

FitzHugh-Nagumo 方程式の大域解の存在と解の漸近挙動

理学コース 数学分野 安間 淳

$v(t, x), u(t, x)$ の 2 つを未知関数とする次の空間 1 次元の FitzHugh-Nagumo 方程式について考える .

$$\begin{cases} v_t = v_{xx} + f(v) - u, & x \in \mathbb{R}, t \geq 0 \\ u_t = \varepsilon u_{xx} + \sigma v - \gamma u, & x \in \mathbb{R}, t \geq 0 \\ U^0(x) := (v(0, x), u(0, x)) = (v_0(x), u_0(x)), & x \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (\text{FNS})$$

ここで, $\varepsilon \geq 0, \sigma, \gamma > 0$ であり $f(v)$ は 3 次の多項式である . (FNS) の解を $U(t, x) = (v(t, x), u(t, x))$ と表記する . B は然るべき条件を満たし, $B \subset C_0(\mathbb{R})$ である様な Banach 空間とする . (詳しくは講演中に説明する) 更に次の成長条件 (growth condition) を仮定する .

$$\liminf_{|v| \rightarrow \infty} \left| \frac{f(v)}{v} \right| > \frac{\sigma}{\gamma} \quad (\text{GC})$$

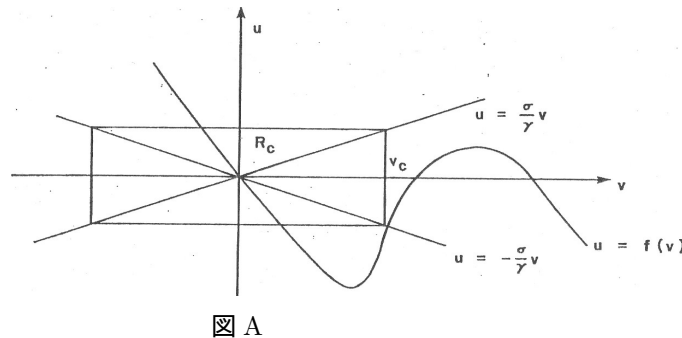
定理 1 (大域解の存在)

(GC) が成り立つならば任意の $U^0 \in B$ に対して (FNS) の解 $U \in C([0, \infty); B)$ が一意的に存在する .

以下からは更に次の仮定を加え v_c を以下の様に定める .

$$\begin{aligned} \limsup_{v < 0} \left(\frac{f(v)}{v} \right) &< 0 \\ v_c &= \min \{ |v| \mid f(v) = -(\sigma/\gamma)v, v \neq 0 \} \end{aligned} \quad (*)$$

$F(U) = (f(v) - u, \sigma v - \gamma u)$ とおく . $-f'(0) > \sigma/\gamma$ と仮定し R_c を下の図で描かれている (v_c に依存する) 長方形領域とする . (詳しくは講演中に説明する) .



補題 1

$-f'(0) > \sigma/\gamma$ と仮定する . 任意のコンパクト集合 Q に対してある長方形 R と定数 $k > 0$ が存在して $Q \subset R \subset R_c$ かつ全ての $\tau \in (0, 1], U \in \partial(\tau R)$ と U での τR の外向き単位法線 n に対して $F(U) \cdot n < -k\tau$ を満たす .

補題 2

$-f'(0) > \sigma/\gamma$ を仮定する . $U^0 \in C_0(\mathbb{R})$ であり $U^0(x) \in \text{int}(R_c), x \in \mathbb{R}$ が成り立つならば, 非負定数 c, K が存在して全ての $t \geq 0$ に対して (FNS) の解 U は $\|U(t)\|_{L^\infty} \leq Ke^{-ct}$ を満たす .

$0 < \theta < 1$ に対して Q_θ を次の様に定め, 補題 1, 2 を用いると次の定理が成り立つ .

$$Q_\theta = \{(v, u) \mid v \leq \alpha\theta, u \geq f(\alpha\theta)\}, \quad \alpha = \inf\{v > 0 \mid f(v) = 0\}$$

定理 2 (小さな σ に対する解の漸近挙動)

$B = C_0(\mathbb{R})$ 又は $B = C_0(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$ とし, ある $0 < \theta < 1$ に対して $U^0(x) \in Q_\theta, x \in \mathbb{R}$ かつ $U^0 \in B$ とする . もし, f が (*) と $f'(0) < 0$ を満たす (例えば $f(v) = v(1-v)(v-1/3)$) ならば, 正定数 c, K, σ_0 が存在して $0 \leq \sigma \leq \sigma_0$ の時 (FNS) の解 U_σ は $\|U_\sigma(t)\|_B \leq Ke^{-ct}$ を満たす .

参考文献

J. Rauch, J. Smoller, Qualitative Theory of the FitzHugh-Nagumo Equations, Adv. in Math., **23**(1987), 12-44.
J. Smoller, Shock Waves and Reaction-Diffusion Equations, Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

距離と位相

理学コース

数学分野

石牟礼 直樹

定義 1 集合 X の部分集合全体を $\mathfrak{P}(X)$ と表す. X 上の位相とは, 次の (i), (ii), (iii) を満たす, $\mathfrak{P}(X)$ の部分集合 $\mathcal{T}$ のことである:

(i) $\emptyset, X \in \mathcal{T}$; (ii) $\mathcal{U} \subset \mathcal{T} \Rightarrow \bigcup \{U : U \in \mathcal{U}\} \in \mathcal{T}$; (iii) $U_1, U_2 \in \mathcal{T} \Rightarrow U_1 \cap U_2 \in \mathcal{T}$.

$\mathcal{T}$ に属するすべての集合は開集合と呼ばれる. 位相 $\mathcal{T}$ をもつ集合 X は位相空間と呼ばれる, $(X, \mathcal{T})$ と書く.

定義 2 (X, d) を距離空間とする. $x_0 \in X, r > 0$ に対し, $B_r(x_0) := \{x \in X : d(x, x_0) < r\}$ を, 中心 x_0 , 半径 r の開球と呼ぶ.

定義 3 (X, d) を距離空間とし, 次の条件を満たす X の部分集合 U 全体を $\mathcal{T}_d$ とおく:
 $\forall x \in U, \exists \varepsilon > 0$ s.t. $B_\varepsilon(x) \subset U$.

例 3-1 定義 3 の $\mathcal{T}_d$ は定義 1 の (i), (ii), (iii) を満たす. したがって, 距離空間は位相空間になる.

定義 4 X を集合とする. X 上の 2 つの距離 d_1 と d_2 に対して, $\mathcal{T}_{d_1} = \mathcal{T}_{d_2}$ となるとき, d_1 と d_2 は同値であると呼ばれる.

例 4-1 $j = 1, \dots, n$ に対して, (X_j, d_j) を距離空間とする. $X := X_1 \times \dots \times X_n$ とおく. ここで, $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n) \in X$ に対して,

$$D_1(x, y) := \sum_{j=1}^n d_j(x_j, y_j), \quad D_\infty(x, y) := \max_{j=1, \dots, n} d_j(x_j, y_j)$$

と定義する. このとき, D_1 と D_∞ は X 上の距離になり,

$$D_\infty(x, y) \leq D_1(x, y) \leq nD_\infty(x, y) \quad (x, y \in X)$$

を満たすので, $\mathcal{T}_{D_1} = \mathcal{T}_{D_\infty}$ が成り立つ. したがって, D_1 と D_∞ は同値である.

例 4-2 $\mathbb{R}^n$ 上のユークリッド距離では, 1 点集合は開集合にはならず, 閉集合である. 一方, 離散距離では, 1 点集合は開集合であり, 閉集合である. よって, $\mathbb{R}^n$ 上のユークリッド距離と離散距離は同値ではない.

定義 5 $(X, \mathcal{T})$ を位相空間とする. $\mathcal{T}_d = \mathcal{T}$ となる X 上の距離 d が存在するとき, 位相空間 $(X, \mathcal{T})$ は距離付け可能であると呼ばれる.

例 5-1 X を任意の集合とし, $\mathcal{T} = \mathfrak{P}(X)$ とすると, $\mathcal{T}$ は X 上の位相である. 位相 $\mathcal{T}$ は離散位相と呼ばれる. 離散位相は距離付け可能である. 実際, d を X 上の離散距離とすると, $\mathcal{T} = \mathcal{T}_d$ となる.

例 5-2 X を任意の集合とし, $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$ とすると, $\mathcal{T}$ は X 上の位相である. 位相 $\mathcal{T}$ は密着位相と呼ばれる. X が 2 点以上を含むとき, 密着位相は距離付け可能ではない. なぜなら, 密着位相が距離付け可能であると仮定すると, $\mathcal{T}_d = \mathcal{T}$ となる X 上の距離 d が存在する. $x \in X$ とし, $U := X \setminus \{x\}$ とおくと, $U \in \mathcal{T}_d$ である. しかし, $U \notin \mathcal{T}$ となり, $\mathcal{T}_d = \mathcal{T}$ に矛盾する. よって, 密着位相は距離付け可能ではない.

2 次多項式の複素力学系

理学コース 数学分野

一瀬 賢吾

1. 複素力学系の基本的事項

P を多項式とする. P の n 回の反復合成 $P \circ P \circ \dots \circ P$ を P^n で表す. $P(a) = a$ となる値 a を P の不動点と呼び, $P^k(a) = a$ となる値 a を P の周期点と呼ぶ. 特に $0 < l < k$ に対して $P^l(a) \neq a$ となる a を P の周期 k の周期点と呼ぶ.

定義 $\{b_1, \dots, b_k\}$ ($b_l = P^{l-1}(b_1)$) を P の k 周期点とするとき $|(P^k)'(b_1)| > 1$ のとき反発 k 周期点といい, $k = 1$ のとき反発不動点という. また, $0 \leq |(P^k)'(b_1)| < 1$ のとき吸引 k 周期点といい, $k = 1$ のとき吸引不動点という. ∞ は P の吸引不動点である.

定義 P の反発周期点全体の集合の閉包を P のジュリア集合といい $J(P)$ で表す.

定義 P のジュリア集合の補集合を P のファトゥ集合といい $F(P)$ で表す.

定義 ある集合 A があるとき $A = P(A) = P^{-1}(A)$ を満たすとき P で完全不変であるという.

$J(P)$ は P で完全不変であり空集合とはならない. また, $J(P)$ は閉集合であるのでその補集合である $F(P)$ は開集合である.

定義 P による軌道が反復によって ∞ に収束しない点全体の集合を P の充てんジュリア集合といい $K(P)$ で表す.

定義 $J(P)$ が連結で内点を持たないとき樹状突起という.

2. 樹状突起をもつ二次多項式 $Q_c(z) = z^2 + c$ について

$c \in \mathbb{R}$ は Q_c が 2 つの反発不動点 $-p, q$ ($p, q > 0$) を持ち, さらに $Q_c^3(0) = -p$ となるように決める. こうなるときの具体的数値は

$$c \approx -1.543689 \quad -p \approx -0.83928675 \dots \quad q \approx 1.83928675 \dots$$

である. このとき Q_c を実軸上で考えると $[-q, q] \subset J(Q_c)$ であることがわかる. $[-q, q]$ の逆像をとっていくことによりこの集合が樹状突起であることがわかる. この Q_c の点の特徴を外射線を用いて考える.

縮小写像について

理学コース

数学分野

氏名 河原 義 晃

定義 (S, ϱ) を距離空間とする. S 上の点 x が写像 $f: S \rightarrow S$ の不動点であるとは $f(x) = x$ が成り立つことである.

また, 写像 $f: S \rightarrow S$ が縮小写像であるとは,

$$\varrho(f(x), f(y)) \leq r\varrho(x, y) \quad (\forall x, y \in S)$$

を満たす定数 r ($0 \leq r < 1$) が存在することである.

縮小写像は一様連続であることが簡単に分かる. なぜならば, $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$ s.t. $\delta < \frac{\epsilon}{r+1}$. ここで, $\varrho(x, y) < \delta$ ($x, y \in S$) とすると, $\varrho(h(x), h(y)) \leq r\varrho(x, y) \leq r\delta < \epsilon$.

定義 距離空間 (S, ϱ) 上のコーシー列とは, 次の条件を満たす点列 $\{x_n\}$ のことである:

$$\forall \epsilon > 0, \exists N \in \mathbf{N} \text{ s.t. } \forall n, m \geq N \Rightarrow \varrho(x_n, x_m) < \epsilon.$$

定義 距離空間 S が完備であるとは, S 上の任意のコーシー列が S で収束することである.

完備距離空間の例 (1) 実数全体 R は完備である. したがって, n 次元ユークリッド空間 R^n も完備である.

(2) R 上の閉区間 $[a_i, b_i]$ ($i = 1, \dots, n$) の直積 $[a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$ は完備である.

定理 空でない完備距離空間 (S, ϱ) 上の縮小写像 f は不動点をただ一つもつ.

証明 まず, 不動点の一意性を示す. $f(x) = x, f(y) = y$ ($x, y \in S$) とする. すると, $0 \leq \varrho(x, y) = \varrho(f(x), f(y)) \leq r\varrho(x, y)$. ところで, $0 \leq r < 1$ であるから, $\varrho(x, y) = 0$, すなわち $x = y$ である.

次に, 不動点の存在を示す. $x_0 \in S$ とし, 点列 $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ を帰納的に

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

と定義する. ここで, $\{x_n\}$ がコーシー列であることを示す. そのため, $a = \varrho(x_0, x_1)$ とおくと,

$$\varrho(x_{n+1}, x_n) \leq ar^n \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

が成り立つ. したがって, m, n ($m < n$) に対し,

$$\begin{aligned} \varrho(x_m, x_n) &\leq \sum_{j=m}^{n-1} \varrho(x_{j+1}, x_j) \leq \sum_{j=m}^{n-1} ar^j \\ &= \frac{ar^m(1 - r^{n-m})}{1 - r} \leq \frac{ar^m}{1 - r}. \end{aligned}$$

ところで, $0 \leq r < 1$ であるから, $\{x_n\}$ はコーシー列である.

いま, S が完備で $\{x_n\}$ がコーシー列であるから, $\{x_n\}$ は収束する. x を $\{x_n\}$ の収束点とすると, f は連続であるから $f(x_n) \rightarrow f(x)$ が成り立つ. ところで, $f(x_n) = x_{n+1}$ であるから, $f(x) = x$ となる. ゆえに, x は f の不動点である. $\square$

chromatic スペクトル系列の E_1 項について

理学コース 数学分野

北濱 理恵

まず初めに, $\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)[t_1, t_2, \dots, t_m]$ を以下のように略記する.

$$\begin{aligned}\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)[t_1, t_2, \dots, t_m] &= H^*(v_n^{-1}BP_*/(I_{n-1}, v_{n-1}^\infty))[t_1, t_2, \dots, t_m] \\ &= \text{Ex}^*(m, n)\end{aligned}$$

ここで $\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)[t_1, t_2, \dots, t_m]$ に現れる Ext は Hopf algebroid (BP_*, BP_*BP) 上の comodule の category でのものである.

このとき, $BP_* = \mathbb{Z}_{(p)}[v_1, v_2, \dots]$, $BP_*BP = BP_*[t_1, t_2, \dots]$ であり, $I_{n-1} = (p, v_1, \dots, v_{n-2})$ とする.

$\text{Ex}^*(m, n)$ を考える必要性については, $\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)$ の 1 次元以降の構造決定はとても困難で未だ未解決なので $\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)[t_1, t_2, \dots, t_m]$ を考えることにより計算が楽になり $\text{Ex}^*(m, n)$ の 0 次元, 1 次元, 2 次元という手順で全次元の構造を決定すると $\text{Ex}^*(m, n)$ の構造から $\text{Ext}_{BP_*BP}^{*,*}(BP_*, M_{n-1}^1)$ の情報が得られるからである.

現在 $\text{Ex}^0(m, n)$ の構造が決定されているのは, $\text{Ex}^0(m, n) \{1 \leq n \leq 3\}$ と $\text{Ex}^0(m, n) \{n(n-1) \leq m+1\}$ のみである. また, n を任意の値にすれば m が大きいという条件がついてしまう. これより, m が小さいところでは難しいということが分かるので, m が小さいところを考えるため m, n の値を任意とし, 条件付きではあるが 0 次元で構造が決定されていない部分を考えることにしたのである.

その結果, 次の補題を用いて以下の結果を得た.

命題

(1) $k \geq 0$, $x_k \in v_{m+n}^{-1}BP_*$, $x_k \equiv v_{m+n}^{p^k} \pmod{(I_{n-1}, v_{n-1})}$,

$$d(x_k) \equiv v_{n-1}^{a_k} v_n^{a'_k} v_{m+n}^{a''_k} g_k \pmod{(I_{n-1}, v_{n-1}^{a_k+1})}$$

(2) $\{v_{m+n}^{a''_k} g_k\} \subset H^1 M_n^0$ は $D_m(n)/(v_{n-1})$ 加群として一次独立

ならば

$$\text{Ex}^0(m, n) = D_m(n)/(v_{n-1}^\infty) \oplus \bigoplus_{p \nmid s > 0, k \geq 0} D_m(n)/(v_{n-1}^{a_k}) \langle x_k^s / v_{n-1}^{a_k} \rangle$$

以下は $n \geq 3$ での結果を表にしたものである.

k	$(n-2)(n-1) \leq m+1 < (n-1)^2$	$(n-1)^2 \leq m+1 < n(n-1)$	$m+1 \geq n(n-1)$
$jn \leq k < (j+1)n$ ($0 \leq j < n-1$)	$p^{k-j}e(j+1)$		
$(n-1)n \leq k < n^2$	$p^{k-n+1}e(n-1) + p^{m+1+k-n^2+n}$		
$k \geq n^2$	$p^{k-n+1}e(n-1) + p^{m+1+k-n^2+n} + a_{k-2n}$	$p^{k-n+1}e(n)$ $p^{k-n+1}e(n)$ $+ p^{k-n^2}(p^{m+1} - p^{(n-1)^2}) + a_{k-2n}$	$p^{k-n+1}e(n)$ $+ a_{k-n-1}$

条件 $n = 3$ のとき上の表全てを市木, 中井, Ravenel [1] によって, 条件 $m+1 \geq n(n-1)$ のとき下村 [2] によって構造が決定された. 今回私は, 条件 $(n-2)(n-1) \leq m+1 \leq (n-1)^2$ と条件 $(n-1)^2 \leq m+1 < n(n-1)$ での構造を決定した.

参考文献

- [1] I. Ichigi, H. Nakai and D. C. Ravenel, The chromatic Ext groups $\text{Ext}_{\Gamma(m+1)}^0(BP_*, M_2^1)$. Trans. Amer. Math. Soc. 354 (2002), no. 9, 3789–3813.
- [2] K. Shimomura, The homotopy groups $\pi_*(L_n T(m) \wedge V(n-2))$. Recent progress in homotopy theory (Baltimore, MD, 2000), 285–297, Contemp. Math., 293, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2002.

自励系常微分方程式の解の挙動

理学コース 数学分野

公文 保仁

連立常微分方程式の二次元自励系が平衡点周辺でどのような振る舞いをするか紹介する。

$D \subset \mathbb{R}^2$ を領域、 $f: D \rightarrow \mathbb{R}^2$ とし f を微分可能と仮定する。

平衡点 自励系連立常微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = f(x), \quad x = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}, \quad f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} \quad (1)$$

において $f(x) = 0$ を満足する点のことを平衡点といい、 $x = \bar{x}$ で表す。

安定 $\forall \epsilon > 0$ に対して $\exists \delta > 0$ が存在し、 $|x(0) - \bar{x}| < \delta$ を満たすような (1) の任意の解 $x(t)$ に対し $|x(t) - \bar{x}| < \epsilon$ ($\forall t > 0$) が成り立つ時、平衡点 $\bar{x}$ を安定であるという。

(a) 2次元線形系のふるまい A を 2×2 行列とする。線形系微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = Ax$$

の平衡点 $\bar{x} = 0$ における安定性を調べる。 A の固有値を λ, μ 、対応する固有ベクトルをそれぞれ $\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathbb{R}^2$ とすると、この方程式の一般解は次のように書ける。

$$x(t) = c_1 e^{\lambda t} \mathbf{p} + c_2 e^{\mu t} \mathbf{q}$$

よって次の定理が成り立つ。

定理 1 行列 A の固有値 λ, μ において、 $\operatorname{Re} \lambda, \operatorname{Re} \mu < 0$ ならば原点は安定であり、 $\operatorname{Re} \lambda > 0$ または $\operatorname{Re} \mu > 0$ ならば不安定である。

(b) 2次元自励系のふるまい 方程式 (1) の平衡点 $\bar{x}$ の安定性を考える。式 (1) は $y(t) = x(t) - \bar{x}$ とおくことで

$$\frac{dy}{dt} = f'(\bar{x})y + r(y), \quad f'(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_1 / \partial x_2 \\ \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_2 \end{pmatrix} \Big|_{x=\bar{x}}, \quad r(y) = o(|y|), \quad (|y| \rightarrow 0) \quad (2)$$

と書き直すことができる。ここで $r(y) = o(|y|)$ とは $r(y)/|y| \rightarrow 0$ ($y \rightarrow 0$) を意味する。式 (2) において、平衡点は $x = \bar{x}$ から原点 $y = 0$ に移されている。(2) において高次項 $r(y)$ を無視して得られる方程式

$$\frac{dy}{dt} = f'(\bar{x})y \quad (3)$$

を (1) を平衡点 $x = \bar{x}$ において線形化した方程式という。

(2) の原点での安定性を調べてみる。 $f'(\bar{x})$ の固有値を λ, μ とし対応する固有ベクトルを $\mathbf{p}, \mathbf{q}$ とする。(2) の解 $y(t)$ を

$$y(t) = u(t)\mathbf{p} + v(t)\mathbf{q}$$

と表すと、スカラー関数 u, v は次の微分方程式系の解となる。

$$\begin{aligned} du/dt &= \lambda u + R_1 \quad (R_1 = O(u^2 + v^2), \quad |u|, |v| \rightarrow 0) \\ dv/dt &= \mu v + R_2 \quad (R_2 = O(u^2 + v^2), \quad |u|, |v| \rightarrow 0) \end{aligned} \quad (4)$$

$\operatorname{Re} \lambda, \operatorname{Re} \mu < 0$ とする。極座標 $u(t) = \rho(t) \cos \theta(t)$ 、 $v(t) = \rho(t) \sin \theta(t)$ を導入し、 $a = \min\{-\operatorname{Re} \lambda, -\operatorname{Re} \mu\}$ とおくと

$$\rho(t) = O(e^{-at}) \quad (t \rightarrow \infty)$$

を得る。つまり原点の十分近くに初期値をもつ (4) の解は $t \rightarrow \infty$ で指数関数のオーダーで原点に引き寄せられる。これより次の定理が成り立つ。

定理 2 方程式 (1) の平衡点 $\bar{x}$ において、線型化した方程式 (3) の右辺に現れる行列 $f'(\bar{x})$ の固有値 λ, μ が $\operatorname{Re} \lambda, \operatorname{Re} \mu < 0$ を満たせば、 $\bar{x}$ は安定である。

On class field theory

理学コース 数学分野 黒岩 朝

類体論とは、体の Abel 拡大の様子がその体に関係する群に映し出される、というものである。
代数体について類体論より分かるのは、代数体 K の Abel 拡大における K の (整数環の) 素イデアルの分解のしかたが mod によって定まる、という事実である。(定理を参照)

〔定義〕

(1) $L:K$ の有限次拡大、 $\mathfrak{p}:\mathcal{O}_K$ の 0 でないイデアル

$\mathfrak{p}$ が L で完全分解する $\stackrel{\text{def}}{\iff} \mathfrak{p}\mathcal{O}_L$ が、 $[L:K]$ 個の $\mathcal{O}_L$ の相異なる 0 でない素イデアルに分解される

(2) $K \ni \alpha (\neq 0)$ が総正である $\stackrel{\text{def}}{\iff}$ 全ての体準同型 $K \longrightarrow \mathbb{R}$ について、 α の $\mathbb{R}$ での像が正

〔定理〕 $\mathfrak{a}:\mathcal{O}_K$ の 0 でないイデアルとし、

$L:\mathfrak{a}$ に対して、類体論によって決まる K の有限次 Abel 拡大 とする。

$\mathfrak{p}:\mathfrak{a}$ を割らない K の素イデアル に対して、

$\mathfrak{p}$ が L で完全分解 $\iff \mathfrak{p} = (\alpha)$ 、 $\alpha \equiv 1 \pmod{\mathfrak{a}}$ なる $\alpha \in \mathcal{O}_K$ で総正なものが存在

〔例〕

・ $K = \mathbb{Q}(\zeta_3) (= \mathbb{Q}(\sqrt{-3}))$ における素数 p の分解

$$\begin{cases} \mathfrak{p} \text{ が } K \text{ において完全分解} \iff p \equiv 1 \pmod{3} \\ \mathfrak{p} \text{ が } K \text{ において素元} \iff p \equiv 2 \pmod{3} \\ \mathfrak{p} \text{ が } K \text{ において分岐} \iff p = 3 \end{cases}$$

