

2022年度 (第11回)

自然科学科 卒業論文発表会

プログラム

日時： 令和5年2月6日(月)，7日(火)
(6日は各自の発表会場に午前9時30分に集合してスライドを提出)

会場： 〈セッションA〉 13P 教室
(ミーティングID: 876 8980 4668 パスコード: 779562)
〈セッションB〉 13Q 教室
(ミーティングID: 834 1115 5971 パスコード: 018398)

主催： 東京都市大学 理工学部 自然科学科

2月6日(月) セッションA

〈生物多様性研究室〉(座長：福田達哉 教授)

- 10:30 安田 昂十 (1924055)
東京都市大学世田谷キャンパスにおける土壌動物相に関する研究
- 10:45 原田 栞里 (1924039)
等々力溪谷の菌類相
- 11:00 河手 天蘭 (1924015)
ヒメムカシヨモギの葉序の起源に関する研究 ～セイタカアワダチソウとの比較から～
- 11:15 高嶋 佳 (1924024)
異なる環境におけるヨモギの光獲得戦略
- 11:30 則安 頼也 (1924037)
アリドオンにおける大型草食動物の被食圧強度に関する研究
- 11:45 近藤 土龍 (1924019)
野外調査実験によるイタドリの花外蜜腺の効果に関する研究

(12:00 – 13:30 休憩 (昼食))

〈生物多様性研究室 (続き)〉

- 13:30 小林 渚咲 (1924018)
外来種コセンダングサの風ストレス変化に伴う形態学的及び生態学的研究
- 13:45 佐藤 嶺司 (1924021)
ヤブニッケイの蛇紋岩地における環境適応
- 14:00 佐藤 直 (1924020)
ハマヒサカキの生育環境変化に伴う葉の変化
- 14:15 渡邊 春花 (1924060)
東京都市大学の空中花粉における解析

(14:30 – 14:45 休憩)

〈地球科学研究室〉(座長：萩谷宏 准教授)

- 14:45 三好 沙恵 (1824052)
地球生命が地球外で存在する可能性
- 15:00 石射 一希 (1924004)
東伊豆単成火山群、岩ノ山—伊雄山火山列の噴出物の化学組成
- 15:15 井上 慧士 (1924006)
関東南部における蛇紋岩の全岩組成及び鉱物組成の分析
- 15:30 岡 美百合 (1924010)
等々力溪谷にあるバクテリアマット含まれる鉄化合物について
- 15:45 金澤 響 (1924011)
茨城県日立市大みか地域における変火山岩類の全岩化学組成
- 16:00 成田 亜美 (1924036)
奄美大島北部及び北東部の海浜堆積物の含有元素測定

2月6日(月) セッションB

〈宇宙科学研究室〉(座長：門多顕司 講師)

- 10:30 植松 せれな (1924007)
市販されているアイシャドウの鉱物由来成分の分析
- 10:45 伏見 美咲 (1924043)
関東各地の飲用水の $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ 硬度から見る取水源の影響
- 11:00 橋本 悠月 (1924038)
宇宙線の銀河磁場内での伝播と異方性
- 11:15 神山 拓斗 (1924013)
宇宙望遠鏡で宇宙から観測することの重要性
- 11:30 宮尾 美月 (1924051)
初代銀河およびクエーサー観測による宇宙再電離の観測的制限
- 11:45 吉崎 謙 (1924059)
惑星状星雲の寿命の計算 ～惑星状星雲が見えなくなるまで～

(12:00 – 13:30 休憩 (昼食))

〈実験原子核物理研究室〉(座長：西村太樹 准教授)

- 13:30 福嶋 知隼 (1924042)
理研 RI ビームファクトリーでのネプツニウム 237 同位体の生成
- 13:45 網谷 芽衣 (1924063)
SHARAQ13 実験でのアイソマー核からのガンマ線を利用した粒子識別
- 14:00 中村 佑生 (1924035)
原子番号 $Z=19-26$ の陽子過剰及び安定核領域における核異性体由来の γ 線測定
- 14:15 富山 琢史 (1924033)
クロム 45 の 107keV アイソマーの寿命決定について
- 14:30 平山 瞳 (1924040)
コンプトン散乱のシミュレーション

(14:45 – 15:00 休憩)

〈理論物理研究室〉(座長：長田剛 教授)

- 15:00 矢敷 修造 (1924054)
宇宙膨張における光子密度パラメーターの時間変化
- 15:15 穂刈 基博 (1924062)
膨張宇宙における冷たいダークマター優勢期
- 15:30 小泉 栄作 (1824022)
ベルの不等式からみた量子力学の非局所性
- 15:45 田嶋 詩穂 (1924031)
非圧縮性粘性流体における流速の減衰
- 16:00 望月 魁斗 (1824055)
地球内部構造による地震波線経路の変化

2月7日(火) セッションA

〈分析化学研究室〉(座長：吉田真史 教授)

- 10:30 池谷 達輝 (1924003)
等々力溪谷の水質調査 ～臭気分析の試み～
- 10:45 伊東 駿 (1924005)
コムギの成分比較と官能評価
- 11:00 太川 春樹 (1924027)
ハナミョウガ属植物の成分比較
- 11:15 田口 剛輝 (1924029)
等々力溪谷の水質調査 ～湧き水との比較と天候の影響～
- 11:30 増田 航太 (1924045)
生物の紫外線写真
- 11:45 横田 大樹 (1924058)
虫媒花の紫外線写真の撮影

(12:00 – 13:30 休憩 (昼食))

〈古生物学的研究室〉(座長：中島保寿 准教授)

- 13:30 三橋 理代 (1924049)
福井県勝山市の下部白亜系北谷層から産出した足跡化石に基づくカメ類のサイズ推定
- 13:45 守岡 聖真 (1924052)
モロッコデボン系産軟骨魚類化石の分類及び体サイズ推定

〈ソフトマテリアル研究室〉(座長：飯島正徳 教授)

- 14:00 加納 大夢 (1924012)
テンパリングによるチョコレートの V 型結晶成長
- 14:15 大橋 佑衣 (1924009)
DSC によるコーンスターチ中の水の状態における定量的解析
- 14:30 八木 葉 (1924053)
タピオカデンプンの糊化反応とハイラム
- 14:45 町田 菜々子 (1924046)
植物性ワックスゲルにおけるカードハウス構造

(15:00 – 15:15 休憩)

〈高分子科学研究室〉(座長：高木晋作 講師)

- 15:15 浅野 遥紀 (1924001)
ポリグルタミン酸を添加したアイスクリームの物性評価
- 15:30 亀田 優斗 (1924014)
二段階乳化法による O/W/O エマルションの調整条件と分散安定性
- 15:45 杉浦 里佳 (1924022)
混合色素によるカメレオンエマルションの変色挙動
- 16:00 保坂 真帆 (1924044)
シクロデキストリンの包接性、選択性、脱包接性に関する研究
- 16:15 山本 純 (1924057)
エマルションテンプレート法を用いた多孔質 NIPAM ゲルの作製

2月7日(火) セッションB

〈位相幾何学研究室〉(座長：中井洋史 准教授)

- 10:30 高橋 龍生 (1924026)
四元数を解にもつ $\mathbb{R}$ 係数の方程式の研究
- 10:45 高橋 慧伍 (1924025)
四元数体に係数をもつ連立方程式の解法の研究
- 11:00 都築 謙太 (1924032)
四元数に係数をもつ 2 次方程式の解法
- 11:15 松本 晃一 (1924047)
Lévi Strauss の標準公式の数学的解釈について
- 11:30 木村 駿介 (1924017)
位数 p^2 の有限環の分類の完全な証明
- 11:45 芹澤 陽奈子 (1924023)
有限環の同型類に関する研究

(12:00 – 13:30 休憩 (昼食))

〈微分幾何学研究室〉(座長：橋本義武 教授)

- 13:30 阿部 優希 (1924002)
ニューラルネットワークを用いた株価の予測
- 13:45 八十島 大貴 (1924056)
画像処理の数理

〈基礎物理学研究室〉(座長：堀越篤史 准教授)

- 14:00 福島 大智 (1924041)
最小作用の原理の作用は本当に最小か？
- 14:15 中村 優汰 (1924061)
ニューラルネットワークは物理現象をどのように『理解』するか
- 14:30 中島 優人 (1924034)
深層学習による三体問題の予測とそのカオス的振る舞いについて
- 14:45 大垣 遼太郎 (1824009)
モンテカルロ法による 2 次元イジングモデルの配位生成とニューラルネットワークによる相転移温度の検出
- 15:00 竹内 悠登 (1824033)
グローバーのアルゴリズムの量子コンピュータによる検証

1. 緒言

生態系は、生物と非生物的環境から構成されており、そのうち生物は生産者・消費者・分解者から構成される。その中でも分解者としての役割を持つ土壌動物は、あらゆる環境で生息を可能としており、原生林から大都市の中心部に至るまでわずかな土壌さえあれば何かしらの種が生息することが可能となっている¹⁾。このようなあらゆる環境で生息を可能としている土壌動物は、林分構成の違いが、種組成に影響を与えることが知られている²⁾。このことが都市環境の植栽の違いにおいても成立するのかが疑問である。

東京都市大学は、キャンパス内に様々な植物が植栽された緑地が道路(幅 4~5m)で分断され、移動能力の低い土壌動物は他地点に移動することが比較的難しいため、細分化された緑地間において土壌動物相の違いがみられる可能性が高い。そこで本研究ではキャンパス内の各緑地間ごとの土壌動物を比較し、土壌動物相の違いが生じる要因を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 調査地点

東京都市大学の 6 地点において土壌動物の採集を行った(図 1)。

2.2 大型土壌動物の採集

ピットフォールトラップを使用した。高さ 8cm 内径 7cm のコップを使用した。内径 2cm、3cm、4cm、7cm の 4 種類を使用した。1 地点 4 か所、2m 間隔で設置した。捕獲後は同定に必要な個体のみを採集し、種や個体数を確認後リリースした。

2.3 中型土壌動物の採集

自作のツルグレン装置を使用した。ツルグレン装置は、採集した土の上に電球を照射することで、乾燥や高温を嫌う土壌動物を下部に設置している標本液に誘導する手法である。本研究では土を 200ml 採集し、60W の白熱電球下で 24 時間照射した。

2.4 土壌動物を用いた「自然の豊かさ」評価での比較

青木(1995)に基づき、環境変化に敏感な種を 5 点、劣悪な環境にも耐えられる種を 1 点、その間を 3 点として 100 点満点で点数付けた。点数が高いほど極相林に近い人の手が加わっていないことを示す。また、本研究の土壌動物の分類はすべて青木(1995)を基にした。

2.5 植生調査

区域内の植物を同定した。根元直径の計測を行った。積算根元直径を用いて植物の構成比を算出した。

3. 結果

3.1 大型土壌動物の採集

地点 1 地点 3 地点 5 で総捕獲個体数が高い値となった。また、全ての地点でダンゴムシが優占していた(図 2)。さらに、種数は地点 1~3 が 10 種と 1 番高い値となった(表 1)。

3.2 中型土壌動物の採集

地点 1 で 9 種と一番多くの種を確認できた(表 1)。また、地点 4 と地点 6 の捕獲個体数が他と比べ低い値となった(図 3)。



図 1. 東京都市大学における土壌動物相の採集地点.

3.3 土壌動物を用いた「自然の豊かさ」評価

地点1で指標となる生物が16種と一番多く確認された(図4)。

点数は地点1が44点と一番高い点となった(表1)。

3.4 植生調査

それぞれの地点の優占種と相対優占度は、地点1:ビジョヤナギ(75%)、地点2:ツツジ(85%)、地点3:ツツジ(76%)、地点4:ツツジ(53%)、地点5:ツクバネウツギ(28%)、地点6:タブノキ(30%)となり、地点2~4の植生が類似していることが示された。

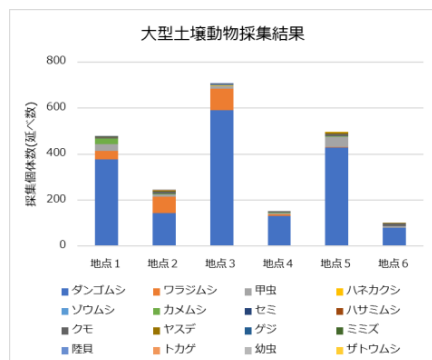


図2. 大型土壌動物の採集結果。

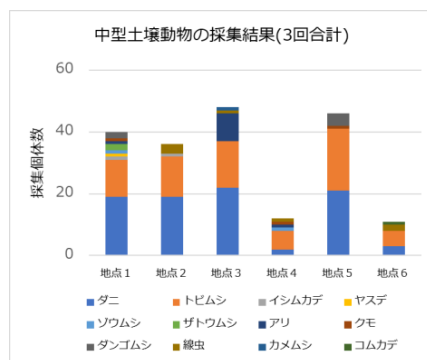


図3. 中型土壌動物の採集結果。

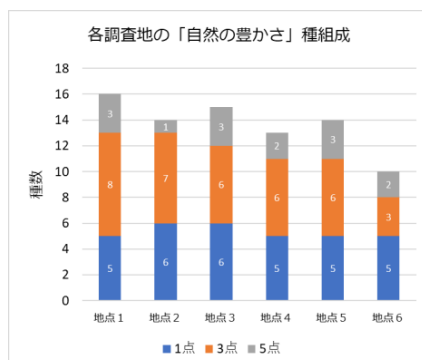


図4. 各地点の「自然の豊かさ」の種組成。

表1. 各地点における採集種数と自然の豊かさの点数と清掃の有無、敷地面積。

	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6
大型土壌動物(種数)	10	10	10	8	8	5
中型土壌動物(種数)	9	4	5	6	4	4
全調査での種数	16	15	14	14	11	10
自然の豊かさ(点数)	44	29	39	33	38	24
敷地面積(m ²)	82.9	122.6	288.7	290	286.3	305.3
清掃	×	○※	○	○※	○	○

×:清掃なし ○:掃除あり ※地点2・4はより丁寧な掃除が実施

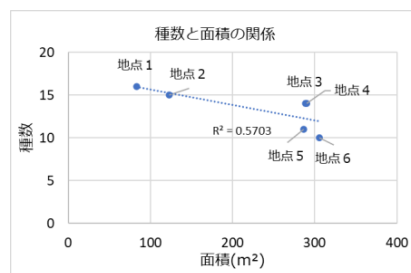


図5. 種数と面積の関係。

4. 考察

本研究の種数に関して、それぞれの敷地面積を用いた比較から種数の増加に敷地面積は関与していなかった(図5)。また、植生の関与は、植生が類似している地点2~地点4において自然の豊かさ指標に点数差が見られた。特に地点2と地点4の値が低く、また、これとは別に地点6の値も低いことが示された。地点2や地点4では人目に付きやすく丁寧な清掃が行われていたのに対し、地点3や地点5地点6では丘のような地形や低木の密度が高かったことで大雑把な清掃しか行われていない状況であり、また、地点1に至っては清掃が行われていなかった。このような清掃は、土壌動物のエサ資源や隠れ家の収奪と考えることができ、落ち葉清掃による人為的な影響が土壌動物相に大きく関与していることが示唆された。

地点6の値が低い背景として、地点6では防虫効果の高い植物が多く植えられていることに加え、タブノキが優占したために落ち葉が少ないことが理由だと考えられる。また、地点5と地点6の間はコンクリートではなくウッドチップ舗装された道であるために地点6から地点5に移動したと考えられる。

5. 参考文献

- [1]青木淳一(1995) 土壌動物を用いた環境診断.千葉県環境部環境調査課
- [2]青木淳一(1973) 土壌動物学-分類生態環境との関係を中心に-.北隆館
- [3]青木淳一(2005) だれでもできるやさしい土壌動物のしらべかた-採集・標本・分類の基礎知識-.合同出版
- [4]島野智之・長谷川元洋・萩原康夫(2022) 土の中の生き物たちのななし.朝倉書店

等々力溪谷の菌類相

生物多様性研究室

1924039 原田栞里

指導教員：福田達哉

1. 緒言

生態系とは一定の地域内に生息する生物集団とそれを取り巻く環境のことを示し、東京都 23 区唯一の溪谷である等々力溪谷の生態系は、世田谷区と本学によって主に昆虫類、鳥類などの調査が行われてきた。菌類相の調査は本学近郊において、これまで生田緑地 [1]、皇居 [2]、国立科学博物館附属自然教育園 [3] において行われてきたために、等々力溪谷の菌類相を明らかにすることは、近隣調査地と比較することで、等々力溪谷における菌類相の特徴、現状の記録を行うことができるために重要であり、これらの比較を通して菌類の面から等々力溪谷の特徴を明らかにすることができる。そこで本研究では、等々力溪谷におけるキノコを中心とした菌類相の多様性を明らかにすることを目的として調査を行った。

2. 方法

2021 年 10 月から 2022 年 9 月において、月 2 回もしくは 3 回以上の頻度で、等々力溪谷において調査を行った。調査時において確認したキノコ類を研究室に持ち帰り、顕鏡・観察・同定を行い分類群ごとにわけて記録をし、標本個体として乾燥保存を行った。同定個体に対して、他 3 地点における確認種と比較を行った。

3. 結果と考察

本研究では、調査期間中に 7 目 20 科 37 分類群の菌類を確認した(表 1)。そこで上述の他の 3 地点と比較したところ、イヌセンボンタケ (*Coprinellus disseminatus*)、コキラタケ (*Coprinellus domesticus*)、オリーブサカズキタケ (*Gerronema nemorale*)、ナヨタケ (*Psathyrella corrugis*)、スエヒロタケ (*Schizophyllum commune*) の 5 種がすべての調査地で報告があり、またビョウタケ (*Bisporella citrina*)、ノボリリュウアカグサレキン (*Mycogone cervina*)、エツキニセシヨウロ (*Veligaster nitidus*) の 3 種は等々力溪谷のみで報告された種であった。分類学的な観点から等々力溪谷は担子菌門が多く、栄養形式からは皇居、自然教育園と同様に腐生菌が最も高かった。等々力溪谷でのみ確認された 3 種のうち、ビョウタケとノボリリュウアカグサレキンが寄生するノボリリュウ属は全国的な分布がみられるにもかかわらず近隣地域における報告はなかった(図 1、2)。キノコは、発生時期と調査時期の重なりが重要であるものの、環境要因との兼ね合いによって観察ができない場合があり、本研究において前者は 11 月、後者は 10 月に確認したことから他の地点においてはこれらの月を中心に高頻度な調査を継続して行う必要がある。またエツキニセシヨウロ(図 3)は、これまでの国内における報告が八丈島、静岡県、沖縄県、宮崎県のみであり(図 4) [4]、そのため、等々力溪谷における採集個体が現状の北限個体である。エツキニセシヨウロの発生する常緑広葉樹林は、茨城県北東部にまで分布しており、本種は等々力溪谷において 10 月に採集したために、今後は茨城県北東部にかけて調査を行うことで分布の北限を求めることができる。

4. 結論

2021 年 10 月から 2022 年 9 月における調査において 7 目 20 科 36 分類群計 43 個体を採集した。等々力溪谷でのみ観察されたキノコであるエツキニセシヨウロは、現状での分布の北限であることに加えこれまで日本国内において 4 地点でのみと希少性が高いために、等々力溪谷におけるエツキニセシヨウロの生育地付近を保護区として指定し、今後の維持管理を行う必要があると考えられる。

表 1. 等々力溪谷で採集したキノコ。☆：近隣3地域で報告、*：等々力溪谷のみで報告

門・目	科	分類群	腐生菌	比較
ハラタケ目	ハラタケ科	トゲカラカサタケ	○	
		キツネノカラカサ	○	
	オキナタケ科	オキナタケ属の一種	○	
		コガサタケ属の一種	○	
	シロソウメンタケ科	シロヤリタケ	○	
	ヒドナンギウム科	カレバキツネタケ	×	
	ヌメリガサ科	アカヤマタケ属の一種	○	
	アセタケ科	アセタケ属の一種	×	
		ビロードムクエタケ属の一種	×	
	ホウライタケ科	オリーブサカズキタケ	○	☆
		ヒカゲオチエダタケ	○	
		ホウライタケ属の一種	○	
		クヌギタケ科	○	
		クヌギタケ属の一種(sp.1)	○	
		クヌギタケ属の一種(sp.2)	○	
	ツキヨタケ科	モリノカレバタケ属の一種	○	
		ワサビカレバタケ	○	
	ウラベニガサ科	ウラベニガサ属の一種(sp.1)	○	
		ウラベニガサ属の一種(sp.2)	○	
		ウラベニガサ属の一種(sp.3)	○	
	ナヨタケ科	イヌセンボンタケ	○	☆
		ナヨタケ	○	☆
		ナヨタケ属の一種	○	
		コキララタケ	○	☆
	スエヒロタケ科	スエヒロタケ	○	☆
	モエギタケ科	ツチナメコ類似種	○	
		フミヅキタケ属の一種	○	
イグチ目	イグチ科	キッコウアワタケ近縁種	×	
	ニセシヨウロ科	エツキニセシヨウロ	×	*
タマチヨレイタケ目	タマチヨレイタケ科	ツヤウチワタケ属の一種	○	
		ハチノスタケ	○	
ビョウタケ目	ビョウタケ科	ビョウタケ	○	*
		ビョウタケ属の一種(sp.1)	○	
		ビョウタケ属の一種(sp.2)	○	
チャワンタケ目	ノボリリュウ科	アシボソノボリリュウタケ	×	
ニクザキン目	ニクザキン科	ノボリリュウアカガサレキン	×	*
クロサイワイタケ目	クロサイワイタケ科	クロコブタケ	○	



図 1. ビョウタケの分布。
●：本研究の採集地を示す。



図 2. ノボリリュウ属の分布。
●：本研究の採集地を示す。



図 3. エツキニセシヨウロ。
Bar = 1.5 cm .



図 4. エツキニセシヨウロの発見報告。
●：本研究の採集地を示す。

5. 参考文献

- [1] 若宮崇令 (1997) 生田緑地のキノコ追跡 I. 川崎市青少年科学館紀要 8: 25-32.
- [2] 早乙女梢・服部力 (2014) 皇居吹上御苑の多孔菌類 (担子菌門ハラタケ綱). 国立科学博物館専報 49: 179-183.
- [3] 保坂健太郎 (2019) 自然教育園の担子菌類相. 自然教育園報告 51:235-242.
- [4] Kasuya T., Guzmán G. (2007) *Veligaster nitidum*, a pantropical sclerodermataceous fungus new to Japan and Thailand. Mycoscience 48 : 259-262.

ヒメムカシヨモギの葉序の起源に関する研究 ～セイタカアワダチソウとの比較から～

生物多様性研究室
河手 天蘭
指導教官 福田 達哉

1 緒言

植物にはある一定の法則性が存在する。例えば、種子の配置や花卉の枚数などが挙げられる。また、互生や対生といった葉序にも規則性が存在し、葉が重ならないように配置することによって光合成による資源を効率的に獲得している。

近内（2021）は、フィボナッチ葉序と呼ばれる互生の一種に関して 5 回転で 13 枚の葉をつけるキク科の 5/13 葉序を示すセイタカアワダチソウ (*Solidago altissima* L.) が 5 枚と 8 枚で葉の重心が茎に帰結する規則性を示した。キク科には他にもこの葉序を示す植物が存在し、ヒメムカシヨモギ (*Erigeron canadensis* L.) (図 1) はセイタカアワダチソウとは系統的に異なる植物群で出現している。異なる系統群で特徴的な同一の葉序が出現することは、5/13 葉序がキク科において単一起源か複数回起源かといった起源に関する新たな問題が生じた。そこで、本研究ではヒメムカシヨモギの葉序における法則性を明らかにし、セイタカアワダチソウと比較することを目的とした。

2 方法

本研究では、近内（2021）と同様の方法を用いた。環境の異なる 2 地点から 30 本ずつ採集し、個体の葉原基が分かるように葉をすべて取り、計測開始場所から 30 か所の節をデジタルノギスで計測した。また、その場所に番号を付け各弧 s を計測したのち、

$$\theta = \frac{s}{2\pi r} \times 360^\circ$$

を用いて葉と葉の角度を算出した。得られた角度を個体間で比較する際に、隣接する点が 2 連続で並んでいる葉を基準に 01-013 を上に向かって番号を付けていき比較した。

3 結果

ヒメムカシヨモギにおける各個体の角度である 01-013 を番号ごとに t 検定を行った結果、05 と 013 に異なる環境間において有意差が確認できた。01-04 と 06-012 では、有意差が確認できなかった (図 2)。ヒメムカシヨモギは上に行くほど葉が小さくなっているが、1 番目から 13 番目まで形態的变化がないものと仮定し、原点から同距離に葉の重心を置き、茎を原点として算出した角度を代入し、座標上に配置した。例えば、葉が 2 枚の時は 01-02、02-03 といった組み合わせのように葉を 2 枚から 13 枚までのすべての連続する組み合わせの配置を行い、重心を明らかにした。その結果、両環境間ともに 01-04 の 4 枚の時 (図 3) と 06-012 の 7 枚 (図 4) の時では原点から大きくずれる結果となったものの、有意差が確認できた 05 と 013 が加わった 01-05 の 5 枚 (図 5) と 06-013 の 8 枚 (図 6) では重心がほぼ原点に近づく結果となった。この結果は近内（2021）のセイタカアワダチソウの 13 枚の葉が 5 枚と 8 枚に分かれる法則と同一であることが示された。



図 1. ヒメムカシヨモギ. Bar=25 cm.

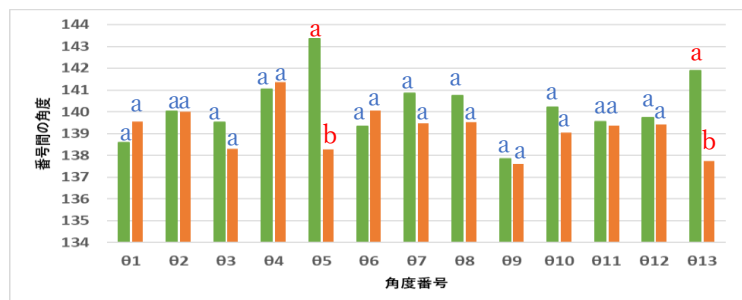


図 2. 異なる環境間における隣接する葉間角度の比較.

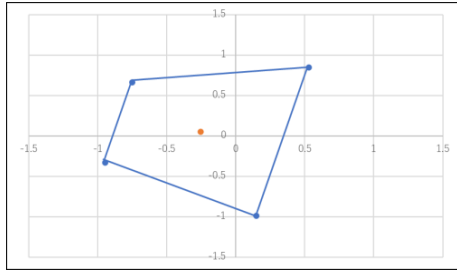


図 3. 01-04 の 4 枚の時の重心.

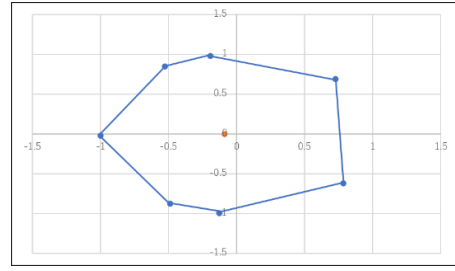


図 4. 06-012 の 7 枚の時の重心.

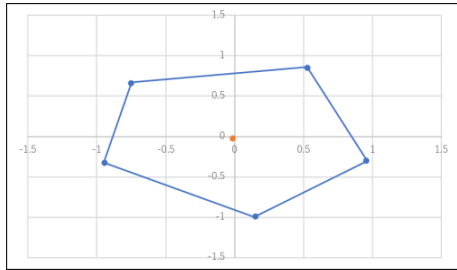


図 5. 01-05 の 5 枚の時の重心.

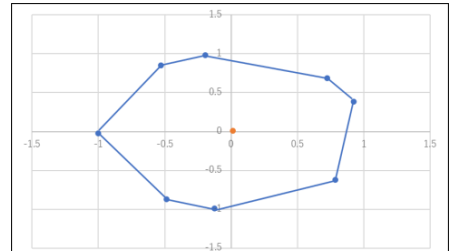


図 6. 06-013 の 8 枚の時の重心.

4 考察

本研究の結果から、環境の異なる 2 地点の比較において、01-04 と 06-012 の計 11 枚の葉では、葉と葉の角度における有意差が見られなかったことから、葉を出す角度が環境によって変化しない遺伝的固定であると考えられる。また、05 と 013 の 2 枚では有意差が見られたために、この角度は環境によって変化すると考えられる。さらに、この環境依存である 2 枚の葉が五角形と八角形にそれぞれ 1 枚ずつ存在することが明らかになった。近内 (2021) はセイタカアワダチソウの五角形と八角形に分かれる葉序のうち五角形の方に 2 枚の環境依存の葉が現れることが報告されているために、両種は過去に 2/5 葉序と 3/8 葉序ですべての葉の配置が遺伝的に固定した植物の雑種形成により誕生したと考えられるものの、本研究では 2/5 葉序で 1 枚の環境依存の葉をもつ植物と 3/8 葉序で 1 枚の環境依存の葉を持つ植物の雑種として、考えられるために両種ともに同じ葉序様式の雑種として考えられるものの、環境依存の葉の枚数の点からは異なる種の交雑によって誕生したと考えられる。このことはキク科植物内の 2/5 葉序と 3/8 葉序において多様な環境依存様式があることが推測され、またそれらの葉序にも多様性があることが示唆される。

5 結論

キク科植物は形態的には多様であるが、生態的隔離が成立していない場合が多く、様々な雑種が報告されている。このようなキク科植物の雑種を形成しやすい特徴が独立に 5/13 葉序を誕生させたと考えられ、この葉序は単一起源ではなく複数回起源であることが示唆された。

6 参考文献

- [1]近内裕香 (2021) セイタカアワダチソウの葉の配置における法則性. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.
- [2]渡邊邦秋 (1996) キク科植物の系統と進化. 種生物学研究 20 : 11-25.

異なる環境におけるヨモギの光獲得戦略

生物多様性研究室

1924024 高嶋佳

指導教員：福田達哉

1. 緒言

植物は、種類や環境によって形態や大きさが異なり、様々な方法で光を最大限獲得する戦略を取っている^[1]。キク科植物は、個体内で葉面積の大きさを変化させ、上部の葉が下部の葉の陰の割合を少なくするように、下から上にかけて葉面積を小さくする。これは植物にとって太陽光による上からの光を受けるため、節間長を最小限に保ちながら光合成獲得資源を最大限にする戦略として考えられている。このように光に対して葉面積を変化させる植物の場合、光が多方向から進入する葉の変化は興味深い問題である。

キク科ヨモギ属のヨモギ(*Artemisia indica* Willd. var. *maximowiczii* (Nakai) H.Hara)は、日本各地の水辺から森林まで広く生育している(図 1)。特に水辺は太陽光を反射するために、植物にとっては水辺という環境が太陽光だけでなく反射光を受ける強光環境であるものの、例えば河川沿いの場合は増水リスクがあり、かつ光の反射面が小さく、また海岸地の場合は強風ストレス下に置かれる。そこで本研究では、光環境の違いとして海岸地を例に、異なる環境におけるヨモギの葉面積を基にした草姿の比較を行うことで、環境間での光獲得戦略の違いを明らかにすることを目的とした。



図 1. 本研究で用いたヨモギ. A:内陸地, B:海岸地.

Bar=15cm.

2. 方法

本研究では、海岸地である神奈川県平塚市と海岸地から離れた神奈川県寒川町でヨモギを 30 個体ずつ採集した。採集した個体に関して、茎の太さ、葉面積を測定した。得られたデータを用いて、葉面積においてはヨモギの 3/8 葉序といったフィボナッチ葉序の規則性に従って比較を行った。

3. 結果と考察

3/8 葉序を示すヨモギは 8 枚ごとに葉が重なる周期が訪れるために、上から n 番目の葉の被陰効果は $(n+8)$ 番目に現れる。そこで本研究では n 番目の葉面積を S_n とし、また上部と下部の葉面積比は S_n/S_{n+8} として算出し、上部と下部の葉面積の関係を海岸地と内陸地のヨモギにおいて比較を行った結果、海岸地のヨモギは上部と下部の葉面積比の変化が大きく、これとは逆に内陸地のヨモギは葉面積比が小さいということが明らかになった(図 2)。この結果は、海岸地のヨモギの方が上部の葉の被陰効果が下部の葉に対して小さいことを示しているものの、海岸地の最大葉面積が小さいために海岸地では上層からの太陽光だけではなく、反射光の多さを考慮すると、本研究で示された葉面積比で海岸地のヨモギは最大の光合成産物量を獲得することができると考えられる。

本研究の結果からヨモギの草姿は三角形を示すものの、内陸地のヨモギは上部が下部よりも葉面積が大きくなるといった S_n/S_{n+8} が1を超えることが多く(図2)、下部から途中までは上部の葉面積が大きくなるという草姿が五角形になることが明らかとなった。内陸地のヨモギがこのような草姿を示すのは、下部で形成された葉による光合成産物が根からの資源とともにすぐ上部の葉へ転流する過程を繰り返すために、上部と下部の葉面積の逆転が起きるものの、上部の葉の形成のための資源が根に満たされた際には光合成産物の転流は根だけとなり、一般的なキク科植物でみられる下部から上部へ向けて葉面積を小さくする草姿へと変化すると考えられる。また茎の断面積の増加を時間軸として最大葉面積をつける位置について比較すると、海岸地のヨモギは上部への葉に転流するまでには比較的長い時間がかかる一方、内陸地のヨモギは海岸地のヨモギより上部へ転流するまでに時間がかからないことが明らかになった(図3)。また、海岸地のヨモギは有意差が見られなかったが、内陸地より茎が太くなる傾向にあり(図4)、個体の最大葉面積に関しては内陸地より海岸地の方が有意に小さくなっていた(図5)。このことから海岸地のヨモギは強風による折損を回避するために葉だけでなく茎にも資源投資する必要があった。さらに少ない光合成産物の多くを茎に投資した結果、上部の葉に転流することができず、最下部の葉が最大葉面積となる三角形の草姿が維持されていると考えられる。また、海岸地のヨモギにおける葉面積の縮小化は、風荷重が葉面積の拡大を抑え^[2]、そのことによる光合成獲得による資源量の低下が、伸長速度の低下を招いたのではないかと考えられる。海岸地と比べて光環境では内陸地よりも条件が良いものの、強風によるストレスが海岸地のヨモギの葉面積に影響を及ぼした結果、異なる草姿を呈するようになったと考えられる。

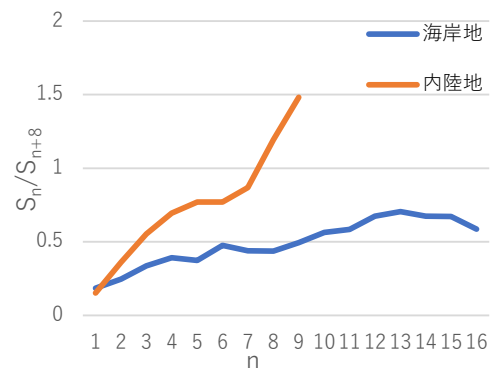


図2. 上部と下部の葉面積比の関係。n:上からの葉順。

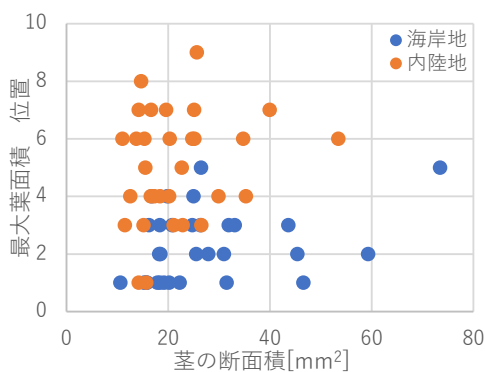


図3. 茎の断面積と最大葉面積の位置の関係。

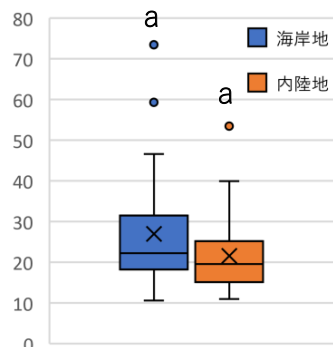


図4. 茎の断面積の比較(P<0.05).

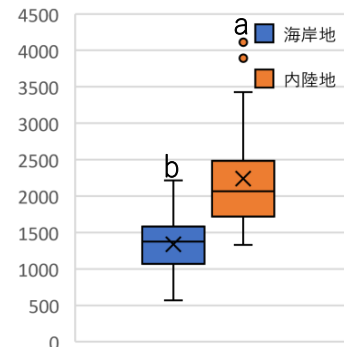


図5. 最大葉面積の比較(P<0.05).

4.参考文献

- [1] 村岡裕由・可知直毅 (2003) 光と水と植物のかたち. 文一総合出版, 東京.
- [2] Bosssdorf O., Pigliucci M. (2009) Plasticity to wind is modular and genetically variable in *Arabidopsis thaliana*. *Evolutionary Ecology* 23: 669-685.

アリドオシにおける大型草食動物の被食圧強度に関する研究

生物多様性研究室

1924037 則安頼也

指導教官：福田達哉

1. 緒言

植物はストレスを受ける環境に適応する為に、それぞれの環境に応じて形態を変化させることが知られている。特に大型草食動物が生息している環境に生育する植物は、大型草食動物からの被食を回避させる形質が被食圧の強さによって変化することが知られている¹⁾。また、その被食は例えばシカの場合は、口が届く範囲に限られ、その被食の境界線はディアライン（シカ被食線）と呼ばれている。これまでディアラインは垂直方向に形成され、シカによっては縦 200cm 以内とされていた。しかし、被食回避形質を保有する植物が高密度に生育し、それらで集団を形成していた場合、シカの侵入が集団内部に及ばない可能性があり、その場合ディアラインが水平方向にも成立することが考えられる。

本研究の予備調査を静岡大学農学部附属演習林において行った結果、アカネ科アリドオシ属のアリドオシ (*Damnacanthus indicus* C.F Gaertn.) が高密度で生育する集団を確認した (図 1)。この植物は防御形態として棘を持ち、被食圧の強弱によって棘の密度の強弱が異なることが報告されている²⁾。そこで本研究では、このアリドオシ集団内の比較形態学解析を行うことにより、アリドオシの集団化がシカの被食に与える影響について明らかにすることを目的とした。

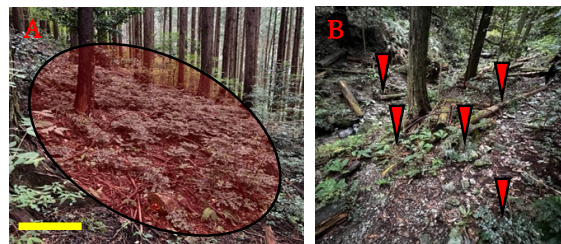


図 1. アリドオシ, A: 集団形成タイプ (Bar = 2m), B: 孤立タイプ (▼ はアリドオシを示す).

2. 実験方法

本研究では、野生のニホンジカの生息地である静岡県浜松市天竜区観音山において直径約 8m のアリドオシ集団の内側 (中心から約 1.5m 以内) から 30 個体、外側 (周囲から約 1m 以内) から 30 個体、更に対照として孤立個体を 30 個体ずつ採集した。採集した個体に関して、棘の長さ、太さ、棘間の距離を 10cm 内で 10 箇所ランダムに測定し、

$$\text{棘の密度} = \frac{10[\text{cm}]}{\text{棘間の距離の平均}[\text{cm}]}$$

を用いて、密度を算出した。その後、得られたデータを用いて、大集団の内側、外側、対照について多重比較検定を行った。

3. 結果

多重比較検定の結果、棘の長さと太さは対照、大集団の外側、内側の順に有意に増加していた (図 2, 3)。また、棘の密度に関しては孤立個体と大集団の内側には有意差は認められず、外側だけが有意に高密度化していた (図 4)。

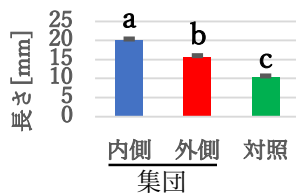


図 2. 棘の長さの比較.

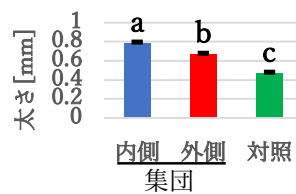


図 3. 棘の太さの比較.

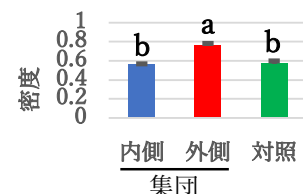


図 4. 棘の密度の比較.

4. 考察

アリドオシの棘は枝が変形したものであり、時間の経過とともに枝の伸長が行われるように棘も伸長する。本研究で棘が、対照、集団の外側、内側の順に長く、かつ太くなったのは、内側が最後に被食されてから時間が経っていることを示しており、それは外側よりも有意に長い時間であることが示された。また、孤立個体から成る対照は更に短いことより、最後に被食されてからの時間が短い可能性が示された。

アリドオシは頂芽優勢を示す植物であり、また対生であるために頂芽の欠失は複数の側芽の成長が促進され、またその側芽が頂芽として欠失した場合は、複数の側芽が発達するといった頂芽の欠失が枝数の増加を導き、結果的に盆栽化のような草姿を示す。このことは、枝を棘状に変形するアリドオシにおいては、棘の密度が頂芽の欠失回数即ち被食回数として認識することができる為に、棘の密度の高低が被食圧の強弱を示していると考えられる。本研究で集団の外側だけ有意に棘が高密度化していたのは、外側の被食圧が高いことを示している。しかし、集団形成の歴史を考慮すると、内側の個体も過去には被食されていたと考えられるものの、外側の棘の密度が有意に内側と異なることに疑問が残る。環境省 (2022) によるとニホンジカの推定個体数が約 25 年で約 10 倍にも増加していることが報告されている^[3]。このニホンジカの増加した個体数は、同じ場所でも過去と現在で被食圧が異なることを示しており、現在は非常に高い被食圧になっていることが考えられる。その為に、集団の内側の棘の密度も過去の被食圧を反映していると考えられる。また、これとは別に複数の孤立個体からなる対照集団の棘の密度は、被食圧が高かった集団の外側から有意に低くなる結果となった。この背景には、シカに対する餌資源としての魅力や、個体成立までの時間が関与すると考えられる。前者の場合は、シカが 1 回の訪問で多くの餌資源を獲得することができる点で、集団の方がシカにとっては魅力的となり、その結果シカに対する影響の差が生じ、また後者の場合は地上部展開以降の時間の短さが反映していると考えられる。今後は異なる集団サイズにおける研究とシカの訪問頻度に関する研究を行う必要がある。

本研究ではディアラインの水平方向への成立を問題として研究を行い、その結果から集団の内外で棘の密度に大きな違いが認められたために、水平方向にもディアラインは成立すると考えられ、アリドオシは面的に大きな集団を形成することで、集団の外側の個体が結果的に内側の個体の被食を守ることができると考えられる。

5. 参考文献

- [1] Takei S., Yoshioka K., Yamada S., Hayakawa H., Yokoyama J., Ito K., Tebayashi T., Arakawa R., Fukuda T. (2014) The Length and Density of Prickles on *Zanthoxylum ailanthoides* (Rutaceae): A Comparison of Japanese Islands with Different Sika Deer Browsing Pressures. *American Journal of Plant Sciences* 5: 332-337.
- [2] 松本昂大 (2018) アリドオシにおける大型草食獣からの被食回避戦略, 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.
- [3] 環境省 自然環境局 (2022) 全国のニホンジカ及びイノシシの個体数推定の結果について.
<https://www.env.go.jp/press/110760.html>

野外調査実験によるイタドリの花外蜜腺の効果に関する研究

生物多様性研究室

1924019 近藤士龍

指導教官：福田達哉

1 緒言

葉は光合成を行う重要な器官であり、植物は葉の被食を様々な方法で回避している。例えばトゲなどを発達させる物理的防御や化学物質を用いる化学的防御、そして花外蜜腺を用いた生物的防御といった様々な回避方法を獲得し、植食性動物を排除している。その中でも生物的防御は、花外蜜腺から分泌される蜜を報酬にアリを誘引し、アリが植物全体をパトロールすることで植食性昆虫が排除されることにより成立し、被子植物の様々な植物群で見られる。

イタドリ (*Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decr.) はタデ科の生物的防御を行う植物であり、茎の節にもつ花外蜜腺からアリの誘引物質を分泌しているが(石川, 2021)、その具体的な効果については不明な点が多い。アリパトロール植物に関しては、例えばトウダイグサ科のオオバギ属(*Macaranga*) に関して多くの報告があり、これらはアリを排除した場合に有意に被食率が向上することが示されている(Fiala et al., 1989; 野村, 2000)。しかし、これらの研究はアリの個体数や種数の多い熱帯地域で行われたものであり、温帯に生育するイタドリの場合はどれほどの効果があるか疑問である。そこで本研究では、アリの個体数や種数が熱帯より少ない温帯において、イタドリの花外蜜腺の効果の有無を明らかにするためにイタドリの花外蜜腺に人為的な改変を加えて解析することを目的として研究を行った。

2 実験方法

本研究ではイタドリを 90 個体採集し、30 個体ずつの 3 つの集団をプランタに作成した(図 1)。花外蜜腺の効果を明らかにするため、1 つはすべてのイタドリの花外蜜腺を接着剤で塞ぎ(以降、塞ぎ集団)、もう一つは半数にあたる 15 個体のイタドリの花外蜜腺を塞いだ(以降、半数塞ぎ集団)(図 2)。また対照として人為的な改変を加えない集団(以降、対照集団)も設けた。それらのプランタを都市大構内の屋外に放置し、1 か月後と 2 か月後にそれぞれの集団の被食率を ImageJ を用いて測定し、実験開始時からの被食率増加量を出した。



図 1. プランタで 3 つの集団に分けたイタドリ。

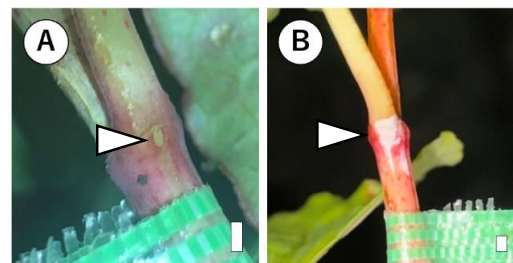


図 2. イタドリの花外蜜腺. A: 接着剤処理前の花外蜜腺. B: 接着剤処理後の花外蜜腺. ▷ は花外蜜腺を示す. Bar=1mm.

3 結果

塞ぎ集団は、半数塞ぎ集団と対照集団に対して有意に被食率が増加していた(図3)。また、半数塞ぎ集団に関して、蜜腺を塞いだ15個体と塞いでいない15個体の被食率を比較したところ、蜜腺を塞いだ個体の方が被食率の高くなる傾向がみられたものの、有意差は認められなかった(図4)。

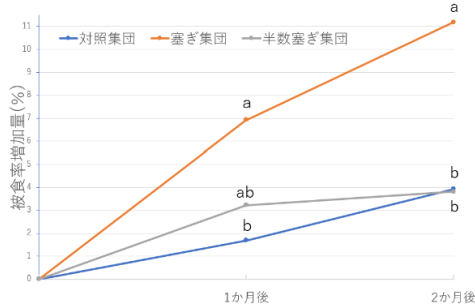


図3. イタドリの異なる3集団における被食率増加量の比較.

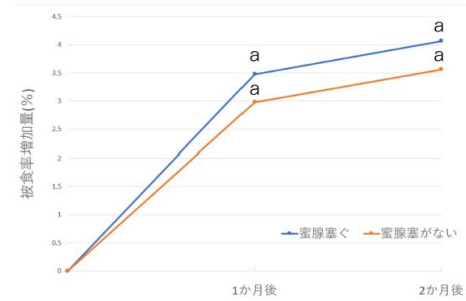


図4. 半数塞ぎ集団における個体別の蜜腺の効果.

4 考察

本研究では、塞ぎ集団の被食率が有意に高くなったために、イタドリの花外蜜腺は生物的防御として温帯においても機能していることが示された。また半数塞ぎ集団は、対照集団よりも有意に被食率が低く、さらに半数塞ぎ集団の中で被食率に有意な差が生じないことが示された。これは、集団中の半分の個体が蜜を分泌する場合、蜜を出さない個体にも生物的防御効果を得ることができることが示された。このことは、花外蜜腺を持たない突然変異個体が出現しても、花外蜜腺を出す個体の近くに生育することで繁殖が可能になることを示している。しかし、実際に野外において花外蜜腺を欠失した個体を見つけることができなかった。この背景には、花外蜜腺を欠失した個体のみで集団を形成した場合には、本研究の結果から被食率が有意に上昇することが示されているために、繁殖に影響が及ぶことが考えられる。そのためにこの突然変異個体の分散は花外蜜腺のある個体付近と制限される。これは花外蜜腺の欠失がその生育域に対する限定要因として作用し、それが自然界への定着を妨げている可能性がある。

今後は、集団内の花外蜜腺の有無の比率を変えて検証することや、個体内で塞ぐ位置や数を変えて研究する必要がある。

5 参考文献

石川貴絵(2021) イタドリの花外蜜腺の効果についての研究. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

Fiala B., Maschwitz U., Pong T.Y., Helbig A.J.(1989) Studies of a South East Asian ant-plant association: protection of *Macaranga* trees by *Crematogaster borneensis*. *Oecologia* 79,463–470.

野村昌弘(2000) オオバギ属アリ植物における被食防衛戦略の多様性に関する研究. 名古屋大学大学院生命農学研究科博士論文.

外来種コセンダングサの風ストレス変化に伴う形態学的及び生態学的研究

生物多様性研究室

1924018 小林渚咲

指導教官：福田達哉

1. 緒言

都市環境には多くの外来種が侵入している。北アメリカから移入されたキク科センダングサ属のコセンダングサ(*Bidens pilosa* L.)は、都市環境においても多く見られる植物である(図 1)。都市では、建築物等の影響により風速の低下が報告されているために(例えば Goyal et al., 2002)、風速の変化が外来種に与える影響が問題となる。そこで本研究では、風ストレスがコセンダングサの繁殖に与える影響を明らかにするために、防風設備を施したオープントップチャンバー(OTC)内における成長と(図 2)、その対照集団(Wind)の比較解析を行った。



図 1. 多摩川に生育するコセンダングサ. Bar=2mm.



図 2. オープントップチャンバー.

