

2023年度 (第12回)

自然科学科 卒業論文発表会

要旨集

日時： 令和 6年2月6日(火)，7日(水)
会場： 〈セッションA〉 61A 教室
〈セッションB〉 61B 教室
2月7日(水)は、 61A 教室のみ

主催： 東京都市大学 理工学部 自然科学科

2月6日(火) セッションA

〈生物多様性研究室〉(座長：福田達哉 教授)

- 10:30 在原 秀真 (2017004)
異なる環境における資源分配様式からみたツワブキの成長戦略
- 10:45 伊澤 颯翔 (2017006)
営巣性アリジゴクの体サイズが巣形成に及ぼす影響
- 11:00 黒須 愁治 (2017024)
アカバナ科マツヨイグサ属の茎における力学的特性の種間比較
- 11:15 黒滝 魁斗 (2017025)
ハマナタマメの果実は種子単体よりも海に到達しやすいのか?
- 11:30 下澤 佑介 (2017033)
葉序配列の極座標変換による重心解析における 3/8 葉序植物の規則性
- 11:45 壺内 裕貴 (2017043)
風ストレスの有無によるコセンダングサ果実への影響

(12:00 – 13:30 休憩 (昼食))

〈分析化学研究室 (座長：吉田真史 教授)〉

- 13:30 長尾 朋樹 (2017044)
GC-MS を用いたマボヤの臭気成分の分析
- 13:45 立川 葵 (2017041)
捕集剤と GC-MS を用いた米飯の香気成分の分析
- 14:00 大橋美里 (2017013)
超臨界抽出と GC-MS を用いたアシタバの成分分析
- 14:15 若林 小暖 (2017060)
超臨界抽出と GC-MS を用いたウライゲットウの成分分析
- 14:30 赤塚 凜太郎 (2017001)
超臨界抽出と GC MS を用いたクマタケランとアオノクマタケランの成分分析
- 15:45 坂口 佑冴 (2017029)
等々力溪谷を流れる谷沢川の水質調査

(15:00 – 15:15 休憩)

〈生物地球化学研究室〉(座長：田中健太郎 准教授)

- 15:15 山田 康陽 (2017057)
スジアラの耳石の酸素同位体比を使った経験水温の特定
- 15:30 勝呂 逸希 (2017034)
二枚貝を用いた窒素負荷モニタリング方法の検証

〈古生物研究室〉(座長：中島保寿 准教授)

- 15:45 朝倉 あとり (2017003)
鳥類の含気性脊椎骨における含気率の制約要因
- 16:00 川上 千明 (2017021)
銚子層群犬吠埼層で産出する Macaronichnus の研究
- 16:15 中島 風雅 (2017046)
皮骨の厚みから復元する板皮類の重心制御の仕組み

2月6日(火) セッションB

〈理論物理研究室〉(座長:長田剛 教授)

- 10:30 原 大悟 (2017051)
非圧縮性流体における跳水と圧縮性流体における衝撃波の類似性
- 10:45 織間 了 (2017014)
非圧縮性完全流体における非線形方程式と KdV 方程式のソリトン解
- 11:05 上谷 朋樹 (2017020)
原子核衝突における π, K 生成比を用いた化学凍結温度の評価
- 11:15 宇田 茜音 (2017011)
膨張宇宙の基準モデルにおける密度パラメーターの時間的変遷
- 11:30 益子 瑛任 (2017054)
ピリアル定理を用いたかみのけ座銀河団の質量評価とガス温度分布
- 11:45 河田 優奈 (2017022)
標準降着円盤のガス温度と表面密度の動径距離依存性および輻射圧の効果

(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 藪田 隼汰 (2017037)
放射化法によるキセノンビームの核融合生成物の核種同定
- 13:45 影山 璃音 (2017016)
理研 BigRIPS における超高速プラスチックシンチレータの時間分解能の研究

〈宇宙科学研究室〉(座長:門多顕司 講師)

- 14:00 高橋 萌 (2017040)
中性子星の限界質量の分析

〈天文学研究室〉(座長:津村耕司 准教授)

- 14:15 劉 燁琦 (2017059)
小質量星の形成

(14:30 – 14:45 休憩)

〈微分幾何学研究室〉(座長:服部 新准教授)

- 14:45 早船 雛妃 (2017050)
素数 p を法とした \sin, \cos の加法定理について

〈位相幾何学研究室〉(座長:中井洋史 准教授)

- 15:00 小玉 駿 (2017026)
素数の部分列に関する Bonse 型の不等式の研究
- 15:15 金子 優人 (2017019)
Bonse の定理の拡張に関する研究

〈微分幾何学研究室〉(座長:橋本義武 教授)

- 15:30 本田 有希恵 (2017053)
3 択共有地ゲーム
- 15:45 秋山 真緒 (2017002)
Catenoid 上の測地線
- 16:00 藤田 翔一 (2017052)
飛行する物体が滑らかに曲がることのできる曲線
- 16:15 瀬戸 大暉 (2017036)
正四面体を用いて面積を反映した世界地図を作成する方法

2月7日(水)

〈地球科学研究室〉(座長：萩谷宏 准教授)

- 10:00 溝脇 空楓 (1924064)
実験から見る竜山石の色相について
- 10:15 井出 新 (2017008)
神奈川県鎌倉市七里ヶ浜地域から産出するパイライトノジュールについて
- 10:30 金子 大輝 (2017018)
千葉県北部第四紀更新統の堆積物組成変化
- 10:45 鈴木 舞生 (2017035)
宮島層堆積物に関する高分解能全岩化学組成分析
- 11:00 高橋 ほのか (2017039)
湘南海岸および三浦半島における海岸砂中の Fe-Ti 鉱物の起源を探る
- 11:15 野本 凜 (2017049)
伊豆大島 S2 部層内 c, d ユニット内に含まれる岩片の全岩化学組成
- 11:30 後藤有輝 (2017027)
未定

(11:45 – 13:30 休憩 (昼食))

〈高分子科学研究室〉(座長：高木晋作 講師)

- 13:30 秋場 日菜 (1824001)
界面活性剤水溶液の動的表面張力評価
- 13:45 井下田 陸歩 (2017005)
分子構造によって色変化する指示薬とシクロデキストリンの包接によって起きる変化に関する研究
- 14:00 石川 佳奈 (2017007)
ハイブリッドゲルの強度とイオン結合の関係について
- 14:15 白井 千尋 (2017010)
多孔質構造を持つアクリルアミド/メタクリル酸ブチル共重合ゲルの脱水特性
- 14:30 川戸 悪渚 (2017023)
カゼインを乳化剤とするエマルジョンに油の種類が与える影響
- 14:45 小林 里桜 (2017028)
ラポナイトによるピッカリングエマルジョンの安定性
- 15:00 柳田 晴 (2017056)
植物油とゲル化剤によるオレオゲルの物性およびその安定性の評価

(15:15 – 15:30 休憩)

〈ソフトマテリアル研究室〉(座長：飯島正徳 教授)

- 15:30 島田 丈瑠 (2017032)
チョコレート(V型結晶制御(テンパリング))における攪拌の効果
- 15:45 佐藤 香雅 (2017031)
DCSによるタピオカ澱粉の糊化における水の状態変化
- 16:00 渡辺 杏実 (2017061)
界面活性剤のクレンジングにおけるオレイン酸モデル汚れの検討
- 16:15 王 化昕 (2017012)
口紅に応用されるオルガノゲルのカードハウス構造
- 16:30 野田 哲伸 (2017048)
DSCによる毛髪熱測定
- 16:45 角田 宗途 (2017015)
加熱の繰り返しによるポリエチレンテレフタラートの劣化の評価

〈化学物理研究室〉（座長：須藤誠一 講師）

17:00 遊佐 史大 (2017058)

誘電測定によるコンクリート中の水の状態評価と硬化進行の推定

異なる環境における資源分配様式からみたツワブキの成長戦略

生物多様性研究室

2017004 在原秀真

指導教員：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ために、環境に応じて形態を変化させることが知られている。例えば、キク科コセンダングサ(*Bidens pilosa* L.)の場合は、強風による機械的ストレスによって葉の面積の縮小化や茎の短小化といった形態的な変化だけでなく、根への資源投資割合の増加といった資源分配戦略の変化も報告されている^[1]。

キク科ツワブキ(*Farfugium japonicum* (L.) Kitam.)は、風速が高い地域に生育する個体ほど葉身を小さく、さらには葉柄を短縮化させ、力学的物性を変えずに形態的变化によって風を回避していることが報告されている^[2]。このような形態変化には、前述のコセンダングサの結果を考慮すると、風速の低い地域に比べ資源投資傾向が強風に耐え、回避するために地上部の形態を縮小させた分、根へ投資しているのではないのかといった疑問が生じる。そこで、本研究では内陸地と比較的風の強い海岸地のツワブキの形態および資源分配率を調べ、風がツワブキの生育戦略に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

本研究では海岸地から離れた内陸地である東京都多摩市と世田谷区に生育している集団から 31 個体 (図 1a)、そして海岸地である神奈川県横須賀市と千葉県安房郡に生育している集団から 23 個体採集した (図 1b)。それぞれの葉面積、葉柄長、葉柄の直径、花茎長、花茎の直径、葉の枚数の計測を行い、また葉、根茎、根、花に分けて絶乾重量の測定後、各器官の資源分配率の解析および比較を行った。

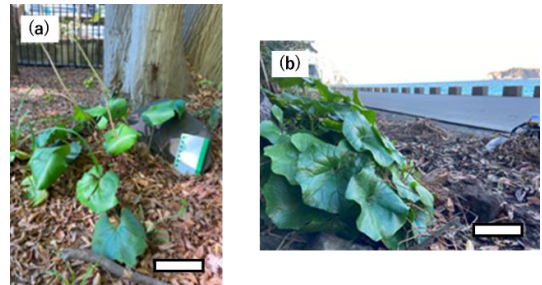


図 1. 本研究で用いたツワブキ。(A)東京都世田谷区 (内陸地), bar=15cm; (B)千葉県安房郡 (海岸地), bar=15cm.

3. 結果

形態学的計測の結果、葉面積は海岸地の方が内陸地よりも有意に小さくなり、これまでの研究結果を支持した。葉柄長と花茎長共に海岸地の方が内陸地よりも有意に短くなった。葉柄と花茎の直径には、両環境間で有意差は認められなかった。このことから、海岸地のツワブキの地上部は、内陸地に比べ基部は太いまま短小化した花茎や葉柄を形成している (表 1)。

個体の総重量に対して付ける葉の枚数は、海岸地の方が内陸地よりも多い傾向を示した (図 2)。個体の総重量に対して伸ばす葉柄の積算には、内陸地と海岸地で差はみられなかった (図 3)。葉柄長と葉面積の相関関係は内陸地と海岸地で同じ傾向を示した (図 4)。これらの結果から、海岸地のツワブキの地上部は、縮小化した葉や短縮化した葉柄の代わりに葉の枚数を増やすことで、内陸地と海岸地共に総葉面積をほぼ同じにするような形態をとっていることが明らかとなった。

各器官の絶乾重量から地上部 (葉、花) と地下部 (根茎、根) の重量を算出した結果、地上部と地下部の比率 (地上部[g]/地下部[g]) に有意差は認められなかった (表 1)。このことから、ツワブキは内陸地と海岸地共に各器官への資源投資割合が同じであることが示された。

表 1. 各計測項目の比較 (平均値±標準誤差).

計測項目	内陸	海岸	
葉面積 [cm ²]	205.5±9.74	174.3±11.6	*
葉柄長 [mm]	281.2±7.08	245.7±7.40	*
葉柄の直径 [mm]	6.12±0.13	6.34±0.17	n.s
花茎長 [mm]	571.1±17.7	419.1±18.2	*
花茎の直径 [mm]	7.72±0.24	8.00±0.49	n.s
地上部[g]/地下部[g]	1.47±0.26	0.58±0.12	n.s

* :t検定(p<0.05)

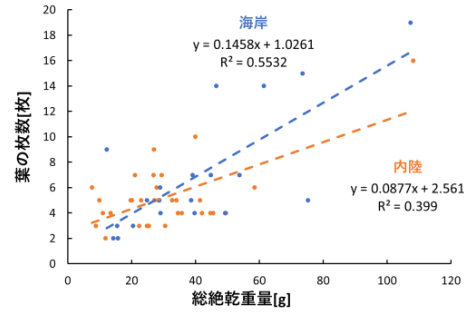


図 2. 総絶乾重量と葉の枚数の関係。

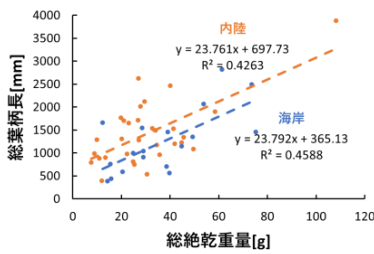


図 3. 総絶乾重量と総葉柄長の関係。

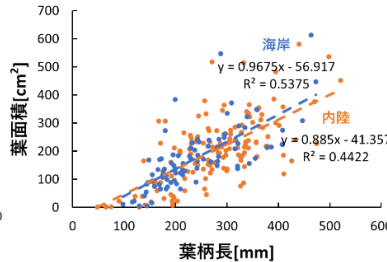


図 4. 葉柄長と葉面積の関係。

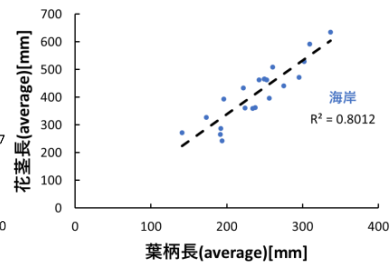


図 5. 葉柄長と花茎長の関係。

4. 考察

比較的風の強い海岸地において地上部が折損してしまうリスクがあるため、海岸地のツブキは、内陸地と比べて地上部のサイズを小さくしたことが示された。しかし光合成において重要な器官である葉を小さくすることは、そのまま個体の成長に大きな影響を与える。本研究では海岸地のツブキは、内陸地と異なり葉を多くつける傾向が示された。これは、海岸地の葉面積の減少を葉数によって補填していることを示し、結果的に総葉面積を補償していることが示され、このような戦略が結果的に風ストレスの回避に繋がり、強風環境下においても生育可能にさせたと考えられる。また地上部の機械的ストレスが地下部の発達を促進させることが知られているものの^[1]、このような海岸地における葉の戦略がストレス軽減に繋がり、地下部の過剰な発達も抑制することができたと考えられる。

本研究では海岸地において花茎も葉柄と同様に短縮化が認められ、花茎長と葉柄長に相関が認められた(図 5)。このことは風ストレスに対して葉だけではなく花茎も同様に短縮化することにより、ストレスを軽減させている可能性がある。しかしツブキの場合、常緑であるために葉は一年中展開しているものの、花茎は晩秋から冬にかけて展開するためにストレスにさらされる期間に大きな差が認められるが、花茎は葉と同様の変化を示している。ツブキの花茎には多くの花が付いており、花茎の折損はそのまま適応度の低下に繋がる。そのために花茎の折損回避により適応度を維持するため花茎は過剰なまでのストレス回避戦略を示したのかもしれない。

5. 引用文献

[1] 小林渚咲(2023) 外来種コセンダングサの風ストレス変化に伴う比較形態学的及び生態学的研究. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

[2] Shiba M., Mizuno T. and Fukuda T.(2023). Effect of strong wind on laminae and petioles of *Farfugium japonicum* (L.) Kitam. var. *japonicum* (Asteraceae). *Frontiers in Plant Science* 14:1182266.

営巣性アリジゴクの体サイズが巣形成に及ぼす影響

生物多様性研究室
2017006 伊澤颯翔
指導教員：福田達哉

1. 緒言

ウスバカゲロウ科昆虫のアリジゴクは営巣性であり^[1]、土壌に逆楕円錐形状の巣を形成して(図 1a)、その中に落ちてくる獲物を捕食して成長する。そのうちの 1 種であるウスバカゲロウ (*Hagenomyia micans*) は、羽化して成虫になるまでの約 3 年間で、一時的に土壌中で幼虫として生活する。その巣穴には、アリジゴクが図 1b のように潜んでおり^[2]、穴の大きさにはバラツキがあるものの、穴の大きさとアリジゴクの体サイズの関係は不明であった。アリジゴクの体サイズは年齢を重ねるほど増加していくため(図 2)、穴のサイズと体サイズの関係は、そのまま穴のサイズと年齢の関係として考えることができる。そこで本研究では穴のサイズと体サイズおよび年齢の関係を明らかにすることにより、体サイズが巣の形成に及ぼす影響について考察することを目的として研究を行った。

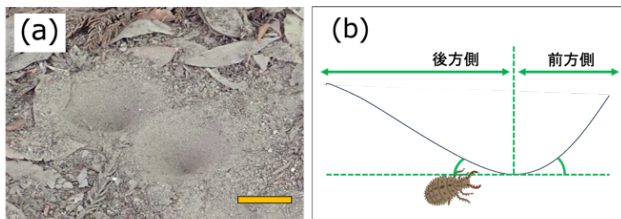


図 1. (a) アリジゴクの巣, bar=20mm ;
(b) 巣の前方側と後方側の距離と傾斜角.

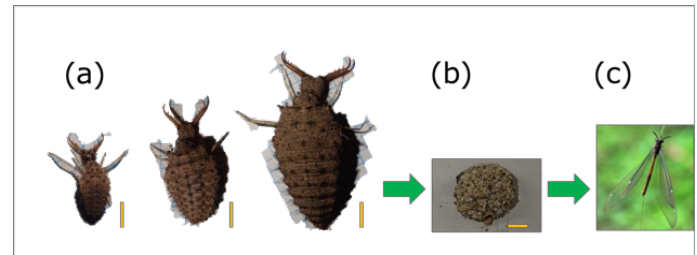


図 2. アリジゴクの (a) 1～3 齢ごとの体サイズ, bar=2mm ;
(b) サナギ, bar=5mm ; (c) 成虫のウスバカゲロウ.

2. 方法

年齢ごとに 30 個体ずつ、アリジゴクの巣の形状解析と、形態計測を行った。巣を正確に測定するため、先行研究に習って^[3]、巣の 3 次元モデル化を行った。3 次元モデル化には、Autodesk 社の ReCap Photo を用いた。巣を様々なアングルから約 60 枚撮影し、それを ReCap Photo にアップロードし、コンピュータ解析をすることにより、生成された 3 次元モデルを用いて、巣の直径や斜面長、深さ、体積などを測定した。さらに、その巣を形成したアリジゴクの形態計測を行った。

体サイズの近いアリジゴクを 5 個体ずつ用いて、巣の形成過程をビデオカメラで撮影した。撮影した動画から、巣を掘り進める方向、周回数や移動距離、1 回の動きでつける角度などを解析した。また、それを年齢ごとに比較し、形成の仕方を調べた。

3. 結果

アリジゴクの年齢と体サイズの関係から、年齢の増加とともに体サイズが有意に増加することが示された(図 1)。また、逆楕円錐形の巣の地表面における周長は体サイズや歩数との相関が認められた(図 2, 3)。また体サイズと脚長(前, 中, 後)のそれぞれとも相関が認められた(図 4)。さらに逆楕円錐形の高さ(巣の深さ)も体サイズと相関が認められ(図 5)、巣の体積が体サイズと相関することが明らかとなった(図 6)。しかし、巣の断面角度には体サイズとの相関が認められなかった(図 7)。

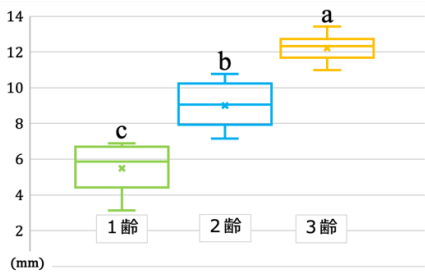


図1. 年齢と体サイズの比較 ($p < 0.05$).
×印は平均値プロットを示す。

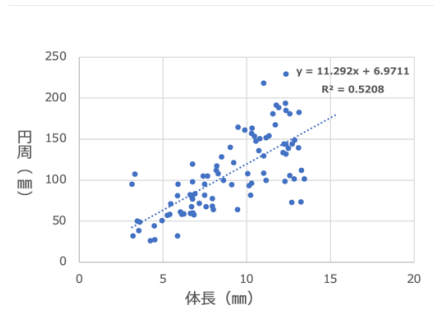


図2. 周長と体サイズの関係。

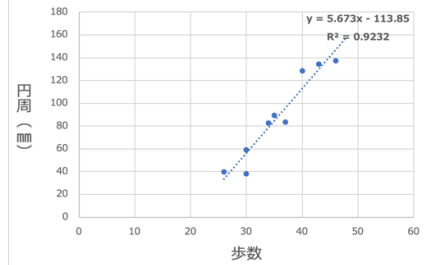


図3. 周長と歩数の関係。

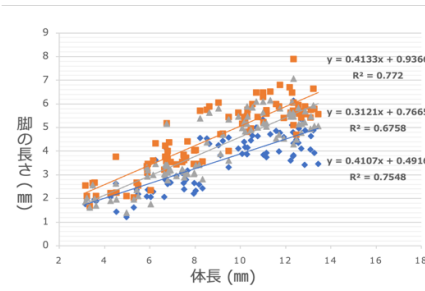


図4. 脚の長さ と体サイズの関係。
◆は前脚, ▲は中脚, ■は後脚を示す。

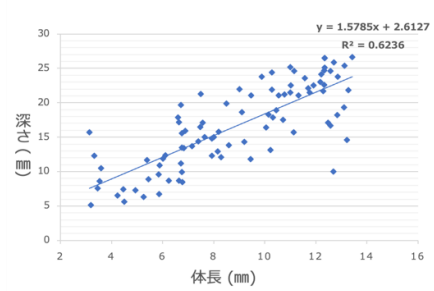


図5. 深さと体サイズの関係。

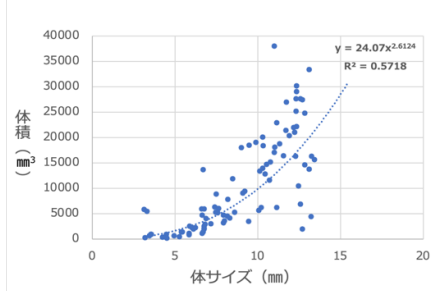


図6. 体積と体サイズの関係。

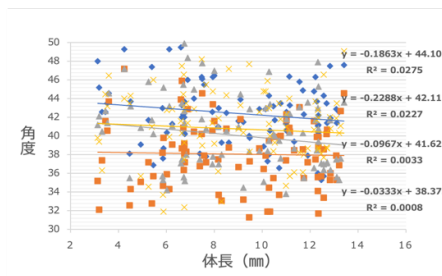


図7. 巣の断面角度と体サイズの関係。
◆は前方, ■は後方, ▲は左方, ☆は右方を示す。

4. 考察

アリジゴクの地表面周長が体サイズと相関するため、罌としての地表面の面積は指数関数的に大きくなり、そこに落ちる土壌動物の確率も、面積増加とともに上昇すると考えられる。また罌としての深さも体サイズとともに大きくなるために、比較的大きな土壌動物が落下した場合においても、体サイズの大きいアリジゴクにとっては報酬となる可能性が示唆された。しかし、巣の断面角度は体サイズとの相関が認められなかったことから、アリジゴクの巣のサイズの増大化が、必ずしも相同的な形状で大きくなっていないことを示した。その背景は、アリジゴクが巣を形成後に砂内に潜り身を隠す際に、掘った砂の影響で上部が崩れ、その修復の程度の違いが断面角度に反映したと考えられる。しかし深さは体サイズと相同するため、当初の掘った深さに落下してきた砂を取り除き、その砂の斜面への付着が断面角度に現れるものの、体サイズに準じた深さは守られていると考えられる。

6. 参考文献

- [1] 松良俊明. (1987). 日本産巣穴形成型アリジゴクの種名. 昆虫, 55(3), 543-548.
- [2] Lucas, J. R. (1989). The structure and function of antlion pits: slope asymmetry and predator-prey interactions. *Animal Behaviour*, 38(2), 318-330.
- [3] Devetak, D., Podlesnik, J., Scharf, I., & Klenovšek, T. (2020). Fine sand particles enable antlions to build pitfall traps with advanced three-dimensional geometry. *Journal of Experimental Biology*, 223(15), jeb224626.

アカバナ科マツヨイグサ属の茎における力学的特性の種間比較

生物多様性研究室

2017024 黒須愁治

指導教員：福田達哉

1. 緒言

植物は各環境特有のストレスを受け、例えば溪流沿いでは増水時に水流のストレスを受けるため葉脚角度の減少、小羽片の幅の減少が報告されている^[1]。また海岸地では、強風ストレスを回避するために植物体の小型化が生じるなどといった、形態学的変化が報告されている^[2]。海岸地や河川沿いに生育するアカバナ科マツヨイグサ属コマツヨイグサ (*Oenothera laciniata* Hill) は、近縁種の直立茎を持つメマツヨイグサ (*O. biennis* L) とは異なり地面を這う様に茎を成長させる。このコマツヨイグサは、海岸地や河川沿いにおける風のストレスを軽減させるために地面に平行に伸びる茎の形態を獲得したと考えられる。両種は外来種であるものの系統的に近縁であるために、両種間の雑種を形成することが知られており、これらの力学的特性を明らかにすることは、外来種の国内環境への適応様式を示すことができるだけでなく、雑種のニッチを考える上でも重要である。そこで本研究ではこの2種の茎の成長様式の違いを力学的特性とそれを可能にする形態学的背景を明らかにすることを目的として実験を行った。

2. 実験方法

本研究ではメマツヨイグサ、コマツヨイグサを研究対象とした(図1)。

力学的解析に関しては乾燥状態、生状態の茎において3点曲げ試験で曲げ弾性率、曲げ剛性の測定を行った。また、ねじれ振り子試験を行い、茎のせん断弾性率、ねじり剛性、ねじり曲げ比の測定を行った。さらに、形態学的解析に関しては茎の絶乾重量とその生状態の体積から単位体積当たりの乾燥重の測定を行った。

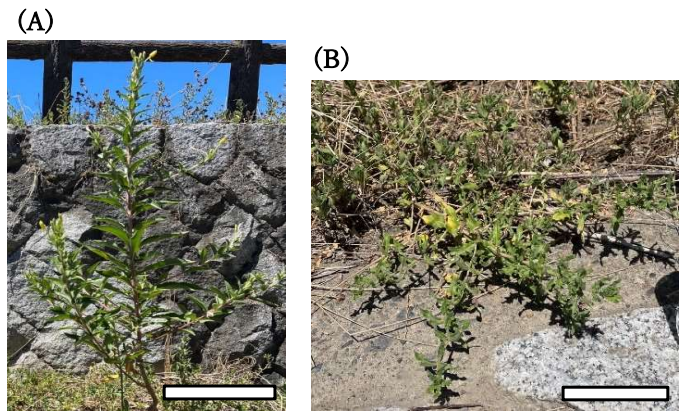


図1.(A)直立茎を持つメマツヨイグサ.

(B)匍匐性のコマツヨイグサ. Bar=10cm.

3. 結果

曲げ弾性率は生状態と乾燥状態ではメマツヨイグサが有意に高く、またねじり曲げ比はコマツヨイグサが有意に高かった(表1)。生状態の曲げ剛性と茎の直径の関係から、茎の直径が大きくなるほどメマツヨイグサの曲げ剛性が高くなることが分かった(図2)。同様に乾燥状態の曲げ剛性とねじり剛性もグラフを作成した結果メマツヨイグサが茎の直径が大きくなるほど曲げ剛性、ねじり剛性が高くなることが分かった(図3,4)。また、単位体積当たりの乾燥重の比較からメマツヨイグサの方が有意に重いことが明らかとなった(図5)。

表1. 各計測項目の比較.

計測項目	メマツヨイグサ	コマツヨイグサ	
生状態での曲げ弾性率 E_{fresh} [GPa]	1.22 ± 0.095	0.61 ± 0.047	*
乾燥状態での曲げ弾性率 E_{dry} [GPa]	1.73 ± 0.058	1.37 ± 0.081	*
せん断弾性率 G_{fresh} [GPa]	0.51 ± 0.035	0.48 ± 0.11	n.s
ねじり曲げ比 EI/GJ [無次元量]	0.21 ± 0.028	0.50 ± 0.062	*
単位体積当たりの乾燥重 [$g/mm^3 \times 10^6$]	384 ± 3.57	350 ± 6.38	*

*:t検定($p < 0.05$)

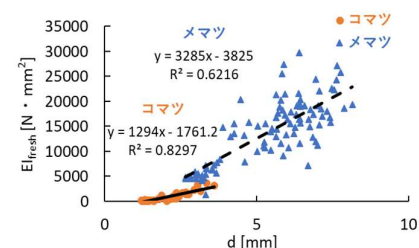


図2. 茎の生状態の曲げ剛性と直径の散布図.

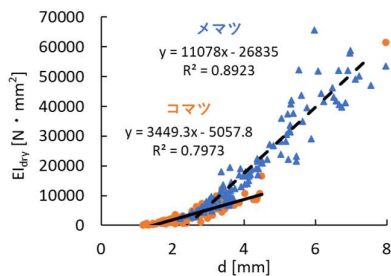


図 3. 茎の乾燥状態の曲げ剛性と直径の散布図.

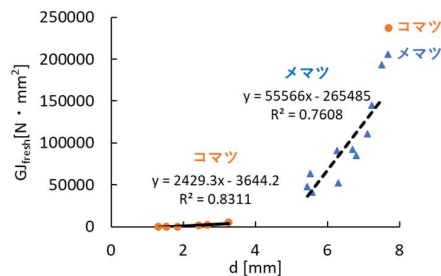


図 4. 茎のねじり剛性と直径の散布図.

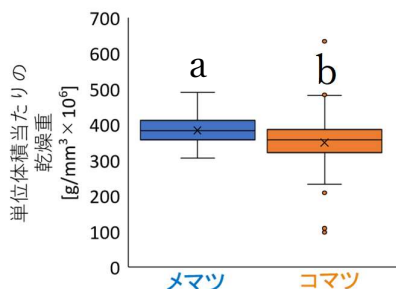


図 5. 単位体積当たりの乾燥重の比較.

異なるアルファベットは Tukey-Kramer 法により有意に異なることを示す($p < 0.05$).

4. 考察

単位体積当たりの乾燥重の比較から、メマツヨイグサの方が重いことが示されたために、単位体積当たりの細胞壁量はメマツヨイグサの方が多く、このことから細胞サイズが小さくなっていることが示唆された。この結果は、同じ力に対してメマツヨイグサの方が多くの細胞壁で支えていることを示しており、そのことがメマツヨイグサの曲げ弾性率の高さに反映したと考えられる。Vogel(1992)は、ねじり曲げの比が高いと曲げよりもねじりが比較的起こりやすく、また低いとその逆であることを報告しており、本研究において、コマツヨイグサのねじり曲げ比が有意に高かったことから、メマツヨイグサに比べてコマツヨイグサは相対的にねじれやすいことを示す。これらの結果からコマツヨイグサの茎はねじりやすく、葉の軸を変え柔軟性を持たせることで風ストレスを軽減させていることが示唆された。一方、メマツヨイグサでは茎が曲がりやすいために、風に対して茎を曲げ、風ストレスを回避していると考えられる。茎の太さとの関係に関しては曲げ剛性とねじり剛性はどちらも茎が太くなるほどメマツヨイグサのほうが大きくなることが明らかとなった。メマツヨイグサは成長とともに主軸から様々な高さで側枝を出すのに対し、コマツヨイグサは基部にて分枝する特徴があり、このことはメマツヨイグサの主軸の成長が顕著であることを示しているのに対し、コマツヨイグサは主軸や側枝の区別なくどの枝も同様に成長し、かつ太くすることなく新たな枝を基部から発生させる。このように茎を太らせるメマツヨイグサと茎を太らせないコマツヨイグサの成長戦略が、曲がりやすくねじれにくい茎を早く形成して風に対して耐性を獲得するメマツヨイグサと、常に一定の曲がりやすさとねじれやすさを維持して風を回避するコマツヨイグサの戦略として考えられ、その戦略が直立茎のメマツヨイグサと匍匐性のコマツヨイグサに反映されたと考えられる。

5. 引用文献

- [1] Imaichi R. and Kato M. (1993) Comparative leaf morphology of young sporophytes of rheophytic *Osmunda lancea* and dryland *O. japonica*. *Journal of Plant Research*, 106:37-45.
- [2] Shiba M., Mizuno T. and Fukuda T. (2023) Effect of strong wind on laminae and petioles of *Farfugium japonicum* (L.) Kitam. var. *japonicum* (Asteraceae). *Frontiers in Plant Science* 14:1182266.
- [3] Vogel S. (1992) Twist-to-bend ratios and cross-sectional shapes of petioles and stems. *Journal of Experimental Botany*, 43:1527-1532.

ハマナタマメの果実は種子単体よりも海に到達しやすいのか？

生物多様性研究室
2017025 黒滝魁斗
指導教員：福田達哉

1. 緒言

植物は多様な種子散布戦略を用いて生育地を広げる。例えば、風散布種子の中には、種子にパラシュート状の付属体を形成して長距離を風で運ばせやすくしたり、動物散布では果皮に粘着物質を生成し、果実ごと動物に付着して種子が運ばれるなどがある。この様に、種子以外の果皮や付属体が種子の散布性能を決定づける場合がある。一方、海流散布種子は、種子単体が、海水浮遊能力に富み、海流によって別の生育地(海岸)に運ばれる。しかし、海流散布種子が親個体から散布され、海に到達するためには、風や高波などの外的要因を利用しなくてはならない。

マメ科ナタマメ属ハマナタマメ(*Canavalia lineata* (Thunb.) DC.)は、日本、台湾、中国に分布し、海流散布種子として、種子単体が長期間海流に浮遊することが可能であり、海水浮遊後の発芽率も高いことが報告されている^[1]。しかし、親個体から散布される際には、裂開せず果実の状態での散布される。ハマナタマメは種子単体で海流に乗って運ばれるが、なぜ果実の状態での散布を行うのだろうか(図1)。果実の状態は、風を受ける面が、種子単体に比べて広い面、多くの風を広い面で受けられる点で有利である。その為、果実の状態での散布されることは、種子単体での散布よりも海までの到達に風などの外的要因を利用する点で有利あると考えられる。そこで本研究では、ハマナタマメの散布に関して果実の状態が、種子単体よりもどのような点で有利であるかを明らかにするために、実験を行った。

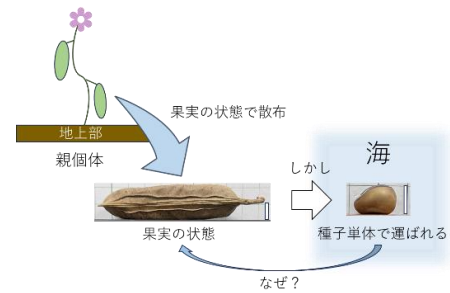


図1. 本研究における問題点. Bar = 10cm.

2. 実験方法

本研究では、予め採集し乾燥させたハマナタマメの果実30個と種子30個の重さ、表面積(果実(横)、果実(縦)、種子(横)、種子(縦))、密度の測定を行った。その後、果実(横、縦)及び種子(横、縦)に対して、動き出す最低風速の測定を行った。この実験はドライヤーで風を徐々に近づけていき、静止した状態から動き出した時の風速を測定した。移動実験を行う地表面条件として、凹凸のない机(平面)、海砂を敷いた状態、軽石を敷いた状態の3つの条件下で行った。気象庁のアメダスデータから、ハマナタマメが生育する海岸近くである館山での1時間ごとの動き出すのに必要な最低風速以上の頻度を、果実が成熟する10月、11月、12月に関して、計測した。

3. 結果

ハマナタマメの果実と種子の重さを測定した結果、果実は種子よりも有意に重いことが示された(図2)。表面積の測定の結果、果実(横)は有意に最も大きく、種子(縦)は有意に最も小さいことが示された(図3)。密度の測定の結果、種子は果実に対して有意に大きいことが示された(図4)。単位面積あたりの質量の測定の結果、果実(縦)は有意に最も重く、果実(横)は有意に最も軽いことが示された(図5)。移動実験の結果、平面条件では種子(縦)は有意に最も動き出す風速が高く、果実(横)は有意に最も動き出す風速が低いことが示された(図6a)。海砂条件では、果実(縦)は有意に最も動き出す最低風速が高く、果実(横)は有意に最も動き出す

最低風速が低いことが示された(図6b)。軽石条件では、果実(縦)は有意に最も動き出す最低風速が高く、果実(横)は有意に最も動き出す最低風速が低いことが示された(図6c)。ハマナタマメが生育する海岸近くである館山での1時間ごとの動き出すのに必要な最低風速以上の頻度を計測した結果、2023年10月から12月までの合計頻度は、果実(横)[5m/s以上]は387回、種子(横)[8m/s以上]は135回、果実(縦)[13m/s以上]は4回、種子(縦)[10m/s以上]は60回となり、果実(横)が動き出すのに必要な最低風速以上の頻度が最も高いことが示された(表1)。

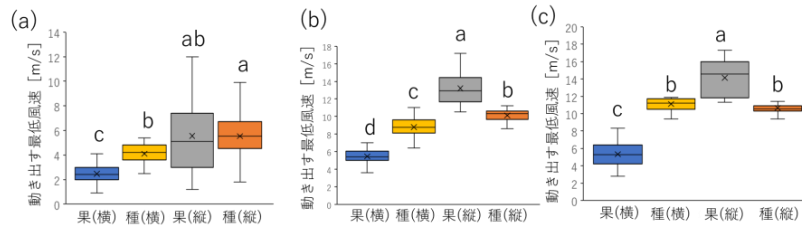
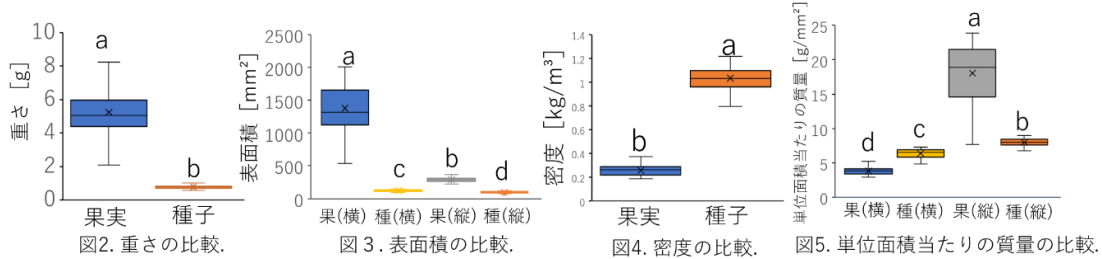


図6. 動き出す最低風速の比較。(a)平面, (b)海砂, (c)軽石。

表1. 果実と種子それぞれの動きだすのに必要な最低風速の頻度(千葉県館山市)

	果実横 (>5m/s)	種子横 (>8m/s)	果実縦 (>13m/s)	種子縦 (>10m/s)
2023.10月	65	4	0	0
2023.11月	174	72	0	30
2023.12月	148	59	4	30
合計頻度	387	135	4	60

4. 考察

移動実験の比較の結果、動き出す最低風速がどの条件下でも果実(横)が低かったのは、風を受ける単位面積に対して軽いからだと考えられる。これは果実と種子の密度の測定結果から種子を複数個包んでいる果実の果肉部分に関係があると考えられる。種子は果実中で横並びに配列され包まれているため、必然的に果実の体積は大きくなる。しかし、密度は種子より果実の方が小さいという結果から、果実は体積の大きさに比例するような重さを有していない。そのため、果皮は複数の種子を包むが、その中身は充実していないと考えられる。そのため、果実(横)は風を受ける単位面積あたりの質量が軽くなり、風の影響を受けやすく動き出しやすくなったと考えられる。また、採集地付近の風速を基にした移動頻度は、果実は種子よりも約200回以上も多く動き出すことが可能であることがわかった。実際の海岸地における岩などの隙間に挟まってしまった想定をしたとき、動き出す頻度が多い果実は、岩の隙間から抜け出す頻度も高いと考えられる。これらのことから、ハマナタマメは果実を裂開させ種子での移動になった場合、低頻度かつ種子単体での散布になるが、裂開させず果実での散布は、動き出す最低風速の頻度を高め、複数の種子を素早く海へ運ぶことができると考えられる。

5. 引用文献

[1]石井 知希 (2022) 海流散布植物ハマナタマメを用いた北限集団における生態的特徴に関する研究. 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.

葉序配列の極座標変換による重心解析における 3/8 葉序植物の規則性

生物多様性研究室

2017033 下澤佑介

指導教員：福田達哉

1. 緒言

植物は、茎に対する葉の付き方から互生、対生そして輪生という葉序があり、このうち互生に関しては、茎に対して葉が同じ配置に戻るまでに要した回転数とその際の葉の枚数を回転数/葉の枚数として、1/2、1/3、2/5、3/8、5/13 といったフィボナッチ数列に倣って葉を配列するフィボナッチ葉序と呼ばれる規則性が存在する。このような規則的な葉の配置は、上下における葉の重なりを回避し光合成効率を高めることに寄与していると考えられている。

これまで、5 回転で 13 枚の葉を配置する 5/13 葉序を示すキク科セイタカアワダチソウ (*Solidago altissima* L.)、およびヒメムカシヨモギ (*Erigeron canadensis* L.) の葉の長さを原点から等距離に配置し、その重心座標を求めた結果、13 枚の配置の重心座標が原点に近づき、その中の 5 枚と 8 枚で重心が原点に近づくことからそれらの葉の重心が茎に帰結することによる安定といった規則性を示してきた^[1,2]。この結果より、フィボナッチ葉序に従うと 5/13 葉序より下位の 3/8 葉序でも 8 枚で葉を形成したとき、5 枚と 3 枚で重心が原点に近づく規則性が見られるのかという疑問が生じる。3/8 葉序植物は、キク科のヨモギ (*Artemisia indica* Willd. var. *maximowiczii* (Nakai) H.Hara) が該当する (図 1.A)。また、キク科以外の植物ではアカバナ科メマツヨイグサ (*Oenothera biennis* L.) も 3/8 葉序を示すために (図 1.B)、異なる系統群で同様のフィボナッチ葉序を持つことを示すことができれば、この葉序と重心の一致がキク科植物特有の現象ではなく、被子植物の広い分類群で見られる可能性を示すことができる。そこで本研究では、これらの 3/8 葉序の重心解析を行い、法則性を明らかにするとともに、系統が異なる植物における 3/8 葉序の規則性を明らかにする。



図 1. (A)キク科ヨモギ. Bar=10cm : (B)アカバナ科メマツヨイグサ. Bar=10cm

2. 材料と方法

本研究は、これまでの実験方法を基に^[1,2]、開度と重心を測定した。材料は多摩川付近においてヨモギ、メマツヨイグサそれぞれ 30 本採集し、採集個体の葉をすべて取り、各葉原基の直径 d 、葉原基から次の葉原基までの弧の長さ l を計測し、

$$\theta = \frac{l}{2\pi r} \times 360$$

を用いて、葉と葉の開度を測定した。重心の測定は、 $r=1$ 、 θ =中心角として、極座標に変換し、8 枚の座標を求め、8ヶ所の座標の平均を算出して求めた。さらに、三平方の定理を用いて重心から原点までの距離を算出し、2枚から 8枚の多重比較検定を行った。また、葉の長さとその葉がついていた茎の直径の計測を行った。

3. 結果

ヨモギ、メマツヨイグサの開度 $\theta_1 \sim \theta_8$ を測定した結果、ヨモギは平均 137.05 度、メマツヨイグサは平均 135.40 とどちらも 135 度に近い値となり、ヨモギ、メマツヨイグサは 3/8 葉序植物であることが明らかとなった (図 2)。本研究の葉の長さ と 茎の太さの解析から葉の長さを 1 とした場合、茎の直径が 0.016 となり (図 3)、原点から半径、0.008 の円内に重心が置かれた際に重心が茎に帰結すると定義できることを示した。次に、 $\theta_1 \sim \theta_2$ 、 $\theta_1 \sim \theta_3$ のように 2 枚から 8 枚の連続する葉の組

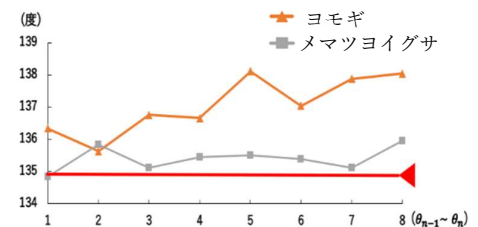


図 2. ヨモギとメマツヨイグサの開度. 赤線は 3/8 葉序の理論値 135 度を示す。

み合わせの重心を測定した結果、8枚で重心が原点に近づき(図4.A)、8枚の際の重心が(-0.0027,-0.0031)となったために、茎の太さとして算出された原点を中心とした半径0.008の円内に収まり重心が茎に帰結することが示された(図4.B)。また、3枚と5枚でも重心が原点に近づく結果となった(図5)。ヨモギ、メマツヨイグサの2枚から8枚の重心距離を測定した結果、3枚と5枚と8枚で有意差が見られ(図6)、重心距離が2枚から8枚まで近づき、遠ざかることを繰り返して、3/8葉序植物の重心を安定させ、3/8葉序は3枚と5枚が影響することが示された。

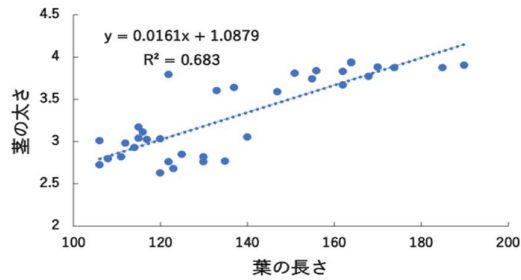


図3. ヨモギの茎の太さと葉の長さ.

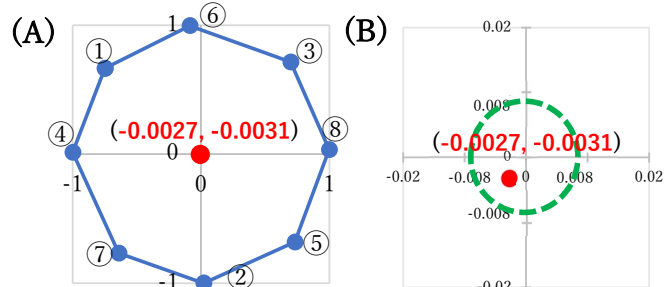


図4. (A)8枚($\theta 1 \sim \theta 8$)の重心,(B)茎の相対長に対する重心の位置.緑線は図2より示された相対的な茎の径を示す.

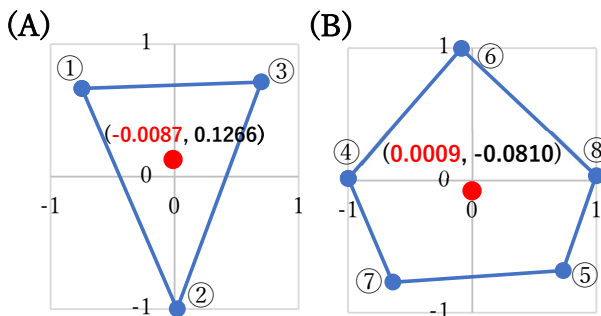


図5. (A)3枚($\theta 1 \sim \theta 3$)の重心,(B)5枚($\theta 4 \sim \theta 8$)の重心.

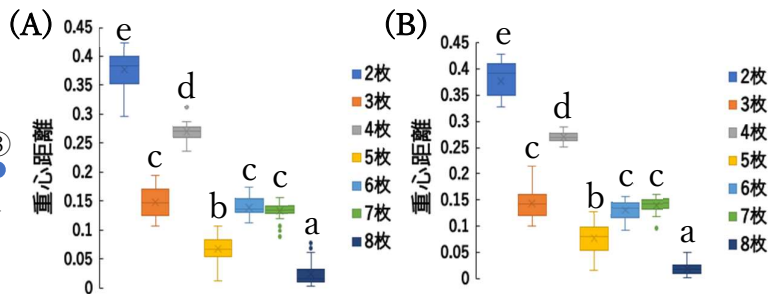


図6. 各枚数配置時の重心距離の比較.(A)ヨモギ;(B)メマツヨイグサ.異なる文字で示されたアルファベットはTukey-Kramer法により有意に異なる($p < 0.05$).