・ $L = \mathbb{Q}(\zeta_3, \sqrt[3]{2})$ における K の素イデアル $\mathcal{P}$ の分解

$$\begin{cases} \mathcal{P} \text{ が } L \text{ において完全分解} \iff \exists \alpha \equiv 1 \pmod{6\mathbb{Z}[\zeta_3]} \text{ s.t. } \mathcal{P} = (\alpha) \\ \mathcal{P} \text{ が } L \text{ において分岐} \iff \mathcal{P} = (2) \\ \mathcal{P} \text{ が } L \text{ でも素イデアル} \iff \text{上記以外} \end{cases}$$

・ 上の 2 例は Abel 拡大だが、 $\mathbb{Q}(\zeta_3, \sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ は Abel 拡大ではない。

よって、上の各拡大においては、素イデアルが完全分解するかどうかは mod で判定できるが、素数 p が、 $\mathbb{Q}(\zeta_3, \sqrt[3]{2})$ において完全分解するかどうかは mod では判定できない。

定常ストークス方程式の弱解の存在、一意性と正則性についての結果を紹介します。

$$\begin{aligned} -\nu \Delta u + \nabla p &= f \\ \operatorname{div} u &= 0, \quad u|_{\partial\Omega} = 0 \end{aligned} \quad (*)$$

特に断らなければ $\Omega (\subseteq \mathbb{R}^n, n \geq 2)$ を領域、 $\Omega_0 (\neq \emptyset)$ を $\overline{\Omega_0} \subseteq \Omega$ であるような有界部分領域で、 $\|u\|_2 = (\int_{\Omega} |u|^2 dx)^{\frac{1}{2}}$ とします。弱解を定義するために $C_{0,\sigma}^\infty(\Omega) := \{u \in C_0^\infty(\Omega)^n : \operatorname{div} u = 0\}$ を $\|\nabla u\|_2$ ノルムで完備化した空間 $\widehat{W}_{0,\sigma}^{1,2}(\Omega) = \overline{C_{0,\sigma}^\infty(\Omega)}^{\|\nabla \cdot\|_2}$ という関数空間を導入します。この空間は内積を $\nu \langle \nabla u, \nabla v \rangle_\Omega = \nu \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v dx$ とすると、ヒルベルト空間になります。このとき、ストークス方程式の弱解を次のように定義します。

定義 1 (弱解)

(1) $u \in \widehat{W}_{0,\sigma}^{1,2}(\Omega)$ が $\forall v \in C_{0,\sigma}^\infty(\Omega)$ に対し、次を満たすときストークス方程式の弱解と言います。

$$\nu \langle \nabla u, \nabla v \rangle_\Omega = \langle f, v \rangle_\Omega. \quad (**)$$

(2) もし u がストークス方程式の弱解かつ $p \in L_{loc}^2(\Omega)$ が存在し $-\nu \Delta u + \nabla p = f$ を超関数の意味で満たすのであれば、 (u, p) はストークス方程式の弱解のペアと呼ばれます。

弱解の存在は外力が $f = \operatorname{div} F (F \in L^2(\Omega)^{n \times 2})$ と表されるときに知られています。

定理 1 (弱解の存在と一意性)

$f = \operatorname{div} F (F \in L^2(\Omega)^{n \times 2})$ とします。そのとき p においては $\int_{\Omega_0} p dx = 0$ を満たすようなストークス方程式の弱解のペア $(u, p) \in \widehat{W}_{0,\sigma}^{1,2}(\Omega) \times L_{loc}^2(\Omega)$ がただ一つ存在します。

$\widehat{W}_{0,\sigma}^{1,2}(\Omega)$ 上の線形汎関数 $[f, v] = -\langle F, \nabla v \rangle_\Omega$ にリースの定理を適用することにより $(**)$ をみたす u の存在と一意性が示されます。

p の存在、一意性に関しては次の補題から示されます。

補題 1 (p の存在と一意性)

$u \in \widehat{W}_{0,\sigma}^{1,2}(\Omega)$ がストークス方程式の弱解を満たしていると仮定します。その時、 $\int_{\Omega_0} p dx = 0$ を満たす $p \in L_{loc}^2(\Omega)$ がただ一つ存在し $(*)$ を超関数の意味で満たします。

次に正則性については、 Ω を $\partial\Omega$ が C^{k+2} 級であるような領域とします。

定理 2 (弱解の正則性)

$k \in \mathbb{N}_0$ を任意に取り、 $\Omega \neq \mathbb{R}^n$ で境界 $\partial\Omega$ を C^{k+2} 級とします。 (u, p) はストークス方程式の弱解のペアで $\int_{\Omega_0} p dx = 0$ とします。このとき、 $f \in W_{loc}^{k,2}(\overline{\Omega})^n$ と仮定します。この時、

$$u \in W_{loc}^{k+2,2}(\overline{\Omega})^n, \quad p \in W_{loc}^{k+1,2}(\overline{\Omega})$$

が成り立ちます。

参考文献

Hermann Sohr : The Navier-Stokes Equations An Elementary Functional Analytic Approach

コバルト酸化物のNMR測定

理学コース 物理科学分野

井上 幸治

ペロブスカイト構造をとるコバルト酸化物は、温度によるスピン状態の転移や金属絶縁体転移を起こしたり、コバルトイオンがHund則を破って中間スピン状態(IS)と呼ばれる特異な状態をとりうるなどから興味をもたれている。 $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CoO}_3$ は合成条件によって酸素量が微妙に異なり、マクロ物性が大きく違う[1]が、酸素定比の試料では90Kで金属絶縁体転移を示すと同時にコバルトのスピン状態が(IS)から低スピン状態(LS)へと変化する[2]。吉田らは、コバルト酸化物の一連の研究の中で、酸素不定比性を含む $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CoO}_3$ について合成し、NMR測定を通じてコバルトの微視的状态を明らかにしてきた。 ^{59}Co 核共鳴信号が40~70MHz付近と120~150MHz付近に検出され、それぞれ Co^{3+} のLS($S=0$)、 Co^{4+} のLS($S=\frac{1}{2}$)によるものと同定されている[3]。酸素定比の試料におけるNMR測定はまだ例がない。

本研究では酸素定比の試料を作成し、コバルトの微視的な電子状態を明らかにすることを目標にした。 Pr_6O_{11} , CaCO_3 , $\text{Co}(\text{CHCOO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ を原料として、ゾルゲル法を用いて1000℃で48時間仮反応を行った後ペレット成形したものを、ステンレス管に8MPaの圧力になるように酸素封入をして400℃で12時間焼結を行い試料を得た。低温においてNMR測定を行い、広い周波数域で信号検索を行った結果、周波数34~72MHz付近と110~142MHz付近にCoの共鳴信号の検出に成功した(Fig. 1, 2)。34~72MHzの信号は $S=0$ で Co^{3+} のLSに、110~142MHzの信号は $S=1/2$ で Co^{4+} のLSに対応しているのではないかと考えられる。また、低周波域のスペクトルは複雑な構造をとり、酸素不定比性を含む試料で得られたそれとは大きく異なっている。酸素量の違いが低温での磁気構造に変化を与えていることが微視的な見地から明らかになった。

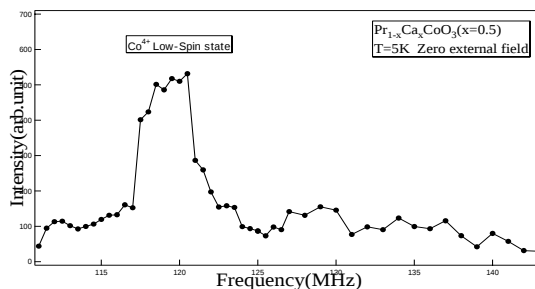
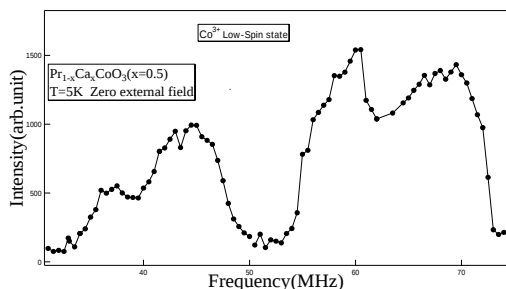


Fig. 1 $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CoO}_3$ の NMR スペクトル (低周波域) Fig. 2 $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CoO}_3$ の NMR スペクトル (高周波域)

[1] Journal of the Physical Society of Japan, 78(3), pp. (2009) 034702

[2] S. Tsubouchi, et al. Phys. Rev. B 66 (2002) 052418

[3] 吉田貴信：高知大学大学院修士論文, 2008

重い電子系 BaAl₄ 型 Ce 化合物の単結晶育成と磁性

理学コース 物理科学分野

大 江 健 太

正方晶 BaNiSn₃ 型結晶構造は、c 軸方向に空間反転対称性を有さない特徴を持ち、CeRhSi₃, CeCoGe₃ 等は圧力下において反強磁性が消失する量子臨界点近傍で特異な超伝導が出現することが知られている [1]. 同じ結晶構造である重い電子系反強磁性体 CeCuAl₃ は、チョクラルスキー法により育成された単結晶の NMR 測定において、反強磁性転移温度 T_N が 1 GPa 未満の圧力で急激に低下することが報告されている [2]. この結果から、1 GPa 程度に量子臨界点があり、特異な超伝導が出現することが期待される. 一方で、多結晶による測定においては数 GPa の圧力範囲では T_N は上昇し、量子臨界点は 8 GPa 程度にあると考えられている [3]. これらの結果は、CeCuAl₃ の物性は試料依存性が大きいことを示している. 本研究の目的は、フラックス法による純良な CeCuAl₃ 単結晶の育成を試み、このような大きな試料依存性が生じる原因を明らかにすることである.

単結晶育成は Al 自己フラックス法により行った. 育成の結果 CeCuAl₃ の Cu の一部が Al に置換された物質 CeCu_{0.7}Al_{3.3} の単結晶が得られた. 様々な原料比による育成を試みたが、育成された単結晶はこの組成比のみであり、CeCu_{0.7}Al_{3.3} が安定相であると考えられる [4]. さらに、CeCuAl₃ の Cu, Al をそれぞれ同属元素である Ag, Ga に置換した物質の育成も試みた. その結果、CeAg_{0.6}Al_{3.4}, CeCu_{0.8}Ga_{3.2}, CeAg_{0.7}Ga_{3.3} の各単結晶の育成に成功した [5].

図 1 に CeCu_{0.7}Al_{3.3} 単結晶の磁化率（内挿図）と逆磁化率の温度依存性を示す. 5 K 以下で急激な磁化の上昇が見られ、さらに 1.8 K における磁化曲線においても低磁場で磁化が飽和するため (not shown), CeCu_{0.7}Al_{3.3} は強磁性体 ($T_C = 3.6$ K) であると考えられる [6]. また、磁化率は図 1 に示されているように結晶場モデルで解析することができ、これは CeCuAl₃ の結晶場とは異なり、基底状態と第一励起状態が逆転している [3]. 電気抵抗測定においては、近藤効果による低温での電気抵抗の上昇は観測されない. また圧力下電気抵抗測定では、2 GPa までの範囲において、 T_C はほとんど変化しない [7]. そのため CeCu_{0.7}Al_{3.3} の磁性は局在的であり、量子臨界点からは離れていると考えられる. また、CeAg_{0.6}Al_{3.4}, CeCu_{0.8}Ga_{3.2}, CeAg_{0.7}Ga_{3.3} においても、同様の傾向が見られた. これらの結果は、反強磁性体であり近藤効果も見られる CeCuAl₃ の物性とは大きく異なる. これは、組成変化によって結晶場が変化したことが原因であると考えられる. CeCuAl₃ の試料依存性が大きいのは、CeCu_{0.7}Al_{3.3} が安定相であるために、CeCuAl₃ の組成比で物質を合成することが困難であるためであると理解される.

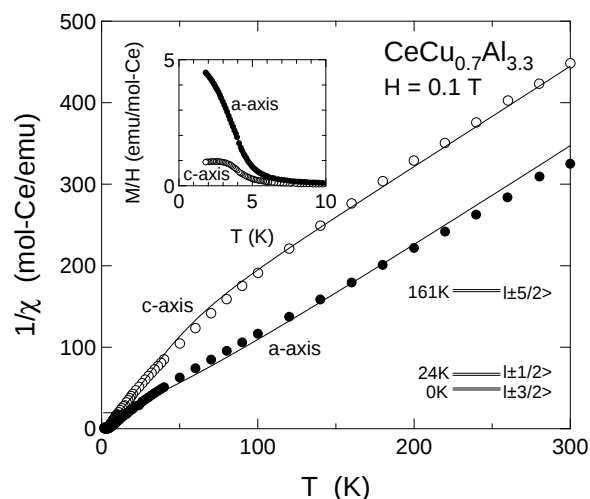


図 1 CeCu_{0.7}Al_{3.3} 単結晶逆磁化率と磁化率（内挿図）の温度依存性と結晶場準位

参考文献

- [1] N. Kimura et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 247004. [2] M. Kontani et al., J. Czech. J. Phys. **64**(S4) (1996) 2067. [3] Y. Kawamura et al., Proc. ICM2009. [4] K. Oe et al., Meet. Abst. Phys. Soc. Jpn. **63** (2008) 509. [5] K. Oe et al., Proc. ICM2009. [6] K. Oe et al., Proc. LT25. [7] Y. Kawamura et al., Meet. Abst. Phys. Soc. Jpn. **64** (2009) 563.

サンゴ粉末の再利用を目的とした CaCO_3 -アミノ酸コンポジットの新規固化プロセス

理学コース 物理科学分野

岡田 俊介

宝石サンゴが日本で発見されたのは高知県土佐沖である。その発見以来、宝石サンゴは高知県を代表する伝統的特産品の一つとなっており、日本で行われている宝石サンゴの生産加工の約 80% が高知県において行われている。加工時には研磨加工を行って、宝石サンゴ本来の光沢を引き出す。それだけでなく、宝石サンゴのモース硬度は 3.5 と高い。

以前、当研究室の広永によりサンゴ粉末の加熱焼結についての研究が行われた。それにより、サンゴ粉末の焼結体は成形圧力と焼成温度が高いほど高い強度を示すことが発見された。しかし、焼成温度が 100 付近で色素が分解し始め、約 480 でサンゴの色素が完全に消失してしまうこともわかった。また、当研究室の丸吉によって、 CaCO_3 に有機バインダーとしてポリビニルアルコール(PVA)、ポリ塩化ビニル(PVC)を湿式混合し、宝石サンゴと同等の硬度と光沢を持つ固化体作成の研究が行われた。しかし、この PVA は、水溶性であるため、水に浸すと簡単に崩れてしまうという欠点があった。本研究では、宝石サンゴに近い硬度を示す固化体作成を目指し、市販の CaCO_3 を代用品として用い、アミノ酸を添加した固化体作成を試みた。

まず CaCO_3 と 4 種類のアミノ酸 (L-Asp, L-Arg, L-Glu, Gly) を 3 時間乾式混合して、590MPa で一軸加圧成形を行い、ペレットを作成した。焼成時間と焼成回数を変化させて焼結を行い、XRD 測定、TG-DTA、SEM 観察、ビッカース硬度測定を行った。また、新たな固化体作成方法として、高周波印加処理を施したペレットを作成し、同様に各種の物性評価を行った。

その結果、Gly を 20wt% 添加して 24 時間仮焼を行い、粉碎し再成形して更に 24 時間焼結したペレットの硬度が高いことがわかった。また、焼成温度 220 の時、最も硬度は高くなった。これらの焼結したペレットについて SEM 観察を行ったところ、粒子の大きさが均一になるほど、硬度が高くなっていることがわかった。

また、高周波印加処理を施したペレットについては、焼成温度 200 、焼成・印加時間 24 時間、電圧 3V、周波数 1kHz の時、最も高い硬度を示すことがわかった。

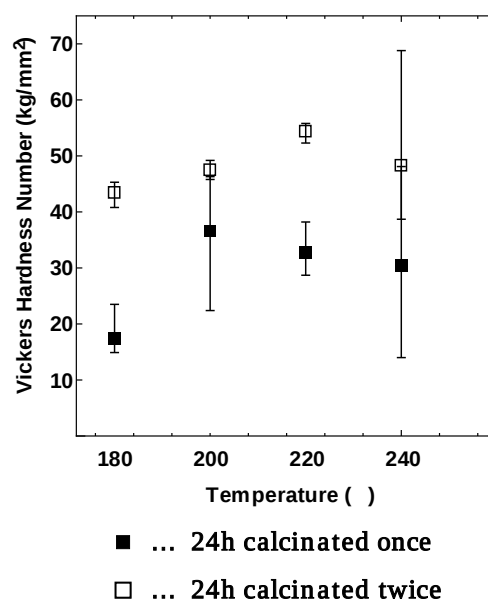


図 1. グリシンを添加した試料の焼成温度を変化させた時のビッカース硬度

新規なニッケル充電電池用ニッケル正電極の作製と評価

理学コース

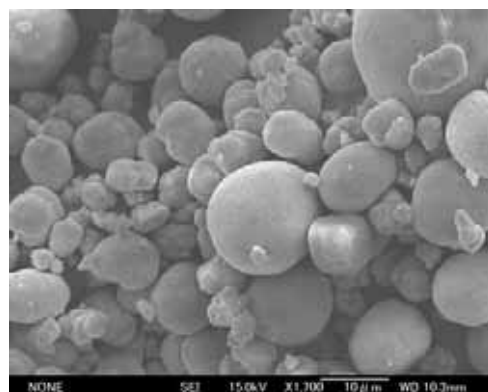
物理科学分野

刈谷 玲菜

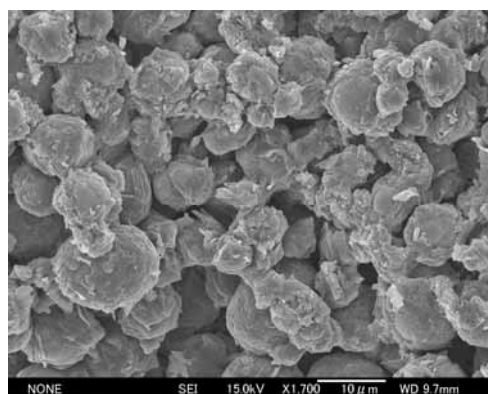
ニッケルカドミウム電池、ニッケル水素電池などの二次電池では、正極活物質として水酸化ニッケルが用いられている。水酸化ニッケルは非導電性であるため電子の移動が困難であり、集電基板の表面に形成されている電極合剤層の厚み方向において、集電基板から離れた位置に存在する水酸化ニッケル粒子と当該集電基板との間の電子伝導性が低下するという問題がある。そのため、活物質の利用率低下、集電効率の低下、電極としての電気抵抗の増大、さらには、放電電圧や放電容量の低下などが引き起こされることになる。そこで市販のニッケル充電電池のニッケル電極は、非導電性である水酸化ニッケルにコバルト、ニッケル金属、またはカーボン粉末を混ぜ、多孔質のニッケル板に充填させ、加圧成形を行い作製されている。こうすることによって、絶縁体である水酸化ニッケルの全てに電子が移動するように工夫されている。

本研究では、このようなニッケル電極の問題点を改善するため、一切の添加物を加えず、水酸化ニッケル表面を電子伝導性の物質で修飾することを目指して実験を行った。その方法として $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ などの各種金属塩水溶液中で水酸化ニッケルを処理することを試み、作製したニッケル正電極について、充放電測定やXRD測定、SEMによる観察などを行い、その特性を評価した。また、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ については 200 近い沸点を持つエチレングリコールを溶媒として用いることにより 100 以上の高温での処理も試みた。

充放電測定により、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液中での処理が放電特性を向上させる上で有効であることが確認された。図 1 にそのSEM写真を示す。しかし、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ のエチレングリコール溶液を用いて高温で処理を行った場合においては、処理温度が高くなるほど、また処理時間が長くなるほど放電持続時間は短くなるという結果が得られた。これはXRDパターンやSEM写真より、エチレングリコールに起因する層状化合物の生成が原因となっていると予想される。そこで、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液による低温での処理を試みたところ、100 以下のいずれの処理温度においてもほぼ一樣に放電持続時間の延長が確認できた。したがって、充放電特性を向上させるためには $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液による処理が有効であることがわかった。その効果は処理温度にはほとんど影響されず、加熱を一切行わない室温においても、処理による十分な成果が得られていた。また、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液のほかに $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ などのいくつかの金属塩水溶液についても、同様の処理により放電特性を向上させる効果が認められた。



(a) 処理前の試料



(b) 処理後の試料

図 1 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液中で処理した試料(1700 倍)

GM 冷凍機を用いた極低温物性測定システムの開発

理学コース 物理科学分野

角 田 泰 啓

重い電子系とよばれる Ce を含む化合物は、1 K 以下の極低温において相反する物理現象である磁性と超伝導が共存するなど新奇な振る舞いを示すために興味をもたれている。現在の低温技術ではこのような極低温は液体ヘリウムを用いて実現されるが、ヘリウムは希少資源であるためヘリウム液化設備のない研究施設においては重い電子系の研究を十分に行うことが出来ない。しかし物性研究は多角的な立場から研究を行うことが重要であり、液化設備の有無に関わらず 1 K 以下の物性研究が可能であることが望まれる。一方液体ヘリウムを用いずに低温を得る方法として、冷凍機を用いる方法がある。冷凍機には様々な種類があり、中でも GM 冷凍機は比較的安価で簡単に 4 K 程度の低温が実現できることが特徴である。しかし GM 冷凍機には『1 K 以下に下げることができない』『温度振動が大きい』という大きな 2 つの欠点があるため、1 K 以下の極低温における物性測定は不可能であった。そこで我々は 2007 年度までに、図に示すような ^3He GM 冷凍機システムの開発し、これらの問題を克服した[1]。しかしこのシステムには冷却にいたるまでの時間が長いことやシステムが比較的大きくなってしまふことなどの問題があり、さらに高温における温度振動の問題も未解決であった。本研究の目的は ^3He GM 冷凍機のこれらの問題を解決し、性能の最適化を図ることである。

まずシステムの小型化を達成するために 4 K pot の構造を pot 型からフランジ型へと変更した。その結果、4 K pot の液化空間としての機能を損なうことなく、10 cm 以上あった 4 K pot は 10 mm 以下に小型化することに成功した。よってフランジに変更し、1 K pot, ^3He pot の最適化を図ることによって、当初 40cm 近い大きさであった ^3He システムを半分以上まで短くすることができた。

次に GM 冷凍機の高温における温度振動を解決するため、我々は 4 K pot のみを用いて、pot 内の ^4He ガスの液化量を変化させて温度振動の測定を行った。Fig.1 にその結果を示す。点線は冷却ヘッドの温度振動を表しており、3 K 付近で 0.2 K 以上も振動しているのが分かる。実線は試料空間における温度振動を示している。4 K pot 内が真空の場合の温度振動は最低温度付近で約 0.2 K 程度もあるが、 ^4He ガスを導入することで徐々に温度振動が逓減され、2.25 L の ^4He ガスを入れた状態では最低温度付近における温度振動を極端に逓減することができた。その結果、最低温度における温度振動は冷却能力を損なうことなく冷却ヘッドの温度振動の 1/10 以下にまで逓減することに成功し、更に 1 K pot においては 1/100 以下にまで温度振動の逓減に成功した[2]。

また、冷却時間の短縮については通常ヒートスイッチなどを用いるが、我々は全く新しい方法で冷却時間の短縮を試みた。その結果 Fig. 2 に示すように大幅な時間短縮に成功したばかりでなく、より低温を実現する見通しができた[3]。

本研究により、 ^3He GM 冷凍機の小型化と冷却時間の短縮、GM 冷凍機の温度振動の逓減に成功した。その結果、精密な温度を必要とする比熱測定などの物性実験が可能になるばかりでなく、電波天文学やテラヘルツ産業などへ応用する道も開かれた。

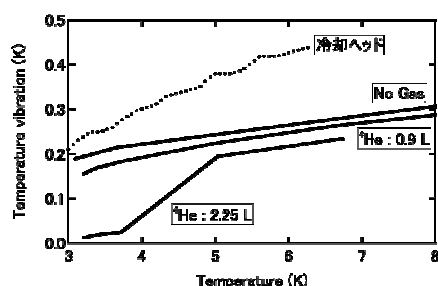


Fig.1 温度振動逓減の様子

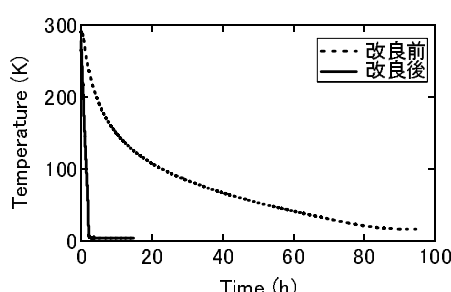
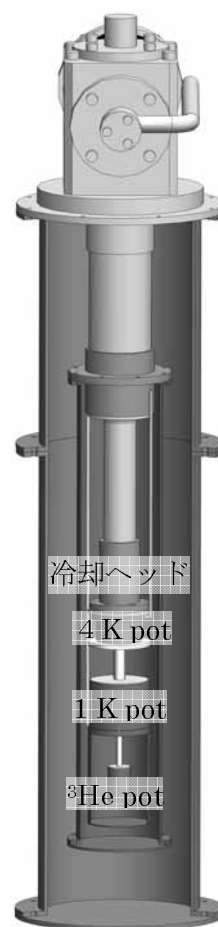


Fig.2 冷却時間の比較



^3He GM 冷凍機

- [1] T. Nishioka et al., J. Phys.: Conf. Ser. 150 (2009) 012030.
- [2] T. Sumida et al., Meet. Abst. Phys. Soc. Jpn. 64 (2009) 447, 541.
- [3] K. Okidono et al., Meet. Abst. Phys. Soc. Jpn. 65 (2010) in press.

