

平成 22 年 度

修 士 論 文 要 旨

(博士前期課程)

(修 士 課 程)

高知大学大学院理学研究科

高知大学大学院総合人間自然  
科学研究科理学専攻

平成22年度理学研究科(博士前期課程)・総合人間自然科学研究科理学専攻(修士課程)修士論文発表会日程

コース	分野	日時	場所	発表者						
理学	数学	平成23年2月10日(木) 13時30分～16時00分	理学部2号館6階 数学大セミナー室	数学分野	矢野 茂雄	阿部 広大	小黒 拓	加藤 諒	川谷 和正	
					笹岡 達弥	白井 大樹	武井 裕史	東川 啓太		
					以上9名					
	物理科学	平成23年2月14日(月) 9時00分～15時00分	理学部2号館4階 共通講義室2	物理科学分野	大谷 光明	嘉藤 博志	久保 圭児	古槍山 大悟	関口 昂臣	
				溝尾 将一	山元 祐弥					
				以上7名						
生物科学	平成23年2月16日(水) 9時00分～11時40分	共通教育棟2号棟 2階221番教室	生物科学分野	朝岡 隆	大谷 正成	Daniela Miwa Kikuchi	清沢 遼太郎	山ノ内 崇志		
				以上5名						
地球科学	平成23年2月17日(木) 9時00分～13時00分	共通教育棟1号棟 2階127番教室	地球科学分野	松原 啓	河田 大樹	坂 耕多	田中 真理子	平林 歩子		
				細井 健太郎	明神 拓也					
				以上7名						
応用理学	情報科学	平成23年2月16日(水) 13時10分～15時30分	メディアの森6階 メディアホール	情報科学分野	高橋 育子	多和田 侑	趙 シン	辻 由彦	西森 博紀	
					宮城 悠					
					以上6名					
	応用化学	平成23年2月18日(金) 8時50分～12時00分	共通教育棟2号棟 1階212番教室	応用化学分野	板倉 章博	魚谷 祐樹	大西 美穂	谷上 拓也	松浦 由美子	
				松永 奈美穂	山口 真功	山下 恵祐				
				以上8名						
海洋生命・分子 工学	平成23年2月17日(木) 13時10分～17時10分	メディアの森6階 メディアホール	海洋生命・分子 工学分野	松本 保	森下 幸典	柏 瀬 幸	川島 大典	北村 昌也		
				草葉 昌平	米田 悠佑	崎山 直人	田代 真那美	長山 宏明		
				堀川 陽輔	松田 泰徳					
				以上12名						
災害科学	平成23年2月15日(火) 9時00分～12時30分	理学部1号館1階 101学生実験室	災害科学分野	佐々木 誠	高橋 宏児	平田 諒次	古野 北斗	山崎 麻未		
				山本 阿子	脇田 茂					
				以上7名						
連携分野	海底資源科学	平成23年2月17日(木) 9時00分～13時00分	共通教育棟1号棟 2階127番教室	海底資源科学分野	川野 雅弘					
					以上1名					
	植物分類・地理学	平成23年2月16日(水) 9時00分～11時40分	共通教育棟2号棟 2階221番教室	植物分類・地理学分野	山下 真人					
				以上1名						

専攻	講座	日時	場所	発表者						
自然環境科学	生物科学	平成23年2月16日(水) 9時00分～11時40分	共通教育棟2号棟 2階221番教室	生物科学講座	中川 起					
					以上1名					

## 目 次

氏 名	論 文 題 目	頁
総合人間自然科学研究科理学専攻		
理学コース (数学分野)		
1. 矢野 茂雄	重み多項式と reflection group における不変式論	1
2. 阿部 広大	Classification of multi-polarized manifolds by their degree	2
3. 小黒 拓	マルチンゲール理論とその応用	3
4. 加藤 諒	Towards stable homotopy groups of spheres	4
5. 川谷 和正	パラログラムタイリングのグリッドによる表現について	5
6. 笹岡 達弥	フーリエ解析の世界	6
7. 白井 大樹	Coxeterhedron の $f$ -vector について	7
8. 武井 裕史	球面のホモトピー群について	8
9. 東川 啓太	ある種のホップ空間の積のホモトピー結合性について	9
理学コース (物理科学分野)		
10. 大谷 光明	層状オキシサルファイドCeOCuSの合成と電気抵抗による物性評価	10
11. 嘉藤 博志	Morel-Anderson 模型と電子ガス超伝道への応用	11
12. 久保 圭児	ビーム・プラズマ系におけるワイベル不安定性	12
13. 古楡山 大悟	熱いパスタ原子核の構造	13
14. 関口 昂臣	有限温度格子QCDにおけるアーベリアン射影のゲージ依存性	14
15. 溝尾 将一	空間反転対称性の欠如した重い電子系圧力誘起超伝導体CeCoGe <sub>3</sub> の圧力温度相図	15
16. 山元 祐弥	籠状物質充填スクッテルダイトの核磁気共鳴	16
理学コース (生物科学分野)		
17. 朝岡 隆	ハゼ亜目魚類2科8属8種における側線系とその神経支配	17
18. 大谷 正成	ソコダラ科トウジン属魚類の比較形態および系統学的研究	18
19. Daniela Miwa Kikuchi	Laboratory scale studies on mass production of <i>Ulva crinita</i> (Roth)Nees	19
20. 清沢 遼太郎	インド洋・西部太平洋産ハダカイワシ属魚類Antグループの分類学的研究	20
21. 山ノ内 崇志	河川における水生植物群落の成立と動態に影響する環境要因	21
理学コース (地球科学分野)		
22. 松原 啓	二枚貝 <i>Amusiopecten praeignis</i> の酸素同位体比: 鮮新世最末期の水期-間水期サイクルと季節性との関連	22
23. 河田 大樹	飼育実験からみる浮遊性有孔虫 <i>Globigerinoides sacculifer</i> (BRADY)の形態的特性	23
24. 坂 耕 多	南海トラフ域の表層堆積物の堆積学的研究 熊野沖、四国沖を例として	24
25. 田中 真理子	北西太平洋域”拓洋第5海山”におけるマンガンクラストの組成変動と生成環境	25
26. 平林 歩子	中部-上部ジュラ系坂本層の潮汐堆積物に産する生痕化石群衆	26
27. 細井 健太郎	西オーストラリア・ヒルバラ地帯にみられる太古代中期 (3.2Ga) の堆積有機物の起源: DXCL型輝石の炭素同位体比と関連FTIRスペクトル	27
28. 明神 拓也	背弧拡大期における弧内堆積盆の堆積環境: 下部-中部中新統久万層群の例	28
応用理学コース (情報科学分野)		
29. 高橋 育子	歩行支援ロボットの開発に向けて	29
30. 多和田 侑	FDLによる組込みソフトウェア開発ガイドライン	30
31. 趙 シ ン	医療情報分散データベースシステムの研究	31
32. 辻 由 彦	手話トレーニングマシンの開発に向けて	32
33. 西 森 博 紀	プレゼンテーション構造に着目したプレゼンテーション・リハーサルにおける議論フェーズ支援環境の構築	33
34. 宮 城 悠	LSI レイアウト設計における全組合せ検索配置法とECO最適化法に関する研究	34

## 目 次

氏 名	論 文 題 目	頁
総合人間自然科学研究科理学専攻		
応用理学コース (応用化学分野)		
35. 板倉 章 博	新規アントラキノイド系発光色素の分子設計・合成・機能評価	35
36. 魚谷 祐 樹	金ナノ粒子を利用したバイオセンサーの開発	36
37. 大西 美 穂	新規Wells-Dawson型バナジウム(V)置換ポリオキシメタレート錯体の合成および電気化学的酸化還元反応の解析	37
38. 谷上 拓 也	複素多環系蛍光色素の分子設計・合成・機能評価	38
39. 松浦 由美子	固体触媒を用いた乳酸からアクリル酸への脱水反応	39
40. 松永 奈美穂	両親媒性ブロックポリマーの自己組織化ナノ構造テンプレートを利用した金ナノ粒子の組織化とその応用	40
41. 山口 真 功	金属錯体系発光色素の分子設計・合成・光物性	41
42. 山下 恵 祐	遊離酸型ポリオキシメタレート錯体の合成と触媒機能評価	42
応用理学コース (海洋生命・分子工学分野)		
43. 松 本 保	オウムガイ・アルギニンキナーゼにおける基質結合時の構造変化について	43
44. 森 下 幸 典	新しいカルバモイル化反応の開発	44
45. 柏 瀬 幸	ミダレクイタボヤの生殖系列における <i>vasa</i> 遺伝子発現制御機構の解析	45
46. 川 島 大 典	カタユウレイボヤの神経管形成における <i>cdx</i> 遺伝子の役割	46
47. 北 村 昌 也	ミダレクイタボヤにおける <i>SoxB1</i> , <i>SoxB2</i> 遺伝子の発現および機能解析	47
48. 草 葉 昌 平	1,2-ジアミノ骨格を持つ天然物の合成研究	48
49. 米 田 悠 佑	宝石サンゴ・ミトコンドリアゲノムの構造とその多様性	49
50. 崎 山 直 人	マンノスタチンAの合成研究	50
51. 田 代 真 那 美	ミダレクイタボヤの胚発生における生殖系列形成機構の解析	51
52. 長 山 宏 明	パラジウム化合物による1,6-エンイン類の水和酸化反応	52
53. 堀 川 陽 輔	カタユウレイボヤ胚における動物半球特異的遺伝子のエンハンサー解析	53
54. 松 田 泰 徳	光学活性な海洋天然物ゲラニルリナロイソシアニドの合成研究	54
応用理学コース (災害科学分野)		
55. 佐々木 誠	秩父累帯北帯の谷ノ内地すべりの地すべり構造と運動像	55
56. 高橋 宏 児	バングラデシュにおける2008-2010年のシビアローカルストームの発生環境場	56
57. 平 田 諒 次	3次元GPS速度場から推定した南海トラフの定常的プレート間固着分布	57
58. 古 野 北 斗	東海・東南海地震発生領域の地震履歴-浜名湖湖底にみられる過去5000年間の津波堆積物について-	58
59. 山 崎 麻 未	スーパーセル竜巻の模擬実験	59
60. 山 本 阿 子	土佐湾沿岸の湖沼に記録された過去2000年間の南海地震津波イベントの復元	60
61. 脇 田 茂	2008年岩手・宮城内陸地震による荒砥沢スプレッドの地すべり構造	61
連携分野 (海底資源科学分野)		
62. 川 野 雅 弘	海底地震計観測データに基づく2004年12月26日スマトラ-アンダマン地震の余震の震源メカニズムの検討	62
連携分野 (植物分類・地理学分野)		
63. 山 下 真 人	キク科トウヒレン属 ( <i>Saussurea</i> ) の形態学的研究	63
理学研究科 (博士前期課程)		
自然環境科学専攻 (生物科学講座)		
1. 中 川 起	徳島県三好市黒沢湿原周辺における最終氷期以降の植生変遷と火事	64

# 重み多項式と reflection group における不変式論

理学コース 数学分野

矢野 茂雄

Shephard と Todd によって分類された, No.4 ~ 37 のそれぞれの群について  $\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G = \mathbb{C}[(x_i^r)^* : r = 0, 1, 2, \dots]$  となるものを求めた.

## 定義

$G$  を,  $GL_n(\mathbb{C}) \supset G, |G| < \infty, f$  を,  $f \in \mathbb{C}[\mathbf{x}]$  とする. そのとき, 任意の  $A \in G$  に対して,

$$A \circ f = f \left( \sum_i a_{1i} x_i, \dots, \sum_i a_{ni} x_i \right) = f$$

が成り立つとき, 不変式であるといい,  $G$  に対する不変式環を次のように定義する.

$$\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G := \{f \in \mathbb{C}[\mathbf{x}] : A \circ f = f, \forall A \in G\}$$

## 定義 (Reynolds operator)

関数 Reynolds operator を次のように定義する.

$$\begin{aligned} * : \mathbb{C}[\mathbf{x}] &\rightarrow \mathbb{C}[\mathbf{x}]^G \\ f &\mapsto f^* := \frac{1}{|G|} \sum_{A \in G} A \circ f \end{aligned}$$

## 定理 (Noether's degree bound)

$\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G$  は有限生成で,

$$\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G = \mathbb{C}[f^* : f \text{ は単項式で次数} \leq |G|]$$

## 定理 (Molien)

$\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G$  を次数ごとの  $\mathbb{C}$  上のベクトル空間として  $\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G = \mathbb{C}[\mathbf{x}]_0^G \oplus \mathbb{C}[\mathbf{x}]_1^G \oplus \mathbb{C}[\mathbf{x}]_2^G \oplus \dots$  とみたとき,

$$\Phi_G(t) = \sum_{d=0}^{\infty} \dim(\mathbb{C}[\mathbf{x}]_d^G) t^d = \frac{1}{|G|} \sum_{A \in G} \frac{1}{\det(1 - At)}$$

## 例

$$G = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \right\}$$

## 定義

$A \in GL_n(\mathbb{C})$  とする.  $A$  の固有値の 1 つが 1 でない, かつそれ以外が 1 であるものを reflection であるといい,  $G \subset GL_n(\mathbb{C})$  が有限かつ reflection で生成されている group を reflection group という.

ここでは有限群のみを扱うので, 1 でないものを 1 の冪であるものとする.

reflection group は, Shephard-Todd の定理によって, 完全に分類されている.

この分類された No.4 ~ 37 について  $\mathbb{C}[\mathbf{x}]^G = \mathbb{C}[(x_i^r)^* : r = 0, 1, 2, \dots]$  となるものを求めた.

## 定理

一致するのは, No.6,8,9,10,17,21,22,23,24,26,27,28,29,30,31,32,36 である.

(注) No.35,36,37 がそれぞれ  $E_6, E_7, E_8$  型の Weyl 群である.

[主題] 複素数体  $\mathbb{C}$  上定義された  $n$  次元非特異多重偏極多様体  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  を,  $n \geq 3$  かつ  $L_1, L_2, \dots, L_n$  が非常に豊富であるような場合に, 次数  $L_1 L_2 \cdots L_n$  を用いて分類する. 多重偏極多様体は偏極多様体を拡張したものと考えられるが, 偏極多様体については次数が 11 の場合までの構造がすでに知られており, その結果を応用して, 分類を多重偏極多様体まで拡張するのが目的である.

[定義]  $n$  次元射影多様体  $X$  と,  $X$  上の  $k$  個の豊富な因子  $L_1, L_2, \dots, L_k$  の組  $(X, L_1, L_2, \dots, L_k)$  を多重偏極多様体という. 特に  $X$  が非特異のとき,  $(X, L_1, L_2, \dots, L_k)$  を非特異多重偏極多様体という.

以下,  $k = n$  の場合を考える.  $n$  次元多重偏極多様体  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  に対して, オイラー標数  $\chi(L_1^{\otimes t_1} \otimes L_2^{\otimes t_2} \otimes \cdots \otimes L_n^{\otimes t_n})$  を次のように表す:

$$\begin{aligned} & \chi(L_1^{\otimes t_1} \otimes L_2^{\otimes t_2} \otimes \cdots \otimes L_n^{\otimes t_n}) \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{\substack{j_1, j_2, \dots, j_n \geq 0 \\ j_1 + j_2 + \cdots + j_n = j}} \chi_{j_1, j_2, \dots, j_n}(X, L_1, L_2, \dots, L_n) \binom{t_1 + j_1 - 1}{j_1} \binom{t_2 + j_2 - 1}{j_2} \cdots \binom{t_n + j_n - 1}{j_n}. \end{aligned}$$

このとき  $\underbrace{\chi_{1, 1, \dots, 1}}_n(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  を  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  の次数とよび,  $L_1 L_2 \cdots L_n$  で表す.

$L_1 L_2 \cdots L_n$  は  $L_1, L_2, \dots, L_n$  の交点数と一致し, 特に  $L_1 = L_2 = \cdots = L_n =: L$  のとき  $L_1 L_2 \cdots L_n = L^n$  は偏極多様体  $(X, L)$  の次数である. したがって,  $(X, L, L, \dots, L)$  は一般の偏極多様体  $(X, L)$  と同一視され, 多重偏極多様体は偏極多様体の拡張になっているといえる.

分類に際して次の定理を用いる.

[定理]  $X$  を  $n$  次元非特異射影多様体,  $L_1, L_2, \dots, L_n$  を  $X$  上の豊富な因子とし,  $n \geq 2$  と仮定する. このとき次が成り立つ:

$$(L_1 L_2 \cdots L_n)^n \geq (L_1^n)(L_2^n) \cdots (L_n^n).$$

$n = 2$  のとき, この定理は Hodge の定理としてよく知られているが, それを用いて一般の  $n$  の場合を示すことができる.

いま, 非特異多重偏極多様体  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  に対して  $L_1^n \leq L_2^n \leq \cdots \leq L_n^n$  であるとすれば, 上の定理から  $L_1^n \leq L_1 L_2 \cdots L_n$  を得る. したがって,  $(X, L_1)$  を偏極多様体とみて, その分類結果を用いれば,  $(X, L_1)$  を決定することができる. さらにその  $X$  に対して  $L_2, \dots, L_n$  を求めれば,  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  の構造は決定される.

[結果] 上記の方法を用いて,  $n = \dim X \geq 3$  かつ  $L_1, L_2, \dots, L_n$  が非常に豊富であるような非特異多重偏極多様体  $(X, L_1, L_2, \dots, L_n)$  に関して, その次数が 5 以下の場合の構造をすべて決定することができた. さらに同様の方法により, 次数が 6 以上の場合の分類が得られることが期待されるため, それを今後の課題としたい.

# マルチンゲール理論とその応用

理学コース 数学分野

小黒 拓

**定義 1** 確率過程  $X = \{X_t : 0 \leq t < \infty\}$  が次を満たすとき、劣マルチンゲールであるという。

(i)  $X$  が適合過程で、 $X \in \mathcal{L}^1$ , (ii)  $\mathbf{E}[X_t | \mathcal{F}_s] \geq X_s$ , a.s. ( $0 \leq s < t < \infty$ )

また、(ii) の  $\geq$  が  $\leq$  のとき優マルチンゲール、 $=$  のとき単にマルチンゲールという。

$X_0 = 0$  a.s. であるようなマルチンゲールの集合を  $\mathcal{M}$  (連続のとき  $\mathcal{M}_c$ ,  $X \in \mathcal{L}^2$  のとき  $\mathcal{M}^2$ ) と表す。

**定理 1**  $X$  は右連続劣マルチンゲールとし、 $[\sigma, \tau]$  は  $[0, \infty)$  の部分区間とする。

$$(1) \lambda \cdot \mathbf{P} \left[ \sup_{\sigma \leq t \leq \tau} X_t \geq \lambda \right] \leq \mathbf{E}[X_\tau^+]. \quad (2) \lambda \cdot \mathbf{P} \left[ \inf_{\sigma \leq t \leq \tau} X_t \leq -\lambda \right] \leq \mathbf{E}[X_\tau^+] - \mathbf{E}[X_\sigma].$$

(3) 任意の  $t \geq 0$  に対して  $X_t \geq 0$  a.s. であり、 $\mathbf{E}[X_t^p] < \infty$  であるとき次が成り立つ。

$$\mathbf{E} \left[ \sup_{\sigma \leq t \leq \tau} X_t^p \right] \leq \frac{p}{p-1} \mathbf{E}[X_\tau^p], \quad p > 1.$$

**例 1**  $N$  は母数  $\lambda > 0$  の Poisson 過程であるとする。このとき、補正した Poisson 過程  $M$  を  $M_t := N_t - \lambda t$  と定義する。このとき、 $M$  はマルチンゲールとなる。そこで、上の不等式 (1)(2) と Stirling の近似を用いると、

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P} \left[ \sup_{0 \leq s \leq t} M_s \geq c\sqrt{\lambda t} \right] \leq \frac{1}{c\sqrt{2\pi}}, \quad \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P} \left[ \inf_{0 \leq s \leq t} M_s \leq -c\sqrt{\lambda t} \right] \leq \frac{1}{c\sqrt{2\pi}}. \quad \forall c > 0$$

であることがわかり、これより、各  $c > 0$  に対して、 $t(c) > 0$  が存在して

$$\mathbf{P} \left[ \left| \frac{N_t}{t} - \lambda \right| \geq c\sqrt{\frac{\lambda}{t}} \right] \leq \frac{3}{c\sqrt{2\pi}}, \quad \forall t > t(c)$$

が成り立ち、Poisson 過程に対する大数の弱法則が導かれる。また、(3) より、

$$\mathbf{E} \left[ \sup_{\sigma \leq t \leq \tau} \left( \frac{N_t}{t} - \lambda \right)^2 \right] \leq \frac{4\tau\lambda}{\sigma^2}$$

が成り立ち、 $\sigma = 2^n$ ,  $\tau = 2^{n+1}$  と選び、Čebyšev の不等式を用いると、任意の  $n \geq 1$ ,  $\varepsilon > 0$  に対して

$$\mathbf{P} \left[ \sup_{2^n \leq t \leq 2^{n+1}} \left| \frac{N_t}{t} - \lambda \right| \geq \varepsilon \right] \leq \frac{8\lambda}{\varepsilon^2 2^{2n}}$$

が成り立つ。Borel-Cantelli の補題を用いると、Poisson 過程に対する大数の強法則が導かれる。

**定義 2** 写像  $T : \Omega \rightarrow [0, \infty]$  が  $\{T \leq t\} = \{\omega \in \Omega : T(\omega) \leq t\} \in \mathcal{F}_t$  を満たすとき、 $T$  は停止時刻であるという。そして、 $\mathcal{T}_a$  を  $\mathbf{P}[T \leq a] = 1$  を満たすすべての停止時刻の全体 ( $a > 0$ ) とする。右連続過程  $X$  は  $\{X_T\}_{T \in \mathcal{T}_a}$  が任意の  $0 < a < \infty$  に対して一様可積分であるとき、DL クラスに属するという。

**定理 2**  $\{\mathcal{F}_t\}$  は通常条件を満たすものとする。右連続劣マルチンゲール  $X$  が DL クラスに属するとき、

$$X_t = M_t + A_t, \quad 0 \leq t < \infty, \quad \begin{array}{l} M : \text{右連続マルチンゲール,} \\ A : \text{自然な増加過程,} \end{array}$$

と一意的に分解することが可能である。この分解を Doob-Meyer 分解という。

$X \in \mathcal{M}^2$  に対して、 $X^2$  は非負劣マルチンゲールとなり、次のように Doob-Meyer 分解が可能である。

$$X_t^2 = M_t + \langle X \rangle_t, \quad 0 \leq t < \infty. \quad \begin{array}{l} M : \text{右連続マルチンゲールで, } M \in \mathcal{M} \\ \langle X \rangle : \text{自然な増加過程 (2次変動と呼ばれる)} \end{array}$$

$X \in \mathcal{M}_c^2$  に対して、 $\Pi = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$  を  $[0, t]$  の分割とし、 $|\Pi| = \max_{1 \leq k \leq m} |t_{k-1} - t_k|$  と定義すると、

$$\lim_{|\Pi| \rightarrow 0} \sum_{k=1}^m (X_{t_k} - X_{t_{k-1}})^2 = \langle X \rangle_t \text{ (確率収束)}$$

が成り立つ。2次変動の名はこの式に由来する。

**例 2** 例 1 での補正した Poisson 過程  $M$  において  $M \in \mathcal{M}^2$  が成り立ち、Doob-Meyer 分解は次のようになる。

$$M_t^2 = ((N_t - \lambda t)^2 - \lambda t) + \lambda t$$

# Towards stable homotopy groups of spheres

理学コース 数学分野

加藤 諒

安定ホモトピー論では、安定ホモトピー圏の性質が研究される。特に、スペクトラムにより構成される圏はその最も顕著かつ重要な例であり、安定ホモトピー論の研究対象の中心に位置している。安定ホモトピー論における主要な問題の1つとして、球面スペクトラムのホモトピー群  $\pi_*(S)$  の構造決定問題があげられ、その研究は困難を極め、現在においても高次元の部分はほとんど何も分かっていない。Adams-Novikov スペクトル系列, chromatic スペクトル系列は、この現状において提唱されている数少ない  $\pi_*(S)$  への有力なアプローチである。以下、その詳細を述べる。

$p$  はある奇素数とする。Adams-Novikov スペクトル系列 (ANSS) の  $E_2$  項  $\tilde{E}_2^s$  は、ある Hopf 垂代数  $(A, \Gamma)$  における  $\Gamma$  余加群の圏での Ext 群で表される:  $\tilde{E}_2^s = \text{Ext}_\Gamma^s(A, A)$ . ここで、 $A = \mathbb{Z}_{(p)}[v_1, v_2, v_3, \dots]$  である ( $\mathbb{Z}_{(p)}$ :  $p$ -localized integers). 1977 年, Miller-Ravenel-Wilson は、 $\tilde{E}_2^s$  を解析する為に chromatic スペクトル系列 (CSS) の概念を導入した。その説明の為、帰納的に次の記号を定義する:

$$\begin{aligned} N_n^0 &= A/I_n \text{ where } I_n = (v_0, v_1, \dots, v_{n-1}) \ (v_0 = p), \\ M_n^i &= v_{n+i}^{-1} N_n^i, \quad 0 \rightarrow N_n^i \hookrightarrow M_n^i \rightarrow N_n^{i+1} \rightarrow 0: \text{ short exact sequence.} \end{aligned}$$

CSS は、上の短完全列により誘導される完全対から得られるスペクトル系列であり、特に  $n = 0$  のとき、それは  $\tilde{E}_2^*$  に収束する:

$$E_1^{s,t} = E_1^{s,t}(0) = \text{Ext}_\Gamma^t(A, M_0^s) \xrightarrow{\text{CSS}} \tilde{E}_2^{s+t} = \text{Ext}_\Gamma^{s+t}(A, A) = \text{Ext}_\Gamma^{s+t}(A, N_0^0).$$

同様に、短完全列  $0 \rightarrow M_{n-1}^{s+1} \xrightarrow{v_{n-1}^{-1}} M_n^s \xrightarrow{v_n^{-1}} M_n^s \rightarrow 0$  により得られるスペクトル系列, Bockstein スペクトル系列 (BSS)

$$E_1^{s,t} = E_1^{s,t}(n) = \text{Ext}_\Gamma^t(A, M_n^s) \xrightarrow{\text{BSS}} E_1^{s+1,t}(n-1) = \text{Ext}_\Gamma^t(A, M_{n-1}^{s+1})$$

が得られる。よって、 $\pi_*(S)$  への次の流れが考えられる:

$$E_1^{s,t}(n-s) \xrightarrow{\text{BSS}} E_1^{s+1,t}(n-s-1) \xrightarrow{\text{BSS}} \dots \xrightarrow{\text{BSS}} E_1^{n,t}(0) = E_1^{n,t} \xrightarrow{\text{CSS}} \tilde{E}_2^{n+t} \xrightarrow{\text{ANSS}} \pi_*(S).$$

現在までに、 $E_1^{s,t}(n-s)$  の構造は、Ravenel, Shimomura を中心とした仕事により  $n \leq 2$  においては完全に決定されている。しかしながら、 $n > 2$  においては次の部分しか決定されていない。

$$\begin{array}{ll} E_1^{0,0}(n), E_1^{0,1}(n), E_1^{0,2}(n) & \text{Ravenel,} \\ E_1^{1,0}(n-1) & \text{Miller-Ravenel-Wilson,} \\ E_1^{2,0}(n-2) & \text{Shimomura } (n > 3), \text{ Nakai } (n = 3). \end{array}$$

私の下村克己教授の下での修士課程 2 年間の研究の大半は、未解決の chromatic  $E_1$  項  $E_1^{s,t}(n-s)$  の構造決定にあった。それにより、次の結果が得られた。

**Result A:** We determined the structure of  $E_1^{1,1}(n-1) = \text{Ext}_\Gamma^1(A, M_{n-1}^1)$  when  $n > 3$ .

$\pi_*(S)$  へは、また違ったアプローチも考えられる。

$\text{Ext}_\Gamma^t M = \text{Ext}_\Gamma^t(A, M)$  とおく。短完全列  $0 \rightarrow N_k^0 \xrightarrow{v_k} N_k^0 \rightarrow N_{k+1}^0 \rightarrow 0$  により得られる連結準同型  $\delta_k : \text{Ext}_\Gamma^t N_{k+1}^0 \rightarrow \text{Ext}_\Gamma^{t+1} N_k^0$  を用いて、 $\text{Ext}_\Gamma^* N_0^0 = \tilde{E}_2^*$  において、次の元が定義される:

$$\alpha_t = \delta_0(v_1^t), \quad \beta_t = \delta_0 \delta_1(v_2^t), \quad \gamma_t = \delta_0 \delta_1 \delta_2(v_3^t).$$

これらはギリシャ文字元と呼ばれ、それぞれフィルトレーション次元  $1, 2, 3$  が対応し、ANSS によるこれらの収束先も同様の記号で表される。Doomsday 予想では、フィルトレーション次元が 2 以上の元は全て零だと主張されていたが、Smith, Toda, Miller-Ravenel-Wilson の仕事により  $\beta_t, \gamma_t$  の非自明性が示され、Doomsday 予想は否定された。最近、私が下村克己教授と行っていた共同研究により、フィルトレーション次元が  $4, 5$  の非自明な元が無限に存在することが示された。それが次の結果である。

**Result B:** If  $t \not\equiv 0, 1, 2 \pmod{p}$ , then  $\alpha_1 \gamma_t, \beta_1 \gamma_t$  and  $\beta_2 \gamma_t$  are nontrivial in  $\pi_*(S)$  at a prime  $\geq 7$ .