4. 考察

本研究の結果から、ヨモギ、メマツヨイグサは、8枚で重心が原点に近づき、相対的な茎の径に重心が帰結し、また、3枚、5枚でも重心が原点に近づいた。近内(2022)は、5/13葉序の植物は5枚と8枚のときに重心が原点に近づくといった規則性から、祖先種の2/5葉序と3/8葉序の交雑によって誕生したと考察した。本研究の3/8葉序は3枚と5枚のとき、重心が原点に近づく規則性を新たに発見した。このことから、3/8葉序植物も同様に、1/3葉序と2/5葉序の交雑によって誕生したという仮説が示された。また、本研究の8枚の中にも3枚、5枚で分かれる結果を示しているものの、それらの重心は茎に帰結しなかったことから、1/3葉序と2/5葉序とによる雑種形成から時間を経たために葉の配置が移動したと考えられる。

5. 結論

ヨモギとメマツヨイグサといった、異なる系統群において独立に8枚で重心を安定化させ、3枚、5枚で重心を安定させる規則性を持つことが明らかになった。このことは、被子植物が多様化する過程において3/8葉序形成のための1/3葉序と2/5葉序による雑種形成が独立で起こっていたことを示唆しており、このような過程は被子植物の様々な系統で起こっていた現象として考えられる。

6. 参考文献

- [1] 近内祐香(2022) 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] 河手天蘭(2023) 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～. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

風ストレスの有無によるコセンダングサ果実への影響

生物多様性研究室

2017043 壺内裕貴

指導教員：福田達哉

1. 緒言

都市環境下では建築物等により風速が低下することが知られている。一年草植物のキク科センダングサ属コセンダングサ (*Bidens pilosa* L.) は都市部で繁殖している帰化植物であり、風の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) 内における栽培集団と対照集団 (Wind) との成長過程の比較解析を行った研究で、OTC 集団の方が、葉を大きく茎を高く伸長させることで多くの光合成資源を獲得し、その資源の多くを花序や種子といった繁殖へ投資することにより適応度を高めていることが示された¹⁾。

コセンダングサの種子は、動物による散布を可能にするためにトゲのついた付属体が種子先端に形成される動物付着散布種子である (図 1)。果実 (種子+付属体) 内の種子サイズの増加は発芽確率を上昇させるものの、質量が増加するために付着による散布距離への影響が及ぶことが考えられ、また付着確率を上昇させる付属体の伸長は散布距離を上昇させるものの、それが直接次世代の繁殖に関与しない。このような関係において獲得資源量の多い OTC 集団が、付属体のサイズやトゲに投資することにより散布を有利に働くように変化させているのかといった疑問が生じる。そこで本研究ではコセンダングサ種子に関する比較形態学的解析から、資源投資の増加が及ぼす散布能力への影響を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 方法

Wind 集団(36 個体)と OTC 集団(35 個体)の種子を 3 個ずつ、種子サイズと付属体サイズ、さらに付属体についているトゲの個数を計測し、付属体長さあたりのトゲの個数からトゲの密度を算出した (図 1)。その後、それぞれの結果について統計処理による比較を行った。

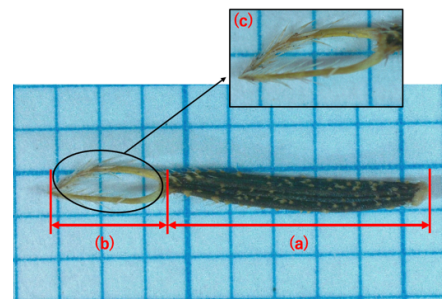


図 1.コセンダングサの種子形態.

(a) 種子サイズ, (b) 付属体サイズ,

(c) 付属体に形成されるトゲの拡大図.

3. 結果

果実の比較形態学的結果より、種子サイズ及び付属体サイズに関して、両集団間で有意差は認められなかった (表 1)。また種子サイズと付属体サイズの関係は、両集団で低い相関が確認された (図 2)。1 付属体あたりのトゲの個数及び密度に関する計測の結果、トゲの個数及び密度は OTC 集団の方が Wind 集団に比べ、有意に多いことが示された (表 1)。

表 1. 種子および付属体の形態学的結果(平均値±標準誤差).

計測項目	OTC	Wind	
種子サイズ(mm)	9.84±0.16	9.96±0.19	n.s
付属体サイズ(mm)	2.79±0.04	2.78±0.05	n.s
トゲの個数(個)	11.3±0.3	10.38±0.29	*
トゲの密度(個/mm)	4.08±0.11	3.74±0.1	*

* : t 検定(p<0.05)

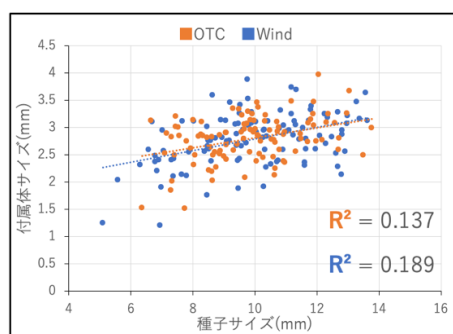


図 2. 種子サイズと付属体サイズの関係.

4. 考察

果実の比較形態学的の結果より、種子サイズの増加に伴い付属体サイズも増加するものの、両集団間において種子サイズ及び付属体サイズに違いが認められないことから、種子と付属体は独立的に成長することが示唆された。このことから、種子サイズの増加に比例して種子重量が増加する仮定においては、動物による散布能力に関わる種子サイズと付属体サイズの比が個々が変わるために、散布距離もまばらになることから様々な範囲に種子を分散させる戦略であると考えられる。また付属体のトゲに関しては、OTC 集団の種子が Wind 集団よりもトゲの個数を多く、かつ密に形成することにより強固に動物に付着することが示唆され、種子の散布距離も増加すると考えられる。このことは、OTC 集団の繁殖への高い資源投資が¹¹⁾、種子の散布距離を大きくすることを可能にしていると考えられる。多くの資源を獲得することができた OTC 集団の直接繁殖に関与しない付属体への投資が、種子の散布距離を大きくすることで親子間や兄弟間における資源獲得競争の回避に関与し、間接的に OTC 集団の適応度を高めることに寄与していると考えられる。そのために、建築物などによってストレスが低減した都市環境下において、散布能力を上昇させたコセンダングサの種子がヒトを種子散布者にして都市における繁殖を成功させている可能性が考えられる。

5. 参考文献

[1] 小林 渚咲 (2023) 外来種コセンダングサの風ストレス変化に伴う比較形態学的及び生物学的研究. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.

GC-MS を用いたマボヤの臭気成分の分析

分析化学研究室
2017044 長尾 朋樹
指導教員 吉田 真史

1. 緒言

マボヤ (*Halocynthia roretzi*) は、北海道から九州、さらに朝鮮や山東半島などに分布しているが、特に三陸地方では食用として養殖されており、重要な産業になっている。珍味として知られており、食べたことがある人は想像がつくと思うが、収穫後の独特な臭いが特徴である。しかし、この臭いに関する研究は十分ではなく、品質管理のためにこの臭気成分の解析が求められている。そのため捕集剤を用いて臭気成分を捕集し、マボヤの独特な臭いの原因を測定する。



図 1. マボヤ.

2. 実験方法

2-1 捕集

ミキサーにかけ、ペースト状にしたマボヤを 10g ずつ蓋つきの容器に分け、2 日間、1 週間、2 週間、常温で保管した。それぞれ捕集剤を使い捕集した。その後、それぞれの期間が経過した捕集剤を、アセトンに入れ、超音波洗浄機で 30 分かしくはんし、臭い成分を抽出した。

2-2 ガスクロマトグラフ質量分析 (GC-MS)

2-1 で得た超音波洗浄機で 30 分かしくはんしたものをガスクロマトグラフ質量分析計で分析した。40°C から 240°C の間で 30 分間分析した。また、カラムは Agilent Technologies の DB-5 ms を使用した。また、マボヤを測定した時に検出された純物質を測定し、マボヤの測定時のマススペクトルと比較した。

3. 結果

GC-MS でマボヤを測定した時に以下の化合物が見られた。

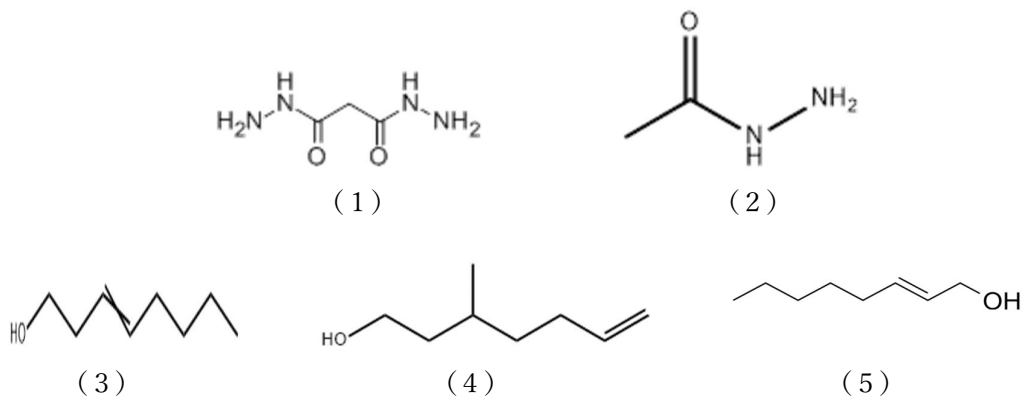


図 2. マボヤの GC-MS 測定時に見られた化合物.

(1) : Malonic acid dihydrazide (化学式 : $C_3H_8N_4O_2$) (図 3 の a のピークで検出)

- (2) : Acetic acid hydrazide (化学式 : $C_2H_6N_2O$) (図3のaのピークで検出)
 (3) : 3-Octen-1-ol (化学式 : $C_8H_{16}O$) (図3のeのピークで検出)
 (4) : 6-Hepten-1-ol,3-methyl- (化学式 : $C_8H_{16}O$) (図3のeのピークで検出)
 (5) : 2-Octen-1-ol (化学式 : $C_8H_{16}O$) (図3のeのピークで検出)

また、マボヤを GC-MS で測定した時のトータルイオンクロマトグラムを以下に示した。

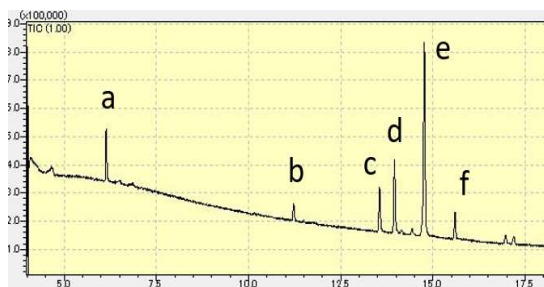


図3.マボヤを GC-MS で測定時のトータルイオンクロマトグラム (1週間) .

4.考察

GC-MS 分析で得られた結果から、上記の5つの化合物が測定できた。また、Malonic acid dihydrazide と Acetic acid hydrazide は、純物質を GC-MS で測定した結果、ホヤを測定した時と同じ時間、同じピークで検出されていることが分かった。また、アンモニアに似た刺激臭を有するヒドラジンの誘導体があり、臭い成分なのかもしれないが、どちらも同じ「a」のピークで検出されているため、今後カラムや条件を変えることで明確にできるのではないかと考えた。また、「e」のピークで検出された3-Octen-1-ol、6-Hepten-1-ol,3-methyl-、2-Octen-1-ol はどれも構造異性体であり、アルコールの一種なので臭い成分として出てきてもおかしくない。また、ホヤの臭気成分の中には10成分以上の C_8 飽和及び不飽和アルコールがある^[1]ため、臭いの原因の可能性があると考えた。こちらも同様に、測定条件やカラムを変えることで明確にできるのではないかと考えた。また、臭いは人間の鼻で感じ取ることができるので、今後もっと温度の低い状態での測定を行うことで、更に詳しい考察が可能になる。その他にも、「b、c、d、f」のピークはマススペクトルのシグナルが微少であり、解析できなかったため、この未知のピークを測定することも今後の課題である。

5.結論

捕集剤、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を使用してマボヤの揮発性の成分を測定することができた。実際に測定された化合物は臭いが強いものではなく、臭いの原因であることを明確にすることはできなかった。カラムや測定条件を変えて測定することや、臭いは人間の鼻で感じ取ることができるので、常温や低い温度を測定することや、解析できなかったピークを測定することが今後の課題である。

6.参考文献

- [1]ホヤのエキス成分 (1989) 渡辺勝子, 鴻巣章二 27 卷 2 号 p96-103.

捕集剤と GC-MS を用いた米飯の香気成分の分析

分析化学研究室

2017041 立川葵

指導教員：吉田真史

1. 序論

本研究の目的は、捕集剤と超臨界二酸化炭素抽出装置を用いて米の香気成分を分析することである。GC/MS での米の分析はこれまでに行われていることから、捕集剤を利用した炊飯米の香気成分と超臨界二酸化炭素抽出での乾燥米の成分分析が可能なのではないかと考えた。乾燥米に含まれる香気成分により、品質や品種改良への道となる可能性もある。

2. 実験方法

試料には、セブンイレブン・ブレンド米、ひとめぼれ、コシヒカリを使用した。

2-1. 捕集剤を用いた炊飯米の香気成分の分析

本実験では、ビーカーに米を 1/2 合、水を 135g 入れ、30 分浸したのち 100°C から 280°C へ温度を上げながら炊飯した。捕集剤はシリカを主成分としたディスク状のものを用い、クリップで吊るし香気成分を捕集した。他に、容器に炊飯器で炊いた米と捕集剤を入れ 30 分間捕集。また、炊飯器の蒸気口に捕集剤を置き香気成分を捕集した。吸着した物質をアセトンに溶かし GC/MS で 40°C から 250°C で 30 分間分析した。

2-2. 超臨界二酸化炭素抽出を用いた乾燥米の香気成分の分析

超臨界二酸化炭素を移動相の溶媒とし、溶解度の違いで米の香気成分を抽出した。粉碎した米 1g を 100 気圧、200 気圧で抽出したものをアセトンに溶かし、GC/MS で 40°C から 250°C で 30 分間分析した。一回目は 100 気圧で抽出、2 回目の測定以降 200 気圧抽出した。

3. 結果

3-1: 捕集剤を用いた炊飯米の香気成分の分析

ビーカーで炊いたブレンド米では、2,5,5-トリメチル-1-ヘキサン、ジアセトンアルコール、1-デカノールが得られた。図 1 にビーカー炊飯米(ブレンド米)の GC スペクトルを示す。



図 1：ビーカー炊飯(ブレンド米)の捕集剤吸着物の GC スペクトル

(a) 2,5,5-Trimethyl-1-hexene (化学式：C₆H₁₄)

(b) Diacetone Alcohol (化学式：C₅H₁₀O)

(c) 1-Decanol (化学式: $C_{10}H_{22}O$)

1-デカノールは炊飯器蒸気口に置いた捕集剤からも検出された。この他、捕集剤を炊飯器内に置いた時にはジアセトンアルコール、ビーカー炊飯の捕集剤を再度分析した際は 2,6-ジ-tert-ブチルフェノール、2-ヘプタデカノールが検出された。

3-2: 超臨界二酸化炭素抽出を用いた乾燥米の香気成分

ブレンド米では主にマロン酸ジヒドラジド、1-テトラデカノール、2,6-ジ-tert-ブチルフェノール、が得られた。図 2 にブレンド米を 100 気圧で抽出した際の GC スペクトルを示す。



図 2: 乾燥米(ブレンド米)の超臨界二酸化炭素抽出の GC スペクトル

(a) Malonic acid dihydrazide (化学式: $C_3H_8N_4O_2$)

(b) 1-Tetradecanol (化学式: $C_{14}H_{30}O$)

(c) 2,6-Di-tert-butylphenol (化学式: $C_{14}H_{22}O$)

(d) 1-Hexadecanol (化学式: $C_{16}H_{34}O$)

ひとめぼれではブレンド米と同様の成分の他に 1-ノナノール。コシヒカリはブレンド米と同様の成分の他にフィトールが得られた。

4. 考察

炊飯米で検出できた 1-デカノールは香気成分である。炊飯米では捕集方法により得られた成分が異なっており、炊飯後に捕集した米の成分では、マロン酸ジヒドラジドは検出されなかった。超臨界抽出で検出された 1-テトラデカノールはウイスキーの香気成分、フィトールは葉緑体としても確認されている。本実験では、米の品種による成分の違いは見られなかった。米の香りの品種による差はない可能性が考えられるが、より多くの種類での分析が必要である。どちらの実験でも、香気成分は検出されたが、米の香気成分としての報告されている成分は検出されなかった。捕集剤を用いた試料を再度分析した際、検出される成分が異なっている場合があった。これは、GC/MS の洗浄が十分でなかったと考える。

5. 結論

多孔質シリカを主成分とする吸着剤により炊飯米の香気成分の捕集が可能であることがわかった。超臨界二酸化炭素抽出により米の香気成分が確認できることがわかった。しかし、米の品種による違いは確認できなかった。また、捕集剤を用いた分析では再現性の高い結果が得られなかったため、再現性を向上させる方法を検討する必要がある。

6. 参考文献

[1] 早野弘道・中込昇(1980) 各種ライウイスキーの香気成分と高級アルコール類の組成

超臨界抽出と GC-MS を用いたアシタバの成分分析

分析化学研究室

2017013 大橋 美里

指導教員：吉田 真史

1. 緒言

アシタバ(*angelica keiskei*)の栽培は伊豆諸島の重要な産業である。アシタバの葉は、飲食、飲料として利用されているが、茎、根は商品として利用される例が少ない。ヨーロッパではアシタバと同じセリ科シシウド属であるセイヨウトキ (*angelica archangelica*) の根の成分が、香水や香料、薬用として使用されている。日本原産のアシタバも、茎、根を香水や香料、薬用として有効活用をするために含有成分の分析が望まれている。植物の香り成分、薬用成分の抽出には、超臨界二酸化炭素抽出法やガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) が広く用いられている。本研究では、八丈島産、伊豆半島産のアシタバの根の香り成分、薬用成分を超臨界二酸化炭素抽出と GC-MS を用いて同定していく。

2. 実験方法

八丈島産と伊豆半島産のアシタバの根をそれぞれ 40 度で 24 時間乾燥器にかけ、乾燥させた。粉末状になるまでミキサーにかけ、試料とした。超臨界二酸化炭素抽出法を用い、抽出条件を変えて行った。抽出条件は、八丈島産で 100 気圧 15 分、100 気圧 30 分、200 気圧 15 分、伊豆半島産で 100 気圧 15 分、200 気圧 15 分で温度はすべて 40°C とした。超臨界二酸化炭素抽出で得たそれぞれの抽出物を、1.5ml のアセトンに溶解させたものをガスクロマトグラフ質量分析計(カラム：DB-5MS、分析条件：40°C-250°C、50 分)で成分分析を行った。

3. 実験結果

図 1 に八丈島産のアシタバの根の香り成分を、保有時間と強度の関係のトータルイオンクロマトグラムで示す。上述の三つの条件で測定したときに、Ethyl acetate、Germacrene B、 γ -Muurolen、Cadinene、Selina-3,7(11)cadinene、Bergapten、1-Heptadecene、Falcarinol、Palmitic acid、1-Nonadecene、Ficusin、Linoleic acid など多くの成分が出た。その中で、超臨界二酸化炭素抽出を 15 分で行った場合にのみセイヨウトキ (*angelica archangelica*) の根の成分として知られる Angelicin (アンゲリシン) が検出された。

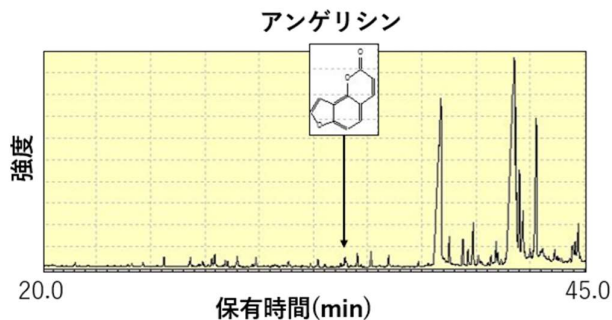


図 1:八丈島産のアシタバの根の香り成分のトータルイオンクロマトグラム

図 2 に伊豆半島のアシタバの根の香り成分を、保有時間と強度の関係のトータルイオンクロマトグラムで示す。上述の二つの条件で測定したとき、主な成分は八丈島産で出たものと変わりがなかったが、

Valencene、 β -Sesquiphellandrene、Copaene、Bisabolol が比較的強く出た。伊豆半島産に関しても超臨界分析を 15 分で行った場合にのみアンゲリシンが検出された。

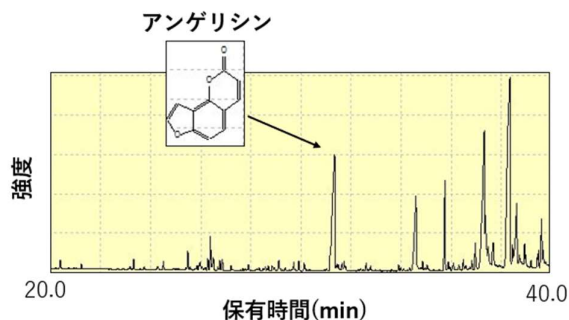


図 2:伊豆半島産のアシタバの根の香気成分のトータルイオンクロマトグラム

4. 考察

八丈島産、伊豆半島産のアシタバの超臨界二酸化炭素抽出を 15 分の条件で行ったときに検出されたアンゲリシンに注目する。アンゲリシンはおもにヨーロッパに生息するセイヨウトキの根に含まれている精油で、フロクマリン類の一種であり、現在ではアンゲリシンを含む植物はカナダ、米国、ヨーロッパの一部のみで見られる。図 3 に市販の純粋なアンゲリシンのトータルイオンクロマトグラムを示す。八丈島産、伊豆半島産のアシタバから抽出されたアンゲリシンと市販のアンゲリシンの分析結果を比較すると、保持時間が同一であり MS スペクトルの類似度も非常に高かったため、図 1、図 2 に示したピークがアンゲリシンであると確定できる。また、ピークの高さから、二つの産地では伊豆半島産のアシタバの方がアンゲリシンを多く含むといえる。

本研究では日本原産のアシタバの根からアンゲリシンが検出されたため、日本原産のアシタバでも香水や香料、薬用として有効活用できると考えられる。

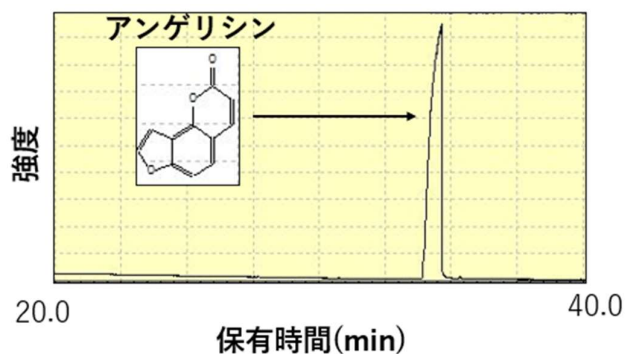


図 3:アンゲリシンの香気成分のトータルイオンクロマトグラム

5. 結論

八丈島産、伊豆半島産のアシタバの根を、超臨界二酸化炭素抽出と GC-MS を用いて分析したところ、香水や香料、薬用として利用できる可能性のある複数の成分が検出された。

6. 参考文献

- [1] 大谷 仁美 東京都市大学 2020 年 学士論文.
- [2] 勢田 愛乃 東京都市大学 2021 年 学士論文.

超臨界抽出と GC-MS を用いたウライゲットウの成分分析

分析化学研究室
2017060 若林小暖
指導教員：吉田真史

1. 序論

ウライゲットウ (*Alpinia uraiensis*) はショウガ科ハナミョウガ属であり、他に代表的な種としてゲットウ (*Alpinia zerumbet*), クマタケラン (*Alpinia × formosana*), レッドジンジャー (*Alpinia purpurata*) などがある。香りが強いことが特徴で観賞用や食品・薬用・化粧品として利用される。アジアの温暖な地域から太平洋諸島にかけて分布があり、日本では沖縄から九州南部にかけて分布している。

ゲットウが分布している沖縄では、ゲットウの栽培は重要な産業の一つである。ゲットウ特有の爽やかな香りには癒し効果があるとされ、香辛料や健康茶、アロマオイルとして利用している。殺菌・抗菌・防虫作用もあるのでお餅をゲットウの葉で包む「ムーチャー」と呼ばれる伝統料理がある。

ゲットウは多くの研究や食品・薬品・化粧品としての利用があるが、同属のウライゲットウは自生しているが利用がされていない。そのため、本研究ではウライゲットウに着目し、同属のゲットウ・クマタケランとも比較をしながら超臨界二酸化炭素抽出法とガスクロマトグラフィー質量分析 (GC-MS) を使用し、ウライゲットウの成分分析を行う。

2. 方法

ウライゲットウの揮発成分の実験は以下のように行った。

- ① ウライゲットウの葉 (5~6 枚) を適当に小さく切り、乾燥機で 2 日間乾燥させる
- ② 乾燥させた葉をミキサーで粉々にする
- ③ 1.0g を量り取り、超臨界二酸化炭素抽出装置で抽出を行う (条件: 100 気圧・40°C・15 分または 30 分)
- ④ 抽出したものにアセトンを 1ml 入れる
- ⑤ GC-MS で分析を行う

3. 結果

以下の A~J 10 種の試料の測定を行った。

- A・B) 石垣島のウライゲットウを超臨界二酸化炭素抽出 15 分間行ったもの (2 回)
- C・D) 石垣島のウライゲットウを超臨界二酸化炭素抽出 30 分間行ったもの (2 回)
- E・F) 石垣島のゲットウを超臨界二酸化炭素抽出 30 分間行ったもの (2 回)
- G) 石垣島のゲットウを超臨界二酸化炭素抽出 15 分間行ったもの
- H・I) 石垣島のクマタケランを超臨界二酸化抽出 30 分間行ったもの (2 回)
- J) 石垣島のクマタケランを超臨界二酸化抽出 15 分間行ったもの

試料 A と試料 E の GC スペクトルを図 1 と図 2 に示す。

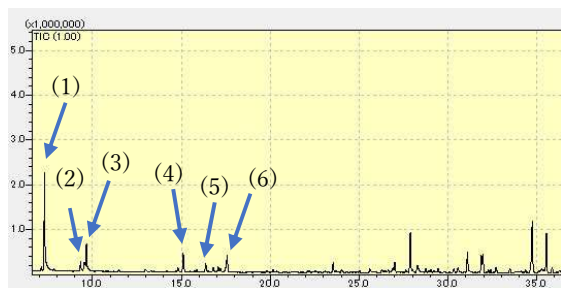


図 1 : 試料 A の GC スペクトル

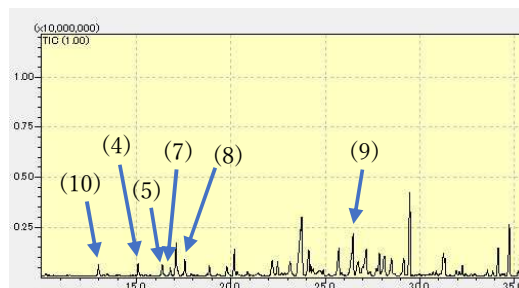


図 2 : 試料 E の GC スペクトル

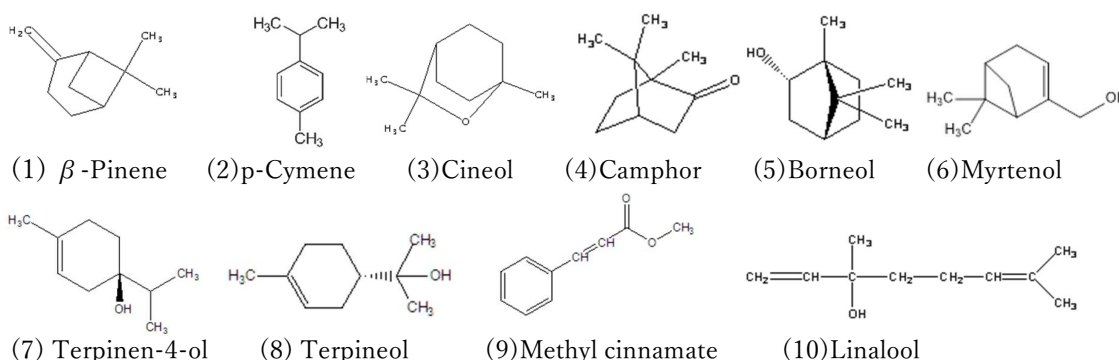


図 3 : 試料 A と試料 E の GC-MS 分析により同定された化合物

4. 考察

ウライゲットウはゲットウに含まれる Camphor などの殺菌・抗菌・防虫効果のある成分が多数検出された。本研究ではウライゲットウ・ゲットウ・クマタケランを比較したがこの 3 つに大きな差は感じられなかった。検出される成分に多少の違いはあるものの、その成分の効果は殺菌・抗菌・防虫効果など共通のものであったため、ウライゲットウとクマタケランもゲットウと同様に食品や化粧品への使用は可能だと考える。しかし、殺菌・抗菌・防虫作用のある成分が一番多く検出されたのはゲットウであったため、それらの目的にはゲットウが最も適しているのではないかと考える。

5. 結論

超臨界二酸化炭素抽出法と GC-MS を用いてウライゲットウと同属のゲットウとクマタケランの成分分析を行った。ウライゲットウはゲットウとほとんど同じ成分が含まれていることが分かった。ただし、殺菌・抗菌作用に関しては、ウライゲットウはゲットウにやや劣ると考えられる。

6. 参考文献

- 「ゲットウ葉の精油成分について」池間洋一郎 他, 2014
 「沖縄産ゲットウの精油成分の季節性と構成」村上志緒 他, 2008

1、序論

沖縄にとってゲットウ（ハナミョウガ属 *Alpinia zerumbet*）の栽培は重要な産業となっている。特にゲットウの葉は食品、飲料、薬品などさまざまな分野で利用されている。しかし、同属であり、ゲットウとアオノクマタケランの中間的な形態で両種の雑種であると推測されるクマタケラン（ハナミョウガ属 *Alpinia formosana*）やアオノクマタケラン（ハナミョウガ属 *Alpinia intermedia*）は同じ地域に自生しているがゲットウと同様の利用例がない。そのため、クマタケランやアオノクマタケランを有効活用できるよう香気成分、薬用成分の分析が望まれている。そこで、本研究では超臨界二酸化炭素抽出と GC-MS という二つの方法を用いて、香気成分、薬用成分の抽出や分析を行い比較する。

2、実験方法・使用器具

2-1：実験方法

- ① クマタケランを細かく刻み、乾燥機で2~3日乾燥させる。
- ② 乾燥させたクマタケランをミキサーで粉末状にする。
- ③ 超臨界二酸化炭素抽出装置で抽出を行う。(100気圧・40°C・30分)
- ④ GC-MS で分析を行う。(温度を60°C~240°Cで65分間)

2-2：超臨界二酸化炭素抽出

二酸化炭素に圧力と温度を加えていくと、気体と液体の間である流体状態、いわゆる超臨界流体と言われる状態になる。その後、流体の圧力を元に戻して気化させると、香気成分と有効成分だけが残るしくみになっている。

2-3：ガスクロマトグラフィー質量分析 (GC-MS)

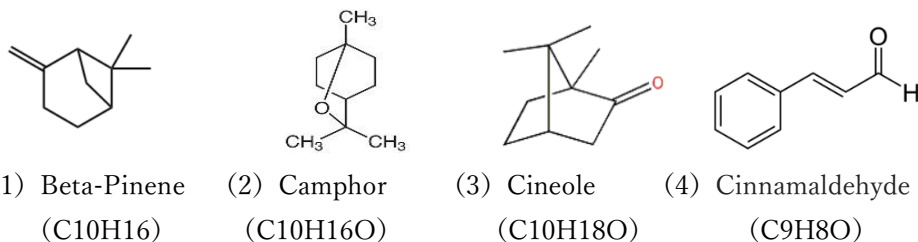
ガスクロマトグラフィーはクロマトグラフィーの一種であり、気化しやすい化合物の同定・定量に用いられる機器分析の手法である。化合物がピークとして現れるためそれを分析してどのような化合物が含まれているのか調べる。

3、結果

石垣島と奄美大島のクマタケランとアオノクマタケランの分析結果は以下のようになった。

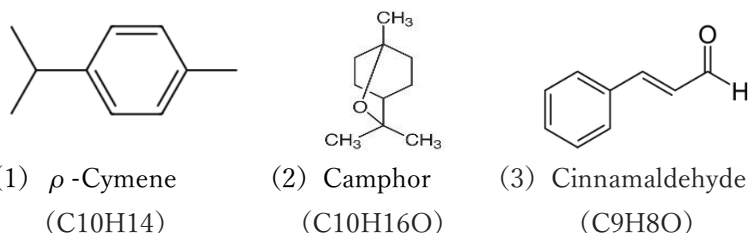
試料1：石垣島のクマタケラン

主要な成分として以下の化合物が得られた。



試料 2：奄美大島のクマタケラン

主要な成分として以下の化合物が得られた。



試料 3：奄美大島のアオノクマタケラン

複数回分析を行ったが、石垣や奄美大島のクマタケランと違って香気成分がピークとして検出されなかった。

4、考察

これらのクマタケランの成分はゲットウの成分としても報告されていることからゲットウと同様の利用方法が可能だと考えられる。現に、石垣島において月桃茶の代用にクマタケランが使用されているため、他の利用方法も代用可能なのではないかと考えられる。今回の分析結果では、ゲットウとクマタケランに含まれる香気成分にあまり違いがない結果となったが、気候や土壌、生育の環境によって成分に多少の変化がある可能性がある。今後は、実際に現地に行ってどのような環境で生育しているのか観察し、石垣島と奄美大島の2つの農家からいただいたものであるため他にもいくつかの農家の方からいただいて観測する個体を増やすことでより良い結果が得られるのではないかと考えられる。また、多年草であるため比較的若い個体なのか、それとも長年生えている個体なのかによっても変わってくるのではないかと考えられる。

5、結論

クマタケランはゲットウと同様の成分が検出されたためゲットウと同様の利用方法は可能であることが分かった。石垣島のクマタケランと奄美大島のクマタケランで成分の出やすさに違いがあることが分かった。

6、参考文献

・村上志緒、ウェイ・リー、松浦真理子、佐藤忠昭、林慎一郎、小池一夫「沖縄産ゲットウの精油組成と季節変動」日本製薬学会

等々力溪谷を流れる谷沢川の水質調査

分析化学研究室
2017029 坂口 佑苒

1. 序論

等々力溪谷は、武蔵野台地の南端を谷沢川が侵食してできた、延長約 1 キロメートルの東京 23 区唯一の溪谷であり、この台地面を浸食して形成された開析谷である。溪谷沿いには武蔵野台地を特徴づける地層断面がよく観察できる箇所がある。今回調査する谷沢川には等々力溪谷の地層から湧き出た湧き水なども混ざっており、地層との関連や、生活排水等との関係も懸念されている。谷沢川の水質を調査することは、等々力溪谷の環境保全、浄化にも関わってくるため、継続的な調査が望まれている。

2. 実験方法

本研究は等々力溪谷内に流れる谷沢川 2 地点(上流から A,B)の水質を定期的に調査した。比較対象として、多摩川の水質も数回調査した。調査項目は pH、COD、DO、導電率、濁度、 NO_3^- 、 NO_2^- などである。

- ・ COD … 過マンガン酸カリウムを用いた測定方法 規格 K0102 の 17 を参照し、計測を行った。

X プランク測定

蒸留水 100mL を三角フラスコに取り、6mol/L 硫酸 10mL と硝酸銀溶液(200g/L)5mL、0.005mol/L 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 0.0125mol/L しゅう酸ナトリウム溶液 10mL を加え、60C 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。

Y 河川水中の COD の測定

河川水 100mL を三角フラスコに取り、その後 X 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。

$$\text{COD} = (B - A) \times 1.000 \times 1000 / 100 \times 0.2$$

- ・ 分光光度計

標準液を薄め、以下の濃度(10,5,2,1,0.5,0.2,0.1ppm)の濃度の溶液を作成した。それぞれの溶液にパックテストの粉末を入れ、色が着くまで時間をおいた。色のついた溶液をそれぞれ、分光光度計で計測した。その結果から検量線を作成し、傾きを求めた。同様に河川の水も測定を行い、検量線から濃度を算出した。

3. 結果・考察

表 1 に調査結果を示す。

表 1. 調査結果

日付・場所	天気	pH	COD _{Mn} (mg/L)	DO (mg/L)	導電率 (μ S/cm)	濁度	NO_3^- (ppm)	NO_2^- (ppm)
-------	----	----	-----------------------------	--------------	----------------------	----	--------------------------	--------------------------

10月2日・A	晴れ	7.03	1.38	24.0	279	0	2	0.02
10月2日・B	晴れ	7.44	1.34	22.0	275	0	5.5	0.02
10月26日・A	晴れ	7.51	1.62	22.7	267	0.5	5	0.02
10月26日・B	晴れ	7.19	2.58	21.6	260	0.3	0.5	0.02
11月6日・A	曇り	7.31	5.40	21.9	183	1.3	6	0.02
11月6日・B	曇り	7.00	4.36	20.2	181	1.2	7	0.02
11月24日・A	晴れ	7.87	2.56	22.7	272	0.9	9	0.03
11月24日・B	晴れ	7.43	1.80	22.3	267	1.4	10	0.05
12月21日・A	晴れ	7.81	測定無	21.1	280	0.4	測定無	0.02
12月21日・B	晴れ	7.47	測定無	21.7	258	0.2	測定無	0.02
12月21日・多	晴れ	8.55	測定無	18.5	361	3.5	測定無	0.1
1月17日・A 15時	晴れ	7.65	測定無	21.2	277	0.3	測定無	測定無
1月17日・B 15時	晴れ	7.30	測定無	21.6	268	0.7	測定無	測定無
1月18日・A 3時	晴れ	6.91	測定無	21.0	273	0.7	測定無	測定無
1月18日・B 3時	晴れ	6.97	測定無	20.6	266	1.0	測定無	測定無
1月18日・多 3時	晴れ	6.70	測定無	19.3	365	2.3	測定無	測定無

- ・過去の実験結果(2022年度)と比較すると、pH、NO₂の値は低く、COD、DO、導電率の値は高かった。
- ・谷沢川の水質を多摩川の水質と比較すると、DO以外の数値は多摩川の水の方が高くなっており、多摩川の方が谷沢川と比べて、水質が汚濁しているといえる。
- ・等々力溪谷の水質の大きな特徴は、pHが塩基性であることである。1月17日の15時と1月18日の3時に地点A,Bで水を採取し、調査項目を比較すると、pHのみ大きな違いが見られた。1月18日3時に採取した水の方が、1月17日15時に採取した水よりも、pHが0.5ほど低かった。このことより、日中の谷沢川のpHが高く、水質が塩基性になっている要因は、川の中の植物(藻類)の光合成の影響で昼間はpHが上昇し、夜間は植物の呼吸の影響でpHの値は低くなると推測される。
- ・また、11月6日の水質調査の結果より、雨天時は晴天時に比べ、濁度、CODの値は高かった。そのため、雨天時は晴天時に比べ、水質が汚濁しているといえる。このとき、電気伝導度は晴天時よりも低くなっているが、その要因は、雨水が河川水に混ざっているためであると推測される。(雨水の一般的な電気伝導度は5~50 μ S/cmといわれている)

4. 結論

雨天時と晴天時の水質の比較により、雨天時は日中と夜間の水質の比較によりpHには、河川内の藻などが関係しており、その影響で日中のpHは塩基性になっていると推測される。今後も等々力溪谷の水質改善のため、継続的な調査が必要であると考えられる。

5. 参考文献

- 5-1. 池谷達輝(2023)等々力溪谷の水質調査～臭気分析の試み～. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文
- 5-2. 環境省ホームページ <https://www.env.go.jp/kijun/wt2-2.html>

スジアラの耳石の酸素同位体比を使った経験水温の特定

生物地球化学研究室

2017057 山田康陽

指導教員：田中健太郎

1 緒言

地球温暖化により全球規模で海水温が上昇している。地球温暖化による海水温の上昇は海洋生態系に影響を与え、海洋生物の分布域を変化させる。亜熱帯、熱帯域に生息する大型のハタ科魚類であるスジアラは、近年、長崎県や山口県でも越冬が確認されており、生息域が北方に拡大している。しかし、スジアラは稚魚期の分散により分布域を拡大しているのか、成魚期に高緯度へ移動しているのか分かっていない。そこで、耳石の酸素同位体比を用いた経験水温の推定を行った。

耳石は魚類の内耳で形成される炭酸カルシウムを主成分とする硬組織である。耳石は付加成長するのでその個体の成長を記録し、輪紋を数えるとその個体の年齢を推測できる。酸素同位体比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)とはある物質に含まれる質量数が16と18の同位体の存在比である。耳石の酸素同位体比は塩分と水温の両方の影響を受け変化するため、海水の塩分が分かれば魚が経験した水温を推定できる。年齢にともなう魚の経験水温の変化を明らかにすることで、その個体がいつ分布域を変化させたのか推測することができる。本研究は耳石の酸素同位体比を用いてスジアラが経験した水温を年齢ごとに調べ、スジアラがどのように分布域を拡大しているかを明らかにすることを目的とする。

2 実験方法

分析に用いられた個体は、2020年から2021年に八重山(9個体)、奄美諸島(9個体)、対馬(8個体)で漁獲された計26個体で、年齢は7-17歳だった。顕微鏡とドリルを用いて深さ50-150 μm でスジアラの耳石の成長方向に沿って核から縁辺まで掘削し、耳石粉末試料の酸素同位体比を安定同位体質量分析計で測定した。次の水温換算式 ([1])を用いて、耳石の酸素同位体比($(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{CaCO}_3}$)から経験水温を求めた。

$$T(K) = 17.88 \times 10^3 / (10^3 \ln \alpha + 31.14)$$

ここで α は炭酸カルシウムと海水の酸素同位体比の同位体分別係数を表す：

$$\alpha = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{CaCO}_3}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{H}_2\text{O}}}$$

海水の酸素同位体比($(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{H}_2\text{O}}$)は採取地の塩分の2003年から2022年の平均値から求めた ([2])。

3 結果

耳石の輪紋から推定したスジアラの年齢とスジアラが経験した水温の関係を図1に示す。また、各個体の核と縁辺の1つ内側から得られたデータに着目し、採取地ごとに稚魚期(核)と成魚期

(縁辺)の経験水温比較するグラフを作成した(図2)。

縁辺のデータは漁獲された時期が個体ごとに異なり、1年ごとの正確な経験水温を推定できないため1つ内側のデータを使用した。どの地点でも共通して稚魚期に高い水温を経験し、2~3歳までに経験水温が低下している。

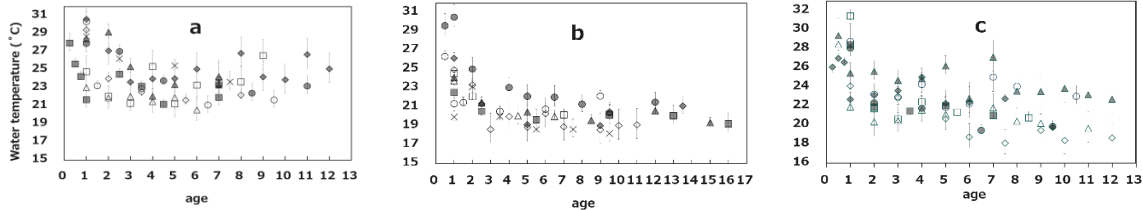


図1：a(八重山)、b(奄美諸島)、c(対馬)で採取されたスジアラの年齢ごとの経験水温

4 考察

図2に示した八重山の核と縁辺で経験水温の差が生じた原因としてスジアラの稚魚期から成魚期にかけてのサンゴ礁内での行動圏の変化が考えられる。スジアラは稚魚期にサンゴ礁の内湾側に生息し、成魚になるとサンゴ礁の外洋側で生息するため[3]、成魚期に比べ、稚魚期は低塩分、高水温を経験していると考えられる。その結果、稚魚期の耳石の酸素同位体比は成魚期よりも低くなるので実際の経験水温よりも高い値になっていると考えられる。

対馬個体群のグラフを見ると(図1c)、2歳になるまでにほとんどの個体が0-1歳の時と比べ低い水温を経験している。また、稚魚期は成魚期よりも高い水温を経験していることから(図2)、対馬で漁獲されたスジアラは八重山や奄美諸島などの温暖な海域で生まれた可能性が高いと考える。したがって、スジアラは稚魚期に黒潮や対馬海流を介して分散により北上していると推測できる。

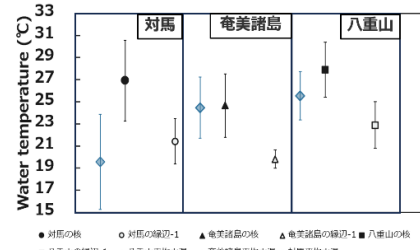


図2：核と縁辺-1歳の経験水温比較

5 結論

対馬で漁獲された個体のほとんどが対馬よりも温暖な海域で生まれ、孵化から1~2年の間に経験水温が下がることから、稚魚期に分散によって分布域を拡大していると推測した。稚魚期と成魚期では生息域が異なり、塩分の影響を稚魚期と成魚期でわけて考える必要がある。また、長崎県よりさらに北方の山口県での越冬が確認されているため、成魚個体だけでなく対馬で漁獲された若齢個体の耳石の酸素同位体比を調べスジアラの分布域の拡大をより正確に調べる必要がある。

6 参考文献

- [1]北村晃寿.海生二枚貝類の貝殻を用いた成長線解析・酸素同位体比分析—完新世環境変動の高分解能解析—.第四紀研究 57,2018,p.19-29.
- [2]小平智弘,堀川恵司,張勁,千手智晴.日本海対馬暖流域における海水の酸素同位体比と塩分の関係.地球科学 50,2016,p.263-277
- [3]Atsushi Nanami et al.Spatial distribution of parrotfishes and groupers in an Okinawan coral reef: size-related associations in relation to habitat characteristics.PeerJ,2021,p14.