$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (以後C12A7) はその結晶構造から、かご状物質と呼ばれている。単位格子の中には12個のかごのような空間があり、かごの一面を二つのかごで共有するように、隣接するかご同士が強く結合している。かごの内径は0.44nm程度であり12個あるうちの2つには酸素がイオンの状態で存在しているといわれている[1]。酸素イオンの大きさは約0.14nmなのでかごにしっかりと押さえられておらず高温では自由にかごの中を動く事ができる。かごの中の酸素イオン(フリー酸素イオン)を他の負のイオンもしくは電子に置き換える事も可能である。イオン種により絶縁体から導体に変化したり、さらには約0.2Kで超伝導に転移するということが近年報告されている[2]。

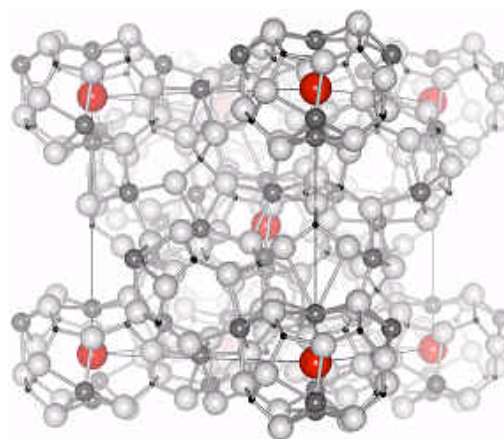


Fig.1 C12A7の結晶構造

本研究ではC12A7及び、それからフリー酸素イオンを抜き出し電子に置き換えたC12A7:e-についての多結晶体の合成を試みた。母体化合物であるC12A7は固相反応法を用いて合成し単相の試料が得られた。C12A7:e-の合成は得られたC12A7をペレット状にし、粉末のTiと接触するように石英管に真空封入し加熱する事で得た。これらの試料の相評価は粉末X線回折測定で行い、またC12A7:e-のかごの中の酸素イオン濃度を見積るためにTG-DTA測定を行った。物性を調べるために磁化率測定及び ^{27}Al -NQR測定を行った。

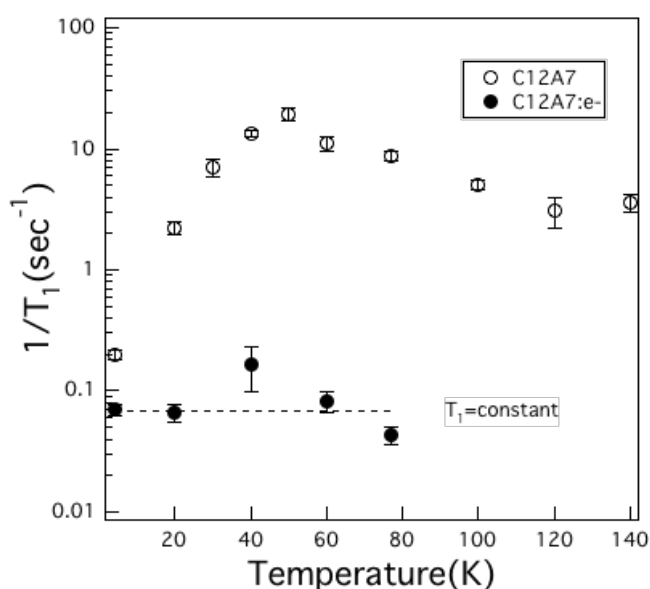
Fig.2 $(1/T_1)$ の温度依存性

Fig.2にNQR測定で得られた縦緩和率 $(1/T_1)$ の温度依存性を示す。C12A7の縦緩和率の温度依存性は40~50Kを最大値とする幅の広い山を示す。フリー酸素を抜き出したC12A7:e-ではこの山が見られないことから、この山はフリー酸素イオンの運動(ラットリング)と関連付けて考えられる。一方、首都大の小中らによれば磁場中におけるAl核の $1/T_1$ は40~50K付近で明確な温度依存性を示さず、またその絶対値も我々の値と比べて4桁程遅い[3]。この事は外部磁場が電子の微視的磁性に強く影響している事を示している。電子系の相互作用を通じて、フリー酸素イオンのラットリングが磁場によって抑制されうる事を示唆しているのかもしれない。

- [1] S.-W.Kim et al, J. Mat. Sci.: Mat. Elec. 18, (2007), S5-14
- [2] M. Miyakawa et al, J. Am. Chem. Soc. 129, (23), (2007), 7270-7271
- [3] Y. Konaka et al, 日本物理学会講演予稿集 3, (2009) 27pPSB-44

YbFe₂Al₁₀ 型 CeRu₂Al₁₀ における奇妙な相転移

理学コース 物理科学分野

竹 坂 智 明

斜方晶 YbFe₂Al₁₀ 型 CeRu₂Al₁₀ は T₀ ~ 27 K で相転移を起こし、その起源は反強磁性転移であることが 2008 年に Strydom によって報告された[1]。しかし、CeRu₂Al₁₀ は Ce イオンが希薄であるため、磁性を担う Ce イオン間の磁気的な相互作用は弱いと考えられ、27 K の相転移は磁気転移としては高すぎるように思われる。実際 Ce 濃度が同程度の化合物は磁気転移温度が 1 K 程度である。Strydom の研究は不純物を含む多結晶試料を用いたものであり、T₀ における相転移が Al の不動態等による extrinsic なものであることも否定できない。本研究の目的は良質な単結晶による CeRu₂Al₁₀ の真の物性を明らかにし、T₀ における相転移の性質を調べることである。

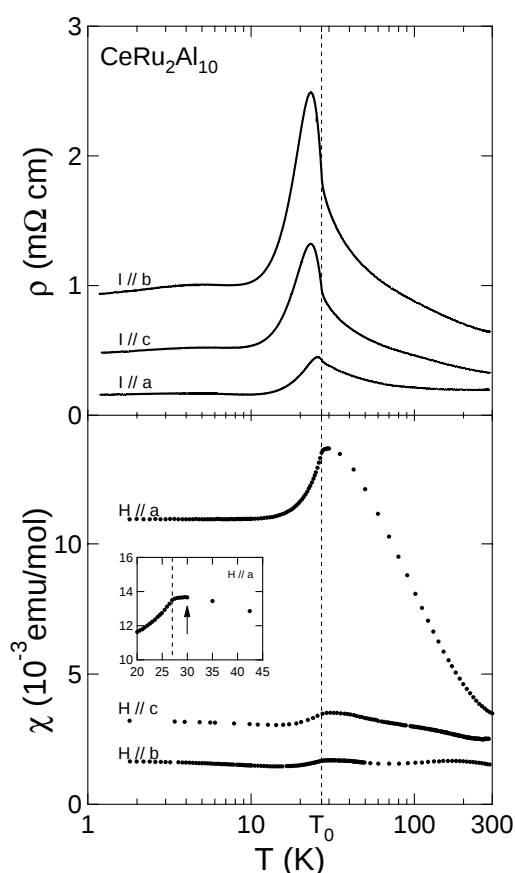
単結晶は Al 自己フラックス法を用いて育成を行った。フラックスは遠心分離機と NaOH 水溶液を用いて完全に除去した。CeRu₂Al₁₀ に加えて同じ結晶構造の CeFe₂Al₁₀、CeOs₂Al₁₀ の単結晶育成にも成功した。得られた単結晶は大きなもので 3×3×2 mm³ 程度である。単結晶の軸評価は通常背面ラウエ法で行うが、これらの物質は a 軸と c 軸がほぼ同じであるためラウエ法による評価は困難であり、粉末 X 線回折装置を用いた新しい方法を考案し軸決定を行った[2]。

図は CeRu₂Al₁₀ の電気抵抗率 ρ と磁化率 χ の温度依存性を示したものである。CeRu₂Al₁₀ は室温から電気抵抗が上昇し、T₀ ~ 27 K でさらに急激に上昇したのち減少する。Ce を他の希土類元素で置換した化合物の電気抵抗は金属的に単調に減少し、この振る舞いは CeRu₂Al₁₀ 特有のものである[2,3]。一方、磁化率は Curie-Weiss 則に従って上昇し、30 K で broad な山を示して T₀ で急激に減少する[2,3]。この振る舞いは反強磁性転移とは異なっている。また、比熱測定より求めた相転移に伴うエントロピーは約 Rlog2 程度である[4]。これらの結果は Strydom の結果とほぼ類似しており、T₀ における相転移は本質的なものであることがわかる。一方、²⁷Al NQR スペクトルの温度変化は T₀ における相転移は磁気転移であることを否定している[5]。これらの結果から、スピンの自由度が“磁気的でない起源をもつ相転移”により消失していると考えられ、これは今までの Ce 化合物では見られなかった新しい相転移であり、その起源の解明が必要である。

CeOs₂Al₁₀ は T₀ ~ 29 K で同様な相転移を示すが、電気抵抗の低温部分は半導体的に上昇する。また、CeFe₂Al₁₀ では T₀ は消失し近藤半導体的に振る舞う。これら関連物質の電気抵抗は CeRu₂Al₁₀ の圧力下の電気抵抗に類似している[4]。

参考文献

[1] A. M. Strydom, Physica B **404** (2009) 2981. [2] T. Takesaka *et al.*, Meet. Abst. Phys. Soc. Jpn. **64** (2009) 564, 413, 429. [3] T. Takesaka *et al.*, Proc. ICM2009. [4] T. Nishioka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 123705. [5] M. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 123713.



グルーオン多体系に対する変分法的アプローチと輸送係数

理学コース 物理科学分野

李 東 奎

グルーオン多体系に対するずれ粘性係数を評価する新しいアプローチを提案する。そこで、QCD への時間依存変分法的アプローチを考える。まず、汎関数シュレーディンガー描像に基づいたガウシアン波動汎関数による時間依存変分法をハミルトン形式で与える。結果として、変分関数 $\bar{A}, \bar{E}, G, \Sigma$ に対する運動方程式が古典力学における正準運動方程式として得られる。

$$\begin{aligned}\dot{\bar{A}}^a(x, t) &= \frac{\delta \langle H \rangle}{\delta \bar{E}^a(x, t)} \quad , \quad \dot{\bar{E}}^a(x, t) = -\frac{\delta \langle H \rangle}{\delta \bar{A}^a(x, t)} \\ \dot{G}^{ab}(x, y, t) &= \frac{\delta \langle H \rangle}{\delta \Sigma_{ij}^{ab}(x, y, t)} \quad , \quad \dot{\Sigma}_{ij}^{ab}(x, y, t) = -\frac{\delta \langle H \rangle}{\delta G_{ij}^{ab}(x, y, t)}\end{aligned}$$

この枠組みの有効性は、 $\bar{A} = 0$ の下で QCD カップリング g の最低次近似において、ワンループの走る結合定数がうまく再現されることから確かめられる。

以上の枠組みを発展させて有限温度系へ拡張する。そこで、ボソン多体系における Hartree-Bogoliubov 型の時間依存平均場近似と似た形式で簡約化密度行列 $\mathcal{M}$ を導入する。ここで、簡約化密度行列 $\mathcal{M}$ は量子グルーオン場から構成されている。量子グルーオンとは、古典場 $\bar{A}, \bar{E}$ の周りの量子揺らぎ (量子ゲージ場 G, Σ) を意味している。結果として、この簡約化密度行列 $\mathcal{M}$ に対する運動方程式は Liouville-von Neumann 型の方程式として定式化される。

$$\begin{aligned}i\dot{\mathcal{M}}_{ij}^{ab}(x, y, t) &= [\tilde{\mathcal{H}}, \mathcal{M}]_{ij}^{ab}(x, y, t) \\ \tilde{\mathcal{H}}_{ij}^{ab}(x, y, t) &= \begin{pmatrix} \lambda_{ij}^{ab}(x) & \delta_{ij} \delta^{ab} \\ \Gamma_{ij}^{ab}(x, t) & \lambda_{ij}^{ab}(x) \end{pmatrix} \delta^3(x - y)\end{aligned}$$

次に、カラー $su(3)$ ピュアゲージ理論 (クォークを無視した QCD) を考える。本論文で発展させたこの変分法の枠組みをカラー $su(3)$ 対称性を持つピュア量子グルーオン物質の系に適用する。久保公式を用いることで、量子グルーオン物質に対する輸送係数の表式を得る。

$$\begin{aligned}\eta(\omega) &= \frac{i}{\omega} [\Pi^R(\omega) - \Pi^R(0)] \\ \Pi^R(\omega) &= -i \lim_{\epsilon \rightarrow +0} \int_0^\infty dt \int d^3r e^{i\omega t - \epsilon t} \langle [T_{12}(\mathbf{r}, t), T_{12}(\mathbf{0}, 0)] \rangle_{\text{eq}}\end{aligned}$$

今回、この量子グルーオン物質の輸送係数の一つであるずれ粘性係数を計算した。結果として、QCD カップリング g の最低次近似において、有限温度では g^0 のオーダーまででずれ粘性係数への量子グルーオンの寄与はないことが示された。また、温度ゼロでは g^1 のオーダーまでで量子グルーオンの寄与がないことが示された。つまり、この変分法的アプローチによればずれ粘性係数が消えるという結果を与えた。

$$\begin{aligned}\eta(\omega) &= 0 \quad \text{for } T = 0, \text{ up to } \mathcal{O}(g^1) \\ \eta(\omega) &= 0 \quad \text{for } T \neq 0, \text{ up to } \mathcal{O}(g^0)\end{aligned}$$

以上の結果より、弱結合 QCD (g が小さい領域) の観点から、量子グルーオンは有限温度で g の 1 次のオーダーあるいはより高次のオーダーからずれ粘性係数へ寄与するので、量子グルーオン物質のずれ粘性係数が小さいと考えられる。

四国山地剣山系におけるツキノワグマの食性と生息適地の解析

理学コース 生物科学分野

伊藤 徹

四国のツキノワグマ個体群は剣山系に数十頭程度が生息していると推定されており、絶滅寸前の状態にある。しかし、当地域のツキノワグマの食性には不明な点が多く、本種にとって好適な生息環境も明らかにされていない。そこで本研究では、四国のツキノワグマ個体群の保全のために不可欠な情報である、本種の食性と本種にとっての好適な生息環境を明らかにすることを目的とした。

剣山系の石立山を中心とする 230 km² 地域を踏査した結果、合計 12 種 200 本の樹木個体でツキノワグマの爪痕を発見した。その内訳は、堅果を生産する樹種が合計 4 種 88 本、液果を生産する樹種が合計 5 種 102 本、その他の果実類を生産する樹種が合計 3 種 10 本であった。爪痕が最も多く発見された樹種はアオハダ 56 本、次いでミズナラ 55 本、コシアブラ 38 本、ブナ 20 本、コナラ 12 本で、その他の樹種は 10 本未満であった。また上記の踏査地域で、2007 年に 25 個、2008 年に 24 個のツキノワグマの糞を発見し、採集した。糞を分析した結果、6 月を除くすべての月に採取した糞で、植物質が 85% 以上を占めていた。6 月に採取した糞では動物質の占める割合が 74% と高かった。8 月に採取した糞ではミヤマザクラの果実が 86% を占めていた。秋から冬にかけて採取した糞ではコナラ属の果実が大半を占め、10 月から 11 月で 90% 以上、12 月では 100% であった。2007 年に 2 頭、2008 年と 2009 年に各 1 頭の学術捕獲を行った。これらの個体が捕獲中に排泄した糞を分析した結果、植物質 4 種類、動物質 3 種類が含まれていた。草本類とアリ科が全ての試料から出現し、そのほかアオハダ、クマヤナギ、ミヤマザクラの種子、スズメバチ科、ヘビ亜目が含まれていた。以上の結果を総合すると、当調査地域のツキノワグマは夏季には液果類やアリ科を主とする昆虫類、秋季にはコナラ属堅果を主に利用していることが明らかになった。これらの結果は本州におけるツキノワグマの一般的な食性と同様の傾向を示していた。春季に糞は発見できなかったが、春季に観察されたものとして、ブナの高木に作られた円座や爪痕、ホオノキの爪痕、植林されたスギやヒノキの樹皮剥ぎ痕などがあり、春季にはこれらの樹種の新芽、花、形成層などを食料としていると推定できる。

数量化理論 II 類による生息適地解析の結果、最も影響力のある変数は群落型であり、次いで主要道路からの距離であった。群落型のうち、ツキノワグマの生息地として好適と判定されたのは、落葉広葉樹二次林、ブナ林およびミズナラ林であった。主要道路からの距離は、500 m ～1100 m 離れている場所が好適と判定された。標高は 1000 m ～1600 m が好適と判定され、この標高域は剣山系におけるブナクラス域植生の垂直分布と一致した。傾斜角度や森林の連続性（CON 値）には、生息適地評価のための一定の傾向は認められなかった。

以上の結果を総合すると、剣山系のツキノワグマは人間活動の影響が及ばない冷温帯のブナ林やミズナラ林および落葉広葉樹二次林を主に利用していることが明らかとなった。しかし当地域の植生は、その 6～7 割をスギやヒノキの植林によって占められており、ツキノワグマが安定して存続することができる最小個体数 100 頭を維持できるだけの環境収容力を備えていないのが現状である。当地域のツキノワグマ個体群を保全し、個体数を回復させるためには、冷温帯落葉広葉樹林を保全するとともに積極的に復元していく必要がある。

絨毛虫コルポータ (*Colpoda cucullus*) の休眠シスト誘導抑制因子 D-グルコースの作用機序に関する研究

理学コース 生物科学分野

大谷 由香利

土壌性絨毛虫 *Colpoda cucullus* の休眠シスト形成の誘導は、外液 Ca^{2+} 濃度の上昇またはコルポータ栄養細胞を過密に保つことによってもたらされる細胞内 cAMP 濃度上昇に起因すると考えられ、バクテリア由来分子やポルフィリン分子によって抑制される。しかし、誘導因子も抑制因子も加えていない液中（純水や薄い緩衝液など）や培養を継続した場合でも、徐々にシスト化は進行する。このような場合のシスト化は‘飢餓’によってもたらされると考えられており、多くの原生動物に共通するシスト化誘導因子であるとされるが、その実体は明らかにされていない。‘飢餓’とは、シスト化を抑制する因子が消費され、枯渇した状態とも考える事ができる。本研究では、D-グルコースによるシスト化抑制機序について検討した。

D-グルコース存在下では、 Ca^{2+} および高密度によるシスト化誘導が抑制され、この条件下では、細胞体成長を伴う細胞増殖がみられた。さらに、グルコース共輸送阻害剤フロリジン存在下では、細胞増殖が抑制されることから、D-グルコースは輸送体を介して細胞内に取り込まれ、栄養源として利用されていることがわかった。フロリジン存在下では、シスト化誘導も抑制された。この結果は、細胞内に取り込まれた D-グルコースや代謝産物等がシスト化誘導シグナリング経路に抑制的に作用することを示唆している。しかし、D-グルコース存在下では、その栄養源を利用してバクテリアが急速に増殖する可能性があり、シスト化の抑制はバクテリア由来の成分に起因する可能性も排除できない。このため、アンピシリン存在下でバクテリアを除去した条件下においてコルポータの増殖やシスト化抑制を検証し、これらが確かに D-グルコースに起因することを確認した。

一般に、D-グルコースは細胞内で代謝され、ミトコンドリアでの ATP 合成に使用されるので、D-グルコース存在下でのシスト化抑制作用は ATP 合成と関係している可能性がある。そこで、CCCP、オリゴマイシン、アジ化ナトリウムを用いてミトコンドリアの ATP 合成を阻害した。この条件下では、D-グルコースによるシスト化抑制効果は無効となる傾向が見られた。この結果は、細胞内の ATP がシスト化抑制に関与する事を示唆しており、‘飢餓’によるシスト化誘導の実体は、シスト化誘導に関わる細胞内シグナル伝達系に抑制的に作用しているグルコースまたはその代謝産物の消費・枯渇によるものであるといえる。

酵素免疫学的手法 (EIA) を用いた細胞内 cAMP 濃度定量的結果、過密による cAMP 濃度の上昇は D-グルコースによって抑制されないことがわかった。この結果から、D-グルコースはシスト化誘導シグナル伝達系初期に位置する cAMP 濃度上昇イベントの下流に作用することが示唆された。

高知県の内湾の干潟と河口域における貝類の分布に関する研究

理学コース 生物科学分野

濱田 早穂子

干潟および河口域は水質浄化の場として、また、多様な生物の生息環境として生態系の中で重要な位置を占めている。しかし、人為的な影響を受けやすく、特に貝類は環境が破壊されることで個体群全体が短期間に消滅することが少なくない。高知県は干潟が形成されにくい地形であるが、高知県の干潟および河口域には全国的に希少な種が生息している。高知県レッドデータブック〔動物編〕には6種の希少種が掲載されているが、汽水産貝類についての情報がきわめて少ないことに加え、刊行から6年以上が経過しており、見直しの必要がある。本研究は、高知県の干潟および河口域に生息する貝類の全貌を明らかにし、環境保全の基礎資料とすることを目的とした。

2006年12月から現在まで24河川の河口と3つの内湾で調査を行った結果、16目56科129種が確認された。そのうち、干潟および河口域に生息する78種が確認され、高知県絶滅危惧ⅠA類が2種、同ⅠB類が1種確認された。また、環境省絶滅危惧Ⅱ類が4種、同準絶滅危惧種が9種確認された。ただし、他の高知県絶滅危惧ⅠA類2種、同ⅠB類1種、同Ⅱ類1種は確認されず、絶滅した可能性が危惧されるため、早急により綿密な調査を実施する必要がある。

本研究の結果と過去の資料を比較すると、浦戸湾には現時点より多くの種が生息する良好な干潟が存在したことが明らかである。浦ノ内湾にはかつてカワアイが生息していた。本種は高知県での産出が稀であるが、現在の浦ノ内湾には生息していない。このように、浦戸湾および浦ノ内湾で、貝類の生息に影響を及ぼすような大きな環境の変化があったと考えられる。

高知県東部で、貝類の生息に適した干潟は確認されなかった。高知県東部の河川の河口は閉塞していることが多く、また、底質が大きな礫か砂で形成されているため、生息可能な種が限定されていると考えられる。ただし東洋町の小池川では、一部に泥の干潟が形成されており、ハザクラガイの死貝を確認することができた。

高知県中央部から西部の内湾の干潟と河口域には、それぞれ貴重な種が生息していることが判明した。中でも、最も多様な種が生息する浦ノ内湾の下中山の干潟と、高知県において希少なカワアイが生息する黒潮町蛸瀬川の干潟は、きわめて貴重な存在であり、高知県希少野生動植物保護条例に基づき、保護地域に指定すべきである。

カレイ目魚類における嗅覚器官の不相称性

理学コース 生物科学分野

太田 真由加

カレイ目魚類 9 科 35 属 54 種において嗅覚器官（嗅房、嗅板、嗅神経および嗅球）、嗅神経の走行様式および鼻孔の位置を観察し、有眼側と無眼側間および分類群間で比較した。無眼側の嗅覚器官は有眼側のそれに比較し、一般的に発達が悪かった。これは無眼側の鼻孔が、基質に接したり離れたりと、安定的な条件下で機能できないことが原因として考えられた。

無眼側の嗅覚器官が比較的発達するタイプ、無眼側の嗅覚器官の発達は悪いが、十分に機能的と判断できるタイプおよび無眼側の嗅覚器官が退化・消失し、機能を失っていると判断できるタイプ、合計 3 タイプが認められた。第 1 のタイプにはボウズガレイ科、コケビラメ科、ヒラメ科、ダルマガレイ科（3 種）、カレイ科、カワラガレイ科およびササウシノシタ科（1 種）が、第 2 のタイプにはウシノシタ科とササウシノシタ科（6 種）が、第 3 のタイプにはダルマガレイ科（14 種）とベロガレイ科が含まれた。

嗅板の配列様式には有眼側と無眼側間で差はなく、3 型が認められた。ボウズガレイ科、コケビラメ科、ヒラメ科、ダルマガレイ科、カワラガレイ科およびササウシノシタ科では葉型、ベロガレイ科とカレイ科では山型、ウシノシタ科ではドーム型であった。

嗅神経の走行と篩骨域の貫通様式には、分類群間で大きな差異は認められなかった。基本的には嗅神経は下垂体窩を出て側篩骨を貫通、もしくは側篩骨の陥入部を通過する。ササウシノシタ科トビササウシノシタのみで有眼側の神経が側篩骨と鋤骨の間を通過する。以上から、本目魚類での頭蓋の不相称性が、基本的な魚類の神経走行パターンを逸脱させるには至っていないことが確認された。ダルマガレイ科では無眼側に嗅覚器官や嗅神経がない種でも側篩骨に神経が通る孔があるが、同様に嗅覚器官がないベロガレイ科では孔がなかった。