2. 実験方法

本研究では 6 号館 4 階のペランダに OTC を設置し、コセンダングサの OTC 集団 36 個体と、Wind 集団 36 個体を用いた。OTC の温室効果排除のために屋根はつけず、また地上付近は約 15cm の空気侵入口を設けた(図 2)。それぞれの草丈、茎の直径、節数、葉面積、花茎数、花茎の長さ、花序数、種子数の計測を週に 2 回行い、また種子生産後は茎、葉、根、種子に分けて絶乾重量の測定を行い、それぞれの値の有意差検定と多重比較検定を行った。

3. 結果および考察

コセンダングサの風ストレスに対する影響は、地上部出現後の比較的早い段階で草丈(図 3)や茎の直径(図 4)および葉面積(図 5)に現れ、また草丈の伸長が風ストレスによって抑制された結果、節数(葉の枚数)(図 6)にも影響が及び、栄養成長期において両集団は大きく異なる草姿となった。この結果は光合成による資源獲得量に反映されると考えられるものの、茎の太さに影響が現れるのは他の形質よりも遅いことが示された。

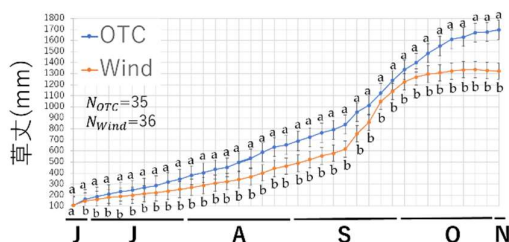


図 3. 草丈.

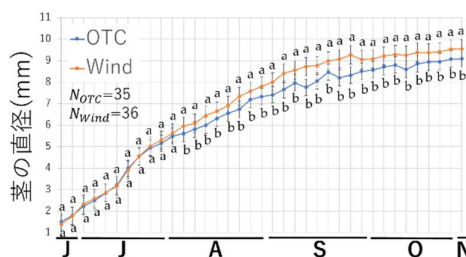


図 4. 茎の直径.

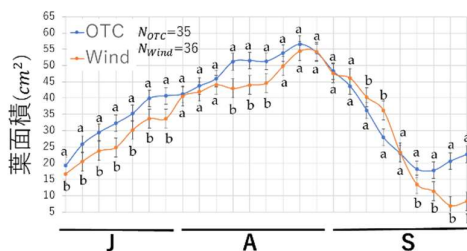


図 5. 葉面積.

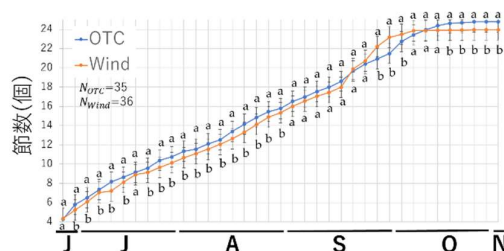


図 6. 節数.

コセンダングサ是一年草であるために翌年への資源の貯蓄が不要であり、根への資源投資量(絶乾重量)は両環境間で有意差は認められなかった(図 11)。生殖成長期においては、風ストレスの影響が花茎の長さに見れたものの(図 7)、花茎数は風ストレスを受けたほうが多くなる傾向にあることが示された(図 8)。植物は獲得した資源を最大限次世代に投資する必要があるために、花茎の長さ制御によって花序数を増やせない Wind 集団は、花茎数を増やすことにより花序数を増加させていることが示された(図 9)。成長を通して、風ストレスのために太く短い茎を作らざるを得なかった Wind 集団は、初期段階からの葉の枚数の減少や葉面積の低下の影響が葉への投資量に反映され(図 12)、その結果、茎への投資量低下にも反映された(図 13)。Wind 集団は茎への投資量が減少しているものの、風ストレスが茎の太さに対する選択圧として作用したために、長さを大きく減少する結果となった。

本研究では、両環境間において花序数がほぼ同数であることに対して(図 9)、種子数が風ストレスにより有意に少なくなった点が非常に興味深い結果となった(図 10)。種子生産にもコストがかかることを考慮すると、OTC 集団は花序数に対して種子へのコストを満たすだけの資源を有していたが、Wind 集団は、花序数に対して種子へ分配する資源量が不足していたために種子数の減少を導いたと考えられる。この場合、獲得資源量が少ないにもかかわらず、Wind 集団がなぜ種子を作れないほどの多くの花序を形成したのかということが問題となる。この答えの 1 つとして、コセンダングサが開花以降の獲得資源量依存で種子数が決まることを示しており、また Wind 集団が獲得資源が少なくにもかかわらず多くの花序をつけた背景には、コセンダングサが環境にかかわらず花序数は遺伝的に決まっていることが考えられる。実際にコセンダングサは開花や結実の時期を終えた冬期においても一年草であるにもかかわらず、枯らすことなく緑色の葉をつけている場合がある。これは受粉した花の種子形成のための資源を冬期においても獲得し、最大限の種子数を残すためのコセンダングサが持つ繁殖戦略として考えられる。

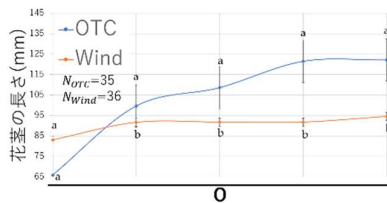


図 7. 花茎の長さ.

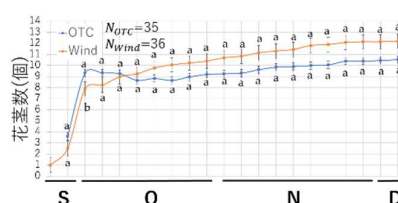


図 8. 花茎数.

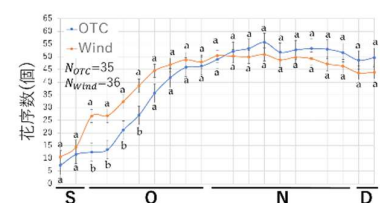


図 9. 花序数.

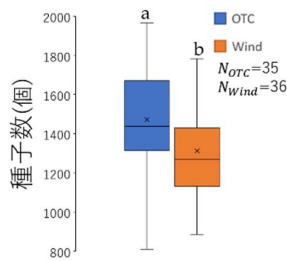


図 10. 種子数.

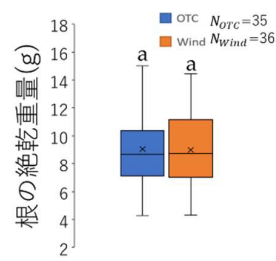


図 11. 根の絶乾重量.

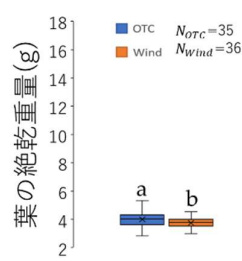


図 12. 葉の絶乾重量.

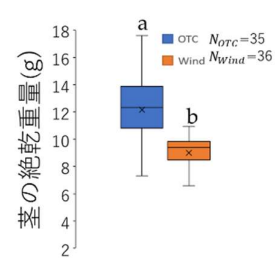


図 13. 茎の絶乾重量.

4. 結論

都市環境に侵入したコセンダングサが、風速の低下により適応度を上昇させることが明らかになったために、この植物が持つ動物付着種子は(図 1)、種子散布媒体をヒトにして、急速に分布を広げ繁殖をすることが可能であると考えられ、今後都市環境において爆発的に増加すると思われる。

5. 参考文献

[1] Goyal P., Krishna R. (2002) Dispersion of pollutants in convective low wind: a case study of Delhi. Atmospheric Environment 36: 2071-2079.

ヤブニッケイの蛇紋岩地における環境適応

生物多様性研究室
1924021 佐藤 嶺司
指導教官：福田 達哉

1. 諸言

植物は環境に応じて形態を変化させ、様々な場所に適応している。そのうち蛇紋岩地は、植物の生育に対して貧栄養や乾燥状態であるために、葉の多肉化や矮小化、気孔面積の縮小といった形態変化によって適応している植物が知られている[1-4]。しかし、これまでの蛇紋岩地における植物の適応に関する研究は日本有数の多雨地域における研究が多く、保水の乏しい蛇紋岩地においても多雨の影響により、ある程度の根による水分確保は可能となる。そのため、このような多雨地域と異なる蛇紋岩地において、降水量を指標とした適応様式を考察する必要がある。

静岡県浜松市から愛知県豊橋市にかけて露出する蛇紋岩は、そこにツツジ科のシブカワツツジ(*Rhododendron sanctum* Nakai f. *albiflorum* Sugim.)といった蛇紋岩地固有種が生育し、そこにおいて本研究の予備調査を行った結果、クスノキ科のヤブニッケイ(*Cinnamomum yabunikkei* H. Ohba)が多く生育していることを確認した(図1)。ヤブニッケイは本州以南に広く生育する樹木であり、これを用いて解析を行うことがこの地域の蛇紋岩地適応形態を考える上で重要であると考えられる。そこで本研究では、蛇紋岩地とその近隣の対照区のヤブニッケイを用いた比較形態学および解剖学的解析を行い、蛇紋岩地の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。

2. 方法

本研究では静岡県浜松市の静岡大学農学部附属演習林内(34°53'59"N, 137°44'44"E)の蛇紋岩地(図1)と、比較対照区として同演習林内のヒノキ林の2カ所でヤブニッケイをそれぞれ21個体、31個体採集した。採集したサンプルは1個体につき3枚ずつ無作為に葉を選び、マイクロメーター、ノギスを用いて葉の厚さ、葉縦、葉横を測定した。その後、SUMP法を用いて1個体につき3カ所の孔辺細胞縦と横、孔辺細胞の密度を測定した。得られたデータをt検定を用いて比較・検討した。

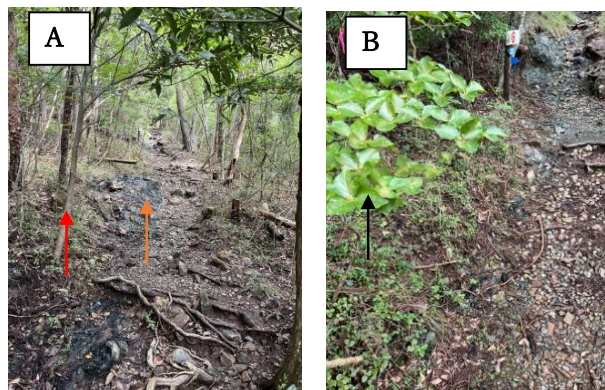


図1. 静岡大学農学部演習林の蛇紋岩地(↑は蛇紋岩の露頭)。A: ↑はヤブニッケイ, B: ↑はシブカワツツジを示す。

3. 結果

3-1 葉の厚さの比較

蛇紋岩地のヤブニッケイは対照地に比べて、有意に高い数値を示し、葉の多肉化が認められた(図2)。

3-2 葉縦・葉横の比較

蛇紋岩地のヤブニッケイは対照地に比べて、葉横が有意に低い数値を示していた(図3, 図4)。また、葉形指数については有意に高い数値を示し、狭葉化が認められた(図5)。

3-3 気孔面積の比較

蛇紋岩地のヤブニッケイは対照地に比べて、有意に低い数値を示し、気孔面積の縮小が認められた(図6)。

3-4 気孔密度の比較

蛇紋岩地のヤブニッケイは対照地に比べて、有意に低い数値を示し、気孔密度の低下が認められた(図7)。

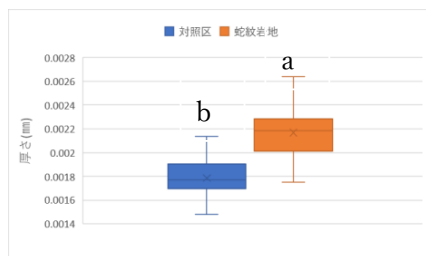


図2. 葉の厚さ.

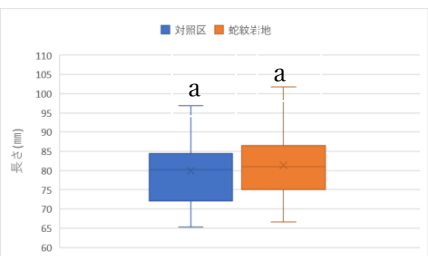


図3. 葉の縦長.

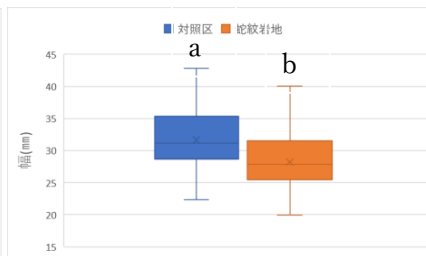


図4. 葉の横幅.

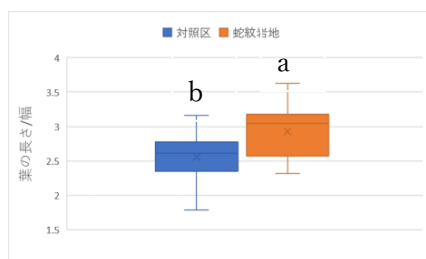


図5. 葉形指数(縦/横).

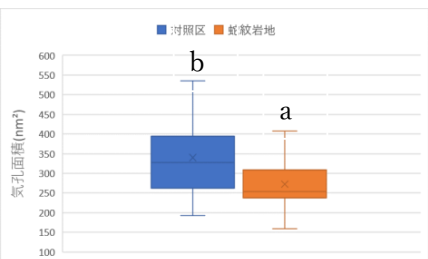


図6. 気孔面積.

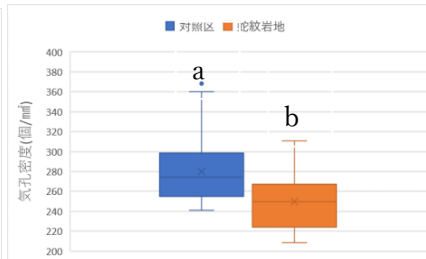


図7. 気孔密度.

4. 考察

蛇紋岩地のヤブニッケイが、これまで報告されていた多雨地域の蛇紋岩地に生育する木本植物よりも、多くの項目で形質が変化をしていることが明らかになった。本研究地域は、これまでの研究地域よりも降水量が少ないため、同様の蛇紋岩地の中でも水分ストレスが強い地域である可能性がある。その結果、水分保持のための多肉化や、過度な蒸散防止のための気孔面積の縮小や気孔密度の低下といった形質の変化が認められた。これまでに報告された蛇紋岩地における木本植物の適応形態よりも、むしろ貯水や蒸散低下に特化した草本植物が示す適応形態と類似している。これまで多雨地域の木本植物における蛇紋岩地適応は、葉の多肉化といった水ストレスに対する形態変化を示していないために、この地域の蛇紋岩地における水ストレスがヤブニッケイの形態に大きな影響を与えていることが示唆された。

5. 参考文献

- [1] Hayakawa H, Tunala, Minamiya Y, Ito K, Gale S, Yokoyama J, Arakawa R, Fukuda T (2012) Comparative study of leaf morphology in *Aster hispidus* Thunb. var. *leptocladius* (Makino) Okuyama (Asteraceae). *American Journal of Plant Science*, 3: 110-113.
- [2] Ohga K, Muroi M, Hayakawa H, Yokoyama J, Ito K, Tebeyashi S, Arakawa R, Fukuda T (2012) Morphological and anatomical analyses of the serpentine Ecotype of *Adenophora triphylla* var. *japonica* (Campanulaceae). *Journal of Plant Studies*, 1: 180-187.
- [3] Shiba M, Tate T, Fukuda T (2022) Adaptive leaf morphology of *Eurya japonica* Thunb. (Ternstroemiaceae) in serpentine areas. *Journal of plant Studies*, 11: 10-18.
- [4] Shiba M, Tate T, Fukuda T (2022) Serpentine adaptation of *Ligustrum japonicum* Thunb. (Oleaceae) based on morphological and anatomical approaches. *International Journal of Biology*, 14: 10-18.

ハマヒサカキの生育環境変化に伴う葉の変化

生物多様性研究室

1924020 佐藤直

指導教員 福田達哉

1. 緒言

植物は様々な環境に形態や生態を変化させることで適応し生育している。このうち海岸地は潮風による土壌の水分ストレスに加え、強風による気孔からの過度な蒸散が植物の生育に対する選択圧として作用している。そのために海岸地に侵入する植物は様々な形態学的、解剖学的変化を伴うことにより適応している(Shiba et al., 2022)。

ハマヒサカキ(*Eurya emarginata* (Thunb.) Makino)はモッコク科ヒサカキ属に属する常緑の低木であり、生育が海岸地に特化した海岸地固有植物であり、葉の端を丸める特徴的な形態を示す(図 1)。この特徴的な葉の形態は、日光が当たる面積を減少させることが考えられるものの、気孔が風に直接触れる機会を低減させるために、これまで報告されている海岸地適応植物のような過度な蒸散を防ぐための気孔の変化とは異なると考えられる。そこで本研究では内陸地で人為的に植栽されたハマヒサカキと海岸地に自生している集団の葉における形態学的及び解剖学的観点から比較を行い、特徴的な葉における形態の変化を明らかにすることを目的とした。



図 1. 本研究で用いたハマヒサカキ. A: Bar=1 cm, B: Bar=10cm.

2. 方法

本研究では海岸地から離れた内陸地である神奈川県川崎市で植栽された集団(以降、内植)、神奈川県三浦市の海岸地付近で植栽された集団(以降、海植)、さらに海岸地である千葉県安房郡の自生集団(以降、自生)から、それぞれ 25 個体ずつ枝を採集した。採集した枝から 3 枚ずつ無作為に葉を選び、ノギスで葉の長さ、幅、マイクロメーターで厚さを測り、SUMP 法を用いつつ顕微鏡で気孔の縦横を計測し、顕微鏡視野内の気孔を数えた。その後、得られたデータを用いて葉面積、葉形指数 (葉の長さ/葉の幅)、葉の厚さ、気孔密度、気孔面積、気孔総個数、気孔総面積、気孔割合を求め、集団間で多重比較検定を行った。

3. 結果と考察

形態学的解析の結果、葉面積は全ての集団間に有意差が認められ、海植、内植、自生の順に大きいことが示された(図 2)。また、葉形指数から導ける葉の形状は内植と自生の間には有意差が認められず、海植が最も大きいために(図 3)、自生は強風ストレスにより矮小化によって適応していることが示された。葉の厚さは海植と自生の間に有意差が確認されず、また内植は有意に葉が薄く、内植は水ストレスを受けていないと示された(図 4)。

解剖学的解析の結果、気孔密度は海植と自生でのみ有意差が確認されたが、内植と他 2 地点では確認されず(図 5)、このことは環境が変化しても気孔密度には大きく影響しないと考えられる。気孔面積は全てに有意差が確認され、自生、海植、内植の順に大きくなった(図 6)。また気孔密度と葉面積から算出される気孔総個数は全てに有意差が確認され、海植、内植、自生の順に大きくなった(図 7)。気孔総個数と気孔面積から算出される気孔総面積は、海植が優位に大きいことが示され(図 8)、さらに葉面積における気孔総面積から算出される気孔割合は海植と自生のみ有意差が確認されず、内植が最も小さくなった(図 9)。

本研究の結果が、これまで報告されていた海岸地適応形態とは異なる結果を示した。ハマヒサカキは端を丸める葉を持っており、過度な蒸散を抑えられるために海岸地でも大きな気孔を持つことが可能である。これは、これまでの平滑な葉とは最も異なる点であり、葉の端を丸めることで光の当たる面積は小さくなるものの光合成に必要な CO_2 の吸収量を低下させることはないために、どのような環境でもある一定の光合成を行うことができることを示している。しかし、土壌の塩濃度上昇に伴う海岸地の水ストレスが大きいために肉厚な葉を持ち、光合成の際の水分量が確保されていることから気孔面積割合を大きくすることで光合成効率を上げていると考えられる。しかし内陸地では水ストレスが小さいために薄い葉を持ち、光合成に使える水分量が少ないことから気孔面積割合を小さくしているために光合成量は低下していると考えられる。このように海岸地と内陸地で光合成量の違いがみられる背景に、海岸の風などの物理的ストレスが強固な植物体を形成せざるを得ない状況を作り出し、これが海岸地において光合成量を増加させなくてはならない状況を作り出していると考えられる。

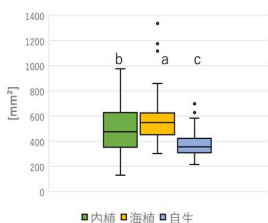


図 2. 葉面積の比較.
($p < 0.05$)

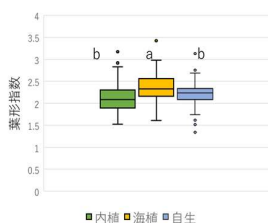


図 3. 葉形指数の比較.
($p < 0.05$)

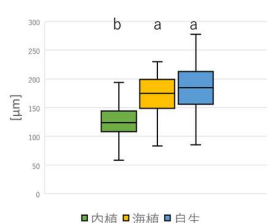


図 4. 葉の厚さの比較.
($p < 0.05$)

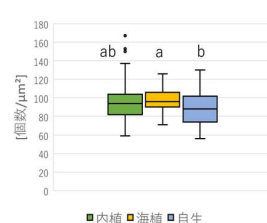


図 5. 気孔密度の比較.
($p < 0.05$)

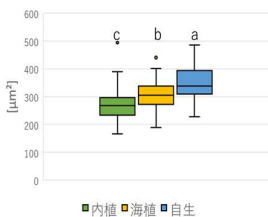


図 6. 気孔面積の比較.
($p < 0.05$)

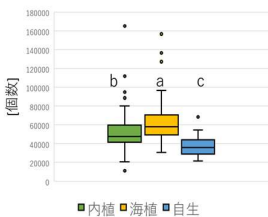


図 7. 気孔総個数の比較.
($p < 0.05$)

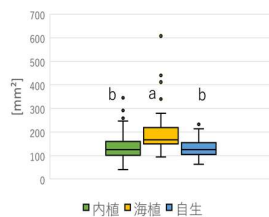


図 8. 気孔総面積の比較.
($p < 0.05$)

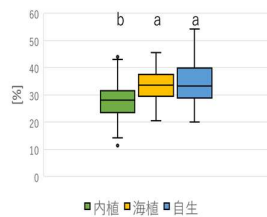


図 9. 気孔割合の比較.
($p < 0.05$)

4. 参考文献

[1] Shiba M., Tate T., Fukuda T. (2022) Leaf adaptation of *Eurya japonica* Thunb. (Pentaphylacaceae) in coastal area. Journal of Plant Studies 11: 31-41.

東京都市大学の空中花粉における解析

生物多様性研究室

1924060 渡邊春花

指導教官：福田達哉

1. 結言

国内では1月や2月のスギやヒノキをはじめ、一年中何らかの花粉が飛散している。それは自然環境が少ない都市環境でも例外ではなく、実際に都内で花粉症の症状を発症する人の割合は62.3%に上る⁽¹⁾。花粉症の原因となるのは、風により花粉を媒介する風媒花植物と呼ばれる植物群の花粉であり、これらは花粉粒が小さく、かつ花あたりの花粉数が多いという特徴を持つ。風媒花植物は虫媒花植物とは違い、花が目立たない植物が多く、例えばイネ、コムギ、イグサ、スギ、ヒノキなどが挙げられる。また風媒花植物は、森林の遷移で考えた場合、遷移初期である草本群落や遷移後期である極相林に多く出現し、遷移中期の低木林や二次林では虫媒花植物や鳥媒花植物といった鮮やかな花を持つ植物の割合が高くなる⁽²⁾。

東京都市大学世田谷キャンパスは、近隣地域に植物の豊かな等々力溪谷があり、本学との位置関係を考慮すると、本学に飛散する多くの空中花粉の供給源である可能性が高いものの不明な点が多い。そこで本研究では、東京都市大学世田谷キャンパスにおける空中花粉数と気象要因の関係を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

本研究は、風媒花植物であるイネ科植物などの草本植物の開花が多くみられる6月から9月にかけて、東京都市大学世田谷キャンパス6号館4階のベランダにおいて行った。花粉の捕集には、一般的に米国標準花粉捕集器であるダーラム型捕集器(図1)を用いて捕集するために、本研究では、それを模した捕集器を作成し空中花粉を捕集し設置した(図2)。

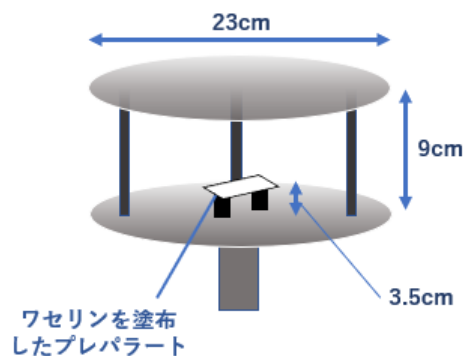


図1. ダーラム型捕集器の設計図.



図2. 実際に設置した花粉捕集機.

花粉の捕集は、捕集器中に 1 cm²の範囲でワセリンを塗ったスライドガラスを設置し、ワセリンに付着した花粉を光学顕微鏡で観察し、花粉数を数えた。またスライドガラスは、研究期間中は 3 日ごとに交換した。さらに研究期間中の気象データは気象庁の観測データ（観測地点：東京管区気象台）を用いた。

3.結果と考察

学内で捕集された花粉数と気象データから、平均風速と花粉数の相関がないということが示され、遅い風速においても多くの花粉が確認されたことから (図 3)、学内における花粉の供給源が比較的に近場に存在すると考えられる。そこで花粉の供給源の位置を推定するために、花粉数と風向の関係を明らかにした結果、本学に飛来する空中花粉は、主に南側から飛散してくる花粉が多いことが示された (図 4)。これらの結果は、学内の空中花粉の供給源の多くが、本学から北西側に位置する等々力溪谷由来ではなく、南側にある多摩川の河川敷由来である可能性が高いと考えられる。

多摩川河川敷は利便性のために毎年刈り取りが行われ、そのために遷移が進まずに常に草本群落の状況を作り出し、イネ科やカヤツリグサ科などの風媒花植物が多く生育している。このことは多摩川河川敷の維持管理が、本学の空中花粉を供給し続ける状況も維持していると考えられる。これに対して等々力溪谷は、低木や亜高木で構成する二次林であり、光が林床まで届くところを中心に風媒花植物が生育しているものの、多くが虫媒花や鳥媒花といった様々な生物に受粉を委ねる植物であり、そのために等々力溪谷が多くの生物をはぐくむ森林を示す一方、学内への空中花粉の影響は少ないと考えられる。

本研究はイネ科植物などの開花が見られる 6 月から 9 月にかけて調査を行った。上述の通り、スギやヒノキの花粉は 1 月から 3 月にかけて多く報告されるために、今後はこのような時期に研究を行うことにより、本学の空中花粉に関して季節による花粉供給源の違いが明らかになると考えられる。

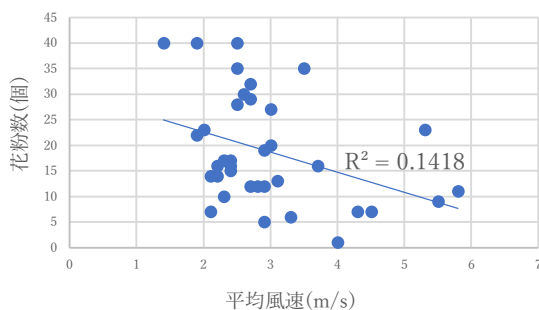


図 3. 平均風速(m/s)と花粉数の関係。

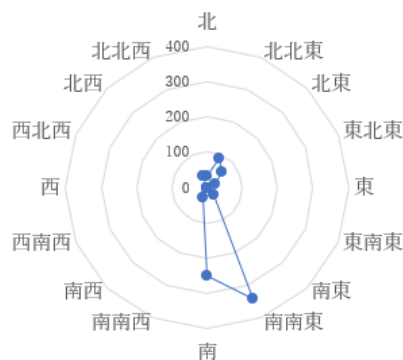


図 4. 風向と花粉数。

4.参考文献

- [1]東京都 (2017) 花粉症患者実態調査報告書.
- [2]沼田真 (1982) 植物群落の遷移にともなう受粉様式の変化. 日本生態学会誌 32: 207-212.

1. 地球以外の天体で生命が存在するために必要な条件

現在我々が知っている生命は地球にいる地球生物のみである。宇宙に生命を探す場合地球生命以外の生態を知らないため地球生命が地球外で生きていくために必要な条件で考える必要がある。地球生命の理解の中から地球生命を育む環境の必須条件は、①生命を構成する物質（有機物）が存在し、②多様な化学反応を支える溶媒（液体の水）が十分に存在し、③化学反応（生命現象）を支える自由エネルギー（熱源）が十分に存在していることである。

2. エウロパとエンケラドスに生命の存在が期待できる理由

こうした観点に基づいた今までの数多くの探査とそれに基づく科学的成果から、太陽系内で生命が存在する可能性のある天体が5つある。火星、木星衛星エウロパとガニメデ、土星衛星エンケラドスとタイタンである。その中でも特に木星衛星エウロパと土星衛星エンケラドスに生命が存在する可能性が高いと考えられている。この2つの天体に注目している大きな理由は、表面の氷層の下に全球規模の地下海が存在が確認されており、上記で挙げた生命存在に必須な3条件（有機物、液体の水、熱源）の全てが揃っていると考えられているからである。エウロパはハッブル宇宙望遠鏡による観測によってプリューム（間欠泉）が観測されており、エンケラドスはカッシーニ探査機によってプリュームが観測されている。プリュームの観測は、地下に液体の海が広がっていることの直接的な証拠になる。

3. 内部海の証拠

エウロパの内部海の存在は最近になってプリュームの観測がされたことで実証されたが、それ以前にも木星探査機ガリレオによる以下の観測結果からその存在は推定されていた。①隕石が衝突したことで内部の水が噴き出しクレーターを消したような地形があること、②スペクトル観測から表面に不均一に水溶液の塩類が堆積していたこと③塩類の溶け込んだ水からなる高電気伝導層が存在していた場合に期待される磁場の異常が検出されたこと。

エンケラドスは土星探査機カッシーニによってプリュームが発見されたことで、地下海の存在が確認された。その後、そのプリューム中に探査機が直接突入して噴出物質の成分分析を行い、水（ H_2O ）の検出にも成功している。

4. 熱の証拠

どちらの天体も太陽から遠いため表面温度は -100°C を下回っているが、エウロパ、エンケラドス共に内部には地下海が存在しており、潮汐加熱によって内部海が維持されていると考えられている。惑星を周回する衛星を考えたとき、その衛星にかかる惑星からの重力は、衛星の場所によって異なる。これが原因で天体表面の海や天体自身の形状が変化することを潮汐といい、その原因となる天体の各部分に働く重力と天体の重心に働く重力との差のことを潮汐力と呼ぶ。そして惑星の軌道が円軌道ではない場合潮汐力の周期的な変化によって衛星の形状が周期的に変化し、それにより衛星内部に熱を生じる。この現象を潮汐加熱と呼ぶ。エンケラドスのブリュームの噴出量の変動と公転周期が一致したことから、エンケラドスの内部海を維持している熱源は潮汐加熱であることが確認された。

5. 有機物の証拠

エウロパは表面上の変色は有機物によるものだと考えられている。エンケラドスはカッシーニ探査機によるブリューム突入時の成分分析によって有機分子（炭化水素、シアン）が検出されている。その他にメタンも検出していることからメタン菌の存在も考えられている。

6. 生命の存在可能性

これまでの知見をまとめたのが以下の表である。この表から、エウロパやエンケラドスには現在も生命が存在する可能性があると考えられている。

天体名 必須条件	エウロパ	エンケラドス	火星
① 有機物	△表面変色	○ブリューム物質	○火星探査機にて発見
② 水の存在	○ブリューム	○ブリューム	△地下に少量あり
③ 熱	○ブリューム	○ブリューム	△過去は温暖だった

7. 今後の探査について

将来的に生命が存在するかどうか調べるミッションが3つある。2023年に打ち上げ予定でガリレオ衛星を探査予定の『JUICE』、エウロパに地球外生命体がいるか調査する『エウロパ・クリッパー』、生命が存在する可能性がエウロパ、エンケラドスの次に高いと考えられているタイタンに実際に降り立ち調査する『ドラゴンフライ』である。これらの調査によって今まで明らかにならなかった地球外での生命の存在が確認できるかもしれないと期待されている。

東伊豆単成火山群、岩ノ山—伊雄山火山列の噴出物の化学組成

地球科学研究室

1924004 石射一希

指導教員：萩谷宏

1. 緒言

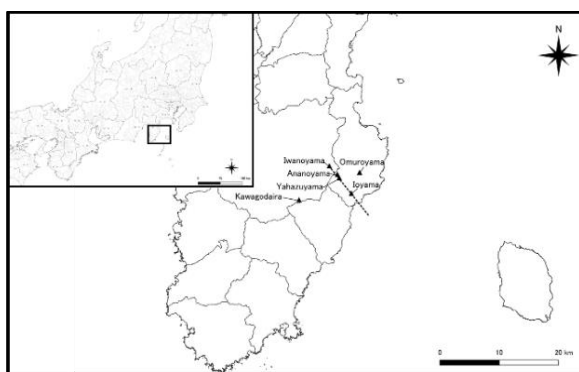
東伊豆単成火山群(荒巻・葉室, 1977)は、伊豆半島東部に分布するスコリア丘や溶岩円頂丘などからなる独立単成火山群である。本火山群には列をなしほぼ同時期に噴火したと考えられている単成火山がいくつか存在しており、岩ノ山—伊雄山火山列はその1つである。この火山列は、東伊豆単成火山群の陸域における最も新しい噴火活動(約2700年前: 小山ほか, 1995)と考えられており、火山列内で玄武岩質安山岩からデイサイトまで幅広い組成の噴出物が確認されている。さらに、この火山列の活動の直前(3000年前前後)には、大室山とカワゴ平火山において、それぞれ当地域における最大規模の噴火活動が起きたと考えられている。大室山に関しては、杉浦(2022MS)によって同一の溶岩流の中にもかなりの組成の幅があることが見いだされており、そのため、これらの火山群の噴出物の化学組成を比較し、それらの成因に関連がないかを検討することに意味があると考えられる。

そこで、本研究では、岩ノ山、孔ノ山、矢筈山、伊雄山と、それらと噴火年代・地域の近い大室山、カワゴ平火山の噴出物の全岩化学組成や斑晶組み合わせから、岩ノ山—伊雄山火山列のマグマの形成過程や組成の多様性の要因について考察した。

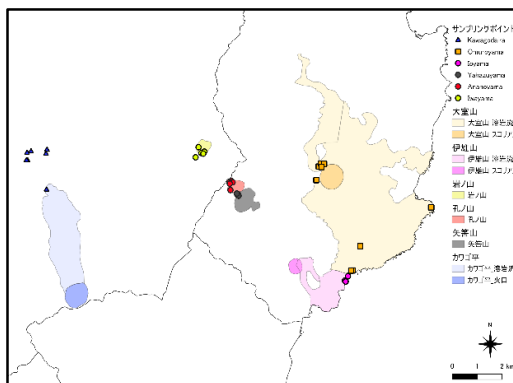
2. 調査地点・研究手法

岩ノ山—伊雄山火山列は、静岡県伊豆市から伊東市にかけて、北西—南東方向に伸びる火山列である(Fig.1 点線)。総延長は約 6km であり、溶岩円頂丘の岩ノ山・孔ノ山・矢筈山、スコリア丘の伊雄山、その他の小さな火口の跡と思われる凹地で構成されている。大室山は、伊東市に属するスコリア丘であり、伊東市東部に溶岩流を広く分布させている。カワゴ平火山は、伊豆市の南部に位置し、天城山の北側に開いた馬蹄形の火口から溶岩流が約 4km 流下している。また、溶岩流の末端北側の大見川流域に火砕流堆積物を厚く堆積させている。本研究での各火山のサンプリングポイントを Fig.2 に示す。

採取した噴出物を粉末にし、本学ナノ科学技術学際研究センターの(株)リガク製 RIX-3000 を使用し、産業技術総合研究所の地球化学標準試料 15 種類から作成した検量線に基に、Rh 管球・50kV・50mA の条件で全岩化学組成を測定した。また、岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察した。



[Fig. 1 東伊豆地域の広域図]



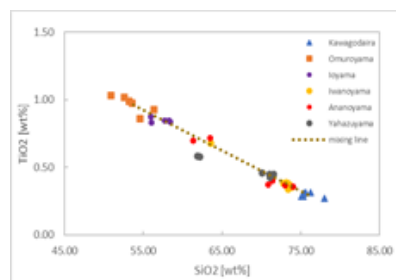
[Fig. 2 サンプリングポイント]

3. 結果

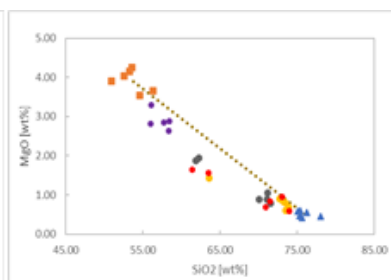
全岩化学組成の変化図の一部を示す(Fig. 3, 4)。岩ノ山-伊雄山火山列の噴出物の全岩化学組成は、多くの元素でほぼ直線上に並び、さらに大室山とカワゴ平の噴出物の組成をつなぐ混合線(Fig. 3~5 茶色の点線)上にプロットされた。しかし、 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 、

Na₂O、Rb、Cr、Ni の変化図では、孔ノ山、矢筈山、岩ノ山から採取した SiO₂=61.3~63.5 wt% の範囲の岩石が混合線から外れる結果となった。さらに、Zr-Rb 図(Fig. 5)では、大室山とカワゴ平はそれぞれ異なる分化線上にプロットされ、前述の範囲の岩石はここでも混合線から外れていた。

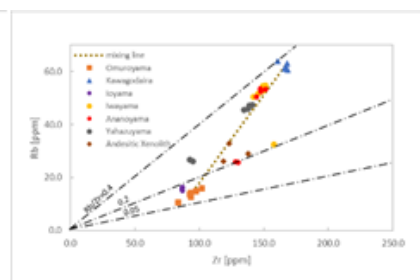
偏光顕微鏡を用いた岩石薄片の観察の結果、岩ノ山—伊雄山火山列の噴出物の斜長石斑晶は、清澄なもの(C-Pl)と汚濁状のもの(D-Pl)の2種類存在することがわかった(Fig. 6)。また、斜長石や輝石の斑晶の多くが累帯構造をなすことを確認できた。



[Fig. 3 SiO₂-TiO₂ 図]



[Fig. 4 SiO₂-MgO 図]

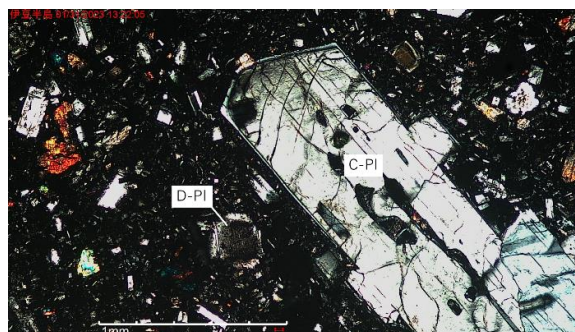


[Fig. 5 Zr-Rb 図]

4. 考察

全岩化学組成の変化図で、多くの元素において噴出物の化学組成が混合線上に乗ることや、岩石薄片で観察された2種類の斜長石斑晶の存在と累帯構造をなす輝石斑晶などから、岩ノ山—伊雄山火山列のマグマは、大室山とカワゴ平のマグマを端成分とするマグマ混合によって生成された可能性が考えられる。ただし、一部の元素で、主に SiO₂=61.3~63.5 wt% の範囲の安山岩が混合線から外れる場合があり、マグマ混合だけでなく結晶分化も若干関与していると考えられる。

今後の課題として、EPMA を用いて鉱物の局所分析を行い、より詳細なそれぞれの端成分となるマグマの特定を目指していく必要がある。また、本研究において調査を行わなかったが、岩ノ山—伊雄山火山列に含まれ、安山岩質の溶岩流を流したとされている岩ノ窪火山についても調査を行い、その噴出物の組成を比較する必要がある。



[Fig. 6 矢筈山の安山岩中に見られた清澄な斜長石(C-Pl)と汚濁状斜長石(D-Pl)]

5. 引用・参考文献

- ・荒巻・葉室 (1977)「東伊豆単成火山群の地質」地震研究所彙報 第 52 巻 235-278
- ・早川・小山(1992)「東伊豆単成火山地域の噴火史 1 : 0~32 k a」火山 第 37 巻 167-181
- ・小山・早川・新井(1995)「東伊豆単成火山地域の噴火史 2 : 主として 32ka 以前の火山について」火山 第 40 巻 191-209
- ・鈴木由希(2000)「東伊豆単成火山群における珪長質マグマの成因」火山 第 45 巻 第 3 号 149-171
- ・Hamuro, K. (1985) Petrology of the Higashi-Izu monogenetic volcano group. Bull. Earthq. Res. Inst., 60, 335-400
- ・宮島宏(1990)「東伊豆単成火山群の岩石学—捕獲結晶の意義と噴出物の時空間的变化—」岩鉱 85 315-336

1. 緒言

地球の上部マントルは、主にカンラン岩から構成されている。カンラン岩が、沈み込み帯の構造運動によって上昇し、水と反応することで蛇紋岩化する。陸上では、断層に伴って存在する。日本列島には各地で様々な時代の蛇紋岩が存在しているが、性質に関して個々の岩体における研究は行われているものの、複数の岩体での性質の比較をする研究は非常に少ない。蛇紋岩の化学組成はもとのマントルの不均質や火成活動の履歴を反映している。本研究では、関東地方周辺の複数の蛇紋岩体における全岩組成と鉱物組成の比較することで分類する。

2. 研究方法

関東南部周辺の蛇紋岩として、埼玉県皆野町の栗谷瀬橋、長瀨町樋口、鴨川市八岡海岸、横須賀市衣笠、秩父市の金昌寺で採取した蛇紋岩を分析した。秩父や長瀨は三波川変成帯中に様々な大きさのブロックとして、衣笠や鴨川は葉山-嶺岡帯中に産する蛇紋岩である。また、葉山-嶺岡帯をはじめとして、瀬戸川層群、小仏層群の蛇紋岩は、荒井・石田(1987)により、「環伊



図 1:蛇紋岩の採取地点

豆地塊蛇紋岩類」と呼称することを提唱されている。試料の採取地点を図 1 に示す。採取した蛇紋岩は、粉末にして本学ナノ科学技術学際研究センターの(株)リガク製 RIX-3000 を使用し、産総研の地球科学標準試料 15 種類から作成した検量線を基に定量分析を行った。また、薄片を作成し偏光顕微鏡の観察によって鉱物の同定を行った。

3. 結果

まず、XRF の結果から横軸に $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{wt}\%)$ 、縦軸に蛇紋岩の主要な元素をプロットし、散布図を作成した。このグラフには、山中地溝帯(平野、飯泉,1973)、小仏層群(石田,1987)の値もプロットした(図 4)。クロム、鉄とは正の相関関係、マグネシウムとは負の相関関係があり、ニッケル・カルシウムとの間には少しばらつきがあった。また、衣笠と栗谷瀬橋の蛇紋岩の Ni の値 2000 以上と 2000 以下で分かれることから、Ni の含まれる量によって岩石の性質が変わる可能性があることから、横軸に Ni(ppm)、縦軸に Cr(ppm) をとり散布図を作成した(図 3)。その結果、栗谷瀬橋と葉山-嶺岡帯、さらに高い金昌寺で識別が可能ということが分かった。

薄片観察の結果、衣笠と鴨川からは、残存カンラン石・輝石を観察することができたが、秩父地方で採取した蛇紋岩は、ほぼ完全に蛇紋石化していることが確認できた。また、残存クロムスピネルを観察することもできた(図 4)。

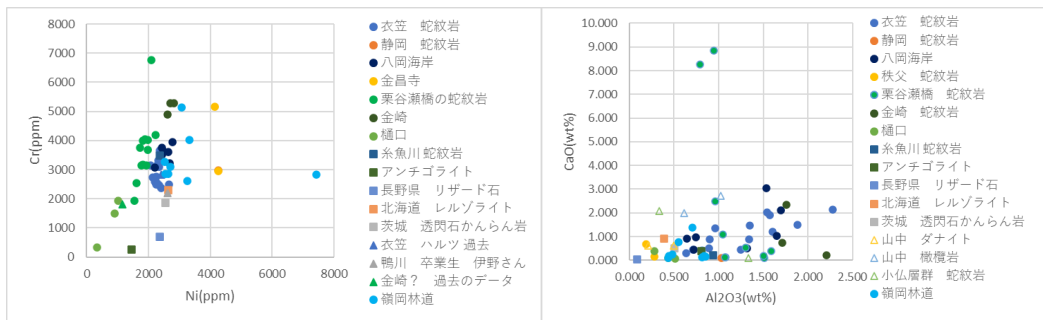


図 2: Ni(ppm)-Cr(ppm)のグラフ

図 3: Al₂O₃(wt%)-CaO(wt%)のグラフ

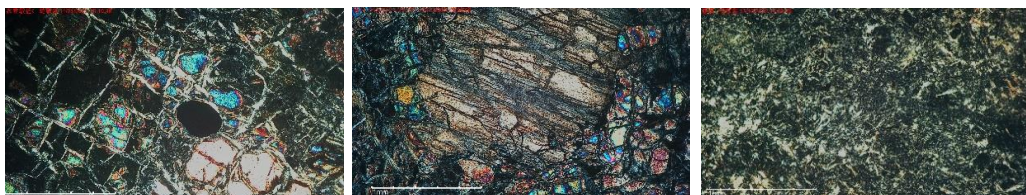


図 4: 薄片写真(左:衣笠,スピネルとカンラン石、中:鴨川,opx、右:栗谷瀬橋,蛇紋石)

4. 考察

Al₂O₃ と CaO の関係について、衣笠・鴨川・栗谷瀬橋にはそれぞれ違う関係があるのではと考える。衣笠は、レルゾライトが1部確認されていることから、単斜輝石の増加に伴い、Al や Ca が増加し、鴨川では荒井,石田(1988)より斜長石が確認されており、Na も少し高い値を示すことから斜長石が存在した影響が考えられる。栗谷瀬橋は、蛇灰岩になっていることによる CaO の上昇、Al を含む層状アルミノ珪酸塩が存在している可能性がある。鴨川に関しては、今後斜長石の確認が、栗谷瀬橋は粘土鉱物の組成を測定することが今後の課題となる。

Ni の値は、2000ppm 前後で長瀬と葉山-嶺岡帯、金昌寺で分けることができる。理由としてカンラン石に含まれている Ni が影響している可能性がある。カンラン石には、マントルカンラン岩とマグマだまりで、結晶分化によって沈積することによって生成されるカンラン石がある。西村他(1968)によると結晶分化の影響を受けているソレライト系列の岩石の斑晶であるカンラン石からは、Ni 値が低くなっていることが分かった。これは、マグマだまりにおける結晶分化の影響を受けたものだと考えることができる。よって、Ni 値が低い三波川変成帯の蛇紋岩の原岩がマグマだまりでできた沈積岩の可能性が考えられる。

また、全岩組成だけでなく、クロムスピネルの組成を分析することで、元のカンラン岩の性質を推定し、さらに地域ごとの特性について検討をする。

5. 文献

荒井章司,石田高(1987): 山梨県笹子地域の小仏層群中の蛇紋岩類の岩石学的性質-他の環伊豆地塊蛇紋岩類との比較-, 岩石鉱物鉱床学会誌,82,336-344.

石田高,1987:山梨県大月市笹子町の小仏層群から産出した蛇紋岩.地質学雑誌,第 93 巻,233-236.

平野英雄,飯泉滋(1973):関東山地西部,秩父帯の超苦鉄質岩.岩石鉱物鉱床学会誌,68,132-137.

荒井章司,高橋奈津子(1988):房総半島,嶺岡帯の蛇紋岩より残留斜長石の発見,岩鉱,83,210-214.