二枚貝を用いた窒素負荷モニタリング方法の検証

生物地球化学研究室

2017034 勝呂逸希

指導教員:田中健太郎

背景

下水や化学肥料などの人為起源の窒素が環境中に排出される窒素負荷が起きている。海洋の沿岸で窒素負荷が起きると富栄養化し、赤潮を形成する。大量の植物プランクトンが短期間に死ぬと、分解の際に大量の酸素が消費され、海洋生物が大量に窒息死してしまう。そこで原因解明のために、窒素負荷の場所、

時期、程度を解明する必要がある。継続的に広い範囲の調査地点に赴き、河川水や海水を採取して分析するためには、膨大な時間とコストがかかってしまう。そこで簡易的な方法を見つける必要がある。

本研究では、二枚貝の窒素同位体比を使って、窒素負荷をモニタリングする手法

を検討する。高い窒素同位体比を持つ下水など生活排水による窒素負荷が起これば、海洋の窒素同位体比が高くなる。貝の窒素同位体比は海洋の窒素同位体比も反映するため、窒素負荷が起これば、二枚貝の窒素同位体比は高くなると予想される。

目的

窒素負荷をモニタリングする簡易的な方法としてムラサキイガイの窒素同位体比を利用できるか検討する。

方法

ムラサキイガイを東京湾(金沢漁港、久里浜港)、佐渡島(両津港)で採取した。ムラサキイガイの貝殻表面の殻皮を成長方向に沿ってドリルで削り粉末を得た。粉末を有機物分析用、炭酸カル

シウム分析用に分けて分析した。有機物分析用は、銀カプセルに入れ希塩酸を使って炭酸カルシウムを除去したのち、80°Cで加熱し一晩乾燥させた。乾燥させた後サンプルの窒素同位体比を安定同位体質量分析計で分析した。炭酸カルシウム分析用の粉末の酸素同位体比を、安定同位体質量分析計で分析した。

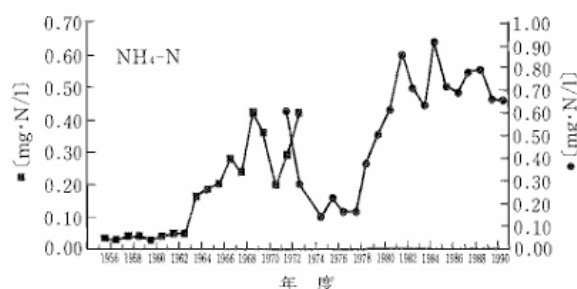


図1:東京湾のアンモニア態窒素の経年変化



図2:ムラサキイガイ

結果・考察

ムラサキイガイ殻皮の窒素同位体比($\delta^{15}\text{N}$)の平均値は東京湾の金沢漁港の個体で $12.4 \pm 0.8\%$ 、久里浜漁港の個体で $10.5 \pm 0.9\%$ 、両津港の個体で $6.0 \pm 0.6\%$ だった。人口が少ない佐渡島に比べて、人口が多い東京湾の窒素同位体比は、約2倍高くなっていた。東京湾と佐渡島のムラサキイガイの栄養段階がほとんど同じだとすると、窒素同位体比の差は海洋の窒素同位体比の差を表すと考えられる。したがって、生活排水による窒素負荷が大きい東京湾の方が、ムラサキイガイ殻皮の窒素同位体比が高かったことから、殻皮の窒素同位体比は窒素負荷を反映していると考えられる。

貝殻の酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)は水温と塩分の影響を受けるため季節変化を表す。同じ粉末の酸素同位体比と窒素同位体比を比較して、成長に伴う殻皮の窒素同位体比の季節変化を図4で表す。その結果、酸素同位体比が低い夏に殻皮の窒素同位体比は高く、酸素同位体比が高い冬に窒素同位体比は低い値を示した。その原因の一つとして、合同式下水道が挙げられる。降水量の多い夏季は、未処理の下水がそのまま沿岸に排出されるため、高い同位体比を持つ窒素が沿岸に供給され貝類に取り込まれる可能性が考えられる。

まとめ

今回の研究の結果から貝殻の殻皮の窒素同位体比は生活排水由来の窒素負荷を反映している可能性が考えられる。貝殻の酸素同位体比も分析することで、殻皮の窒素同位体比の季節変化を明らかにすることができた。季節変化の原因は特定できないが、一つの可能性として夏季に未処理の生活排水が沿岸に排出していると考えられる。

引用文献

東京湾 - 100年の環境変遷 小倉紀雄, 高田秀重 安全工学, 1995年, 34巻5号 P.325-331

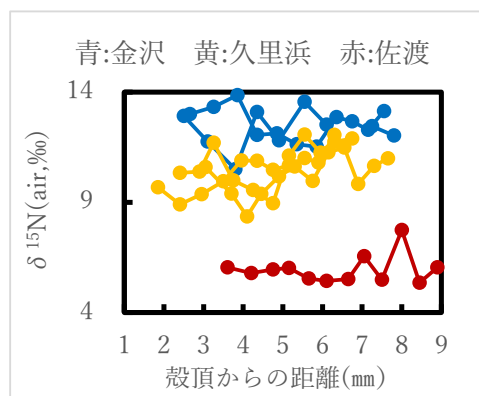


図3:ムラサキイガイの殻皮窒素同位体比

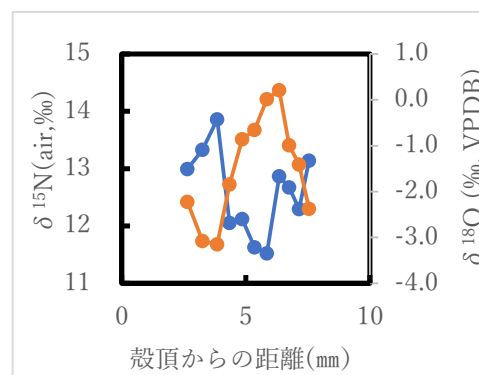


図4:金沢漁港から採取したムラサキイガイの窒素(青)・酸素同位体比(橙)

鳥類の含気性脊椎骨における含気率の制約要因

古生物学研究室

2017003 朝倉 あと

指導教員 中島保寿

1. 緒言

鳥類のからだには肺のほか気嚢と呼ばれる袋状の気管があり、これが伸縮することで、肺において呼吸時吸気時のいずれにおいても一方通行で空気が流れ、きわめて効率的なガス交換が行われる。この気嚢が入り込んだ骨を含気骨 (Fig. 1) と呼ぶが、化石においても含気骨は確認でき、鳥類の祖先である獣脚類恐竜の段階から発達していることがわかっている (O'Chonner, 2005)。ただし鳥類やその他恐竜類の骨含気性については系統によってばらつきがあり、各骨の含気性の有無や含気率を決定する要因についてはほとんど明らかになっていない。Moore (2021) はコウノトリ科の脊椎骨の含気率と脊椎骨の形状には相関関係があるとしたが、それ以外の分類群で一般的に椎骨形態と含気率に関する関係があるかはわかっていない。そこで、本研究ではコウノトリ科以外の鳥類における椎骨の形態と含気率の関係を明らかにし、含気率を決定する制約要因を解明することを目的とした。

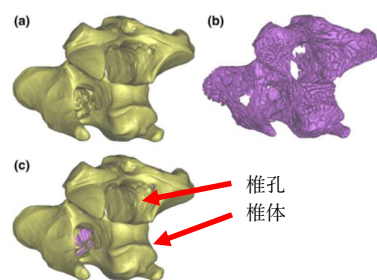


Figure 1. コウノトリ科エンビコウの含気骨(第3頸椎)(Moore, 2020)
(a)緻密骨のみ (b)含気洞のみ (c) 緻密骨と含気洞の組み合わせ

2. 材料・方法

本研究では、材料として後述する実験系で解析可能なサイズの椎骨を持ち、かつ、系統的にもサイズの点でも幅広い対象種 (Table 1.) を選定し、非交連骨格標本の状態と

Table 1. 使用した対象種

種名	分類	体長(cm)	椎骨の数
クロサギ	ペリカン目サギ科	約 63	23(C:17個, T:6個)
アオサギ	ペリカン目サギ科	約 93	23(C:17個, T:6個)
ハシブトガラス	スズメ目カラス科カラス属	約 57	19(C:13個, T:6個)
トビ	タカ目タカ科	59~69	19(C:13個, T:6個)
エミュー	ヒクイドドリ目エミュー科エミュー属	150~200	27(C:18個, T:9個)

して実験に用いた。鳥類の脊柱は頸椎 (C)、胸椎 (T)、複合仙椎、尾椎からなるが、このうち C と T のみ計測対象とし、また明らかに含気洞の発達していない第 1 頸椎 (C1) は検査対象外とした。各脊椎骨について、ノギスを用いて頭尾方向、背腹方向、左右幅を測定し、各部位の長さをもとに、椎体を単純な円錐台形、椎孔を円柱、棘突起を台形と長方形からなる立体に近似して立体図形モデルとし、モデルの表面積を求めた。

各椎骨の緻密骨の体積は、緻密骨の比重 (1.9 g/cm³: Pithioux et al., 2002) と、電子天びんで秤量した骨格標本の重量から算出した。このとき、脊椎骨を湿ったペーパータオルで包み密封安置することで、体内に近い含水率を再現した。次に、椎骨の含気洞も含む全体の体積を求めるために、真空下で含気洞をゼラチンで充填した。これを高さ調節可能な三脚に固定した針金製フックに吊るし、電子秤り上の蒸留水 (26°C、密度 0.997 g/cm³) 入りビーカーに沈め、重量変化からアルキメデスの原理を用いて体積を算出した。含気率を求めるために椎骨の含気洞も含む全体の体積と緻密骨の体積から含気洞のみの体積を算出し、椎骨の含気洞も含む全体の体積におけるその割合を求めた。

3. 結果

クロサギとアオサギの頸椎は総じて頭尾方向に長いが、特に長さ／高さ比は頸部中盤前半部（C6-C9）で大きく、胸椎で小さくなる傾向にある。一方で、トビ・ハシブトガラスでは椎骨の長さ／高さ比は脊柱を通じて大きな変化はなく、サイズが徐々に増加する傾向にあった。含気率についてはいずれの種も前方から後方にかけて増加する傾向にあるが、サギ科の2種では頸椎中盤前半部で顕著に減少し、再び増加するパターンをした（Fig. 2）。一方、概算表面積と緻密骨の体積を用いた回帰分析の結果、エミューでは線形回帰式の決定係数は非常に高い値（ $R^2=0.9464$ ）を示した（Fig. 3）。

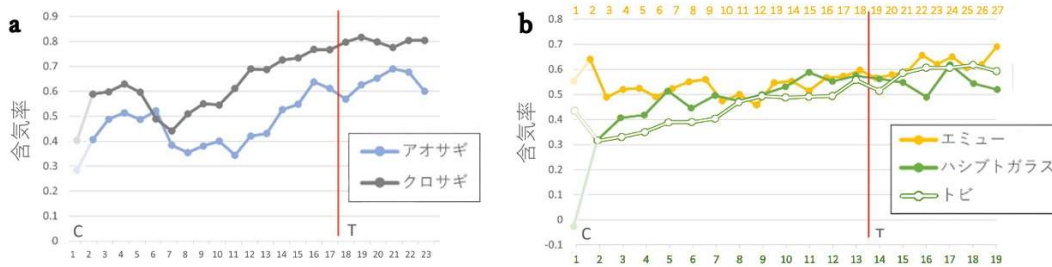


Figure 2. 鳥類の椎骨における含気率の連続変動 a)クロサギとアオサギ. b)ハシブトガラス、トビ(横軸下段), エミュー(横軸上段). 赤い線は頸椎と胸椎の境界線.

4. 考察

Moore (2020) ではコウノトリ科の脊椎骨の形状が長細いほど含気率が低下する傾向があることを示し、その原因は頸部の運動に伴って生じる応力への適応として一部の頸椎で緻密化が起こる可能性を示唆した。本研究の結果についてもクロサギとアオサギにおいて最も細長い頸部中盤の頸椎（C6-C9）で含気率が低い傾向は示された。ただし、表面の緻密骨の厚みが椎骨の形状によらずば一定であると仮定すると、概算表面積と緻密骨体積の線形関係と、形状により含気率が変化する現象の2つを同時に説明できる。

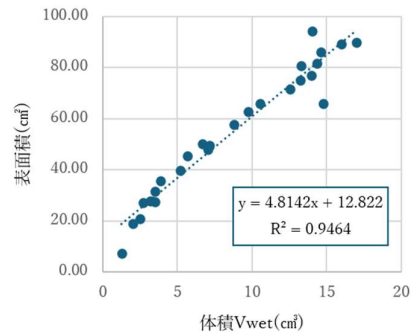


Figure 3. エミューの椎骨の表面積と緻密骨の体積の関係.

5. 引用文献

- Gutzwiller, S.C., Su, A., and O'Connor, P.M. (2013) Postcranial pneumaticity and bone Structure in two clades of neognath birds. *The Anatomical Record* 296:867–876.
- Moore, A.J. (2021) Vertebral pneumaticity is correlated with serial variation in vertebral shape in storks. *Journal of Anatomy* 238:615–625.
- Pithioux, M., Chabrand, P., and Mazerolle, F. (2002). Statistical failure model of bones. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 2:19-27
- O'Connor, P.M. and Classens, L.P.A.M. (2005) Basic avian pulmonary design and flow-through ventilation in non-avian theropod dinosaurs, *Nature* 436:253-256.

銚子層群犬吠埼層で産出する *Macaronichnus* の研究

古生物学研究室

2017021 川上千昭 指導教員 中島保寿

1. 緒言

中生代海洋革命(MMR)は、底生生物と捕食者との競争的進化がエスカレートした時代とされ (Vermeji, 1977), 当初は白亜紀がその最も激化した時代と考えられていたが, 近年は生痕化石の分析から, ジュラ紀において多様な内在底生生物による空間利用の増加があったことが示されている (Buatois, 2022). 一方で前期白亜紀の生痕化石に関しては未だ情報が少なく, この時期にさらなる内在底生生物の進化が起こった可能性も残されている. 千葉県銚子市に分布する下部白亜系銚子層群においては, 犬吠埼層のみから内在性生物の生痕化石である *Macaronichnus* の産出が報告されている (Nara and Seike, 2019) が, 犬吠埼層以外の産出層準や生痕化石の形態, 生成者の古生態についての記載はいまだ乏しい. そこで本研究では銚子層群において生痕化石の産出と古環境との関連を明らかにすること, および *Macaronichnus* の特徴とされる鉋物選別の過程など, 同生痕の形成生物の古生態を明らかにすることを目的とした.

2. 地質概説

銚子層群は前期白亜紀の浅海性堆積物であり, ジュラ系愛宕山層群を不整合で覆い, 下部から海鹿島層, 君ヶ浜層, 犬吠埼層, 酉明浦層, 長崎鼻層に区分される (安藤, 2006). 基底の海鹿島層下部はトラフ状斜交層理を示す礫岩と礫質砂岩で構成され, 下部外浜環境よりも浅い堆積環境の堆積物とみなされている. 海鹿島上部, 犬吠埼層は下部外浜で堆積したハンモック状斜交層理(HCS)細粒砂岩であり, 君ヶ浜層と酉明浦層は砂岩泥岩互層と砂質シルト岩からなる内側～外側陸棚堆積物, 最上位の長崎鼻層はタービダイト成砂岩泥岩互層を主体とする外側陸棚～大陸斜面上部の堆積物とされている. (安藤, 2006)

3. 材料と方法

千葉県銚子半島の太平洋沿岸で露出する露頭の野外観察を行い, 粒度, 堆積構造, 生痕化石の有無および種類を柱状図に記載し, 斎藤 (1989) に基づく堆積環境を推定したうえで, 産出した *Macaronichnus* との対応関係を検討した. また, 犬吠埼層の転石標本から *Macaronichnus* の発達する砂岩の縦断面での薄片を作成し, その微細構造を偏光顕微鏡およびカメラを用いて観察した.

4. 結果

4-1 堆積相解析と産出の記載

犬吠埼層における *Macaronichnus* はすべて細粒砂岩の層理面に対して平行に走行していた. 直径は約 5mm で, 表面が黒色の粒子でおおわれた円筒状の構造であった (Fig. 2A). また, 犬吠埼層の堆積環境は下部外浜と内陸陸棚であり, 両方の堆積物から *Macaronichnus* が産出し, 犬吠埼層のやや泥質の層準でも *Macaronichnus* の産出を確認した. なお君ヶ浜層, 酉明浦層は生物擾乱が激しく生痕化石が確認できず海鹿島層, 長崎鼻層の層準から *Macaronichnus* は確認できなかった.

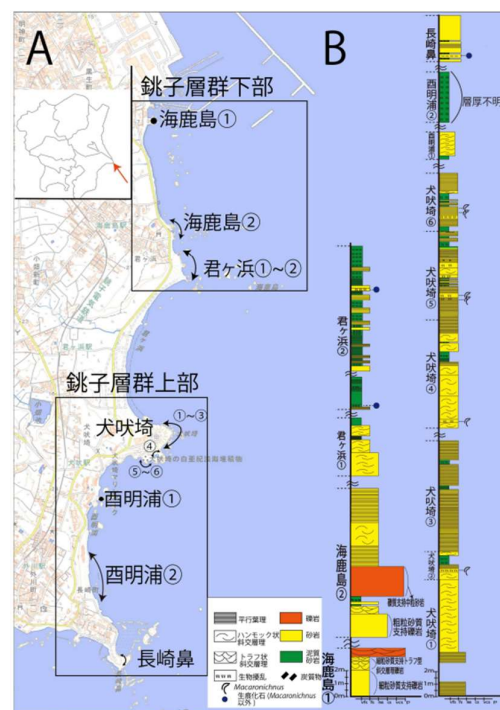


Figure 1A. 調査地域の地質. 1B. 銚子層群総合柱状図. (国土地理院地図を編集)

4-2 断面構造の観察

Macaronichnus は泥質を挟んで産出していた (Fig. 3A). 生痕内部は周囲の砂岩と比べて鉱物粒子の淘汰が良く、無色鉱物の割合が多くそのほとんどが石英を占め、次いで斜長石の割合が多い (Fig. 3B). 生痕内部の有色鉱物は主に海緑石であった.

5. 考察

下部外浜から内側陸棚にかけては主に細粒砂が堆積し、沖合に向かうにしたがって細粒化し泥質の割合が多くなる。泥質堆積物は静穏な環境で堆積するため、生物の死骸やフンとともに波浪による侵食を受けずに堆積する。したがって泥質堆積物は生物由来の有機物を多く含み *Macaronichnus* 生成者にとって泥質堆積物は餌場であると考えられる。そのため有機物を含む泥質の細かい粒度を摂食しそれ以外の比較的大きい粒度の鉱物を排泄したため、泥質を貫通した *Macaronichnus* が産出したと考えられる (Fig. 3A). そして生痕内部の海緑石は体内で取り込み排泄した有機物が置き換わったものと考えられる。一方で泥質砂岩主体の君ヶ浜層や酉明浦層において *Macaronichnus* の産出は確認されなかったが、君ヶ浜層の堆積環境である内側陸棚から外側陸棚は生物にとって生息しやすい環境であることから生存競争が激しかったと考えられる。したがって今回の下部外浜から内側陸棚を示す犬吠埼層のみでの *Macaronichnus* の産出は波による洗い出しを受けるリスクがありながらも生存競争の少ない環境で有機物を摂食する行動の反映と考えられる。

引用文献

- 安藤寿男 (2006) 関東平野東端の太平洋に分布す銚子層群・那珂湊層群・大洗層の地質学的位置づけ, 地質学雑, 112.1.84-97
- 石垣朝子・安藤寿男 (2000) ハンモック状ベッドフォームのサイズ分布-千葉県北東部, 下部白亜系銚子層群を例として-, 地学雑誌, 106, 7, 472-481
- Buatois, L et al. (2022) Infaunalization and resource partitioning during the Mesozoic marine revolution: *Geology*, 50, 786-790
- Nara M et al. (2019) Palaeoecology of *Macaronichnus segregatis degiberti*: Reconstructing the infaunal lives of the traviid polychaetes, *PALEO*, 516, 284-294
- 斎藤文紀 (1989) 陸棚堆積物の区分と暴風陸棚における堆積相, 地学雑誌, 98.164-179.
- Vermeij, G.J (1977) The Mesozoic marine revolution: Evidence from snails, predators and grazers: *Paleobiology*, 3, 245-258

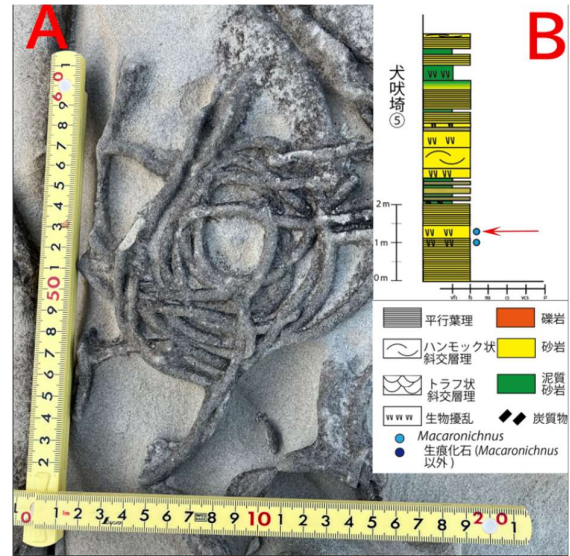


Figure 2. A) 層理面から見た *Macaronichnus* の産状. B) 産出層準前後の柱状図. *Macaronichnus* の産出地点を矢印で表示.

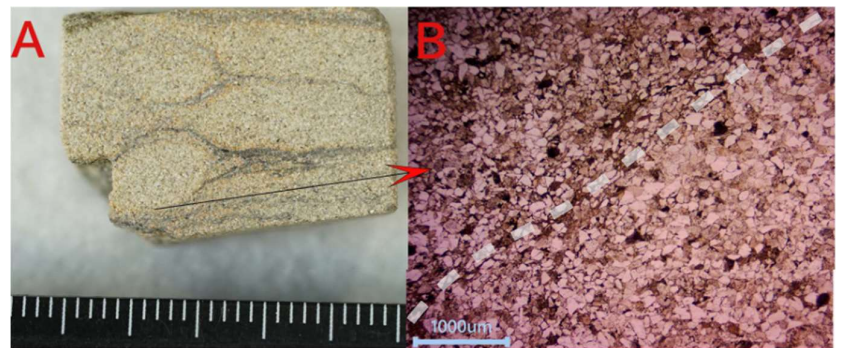


Figure.3 A) 泥質の薄層を挟む細粒砂の薄片試料. B) 生痕縁の微細構造. 画像中央の泥質の縁(白点線)を境に右側が生痕内部で左側が犬吠埼層の鉱物組成を示す.

Dunkleosteus 皮骨の厚みから復元する板皮類の重心制御の仕組み

古生物学研究室
2017046 中島 風雅
指導教員 中島 保寿

1. 緒言

魚類の遊泳様式の進化には、体重、形態、筋収縮といった多くの要素が複合的に関わっている(Langerhans and Reznick, 2010). 古生代シルル紀からデボン紀にかけて、魚類の一部が捕食を可能とする顎骨を得た(Lamsdell and Braddy, 2009)ことで、遊泳を行う脊椎動物の形態は著しく進化した. その代表例として挙げられるのが板皮類(Placodermi)である. 中でも、デボン紀後期の大型節頸類 *Dunkleosteus* は全体像や全体の復元に注目が集まっているが不明点も多い(Engelman, 2023). そこで本研究では、*Dunkleosteus* の実物皮骨化石を用いてその遊泳や捕食における姿勢調節の様式を解明することを目的とする.

2. 材料と方法

本研究に用いたのは *Dunkleosteus* sp. の皮骨化石を含む炭酸塩質コンクリーションのブロックである. 本標本はモロッコ南部に位置する Anti-Atlas 山脈の東部 (N31° E5°) から産出した. この地域では中部-上部デボン系が分布し、後期デボン紀 Givetian-Famennian にかけての海洋生物化石が産出する(Wendt, 2021; Frey et al., 2019).

本標本は同一個体の骨の集合体と見られ、ブロック①-⑳に大別される (Fig. 1). 左下顎骨 (④) には内側縁の弧の輪郭や *Dunkleosteus* の特徴である頭側端の牙状の突起が見られる. また⑲は胴体の最も背側に位置する中央背骨の一部である. 本研究では母岩の付着が少なく欠損が少ない骨から随時化石剖出作業を進め、主に剖出の完了した左前位背側骨 (⑳) 及び後位腹側骨 (㉑) を対象とした.

まず破断していた左前位背側骨に関して、破断面においてその組織学的特徴を観察、カメラ撮影したのちホットメルト接着剤により接着した. 次にそれぞれの標本の外表面上に 2 cm 四方のグリッドを設定した. 次にグリッドのマス目の中心点から側面の最近傍点までの厚みを計測した. 計測は 3 回行いその最小値を最終的な計測値とした. 厚みの分布は、最大値を 80 mm として 1 mm 単位で設定したカラースケールで可視化した.

また、剖出が完了していない中央背骨 (⑲) については、比較のために簡易的な計測を行った. 計測点は特に厚い中央の突起部分、及び比較的薄いとされる前位背側骨付近の 2 点とした.

3. 結果

前位背側骨のグリッド交点 A10 から O10 にかけての破断面 (Fig. 3B 参照) では頭側端から中央部にかけて表層、内層の二層に区分され、それより後方では表層のみからなる. 二層構造の各層には頭側端 (頸関節付近) を中心として壘重する薄層状構造が発達していた. また、骨組織は全体的に血管腔に富むものの内部に骨髓腔にあたる大きな空隙は見られず比較的高密度の組織からなることが観察された (Fig. 3A).

厚み測定の結果、前位背側骨の頭側端に副項骨と接する突起が存在し、骨盤はその周辺において特に厚く約 40~50 mm の値を示し、尾側、背側、腹側縁に近づくごとに薄くなっていく構造が観察された (Fig. 4A). 一方、後位腹側骨は全体的に薄く厚さ 35 mm を越えることはなかった (Fig. 4B).

また、中央背骨の厚みは突起部分で 97.1 mm、前位背側骨付近で 27.6 mm であった.



Figure 1. 東京都市大学に保管されている *Dunkleosteus* sp. 標本の全体図 20 個のブロックに大別されている.

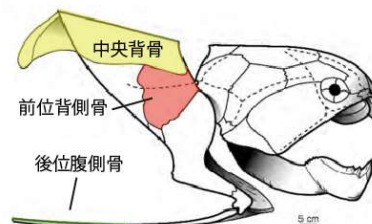


Figure 2. *Dunkleosteus* 骨格復元図 Carr (2010) を改変.

4. 考察

前位背側骨が後位腹側骨に比べ厚く、特に厚い領域は前方に偏っていること、及び中央背骨の突起部分が 97.1 mm という非常に大きい値をとることから *Dunkleosteus* の胴甲の骨格の重心は背側かつ前方に偏っていると見える。この結果は、Carr (2010) が述べたように *Dunkleosteus* が底生生活には向いておらず活発な遊泳を行う遊泳捕食者であったことを支持する。また、前位背側骨断面に見られた薄層状の構造を成長線であると解釈すると、骨の成長中心が頸関節付近にあり、その表面で付加成長が続いたことで頭側に厚みが集中したと考えられる。肉眼観察では顕著な空洞は見られず一定の骨密度をもつことから、厚みの差は重心に少なからず影響を与えていたと解釈出来る。

水棲生物において背側に重心が偏っている場合、揚力などの外力を受けた際にローリングモーメントが発生し安定性を損なう (Webb, 2002)。従って、活発な遊泳者であったとされる

Dunkleosteus の骨格の重心が背側に偏っていたとすると、それ以外の組織を用いて重心を調節していたと予想出来る。現生の魚類では浮力調節器官として鰾が利用されている (塚本, 1996) が、Trinajstić (2022) が示したように板皮類に見られた肺や鰾らしき痕跡は硬骨魚類の持つそれらと位置が矛盾するため、鰾と相同なものではなく肝臓などの別の器官であるとされている。そのため、*Dunkleosteus* が安定した遊泳を行うには、現存する鰾とは異なる起源をもつ重心調節のための組織を持つことで、軟組織の重心を腹側に偏らせる必要があったと考えられる。

5. 引用文献

- Carr, R. 2010. Paleocology of *Dunkleosteus terrelli* (Placodermi: Arthrodira). *Kirtlandia*, 57, 36-45.
- Engelman, R. 2023. Giant, swimming mouths: oral dimensions of extant sharks do not accurately predict body size in *Dunkleosteus terrelli* (Placodermi: Arthrodira). *PeerJ*, 15131.
- Frey, L. et al. 2019. Fossil-Lagerstätten, paleoecology and preservation of invertebrates and vertebrates from the Devonian in the eastern Anti-Atlas, Morocco. *Lethaia*, 53, 242-266.
- Langerhans, R. B. and Reznick, D. N. 2011. Ecology and Evolution of Swimming Performance in Fishes: predicting evolution with biomechanics. *Fish Locomotion*, 1, 200-248.
- Lamsdell, J. C. and Braddy, S. J. 2009. Cope's Rule and Romer's theory: patterns of diversity and gigantism in eurypterids and Palaeozoic vertebrates. *Biology Letters*, 6, 265-269.
- 塚本勝巳, 1993. 魚類の遊泳運動, 比較生理生化学, 10, 249-262.
- Trinajstić, K. et al. 2022. Exceptional preservation of organs in Devonian placoderms from the Gogo lagerstätte. *Science*, 377, 1311-1314.
- Wendt, J. 2021. Middle and Late Devonian paleogeography of the eastern Anti-Atlas (Morocco). *International Journal of Earth Science*, 110, 1531-1544.
- Webb, P.W. 2022. control of posture, depth, and swimming trajectories of fishes. *Integrative and Comparative Biology*, 42, 94-101.

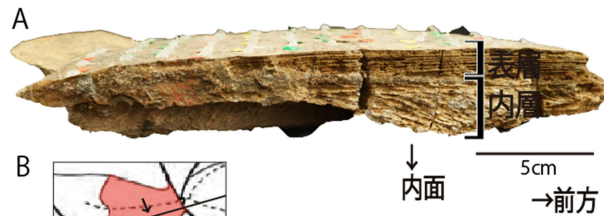


Figure 3. 前位背側骨の破断面図
A:破断面写真。表面に層状、内面に海綿状の二層構造が見られる。BはCarr (2010)より改変。

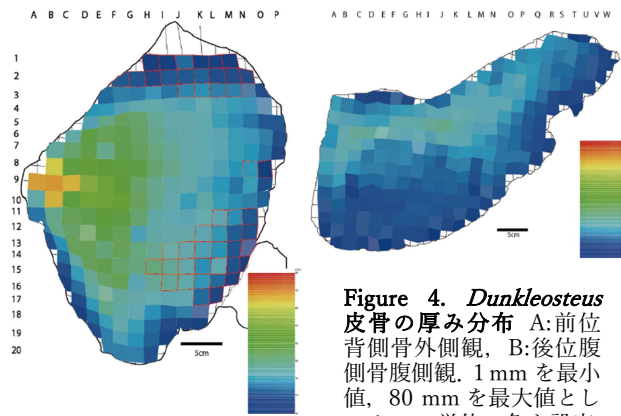


Figure 4. *Dunkleosteus* 皮膚の厚み分布 A:前位背側骨外側観, B:後位腹側骨腹側観. 1 mm を最小値, 80 mm を最大値として 1 mm 単位で色を設定, 小数点以下切り捨て. 参考データは赤枠で実測値と区別している。

非圧縮性流体における跳水と圧縮性流体における衝撃波の類似性

理論物理研究室 2017051 原 大悟
指導教員 長田 剛

1 緒言

私たちは液体や気体とのかかわりを持たずに生きていくことはできない。そのため、流体の運動は日常の中にたくさん隠れており、その一例が跳水である。跳水とは流速の速い流れ（射流）から流速の遅い流れ（常流）に切り替わるときに水位が急激に増加するという現象である。難しく聞こえるかもしれないが、実は蛇口からシンクに流れる水でも見ることができる。この現象は水という非圧縮性流体で起こる現象だが、圧縮性流体である気体でも類似の現象が知られている。その現象とは衝撃波である。本論では跳水と衝撃波の類似性に注目し、それぞれの式を比較するとともに、衝撃波の特性について調べた。また、跳水の理論をもとに目測では測れない射流の水深の測定を試みた。

2 理論

跳水は水位に不連続面をもつ定常な流れである。本論では跳水を非圧縮性完全流体、渦なしの浅水波として考え、その不連続面は薄いものとして取り扱う。すると、流体の V で定義される領域内の質量は、流体の運動とともにその領域の形状が変化しても内部の質量は変化しない。そのため、密度 ρ を用いて質量保存の式

$$\int_V \rho dV = \text{一定} \quad (1)$$

が成立する [1]。また、圧力 p と水深 h の間には

$$p = \frac{1}{2}gh^2 \quad (2)$$

が成り立つ [2]。そして、流体の運動は一般的にナビエ-ストークス方程式に従う。本論で扱う跳水、衝撃波は不連続面の前後で、一様かつ定常であると考えられるため、ナビエ-ストークス方程式を積分した式が有用である。これらより、詳細は本論で議論するが、跳水不連続面前後の深さの比、連続の式、運動量保存

$$\frac{h_2}{h_1} = -\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8F_r^2} \right) \quad h_1 U_1 = h_2 U_2 \quad h_1 U_1^2 + \frac{1}{2}gh_1^2 = h_2 U_2^2 + \frac{1}{2}gh_2^2 \quad (3)$$

の形にまとめることができる [2, 3]。ここで、 h 、 F_r 、 U 、 g はそれぞれ、水深、フルード数、流速、重力加速度を表している。また、添え字の 1 は跳水や衝撃波の不連続面の前の物理量を、添え字の 2 は跳水や衝撃波の不連続面の後ろの物理量であることを示している。例えば、 h_1 は不連続面の前の水深を表しており、 h_2 は不連続面の後の水深を表している。ここで、フルード数 F_r は流速と伝播速度との比で与えられており、気体では波の伝播速度は音速となるため、衝撃波におけるマッハ数 M との対応関係がある。衝撃波は空気中を密度波として伝わっていくため、圧縮性流体として考えなければならない。したがって、跳水の場合とは異なる仮定が必要になるが、連続の式と運動量保存は跳水の式の圧力項以外の h が流体の密度 ρ に入れ替わった式で表すことができる。また、衝撃波前後の密度変化はランキン-ユゴニオ関係として与えられ、マッハ数 M を用いた表現

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2} \quad (4)$$

や、圧力 p を用いた表現

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma - 1)p_1 + (\gamma + 1)p_2}{(\gamma + 1)p_1 + (\gamma - 1)p_2} \quad (5)$$

を導くことができる [1, 3]。ここで、 γ は比熱比である。

3 結果

跳水の h と F_r に対して、衝撃波の ρ と M がそれぞれ対応することが明らかとなったので、フルード数 F_r とマッハ数 M のそれぞれの関数として、跳水の無次元化された圧力変化

$$q_w = \frac{p_2 - p_1}{1/2h_1U_1^2} = \frac{2F_{r1}^2 - \sqrt{1/4 + 2F_{r1}^2} - 1/2}{F_{r1}^2} \quad (6)$$

と衝撃波の無次元化された圧力変化

$$q_a = \frac{p_2 - p_1}{1/2\rho_1U_1^2} = \frac{4(M_1^2 - 1)}{(\gamma + 1)M_1^2} \quad (7)$$

のような形で表すことができる [2]。

また、空気は比熱比 $\gamma = 1.4$ であり、水の波は $\gamma = 2$ の式と一致することが知られている [1]。このことから、これらの値を γ に代入した (6) 式と (7) 式を比較したものを図 1 に示した。図 1 からわかるようにフルード数が小さい時には $\gamma = 2$ の水の波の式が良い近似になっており、マッハ数が $2 < M_1 < 6$ の範囲では $\gamma = 1.4$ の衝撃波のものに近くなっていることが確認できた。

また、跳水の理論を用いて実際にシンクで見られる射流の水深 h_1 を推定するという実験を行った。フルード数を用いた水深の比 (3) 式に流量 Q を用いると、

$$\frac{h_2}{h_1} = -\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{8Q^2}{gh_1^3}} \right) \quad (8)$$

が得られる。ここで流量 Q が円状に広がる射流の半径 r と、一秒あたりに流れる水の質量 m の関数であることから h_2 、 m 、 r を測定することで h_1 を推定した。測定結果を図 2 に示す。跳水のフルード数依存性 (3) 式 (オレンジの直線) を再現するような h_1 を求めると、今回の実験 (詳細や条件等は本論文を参照) において水道からシンクに流れる射流の水深は 0.5mm 程度であると推定された。

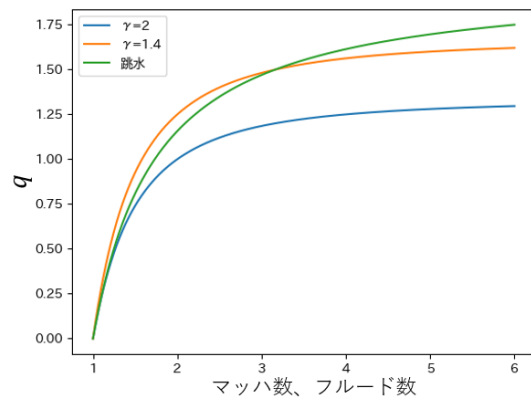


図 1: マッハ数、フルード数と無次元化した圧力変化

4 結論

跳水と衝撃波について比較し、その類似点を見つけることができた。実際にシンクで蛇口をひねった時に発生する跳水の h_1 はこれを定数として取り扱くと 0.5mm 程度と推定できた。今回は h_1 を固定し解析したが、これを精度よく測定できる機器の導入や現実に近い取り扱いをすることで、跳水の理論の検証や、対応関係を利用した衝撃波の理論の検証を行うことができるだろう。

参考文献

- [1] 巽 友正著, 「連続体の力学」, 岩波書店 (2021).
- [2] 富田 幸雄, 「浅底水流における高速気流の研究 (第 3 報)」, 日本機械学会論文集 22 巻 (1956),343.
- [3] 福江 純著, 「宇宙流体力学の基礎 [改訂版]」, 日本評論社 (2022).

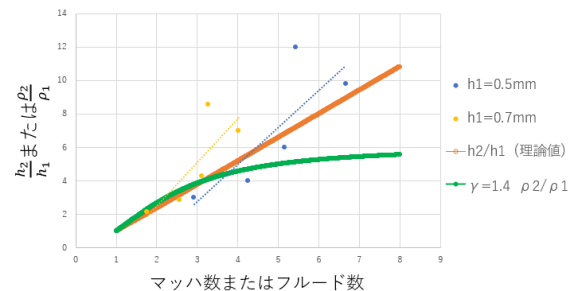


図 2: シンクに見られる跳水の h_1 の推定

非圧縮性完全流体における非線形方程式と KdV方程式のソリトン解

理論物理研究室
2017014 織間了
指導教員 長田 剛

1 緒言

流体は非線形方程式に従い、多様な様相を呈する。その中でも孤立波、ソリトンと呼ばれる波の運動についてその振る舞いを調べる。ソリトンは水の波の運動から発見されたので、同じように水の波の運動について考える。簡単のために、水の波は xy 面内の 2 次元運動で、 x 軸方向に伝播する 1 次元波として考える。また、水の波は粘性がなく、密度が変化しないと仮定し、非圧縮性完全流体として考えた。

2 理論

水の波は重力の下での静止状態から、何らかの力の作用によって引き起こされたものとする。静止状態から始まった流体の運動は、ラグランジュの渦定理により渦なしでなければならない。渦なしの流れでは、流体の速度成分を速度ポテンシャル $\Phi(\mathbf{x}, t)$ を用いて $\mathbf{u} = (u, v, w) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)$ と記述される [1]。また、非圧縮性流体は連続の方程式より

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (1)$$

が成り立つ。さらに、水面の y 座標と水底の y 座標をそれぞれ $y = \eta(x, z, t)$, $y = -h(x, z)$ と定義する。次に (1) 式の満たす Φ は水底と水面の両方における境界条件をそれぞれ満たさなければならない。水底 $y = -h(x, z)$ に対しては固体境界に対する非粘性境界条件により、固体境界の法線方向の座標成分を n として

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

が要求される。また、水面に対する境界条件については、変形する水面を表す表面条件 $F(\mathbf{x}, t) \equiv y - \eta(x, z, t) = 0$ と定義すると、任意の時刻で

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})F = 0 \quad (3)$$

が成り立たなければならない。すると、これらの条件より次の式が得られる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial z} \quad (4)$$

さらに、水面においては力の釣り合いが要求される。流体は非圧縮性であるので、一般化されたベルヌーイの定理より

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2g} |\text{grad } \Phi|^2 \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、(1) 式を波が微小振幅として解くと、波の位相速度 c は

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (6)$$

となり、位相速度が波数 k 、波長 λ に依存する分散関係が得られる。次に波の振幅が有限の大きさを持つ場合について (1) 式を解く。(6) 式を浅水長波近似を適用し、 $kh (\ll 1)$ で 2 次まで展開すると

$$c = c_0 \left[1 - \frac{h^2 k^2}{6} + O(k^4) \right], \quad c_0 = \sqrt{gh} \quad (7)$$

が得られる。この (7) 式の第 1 項は非分散的な浅水長波の位相速度であり、第 2 項は波数 k を含むため分散的である。その分散の強さを $\varepsilon = h^2 k^2$ とする。(7) 式の近似のもとでは波の位相は

$$kx - \omega t = k(x - c_0 t) + \frac{c_0 h^2}{6} k^3 t \quad (8)$$

で表される。この位相に現れる座標 x 、時間 t 共に微小な係数 k を含むので波の位相変化も微小になる。ここで、座標変換 $\xi = \varepsilon^{1/2}(x - c_0 t)$, $\tau = \varepsilon^{3/2} t$ を行い、その上で、速度ポテンシャル Φ と水面の座標 η をそれぞれ ε の冪級数で展開をすると

$$\Phi(x, y, t) = \varepsilon^{1/2} \left[\Phi^{(1)}(\xi, y, \tau) + \varepsilon \Phi^{(2)}(\xi, y, \tau) + \dots \right], \quad \eta(x, t) = \varepsilon \left[\eta^{(1)}(\xi, \tau) + \varepsilon \eta^{(2)}(\xi, \tau) + \dots \right] \quad (9)$$

を得る。(9) 式について、ラプラス方程式 (1) 式、境界条件 (2),(4),(5) 式を用いて $\eta^{(1)}$ についてまとめ、無次元の実定数 μ を用いた変数変換 ($\eta^{(1)} \rightarrow u, \tau \rightarrow t, \xi \rightarrow x$) を行うことによって、次の KdV 方程式を得る。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (10)$$

3 数値計算

数値計算の詳細に関しては本論にゆずるが、ここではその概略を述べる。時間 t については $0 \leq t \leq 2$ に対して、時間間隔 $dt = 0.02$ 、変位 x については $-1 \leq x \leq 2$ に対して、空間間隔 $dx = 0.003$ 、初期波形 $u_0 = \cos(\pi x)$ と設定して差分法によって (10) 式の解を求めた [2]。すると、パラメータ μ に対して、 $\mu = 0, (0.022)^2$ のとき時間発展させた波形 u はそれぞれ図 1, 2 のようになった。図 1 より、 $\mu = 0$ のときは波の波形 u のグラフは $t = \frac{1}{\pi}$ のときに波は垂直になり、 $t \leq \frac{1}{\pi}$ で波が発散することが確認された。一方で、 $\mu = (0.022)^2$ のとき、図 1 の場合と同様に $t = \frac{1}{\pi}$ のとき波は垂直になったが、 $t \geq \frac{1}{\pi}$ では図 2 の様に波が発散せず、いくつかの波に分かれて進行する。また、 $\mu = 2(0.022)^2$ のときについて数値計算を行うと $\mu = (0.022)^2$ と同様の振る舞いを見せた。

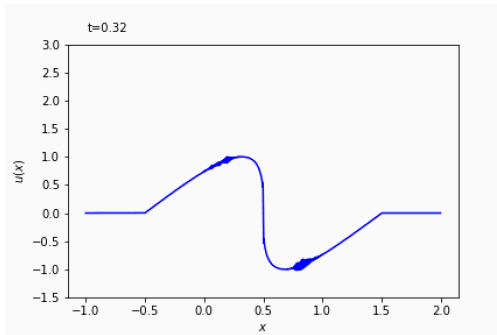


図 1: KdV 方程式 (10) の数値解 ($\mu = 0$)

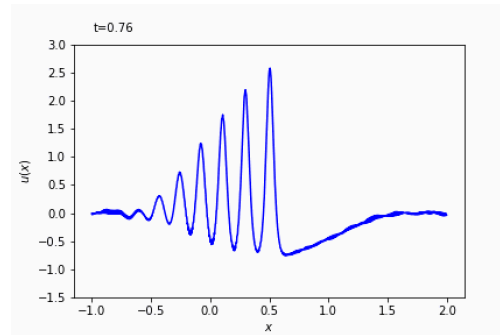


図 2: KdV 方程式 (10) の数値解 ($\mu = (0.022)^2$)

4 結論

数値計算の結果より、KdV 方程式 (10) 式は初期波形が $u = \cos(\pi x)$ において、 $t = \frac{1}{\pi}$ で波が垂直になることが明らかになった。また、 $\mu = 0$ すなわち x による 3 階微分の項が存在しないときには解が発散してしまい、孤立波は現れない。一方で、3 階微分の項が存在し、その係数が $\mu = (0.022)^2$ のときには波が垂直になったあとも発散せず、孤立波が現れる。また、 $\mu = 2(0.022)^2$ ときにも孤立波が現れることを確認した。

参考文献

- [1] 巽 友正著, 「連続体の力学」, 岩波書店 (1995).
- [2] 大槻 純也著, 「Python による計算物理」, 森北出版 (2023).

原子核衝突における π, K 生成比を用いた化学凍結温度の評価

理論物理研究室 2017020 上谷朋樹

指導教員 長田剛

緒言

物質は原子からできており、原子は原子核と電子、原子核は陽子と中性子から構成されている。さらにこれら陽子と中性子はハドロンと呼ばれ、クォークとグルーオンによって構成されている。クォークは単体で存在することができず、2 つまたは3つのクォークの強い相互作用によってハドロンとして自然界に存在している。クォーク間の相互作用は量子色力学(Quantum Chromo Dynamics)によってその性質が明らかにされた。それによるとクォーク間の距離が大きくなるにつれ相互作用が強くなるという性質(図1)があり、その結果、ハドロン内にクォークが閉じ込められている。この閉じ込めが破れる状況としてクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相の存在が予想されている。このQGPの状態は高温または高密度の条件下において量子色力学が持つ漸近的自由性により説明される。また、この状態は宇宙最初期に出現していたと考えられ、量子色力学の理論を検証するだけでなく、初期宇宙の物質の状態を解明するうえでもQGPの研究は重要である。

QGPは原子核衝突実験によって生成し観測することができると考えられている。本研究では化学凍結温度と呼ばれるQGP生成後に再びクォークとグルーオンがハドロン内に閉じ込められ、それ以上、ハドロン同士の非弾性衝突反応が起きなくなる温度を推定することを目的とする。この温度の推定にはクォークやグルーオン、およびハドロンは熱平衡状態にあると仮定した。

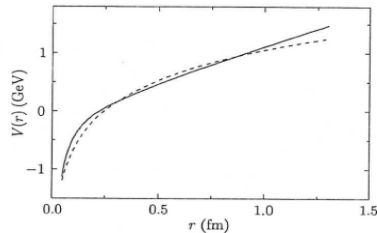


図1. qq 間距離と相互作用(実線と点線は異なる二つの理論モデルの結果である。)

実験と理論

原子核衝突の実験データとして核子あたりの衝突エネルギーが $\sqrt{s_{NN}}=5.44\text{TeV}$ (LHC ALICE)によるXe-Xe衝突実験のデータ[4]、 $\sqrt{s_{NN}}=193\text{GeV}$ (RHIC STAR)によるU-U衝突実験のデータ[5]の二つのデータを理論との比較に用いた。QGP後に生成されるハドロンの多くは

π 中間子、K中間子であるため、この2つのハドロンに注目する。K中間子にはsクォークまたは \bar{s} クォークが含まれているのに対し、衝突前の原子核はu,dクォークで主に構成されているためs、 \bar{s} クォークの生成はQGP状態が実際に生成されていることを示す証拠となる。原子核衝突後に生成したQGPが冷めてできた π 、Kを含むハドロン物質を熱的平衡にある電氣的に中性なボゾンガスとして扱う。ここで電氣的に中性であるため、 K^+ と K^- や π^+ と π^- のそれぞれの生成量は同じであると考えられる。ガスに含まれるハドロン同士が強い相互作用により衝突反応を繰り返し、熱平衡状態となると考えられるが、このときの温度をTとすると、質量 m_i のハドロンの生成量は

$$n_i = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \frac{4\pi p^2 dp}{\sqrt{p^2 + m_i^2/T - 1}} \quad (1)$$

で与えられる。そして、(1)式の積分を実行すると

$$n_i = \frac{Tm_i^2}{2\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} K_2\left(\frac{k m_i}{T}\right) \quad (2)$$

となる。ここで π 中間子の質量 134MeV、K 中間子の質量 494MeV を用いて(2)式より π 中間子と K 中間子の生成比 n_K/n_π を数値計算で求めた。また、 K_2 は二次の変形ベクセル関数である。

結果

π 、K 生成比の値は中心衝突において一定の値に収束することが実験で観測されている[4]。また、衝突エネルギー、衝突させる原子による影響は小さく、 π 、K 生成比は 0.13~0.17 となることが報告されている[4,5]。一方、図 3 に(2)式を用いて求めた n_K/n_π を示した(青い実線)。また、この結果に ALICE と STAR の実験結果を考慮すると、化学凍結温度は 110~130MeV であることがわかった。(図 3)

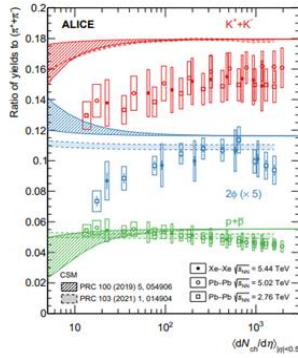


図 2. 原子核衝突後のハドロン生成量における π 、K 生成比[4]。生成量が多いほど多数の核子が関与した衝突で、生成される QGP の温度が高いと考えられる。

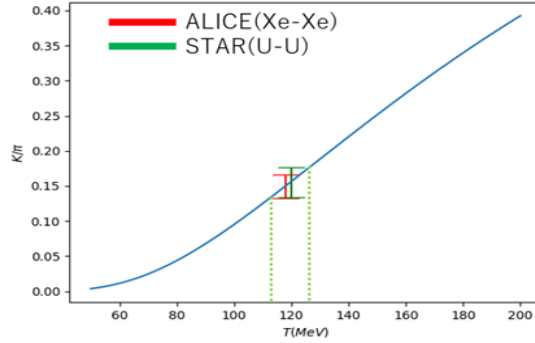


図 3. 理論式と実験データ

(2)式に基づいた理論計算(温度に対する π 、K 生成比)に実験データ(赤 ALICE[4],緑 STAR[5])を重ねることで化学凍結温度が推定できる。実験の誤差をエラーバーとして加えている。

結論

(2)式に基づいた π 中間子と K 中間子の比の値と実験データ(ALICE,STAR)の測定結果を用いることで、実験では直接観測することが難しい化学凍結温度を推定することができた。今後の課題は、化学ポテンシャルや膨張を理論式(1)に導入することで、より正確な化学凍結温度を求めることである。また、 π 、K 以外のハドロンに注目することでハドロンの種類による化学凍結温度の違いを明らかにし、QGP 生成後のクォークの振る舞いを調べたい。

参考文献

- [1] 「マーティン/ショー素粒子物理学」, B.R.マーティン,G.ショー 2017.
- [2] 大和 祐貴, 2021 卒業論文「相対論的原子核衝突にて生成される クォーク・グルーオン・プラズマの熱平衡化時間」.
- [3] C. Y. Wong. Introduction to high-energy heavy ion collisions. 1995.
- [4] ALICE Collabo., Eur.Phys.J.C **81** (2021),581.
- [5] STAR Collabo., Phys.Rev.C **107** (2023),024901.