無眼側の鼻孔の位置は 3 タイプにわけられた。第 1 のタイプでは無眼側の鼻孔が正中線に接近し、第 2 と第 3 のタイプでは正中線から離れ、完全に無眼側に位置する。第 2 のタイプでは頭部腹面の中央付近に開孔し、第 3 のタイプでは背鰭起部の下方に開孔する。これらのタイプは無眼側嗅覚器官の発達程度による 3 タイプと、ほぼ一致した。すなわち、第 1 のタイプにはボウズガレイ科やダルマガレイ科（3 種）などが、第 2 のタイプにはウシノシタ科などが、第 3 のタイプにはダルマガレイ科（14 種）などが含まれる。第 2 のタイプのササウシノシタ科とウシノシタ科では夜間に埋蔵性動物を捕食するので、この位置は基質中のおいを受容するのに機能的と考えられた。一方、正中線に接近する第 1 のタイプは、完全に無眼側にある第 3 のタイプで嗅覚器官が退化・消失することから判断し、基質中よりもむしろ水中の臭いを受容するのに役立っている可能性が高い。したがって、カレイ目魚類の無眼側嗅覚器官は、魚類全般に共通する水中の臭いを受容機能を基本的には保持し、ササウシノシタ科とウシノシタ科で基質中のおいを受容に機能の中心が移行したと考えられる。

高知県沿岸の3地域における出現魚類に関する研究

理学コース 生物科学分野

山 村 将 士

南日本の造礁サンゴ群落を含む沿岸岩礁域における魚類の調査は、数多くの海域で行われており、高知県の大月町柏島では日本産魚類全体の約4分の1にのぼる884種が報告されている。これらの調査では多くの魚類が造礁サンゴ類やその周辺を利用して生息し、底質の環境が魚類の出現状況に与える影響が強いことが示唆されている。近年、土佐湾内でも奈半利町加領郷港や須崎市池ノ浦などで新たな造礁サンゴ群落が確認されており、魚類を中心とする調査が行われてきた。

本研究では高知県内で造礁サンゴ群落の発達を確認されている加領郷、池ノ浦および土佐清水市清水浜において、2009年4月から同年12月までの9ヶ月間にラインセンサス法を用いた魚類の出現状況と底質環境の調査を行い、それらの関係性を明らかにすることを目的とした。また、上記調査と同時に行った周辺区域の魚類観察調査や過去の研究などから、各地点の出現魚類を明らかにし、他海域の魚類相との比較から、各調査地域の特徴を明らかにすることを目的とした。

その結果、ラインセンサス調査により、加領郷では98種(4,237個体)、池ノ浦では47種(2,171個体)、清水浜では94種(3,679個体)、合計で140種(10,087個体)の魚類が確認された。さらに周辺区域の魚類相調査では3地域すべてで300種近い魚類が確認された。また各調査地点において魚類の出現状況と底質の関係性に大きな違いが見られた。

加領郷の底質では岩礁域の一部に造礁サンゴ群落が形成された環境(平均被度44%)がみられ、魚類の出現は造礁サンゴ類の被度が高い区域、樹枝状サンゴや葉状サンゴなどの付近に集中していた。それに対し、池ノ浦の底質では一様に造礁サンゴ類に覆われた環境(90%)がみられ、魚類の出現は種数や個体数に大きな差がなく、分散傾向にあった。しかし、池ノ浦でもより形状の複雑な樹枝状サンゴの付近でやや個体数が増加した。また、清水浜の底質では水深が比較的浅い区域で、砂地上の死サンゴに造礁サンゴ群落が形成された環境(62%)がみられ、魚類の出現は造礁サンゴ類の付近では池ノ浦のような分散傾向にあったが、砂地や転石帯では前者と比べ種数と個体数が少なかった。しかし、清水浜では砂地の一箇所に金網のフェンスが折り重なったような立体的な人工物があり、魚類はその周辺で種数と個体数ともに最も多く観察された。

これらの結果から、魚類は造礁サンゴ類の被度の低い地域では、サンゴ類付近に魚類が集中し、逆に造礁サンゴ類の被度の高い地域では、分散する傾向にあった。また、造礁サンゴ類の形状は複雑で立体的になるほど、その周辺に多くの魚類が出現することも示唆された。さらに、サンゴ礁性魚類を含む多くの魚類は、造礁サンゴ類だけでなく、立体的で複雑な形状のものであれば人工物も生息場所として利用していることが観察された。

他海域の魚類相との比較では、高知県内において造礁サンゴ群落の発達した地域と、岩礁域など造礁サンゴ類があまり見られない地域との間では、類似性が低い傾向にあった。また、波あたりや地形要因による複雑な自然環境の影響が示唆された。

高知県沿岸におけるミミズハゼ属魚類の分布ならびに分類に関する研究

理学コース 生物科学分野

坪井 尚美

ミミズハゼ属 (*Luciogobius*) はスズキ目ハゼ科ハゼ亜科に属し、体が円筒形で細長く、ミミズのような魚類である。全長 5 cm 程度に成長する小型種が多いが、種によっては全長 10 cm に達することがある。本属魚類は河川や海岸の転石や礫の隙間に潜って生活しており、あまり人目につくことはない。体は無鱗で眼が小さく、第一背鰭を欠く。種によっては眼が皮下に埋没する、腹鰭軟条数が 5 に満たない、腹鰭がない、背鰭および臀鰭を欠くことがあるなど、退化的傾向を示す種が多い。分布域はロシア極東部から朝鮮半島、中国および日本で、国外から 2 種、国内で 11 種が報告されているが、少なくとも 20 種以上の未記載種が存在するとされている。また、コマハゼ属 (*Inu*) を本属に含めるとする見解があり、分類は混乱している。高知県では 1976 年に、本属魚類の分布と分類に関する知見が卒業および専攻科の研究で得られたが、一部の絶滅危惧種を除き分布の詳細は不明のままであった。

高知県東洋町小池川から宿毛市藻津の県境にある海岸まで、計 120 地点で手網による採集を行った結果、ミミズハゼ、ナガミミズハゼ、ナンセンハゼ、イドミミズハゼ、オオミミズハゼ、ヤリミミズハゼの既知 6 種と、7 種の未記載種が得られ、希少種を含むそれぞれの分布域が明示された。

本研究で、以下の未記載種の存在が明らかとなった。*L. sp. 1* はミミズハゼに最もよく似るが、淡水域には生息せず、腹椎骨数が 16 と限られ、体に淡色点はなく一様に黒褐色で、尾鰭中央部が黒く、縁辺が淡色であることを特徴とする。*L. sp. 2* は過去の研究で記録されておらず、ナガミミズハゼに似て体高が低く細長い、各鰭の鰭条数が多く、胸鰭上部に 1 本の遊離軟条があり、腹鰭が吸盤状である。ヤリミミズハゼとは胸鰭上部の遊離軟条が単一であること、眼径が小さいこと、腹椎骨数が通常 17 に対し通常 19 と多い点で異なる。*L. sp. 3* は過去の研究でも採集されており、体高が低くナガミミズハゼに似るが、腹鰭が吸盤状であること、体側中央に 1 本の連続した色素胞からなる縦線があること、前者の腹椎骨数が通常 19 であるのに対して後者は通常 17 で、肛門が臀鰭起部と顕著に離れる。*L. sp. 4* も過去の研究で記録されている。体高が低くナガミミズハゼに似るが、腹鰭が吸盤状で、体側中央に不連続な色素胞の縦線が 1 本あること、腹椎骨数が通常 18 であることで識別可能である。また、*L. sp. 3* とは体側の色素胞の列が不連続であること、腹椎骨数が多いこと、肛門-臀鰭起部間の距離が *L. sp. 3* では体長の 13-14% であるのに対し、本種では 9-11% であることで異なる。*L. sp. 5* は過去に 3 個体が採集されていたが、本研究で新たに 4 個体が得られた。体高が低くナガミミズハゼおよびヤリミミズハゼに似るが、胸鰭上端に 1 本の遊離軟条がある。*L. sp. 2* とは各鰭条数が少ないこと、脊椎骨数が通常 39 であるのに対し、本種では通常 42 と多いことで識別できる。*L. sp. 6* も過去の採集例がない。体高が低くナガミミズハゼに似るが、体側中央に不明瞭ではあるが色素胞からなる 1 本の縦線がある。また、腹椎骨数が 14 で、既知種および本研究の未記載種より少ない。*L. sp. 7* はこれまでに記録がない。体高が低くナガミミズハゼに似るが、腹鰭が吸盤状で、胸鰭鰭条数が多く、腹椎骨数は通常 20 である。

本属はこれまで汽水性が強いと考えられていたが、本研究で得られた未記載種のほとんどは海産であり、海産の本属に関する研究の必要性が示唆された。

ソコダラ科は 3 亜科 35 属 300 種以上を含むタラ目最大のグループであり、尾部が細長い、第 2 背鰭と臀鰭が体の後端で連続する、および鰓耙が瘤状などによって特徴づけられる。本科魚類は北極海を除く世界の海洋に広く分布し、大部分の種は水深 100–6500 m の海底直上に生息するが、一部は中深層にも出現する。日本周辺における本科魚類の分類学的研究はおもに 1980 年代以前に行われたが、それ以降は少ない。本研究では 5125 個体の標本と既報論文に基づき日本産ソコダラ科魚類の注釈付きチェックリストを作成し、日本周辺の北西太平洋における本科魚類の動物地理について考察した。

本研究の結果、2 亜科 16 属 79 種のソコダラ科魚類が確認された。属ごとの種数の構成比はトウジン属がもっとも多く (33% ; 26 種)、ホカケダラ属 (23% ; 18 種)、スジダラ属 (10% ; 8 種)、ミサキシソコダラ属 (10% ; 8 種)、ネズミダラ属 (8% ; 6 種) と続き、残りの 12 属ではいずれも 3% 以下であった。また、ホカケダラ属の 2 種とネズミダラ属の 1 種は未記載種と判明したため、分類学的検討を行った。ホカケダラ属の一種 1 は宮城県金華山沖の水深 2607–2609 m から得られ、同所的に生息するヒラガシラダラに酷似するが、横列鱗数と頭部感覚孔の配置によって容易に区別できる。ホカケダラ属の一種 2 は福島県小名浜沖と七島・硫黄島海嶺の水深 2740–2991 m から採集され、ハワイ産の *Coryphaenoides longicirrhus* にもっとも似るが、体側鱗上の棘の形態によって識別可能である。ネズミダラ属の一種は土佐湾の水深 700 m から得られ、ゴテンヒゲと *Nezumia merretti* に類似するが、頭部下面の感覚孔の大きさ、鱗の形態および鰭条数によって明瞭に識別できる。また、日向灘産の 3 個体と沖縄舟状海盆産の 1 個体は、それぞれ日本初記録となる *Coryphaenoides rudis* と *Ventrifossa johnboborum* であることが判明した。

動物地理学的解析では、過去に十分な調査が行われた次の 13 海域について、海域ごとの本科の種の出現を 2 値変換し、単純一致係数と群平均法を用いてクラスター解析を行った：南シナ海北部；東シナ海の 3 地点；南日本の太平洋岸沖の 3 地点；東北太平洋岸沖の 3 地点；オホーツク海；九州–パラオ海嶺；七島・硫黄島海嶺。その結果、日本周辺の北西太平洋の本科魚類相は、南シナ海北部とその他の海域に大きく分かれた。また、残りの 12 地点うち、南日本の太平洋岸沖は東シナ海と、北日本の太平洋岸沖はオホーツク海と類似性が高いことが判明した。また、九州–パラオ海嶺ならびに七島・硫黄島海嶺は、距離的に近い南日本ではなく、むしろ北日本の太平洋側に類似する。これらの結果は、日本周辺における本科魚類の分布について、水深 2000 m 以深の深海底帯、海峡や海嶺などの海底地形、および中深層まで影響がおよぶ黒潮が障壁となっていることを示唆する。

高知県における生薬「蒼朮」^{ソウジュツ}の栽培

理学コース 植物分類・地理学分野

松本匡史

生薬「蒼朮」は、伝統的な漢方薬として健胃消化薬などを主流に処方され、その基原植物は、中国原産の多年生草本であるオケラ属ホソバオケラ *Atractylodes lancea* DC.とシナオケラ *A. chinensis* Koidz.である。「蒼朮」の日本国内での需要は年間約 300 トンであり、その全てを中国から輸入している。海外からの供給に依存することから、安定した供給が継続する保証はなく、栽培過程における農薬の使用など、安全性においても懸念がある。そのため、国内での栽培による安定・安全な供給が望まれている。日本での栽培は、新潟県佐渡島で系統保存された株（以下サドオケラとする）があるが、同じオケラ属植物で国内に自生するオケラ *A. japonica* Koidz.との交配が進み、純系統が減少したともいわれる。そこで、本研究では、サドオケラについて実体を明らかにしたうえで、高知県内での栽培を試みた。

日本・韓国・中国で採集されたオケラ属植物 146 標本を観察し、外部形態 79 形質について比較検討した。その結果、7 つの形質によりオケラと「蒼朮」の基原植物とに明瞭に識別された。「蒼朮」の基原植物にはホソバオケラとシナオケラが含まれるが、外部形態からは両種を区別することはできなかった。サドオケラは、無柄で、葉が茎を抱き、全縁または浅裂する特徴をもつことから、「蒼朮」の基原植物であることが判明した。

実体が明らかになったサドオケラについて、高知県内 2 ヶ所の圃場で生育動態を観察した結果、3 月中～下旬に萌芽し、6 月に魚骨状苞葉が確認でき、8 月に蕾が肥大、9 月下旬～10 月に開花、11 月以降には地上部が枯死する生育周期であった。梅雨の時期に病害虫が出たが、農薬を散布することなく自然に消滅し、生育過程に影響はなかった。植え付けから 2 年後の根茎の増殖率および平均重量を比較すると、30g 区(30-34g)では増殖率が約 5 倍で平均重量が 162.7g/個体、同様に 50g 区(50-54g)では約 2 倍で 116.2g/個体、70g 区(70-74g)では約 2 倍で 113.2g/個体となった。つまり、30g 区の根茎の増殖率および平均重量が最も高い値となった。生薬栽培で根茎肥大に有効な摘蕾・摘花処理をサドオケラで調査したが、それらによる収量の増加に有意な差はなかった。従って、栽培過程において摘蕾・摘花処理を含めなくともよいと考えられる。以上の結果をまとめ、生薬「蒼朮」の基原植物サドオケラについて、高知県での栽培普及に向けた栽培モデルを作成した。

東地中海の高塩水湖(Meedee Lake)から採取された海洋コアの堆積環境の解明

理学コース 地球科学分野 泉谷 直希

【はじめに】

地中海には、5.96～5.33 Ma に起こった Messinian Salinity Crisis (地中海が外海から孤立し、海水が干上がったイベント) 時に堆積した蒸発岩類が海底下に存在している (Krijgsman *et al.*, 1999). 東地中海にはプレートの沈み込み帯が存在し、鮮新世から第四紀の堆積層、Messinian 蒸発岩層が変形を受け、断層や凹地が形成されている (Westbrook and Reston, 2002). その断層に沿って、Messinian 蒸発岩中の塩類が浸み出し、凹地に塩水湖が形成されている。湖内は塩分が通常海水の約 10 倍にあたる >300 ‰, 溶存酸素がまったくない極限環境である。現在、塩水湖は東地中海に 5 つ発見されており、極限微生物学的な研究例が多く、堆積学的研究は少ない。そこで、本研究では新たに発見された塩水湖「Meedee lake」から採取された明色と暗色が繰り返す特徴を持つ海洋コアを用いて、堆積環境を解明することを目的とした。

【試料と手法】

試料は、学術研究船「白鳳丸」KH06-4 次航海において Navigable Sampling System (NSS) を用いて海底を観察しながら、塩水湖の縁でピンポイントサンプリングされたピストンコア (PC5; 34°27.02 N, 22°16.61 E, W.D.: 2920 m, コア長: 290.5 cm) を用いた。岩相は calcareous ooze で、肉眼や X 線 CT 観察からは目立った堆積構造は見られない。東地中海に一般的に見られる sapropel 層は含まれておらず、明色 (grayish white) と暗色 (yellowish orange) の色調変化が、数 cm～数十 cm 間隔で繰り返す特徴を持つ (以下、明色バンド・暗色バンドと呼ぶ)。その境界は、gradual にあるいは sharp に変化し、堆積環境が異なると推定される。コア試料は、半裁後、非破壊物性計測 (X 線 CT スキャン・カラーイメージ・帯磁率・色) 後、連続キューブサンプリングを行った。各キューブから、含水率と sand fraction (>63μm) を求めた。浮遊性有孔虫 2 種を拾い出し、質量分析計 (Finnigan MAT253) を用いて酸素・炭素同位体比測定を行った。底生有孔虫 200 個体を目安に拾い出し、Benthic Foraminifera Number (BFN) /g と貧酸素耐性種と高塩分耐性種の割合を求めた。また、還元環境の指標である pyrite 含有量の相対変化を求めた。

【結果と考察】

年代決定は、浮遊性有孔虫 (*Globorotalia inflata*) を用いた AMS¹⁴C 年代、ナノ化石層序、浮遊性有孔虫 (*Globigerinoides ruber*) の $\delta^{18}\text{O}$ とボストーク氷床コアの酸素同位体比カーブとの対比によっておこなった。本コアの年代は約 5～21 万年を示し、平均堆積速度は約 1.8cm/kyr. と見積もられ、各バンドの平均堆積年代は数千年である。

明色バンドは framboidal pyrite が多産し、特にその下部に濃集していた。また、底生有孔虫群集解析の結果、明色バンドでは相対的に産出個体が少なく多様性が低い、逆に、暗色バンドでは相対的に産出個体が多く多様性に富む傾向が見られた。さらに、明色バンドでは貧酸素耐性種 (*Stainforthia complanata*) や高塩分耐性種 (*Articulina tubulosa*) の産出が多い。TOC・CaCO₃ 含有量は、明色バンドで高く、暗色バンドで低い (高野, 2008, 本学卒論)。コア採取時に NSS によって撮影された塩水湖外の酸素に富む海底は褐色 (暗色) を呈し、酸素のない湖央で採取された表層堆積物の色は grayish white であった。以上のことから、暗色バンドは酸化的環境で、明色バンドは還元的環境で堆積したと考えられる。コア採取地点が塩水湖湖畔であることから、酸化-還元環境の変化の要因は、塩水湖面の上下動が考えられる。

酸素同位体比カーブと色の変化 (L*) の対比から、暗色バンドは氷期に、明色バンドは間氷期にほぼ対応している。このことは、塩水湖面の上下動は、東地中海の氷期-間氷期に伴う深層水循環の変化、特に底層流の強弱によって引き起こされていることを示唆する。また、それ以外の対応しない場合は、本調査海域がプレート境界域に位置していることから、テクトニックな変動にともなう塩水湖面の上下動が引き起こされたのかもしれない。

東南極リュツォ・ホルム湾における完新世の古環境変動

理学コース 地球科学分野 澤田 秀貴

【はじめに】

南極域における古環境学・古海洋学的研究は、地理的・環境的な制約により研究用試料を採取することが非常に困難であることから、他の地域や海域に比べ遅れを取っていた。南極域における完新世の気候変動である Neoglacial や Mid-Holocene Climatic Optimum の規模やタイミングについても共通認識は得られていない。南極周辺における古環境復元データを蓄積すると共に、これらの変動の詳細とそのメカニズムを明らかにすることは、第四紀後期の南極寒冷圏研究の大きな課題である。そこで、本研究では堆積物コアを用いて、これまで詳細な研究例が少ない東南極リュツォ・ホルム湾の完新世における古環境変動を復元する研究を行った。

【試料と分析】

本研究で用いた試料は、第47次日本南極地域観測隊において東南極リュツォ・ホルム湾内の陸棚から採取された3本のグラビティコア（LHB060908-1：スカルプスネス・オーセン湾,水深 50m；LHB060930-1：昭和基地沖,水深 229m；LHB061108-1：オングル海峡,水深 605m）である。これらのコアについて、生物源オパール量（紫外可視分光光度計：UV-Visible Spectro Photometer）、バルク堆積物の粒度分析（レーザー回折式粒度分布測定装置：Master Sizer2000 と篩い分け法）、全有機炭素量(TOC)、全窒素量(TN)、バルク有機炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)（元素分析計オンライン質量分析計：Delta Plus Advantage）、磁化率(MS)（磁化率異方性測定装置：KLY-3S KAPPABRIDGE）の測定を行った。なお、各コアについてはバルク有機炭素の ^{14}C 年代値が得られており、池原ほか(2007)で非破壊測定もなされている。

【結果と考察】

3地点の堆積物の特徴について比較検討を行った。LHB060908-1 における生物源オパール濃度の平均値は 51.3%であり、LHB060930-1 および LHB061108-1 の 13.2%、7.9%に比べ非常に高い値を示した。また、LHB060908-1 の TOC の平均値 (2.2%) も他の地点に比べて有意に高い値を示す。さらに、磁性鉱物量に依存すると考えられる磁化率は、LHB060908-1 ではコア最下部付近の重力流堆積物以外の大部分でほぼ 0 であるのに対し、LHB061108-1 は遥かに高く 1346~14082 の範囲での変動を示した。重力流堆積物を除いた LHB060908-1 と LHB060930-1 の砂礫含有率は、それぞれ 5.2~18.5%および 4.8~44.3%の変動幅を示した。南極大陸沿岸から約 50km 離れた場所に位置する、LHB060930-1 の方が、砂礫含有率の変動幅が大きく、より粗粒な砂礫を多く含む。これらのことから、LHB060930-1 の堆積物は、リュツォ・ホルム湾の南に位置する南極大陸上のしらせ氷河から流入するアイスストリームによって運搬された陸起源砕屑物を多く含み、一方、LHB060908-1 はアイスストリームの流路に位置しないことから、砕屑物が少なく珪藻殻が多くを占めていることが明らかになった。また、これら砂礫粒子の堆積の影響により、LHB060930-1 と LHB061108-1 では、TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ の分析は測定限界以下であったと考えられる。

LHB060908-1 における TOC フラックスとオパールフラックスの層位的関係をみると、中位から上位で両者の変動傾向はよく一致する。しかし、約 50cm より上部では TOC が増加するのに対し、オパールは上位に向けて減少する傾向を示す。また、本コアでは約 50cm より上部において、サイズは小さいが厚い殻を持つ珪藻種である *Chaetoceros* spp.が減少し、サイズの大きい *Porosira glacialis*や *Paralia sulcata*が卓越している(法銭, 2009 卒論)。珪藻は殻と細胞の大きさ、つまり Si:C の比率が種によって異なることが過去に報告されている(例えば, Strathmann 1967; Conley et al., 1989)。よって、約 50cm（現時点の年代モデルでは約 2000 年前）に温暖な環境へ変化したことをきっかけとして主要珪藻種が代わり、Si:C の比率が変化したものと考えられた。

LHB060908-1 の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ の平均値は -20.0‰であった。一般に、南極前線以南の南大洋における懸濁態有機物や表層堆積物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は、中低緯度域に比べて軽い炭素同位体比 (-24~-30‰程度)をとることが知られている(例えば, Rau et al., 1989; Ohkouchi et al., 2000; Lourey et al., 2004)。これに対し、スカルプスネス・オーセン湾の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は明らかに重い値を示した。Gibson et al. (1999) は、東南極プリッツ湾でのセディメントトラップ実験から、アイスアルジー由来の有機物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ が -20‰よりも重い値をとることを示した。したがって、スカルプスネス・オーセン湾の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は主にアイスアルジー由来の有機物の情報を反映している可能性が高いと考えられた。

山陽帯・万成花崗複合岩体の磁鉄鉱系細粒花崗岩相の記載岩石学と岩石化学

理学コース 地球科学分野

徳増由美子

西南日本内帯における白亜紀-古第三紀の花崗岩類は、形成年代と Ishihara(1977)の花崗岩系列に基づき南から領家帯・山陽帯・山陰帯に区分され、山陽帯には白亜紀後期のチタン鉄鉱系花崗岩が分布する。Ishihara et al.(2005)は、万成花崗岩体(岡山市)は山陽帯に産するにもかかわらず、チタン鉄鉱系花崗岩である粗粒相と、これに貫入する磁鉄鉱系花崗岩である細粒相からなる特異な複合岩体であり、細粒相は固結末期のマグマに濃集した H_2O の解離で生じた酸素による酸化環境下で形成されたものであることを明らかにした。本修士論文の目的は、万成花崗岩体、特に細粒相の記載岩石学のおよび岩石化学的特徴に基づき、そのマグマの生成に関与した要因を明らかにするとともに、大規模な爆発的噴火を起こす High Silica Rhyolite(以下、HSR)の成因との関係について論じることにある。

細粒相は miarolitic domain と aplitic domain の二つの異なる組織が共存する two-domain texture(Candela,1995)を示す。miarolitic domain は淡紅色を呈し、miarolitic cavity とそれを充填する石英・アルカリ長石・蛍石などからなる。aplitic domain はより細粒で灰色を呈し、針状の黒雲母を特徴的に含む。また、micropegmatitic 組織、micrographic 組織、あるいは skeletal quartz を含む granophyric 組織が発達する。これらはマグマの過冷却度が著しく高かったことを示唆している。隣接する miarolitic domain は互いに連結して、三次元的に interconnected miarolitic texture とよばれる(Candela,1995)ネットワークを構成している。interconnected miarolitic texture の存在はマグマ中の volatile phase が飽和すると共に、マグマの上昇に伴い気泡の発生と成長があった証拠である。

