

大船渡湾における密度貫入が中層 Chlorophyll-*a* 濃度に及ぼす影響

佐藤博信* ・ 高橋研也** ・ 柏舘信子***
野村宗弘**** ・ 沢本正樹*****

密度貫入が水質変動に及ぼす影響を明らかにするため、大船渡湾にて現地観測を試みた。その結果、中層 Chlorophyll-*a* (Chl. *a*) 濃度の急変が見られた。密度貫入を考慮した物質循環モデルによる解析の結果、密度貫入による急変であることが確認された。また、密度貫入を考慮した場合、潮汐のみの海水交換と比較して湾内 Chl. *a* 濃度は低い、栄養塩類による Chl. *a* 増殖制限項は高いことがわかった。一方、親潮南下時に密度貫入が発生したことを想定すると、貫入による一時的な濃度の減少は見られるが、湾内 Chl. *a* 濃度は増加を示した。ゆえに、親潮南下時の密度貫入は湾内の植物プランクトンを増殖させる可能性がある。

1. はじめに

閉鎖性内湾域において、湾外水が湾内へ流入することによる、水温・水質変化が実測により確認されている。特に、永田(1982)は海流の変化による水温の急変現象を報告している。また、大船渡湾において、日比野ら(1999)は、湾内と比較して溶存酸素を多く含んだ高密度の湾外水が、湾内底層へ流入することにより貧酸素水塊が消滅することを報告している。岡田ら(2000)は湾外の影響を考慮した大船渡湾内溶存酸素(DO)濃度変動の定量的評価を行っている。特に、湾外の密度変動を考慮に入れているのが特長である。

一方、片岡ら(1999)は、外洋から大船渡湾内に流入する負荷を削減した際の湾内水質分布に関しても言及し、外洋水が内湾生態系へ及ぼす影響の重要性を指摘している。

しかし、三陸沖は親潮、黒潮、津軽暖流の3種類の海流が出会う混合水域であるため、三陸沿岸における湾外水質も流況によって異なる。特に、夏季に台風などの低気圧が通過した際に親潮が南下することがあるが、このとき湾内水質にどのような影響が見られるかについては、水温や DO に関しては議論されているが、植物プランクトン濃度に関する議論が不足している。

一般的には湾外の方が植物プランクトン濃度は低いので、単純に考えると密度貫入は湾内の植物プランクトン濃度を下げる方に働くと考えられるが、親潮等の南下により湾外の栄養塩類濃度が高くなった場合、貫入現象は植物プランクトンの増殖を促進する方に働くことが考えられる。

特に、水域内の光環境によっては、植物プランクトンは表層～中層まで幅広く分布し、場合によっては中層赤潮が発生する場合もある。このとき、特に中層への密度貫入が植物プランクトン増殖にどう影響しているのかを把握することは重要である。

そこで本研究では、植物プランクトンを示す指標となりうる Chlorophyll-*a* (Chl. *a*) 濃度および湾外における栄養塩類濃度に焦点を当てた現地観測を行った。続いて、海水交換を考慮した湾内物質循環モデルを構築し、特に中層における Chl. *a* および栄養塩類濃度の変化と密度貫入、湾外水質の関連について明らかにする。

2. 研究対象領域および観測方法

(1) 大船渡湾の概要

岩手県南部に位置する、大船渡湾(北緯39°02′, 東経141°44′)を研究対象領域とした。水表面積は7.89 km²、最大水深は約38 m で、南北に細長い水域である。湾口部には津波防波堤が設置され、閉鎖度指標は14.04と高い。

湾内においては夏季の成層期に、湾外水は湾内の同一密度層に流入する密度貫入による海水交換が発生している。湾奥部には二級河川盛川などが流入している。

(2) 実測方法

著者らは、2004年夏季において水質観測を行った。図-1に示す Stn. A 中層(depth/2)において水温、塩分および Chl. *a* 濃度の連続観測を行った。また、湾口防波堤外側の Stn. B にて、水温および塩分を測定した。一方、Stn. 1, Stn. 7, Stn. 12において水温、塩分、Chl. *a* および光量子の鉛直観測、また、表層(Surface-1 m)、中層、底層(Bottom+1 m)にてバンドン式採水器を用いて採水、0.45 μm メンブレンフィルターでろ過後、冷蔵保存、実験室にて NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P を測定した。