膨張宇宙の基準モデルにおける密度パラメーターの時間的変遷

理論物理研究室
2017001 宇田茜音
指導教員 長田 剛

1 緒言

宇宙を非常に大きなスケール (100 Mpc 以上) で見ると、どこを見ても、どの方向を見てもほぼ同じように見える。すなわち宇宙は一様かつ等方である。また、ビックバンから現在まで膨張し続けていることが知られている。さらに、宇宙の曲率は 0 で平坦である。観測結果によると現在の宇宙の組成は、放射 (光子、ニュートリノ) 0.009 %、物質 (バリオン物質、ダークマター) 31 %、宇宙定数 (ダークエネルギー) 69 % である。では、宇宙は過去から現在までどのように膨張し、その組成はどのように変化してきたのだろうか。本研究ではフリードマン方程式を解くことにより、宇宙のスケールファクターと密度パラメーターの時間的変遷を見ていく。

2 理論

まず、ニュートンの重力理論と運動の第二法則からフリードマン方程式に類似した式を導出する。自己重力のもと膨張収縮する半径 R_s 、質量 M_s の球状の物質を考える。球面上の物質の単位質量あたりの運動エネルギーと重力ポテンシャルエネルギーの和が一定になるため、

$$\frac{1}{2}r_s^2\dot{a}^2 = \frac{4\pi}{3}Gr_s^2\rho(t)a(t)^2 + U \quad (1)$$

と示すことができる。ここで a はスケールファクターで、宇宙が時間とともにどのように膨張収縮するかを示す。また U は積分定数、 r_s は共動半径で $R_s(t) = a(t)r_s$ である。この (1) 式を $(r_s^2 a^2)/2$ で割る。すると、ニュートン形式のフリードマン方程式は

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) + \frac{2U}{r_s^2 a(t)^2} \quad (2)$$

と書ける。次に (2) 式に一般相対論的効果を含めると正しいフリードマン方程式 [1]

$$H(t)^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\varepsilon(t) - \frac{\kappa c^2}{R_0^2} \frac{1}{a(t)^2} \quad (3)$$

が導出できる。ここで $H(t) = \dot{a}/a$ はハッブルパラメーターで、比例関係にある銀河の後退速度と距離の比例定数である。現在の値は $H_0 = 68 \pm 2 \text{ km/s Mpc}^{-1}$ [1] と観測結果より知られている。また κ は曲率と呼ばれ宇宙がどのように曲がっているかを示す符号である。現在の宇宙は $\kappa = 0$ (平坦な宇宙) である。このときのエネルギー密度 $\varepsilon(t)$ を臨界密度と呼び、

$$\varepsilon_c(t) = \frac{3c^2}{8\pi G}H(t)^2 \quad (4)$$

と定義する。各組成のエネルギー密度を臨界密度で割ったものを密度パラメーター $\Omega(t)$ という。(3) 式のフリードマン方程式を密度パラメーターで表すと

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_{r,0}}{a^4} + \frac{\Omega_{m,0}}{a^3} + \Omega_{\Lambda,0} + \frac{1 - \Omega_0}{a^2} \quad (5)$$

となる。 $\Omega_{r,0}$ 、 $\Omega_{m,0}$ 、 $\Omega_{\Lambda,0}$ はそれぞれ現在の放射、物質、宇宙定数の密度パラメーターである。なお、 $\Omega_0 = \Omega_{r,0} + \Omega_{m,0} + \Omega_{\Lambda,0}$ となっている。(5) 式を解くことにより、スケールファクター $a(t)$ が時間の関数として求まる。 $a(t)$ が決まると赤方偏移 z の天体までの固有距離

$$d_p(t_0) = c \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad (6)$$

を求めることができる [2]。なお、 t_e は天体から光が放射された時刻、 t_0 は現在の時刻である。

3 結果

図1はスケールファクター a を時間 t の関数として表したものである。図2はそれぞれの密度パラメーターの時間的変遷を表したものである。なお、時間 t はハッブル定数の逆数であるハッブル時間 $H_0^{-1} = 14.38$ Gyr で表す。

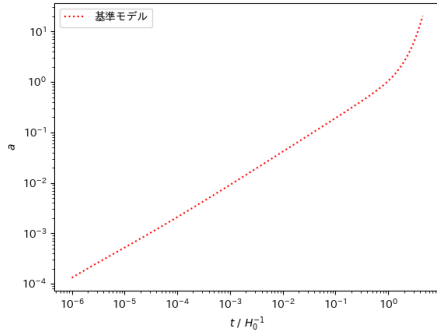


図1: 過去から現在まで宇宙は加速膨張している。 $a = 0.7$ となる時刻で膨張がより加速している。

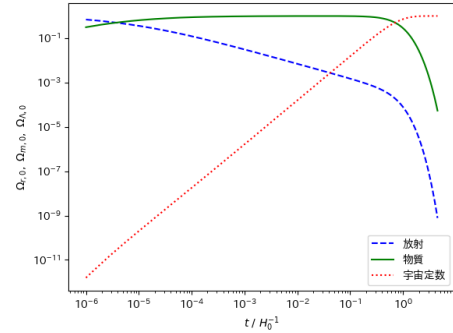


図2: $a = 0.7$ で物質優勢から宇宙定数優勢へと変化した、 $a = 2.8 \times 10^{-4}$ で放射優勢から物質優勢へと変化した。

図1より宇宙は過去から現在まで加速膨張し続けており、 $a = 0.7$ となる時刻で膨張がより加速していることがわかる。また、図2より宇宙の膨張がより加速した時期は、物質優勢から宇宙定数優勢へと変化した時期だとわかった。このことより、宇宙を加速膨張させているものは宇宙定数だと考えられる。さらに、 $a = 2.8 \times 10^{-4}$ となる時刻で放射優勢から物質優勢へと変化したこともわかった。

図3は観測される赤方偏移 z の関数として固有距離 $d_p(t_0)$ を、(6) 式で数値的に計算した結果である。この結果より赤方偏移 z が大きくなるにつれ、固有距離 $d_p(t_0)$ が一定の値に近づいている。つまり、基準モデルの地平距離は有限だとわかる。従って、この地平距離以上離れた天体からの光は私たちには届かない。これは宇宙の年齢が有限だということを示している。

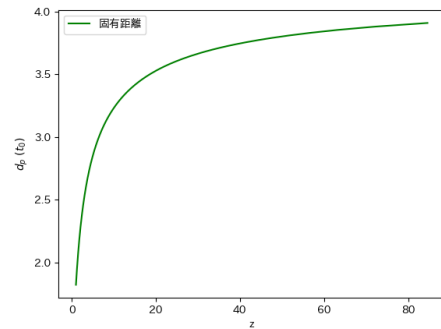


図3: 赤方偏移 z が大きくなるにつれ、固有距離 d_p が一定に近づいている。

4 まとめ

本研究では、平坦な宇宙における基準モデルのスケールファクターや密度パラメーターの時間的変遷を、フリードマン方程式を解くことにより求めた。数値計算の結果、組成が物質優勢から宇宙定数優勢へと変化した時期に、宇宙膨張がより加速した。これにより宇宙は宇宙定数によって加速膨張していることがわかった。また、赤方偏移と固有距離の関係により、地平距離が有限、宇宙年齢が有限ということが明らかになった。

参考文献

- [1] バーバラ・ライデン著, 牧野 伸義訳, 「宇宙論入門」(原著第2訳), 森北出版(2021).
- [2] 辻川信二著, 「入門 現代の宇宙論」, 講談社(2022).

ビリアル定理を用いたかみのけ座銀河団の質量評価とガス温度分布

理論物理研究室 2017054 益子 瑛任

指導教員 長田 剛

1. 緒言

1930年代、天文学者フリッツ・ツビッキーによって観測されたかみのけ座銀河団中の銀河の動径方向の速度分散は 1000 km s^{-1} と予想に反して非常に大きかった。銀河中に見える星やガスだけでは銀河団の存在を保証するための重力は作り出せないため、銀河団には電磁波では観測できない未知の物質が大量に存在する必要がある。その物質をダークマター（暗黒物質）と呼び、ダークマターが実際に存在することは、重力レンズ効果による銀河団の観測によって確認されている。ダークマターは宇宙の曲率や膨張率を決め、宇宙がどのように構成されているのかを知るための重要な要素である。本研究では、かみのけ座銀河団の全質量とガス温度分布を求め、観測結果と比較することで、ダークマターがどの程度、銀河団内に拡がって分布しているかの考察を行った。

2. ビリアル定理を用いた銀河団の質量評価

本研究では銀河団を N 個の銀河から構成され、球形で等方的なものと仮定した。銀河団の重力ポテンシャルエネルギー W は銀河団を構成する各銀河同士の万有引力の重ね合わせ

$$W = -\frac{1}{2} G \sum_{\substack{i,j \\ j \neq i}} \frac{m_i m_j}{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|} \quad (1)$$

で与えられる。ここで(1)式の係数 $1/2$ は i 番目の銀河と j 番目の銀河の間の重力ポテンシャルを 2 重に評価している事を補正する因子である。また、銀河団全体の相対運動の運動エネルギー K は

$$K = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\vec{x}}_i|^2 = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle \quad (2)$$

ように各銀河の運動エネルギーの和で与えられる。ここで、 $\langle v^2 \rangle$ は銀河の二乗平均速度である。また、銀河団の慣性モーメントを $I = \sum_i m_i |\vec{x}_i|^2$ と定義すると、その慣性モーメントの時間二階微分は重力ポテンシャルエネルギー W と運動エネルギー K を用いて

$$\ddot{I} = 2W + 4K \quad (3)$$

で与えられる。(3)式はビリアル定理と呼ばれ、銀河の形状が変化しない定常状態での銀河団に適用すると、銀河団の慣性モーメントの時間微分は 0 である。さらに、(1)式, (2)式をビリアル定理(3)式に代入すると定常状態にある銀河団の質量を、

$$M = \frac{\langle v \rangle^2 r_h}{\alpha G} \quad (4)$$

と見積もることができる。ここで、 α は銀河の形状に関するパラメータで、 r_h は銀河団の重心を中心として全質量の半分を含む球の半径である。

3. 銀河団中のガス温度分布

銀河団に含まれる高温ガスが重力によって中心に落ちこまないよう、ガス自体の圧力によって支えられているものとする、ガスは静水圧平衡の式

$$\frac{dP_{gas}}{dr} = -\frac{GM(r)\rho_{gas}(r)}{r^2} \quad (5)$$

に従う。ここで、(5)式に現れる ρ_{gas} はガスの密度、 $M(r)$ は半径 r に含まれる質量、 P_{gas} はガスの圧力である。銀河の質量の大部分はダークマターが担っており、それは光学的に観測される銀河団の領域より大きな領域にわたって分布していることが知られている。これはダークハローと呼ばれ、その質量密度はN体計算と呼ばれる手法から、その平均的な密度動径分布は

$$\rho_{gas}(r) = \frac{\rho_s}{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\beta \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^{3-\beta}} \quad (6)$$

で表されることが提唱されている[2]。ここで、 β と r_s は密度分布の形を決めるパラメータである。本研究では、(6)式を銀河の質量密度分布とみなす。また、銀河団中のガスは十分希薄で理想気体として取り扱えたと仮定し、

$$kT_g(r) [eV] = \mu \frac{P_g(r)}{\rho_g(r)} \quad (7)$$

が成り立つとする。ここで、(7)式における μ はガス粒子あたりの平均質量である。

4. かみのけ座銀河団の質量とガス温度分布の推定

以上の(4)式および(5)式から(7)式までの条件をかみのけ座銀河団の全質量とガス温度分布の推定に適用した。ここで、文献値[1]から

$r_h = 4.6 \times 10^{22} \text{ m}$, $\langle v^2 \rangle = 2.32 \times 10^{12} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$,
 $\alpha = 0.45$ を用いると、かみのけ座銀河団の質量は
 $1.8 \times 10^{15} M_\odot$ であることが分かった。

また、温度分布は $\beta = 1.5$ 、ガスは水素原子として求めた。さらに、(6)式の ρ_s はかみのけ座銀河団の全質量を再現するように決めた。求めた温度分布を図1に示した。実際の観測結果との比較は本論にゆずるが、銀河団の温度分布は

$r_s = 0.01 \times r_h$ の場合、中心付近のガス温度はほぼ再現できるが、中心から距離が大きくなると観測結果より温度の落ち方が著しいことが分かった。

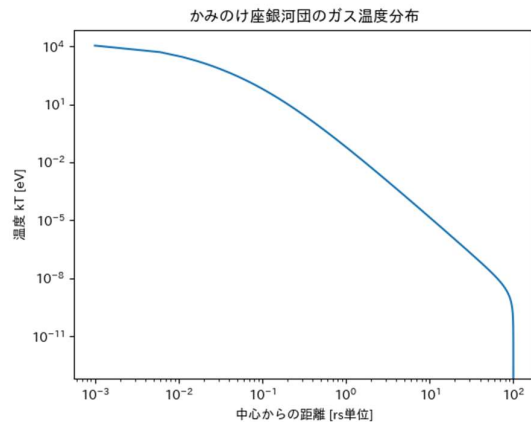


図1. かみのけ座銀河団のガス温度分布

5. まとめ・結論

本研究では、ビリアル定理及び密度の動径分布を用いてかみのけ座銀河団の全質量とガス温度分布を求めた。得られた計算結果はかみのけ座銀河団の中心近傍の温度を再現することができた。しかし、中心から離れるほど急激に温度が下がっている。今回の計算で、銀河団の質量の大部分がダークマターとして考えているため、それ以外の星間塵や高温ガスなどのバリオン物質は考慮に入れていない。これらの物質は銀河団全体の質量に大きく寄与しないが、温度分布には影響を与えると考えられる。このバリオン物質等の導入が、かみのけ座銀河団の温度分布にどのような影響を与えるのかを、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] バーバラ・ライデン著, 牧野 仲義訳, 『宇宙論入門』(原著第2訳), 森北出版 (2021).
- [2] 北山 哲, 『銀河団』, 日本評論社 (2020).

標準降着円盤のガス温度と表面密度の 動径距離依存性および輻射圧の効果

理論物理研究室 2017022 河田 優奈

指導教員 長田 剛

1 緒言

降着円盤とは、原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホールなどの重力を及ぼす天体を中心として、その周りを回転するガスの円盤のことを指す。円盤を構成しているガスは、ヘリウムや重元素も若干含まれるが、主成分は水素プラズマであり、一般に降着円盤は平べったく軸対象で不透明である。また、激しく回転している降着円盤ではガス層の間で摩擦による加熱や角運動量の輸送が働き、ガスは降着円盤の中を回転しながら中心の天体へ落下するが、常に外部からガスが補給され続けることによって降着円盤は定常的な状態を維持している。

2 理論

大きな質量 M の天体の周辺に広がった回転ガス円盤、すなわち降着円盤 [1] を考え、ガスを宇宙流体として取り扱う。なお、ガス円盤に鉛直な方向を z 軸とする円筒座標 (r, φ, z) を用い、中心からの半径 r における赤道面から測った円盤の厚みを H とし、円盤ガスの密度、温度、圧力をそれぞれ ρ 、 T 、 P 、円筒座標系での速度ベクトルを (v_r, v_φ, v_z) とする。以下では 5 本の流体力学の基礎方程式に加え、ガスの状態方程式に関する 3 本の補助方程式を用いて、標準降着円盤のモデルを考えていく。

1. 連続の式：流管の各断面 A を通って流れる流体の質量は保存されるので、 A を定数として連続の式 $A\rho v = \dot{M}$ と表せる。ここでは降着円盤を定常的かつ軸対象と考え、円盤の各半径での断面積は $2\pi r \times 2H$ となるので、

$$4\pi r H \rho v_r = 2\pi r \Sigma v_r = -\dot{M} \quad (1)$$

を得る。ここで、 Σ は表面密度、 \dot{M} は質量降着率である。

2. 運動方程式：動径速度が回転速度より十分小さく、円盤が冷たいことにより動径方向の圧力勾配が無視でき、円盤が幾何学的に薄いと仮定すると、中心天体の重力と回転に伴う遠心力が釣り合うので、ガスの回転速度 v_φ は、いわゆるケプラー回転の速度となり、以下で与えられる。

$$v_\varphi = \sqrt{\frac{GM}{r}}. \quad (2)$$

3. 角運動量輸送の式：角運動量の輸送 (角運動量は r と共に大きくなる) と、降着 (物質の輸送) は、連続の式により関係付けられている。また、降着円盤には内縁が存在し、そこで粘性が働かなくなると仮定する。角運動量を l 、内縁の半径を r_{in} 、そこでの角運動量を l_{in} とすると、ケプラー回転では $l = r v_\varphi$ 、 $l_{in} = \sqrt{GM r_{in}}$ であり、摩擦力によるトルクは回転するガスの角運動量の減少と等しいので、

$$-\frac{\dot{M}}{2\pi} (r v_\varphi - \sqrt{GM r_{in}}) = \eta r^3 \frac{d}{dr} \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad (3)$$

が成立する。ここで、 η は粘性係数、 Ω は回転角速度であり、 $\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$ となる。

4. 静水圧平衡の式：鉛直方向の圧力勾配力と重力の鉛直成分が釣り合う。その条件式を鉛直方向に積分し、表面密度 Σ と鉛直方向に積分した圧力 Π を用いると静水圧平衡の式は次で与えられる。

$$\frac{\Pi}{\Sigma} = \frac{GM}{r^3} H^2. \quad (4)$$

5. エネルギー平衡の式：ガスの粘性の働きによって発生した摩擦熱による粘性加熱と、放射冷却として円盤表面から放射される熱が、円盤の任意の位置で釣り合っていると仮定し、 a を放射定数、 κ を不透明度とすると、エネルギー平衡の式は以下で与えられる。

$$\frac{3GM\dot{M}}{4\pi r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}}\right) = \frac{16acT^4}{3\kappa\Sigma}. \quad (5)$$

6. 状態方程式：ガス圧と輻射圧の両方を考慮し、それを鉛直方向に積分すると円盤表面近傍のガスの状態方程式は、

$$\Pi = \frac{R}{\mu} \Sigma T + \frac{1}{3} a T^4 2H \quad (6)$$

と表される。ここで $\bar{\mu}$ は平均分子量であり、第 1 項がガス圧による項、第 2 項が輻射圧による項である。温度の低い領域では単純の為に輻射圧による第 2 項を落とすこともあるが、本研究では降着円盤の中心部分についても正確に評価するため、第 2 項を考慮する場合としない場合の両方を取扱った。

7. 粘性則：降着円盤のガスは極めて希薄なため分子粘性の効果は極めて小さいが、衝撃波の散逸に伴う粘性や乱流粘性、磁場粘性、輻射粘性などが粘性散逸を引き起こすと考えられており、粘性力は鉛直方向の圧力 Π に比例すると仮定して次を得る。

$$\bar{\eta}r \frac{d\Omega}{dr} = \bar{\eta}r \frac{d}{dr} \left(\sqrt{\frac{GM}{r^3}} \right) = -\alpha\Pi \quad (7)$$

ここで、 α は粘性の強さを表すパラメータであり、 $0 < \alpha \leq 1$ の値をとる量とする。

8. 不透明度：粘性によって生じた熱エネルギーが放射によって円盤表面まで運ばれる際の、光子の伝わりにくさを表す不透明度は、 10^6K ぐらいまでは原子による光子の吸収 $\kappa_{\text{ff}} = 0.64 \times 10^{23} \rho T^{-3.5} \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ が重要になり、 10^6K を大きく超えると電離した自由電子による光子の散乱 $\kappa_{\text{es}} = 0.40 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ が重要になる。これらの効果を足し合わせて不透明度は $\kappa = \kappa_{\text{ff}} + \kappa_{\text{es}} = 0.64 \times 10^{23} \rho T^{-3.5} + 0.40 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ となるが、今回は降着円盤の中心付近について評価するため $\kappa_{\text{ff}} = 0$ とした。

3 結果

以上の 8 つの方程式を用いて、ガス温度 T 、表面密度 Σ 、円盤の厚さ H 、 r 方向の速度 v_r を評価する。(円盤の厚さ H と r 方向の速度 v_r の結果に関しては、本論を参照のこと。) 今回は中心天体の質量を 10^8 太陽質量、粘性の強さを 1 とした。また、質量 M 、質量降着率 \dot{M} 、半径 r については、それぞれ太陽質量 M_s 、エディントン光度 $L_E = 4\pi cGM/\kappa_{\text{es}}$ を用いたエディントン降着率 $\dot{M}_E = L_E/c^2$ 、シュバルツシルト半径 $r_g = 2GM/c^2$ で規格化した量： $m = M/M_s$ 、 $\dot{m} = \dot{M}/\dot{M}_E$ 、 $x = r/r_g$ を用いて表し、境界条件に関する因子を $f_{\text{in}} \equiv 1 - \sqrt{r_{\text{in}}/r}$ と定義した。この条件より、輻射圧による影響を考えない場合の温度 T を求めると

$$T^5 = \frac{9\kappa}{256\pi^2} \frac{\dot{M}^2 c^2}{\sqrt{2a}} \frac{f_{\text{in}}^2}{r_g^3} \frac{1}{\alpha} x^{-\frac{9}{2}} \frac{1}{R/\bar{\mu}} \quad (8)$$

のように表すことができる。図 1 に温度 T の x 依存性を示した。同様に、輻射圧の影響を考えない場合の表面密度 Σ を求めると、

$$\Sigma = \frac{\Pi \bar{\mu}}{T R} \quad (9)$$

と表すことができ、図 2 にその x 依存性を示した。また図 1,2 では、青の線が輻射圧による影響を無視する近似をした場合、オレンジの線が輻射圧による影響も考慮した場合の結果である。

4 結論

降着円盤の温度 T 、表面密度 Σ 共に、円盤の中心に近づくほどにガスの輻射圧の効果が顕著となる。また、温度 T は中心天体からの距離が離れるほどに温度が下がるが、中心付近でも放射によりエネルギーが放出されることで温度勾配が小さくなるのが分かった。さらに、表面密度 Σ は降着円盤の中心付近において、放射を取り入れることで表面密度が上がっている。これは、放射によるエネルギーの放出によって降着円盤の鉛直方向の圧力勾配力が小さくなり厚みが薄くなることで表面密度が上がると考えられる。

参考文献

[1] 福江純著, 「宇宙流体力学の基礎」, 日本評論社 (2014).

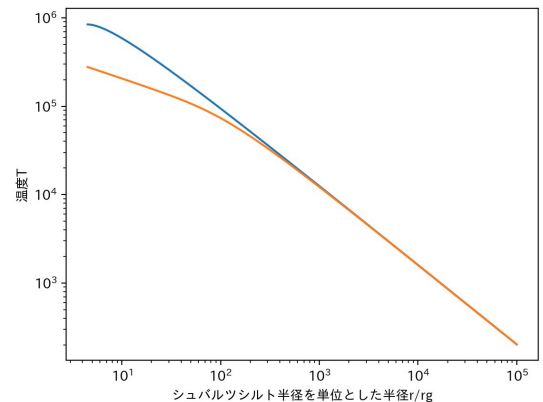


図 1: 温度 T の動径距離依存性

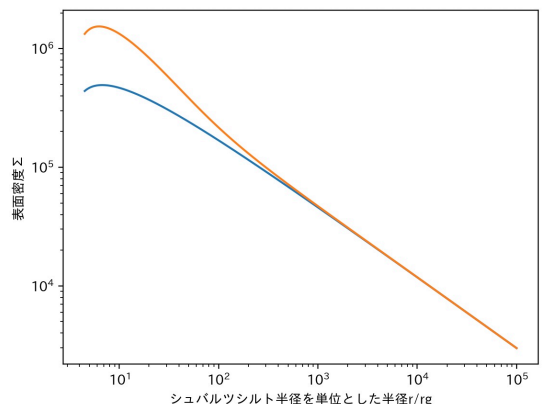


図 2: 表面密度 Σ の動径距離依存性

放射化法によるキセノンビームの核融合生成物の核種同定

実験原子核物理研究室

2017037 藺田隼汰

指導教員 西村太樹

1. 緒言

原子核物理の大きな目標は、人類がまだ見つけてもいない原子核を見つけ核図表を広げたり、自然界の4つの相互作用の1つである強い相互作用を理解したり、新たな重たい元素を見つけたりすることである。原子核には安定原子核と不安定原子核があり、不安定原子核は自然界で安定に存在できず、加速器等を用いて人工的に生成できる。特に、陽子か中性子が極端に安定核よりも多い、重たい不安定原子核の生成方法の確立が待たれている。

現在、我々のグループでは東京大学原子核科学研究センター(以下 CNS)と共同で千葉県稲毛区にある量子科学技術研究開発機構の HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)にある加速器を用いてキセノン ^{136}Xe をビームとしてイットリウム ^{89}Y 標的に当てて将来的に新同位体であるネプツニウム ^{221}Np やウラン ^{220}U の発見を目指している。これらの新同位体は非常に短い時間で α 崩壊することが予言されている。本実験ではそのテスト実験として、原子番号 54 番の ^{136}Xe ビームを原子番号 30 番の天然亜鉛($^{\text{nat}}\text{Zn}$)標的に当てて、原子番号 84 番ポロニウム Po 同位体近傍を核融合反応により生成し、シリコン半導体検出器で直接 α 粒子を測定することを目指している。本研究では、直接 α 粒子測定と並行して、Po 同位体が生成されていることを α 崩壊や β 崩壊の遅延 γ 線を観測することで確かめるために、放射化法で $^{136}\text{Xe}+^{\text{nat}}\text{Zn}$ 核融合反応由来の γ 線を検出することを目的としている。

2. 実験方法

実験は HIMAC にて行われた。イオン源から取り出された ^{136}Xe を RFQ 型とアルバレ型の線形加速器を通すことで核子あたり 6 MeV まで加速させ、中エネルギー照射室に導いた。この ^{136}Xe ビームは、厚さ可変の Al 板(最小厚さ $12\ \mu\text{m}$)でエネルギーを減衰させられて、炭素バッキング(厚さ $18\ \mu\text{m}$)に蒸着された Zn 標的(厚さ $1\ \mu\text{m}$)に約 1 時間照射された。その後、Ge 半導体検出器(EURISYS 社製 型番 EGC 40-190-PF)のもとに、この Zn 標的を移し γ 線測定を開始した。

この Ge 検出器は Zn 標的以外からの背景事象の γ 線をできるだけ減らす必要があった。我々は鉛ブロックや銅板を用いて遮蔽物を作り Ge 検出器を囲った。これらの遮蔽物により 1 秒に平均 120 回検出されていた背景 γ 線を 1 秒に平均 10 回以下まで抑えることができた。



図 1: 遮蔽物に囲まれた Ge 検出器の写真。

3. 結果

図 2 に、Ge 検出器で得られた γ 線のエネルギースペクトルを示すように、想定外にも原子番号 66 番のジスプロシウム(Dy)や 67 番のホロニウム(Ho)の同位体由来の γ 線と同じエネルギーのピークを多数観測した。そこで、これらのピークの半減期($T_{1/2}$)についても調べた。例えば、図 2 の赤棒で示す 279.9 keV や 326.3 keV 付近にゲートをかけて得られた時間スペクトルは図 3 のようになった。これらの γ 線

の時間スペクトルから崩壊の $T_{1/2}$ を導出するために、フィッティング関数として $N(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3$ を用いた。ここで、得られる崩壊強度パラメータ λ から $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ により半減期を導出できる。この解析結果から 279.9 keV の γ 線は $T_{1/2} = 13.08$ minとなり、 ^{157}Ho から ^{157}Dy の β 崩壊半減期の文献値 12.6 min^[1]とよく一致していることを確認できた。また、326.3 keV の γ 線も同様の解析を行ったところ、 $T_{1/2} = 8.38$ hourとなり、 ^{157}Dy から ^{157}Tb への崩壊由来で半減期 8.14 hour^[1]の γ 線であると特定できた。他にも、図2で示しているように $^{159}\text{Ho} \rightarrow ^{159}\text{Dy}$ 、 $^{158}\text{Ho} \rightarrow ^{158}\text{Dy}$ 、 $^{157}\text{Ho} \rightarrow ^{157}\text{Dy}$ 、 $^{156}\text{Ho} \rightarrow ^{156}\text{Dy}$ への崩壊由来の γ 線を確認できた。

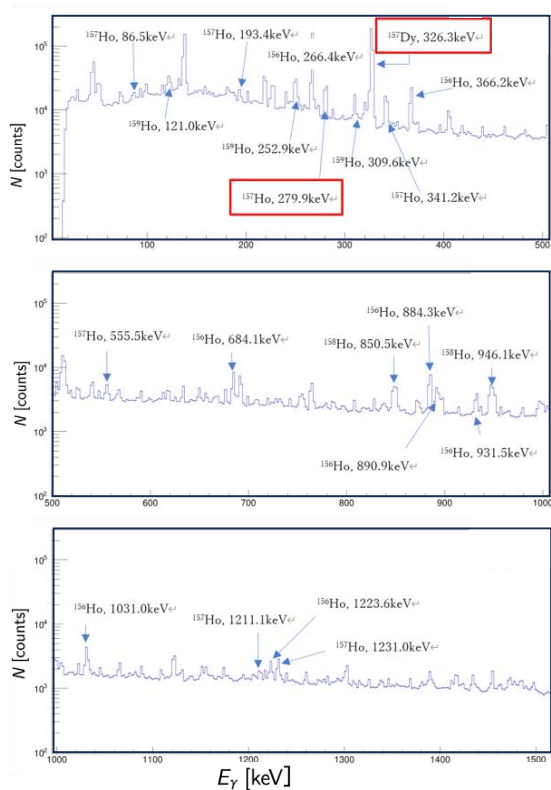


図 2：観測できた γ 線エネルギースペクトル。横軸の γ 線のエネルギーの範囲を(上)0~500 keV、(中)500~1000 keV、(下)1000~1500 keVの範囲で示している。

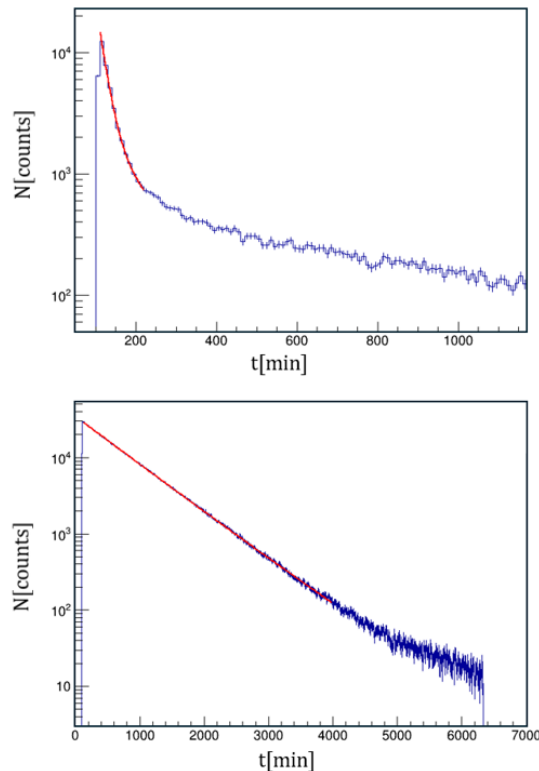


図 3：(上)279.9 keV と(下)336.3 keV の γ 線の時間スペクトル。横軸は時間、縦軸はカウント数を対数で表示している。

4. 結論及び今後の方針

今回の結果では、原子番号 67 番 Ho や Ho の娘核である 66 番 Dy の崩壊由来の γ 線エネルギーを確認できたので、54 番 ^{136}Xe とエネルギーを減衰させた 13 番 Al 板との核融合反応で 67 番 Ho が生成されてしまっていることが放射化法により特定できた。今後は未特定の γ 線ピークの解析をさらに進め、本来の目的である Xe+Zn 核融合反応由来の γ 線を観測し、Po 近傍核が生成されていることを確認したい。

5. 参考文献

[1] R.B. Firestone, Table of Isotopes (1996) 1.

理研 BigRIPS における

超高速プラスチックシンチレータの時間分解能の研究

実験原子核物理研究室

2017016 影山璃音

指導教員：西村太樹

1. 緒言

原子の中心にある原子核は核子(陽子と中性子)で構成される。原子核には、安定原子核と不安定原子核が存在し、自然界に存在する安定原子核は約 250 種類、陽子または中性子が過剰で自然界に存在することができない不安定原子核は 3000 種類以上存在する。これらの不安定原子核の内部構造や強い相互作用はまだ完全には解明されていないため不安定原子核を生成し、性質を理解することが重要である。これらの不安定原子核は加速器で粒子を加速させ、標的に当てることで人工的に不安定核ビームとして生成できる。理化学研究所(理研)の重イオン加速器施設 RI ビームファクトリー(RIBF)では原子番号 1 の水素(^1H)から原子番号 92 のウラン(^{238}U)までの全元素の不安定原子核を世界最高強度の重イオンビームとして供給することが可能である。不安定核ビームには様々な種類の原子核が混在しているため RIBF の RI ビーム分離生成装置 BigRIPS で複数の検出器を用いて分離し、粒子識別をする必要がある。粒子は原子核の質量数 A 、電荷 Q 、原子番号 Z を求めることで核種を識別することができる。2021 年に行われた本学自然科学科同研究室の宇根氏らの実験では、高速応答プラスチックシンチレータを粒子識別の時間検出器として開発し、データ収集システムの改良も行うことで、質量電荷比 A/Q の分解能が向上することが示された。本研究ではこの実験のデータ解析をさらに進め、データ処理の工夫を行うことで、粒子識別に必要な A/Q の分解能をさらに向上させることを目的としている。

2. 実験方法

実験は理研 RIBF の BigRIPS で行われた。一次ビームである 345 MeV/u の ^{238}U を厚さ 3 mm の ^9Be 標的に照射し、294 MeV/u の原子番号 50 のスズ ^{130}Sn を含む二次ビームを生成した。生成された二次ビームを BigRIPS により TOF- $B\rho$ - ΔE (飛行時間 TOF, 磁気剛性率 $B\rho$, エネルギー損失 ΔE)法を用いて、粒子識別を行った。新たに改良された高速応答プラスチックシンチレータ(PL)検出器(図 1)の性能評価を行うために、焦点面 F3 と F7 に理研の標準 PL 検出器と回路に変更を加えて、ビームの粒子識別に必要な TOF を測定した。PL 検出器は 100 mm \times 100 mm \times 0.2 mm のプラスチックシンチレータの両端に 2 台の光電子増倍管(PMT)が取り付けられている。改良 PL 検出器は標準のものと比較して、立ち上がり時間が 0.5 ns から 0.35 ns のシンチレータ(EIjen 社 EJ232)や、走行時間幅の拡がりりが 0.37 ns から 0.23 ns の PMT(浜松ホトニクス社 R13089)で構成されている。また、入力信号のデータ取得方法についても、従来の時間デジタル変換器 TDC より最小時間幅の短い回路系 TAC-ADC を使用し改良した。

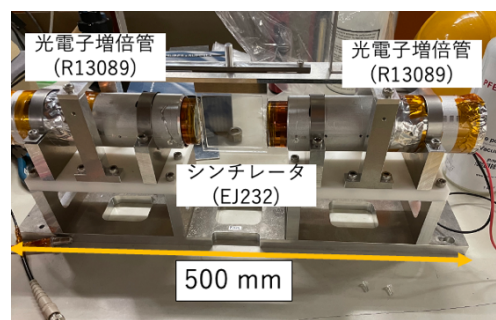


図 1: 高速応答プラスチックシンチレータの写真。

3. 実験結果

図 2 に改良時間測定システムを用いた粒子識別図を示す。改良時間測定システムで測定した相対 A/Q 分解能は $(0.0311 \pm 0.0001)\%$ となった。表 1 に、先行研究と本研究の実験における標準時間測定システムと改良時間測定システムの相対 A/Q 時間分解能の比較を示す。標準時間測定システムで測定した相対 A/Q 分解能は 0.0390% であり、先行研究と一致した。なお、本研究では図 3 のように、粒子ビームの軌道 (x, y, a, b, δ) はそれぞれ F3 での水平位置、垂直位置、水平傾斜角、垂直仰角、F3-F5 間での $B\rho$ のずれを示す。)や振る舞いを表すための数学的なモデルである三次の光学輸送行列を用いて A/Q が粒子の軌道に依存しないような補正を行った。

また、TDC の TOF 分解能 (60.7 ± 0.7) ps と比較して TAC-TDC の TOF 分解能は (50.4 ± 0.6) ps と向上した。PL 検出器と標準の PMT を使用した検出器の分解能は (28.1 ± 0.8) ps であったが、改良された PL 検出器と新しい PMT に変更した検出器の分解能は (23.3 ± 1.0) ps とわずかに向上した。

表 1: 標準時間測定システムと改良時間測定システムの相対 A/Q 分解能。

	用いた光学輸送行列	標準時間測定システム	改良時間測定システム
先行研究	三次 ^[1]	0.038%	0.040%
本研究の実験	一次 ^[2]	0.050%	
	三次	0.039%	$(0.0311 \pm 0.0001)\%$

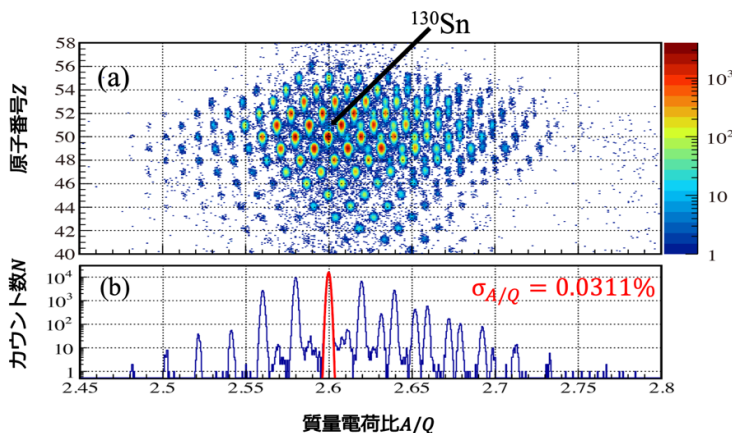


図 2: (a)改良時間測定システムの粒子識別図。(b)図(a)の Sn 同位体 ($Z = 50$)の x 軸への投影。

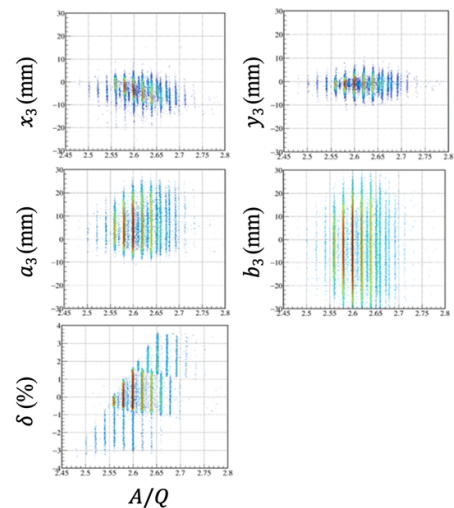


図 3: 三次の光学輸送行列要素の導出。

4. 結論及び今後の展望

BigRIPSでの不安定核ビームの粒子識別において、高速応答プラスチックシンチレータに三次の光学輸送行列による補正を行うことで相対分解能を向上させることができた。今後はこの時間測定システムと解析システムを荷電状態が混合する原子番号 $Z > 60$ の重い核種が含まれた二次ビームにも応用することで、高い精度での粒子識別を可能にし、新同位体探索や原子核構造の解明を進めていきたい。

5. 参考文献

- [1] N. Fukuda *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B 317, (2013) 323.
- [2] 宇根 千晶、東京都市大学 知識工学部自然科学科、2021 年 卒業論文(学士).

中性子星の限界質量の分析

宇宙科学研究室

2017040 高橋萌

指導教員：門田顕司

1. 緒言

天体には複数種類があり、宇宙に存在する岩石、ガス、塵などで構成されている。その中に中性子星と呼ばれる質量の大きな恒星が変化した天体が存在する。中性子星は縮退圧によって支えられ形状を保っているが、その縮退圧には質量の上限があるとされている。本論では中性子星における限界質量を求め、実際に観測されている中性子星の質量と研究結果から導き出された限界質量を照らし合わせ中性子星の成り立ちについて述べる。

2. 方法

縮退圧は物質を恒星する粒子が司る物である。中性子星の主成分は中性子であるため、これが縮退した状態方程式とエネルギー密度を定める。

i) 状態方程式

縮退した状態での中性子の、位置と運動量を作る位相空間における運動量 p の粒子密度 $f_n(p)$ は

$$f_n(p) = \frac{2}{h^3} \bar{N}, \quad \bar{N} = \begin{cases} 1 & (E \leq E_F) \\ 0 & (E > E_F) \end{cases} \quad (2.1)$$

となる。中性子のエネルギー E は

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_n^2 c^4} \quad (2.2)$$

で与えられる。

ここで、 m_n は中性子の質量、 c は光速とする。

全運動量で $f_n(p)$ を積分することで実空間での単位体積あたりの中性子数 (数密度) n_n が得られる。

E_f をフェルミエネルギーとし、 $u^\mu = \partial x^\mu / dt$ は 4 元速度 (τ は固有時間) と表す。ここで n_n を

$$n_n = \frac{8\pi}{3\lambda_n^3} x_F^3 \quad (2.5) \quad u^\mu = (ce^{-\kappa/2}, 0, 0, 0) \quad (3.4)$$

と表す事ができる。ここで

$$\lambda_n = h/m_n c \approx 1.32 \times$$

10^{-15} m 中性子線のコンプトン波長である。

圧力がある方向を z 方向とし、中性子の圧力 P は

$$P = \frac{8\pi m_n^4 c^5}{3h^3} \int_0^{x_F} \frac{x^4}{\sqrt{x^2+1}} dx = \frac{8\pi m_n c^2}{3\lambda_n^3} \int_0^{x_F} \frac{x^4}{\sqrt{x^2+1}} dx = A\phi(x_F) \quad (2.9)$$

と求められる。故に

$$A = \frac{\pi m_n c^2}{\lambda_n^3} \approx 2.06 \times 10^{35} \text{ Pa} \quad (2.10) \quad \frac{dP}{dr} = -\frac{\rho c^2 + P}{2} \frac{d\kappa}{dr} \quad (3.7)$$

$$\phi(x_F) = \frac{8}{3} \int_0^{x_F} \frac{x^4}{\sqrt{x^2+1}} dx = x_F \sqrt{x_F^2+1} \left(\frac{2}{3} x_F^2 - 1 \right) + \ln \left(x_F + \sqrt{x_F^2+1} \right) \quad (2.11)$$

と導ける。

同様にエネルギー密度 $\varepsilon = \rho c^2$ (ρ は中性子の密度) は

$$\varepsilon = \frac{8\pi m_n^4 c^5}{h^3} \int_0^{x_F} x^2 \sqrt{x^2+1} dx = A\chi(x_F) \quad (2.12)$$

となる。

ii) 中性子星の一般相対論的な扱い

中性子星は光速に近い速さで運動をしている。そのため、一般相対論的な視点が必要になる。中性子星を静的な球対称の天体と仮定すると、三次元空間を表す座標として極座標 $\theta = x_1, \varphi = x_2, r = x_3$ を用いると

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -e^\kappa (cdt)^2 + e^\lambda (dr)^2 + r^2 (d\theta)^2 + r^2 \sin^2 \theta (d\varphi)^2$$

と記述できる。ここでは κ, λ は r の関数 $\kappa = \kappa(r), \lambda = \lambda(r)$ である。中性子星は完全流体だとすると、エネルギー・運動量テンソルは

$$T_{\mu\nu} = (\rho c^2 + P) \frac{u_\mu u_\nu}{c^2} + P g_{\mu\nu}$$

で与えられる。ここで、

$$e^{-\lambda} \left(\frac{1}{r} \frac{d\lambda}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{1}{r^2} = \frac{8\pi G}{c^4} \rho c^2 \quad (3.5)$$

$$e^{-\lambda} \left(\frac{1}{r} \frac{d\kappa}{dr} + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{1}{r^2} = \frac{8\pi G}{c^4} P \quad (3.6)$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\rho c^2 + P}{2} \frac{d\kappa}{dr} \quad (3.7)$$

とし、 $r \geq R$ では $\rho c^2 = P = 0$ とする。この条件を (3.5) (3.6) に当てはめ計算をすると

$$e^\lambda = \left(1 - \frac{a}{r} \right)^{-1} \quad (3.15)$$

$$e^\kappa = e^{b-\lambda} = e^b \left(1 - \frac{a}{r} \right) \quad (3.16)$$

を得る。

これを (3.2) に代入すると

$$ds^2 = -e^b \left(1 - \frac{a}{r} \right) (cdt)^2 + \left(1 - \frac{a}{r} \right)^{-1} (dr)^2$$

となり、この式は

$$g_{00} = -e^b \left(1 - \frac{a}{r} \right) \quad (3.18)$$

を意味する。ニュートン力学で表

$$\therefore b = 0, a = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.20)$$

得る事ができる。ここでは M を中性子星の質量、 a をシュワルツシルト半径とする。 $r < R$ の時、式 (3.3)~ (3.7) を次のように書き直す。状態方程式 $\rho = \rho(P)$

を用いると、式 (3. 7) は直ちに積分でき、(3. 22) を得られる。ここで $e^{\kappa(r)}$ は $r=R$ で連続であるとして式 (3. 16) から、

$$e^{\kappa(r)} = \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right) \exp\left[-\int_0^{P(r)} \frac{2dP}{\rho(P)c^2 + P}\right] \quad (3.24)$$

を得られ、中性子星内部の圧力 P が r の関数として与えられると $e^{\kappa(r)}$ が r の関数として与えられる。また、

$$q(r) = \frac{1}{2}r(1 - e^{-\lambda}) \text{ or } e^{-\lambda} = 1 - \frac{2q}{r} \quad (3.25)$$

(d) $x_F = 0$ のときの q の値 q_R が

$$\frac{dq}{dr} = \frac{4\pi G}{c^4} \rho(P)c^2 r^2 \quad (3.27)$$

となる。さらに式 (3. 6) は式 (3. 7) (3. 25) から

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\rho(P)c^2 + P}{r(r-2q)} \left(\frac{4\pi G}{c^4} Pr^3 + q\right) \quad (3.28)$$

となる。

iii) 中性子星の限界質量

縮退した中性子の状態方程式 (2. 9) と (2. 12) を中性子星内部の力学平衡の式 (3. 27) と (3. 28) に代入すると

$$\frac{dq}{dr} = \frac{4\pi G}{c^4} Ar^2 \left[x_F \sqrt{x_F^2 + 1} (2x_F^2 + 1) - \ln \left(x_F + \sqrt{x_F^2 + 1} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$\frac{dx_F}{dr} = -\frac{x_F^2 + 1}{r(r-2q)} \left\{ \frac{4\pi G}{c^4} Ar^3 \left[x_F \sqrt{x_F^2 + 1} \left(\frac{2}{3} x_F^2 - 1 \right) + \ln \left(x_F + \sqrt{x_F^2 + 1} \right) \right] + q \right\} \quad (4.2)$$