粗粒相の SiO_2 は 72~74%、Rb/Sr は 1.2~1.6 であるのに対して、細粒相の SiO_2 は 76~78%、Rb/Sr=6~188 であり、分化の著しいマグマが固結したものである。コンドライト規格化 REE パターンは、粗粒相で LREE に富み HREE に乏しく(L/HREE=1.52~2.93)、Eu の負異常が軽微である(Eu/Eu*=0.40~0.50)。一方、細粒相では LREE に乏しく HREE に富み(L/HREE=0.58~0.91)、Eu の負異常が顕著で(Eu/Eu*=0.01~0.20)、いわゆる“カモメ型”パターンを示す。また細粒相には軽微ながら lanthanide tetrad effect (例えば, Irber1999)が認められ($\text{TE}_{1,3} \approx 1.1$)、Y/Ho と Zr/Hf は non-CHARAC and RADIUS Controlled (CHARAC) behavior(Bau, 1996)を示す。lanthanide tetrad effect、Eu の負異常、Y/Ho と Zr/Hf の non-CHARAC behavior などは、分化が進み流体相に富む花崗岩に特徴的である。これは REE が F、B、Li などの揮発成分と錯体を形成するなど、流体-鉱物間ではメルト-鉱物間とは異なる微量元素の分配メカニズムが働くためであると考えられている(Irber,1999)。これは細粒相の miarolitic cavity に産する蛍石の CL スペクトル解析の結果、Eu²⁺をはじめ Sm・Dy・Tm などの REE が検出されたことと矛盾しない。

従来、HSR は花崗岩マグマから分化した aplite 質マグマが地表に噴出したものと考えられてきた。しかし、HSR と aplite には①HSR が“カモメ型”REE パターンを示すのに対して、aplite は MREE に乏しく HREE と LREE に富む”U 字型”を示す、②HSR は aplite に比べて Sr に乏しく Y に富む、などの地球化学的な相違点が認められ、最近その成因が再検討されている(Glazner et al.,2008)。万成花崗岩体細粒相の REE パターン、および Y/Sr は HSR のそれらに類似することから、HSR マグマは花崗岩マグマから分化し流体相に富み、気泡の生成に伴う重力的不安定によってマグマ溜りの壁面に沿って上昇し、その上部に濃集したものと考えられる。

四国沖表層堆積物における堆積速度と有機物運搬過程に関する研究

理学コース 地球科学分野 豊村克則

【はじめに】

^{14}C 年代測定法は, Libby (1955)により確立された年代測定法である. 数百年から数万年前までの海底堆積物の年代決定には, 堆積物に含まれる浮遊性有孔虫の殻を用いた ^{14}C 年代法を採用するのが一般的である. しかし, 研究対象海域によっては ^{14}C 年代測定に必要となる浮遊性有孔虫の試料量(>6mg)が得られない場合がある. このような場合, 測定対象は堆積物中のバルク有機物になるが, 海や陸起源の有機物は当時の ^{14}C 濃度に対応した年代を示すものだけでなく, 海底のより古い地層や河川からの浸食にともなう陸上地層由来や大気由来の風成塵などにより, 年代の‘古い’有機物がもたらされる. このことから, 一般に浮遊性有孔虫を用いた ^{14}C 年代よりも数百年から数千年古い年代を示すことが多い. 本研究では, 仁淀川河口域から遠洋域(四国海盆側)にかけて採取された表層堆積物を試料として, 1)堆積物の浮遊性有孔虫殻とバルク有機物それぞれの ^{14}C 年代を用いて堆積年代と堆積速度の比較, 2)有機炭素の安定・放射性同位体比のデータをもとに, これらをダブルトレーサーとし, 有機物の起源と運搬過程について考察することを目的とした.

【手法】

本研究で使用した試料は, 学術研究船「淡青丸」による KT-07-19 次航海, KT-09-17 次航海と海洋調査研修船「望星丸」による BO-09-01 次航海において, マルチプルコアラーと小型表層不擾乱採泥器(アシュラ)を用いて採取された試料である. 試料を篩(開口径 63 μm)で洗浄し乾燥させ, 実体顕微鏡下で残渣試料から浮遊性有孔虫をピッキングする. 本研究で主に用いた浮遊性有孔虫は比較的大型で殻の厚い *Pulleniatina obliquiloculata* である. ピッキングした試料を真空下で H_3PO_4 (100%)と反応させ CO_2 に変えた. バルク有機物は 1.2N の塩酸で炭酸塩を除去した後, 封管燃焼法(850°C, 2h)を用いて CO_2 に変えた. これらの CO_2 を精製し, 鉄粉を触媒とした水素還元法を用いてグラファイトを作成し, 加速器質量分析計で $\Delta^{14}\text{C}$ を測定した. 同時に分取しておいた CO_2 を用いて安定同位体質量分析計を用いて $\delta^{13}\text{C}$ も測定した.

【結果・考察】

浮遊性有孔虫を用いた ^{14}C 年代において見積もられた堆積速度は, 上部斜面海盆では 7.7cm/kyr, 下部斜面では 9.1cm/kyr であった. 下部斜面海盆において同層準でそれぞれ測定された浮遊性有孔虫とバルク有機物の ^{14}C 年代は 2 層準ともバルク有機物年代が古く, とともに年代差は 870 年である. これは $\delta^{13}\text{C}$ 値も考慮すると, 陸起源の古い有機物が混入していた結果と考えられる. バルク有機物炭素含有量(100mg 中)は, 陸から距離がもっとも遠い四国海盆では 0.3~0.6 mg とほぼ一定であるのに対し, 下部斜面海盆では 0.5~3.3 mg と大きく変動していた. このことは, 両地点で堆積速度が 2 倍異なることを考慮すると, 下部斜面海盆ではバルク有機物炭素の埋積量が 2~10 倍程度多いことになる. バルク有機物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\Delta^{14}\text{C}$ データからは, 陸から距離が離れるほど古い陸起源有機物の寄与が少なくなる傾向にあると考えられる.

Ontong Java 海台 および Ceara Rise における *Streptochilus* 属の特異的な産出と分類学的意義

理学コース 地球科学分野

治良 真

Biserial planktic foraminifera とは、二列状 (biserial) 配置の殻を持つ浮遊性有孔虫 (planktic foraminifera) である。このグループの有孔虫は、白亜紀中期頃から現生まで産出する。しかし、そのサイズの小ささ ($<125\ \mu\text{m}$) や、散発的な産出傾向から、特に新生代に産出する *Streptochilus* 属の研究例は少ない。

西赤道太平洋 Ontong Java 海台より採取されたコア KH90-3-2PC (670cm, ~33 万年), および西赤道大西洋 Ceara Rise より採取されたコア ODP leg154 hole 928A (150m, ~610 万年)において、この biserial planktic foraminifera と思われる有孔虫が産出していることが確認されている (国澤,平成 8 年度修士論文, Yasuda, 1997)。そこで、それぞれの有孔虫を記載し産出傾向を調べることで、また、それらが属していると考えられる *Streptochilus* 属の生活形態を推測することを目的とした研究を行った。

2 本のコアに産出する有孔虫種の同定および記載のため、実体顕微鏡、走査型電子顕微鏡を用いて有孔虫化石の形態観察を行った。そして、上記研究の有孔虫群集試料中の biserial な有孔虫の個体数を再カウントし、Accumulation Rate(個体/cm²/kyr)を求めた。また、生活形態の推測のため、殻の酸素同位体比を発表までに測定予定である。

その結果、いずれのコアにおいても、産出する biserial な有孔虫は、biserial planktic foraminifera の *Streptochilus* 属の特徴である、lip に縁取られた口や、tooth plate を持っていた。さらに、表面にしわがあるものと、しわがないものの大きく 2 つの種類が産出し、それぞれを *Streptochilus globigerus*, *Streptochilus globulosus* と同定した。

Ontong Java 海台の第四紀層準において *S. globigerus* が産出することは、これまで始新世から鮮新世までと考えられていた生息期間 (Resig, 1989 など) を延長し、現生個体 (Darling et al., 2009 など) までの間の一部を埋めると考えられる。

Streptochilus spp.の産出傾向は、Ontong Java 海台の過去 33 万年間では 134ka において、Ceara Rise の過去 610 万年間では 4Ma において著しく突出した産出を示す。この傾向は他の浮遊性有孔虫、底生有孔虫のそれと大きく異なっている。それに加え、全底生有孔虫のものに匹敵するほどの産出量は浮遊性有孔虫であることを示唆している。

S. globigerus を主として現生個体がプランクトンネットで採集されたこと (Darling et al., 2009 など)、殻の酸素同位体比が浮遊性有孔虫と同程度に軽いこと (Smart and Thomas, 2006 など)、さらに現生個体が沿岸性の底生有孔虫と遺伝的に同一種であること (Darling et al., 2009)、から *Streptochilus* 属の生活形態は基本的には浮遊性だが、底生生活もすることができるのではないかと考えられる。

徳島県上勝町の下部白亜系汽水生貝類群集と
Tetoria sanchuensis の古生態

理学コース 地球科学分野

箭野 敬典

アサリやオキシジミなど、長い水管をもち堆積物中に深く潜る異歯類は現在の汽水域や海域において一般的である。白亜紀初期の汽水生異歯類で、套線が深く湾入し、長い水管を持っていたと推定される *Tetoria* はその初期のグループと考えられ、その進化古生態が注目される。本研究では *Tetoria* の中でも比較的初期(Barremian)に産する *Tetoria sanchuensis* の自生産状に注目し、その生息場所や分布を明らかにし、長い水管の役割についても考察する。

調査地の徳島県上勝町柳谷・辰ヶ谷林道の下部白亜系は物部川層群下部羽ノ浦層に相当するが、汽水成堆積物から構成されるため日浦相として区分されている(石田ほか, 1992)。辰ヶ谷林道沿いには、礫岩、砂岩、泥岩が層厚約 100 m にわたって露出している。*T. sanchuensis* の自生産状が多く見つかる露頭は層厚約 7 m あり、おおよそ下位から順に河川・氾濫原・湿地・砂質干潟・泥質干潟堆積物からなり、エスチュアリの堆積物が主体をなす。露頭上部においては湿地堆積物から砂質干潟・泥質干潟堆積物を経て再び湿地堆積物へと変化する海進海退サイクルが確認できる。

調査露頭は、下位の *Costocyrena radiatostriata*, *Isodomella* sp., *Pharella* sp. の自生産状を含む *C. radiatostriata* (合弁) 群集の見られる砂質干潟堆積物から、上位に向かい泥質干潟堆積物へと変化する。泥質干潟堆積物中においては、下位から順に *C. radiatostriata* (離弁)・カキ群集、*T. sanchuensis* 群集、カキ・腹足類群集へ、貝化石群の組成が変化する。*T. sanchuensis* の自生産状はエスチュアリ堆積物の上部にあり、湿地堆積物やレンズ状層理の発達した泥質干潟堆積物に整合的に覆われる泥質干潟堆積物(黒色泥岩)中に見つかる。また、本露頭以外の砂質干潟堆積物からも *T. sanchuensis* の自生産状を、*C. radiatostriata* の自生産状などと共に確認できる。以上のことから *T. sanchuensis* の生息環境はエスチュアリの中でも、より湾奥部または陸域に近い環境である泥質干潟から、その周辺の砂質干潟であり、広範囲の底質に分布することが明らかとなった。

長い水管を進化させた初期の異歯類である *T. sanchuensis* にとって、長い水管はどのように機能していたのだろうか。現在、長い水管を持つ多くの異歯類は、その長い水管を伸ばして堆積物中に深く埋没して生活する深埋没者が多い。これらは、エスチュアリ奥部や陸域付近では塩分・水温の激変や、干上がった場合の乾燥に対して、深く潜ることによって緩和できる。一方、長い水管を持ちながら海底よりも高く、煙突のように水管を伸ばして生活する二枚貝も知られている。これらは、流速の大きな場所での摂餌の効率化や急速埋没からの回避などに有効と考えられる。

本研究の結果、*T. sanchuensis* が幅広い底質に分布することが明らかとなったが、砂質底では他の多くの二枚貝と共存するのに対して、エスチュアリ奥部もしくは陸域付近の泥底では、本種が単独で生息することが分かった。エスチュアリ奥部は浮遊泥の堆積が頻繁に起こると推定される場所であり、環境変化の緩和効果よりも、埋没からの脱出や浮遊泥による鰓詰まりの回避が必要と考えられる。したがって、ここに *T. sanchuensis* だけが生息できたことは、新たに獲得した長い水管が埋没からの脱出や浮遊泥による鰓詰まりの回避に役立ったと推定することができる。

砂質干潟堆積物中に直立する *T. sanchuensis* は水管が出る殻後縁部を上に向けており、通常の生息姿勢と同じである。一方、泥質干潟堆積物中に見られる直立した姿勢の *T. sanchuensis* を観察してみると、殻頂を下に向けた個体が多く見つかる。これは、泥質干潟堆積物中に生息していた *T. sanchuensis* が逃避姿勢の状態で死亡したことを表している可能性があり、泥による埋没が起こっていたと考えられる。なお、逃避姿勢で死亡した原因については、泥による堆積が水管をのばせる限界以上に達したことや、急速な泥の堆積が起きたことなどが考えられる。

和歌山県南西部に分布する中部中新統田辺層群白浜累層の堆積環境と底生動物群集

自然環境科学専攻 地球史環境科学講座 下郡裕之

田辺層群は紀伊半島南西部に分布する浅海性の下部～中部中新統である。本層群は中部中新統の分布が少なく堆積学的背景や古生態について不明な点が多い西南日本外帯に分布し、マングローブ沼およびその周辺環境に代表される内帯の内海性の環境とは堆積学的背景も大きく異なる。したがって本層群の堆積学的背景や底生動物群集を解明することは、我が国の中期中新世における古生態を復元する上で欠かせない。しかしながら、これまで田辺層群に関して行われてきた研究は地質構造や岩相変化の解明を目的とする研究が多く、堆積環境や化石底生動物群集を扱ったものは少ない。そこで本研究では和歌山県田辺市文里港～同県西牟婁郡白浜町瀬戸湾に分布する田辺層群白浜累層 S1～S4 部層について層序学的検討ならびに堆積相解析を行い、堆積環境の変化を明らかにした。それと共に、本調査地域から産出する貝類化石の組成から底生動物群集を認定し、堆積環境の変化とともにそれらの産出がどのように変化するのか明らかとすることを試みた。

調査地域の白浜累層（層厚約 650 m）は、下半部ではストーム堆積物、上半部では潮汐堆積物および河川成堆積物が発達することが特徴である。これらは全体として上方粗粒化を示し、下位から（開放的な内側陸棚～下部外浜：ユニット 1）→（潮汐卓越型の潮下帯～潮間帯：ユニット 2）→（大規模な干潟：ユニット 3）→（河川堆積物：ユニット 4）という一連の浅海化が認められる。

調査地域の白浜累層には上方粗粒化に加え、上方厚層化のシーケンスも頻繁に認められ、最上部に河川堆積物が累重するなど、デルタの特徴も認められる。以上の堆積サクセッションは、陸棚から干潟にかけての堆積システムが小規模な前進・後退（海退・海進）を繰り返しながら大局的にみて前進していく過程が保存されていると考えられる。

調査層準から産出する貝類化石は種構成から、6 つの群集（*Vasticardium* - *Paphia* 群集、*Turritella* - *Ostrea* 群集、*Crassostrea* 群集、*Paphia* - *Turritella* - *Siratoria* 群集、*Clementia* - *tellinid* 群集、*Turritella* - *Anadara* 群集）に区分される。個々の底生動物群集は特定の堆積環境から産出する傾向がある。つまり調査地域の白浜累層には、堆積環境の変化に応じて群集が変化していく様子が明瞭に保存されている。

堆積環境と底生動物群集の遷移についてまとめると、ユニット 1 堆積時において、ストーム堆積物が発達する波浪卓越型の開放的な内側陸棚～下部外浜に小型二枚貝を中心とする *Vasticardium* - *Paphia* 群集が存在していた。やがて浅海化に伴い、環境は潮汐卓越型の潮下帯～潮間帯（ユニット 2）に変化する。そこでは水流のエネルギーレベルの高い環境だけでなく、近傍には比較的静穏な環境も形成され、そこにはイワガキに似た絶滅種のカキからなる *Crassostrea* 群集が存在していた。その後、潮間帯の環境は内湾的要素をもった大規模な干潟へ変化し（ユニット 3）、干潟前面の下部外浜～潮下帯には *Paphia* - *Turritella* - *Siratoria* 群集、海水域の干潟には *Clementia* - *tellinid* 群集が存在していた。その近傍には小規模な汽水性の環境も存在し、そこには *Turritella* - *Anadara* 群集が存在していた。

LSI とパッケージのための 45 度多層配線法の研究

応用理学コース

情報科学分野

來栖 正博

情報化社会を支える、電子機器の部品である LSI の高性能化、小型化、低価格化やパッケージの高性能化が望まれている。LSI とは、多数のスイッチを集積した半導体集積回路のことであり、パッケージとは、幾つかの LSI チップを集積した実装回路のことである。

LSI の高性能化・低コスト化は、製造微細化によって進められてきた。半導体製造微細化により、素子が相互に近接するため信号遅延が短く、また 1 チップに搭載できる素子数を増やすことができ素子あたりのコストが減少するためである。

一方、微細化により配線遅延が遅れるなどタイミングエラーが多発し、未配線が生じるため修正のための設計やり直しが不可欠となる。これらは DSM (DeepSubMicron) 問題と呼ばれる。

また、パッケージの高性能化・低コスト化は、搭載する素子種類の増加と結線の 3D 化により進められてきた。3D 化された配線構造は人手で設計され、高機能な LSI やアナログ素子を同時に多数集積することで 1 チップ LSI より低コストな部品を提供してきた。

近年 SiP (System-in-Package) の部品種類が急増し、その配線自動化が求められるが、配線制約やデザインルールが複雑なため LSI 配線のような自動化が困難である。

本論文は、これら DSM 問題解決や SiP 自動配線にむけた 45 度多層配線手法の有効性について研究を行ったもので、VLSI クロック回路設計法と ECO 配線法および SiP 自動配線法の 3 点についてについて述べる。なお ECO とは、一部の回路のみで修正を完了させる設計技術を指す。

本論文で提案する ECO 配線手法は、従来配線後に Ripup-reroute で 45 度多層配線法により配線特性を改善するものである。ランダムに配した 2 端子ネット (50,100,150 組) について、従来の縦横配線手法と提案手法を、配線率、ビア数、配線長で比較したところ、100 組では配線率は 100%、ビア数は 17.6%、配線長は 7.8% で改善されることがわかった。

本論文で提案するクロック配線法は、本研究室の提案する 3 分木クロック回路に適用することを前提とした 45 度多層配線と端子順序について提案する。2 分木構造、3 分木構造のクロック回路で、従来の縦横配線手法と提案手法を、クロックからの距離バラツキ、平均配線長の比較を行ったところ、2 分木クロック回路では、バラツキは 14.89、平均配線長は 112.82 となり、3 分木クロック回路では、バラツキは 14.81、平均配線長は 81.14 であった。

本論文で提案する SiP 自動配線法は、SiP の 1 つである CSP (Chip-scale-Package) を対象とした自動配線で、特別な端子構造と配線順序について新たな提案する。同配線法を 253 端子をもつ CSP で評価したところ、配線順序を考慮しない場合では、配線率 45.45%、配線順序を考慮した場合では、100% の配線ができることが確認された。

以上の研究により、提案する 45 度多層配線を用いることで、DSM (DeepSubMicron) 問題における遅延時間改善と、ECO による配線率の向上ができる。また、今回のパッケージ自動配線でさらに複雑な設計ルールの反映させることで、SiP 配線の自動化への展開が期待される。

クロストークによる遅延変動を考慮した動的解析手法

応用理学コース 情報科学分野 小林 政幸

近年、半導体の微細化技術の進歩に伴う集積回路の増大と微細化により、高集積化や高性能化が進みつつある。しかし、微細化の進展によりクロストークと呼ばれる現象が問題になっている。クロストークとは、ある配線の信号変化が配線間容量を介して隣接する配線の信号にノイズが現れる現象のことであり、信号遅延を増減させ、最悪の場合回路の誤動作を招く。

従来のクロストーク検出方法としては、信号の経路遅延を網羅的に洗い出してタイミング解析を行う静的タイミング解析（STA：Static Timing Analysis）と回路シミュレータを組み合わせで行われていた。しかし、静的な解析手法では論理動作を考慮した経路が反映されないため擬似エラーが検出されてしまい、クロストーク箇所が過剰に検出されてしまうという問題があった。

この問題を解決するために、テストパターンを用いた動的クロストーク解析手法およびそれに起因するタイミングエラー検出手法を提案する。

動的クロストーク解析手法は、レイアウト後の隣接配線箇所を抽出し、それらについてテストパターン入力に対応した論理シミュレーションを行う。次に、隣接配線箇所の動作タイミングを解析することにより、擬似エラーを発生させることなく動的なクロストークの検出を可能とする。

また、クロストークにより生じるタイミングエラー検出手法は、クロストークによる影響で増加する遅延時間を提案する方法で算出し、論理シミュレーションにバックアノテーションすることにより、回路のタイミングエラーを検出する。

本手法を乗算器 5 種と 8 ビット CPU の 6 つの回路を対象として適用、評価を行った。乗算器では回路規模に関わらず、隣接配線箇所のうち動的なクロストークが生じるのは 4 割程度であり、その動的なクロストークがタイミングエラーを生じさせる箇所は 1 割程度以下（隣接配線箇所の約 4% 以下）であることが判明した。8 ビット CPU では隣接配線箇所のうち動的なクロストークが生じるのは 1% 程度であり、その動的なクロストークがタイミングエラーを生じさせる箇所はなかった。本手法を用いるとクロストークによりタイミングエラーを生じさせる箇所を擬似エラーなしで特定できるため、従来の方法に比較すると配線修正箇所がきわめて少なくなり、動作周波数の高い回路の性能を最大限に引き出すことが可能と考えられる。

時系列気象画像からの時空間相関性発見支援システムの構築

応用理学コース 情報科学分野 坂口 祥太

近年様々な分野でデータマイニングの手法に基づいた大量の時空間データからの知識発見が検討されている（生駒ら，2004 など）。本研究では気象観測衛星ひまわり 6 号（MTSAT-1R）の時系列気象画像を用いて，データマイニングの観点から時空間変動の相関性や特徴的パターンの発見を支援するシステムを構築した。構築にあたっては、(1)分析的手法に加えて試行錯誤や可視化による発見を重視し，GUIを備えた対話的システムとして構築すること，(2)DBMSとシームレスに接続して背後の大量データをユーザーが意識することなく利用できること，(3)拡張性を考慮してこれらのシステムをオブジェクト指向のモデルで構成すること，の3点に留意した。

本論文の前半では，可視化による時空間変動パターンの視覚的発見を目的とした検討を行った。画像のブロックのテクスチャに自己組織化マップによるクラスタリングをおこない，その結果を用いて画像に色付けし，動画化をおこなった。1ヶ月の気象画像を用いた実験から、時空間変動の視覚的発見支援に対する本手法の有用性を確認することができた。

後半では，各地点のブロックの雲量を反映する平均輝度の時系列データを抽出し，遅延を考慮に入れながら基準地点に対する各地点の時系列変化の相関係数を求め，この結果を空間と時間的遅延を3軸とする3次元空間内の等値面やある時間断面のカラーマップとして可視化することによってユーザーによる視覚的な発見を支援するシステムを検討した。このシステムに含まれるデータ処理過程では時空間のキューブ状データから時間断面や特定地点のコラム（時系列）を抜き出す作業が多数回必要である。この過程を効率化して対話性を実現するために，DBMS（PostgreSQL）のラージオブジェクト機能を利用した。時系列画像は一旦ラージオブジェクトに変換され，時間断面やコラムはラージオブジェクトから直接抽出できるように設計した。640×640pixel, 8 階調の原画像から作成した 40×40 block, サンプリング間隔 2 時間のデータで実装を行い，ユーザーが指定する 1 ヶ月程度の参照期間に対してその場でラージオブジェクトを生成して可視化することによって，対話性を損なわずに結果の表示や試行錯誤が可能なシステムを構築することができた。

今後はこのシステムを核にして、さらに機能を拡張することで、高次の知識発見に対応したシステムを実現することができるものと考えられる。

近年では聴覚障害者とのコミュニケーションを円滑にするために、手の動きを読み取り言語に変換するための手話変換システムの研究が進められている。手話変換システムに利用される手の動作を読み取る装置は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関節部分などに直接取り付けられた曲げ抵抗から情報を取得し手の状態を読み取る手法に大きく分類され、これらを総称してデータグローブと呼ぶ。現在、データグローブは3次元空間上での手の動きを捕らえ、それを手話の入力やロボットの遠隔操作などに利用する研究が進められている。