また、透明度の測定もあわせて行った。

* 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

** 正会員 修(工) 五洋建設株式会社

*** 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

**** 正会員 博(工) 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻

***** フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

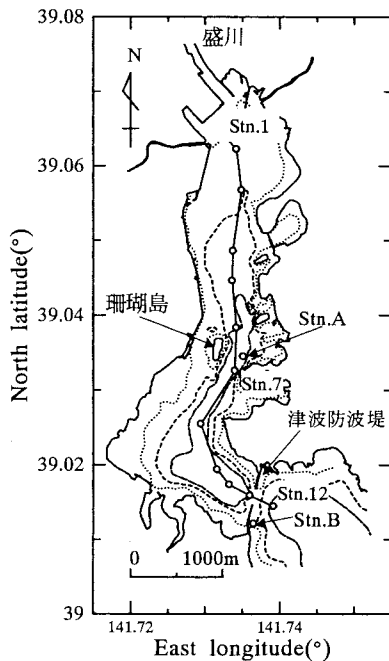


図-1 大船渡湾の概要

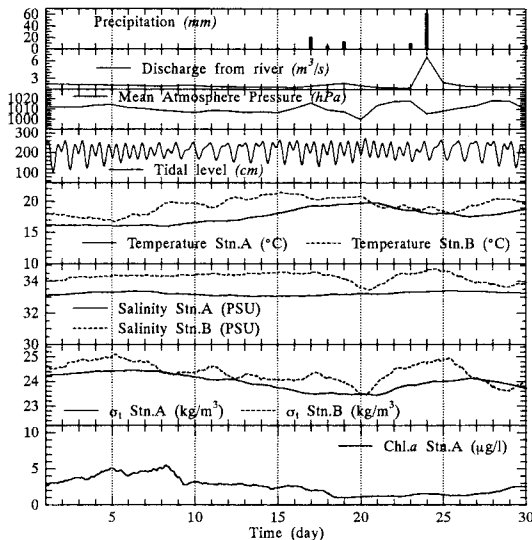


図-2 時系列観測結果 (8月)

3. 観測期間中の気象状況および現地観測結果

(1) 気象状況および水質時系列変化

図-2 に 8 月の大船渡における降水量、盛川流量、平均海面気圧、潮位および湾内外水温、塩分、 σ_t および Chl. *a* 濃度を示す。横軸は日付である。また、水温、塩分、 σ_t および Chl. *a* 濃度においては、潮汐成分を除去するために 25 時間の移動平均を施した。なお、湾外 Stn. B

表-1 Stn. 12 における栄養塩類濃度 (mg/l)

	下げ潮時		上げ潮時	
	DIN	DIP	DIN	DIP
5/27	0.047	0.003	0.024	0.004
6/21	0.017	0.001	0.010	0.001
7/23	0.023	0	0.010	0.001
9/1	0.062	0.010	0.016	0.004
9/28	0.041	0.002	0.019	0
10/22	0.033	0.004	0.024	0.004

の塩分については、付着物の影響によるセンサーの劣化が著しいために、Stn. 12 における鉛直観測データを用いて補正した。なお、降水量、平均海面気圧および潮位は気象庁 web サイト <http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html> 掲載のものを利用した。

8 月前半においては大きな降雨はないが、8 月 6 日は TY0411 から変わった熱帯低気圧が東北を通過している。また、8 月 20 日には TY0415 が東北地方を通過しており、このためとみられる海面気圧の低下が見て取れる。

特徴的な現象は、Chl. *a* 濃度が 8 月前半は上昇傾向にあるが、8 月 8 日を境に、急激に減少していることである。この急変現象以降は Chl. *a* 濃度は低く保たれている。急変した時の湾内外中層の σ_t は等しいので、このとき、中層における密度貫入の発生が示唆される。

(2) 海流と湾外栄養塩類濃度の関連性

表-1 に Stn. 12 中層の DIN ($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) および DIP ($\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度を示す。

上げ潮時と下げ潮時では濃度差があるが、下げ潮時は湾内水が流出しているために、湾外水の栄養塩類濃度をよりの確に示しているのは上げ潮時であると考えられる。

7 月 23 日上げ潮時と比較し、9 月 1 日上げ潮時は、DIN においては 1.6 倍、DIP においては 4 倍の差があることが確認できた。この結果は、8~12 月においては中層、底層ともに湾外水中の DIP 濃度は 0 mg/l であったという、豊田ら (1999) の観測結果とは異なっている。