となる。中性子星の中心 $r=0$ から中性子星表面 $r=R$ まで数値積分をする。中性子星の表面は圧力を 0 としているので式 (2. 9) と (2. 11) より $r=R$ では $x_F=0$ である。計算方法は以下である。

- (a) $r=0=r_0$ での q の値 q_0 は $q_0=0$ とする。 $r=0$ での X_f の値 X_{f0} を設定する。ただし $X_{f0} > 0$ である。 x_{f0} は式 (2.5) より $r=0$ での中性子数密度に対応する。
- (b) $r_1 = r_0 + \Delta r$ での q, x_F の値 q_1, x_{F1} は $q_1 = q_0, x_{F1} = x_{F0}$ とする。
- (c) $r_{i+1} = r_i + \Delta r$ での q, x_F の値

$q_{i+1}, x_{F_{i+1}}$ を式(4.1)と(4.2)より

$$q_{i+1} = q_i + \frac{4\pi G}{c^4} Ar_i^2 \left[x_{F_i} \sqrt{x_{F_i}^2 + 1} (2x_{F_i}^2 + 1) - \ln \left(x_{F_i} + \sqrt{x_{F_i}^2 + 1} \right) \right] \Delta r \quad (4.3)$$

$$x_{F_{i+1}} = x_{F_i} - \frac{x_{F_i}^2 + 1}{r_i(r_i - 2q_i)x_{F_i}}$$

$$\times \left\{ \frac{4\pi G}{c^4} Ar_i^3 \left[x_{F_i} \sqrt{x_{F_i}^2 + 1} \left(\frac{2}{3} x_{F_i}^2 - 1 \right) + \ln \left(x_{F_i} + \sqrt{x_{F_i}^2 + 1} \right) \right] + q_i \right\} \Delta r \quad (4.4)$$

を用いて $X_f=0$ となるまで計算する。

求まると、式(3.29)から中性子星の質量

$$M = \frac{q_R c^2}{G} \quad (4.5)$$

をもとまる。

上記の方法を用い、限界質量の数値を求めた。

3. 結果

X_f に 4~0.1 までの数値を 0.1 刻みで代入して計算した。縦軸に M/M 太陽質量、横軸に中性子星の半径を定めると、以下のようなグラフが求められる。

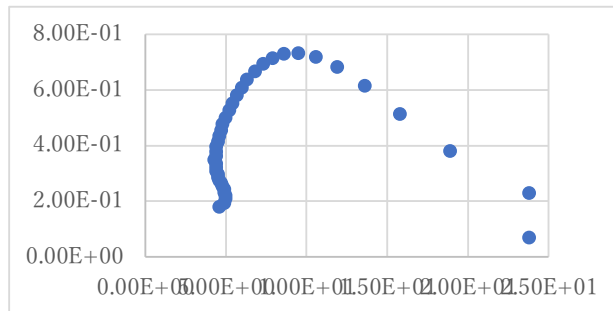


図.1 限界質量

4. 考察

図 1 より、質量が 0.729 M/M 太陽質量が上限であった。この結果から中性子星の限界質量は 0.729 M/M 太陽質量であると考えられる。しかし中性子星は約 1.4 太陽質量程度の質量を確保できるとされている。

図 1 は収縮圧よっての限界質量を

求めたが、収縮圧以外の要因によって 1.4 太陽質量を保っていることがわかった。

中性子星の主成分は中性子であるため、計算では中性子の収縮した状態方程式を用いたが、中性子星には中性子以外に 5%程度陽子やそれ以外のハドロンが混合されているとされている。そのため、結果と実際に観測されている事実との差が生じたと考えられる。しかし、詳細についてはまだ未解明であるため、今後は中性子星の陽子とハドロンの解明が必要だと考えた。

5. 参考文献

https://www.riken.jp/press/2021/20210511_2/index.html#:~:text=5.中性子星太陽と,が行われている%E3%80%82

小質量星の形成

天文学研究室

2017059 劉燁琦

指導教員 津村耕司

1. 諸言

宇宙は約 138 億年前のビッグバンに始まり、数多くの天体が形成され、46 億年前に私たちの住む地球が誕生した。人類はこれまで、宇宙の謎を追い求め、さまざまな理論や仮説を提唱し、真理を探究してきた。特に、太陽と同程度かそれ以下の質量を持つ小質量星は数が多く長い寿命を持っているため、宇宙の構成と進化において中心的な役割を担っており、また、地球外生命の探索においても極めて重要である。

20 世紀半ばまでの天文学観測は可視光に限られていたが、初期の天文学の発見は後の観測に向けた基礎を築いた。これらの基礎の上に、電波や赤外線による観測技術が発展し、ハッブル宇宙望遠鏡や ALMA 望遠鏡による観測が可能となり、星間物質の物理的状態や化学的組成の理解が進み、小質量星の形成と進化に関する理解が飛躍的に進展した。

本研究の目的は、小質量星の形成過程とその特性を詳細に分析し、これまでの理論と観測との関連を明らかにすることにある。この研究は、恒星形成の基本理論の理解を深め、また宇宙の歴史を解き明かす手がかりを提供することを目指している。

2. 小質量星の形成に関する理論

恒星とは、宇宙空間に存在する自ら光を出している天体である。そのエネルギー源は、主に恒星の奥深くで起こる熱核反応によって生み出される。恒星が自らの重力を支え、十分な圧力を維持するためには、エネルギーを生み出す必要がある。恒星の構造と進化は、重力（恒星を収縮させる力）と内部圧力（恒星を膨張させる力）という 2 つの相反する力のバランスによって決定される。時には、これらの力のどちらかが優勢になり、恒星が膨張したり収縮したりすることがある。

小質量星の誕生は、以下のような段階を経て進行する。

(1) 分子雲の収縮：宇宙の分子雲は、主に水素ガスと塵で構成されている。巨大な分子雲の中には、重力の影響で局所的に密度が高い領域が存在し、これは分子雲コアと呼ばれる。分子雲コアの形成メカニズムは、重力、磁場、乱流など複数の物理的プロセスによって説明される。

まず、重力収縮による恒星の形成について、ガス圧が存在しない一様密度球のダイナミクスを考えてみる。流体粒子の時間発展を記述する運動方程式を解けば、自由落下時間 t_{ff} (free fall time) は

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho(0)} \right)^{1/2}$$

となる。自由落下時は密度が大きければ大きけれど落下が速いことを意味している。したがって、球対称の分子雲が重力収縮する際に、中心部分が周りを置いてきぼりにして収縮することになり、密度分布はますます中心集中することになる。

そして分子雲が収縮して恒星になる条件について考える。分子雲内のガスは無限一様に広がった状態で静止しているとし、ゆらぎの波長がジーンズ波長 λ_J よりも長い場合、圧力による復元力が自己重力の効果に打ち勝つことができず、重力収縮が起こる。

$$\lambda_J = \left(\frac{\pi}{G\rho_0} \right)^{1/2} a$$

直径が臨界波長に等しい球の質量はジーンズ質量 M_J と呼ばれる。

$$M_J = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\lambda_J}{2}\right)^3 \rho_0$$

この解析によると、波長が無限大のゆらぎがもっとも速く成長することになり、雲全体が重力で潰れ、分裂は起きないことになる。

次に磁場による分子雲の収縮を考える。ここで分子雲は球状の雲を考え、ガスの熱的圧力や乱流場などの他の寄与を無視する。分子雲の自己重力と磁気力がちょうどつり合う臨界質量 M_{cr} は

$$M_{cr} = \frac{2\sqrt{5}}{3\pi\mu_0^{1/2}G^{1/2}}\Phi$$

と求められる。分子雲の質量が M_{cr} よりも大きい場合、磁場は分子雲を完全に支えることはできず、分子雲はただちに動的に収縮し、原始星へ進化する。

(2) 原始星の形成と成長：分子雲コアが十分な密度に達したとき、自己重力と圧力が釣り合うという星の基本条件を満たすことができる。この力学平衡になった中心部を第1のコア(the first core)と呼び、原始星が形成される。この原始星は、周囲のガスと塵を吸収しながら成長し、核融合が始まる条件に近づく。太陽質量程度の星が誕生するには、分子雲の密度を $\rho(0) = 10^5 \text{ cm}^{-3} = 1.67 \times 10^{-16} \text{ kg/m}^3$ とすると、

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho(0)}\right)^{1/2} = \left(\frac{3\pi}{32 \times 6.7 \times 10^{-11} \times 1.67 \times 10^{-16}}\right)^{1/2} = 1.6 \times 10^5 \text{ yr}$$

ほどかかる。

(3) 恒星への進化：中心部で水素の核融合が安定して行われると、星は主系列星としての長い生涯を送り始める。この段階で星は、エネルギーを持続的に放出しながら、安定した状態を維持する。

これらの恒星は、温度と圧力が低いため、核融合が始まるまでに長い時間がかかり、低温度と低光度を持つ。また、小質量星はゆっくりと核融合を行うため、長い寿命を持ち、安定した環境を提供し、生命が存在する可能性のある惑星が存在する。その特性と長寿命により、銀河系内での恒星の進化や、惑星系の形成と進化において重要な役割を果たしている。

3. まとめ

小質量星は、宇宙で最も一般的な恒星タイプであり、低光度と長寿命が特徴であり、銀河系内での恒星進化や惑星系形成において中心的な役割を果たしており、地球外生命の探索においても極めて重要である。

この研究を通じて、小質量星の形成過程についての理解が深まり、天文学の分野での新たな発見の道が開かれることが期待される。

4. 参考文献

「シリーズ 現代の天文学 6 星間物質と星形成」福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮 (日本評論社 2008)

「天体物理学」李宗伟, 肖兴华 (高等教育出版社)

Massive star formation: theories and observations, Jiang Zhi-bo, YANG Ji

「Stellar Evolution and Nucleosynthesis」Sean G. Ryan, Andrew J. Norton (Cambridge University Press 2010)

素数 p を法とした \sin, \cos の加法定理について

2017050 早船雛妃

整数論研究室 指導教員 服部新准教授

三角関数 \sin と \cos は実数を変数に持つ実数値関数であり、加法定理と呼ばれる次の等式を満たす。

$$\sin(x+y) = \sin(x)\cos(y) + \cos(x)\sin(y)$$

$$\cos(x+y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y)$$

$\sin(x)$ と $\cos(x)$ のマクローリン展開は以下のように定義される。

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \cdots \quad (|x| < \infty)$$

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \cdots \quad (|x| < \infty)$$

p を素数, n を自然数とする。本研究の目的は次の二つである。

- $\text{mod } p^n$ における \sin と \cos の類似を定義する。
- これらの類似について、加法定理が成立するかを調べる。

$\text{mod } p^n$ では p の倍数で割り算ができないが、マクローリン展開における p 次以上の項には p の倍数での割り算が現れる。そのため本研究では、マクローリン展開を $p-1$ 次で打ち切った以下の関数を考える。

$$\sin_p(x) = \sum_{n=0}^{\frac{p-3}{2}} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (x \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})$$

$$\cos_p(x) = \sum_{n=0}^{\frac{p-1}{2}} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} \quad (y \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})$$

本研究の主定理は以下のものである。

定理 1. $(p, n) = (3, 2), (3, 3), (5, 2), (5, 3), (7, 2)$ とする. このとき,
 $x \equiv 0 \pmod p, y \equiv 0 \pmod p$ ならば $\pmod{p^n}$ について加法定理が成り立つ.
 つまり次の式が成り立つ.

$$\begin{aligned}\sin_p(x+y) &\equiv \sin_p(x)\cos_p(y) + \cos_p(x)\sin_p(y) \pmod{p^n}, \\ \cos_p(x+y) &\equiv \cos_p(x)\cos_p(y) - \sin_p(x)\sin_p(y) \pmod{p^n}\end{aligned}$$

この他にも加法定理が成立する場合を複数見つけた.
 $p = 3$ の場合は \sin_3, \cos_3 は次のようになる.

$$\sin_3(x) = x, \quad \cos_3(x) = 1 - \frac{x^2}{2!}$$

ここで, $\frac{1}{2!}$ は $\pmod{3^n}$ で考えるものとする. 例えば, $\pmod{3^n}$ なら
 $2 \times 5 \equiv 1 \pmod 9$ なので, $\frac{1}{2!} = 5$ と考える.

\sin_3 と \cos_3 の加法定理が $\pmod{3^n}$ で成立するかどうか調べるには以下を見ればよい.

$$\begin{aligned}\sin_3(x+y) - (\sin_3(x)\cos_3(y) + \cos_3(x)\sin_3(y)) &\equiv 0 \pmod{3^n} \\ \cos_3(x+y) - (\cos_3(x)\cos_3(y) - \sin_3(x)\sin_3(y)) &\equiv 0 \pmod{3^n}\end{aligned}$$

$\pmod{3^2}$ の場合に, x, y を動かして上式の左辺を計算したものを表にすると
 以下のようなになる. 赤く塗った部分が, 加法定理の成立する場合である.

▲	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	3	6	1	6	3	1	0	0
2	3	8	6	6	8	3	0	8	0
3	6	6	0	6	6	0	6	6	0
4	1	6	6	1	0	3	1	3	0
5	6	8	6	0	8	3	3	8	0
6	3	3	0	3	3	0	3	3	0
7	1	0	6	1	3	3	1	6	0
8	0	8	6	3	8	3	6	8	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

▲	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	8	5	0	2	2	0	5	8	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	2	0	8	8	0	2	5	0
5	5	2	0	8	8	0	2	5	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	8	5	0	2	2	0	5	8	0
8	2	8	0	5	5	0	8	2	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

References

- [1] 雪江明彦, 『整数論 1 初等整数論から p 進数へ』, 日本評論社

素数の部分列に関するBonse型の不等式の研究

位相幾何学研究室

2017026 小玉駿

指導教員 中井洋史 准教授

1 Bonseの不等式

素数に関する研究は、数学の歴史の中でも古い。例えば、Euclid は以下の結果を示した。

命題. 素数は無数に存在する。

これは背理法を用いて証明できることが知られている。以下、 i 番目の素数を p_i で表す。例えば

$$p_1 = 2, \quad p_2 = 3, \quad p_3 = 5, \quad p_4 = 7, \quad \dots\dots$$

である。素数が全部で n 個しかないと仮定すると、「すべての素数の積」から 1 を引いた数

$$P = p_1 p_2 \cdots p_n - 1 \tag{1}$$

は p_1, \dots, p_n のどれでもで割り切れないため、素数が n 個しかないと矛盾するからである。さらに、(1) の式からは次のことも分かる。

命題. 不等式 $p_1 p_2 \cdots p_n > p_{n+1}$ が成り立つ。

一般に、素数定理を用いると以下の結果が成り立つことが示される。

命題. 各自然数 k に対し自然数 N が存在し、 $n \geq N$ ならば $p_1 p_2 \cdots p_n > p_{n+1}^k$ が成り立つ。

したがって、各 k を定めたときに上の命題を満たすような自然数 N を求めることが問題となる。H.Bonse [2]は、1907年に以下の結果を示した

命題. 以下の不等式が成り立つ。

- $n \geq 4$ に対し、 $p_1 p_2 \cdots p_n > p_{n+1}^2$
- $n \geq 5$ に対し、 $p_1 p_2 \cdots p_n > p_{n+1}^3$

任意の k に対し N を求めることは現在でも未解決である。

2 主結果

Bonseの不等式は一般の素数に関するものだったが，素数の特別な部分集合に対して同様の不等式が成り立つかどうかを考察したい．例えば，4で割って1余る素数

$$q_1 = 5, \quad q_2 = 13, \quad q_3 = 17, \quad q_4 = 29, \quad \dots$$

は無数に存在することが知られている(「 $4n+1$ 型の素数」と呼ばれる)．これらの素数を小さい順に並べて得られる数列 $\{q_n\}$ について，Bonse の不等式と同様のものが成り立つことが証明できた．

定理 A. 自然数 k に対し $a(k)$ を以下で定める．

$k =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
$a(k) =$	2	3	5	6	7	8	10	11	12	13	...

このとき， $n \geq a(k)$ ならば， $4n+1$ 型の素数列 $\{q_n\}$ に対し以下の不等式が成り立つ．

$$q_1 q_2 \cdots q_n > q_{n+1}^k$$

さらに「 $4n+3$ 型の素数」についても同様の結果を証明することが出来た．

定理 B. $4n+3$ 型の素数列を $\{r_n\}$ とするとする．例えば

$$r_1 = 3, \quad r_2 = 7, \quad r_3 = 11, \quad r_4 = 19, \quad \dots$$

である．このとき，自然数 k に対し $b(k)$ を以下で定める．

$k =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
$b(k) =$	2	4	5	7	8	9	10	11	13	14	...

このとき， $n \geq b(k)$ ならば不等式 $r_1 r_2 \cdots r_n > r_{n+1}^k$ が成り立つ．

3 今後の展望

一般に， a, b を互いに素な自然数とするとき， $a_n = an + b$ で定められる等差数列 $\{a_n\}$ には無限個の素数が含まれることが「ルジャンドルの算術級数定理」として知られている．今回の結果は $a=4$ かつ $b=1$ または 3 の場合だが，より一般の「 $an+b$ 型の素数」の場合にも Bonse 型の不等式がどのように成り立つかどうか？を調べることは興味深い問題と思われる．

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習 (1985).
- [2] H.Bonse. Über eine bekannte Eigenschaft der Zahl 30 und ihre Verallgemeinerung. *Archiv der Mathematik und Physik.* **3**, 1907, (12): 292–295.
- [3] R.Breusch. Zur Verallgemeinerung des Bertrand'schen Postulates, daß zwischen x und $2x$ stets Primzahlen liegen. *Math. Z.* **34** (1932), no. 1, 505–526.

Bonseの定理の拡張に関する研究

位相幾何学研究室

2017019 金子優人

指導教員 中井洋史 准教授

1 はじめに

\mathbb{N} を自然数の集合とし, $a, b \in \mathbb{N}$ の最大公約数を $\gcd(a, b)$ で表す. H.Bonse は1907年の論文 [2] で以下の定理を示した.

定理. 自然数 \mathbb{N} の部分集合

$$B = \{a \in \mathbb{N} \mid 1 < r < a, \gcd(r, a) = 1 \Rightarrow r \text{ は素数}\}$$

は最大元 30 をもつ.

集合 B は「 $a \in B$ より小さい自然数 r は, a と互いに素ならば素数」という性質を持ち, 実際に B の元を列挙すると以下のようなになる:

$$B = \{3, 4, 6, 8, 12, 18, 24, 30\}$$

例えば, $30 \in B$ より小さい自然数で 30 と互いに素なものは 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29 であり, これらは確かに素数である. このような性質をもつ自然数が無数には存在せず, 最大値 30 をもつということが, この定理の面白いところである.

2 主結果

まず, 本研究の主結果を述べる. 自然数の部分集合 K_ℓ を

$$K_\ell = \{a \in \mathbb{N} \mid 1 < r < a, \gcd(r, a) = 1, \gcd(r, p_i) = 1 (i = 1, \dots, \ell) \Rightarrow r \text{ は素数}\}$$

と定める. 集合 K_0 は Bonse の定理に出てきた集合 B と同じものである.

本研究の主結果として, 次の結果を得た.

定理. すべての自然数 $\ell = 1, 2, \dots$ に対し, 集合 K_ℓ は有限集合である. 具体的には以下のようなになる.

- $K_1 = \{r \mid 3 \leq r \leq 9\} \cup \{12, 15, 18, 21, 24, 30, 45, 105\}$
- $K_2 = \{r \mid 3 \leq r \leq 25\} \cup \{30, 35, 40, 45, 70, 105\}$
- $K_3 = \{r \mid 3 \leq r \leq 49\} \cup \{56, 63, 70, 77, 84, 91, 98, 105, 112, 119, 154\}$
- $K_4 = \{r \mid 3 \leq r \leq 121\} \cup \{132, 143, 154, 165, 286\}$
- $\ell \geq 5$ のとき, $K_\ell = \{r \mid 3 \leq r \leq p_{\ell+1}^2\} \cup \{sp_{\ell+1} \mid s = p_{\ell+1} + 1, \dots, \lfloor p_{\ell+2}^2/p_{\ell+1} \rfloor\}$

特に, $\ell \geq 5$ では集合 K_ℓ を表す条件が同じになったことは予想外だった.

この定理を証明するために, 本研究ではまず「Bonse の不等式」と呼ばれる結果を一般化した. さらに, $\ell \geq 5$ での結果を示すために「Bertrand-Chebyshev の不等式」の改良版を用いた.

3 今後の展望

今回示したのは整数環 \mathbb{Z} に関する結果だが, 岩田 [5] が論文の最後に指摘したようにガウス整数環 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ でも類似の結果が言えそうであり, より一般の環でも同様の結果が成り立つかどうか調べるのは面白い問題と思われる.

さらにDalezman [4] は, 自然数 \mathbb{N} の部分集合

$$D = \{a \in \mathbb{N} \mid r \in \mathbb{N}, \gcd(r, a) = 1, 1 < r < a \Rightarrow r \text{ は素数べき}\}$$

は最大元 60 をもつことを示した. この方向性での一般化も面白いのではないかと思う.

References

- [1] 加藤明史. 新装版親切な代数学演習 (1985).
- [2] H.Bonse. Über eine bekannte Eigenschaft der Zahl 30 und ihre Verallgemeinerung. *Archiv der Mathematik und Physik.* **3**, 1907, (12): 292–295.
- [3] L.Cseh. Generalized integers and Bonse’s theorem. *Studia Univ. Babeş-Bolyai Math.* **34** (1989), no. 1, 3–6.
- [4] M.Dalezman. From 30 to 60 Is Not Twice as Hard. *Math. Mag.* **73** (2000), no. 2, 151–153.
- [5] H.Iwata. On Bonse’s theorem. *Math. Rep. Toyama Univ.* **7** (1984), 115–117.

3 択共有地ゲーム

微分幾何学研究室
2017053 本田有希恵
指導教員 橋本義武

ゲーム理論

ゲーム理論とは、複数の行為者がそれぞれに相手の選択を考えながら自分にとっての最適な選択を選ぶ状況を表現する数理モデルである。もっとも単純なモデルを作るのに仏様な要素は、プレイヤーの人数、各プレイヤーが選べる選択肢、戦略の組み合わせと利得の対応の3つである。

A\B	選択肢 1	選択肢 2
選択肢 1	(3,3)	(1,4)
選択肢 2	(4,1)	(2,2)

表 1

このようなモデルがあった時、() の右の数値すなわち水色が縦の人、ピンク色で書かれた左の数値は横の人の利得を表している。

ここで上記のモデルにおいて、水色を企業 A、ピンク色を企業 B とし、選択肢 1 と 2 を適正価格と値下げに設定する。両社は合理的に自分の利得を高めようと考えて値下げを選択するので、お互いに適正価格を選んだ時の利得ではなく、どちらにとっても利得が低い環境が結果的に生まれてしまうという状況が起こる。

このようなモデルは囚人のジレンマと呼ばれる。この囚人のジレンマという状態は、様々な社会現象をゲーム理論のモデルに起こした時にもよく見られる。

共有地ゲームとは

ある 2 人の人が共同牧場で羊を飼う時に、それぞれ羊を 1 匹飼うか 2 匹飼うかを選ぶことができる。ただし相手の選択がお互いに見えない状況であることを共有地ゲームという。

以降、羊 1 匹の値段を b とする。羊は同じ土地の牧草で育つため、栄養面や運動不足など諸々の理由で羊が 1 匹増えるごとに 1 匹当たりの価値は下がることになる。この下がり幅となる額を d とする。

この設定において利得表を考えると

A\B	羊 1 匹	羊 2 匹
羊 1 匹	(b,b)	(b-d,2(b-d))
羊 2 匹	(2(b-d),b-d)	(2(b-2d),2(b-2d))

表 2

<例> b=100、d=30 の時

A\B	羊 1 匹	羊 2 匹
羊 1 匹	(100,100)	(70,140)
羊 2 匹	(140,70)	(80,80)

表 3

上記の利得票だと、相手がどんな選択をするにしても自分は羊を 2 匹飼うという選択するのが好ましいと分かる。両者ともに羊 2 匹を選択するため、それぞれが自分の利益を追求した結果 1 匹ずつ飼う時よりも得られる利益が少なくなっていることが分かる。これが共有地ゲームにおいてジレンマ状態と呼ばれる場合の利得表の一例である。

本題

上記の共有地ゲームに対し、b,d の設定はそのまま、両者が選べる羊の数を 2 匹までから 3 匹までに変更する。

A\B	羊 1 匹	羊 2 匹	羊 3 匹
羊 1 匹	(b,b)	(b-d,2(b-d))	(b-2d,3(b-2d))
羊 2 匹	(2(b-d),b-d)	(2(b-2d),2(b-2d))	(2(b-3d),3(b-3d))
羊 3 匹	(3(b-2d),b-2d)	(3(b-3d),2(b-3d))	(3(b-4d),3(b-4d))

表 4

発表の際には、このゲームでジレンマ状態になる時、新たな条件で追加維持費を表す a を加え、ジレンマの解消について詳しく論じる。

参考文献

- ・「社会を数理で読み取るー不平等とジレンマの構造」 浜田宏,武藤正義,瀧川裕貴
- ・「その問題、数理モデルが解決します」 浜田宏

Catenoid 上の測地線

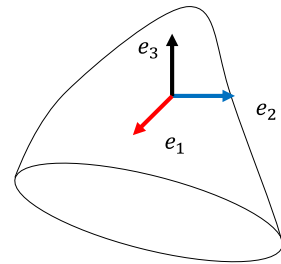
微分幾何学研究室
2017002 秋山真緒
指導教員 橋本義武

1, 諸言

測地線とは、2点を結んだときの最短距離か接ベクトルが曲線に沿って平行であることである。測地線は、正規直交標構と微分形式の測地線の微分方程式を用いて求めることができる。Catenoid 上の測地線が、S. E. Rasor “The Geodesic Lines on the Helicoid” (1910) により、ヤコビの楕円関数で表されることが知られている。この論文では、Elie Cartan による正規直交標構と微分形式の方法を用いていない。そこで、本研究では正規直交標構と微分形式による曲面の幾何について述べ、Catenoid の測地線がヤコビの楕円関数によって表されることを確かめる。

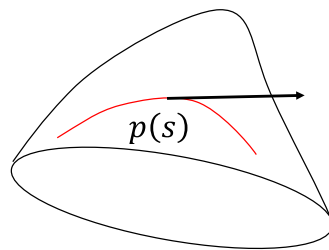
2, 曲面上の正規直交標構

曲面上の各点における互いに垂直な3つの単位ベクトルの組 (e_1, e_2, e_3) のことである。ただし、 e_1, e_2 は接ベクトル、 e_3 は法ベクトルである。



3, 正規直交標構と微分形式を用いた測地線の方程式

測地線の方程式は以下のものを使って表すことができる。



$$p'(s) = \xi^1 e_1 + \xi^2 e_2$$

第一構造式である、

$$d\theta^1 = \theta^2 \wedge \omega_2^1$$

$$d\theta^2 = \theta^1 \wedge \omega_1^2$$

e_1, e_2, e_3 は 3次元ベクトル空間の基底なので

$$de_i = \omega_i^1 e_1 + \omega_i^2 e_2 + \omega_i^3 e_3 \quad (i = 1, 2, 3)$$

以上を用いて、正規直交標構と微分形式を用いた測地線の方程式は、

$$\frac{d\xi^i}{ds} + \sum_{j=1}^2 \frac{\omega_j^i}{ds} \xi^j = 0$$

$$(i, j = 1, 2)$$

4, ヤコビの楕円関数

ヤコビの楕円関数は、

$$u = \int_0^x \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \Leftrightarrow x = sn(u)$$

で定義される。

$$k = 0 \text{ の時 } sn(u) = \sin(u)$$

$$k = 1 \text{ の時 } sn(u) = \tanh(u)$$

となる。

S. E. Rasor の The Geodesic Lines on the Helicoid(1910)によると, Catenoid 上の測地線は、

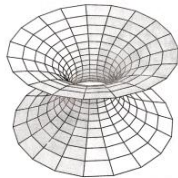
$$\varphi = c \int_0^u \frac{du}{\sqrt{(u^2-1)(u^2-c^2)}}$$

ということが知られている。

本研究では、これによって Catenoid の測地線であることを確かめる。

5, 参考文献

- ・ 小林昭七 「曲線と曲面の微分幾何(改訂版)」
- ・ 梅原雅顕, 山田光太郎 「曲線と曲面-微分幾何学的アプローチ- 」
- ・ S. E. Rasor 「The Geodesic Lines on the Helicoid(1910)」



飛行する物体が滑らかに曲がることのできる曲線

微分幾何学研究室
2017052 藤田翔一
指導教員：橋本義武

1. 緒言

高速道路を運転するドライバーにとってカーブを曲がる時に急ハンドルとなる道路形状は事故につながり大変危険である。そのため、高速道路のインターチェンジやジャンクションなどのように、ある程度速いスピードを保ったまま曲がる場所では、なるべくスムーズなハンドル操作でカーブを曲がることのできるようにクロソイド曲線が利用されている。

そこで図1のようなカーブを考える。左の図では直線から円弧に直接接続するため、その際のハンドル操作としては、「まっすぐから急に横向き」になる。右の図では直線と円弧の間にクロソイド曲線を設けているため、ハンドル操作としては「まっすぐから徐々に横向き」になる。

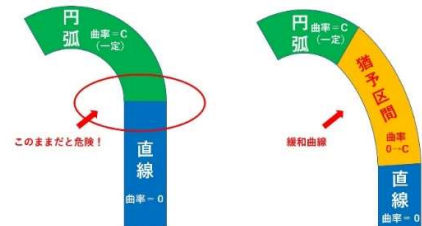


図1：クロソイド曲線

このハンドル操作は、「曲率」に大きく関係している。曲率とは、カーブを円に見立てたときの半径である「曲率半径」の逆数のことである。クロソイド曲線を設けることによって直線(曲率=0)から円弧(曲率=定数)を滑らかに結ぶことができている。

本研究では、このような滑らかに曲がることのできる曲線を3次元で考えることを目標に、空間曲線を考えていく。

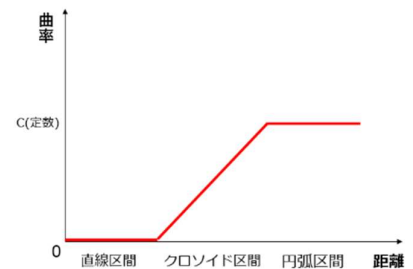


図2：曲線の距離と曲率の関係

2. 研究

本研究では、曲面の測地線に着目し、空間を滑らかに曲がる曲線を考えていった。

2-1. 円柱の測地線

まず円柱の側面の測地線を考えた。

円柱の側面の測地線(=常螺旋)は、 $x = a \cos t$, $y = a \sin t$, $z = bt$ ($a > 0$)
で与えられる。

この測地線における曲率と捩率を求めると、

$$\kappa = \frac{a}{a^2 + b^2}, \quad \tau = \frac{b}{a^2 + b^2}$$

となり、曲率も捩率も定数となる。

図4のようにこれでは直線から円柱の測地線に入る際に滑らかなカーブにならない。

従って、曲率と捩率が滑らかに変化するような測地線を考える事にした。

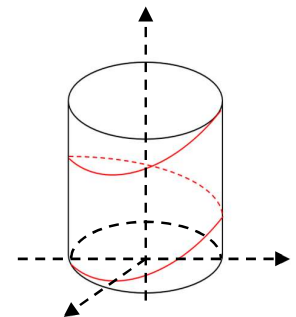


図3：円柱の測地線

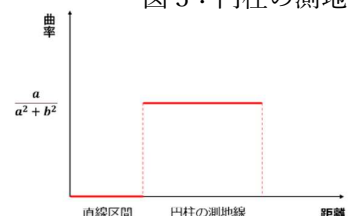


図4：円柱の測地線と曲率の関係

2-2. 円錐の測地線

次に円錐の側面の測地線を考えた。

円錐は展開図が描けるため、展開図である扇形上の直線が円錐の側面の測地線となる。

(u, v) 平面上で半径 r 、中心角 θ の扇形を考え、扇形の頂点を $(u, v) = (0, 0)$ として、 $(0, 0)$ を通り、 x 軸とのなす角 $t\theta$ で扇形の弧上の点 (u, v) を通る直線を考える。

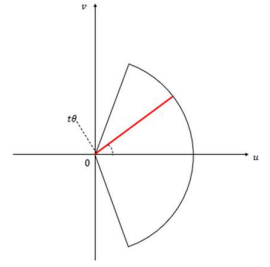


図 5：扇形

円錐の中心角を φ 、底面の円と半径である $r \sin \varphi$ のなす角を α とし (x, y, z) 空間に変換すると、円錐は $(x, y, z) = (r \sin \varphi \cos \alpha, r \sin \varphi \sin \alpha, r \sin \varphi)$ となる。

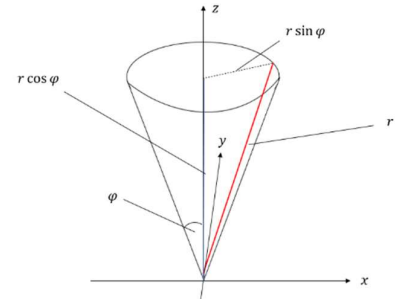


図 6：円錐

計算しやすいように $\theta = \pi$ のときを考え、先ほどの扇形において $(u, v) = (u_0, 0)$ を通り、 v 軸に平行な直線を考える。

この直線は $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ と考える事ができる。

この直線を先ほど求めた円錐の式に代入し、円錐の測地線を求めると、

$$p(s) = \sqrt{u_0^2 + s^2} \left(\frac{u_0^2 - s^2}{2(u_0^2 + s^2)}, \frac{u_0 s}{u_0^2 + s^2}, \frac{\sqrt{3}s}{2\sqrt{u_0^2 + s^2}} \right) \text{ となる。}$$

これをもとに、曲率と捩率を求めると、

$$\kappa = \frac{\sqrt{3}u_0^2}{(u_0^2 + s^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad \tau = \frac{\sqrt{3}u_0 s(3u_0^4 + 6u_0^2 s^2 + 23s^4)}{8(u_0^2 + s^2)^{\frac{7}{2}}} \text{ となり、どちらも滑らかに変化することが分かる。}$$

3. 結果

今回求めた測地線をグラフに表したのが、図 7 である。

曲率と捩率の極限を求めると、

$$\lim_{s \rightarrow -\infty} \kappa(s) = 0, \quad \lim_{s \rightarrow -\infty} \tau(s) = 0$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \kappa(s) = 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} \tau(s) = 0$$

となり、円錐の測地線を伸ばすと直線に近づいていくことが分かる。

したがって、曲率が 0 に近い点で接線を引くことによって、滑らかに円錐の測地線に接続でき、このような曲線であれば飛行する物体は滑らかに曲がる事ができると分かる。

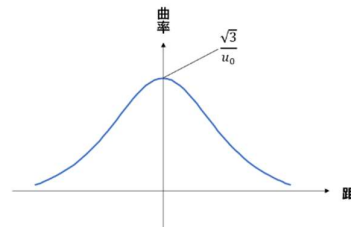


図 7：円錐の測地線と曲率の関係

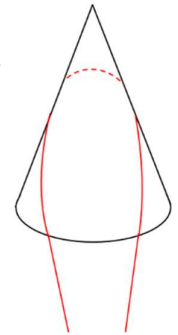


図 8：円錐の測地線

4. 参考文献

- [1] 小林昭七．曲線と曲面の微分幾何．裳華房，1977
- [2] 和から株式会社．“高速道路の美しい曲線—安全運転のための数学”．2020.7.24
<https://wakara.co.jp/mathlog/20200724>
- [3] 土木 LIBRARY．“【クロソイド曲線の計算はそんなときに使うの？】計算方法を理解できる！”．2022.4.8 ，<https://chansato.com/doboku/clothoid-curve/>

正四面体を用いて面積を反映した世界地図を作成する方法

微分幾何学研究室
2017036 瀬戸大暉
指導教員：橋本義武

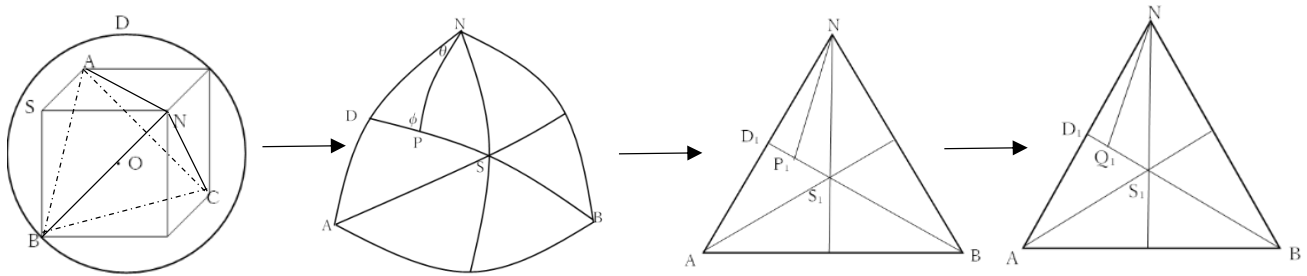
1. 緒言

地図投影法とは地球の表面の一部を平面の一部に対応させる方法である。数学的には球面の開集合と平面の開集合の間の微分同型写像を与えることである。メルカトル図法は長方形の世界地図であり、方角は正確だが面積は反映されない。例えばグリーンランドの面積が約 17 倍拡大されてしまう。そこで面積が反映される長方形の世界地図を作成することはできないかと考えた。正四面体を用いる理由は、正四面体の展開図を変形させると長方形が作成できるからである。

鳴川肇「正多面体図法を用いた歪みのない長方形地図の提案 (AuthaGraph)」は私の研究と面積について考えている点と長方形であるという点が同じであったためこの論文を先行研究とした。

本研究では鳴川肇氏の研究を参考に、異なった方法 (アフィン変換) で正多面体図法を修正して面積を反映する世界地図を作成する。

2. 研究方法



1. 球の中心 O を中心とした正四面体の面への射影を考える
2. 半径 1 の球に内接する正四面体の 4 頂点 $NABC$ を用いて球に内接する正四面体を作成する
3. 正四面体の頂点 $NABC$ を結び、球面を 4 等分する
4. 4 等分されてできた球面三角形 NAB を重心細分する
5. 重心細分された球面三角形を角の二等分線を用いてさらに 2 つに細分する
よって 48 等分された球が完成する
6. 角の二等分線によって作成された球面三角形に注目し面積比を計算する

- 7. 面積比を求めた部分に対応する平面三角形の面積比を求める
- 8. 球面三角形の面積比になるように P_1 を Q_1 にアフィン変換を用いてずらす

3. 研究結果と考察

球面三角形の面積比は

$$\triangle NDP : \triangle NPS = 0.440742 : 0.559258$$

平面三角形の面積比は

$$\triangle ND_1P_1 : \triangle NP_1S_1 = 0.6 : 0.4$$

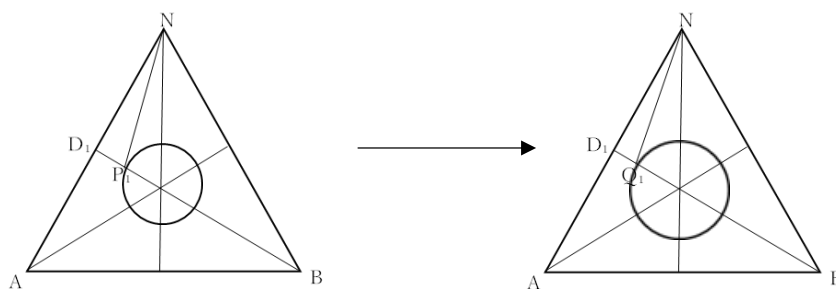
となった。

$\triangle NPS \div \triangle NP_1S_1$ は

$$\frac{0.559258}{0.4} = 1.399145$$

となる。

アフィン変換を用いて P_1 を Q_1 にずらす



$$u\vec{ON} + v\vec{OD}_1 + w\vec{OP}_1 \mapsto u\vec{ON} + v\vec{OD}_1 + w\vec{OQ}_1 \quad (u+v+w=1 \text{ かつ } u \geq 0, v \geq 0, w \geq 0)$$

$$u\vec{ON} + v\vec{OP}_1 + w\vec{OS}_1 \mapsto u\vec{ON} + v\vec{OQ}_1 + w\vec{OS}_1 \quad (u+v+w=1 \text{ かつ } u \geq 0, v \geq 0, w \geq 0)$$

よって円の半径を 1.399145 倍した点を Q_1 とすることで球面三角形の面積比を平面三角形で表すことができる。

アフィン変換を用いて球面と正四面体の分割領域の面積比を等しくすることが可能であることがわかった。よってこの研究の手順で世界地図を作成すれば面積を反映した長方形の世界地図が作成できる。

4. 引用・参考文献

- [1] 田崎博之 「曲線・曲面の微分幾何」
- [2] 鳴川肇 「正多面体図法を用いた歪みの少ない長方形世界地図の提案」
- [3] 堀部和経 「球面三角法の定理」

実験から見る竜山石の色相について

地球科学研究室

1924064 溝脇空楓

指導教員：萩谷宏

1. 緒言

兵庫県南東部高砂市一加古川市に分布する「竜山石」は白亜紀後期のガラス質の結晶凝灰岩が層状ハイアロクラスタイトとして堆積して形成された。竜山石は青色、黄色、赤色の三色の色相をもち、古墳時代前期から石棺として畿内を中心に広く用いられてきたが、現在見つかっている石棺は黄色である。青色を呈している竜山石は緑泥石とイライトからなり、そのうち緑泥石の存在がこの岩石の青灰色を作り出していると考えられている。黄色を呈している竜山石の黄色は水酸化鉄(III)に由来していると考えられ、青色の竜山石が風化変質作用を受けることにより、緑泥石がスメクタイトと水酸化鉄(III)に変化したと考えられる。赤色を呈している竜山石の赤色は赤鉄鉱に由来しており、青色の竜山石が熱水変質により、緑泥石がスメクタイトと赤鉄鉱に分解したと考えられる。(先山, 2011)

本研究では、現在採掘されている竜山石は主に青色であるのに対して、発見されている石棺は黄色であることから、青色と黄色の竜山石に着目し緑泥石の有無による色の変化と酸化還元実験による色の変化を調べ、緑泥石と水酸化鉄(III)が色に影響を与えているのかを検討する。

2. 調査・実験方法

2.1. 調査場所

(株) 松下石材店採石場(34.7884375, 134.7937968)で竜山石を採取した。採取した地点と試料名については図 1 に示す。この採石場では図 1 で示した 231018-01 ~ 231018-09 の試料の他、すでに切り出されていたものを 5 点(試料 231018-a, 231018-b, 231018-B, 231018-Y, 231018-R)、(株) 松下石材店で細礫サイズに粉碎された青色と黄色の竜山石(砂利)をそれぞれ 1 点ずつ(試料 jari-B, jari-Y)購入した。採取・購入した試料を一部ステンレス製乳鉢で砕いて粉末にした。

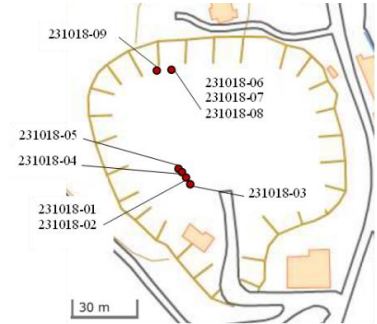


図 1 松下石材店採石場地形図^[2]

2.2. 塩酸による緑泥石の溶解

粉末試料を本学の X 線回折装置(以下 XRD)により含まれる鉱物の結晶構造を分析した。また、本学の紫外可視分光分析装置(以下 UV-vis)により吸収スペクトルを分析した。先行研究(八木ほか, 2011)を参考に青色の粉末試料 231018-B, 231018-a, jari-B と塩酸(3 mol/L, 6 mol/L)の割合を 1 : 1 にして 60~80°C で湯煎しながら攪拌し、蒸留水で粉末試料をよく洗い乾燥させた。乾燥させた試料を肉眼で観察、再度 XRD、UV-vis で分析した。

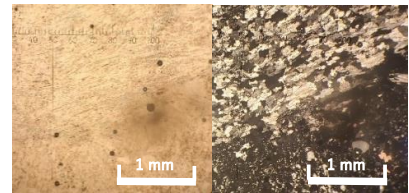


図 2 竜山石の偏光顕微鏡写真
(左図：平行ニコル、右図：直交ニコル)

2.3. 酸化還元実験

酸化実験のための液体には酸素系漂白剤(10 wt%)、イソジン(ポビドンヨード, 10 wt%)を用意した。青色の粉末試料 231018-B, 231018-a, jari-B に液体をかけ常温かつ直射日光の当たらないところに約 4 週間置き、肉眼で観察、XRD、UV-vis で分析した。

還元実験では先行研究(折笠ほか, 2015)を参考にクエン酸(10 wt%)とビタミン C(L-アスコルビン酸, 10 wt%)を用意した。黄色の粉末試料 231018-Y, 231018-b, jari-Y に液体をかけ常温かつ直射日光の当たらないところに約 4 週間置き、肉眼で観察、XRD、UV-vis で分析した。

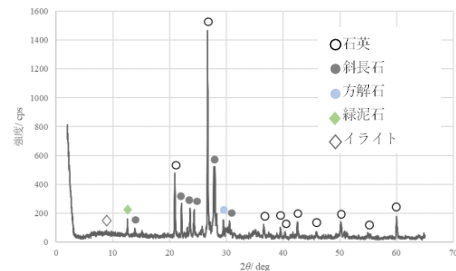


図 3 試料 231018-B (青) XRD 分析結果

3. 結果

3.1. 塩酸による緑泥石の溶解

青色の試料 231018-B と黄色の試料 231018-Y の XRD 分析結果を一例として図 3, 4 に示す。青色の試料では緑泥石のピークが確認できた。黄色の試料ではスメクタイトのピークを確認できた。また、石英、斜長石、イライト、方解石は青色、黄色どちらの試料でもピークを確認できた。

XRD 分析より粉末試料と塩酸を反応させた後、緑泥石のピークが無くなったことから、緑泥石が塩酸により溶けたことがわかった(図 5)。肉眼での観察では色の変化は見られなかった。また、実験前後の UV-vis の分析結果を図 6 に示す。図 6 より緑泥石の有無にかかわらず可視光線の波長領域を一樣に反射していることがわかった。また、塩酸との反応後は明度が低くなっていることがわかった。

3.2. 酸化還元実験

肉眼での観察では酸化実験の前後で色の変化は見られなかった。

XRD 分析では実験前後で変化は見られなかった。また、UV-vis 分析より酸素系漂白剤、イソジジンによる酸化実験後は明度が低くなっているが、可視光線の波長領域を一樣に反射していることは変わらなかった(図 6)。

肉眼での観察では還元実験の前後で色の変化は見られなかった。XRD 分析では還元実験の前後で変化は見られなかった。また、UV-vis 分析よりクエン酸、ビタミン C による還元実験後は明度が低くなっているが、黄色の波長領域(550 ~ 590 nm)で反射率が高いことは変わらなかった(図 7)。

4. 考察

青色の竜山石では XRD 分析より緑泥石の存在が認められたことから、先行研究(先山, 2011)でも述べられていたように緑泥石が青色の由来のひとつであると考えられる。しかし、酸化実験と塩酸による緑泥石の溶解を行ったが、UV-vis の結果より明度以外の変化は見られなかった。よって、上述したように緑泥石は青色の由来のひとつではあるが、青色を呈する主な要因は他にあると考えられる。

また、還元実験では黄色の由来だと考えられている水酸化鉄(III)の還元を試みたが、明度以外に変化がなかったことから水酸化鉄(III)以外に黄色を呈する要因があると考えられる。

5. 結論

XRD 分析の結果から青色の竜山石で緑泥石の存在を確認することができた。緑泥石の有無により色に変化がないこと、酸化還元実験により色に変化がないことから緑泥石も水酸化鉄(III)も竜山石の色に全く関係がないとは言えないが、竜山石が青色、黄色を呈する主な要因は他にあると考えられる。また、酸化還元実験に関しては液体の濃度を 10 wt%のみで行ったので、濃度を変えて実験する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 先山徹 (2011), 第 8 章 岩石調査, 高砂市文化財総合的把握モデル事業 文化財調査報告書, p128-134.
- [2] 地理院地図/GSI Maps | 国土地理院, <https://maps.gsi.go.jp/>, 2023 年 1 月 19 日.
- [3] 八木公史・板谷徹丸 (2011), 塩酸処理による主要鉱物の K-Ar 年代への影響, 地質技術第 1 巻, p37-43.
- [4] 折笠智紀・多田海成・清木隆文 (2015), 色調還元に基づいた大谷石の色調変化の原因に関する検討, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, p42-47.