# パラレログラムタイリングのグリッドによる表現について

理学コース 数学分野

川谷 和正

## 1. はじめに

ペンローズタイリングにおいては、カイトとダートと呼ばれるタイルの上に線分を描くことにより、ペンローズタイリングに5つの方向をもつ平行線の族(グリッド)が現れることが知られている。このグリッドはアンマン棒と呼ばれており、逆にアンマン棒からペンローズタイリングが復元される。また射影法によって得られる非周期タイリングでは、グリッドの構成法が知られている。

そこで、より広い対象であるパラレログラムタイリングにおいて、グリッドの構成法を定式化しようと考えた。パラレログラムタイリングとは、単に、タイルが平行四辺形であるという条件を課しただけのタイリングである。射影法で得られるタイリングはパラレログラムタイリングであるが、逆は必ずしも成立しない。

## 2. 研究内容と考察・結果

パラレログラムタイリングにおいて次の手順を行うことによりグリッドが構成される。

手順1 タイリングの中からあるタイルを選び、そのタイルの平行な2つの辺をとる。その辺で隣接するタイルを選び、再び前と平行な辺で隣接するタイルを選ぶ。それを左右に繰り返すことで、1つの帯のようなものができる。

手順2 最初に選んだタイルと同じ傾きの他のタイルと、その平行な2つの辺に対して同じことを行う。

手順3 最初にとった平行な2つの辺と平行な各帯に含まれているタイルの辺に対する垂直二等分線を引く。

上記の手順により得られたグリッドは次の性質をもつ。

### 定理1

パラレログラムタイリングに対して次の(1),(2)が成立する。

- (1) グリッドを構成する同じ傾きをもつ平行線の族は離散的である。
- (2) グリッドを構成する同じ傾きをもつ平行線の族の幅について、その幅から得られる記号列が全ての傾きにおいて、非周期的ならば、タイリングは非周期的である。

上記の手順をペンローズタイリングに適用した場合に得られるグリッドは次の性質をもつ。

### 定理2

- (1) 右の図1の vertex atlas を横切る平行線は正5角形を描く。
- (2) グリッドから元のペンローズタイリングが復元できる。

## 3. 今後の課題

今回の研究で定理2の(2)のグリッドから元のペンローズタイリングを復元するために、vertex atlas の情報を必要としたが、次は vertex atlas を用いなくてもよい方法を模索する。

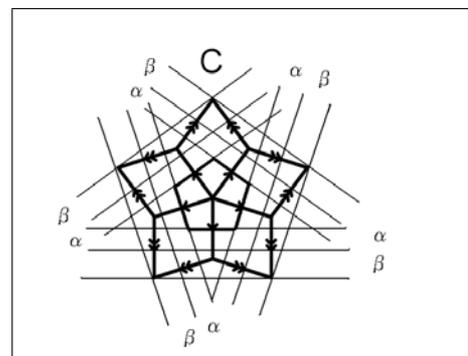


図1: vertex atlas に現れる正5角形

# フーリエ解析の世界

理学コース 数学分野

笹岡達弥

等周問題：同じ周長の平面図形のなかで、円が最大の面積をもつ。

等周問題の図形的議論とフーリエ級数による議論の2通りの証明を行う。

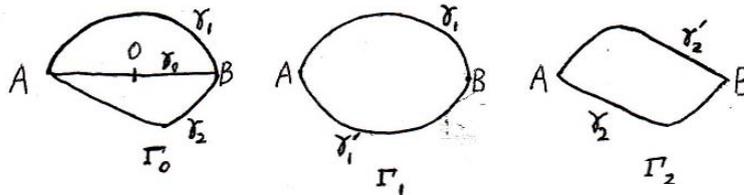
(1) 図形的証明

定理1 同じ周長の平面図形の中で最大の面積をもつ図形  $\Gamma_0$  が存在するとすれば、 $\Gamma_0$  は円である。

(平面領域の凸性の定義) 平面上の領域  $\Gamma$  が凸であるとは、 $\Gamma$  の相異なる二点  $A, B$  に対して、線分  $AB$  上のすべての点が  $\Gamma$  に属することである。

補題1 同じ周長の平面図形の中で最大の面積をもつ図形  $\Gamma_0$  が存在するとすれば、 $\Gamma_0$  は凸である。

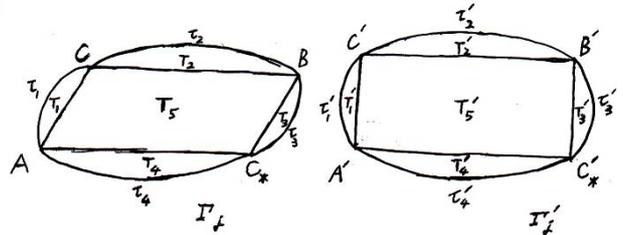
$\Gamma_0$  の周上に一点  $A$  をとり、別の点  $B$  を  $\Gamma_0$  の周上にとる。点  $B$  を、 $A$  から周に沿って測った  $AB$  の距離がちょうど  $\Gamma_0$  の周長の半分にすると、 $\Gamma_0$  の外周は  $AB$  を結ぶ二つの弧  $\gamma_1$  と  $\gamma_2$  に分けられる。補題1より  $\Gamma_0$  は凸なので、 $\gamma_1$  と  $\gamma_2$  はともに線分  $AB$  と点  $A, B$  でのみ交わる。線分  $AB$  の中点を  $O$  とする。 $\gamma_1$  を  $O$  について  $\gamma_1$  と点対称であるような弧とし、 $\gamma_2$  を  $O$  について  $\gamma_2$  と点対称であるような弧とする。 $j = 1, 2$  として、 $\Gamma_j$  をそれぞれ  $\gamma_j$  と  $\gamma_j'$  とで囲まれた図形とする。(次の図を参照)



補題2  $\Gamma_1$  と  $\Gamma_2$  の周長と面積は  $\Gamma_0$  と同じである。

補題3  $\Gamma_1$  と  $\Gamma_2$  は円である。

(右図は証明を行う際に構成する  $\Gamma_j, \Gamma_j'$  である。)



定理1の証明  $\Gamma_1$  と  $\Gamma_2$  は円であるから、 $\gamma_1$  と  $\gamma_1'$  は半円弧である。 $\Gamma_0$  は円である。

(2) フーリエ級数による証明

定義 (フーリエ係数)  $\hat{f}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{T}} f(t) \exp(-irt) dt$ . ( $\mathbb{T} = \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$ ,  $r \in \mathbb{Z}$ )

定理2 (1) 長さ  $L$  で、自身とは交わらない閉曲線を  $\Gamma$  とする。弧長表示  $f: \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{R}^2, f(t) = (x(t), y(t))$  をとる。 $x, y$  は連続微分可能と仮定する。 $\Gamma$  を囲む面積を  $A$  とすれば

$$\frac{L^2 - 4\pi A}{2\pi^2} \geq \sum_{n \neq 0} \left( |(n\hat{x}(n) - i\hat{y}(n))|^2 + |n\hat{y}(n) - i\hat{x}(n)|^2 + (n^2 - 1)(|\hat{x}(n)|^2 + |\hat{y}(n)|^2) \right)$$

(2) とくに、 $L^2 \geq 4\pi A$  であって、等号は  $\Gamma$  が円のときに限り成立する。

定理2は次の式 (a)、(b) を用いて示される。

$$\Gamma \text{ を囲む面積 } A = - \int_{\mathbb{T}} y(s) x'(s) ds = - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{y}(n) \hat{x}'(n) \cdots (a)$$

(パーセヴァルの等式) 連続関数  $f: \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{C}$  について次の等式が成り立つ。

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{T}} f(t) g(t)^* dt = \sum_{r=-\infty}^{\infty} \hat{f}(r) \hat{g}(r)^* \cdots (b)$$

# Coxeterhedron の $f$ -vector について

理学コース 数学分野

白井 大樹

凸多面体  $P$  とは、ユークリッド空間  $\mathbb{R}^n$  における有限個の半空間の共通部分として表せる有界な部分集合をいう。 $P$  を含む  $\mathbb{R}^n$  の最小のアフィン部分空間の次元を  $P$  の次元と呼ぶ。 $\mathbb{R}^n$  の超平面  $H$  で、それによって定まる二つの半空間の一方が  $P$  を含む時、 $P \cap H$  を  $P$  の面と呼ぶ。 $P$  の面も凸多面体になることが分かる。

凸多面体  $P$  の面全体の集合は、包含関係により半順序集合となる。これを  $P$  の面束と呼ぶ。

$n$  次元凸多面体  $P$  の  $d$  次元面の数を  $f_d$  としたとき、 $(f_{-1}, f_0, \dots, f_d)$  を  $P$  の  $f$ -vector と呼び、 $f(P)$  で表わす。ただし、 $f_{-1} = 1$  と定める。

ユークリッド空間の鏡映で生成される効果的な有限群を Coxeter 群と呼ぶ。任意の Coxeter 群  $G$  は有限個の生成元の集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  を用いて次の様に表すことができる。

$$G = \langle S \mid s_i^2 = 1, (s_i s_j)^{m_{i,j}} = 1 (i < j) \rangle \quad (2 \leq m_{i,j} < \infty)$$

$(G, S)$  を  $G$  の Coxeter 系と呼ぶ。

既約な Coxeter 群は完全に分類されており、それらは記号

$$A_n (n \geq 1), B_n (n \geq 2), D_n (n \geq 4), E_n (n = 6, 7, 8), F_4, G_2, H_2^n (n \geq 5, n \neq 6), I_n (n = 3, 4)$$

で表わされる。

$(G, S)$  を Coxeter 系とする。 $S$  の部分集合  $J$  で生成される  $G$  の部分群  $G_J$  を考え、集合  $L(G) = \bigcup_{J \subset S} G/G_J$  を考える。 $L(G)$  は包含関係により半順序集合をなす。次のことが知られている。

定理 任意の Coxeter 系  $(G, S)$  に対し  $L(G)$  を面束とする凸多面体  $PG$  が存在する。

$PG$  を  $G$  の Coxeterhedron と呼ぶ。Reiner-Ziegler [1] は Coxeter 群  $A_n, B_n, D_n$  に対し、それらの Coxeterhedron の面束の表現方法を与えている。ここでは、それを用いて  $f$ -vector  $f(PA_n), f(PB_n), f(PD_n)$  を決定する。

主定理 (1)  $PA_n (n \geq 1)$  の  $f$ -vector  $f(PA_n) = (f_{-1}, f_0, \dots, f_n)$  は次で与えられる。

$$f_t = \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t+1}=n+1 \\ s_i \geq 1}} \frac{(n+1)!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t+1}!} \quad (0 \leq t \leq n)$$

(2)  $PB_n (n \geq 1)$  の  $f$ -vector  $f(PB_n) = (f_{-1}, f_0, \dots, f_n)$  は次で与えられる。

$$f_t = \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t}=n \\ s_i \geq 1}} \frac{2^n n!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t}!} + \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t+1}=n \\ s_i \geq 1}} \frac{2^{n-s_{n-t+1}} n!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t}!} \quad (0 \leq t \leq n)$$

(3)  $PD_n (n \geq 1)$  の  $f$ -vector  $f(PD_n) = (f_{-1}, f_0, \dots, f_n)$  は次で与えられる。

$$f_t = \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t}=n \\ s_i \geq 1}} \frac{2^{n-1} n!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t}!} + \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t}=n \\ s_i \geq 1 (i \neq n-t) \\ s_{n-t} \geq 2}} \frac{2^{n-1} n!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t}!} \\ + \sum_{\substack{s_1+s_2+\dots+s_{n-t+1}=n \\ s_i \geq 1 (i \neq n-t+1) \\ s_{n-t+1} \geq 2}} \frac{2^{n-s_{n-t+1}} n!}{s_1!s_2! \cdots s_{n-t+1}!} \quad (0 \leq t \leq n)$$

## 参考文献

[1] V. Reiner and G. M. Ziegler, Coxeter-associahedra, *Mathematika* 41 (1994), 364–393

# 球面のホモトピー群について

理学コース 数学分野

武井 裕史

球面の安定ホモトピー群  $\pi_k(S)$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ) を求めることが安定ホモトピー論における重要な問題の一つである。そこで X-G. Liu によって決定されている下記のことをみてきた。

Theorem

- $p \geq 7, n \geq m + 2 > 6, 0 \leq s < p - 3$  のとき  $\gamma_s \omega_{m,n} \in \pi_{p^n q + p^m q + (s+3)p^2 q + (s+2)pq + (s+2)q - 6}(S)$
- $p \geq 7, n \geq 4, 0 \leq s < p - 5$  のとき  $\gamma_{s+3} \chi \in \pi_{p^n q + (s+3)p^2 q + (s+4)pq + (s+3)q - 7}(S)$
- $p \geq 5, n \geq 3, 2 \leq s < p$  のとき  $\beta_{s-1} \varpi_n \in \pi_{p^n q + spq + (s-1)q - 3}(S)$
- $p \geq 5, n \geq m + 2 \geq 6, 0 \leq s < p - 3$  のとき  $\xi_{s,m} \varrho_n, \xi_{s,n} \varrho_m \in \pi_{p^n q + p^m q + (s+1)pq + (s-1)q - 6}(S)$

球面のホモトピー群を求める方法は次のようにスペクトル系列を 2 回計算することを考える。

$$\begin{aligned} & \pi_*(S) \\ & \uparrow \text{Adams spectral sequence (ASS)} \\ & E_2^{*,*} = \text{Ext}_A^{s,t}(\mathbb{Z}_p, \mathbb{Z}_p) \\ & \uparrow \text{May spectral sequence (MSS)} \\ & E_1^{*,*} = E(h_{m,i} | m > 0, i \geq 0) \otimes P(b_{m,i} | m > 0, i \geq 0) \otimes P(a_n | n \geq 0) \end{aligned}$$

$\pi_*(S)$  の非自明な元  $\alpha$  に収束する ASS の  $E_2$  項の非自明な元を  $a$ 、 $\pi_*(S)$  の非自明な元  $\beta$  に収束する ASS の  $E_2$  項の非自明な元を  $b$  とすると  $a \neq 0, b \neq 0$  で  $d_r(a) = d_r(b) = 0$  ( $r \geq 2$ ) である。このとき、米田積で表された  $E_2$  項の積  $ab$  が球面のホモトピー群での合成  $\alpha\beta$  に収束するためには次を満たせばよい。

- $$(i) \left\{ \begin{array}{l} (1) ab \neq 0 \\ (2) d_r(ab) = 0 \\ (3) ab \text{ が ASS での微分であたらない。即ち } d_r(x) = ab \text{ となる } r, x \text{ が存在しない。} \end{array} \right.$$

まず、(2) についてみていく。ASS の微分は derivation

$$d_r(ab) = d_r(a)b \pm ad_r(b) \quad ( )$$

を満たすので  $d_r(a) = d_r(b) = 0$  より  $d_r(ab) = 0$  である。すると微分で他の元に当たらないことがわかる。もし当たってしまうと死んでしまう。また他の微分で当たってしまうと殺されてしまうので他の微分で当たらない事を見ていく。これが上の (3) である。

上の (1) に相当する  $ab$  が 0 でないことを見ていく。そのため ASS の  $E_2$  項に収束する MSS があるので MSS の  $E_1$  項を見ていく。

ASS の  $E_2$  項の非自明な元  $a$  に収束する MSS の  $E_1$  項の非自明な元を  $\bar{a}$ 、ASS の  $E_2$  項の元  $b$  に収束する MSS の  $E_1$  項の元を  $\bar{b}$  とすると  $\bar{a} \neq 0, \bar{b} \neq 0$  で  $d_r(\bar{a}) = d_r(\bar{b}) = 0$  ( $r \geq 1$ ) である。このとき次を満たせばよい。

- $$(ii) \left\{ \begin{array}{l} (1) \bar{a}\bar{b} \neq 0 \\ (2) d_r(\bar{a}\bar{b}) = 0 \\ (3) \bar{a}\bar{b} \text{ が MSS 他の微分で当たらない。即ち } d_r(x) = \bar{a}\bar{b} \text{ となる } r, x \text{ が存在しない。} \end{array} \right.$$

まず (2) については、ASS のときと同じように MSS の微分は derivation ( ) を満たすので  $d_r(\bar{a}) = d_r(\bar{b}) = 0$  より  $d_r(\bar{a}\bar{b}) = 0$  である。すると微分で他の元に当たらないことがわかる。

他の微分で  $\bar{a}\bar{b}$  に当たらないこと、そして  $\bar{a}\bar{b}$  が 0 でないことを見ていくために MSS の  $E_1$  項を計算する。MSS の  $E_1$  項を計算することによって  $\bar{a}\bar{b}$  がゼロでなく他の微分で当たらないことがわかり、上で述べたように  $ab$  がゼロでなく他の微分で当たらないことがわかるので  $\alpha\beta$  に収束することがわかる。

よって (i) の (3) と (ii) の (1) と (3) を満たすことを示せば  $\alpha \neq 0, \beta \neq 0 \in \pi_*(S)$  に対して  $\alpha\beta \neq 0 \in \pi_*(S)$  が示せるので、この 3 つを与えられたホモトピー元に対して確かめることによって上の Liu の定理が従う。

# ある種のホップ空間の積のホモトピー結合性について

理学コース 数学分野 東川 啓太

以下, 空間は単連結で基点  $*$  を持つとする.

位相空間  $X$  がホップ空間とは, 連続な写像  $\mu: X \times X \rightarrow X$  で  $\mu(x, *) = \mu(*, x) = x$  ( $\forall x \in X$ ) を満たすものが存在するときをいう. さらに  $\mu \circ (\mu \times 1) \simeq \mu \circ (1 \times \mu): X \times X \times X \rightarrow X$  が成り立つとき, ホモトピー結合的ホップ空間という. 位相群やループ空間はホモトピー結合的ホップ空間の例である.

$p$  を素数とする. このとき  $\mathbb{Z}/p$  係数のコホモロジー環  $H^*(X) = H^*(X; \mathbb{Z}/p)$  はホップ代数になり, Borel の定理より代数的構造がよく分かっている. 特に  $H^*(X)$  が有限の時は,  $H_*(X; \mathbb{Z})$  が  $p$ -torsion を持たないことと,  $H^*(X)$  が有限個の奇数次元の元で生成される外積代数

$$H^*(X) \cong \Lambda(x_1, \dots, x_k), \quad \deg x_i = 2n_i - 1 \geq 3$$

になることは同値である. このとき生成元の個数  $k$  を  $X$  の階数とよぶ. また, このような  $X$  を  $\text{mod } p$  外積ホップ空間と呼ぶことにする.

$k \leq p-2$  のとき, 階数が  $k$  である  $\text{mod } p$  外積ホップ空間はよく調べられている. 特に次のことが知られている.

定理 1 (cf. [1])  $k \leq p-2, k \leq n$  のとき次を満たすホップ空間  $X_{n,k}$  は存在する.

$$H^*(X_{n,k}) = \Lambda(x_1, \dots, x_k), \quad \deg x_1 = 2n-1, x_{i+1} = \mathcal{P}^1 x_i (1 \leq i \leq k-1)$$

ここで  $\mathcal{P}^1$  は reduced power operation である.

一方 Theriault は次を示した.

定理 2 ([2]) 階数が  $p-3$  以下の  $\text{mod } p$  外積ホップ空間はホモトピー結合的である.

上の 2 つの定理より,  $k = p-2$  のとき  $X_{n,k}$  がホモトピー結合的であるかどうかの問題になる.

$p = 3$  のときは  $k = 1$  であり,  $X_{n,1}$  は素数 3 で局所化された球面  $S_{(3)}^{2n-1}$  と同値になる.  $S_{(3)}^{2n-1}$  がホモトピー結合的である必要十分条件は  $n = 2$  であることが知られている.

ここでは  $p = 5$  のときを考える.

主定理  $p = 5$  のとき,  $n \equiv 3, 4 \pmod{5}$  で  $n \neq 3, 4, 8, 14, 19, 23, 24, 28$  であればホップ空間  $X_{n,3}$  はホモトピー結合的にならない.

証明には次の定理を用いる.

定理 3  $X$  をホモトピー結合的な  $\text{mod } 5$  外積ホップ空間とする.  $n$  を  $n > 5$  で  $n \equiv 3, 4 \pmod{5}$  を満たす整数とし,  $H^*(X)$  は  $10n + 13$  次元の生成元をもたないとする. このとき,  $m = 10n - 26, 10n - 3, 10n + 12$  に対して,  $H^m(X \wedge X) = 0, m = 10n - 27, 10n - 4$  に対して,  $H^m(X \wedge X \wedge X) = 0$  を満たすなら, 任意の  $a_3$  類  $x \in H^{2n-1}(X)$  に対して,  $\mathcal{P}^2 x \in \text{Im } \mathcal{P}^3$  が成り立つ.

定理 3 を  $H^*(X_{n,3}) = \Lambda(x_1, x_2, x_3)$  における  $x_1$  に対して用いることにより主定理を示すことができる.

## 参考文献

[1] F. R. Cohen and J. A. Neisendorfer, A construction of  $p$ -local  $H$ -spaces, Lecture Notes in Math. 1051(1984), 351-359.

[2] S. D. Theriault, The  $H$ -structure of low-rank torsion free  $H$ -spaces, Quart. J. Math. 56(2005), 403-415.

# 層状オキシサルファイド CeOCuS の合成と電気抵抗による物性評価

理学専攻 理学コース 物理科学分野

大谷 光明

二次元面を有する層状化合物は、強相関電子系として数多くの研究が成されている。特に近年では鉄を含んだ LaOFeP に超伝導が発見され、世界中で注目を浴びた<sup>[1]</sup>。この物質の結晶構造は LaOAgS 型として知られている。同様の結晶構造を示す ROCuS (R はランタノイド) は R = Ce を除いて半導体的性質を示す<sup>[2]</sup>。一方、高野らは R = Ce である CeOCuS を合成し、金属的性質を示すと報告している<sup>[3]</sup>。CeOCuS の単位胞体積は ROCuS の系統的变化に従わない<sup>[4]</sup>ことから、Ce が混合原子価状態にあるのではないかと推測が成されている。さらに CeOCuS は低温で大きな電子比熱  $\gamma = 324 \text{ mJ/mol}\cdot\text{K}^2$  をもつ<sup>[3]</sup>ため、価数揺動に関係した「重い電子系」として捉えられるかもしれない。しかし高野らが作成した CeOCuS には相当量の不純物が含まれ、それがこの系の物性探索を難しくしている。単相試料の作成がまたれる。

我々は CeO<sub>2</sub>, CuO, S を出発物質として Ti ゲッター法を用いることにより、CeOCuS の合成を試みた。その結果、単相試料を得ることに成功した。得られた試料は半導体的性質を示す (Fig.1)。単位胞体積が ROCuS にみられる系統的变化に従うことから Ce は3価にとどまっていると思われる。高野らの報告との違いは、彼らの試料では不純物により組成にわずかな違いが生じた為ではないかと考えられる。そこで次に、Ce を意図的に欠損させた試料を作成し、物性がどう変化するか確認した。Ce の仕込み量を減らした試料においては、合成の結果少なからず CeO<sub>2</sub> が不純物として検出されたものの、Ce の仕込み量が減少するにつれて電気抵抗は小さくなっていった。Ce の欠損に伴い Ce が混合原子価状態になり、それが金属的電気伝導を担っていることを示しているだろう。

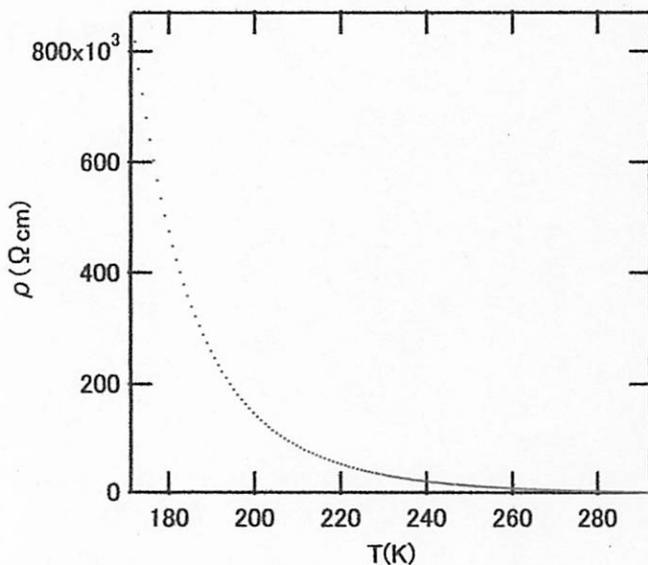


Fig.1 単相 CeOCuS 試料の電気抵抗-温度特性

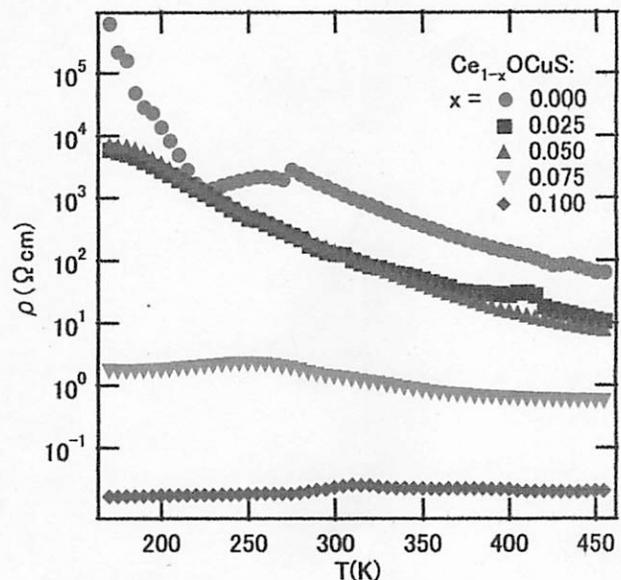


Fig.2 Ce の仕込み量による電気抵抗の変化

Ref.

[1] Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. 128(2006) 10012-10013.

[2] H. Nakao et al., J Alloys Compd. 408-412(2006)104-106.

[3] Y. Takano et al., J Alloys Compd. 408-412(2006)101-103.

[4] D.O. Charkin et al., Russ. J. Inorg. Chem. 44(1993)833.

# Morel-Anderson 模型と電子ガス超伝導への応用

理学コース 物理科学分野

嘉藤 博志

BCS 理論によると,有限温度 $\beta$ における超伝導状態のギャップ関数 $\Delta_k$ は次の方程式の解である.

$$\Delta_k = - \int d\xi_{k'} n(|\xi_{k'}|) N(0) V_{k,k'} \frac{\Delta_{k'}}{2E_{k'}} \tanh \frac{\beta E_{k'}}{2}$$

ここで $n(|\xi_{k'}|)$ は,基底状態でのスピン当たりのフェルミ面での状態密度 $N(0)$ で規格化された,状態密度, $V_{k,k'}$ は何らかの方法で与えられた対ポテンシャルである. Morel-Anderson 模型では

$$N(0)V_{k,k'} = \begin{cases} \nu - \lambda & |\xi_k|, |\xi_{k'}| < k_B \theta_D & (\text{領域 I}) \\ \nu & |\xi_k|, |\xi_{k'}| < \mu' \text{で上記を除く} & (\text{領域 II}) \\ 0 & \text{その他} & (\text{領域 III}) \end{cases}$$

と仮定している.これはBCSモデルでは無視された,クーロン力による斥力を考慮したことによるものである.

本研究では斥力下 ( $\nu - \lambda > 0$ ) においても超伝導状態が発現することを確認し,その超伝導の性質を調べ,電子ガスへの応用の可能性を探ることを目的としている.

領域 I, 領域 II におけるギャップをそれぞれ $\Delta_1, \Delta_2$ とすると,次の連立方程式が導かれる.

$$\begin{cases} \Delta_1 = (\lambda - \nu)\Delta_1 \int_I d|\xi_{k'}| \frac{n(|\xi_{k'}|)}{2E_{k'}} \tanh \frac{\beta E_{k'}}{2} - \nu\Delta_2 \int_{II} d|\xi_{k'}| \frac{n(|\xi_{k'}|)}{2E_{k'}} \tanh \frac{\beta E_{k'}}{2} \\ \Delta_2 = -\nu\Delta_1 \int_I d|\xi_{k'}| \frac{n(|\xi_{k'}|)}{2E_{k'}} \tanh \frac{\beta E_{k'}}{2} - \nu\Delta_2 \int_{II} d|\xi_{k'}| \frac{n(|\xi_{k'}|)}{2E_{k'}} \tanh \frac{\beta E_{k'}}{2} \end{cases}$$

上記の連立ギャップ方程式を $\Delta_1, \Delta_2$ について数値的に解いた (図 1). また,超伝導体と常伝導体間のトンネル電流 $I$ と微分伝導度 $dI/dV$ について数値計算を行った結果が図 2 である.図 1 では,ギャップ $\Delta_1$ に対してギャップ $\Delta_2$ が負になっているが,このことが電子間距離 $r \approx 0$ でのクーバー対の確率振幅の減少をもたらす.また,図 2 では,Morel-Anderson 模型の特徴として,微分伝導度に第 2 のピークが出た.さらに,このモデルを電子ガスに応用することを試みる.

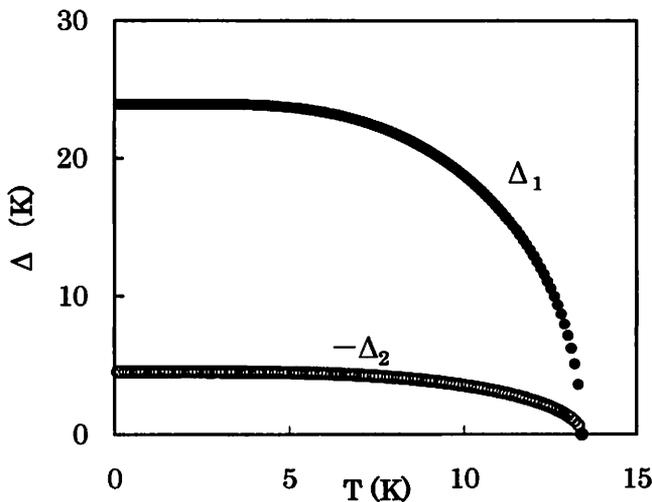


図 1

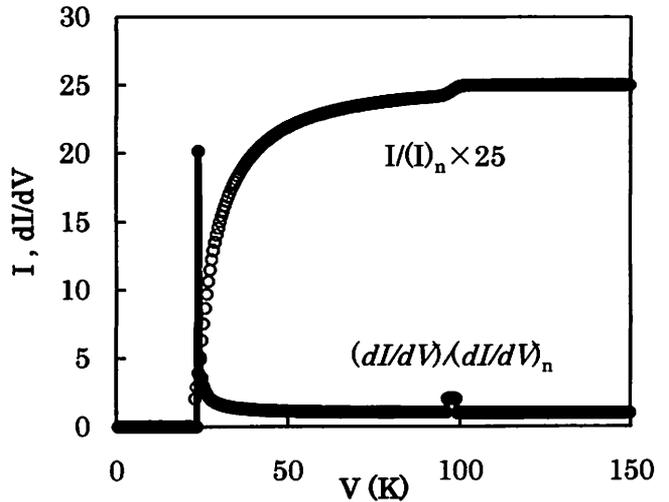


図 2

ビーム・プラズマ系におけるワイベル不安定性

理学コース 物理科学分野

久保 圭 児

ワイベル不安定性は、プラズマ中の粒子速度分布の非等方性に起因する不安定性の一種で、荷電粒子の速度分布に非等方性がある場合、磁場の揺らぎにより荷電粒子の軌道が曲げられることによって生じた電流が、磁場揺らぎを増幅することによって成長するというものである。その成長にともなって、電流分布がフィラメント状になり、電流フィラメント同士が合体して、より大きな構造を作ることになる。この機構は宇宙線加速の現場と考えられている超新星残骸中の乱れた磁場を作り出している可能性があるといわれている。それ以外にも高エネルギー重イオン衝突実験におけるクォーク・グルーオンプラズマの熱化のメカニズムとして有力視されていたり、相対論的電子ビームを無衝突プラズマに当てるといふ粒子シミュレーションでもワイベル不安定性が生じることがわかっている[1]。

ここではブラゾフ方程式を用いた弱結合極限における運動論的解析[2]により分散関係を求め、磁場揺らぎが増大するモードの解からワイベル不安定性の発生条件を見定める。具体的には、電子ビーム・プラズマ系を想定し、ワイベル不安定性が生じるかを考える。

マクスウェル分布に分布したプラズマにビームを摂動した状況を設定する。すると磁場の揺らぎに対する分散関係を運動論的に解析することにより図1のような結果が得られ、不安定性が起こる条件である  $\omega^2 < 0$  の波数領域が存在した。ただし、モードの波数でみると、デバイ波数より十分小さい領域でのみ不安定性が生じることが明らかになった。

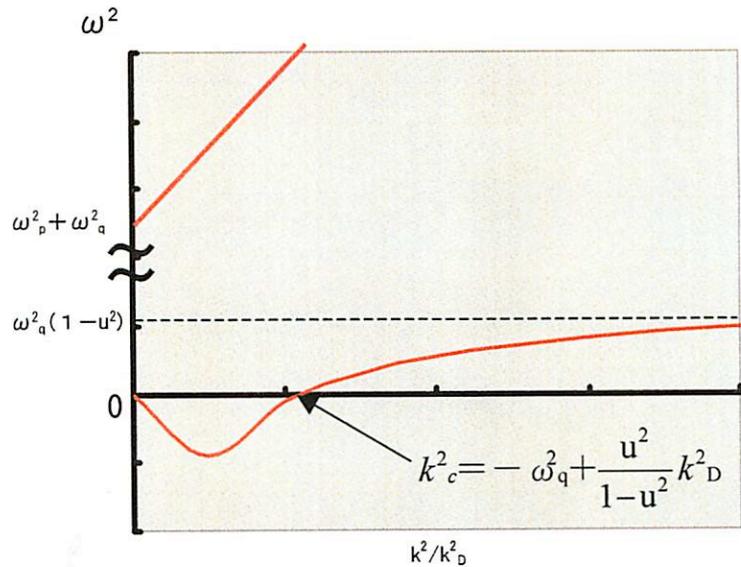


図1.磁場の揺らぎに対する分散関係

$\omega_p$ : プラズマのプラズマ振動数     $k_D$ : プラズマのデバイ波数  
 $\omega_q$ : ビームのプラズマ振動数     $u$ : ビームの速度

参考文献

- [1] A. Karmakar et al., Phys. Rev. Lett. 101, 255001 (2008).
- [2] S. Mrowczynski, Acta Phys. Pol. B 39, 941 (2008).