Masakichi Nishimura,Kenzo YAGI, and Masahiro YAMAMOTO(1968): Nickel Content of Olivines

等々力渓谷にあるバクテリアマット含まれる鉄化合物について

地球科学研究室

1924010 岡美百合

指導教員：萩谷宏

1. 緒言

バクテリアマットは太古代からストロマトライトの形成などで存在が知られており、原核生物の生態や古環境を知る上での重要な存在である。現世のバクテリアマットについては、陸上や汽水域、温泉環境など、様々な場所と条件で繁殖していることが知られている。

本研究では等々力渓谷で観察されたバクテリアマットを主な対象として、生成物の分析と光学顕微鏡、電子顕微鏡を用いた観察によりシアノバクテリア及び鉄バクテリアを検出し、それらの共生関係について考察した。

2. 実験方法

神奈川県世田谷市にある等々力渓谷(図1①)、伊豆半島にあるカワゴ平(図1②)、東京都目黒区にある目黒不動尊の山手七福神(図1③)、神奈川県足柄下郡にある彫刻の森美術館(図1④)の4地点でバクテリアマットを観察し、試料の採取と水に含まれる鉄とアンモニウムの濃度測定を行った。

まず採取したバクテリアマットの一部を、光学顕微鏡を用いてバクテリアマットの構造や生育している生物などを観察した。そして、乾燥機に入れて乾燥させて粉末状にし、蛍光 X 線分析(以下 XRF)と X 線回析装置(以下 XRD)を用いてバクテリアマットに含まれる元素及び鉱物種の測定を行った。また、卓上型走査電子顕微鏡(以下 SEM)や電界放出型走査電子顕微鏡(以下 FE-SEM)を用いて、より高倍率でバクテリアマットを観察した。そして、各地点で採取した水を簡易水質測定した結果、水中に含まれる鉄とアンモニウムの濃度を測定した。



図1 採取地点

3. 結果

光学顕微鏡で観察すると、等々力渓谷のバクテリアマットには鉄バクテリアの一種である *Leptothrix ochracea* と呼ばれる棒状の構造(図2)が主にみられ、同時にシアノバクテリアも観察することができた。FE-SEM では鉄バクテリアの体についている丸い付着物が観察できた(図3)。山手七福神では、等々力渓谷で見られた *Leptothrix ochracea* の他にも、*Gallionella ferruginea* と呼ばれるリボンをねじったような構造(図4)の鉄バクテリアが見られた。



図2 *Leptothrix ochracea* (×1,000)

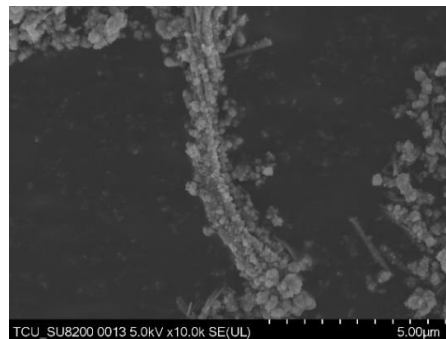


図3 鉄バクテリアの付着物(×10,000)



図4 *Gallionella ferruginea* (×1,000)

XRF の結果より、赤茶色のバクテリアマットには鉄が多く含まれていることが分かった(表1、表2)。また、*Leptothrix ochracea* や *Gallionella ferruginea* が見られた2箇所では、 P_2O_5 の割合が他の地点よりも高いことが分かった(表1、表2)。

XRD の結果(図5)より、決まったピークが見られなかったため赤茶色のバクテリアマットは結晶構造を持たないことが分かった。そして簡易水質測定の結果より、赤茶色のバクテリアマットがある所のみ水中に含まれる鉄とアンモニウムの量が多いことが分かった。

SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	
20.99	0.5350	2.413	72.22	0.7741	
MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	total
0.1822	1.658	0.02714	0.009046	1.185	100

表1 等々力溪谷バクテリアマットに含まれる各物質の割合

SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	
11.10	0.2342	1.268	86.15	0.04739	
MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	total
0.1366	0.9562	0.047393	-	0.1185	100

表2 カワゴ平のバクテリアマットに含まれる各物質の割合

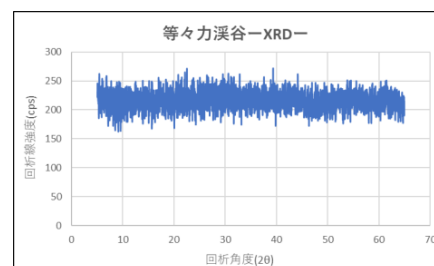


図5 等々力溪谷バイオマットのXRD結果

4. 考察

光学顕微鏡・電子顕微鏡・XRFの結果より、等々力溪谷では主に *Leptothrix ochracea* が、山手七福神では等々力溪谷で見られた *Leptothrix ochracea* と *Gallionella ferruginea* の2つの鉄バクテリアが関連し、鉄化合物を生成していることが分かった。そしてXRFの結果から、鉄バクテリアが多く見られた等々力溪谷や山手七福神の P_2O_5 の割合は、鉄バクテリアがあまり見られなかったカワゴ平やカワゴ平水源、彫刻の森美術館と比べると多いことが分かった。これより、バクテリアが多く生育していれば P_2O_5 の割合が多いと考えることができた。

XRDの結果では、明瞭なピークを示さず、赤茶色のバクテリアマットは結晶構造を持たないことが分かった。鉄の酸化物と水酸化物の特徴をそれぞれ調べた結果、水酸化鉄(III)はアルカリ水溶液で非晶質として存在できることが分かった。等々力溪谷のバクテリアマットがあったところの水のpHを調べた結果、7.05と酸性ではなく中性だったため水酸化鉄(III)を形成できると考えられる。よって、等々力溪谷の赤茶色の物質は、水酸化鉄(III)の非晶質の状態で存在していると考えられた。

5. 結論

赤茶色のバクテリアマットは、*Leptothrix ochracea* や *Gallionella ferruginea* と言った鉄バクテリアが関連し、鉄化合物の生成物だということが分かった。形成の順として、まず共存しているシアノバクテリアが生み出す酸素を用いて鉄バクテリアが Fe^{2+} を酸化させ、 Fe^{3+} に変える。そして湧水と Fe^{3+} が反応して水酸化鉄(III)ができ、結晶構造を持たない状態で生成物として存在していることが分かった。

赤茶色のバクテリアマットがある所の湧水を簡易水質測定でアンモニウムの濃度を調べた結果、還元的な環境であることが分かった。バクテリアマットがあるところのみ還元的な環境であることが分かったため、特定の場所にのみ発生する原因が湧水の性質にあることが分かった。本来好氣的な環境下で生育する鉄バクテリアが還元的な環境で生息できている理由として、シアノバクテリアが酸素を作り出しているからだと考えることができた。等々力溪谷のバクテリアマットでは、複数の原核生物の共生関係が成立していることが考えられる。

6. 参考文献

- [1] 島田武典・本田数博(2009)「厚木市棚沢の砂防ダムに生息する鉄細菌の形成するバイオマットの観察」, 島田
- [2] 加藤真悟(2015)「中世 pH で生育する鉄酸化細菌の生理生態とその生物地球化学的重要性」
- [3] 「新滝ヶ洞溜池の水質異常に係わる対策協議会」第20回対策協議会資料,p10
- [4] 畑中將志他(2014)「水酸化鉄による排水材の目詰まり現象の解明」

1. 緒言

阿武隈山地南端部には、火成岩及び各種堆積岩が原岩の変火山岩類を主とする日立変成岩類が分布する。日立変火山岩類は見かけ上、下位から西堂平層、玉簾層、赤沢層、大雄院層、鮎川層である(田切・大倉：1979)。このうち鮎川層の見かけ上位には、最も変成度の低い大みか塩基性火山岩及び凝灰岩類(黒田・倉林：1952)が日立市大みか地域に分布しており、その大部分は苦鉄質塩基性火山岩類である。過去に田切・大倉(1979)によって全岩化学組成の観点からその性質が検討されたが、微量元素による分析は示されていない。変成・変質された岩石を分析する場合、変成・変質の原因となる二次的作用によって移動しにくい HFS 元素(Zr・Y・Nb など)に相当する微量元素類を考慮する必要がある。そこで本研究は、蛍光 X 線分析(以下 XRF)を使用して全岩化学組成を行い、主に HFS 元素・微量元素の観点から、大甕地域に分布する苦鉄質火山岩類の起源について検討を行った。

2. 調査と分析方法

大みか地域の露頭・岩体にて、大みか塩基性火山岩及び凝灰岩に相当もしくは近い特徴を持つと確認できた試料 33 個を採取した(図 1)。XRF は本学ナノテクノロジー研究推進センターの(株)リガク製 RIX-3000 を使用し、産業技術総合研究所の地球化学標準試料 15 種から作成した検量線を基に、主要 10 元素と微量 9 元素の全岩化学組成を分析した。

3. 結果

(産状) 風神山南側の複数の谷、山道で露出している岩石や露頭のほかに、風神산을 切り込んでできた山側道路に確認できる露頭からサンプリングを行った。露頭の状態は様々で、固く緻密な黒～濃青色の火山岩・溶岩をはじめ風化・変成の程度に差の大きい変火山岩類・火山碎屑岩類が確認できた。できるだけ表面の風化が激しい部分を避けてコアストーンをサンプリングしたが、尾根部などでは粘土化したサンプルもある。田切・大倉(1979)で報告のあった枕状溶岩は今回確認できなかった。

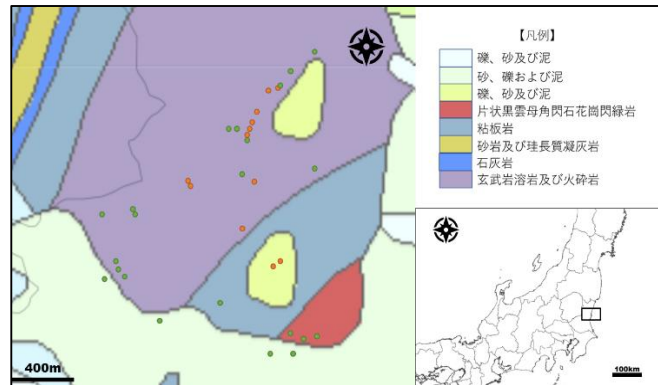


図 1：大みか地域(地理院地図 web より)と試料採取地(緑：低 Cr、橙：高 Cr)

(薄片観察) 偏光顕微鏡での観察においても、斑晶のほとんどが変成鉱物に置き換えられている。図 2 は、露頭では鮮やかな緑色で状態の良い緑色岩の薄片写真である。中心の斑晶は緑泥石・緑簾石化したかんらん石とみられ、結晶外形をやや保っているものの、変成鉱物の集合体である。ほか火山岩・溶岩では斑状組織がみられるものの、その斑晶・石基ともに元の鉱物が判別できないほどに緑泥石・緑簾石化している。

(全岩化学組成) 微量元素において顕著に見られた違いとしてあげられる値は Cr である。ばらつきは大きいものの、最も高い値を示す試料で 2025ppm を示した。全 33 試料のうち 13 個は高い値を示した。本要旨中の図では Cr 値が 500ppm よりも高い試料を橙色、500ppm よりも低い試料を緑色のポイントで示した。図 3a は $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ でのハーカー図、図 3b は Nb/Y-Zr/TiO_2 での岩石分類図である(Winchester, J.A. and Floyd, P.A. : 1977)。一部試料を除いて、非アルカリ玄武岩にプロットされた。

4. 考察

MgO, Cr 値が高い岩石として知られている火山岩として、小笠原諸島などで見られる火山岩のボニナイト（無人岩）、かんらん石の斑晶を多く含むピクライト玄武岩が挙げられる。また、Nb や Y が低い事でも知られ、この特徴は大みか地域の試料にも共通である。一方で、ボニナイトとピクライト玄武岩は Ti 含有量に大きな違いがあり、前者は Ti に乏しく、それに対して後者は比較的豊富である。そこで、HFS 元素を用いたボニナイトと MORB（中央海



図 2：緑色岩中に見られる斑晶の仮像

嶺玄武岩) の判別図に今回の試料をプロットすることで、大みか地域に分布する変火山岩類の特徴を捉えたい。図 3c $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, 図 3d Y-Cr(対数グラフ)を用いたグラフで、図 3d の場合は前述に加えて島弧ソレアイトも判別できる。いずれの判別図でも、ボニナイトと MORB にまたがる形でプロットされた。よって、図 3c ではボニナイトと MORB いずれかの性質を持った岩石が混在していることが判明し、図 3d ではソレアイト岩系にも一部属することが判明した。これは田切・大倉（1979）によって報告されたチタン含有量の低い枕状溶岩の持つ特徴に近い。

5. 結論

茨城県大みか地域の露頭にて採取したサンプル全 33 試料の全岩化学組成を分析した。大みか地域の変火山岩類は非アルカリ玄武岩であり、ボニナイトと MORB の両方にまたがってプロットされることが判明した。また、一部の試料は、過去の文献に記述のある大みか地域で確認された枕状溶岩に特徴に近いことが分かった。しかし未発見の残存斑晶鉱物を検出した上でマグマの性質を検討するなど、更なる調査・分析が必要であると考えられる。

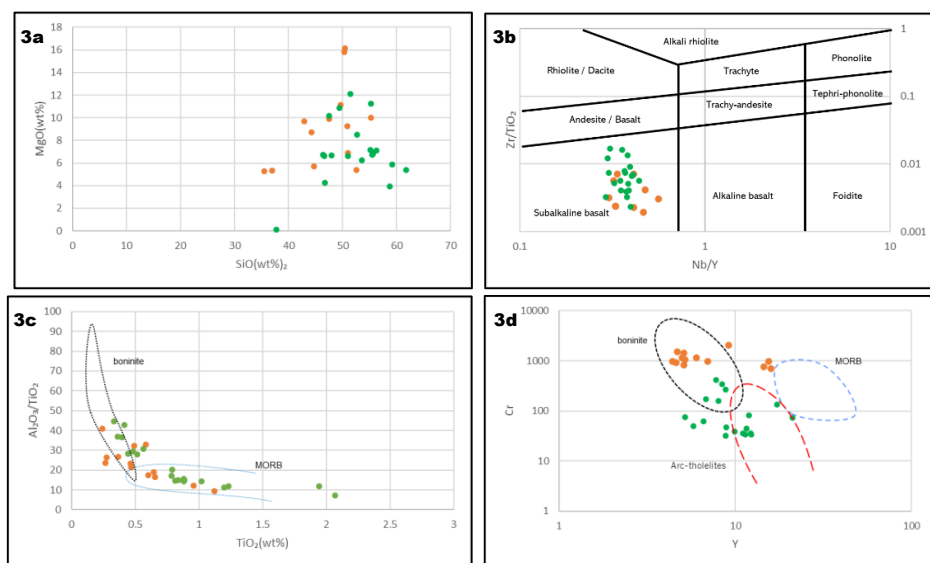


図 3：a $\text{SiO}_2\text{-MgO}$, b Nb/Y-Zr/TiO_2

(Winchester, J.A. and Floyd, P.A. 1977), c

$\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (Hickey and Frey 1982),

d Ti-Zr(Dilek et al. 2007).

6. 参考文献

- ・田切美智雄・大倉智恵子（1979）：日立および鶴見山塊地域の火山岩類、特にそれらの火成活動場と棚倉構造線について 地質学雑誌 第 85 巻 第 11 号 p.679-699
- ・黒田吉益・倉林三郎（1952）：日立地方結晶片岩類の成因について-阿武隈高原の地質学的岩石学的研究(その 2)- 地質学雑誌 第 58 巻 第 677 号
- ・Sławomir Ilnicki, Jacek Szczepański, Christian Pin (2020): Tholeiitic-and boninite - series metabasites of the Nové Město Unit and northern part of the Zábřeh Unit (Orlica-Śnieżnik Dome, Bohemian Massif): petrogenesis and tectonic significance
- ・Winchester, J.A. and Floyd, P.A. (1977) : Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.
- ・Dilek Y, Furnes H, Shallo M (2007) Suprasubduction zone ophiolite formation along the periphery of Mesozoic Gondwana. Gondwana Res 11:453-475
- ・Hickey RL, Frey FA (1982) : Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implications for their source. Geochim Cosmochim Acta 46:2099-2115

1. 緒言

奄美大島は温暖多雨な気候である。世界的にも珍しい亜熱帯性多雨林の森は、絶滅危惧種をはじめとする貴重な動植物が多く生息する。沿岸には黒潮が流れるため、海中にはサンゴ礁が発達している。このようなサンゴ礁域の州島や海浜は、主にサンゴ礁や軟体動物・有孔虫などの石灰化生物の骨格片や殻が集まって形成される。[文献 1] サンゴ礁域の海岸砂を調査することは、起源を知り、これからの海岸線、海岸の堆積粒子の組成についての変遷を考察するのに役立つものである。

本研究では、奄美大島北部及び北東部の海岸砂の各地の特徴を、蛍光 X 線分析法による含有元素測定と X 線解析法を行い、サンゴ片、貝殻、有孔虫等の生物片も調査し、海岸砂の組成について考察する。

2. 実験方法

奄美大島の 8 か所の海岸と 2 ヶ所の河川の砂を採取した（図 1 奄美大島の各海岸①笠利の海岸、②赤尾木海岸、③あさに海浜公園、④用安海岸、⑤土盛海岸、⑥赤木名港の海岸及び前田川、⑦打田原海岸、⑧手広海岸及び河川）。各海岸は約 100m 間隔で採取し、河川は採取可能な場所で行った。その砂を 2 つの方法で調査した。1 つ目は実体顕微鏡を用いて、砂粒子を生物片と岩石片に分類、割合を調べた（鉱物組成分析）。2 つ目は蛍光 X 線を用いた化学分析を行った。この分析によって試料中に構成する元素の濃度を測定することができた。（元素分析）

鉱物組成分析では、実体顕微鏡を用いて、生物片と岩石片に分け、1 サンプルあたり 200 以上の粒子をカウントした。

元素分析は XRF を用いて、それぞれのサンプルについて主要 10 元素と微量 9 元素の化学組成を調べた。海岸サンプル 102 地点に加え、河川の砂 7 点、生物片 30 点のサンプルを調査した。

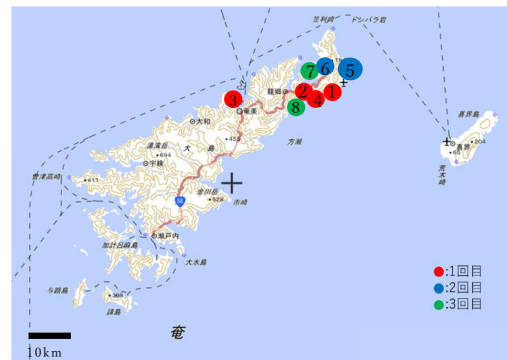


図 1 調査地 奄美大島

3. 結果

図 2 は、鉱物別組成をグラフ化したものである。あさに海浜公園の地点 1 及び土盛海岸の地点 20 は他の海岸より岩石片が多く含まれていることがわかる。岩石には含まれるが

生物片に含まれない Ti、Al を用いて、散布図を作成した。CaO-TiO₂ を図 3、CaO-Al₂O₃ を図 4 とする。土盛海岸の地点 20 は Ti、Al が最も高く、あさに海浜公園は 2 番目、手広海岸地点 4 は 3 番目に高いことが分かり、図 1、図 2 及び図 3 は対応していることが言える。生物片の構成生物種を識別するために、MgO-Sr の散布図を図 5 に示す。各種生物遺骸のみを集めた分析値がグラフ上で作る多角形の中に、海岸砂の値がプロットされ、それらの生物遺骸の混合比率により各地の砂の組成が決まっていることが示された。

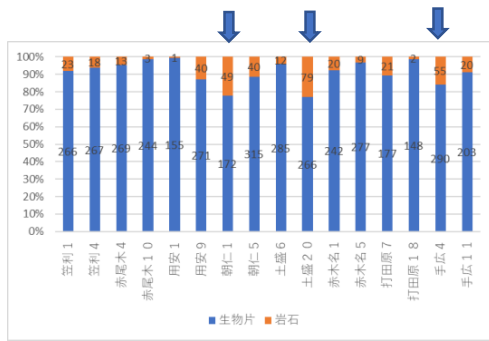


図 2 鉱物別組成

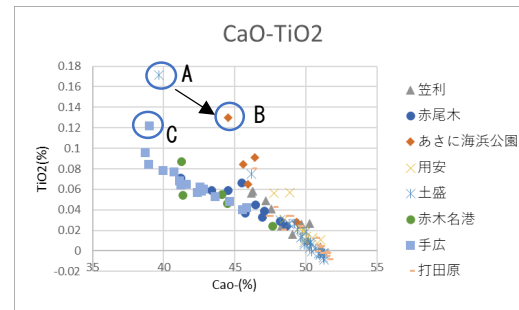


図 3 CaO-TiO2 分布図

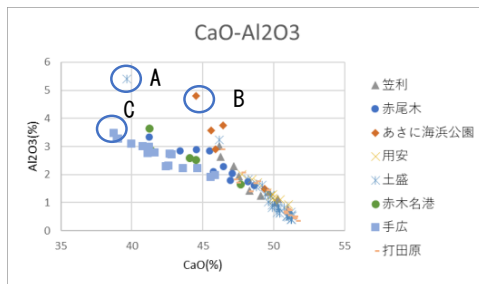


図 4 CaO-Al2O3 分布図

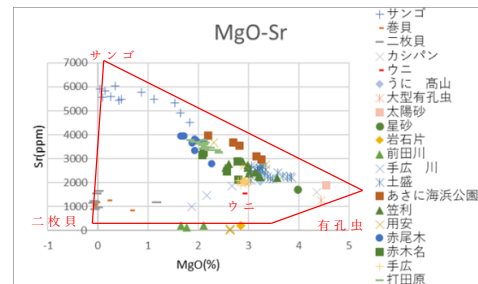


図 5 MgO-Sr 分布図

高山（2017 卒論）のデータも含む

4. 考察

土盛海岸とあさに海浜公園の地質は、泥岩と粘板岩で構成されている。【文献 2】土盛海岸地点 20 には岩礁があり、その影響を強く受けていると考えられる。あさに海浜公園に岩礁はなく、地点 1 付近に河川があり、山からの流入により Ti、Al の値が高くなっていると考えられる。図 3 から、土盛海岸地点 20（図中の A）とあさに海浜公園地点 1（図中の B）は平行にシフトしているため、同じ岩石片で構成されており、岩石片の割合の違いによる変化だと考えられる。しかし、手広海岸は他の海岸とは傾きが異なるため、泥岩や粘板岩ではない岩石が多く含まれており、組成が異なると考えられる。

図 5 の結果より、貝類の影響はあまりないことが言える。MgO が高くなるのは有孔虫が強く関与し、ウニやカシパンといった生物片も関係していると考えられる。Sr が高くなるのはサンゴ片の影響であり、サンゴ片が多く含まれている海岸は Sr の値が大きく示されていると考えられる。

5. 結論

岩礁や地質、漂着物が海岸に含まれる岩石に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

奄美大島の海岸はサンゴ、有孔虫、ウニといった生物片または遺骸によって構成されていることが分かった。また、河川による砂の供給により構成されている海岸の地点があることが分かった。

6. 参考文献

- 1) 伊藤真裕子, 森愛, 本郷宙軌, 浅海竜司, 宮入陽介, 横山祐典, 藤田和彦, 2018, 星砂の磨耗度と放射性炭素年代に基づく瀬底島海浜堆積物の生産年代と運搬・堆積過程, 日本サンゴ礁学会誌第 20 巻, 1-20
- 2) 産総研, 地質調査総合センター 20 万分の 1 地質図 奄美大島
- 3) 高山千尋 日本各地の貝殻内部の結晶形態と含有微量元素測定 2016 年度卒業論文

市販されているアイシャドウの鉱物由来成分の分析

宇宙科学研究室

1924007 植松せれな

指導教員：門多顕司

1. 緒言

「お化粧」という文化の起源は古代エジプトと言われており、絵画や彫刻には目の周りに彩色したものが残されている。古代エジプトのアイシャドウは孔雀石(*malachite*)をすりつぶした緑色の粉状のものや、藍銅鉱(*azurite*)をすりつぶした青色の粉状のものを顔に塗るもので、この時代でいう「化粧」とは現代とは異なる魔除け・虫よけ・目の病気への対策として行われていた。アイシャドウは20世紀半ばにヨーロッパで一般化され、日本には西洋からの輸入といった形で明治時代頃入ってきた。当時は魔除けとして目じりに赤く塗る赤土化粧に始まったがほとんど普及せず、女性一般に浸透されたのは昭和時代に入ってからである。近年ではヨーロッパのブランドだけでなく韓国や中国、タイなどのアジア圏のブランドの急成長し、低価格帯で高発色ものも多く流通するようになっている。しかし、アイシャドウを塗布する目の周りは顔の中でも皮膚がとても敏感な部位であり、少しの外的刺激でも炎症が起きてしまうため、安全性が求められる。化粧品の成分配合量は企業秘密であり公開されていない。どのような材料が使用されているか自分なりに探ることで、それぞれのブランドの違いを知り、消費者として機能や配合目的、安全性を確かめることができる。

本研究では、幅広い価格帯の様々なブランドのアイシャドウを用い、可視分光測定での色調の相違点の比較に加え、X線分析での構成鉱物や構成する元素量の分析の3方向から比較検討を行い、価格と素材の関係について考察する。

2. 実験方法

低価格帯から高価格帯で色が異なる54種類のアイシャドウについて、以下の3つの方法を用いて色と構成している鉱物・元素について分析をおこなった。

1) 紫外可視分光分析装置を用いた吸光度の測定(UV-Vis)

実際に皮膚の上でアイシャドウを使用している状態に近づけるため肌色のサロンパス表面にコットンで塗布し測定した(右図1)。

2) 粉末 X 線回折(XRD)測定

試料がどのような鉱物で構成されているかを測定することができた。

3) 蛍光 X 線分析(XRF)測定

産総研の地球化学標準試料15種で作成した検量線を用いて、主要

10元素(Si.Ti.Al.Fe.Mn.Mg.Ca.Na.K.P)と微量9元素(Rb.Sr.Ba.Y.Zr.Nb.Cr.Ni.S)の化学組成を調べた。



図1：UV-Vis 測定で使用したアイシャドウ 54 種

3. 結果

UV-Vis 測定の結果、肌なじみの良いページュに近い色や、白に近い色に関しては、反射や吸収が全波長域を通してあまり見られなかった(図2 CHANEL272 左上)。ピンク系の色のアイシャドウは、緑～黄の波長領域(500～550nm)に大きな吸収がみられた(図3 ADDICTION145)

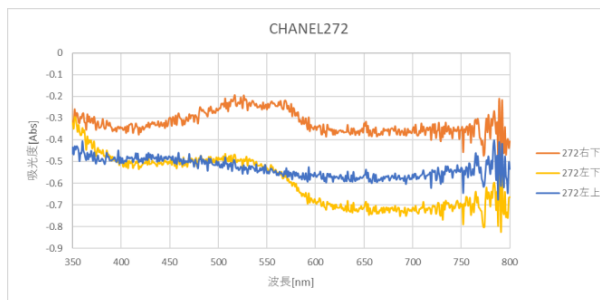


図2：CHANEL272 3種類の UV-Vis 測定結果

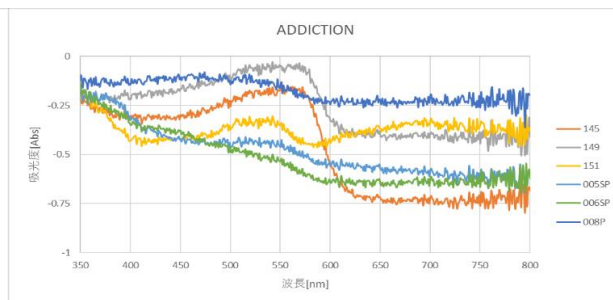


図3：ADDICTION6種類の UV-Vis 測定結果

XRD 測定では、今野 (2015)^[1]の先行研究で示されたフロゴパイト(*Phlogopite*)はマットな色のアイシャドウ以外のキラキラとした成分を含むアイシャドウに含まれていることがわかった。そのほかに、ヘマタイト(*hematite*)、ローモンタイト(*Laumontite*)、タルク(*Talc*)、ムライト(*Mullite*)、酸化チタン(*titanium oxide*)、マグネタイト(*magnetite*)が含まれていることが分かった。さらに、中国コスメの ZEESEA 0 9 のみ鉱物の結晶構造ではないもののプロファイルを得た(図 5)。

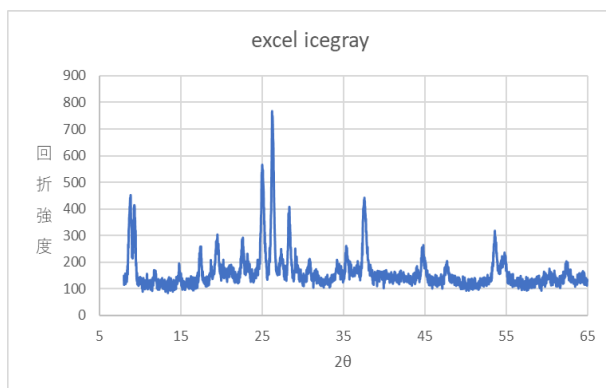


図 4 : Excel の XRD 測定結果

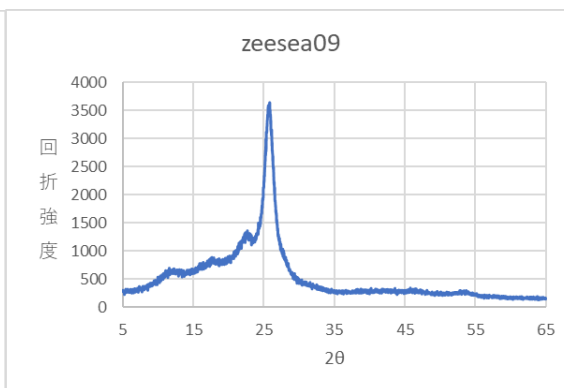


図 5 : ZEESEA 0 9 の XRD 測定結果

4. 考察

UV-Vis 測定の結果より、同じピンクに見えても吸収が異なる波長に出てくるものがあつた。これは、混ぜられているラメの色がゴールドかシルバーなのかで色の吸収や反射が変わっている要因の一つであると考ええる。

XRD 測定の結果より、キラキラとしたアイシャドウにフロゴパイトのピークがあつたことから、アイシャドウのキラキラの正体は、フロゴパイト(和名：金雲母)であるといえる。しかし、XRF 測定の結果より、フロゴパイトが含まれている量に関しては見た目のキラキラが多く見えても必ずしもフロゴパイトが多く含まれているわけではないことがわかった。他のアイシャドウを比較すると TiO₂ と K₂O の値が少ないが、MgO が高い値であつた。その理由として、フロゴパイトより安価で手に入りやすいタルク(和名：滑石)が使用されていると考える。ベースをマットな色にし、そこにキラキラを足すことでごく少量のフロゴパイトでもキラキラしているように見せているのではないかと推測する。

XRD 測定で他のアイシャドウと異なる結果が出たものに関しては、見た目が似ているものとして 100 円ショップなどで売られているキラキラしているモールを粉碎し XRD 測定で分析したところ、図 6 のような結果がえることができた。結果よりポリエチレンと考えることができ、その結果は ZEESEA 0 9 と一致した。この背景には、鉱物以上にキラキラし光を反射しやすいものとして、安価で手に入りやすい黄色の透明ポリエチレン樹脂にアルミ箔を混ぜてつくられたものを金色の反射材料として使用している可能性が高いと考えた。

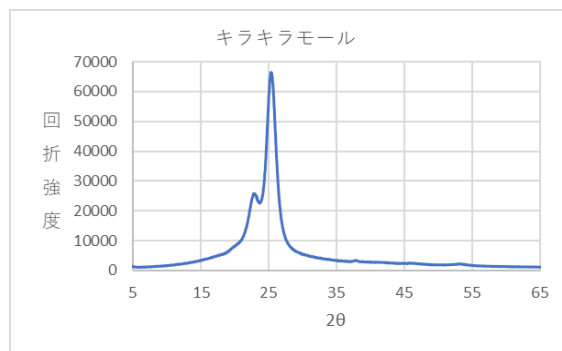


図 6 : キラキラのモールの XRD 測定結果

5. 結論

アイシャドウを構成する材料に大きな違いはなかったが、成分配合量を変えることにより価格を抑えながら高価格帯のものに劣らない商品の開発における工夫を知ることができた。鉱物のキラキラよりさらに目元を華やかにするために、加工された人工のポリエチレン樹脂にアルミ箔を混ぜたものが使用されていることが分かった。いずれも人体に影響がないものを選択して加工していることがわかるが、使用感に関しては価格が高いものの方がキラキラしていても肌触りがよく、発色に関しても長時間よれずにつけたときの発色が続いていると感じた。

6. 参考文献

[1]「アイシャドウにおける UV-Vis を用いた比較研究」今野 真祐子卒論 2015

関東各地の飲用水の $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ 硬度から見る取水源の影響

宇宙科学研究室

1924043 伏見美咲

指導教員：門多顕司

1. 緒言

地球上の水は多様な循環を経ながら存在している。私たちの生活を支える水道水は、日々の生活の中の基本的な資源であり、飲料や料理など生活や農業などの幅広い産業で利用されている。水道水の硬度は原水の水質に由来しており、水道管の影響を受けることは少ない。日本の水道水の硬度の平均は 48.9mg/L であるが、地域によって水質や硬度の特徴は大きく異なる。本研究では関東各所で水道水を採取し、関東各地の水道水について、Ca 及び Mg の濃度を測定し、その取水源の地質と Ca、Mg 濃度との関係を明らかにした。その分析結果から、水がどのような過程を経て供給されたのか調査・検討を行う。

2. 調査地域と特徴

試料の採水において、通常の浄水処理、オゾン処理や生物活性炭吸着処理といった高度処理を行っていない地域を選択した。

2-1 伊豆大島

伊豆大島にて水試料を採取できる地点で試料採取を行った。伊豆大島は島そのものが 1 つの活火山であり、主に玄武岩溶岩流や火砕岩、多数の岩脈で形成されており、水道水の水源は地下水と湧き水である。

2-2 東京都青梅市

多摩川の表流水を水源とし、同じ取水源と思われる地点数か所で採水を行った。採取地点は河川堆積物が積み重なっている地層である。上流は砂泥岩互層や混在岩の地層で形成されている。

2-3 千葉県市原市

千葉県市原市を構成する地層は海の堆積物によって構成されており、主に砂岩泥岩の互層や砂質泥岩及び泥質砂岩で形成されている。水道水の水源は主に地下水であるが、一部はダムや表流水から供給をしている。

2-4 神奈川県箱根町

神奈川県箱根町は大部分が活火山由来の地域であり、主に玄武岩質安山岩溶岩流や火砕岩で形成されている。水道水の水源は地下水と湧き水である。

3. 研究方法

採水した水試料についてはキレート滴定法を用いて陽イオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})と硬度の測定を行った。

4. 結果

4-1 伊豆大島

伊豆大島で採取した試料について採取位置と水源を図 1-a) 上、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} イオンの値を図 1-a) 下に示す。伊豆大島において採取したものは Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ともにすべての地点で高い値が確認された。湧き水を水源としている地点 4 は Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ともに他の地点に比べ、低い値が確認された。地点 7 は Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ともに高い値が確認されたが、温泉水由来であることが理由であると推測した。

4-2 東京都青梅市

東京都青梅市で採取した試料について採水地点と水源を図 1-b) 上、陽イオンの値を図 1-b) 下に示す。結果がほぼ一定だったことから、水道水の取水位置が同じであると推測できる。

4-3 神奈川県箱根町

神奈川県箱根町で採取した試料について採水地点と水源を図 1-c) 上、陽イオンの値を図 1-c) 下に示す。地点 4 は地点 1～3 地点と同様の地質の取水であるが、高い値が確認された。表流水を水源としている地点 7 は低い値が確認された。

4-4 千葉県市原市

千葉県市原市で採取した試料について採水地点と水源、陽イオンの値を図 3 に示す。地点 11 は比較的高い値が見られたが、この地点の水源は他の地点（平均 151.2m ）よりも地下深く（ 285m ）にあることがわかっている。

5. 考察

5-1 4-1の考察

伊豆大島の地質は玄武岩溶岩流で形成されているため、 Mg^{2+} が多く含まれていると考えられる。また、水源が地下深くなるほど、陽イオンの値が高くなる傾向にあると考えられる。

5-2 4-2の考察

水源が表流水であったことや、周辺の地層が砂泥岩互層や河川堆積物のため、水に含まれている陽イオンには地層の影響はあまりないと考えられる。

5-3 4-3の考察

地点1~3と地点4の地質は同じだが、地点4の水源に温泉水が混入しているので数値が高くなった可能性があると考えられる。そして、地点7は表流水を水源としているため陽イオンの値は小さくなると考えられる。

5-4 4-4の考察

すべての地点の地質がほとんど変わらず、水源である地下水やダムの水が養老川水系であるため水質に大きな差は見られなかったと考えられる。しかし、地点10は他の地点と比べ、原水の採水地点が地下深く（285m）にあるためその地層中の貝化石層の影響を受け、 Ca^{2+} の値が高くなったと考えられる。

6. 結論

水道水の水質は水源の地質要因に依存していると考えられるが、原水の取水地点が地下深くにある

場合、よりその影響を受けやすく水に含まれる陽イオンの値が大きくなる。表流水などの地表に近い地点で取水した場合には降雨の浸透などによる影響から（季節にもよるが）陽イオンの値が低くなると考えられる。

7. 参考文献

[1] 堀まゆみ・小豆川勝見・杉森賢司・渡邊雄一郎『あなたの水道水、「硬さ」調べました～日本全国水道水の硬度分布～』2021年6月19日。（web閲覧日：2023年1月28日）

[2] 大森昌衛・端山好和・堀口万吉「日本の地質3 関東地方」共立出版、1993



図1：関東各地の採取地点（上）および $Ca^{2+}Mg^{2+}$ の測定値（下）
a)伊豆大島、b)東京都青梅市、c)神奈川県箱根町、d)千葉県市原市

1. 緒言

高エネルギー粒子である宇宙線の発生源は、今もなお判っていない。宇宙線は地球に到達する前、宇宙空間の磁場に大きく影響されているからだ。本研究では、銀河磁場モデル (GMFmodel) とパルサー分布を仮定し、宇宙線をエネルギーが 10^{18} 、 10^{19} 、 10^{20} [eV] の陽子の場合と鉄の場合を仮定して、伝播シミュレーションを行った。得られたシミュレーション結果より、陽子と鉄の flux (単位時間、単位面積、単位立体角あたりの到来頻度) の計算を行い、skymap を作成した。その後、テレスコープアレイ実験(TA)、及びピエールオージェ観測所(Auger)による、実験的に得られた宇宙線データの skymap と比較し、宇宙線の異方性について検討した。

2. 方法

GMFmodel は、M.F Pshirkov et al.(2011)^[1]を参考にした。この GMFmodel は、diskfield と halofield の2つの構成要素から成る。これら2つの成分に分け磁場を求めた。銀河中心を原点とし、地球から銀河中心方向を x 軸、銀河面から北へ向かう向きを z 軸にとる。

diskfield の磁場は式(1)で表される。

$$B^D(r, \theta, z) = B^D(r) \cos\left(\theta - b \ln \frac{r}{R_\odot} + \phi\right) \exp(-|z|/z_0) \quad (1)$$

$$\text{但し、} B^D(r) = \begin{cases} B_0^D \frac{R_\odot}{r \cos \phi}, & r > R_c \\ B_0^D \frac{R_\odot}{R_c \cos \phi}, & r < R_c \end{cases}, \quad R_c = 5[\text{kpc}], \quad B_0^D = 2[\mu\text{G}], \quad \phi = b \ln\left(1 + \frac{d}{R_\odot}\right) - \frac{\pi}{2}, \quad b = \frac{1}{\tan p},$$

$R_\odot = 8.5[\text{kpc}]$, $d = -0.6[\text{kpc}]$, $z_0 = 1[\text{kpc}]$ とした。また、diskfield の方位角成分、動径成分はそれぞれ、 $B_\theta^D = B^D(r, \theta, z) \cos p$, $B_r^D = B^D(r, \theta, z) \sin p$ で表される。 $p = -6^\circ$ とした。

halofield の磁場は式(2)で表される。

$$B_\theta^H(r, z) = B_0^H \left[1 + \left(\frac{|z| - z_0^H}{z_1^H} \right)^2 \right]^{-1} \frac{r}{R_0^H} \exp\left(1 - \frac{r}{R_0^H}\right) \quad (2)$$

$$\text{但し、} B_0^H = \begin{cases} 4 [\mu\text{G}] (\text{銀河面の北}) \\ -2 [\mu\text{G}] (\text{銀河面の南}) \end{cases}, \quad z_1^H = \begin{cases} 0.25[\text{kpc}] (|z| < z_0^H) \\ 0.40[\text{kpc}] (|z| > z_0^H) \end{cases}, \quad z_0^H = 1.3[\text{kpc}], \quad R_0^H = 8[\text{kpc}] \text{ とした。}$$

パルサー分布は、P.G.Tinyakov(2016)^[2]より銀河系内でのパルサー分布関数を使用した。それぞれ平面の分布を $p(r)$ 、垂直方向の分布を $p(z)$ とする。

$$p(r) = r^p \exp(-r/\sigma_r) \quad ; p = 2.35, \sigma_r = 1.528[\text{kpc}] \quad (3)$$

$$p(z) = \exp(-z^2/2\sigma_z^2) \quad ; \sigma_z = 0.05[\text{kpc}] \quad (4)$$

以上の式を用いて、地球から反陽子、反鉄を打ち出し、銀河磁場中の軌道計算を行った。任意の方向 $\vec{n}$ から打ち出される宇宙線の flux $\Phi(\vec{n})$ は、式(5)で表される。

$$\Phi(\vec{n}) \propto \int_{\oplus}^{end} p(l) dl \quad (5)$$

3. 結果

求めた flux より作成した skymap を以下に示す。原点を銀河中心とし、横軸を銀経 ℓ 、縦軸を銀緯 b とする。

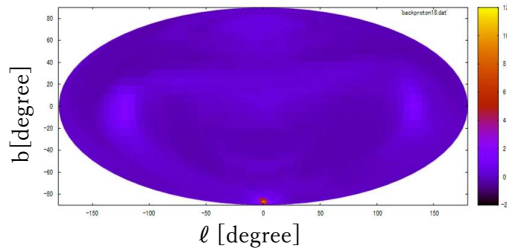


図 1. 10^{18}eV の陽子の flux の skymap

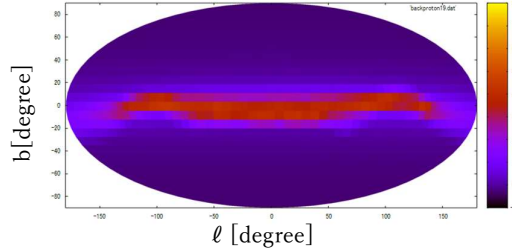


図 2. 10^{19}eV の陽子の flux の skymap

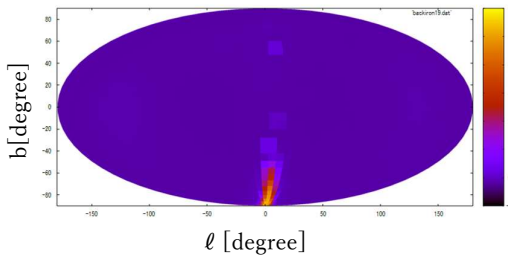


図 3. 10^{19}eV の鉄の flux の skymap

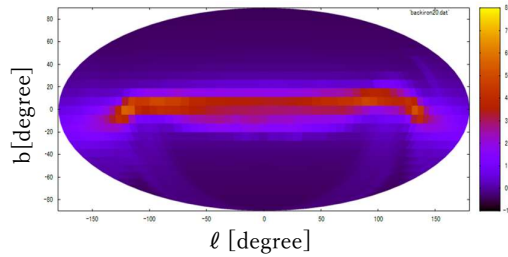


図 4. 10^{20}eV の鉄の flux の skymap

4. 考察

図 1 では異方性はほとんど見られなかったが、図 2 では $b=0$ 付近で flux が高いことがわかった。図 1 で異方性が見られなかったのは、エネルギーが低く、磁場に巻き取られ様々な方向に地球に到達してしまうためだと考えられる。また、図 2 の $b=0$ 付近で flux が高いことは、銀河平面に宇宙線源であるパルサーが多く集中しているためだと考えられる。さらに、作成した skymap を TA、Auger による skymap^{[3],[4]}と比較した。まず異方性が見られた図 2 と TA を比較した結果、flux の結果は一致しなかった。同様に Auger と比較しても、結果の一致は見られなかった。実験的な観測結果と今回のシミュレーション結果が一致しなかったことから、宇宙線源は銀河系内にはないのではないかと考えられる。

5. 結論

エネルギーが 10^{18}eV の陽子では異方性は見られず、 10^{19}eV の陽子では $b=0$ 付近で高い flux が見られ、異方性が見られた。またそれぞれ TA、Auger による skymap と比較すると、flux の結果は一致しなかった。これらのことから、今回使用した銀河磁場、パルサー分布を変えて計算を行うことによる検討が必要になると考える。

6. 参考文献

- [1] M.S.Pshirkov et al.(2011) 「Deriving the global structure of the galactic magnetic field From faraday rotation measures of extragalactic sources」, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 436(2013)2326.
- [2] P.G Tinyakov et al.(2016) 「A signature of EeV protons of Galactic origin」, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 460(2016)3479-3487
- [3] R.U. Abbasi et al.(2016) 「Search for EeV protons of galactic origin」, Astroparticle Physics 86(2017),21-26
- [4] A. Aab, et al.(2017) 「Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above $8 \times 10^{18} \text{ eV}$ 」, Science 357(6357),1266-1270

宇宙望遠鏡で宇宙から観測することの重要性

知識工学部 自然科学科 宇宙科学研究室

1924013 神山拓斗

指導教員：門多顕司

1. 地上からの天文観測と大気の影響

地上から天文観測を行うと地球大気の影響を受けてしまう。大気の影響をできるだけ避けるために、多くの天文台は標高の高い場所に設置されている。しかし、大気の影響を完全に避けることはできない。その中でも大気のゆらぎ、大気の発光、大気による電磁波の吸収による影響が大きい。大気の大気温度分布は様でないため、時間や場所によって常に大気の状態は変化し続けている。これが屈折率分布の不規則な変動になり、得られる星像がゆれ動いてしまう。これが大気のゆらぎである。大気の発光の原因は、昼間に太陽光を受け励起状態になった OH 分子が夜間に発光してしまうことである。加えて、大気自体も主に赤外線の大気波長で熱放射をしており、これらの光が観測装置に入射することで天体の検出感度の低下を招く。オゾン層や酸素分子によって成層圏より上空の大気で 300nm より短い波長の光が完全に吸収されてしまう。また、大気中に含まれる水分子等によって赤外線の大部分が吸収されてしまうので、地上から観測できるのは可視光、電波、一部の赤外線のみである。これらの理由から、高精度で天文観測を行うためには宇宙から観測する必要がある。

2. 観測波長と観測天体

表 1 のように、宇宙望遠鏡は観測する天体や目的に応じて観測波長を使い分けている。それぞれの宇宙望遠鏡が用いている波長を示

す(表 2)。また、ハッブル宇宙望遠鏡、ケプラー宇宙望遠鏡、JWST を例としてこの後詳しく説明する。

表 1. 観測波長と観測対象

波長	観測対象
電波	星間物質など
マイクロ波	宇宙マイクロ波背景放射など
赤外線	ダスト、赤方偏移している天体など
可視光	恒星、銀河、原始惑星系円盤、惑星状星雲など
紫外線	紫外線を放射する恒星、銀河など
X線	中性子星、ブラックホールなど
ガンマ線	中性子星、ブラックホールなど

表 2. 宇宙望遠鏡の観測波長

波長	宇宙望遠鏡
電波	はるか
マイクロ波	COBE、WMAP、Planck
赤外線	Spitzer、JWST、あかり
可視光	Hubble、Kepler
紫外線	Hubble、GALEX
X線	Chandra、XMM-Newton、すざく、ひとみ
ガンマ線	Compton、Swift、Fermi

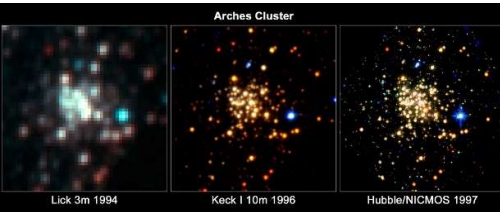
3. 人工衛星と宇宙望遠鏡の軌道

人工衛星は、地球から打ち上げた後に軌道に乗せる必要がある。望遠鏡の場合は観測波長、観測目的などに応じて適切な軌道を用いる必要がある。月のように地球を周回する軌道を地球周回軌道と言い、主に軌道傾斜角と軌道高度で分類される。宇宙望遠鏡は昼夜境界線上を周回する極軌道がよく用いられている。地球周回軌道以外では、太陽周回軌道やラグランジュ点などの軌道がある。地球周回軌道は地球に近いので比較的低コスト

が低い、太陽周回軌道やラグランジュ点などの軌道は地球から離れているため打ち上げコストが高い。

4. ハッブル宇宙望遠鏡

ハッブル宇宙望遠鏡は1990年に打ち上げられ、現在まで稼働している宇宙望遠鏡である。幅広い天文観測を目的としており、他の宇宙望遠鏡と比較しても質量が大きいので打ち上げやすい地球低軌道を用いている。地球に近い軌道のためスペースシャトルから修理を行うことが可能だった。地上望遠鏡と比較すると、地上望遠鏡はハッブル宇宙望遠鏡より大きな口径であるにも関わらず、像がぼやけていることがわかる。これは地球大気の影響が大きな理由である。ハッブル宇宙望遠鏡の主な成果として、遠方の銀河を捉えた“Hubble Deep Field”が挙げられる。



画像1. 左から、リック(地上望遠鏡・口径3m)、ケック(地上望遠鏡・口径10m)、ハッブル宇宙望遠鏡(口径2.4m)の観測画像の比較

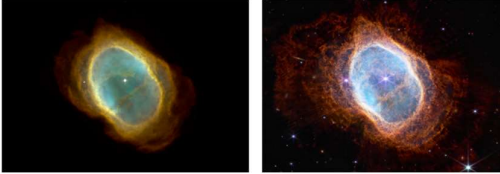
5. ケプラー宇宙望遠鏡

ケプラー宇宙望遠鏡の目的は太陽系外惑星の発見である。その手法として、惑星の公転による恒星の光度変化を検出するトランジット法が用いられている。この光度変化は主星と惑星の断面積の比によって決まる。太陽と地球の場合は0.01%程度の変化であり、ケプラー宇宙望遠鏡は0.01%の光度変化まで観測が可能である。この変化を捉えるためには大気の影響を受けない宇宙から観測する必要がある。

ある。また、長期間同じ方向を観測し続ける必要があるため太陽周回軌道を用いている。ケプラー宇宙望遠鏡の成果として、約2600個の太陽系外惑星を発見した。

6. JWST

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)は初期宇宙の観測が主な目的である。口径は宇宙望遠鏡の中でも過去最大級である。赤外線観測を行うため、太陽・地球・望遠鏡自体の発熱などによる熱放射の影響を受けにくく、望遠鏡の冷却に適している第2ラグランジュ点の軌道を用いている。表3より、口径がハッブル宇宙望遠鏡の2.7倍であるにも関わらず質量は0.6倍であり、大型化と軽量化を両立している。ハッブル宇宙望遠鏡の観測した画像と比較すると、JWSTは細部の構造まで観測できていることがわかる。



画像2. ハッブル宇宙望遠鏡(左)とJWST(右)の観測画像の比較

表3. 宇宙望遠鏡の比較

	ハッブル宇宙望遠鏡	ケプラー宇宙望遠鏡	JWST
打ち上げ日	1990/4/24	2009/3/7	2021/12/25
質量[kg]	11,110	1,052	6,200
口径[m]	2.4	0.95	6.5
軌道	地球低軌道	太陽周回軌道	太陽-地球の第2ラグランジュ点 (SEL2)
観測波長	近赤外線 可視光 紫外線	可視光	赤外線
観測目的	幅広い天文観測	太陽系外惑星探査	初期宇宙の観測 幅広い天文観測

参考文献

家正剛・岩室史英・舞原俊恵・水本好彦・吉田道利「宇宙の観測1」(日本評論社 2007年)
岡村定雄・池内了・海部宣男・佐藤勝彦・永原裕子「人類の住む宇宙」(日本評論社 2007年)
<https://www.sciencefriday.com>
<https://esahubble.org>
<https://www.therobotreport.com>

初代銀河およびクエーサー観測による宇宙再電離の観測的制限

宇宙科学研究室
1924051 宮尾 美月
指導教員 門多 顕司

1. 諸言

「宇宙再電離」は、宇宙全体を満たしていた中性水素が数億年という短い間に全て電離されたという、宇宙 138 億年の歴史における一大イベントである。ビッグバン後、電離状態であった水素原子はその後宇宙膨張によって温度が下がり、ビッグバンから 38 万年後に陽子と電子が再結合して中性化したと考えられている(宇宙の晴れ上がり)。一方で、現在の銀河間空間は電離状態の水素で満たされている。つまり宇宙晴れ上がり以降、再結合した水素は再び電離したことになる。これが宇宙再電離である。中性水素が陽子と電子に電離するためには、紫外線がぶつかる必要がある。銀河間空間の中性水素を全て電離したとなると大量の紫外線を要するが、宇宙再電離について詳細はわかっておらず、いつ起こったのか、大量の紫外線を放射した電離源すらも特定されていない。