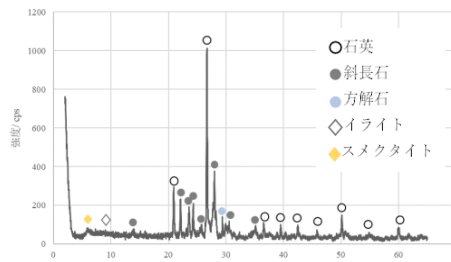


図 4 試料 231018-Y (黄) XRD 分析結果

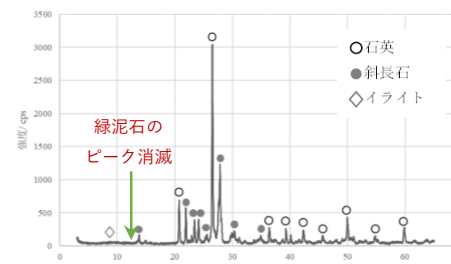


図 5 試料 231018-B (青) 塩酸処理後 XRD 分析結果

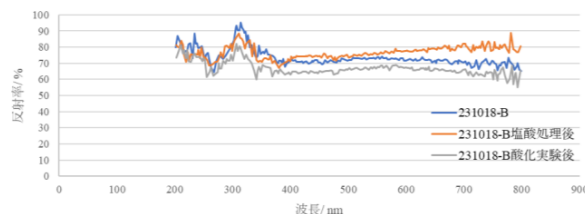


図 6 試料 231018-B (青) UV-vis 分析結果

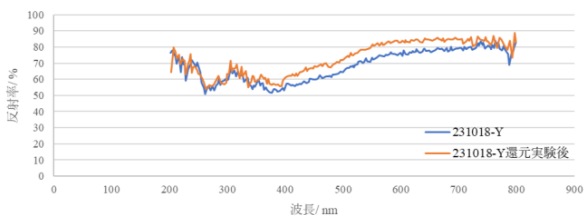


図 7 試料 231018-Y (黄) UV-vis 分析結果

1. 序論

神奈川県鎌倉市は神奈川県中部、相模湾へ面した海岸線を持つ地域である。この海岸線のうち、小動岬と稲村ヶ崎に挟まれた範囲は一般的に七里ヶ浜と呼称される。七里ヶ浜は近年砂浜の浸食が進行し、現在では三浦層群逗子層主部に相当する灰色のシルト質凝灰岩層が広く露出する。露頭の表面はノジュールや植物化石などの含有物がしばしば観察できる。これらの含有物の存在や成因についての報告は現在までない。そこで本研究では、七里ヶ浜地域の海岸線にて露出したノジュールの組成や成因を調査し、堆積環境や形成要因等を考察する。

2. 調査地点・サンプリング地点

七里ヶ浜と呼称される、稲村ヶ崎と小動岬に挟まれた海岸線に点在する露頭は、波浪によって砂堆・砂丘堆積物が取り払われる事で露出している。七里ヶ浜周辺の地質について 5 万分の 1 地質図幅「横須賀」(江藤ほか, 1998)では周囲に三浦層群逗子層主部(後期中新世～前期鮮新世)が分布するとしているが、浸食が進行する前に作成されたため、海岸線は砂堆・砂丘堆積物のみ表記され、露頭の存在は反映されていない。そこでまず大まかに露頭が見られた箇所を、2500 分の 1 鎌倉市都市基本図に記入した。

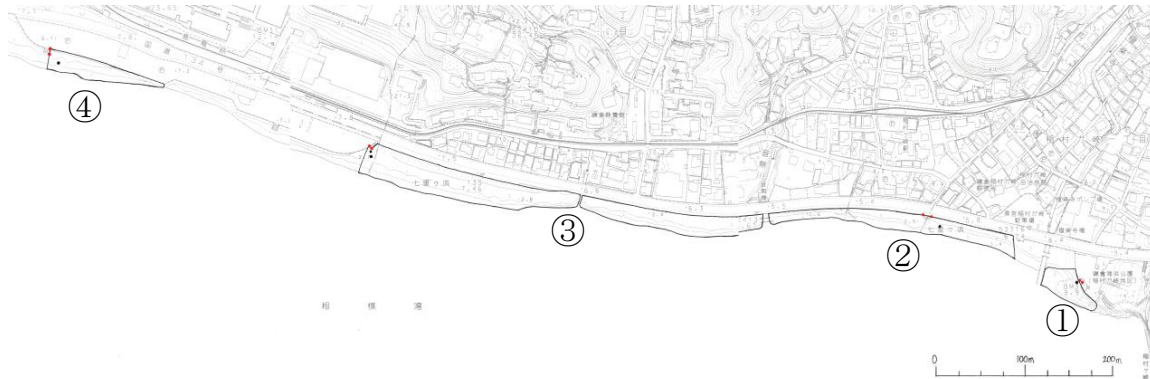


図 1 調査地域全景(2500 分の 1 鎌倉市都市基本図より改変)

試料を採集した地域は、地図に表示されている海岸線の箇所である。これらを大まかに、隣接する地形や施設から①稲村ヶ崎前、②極楽寺橋～音無橋海岸線、③音無橋～海岸駐車場(東)端海岸線、④海岸駐車場(西)前海岸線と呼称する。これらの露頭は波浪による浸食はあるものの起伏が少なく、全体的に海側に 3° 程度傾斜していた。

3. 観察分析装置・観察分析方法

採集したノジュール、母岩試料に対する分析として、まず(株)Bruker 製 D2phaser を使用し 30kV, 10mA, 回折角度 5° ~65° の条件で粉末 X 線回折法分析(XRD)を行った。また地点①～④から採集されたノジュール試料 22 個、母岩試料 4 個に対して(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物質 15 種類から作成した検量線を基に Rh 管球、50kV、50mA の条件で蛍光 X 線分析(XRF)を行い、主要元素 10 種類(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)、微量元素 9 種類(Rb , Sr , Ba , Y , Zr , Nb , Cr , Ni , S)の定量分析を行った。さらにノジュール試料の岩石薄片標本の作成を行った。XRD では、分析結果を試料毎にグラフとして集計後、強度のピークと様々な物質のピークを比較した。XRF では分析結果を SiO_2 と各元素ごとの二軸散布図として集計し、その相関を比較した。岩石薄片は作成後、(株)Nikon 製の偏光顕微鏡 Eclipse E600POL、(株)島津理化製のデジタルカメラシステム Moticam 1080 の二つを用いてオープン、クロス二種類の状態で薄片写真を撮影した。

4. 結果

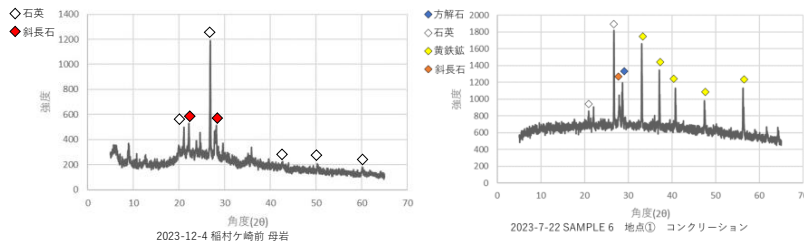


図 3.4 地点①の母岩、ノジュールの XRD 結果

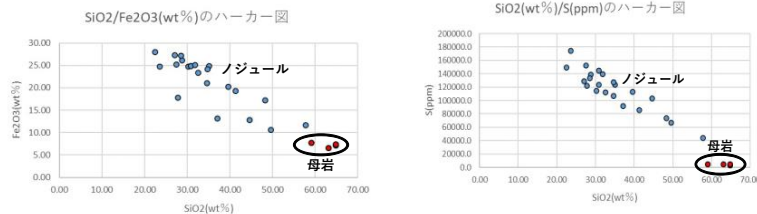


図 3.4 母岩、ノジュールの SiO_2/Fe_2O_3 , SiO_2/S 散布図



図 5.6 ノジュール薄片に見られた斜長石と黒色の粒(上),金属光沢(下)



図 7 植物化石に隣接するノジュール

XRD 結果より地点①から採集された母岩とノジュールを比較すると、どちらにも石英(SiO_2)、斜長石($NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$)のピークが確認できる。またノジュールには上記の二つに加え、母岩には見られなかった黄鉄鉱(FeS_2)のピークが複数見られた。

XRF 結果のハーカー図では、 SiO_2/Fe_2O_3 , SiO_2/S の二つは母岩が末端となる右下がりの直線状にプロットされ、特に強い相関を示した。これは母岩からノジュールが形成される過程で、Fe と S のみが多量に増加した事を示す。

偏光顕微鏡を用いたノジュール薄片の観察では、クロス状態でアルバイト双晶が確認できる斜長石、白～灰色、黒色に変化する石英の摩耗した鉱物粒が確認できた。また視野の大部分が黒色であった。この黒色部分はオープン、クロス両状態でも変化を起こさない金属鉱物(不透明鉱物)であり、オープン状態で薄片上部から光を浴びせると、黒色部分の表面に黄色の金属光沢が見られた。これは黄鉄鉱の特徴である。鉱物粒の無い石基部分の一部には、微生物の働きと関連すると考えられているフランボイダルパイライトに類似する直径数 μm ～数十 μm 程度の黒色粒が見られた。

5. 考察

XRD, XRF 結果、薄片写真から、母岩は石英と斜長石主体の堆積岩であるのに対して、ノジュールは黄鉄鉱が多量に含まれるパイライトノジュールである。その成因としては、還元的環境下で海底に沈降した植物片を硫酸還元菌が硫化水素(H_2S)を放出しながら分解し、これが還元的環境で海底の碎屑物から供給される二価の鉄イオン(Fe^{2+})と結合する事で、植物の周囲に黄鉄鉱が発生したと考えられる。実際にノジュールと植物化石が隣接した試料も複数採集された。パイライトノジュールの存在の他に、逗子層主部の堆積環境は水深 500-2,000m の上部漸深海帯下部～中部漸深海帯(江藤ほか, 1998)であり、底生生物の生痕化石が露頭からほぼ産出しない事からも、七里ヶ浜地域の堆積時の海底は植物片が多く含まれた、酸素の少ない還元環境に近いと推測される。

今後の課題として、まず黄鉄鉱が硫酸還元菌によるものかどうかを特定する必要がある。また七里ヶ浜以外の逗子層主部の露頭でパイライトノジュールが産出するか否かも調査を行う。

6. 引用、参考文献

2500 分の 1 鎌倉市都市基本図(切図) 七里ヶ浜

江藤哲人, 矢崎清貴, 卜部厚志, 磯部一洋, (1998), 5 万分の 1 地質図幅「横須賀」, 地質調査所

江藤哲人, 矢崎清貴, 卜部厚志, 磯部一洋, (1998), 横須賀地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所

千葉県北部第四紀更新統の堆積物組成変化

地球科学研究室
2017018 金子 大輝
指導教員 萩谷 宏

1. 緒言

千葉県北部から中部にかけては、下総台地と呼ばれる平坦な土地からなる。第四紀更新世中期(チバニアン期)から後期にかけての海進・海退のサイクルで堆積した、海成砂層が主体の下総層群が基盤である。下位から地蔵堂層、藪層、上泉層、清川層、木下層で構成される。下総層群の上位には、常総粘土層、関東ローム層(主に武蔵野ロームと立川ローム)の順に堆積する。(中里ほか, 2016)

本研究では、下総層群と常総粘土層、関東ローム層の各層を構成する堆積物の全岩化学組成の測定に軸をおいて、各層や地域によって組成に変化が生じていないか、地層の供給源を考慮しつつ検討する。

2. 調査地域・研究方法

千葉県北部の利根川南方の東西約 45km の範囲内で、計 16 地点 234 試料を採取した。採取する試料の層準を明らかにするために、露頭ごとに柱状図を作成した。多くの露頭では露頭面風化が激しく進んでいるため、ねじり鎌を用いて表面を剥ぎ、新鮮な面で試料を採取した。

採取した各試料は乾燥・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を基に、Rh 管球・50kV・50 mA の条件で主要 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 XRF 分析を行った。代表的な試料については、双眼実体顕微鏡を用いて、洗い出した砂を 1 試料につき 300 粒カウントし、砂粒子組成を算出した。

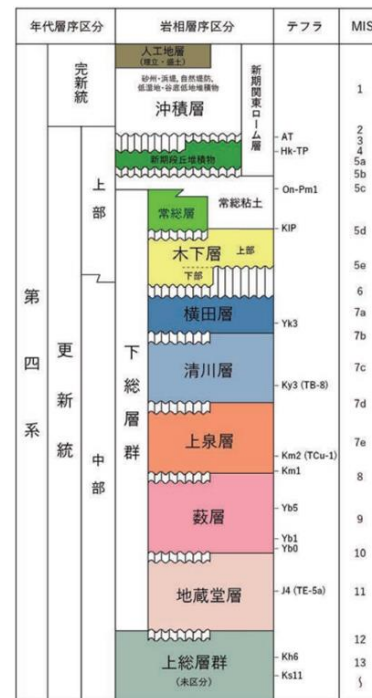


Fig. 1 下総層群層序総括図(納谷ほか,2018)

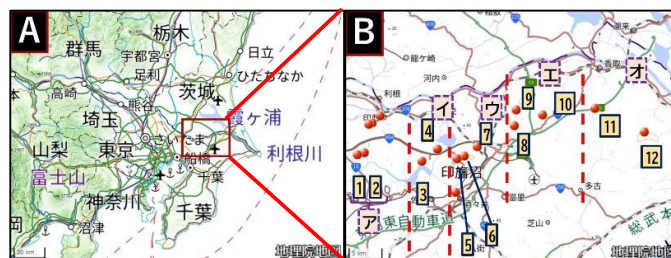


Fig. 2 広域地図とサンプリングポイント(地理院地図に加筆)

(A)関東広域地図 (B)調査地域拡大地図

3. 結果

3-1. 全岩化学組成

同一露頭で最も多くの層から採取できた地点 8 の相関図の一部を、石井ほか 2010 のデータとあわせて示す(Fig. 3)。TiO₂-Nb 図は大きく 2 つの直線(図の茶線と緑線)に分かれた。常総粘土層で代表されるように、粒度の小さい粘土質のものは Nb の値が高く出た。また、最も多くの地点で採取できた清川層の図の一部を示す(Fig. 4)。Al₂O₃-Fe₂O₃図では東側ほど値の大きい部分にプロットされた。同様に、調査地域東端の(エ)では Ca や Na, Sr などの値が低く、西側地域との差が現れた。

3-2. 砂粒子組成

砂試料の東西方向の組成変化について、Fig. 5 に広域で採取できた清川層を、Fig. 6 に東側の上泉層・藪層を示す。生物片の不均衡が目立ち、含有量の少ない有色鉱物は東側で輝石が多くみられた。

4. 考察

地層や地域により組成の違いが現れた。TiO₂-Nb 図では、TiO₂の低い側(緑線)に下総層群の大部分が、高い側(茶線)にロームと上泉層最上部の試料がプロットされた。下総層群は Ti に乏しく、安定大陸的な起源を持つことが推定される。一方、下総層群各層最上部は海退期の堆積物を挟む場合があり、海退期には現在のロームのような陸成層起源の堆積物を多く含み、堆積物の起源の違いが組成の違いに反映されたと考えられる。

地域差は、東側で K や Ca など風化で溶脱しやすい元素に乏しく、Al や Fe など風化で残りやすい元素に富む傾向がみられた。Fig. 4 に粘土分を洗い流した砂試料(図の▲)をプロットすると、西側の傾向と類似したことから、砂試料中の粘土分の量が組成の違いに反映されたと考えられる。砂粒子組成から、有色鉱物の含有量は地点により若干の違いはみられたが、全体的として量が少なく、全岩化学組成の変化に大きく寄与していないものと推定される。

また、Fig. 3 に粘土分を洗い流した砂試料(図の▲)をプロットすると、九十九里浜の砂と似た組成を示し、洗い出された下総層群の砂が九十九里浜に堆積していることが考えられる。この点から、洗われた直後の現生海岸砂と、陸化した堆積砂を比較する際には、注意が必要である。

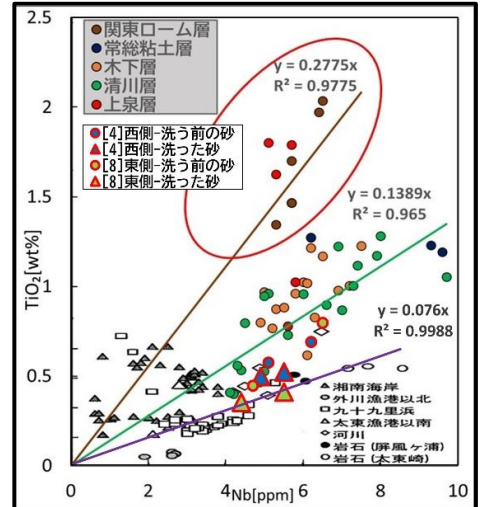


Fig. 3 TiO₂-Nb の相関図(地点[8])

(石井ほか 2010 のデータを含む)

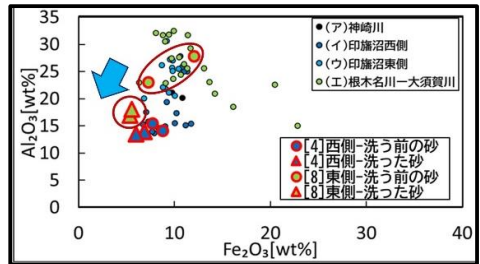


Fig. 4 Al₂O₃-Fe₂O₃の相関図

(ア)-(エ)や[4][8]は Fig. 2(B)の地点と対応

5. まとめ

下総層群の堆積した時代及び地域によって、全岩化学組成に変化が認められた。特に TiO₂/Nb 比が堆積時の環境により異なり、堆積物の供給源の違いが組成に反映されている。

Nb・Al・Fe など風化で残りやすい元素が細粒物質に集まりやすく、下総層群の細粒物質が除去された砂が九十九里浜に堆積している。

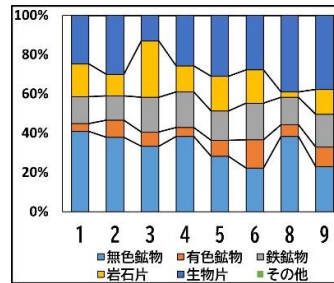


Fig. 5 清川層の砂粒子組成

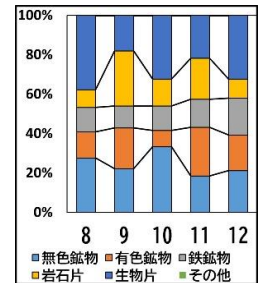


Fig. 6 上泉層・藪層の砂粒子組成

数字は Fig. 2(A)と対応 (8-10: 上泉層、11-12: 藪層)

6. 参考文献

- 納谷友規ほか(2018), 「都市域の地質地盤図『千葉県北部地域』(説明書)」, 産総研地質調査総合センター, 第2-4章。
- 中里裕臣・佐藤弘幸(2016), 「千葉県北部地域の下総層群の層序」, 平成27年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告(地質調査総合センター速報), 第71巻, p. 55-p. 78。
- 石井敦子・萩谷宏・渡辺国広(2010), 「全岩組成分析を用いた九十九里浜の供給源の検討」, 海洋開発論文集, 26, p. 1125-p. 1130。
- 岡崎浩子・増田富士雄(1992), 「古東京湾地域の堆積システム」, 地質学雑誌, 第98巻, p. 235-p. 258。
- 岡崎浩子・佐藤弘幸・中里裕臣(1997), 「古東京湾に発達した2つのタイプの堆積シークエンス-下総層群上泉層, 清川層および横田層-」, 地質学雑誌, 第103巻, p. 1125-p. 1143。
- 下総台地研究グループ(1984), 「千葉県手賀沼周辺地域における木下層基底の形態と層序の関係」, 地球科学, 第38巻, p. 226-p. 234。

宮島層堆積物に関する高分解能全岩化学組成分析

地球科学研究室

2017035 鈴木舞生

指導教員：萩谷宏

1. 緒言

栃木県那須塩原市の塩原盆地に分布する更新統塩原層群宮島層(Tsujino and Maeda, 1999)は年縞堆積物にイベント堆積物が挟在した湖成層である。年縞堆積物は*Stephanodiscus akutsui* の珪藻被殻主体の明色葉理(Kojima ほか, 2016)と碎屑物主体の暗色葉理からなり、明暗の葉理 1 セットで 1 年を示すとされている(Akutsu, 1964)。イベント堆積物は主に河川からの洪水流によって運ばれたシルト質堆積物である(佐々木ほか, 2019)。本研究ではイベント堆積物と年縞 1 枚 1 枚の全岩化学組成の変化から宮島層を構成する堆積物の変動要因を考察することを試みる。

年縞は 1 年単位で情報を記録しており、イベント堆積物の組成は湖周辺の地表付近の地層や岩石を反映している。従って、全岩化学組成の測定結果から得た元素濃度の鉛直変化を解析することにより、堆積時の条件を読み取ることが出来ると考えられる。

2. 分析方法

試料は栃木県那須塩原市の要害公園を通る箒川沿いの露頭で採取した(Fig. 1)。平均層厚 0.7mm の明色・暗色葉理は 0.05~0.5mm ずつ削り 1 枚の葉理につき 3 つの堆積面、イベント堆積物も同様に削っていき一度につき最低 3 つの堆積面について、堆積面に対し鉛直方向に数十~数百ミクロン単位での全岩化学組成分析を行った。分析は東京都市大学の蛍光 X 線分析装置(XRF)RIX-3000(リガク, Rh 管球, 50kV, 50mA)を用い、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をもとに行った。

3. 結果

試料では 68 枚の年縞堆積物と思われる堆積物と 19 層の塊状シルト岩 (Fig. 2)、さらに 8 枚の青灰色葉理が観察できた。

Al_2O_3 、 CaO に関する全岩化学組成の変化を Fig. 3 に示す。 Al_2O_3 は明色葉理、暗色葉理、イベント堆積物のプロットが珪藻被殻の組成である SiO_2 100wt%(他 0wt%)と塩原カルデラ噴出物の組成の混合線上に並んだ。一方 CaO では、イベント堆積物のプロットが一部異なるトレンドを示した。

Fe_2O_3 、S の元素濃度を横軸、層厚を縦軸にとったグラフを Fig.4 に示す。青灰色葉理では Fe_2O_3 が 4.29~11.95wt%、S が 0.93~5.1wt%と高い濃度を示した。

4. 考察

Fig. 4 より、全岩化学組成のプロットが SiO_2 100wt%(他 0wt%)と塩原カルデラ噴出物の組成の混合線上にのることから、堆積物の組成は珪藻と碎屑物の割合で決まると考えられる。混合線から外れるイベント堆積物には、XRD 分析の結果、モンモリロナイトが確認された(Fig. 5a)。モンモリロナイトは風化や熱水変質作用を受けた際に生成される鉱物である(武司ほか, 1980)。従って、陸上で風化した堆積物がイベント堆積物として運ばれてきたと考えられ、他のイベント堆積物とは供給源が異なる可能性がある。

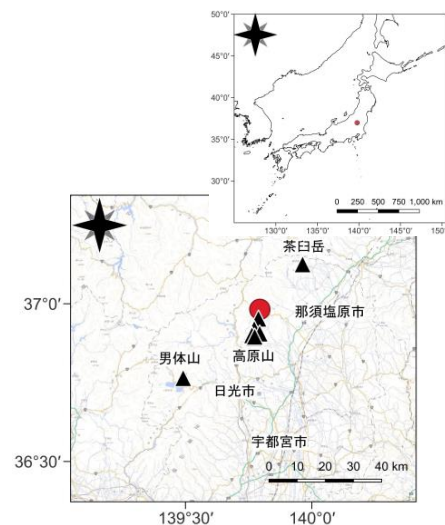


Fig. 1 要害公園周辺地図

● : 試料採取地点 N36.98233° E139.79406°



Fig. 2 試料の偏光顕微鏡写真(直交ニコル)

Fe₂O₃及びSの濃度が高い青灰色葉理ではXRD分析の結果、強い黄鉄鉱のピークが認められた(Fig. 5b). 黄鉄鉱は還元的な環境で生成する鉱物である. 従って、黄鉄鉱が濃集した葉理は還元的かつ硫黄の供給が多い環境で形成されたと考えられる. 硫黄の起源としては(1)有機物が大量に供給されたことにより増加した生物起源の硫化水素、(2)火山ガス、温泉水起源の硫化水素が挙げられる.

5. まとめ

宮島層の年縞堆積物は珪藻と碎屑物の割合の季節ごとの変化で決まることが示された. 青灰色葉理には黄鉄鉱が多く含まれていた. 還元的条件下ではFe²⁺が堆積物中を移動しやすいことを考慮すると、葉理形成時には大量の硫化水素イオンを生じるイベントが起きたと推定される. 硫黄同位体比δ³⁴Sの値は硫黄の起源を反映する(山岡, 2007). 従って、黄鉄鉱に含まれる硫黄の同位体比を測定し、黄鉄鉱が急増した時期に起きたイベントとは何かを決定することが今後の課題である.

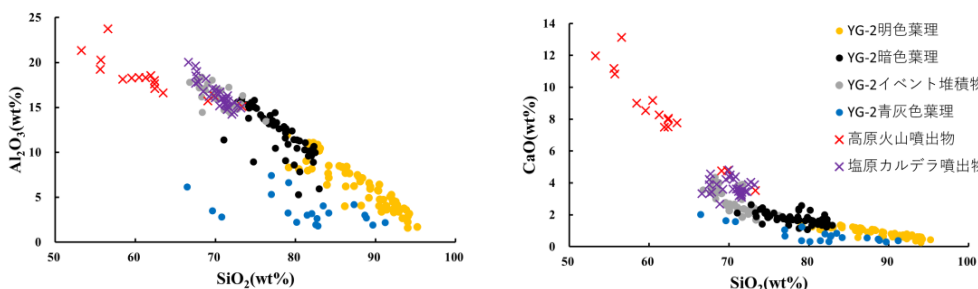


Fig. 3 全岩化学組成の変化図

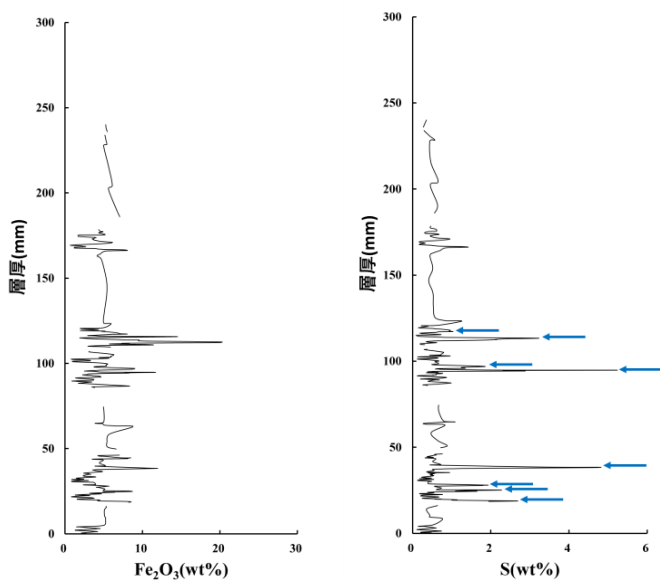


Fig. 4 元素濃度の鉛直分布

青矢印が青灰色葉理

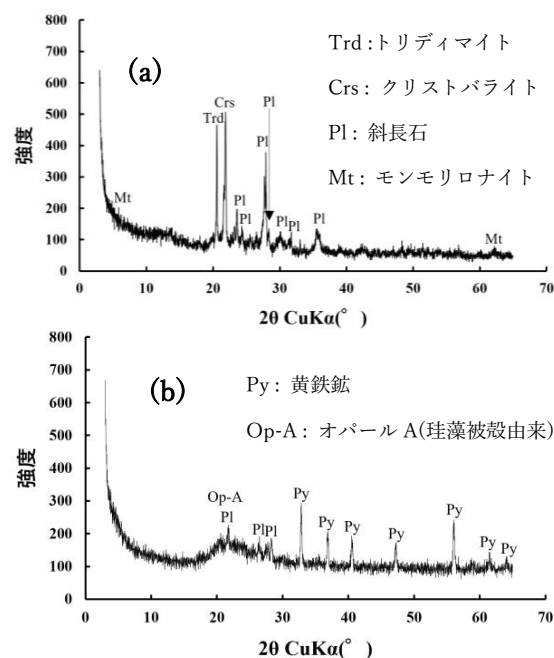


Fig. 5 (a) イベント堆積物, (b) 青灰色葉理の XRD 分析結果

6. 参考文献

- ・ Takumi Tsujino and Haruyoshi Maeda. Stratigraphy and Taphonomic Features of Diatomaceous Shale of the Pleistocene Shiobara Group, in Tochigi, Japan. Bulletin of the National Science Museum, Series C (Geology & Paleontology). 1999, no.25, vol.3-4, p.73-104.
- ・ 尾上亨. 栃木県塩原産更新世植物群による古環境解析. 地質調査所報告. 1989, no.269, p.1-226.
- ・ Akutsu Jun. The Geology and Paleontology of Shiobara and Its Vicinity, Tochigi Prefecture. The science reports of the Tohoku University. Second series, Geology. 1964, no.35, vol.3, p.212-289.
- ・ 佐々木華・大西由梨・石原与四郎. 更新統塩原層群宮島層における湖成年縞堆積物に挟在するイベント堆積物の特徴とその識別方法—側方変化を考慮した堆積過程の検討—. 第四紀研究. 2019, no.58, vol.2, p.237-249.
- ・ Takahiro KOJIMA・Megumi SAITO・Makoto OKADA. *Stephanodiscus akutsui*, a new fossil diatom species from the Middle Pleistocene Miyajima Formation, Shiobara Group, Tochigi Prefecture, central Japan. Diatom. 2016, no.32, p.47-55.
- ・ 武司秀夫・宇野泰章. モンモリロナイトの鉱物学的性質と変質. 粘土科学. 1980, no.20, vol.3, p.67-78.
- ・ 山岡香. 地下生物圏とバイオミネラリゼーション—硫黄循環における硫酸還元菌の役割—. 地質ニュース. 2007, no.632, p.46-52.

湘南海岸および三浦半島における海岸砂中の Fe-Ti 鉱物の起源を探る

地球科学研究室
2017039 高橋ほのか
指導教員：萩谷宏

1. 緒言

神奈川県湘南海岸の江ノ島よりも東、片瀬東浜～由比ヶ浜の約 5km 間では、砂の構成粒子や粒径が地点により大きく変化する。先行研究においては海岸砂の全岩化学組成分析^[1]や動態調査などを行い、その特徴から起源の推定が試みられてきた。一方でこの地域は汀線付近や風の吹きだまり、露出した岩床の窪みなどにしばしば重鉱物の濃集が見られる。特に稲村ヶ崎では砂浜の大半が磁鉄鉱、輝石、かんらん石といった重鉱物の砂に占められている。この重鉱物の濃集は、過去と比較して汀線の後退が指摘^[2]され養浜対策も取られている湘南海岸全体で近年見られる範囲が広がりつつある。

この大量の砂鉄の起源が未だはっきりと決定されていないことに加え、砂浜が流失しても海岸から移動しにくい重鉱物について調べれば、砂浜形成や海岸砂の起源について新たな角度から明らかにできる事実があるのではないかと考えた。また磁性鉱物の化学的特性を海岸砂の起源を考察する試みに用いられた例はほとんどないことから、本研究では湘南海岸および三浦半島における海岸砂の titanomagnetite をはじめとした磁性鉱物に着目し、顕微鏡観察や化学分析を用いて各海岸の特徴について調査を行うこととした。結果をもとに火山砕屑物や川砂、海岸に露出した岩床に含まれる磁性鉱物との比較を行い、この手法による海岸砂の起源推定が可能かを検討する。

2. 実験方法

2-1. サンプル採取

神奈川県湘南海岸・三浦半島の海岸 22 箇所(地点 1～22)において、各海岸に濃集する重鉱物を採取し持ち帰り、洗浄・乾燥後に磁石を用いて磁性鉱物を分離した。濃集が確認できなかった海岸については汀線付近の海岸砂を採取し、同様の手法で磁性鉱物を分離した。また等々力溪谷で採取した箱根東京軽石層(Hk-TP)(比較試料 1)、山梨県甲州市を流れる重川の川砂(比較試料 2)、七里ヶ浜と稲村ヶ崎間に露出する岩床(三浦層群逗子層)から採取した泥岩(比較試料 3)も比較試料として使用した。比較試料 1, 2 については海岸砂同様磁性鉱物を分離し、比較試料 3 については泥岩を粉砕し測定に使用した。

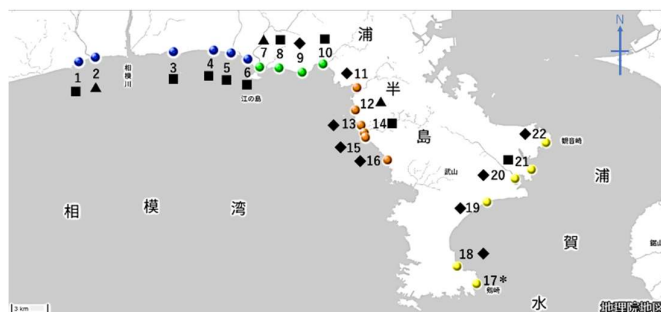


図 1：試料採取地点(記号は図 4 と対応)

2-2. 顕微鏡観察

実体顕微鏡下で砂粒子の粒径や鉱物割合、鉱物形状を観察した。

2-3. 化学組成

蛍光 X 線分析では加圧形成ディスク作製に足る量 4～5 g の重鉱物を集められない地点があるため、比較試料 3 を除いた試料は直径 3cm の円状に切った養生テープ(ニチバン(株)、フィルムクロステープ養生用(半透明))に鉱物をまぶしてシートを作製し分析する方法をとった。石英を粉砕して作製した加圧形成ディスクを土台として鉱物シートをのせ、本学ナノ科学技術学際研究センターの RIX-3000(株)リガク、Rh 管球、50kV、50mA)にて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を基に定量した。

3. 結果

3-1. 顕微鏡観察

右図 2, 3 に顕微鏡観察例を示す。分離した磁性鉱物は、正八面体が円磨された形状をもつ金属光沢のある細粒なもの、不定形で光沢が少なく比較的粗粒でわずかに褐色を呈したものと 2 種類が観察された。



図 2：地点 9 稲村ヶ崎の磁性鉱物



図 3：地点 8 七里ヶ浜の磁性鉱物

3-2. 化学組成

これらの磁性鉱物は予察的な定量分析から Fe-Ti 酸化物の magnetite~ilmenite~hematite の固溶体であると推定された。Fe-Ti 酸化物の固溶体成分の Ti 含有量に違いが見られ、地域によって Ti の高いものと低いものが区別された。また、顕微鏡観察において円磨度が高く粒度の細かい金属光沢を呈した砂ほど、Ti の割合が高い傾向が見られた(図 1,4)。

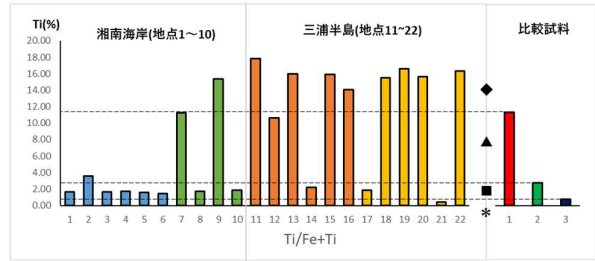


図 4：各海岸砂と比較試料の Fe・Ti の wt% の和に対する Ti の割合 (横軸番号と記号は図 1 と対応)

4. 考察

いわゆる磁鉄鉱は、 $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ の 3 成分系に属する固溶体である^[3]。そこで三角図を作成し、測定結果をプロットした。これより今回測定した磁性鉱物はいずれも titanomagnetite~titanohematite 系列にあたる組成を持つ鉱物であると言える。近い海岸でも大きなばらつきが見られるのは、供給源が異なるか、あるいはその一帯で複数存在する可能性を示唆しており、河川や潮流、露出している岩床、後背地の地質等の各海岸の個々の条件が反映されていると考えられる。

甲府盆地の周辺南北約 45km、東西約 30km の環状を成して分布する^[4]新第三紀の花崗岩体に流域を持つ重川の砂は低 Ti の titanomagnetite 系列に寄っている。重川と同じ岩体に流域を持つ相模川上流真木川で見られる磁性鉱物も重川と同じ組成であるとする、大磯~片瀬西浜、七里ヶ浜や由比ヶ浜などと似た組成を持っていることから、大磯~由比ヶ浜までの湘南海岸は、相模川上流の花崗岩由来の鉱物が起源の 1 つであると考えられる。

また湘南海岸の江ノ島以東で、重鉱物の濃集から砂を採取した稲村ヶ崎・片瀬東浜では Ti が高く titanohematite に寄り、濃集以外の砂から磁性鉱物を採取した七里ヶ浜や由比ヶ浜反対に titanomagnetite に寄る。片瀬東浜は Ti が高い集団と低い集団の中間にプロットされることから、大磯~由比ヶ浜までの共通した供給源に加えて、片瀬東浜~由比ヶ浜には Ti の値がより高い供給源があり、理想的には重川~片瀬東浜を通る混合線付近にプロットされる組成を持つと考えられる。

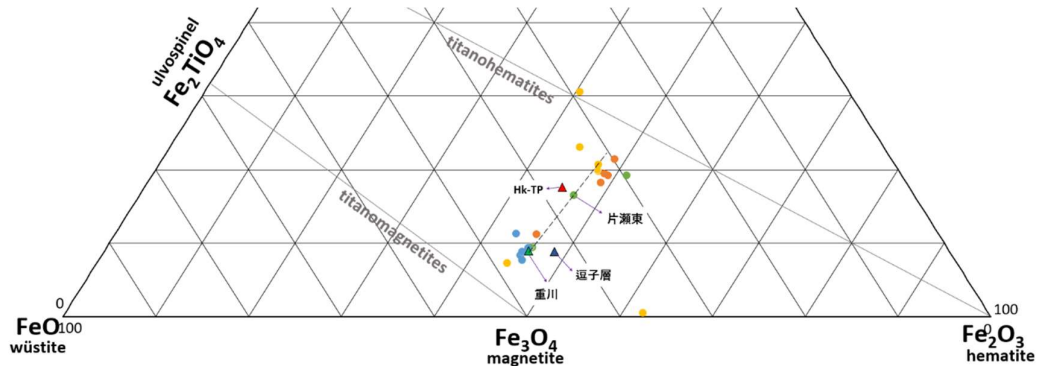


図 5：Fe-Ti 酸化物固溶体の三角図の一部($FeO-Fe_2O_3-TiO_2$)

5. 結論

海岸砂の磁性鉱物の化学組成分析し周辺地域に含まれるものと比較することで、湘南海岸では相模川上流の花崗岩由来の Fe-Ti 酸化物が供給されていることが明らかとなった。一方で Ti の高い Fe-Ti 酸化物の供給源については、関東ローマや、三浦半島の三崎層・初声層等に含まれる火山噴出物由来であることが疑われる。今後、比較する周辺地の試料を増やすなどしてさらなる検討が必要である。

6. 参考文献

- [1] 石井敦子・萩谷宏・渡辺国広(2009)：「海岸砂の鉱物組成および全岩組成に基づく土砂移動動態の推定-湘南海岸・九十九里浜を例として-」海洋開発論文集 vol.25 No.1 1107-1111
- [2] 宇多高明・木下幸夫・山野巧・吉岡敦・三波俊郎・志岐信二・石川仁憲(2006)「長期深淺測量データに基づく湘南海岸の海浜変形の実態分析」：海岸工学論文集 53 651-655, 2006
- [3] 青柳隆二(1970)：「関東ローマの地球化学的研究 軽石中に含まれる強磁性鉱物の一般的性質」地球科学 24 (1), 1-17, 1970
- [4] 佐藤興平・石原舜三(1983)：「甲府花崗岩体の帯磁率と化学組成」地質調査所月報 34 (8), p413-427, 1983-08
- ・青柳隆二(1970)：「関東および信州ローマ中のチタン磁鉄鉱の化学組成と共存する有色鉱物との関係」
- ・佐藤良昭(1971)：「重鉱物研究の現状と問題点」地質調査所月報 22 (9), p487-499, 1971-09
- ・増井次夫(1952)：「砂鉄の堆積機構について」横浜国立大学理紀要 第二類 生物学・地学 1 79-85 1952-03-25
- ・大島治(1971)「樺名火山噴出物中の磁鉄鉱の化学組成変化」日本火山学会 1970 年秋季大会講演要旨 15 巻 3 号 p. 146-
- ・Nobuyuki Kinami(2020)：「鎌倉砂鉄を原料とするたたら製鉄の再現と原料砂鉄の産地推定」Journal of Advanced Science Vol.32,32106
- ・荒巻学・鈴木隆介(1962)：「海浜堆積物の分布傾向からみた相模湾の漂砂について」地理学評論 1962 年 35 巻 1 号 17-34 ページ
- ・久城育夫・都城秋徳(1972)：「岩石学 I：偏光顕微鏡と造岩鉱物」共立全書

伊豆大島 S2 部層内 c, d ユニット内に含まれる岩片の全岩化学組成

地球科学研究室

2017049 野本凜

指導教員：萩谷 宏

1. はじめに

伊豆大島は伊豆半島の南東に位置する島で、フィリピン海プレート上に存在する、現在も活動を続ける火山島である。著しく開析された三つの成層火山と、それを覆う大島火山とから成る。大島火山は主に玄武岩質溶岩から成り、主成層火山のカルデラ内部、三原山に中央火口丘を持つ。

伊豆大島火山はおよそ4万年前から活動を始め、その活動の特徴から大きく3つの時代に分けられる。約4万年前から現在のカルデラ形成までの先カルデラ期、カルデラ形成期、そして形成以降から現在までの後カルデラ期である。カルデラ形成以降の噴火に関しては詳細が明らかにされているものも多いが、カルデラ形成以前の噴火に関しては年代試料に乏しい。

このうち、カルデラ形成期の最下位に位置する S2 部層は、山元 (2006) によって S2-a から S2-f までのユニットに細分されており、その部層ごとに特徴が見られる。そのなかでも、今回は流れ堆積物であり、本質物をほとんど含まないことから、カルデラ形成期以前の岩片を内包する。c ユニット d ユニットに含まれる岩片について全岩化学組成と薄片の作製を行い、過去の噴火噴出物について考察を行う。

2. 方法

伊豆大島火山博物館駐車場露頭にて c ユニット、御神火茶屋レストハウス裏にて d ユニットの岩片を採取、本学ナノ科学技術学際研究センターの蛍光 X 線分析装置 RIX-3000 (リガク、Rh 管球、50kV、50mA) にて産総研 (地質調査所) の岩石資料 15 種類から作成した検量線をもとに定量した。また、薄片を作製し、偏光顕微鏡で観察した。

3. 結果と考察

3-1 XRF で得た全岩化学組成の結果をもとに、マグマの結晶

分化の進行を見るためのグラフを作成した (図 2)。結果、 MgO/FeO , Na_2O/CaO , K_2O のグラフにおいて SiO_2 との相関が見られた。 MgO/FeO の値の減少は分化に伴う苦鉄質鉱物の分別が行われていることを示し、 Na_2O/CaO が示す正の相関は元のマグマより低い値の Na_2O/CaO の組成を持った斜長石を晶出したことにより、残りのマグマの組成が変化したことを表す。 K_2O の正の相関でも同様、マグマの分化に伴い徐々に元のマグマの K_2O の割合が上昇している (= 分化の初期に晶出する鉱物の影響で、残ったマグマ液により多くの K_2O が含まれるため、) 様子が見られた。

3-2 過去約千年間、伊豆大島火山の噴火は山頂上で起こっており、その組成は噴火の規模と斜長石の濃集の影響を受けていると考えられる (荒巻・藤井, 1987, 1988)。先カルデラ期の噴火においても同様の傾向があるなら、組成と斜長石斑

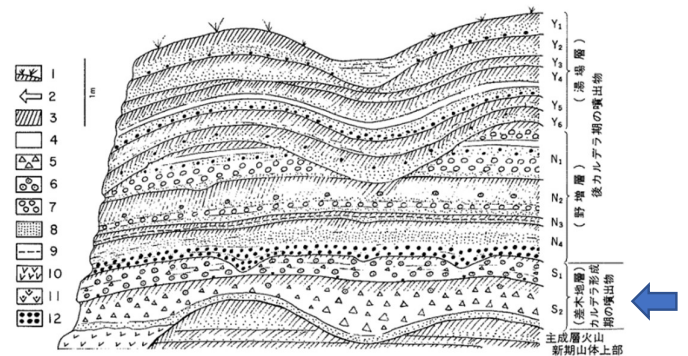


図 1 S2 ユニットを含めたカルデラ形成以降の露頭の模式スケッチ (一色, 1984 より引用)。青矢印が S2。

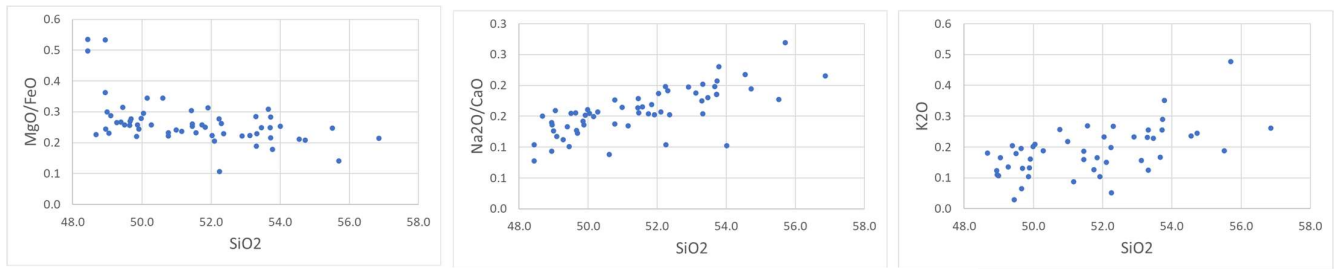


図2 MgO/FeO, Na2O/CaO, K2O のグラフ

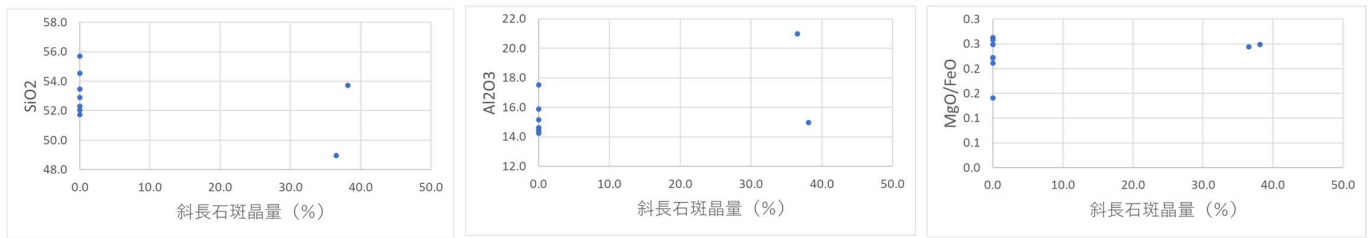


図3 斑晶質岩と無斑晶質岩の組成比較

晶量の間に関係が見られるのではないかと考え、斜長石以外の斑晶を除いた部分における斜長石の割合を求め、(ほぼ)無斑晶質の岩石を0%とし、比較した(図3)。結果、無斑晶質の岩石でもSiO₂の値にばらつきが見られ、斑晶質のふたつの岩石でもSiO₂とAl₂O₃の値で開きが見られた。特に、濃集による影響が見られるなら斑晶質である岩石の方がAl₂O₃の値は相対的に高くなると考えたが、実際には斑晶質であっても無斑晶質の岩石に近い値のAl₂O₃を示している。低濃度のSiO₂で高い斑晶量とAl₂O₃の値を示した岩石は濃集の影響を受けたとも考えられるが、もう一方の岩石の組成については、全岩の組成は斜長石斑晶量以上にマグマ全体の分化の程度が重要なのであって、低いAl₂O₃を示した斑晶質の岩石は斜長石が一部分に濃集したものではなく、全体的に分化が進んで斜長石を晶出している状態のマグマが岩石となったものだと考えられる。

4. 結論

S2部層のc,dユニットに含まれる岩片の全岩化学組成をもとに分化の進行を見た結果、今回採取した岩石においてマグマの分化による組成変化はひとつの線上に沿って進行していると思われる。すなわち、時期は不明だがこれらの噴出物のもととなったマグマでは、同様の組成のものが同様に結晶分化作用を進行させており、別源のマグマや異なる推移での結晶分化作用の様子は見られなかった。今回は斜長石の組成を一律でAn₉₀Ab₁₀と仮定して考察したが、今後EPMAを使用して得た値を基にさらなる検討を重ねることが必要だと考える。

5. 参考文献

- 久野 久 (1954) 火山および火山岩, 岩波書店
- 一色直記 (1984) 大島地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所
- 藤井ほか (1988) 伊豆大島火山1986年噴火噴出物の岩石学的特徴. 火山 第2集 第33巻 234-254.
- 川辺禎久 (1991) 伊豆大島火山の岩石学的発達史. 火山 第36巻 第2号 297-310.
- 山元孝広 (2006) 伊豆大島火山, カルデラ形成期の火砕物密度流堆積物: 差木地層 S2部層の層序・岩相・年代の再検討. 火山 第51巻 第4号 257-271.