## 熱いパスタ原子核の構造

理学コース

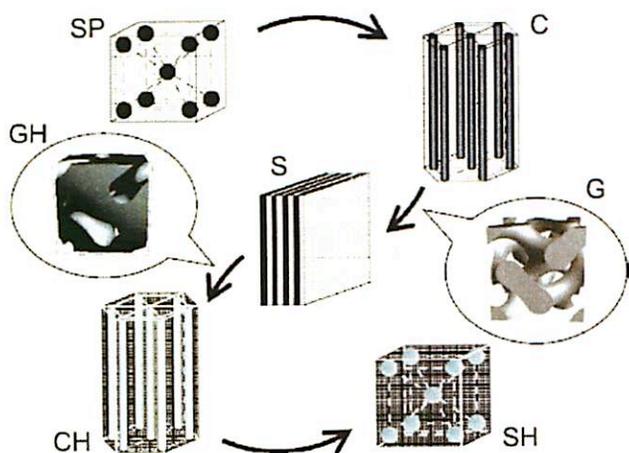
物理科学分野

古 檜 山 大 悟

恒星の一生の最後にはいくつかの種類がある。それらは白色矮星や中性子星、ブラックホールである。一般的にどの姿となって一生を終えるかは、恒星の質量によって決まる。この論文では太陽と比較して大きな質量を持つ恒星が一生の最後に起こす超新星爆発時の超新星物質と、超新星の残骸として出来る中性子星中の中性子星物質について研究した。

標準核密度よりも低い密度領域において、有限温度下の中性子星物質もしくは超新星物質の様子を、熱統計力学に基づいて調べた。中性子星あるいは超新星の内部には核物質の液相と気相が交じり合った層があると考えられている[1,2]。ここで液相は原子核部分、気相は薄い中性子ガス部分に相当する。その層の深部では原子核がクーロンエネルギーと表面エネルギーの均衡により球形を保てず、液相の割合が大きくなるにつれ、図のように棒状や板状になるとされる。パスタ原子核と一部の物理学者が呼ぶ原子核である。有限温度下では球形でない原子核が主となる密度であっても球形の原子核が混ざる可能性がある。この論文では、その球形の原子核が混ざる可能性を検証し、その現象への影響を議論する。

まず有限温度平衡状態において、原子核の分布関数を計算した。その際、原子核のエネルギーを、液滴モデルを用いて求めた。また、いろいろな形状・サイズの原子核が混ざり合うことによるエントロピーを考慮に入れた。得られた分布関数から、球形核がパスタ核に有意に混ざる温度を推定した。超新星物質中ではこの温度のスケールは、液相と気相の区別が消失する臨界温度より高いため、超新星物質内部のパスタ原子核に球形核が混ざることは、ほぼないことが分かった。



基底状態のパスタ原子核のイメージ図：

黒い部分が液相で白い部分が気相。

液相の割合が大きくなるにつれ

SP(球) → C(棒) → (G(gyroid)) → S(板) →

(GH(gyroid 孔)) → CH(棒孔) → SH(バブル)

となると考えられる[3]。

References:

[1]D.G.Ravenhall,C.J.Pethick,J.R.Wilson,Phys.Rev.Lett.50(1983)2066.

[2]M.Hashimoto,H.Seki,M.Yamada,Prog.Theor.Phys.71(1984)320.

[3]K.Nakazato,K.Iida,K.Oyamatsu, arXiv:1011.3866.

# 有限温度格子 QCD におけるアーベリアン射影のゲージ依存性

理学コース 物理科学分野

関 口 昂 臣

クォーク間に働く相互作用である強い相互作用を記述する QCD は、高エネルギー領域（近距離）に行くほど、結合定数が小さくなり自由粒子のように振る舞う漸近的自由性をもつ。しかし、低エネルギー領域（遠距離）に行くほど、結合定数は大きくなってしまふ。結合定数が大きくなると、摂動論による解析が困難で、低エネルギー領域の解析には非摂動的な手法が必要になる。非摂動的な手法として、時空間を離散的な格子として捉え、格子上に QCD を定式化し、モンテカルロ法を使つての数値シミュレーションが用いられる。

低エネルギー領域での QCD において、未解決の重要な問題として『クォークの閉じ込め』問題がある。実際に、実験でクォークと単独で観測しようとする、クォーク 3 体または、クォークと反クォークというように、カラー電荷のないクォークの複合粒子であるハドロンで観測されている。このクォークの閉じ込めの機構を解明するのに有効なモデルとして、monopole 凝縮による双対マイスナー効果がクォークの閉じ込めを引き起こす双対超伝導描像がある。クォークの閉じ込めの本質が monopole 凝縮だとすると、非閉じ込め相転移の前後で、monopole の様子が著しく変化して、その変化が相転移において、閉じ込めに関する物理量を変化させているようになっていると期待されている。ただし、QCD には monopole は定義されておらず、'tHooft が QCD にアーベリアン射影で抜き出した abelian 成分から monopole の自由度が導かれることを示した。

クォークの閉じ込めとはクォーク間の距離を離れた時、線形にポテンシャルが増加する現象と言い換えることができる。その線形ポテンシャルの係数である string tension は閉じ込めに関して最も重要な量である。これまでに、非摂動的な量である string tension などの閉じ込めに関する物理量が、monopole の寄与だけでほぼ再現される monopole dominance が確認され、双対超伝導描像を支持する結果が得られている。string tension は温度を上げていくと、ある温度で 0 になることが確認されているが、高温相において全ての非摂動的な量が 0 になるという訳ではないことも確認されている [1]。高温相において 0 にならない非摂動的な量として spatial string tension がある。また、双対超伝導描像を支持する結果や spatial string tension に対する abelian · monopole dominance は、MA ゲージなどの特定のゲージで得られた結果で、ゲージ依存性の問題が残っている。MA ゲージなどで得られた結果が、物理的なものを意味するのであれば、ゲージに依存しないはずである。ゲージ固定をしない場合でのシミュレーション結果も、MA ゲージでの結果と同様のものを示すはずである。

ゲージ固定をしない場合での結果は、数値結果にノイズが多く、得られた結果が物理的なものか判断するのが困難である。そこでノイズリダクション法として、ランダムゲージ変換を採用して、有限温度における spatial string tension を計算した。spatial string tension が abelian からの寄与によって導かれる abelian dominance を観測することができた。monopole dominance を見るには、未だにノイズが多く、更なるノイズリダクション法が必要である。

## 参考文献

- [1] S,Ejiri et al, Phys. Lett.B343(1995)304

# 空間反転対称性の欠如した重い電子系圧力誘起超伝導体 CeCoGe<sub>3</sub> の圧力温度相図

理学コース 物理科学分野

溝尾 将一

正方晶 BaNiSn<sub>3</sub>型 CeCoGe<sub>3</sub>は c 軸方向で空間反転対称性が欠如しており、圧力下において反強磁性秩序が消失する量子臨界点(P<sub>c</sub>~5.5 GPa)近傍で特異な超伝導が出現することが知られている[1]。また常圧においても逐次転移を起こし、複数のメタ磁性転移が確認されるなど複雑な磁気相図をもつことが知られている[2]。単結晶のマクロ測定からは3つの反強磁性転移、T<sub>N1</sub>=21 K, T<sub>N2</sub>=12 K, T<sub>N3</sub>=8 Kが存在すると報告されている[2]。しかし多結晶試料での研究からは21 Kと18 Kのみに転移が存在するという報告や[3], 21 Kの反強磁性転移の直後に20 Kでフェリ磁性的な転移が存在するという報告が存在する[4]。また、近年行われたCo-NQRの結果から、20 Kと12 Kで磁気構造の変調がありそのどちらも反強磁性転移であることが分かっている[5]。単結晶の高圧下の比熱測定から作成された圧力温度相図(P-T相図)から、常圧において4つの磁気相が存在し、量子臨界点までに全部で6つの磁気相が存在することが明らかになっている[6]。しかしこの相図では圧力下での磁気的な情報が含まれておらず、1 GPa以下の低圧部があまり詳細ではなかったため常圧と高圧の転移点の繋がりが曖昧だった。本研究の目的は、CeCoGe<sub>3</sub>の詳細なP-T相図を作成することで、これらの報告されている常圧における複数の転移点に加圧とともにどのように変化するかを明らかにすることである。

CeCoGe<sub>3</sub>の多結晶試料を用いた圧力下の磁化、ホール磁化、電気抵抗測定を行い、それらの結果を用いて作成したP-T相図をFig. 1に示す。それぞれの実験で得られた転移点とともに、文献からの引用(比熱○, 電気抵抗□)を示している。これらの転移点は磁化やホール磁化での明確な異常をそれぞれT<sub>M</sub>(◆)とT<sub>H</sub>(▲)とし、電気抵抗率ρ(T)の急激に減少し始める点と電気抵抗率の微分dρ(T)/dTのpeakをT<sub>R</sub>(■)とした。相図から常圧では5つの相があり、磁気測定で見られる異常は1 GPaで集束するように接近していき、さらに高圧になると1.2 GPa付近で再び転移点が多数現れている。これらの転移点は文献からの比熱測定の結果とほぼ矛盾していない。0.5 GPa付近から低温側に現れる異常は、圧力下でのCo-NQRの結果から、常圧と0.7 GPaでの磁気構造に明確な違いがあることから確かに存在するものと考えられる[5]。これらのことから2 GPaまでに少なくとも8つの相が存在すると考えられる。さらに化学圧力と物理圧力の比較として、CeCoGe<sub>3-x</sub>Si<sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 1.5)の電気抵抗と交流磁化率測定の結果からx-T相図を作成した。相図はCeCoGe<sub>3</sub>のP-T相図と類似しており、化学圧力は物理圧力とほぼ同等の効果を与えていると考えられることが分かった。

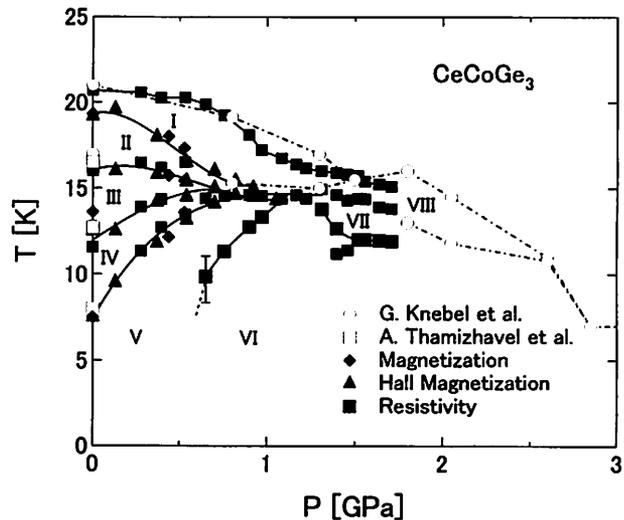


Fig.1 CeCoGe<sub>3</sub>のP-T相図

## References

- [1] R. Settai *et al.*: J. Magn. Magn. Mat. 310 (2007) 844. [2] A. Thamizhavel *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 74 (2005) 1858. [3] V. K. Pecharsky *et al.*: Phys. Rev. B. 47 (1998) 11839. [4] D. Eom *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 67 (1998) 2495. [5] M. Matsumura *et al.*: SCES (2010) proceedings. [6] G. Knebel *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 074714.

# 籠状物質充填スクッテルダイトの核磁気共鳴

総合人間自然科学研究科

理学専攻 理学コース 物理科学分野

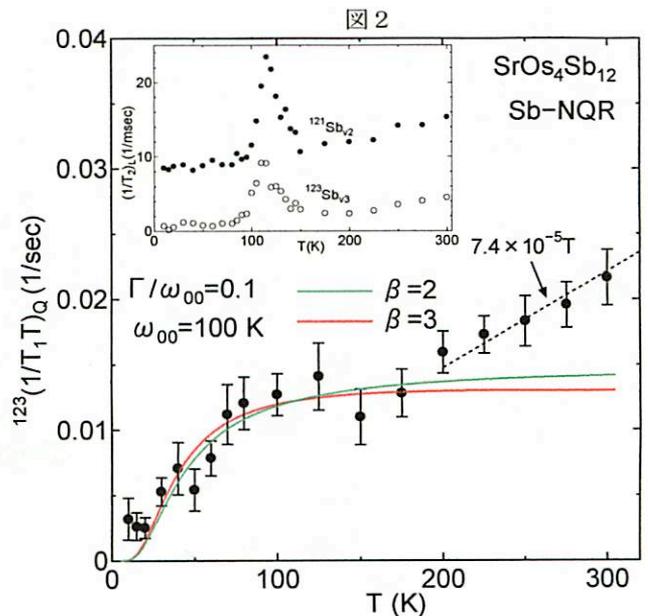
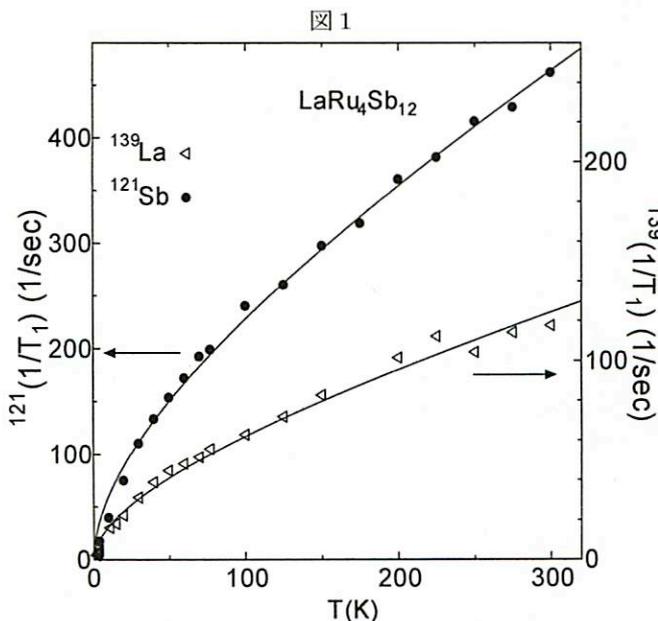
山元 祐弥

充填スクッテルダイト化合物  $RT_4X_{12}$  (R: 希土類、アルカリ土類、アルカリ金属, T: 遷移金属, X: P, As, Sb) は X の作る 20 面体の籠に充填される R 原子の種類に応じて超伝導から強磁性まで様々な電子物性を示すことで注目されている。特に籠の中の充填イオンが示す局所大振幅非線形振動 (ラットリング) が及ぼす、基礎電子物性への関与や熱電変換材料の性能指数増大への関与が注目されている。

本研究は非磁性イオン充填スクッテルダイト  $LaRu_4Sb_{12}$  と  $SrOs_4Sb_{12}$  の二つを取り上げ、核四重極共鳴測定 (Sb-NQR) / 核磁気共鳴 (La-NMR) を用いこの物質の電子状態を微視的に調べた。 $LaRu_4Sb_{12}$  は既に磁化率、比熱の結果が報告されている。同類の Ru4d 系 (Sr, Ba)  $Ru_4Sb_{12}$  と比べると、磁化率は同様に反磁性 ( $\sim 2 \times 10^{-4}$  (emu/mol)) であるが、比熱が 3~4 倍と大きく  $\gamma \sim 40$  mJ/molK<sup>2</sup> である。またこの物質は  $T_c \sim 3.58$  K で超伝導を示すことも知られている<sup>[1][2]</sup>。一方、 $SrOs_4Sb_{12}$  は籠サイズが大きい系として知られている。両者の系において、La-NMR / Sb-NQR により電子物性、超伝導、及びラットリング運動に伴う電荷揺らぎの有無、を調べた。Sb には <sup>121</sup>Sb と <sup>123</sup>Sb の同位体があり核スピン-格子緩和率  $1/T_1$  の比から磁気揺らぎ、電気揺らぎの支配を調べることができる (同位体効果)。

$LaRu_4Sb_{12}$  ではラットリングの寄与は小さく、磁気緩和が支配的である。La サイトでも Sb サイトでも  $1/T_1$  の温度依存性が図 1 のように  $a\sqrt{T} + bT$  のフィット式によく一致していることから、 $LaRu_4Sb_{12}$  は反強磁性に近い物質であることが解った。また、大きな反強磁性揺らぎにも関わらず超伝導は BCS 的であることが解った。

$SrOs_4Sb_{12}$  は Sb- $1/T_1$  の同位体効果から電荷揺らぎの寄与が大きいことが解った。電荷揺らぎの緩和成分 <sup>123</sup>( $1/T_1T$ )<sub>q</sub> の温度依存性は  $\sim 180$  K 以下では図 2 の実線で示すようにラットリングモデルによる理論曲線と一致した振る舞いを示すが、200 K 以上ではこれから逸れている。これは通常フォノンによる緩和が支配的になるためと考えられる。さらに、この系では核スピン-スピン緩和率  $1/T_2$  のローレンツ成分 ( $1/T_2$ )<sub>L</sub> が  $T^* \sim 110$  K 付近で発散的振る舞いを示すことが解った (挿入図)。 $T^*$  付近では磁気緩和 ( $1/T_1$ )<sub>mag</sub> に特に異常はない。従って、この発散は量子化軸方向の超低周波 ( $\sim 10^{-5}$  sec) 揺らぎをもたらす何らかの運動の運動尖鋭化に起因していると考えられる。



[1] T. Takabatake et al., Physica B 383 (2006) 93-102

[2] N. Takeda and M. Ishikawa, J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 868.

## ハゼ亜目魚類 2 科 8 属 8 種における側線系とその神経支配

理学コース

生物科学分野

朝岡 隆

ハゼ亜目魚類 2 科 8 属 8 種において側線系とその神経支配を明らかにした。 躯幹部の側線系は 3 本の連続的なシリーズ（体側背方の *ld*、中央の *lm* および腹方の *lv*）から構成される。 神経支配の様式から、*ld* シリーズと *lv* シリーズは *lm* シリーズから移動した感丘列と新たに追加された感丘列から形成されると判断された。 ウロハゼを除く底生性のハゼ亜目魚類ではよく発達する *lm* シリーズに比べ、*ld* シリーズと *lv* シリーズは未発達である。 漂泳性のキヌバリでは両シリーズがよく発達していた。 キヌバリは水柱に浮遊し、群れを形成するので、背方と腹方に発達した感丘列は、体の上方と下方からの刺激を受容するのに機能的と考えられた。 キヌバリでは、体側中央を走る側方神経枝から発する 2 本の長大な神経枝が *ld* シリーズと *lv* シリーズのそれぞれを支配していた。 ウロハゼでは、ほぼすべての体側鱗に感丘列があった。 これは本種が夜行性であることと関係し、側線系で視覚を補っている可能性があると考えられた。 頭部と躯幹部における感丘列の相同性を神経支配の様式から考察した。 その結果、過去に位置によって定義されてきた感丘列はおおむね相同性を反映していると判断された。 主鰓蓋骨上の感丘列が本亜目（ないしはその近縁群）の共有特化の有力な候補と考えられた。

## ソコダラ科トウジン属魚類の比較形態および系統学的研究

理学コース 生物科学分野

大谷 正成

トウジン属 (*Coelorinchus*) 魚類は、タラ目ソコダラ科ソコダラ亜科に分類され、本目では最大のグループで、現在世界では 100 種以上が、日本では 23 種が知られる。本属は眼下隆起縁と鼻骨がよく発達する、鰓条骨数が 6、第 1 鰓弓外側に鰓耙がない、肛門が臀鰭基部直前にある、肛門前方に発光器があるなどの特徴をもつ。本属とその周辺の系統樹は、1970 年に日本産の標本の骨格系の形質をもとに提案され、本属は発光器の長さなどで 4 亜科に分類された。しかし、その後分岐学的手法に基づく系統解析は行なわれていない。1990 年に本属内の全種 (76 種) は、発光器の長さによりグループ I から IV へ便宜的に分類された。また、最近では本属内の分子系統仮説がいくつか提案されたが、形態形質に基づく 4 グループの再検討は行われていない。本研究では、日本産の本属 11 種の形態形質を比較し、分岐学的解析に基づく系統類縁関係の推定を目的とした。さらに、既知の分子系統仮説と比較し、浅海域に適応した種の形態形質の進化を考察した。

本研究の解析の結果、系統推定に有効と考えられる 21 個の形態形質から本属 11 種の分岐仮説を得た (最節約樹 6, 樹長 35, CI 値 0.6)。11 種は 3 個の共有派生形質をもつ単系統群で、2 つのクレイドに分岐した。7 種を含むクレイド B は第 5 眼下骨が細長く、長方形など 2 個の、4 種を含むクレイド C は腰帯後背部が直線的など 2 個の共有派生形質によりそれぞれ支持される。クレイド C は、グループ IV (発光器が著しく長い) の種のみで構成され、本属内では浅海域に適応したグループである。しかし、グループ IV のモヨウヒゲはクレイド B 内に位置し、解析に含めたグループ IV の 5 種は単系統群とはならなかった。この結果は最近の分子系統仮説を支持する。また、グループ III (発光器が肛門周辺から腹鰭基底に達する) のキュウシュウヒゲとムグラヒゲは、クレイド B の末端に位置し、角舌骨と上舌骨が内側表面で縫合するなど 3 個の共有派生形質に支持される姉妹群となった。さらに、2 種は体色などの外部形態や生息水深帯などから、本属内においてグループ IV と同様に、浅海域に適応したグループである。本分岐仮説では、舌弓内側の骨要素の縫合はこの 2 グループのみに見られる平行現象となった。また、これら 2 グループは、異なる系統からそれぞれ浅海域に適応進化した可能性が高い。

## Laboratory scale studies on mass production of *Ulva crinita* (Roth) Nees

理学コース 生物科学分野 Daniela Miwa Kikuchi

Macroalgae biomass production has been suggested as an option to contribute to the increasing market demand for food, chemicals and fuels. Biomass production is normally associated with finding a fast growing strain and then establishing the optimum condition for its growth. Studies showed that *Ulva crinita* cultured in optimum environmental conditions can double its growth rate. However, experiments in relation to the optimization of the growth medium and CO<sub>2</sub> supplementation, which are considered fundamental to improve production have not been conducted.

Enriched Seawater (ES) has been widely employed in seaweed cultures. It was formulated according to the general necessities of macroalgae, including components such as buffer TRIS, nitrate, phosphate composts and trace metals. Many of these could be unnecessary or in inappropriate concentrations for *U. crinita* optimum growth. Thus experiments for the formulation of a suitable medium for *U. crinita* were carried out. *Ulva crinita* cultured in seawater enriched with ES without TRIS and most of the metals led to a similar growth rate than normal ES. However, when this species was cultured without the addition of iron to the seawater, a negative effect on growth was observed. Hence, this study revealed the unnecessary addition of buffer and trace metals, except iron, to the seawater for *U. crinita* growth. This resulting medium is suitable to promote *Ulva crinita* growth, allowing its use as a standard medium for high production purposes.

Using the formulated medium, a free-floating form of *Ulva crinita* was held in different enriched CO<sub>2</sub> seawater conditions. *Ulva crinita* was kept in high densities under a light regime of L:D 12:12 and exposed to differing concentrations and periods of CO<sub>2</sub> enrichment. When CO<sub>2</sub> was added during the light period only, maximum growth rates were seen in the two highest CO<sub>2</sub> concentrations (3.7-3.9 & 7.0-7.4 mmol/kg) compared to control (unenriched, CO<sub>2</sub> 1.9-2.0 mmol/kg). However, when the maximum CO<sub>2</sub> enrichment concentration was applied for the full 24 hours of L:D 12:12, its growth rate was inferior to the control. This study demonstrated that higher productivity of *U. crinita* was obtained when the two highest CO<sub>2</sub> concentrations tested were provided only during the photosynthetic period.

Thus, this study conclude that *U. crinita* cultured in a suitable medium and in high CO<sub>2</sub> seawater concentrations during the light period can maintain a high productivity of 100%/day even when the algal density is high.

# インド洋・西部太平洋産ハダカイワシ属魚類 Ant グループの分類学的研究

理学コース 生物科学分野 清沢遼太郎

ハダカイワシ科ハダカイワシ属 (Genus *Diaphus* Eigenmann and Eigenmann, 1890) は3大洋に分布する中深層性魚類で、世界に約80種、日本近海から33種が知られる。本属は、一対以上のよく発達した頭部発光器をもつ、頭部発光器と眼の間に黒色の帯状組織がある、尾柄上部発光腺 (SUGL) および尾柄下部発光腺 (INGL) がない、胸鰭上発光器 (PLO) に通常発光鱗があることで特徴づけられる。また、頭部発光器の有無や配置により5つのグループに分けられ、その1つが眼前上部発光器 (Ant) をもつ Ant グループである。Ant グループは、約24種が知られ、インド西部太平洋に分布する。日本産本属魚類の分類学的研究は、1978年以降詳しく行われていない。また、九州-パラオ海嶺産の Ant グループには1未記載種が報告され、土佐湾でも同種が多数採集された。本研究では本属 Ant グループの分類学的再検討を行うことを目的とした。

本研究の結果、日本近海ではスイトウハダカ *D. gigas*, クマドリハダカ *D. fragilis*, ナミダハダカ *D. knappi*, ダイコクハダカ *D. metopoclampus*, シロハナハダカ *D. perspicillatus*, チギレハダカ *D. phillipsi*, サガミハダカ *D. sagamiensis*, そしてハダカイワシ *D. watasei* の8種と1未記載種が確認され、他の海域からは3未記載種が確認された。*D. sp. 1* は九州-パラオ海嶺と土佐湾、茨城沖、フィリピン、オーストラリア北東部と西部、アフリカ東岸の水深174-633 m から得られ、*D. watasei* に酷似するが、眼径や上顎長など6形態により区別できる。*D. sp. 2* はオーストラリア東部のタスマン海の水深362m から得られ、*D. watasei* と *D. sp. 1*, *D. kapalae* に類似するが、頭部発光器と体側発光器の形態と配置により区別できる。*D. sp. 3* はオーストラリア北西部から得られ、*D. watasei* および *D. burtoni* に類似するが、背鰭軟条数と尾鰭後端が黒色であることなど5形態で区別できる。*D. sp. 4* はオーストラリア南部の水深650m から得られ、*D. watasei* に類似するが、鰓耙数と眼径により区別できる。形態的に類似する *D. gigas* と *D. perspicillatus* の新たな分類形質を発見した。

## 河川における水生植物群落の成立と動態に影響する環境要因

理学コース 生物科学分野

山ノ内 崇志

水生植物は河川生態系の重要な構成要素であり、水路の機能維持や絶滅危惧種の保全、外来種の管理などに必要な情報として、水生植物の分布と環境要因との関連性についての知見が求められている。河川における水生植物の分布は、様々な要因によって影響を受けていることが指摘されているが、群落の成立を決定する条件やメカニズムについてはほとんどわかっていない。そこで、水生植物の分布と群落の成立を決定する要因について明らかにすることを目的として、以下の5つのテーマで研究を行い、これらの結果から総合的な考察を行った。1) 高知市春野町における特定外来種ミズヒマワリの分布状況、2) 高知市前田川における水生植物の個体群動態、3) 四万十川支流中筋川におけるオオカナダモ群落とササバモ群落の成立要因、4) 高知市神田川における水質および河川改修履歴の観点から見たコウホネ属の分布、5) 高知県中部の複数河川における水生植物の分布と環境要因との関連性。これらの研究の結果、水生植物の分布を決定している重要な環境要因として、地形などに影響される日照条件、河川地形とそれに規定される増水攪乱の頻度および強度、pH および CO<sub>2</sub> 過飽和の湧水に規定される光合成炭素源の有効性、流速が速い条件下での特定の生育型の排除や植被率拡大の制限などが挙げられた。しかし、調査範囲を複数河川に広げると、多くの種で出現する環境条件の範囲が重複した。これを反映して、群落の種組成には様々なパターンが見られ、種組成から群落を分類することが困難だった。一方で、2) の個体群動態の調査結果からは、分類群によって増水攪乱の影響やその後の回復速度が異なること、越冬形態に基づく生育初期段階の個体数や初期成長の速度、気候や種間競争の影響から、各種が異なった年較差を示し、年によって群落組成が変わる可能性が示唆された。さらに、調査地の河川改修履歴も、一部の種の分布に影響を与えていると考えられた。これらの結果は、群落の成立が環境要因のみによって決定されるのではなく、歴史的・時間的な影響が大きいことを示唆すると考えられた。

一連の研究で得られた知見から、Biggs (1996) の水力学的ハビタット概念モデルを基本として、水系内の種の在不在、種固有の生態的特性、および種間競争の情報を考慮した群落成立メカニズムに関する仮説の構築を試みた。水力学的ハビタット概念モデルでは、水生植物群落の成立と現存量は、主としてバイオマスの増加と減少のバランスによって説明される。バイオマスの増加は、日照条件、光合成炭素源の有効性のほか、栄養塩や温度によって規定され、バイオマスの減少は、増水や人間活動、あるいは植食者による攪乱によって規定される。水生植物種にとっての各要因の重要性は、それぞれの種がもつ生態的な特性によって異なると考えられる。本研究ではこれらの要因に加え、水生植物にとって、河川は孤立した環境であるために、水系間での散布体の移動が起きにくく、しばしば水系ごとに出現種が限られること、そのため生態的解放が起こり、種が生育可能な環境条件が広がる可能性を指摘した。結論として、種の分布は環境条件や競争によって規定されること、一方で、生態的解放により分布可能な条件は拡大すること、また、頻繁な攪乱により様々な遷移段階の群落が多数出現することが、河川における多様な水生植物群落を生み出す原因であると考えられた。

二枚貝 *Amusiopecten praesignis* の酸素同位体比：  
鮮新世最末期の氷期-間氷期サイクルと季節性との関連

理学コース 地球科学分野

松原 啓

高知県東部室戸半島西岸に分布する鮮新-更新統唐の浜層群穴内層で以前から知られていた海進海退サイクル(近藤, 2005 など)の成因は, 陸上掘削コア(ANA1, ANA2)中の底生有孔虫の酸素同位体比測定によって, 氷河性海水準変動であったことが明らかにされている(北ほか, 2009). 本研究は, これまであまり情報が得られていない, これらの氷期-間氷期サイクルと季節性との関連性を, 同位体比変質リスクの少ない方解石の殻を持ち, 成長速度が速い二枚貝 *Amusiopecten praesignis*(モミジツキヒガイ)の酸素同位体比測定によって明らかにすることを目的として行った.