多くの謎に包まれている宇宙再電離であるが、高赤方偏移天体を観測することによって電離時期や再電離源候補について観測的制限をつけることができる。本研究では、初期宇宙に分布する銀河やクエーサーに着目し、宇宙再電離の解明にどのように関わってくるのかを述べる。

2. ガンピーターソンテストによる宇宙再電離完了時期の観測的制限

ガン・ピーターソンテスト(以下:GP テスト)とは、高赤方偏移宇宙における中性水素割合を見積もるための観測手法である。宇宙再電離末期のクエーサーから放射される紫外線を観測した場合、周囲の銀河間空間は電離されているため紫外線はほとんど吸収されことなく(ただし赤方偏移して)地球に到達するが、宇宙再電離の最中にあるクエーサーから放射された紫外線を観測した場合、銀河間空間の中性水素に紫外線の大部分が吸収され地球に到達する。その様子を赤方偏移とともに調べることで、赤方偏移に応じた中性水素割合を見積もることができる。特に、中性水素ガスによって鋭い吸収が発生している部分を GP トラフという。これは、紫外線が非常に高濃度の中性水素ガス中を通過している証拠である。つまり、宇宙再電離末期に分布するクエーサーを複数観測し、GP トラフの有無を確認することで宇宙再電離期の終わりに観測的制限をつけることができる。

図 2 は、 $5.74 < z < 6.42$ (ビッグバンから 7~8 億年後)の SDSS クエーサー 19 個のスペクトルである。 $z > 6.00$ (130 億光年以上)のクエーサーに着目すると、GP トラフが確認できる。このことから、 $z = 6$ 付近(ビッグバンから 7~8 億年)で宇宙再電離が完了したのではないかと考察することができる。

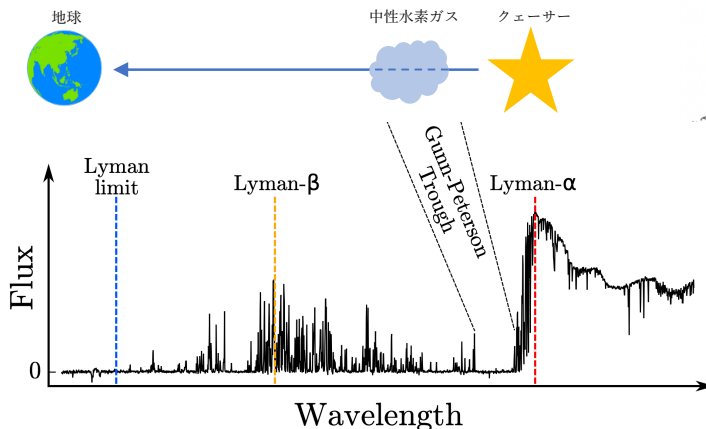


図 1. GP テスト[1]

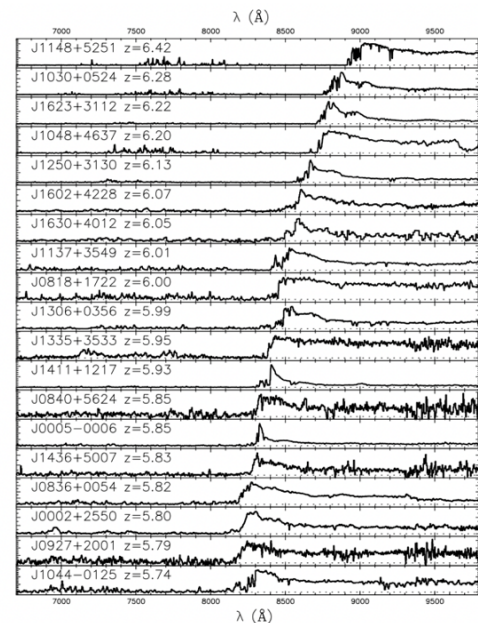


図 2. SDSS クエーサー 19 個のスペクトル[3]

このように GP テストは宇宙再電離完了時期に観測的制限をつける手法としては大変有用である。しかし、GP テストに用いられる紫外線は極少量の中性水素でも吸収されてしまう。それゆえに GP テストは完全電離に極めて近い時期の観測でのみ有効な手段であり、宇宙再電離初期のような中性水素濃度が高い時期については制限をつけることができない。

3. 宇宙再電離源を探る

GP テストによって、宇宙再電離の完了時期に観測的制限をつけることができたが、宇宙全体の中性水素を電離させるほどの紫外線を放射した電離源の正体については、初期宇宙の銀河、クェーサーなど複数の候補が挙げられている。

電離源有力候補の1つである初期宇宙の銀河は重元素量によって分類することができる。重元素量が小さいほど昔の天体であることを示しており、宇宙で最初に作られた第一世代星はヘリウムと水素のみで形成されていたと考えられている。第一世代星は大質量で高温であるために大量の紫外線を放射したと考えられているが、寿命が短いため宇宙全体の中性水素を電離するためには紫外線光子量が不十分であったと考えられている。

一方で、第二世代以降の星には第一世代星が生成・放出した重元素が含まれており、第一世代星と比べて質量は小さく温度が低いため放出する紫外線光子は少ないが、寿命が長い最終的な紫外線光子数は多かったと考えられている。第二世代以降の星は、宇宙全体を再電離させた最有力候補とされており、その候補天体として 130 億光年彼方で大規模天体ヒミコ(図 3)が発見されている。しかし、宇宙誕生から数億年でどのようにしてこのような大規模天体に成長したのか、詳細はわかっていない。



図 3. 初期宇宙大規模天体ヒミコ[3]

もう一つの再電離源候補はクェーサーである。すでに宇宙再電離末期のクェーサーが複数見つかっており、宇宙再電離に寄与したと考えられているが、遠方のクェーサーは普通の銀河に比べ数が非常に少なく、広い天域を探さなければ発見することができない。観測の難しさから、放射した紫外線光子量の詳細がわかっておらず、宇宙再電離への直接的な寄与は不明である。

4. 考察と今後の課題

宇宙再電離期末期クェーサーのスペクトル観測から、宇宙再電離はビッグバンから 7~8 億年で完了したことがわかった。このような短期間で宇宙を再電離させた候補天体に関しては、第二世代以降の星が最有力候補である。今後再電離源に対してより詳細な観測的制限をかけるためには、電離光子脱出率の見積もりが鍵となる。電離光子脱出率とは、銀河内で生成された電離光子(紫外線)が銀河間空間に供給される割合を表したものであり、銀河がどの程度宇宙再電離に寄与したのかを理解する上で重要である。宇宙再電離に必要な電離光子脱出率は 10%[4]と考えられているが、電離光子脱出率を観測的に検証することは難しく、宇宙再電離の研究における一つの大きな課題となっている。

今後、再電離解明に向け初代銀河やクェーサー観測を行う必要があるが、2021 年 12 月に打ち上げられたジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(以下: JWST)にて高赤方偏移宇宙探査が行われており、すでにいくつかの最遠方天体候補が発見されている。JWST では、 $z=20$ (135 億光年)を超える遠方銀河を観測できる性能があるとされており、今後の JWST による宇宙再電離源(銀河やクェーサー)の発見に期待したい。

5. 参考文献

- [1] John H. Wise (2019) arXiv:1907.06653
- [2] Fan et al.(2006),AJ 132, 120
- [3] <https://alma-telescope.jp/column/6000vol2>
- [4]井上昭雄 & 岩田生 (2007) 天文月報 100, 174

惑星状星雲の寿命の計算 ～惑星状星雲が見えなくなるまで～

19240059 吉崎 謙, 指導教員: 門多 顕司

1. 背景・目的・動機

惑星状星雲 (PNe) は、主系列星の中でも太陽質量の 8 倍程度以下の天体が赤色巨星へと進化し、恒星を構成していた水素やヘリウムなどのガスや塵を放出後、そのガスや塵が白色矮星 (WD) へと進化した中心星からの光を受けて光っている輝線星雲である。そのため、天の川銀河内には PNe が大凡 11000~22000 個ほど存在しているはずであることが理論的に推定されている。その一方で、現在発見されている PNe は大凡 1500 個ほどで理論上の 15~30% ほどしか発見に至っていない。この原因の一つに惑星状星雲を構成する星間塵や星間ガスが拡散して観測できないほどに暗くなってしまうことが考えられる。よって本論文では、PNe が地球から観測することが難しくなるほど暗くなるまでにかかる期間を簡単なモデル計算で推定した。

2. 惑星状星雲の簡易進化モデル計算

2.1 仮定条件



図 1: 計算を行なった PNe の写真。左上、M97。中上、NGC 2392。右上、NGC 6751。左下、Abell 30。中下、Abell 33。右下、Abell 39。

PNe の寿命を計算するにあたり、モデルの簡単化のため、いくつかの仮定条件を設定した。①PNe の形状は真球である。②真球のまま膨張していく。③中心星から PNe の外縁までの密度は一定である。④ PNe 内における水素とヘリウムの存在比を 4:1 としそれ以外の物質は存在しない。⑤水素、ヘリウム共に単原子分子理想気体とする。⑥PNe は断熱膨張している。⑦PNe はガスの黒体放射によってのみ輝い

ている。これらの仮定条件をもとに計算を行なった。

2.2 計算原理

PNe が理想気体によって構成されていると考えているため、理想気体の状態方程式 ($pV = nRT$) を用いて PNe の半径、質量、温度といった観測量から、PNe を構成するガスの圧力を求めることができる。断熱変化であると考えている為、ポアソンの法則 $pV^\gamma = \text{一定}$ (γ は単原子分子であるため 5/3) によって PNe の拡大速度にから求められる体積の時間変化に伴う圧力の時間変化を導出できる。これらのデータを再度理想気体の状態方程式を代入して、PNe の温度の時間変化を求めることができる。温度を持つ物体は黒体放射を行うため、プランクの法則 ($B(\lambda)T = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1}$)

をもとに惑星状星雲の表面輝度を求めた。

2.3 PNe の既知情報

PNe の既知の物理量に関しては表 1 にまとめた。このデータの中で最も重要となりうる地球から PNe までの距離については、PNe の膨張速度と接線方向への固有運動との比較から推定しているため誤差が非常に大きくなっている。その為、距離の誤差が PNe の大きさに対しても誤差を与えてしまっている。

3. 結果

3.1 PNe の面輝度時間変化

図 2 は導出した惑星状星雲の面輝度の時間変化を示している。図中の赤線は地球上で最も暗い場所における表面輝度の検出限界である 26 mag/arcsec^2 を示しており、これより惑星状星雲の面輝度が暗くなると、地上では観測不可能になると判定した。この図からわかることは、今回計算した 6 天体に関して、約 1000 年後から 1 万年の間で順々に地上において最も暗い場所から観測することが難しくなるということであ

表 1:惑星状星雲の既知データ

	等級	距離 (ly)	年齢	半径 (m)	質量 (kg)	温度 (K)	拡張速度 (m/s)
M 97	15.77	2600	6000	1.18E+16	3.18E+30	5872	6.00E+04
NGC 2392	9.63	2900	1050	5.74E+15	3.97E+29	16000	5.25E+04
NGC 6751	15.48	4564	3000	2.15E+15	5.97E+27	8000	4.00E+04
Abell 30	9.63	3000	12500	3.22E+15	4.97E+26	16000	4.00E+04
Abell 33	15.54	2700	7500	1.66E+16	1.52E+30	4600	4.50E+04
Abell 39	15.60	3800	3800	1.52E+16	1.17E+30	15400	3.50E+04

る。地上から観測できなくなる順序には、今現在の年齢との相関を見ることはできなかった。

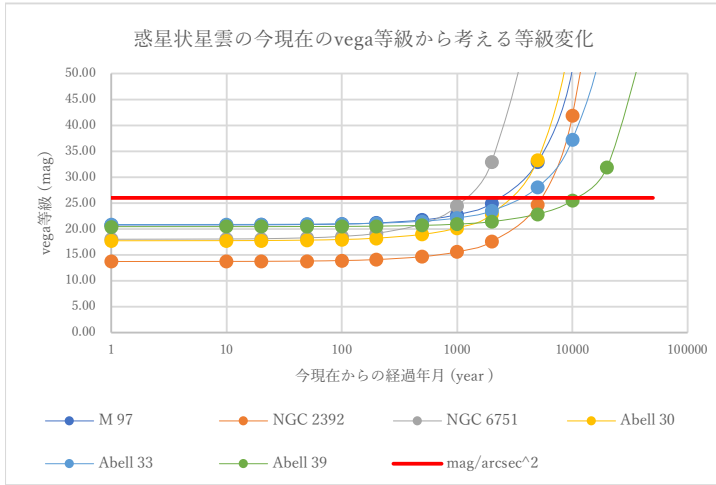


図 2: PNe の面輝度から考える等級変化

各 PNe の面輝度の時間変化を時間軸を対数とする片対数グラフ。地球上で最も暗い場所において観測することが出来る、26 mag/arcsec² を示している。

4. 考察

今回のモデル計算において、惑星状星雲の形成から1000年から長くても1万年以内にPNeの地球から観測が難しくなることがわかった。天の川銀河は形成から100億年が経過しており、それと比較するとこの短い観測可能期間が、理論によって考えられている15~30%しか発見されていないことの原因になりうると思われる。

時間発展によりPNeは立体的に広がっていき、PNeの外枠のガスは中心星からの距離が離れる。同時に、ガスが中心星から受け取ることのできるエネルギー量も小さくなる。そのため、PNeを持たない白色矮星の周りを、夜空の明るさの影響を受けない宇宙望遠鏡で、広視野かつ露光時間を長くして観測すれば、まだ見つかっていない惑星状星雲の残骸を見つけることができるかもしれない。

5. 今後の課題

本研究においてはPNeのモデルを簡略化し過ぎた

ため計算結果が不十分な形に終わってしまった。特に、4つの点について問題点があると認識している。一つ目が、PNeを構成するガスが中心星からエネルギーを受け取らずに断熱変化をしていると仮定した点である。2つ目は、PNeを構成するガスからの輝線を考慮に入っていない点である。3つ目は、PNeが理想気体によって構成されているとした点である。4つ目は、PNeの密度が一定であるとしたが、実際のPNeは様々な内部構造を持っている点である。以上の4点が計算に大きな影響を与えるのではないかと考える為それらを考慮した理論計算を行いたい。

また、PNeまでの距離は2.3章において述べたように大きな誤差を持ち、それが見かけの大きさに影響を与えることで体積や密度、質量といった観測量に対しても大きな影響を与えてしまっている点も問題点として認識している。

PNeの年齢に関しても、現在の膨張速度をもとに算出している天体が存在しており、膨張速度が途中で変化した天体があった場合には、計算されている年齢と異なってくることが考えられるため、PNeの膨張速度の変化についても考慮する必要がある。

参考文献

1. D.E.Osterbrock 田村眞一 訳 (2001), ガス星雲と活動銀河核天体物理学
2. Karen B. Kwitter et al. (2022), Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 134:022001 (61pp), "Planetary Nebulae: Sources of Enlightenment"
3. THE STRASBOURG-ESO CATALOGUE of GALACTIC PLANETARY NEBULAE
4. <https://www.universetoday.com>
5. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic>
6. Ma, T. García-Díaz et al. (2018), MNRAS 479, 3909–3922 "The Owl and other strigiform nebulae: multipolar cavities within a filled shell"
7. J. P. Philips et al. (1999), THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 118:2929–2939, 1999 December "THE STRUCTURE OF NGC 2392"
8. C. R. O' Dell et al. (2002), The Astronomical Journal, 123:3329–3347, 2002 June, "KNOTS IN NEARBY PLANETARY NEBULAE"
9. S. R. Pottasch et al. (2008), A&A 481, 393–400 (2008) "Abundances of planetary nebula NGC 2392"
10. Brent Miszalski et al. (2019), Publications of the Astronomical Society of Australia (2019), 36, e018, 10 pages "The post-common-envelope X-ray binary nucleus of the planetary nebula NGC 2392"
11. R. Montez Jr et al. (2015), The Astrophysical Journal, 800:8 (19pp), 2015 February 10 "THE CHANDRA PLANETARY NEBULA SURVEY (ChanPlaNS). III. X-RAY EMISSION FROM THE CENTRAL STARS OF PLANETARY NEBULAE"
12. You-Hua Chu et al. (1991), The Astrophysical Journal, 376:150–160, 1991, July 20 "THE MULTIPLE-SHELL STRUCTURE OF THE PLANETARY NEBULA NGC 6751"
13. D. M. Clark et al. (2010), The Astrophysical Journal, 722:1260–1268, 2010 October 20 "SHAPING THE GLOWING EYE PLANETARY NEBULA, NGC 6751"
14. H. Todt et al. (2015), "The Born-again Planetary Nebulae Abell 30 and Abell 78"
15. <https://chandra.harvard.edu/photo/2012/a30/>
16. <https://www.esa.int/ESA>
17. R. Wesson et al. (2002), Mon. Not. R. Astron. Soc. 340, 253–263(2003) "Physical conditions in the planetary nebula Abell30"

理研 RI ビームファクトリーでの

ネプツニウム 237 同位体の生成

実験原子核物理研究室

1924042 福島知隼

指導教員：西村太樹

1. 緒言

原子核は 250 種類の安定原子核が自然界に存在し、その他に 3000 種類以上の不安定原子核が存在する。これらの不安定原子核は、加速器や原子炉内で生成させる。原子核の構造や強い相互作用を理解するためには、この不安定な原子核を一つずつ理解していくことが大切である。この不安定な原子核を生成することができる理化学研究所の RI ビームファクトリーでは、粒子を加速させ標的に当てることで原子核を生成している。現在、理化学研究所が所有する重イオン加速器施設では、原子番号 1 の水素(H)から原子番号 92 のウラン(U)までの全ての元素の放射性同位体元素をビームとして供給することができる。理化学研究所では一次ビームである ^{238}U をベリリウム 9(^9Be)標的に当てることで原子番号 93 のネプツニウム Np を生成し、この Np を二次ビームとして利用する計画がある。実際にドイツにある GSI では、1GeV/u のエネルギーの ^{238}U を液体二重水素標的に当てて $^{234-238}\text{Np}$ の生成に成功している^[1]。Np を二次ビームとすると、今までみることのできなかった領域の原子核を見ることができるだろうと予測される。本研究では、 ^{238}U に ^9Be 1mm 標的を用いて Np を生成させ、その生成断面積を求めることを目的としている。

2. 実験方法

理化学研究所の RI ビームファクトリーでは、重イオンビームにより生成された粒子を BigRIPS で識別している。厚さ 1mm の ^9Be 生成ターゲットに 345MeV/u の ^{238}U ビームを入射し、 ^{237}Np を含む二次ビームを生成した。二次ビームは BigRIPS スペクトロメーターに送られ、分離・同定した。電荷状態変化を低減するため、第一分散焦点面 F1 には parallel-plate avalanche counters (PPAC) を含む材料は設置されていない。BigRIPS 分離装置の構成は ^{237}Np ビームの生成に最適化されており、D1, D2, D3-D4, D5-D6 の磁気剛性 $B\rho$ 値はそれぞれ Fully-stripped, Fully-stripped, H-like, He-like ^{237}Np イオンに対して最適に設定した。二次ビームの粒子識別は TOF- $B\rho$ - ΔE 法を用いて行った^[2]。F7 では、キセノンガスをを用いた新開発のイオンチャンバー (IC) を使用した。

3. 実験結果

図 1 に粒子識別図を示す。今回の実験での原子番号 Z 及び質量数電荷比 A/Q の 1σ における相対分解能はそれぞれ 0.057% と 0.43% となり分解能は向上した。 Z と A/Q の較正に

は厚さ 1mm の ^9Be 標的を通った $^{238}\text{U}^{90+,91+}$ を用いた。粒子識別図における $^{237}\text{Np}^{91+}$ は $Z=93$ 、 $A/Q=2.604$ の位置であり、収量の多い核種である $^{232}\text{Pa}^{89+}$ 、 $^{234}\text{U}^{90+}$ 、 $^{235}\text{U}^{90+}$ に囲まれている。そのため、三次元によるフィッティングで $^{237}\text{Np}^{91+}$ を数える必要があった。 ^{237}Np 周りの三次元粒子識別図と ^{237}Np を除いた 3 核種を二次元ガウス関数でフィッティングしたグラフ(図 2(a))から残差(図 2(b))を求めた。図 2(b).から見られるように $^{237}\text{Np}^{91+}$ 由来のイベントが明確に見られるようになった。

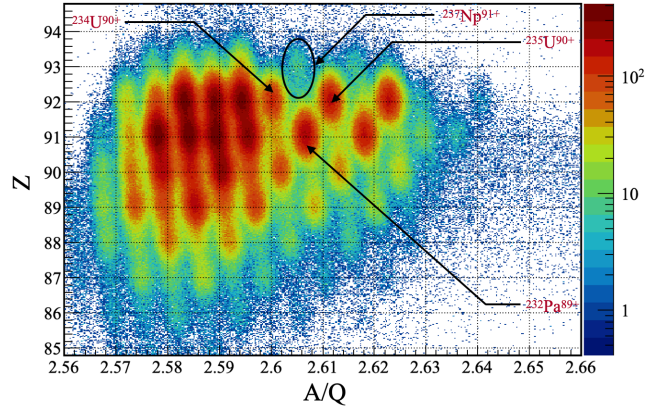


図 1. 粒子識別図

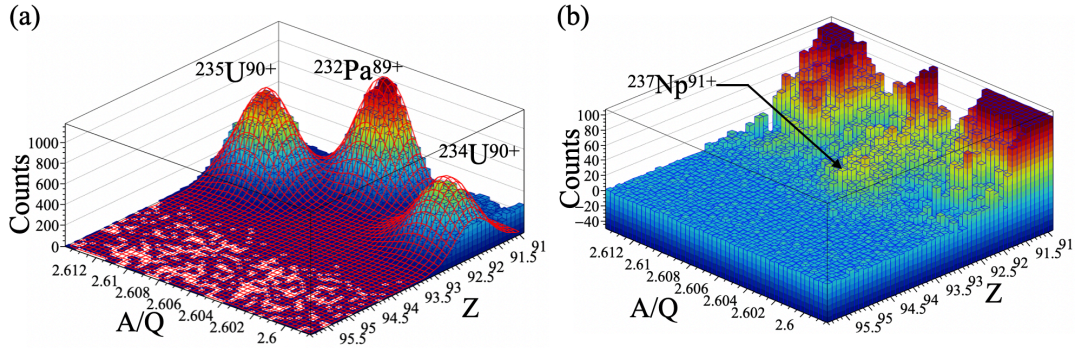


図 2.(a) 三次元粒子識別図 (b)残差

4. 結論及び今後の展望

^{237}Np の数とビーム強度の情報を用いて生成断面積を求めることができた。これから Np 同位体についても同様にして生成断面積を求めることで、断面積の系統性について議論できるようにする。

5. 参考文献

- [1] E. Casarejos *et al*, Phys. Rev. C **74**, 044612
- [2] N. Fukuda *et al*, Nucl. Instrum. Meth. B **317**, 323

SHARAQ13 実験でのアイソマー核からの ガンマ線を利用した粒子識別

実験原子核物理研究室
1924063 網谷 芽衣
指導教員：西村 太樹

1. 緒言

原子核は陽子と中性子の核子からなり、陽子と中性子の比率のバランスが保たれていて自発的に崩壊することのない安定な原子核を安定原子核、陽子と中性子の比率のバランスが取れておらず、不安定で短寿命で崩壊してしまう原子核を不安定原子核と言い、これら二つに分類される。天然に存在する多くの原子核は安定原子核であり、種類は約 250 種類ある。一方で不安定原子核は 3000 種類以上あり、これらの構造は未だに完全には解明されていない。そのため、これら全ての原子核の構造を解明するために陽子と中性子の様々な組み合わせを持つ原子核の研究をすることが重要である。近年の発達した加速器の技術を用いて、原子核の陽子数に対して中性子数の数が極端に多いまたは、少ない不安定原子核を加速器で人工的にビームとして生成することが可能となってきた。このように不安核ビームを生成するとき、様々な種類の原子核が混在している。そのため複数の検出器を用いて、各粒子がどの種類の原子核であるかを識別する、粒子識別が必要となる。その際に粒子識別では各粒子の原子の質量数を A 、電荷比を Q 、原子番号を Z として縦軸を Z 、横軸を A/Q で定義し、各粒子がどの種類の原子核であるかを識別する。今回の SHARAQ13 の実験では A/Q の精度を良くして質量測定をメインで行ったが、その際に得られる原子核の長寿命励起状態であるアイソマー核の測定を東京都市大学の方ではメインで行った。また今回の測定に用いた Ge 検出器を用いており、原理としては電磁波であるガンマ線が Ge 半導体に入った後、その中にある荷電粒子の運動経路に沿って運動した自由電子の動きを電気信号として読み取っている。

2. 実験方法

SHARAQ13 実験は、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) で行った。RIBF は多段階の加速器であり、Big RIPS で不安定核ビームを生成し、分離・識別を行うことができる。そこで生成、分離・識別された不安定核ビームを用いて SHARAQ でアイソマー核のガンマ線のエネルギー・スペクトルや寿命の測定を行った。一次ビームである ^{238}U を Be 標的に照射し、 ^{46}Fe や ^{22}Si を含む二次ビームから粒子識別の測定やアイソマー核の測定を Ge 検出器

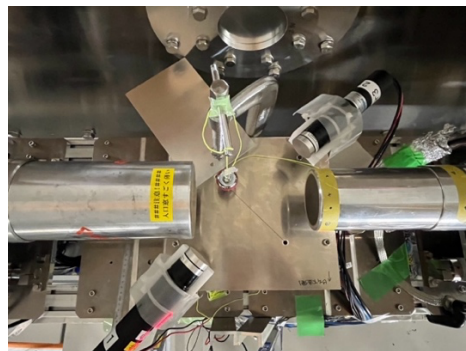


図 1. 実験で用いた Ge 検出器、CeBr 検出器

で行った。

3. 実験結果

SHARAQ で測定した二次ビームから縦軸を Z 、横軸を A/Q として PID (Particle IDentification) 図を作成し、原子番号と質量電荷比から核種を同定した。そこで行った粒子識別から ^{43}Ti を選びエネルギースペクトルの実験値と文献値の比較、また寿命の測定等を行い、 ^{43}Ti のアイソマーについて調べた。また実験中に観測した RIBF のルームバックグラウンドのエネルギースペクトルについても調べることができ、それぞれのエネルギーの値とそれに対する核種を同定することができた。

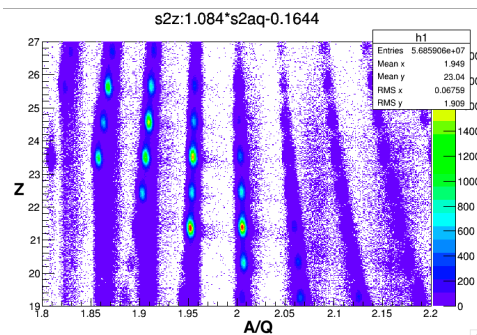


図2. 実験で得られた原子番号 Z と質量電荷比 A/Q のグラフ

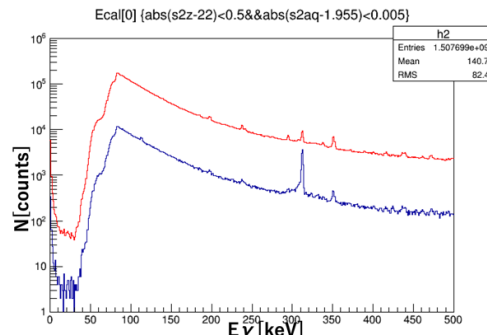


図3. ^{43}Ti (青) と PID ゲートなし (赤) のエネルギースペクトルの比較

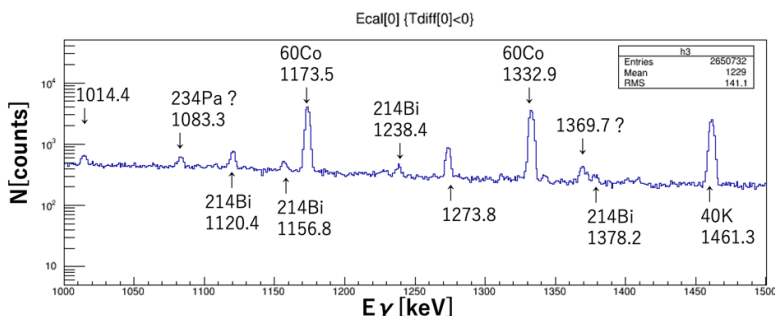


図4. Ge 検出器で測定したルームバックグラウンド

4. 結論及び今後の展望

今回の実験での二次ビームから PID 図を作成して粒子識別を行い、核種を同定することができた。また ^{43}Ti のアイソマーのエネルギースペクトルの実験値と文献値の比較、寿命測定について調べることができた。今後の展望としては、文献値にはないガンマ線のエネルギーで ^{43}Ti はアイソマー状態を今回の実験では測定することができたのかを調べたい。また今回の実験で使用した他の検出器、具体的には AS (アクティブストッパー) や CeBr 検出器で得られた実験結果の解析も行っていきたいと考えている。特に AS は陽子を測定でき、陽子が過剰にある不安定原子核から陽子を放出する現象を測定している可能性があるため、そのような現象が起きているかどうかを探りたい。

5. 参考文献

[1] 清川 裕 東京大学 2016 年修士論文

原子番号 $Z=19-26$ の陽子過剰及び安定核領域における核異性体由来の γ 線測定

実験原子核物理研究室

1924035 中村 佑生

指導教員：西村 太樹

1. 緒言

原子核の励起状態での寿命は、通常 $10\mu\text{s}$ 以下であるが、寿命が異常に長い励起状態が現れる場合があり、これをアイソマーと呼ぶ。そのアイソマーの中には、存在が予想されているものの、未だ発見されていない未知のアイソマーも多く論じられている。

本研究では、数ある種類の原子核の中で、原子番号 $Z=21$ のスカンジウム (Sc) のアイソマーを探索し、それらに関するデータの解析値を文献値と比較した。

この研究は理化学研究所・仁科加速器科学センター内の重イオン加速器施設で行われた。数年前、アジア初の新元素発見であると連日報道されていたニホニウム Nh は、この仁科加速器科学センターでの研究により発見されている。

2. 実験方法

加速器により加速された粒子ビームがターゲットに照射し、原子核が生成され、 γ 線を放出する。検出器に入射した γ 線がその検出器の内部で光電効果を起こして電子を生み出し、電極に集め、その電荷を増幅して γ 線エネルギーを計測する。そのエネルギー値から原子核の種類を決定できる。本研究では、原子核から放出された γ 線をセリウムブロマイド (CeBr) 検出器と、ゲルマニウム (Ge) 検出器で測定し、生成された原子核の種類を決定した。

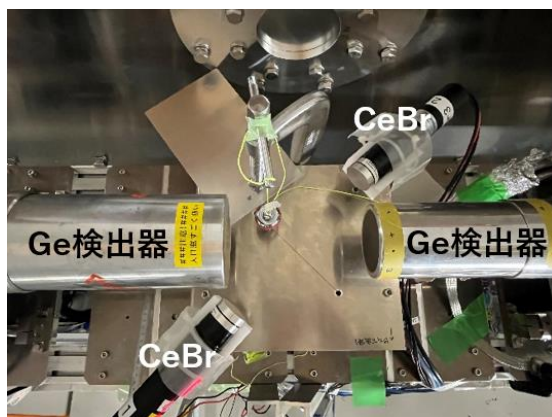


図 1. γ 線測定セッティング

以上の実験で得られたエネルギースペクトルに、測定対象のアイソマーが持つ Z と質量数

A と電荷 Q を利用したゲートをかけて範囲を絞り、解析を行った。本研究では、主に Ge 検出器で取得したデータを元に解析をした。

3.結果

実験で得られたエネルギースペクトルを解析したところ、 ^{43}Sc と ^{46}Sc 由来であると思われしき γ 線ピークが見られた。これらのピークをフィッティングしたところ、表 1 のように、文献値と一致するような結果となった。

また、各々の半減期をフィッティングした結果、こちらは誤差が大きく出た。文献値と解析値の比較を表 2 にした。

表 1.ピークの測定結果と文献値との比較

文献値 [1]	解析値
$^{43}\text{Sc}_{135.6 \pm 0.1 \text{keV}}$	$135.6 \pm 0.07 \text{keV}$
$^{43}\text{Sc}_{151.65 \pm 0.17 \text{keV}}$	$151.5 \pm 0.06 \text{keV}$
$^{43}\text{Sc}_{1157.5 \pm 0.1 \text{keV}}$	$1157.5 \pm 0.13 \text{keV}$
$^{43}\text{Sc}_{1830.1 \pm 0.13 \text{keV}}$	$1830.7 \pm 0.31 \text{keV}$
$^{46}\text{Sc}_{52.011 \pm 0.001 \text{keV}}$	$52.0 \pm 0.15 \text{keV}$

表 2.半減期の計算結果と文献値との比較

文献値 [1]	解析値
$^{43}\text{Sc}(135.6 \text{keV})_{472 \pm 4 \text{ns}}$	$(4.6 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ns}$
$^{43}\text{Sc}(151.65 \text{keV})_{438 \pm 7 \mu \text{s}}$	$(5.2 \pm 2.0) \times 10^2 \mu \text{s}$
$^{43}\text{Sc}(1157.5 \text{keV})_{472 \pm 4 \text{ns}}$	$(4.7 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ns}$
$^{43}\text{Sc}(1830.1 \text{keV})_{472 \pm 4 \text{ns}}$	$(5 \pm 1) \times 10^2 \text{ns}$
$^{46}\text{Sc}(52.0 \text{keV})_{9.4 \pm 0.8 \mu \text{s}}$	$(3 \pm 2) \times 10 \mu \text{s}$

半減期の計算で誤差が大きく出てしまった原因として、即発 γ 線が考えられる。この即発 γ 線を含めて計算を行うと、本来の解析値からは大きくずれてしまうため、時間 0s から計算することを避けた。しかし、即発 γ 線が検出されていた時間の中にも、解析対象のアイソマーの γ 線が存在している可能性があり、それらも無視して計算を行うことになってしまった。これが大きい誤差を生んだと思われる。

5.結論・今後の展望

解析結果から Sc のアイソマーである ^{43}Sc と ^{46}Sc 由来の γ 線ピークが確認できた。今後は、現時点ではまだ発見されていないアイソマーの解析を行っていきたい。

6.参考文献

[1] Nuclear charge radii and electromagnetic moments of radioactive scandium isotopes and isomers M Avgoulea 他 Journal of Physics G Nuclear and Particle Physics 2011

クロム 45 の 107keV アイソマーの寿命決定について

実験原子核物理研究室

1924033 富山 琢史

指導教員 西村 太樹

1. 諸言

アイソマー(核異性体)とは原子核の励起状態のうち、何かしらの理由でかなり長い寿命(10^{-9} ms~数秒以上)をもつものであり、この状態をアイソマー状態という。アイソマーを見つけることは核構造を決定する上で重要である。クロム 45(^{45}Cr)に関しては半減期が $80\mu\text{s}$ 以上の 107keV のアイソマーが存在することが先行論文によって分かっている[1]。この先行論文のデータでは半減期が $80\mu\text{s}$ 以上というデータしか分かっておらず、エラーバーを含む具体的な数値として半減期を算出できていない課題がある。そこで理化学研究所の不安定核ビーム加速器施設(RIBF)で行われた SHARAQ13 の実験で得たデータを使ってアイソマーの解析を行う。解析ツールとして ROOT というデータ分析ツールを使用する。時間幅が 20ms のデータを使用して自分でヒストグラムの条件を加えたり、半減期を求める fitting 関数を設定したりすることで、具体的な数値として半減期を算出し、寿命決定を行う。

2. 解析方法

寿命測定を行うときの式は以下の崩壊曲線である。((1)式)

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

今回は測定したい γ 線源由来以外の放射線であるルームバックグラウンドを考慮して崩壊曲線+定数の関数で fitting を行った。

まず、半減期 $T_{1/2}$ は崩壊定数 λ を用いて以下のように表される。

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

この式を用いて fitting に使う指数関数+定数の関数は以下のように設定した。C はルームバックグラウンドを考慮した定数である。

$$N_0 * \exp\left(-\ln 2 * \frac{x}{T_{1/2}}\right) + C \quad (2)$$

次に fitting をするヒストグラムは、原子番号 Z、質量数 A、電荷 Q を用いて、表示する範囲を絞った。横が時間軸で縦がカウント数のグラフである。その条件は 107keV 崩壊曲線のヒストグラムから、104keV と 110keV のヒストグラムの両方を引いたグラフを使用した(図 1 の右の fitting 前のグラフ)。107keV のヒストグラフのままだと崩壊していないルームバ

ックグラウンド由来のスペクトルの分が多いことから、崩壊 107keV のアイソマーの成分が少ない問題があった。そこで 107keV のヒストグラムから崩壊していない 104keV と 110keV のルームバックグラウンドのスペクトルであるグラフを引き算することで、本来求める 107keV アイソマーの成分を多くした。よって正確な寿命決定をしやすようなヒストグラムを設定した。

3.解析結果

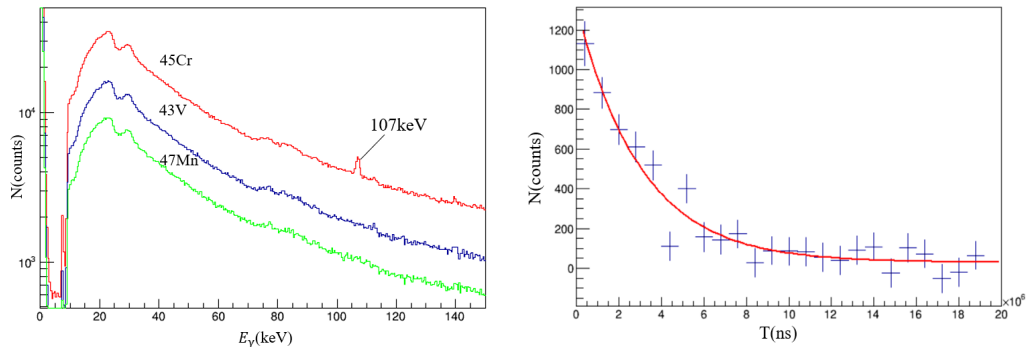


図 1: 上から 45Cr と周辺核の 43V と 47Mn のエネルギースペクトル(左)と 45Cr の 107keV の崩壊曲線(右)

^{45}Cr の周辺核に 107keV ピークが無いことを確認するために周辺核のバナジウム 43(^{43}V) とマンガン 47(^{47}Mn) のエネルギースペクトルを比較した。 ^{45}Cr には 107keV のピークを確認することが出来き、 ^{43}V と ^{47}Mn では 107keV にピークは見られなかった。このことから、 ^{45}Cr の 107keV のピークはルームバックグラウンド由来ではなく、アイソマーのピークであることが分かる。次に図 1 (右) の図は先ほど挙げた条件を加えた崩壊曲線のヒストグラムを (2) 式で示した指数関数+定数で fitting を行った結果である。

図 1(右)で fitting した 107keV の半減期の値は $2.1 \pm 0.3\text{ms}$ という結果になり、エラーバーも含んだ具体的な数値として半減期を算出することができた。

4.結論、今後の展望

今回、解析したデータは時間幅が 20ms だったが、先行論文では時間幅が $16\mu\text{s}$ 辺りで解析を行っていたことから、先行論文の崩壊曲線の fitting は今回の時間幅が 20ms のヒストグラムのかかなり前で行っていたことが分かる。今回のデータ解析から ^{45}Cr の 107keV アイソマーの半減期をエラーバー含む、具体的な数値で算出することができた。今後は時間幅が 20ms より長い 50ms のデータで fitting を行い、解析を引き続き行っていく。

5.参考文献

[1] R.Hoischen *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 38, 035104 (2011).

コンプトン散乱のシミュレーション

実験原子核物理研究室

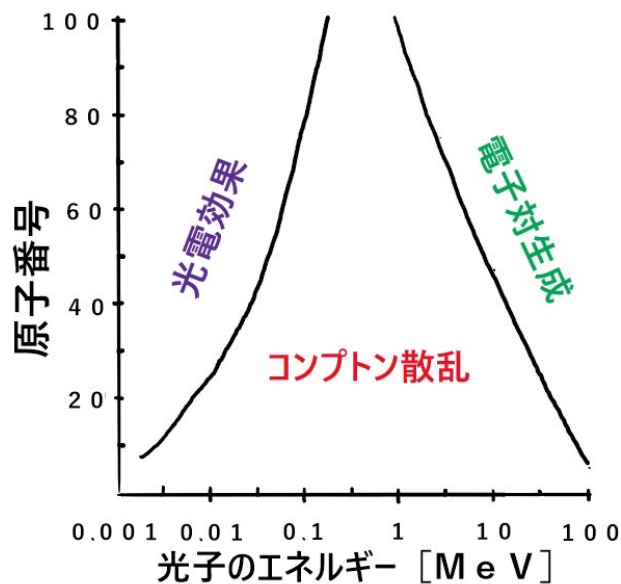
1924040 平山瞳

指導教員 西村太樹

1. 緒言

光には波動性と粒子性の二重性がある。そのうちの粒子性を裏付ける有名な現象に光電効果、コンプトン散乱、電子対生成というものがあるが、これらはすべて電磁波を静止している電子に当てた場合の反応である。そしてそれぞれの反応の発生確率は、吸収物質の原子番号と光子のエネルギーにより左右され、次のようになる。

- ・光子のエネルギーが低い場合は、光電効果が支配的である。
- ・吸収物質の原子番号が小さい程、エネルギーが上がるにつれて光電効果よりコンプトン散乱に移行する。
- ・光子のエネルギーが 1.022MeV (陽子+電子の静止エネルギー) を超えると、吸収物質の原子番号の大きい場合からコンプトン散乱から電子対生成に移行する。



今回はコンプトン散乱がどのように起こるのかをシミュレーションした。

2. 実験方法

本研究では、X線を静止している電子に当ててコンプトン散乱が起きた場合の電子の動きを GeoGebra というシミュレーションアプリを使って再現した。

再現するにあたって3つの式を解く必要があり、その式は以下の通りである。

① 衝突前後のエネルギー保存

② x 軸上の運動量保存

③ y 軸上の運動量保存

これら3つの式より衝突後の散乱ガンマ線のエネルギー $E\gamma'$ 、反跳電子の反跳角 ϕ 、反跳電子の運動量 Pe 、反跳電子の運動エネルギー Ke を求めた。

それらの値を GeoGebra に打ち込みコンプトン散乱の現象を再現した。

3. 結果

衝突前後のエネルギー保存の式は、入射ガンマ線のエネルギーを $E\gamma$ 、散乱ガンマ線のエネルギーを $E\gamma'$ 、反跳電子の運動エネルギーを Ke とすると

$$E\gamma = E\gamma' + Ke \quad (1)$$

となる。また入射ガンマ線の散乱角を θ 、反跳電子の反跳角を ϕ 、反跳電子の運動量を pe とすると x 軸方向の運動量保存則は

$$\frac{E\gamma}{c} = \frac{E\gamma' \cos \theta}{c} + pe \cos \phi \quad (2)$$

y 軸方向の運動量保存則は

$$0 = E\gamma' \frac{\sin \theta}{c} + pe \sin \phi \quad (3)$$

また、電子の質量エネルギー mc^2 とアインシュタインの公式を用いて

$$(mc^2 + Ke)^2 = (mc^2)^2 + (pec)^2 \quad (4)$$

と表せる。

$$(4) \text{ より、 } pe \cdot c = (Ke(2mc^2 + Ke))^{\frac{1}{2}}$$

または

$$Ke = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

これらより $E\gamma'$ 、 v 、 ϕ を求め近似を用いると

$$E\gamma' = E\gamma(2\cos\theta - 1) - \frac{E\gamma^2 \cdot \sin^2\theta}{2mc^2}$$

$$v^2 = \frac{2}{m}(E\gamma^2 \sin^2\frac{\theta}{2mc^2} - 2E\gamma\cos\theta)$$

$$\tan \phi = \frac{\left[E\gamma(2\cos\theta - 1) - \frac{E\gamma^2 \sin^2\theta}{2mc^2} \right] \sin\theta}{E\gamma - \left[E\gamma(2\cos\theta - 1) - \frac{E\gamma^2 \sin^2\theta}{2mc^2} \right] \cos\theta}$$

4. 参考文献

[1] 鷺見義雄 原子核物理入門 裳華房 1997

[2] 八木浩輔 原子核物理学 朝倉書店 1971

宇宙膨張における光子密度パラメーターの時間変化

理論物理研究室 1924054 矢敷 修造

指導教員 長田 剛

1 緒言

宇宙には地球をはじめとした様々な天体がある。それらの天体は、原子や分子から構成されていることは良く知られているが、その他にも宇宙には光、ダークマターやダークエネルギーといった様々な物質によって宇宙が成り立っている。また、宇宙の成り立ちは、ビッグバン後から現在に至るまで宇宙は膨張を続けていることにより変化していると考えられる。本研究では、宇宙が膨張をするにあたって宇宙を占める光子をはじめとする物質の密度が、宇宙の晴れ上がりを境としてどのように変化していったのかを考察する。

2 宇宙膨張と熱力学第一法則

宇宙膨張は空間三次元で等方膨張をしていると仮定し、膨張する宇宙のスケールを時間の関数として表すスケール因子 $a(t)$ を導入する。スケール因子とその時間微分の比はハッブルパラメーター H と等しい。天体までの距離 r が十分大きい場合、天体の速さ v は、 $v = Hr$ というハッブルルメートルの法則が得られる。

全宇宙の質量(エネルギー)は、半径が $a(t)$ と一様等方宇宙の質量密度 $\rho(t)$ を用いて、 $M = \frac{4}{3}\pi a^3(t)\rho(t)$ で与えられる。原子で作られる物質のような非相対論的物質においては質量保存則が成り立つので、質量密度とスケール因子の関係は、 $\rho(t) \propto a^{-3}(t)$ となる。一方、光子がプランク分布に従う熱平衡状態にある場合、宇宙の断熱膨張の過程では熱力学第一法則よりエネルギーを U 、体積を V として $dU = -PV$ が成り立つ。この式を時間で微分することにより、以下のエネルギー密度 ε と圧力 P の関係である連続方程式が得られる。

$$\dot{\varepsilon} + 3H(\varepsilon + P) = 0 \quad (1)$$

なお、物質の状態パラメーター w を圧力 P とエネルギー密度 ε の比 $w = \frac{P}{\varepsilon}$ で定義し、この式を状態方程式と呼ぶ。この(1)式を時間 t で微分すると、エネルギー密度とスケール因子の関係は w の値によって決まり $\varepsilon(a) \propto a^{-3(1+w)}$ と表される。本研究では光のような輻射の場合である $w = 1/3$ の場合を考えるので、エネルギー密度とスケール因子の関係は $\varepsilon(a) \propto a^{-4}$ となる。また、フリードマン方程式

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\varepsilon - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (2)$$

により、スケール因子は $a(t) \propto t^{2/[3(1+w)]}$ のように時間の関数として表すこともできる。ただし、ここで宇宙は平坦であるとして $K = 0$ を用いている。

3 晴れ上がりと脱結合

宇宙の晴れ上がりとは、ビッグバン後における宇宙膨張の過程で初めて光子が長距離を進めるようになった現象を指す。これは、宇宙膨張により絶対温度が 3000K まで低下することで、自由電子が原子核に捕獲されて原子が形成される。このとき、光子と電子が熱平衡状態から外れることになるので脱結合と呼ばれる。この脱結合前（スケール因子は a_* ）では熱平衡状態であり振動数 ν_* のプランク分布となる。宇宙膨張でスケール因子が変化した分だけ光の波長が伸びるため、脱結合後の振動数 ν 、スケール因子 a の間には、 $\nu_*/\nu = a/a_*$ が成立する。また、脱結合時の前後で光子数は保存し、脱結合後もプランク分布

$$\bar{n}(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{\nu^2}{\exp[h_p \nu / k_B T] - 1} d\nu \quad (3)$$

を仮定すると、温度とスケール因子の関係は $T \propto a^{-1}$ を満たす必要がある。実際、COBE 衛星の観測データによって得られた現在の宇宙の温度はプランク分布から決定でき、 $2.75 \pm 0.002 \text{ K}$ とされている。また、現在の宇宙の光子の全エネルギー密度 $\varepsilon_\gamma^{(0)}$ と、平坦な宇宙のフリードマン方程式より決められる、現在の宇宙の物質の全エネルギー密度 ε_0 （臨界密度）が求められ、これらの値の比、密度パラメーターは $\Omega_\gamma^{(0)} = \varepsilon_\gamma^{(0)} / \varepsilon_0 = 2.47 \times 10^{-5} h^{-2}$ と得られている。図 1(a)に物質のエネルギー密度と宇宙の温度の関係、(b)に状態方程式とプランク分布から求めた宇宙の温度と時間の関係を示した。ここで t_0 は宇宙年齢である。

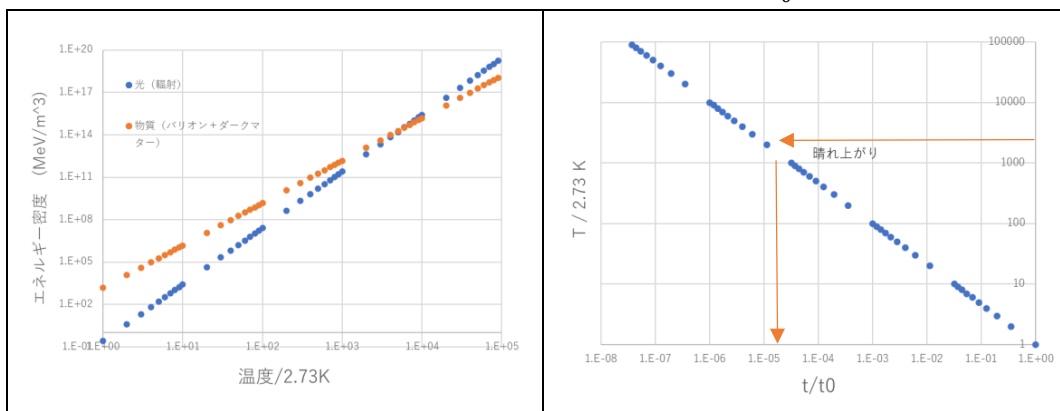


図 1 (a) 物質のエネルギー密度と宇宙の温度の関係

図 2 (b) 宇宙の温度と時間の関係

4. 結論

ビッグバン後から現在に至るまで宇宙膨張を表すスケール因子と温度は両対数で比例関係であり、時間と共に温度は低下する。光子や物質のエネルギー密度と温度は状態のパラメーター w の値に応じた、異なるべき乗で変化する。断熱膨張下の宇宙では時間と共に光子のエネルギー密度は低下し、物質が宇宙のエネルギー密度の大半を占めるようになる。

参考文献

辻川信二, 「入門 現代の宇宙論」, 講談社 (2022).