本研究室では「手話入力装置の開発」と題して、平成20年度の修士論文として牛田吉章によってまとめられた。その研究では手話認識の第一段階として加速度センサを使用した手話認識装置を製作し、静止時の指文字を対象に研究を行った。その結果、静止時の指文字41文字のうち32文字を認識できた。しかし加速度センサのみでは表裏の判定ができない、手の形状が同様のものを判別できないなどの問題点が挙げられた。そこで先行研究の問題点である表裏の判別するために、カメラからの視覚情報を用いて改善を試みた。複数のカメラによる認識は持ち運びに適さないが、近年では多くのノートパソコンにカメラが内蔵されている。表裏の判別は複眼ではなく単眼で十分である。そのため本研究では、加速度センサに加えカメラで画像を取得することで、手袋の裏と表に異なった色を付けた画像からの判別を行い、認識率の向上を試みた。その結果、本研究により先行研究ではできなかった表裏の認識が可能となった。しかし加速度センサにかかる重力加速度がほぼ同じ方向を示しているものは認識ができなかった。

また本研究では静止時のみでなく動きを伴う指文字の認識も試みた。形状を判別するとともに、加速度センサのからの動きをもとにどの方向に動いたかを判別し、動きを伴う指文字の認識を試みた。

結果として単純な手の振りかたの特徴を見出すことができ、この特徴を用いて動きを認識できるようになった。本研究により新たに静止時の指文字4文字、動きを伴う指文字5文字が認識可能となり、46文字の指文字のうち42文字が認識可能となり、認識率が約91%に向上した。しかし先述のように、加速度センサにかかる重力加速度がほぼ同じ方向を示していて認識できていない指文字が4文字残っている。

また本論文では単純な動きの認識まで可能になった事を踏まえて、今後の課題として挙げられる単語レベル、会話レベルの手話の認識や、それに必要となる単語と単語の間の動きをどのように捕らえるか、教師データとの比較の仕方などについても言及した。

VLSI 設計におけるレイアウト高速配置法の研究

応用理学コース 情報科学分野

竹内 豪

近年の高度情報化社会では、高性能でより小型な電子機器が求められている。電子機器の高性能、小型化は、その重要部品である半導体チップの微細化で支えられている。これは半導体回路が微細化で素子間が近づき信号伝達が速くでき素子の高集積化が可能で高機能化が計れるためである。

しかし、微細化により設計が困難になる DSM (Deep Sub-Micron) 問題が深刻になってきている。DSM 問題とは、配線間隔の近接で電荷容量の増加し、細線化で配線抵抗が増加して信号遅延が増大し、配線や素子の製造ばらつきが増えて製造歩留まりが下がる問題を指す。DSM 問題は、信号経路の距離や、配線経路や配線間の間隔を決める VLSI 設計工程のレイアウト設計段階で決まり、その概要は、素子位置を決める配置設計が支配している。しかし近年の配置設計は、半導体回路の増大に比例して長時間を要するため、これら DSM 問題解決には高速な配置解が得られる配置手法が望まれる。

本論文で著者は、大規模回路において高速、高品質な配置解を得る新たな配置手法を提案する。まず著者は、素子と素子間の接続情報（ネットリスト）から接続関係のみを用いた配置法(Seed 法)に着目する。具体的には、ある素子を種（シード）として、それに接続する素子群をその周りに配置することを繰り返して配置近似解を得る方法である。Seed 法では、素子 1 つにつきたかだか 1 回程度の処理で完了するため、全素子数 N に対して処理時間は $O(N)$ となり高速である。

しかし、シードとなる素子に接続する素子数や素子形状が様々で、周囲に最適場所に置けないときには隙間や素子の重複などが発生してしまい、高品質な配置解が得られない問題がある。そこで本研究では Seed 法から常に正規解を得るため、グリッド（格子）を設けて、グリッド上に 1 素子を置き、それら素子間の配置交換を通じて近似解を求める新手法（Peeler 配置手法）を検討する。また、同手法をグリッドの変わりにソート処理を用いてグリッドレスな環境に拡張した AKEBONO 配置手法を提案する。

提案する 2 つの配置法についてそれぞれ実験をおこなった。Peeler 配置手法を簡単な配置問題に適用し、従来手法（Pair-wise 法）と厳密解と比較したところ、総配線長が Pair-wise 法より 21%改善され、より優れた配置解を得た。なお処理時間は Pair-wise 法の約 7225 倍短くできることがわかった。また、一般のベンチマーク回路で AKEBONO 配置手法を 4 つの最新の配置手法（Capo 8.7, Dragon 3.01, FastPlace 3.0, mPL6）と比較したところ、総配線長は他の配置手法に比べて平均 54%程度長くなっているが、処理時間は平均 18.7 倍高速になることがわかった。

これら提案する新配置手法を用いることで、レイアウト設計より上位の設計（論理設計など）へ DSM 問題解決のための高速な配置解を提供することができ、将来の高集積化された VLSI 設計工程の改善が期待できる。

RESEARCH ON SPECIAL ROUTERS IN CROSSTALK-AVOIDANCE OF VLSI PHYSICAL DESIGN AND SYSTEM-IN-PACKAGE (SIP)

応用理学コース 情報科学分野 HERATH UPUL PRIYADARSHANA

High-performing and cost-effective electronics have a rising demand in today's information society. Very Large Scale Integration (VLSI) and system integration technologies such as System-in-Package (SIP) have emerged as technological breakthroughs in electronic design. However, as the technology keeps on advancing, several issues have surfaced that need designer's special attention.

Crosstalk is a major issue in Deep Submicron (DSM) LSI. Maze router-based rectilinear crosstalk-avoidance routers can only route in the four rectilinear directions. So that they may fail to find alternate paths that avoid parallel runs of aggressor and victim, eliminate acute congestion and shorten wirelength. In order to redress this issue, an Octilinear Re-router for Crosstalk Avoidance (ORCA) is proposed as an augmentation to rectilinear routers. It has the flexibility to route in all eight directions. Use of a label map and multiple candidate point lists are central to the new algorithm. Experiments are conducted using several benchmark circuits, and the efficacy of the octilinear approach over rectilinear method is proven by showing: avoidance of parallel runs, keeping crosstalk-avoidance distance as much as possible, wirelength reduction, handling areas with acute congestion and ensuring routability. Results show that ORCA reduces wire length up to 21.6% in comparison with rectilinear routing.

System-in-Package (SIP) technology has an increasing presence in many applications. It is quite clear from Rent's rule that the number signal and control I/Os of a chip increases with the integration level. In addition, wires in packages require special design techniques. In this context, current 3D SIP architecture puts forward few challenges to routing: growing number of interconnects, space constraints, complexity with multiple chips and interconnect coupling. To address some of these issues, an escape routing design strategy is proposed. It aims to minimize the number of layers and ensure no unconnected pins are left. Routing strategy employs a central triangular pattern. It is demonstrated that the strategy guarantees routing, minimizes the number of layers and can handle interconnect coupling issues. In experiments, a Chip Scale Package (CSP) with 1940 nets could be routed successfully in four-layers using the above routing strategy.

This whole research is about two critical issues that have a growing influence on modern Electronic Design Automation (EDA). The author earnestly believes that the research findings would in someway contribute to the improvement of present design approaches in mitigating crosstalk and addressing SIP routing issues.

ソフトウェアの実行時間を考慮したハードウェア/ソフトウェア分割手法

応用理学コース 情報科学分野 松 永 惇 弥

近年、携帯機器、情報機器、家電機器、車載機器などのさまざまな機器製品にシステム LSI が用いられており、その集積率の向上に伴い、ハードウェアの大規模化・複雑化が進み、設計工数・設計期間の長期化が課題となっている。このような課題に対応するために SystemC や SpecC などのシステム記述言語を用いたシステムレベル設計技術(ESL)の自動化の進展が要望されている。

一方、システムレベル設計においては、アーキテクチャレベルにおいてはハードウェア/ソフトウェアの分割において最適な分割が大きな課題である。従来のハードウェア/ソフトウェアの分割は、ソフトウェアの実行ライン数、呼び出し回数、データ転送量などの分析を行うプロファイリングを行うことにより、対象システムの実行時間におけるボトルネック部分を洗い出し、ハードウェア/ソフトウェア分割を行っていた。しかしながら、対象システムのソフトウェア実行時間を精度よく見積もれず、ボトルネック部分を洗い出すことが困難であった。

本研究では、実行時間を考慮したプロファイリングを行い、ソフトウェア上のボトルネック部分を洗い出し、そのボトルネック部分にたいしてマルチコアを前提としたアーキテクチャの試行を可能とするハードウェア/ソフトウェア分割およびソフトウェア並列化手法を提案する。

本手法では、ソフトウェアの実行時間を求める方法として、時間精度付きモデルを用いた。本方法は、C 言語で記述されたアルゴリズムをいくつかの Basic Block と呼ばれる基本ブロックに分解し、ターゲットプロセッサの実行サイクル数を各 Basic Block に付与することにより、ソフトウェア上の実行時間を得ることができる。このモデルを用いることにより、対象アルゴリズムのボトルネック部分の実行時間を精度よく見積もることを可能とした。

提案する手法を、暗号化アルゴリズム AES に適用した結果、対象アルゴリズムのボトルネック部分を洗い出し、マルチコアを前提としたソフトウェアの並列化を行うことによりボトルネック部分の実行サイクル数を約 3 割削減する見通しを得た。また、この手法を用いることにより、さまざまなアーキテクチャの試行とハードウェア/ソフトウェア分割を容易かつ短時間で行えることを示すことができた。

プレゼンテーション構造を利用した指摘のグループ化による リハーサルレビュー支援方法の提案

応用理学コース

情報科学分野

宮脇 剛志

1. はじめに

プレゼンテーション・リハーサルは、同僚や仲間内による批評をもとにプレゼンタ自身への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、プレゼンタの知識洗練を行う機会である^[1]。しかし、改善作業を行う際、プレゼンタがリハーサルにおける改善点を特定する議論の内容を完全に想起することは困難である。この問題を解決するためには、議論内容を記録してプレゼンタによる改善作業中に提示することで議論内容の想起を支援する必要がある。

そこで、本研究ではプレゼンテーションの持つ構造を視覚化し、同様の議論で出された指摘のグループと議論中に作成したメモを対象となる箇所に対して一元的に関連づけることで、議論の情報を整理する手法を提案する。

2. プレゼンテーションの改善支援手法

本研究では、リハーサル終了後の改善作業において、プレゼンタが効率的にプレゼンテーションの改善作業を可能とすることが目的である。そのためには、以下に挙げる2点の支援が必要である。

(1)発表における改善箇所の明示

(2)議論中に考察した改善方法の提示

これらの支援を行うためには、プレゼンテーションリハーサルにおける議論(以下、リハーサルディスカッション)を通じてこれらの情報を整理し、改善作業においてプレゼンタに提供する必要がある。

3. プレゼンテーション構造を利用した リハーサルにおける指摘の整理

本研究では、発表のシナリオを階層的に表現したプレゼンテーションの構造を利用して、一元的な問題を持つ指摘を整理することで改善箇所の特定を支援する手法を検討した。また、プレゼンタ自身が行う議論メモの作成過程をレビューに見せることでプレゼンタの議論に対する理解を促進できると考えた。これらの情報を議論中に生成し、改善作業中に提示することで、プレゼンタは効率的に知識の洗練化を図ることができる。

4. リハーサルディスカッション支援ツール

本研究では、リハーサルディスカッション中において前章で考察した情報の整理を可能とする議論支援用のツールを開発した。本ツールは、プレゼンテーション・リハーサル支援システム^[2]で獲得したスライドの画像、発表様子のムービー、スライド切り替えのタイミングなどの発表に関する情報とレビューが発表中に行ったレビューで構成されるプレゼンテーションデータを議論開始時に読み込んで利用する。

議論中、プレゼンタは自身のパソコン上で本ツールを起動し、図に示すインターフェースをスライドの代わりとしてスクリーンに投影することで利用する。以下、本ツールの機能について述べる。

4.1 レビュー結果の整理

本ツールでは、議論中の話題を記録するメモを作成可能とした。プレゼンタは作成したメモに対してレビューを関連づけることで関連する指摘を一元的に管理できる。また、議論されたスライドを構造表示フィールドに作成したシナリオの段落ノードに関連づけることでプレゼンテーション構造を表現することができ、それに対してメモの情報を関連づけることでプレゼンタが指摘を受けた箇所を参照できる。

4.2 プレゼンテーションデータの表示

本ツールは、議論中スクリーンに投影して利用するため、プレゼンテーションの情報を必要な際に確認できる機能が必要である。そのため、プレゼンタによる簡易な操作でスライドの画像や発表ムービーを即座に表示できる機能を備えている。

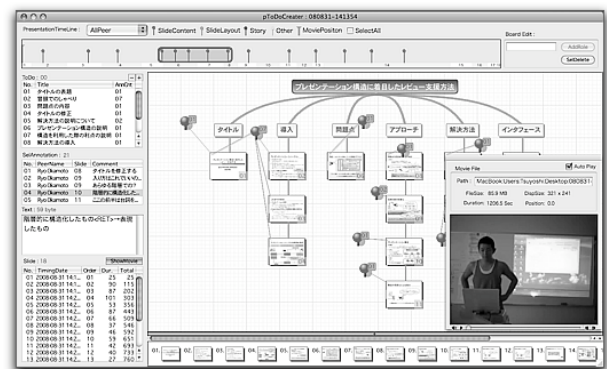


図 プロトタイプシステムのインターフェース

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内容の整理方法を提案し、それを実現するための支援ツールの試作を行った。本ツールを利用することで、プレゼンタに改善作業における議論内容の想起を目的とした議論支援環境の提供を実現することができた。

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

血液検査データ解析による知識発見手法

～血液検査データの正規化と相関モデル～

応用理学コース 情報科学分野 山下 真

近年、医療情報が電子化され診療情報、検査結果など診療で得られる様々な情報が蓄積されている。現状では蓄積されたデータの有効活用があまり行われていないが、データ解析やデータマイニングにより活用することで新たな知識の発見に繋がると考えられる。本研究では蓄積された血液検査データから新たな知識の一端を発見することを目的とする。

蓄積されたデータの有効活用の一つとして血液検査データの解析が要望されているが、解析をする上での問題点も多く存在する。主要な問題点の一つは検査方法の改定に伴い検査値の分布に違いがあるため、解析が困難になることである。長期間蓄積されたデータを用いてデータ解析を行う場合、検査方法の差異により検査値の分布に違いが生じるため解析が困難となる。二つ目の問題点は血液検査データに多数の欠損値が存在するため、通常の解析手法が適用できないことである。血液検査は一般的には診断に必要な検査項目しか検査が行われなかったため、多数の欠損値が存在する。また、検査の間隔は患者ごとに異なるため一般的なデータ解析やデータマイニングの手法の適用が困難である。これらの問題を解決し、蓄積された血液検査データの解析を行うことで従来知識の確認や新たな知識の発見が期待される。

本研究では上記の血液検査データのもつ問題点を解決し、データ解析を行うための手法を提案した。この手法は検査値の正規化方法、血液検査相関モデル、血液検査の比較方法で構成される。検査値の正規化方法は検査値の分布の違いを正規化することにより統一し、長期間データの利用を可能とする方法である。血液検査相関モデルは検査項目間の関係性を表現する方法である。本研究では血液検査相関モデルを図表により可視化するシステムを構築した。また、血液検査の比較方法は検査値の分布と相関関係の比較を行う方法である。

本手法を用いて肝機能障害患者と白血病患者の血液検査の比較を行ったところ、医師のもつ経験による知識に近い解析結果を得た。また、抗うつ薬服用前後の患者の血液検査の比較を行い、投薬前はCKと肝機能関連項目との相関が強いが、投薬後はCKと血液関連項目との相関の方が強いという新たな変化を発見した。

VLSI レイアウト設計におけるクロストーク回避配置と配置 ECO 判定手法の研究

応用理学コース

情報科学分野

吉田佑馬

情報化社会の発展に伴い、高性能で安価な電子機器が市場で求められている。高性能な電子機器を実現するためには、多くの機能の実装(回路規模増大)と動作速度の高速化と低消費電力化と、それらを安価に提供する技術が必要となる。そこで電子機器のコア部品であるLSI製造技術は微細化により膨大な回路の実装と LSI 動作速度の高速化が進められている。また低消費電力のため低電圧化が進んでいる。さらに低価格に製造するため、LSI 設計の大規模回路を効率よく設計する技術が求められている。

しかし、LSIにおける微細化は、DSM問題(DeepSubMicron)と呼ばれる性能や生産性を左右する新たな問題を引き起こす。具体的には、VLSIの信号タイミングの推定を困難にし、信号品質を落とすためにLSI機能や性能を劣化させる。さらにDSM問題は設計規模増大と相まって、設計やり直しなど設計効率を著しく下げる問題も起こすため、生産効率を下げってしまう。結果として設計期間の長期化や設計コストの増大を招いてしまう。

本論文では、DSM問題における2つの設計改善手法について述べる。1つは、信号タイミングや信号品質の原因となる信号クロストークの回避技術、2つめは、設計やり直しを効率よくするECO(Engineering Change Order)設計技術である。信号クロストークは、信号間干渉で、製造微細化により金属配線が相互に近接することで生じる。ECOとは、設計を効率よく修正する技術を指し、設計ミス修正やタイミング改善を、既に設計された一部分のみの修正で完結させる技術である。

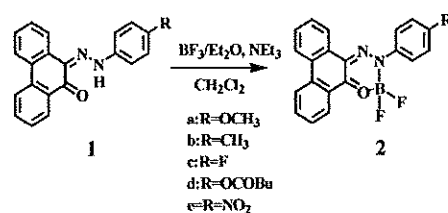
従来のクロストークの回避技術は、金属配線が相互に近接しないよう配線経路修正をおこなう方法が中心であった。しかし配線が高密度化な場合は、配線相互を離す領域が確保できない。また配線経路の変更では、配線長が変わり、別の信号遅延問題を生じることがある。

そこで本論文では、配置設計における改善法を提案する。配置設計による改善は、配線領域の確保や配線長増減を少なくできる可能性がある。提案する配置手法は、クロストーク回避評価を加えた配置評価関数を用いる。この配置手法を、クロストーク回避の程度と配置品質(信号総配線長)とのトレードオフ関係、およびトレードオフ関係の回路構成(人工的な回路、演算器(乗算器)およびランダム論理回路)依存性について評価し、どこ、どの場合においても配線長増が数%程度でクロストークを完全に回避できることがわかった。

従来のECO技術は、設計ミスやタイミング修正などの設計変更を、LSI設計フローのどの段階で行うかは特に指標がなかった。しかしECOにおいて設計期間は、設計フローの段階で大きく変わる。そこで設計効率を上げるECO設計段階の最適な決定法を本論文で検討した。ここでは、「配置ECO有効性」という新たな指標を導入する。配置ECO有効性とは、既存の配置結果の一部と、その配置改善解の評価関数値の差で、配置ECO有効性が高ければ配置設計で改善程度が大きくなるため、例えばタイミング修正量から「配置設計で修正可能かどうか」が判定できる。しかし「配置ECO有効性」は、配置改善結果が必要なため時間が長期になり現実的ではない。そこで配置改善に代えてランダム配置との評価関数値の差から「配置ECO有効性」を推定する。本提案手法を格子状の接続を持つ人工的な回路で評価したところ、「配置ECO有効性」と推定手法が高い相関性をもつことが確認できた。

以上、本研究で提案された新手法を用いることで、DSMにおいても信号品質が改善され、さらに設計修正の効率化が可能となり、LSI製造の高性能化、低コスト化が期待できる。

【緒言】アゾ系色素は、機能性色素として広く利用されているが、蛍光を発するものは非常に少なく、発光性を付与できれば高次機能材料としての新しい応用が期待できる。そこで、本研究では新規なアゾ-ヒドラゾン系蛍光色素の創出を目的として、置換基の異なる色素配位子(**1a-1e**)を合成し、これらをホウ素錯体化(**2a-2e**) (Scheme 1) して発光性の改善を試みた。有機溶媒中および結晶状態での吸収スペクトル及び蛍光スペクトルの測定を行い、置換基効果とホウ素錯体化による発光性への影響を考察した。また、結晶構造に及ぼす置換基効果やホウ素錯体化の影響を調べるために、色素配位子(**1b**)およびホウ素錯体(**2a**)と(**2b**)の単結晶 X 線構造解析を行った。



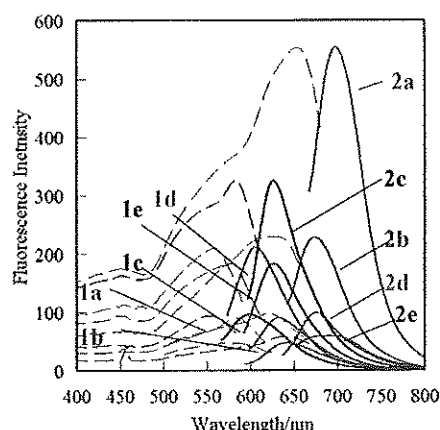
Scheme 1. Synthesis of boron complexes of azodyes.

【結果・考察】色素配位子(**1a-1e**)の CH_2Cl_2 中での可視吸収スペクトルは $\lambda_{\text{max}} = 480 \sim 500 \text{ nm}$ 付近 ($\epsilon_{\text{max}} = 26,000 \sim 44,000$) に吸収帯が現われ、対応する蛍光スペクトルは $F_{\text{max}} = 540 \sim 580 \text{ nm}$ 付近に幅広い蛍光帯を示したが、微弱な蛍光しか示さなかった ($\Phi = 0.001$)。しかし、ホウ素錯体化(**2a-2e**)することによって、同じ溶媒中で、 $\lambda_{\text{max}} = 500 \sim 520 \text{ nm}$ 付近 ($\epsilon_{\text{max}} = 25,000 \sim 33,000$) に吸収帯を示し、対応する蛍光スペクトルは $F_{\text{max}} = 560 \sim 630 \text{ nm}$ 付近に幅広い蛍光帯を示すようになった。色素(**1**)と比較してホウ素錯体(**2**)の蛍光強度は大きく増大した ($\Phi = 0.01 \sim 0.02$)。例えば、ホウ素錯体(**2a**)は色素配位子(**1a**)の約30倍強い蛍光量子収率を示した。

置換基(R)効果では、色素配位子(**1**)およびホウ素錯体(**2**)の吸収極大波長及び、蛍光極大波長は、電子吸引基から電子供与基になるにつれ波長は長波長側へシフトしていた。しかし、色素配位子(**1d**)と(**1e**)およびホウ素錯体(**2d**)と(**2e**)は、他と少し異なる挙動を示していたことから、アゾ-ヒドラゾン互変異性が関与していると思われる。

一方、結晶状態では、溶液状態と比較して、色素(**1**)とホウ素錯体(**2**)は共に蛍光強度は増大した。固体励起・蛍光スペクトルの測定において、色素配位子(**1a-1e**)は $\lambda_{\text{ex}} = 550 \sim 580 \text{ nm}$ 付近に現れ、 $\lambda_{\text{em}} = 600 \sim 640 \text{ nm}$ 付近に現れた ($\Phi = 0.03 \sim 0.05$) (Figure 1)。ホウ素錯体(**2a-2e**)は、 $\lambda_{\text{ex}} = 580 \sim 650 \text{ nm}$ 付近に現れ、 $\lambda_{\text{em}} = 630 \sim 700 \text{ nm}$ 付近に蛍光を発した ($\Phi = 0.04 \sim 0.30$)。結晶状態においてもホウ素錯体化による蛍光強度の増大が確認できた。

色素(**1b**)、ホウ素錯体(**2a**)、(**2b**)の単結晶 X 線構造解析より、基底状態では、色素(**1b**)はヒドラゾンフォームを取り、ホウ素錯体(**2a**)、(**2b**)はアゾフォームを取っていることが分かった。さらに、色素配位子(**1**)とホウ素錯体(**2**)のフィルム中における光物性および光安定性についても調査し、溶液状態と固体状態との相違を明らかにした。

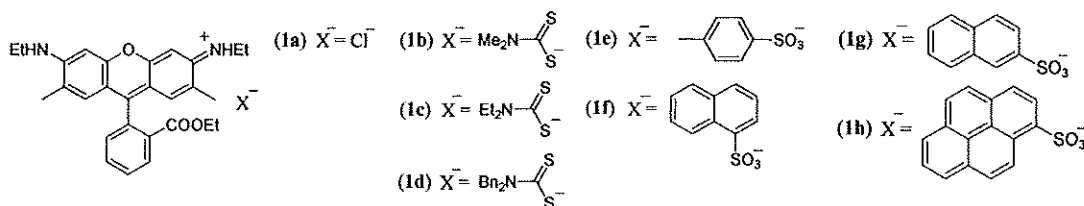
Figure 1. Solid state excitation(··) and emission(-) spectra of (**1a-1e**) and (**2a-2e**).