*Amusiopecten praesignis*の標本は, 高知県安田町唐の浜農道のサイクル 12 下部の炭質物薄層を鍵層とし, これより上位 5mから下位 1.5mの計 6.5m間で, 氷期(MIS G2), および間氷期(MIS G7)にそれぞれ相当する層準より1個体ずつ, その中間より2個体を採取した. 殻表の付着物を除去し洗浄, 乾燥の後ハンディルーターで殻頂部から腹縁部にかけて成長輪に沿うように, 各個体 30 箇所ずつ削り粉末試料とした. 測定は高知大学海洋コア総合研究センターの安定同位体分析システムMAT253 で行った.

その結果, 間氷期の *Amusiopecten praesignis*の  $\delta^{18}\text{O}$ 値は, 殻頂部から 5.5cmで最低値  $-1.75\text{‰}$ , 7.2cmで最高値  $0.14\text{‰}$ (差は  $1.89\text{‰}$ )の明瞭なピークを示し, それぞれ夏季・冬季に対応すると考えられる. これらのピークはおそらく1年目であり, 2年目を越えることはないと推定される. その後成長は急速に停滞し始め, この層準での本種の最大殻高は 9.3cmにとどまる. このように *Amusiopecten praesignis*の初期の成長は非常に速く, 季節変化を詳細に記録していることが分かる.

一方, 氷期標本の  $\delta^{18}\text{O}$ 値は  $-0.72\sim-0.17\text{‰}$ (差は  $0.55\text{‰}$ )であり, 間氷期個体の1/3以下と小さい. また,  $0.3\text{‰}$ 程の小刻みな振幅を繰り返すのみであり, 季節性は不明瞭である. 氷期-間氷期の中間の2個体はそれぞれ  $-1.23\sim-0.03\text{‰}$ (差は  $1.20\text{‰}$ ),  $-1.35\sim-0.17\text{‰}$ (差は  $1.52\text{‰}$ )であり,  $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動幅も中間的な値を示す. このように, 氷期には季節性に乏しく, 間氷期に向かい季節性が増すという明瞭な傾向が, 今回の研究で初めて明らかとなった.

浅海域の海進海退サイクルでは, 水深変化の結果, 水深が深くなる最大海進時には季節性が小さくなり, 水深の浅い最大海退時には季節性が大きくなるはずである. しかし, 今回の測定結果は, 全く逆のパタンであった. したがって, 想定されるパタンを十分に相殺する逆センスの要因が存在したことになる. その要因の特定は難しいが, 鮮新世最末期の氷期(MIS G2)の土佐湾は, 季節性に乏しい, エルニーニョのような冷夏暖冬の状態にあった可能性がある.

# 飼育実験からみる浮遊性有孔虫 *Globigerinoides sacculifer* (BRADY) の形態的特性

理学コース 地球科学分野

河田 大樹

浮遊性有孔虫 *Globigerinoides sacculifer* は熱帯から亜熱帯の温暖な海洋に生息する。この種は、採集や飼育が比較的容易なため、よく飼育実験が行われている。また、古海洋学の分野でも群集解析や殻の化学分析などに広く扱われる種である。しかし *G. sacculifer* の殻形態と生息環境との関係や、生態との関連性について議論している研究例は少ない。殻の形態は種が生息する環境の中で成長し、繁殖していく上で、とらなければならない形態をしているはずであり、これらを比較することで、両者の関連についての理解が深まるはずである。

このような考えに基づき本研究では、代表的な環境因子である水温をコントロールできる飼育システムを構築した。そして、違う飼育水温中で飼育した *G. sacculifer* を定期的に観察し、殻の付加成長の様子を観察するとともに殻の形態（長径と短径）を計測した。得られた長径、短径のデータを、飼育水温や、生態と比較し、*G. sacculifer* の形態的な特徴と生息環境との関連について考察した。

本研究において、新たにチェンバーを付加した *G. sacculifer* は 89 個体であった。チェンバーを付加した 89 個体の *G. sacculifer* の長径変化を飼育水温別に図化した。その結果、チェンバー付加前後の長径は、飼育水温とは独立して対数の関係をもつことが分かった。よってこれは *G. sacculifer* の長径は殻が生息水温には依存することなく、チェンバー付加以前の長径によって、次にチェンバーを付加した後の長径が決まることを意味する。

次に、サックを形成しなかった 51 個体の *G. sacculifer* の長径/短径比の推移を時系列でみると、長径/短径比においても水温ごとによる長径/短径比の推移に違いがみられなかった。さらに長径/短径比の平均値の推移は、死亡日に向かって緩やかに長径/短径比が上昇していく傾向がみられた。サックを形成しなかった *G. sacculifer* の死亡日の長径/短径比と長径を比較してみると、長径 332  $\mu\text{m}$  以上でリプロダクションする個体を観察した。

また、飼育水温中の 21.5–29.9 $^{\circ}\text{C}$  において *G. sacculifer* がサック状の最終チェンバーを形成していたことを確認した。そのサックはリプロダクションする 72 時間以内に形成されていた。

これらのことから、浮遊性有孔虫 *G. sacculifer* の形態に関して、長径の変化は水温とは独立して対数的に変化し、長径 332  $\mu\text{m}$  以上からリプロダクションするほどの成熟した大きさであるとみなすことができると考えられる。また *G. sacculifer* がサックをなぜ形成するのかに関してまだ検討の余地が残るが、生息できる水温の範囲内に限って言えば、どの水温でもサックを形成する可能性があり、それがリプロダクションにむけた形成であることが考えられる。以上のことから、水温のような外的要因は、*G. sacculifer* の大きさに影響を及ぼす一つの大きな因子であるが、形には影響が小さいことが考えられる。そして形に影響するのはリプロダクションのような生態学的要因が影響している可能性が考えられる。

# 南海トラフ域の表層堆積物の堆積学的研究

## 熊野沖、四国沖を例として

理学コース 地球科学分野 坂 耕多

### はじめに

フィリピン海プレートが年間約 4cm の速度で沈み込んでいる南海トラフ域の陸側斜面では、特徴的な海底地形が存在する。陸側から、大陸棚、上部斜面、上部斜面海盆、下部斜面、南海トラフ、四国海盆に区分される。このような海底地形上に存在する表層堆積物の組成変化について調べることは、その堆積物の供給源、流路、再堆積などのメカニズムを明らかにする上で非常に重要である。そこで本研究では、熊野沖および四国沖から南海トラフまでの 2 つの測線上の各海底地形に沿って表層堆積物を採取し、堆積物の組成変化、両海域の堆積物特性について相互比較を行うことを目的とした。

### 分析手法

コア試料を 1cm ごとに切り分け、合計 403 試料を使用した。その後、含水率と coarse fraction ( $>63\mu\text{m}$ ) を求めた。CSN 元素分析計を用い、全炭素・窒素量を求め、その後、酸処理をおこない、有機炭素・窒素量、有機物の C/N を求めた。また、全炭素量と有機炭素量の差から、無機炭素量を求めた。レーザー回折散乱式粒度分析装置を用い、粒度分析を行った。XRD 測定からは、各地点の表層(0~1cm)の堆積物( $<63\mu\text{m}$ )に含まれる鉱物の同定を行った。有孔虫 AMS<sup>14</sup>C 年代測定から堆積速度を上部斜面海盆、下部斜面でもとめた。また、熊野沖で採取された柱状試料(5m)についても、同様の解析を行った。

### 結果・考察

- ・ coarse fraction は、陸から離れるほど減少し、逆に含水率は増加する傾向が見られた。
- ・ 有機炭素に対する無機炭素量の割合は、CCD に到達したと思われる水深の地点を除いて、熊野沖で 33.7 から 67.3%，四国沖で 15.7 から 77.7%と、陸から離れるほど増加している。
- ・ 有機物の C/N は熊野沖で 8.9 から 5.0，四国沖で 10.4 から 3.4 と変化し、陸から離れるほど陸起源有機物量が減少する傾向が見られた。
- ・ 粒度分析では、熊野沖で 15.7 から 6.9 $\mu\text{m}$ ，四国沖で 123.8 から 5.6 $\mu\text{m}$  と、陸から離れるほど各地点の Mode 値は減少する傾向にある。特に、各地点の粒度分布曲線と Mode 値は、大陸棚と上部斜面を境界に大きく異なる。
- ・ 泥堆積物( $<63\mu\text{m}$ )は、主に石英、方解石、長石、斜緑泥石、白雲母のピークが見られた。
- ・ 熊野沖では水深 4347m，四国沖では水深 4688m の地点で、方解石のピークが出ないことから、各海域の CCD はそれよりも浅い。

以上の結果から、熊野沖と四国沖の堆積物の組成変化は、陸からの距離によって大きく異なり、両海域とも同様な結果が得られた。

## 北西太平洋域“拓洋第5海山”におけるマンガンクラストの組成変動と生成環境

理学コース 地球科学分野

田中真理子

深海底に分布する鉄・マンガンクラストは海山や海台の表面を広く覆う化学堆積岩で、主成分である鉄やマンガンの酸化物が持つ吸着能力により多様な金属を濃縮する。特にコバルト、ニッケル、希土類元素などの有用元素を含有し埋蔵量が膨大なため、将来的な資源として注目されている。太平洋における資源量や化学組成の広域的变化の概要が明らかにされつつあるが、その変化の規則性や要因は十分に理解されていない。理由は、試料内部の組成変化を無視した全岩分析に基づく議論が多く、不均質性や局地的変化、生成年代による組成変動に関する記載に乏しいことが挙げられる。本研究では、試料間での変動の規則性や対応関係を明らかにし、化学組成の地域変化や不均質性を支配する要因を明らかにすることを目的とした。

分析試料は、遠隔探査ロボット HYPER-DOLPHYN によって、拓洋第5海山の斜面、水深 3000m から山頂付近まで連続的に採取された全 113 個のマンガンクラスト・団塊試料である。非常に短い間隔で、水深方向に綿密なサンプリングが行われたのは世界でも初めてのことである。この試料の中から水深 500m 間隔で且つ連続性の良い厚い試料を約 5 地点（水深 965m~2987m）選び、<sup>10</sup>Be 放射性同位体年代に基づく成長史、微細スケールでの成長構造と鉱物組成、金属元素の濃度変化のパターンを詳しく記載した。

調査の結果、マンガンクラストの表面の形状は基盤岩や核の形に規制されているが、広い水深帯にわたって厚いクラストが連続的に成長していることが判明した。肉眼的に認められる内部の成長構造は、試料間で上下関係の対比が一部認められるが明瞭とは言えず、これは客観的な基準とはなりにくい。そこで、顕微鏡スケールの微細成長構造に注目すると、より明瞭に層状、柱状、波状の3タイプに分けることができる。水深約 2000m 以深の試料で柱状構造が卓越し、一方以浅では同構造が優勢だが波状や層状の構造が発達する。深い水深域の試料においては、微細成長構造の時間的変化は少なく、浅い水深域の試料はで変化が大きいという傾向が明らかである。

7 試料を厚さ約 3 mm 間隔でスライスし粉末試料を作成し、層別に XRD 鉱物分析、年代測定(委託)・化学分析(委託)・抽出実験等を行った。全試料を通じて、成長曲線は概ね直線であり、ほぼ一定速度(約 4 - 6mm/百万年)で連続成長したことを示す。また、コバルト、ニッケルなどの重金属元素濃度の内部変化にそれぞれ特有の傾向がみられ、生成時代によりクラストの化学組成が大きく変わっている。Mn/Fe 比はほぼ全試料で表面から基盤に向かって増加傾向を示し、同様にニッケル、銅、亜鉛なども表面から増加を示している。一方で逆に減少するコバルト、鉛などの元素もある。深い水深域に分布する試料では類似の変動パターンを示してもその変動幅が小さく、浅い水深域の試料で大きい。また、抽出実験(Koschinsky et al., 1995)を行ったところ、Mn/Fe 比の低い試料では、重金属を伴わない鉄酸化物が存在し、マンガンクラストに含有される鉄酸化物には少なくとも 2 種類以上の形態が存在していると推定される。

以上のことから、肉眼的特長や成長構造は、主に堆積物起源物質の構造や量と関連が強く試料間での対応が弱い場合、局地的な堆積環境を反映しているらしい。一方で、時間的・広域的な変化と形成環境とを比較するには、成長構造よりも化学的特性のほうが重要であると考えられる。例えば、コバルトなどの酸化・還元環境に敏感な元素の濃度変化を支配する要因として、水深の違いが挙げられ、溶存酸素量など水深によって変化する条件が重要であると考えられる。マンガンクラストの化学組成は年代を伴う共通の変化の傾向がみられることから、過去の環境変化を記録している可能性が高い。今後、化学的性質に注目してさらに規則性や対応関係を明らかにしていくことにより、マンガンクラストの化学堆積岩としての意義が高まる。

## 中部—上部ジュラ系坂本層の潮汐堆積物に産する生痕化石群集

理学コース 地球科学分野

平林歩子

熊本県南西部、海浦海岸に露出するジュラ系坂本層の砂岩層には、未記載生痕化石である *aff. Hillichnus isp.* で特徴づけられる生痕化石群集が見られる。この生痕化石群集が産出する砂岩層は、反対方向を向くフォアセットが発達し、マッドドレープも頻繁に挟在される。さらに、汽水域に生息すると考えられる *Crassostrea ryosekiensis* も産出する。以上のことから、その堆積環境は干潟システムにおける潮汐砂底から潮汐流路と考えられる。ところで、ジュラ紀の潮汐低地堆積物に産する生痕化石群集の研究は、本邦では例がなく、世界的に見ても極めて少ない。さらに、上記の *aff. Hillichnus isp.* は、極めて複雑な構造を有する大型の生痕化石で、古生態学的観点から極めて興味深い。そこで本研究は、その特徴生痕種とも言える *aff. Hillichnus isp.* をはじめとした坂本層の潮汐堆積物に産する生痕化石群集について記載するとともに、その古生態学的意義について議論する。

*aff. Hillichnus isp.* は、層理面に対しほぼ平行に伸長し、緩くカーブする下部のトンネル状構造と、そこから上方へ伸びる、密集した多数のチューブ状構造から成る。トンネル状構造は、ほぼ楕円形の断面を有し、メニスカス構造が見られる堆積物で充填される。個々のチューブ状構造は上方ほど層理面に対して平行になるようにカーブすることが特徴である。そして、上部の層理に平行な部分が密集すると、しばしば層理面上において木の葉状に展開する。こうした木の葉状の構造が見られる層理面上には、しばしば潮汐作用によって形成されたマッドドレープが存在する。以上のことから、この *aff. Hillichnus isp.* は、自由生活をする埋在動物による移動摂食痕であり、形成者は、停潮時に堆積するマッドドレープに濃集した有機物を、チューブ状の器官を堆積物に挿入して吸い込むプロービング (probing) と呼ばれる方法で摂食していたものと考えられる。こうした生態を有する現生生物を探すと、ニッコウガイ超科に属する二枚貝が挙げられる。現在知られるニッコウガイ超科の最古の化石記録は、白亜紀前期であるが、この形成者は未知の初期ニッコウガイ類であった可能性がある。

この *aff. Hillichnus isp.* とともに生痕化石群集を構成するのは、砂底に生息するイソギンチャク類の居住痕 *Bergaueria isp.*、懸濁物食十脚類の巣穴化石 *Ophiomorpha isp.*、堆積物食の多毛類の移動摂食痕 *Macaronichnus isp.*、捕食性腹足類の移動痕 *Curvolithus simplex*、堆積物食多毛類?の定在摂食痕 *Dactyloidites ottoi*、堆積物食の環形動物?の移動摂食痕 *Gyrochorte comosa*、堆積物食十脚類の巣穴化石 *Teichichnus isp.* などがある。この群集において *aff. Hillichnus isp.* は最も多く産出し、その他に比較的多く見られるのは、*Bergaueria isp.*、*Ophiomorpha isp.*、*Macaronichnus isp.* である。これらの形成者は活発な運動性を有し、堆積作用による“生き埋め”ストレスに良く適応した動物であることが特徴である。また、今回一個体のみ見られたのは *C. simplex*、*D. ottoi*、*G. comosa*、*Teichichnus isp.* で、中にはあまり運動性のない形成者による生痕化石も存在する。

以上をまとめると、この生痕化石群集は、潮流による砕屑性基質の活発な移動に伴う環境ストレスのもとに、上げ潮 - 下げ潮時に懸濁する有機物、あるいは、停潮時に堆積する有機物を餌として利用する、堆積物食者と懸濁物食者が混在した動物群集を反映したものと考えられる。*aff. Hillichnus isp.* の形成者は、移動能力を有することで、こうした場に生息し、周期的に堆積する堆積性有機物を摂食していたと考えられる。

# 西オーストラリア・ピルバラ地域にみられる太古代中期 (3.2Ga) の 堆積有機物の起源：DXCL 掘削コアの炭素同位体比と顕微 FTIR スペクトル

理学コース 地球科学分野

細井健太郎

## 【はじめに】

西オーストラリアのピルバラクラトンは変成作用の影響が少なく、太古代の環境情報を保存した世界でも稀な地質帯である。これまでピルバラ海岸グリーンストーン帯のデキソンアイランド・クリバービル層の詳細な層序が調査され、これらの堆積物が太古代中期（およそ 32 億年前）の海底熱水系の堆積物であることが明らかになっている (Kiyokawa et al., 2006)。しかしながら、当時の堆積環境や酸化還元状態、それらに大きく影響を受けていたであろう微生物相は不明な点が多い。

2007 年 7 月、同地域で DXCL (Dixon Island-Cleaverville) 掘削計画により 3 本のボーリングコアが掘削され、未風化の岩石試料が得られた (Yamaguchi et al., 2009)。本研究では特に、DXCL コアの有機炭素の安定同位体比と顕微 FTIR スペクトルから、太古代中期における海底熱水系堆積物にみられる有機物の起源を議論する。

## 【試料と分析】

試料は 3 本のボーリングコア CL1 (全長 105.3m) , CL2 (全長 92.0m) , DX (全長 148.3m) である。CL1 と CL2 はクリバービル層に、DX はデキソンアイランド層にそれぞれ相当し、分析試料は黒色頁岩を中心に採取された。粉末化した試料は 6N 塩酸により炭酸塩鉱物を除去した後、元素分析計オンライン質量分析計を用いて全有機炭素量 ( $C_{org}$ ) と有機炭素同位体比 ( $\delta^{13}C_{org}$ ) を測定した。さらに顕微 FTIR 分析によりケロジェン (山田, 2011MS) の IR スペクトルから、脂肪族  $CH_3$  と  $CH_2$  のスペクトル比である  $R_{3/2}$  値 (Igisu et al. 2009) を求めた。また XRD 測定により、バルク試料の鉱物の同定を行った。

## 【結果と議論】

有機炭素量は 3 本のコアともに多くの試料で 0.5 wt.% を越え、特に DX では平均で 1.2 wt.%、最大値は 3.0 wt.% に達する。同地域の露頭の岩石試料の有機炭素量が 0.2 wt.% 未満 (Kiyokawa et al., 2006) であったことから、コア試料が露岩に比べて風化の影響が少なく、古環境および生物起源物質をよく保存していることが分かる。そして 3 本のコアには黄鉄鉱や菱鉄鉱などの還元的な環境で形成される鉱物が保存されている。堆積環境が還元的だったことは、同試料の硫黄同位体比が硫酸還元細菌による活発な硫酸還元を示すことから支持されている (坂本, 2010MS)。よって、本試料の有機炭素量が高いのは還元的な環境で有機物が分解されにくかったためだと考えられる。

また、大部分の試料の  $\delta^{13}C_{org}$  値はおよそ -30‰ である。これまでの  $\delta^{13}C_{org}$  値の解釈 (例えば Schidlowski, 2001) に基づくと、DXCL コア堆積物中の有機物の起源は、メタン酸化起源の  $CO_2$  を固定する微生物よりも大気  $CO_2$  を固定する微生物の寄与が大きかったことを示唆する。そして IR スペクトルの  $R_{3/2}$  値は、古細菌由来の有機物よりも相対的に細菌由来の有機物が多かったことを示している。

以上のことから、32 億年前の海洋底は還元的な環境であったが、海洋表層にはすでに生物活動が確立され、主要な生物生産が細菌によるものであった可能性を提示する。

## 背弧拡大期における弧内堆積盆の堆積環境：下部－中部中新統久万層群の例

理学コース 地球科学分野

明神拓也

前期～中期中新世の北西太平洋地域で生じた背弧（日本海）の急激な拡大の結果、西南日本弧は時計回りに約  $50^\circ$  急回転した。その際の島弧の移動速度はきわめて高く、現在知られている海洋地殻生産速度の 10 倍 (100cm/年) に達するという見解までである。こうした活発な構造運動は、西南日本弧内の陸域環境にも大きく影響していると考えられる。しかし、このような観点から、同弧内の陸域環境とその変遷を調べた研究は十分ではない。そこで、前期～中期中新世の陸域堆積物である久万層群を対象に堆積相解析を行い、堆積システムとその変遷を明らかにした。

愛媛県中部から高知県にかけての四国山地に広く分布する久万層群は、下位の三波川結晶片岩を不整合に覆い、上位の中部中新統石鎚層群により不整合に覆われる砂礫質堆積物で、下部を占める角礫岩主体の古岩屋層（再定義）、上部の円礫岩層主体の嵯峨山層（再定義）、同じく上部の砂岩泥岩互層からなる狩場層（再定義）に区分される。調査を行ったのは、久万層群の北部に位置し、それがほぼ全層準にわたって良く露出する滑川地域、ならびに南部の分布の中心である久万盆地である。

堆積相解析の結果、久万層群は堆積組相 I・II・III に大別されることがわかった。堆積組相 I（沖積扇状地堆積物：古岩屋層に相当）は、淘汰が悪く塊状の大～巨礫の基質支持角礫岩層（堆積相 I a：土石流堆積物）、下に凸のレンズ状の形態をとる小～大礫の礫支持礫岩層（堆積相 I b：小規模流路堆積物）、ならびに砂岩層（堆積相 I c：小規模流路堆積物）から成る。堆積組相 II（網状河川堆積物：嵯峨山層に相当）は、弱く成層した中～大礫礫支持円礫岩層（堆積相 II a：縦州堆積物）、下に凸のレンズ状を示す礫支持円礫岩層（堆積相 II b：小規模流路堆積物）、根化石を含み、逆級化構造あるいはクライミングリップが発達し、連続性の悪いシート状の砂岩泥岩互層（堆積相 II c：オーバーバンク堆積物）から成る。堆積組相 III（湖沼堆積物：狩場層に相当）は、植物片を多量に含み、逆級化構造、リップル葉理、斜交葉理が発達し、連続性の良いシート状の形態をとる砂岩泥岩互層（堆積相 III a：ハイパーピクナイト）、塊状の砂岩に覆われる、級化した小～中礫礫支持円礫岩層（堆積相 III b：水中土石流堆積物）から成る。

滑川地域では、堆積組相 I の沖積扇状地システムが基盤岩（三波川結晶片岩）に高角でアバットし、その上位に堆積組相 II の網状河川システムが発達する。沖積扇状地システムの基底面（不整合面）は、北北東－南南西方向に直線的であり、その直上には、基底面に調和的な走向傾斜を有する正断層が存在する。これらの事は、基底面が沖積扇状地システムの活動時において成長断層としても活動していたことを示唆する。その上位の網状河川システムは、構成礫種と古流向から判断して、成長断層の活動が弱まったことで基盤からの碎屑物の供給が停止し、その代わりに北方の領家帯から運搬された礫によって堆積が進行したことを示す。一方、久万盆地では、沖積扇状地システムの上位に、湖沼システムが重なる。この地域における久万層群分布域の形態は、この地層が複数の半地溝を充填したことを示唆する。さらに、その走向傾斜は、それぞれの半地溝の領域に呼応して連続的に変化し、その半地溝群が成長断層によって形成されたことを示唆する。湖沼システムに含まれる礫種は和泉層群と領家帯を起源とする事から、これらの半地溝発達期には、断層運動で形成された急斜面から生成された碎屑物が土石流によって堆積し、断層運動停止後に、滑川地域同様、領家帯を源流とする河川から供給された堆積物によって埋め立てられていったのであろう。しかし、久万盆地は、滑川地域よりも供給源（領家帯）から遠いことから、碎屑物の粒径も小さいというえに供給量も少なかったと考えられる。もしそうだとすれば、網状河川システムが発達せずに湖沼システムが発達したことも良く説明できる。

## 歩行支援ロボットの開発に向けて

応用理学コース 情報科学分野 高橋 育子

近年、日本では高齢化が進み、現在(平成 22 年 9 月 15 日推計)では 65 歳以上の高齢者人口は 2944 万人で、総人口に占める割合は 23.1%となり超高齢化社会に突入している。そんな中で、介護者の不足や介護者への精神的・体力的な負担、介護を行う家族もまた高齢者であるという老老介護などの問題が発生している。その問題を解消するために、多様な介護・介助ロボットが開発されている。しかしロボットの实用化に向けては、安全性や柔軟性、重量、コストなど様々な問題がある。

高齢者の中には身体的衰えのある人が多く、下肢の筋力や関節の機能低下は年齢と共に必然的に起こり、歩くことが困難になり下肢を運動させる機会が減少してしまう。そこでいろいろな歩行支援ロボットの開発が行われてきたが、これらは力をサポートすることが目的であり、対象者自身がバランスをとるということについてはあまり考えられていない。しかし人間が歩行するには力に加えバランス感覚も重要になる。そして、人間の感性に近いバランス制御を行うには柔軟性やロバスト性が必要である。

本研究では、人間が得意とする「あいまいさ」を扱うことができる Fuzzy 制御を用いて、バランスを取りながら歩行を助け、日常生活で使えるロボットの提案を目標とした。提案する歩行支援ロボットの形状は、足の付け根、おなかの横の部分に左右 2 個ずつ計 4 個モータとセンサもしくはカメラを取り付ける。これにより現在の姿勢情報を取得し、モータがモータと繋がっているフレームを動かすことで、パワーアシストやバランス制御を行う。また歩行支援ロボットで重要となるのは、外乱に強く柔軟性の高いバランス制御であると考え、歩行支援ロボットの前段階として、本研究室で作成していた自走式倒立振子を用いて、正しい姿勢情報の取得と Fuzzy 制御を用いた外乱に強いバランス制御についての考察を行った。その結果、外乱に強いバランス制御を行うには、ハード面では、使用するセンサやセンサの位置を正しく決めることによって、現在の正しい姿勢情報の取得をすることが重要であることがわかった。倒立振子ではジャイロセンサを用いて角速度を計測し、現在の姿勢情報の取得を行った。また、ソフト面では制御時間が重要である。制御時間を長くすると制御が遅れる、しかし反対に制御時間を短くすると制御は細くなるが、細くなり過ぎるとなめらかな制御はむずかしくなるため適切な制御時間にしなければならない。Fuzzy 制御を用いた制御の場合、制御時間を抑える為にはルール数、分割数を制限し、それに合ったメンバーシップ関数を設定しなければならない。それとともに、外乱に耐えるには状態が大きく乱れたときと安定領域内のときのルールベースをわける必要があることがわかった。

# FDLによる組込みソフトウェア開発ガイドライン

応用理学コース 情報科学分野

多和田 侑

近年、様々な研究機関でファジィ理論を応用したシステム（ファジィシステム）が開発されている。ファジィシステム開発時の問題として、ファジィ理論による推論（ファジィ推論）の実装方法が異なる、ファジィシステムの性能比較ができない、ファジィ推論により得られた知識を活かす事ができないなどが挙がっていた。そこで、それらの問題を解決するためにファジィシステム開発用言語として、ファジィシステム記述言語（FDL：Fuzzy systems Description Language）の言語仕様が策定された。

FDLの言語仕様はC言語の言語仕様を基礎としている。そして、ファジィシステムの開発に必要なファジィ集合、ファジィ演算、ファジィ推論記述を実装できるようにC言語の言語仕様を拡張している。FDLの言語仕様をC言語の言語仕様を基礎とすることで、FDLを用いてシステム開発をする際にC言語の既存の資源を活用できる。FDLの処理系はFDLの言語仕様がC言語を基礎としていることもあり、FDLのプログラムソースをC言語のプログラムソースへと変換する仕様となっている。従って、様々なアーキテクチャ向けに開発されているC言語の処理系を利用することが出来るため、FDLの処理系の規模を最小限に抑える事が出来る。現在はWindows, Linux, MacOSなどの一般的なOS環境のUNIX環境上でfdltocを用いたシステム開発が可能である。

ファジィ理論は組込みシステムでも利用されており、ファジィ推論を応用したファジィ制御の研究が多くの研究機関で行われている。組込み分野はファジィ制御の得意とする分野であることから、FDLによる開発の利点が組込みソフトウェア開発で発揮されるのは明らかである。また、今までの組込み系CPUの処理能力の関係からFDLによって開発されたファジィシステムを組込み系ハードウェア上で運用することは難しかったが、現在の組込み系CPUは飛躍的に処理能力が向上している。

本研究ではFDLによるファジィ推論を利用した組込みソフトウェア開発について考察を行った。FDLの言語仕様と処理系、及びFDLライブラリ関数が組込みソフトウェア開発に対応できるかを検討し、FDLの処理系とFDLライブラリ関数の改良、そして、FDLによる組込みソフトウェア開発のガイドラインを提案する。