膨張宇宙における冷たいダークマター優勢期

理論物理研究室 1924062 穂苅基博

指導教員 長田剛

1. 導入

ダークマターは、重力以外の自然界の3つの相互作用（電磁気力、弱い力、強い力）をしない物質であると考えられている。従って、ダークマターの特徴として、直接見ることは難しい特徴がある。しかし、ダークマターは重力相互作用だけを行うと考えられているため、銀河や銀河団のような宇宙の大規模構造を作る要因にもなる。そのダークマターが存在する証拠として重力レンズ効果による銀河団の観測が提案されている。この重力レンズとは、ダークマターの持つ非常に強い重力によって、銀河からの光が曲げられて像が歪んで見える現象である。2013年のPlanck衛星による宇宙背景放射の温度ゆらぎのデータに基づく統計解析から、現在の宇宙組成は、ダークエネルギーが68%、ダークマター27%、原子5%となっている[1]。本論文では、宇宙のエネルギーの組成において、ダークマターとダークエネルギーが占める割合が宇宙の進化とともにどう変化してきたかを調べることを目的とする。

2. 理論

スケール因子を $a(t)$ 、現在の銀河までの位置にあたる共動距離を x とした時、銀河の速度 v は、

$$v = \dot{a}x + a\dot{x} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 x が十分大きい場合を取り扱うため、 $a\dot{x}$ 項は無視する。また、宇宙の膨張率を表す量はハッブルパラメータ $H = \dot{a}/a$ と表される。一方、赤方偏移は近似的に $z \approx \frac{v}{c}$ で与えられるため、これは後退速度と関係づけられる。宇宙のエネルギー密度 ε の変化については宇宙膨張が断熱変化であるこ

とに注意すると、熱力学第一法則より（断熱膨張） $dU = -PdV$ で与えられる。これより、いわゆる連続方程式が得られ、さらに、 ε をエネルギー密度、 ρ を質量密度として、相対論的な表現($\varepsilon = \rho c^2$)を取り入れる。すると、

$$\dot{\rho} + 3H\left(\varepsilon + \frac{P}{c^2}\right) = 0 \quad (2)$$

と書ける。また、この式(2)を時間で積分することで、 $\varepsilon(a) \propto a^{-3(1+w)}$ の関係が得られる。特に $w = \frac{1}{3}$ の時、(2)式は、光（輻射）のエネルギー密度のスケール依存性を与え $\varepsilon \propto a^{-4}$ の関係が得られる。また、 $w = 0$ 及び $w = -1$ の時は、それぞれ非相対論的物質（ダークマター）とダークエネルギーに対するスケール依存性を得ることができ、 $\varepsilon \propto a^{-3}$ と $\varepsilon = \text{定数}$ となる。一方、スケール因子と時間の関係を与えるフリードマン方程式は、以下で与えられる。

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \varepsilon - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (3)$$

この(3)式を時間で積分することで、スケール因子を時間の関数として表すことができ、 $a(t) \propto t^{2/[3(1+w)]}$ の関係が得られる。また、フリードマン方程式(3)式を以下の様に、各物質（輻射（光）、非相対論的物質、暗エネルギー）の密度を用いて表すと以下を得る。ただし、ここで宇宙は平坦($K = 0$)とした。

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_r + \rho_m + \rho_{DE}) \quad (4)$$

ここで、それぞれの宇宙組成（輻射(光)、非相対論的物質（ダークマター）、ダークエネルギー）に対して質量密度と赤方偏移 z の関係を求めることができ、それぞれ、(5)式のように求めることができる。

$$\rho_r = \rho_r^{(0)}(1+z)^4, \quad \rho_m = \rho_m^{(0)}(1+z)^3, \quad \rho_{DE} = \rho_{DE}^{(0)}(1+z)^{3(1+w_{DE})} \quad (5)$$

3. 結果

(4)式の両辺を H^2 で割り、右辺 3 つの項をそれぞれ輻射、非相対論的物質、ダークエネルギーの密度パラメータと呼び、 Ω_r , Ω_m , Ω_{DE} で表す。ここで $\Omega_r + \Omega_m + \Omega_{DE} = 1$ であることに注意する。これらの 3 つの密度パラメータを赤方偏移の対数 $\log_{10}(1+z)$ と宇宙年齢の対数 $\log t/t_0$ の関数として表した結果をそれぞれ、図 1 と図 2 を示す。赤方偏移 z が大きいことは、銀河が遠いことを意味するため、過去の情報である。一方、 z が小さい場合は、距離的に近いことを表し、時間的にも近いことを表している。従って、図 1 の右側が宇宙の過去、左側が現在に近い状態を表している。図 1 より、宇宙初期では、輻射（光）が宇宙の組成の大部分を占め優勢であった。しかし、宇宙の進化の途中からダークマターの占める割合が

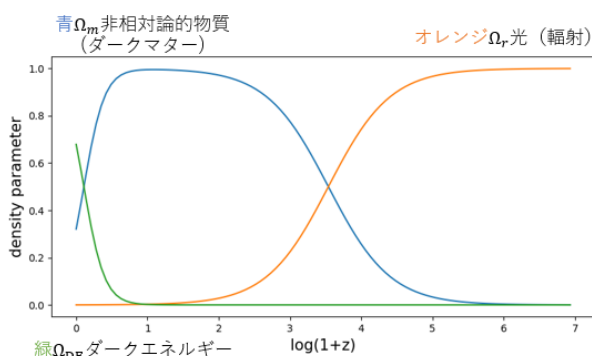


図 1. $\log_{10} 1+z$ と密度パラメータの関係

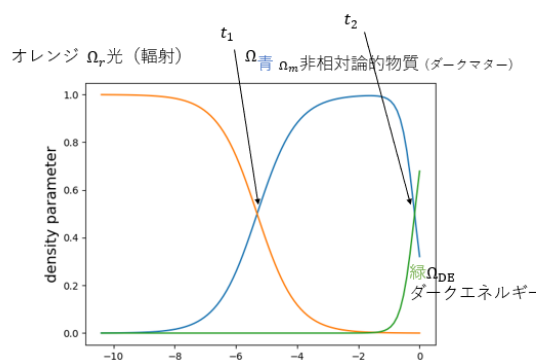


図 2. $\log_{10} t/t_0$ と密度パラメータの関係

大きくなり、現在はダークエネルギーの割合が大きくなる。図 2 では、横軸は $\log_{10} t/t_0$ 、縦軸は密度パラメータである。図 2 より、それぞれの優勢期が入れ替わる時刻を求めることができ、その結果、宇宙の初めから $t_1 = 63$ 万年までは光（輻射）が優勢であり、それ以降から $t_2 = 93$ 億年までの期間は、ダークマターが優勢であることがわかった。 $t_2 = 93$ 億年から現在までは、ダークエネルギーが優勢になる

4. 結論

熱力学第一法則とフリードマン方程式を使って、スケール因子が、時間とともに変化していくことを調べた。これをもとに宇宙を構成する輻射、非相対論的物質、ダークエネルギーの割合が時間とともに変化する様子をそれぞれ調べた。宇宙が誕生してから、63 万年頃までは、光が宇宙の大部分の密度を占めていることがわかった。また、現在では依然として正体不明のダークマターが大部分を占めているのは、その後 63 万年から 93 億年までであることがわかった。そして現在は、ダークエネルギーがその宇宙の組成の多くを占めていることがわかった。

参考文献

[1] 辻川信二:「入門現代の宇宙論」講談社(2022)

ベルの不等式からみた量子力学の非局所性

理論物理研究室

1824022 小泉 栄作

指導教員 長田 剛

1 諸言

19世紀までの古典力学的な世界観では、サイコロの出る目は初期条件を知ることができれば、原理的にニュートンの運動方程式より予言できるとされていた。仮にこのサイコロをミクロなものに変更したとしても、確定できない自由度が隠れているだけで、これらの不定性が確定することによりサイコロの出る目（測定値）は予言できると考えられていた。しかしこの隠れた変数の理論は、1970年～1980年の一連のベルの定理の検証実験により否定された。本研究では、まず古典物理学で暗黙のうちに仮定されている局所实在論で必ず満たすことが求められる CHSH 不等式[1]を説明する。次に、量子力学に現れる量子もつれ状態[1]はこの局所实在論では説明できないことをその量子状態が CHSH 不等式を破ることで証明した。

2 2値2測定

遠く離れた観測者 A,B に向け、中間地点から粒子が A と B に飛んでいくものとする。A は測定 M または M' のどちらかをランダムに行い、B も測定 N または N' のどちらかをランダムに行う。ただし、すべての実験において、得られる測定値は ± 1 とする。

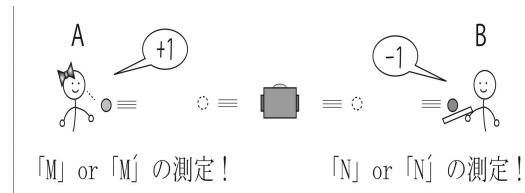


図 1: 木村 元, 『数理科学, Vol52-12 (No.618), pp.36-42, サイエンス社, (2014) より抜粋』

3 局所实在論で満たすことが求められるベルの不等式

局所实在論は局所性と实在性の二つの物理的特性を要請している。ここで、局所性とは物理的状态の変化は空間において連続的に伝わることを指す。また、实在性とは物理系を乱すことなく、確実に測定値が予言できることを指す。この二つの要請が満たされるとき、局所实在論が成立する。2つの離れた地点での測定 M と N においてそれぞれ測定値が m と n になる同時確率分布[1]は隠れた変数を用いて

$$\int d\lambda p(\lambda) \Pr(M = m|\lambda) \Pr(N = n|\lambda) \quad (1)$$

と表現することができる。ここで、 λ は隠れた変数であり、 $p(\lambda)$ は λ の値を完全に知らない不確定さからくる確率的な重みで状態を指定する同時確率分布に導入されている。また、

$\Pr(M = m|\lambda)$ と $\Pr(N = n|\lambda)$ は観測者 A と B による測定がそれぞれ値 m と n を得る確率であり、積の形となっていることから M,N の測定は独立におこなわれており、局所性を満たしていることが分かる。ベルはあらゆる局所实在論が満たすべき不等式を導出した。これがベルの不等式と呼ばれるものである。その後、クラウザー、ホーン、シモニー、ホルトによって完全反相関の条件を取り除いた CHSH 不等式を導出した[2]。本研究では CHSH 不等式を用いて局所实在論が正しいか否かを議論する。CHSH 不等式は

$$|\langle M, N \rangle + \langle M, N' \rangle + \langle M', N \rangle - \langle M', N' \rangle| \leq 2 \quad (2)$$

と表現される。ここで、 $\langle M, N \rangle$ は測定 M と N をそれぞれ選択した場合の期待値を表す。

4 量子もつれ状態を用いたベルの不等式の破れ

CHSH 不等式を破る量子もつれ状態は次の様に与えられる[1]。

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|-+\rangle - |- -\rangle) \quad (3)$$

ここで、 $|01\rangle$ は A、B における粒子のスピン Z 成分で指定される状態であり、それぞれスピン上向き、下向きの状態である。また、 $|01\rangle - |10\rangle$ は 2 つの重ね合わせ状態である。一方、 $|-+\rangle$ はスピン X 成分で指定される状態であり、それぞれスピン左向き、右向きの状態である。(3)式で導入した量子もつれ状態を用いて、(2)の期待値を計算する。ここで、この期待値は、それぞれの観測の向きを m と n 方向の単位行列で表しパウリ行列をそれぞれの方向に射影したスピン演算子に量子もつれ状態のブラケットを挟んで

$$\langle M, N \rangle = \langle \psi | \sigma_m \otimes \sigma_n | \psi \rangle = -\vec{m} \cdot \vec{n} \quad (4)$$

と計算できる。なお、 $\otimes$ は(テンソル積であり)直積を表している。

ここで計算した(4)と(2)式の最大の値は、 $\vec{m} = (0,1)$ 、 $\vec{m}' = (1,0)$ 、 $\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1,1)$ 、 $\vec{n}' = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1,1)$ の場合に得られ、それらを期待値に代入することで

$$|\langle M, N \rangle + \langle M, N' \rangle + \langle M', N \rangle - \langle M', N' \rangle| = 2\sqrt{2} \quad (5)$$

を得る。これより量子もつれ状態は局所实在論では説明できないことが証明された。

4 結論・考察

局所实在論で満たされるべきベルの不等式の中の一つである CHSH 不等式を紹介し、量子力学に現れる量子もつれ状態がこの CHSH 不等式を破ることを証明した。このことは量子力学に現れる量子もつれ状態は、局所实在論では説明不可能であることを意味している。また、これにより、量子もつれ状態は遠距離間でも相関がある非局所性と考えられる。今後の課題としては、量子もつれ状態を用いて量子コンピュータや量子暗号などの量子情報系が発展している。その量子情報での量子もつれ状態の役割をさらに深く研究したい。

参考文献

- [1] 木村 元, 『数理科学, Vol52-12 (No.618), pp.36-42, サイエンス社, 2014, 量子力学に現れる非局所性の意味』
- [2] ニコラ・ジザン 『量子の不可解な偶然 - 非局所性の本質と量子情報科学への対応 - 』 共立出版株式会社 (2022 年)

非圧縮性粘性流体における流速の減衰

理論物理研究室 1924031 田嶋 詩穂 指導教員 長田 剛

1 諸言

流体の運動は、日常の現象の中に数多く見ることができる。例えば、お線香の煙や雲の動き、川の流れ、コーヒーに砂糖などを入れて混ぜるときにできる渦などがある。これらの流動現象は細胞内の流動や宇宙空間での気体運動等、マクロからミクロの世界でも普遍的にみられる運動である。これにより流体力学は幅広く応用されている。上の例にもみられるように、気象・海洋の流体力学や地球・惑星の力学等、そこから航空工学、河川・海岸工学等の基本的な役割として用いられている。

このように幅広い流体力学の中でも水の流れや渦といった現象に本論文では注目した。その理由は、我が国では自然災害が数多く発生するが、それらのうち河川の氾濫による災害は最も印象的な災害の一つであり、とりわけ水の流れに関する物理に関心を持った。そこで、ナビエストークス方程式について学び、そこから境界条件などを導入し、減衰する渦の速さの変化を、粘性率を変化させて調べた。

2 理論

ナビエストークス方程式により記述される流体を理解するためには、先ず連続体の運動方程式 [1]

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} + \rho K_i \quad (1)$$

から出発する。この(1)式の左辺は単位時間当たりの流体の運動量の変化を表してあり、右辺は流体の作用する力を表している。この(1)式に粘性流体を特徴づける。応力テンソル

$$P_{ij} = (-p + \chi \operatorname{div} \mathbf{u}) \delta_{ij} + 2\eta \left(E_{ij} - \frac{1}{3} \operatorname{div} \mathbf{u} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

が代入される。ここで p は圧力、 χ と η はそれぞれ粘性率、 E_{ij} は歪み速度テンソルである。また(2)式を代入して、粘性率 χ , η は温度や圧力に依存することに留意する必要がある。また、温度や圧力の変化が小さい場合には、 χ , η を一定とみなすことができ、この時(1)式は、

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{1}{\rho} \left(\chi + \frac{1}{3} \eta \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + \frac{\eta}{\rho} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (3)$$

となる。この運動方程式をナビエストークス方程式という。非圧縮性粘性流体の連続方程式 $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$ を加えさらに円状に流れる流体を考えるうえで都合の良い、円柱座標 (r, ϕ, z) を導入する。ここで、 z 軸を対称軸にとればこの流れにおいて流速の、速度成分は $\mathbf{u} = (0, v(r, t), 0)$ で表される。すると、(3)式は

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \quad \frac{v^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4)$$

のように、2つの方程式(動径方向、角度方向)にすることができる。(4)の左の式の解を変数分離だと仮定して微分方程式を解くと、

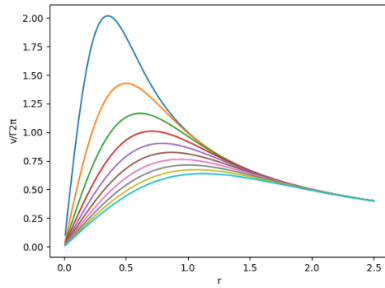
$$v(r, t) = \int C \exp(-\beta t) J_1\left(\sqrt{\frac{\beta}{v}} r\right) d\beta \quad (5)$$

と表記できる【2】。そして、最終的に(5)式の積分を解くことで、減衰渦の速度 v は

$$v(r, t) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4vt}\right) \right] \quad (6)$$

このように表すことができる。

3 結果



速度分布(6)の時間的变化の様子は、図1に示すように回転軸であるZ軸に近い $r \ll \sqrt{4vt}$ の領域では、

$$v(r, t) \approx \frac{\Gamma}{8\pi vt} r \quad (7)$$

となり、回転速度が回転中心からの距離 r に比例するので剛体的な回転のように流体は振る舞う。

また、これらの渦運動は時間がたつにつれて速度は減少する。一方で、外側の $r \gg \sqrt{4vt}$ の領域では、

図1 減衰渦の速度分布【1】

$$v(r, t) \approx \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (8)$$

となり、渦なしの運動となり循環 Γ のポテンシャル渦のままである。すなわち、ポテンシャル渦と剛体的回転が、それぞれ(7),(8)として同時に実現して、渦ありの領域の半径は時間とともに増大する。

4 結論・展望

ナビエーストークス方程式は流体力学において軸となる方程式であることが分かった。そして実際の現象として渦の減衰について定量的に調べた。その結果、図1のように円流の回転軸に近ければ渦ありで剛体的な回転になり、時間がたつにつれて速度は減少していくことが分かった。今後は、さらに現実的な境界条件を課すことで流体の流れをより詳細に解析して、河川・海岸工学等につなげたい。すなわち、河川を流れる流体の運動を解くことによって、それを受けとめる堤防設計などにつなげていくことができ、ひいては、災害対策に役立たせることができると考える。

4 参考文献

【1】 巽 友正.連続体の力学.岩波書店,1995

【2】 森口 繁一・宇田川 銈久・一松 信.岩波数学公式.岩波書店,1987

地球内部構造による地震波線経路の変化

理論物理研究室

1824055 望月魁斗

指導教員 長田剛

1 緒言

私たちの住む日本は4つのプレートの境界に位置していることもあり、日頃から大小様々な地震が発生している。地震というものは世間一般には多くの人に不安や恐怖を与え、規模が大きいものでは災害を引き起こす非常に恐ろしい存在である。そんな負の印象が強い地震だが、地球内部構造の情報を得る手段として大いに役立っている。地震波は大きく分けて表面波と実体波に分類される。後者は地中を伝播してくるため、地球内部の様々な構造に影響を受けて観測される。この実体波を解析することにより、地震波速度、震源の位置、地球内部の層構造などといった情報を得ることができる。また、この情報から巨大地震発生メカニズムの解明や、震源位置の予測に役立つという研究結果も出ている[1]。本論文では、地震波の基礎となる弾性体力学から水平成層構造における地震波の伝播を考え、その伝播に変化が現れるかを調べた。

2 理論

無限均質弾性体内の微小体積における運動方程式を立て、応力とひずみのフックの法則を考慮すると、運動方程式をベクトル表記で表すことができる。この弾性体の変位をスカラーポテンシャル ϕ とベクトルポテンシャル ψ で分離すると、運動方程式から P 波と S 波の波動方程式を導出できる[2]。例えば、P 波に対しては(1)式のように表せる。

$$\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi \quad (\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}) \quad \alpha: \text{P 波速度} \quad (1)$$

ここで ρ は媒質の密度、 λ, μ はラメの弾性定数を表す。本論文では、スカラーポテンシャルの P 波の波動方程式に着目し、アイコナル近似を行うと、波の位相の勾配は伝播する波の速度の逆数に等しいという関係が得られる。導出過程は本論文にて述べる。波線と波面の説明を図 1. に示す。ある深さ z における波線の法線単位ベクトルと、 z 軸と波線の成

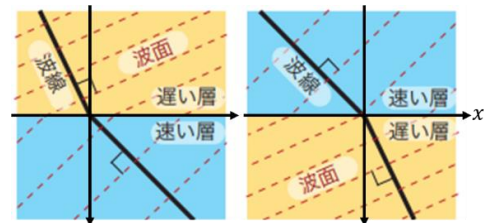


図 1: 波線・波面・屈折の概略

す角を $\theta(z)$ とすると、波線に沿って保存する波線パラメータと呼ばれる $p = \sin \theta(z) / c(z)$ が定義できる。すると、波線は $p = \text{一定}$ の曲線で決まることになり、これはスネル則である。ここで c は波の伝播速度であり、深さ z に依存する。例えば、境界面上層での速度を v_1 、下層での速度を v_2 、入射角 θ_1 とすると、屈折角 θ_2 は次のスネル則より決定できる。

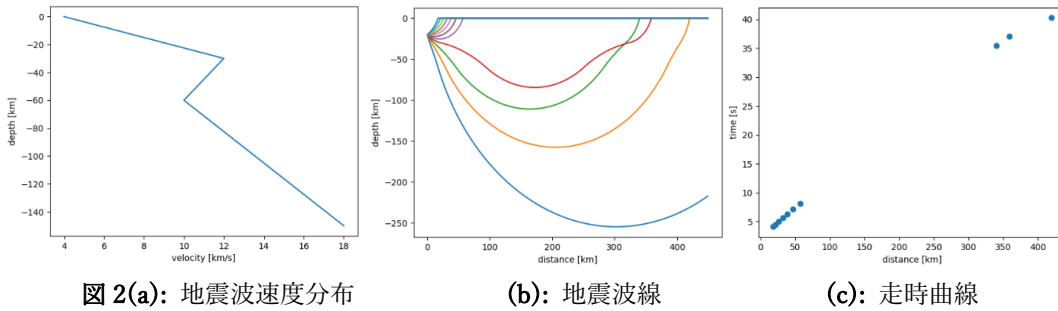
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} = p \quad (2)$$

地震波の伝播速度は地球内部の深さ依存し、深くなるほど地震波速度が速くなる為[2]、(2)式の v_2 の値が大きくなり屈折角 θ_2 も大きくなる。逆に低速度層に入射する場合は、屈折角 θ_2 は小さくなる。(図 1)

本研究では、以上の理論を考慮した上で顕著な変化が見られる場合の速度変化条件を設定し、速度変化層無し・高速度層有・低速度層有の 3 つの場合についての数値計算を行い、それぞれの場合の地震波線経路を可視化した。また、走時曲線と呼ばれる震源から輻射された地震波が観測点に到達する時間と震央距離の関係を表した図も地震波線の結果から作成した。

3 結果

深さ 30-60km に低速度層が存在する場合の数値計算結果を図 2 に示す。



深さ 20km で発生した地震波線は図 2(b)のような結果を得た。低速度層を通過した地震波は地表に到達まで時間がかかる為、深さと震央距離が大きくなる。その結果、低速度層を通過しない方向に輻射された地震波が地表に到達した場所との間に地震波が観測されないシャドーズーンと呼ばれる地域が存在することが確認できた。(図 2(c)) 尚、速度変化する層が存在しない場合と速度が速くなる層が存在する場合の結果については本論文にて述べる。

4 結論

基礎となる弾性体力学から水平成層構造の場合の地震波の伝播を考え、数値計算により、地球内部の層構造によって地震波線経路が変化することを確認することができた。また、この結果は文献[3]に示されている定性的な振舞いを再現している。今後の課題としては、地球のような三次元球体における地震波の伝播を考え、同様に地震波線経路と走時曲線を作成し、より現実的な設定で地震波の解析に取り組みたい。

参考文献

- [1] Jianke Fan & Dapeng Zhao, Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes. Nature.2021-Apr-26.
- [2] 長谷川昭 佐藤春夫 西村太志『地震学』 共立出版 (2015).
- [3] 日本地震学会『日本地震学会広報紙 79 号』 <<https://www.zisin.jp/publications/naifuru.html>>, 2010-May.

等々力溪谷の水質調査

～臭気分析の試み～

分析化学研究室

1924003 池谷 達輝

指導教員: 吉田 真史

1. 序論

等々力溪谷は東京都 23 区内唯一の溪谷で都市地域にありながら自然環境が残されている数少ない場所である。しかし、水質や臭気が問題となっており、生態系に影響が出ている。そのため水質及び臭気を調査し問題改善を行い、環境保全の促進に取り組む。追加検証として地元の近くに流れる天竜川と二俣川についても調べた。水質の調査項目は pH、導電率、DO、COD、陽イオン、陰イオンを測定した。そして臭気はガスクロマトグラフ質量分析計を使い成分を同定し、何の影響を受けて発生しているのかを明らかにすることを目的として研究した。

2. 実験方法

水質調査は等々力溪谷 4 地点(上流から A,B,C,D)を軸に置き、定期的に測定を行った。追加検証として等々力溪谷内にある釣り堀池跡、静岡県の天竜川、二俣川の水を採取した。調査項目は表 1 の通りである。

表 1.測定項目の実験方法と測定機器

調査項目	方法	測定機器(型番・メーカー)
pH	pH計	Tester30,ケニス
導電率($\mu\text{s}/\text{cm}$)	導電率計	EC11+,ケニス
DO(mg/L)	隔膜電極法	PDO-519,FUSO
COD(mg/L)	過マンガン酸を用いた測定	下記に記載
NO_3^- , NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}	分光光度計	ASV 11D,AS ONE
臭気	ガスクロマトグラフ質量分析計	GCMS-QP2010,島津

・過マンガン酸カリウムを用いた測定方法 (JIS 規格 K0102-p38 参照)

a ブランク測定

蒸留水 200mL を三角フラスコに取り、6M 硫酸 10mL と硝酸銀溶液(200g/L)5mL, 0.005M 過マンガン酸カリウム溶液 10mL を加えた。溶液を電熱ヒーターに乗せ、煮沸してから 30 分間加熱した。加熱後 0.0125M シュウ酸溶液 10mL を加え、60°Cを保ちつつ過マンガン酸カリウム溶液で滴定し、溶液の赤紫色が着いた点を終点とした。滴定に要した過マンガン酸カリウム溶液の量(A mL)を記録した。

b 河川水中の COD の測定

河川水 100mL と蒸留水 100mL を三角フラスコに取り、6M 硫酸 10mL と硝酸銀溶液(200g/L)5mL, 0.005M 過マンガン酸カリウム溶液 10mL を加えた。以下 a と同様の操作を行い、滴定に要した過マンガン酸カリウム溶液の量(B mL)を記録した。

$$\text{COD}=(B-A) \times 0.999 \times 0.2 \times 1000 / 100$$

・分光光度計

原液から濃度(0.1,0.2,0.5,1,2,5,10ppm の中から数個)を作り、バックテストの粉末を利用し検量線を作成し

た。その後、河川も同様に計測し、検量線から濃度を求めた。

・臭気分析

60℃で1時間放置した後、アセトンを2mL加え、超音波を20分かけた試料を作成した。試料をフィルター付き注射器で不純物が入らぬようにし、ガスクロマトグラフ質量分析計にて計測を行った。

3. 結果・考察

実験結果を表2に示す。

表2.各測定結果

	A	B	C	D	釣り堀池跡	E	F
pH	7.75~8.97	7.75~8.36	7.87~9.51	7.73~8.86	7.51~8.96	6.95~7.73	7.24~7.53
導電率(μ S/cm)	41.6~286	73.3~309	56.8~294	44.7~281	168~244	105~156.8	137.6~161
DO(mg/L)	12.1~16.9	12.5~15.5	12.7~15.6	12.7~14.9	11.8~13.6		
COD _{Mn} (mg/L)	0.77~6.78		0.78~2.10	0.58~5.70	0.27~5.72	0.16~0.82	0.22~0.78
NO ₃ ⁻ (ppm)	2.5~11.3		1.3~8.8	6.3~15.0	2.5~13.8	1.3~7.5	3.8~7.5
NH ₄ ⁺ (ppm)	0.5~3.3		0.4~2.2	0.5~3.2	0.5~2.6	0.1~0.8	0.1~1.1
NO ₂ ⁻ (ppm)	0.08~0.71		0.08~0.59	0.08~0.72	0.08~0.91	0.08~0.79	0.08~0.59
PO ₄ ⁻ (ppm)	0.05~0.35		0.09~0.33	0.09~0.21	0.06~0.55	0.03~0.21	0.06~0.14

臭気については10/17に強い青草臭するヘキサナールとおだやかなアンモニア臭がするN-(2-アミノエチル)-1,2-エタンジアミンが検出された。

過去(2021年度)の比較としては、pH、DO、硝酸イオンは数値が高く、導電率、CODは低かった。

渓谷内より静岡の水の方が、全体的に数値が低い傾向があった。渓谷内の水質は、pHが若干塩基性であること、全イオンが日によって高いことが問題であると考察する。pHが高い原因として光合成や臭気、地層などが要因として挙げられるが、今回のデータからは、光合成と臭気によるものが大きいと考察する。イオンについて河川の污水指標は硝酸イオン:5mg/L以上、アンモニウムイオン:2mg/L以上、亜硝酸イオン:0.1mg/L以上、リン酸イオン0.2mg/L以上⁽¹⁾と全数値を超えている結果となった。アンモニウムイオンはアンモニア臭が水に溶けたことで濃度が高くなる。亜硝酸イオンはアンモニウムイオンが酸化により発生するイオンである。臭気でアンモニア臭が検出されたことから水に溶け、酸化したことにより濃度が高くなったと考察する。リン酸イオンについては、同日の別地点での変化があまり見られないことから濃度が高い原因は渓谷より上流にあると考える。また、導電率は降水量が高いと数値が低い傾向であった。

4. 結論

渓谷内の水質は污水に近い。特にpHと今回計測したイオンが高いことが本研究からわかった。臭気からは、青草臭とアンモニア臭が特徴の成分が検出され臭気問題の原因の一つであることが判明した。水質改善の為、今後も定期的な測定が必要である。

5. 参考文献

(1)共立理化学研究所 パックテスト 「硝酸」 <https://kyoritsu-lab.co.jp/pdf/zak-no3.pdf>

「アンモニウム」 <https://kyoritsu-lab.co.jp/pdf/zak-nh4-3.pdf>

「亜硝酸」 <https://kyoritsu-lab.co.jp/pdf/zak-no2.pdf>

「リン酸(低濃度)」 <https://kyoritsu-lab.co.jp/pdf/zak-po4d.pdf>

1.序論

コムギ(*Triticum aestivum* L.)は、イネ科の植物で主食とする国が多くある。多収、安定、高品質といった理由から種改良も行われている。本研究では、東京農業大学の圃場で品種改良を目的に育成されたコムギ7種(V-1B,V-8B,V-9B,V-10B,V-24B,V-29B,V-31B)について、全自動蛍光 X 線分析装置(XRF)を用いて元素分析を行う。次に、その結果から主成分分析を行い、コムギの持つ成分情報を明確にして比較する。さらに、その結果から発酵した際に、pH、電気伝導度などに違いが出そうなコムギ 2 種について発酵実験を行い比較する。また、違いが出そうなコムギ 2 種についてパンにしたときに、香り、味などに違いが出るのかを比較する。

2.実験方法

2-1.元素分析

コムギ 7 種をミキサー(DM-6,佑崎機械有限公司)で全粒粉にして、XRF(RIX-3000,リガク)を用いて元素分析を行った。測定結果から全粒粉に含まれる元素と、それらの X 線強度のデータを得た。また、測定結果をより正確にするため、元素分析を 5 回行い得られたデータの平均をとった。

2-2.主成分分析

蛍光 X 線分析の結果から得られた元素の X 線強度のデータを主成分分析(LightStone®,ORIGINPRO®)した。コムギには様々な成分が含まれている。主成分分析は、多次元データの持つ情報をできるだけ損なわずに、低次元空間に縮約する方法である。そのため、2 次元や 3 次元にすることで、コムギの持つ成分を図に示すことができるようになり、可視化することができる。主成分分析では相関行列と共分散行列を行いそれぞれ図に示した。主成分分析には X 種類の元素(A, B, ...)のデータを用いた。

2-3.発酵実験

コムギの元素組成の違いが、パン生地が発酵過程に及ぼす影響を調べるため、主成分分析の結果で得られた相関行列と共分散行列の図から、距離が離れており pH、電気伝導度などに違いが出そうなコムギ 2 種について発酵実験を行った。本実験では、全粒粉にイーストを加えた場合と加えなかった場合について行った。

2-4.パン作製

コムギの元素組成の違いが、焼成したパンの味や食感に及ぼす影響を調べるため、主成分分析の結果で得られた相関行列と共分散行列の図から、距離が離れているコムギ 2 種についてホームベーカリー(SD-BH1001,パナソニック)を用いてパンを作製した。

2-5.官能評価

作製したパンを厚さ 2cm の 1 辺 4cm の正方形にカットし、2 種類のパンについてアンケート調査を行った。調査項目は、篠原(2019)[1]を参考にし、おいしい-まずい、甘い-苦い、明るい-暗い、かぐわしい-くさい、硬い-やわらかい、また食べたい-もうけっこう、の計 6 項目で 5 段階の選択式とした。

3.結果・考察

まずコムギ7種と“きたほなみ”の主成分分析の結果を図1、図2に示した。“きたほなみ”は比較で用いた。

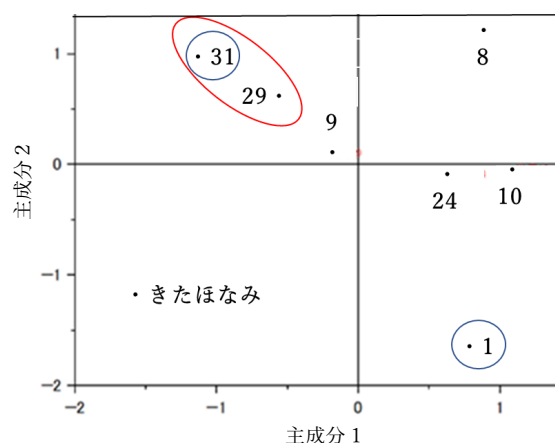


図1: コムギに含有される元素の主成分分析(相関行列)

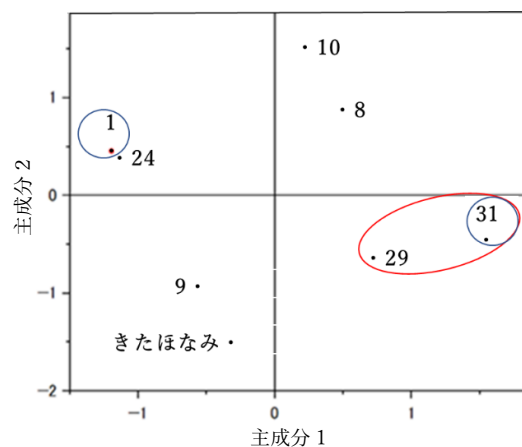


図2: コムギに含有される元素の主成分分析(共分散行列)

図1と図2の共通点より、V-29BとV-31Bが集まっていることから、同じグループであると考えた。また、V-1BとV-31Bの距離が離れていた。次に、距離が離れていたV-1BとV-31Bについて、イーストを加えた場合と加えなかった場合で発酵実験を行った。保温前と後のpH、電気伝導度の結果を図3、図4に示した。

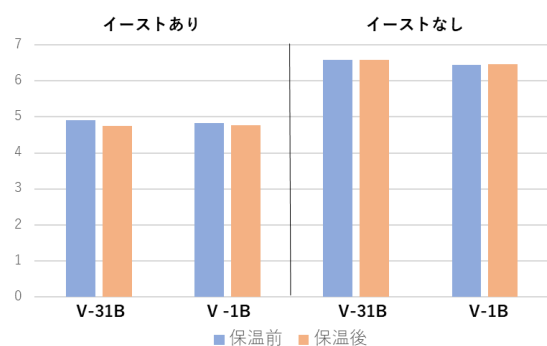


図3: 保温前と後のpH

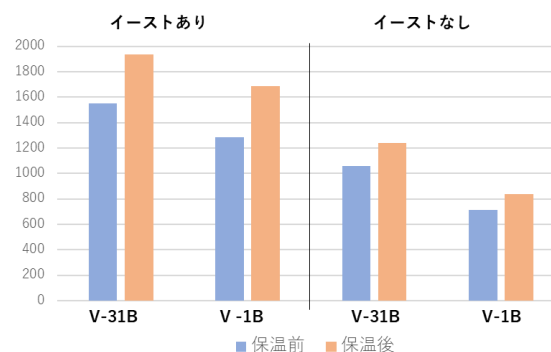


図4: 保温前と後の電気伝導度[μs]

図3より、pHはともに保温前と後では誤差程度の変化であった。また、どちらともイーストを加えた方がpHは低い結果となった。図4より、電気伝導度はともに保温前と後では、イーストを加えた場合において変化が大きかった。次に、V-1BとV-31Bについてパンを作製して官能評価を行ったが、アンケート結果はどちらのパンともすべての項目にばらつきが生じた。発酵実験において、イーストを加えるとコムギが反応して糖を分解し、弱酸性の炭酸ガスを発生させる。そのため、イーストを加えた場合はpHが低くなり、電気伝導度が高くなると考える。官能評価において、感覚の異なる人間が評価を行ったため、アンケート結果にばらつきが生じたと考える。

4.結論

品種改良を目的に育成されたコムギ7種について蛍光X線分析を行なったところ元素組成に差があることがわかった。一方、元素組成に大きな差がみられた2種について、発酵実験と官能評価を行なったところ有意な差はみられなかった。以上のことから、本研究においては、この7種のコムギに関して、焼成されたパンの味や食感に大きな違いが生じないことが示唆された。今後、コムギの元素組成の違いがパンの味や食感に及ぼす影響について、さらに検討を進めることが期待される。

5.参考文献

- [1] 篠原祐希 (2019) 薬草入りパンの開発～ドクダミを例に～
- [2] 相原美輝 (2021) 主成分分析を用いた青森県産リンゴの成分特性

1. 緒言

フィジー共和国を含む南太平洋地域では、薬用植物が幅広く利用されている。これらは中国や日本における民間医薬と同様、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。これらの地域においては科学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。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おり課題になっている。

本研究では、フィジー共和国でゼブガと呼ばれているハナミョウガ属の植物 (*Alpinia* sp.) と近縁の月桃 (*Alpinia zerumbet*) が沖縄県から九州南部に分布していることに注目し、精油成分の比較検討を行なった。

2. 実験方法

2-1：溶媒抽出

試料に溶媒を加え、溶解度の差を利用して特定の成分を分離する手法。本研究では液を入れてから 1 日放置した溶液、粉末状にして 1 日放置した溶液、2 日放置した溶液、3 日放置した溶液、7 日放置した溶液、超音波抽出洗浄機で超音波 40Hz を 1 時間かけた溶液、粉末状にして超音波抽出洗浄機で超音波 40Hz を 30 分間加えた溶液を作成。また溶液として、エタノール、ヘキサン、アセトンを使用した。

2-2：超臨界二酸化炭素抽出

超臨界二酸化炭素抽出法は、試料に抽出媒体として超臨界二酸化炭素を加え、溶解度の差を利用して成分の抽出を行う手法。本研究ではゼブガと月桃ふたつとも乾燥の条件として、40 度、24 時間で行い、超臨界二酸化炭素抽出の条件は 100 気圧・40℃・40 分で行った。

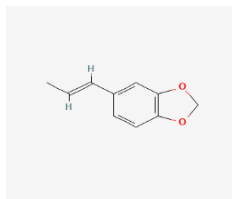
2-3：ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS)

ガスクロマトグラフィーはクロマトグラフィーの一種であり、気化しやすい化合物の同定・定量に用いられる機器分析の手法。本研究では、2-1 と 2-2 で得た抽出液を、ガスクロマトグラフィー-質料分析計 (GC-MS) を用いて分析・同定を行った。

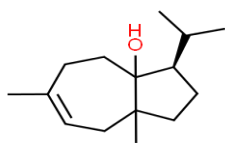
3. 結果

3-1：ゼブガの分析結果

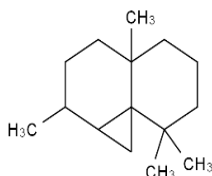
フィジー共和国のゼブガの超臨界二酸化炭素抽出物を GC-MS で分析したところ、主要な成分として、図 1 の化合物が得られた。



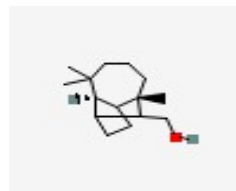
(1)



(2)



(3)



(4)

図1：ゼブガの超臨界二酸化炭素抽出物から得られた主要成分

- (1) 5-[(E)-prop-1-enyl]-1,3-benzodioxole (化学式： $C_{10}H_{10}O_2$)
- (2) (3R)-6,8a-dimethyl-3-propan-2-yl-1,2,3,4,5,8-hexahydroazulen-3a-ol (化学式： $C_{15}H_{26}O$)
- (3) (3R)-6,8a-dimethyl-3-propan-2-yl-1,2,3,4,5,8-hexahydroazulen-3a-ol (化学式： $C_{15}H_{26}O$)
- (4) 2,4a,8,8-tetramethyl- (化学式： $C_{15}H_{26}$)

3-2：月桃の分析結果

奄美大島の月桃の超臨界二酸化炭素抽出物を GC-MS で分析したところ、主要な成分として、図2の化合物が得られた。

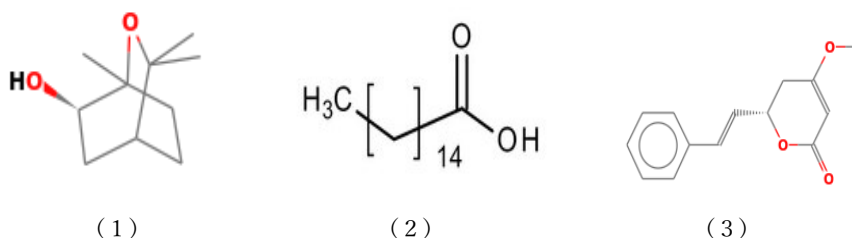


図2：月桃の超臨界二酸化炭素抽出物から得られた主要成分

- (1) exo-2-Hydroxycineole (化学式： $C_{10}H_{18}O_2$)
- (2) palmitic acid (化学式： $C_{16}H_{32}O_2$)
- (3) kavain ($C_{14}H_{14}O_3$)

4. 考察

超臨界二酸化炭素抽出物の GC-MS 分析では、ゼブガと月桃で共通の成分はみられなかった。なお、本研究の月桃から得られた kavain は神経系に薬理作用を示す化合物として注目されており、先行研究[1]におけるゼブガの超臨界二酸化炭素抽出物からも得られている。今回のゼブガから kavain が得られなかったことはゼブガの生育条件等が影響している可能性もある。

また、ゼブガはエタノールにおいては主成分の 1,8-シネオールやカンファーは出たが、他の溶液からは主成分を検出することができなかった。これは濃度調節がうまくできなかったことや、個人栽培と現地の物の違いが出たのかと考える。月桃はアセトンで作った溶液からしか主成分が出ず、エタノールで作った溶液からはケイ素の入った化学式しか出なことがあったことから、濃度調整がうまくできなかったのだと考える。

5. 結論

ゼブガと月桃を溶媒抽出、超臨界二酸化炭素抽出装置 (SFE) とガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を使用した成分分析より、ゼブガからはエタノールを使用した溶液からしか主成分が出なかった為、育てた場所による違いがあるかは明確にはわからなかった。また、月桃からはアセトンを使用した溶液からしか主成分が出なかった為、ゼブガと月桃の比較が明確にできなかった。今後、葉っぱをパウダー状にしてから溶液を作り分析を行う。

6. 参考文献

- ・村田 柚葉 (2018)「南太平洋地域において伝統医療に用いられる天然物の研究」 東京都市大学

等々力溪谷の水質調査
～湧き水との比較と天候の影響～

分析化学研究室
1924029：田口剛輝
指導教員：吉田真史

1. 緒言

等々力溪谷は東京都 23 区内唯一の溪谷として憩いの場、学びの場として広く活用されている。また等々力溪谷は東京都を代表する自然地理の名勝として植生学、地質学などの自然科学において重要な溪谷である。しかしながら急激な都市化による環境変化等により、清流に多様な魚、水生生物などが生息する環境とは言えない状況である。そこで等々力溪谷内の谷沢川と湧水池の水質調査を行い、また天候による水質の変化を調査し、谷沢川及び等々力溪谷の環境保全の促進に取り組む。

2. 調査地域・方法

水質の分析項目は pH、COD、電気伝導度、陰イオン、陽イオンで測定を行った。6 月上旬から 11 月下旬の間で 17 回採水を行った。採水場所は上流から下流にかけて、図 1 の 4 箇所(地点①、地点③、地点④と湧水池)で行った。pH、電気伝導度は図 1 の 5 箇所(地点①から地点④と湧水池)にて測定機器を用いて水質分析を行った。



図 1.採水場所

2-1. 測定機器

・ pH：【ケニス株式会社】 ポケット pH 計 pHTestr30	・ 電気伝導度：【ケニス株式会社】 導電率計 EC11 プラス
・陽イオン,陰イオン(PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+):分光光度計【アズワン株式会社】ASV11D	

2-2.COD の測定

2-2-1.ブランク測定

蒸留水 200mL をコニカルビーカーに取り、6mol/L 硫酸 10mL と 5mol/L 硝酸銀溶液 5mL を加える。溶液を電熱ヒーターに乗せ、煮沸してから 30 分間加熱した。加熱後 1.25mmol/L シュウ酸溶液 10mL を溶液に加え、5mmol/L 過マンガン酸カリウム溶液で滴定し、溶液の赤紫色が着色した時点を終点とした。滴定に要した 5mmol/L 過マンガン酸カリウム溶液の量(AmL)を記録した。

2-2-2.河川水の COD の測定

河川水 100mL と蒸留水 100mL をコニカルビーカーに取り、硫酸 10mL と硝酸銀溶液 5mL、過マンガン酸カリウム溶液 10mL を加えた。以下 2-2-1.と同様の操作を行い、滴定に要した過マンガン酸カリウム溶液の量(BmL)を記録した。再度同様の操作を行い、過マンガン酸カリウム溶液の量を記録した。試料水の COD は次の式で求められる。

ブランク測定：AmL 試料水：BmL

$$\text{COD} = (B - A) \times 0.999 \times 1000 / 100 \times 0.2$$

3. 結果と考察

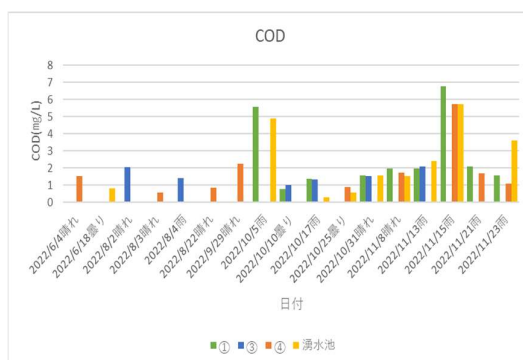


図 2.天候と COD の関係

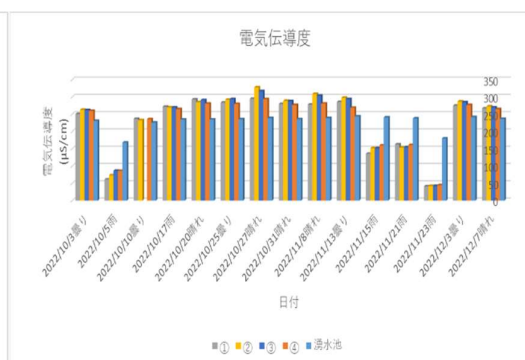


図 3.電気伝導度の湧水池と河川の比較

図 2 の結果のグラフから雨天では COD が高くなることが分かった。一方で雨天で COD が高くなっていない日もあることが分かった。したがって一定の雨量によって COD が高くなる可能性があると考えられる。また、図 3 より雨天では湧水池と谷沢川の電気伝導度の数値が低くなっていることが分かる。したがって天候の変化を湧水池と谷沢川が受けると考えられる。また雨天において湧水池の電気伝導度より谷沢川の電気伝導度が低くなっていることも分かる。したがって湧水池より谷沢川の方が天候の影響を受けやすいと考えられる。

4. 今後の課題

- ・他の湧水池の水質の調査・比較
- ・雨天以外の天候による変化の影響

5. 参考文献

- (1)小野未来(2022)等々力溪谷清流化プロジェクトにおける水質調査.東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文
- (2)国土地理院:GSI HOME PAGE(<https://www.gsi.go.jp/>)
- (3)気象庁ホームページ (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)

生物の紫外線写真

分析化学研究室

1924045 増田 航太

指導教員：吉田 真史

1. 序論

私たちの眼は 380nm から 780nm までの波長を見ることができるが、より波長の短い紫外線やより波長の長い赤外線を見ることはできない。しかし、クモや昆虫、鳥などは私たちの見ることでできない紫外線を認識できることが分かっている。鳥やクモなどは、紫外線で見ると、雄雌によって異なっていることや、紫外線を利用して餌を捕ることなどに役立っているということが報告されている。例えば、シロチョウ科とシジミチョウ科のチョウは、雄と雌で可視光線と紫外線の写真で大きく異なって見える。モンシロチョウの雄の翅は紫外線を吸収し、雌は反射する。モンシロチョウの区別は私たちには難しいが、紫外線が見えるチョウには容易である。

本研究では、実際に生物を撮影し、紫外線を通して撮影した写真と、紫外線を通さずに撮影した写真を比較した。

2. 実験方法

今回は、紫外線写真をとるデジタルカメラとして、Nikon 70s(Nikon)を使用した。フィルターは、紫外線を通さない L42 (HOYA) と、紫外線だけを通す U340 (HOYA) を使用した。また、撮影には、シャッタースピードを長い時間を要する場合があります、動かないよう三脚を用いた。

撮影は、フィルターを何もつけない場合と、L42 をつける場合、U340 をつける場合の 3 種類で行った。撮影のあとは、撮れた写真を編集ソフト NX Studio を使用し、L42 と U340 で撮った写真を編集した。主に編集した部分は、カラー設定、輪郭強調、明るさである。カラーは、L42 と U340 の写真を比較し、人間の見ているときと見えていない紫外線の世界ではどう変わっているのかが、わかりやすい白黒に設定した。輪郭強調はできるだけ生物の形がみえやすいように最も強く設定した。明るさは、見えやすいように明るすぎて見えにくくならない程度に設定した。

3. 結果と考察

モンシロチョウ、キタキチョウ、モンキチョウの雄と雌の標本を撮影した。モンシロチョウは雄が紫外線を吸収し、雌が反射すること、キタキチョウは黄色い部分が紫外線を雄は反射し、雌は吸収すること、モンキチョウは雄と雌で変化が見えにくいことがそれぞれ発見されている。著者の撮影技術の正確さを証明すると同時に、発見された通りなのかどうか実際に確かめた。

左からモンシロチョウ、モンキチョウ、キタキチョウであり、上が雄で、下が雌である。



図1 フィルター無し

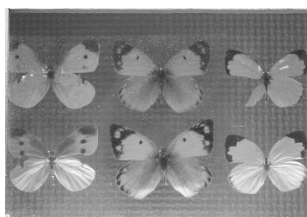


図2 フィルターL42

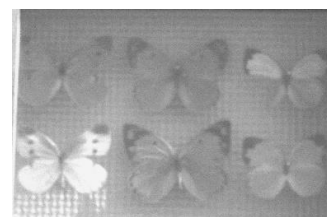


図3 フィルターU340

シャッタースピード：

1/250 秒

1/250 秒

5 秒

しぼり：F7.1

F7.1

F10

図2のモンシロチョウの雄と雌は、変化が見られないが、図3のモンシロチョウは、雄は暗く、紫外線を吸収しているように見えるが、雌は明るく光り、紫外線を反射しているように見える。

図2のキタキチョウの雄と雌は、変化が見られないが、図3のキタキチョウは、雄は上の翅が明るく光り、紫外線を反射しているように見えるが、雌は翅が暗く、紫外線を吸収しているように見える。雄の下翅が暗く、紫外線を吸収しているように見えるのは、雄のキタキチョウは、少し角度が変わるだけで見え方が変わるためであると考えられる。

モンキチョウは、図2と図3を比較しても、あまり変化は見られなかった。

クロガネモチは鳥類が実を食べて種子を運ぶことによって生息域を広げる。クロガネモチが、紫外線を使ってどのように鳥類に実を発見してもらうとしているか調べると同時に、街路樹や生垣など身近な場所にあり、学校の教材に役立つのではないかと考え、撮影を行った。

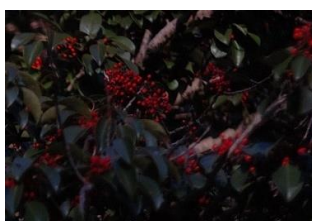


図4 フィルター無し



図5 フィルターL42



図6 フィルターU340

シャッタースピード：

1/4000 秒

1 秒

30 秒

しぼり： F2

F2.5

F20

クロガネモチの実を撮影した。図6を見ると、クロガネモチの実は、明るく光り、紫外線を反射しているように見える。色が赤く、紫外線吸収度が弱いことから、主な色素は、カロテノイドかベタレインであると考えられる。

4. 参考文献

[1] 浅間 茂著 中公新書「虫や鳥が見ている世界-紫外線が明かす生存戦略」(2019 年)

虫媒花の紫外線写真の撮影

分析化学研究室

1924058 横田 大樹

指導教員：吉田 真史

1.序論

私たち人間は、可視光線と呼ばれる 380~780nm の光の波長を見て生活している。可視光線よりも短い波長の紫外線や長い波長の赤外線人間は見ることはできない。しかし、昆虫や鳥の中には紫外線を見ることができるものも多く存在する。また、昆虫や鳥を使って受粉を行う植物も、紫外線を反射や吸収することでそれらの生物たちにのみ分かるように人間の目に見えない世界でサインを出している。

本実験では、昆虫によって受粉を行う植物に焦点を当てる。デジタルカメラと2種類のフィルターを用いて可視光線と紫外線の写真を撮影し、それらの写真を比較して人間には見えない世界でどのようなサインを出しているのかを明らかにする。

2.実験方法

本実験では、デジタルカメラ (Nikon D70s)、カメラレンズ (Nikon AI AF Nikkor 50mm f/1.8D)、三脚、フィルター2種類 (紫外線透過フィルター [HOYA U340] と紫外線吸収フィルター [HOYA L42])、紫外線照射装置 (convoy S2+) を用いて実験を行った。撮影した被写体はモンシロチョウの標本、たまねぎ、小菊、マリーゴールド、アサガオなど。

今回使用したカメラレンズは紫外線撮影用のものではないため、晴れた日の正午や紫外線照射装置を使い、紫外線が多い状況で撮影を行う。まず、三脚で固定したカメラに紫外線吸収フィルターを装着してピントを合わせて被写体を撮影し、可視光線写真を撮る。次に、ピントがずれないように気を付けながらフィルターを紫外線透過フィルターに変更し、紫外線写真を撮影する。(それぞれのフィルターで撮影する際に、シャッタースピードとしぼりを適宜調節しつつ撮影する。) 撮影後に編集ソフト (Capture NX-D) を利用して撮影した写真の明るさを調節し、それぞれの写真を比較する。

3.結果と考察

左上：モンシロチョウ雄(Pieris rapae) 右上：モンキチョウ雄(Colias erate)

左下：モンシロチョウ雌(Pieris rapae) 右下：モンキチョウ雌(Colias erate)

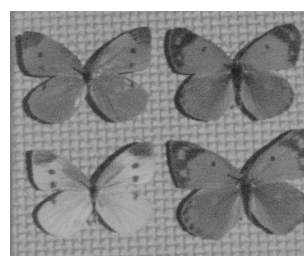
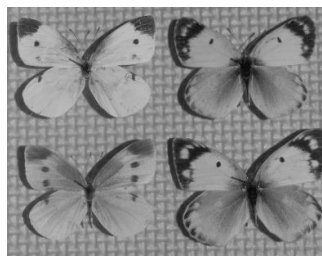


図1 可視光線写真	図2 可視光線写真（編集後）	図3 紫外線写真（編集後）
シャッタースピード：	1/60 秒	1 秒
しぼり：	f22	f8

図2と図3の写真を比較すると、モンシロチョウの雌のみ紫外線を反射していることが分かった。図1を見ると、モンシロチョウの雄と雌どちらも似たような見目をしているため、可視光線の世界では雌雄の判断が難しいが、紫外線の世界では簡単に見分けがつくようになっていた。しかし、モンキチョウに注目すると、図1では雌雄の判断が視覚的に分りやすいのに対して、図3では雌雄どちらも紫外線を吸収していることから、モンキチョウは視覚以外の情報から雌雄を区別していると考えられる。

小菊（*Chrysanthemum morifolium*）



図4 可視光線写真	図5 可視光線写真（編集後）	図6 紫外線写真（編集後）
シャッタースピード：	1/400 秒	1/10 秒
しぼり：	f8	f5

図6を見ると、外側の花びら（舌状花）が紫外線を反射しているのが分かった。また、図5と図6を比較すると花の中央部（管状花）が紫外線を吸収していることも確認できた。これらのことから、小菊は紫外線を反射する舌状花で昆虫たちの注目を集めた後、紫外線を吸収する管状花に誘うことで効率良く花粉を運ばせていると考えられる。

4. 結論

カメラと紫外線フィルターを用いて肉眼では見えない部分の昆虫や植物の紫外線写真を撮影することができた。しかし、紫外線フィルターを装着した状態ではシャッタースピードを遅くする必要があり、動いている被写体を撮影することができなかった。しぼりを調節し、シャッタースピードを遅くせずに撮影することで、動いている被写体も撮影しやすくなる。

5. 参考文献

浅間 茂. 虫や鳥が見ている世界. 中公新書, 2019, [179].

