東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

第9回
自然科学科　卒業研究発表会
要旨集

日時:　令和3年　2 月 9 日(火)、10 日(水)

会場:セッション A

Zoom　ID:　860 6550 2047

パスコード:　621308

セッション B

Zoom　ID:　859 0767 8217

パスコード:　299342

主催　東京都市大学　理工学部　自然科学科

2 月 9 日（火）セッション A

ID：860 6550 24047
パスコード：621308

＜地球科学研究室＞ 座長 萩谷宏 准教授

10:30 大石 実萌里 等々力渓谷の接地逆転層における二酸化炭素濃度

10:45 倉本 天 加速度センサーを用いた簡易地震計の開発と評価

11:00 鈴木 貴絵 無銘日本刀の分析

11:15 田口 開理 荒川流域の河床堆積物（川砂）の流路に沿った化学組成変化

11:30 谷山 実加子 大正期の高等女学校における理科教育 ―教授要目と実例から探る独自性―

11:45 三原 啓太 初島に分布する玄武岩類の岩石学的特徴

12:00-13:30 休憩（昼食）

＜生物多様性研究室＞ 座長 福田達哉 教授

13:30 井部 和真 ハツカダイコンの密度効果について

13:45 瀧澤 英一 ネズミモチの海岸地適応に関する研究

14:00 西行 来 秩父市荒川上流に生息するコアカソの研究

14:15 加藤 桃子 コマツヨイグサの資源分配からみる繁殖方法について

14:30 高橋 由明 ダイモンジソウの成長戦略についての研究 ―渓流沿い環境を例に―

14:45 水野 九十九 ツワブキの海岸地における形態学的適応様式

15:00－15:15 休憩

＜天然物化学研究室＞ 座長 蛙原絹子 講師

15:15 海津 大樹 イタドリの種子散布戦略についての研究

15:30 武田 未来 等々力渓谷における水性生物の調査

15:45 相原 美輝 主成分分析を用いた青森県産りんごの成分特性

16:00 大谷 仁美 アシタバ *Angelica keiskei* の根の成分について

16:15 永井 傑 東京のカラスアゲハの休眠誘導条件

16:30 池上 聖人 核磁気共鳴撮像法（MRI）による完全変態昆虫蛹体内の組織変化の解明

2 月 9 日（火）セッション B

ID： 859 0767 8217
パスコード： 299342

＜ソフトマテリアル研究室＞ 座長 飯島正徳 教授

10:30	中島 翔	DSC によるペットボトルの熱測定
10:45	牧 寛子	DSC による米の糊化反応の浸漬時間変化について
11:00	後藤 沙耶	DSC による卵白と卵黄の熱測定
11:15	友森 崚介	クモ・カイコ・ミノムシの糸の熱的性質
11:30	濱田 光	DSC および引張試験機による糖、クエン酸添加ゼラチンのゾルゲル転移、強度の依存性
11:45	小林 星羅	防振・免震ゴムの粘弾性的挙動について

12:00–13:30 休憩（昼食）

＜高分子科学研究室＞ 座長 高木晋作 講師

13:30	塚原 葵	低分子オルガノゲル化剤によるリオトロピック液晶のゲル化
13:45	辻 涼介	アミノ酸塩型カチオン界面活性剤の発泡特性について
14:00	野中 裕冬	水駆動摩擦電気ナノ発電機の実現可能性の検討
14:15	増田 仁	pH 応答性ワームライクミセルが高分子鎖へ与える影響
14:30	山崎 萌成	光応答性アゾ色素モノマーの吸光度測定

14:45－15:00 休憩

＜基礎物理学研究室＞ 座長 堀越篤史 准教授

15:00	内野 日向子	ヒトは匂いをトンネル効果によって認知しているか？
15:15	河野 優大	機械学習による 2 次元イジングモデルの相転移温度の検出
15:30	櫻井 燿亮	PsychoPy によるミュラー・リヤー錯視の実験
15:45	古田 詠之	ロトカ・ヴォルテラ方程式の安定性解析

15：45－16:00 休憩

＜微分幾何学研究室＞ 座長 橋本義武 教授

16:00	勝又 芽依	タカハトゲームを利用したコロナ下の利得ゲーム
16:15	久間木 薫是	金平糖における角の形態形成についての数理モデル

＜位相幾何学研究室＞ 座長 中井洋史 准教授

16:30	善波 佑斗	ホップ写像の単体写像としての理解とその応用について

＜整数論研究室＞ 座長 服部新 准教授

16:45	武田 創佑	第 2 種スターリング数の素数を法とする合同に表れる規則性について

2 月 10 日（水）セッション A

ID：860 6550 2047
パスコード：621308

＜分析化学研究室＞ 座長　吉田真史　教授

13:30	工藤　滉大	デジタルカメラによる紫外線写真撮影法
13:45	森田　薫	量子化学計算による静電気の考察
14:00	東田　大輝	植物の光合成から見る二酸化炭素量の増減
14:15	須摩　昂樹	植物の光合成量測定方法
14:30	高島　琉衣	南太平洋地域の伝統医療に用いられる薬用植物ムロカカの成分分析
14:45	藤井　康平	等々力渓谷の湧水の水質調査

14:45－15:00　休憩

＜古生物学研究室＞ 座長　中島保寿　准教授

15:00	梅村　浩平	中生代海棲爬虫類歯化石の内部組織に基づく分類群の判別
15:15	菊池　優	糞石から解明するペルム紀–三畳紀境界における大量絶滅後の海洋食物網
15:30	小柳　豪大	フランス Bouxwiller の始新統湖成石灰岩より産出する楕円体化石の成因について
15:45	船場　大輝	ロシア白海地域 Penega 層から産出した/Kimberella quadrata/の堆積環境及び保存状態の検討
16:00	柳田　優樹	成長パターンの異なる羊膜類動間にみられる骨細胞形態の傾向の検討
16:15	渡邊　萌	日本近海に生息するダツ目魚類の滑空適応に伴う骨形態進化

2 月 10 日（水）セッション B

ID:: 859 0767 8217
パスコード: 299342

＜天文学研究室＞ 座長 津村耕司 准教授

13:30	三浦 昂大	ブラックホールから放出される超光速運動をするジェット
13:45	石田 みずき	原始惑星系円盤から探る惑星の形成
14:00	奈須 のどか	2 つの恒星間天体の起源の比較
14:15	戸川 尊博	金星のスーパーローテーションを維持する有力なメカニズムとは
14:30	原口 宗一朗	系外惑星大気中のダストとハビタビリティ
14:45	本澤 悠希	地球外知的生命体の数と文明の寿命

15:00－15:15 休憩

＜宇宙科学研究室＞ 座長 門多顕司 講師

15:15	青木 姫乃	金星大気のスーパーローテーションの維持機構
15:30	土方 日向子	米ゲルと米粉によるパンの製造と加水量の関係

＜実験原子核物理研究室＞ 座長 西村太樹 准教授

15:45	菅原 奏来	位置感応型ゲルマニウム半導体検出器の位置決定法の開発

＜理論物理研究室＞ 座長 長田剛 教授

16:00	田所 有人	白色矮星の質量と半径の関係および質量限界について
16:15	植松 正揮	球対称ブラックホール近傍の光の世界線
16:30	久保 陽大	長距離相互作用を考慮した1次元イジング模型と相転移

加速度センサーを用いた簡易地震計の開発と評価

地球科学研究室
1724021　倉本　天
担当教員：萩谷　宏

1. 緒言

地震計とは地震の揺れを計測するための機械である。日本の地震学は明治時代から、地震を計測する研究が始まった。1880 年代から地震計が開発され、地震の揺れの記録が得られた。時代が進むにつれ、地震計の電子化、デジタル化により精度もよくなり、地面の微小な振動から災害をもたらす揺れまで計測できるようになった。しかし、加速度センサーという機械が必要となる。多くの地震計は MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と言われる加速度センサーを用いているが、本研究では、MEMS 以外の加速度センサーで簡単な地震計を開発して、身近な振動や大地震の揺れが計測できるか確認を行った。

2. 原理

地震計の基本原理は振り子である。右の Fig.1 で示したように単振り子とばね振り子がある。この 2 種類の振り子の周期 T が求められていて、Fig.1 にある文字を用いて

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (1)$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (2)$$

と表せられる。(1)はばね振り子、(2)は単振り子の周期を示している。しかし、地震は地面を揺らすため、振り子の支点も揺らされることで強制振動をしている。

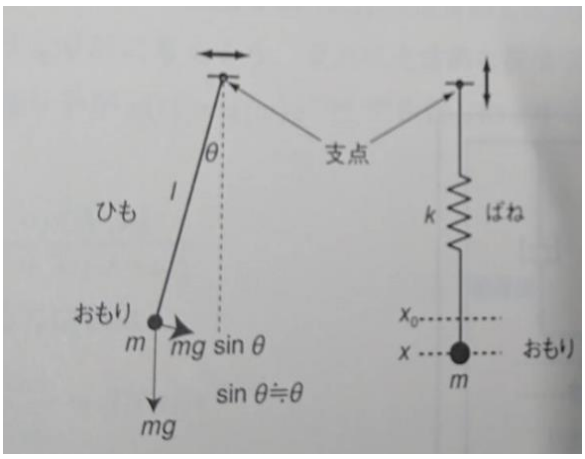


Fig. 1 単振り子(左)とばね振り子(右)

3. 実験方法・手順

この研究で用いた加速度センサーは右の図(Fig.2)の赤丸で示した MMA8452Q というセンサーである。このセンサーが乗っている基盤は、2018 年に秋月電子によって開発されたセンサーモジュールである。この基盤を Arduino UNO と呼ばれる機械を介して、PC に接続し、プログラムを組んだ。得られた波形を Excel で簡単な解析を行った。

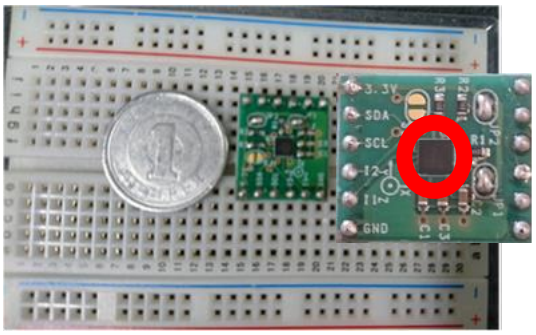


Fig. 2 MMA8452Q(1 円玉はスケール　挿入図は基板を拡大した図である)

4. 結果・考察

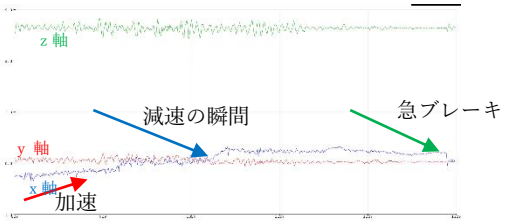


Fig. 3 田園都市線各駅停車(宮前平～宮崎台)

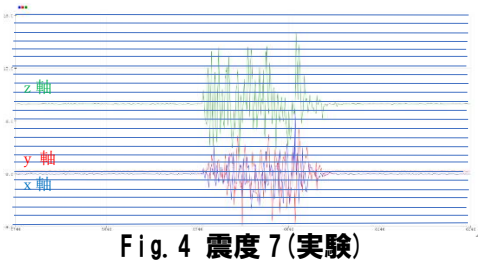


Fig. 4 震度 7(実験)

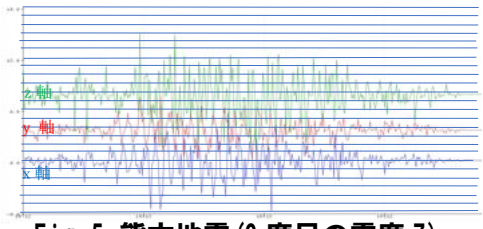


Fig. 5 熊本地震(2 度目の震度 7)

Fig. 4 と Fig. 5 の青い線は 1m/s²(=100gal)ごとに引いている

Fig.3 は電車の振動の様子を波形で示している。図の赤い矢印と青の矢印、緑の矢印、青と緑の間の電車の速度と変位をそれぞれ求めた。この波形から、走行中は一直線上になっていて、走行中の電車の運動が等加速度直線運動をしていることが分かる。また、加速と減速、電車の急ブレーキの様子も波形から読み取れる。Fig.4 は起震室で体験した震度 7 の波形を示している。この波形から、最大加速度は約 810gal(z 軸)、その時の見かけの計測震度は約 6.8 であった。これは熊本地震本震で記録された計測震度(6.7)【4】を超える値である。最後に Fig.5 は起震室で体験した 2016 年 4 月 16 日に起きた熊本地震本震の波形である。この波形が得られた最大加速度は 710gal、その時の見かけの計測震度は 6.6 であり、文献値【4】より 0.1 だけ小さいことが分かる。しかし、波形データから、震度 7 程度の大地震に対しても、波形として記録することができた。

5. まとめ

この研究で用いた MEMS とは異なる加速度センサーを用いて振動の計測を行った。この加速度センサーを用いて、電車の振動を計測したところ、電車の加速度データが得られ、加速または減速する様子や急ブレーキした瞬間の様子も波形から得られた。また、起震室で地震の波形データも得られ、過去に起きた大地震を含め、震度 7 程度の大地震に対しても波形として記録ができた。

参考文献

【1】西村太志　長谷川昭　佐藤春夫 2015「現代地球科学入門シリーズ 6　地震学」，共立出版 8,18

【2】小出昭一郎 2017「物理学　三訂版」，裳華房 121-122

【3】纐纈一起 2018「地震動の物理学」，近代科学社 341

【4】気象庁，2016，地方公共団体震度計の波形データ，

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index2.html>

(参照 2016-4-16)

無銘日本刀の分析

地球科学研究室
1724030 鈴木 貴絵
指導教員：萩谷 宏

1.緒言

1000 年以上の歴史を有する日本刀は武士の必需品として賞用され、他の国には見られない独特な進化を遂げた[1]。その一つが材料である。現在鉄鋼材のほとんどは鉄鉱石からつくられる。しかし日本では大量の鉄鋼材をつくれるほどの鉄鉱石が採集できないため、多くの日本刀は砂鉄を原料とする玉鋼を加工してつくられてきた[2]。日本刀の鍛造では、炭素濃度が低い軟鋼を中心にし、その外側を炭素濃度の高い硬鋼で包むようにしてつくられる[3]。

現在日本刀は美術品として扱われ、通常は断面を観察することはできない。だが断面を観察することによって製法や材料、工芸品としての日本刀の特性が明らかになるのではと考え、本学の機器分析装置を用いて、日本刀断面の観察を行った。

2.資料及び分析方法

先に述べたように美術品としての日本刀は破壊分析ができない。よって本研究ではヤフーオークションですでに切断された無銘の日本刀を購入。その断面の成分分析を行い、分析結果から原料の産地推定を試みた。

購入した日本刀の先端から 2 ㎝のところを切断し樹脂固定を行った後、中心で切断し切断面の研磨を行った。微小部電子線分析装置(EPMA)と 電解放出型走査電子顕微鏡(SEM-EDS)を用いて、研磨された切断面の成分分析を行った。

図 1.購入した日本刀

3.結果

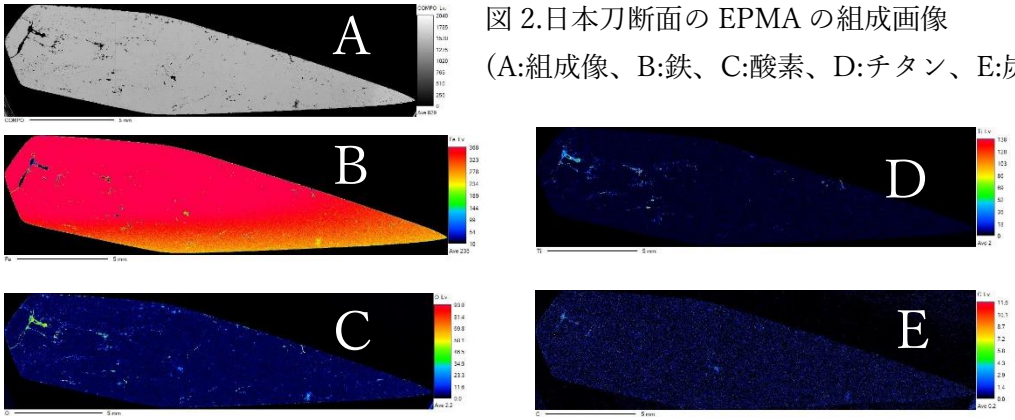
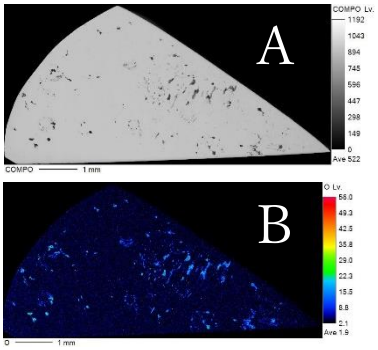


図 2.日本刀断面の EPMA の組成画像
(A:組成像、B:鉄、C:酸素、D:チタン、E:炭素)

日本刀の特徴である内側と外側の炭素濃度の変化が見られなかったことにより、鍛造品ではなく鋳造品ではないのかという疑いが出たため、比較として川口にある株式会社昌国で日本刀と同じ硬い鋼と柔らかい鋼を組み合わせた製法でつくられた剪定鋏を購入し同様の分析を行った。



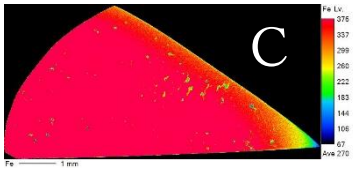


図 3 左.購入した剪定鋏
図 4 右.剪定鋏の EPMA の組成画像(A:組成像、B:酸素、C:鉄)

日本刀は不純物が直線上に分布しているのに対し、剪定鋏はまばらに分布していることから日本刀が鍛造品であると思われる。
また、EDS-SEM による日本刀の不純物の分析結果は以下のようになった。

表 1.日本刀の不純物

元素	C	O	Al	Si	Ti	Fe
質量(%)	0	39.20	2.11	2.31	50.72	5.66
元素	C	O	Al	Si	Ti	Fe
質量(%)	3.58	48.91	8.79	31.2	4.61	2.89

4.考察

EPMA の分析結果から無銘日本刀は、刃先から棟にかけて不純物が直線上に分布していることや炭素の分布が一様であることから、無垢と呼ばれる単一種の鋼だけでつくる製法で作製されたのではないかと考えられる[3]。またアルミニウムとケイ素、チタンの割合からケイ酸塩鉱物とチタン鉄鉱由来の混合物であると考えられる。この特徴はマサ砂鉄ではなく相州産玉鋼にみられる赤目砂鉄由来のものと似ており、南関東でつくられたものと推定される[4]。

5.参考文献

[1]谷村熙著　日本刀研究の手引　日本金属学会会報　第 20 巻　第 5 号(1981)pp351-357
[2]井上達雄著　日本刀その美,外国刀との比較と焼入れの変態・熱・力学シミュレーション　まてりあ 第 47 巻　第 7 号(2008)pp359-363
[3]斎藤勝裕著　日本刀 技と美の科学　株式会社秀和システム(2020)pp96-99
[4]木浪信之著　赤目砂鉄を原料とするたたら製鉄の再現と原料砂鉄の産地特定について　大妻女子大学紀要. 社会情報系, 社会情報学研究 28 巻(2019)pp105-111

荒川流域の河床堆積物（川砂）の流道に沿った化学組成変化

地球科学研究室
172036　田口　開理
指導教員：萩谷　宏

1.　緒言

荒川は、埼玉県・長野県県境に源流部をもち、埼玉県と東京都を流れ、東京湾に注ぐ一級河川である。荒川上流域にはチャートなどの中・古生層や変成岩が分布し、これらの砕屑物を関東平野や東京湾に大量に供給してきた河川でもある。本研究では、荒川の河床堆積物を連続的に採取し分析することで、その流下過程で化学組成・粒子組成にどのような変化が生じているかを明らかにし、堆積盆地を埋める砕屑物の形成過程を明らかにしたい。

2.　実験方法

２－１　調査地域

埼玉県大里郡寄居町にある川の博物館から上流に向かって連続的に調査を行い、秩父鉱山までの間で合計３４地点から砂を採取した。（図１）この３４地点を秩父盆地より上流部と、下流部とで便宜上区分し、以下、区間Ａ・区間Ｂ・区間Ｃの三つに分けたグループとして扱う。（図２）

２－２　蛍光Ｘ線分析装置（ＸＲＦ）による化学組成分析

採取した砂は洗い、乾燥させ、ふるいにかけた後、・１mm～0.5mm　（粗粒砂）・0.5mm～0.25mm　（中粒砂）・0.25mm～0.125mm（細粒砂）を粉砕し粉末にし、本学ナノテクノロジー研究推進センターの㈱リガク製 RIX-3000(Rh 管球、50kV-50mA)を使用し、産業技術総合研究所の地球化学標準物質 15 種類から作成した検量線をもとに定量分析を行った。荒川河床で採取した緑色片岩・チャート・石英閃緑岩・蛇紋岩・石墨片岩・泥岩・砂岩・緑色岩の礫も、同様に蛍光Ｘ線分析装置（ＸＲＦ）により化学組成の分析を行った。

２－３　実体顕微鏡による観察

実体顕微鏡(Nikon SMZ1500)による観察では地点一つにつき約 300 粒のカウントを行った。

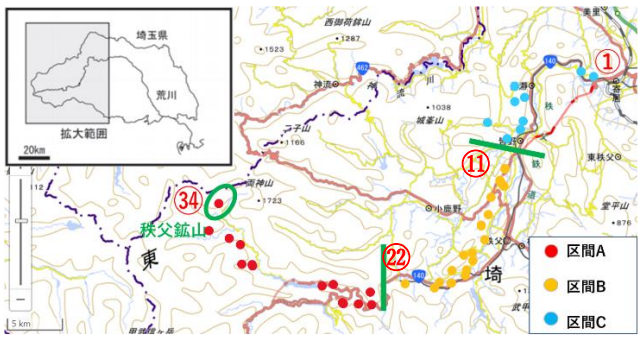


図１：調査地域（国土地理院地図 https://maps.gsi.go.jp/より引用）

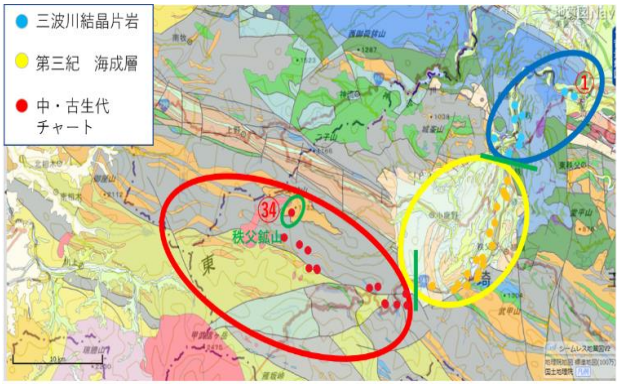


図２：地質図（地質図 navi　https://gbank.gsj.jp/より引用）

3.　結果

河床堆積物をふるい分けたうえで、粗粒砂・中粒砂・細粒砂での分析を行った。

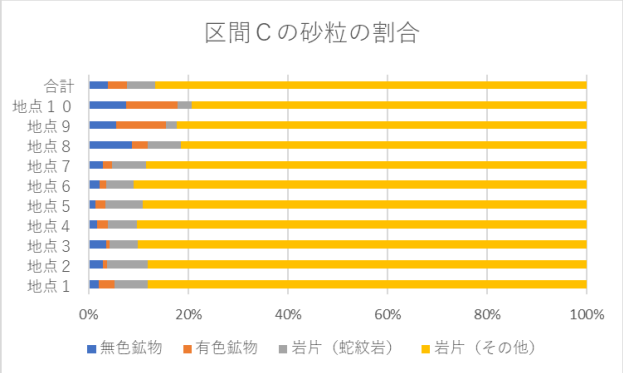
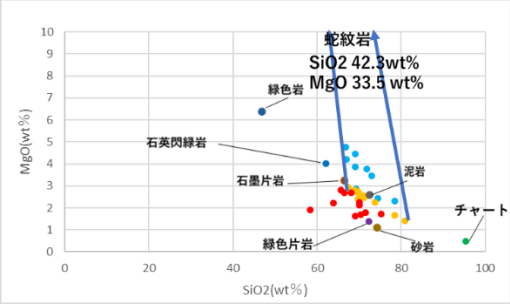


図３：中粒砂内の蛇紋岩　（区間Ｃ）※１マス　１mm　　図４：区間Ｃの砂粒の割合



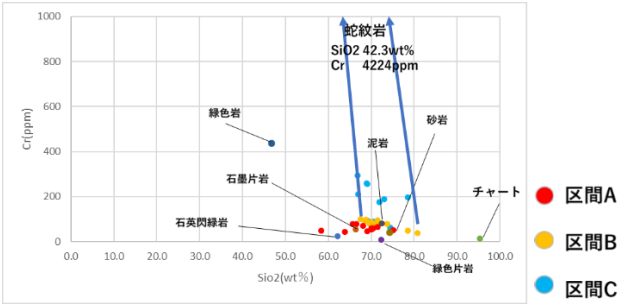


図５：区間Ｃで採取した粗粒砂の化学組成（MgO）　図６：区間Ｃで採取した粗粒砂の化学組成（Cr）

３－１　化学組成

砂組成のグラフに河床礫の各種岩石の組成をプロットすると、砂の化学組成はこれらの岩石の組成の中間に位置し、それぞれの混合率に応じた組成を表現している。採取地点ごとの組成のばらつきが大きく SiO2 量ではＢ区間Ｃ区間内にて 60wt%～80wt%の大きな幅があり、同一地点でも粒度別に見ると大きなばらつきがあった。区間Ｃにおいて区間Ａ・Ｂと比べ顕著に差が出た MgO と Cr の結果を図５、図６に示す。また Ni でも同様の結果を確認することが出来た。CaO についてはＡ区間内で高く 20wt%～10wt%の幅があった。

３－２　砂の粒子組成

調査したすべての区間で 9 割近くを岩石片が占めていた。区間Ａから区間Ｂの途中にかけて砂の中にカルサイトが見られ、区間Ｃの蛇紋岩の岩片は全体の 6%程度存在した。（図４）

4.考察

図５・図６から、区間Ｃの粗粒砂では MgO・Cr・Ni の値が区間Ａ・区間Ｂより高いものがあることは区間Ｃに分布する蛇紋岩が砂に加わったと考えると説明でき、実体顕微鏡の蛇紋岩の割合から想定される Cr・Ni の濃度の上昇と、化学組成分析値もほぼ一致した。SiO2(wt%)の幅が広くなっている原因としてはチャートや変成岩中の石英が川砂として供給されるものがあると考えられ、同様に区間ＡのCaOの値が高い原因はＡ区間に分布する石灰岩のカルサイトが川砂に入り込むことが考えられる。

５.参考文献

片山信夫,高野幸雄,加藤一郎,加藤敏郎,中川進(1954)秩父鉱山橋掛沢、石灰沢及び出会附近のスカルン鉱物の産状　鉱物学雑誌 第２巻 第１号 1954:pp46-52

小林 まさ代(2012) 荒川中流域の河川砂中のざくろ石の特徴と起源　　川博紀要　12 号　2012：pp9-12

青島晃,佐藤友哉,鈴木竜成,下谷豪史(2011)遠州灘の海岸の砂に含まれるざくろ石の性質と起源の推定 伊那谷自然史論集 2012:1pp9-24

大正期の高等女学校における理科教育

―教授要目と実例から探る独自性―

地球科学研究室
1724040　谷山 実加子
指導教員：岡山 理香、萩谷 宏

1.背景

日本における理科教育の起源は江戸時代の「本草学」まで遡る。本草とは、生活に必要なものや当時の人々と密接な関りを持つ自然物について調査をし、図鑑のようにまとめていく学問である。江戸時代に中国から渡来した本草書をもとに日本独自の発展を遂げ、好事家の趣味として定着しただけではなく薬作りなど産業にも貢献した。明治期には文部省博物局が主導し欧米科学文化の啓蒙が盛んになった。教育制度等が西欧化したことにより日本社会で本草学が担っていた事物が置き換わり、衰退した。
明治 5 年(1872)に学制が発布され、現代の「学校」の原型となる教育機関が誕生した。明治前期の政策は初等教育(尋常小学校)に重点を置き、明治後期に差し掛かると尋常小学校の就学率も男女ともに 90%を超えた。同時に、明治後期は日清戦争など歴史的転換点を経て日本社会が近代化を遂げる時期でもある。先進国と肩を並べる・国力を豊かにするといった観点からも農耕社会からの脱却を課題とし、中等教育に目が向けられた。

学制発布時、中等教育以上の教育機関は男子校のみであった。明治 24 年(1891)に中学校令が改正され、女学校の記述が追加された。のちに明治 32 年(1899)に独立した高等女学校令が施行された。明治終盤から大正期にかけては中等教育の体制も安定してきた。大正デモクラシーなど大衆が自由を追求する活動が盛んになったことも一因となり、教育界では私学が増加し、学校に多様性が現れた。

明治 44 年(1911)、文部省主導で『中学校教授要目』『高等女学校及実科高等女学校教授要目』が作成された。内容は中等教育機関で生徒に教授すべき項目を指示するもので、教授方法については子細に記されてはいない。

大正 7 年(1918)、文部省主導で『中学校物理及化学生徒実験要目』が作成された。同時に生徒が自ら実験を行う時間の確保を義務化したことに伴い、設備の拡充のための費用を国庫補助金から全国の中学校に配布した。高等女学校は対象外であったが、一部では思潮に影響を及ぼしたとされる。

2.調査対象・方法

調査を行う主な時代区分を大正期に設定した。

明治期に創立した女子高等学校の記念誌などから文献調査を行った。

『中学校教授要目』『高等女学校及実科高等女学校教授要目』の、中学校では「博物・物理及化学」高等女学校では「理科」の欄からそれぞれの項目を箇条書きして整列し、比較した。

3.結果

大正期の中学校、高等女学校の理系科目に関する教授要目を比較した内容を一部抜粋し表 1 に示す。比較の結果、以下のことがわかった。

表 1. 各教授要目の比較(一部抜粋)

		中学校	高等女学校
科目名		物理及化学	理科
		物理	物理
授業時間数		週 2 時	化学と併せ週 2 時
単元		熱	区分なし
教授項目	共通項目	温度・膨張・比熱・三態の変化・潜熱・湿度	
	一方のみに記載された項目	熱の異動	寒暖計 蒸気機関

・高等女学校の教授要目において理科に関する記載は、中学校と比較して相対的に項目数が少なかった。中でも生物学に関する項目には著しい量的な差があった。

・高等女学校の化学の教授上の注意として「家事と関連付け、日常生活への応用を図るへし」と記載されており、物理・化学に関する項目では蓄音機・洗剤・避雷針などといった家財道具や公共の設備に関する項目が散見された。中学校では同様の項目は確認されなかった。

・教授上の注意に「理科と連携を図るへし」と記載されていた地理学の項目に相違点はなかった。

文献調査を行った結果、文部省が掲げた教育方針と高等女学校が行った教育は必ずしも一致しない例が複数存在することがわかった。一例に大森高等女学校の(表：大森高女)を挙げ、表 2 にて教授要目と比較したものを示す。大森高等女学校とは、明治 35 年(1902)に創立した私学の高等女学校である。

表 2. 教授要目と大森高等女学校の理科の週当り授業時間数の比較

科目		1 学年	2 学年	3 学年	4 学年	5 学年
理科	教授要目	2	2	2	1	
	大森高女	2	2	2	2	2

また、大正 7 年に中学校の物理及化学の時間内に生徒実験の導入が義務化された際、義務化・国庫補助金の対象外であった中で独自の実験要目を作成した兵庫県立柏原高等女学校や、生徒実験は 4~7 人ほどの班編成が一般的であったが「少人数で行うこと」を教授上の注意として 2~4 人班で実験を行った島根県立松江高等女学校の存在を確認した(松野・磯崎、2004)。

4.まとめ

教育内容に独自性の見られる高等女学校が複数存在したことから、教授要目に沿った教育の実施率も教育機関によって異なる可能性がある。

双方の教授要目において理系科目の項目内容が異なる理由としては、当時女性の多くが中等教育機関卒業後は家庭に入ると政府が前提としていることが要因の一つであると考えられる。対して、教授要目の指示よりも多く理科の授業時間を取り入れていた大森高等女学校は「自立した女性・女性の社会進出」を掲げていたことから、大正期の女性の役割・女子教育のあり方に対する認識は政府と民間の一部に相違があり、社会的にも女子教育に関する思潮が変化する過渡期であったと推察される。

主要参考文献

[1] 同誌編集委員会 編『戸板学園－八十周年記念誌－』、株式会社金羊社(1982)

[2] 松野 佐知子、磯崎 哲夫「理科教育史におけるジェンダー問題(前編)」理科教育学研究 Vol.44-2 (2004)

[3] 教育品研究所 編『中学校教授要目』、教育品研究所(1911)

[4] 教育品研究所 編『高等女学校・実科高等女学校教授要目』、教育品研究所(1911)

[5]吉田光邦『日本科学史』、朝倉書店(1955)

初島に分布する玄武岩類の岩石学的特徴

地球科学研究室
1724061　三原啓太
指導教員：萩谷宏

1.緒言

静岡県伊豆半島東方沖に位置する初島は二段の海成段丘からなる面積約 0.47km²の小島である。沿岸部には組織の異なる二種類の玄武岩(Haa,Hap)熔岩の存在が確認されている。Haa は北西部のみに分布する無斑晶状の玄武岩で、それ以外に分布する Hap は斜長石斑晶に富むかんらん石玄武岩ないしかんらん石単斜輝石玄武岩で構成されるが、まれに斜方輝石単斜輝石安山岩も含まれる。先行研究ではこの二種類の玄武岩を初島火山噴出物と定義した(及川輝樹・石塚治,2011)。また、石塚（2006）により本火山噴出物の無斑晶状玄武岩溶岩から約 0.7～0.6Ma、斜長石斑晶に富む玄武岩溶岩から 0.3Ma より若い K-Ar 年代値が得られている。

初島の基盤をなすこの二種類の玄武岩について詳しく岩石学的性質を検討した研究はない。本研究では全岩化学組成分析と岩石薄片の観察を通して、初島火山噴出物の性質を明らかにし、初島火山噴出物の起源を推定する。

2.調査地域・手法

初島は静岡県熱海市に属する台地状の島で伊豆半島の東方沖に位置する(図 1)。本研究における初島火山噴出物のサンプリングポイントを図 2 に示す。サンプリングの際に露頭での産状を観察した。

採取したサンプルで岩石薄片を作製し、偏光顕微鏡で観察した。また全岩化学組成を本学ナノテクノロジー研究推進センターの㈱リガク製 RIX-3000 を使用し、Rh 管球・50kV・50mA の条件で産業技術総合研究所の地球化学標準物質 15 種類から作製した検量線をもとに定量分析を行った。

図 1.初島付近の広域図.

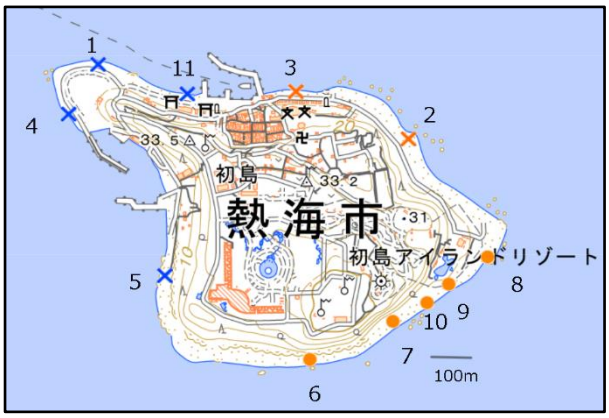


図 2.本研究におけるサンプリングポイント
●：露頭・巨礫から採取　×：露頭・巨礫・転石から採取
オレンジ色のポイント：Hap のみ採取された地点
青色のポイント：Hap,Haa が採取された地点

3.調査結果

北西部では赤く酸化したクリンカー(火山角礫岩)が見られ、北東から南西に流理構造のある塊状熔岩(Haa)が確認された。南部の段丘崖でもクリンカーや一部酸化した熔岩流(Hap)が複数あり、西から東に傾斜していた。

作製した岩石薄片の一例を図 3 に示す。上部の丸みを帯びた鉱物はかんらん石(①)で、全体に広く分布する長方形の鉱物は斜長石である。中央部の斜長石(②)には斑晶が晶出する際にケイ酸塩メルトが捕獲された跡(メルトインクルージョン)が含まれていた。

作成した変化図の一部を図 4 に示す。

全岩化学組成分析の結果から初島火山噴出物は非アルカリ系列ソレアイト質玄武岩-安山岩に分類できた。また Hap は Al_2O_3が 17%以上のサンプルが多く、久野(1960)に基づき、高アルミナ玄武岩と分類できる。また K_2O が他の地域よりも際立って低い特徴がある。比較のため大島古期火山群(筆島火山,岡田火山,行者窟火山)、富士火山、東伊豆単成火山群(大室山)の溶岩を分析した。

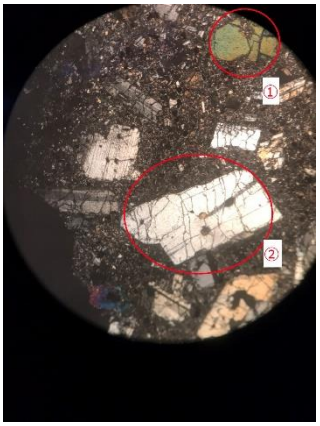


図 3.地点 1-7 の岩石薄片
視野の直径 5.5mm

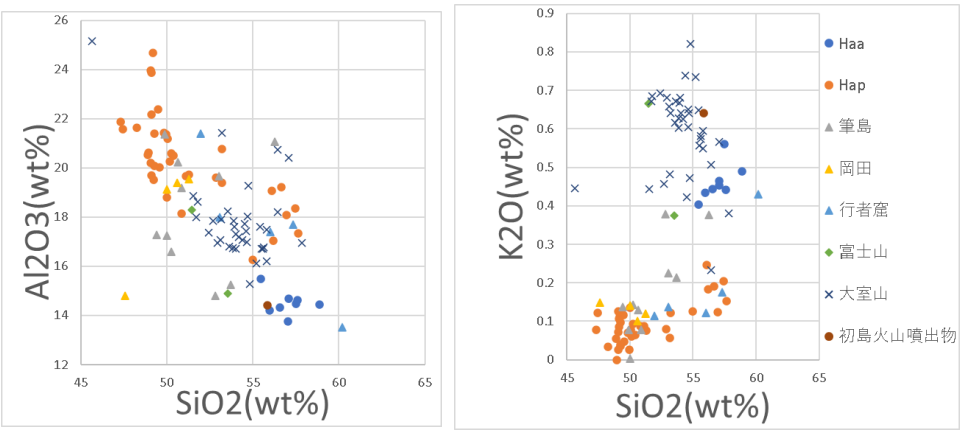


図 4.全岩化学組成分析の結果をもとに作成した変化図(横軸に SiO_2、縦軸に各主要元素)

4.まとめ

Hap は SiO_2の幅が広く一連のトレンドを示し、結晶分化あるいはマグマ混合などが生じたと考えられる。同様のトレンドが行者窟火山と一致している。K_2O-SiO_2比図(図 4 右)について、K_2O が低い Hap は行者窟火山、岡田火山と似た組成で、K_2O が高い Haa は大室山と似た組成である。他の主要元素でも同様に二つのグループに分けられる。

Hap の Al_2O_3が高く、K_2O が低い組成は特異な特徴であるが、伊豆大島の行者窟火山と岡田火山と共通している。Hap と大島古期火山群についてなぜこのような組成になったのか、なぜ二つが似た組成なのかについては今後検討する必要がある。

5.参考文献

・及川 輝樹,石塚 治(2011) 『熱海地域の地質』 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 東京 (8) 92 号 NI-54-26-14pp24-27.

・Hisashi Kuno.(1960) “High-alumina Basalt” Journal of Petrology, Volume 1,pp121-145.

・石塚 治(2006)『伊豆半島における火山活動の時空変遷とその鉱床形成との関連』 資源地質学会年会講演会講演要旨集, vol. 56, p. 65.

ハツカダイコンの密度効果について

生物多様性研究室
指導教員　福田　達哉
1724005　井部　和真

1.緒言

植物は自身で移動できないために播種された場所で生涯を遂げなくてはならない。そのために、その場の資源は自身の成長のためにできるだけ多く利用したいものの、播種密度が高い場合は種子間で資源獲得競争により、総じて個体のサイズが低下する。例えば、間伐を行わない人工林は、それぞれの樹木は細く折れやすくなり、台風や土砂崩れなど様々な自然災害の影響を受ける。このように密度が個体の成長に与える現象は密度効果と呼ばれ、単位面積あたりの個体密度などが作用することが知られている。しかし、植物の場合は具体的な密度効果がどのように競合個体に影響を及ぼすのか不明な点が多い。

ハツカダイコン(*Raphanus sativus* var. *sativus*)は根に多く資源を貯蓄する農作物の 1 つであり、比較的に短い栽培期間においても個体サイズが増大し、また実験室内で栽培することができるサイズでもあるために環境を調節して研究することが可能な植物である(大和ら，1990)。そこで本研究ではハツカダイコンを用いることにより、播種密度に差をつけたハツカダイコンの成長に対する密度効果による各形態形質への影響を時間的及び空間的に明らかにすることを目的として研究を行った。

2.実験方法

植木鉢(4 号鉢)にハツカダイコンの種子((株)トーホク)を 5 個播種する鉢(以下，低密度)と 25 個播種する鉢（以下，高密度）を比較に用いた。鉢内に 6cm×6cm の方形区を設け、低密度にはこの方形区の頂点に 4 個と正方形の中心に 1 個の計 5 個を、また高密度には前述の方形区内に 1cm×1cm の方形区を 36 個設け、その対角線上に播種距離が√2cm になるように計 25 個の種子を播種した。さらに土壌は養分過多にするために［培養土((株)大石物産)：油かす((株)JOY アグリス)：化成肥料((株)コメリ)：石灰((株)オクト)］= 7：1：1：1 の比で混合し、鉢あたり計 280g を用いた。水は十分な量を与えるために、9 時と 15 時にそれぞれ 100ml ずつ与え、播種後 20 日で採集し、押し葉標本にした。その標本を、電子ノギス(Mitutoyo) を用いて葉身の縦幅と横幅、葉柄の長さと幅、根の長さと幅の計測を行った。その後それぞれ葉身、葉柄、根に分け乾燥機を用いて 100℃で 72 時間乾燥させ水分を飛ばし、電子天秤を用いてそれぞれの絶乾重量を計測した。この結果を基に、ハツカダイコンの成長の時間的変化を明らかにするために前述の方法を用いて再度栽培し、播種後 8 日目、12 日目、16 日目、18 日目、20 日目に採集し、前述の計測方法と同様に計測を行った。

3.結果

第一段階の実験として播種密度がハツカダイコンに与える影響を確認した結果、根の重さに有意差が見られた(図 1)。このことから本実験方法によってハツカダイコンは密度効果を示す植物と確認することができた。そこでハツカダイコが密度効果を示す時間的変化を明らかにするために、第二段階の実験を行った結果、葉の絶乾重量では 20 日目に有意差を確認することができた(図 2)。また、根の絶乾重量では 12 日目から有意差が見られ、20 日目にも有意差を確認することができた(図 3)。これらの結果から、時間的に葉と根の有意差が認められる日数において差が見られることが明らかとなった。

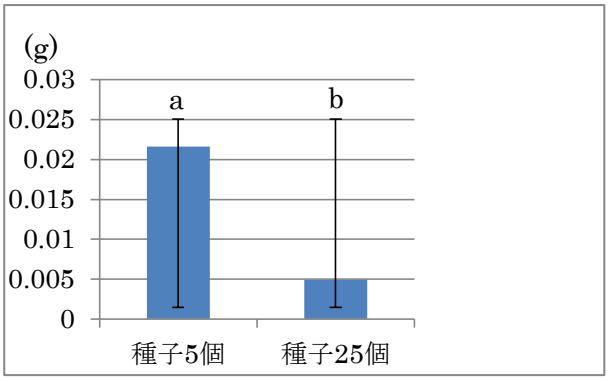


図 1. 20 日後の根の絶乾重量.

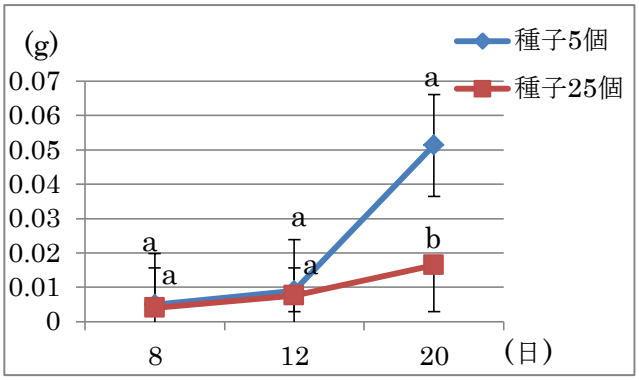


図 2. 葉(葉身+葉柄)の絶乾重量の時間的変化.

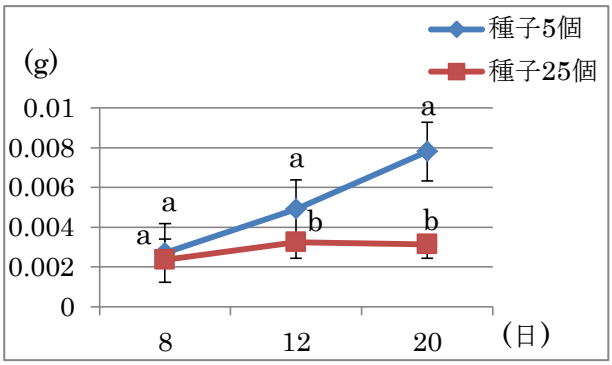


図3. 根の絶乾重量の時間的変化.

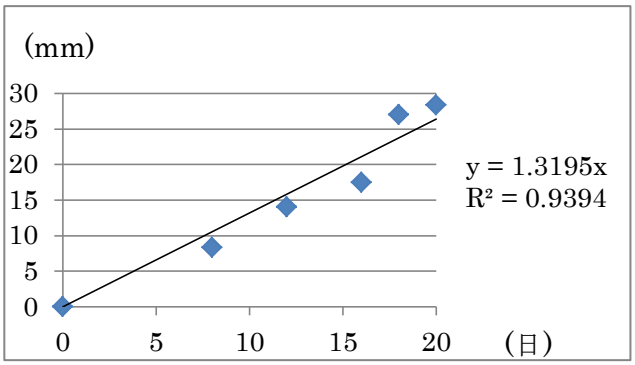


図4. 種子 25 個の葉(葉身+葉柄)の長さ平均長の時間的変化.

4.考察

本研究の成長に関する結果から、最初に根に密度効果による差を検出することができた。根は葉における光合成産物の貯蓄器官であり、本研究の場合は 12 日目までには光合成産物獲得量に差が出たと考えることができる。高密度における種子間距離は√2cm であるために計算上は両個体の葉の長さが√2/2cm を超えた時点で被陰が始まると考えられる。そこで高密度の葉長変化の時間経過を解析した結果(図 4)、およそ 5 日で被陰が始まることが示された。そのために根の重さで有意差が見られた 12 日目には既に被陰が始まっていることを示しており、この被陰の効果が光合成産物量の差として根に反映されていると考えられる。これに対し葉は根よりも後に密度効果による違いを示す結果になった。葉は光合成産物をそのまま滞留させるのではなく一度根に回収され、そこから根の資源が転流することによって成長が促されるために、根への貯蓄資源量の違いが転流量に反映し、葉の違いが現れたのだと考えられる。このように密度効果に関して植物の場合は根から先に違いが現れ、その要因は個体間の短い距離が原因である被陰であり、そのために個体間距離が葉長/2 より短い場合、被陰してしまい密度効果が現れていることが考えられる。

5.結論

植物における密度効果による成長抑制の回避のためには、(播種間距離)>(葉長)/2 の成立が重要であることが示された。

6.参考文献

大和陽一, 寺分元一, 前川進, 稲垣昇 (1990)ハツカダイコン (*Raphanus sativus* L. *radicula* group)の生育に及ぼす構造物の被陰及びしゃ光の影響 .神戸大学農学部研究報告 19 : 1-9.

ネズミモチの海岸地適応に関する研究

生物多様性研究室
指導教員　福田　達哉
1724035 瀧澤　英一

1.　緒言

植物は特殊環境に生育する際に形態を様々に変化させて適応することが知られている。例えば海岸地環境では海岸線からの距離に応じて強風、塩ストレスなどの選択圧が通常の環境とは異なるため、そこに生育する植物とっては、これまでとは異なる適応戦略が必要であると考えられ、その戦略の 1 つとして、葉の多肉化などの形態変化がその環境への適応するための戦略として知られている(Ohga et al., 2013)。

ネズミモチ(*Ligustrum japonicum*)はモクセイ科イボタノキ属に属する常緑小高木であり、国内各地の様々な場所で生育が確認されており、蛇紋岩地といった特殊岩地にも適応していることが知られている(桑原, 2020)。このネズミモチに関して、楯(2018)は四国の太平洋側海岸地に生育している集団は気孔を矮小化させることで過度な蒸散を防ぐことを可能にさせ、海岸地に適応していることを報告している。この形態変化がネズミモチの海岸地適応戦略として考える場合、異なる地域でも同様の変化を起こしている可能性があるために、異なる地域との共通の形態変化を示すことができれば、ネズミモチの海岸地適応における一般的な適応様式として考えることができる。そのために、予備調査として神奈川県平塚市の海岸地において植物調査を行った結果、海岸林内にネズミモチが生育していることを確認した(図 1)。そこで本研究では平塚市の海岸地におけるネズミモチの形態的及び解剖的適応を明らかにし、また得られた結果から、ネズミモチの海岸地適応戦略の一般化について議論を行うことを目的として研究を行った。

図 1. 調査地点.

2.　方法

2-1. 形態学的計測

本研究では神奈川県平塚市の海岸地(北緯 35°18’54”東経 139°20’42”)においてネズミモチを 30 個体採集し(以下、海岸地型)、それらを押し葉標本にした。その標本を用いて 1 個体につき葉を 3 枚ずつ無作為に選び、葉長、葉幅、厚さを電子式ノギス、電子マイクロメーターを用いて測定した。各計測値を用いて、(葉面積)＝(葉長)×(葉幅)、(葉形指数)＝(葉長)/ (葉幅)を算出した。

2-2. 解剖学的計測

葉の裏側にセメダインを塗り、乾燥後にその表面をピンセットで剥がし、剥がしたサンプルをスライドガラスの上に置き、光学顕微鏡(OLYMPUS)を用いて観察した。孔辺細胞の大きさに関する計測は葉 1 枚につき 5 個の細胞をランダムに選び、縦の長さと横の長さを計測した。各計測値を用いて、(葉の孔辺細胞の面積)＝(葉の孔辺細胞の縦の長さ)×(葉の孔辺細胞の横の長さ)、(葉の気孔数)＝(葉の面積)×(葉の気孔密度)を算出した。

3.　結果

海岸地型の葉の縦と横、厚さは内陸に生息するネズミモチ(以下、内陸型)と比べて有意差は認められなかったものの、葉形指数に関しては海岸地型が有意に小さかったために、海岸地型の方が有意に丸

くなっていることが示された(表 1)。また、葉あたりの孔辺細胞数に有意差は認められなかったものの、孔辺細胞の縦と横の長さは海岸地型が有意に小さくなっていることが明らかとなった(表 1)。

表 1. 形態学的及び解剖学的計測の結果(平均±標準誤差).

	海岸地型	内陸型	有意差
葉縦(mm)	63.14±1.83	66.20±1.65	無
葉横(mm)	34.81±0.82	33.50±0.95	無
葉形指数	1.82±0.033	2.01±0.044	**有**
葉の厚さ(μm)	190.36±7.91	173.04±7.89	無
孔辺細胞縦(μm)	18.04±0.13	22.42±0.14	**有**
孔辺細胞横(μm)	14.37±0.091	15.41±0.12	**有**
孔辺細胞数(個)	$4.17\times10^{5}\pm7.67\times10^{3}$	$4.17\times10^{5}\pm1.63\times10^{4}$	無

4. 考察

本研究のネズミモチの解析から、海岸地型は葉を多肉化させていないことが明らかとなった。草本植物は海岸地に適応する際に葉を多肉化させ水を貯留するのに対し、木本植物であるネズミモチが葉を多肉化せずに海岸地に生育できる結果となった理由として、木本植物は幹に水分を貯めることが要因であると考えられる。また解剖学的解析の結果、海岸地型は孔辺細胞の面積を減少させていることが明らかになった。この結果は先行研究と同様の結果を示しており(楯, 2018)、孔辺細胞の面積を減少させることによって過度な蒸散を防ぎ、海岸地の塩ストレスや強風による乾燥から身を守る水利用戦略が存在することが示され、異なる地域における共通のメカニズムは、ネズミモチの海岸地環境へ進出の際の一般的な変化として捉えることができると考えられる。

本研究で明らかとなったネズミモチの海岸地環境への適応戦略が、木本植物全般における一般論として議論することができるかどうか疑問である。この変化が系統的に異なる分類群でも成立している場合、木本植物の一般的傾向として示すことができる。楯(2018)は、山地から海岸林まで広く生育しているモッコク科のヒサカキ(*Eurya japonica*)においても四国の太平洋側海岸地においてネズミモチと同様の傾向が見られることを示しているために、今後は本研究の調査地付近においてヒサカキを用いた研究を進める必要があると考えられる。

本研究の結果から、海岸地型の葉が有意に丸くなっていることが明らかとなった。しかし、これまでのネズミモチの葉に関する研究結果を考慮すると、対照地である内陸型の葉が楕円形から丸型の葉といった多型があることが報告されている(楯, 2018)。本研究では内陸型のネズミモチとして横須賀市の集団のみを用いていたものの、今後は内陸型集団の地点数を増やすことによって、葉の形態変化に関する議論が可能になってくると考えられる。

5. 参考文献

[1] 桑原古都美 (2020) 蛇紋岩地におけるネズミモチの形態学的研究. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

[2] Ohga K., Muroi M., Hayakawa H., Yokoyama J., Ito K., Tebayashi S., Arakawa R., Fukuda T. (2013) Coastal adaptation of *Adenophora triphylla* var.*japonica* (Campanulaceae). American Journal of Plant Sciences 4: 596-601.