固体発光性分子塩型色素の分子設計・合成と機能評価

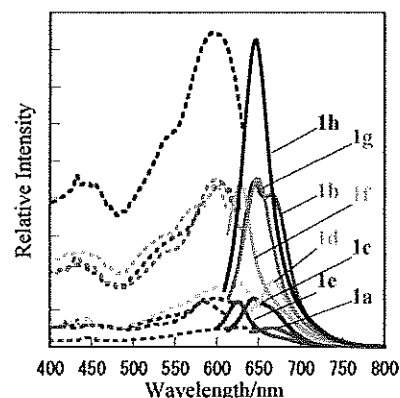
応用理学コース 応用化学分野

田中 将雄

【緒言】蛍光色素の固体状態における濃度消光の解明は、有機固体光化学の基礎研究から発光性機能材料の応用まで広い範囲で強い関心がもたれている。本研究は、優れた新規な色素材料の開発を目的として発光性分子塩型色素の分子設計・合成・機能評価を課題とし、イオン性を持たせた蛍光色素分子に様々な対イオン種を組み合わせた新規な固体発光性分子塩型色素を創出した。結晶構造の制御による濃度消光の緩和、光物性の改善、耐久性の改善について検討した。



【結果と考察】新規な分子塩型色素として、キサンテン系分子塩型蛍光色素を分子設計・合成し、光物性を評価した。まず、キサンテン系分子塩型蛍光色素(1a)-(1g)では、ジクロロメタン溶媒中において吸収スペクトルは、 $\lambda_{\text{max}}=523\text{ nm}$ ($\epsilon_{\text{max}}=93000\sim95000$)の非常に強い吸収帯を示し、蛍光スペクトルでは $F_{\text{max}}=540\text{ nm}$ に鋭い蛍光帯を示した。発光量子収率は、 $\phi=0.82\sim0.90$ を示した。また、これらのプラスチックフィルム中におけるキセノン照射に伴う光安定性の評価を行ったところ $\text{PS}<\text{PMMA}$ の順に安定性が向上し、発光性は PMMA が優れていることが明らかとなった。固体状態における励起・蛍光スペクトルを測定した結果、いずれの色素も溶液状態と比べ大きく異なり、 $\lambda_{\text{ex}}=582\sim627\text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{em}}=625\sim667\text{ nm}$ に吸収・蛍光極大を示した。発光量子収率は、 $\phi=0.001\sim0.017$ と溶液状態に比べ著しく低下することがわかった。しかし、対アニオン種の構造を変化させることによって発光性を大きく改善することができた。そこで、分子塩(1a), (1e), (1g)の単結晶 X 線構造解析を行うことにより、結晶構造と固体発光性との相関性を明らかにした。



さらに、二波長発光性分子塩型蛍光色素(1h)を分子設計・合成し、光物性を評価した。ジクロロメタン溶液状態において、 $\lambda_{\text{max}}=347\text{ nm}$ ($\epsilon_{\text{max}}=36400$), 509 nm ($\epsilon_{\text{max}}=55200$)の2つの強い吸収帯を示し、対応する蛍光スペクトルでも $F_{\text{max}}=377\text{ nm}$ と $F_{\text{max}}=560\text{ nm}$ に2つの蛍光帯を示し、二波長発光色素であることを確認した。それぞれの量子収率は、 $\phi=0.18$ と $\phi=0.59$ を示した。また、フィルム中においても二波長発光性が認められたが、この光退色挙動を調査したところ、分子塩(1a)-(1g)に比べて不安定化することが分かった。一方、固体状態においては、 $\lambda_{\text{ex}}=594\text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{em}}=645\text{ nm}$ に励起・蛍光極大を示すのみで二波長発光性は消失することがわかった。この場合では、発光量子収率は $\phi=0.029$ となり、溶液状態に比べて著しく低下していたが、これまでに得られたキサンテン系分子塩型色素の中では最も発光特性に優れていることが示された。

新規近赤外発光性色素の分子設計・合成・機能評価

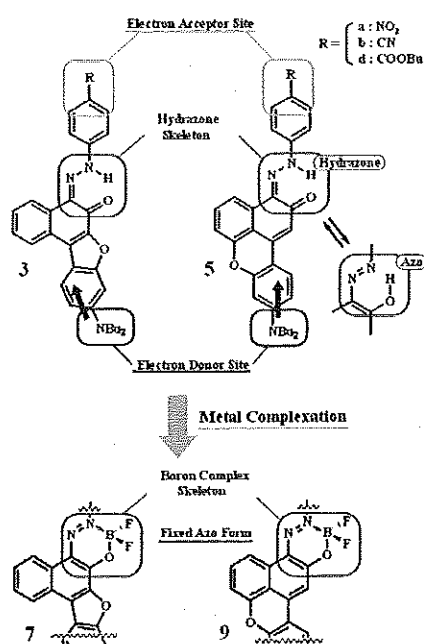
応用理学コース

応用化学分野

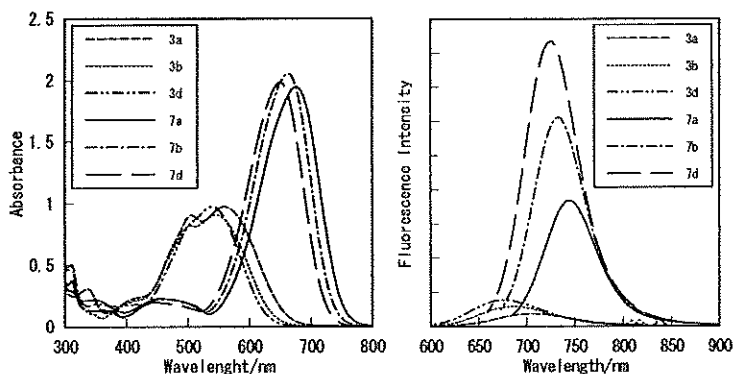
坂本 武大

【緒言】 近年、様々な機能性色素が開発・応用され、それらを評価するための分光機器も目覚ましい発展を遂げている。特に、従来から行われている紫外～可視領域の測定に加えて、波長が 700 nm 以上の近赤外領域の測定が可能となってきた。この近赤外領域の光は、生体への浸透に優れているなど、その吸収・蛍光発光特性から更なる応用が期待される。これらの理由から、近赤外領域(700 nm-900 nm)で蛍光を示す近赤外発光性色素が注目されている。そこで本研究では、良好な発光性と耐光性を有する近赤外発光性色素の開発を目的として、新規なアゾ-ヒドラゾン系蛍光色素およびホウ素錯体の分子設計、合成を行い、光物性や耐光性、熱安定性などの評価を行った。

【結果・考察】 分子設計として、金属配位能を付与するために蛍光母体にアゾ-ヒドラゾン骨格を選択して、さらに π 共役を拡張した分子内電荷移動型とし、近赤外領域での光吸収および発光を見込んだ。具体的には、ドナー部位となるジブチルアミノ基を有するオルトキノンと、アクセプター部位となる電子吸引性の置換基を有するヒドラジン誘導体とを反応させることにより、分子設計を満たす色素(3)および(5)を簡便に合成した。光物性を測定した結果、色素(3)は $\lambda_{\max} = 538\text{-}558\text{ nm}$ ($\epsilon_{\max} = 39,000 \sim 45,100$)、色素(5)は $\lambda_{\max} = 560\text{-}573\text{ nm}$ ($\epsilon_{\max} = 64,800\text{-}68,600$)の強い吸収帯を示し、対応する蛍光スペクトルは、色素(3)は蛍光極大波長 $F_{\max} = 675\text{-}705\text{ nm}$ ($\phi = 0.028\text{-}0.046$)、色素(5)は $F_{\max} = 656\text{-}710\text{ nm}$ ($\phi = 0.003\text{-}0.007$)の蛍光帯を示した。測定結果から、これらの蛍光色素は期待通りに、近赤外領域で発光を示すことが確認できた。しかし、発光性に優れた色素にするためには、無放射失活過程であるアゾ-ヒドラゾン互変異性による蛍光発光効率の減少を抑える必要があった。



そこで、蛍光発光効率の増大を目的として、アゾ-ヒドラゾン互変異性を制御することを狙って、さらにアゾ-ヒドラゾン系ホウ素錯体を分子設計し合成した。ホウ素錯体化した色素(7)および(9)の光物性を測定した結果、色素(7)は $\lambda_{\max} = 650\text{-}683\text{ nm}$ ($\epsilon_{\max} = 72,000\text{-}84,700$)、色素(9)は $\lambda_{\max} = 651\text{-}670\text{ nm}$ ($\epsilon_{\max} = 121,300\text{-}130,100$)の非常に強い吸収帯を示し、対応する蛍光スペクトルは、色素(7)は $F_{\max} = 726\text{-}747\text{ nm}$ ($\phi = 0.15\text{-}0.27$)、色素(9)は、 $F_{\max} = 679\text{-}697\text{ nm}$ ($\phi = 0.34\text{-}0.60$)の蛍光帯を示した。ホウ素錯体化により、無放射失活過程であるアゾ-ヒドラゾン互変異性の制御による蛍光発光効率の増大と、蛍光波長の更なる長波長化を実現でき、新規な近赤外発光性色素を開発することができた。



カタユウレイボヤ胚における内在性レチノイン酸の機能阻害

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 池田 拓

レチノイン酸 (retinoic acid: RA) は、脊索動物あるいは脊椎動物を特徴づける形態をつくるために重要な役割を担っている。脊椎動物において RA は *Hox* 遺伝子の発現を調節することにより前後軸に沿ったパターン形成を支配している。本研究は、カタユウレイボヤ胚において内在性の RA が *Hox1* 遺伝子のオーソログ (*Ci-Hox1*) 遺伝子の発現の活性化に必要であるという決定的な証拠を得ることを目的とした。

RA は、一般にレチナールがレチナール脱水素酵素 (retinaldehyde dehydrogenases: Raldh) により酸化されて生成する。RA は、受容体である RAR/RXR ヘテロダイマーに結合し、標的遺伝子の転写を活性化する。カタユウレイボヤの RAR (Ci-RAR) と RXR (Ci-RXR) に特異的なモルフォリノオリゴヌクレオチド (MO) を導入した胚においては、*Ci-Hox1* の表皮における発現がみられなくなった。また、神経索における発現も減少したが、完全にはなくならなかった。カタユウレイボヤの Raldh2 (Ci-Raldh2) に特異的な MO を導入した胚においては、神経索と表皮における *Ci-Hox1* の発現がほぼ完全に消失した。これらの MO 導入胚を中期尾芽胚期まで観察したが形態異常は見られなかった。3,7-Dimethyl-2,6-octadienal (citral) と 4-(Diethylamino)-benzaldehyde (DEAB) は、Raldh に結合することによってレチナールの酸化を阻害する RA 合成阻害剤である。Citral や DEAB で処理した胚においては、尾芽胚の尾が短くなり、表皮や神経索における *Ci-Hox1* の発現もまったく見られなかった。

これらの結果から、カタユウレイボヤ胚において、RA は *Ci-Hox1* の表皮における発現に必須であり、その効果は Ci-RAR と Ci-RXR によって仲介されていることがわかった。*Ci-Hox1* の表皮エンハンサー内には、Ci-RAR/Ci-RXR ヘテロダイマーの結合配列 (RARE) があり、この配列が表皮におけるエンハンサーの活性化に必要であることがわかっており、本研究の結果とつじつまが合う。また神経索における *Ci-Hox1* の発現にも RA が必要であることがわかった。しかしながら、Ci-RAR 特異的 MO によって *Ci-Hox1* の発現が完全に消えなかったことは、神経索における *Ci-Hox1* の発現を活性化できる別の因子が存在することや、RA 効果を仲介する RAR 以外のシグナル伝達経路があることを示唆する。

カタユレイボヤ胚の表皮系統細胞における転写調節の解析

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 石田 聡美

～動物半球特異的な遺伝子 *Ci-ephrin-Ad* のエンハンサー解析～

ホヤの幼生の 800 個の表皮細胞は、8 細胞胚の動物半球の 4 個の割球から生じ、植物半球の 4 個の割球からは生じない。動物半球のほとんどの細胞は将来表皮へと分化する。表皮細胞の発生運命は 110 細胞胚までに決定する。表皮分化の運命は、母性の決定因子によって決定されると考えられている。しかし、表皮決定因子の正体や表皮分化のメカニズムはまだわかっていない。これらを解明するために、16 細胞胚の動物半球で特異的に発現する *Ci-ephrin-Ad* のエンハンサー解析を行った。

著者のこれまでの研究により、転写開始点から上流 1.7 kb の領域が 16 細胞期における動物半球特異的な転写活性化に必要であることがわかっている。そこで、上流 1.7 kb の領域を段階的に欠失させた *lacZ* レポーター遺伝子を作製し、胚に導入して発現解析を行った。上流 403 bp の領域を含むレポーター遺伝子は正常に発現したが、上流 343 bp の領域を含むレポーター遺伝子は全く発現しなかった。このことから、*Ci-ephrin-Ad* の発現には、上流 -403 ～ -344 の領域が必要であることが示唆された。この領域内には、Sox 転写因子と GATA 転写因子の結合配列に似た配列がみられた。カタユレイボヤの GATA タンパク (Ci-GATAa) は、動物半球特異的な遺伝子の発現を活性化することがわかっている。そこで、Sox の結合配列に変異を入れたレポーター遺伝子を胚に導入し、発現解析を行った。その結果、レポーター遺伝子は発現していた。このことから、*Ci-ephrin-Ad* の発現に、-403 ～ -344 の領域内の Sox の結合配列は必要ではないことが示唆された。この領域内の Sox と GATA の結合配列の両方に変異を入れれば発現しなくなる可能性、また -343 より下流にも Sox の結合配列があるので、両方の Sox 結合配列に変異を入れれば発現しなくなる可能性も考えられる。

～背側正中線表皮における *Ci-RAR* の転写調節の解析～

ホヤ胚においては、多くの表皮特異的な遺伝子が同定されており、それらの発現パターンにより表皮は異なった領域に分けられる。背側正中線表皮は、110 細胞胚の b8.18, b8.20 割球に由来する。背側正中線表皮において、多くの表皮特異的な遺伝子は発現しないが、*Pax3/7*, *msxb*, *Bmp2/4* は特異的に発現する。このことは、背側正中線表皮における遺伝子発現調節カスケードが他の領域の表皮と異なっていることを示している。

カタユレイボヤのレチノイン酸受容体 (*Ci-RAR*) は、64 細胞胚の全ての表皮系統細胞で発現する。表皮における発現には *Ci-RAR* の上流 -1001 ～ -987 と -982 ～ -973 の両方が必要であり、それぞれの領域に SoxB1 転写因子と Msxb 転写因子の結合配列に似た配列が見つかっている。そこで、それぞれの領域に SoxB1 と Msxb が結合するのかを調べるために、ゲルシフトを行った。その結果、-1001 ～ -987 の領域には SoxB1 が、-982 ～ -973 の領域には Msxb が結合することが確かめられた。

レチノイン酸によるカタユウレイボヤ *Hox1* 遺伝子の転写調節

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 神田 美幸

脊椎動物に特徴的な体構造が作られるにはレチノイン酸が必要である。脊椎動物では *Hox* 遺伝子の転写がレチノイン酸受容体 (Retinoic acid receptor, RAR) を介したレチノイン酸シグナルによって制御される。そして *Hox* 遺伝子が様々な下流遺伝子の転写調節を通じて体構造の形成を制御する。本研究では、脊索動物門・尾索動物亜門に属するホヤの一種、カタユウレイボヤ (*Ciona intestinalis*) を実験動物として用いた。ホヤは脊椎動物に最も近縁な無脊椎動物である。カタユウレイボヤ胚をレチノイン酸で処理すると *Hox1* 遺伝子 (*Ci-Hox1*) の転写レベルが上昇するが、正常胚における転写活性化に内在性のレチノイン酸が必要であるかどうかは明らかになっていない。また、ホヤと同じく尾索動物であるオタマボヤ (*Oikopleura dioica*) のゲノムには RAR をコードする遺伝子が存在しないため、尾索動物では RAR を介したレチノイン酸シグナルが体づくりに重要な機能を持っていないのではないかと考えられている。そこで、本研究では、カタユウレイボヤの *Ci-Hox1* のエンハンサー中に RAR が結合するレチノイン酸応答エレメント (RARE) を見つけ、カタユウレイボヤにおいても脊椎動物と同様に、レチノイン酸と RAR によって *Ci-Hox1* の発現が制御されることを証明しようと試みた。

Ci-Hox1 の 5' 上流領域と第 2 インترونの一部を連結したレポーター遺伝子は、内在性 *Ci-Hox1* と同様に、カタユウレイボヤ尾芽胚の頭と尾の境目部分の表皮と神経索で発現した。このレポーターコンストラクトから 5' 上流領域を欠失させると表皮での発現が減少した。つまり、*Ci-Hox1* の 5' 上流領域には表皮エンハンサーが存在すると考えられた。また、胚をレチノイン酸合成阻害剤で処理すると、表皮でのレポーター遺伝子の発現は減少した。この表皮エンハンサー内には RARE 類似配列が存在し、この配列に点突然変異を導入すると、表皮におけるレポーター遺伝子の発現が消失した。また、ゲルシフト解析によりこの RARE 類似配列にレチノイン酸受容体が特異的に結合することが明らかとなった。これらの結果は、レチノイン酸が *Ci-Hox1* の表皮エンハンサーを直接活性化していることを示す。ホヤ胚においてレチノイン酸が内在性の遺伝子発現に必要であることを明確に示したのは本研究が初めてである。このことにより、ホヤにおいても脊椎動物と同様に RAR が介在するレチノイン酸シグナル伝達経路が保存されていることがわかった。

カタユウレイボヤ胚における DNA 複製回数のカウントと遺伝子発現の関係

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

三科 亮

カタユウレイボヤのアセチルコリンエステラーゼ遺伝子 (*Ci-AChE*) は原腸胚期以降に筋肉細胞特異的に発現する。カタユウレイボヤの胚を DNA ポリメラーゼ α の阻害剤であるアフィディコリンで処理して 32 細胞期以降の DNA 複製を停止させると、対照実験の正常胚が尾芽胚期を過ぎても *Ci-AChE* は発現しない (片岡, 2007)。この結果から、*Ci-AChE* の発現には一定回数の DNA 複製を経験する必要があることがわかった。これは、細胞あるいは遺伝子に DNA 複製回数をカウントする何らかのメカニズムが存在することを示唆している。

当研究室の実験系では、カタユウレイボヤ胚に導入した外来遺伝子は複製されない。よって、*Ci-AChE* 遺伝子近傍の DNA 分子自体が複製回数をカウントしているのならば、*Ci-AChE* レポーター遺伝子を発現する割球数は DNA 複製回数に左右されないと考えられる。片岡 (2007) は、アフィディコリン処理胚において *Ci-AChE* レポーター遺伝子を発現する胚の割合が減少すると報告している。しかも、1 個の胚あたりで、レポーター遺伝子を発現する割球数も減少した。しかし、その実験では例数が少なく、DNA 分子が複製回数のカウントに無関係とは断定できなかった。本研究では、この実験の追試を行った。アフィディコリン処理を行っていない胚では、胚全体のうち約 84% の胚で発現が見られ、そのうち約 77% の胚が 4 つの割球で発現していた。アフィディコリン処理を行った胚では、処理胚全体のうち約 73% の胚で発現が見られたが、そのうち 4 つの割球でレポーター遺伝子が発現していた胚は全体の約 6% であった。この結果から、*Ci-AChE* 近傍の DNA 分子自体は複製回数をカウントしていないことが示唆された。この実験と並行し、DNA 複製回数のカウントメカニズムとして DNA のメチル化に注目し、*Ci-AChE* のメチル化状態の変化を調べた。各発生段階 (16, 32, 64, 110 細胞期) において、エンハンサーエレメント、コアプロモーター、および第一エクソンの領域のメチル化状態を調べた。どの領域もほとんどメチル化されておらず、発生段階によるメチル化状態の変化はなかった。これらの結果から、*Ci-AChE* 遺伝子を含む領域のゲノム DNA 配列自体での複製回数のカウントは行われていないと考えられた。

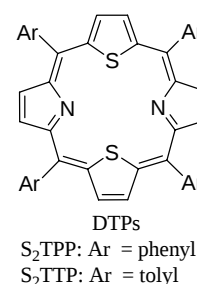
そこで、*Ci-AChE* の転写を活性化する因子である *Ci-MyoD* に注目した。アフィディコリン処理胚における *Ci-MyoD* の発現を調べた。64 細胞期からアフィディコリン処理を行った場合は *Ci-MyoD* の発現が見られたが、32 細胞期からアフィディコリン処理を行うと、*Ci-MyoD* の発現は見られなかった。この結果から、*Ci-MyoD* の発現にも 64 細胞期までの DNA 複製が必要であることがわかった。したがって、32 細胞期からのアフィディコリン処理によって *Ci-AChE* の発現が見られなかったのは、*Ci-MyoD* が発現していないためであると思われる。

ジチアポルフィリン (DTP) 関連錯体ライブラリーの構築

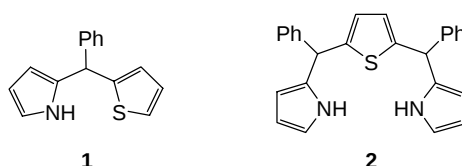
応用理学コース 海洋生命・分子工学分野 中馬 舞子

金属ポルフィリンあるいはその類縁体はヘム鉄やクロロフィル，P450 等の金属酵素の活性中心に含まれ，生命現象と密接に関連した機能性物質として知られているだけでなく，安定な酸化・還元特性，特徴的な光学的特性を有するため，触媒，機能性材料，医療・医薬等，幅広い分野での応用研究が行われている。

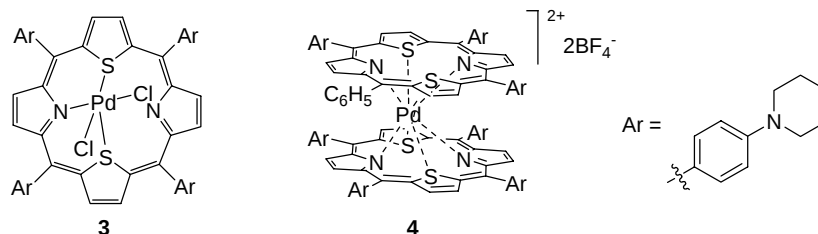
核修飾ポルフィリンの一つである 21,23-ジチアポルフィリン (DTP) は，通常のポルフィリンに比べて，HOMO-LUMO 間のエネルギー差が小さくなっており，電子遷移がポルフィリンよりも容易である。この特性はその金属錯体にも反映され，酸化・還元の関与する全ての反応に対して高い触媒活性が期待できるが，これまでに $\text{RuCl}_2(\text{s}_2\text{tpp})$ ¹⁾ および $\text{PdCl}_2(\text{s}_2\text{tpp})$ ²⁾ の二つしか知られていない。本研究ではメソ位にフェニル基をもつ S_2TPP を標準配位子として，各種類縁体を用いた金属錯体ライブラリーの構築を目指す。



ライブラリーに用いる配位子には S_2TPP の部分構造を持つ **1**, **2**, および S_2TPP のメソ位フェニル基への置換基の導入など DTP の各種アリアル誘導体を用いて，種々の金属錯体の合成を行う。



化合物 **1**, **2** および各種 DTP は文献記載の方法に従い合成し，様々な条件で錯形成を検討した。パラ位にピペリジンを持つ S_2TPP 誘導体を用いて，当研究室で開発した手法でパラジウム錯体 **3** を合成した。この錯体に対して 1 当量の配位子を追加し AgBF_4 を加えることで，サンドイッチ構造をもつ錯体 **4** を合成することができた。



1) Hung, C.-H.; Ou, C.-H.; Peng, S.-M. *Inorg. Chem.* **2001**, *40*, 6845-6847.