福井県勝山市の下部白亜系北谷層から産出した 足跡化石に基づくカメ類のサイズ推定

古生物学研究室

1924049 三橋理代

指導教員：中島保寿

1. 緒言

白亜紀中頃、スッポン上科とリクガメ上科がアジアを中心として汎世界的に広がり、現代の非海生カメ類の分布に大きな影響を与えた(Hirayama et al., 2000). 従ってこの時代のアジアの非海生カメ類相は、現代型のカメ類の起源を明らかにする上で重要である. しかし、その化石記録は断片的であり、分類群構成や体サイズ等に関する情報は限られている. 本研究では、過去のカメ類相を明らかにする上で注目されている足跡化石(Lichtig et al., 2018)に注目し、現生カメ類の足跡を解析した上で、前期白亜紀のアジアに生息したカメ類のサイズ推定を行う.

2. 地質概説

今回使用する足跡化石は、福井県勝山市の北谷恐竜採石場 (Kitadani Dinosaur Quarry: KDQ) から採集された. KDQ に露出する北谷層 (前期白亜紀 Aptian) は厚さ約 40 m で、主に蛇行河川を伴う沖積平野の堆積物で構成され、岩相は灰色-黒色の泥岩と白色-灰色の細粒-粗粒砂岩からなる (Tsukiji et al., 2019). これまで KDQ では恐竜類やワニ類などの体化石のほか、恐竜類・翼竜類の足跡が発見されている. カメ類体化石としては、スッポン上科アドクス科の *Adocus*, ナンシュンケリス科の *Basilemys*, スッポン科属種未定, リクガメ上科属種未定, シネミス科? 属種未定なども報告されているが、いずれも断片的である (平山, 2002).

3. 材料と方法

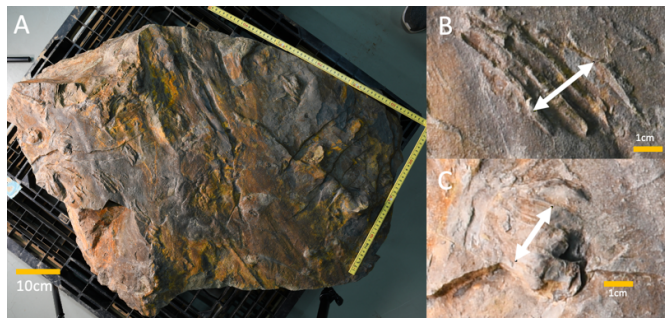


図 2. 北谷恐竜採石場から採掘されたカメ類の足跡化石.

(A) 代表的な標本の全体像 (B) 長い爪痕および (C) 短い爪痕. 両矢印は計測部位を示す.

本研究ではまず足跡化石をデジタルカメラで撮影し、画像計測ソフト ImageJ を用いて各足跡を計測した. 足跡化石には互いに並行な 3-4 本の長い曲線的又は直線的な爪痕と、短い並行な爪痕とがあり、水底で移動した際に形成されたことが示唆された. 最も内側の爪痕の中心線と最も外側の爪痕の中心線の最短距離を計測し、これを足底幅 (3 本指,

FW3; 4 本指, FW4) とした. 実験においてはミシシippアカミミガメ *Trachemys scripta* 1 個体 (直甲長 215 mm, 直甲幅 150 mm) とクサガメ *Mauremys reevesii* 1 個体 (直甲長 121 mm, 直甲幅 90 mm) を用いた. 北谷層の氾濫原堆積物と粒径構成が類似する多摩川氾濫原で採取した砂泥 (粒径<500 μ m) を大型の容器に敷き、水底での移動を想定して砂泥の上に深さ 10 cm の水を張り、実験カメ個体を投入して自然に歩行を開始させ、カメラを使って動画を撮影した. その後、水を抜いて足跡の写真を撮影し、写真から計測を行った.

4. 結果

代表的な足跡化石標本を観察した結果、足印の形状からは、前足印・後足印の判別は困難であった。代表的な一連の行跡に含まれる5点の足印を計測した結果、FW3の最小値は17.7 mm、最大値は24.8 mmであり、FW4の最小値は31.1 mm、最大値は36.5 mmであった。

現生カメの足跡観察の結果、足跡化石と同様の形態的特徴が確認されたが、前足印・後

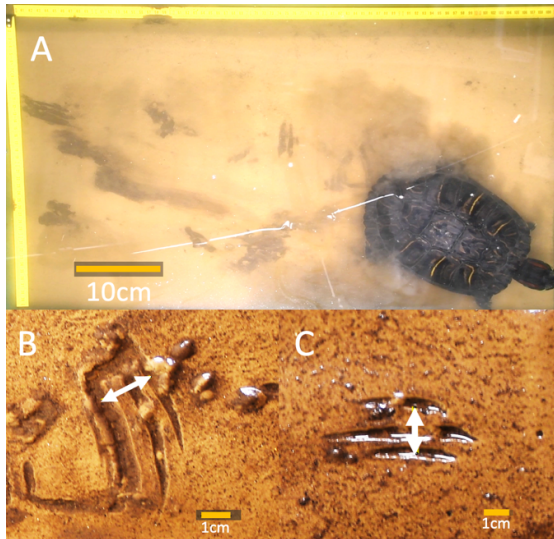


図3. 実験的に形成したカメの足跡。(A) 形成実験の様子 (B) 後足の長い爪痕 (C) 後足の短い爪痕。両矢印は計測部位を示す。

足印は非常に似通っており、また2種の足印にはサイズ以外に明確な差異は見られなかった。*T. scripta*のFW3およびFW4はそれぞれ平均27.2 mm (n=16), 28.9 mm (n=4)であり、直甲長との比はそれぞれ約7.9と約7.4であった。一方、*M. reevesii*ではFW3の平均が13.7 mm (n=13), FW4の平均が18.2 mm (n=5)であり、直甲長との比はそれぞれ約8.8と約6.7であった。以上の結果を足跡化石のサイズに適用すると、*T. scripta*を基準とする形成者の推定直甲長は最小で約148 mm (FW3に基づく推定)または219 mm (FW4), *M. reevesii*を基準とすると最大で207 mm (FW3) または257 mm (FW4)であった。

5. 考察

北谷層から体化石として産出するカメ類のうち、前後肢ともに3本爪のスッポン科は4本の爪痕の残るこの足跡化石の形成者としては除外される。平山(2002)によると、北谷層産のリクガメ上科とスッポン科は甲長15 cm以下と推定され、この足跡化石の形成者である可能性は低い。一方アドクス科・シネミス科標本は推定甲長35 cm以上になる大型標本も知られており、特にアドクス科は小型の個体も含め多くの標本が発見されているため、形成者である可能性は高い。ナンシュンケリス科標本については、甲長40 cmに達するとみられているが、この科は陸棲傾向が高いとされ、指も短い(Brinkman, 2005)ことから、本研究で実験的に形成されたような幅広い足跡を水中で形成できたとは考えにくい。本研究の結果より、カメ類足跡化石の解析は、現生カメ類の足跡解析と合わせることで、体化石が発見されていない非海生層のカメ類相を明らかにする上で有効であることが予察的に示された。

6. 引用文献

- Brinkman DB (2005) pp. 202-220 in P. J. Currie and E. B. Koppelhus (eds.), *Dinosaur Provincial Park: A Spectacular Ancient Ecosystem Revealed*. Indiana University Press, Bloomington, Indiana.
- 平山廉 (2002) 福井県立恐竜博物館紀要 1, 29-40.
- Hirayama R et al. (2000) *Russian Journal of Herpetology* 7, 181-198.
- Lichtig AJ et al. (2018) *Historical Biology* 30, 1112-1122.
- Tsukiji Y et al (2019) *Cretaceous Research* 97, 16-33.

モロッコデボン系産軟骨魚類化石の分類及び体サイズ推定

古生物学研究室
1924052 守岡 聖真 指導教員 中島 保寿

1. 緒言

軟骨魚類 (Chondrichthyes) は魚類の一系統で、軟骨を主体とする骨格、骨質の板ではなく楯鱗に覆われた体などの特徴を持ち、現生では全頭類・サメ類・エイ類が知られる。軟骨魚類の共通祖先はシルル紀頃に棘魚類と分岐し、デボン紀 Frasinian-Famennian 境界の大量絶滅で板皮類が衰退してからは、頂点捕食者として海洋生態系を支配してきた。しかしデボン紀における捕食者相の変遷については、化石記録の不完全性より未だ多くの謎が残る。そこで本研究では、モロッコのデボン系から発見された骨格を伴う大型軟骨魚類化石の記載及び形態・生態の復元を行う。

2. 地質概説

使用した化石標本はモロッコを東西に横切る Anti-Atlas の Aferdou El Mrakib 地域に露出する Ibaouane 層 Lahfira 部層 (後期デボン紀 Famennian 中期) から産出した。同層は泥灰岩、石灰質・シデライト質の団塊などで構成され、板皮類や棘魚類などの魚類、三葉虫類、ウミユリ類、頭足類などの化石を産することが知られている (Frey et al., 2018)。

3. 材料・方法

標本は左右メッケル軟骨 (下顎) の一部、角舌骨の一部、部位不明な軟骨片多数等から構成され、付随する灰色-赤色の母岩には顎歯列から外れた 20 本以上の歯と多数の楯鱗が保存されている (図 2 A)。各部位をノギスで計測し、歯・軟骨の形態・断面等を観察した上で、Ginter et al. (2010)等を基に分類を試みた。また現生軟骨魚類 9 種 10 個体の解剖・計測を行い、各部位の計測値と下顎長及び下顎高・全長の関係式 (相対成長モデル、最小二乗法) を導出した上で、これに基づいて化石種のサイズ推定を行った。計測部位は岸本ほか (2017)を参考にした。

4. 結果

4-1. 化石の分類記載 一本標本は軟骨魚類としては珍しく軟骨組織が立体的に保存されている。歯は大きい主咬頭と二対の副咬頭をもつ「クラドント型」で、面对称に近い形状を示す (図 2B)。中央の主咬頭は細長い円錐状で切縁を持ち、舌側方向に緩やかに傾斜する (図 2-G,H)。歯冠表面には線条があり、歯根基底部は平坦である。以上の特徴から本標本はシモリウム目属種未定 (Symmoriformes gen. et sp. indet.) と同定される。メッケル軟骨の断面は他の軟骨魚類化石の断面と同様に空洞を持ち、軟骨組織は層状をなす。内層は粒状の石灰化軟骨が青白色の鉱物として保存され、表層は滑らかな組織が黄色-黒色の鉱物に置換されている (図 2-I)。

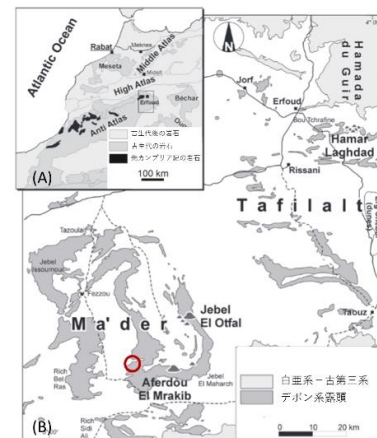


図 1. 化石産出地の地質概要 (Tessitore et al., 2018 を改変). Anti-Atlas (A), Aferdou El Mrakib 周辺 (B)の地質図。化石の産出地点を赤丸で示す。

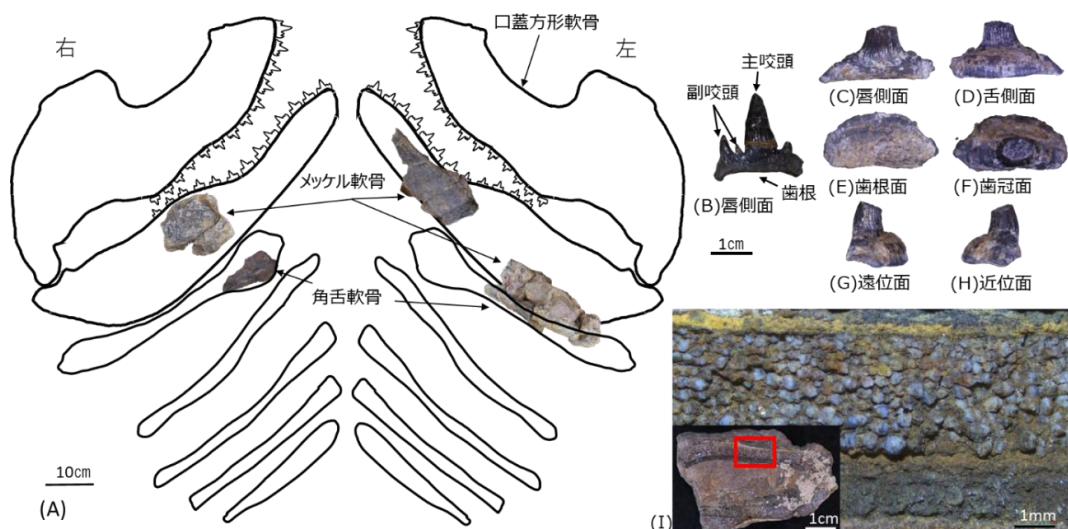


図 2. Symmmoriformes gen. et sp. indet. の腹側から見た頭骨復元図(A), 歯 (B~H), およびメッケル軟骨化石の断面と拡大図 (I).

4-2. 現生軟骨魚類の計測に基づく顎・体サイズ推定—現生軟骨魚類の下顎高(x)と下顎長(y)の関係を示す相対成長式 $y = bx^a$ は $a=1.0414$ となりほぼ等成長である (図 3A). 下顎高(x)と全長(y)の関係においては $a=0.7656$ であり, 全長は下顎長に対して劣成長である (図 3B). また, 背側部が欠損した下顎の高さの最大計測値は 128.53 mm であり, 回帰式に外挿し下顎長と全長をそれぞれ推定した結果, 下顎長の最低推定値は約 400 mm, 全長の最低値は約 3818 mm となった.

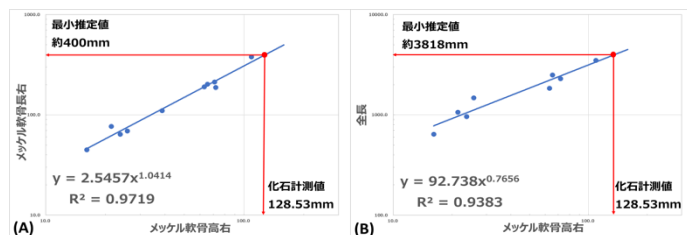


図 3 軟骨魚類の相対成長式を示した両対数グラフ。下顎高と下顎長の関係(A)と下顎高と全長の関係(B)。

5. 考察

文献調査の限り, デボン紀軟骨魚類の下顎長の最大値はクテナカントゥス目の一種における 42.5 cm で (Williams, 2001), シモリウム目はこれと比較すると小型とされてきた。本研究で得られた全長/下顎長の最小推定値は 382 cm/40 cm であるが, 欠損した標本のデータであることなどを考慮すると, 下顎長だけで 75 cm (全長にして約 6 m) を超えた可能性がある。これは既知のシモリウム類のサイズを大幅に上回り, 当時の捕食者として最大級の板皮類ダンクレオステウスに匹敵する。また歯の形状から獲物を突きさして丸呑みしていたこと, さらに, 自身の顎サイズより大きな獲物をかじり取ることができる板皮類とは食い分けをしていたことが示唆される。

6. 引用文献

- Frey L et al. (2020) Commun Biol 3, 681.
 Frey L et al. (2018) Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 496,1-17
 Ginter M et al. (2010). Chondrichthyes: Paleozoic Elasmobranchii Teeth. Verlag Dr. Friedrich Pfeil 168pp
 Tessitore L et al. (2016) Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen 281(3):247-266
 Williams ME (2001) Journal of Vertebrate Paleontology, 21:2, 214-226,
 岸本浩和, 鈴木伸洋, 赤川泉 (2017) 魚類学実験テキスト 東海大学出版部 130pp.

テンパリングによるチョコレートのV型結晶成長

ソフトマテリアル研究室

1924012 加納 大夢

指導教員：飯島 正徳

1. 背景

我々にとって身近な食品であるチョコレートは室温では光沢感のある固体であり素手でパリッと割ることができ、また口に入れるとジワーッととろけてくる。しかし、チョコレートを一度溶かし固めるだけではチョコレート独特の特性は失われてしまう。これはチョコレートの結晶多形によって融点や見た目、スナップ性が変わってしまうからである。チョコレートには6つの結晶多形があり、結晶多形と融点を表1に示す。¹⁾

ここでチョコレートの製品とし最適なのはV型であり図1のように33°C付近に融点が見られる。しかし、一度溶かしたチョコレートはI型をとり図1のように17°C付近に融点が見られ、溶けたチョコレートを静置させておくだけではV型になるまでに約16時間を要してしまう。²⁾そこで、溶けたチョコレートで一旦降温し不安定多形を生成し若干温度を上げてV型のみを作るテンパリングという操作が行われる。³⁾

先行研究では示差走査熱量測定 (DSC : Differential Scanning Calorimetry) を用いてココアバターのテンパリングにおける結晶化前の溶液保持温度について測定している。³⁾本研究では、チョコレートにはココアバターの他に砂糖や全粉乳などが含まれていることに着眼し、DSCを用いてココアバターとチョコレートの比較、テンパリングで重要とされている攪拌について考察する。³⁾

表 1. ココアバターの結晶形と融点・安定性

Wille	I 型	II 型	III 型	IV 型	V 型	VI 型
Button	γ 型	α 型	β 型		β 型	
融点(°C)	17	23	25	28	33	36
安定性	不安定				準安定	最安定
不可逆的に転移➡						

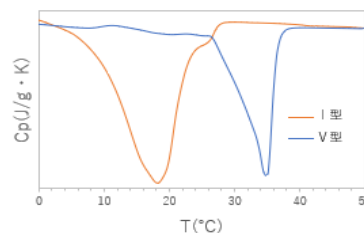


図 1. チョコレートの I 型、V 型

2. 実験方法

試料にはアオギリ科 (カカオ) の種子から分離された(株)生活の木社製ココアバターと(株)ロッテの Ghana ミルクチョコレートを用いた。実験装置は示差走査熱量測定(DSC)METTLER TOLEDO 社製 DSC832e とホットスターラーを用いた。DSC では質量 5.00mg 程度のチョコレートを DSC 用の Al パンに入れて行った。DSC は窒素雰囲気中で行い、DSC では質量の異なる試料を測定するために見かけの比熱 $C_p(J/g \cdot K)$ に換算している。攪拌では板状のチョコレートをステンレス製のボウル内で砕き、ホットスターラーで融解、冷水で冷却を行った。テンパリングの温度操作は先行研究を基に設定した。

温度プログラムを図 2.3.4 に示す。

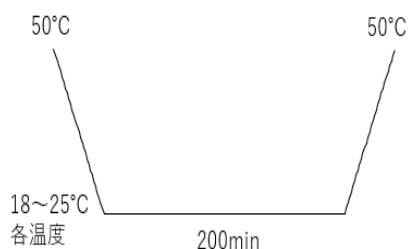


図 2. 恒温型テンパリング

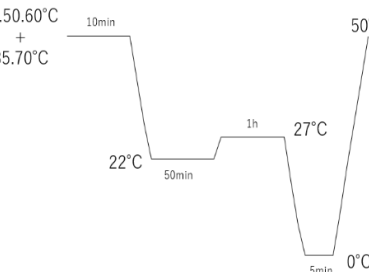


図 3. 昇温型テンパリング

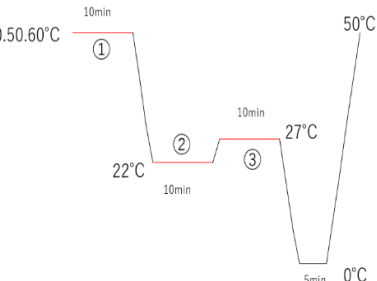


図 4. 昇温型テンパリング+攪拌

3. 結果

恒温型テンパリングによる結晶化のピークを Alejandro による相図に照らし合わせた結果を図5に示す。ココアバターでは結晶化時間 200 分で 24.25°Cの結晶化が確認されなかった。一方チョコレート中のココアバターでは、同条件で 23.24.25°Cの結晶化が確認できなかった。また、ココアバターに比べチョコレート中のココアバターの結晶化時間が長くなっている。

昇温型テンパリングの結果からココアバターでは 35.40.50°CでV型を確認することができ、チョコレートでは全ての温度でV型を確認することができた。先行研究で昇温型テンパリングを行った場合V型を形成するために約 25 時間かかっていたが本研究では結晶量は減少したが約 2 時間まで短縮することができた。

昇温型テンパリング+攪拌による図4中の①では、50.60°CでIV型が確認された。②ではすべての温度範囲でIV型が確認された。③ではすべての温度範囲でIV.V型を確認できた。①②③の範囲で攪拌を行った結晶の融解曲線を図6に示す。①②③の範囲で攪拌を行うことで図1のようにV型がよく確認できた。また攪拌を行う範囲によって異なる結晶量、結晶形が確認された。攪拌無しでテンパリングを行った場合V型を形成するために約 2 時間かかっていたが攪拌を行うことにより約 40 分まで短縮することができた。

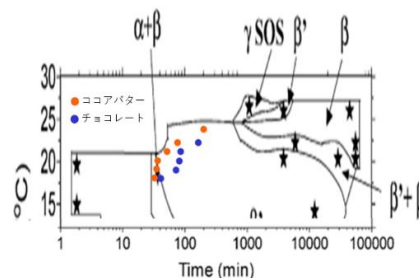


図5. 結晶化時間

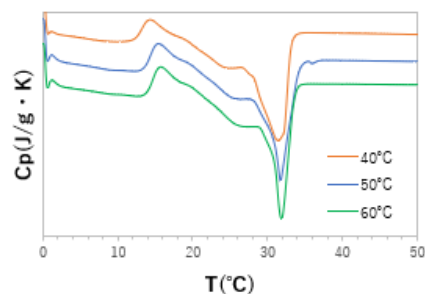


図6. ①②③で攪拌

4. 考察

恒温テンパリングの結果よりココアバターに比べチョコレート中のココアバターの結晶化時間が長くなっており、これはチョコレートに含まれる砂糖や全粉乳による効果と考えられる。⁴⁾⁵⁾

昇温型テンパリングの結果よりココアバターの場合 60.70°CでV型を確認することができず、溶液内で分子の動きが激しくV型ができにくくなったと考えられる。また 35°Cで融解した場合多くのV型を確認することができたが、これは 35°Cで 10 分間の融解では分子が動きづらくV型が完全に溶けきることができなかったと考えられる。このことより、結晶化を行う前の溶融状態における分子の動きやすさが結晶多形と密接な関係にあると考えられる。しかし、チョコレートでは 60.70°CでもV型結晶が確認されており、これはチョコレートに含まれるカカオマスやレシチンによる効果だと考えられる。⁴⁾⁵⁾

昇温型テンパリング+攪拌の結果より、攪拌無しのテンパリングと比べ短時間で安定した結晶が確認されたが、これは攪拌無しの場合チョコレート内で温度差ができ、十分にテンパリングされていないからだと考えられる。

5. 結論

- ① 恒温テンパリングではココアバターに比べチョコレート内ココアバターの結晶化が長くなる。
- ② 昇温型テンパリングではココアバターよりチョコレート中のココアバターの方が広い温度範囲でV型が確認される。
- ③ 攪拌を行う温度によってできる結晶形や結晶量が変わり、全ての範囲で攪拌を行うことによりV型を結晶化させることができる。
- ④ 先行研究ではV型を形成するために約 25 時間かかっていたが本研究では約 40 分まで短縮することができた。

6. 参考文献

- 1) 物質構造科学研究所 チョコレートを美味しくする物理 2013
- 2) Alejandro G. Marangoni* and Sara E. McGauley Relationship between Crystallization Behavior and Structure in Cocoa Butter 2002
- 3) 佐藤 光 DSC によるココアバターのテンパリング 2020
- 4) 佐藤 創平 温度変動によるチョコレートの ファットブルーム発現機構の解明 2021
- 5) L. Svanberg, L. Ahrné, N. Lorén, E. Windhab Effect of sugar, cocoa particles and lecithin on cocoa butter crystallisation in seeded and non-seeded chocolate model systems 2010

DSC によるコーンスターチ中の水の状態における定量的解析

ソフトマテリアル研究室

1924009 大橋 佑衣

指導教員 飯島 正徳

1. 緒論

でん粉は、白米やパン、ビールといった様々な飲食物の主体であり、食生活には欠かせない食品素材となっている。でん粉を多量に含む穀類やいも類、これらのでん粉質原料から分離された精製でん粉は多種多様な食品に用いられている。

でん粉は、多数の α -グルコースが脱水縮合した構造をもっていて、アミロースとアミロペクチンの2種類の成分がある (Fig.1)。アミロースは、 α -グルコースが α -1.4 結合により直鎖状の構造をもっている。アミロペクチンは、 α -1.4 結合のほかに α -1.6 結合による枝分かれの構造をもっている。

水に溶けない状態になっている生でん粉を水とともに加熱すると、でん粉粒子が膨潤、崩壊し糊化(gelatinization)と呼ばれる現象が生じ、糊化でん粉になる。そして、この糊化でん粉を放置冷却すると、膨潤したでん粉粒子内に存在するアミロースとアミロペクチンの再配列により水分を放出することで、生でん粉のように堅いでん粉の状態になる現象を老化(retrogradation)といい、老化でん粉になる¹⁾。本実験では、コーンスターチと水の混合物の糊化反応について考察する。

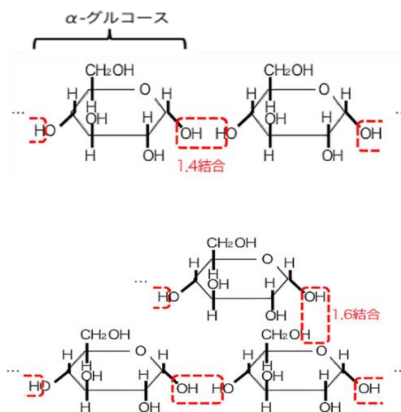


Fig.1 アミロース(上)とアミロペクチン(下)

2. 実験方法

でん粉は、とうもろこし[関東化学(株)製でんぶん (Cat. No. 37325-02)]を用い、真空乾燥機で十分に乾燥させた後、でん粉濃度 wt% (Tab.1) となるように蒸留水で調整し、試料を用意した。パンに試料を入れて蓋をして密閉させた後、DSC (示差走査熱量計) で、窒素雰囲気中 温度範囲-30~90°C、昇温速度 5°C/min の条件で行った。DSC では、熱流束 HF(mW) を見かけの比熱 $C_p(J/gK)$ に換算している。水の測定は、蒸留水 2.61mg を装置にセット後、でん粉と同様の条件で行った。ボルテックスミキサーは、でん粉と水を混合させてから 10 分間振動を与えた。

	CS	水	CS濃度
	[mg]	[mg]	[%]
CS0	0.00	2.61	0.00
CS30	5.43	12.48	30.31
CS70	14.23	5.20	73.23

Tab.1 でん粉濃度 wt%

3. 結果及び考察

CS30 の DSC 曲線を Fig.2 に示す。はじめに、室温から-30°Cまで降温すると、-20°C付近で過冷却による水の凝固を示すシャープな発熱ピークが見られた。次に、90°Cまで昇温すると、0°C付近に水の融解を示す吸熱ピークが見られた。この融解熱量から求めた水分量は、仕込んだ水分量との差がある。これは、でん粉分子中に入り込んで凍ることのできない水(不凍水)が存在していることを示している (Fig.3)。さらに 90°Cまで昇温すると 70°C付近に糊化反応によるピークが見られた (Fig.2 の拡大図)。

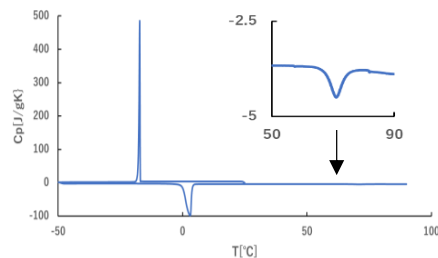


Fig.2 CS30 の DSC 曲線

Fig.4 は、CS70 のでん粉の水の融解曲線(青線)と水単体の融解曲線(灰色線)を示している。でん粉中の水の融解は水単体の融解曲線と比べて低温側から始まっている。このとき、水単体の融解曲線との間にできる面積から求められる水分量が束縛水を表す。この試料内の水の融解ピークから束縛水を除いたものが自由水で、束縛水と自由水を合わせたものが凍結水となる²⁾。

ボルテックスミキサーによりでん粉中の水分量の変化について検討するため、CS 濃度は同じで、浸漬時間の異なる 4 種類の試料を用意した(以下の Fig では、●：ボルテックスミキサーを使用、■：ボルテックスミキサーを不使用とする)。浸漬時間に対する水の融解 ΔH は、ボルテックスミキサーを使用することで、浸漬時間を長くすると ΔH が増加する。

浸漬時間に対しての束縛水の割合 (Fig.5) と糊化反応 ΔH (Fig.6) の関係について示す。ボルテックスミキサーを使用した結果、束縛水の量が増加すると、糊化反応の ΔH は増加する。糊化の現象は、でん粉と水分子との相互作用の結果であり、ボルテックスミキサーによる微小振動を与えたことで、浸漬時間に伴って束縛水がよりでん粉中にしみ込んだと考えられる。

でん粉中の束縛水・不凍水の割合と糊化反応 ΔH に関係について示す (Fig.7)。束縛水の割合が増加すると、糊化反応 ΔH は増加する。不凍水の割合が増加すると、糊化反応 ΔH は減少する。束縛水の量が増加するほど糊化しにくくなると考えられる。

以上のことから、ボルテックスミキサーの有無によるでん粉では、でん粉への水の浸透量が異なり、糊化反応に影響を及ぼすと考えられた。

今後、種類の違うでん粉を用いてコーンスターチと比較することにより、糊化反応によるメカニズムについて詳しい考察が可能となる。

5. 結論

DSC によるコーンスターチに関する本研究によって、以下のことが明らかになった。

- ・コーンスターチ内に不凍水が確認できた。
- ・コーンスターチの糊化反応は、70°C 付近であることが分かった。
- ・束縛水の割合は、ボルテックスミキサーを使用しないと減少し、使用すると増加した。
- ・ボルテックスミキサーにより、でん粉への水の浸透量が異なり、糊化反応に影響を及ぼした。

6. 参考文献

- 1) Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi Vol.59, No.2, 56~62 (2012) [報文]
- 2) Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi Vol.35, No.2, 98~104 (1988) [報文]

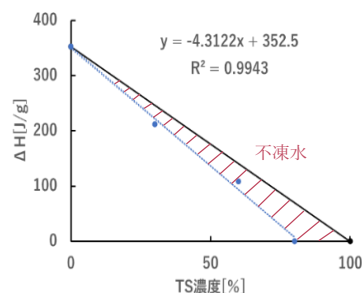


Fig.3 水の融解 ΔH

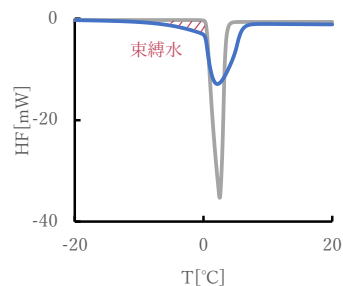


Fig.4 でん粉中の水

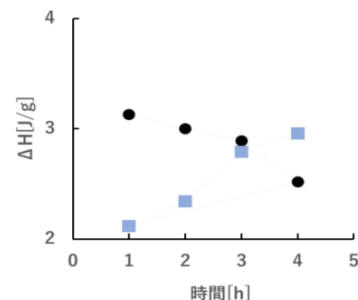


Fig.5 束縛水の割合

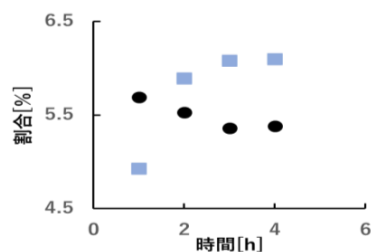


Fig.6 糊化反応の融解 ΔH

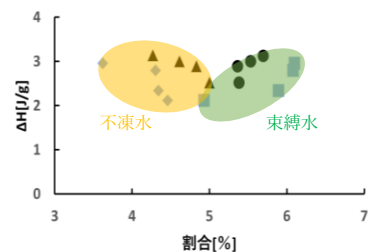


Fig.7 束縛水・不凍水の割合と糊化反応 ΔH

タピオカデンプンの糊化反応とハイラム

ソフトマテリアル研究室

1924053 八木栞

指導教員 飯島正徳

1. 緒論

タピオカの原料は、「キャッサバ」というイモの一種で、有毒な成分「シアン化合物」が含まれている。そして、キャッサバをタピオカにするために、キャッサバの根茎から取ったでんぷんを水で溶き、加熱する。その後粒状にして乾かすとタピオカパールになり、これをゆでると、タピオカミルクティーでおなじみのタピオカとなる。

澱粉は、水と一緒に加熱すると、澱粉の間に水分子が入り込み、ねばりが出てやわらかくなる。これは澱粉の「糊化(gelatinization)」という状態で、一度糊化したものは、その後時間が経過し、温度が下がるにつれ、澱粉に入り込んでいた水分子が抜け出て澱粉同士が結びつき、かたくなる。これが澱粉の「老化(retrogradation)」である。

澱粉の構造は α -D-グルコースが直鎖状に結合(α -1,4 結合)したアミロースと分枝(α -1,6 結合)をもったアミロペクチンとの混合物である。澱粉粒子には水に不溶植物の種類毎に特徴があり、粗密の層状構造の中心に「ハイラム」という形成核があり、澱粉は水がハイラムを通り糊化される。糊化は、水の共存下で加熱すると、秩序→無秩序転移により不可逆的に変化する。その結果、澱粉粒子が膨潤、崩壊して糊になる (Fig.1)¹⁾。

本研究では、タピオカ澱粉と水の糊化反応とハイラムについて考察する。

2. 実験方法

澱粉は、タピオカスターチ ((株) ギャバン製)を用いた。Al パンに真空乾燥機で乾燥させたタピオカ澱粉を入れ、スポイトを用いて精製水を注いだ。Tab.1 に実験に用いた試料のタピオカと水の濃度示す。Al パンに蓋をのせ密閉した後、DSC(Differential Scanning Calorimetry:示差走査熱量計;METTLER TOLEDO 社製 DSC822e)で窒素雰囲気中-50℃～110℃、10℃/min の条件で行った。DSC の縦軸は異なる質量の試料を比較するために見かけの比熱 c_p (J/g・K) に換算している。卓上 SEM (Scanning Electron Microscope:卓上型分析走査電子顕微鏡;(株)日立ハイテクノロジーズ TM3000) は加速電圧 15kV、倍率 1000～1500 倍、FE-SEM (Field Emission Scanning ElectronMicroscope:電界放出形走査電子顕微鏡;(株)日立ハイテクノロジーズ SU-8230) は加速電圧 1kV、倍率 800～1800 倍で観察した。

3. 結果

TS30 の DSC 曲線を Fig.2 に示す。初めに、室温(25℃)から-50℃まで降温後、-50℃から 110℃まで昇温すると 68℃付近に糊化反応によるピークがみられた。これは、Fig2 の拡大図からわかるようにとても小さな吸熱ピークが見られた。

Fig.3 に各澱粉濃度の糊化反応の DSC 曲線を示す。各濃度の

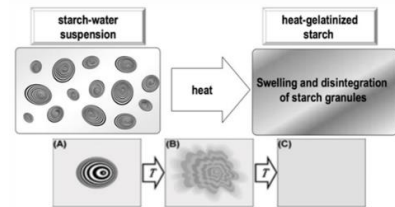


Fig.1 熱糊化

		TS	水	TS濃度
		[mg]	[mg]	[%]
冷却あり	TS70 0h	22.16	9.51	69.97
	TS70 1h	24.14	10.41	69.86
	TS70 2h	20.07	8.48	70.29
	TS50 0h	12.47	12.44	50.62
	TS50 1h	12.44	12.02	50.85
	TS50 2h	11.77	11.81	49.91
冷却なし	TS30 0h	7.87	17.83	30.62
	TS30 1h	6.50	14.63	30.76
	TS30 2h	8.34	18.92	30.59
	TS70 0h	16.27	6.69	70.86
	TS70 1h	22.30	9.31	70.54
	TS70 2h	17.04	7.48	69.49
	TS50 0h	14.04	13.53	50.92
	TS50 1h	12.31	12.30	50.02
	TS50 2h	11.93	11.81	50.25
	TS30 0h	6.93	16.03	30.18
	TS30 1h	5.98	14.07	29.82
	TS30 2h	6.91	15.56	30.75

Tab.1 澱粉濃度 wt%

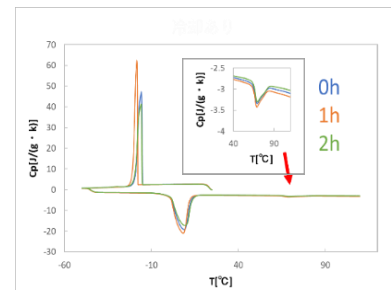


Fig.2 DSC curves of 30%

糊化反応ピークは、68°C付近であった。澱粉濃度が 50wt%以上の時、高温側にもピークが見られた。

Fig.4 に偏光顕微鏡と卓上 SEM で見たタピオカ澱粉を示す。偏光顕微鏡では輪の層が見られ、ハイラムが確認できた。卓上 SEM では、熱糊化前ではタピオカ粒子が確認できたが、熱糊化後ではタピオカの粒子が確認できず、熱糊化によってハイラムが破壊されたと理解できる。

4. 考察

糊化ピークの ΔH と浸漬時間のはどの時間も冷却あり、なしによって ΔH は大きく変化が見られなかった。この結果から、糊化ピークの ΔH は冷却あり、なしや水の浸漬時間に影響されないことがわかった。

Fig.5 に糊化開始温度(T_s)、糊化ピーク(T_{p1} 、 T_{p2})、糊化終了温度(T_c)、 ΔH と TS 濃度についての関係を示す。 T_s 、 T_{p1} は濃度が変わっても変化が見られなかった。 T_{p2} 、 T_c は濃度が大きくなる程温度が高くなることがわかった。また ΔH は、50wt%までは濃度が大きくなる程 ΔH も大きくなり、70wt%になると急激に ΔH が小さくなることがわかった。Fig.6 に FE-SEM で見たタピオカ澱粉を示す。生澱粉では、澱粉粒子を確認することができ、50、30wt%では澱粉粒子を確認することが出来ず、糊化されて糊状になったことがわかった。また 70wt%では、澱粉が全て糊化されずいくつか澱粉粒子が残っていることがわかった。この結果から、70wt%では澱粉が全て糊化されなかったため ΔH が小さくなったと考えられる。

糊化には高圧糊化があり、容器内全ての部位で均一な処理が可能であり、ハイラムを維持した状態で糊化できる処理である。

5. 結論

本研究によって、以下のことが明らかとなった。

- ・タピオカの生澱粉からハイラムが存在することが確認でき、熱糊化によって澱粉は糊状となり、ハイラムは破壊されることが確認できた。

- ・タピオカ澱粉は 68°C 付近に糊化反応によるピークと 50wt%以上で高温側に複数ピークが見られた。

- ・糊化反応によるピークは浸漬時間や冷却あり、なしによって変化が見られなかった。

- ・熱糊化後のデンプンは 70wt%では、全ての澱粉が糊化しきることができず、澱粉の粒子が確認でき、50、30wt%では、澱粉が全て糊化されて、糊状となることがわかった。

今後、高圧処理にも応用できるので、ハイラムが残った高圧処理も興味深い。

6. 参考文献

- 1) 高圧処理澱粉の示差走査熱量分析 山本和貴, 川井清司, 深見 健 (2008)

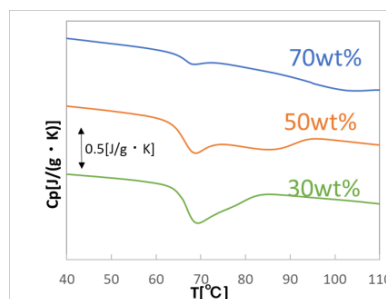


Fig.3 DSC curves of tapioca starch genelazation

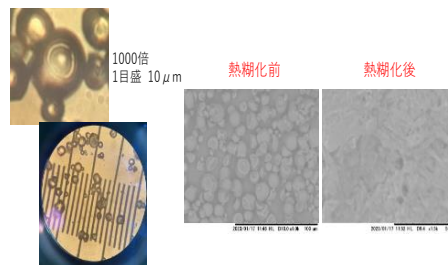


Fig.4 偏光顕微鏡、卓上 SEM でみたタピオカ澱粉

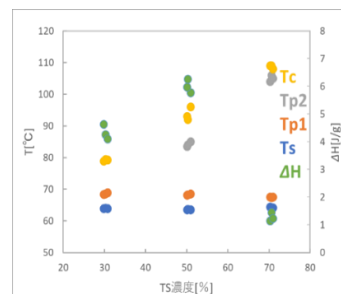


Fig.5 Temperation vs starch nitrination

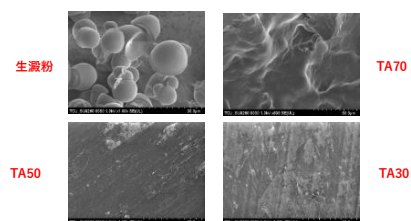


Fig.6 FE-SEM で見たタピオカ澱粉

1. 序論

ゲルとは液体がゲル化剤によって固化され、流動性を失ったもので、化粧品、食品など身近なものに応用される。ゲルの中でも分散媒が有機溶剤のものはオルガノゲル、そのうちゲル化剤がワックス類のものはワックスゲルとよばれる。ワックスゲルは常温で固体のワックス（蠟）と液体のオイルが混ざったもので、ワックス結晶の隙間にオイルを含むカードハウス構造を持つ。ワックスゲルはこのカードハウス構造の特徴を生かして口紅に応用される。

本研究では、キャンドリラワックスとホホバオイルを用いたワックスゲルの熱測定と結晶構造の観察からカードハウス構造の形成について考察する。

2. 実験試料及び方法

表 1.実験試料

CW比率 (%)	100	50	30	15	0	BB比率(%)	20	30	BB:CW=20:80 oil:wax=85:15
名称	CW100	CW50	CW30	CW15	JO100	BB	BBCW	BBJO	BBCWJO
CW(g)		1.5	1.5	1.2	-	-	2.188	-	0.798
JO(g)	-	1.5	3.5	6.8		-	-	0.348	5.654
BB(g)	-	-	-	-	-		0.550	0.140	0.200

ホホバオイル（JO・和光純薬工業（株）社製）とキャンドリラワックス（CW・Orange flower 製）添加物としてベヘン酸ベヘニル（BB・フナコシ株式会社製）を用いて試料を用意した（表 1）。これらを示差走査熱量測定（DSC）で-20℃から 90℃まで 10℃/min、窒素雰囲気中で測定した。さらに走査電子顕微鏡（SEM・（株）日立ハイテクノロジーズ・TM3000）と X 線回析（XRD・Bruker AXS,D8 Advance）で結晶構造を調べた。

3. 結果及び考察

JO-CW 系を混合比率別に測定した DSC 結果の JO ピークを図 1、CW ピークを図 2 に示す。先行研究⁽¹⁾と同様の振る舞いが見られた。JO-CW 系はその混合比率によって結晶化温度が変化し、JO ピークは JO 比率下がるほど、CW ピークは CW 比率が下がるほど融点は低くなった。JO より CW のピーク温度変化が大きいので、CW の方がより影響を受けていることがわかる。