本研究でのFDLの処理系とFDLライブラリ関数の改良により、FDLによるソフトウェアのリソース量の増大を削減する。そして、組込みソフトウェアでは処理時間と処理効率、リソース量が重要視されるため、本研究で提案する開発ガイドラインは、処理時間とリソース量に重点を置いてそれらの効率的な削減方法について提案する。この開発ガイドラインに沿ってFDLを用いて組込みソフトウェア開発を行えば、従来の手法による開発よりも開発時の工程を軽減することが可能であり、FDLによる開発の利点を活かしながら組込みソフトウェア開発をすることが出来る。

## 手話トレーニングマシンの開発に向けて

応用理学コース 情報科学分野 辻 由彦

近年、日本では約 343,000 人の聴覚障害者の方がおり、(平成 18 年 : 障害保険福祉研究情報システム調べ) 裁判員制度への参加も例外ではなく、聴覚障害者の活躍の場は年々広がりがつつある。聴覚障害者と健常者のコミュニケーションを取る方法としては、手話・点字・筆談・読唇術などがあげられる。本研究ではその中でも最もポピュラーな手話に注目して手話入力システムの開発を行っている。この手話入力システムとは、手話の動作を読み取り、言葉に変換するシステムのことである。日立製作所が同じく裁判員制度での聴覚障害者のサポートのために、2010年5月から、裁判でよく使われる用語を手話アニメーションで表示するアプリケーションを無償提供しているが、それでは聴覚障害者への一方通行なコミュニケーションになってしまうため、意思疎通には不十分であると考えられる。本研究では、手話入力システムとして手話認識装置と手話トレーニングマシンに注目した。手話認識装置は、手話を翻訳して、テキスト化し、手話を使えない人とコミュニケーションを取る事を目的としたものである。手話トレーニングマシンは手話の学習をサポートする事を目的としている。手話トレーニングマシンでは予め学習者の入力が予測できるので、手話の文法的な意味合いを考慮する必要が無い事から、手話認識装置の前段階として研究を行っている。手話トレーニングマシンは登録してある教師データと、ユーザからの入力データを比較、その違いを提示して手話の学習を手助けする事が主な機能である。その提示方法は、3次元空間での手の動きをCGで再現し、教師の動作と学習者の動作を重ねて表示、その際動作の違いを強調表示することにより、学習者に対して相違点を明示する事により、改善点の派遣を促し効率的に学習を支援するという方法である。学習者の手話を効率的・効果的に評価するという点から、非常に実践的な学習方法として位置づけられる。

一般に手話認識システムに利用される手の動作を読み取る装置は、複眼カメラで手を撮影し、画像処理やモーションキャプチャ等で手の動きを読み取る手法と、手袋状になっていて各間接部分などの状態を読み取る手法の2つに大きく分類され、これらを総称してデータグローブと呼ぶ。本研究では手話において必要不可欠な3次元での情報取得に加え、ノートパソコンと簡易なデバイスのみを用いる事で携帯性を考慮した手話トレーニングマシンの開発を目標とした。そこで、3次元的なデータについては3軸加速度センサ、手の形状については曲げセンサ、手の裏表や位置情報を取得するためにノートパソコンなどに内蔵されるwebカメラを用いてシステムの構築を行った。

## 医療情報用分散データベースシステムの研究

応用理学コース 情報科学分野 趙 シン

近年、病院で管理されているデータベースは、機密レベルの高い個人情報  
が記録され、さらに、それぞれの病院では異なるスキーマで設計された  
システムが導入されている。このため、病院間で患者に関する情報交換を  
行うには技術的に困難な問題であった。一方、患者の視点からは、病気の  
重症度や治療の進行によって転院しなければならない場合があり、本人の  
診療情報を他病院に転送する要望がある。

このため、異なるオペレーティングシステムや異なるデータベースで構  
築された病院システム間で円滑にデータ交換を可能とする仕組み作りが必  
要である。

本研究では、患者の要望に応じて、各病院の異なるオペレーティングシ  
ステムや異なるデータベース設計で構築された病院情報システム間でのデ  
ータ交換を容易に行える技術を確立することである。また、各病院では患  
者のプライバシーを保護するため、患者個人の認証と病院管理者の認証に  
より情報交換の許諾を行える環境を構築する。これらの要件を満たすデー  
タ交換の Protokol 及びデータ交換を行う基本的なオブジェクト等の提案  
と設計及びその評価を目的とする。

具体的なデータ交換方法としては、異なるデータベース環境として、リ  
レーショナルデータベース (RDB) を基本とした SQL Server により構築さ  
れたデータベースとオブジェクト指向データベース (OODB) を基本とし  
た Caché により構築されたデータベースとの間およびユーザ間の通信イン  
ターフェースを実現するため、SOAP (Simple Object Access Protocol)  
を利用してシステムを設計し、その一部を実装した。SOAP とは、分散ネ  
ットワークにおいて XML ベースのデータを交換するための Protokol で  
あり、SOAP の Web サービスのソフトウェアを利用した。

提案するシステムにより、従来の TCP/IP と HTTP を用いたデータベー  
ス間のデータ交換システムの開発に比較して、短期間でシステム開発を行  
うことができた。また、異なるオペレーティングシステムや異なるデータ  
ベース間において、容易にデータ交換が行えるソフトウェアとして利用で  
きることを実証した。このソフトウェアは、クライアントとサーバ側のア  
プリケーション開発において、通信 Protokol を意識させないオブジェク  
ト開発を可能とし、効率的なシステム開発が可能であることが分かった。

# プレゼンテーション構造に着目した プレゼンテーション・リハーサルにおける議論フェーズ支援環境の構築

応用理学コース 情報科学分野 西森 博紀

## 1. はじめに

近年、大学などの教育現場ではプレゼンテーション・リハーサルが日常的に行われている。プレゼンテーション・リハーサルは同僚や仲間内からの批評をもとにプレゼンタに知識の不十分さや不適切さに対する気づきを与えることで、プレゼンタの知識を洗練化する機会である<sup>[1]</sup>。したがって、プレゼンテーション後に行われる議論において、プレゼンタが改善に必要な結果を十分に得ることが重要である。しかし、プレゼンテーション・リハーサルにおける議論を対象とした研究事例は少ない。そこで、本研究では効果的な議論を行うために、改善すべき議論フェーズの諸問題を考察し、問題を解決するための支援方法の検討、及び、検討に基づいた計算機援用による支援環境を構築した。

## 2. リハーサルにおける議論の問題

本研究では、リハーサルにおける議論を効果的に行うための支援環境の実現を目的としている。そのために、以下に示す問題を改善することが望ましい。

- (1) 指摘意図の正確な伝達が困難
- (2) 議論内容の重複による議論時間の浪費
- (3) 全レビューからの指摘の収集が困難
- (4) 議論結果の記録の不備による改善作業の不十分さ

## 3. 議論支援方法の提案

### 3.1 支援環境に必須となる基本機能

本研究では、前章の問題を解決するアプローチとして、以下に示す支援環境に必須となる基本機能を検討した。これらの機能は、参加者全員がパソコンを持ち、ネットワーク環境整備下でリハーサルを行うことを前提として実現される。

- (1) 指摘の記録・収集と発表状況の記録
- (2) 指摘箇所の分布を把握した議論項目の選択
- (3) 容易な指摘に関連するリソースの参照
- (4) 参加者全員が把握した議論結果の記録・整理

これらの機能を実現することで効果的な議論を行うための支援環境を構築する。(1)は既に研究室内で開発されているリハーサル支援システムによって実現されている<sup>[2]</sup>。したがって、リハーサル支援システムで得られたリソースを活用して他の機能の実現する。そこで、本研究ではプレゼンテーション構造に着目した議論支援方法を提案した。

### 3.2 プレゼンテーション構造を用いた議論支援方法

プレゼンテーション構造とは、プレゼンテーションの構成を階層構造で表現したものであり、プレゼンテーションのタイトル、役割、スライドの順に階層化されている。このプレゼンテーション構造を用

いることで、基本機能(2)～(4)の実現が可能だと考えた。(2)、(4)に関しては、構造上に指摘や議論結果の記録を視覚化して関連付けることで、分布の把握や整理が可能となる。(3)に関しては、構造上に関連付けられた指摘を選択した際に、リハーサル支援システムで得られる指摘に関連したリソースを提示することで、プレゼンタへの指摘や改善案の検討を円滑に行うことができる。

構造や指摘内容はプレゼンテーション毎に異なるため、スライドからの構造の抽出や構造に対する指摘の関連付けを自動化することは難しい。したがって、本研究では議論中での支援に加えて、議論支援の準備段階としてプレゼンタによる構造作成と各レビューによる指摘の関連付けを検討した。

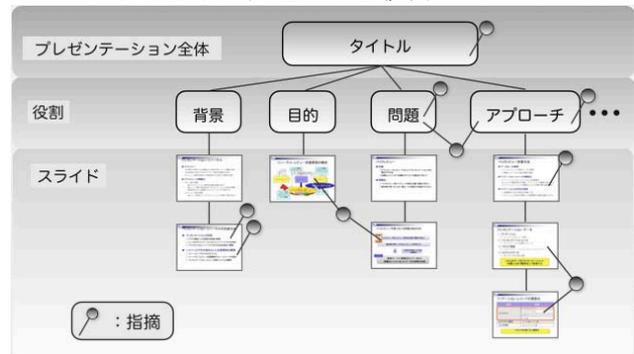


図 プレゼンテーション構造を用いた指摘の整理

## 4. 議論支援システムの開発

本研究では、前章で提案した議論支援方法に基づいたプロトタイプシステムの開発を行っている。プロトタイプシステムには、リハーサル支援システムに加えて、プレゼンタの構造作成用ツール、ピアの構造への指摘関連付けツール、議論中に構造や指摘に関連するリソースの提示と議論結果の記録を行う議論用ツール、それらを連携する議論サーバを試作した。

## 5. おわりに

本研究では、プレゼンテーション・リハーサルにおける議論支援方法を提案し、それを実現するためのプロトタイプシステムの開発を行った。本システムを利用することで、効果的な議論を行うための支援環境を実現できた。

### 参考文献

- [1] A.Kashihara & S.Hasegawa: "LearningBench: A Self-Directed Learning Environment on the Web", Proc. of ED-MEDIA2003, pp.1032-1039, 2003
- [2] R.Okamoto, & A.Kashihara: "Presentation Review Supporting Environment with Realtime-created Hypervideo Technique", Proc. of International Conference on Computers in Education (ICCE 2007), November Hiroshima, JAPAN, 2007

# LSI レイアウト設計における全組合せ検索配置法と ECO 最適化法に関する研究

応用理学コース

情報科学分野

宮城 悠

高度情報化を支える LSI (大規模集積回路) 設計技術は, 近年になり性能劣化と設計効率低下の問題に直面している. 高性能で安価な電子機器の実現は, コア部品となる LSI の半導体メーカーによりムーアの法則に沿う微細加工技術による多機能化, 高速化および低消費電力化が支えてきた. しかし回路の大規模化は, 従来自動設計手法の解の品質低下を生じさせる. 回路性能を向上させるため, より高品質な最適化手法の研究が求められている. また, 回路規模が大きくなるにつれて設計ミスも増加する. さらに加工微細化に伴って“DSM 問題 (DeepSubMicron)”, 即ち設計後に予想できない信号遅延や電圧降下などの性能劣化問題も表面化する. そのため近年の LSI 設計では繰り返し修正 (Engineering Change Order:ECO) が必須となり, その設計効率向上の研究が求められている.

本論文は, レイアウト配置設計における高品質な最適化手法と, LSI 設計全体における ECO 最適化手法についての研究である.

LSI 設計におけるレイアウト配置問題は, LSI 回路の全配置素子をチップ (レイアウト領域) 上に, 回路の全配線が最短となるような位置を決める問題である. 厳密な最適配置解を得るには, 素子  $N$  個の位置の全並び替えの組合せを調べて配線長が最短となる素子位置を探せばよいが, その問題のクラスは NP 完全となるため現実的ではない. そこで従来は, 近似最適化手法, 例えばシミュレーテッドアニーリング法 (SA 法) やペアワイズ交換法に基づく配置手法が用いられている. しかし, これら従来手法では, 素子数が増大すると近似解の品質が低くなる. 本論文では, 部分的に配置組合せ全てを調べて最適化する新たな配置手法を提案する.  $M!$  が計算可能な範囲の素子群 (部分素子数  $M \in$  全素子数  $N$ ) では, 配置組合せ全てを調べて最適化することができる点に着目した方法である. 簡単な回路データの配置実験で調べたところ,  $N$  が 16 個程度までの回路で, 2 秒に満たない処理時間で厳密解を得られることが判明した.  $N$  が小さい範囲では有効であることから, 従来法と併用 (ハイブリッド) アルゴリズムとして使うことで品質向上が図れそうである.

LSI 設計フローにおける ECO 最適化問題は, いくつかで構成される LSI 設計段階において, 回路修正をどの段階まで戻って行くかを決める問題である. 厳密に最適な段階を求めるには, 全ての設計段階をやり直せばよいが, 設計長期化や設計コスト増大となるため現実的ではない. そこで従来は, 人手による経験などに頼り修正段階を決定している. しかし, 人手による方法は不確実なため, 修正が十分でない場合も生じ, さらなる修正が必要となる. 本論文において, 配置設計段階における ECO の改善効果の推定による新たな ECO 最適化手法を提案する. ランダム配置から配置 ECO を推定し, ECO 最適化を目指すものである. 先ほどの簡単な回路データの部分領域内において, 配置の一部分についてランダム配置と配置 ECO の相関を調べ, 両者に強い相関があること, ランダム配置が極短時間でできることから部分領域の配置 ECO を推定できることを明らかにした. また, 任意の領域での配置 ECO 推定手法も示した. その結果, 本手法は, 先ほどの簡単な回路では配置 ECO を精度よく推定できることを示した.

本研究により新たな配置改善手法および新たな ECO 最適化手法の提案により, 今後の LSI (大規模集積回路) 設計技術における性能向上と設計効率向上が期待できる.

# 新規アントラキノイド系発光色素の分子設計・合成・機能評価

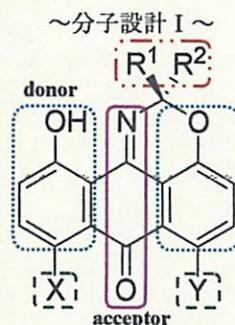
応用理学コース 応用化学分野 板倉 章博

**【緒言】:** アントラキノン骨格は、良好な耐久性を示すことから古くから染・顔料として使用されている。しかし、蛍光色素としての応用例は少ない。そこで本研究では、良好な発光性と耐久性を示す蛍光色素の創出を目的とし、アントラキノイド系骨格を利用した新規な蛍光色素の分子設計・合成・物性評価を行なった。以下に本研究で行なった3種類の色素の評価結果について報告する。

**【結果・考察】:** 分子設計 I は、アクセプター部位として中央のベンゾキノイド部を、ドナー部位に種々の置換基(X, Y)を導入したベンゼン環を有するヘテロ環縮合アントラキノイド系蛍光母体を基本骨格として用いた。ヘテロ環状に非共役的に導入した置換基(R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>)は、分子凝集状態におけるパッキング構造の制御と、有機溶媒に対する溶解性の向上を意図として組み込んだ。合成より得られた色素(1a- c), (2a- c)を1,4-ジオキサン中で測定した結果、置換基(X, Y)については、顕著な置換基効果が現れた。

分子設計 II では、先に合成した色素(1a), (1c)を配位子とするホウ素錯体、ベリリウム錯体の設計・合成を行なった。これは、水酸基とイミン窒素を利用した錯形成により、分子内水素結合の消失、分子内の剛直性の増大などによる蛍光強度・量子収率の増大を狙った。合成により得られた色素(3a), (3c), (4a), (4c)を1,4-ジオキサン中で測定した結果、配位子(1a)は、錯体化することで蛍光量子収率は1.7- 5.3倍に増大した。これは、分子設計で予測したとおりの結果となった。しかし、アミノ基を有する配位子(1c)は、錯体化により蛍光量子収率は0.08~ 0.2倍と著しく減少した。

分子設計 III では、さらなる蛍光強度・量子収率の増大を狙い、色素(2c)のアミノ基、カルボニル基を利用し、環拡張させた新規な蛍光母体の設計・合成を行なった。合成により得られた色素(7), (8)を1,4-ジオキサン中で測定した結果、蛍光量子収率は、配位子(1a)に比べ、色素(7)は26倍、色素(8)は、42倍と著しい増大を示した。環拡張により顕著な発光性の増大が確認できた。発光性に優れた色素(7), (8)をキャスト法により種々のポリマー樹脂(PS, PLA, PMMA)中に含有させて蛍光フィルムを試作した。試作した蛍光フィルムは、(7):  $\lambda_{\max} = 455 \sim 536 \text{ nm}$ , (8):  $\lambda_{\max} = 529 \sim 550 \text{ nm}$  付近に吸収帯を示し、対応する蛍光スペクトルは、(7):  $F_{\max} = 597 \sim 633 \text{ nm}$ , (8):  $F_{\max} = 560 \text{ nm}$  付近に現れた。蛍光量子収率( $\phi$ )はポリマー種で差があり、(7); PS= 0.43, PMMA= 0.41、(8); PS= 0.64, PMMA= 0.57 を示した。各ポリマーにおいて、色素(7), (8)は溶液状態とほぼ同じスペクトル、量子収率を示すことが確認された。最後に、キセノン光照射に伴う蛍光フィルムの耐光性試験では、PMMA < PLA < PS の順で安定性は高くなり、色素だけでなくポリマー種で大きく異なった。特に PS フィルムに組み込んだ色素(7)は、100時間のキセノン光照射後でも吸収・蛍光共に65%以上の保持率を示しており、非常に耐光性に優れた色素であることがわかった。



R<sup>1</sup>=H, R<sup>2</sup>=Pr

(1a) X=Y=H

(1b) X=Y=NO<sub>2</sub>

(1c) X=Y=NH<sub>2</sub>

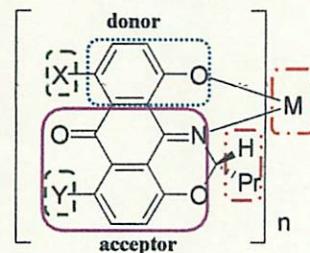
R<sup>1</sup>=R<sup>2</sup>=Me

(2a) X=Y=H

(2b) X=Y=NO<sub>2</sub>

(2c) X=Y=NH<sub>2</sub>

~分子設計 II~



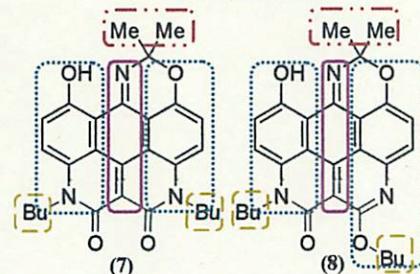
(3a): n=1, M=BF<sub>2</sub>, X=Y=H

(3c): n=1, M=BF<sub>2</sub>, X=Y=NH<sub>2</sub>

(4a): n=2, M=Be, X=Y=H

(4c): n=2, M=Be, X=Y=NH<sub>2</sub>

~分子設計 III~



# 金ナノ粒子を利用したバイオセンサーの開発

応用理学コース 応用化学分野 魚谷 祐樹

## 緒言

金ナノ粒子は、可視領域の光と相互作用(局在表面プラズモン共鳴)し、その溶液は鮮やかな赤色を呈する。その吸収・散乱スペクトルは、粒子の大きさや形状および分散状態によって大きく変化し、金ナノ粒子近傍の環境(局所屈折率)変化にも敏感である。そこで、これを生体分子認識現象とリンクさせることによって、生体分子の高感度な比色検出試薬への応用が期待されている。渡辺らは、このようなバイオセンシング用金ナノ粒子として、チオグルコースで粒子表面を保護した金ナノ粒子を開発し<sup>1)</sup>、その表面に各種生体分子を導入するための固定化技術の開発に取り組んできた。本研究では、マンノースなど単糖類を固定化した糖機能化金ナノ粒子を合成し、局在表面プラズモン共鳴吸収・散乱スペクトルの変化を通して、糖特異的結合タンパク質(レクチン)を選択的かつ高感度で検出する方法について検討した<sup>2)</sup>。

## 結果・考察

チオグルコース修飾金ナノ粒子は、加熱還元下塩化金酸水溶液に還元剤および保護剤としてチオグルコースを添加することで合成した。その粒子表面には、合成過程でカルボキシル基が形成されており、これをスクシンイミドで活性化した後、アミノ化されたマンノースと室温で2時間反応させた。次に、未反応部位をエタノールアミンでブロッキング後、透析によって精製し、マンノース修飾金ナノ粒子を得た。合成したマンノース修飾金ナノ粒子のHEPES緩衝溶液(pH = 7.4)にマンノース特異的なレクチン(Concanavalin A: Con A)を添加すると、溶液の色が赤から青紫に変化し(Figure 1)、散乱スペクトルでも散乱光強度の増加が確認された。一方、マンノースに非特異的なレクチンを添加しても、大きな変化は確認できなかったことから、これらのスペクトル変化がCon Aに特異的であることがわかった。Con Aは4つのサブユニットから形成されており、各サブユニットに1個の糖結合部位が存在する。金ナノ粒子に導入されたマンノースがCon Aと結合することで、Con Aを介して金ナノ粒子が凝集し、色調や散乱光強度に変化をもたらしたと考えられる(Figure 2)。

これらの実験結果は、チオグルコース修飾金ナノ粒子表面に導入する機能分子を変えることで、レクチン以外のタンパク質の検出にも利用できることを示唆しており、多種多様な生体分子を標的としたナノバイオセンサーへの応用が期待できる。

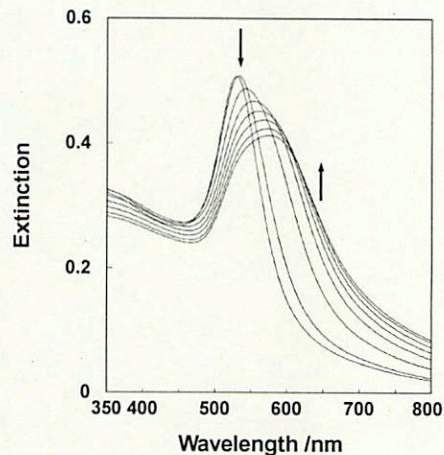


Figure 1. Change in the LSPR absorption spectra of Man-AuNPs upon addition of Con A in 10 mM HEPES buffer.

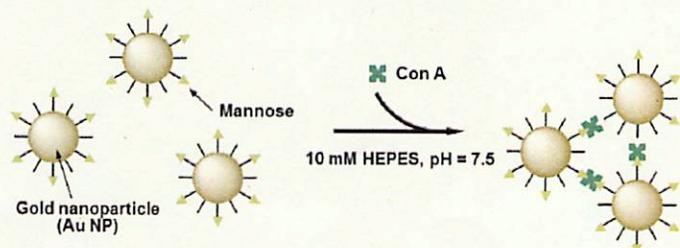


Figure 2. Schematic illustration of Con A-induced AuNP aggregation.

- 1) S. Watanabe, et al., Tetrahedron Lett., 46 (2005) 8827-8829.
- 2) S. Watanabe, et al., Colloids Surf. B, 81 (2010) 570-577.

# 新規 Wells-Dawson 型バナジウム(V)置換ポリオキソメタレート錯体の合成および電気化学的酸化還元反応の解析

応用理学コース 応用化学分野 大西 美穂

【緒言】ポリオキソメタレート錯体(POM)は分析化学、生化学、材料化学など広範囲にわたって応用的研究が行われている無機高分子錯体である<sup>[1]</sup>。特に最近では、触媒化学の分野において、数多くの研究が行われている<sup>[2]</sup>。POMの典型的な構造である Keggin 型や Wells-Dawson 型(Fig. 1)の POM は、多段階かつ多電子に可逆な酸化還元を受ける珍しい錯体である。また、V(V)で置換された V(V)置換型 POM は他の POM に比べ、高い酸化還元電位を持つことなどが知られている。しかし、POM の酸化還元反応メカニズムに関しては、未だに不明瞭な部分が多く残されている。本研究では、新規 Wells-Dawson 型 V(V)置換タングスト硫酸錯体の新規合成を行った。さらに、それらの錯体の酸化還元挙動を調べるために、サイクリックボルタモグラム(CV)の測定も行い、得られたデータとデジタルシミュレーションとのフィッティングから、酸化還元反応メカニズムを解明した。さらに、中心原子がリンやヒ素の Wells-Dawson 型 V(V)置換 POM の酸化還元挙動と比較した。

【結果と考察】H<sub>2</sub>O/CH<sub>3</sub>CN 混合溶媒中より、V(V)置換タングスト硫酸錯体(*n*-Bu<sub>4</sub>N)<sub>5</sub>[1-S<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub>]と(*n*-Bu<sub>4</sub>N)<sub>5</sub>[4-S<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub>]を分離生成することができた。これらの錯体を、支持塩として *n*-Bu<sub>4</sub>NPF<sub>6</sub> を含む CH<sub>3</sub>CN に溶かして CV を測定した。その結果、酸を添加していない時、1-S<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub><sup>5-</sup>は-160 mV (vs. Fc/Fc<sup>+</sup>)に、4-S<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub><sup>5-</sup>は-30 mV に、V(V/IV)に対応する還元波が得られた(Fig. 2 (a))。さらに酸を添加して、CV を測定したところ、酸添加前に見られた V(V/IV)に対応する還元電流値は減少し、正電位側に新たな還元波が得られた。さらに過剰の酸を添加することによって、その還元波は正側にシフトしていった(Fig. 2 (b))。これら一連のデータと <sup>51</sup>V NMR, EPR のデータから、CV のデジタルシミュレーションを行い、酸化還元反応メカニズムを解明した。また、既存の Wells-Dawson 型 POM (1- and 4-X<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub><sup>7-</sup>; X = P or As) の CH<sub>3</sub>CN 中における CV と比較を行った結果、V(V/IV)に対応する酸化還元電位と、錯体の全電荷の間には、直線関係が成り立つことがわかった。

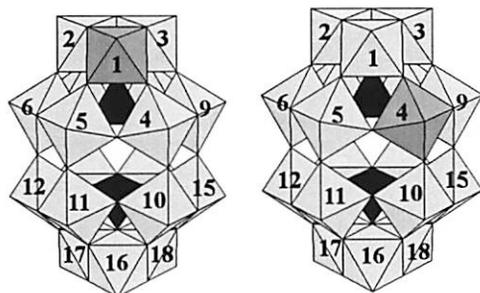


Fig. 1 Structures of 1- and 4-vanadium(V) substituted Wells-Dawson type polyoxometalates.

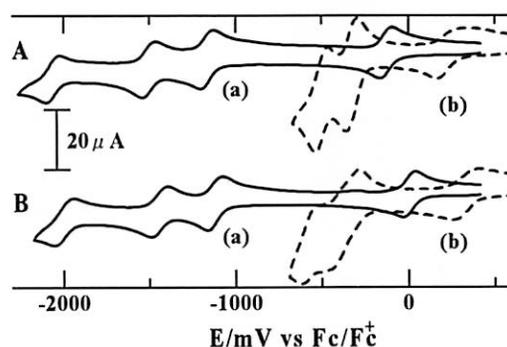


Fig. 2 Cyclic voltammograms of (A) 1- and (B) 4-S<sub>2</sub>VW<sub>17</sub>O<sub>62</sub><sup>5-</sup> in CH<sub>3</sub>CN containing 0.1 M *n*-Bu<sub>4</sub>NPF<sub>6</sub> in the absence of acid (a) and in the presence of 5.0 mM CF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H (b).

【参考文献】 [1] (a) *Chem. Rev.*, **98**, 359-387, (1998); (b) *Chem. Rev.*, **98**, 327-357, (1998); (c) *J. Inorg. Biochem.*, **86**, 657-667, (2001). [2] (a) *Heterocycles*, **76**, 73-97, (2008); (b) *Chem. Rev.*, **98** (1998) 171-198; (c) *Russ. Chem. Rev.*, **56**, 811-825, (1987); (d) *Russ. Chem. Rev.*, **51**, 1075-1088, (1982).