2) 宝利美穂，中野啓二，日本化学会第 88 春季年会 (2008)

ミサキマメイタボヤの無性生殖における TRAMP の機能解析

応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

森 謙 治

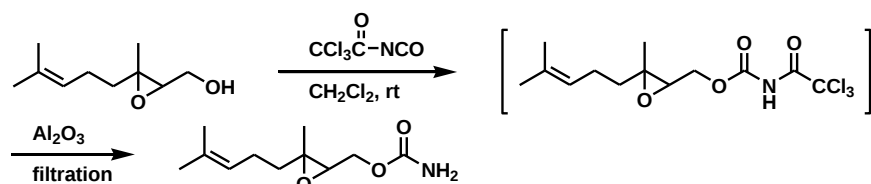
ミサキマメイタボヤは脊索動物門に分類され、有性生殖と、出芽による無性生殖の両方を行う。無性生殖の際には、囲鰓腔上皮の細胞が分化転換によって消化管の細胞になる。囲鰓腔上皮の分化転換を誘導するタンパク質の候補の一つが Tunicate Retinoic Acid-inducible Modular Protease (TRAMP) である。TRAMP は分化転換と同じ時期に、分化転換の起こる場所の近くで発現する。また TRAMP のリコンビナントタンパクは囲鰓腔上皮由来の培養細胞に対して増殖を促進する活性を持っている。これらのことから TRAMP は囲鰓腔上皮細胞の脱分化を誘導すると考えられている。しかし現在までに芽体に対して *in vivo* での解析は行われていないため、これを断定することは出来ない。そこで本研究では芽体における TRAMP の機能を RNA interference (RNAi) 法によって阻害し、消化管の形成にどのような影響が出るかを調べた。RNAi 法では、二本鎖 RNA で芽体を処理した後、7 日間人工海水中で飼育した。コントロール実験では、大腸菌の *lacZ* 遺伝子に対する二本鎖 RNA で芽体を処理した。コントロール実験の結果は、正常な消化管を持っていた個体の割合が 54.8% であった。また、消化管の小さかった個体の割合は 25.8% で、消化管の無かった個体の割合は 19.4% であった。それに対して TRAMP に対する二本鎖 RNA で芽体を処理した場合は正常な消化管を持っていた個体の割合は 46.3% であった。そして消化管の小さかった個体の割合は 11.2% で、消化管の無かった個体は 42.5% であった。TRAMP に対する二本鎖 RNA で芽体を処理した方が消化管の無かった個体の割合が多かった。このことから TRAMP がミサキマメイタボヤの無性生殖における分化転換プロセスに必要であることが示唆された。また、飼育期間を 14 日間にした場合ではコントロールと TRAMP 共に発生率がほぼ 100% になった。このことから TRAMP に対する RNAi の効果が切れると消化管の形成が再開されることが分かった。すなわち、RNAi 法は芽体の生存に影響を及ぼさず、TRAMP の機能が阻害されたことのみが、消化管の形成率の低下を引き起こしていると考えられる。また、RNAi による TRAMP mRNA の発現量の変化を調べるために RT-PCR を行った。しかし、消化管の観察結果に反してこの結果は、コントロールと TRAMP に対する dsRNA で処理した場合とで、ほとんど差は見られなかった。さらに、TRAMP のリコンビナントタンパクを用いて二次体軸の誘導を試みたが、実験サンプルはコントロールの 1 個体を除いて死んでいた。この実験に関しては、条件の大幅な改善が必要であると考えられる。

新しいカルバモイル化反応の開発

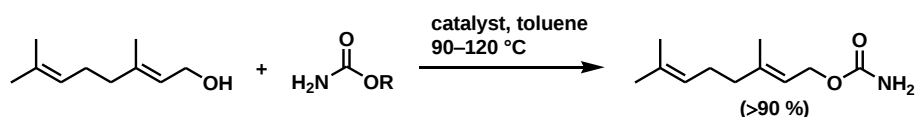
応用理学コース 海洋生命・分子工学分野

森 下 幸 典

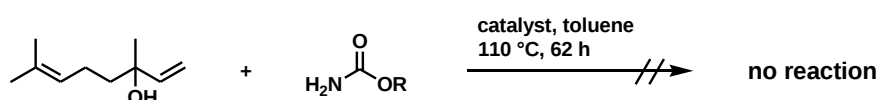
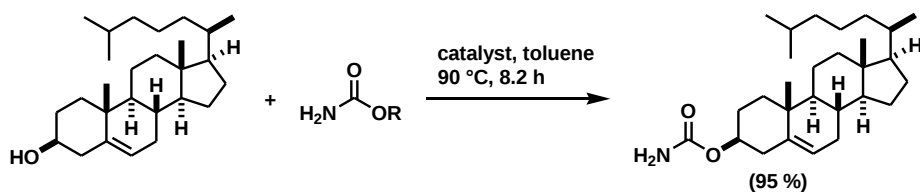
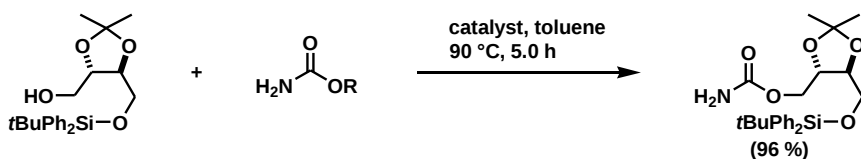
カルバメートは、様々な天然物合成中間体として重要な役割を担っている。カルバメートの合成法として、トリクロロアセチルイソシアナートを用いる手法等が報告されている。この方法は反応性が高く取り扱いにくい試薬を用いる必要がある。



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。



模擬されたガストフロントの微細構造

応用理学コース 災害科学分野 井上 暁

ガストフロントは積乱雲の降水に伴って生ずる下降気流により地表面に溜まった冷気が、冷氣外出流として水平に流出するときの重力流前線である。通過時の最大風速が 40m/s を越えることもあり、しばしば突風災害をもたらす。その被害は一般的に水平スケールが 10km を越えるガストフロントに対して数 10m 程度の小規模に局在することが多く、地表面付近の微細な内部構造を解明することが急務である。これまでレーダー観測や模擬実験などによりその全体構造や平均的速度場などが明らかにされてきたが、微細構造については十分に評価されていない。そこで本研究ではガストフロントの微細な内部構造を明らかにすることを目的として、重力流的性質は持たないが定量計測の容易な中立条件下でマルチファン型風洞を用いて冷氣外出流の模擬実験を行った。

マルチファン型風洞は、測定部断面が高さ 1.8m 、幅 2.5m の吹き出し型風洞で、縦 11 台、横 9 台の計 99 台のファンをコンピュータ命令で各々独立制御することにより色々な流速パターンを作り出すことが出来る。本研究ではファンの最下部 1 列のみを、ダウンバーストの水平流速分布(Hjelmfelt, 1988)を模擬した 3 種類の波形を運転命令として稼働させた。まず、スモークワイヤー法により模擬ガストフロントの可視化を試みた。次に、参照用の I-プローブと計測用の X-プローブを用いて熱線流速計による条件付き計測を行い、10 回分のデータをコンピュータに記録して位相平均し、模擬ガストフロント全体の平均構造を調べた。X-プローブは風洞最上流部中央床面を原点として主流方向に $X=1, 2, 5\text{m}$ 、鉛直方向に $Z=82\sim 902\text{mm}$ に設置して計測した。さらに、下層の風速分布や風速変動を詳細に調べるために X-プローブを 1 本 $X=1\text{m}, Z=8.2\text{mm}$ に固定し、もう 1 本を鉛直方向($Z=16.4\sim 246\text{mm}$)に移動させることにより 2 点同時熱線計測を行い、局所的突風の条件付き抽出を行った。

可視化や平均速度場の計測結果から、模擬されたガストフロントにおいて明瞭な水平渦の存在が確認でき、その水平渦のすぐ背後下層側に強風域が現れることが分かった。模擬ガストフロントの水平風速の鉛直分布は実現象と相似であり、水平風速のピーク高さの比から、約 $1/1600$ のモデルに相当することが分かった。風速変動には水平風速のピーク高さ付近において周期性が確認でき、パワースペクトルには約 20Hz のピークを持つ低周波数帯($6\sim 40\text{Hz}$)に高エネルギー領域が存在した。この周期的変動は実現象のケルビン-ヘルムホルツ不安定波に相当しており、重力流的性質を持たない中立条件下でもガストフロントの速度場や特性がよく再現できていることが確認された。一方、床面近傍($Z=8.2\text{mm}$)においては水平風速が平均より大きく、かつ鉛直成分が下降流を示すパターンが多く見られた。この高速下降流が地表面に突発的な災害をもたらす原因と考えられるため、 $Z<100\text{mm}$ について条件付き突風抽出を行った結果、床面の高速下降流は水平風速のピーク高さよりも上層にまで及ぶ風速変動に関連したものであることが分かった。

四国西部の地殻変動と中央構造線の運動様式の推定

応用理学コース 災害科学分野

島本 麻美

西南日本の地殻変動場は主に 2 つの要因に支配される。1 つは西南日本下へのフィリピン海プレートの斜め沈み込みによる、100 年単位の地殻の圧縮変形であり、もう 1 つは中央構造線(MTL)を境とする前弧ブロックの永久的な横ずれ運動である。前者は量的に後者より 1 桁大きいものの、南海トラフの地震の発生によりリセットされる。こうした異なる変動様式を解明する目的で、四国東部において MTL を横断する稠密 GPS 観測(1998-2003 年)が実施された。想定プレート境界面に沈み込みによる引きずりを仮想的に与えて、弾性圧縮変形を評価し、これを観測値から除去することで MTL に起因する変動を分離した。その結果、MTL の断層面上部は深さ 15km まで固着しているのに対し、それより下部で定常すべりが発生し、前弧ブロックが約 5mm/yr の速度で西方へ横ずれしていることが明らかとなった(Tabei et al., 2002)。

四国西部においても、MTL を横断する稠密 GPS 観測が実施された(2002-2007 年)。2006 年を境に、解析の基盤となる地球基準座標系が更新されたため、すべての観測点座標を再決定し、それぞれの 6 年間の座標時系列から平均変位速度を決定した。これまでの研究(一谷, 2008)により、西南日本前弧ブロックの反時計回りの回転運動が確認されている。しかし、四国西部を境にプレート境界の走向と傾斜が急変しており、従来用いられてきた矩形断層の集合では断層面の間に重なりや隔たりが生じ、プレート境界面の形状を十分再現できない。本研究では、Yoshioka and Murakami (2007)が震源分布と構造探査から更新したプレート境界面を基礎とし、756 枚の三角形要素を用いてプレート境界面を再現する。従来の矩形断層の集合と比べて、重なりや隔たりなく、急変するプレート境界面形状をより忠実に再現することが可能となる。対象とするプレート境界面の範囲は東経 131 度から 138 度、北緯 30 度から 35 度の区間とする。固着率の分布は一谷(2008)を参考に、深さ 10~24km で 100%, 24km~36km で 25~75%, 36km 以深では 10~0%を設定する。これらの想定境界面にプレート沈み込みによる仮想的な引きずりを与え、それによって生じる地表面の変動を半無限弾性体内の三角形断層を扱った Poly3D (Maerten et al., 2005) によって計算する。これらを観測値から除去することで MTL に起因する変動を抽出する。なお、仮想的引きずりと観測点水平変位速度はすべて REVEL (Sella et al., 2002) よりアムールプレート準拠とした。

今回のモデル化によって、四国西部では MTL の南側ブロックが北側に対し 2~10mm/yr の速度で西南西へ変位していることが確認された。MTL を挟んだ南北ブロック間の相対変位は、MTL の走行に平行な成分だけでなく、わずかながら開口成分も認められる。これは Nishimura and Hashimoto (2006)が広域 GPS データ解析から指摘した反時計回りの地殻ブロックの回転運動につながるものと解釈できる。ただし断層一枚の単純な横ずれ運動では説明が困難で、MTL の北側に剪断帯が存在することが示唆される。しかし今回用いた観測点数では局所的な変動しか確認できない。西南日本のより広域の地殻変動をモデリングするために、海域における観測空白域の解消や、他の地球物理観測量との統合処理が必要である。

地震の発生にとって断層近傍の流体の有無は重要な情報である。断層近傍での流体の存在やその状態を調べる方法として、ポアソン比との関係から V_P/V_S (V_P : P 波速度, V_S : S 波速度)の推定が考えられる。 V_P/V_S を求める方法として、和達ダイアグラムや地震波トモグラフィを用いた手法が用いられてきた。最近、地震発生域の V_P/V_S をより直接的に推定する方法(Lin and Shearer, 2007)が提案された。本研究では、この方法を地震活動が比較的活発で、かつ高サンプリングレート、高密度の地震観測が行われている長野県西部地域の読み取りデータに対して適用した。

この方法では、 V_P/V_S 値が一定と考えてもよい微小領域を想定し、その微小領域内で起こった地震群の P, S 波の読み取り値をもとに V_P/V_S を求める。まず、1 組の地震について考える。P, S 波の両方が観測された観測点について、各観測点での P 波到達時刻の差から全観測点での P 波到達時刻の差の平均値を引いた δt_P を横軸に、同様に求めた δt_S を縦軸にとったグラフを作る。このデータは原点を通る直線上に配列すると考えられるので、全ての地震の組み合わせについても同様の作業を行い、データの重ね合わせを行う。このプロットの近似直線の傾きが V_P/V_S に等しくなる(Lin and Shearer, 2007)。傾きの決定は繊細であり縦横の両軸に誤差を考える必要がある。そのため、残差をデータの点と近似直線の距離と考える主成分分析法や York 法(最小二乗法)を用いて傾きを決定した。ここで、 δt_P の誤差と δt_S の誤差の比が傾きに大きく影響を与える。一般的に P 波・S 波の読み取り誤差に関しては、S 波の読み取り誤差は、P 波の読み取り誤差よりも約 10 倍大きいという意見と、2 倍以内という意見に分かれている。そのため、本研究では次の 4 通りに関して解析を行った。①S 波の読み取り誤差が P 波の読み取り誤差の約 10 倍、②S 波の読み取り誤差が 5 倍、③S 波の読み取り誤差が 3 倍、④個々の読み取り誤差を考えない場合(主成分分析法)。解析範囲に関しては長野県西部地域(北緯 $35.76^\circ \sim 35.94^\circ$, 東経 $137.44^\circ \sim 137.66^\circ$, 深さ $0 \sim 10$ km)で発生した地震について、緯度・経度方向に 0.5 km 刻み、深さ方向に 0.5 km 刻みにグリッドを作り、各点から半径 0.5 km の範囲を微小領域と考え V_P/V_S を求めた。

読み取り誤差の扱い方と、フィッティングの方法によって、 V_P/V_S の値に偏りが生じることが分かった。しかし、各方法で求められた V_P/V_S を比較してみると、各領域で求められた V_P/V_S の相対的な大小関係の差に関しては議論できると考えられる。上部地殻全体の V_P/V_S が求められると考えられる和達ダイアグラムの結果との比較を行った。上部地殻全体の V_P/V_S の平均値が 1.64 なのに対して、震源域近傍の V_P/V_S の平均値は①～④のフィッティング方法で①から順に $1.69 \sim 1.85$ となり、全体的に少し大きな値が得られた。しかし、検定の結果どの場合も差が無いとなった。長野県西部地域では、御嶽山の高温流体の影響から震源の下限深度が 10 km 付近で、御嶽山を中心に円錐状になっているとされている(堀内ら, 2005)。そこで、御嶽山からの距離と V_P/V_S の関係を見てみると、震源の下限深度付近に②の解析結果で 2.0 を超える高 V_P/V_S 領域があることが分かった。電磁気による比抵抗構造の結果(Kasaya, 2002)との比較を行った。比抵抗構造では、1984 年に発生した長野県西部地震の断層面の北側に低比抵抗領域があり、南側に高比抵抗領域が現れているのに対して、本研究の結果ではそれが見られなかった。最後に、中規模地震を中心に同じ微小領域を考え、その前後の時間変化について求めた。しかし、誤差の扱い方やフィッティングの手法による誤差を考慮すると V_P/V_S の時間変化は検出できなかった。

謝辞: 長野県西部地域での貴重な読み取りデータの利用を許可していただいた京都大学防災研究所の飯尾能久教授に感謝します。

竜巻下層構造と竜巻による飛散特性の実験的解明

応用理学コース 災害科学分野

竹村 早紀

竜巻による突風やそれに伴う飛散物によって竜巻の被害は甚大となる。竜巻災害の原因究明や被害低減のためには、地表面付近の詳細な構造と飛散特性を明らかにすることが望まれる。しかし、竜巻の時間空間的スケールは小さいため実測が難しく、気象モデルを用いても解像度が十分でない。さらに模擬実験には定量的な研究が少ない。本研究室では、これまで自由空間中で竜巻状渦を模擬できる装置を用いて DPIV 法により定量計測を行ってきた。本研究は、竜巻の速度渦度場や飛散物挙動の評価を目的として2つの実験を行い、PIV データと熱線データの解析を行った。

実験Ⅰではメソサイクロンの回転上昇流を模擬するつりがね状竜巻模擬装置を用いた。比較的安定な渦を発生させる上昇流速(270mm/s)と回転速度(33.5rad/s)に設定し、装置を静止させた場合と移動速度 $U_c=20, 40, 80\text{mm/s}$ で移動させた場合の渦の水平断面に Ar レーザーシート光を照射し高速度カメラ(フレームレート 1000fps、解像度 $1024 \times 1024\text{pixel}$)で撮影し、DPIV 解析を行った。トレーサーには直径 $5\mu\text{m}$ のベビーパウダーを用いた。実験Ⅱでは、スーパーセル下層の流れを模擬するため案内羽根型メソサイクロン模擬装置(直径 $D=900\text{mm}$)と RFD を模擬するウォールジェットジェネレーターを用いた。可視化により多重渦が見られた案内羽根の迎角 $\alpha=60^\circ$ と装置下端の高さ $z/D=0.022, 0.044, 0.089$ について、自作の X プローブ(直径 $5\mu\text{m}$)を用いて $z=4\text{mm}$ においてサンプリング周波数 3kHz で 20 分間熱線計測した。

実験Ⅰの結果、静止竜巻の平均速度場では境界層内の $z<14\text{mm}$ において回転収束流、 $z>14\text{mm}$ で回転流のみが見られた。境界層の上では鉛直循環は高さ方向に一定($z=14, 30\text{mm}$ で $\Gamma=0.031\text{m}^2/\text{s}$)であったが、 $z=4\text{mm}$ では $\Gamma=0.005\text{m}^2/\text{s}$ となり、境界層内では鉛直渦に渦度供給があることを示した。その供給には境界層内の収束流に伴う水平渦の水平渦度よりも、水平渦に伴ってできる鉛直渦度の方が寄与することを示した。移動竜巻については、反時計回転する場合、進行方向に対し右後方が最大風速となる非対称な速度分布が得られた。また、単に移動速度が加わるだけでなく渦軸が傾いて伸張されるため渦が強化され、 U_c が増加するほど速度場も強化されることがわかった。さらに移動竜巻の速度場から固定観測点における風速変化を評価し、渦軸通過に伴い風向が急変することや、最大風速は渦軸通過後に現れることを示した。これらの速度場から水平面上の飛散物の挙動を評価したところ、静止竜巻内では飛散粒子の軌跡は最終的に渦核半径よりも大きな円に収束し、移動竜巻内では竜巻の移動に伴って粒子がらせん状に移動することがわかった。実験Ⅱの結果、接線方向の平均風速は $U_\theta \sim 0.4\text{m/s}$ と低風速であったが、風速変動スペクトルから発達した乱流状態にあることがわかった。4Hz 付近のピークから、吸い込み渦は 12cm 程の間隔で主渦のまわりを回転していることがわかった。条件付抽出により竜巻の中には直径 7mm の微細秩序渦が多数存在するとともに、それらより大きい吸い込み渦は直径 5cm 程度で、吸い込み渦の通過に伴い風速が増すことがわかった。

山形県庄内平野における突風の統計解析とレーダー解析

応用理学コース 災害科学分野 谷脇 和博

突風による被害は、十 km 前後の水平規模をもつ親雲に対して空間スケールが 1/100 以下と小さく、局所的であることが多い。この空間スケールの小ささが地上における観測を困難にしているため、親雲と突風との関係が十分に明らかにされていない。本研究は、このような突風の統計的性質を明らかにすることを目的として、庄内平野に設置した多数の超音波風速計、X バンドドップラーレーダーによる観測結果の解析を行った。

超音波風速計は庄内平野の JR 羽越線第二最上川橋梁を挟んで南北 1.2km の区間に線状に 12 基設置され、風速 3 成分を 0.25 秒間隔で観測している。X バンドドップラーレーダー(距離分解能 75m、観測半径 30km)は橋梁の南約 4km の JR 余目駅屋上に設置され、仰角 3° の PPI 観測を 30 秒間隔で行っている。突風が三角波になると仮定して、超音波風速計の 2 分移動平均した速度変動から勾配の変化が三角波に対応し、正→負と変化し、かつピークが 20m/s 以上あった場合、それを突風イベントとして条件付き抽出した。抽出された三角波の持続時間(ΔT)、最大瞬間風速($V_{\max}$)やイベント発生日時と突風時の主風向などの特性量を求め統計解析をした。X バンドドップラーレーダーは連続法と 2 重 PRF 法を用いて測定可能範囲をもとの $\pm 27\text{m/s}$ から $\pm 33\text{m/s}$ まで拡張して解析した。また、ウインドプロファイラーなどの観測データも利用した。解析期間は 2006 年 3 月～2008 年 12 月までである。

突風は各超音波風速計からのべ 8400 個抽出された。その約 90% が 11 月～4 月の冬季にかけて発生しており、その時の風向は日本海からの季節風による西風～北西風であった。一方、夏季に発生する突風の主風向は清川だしと思われる東～南東風であった。時間別にみると対流混合が発生しやすい昼間にやや発生頻度が高かった。 ΔT は一般的なマイクロバーストやガストフロントの時間スケールに近い 5 分が最頻値であったが、中には 20 分を超えるような突風もあった。一日当たりの突風発生回数は最大で 1 日当たり 100 回を超える場合もあったが、20 回未満の日が全体の約 60% と突出して多かった。一基の超音波風速計による一日当たりの突風発生頻度が 20 回以上の場合と 20 回未満の場合を分けたところ、20 回を超える場合の発生件数は全抽出数の 85% に相当し、冬季に集中していた。一方、20 回未満も冬季に発生件数が集中しているが夏季にも発生が見られた。これらのうち $V_{\max}$ が 24m/s を超える突風は、一日当たりの発生件数が 20 回以上の場合にのみ見られた。このことは冬季に発生する突風のほうが夏季に比べて強く、季節風が一日中持続する中で発生することを示唆している。

1 日当たりの発生回数が 20 回を超えたとき風速計の近傍にエコーを伴うものは全体の 95% であり、レーダー観測範囲内に必ずエコーがみられた。また、ドップラー速度の示す風向が観測範囲内ではほぼ一定で、観測半径 20km 以内で(観測高度約 10m から約 1km) ドップラー速度が約 20m/s を超え、ほぼ均一であった。同時に酒田市のウインドプロファイラーの観測データからイベント発生時にはエコーの有無にかかわらず高度 400m～1 km 付近の風速の鉛直シアが小さくなっていた。これらのことから冬季に起こる突風の多くは上空の高速運動量が下層に輸送されることにより発生すると考えられる。

ドップラーレーダーにより検出された渦の特性と発生環境

応用理学コース 災害科学分野

根平 嶺央

2008年3月から気象庁では「竜巻注意情報」の発表を開始したが、その予測精度は公称10%といわれている。予測精度の向上には竜巻をもたらすような親雲の特性や環境場を詳細に調べ、情報を蓄積することが必要である。そこで本研究は、分解能の異なる2種類のドップラーレーダーを使用し、2008年6月29日に発生した安芸竜巻と、2009年6月3日土佐湾沖で発生し高知空港を通過したマイソサイクロンについて、それぞれの渦の特性や発生環境の解析を行った。

解析には、室戸岬に設置された気象庁Cバンドドップラーレーダー(観測半径400km, 距離分解能500m)と針木浄水場に設置されたXバンドドップラーレーダー(観測半径60km, 距離分解能75m)の2つのレーダーデータを用いた。渦の検出条件は、①各仰角の時間空間的なつながり、②ビーム動径方向に直交するドップラー速度の正負極大分布、③正負の速度差5m/s以上とした。

2008年6月29日2時頃に発生した安芸竜巻の事例では、ビニールハウスの損壊と植物の転倒、瓦の飛散などの被害が、南西から北東に接道長1.8km、最大幅30mの帯状領域に見られた。風向分布は主として被害分布の走向と平行な南西風が多いが、一部に反時計回転を表す収束性が明瞭に見られた。針木レーダーでは発生域との間の強エコー域により電波が減衰し渦を捕らえることが出来なかったが、室戸レーダーでは竜巻発生前後と思われる時間帯に2つの反時計回りのメソサイクロンを検出した。2つのメソサイクロンはともに被害域から南西約20km離れた土佐湾沖で1時50分、2時10分にそれぞれ検出され、移動速度11m/sで東北方向へ移動し上陸した。1つ目のメソサイクロンが被害域に最接近した2時20分には、被害域から1.5km北北東に離れていたが、高度約1kmにおいて渦径2.5kmで速度差は30m/sに及び渦度が 0.023sec^{-1} と最大の渦度となった。この渦は高度約5kmまで観測された。2つ目のメソサイクロンは最盛期に高度1.4kmで渦度 0.022sec^{-1} 、渦径1.9kmであったが地上での被害報告はされていない。2009年6月3日の事例では、土佐湾内で10時頃に相次いで発生した4つの時計回りのマイソサイクロン(平均渦径0.9km, 平均渦度 0.02sec^{-1})を針木レーダーで観測した。同時刻の室戸レーダーでは弱いシアーは見られたものの分解能が低いため渦を明瞭には捉えることはできなかった。その内1つは上陸時に前方で新たなエコーの発達に伴う別のマイソサイクロンを発生させ消滅した。発生した渦は元のマイソサイクロンより渦径が小さくなり渦度が大きくなる傾向が見られた。他の2つのマイソサイクロンは気象観測点のある高知空港上空を通過した。その風速風向の変化は明瞭な竜巻の通過を示すものではなかったが、2つの渦に対応する風向変化を示していた。

1km-NHMデータにより環境場を見てみると、2009年6月3日の事例では $SReH=117\text{m}^2/\text{s}^2$ と小さく、下層に収束と時計回転に伴う鉛直渦度が見られたことから非スーパーセル型の発生メカニズムにより生じたものと思われる。安芸の事例でも下層に同様な収束と渦度集中が見られたが、 $SReH=457\text{m}^2/\text{s}^2$ とかなり大きく、竜巻発生の指標の1つである $EH1>3$ でありスーパーセルによって生じた竜巻の可能性が高い。