[3] 楯智樹 (2018) 特殊環境に適応するための木本植物に関する形態学的及び解剖学的研究.高知大学大学院総合人間自然科学専攻修士論文.

秩父市荒川上流に生育するコアカソの研究

生命科学研究室
指導教員　福田　達哉
1724027　西行　来

1. 緒言

植物は生育環境に応じて形態を変化することで適応している。例えば増水時に冠水する渓流帯に生育する植物は国内ではゼンマイ科のヤシャゼンマイ(*Osumunda lancea*)をはじめ、水流ストレス回避の形態変化として葉の狭葉化が報告されており、このような場所で狭葉化を獲得している植物群は渓流沿い植物と呼ばれ、いくつかの種で同様の形態変化が確認されている[1,2,3]。これらのうちイラクサ科のコアカソ(*Boehmeria tricuspis*)は、神奈川県相模原市の水沢川[4]、山梨県上野原市の鶴川[5]といった関東地方の渓流沿い環境に狭葉化を伴って生育していると報告されている。これらのコアカソにおける研究結果は、増水頻度が同程度相当の河川において、他の地域・水系の河川であっても同様の結果が得られる可能性が高い。そこで予備調査を行った結果、埼玉県秩父市の荒川上流域にコアカソの集団を確認することができた。そこで本研究では、これらを用いた形態解析とともに先行研究の結果[5]と比較することで、このコアカソの適応形態を明らかにするとともに、河川沿いにおける選択圧の強度の比較に関する考察を行うことを目的として研究を行った。

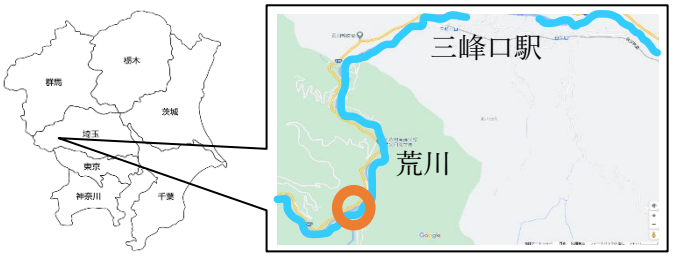


図 1.　コアカソの採集地.

2. 材料および方法

本研究で用いたコアカソは、埼玉県秩父市の荒川上流(35° 52’ 21” N, 138° 20’ 26” E)において渓流沿い個体(以下、渓流型)コアカソを 33 個体、対照として通常地個体(以下、陸上型)を 37 個体採集した(図 1)。1 個体につき葉を 3 枚選び、葉の縦幅、横幅、葉脚角度を測定し、葉形指数(縦幅/横幅)を求めた。葉脈数を数え、葉脈間を測定し、葉の厚さを測定した。

3. 結果

本研究による解析の結果、葉の縦幅、横幅、葉脚角度は渓流型の方が有意に低い値を示した(表 1)。また葉形指数(縦幅/横幅)は有意差が認められなかったために狭葉化ではなく矮小化を起こしていることが示された(表 1)。さらに葉脈数、葉脈間は共に渓流型の方が有意に低い値を示し、葉の厚さは渓流型の方が有意に高い値を示した(表 1)。

表 1. 形態計測結果. **は有意差が認められたことを示す。

	陸上型	渓流型	有意差
縦(mm)	47.25 ± 17.86	32.67 ± 12.24	**
横(mm)	35.14 ± 12.44	23.96 ± 8.72	**
葉脚角度	123.99 ± 14.57	111.24 ± 13.23	**
葉形指数	1.34 ± 0.16	1.36 ± 0.14	
葉脈数	12.47 ± 1.90	10.56 ± 2.15	**
葉脈間 1 (mm)	8.32 ± 2.79	5.18 ± 1.63	**
葉脈間 2 (mm)	15.08 ± 5.82	8.84 ± 2.85	**
厚さ(μm)	83.99 ± 0.56	93.23 ± 0.28	**

4. 考察

本研究の結果から、埼玉県秩父市の荒川上流に生息する渓流型は、陸上型に比べて矮小化することで適応していることが明らかとなったものの、これまでのコアカソの狭葉化といった形態変化とは異なることが示された(表 1)。これまでの狭葉化に関する研究結果から渓流沿いにおける狭葉化による適応形態が、矮小化のプロセスを経ることにより起こっている現象であることを考慮すると、本研究の渓流型は、狭葉化する途中のプロセスで止まり、矮小化することで適応していると考えられる。このように渓流帯における適応形態が異なる背景に、河川沿いの選択圧の強度の違いが関係していることが報告されて明らかにしており、渓流帯の選択圧が強い場合は葉形指数が高くなることが示されている[3]。そのために本研究の荒川上流における結果を先行研究の鶴川の結果と比較したところ(図 2)、鶴川の葉形指数の方が有意に大きな値を示したために、本調査地は鶴川よりも選択圧が弱いことが考えられる。本調査地付近の埼玉県秩父市(三峰)の方が鶴川の位置する山梨県上野原市に比べて、選択圧に関与する突発的な増水の要因である豪雨の頻度が低く、増水頻度の低下が河川沿いの選択圧の低下に寄与したのではないかと考えられる。

本研究の渓流型で見られた葉の矮小化に関して陸上型と葉脈の比較を行った結果、渓流型が葉脈間を狭くすることで矮小化していることが示されたために(表 1)、相対的な比較から、葉の発生段階で特殊な変化を伴わない変化であることが明らかとなった。この結果に加えて、本研究の渓流型の方が葉が厚くなっていることが明らかとなった(表 1)。この結果は、林内や林縁に比べて河川沿いで増加する光量に応答する形でクチクラ層を厚くしたヤシャゼンマイと同様の変化を起こしていることが示され[1]、河川沿いの光環境に呼応した変化であることが示唆された。

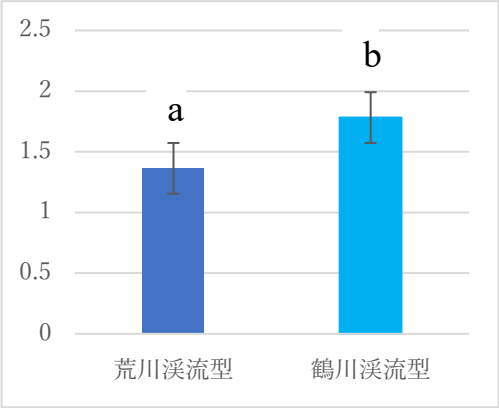


図 2. 葉形指数の比較.

5. 引用文献

[1] Imaichi R.,Kato M. (1997) A facultative angiosperm rheophyte, *Farfugium japonicum* var. *luchuense* (Compositae). Evolution and Diversification of Land Plants PP.314-316. Springer.Tokyo.

[2] Ohga K., Muroi M., Hayakawa H., Yokoyama J., Ito K., Tebayashi S., Arakawa R., Fukuda T. (2012) Morphological and anatomy of non-rheophytic and rheophytic types of *Adenophora triphylla* var. *japonica*(Campanulaceae). Journal of Plant Sciences 3: 805-809.

[3] Yamada Y., Hayakawa H., Minamiya Y., Ito K., Shibayama Z., Arakawa R., Fukuda T. (2011) Comparative morophology and anatomy of rheophytic *Aster microcephalus* var. *ripensis* (Asteraceae). Journal of Phytogeography and Taxonomy 59: 35-42.

[4]石毛貴大 (2020) 上野原市周辺に生息しているコアカソの渓流沿い適応. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

[5]吉田伸 (2019) コアカソの渓流沿い適応に関する研究. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

コマツヨイグザの資源分配様式からみる繁殖戦略

生物多様性研究室
指導教員　福田　達哉
1724014　加藤　桃子

1.緒言　国内に人為的に導入された在来種の生態に影響を及ぼす生物は、要注意外来種として分類されるために、駆除の対象生物として指定される。植物の場合は、駆除ステージとして種子の段階での発見は難しく、また繁殖期に至った場合は既に種子散布が行われている可能性があるために、外来種の繁殖戦略を明らかにし、最適な駆除ステージを明らかにすることは重要であると考えられる[1]。

コマツヨイグサ(*Oenothera laciniata*)は、北アメリカ原産のアカバナ科に属する多年生草本であり(図 1)、要注意外来種に指定されているために、生育の中心である海岸地において他の在来種との競合が懸念される植物である。そこで、本研究では、コマツヨイグサの繁殖戦略を資源分配様式の点から明らかにすることにより、最適な駆除ステージを提案することを目的として研究を行った。

図 1. コマツヨイグサ. A: 全体; B: 根; C: 種子（Bar=1 ㎜).

2. 方法　神奈川県平塚市袖ヶ浜(35°18’ 54” N; 139° 20’ 42” E)においてコマツヨイグサを 43 個体採集した。採集した個体の各器官を計測し、その後各器官を 100℃で 72 時間乾燥させ、乾燥後電子天秤を用いて絶乾重量を測定し、資源分配比率を算出した。

3. 結果　コマツヨイグサの成長をロゼット期と地上展開期に分けて比較した結果、ロゼット期では成長に伴う総重量の増加とともに、葉の枚数、葉面積、根の長さと太さは増加させるものの、そのうち葉面積は高止まりすることが明らかとなった(図 2 A-D)。また地上展開期では総重量の増加とともに葉の枚数と面積、根の長さと太さ、茎の長さと太さは増加し、特に茎の長さは指数関数的に増加し、また葉面積、根と茎の太さはそれぞれ高止まりすることが明らかとなった(図 3 A-F)。さらに種子は個数と総重量がともに増加することが明らかとなった(図 3 G, H)。

これらの結果を資源分配率の点から解析した結果、ロゼット期の初期に根への投資率は高いものの、成長とともに獲得資源の多くを葉へ投資することが明らかとなった(図 2 E, F)。また地上展開期に関しては根と葉の資源分配率の変化がロゼット期の場合と類似していることが示され、さらに茎への投資の変化は葉と同様であることが示された(図 3 I-L)。これに対して種子への投資は初期段階では比率が高いものの、その比率は成長とともに穏やかに下降することが明らかとなった(図 3 L)。

4.考察　本研究の結果から、ロゼット期および地上展開期を通して根は常に伸長していることが明らかとなった。一般に主根を発達させる植物の場合、獲得資源を例えば塊根や塊茎といった太さへの投資による貯蓄を行い、伸長を制限することで根端分裂組織保護の根冠における損傷を防ぐことが知られている。しかし、コマツヨイグサの根が伸長を続ける背景に、生息地が海岸地の砂地という特殊な生育環境が考えられ(図 1 A)、植物体の水分や無機養分の獲得効率を上昇させるためには伸長を続ける必要があるとあることが示された。

根は獲得資源の貯蓄器官であるために、獲得資源の増加に伴い、資源分配率は一定もしくは増加すると予想されるものの、本研究の結果は下降することが示された。コマツイグサは草本植物であるものの、茎は表皮にリグニンが沈着し木質化することが知られている。この木質化は被食防御効果をも

たらすだけでなく、茎に投資した資源は木本植物と同様に貯蓄資源とすることができる。このことはコマツヨイグサが資源の貯蓄を根に頼らず茎にもすることを示しており、根への資源分配率の下降は、茎への増加する資源分配率の増加により、個体における資源の枯渇は回避することができていることを示している。またコマツヨイグサは匍匐性であるため(図 1 A)、個体を維持するための茎の太さへの投資が必要ない分、長さへの投資が非常に大きく、長さの成長が指数関数的であることが示された。しかしこの茎の成長に対して葉や種子が単調増加である背景に、コマツヨイグサが葉の先端へ向けて茎が付く節間距離を増加させていることが考えられる。葉の増加は光合成産物獲得には重要であるものの、海岸地特有の環境ストレスは葉の増加とともに個体にかかる物理的影響を増加させると考えられ、そのために茎の長さの指数関数的な増加に対して葉は単調増加しているのだと考えられる。

コマツヨイグサは非常に小さな種子をつけ、重力散布を行う(図 1 C)。そのため種子散布距離は、必然的に茎の長さに依存する。コマツヨイグサの指数関数的に成長する茎は、種子散布距離を稼ぎ、また指数関数的には増加させない種子数は、播種密度を調節することにより、子孫間競争を低減させて適応度を上げる戦略である可能性が考えられる。このように地上展開期を迎えたコマツヨイグサは指数関数的に茎を成長させて早期に種子散布を行っている可能性が高いにも関わらず、種子は微小であるために、外来種の駆除を目的に種子を回収することは難しい。そこで本研究では根の伸長が進行している、葉の枚数が少ないロゼット期において駆除することがコマツヨイグサに対する効率的な外来種対策方法であると考えられる。

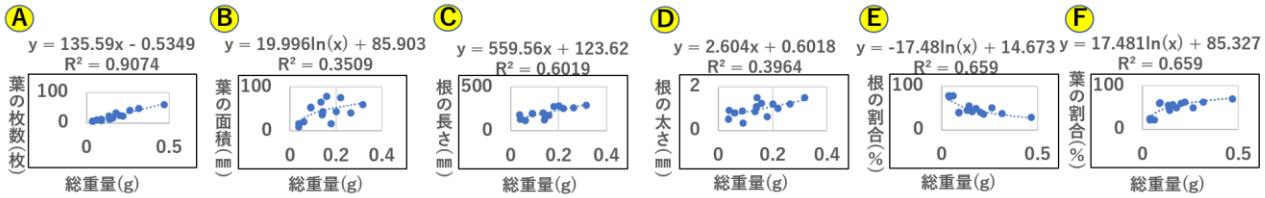


図 2. ロゼット期における成長(総重量)と各器官の発達に関する相関関係. A: 葉の大きさ; B: 葉の枚数; C: 根の長さ; D: 根の太さ; E: 根の資源分配率; F: 葉の資源分配率.

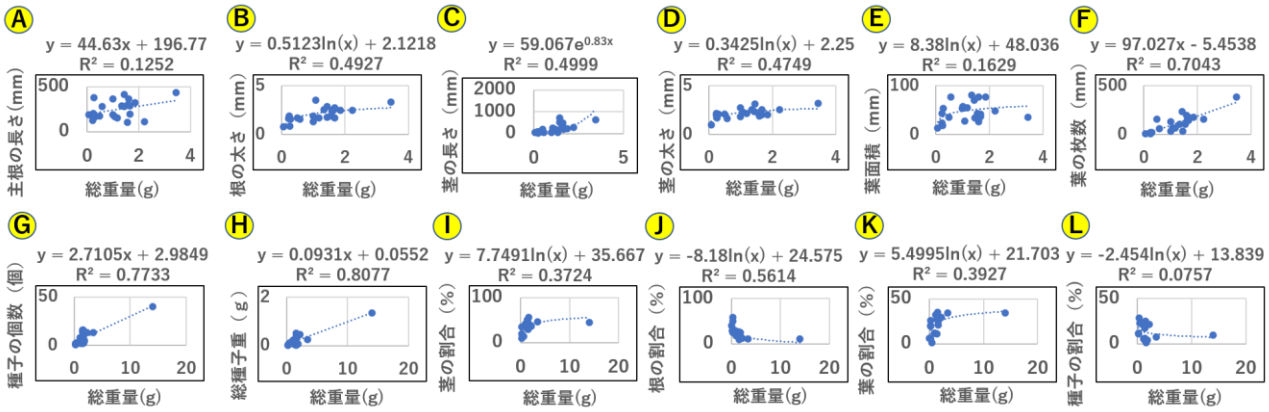


図 3. 地上展開期における成長(総重量)と各器官の発達に関する相関関係. A: 根の長さ; B: 根の太さ; C: 茎の長さ; D 茎の太さ; E: 葉の大きさ; F: 葉の枚数; G: 総種子数; H: 種子重 I: 茎の資源分配率 J: 根の資源分配率 K: 葉の資源分配率 L: 種子の資源分配率.

5.参考文献 [1]石井知希（2020）資源分配様式からみたトキワツユクサの繁殖戦略. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

ダイモンジソウの成長戦略についての研究　---渓流沿い環境を例に---

生物多様性研究室
1724034 高橋由明
指導教員：福田達哉

1. 緒言

河川の増水の影響を受ける渓流帯に生育する植物は、流水による物理的ストレスを回避するために狭葉化などの渓流帯への適応様式が知られており、このような適応形態を持つ植物は一般に渓流沿い植物と呼ばれる[1]。関東地方では、いくつかの植物が渓流帯に生育しているにもかかわらず、これまでに渓流沿い植物としての報告は、ヤシャゼンマイ(*Osmunda lancea*)やコアカソ(*Boehmeria spicata*)と非常に限られているために[2, 3]、関東地方における新たな渓流沿い植物を発見する目的として埼玉県秩父市の荒川渓流帯において予備調査を行った。その結果、ヤシャゼンマイが生育していた荒川渓流帯にユキノシタ科のダイモンジソウ(*Saxifraga fortunei* var. *alpina*)が生育していることを確認した(図 1)。そのために、このダイモンジソウはヤシャゼンマイと同様の河川からの選択圧を受けている可能性を示している。そこで本研究ではこの渓流帯に関するダイモンジソウの適応形態を明らかにすることを目的として行った。

2. 方法

埼玉県秩父市の荒川渓流帯(35° 56′ 23″ N; 138° 57′ 58″ E)(図 2)にて渓流沿い植物であるヤシャゼンマイを基準とし、それより下方を川側、上方を陸側としてそれぞれの地点でダイモンジソウを 30 個体以上採集した。採集した個体に関して葉長、葉幅を測定し葉形指数(葉長/葉幅)を求め、また葉脚角度と茎の太さを測定し、有意差検定を行った。さらに葉の面積(葉長×葉幅)を算出した。

3. 結果

川側・陸側の両地点の集団間において葉長、葉幅に有意差が認められ、どちらも川側の集団が大きいことが明らかとなった。一方で葉形指数、葉脚角度については有意差が見られなかった(表 1)。これらの結果は、陸側の集団が川側の集団と比較し矮小化していることを示しており、また川側の集団が一般的に見られる渓流沿い適応形態を獲得していないことが示された。さらに、茎の太さは有意差が認められ川側の集団の方が太いことが示された(表 1)。

図 1. 調査地のダイモンジソウ.

図 2. 調査地点.

表 1. 本研究の計測結果.

	川側	陸側	有意差
葉長(mm)	24.33± 6.89	16.71± 5.04	有
葉幅(mm)	30.46± 8.37	20.44± 6.37	有
葉形指数	0.81± 0.06	0.83± 0.08	無
葉脚角度(度)	196.75±34.84	188.09±45.89	無
茎の太さ(mm)	1.04± 0.30	0.68± 0.26	有

4. 考察

本研究の結果から川側の集団は、渓流沿い植物であるヤシャゼンマイと同所的に生育しているにも拘わらず、狭葉化という適応形態を獲得することなく生育していることが示された。この結果は調査地点付近で流水によるストレスは認められるものの、そのストレスはダイモンジソウに対しては非常に小さく、植物体に大きな影響を与えないものであったと考えられる。また本研究の計測結果は、陸側の集団の葉の方が矮小化しているといった興味深い結果を得ることができたために(表 1)、この結果を川側と陸側の集団間における成長比較の観点からと、葉形成の観点からの 2 つの観点から考察を行う。

4-1. 川側と陸側におけるダイモンジソウの成長比較の観点から

一般に直立する植物は成長すると茎は太くなることが知られている。このことは、茎の太さを成長の指標として用いることができることを示しており、茎の太さは陸側の集団のほうが有意に細かったことから(表 1)、川側と比べ陸側の集団の方が定着してから日が浅いことが示唆される。また、そのために陸側の集団の葉は有意に小さかったのではないかと考えられる。さらにこの結果は陸側の集団が長く定着していないという新たな疑問を生じる。この答えの 1 つとしてダイモンジソウは分布が広いにも拘わらず多種共存が難しい植物であり、比較的に種間競争に弱いことが挙げられる。このことから多くの種が生育する陸側にはダイモンジソウは長期間定着できていないことが考えられ、茎の細さに反映されたと考えられる。

4-2. ダイモンジソウの葉形成の観点から

上述の考察は、川側の集団が種間競争によるストレスが低く成長していることを示唆している。また本研究の結果から、川側の流水によるストレスもダイモンジソウにおいては比較的弱いことが明らかとなったため、川側の集団はダイモンジソウの葉形成の面から解析することに好適な材料となる。そこで本研究では、川側の集団において葉の枚数ごとに個体を分け、茎の太さと葉の面積の関係を解析した結果、大きさごとに相関が認められた(図 3A-C)。この結果は同一個体内で葉の大きさに違いがあることを示しており、ストレスが多い場所で生育するダイモンジソウはリスク感知のために葉の大きさに差をつける成長を行っていると考えられる。しかし陸側の集団では川側のような相関は見られず(図 3D-F)、これは被食や病原菌といった何らかの原因により大きな葉を失ったためと考えられ、本研究で陸側の集団が矮小化していた背景には、このようなことが関与していることが考えられる。

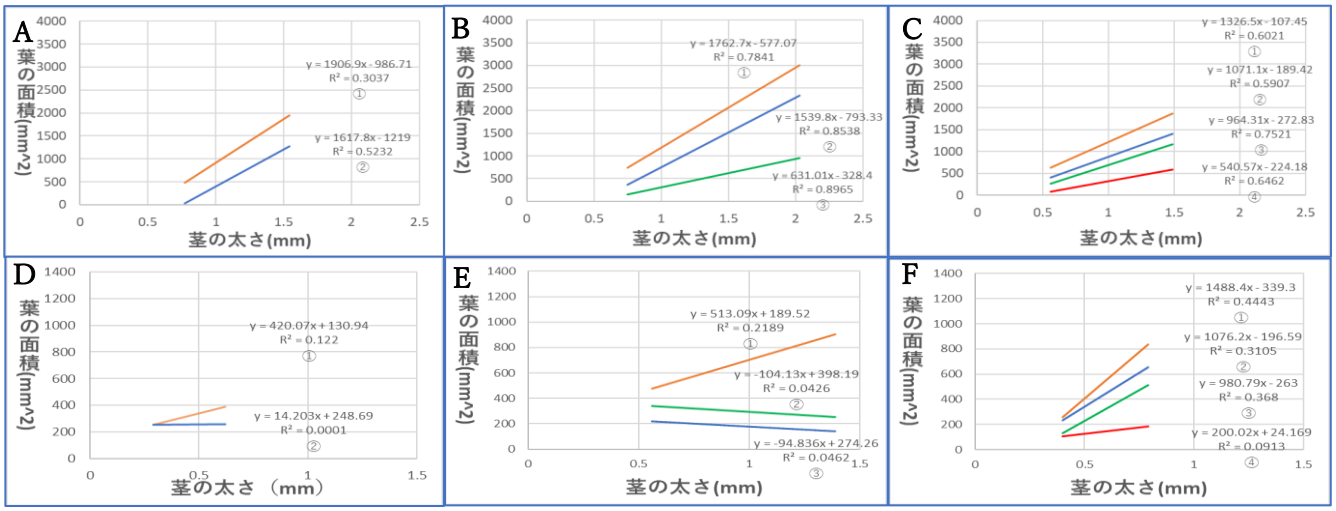


図 3. 葉の成長過程. A-C: **川側の集団**; D-F: **陸側の集団**. A, D: **葉が 2 枚の個体**; B, E: **葉が 3 枚の個体**; C, F: **葉が 4 枚の個体**. **図中の番号は個体における葉の大きさ順を示す**. —: 1 **枚目の葉**; —: 2 **枚目の葉**; —: 3 **枚目の葉**; —: 4 **枚目の葉**.

5. 参考文献

[1] 加藤雅啓 (2003) 渓流沿い植物の進化と適応に関する研究. 分類 3: 107-122.

[2] Imaichi R., Kato M. (1992) Comparative leaf development of *Osmunda lancea* and *O. japonica* (Osmundaceae). Heterochronic origin of rheophytic stenophylly. Botanical Magazine 105: 199-213.

[3] 石毛貴大（2020）上野原市周辺に生息しているコアカソの渓流沿い適応. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

ツワブキの海岸地における形態学的適応様式

生物多様性研究室
1724060　水野　九十九
指導教員：福田　達哉

1.緒言

海岸地の潮風、強光、土壌に含まれる塩分といった通常とは異なる環境が、そこに生育する植物の成長を妨げる要因として知られ、そのような環境に生育している植物はこれらのストレスに対して例えば葉を多肉化させるなどといった形態変化によって適応している(Tunala et al. 2012; Ohga et al. 2013)。

ツワブキ(*Farfugium japonicum* (L.) Kitam.)はキク科ツワブキ属に属する多年生草本であり、日本各地の内陸部から海岸地まで広く生育している。このツワブキに関して荒川(2020)は、内陸地と海岸林に生育しているツワブキの形態学的比較を行った結果、海岸林に生育する集団は、汀線に近いものの内陸地と形態的な変化をすることなく適応していることが示され、その背景には海岸林が海岸地特有の環境要素を低減させる効果を持っている可能性を示した。そこで本研究では海岸林を越えた汀線側に生育する集団を用い、これまでの結果と比較することで海岸地適応環境に対する適応形態を明らかにすることを目的として研究を行った。

図 1. ツワブキ. Bar=10cm.

2.方法

千葉県勝浦市の毛戸浦に 2 つの集団を設け(A 35° 13′ 18″ N, 140° 27′ 71″ E; B 35° 13′ 15″ N, 140° 27′ 60″ E)、それぞれから約 30 個体採集した(図 2)。採集した個体を押し葉標本にしたのち、葉長、葉幅、葉柄の長さを電子式ノギスで、また葉の厚さと葉柄の太さを電子マイクロメーターでそれぞれ 3 回測定をし、その平均値を算出した。さらに、気孔数に関しては葉の裏を SUMP 法により葉 1 枚に対しそれぞれ 3 回の測定をし、その平均値を算出した。葉長と葉幅の値を用いて葉面積を算出した。

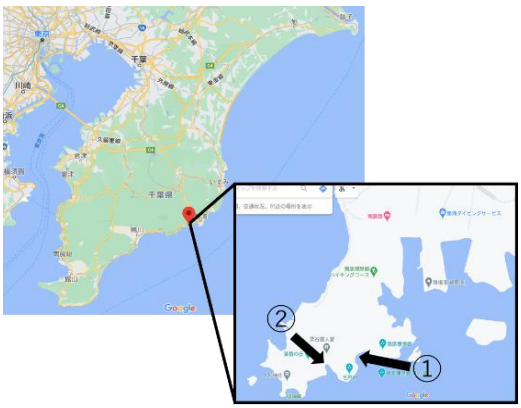


図2. 採集地点. ①A; ②B.

3.結果

先行研究である荒川(2020)の結果を加えた測定結果を表 1 に示した。葉の厚さの結果から、海岸地の集団では有意に厚くなっていることが明らかになった。葉長、葉幅、葉面積の結果は、葉面積が海岸林の集団で最も大きく、次に海岸地が大きくなっていることが明らかとなった。葉柄の長さの結果は、内陸部の集団で一部有意に短かったもののそのほかでは有意差は見られなかった。葉柄の太さの結果は海岸林と海岸地の一部の集団で有意に太く、内陸部の一部の集団で有意に細いことが明らかとなった。気孔数の結果は内陸部の一部の集団が有意に少ないことが明らかとなった。また、葉のサイズ(葉面積×厚さ)を算出しその平均値と葉柄の太さの関係を明らかにした結果、両者に相関関係が見られた(図 3)。さらに気孔数と葉面積の関係についても同様に相関関係が確認できた(図 4)。

表1.各形態の測定結果.

	内陸地		内陸地		海岸林		海岸地		海岸地	
	高麗山		衣笠山公園		しおさいの森		毛戸浦		岬の中間	
葉の厚さ(μm)	182.37±5.88	a	175.82±7.43	a	157.80±4.93	a	242.39±12.99	b	235.81±10.66	b
葉の横幅(cm)	11.92±0.66	a	13.52±0.5	a	17.58±0.51	b	17.05±0.44	b	16.79±0.37	b
葉の長さ(cm)	9.13±0.47	a	10.86±0.45	b	13.23±0.40	c	11.43±0.28	b	11.50±0.29	b
葉面積(cm²)	58.40±6.17	a	76.25±6.46	ac	118.74±6.74	b	98.70±4.56	b	97.84±4.43	bc
葉柄の長さ(cm)	18.67±1.69	a	13.38±0.82	b	21.12±0.77	a	22.33±0.96	a	19.89±0.71	a
葉柄の太さ(mm)	1.95±0.09	ac	1.87±0.08	a	2.53±0.07	b	2.56±0.08	b	2.21±0.08	c
気孔の数	978,868.96±95,020.15	a	1,366,339.85±119,773.18	ab	1,729,901.48±94,672.20	b	1,366,339.85±119773.18	b	1,686,097.40±98,735.90	b

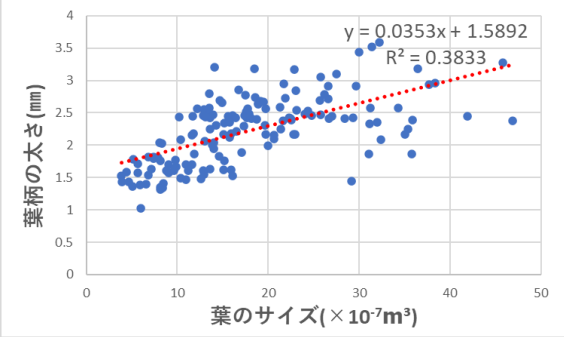


図3. 葉のサイズと葉柄の太さの関係.

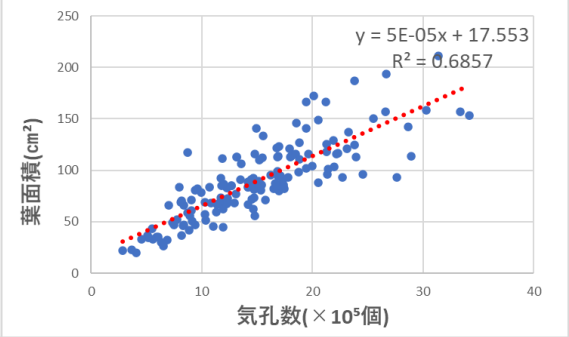


図 4. 葉面積と気孔数の関係.

4.考察

本研究でツワブキは、海岸地に分布を拡大する際に海岸地特有の乾燥に対する貯水のために、葉を多肉化することで適応していることが明らかとなった。また葉面積に関しても光環境が他の地点と明らかに異なる海岸林内であるしおさいの森の集団を除いた場合、海岸地で大きくなる傾向が確認でき、葉全体を大きくすることで水分の貯蓄量を上げ、海岸地に適応していることが明らかとなった。この結果は、ツワブキと同じキク科植物で海岸地適応形態が示されているソナレギク(*Aster hispidus* var. *insularis*)においても同様の形態変化が示されているため(Tunala et al. 2012)、キク科植物が海岸林を越えて汀線側に侵入する際の共通した形態学的適応様式でないかと考えられる。

ツワブキは、比較的に長い葉柄により葉が支えられているために(図 1)、葉のサイズの増加は葉柄に負荷がかかると考えられる。そこで本研究では葉のサイズの変化に伴う葉柄の変化を明らかにするために、それぞれの値を用いた相関についての解析を行った結果、相関関係が成立することが示され、本研究で明らかとなった海岸地での葉柄の太さの変化は葉のサイズの変化に伴う現象であることが明らかとなった。また同様に、気孔数についても解析を行った結果、葉面積との相関が確認できたため、海岸地において蒸散量を減少させるための気孔における特異的な変化は示されなかった。前述のソナレギクの場合、気孔数の有意な減少が示されており、気孔からの過剰な蒸散を減少させていると考えられている(Kumekawa et al. 2013)。これらの結果を考慮すると、キク科植物で共通する海岸地への適応形態は葉の多肉化であり、気孔数の変化は種間もしくは地域間の違いによって変化する可能性が示された。

5.参考文献

荒川優香里 (2020) 海岸地に生息するツワブキの形態学的適応様式. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

Kumekawa Y., Miyata H., Ohga K., Hayakawa H., Yokoyama J., Ito K., Tebayashi S., Arakawa R., Fukuda T. (2013) Comparative analyses of stomatal size and density among ecotypes of *Aster hispidus* (Asteraceae). American Journal of Plant Sciences 4: 524-527.

Ohga K., Muroi M., Hayakawa H., Yokoyama J., Ito K., Tebayashi S., Arakawa R., Fukuda T. (2013) Coastal adaptation of *Adenophora triphylla* var. *japonica* (Campanulaceae). American Journal of Plant Sciences 4: 596-601.

Tunala, Hayakawa H., Minamiya Y., Gale.S.W., Yokoyama J., Arakawa R., Fukuda T. (2012) Foliar adaptations in *Aster hispidus* var. *insularis* (Asteraceae). Journal of Plant Studies 1: 19-25.

イタドリの種子散布戦略についての研究

生命科学研究室
1724012　海津大樹
指導教員：　蓜原絹子　福田達哉

1. 緒言

植物の果実には様々な果実形態があり、その形態は種子散布様式に対応していることが多い。その中でも風散布種子は、種子に付属体をつけ効率的に散布していることが知られており[1]、そのために風を利用して様々な方向への長距離散布が可能となる[2]。

イタドリ（*Fallopia japonica*）はタデ科ソバカズラ属に属する風散布種子を持つ多年生草本植物であり、散布能力が非常に高いために広範囲に種子を拡散させることが知られている。しかし、その一方で親個体周辺といった近距離に種子を散布し、大きな集団を形成している場面をよく見かける（図 1)。イタドリは散布能力が高い果実（種子＋付属体）を保有しているにもかかわらず（図 2)、親個体周辺に集団を形成する背景に、イタドリが種子の散布距離を調整している可能性が考えられる。そこで本研究ではイタドリの成長に着目し、種子散布距離との関係を明らかにすることを目的とする。

図１. イタドリ集団.

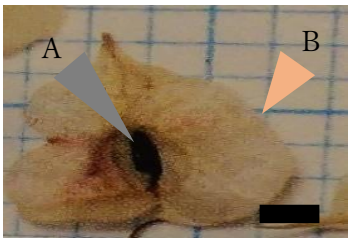


図２. イタドリ果実.
A:種子, B:付属体. Bar=1mm.

図３. 採集地.

２. 方法

本研究では神奈川県川崎市～東京都稲城市の多摩川河川敷（矢野口駅付近： 35° 38’ 32” N, 139° 31’ 26” E）において合計３０個体を採集した（図３)。採集したイタドリの茎の太さを電子式ノギスで、果実及び種子の重さを電子天秤で測定した。付属体効果の計測は、落下時間を果実と種子のそれぞれを計測し、前者を t_1、後者を t_2 とし付属体の効果を $\Delta t = |t_1 - t_2|$ として求めた。

３. 結果

イタドリは茎が太くなるとともに種子が重くなり、太さと重さに相関関係が成立することが示された（図４)。果実重（付属体重＋種子重）が重くなるにつれて滞空時間が短くなった（図５)。また、種子重の場合も同様に重くなるにつれて滞空時間が短い結果となった（図６)。また、種子が重くなるにつれて付属体重が有意に軽くなるということが明らかとなり（図７)、軽い種子には付属体の効果が大きい傾向が示された（図８)。

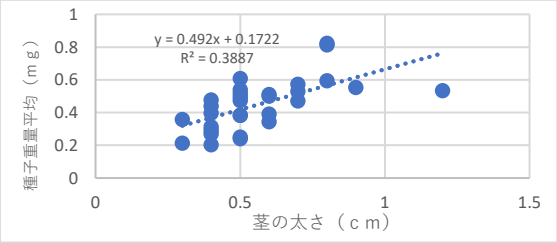


図４．茎の太さと種子重量平均の関係.

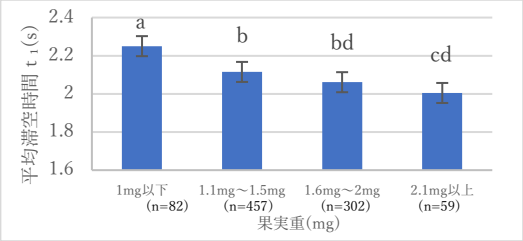


図５．果実重と平均滞空時間(t_1)の関係.

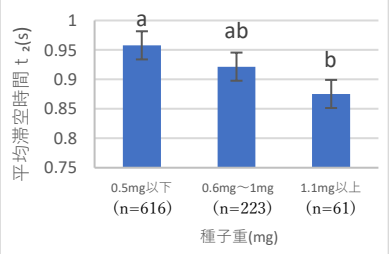


図６．種子重と平均滞空時間(t_2)の関係.

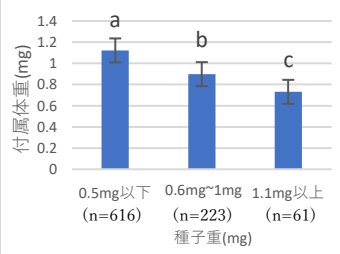


図７．種子重と付属体重の関係.

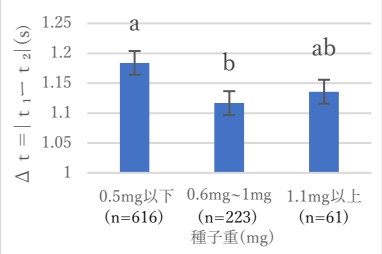


図８．種子重と付属体の効果(Δｔ)の関係.

4. 考察

イタドリが定着の初期は、長距離種子散布を行っているものの、定着してから時間が経過するにつれて、生産する種子の散布距離は短くなることが明らかとなった。この結果は、イタドリの種子散布能力が成長とともに低下していくことを示している。長距離散布が可能な風散布種子を持つにもかかわらず、積極的に散布能力を低下させていることには疑問が残る。その答えの１つとして、種子が散布される環境に原因があると考えられる。本来、長距離散布をする風散布種子には、親個体の影響が及ばず、かつ新しい生育地の獲得を目的として種子をその場から逃がす戦略が発達している。しかし、定着してから長期間、淘汰されずに成長をすることができた場所は、どのような環境か分からない場所へ種子を散布するよりも、イタドリにとって生存に有利な場所だと推察される。そのため、親個体の成長にしたがって、近距離に散布させるのではないかと考えられる。しかし、近距離に種子が散布された場合、親個体による土壌養分収奪の影響で、発芽の際は必然的に貧栄養状態の環境下で行うことになる。そのために、種子重を大きくすることで発芽に必要な養分を多くし、親個体付近においても発芽率を上げる効果が得ていると考えられる。つまり、イタドリは成長過程において、種子の散布距離を積極的に変える戦略を持っていると思われる。

5. 結論

イタドリは広範囲に拡散する種子散布戦略と局所的に大集団を形成する種子散布戦略を兼ね備え、一度侵入した地域では多面的に生育地域を拡大することが明らかとなった。

6. 参考文献

[1] 小熊佑紀奈（2017）風散布植物における付属体の効果に関する研究．東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

[2] 鈴木庸夫，高橋冬，安延尚文.（2018）草本の種子と果実・形態や大きさが一目でわかる 734 種．誠文堂新光社，共著，東京.

等々力渓谷における水生生物の調査

生命科学研究室
指導教員　蛭原　絹子
福田　達哉
1724038　武田　未来

1. 緒言

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で発生した津波は、沿岸域の水生生物にとって大きな攪乱要因となり、これまで知られていた仙台湾の生物の多くが見られなくなった。しかし、数年後には生物が戻りはじめ、これまでの生態系が部分的に回復したとの報告がある[1, 2]。このように大きな攪乱は、これまでの生態系を一時的に不均衡にする。その結果、多様性を低下させる要因となるが、自然状態が維持されている環境においては、時間の経過とともに回復することが知られている。

等々力渓谷は 23 区で唯一残されている渓谷であり、本学と世田谷区が共同で環境維持のために様々な環境調査が行われている。そのうち水生生物に関しては 2017 年、2018 年、2019 年に本学と世田谷区によって行われ[3,4]、2017 年にはトウヨシノボリ、サワガニ、モツゴ、ドジョウ、スミウキゴリの 5 種が生息していることを報告している[3]。しかし 2018 年以降の調査から、等々力渓谷においてトウヨシノボリ、サワガニ、モツゴの 3 種が未確認となったことが報告されている[4]。これらの結果は、等々力渓谷の水生生物における種の多様性の低下を示している。この要因として 2017 年に何らかの攪乱によって 3 種が未確認になり、これまでに回復していない可能性がある。そこで本研究では等々力渓谷における未確認を含めた水生生物の 2020 年時点の生息状況を明らかにし、これまでの結果と比較を行う。その結果より、等々力渓谷の種の多様性低下に関する攪乱要因と今後の多様性の維持に関して考察を行うことを目的として研究を行った。

2. 方法

タモ網を用いて先行調査で確認された水生生物の生息地を重点的に 10 月から 12 月にかけて 5 日間調査した。捕まえた水生生物をその場で同定し同定できたものはその場で返した。同定できなかったものは持ち帰り研究室にて同定した。

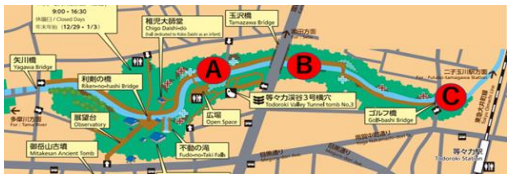


図1. 本研究の調査地域. 図中の A,B,C は図 2 に対応.

図2. 調査地の風景. A,B,C は図1に対応.

3. 結果及び考察

等々力渓谷における調査の結果、未確認であった 3 種のうちサワガニのみを発見することができた。この結果から、その他 2 種は 2018 年以降生息が確認されていないことが示された。またこの結果は、2017 年から 2018 年の間に等々力渓谷に何らかの攪乱があったことを示唆している。特に 2017 年 10 月下旬に上陸した台風は、多摩川の水位を大幅に上昇させた。結果、多くのアユが多摩川河川敷を越えて等々力渓谷を流れる谷沢川の最下流部に入り込んでいたことを報告している[3]。そのため、この台風の影響を等々力渓谷だけではなく関東一円で考えるために(図 3)、2017 年の関東の河川水位を調査した。その結果、10 月下旬に大きな河川水位の変化があったことが明らかとなった(図 4)。そこで 10 月下旬に絞り、その詳細を調査した結果、10 月 22 日から 23 日にかけて最大 4m の水位の変化があったことを示した(図 5)。この結果は多摩川の増水の結果と一致したために、台風の影響が関東一円に広く及んでいることが明らかとなった。そのために、これらの河川付近の水生生物の変化を明らかにした結果、調査地

6 か所のうち 3 か所は 2017 年から 2018 年の間に水生生物の減少が見られた。そのうち 1 か所では 2019 年に再び増加していた(図 6)。そこで、この減少した河川 2 か所の特徴および共通点を調査した結果、両河川とも河川改修による人工的な整備のために水位が低く、下流に流された水生生物が再び上流に戻ってこられないような構造になっていた。等々力渓谷も下流域が整備されているうえに水位が低く、また上流に浄水施設があることで上流と下流のどちらからも水生生物の供給が見込めない構造になっている。その為、攪乱によって渓谷の多様性が減少した場合、水生生物の供給が見込めずに多様性が低下した状態となると考えられる。

本研究では 2019 年には発見されていなかったサワガニが発見された。サワガニはエラ呼吸をするものの陸上を移動することも可能であるために、等々力渓谷の他の水生生物とは異なり河川改修の影響は比較的に小さかったのではないかと考えられる。またサワガニは環境省が指定する水質に関する指標生物であり 2020 年時点において、等々力渓谷の水質は 2017 年と大きく変化していないことを示している。そのために上流域もしくは下流域からこれまで生息が確認された水生生物の供給が等々力渓谷に見られた場合は、これまで通り定着することが出来る水質を維持していると考えられる。

図 3. 水位観測地及び水生生物採集地.

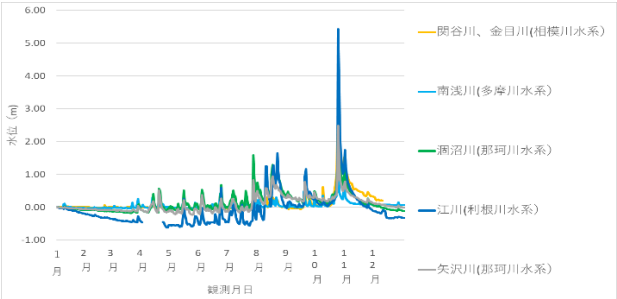


図 4. 2017 年の水位の変化.各色は図3に対応.

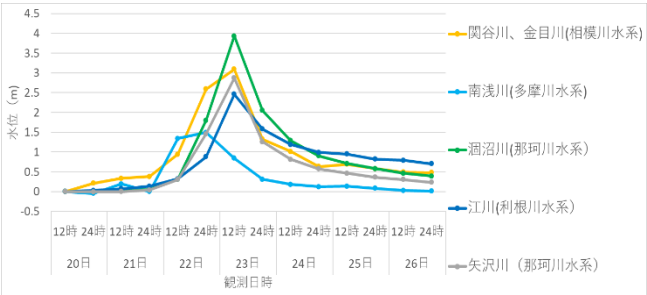


図 5. 10 月 20 日～26 日の水位の変化.各色は図3に対応.

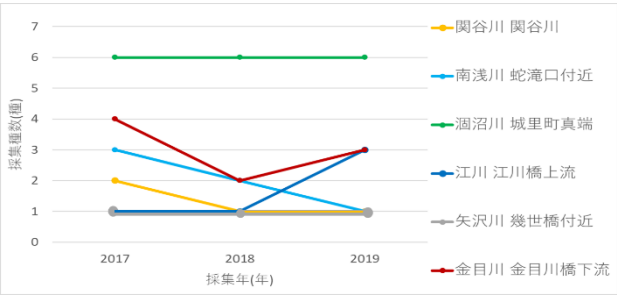


図 6. 他の河川の水生生物の変化.各色は図3に対応.

5. 今後の課題

一般的に生物相調査の場合、年間を通じた生物の季節性を考慮して行う必要があるものの、活動開始が 10 月と大幅に遅れて開始せざるを得ない状況で研究を行った。そのために、今後は未調査期間である春季や夏季を中心に調査を行い、本研究の秋季と冬季の結果に加えることにより、年間を通した等々力渓谷の水生生物相の議論が行えると考えられる。

6. 参考文献

[1] 大越和加 (2018) 地震・津波攪乱が砂泥底に生息するマクロベントス群集へ及ぼす影響と変化. 日本水産学会誌 86: 1062-1065.

[2] Miura O., Kanaya G., Nakai S., Itoh H., Chiba S. (2019) Prevalence and species richness of trematode parasites only partially recovers after the 2011 Tohoku, Japan, earthquake tsunami. International Journal for Parasitology 49: 1023-1028.