8 月末は TY0415 のほかに、31 日には TY0416 が東北地方を通過しているため親潮南下の影響が示唆される。

そこで、三陸沖の親潮挙動を確認するために、日本画像データベース (JAIDAS) 公開の、東日本の NOAA/AVHRR 画像による SST 分布図を図-3 に示す。

沿岸モードの津軽暖流の存在も確認できるが、親潮の張り出しも大きい。このため、大船渡湾では津軽暖流以外に親潮の影響も受けていたと考えられる。また、5 月も DIP 濃度は高いが、やはりこのときに親潮が南下している様子が確認できる。

よって、以降、親潮が南下した際には大船渡湾外の栄養塩濃度は、DIN は 0.016 mg/l、DIP は 0.004 mg/l 程

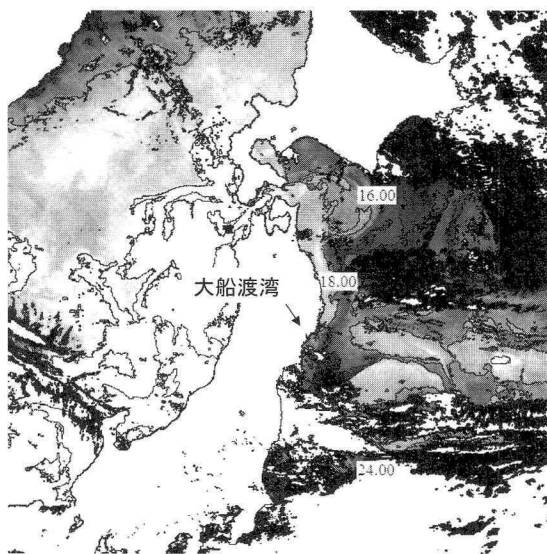


図-3 親潮南下状況(2004/8/27)

度に上昇するものと仮定して解析を進める。

(3) Chl. *a* 濃度の光合成最適深度および補償深度

湾内において植物プランクトンが増殖できる深度を光環境の点から把握するために、光合成速度が最大になる深度および補償深度を求める。

Steele の式により、水深 z m における光による植物プランクトン増殖制限項 $F_I(z)$ を (1) 式のように表す。

$$F_I(z) = \frac{I(z)}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I(z)}{I_{opt}}\right) \quad (1)$$

ここで I : 日射量 (W/m^2), I_{opt} : 最適日射量 ($=96 W/m^2$) とする。

これより、 F_I が最大となる水深、すなわち最適光合成深度を求めると晴天時は約 6 ~ 7 m であった。

また、補償点 I_c は一般的には $1 \sim 10 \mu mol/cm^2/sec$ であること (Lalli ら, 2005) を考慮し、ここでは $I_c = 10 \mu mol/cm^2/sec$ とし、補償深度 Z_c を (2) 式により求めた。

$$Z_c = -\frac{1}{k} \ln \frac{I_c}{I_0} \quad (2)$$

ここで、 Z_c : 補償深度 (m), I_0 : 水面の日射量 (W/m^2), k : 消散係数 ($=0.185/m$) である。

この結果、補償深度は平均 22 m であった。このことから、22 m 程度までであれば、密度貫入により湾外から栄養塩類が供給されることがあった場合、Chl. *a* 濃度の増殖を促進する方向に働くことも考えられる。

4. 水質のモデル解析

(1) 水質構造のモデル化

はじめに、解析に用いたモデルの概要を示す。本論では、湾内での平均的な影響について議論するので、鉛直

一次元モデルを用いた。水温および塩分モデルを以下の (3), (4), (5) 式に示す。

$$V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{-\frac{\partial A_i Q(z)}{\partial z}}{\rho_w c_w} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + \alpha Q (T_{OUT} - T_i) \quad (3)$$

$$Q(z) = (1 - \beta)(1 - ref) Q_s \exp(-kz) \quad (4)$$

$$V_i \frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + \alpha Q (S_{OUT} - S_i) \quad (5)$$

ここで、 z : 鉛直座標 (下向き正), t : 時間, T : 水温 ($^{\circ}C$), S : 塩分濃度 (PSU), V : 容積 (m^3), A : 水面積 (m^2), K_z : 鉛直渦動拡散係数 (m^2/s), Q : 潮汐プリズム (m), β : 吸光係数 ($=0.4$), ref : アルベド ($=0.08$) Q_s : 全日射量 (W/m^2), k : 消散係数 ($/m$), ρ_w : 密度 (kg/m^3), c_w : 比熱 ($J/kg/K$), α : 海水交換率 (海水交換時間の逆数) であり、添え字の "i" は層番号, "OUT" は湾外水を意味する。