界面活性剤水溶液の動的表面張力評価

高分子科学研究室
1824001 秋場日菜
指導教員 高木晋作

1. 緒論

表面張力は物質を構成する分子間の引力による現象で、液体中の分子は凝集相互作用によって引きあっている。液体表面では引力が均衡を欠くため表面張力が働き、液体表面は弾性膜のように張り、分子間の凝集力が大きいほど表面張力は強くなる。

一般に表面張力は時間に対して以下に示す二つに分類されている。一つは静的表面張力（これがよく知られている表面張力）であり、平衡に達した時の表面張力を指し、値は時間に対して不変である。これに対してもう一つは動的表面張力であり、平衡に達するまでの表面張力の変化を指し、値は時間に対して変化する。後者は界面活性剤水溶液などでみられる。印刷分野では、実際の印刷工程には動的表面張力が影響し、これが印刷インクの挙動に関与している。流体において静的と動的な場合の異なる流動を理解することは製品品質や印刷技術の向上にとって不可欠であり、理論体系の構築が求められている。

本研究では参考文献 [1] に倣い、動的表面張力の簡易測定装置を構築した。この装置を使い、ドデシル硫酸ナトリウム (SDS) 水溶液の濃度別、液滴形成時間別の静的、動的表面張力を測定し、評価することを目的とした。

2. 実験方法

まず、測定試料を精製する。SDS 水溶液を濃度別に 5 種類である。SDS 水溶液の濃度はそれぞれ $0.347 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $1.736 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $3.472 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $7.986 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $10.417 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ である。 $7.986 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ は、SDS 水溶液の臨界ミセル濃度に対応する。

静的表面張力は、デュヌイ表面張力計（大平理化工業株式会社 D 型）により測定した。動的表面張力は、液滴を装置先端部分の細管から滴下させ、液滴を形成する時間を変える方法で測定した。実験装置は参考文献 [1] 内にあった実験装置を参考にしながら作成した。細管は、外径 D : 1.55mm、内径 d : 1.05mm のものを使用した。液滴が細管から分離する直前の液滴にはたらく力をもとに、動的表面張力 γ の式を簡単にして以下に示す。

$$\gamma = \frac{1}{3} \rho \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 \cdot \frac{d^2}{D} + \frac{Mg}{\pi D} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\text{ビーカーの中の体積(mL)}}{\text{落下させた総時間(s)}} \quad \rho : \text{密度} \quad M : \text{1 滴あたりの質量}$$

Q 、 ρ 、 M を実験により測定し、式(1)に代入して動的表面張力を求める。

3. 結果と考察

実験結果をグラフに示す。図1. には、縦軸表面張力、横軸液滴形成時間の対数の、濃度別のグラフを示す。また、右端には、平衡値であるデュヌイ法で測定した静的表面張力の値を示す。図2. には、縦軸表面張力、横軸濃度の、液滴形成時間別のグラフを示す。これらの結果は先行研究 [1] と同様の挙動を示した。

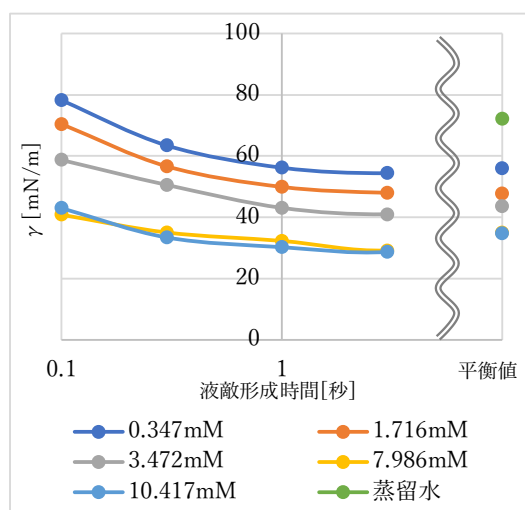


図1. 濃度別表面張力

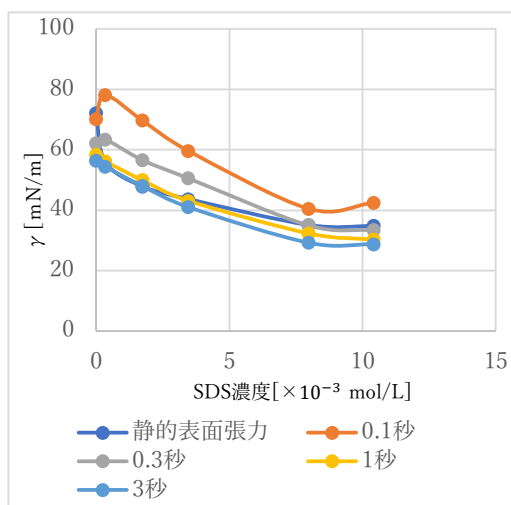


図2. 液滴形成時間別表面張力

図1. では、液滴形成時間を長くするにつれどのグラフの値も下がり、静的表面張力の値に近づく結果となった。液滴形成時間が1秒を下回ると、界面活性剤が液滴表面に拡散するのが間に合わず、液滴表面の界面活性剤濃度が実効的に小さくなっているため、動的表面張力は静的表面張力に比べて増加しており、 $t \rightarrow 0$ で水の静的表面張力 72mN/m に近づいていく。臨界ミセル濃度を超えると、すべての液滴形成時間で表面張力の値はほぼ一致した。

図2. では、SDS水溶液濃度が希薄かつ液滴形成時間が0.1秒の時に値が蒸留水の静的表面張力を上回った。液滴形成時間が短いときは細管中の流速が大きいので、特に γ が大きい場合に液滴の形が不揃いになり、測定した値にずれが生じたと思われる。

4. 結論

液滴形成時間が1秒を下回るとSDS水溶液の動的表面張力を確認することが出来た。ところどころで結果にずれが生じていたので、装置の改善が必要であると考えられる。改善策として、細管の断面積をもう少し小さくしレイノルズ数を低くすることが考えられる。

5. 参考文献

- [1] 界面活性剤水溶液の動的表面張力に関する研究 新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程 唐澤政弘

分子構造によって色変化する指示薬とシクロデキストリン
の包接によって起きる変化に関する研究

2017005 井下田陸歩
高分子科学研究室
指導教員：高木晋作

1. 諸言

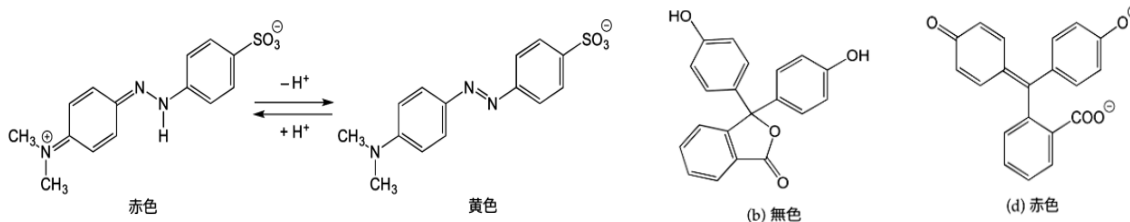
シクロデキストリン (CD) は、ブドウ糖が連なってできたオリゴ糖の両端がつながって輪 (環) になっている。ブドウ糖が6つ結合して輪になったものを α -シクロデキストリン、7つ結合して輪になったものを β -シクロデキストリン、8つ結合して輪になったものを γ -シクロデキストリンと呼んで区別している。3種は性質や働きなどにも大きな違いがみられる。

CD は、分子の中心に存在する空洞に分子を取り込む性質があり包接とよぶ。包接現象は食品や医薬品をはじめとした様々な分野で広く利用されている。

フェノールフタレイン(PP)、メチルオレンジ(MO)などの pH 変化に応じて分子構造が変化し色変化する。特に水中では水に易溶性な CD は水中において種々の有機分子を空洞に取り込み、分子包接錯体を形成する。

2種類の内径が異なる CD を指示薬である MO,PP に添加することで、包接の有無と分子構造の変化が溶液の色調にどのような影響を及ぼすかを調べる。

(図1 メチルオレンジの pH による構造の変化) (図2 フェノールフタレインの pH による構造の変化) <化学と教育 65 巻 8 号 p397>



2. 実験方法

MO での酸性域での溶液は塩酸(12mol/L) 1.0g、蒸留水 300ml、MO0.045g で調製した。塩基性の溶液は水酸化ナトリウム水溶液 (2mol/L) を 1.2g 蒸留水 200.21ml、MO0.045g 調製した。PP での酸性域での溶液は塩酸 1.0g に蒸留水 100ml、PP0.04g 入れて溶液を調製した。塩基性域での溶液は水酸化ナトリウム水溶液を 3.5g、蒸留水 80ml、PP 0.04g 入れて溶液を調製した。作られた包接錯体の pH を測定した。

これらの分子構造の異なる溶液に α -CD、 β -CD を添加していった。CD を 0.025g,0.050g,0.075g と濃度を変え包接、選択性を指示薬の色の変化や吸光度測定により調べた。

3. 結果、考察

MOの酸性水溶液へ α -CDを添加すると、溶液は赤から黄色へと変化した。またpH値は2.2付近で強酸性にもかかわらず、黄色になっていた。塩基性水溶液での α -CDを添加したときは若干色が薄くなることが確認できた。酸性、塩基性域の溶液に β -CDを添加した場合は色の変化はなかった。吸光度測定で酸性域のMOでは450nmか550nm付近で吸光度が極大でそれ以外の波長領域では吸光度が1.0以下になっていた。そこに α -CDを加えると400nm以下の波長領域で吸光度が増大した。MOの酸性水溶液へ α -CDを添加するとことで赤から黄色になる原因は図1よりMOの黄色の分子が α -CDの空洞の中に入り込む包接が起きるからであると考え。黄色を示す分子構造は片方に電荷を持たない。そのため疎水性のCD内部に黄色を示す分子が取り込まれる。図1の平衡でルシャトリエの原理により図1の平衡が右に移動したと考える。

PPの塩基性赤紫色溶液に β -CDを添加していくとCDの濃度に比例して色が薄く、無色になっていく。PPの塩基性域では吸光度が急激に下がり一定になった。この原因はCDを多量に添加していることだと考える。

PPでは α -CD濃度を増やしても酸性域、塩基性域共に色の変化はなく、また吸光度を測定しても大きな変化はなかった。

PPでは β -CDに包接されたと考える。図2より塩基性域で赤色を示す分子の中央の炭素がsp²混成軌道であり、酸性域で無色の分子の中央の炭素はsp³混成軌道である。sp²混成軌道の平面的な分子構造では β -CDに取り込まれない。一方、sp³混成軌道の立体的な構造の分子は β -CDの内部に取り込まれやすい。図2の平衡でルシャトリエの原理により平衡が左に移動して色が薄くなると考える。

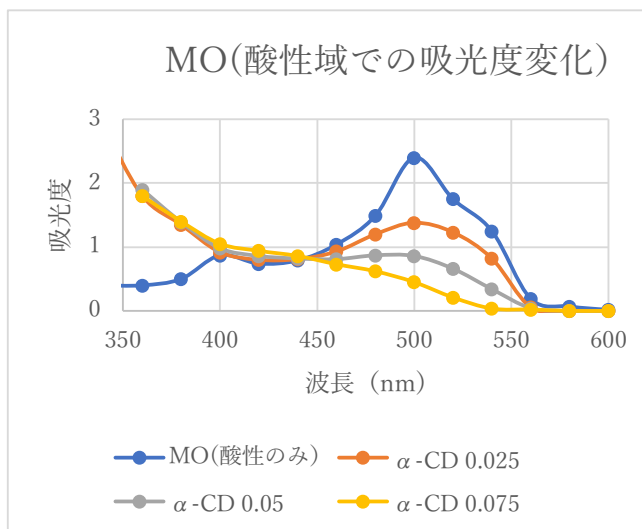
4. 結論

PPとMOの酸性域と塩基性域での分子構造の違いから、CDの種類に応じて選択的に包接が行われることが分かった。

特にMOでの酸性溶液では α -CDを添加させることで、pH値が酸性域で赤色をしているにもかかわらず、黄色を示すことを確認できた。指示薬の役割を果たすMOでも溶液中にCDが溶けている場合はpHに応じた色変化をしないといえる。

5. 参考文献

- ・保坂真帆(シクロデキストリンの包接性) 東京都市大学
- ・化学と教育 65巻 8号(2017年)
- ・山梨大学大学院総合研究部 J. Jpn. Soc. Colour Mater., 78(6), 265-271 (2005)
- ・Cyclodextrins and Their Application
- ・Construction of Stimuli-Responsive Self-Healing Supramolecular Materials Using Host-Guest Interaction



ハイブリッドゲルの強度とイオン結合の関係について

高分子科学研究室
2017007 石川佳奈
指導教員：高木晋作

1. 緒言

ゲルとは、何らかの網目状構造ができ、その網目の中に水や有機溶媒が閉じ込められて流動性を失った物体である。ゲルは、網目状構造をつくる物質(網目物質)、架橋点、中に閉じ込められる液体(媒体)の3つの構成要素から成り立っている。架橋点の結合の仕方によって、化学ゲルと物理ゲルの2つに分類される。共有結合で架橋されているゲルを化学ゲル、水素結合・イオン結合などの物理的な結合で形成されているゲルを物理ゲルと呼ぶ。

ハイブリッドゲルは、共有結合で架橋された網目とイオン結合で架橋された網目が相互に侵入した二重網目のゲルである。ゲルに負荷がかかったときにイオン架橋が分離することにより、化学ゲルの網目へダメージが広がるまでにエネルギーが消失するので、通常のゲルよりも高い耐久性を示す。本研究では、物理ゲルのイオン種や濃度とハイブリッドゲルの強度の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

アルギン酸ナトリウム 3.23g, 純水 230g を混ぜ、アルギン酸水溶液を作成した。これとは別に、アクリルアミド 40g, 純水 50g を混ぜてアクリルアミド水溶液を作り、N,-N'-メチレンビスアクリルアミド (MBAA, 架橋剤)0.25g または 0.5g を溶かした。アルギン酸水溶液とアクリルアミド水溶液を混ぜ、ペルオキシ二硫酸カリウム(KPS, 開始剤)0.1g を溶かした。このアクリルアミド-アルギン酸水溶液を5つに分け、乾燥機に 60°C で 6 時間かけて重合させた。できたゲルをそれぞれ濃度の違う塩化カルシウム水溶液または硫酸鉄(II)水溶液に数日間浸した。MBAA の量、塩化カルシウム水溶液・硫酸鉄(II)水溶液の濃度は下の表に示す。

表1 ハイブリッドゲルの作成条件

MBAA0.25g(0.001%)		MBAA0.5g(0.002%)		イオン濃度 (mol/L)
CaCl ₂ 濃度	FeSO ₄ 濃度	CaCl ₂ 濃度	FeSO ₄ 濃度	
0wt%	0wt%	0wt%	0wt%	0
0.05wt%	0.07wt%	0.05wt%	0.07wt%	0.0125
0.1wt%	0.14wt%	0.1wt%	0.14wt%	0.025
0.5wt%	0.7wt%	0.5wt%	0.7wt%	0.125
2wt%	2.8wt%	2wt%	2.8wt%	0.5

また、比較対象として、アルギン酸を含まないポリアクリルアミドゲル(PAAmゲル)を作成した。アクリルアミド 8g, 純水 56g, MBAA 0.1g, KPS 0.02g を混ぜ、乾燥機に 60°C で 6 時間かけて重合させた。そして、ハイブリッドゲルと同様に、それぞれ濃度の違う塩化カルシウム水溶液または硫酸鉄(II)水溶液に数日間浸した。ハイブリッドゲルも PAAmゲルも 0wt%のものは何にも浸さずにおいた。

オートグラフ(島津製作所 AGS-J)を用いて、断面積 126mm²のプランジャー、試験速度 1mm/s で圧縮試験を行い、これらのゲルの強度を測定した。

3. 結果

試験力とプランジャーの面積から応力を求め、応力を縦軸、ストロークを横軸にしてグラフを描いたところ、低ストローク領域ではすべて直線的に応力が増加した。このグラフの直線の傾きを求め、架橋剤濃度、イオン種で4通りのゲルで、イオン濃度依存性を図1にまとめた。比較のため、アルギン酸を含まないゲルについてもイオン種ごとに併記した。

図1から、ハイブリッドゲルは、イオン濃度が低いときは0mol/Lのときよりも強度が低くなるが、イオン濃度が上がると強度も高くなるのがわかる。一方で、PAAmゲルは、イオン濃度を上げると強度は低くなった。また、硫酸鉄水溶液に浸したハイブリッドゲルよりも、カルシウム水溶液に浸したハイブリッドゲルの方が、強度が高くなった。

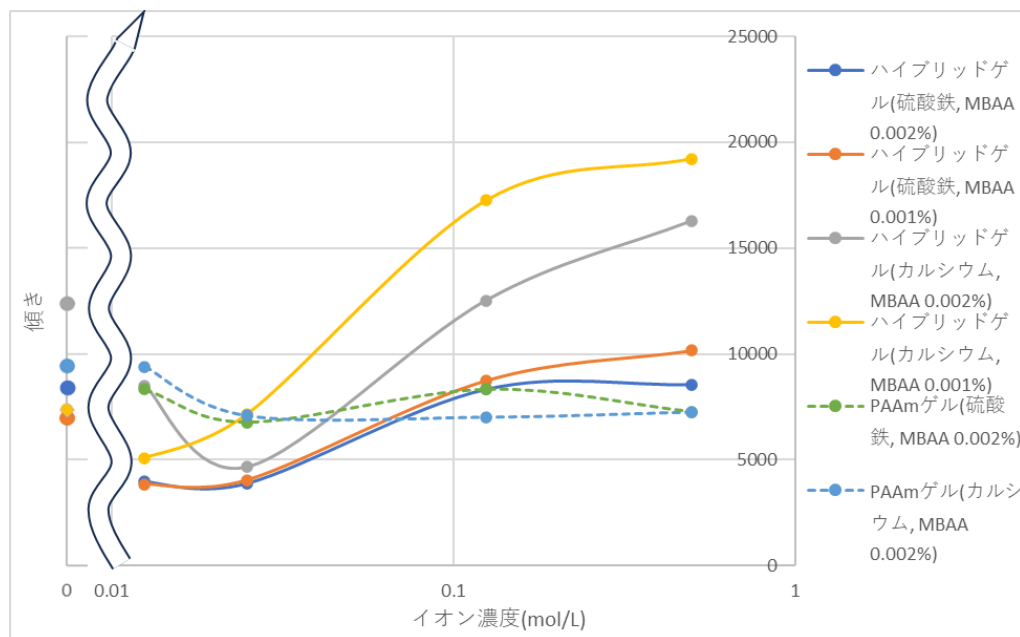


図1 ゲルの強度とイオン濃度の関係

4. 考察

低濃度のときにハイブリッドゲルの強度が下がるのは、アルギン酸が十分に架橋されておらず、イオンおよびアルギン酸による浸透圧がはたらき、ゲルへの吸水が促進したためと考えられる。高濃度の場合、アルギン酸がイオン結合によって架橋されるようになり、二重網目が完成した状態なので、力がかかっても変形しにくくなる。低濃度の PAAm ゲルもハイブリッドゲルの場合と同様に、0mol/L のときよりも強度が下がるが、アルギン酸による浸透圧がはたらかない分強度低下は小さい。PAAm ゲルの場合、アルギン酸による網目が形成されることはないため、イオン濃度が高くなっても強度は低下したままとなる。

5. 結論

ハイブリッドゲルの強度は、イオン濃度に影響されることがわかった。ある濃度を超えると、ハイブリッドゲルの強度は急激に上昇する。イオンの違いによる強度の違いについての解明は今後の課題である。

6. 参考文献

- Time-dependent mechanical properties of tough ionic-covalent hybrid hydrogels
Hai Xin, Hugh R. Brown, Sina Naficy, Geoffrey M. Spinks / Polymer 65 (2015), 253-261
- Hybrid double-network dual-crosslinked hydrogel with self-healing ability and mechanical stability.
Samaneh Khodami, Klaudia Kaniewska, Zbigniew Stojek, Marcin Karbarz / European Polymer Journal

多孔質構造を持つアクリルアミド/メタクリル酸ブチル共重合ゲルの脱水特性

高分子科学研究室
2017010 白井千尋
指導教員:高木晋作

1.緒言

高分子ゲルは近年急激な進歩を遂げた高分子科学分野の一つである。「高分子が架橋して三次元網目構造を形成し、溶媒を吸収して膨潤はするが溶解はしない、固体と液体の中間に属する状態をとる物質」と定義される。これらのゲルの特性はその組成や架橋点となる物質、内部構造などの要因によって変化する。ゲルはその内部に溶液を保ちつつ形質を維持できるという点から吸湿剤や吸着剤としての利用度が高く、その他にもコンタクトレンズや化粧品などに利用されている。またゲルは外的要因によっても化学的特性や物理的特性を可逆的に変化させることが可能な物質でありドラッグデリバリーシステム(DDS)への応用も行われている。

本研究では、2つの先行研究を参考に共重合体の利用と多孔質構造の付与によってゲルの特性に変化が起こるかを検討した。先行研究は親水性のアクリルアミド(AA)や疎水性のブチルメタクリレート(BMA)とN-イソプロピルアクリルアミド(NIPAM)の共重合水溶液とその架橋ゲルを作製し、相転移温度及び相転移熱がAAやBMAの組成によってどのような変化を起こすか検討したもの【1】とPNIPAM/ γ -PGA/PEGゲルを作製しポリグルタミン酸(γ -PGA)の含水特性やポリエチレングリコール(PEG)がゲルの脱水機構に果たす機能を定量的に評価したもの【2】を参考にした。両論文で使用されているポリN-イソプロピルアクリルアミド(PNIPAM)は温度変化に応答して相転移現象を誘起するゲルである。またPEGはゲル化前のモノマー溶液に混合させていたとしてもモノマーと化学的相互作用を持たない物質であり、これをゲル化後に溶出させることでゲルの多孔質化が可能となっている。本研究はPNIPAMゲルに多孔質構造の付与、共重合体の利用によって新たな特性を付加するという点でこれらを参考にし、親水性ポリアクリルアミド(PAA)に疎水性メタクリル酸ブチル(BMA)を共重合した状態で多孔質構造を付加させた場合AAのモノマーゲルと比較して強度及び脱水特性がどのように変化するかを検討した。

2.実験方法

AA7.83g、メチレンビスアクリルアミド(架橋剤)37.6mg水31.8ml【3】を混ぜPAA溶液を作製した。PEGは0g、5.6g、11.2gをそれぞれPAA溶液に混合させ25°C,500rpm条件下で20分攪拌し完全に溶解させた。そしてBMA0.7mlを加えホットスターラーDSHS-1N(アズワン株式会社)を使用し80°C,500rpm条件下で一時間攪拌を行った。【4】その後過硫酸アンモニウム(APS、反応開始剤)を水10ml中に432mg溶解させたAPS溶液をAA/BMA溶液に混合させ同条件下で20分攪拌させた。攪拌後は80°C環境下で約1日放置しゲル化を誘起した。ゲル化後は蒸留水につけ3日に一度水を取り替え6日間置くことでPEGを溶出させた。

ゲルの特性の試験方法は引張試験機AGS-J(SHIMAZU)による圧縮試験、真空乾燥器ETTAS AVO-200V CR(アズワン株式会社)を使用したゲル内の液体の蒸発による質量減少量測定、卓上型分析走査電子顕微鏡TM3000/EDS(日立ハイテクノロジーズ)による内部構造の撮影を行い検討した。PEGによる多孔質化は卓上SEMによる観察とPEGが溶出している溶液の粘度測定により確認した。

3.結果

得られた共重合ゲルは形状が PAA ゲルと類似しており、PEG を含まないものは無色透明、PEG を含むものは白色不透明なゲルとなり PEG を含まないものに比べ形状維持が弱かった。

圧縮試験における結果を右の図 1 に示す。PAA ゲルに対して BMA を 5.0mol% の割合で混入させた場合大きな差異は見られなかった。

真空乾燥器による質量減少量測定の結果を右の図 2 に示す。質量減少量は含有する PEG の量に応じて大きくなり、同じ PEG 量で比較すると共重合させたゲルがより質量の減少量が大きかった。

4.考察

本研究で設定した AA に対して 5.0mol% の混入割合の範囲においては強度に差異が見られなかったのは共重合による官能基の置換がゲル強度へもたらす影響はないと考えられる。対照的にゲルの多孔質化はゲル強度の低下につながる。

質量変化測定においては PEG 含有量が高い AA-BMA 共重合ゲルがよりゲル内に含まれる水の脱水速度が大きい。これは PEG 含有量が高いことでゲル内部からの脱水が促進されるためである。同 PEG 含有量では共重合ゲルの脱水速度がより大きい。これは親水性アミド基のみを持つ PAA ゲルに対して共重合ゲルはゲル内に BMA 由来の疎水性炭素鎖への置換によってゲル内の水がよりはじかれやすいためだと考える。

5.結論

PAA ゲルに対して AA-BMA 共重合ゲルは強度や形質上の変化は見られなかったが脱水機構にて PEG 含有量が高いと脱水速度が上昇する点と BMA との共重合を行うことでも脱水速度が上昇する点から BMA の共重合を行うことで強度を維持しつつ脱水を効率的に行うことが可能であり応用が期待できる。

6.参考文献

- [1] 「NIPAM-Am/NIPAM-BMA 共重合体水溶液とそのゲルにおける相転移の研究」 2015 年度森井翔太
- [2] 「多孔質構造を持つ温度応答性ゲルの含水・脱水特性」 2021 年度新谷悠之介
- [3] 「Hybrid double-network dual-crosslinked hydrogel with self-healing ability and mechanical stability. Synthesis, characterization and application for motion sensors」 European Polymer Journal 173 2022 Samaneh Khodami, Klaudia Kaniewska, Zbigniew Stojek, Marcin Karbarz
- [4] 「アクリル酸またはメタクリル酸の数種の共重合物の電位差測定」 高分子化学第 27 巻第 306 号 1970 年 坂口康義、玉置克之、村上哲夫

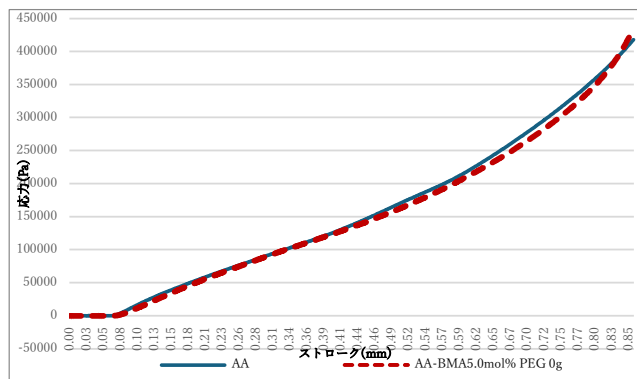


図 1 圧縮試験結果

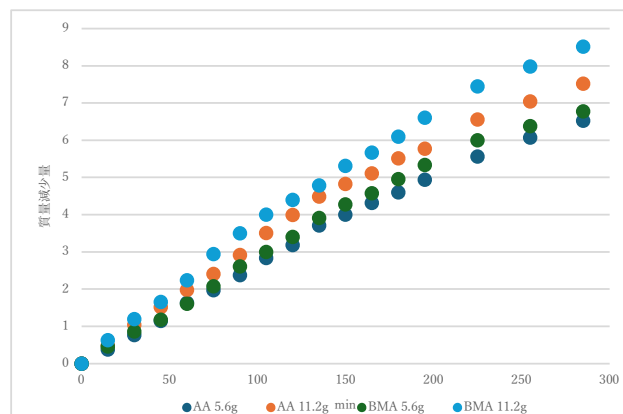


図 2 質量測定結果

カゼインを乳化剤とするエマルジョンに油の種類が与える影響

高分子科学研究室
2017023 川戸恵渚
指導教員：高木晋作

1. 緒言

エマルジョンとは、コロイド分散系において液体の分散媒に液体の分散質が互いに溶解せずに分散しているものを指す。このように液体中に液体を分散させることを乳化と言う。水の中に油が分散している型を O/W 型と言い、油の中に水が分散している型を W/O 型と言う。水に不溶な固体粉末を O/W エマルジョンの油相に分散させて S/O/W エマルジョンを作ることによって食品に栄養素を添加するという試みが報告されている。食品栄養素のキャリアとして、S/O/W 型は、製造コストが低く、簡便であるという利点がある。

カゼインナトリウム(NaCas)とは牛の乳から分離される主要なたんぱく質成分で、油水界面に素早く吸着し、界面張力を低下させて比較的厚い界面層を形成し、静電反発効果と立体効果によって新たに形成される液滴の凝集と合体を防ぎ、エマルジョン中の液滴の安定性を長持ちさせることができるため、食用可能な界面活性剤として広く用いられている。牛の乳から分離されているため、乳アレルギーを持つ人は利用できないという問題点はあるものの、非常に栄養価が高く、食品添加物としてだけでなく栄養補助剤としても使用されている。

2. 目的

先行研究では固相、油相、液相として、それぞれ炭酸カルシウム(CaCO_3)、大豆油、NaCas を使用しており、優れた安定性・レオロジー特性を示す NaCas 濃度が特定された。そこで、本研究では、油相の種類による S/O/W エマルジョンの安定性や粘度に対する影響を解明することを目的とする。

3. 実験方法

NaCas を 10wt% または 20wt% になるようにリン酸緩衝液に加えた。それぞれを約 70°C にしたホットスターラー(ASONE, DSHS-1N)で 2 時間 30 分間磁気攪拌したものを冷蔵庫で一晩保存した。また、 CaCO_3 とヒマシ油、ホホバオイル、キャノーラ油をそれぞれ 1:10(w/w)の割合で磁気攪拌を一時間し、S 相を O 相に懸濁させ、ホモジナイザー(IKA, T25 digital ULTRA TURRAX)で 3 分攪拌した。調製の際はカゼインナトリウム水溶液と油の比率を 3 種類(s/o:w, 1%:99%、5%:95%、10%:90%、w/w)、攪拌速度と攪拌時間の設定を 3 種類(15000rpm5 分、15000rpm10 分、7500rpm5 分)計 9 種類の試料を各油に対して調製した。

S/O/W エマルジョンを顕微鏡で観察し、油滴の大きさの比較をした。(図 A) また、得られた o/w エマルジョンは、10wt%の試料では液状であり、シリンジを用いて試料流出時間により粘度を評価した。また 20wt%の試料はゲル状であり、圧縮試験機 (SHIMADZU, AGS-J) を用いて断面積 126×10^{-6} のプランジャーの抵抗力を評価した。

4. 結果

10wt%の NaCas 溶液で各油 S/O/W エマルジョン(s/o:w、10%:90%、w/w)を作成したところ、キャノーラ油は約7日間分離せずにいたが、ヒマシ油・ホホバオイルは1日経つと分離していた。S/O/W エマルジョン(s/o:w、1%:99%、w/w)の場合、ヒマシ油・ホホバオイルの安定性は向上した。

顕微鏡での S/O/W エマルジョン観察の結果、攪拌時間を長くするともしくはホモジナイザーの回転数を上げると油滴の大きさのばらつきが抑えられた。S/O/W ゲルを観察したところ攪拌時間での大きな違いを見ることはできなかった。

シリンジでの粘度測定の結果、油単体ではホホバオイルが最も粘度が低く、ヒマシ油の粘度が最も高いが、S/O/W エマルジョンになるとキャノーラよりもホホバのエマルジョンの粘度が高いという結果が得られた。S/O/W ゲルになると、ホホバオイルのゲルが最も弾性が高く、ヒマシ油のゲルが最も弾性が低いという結果になった。

図 A

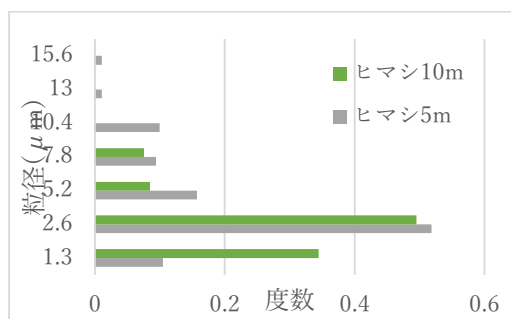
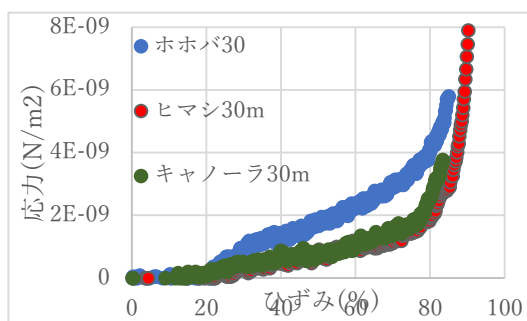


図 B



5. 考察

結果より、油の性質としてキャノーラ油は分散させやすい性質があり、ホホバ・ヒマシは分離しやすい傾向があることが考えられる。NaCas 溶液に混ぜこむ油の量を減らすことにより、NaCas が油を包み込む力がホホバ・ヒマシの分散する力を抑え込むことができるから安定性があるのではないかと考えられる。

20wt%の S/O/W ゲルを三種類の油で比較したところ、おおそ同じ弾性を示したため、カゼインゲルには油自体の粘度は大きく反映されないことが考えられる。

10wt%の S/O/W エマルジョンを比較した結果と顕微鏡での観察の結果から、カゼインの S/O/W エマルジョンにも油自体の粘度は大きく影響せず、攪拌した際の粒のばらつき度合いが高いほど粘度が高くなると考えられる。

6. 結論

NaCas の S/O/W エマルジョン、ゲルの粘度は油の粘度ではなく、油の分散する力が大きく影響することが確認できた。

7. 参考文献

[1] Jie Zhang, Gongwei Li, Duoxia Xu and Yanping Cao, MDPI, Novel Strategy of Food Ingredients: Functional, Bioactivity, and Application (2021.10)

ラポナイトによるピッカリングエマルジョンの安定性

高分子科学研究室
2017028 小林里桜
指導教官 高木晋作

1. 緒言

水と油のように混ざり合わない液体において、一方の液体中に他方の液体を微細な液滴(乳化粒子)として分散させることを乳化、その乳化によって生じたものをエマルジョンという。水が油中に分散している W/O 型(図 1 a)と、この逆の O/W 型(図 1b)に区別される。混ざり合わない液体同士は互いに接触している面で反発し合い、界面張力がはたらく。エマルジョンのような微細な分散は、高いエネルギー状態により熱力学的に不安定な非平衡状態となっているため、時間経過に伴い二相に分離する。この様な分離要因として拡散と流動があり、拡散には凝集やオストワルド成長、流動にはクリーミング現象や合一などが挙げられる^[1]。エマルジョンの作成には界面張力を低下させるために、乳化剤の添加と攪拌などのエネルギーを付与する必要がある。



図 1. (a) W/O 型と; (b) O/W 型のエマルジョン、(c) 微粒によるピッカリングエマルジョンの乳化粒子。株式会社マダムより引用

一般的に乳化剤には界面活性剤を用いるが、粉体粒子を用いたピッカリングエマルジョンは、界面活性剤よりも分離しにくく安定性が高いことが知られている(図 1c)。また粘土鉱物由来の粉体粒子であれば界面活性剤に比べ、環境負荷が小さくなる。乳化剤に天然粘土鉱物であるモンモリロナイト、油相にイソヘキサデカンを用いた O/W 型ピッカリングエマルジョンの作成の研究では、ホモジナイザーだけではすぐに分離してしまうため超音波プロセッサーでの攪拌も必要とした^[2]。モンモリロナイトは天然粘土鉱物であるため粒径が不揃いであるが、人工粘土鉱物のラポナイト(図 2)は、モンモリロナイトに比べ粒径が比較的均等であるため分散性が高いことが見込め、ピッカリングエマルジョンの作成が容易になると考えられる。

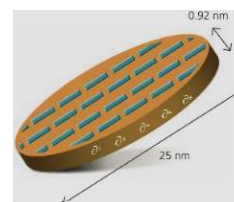


図 2. ラポナイトの結晶構造。株式会社 BYK より引用

そこで本研究では、乳化剤にラポナイトを用いた O/W 型ピッカリングエマルジョンと、界面活性剤であるドデシル硫酸ナトリウム(SDS)を用いた O/W 型エマルジョンを、油相にホホバオイルを用いてホモジナイザーのみで攪拌し作成し、時間経過による乳化粒子直径の計測および比較を行い、人工粘土鉱物によるピッカリングエマルジョンの安定性の評価を行った。

2. 実験方法

ピッカリングエマルジョンの作成は、蒸留水 20ml にラポナイトを 0.5g 加え、ホモジナイザー(T25digital, IKA)により 15000rpm で 5 分間攪拌したのち、ホホバオイルを 10ml 加え、ホモジナイザーにより 15000rpm で 20 分間攪拌して調製した。エマルジョンの作成には、蒸留水 20ml にドデシル硫酸ナトリウムを 0.5g 加え、攪拌したのち、ホホバオイルを 10ml 加えホモジナイザーにより 15000rpm で 20 分間攪拌して調製した。乳化後、1 時間ごとに目視と光学顕微鏡(CX23, OLYMPUS)による観察と乳化粒子径を無作為に 50 個の計測および比較を行った。

3. 結果

光学顕微鏡における乳化粒子の観察より、エマルションは乳化粒子の密集に加え流動が確認されたが、ピッカリングエマルションは点在であり流動は確認されなかった(図3)。ピッカリングエマルションの乳化粒子はエマルションに比べ、平均粒径が大きく(図4)、その中でも粒径の大小差が顕著であった。また、時間経過に伴う乳化粒子の成長に関して、直線で近似した場合ピッカリングエマルションはエマルションに比べ近似の精度が低かった(図4)。この観察中、エマルションは乳化粒子同士がぶつかり、大きな液滴に成長する瞬間が確認できた。

目視の観察では、エマルションは1時間後には上下に二相分離していたが、ピッカリングエマルションは6時間後も分離が確認されなかった(図5)。この為、ホモジナイザーのみでの乳化でも安定なエマルションが作成できた。

4. 考察

光学顕微鏡の観察によりピッカリングエマルションがエマルションよりも乳化粒子径が比較的大きいのは、SDSは界面張力を低下させる力が強いいため小さな乳化粒子を形成すると考えられる。ピッカリングエマルションがエマルションに比べ乳化粒子が点在しているのは、ラポナイトは水にも油にも溶けないので、エマルションに比べ乳化後の溶液の体積が増え密度が低くなったと考えられる。

一般的に分離過程は初期に拡散が支配的であるが、後期には流動が支配的となる。エマルションは乳化粒子の密集により衝突回数が増え初期の拡散状態が終わり、後期の流動状態に移りやすくなったと考えられる。一方ピッカリングエマルションにおいて乳化粒子同士が接触していないのに粒径が成長しているのは、小さな乳化粒子の油が水に少しずつ溶け、大きな乳化粒子がその油を吸収し、さらに大きな乳化粒子となるオストワルド成長が起っていると考えられる。ラポナイトは粒径が大きいため乳化粒子の水と油を剥離するエネルギーが高く、それを破壊する分散媒の運動エネルギーが低いために遅いオストワルド成長が引き起こされる。そのため同時間経過で考えた際にピッカリングエマルションはエマルションに比べて二相分離が起っておらず、分離過程初期の拡散状態が考えられる。

5. 結論

ラポナイトを用いた安定なピッカリングエマルションを作成することができた。ピッカリングエマルションはラポナイトのような大きな粒子径によってオストワルド成長が遅延され、拡散状態を長くさせることによって界面活性剤よりも安定性が高くなることが示された。

6. 参考文献

- [1] 堀内昭夫 (2020) 実践エマルション安定化・評価技術. p. 136-144. NTS, 東京.
- [2] Sabine et al. (2019) Colloids and Surfaces A, 583.

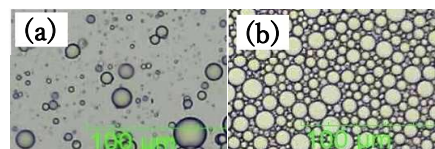


図3. (a)ピッカリングエマルション(×100) ; (b) エマルション(×100).

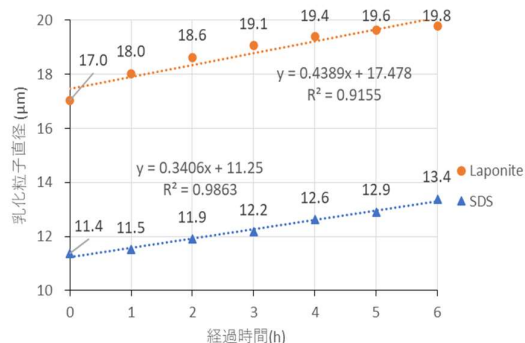


図4. 時間経過による乳化粒子直径の関係.

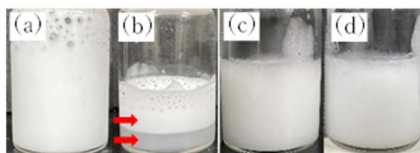


図5. エマルションの(a)乳化直後; (b) 6時間後、赤矢印は分離した相を示す. ピッカリングエマルションの(c)乳化直後; (d) 6時間後.

植物油とゲル化剤によるオレオゲルの物性およびその安定性の評価

高分子科学研究室
2017056 柳田晴
指導教員：高木晋作

1. 緒言

オレオゲルとは、ゲル化剤からなる網目構造の中に液状油脂を取りこませ、全体としてあたかも固体脂肪のような形状をとっている状態をいう。ゼリーや寒天のハイドロゲルでは、ゲル化剤の網目構造に水が取り込まれた状態だが、水を油に変えたのがオレオゲルである。これまで化粧品などで用いられてきたが、最近になって急速に食品用オレオゲルが注目されている。飽和脂肪酸や「水素添加による不飽和→飽和脂肪酸変換」に伴って発生するトランス脂肪酸は比較的融点が高く油脂に固体的な性質を与えるため、これらの代替あるいは低減する手段としてオレオゲルが注目されている。

本研究では、ツバキ油、ヒマシ油、ヤシ油の3種類の油とミツロウビーズワックス(主成分パルミチン酸ミリシル)、ヒドロキシオクタデカン酸(12-HOA)の2種類のゲル化剤を使用し、全6種類のオレオゲルを作成した。同条件で圧縮強度を測ることで、油やゲル化剤の調整条件の違いによるオレオゲルの特性を明らかにすることを目的とした。

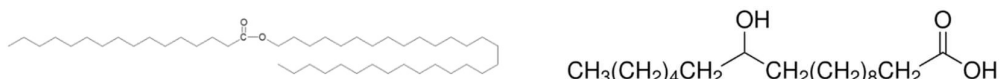


図1. パルミチン酸ミリシル(左)と12-ヒドロキシオクタデカン酸(右)の構造式

画像出典：気になる遺伝子 | 生化学・単純脂質

MERCK | organic Building Blocks 219967

2. 実験方法

はじめにツバキ油(大島椿株式会社)、ヒマシ油(富士フィルム和光純薬(株))、ヤシ油(富士フィルム和光純薬(株))の3種類の油とミツロウビーズワックス(ASH AROMA)、12-HOAの2種類のゲル化剤を使用し、試料の作成を行った。それぞれの油に対してゲル化剤が7%となるように調製し、マグネチックスターラーを用いて150°Cに設定し、500rpmで15分間攪拌した。試料の作成方法は先行研究^[1]と同様の条件で行った。

次に、作成した試料を引張試験機(島津製作所 AGS-J)を用いてプランジャー貫入時の抵抗力を測定した。実験治具には、直径12.7mmの円柱型プランジャーと直径5mmのステンレス棒を使用し、1mm/sの速さで貫入した。2種類の治具を使用したけど、測定結果に大差はなかったため、ステンレス棒の結果を中心に評価を行った。

3. 結果・考察

引張試験機によって得られた試験力を用いて応力-ストローク曲線に表した。ミツロウをゲル化剤とした場合の3種類の油の応力-ストローク曲線を図2に表す。ヤシ油の応力が大幅に大きく、ツバキ油の応力は極めて小さい値となった。図3は、12-HOAをゲル化剤とした場合のグラフである。ミツロウの場合と同様にヤシ油の応力は極めて大きい結果となったのに対し、ヒマシ油の応力は極端に小さい値となった。

ゲル化剤で比較をすると、基本的に12-HOAを添加した場合に応力が増している。油に対して同じ濃度で添加しているため、分子鎖の短い12-HOAの方が細かい網目構造を作ることによってゲル強度が増したのだと考えた。ヤシ油に関しては、融点が20~28°Cと高く常温でグリース状となっているため、ゲル化剤を添加することで強度がさらに高くなり、極端に応力が大きくなっていると考えた。また他の油とは異なり固体状態に近いので、貫入とともに応力が増加していくグラフとなった。

ミツロウを添加したツバキ油と、12-HOAを添加したヒマシ油の応力は極端に小さい値を示していた。これらの応力はほぼ0に近く、完全にゲル化がされていなかったことが考えられる。ミツロウの主成分であるパルミチン酸ミリスルは12-HOAと比べて分子量が大きく、ゲルネットワークを作る能力が低いのでゲル化剤としての働きが十分に行われていなかった。また、12-HOAはヒマシ油を原料とした化合物であることからヒマシ油への溶解度が高いため固まりづらく、ゲル化に至らなかったのだと考えた。しかし、ヒマシ油はヒドロキシ基やカルボキシ基をもつリシノール酸を主成分とし、強い極性基を持たないミツロウへの溶解度が低く、ミツロウを添加した際はゲル化することができたと考えられる。

4. 結論

油とゲル化剤のそれぞれのゲル強度を測ることで、油そのものの性質やゲル化剤の溶解度などがゲル強度に影響していることが分かった。オレオゲルを作成する上で、油の物性や性状に大きく左右され、ゲル化するものと不完全なものに分けられた。

5. 参考文献

- [1]Xinyu Jing et al. (2022).*Preparation of camellia oil oleogel and its application in an ice cream system*. LWT-food science technology 169(113985).
- [2]佐藤清隆. 食品用オレオゲル：その可能性と問題点. オレオサイエンス. 2022.