次に BB を添加したワックスゲルでの測定結果を図 3 に示す。BBCWJO は CW15 と比較するとピークがやや鋭く、BB のピークは見られなかった。

また、BB 単体及び CW と BB を混ぜたワックスの結果を図 4 に示す。混合させたものは BB の結晶化温度が低くなって

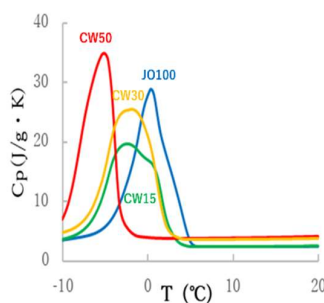


図 1. JO 結晶化ピーク

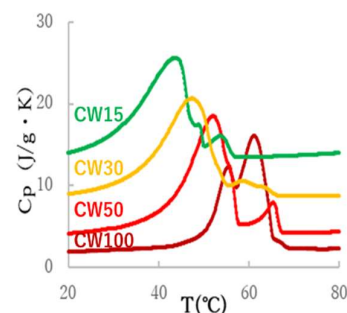


図 2. CW 結晶化ピーク

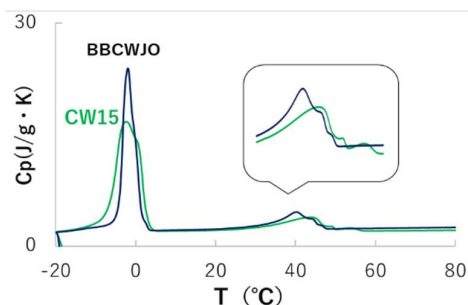


図 3. BB 入りワックスゲル

いることがわかり、結晶化温度がCW とほぼ等しくなっている

このことから BB と CW を混ぜると結晶生成時に影響を及ぼし合うと考えられる。

次に XRD の測定結果を図5に示す。2θの値が22° (4.2Å)、24° (3.8Å)、でピークが見られた。22° はCW 結晶の(110)面、24° は(200)面によるものである。柴田雅史ら⁽²⁾によるCW 主成分ヘントリアコンタン (鎖長約40 Å、2θ=1°) に由来するピークは確認できなかった。

混合比の変化やBBの添加によるピーク変化は見られないことから、CW 結晶の構造が維持されていることがわかった。

最後に図6にCW50、図7にBBCWJOのSEM観察結果を示す。SEMは試料に電子線を当て、試料表面を観察するため、表面に電子が流れやすいようにコーティングが必要である。しかし、本研究のワックスゲルは融点が高いため、BB入りでは無蒸着観察を行った。その結果、JO-CW系ではカードハウス構造が確認できなかったが、BBCWJOでは確認できた。

4. 結論

SEM観察結果からJO-CW系ゲルにBBを添加するとカードハウス構造ができることが確認できた。これはBBが単体で板状結晶であること⁽³⁾、DSC結果からCWとBBの融点がほぼ等しいことに起因すると考えられる。

また、XRDの結果からカードハウス構造を形成してもCW結晶構造を維持することがわかった。

カードハウス構造の構造形成メカニズムについては今後の課題である。

参考文献

(1) 塩原正己、天然ワックスーオイル系オルガノゲルの熱測定、東京都市大学大学院 総合理工学研究科 自然科学専攻 修士論文 (2021)

(2) 柴田雅史・吉田健介・伊藤康志・中村元一・細川均、中央分岐型ワックス Bis(polyethylenyl)-tetramethyldisiloxane によるオイルワックスゲルの硬度コントロール、色材、77[6] (2004) 258-263

(3) 柴田雅史、ワックスゲルの物性制御と化粧品への応用、オレオサイエンス第17巻第12号 (2017)

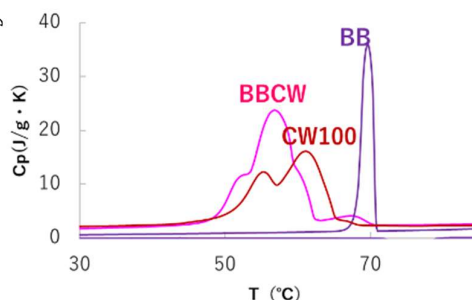


図4. BB、BB:BW DSC 曲線

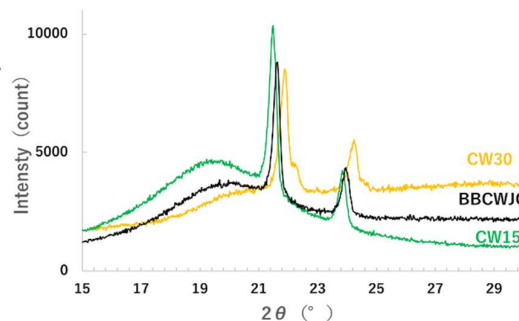


図5. XRD 測定結果

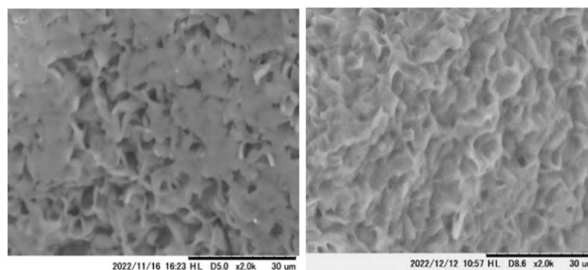


図6.SEM結果 CW50 2000倍
左：コーティング有り 右：無し

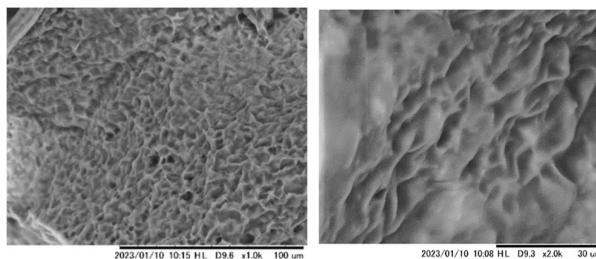


図7. SEM結果 BBCWJO
左 1000倍 右 2000倍

1. 緒言

アイスクリームは基本的に水、糖分、乳、脂肪分からなり、内部に存在する気泡を氷と乳脂肪分、糖分が取り囲んでいる。アイスクリームの中に空気が含まれる割合をオーバーラン率といい、例えば 100ml の原液で作成したアイスクリームに 50ml の空気が含まれる場合、オーバーラン率は 50%である。氷が融解すると気泡は潰れるがアイスクリームの粘度を上げることで気泡が潰れることなくアイスクリームの状態を維持できる。この粘性を高める物質として、ポリグルタミン酸(以後 PGA と略)が挙げられる。納豆の粘りの成分であるこの化学物質は、グルタミン酸分子がペプチド結合によりつながっている。今回の研究ではこの PGA をアイスクリームに添加することにより融解特性や圧縮強度などの物性にどのような影響が生じるのかを評価した。

2. アイスクリームの試料作製

前提として、参考文献(1)に記載されているアイスクリームの作成方法に準拠した試料を作成したものに PGA を 0%,5%,10%,15%の割合で添加した試料を用意し、本実験ではそれを A,B,C,D としている。

3. アイスクリームの融解時間計測

10g のアイスをココット皿の容器に入れ、容器を 90° に傾けて 30°C に保ち、器から液体となって漏れ出るまでの時間を計測した。これを 3 回行った平均を図 1 にまとめている。

アイスクリームは PGA を混ぜる量を増やすと融解時間が長くなった。これは PGA が基質の結合を補助することで融解までの時間を遅延させていることを示す。D で融解時間が短くなっているのは PGA の濃度を 15%以上にした場合融解時間が大きくばらつく傾向があるためである。これは PGA がアイスクリームに対する溶解度に達してしまっているからと考えられる。

4. アイスクリームのオーバーラン率測定

A,B,C,D を作成し体積を測定後、30°C の空間に 10 分、2000rpm の遠心分離機に 10 分かけて空気を排除して再び体積を測定し、減少量からオーバーラン率を計測した。結果は図 3 のようになり、空気含有率に正の相関があることがわかった。

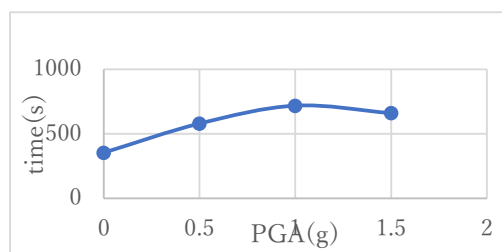


図 1.A~D の融解時間

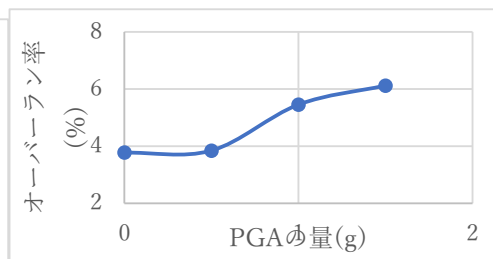


図 2.A~D のオーバーラン率

この結果はPGAが添加されることでアイスクリームが凍結前に混入させた空気を逃がすことなく閉じ込めているためオーバーランが上昇しているのだと推測した。

5. アイスクリームの硬さの測定

10gのA,B,C,Dを引張試験機(島津製作所 AGS-J)によって圧縮し、アイスクリームの抵抗力を測定したところ、図3のようになった。

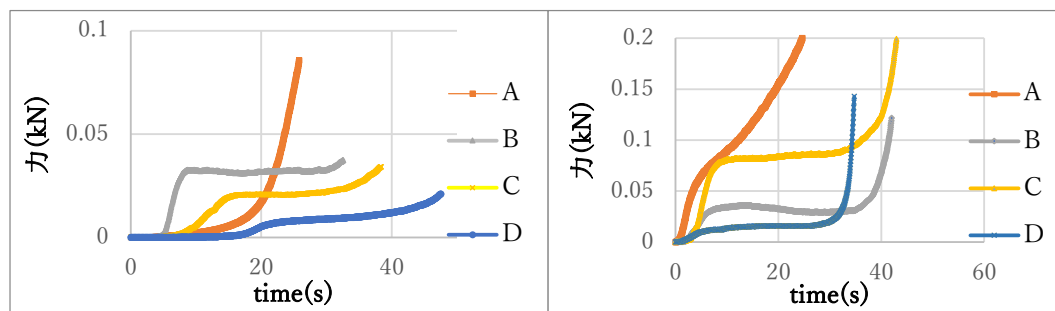


図3.A~Dの抵抗力の推移

図4.ドライアイスで5分凍結させたA~Dの抵抗力の推移

PGAを添加したB,C,Dのアイスクリームはどれも一定の時間でグラフが横這いになっている。これは機械の圧力に対し、アイスクリーム自体が変形しているためである。PGAの添加量が多くなるにつれて0から立ち上がる時間が遅くなり、弱い力で変形し、そして長い時間変形を続けている。これはPGAがアイスクリームの粘度を増加させるものの、PGAはアイスクリームの強度を低下させてしまったためと考える。Aのグラフが他のグラフと異なる数値を示しているのは、PGAを含まないAは融解しやすく、試験機によって圧力をかけられた途端凹んでいくためだと推測した。ドライアイスで5分凍結させた試料を利用すると、図4のようにグラフが横ばいになるために必要な力が増加しており、さらにはAのグラフが他と同じように最初から圧力を受け止め、他のグラフと近い結果を示すようになっている。硬度においてPGAを添加することは温度を下げることに似た作用を示すことがわかった。

6. 結論

PGAを投入したアイスクリームは通常のものと比較して熱や外力などの刺激に対して多少の耐性を手に入れている。これは夏場の猛暑でのアイスクリームの融解を防ぐ他、オーバーランの増加による口当たりの良さを期待することができ、トルコアイスと似た特性を示すため、新規製品作成の可能性が示唆される。

7. 参考文献

LWT-food science and technology 36 巻 8 号 743-749p 2003 年 著者:cailletA. Cogne C. Andrieu j. Laurent P. riovoire A.

二段階乳化法による O/W/O エマルションの調整条件と分散安定性

高分子科学研究室

1924014 亀田優斗

指導教員：高木晋作講師

1.緒言

水と油は混ざり合わないが界面活性剤などの乳化剤を加え激しく攪拌させることで一時的に混ざり合う状態(エマルション)にすることができ、この現象を乳化という。エマルションには主に二つのタイプが存在し、水相中に油が分散したものは O/W 型、油相中に水が分散したものは W/O 型と呼ばれる。さらに、多相エマルション(ME)として水相中に W/O 型エマルションが分散した W/O/W 型、油相中に O/W 型エマルションが分散した O/W/O 型も存在する。ME にはドラッグデリバリーシステム、カプセル化など W/O 型、O/W 型にはない新たな性質や特性が期待される。

しかし、安定化や調整が難しい。そこで本研究では O/W/O 型 ME を調製するために、適した界面活性剤・温度・量などの作成条件と安定分散性の間の関係を明らかにする。

本研究では O/W/O 型 ME を二段階乳化法によって作製する。二段階乳化法とはあらかじめ調製したエマルション（一次乳化）を最外相となる液体中に分散することで得られる。二段階乳化法は内相比の高い ME が再現よく調製できるためよく扱われる方法である^[1]。

2.界面活性剤の選定

HLB 値とは界面活性剤が水に溶けやすいか油に溶けやすいかを示す尺度の指標である。HLB4～6 で W/O エマルション,8～16 で O/W エマルションの乳化剤として使われる^[2]。HLB の算出方法は複数あるが、本研究ではグリフィン法を採用し(1)式により求めた。

$$HLB = 20 \left(\frac{M_w}{M} \right) \quad M: \text{分子量}, M_w: \text{親水基の分子量} \quad (1)$$

(1)よりレシチン、ジドデシルジメチルアンモニウムブロミド(DDAB)は親油性界面活性剤として、ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)は親水性界面活性剤として適している。本研究での親油性界面活性剤は、これらの中から二本鎖の疎水基を持ち入手しやすく安価であるレシチンを選定した。

3.実験方法

水 30ml、ミリスチン酸イソプロピル(IPM)10ml、SDS4 g をホモジナイザーで 5000rpm を 5 分間攪拌し O/W エマルションを作製した(一次乳化)。最外相となるサラダ油 20ml にレシチン(大豆由来)1g を、ホモジナイザーを用いて 5000rpm で 3 分間攪拌させ、作成しておいた一次乳化液を 1ml 滴下した。その後のせん断時間を 1~11 分間に変え、試料を調製した。

先ほどと同じ分量で一次乳化液と最外層を作製し、一次乳化液をそれぞれ 1ml~6ml まで滴下した試料を調製した。なお、一次乳化液滴下後のせん断時間はすべて 5 分とした。

最後に ME 調整中の温度が与える影響を調べるため先ほどと同量で一次乳化液 1ml 滴下し、攪拌中に恒温器(アズワン株式会社、EWS-100R)を用いて調整時の温度の異なる 5 つの試料を作製した。

その後これらの試料を光学顕微鏡(OLYMPUS、CX23)で観察し、ME 中の O/W 液滴の最大直径、最頻直径、個数を計測した。

4.結果・考察

図 1 から分かるようにせん断時間が 1 分だと O/W 液滴の数が極端に少ない。このことからせん断時間が短く攪拌が足りていない事が分かる。せん断時間 5 分、11 分の時は個数が多く最頻直径が小さい。よって液滴の大きさはせん断する事によって分断され小さく多くなっていることが分かった。また、せん断時間 3 分の時に他より最大直径が大きく、3 分だとまだ攪拌が足りないため液滴の大きさが不安定である事が分かった。これにより以後の実験のせん断時間を 5 分に統一した。

一次乳化液の添加量の実験では、一次乳化液が多いほど生成量が少なくなった。実際に 5ml から黄色いクリーム状の W/O エマルションができはじめた。これは、一次乳化液が多くなった事で、レシチンの許容量を超える水が加えられたために O/W 界面で IPM を包んでいた SDS がレシチンを補強するように W/O 界面に移り W/O 型に転移したと考えられる。

攪拌中の温度は室温(18℃)に近いほど O/W 液滴が多く生成され、30℃を超えると生成量が減った。50℃になるとエマルション自体ほぼ確認できなかった。これは熱運動が上がりエマルション同士でぶつかり合い、エマルションの構造自体を保つのが難しくなり生成量が下がったと考えられる。

5.結論

O/W/O 型 ME はせん断時間・一次乳化液の滴下量・調整時温度を調整する事で液滴のサイズ、個数が変化した。一次乳化液の添加量・調整時温度を上げることはどちらも生成量を減少させる効果があったが、添加量について O/W/O 型 ME ができずに W/O 化したためであるのに対し、温度についてはエマルション自体の不安定化の結果である事が分かった。

6.参考文献

- [1] 今村仁 特集総説 乳化技術の基礎と進化(5) 45 巻 p.3-8 2011 年
- [2] 「エマルション 安定化・評価技術」堀内照夫著 NTS 2020 年 7 月 27 日

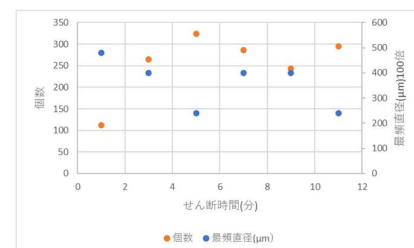


図 1.せん断時間による個数と最頻直径の変化

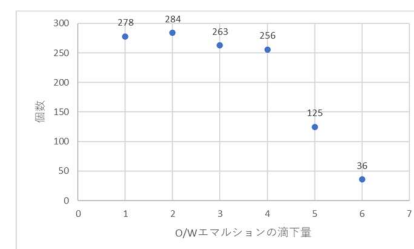


図 2.O/W エマルションの滴下量と個数

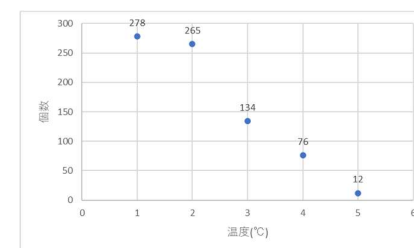


図 3.温度と個数の変化



写真 1.作製した O/W/O 型 ME の光学顕微鏡蔵(400 倍)

混合色素によるカメレオンエマルジョンの変色挙動

高分子科学研究室

1924022 杉浦里佳

指導教員：高木晋作

1. 緒言

水と油のように互いに溶解しない液相の一方が、他の一方に微細な液滴として分散したものをエマルジョンという。カメレオンエマルジョン(以下 CE)とは、特定の色素を加えた水溶液と油(トルエンなど)を一緒にの瓶に入れ、振ると色が変わり、静置すると色がもとに戻るような液のことである。(図 1 参照)

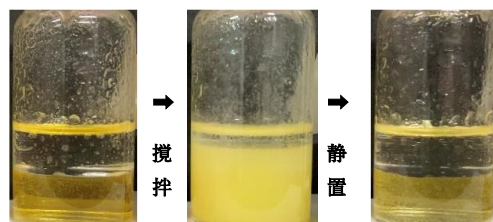


図 1 カメレオンエマルジョンの変色過程

[試料：プロモチモールブルー、塩酸 (pH4)、トルエン]

先行研究^{[1][2]}では、中和指示薬であるプロモチモールブルー(以下 BTB)を用いた CE の変色挙動について、変色挙動と同時に発生する油滴と気泡について注目した。結果、界面活性剤では気泡・油滴どちらに対しても吸着反応を起こすが、気泡にはわずかにしか吸着反応を起こさないことが明らかになった。

本研究では、蛍光色素であるローダミン B (以下 RB) でも、中和指示薬の BTB と同様に CE が起こるのかについて確認した。その上で、蛍光色素と中和指示薬による混合 CE を作製して、単一色素の場合と同様の油滴形成と色素吸着の現象が見られるのか、また両者の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

蒸留水に pH 調整用液を加え、pH2.0,4.0,6.0 の溶液を作成した。pH 調整には、塩酸と硫酸アンモニウムの二通りの場合で作製した。単一色素の CE 作成では、各 pH 溶液に RB、BTB を濃度 0.030g/L になるように加え攪拌し、色素定着のため 1 時間ほど静置させた。その後、作成した水溶液 5mL とトルエン 5mL を円柱状の試料瓶に加え、静置した。混合色素の場合は、各 pH 溶液に BTB を濃度 0.030g/L になるように加え、トルエンにも同様に、RB を濃度 0.030g/L になるよう調製し、色素定着のため 1 時間ほど静置させた。その後、作成した水溶液 5mL とトルエン 5mL を円柱状の試料瓶に加え、静置した。

油滴の挙動観察は、試料を手で 7 秒間振り静置させ、その経過を動画で撮影した。また、ローダミン B の発色と攪拌後に起こったトルエン層の変色について調べるため、UV (紫外可視分光分析装置：日立 U-4100) と FT-IR (フーリエ変換赤外分光光度計：PerkinElmer Japan 社製 Spectrum One) で測定した。

3. 結果および考察

RB 単一の CE について、全ての pH と調整用液の組み合わせにおいて、はじめは全体が無色で、攪拌するとピンクに変色し、静置し時間が経つとエマルジョンは分離し攪拌前の無色に戻ることが確認された。(図 2 参照) ローダミン B 水溶液について、UV で波長 200-800nm の吸光度を測定すると、波長が 520nm-560nm に吸収ピークが確認された。

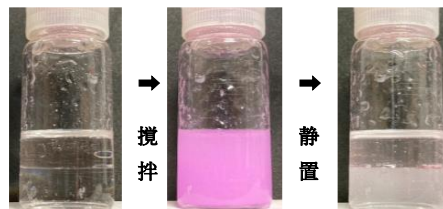


図 2 RB による CE の変色過程

[試料：RB、HCl (pH4)、トルエン]

RB と BTB の混合色素における、pH 4 の塩酸溶液中での変色過程を図 2 に示す。攪拌前はトルエン層が薄ピンク色、水溶液層は黄色を示すが、攪拌すると全体が桃色に変色し、静置し時間が経つとエマルションは分離し攪拌前と同じ状態に戻った。

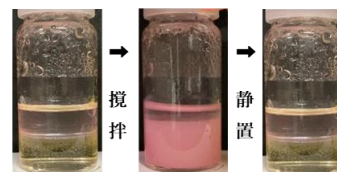


図 3 混合色素の CE の変色過程

図 3 は、いずれも pH 4 の塩酸を用いて作製した CE で、攪拌静置後の試料である。色素は、左から RB のみ、RB と BTB、BTB のみと並んでいる。このとき、トルエン層の色に着目すると、RB 単一のときにはトルエン層が無色であったが、混合色素になるとピンクに着色していることが確認できた。混合色素の CE について、攪拌操作を 5 回以上行っても 1 回目の操作と同様に発色が見られ、トルエンのピンク色が取れることはなかった。よって、RB のみの CE と混合色素の CE では、RB が異なる挙動を起こしていると明らかになった。

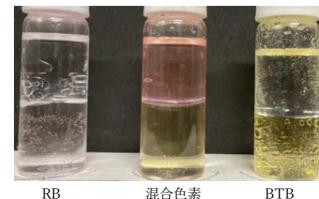


図 4 トルエン層の発色比較

RB は、水溶液中で図 5 の平衡状態にあり、無色 (I) のみトルエンに可溶である。^[3] RB 単一の CE の場合においては、RB は (I) の構造でトルエン層に溶けていたので全体として無色になる。攪拌時には、界面にトルエン層から吸着した RB は、水層に接するため吸着層中に (II) (III) の存在が可能となり、赤色を示す。

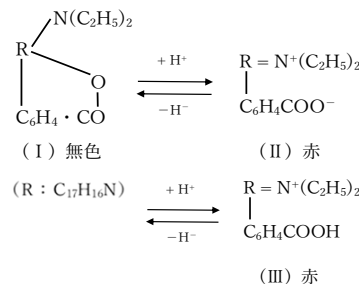


図 5 RB の平衡反応式

しかし、混合 CE においては、静置後に (II) または (III) がトルエン層に溶けていたということになる。一方で RB のみの CE ではトルエン層は無色で水層が着色していることから、トルエン層が着色するのは水層に BTB が溶解しているためだとわかる。混合色素 CE によって、トルエン層に (II) (III) の存在が可能になったのは二つの理由が考えられる。一つ目は、(II) が二分子で会合して二量体を形成している場合だが、この場合は溶液の色が単量体とは異なることが多い。もう一つは、トルエンに微量の水が溶ける (0.05g/100mL 水, 25°C) ため、トルエン内で微量の水と (II) または (III) が共存した場合である。RB は、BTB 共存下で攪拌するとトルエン側に移動し、同時に水もわずかにトルエンに溶け込むので、(II) や (III) がわずかに存在できたと考えられる。トルエン層における RB の発色原因について詳しく調べるため、FT-IR で、図 3 の試料のトルエン層の吸光度を測定したが明らかなピークは見られなかった。原因は、RB が微量しかトルエンに溶解していないことによる、ピーク信号の強度不足であると考えられる。

4. 結論

混合色素の CE では、攪拌前はトルエン層が薄ピンク色、水層は黄色を示し、攪拌すると全体が桃色に変色し、静置すると攪拌前と同じ状態に戻った。このことから、RB と BTB の混合色素について、CE は成立すると言えた。しかし、RB は、BTB との共存によって分子構造が変化しトルエン層が着色することが明らかになった。着色の機構の解明には、さらなる実験が必要であり、今後の課題である。

5. 参考文献

- [1] 内山未里 (2019) 東京都市大学卒業論文
- [2] 塩野綾菜 (2016) 東京都市大学卒業論文
- [3] 佐々木恒孝, 宮本正彦 (1985) 化学教育 33 巻 4 号 p.59

シクロデキストリンの包接性、選択性、脱包接性に関する研究

高分子科学研究室

1924044 保坂真帆

指導教諭：高木晋作

1. 緒言

シクロデキストリン(CD)はグルコースが α -1,4 グリコシド結合によって結合し環状構造をとった環状オリゴ糖の一種である。グルコースが 6 個結合したものを α -CD、7 個結合したものを β -CD、8 個結合したものを

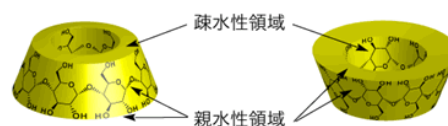


図 1. CD の構造

γ -CD と呼ぶ。図 1 に CD の構造を示す。これらの CD の構造上の特徴として、環状外部は親水性の性質があり、環状内部に疎水性の空洞を有する。この空洞内に疎水性化合物を取り込むことが可能である。このような CD の包接作用はホスト-ゲスト相互作用とも呼ばれ、食品工業分野では臭気対策、薬学分野では香粧品や、香料、薬物分子の体内の運搬(ドラッグデリバリーシステム)などへの応用が進展してきている。

本研究では、空洞径の異なる α -CD と β -CD についてポリエチレングリコール(PEG)、ポリプロピレングリコール(PPG)およびフェノールフタレイン(PP)を対象に包接の成否、ゲスト分子選択性、ゲスト分子間の競合性などを調べ、CD を用いた高い選択性を持った材料への応用をはかることを目的とした。

2. 実験方法

はじめに、 α -CD と PEG、 β -CD と PPG の包接錯体を生成し、その沈殿量から結合定数と飽和錯体量を求めた。結合定数と飽和錯体量はラングミュアの吸着等温式をもとに解析した。CD とポリマー(P)、包接錯体として沈殿したもの(Q)には次の平衡式が成り立つ。



また、P の初濃度を c 、混合溶液の単位容積あたりの Q の包接量を x 、飽和包接量を x_{∞} とし、平衡反応式(1)の平衡定数である結合定数を K とすると、次の式が成り立つ。

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{x_{\infty}} + \frac{1}{Kx_{\infty}} \cdot \frac{1}{c} \quad (2)$$

(2)の式より、 x^{-1} と c^{-1} をそれぞれ縦軸、横軸としてグラフに表すことで K と x_{∞} を評価した。

つぎに、 α -CD と PPG、 β -CD と PEG の反応からそれらの相互性を調べた。そして、 α -CD と β -CD の混合液において PEG、PPG それぞれの包接錯体を生成し、包接量の変化を測定した。また、混合液については α -CD の濃度を变化させた場合の PEG の包接錯体の形成量についても測定した。

最後に、 β -CD と PPG の包接錯体を含む溶液を加熱し、フェノールフタレイン(PP)を加えたときの包接錯体量の変化について調べた。

3. 結果・考察

α -CD と PEG、 β -CD と PPG の反応では包接錯体の白色沈殿が観察された(図 2:右に行くにつれ PEG の濃度が高い)。錯体量はそれぞれポリマーの濃度が高くなるにつれ増加した。結合定数と包接飽和量の結果を表 1 に示す。この時の α -CD のモル濃度は $4.115 \times 10^{-2} \text{mol/l}$ 、 β -CD のモル濃度は $1.057 \times 10^{-2} \text{mol/l}$ である。この結果は β -CD 水に対する溶解度が低いため、飽和包接量は α -CD の飽和包接量に対して少ない。しかし、結合定数は β -CD の方が比較的大きく、PPG は β -CD に安定して包接されることが分かった。

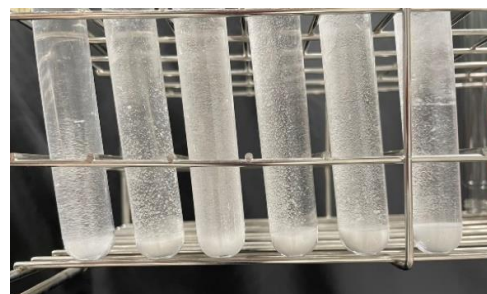


図 2. α -CD と PEG の錯体形成の様子

α -CD と PPG、 β -CD と PEG の反応では白い沈殿は観察されず、錯体は形成されなかった。これは α -CD と β -CD の空洞内の大きさが PEG と PPG では合わなかったため、包接が行われなかったと考えられる。

	α -CD と PEG	β -CD と PPG
結合定数	59.7M^{-1}	960.6M^{-1}
飽和包接量	0.1239g	0.0703g

表 1. α -CD と PEG、 β -CD と PPG の結合定数と飽和包接量

α -CD と β -CD の混合液と PPG、PEG の反応ではそれぞれ錯体が形成されていたが、混合液内の α -CD と β -CD がそれぞれ選択的に PEG、PPG と反応したため錯体が形成されたと考えられる。しかし、錯体量はどちらも減少し、混合液と PEG の錯体量は、 α -CD のみの液体と PEG の反応の錯体量よりも著しく減少していた。これは、沈殿形成の過程においてホスト、ゲスト分子以外の物質が混在して沈殿形成を阻害しているからと考えられる。また、混合液と PEG の錯体量が著しく減少していた理由としても α -CD に比べて β -CD の分子が大きいため、沈殿形成阻害の影響が大きかったと考えられる。

最後に β -CD の錯体を加熱し、PP 溶液を加えた反応では、PP 溶液が少量の場合は錯体が沈殿していた。しかし、PP の添加が十分な場合では錯体は観察されず、薄いピンク色に呈色した透明な液体が観察された。これは加熱することによって、 β -CD から PPG が離脱した後、包接の競合相手として PP を添加したところ PP が選択的に包接され、溶液の脱色が見られたと考えられる。

4. 結論

CD の包接錯体の生成をもとに、CD のゲスト分子の大きさによる高い特性があることが分かった。また、包接錯体においてホスト、ゲスト分子以外の物質が錯体形成に影響を及ぼすことがわかった。

CD の選択性について、 β -CD は PPG よりも PP との選択性が高いことが分かった。しかし、選択の要因について分子の大きさや、疎水性などさまざまな要因が考えられるため、それぞれのゲスト分子と CD の結合定数を求めたうえで、条件をそろえた CD の選択性における検討を行う必要がある。

4. 参考文献

- [1] 梶野悦子、藤井富美子 日本家政学会誌 Vol.56 No.8 p533~539 2005
- [2] 藤原隆二、他 7 人 日本化学会誌 No.2 p181~187 1983
- [3] 鈴木北斗 東京大学大学院修士論文 2017
- [4] シクロデキストリン(CD) - 大阪大学理学部化学科
<https://www.chem.sci.osakau.ac.jp/lab/harada/jp/research/001-1.html>

エマルジョンテンプレート法を用いた多孔質 NIPAM ゲルの作製

高分子科学研究室

1924057 山本 純

指導教員：高木 晋作

1,緒言

高分子ゲルとは3次元の網目構造ができ、その網目の中に溶体が閉じ込められて流動性を失った物体であると定義されている。[1]。N-イソプロピルアクリルアミド(NIPAM)からなるゲルは、LCST(Lower Critical Solution Temperature)と呼ばれる下限臨界溶液温度より高い温度を超えると分子の熱運動が活発になり、親水性のアミド基周囲の水素結合が切れることで疎水基のイソプロピル基が集まり水を押し出して収縮し体積も小さくなり白濁した状態へと体積相転移を起こす。この性質を活かしドラッグデリバリーシステム(Drug Delivery System,DDS)への応用の可否について近年では研究されている。

本研究では、先行研究[2]に伴って高分子ゲルが重合される前の溶液（プレゲル）の中にエマルジョンを作成してから重合を行うことで多孔質構造をもつNIPAMゲルを作製した。本研究でエマルジョンを構成する溶媒は、油滴の部分にオリーブオイル、界面活性剤にレシチン（大豆由来）を選択した。油滴の大きさを制御することで多孔質の孔径を変化させ高い膨潤度のゲルを作製することを研究目的とする。

2,実験方法

はじめに蒸留水の溶存酸素を取り除くために窒素バブリングを行った後、N-イソプロピルアクリルアミド(NIPAM)、N,N'-メチレンビスアクリルアミド(MBAA)、N,N,N',N'-テトラメチルエチレンジアミン(TEMED)を加え十分に攪拌した。別のビーカーでオリーブオイル、レシチンを加え攪拌したものを先ほどの溶液に加えて開始剤としてペルオキシ二硫酸アンモニウム(APS)を加えたら、ホモジナイザー(IKA社製 T25 digital ULTRA URRAX)を使い攪拌を行った。この溶液を雰囲気窒素中で重合させ得られたゲルを小さく切り分けN,N-ジメチルホルムアミド(DMF)を使って油滴を取り除き蒸留水で洗浄した。ホモジナイザーの回転数を上げることでエマルジョンの油滴が小さくできるため、回転数を3000,5000,8000rpmに設定してゲルを作成した。以下、通常のNIPAMゲルをゲル1、3000,5000,8000rpmで作成したゲルをそれぞれゲル2,3,4とする。

蒸留水に浸してあるゲルを加熱することで体積相転移を目視で確認した。また、DSC(METTLER TOLEDO社製 DSC823e)を使いLCSTの温度とピークの熱量を計測した。乾燥機を用いてLCSTを超えた温度で合計150分間計測し膨潤状態のゲルの体積相転移による脱水を行い多孔質ゲルの質量比率を測定した。走査電子顕微鏡(SEM HITACHI社製 TM3000)を用いて多孔質構造を持つゲルの表面を観察した。

3.結果

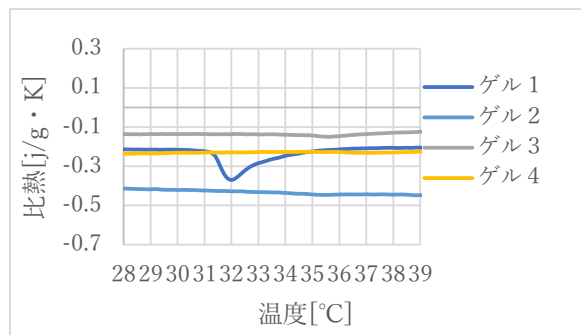


図 1 ゲルの LCST と比熱

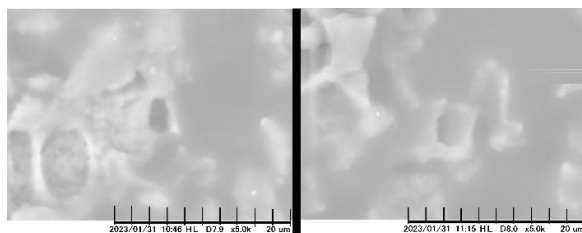


図 2 SEM 像(左:ゲル 4 右:ゲル 3)

倍率 ×5000 倍

ゲル 1～4、すべてのゲル化を確認した。

温度応答性を確認する実験においては、30℃を超えたあたりで多孔質を持たないゲルが多孔質構造のゲルは3 5℃を超えた辺りで白濁したことを確認した。

DSC を用いた LCST の確認と転移熱の確認は、ゲル 1 が 32℃、ゲル 2,ゲル 3,ゲル 4 はそれぞれ 35.35℃、35.60℃、37.11℃付近でピークを迎え LCST を確認できた。

乾燥による質量減少量を調べる実験では、60℃の温度で 10 分おきに質量を計 150 分間測定した。多孔質構造を持たないゲルは 43%、ゲル 2,ゲル 3,ゲル 4 はそれぞれ 22%、15%、12%であった。

SEM の観察では、ゲル 2 は穴の確認ができなかったがゲル 3、ゲル 4 は穴を確認できた。

4.考察

SEM の観察ではゲル 3 はゲル 4 と比べて 1.7 倍大きい穴であることが確認できることから、回転数を上げて作製するほど平均の孔径が小さく、多く穴の開いた多孔質構造をもつゲルになった。回転数の少ないゲル 2 は SEM 像では穴が確認できなかったが、DSC および質量減少率の結果からは空孔の存在が示唆される。多くの穴が開いているとスポンジの毛細管現象の様に多くの水を保持することができることと、ゲルが収縮した時に手放す水を効率よく吐き出せるので膨潤度も高くなると推測する。

5.結論

オリーブオイルとレシチンで作るエマルションを用いて多孔質 NIPAM ゲル化した。ホモジナイザーの回転数を上げることでエマルションの大きさや数を調整することができゲル内部の多孔質にも影響を与えることが確認できた。孔径や穴の数によって膨潤度も高くなることから通常の NIPAM ゲルよりも高膨潤のゲルを作製することが可能であるといえる。

6.参考文献

- [1]コロイド・界面化学 基礎から応用まで p186 2019 年 講談社
- [2] Langmuir 2007, 23, 11246-11251 Hideaki Tokuyama 他

四元数を解にもつ $\mathbb{R}$ 係数の方程式の研究

位相幾何学研究室

1924026 高橋龍生

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

実数体 $\mathbb{R}$ を拡張した複素数体

$$\mathbb{C} = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{R}, i^2 = -1\}$$

はよく知られているが、W.R.ハミルトンは複素数を拡張したものとして四元数 (quaternion) と呼ばれる数学的対象が存在することを示した。具体的には以下であたえられる。

$$\mathbb{H} = \{a + bi + cj + dk \mid a, b, c, d \in \mathbb{R}, i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1\}$$

$ij = -ji$ であることから分かるように、 $a, b \in \mathbb{H}$ に対し一般には ab と ba は等しくない (非可換である)。このことから、四元数の計算では実数や複素数では考えられないような現象が起こる。例えば、複素数係数の方程式は必ず解を $\mathbb{C}$ の中にもつこと (代数学の基本定理) が C.F.ガウスにより示されたが、 $\mathbb{H}$ 係数の場合は同様の結果が成り立たない。実際、1 次の方程式

$$ix - xi = 1$$

が $\mathbb{H}$ の中に解をもたないことは容易に確かめられる。代数学の基本定理に対応する以下の結果は 1944 年に Eilenberg-Niven の論文[3]によって示された。

定理. $\mathbb{H}$ 係数の方程式は、最高次の項が一つしかない場合は必ず解を $\mathbb{H}$ にもつ。

本卒業研究では、最高次の項が一つしかない $\mathbb{R}$ 係数の方程式の解の様相を調べることを目的とする。特に、高校までの授業で習った 2 次方程式や 3 次方程式についてどのような四元数解をもつかを調べる。

2 方程式の球面解

例えば、複素数の範囲では

$$x^2 + 1 = 0 \quad \cdots (1), \quad (x + i)(x - i) = 0 \quad \cdots (2)$$

は同じ式を表すが、四元数では (1) と (2) は異なる式である。実際、四元数では

$$(x + \mathbf{i})(x - \mathbf{i}) = x^2 - x\mathbf{i} + \mathbf{i}x + 1$$

のように式変形され、(1)と(2)は一致しない。さらに、(2) の方程式では解が $x = \pm \mathbf{i}$ のみだが、(1) の方程式では虚部のノルムが 1 になるような四元数

$$S = \{b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k} \mid b^2 + c^2 + d^2 = 1\}$$

はすべて解になり得る。集合 S は bcd 空間内の単位球面であり、球面解と呼ばれる。

四元数 $a = a + b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k}$ の共役を $\bar{a} = a - b\mathbf{i} - c\mathbf{j} - d\mathbf{k}$ と定めるとき、複素数の場合と同様に $a + \bar{a}$ および $a\bar{a}$ は実数であることが確かめられ、方程式

$$x^2 - (a + \bar{a})x + a\bar{a} = 0$$

の判別式は $D = (a - \bar{a})^2 \geq 0$ となる。特に $D < 0$ のときこの 2 次方程式は球面解をもつ。この方程式は、例えば論文[4]でも一般の $\mathbb{H}$ 係数の 2 次方程式の解の公式を導くために使われる。

3 主結果

同様の考察を 3 次方程式の場合に試みた。特に、以下の結果が得られた。

定理. 3 次方程式

$$x^3 + ax + b = 0 \quad (a, b \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{H})$$

は判別式 $D = -(4a^3 + 27b^2)$ が $D > 0$ の場合は異なる 3 実数解、 $D = 0$ の場合は 3 重実数解、 $D < 0$ の場合は 1 つの実数解と 1 つの球面解をそれぞれもつ。

実数係数の場合は 4 次方程式にも解の公式が存在することが知られているので、4 次方程式でも同様の考察をすることを今後の展望としたい。

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習. ISBN: 978-4-7687-0431-8
- [2] 今野紀雄・成松明廣. 未解決問題から楽しむ数学. 技術評論社 (2020).
- [3] S.Eilenberg and I.Niven. The “fundamental theorem of algebra” for quaternions. *Bull. Amer. Math. Soc.* 50 (1944), 246–248.
- [4] L.Huang and W.So. Quadratic formulas for quaternions. *Appl. Math. Lett.* 15 (2002), no. 5, 533–540.

四元数体に係数をもつ連立方程式の解法の研究

位相幾何学研究室

1924025 高橋慧伍

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

C.F.ガウスが証明した代数学の基本定理より，複素数を係数にもつ方程式は必ず解をもつ．複素数を拡張した数の体系としては，19世紀にハミルトンが構成した四元数 $\mathbb{H}$ が知られているが， $\mathbb{H}$ 係数の方程式は必ずしも $\mathbb{H}$ に解をもたないこと（ $\mathbb{H}$ は代数的閉体ではないこと）が容易に確かめられる．さらに， $\mathbb{H}$ 係数の方程式は孤立した解以外にも様々な形態の解をもつことも知られており， $\mathbb{H}$ 係数の方程式の解の挙動は非常に複雑である．特に，一般の1次方程式の解法が明確に示されたのも最近のことであり，一般の方程式についてはまだ十分な研究がなされていないのが現状である．特に，Janovská-Opferにより2008年に連立1次方程式の解法に関する研究もおこわれたが，明示的な解の公式はあたえられなかった．本卒業研究では，連立1次方程式に具体的な解を与えることを目標とする．

2 $\mathbb{H}$ 係数の1次方程式の行列表示

四元数は積に関して非可換なことから，一般的な1次式は1次の項を同類項にまとめることは出来ず，以下の形をしている．

$$f(x) = a_1 x a'_1 + \cdots + a_n x a'_n = b$$

1次の項が1つしかない場合は容易に解が得られるが，項が複数ある場合は一般には $x =$ の形にすることが出来ない．しかし， $f(x)$ は $\mathbb{R}$ 上の線形写像であることから，四元数を左からかける作用と右からかける作用を，それぞれ行列の左からの作用と解釈することが可能である (Georgiev-Ivanov-Mihaylova-Dinkova)．例えば，四元数 $a \in \mathbb{H}$ を $a = a_0 + a_1 i + a_2 j + a_3 k$ のように表すとき，1次方程式

$$ax + xb = c \quad (a, b, c \in \mathbb{H})$$

は行列を用いると以下のように表示される．

$$\left(\begin{bmatrix} a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 \\ a_1 & a_0 & -a_3 & a_2 \\ a_2 & a_3 & a_0 & -a_1 \\ a_3 & -a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 \\ b_1 & b_0 & b_3 & -b_2 \\ b_2 & -b_3 & b_0 & b_1 \\ b_3 & b_2 & -b_1 & b_0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$$

この方程式が唯一の解をもつ、無数の解をもつ、解をもたない、のいずれの挙動をとるかは、カッコ内の4次正方行列の和の階数を調べることで理解される。より一般的な Sylvester 型方程式

$$a_1xb_1 + \cdots + a_nxb_n = c \quad (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n \in \mathbb{H})$$

に対しても同様の考察が可能である。

3 主結果

最も簡単な1次連立方程式は不定方程式

$$ax + by = c \quad (a, b, c \in \mathbb{H}, ab \neq 0)$$

である。この一般解は、実数係数の場合と同様に解くことができる。次に簡単なのは、 $\mathbb{H}$ 係数が左側にしかない連立方程式

$$\begin{cases} ax + by = p \\ cx + dy = q \end{cases} \quad (a, b, c, d, p, q \in \mathbb{H}, abcd \neq 0)$$

だが、 $a^{-1}b \neq c^{-1}d$ を満たすときこの方程式が唯一の解をもつことも比較的容易に確かめられる。

本卒業研究では、さらに一般の 2 元 1 次連立方程式にも解を導くためのアルゴリズムが存在することを示した。

定理. $\mathbb{H}$ 係数の 2 元 1 次連立方程式

$$\begin{cases} a_1xa_2 + b_1yb_2 = p \\ c_1xc_2 + d_1yd_2 = q \end{cases} \quad (a_i, b_i, c_i, d_i \neq 0 \in \mathbb{H})$$

は Sylvester 型方程式に帰着して解くことが可能である。

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習. ISBN: 978-4-7687-0431-8
- [2] 今野紀雄・成松明廣. 未解決問題から楽しむ数学. 技術評論社 (2020).
- [3] G.Georgiev, I.Ivanov, M.Mihaylova and T.Dinkova. An algorithm for solving a Sylvester quaternion equation. Available at <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp09/6.1/6.1-8.pdf>
- [4] D.Janovská and G.Opfer. Linear equations in quaternionic variables. *Mitt. Math. Ges. Hamburg* 27 (2008), 223–234.