次に Chl. *a* 濃度モデルであるが、増殖速度 G は (6) 式のとおり、日射量、水温、栄養塩の制限項にて表せるとする。

$$G = G_{max} \cdot F_I \cdot \frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \cdot \min\left(\frac{C_{DIN}}{K_N + C_{DIN}}, \frac{C_{DIP}}{K_P + C_{DIP}}\right) \quad (6)$$

G : 増殖速度 ($/day$), G_{max} : 最大増殖速度 ($=2.3/day$), T : 水温 ($^{\circ}C$), T_{opt} : 最適水温 ($=25^{\circ}C$), C_{DIN} : DIN 濃度 (mg/l), C_{DIP} : DIP 濃度 (mg/l), K_N : 窒素の半飽和定数 ($=0.014 mg/l$), K_P : リンの半飽和定数 ($=0.003 mg/l$)。これらのパラメータは、(1) 式で用いた I_{opt} の値も含めて片岡ら (1998) にならった。

これらを踏まえ、Chl. *a* 濃度は (7) 式を用いて算出できるものとする。また、DIN および DIP 濃度は (8) 式で算出できるものとする。

$$V_i \frac{\partial C_{chl.ai}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial C_{chl.ai}}{\partial z} \right) + G \cdot C_{chl.ai} + \alpha Q (C_{chl.aOUT} - C_{chl.ai}) \quad (7)$$

$$V_i \frac{\partial C_{ni}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial C_{ni}}{\partial z} \right) - \beta_{ni} G + \alpha Q (C_{nOUT} - C_{ni}) \quad (8)$$

ここに、 C_n : 栄養塩類濃度 (mg/l), $C_{chl.a}$: Chl. *a* 濃度 (mg/m^3), β_n : 植物プランクトン中の栄養塩類/Chl. *a* 比である。なお、 β_n の値は細田ら (2002) に従った。

主な計算条件に関しては表-2 に示す。

表-2 計算条件

水深	35.0 m	鉛直層数	35層
空間格子間隔	$\Delta z=1.0$ m	時間格子間隔	$\Delta t=600$ s
気象データ	大船渡測候所日別値および時別値		
湾外密度	Stn. B の25時間移動平均値 (10 m)		
湾外 DIN	0.010 mg/l (親潮南下時: 0.016 mg/l)		
湾外 DIP	0.001 mg/l (親潮南下時: 0.004 mg/l)		
水面	水面熱収支 (バルク法)		
河川	盛川日平均流量		
計算期間	2004年7月23日~8月31日 (40日間)		
海水交換率	密度貫入: 1/3, 潮汐: 1/60 (/day)		
消散係数	0.185 (/m)		

また、計算パターンとしては、以下の3パターンの計算を行った。

Case 1 : 潮汐による海水交換のみを考慮した場合。

Case 2 : 潮汐+密度貫入を考慮した場合。

Case 3 : 潮汐+密度貫入を考慮し、さらに湾外に親潮が南下しているものと仮定した場合。

(2) 密度貫入が Chl. *a* 濃度に及ぼす影響

解析を行った結果を図-4、密度貫入が発生する水深を図-5に示す。Case 1 の場合は、はじめのうちは増加しているが、 6 mg/m^3 で頭打ちになってしまっている。一方、Case 2 については実測値に示すほど急激ではないが、8月8日に Chl. *a* 濃度は減少傾向に転じている。このとき、貫入深さはまさしく中層であり、密度貫入による影響であることが確認できる。しかし、それほど実測値のような急激な変動が発生していない。これは、計算期間内の海水交換率を一律に与えているためであると見られる。一方、Case 3 に関しても、8月8日に貫入による急変が見られる。しかし、再び Chl. *a* が増加していることがわかる。

栄養塩類による Chl. *a* 増殖制限が3つのケースでどのように異なるかをみるため、(6)式に示した増殖の式のうち、栄養塩類に関する項 F_n の計算結果を図-6に示す。なお、解析の結果、この時期、大船渡湾においてはリン制限であった。

これより、Case 1 の場合、栄養塩類に関しては7月より低下し、8月11日以降は増加せずにほぼ一定になっている。したがって、Case 1 の場合、 6 mg/m^3 程度で増加が頭打ちになってしまったのは栄養塩類による増殖制限とみることができる。