[3]五十嵐玲音 (2017) 等々力渓谷渓流化プロジェクト. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

[4]世田谷区 (2019) 河川生態調査 https://www.city.setagaya.lg.jp/mokuji/sumai/011/006/003/d00124130.html

主成分分析を用いた青森県産リンゴの成分特性

天然物化学研究室
1724001　相原美輝
指導教員：蛭原絹子

1.緒言

リンゴ(*Malus domestica*)は，バラ科リンゴ属に分類される落葉高木樹である。日本で生産されている品種は約 2,000 種類あるといわれ，生食されるほか，加工してジュース，ジャム，リンゴ酒，菓子の材料などに利用されている。リンゴを選ぶ判断基準には，各リンゴの特徴の他，リンゴの甘味(糖度)や酸味(pH)に着目することが多い。果実において主成分分析を用いた研究は，イチゴ(曽根ら，2002)やブルーベリー(車ら，2009)で行われているが，リンゴの報告例はない。

本研究では青森県産リンゴ 12 品種(王林・金星・ぐんま名月・紅玉・サンジョナゴールド・サンふじ・シナノゴールド・世界一・トキ・ふじ・むつ・早生ふじ)の品種の特性を明らかにし，グループ化を行うことを研究目的とする。

2.実験方法

実験は，事前調査で行ったリンゴの嗜好調査(対象：19 歳から 21 歳の学生 95 名)の結果を参考にし，リンゴの持つ特性のうち，硬度，有機酸，糖，色差，香気成分の測定を行った。

2-1.色差及び硬度の測定

表皮の上中下 3 点，表皮を取り除いた可食部の上中下 3 点を各 4 ヶ所測定した。色差は色差計 CR-400(KONICAMINOLTA 製)を用いた。硬度は果実硬度計 KM-1 (藤原製作所製)を用いた。

2-2.糖及び有機酸の分析

可食部を冷凍保存したサンプルを用い，高速液体クロマトグラム(日本分光製)により分析した。

2-3.香気成分の分析

冷凍保存した表皮からモノトラップ法(吸着剤:RCC18　ジーエルサイエンス製)を用いて香気成分を捕集し，アセトンで抽出後，ガスクロマトグラフ質量分析計 QP-2010(島津製作所製)により分析した。香気成分は１２品種を測定した際に，共通して検出されたもののみを取り扱った。

2-4.主成分分析

色差，硬度，糖(4 成分)，有機酸(3 成分)，香気成分(4 成分)を用いて主成分分析(OriginPro 2021)を行った。

3.結果

主成分分析の結果，生食を行う場合を図 1 に，ジュースに加工した場合を図 2 に示す。生食を行う場合とジュースに加工する場合，a:シナノゴールド・世界一・ふじ，b:サンふじ・早生ふじ，c:王林・金星・紅玉・むつ，d:ぐんま名月・サンジョナゴールド・トキの 4 つのグループに分けることができた(参照: 図 1 ,図 2)。表皮を利用した加工品の場合を図 3 に示す。表皮を利用した加工品にする場合, a:サンジョナゴールド・サンふじ・早生ふじ，b:ぐんま名月・シナノゴールド・トキ,

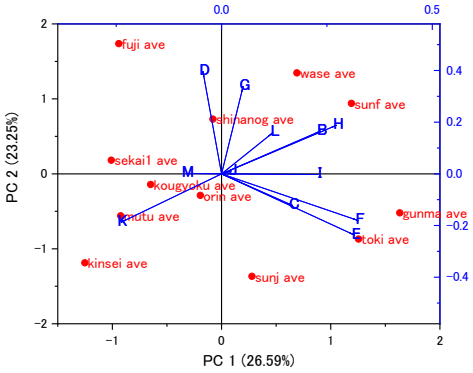


図 1：生食を行う場合の主成分分析

c:紅玉・世界一・ふじ・むつ，d:王林・金星の 4 つのグループに分けることができた(参照:図 3)。また，これらの結果から，青森県産りんご 12 品種を分類した結果を表 1 に示す。これはリンゴを選ぶ際の基準となる。

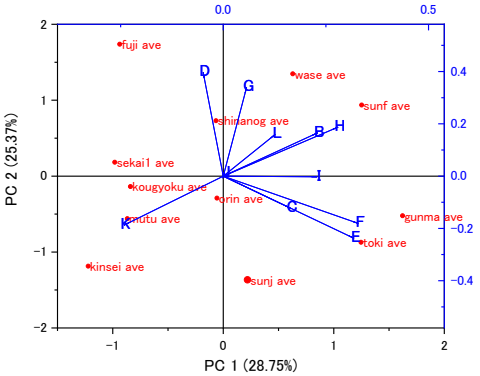


図 2：ジュース加工用の主成分分析

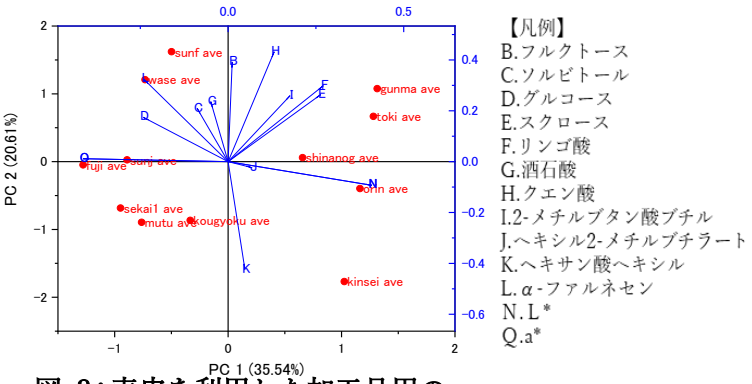


図 3：表皮を利用した加工品用の主成分分析

4.考察

本研究の結果は糖 4 種類，有機酸 3 種類，香気成分 4 種類を反映していることから，リンゴの甘味，酸味，香りの特徴を生かしたものになっている。

リンゴ 12 品種は生食用とジュース用で利用する場合では，分類に大きな差がなかった。しかし，表皮を利用した加工品を想定した場合では，表皮が赤い品種は y 軸よりも左側に集まり，表皮が黄緑色・黄色の品種は y 軸よりも右側に集まった。つまり，表皮の色はリンゴの特性に大きな影響を与えると考えられる。そのため，作成するグループには考慮しない方が良いと考える。また，今回の結果は，寄与率が約 50%と低かったため，さらなる検討が必要であると思われる。

表 1 ：青森県産リンゴの分類

<品種> シナノゴールド・世界１・ふじ <特徴> 爽やかな甘さ 酸味は弱い 果肉が硬い	<品種> サンふじ・早生ふじ <特徴> ねっとりとしたコクのある甘さ 爽やか酸味や渋みのある酸味 リンゴの青臭さが目立つ
<品種> 王林・金星・紅玉・むつ <特徴> 酸味・甘味が弱い 果肉が硬い	<品種> ぐんま名月・サンジョナゴールド・トキ <特徴> 好ましい甘さですっきりとした後味 あと味が残る酸味 エステル類の香りが目立つ

リンゴの香気成分中にアルコール類が検出されなかった。原因として香気成分を測定する前に冷凍処理を行ったこと，ガスクロマトグラフ質量分析計の設定温度が高かったことが考えられる。

5.結論

主成分分析を用い，シナノゴールド・世界一・ふじ，サンふじ・早生ふじ，王林・金星・紅玉・むつ，ぐんま名月・サンジョナゴールド・トキのリンゴの特性を生かした 4 つのグループに分類できる。また，表皮の色を考慮する際，分類したグループから表皮の色を判断することが必要である。

また，今後の課題として，今回の実験結果はリンゴ 1 品種当たり 3 個であるため，個体差による数値の変動が見られたため，データ数を増やす必要がある。また，香気成分中のアルコール類が観測できなかったため，抽出法やガスクロマトグラフ質量分析計の設定温度を見直すことで，リンゴの特性の判断基準に加えたい。

6.参考文献

・苫名孝・山田寿著 栽培地の異なるリンゴ果実における成熟期の糖組成の変化 園藝學曾雑誌 572 号 p.178-183 1988 年

・石川勝規他著 各種有機酸のリンゴに対する摘花効果 東北農業研究 54 号 p.133-134 2001 年

・垣内典夫他著 リンゴ果実の香気成分の検索と品種特性 園藝學曾雑誌 553 号 p.280-289 1986 年

アシタバ *Angelica keiskei* の根の成分について

天然物化学研究室
1724010　大谷仁美
指導教員：蛙原絹子

1.緒言

アシタバ *Angelica keiskei* は葉や茎に独特のにおいのあるセリ科シシウド属の大型多年生草本で、日本原産である。葉や茎は古くから健康によい野菜として親しまれている[1]。また、葉や茎には生活習慣病の予防になるといわれているカルコン類やクマリン類の存在が確認されている[2] 。しかし、アシタバの根はほとんど利用されていない。一方、同じセリ科シシウド属のヨーロッパ原産のアンゼリカ（セイヨウトウキ）*Angelica archangelica* は、葉や茎が食用や薬用に、根が精油として植物療法などに利用されている。このことからアシタバの根にも有用な利用法があるのではないかと考えられるが、根の利用法に関する報告例はほとんどない。

図 1.アシタバ

本研究では、アシタバの根は葉や茎とは異なるにおいがすることから香気成分に着目した。そのため根、茎、葉の 3 部位について香気成分の比較を行い、アシタバの根の有効利用を検討することを目的とする。

2.実験方法

アシタバの根、茎、葉をそれぞれの部位に分けてから 40℃で乾燥させ、粉砕し試料とした。その後、モノトラップ法(吸着剤：RCC18 ジーエルサイエンス製)で抽出を行い、アセトンで希釈後、ガスクロマトグラフ質量分析計 QP-2010（カラム：DB-5MS、分析条件：40℃（2min）-5℃/min-240℃（5min））で成分分析を行った。成分の同定にはデータベースＮＩＳＴを用い、根、茎、葉の 3 部位の成分比較を行った。なお、抽出・分析は神津島、八丈島、三宅島産のアシタバについて、それぞれ 2 回ずつ行った。

3.結果

アシタバ（三宅島）の根、茎、葉の香気成分のトータルイオンクロマトグラムを図 2 に示す。アシタバの根、茎、葉では、α-ピネン（保持時間 5.4min）やミルセン（保持時間 6.4min）、3-カレン（保持時間 6.8min）、o-シメン（保持時間 7.0min）、エリキセン（保持時間 13.5min）など多くの主要成分が共通であった。しかし酢酸ボルニル（保持時間 11.3min のピーク）は葉や茎にはなく、根のみに含まれていた。

島ごとでみると神津島、八丈島、三宅島産のアシタバの各部位の香気成分は、成分比に違いはみられたが主要成分はほとんど同じであり、３つの島で根のみに酢酸ボルニルが含まれていた。

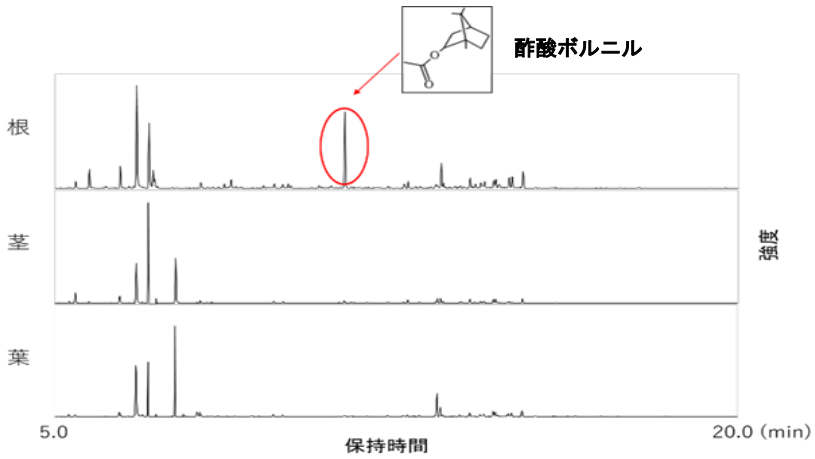


図 2.アシタバ（三宅島）の根,茎,葉の香気成分のトータルイオンクロマトグラム（モノトラップ法）

4.考察

酢酸ボルニルは森のような爽やかな香りを持っていて、抗炎症効果や鎮静作用、睡眠誘導効果[3]などがある成分である。ヒノキやモミなどに含まれ、その精油は鎮静や疲労回復を目的として利用されている。

このことから、アシタバも精油として使えるのではないかと考え、精油の主な抽出法である水蒸気蒸留法を行った。結果を図 3 に示す。酢酸ボルニルの他、精油によく含まれる 3-カレンやβ-オシメン、エレモフィレンが主要成分として含まれていた。3-カレンは鎮静作用がある甘い香りで、β-オシメンは植物や果実に、エレモフィレンは柑橘類によく含まれている。このことから、アシタバの根の精油には有用な成分が多く含まれ、精油として利用できると考えられる。利用法としては酢酸ボルニルの効能からアロマテラピーにしたり、睡眠誘導効果や香りから芳香剤や化粧品にして使ったりするなどが考えられる。

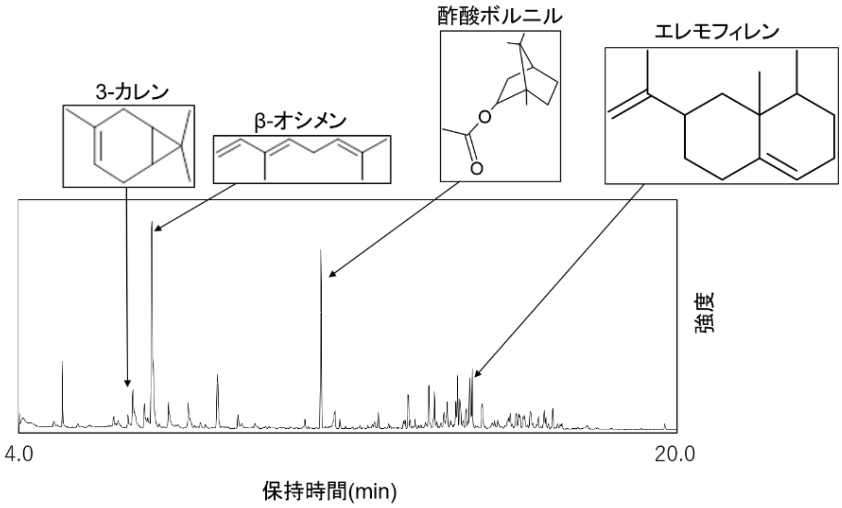


図 3.アシタバ（神津島）の根の香気成分のトータルイオンクロマトグラム(水蒸気蒸留)

5.結論

アシタバの香気成分を分析した結果、根のみに酢酸ボルニルが含まれていることがわかった。アシタバの根の精油（水蒸気蒸留）には、主要成分として酢酸ボルニル、3-カレン、β-オシメン、エレモフィレンなどが含まれていた。これらの成分の特徴から精油として利用できることが示された。利用法は芳香剤や化粧品、アロマテラピーなどが挙げられる。

6.今後の展望

今後は他の産地でも同じような結果が出るのか、採取する時期や生育期間によって成分に違いが出るのかなどを調べる必要がある。また、本研究では香気成分に着目したが、他の抽出法を用いて成分分析を行い、薬用植物としての有用性やハーブティーなどの利用法を検討したい。

7.参考文献

[1] 豊山恵子,一寸木宗一(2014) 「近世における八丈島の霊草-アシタバ」 神戸医療福祉大学紀要 Vol.15(1) 37~44

[2] 馬場きみ江(2013) 「アシタバに関する研究 」Bulletin of Osaka University of Pharmaceutical Sciences 7

[3] 清水邦義,松本清,大貫宏一朗(2016) 「睡眠誘導効果をもつ（−）−酢酸ボルニルの睡眠促進効果ならびに肌質改善効果」 コスメトロジー研究報告 Vol.24, 2016 181-189

東京のカラスアゲハの休眠誘導条件

天然物化学研究室
1724045　永井 傑
指導教員：蛙原　絹子

1. 緒言

日本は四季の区別が明確で、夏と冬の気候が大きく違っている。このため、アゲハチョウ科の多くのチョウは寒い冬を越えるために、蛹で越冬することが知られている。その中で、アゲハ族は成虫が年に数回発生するため、越冬する休眠蛹と越冬しない非休眠蛹が存在する。休眠蛹と非休眠蛹に分かれる要因に関する報告については、アゲハ属のナガサキアゲハ(*Papilio memnon*)、クロアゲハ(*Papilio protenor demetrius*)などで報告されている。これらの報告から休眠誘導条件は日長と温度と産地であることが確認されている。また、ナガサキアゲハに対する報告では地理的変異があることが報告されている。

カラスアゲハ(*Papilio dehaanii*)は北海道から九州まで全土に分布し、年 2-3 回発生する。カラスアゲハにもナガサキアゲハ同様に地理的変異がある可能性があるが、カラスアゲハの休眠誘導条件に関する報告は、札幌で採取したカラスアゲハの報告例のみであり、地理的変異は不明である。

本研究では、東京で採取したカラスアゲハについて、休眠誘導条件を調べ、地理的変異につい検討する。

2. 実験方法

電照箱を 6 つ用意し、温度 25℃に固定し、日照（点灯）時間を 12 時間、12.5 時間、13 時間、14 時間、15 時間、16 時間で設置した。その中にカラスアゲハの幼虫を 3 齢から 10～20 匹を電照箱に入れて飼育した。蛹化した個体について、体側の線の有無を確認して、休眠蛹と非休眠蛹のどちらであるかを確認した。その結果から休眠蛹の割合を求めてグラフ化した。そのグラフの休眠蛹の発生率が 50%になる時間を臨界日長として算出した。

3. 結果

本研究の結果を表 1 と図 I に示す。図 1 の休眠蛹の発生率 50%になる時間から、東京近郊で採取したカラスアゲハは 25℃の環境では、臨界日長は 12.92 時間であることが分かった。また、東京近郊の日照時間と臨界日長との関係を図 2 に示す。東京近郊の日長時間とカラスアゲハの臨界日長時間の交点から、カラスアゲハは 8 月～9 月に休眠蛹への移行を判断している可能性が示唆された。

表 1．東京産カラスアゲハの休眠誘導の結果

時間(h)	12	12.5	13	14	15	16
蛹化数(個体)	3	2	10	16	3	10
休眠蛹(個体)	3	2	4	2	0	0
非休眠蛹(個体)	0	0	6	12	3	10
休眠率(%)	100	100	40	25	0	0

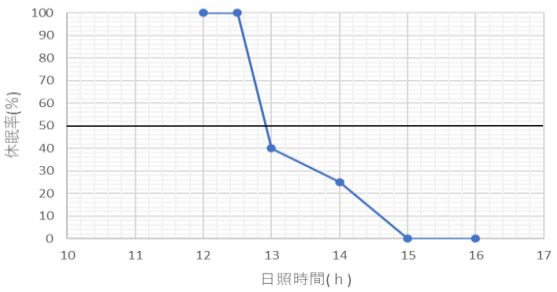


図１、東京産の日照時間と休眠率のグラフ

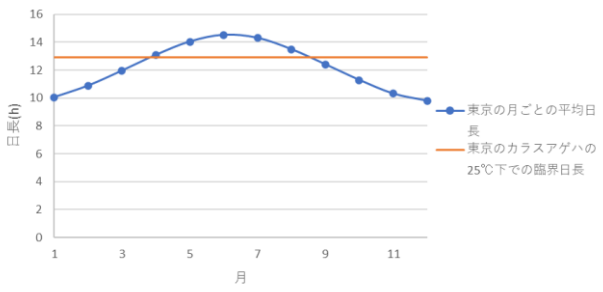


図２、東京の 2,020 年の月ごとの平均日長と東京のカラスアゲハの臨界日長

4. 考察

今回の実験結果と、国立天文台の日の出と日の入りから作成した東京の平均日長を示した図２より、休眠蛹が発生する時期は実験結果より、休眠蛹が発生する時期は 8～9 月と考えられるが、この結果は休眠蛹が 10 月から観察されるという野外での観察結果と一致しない。その理由は、この時点で、カラスアゲハは既に休眠するかしないかを判断をしている可能性がある。また、今回の実験では気温の設定が 25℃で、野外で休眠蛹出始める時期の気温より高めだったため、判断を間違えた可能性も考えられる。

札幌で採取したカラスアゲハの報告では、24～32℃の環境下で臨界日長時間は 15.42 時間であることから、札幌と東京で地理的変異がある可能性が示唆された。これまでの報告にあるようにアゲハ族の休眠誘導条件は温度と日長と産地で変化していることが分かっている。しかし、カラスアゲハの休眠誘導に関する報告で既にあるのは、札幌で採取されたカラスアゲハの報告のみであり、この報告の実験では、設定温度が 24～32℃で、幅が広すぎる。このことから、本実験の結果と単純に比較することが出来ない。地理的変異についてはさらなる実験が必要である。

5. 今後の課題

既に報告されているカラスアゲハの臨界日長が札幌のみである。このため比較対象とすることが出来る報告が無いので、産地を変えて同じように実験する必要もある。

6. 参考文献

1. Ichinosé T and Negishi H　Pupal diapause in some Japanese papilionid butterflies　II. The difference in the induction of diapause between the two subspecies of *Papilio prptenor Cramer*　The Entonological Society of Japan Kontyu, 47:89-98　1979

2. Yoshio M and Ishii M　Geographical variation of pupal diapause in great Mormon butterfly, *Papilio memnon* L.(Lepidoptera: Papilionidae), in Western Japan　Japanese Society of Applied Entomology and Zoology Appl. Entomol. Zool.,　33:281-288　1998

3. Ishii M　Photoperuidic reaction of the Hokkaido population of *Papilo bianor dehaanii* C. et R. Felder (lepidoptera : papilionidae) The Lepidopterological Society of Japan Tyo to Ga,　28:115-116　1977

4. https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/2020/dni00.html

磁気共鳴撮像法(MRI)による完全変態昆虫蛹体内の組織変化の解明

天然物化学研究室
1724003 池上聖人
指導教員：蛙原絹子

1.緒言

昆虫には幼虫期と成虫期があり、その中に蛹を経て幼虫から成虫へと姿を変える完全変態のグループがある。チョウ類の場合、緑色の細長い体に小さな口や短い脚を持った幼虫から、外部を硬くして何も摂取しない蛹の時期を終えると、黄色や青や黒などの色づいた翅に長い口吻と脚をもった成虫が形成され羽化する。このように外部形態の変化に関する記録は個体を損傷すること無く行うことができる（司馬, 2002)。しかし、蛹体内のような閉鎖空間内の観察では、樹脂の注入や凍結などによって固定をしてから物理的に切断する方法がとられる。しかし、この方法では、個体の損傷を回避することが出来ない。また、経時的な観察をすることは不可能である。近年では、調査個体を損傷せずに観察するために、磁気共鳴撮像法(MRI)が用いられるようになった。例えば、MRI を用いたモンシロチョウ(*Pieris brassicae*)とオオモンシロチョウ(*Pi. rapae crucivora*)の解析では、休眠蛹と非休眠蛹の蛹内部の差異を明らかにした(Kaneko, 2006)。このことから、MRI が個体を損傷せずに閉鎖空間内を解析することの有効性が示されている。そこで本研究では、これまでに解析方法が確立しており(中司, 2020)、東京近郊でもよく見られ材料入手の点からも好適であるカラスアゲハ(*Papilio bianor*)の蛹について、MRI を用いて蛹体内を非侵襲的に撮像し、蛹内部の変化を解明する。また、MRI の昆虫類の撮像の応用の可能性を検討する。

2.実験方法

小動物用 MRI 装置(Ascend 400WB, Bruker Biospin：東海大学湘南キャンパス所有)を用いてカラスアゲハ休眠蛹 3 個体の撮像を行った。それぞれの個体の詳細は Tab.1 に示す。蛹は尾部分を台紙に瞬間接着剤を用いて固定したまま保管し、それぞれ撮像時に専用容器に固定した。それを小動物用 MRI 装置内部の 25mm 直径のプローブに固定し、矢状面にて撮像した。装置の制御には Paravision5.1 を用いた。撮像条件は以下に示す。TR, 5232.58 msec ； TE, 33msec ； スライス厚, 0.25 mm ； スライス枚数 21 枚 または 48 枚.得られた画像は DICOM 形式で取り出し、DICOM ビューアーの Horos (Horos project)を使用し解析を行った。

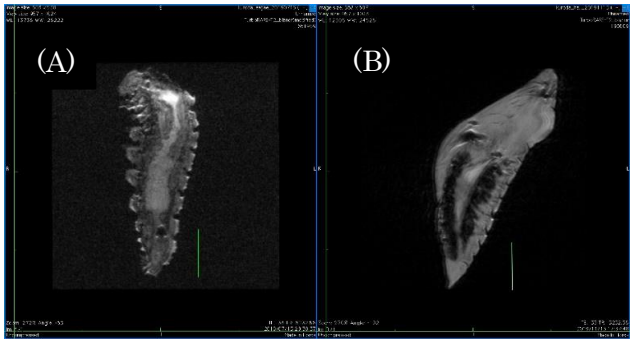
Tab.1 本研究で用いた個体とその発生段階および撮像回数.

個体番号	観察期間(日数)	撮像回数(回)
1	前蛹から蛹化前日まで(5日)	5
2	蛹化後約2ヶ月後から羽化まで(175日)	23
3	蛹化後2日目から139日目まで(137日)	19

3.結果

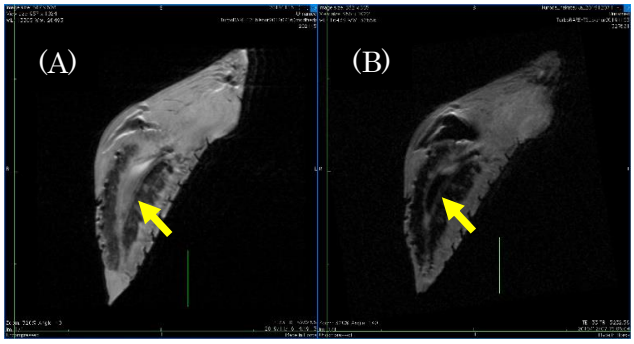
本研究の断面図の結果を Figs.1-4 に示した。蛹化 5 日前と蛹化後 9 日目の比較した結果、主な変化は幼虫を模した姿から蛹を模した姿になるという外形の変化であることが明らかとなった(Fig. 1)。また、蛹化後 12 日目と蛹化後 33 日目の画像を比較した結果、主な変化は内部変化のみであり、消化管、中腸の内部にあった信号が無くなったことが明らかとなった(Fig. 2)。蛹化後 107 日目と羽化直前の画像を比較した結果、生殖器官について比較すると、蛹化後 107 日目では小さく見えづらかった

精巣が大きくはっきりと映るように変化したことが明らかとなった(Fig. 3)。さらに羽化 10 日前と 1 日前での画像を比較した結果、前述の精巣同様に羽化 10 日前では見えづらかった眼が、はっきりと円形に映るように変化したことに加え、飛翔筋も形成されていることが明らかとなった(Fig. 4)。



A: 蛹化 5 日前　　B: 蛹化後 9 日目

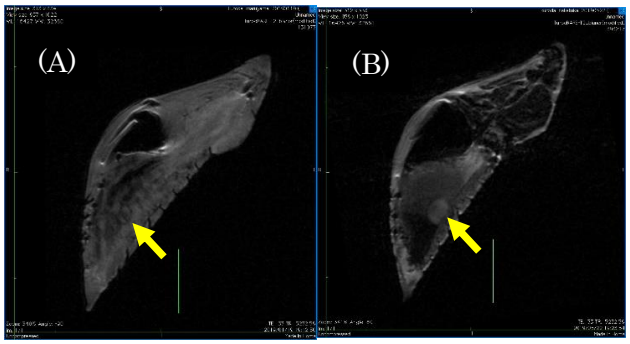
Fig. 1. 前蛹と蛹化直後の変化 (Bar=6mm)



A: 蛹化後 12 日目　　B: 蛹化後 33 日目

Fig. 2. 蛹化後の内部 (Bar=6mm)

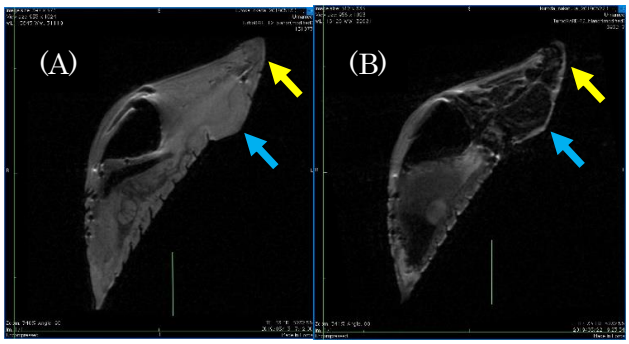
図中の矢印は消化管を示す.



A: 蛹化後 107 日目　　B: 羽化 1 日前

Fig.3. オス個体における生殖器官の変化(Bar=6mm)

図中の矢印は消化管を示す.



A:羽化 10 日目　　B: 羽化 1 日前

Fig. 4. 羽化直前の変化 (Bar=6mm)

図中の矢印(黄)は眼を、矢印(青)は飛翔筋を示す.

4. 考察

経時的撮像の結果、カラスアゲハは幼虫から蛹へと姿が変わる外部形態の変化に続き、蛹化直後は触角、脚や口吻が形成され、その後に生殖器官(精巣)や眼といった内部変化が起きている。これは、比較的に大きな形態の形成が先に行われ、その後に小さな形態の形成が行われると考えられる。また、生殖細胞が蛹化後初期から長い時間をかけて形成するのは、生殖器官が生物にとって最も重要な器官の一つであり、体細胞分裂とは分裂様式が異なるためではないかと考えられる。

5. 今後の展望

本研究はカラスアゲハの休眠蛹の撮像を行ったが、非休眠蛹と比較を行うことで、既に報告例のあるモンシロチョウとの比較ができると考えられる。

6. 参考文献

1)Kaneko J., Katagiri C. A simple method to discriminate diapause from non-diapause pupae in large and small white butterflies, *Pieris brassicae* and *P. rapae crucivora*. Naturwissenschaften 93: 393-396. (2006)

2)中司海渡, アゲハチョウ蛹体内部構造の MRI による描出. 東海大学情報理工学部情報科学科卒業論文(2020)

3)司馬肇 (2002) 昆虫の変態と細胞死. 化学と生物 40: 413-420.

DSC によるペットボトルの熱測定

ソフトマテリアル研究室
1724046　中島　翔
指導教員：飯島　正徳

1.緒言

身近な高分子は、長いひも状の分子鎖が規則正しく並んだ結晶とランダムに並んだ非晶が共存する半結晶性高分子である。この結晶と非晶は、高分子内部にある球晶や積層構造からなる板状のラメラ結晶に存在し、ラメラ結晶の厚さによって融点が異なる。そのため、低分子に比べて、高分子の融解温度範囲は広くなる。高分子の中でも特に身近であるプラスチック製品は、軽さ、成形の容易さなどから、今では日用品の容器から、家電、自動車の内装など幅広く利用されている。その中で普段よく目にするプラスチック製品として、PET(Polyethylene Terephthalate)がある。PET は主にペットボトルとしてよく使われている。飲料用ペットボトルは大きく炭酸用、耐熱用、無菌充填用の 3 種に分けることができる。それぞれの特徴は表 1. にまとめる。

表 1. ペットボトルの特徴

種類	特徴
炭酸用	内部からの圧力に耐えられるように円柱状
耐熱用	高温で入れた飲み物を冷やすためへこみを防ぐために角柱状で厚みがある。
無菌充填用	ミネラルウォーターやお茶に使われる。潰しやすいのが特徴

本研究では、一般的な高分子である PET の中でもよくつかわれているペットボトルを口、胴、底の 3 部位に分けて、それぞれの熱解析を行った。特に今回使用したペットボトルのうち伊右衛門のペットボトルは胴が 3 層構造、底が 2 層構造だったので胴部分では 3 層分全部と外側、内側、真ん中のそれぞれ 4 つのデータを取った。先述のように高分子材料はラメラ結晶の厚さによって融点が異なるため 1 回目の昇温では、成型加工の挙動がみられる。2 回目の昇温では製造工程の熱履歴が削除され、試料本来の挙動が見られる。よって 2 回の昇温のデータを比較することで考察を行う。

2.実験方法

実験試料に市販の飲料用ペットボトル、日本サンガリアビバレッジカンパニーが製造販売している『大阪生まれのフリフリみっくちゅじゅーちゅ』、アサヒ飲料が製造販売している『WILKINSON』、サントリーフーズが製造していてサントリー食品インターナショナルが販売している『伊右衛門　炙り茶葉入り』を用いた。試料を細かく削ったものを Al パンに入れ、示差走査熱量測定(DSC:Differential Scanning Calorimetry,Mettler Toledo 社製 DSC822)で測定した。温度プログラムは 0 ℃から 300℃まで 10K/min で昇温、5 分保持した後に 0℃まで 10K/min で降温、5 分保持した後に 300℃まで 10K/min で昇温をして 1 回目の融解曲線と 2 回目の融解曲線を測定した。

3.結果および考察

口、胴、底の部位での 1 回目の昇温の結果、2 回目の昇温の結果をそれぞれ図 1.2.に示す（本概要では、炭酸用の測定結果のみ）。図 1. について 3 部位のデータに共通しているのは、PET の融点である 257℃付近に大きく融解のピークがみられる。3 部位に共通しない点として、口部分のデータからは 150℃付近に結晶のピークがみられる。同様に、底部分のデータの 130 度付近にも結晶のピークがみられる。しかし、胴部分には結晶のピークがみられない。これらは、ペットボトルの製造の過程を示している。口、底部分の曲線にみられる。結晶ピークはペットボトルの製造時 PET が結晶化できずに過冷却状態になったものである。

図 2. についてはグラフの傾きがそれぞれ異なっているが 80℃付近にガラス転移がみられ、150℃程に微小ながら結晶のピーク、250℃付近に融解のピークがみられる。これらは、PET 本来の熱反応を示している。しかし、本実験では 1 度目の昇温の後速度 10K/min で冷却しているため。図 1. の考察と同様 150℃付近で過冷却状態の反応がみられる。次に、炭酸用ペットボトルのそれぞれの部位の結晶化度を表 2. として示す。

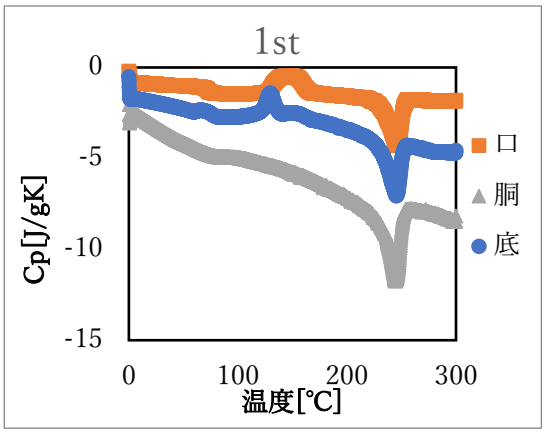


図 1. 1 回目の昇温の比較

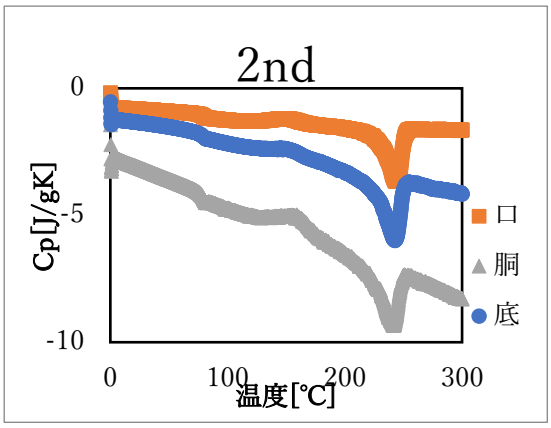
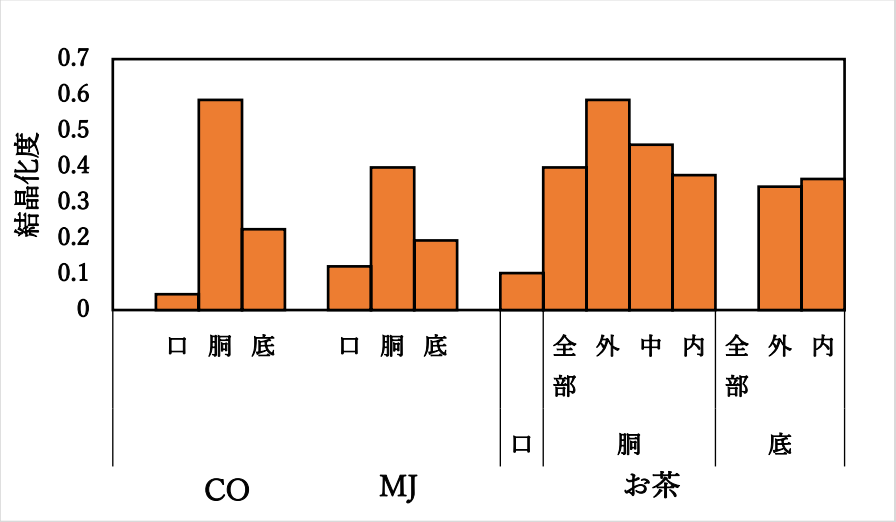


図 2. 2 回目の昇温の比較

表 2. 部位ごとの結晶化度



胴部分の融解曲線では冷結晶が見られないことから結晶質の PET だと言える。そのため同一ペットボトルでは胴部分の融解ピークの大きさは 100%結晶の融解ピークの大きさと見立てることができるため、胴部分を基準に口部分、底部分の結晶化度を算出した。

4.結論

ペットボトルの構造を結晶化度という観点から考察することができた。作業中に感じた部位ごとの硬さは底＞口＞胴と感じた。しかし、結晶化度の値は胴＞底＞口であったため、結晶化度と物理的な硬さに直接的な関係はないといえる。

DSC による米の糊化反応の浸漬時間変化について

ソフトマテリアル研究室
1724057　　牧寛子
指導教員：飯島正徳

1. 諸言

澱粉とは小麦粉やジャガイモといった炭水化物の主成分であり、その特性から様々な用途に利用されている。食品では酒やパン、糖化製品では澱粉を原料としたキャンディーや医療品、加工品では粘着テープや接着剤などに利用されている。主な用途は糖化製品であり、澱粉はその 7 割が食用として利用されている。

澱粉は光合成によって作られるため、ほとんどの植物に存在する。その中でも本研究で取り扱う澱粉は日本人がほぼ毎日口にしている米である。

図 1　アミロペクチンとアミロース

天然高分子である澱粉は α-グルコースのグリコシド結合によって重合され、直鎖状のアミロースと分岐状のアミロペクチンがある（図 1）。一般的な澱粉には両者が存在し、室温ではアミロースとアミロペクチンの分子鎖が水素結合によって規則的に集合したミセル構造(結晶構造)をとる。澱粉に水を加えて加熱すると結晶を形成する分子鎖間の水素結合が切れ、分子鎖間に水分子が入り込む。この時、澱粉は結晶構造が崩れて糊の状態となる。これを澱粉の糊化と呼ぶ[2]。しかし、長年糊化反応によるアミロースとアミロペクチンの細かい構造の変化について解明されていない部分が多かったが、成長予測曲線の一つであるゴンペルツ曲線を利用することでその解明が可能となった[1]。このゴンペルツ曲線はコロナウイルスの累積患者数の推移でも用いられている。本研究では米と水を混ぜた混合物の浸漬時間に差をつけそれによる糊化反応の違いについてゴンペルツ曲線を利用し考察する。

2. 原理

初めにゴンペルツ曲線は 19 世紀にベンジャミン・ゴンペルツが考案した死亡率に関する関数である[4]。ゴンペルツ曲線を式(1)、図 2 に示す。本研究では DSC による結果にフィッティングするために式(1)を微分した式(2)、図 3 を使用した。

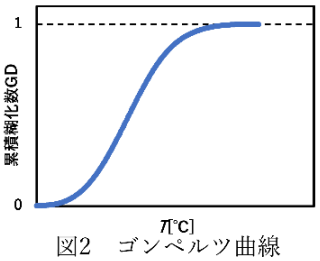


図2　ゴンペルツ曲線

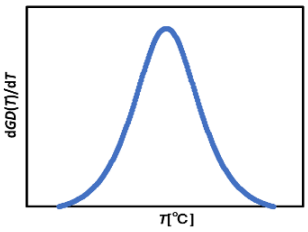


図3　ゴンペルツ曲線の微分

1）温度(T)での澱粉の糊化度を表すゴンペルツ曲線の式 $GD(T)$

$$GD = GD_{final} \times \mathrm{e}\left[-e^{k_{max} \cdot e^{1} \cdot (T_L - T + T_S)} + 1\right] \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、GD_{final} は最大糊化度、$k_{\max}$ は最大糊化率(℃$^{-1}$)、T_L は糊化開始段階(T_S)から急激な糊化段階までの温度範囲を表す。

2）式(1)の微分後の式 $dGD(T)/dT$

$$\frac{dGD(T)}{dT} = -A \cdot GD_{final}\left(e^{A(T_P - T) + 1 - e^{A(T_P - T)}}\right) \quad \cdots \quad (2)$$

ここで、A は $k_{\max} \cdot \mathrm{e}^1$、$T_P$ は $T_L + T_S$ を表す。

3. 実験方法

澱粉は伊丹産業(株)無洗米つや姫を用いた。表 1 のように容量が 40 μ ℓ の Al パンに米を入れ、澱粉濃度が 40%となるようにマイクロピペットを用いて蒸留水を注いだ。Al パンに蓋をのせ密閉後、DSC（Differential Scanning Calorimetry:示差走査熱量計；METTLER TOLEDO 社製 DSC823e）で窒素空気中 25℃で 5 分間一定にした後 25℃～100℃、5℃/min の条件で行った。DSC では熱流束 HF(mW)が測定されるが異なる質量の試料を比較するために見かけの比熱 Cp(J/g・K)に換算している。

表 1　浸漬時間と澱粉濃度(%)

	浸漬時間＋5分	米 [mg]	水 [mg]	米濃度 [%]
米 2	7	8.25	12.07	40.60039
米 4	9	11.29	13.54	45.46919
米 6	11	6.03	8.5	41.50034
米 8	13	7.77	11.16	41.04596
米10	15	6.49	9.67	40.16089
米15	20	5.40	4.09	56.902
米20	25	8.64	10.78	44.49022
米25	30	8.44	12.56	40.19048
米40	45	9.27	13.22	41.21832
米60	65	9.55	14.32	40.00838

4. 結果

浸漬時間が 25 分の DSC 曲線を図 4 に示す。25℃で 5 分間一定にした後 100℃まで昇温すると 68℃付近に小さな糊化反応のピークが見られた。これはとても小さな吸熱ピークで DSC の性能を表す指標の一つでもある。

図 5 に各浸漬時間の糊化反応の DSC 曲線を示す。各浸漬時間の糊化反応のピークは 68℃付近であった。また、中には高温側にも小さなピークが見られるものもあった。浸漬時間が長くなるほどピークが若干穏やかになっていた。これらの結果に W ピークを仮定したゴンペルツ曲線をフィッティングした。

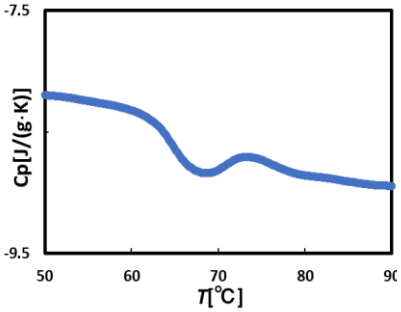


図4　浸漬時間25分の米の糊化反応

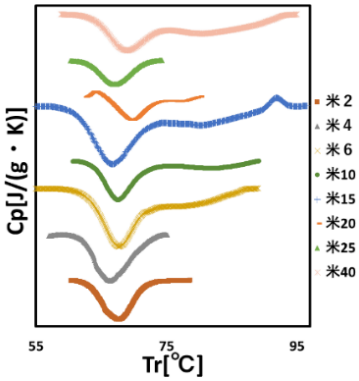


図 5　各浸漬時間の糊化反応

5. 考察

DSC の結果から求めた糊化温度範囲$T_C - T_O$、フィッティング後のゴンペルツ曲線の式から求めた最大糊化率k_{max}と浸漬時間の関係を図 6,7 に示す。図 6,7 より浸漬時間が長くなるにつれて k_{max} は小さくなり$T_C - T_O$は大きくなっている。この結果から浸漬時間が長くなるほど糊化反応がゆっくりと起こり糊化反応にかかる時間が長くなるということがわかる。また、論文[1]によるとk_{max}が大きく$T_C - T_O$が小さいほどアミロペクチンは規則正しく並び二重らせんも形が均一だとされる。一方で、k_{max}が小さく$T_C - T_O$が大きいほどアミロペクチンは不規則に並び二重らせんの形が不均一になるとされている。そのため、これらの結果から浸漬時間が短いほど均一な形の二重らせんが多く存在し、アミロペクチンも規則正しく並んでいるということが理解でき、浸漬時間が長くなるほど分子内に水が染み込み、構造を変化させるということが考えられる。

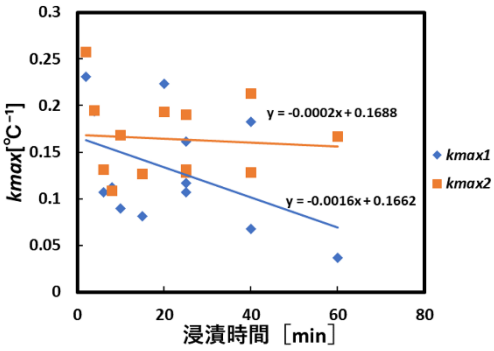


図 6　浸漬時間とk_{max}の関係

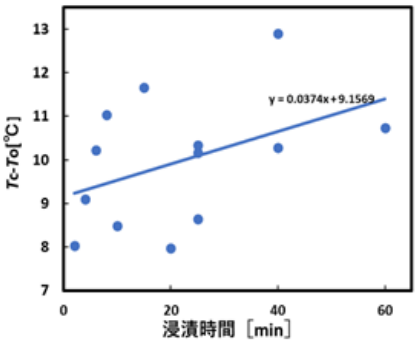


図 7　浸漬時間と Tc- To の関係

6. 結論

DSC による米の糊化反応の浸漬時間変化について以下のことが明らかになった。

- 米の糊化反応は 2 つのピークで表され 68℃付近に 1 つ目のピークがあり、高温側に 2 つ目の小さなピークがあるということが分かった。
- 浸漬時間はアミロペクチンの配列や二重らせんの形と関連している可能性が見いだされた。
- 浸漬時間と分子内の水の浸透がアミロペクチンの配列や構造に影響を及ぼしている可能性が見いだされた。
- ゴンペルツ曲線を DSC の結果にフィッティングすることによって、それによって分子構造についての知見を得ることができる。

今後、米の種類の違いや浸漬時間の差による影響をより詳細に実験を行うことによってアミロペクチンとアミロースの分子構造についての考察が明らかになる。

7. 参考文献

(1) Cheng Li. Bo Gong
Insights into chain-length distributions of amylopectin and amylose molecules on the gelatinization property of rice starches　721-729(2020)
(2)平久井愛由　DSC によるタピオカに水を混ぜた混合物の糊化反応(2019)
(3)宮崎裕太　DSC によるトウモロコシ澱粉の糊化反応と水の状態(2016)
(4)@BMJr　ゴンペルツ曲線とは何か?　https://qiita.com/BMJr/items/24fca066926d471c651e

DSC による鶏卵の卵白と卵黄の熱測定

ソフトマテリアル研究室
1724022　後藤沙耶
指導教員　飯島　正徳

1.　緒論

卵はあらゆる料理に使われる身近な食品だが、液体から完全に固まり凝固した状態まで、化学反応によって様々な形をとり、我々はそれを目にする。卵は大きく起泡性、乳化性、熱凝固性という 3 つの性質を持ち、このうち熱凝固性は熱を加える事で卵が含むたんぱく質を熱変性させて凝固する性質である。

表 1 に示す様に卵白と卵黄はそれぞれ違う種類のたんぱく質で構成されているのだが、そもそもたんぱく質とは特定のアミノ酸が立体的に連なったものである。卵を構成するアミノ酸のほとんどに SH 基が含まれており、熱変性をさせる事でアミノ酸が保有する SH 基同士を SS 結合させ凝集する [1)]のが卵の熱凝固のメカニズムである。

しかし、卵白と卵黄では熱変性を起こす温度に差がある為、その差を利用し半熟卵や温泉卵という様々な料理が存在する。本研究では鶏卵に注目し、鮮度や保存条件を変えてたんぱく質の熱変性について考察を行う。

表 1.　鶏卵が含む主要なたんぱく質 [2)3)]

卵白主要なたんぱく質	変性温度	含有率
オボアルブミン	75～85℃	54%
オボトランスフェリン	60～65℃	13%
リゾチーム	70～75℃	3.5%
卵黄主要なたんぱく質	**変性温度**	**含有率**
リポビテリン(HDL)	65～70℃	70%
ホスビチン	約 60℃	16%
低密度リポたんぱく質(LDL)	65～70℃	12%
リベチン	約 60℃	2%

2.　実験方法

試料は、伊藤忠飼料(株)の「サイズいろいろたまご」を用いた。鶏卵を一定の条件下に置き、取り出した卵を卵白と卵黄に分けた。示差走査熱量測定 DSC(Differential Scanning Calorimetry METTLER TOREDO 社製 DSC823)用の Al パンに試料を入れて、窒素雰囲気中 20℃～110℃、昇温速度 2℃/min の条件で熱測定を行った。

3.　結果及び考察

卵白の常温保存期間の測定結果を図 1 に示す。谷状のピークになっている部分は熱変性による凝固が起きている事を示す。この結果のうち一番低温側のピークを TP1、高温側のピークを TP3、その間にみられるピークを TP 2 とする。この 4 種類の結果はどれも、TP1 は 60~65℃付近、TP 2 は 70~75℃、TP3 は 75~85℃付近でみられた。この温度は表 1 に示した卵白の主要なたんぱく質の変性温度とほぼ一致していることから、TP1 がオボトランスフェリン、TP2 がリゾチーム、TP3 がオボアルブミンの変性を示していることがわかる。[2)]

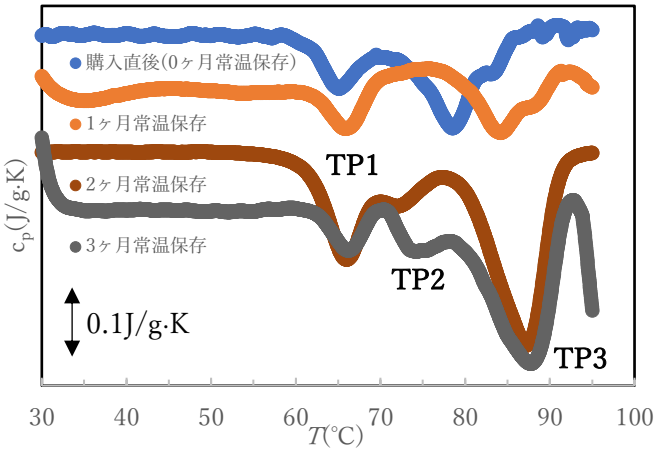


図1.　常温保存下で鮮度の違う試料のDSC

図 1 のピークの温度を保存期間に対してとったものを図 2 に示す。TP1 はあまり変化がない一方で、TP3 は卵の劣化と共に熱変性の温度が上昇していることがわかる。また、TP2 は 2 ヶ月間以上の間常温保存をしたものに現れ、こちらも卵の劣化と共に熱変性の温度が上昇していた。したがって、卵に含まれるリゾチームとオボアルブミンは劣化に強く影響され、熱変性の温度が高温側に移動することが示された。

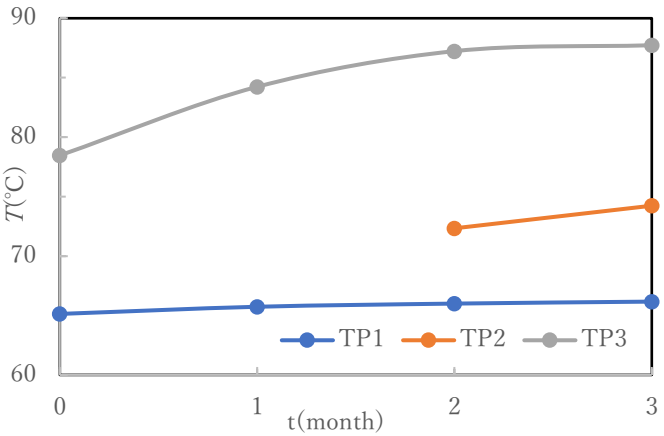


図2.　卵白のたんぱく質による変性温度

卵の賞味期限は一般的に生で食べられる状態の期間のことをいうが、平均して産卵から 2 週間で購入者のもとへ届き、そこから約 1 か月間後に賞味期限まで余裕があるため、まとめると産後から約 2 ヶ月間は生の状態でも人間が安全に食べることができるとい

うことになる。
これを踏まえたうえで図 2 から、2 ヶ月以上保存した試料に限って TP2 にあたるリゾチームが明確なピークを示すことと、同じく 2 ヶ月以上保存した試料で TP3 にあたるオボアルブミンが 87℃以上で熱変性をしており本来の変性温度を大きく上回っていることから、TP2 と TP 3 が賞味期限と強い相関があることが分かった。

次に、卵黄の冷蔵保存期間の測定結果を図 3 に示す。80℃付近で見られる大きなピークを TP4 とする。これらは熱変性による凝固を示している。卵白と同様に表 1 の卵黄の主要なたんぱく質のそれぞれの変性温度と照らし合わせたところ、どの主要なたんぱく質も 60~70℃までの間には熱変性が起きているはずであるにもかかわらず、図 3 の結果では 60~70℃の間は小さなピークのようなものがみられるだけで、卵黄が熱変性を起こしていることを示す TP4 の温度とはどれも大きな差が出ていた。その原因として、卵黄を構成するたんぱく質の分子量が全て大きく[3]、混ざり合って熱変性をしているためそれぞれ単体の変性温度とは異なる温度で熱変性が起きているためと考えられる。

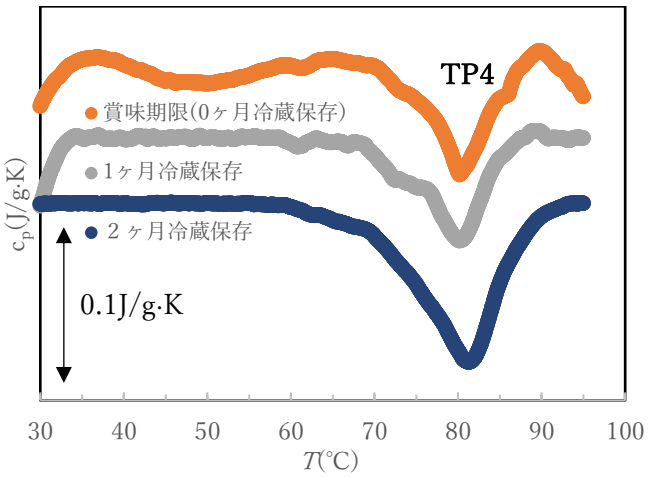


図 3．冷蔵保存下で鮮度の差の比較

ここで卵白の時と同様に図 3 のピークを保存期間に対してとったものを図 4 に示す。TP4 のピーク温度は劣化と共に若干の上昇がみられるが、卵白のピークに比べて差がほぼ無いに等しいといえる。

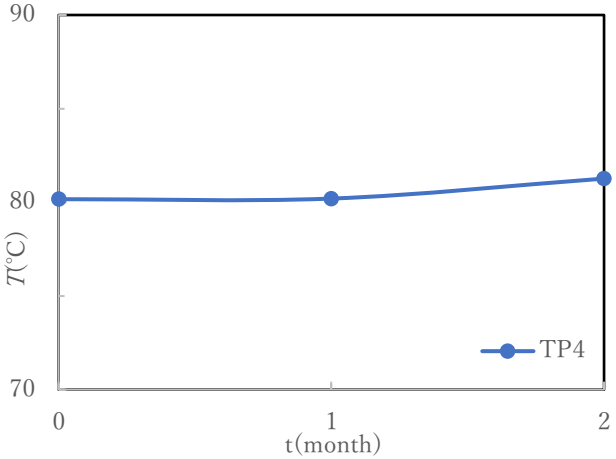


図4．卵黄のたんぱく質による変性温度

卵白と卵黄の劣化に差をうみだす原因の一つが卵の殻にあると考えた。殻には無数の気孔があり常に呼吸をしていて、生まれた際には必ず、その気孔から侵入してくるサルモネラ菌から守る為のクチクラ層[4]という膜が張られるのだが、市販の卵は衛生面だけを重視し汚れと共にその層も洗い落とされてしまう。したがって、普段一般的に販売されている卵は菌が繁殖しやすい状態になっているため劣化もしやすくなっている。卵白は殻と接しているため劣化の影響をダイレクトに受ける一方で、卵黄は卵白に覆われ守られているので、劣化の影響をあまり受けないと考察した。

4. 結論

本研究により得られた、卵白と卵黄に関する結果について以下にまとめる。

◆ 卵白
- オボトランスフェリン、リゾチーム、オボアルブミンについての熱変性を DSC で確認した。
- オボアルブミンとリゾチームが賞味期限と強い相関があることが分かった。

◆ 卵黄
- 構成しているたんぱく質は沢山あるはずが熱変性のピークが 1 つしか見られなかった。
- 各成分の熱変性温度より高い温度でピークを示した。
- 主要なたんぱく質は保存期間に対して弱い依存性が認められた。

5. 参考文献

1）「Food Chemistry252(2018)」, p126-133
2）塩坪聰子,「調理科学 Vol.24No.2(1991)」, p79-86
3）「Food Bioscience18(2017)」, p38-45
4）ヨード卵光オフィシャルサイトトップ
https://www.yodoran.com/oshiete-tamago/life/post_29.html

クモ・カイコ・ミノムシの糸の熱的性質

ソフトマテリアル研究室
1724044　友森崚介
指導教員：飯島正徳

1．序論

我々の身近に生息する生物には体内で糸を作り吐きだすものが存在し、その用途は自分の身を守るもの、獲物を捕らえるものなどさまざまである。たとえばクモは鋼鉄の約 5 倍もの強さの糸を持ち、それでいてナイロンのように伸縮性がある。計算上では直径 1 cm の太さの糸でクモの巣を作れば、ジャンボジェット機を捕まえられるほどらしい。近年の研究ではそのクモの糸よりもミノムシの糸がより強力であるとされる報告（表 1）があり、石油に依存しない繊維素材としての期待が高まっている。

糸の主成分はフィブロインとセリシンというたんぱく質の一種からできている。（図 1）セリシンはセリンというアミノ酸から成り、フィブロインはグリシンやアラニンというアミノ酸がそれぞれ約 40%ずつから成り、10 数種類のアミノ酸がペプチド結合している。しかし、糸が体外に出ると固まってゾルからゲル状になることなど、糸の仕組みにはいまだに解明されていないことも多い。[3]

図 1 ：糸の断面図[2]

本研究では、示差走査熱量測定（DSC：Differential Scanning Calorimetry）を用いてクモ・カイコ・ミノムシの糸の熱的性質について考察する。

2．実験方法

試料には川崎市や世田谷区内、高尾山で採取したクモ（ジョロウグモ）やミノムシ、シルク 100%の刺しゅう糸を用いた。クモの糸は巣から直接採取し、ミノムシの糸は飼育しながら採取した。採取後はセリシンの特性を調べるため採取したままのもの、水で洗浄し乾燥、煮沸し乾燥させたものを用意した。それらは約 1mg を DSC 用 Al パンに入れ DSC(METTLER TOREDO 社製 DSC822)で実験を行った。