# 複素多環系蛍光色素の分子設計・合成・機能評価

応用理学コース 応用化学分野

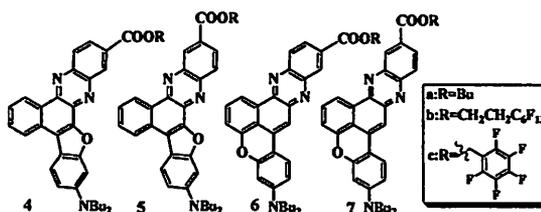
谷上 拓也

[緒言] 蛍光色素の光物性や機能性の解明は、有機光化学の基礎研究から光機能材料への応用まで広い分野で強い関心もたれている。特に、固体発光性、高分子樹脂との相溶性、発光効率及び耐久性に優れた赤色、緑色及び青色発光色素の開発は、発光デバイスへの応用の可能性から注目されている。そこで、本研究では、新規な複素多環系蛍光色素を分子設計・合成し、溶液状態、固体状態、及び高分子樹脂中における光吸収・発光特性及び耐熱・耐光性などの評価を行った。

## [結果・考察]

### 1. 複素多環フェナジン系赤色蛍光色素

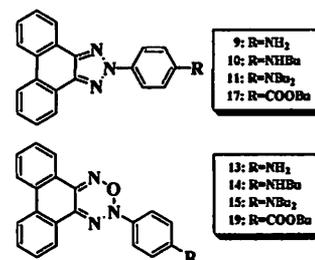
非極性溶媒への溶解性の向上と発光性及び耐久性に及ぼす母体骨格及び置換基の影響を調べるために、複素多環フェナジン系色素(4a-4c), (5a-5c), (6a-6c), (7a-7c)を合成した。



溶液状態では、 $\lambda_{\max}=516-538\text{ nm}$  ( $\epsilon_{\max}=9,300-38,000$ ),  $F_{\max}=594-652\text{ nm}$  ( $\phi=0.21-0.89$ )で、置換基効果が見られ、(a)<(b)<(c)の順に長波長シフトした。発光性に及ぼす影響は、置換位置においては色素(5), (7)が、母体骨格間の比較では、フラン環を有する色素(4), (5)よりもピラン環を有する色素(6), (7)の方が優れていた。固体状態では良好な発光性を示したが、置換基による大きな変化は見られなかった。しかし、母体骨格間においては、溶液状態とは逆に色素(4), (5)の方が良好な発光性を示した。溶解性では、置換基や母体骨格による違いが顕著に見られた。耐光性では、キセノン促進耐光試験機を使用して、10時間照射を行ったところ、いずれの色素も蛍光保持率が80%を超えており、光安定性に優れていることがわかった。耐熱性においては、いずれの色素も330℃付近までは分解を起こさず、熱安定性にも非常に優れていることがわかった。

### 2. 複素多環トリアゾール系青色蛍光色素

青色領域での良好な発光性及び耐久性を有する色素を合成するために、紫外線吸収材として知られるトリアゾール環を母体骨格に導入した複素多環トリアゾール系蛍光色素(9-17)を分子設計・合成し、当研究室で開発した複素多環オキサゾール系蛍光色素との比較を行った。その合成過程において、オキサトリアジン環を有する色素(13-19)を選択的に合成することができた。



溶液状態では、色素(9-17)は $\lambda_{\max}=356-373\text{ nm}$  ( $\epsilon_{\max}=28,100-38,500$ )で青色領域  $F_{\max}=379-448\text{ nm}$  ( $\phi=0.77-0.93$ )に強い蛍光を発した。置換基効果が見られ、(17)<(9)<(10)<(11)の順に長波長シフトした。固体状態でも、色素(10-17)で非常に優れた発光性  $F_{\max}=419-470\text{ nm}$  ( $\phi=0.33-0.42$ )を示すことがわかった。一方、色素(13-19)については $\lambda_{\max}=343-370\text{ nm}$  ( $\epsilon_{\max}=14,400-21,100$ )で吸収は示したが、 $\pi$ 共役が繋がっていないため発光性は示さなかった。耐熱性は、いずれの色素も300℃付近まで分解しないことから、非常に熱安定性に優れていることがわかった。耐光性は上記と同様の方法で評価した。その結果、蛍光保持率が色素(11):69%、色素(17):93%と電子吸引基を有する方が光安定性に優れていることがわかった。複素多環オキサゾール系蛍光色素と比較すると、電子供与基を有する色素、電子吸引基を有する色素ともに本研究で開発した複素多環トリアゾール系蛍光色素の方が良好な光安定性を示す結果となった。

# 固体触媒を用いた乳酸からアクリル酸への脱水反応

応用理学コース 応用化学分野 松浦 由美子

## 1. 諸言

アクリル酸はアクリル繊維, アクリル樹脂, 吸水性ポリマーなどの原料として重要な化合物である。現在, アクリル酸は石油から製造されているが, 石油枯渇や地球温暖化による懸念から石油に代わる再生可能な資源が強く求められている。そこで再生可能なバイオマス資源から容易に製造できる乳酸に着目し, アクリル酸への化学変換について検討した。これまでいくつかの固体酸塩基触媒による乳酸の脱水反応が報告されているが, アクリル酸収率や触媒寿命などに問題があった。そこで, 固体の酸触媒, 酸-塩基両機能性触媒, 塩基触媒を系統的に調べ, アクリル酸生成に最適な酸, 塩基特性をもつ固体触媒を見出すことを目的とした。

## 2. 実験

2.1 触媒調製: 活性炭触媒, シリカ・アルミナ触媒, ゼオライト触媒は, 市販の担体を用いた含浸法により調製した。また, ハイドロキシアパタイト( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot \text{Ca} \cdot \text{P}$ )は,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  水溶液及び  $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{NaOH}$  混合溶液をテフロン内張りオートクレーブに導入し, 110 °C, 14 h で水熱合成した。得られた粉末は XRD, ICP, BET で評価した。

2.2 触媒反応: 固定床流通式反応装置を用い, 38 wt% 乳酸水溶液 20  $\mu\text{l}/\text{min}$ , 反応温度 350 °C, Ar 気流中 40  $\text{ml}/\text{min}$  で行った。生成物は HPLC, GC-TCD, GC-FID, TOC で分析した。

## 3. 結果と考察

Table 1 に酸触媒, 酸-塩基両機能性触媒, 塩基触媒を用いた乳酸の脱水反応の結果を示す。酸触媒において, 乳酸の転化率は高く, アセトアルデヒドが多量に生成した(Entry 1-3)。酸-塩基両機能性触媒において, 硝酸カルシウム担持アルミナ触媒では, アクリル酸の選択率が向上した(Entry 4)。また,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  では, アクリル酸収率が飛躍的に向上し, 転化率 81.0 %, アクリル酸収率 69.5 C-%を示した(Entry 5)。NaY では, 初期活性は高いものの, すぐに触媒活性が低下した(Entry 6)。塩基触媒において, 硝酸カルシウム担持シリカ触媒では, 転化率は低く, アクリル酸の生成はほぼ見られなかった(Entry 7)。MgO では, 乳酸の転化率及び, アクリル酸収率は低かった(Entry 8)。

Fig.1 に Ca-P による経時変化を示す。反応 60 h 後においても, 高い触媒活性及びアクリル酸収率を維持することが分かった。そして, 反応後の触媒はほぼ白色のままで, 反応物の付着などもほぼ見られなかった。

Table 1 様々な固体触媒を用いた乳酸の脱水反応

Entry	固体触媒	転化率 (%)	収率 (C-%)
1	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2^{\text{a)}$	90.9	0.5
2	HY <sup>a)</sup>	68.3	2.5
3	$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{a)}$	93.0	5.0
4	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{b)}$	77.4	14.2
5	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2^{\text{b)}$	80.9	69.5
6	NaY <sup>b)</sup>	20.3	10.7
7	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2^{\text{b)}$	5.0	3.0
8	MgO <sup>b)</sup>	20.5	0.2

流通時間 6 h, 触媒量 a)0.2 g, b)1.0 g

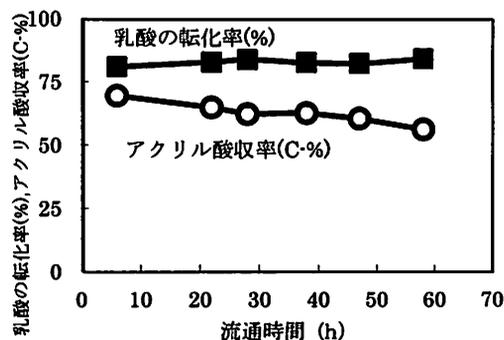


Fig. 1  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  による経時変化

# 両親媒性ブロックコポリマーの自己組織化ナノ構造テンプレートを 利用した金ナノ粒子の組織化とその応用

応用理学コース 応用化学分野

松永 奈美穂

## 1. 緒言

金や銀などの金属ナノ粒子は、局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) に起因した強い光吸収・散乱スペクトルを示し、そのスペクトルは粒子近傍の環境変化に敏感に応答することが知られている。特に、これらナノ粒子を基板上に規則正しく配列したLSPRセンサーは、センシング領域の局在化にともない環境ノイズが低減されるなど、検出精度にすぐれた高感度なナノバイオセンサーへの

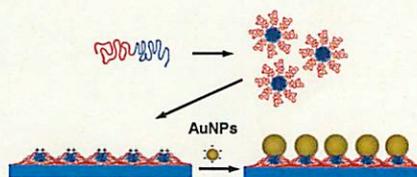


Figure 1. Schematic of the process for block copolymer micelle templated nanopatterning of metal nanoparticles.

応用が期待されている。これまでいくつかのセンサーチップ作製方法が提案されているが、簡便性に欠け製造コストがかさむなど実用化の障害となっている。本研究では、高分子ミセルの自己組織化膜をテンプレートとして、迅速かつ簡便に金ナノ粒子を配列する技術を開発し (Figure. 1) <sup>1)</sup>, LSPRセンサーへの応用を検討した。

## 2. 結果と考察

疎水性のポリスチレン (PS) と親水性のポリビニル-4-ピリジン (P4VP) からなる両親媒性ブロック共重合体 (PS<sub>50000</sub>-*b*-P4VP<sub>13000</sub>) は、P4VP部をコア、PS部をコロナとするコア-コロナ型ミセルを形成する。その0.5 wt%トルエン溶液をガラス基板上にスピコートし、ミセルの自己組織化膜を作製した。さらに、これをTHFの飽和蒸気に40°Cで30分間曝露し、ミセルを再

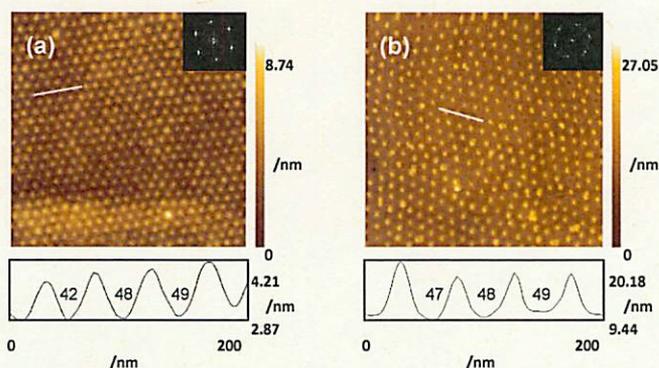


Figure 2. AFM topographic images (1000 × 1000 nm<sup>2</sup>) of the self-assemble monolayer of PS<sub>50000</sub>-*b*-P4VP<sub>13000</sub> micelles before (a) and after (b) immersing an aqueous solution of 10 nm gold nanoparticles for 5 min.

配列させることで規則性を向上させた (Figure 2a) <sup>2)</sup>。次に、これをテンプレートして金ナノ粒子の水溶液に数分間浸漬させた。浸漬後、基板表面を原子間力顕微鏡で観察すると、規則正しく並ぶ各ミセル上に金ナノ粒子がそれぞれ組織化されている様子が観察された (Figure 2b)。水溶液中、ミセルのピリジン部分は、プロトネーションによって正電荷を帯びている。一方、粒子表面は負電荷を帯びており、静電相互作用を介してミセル上に組織化されたものと思われる。ミセルテンプレートは、各ブロックの成分比を変えることで、粒子の受け皿となるミセルの大きさや中心間距離の自在な制御が可能であり、粒径や粒子間隔などセンサー機能に直結する構造因子を、自由自在に制御しながらセンサーチップを作製できる可能性が高い。

1) S.Watanabe, et al., *Chem. Lett.*, **39**, 902-904 (2010).

2) Sang-Hyun Yun, et al., *Chem.Mater.*, **2006**, *18*, 5646.

# 金属錯体系発光色素の分子設計・合成・光物性

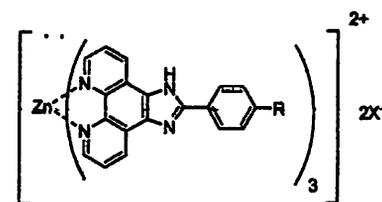
応用理学コース 応用化学分野

山口 真功

蛍光色素は、わずかな環境変化や外部刺激によって、光吸収・発光性が鋭敏に変化する。この動的光物性変化を利用すれば、新しい生体分析試薬や機能性材料開発への応用展開が期待できる。そこで、本研究では、金属キレート錯体形成に伴う顕著な光物性変化や新機能出現を期待して、2種類の新規な蛍光色素配位子を分子設計・合成した。これらのホウ素錯体化や金属錯体化について検討し、溶液状態および固体状態における光物性への影響について調べた。

## 1. イミダゾフェナントロリン系蛍光色素配位子および金属錯体効果

イミダゾフェナントロリン系蛍光色素を配位子とする Zn 錯体を合成し、配位子の置換基を変化させた時に吸収や発光性に及ぼす効果について検討した。その結果、配位子と錯体を比較すると、吸収波長に大きな変化が見られなかったが、メタノール中での配位子の蛍光極大波長は  $F_{\max}=463\text{nm}$  であり、Zn 錯体(1a)-(1c)では  $F_{\max}=513\sim 528\text{nm}$  と著しく長波長側にシフトした。蛍光量子収率も配位子( $\Phi=0.007$ )に対して、Zn 錯体( $\Phi=0.022\sim 0.031$ )では増大し、Zn 錯体化による発光性増大の効果が認められた。さらに、固体状態における光物性への影響はより顕著に現れており、配位子(2)( $\Phi=0.001$ )に対して Zn 錯体(2a)-(2c)( $\Phi=0.031\sim 0.050$ )の方が強い発光性を示した。



R=OEt

R=t-Bu

1a :  $2X^- = \text{SO}_4^{2-}$

2a :  $2X^- = \text{SO}_4^{2-}$

1b :  $2X^- = 2\text{Cl}^-$

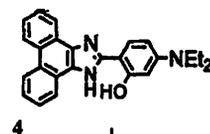
2b :  $2X^- = 2\text{Cl}^-$

1c :  $2X^- = 2\text{Br}^-$

2c :  $2X^- = 2\text{Br}^-$

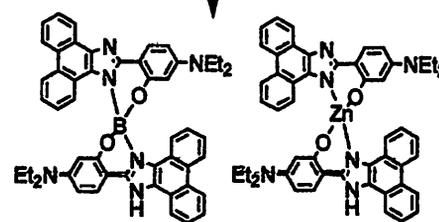
## 2. イミダゾール系蛍光色素配位子および金属錯体効果

1.とはタイプの異なるイミダゾール系蛍光色素(4)を合成し、金属錯体化させることで更なる発光性増大を目指した。溶液状態での光物性を比較すると、配位子(4)は  $\lambda_{\max}=357\text{nm}$  ( $\epsilon_{\max}=39,200$ )、 $F_{\max}=443\text{nm}$  で、ホウ素錯体(5)は  $\lambda_{\max}=366\text{nm}$  ( $\epsilon_{\max}=65,900$ )、 $F_{\max}=416\text{nm}$  となり、吸収・蛍光極大波長に差が見られ、(5)の蛍光極大波長は(4)よりも 27nm 短波長側にシフトした。蛍光量子収率は(4)( $\Phi=0.39$ )に対して、(5)( $\Phi=0.73$ )で増加した。また、(4)と比較すると、Zn 錯体(6)の吸収・蛍光極大波長に差は見られないが、(6)では分子吸光係数・蛍光強度が約 2 倍増加した。固体状態における光物性は、配位子および金属錯体共に溶液中に比べて蛍光極大波長が 16~30nm 長波長側にシフトしており、蛍光強度については(5)が(4)よりも 5.42 倍増加し、(6)は 0.62 倍に減少することが分かった。さらに、溶液状態における色素配位子(4)( $\Phi=0.59$ )および Zn 錯体(6)( $\Phi=0.57$ )と比較して、蛍光母体を変化させた色素配位子(7)( $\Phi=0.7$ )と Zn 錯体(9)( $\Phi=0.7$ )では、発光性を著しく増大させることができた。



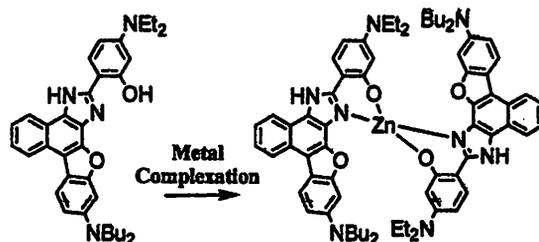
4

Metal Complexation



5

6



7

9

# 遊離酸型ポリオキソメタレート錯体の

## 合成と触媒機能評価

応用理学コース 応用化学分野

山下 恵祐

### Introduction

近年、ポリオキソメタレート錯体(POM)の触媒に関する研究が盛んに行われている[1]。なぜなら、POMの遊離酸は、硫酸や塩酸よりも強酸性であるが、硫酸のような腐食性もなく、熱安定性にも優れており、環境に優しい触媒として期待されているからである。POMは、通常水溶液中で合成され、ジエチルエーテル等によって遊離酸として抽出される。しかし、水-有機混合溶媒中において生成するPOMは、これまで遊離酸として抽出することができなかった。そこで、水-有機混合溶媒中において生成する $S_2V_xM_{18-x}O_{62}$ 、 $AsV_xM_{12-x}O_{40}$ ( $M=Mo,W$ ;  $x=0-2$ )を遊離酸として抽出する方法を検討した。さらに、POMを用いた既報の触媒反応をモデル反応として、 $S_2V_xM_{18-x}O_{62}$ 、 $AsV_xM_{12-x}O_{40}$ の遊離酸の触媒機能について、比較検討した。

### Results and Discussion

既存の方法で $S_2V_xM_{18-x}O_{62}$ 、 $AsV_xM_{12-x}O_{40}$ が生成している反応溶液を調製し、その反応溶液の体積に対して抽出溶媒(ジエチルエーテル等)の量と酸(硫酸や塩酸等)の量の最適化を行って、 $S_2V_xM_{18-x}O_{62}$ 、 $AsV_xM_{12-x}O_{40}$ を遊離酸型として合成する条件を確立した。遊離酸型POMの元素分析を行い、IRスペクトル等によって同定した。例として $S_2W_{18}O_{62}$ の遊離酸と $(n-C_3H_7)_4N^+$ 塩のスペクトルをFig. 1に示す。ほぼ同じスペクトルが得られたことと、元素分析の結果から遊離酸として単離できることが分かった。また、Hammett指示薬を用いて酸性度を求めた結果、どの錯体も硫酸よりも高い酸性度を示した。

次に、遊離酸型POMの触媒機能を評価するために、Scheme 1に示すような、ピルビン酸エステルと無水酢酸との反応をモデル反応として使用した[2]。この反応の触媒として、 $H_2SO_4$ や $H_3PMo_{12}O_{40}$ を用いると、ほとんど反応は進行しなかった。しかし、今回合成した $H_4S_2W_{18}O_{62}$ を用いると、反応がスムーズに進行した。この結果は、今回合成した $H_4S_2W_{18}O_{62}$ の性質、強酸性によるものだと考えている。その他の触媒反応についても同様な比較検討を行った。

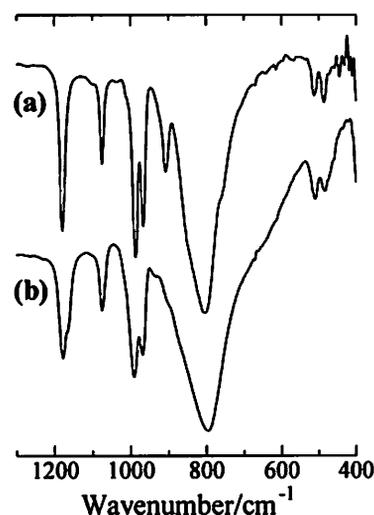
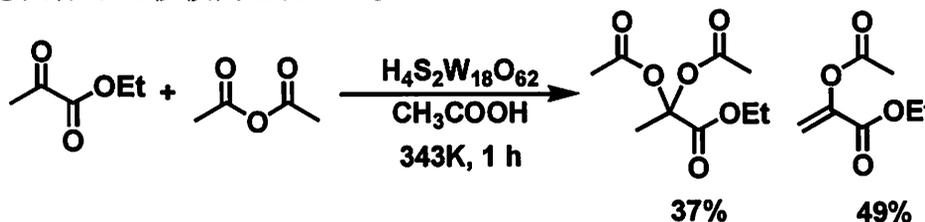


Fig. 1 IR spectra of  $(n-C_3H_7)_4N^+$  salt (a) and free acid (b) of  $S_2W_{18}O_{62}^{4-}$  in KBr pellets.



Scheme 1 Acylation of ethylpyruvate.

### References

[1] T. Ueda and H. Kotsuki, *Heterocycles*, 76, 73 (2008).

[2] W. Ninomiya, M. Sadakane, S. Matsuoka, H. Nakamura, H. Naitou and W. Ueda., *Chem Commun.*, 5239 (2008).

## オウムガイ・アルギニンキナーゼにおける基質結合時の構造変化について

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 松本 保

フォスファゲンキナーゼは、ATP の  $\gamma$  リン酸基をグアニジノ化合物に転移する反応を可逆的に触媒する酵素であり、エネルギー代謝において重要な役割を果たしている。分子系統解析によると、フォスファゲンキナーゼは大きくアルギニンキナーゼグループとクレアチンキナーゼグループとに分かれており、無脊椎動物では主に前者が分布し、脊椎動物では後者のみが分布している。これらのフォスファゲンキナーゼは同じ祖先遺伝子から進化したと考えられ、なかでも、アルギニンキナーゼはフォスファゲンキナーゼの先祖に近いとされている。

現在、アルギニンキナーゼの立体構造として、カプトガニ・アルギニンキナーゼの基質結合時ならびに基質非結合時の構造が報告されている。そして、これらの基質結合時の構造変化によって、基質結合時の相乗効果（先行する基質との結合が、後続する基質との結合を促進する現象）が生じるとされている。また、アルギニンキナーゼの基質結合時には、複数の内部ドメインが接近して最適な活性部位が提供されることが Dynamic domain 解析からわかっている。

本研究では、アルギニンキナーゼの基質結合時においてのみ形成される内部ドメイン間の水素結合の重要性を明らかにするために、オウムガイ・アルギニンキナーゼにおいて、これらの水素結合に関与するアミノ酸残基を置換した複数の変異体酵素を作製し、基質結合時の相乗効果に与える影響について検討した。

まず、カプトガニ・アルギニンキナーゼの立体構造から、基質結合時にのみ内部ドメイン間で形成される 16 個の水素結合と、それを形成する 22 個のアミノ酸残基を特定した(S56, N60, D62, Y89, H90, R126, R129, R193, F194, D226, R229, E254, T273, N274, M279, R280, D324, S326, N327, K328, R329, R330)。そして、これらの水素結合が酵素機能に与える影響を調べるため、オウムガイ・アルギニンキナーゼにおいて 9 種類のアミノ酸置換変異体 (Y89F, H90A, R193A, N274A, S326A, N327A, K328A, R329A, R330A) を作製し、その反応速度パラメータを野生型酵素と比較した。Y89F, H90A, R193A, K328A, および R329A 変異体酵素は詳細な反応速度パラメータの測定に十分な反応速度（野生型酵素の約 16% ~ 96% の  $k_{cat}$  値）が得られた。そして、基質結合時の相乗効果の指標となる  $K_d/K_m$  値は、野生型酵素において 2.2 であるのに対し、Y89F, H90A, R193A, および R329A 変異体では、それぞれ 1.3, 1.1, 0.8, および 1.2 となり、いずれも基質結合時の相乗効果が減少した。しかしながら、K328A 変異体の  $K_d/K_m$  値は 2.2 であり、野生型酵素とほぼ同じ値となった。これは、K328 がその主鎖で Y89 と水素結合を形成しているため、K328A 変異体では、水素結合の破壊に至るほどに主鎖の自由度を高くできなかったためであると考えられる。一方、野生型酵素の約 3% 未満の  $k_{cat}$  値しか得られず、一部のパラメータのみが測定できた S326A, N327A, および R330A 変異体においても、基質結合時の相乗効果が損なわれている可能性が示唆された。なお、N274A 変異体は活性を完全に失い、反応速度パラメータは決定できなかった。

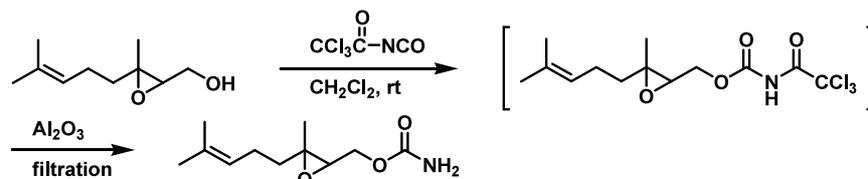
本研究によって特定されたアルギニンキナーゼの基質結合時にのみ形成される内部ドメイン間の水素結合は、その多くが基質結合時の構造変化に重要な役割を果たし、ひとつでも破壊されることで基質結合時の相乗効果や酵素活性に大きな影響を与えることが示された。

# 新しいカルバモイル化反応の開発

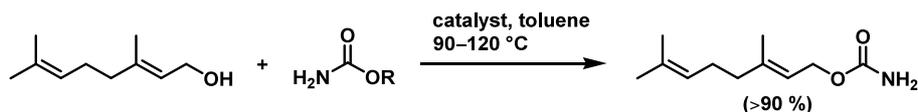
応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

森 下 幸 典

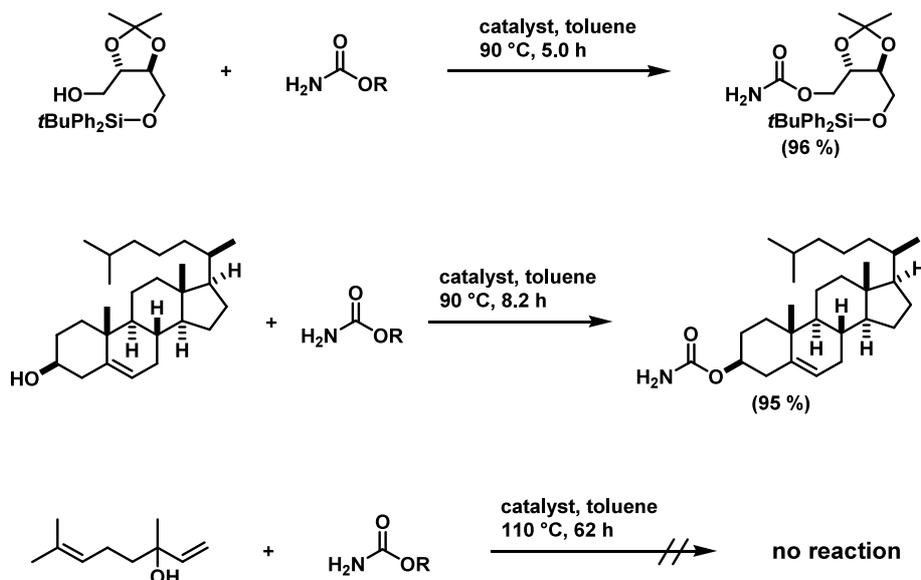
カルバメートは、様々な天然物合成中間体として重要な役割を担っている。カルバメートの合成法として、トリクロロアセチルイソシアナートを用いる手法等が報告されている。この方法は反応性が高くて取り扱いにくい試薬を用いる必要がある。



そこで安定で容易に入手可能な試薬を用いる新しいカルバモイル化反応の開発を検討した。この結果、フェニルカルバメートを用いた、トランスカルバモイル化反応による合成法をゲラニオールをモデル化合物として開発した



この反応の一般性を確認する為に、下記に示した種々のアルコールのカルバモイル化を検討した。その結果、1級と2級のアルコールでは収率良く生成物を得る事が出来た。しかし、3級アルコールの場合には、反応が進行しない事を確認した。



## ミダレクイタボヤの生殖系列における *vasa* 遺伝子発現制御機構の解析

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 柏瀬 幸

あらゆる多細胞動物は、胚発生の時期に生殖細胞を正確にかつ適切なタイミングで生み出すしくみをもっている。脊索動物門尾索動物亜門に属するミダレクイタボヤ (*Botryllus primigenus*) は、無性生殖により増殖し、群体を形成する。一方、有性生殖期には芽体に生殖腺が形成され有性生殖を行う。群体ボヤの生殖細胞形成が胚発生のそれと同じ仕組みで行われているのか、それとも別の仕組みで行われているのか、興味深い問題である。我々は、群体ボヤが生殖系列幹細胞をもち、その幹細胞から生殖細胞への分化が適切に制御されていると考えているが、その分子メカニズムについてはほとんど何も分かっていない。

本研究は、生殖系列幹細胞から生殖細胞が分化するメカニズムを明らかにするために、*Vasa* 遺伝子 (*BpVas*) の転写調節機構の解析を試みた。*BpVas* は生殖系列幹細胞から低密度細胞塊 (生殖前駆細胞) が形成される際に発現が開始し、生殖細胞の分化過程で発現が維持される遺伝子である。まず、TAIL-PCR 法およびゲノムライブラリーのスクリーニングにより *BpVas* を含む領域を 4 種類単離し、塩基配列を決定した (それぞれ、*BpVas*-TAIL, -P4F11, -P5B4, -P7F9 とした)。4 種の *BpVas* 配列全てでイントロンが 1 つ見つかり、4 つのイントロン配列は 88.3% の類似性を示した。*BpVas*-P4F11 では、*BpVas* タンパク質の N 末端側にある zinc-finger モチーフが 6 個コードされており、他の 3 種より 1 個多かった。4 種の *BpVas* 配列は、転写開始点から上流 1216 bp (-1216) まではほぼ一致していたが、さらに上流では配列が大きく異なっていた。これは単離した 4 つの *BpVas* 配列が、それぞれゲノム上の異なる領域に存在することを示唆する。次に、*BpVas*-TAIL を鋳型に -1542 から第 2 エクソン中の翻訳開始点までの DNA 断片を増幅した。この断片にレポーターを連結したコンストラクト [*BpVas* (3845)-*LacZ*] を作製し、*in vivo* リポフェクション法でミダレクイタボヤの間充織細胞に導入した。導入後 3 日間飼育し、ホールマウント *in situ* ハイブリダイゼーション法で *LacZ* mRNA の発現を検出した。その結果、卵母細胞でのみ *LacZ* の発現が見られ、その他の生殖系列細胞では発現が見られなかった。このことから、*BpVas*-TAIL の -1542 から第 1 イントロン全長を含む 3845 bp は生殖系列細胞での *BpVas* の発現を再現するのに十分でないことが示唆された。また、単離した 4 種類の *BpVas* の発現時期や発現場所がそれぞれ異なる可能性が考えられた。これらのことから、生殖系列細胞での *BpVas* の発現を再現するには、*BpVas*-TAIL の -1542 よりさらに上流の配列を組み込むこと、さらに、他の 3 つの *BpVas* 配列を組み込んだレポーターコンストラクトの作製が必要と考えられる。

## カタユレイボヤの神経管形成における *cdx* 遺伝子の役割

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

川島 大典

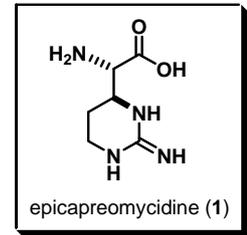
カタユレイボヤ (*Ciona intestinalis*) の中枢神経系は、その形成過程において管構造をとる。神経管の形態形成運動には、細胞外分泌性のシグナル因子である Nodal が関与する。転写因子 Cdx は、Nodal による誘導を受けて原腸胚期の予定神経管細胞で発現し、その機能を阻害すると神経管が閉じない。したがって、Cdx が Nodal による神経管形成の制御を仲介することが考えられる。しかし、Nodal シグナル伝達経路のエフェクターである FoxH と Smad が直接 *cdx* の転写を活性化するのか、Nodal の別の標的遺伝子の産物である ZicL が *cdx* の転写を活性化するのかはわかっていない。本研究では、*cdx* の転写を直接活性化する因子を明らかにするために、*cdx* の上流配列約 2.3 kb を用いてレポーター解析を行った。この上流配列は、FoxH 結合配列の類似配列を 4 個と Smad 結合配列の類似配列を 10 個、ZicL 結合配列の類似配列を 11 個もつ。2.3 kb の上流配列を含むレポーター遺伝子は、尾芽胚期の神経管細胞で発現した。しかし、レポーター遺伝子は原腸胚期の予定神経管細胞では発現せず、筋肉系統の細胞で異所的に発現した。原腸胚期と尾芽胚期における *cdx* の転写活性化はそれぞれ異なるエンハンサーエレメントにより調節されているのかもしれない。Nodal によって活性化されるエンハンサー領域は、今回同定できなかった。神経管の形づくりにおいては、Nodal が Cdx を活性化し、Cdx が形態形成を進める因子の発現を制御すると考えられる。しかし、カタユレイボヤにおける Cdx の標的遺伝子は知られていない。既知の Nodal 標的遺伝子 15 個が Cdx による制御を受けるかどうかを確かめるため、Cdx の機能を阻害した胚における発現を観察した。それらのうち、2 個の遺伝子の発現パターンに変化が見られた。細胞極性の制御に関わる因子 *rho-like 2* と細胞外基質因子の *type IV collagen1/3/5* は、本来 *cdx* の発現する神経板側部の予定神経管細胞で発現する。しかし、Cdx の機能を阻害した胚ではその発現が弱くなった。このことから、これらの遺伝子が Cdx の下流で神経管形成に関与する可能性が示唆された。