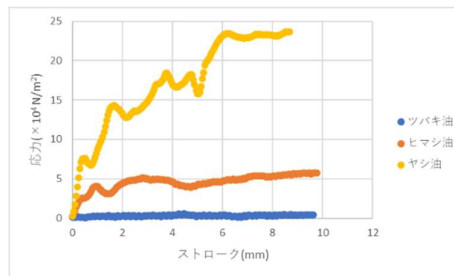


図2. ミツロウをゲル化剤としたオレオゲル

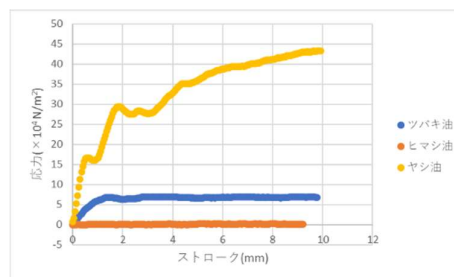


図3. 12-HOAをゲル化剤としたオレオゲル

チョコレートのV型結晶制御(テンパリング)における攪拌の効果

ソフトマテリアル研究室 2017032 島田 丈瑠

指導教員：飯島 正徳

序論

チョコレートは、室温では光沢感のある固体だが、口の中に入れると体温でとろけるという特性を持っている。しかし、一度融解したチョコレートを単純に冷却し、固化するだけではこの特性を得ることはできない。これには、チョコレートに含まれるココアバターの結晶構造が深く関わっている。

ココアバターとは、トリアシルグリセロール(TAG)という油脂に分類され、グリセリンにパルミチン酸(P)、オレイン酸(O)、ステアリン酸(S)がエステル結合した物質である。また、ココアバターには多くの多形が存在し、表1に示す結晶多形が報告されている。

表1 ココアバターの結晶多形と融点

Wille & Lutton	I型	II型	III型	IV型	V型	VI型
Veack	γ 型	α 型	β' 型		β 型	
融点(°C)	17	23	25	28	33	36

これらの結晶多形の中でチョコレートとして最適であるのはV型結晶である。これは、V型結晶の融点が約33°Cにあり、室温よりも高く体温よりも若干低いため、チョコレートのおいしさの秘密でもある。しかし、一度融解したチョコレート(I型)が、自然とV型結晶になるためには約17時間もかかるため、商業的には効率よくV型結晶を生成するための「テンパリング」という温度操作を行う。

本研究では、V型結晶の含有率を高めるため、テンパリング中に行われる攪拌作業の重要性に着眼し、昇温型テンパリングにおいて攪拌作業を行う時間や方法の違いが、ココアバターの結晶化にどのような影響を及ぼすのかについて、示差走査熱量測定(DSC: Differential Scanning Calorimetry)を用いて考察していく。

実験方法

試料には、(株)ロッテのガーナミルクチョコレートを使用し、実験装置は、示差走査熱量測定(DSC)のMETTLER TOLEDO社製DSC822_eを使用した。昇温型テンパリングの温度プログラムを図1に示す。①②③のそれぞれで10分間、攪拌をした。攪拌方法は、湯煎中での攪拌と大理石上での攪拌の2種類の方法を行った。さらに②③においては、同様の温度でそれぞれ1時間の湯煎中での攪拌も行った。またテンパリング後は、0°Cで10分間チョコレートを冷却・固化し、質量5mg程度削り取り、DSC測定用のAlパンに入れ、窒素雰囲気中、5°C

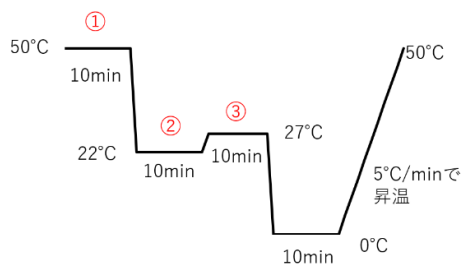


図1 温度プログラム

/min で昇温した。

結果

10 分間の湯煎攪拌を行った昇温型テンパリングの結果を図 3 に示す。②③で攪拌したとき 33°C 付近に、V 型結晶のピークを確認することができたが、②で攪拌したときの方がより V 型結晶に近いシャープなピークとなった。また、湯煎攪拌を 1 時間行った場合、同様に②で攪拌をしたときは、③で攪拌したときよりも V 型結晶に近いシャープなピークとなった。

大理石上で 10 分間攪拌を行った昇温型テンパリングの結果を図 4 に示す。②③で攪拌したとき、シャープなピークが 33°C 付近に見られ、V 型結晶を確認することができた。また湯煎攪拌の②と大理石攪拌の②③では、17°C 付近に結晶化のピークが現れた。

考察

チョコレートに含まれるココアバターの結晶は非常に複雑な構造をとり、攪拌することで構造形成が促進される。

②で攪拌することで IV 型の種結晶の生成を促進し、V 型結晶として成長することが効果的である。そのため、②で攪拌することで IV 型の種結晶を均一に生成できているためであると考えられる。また、攪拌作業はココアバター結晶の形を整える効果もあり、大理石上攪拌ではチョコレートを折りたたむように攪拌をした。これを行うことで、ココアバター結晶が二鎖長構造から V 型結晶の三鎖長構造に有効に変化すると考えられる。17°C 付近の結晶化のピークは、攪拌をした際にムラがあり、すべての結晶多形を均一にできなかったため、テンパリング後のチョコレート冷却時に起こった I 型結晶の結晶化反応だと考えられる。

結論

昇温型テンパリングにおける攪拌は、攪拌の方法を問わず、チョコレート融解後の降温時(②)で行うことが V 型結晶形成に効果的である。また②の攪拌は湯煎中に 10 分間行うと最も効果的である。チョコレートを折りたたむような攪拌方法は、ココアバターの鎖長構造の変化において重要な役割を果たしている。

参考文献

- (1) 古谷野 哲夫, チョコレートの結晶学, 日本結晶学会誌, 2014.
- (2) 蜂屋 巖, チョコレートの品質を決める油脂の結晶化挙動, 日本結晶学会誌, 2001.
- (3) 石橋 ちなみ ほか, チョコレートのおいしさの科学, 日本食品工学会誌, 2019.
- (4) 加納 大夢, テンパリングによるチョコレートの V 型結晶成長, 2023.
- (5) Alejandro G. Marangoni, Sara E. McGauley, Relationship between Crystallization Behavior and Structure in Cocoa Butter, Crystal Growth & Design, 2002.

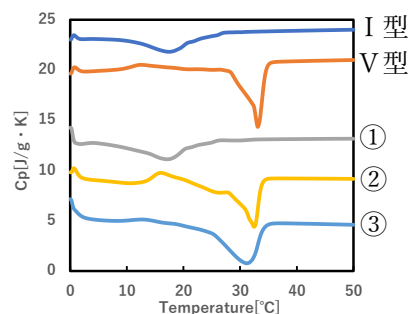


図 2 湯煎攪拌(10 分間)

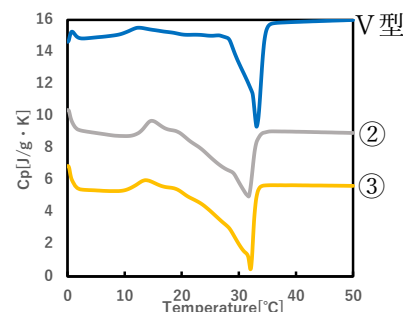


図 3 大理石攪拌(10 分間)

DCS によるタピオカ澱粉の糊化における水の状態変化

ソフトマテリアル研究室

2017031 佐藤香雅

指導教員 飯島正徳

1. 序論

澱粉とは小麦粉や片栗粉といった粉食の主原料であり特性から様々な用途に利用される天然高分子である。タピオカとはキャッサバを原料とした澱粉であり本研究ではタピオカ澱粉について取り扱っていく。澱粉はグルコースが α 1-4グリシコリド結合により重合され、直鎖状になっているアミロースと α 1-4結合に加え α 1-6結合により枝わかれの構造であるアミロペクチンによって構成されている (Fig.1) 生状態ではアミロース、アミロペクチンの分子鎖が水素結合により規則正しく並んでいてミセル構造をとっている。澱粉に水を加え加熱していくことでこの水素結合が切れ分子鎖間に水が入り込む、この時澱粉の結晶構造が崩れ糊の状態になる現象を糊化という。本研究ではタピオカと精製水を混ぜ加熱することで糊化反応させる実験を行い澱粉内の水の存在状態と糊化による変化を解明することを目的とし研究を行った。

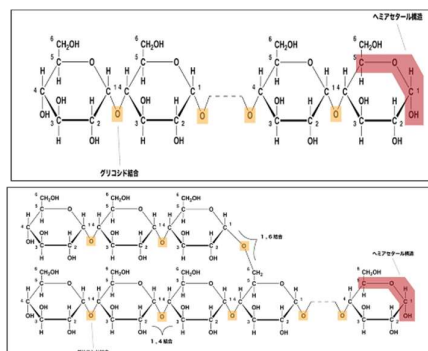


Fig.1 アミロースとアミロペクチンの分子構造

2. 実験方法

澱粉は(株)ギャバン製タピオカスターチを使用した。Al のパンにタピオカを入れ、精製水を加えふたを閉め密閉した後 DSC(differential Scanning Calorimetry)装置 METTLER TOLED 社製 DSC822c で窒素雰囲気中 -50°C~90°Cの昇温を連続2回、5°C/min の条件で行った。

表 1 実験試料

資料名	TS(mg)	水(mg)
0.0%TS0	0	1.31
18.1%TS18	7.77	35.18
47.8%TS47	14.27	15.57
73.3%TS73	19.94	7.2
80.0%TS80	10.08	2.52
82.1%TS82	9.62	2.1
83.0%TS83	9.9	2.03
84.4%TS84	10.19	1.88
86.5%TS86	9.96	1.55
92.5%TS92	36.25	2.93
100.0%TS100	32.35	0

3. 結果

TS47 の測定結果を Fig.2 に示す。室温から-50 に下げると-20°C付近で水の結晶化を示す発熱ピークが見られた。その後90°Cまで昇温させると 0°C付近で水の融解を示す吸熱ピークが現れ、60°C付近で澱粉の糊化を示すピークが見られた。また、オレンジ色で示した 2 度目の昇温では水の融解を示す吸熱ピークが全体的に低温側にシフトしている形になった。水の融解に関して、融解熱量 (ΔH) 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、デンプン分子中に入り込んで凍ることのない水(不凍水)の存在を示している (Fig.3)。

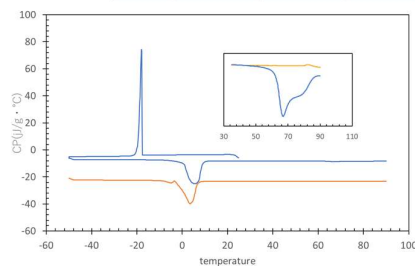


Fig.2 TS47 の DSC 曲線

4. 考察

Fig4 に TS47 の水の融解ピークを示す。このような含水量

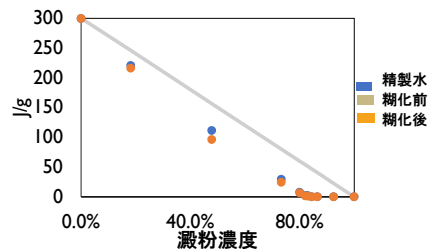


Fig.3 水の融解熱量

が多いものでは糊化前の曲線の 0°C直後に精製水のピークと同様のものが見られ自由水のピークであると推定した。グラフのように精製水と重ねたものを境界線とし、それ以前を束縛水のピーク、以降を自由水のピークとして融解面積からそれぞれ融解熱 ΔH_{bd} ・ ΔH_f を求めた。TS80 以降の含水量が少ないものでは 0°C以下のピークのみとなり精製水と同様のピークは見られなかったため、束縛水みのピークと推定し、 ΔH_{bd} を求めた。

Fig.4 の ΔH_{bd} と ΔH_f を Fig.6、Fig.5 の ΔH_{bd} を Fig.7 に示す。これらは試料に仕込んだ水の量 (W_g) をタピオカ澱粉質量 (DM) で割ったものを横軸、 ΔH を DM で割ったものを縦軸とし、水分量に対する ΔH を示したグラフである。回帰直線の傾きからそれぞれの水 1g に対する ΔH が求められる。その値は Fig.6 から $\Delta H_f = 283.17\text{J/g}$ 、 $\Delta H_{bd} = 2.36\text{J/g}$ で Fig.7 から $\Delta H_{bd} = 137.44\text{J/g}$ であった。

ΔH_f は本研究で求めた精製水の融解熱

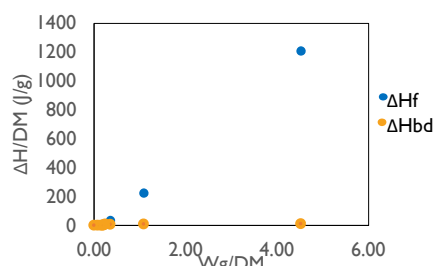


Fig. 6 自由水束縛水で仕分けした ΔH

299.35j/g と近い値となり自

由水の測定は精度が高いものと言える。束縛水はある一定の水分濃度になると増加しなくなり融解熱は精製水の半分以下である。そのため、自由水よりも低温でピークが現れると考える。

糊化することでピークが全体的に低温側にシフトし、自由水と束縛水の境界線を引くことによる ΔH の測定ができなかった。しかし TS47 では明確に束縛水を示すピークが -5°C 付近に現れピーク全体が低温側にシフトしたことから、糊化により自由水の一部が束縛水の状態に変化したといえる。また、低含水量のものではより低温側に開いたピークとなり融解開始温度が低くなったことから澱粉との結合が強くなり束縛水の状態が不透水に近づいていると考えられる。

5. 結論

澱粉内に存在する自由水は精製水と同様の状態であり、束縛水は自由水や精製水の ΔH の半分以下である。糊化することで澱粉に存在する水は澱粉との結合力が強まり、自由水は束縛水に変化し束縛水は不凍水や不透水に近い状態に変化した。

6. 参考文献

1. デンプン水系における凍結水の熱分析による解析 高田晶子ら
2. DSC による糊化デンプン中の水の存在状態の分析 貝沼佳二
3. グリコ栄養食品 (glico.com)

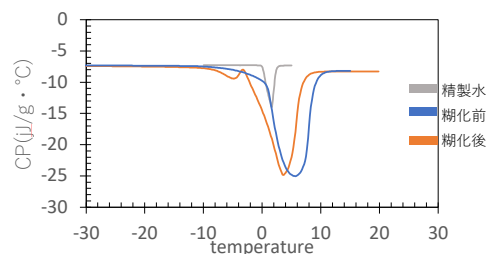


Fig. 4 TS47 の水の融解ピーク

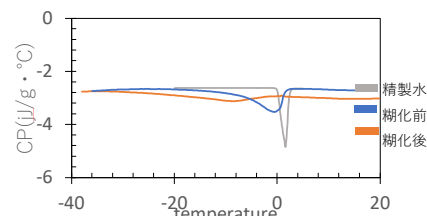


Fig. 5 TS83 の水の融解ピーク

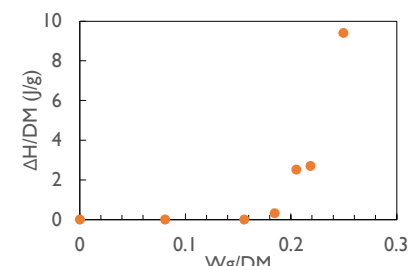


Fig. 7 束縛水みの ΔH_{bd}

界面活性剤のクレンジングにおけるオレイン酸モデル汚れの検討

ソフトマテリアル研究室

2017061 渡辺杏実

指導教官 飯島正徳

1. 序論

クレンジングは油と界面活性剤が主成分となりメイク汚れを落とす役割があり、界面活性剤は水と油などの本来混ざり合わない液体同士に加え攪拌する事で、混ざり合わせる事を可能とする。また界面活性剤は水中に溶かすと、ある濃度までは水と空気の界面に存在するが、高まると水中で複数の同じ分子が弱い力によって集合することでミセルを形成する。また濃度だけではなくクラフト点と呼ばれる界面活性剤が析出する温度も超えることが条件となり、ミセルが形成されると洗浄力が高まる事が判明している。

本研究で用いる界面活性剤である SDS の組成位相図⁽¹⁾を図 1 に示す。濃度や温度を高めると、結晶状態から状態が変化しミセルが形成されていく事がわかる。そこで本研究では界面活性剤の性質から SDS と化粧品に配合されるオレイン酸を用いた熱測定によってオレイン酸のモデル汚れとしての機能性を検討する。

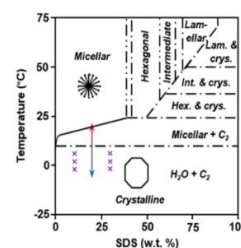


図 1.DSC 組成位相図

2. 実験資料及び方法

表 1.実験資料

水-SDS (10%) : オレイン酸	水-SDS (mg)	オレイン酸 (mg)
1 : 2 (オレイン酸 66.6%)	7.10	16.62
1 : 1 (オレイン酸 50%)	14.67	15.47
2 : 1 (オレイン酸 33.3%)	14.52	6.12
3 : 1 (オレイン酸 25%)	26.78	7.26

水と SDS を加え、マグネチックスターラーで (30°C、300rpm、5min) 攪拌し、15 分静置させた。その後パンの中にオレイン酸、そして水-SDS を加え試料を作成した (表 1)。これらを示差走査熱量測定 (DSC) で -20°C から 40°C まで 1.25°C/min で測定した。

3.結果及び考察

SDS-水の 2 成分系から SDS 濃度変化の結果を図 2 に示す。10°C 付近のピークは各濃度ほとんど一定の温度で現れ、20°C 前後のピークは濃度が上がるにつれて高温側にピークがみられた。各ピークを点にとると図 1 の組成位相図と同様な振る舞いがみられた。

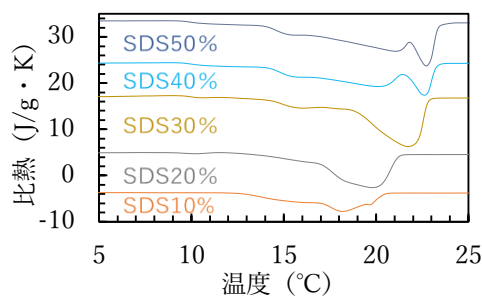


図 2.SDS 濃度依存性

次に水-SDS-オレイン酸の3成分系で、オレイン酸濃度50%、SDS濃度10%と20%に変化させた結果を図3に示す。どちらも4つのピークがみられた。④はオレイン酸の融点(13°C)によるピーク、③はSDSのクラフト点(10°C)によるピーク、そして先行研究⁽²⁾から①と②のピークは3成分系のみに見えるピークだと推測した。またSDS濃度が高くなると②のピークが低温側にずれている事が分かった。よって②はSDSの濃度に関係しているピークだという事が考えられる。

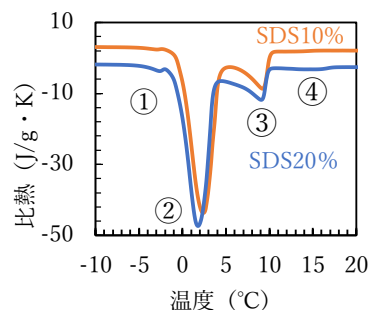


図3.3成分系 SDS濃度変化

最後に SDS10%の時、オレイン酸の濃度を変化させた測定結果を図4、図5に示す。

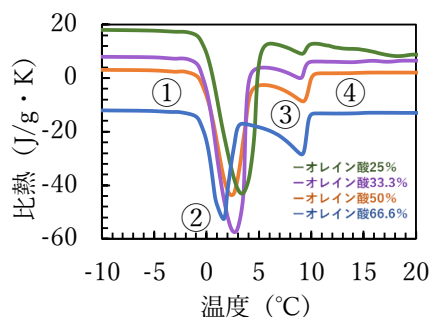


図4.オレイン酸濃度変化

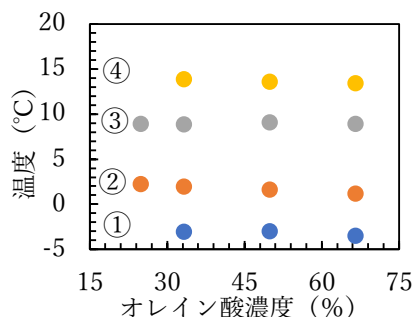


図5.オレイン酸濃度変化の各ピーク

図4、図5からオレイン酸濃度が高くなるにつれて②のピークが低温側に動く事が分かった。よって②はSDS濃度だけではなくオレイン酸濃度にも関係しており、3成分系のみに見える吸熱反応のため、先行研究から液晶を形成している可能性がある事がわかった。

4.結論

水-SDS-オレイン酸3成分系のDSC測定から先行研究と同様に液晶が形成される可能性を見出すことができた。また先行研究ではパルミチン酸およびステアリン酸4:1の混合物をモデル汚れとして用いているが、本研究で用いたオレイン酸でもSDSの洗浄力、そしてモデル汚れとしての機能性を確認することができた。

しかし液晶が形成される可能性があるピークに関して偏光顕微鏡での液晶の確認、そして洗浄力との関係性については今後の課題である。

5.参考文献

- (1) Ruhina M. Miller, Andreas S. Poulos, Eric S. J. Robles, Nicholas J. Brooks, Oscar Ces. and Joao T. Cabral/ Isothermal Crystallization Kinetics of Sodium Dodecyl Sulfate-Water Micellar Solutions/ ACS Publications CRYSTAL GROWTH&DESIGN
- (2) 山田泉・黒岩茂隆/界面活性剤による液晶形成と油性汚れの洗浄機構(第2報) DSC測定による検討/家政学雑誌 Vol. 37 No.12 1063~1067 (1986)

口紅に应用されるオルガノゲルのカードハウス構造

ソフトマテリアル研究室

2017012 王 化昕

指導教員：飯島 正徳

1. 緒言

我々が日常よく目にする食品、化粧品、医薬品等の分野に幅広く応用されているゲルは、液体に少量の固体成分を添加することによって、固体成分によるネットワーク中に大量の液体を取り込み、液体の流動性を消失させて形状付与したもので、固体と液体の性質を併せ持つ第三の材料とされている。そのため柔らかいものが多く、液体成分が水であるゲルは水性ゲルまたはハイドロゲルと呼ばれ、代表的なものとしてはゼラチン、寒天があり、食品分野で広く用いられている。一方、液体成分がオイルや有機溶媒である油性ゲル、オルガノゲルは化粧品、食品、医薬品などの分野で応用されている。口紅、リップクリームなどの化粧品ではスティック製品を構成する基材として使われ、高次構造としてオルガノゲルのワックス結晶がトランプのタワーのように積み重なり、隙間にオイルを取り込むカードハウス構造が形成される。本研究では、口紅に用いられているホホバオイル (JO) とキャンドリラワックス(CW)にベヘン酸ベヘニル(BB)を混合した JO-CW-BB 系について、熱測定、SEM、X線回折によりカードハウス構造の形成について考察することを目的としている。

2. 実験材料及び方法

精製キャンドリラワックス(CW: (株)セラリカ NODA) ホホバオイル(JO: 富士フィルム 和光純薬工業(株))、及びベヘン酸ベヘニル(BB: Larodan AB)を用いて CW-JO 系、BB-JO 系、CW-BB 系、CW-BB-JO 系のそれぞれについて適当な濃度の試料を作成し、示差走査熱量測定(DSC: METTLER TOLEDO 社製 DSC822e)に用いた。DSC 測定は Al パンに試料を入れ窒素雰囲気中 10°C/min で行った。形態観察のために卓上型分析走査電子顕微鏡(SEM: (株)日立ハイテクノロジー TM3000)、結晶構造解析のために X線回折(XRD: Bruker AXS D8 ADVANCE)を行った。

3. 結果及び考察

図2に BB-JO 系における降温過程での BB 成分の結晶化の振舞を示す。BB 単体では 70°C で結晶化するが、BB-JO 系では液体の JO 中から BB の結晶が析出し結晶化温度は JO 濃度の増加と共に低温側にシフトする。図3に CW-JO 系及び BB-JO 系について DSC 曲線の結晶化ピークから求めた ΔH を単体の ΔH_0 で割った比 $\Delta H/(\Delta H_0)$ の JO 濃度依存性を示す。JO 濃度の増加と共に直線的に減少し、 $\Delta H=0$ となる JO 濃度は CW-JO 系で 100%、BB-JO 系で約 90% となる。これは、CW は JO に溶けないが、BB と JO は同じエステル類であるため、BB は若干 JO に溶

表1. 試料の性質

名称	キャンドリラワックス(CW)	ホホバオイル(JO)	ベヘン酸ベヘニル(BB)
構造	ヘントリアコンタン $C_{31}H_{64}$	高級脂肪酸と不飽和アルコールのエステル	$C_{44}H_{88}O_2$
融点(°C)	68~72	6.8~7.0	70
ΔH (J/g)	98.94	102.57	236.93

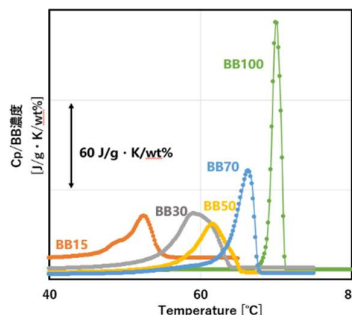


図2. BB-JO系のBB成分の結晶化

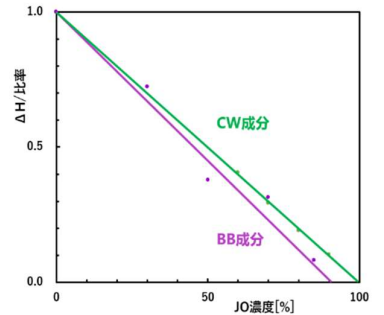


図3. CW-JO系&BB-JO系結晶化 ΔH

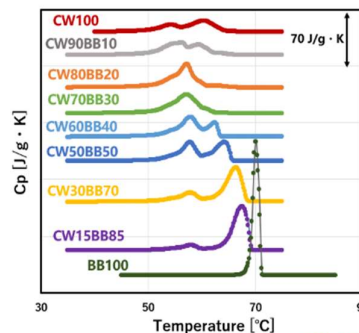


図4. CWBB成分結晶化 (JOなし、CW-BB系)

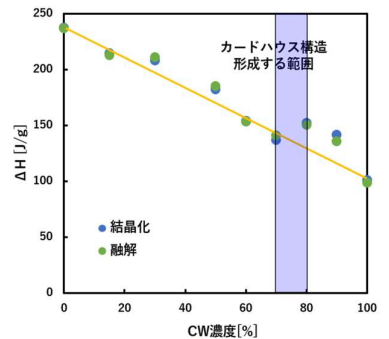


図5. CW-BB系 ΔH のCW濃度依存性

け込むことを示している。図4にJOなしのCW-BB系でのDSC曲線(降温過程)を示す。降温過程では高純度のBB単体とCW-BB系の一部を除きCWとBB由来の2つの結晶化ピークが見られる。特筆すべき点は、CW濃度が70%から80%ではシングルピークになっていることである。図5にはJOなしのCW-BB系での融解エンタルピー ΔH のCW濃度依存性を示す。CW0にあたるBB単体からCW100のCW単体までの直線的な減少からのずれがみられる。これはCW0からCW100の間で起こる構造変化によるものと考えられる。DSCの結果のまとめとして、図6にJOなしのCW-BB系とJOありのCW-BB系であるJO-CW-BB系の結晶化ピーク温度 T_c のCW濃度依存性を示す。橙色はCW-BB系のBB成分の T_c でCW濃度の増加とともに緩やかに減少しているが、青色はCW濃度に対してほぼ一定である。これはCWがBBに少量溶けBBの融点を下げ、CWはBBに溶け難いといったCWとBBの相溶性によるものである。これは図5の結果と矛盾しない。JO-CW-BB系の黄色はBB成分、グレーはCW成分のJO中での T_c を示す。CW-BB系と比較してDSCで結晶化がシングルピークを示すCW濃度範囲が広がっていることがわかる。JOとBBが同じエステル類であることによるものと思われる。

SEMの観察結果を図7に示す。ここに示した組成で明確なカードハウス構造が観察された。CW80BB20のカードハウス構造の空隙はCW70BB30のものより大きく、JOありのCW80BB20JO85では少し小さくなった。空隙の大きさはCW80BB20>CW80BB20JO85>CW70BB30である。

4. 結論とまとめ

本研究から以下のことが明らかとなった。

- ・JOなしのCW-BB系、JOありのCW-BB系ともにDSCの降温過程に見られる固体成分の結晶化がシングルピークの時にカードハウス構造を形成すると考えられる。これは、溶液の中からCWとBBが同じ温度で析出されることで、これがカードハウス構造形成にとって重要な意味を持っていることが明らかとなった。
- ・CWと比べて、同じエステル類であることからBBはJOに溶けやすく、JO-CW-BB系ではカードハウス構造が形成されるCW濃度範囲が拡大されているものと考えられる。
- ・カードハウス構造形成のためには、お互い同じエステル類で分子構造が似ているJOがBBに若干溶け込み同じ温度で析出することが必要であるが、分子レベルでの構造形成については今後の研究が期待される。

5. 参考文献

- ・塩原正己 天然ワックス-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)
- ・町田菜々子 植物性ワックスゲルにおけるカードハウス構造 東京都市大学 理工学部 自然科学科 卒業論文 (2022)
- ・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) P633
- ・J.F.Toro-Vazquez Thermal and Textural Properties of Organogels Developed by Candelilla Wax in Safflower Oil (2007)

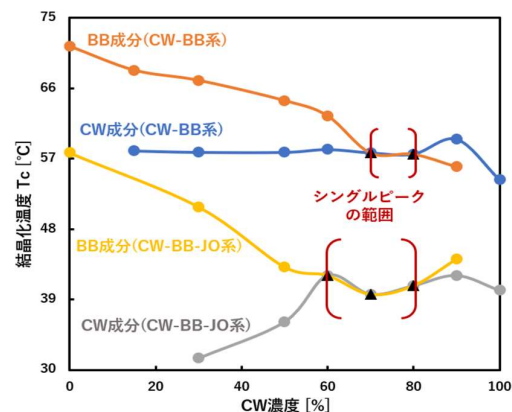


図6. CW&BB成分 T_c のCW濃度依存性

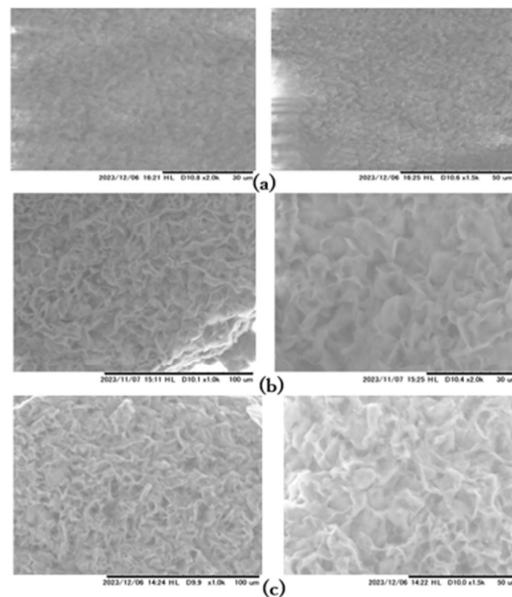


図7. SEMによる観察結果

- (a) CW70BB30
- (b) CW80BB20
- (c) CW80BB20JO85

DSC による毛髪熱測定

理工学部 自然科学科
ソフトマテリアル研究室
野田哲伸

・緒論

人間の体の1部である毛髪は暑さや寒さから身を守る、直射日光や紫外線を防ぐ、体内の老廃物や有害物質を体外へ排出するなどと言った役割をこなしている。そして今ではファッションの1部としての視覚的な役割も果たしている毛髪だが、艶のある毛髪と傷んだ毛髪を比較した際にどのような点に差があるのかを疑問に抱き卒業研究のテーマに選択した。

毛髪の基本情報

1本の髪は、大きく分けると3つの部分からなり、一番外側をキューティクル、中間部をコルテックス、中心部をメデュラといい化学的な構成成分は、大部分がタンパク質であり、残りは脂質、メラニン色素などで毛髪のタンパク質は、シスチンというアミノ酸が多いのが特徴。

本研究ではキューティクル、コルテックス、タンパク質である α -ヘリックスについて主に注目したい。



Figure 1.毛髪の構造図

Figure1.引用元 <https://www.aujua.com/technology.php>

・目的

毛髪に関する知識を高め、毛髪の構造や毛髪がどのようにして痛むのか、また様々な施術による痛み具合や痛んだ際の毛髪の状態について調査する。

・実験方法

- ① DSCにて毛髪を細かく切りアルミニウム製のクランプ型のパンに入れ、煮沸処理3.5.10分した毛髪2.0mg~4.0mgを細かく切り穴を開けたパンに入れ0~350°Cまで昇華速度10°C/minにて測定。
- ② 未処理毛髪、脱色処理10、20、30分処理した毛髪を①と同様に0~350°Cまで昇華速度10°C/minにて測定。
- ③ 未処理毛髪、脱色処理20分を1回2回3回処理した毛髪を①と同様に0~350°Cまで昇華速度10°C/minにて測定。

実験結果

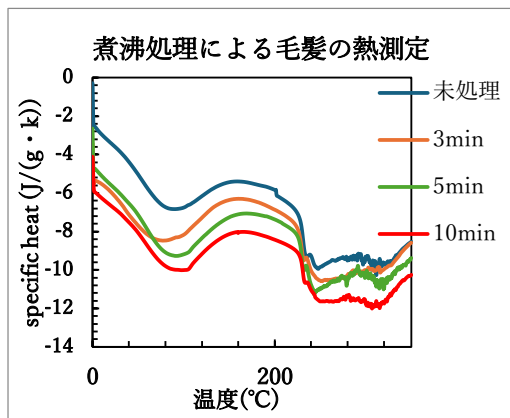


Figure 2.DSC の結果グラフ

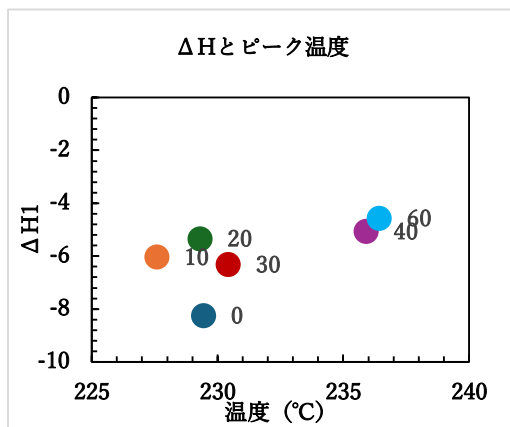


Figure 4.ブリーチによる ΔH とピーク温度

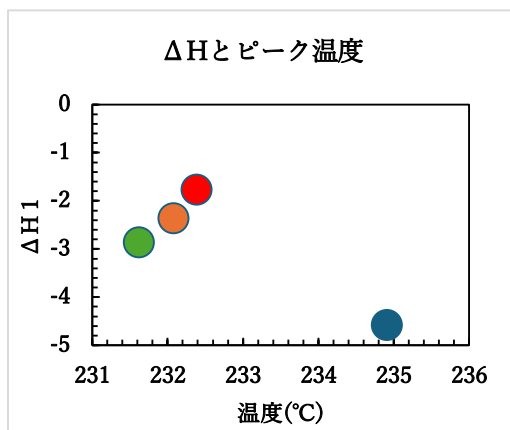


Figure3.煮沸処理による ΔH とピーク温度

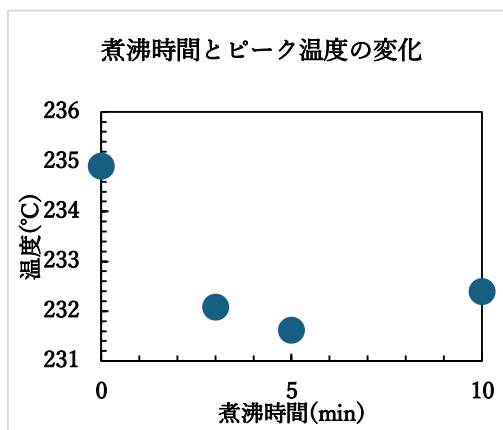


Figure 5.煮沸時間とピーク温度

・考察

今回の実験にて3種類の実験を行ったがいずれにせよ処理時間の変化と共にαヘリックスの変性が確認されるピーク温度が低温へとシフトしていく傾向が確認された。これは煮沸処理による熱ダメージ、ブリーチによるダメージがs s結合の含有量を減少させることが原因であると考えたい。αヘリックスの変性する際のエンタルピーを確認した際にも処理時間の変化につれて大きさが小さくなることからs s結合の含有量に紐づけられるのではないかと考えたい。この傾向に反するデータに関しては毛髪が既に摩擦によりキューティクル層がはがれることで結合の含有量に差が出ることや私自身の実験精度の影響であると考えられる。

・参考文献

- ・ポリオール類の毛髪に与える影響
細川稔, 佐藤美穂子, 定井正直
- ・最新の毛髪科学科 松崎貴 他
- ・博士論文 原子間力顕微鏡による毛髪に対するブリーチ処理の影響に関する研究
名和哲兵

加熱の繰り返しによるポリエチレンテレフタラートの劣化の評価

ソフトマテリアル研究室

2017015 角田宗途

指導教員：飯島正徳

1. 緒言

ポリエチレンテレフタレート（以下、PET）というプラスチックは、エチレングリコールとテレフタル酸が縮合重合してできた高分子化合物であり、主にペットボトルの原料として私達の身近で利用されている。飲料の容器として PET の需要が高まる一方で、PET の生成に使われる石油の枯渇が懸念されるようになり、現在では社会全体でペットボトルのリサイクルに力を入れている。

回収されたペットボトルは、メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの 2 通りの方法でリサイクルされる。それぞれのリサイクルの行程を図 1 に示す。

メカニカルリサイクルでは、ボトルを細かく砕くことでリサイクル前より分子鎖が短い分子が増えるため、リサイクルの度に品質が落ちていくが、ケミカルリサイクルでは、モノマーサイズまで化学的に分解して再重合するため、リサイクルされていない PET（ペレット）に近い品質が保たれる。

本研究では、融点や融解熱量、結晶化ピーク温度、結晶化の発熱量などを測定することにより、PET の種類による DSC 曲線の違いを調べる。また、複数回測定することによって PET の加熱を繰り返すうちに、DSC 曲線が加熱の繰り返しによって変化するかを調べ、その変化の原因を考察する。

PET はおよそ 300°C 以上で少しずつ熱分解が起こる。熱を加えることにより、エントロピーの高い低分子に分解して自由エネルギーの低い状態を維持しようとするのである。熱分解で分子鎖のどの部分が切断されるかによって生成物は様々で、CH₃CHO や CO₂、モノマーのテレフタル酸などが発生

する。一例として CH₃CHO が発生する時の熱分解の行程を図 2 に示す。

2. 実験方法

メカニカル PET、ペレットを、それぞれ 5mg 程度に調整してパンに入れたものを試料とした。

メカニカル PET はコカ・コーラ



図 1.リサイクルの行程 [1]

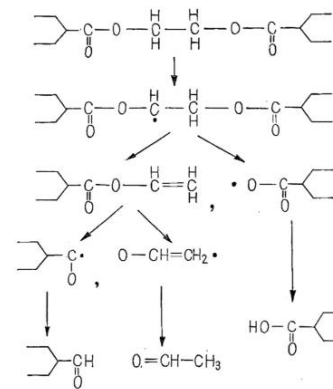
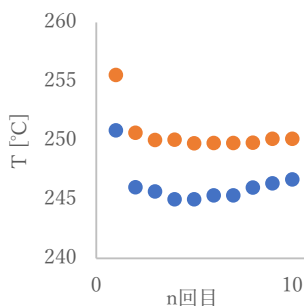
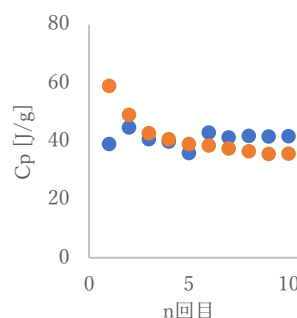


図 2.PET の熱分解による CH₃CHO の生成の行程 [2]



●メカニカル ●ペレット

図3.測定1の融解ピーク温度



●メカニカル ●ペレット

図4.測定1の融解熱量

500mL ボトル (日本コカ・コーラ (株) 製) を用いた。これらの試料を、DSC を用いて室温(25°C)から 20°C/min で昇温、300°Cで 5 分間保持、10°C/min で室温まで冷却、室温で 5 分間保持し、その行程を 10 回繰り返した。

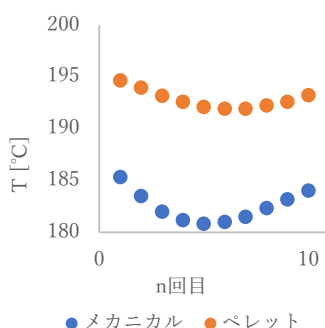


図5.測定1の結晶化ピーク温度

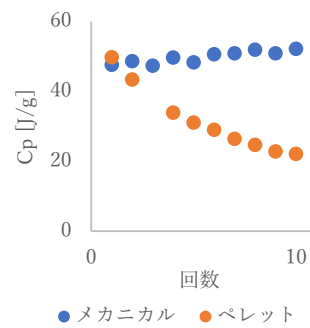


図6.測定1の結晶化の発熱量

3. 結果と考察

n 回目の昇温の時の融解ピーク温度と融解熱をプロットしたものをそれぞれ図 3、図 4 に示す。融解ピーク温度は 4、5 回目以最も低くなり、その後は徐々に高くなっていく。融解熱については、ペレットは加熱回数を増やすと融解熱量が小さくなっていくのに対し、メカニカル PET は小さくならなかった。

次に、n 回目の冷却の時の結晶化ピーク温度と結晶化による発熱量を図 5、図 6 に示す。結晶化ピーク温度も、融解ピーク温度と同様に 5 回目あたりで最も低くなり、その後は高くなっていった。また、結晶化による発熱量も、融解熱量と同様にペレットは小さくなっていき、メカニカル PET は小さくならなかった。

図 3 と図 5 から、メカニカル PET もペレットも 5 回目前後で融解ピーク温度や結晶化ピーク温度が最も低く、その後は徐々に高くなる点が共通していることがわかる。

一方、図 4 と図 6 から、ペレットは加熱の繰り返しによって融解熱量や結晶化の発熱量が減少しているが、メカニカル PET は減少していないことがわかる。

このような違いが出てくるということは、メカニカルリサイクルを繰り返して平均分子量が小さくなるほど、融解熱量や結晶化の発熱量が減少しにくくなっていくのではないかと考えられる。

4. 結論

ペレットとメカニカル PET を繰り返し加熱することによって、融解ピーク温度、融解熱量、結晶化ピーク温度、結晶化の発熱量がどのように変化していくかを調べた。融解熱量と結晶化の発熱量に関しては、ペレットとメカニカル PET で違いが顕著に表れ、ペレットは加熱の繰り返しで減少していくが、メカニカル PET は減少しなかったことから、メカニカルリサイクルを繰り返して平均分子量が小さくなるほど減少しにくくなっていくものと考えられる。具体的に何回メカニカルリサイクルを繰り返すとペレットとの違いが顕著に表れるか、そしてその実験方法について模索することが今後の課題である。

5. 参考文献

- [1]森田英資、PET ボトルのリサイクル「ボトル to ボトル」|株式会社ツカサペトコ(2022)
- [2]桜井亮一、ポリエチレンテレフタレート劣化(1962)
- [3]上野智永、ポリエステル熱による主鎖開裂、高分子論文集 (2007)

誘電測定によるコンクリート中の水の状態評価と硬化進行の推定

化学物理研究室

2017058 自然科学科 遊佐史大

指導教員:須藤誠一

1 背景

コンクリートは様々な建造物の材料として使用されている。その要因は他の建材である木材や鋼材と比較し、耐腐食性や耐火性が高いことなどがある。また日本では水害による被害を防止するため土砂流出に対して耐久力が高い建材として、圧縮強度の高いコンクリートを用いること重要である。本研究で用いる誘電測定は電極を接触させるだけで、測定物内部の分子の状態を評価することが出来る実験方法である^[1]。先行研究では、コンクリートの養生過程の誘電測定を行った。その結果、誘電測定の結果と圧縮強度に相関がある事が確認された。しかし、この相関の分子メカニズムは解明されていない。そこで本研究の目的は、誘電測定の結果からコンクリート中の水分子の状態評価を行うことと、施工現場環境における誘電測定の結果から養生進行の判定を達成することである。

2 実験方法

2.1 誘電測定

コンクリートに直径 3 cm の同軸電極を押し当て、インピーダンスアナライザ(ヒューレットパッカード社 JP1KE00245)でキャパシタンスとレジスタンスの周波数依存性を測定した。このとき、キャパシタンスとレジスタンスから、それぞれの周波数での複素誘電率の実部と虚部を求めた。この実部の高さは緩和強度と呼ばれ、単位体積中の水分子数に比例する。虚部のピーク周波数は水分子の運動の時間スケールを表す緩和時間と対応する。

2.2 実験材料

実験試料として普通ポルトランドセメント、水セメント比 55%、セメント細骨材比 40%、セメント粗骨材比 31%、のものを使用し、細骨材は鬼怒川産川砂、粗骨材は碎石を使用した。また試験体に使用した型枠は直径 5 cm 高さ 10 cm のものを主に使用した。

3 結果・考察

(1)環境温度による測定結果への影響

図 1 はコンクリートの誘電スペクトルと環境温度の関係を示す。実験では材齢 1 年のコンクリートブロックで観測されたスペクトルの温度依存性から、環境温度が増加すると、緩和時間が減少していることが分かった。緩和時間を定量的に評価するために、Cole-Cole の式の重ね合わせでカーブフィッティングを行い、緩和時間を求めた。ここでは圧縮強度と相関性を持つ、低周波側の過程に注目した。

(2)養生温度による緩和時間推移の評価

図 2 はコンクリートブロックの緩和時間の養生日数の関係と得られたパラメータを示す。

先行研究では、20°Cだけで養生を行った場合、左の青色のような単純な指数関数で記述できた。養生する環境温度と緩和時間の関係を明らかにするために、5°Cから40°Cのそれぞれの温度で養生を行った。コンクリートの圧縮強度の増加は積算温度で記述されるため、横軸に積算温度の対数と縦軸に緩和時間の対数をとった結果、同一の式で記述でき、この特徴を見ると、切片が温度と強く関係していることがわかった。これは緩和時間が活性化エネルギーと関係しているためと考えられる。

(3) 活性化エネルギーによる補正と養生進行判定の評価

図3はコンクリートのアレニウスプロットと補正した緩和時間と圧縮強度の関係を示す。結合水の活性化エネルギーを求めるために、環境温度を変えながら誘電測定を行った。緩和時間はアレニウス則に従い、その材齢1年のものでは活性化エネルギーは47.9 kJ/mol、初期養生のものは20.1 kJ/molとなった。学内で模擬試験体を作成し、養生3日目に脱型を行った。また、温度が一定の実験室内で、型枠内にコンクリートを打設し、脱型した。これらの緩和時間はよく一致することがわかった。また、養生温度や材齢を変えた試験体を作成し、この圧縮強度試験を行った。圧縮強度と緩和時間に相関性が得られたことから、施工現場環境における誘電測定の結果から養生進行の判定が達成できたと考えられる。

4 まとめ

本研究の結果、誘電測定を用いて、得られた緩和時間と β から水の分子描像のモデル作成を行いました。また、施工現場で起きる環境温度の変化を、活性化エネルギーで補正することで圧縮強度と緩和時間に相関が得られ、養生進行の判定が達成できた。

5 参考文献

[1] 滝澤 諒大, 渡辺 舜基: 誘電測定による養生度評価, 2022, p8.

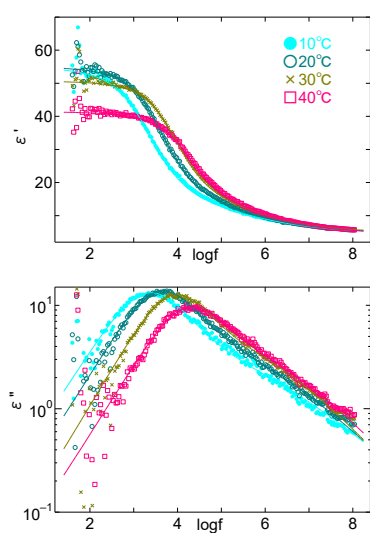


図1. コンクリートの誘電スペクトルと環境温度の関係

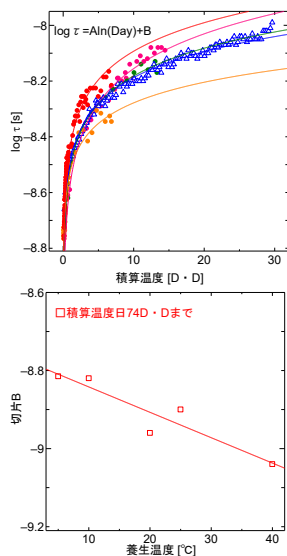


図2. コンクリートブロックの緩和時間の養生日数の関係と得られたパラメータ

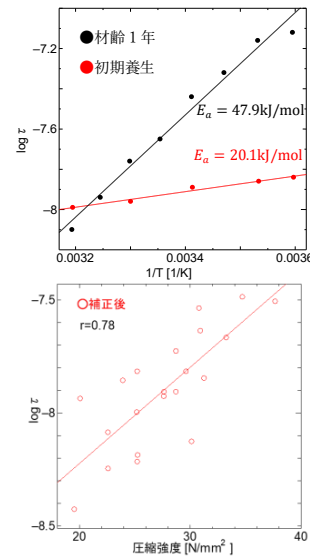


図3. コンクリートのアレニウスプロットと補正した圧縮強度と緩和時間の関係