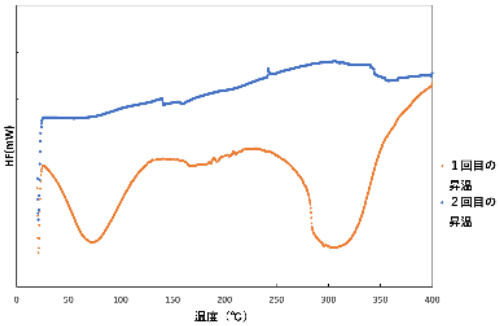


図 2 ：クモの実験結果

実験は窒素雰囲気中 20～400℃を昇温・降温速度 10℃，20℃/min で 2 回繰り返した。DSC で測定されるデータは HF（mW）であるが、質量や昇温速度が異なるため、比較を行うときには比熱 C_P に換算した。

表 1 ：近年の研究で分かった破断強度などの比較データ[1]

		Young's modulus (GPa)	Fracture strength (GPa)	Extensibility	Toughness (MJ m^{-3})
Araneus diadematus	クモ	10	1.1	0.27	160
Nephilla clavipes		13.8	1	0.20	111.2
Latrodectus hesperus		10.2	1	0.45	180.9
Caerostris darwini		11.5	1.7 (1.0)[a]	0.52 (0.69)[b]	354
Bombyx mori	カイコ	7	0.6	0.18	70
Eumeta minuscula	ミノムシ	28	2.0	0.32	364

約 2 倍　約 2.3 倍

[a]The true stress and [b]true strain values from the original paper were converted into engineering stress and strain and are given in parentheses

3．結果・考察

クモ、カイコ、ミノムシの DSC の結果の一つを図２に示す。図２より１回目の昇温ではピークが現れたが、２回目の昇温では現れなかった。すべての試料について同様の結果を示した。これらのピークは不可逆変化であり、脱水あるいはタンパク質の変性によるものと考えられる。70～80℃にみられる低温側のピークはセリシンが溶けた反応、250～300℃の高温側のピークはフィブロインを構成しているアミノ酸の分解温度やセリシンを構成しているセリンの分解温度が関係していると考えられる。以降は２回目の昇温グラフをベースラインとしてグラフを修正する。

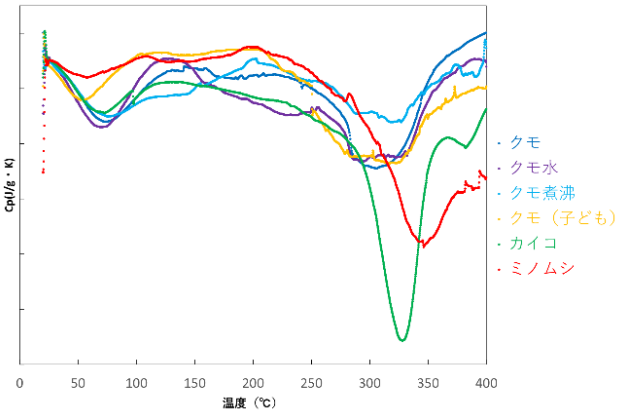


図３：測定結果（比熱）の比較

測定結果の比較を図３,４に示す。採取そのままのものと水で洗ったものではあまり差がなかったことに対して、煮沸したものはΔH が小さくなった。これは煮沸させたときにセリシンが溶け出て反応が薄くなったと考えられ、反応が完全に無くならないのはフィブロインの間に入り込んでいるものが溶けなかったり、温度が高すぎて逆に固まってしまったりしたことが考えられた。

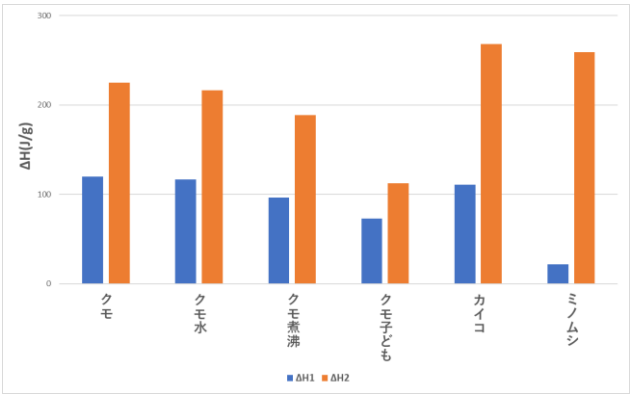


図４：測定結果（ΔH）の比較

ミノムシの糸のピーク温度はクモやカイコに比べて高く、ΔH も比較的大きい。これはミノムシの糸がより高い温度まで分解されにくく、分解に必要なエネルギーも大きいということで熱的にもミノムシの糸がより強力であることが考えられた。

4．結論

近年発表されたミノムシの糸がより強力であるという報告から、糸の特性を確認しつつ熱的性質を比較したが、決定的な大きな違いは見られなかった。しかし、わずかではあるが融解に必要な温度やエネルギーが大きいという結果から、熱的にもミノムシの糸がより強いのではないかと考える。

5．参考文献

（１）Taiyo Yoshioka, Takuya Tsubota, Kohji Tashiro, Akiya Jouraku, Tsunenori Kameda
A Study of the Extraordinarily Strong and Tough Silk Produced by Bagworms　2019
（２）株式会社免疫生物研究所（ibl-japan.co.jp）
（３）「クモの糸の秘密」繊維と工業　大﨑茂芳
Vol62,No.2 SEN’I GAKKAISHI　2006

DSC および引張り試験機による糖、クエン酸添加ゼラチンのゾルゲル転移、強度の依存性

ソフトマテリアル研究室
1724049　濱田光
指導教員　飯島正徳

1.　背景

ゼラチンとは、豚や牛などの動物の皮から得られる水に不溶性のコラーゲンを酸またはアルカリ処理して抽出したものであり古くから薬のカプセル、膠などの医療用製品や工業製品に使われてきた。現在では使用用途の約六割がゼリーなどの食品になっている。このゼラチンの原料であるコラーゲンは、トリプルヘリックス構造(らせん構造)を持っている。ゼラチンは水に溶かしたもの(ゼラチン溶液)は人間の体温付近(30～40℃)でゼリー状(ゲル)から液体状(ゾル)に転移し、このゾルを冷却すると再びゲルになる。これは、ばらばらになっていたゼラチンの分子鎖が部分的にヘリックス構造を形成し、それが架橋してゲル化する。これがゾルゲル転移と呼ばれるもので、ゼラチンゲルの場合は可逆的である。先行研究では、ゼラチンゲルに添加物として(糖)スクロースを用い作成方法の異なるゼラチンゲルについて引張り試験、DSC を行い糖(スクロース)がゼラチン分子に及ぼす影響、ゼリー強度との関連性について行った。本研究では、ゼラチンゲルに(糖)スクロース、クエン酸を添加することによるゼラチン分子に及ぼす影響、ゼリー強度との関連性について引張り試験、DSC 測定を行い考察する。

2.　実験方法

試料：ゼラチンタイプ A(関東化学(株))
　　：上白糖(日新製糖)
　　：クエン酸

試料作成方法

JIS6503:2001(にかわ及びゼラチン)に従いゼラチン、糖 10%,20%,40%を作製

測定条件

① DSC
　昇温プログラム：25℃→-50℃→60℃
　速度：10℃/min

② 引張試験機
　圧縮
　速度：1mm/s

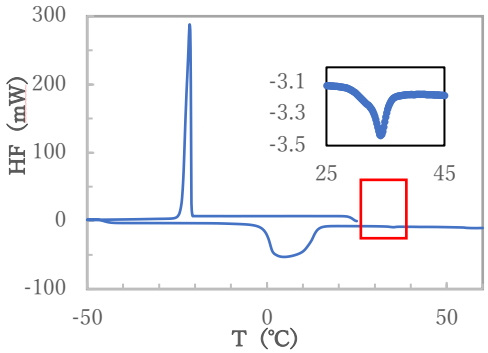


図1.　ゼラチンゲルのDSC曲線

3.　結果および考察

ゼラチンの DSC 曲線を図 1 に示す。

-20℃の発熱ピークでゲル中の水が凝固
0℃の吸熱ピークでゲル中の水が融解
30℃での非常に小さい吸熱ピークがゾルゲル転移である。
図 2 に各糖濃度の添加したゼラチンのゾルゲル転移を示す。糖添加の濃度が大きいほど無添加に比べて高温側にシフトしダブルピークになった。また、糖添加の濃度が大きくなるほどゾル化点は高くなった。これは、糖によりゼラチン分子が部分的にヘリックス構造を構築する際に阻害していると考えられる。
図 3 に各クエン酸濃度の添加したゼラチンのゾルゲル転移を示す。クエン酸濃度が 4%以降のときゾルゲル転移が見られなかった。また、各クエン酸濃度添加によるゾル化点の変化は濃度が高いほどゾル化点が下がった。これは、クエン酸がゼラチン分子に入り込み水素結合、ペプチド結合を阻害したため、らせん状に絡まずゲル化しなかったと考えられる。
図 4.5 に各糖濃度と各クエン酸濃度に対する強度を示す。どちらも添加濃度が大きいほど強度が小さくなる傾向にあった。

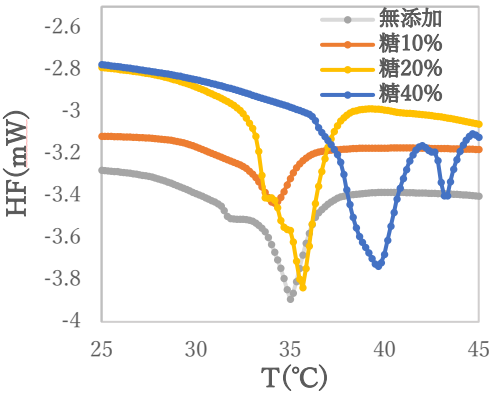


図 2.　糖添加のゾルゲル転移

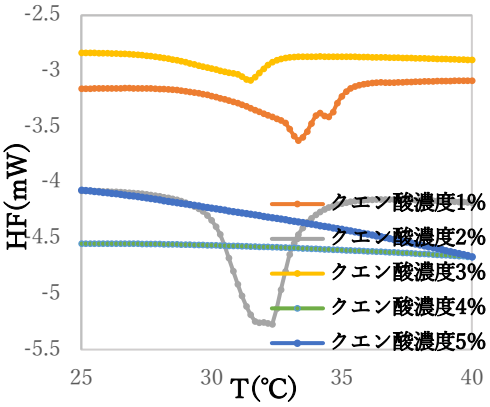


図 3.　クエン酸添加のゾルゲル転移

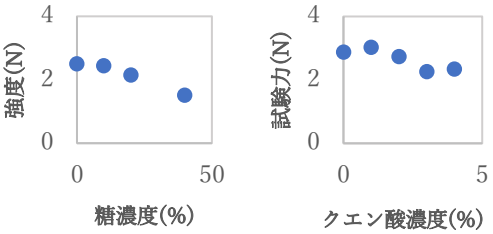


図 4.　糖、クエン酸添加による強度

4.結論
・糖添加濃度が大きくなるほどゾルゲル転移のゾル化点は高くなり、転移エンタルーは増加する。
・クエン酸添加濃度が大きくなるほどゾルゲル転移のゾル化点が高くなる。
・クエン酸濃度 4%以上添加するとゾルゲル転移は見られない。
・糖、クエン酸の添加濃度が大きくなるほどゼリー強度は減少する。
赤外分光法などで結合状態を調べより分子的に考察
糖、クエン酸を添加したときの最適な撹拌条件が必要

5.参考文献

［1］JIS6503:2001(にかわ及びゼラチン)
［2］門岡健司「DSC および引張り試験による糖添加ゼラチンのゾルゲル転移の関係」
［3］奥山健司,川口辰也「コラーゲンの分子構造・高次構造」

防振・免振ゴムの粘弾性的挙動について

ソフトマテリアル研究室

1724023　小林星羅

指導教員：飯島正徳

1.緒言

ゴムは日常生活において必要不可欠の素材である。電車や自動車、自転車ではタイヤやモーターの制御装置に使われている。身近な日用品としてはゴム手袋や輪ゴム、ゴルフボールなど、多岐にわたる。ゴムは弾性と粘性の両方の性質を持つ粘弾性として知られ、その特性を利用して私たちの日常生活を根幹から支えている。例えば防振・免振ゴムである。防振ゴムは振動を吸収し設置した家具等の落下を防ぐ効果がある。免振ゴムは地盤と構造物の間に設置し、ゴムと鋼板を交互に張り付けて積層させたものであり、日々の振動や地震による揺れから構造物本体の損傷を防いでいる。我が国は世界有数の地震大国であることから、防災によるゴムの研究が盛んである。さらに、橋梁やトンネル、道路などの社会資本は常時使用され、老朽化による損傷が深刻となっている点より、ゴムによる振動の吸収性能向上が課題となっている。今回は、防振・免振ゴムの素材として選ばれるウレタンゴム(U)、シリコンゴム(Q)、クロロプレンゴム(CR)から、引張試験や圧縮試験における粘弾性的挙動に関する考察を行う。

2.実験方法

試料は市販されている U ゴムおよび Q ゴムそして CR ゴムを用いた。今回は引張試験と圧縮試験を行った。実験装置は(株)島津製作所製のオートグラフ AGS-1kN である。引張試験での各試料の条件を表 1 に示す。コントロール機能により、つかみ具の操作をプログラムした。U ゴムと Q ゴムは試験機に 0.7N、CR ゴムは 7N を入力するまで、つかみ具を鉛直方向に 20mm/min で動かした。その後、試験力を一定にして 4.0×10^3 秒待機した。引張試験用の試料の作成には(株)ダンベル社によるスーパーダンベルカッター（JIS k-6351-2）を用いた。

圧縮試験では、入力荷重を 800N に設定した。載荷速度は 1、5、10、20mm/min である。
試料は引張試験と同様だが、寸法は 40×40mm に統一した。また、圧縮試験では目視による初期変位誤差を少なくするため(株)キーエンス製の画像変位装置を使用した。

表 1. 試料と測定条件

試料 / 条件	Uゴム	Qゴム	CRゴム
社名	セイワプロ	Nextup	ドア・トウ・ジャパン
チャック間[mm]	20	20	30
幅[mm]	10	10	10
厚さ[mm]	3	5	5

引張試験では、公称応力-公称ひずみによって測定した。外力Fで引っ張ったときのゴム試料の伸びをσとする。このとき、ゴム試料内部に応力δとひずみεが生じる。応力は、外力をゴム試料の初期断面積Aで割った値で示せる。よって、以下の式が成立する。[1]

$$\delta = F/A \cdots (1)$$

$$\sigma = l' - l \cdots (2)$$

元の試料長はl、引張時の試料長がl' である。
この試料の伸び σ を元の試料長で割ることでひずみεが求められる。

$$\varepsilon = \sigma/l \cdots (3)$$

応力-ひずみのグラフ[(1)-(3)グラフ]において、傾きEは、弾性率である。

$$E = \delta/\varepsilon \cdots (4)$$

引張および圧縮ではゴムの応力ひずみ曲線を表すために、Mooney-Rivlin 式が用いられる。[2][3]

$$\frac{\delta}{(\lambda - 1/\lambda^2)} = 2C_1 + 2C_2\frac{1}{\lambda} \cdots (5)$$

λは伸長率、C_1 および C_2 は未定定数である。C_1 は一次化学架橋を示し C_2 は一次結合以外の結合である疑似的な架橋点の数に起因する。今回は、それぞれの試料において、Mooney-Rivlin 式を適用した。(5)式は、弾性体であるゴム試料がひずんだとき、貯えられるひずみエネルギーを多項式で示し、ひずみエネルギー関数として表している。このとき、ゴム試料が完全弾性体であれば中程度のひずみで式が適応される。今回は、プロットした後に、直線となる範囲までのデータを用いた。

圧縮試験では、試料のエネルギー吸収率を算出した。試料に圧縮荷重を作用させたときの変位から、エネルギー変化量を導いた。変位直前を A 点（このとき変位x_A、荷重F_A）とすると、載荷時の B 点および除荷時の C 点において、入力されるエネルギーW_{in}と除荷時に放出されるエネルギーW_{out}はそれぞれ次式で表せる。[3]

$$W_{in} = \int_{x_A}^{x_B} F_{in}\, dx \cdots (6)$$

$$W_{out} = \int_{x_C}^{x_B} F_{out}\, dx \cdots (7)$$

(6)および(7)式の差がエネルギー吸収量ΔWであり、エネルギー吸収率W_{ABR}は以下となる。

$$W_{ABR} = \frac{\Delta W}{W_{in}} \times 100\% \cdots (8)$$

なお、変位速度を初期の試料の厚さで割り、単位時間当たりのひずみ増加量であるひずみ速度v_εを定義した。これにより、変位速度に関して試料に入力される速度差をなくすことができる。
εはひずみ、tは時刻、v_Dは変位速度、L_0は初期の試料の厚さである。単位は%/min である。

$$v_\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_D}{L_0} \times 100\% \cdots (9)$$

3.結果および考察

図 1 は引張試験に続く応力緩和曲線である。試料の緩和時間について、CR ゴムは約 167 時間、Q ゴムは約 3 時間、U ゴムは約 6 時間だった。図 2 は Mooney-plot を示し、図 3 はエネルギー吸収率とひずみ速度の関係である。以上の結果から順位付けを表 2 にまとめた。

表 2. 実験結果のまとめ

試料 / 結果	Uゴム	Qゴム	CRゴム
緩和時間	2	3	1
弾性率	3	2	1
架橋数	3	2	1
エネルギー吸収率	3	2	1

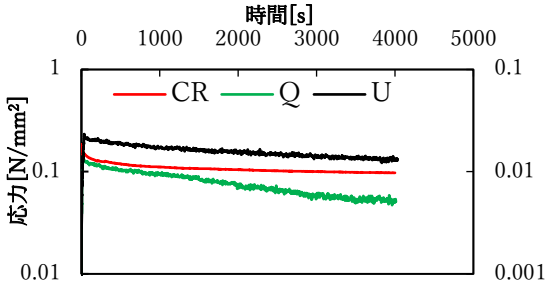


図 1. 引張試験に続く応力緩和曲線

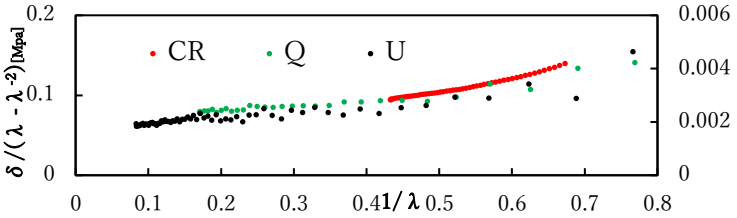


図 2. Mooney-plot

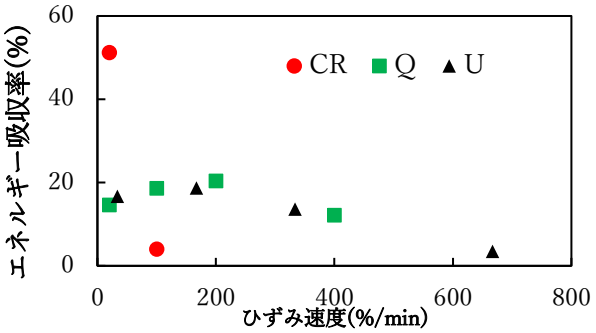


図 3. エネルギー吸収率とひずみ速度

架橋数と弾性率およびネルギー吸収率には相関がみられた。架橋が多いと網目構造により分子鎖が固定され、高弾性になるためである。そのため、元に戻ろうとする力が大きければ、試料がするエネルギーも大きくなる。

緩和時間においては、CR ゴムが突出して長く Q ゴムが最も短時間だった。しかし、この結果からゴムの粘性評価をすることはできない。架橋状態の変化を測定するには、3.6×10^5秒程[4]が必要だからである。今回は、つかみ具内での試料のズレによる誤差を少なくするため、測定時間を短くせざるを得なかった。また、緩和時間に関して、今回はゴム試料を一つの模型と仮定しているため、実際の緩和時間とは異なると感じた。したがって、ゴムは無数の模型が試料内に内在し、構成されていることから、一つ一つの模型による緩和時間を算出し、ガウス分布を用いた統計を行うとより精度の高い緩和時間測定が可能になると推測した。

構造物に用いる CR ゴムは振動の吸収の他に、水平面を固定させる必要もあることから架橋数が多くあると思案した。また、カーボンブラックによって分子鎖間の結合が補強されているため、弾性率が最も高く、ひずみ速度を上げると反発が起こり除荷時のエネルギーの方が載荷時よりも大きくなった。この結果から、カーボンブラックの添加量によって同じ材質であっても弾性率は変化すると考えた。U ゴムと Q ゴムは粘着性を優先しているため、架橋数は低いと思われる。今回は静的挙動による実験であったが、振動を試料に与える動的挙動についても実験を行うことで、両者の性能がより明らかになる可能性がある。ゴムを設計する際には、耐候性や耐摩耗性など複数の性能をどの程度付与するか検討するため、U ゴムと Q ゴムは弾性や粘性以外の性能に差があると推測した。U ゴム素材のウレタンは高湿度時に水分と結合しやすいため多湿空間では性能が劣化する一方、Q ゴム素材のシリコンは温度変化に強く安定している。以上の性質から防振ゴムはシリコン素材が長期間の使用には適していると考えた。

4.結論

防振ゴムの Q ゴムと U ゴムは家財の下に設置することを考慮して、架橋が少なく、粘着質だった。一方、免振ゴムに使われる CR ゴムは粘弾性的な挙動が顕著だった。

5.参考文献

[1]一般社団法人日本ゴム協会編集委員会(2018),ゴム技術入門,第 14 刷,丸善出版株式会社,東京
[2]G.R.ストローブル(1998),高分子の物理-構造と物性を理解するために,シュプリンガー・フェアラーク株式会社,東京
[3]丸山健司(2006),力学試験と熱分析による緩衝ゴムの性能評価及び材料設計についての検討,東京都市大学平成 18 年度修士論文, pp. 5-11-5-14,7-5-7-7
[4]村上謙吉(1969),ゴムのクリープと応力緩和,日本ゴム協会誌,第 42 巻,第 9 号,pp. 98-100
[5]小野木重治(1997),化学者のためのレオロジー,第 10 刷,株式会社化学同人, 京都
[6]伊藤眞義(2009),図解入門よくわかる最新ゴムの基本と仕組み,株式会社秀和システム,東京

低分子オルガノゲル化剤によるリオトロピック液晶のゲル化

高分子科学研究室
1724041　塚原　葵
指導教員：高木　晋作

1.緒言

リオトロピック液晶は、リソソームや真核細胞の細胞膜などのさまざまな生物学的構造に出現する液晶である。リオトロピック液晶を溶媒としたゲルは化学ゲルと物理ゲルの両方の特徴を有しており、新しい機能性材料としての応用が様々な分野で可能である。ゾル-ゲル相転移と、pH 値、光、酵素、イオン濃度などの外部刺激に対する応答性により、オンデマンドの放出が必要な化粧品、インク、薬物などへの利用が期待されている。[1]特に 12-ヒドロキシオクタデカン酸（12-HOA)は有機溶剤をゲル化させる低分子オルガノゲル化剤としてよく知られている。ゲル化剤分子は、水素結合や π-π スタッキングなどの非常に選択的な非共有相互作用を介して自己組織化し、絡み合って 3 次元ネットワークを形成することで溶媒をゲル化させる。本研究では液晶相の違いによるゲル化の違いや、HOA 濃度によるゲル化の違いについて比較し、機能性材料への応用に適した作成条件を検討することを目的とする。

2.実験方法

始めに、水/アルコール/界面活性剤からなるリオトロピック液晶として、参考論文の三角相図（図 1 [2]）を参考に、赤い点の組成（ラメラ相）の試料を調製した。サンプル瓶に蒸留水(H_2O) 6.7g とドデシル硫酸ナトリウム（SDS) 2.3 g を入れ、蓋をして 40℃で均一になるまでスターラー付き恒温槽（EMS-100R）で 30 分ほど混ぜ、デカノール(DOH) 0.7g を加え、均一になるまでさらに 30 分ほど混ぜた。次に、ゲル化剤濃度の異なる 2 種類の試料を作成した。同じ分量の液晶に 12-HOA（低濃度の方は 0.19g,高濃度の方は 0.4 g ）を加え、高温（70℃～80℃）で HOA が溶けて均一になるまで 1 時間ほど混ぜその後室温で 1 日放置した。ゲル化の確認として 1 時間逆さにし、流動性の有無を確認した。試料を偏光顕微鏡（Nikon ECLIPSE E200）で観察し、液晶相の同定をした。さらに比較のため示差走査熱量測定(METTLER TOREDO 社製 DSC823)を用い、20℃～80℃を 5K/min で測定した。

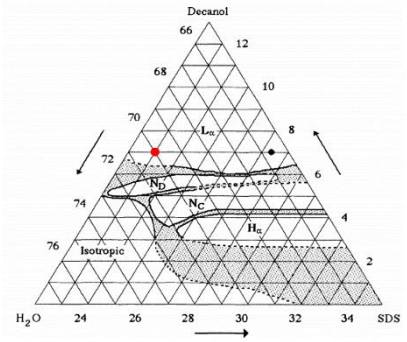


図 1 .リオトロピック液晶の三角相図

3.結果

図 2 に試料を静置した様子(左)と逆さにして 1 時間放置した時の様子(右)を示す。（左から液晶、低濃度ゲル、高濃度ゲル）低濃度のゲルについては少し流動していたが、高濃度のゲルに流動性は見られなかった。

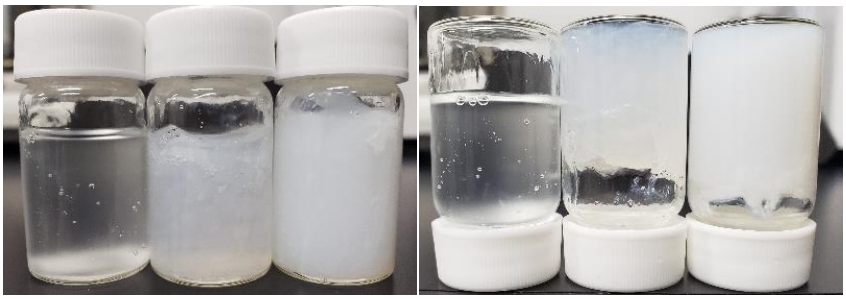
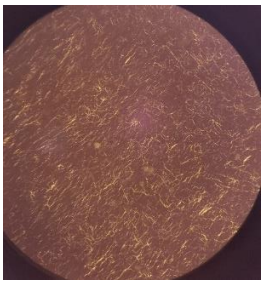
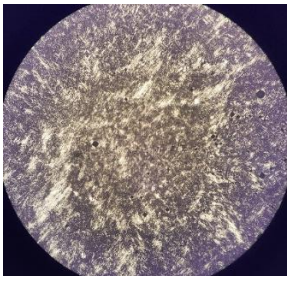
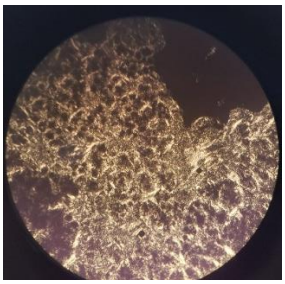


図 2 .静置した様子(左)と逆さにして 1 時間放置した時の様子(右)

それぞれを偏光顕微鏡で見た様子を表 1 に、DSC 測定の結果を図 3 に示す。

表１．偏光顕微鏡の結果（100 倍）

液晶	低濃度ゲル	高濃度ゲル
		

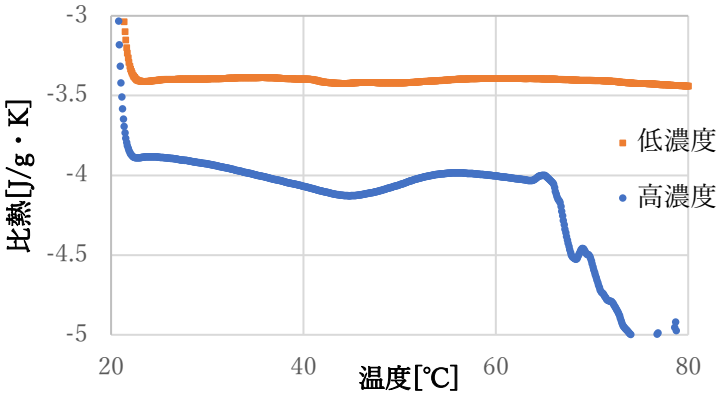


図 4.DSC による測定結果

4.考察

1 時間逆さにしたところ低濃度ゲルについては少し流動性が見られたが、高濃度ゲルについては流動性が確認できなかったことから濃度が高い方がしっかりゲル化していると考えられる。参考論文では調製直後から 12 週間ゲルの観察を行っており[3]、さらに 2 週間ほどたてば低濃度ゲルも流動性を失う可能性はある。偏光顕微鏡像では場所によって同じような方向に細い線が見られ、文献通り液晶はラメラ相である。低濃度ゲルは液晶の時と同様に場所により同じような方向に線が見えるが、液晶と比較すると太い。高濃度ゲルについても場所により同じような方向に線が見えるが、粘度が高くプレパラートを作るときに薄くのばしきれず重なって見えている可能性がある。DSC の結果から低濃度ゲル、高濃度ゲルともにピークの位置は 45℃付近であるが、ピークの高さを比較すると、高濃度ゲルの方が架橋の度合いが高いと考えられる。

5.結論

今回の実験でラメラ相がゲル化することの確認はできた。ヘキサゴナル相や、他の組成のラメラ相について、HOA 濃度がより高いときなどについては追実験や分析が必要である。

6.参考文献

[1] S. Dieterich, T. Sottmann, and F. Giesselmann, “Gelation of Lyotropic Liquid-Crystal Phases-The Interplay between Liquid Crystalline Order and Physical Gel Formation,” *Langmuir*, vol. 35, no. 51, pp. 16793–16802, 2019, doi: 10.1021/acs.langmuir.9b02621.

[2] S. Folding, “Defects: a,” vol. 70, no. 24, pp. 3812–3815, 1993.

[3] M. Burkhardt, S. Kinzel, and M. Gradzielski, “Macroscopic properties and microstructure of HSA based organogels: Sensitivity to polar additives,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 331, no. 2, pp. 514–521, 2009, doi: 10.1016/j.jcis.2008.11.078.

アミノ酸塩型カチオン界面活性剤の発泡特性について

高分子科学研究室
1724042　辻涼介
指導教員：高木晋作

1.緒言

溶質が２層間の界面に働き､それらの界面張力を著しく低下させる性質を示す物質を界面活性剤という。界面活性剤の構造は、水になじみやすい親水基と、水になじみにくい疎水基を併せ持つ。界面活性剤の濃度が高くなると水中では親水基を外側に向けた会合体(ミセル)をつくる。ミセルができる濃度のことを、臨界ミセル濃度(CMC)という。CMC 以上の濃度では、それ以上の界面張力の低下は見られない。界面活性剤の種類は様々あるが、特に親水基がイオンに解離し、そのイオンが正に帯電するものをカチオン界面活性剤という。界面張力が低下すると泡ができやすくなるため、より低い CMC をもち、短時間で多くの泡をつくることができる界面活性剤が発泡特性の優れたものといえる。界面活性剤の発泡特性の向上は、例えば消火剤の性能を改善するなどの応用が期待できる。Min Li らの先行研究(以下先行研究 1 と記載)[1]では、発泡特性の評価専用の装置を用いた特性評価がなされていた。

ヘキサデシルトリメチルアンモニウムクロリド(CTAC)は第四級アンモニウムカチオン界面活性剤であり、これは化粧品や洗剤、石油化学工業などに広く応用されている。Gang Chen らの先行研究(以下先行研究 2 と記載)[2]では、CTAC をよりよいものにするためにアミノ酸の影響を調べることを目的として CTAC からヘキサトリメチルアンモニウムグリシン(CTAG)を作成し、泡の安定性と表面張力に着目して評価していた。この際、評価の際には専用の装置と偏光顕微鏡などを用いていた。発泡段階の泡体積の経時変化は記録していなかった。その結果、CMC や泡体積の維持といった観点から CTAG の方が優れた発泡特性を示すと報告されていた。

2.目的

本実験では、先行研究 1 の調査法をさらに簡略化した方法を考案し、CTAC と CTAG の発泡特性を調査することでその調査法が信頼に値するかを確かめる。

3.実験方法

3.1　CTAG の作成

0.016mol の NaOH を、メタノール約 40ml に加えて溶かした。次に、0.016mol の CTAC を溶液に加えて溶かした。その後上澄みに 0.016mol のグリシンを加え、冷却器とスターラーを用いて 750rpm で撹拌しつつ 100℃で熱して還流を行った。還流が終了した後、乾燥機に入れて 100℃で 24 時間乾燥させた。その後、残った水分を飛ばすために、シャーレに移して乾燥機の外で 30 分ほど放置した。最後に残留物(CTAG)が得られた。

また、作成した CTAG の確認にはニンヒドリン反応による試験でアミノ酸が含まれているかどうかを判断することとした。

3.2　発泡と測定

3.1 で得られた CTAG を、0.1,0.3,0.5,0.7,1,3,5,7,10‰の濃度で調製した水溶液、各 60ml を用意した。それらをメスシリンダーに入れたあとに空気供給ポンプ(流量 16ml/s)で空気を送り、泡体積が 200ml になるまでの様子を観察した。発泡の様子は、動画として記録を残し、それをもとに測定を行った。泡が 10ml に達する時間から、5ml 刻みに時間を測定、記録した。これを泡体積が 200ml になる時間(以降 t200 と表記する)まで繰り返した。この記録から泡体積-時間のグラフ(以下グラフ①)をつくった。また、t200-質量濃度のグラフ(以下グラフ②と記載)も作成した。グラフ②から得られた結果を確かめるために、表面張力の測定はデュヌイ表面張力計を用いて測定した。その際表面張力-質量濃度のグラフを作成した。

4.結果

4.1　CTAG の確認

CTAC と CTAG、さらに比較のためグリシンでもニンヒドリン反応による試験を行った。

グリシンはきれいな青紫色になったが、CTAG はかなり黒に近い呈色反応を示した。CTAC は反応を示

さなかった。
また、上記と同じ 3 種で硝酸銀の反応による試験も行った。CTAC は白濁し、グリシンは反応を示さなかったが、CTAG は褐色に濁って沈殿が生じた。

4.2　CTAC と CTAG のグラフ①

以下に、CTAC と CTAG の泡体積の経時変化をあらわしたグラフを示す。

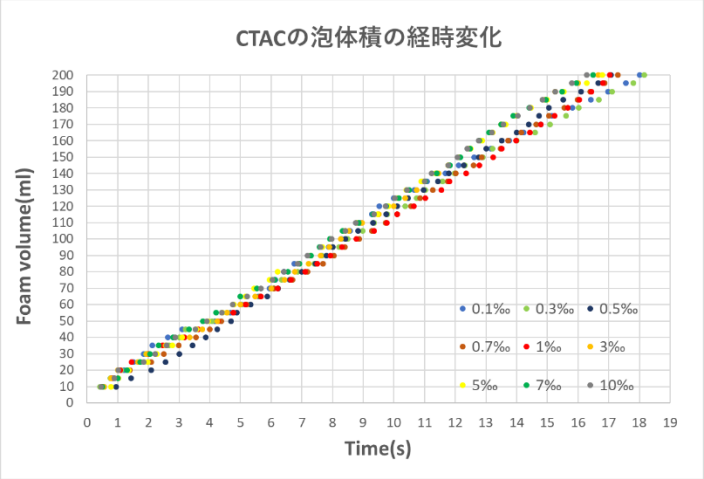


図 1.CTAC の泡体積の経時変化

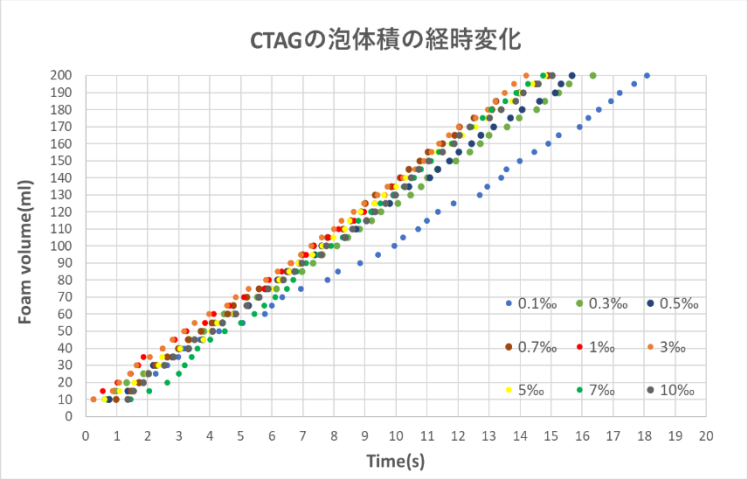


図 2.CTAG の泡体積の経時変化

4.3　CTAC と CTAG のグラフ②

以下に CTAC と CTAG の、質量濃度ごとの t200 の変化をあらわしたグラフを示す。

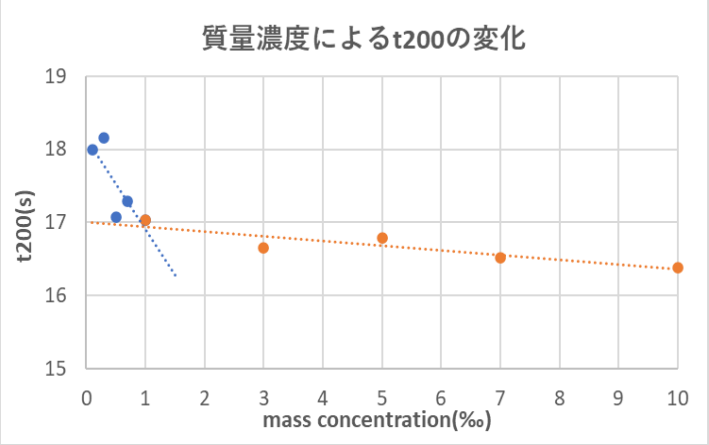


図 3.CTAC の質量濃度による t200 の変化

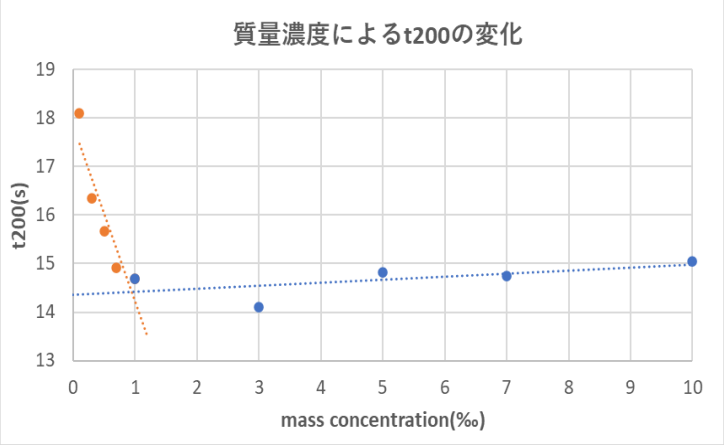


図 4.CTAG の質量濃度による t200 の変化

それぞれの 0.1 から 1‰までの点での近似曲線と、1‰から 10‰までの点の近似曲線の交点を調べたところ、約 0.95‰と約 0.94‰付近で交わっており、これは表面張力計で測定した CMC(CTAC:1.04‰、CTAG:0.77‰)に近い値となった。

5.考察と結論

グラフ①から、CTAG の t200 が小さい値を示している事から、CTAC よりもより速い速度で発泡することが分かる。グラフ②と表面張力計から求めた CMC はどちらも CTAG の方が低いという結果だった。このことから CTAG の方がより低い濃度でミセルを形成することができ、表面張力を低下させることが可能であるため、CTAG の方が優れていることが分かる。
よって、先行研究 1 の測定法を簡略化した本実験でも、先行研究 2 と大きな差異がない結果が出たことから、本実験の測定法は信頼に値するものといえる。

6.参考文献

[1] Experimental study on foaming properties of anion-cation compound foaming agent to prevent coal spontaneous combustion. Colloids and Surfaces A 581(2019)123847

[2] Preparation and surface activity study of amino acid surfactants　C.R Chimie 22 (2019)277-282

水駆動摩擦電気ナノ発電機の実現可能性の検討

高分子科学研究室
1724048 野中　裕冬
指導教員　高木　晋作

1、緒言

昨今、科学技術の発達によって環境問題は深刻化し、今現在利用しているものに代わる新しいエネルギーの生成、運用に関する研究が盛んになりつつある。その中でも、主に研究で用いられている、固体と液体の摩擦によって発電する固液摩擦発電は、従来の発電方法と比較して生産効率は劣るものの、発電の持続力が高く環境への影響も小さいため、期待が寄せられている。

TENG（ナノ発電機）とは、微小な規模の物理現象から力学的エネルギーや熱エネルギーを取り入れて電気に変換する技術のことを指す。典型的な方式として、圧電型、摩擦帯電型、焦電型の 3 種類がある。本実験では、その中の摩擦帯電に着目した。摩擦帯電型ナノ発電機とは、摩擦帯電効果と静電誘導の組み合わせによって外界の力学的エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーヴェスティングデバイスのことを言う。この発電機は有機材料が比較的適性が高く、有機ナノ発電機とよばれることもある。この発電方式は、前述の環境に優しい他、製造加工のコストが低いというメリットも持つ。また、TENG が利用できるエネルギー源は、身体運動、歩行、振動、回転、水の流れ、風力など多岐に渡り、生活の多くの部分で活用することが可能である。本研究では、アルミニウム板に防錆処理、陽極酸化、PTFE コーティングを順に施し、アルミニウム、酸化アルミニウム、PTFE の 3 層構造に加工し、完成したものを電極板として用い、また液体との摩擦によるエネルギー生成の他、電極板同士の摩擦によるエネルギー生成について調べ、それぞれの摩擦が引き起こす出力への増加量について考察することを目的とした。

2、実験方法

150mm 四方、厚さ 10mm のアルミニウム板を、30mm×75mm のもの 10 枚に切断し、それを過塩素酸とエタノールを 1:4 で混合した溶液に浸しながら、研磨剤を用いて表面を 5 分間研磨した。その後、完成したものを脱イオン水ですすぎ、空気乾燥させた。次に、25℃、0,3mol のシュウ酸溶液を 400ml 入れたビーカーの中に陽極に先程のアルミ板、陰極側に炭素棒を配置し、5V の定電圧下で 20 分間陽極酸化処理を行った。この時、溶液を毎分 200 回の速度で攪拌しながら行った。再び空気乾燥した後、PTFE 層を表面に付加するため、耐熱皿の上にアルミ板をのせ、その上に粉末状の PTFE をのせ、そのまま 350℃まで温度を上げた状態の電気炉に,30 分、60 分入れた後、取り出してそれぞれ 24 時間室温で冷まし、圧着させた。尚、陽極酸化ができていることを確認するため、機器分析センターの FESEM（電界放出型走査電子顕微鏡）を用いて観察した。

加工前のアルミ板、陽極酸化のみ行ったアルミ板、PTFE コーティングまで行ったアルミ板を色々な組み合わせで並行、間 1 cm の間隔をあけて水中に配置し、5V の定電圧を加えた。その後、アルミ板を上下に動かし、アルミ板間の出力電圧の変化量を測定した。また、空気中において定電流のもとで極板同士を直接擦り合わせた際の摩擦の出力への影響も計測した。出力の変化は、オシロスコープ（岩崎通信機　DS-5104A）を用いて観測した。

3、結果

表 1　各アルミ板を用いた際の摩擦と出力上昇量の関係

状態	水中			空気中		
出力	20V	10V	5V	0.8A	0.6A	0.4A
PTFE 層あり	28mv	20mv	20mv	28mv	20mv	40mv
陽極酸化のみ	4mv	4mv	0mv	0mv	4mv	0mv
無加工	0~4mv	0mv	0mv	0mv	0~4mv	0mv

上表は、水中では固体―液体、空気中では固体同士の摩擦を付加した際の出力の変化量をまとめたものである。どちらの場合においても、PTFE コーティングをしていないものを使用した時は、出力の変化はほぼ見られなかった。また、電源の出力は上昇量とは関係性がなかった。また、摩擦速度を上昇させることにより、若干ではあるがさらなる出力の上昇が見られた。

4、考察

PTFE コーティングを行なっていないものからは摩擦による出力上昇が見られなかったのは、表面が滑らかであるため摩擦がほとんど起こらず、導電性があるため仮に摩擦が起こったとしても外部に逃げてしまったと考えられる。また、液体よりも固体同士の摩擦の方が比較的大きく出力上昇したのは、液体は流動性があり力が分散してしまうのに対し、固体同士の場合は、力が外に逃げていかないことが考えられる。

5、結論

TENG を用いた固体―液体、固体―固体間の摩擦による出力の上昇を観測することができた。そのままでは摩擦が起こらないような金属でも、表面を PTFE などの樹脂で上からコーティングをすることで、摩擦発電用の極板として利用することができるのではないかと考えられる。

6、参考文献

［1］　山川奈緒子　東京都市大学卒業論文　（2020）

［2］　Arrangement optimization of water-driven triboelectric nanogenerators considering capillary phenomenon between hydrophobic surfaces　Hong Ryul Park 他　scientific reports　（2020）

pH 応答性ワームライクミセルが高分子鎖へ与える影響

高分子科学研究室
1724058　増田仁
指導教員：高木晋作

1. 緒言

ポリマー/界面活性剤系の研究は何十年もの間研究者の注目を集めている。ポリマー/界面活性剤系の最初の研究[1]は中性ポリマーとアニオン界面活性剤との相互作用に関するメカニズムに焦点を当てたものであり、ポリマー界面活性剤複合体、いわゆるポリマー結合ミセルの形成が報告された。先行研究[2]では、界面活性剤の濃度を変えることでミセルの形状を球状から円柱状へと変化させ、希薄領域から準希薄領域でのポリマーとミセルの形状ごとの相互作用について報告しており、ミセルの成長や高分子濃度の上昇に伴いポリマー結合ミセルは動粘度の大幅な上昇など強固な特性を獲得することが判明している。これによりポリマーとミセルの相互作用は両者の状態に応じて変化することが明らかであり、様々な状態でのポリマーと界面活性剤の相互作用の研究は重要性を増していると言える。
本研究では一般的な球状ミセルではなく、pH応答性ワームライクミセル（WLM）を用いて界面活性剤ミセルの形状を変化させ、希薄領域から準希薄領域でのポリビニルピロリドン（PVP）との相互作用を調査した。
WLM は環境感度と大きな物理的変化のため石油産業、医学の分野などで関心を集めているものであり、pHや光、CO_2濃度など様々な刺激に反応しミセルの形状を変化させることが確認されている。特にpHは調整が簡易であり幅広い用途で用いられているため、pH応答性 WLM は多くの研究[3]が報告されている。

2. 目的

本研究ではpH応答性 WLM を用いて界面活性剤の濃度によらないミセルの成長を促し、希薄領域でのポリマーと界面活性剤ミセルの相互作用を調べることで、溶液内のミセル量が変化しない状況下においてミセルの形状によるポリマーと界面活性剤ミセルの相互作用及びポリマー結合ミセルの特性を解明することを目的とする。

3. 実験方法

ラウレス硫酸ナトリウム 8.13 g 、Na_3PO_4 4.9176 g を蒸留水に溶解させ 200mM ラウレス硫酸ナトリウム＋300mM Na_3PO_4を 200ml 作成した。作成した溶液 20ml に塩酸 1ml を加えpH 13、7、2 の 3 つを作成し、それぞれの粒形を DLS によって測定しpH応答性を確認した。次に、PVP 量 0.1 g から 0.1 g ずつ 1.3g まで蒸留水と混合し、それを 25℃に保ちながらウベローデ毛細管粘度計で測定し固有粘度を求めた。さらに作成した界面活性剤溶液にPVP0.1g～0.4g を混合し恒温槽で温度を 25℃に保ち粘度計を用いて粘度を測定した。

4. 結果

PVP 溶液の粘度の PVP 濃度依存性を以下の図 1 に示す。PVP のみの溶液の場合、いずれの溶液も PVP 濃度に対してほぼ線形に粘度が上昇した。界面活性剤と混合した場合粘度上昇の割合が大きくなっている。

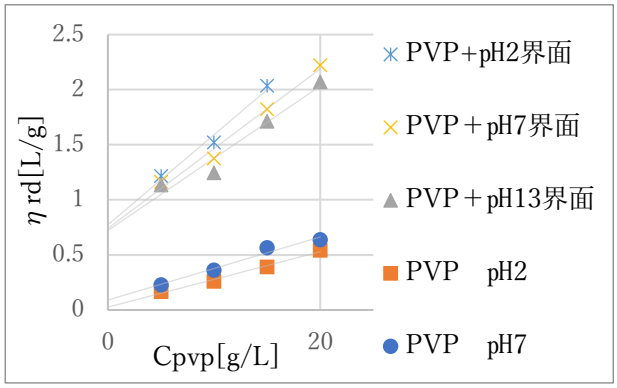


図 1. PVP と界面活性剤の粘度変化

5. 考察

図 1 から求めた固有粘度を表 1 に示す。

表 1. 溶液と固有粘度

	pH 13	pH 7	pH 2
界面活性剤なし[L/g]	—	0.1046	0.026
界面活性剤あり[L/g]	0.7219	0.7406	0.7731

界面活性剤を加えた場合と PVP 単体の場合を比べると同じpHにおいて固有粘度が0.7[L/g]程度増加していることから、ポリマー結合ミセルが形成されたと考えられる。また界面活性剤を加えた場合のみを比較するとpHが低くなるほど粘度の増加がみられた。本研究で用いた SLS/Na_3PO_4水溶液でのミセル形状は高pHで球状、低pHで円柱状であるため、ポリマーと結合したpH応答性 WLM もpHによる構造の変化が起きたと推察でき、pHによって上昇量に変化がみられるのは PVP が増加するほど溶液内のポリマー結合ミセルが増え、ミセルの構造による粘度への影響が大きくなるからだと思われる。

6. 結論

pH応答性 WLM とポリマーとの間にもポリマー結合ミセルが形成されたことが示唆される結果が得られた。また、溶液内のミセル量が一定の状態でもpHによってミセルの構造が変化すると粘度の上昇量に変化がみられることが確認できた。

7. 参考文献

[1]S. Saito　J. Colloid Interface Sci., 24 (1967), pp. 227-234

[2]M. Kamli, M. Guettari, T. Tajouri　J. Mol. Struct., 1196 (2019), pp. 176-185

[3]Wanli Kang　Journal of Molecular Liquids 286 (2019) 110946

光応答性アゾ色素モノマーの吸光度測定

高分子科学研究室
1724064　山崎萌成
指導教員：高木晋作

1. 緒言

光エネルギーを仕事に変換する光応答性ポリマーの研究に関心が寄せられている。光誘導性シス-トランス異性化で固液相転移を起こすアゾベンゼン化合物がある。架橋された“光融解”アゾベンゼンモノマーを液晶（LC）ネットワークに組み込み、UV/可視光によって刺激すると、フォトメカニカル的動作および室温において可逆的ガラス転移温度（以下、Tg）を示す光応答性ポリマー膜を生成する。アゾ発色団によるシス-トランス異性化は、架橋された LC ポリマーの Tg 変化をもたらす。そこで、ドデシルグリセリルイタコネート(DGI)（図１）ポリマーネットワークに共有結合で架橋された光応答性部分として重合可能なメタメチルアゾベンゼン(M-azo)（図 2）を使用した LC ネットワークを土台とした光応答性薄膜を開発した。

M-azo は三段階の合成反応によって得られる。まず 4,4-ジヒドロキシ-3-メチルアゾベンゼン（以下、1a）（図 3）を合成し、次にこれを用いて 6-（4-（(4-（(6-hydroxyheyl）oxy）-3-methylphenyl）diazenyl）phenoxy）hexan-1-ol（以下、2a）（図 4）を合成する。最後に、2a を用いて M-azo を合成する。1a を合成する際に溶液を中和してろ過する過程がある。このとき、溶液の pH が変化すると色が変化する。

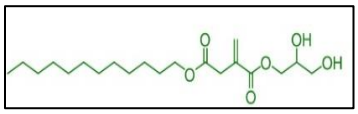


図 1

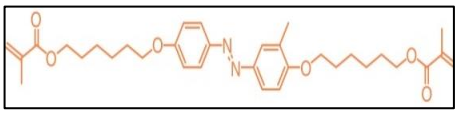


図 2

本研究では、1a の pH を変化させ、それぞれの溶液を紫外可視分光光度計によって吸光度の変化を調べてメチルオレンジ（以下、MO）との違いを調べる。さらに 1a を用いて 2a を合成する際、pH の変化をさせた 1a が次に合成される 2a にどのような影響が及んでいるのかを検討するものである。

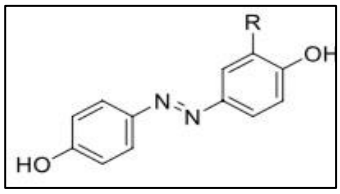


図 3

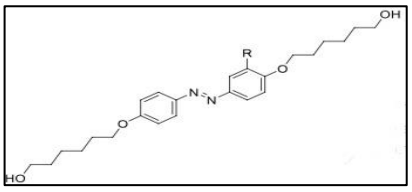


図 4

2. 実験方法

p-アミノフェノール 4.36g を 2.4N の希塩酸 50ml に混ぜ、氷浴させて約 0℃に保った。この溶液に、水 4ml に亜硝酸ナトリウム 3.32g 溶かした溶液を滴下した。氷浴させた状態でこの混合液を 30 分間撹拌した後、o-クレゾール 4.32g と 20%水酸化ナトリウム 16ml を混ぜた溶液を加えた。その後、室温で 22 時間撹拌した。撹拌後の溶液の pH を変化させて調整した。その後、このとき pH を変化させ、濾過して沈殿物が得られ、蒸留水で洗浄し、乾燥機を用いて乾燥させた。この固体が 1a である。