四元数に係数をもつ2次方程式の解法

位相幾何学研究室

1924032 都築謙太

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

実数係数の2次方程式 $ax^2 + bx + c = 0$ ($a, b, c \in \mathbb{R}$) の解の公式

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

は中学校・高校でも教わるので馴染み深く、また a, b, c が複素数の場合であったとしても同様の解法で解が得られることが知られている。

$\mathbb{R}$ や $\mathbb{C}$ は体(field)と呼ばれる数学的対象であり、包含関係 $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ をもつが、 $\mathbb{C}$ を含むさらに大きな体が存在することが知られている。特に、19世紀の数学者であるW.R.ハミルトンが構成した四元数体 $\mathbb{H}$ を係数にもつ方程式が考えられる。

$\mathbb{H}$ が $\mathbb{R}$ や $\mathbb{C}$ と大きく異なる点は積に関して非可換、すなわち一般には元 $a, b \in H$ に対し ab と ba が異なる。このため方程式の式変形に様々な制約が生じてしまい、解の公式を得ることが極めて困難となる。例えば、今野・成松の2020年の著作[2]では解法が未解決なものとしていくつかの方程式が紹介された。本卒業研究では、これらの未解決な場合を含め一般の2次方程式の解法について考察を試みた。

2 2次方程式の解法の概要

[2]では、四元数係数の2次方程式として

$$\begin{aligned} ax^2 + bx + c &= 0, & ax^2 + xb + c &= 0, \\ xax + bx + c &= 0, & xax + xb + c &= 0, \\ x^2a + bx + c &= 0, & x^2a + xb + c &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

が紹介されていて、ほとんどの場合が解法が未解決とされている。しかし、方程式

$$x^2 + bx + c = 0 \quad (b, c \in \mathbb{H}) \quad \cdots (*)$$

の解法は2002年にHuang-So [4]により示されており、最初の方程式は左から a の逆元をかけると

$$x^2 + (a^{-1}b)x + (a^{-1}c) = 0$$

と形になるので(*)の形に帰着される。また、最後の方程式についても共役をとることで

$$a^*(x^*)^2 + b^*x^* + c^* = 0$$

の形になるので、やはり解決済としてよい。このように方程式を考える際は、まず「変形可能な簡単な形(標準形)」を決めておく方が見通しが良い。

3 主結果

(1)の2次方程式はすべて

$$axa'xa'' + bxb' + c = 0 \quad (a, a', a'', b, b', c \in \mathbb{H}) \quad (2)$$

の形をしている。以下の結果を示すことができた。

定理. 方程式(2)は以下の標準形に変形可能である。

$$x^2 + bxb' + c = 0 \quad (a, a', a'', b, b', c \in \mathbb{H}) \quad (3)$$

特に, (2)において a'' の虚部と b' の虚部の比が実数ならば, 方程式は Huang-So [4] の解法に帰着できる。

同様の手法により, 1次の項を複数もつ一般的な方程式

$$axa'xa'' + \sum_{k=1}^n b_k x b'_k + c = 0 \quad (a, a', a'', b_1, b'_1, \dots, b_n, b'_n, c \in \mathbb{H}) \quad (4)$$

についても標準形が得られることが確かめられた。

これらの標準形の一般的な解の公式を得ることができれば四元数係数の2次方程式の問題は完全に解決されることになる。本卒業研究では, いくつかの条件のもとでこれらの標準形の方程式の具体的な解法も得られた。

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習. ISBN: 978-4-7687-0431-8
- [2] 今野紀雄・成松明廣. 未解決問題から楽しむ数学. 技術評論社 (2020).
- [3] Zhigang Jia, Xuehan Cheng, and Meixiang Zhao. A new method for roots of monic quaternionic quadratic polynomials
- [4] L.Huang and W.So. Quadratic formulas for quaternions. *Appl. Math. Lett.* 15 (2002), no. 5, 533–540.
- [5] D.Janovská and G.Opfer. Linear equations in quaternionic variables. *Mitt. Math. Ges. Hamburg* 27 (2008), 223–234.
- [6] G.Georgiev, I.Ivanov, M.Mihaylova and T.Dinkova. An algorithm for solving a Sylvester quaternion equation. Available at <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp09/6.1/6.1-8.pdf>

Lévi Strauss の標準公式の数学的解釈について

位相幾何学研究室

1924047 松本晃一

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

Lévi-Strauss は構造主義 (structuralism) の旗手として有名であり、文化人類学においてオーストラリアの婚姻体系を、群論を用いて説明したことが構造主義の端緒とされる。その後、人間の精神の隠された〈構造〉を探りたいと考えた Lévi-Strauss はより純粹に「精神の働きだけから出来ている現象」として、神話の調査へと転向した。その成果である「神話研究」には今日「標準公式」と呼ばれる謎の式

$$Fx(a) : Fy(b) \approx Fx(b) : Fa^{-1}(y)$$

が発表されたが、当時の学者たちの間ではこれがどのような意味をもつか十分に理解されたとは言い難い。例えば、社会学者である橋爪大三郎の 1988 年の著書にも Lévi-Strauss 自身に解説の一端が述べられているが、その記述は非常に曖昧である。

この等式の意味を理解するために数学的な対象である「群(group)」を理解する必要があることは従来から喧伝されてきたが、明確な解説は 21 世紀に入ってから数学者 Jack Morava によってなされた。卒業研究では、この原論文を読み Lévi-Strauss の神話研究の意義とその数学的側面を理解することを目標とした。

2 四元数群について

集合 G に演算 $(a, b) \rightarrow ab$ があたえられて結合法則、単位元の存在、逆元の存在が成り立つとき、 G は群と呼ばれる。特にすべての元 a, b に対し $a \cdot b = b \cdot a$ が成り立つとき G は可換群、そうでないときは非可換と呼ばれる。非可換な群として、以下では元 $1, i, j, k$ に $\pm$ の区別をつけた集合

$$Q = \{\pm 1, \pm i, \pm j, \pm k\}$$

に積を

$$i \cdot j = k = -j \cdot i, \quad j \cdot k = i = -k \cdot j, \quad k \cdot i = j = -i \cdot k$$

で定めたものの四元数群を考える。四元数は

$$H = \{ a+bi+cj+dk \mid a, b, c, d \in \mathbb{R} \}$$

であったのに対し，四元数群は 8 つの要素からなることに注意する．

3 結論と展望

一般に，群の間の対応

$$f : G \rightarrow G$$

は各 $a, b \in G$ について $f(a \cdot b) = f(b) \cdot f(a)$ が成り立つとき反自己準同型写像，特に全単射の場合は反自己同型写像という．四元数群の間の反自己同型写像は，例えば以下であたえられる．

$$\lambda : Q \rightarrow Q \Leftrightarrow \lambda(1)=1, \quad \lambda(i)=k, \quad \lambda(j)=i^{-1}, \quad \lambda(k)=j$$

Morava は 2003 年の論文で，Lévi-Strauss の標準公式は変換

$$F_X(a) : F_Y(b) \rightarrow F_X(b) : F_a^{-1}(y)$$

と考えれば，数学的には四元数群の反自己同型写像として解釈することができる」と主張した．卒業研究発表会では，その解釈の詳細について述べる．

さらに将来の展望として，そのような解釈が神話研究に直接的にどのような影響をあたえるかについて述べた 2020 年の論文の理解にも挑戦したいと思う．

参考文献

- ・ 加藤明史. 新装版・親切な代数学演習. 現代数学社(2013).
- ・ 「はじめての構造主義」(橋爪 大三郎著, 講談社現代新書, 1988 年)
- ・ 今野紀雄・成松明廣. 未解決問題から楽しむ数学. 技術評論社(2020).
- ・ 橋本義武. 数学(代数学)-婚姻の数理-, 「世界を読み解くリテラシー」井上健・山本史華・中井洋史編. p141-p156. 萌書房(1988)
- ・ J.Morava. On the canonical formula of C.Lévi-Strauss.
Available at <https://arxiv.org/abs/math/0306174>
- ・ J.Morava. ON THE CANONICAL FORMULA OF C LÉVI-STRAUSS, II
Available at <https://arxiv.org/abs/2002.12813>

位数 p^2 の有限環の分類の完全な証明

位相幾何学研究室

1924017 木村駿介

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

現代数学では抽象的な構造を考察するために群 (group), 環 (ring), 体 (field) のような代数的対象を扱う. これらを同型の観点で分類することは大きな研究テーマであり, 特に元の個数 (位数) が有限な場合の分類は古くから研究されてきた. 一般に有限群の分類は難解な問題とされており, 分類を完了したことで Thompson は 1970 年の Fields 賞を受賞した. 一方, 有限体の場合, 素数 p と自然数 n ごとに唯一の有限体 $GF(p^n)$ しか存在しないことが知られている. しかし, 群と体の中間的な存在である有限環については分類があまり進んでいなかった.

有限環 R の元の位数が $r = p_1^{e_1} \cdots p_n^{e_n}$ (各 p_i は素数) と因数分解されるとき, R は位数 $p_i^{e_i}$ の部分環 R_i の直積と同型であることが知られている (有限環の基本定理):

$$R = R_1 \times \cdots \times R_n \quad (i \neq j \text{ のとき, } R_i \text{ の元と } R_j \text{ の元の積は } 0)$$

したがって, 有限環の分類では位数が素数べきの環の分類が重要となる.

2 有限環の分類

位数が p の場合の分類は容易だが ([8]), 位数が p^2 の場合は $p = 2$ のとき Singmaster-Bloom ([7], 1964年) が決定し, 一般の p での同型類の個数は Raghavendran ([6], 1969年) が決定した. さらに, 生成元と関係式による具体的な表示は Fine ([4], 1993年) でなされた.

さらには, 位数 p^3 の場合の分類は Gilmer-Mott ([5], 1973年) および Antipkin-Elizarov ([2], 1982年) が, また位数 p^4 の場合の分類は Derr-Orr-Peck ([3], 1994年) が, それぞれ達成したと主張しているが, 位数が増えるにつれてベースとなる加法群に様々な形があることや, 定義した積が結合法則を満たすかどうか, 表示が異なる 2 つの環が同型かどうか等を調べるのが非常に煩雑になるためミスも生じやすくなる. 実際 p^3 の場合は, Gilmer-Mott がおこなった分類の誤りを Antipkin-Elizarov が指摘したが, 後者の論文にもいくつかのミスプリントがあることをゼミで確認した. このため, これらの論文の結果が信用できるかどうかは現状では疑問だと言わざるを得ない.

3 主結果

位数 p^2 の場合に生成元と関係式で分類したと主張するFineの論文 [4] は読みやすいが、最も分類が難しい箇所の証明が

“an enumeration of cases leads to two new additional nonisomorphic rings”

のように書かれて省略されており、結果の正しさの確認が困難な状況だった。本卒業研究ではFineの論文の結果を検証し、以下の結果が正しいことを再確認した。

定理. p を素数とする。位数 p^2 の有限環は 11 種類存在し、特に単位元をもち可換なものが 4 種類、単位元がなく可換なものが 5 種類、単位元がなく非可換なものが 2 種類、それぞれ存在する。

卒業研究発表会では、この証明で最も困難だった箇所について大まかに解説をおこなう予定である。

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習. ISBN: 978-4-7687-0431-8
- [2] V.G.Antipkin and V.P.Elizarov. Rings of order p^3 . *Sib. Math. J.* **23** (1982), 457–1464.
- [3] J.B.Derr, G.F.Orr and P.S.Peck. Noncommutative rings of order p^4 . *J. Pure Appl. Algebra* 97 (1994), no. 2, 109–116.
- [4] B.Fine. Classification of finite rings of order p^2 . *Math. Mag.* 66 (1993), no. 4, 248–252.
- [5] R.Gilmer and J.Mott. Associative rings of order p^3 . *Proc. Japan Acad.* 49 (1973), 795–799.
- [6] R.Raghavendran. Finite associative rings. *Compositio Math.* 21 (1969), 195–229
- [7] D.Singmaster and D.M.Bloom. Rings of order four. *Amer. Math. Monthly* 71 (1964), no. 8, 918–920.
- [8] W.C.Waterhouse. Rings with cyclic additive group. *Amer.Math.Monthly* 71 (1964), 449–450.

有限環の同型類に関する研究

位相幾何学研究室

1924023 芹澤陽奈子

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

環 (ring) とは、整数のように和と積の 2 つの演算をもつ代数的対象であり、イデアル (=部分加群) の性質などを中心として古くから研究されてきた。その一方で、環の分類問題は群や体など他の代数的対象の分類問題とは対照的にあまり進んでいるとは言えない。有限環の基本定理により、有限環の分類問題はある素数 p と自然数 n ごとに位数 p^n の場合の分類問題に帰着されるが、本格的な研究の歴史はまだ浅く、半世紀ほど前に始まったばかりである。1980年代までに位数が p^4 までの分類が発表され、さらに位数が p^5 の場合は2000年に Corbas-Williams [3, 4] が、また位数が p^6 の場合は Beiranvand-Beyranvand-Gholami [2] が、それぞれ部分的に決定したと主張しているが、例えば $p = 2$ の場合 (位数 32, 64 の場合) の分類は現在も未解決のままである。

本卒業研究では、いくつかの場合について有限環の分類問題に寄与する結果を得た。特に、特定の加法群をもつ有限環の同型類の個数を決定することに成功した。

2 有限環の同型類の個数判定

有限環は加法群の生成元に積を入れることで構成されるが、位数 p^n の加法群は n が増大するに伴い種類が増える。例えば、位数が p^2 の加法群には $\mathbb{Z}_{p^2}$, $(\mathbb{Z}_p)^2$ の2種類あり、また位数が p^3 の加法群には $\mathbb{Z}_{p^3}$, $\mathbb{Z}_p + \mathbb{Z}_{p^2}$, $(\mathbb{Z}_p)^3$ の3種類ある。一般に、位数が p^n の加法群は

$$\mathbb{Z}_p + \mathbb{Z}_{p^{n-1}}, \quad \mathbb{Z}_{p^2} + \mathbb{Z}_{p^{n-2}}, \quad (\mathbb{Z}_p)^2 + \mathbb{Z}_{p^{n-2}}, \quad \dots, \quad (\mathbb{Z}_p)^n \quad (1)$$

等であり、自然数 n を分割する方法の数 $p(n)$ と同じ数だけ存在する。例えば

$$p(4) = 5, \quad p(5) = 7, \quad p(6) = 11, \quad p(7) = 15, \quad p(8) = 22, \quad \dots$$

のようになっている。さらに、加法群ごとに有限環としての積がどれほど存在するかを調べる必要があるが、数 n の分割が多いほど対応する加法群の積構造の分類は困難であり、最も積構造の分類が困難なのは加法群 $(\mathbb{Z}_p)^n$ から得られる有限環である。

3 主結果と予想

加法群の列 (1) のうち, 最初の 2 つのタイプに対し以下の結果を得た.

定理. n を 2 以上の自然数とする. 単位元をもつ可換環のうち

- 加法群 $\mathbb{Z}_p + \mathbb{Z}_{p^n}$ から得られる有限環の同型類は $p + 1$ 種類
- 加法群 $\mathbb{Z}_{p^2} + \mathbb{Z}_{p^{n+1}}$ から得られる有限環の同型類は $p^2 + 3$ 種類

これらの結果は自然数 n にはよらない.

さらに以下の予想を立てた.

予想. n を 3 以上の自然数とする. 単位元をもつ可換環のうち, 加法群 $(\mathbb{Z}_2)^n$ から得られるものは $2^{n-1}(2^n - 1)$ 種類あるだろう.

この予想は $n = 3, 4$ のときは正しい. さらに, $n = 5$ のときに正しければ位数 32 の有限環の分類が完成する.

加法群の形	得られる有限環の同型類の個数
$\mathbb{Z}_{32}$	6
$\mathbb{Z}_2 + \mathbb{Z}_{16}$	38
$\mathbb{Z}_4 + \mathbb{Z}_8$	167
$(\mathbb{Z}_2)^2 + \mathbb{Z}_8$	251
$\mathbb{Z}_2 + (\mathbb{Z}_4)^2$	11593
$(\mathbb{Z}_2)^3 + \mathbb{Z}_4$	6535
$(\mathbb{Z}_2)^5$	496
合計	19086

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切的な代数学演習 (1985).
- [2] P.K.Beiranvand, R.Beyranvand and M.Gholami. Classification of finite rings of order p^6 by generators and relations. *J. Math.* 2013, Art. ID 467905, 8 pp.
- [3] B.Corbas and G.D.Williams. Rings of order p^5 . I. Nonlocal rings. *J. Algebra* 231 (2000), no. 2, 677–690.
- [4] B.Corbas and G.D.Williams. Rings of order p^5 . II. Local rings. *J. Algebra* 231 (2000), no. 2, 691–704.

ニューラルネットワークを用いた株価の予測

微分幾何学研究室
1924002 阿部優希
指導教員: 橋本義武

1. 諸言

ニューラルネットワークとは機械学習という人工知能の分野で用いられる学習モデルである。脳の神経回路網を模した数理モデルであり、神経細胞で行われている情報処理の仕組みを計算式に落とし込み、数学的にモデル化したものである。与えられた入力データに対して、複数のパターンやルールを学習し、分類や予測を行うことができる。今回はニューラルネットワークを用いて日経平均株価が上がるか下がるかのモデルを作成し予測を行った。また、予測結果を実際の値と比較して正解率を算出した。

2. 予測日

2018 年から 2020 年の日経平均株価のデータを学習し、2021 年 1 月から 2021 年 10 月までの隔週の金曜日の終値が前日の木曜日よりも上がるか下がるかを予測した。

3. 予測手順

1. 日経平均株価の始値、終値、最高値、最安値のデータを読み込む
2. データの中身を整える
3. 特徴量として更に終値の前日比率、始値・終値の差分を追加する
4. 2018 年～2020 年を学習データ、2021 年以降を検証データに分割する
5. 学習データと検証データをそれぞれ説明変数と目的変数に分割する
6. 予測モデルを作成し、交差検証で予測精度を確認する
7. 作成したモデルで予測
8. 予測値の正解率を計算
9. 予測結果を混同行列により確認

4. 交差検証の結果

学習データを複数に分割し、4 回の予測と精度検証を行なった。平均ス

コアが 50%を超えているためモデルが使用できるものとして扱った。

```
valid_scores: [0.5, 0.75, 0.5416666666666666, 0.3333333333333333]  
CV score: 0.53125
```

5. 予測結果

予測した結果の先頭 10 個を表示した。予測結果を 0.5 を境にして、1 に近いほど株価が上昇、0 に近いほど株価が上昇しないとし、修正した。この結果を正解データとなる検証データの目的変数と比較したところ、正解率は 51.5%となった。

array([[0.47934645],	array([[0],
[0.500785],	[1],
[0.52340347],	[1],
[0.51896715],	[1],
[0.5307365],	[1],
[0.5468513],	[1],
[0.47566485],	[0],
[0.48891264],	[0],
[0.46479204],	[0],
[0.5349958]],	[1]])

6. 考察

交差検証の結果に関しては、4 回目の値が 0.5 を下回った原因として外れ値が固まっていたと推測できる。外れ値を除くことや、データをシャッフルすることによってモデルの平均スコアを更に向上させる可能性がある。予測結果に関しては株価が上がるか下がるかの 2 値予測では、直感的に予測を行う場合 50%の正解率となる。ニューラルネットワークを用いることによって 51.5%の正解率となった。更に特徴量の追加や、モデルの改良を行うことによって予測精度を向上させることができると考えられる。

7. 参考文献

斎藤康毅著「ゼロから作る Deep Learning」オーム社 2018 年
中田秀基著「Python ではじめる機械学習」オライリージャパン

画像処理の数理

微分幾何学研究室

1924056 八十島大貴

指導教員：橋本義武

1. 緒言

画像処理とは、コンピュータを使用して、画像を変形したり、色合いを変えたり、別の画像と合成したり、画像から何かしらの情報を取り出す処理全般を指す。身近なところでは、スマートフォンの画面ロック（顔認証）の技術や、製造業においての人の目が変わる製品の品質を検査するのに利用される。また、研究でフィルタ処理も行った。フィルタ処理とは、ノイズ軽減やエッジの強調をするために使われる。エッジの強調とは、白から黒のように明るさが急変する部分を強調する処理である。フィルタを使うことにより解析しやすい画像を作成でき、機械でも製品の検査ができるような画像になる。

私がなぜ画像処理に興味を持ったかという、画像処理が身近でも活躍しているので関心を持ったのと、自分が撮った写真が画像処理を行うことによりほかの画像に変わるのを実感してみたいという気持ちから興味を持ちました。また、画像処理に使われてる数学を知りたいのでこのテーマを選んだ。

本研究では、画像処理を行うために Python を使い参考文献に倣って、プログラミングを行って画像処理をしていく。

2. 研究方法

まず、画像補正と射影変換についてで、駅の案内表示の看板を看板が台形になるように斜めから写真を撮った。これを元画像として GIMP というアプリケーションを使って正面からの画像に変換した。次に Python でプログラミングコードを書き、元画像を正面からの画像にした。

フィルタ処理については、グラディエント (Sobel) フィルタ・ラプラシアンフィルタ・ガウシアンフィルタの三種類について研究した。この三種類とも Python を使い元画像にフィルタ処理を行った。

3. 研究成果

画像補正と射影変換については、GIMP というアプリケーションを使った場合、画像補正後の画像は正面の画像になっていたが、縦横比が悪くとても見にくい画像になってしまった。Python でプログラミングコードを書き、画像補正を行うと、画像補正後の画像は正面からになっていた。また、縦横比も元画像と同じ比率になっていてとても見やすい画像になった。

射影変換で、投影面積の点を (X,Y,Z) ($Z=1$) と置き、実際に見える物体の点を (x,y,z)

と置く。(X,Y,Z) を x,y,z で表すと、 $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$ となる。

フィルタ処理については、グラディエント (Sobel) フィルタで横方向のフィルタと縦方向のフィルタの 2 パターンの結果を見た。それぞれしっかりと輪郭が強調された画像処理後の画像を表示することができた。横方向の 1 階微分では、縦線がくっきりと分かるようになっている。また、縦方向の 1 階微分では横線がくっきりわかるようになっている。ラプラシアンフィルタでは、2 階微分を行うことにより、グラディエント (Sobel) フィルタよりもぼやけてないはっきりとした輪郭が表示された画像処理後の画像ができた。グラディエントフィルタでは、ほかの 2 つとは違い元画像に対してぼやけた白黒の画像処理後の画像を表示することができた。 σ の値を変えることによってぼやけ方の違いを観察することができた。

4. 考察

画像補正で GIMP のアプリケーションを使ったとき、縦横の比率が悪くなってしまったのは、無理やり角を指定して正面からの画像に画像補正しようとしたからだと考えられる。それに対して、Python を使った画像補正では、プログラミングによって射影変換を行ったので、縦横の比率も計算されたからとても理解しやすい画像になったと考えられる。

フィルタ処理では、グラディエント (Sobel) フィルタとラプラシアンフィルタのとき輪郭が浮き出てきたのは、微分しているからである。また、黒くなっているところは変化していないところとなっている。ガウシアンフィルタは周りとの平均を取っているので、処理後の画像がぼやけて見える。 σ の値が小さいほど平滑化の効果は小さくなり、 σ の値が大きいくほど平滑化の効果が大きくなる。

5. まとめ

画像処理に応用されている数学の射影変換とグラディエント (1 階微分) ラプラシアン (2 階微分) ガウシアン (積分) を研究してきた。今回は Python を使い画像処理を行ったが、画像処理は c 言語、Java 言語、MATLAB でも行われるので、次はそちらも使ってみたい。

6. 参考文献

[1]北山直洋著 Python で始める OpenCV 4 プログラミング 2019 年

最小作用の原理の作用は本当に最小か？

基礎物理学研究室

1924041 福島 大智

指導教員 堀越 篤史

1. 緒言

自然の法則の背後には変分原理が存在することがある。変分原理とは、何かが最小となるように自然が変化するという原理の総称であり、フェルマーの原理や最小作用の原理などが知られている。フェルマーの原理は最短時間の原理とも呼ばれ、光は所要時間が最小となる経路を通るというものであり、所要時間が極値をとる条件からスネルの法則などを導くことができ、この極値は確かに最小値になっている。一方、最小作用の原理は、物体は作用が最小となる経路を通るというものであり、作用が極値をとる条件からオイラー・ラグランジュ方程式（ニュートンの運動方程式を一般化したもの）を導くことができるが、この極値が最小値になっているかは自明ではない。本研究では、いくつかの例において作用の極値が本当に最小値になっているか検証する。

2. 最小作用の原理

一次元空間において質量 m の物体(座標 q)がポテンシャル $V(q)$ のもとで運動しているとす。この運動を表すニュートン方程式は $m\ddot{q} = m \frac{d^2}{dt^2} q = -\frac{\partial}{\partial q} V = F$ であり、運動エネルギーを $T(\dot{q}) = \frac{m}{2} \dot{q}^2$ とすると全エネルギー $E = T(\dot{q}) + V(q)$ が保存する。ここでラグランジアン $L(q, \dot{q}) = T(\dot{q}) - V(q)$ を導入すると、作用は

$$S[q] = \int_{t_1}^{t_2} dt L(q(t), \dot{q}(t))$$

と定義される。二つの時刻 t_1 と t_2 における q の値 $q(t_1), q(t_2)$ を固定したとき、 $t_1 \leq t \leq t_2$ における系の運動の経路 $q(t)$ は作用 $S[q]$ が極値をとるように決まる。これが最小作用の原理であり、 $S[q]$ が極値をとる条件からオイラー・ラグランジュ方程式が導かれる。最小作用の原理と呼ばれてはいるが、オイラー・ラグランジュ方程式を導くには作用 $S[q]$ が極値を取りさえすればよく、最小となる必要はない。

3. 作用の極値

作用 $S[q]$ の極値が最小値になっているか調べるために、質量 m 、角振動数 ω の一次元調和振動子 $L = \frac{m}{2} \dot{q}^2 - \frac{m\omega^2}{2} q^2$ を考える。運動方程式の解を q_c とすると q_c から δq だけずれた経路 $q_c + \delta q$ の作用は調和振動子の場合 $S[q_c + \delta q] = S[q_c] + S[\delta q]$ となる。

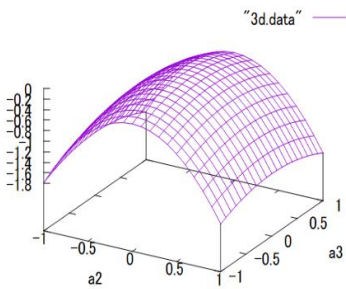
ここで $(t_1, t_2) = (T, 0)$ として、 δq のフーリエ展開

$$\delta q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{n\pi}{T}t\right)$$

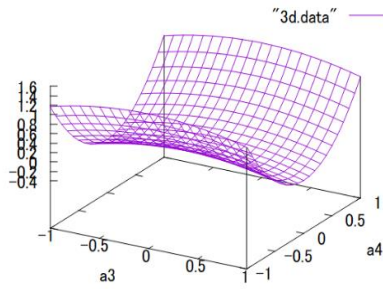
を $S[\delta q]$ に代入すると

$$S[\delta q] = \frac{m}{2} \int_0^T dt ((\delta \dot{q})^2 - \omega^2 (\delta q)^2) = \frac{mT}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{n\pi}{T}\right)^2 - \omega^2 \right] a_n^2$$

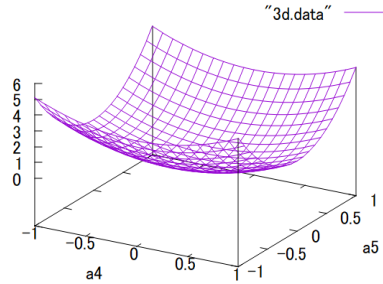
となる。これより $S[q_c + \delta q] = S[q_c] + S[\delta q]$ は $\delta q = 0$ において $n < \frac{\omega T}{\pi}$ の方向について最大値をとり、 $n > \frac{\omega T}{\pi}$ の方向について最小値をとることが分かる。 $\frac{\omega T}{\pi} > 1$ の場合は最大値をとる方向と最小値をとる方向が混在するが、 $\frac{\omega T}{\pi} < 1$ の場合は最大値をとる方向が存在しないため、 $\delta q = 0$ はあらゆる方向について最小となる。すなわち調和振動子の場合、「最小」作用の原理と言えるのは $\frac{\omega T}{\pi} < 1$ を満たすときである。具体例を見てみよう。 $m = \omega = 1$ とすると、 $T = 10$ のときの $S[\delta q]$ は $x-y$ 軸を (a_n, a_m) としてプロットすると次のようになる。



a_2, a_3 : ともに最大



a_3, a_4 : 鞍点



a_4, a_5 : ともに最小

この例では $\frac{\omega T}{\pi} = 3.18 > 1$ であるため、 $\delta q = 0$ は $n = 1, 2, 3$ の方向について最大、 $n = 4, 5, 6, \dots$

の方向について最小となり、 $S[q_c]$ は「最小」作用ではない。

同様の考察を行うと、一様な重力ポテンシャル下の運動 $L = \frac{m}{2} \dot{q}^2 - mgq$ の場合は無条件に $S[q_c]$ が最小作用となっていることが分かる。また調和振動子よりも高次のポテンシャルの場合は $S[q_c + \delta q]$ が δq の高次の項を含むため、極小/極大の判定のみならず、極小が最小かどうかの判定も容易ではなくなる。

参考文献

- [1] 畑浩之 「基幹講座 物理学 解析力学」東京図書 (2014).
- [2] 岡崎誠 「べんりな変分原理」共立出版 (1993).
- [3] 前野昌弘「最小作用の原理はどこからくるのか？」

[最小作用の原理はどこからくるか？ - 物理 Tips \(u-ryukyu.ac.jp\)](http://u-ryukyu.ac.jp)

ニューラルネットワークは物理現象をどのように『理解』するか

基礎物理学研究室

1924061 中村 優汰

指導教員 堀越 篤史

1. 緒言

ニューラルネットワークは動物の神経細胞（ニューロン）を模した形で構成される機械学習のモデルの一種であり、幅広い分野で応用されている。ニューラルネットワークを用いて物理現象について予測を行うことを考えてみよう。我々人間はデータから導かれた法則を用いて現象を理解し、予測を行う。一方、ニューラルネットワークもデータから学習して予測を行うが、その過程はブラックボックス化しており、どのような内部処理をしているか不明である。そこで本研究では惑星の軌道予測を例に、人間によるエネルギー保存則を用いた予測とニューラルネットワークによる予測を比較し、両者の違いを議論する。

2. ニューラルネットワークの仕組み

ニューラルネットワークは層構造になっており、入力層、中間層、出力層から成る（図1）。ネットワーク内では前の層のニューロンから受け取った情報 $\vec{x}$ に重み行列 W をかけ、バイアス $\vec{b}$ を足して活性化関数 f に入れたものを情報 $\vec{y} = f(W\vec{x} + \vec{b})$ として次のニューロンに伝えている（図2）。人工ニューロンの一つ一つのつながりは単純であるが、それぞれが W 、 $\vec{b}$ というパラメータを含むため、多数のニューロンが結合すると複雑な関数を近似することが可能になる。

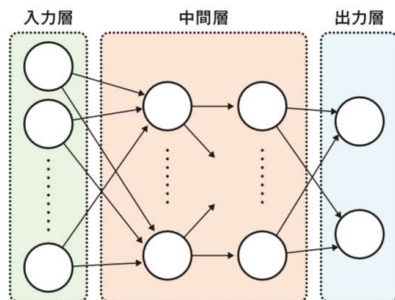


図1. ニューラルネットワーク[1]

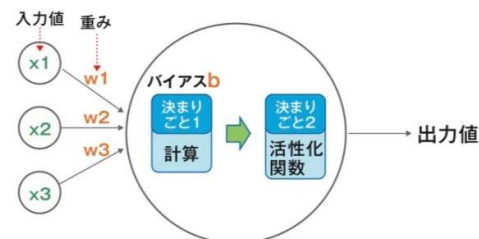


図2. ネットワークの1ステップ[1]

3. 惑星の軌道予測

太陽からの距離 r 、速さ v で運動する惑星を考える。我々はエネルギー保存則より、

$$v \geq \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

のとき惑星は太陽の周回軌道から外れることを知っている。ここで G は万有引力定数、 M は太陽の質量である。つまり初期位置 $\vec{r}(0)$ と初期速度 $\vec{v}(0)$ の2つが分かればどのよう

な軌道が判定することができる。このような判定をニューラルネットワークは行うことができるだろうか？入力データの与え方のパターンをいろいろ変えることにより、それを調べる。具体的には入力データとして位置 $\vec{r}$ 、速度 $\vec{v}$ のほかに加速度 $\vec{a}$ や加加速度 $\vec{\ddot{a}}$ を与えたり、速度の代わりに2つの時刻 $(0, \Delta t)$ における位置や速度を与えたりする。惑星が周回軌道から逸れるかどうかを2値分類問題として機械学習を行う。データの与え方は、 $x-y$ 平面における初期位置 $\vec{r}(0)$ と初期速度 $\vec{v}(0)$ を均等な振幅でランダムに生成し、これから初期加速度 $\vec{a}$ 、初期加加速度 $\vec{\ddot{a}}$ を求めた。また Δt 秒後の位置 $\vec{r}(\Delta t)$ と速度 $\vec{v}(\Delta t)$ を4次のルンゲ・クッタ法により計算した。これらを様々に組み合わせたものを入力データとして中間層が2つの4層ニューラルネットワークに学習させた。中間層の活性化関数にはRelu関数、出力層の活性化関数にはシグモイド関数を使用した[2]。入力データを適宜変更しながら様々なパターンの学習を行い、結果の精度を評価した。

4. 結果と考察

表 1. 惑星の軌道予測の結果 ($\Delta t = 0.0001$)

入力データ	精度	入力データ	精度
$\vec{r}(0), \vec{v}(0)$	0.983	$\vec{r}(0), \vec{r}(\Delta t)$	0.557
$\vec{r}(0), \vec{a}(0)$	0.542	$\vec{v}(0), \vec{v}(\Delta t)$	0.889
$\vec{r}(0), \vec{\ddot{a}}(0)$	0.618	$\vec{r}(0), \vec{r}(\Delta t) - \vec{r}(0)$ (位置の差)	0.989
$\vec{v}(0), \vec{a}(0)$	0.987	$\vec{v}(0), \vec{v}(\Delta t) - \vec{v}(0)$ (速度の差)	0.975
$\vec{v}(0), \vec{\ddot{a}}(0)$	0.885	$\vec{r}(0), (\vec{r}(\Delta t) - \vec{r}(0))/\Delta t$ (位置の差分)	0.989
$\vec{a}(0), \vec{\ddot{a}}(0)$	0.662	$\vec{r}(0), \vec{v}(0), \vec{a}(0)$	0.987
$\vec{r}(0)$	0.547	$\vec{r}(0), \vec{v}(0), \vec{a}(0), \vec{\ddot{a}}(0)$	0.989
$\vec{v}(0)$	0.894		

人間と同様、位置 $\vec{r}(0)$ と速度 $\vec{v}(0)$ を入力したときの精度は0.983と高い。またその速度の情報を、位置の差分 $(\vec{r}(\Delta t) - \vec{r}(0))/\Delta t$ や位置の差 $\vec{r}(\Delta t) - \vec{r}(0)$ に置き換えた場合も、ともに0.989と高精度であった。一方、位置 $\vec{r}(0)$ だけを入力したときは0.547と精度は低い、これは人間でも位置の情報だけでは軌道予測はできないので妥当な結果である。ただし、速度 $\vec{v}(0)$ のみを与えた場合は0.894と高精度となった。この位置の情報と速度の情報の非対称性は、エネルギーの関数形における $\vec{r}$ と $\vec{v}$ の非対称性に起因すると考えられる。

5. 参考文献

- [1] 立山秀利 「ディープラーニングA I 超入門」, 日経ソフトウェア (2020年11月号) .
- [2] 富谷昭夫 「これならわかる機械学習入門」, 講談社 (2021).

深層学習による三体問題の予測とそのカオス的振る舞いについて

基礎物理学研究室

1924034 中島 優人

指導教員 堀越 篤史

1. 諸言

三体問題とは互いに重力相互作用をする 3 つの物体がどのように時間発展していくかを考える問題である^[1]。この問題はニュートンの運動方程式を解こうと試みても、系の変数の数が 18 個であるのに対して運動の定数が 10 個しかないので解析的に解くことはできない。そのため常微分方程式の初期値問題として数値積分法を用いて運動方程式を解くことが一般的である。しかしある時刻での物体の位置を求める場合、数値積分法では時刻 0 から徐々に時間発展させて解を求めなくてはならないため、計算コストは大きくなってしまふ。

近年、運動方程式を数値積分法により解く代わりに、深層ニューラルネットワーク(DNN)を用いて物体の時間発展を予測する研究が行われている^[2]。物体の時間発展を学習した DNN は任意の時刻での物体の位置をピンポイントで予測することができる。本研究では数値積分法を用いて生成された三体問題の時間発展データを DNN に学習させて、その予測性能を検証する。特に三体問題においては系がカオス的に振る舞うことが知られているが、リアプノフ指数を計算することで DNN がカオス的性質を捉えられているか検証する。

2. 三体問題の条件設定と学習データの生成

三体問題の運動方程式は重力定数 G 、粒子の座標 $\mathbf{r}_i (i = 1, 2, 3)$ 、粒子の質量 m_i を用いて以下のように表される。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = - \sum_{j \neq i} G m_i m_j \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3}$$

今回は xy 平面に位置する初速度 0 の 3 つの等質量粒子の自由落下問題とすることで、運動を xy 平面に制限した。粒子 1 の初期位置を (1, 0) に固定し、粒子 2 の初期位置は原点を中心とした単位円内の $-0.5 < x \leq 0, 0 \leq y < 1$ の領域にランダムにとる。重心を原点とすることで粒子 3 の初期位置は自動的に定まる。

この常微分方程式の初期値問題を SciPy ライブラリを用いてルンゲ・クッタ法で解いた。粒子 2 の初期位置をランダムに生成し、時刻 $t = 0$ から $t = 4$ までの時系列データを 10^4 セット作成した。

3. 深層学習による予測

128 個のノードが全結合した 10 層の隠れ層からなる DNN を作成した。この DNN は粒子 2 の初期位置と時刻 t を入力すると、時刻 t における粒子 1 と粒子 2 の位置を出力する。

上記のデータセットで学習した DNN は、時刻 $t = 0$ から $t = 4$ の範囲での任意の時刻における粒子 1, 2 の位置をピンポイントに予測することができる(図 1). 重心を原点にしているため粒子 3 の位置は自動的に定まる.

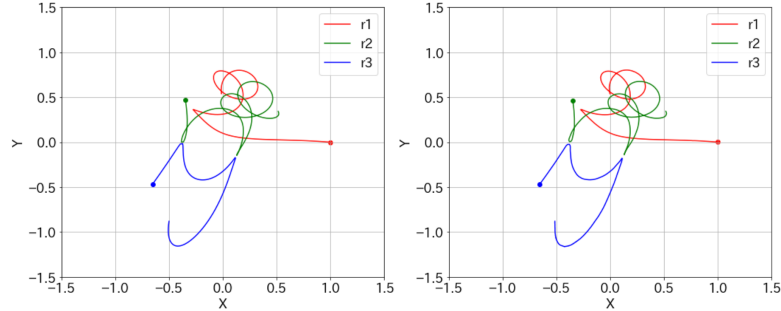


図 1: 左が SciPy の計算結果. 右が学習済み DNN による予測.

4. カオスの性質の検証

カオスの性質の視覚化のために、粒子 2 の初期位置を $(-0.3, 0.8)$ を中心とする半径 0.01 の円周上に均等に 1000 個生成し、SciPy と学習済み DNN を使用して粒子 2 の軌道を計算した(図 2). 時間が経つにつれて軌道間の距離が広がっていくカオスの振る舞いが確認できる.

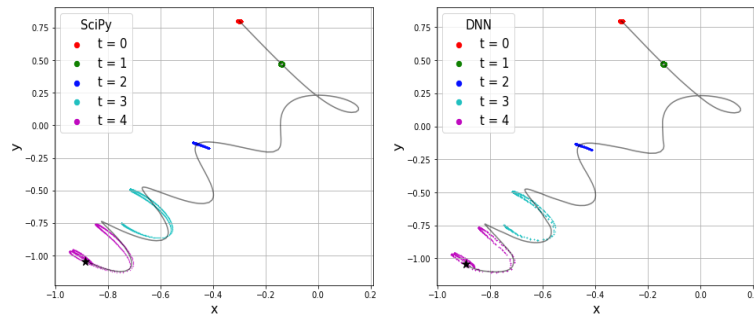


図 2: 各時刻における 1000 個の粒子 2 の位置. 黒の曲線は初期値 $(-0.3, 0.8)$ から出発した粒子 2 の軌道.

カオスの振る舞いを定量的に評価するため、リアプノフ指数を計算した。初期条件がそれぞれ $\mathbf{x}(0)$, $\mathbf{x}(0) + \delta(0)$ から出発した二つの軌道について、写像を n 回反復した後の軌道間の距離を $|\delta(n)| \approx |\delta(0)|e^{\lambda n}$ と表したときの λ がリアプノフ指数である。 $\lambda > 0$ ならば軌道が指数関数的に乖離していくカオスの状態、 $\lambda < 0$ ならば軌道が指数関数的に収束していく非カオスの状態である。 $(-0.3, 0.8)$ から x, y 方向にそれぞれ $\delta = 10^{-4}$ だけ変化させた場合のリアプノフ指数を計算したところ、SciPy による軌道では $\lambda = 1.67$, DNN の予測軌道では $\lambda = 1.27$ となった。リアプノフ指数が正であるため DNN でもカオスの性質を表現できることが確認できた。

5. 参考文献

- [1] 浅田秀樹 「三体問題」 講談社 (2021).
- [2] P. G. Breen, C. N. Foley, T. Boekholt and S. P. Zwart S P, "Newton versus the machine", Mon. Not. R. Astron. Soc. **494** (2020) 2465–2470.

モンテカルロ法による 2 次元イジングモデルの配位生成と ニューラルネットワークによる相転移温度の検出

基礎物理学研究室

1824009 大垣 遼太郎

指導教員 堀越 篤史

1. 緒言

2016 年 3 月 9 日、ディープマインド社が開発した人工知能(AI)である AlphaGo が、当時囲碁の世界ランカーである棋士イ・セドル九段を下した。囲碁はその複雑性から AI が人間に勝つには相当な時間が必要だと考えられていたが、それを AlphaGo が打ち破ったのだ。本研究ではそんな AI 技術の一種であるニューラルネットワークを 2 次元イジングモデルの相転移の解析に応用する。これはモンテカルロ法により生成されたスピン配位の画像データに対して、AI 技術でよく行われている画像判定法を応用するものである[1][2]。

2. 2 次元イジングモデル

磁石を温めると、ある温度 T_c で磁石の中のスピンの向きがバラバラになり、磁石としての性質を失う相転移が起こる。2 次元イジングモデルはこの相転移を調べるためのモデルであり、2 次元格子の上にスピン S_i が並び、各スピンは上向き(+1)と、下向き(-1)の 2 つの値を取る。格子サイズ $L \times L$ の 2 次元イジングモデルのエネルギーは、隣り合うスピン同士のカップリング J 、外部磁場 h を用いて次のように表される。

$$E[C] = -J \sum_{i=1}^{L^2} \sum_{j \in N(i)} S_i S_j - h \sum_{i=1}^{L^2} S_i.$$

$J > 0$ の場合は隣り合うスピンの方向が $\uparrow\uparrow$ や $\downarrow\downarrow$ のように揃った方がエネルギーが下がるので、低温ではスピンが揃った秩序相が実現し、磁石となる。イジングモデルのスピンの期待値(磁化 $m(\beta)$)は逆温度 $\beta = 1/(k_B T)$ (k_B はボルツマン定数、 T は温度)と分配関数 Z を用いて

$$m(\beta) = \frac{1}{Z} \sum_{C \in \{S\}} e^{-\beta E[C]}$$

と表され、秩序相なら $m(\beta) \neq 0$ 、無秩序相なら $m(\beta) = 0$ となる。 $m(\beta)$ の計算には全てのパターンのスピン配位 C が必要だが、それは膨大な数となり、実際の計算は困難である。そこで重要な配位のみを効率的に生成(サンプリング)するのがマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)である。MCMC のサンプリング回数を大きくするほど、 $m(\beta)$ の評価は厳密になっていく。今回は MCMC の 1 つである熱浴法を用いて格子サイズ 32×32 のスピン配位を生成した(図 1,2)。

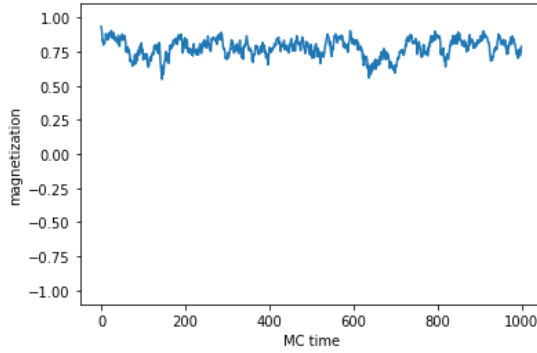


図 1: $\beta=0.45$ のときの磁化の履歴

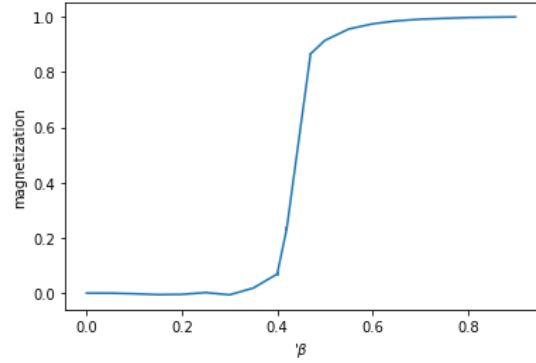


図 2: 各 β における磁化の平均値

3. ニューラルネットワークによる解析

MCMC により生成したスピン配位から $m(\beta)$ を計算すれば相の分類は出来るが、ここではニューラルネットワークにスピン配位の画像データを学習させて相の分離を行ってみる。まず、スピン配位のデータを相転移温度の厳密解 $\beta_c = 0.440686$ を用いて、 β_c よりも高いものと低いものに分けた。そのデータを訓練データと検証データにさらに分け、訓練データを隠れ層 1 層のニューラルネットワークに入力し、学習させた。活性化関数は隠れ層では Relu 関数、出力層では softmax 関数を使用した。

学習したネットワークに検証データを入力すると、ネットワークはそれが秩序相にあるか無秩序相にあるかを判定する。図 3 は、各 β の配位が秩序相と判定された割合(青色の点)と無秩序相と判定された割合(赤色の点)を表したものである。青色の曲線と赤色の曲線の交点が相転移温度 β_c^{NN} を与える。この図の β_c^{NN} は 0.443447 であり、厳密解とのズレは 0.4% であった。

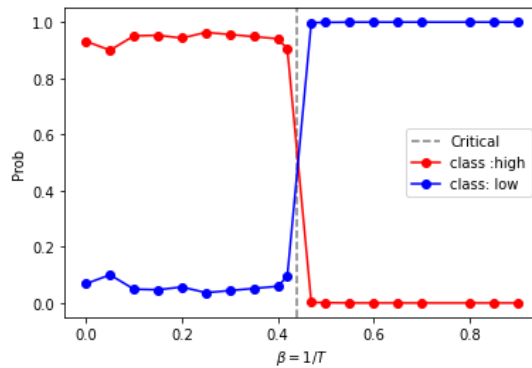


図 3: ニューラルネットワークによる相転移温度の検出過程

4. 参考文献

- [1] 富谷昭夫 「これならわかる機械学習入門」 講談社 (2021).
- [2] J.Garrasquilla and R.G.Melko, Nature Physics, **13** (2017) 431-434.

グローバーのアルゴリズムの量子コンピュータによる検証

基礎物理学研究室

1824033 竹内悠登

指導教員 堀越篤史

1. 緒言

量子コンピュータとは量子力学に基づいて動作するコンピュータである。量子コンピュータが古典コンピュータよりも優れていると期待される理由の一つに、データベース検索を高速に行えるというものがあり、その一つがグローバーのアルゴリズムである。これは 1996 年にグローバーによって提案された量子アルゴリズムであり、検索したい量子状態の確率振幅を増幅することで検索効率を上げることができる[1][2]。グローバーのアルゴリズムが提案された頃は量子コンピュータの実現はほぼ不可能と思われていたが、近年の量子技術の発展により、IBM をはじめとする企業によって実際に動作する量子コンピュータが開発され、クラウド上で無料で使用できるようになった。本研究では量子コンピュータの実機 (IBM-Q) を実際に動かして、グローバーのアルゴリズムの検証を行う[3]。

2. グローバーのアルゴリズム

量子コンピュータでは量子状態（量子ビット）に量子ゲートが作用する形で計算が行われ、量子アルゴリズムは様々な量子ゲートを組み合わせた量子回路で表現される。グローバーのアルゴリズムは量子状態を検索するアルゴリズムであり、どの量子状態が欲しいのかをリクエストする「オラクル」と、その量子状態の確率振幅を増幅する「拡散」からなる。

「オラクル」では所望の量子状態の振幅を反転させることで状態に目印をつける。例えば、2 量子ビットからなる $2^2 = 4$ 個の状態 $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$ があるとき、 $|11\rangle$ に目印をつけたい場合はこれに制御 Z ゲートを作用させるだけで良いし、 $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle$ に目印をつけたい場合は、それぞれを $|11\rangle$ に変換してから制御 Z ゲートを作用させたのち、元の量子状態に戻せば良い。図 1 は $|11\rangle$ に目印をつける量子回路であり、初期状態 $|00\rangle$ にアダマールゲート H を作用させることで重ね合わせ状態 $|\psi\rangle = \frac{1}{2}|00\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}|11\rangle$ をつくり、それに制御 Z ゲートを作用させて $|\psi\rangle = \frac{1}{2}|00\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle - \frac{1}{2}|11\rangle$ をつくっている。

一方、「拡散」では目印のついた（振幅が反転した）量子状態にいくつかの量子ゲートを作用させることでその振幅を増加させる。図 2 は $|11\rangle$ の振幅を増幅する量子回路であり、回路が出力する状態は $|\psi\rangle = -|11\rangle$ となっており、欲しかった状態のみが得られる。任意の数の量子ビットに対して、同様のアルゴリズムを作ることができ、計算を繰り返すほど増幅率は上がっていく。

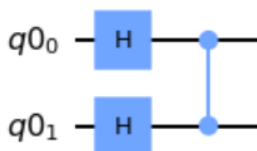


図 1. 重ね合わせ状態の生成と「オラクル」

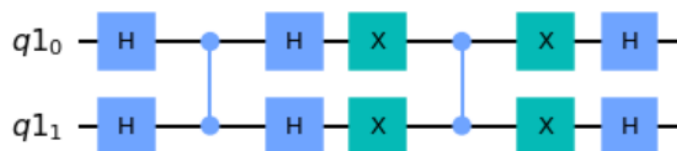


図 2. 図 1 の量子回路に「拡散」を足したもの

3. 量子コンピュータによる検証

グローバーのアルゴリズムを実際に量子コンピュータを動かして検証してみよう。検証には IBM 社の提供する「シミュレータ」と量子コンピュータの実機 IBM-Q を用いる。シミュレータとは、量子コンピュータの動作を古典コンピュータによりシミュレートするもので、理想的な計算が実行できる。ここでは 5 量子ビットからなる $2^5 = 32$ の状態のなかから $|00111\rangle$ を検索する場合を考える。まず、シミュレータで計算を 3 回繰り返した場合、測定結果は図 3 のようになり、状態 $|00111\rangle$ が正しく増幅されていることが分かる。一方、同じ計算を実機で実行すると結果は図 4 のようになり、理論通りの増幅ができていないことが分かる。これは、量子コンピュータの実機では量子ビットの制御にエラーが存在するため、量子ビットが増えたり量子ゲートが増えたりするほどエラーが蓄積し、重ね合わせ状態が壊れるデコヒーレンスなどにより本来のアルゴリズムが実行できなくなってしまうからである。

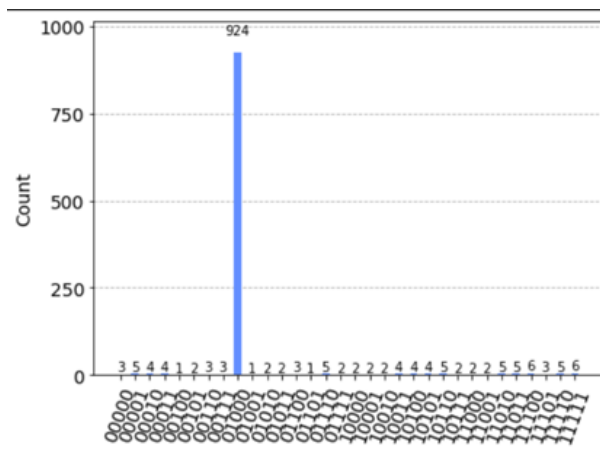


図 3. 測定結果（シミュレータ）

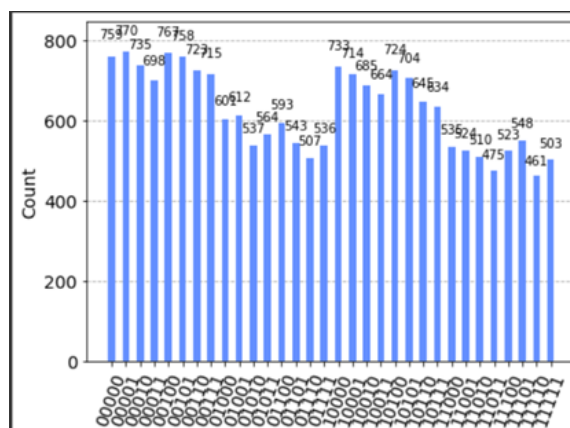


図 4. 測定結果（実機）

4. まとめ

2016 年に IBM が初めて量子コンピュータの実機をクラウドで一般公開してから、2023 年現在では数多くの企業が実機を公開している。今回のグローバーのアルゴリズムの検証で見たようにエラーの問題は深刻であるが、現在、誤り耐性型汎用量子コンピュータという、演算途中に発生するエラーを検出し訂正する機能を持った量子コンピュータの開発が進められている。しかし、それが実現するには相当の時間を要すると思われ、今後のさらなる技術の発展が期待される。

5. 参考文献

- [1] Bernhardt 「みんなの量子コンピュータ」 翔泳社 (2020).
- [2] Bennett C.H., Bernstein E., Brassard G., Vazirani U., The strengths and weaknesses of quantum computation., SIAM Journal on Computing, **26** (1997) 1510-1523.
- [3] 【誰でも量子コンピュータ！量子アルゴリズム編】 Quantum Computing for You
<https://altema.is.tohoku.ac.jp/QC4U/>