幹細胞とは、多分化能と自己複製能を備えた細胞である。本研究で用いたミダレキクイタボヤでは、間充織細胞の一種であるヘモブラストが幹細胞として機能していることが知られている。血管出芽と呼ばれる無性生殖では、ヘモブラストが被囊血管内に凝集塊を形成し、表皮を除く全ての体細胞へと分化することで新個体を生み出す。また、一部のヘモブラストは個体の生殖腺および生殖系列細胞を形成する。よって、ミダレキクイタボヤの生殖において、必要な細胞が安定的に供給されるためには、ヘモブラスト（幹細胞）を適切に制御する仕組みが不可欠である。本研究では、ヘモブラストの多分化能と自己複製能の維持機構に関与する遺伝子として、*SoxB* グループ遺伝子に注目し、それらの単離、発現解析および機能解析を行った。まず、RACE 法および cDNA ライブラリーのスクリーニングにより翻訳領域の全長が含まれた 2 種類の cDNA 断片を単離し、*BpSoxB1*, *BpSoxB2* とした。両者の予想アミノ酸配列には、*Sox* タンパク質に保存された HMG ドメインが見つかった。また、様々な動物の *SoxB* グループ遺伝子の配列情報を用いて分子系統樹を作成したところ、*BpSoxB1* は *SoxB1* クラスタに、*BpSoxB2* は *SoxB2* クラスタに含まれた。*In situ* hybridization 法により、mRNA の発現を調べた結果、少数の間充織細胞にて *BpSoxB1*, *BpSoxB2* の発現が観察された。一方、終末分化した組織や器官では *BpSoxB1*, *BpSoxB2* の発現は観察されなかった。また、発達中の芽体や分化の過程にあると考えられる細胞でも発現が見られなかった。*BpSoxB1*, *BpSoxB2* を発現する細胞は、形態的特徴からヘモブラストであることが示唆された。また、*BpSoxB1*, *BpSoxB2* の発現が検出されないヘモブラストがあった。更に、*BpSoxB1* については、接触した 2 つの細胞のうち片方だけで *BpSoxB1* が発現している例が観察された。次に、siRNA を用いたノックダウン法で *BpSoxB1*, *BpSoxB2* の機能を阻害し、*BpSoxB1*, *BpSoxB2* を発現するヘモブラストの役割を調べた。Vascularization 法で血管出芽を誘導した群体に *BpSoxB1*, *BpSoxB2* を標的とする siRNA を導入し、血管出芽への影響を調べた。コントロールとして *lacZ* に対する siRNA を導入したサンプルでは、ノックダウン処理から 1~5.5 日後で、全てのサンプル（5 例）において血管出芽による芽体形成が観察された。一方、*BpSoxB1* に対する siRNA で処理したサンプルの芽体形成はコントロール群に比べて 5 日遅れが見られた。また、*BpSoxB2* をノックダウンしたサンプルでは、コントロール群同様の芽体形成が 3 例、芽体形成の遅れが 2 例で観察された。以上の結果は、*BpSoxB1* を発現するヘモブラストが血管出芽の芽体形成に重要な役割を果たしている可能性を示している。しかし、本研究における発現解析では、血管出芽による芽体で *BpSoxB1* の発現が検出されておらず、今後この点を考慮した解析と議論が必要である。

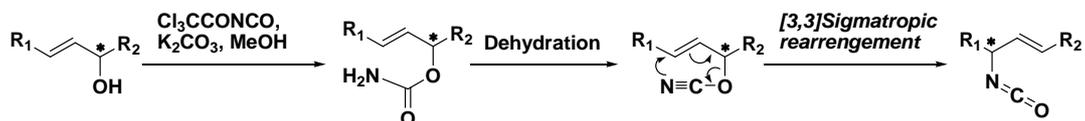
# 1,2-ジアミノ骨格を持つ天然物の合成研究

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 草葉 昌平

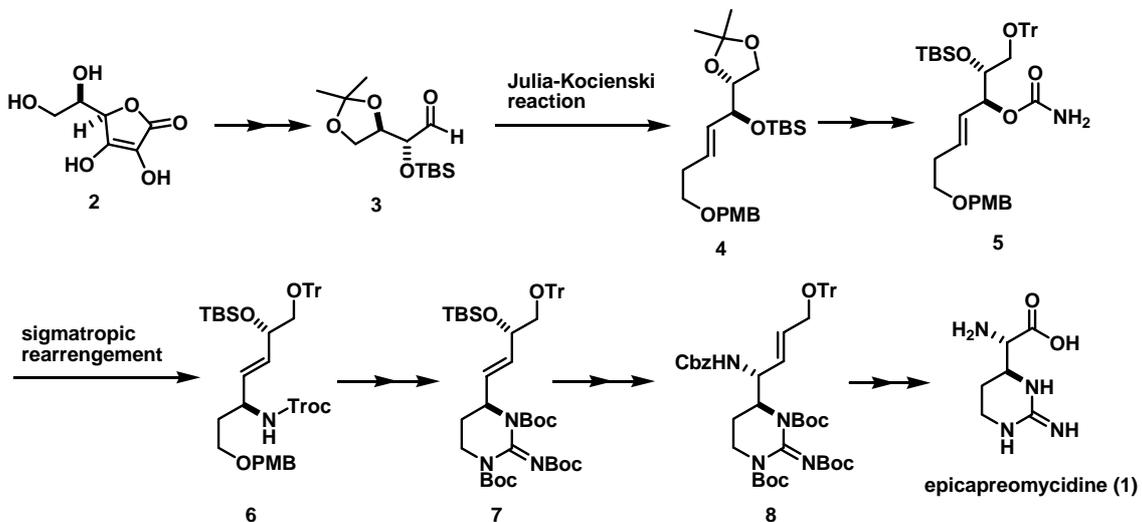
自然界より多様な 1,2 - ジアミノ骨格を持つ天然物が見出されている。そのひとつとして、ペプチド系抗生物質キモスタチン A の構成単位で特異な環状グアニジン骨格を持つエピカプレオマイシジン(1)が知られている。本研究ではアリルシアナートの[3,3]-シグマトロピー転位反応を鍵反応とした。エピカプレオマイシジン(1)の合成を目的とした。



## [3,3]-シグマトロピー転位反応



D-アラボアスコルビン酸(2)を出発原料として、数段階を経てアルデヒド 3 とした。これを Julia-Kocienski 反応によって炭素鎖を伸長して 4 とし、さらに[3,3]-シグマトロピー転位反応を用いて Troc-カルバメート 6 を合成した。そして数段階を経てグアニジン環を導入して 7 とした。さらに二回目の[3,3]-シグマトロピー転位反応を用いて 1,2 - ジアミノ骨格を構築して 8 を得た。8 の二重結合を酸化的に切断しカルボン酸とした後、保護基を除去することでエピカプレオマイシジン(1)の合成に成功した。



# 宝石サンゴ・ミトコンドリアゲノムの構造とその多様性

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 米田 悠佑

サンゴとは、刺胞動物門花虫綱に属する生物で骨格を発達させる種の総称である。宝石サンゴとは八放サンゴ亜綱ヤギ目サンゴ科 (*Coralliidae*)に属するサンゴのことであり、内骨格は装飾品等に用いられる。サンゴ科には *Corallium* 属のみ存在していたが、2003年に *Paracorallium* 属が創設されて1科2属となった。本研究で使用したアカサンゴ (*Paracorallium japonicum*)は *Paracorallium* 属、シロサンゴ (*Corallium konojoi*)とモモイロサンゴ (*Corallium elatius*)は *Corallium* 属に分類されている。

刺胞動物門花虫綱全般の分子系統解析としては、2006年、Medina らによって10を超える生物種のミトコンドリアゲノム (mt ゲノム)配列が決定され、その比較が行われている。しかし、宝石サンゴに限れば、その分子系統解析はあまり行われていないのが現状である。

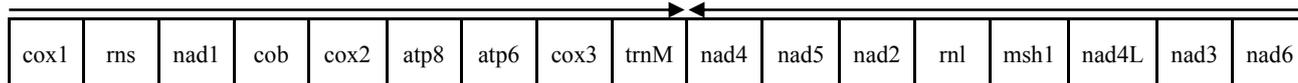
本研究では、*P. japonicum*, *C. konojoi* および *C. elatius* の mt ゲノムの全塩基配列を決定し、宝石サンゴの mt ゲノムの構造を初めて明らかにした。また、mt ゲノムが核ゲノムよりも進化速度が速いことや母系遺伝であることなどの特徴を活かして、宝石サンゴの生物種間、個体群間の遺伝系統や進化について解析し、さらに、*P. japonicum* が *Corallium* 属から *Paracorallium* 属に移されたことが妥当であったかどうかについても検討した。

配列解析の結果、*P. japonicum* の mt ゲノムの全長は18913 bp、*C. konojoi* および *C. elatius* の mt ゲノムの全長は18969 bpであった。*C. konojoi* と *C. elatius* の mt ゲノムはわずか10塩基が異なるのみであった。*P. japonicum* と *C. konojoi* の mt ゲノムにおいても、各遺伝子の塩基配列及び推定されるアミノ酸配列は95.46~100%という高い配列一致率を示し、分子系統樹からも両者は非常に近縁であることが示された。しかし、*P. japonicum* と *C. konojoi* の mt ゲノムでは、遺伝子の並びが大きく異なっていることがわかった。刺胞動物において mt ゲノムの遺伝子の並びの相違は、少なくとも亜科レベル、多くは亜目あるいは目レベルにおいて見られる。この結果は、サンゴ科が *Corallium* 属と *Paracorallium* 属に分けられ、アカサンゴ (*P. japonicum*)が *Paracorallium* 属に移されたことを支持している。

興味深いことに、*P. japonicum* と *C. konojoi* において遺伝子の逆転が起こったと考えられる領域に反復配列が見つかった。この反復配列は、この遺伝子再配置のメカニズムを考える上で重要な要素となることが推測された。

また、*P. japonicum* の種内変異を調べるために、異なる採取地 (鹿児島産、高知産、沖縄産)における7個体の mt ゲノムの配列解析を行った。その結果、採取地による塩基配列の違いは *rns*, *rnl*, *nad5*, *msh1* 遺伝子 (合計で8154塩基を構成)に集中し、全体として10箇所遺伝子多型が観られた。

## ・アカサンゴ (*P. japonicum*)の mt ゲノム



## ・シロサンゴ (*C. konojoi*)の mt ゲノム

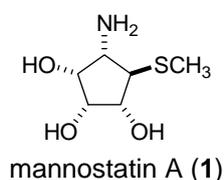


# マンノスタチン A の合成研究

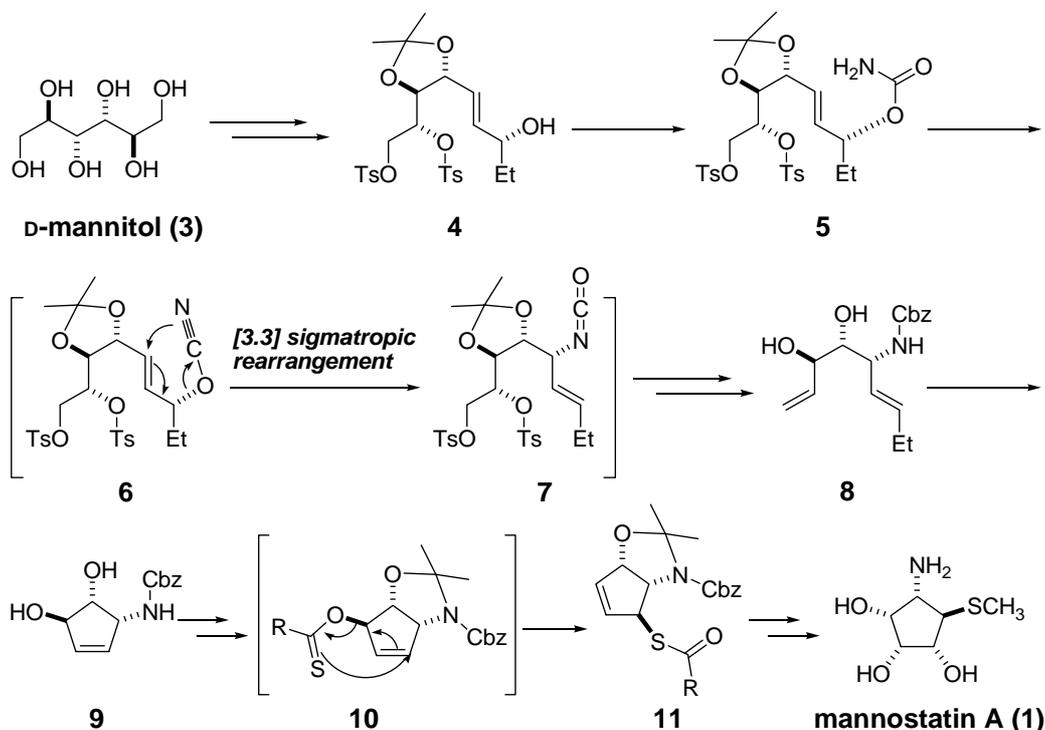
応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 崎山直人

マンノスタチン A(1)は1989年に微生物化学研究所の梅沢らによって土壌微生物 *Streptoverticillium uerticillus* の培養液より新規なグリコシダーゼ阻害剤として単離・構造決定された。構造的な特徴としてメチルチオ基と、シス配置の3つのヒドロキシル基とアミノ基によって修飾されたシクロペンタン骨格を持つ。

生理活性としてはラット精巢上体の  $\alpha$ -マンノシダーゼに作用する強力な拮抗阻害剤である。また、ラットの肝臓リソゾーム、タチナタマメ、グリーンビーンズ由来の  $\alpha$ -マンノシダーゼを阻害する。本研究では安価で入手可能な D-マンニトールを出発原料としたマンノスタチン A の合成を目的とした。



D-マンニトール 3 を出発原料として数段階を経て立体選択的にアリルアルコール 4 を得た。4 をアリルカルバメート 5 へと誘導した。得られた 5 の脱水反応によって発生するアリルシアナート 6 の[3.3]シグマトロピー転位反応によりアリルイソシアナート 7 とし、数段階を経て 1,6-ジエン 8 を構築した。さらに 8 の閉環メタセシス反応によって、シクロペンテン 9 とした。さらに 9 を 10 とし、ヘテロクライゼン反応を利用し 11 へと誘導した。最後にチオメチル基へ変換後、四酸化オスミウムによるジヒドロキシル化と脱保護を行い、マンノスタチン A(1)の合成に成功した。



## ミダレクイタボヤの胚発生における生殖系列形成機構の解析

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

田代 真那美

無性生殖で増殖し群体を形成するミダレクイタボヤ (*Botryllus primigenus*) は、有性生殖期になると芽体に生殖腺が形成され、生殖細胞が分化する。このとき、生殖細胞の起源は、群体内にストックされた生殖系列幹細胞である。一方で、後生動物の生殖系列は、胚発生の早い時期に体細胞から分離され、体細胞系列とは異なる発生過程を進行することが知られている。しかし、ミダレクイタボヤの胚発生期における生殖系列細胞の形成過程についての知見は全くなく、生殖系列幹細胞の起源も不明であった。これらのことを明らかにするため、本研究では、胚発生過程から幼生期における生殖系列のマーカ分子の発現を解析した。まず、初期胚における *Vasa* 遺伝子 (*BpVas*) の発現を whole-mount *in situ* hybridization 法で調べた。その結果、4細胞期から16細胞期まで後方2つの割球の後極に *BpVas* mRNA の局在が見られた。その後、胞胚期と原腸胚では後方2つの割球で発現が見られた。神経胚では、将来尾部になる領域で前後に並んだ2つの腹側割球が、尾芽胚では尾部の2つの腹側割球が *BpVas* を発現した。この発現パターンは、同じホヤ類のカユウレイボヤ胚における *Vasa* の発現と類似しており、ミダレクイタボヤの初期発生過程で生殖系列が形成されていること強く示唆する初めて証拠である。しかし、さらに発生が進むと、*BpVas* mRNA は検出されなくなり *BpVas* 発現細胞の運命は分からなくなった。次に、*BpVas* タンパク質に対するウサギポリクローナル抗体を作製し、免疫組織化学により *BpVas* 発現細胞の検出を試みた。その結果、幼生の尾部では *BpVas* タンパク質の発現が観察されなかったが、体幹部にある直径約 10 $\mu$ m の細胞でシグナルが見られた。この細胞が尾芽胚の尾部で見られた *BpVas* 発現細胞もしくはその子孫細胞である可能性が考えられたが、形態および胚における細胞の位置が大きく異なっており、結論を得るには更なる解析が必要である。また、本研究では、*BpVas* 発現細胞の発生運命を追跡するための新たな実験系の構築も試みた。*BpVas* の 3'UTR を連結することで、胚において *BpVas* mRNA と同様の挙動を示すように設計したレポーターRNA を合成した。このレポーターを胚に導入し、追跡することで、初期胚で観察された *BpVas* 発現細胞の発生運命が明らかとなると期待できる。

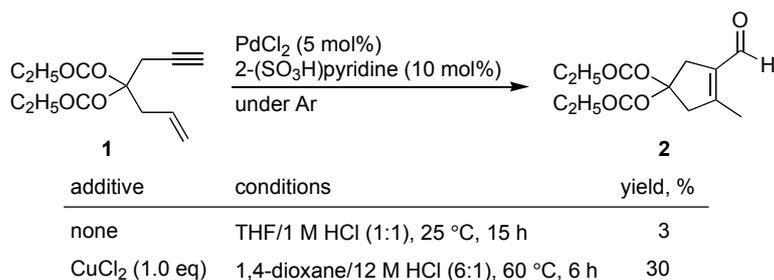
# パラジウム化合物による 1,6-エンイン類の水和環化反応

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 長山 宏明

分子内に炭素-炭素二重結合と三重結合を併せ持つエンイン化合物は遷移金属化合物存在下，アルケンあるいはアルキンそれぞれ単独に存在するときとは異なった特徴的な反応性を示す。求核剤共存下での求核的環化反応は，環化様式と求核位置の組み合わせによって多様な生成物を与える。水を求核剤とする水和環化反応は，アルコールあるいはカルボニル基を含む種々の環状化合物を合成することができるため有機合成上有用性の高い手法となるが，一部を除いて未開拓のままである。

アルケンやアルキンなどの不飽和化合物は，酸性条件下で水和反応が起こる。水の求核性は低いですが，酸性条件下では基質の多重結合がプロトン化されることで活性なカルボカチオン中間体になるため，弱い求核剤である水でも反応が進行する。パラジウムは環化異性化，求核的環化等，エンイン化合物の反応における触媒の代表的な金属として認知されている。これら酸による水和反応促進効果とパラジウム化合物の持つエンイン基質に対する反応促進効果の相乗効果により水和環化反応が進行するとの考えのもと，これまでに当研究室で新しい反応系を見出している。具体的には，マロン酸由来のエンイン化合物 **1** を，パラジウム触媒存在下，塩酸を含む有機溶媒との混合系で 15 時間反応させることにより，低収率ではあるが水和環化生成物 **2** が生成することを確認している。本研究では，収率の向上を目指して，反応条件の最適化を行った。

溶媒，酸濃度，添加剤等各種パラメータを系統的に調査した結果，溶媒として 1,4-ジオキササン-12 M 塩酸 (6:1) 混合系を用いて 1 当量の塩化銅 (II) 存在下，60 °C の条件で活性は 10 倍以上向上し，6 時間で 30% の **2** を得ることができた。塩化銅を添加する代わりに，空気あるいは酸素雰囲気下，反応を行っても同様の活性向上が見られた。塩化銅は酸化剤として働いていると考えられる。酸化的条件であることが本反応系実現のために重要であることを明らかにした。



## カタユウレイボヤ胚における動物半球特異的遺伝子のエンハンサー解析

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

堀川 陽輔

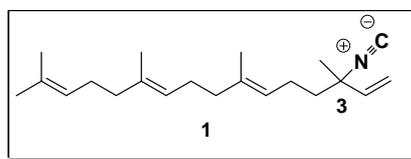
ホヤ胚の卵割期における動物半球の細胞のほとんどは、将来表皮や神経に分化する。カタユウレイボヤ (*Ciona intestinalis*) の Ci-GATAa は動物半球においてのみ活性化する母性の転写因子で、動物半球特異的に遺伝子の転写を活性化する。GATA 転写因子は Ets など、他の転写因子と協同で遺伝子の発現を活性化することが知られている。そのため、Ci-GATAa のみによって動物半球の遺伝子発現がコントロールされているわけではなく、他の因子との協同的な作用により転写量などが制御されていると考えられる。そこで、Ci-GATAa と協同的な作用をする因子が存在するのか、またその因子が何であるのかを突き止めることを目的として、動物半球において特異的に発現する遺伝子のエンハンサーを解析した。

本研究では、16 細胞胚において、動物半球の 8 つの割球で特異的に発現する遺伝子 *Ci-GDF1/3*, *Ci-ephrin-Ad*, *Ci-Fz4* のエンハンサー領域を解析した。それぞれの遺伝子の 5' 上流領域をレポーター遺伝子 *lacZ* につないで受精卵に導入し、発現解析を行った。その結果、*Ci-GDF1/3* については上流 -205 ~ -69, *Ci-ephrin-Ad* については上流 -403 ~ -344, *Ci-Fz4* については上流 -2000 ~ -821 の領域が、16 細胞胚の動物半球における転写活性化に必要であることがわかった。これらの領域を動物半球エンハンサーと表記する。*Ci-ephrin-Ad* の上流 403 bp には Sox 転写因子と GATA 転写因子の結合配列が見つかった。16 細胞胚において動物半球では 2 つの Sox 転写因子 (Ci-SoxB1 と Ci-SoxF) が発現する。そこで、*Ci-ephrin-Ad* の上流 403 bp の領域内の Sox 結合配列と GATA 結合配列に点突然変異を導入し、レポーター解析を行った。その結果、*Ci-ephrin-Ad* 上流 -403 ~ -344 に 2 つ存在する GATA 結合配列のうち、3' 側に存在する GATA 結合配列が 16 細胞胚における転写活性化に必要であることがわかった。また、*Ci-ephrin-Ad* 上流の 403 bp に存在する 2 つの Sox 結合配列は、*Ci-ephrin-Ad* の転写活性化に必要ないことがわかった。対照的に、アンチセンスオリゴを用いて Ci-SoxB1 の機能を阻害すると、*Ci-ephrin-Ad* レポーター遺伝子の発現が消失した。これらの結果より、Ci-SoxB1 は Ci-GATAa と協同的に働く因子の転写活性化を介して、間接的に *Ci-ephrin-Ad* の転写を活性化する可能性が示唆された。また、*Ci-GDF1/3*, *Ci-ephrinAd*, *Ci-Fz4* の動物半球エンハンサーには、共通して非常に類似性の高い 8 塩基 [GA(T/G)AAGGG] のモチーフが見つかった。今後は、このモチーフがそれぞれの遺伝子の転写に必要かどうかを検証することが課題である。

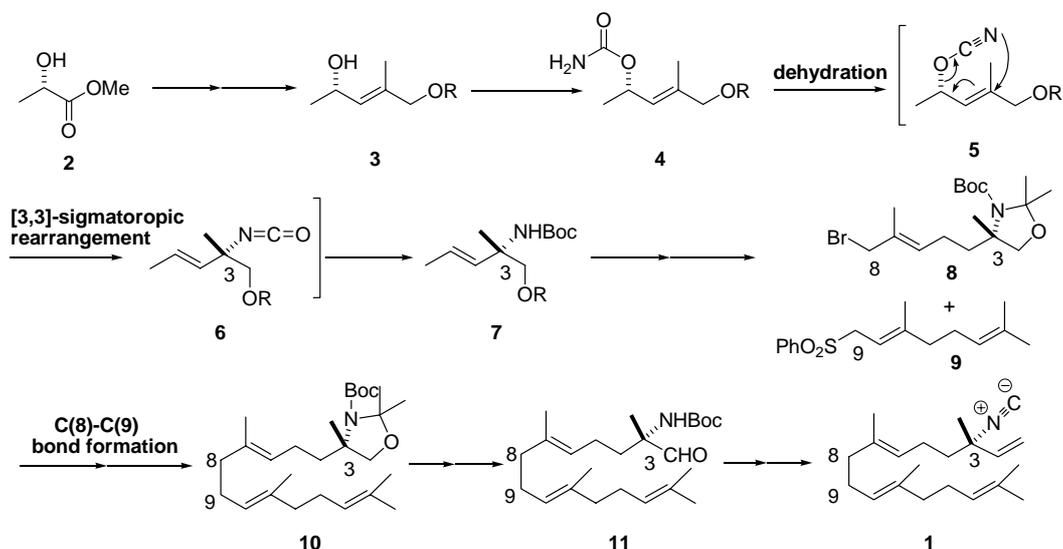
# 光学活性な海洋天然物ゲラニルリナロイソシアニドの合成研究

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 松田泰徳

ゲラニルリナロイソシアニド **1** は、海綿より抗菌性を示す物質としてハワイ大学の Scheuer 教授によって単離・構造決定された。この海洋天然物は、イソニトリル基を持つジテルペンとして、初めて報告された例である。しかし 3 位の立体化学は未決定である。そこで、両鏡像異性体が入手可能な乳酸メチルエステルを出発原料として選び、アリルシアナートのシグマトロピー反応もちいて光学活性な **1** の合成と立体化学の決定を目的として研究を行った。



L-乳酸メチルエステル **2** を出発原料として、数段階経てアリルカルバメート **3** を得た。得られた **3** の脱水反応によって発生するアリルシアナート **4** からのアリルイソシアナートの [3,3]シグマトロピー転位反応によって、四級不斉炭素を構築した。さらに数段階を経て臭化アリル **8** へと変換し、別途合成したアリルスルホン **9** とのカップリング反応をもちいて炭素鎖を伸ばし **10** を得た。続いて **10** からアルデヒド **11** へと変換し、Wittig 反応によって末端オレフィン を構築した。さらに、アミノ基をイソニトリル基へと変換することで、光学活性なゲラニルリナロイソシアニド **1** の全合成を行い、3 位の絶対立体配置を決定した。



# 秩父累帯北帯の谷ノ内地すべりの地すべり構造と運動像

応用理学コース 災害科学分野

佐々木 誠

近年、高知県の秩父累帯北帯には玄武岩をすべり面とする地すべりの分布が明らかになってきた。高知県高岡郡越知町片岡に分布する谷ノ内地すべりもそのひとつで、体積  $10^7\text{m}^3$  オーダーの大規模地すべりである。これまでに多くの調査がなされてきたが、既往研究間で、地すべりの基本的情報である地すべりの地表面輪郭構造の位置に関する見解が異なっている。そこで修論研究では、これまで明確ではなかった地すべり構造を規制している地質構造の解明に重点を置き、地すべり構造と運動像を明らかにした。

地質は、主滑落崖の屈曲部を中心に、上位からチャート、泥岩、砂岩・泥岩互層と重なり、砂岩・泥岩互層中に挟在する玄武岩の薄層の一部がすべり層になっている。岩相境界面や片理の傾斜は  $10^\circ$  前後と緩く、NE 方向に褶曲軸をもつ緩やかな背斜・向斜が複数発達しているが、大局的な岩相分布は SE 傾斜である。これらを横切って、地層の走向方向と最大傾斜方向の断層が多数発達し、地すべり構造を規制している。

谷ノ内地すべりは尾根の線状凹地から成長し、特異な矩形の地表面輪郭構造をもつことが分かった。主滑落崖は「く」の字に折れ曲がり、主滑落崖に対してそれぞれ直交する方向に側方部が延びている。両側方部に滑落崖はない。左側方部は谷ノ内川に沿い、右側方部は谷屋敷川に沿って、両者は鋭角で連結する。このため、地すべり末端に向かって移動体の幅は急激に狭まり、尖端は尖っている。

主滑落崖は、NE 方向から NNW 方向に「く」の字に折れ曲がる尾根に沿って形成され、尾根は東側が滑落して非対称な横断面形をしている。NE 方向の主滑落崖はほぼ尾根の端から端まで延びる線状凹地に規制されている。その位置には地質分布から推定された断層が走っている。主滑落崖の比高は中央部で最も大きく、折れ曲がり地点に向けて急速に小さくなる。NNW 方向の主滑落崖になると、比高はさらに小さくなり、SSE 端でゼロになる。地すべり移動体は時計回りに回転していると判断した。NNW 方向の主滑落崖が断層の規制は地質分布からは不明であるが、折れ曲がり部の明瞭な鞍部の存在、主滑落崖の背後にそれと平行する多くの線状凹地や段差地形が発達していたこと、硬質なチャートを切断していることから、複数の断層に規制された線状凹地群の一部が連結して主滑落崖に成長したと推察した。こういった尾根の裂け目は主滑落崖よりもさらに先の尾根にも分布している。これは尾根の裂け目が地すべり運動に先行して形成されていたことを示唆する。

主滑落崖の SSE 端から延びる右側方境界は谷屋敷川の左岸斜面の中腹を通ることが玄武岩すべり層の分布から明らかになった。その玄武岩すべり層は谷ノ内川の右岸斜面中腹まで連続するが、東西性の断層を境に、すべり面標高が下がり、谷ノ内川河床を通る。この東西性の断層は主滑落崖の折れ曲がり部の南まで延びている。東西性の断層に規制されて、ほぼ東西に伸長した 2 つの中規模地すべりが発生している。このうち、北側に位置する谷ノ内川の河床に到達した方の地すべりは、谷ノ内川の屈曲、河成段丘の偏在分布、谷ノ内川の閉塞（地すべりダム地形）、擁壁のクラックなどの変位センスから、地すべり移動体は東進し、末端で時計回りに回転したと推定した。このような地表踏査から得られた運動像は既往のボーリングコア鑑定と動態観測から得られた結果が支持している。

## バングラデシュにおける 2008–2010 年のシビアローカルストームの発生環境場

応用理学コース 災害科学分野

高橋 宏児

バングラデシュはインド亜大陸北東部に位置し、世界的な多雨地帯として知られており、年間降水量の約70%がモンスーン期（6–9月）に集中している。それら降水によって、国土の50%が標高7m以下の低地であるために、毎年のように洪水などが発生し、主な気象災害として知られている。しかし、プレモンスーン期（3–5月）にはシビアローカルストーム（雹、落雷などの激しい対流現象に伴う気象擾乱）が多発し、毎年甚大な被害が発生している。バングラデシュ及び隣接したインド地域では、シビアローカルストームのことをNor'wester（ノルウェスタ、これら擾乱が概して北西の方向からやってくることに由来する）と呼んでいる。本研究では、シビアローカルストーム発生日の総観場を明らかにし、今後の予測等に貢献することを目的とする。