次に、紫外可視分光光度計を用いた吸光度測定を行うためのサンプルを作成した。三種類の 1a を 0.1g だけ取り、エタノール 10ml に混ぜ、固体が完全に溶けるように撹拌した。その後、この溶液に水 190ml を加えた。この溶液を紫外可視分光光度計のサンプルとして用いた。これらの試料を用いて吸光度測定を行った。続いて、2a の合成を行った。1a 2.33g、KI 0.0312g、K_2CO_3 4.137g を DMF 40ml

に溶かした。この溶液に、DMF 10ml と（$HO(CH_2)Cl$）3.11g を混合させた溶液を滴下した。溶液を 70 時間撹拌した。反応後、多量の水を加えて沈殿物が生じ、これをエタノールを用いて再結晶させると黄色粉末が得られた。これが 2a である。

3. 結果

可視光領域において、より長い波長の光はほとんど吸収されていなかった。波長を短くしていくと、各試料による光の吸収率は徐々に高くなり、吸光度のピークを迎える波長はすべて近い値であった（図 5）。また吸光度の変化率は、試料が中性→酸性→塩基性の順で大きくなった。また、ピーク時の吸光度は、試料の pH が中性→酸性→塩基性の順で吸光度が大きくなった。

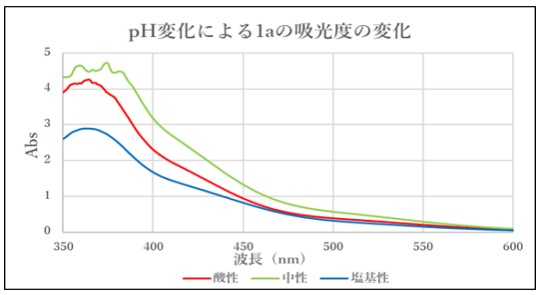


図 5

1a 合成過程において、溶液を強い酸性または塩基性にしたときには固体が得られなかった。

4. 考察

1a には MO（図 6）に含まれるような pH 変化によって構造を変える官能基を持っていない。そのため、吸光度の違いは 1a の分子数によるものである。すなわち、合成される 1a の濃度は中性条件でもっとも高くなることが分かった。

吸光度の比較をするために 1a と同様のアゾ色素である MO を例に出してみる。この変色域は 3.1～4.4 であり、この範囲より酸性側では赤色、中性側では黄色を呈する。溶液の pH すなわち濃度が変化すると、ピークを迎えるのが 1a はほぼ同波長にあるのに対して、MO は波長が変化することがわかっている。この変色は、pH の変化により分子構造が変化し吸収される波長も変化することが挙げられる。強い酸性溶液中では、MO はアゾ基（－N=N－）に H^+ が付加し、一方のベンゼン環が部分的にキノイド型構造となるため、より長波長の光を吸収する。

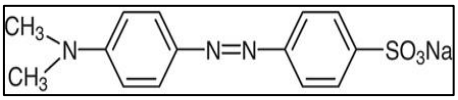


図 6

（引用：Methyl Orange 547-58-0｜東京化成工業株式会社 (tcichemicals.com)）

5. 結論

1a と MO の吸光度の違いが実験を通して読み取ることが出来た。官能基や構造による影響を確認できた。

最終的には、pH を変化させた 1a から 2a を合成し、吸光度や構造的にどのような影響が及ぶかを調べたいと考える。さらに、余裕があれば M-azo のガラス転移を観察したいと考えている。

6. 参考文献

［1］『Light-induced mechanical response in crosslinked liquid-crystalline polymers with photoswitchable glass transition temperatures』 Youfeng Yue、Yasuo Norikane、Reiko Azumi & Emiko Koyama （2018） nature COMMUNICATIONS

［2］『中和滴定と酸塩基指示薬の可視吸収スペクトル』 小畠りか、向井知大、大場茂 （2011） 慶応大学日吉紀要刊行委員会

ヒトは匂いをトンネル効果によって認知しているか？

基礎物理学研究室
1724007 内野日向子
指導教員　堀越篤史

1.緒言

生物が匂いを感知するメカニズムは、アクセルとバックの嗅覚受容体発見以降[1]、ほぼ全貌が明らかになった（図 1)。しかし私たちが遭遇するさまざまな匂いを鼻がどのように識別するかはまだ完全には理解されておらず、嗅覚受容体が匂いの分子を識別するメカニズムとして立体構造説と分子振動説が対立している[2]。立体構造説は、匂い分子の形と大きさが識別される「ロックアンドキー」メカニズムに依拠している。一方の分子振動説は、匂い分子を構成する原子間の結合の振動スペクトルを嗅神経細胞が認識するものであり[3]、その最新版は「スワイプカードモデル」と呼ばれる[4]。これは、私たちの鼻が匂い分子の微細な振動を量子力学的なメカニズムにより感じるとする大胆なモデルである。私たちの鼻は精密な「分光器」として機能しているのだろうか？本研究ではスワイプカードモデルにおける量子力学的な効果を評価し、分子振動説の可能性を議論する。

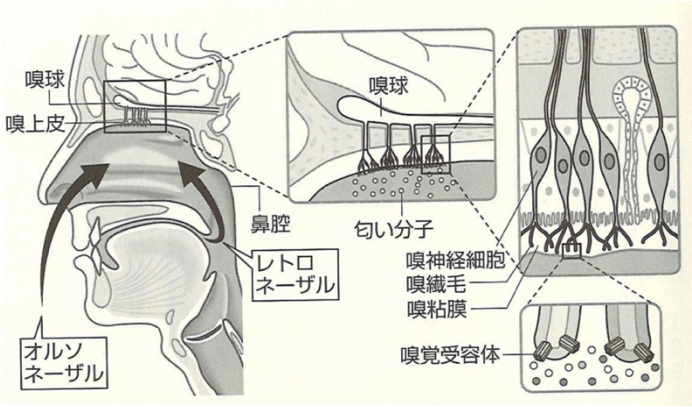


図 1.匂いを感知する器官[1]

2.匂い認識のスワイプカードモデル

スワイプカードモデルは、嗅覚受容体が磁気カードのカードリーダーのような作用をするというものである[4]。匂い分子がぴたりと合う受容体にはまり込むと、電子が非弾性トンネリングを起こし、嗅神経細胞が発火する。その情報は電気信号に変換され、脳へ伝わる。ポイントは匂い分子が存在しないときは弾性トンネリング（図 2)、匂い分子が受容体にはまり込むと非弾性トンネリング（図 3）が起こるという点であり、弾性、非弾性トンネリングにかかる時間をそれぞれτ_0、τ_1とすると、$\tau_1 \ll \tau_0$ならば非弾性トンネリングすなわち匂い分子がスイッチとなるトンネリングが支配的ということになる。

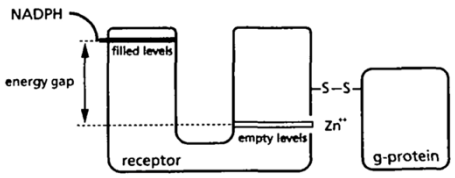


図 2.弾性トンネリング[3]

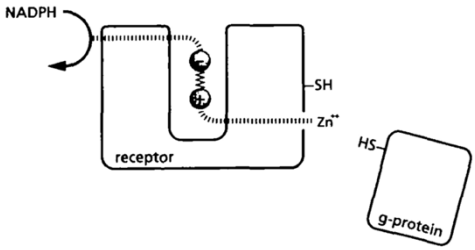


図 3.非弾性トンネリング[3]

3.トンネリングにかかる時間の評価

マーカスの電子移動の理論を用いると、トンネリングにかかる時間 τ_n は次のように与えられる[4]。

$$\frac{1}{\tau n}=\frac{4\pi^2}{h}\frac{1}{\sqrt{4\pi kT\lambda}}Cn\exp\left(-\frac{(\varepsilon-\lambda)^2}{4kT\lambda}\right)$$

ここで Cn はカップリング定数、λ は再配向エネルギー、ε は電子移動反応によるエネルギー変化、k はボルツマン定数、T は絶対温度、h はプランク定数である。$n=0$ が弾性トンネリング、$n=1$ が非弾性トンネリングに対応する。それぞれのパラメータに妥当な値を入れて評価すると、室温において $\tau_0=1.2\times10^{-7}$ s、$\tau_1=1.5\times10^{-9}$ s が得られた。すなわち $\tau_1 \ll \tau_0$ となり、非弾性トンネリングの方が圧倒的に速く、分子振動説が現実的に成立しうることが分かった。

4.まとめ

今回は分子振動説のスワイプカードモデルについて特徴的な時間を定量的に評価した。しかし、鼻が匂いを識別するメカニズムには不明な点も多く、立体構造説と分子振動説の決着はまだついていない。嗅覚は他の五感にはない、過去の記憶や風景が瞬時にして匂いによって呼びさまされるといった高次脳機能に関わる感覚であり[1]、物理・化学的作用だけでなく脳科学、食品科学とも関連性が深く、今後の発展が期待される。

5.参考文献

[1] 新村芳人「嗅覚はどう進化してきたか　生き物たちの匂い世界」岩波書店(2018).
[2]ジム・アル=カリーリ、ジョンジョー・マクファデン「量子力学で生命の謎を解く」SB Creative (2015).
[3] L. Turin "A Spectroscopic Mechanism for Primary Olfactory Reception" *Chem.Senses*,21(1996)773-791.
[4] J. C. Brookes, A. P. Horsfield, and A. M. Stoneham "The Swipe Card Model of Odorant Recognition" *Sensors*,12(2012)15709-15749.

機械学習による２次元イジングモデルの相転移温度の検出

基礎物理学研究室
1724015　河野　優大
指導教員　堀越　篤史

1.　緒言

磁性体（磁石）は温度が高くなると磁石としての性質を失う。これが強磁性から常磁性への相転移である。2 次元イジングモデルは磁石の相転移を調べるためのモデルであるが、最近その研究に機械学習の手法を用いる試みがなされている[1]。これは、機械学習においてよく行われる画像判定を相の判定に応用するものである。

本研究ではモンテカルロ法により作成されたスピン配位から機械学習を用いて相の判定を行い、相転移温度を検出する。特に配位のサイズを 4×4 から 32×32 まで変化させたときの結果の収束性を議論する。

2.　2 次元イジングモデル

2 次元イジングモデルは 2 次元の格子上に小さな磁石(スピン)S_iが並んでいるとするモデルであり、スピンは上向きと下向きしかとれないとし(図１)、上向きを$S_i=+1$、下向きを$S_i=-1$で表す[2]。

↑	↑	↓	↓
↓	↑	↑	↑
↓	↓	↑	↑
↑	↓	↑	↑

図 1:2 次元イジングモデルの配位(4×4)

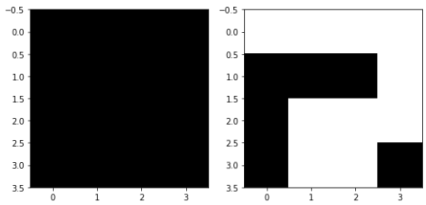


図 2:モンテカルロ法により生成されたスピン配位(4×4)

イジングモデルのハミルトニアンはカップリングJを用いて次のように表され

$$H = -J \sum_{<i,j>} S_i S_j \tag{1}$$

隣り合ったスピンが平行(↑↑)か反平行(↑↓)かでエネルギーが異なるが、$J>0$の場合はスピンの方向がそろったほうがエネルギーが低くなるので、低温ではスピンがそろった強磁性相が実現すると期待される。イジングモデルのスピンの期待値は逆温度$\beta=1/kT$(kはボルツマン定数)、温度 T、分配関数Zを用いて

$$m(\beta) \equiv \frac{1}{Z} \sum_{C \in \{s\}} e^{-\beta E[C]} \hat{m}[s] \tag{2}$$

と表される。これが計算できれば $m(\beta)\neq 0$ ならば強磁性、$m(\beta)=0$ ならば常磁性、と相を判定できる。しかし、全てのスピンの配位を考えるのは困難なので、通常はモンテカルロ法を用いて出現確率の高い

配位を生成し(図２)、期待値の計算が行われている。

3.　機械学習による解析

機械学習の有名な例にアヤメの画像判定がある。この画像判定アルゴリズムを応用し、スピン配位から期待値を計算して相を判定するのではなく、スピン配位の「画像データ」から相を判定するのが機械学習による解析のアイデアである[1]。まず、スピン配位をβの値ごとに分け、データの分類を行う。分類には相転移温度の厳密解$\beta_c = 0.440686$を使用し[5]、β_cより高いものと低いものでラベル付けを行う。訓練データと解析データは全データの偶数番目と奇数番目で分ける。ラベルも同様である。

機械学習におけるネットワークは入力層、隠れ層、出力層の３層構造となっているが(図３)、最初の層では活性化関数として relu 関数を使用し、次の層では softmax 関数を使用した[3]。

図 3:ニューラルネットワークのイメージ[4]

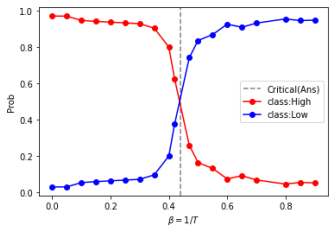


図 4:機械学習による相転移温度の検出過程

学習したネットワークにデータ(ある温度の配位)が入力されると、ネットワークはそれが強磁性か常磁性にあるかを判定する。図４は、ある温度の配位が強磁性相と判定された確率(青色の点)と常磁性と判定された確率(赤色の点)を表し、二つの確率を合わせたものは１となっている。青色の曲線と赤色の曲線の交点が相転移温度β_cを与える。それぞれの配位のサイズにおけるβ_cを表１に示す。検出された相転移温度は、配位のサイズを大きくするにつれて厳密な値$\beta_c = 0.440686$に収束していく傾向にあることが確認できた。

表 1:各サイズにおける相転移温度

配位のサイズ	逆温度　β_c
4×4	0.43685315
8×8	0.43870567
16×16	0.44172337
32×32	0.44244712

4.　参考文献

[1] 田中 章詞 「2 次元イジングモデルの相転移の機械学習」，アンサンブル（2019）

[2] 藤崎　弘士 「統計力学に基づく細胞ダイナミクスの 計算手法について」，日本医科大学基礎科学紀要　第 45 号，（2016）

[3]Deep learning and Physics 2020 「機械学習と物理」 富谷昭夫 （https://cometscome.github.io/DLAP2020/#%E7%AC%AC16%E5%9B%9E)

[4]AI 研究所 （https://ai-kenkyujo.com/2017/09/14/python-nn/)

[5]T.Akinori,and A.Tomiya, Journal of the Physical Society of Japan, 86, 6 (2017).

PsychoPy によるミュラー・リヤー錯視の実験

基礎物理学研究室
1724028 櫻井　燿亮
指導教員　堀越　篤史

1.緒言

人間が世界を正しく認識しているとは限らない。人間が実際に見ている景色の情報は、一度脳に入力されたのち、解釈、推測される。そのため、私たちが知覚している世界は、必ずしも正確ではなく、しばしば客観的現実と主観的現実との間にずれが生じる。そのずれが明確に現れたものが、錯視である。錯視にはさまざまなものがあり、ポンゾ錯視やエンビングハウス錯視などがその代表である(図 1)。私たちにはこうした錯視を活用する文化があり、その一つが化粧である。小顔に見えたり、目が大きく見えたりすることに、錯視が利用されている[1]。

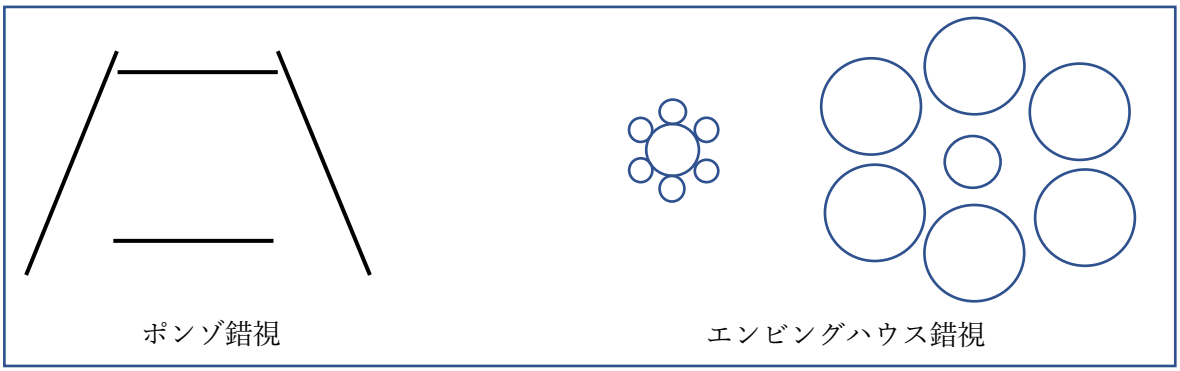


図 1　ポンゾ錯視とエンビングハウス錯視の例

これまでに多くの錯視の例が見つかっているが、その効果の定量的研究や、メカニズムの理論的研究は発展途上である。本研究では、ミュラー・リヤー(ML)錯視について、主観的感覚を定量的に測定するための実験を PsychoPy(サイコパイ)[2]を用いて作成した。

2.ミュラー・リヤー錯視

ミュラー・リヤー錯視とは物理的に同じ長さの 2 本の線分を異なる長さとして知覚する現象である。図 2 の線分 a と b は同じ長さであるが、線分 a は内向きに矢羽が付けられた内向図形、線分 b は外向きに矢羽が付けられた外向図形となっている。(これらを ML 図形と呼ぶ。)両者を比較すると、線分 a よりも線分 b の方が長いと知覚する。このような錯視がミュラー・リヤー錯視であり、その錯視の度合いを ML 錯視量と呼ぶ。

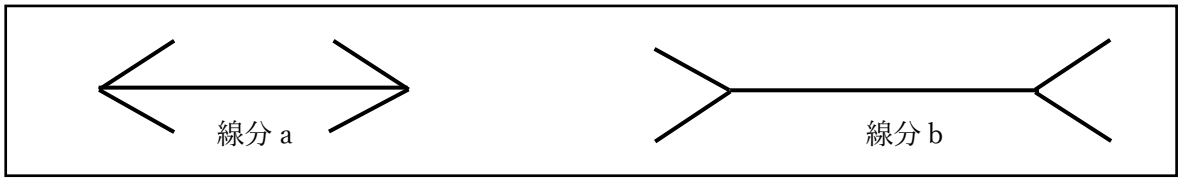


図 2　ミュラー・リヤー錯視の例

3.PsychoPy による錯視量の測定実験

PsychoPy は神経科学や心理学の実験構築用のアプリケーションであり、Python を用いたプログラミングにより、様々な実験を作成・実行することができる[2]。今回作成した実験は以下の 3 つである。

図 3　Psychopy の起動時の画面

1）直線と ML 図形の比較による ML 錯視量の測定

画面に直線と、ML 図形を表示する。被験者には直線の長さを矢印キーを操作し、左右の直線の長さが等しくなるように調整してもらう。調整した度合いを測定することで、矢羽の角度が錯視に与える影響を計測する。

図 4　ML 図形と直線の比較

2）内向図形と外向図形の比較による ML 錯視量の測定

画面に外向図形と内向図形を表示し、被験者は右側の図形を矢印キーで操作し、左右の直線が同じ大きさになるように調整してもらう。調整した度合いを測定することで、2 つの矢羽の角度が錯視に与える影響を計測する。

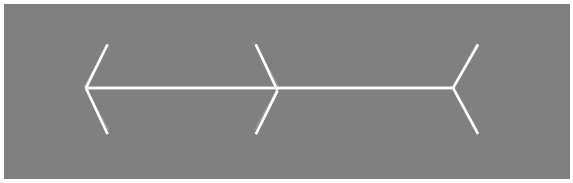


図 5　内向図形と外向図形の比較

3）視覚と触覚を利用した ML 錯視量の測定

画面に ML 図形を表示し、被験者にマウスを用いて線分の長さを実際になぞってもらい、長さを記憶してもらう。その後、図形を非表示にし、線分の端点に表示されている十字架から線分の長さの分だけマウスを引っ張ってもらう。その長さと元の線分の長さを比較することで、ML 図形が視覚と触覚の両方に与える影響を評価する[3]。

図 6　マウスを使用した ML 錯視の錯視実験

参考文献

[1]森川　和則「化粧による顔の心理効果:顔錯視研究の観点から」 映像情報メディア学会誌 Vol69,p.842-847(2015)

[2]PsychoPy3 Now running studies online　https://www.psychopy.org

[3]伊藤　尚枝「触覚のミュラー・リヤー錯視における鋭角の影響」人間関係学研究：社会学社会心理学人間福祉学：大妻女子大学人間関係学部紀要　Vol21,p.119-127(2019)

ロトカ・ヴォルテラ方程式の安定性解析

基礎物理学研究室
1724055 古田　詠之
指導教員　堀越　篤史

1.緒言

第一次世界大戦後、アドリア海の漁獲量にサメなどの大型肉食魚が占める割合が戦前よりも高くなっていることが分かった。これは、戦争による大規模漁業の停止が、捕食者である大型肉食魚に有利に、被食者である小型の魚にとって不利に働いた事を意味している。このメカニズムを説明するためにヴォルテラによって導入されたのが、ロトカ・ヴォルテラ方程式と呼ばれる微分方程式である。この方程式は個体数の増減の様子がパラメータや初期値によってどのように変化するか示すことができ、今日まで様々なモデル（状況設定）が提案されている[1-3]。

本研究では、ロトカ・ヴォルテラ方程式の3つのモデル(競争モデル、捕食者-被食者モデル、内部競争のある捕食者-被食者モデル)について安定性解析を行う。

2.競争モデル

限られた餌を2種の動物で奪い合うモデルであり、例えばウサギとヒツジの個体数をそれぞれx、yとし、環境収容力をk_1、k_2 内的増加率をr_1、r_2 競争係数をα_1、α_2とおくと、ウサギとヒツジについてのロトカ・ヴォルテラ方程式は次のように表される[1]。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{r_1}{k_1}x(k_1 - x - \alpha_1 y) \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{r_2}{k_2}y(k_2 - y - \alpha_2 x) \end{aligned} \qquad (1)$$

パラメータを$k_1 = 3, r_1 = 3, \alpha_1 = 2, k_2 = 2, r_2 = 2, \alpha_2 = 1$と選ぶと、相空間には4つの固定点が存在する(図1)。図中の黒点が固定点であり、それぞれの固定点でヤコビ行列を評価することで固定点周りでの安定性を議論できる。(0,0)は不安定固定点であり、近くの軌道は固定点から離れていき、(3,0)と(0,2)は安定固定点であり、近くの軌道は固定点に吸い込まれていく。(1,1)はサドル点と呼ばれ、安定な方向と不安定な方向がある。図には方程式(1)を4次のルンゲクッタ法で数値的に解いて得られた解軌道も示した。

3.捕食者-被食者モデル

被食者が捕食者に一方的に食べられるモデルであり、例えばウサギとキツネの個体数をそれぞれxとyとし、ウサギの内的自然増加率をr_1、捕食による減少率をa_1とし、キツネの内的自然減少率をr_2、捕食による増加率をa_2とするとロトカ・ヴォルテラ方程式は次のようになる[2]。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= r_1 x - a_1 xy \\ \frac{dy}{dt} &= -r_2 y + a_2 xy \end{aligned} \qquad (2)$$

ここで、捕食者が増えるほど被食者は捕食されやすくなるので、捕食による減少率は捕食者の個体数に比例して$a_1 xy$となり、被食者が増えるほど捕食者は簡単に捕食出来るようになるため、捕食者の捕食による増加率は被食者の個体数に比例して$a_2 xy$となっている。全てのパラメータを$r_1, r_2, a_1, a_2 = 1$と選ぶと相空間には2つの固定点が存在する(図2)。(0,0)には安定な方向と不安定な方向がある。(1,1)はリアプノフ安定と呼ばれ、解軌道は初期値に依存した周期軌道になり、固定点に吸い込まれ続けることも固定点から離れ続けることもない。実際、方程式(2)を4次のルンゲクッタ法で数値的に解くと、(1,1)のまわりの円状の軌道を確認できる。

4.内部競争のある捕食者-被食者モデル

式(2)は、捕食者が存在しないとき被食者が指数関数的に成長するという点で現実的ではない。そこで捕食者-被食者モデルを拡張し、それぞれの種の内部で餌の奪い合いなどの内部競争があるモデルを考える[3]。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= r_1 x - a_1 xy - b_1 x \\ \frac{dy}{dt} &= -r_2 y + a_2 xy - b_2 y \end{aligned} \qquad (3)$$

このモデルは単純な捕食者-被食者モデルのような周期解を持たず、以下の2つのパターンで固定点に収束する。

① $a_2 r_1 - b_1 r_2 \leq 0$ のとき

捕食者は絶滅する。一方、被食者は環境収容力 r_1/b_1 に収束する。例えばパラメータを $r_1 = 5, r_2 = 6, a_1 = 2$ $a_2 = 1, b_1 = 2, b_2 = 3$ と選ぶと、相空間には4つの固定点が存在する(図3)。($\frac{5}{2}$,0)が唯一の安定固定点であり、$y = 0$ は捕食者が絶滅することを意味している。他の固定点については、(0,−2)は不安定固定点であり、($\frac{27}{8}$,− $\frac{7}{8}$)と(0,0)には安定な方向と不安定な方向がある。

② $a_2 r_1 - b_1 r_2 > 0$ のとき

捕食者と被食者は共存する。例えばパラメータを $r_1 = 5, r_2 = 1, a_1 = 2, a_2 = 2, b_1 = 1, b_2 = 3$ と選ぶと、相空間には4つの固定点が存在する(図4) 。($\frac{17}{7}, \frac{9}{7}$)が唯一の安定固定点であり、両者が共存することを意味する。また(0,− $\frac{1}{3}$)は不安定固定点であり、(0,0)と(5,0)には安定な方向と不安定な方向がある。

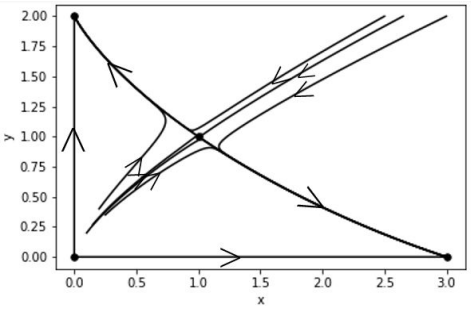


図1.競争モデル

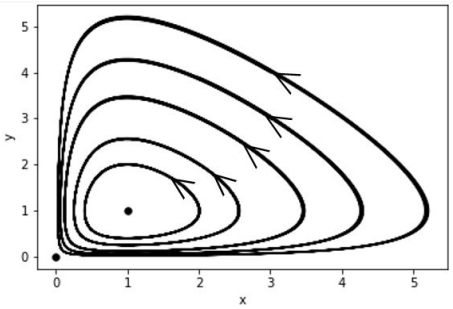


図2.捕食者-被食者モデル

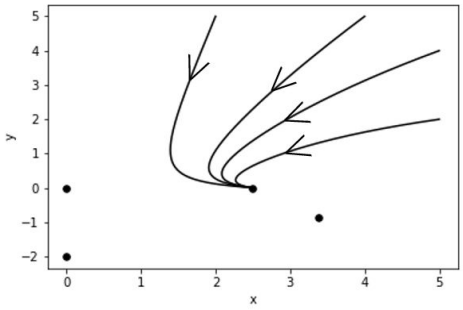


図3.内部競争のある捕食者-被食者モデル
$a_2 r_1 - b_1 r_2 \leq 0$のとき

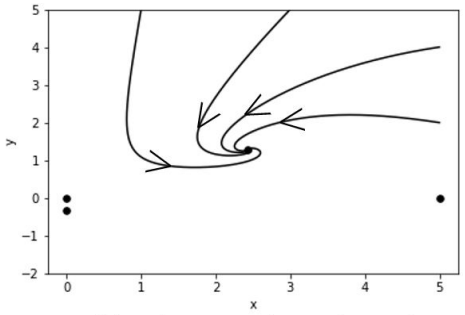


図4.内部競争のある捕食者-被食者モデル
$a_2 r_1 - b_1 r_2 > 0$のとき

4.参考文献

[1]スティーブン・H・ストロガッツ「ストロガッツ　非線形ダイナミクスとカオス」丸善出版(2015).
[2]金子邦彦 澤井哲 高木拓明「細胞の理論生物学:ダイナミクスの視点から」東京大学出版会(2020).
[3]金澤尚史 「ポピュレーションダイナミクスの安定性解析」計測と制御2016年4月号 p356～361.

タカハトゲームを利用したコロナ下の利得ゲーム

微分幾何学研究室
１７２４０１３　勝又芽依
指導教員　橋本義武　教授

１.ゲーム理論とは
ゲーム理論は人間行動をモデル化して数学的に厳密に研究する学問である。
１９４４年に発表された、数学者ジョン・フォン・ノイマンと経済学者オスカー・モルゲンシュテルンによる「ゲーム理論と経済行動」が出発点とされている。

２.ESSとは
計算した利得に従って繁殖の成功度が決まり、他より高い利得を持つ行動が次世代により高い割合を占めるという動態を考える。その結果の戦略を進化的に安定な戦略（evolutionarily stable strategy,ESSと略す）と呼ぶ。
例えば、ある戦略Iを持つ個体だけからなる集団Aがあるとする。この集団に加えて、ある戦略Rを持つ個体だけからなる集団Bも存在するとしよう。そのとき、戦略Rを持つどの個体が集団Aに侵入しても侵入に成功しない場合、IをこのIとRからなる集合内での進化的に安定な戦略、つまりESSであると言う。

３.タカ・ハトゲームとは
タカ・ハトゲームとは、イギリスの生物学者であるジョン・メイナード＝スミスが動物たちの戦略として導入したゲーム理論である。
まず、プレイヤーは受動的、攻撃的の2種類の性格特性を持つ。それを鳥で例えて、二羽の鳥がナワバリや餌争いで競争する際に、「どちらかが傷つくまで戦いを続けるタカ」と、もう一つはツノなどを突き合わせるだけで戦いがエスカレートしたら戦いをやめるハト」に分ける。
ここでいう「タカ戦略」は、持っている武器を有効に用いて相手を倒そうとする。一方の「ハト戦略」は、戦いがエスカレートしたら逃げ出す。

４.タカ・ハトゲーム実例
表２.コロナ下におけるタカハトゲーム（r＜R)

		相手	
		ハト	タカ
自分	ハト	2,2	1,3
	タカ	3,1	0,0

表１は、タカハトゲームの利得表である。表の通り、双方にとっての平和的解決は、双方がハト戦略を取ったときである。しかし、自分の利得のみを考えると自分がタカ戦略、相手がハト戦略を取った場合が一番有利な状況となる。もし双方がタカ戦略をとるならば、最悪の結果となる。

５.タカハトゲームの利用

以上のタカハトゲームを利用して、昨今の話題・課題となっている新型コロナウイルス感染症（COVID-19）流行下の二人暮らしの家でのコロナ感染ストレスゲームを展開しよう。

二人暮らしをするプレイヤーをAとBとする。（以後プレイヤーA・プレイヤーBと記述）

表２.コロナ下におけるタカハトゲーム（r＜R)

		相手	
		自粛	外出
自分	自粛	0、0	r、R
	外出	R,r	R+r,R+r

ここでのタカ戦略は外出、ハト戦略は自粛である。自分が外出してコロナウイルスに感染するストレスをR、相手が外出することによって自身に感染する恐れがあるストレスをrとすると表２となる。このとき双方の平和的解決はお互いに自粛することと明確である。一方双方にとって最もストレスが大きいのは双方が外出した場合となる。

しかしこれは、単純なゲームである。人間の心はもっと複雑な感情を持ち、十人十色と言う言葉があるように個人によってその感情は大きく変わる。

ここで簡単な性格特性を割り出すフローチャートを作成し、ストレス表の数値を変えることによって個人のストレスゲームが完成すると言える。

例を出せば、表２に外出することへの楽しさE、自粛を強いられるストレスS、自分は自粛しているのに相手は外出していることへの嫉妬J、相手は自粛しているのに自分は外出しているという罪悪感Gなどの人間ならではの感情の要素を加える。

６.考察

罪悪感が大きいか嫉妬心が大きいかは性格によって変わるため、コロナ下でのストレスゲームには全員等しいゲームではないことが分かる。

しかしどの場合もESSとなるのは双方自粛した場合である。

参考文献

小波秀雄「進化をプログラムする一進化的に安定な戦略」２００８年７月４日
ケン・ビンモア　「ゲーム理論」岩波書店　p１６０,１６１
コンラート・ローレンツ　「ソロモンの指環　動物行動学入門」早川書房
デイヴィット・P・パラジュ　ゲーム理論の愉しみ方一得するための生き残り戦術一河出書房新社
岡田章「新版　ゲーム理論・入門一人間社会の理解のためにー」有斐閣アルマP４８
巌佐庸「数理生物学入門一生物社会のダイナミックスを探るー」HBJ出版局　第１４章p２０６～２１５

金平糖における角の形態形成についての数理モデル

微分幾何学研究室　1724020　久間木薫是

指導教員　橋本義武 教授

1　背景及び目標

金平糖は, 我々が知っている砂糖菓子の 1 つであり, その「角」がとても印象的である. この金平糖について, 誰しもが抱くであろう疑問として「金平糖において特徴的である角がどのようなメカニズムで成長し形成されていくのか？」という点である. この角の大きさは, 結晶粒子の成長と共に変化する. 金平糖の大きな角を明快に説明する事の出来る数理モデル及び理論は, 未だ完璧なものは提案及び構築されていないが, 最も相応しいとされている数理モデルは存在する. 今回は, その先行研究における数理モデルを構築し, そのモデル方程式の精度が如何なものなのかについて数値計算を用いてシミュレーションを再現し, 議論していく.

2　数理モデル

金平糖の角の形成について界面運動方程式の観点からアプローチし, 平坦な結晶が均一な厚さ w の流体の薄膜で覆われている状況を想定し, 気液界面の高さ h の時間発展における現象の数理モデルを構築する. ショ糖溶液で湿った種粒子に他の種粒子が接触すると, 粘性流体であるショ糖溶液の一部がその接触した部分に輸送されていく. 今回はショ糖溶液の濃度は飽和状態に近いものを用いたので, 界面から水分が蒸発して結晶化が素早く起こると考えられる. その湿潤層が十分に薄い場合, 固液界面は気液界面に従う.

この数理モデルについて説明する上でまずは, (1) 式を用いるにあたって仮定をする必要がある. まず本題に入る前に, この (1) 式がどのようにして表現されたのかにおける導出過程について軽く触れる. p と u の Navier-Stokes 方程式に一定の大気圧 P_0 と表面張力 σ から表される局所的な圧力である $P = P_0 + \sigma H$ を代入し, その Navier-Stokes 方程式を実際に解き, 粘性係数を ∞ に取り高粘度限界を考え, それにより得られた近似方程式を計算することにより, 界面に沿って均一な流速 u が求まる.

$$u = \frac{\sigma}{\eta}\nabla H\left(\frac{z^2}{2} - wz\right) \tag{1}$$

この (1) の式である流速 u は, 3 次元空間に時間経過を考慮した 4 変数関数 $u = U(x, y, z, t)$ であり, 3 次元 Navier-Stokes 方程式の解でもある. また, この式に用いられている η は粘性度数, σ は表面張力, さらに $H = H(x, y, t)$ という 3 変数関数であり, その関数 H を用いて表される ∇H は空間勾配を表している. この (1) 式より, z 方向に平均を取ると, 境界面に沿った流体の動きは次のように表せる.

$$\overline{u} = \frac{1}{w}\int_0^w u(z)dz = -\frac{w^2\sigma}{3\eta}\nabla H \tag{2}$$

簡潔に表現するために, ショ糖溶液により湿った金平糖の結晶における表面成長を平面的に考えることにする. 流体の保存から, 気液界面の高さ h は $\partial h/\partial t + \nabla\cdot(wu) = 0$ に従うとされている. (2) 式を用いると, (3) のような式になる.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{w^3\sigma}{3\eta}\nabla^2 H \tag{3}$$

詳細は不明だが, この (3) 式を p と u の Navier-Stokes 方程式の自由境界値問題に全て代入すると, 次の (4) 式のようになる.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -c_2\nabla^2 h - c_4\nabla^4 h + v_0\left(1 + \frac{1}{2}(\nabla h)^2\right) + F \tag{4}$$

この c_2, c_4 は拡散係数, F は空間と時間に依存するショ糖溶液のやり取りを表している. この (4) の方程式は, 外力に相当するショ糖溶液のやり取りである F の要素を考慮した蔵本-Sivashinsky 方程式である. この蔵本-Sivashinsky 方程式は, 一般的に Navier-Stokes 方程式の自由境界値問題に自然に現れる方程式として有名である. 以上より, このモデル方程式が金平糖の角の形成を表すものとして 1 番ふさわしいと現時点で考えられている.

3　数値シミュレーション及び考察

前節で議論して構築した数理モデルをもとに, 実際に (4) の金平糖の角の形態形成を説明するのに最もふさわしいモデル方程式である蔵本-Sivashinsky 方程式を周期境界条件のもとで数値シミュレーションをした結果, 以下の図 1 のようになった.

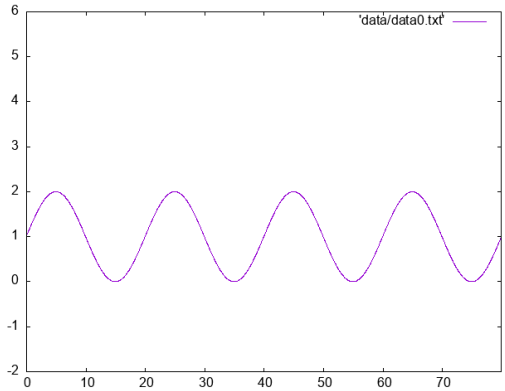


図 1: 金平糖の角の形態形成におけるモデル方程式である (4) の蔵本-Sivashinsky 方程式においての数値シミュレーション結果

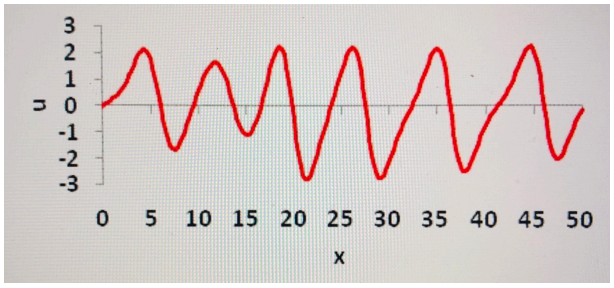


図 2: 蔵本-Sivashinsky 方程式の正確な数値シミュレーション結果

数値シミュレーションの結果として, この図 1 のグラフはシミュレーション失敗である. 本来なら, 図 2 のように 1 次元の右肩上がりに動くシンプルな形で現れ, 時間が経つに連れてだんだん乱れていくはずなのである. 今回数値シミュレーションを実際に行った結果, 図 1 のようなグラフになってしまった原因として次のことが考えられる. 1 つ目は, この蔵本-Sivashinsky 方程式を離散化し差分方程式を導出し, それをもとにプログラムを組み立てていく際に, 時間の刻み幅を大きな値で取ってしまったのではないかということである. 2 つ目は, この (4) の式は空間と時間に依存するショ糖溶液のやり取り F(外力) を考慮した蔵本-Sivashinsky 方程式であり, この外力 F の数値の設定を誤ってしまったのではないかと考えられる.

4　結論

今回, 金平糖の角の形態形成についての数理モデルを構築し, そのモデル方程式をもとに数値シミュレーションを行ったが, 正確な結果は得られなかった. 前節の考察をもとにプログラムを考え直し, 同時に他のパラメータである c_2 や c_4 などの拡散係数についての値の設定にも取り掛かる必要があると考えられる.

参考文献

[1] 早川 美徳, 酒井 勇, 『金平糖の成長過程とパターン選択』, 固体物理 42 巻 305-312 アグネ技術センター, 2007

[2] Hayakawa Y., Sakai I., "Shape Selection of Kompeitoh", Journal of the Physical Society of Japan vol.75, No. 10, October, 2006

[3] 早川 美徳, 『金平糖の形成ダイナミクス』, 日本物理学会誌 64 巻 753-757, 2009

[4] 今井 功, 『流体力学 (前編)』, 裳華房, 2018

ホップ写像の単体写像としての理解とその応用について

位相幾何学研究室
1724032 善波佑斗
指導教員　中井洋史　准教授

1　はじめに

球面はトポロジーの研究において最も基本的な対象として知られています。例えば、図形を胞対複体として捉える場合は球面 S^n が基本構成要素であり、それらの間の連続写像は重要な研究対象です。特に「２つの球面の間の連続写像で本質的に異なるものがどれ程あるか」はトポロジーにおける基本的問題です。例えば、円周 S^1 の自己写像の連続変形による同値類は回転数を考えることにより整数と一対一に対応します。一般に、S^n の自己写像は任意の自然数nで整数と一対一に対応することが知られています。

球面の間の連続写像で、自己写像以外で最初に発見されたものはドイツの数学者H.ホップが発見([1], 1931年)したホップ写像であり、ホップ写像は現在では数学の様々な分野や理論物理において重要な研究対象となっています。

このようなホップ写像を理解する最近の試みの一つが、Madahar-Sarkariaによる単体写像としての捉え方です。本卒業研究では彼らの論文([3],2000年)および関連するトポロジーにおける現代までの諸結果の理解を目的とし、可能な応用を考察しました。

2　単体写像としてのホップ写像の構成

一般に、閉多様体の間の可微分写像は単体写像として捉えられることが知られています。特に、ホップ写像 $h : S^3 \to S^2$ は、定義域を $\mathbb{C}^2$内の単位球面

$$S^3 = \{(z_1, z_2) \mid z_1, z_2 \in \mathbb{C}, \quad |z_1|^2 + |z_2|^2 = 1\}$$

として捉え、値域を複素平面の１点コンパクト化として捉えることにより、対応 $(z_1, z_2) \mapsto z_1/z_2$ として定義されます。定義域と値域を適当に単体分割してホップ写像を単体写像 $\eta : S^3_m \to S^2_n$ として捉えるとき、次のことが問題となります。

Q.　単体写像 η の定義域と値域の頂点数mとnは、どこまで小さく出来るか？

この疑問に対し $(m, n) = (12, 4)$ と答えたのがMadahar-Sarkariaの論文[3]の主結果でした。彼らは、定義域の S^3 を共通の境界 T^2 をもつ２つのsolidトーラス M^3 と N^3

に、また値域の S^2 を共通の境界 S^1 をもつ２つの円板 A,B にそれぞれ分解し、２つの連続写像

$$\varphi_1 : M^3 \to A, \qquad \varphi_2 : N^3 \to B$$

をそれぞれ単体写像として表示することで単体写像 $\eta : S^3_{12} \to S^2_4$ を構成しました。

さらに、彼らはKühnel-Banchoffが論文[2]で示した２次元複素射影空間 $\mathbb{C}P^2$の単体分割への応用についても言及しています。

3　主結果と今後の展望

H.ホップが構成した球面の間の連続写像は、他にも $\nu : S^7 \to S^4$, $\sigma : S^{15} \to S^8$ のようなものが知られています。ホップ写像 $h : S^3 \to S^2$ が複素数を用いて構成された写像だったのに対し ν は４元数で、また σ は８元数で、それぞれ h と同様の考え方で得られる写像です。

本卒業研究では、 Madahar-Sarkariaの結果を拡張して次を示しました。

定理.　H.ホップが構成した連続写像 h, ν, σ を単体写像 $S^{4i-1}_m \to S^{2i}_n$ $(i = 1, 2, 3)$ として捉えるとき、不等式 $m \geq (2i+1)(2i+2)$ かつ $n \geq 2i+2$ が成り立つ。

References

[1] H.Hopf, Über die Abbildungen der dreidimensionalen Sphäre auf die Kugelfläche. *Math. Ann.* 104 (1931), no. 1, 637-665.

[2] W.Kühnel and T.F.Banchoff, The 9-vertex complex projective plane. *Math. Intelligencer* 5 (1983), no. 3, 11–22.

[3] K.V.Madahar and K.S.Sarkaria, A Minimal Triangulation of the Hopf Map and its Application, *Geom. Dedicata* 82 (2000), no. 1-3, 105–114.

第2種スターリング数の素数を法とする合同に表れる規則性について

1724037 武田 創佑

整数論研究室　指導教員 服部新准教授

本論では第 2 種スターリング数の素数を法とする合同に表れる規則性について論じる．第 2 種スターリング数 $\left\{ {n \atop m} \right\}$ とは，n 元集合を m 個の空でない部分集合に分ける方法の数である．例えば，4 元集合である {1,2,3,4} を 2 個の集合に分ける方法の数は，$\{1\} \cup \{2,3,4\}$, $\{2\} \cup \{1,3,4\}$, $\{3\} \cup \{1,2,4\}$, $\{4\} \cup \{1,2,3\}$, $\{1,2\} \cup \{3,4\}$, $\{1,3\} \cup \{2,4\}$, $\{1,4\} \cup \{2,3\}$ の 7 つであるため，$\left\{ {4 \atop 2} \right\} = 7$ となる．

第 2 種スターリング数は任意の整数 n,m に対して以下の漸化式が成り立つ．

$$\text{初期値} \left\{ {0 \atop 0} \right\} = 1, \left\{ {n \atop 0} \right\} = \left\{ {0 \atop m} \right\} = 0 \ (n, m \neq 0) \tag{1}$$

$$\left\{ {n+1 \atop m} \right\} = \left\{ {n \atop m-1} \right\} + m \left\{ {n \atop m} \right\} \tag{2}$$

さらに以下の等式が成り立つ．

$$\left\{ {n \atop m} \right\} = \frac{(-1)^m}{m!} \sum_{l=0}^{m} (-1)^l {}_m C_l l^n \tag{3}$$

$$\sum_{n=m}^{\infty} \left\{ {n \atop m} \right\} x^n = \frac{x^m}{(1-x)(1-2x)\cdots(1-mx)} \tag{4}$$

この漸化式を用いて素数を法とする表を作ったところ以下のような表となった．この表は 7 を法としている．

私の研究の目的は，このような形が出現した理由を解明することである．

この表に対する研究の成果は以下である．

命題 1. p を 3 以上の素数とする．このとき次の式が成り立つ．

$$\left\{ {p \atop 2} \right\} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Proof. 漸化式より,$a_{n,m} = \left\{ {n \atop m} \right\}$ とすると，二項間漸化式

$$a_{n+1,2} = 1 + 2a_{n,2} \quad (n \geq 1)$$

が得られる．これを解くと

$$\left\{ {n \atop 2} \right\} = 2^{n-1} - 1 \quad (n \geq 1)$$

となる．$n = p$ とすると，仮定より p と 2 は互いに素であるため，フェルマーの小定理より従う． □

命題 2. $m, n \geq 1$ に対し,

$$\sum_{k=0}^{m} \frac{1}{k!} \left\{ {n \atop m-k} \right\} = \frac{m^{n-1}}{(m-1)!}$$

Proof. 右辺を $a_{n,m}$，左辺を $b_{n,m}$ とすると,，両辺とも初期値は

$$a_{1,m} = b_{1,m} = \frac{1}{(m-1)!}$$

漸化式も

$$a_{n,m} = ma_{n-1,m}, \quad b_{n,m} = mb_{n-1,m}$$

となるため従う． □

命題 3. $2 \leq m < p$ のとき,

$$\left\{ {p \atop m} \right\} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Proof. これは命題 1 と命題 2 を用いて，帰納法で示せる． □

命題 4. $(r-1)p + 1 < m < rp$，$k \geq 0$ を整数とすると,

$$\left\{ {rp + k(p-1) \atop m} \right\} \equiv 0 \pmod{p}.$$

Proof. $m = (r-1)p + c$ と置くと $2 \leqq c \leqq p-1$ である．

また (4) 式から，左辺はべき級数

$$\frac{1}{(1-x)(1-2x)\cdots(1-mx)}$$

における $x^{k(p-1)+(p-c)}$ の係数と一致する．これを解くと，$x^{k(p-1)+(p-c)}$ の係数は $0 \pmod{p}$ であることがわかる．

このことから，図の最も小さい三角形が連続することがわかった． □

References

[1] 荒川恒男・伊吹山知義・金子昌信, ベルヌーイ数とゼータ関数, 牧野書店

デジタルカメラによる紫外線写真撮影法

分析化学研究室
1724018　工藤滉大
指導教員：吉田真史

1. 緒言

一般に紫外線写真とは、約 360nm の近紫外線波長の光で撮影する写真である。肉眼は、約 400nm から 700nm の光を網膜の細胞で感じて脳で判断している。そのため、紫外線を人間が感じることは不可能である。しかし、人間などの哺乳類と違って虫や鳥は紫外線を見ることが可能である。人間の目の網膜には青、緑、赤の 3 色を感じる視物質があるのに対し、ミツバチには 1 つの個眼に紫外線、青、緑の 3 種類の色受容細胞がある。アゲハ蝶には紫外線、紫、青、緑、赤、広帯域の 6 種類の色受容細胞があり、そのうち紫外線、青、緑、赤の 4 種が色覚に使われている[1]。このことから、昆虫から見た花の像などは、私たちから見たそれとは異なっていると思われる。また、紫外線を見ることは紫外線が見える多くの生き物にとって餌をとる、求愛行動、個体識別など多くの点で戦略上有利であるからその能力を維持してきたと考えられている。紫外線を利用しているのは昆虫や鳥、そして植物も例外ではない。植物は紫外線を利用して蜜のありかを花粉の運び屋である虫に教えたり、鳥に果実を提供し種子を運んでもらっている[2]。この紫外線を人間が見るためには特別な方法が必要になる。その一つがデジタルカメラを利用した紫外線写真撮影である。本研究ではこの撮影法を用いて、紫外線の世界を覗いてみた。

2. 方法

・必要な機材

紫外線写真撮影でまず備えるのはカメラとレンズである。今回使用したのは、カメラが Nikon 1 J4、レンズが標準ズームレンズである。(図 1)

この外に色々な光から紫外線だけを通すようにするフィルターが必要になる。紫外線を通すフィルターは下の写真のように黒くなっている。(図 2)

図 1 Nikon 1 J4

図 2　紫外線透過フィルター(波長 320～385nm)
B+W 77mm UV Black Filter

・撮影方法

今回使用したレンズでは紫外線をかなりカットしてしまうため簡単には紫外線写真を撮影することが出来なかった。そのため長時間シャッターを開けておく必要があった。

1. カメラを三脚(もしくは台)に付けた。UV フィルターを付けている場合これを外した。
2. 標本などを太陽光または紫外線照射ライト（ブラックライト等)のある場所に置き、カメラをセットした。
3. まずは被写体を普通の状態で撮影し、ここでしっかりピントを合わせた。

4. シャッタースピードは Bulb にし、最長である 2 分に設定。ISO 感度を 400、開放 F 値を F5.6 に設定した。AF(オートフォーカスモード)から MF(マニュアルフォーカスモード)に切り替え、紫外線フィルターを取り付けて撮影した。カメラのファインダからは何も見えないため、3 のステップでピントをしっかりと合わせておく必要があった。

3. 観察結果と考察

撮影された写真を Photoshop で開き、明るさ、コントラストを調節。そうして出来上がった画像が以下の画像である。

図 3　通常写真　　図 4　紫外線写真(野外)　2 分 F5.6 ISO400

左からモンシロチョウ(Pieris rapae)、モンキチョウ(Colias erate)

キタキチョウ(Eurema hecabe)

・モンシロチョウ

雄は紫外線を吸収し黒くなり、雌は紫外線を反射して白くなっていることが確認できた。この違いを利用してモンシロチョウは容易に雌雄を見極めていると考えられる。

図 5　通常写真　　図 6　紫外線写真　2 分 F5.6 ISO400

・カーネーション(Dianthus caryophyllus)

図 6 の通り紫外線に対する強い反射が見られた。花の中心部が吸収して暗くなっており、紫外線を利用して虫に蜜のありかを知らせていると考えられる。

4. 今後の展望

モンシロチョウの雄が可視光下では白色だったのに対し、紫外線下では吸収し黒くなる。白い花も同様、紫外線を吸収することが知られている。だが、雌が紫外線下では反射したことを踏まえると、もしかしたら反射する白い花も存在するのではないか？この点については今後も研究を続ける必要がある。

5. 参考文献

【1】蟻川　謙太郎(2008)　視細胞間結合による波長情報処理と色覚

【2】浅間　茂(2019)　虫や鳥が見ている世界―紫外線写真が明かす生存戦略

植物の光合成から見る二酸化炭素量の増減

分析科学研究室
1724051　東田 大輝
指導教員:吉田真史

1.緒言

光合成とは太陽などから発せられる光を用い、水を分解、酸素を発生させ、二酸化炭素（以後 CO_2）を有機物に変換すると言う現象[1]である。そしてこの現象は中学校学習指導要領[2]に記載されているように、小・中学校理科教育において非常に重要且つ比較的取り上げやすい題材と言える。そして、植物が光合成をしている事を確認するための手法として BTB 溶液等の指示薬を用いた光合成の確認、ヨウ素デンプン反応を利用した光合成産物の確認が主に挙げられる。しかし、その過程で二酸化炭素量がどの程度変化するかまでは測定されないことがある。

また外的要因による CO_2 の変化の影響を少なくする為に土の代用として容器に水を張った容器に植物を入れ測定した。この固形培地を必要としない栽培方法は水耕栽培と呼ばれ、農業のみならず園芸の分野においても利用されている。

2.実験方法

タマリュウ（*Ophiopogon japonicus*）、ノハカタカラクサ（*Tradescantia fluminensis*）を用い、それぞれの光合成量を算出する為、ガラス容器の中に水とそれぞれの植物が入ったトレー、エアーチェッカーMB-530（以下エアーチェッカー）を入れガラス板で蓋をした後、MORSEN　LED ライトを点灯した時刻を 0 分とし、容器内の CO_2 の変化を 10 分毎に二酸化炭素量、湿度、気温の値を記録し、これを 120 分間行った。

上記の作業後、ガラス板を外し、ガラス容器を 1 時間放置した後、植物を入れず水を張ったトレーのみをガラス容器に入れ上記と同じ方法で測定した。

これを 10 回行いその平均値を算出し、それぞれグラフで表した。

3.結果

タマリュウを入れたガラス容器内と水のみが入った容器内での CO2 量の変化を図 1 に、ノハカタカラクサを入れた容器内と水のみの容器との変化量を図 2 に示す。

図 1 ではライトを着けてから 10 分地点まで容器内の CO_2 量が上昇、その後は下降を続け 120 分時点では 394.5ppm まで下降しており、これは計測開始時点の 568.0ppm より 174.5ppm の減少である。一方図 2 は、計測を開始してから 120 分間の間 CO_2 量の上昇は見られず下降を続け、最終的に 192ppm まで下降していることが分かる。
水においてはどちらの計測後においても上昇し、その変化量の平均は 520ppm となった。

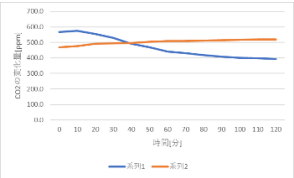


図 1.タマリュウを用いた CO2 量の変化グラフ

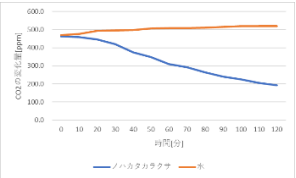


図 2.ノハカタカラクサを用いた CO2 量の変化グラフ

表 1.タマリュウの測定結果表

時間[分]	CO2量[ppm]	気温[℃]	湿度[%]
0	568.0	21.65	45.5
10	575.5	22.00	60.5
20	555.0	22.70	63.0
30	529.5	23.25	63.5
40	491.0	24.00	64.5
50	469.5	24.10	65.0
60	440.5	24.20	66.5
70	430.5	24.30	67.5
80	418.5	24.45	68.0
90	408.0	24.55	68.5
100	402.0	24.65	69.0
110	398.5	24.80	70.5
120	394.5	24.80	71.0

2.ノハカタカラクサの測定結果

時間[分]	CO_2量[ppm]	気温[℃]	湿度[%]
0	462.2	17.6	25
10	457.5	18.0	38
20	445.4	19.1	65
30	419.0	19.8	72
40	374.7	20.6	75
50	347.9	20.9	76
60	309.0	21.3	76
70	291.7	21.6	76
80	264.0	21.8	77
90	240.3	22.0	77
100	225.2	22.2	77
110	206.0	22.5	78
120	192.0	22.5	78

表 3.水の測定結果

時間[分]	CO_2量[ppm]	気温[℃]	湿度[%]
0	470.1	17.4	22
10	475.8	18.3	66
20	492.5	19.4	76
30	494.5	19.9	77
40	498.0	20.1	77
50	505.0	20.8	79
60	508.8	20.8	79
70	509.2	20.9	79
80	511.0	20.9	79
90	515.0	20.8	79
100	518.1	20.9	79
110	518.9	20.9	79
120	520.0	21.0	79

4.考察

得られたデータを比較するとノハカタカラクサがタマリュウより CO2 の減少量が大きい結果となった。この事から主に熱帯地域に生息している事の多いノハカタカラクサの方がより光合成を行っており、またタマリュウは日向、ノハカタカラクサは日陰に生息していると言う違いがあるので、より日陰に生息している植物の方が同量の光の元でもより光合成の効率が良いのではないかと考えられる。

5.結論

上記の実験だけでは容器内の CO2 の変化量に差が生じた要因が判明したとは言えない為、植物の総重量、葉のサイズなどの差違に起因する現象であるかどうかを検証する必要がある。

6.参考文献

[1] 園池 公毅 (2008) 『光合成とはなにか―生命システムを支える力』 ブルーバックス

[2]文部科学省 【理科編】中学校学習指導要領(平成 29 年 7 月)解説
https://www.mext.go.jp/content/20201203-mxt_kyoiku01-100002608_5.pdf

植物の光合成量の測定

分析化学研究室
1724031　須摩昂樹
指導教員：吉田真史

1.緒言

光合成とは、光エネルギーを用いて二酸化炭素と水を炭水化物(ブドウ糖)に変える反応のことをいう。化学式で書くと、$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$となる。植物は光合成を行うが、植物による光合成の量の違いを簡易に測定する手法はあまり普及していない。そこで、本実験ではエアチェッカーを用いて植物がどの程度光合成するかに着目した。

今回の実験では、太陽光があまり当たらない実験室でも育てられる陰性植物であるタマリュウ(Ophiopogon japonicus Gyokuryu)と等々力渓谷で採取したノハカタカラクサ(Tradescantia flminensis)を使用した。

2.実験方法

①.植木鉢に鉢底石を敷き、土を入れタマリュウを5株植えた。水槽にタマリュウの入った植木鉢とエアチェッカーを入れ、ガラス板で蓋をした。水槽の上から植物育成ライトでタマリュウを照らし、10分おきにエアチェッカーでCO_2濃度(ppm)を確認した。10分おきのエアチェッカーの確認をCO_2濃度(ppm)が安定するまで続けた。

②.①の実験を植物育成ライト2つで照らして行った。

③.①の実験を植物育成ライトなしで行った。

④.水槽にエアチェッカーを入れガラス板で蓋をして、10分おきに水槽内の状態をエアチェッカーで確認した。

⑤.④の実験を植物育成ライトで照らして行った。

⑥.植木鉢に鉢底石を敷き、土を入れた。水槽にその植木鉢とエアチェッカーを入れガラス板で蓋をした。水槽の上から植物育成ライトで照らし、10分おきに水槽内の状態をエアチェッカーで確認した。

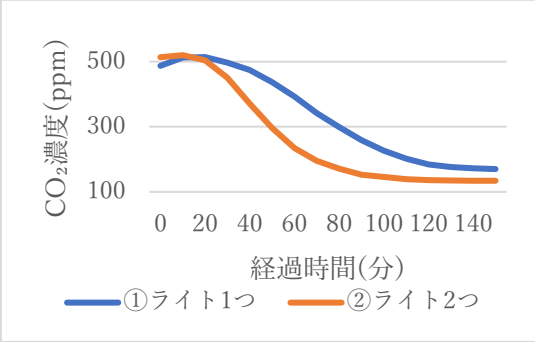
⑦.⑥の実験を植物育成ライトなしで行った。

⑧.①の実験の植物をタマリュウからノハカタカラクサに変えて行った。

3.結果

密閉した容器にタマリュウやノハカタカラクサを入れて植物育成ライトで照らしたら、光合成を行いCO_2濃度(ppm)が下がった(図1.4)。ライトの量を増やしたら、CO_2濃度の減少がはやくなった。(図.1)また、空容器と空容器に植物育成ライトを照らし時、CO_2濃度はだいたい一定を保った(図.2)。そして、タマリュウを密閉した時と土に植物育成ライトを照らした時、土だけを密閉したとき、CO_2濃度は上昇した(図.3)。

この結果を図に縦軸にCO_2濃度(ppm)、横軸を経過時間(分)に示す。



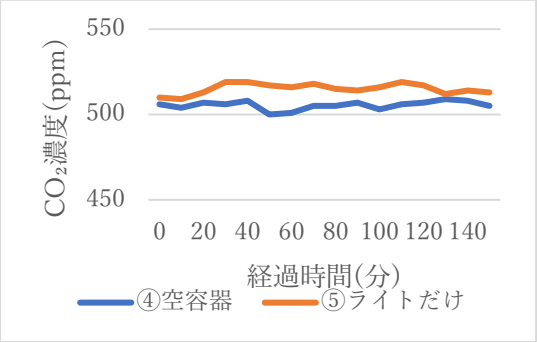
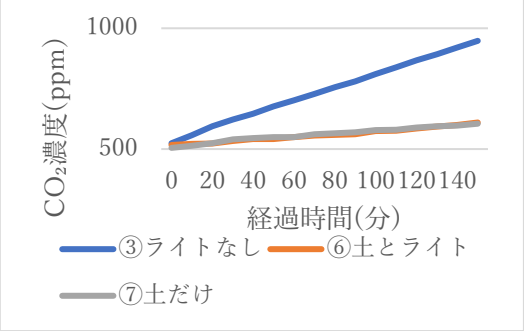


図 1.ライト 1 つと 2 つのタマリュウの光合成　図 2.空容器とそれにライトを照らした



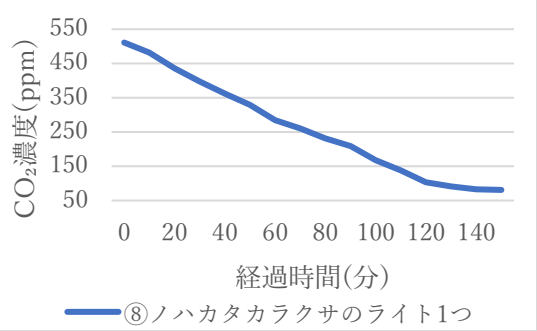


図 3.タマリュウの呼吸と土だけと土と光　図 4.ノハカタカラクサの光合成

4.考察

空容器や土だけの植木鉢に光を当てても当てなくても CO_2濃度があまり変わらないことから、植物育成ライトは単体では CO_2濃度に関係ないことが推定できる。また、土だけを密閉したときに CO_2濃度が上がり続けるのは土の中の微生物が呼吸していることが考えられる。ノハカタカラクサと違いタマリュウは植物育成ライトを当ててから少しの時間 CO_2濃度が上がるのは、タマリュウのほうが光合成しづらく最初の 10 分くらいは呼吸していると考えられる。

5.結論

植物育成ライトやエアチェッカーを用いてタマリュウもノハカタカラクサ光合成していることが確認することができた。密閉できる容器に入る小さい植物であれば、どの植物でも光合成実験は可能であるといえる。課題としては植物育成ライトの照度を調整して、どの程度の光の強さで一番植物が光合成をするのかを調べてみたい。

6.参考文献

[1]平川大輔　森川英美　後藤太一郎　光合成の授業における ICT の活用とその有効性　小学校理科 6 年小単元「生物と空気のかかわり」に注目して

[2]佐藤公行　朝倉植物生理学講座 3　光合成

[3]伊東正　そ菜の光合成特性とその栽培的意義 1 同化箱による光合成測定法の検討

[4]巽穣　堀裕　そ菜の光合成に関する研究 1 光の強さとそ菜幼植物の同化特性

南太平洋地域において伝統医療に用いられる薬用植物ムロカカの研究

分析化学研究室 1724033 高島琉衣　主査：吉田真史教授

１．背景

南太平洋地域では伝統医療において古くから薬用植物が利用されている。これらは中国や日本における民間医薬と同様で、植物が生成する有機化合物を加工、抽出して取り込み、効能を得ようとするものである。こうした伝統医療は先進国においては科学の進歩に伴い衰退していったが、島国であり、他国からの影響を受けにくかった南太平洋地域では現在も頻繁な薬用植物の利用が続いている。それ故に多くの植物は成分や薬効など科学的な検証が行われておらず、その豊富な植物資源に注目が集まっている。

南太平洋地域に位置するフィジー共和国(図 1 参照)では現在も日常的に薬用植物が利用されており、伝統医は 50 種類に及ぶ薬用植物のリストを所持している。こうした背景からフィジーでは薬草栽培も換金作物として大事な産業であるが、薬用植物として粗悪な品質のものが流通していることもある。図 2 はフィジー共和国の医療制度の関係図である。

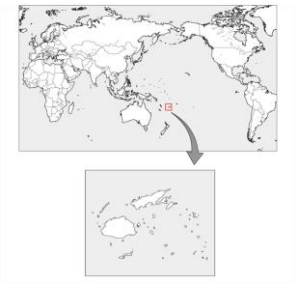


図 1　フィジー共和国

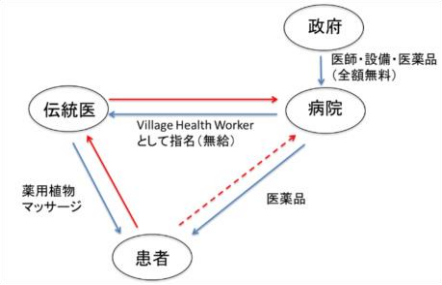


図 2　フィジー共和国の医療制度

これらの課題を解決するため、成分を記載した薬草のリストを完成させ、現地の医師、伝統医に普及させることが必要である。また、抽出方法をマニュアル化し普及させることで、現地の保健医療に貢献できると考えた。本研究では、フィジー共和国に自生する薬用植物ムロカカを研究対象として取り扱った。

２．実験対象

図 3　ムロカカ

ムロカカ（Vitex trifolia var. bicolor）

ムロカカはシソ科ハマゴウ属の植物で、日本や中国に 自生するミツバハマゴウ（Vitex trifolia var. bicolor）の亜 種である。沿岸に分布する 4mほどの低木で、白または青の花が咲く。フィジーでは葉を水で煎じて飲み、鎮痛・消炎作用や婦人科系の症状の改善を目的に利用されている。

３．実験方法

３−１．実験①(図 5 参照)

①乾燥させたムロカカ 60g 用意し、水蒸気蒸留装置(図 4 参照)を用いて成分の抽出を行った。

② ①の抽出物 A にアセトンを加え（抽出物が 100 μℓ の時アセトン 900 μℓ）、ガスクロマトグラフ質量分析計（GC-MS）を用いて分析・同定を行った。
③ ①の抽出物 B はトータルイオンクロマトグラム（TIC）を用いて分析・同定を行った。

３－２．実験②（図 6 参照）

① ムロカカの他アールグレイ、カモミール、ジャスミン、蓮花のお茶葉を煎じた。
② コンパクトイオンメータを用いて、Na^+, K^+のイオン濃度を測った。

図 4　水蒸気蒸留装置

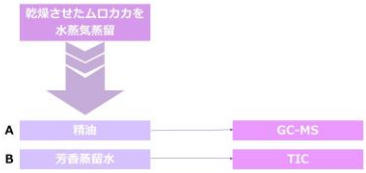


図 5　実験①のプロセス

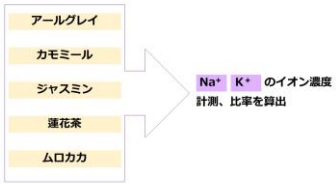


図 6　実験②のプロセス

４．結果と考察

精油を GCMS で成分分析した結果を図 7 に参照した。ピーク値が検出され、それぞれのピーク値に類似している化合物を予測できる。7.519min では類似度 96%で Eucalyptol と検出された。また 9.391min, 9.532min ともに terpineol が検出された。Eucalyptol は喘息の制御や炎症や痛みの軽減が効果として確認されており、Terpineol は植物代謝産物であり、抗菌剤や抗炎症剤としての役割をもつ。フィジー共和国では咳止めとして処方されていることから、精油から確認された Eucalyptol や terpineol が効果を示していることが考えられる。
また 5 種のお茶それぞれ Na^+と K^+のイオン濃度を比較した結果を図 8 に参照した。ムロカカは他の茶葉に比べ Na^+,K^+の含有割合が多いことが分かった。

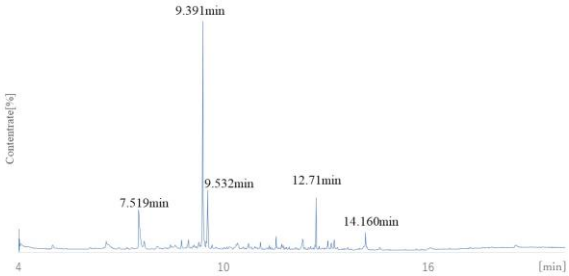


図 7　精油の GCMS

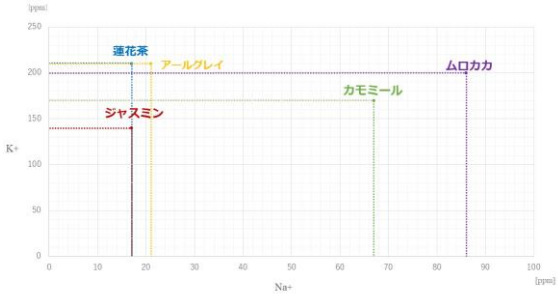


図 8　5 種の茶葉の Na^+と K^+イオン濃度

５．結論

フィジーの植物であるムロカカを IC と GC-MS を使用して様々な種類の生理活性物質を抽出、同定することができた。

６．今後の展開

・水蒸気蒸留以外の抽出方法で同様の成分分析を行う
・伝統医療に用いられており、未だ主成分の解析が進行していない他薬用植物の成分分析を行う

等々力渓谷の湧水に含まれる化学物質の調査

分析化学研究室
1724053　藤井康平
指導教員：吉田真史

1.緒言

等々力渓谷は、東京都世田谷区等々力にある、谷沢川を中心とした渓谷である。都市化が進んだ東京 23 区内では唯一の渓谷であり、周辺の等々力不動尊を含む渓谷一帯は、東京都から指定された名勝となっている。またこの渓谷は、粘土層上を流れる地下水がこの等々力渓谷で湧水となって地表に湧き出てくる。この湧水も都市化が進んだ東京都内では貴重な存在であり、東京の名湧水 57 選に選定[1]されている。この湧水は谷沢川の水質改善に寄与して[1]おり、水質は谷沢川本流に比べ見た目綺麗である。今回は、環境に影響を与えやすいとされる、湧水中の陰イオンを測定した。

2.実験方法

等々力渓谷の内の湧水 3 か所(地図上②～④)と、渓谷内の谷沢川本流 2 か所(上流側が⑤、下流側が①)から採取した。また、11/13、11/26、12/7、12/23 の計 4 日間採取した。採取したサンプルは、イオンクロマトグラフィーやデジタルパックテストで含有物質量を測定した。

図 1. 等々力渓谷の地図と採取場所①～⑤

3.結果

陰イオンクロマトグラフィーの結果、どの地点から採取した水も図 1 のようなグラフになった。また、陰イオンクロマトグラフィーの標準液と比較すると、以下の物質が含まれていることが判明した。(青線は標準液、灰線は谷沢川本流、橙線は湧水)

(a)、(b)、(c)の 3 つが河川水・湧水共に標準液と同じ物質が検出された。これらは順に Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}であった。また、これを踏まえ Cl^-、NO_3^-のデジタルパックテストを行った。結

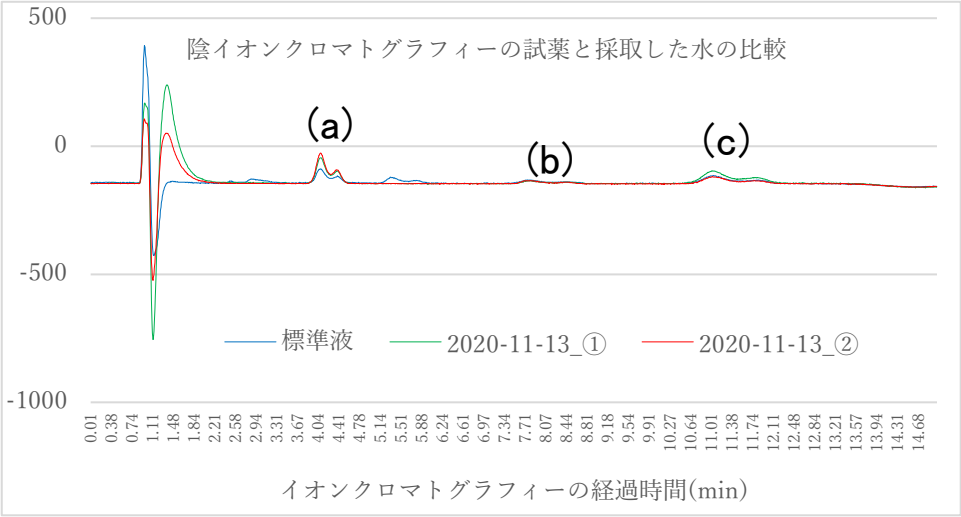


図 2. 陰イオンクロマトグラフィーの結果

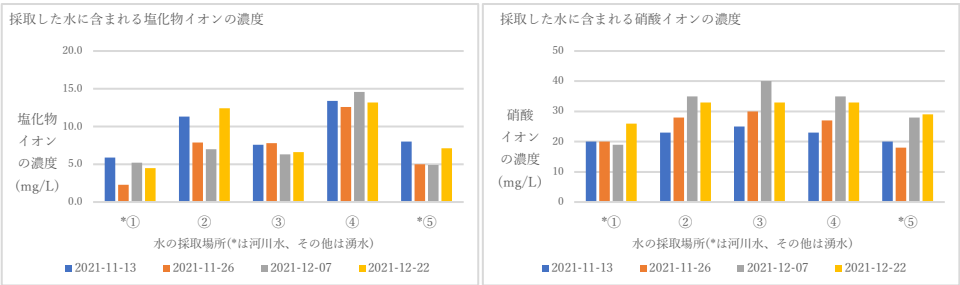


図 3. 採取場所と陰イオン濃度

4.考察

河川水に比べ湧水の陰イオンがやや高めに検出された理由として、地下水が河川水に比べ流速が低く、また大気に触れない環境であるため、地中の土壌や岩石に多く接することで、多くのイオンを含みながら地表に湧出[2]すると考えられる。特に NO_3^- に関しては、土壌中の硝化菌が窒素化合物を酸化し NO_3^- に変え、これが地下水に溶けだしたものだと考えられる。

5.結論

湧水、河川水共に含有物質は大きく変わらないが、その含有物質の割合は異なり、湧水中の陰イオンの濃度のほうが高く検出された。また、この湧水が水質改善に寄与して[1]いるとあるが、これらの陰イオンが直接的に水質を改善していると断定できるものはなった。おそらく、これは主に濁度などの別の要因だと考えられた。

6.参考文献

[1]https://www.city.setagaya.lg.jp/theme/kanko/002/003/003/d00040624_d/fil/sono2.pdf
[2]半谷高久、小倉紀雄著 第 3 版 水質調査法 丸善株式会社 1995 p70
宗宮功、津野博著 環境水質学 コロナ社 1999

中生代海棲爬虫類歯化石の内部組織に基づく分類群の判別

古生物学研究室

1724008　梅村浩平　　指導教員　中島保寿

1. 緒言

中生代(約 2 億 5190 万年前～約 6600 万年前)の海には，様々な系統の大型爬虫類が同時に繁栄していた．日本にも中生代の地層が全国に分布しており，部分的な海棲爬虫類の化石が多数発見されている(Sato et al., 2012)．特に単離した歯化石が多く，それらの形態は様々である(高橋他, 2008)．本研究では，福島県の上部白亜系から産出した海棲爬虫類の歯化石群集に基づき，当時の北西太平洋における海棲爬虫類相を復元することを目指す．但し，海棲爬虫類の歯の外部形態は食性によって頻繁に収斂進化を示し，必ずしも系統的位置を反映しない(Massare, 1987)ため，歯化石のみから分類を行うことは難しい．そこで本研究では，外部形態と比べ機能的な制約が小さいと期待される内部組織の違いから歯の同定を試みる．

2. 研究手法

本研究では, 福島県いわき市大久町(北緯 37°　10'16.9" , 東経 140°　56'26.0")に分布する双葉層群足沢層から鈴木千里氏によって発掘され，ミュージアムパーク茨城県自然博物館に寄贈された爬虫類歯化石 18 点(以降 SCRT と表す)のなかで保存状態のよい 6 点を中心に同定を試みた. 足沢層は中生代の後期白亜紀コニアシアン(約 8980 万年前～約 8630 万年前)の河川から浅瀬の海洋環境を表すと考えられており(安藤他,1995)，多くの化石が確認されている．また，比較標本として，首長竜類エラスモサウルス科(後期白亜紀マーストリヒチアン，モロッコ)，有鱗類モササウルス科(後期白亜紀マーストリヒチアン，モロッコ)，主竜類タラットスクス亜目ステネオサウルス科(中期ジュラ紀カロビアン，アメリカ)，及びテレオサウルス科(中期ジュラ紀アーレニアン，イギリス)，及び主竜類恐竜上目スピノサウルス科(後期白亜紀セノマニアン，モロッコ)を用いた．

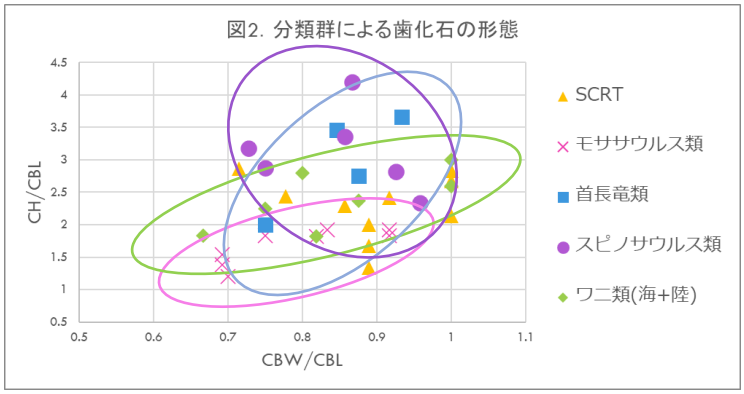
図 1.左から.SCRT-01,07,08,11,13,14

まず全標本について，各部位の計測を行った．計測法は獣脚類恐竜の単離歯の計測法(Smith et al.,2005)に基づき，歯冠基底部の厚さ比，歯冠高と基底部の長さ比を計測した．また，表面装飾の形態についても記載を行った．借用標本は非破壊で内部組織を観察する必要があるため，マイクロ CT スキャナ（XT H 225 ST, 株式会社ニコンソリューション大船事業所）を用いて撮影し，CT データブラウザ（Pixmeo OsiriX MD（v.11.0.4））を用いて観察を行った．また比較標本を用いて薄片を作り，偏光顕微鏡でエナメル質の厚みの平均，象牙細管の表層近くの密度，歯髄腔の大きさを観察した．薄片観察には偏光顕微鏡(OLYMPUS BH-2)と顕微鏡カメラ(AMScope MU1400)を用いた．

3. 結果

3-1. 各歯化石の形態記載および計測

SCRT の他に，モササウルス類，スピノサウルス類，首長竜類，ワニ類を計測した．SCRT-01,07,08,11 は細長く，SCRT-07,08,11,13,14 には条線が確認できた．SCRT-13,14 は低く，カリーナ(切縁)を持っていた．比較標本と SCRT の計測結果から，分類群が異なっても形態空間には重複する部分が多く，同定が困難であることを再確認した．具体的にモササウルス類とワニ類は判別が困難であり，SCRT 標本の同定基準として外部形態計測は適してないことが確認された．



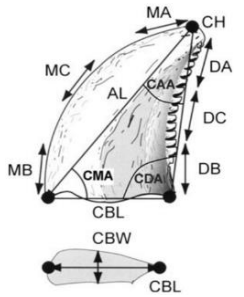


図 3. 歯の計測方法
(Smith et al., 2005)

3-2. CT スキャンと偏光顕微鏡による薄片の内部組織の観察

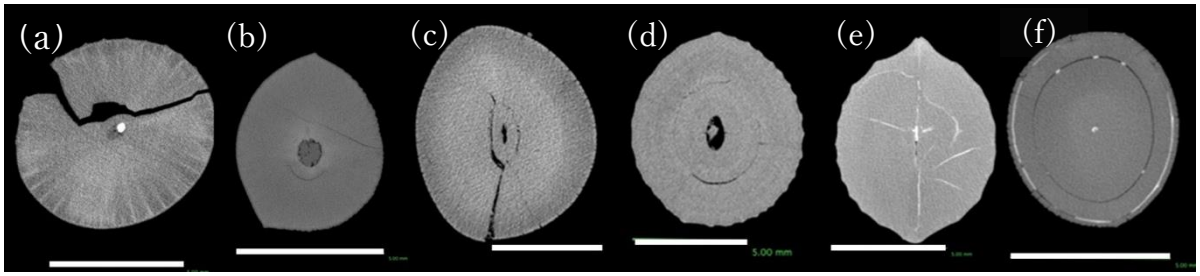


図 4. CT スキャンによる単離歯化石の横断面画像. (a): SCRT-01(種別不明),(b):SCRT-13(種別不明),(c):UT-78(エラスモサウルス科),(d): UT-05(モササウルス科),(e):UT-086(スピノサウルス科),(f):UT-58(ステネオサウルス科)の歯化石の横断面. スケールバー:5 mm

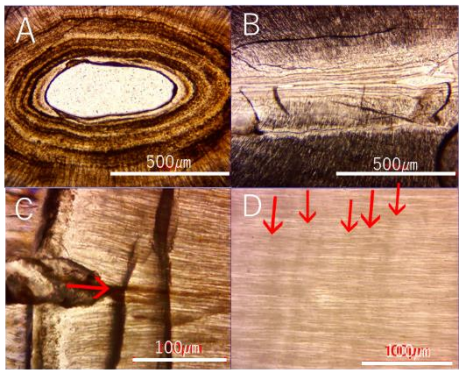


図 5. 白亜紀爬虫類歯化石薄片の偏光顕微鏡写真. A, UT-77(エラスモサウルス科)の歯髄腔; B, UT-01(モササウルス科)の歯髄腔 C, UT-77 のエナメル質裂溝直下に発達する放射状構造;D, UT-01 の同心円状の多層構造. 偏光顕微鏡による撮影. スケールバーは A,B: 500 μm C,D：100 μm.

エラスモサウルス科標本(UT-78)のエナメル層にはほぼ等間隔に裂溝が発達し，そこから歯髄腔に向かって象牙質層に放射状構造が確認できた．また，モササウルス科標本(UT-05)には象牙質に同心円状の薄層の多層構造がみられた．ステネオサウルス科標本(UT-58)には象牙質にいくつかの層が確認された．

薄片ではエラスモサウルス科標本(UT-77)の歯髄腔付近では同心円状の多層構造が確認できた．また，象牙質内に放射状構造と同程度のひびが確認できた．モササウルス科(UT-01)の多層構造は一定間隔で続いていることが確認できた．

SCRT-01,07,08,11 では放射状構造を確認できたが，多重薄層構造は確認できなかった．また SCRT-01 においては，歯髄腔の周囲だけに発達する薄層構造が確認された．一方で SCRT-13,14 においては，CT 断面画像での観察において，いくつかの成層構造が確認されるものの，放射状構造，多重薄層構造は確認されなかった．

4.考察

SCRT-01,07,08,11 の CT 断面画像に見られた放射状構造は、UT-77, 78（エラスモサウルス科）に見られた構造と類似していた．放射状構造はエナメル層の裂溝により地下水が入りこみ侵食されたことに起因すると考えられる．同様の構造が確認された SCRT01,07,08,11 は首長竜目と同定され，これは外部形態による比較結果とも矛盾がない．また，首長竜類の歯の特徴として歯髄腔周囲の薄層構造が挙げられるが，SCRT-01 には CT 画像においても同様の特徴が確認され，首長竜類として同定できる．

モササウルス科歯化石標本(UT-01,05, INM-49-041)の共通点として，象牙質内の同心円状の多重薄層の存在が挙げられるが，SCRT 標本の CT 画像においては明確には確認されなかった．SCRT-13,14 は形態からはワニ類，またはモササウルス類の両方の可能性が考えられたが，CT 断面画像での観察において多重薄層構造が確認されないことから，モササウルス類よりもワニ類・スピノサウルス類に類似していた．首長竜目の特徴だと考えられる放射状の構造や歯髄腔付近の薄層構造は確認できなかった．よって恐竜類とワニ類を含む主竜類の歯化石の可能性が高い．

以上のことから，コニアシアンの北西太平洋には首長竜目，主竜類の海棲爬虫類が共存していた可能性が高い．また，同じ礫岩層からモササウルス科の下顎化石が産出している（加藤太一私信）ため，コニアシアンの北西太平洋の海棲爬虫類相には少なくとも 3 系統の海棲爬虫類が共存していたと考えられる．

本研究の結果は予察的ながら，CT スキャンによる歯内部組織観察は，目もしくは科レベルでの判別に有効である可能性が示され，少なくとも形態や表面構造からの分類群判別を結論づけるための補助や最終的な判断に用いることができると結論づけられる．

参考文献

安藤寿男・勢司理生・大島光春・松丸哲也(1995)：上部白亜系双葉層群の河川成～浅海成堆積システム―堆積相と堆積シーケンス―. 地学雑誌, 104(2) ：284-303

Judy A. Massare. 1987 Tooth morphology and prey preference of mesozoic marine reptiles. Jornal of Vertebrate Paleontology. 7(2):121-137.

Joshua B. Smith, David R. Vann, & Peter Doson. 2005 Dental Morphology and Variation in Theropod Dinosaurs: Implications for the Taxonomic Identification of Isolated Teeth. THE ANATOMICAL RECORD PART A. 285A,699 –736

T. Sato, T. Konishi, R. Hirayama, M.W. Caldwell. 2012 A review of the Upper Cretaceous marine reptiles from Japan. Cretaceous Research. 37,319-340

高橋利信・八巻安夫・平宗雄・橋本悦雄(2008)：福島県の双葉層群笠松層から採集されたは虫類の歯化石. 地学研究, 56：195-199

糞石から解明するペルム紀-三畳紀境界における大量絶滅後の海洋食物網

古生物学研究室
1724016　菊池　優
指導教員　中島　保寿

1．緒言

約 2.52 億年前，ペルム紀-三畳紀境界(以下 P-T 境界)にて顕生代史上最大の大量絶滅が発生した．この時，海生生物の約 80~90%の種が絶滅したとされている(Hu et al., 2011)．P-T 境界以降，海生生物が回復した時期は今までも議論されてきた．三畳紀海洋生態系における複雑な食物網の回復時期として，以前までは化石の有無から中期三畳紀が最古の記録であるとする考えもあった一方で，近年では下部三畳系海成層からも多様な海生生物化石が発見されたことから，初期三畳紀には既に複雑な海洋食物網を構築していたと考えられるようになってきている(e.g., Hu et al., 2011; Brayard et al., 2017).

本研究では P-T 境界後の海洋食物網を，下部~上部三畳系海成層から発見された糞石(Coprolite)から推測することを目的とする．糞石は生物の糞便が化石化した生痕化石の一つであり，生成生物の摂食行動に深く関わる．そこで本研究では，糞石のサイズ・形状・内容物・構成物質などを記録し，糞を排泄した生物又は捕食された生物の検討を行った．

2．材料・方法

試料には下部~上部三畳系海成層から産出した糞石を用いた．産出地は中国安徽省巣湖周辺 Majiashan(前期三畳紀，オレネキアン，Nanlinghu 層，Chaohu 生物相)，雲南省羅平県 Daaozi 村(中期三畳紀，アニシアン，Guanling 層 Member II，Luoping 生物相)，貴州省興義市 Jiyangshan(中期三畳紀 後期ラディニアン~後期三畳紀 初期カーニアン，Falang 層 Zhuganpo 部層，Xingyi 生物相)である．

糞石を覆う母岩を 3~5 %のギ酸水溶液で溶解し，糞石表面と現れた骨や鱗などの内容物について，その形状や模様などの立体的な観察を行った．また，一部の標本については表面からでは観察困難な内容物を観察するため，マイクロフォーカス X 線 CT システム(SHIMADZU 社 inspeXio SMX-225CT FPO HR)を利用して X 線透過率からなる内容物の検討を行った．CT データの編集には OsiriX を使用した．形状等だけでは特定困難な糞石内容物に対して，薄片化した後に偏光顕微鏡(OLYMPUS BH-2)を用い，その微細構造や偏光特性から内容物を同定した．

3．結果

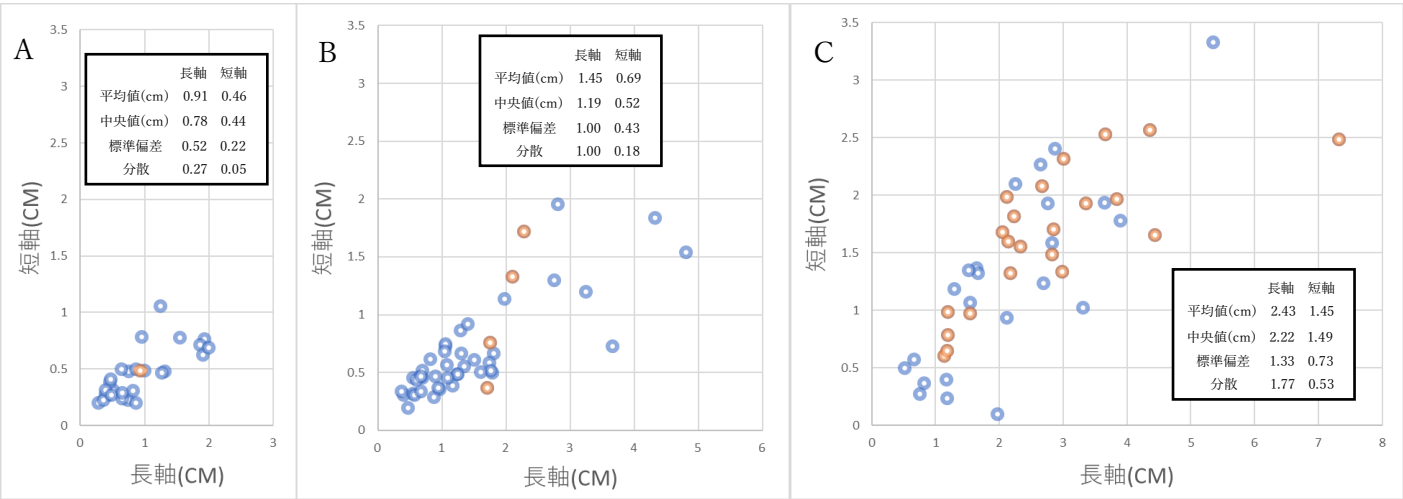


Figure 1. 中国三畳系海成層産糞石のサイズ分布．A，Chaohu 生物相(前期三畳紀)；B，Luoping 生物相(中期三畳紀)； C，Xingyi 生物相(中期~後期三畳紀)．橙色は内容物(骨や鱗)が確認された標本．

全試料の計測の結果，糞化石のサイズは時代が進むに伴って大きくなる傾向にあり，最も新しい時代の Falang 層の糞石群がサイズ，内容物含有率ともに他の産出地と比べて顕著に大きいことが明らかとなった(Fig.1)．また糞石の長軸長・短軸長の分散は時代が進むにつれて大きくなる傾向が見て取れる(Fig.1)．糞石の内容物としては，Falang 層においては比較的太い骨が主体であるが，Guanling 層においては細長い骨や鱗が主体であった．糞石の形状についても，Falang 層のものは楕円体，球体，不定形などがあり，Guanling 層，Nanlinghu 層と比較しても多様であった．Guanling 層の糞石の中には螺旋状をなすリボン状の糞も確認された．一方 Nanlinghu 層の糞化石の形状はほとんどが円形に近いものであった(Fig.2)．

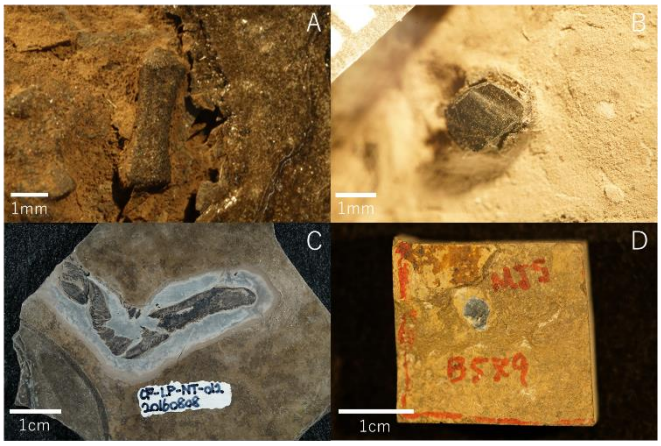


Figure 2．中国三畳系海成層産糞石．A，Falang 層の糞石で確認された爬虫類の四肢骨と思しき内容物；B, Guanling 層の糞石の鱗状内容物；C，Guanling 層のリボン状糞石；D, Nanlinghu 層の円形糞石．

４．考察

Falang 層(中期~後期三畳紀)から産出した糞石は，他の中国産出地の糞石(中期三畳紀，前期三畳紀)よりサイズや分散が大きく，内容物を含んだ糞石も多い(Fig.1)．この結果は三畳紀の時代ごとにおける海洋生態系の変遷が大きく関係すると考えられ，これは P-T 境界から長時間が経過した Xingyi 生物相には比較的体サイズの大きな海生爬虫類が生息していたことからも裏付けられる．螺旋状の糞石に関しては，原始的な魚類の腸管に見られる螺旋弁の形状に由来すると考えられ，Guanling 層の糞石は海生爬虫類だけでなく魚類起源のものが混在することが示された．またサイズの平均値・中央値のみならず分散が大きいことから，多様な体サイズの生成生物が生息していたことが伺える．内容物の高い残存率も，消化困難な部分(骨や鱗等)を有する被食生物の多さを示唆する．

糞石のサイズ分散は生成者の体サイズの多様性を，大きさは生成生物の体サイズを反映し，内容物含有率は骨や鱗を有する被食生物が豊富に生息していたかを表している可能性が高い．以上を踏まえて，糞石のサイズや内容物等の糞石より得られる様々な情報から，P-T 境界大量絶滅後の海洋生態系の回復過程に関する理解に繋げられる可能性があるということが分かった．

５．参考文献

[1]Hu, S. X., Zhang, Q. Y., ... & Chen, Z. Q. 2011 The Luoping biota: exceptional preservation, and new evidence on the Triassic recovery from end-Permian mass extinction. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 278(1716), 2274-2282.

[2]Brayard, A., Krumenacker, L. J., ... & Botting, J. P. 2017 Unexpected Early Triassic marine ecosystem and the rise of the Modern evolutionary fauna. Science Advances, 3(2), e1602159.

[3]Argyriou, T., Clauss, M., ... & Maxwell, E. 2016 Exceptional preservation reveals gastrointestinal anatomy and evolution in early actinopterygian fishes. Scientific Reports, 6(1), 1-10.

[4]Lu, H., Jiang, D. Y., ... & Motani, R., 2018 Middle Triassic Xingyi Fauna: showing turnover of marine reptiles from coastal to oceanic environments. Palaeoworld, 27(1), 107-116.

[5]Ji, C., Zhang, C., Jiang, D. Y., ... & Bucher, H. 2015 Ammonoid age control of the Early Triassic marine reptiles from Chaohu (South China). Palaeoworld, 24(3), 277-282.

フランス Bouxwiller の始新統湖成石灰岩より産出する楕円体化石の成因について

古生物学研究室
1724026　小柳　豪大
指導教員　中島　保寿

1.緒言

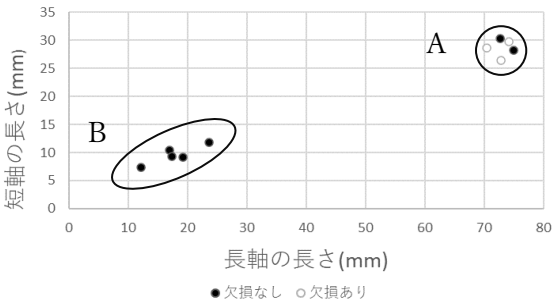
西ヨーロッパのライン地溝帯西部に位置するフランス Bouxwiller に分布する始新統湖成石灰岩からは，古くより様々なサイズの楕円体化石が採取されることが知られている．これらは長らく様々な爬虫類の卵の化石とされていた(Kuntz, 1983)が，近年になり構造の強度，形状，外観から昆虫の繭であるとする説が提唱された(Kuntz, 2002).しかしいずれの説についても，複数種の生物の卵や繭の化石が密集するという不自然な状況を想定せざるを得ず，説得力のある結論に至っているとは言えない.

本研究では楕円体化石の成因の解明を目的とする．楕円体化石の起源を理解することは，当時のライン地溝帯における生物相の解明に貢献し，また当時の古環境を復元する一助となると期待される.

2.材料と方法

本研究ではフランス Bouxwiller 採石場跡地にて採取された楕円体化石 10 点を用いた．うち 3 点は風化もしくは人為的な剖出によって楕円体構造が露出･単離しており, その他は母岩に含まれていた．産出層準は湖成石灰岩層であり，年代は始新世ルテシアン後期とされている(Reichelt et al., 2013)．漸新世ルペリアンでは海進により扇状地となったとされ，少なくとも古第三紀を通じて淡水環境であったわけではないことがわかる(Berger et al., 2005).

まず全標本に関して，ノギスまたは定規を用いて計測を行った．欠損のある化石においては楕円体の長軸を短軸との交点まで測り，その値を 2 倍したものを推定長軸長とした．一部の標本については，X 線 CT(ニコン XT H 225 ST)を利用して内部構造の観察を行った後，化石を切断し研磨を行い Brother MFC-J5630CDW でスキャン撮影を行った．楕円体化石から薄片を作成し,偏光顕微鏡(OLYMPUS BH-2) 及びカメラ(AmScope MU1400)で観察・写真撮影を行った.



Figue1.　楕円体化石の長軸短軸の長さ．“欠損あり”の長軸長は推定に基づく.

3.結果

3-1. 標本の計測及び表面構造の観察

外部計測の結果, 楕円体化石は長軸 70 mm 短軸 30 mm の A タイプと長軸 20mm 短軸 10mm の B タイプの 2 つのタイプに分けられることがわかった　(Fig. 1)．また母岩はオンコライト質もしくは石灰質の円礫と泥質の基質からなる石灰岩で方解石が含まれていた．母岩中には，ヒラマキガイ科に似た腹足類化石が含まれていた．この科の腹足類は，Spijkerman et al.　(2015)によると淡水環境を示すとされている.

3-2.標本の内部観察

CT スキャンおよび切断研磨による内部構造観察の結果，A タイプの楕円体化石の外側のほとんどは厚さ約 1 cm のカプセル状の泥質堆積物に覆われていた．一部泥質堆積物に覆われていない境界部があるが母岩との境界は明瞭である．また楕円体内部は母岩同様石灰岩であるが，礫は含まれておらず母岩とは異なっていた．A タイプの KM-004 においては，楕円体化石には直径 10mm 程度の円柱状の構造が付属し，カプセル状泥岩を貫いていた．母岩表面には酸化鉄または水酸化鉄の結晶とみられる赤褐色の結晶が露出していた．この結晶は母岩内部で網状に枝分かれし，先端に向かうほど細くなる (Fig. 2) ことから，植物の根の痕跡と考えられる．さらに，A タイプ KM-015 の楕円体内部には，腹足類の化石や B グループの楕円体化石が包含されていることが確認された (Fig. 3A). 薄片検鏡によって, この KM-015 内部の B タイプ化石は，複数が空間的に重複し，一方の発達によってもう一方が削り取られた様子が確認された．B タイプ KM-002 は楕円体部の片側先端が細く伸びている (Fig.3B).

4.考察

以上の観察結果より，この化石の生成過程以下の4段階からなると推定される．

（1）泥質カプセル構造の形成

同様の構造を形成する生物の候補としてハチが考えられる．スズメバチ科のハチの一部は泥を用いて巣を作り，巣の内部に幼虫の餌となる他の昆虫を貯蓄する(Robert et al., 2009)．円柱状の構造は捕獲した昆虫を内部に入れるためのものと考えられる．また境界部は内部で羽化した成虫が出てきた穴と考えられる．

（2）泥質カプセル構造の埋没及び固結

泥質構造と周囲の母岩の境界が明瞭であることから，カプセル構造は現地性ではないといえる．楕円体内部に鉱物結晶や巻貝の化石が含まれていたことから，泥質構造の内部に礫とともに水が流入したことがわかる．

（3）泥質構造の洗堀，埋没

内部の体積物と外部の堆積物が同様でないため，流入後一度固結したのち洗掘を受けたと考えられる．固結した泥質構造が洗堀され再度埋没したと考えられる．母岩に根の痕跡があることから植物の生育できるような環境の時期があったといえる．

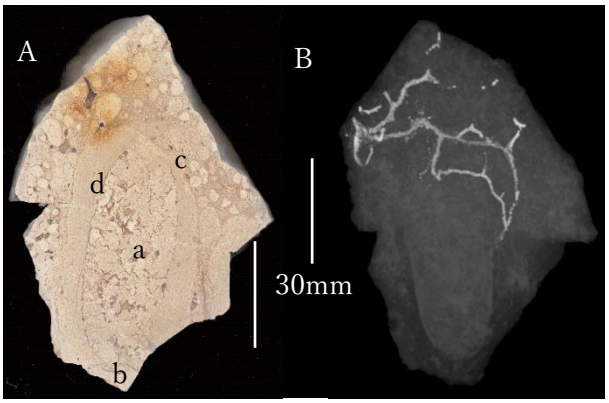


Figure 2.　タイプA楕円体化石の例（KM-004）．
A）断面スキャン画像　B) X線CTによる画像．
a.楕円体部 b.円柱状構造 c.境界部 d.カプセル状泥岩

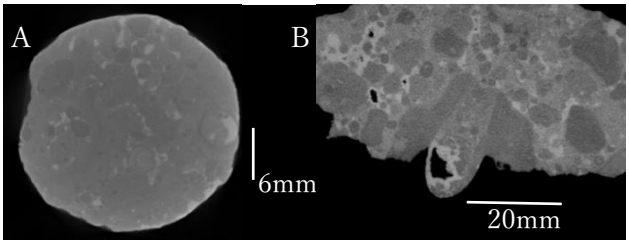


Figure 3. タイプB楕円体化石の例. A)KM014のCT画像. 内部にタイプBが発達する. B)KM002のCT画像.