使用した気象データは、シビアローカルストームの発生日の抽出にはコックスバザールのレーダー反射強度データ、大気鉛直構造の特徴はダッカにおける00UTC（06BST）のレーウィンゾンデデータを用いて示した。降水雲の分布は気象衛星ひまわり6号（MTSAT-2）の赤外輝度温度1のデータを用いた。解析期間は2008年5月、2009–2010年のプレモンスーン期（3–5月）とした。

シビアローカルストームの発生日は、Nor'westerが北西の地域からやってくることから、レーダー反射強度の分布がバングラデシュ北西部から南東方向へBow echo状に広がっていくものを抽出した。解析期間中にシビアローカルストーム発生日は6事例（2008年3事例、2010年3事例）であった。発生日の特徴として、ダッカのレーウィンゾンデデータから環境場の熱的不安定による対流の指標であるCAPE（対流有効位置エネルギー）を用いると、6事例中5事例においてCAPEの値が2500J/Kg以上と高くなっている。CAPEの値が378J/Kgと低かった1事例については、シビアローカルストームがバングラデシュの北東部での発生だったために、ダッカにまで影響が及ばなかったと示唆される。

925hPa面における相当温位の分布は、すべての事例においてバングラデシュ全域で340K以上の高相当温位域となっており、そのうち3事例については、バングラデシュから西に面したインド地域において20Kほど相当温位が低くなっている。それらの地域は、2事例においてTBBの分布から、レーダーから距離が離れた降水雲の発生域付近と一致していた。また、925hPa面におけるジオポテンシャル高度と風向風速の分布は6事例共、インドからバングラデシュにかけて低圧部となっている。その南端で南よりの風が強化されることによって、水蒸気輸送が活発化され、上昇流を誘発しやすい状況になっていたことが指摘される。

### 3次元 GPS 速度場から推定した南海トラフの定常的プレート間固着分布

応用理学コース 災害科学分野

平田 諒次

西南日本の地殻変動場は、フィリピン海プレート(PH)の沈み込みによる北西-南東方向の弾性圧縮変形が支配的であり、プレート境界である南海トラフでは約 100 年の周期で海溝型巨大地震が発生している。巨大地震発生サイクルの解明のため、本研究では GPS 変位速度データのインバージョン解析により、南海トラフにおける地震間の定常的なすべり欠損速度分布を推定し、固着状態を議論する。

PH 境界面は紀伊半島の下で屈曲し、四国以西で走向と傾斜角が急変しているため、従来の矩形断層の集合では断層面間に重なりや隔たりが生じ、曲面の形状を十分再現できない。そこで、三角形要素で表現された半無限弾性体内の断層面を扱う Poly3D (Maerten *et al.*, 2005)を使用した。まず、震源分布と構造探査結果から Yoshioka and Murakami (2007)が更新したプレート境界面(深さ 4~60km)を 533 枚の三角形要素で表現した。次に、国土地理院 GPS 連続観測網の西南日本 430 点における 2004 年 1 月~2009 年 12 月の期間の日々の座標値 F3 解から、アムールプレート準拠の水平速度と楕円体高を基準とする上下速度を算出した。インバージョン解を安定させるため、プレート境界縁辺部の固着率がゼロとなる境界条件と、すべり欠損速度が要素間で滑らかに変化する拘束条件を与えた。

インバージョンの結果、土佐湾沖と紀伊半島南方沖の共に深さ 10km 付近のプレート境界面に固着率が 100%に達するすべり欠損速度の大きな領域が推定された。これは、1946 年南海地震のアスペリティ領域と良く一致する。豊後水道では 1996 年、2003 年、2009 年と 6~7 年周期で長期的スロースリップイベント(L-SSE)の発生が確認されている。L-SSE は数ヶ月~1 年かけて応力を解放する地震動を伴わないプレート境界面のすべりであり、2003 年 L-SSE での最大すべり量は 30cm であった。その豊後水道下では約 70%の固着率が推定され、この領域に収束速度 70mm/yr、固着率 70%で期間 6 年間に累積するすべり欠損量は、1 回の L-SSE によって解放されるすべり量に匹敵する。また、西南日本の地殻変動場には中央構造線(MTL)を境とする前弧ブロックの横ずれ運動(5~10mm/yr)も存在する。そこで、MTL の断層モデルを追加したインバージョン解析を行うと、豊後水道下でほぼ西向きであったすべり欠損速度がわずかに北を向き、インバージョンによる推定値と F3 解による観測値との残差が減少した。これは、すべり欠損速度と前弧ブロックの横ずれ運動が分離できた結果である。西南日本の地殻変動場にはこの他に、東北日本弧と西南日本弧の衝突や沖縄トラフの背弧拡大の影響が含まれている。また現在、紀伊半島下での PH 断裂(Ide *et al.*, 2010)が提唱されている。今後、さらに詳細なプレート間固着分布の推定のため、対象領域の拡張や異なる変動源を追加したインバージョン解析が必要である。

# 東海・東南海地震発生領域の地震履歴 —浜名湖湖底にみられる過去 5000 年間の津波堆積物について—

応用理学コース 災害科学分野

古野 北斗

浜名湖は南海トラフを震源とする東海地震と東南海地震の震源域の中間に位置する（地震調査推進本部地震調査委員会，2001）。そのため、東海・東南海域を震源とする巨大海溝型地震とそれに伴う津波は、交通の要所であった浜名湖周囲の町を破壊し地形を変化させるなど、大きな被害をあたえたという歴史記録を残している。歴史記録には、高潮記録のほか4回の地震・津波（明応，慶長，宝永，安政）がAD850年から残されている（都司，1979）。過去の調査（五島，2002）で湖底に津波堆積物が確認されたが年代等がはっきりしておらず正確な地震記録の復元までは至っていない。最近、浜名湖より西約9kmの沿岸低湿地でジオスライサーによるコアリングも行われており（藤原，2008）、これらの結果と対比させることにより湖底に残された地震記録をより詳細に復元させることが可能であると期待される。

本研究の目的は浜名湖湖底堆積物から読み取れる地震記録を復元することである。まず、堆積イベントの分類と認定のために高分解能音波探査によって湖底に広がる音響反射面を追跡した。次に、採取したコア試料を分析し、 $^{14}\text{C}$ 年代測定や湖底環境の変化から津波襲来イベントを推定、歴史記録と対応する地震を特定する。

湖盆全域に広がる音響反射面は湖底面より120cmにみられる。さらに、小崖より500mの範囲において反射面が褶曲する様子が見られ、下部の堆積物が傾斜していることが分かった。採取したコアのうち3地点5本（全長402～350cm）を、分析した結果、肉眼では全体的に灰白色の泥の中に数枚の砂層が認められ、北側のコア（260cm）と中間のコア（210cm）にスコリア火山灰層（大沢スコリア）を確認した。年代は約5000yBPまでカバーしている。帯磁率は2.0から15.0( $10^{-6}\text{S. I.}$ )を示し、おもに砂層で値が上昇、火山灰層では特に高い。海水流入を示すナノ化石、珪質鞭毛藻、有孔虫は、すべてが存在する層、珪質鞭毛藻のみ存在する層、すべて存在しない層の3種類に区分され、それぞれのコアで対比可能である。粒度分析より、北側で7層、中間で6層、南側で4層の砂層と、スコリア火山灰層の直下にパミス火山灰層（カワゴ平パミス）を確認した。

ナノ化石、珪質鞭毛藻、有孔虫は海水流入の指標となる。しかし、分析の結果これらすべての指標のうち、珪質鞭毛藻のみ存在する層の存在が確認された。これは、海水流入はあったものの汽水環境であったため後に石灰質微化石が溶脱されたと解釈した。さらに、海水流入の痕跡が見られない層を淡水環境と考え古環境を推定したところ、主に砂層を境界として海水→汽水→淡水→汽水という環境変化が確認された。年代測定結果と火山灰層の存在から、音波探査で見られた下部堆積物の傾斜は約3000年前に湖口側が隆起した痕跡と考えられる。その境界の汽水から淡水への変化はこの地殻変動に伴うものと解釈される。120cm前後には淡水から汽水への環境変化を表す砂層があり、それまで淡水湖であった湖が汽水湖へと変化したAD1498の明応地震に対応する。その上部には10cmほど泥層を削り込む大規模な砂層が存在し、これは年代測定結果や歴史記録からAD1707の宝永地震に相当する。

本研究によって浜名湖湖底に残された明応地震と宝永地震の記録が復元された。それに加え約3000年前に起こった海溝型とは異なる地殻変動の痕跡が確認された。

# スーパーセル竜巻の模擬実験

応用理学コース 災害科学分野

山崎麻未

スーパーセルは、内部に強い回転上昇流であるメソサイクロンを伴った積乱雲であり、竜巻などの突風を引き起こす可能性が高い。しかし米国では、レーダーで捉えられたメソサイクロンの20%しか竜巻を発生させないと報告されている。このように、スーパーセルのどのような流れ構造が竜巻を発生させるかという条件や、発生メカニズムはまだ十分に理解されていない。本研究では、①スーパーセル竜巻の発生条件と発生メカニズムを明らかにすること、②多重竜巻の内部速度場を求めることを目的とし、スーパーセル下層のメソサイクロンと降水に伴うスーパーセル後面側の冷氣下降流である RFD(Rear flank downdraft)に伴うガストを再現する新たな模擬装置を製作して、可視化計測を行った。

メソサイクロンの回転上昇流をファンと案内羽根で模擬するメソサイクロン模擬装置と、RFDをドライアイスミストで模擬するガストジェネレーターを製作した。メソサイクロン模擬装置は、ファンの下に直径  $D=900\text{mm}$  の対流洞を持ち、収束層にあたる48枚の案内羽根の角度を  $0\sim 75$  度まで変えることにより、旋回流の強度を変化させることができる。また、床面から模擬装置底面までの高さ  $h$  を上下に変化させることで、メソサイクロンの下に回転の影響を受けない自由な空間を設けた。メソサイクロン模擬装置の中心軸上、または、少し端に動かした位置にガストジェネレーターを設置し、それぞれ  $h=20\sim 100\text{mm}$  の5高度、案内羽根の角度を  $\alpha=10\sim 75$  度の7仰角に変化させたパラメーターを用いて実験を行った。このとき、トレーサー粒子としてドライアイスミストを用いて可視化し、形成される流れパターンをビデオカメラにより撮影記録して分類した。次に、ガストジェネレーターを除いて、メソサイクロンのみによる回転が地表面の流れに及ぼす影響をスモークワイヤ法により調べた。また、多重渦が発生しやすい条件( $h/D=0.09, S=0.9$ )において、ドライアイスミストをトレーサー粒子として Ar レーザーシート光を照射することで水平断面( $z=10, 210\text{mm}$ )の流れの様子を高速度カメラで撮影し、DPIV解析を行った。ただし、ここでは改良前のメソサイクロン模擬装置を用いた。

可視化観測の結果、①多重渦と思われる渦ができた場合、②一對の逆回転の渦を形成した場合、③単一の竜巻が形成する場合、④竜巻のできない場合の4パターンを確認した。低いスワール比ではガストジェネレーターからの下層ジェットが流れを乱すだけで渦ができなかった。これは、竜巻を発生させないメソサイクロンの条件に相当すると考えられる。一方、高いスワール比のときは多重竜巻が発生する傾向にあった。再現された多重竜巻や一對の逆回転の渦は、実際のスーパーセル竜巻のレーダーによる観測事例と類似しており、本装置がメソサイクロン雲底下の流れ構造をよく模擬していることがわかった。また、メソサイクロンと RFD の位置関係によっても竜巻状渦の発生パターンが変わることがわかった。RFDを与えない際、竜巻のできない場合でも下層まで回転の影響が及んでいることがわかった。多重竜巻の内部速度場を計測した結果、吸い込み渦の移動速度は軌道上の主渦の風速の下層では60%、上層は20%と遅くなっていたことがわかった。

## 土佐湾沿岸の湖沼に記録された過去 2000 年間の南海地震津波イベントの復元

応用理学コース 災害科学分野

山本阿子

土佐湾沖の南海トラフを震源とする南海地震は、これまで 90 年から 150 年の間隔で活動し、四国・九州沿岸域では、マグニチュード 8 を超える地震と 10m を超える津波が襲来したことが歴史記録から明らかにされた(都司, 1981)。土佐市宇佐町も、古くから漁師町として栄えており被害記録が多く残っている地域の一つである。本調査地は、宇佐市街地の対岸に位置し、池から 300m 北側に離れた浜堤(5m) 以外は山林に囲まれ、大きな流入河川はない。平常時は植物片を主とした泥が堆積しているが、津波発生時浜堤を構成する灰白色の砂が流入・堆積しており容易に区別がつく。さらに、池の南西方向の四国 36 番札所青龍寺には、最近三回の津波被害記録が残っているため、津波堆積物と比較が可能なことも研究の利点として挙げられ、2006 年からパイプロコアリングによって調査が続けられてきた。

本研究では、新たに蟹ヶ池において池の南側を東西方向に 7 本の試料をパイプロコアリングによって採取した。さらに、同地点においてピストン内蔵の亚克力パイプを用いて、含水率が高く比較的新しい堆積物の検討の為、表層の試料を手差しによって採取した。

その結果、植物片を主とする泥の堆積物の中に、厚さ 1 cm~30cm の砂層が多数と粘土層が確認された。さらに、植物観察によって砂層や平常時の堆積物における破片の大きさや種類の変化、含有量増減などの特徴から、5 つの砂層と 2 つの特徴的な粘土層に区分し、これまで採取した資料も含め、これらのコアの対比を行った。試料中の砂層で最も新しい順に砂層 1 から 5 とし、粘土層を a・b とした。それぞれの砂層の特徴として、砂層 1 の境界は不明瞭な砂層である。砂層 2 は、厚さ 10cm~20cm の砂層内に植物片を多く含み、砂層の 14C 年代と歴史記録から宝永の南海地震の堆積物を含む砂層と考えられる。砂層 3 は、下端に植物片が密集した層を伴い、正平または康和の南海地震によるものと考えられる。コアによっては砂層 2 と境界が不明瞭なコアもあることから、上層の宝永津波が削剥を伴い流入してきたと判断した。砂層 4 は、パッチ状の泥を含むことから、すでに堆積していた泥を巻き上げて堆積したと思われる、天武またはそれ以降の南海地震によるものと考えられる。砂層 5 は、これまでの砂層とは異なり粒径の大きなレキを多く含んでおり、歴史記録にはない約 2000 年前に宝永南海地震の流速・流量を超える津波があったことを示す。砂層 5 よりも古い堆積物には、2cm 程度の薄い砂層と木片などを多く含んだ砂質泥層と、粘土層が連続して堆積しており、これまで堆積していた堆積物とは特徴が異なることから、蟹ヶ池の大きな堆積環境の変化を示唆していると考えられる。砂層 4 と 5 の間に上端に多くの植物片を伴う黄褐色粘土層(粘土層 a)と、上下端に多くの植物片を伴い、下端で少量の砂を伴う灰白色と黒色の粘土層(粘土層 b)が観察された。この粘土層は、殆どの試料でも確認でき、試料を対比するにあたって重要な鍵層となった。さらに年代測定では特定できない最も新しい砂層 1 は、青龍寺に残る歴史記録にある宝永の南海地震による大きな被害に比べ、安政の南海地震による津波の被害は比較的被害の少なかったこと、昭和の南海地震の津波は池に流入していないなどの事実と矛盾しないことから、安政の南海地震による津波堆積物である可能性が高い。

今回の研究では、特に過去 2000 年間の堆積物が採取され、特に過去 1000 年間の歴史記録と対応させることによって、地質学的記録から過去の南海地震の履歴を復元することが出来た。さらに、新たにおよそ 2000 年前に宝永南海地震の規模を超える津波が発生していたことが明らかになった。

## 2008年岩手・宮城内陸地震による荒砥沢スプレッドの地すべり構造

応用理学コース 災害科学分野

脇田茂

2008年岩手・宮城内陸地震によって荒砥沢ダムのすぐ上流に巨大地すべりが発生した。この地すべりの地すべり構造の解析および運動像の復元から、スプレッドが基本的な運動様式であることを明らかにし、荒砥沢スプレッドと命名した。荒砥沢スプレッドは、移動体体積  $6.7 \times 10^8 \text{m}^3$  で、速度  $1 \text{m/s}$  以上で大局 SSE 方向に最大約  $300 \text{m}$  移動し、末端部は不動体斜面上を  $50 \text{m}$  の高さまで乗り上げ停止した。発生域の輪郭を規制するようにナカイシ沢、ヒアシクラ沢、ヨモギクボ沢が流れていたが、末端部を規制するヨモギクボ沢は移動体の衝上によって被覆され、現在は目にすることができない。地表面変形構造の解析は、空中写真判読と地質踏査、さらにレーザー測距儀によるクラックの位置と崖の落差の実測と、樹木の傾きによる地表面の傾動量の推定によって行った。その結果、移動体は砂岩・シルト岩互層からなる下位層と軽石凝灰岩からなる上位層がキャップロック構造を形成していること、ホルスト・グラーベン構造によって特徴づけられることが明らかになった。そのホルスト・グラーブンの大部分は、発生域内にすでに存在していた地すべりのホルスト・グラーブンの分離面が再活動したものであることも分かった。その分離面はテクトニック断層に規制されている。断層面は過去の地すべり運動で開口し、そこに流入粘土が挟在している。今回の地すべり運動ではその流入粘土に削痕が刻まれた。移動体下半部を横断するナカイシ沢、右側方を流れるヒアシクラ沢、衝上によって新たに末端に形成された谷では、比高  $10$  数  $\text{m}$  程の碎屑丘がいくつも配列している。ナカイシ沢・ヒアシクラ沢では、地表に顔を出すはずのない砂岩・シルト岩互層を起源とする角礫とマトリクスからなる混在層が地中から絞り出され、碎屑丘を構成している。ナカイシ沢では、右岸側の移動体の軽石凝灰岩は絞り出しによって反り返り (cambering) を起こし、沢底にあった河床礫や埋没材が碎屑丘の頂部に持ち上げられている。混在層中の地下水が泥と共に噴き上げて樹木に付着した現象が四箇所あり、中には  $7 \text{m}$  程の高さまで噴き上げている。混在層中の地下水は地すべり末端で特に多く、絞り出された混在層の一部は土石流化している。この混在層が下位層に形成されたすべり層に相当すると考えている。地震動によって上位層が分断されるのと同時に、多量の地下水を含んだ下位層は上位層との境界部付近で破碎・流動化し、混在層を形成した。分断された上位層は流動化した混在層を押し退けつつ沈降し、斜面下方に移動した。押し退けられた混在層は既往谷部および末端から絞り出され、地すべりの移動を加速した。その結果、移動体の体積が  $10^{10} \text{m}^3$  の地すべりが通常もちうる等価摩擦係数に相当する小さな値 ( $0.1$ ) を、体積が  $10^8 \text{m}^3$  の荒砥沢スプレッドが獲得し、体積効果以上に長距離運動を可能にした。すべり面の摩擦係数の低下の原因として想定される機構は地震動による液状化か、破壊が先行するすべり面液状化であると考えた。移動体が移動する過程では、形成されたばかりのホルスト・グラーブンの内部に、それらをさらに分断する小規模なホルスト・グラーベンが形成されただけでなく、小規模な回転すべりや転倒などの地すべり運動も加わって、最終的には隣同士で落差を異にする領域が形成された。領域内では細分化の程度や細分する地すべりの運動様式が異なっている。

# 海底地震計観測データに基づく 2004 年 12 月 26 日スマトラ-アンダマン 地震の余震の震源メカニズムの検討

連携分野コース 海底資源科学分野 川野 雅 弘

2004 年 12 月 26 日インドネシア西部スマトラ島北西沖を震源とする地震が発生し、最大 34m、平均 10m の高さの巨大津波を引き起こした。これはスマトラ-アンダマン地震(Mw9.2)と呼ばれ、観測史上最大級の地震である。この地震に伴った巨大津波を、プレート境界での単純な断層破壊によって説明することが難しいことが複数の研究チームによって報告されている。しかし、スマトラ島陸上地震観測網あるいはグローバル地震観測では、同定可能な地震の数が限られる上、深さ 30km より浅い地震の深さを精度良く推定することが難しい。

本震発生直後の余震分布を明らかにするために、海洋研究開発機構のスマトラ沖調査航海によって、2005 年 2 月から 3 月にかけて、スマトラ北西沖の断層破壊域に 17 台の短期海底地震計(OBS)と 2 台の長期 OBS を設置し、観測を行った。2 月 20 日から 3 月 12 日の間に約 4000 の余震が観測された。その結果 Araki et al.(EPS,2006)では、沈み込んだインド-オーストラリアプレート境界の上端付近で発生している多数の余震活動の形状が明らかにされたが、同時にプレート境界よりも上盤側の陸側プレート内部(深さ 30 km 以浅)でも、複数の余震が発生しているらしいことが判明した。Araki et al.(2006)では、合成震源メカニズム解を用いて、内陸側深さ 30km 以深では dip-slip 型、海溝側 120-170km、深さ 30km 以浅では dip-extension 型のメカニズムが優勢であるとした。しかしながら、これらの浅い余震活動は OBS 観測網の外で発生していたため、これらが本当に陸側プレート内部で発生していたかについてはさらなる検討が必要とされている。陸側プレート内部で発生しているように見える、いくつかの浅い地震活動の深さと震源メカニズムを精度良く求めることができれば、巨大津波を引き起こした分岐断層の存在の可能性を明らかにすることができるかもしれない。

そこで、本研究では、スマトラ沖調査航海で得られた 17 台の短期 OBS データの再解析を実施した。P 波初動を読み取り、その押し引き分布から余震の震源メカニズム解を推定することによって、スマトラ北西沖の大陸斜面で発生していた余震の空間分布と発震機構の再検討を行った。本研究では、Araki et al.(2006)の解析よりさらに多くの余震を読み取り、データ数を増加させ、データの質を厳選して、dip-extension 型と dip-slip 型という 2 領域 2 タイプだけではなく、もっと細かい領域毎に、さらに詳しく震源メカニズム解を推定した。

結果は、30 km 以深のプレート境界に分布する余震は、Araki et al.(2006)の結果よりも明瞭に dip-slip 型のメカニズムが示された。30 km 以浅の余震については、ある特定の震源メカニズムが卓越するという明瞭な傾向は見られなかった。これは、浅い地震が OBS 観測網の外で発生していたため、震源メカニズムを求めることが困難であったためか、あるいは、微小領域毎に震源メカニズムが異なっている可能性を示唆している。

## キク科トウヒレン属 (*Saussurea*) の形態学的研究

連携分野 植物分類・地理学分野

山下 真人

トウヒレン属 (*Saussurea*) は、主にユーラシア大陸の温帯から亜氷雪帯に生育し、これまでに6亜属約400種が報告されている。亜氷雪帯に生育する種は、綿毛が植物体を覆うもの(セーター植物)や半透明の苞が発達して複花序を包むもの(温室植物)、クッション状になるもの(クッション植物)などの形態の特殊化が見られ、アジアに産するキク科植物の中では、種および形態が多様化しているグループの一つである。

本属の形態学的特徴は、植物体には刺がなく、頭花は両性の筒状花のみからなり、花床には鱗片状の剛毛が生え、瘦果は不明瞭な条があるかまたは4稜あり、冠毛が基本的に2列で外列は早落性の突起がある短い剛毛で、内列は基部が環状に合生する長い羽毛状毛であるとされる。しかし、近年の核DNAならびに葉緑体DNAによる分子系統解析から、トウヒレン属は多系統群であることが推定され、ユリネア属 (*Jurinea*) と単系統群を形成するグループと、キツネアザミ (*Hemistepta lyrata*) を姉妹群とするトウヒレン属のタイプ *Saussurea alpina* を含むグループの2つに大きく分けられた。前者については、詳細な形態観察が行われ各種の分類学的位置が与えられたが、後者(以下狭義トウヒレン属と呼ぶ)については未だ十分な形態学的研究がなされていない。加えて、2つのグループに入らない分類群があり、これらについて適切な分類学的位置づけが求められている。

そこで、本研究では狭義トウヒレン属119分類群とその近縁属とされるユリネア属、キツネアザミ属、ヒマライエラ属 (*Himalaiella*)、テオレピス属 (*Theolepis*) の13分類群ならびに分類学的位置が定まらない1分類群について、系統を反映しているとされる生殖器官の形態である花および花粉の22形質を詳細に観察して、狭義トウヒレン属の形態学的特徴を明確にし、分子系統解析の結果と併せ比較検討を行った。

狭義トウヒレン属の花形態では17形質、花粉形態では4形質において多様性が見いだされた。特に瘦果の縁の形は多様で、全縁、円鋸歯状、波状、深波状、鋭浅裂状、針状、棍棒状、舌状の8つの型が観察された。花粉は、三溝孔性で、亜長球形~亜偏球形、外壁が薄く、刺が表面に散在し、赤道観は楕円形で、極観は亜三角形で角は鈍頭となり、花粉溝は角と角の中央に位置する。極軸は33.5~60.7 $\mu$ m、赤道軸は33.4~64.9 $\mu$ m、極軸と赤道軸の比は、0.87~1.14であった。数多くの分類群を用いた花粉形態の観察は、本研究が初めての報告である。

近縁属との比較により狭義トウヒレン属は、瘦果の縁に歯状の突起がなく、冠毛が基本的に2列で外列は早落性の突起がある短い剛毛、内列は基部が環状に合生する長い羽毛状毛である特徴をもつことが明らかとなった。狭義トウヒレン属は分子系統解析により大きく3つのグループに分けられており、このうち2つのグループについては以下のとおり形態の特徴が判明した: 基部に位置するグループでは瘦果の基部が向軸側を向くか傾き、かつ多数の頭花が散房状に配列する; エリオコリネ節 (*Eriocoryne*) の分類群が含まれるグループでは肥厚した茎の先端部に頭花が密集して配列する。

次に、分子系統解析によりトウヒレン属が含まれるアザミ亜連 (*Carduinae*) とは異なるカリナ亜連 (*Carlininae*) との近縁性が示唆された *Saussurea forrestii* は、冠毛が1列で基部が環状に合生せずに瘦果の縁から羽毛状毛が伸び、柱頭部の先端部が円頭で、短い毛が花柱分枝全体に広がる形態が観察され、これはカリナ属 (*Carlina*) の特徴である形態形質と一致した。

## 徳島県三好市黒沢湿原周辺における最終氷期以降の植生変遷と火事

自然環境科学専攻 生物科学講座

中川 赳

四国地方、特に太平洋沿岸域では、花粉分析による植生史研究が数多く行われており、後氷期の植生史については詳しく解明されてきている。しかし、最終氷期まで遡る花粉化石資料は少なく、山地域では全く得られていない。四国における現在の植生分布、構成種の地理分布、種多様性などの形成過程を解明するには、それらに重大な影響を及ぼしたと推定される最終氷期とそれ以降の花粉分析資料の蓄積が必要である。近年、炭化した微細な植物片（微粒炭）を用いた、火事に関する研究が世界各地で行われている。しかし、日本では最終氷期の微粒炭資料は少なく、当時の火事攪乱とそのレジームに関しては不明な点が多い。本研究では、これらを踏まえ、徳島県三好市の黒沢湿原（北緯 33 度 59 分、東経 133 度 50 分、標高 562 m）で採取した堆積物コア試料の花粉分析、木材化石分析および微粒炭分析を行い、本湿原周辺における最終氷期以降の植生変遷と火事を明らかにした。

採取したコア試料（KRZ1, KRZ2 および KRZ3）はいずれも全長 3.5 m 前後で、上部は泥炭と有機物に富む粘土からなり、中・下部は有機物を含むシルト、砂および礫の互層からなる。また、コア試料には 3 つのテフラ層が挟在する。全鉱物組成、火山ガラスの形態と屈折率などの特徴から、これらは下位より鬼界葛原テフラ（K-Tz: 約 9.1 万年前）、始良 Tn テフラ（約 2.9 万年前）、鬼界アカホヤテフラ（約 7.3 千年前）と同定された。これらの降灰年代と堆積物の  $^{14}\text{C}$  年代に基づくと、不整合が一部存在するものの、コア試料は最終氷期初期以降に堆積したものであると推定できる。

KRZ1 上部と KRZ2 下部から得られた花粉分析資料を、花粉・孢子化石の組成と頻度の垂直変化をもとに、KRZ2-I および KRZ2-II と、KRZ1-I から KRZ1-IV の 6 つの局地花粉帯に分帯した。これらの花粉帯に相当する時期の植生は次の通りである。最終氷期初期（KRZ2-I 帯: 9 万年前前後）には、スギとコウヤマキが優占する針葉樹林が成立していた。最終亜間氷期（KRZ2-II 帯: 約 4.3—2.9 万年前）には、コメツガ、ヒノキ科、マツ属単維管束亜属などが優勢で、コウヤマキ、スギ、トウヒ属、コナラ属コナラ亜属、クマシデ属、カバノキ属などが随伴する針広混交林が分布していた。後氷期初頭（KRZ1-I 帯: 約 12.5—7.6 千年前）には、クマシデ属、コナラ属コナラ亜属、カバノキ属などを主とする落葉広葉樹林が優勢となり、この時期の終わりにコナラ属アカガシ亜属が分布を拡大した。後氷期中頃（KRZ1-III, KRZ1-IV 帯: 約 7.6—1.8 千年前）には、コナラ属アカガシ亜属が優勢な常緑広葉樹林が発達した。後氷期末（KRZ1-V 帯: 約 1.8 千年前—現在）には、常緑広葉樹林が急激に衰退し、マツ属複維管束亜属、コナラ属コナラ亜属などを主とする二次林に移行した。また、スギ林が増加した。

本州中部の花粉分析資料から、最終間氷期末からスギが増加し始め、最終氷期初期にはスギが優勢となり、スギ林が少なくとも数万年は続くことが明らかにされている。本研究により、この時期、四国にもスギの優勢な樹林が分布していたことが分かった。最終亜間氷期に、スギは冷温帯上部の気候環境下でコメツガ、ヒノキ科、マツ属単維管束亜属などと混生していた。後氷期初頭にスギ属花粉が全く産出しないことから、スギは最終氷期最盛期には本湿原周辺から消滅していたと考えられる。

微粒炭と炭化材化石の産出状況に基づくと、最終氷期初期の K-Tz 降灰期後の一時期と後氷期中頃の約 5.0—2.9 千年前には、主に集水域内において森林火事が生じていたと推定される。本州中部の微粒炭分析資料によると、最終氷期は後氷期に比べて微粒炭量が極めて少なく、火事が少ない時期であったと考えられている。本湿原の分析資料は最終氷期初期にも火事が生じていたことを示すものとして重要である。