（4）固結した堆積物に穿孔，再び埋没

カプセル状泥岩を含む石灰岩に二枚貝類が穿孔したと考えられるが，穿孔性二枚貝類は本来浅海に生息していることから，堆積環境は海洋となり，埋没・固結・露出の過程が2回以上繰り返されたことがわかる．

以上を踏まえると，従来卵や繭の化石とされてきた楕円体化石は，陸上と水中の少なくとも2種類の全く異なる生物の活動を起源とする堆積構造であることが示された．植物の根や再堆積の痕跡など，本研究で確認された構造のすべてが発達するには，陸上環境，淡水環境，浅海環境と，堆積環境のめまぐるしい変化が不可欠であり，ライン地溝帯における激しい隆起・沈降に加え，海水準変動の影響を記録したものといえる．

5.参考文献

Jean-Pierre B.,Bettina R. and Damien B. et al.,(2005)Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene,

Kuntz P.,(1983) Oeufs fossiliss de Reptiles et d' Oiseaux dans le gisement Lut&ien de Bouxwiller (Dpt Bas-Rhin/ France)

Kuntz P.,(2002)Cocons, Œufs, Pupes et Graines ou Révision des ovoïdes du Lutétien de Bouxwiller en Alsace–France,

Reichelt R., Vogt H., J.-J. Grosset et al., (2013) CARTE GEOLOGIQUE DE LA FRANCE A 1/50000 BOUXWILLER, pp. 29–31,

Matthews W. R. and Matthews R. J.,(2009) Nesting Behavior of *Abispa ephippium* (Fabricius) (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae): Extended Parental Care in an Australian Mason Wasp, Hindawi Publishing Corporation, Psyche, Volume 2009, Article ID 851694, 15 pages,

Spijkerman E., Nieulande F.A.D. van, and Wesselingh F.P. et al.,(2015), Pourcy (Paris Basin, France): preliminary assessment of an early Eocene NW European tropical coastal environment from molluscs and vertebrate fossils, Cainozoic Research, 15(1-2), pp. 155-180,

ロシア白海地域 Pinega 層から産出した *Kimberella quadrata* の堆積環境及び保存状態の検討

古生物学研究室
1724054　船場大輝
指導教員　中島保寿

1.緒言

エディアカラ生物群（Ediacara biota）は約 5 億 7 千万～約 5 億 4 千万年前の先カンブリア時代エディアカラ紀に生息していた原始的な多細胞生物からなる生物相である．放射相称の体を持つ生物が多かったエディアカラ生物群において，*Kimberella quadrata* は例外的に左右相称の体を持つ底生動物であり[1]，オーストラリアのエディアカラ丘陵とロシア白海の浅海成層より印象化石として産出する[2]．*K. quadrata* 化石は一般に左右相称の楕円形状をなす．外郭は小円鋸歯状を示し，これを呼吸器官とみる研究者もいる[3]．また，成長した個体では中央部の正中線上に隆起が発達し，この中央隆起の表面に軟体動物の殻に似た顆粒状の凹凸が発達することや，層理面上に歯舌による摂食痕に似た扇状の生痕化石が発達することなどから，*K. quadrata* は軟体動物と近縁であるとの見方もある[1]．しかし，鉱物化した殻や歯舌の化石は発見されておらず，形態，生態及び系統分類学的位置については依然として共通見解が得られていない．これらを明らかにするには，*Kimberella* 化石がどのような条件で化石化し，何が保存されているのかを正確に理解することが不可欠である．そこで本研究では，主に印象化石の保存状態に着目し，*Kimberella* の堆積環境及び保存状態について検討した．

2.材料と方法

本研究ではロシア白海地域 Pinega 層から産出した *K. quadrata* 標本（INM-4-015246，ミュージアムパーク茨城県自然博物館）を材料として用いた．まず化石の保存状態及び母岩の岩相の観察を行い，ノギスを用い印象化石各部位の計測を行った．次に高精度の堆積相解析を行うため，母岩を切断研磨し，画像スキャナを用いて堆積構造の記載を行った．また印象化石としての保存状態を評価するため，化石が保存されている層理面（以下「化石面」）の高精度のレプリカをシリコン型と歯科用石膏を用いて作成し，これを垂直方向に切断研磨・スキャンすることで高精度の断面プロフィールを記録した．また，*Kimberella* の堆積環境及び保存状態を無機化学的に明らかにするため，蛍光 X 線分析装置 EA1000AIII （日立製）を用いて化石面及び母岩断面の元素組成の分析を行った．

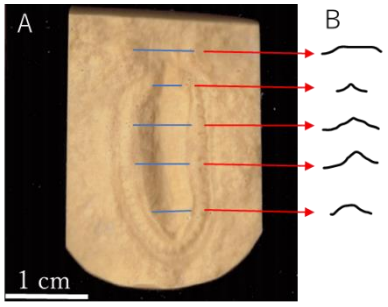


図 1. *Kimberella* 化石の石膏レプリカ横断面の形状．Aはレプリカ表面，青線は正中線に沿った窪みに対応する研磨線，Bは各研磨線におけるレプリカ横断面の窪みの形状．

3.結果

3.1. *Kimberella* 化石の保存状態

体長 22.1 mm，幅 11.1 mm の楕円形で，左右相称であり，母岩表面に印象化石として保存されていた（図 1A,2A）．中央の正中線に沿って深さ 0.5 ～ 2 mm 程度の窪みが発達し，その断面は三角形をなす（図 1）．先端部からは長さ 4.4 mm の吻部が突出する（図 1A）．中央の窪み周囲には同心円状に 2 本の溝，その間に約 1.3 mm 周期の小円鋸歯状構造が見られた（図 1A）．中央の窪みの底には正中線に沿って黒色粒子が密集していた．

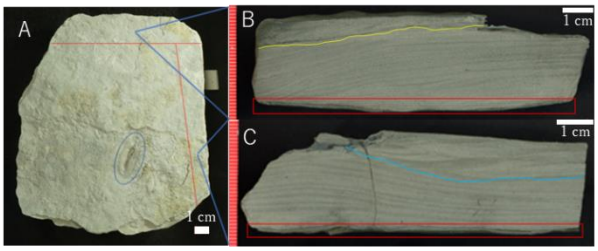


図 2. 母岩表面及び断面の堆積構造．Aは母岩表面，赤線は母岩切断線，青枠は*Kimberella*化石，B,Cはそれぞれ A で切断された母岩断面，B,Cの図の上方向が上位，赤枠は化石面及びその直下の黒色葉理．黄線・水色線上位には斜交葉理，水色線下位には対称形の山型をなす葉理が見られた．

3.2.母岩の岩相

母岩は粒径約 30μm 程度の白色粒子と少量の 6 μm 程度の黒色粒子を含む断面の厚さ 3.3 cm の緑灰色シルト岩である（図 2,3）．断面では粒径 0.2～ 0.7 mm 程度の

緑灰色葉理と黒色葉理が互層をなし，斜交葉理及び対称形の山型をなす葉理が確認された（図 2B,C）．これらの構造から，化石面側が下位にあたることが分かる．また，化石面側には化石面の直下に黒色葉理が見られた（図 2B,C）．黒色葉理の中には粒径 6 μm 程度の不透明粒子が房状に連なった構造（フランボイダル構造）が見られた（図 3）．黒色葉理の上位及び下位は主に白色の石英粒子 で構成されており，黒色葉理周辺では不透明粒子が石英粒子 の間隙を取り囲んでいた（図 3）．

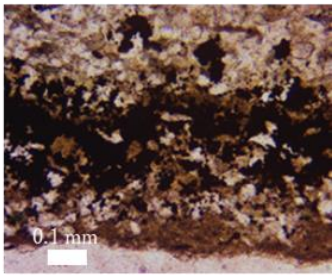


図 3. 母岩断面の化石面と黒色葉理の境界部分の粒子．図の上方向が上位．フランボイダル構造が石英粒子の間隙で顕著に見られた．

3.3.化石面及び母岩断面の元素組成

化石面では化石の吻部と小円鋸歯状構造の一部に Fe の濃集が確認された（図 4(B)）．母岩断面では化石面直下の黒色葉理中に S,Fe,Cu の濃集が確認された（図 4(D),(E),(F)）．

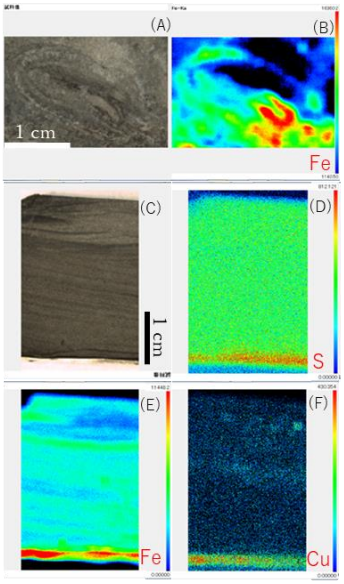


図 4. 化石面及び母岩断面の主な元素組成．(A),(C)はそれぞれ図 2.Aの母岩表面とCの母岩断面の分析範囲，各図の上方向が上位．(A),(B)は共に化石全体，(C),(D),(E),(F)は共に母岩断面で同じ位置にある．(B)及び(E)は鉄の分布を，(D),(F)はそれぞれ硫黄,銅の分布を表し，濃度が高いほど赤く，低いほど青い．

4.考察

化石面の直下に発達する黒色葉理は，*Kimberella* の本体があった海底面直下に相当し，ここに発達するフランボイダル構造は，S，Fe の濃集から黄鉄鉱だと推測される．フランボイダル黄鉄鉱は酸化還元境界で微生物の作用によって形成されるとする研究結果もあり[4]，化石面の堆積環境も同様であった可能性がある．また，上位のシルト岩には斜交葉理が発達することから，*Kimberella* 個体の埋没後には少なくとも水流があったことが示唆される．さらに下位に対称形の山型をなす葉理は，振動流によって形成されるウェーブ・リップルと解釈され，潮間帯かそれに類似した環境条件が想定される．以上より，*K. quadrata* 化石の産出する Pinega 層は穏やかな還元的環境と水流のある酸化的な環境が交互に繰り返し，還元的な底質の上に生息していた *Kimberella* が堆積物に埋没することによって保存されたものと推察される．

断面の形状から，生前の *Kimberella* では正中線に沿った部位は他の部位よりも固く隆起していたと推察される．また，化石の吻部の Fe の濃集から，底質環境の影響だけでは説明できず，*Kimberella* の元素組成もしくは形態を反映している可能性が高い．*Kimberella* の吻部には鉄が含まれており，現生軟体動物同様，磁鉄鉱でできた歯舌の可能性がある．

参考文献

[1]Fedonkin, A. M., & Waggoner, M. B., 1997. The Late Precambrian fossil *Kimberella* is a mollusc-like bilaterian organism. Nature. 388, 868-871.

[2]Ivantsov, Y. A., 2009. A New Reconstruction of *Kimberella*, a Problematic Vendian Metazoan. Paleontological Journal. 43, No. 6, 601–611.

[3]Fedonkin, A. M., Simonetta, A., & Ivantsov, Y. A., 2007. New data on *Kimberella*, the Vendian mollusc-like organism (White Sea region, Russia): palaeoecological and evolutionary implications. Geological Society. 286, 157-179.

[4] Wilkin, R. T., Barnes, H. L., & Brantley, S. L., 1996. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta 60, 3897-3912.

成長パターンの異なる羊膜類動物間にみられる骨細胞形態の傾向の検討

古生物学研究室
1724063　柳田優樹
指導教員　中島保寿

1. 緒言

現生の非鳥類爬虫類はほぼ一定の成長率を維持する．これに対し，鳥類や哺乳類は成体になるまで急速に成長するが，その後は緩やかになる．このような成長率の違いを記録するものの中に，骨基質の組織学的性質の違いがある．すなわち，比較的ゆっくりと形成された骨基質は線維の配向が揃った lamellar-zonal bone（LZB）もしくは parallel-fibred bone（PFB）の構造をとり，比較的早く形成された骨基質は線維方向が揃っていない woven bone（WB）もしくはそれを含んだ fibro-lamellar complex（FLC）の構造をとる（Francillon-Vieillot et al., 1990）．これを応用すると化石骨から成長パターンを推定することも可能である（e. g., Woodward et al., 2015）．しかし線維の方向性等は続成過程で失われることも多い．そこで本研究は，線維の方向とは異なる成長速度の推定方法を確立する上で，骨細胞に着目する．骨基質は通常，骨細胞を含む小腔（骨細腔）を含み，この骨小腔の形態は骨基質の種類によって変化することも知られている（Kerschnitzki et al., 2011）．本研究は、骨基質の成長速度と骨細胞形態の関連を確かめることを目的とし，成長パターンが異なる生物の骨内部微細構造を調べ，骨細胞形態の違いに一定の傾向がみられるかどうかを検証する．

2. 材料と方法

試料は骨組織観察の容易なサイズであることを基準に，様々な骨形成速度の爬虫類・鳥類５種（グリーンイグアナ *Iguana iguana*，ワニガメ *Macrochelys temminckii*，ミズオオトカゲ *Varanas salvator*，イリエワニ *Crocodilus porosus*，ニワトリ *Gallus gallus*）の５種を選定し，それぞれ上腕骨と大腿骨をサンプリングした（Table 1）．それぞれマイクロ CT スキャンにより内部構造データを取得した後，OsiriX で切断面の選定を行った．骨幹中央の横断面で骨組織薄片を作成し，偏光顕微鏡で観察および写真撮影を行った．

Table 1. 観察を行った試料

	部位	長さ
グリーンイグアナ	左大腿骨	8.8cm
ワニガメ	右大腿骨	12.2cm
ミズオオトカゲ	左大腿骨	11.5cm
イリエワニ	左大腿骨	8.5cm
ニワトリ	左大腿骨	8.0cm

3. 結果

イリエワニの皮質骨は明瞭に二層に分かれる．皮質骨深層は血管腔に富み，その周辺の骨細胞に乏しく光学的異方性を示す領域と，骨小腔に富み等方性を示す領域で構成される．骨小腔は長径 5～20μm，短径 5～10μmで，多くの細胞突起で互いに連絡している．また，皮質骨表層は異方性を示す薄い層板が重なっており，骨細胞と血管腔をほとんど含まない．ニワトリ皮質骨の骨基質は血管腔と骨小腔に富み，光学的異方性を示す部分と等方性を示す部分が入り組んでいる．骨小腔は長径 5～10μm，短径 3～5μmの球形あるいは楕円形で細胞突起をほとんど持たない．グリーンイグアナの皮質骨の骨基質は血管腔に乏しく，異方性を示す薄い層板状組織からなる．層板の間には，長径 5～20μm，短径 2～5μmの細長い骨細胞が配列している．この骨細胞は深層ほど，層板に対して垂直に延びた細胞突起を多く持つ．ワニガメの皮質骨は明瞭に二層に分かれる．皮質骨深層は血管腔に富み，骨細胞を多く含み等方性を示す．骨小腔は長径 5～15μm，短径 2～5μmで，多くの細胞突起で互いに連絡する．また，表層は血管腔に乏しく，異方性を示す薄層板間に長径 10～50μm，短径 2～5μmの細長い骨小腔を含む．この骨小腔は深層ほど層板に対して垂直に延びた細胞突起を多く持つ．ミズオオトカゲの骨基質は異方性を示し，骨小腔は長径 7～10μm，短径 5～7μmの球形あるいは星形で，やや潰れた形状を示す．多くの細胞突起で互いに連絡した骨小腔を伴う領域の中に，ほとんど細胞突起を持たない骨小腔を伴う同心円に対して垂直に延びた楕円形の領域が点在する，この二つの領域の境界はやや不明瞭で，細胞突起を持つが互いに連絡しない骨小腔が含まれる。

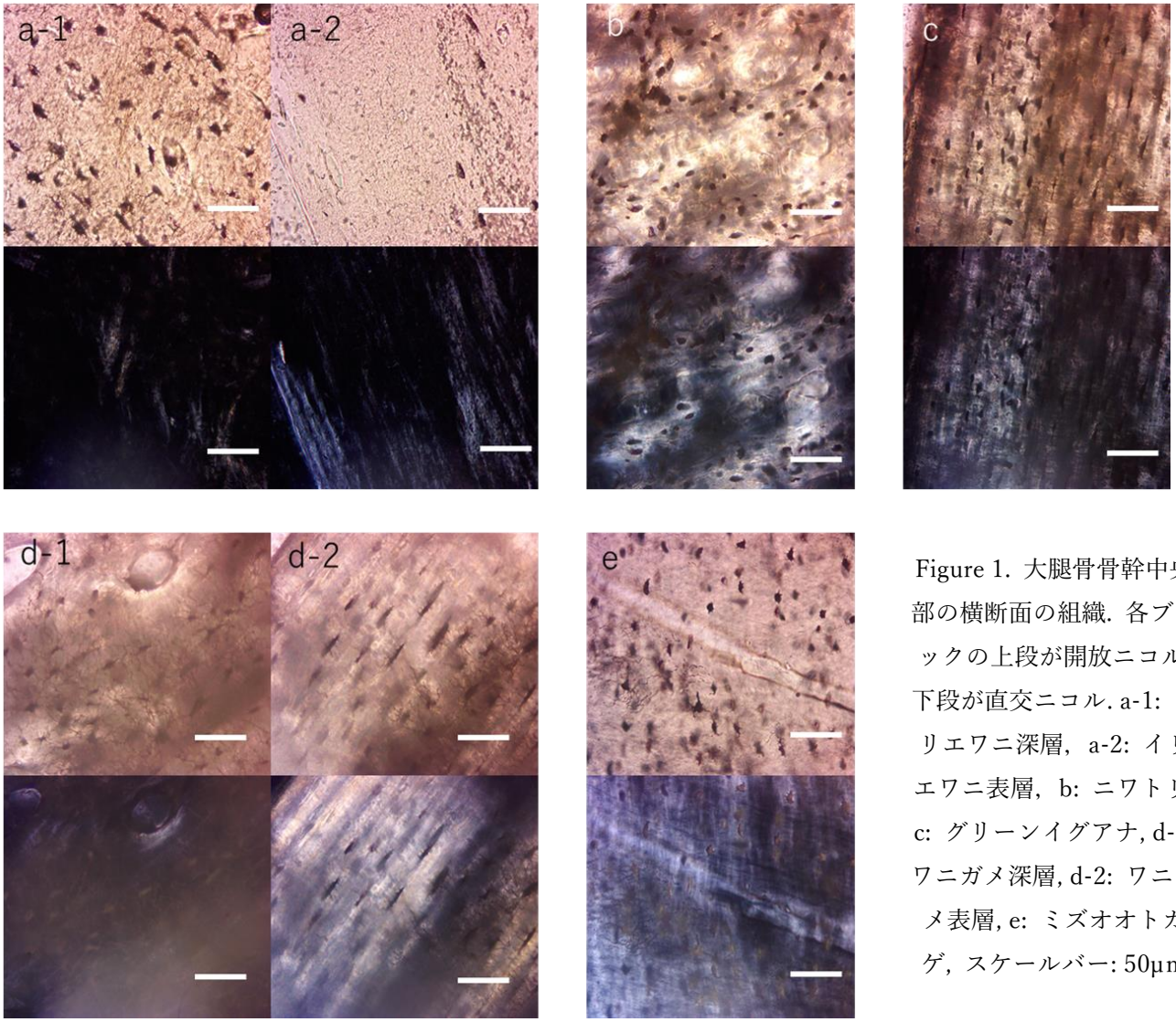


Figure 1. 大腿骨骨幹中央部の横断面の組織. 各ブロックの上段が開放ニコル, 下段が直交ニコル. a-1: イリエワニ深層, a-2: イリエワニ表層, b: ニワトリ, c: グリーンイグアナ, d-1: ワニガメ深層, d-2: ワニガメ表層, e: ミズオオトカゲ, スケールバー: 50μm

4. 考察

イリエワニ大腿骨深層は FLC, 表層は LZB を示し, 成長を通じて徐々に骨沈着速度が低下した結果骨組織に変化が起きた結果と考えられる. ニワトリ大腿骨は WB を示し, 急速な骨沈着が起きたと考えられる. グリーンイグアナ大腿骨は LZB を示し, 緩やかな骨沈着が起きたと考えられる.ワニガメ大腿骨深層は WB, 表層は LZB を示し, イリエワニと同様に骨沈着速度の低下が窺える. ミズオオトカゲ大腿骨は PFB に分類できると考えられ, ニワトリに次いで速い骨沈着を示す. 層板方向に長細い骨細胞が, 沈着速度が沈着方向に対して一定以上の径を持つ骨細胞を取り込めないことに起因するとすれば, グリーンイグアナとワニガメの表層の沈着速度は遅く, イリエワニ表層はさらに遅く, ニワトリとミズオオトカゲは十分に速く沈着したと考えられる. また, 細胞突起の種間差は, 骨基質が沈着してから細胞突起が延伸するまでにある程度の時間を要するためだと考えられる. ミズオオトカゲに見られた細胞突起に富む領域とこれに乏しい領域の混在は, 全体として細胞突起が延伸していく途中の状態を示していると推察できる。このように, 骨細胞の形態は骨基質の沈着速度ごとに特徴的な形態を示す.

5. 参考文献

Francillon-Vieillot H et al. (1990) Microstructure and Mineralization of Vertebrate Skeletal Tissues. In: J. G. Carier, ed., Skeletal Biomineralization: Patterns, Processes and Evolutionary Trends. Volume 1, New York, Van Nostrand Reinhold, 471-530.

Kerschnitzki M.et al., (2011) The organization of the osteocyte network mirrors the extracellular matrix orientation in bone. Journal of Structural Biology, 173 : 303-311.

Woodward H. N. et al., (2015) *Maiasaura*, a model organism for extinct vertebrate population biology: a large sample statistical assessment of growth dynamics and survivorship. Paleobiology, 1-25

日本近海に生息するダツ目魚類の滑空適応に伴う骨形態進化

古生物学研究室
1724065　渡邊　萌
指導教員　中島　保寿

1. 諸言

脊椎動物の骨格は進化の過程で様々な形態を獲得してきた．脊椎動物の体骨格の形態は運動様式によって変化し，運動様式は骨形態や骨密度に顕著に現れる．そのため，各分類群の系統樹と骨形態および生態の情報を統合することで，骨形態進化のメカニズムを理解する事ができる．トビウオ(ダツ目:トビウオ科)は滑空という特徴的な運動様式によって大きく体形態を変化させてきた硬骨魚類の一系統であり，進化の過程を知るべく多くの研究が行われている．しかし，その多くは分子系統学的解析(e.g.,Nathan,2000)や一部の系統の体形態観察(e.g.,藪本,1984)のみであり，いくつかの種の骨形態に関する論文や「トビウオの骨は強いが軽い」という記述(Dasilo,1998)はあるものの，ダツ目魚類(Fig.1)を骨学的観点から網羅的に比較検討し，生態進化との関連を論じた研究はほぼ皆無である．

そこで本研究では，トビウオ科の運動様式の変化に伴う骨形態・内部構造の変化を明らかにするために，日本近海のトビウオ科を含むダツ目魚類の種間比較を行った．

2. 材料と方法

2-1　分離骨格標本による骨外部形態の観察

屋久島を含む日本近海で捕獲されたものを購入し，試料の収集を行った．収集したダツ目魚類は全体で 5 科 11 属 13 種となった．これらのうち，トビウオ科の種は滑空行動の様式によって a)鰭の拡大が見られない 0 翼型:，b)腹鰭の発達した 2 翼型，c)腹鰭・胸鰭の発達した 4 翼型に分けられる(Davenport 1994)．本研究の試料は，a)0 翼型：サヨリトビウオ，b) 2 翼型：イダテントビウオ，c)ツクシトビウオ・ニノジトビウオ・ハマトビウオに分けられる．

外部計測部位は魚類実験テキスト(岸本 他 2006)を参考に全長，標準体長，胸鰭長腹，鰭長とし，13 種に対して体重を含めた 5 項目の測定を行った．試料を熱水中で加熱・除肉し，分離骨格標本を作製した．作製した標本をもとに，トビウオ科の滑空時に使用する胸鰭と腹鰭を支える肩帯・腰帯外部形態観察を行った．

2-2　ＣＴスキャナーによる骨格の内部観察

実験動物用Ｘ線 CT スキャナー(Latheta 200)を用い，骨内部の観察を行った．非破壊による形態の観察とともに，肩帯・腰帯の骨内部の観察と骨の緻密度の比較も行った．

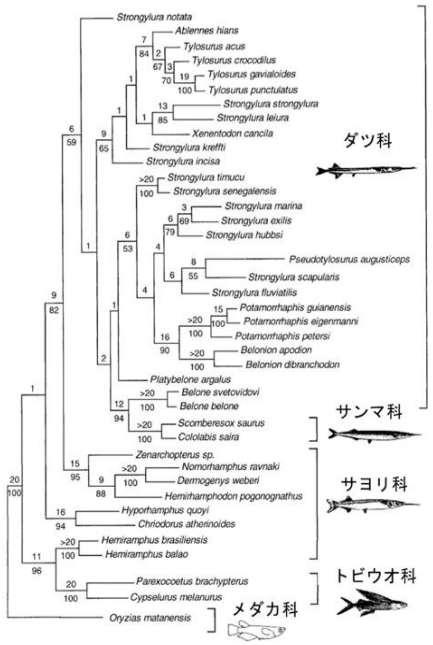


Fig.1 ダツ目魚類の系統樹(Nathan,2000，一部改変)

3. 結果

3-1 骨外部形態の比較

烏口骨はダツ科・メダカ科，サンマ科・サヨリ・0 翼型の種，トウザヨリ・2 翼型の種・4 翼型の種の順に前後長の拡大がみられた．それに対し，擬鎖骨はトウザヨリ，ダツ科・サンマ科・サヨリ・メダカ科，トビウオ科の順に内外側方向の拡大がみられた．また，トビウオ科の 2 翼型・4 翼型の種のみにおいて，擬鎖骨の背側に網

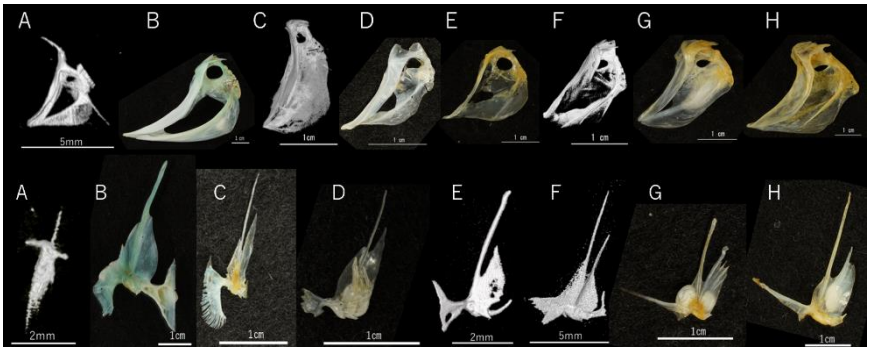


Fig.2 ダツ目魚類の腹側を下，頭部を左とした際の左肩帯及び左腰帯の骨形態
A）メダカ，B）オキザヨリ，C）サンマ，D）サヨリ，E）トウザヨリ，F）サヨリトビウオ，G）イダテントビウオ，H）ツクシトビウオ

目状の構造が確認された．ダツ科・サンマ科・サヨリの腰帯の外側へ伸びる突起は受け皿状に対し，トウザヨリ・0 翼型の種の突起は受け皿の形状はしているが背側へ伸びており，2 翼型・4 翼型の種・メダカ科では鋭い突起が背側に伸びていた(Fig.2).

3-2 骨形態の内部構造

肩帯の背側面と腹側面の中間の水平断面と垂直断面(Fig.3)・腰帯の垂直断面画像を作成し、骨内部構造の種間比較を行った．水平断面から，長距離間の滑空を行う 2 翼型・4 翼型の種の擬鎖骨の内側への大きなカーブが観察できたが，短距離のみの滑空を行う 0 翼型の種・トビウオ科と異なる滑空方法を行うトウザヨリには確認できなかった．垂直断面から，ダツ科・サンマ科・トウザヨリ・2 翼型・4 翼型の種には擬鎖骨背側に空洞がみられ，滑空を行うトウザヨリ・トビウオ科ははっきりと観察できた．

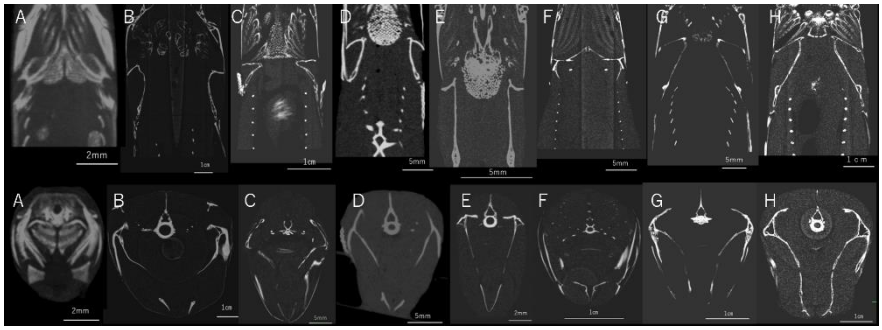


Fig.3 肩帯の水平断面と垂直断面

A）メダカ，B）オキザヨリ，C）サンマ，D）サヨリ，E）トウザヨリ，F）サヨリトビウオ，G）イダテントビウオ，H）ツクシトビウオ

腰帯の垂直断面から，大きさは異なるものの種に限らず複数の空洞が見られ，種間の違いは観察されなかった．

4．考察

ダツ目の肩帯外部形態また肩帯の水平断面画像による比較において，滑空適応の段階が進行するに従って烏口骨前後長の拡大がみられたことは，烏口骨より起始し滑空時に胸鰭を下制する筋の発達に伴う，滑空適応の一つと考えることができる．トビウオ科における擬鎖骨の内外側方向の拡大もまた，胸鰭を制御する筋の付着面積を大きくすることで滑空時の鰭の維持につながっていると考えられる．ただしトビウオ科とは独立して滑空適応したトウザヨリにおいては擬鎖骨の内外側方向の拡大は見られなかった．この要因としては，トウザヨリが胸鰭のほかに背鰭・臀鰭・尾鰭を用いて揚力を得ていることが挙げられる．また太い紡錘形の体型と大きな鰾を獲得して飛行適応したトビウオ科に対し，細長い体型によって軽量化と抵抗の軽減を実現しているトウザヨリにとっては，烏口骨を内外側方向に拡大させることは非現実的であったと考えることができる．

トビウオ科肩帯の内部構造の観察でみられた骨内部の空洞構造及び擬鎖骨背側で観察された網目状の骨構造の発達は，高度な滑空適応に伴い，骨の強度を保ちつつも骨内部の緻密度を低くし，軽量化を実現することで，重力と揚力のバランスが取られているものと解釈できる．

以上のように，ダツ目の肩帯の形態および内部構造は滑空適応の有無によって合理的に変化し，さらにその変化の程度は滑空適応の程度もしくは戦略の違いによって変わってきたことが示されたといえる．ただし腰帯の形態については，腹鰭を用いた滑空行動の獲得との関連性を見出すことはできなかった．この点についてさらに理解するには，今後軟組織の形態比較や，滑空以外の腹鰭の持つ機能と形態との関連性を検討することが必要である．

5．参考文献

Davenport, J., 1994, How and why do flying fish fly?, Reviews in Fish Biology and Fisheries, 4, 184-214.

Dasilao, C. J. Jr. & Yamaoka.K., 1998, Osteological and functional development of the flyingfish, *Cypselurus heterurus doederleini*（Teleostei:Exocoetidae）, Bull.Mar.Sci.Fish., Kochi Univ. 18, 13-26.

岸本浩和ほか，2006，魚類学実験テキスト，東海大学出版会，130p.，神奈川

Nathan R. L. 2000. Reinterpreting recapitulation:systematics of needlefishes and the their allies(Teleostei:Beloniformes), Evolution, 54(4), 1349-1362.

藪本美孝・上野輝彌，1984，メダカ *Oryzias latipes* の骨学的研究，Bull.Kitakyushu.Mus.Nat.Hisl., 5, 143-161.

ブラックホールから放出される超光速運動をするジェット

天文学研究室
G1724059 三浦昂大
指導教員：津村耕司

1.緒言

何であろうと吸い込み闇の底へと引きずり込むブラックホール。実は銀河系内に 1 億個程存在する天体なのだが、その中心には物質が極限まで密集し密度が非常に高くなり体積が 0 になった空間を持つなど、普通の天体と異なって奇妙な点が多い。ブラックホールの特徴の 1 つに「ジェット」の放出と呼ばれる天文現象がある。吸い込まれるガスの一部が荷電粒子としてブラックホール周囲の磁場に沿って極域に集められ、極性方向へと鉄砲弾のように放出される現象だ。ジェット全般としてとても興味深いのは放射速度が光速の約 99%にも達する事だ。このようなジェットを放つブラックホール天体は、実は多く存在する。本研究の対称とするのはブラックホール天体 MAXI J1820+070 である。太陽質量の約 8 倍で地球から約 2.96 kpc 離れた位置に存在する。MAXI J1820+070 から放出されたジェットの速度を計算すると、光速(3.0×10^8 m/s)を超えているように見える。しかし相対性理論によれば、すべての物質は光速を超えることはないはずである。本研究では、このような超光速現象がどのような仕組みで起こっているのかについて述べる。

2.ジェットの観測

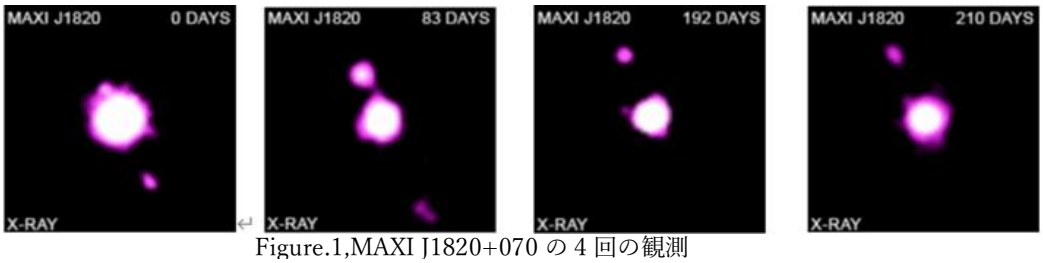


Figure.1,MAXI J1820+070 の 4 回の観測

Espinasse et al.(2020)は、 NASA のチャンドラ X 線宇宙望遠鏡を用いて、2018 年 11 月 13 日から 2019 年 6 月 11 日にかけて、MAXI J1820+070 とそこから放出されるジェットの観測を行った。その観測結果を表したのが Figure.1 である。この画像を元に別の観測結果も加えて、南北ジェットが移動する様子を表したものが、Figure.2 である。この図から、ブラックホールからの重力を考慮し鉛直投げ上げの式を用いて、南北ジェットそれぞれの初速度を計算した。その結果、MAXI J1820+070 から北に放たれたジェットの初速度は、1.84×10^8 m/s で、南に放たれたジェットの初速度は 4.79×10^8m/s という値が得られた。南のジェットの初速度の値は光の速度の 1.59 倍で理論的にはありえない数値になっている。

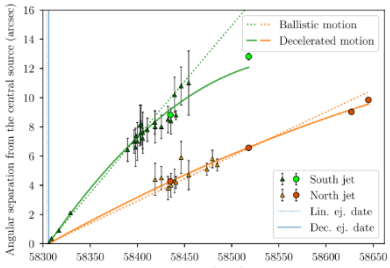


Figure.2,南北のジェットが移動する様子
Espinasse et.al. (2020)

3.考察

光速を超えたのは、あくまで見かけ上の結果である。Figure.3 のように、観測者からブラックホールまでの距離を l_1とすると、ブラックホールから放出された直後のジェットから発せられた光が観測者に届くまでの時間 t_1は、$t_1 = l_1/c$ と表せる。一方、このジェットが観測者から角度 θ の方向に、速度 v で放出されたとする。Δt 秒間にこのジェットは観測者に対して$l_{jet} = v\Delta t \cos\theta$だけ近づくので、放出から Δt 秒後のジェットから出た光が観測者に届くまでの時間 t_2は、$t_2 = \Delta t + \frac{l_1 - l_{jet}}{c}$と表せる。ここで見かけ速度のジェットを V_{app} とおき、光速 c との差比を $\beta_{app}\ (= \frac{V_{app}}{c})$ とすると、$\beta_{app} = \frac{\beta \sin\theta}{1-\beta\cos\theta}$ ($\beta = v/c$：実際のジェットの速度と光速 c との差比)となる。以上の計算より、X 軸を θ、Y 軸を β_{app} としたグラフ(Figure.4)を描き、実際のジェットの速度 v と視差角 θ の関係性を求める。その結果、見かけ速度が光速を超えるには、少なくとも光速の 75%以上の速度を持たなければならないことが分かった。今回、観測対象とした MAXI から放出された南ジェットにおいては、光速の 85%以上の速度で観測者の方向に向かって飛んできた為、見かけ速度が光速の 1.59 倍にもなったと結論づけた。

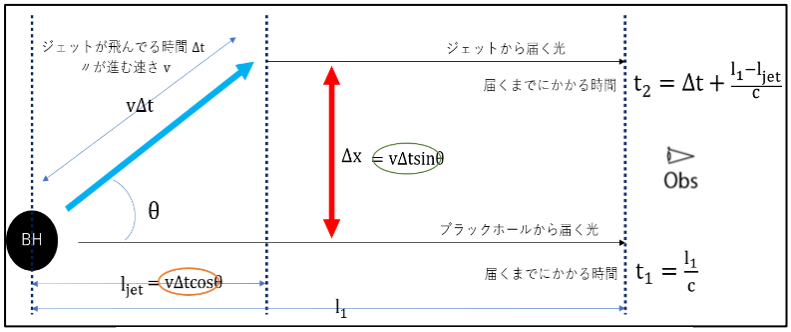


Figure.3,観測されたジェットの仕組み

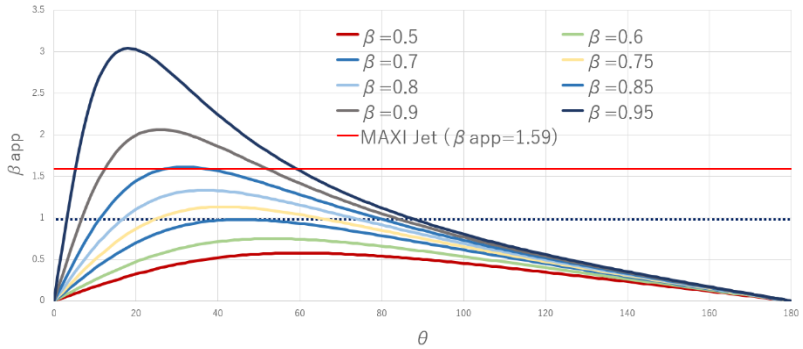


Figure.4,見かけ速度のジェットと視差角の関係

4.参考文献

Mathilde Espinasse et.al. (2020), “Relativistic X-Ray Jets from the Black Hole X-Ray Binary MAXI J1820+070”, *The Astrophysical Journal Letters*, 895, L31

https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-87

原始惑星系円盤から探る惑星の形成

天文学研究室
1724004：石田みずき
指導教員：津村耕司

1. 緒言

現在一般的に考えられている惑星形成理論について概要を述べる。

原始星は分子雲が自己重力によって収縮することで形成される〔1〕。かき集められたガスの一部は大きな角運動量を持つために原始星には落下せず、原始星を公転するガス円盤、原始惑星系円盤を形成する。円盤内の固体成分のダストは、重力により衝突合体を繰り返すことで成長し、原始惑星となる。揮発性物質が固体になる温度の境界である雪線の内側では、地球型惑星が形成され、外側では惑星形成の材料に氷が加わるため大きな固体惑星が形成され、重力で円盤のガスを集積し十分にガスを集められると木星型惑星、集められないと天王星型惑星を形成する。残った原始惑星系円盤のガスが散逸し惑星形成が完了する。

太陽系の惑星も系外惑星と同様に形成・進化したと考えられているため、系外惑星の形成過程を研究することは太陽系の起源を解き明かす上で、とても重要である。そこで本研究では、太陽系の起源について考察するために、ALMA 望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計:Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)を用いて①おうし座 HL 星の原始惑星系円盤を観測した論文[2]と、②うみへび座 TW 星の原始惑星系円盤からの局所的なミリ波過剰を観測した論文[3]から、惑星形成について調査した。

2. 観測装置

原始惑星系円盤は、中心星からの輻射による加熱と円盤内のダストの熱放射による冷却がつりあった系である。円盤内のダスト放射は中間赤外線から電波の波長域で発せられる。また原始惑星系円盤を持つ星が多く存在する星形成領域は太陽系からもっとも近いものでも約 140 pcの距離である。原始惑星系円盤の典型的な大きさを 100 天文単位程度とすると、この構造を観測するためには、高い解像度が必要だということが分かる。〔4〕そこで観測装置には ALMA 望遠鏡が用いられた。これは、7mと 12m のパラボラアンテナをそれぞれ 12 台と 54 台の計 66 台を組み合わせる干渉計方式の巨大電波望遠鏡である。観測波長はミリ波やサブミリ波と呼ばれる電波(波長 0.3-10 ㎜)で、干渉計方式を利用しているため最大で 0.1 秒角よりもよい空間分解能で観測が可能である。これは従来の電波望遠鏡と比較すると桁違いの空間分解能である。①、②の ALMA での観測はどちらもバンド 6(波長 1.3 ㎜)で行われた。

3. おうし座 HL 星の観測結果と考察

(1)観測結果

得られたデータを図 1 に示す。世界で初めて原始惑星系円盤の構造を捉えることに成功した。地球からの距離が約 450 光年で年齢 100 万歳以下のこの星の原始惑星系円盤の直径は、およそ 100 天文単位程度であり、その円盤は、複数の溝(ギャップ)を持つことが分かった。円盤のギャップ内は光学的に薄くリングの中心位置と中心星の位置がずれていることから、リングは離心率を持っており、内側から 4 つのリングのギャップが 1:4:6:8 の軌道共鳴の位置関係にあることが詳細な解析で明らかになった。〔5〕

図 1:おうし座 HL 星の原始惑星系円盤
引用:ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

(2)考察

原始惑星系円盤の溝について小石集積モデル[6]を考える。原始惑星系円盤内の固体粒子の合体成長により形成された微惑星のうち相対的に重い微惑星は、より早く成長し一層重くなる暴走成長をする。結果、少数の重い惑星(原始惑星)と軽い惑星に二分される。[7] この少数の原始惑星が、集められる範囲の微惑星をかき集めきり、各領域ごとに孤立するようになる。したがって原始惑星の軌道上の材料が枯渇したために溝として観測されたものと考えられる。つまり円盤内の溝は、惑星形成が進行している現場を初めてとらえた証拠と考えられる。

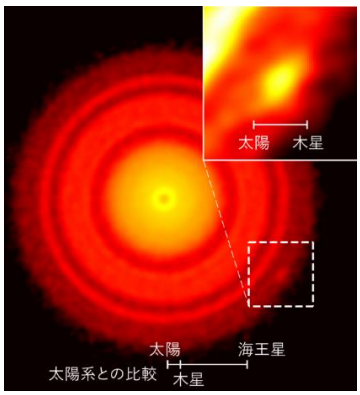


図 2:うみへび座 TW 星の原始惑星系円盤

引用: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

4. うみへび座 TW 星の観測結果と考察

(1)観測結果

得られたデータを図 2 に示す。地球からの距離は約 194 光年の地球から最も近い位置にある原始惑星系円盤で年齢は 1000 万歳である。円盤の南西、中心星から 52 天文単位の位置に局所的なミリ波放射の超過が観測された。この電波源は周囲より 1.5 倍程度電波が強く、円盤の回転方向に引き延ばされていて長さが 4 天文単位、幅 1 天文単位であった。[4]

(2)考察

超過放射の起源は 2 つ考えられている。1 つは、原始惑星系円盤内に生じたガス渦にダストが捕捉されているというものだ。捉えられたダストは楕円状に広がると予測されており、実際に観測された電波源も引き伸ばされた構造をしているのでこの予想と一致する。したがって、まだ惑星は形成されていないものの今後惑星が形成される初期の段階であると考えられる。

もう 1 つは、形成中の惑星を取り巻く周惑星円盤の可能性である。形成中の惑星が存在する時、原始惑星系円盤から、ダストやガスが降着する。このとき局所的に密度と温度が上昇し周惑星円盤が形成される。この周惑星円盤のサイズから惑星質量を推測すると海王星質量程度と見積もられる。[3] この構造がある 52 天文単位の位置では、惑星質量の上限値が得られており、1～2 木星質量の惑星は存在しないことが示唆されている。また推測された海王星サイズの惑星が存在した場合、ガス分布にもダスト分布にも大きなギャップを作ることが難しいと予想されている。超過放射の見られた部分にギャップ構造が観測されなかったことからも、木星質量に満たない惑星の存在の可能性が考えられる。

5. 結論

ALMA 望遠鏡の高解像度観測の結果、惑星形成の現場と考えられている原始惑星系円盤の詳細な構造の観測に初めて成功した。惑星が形成されつつある天体で、理論研究で示されてきた原始惑星系円盤の構造が実際に観測されたことで、惑星形成過程の解明に繋がることが期待される。

6. 参考文献

[1] 高橋実道 (2017), 天文月報, 110, 358
[2] ALMA Partnership (2015), ApJL, 808, L3
[3] Tsukagoshi et al. (2019), ApJL, 878, L8
[4] 武藤恭之 (2019), 日本惑星科学会誌, 28, 190
[5] 秋山永治 (2018), 日本惑星科学会誌, 27, 4
[6] Boyle (2018), Nature, 564, 20
[7] 渡部潤一, 井田茂, 佐々木晶(編) (2008), 『シリーズ 現代の天文学 9 太陽系と惑星』, 日本評論社

2 つの恒星間天体の起源の比較

天文学研究室
1724047　奈須のどか
指導教員：津村耕司

1.緒言

私たちの住む太陽系の成り立ちはどのようなものかを知るためには、太陽系の昔の姿を探る必要がある。そのためには太陽の熱による風化や浸食作用のない遠くの天体を調べる必要がある。遠方の天体が太陽や地球に近づくと、温度が上昇することで表面や内部の氷が急激に蒸発し、彗星活動を行う。これを地球から観測することで、太陽系の過去を調べることが出来る。

恒星間天体とは、太陽系外から飛んできた天体のことである。これまで観測されている太陽系天体と違い、双曲線軌道を持ち、一度近づいたら戻ってこない。太陽系天体から太陽系について調べられるが、恒星間天体からはその母天体の恒星系について調べられる。人類はこれまでにオウムアムアとボリソフの 2 つの恒星間天体しか知らないが、同じ恒星間天体でも見た目の形や特徴が違っていた。

本研究では、これまでに観測された 2 つの恒星間天体について、参考論文からその起源について比較していく。

2.ボリソフ(2I/Borisov)

ボリソフとは、2019 年 8 月に発見された恒星間天体であり、彗星活動をともなっていた。ボリソフの最大の特徴は大量の CO が観測されたことである。CO は、固体の状態だと観測することができない。太陽に近づき、彗星活動として噴き出すことで初めて観測できる。その蒸発する温度は物質によって違い、H_2O は 120K、CO は 25K で蒸発する。ハッブル宇宙望遠鏡の観測から 30～50 kg/s の CO が検出され[1]、ALMA の観測でも 22 kg/s の CO が検出された[2]。この値は太陽系彗星と比較しても多い値となっている。CO は揮発性が高いのにも関わらずたくさん観測された。つまりボリソフは 25K 以下の環境にずっといて、今回太陽に近づくまで、一度も 25K 以上になったことがないと考えられる。

ボリソフが回っていた恒星(主星)の候補として M 型星があげられる。M 型星とは、太陽よりも軽く、低温の星である。軽い星ほど宇宙にたくさん存在し、低温の星ほど CO が氷で存在する領域が広くあるため、可能性が高いとされている。そのような星の周りを回っていたボリソフは、同じ主星を回る惑星による重力や、たまたま近くを通過した恒星などの重力による摂動によって軌道がずれ、遠くに弾き飛ばされたと考えられる。

3.オウムアムア(1I/2017 U1)

オウムアムアとは、2017 年 10 月に発見された恒星間天体であり、彗星活動はしていなかった。オウムアムアについて、恒星間天体としては不思議な「細長い形」[3]「彗星活動なし」「非重力加速がある」の 3 つの点に注目する。これらは、潮汐破壊モデルで統一的に説明できた[4]。

1 つ目の「細長い形」は、母天体(オウムアムアの元の天体)が主星(オウムアムアの母天体が回っていた恒星)に近づいた際の潮汐力で砕かれたとするモデルにより説明される(図 1)。主星との距離が近いほど、母天体の破片は小さく細長い形になり、オウムアムアの不思議な細長い形状とよく一致する。効率よく母天体が砕かれるためには主星に十分近づく必要があることから、主星の候補として小さい天体である M 型星か白色矮星が考えられる。

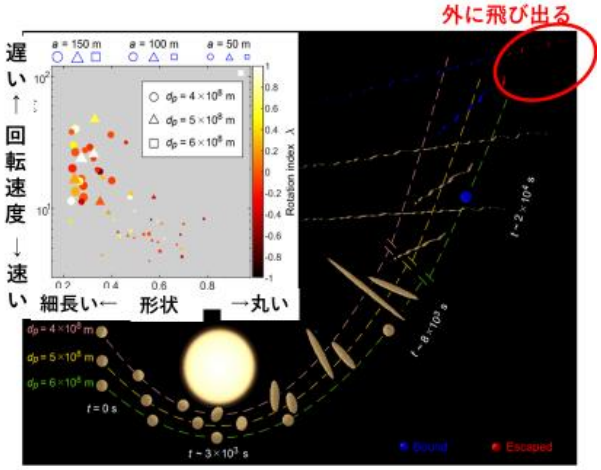


図 1.異なる距離での潮汐破壊シミュレーションと断片化の結果

2 つ目の「彗星活動なし」は、母天体が砕かれた際に主星に近づき高温になったことで説明される。オウムアムアの表面にもともとあったはずの H_2O や CO_2は主星に近づいた時に蒸発してしまったため、太陽にやってきたとき彗星活動が見られなかったと考えられる。

3 つ目の「加速」は、オウムアムアが太陽に近づいた時にオウムアムアの地下にわずかに残っていた H_2O と CO_2が蒸発したためと説明できる。この放出が非重力加速源であると考えられる。この時の蒸発量は少なかったため、彗星活動としては観測されなかった。

4.まとめ

以上のことから、ボリソフもオウムアムアも M 型星か白色矮星の周りを回る天体が、何かの拍子に軌道が曲げられ、ボリソフは軌道の外側に弾き飛ばされ太陽系にやってきて、オウムアムアは内側に飛ばされ一度主星に近づいてから太陽系にやってきたということが考えられる(図 2)。

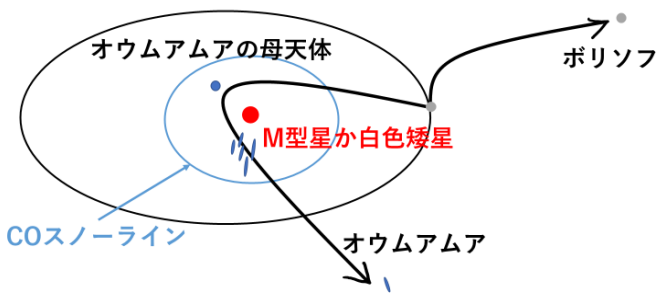


図 2.オウムアムアとボリソフの起源の比較図

ボリソフは CO が多かったことを除くと、太陽系彗星と似た特徴であったのに対し、オウムアムアは彗星活動をしない小天体のようであることが分かった。このように同じ恒星間天体でも起源や歴史が大きく異なることが分かった。

5.参考文献

[1] D. Bodewits et al. (2020) *Nature Astronomy*, **4**, 867
[2] Cordiner et al. (2020) *Nature Astronomy*, **4**, 861
[3] K J Meech et al. (2017) *Nature* **552**, 378
[4] Yun Zhang & Douglas N.C. Lin et al. (2020) *Nature Astronomy*, **4**, 852

金星のスーパーローテーションを維持する有力なメカニズムとは

天文学研究室
1724043　戸川尊博
指導教員：津村耕司

1.背景：金星について

金星は質量や大きさが地球に似ていることから「双子星」とも呼ばれているが地表での環境などは地球とは大きく異なっている。金星の大気の 97%は二酸化炭素であり、上空には濃硫酸の雲が全球を覆うように浮遊している。金星は外部からの光の入射光と反射光の比率から求められる反射率(アルベド)が非常に高い。そのため金星に入射する太陽光のほとんどは上空の雲に吸収されてしまう。金星の自転周期は非常に遅く 243 日であり、地球と逆方向に自転(西回転)している。公転周期は 225 日であり自転周期とほぼ同期しているため太陽と潮汐ロックに近い関係にある。そのため金星の 1 日は地球の 117 日相当の長さとなり昼夜が非常に長くなって昼側では太陽に長時間照らされて加熱される。1960 年代に金星で風が高速で回転する気象現象が発見された。金星で吹く風の速度は高度が増すとともに増大していき、高度約 50～70km で最大となる。その領域での風の速度は 4 金星日程度で金星を 1 周するほどで、自転の約 60 倍の速度に達している。この現象はそれらの特徴からスーパーローテーション(超回転)と呼ばれている。スーパーローテーションが発見されるまで惑星の大気に自転速度を大きく上回る速度の循環が生じることは有り得ないと考えられていたため、この現象は天文学や気象学において大きく注目された[1]。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は金星の詳細な観測及びスーパーローテーションのメカニズムを解明する事などを目的として 2010 年に金星探査機「あかつき」を打ち上げた。しかし金星への周回軌道投入時にメインエンジンが故障してしまいミッション失敗に思えたが、打ち上げから 6 年後に金星へ再度最接近した際に姿勢制御用のエンジンを用いて金星への周回軌道投入に成功した。その後「あかつき」は搭載された観測装置を用いて金星のスーパーローテーションについてより理解を深めるために重要な金星の夜部分の観測に成功しただけなく、金星全体の温度場や風速場の観測データを解析したことによりスーパーローテーションが維持され続けるメカニズムの最も有力な説の鍵となる「熱潮汐波」の全体構造を世界で初めて観測を成功させた[2]。

2.熱潮汐波によるスーパーローテーションのメカニズム

JAXA は「あかつき」から得られたデータを基に解析を行った結果、スーパーローテーションを維持するメカニズムは熱潮汐波にあると提唱した。熱潮汐波とは地球でも観測される気象現象のひとつで、これは太陽光に加熱された大気が振動することによって励起される波である。この熱潮汐波によってスーパーローテーションを加速させる運動量が発生し、スーパーローテーションが減速せず維持され続けるというのが提唱されたメカニズムである(図 1 左)。熱潮汐波によるメカニズムはシミュレーションによって理論的に計算され、スーパーローテーションが確認された高度 50～70km で風速が最大となる結果が示されていた(図 1 右)。それを証明するため JAXA は「あかつき」で金星全体の観測を行い熱潮汐波の全体構造を解明した。熱潮汐波は太陽光加熱によって励起されるため、太陽の運動方向と同じ方向への運動量が生じる。それに伴って反作用により雲には反対方向(西向き)の運動量が生じる。熱潮汐波

の半日潮という成分の波は金星の地表面まで届く特性があり、この波が地表に届くと波に摩擦力が生じ東向きの運動量は打ち消される。すると西向きの運動量のみが取り残され、この運動量が上空に汲み上げられることでスーパーローテーションを加速させる。この運動量は昼側では大気循環によって極方向へ輸送されてしまうが、金星の夜側では極から赤道方向への風速場があるため赤道に運動量が輸送されてくる。これによってスーパーローテーションを加速させる運動量は金星全体へ行き渡りスーパーローテーションを維持している。

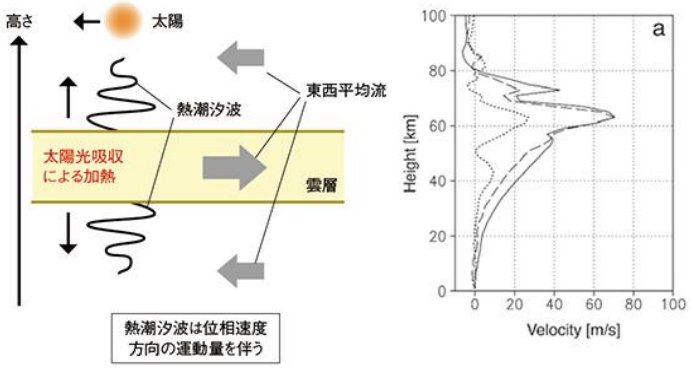


図 1.熱潮汐波によるメカニズムとシミュレーション結果[3]

3.金星探査機「あかつき」による観測

上記で述べたように「あかつき」は金星の夜部分の観測に成功した。それを可能としたのは搭載された「中間赤外線カメラ(LIR)」である。LIR は人の目に見えない 10μm の赤外線を用いた観測装置で、サーモグラフィと同じ原理で熱放射を観測するため夜側の観測が可能である。LIR のメリットは観測する雲頂(高度約 70km)での昼夜両方の温度・風速を測定が可能なことにある。この LIR により得られた 3 金星年分の温度場のデータを平均した結果、金星全体の温度場を解析することが出来た(図 2)。観測する角度の違いにより観測される高度が異なるため半日潮成分の 3 次元構造が判明した。この波の高度方向の傾きを検出したことによって気象力学の理論から半日潮汐波がスーパーローテーションを加速していることが示唆される。また LIR の観測で得られた雲の細かな模様が強調された画像に温度分解能を上げる処理を施して解析を行った結果、昼側では赤道から高緯度へ向かう流れが、夜側では赤道へ向かう流れが確認された。金星における風速場は計算などで理論的に予想されており、観測的にこの結果を得られたのは世界初である。

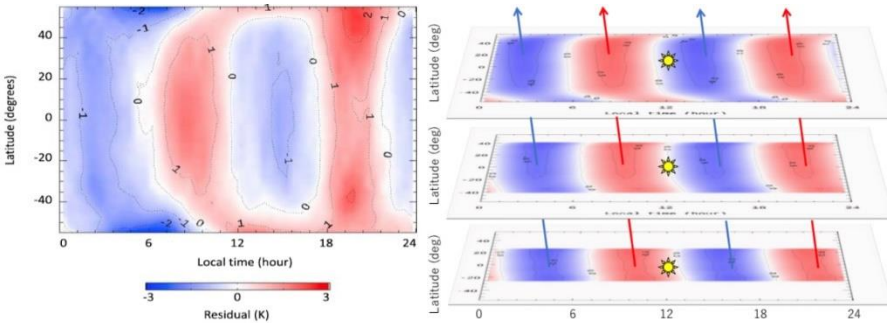


図 2.観測された温度場と半日潮成分の 3 次元構造[4]

4.参考文献

[1] 松田佳久（2016），*日本気象学会機関誌「天気」*, 63, 499
[2] Horiguchi et al. (2020), *Science* 368, 405-409
[3] 髙木征弘,「金星のスーパーローテーションの謎に迫る」 京都産業大学ウェブサイト
https://www.kyoto-su.ac.jp/project/st/st17_02.html
[4] 神山徹（2019）「LIR によって初めて決定された金星における熱潮汐波の全球構造」，金星探査機「あかつき」の観測成果に関する記者説明会資料
https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20191119_akatsuki-02.pdf

系外惑星大気中のダストとハビタビリティ

天文学研究室
1724050　原口　宗一朗
指導教員：津村　耕司

1. 概要

系外惑星とは、太陽系の外の恒星の周りを回っている惑星のことである。そして、私たちは、生命が生存可能な系外惑星（ハビタブルな惑星）を探している。

本研究では、M 型星周りの系外惑星のハビタビリティについて述べる。M型星周りの系外惑星は潮汐ロックされている可能性が高い。また、潮汐ロックされている惑星の昼側ではダストが発生しやすくなる。よって、ダストが系外惑星のハビタビリティやバイオシグネチャーの観測にどのような影響を及ぼすかを述べる。

2. 系外惑星に関する基本的知識

系外惑星の観測は非常に難しい。その理由は、惑星自身が光を放っていないので暗いことに加え、その惑星のすぐ近くに非常に明るい恒星があるからである。それゆえに、トランジット法という特殊な方法を使う必要がある。トランジット法とは、恒星の前を惑星が横切った時の減光を観測する方法である。この減光の度合いを調べることによって惑星の大きさ、公転周期、軌道長半径などの惑星に関する情報が手に入る。しかし、このようなトランジット法にもいくつかの注意事項がある。それは、系外惑星が恒星の前を通過するような位置関係でないとトランジットを観測できないことである。もう 1 つは、減光の度合いが小さいことである。

次にハビタブルゾーンについて述べる。ハビタブルゾーンとは、惑星表面で水が液体で存在できる領域のことで、生命の存在が期待される。このハビタブルゾーンは、中心にある主星の種類によっても位置は異なってくる。主星が太陽より暗ければ、ハビタブルゾーンは内側に移動する。また、主星が太陽より明るければハビタブルゾーンは外側に移動する（図 1 を参照）。

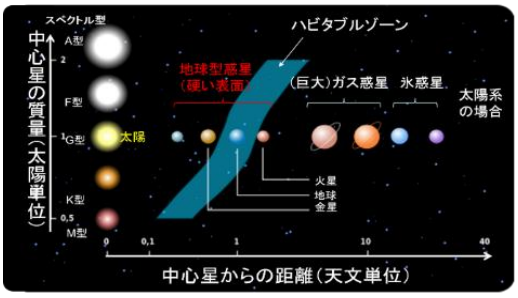


図 1：ハビタブルゾーンと主星の関係 出典：天文学辞典

系外惑星の大気組成の特定の仕方について述べる。ある特定の分子は特定の波長の光を吸収するという性質がある。それを使って、恒星から出て惑星の大気を透過した光をトランジットの際に観測することで、大気の組成を特定することができる。

3. 惑星大気中のダストによるハビタビリティへの影響

系外惑星を探査する上でM型星を観測するといいとされている。M型星とは、小さく軽いために、暗くて赤い星である。それゆえに、M型星は数が多く、断面積が小さいのでト

ランジット観測がしやすい。加えて、M型星は暗いのでハビタブルな惑星の公転周期が短く高頻度のトランジット観測ができるという利点がある。そのM型星のハビタブルな惑星は主星との距離が近いので潮汐ロックされている可能性が高い。潮汐ロックとは、月と地球のように2天体あるうちの質量の小さい方の天体の自転周期と公転周期が同じになってしまう現象ことである。よって、潮汐ロックされていると昼側が熱くなりダストが発生しやすくなる。

大気ダストが潮汐ロックされた系外惑星にどう影響するかを Boutle et al.(2020)によってシミュレーションされた。その結果、潮汐ロックされている惑星の場合、昼側ではダストが主星からの光を妨げるので、外からの入熱を防ぎ、系外惑星の温度を下げる。それによってハビタブルゾーンの内側は内側に拡がる。また、夜側では惑星表面からの熱を逃がさないダストの効果によって高い温度を維持できる。それによって、ハビタブルゾーンの外側は外側に拡がる。一方、潮汐ロックしていない天体では全体的にダストは惑星を冷ます効果があることが明らかになった。それによってハビタブルゾーンの内側と外側がともに内側に移動するので、ハビタブルゾーンが狭まる可能性があることが明らかになった。

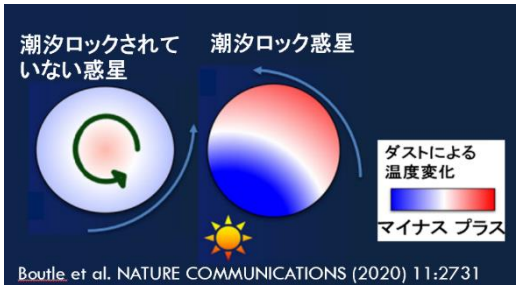


図2：ダストによる温度変化（Boutle et al. 2020）

その大気ダストがバイオシグネチャーガスの観測にどのような影響を及ぼすかも Boutle et al.(2020)によってシミュレーションされた。大気ダストがあることによってバイオシグネチャーガスの吸収構造が不明瞭になり、バイオシグネチャーガスがない惑星と判断されてしまう可能性があることが明らかになった。

4. 結論

私たちは生命が生存可能な系外惑星（ハビタブルな惑星）を探している。その為には探査しやすいM型星を観測する。しかし、M型星周りのハビタブルな系外惑星は潮汐ロックされている可能性が高い。潮汐ロックされている惑星では以下の3つがシミュレーションからわかった。

（1）昼側でダストが生成されやすい
（2）潮汐ロックされている惑星ではダストはハビタブルゾーンを拡げる
（3）ダストはバイオシグネチャーを見えづらくする

5. 参考文献

[1] Boutle et al. Mineral dust increases the habitability of terrestrial planets but confounds biomarker detection. NATURE COMMUNICATIONS 11:2731(2020)

[2] Sedaghati et al. Detection of titanium oxide in the atmosphere of a hot Jupiter . Nature 549, 238-241 (2017)

地球外知的生命体の数と文明の寿命

天文学研究室
1724056　本澤悠希
指導教員：津村耕司

1.はじめに

近年、系外惑星が多く発見されたことなどから、地球外生命体探しが注目されている。それにもかかわらずまだ見つかっていないということは、地球外生命体はいないのだろうか。ここでは地球外生命体の中でも地球文明と同等以上の知能を持っている地球外文明に限定して考えていく。地球外文明を見つけたければ存在している数が多ければ多いほど見つかる可能性が高くなる。また、文明の存続期間が重なっていなければ見つけられないので文明の寿命も重要である。地球外文明を見つけるために必要な天の川銀河内の文明の個数と平均寿命について、ドレイク方程式とフェルミのパラドックスの 2 つを使い推定していく。

2.ドレイク方程式

ドレイク方程式とは天の川銀河内の通信ができる文明の数 N を推定する式であり、次のように表される。

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L \tag{1}$$

ここでR_*は天の川銀河内で 1 年間に誕生する恒星の数、f_pは恒星が惑星を持つ割合、n_eはその恒星が持つハビタブルゾーンにある惑星の平均数、f_lはその惑星で生命が誕生する割合、f_iは発生した生命が知能を持つまで進化する割合、f_cは知能を持った生命が星間通信を行う割合、Lは文明の寿命となっている。

次にそれぞれの値を考える。$R_* f_p n_e$はこれまでの観測結果から求めることが出来るが、$f_l f_i f_c$は地球以外に生命が見つかっていないため推定値である。R_*は銀河内の恒星の数が約 1000 億個、銀河の年齢が約 100 億年なので 10[個/年]。f_pは系外惑星探査の結果[1]から 1。n_eはケプラー宇宙望遠鏡の観測結果[2]から 0.2。f_lは生命が誕生できる環境ならば時間が経てば必ず生命が生まれると考えて 1 とする。f_iは「地球生命が 40 億年間で絶滅しなかった確率は約 15%」[3]より 0.15 とする。f_cは人類が通信できるようになるまで時間はかかっていないが、通信技術が完璧ではないことから 0.1 とする。

式(1)に値を代入するとドレイク方程式は次のようになる。

$$N = 0.03L \tag{2}$$

3.フェルミのパラドックス

フェルミのパラドックスとは、地球外生命体が地球に来たという痕跡がないことについて疑問を投げかけたものである。宇宙が誕生したのが 138 億年前、地球が誕生したのが 46 億年前なので地球文明よりも先に誕生した文明があってもおかしくない。文明の成長スピードが地球と同じとすると、1 億年先に誕生した文明は、1 億年先を行っていることになる。それならば地球に来る技術もあってもおかしくないはずだが、なぜまだ来ていないのかという疑問である。

次にフェルミのパラドックスの定式化について考える。全ての文明の寿命がL年であり、文明がN個均等に散りばめられているとすると、その文明からのメッセージが届く範囲の合計は次のように表される。

$$\pi(cL)^2 \times N \tag{3}$$

式(3)が銀河の面積Sよりも大きければメッセージが届き、小さければ届かないということになる。

この式を変形し、*銀河の*半径$r = 6.0 \times 10^{20}\ \ m$、光速$c = 9.5 \times 10^{15}\ \ m/yr$を代入するとフェルミのパラドックスの式は次のようになる。

$$N = \frac{4.0 \times 10^9}{L^2} \tag{4}$$

4.文明の個数、寿命の推定

式(2).(4)からN、Lを求めれば、地球外文明に出会うために必要な文明の個数、寿命がわかる。実際に計算するとLは 5000 年、Nは 150 個となる。このことから宇宙に存在する文明が平均として約 5000 年以上存在し続け、天の川銀河に約 150 個以上の文明があれば互いに会うことが出来るといえる。しかしこれはドレイク方程式のf_l(生命が誕生する割合)を 1 としているので、文明の数が最大値に近い場合の推定値となっている。f_lの値を変えて考えた場合の L と Nの値を表 1 に示す。

表 1. f_lの値を変えた場合のLとNの値

f_l	L(年)	N(個)
1	5000	150
0.5	6500	100
0.1	11000	30
0.01	24000	7

5.考察

f_l(生命が誕生する割合)を小さく考えると、文明の数が少なくなり、出会うために必要な文明の寿命は大きくなることがわかった。生命が誕生できる環境の惑星には必ず生命が誕生する($f_l = 1$)という、文明の数が最大値に近い楽観的な考え方をした場合でも、他の文明に出会うためには文明が 5000 年存続しなければならない。このことから電波を扱えるようになって 100 年程度の地球文明が他の文明にまだ出会えていないことは不思議なことではないということがわかる。また、楽観的な考え方をすれば他の文明に出会えていない場合でも 150 個未満の文明は存在している可能性があると考えられる。

6.結論

ドレイク方程式とフェルミのパラドックスから地球外文明に出会うために必要な文明の数と寿命を求めたところ、150 個の文明と 5000 年の寿命が必要なことがわかった。このことから地球外文明とコンタクト可能な技術を得てからまだ 100 年しか経っていない地球文明が現在、地球外文明に出会えていないことは不思議なことではなく、会えていないからといって地球外文明が存在しないとは言えないことがわかる。また、もし天の川銀河内に 150 個以上の文明が存在しているなら、5000 年の間に出会える可能性が高いといえる。

7.参考文献

[1] Cassan et al. (2012) Nature,481,167
[2] Petigura,Howard,＆Marcy (2013) PNAS,110,19273
[3] Tsumura (2020) Scientific Reports,10,12795

金星大気のスーパーローテーションの維持機構

宇宙科学研究室
1724002　青木姫乃
指導教員：門多顕司

1.緒言

惑星や衛星の自転速度を遥かに上回る速さで自転と同じ方向に回転する大気現象を「スーパーローテーション」と呼び、金星がよく知られている例である。金星の自転方向は地球とは逆向き(西向き)で周期は 243 日と非常に遅く、スーパーローテーションは最も速度が大きい赤道上空の雲層(高度 50～70 km)の上端付近では自転速度の 60 倍の 100 m/s にも達する。この金星大気のスーパーローテーションは 1960 年代に発見されたものの、その維持機構が何であるかはつい最近まで明らかになっていなかった。しかし 2020 年 4 月 24 日、金星探査機「あかつき(PLANET-C)」の観測により長年謎に包まれていた金星大気のスーパーローテーションの維持機構が解明された[1]。

本研究では、文献[1]を基に金星大気のスーパーローテーションが維持されるメカニズムを紐解くと同時に、金星大気のスーパーローテーションの時間変化についてモデル計算を行った。

2.あかつきの観測結果

あかつきでは、紫外線による雲の観測から大気の速度が、赤外線による輝度温度の観測から大気の熱流束が推定された。2015 年 12 月から 2018 年 12 月までのデータから得られた金星大気のスーパーローテーション維持機構の概念図を図 1 に示す[2]。極と赤道の温度差により南北方向にゆっくりと大気が循環している子午面循環は、低緯度から高緯度に向けて角運動量を運び去り、スーパーローテーションを減速させる作用がある (図 1 の白い矢印)。一方、太陽によって昼側の大気が加熱され夜側で冷えることによって生じる熱潮汐波は、低緯度の大気に角運動量を運び込み、スーパーローテーションを加速する作用がある(図 1 の赤い矢印)。さらに、これら以外の波や乱流はこれまではスーパーローテーションを加速させる作用があると考えられていたが、むしろその逆で減速の作用があることが明らかになった。これらの効果によって金星のスーパーローテーションは維持されていると推測された。

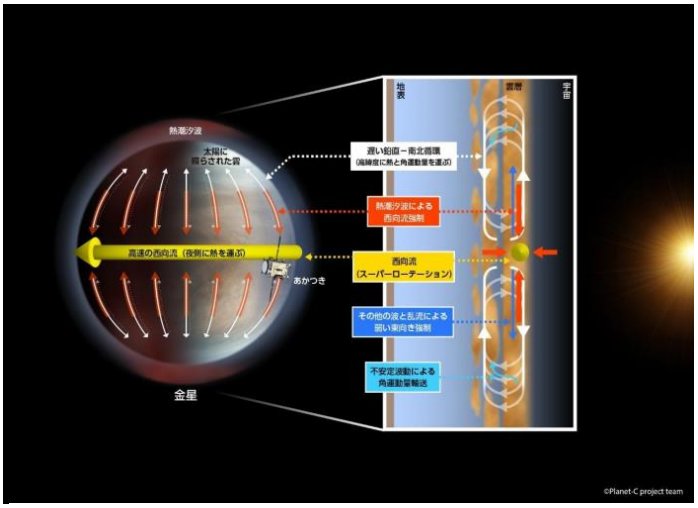


図 1. 金星大気のスーパーローテーション維持機構の概念図

3.大気大循環モデル

角運動量の時間発展は、気象学において変形オイラー平均方程式~~は~~と呼ばれる式(1)で与えられる[1]。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\boldsymbol{v}^r \cdot \boldsymbol{\nabla} M + \rho_0^{-1} \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{F} \tag{1}$$

Mは帯状平均（緯度円に沿って平均）した単位質量あたりの角運動量であり、スーパーローテーションのように西向きの場合は負となる。$\boldsymbol{F}$は角運動量フラックス（単位面積の断面を通過する単位時間あたりの

角運動量）であり、エリアッセン・パームフラックスと呼ばれる。$\boldsymbol{v}^r \equiv (0, v^r, w^r)$は平均子午面循環速度を表し、残留循環と呼ばれる。$v^r$は北向きの速度、$w^r$は湧昇（鉛直上向きの速度）であり、$\rho_0$は大気の密度である。また、

$$M = (a+z)\langle u\rangle \cos\varphi + (a+z)^2 \Omega \cos^2\varphi \tag{2}$$

であり、$\langle u\rangle$は東西方向の風速uの帯状平均、$a = 6.052 \times 10^6$ m は金星の半径、$\Omega = -\frac{2\pi}{243\mathrm{days}} = -2.99 \times 10^{-7}$ s^{-1} は金星の回転の角速度、zは高度、φは緯度である。

エリアッセン・パームフラックス$\boldsymbol{F}$のy成分F_yは式(3)で与えられる[1]。

$$F_y = \rho_0(a+z)\left(f_{yv} + f_{yT}\right) \tag{3}$$

$f_{yv} \equiv -\langle u^* v^*\rangle \cos\varphi$, [3]$f_{yT} \equiv \frac{\partial\langle u\rangle}{\partial z} S^{-1}\langle v^* T^*\rangle \cos\varphi$であり、$\langle\ \ \rangle$と *はそれぞれ帯状平均とそれからの偏差を表す。$S$は温度の高さによる変化の割合を表す。熱潮汐波の場合、$|f_{yv}| \gg |f_{yT}|$と考えられるのでf_{yT}を無視すると、熱潮汐波によるエリアッセン・パームフラックス$\boldsymbol{F}$のy成分F_yによる角運動量変化は式(4)で与えられる。

$$\rho_0^{-1}\frac{\partial F_y}{\partial y} = -(a+z)\frac{\partial}{\partial y}(\langle u^* v^*\rangle \cos\varphi) = -\frac{\partial}{\partial \varphi}(\langle u^* v^*\rangle \cos\varphi) \tag{4}$$

また、エリアッセン・パームフラックス$\boldsymbol{F}$のz成分F_zは式(5)で与えられる[1]。

$$F_z = \rho_0(a+z)(f_{zw} + f_{zT}) \tag{5}$$

$f_{zw} \equiv -\langle u^* w^*\rangle \cos\varphi$, $f_{zT} \equiv \zeta_a S^{-1}\langle v^* T^*\rangle \cos\varphi$であり、$\zeta_a$は絶対渦度の鉛直成分である。

4.結果

あかつきの観測から示唆された値[1]を用いて、赤道上空 73 km の場合に式(1)から計算した子午面循環と熱潮汐波によるスーパーローテーション$\langle u\rangle$の時間変化を図 2 に示す。図 2 よりスーパーローテーションは時間の経過とともに加速している。ただし、スーパーローテーションを減速させると考えられる他の波や乱流は今回のモデル計算では考慮していない。これより、熱潮汐波が金星大気のスーパーローテーションを維持するために大きく寄与していることが確認できる。

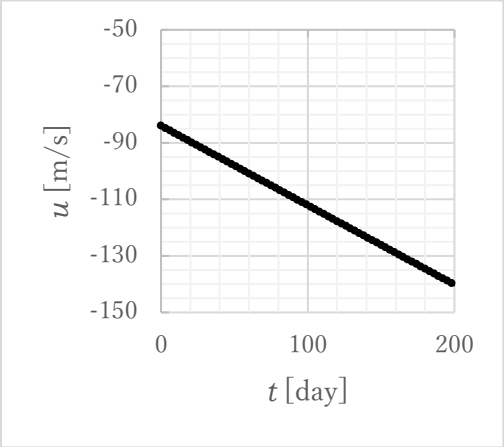


図 2.子午面循環と熱潮汐波による$\langle u\rangle$の時間変化

5.結論

あかつきの観測データを用いて大気大循環モデルを計算することにより、金星大気が太陽により昼間に加熱され夜間に冷却されることで大気が動いて生じる「熱潮汐波」が赤道領域へ角運動量を運び、スーパーローテーションが維持できているということが確認できた。

6.参考文献

[1] Takeshi Horinouchi *et al.*, Science **368**, 405-409 (2020)
[2]金星探査機「あかつき」観測成果論文の Science 誌掲載について
https://www.jaxa.jp/press/2020/04/20200424-1_j.html(2020)

米ゲルと米粉によるパンの製造と加水量の関係

宇宙研究室
1724052　土方日向子
指導教員：門多顕司

1.緒言

米ゲル[1]とは、高アミロース米を高速せん断「ダイレクト Gel 転換」することで得られるゲル状の新食材のことである。日本の食料自給率低下が懸念され特に炊飯米の需要低下が問題視されている現在、その改善策として生産コストの低い高アミロース米の普及を目的とした農研機構よる研究によって開発された。米粉と違い低コストで家庭でも加工が容易であることから最近注目を集めている。固さの調整洋菓子やパン、麺類など様々な食品に利用でき、小麦粉の代用として使用できることから小麦アレルギーの人でも食べられる食品の開発が進んでいる。また固さの調整も容易にできることから流動食としての利用も期待されている。実際カスタードクリームやシュー生地、レアチーズケーキ、パン、うどんなどに加工がされている。

しかしパンに限って見ると理想の米ゲルパンの製造方法が確立していない。先行研究[2]では、米ゲルと米粉のパンの比容積と硬さの点で最適水分量を導き出していたが、気泡が大きく形状が悪いと言った問題点がみられた。本研究では米ゲルと米粉が完全に混ざるためには比率を変える必要があると考え、米ゲルの量を増減させて変化をみた。

2.実験方法

米は岡山県産(平成 29 年)の高アミロース米(低 GI 米)品種夢十色を使用した。洗米後、米に対して 1.2 倍の水を加水し炊飯器のおかゆモードで炊飯した。炊飯後約 5 分間蒸らし粗熱を取ったら炊飯時に損失した水 20g を加えフードプロセッサーのボウルに投入した。炊飯米をボウル内で均一に広げるために 1 秒間ずつ撹拌しこれを 3 回繰り返した。その後回転数 2,900rpm で 3 分間高速せん断を行った。米粉は「パン用米粉　ミズホチカラ」(熊本製粉株式会社)を使用した。分量はベーカーズパーセントで表記し、米粉と米ゲル中の米の総量を 100%とし、合計総量を 300g とした。その他に砂糖 2.8%、塩 1.7%、オリーブオイル 2.7%、ドライイースト 1.4%を使用した。米ゲルと米粉の比率は表 1 に示すとおりである。また加水量については米ゲル中の水と製パン時の加水量の合計が米総量の 100%、120%になるように加えた。また基準として先行研究の最適製造割合にもとづくパンも製造し、これを A とした。

製パンにはホームベーカリーを使用し、米粉パン(小麦なし) モードで焼成した。焼成後ホームベーカリーの容器から取り出したあと 1 時間常温で粗熱を取った。

パンの容積を菜種置換法で測定し比容積(㎤/g)を算出した。

表 1. 米ゲルと米粉の比率

試料名	米ゲル	米粉
A	30	70
B	33.3	66.7
C	26.7	73.3

3.結果

今回は A、B、C、C'(加水 120%)の四本のみ製造した。A は高さ 10.5 ㎝　比容積 3.99 ㎤/g であった。B は高さ 8.5 ㎤　比容積 2.80 ㎤/g であり、C は高さ 11.3 ㎝　比容積 4.35 ㎤/g であり、C'は高さ 9.2 ㎝ 比容積 3.18 ㎤/g であった。B と C'は上部に凹みが見られ、膨張不足であることがうかがえる。

図 1.　それぞれのパンの高さ

左から順に A、B、C、C’

4.考察

米ゲルの増減量によりパンの高さや比容積が変化するのではなく、加水量に基づいて変化するのではないかと考えた。C と C’の結果を見ると加水量 120%より 100%のほうが良いことからも明らかである。ただし、B では加水量を変化させたパン試料を製造していないので、米ゲルが多い場合は加水量の増減が結果に繋がるか不明である。

5.結論

本研究はまだ研究中であるため現段階では不明なことが多い。今後条件を変えて実験していく。

6.参考文献

[1]農研機構　高アミロース米による新規食品素材「米ゲル」
https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nfri/2013/13_064.html
[2]中野 明日香, 粉川 美踏, 北村 豊（2018），米ゲルと米粉によるグルテンフリーパンの開発および特性の検討，日本食品科学工学会誌，65，124-129

位置感応型ゲルマニウム半導体検出器の位置決定法の開発

実験原子核物理研究室
1724029　菅原　奏来
指導教員　西村　太樹

1. 緒言

陽子と中性子から成る原子核は物質の質量の大半を占め、私たちの身の回りから、宇宙の果てに至るまで、ありとあらゆるところに存在する。物質の起源である原子核の構造を理解することは、4 つの基本相互作用の 1 つである核力を解明したり、宇宙元素合成の謎を解明したりするためにも重要である。原子核の研究はラザフォードによる発見以来、「安定核」と呼ばれる陽子数と中性子数がほぼ同数からなる天然の原子核を中心に進められてきた。今から約 40 年前に、陽子に比べて中性子が非常に多い原子核「中性子過剰核」や、逆に陽子が多い「陽子過剰核」を人工的に効率よく生成する革新的技術が生まれ、原子核物理の対象が飛躍的に増えることとなった。 こうした中性子過剰核、陽子過剰核を「不安定核」と呼んでいる。

近年では、原子核の秩序を特徴づける「魔法数」が破れたり、3 軸非対称な変形原子核などが見つかったりしている。変形原子核を研究する実験手法にインビームガンマ線核分光というものがある。インビームガンマ線核分光は加速された重イオンビームをターゲットに照射し核反応によって生成した原子核から放出されるガンマ線を測定し、原子核の励起準位およびスピンパリティ、励起状態の寿命などを測定することにより原子核構造を明らかにする実験手法である。インビームガンマ線核分光の実験に伴う困難として、原子核から放出されるガンマ線がドップラーシフトの影響を受けエネルギー分解能が悪化することが挙げられる。つまり、高分解能での核構造研究のためにはガンマ線の放射角度を測定しドップラーシフトの補正を精度良くできる位置感度型のガンマ線検出器の開発が重要である。位置感応型ゲルマニウム半導体検出器 GRAPE(図 1) は波形解析を用いて検出器内でのガンマ線の相互作用位置を導出できる。六角形の金属容器の中は円筒形の高純度ゲルマニウム結晶を用いたダイオードになっており、陽極には 2500 V の逆電圧が印加されている (図 2)。本研究の目的はガンマ線の相互作用位置依存性を持った波形を取得し、GRAPE の位置決定法を開発することである。

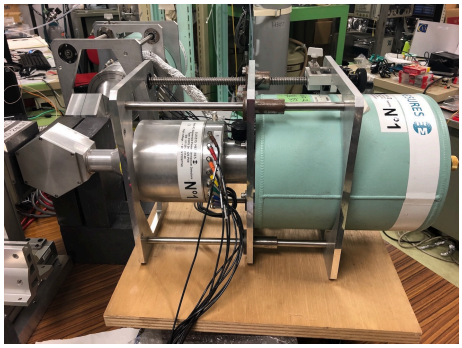


図 1　位置感応型 Ge 検出器 GRAPE

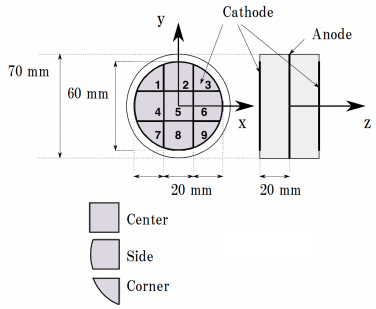


図 2　検出器内の結晶と電極の構成と空間軸の定義

2. 実験方法

本実験では、校正用 ^{137}Cs 線源から放出される 662 keV のガンマ線による 90° コンプトン効果を用いてガンマ線の相互作用位置依存性を持った波形取得を試みた。コンプトン効果とは入射ガンマ線と電子の相互作用によって、散乱角度ごとに異なるエネルギーの内訳で電子とガンマ線が散乱する現象である (図 3)。このときエネルギー保存則 $E_\gamma = E'_\gamma + K_{e^-}$ が成り立つ。実際の実験のセットアップは図 4 の通りである。まず①において、自ら設計及び調整した可動式の鉛コリメータ (厚さ 60 mm、穴の直径 2 mm) によって、検出器 1 に届くガンマ線の放射角度を制限した。コリメータの中を通ってきた入射ガンマ線が、②で θ =90° のコンプトン効果を起こし、散乱ガンマ線が③の厚さ 100 mm の鉛スリットを通り、検出器 2 で検出される。ここで重要なことは、ガンマ線の放射方向をコリメータで

線状に制限し、スリットで面状に制限することによって、線と面の交点はただ 1 点に絞られて、検出器 1 でのコンプトン効果の相互作用位置点での波形が取得できることである。解析時は、検出器 1 と検出器 2 の間でエネルギー保存則 662 keV$= E'_\gamma + K_{e^-}$ を満たすものだけに制限をかけることで、90° コンプトン散乱のイベントの波形を得ることができた [1]。

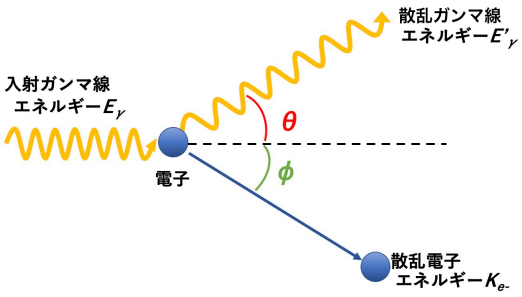


図 3　コンプトン効果

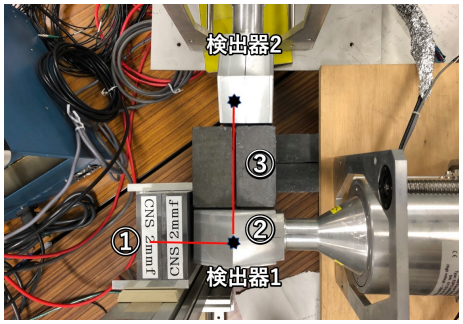


図 4　実験のセットアップ

3. 実験結果

例として、6 番目 (#6) の電極でガンマ線が相互作用したときの各電極の波形を図 5 に示す。x, y 座標はガンマ線が相互作用した再近接の電極とその周囲の電極の波形を解析に用いる [2]。図 5 より、ガンマ線が相互作用した再近接の電極 #6 とその周囲の電極 #3,#5,#9 が特徴的な波形になっていることがわかる。ガンマ線の放射角度に最も影響を及ぼす z 座標 (陽極からの距離) の導出にはゲルマニウム結晶内での電子・正孔対の電極までの到達時間の違いを利用して、電極#6 自身の波形の立ち上がりを解析に用いた。図 6 に陽極からの距離 z を変えたときの、立ち上がり波形を示す。

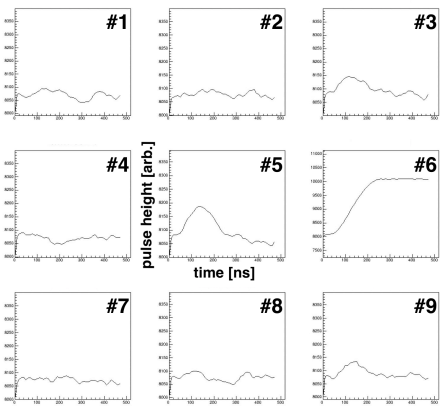


図 5　各電極ごとの波形

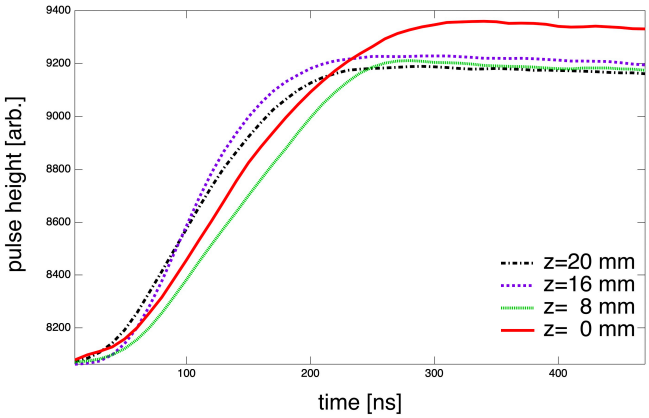


図 6　z=0,8,16,20 mm のときの波形の立ち上がりの比較

4. 結論および今後の展望

コンプトン効果を用いて、ガンマ線の相互作用位置依存性を持った波形を取得することができた。今後の目標は、原子核実験での実用化に向けて、全ての電極の波形を教師データとして機械学習を利用し、(エネルギー, 波形) というデータから (x, y, z) というガンマ線の相互作用位置を導出できるように開発を進めることである。

5. 参考文献

[1] Y. Yamaguchi, Master Thesis, Center of Nuclear Study, The University of Tokyo.

[2] S. Go, Master Thesis, Center of Nuclear Study, The University of Tokyo.

白色矮星の質量と半径の関係および質量限界について

理論物理学研究室
1724039 田所　有人
指導教員　長田　剛

1.　導入

量子統計力学とは、「統計力学という物質を構成する個々のミクロな粒子の性質から、それらが多量に集まって出来る物質の性質を記述することを目的とする学問」つまり、気体や固体の熱的性質や磁性などのマクロな性質を量子力学を用いてミクロな観点から理解する学問である。本論では、量子統計力学を巨視的なフェルミ粒子系である白色矮星に適用した。

白色矮星とは、恒星の進化の過程で存在が確認されている星の形態である。太陽質量の約 8 倍以下の質量の恒星は赤色巨星へと進化し、中心核は自己重力により収縮し、周りのガスは自己重力を振り切り周囲に放出され、惑星状星雲となる。この時残った中心核が白色矮星になり、これは自己重力と天体内の電子による縮退圧が釣り合うことで形成されている[1]。この自己重力と電子の縮退圧が釣り合っているという仮説から、チャンドラセカールが指摘した白色矮星の半径と質量の関係を表す式と、白色矮星の質量限界を導出することを本研究の目的とする。

2.　モデル・アイデア

本研究では典型的な白色矮星として、質量 $M = 10^{30}$ kg ,温度 $T = 10^7$ K ,密度 $\rho = 10^{10}$ kg/m^3 , 質量数 4 のヘリウムからなる気体の球と仮定した。なお、星の主原料であるヘリウムは完全にイオン化しているとする。一般的に、白色矮星の質量は太陽質量と同程度か数分の一であり、前述したように恒星の中心核の残骸とみなしている。

星を構成する電子を相対論的なフェルミ気体として取り扱うと、運動量 p を持つ状態の 1 電子のエネルギーが

$$\epsilon_p = mc^2\left[\sqrt{1+\left(\frac{p}{mc}\right)^2}-1\right] \tag{1}$$

で与えられる[2]。フェルミ粒子系では、$T = 10^7$ K という温度は、対応するフェルミエネルギーの温度と比較して十分に低く、電子はフェルミ縮退を起こしていると考えられる。この時の系の縮退圧 P は、フェルミ運動量 p_f を用いて、無次元の変数を $y_f = \frac{p_f}{mc}$ とおくと、以下のように表される。

$$P = \frac{g\pi m^4 c^5}{6h^3}A(y_f), \tag{2}$$

$$A(y_f) = \sqrt{1+{y_f}^2}\left(2{y_f}^3 - 3y_f\right) + 3\sinh^{-1} y_f\,. \tag{3}$$

星を構成する気体の温度が　$T = 10^7$ K の時の状態を考える。完全にイオン化した気体はヘリウム原子核気体と電子気体の混合気体として考えられる。この温度の粒子の平均運動エネルギーは $k_B T \approx 1$keVである。この平均運動エネルギーとヘリウム原子核及び電子のそれぞれの静止質量を比較すると、ヘリウム原子核の静止質量は 4GeVと平均運動エネルギーよりも遥かに大きいため、非相対論的に扱ってよい。一方、電子気体にとってこの温度は十分に冷たく縮退していると考えられるため、フェルミエネルギーと電子の静止質量を比較する必要がある。(1)式より、電子のフェルミエネルギーは0.5MeVであり、電子の静止質量とほぼ同等であるため相対論的な議論が必要であることがわかる。よって、本研究では圧力を求める式は(2)式を用いることにする。ここで、ヘリウム原子核気体と電子気体の圧力を比較すると、圧倒的に電子の圧力のほうが大きい。従ってこの天体は電子の縮退圧によって支えられていると考えられる。すなわち、この縮退圧と重力が釣り合うと考える。この時、天体の半径が微少量 dR だけ膨張し、体積が微少量 dV だけ大きくなると、エネルギーは、

$$dE_P = -PdV = P(R)4\pi R^2 dR \tag{4}$$

だけ変化する。ただし、星は球対称であるので圧力 P は動径 R だけの関数であるとした。一方、重力のポテンシャルエネルギーE_gは、

$$E_g(R) = -\alpha\frac{GM^2}{R} \tag{5}$$

$$dE_g = \frac{dE_g(R)}{dR}dR = \alpha\frac{GM^2}{R^2}dR \tag{6}$$

だけ変化する。なお、αは星の内部の密度が一様で無いことによる補正を表す因子である。今、星は熱平行状態にあるため自由エネルギーは変化せず $dF = 0$ である。さらに、温度変化もないので $dT = 0$ となる。自由エネルギーの定義より　$F = E - TS$　なので微少量は $dF = dE - SdT = 0$ から $dF = dE$=0 となるので、$dF = dE_P + dE_g = 0$ である。これと(4),(5)式より、

$$P(R) = \frac{\alpha}{4\pi}\frac{GM^2}{R^4} \tag{7}$$

となる。ここで、(7)式の左辺に(2)式と$p_f = \left(\frac{3}{4\pi}\frac{N_e h^3}{Vg}\right)^{\frac{1}{3}}$　、$M \approx N_e(m_e + 2m_n) \approx 2m_n N_e$ を用いると、

$$A\left(\left(\frac{9\pi M}{8m_n}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\hbar c}{m_e c^2}\frac{1}{R}\right) = 6\pi\alpha\left(\frac{\hbar c}{m_e c^2}\frac{1}{R}\right)^3\frac{1}{m_e c^2}\frac{GM^2}{R} \tag{8}$$

を得る。ただし、N_eは電子数、Vは星の体積、 m_n は核子の質量、 m_e は電子の質量である。この(8)式は星の半径 R と質量 M の関係を与えていることがわかる。

3. 結果・考察

本論では(8)式を数値的に解いてMとRの関係を詳細に調べるが、M/M_0の漸近的な振る舞いは調べることができる。(3)式の$A(y)$は、$A(y) \approx 2y^4 - 2y^2$ と近似できるので、

$$R \approx \frac{(9\pi)^{\frac{1}{3}}}{2}\frac{\hbar c}{m_e c^2}\left(\frac{M}{m_n}\right)^{\frac{1}{3}}\left(1 - \left(\frac{M}{M_0}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

という式が得られる。このM_0は、

$$M_0 = \frac{9}{64}\left(\frac{3\pi}{\alpha^3}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\hbar c}{Gm_n^2}\right)^{\frac{3}{2}}m_n \approx 1.44M_{sun} \tag{10}$$

で表され、チャンドラセカール限界と呼ばれる。ただし、M_{sun}は太陽質量である。(9)式を見てみると、$M > M_0$では実数の解 R は存在しない。 M が有限値 M_0 に近づくと星の半径は 0 に近づく。このことから、 M_0 を超える質量を持つ白色矮星は存在しないと考えられるので、 M_0 は質量限界と言えるだろう。また、(8)式は星の質量 M は核子の質量 m_n を単位とし、星の半径 R は電子のコンプトン波長 $\hbar c/m_e c^2$ を単位とし、右辺の重力エネルギー GM^2/R は電子の静止質量 $m_e c^2$ を単位としている。この様に(8)式は、量子力学・特殊相対論・古典重力理論を結びつける式となっている。今回、巨視的な天体を構成する気体の微視的な状態に着目する統計力学的なアプローチを量子力学的な観点から考察することで、白色矮星の質量限界である M_0 を導出することができた。

4. 結論

白色矮星に対して、恒星の進化と照らし合わせて妥当など温度などのモデルを設定し、目的とした質量と半径の関係及び質量限界を計算した結果、白色矮星の質量の最大値は理論的に太陽質量の約 1.4 倍であるという結果を得ることができた。微視的な理論である量子統計系力学が巨視的なスケールの白色矮星の特徴を説明することは興味深い。白色矮星の質量と半径を詳細に観測することで、この様な星の内部構造をより正確に知ることができるに違いない。

参考文献

[1] 福江　純,「完全独習　現代の宇宙物理学」, 講談社, 2015 年

[2] W.Greiner,L.Neise,H,Stöcker,「熱力学・統計力学」, シュプリンガーフェアラーク東京, 1999 年

球対称ブラックホール近傍の光の世界線

理論物理研究室　学籍番号 1724006　氏名　植松正揮
指導教員　長田　剛

1　序論

一般相対性理論が構築される前は、ニュートン力学における万有引力

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{1}$$

で重力は記述されると考えられていた。ここで G は万有引力定数であり、例えばある天体の周りを公転する惑星の場合 M, m, r はそれぞれ、万有引力定数、天体の質量、惑星の質量、天体と惑星の間の距離を表す。ニュートン力学での万有引力は瞬時に伝播するという事を要求するが、これは特殊相対性理論により否定され、ニュートンの万有引力を局所的な場の理論に拡張する必要があった。その理論が、一般相対性理論である。一般相対性理論は、1915 年にアインシュタインによって構築され、時空の歪みとして重力を幾何学的に記述する。例えば、大きな質量を持つ天体が回転をすることで一般相対性理論の予言する重力波と呼ばれる時空の歪みが波として周囲に伝播することが予言されるが、実際に予言されてから 100 年後の 2015 年に重力波が初検出された事は記憶に新しい [1]。　本論文では一般相対性理論の概略を説明したのち、シュバルツシルト解を導き、球対称ブラックホール近傍における光の世界線の振る舞いを調べることを目的とする。

2　理論

アインシュタインは、特殊相対性理論と一般相対性理論を構築したが、特殊相対性理論は等速運動をしている座標系（慣性系）間の変換に共変な理論になっている [2]。一方、一般相対性理論では加速度系も含めた一般座標変換に対して共変な理論になっている。このように一般相対性理論には 2 つの特徴がある。すなわち、等価原理と一般座標変換である。1 つ目に等価原理とは、重力の作用と加速度運動をする物体に作用する見かけの力である慣性力は、区別不可能であるという原理である。 2 つ目に一般座標変換とは、ローレンツ変換で取り扱うことができなかった非慣性系どうしを結ぶことを意味している。一般相対性理論では重力を時空の歪みの幾何学で表現されるが、これはユークリッド幾何学では現れない、ベクトルの平行移動の差によって定義されるリーマン曲率によって表現される。

重力は、ニュートン力学のような遠隔作用ではなく近接作用で表される必要がある。そのためには、場の方程式で理論を構築する必要がある。一方で、この方程式は物体の速度が光速に比べて非常に小さい場合はニュートン力学と一致させる必要がある。この条件を満足する方程式はアインシュタイン方程式と呼ばれ

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T^{\mu\nu} \tag{2}$$

で与えられる [3]。　ここで $R^{\mu\nu}$, R, $T^{\mu\nu}$, $g^{\mu\nu}$, G, c はそれぞれ、リッチテンソル、リッチスカラー、エネルギー運動量テンソル、計量テンソル、万有引力定数、光速　を表す。この方程式において、左辺は時空の歪みを表し、右辺は物質のエネルギー密度や運動量の流れを表す。

3　結果

本論では、原点に静止する質量 M の物体が周辺の時空に対して与える影響を時空に球対称性を課してアインシュタイン方程式を解析的に解いた。その結果、シュバルツシルト解と呼ばれる時空の不変間隔は

$$ds^2 = -(1 - \frac{r_g}{r})(cdt)^2 + \frac{1}{1 - \frac{r_g}{r}}dr^2 + r^2 d\Omega^2 \tag{3}$$

と与えられる。ここで、r_g、$d\Omega^2$ はそれぞれ、シュバルツシルト半径、角度変数の微分要素を表している。またここで、シュバルツシルト半径 r_g は

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{4}$$

で与えられる。光の世界線は (3) 式で $ds^2 = 0$ を満たすことより、以下のように求めることができる。

$$ct = ct_0 \pm (r - r_0 + r_g[\ln \frac{r - r_g}{r_0 - r_g}]) \tag{5}$$

ここで、$r < r_g$ の領域はいわゆる事象の地平面の内側にあたり、ブラックホールと呼ばれる。ブラックホールの外側から外向きへ光の世界線は、プラス解を選択し

$$ct = ct_0 + (r - r_0 + r_g[\ln \frac{r - r_g}{r_0 - r_g}]) \tag{6}$$

となる。一方、ブラックホールの外側からブラックホールに向かって内向きへの光の世界線はマイナス解を選択し

$$ct = ct_0 + (r - r_0 - r_g[\ln \frac{r - r_g}{r_0 - r_g}]) \tag{7}$$

となる。この解の振る舞いは、プラス解では $r = r_g$ の周辺で小さな r の変化に対して ct は大きく変動し、r_g より十分に離れると ct は r に比例しミンコフスキー時空との一致が見られる。一方、マイナス解でも同様の振る舞いが見られ、r_g より十分離れた光はミンコフスキー時空と同じように運動することが分かるが、r_g に近づくにつれて ct は発散する。また、$r > r_g$ で r_g に十分近くから外向きに運動する光の世界線は、時空図内でその傾きは発散するので光がブラックホールから遠方に進むのに要する時間は無限大となる。

4　まとめ、今後の課題

シュバルツシルトが行ったアインシュタイン方程式を球対称性を課して解析的に解くことで、シュバルツシルト解を求めた。また、これによりブラックホールの性質として光がブラックホールから脱出するための時間が無限大であることが分かった。つまり、ブラックホールが持つ「光さえも脱出できない」天体といった性質を (3) 式を解くことで、定量的に確認した。今後の課題としては、ブラックホール解の角度成分を取り入れ、1+3 次元のシュバルツシルト時空図内の光の世界線を数値的に解くことがあげられる。

5　参考文献

[1] B.P. Abbott et al. Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).

[2] 安東正樹、白水徹也　著:　「相対論と宇宙の事典」p.44 朝倉書店　(2020 年)

[3] 杉山直　著：講談社基礎物理学シリーズ 9「相対性理論」p.124 講談社 (2017 年)

長距離相互作用を考慮した１次元イジング模型と相転移

1724019　久保陽大
指導教員　長田　剛

1. 導入

統計力学とは系の微視的状態のとりうる確率分布を推定し、それより系がどのような振る舞いを持つかを調べる学問である。本論では一次元スピン系がカノニカル分布に従うとして議論する。カノニカル分布とは系 A と系 B が外部から孤立していて、互いにエネルギーの交換はあるが、粒子数に変化はないような系のミクロ状態の確率分布である。ここで系 B は系 A より十分大きいとし、系 B は温度 Tの熱浴として扱われる。すると、カノニカル分布は系 A の全ての微視的状態をボルツマン因子を重みとして足し上げることで定義される分配関数

$$Z = \sum_n \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right) \tag{1}$$

を用いて系を指定することができる。ここでE_nは系 A の n番目のエネルギーであり、k_Bはボルツマン定数、Tは熱浴の温度を表す。このとき自由エネルギーは(1)式の分配関数を用いて、

$$F = -k_B T \ln Z \tag{2}$$

で与えられ、また系 A のエントロピーは、

$$S = -\frac{\partial F}{\partial T} \tag{3}$$

で与えられる。注目する系が相転移を起こしているか否かを調べるためには、温度など熱力学的な量のパラメータの変化に対する系の応答を知る必要がある。相転移とは日常的なマクロなスケールで一様な状態にある相が変化することである。特に磁性体の相転移を記述するにはスピンの自由度が本質的な役割を演じる。物質を構成する粒子はその粒子固有のスピンをもつ。本論ではスピン 1/2、磁気モーメントμ_Bの原子が 1 次元に N個直線に並んだ系を考える。その上で本研究の目的は、長距離スピン-スピン相互作用をするスピン系のエントロピーを計算し、従来のイジング模型と比較することで長距離相関が系の相転移現象に与える影響を調べることを目的とする。

2. イジング模型

イジング模型とは熱力学量や相転移現象を記述するための一般的なモデルである。上向きスピンのとき s=+1、下向きスピンのとき s=－1 をとるとする。一次元イジング模型で最近接スピン同士の相互作用のみを考慮すると、系のエネルギーは、

$$E = -J\sum_{(i,j)} s_i s_j - \mu_B H \sum_i s_i \tag{4}$$

で与えられる。ここで Jは相互作用定数、μ_Bは磁気モーメント、Hは外部磁場である。また、自由境界条件(境界条件を課さない)かつ外部磁場 H=0 のとき、(4)式は

$$E = -J\sum_{i=1}^{N-1} s_i s_{i+1} \tag{5}$$

となる。この系のエネルギーの表式を用いると、分配関数、エントロピーはそれぞれ、

$$Z = 2\left(e^{J/k_B T} + e^{-J/k_B T}\right)^{N-1} \tag{6}$$

$$S = N k_B \left\{\ln 2\cosh\frac{J}{k_B T} - \frac{J}{k_B T}\tanh\frac{J}{k_B T}\right\} \tag{7}$$

で与えられる[1],[2]。

3. 長距離相互作用を考慮した１次元イジング模型

長距離相互作用模型、Long Range Model(以下 LRM とする)では自身以外の全てのスピンと相互作用を計算にとり入れる。このとき系のエネルギーは、(5)式から次のように変更され、

$$E = -\frac{J}{2N}\sum_{(i\neq j)} s_i s_j \tag{8}$$

で与えられる。また、分配関数は積分変数mを用いて

$$Z = \sqrt{\frac{NK}{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-N\{\frac{Km^2}{2}-\ln(2\cosh Km)\}}dm \tag{9}$$

と表現できる[1]。ここで$K = \frac{J}{k_B T}$とした。この分配関数の被積分関数は Nが非常に大きいことから近似

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{N\phi(m)}dm \approx e^{N\phi(m_0)} \tag{10}$$

を用いた。ここで、Nを除く指数関数の肩の $\phi(m)$ がその最大値 $\phi(m_0)$ が最も積分で寄与することを利用している。また、その最大値を与えるm_0は、鞍点条件より導かれる自己無撞着方程式

$$m_0 = \tanh Km_0 \tag{11}$$

より定まる。なお、(11)式はイジング模型を平均場近似で取り扱う際にも現れる式である。(9),(11)式を用いてエントロピーを計算すると、

$$S = Nk_B\{\ln(2\cosh Km_0) - Km_0\tanh Km_0\} \tag{12}$$

を得る。ここで最近接スピンだけを考慮したエントロピーと LRM の場合のエントロピーを比べると、$m_0 \leq 1$より長距離相関により実質的に相互作用定数が小さくなっていると見なすことができる。

4. 結果

(7)式と(12)式で得られたエントロピーを図 1 に示す。縦軸は$S/k_B T$,横軸は $k_B T/J$ である。図 1 の橙色の線は最近接のみの相互作用(short)、青色の線は LRM の結果である。図 1 より低温と高温の領域でそれぞれの結果が一致していることから、計算結果が正しいことがわかる。また、エントロピーの微分係数が不連続となる領域では、最近接スピンとの相互作用のみを考慮したイジング模型の場合には相転移が起こらないのに対し、LRM の場合にはエントロピーの微分係数が不連続となり相転移が起こっていることがわかる。相転移が起こる温度を転移温度といい、これは自己無撞着方程式(11)式より、K=1 を満たす温度 $T_c = J/k_B$として求めることができた。

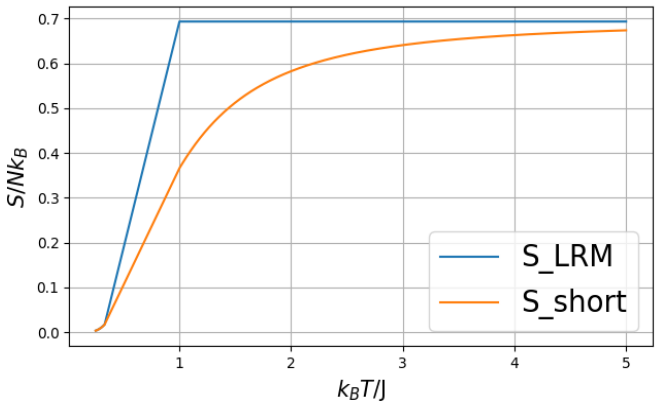


図1. イジング模型のエントロピーとLRMのエントロピーの関係

5. 結論と今後の課題

LRM は一次元イジング模型で見られない相転移を誘起することがわかった。また通常の一次元イジング模型のエントロピーと比較することで、相互作用定数が実質的に小さくなっていると見なせることがわかった。今後の課題としては、LRM における他の物理量に対しての相転移現象の検証、鞍点法を用いない計算方法の確立、外部磁場を取り入れての計算方法の確立や相関関数を詳しく調べることで、さらに長距離相関の物理的な役割を調べたい。

参考文献

[1]北原 和夫,杉山 忠男, 「統計力学」, 講談社, 2010 年

[2]田崎晴明, 「統計力学 I 」, 「統計力学 II 」培風館, 2008 年