また、Case 1 と Case 2 を比較すると、8月中旬に F_n の大小関係が逆転している。これは、湾外の栄養塩類が密度貫入によっても湾内に流入したためであると考えられる。しかし、Chl. *a* そのものの湾内外の入れ替わりにより、実際の Chl. *a* 濃度は増殖をせずに低い値を保っている。

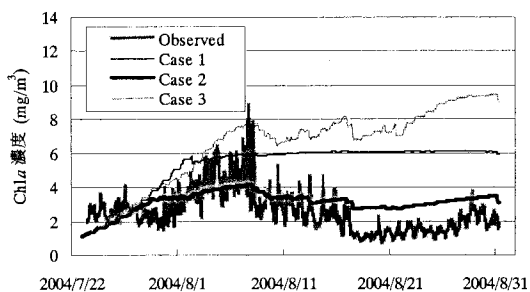
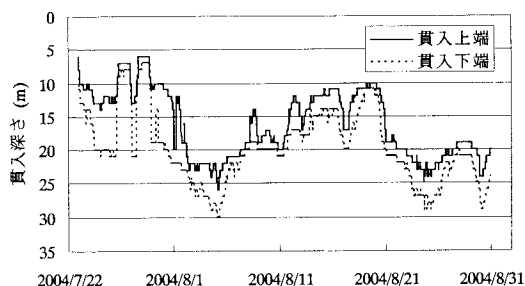
図-4 Chl. *a* 濃度の計算結果

図-5 密度貫入が発生する水深

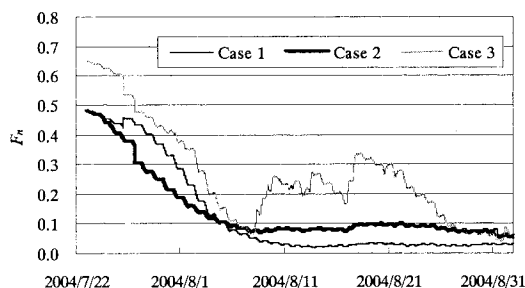


図-6 栄養塩類による植物プランクトン増殖制限項の変化

一方、Case 3 では密度貫入が発生した際に、湾内外の Chl. *a* 濃度の交換が発生し、一度は濃度が下がるが、同様に湾外から密度貫入により多量に栄養塩類が流入する。よって、貫入により Chl. *a* 濃度が減少した際に、 F_n は逆に大きく増加している。したがって、貫入が発生しても再び Chl. *a* は増加する。ゆえに、親潮接岸時の密度貫入は、Chl. *a* 増加の方向に働く可能性がある。

5. 結 論

本論において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2004年の春~秋の調査により、大船渡湾外の栄養塩類濃度は季節によって異なることがわかった。この原因として、低気圧の通過により親潮が南下し、親潮由来の栄養塩を含んだ湾外水の影響であることが示唆さ

れた。

- (2) 光環境の面から検討した結果、2004年8月においては、最適増殖深度は6~7mであり、補償深度も平均22mであった。したがって、表層のみでなく、中層においてもChl. *a*が増殖可能であることがわかる。よって、特に中層への密度貫入によるChl. *a*濃度の変動も起こりうる。
- (3) 2004年8月において、大船渡湾内中層において、密度貫入によるChl. *a*濃度の変動を確認した。また、貫入を想定しない場合においても、植物プランクトンは増殖を続ける一方ではなく、栄養塩類の消費により頭打ちになる。また、密度貫入を考慮した場合では、考慮しない場合と比較して、 F_n が高く算出された。このことは、密度貫入が場合によっては植物プランクトンの増加に働くことを示している。
- (4) 親潮が南下した場合を考慮して解析を行った結果においても、密度貫入によるChl. *a*濃度の急変現象の発生が確認できた。しかし、一時的にChl. *a*濃度は減少するものの、再び上昇を続けることが確認された。ゆえに、密度貫入が発生しやすい成層期においては、河川からの流量だけでなく、親潮の流況も併せて観測することが、湾内の赤潮予測等、植物プランクトンの発生状況を予測する上で重要である。
- 今後は、これらの影響を踏まえつつ、親潮の南下による短期的な栄養塩類の変動を考慮にいたした水質モデルの構築が必要である。また、海水交換率の変化にも重点をおき、急潮など、海水交換率が短期的に激変した場合に湾内の一次生産力がどう変化するかについての検討が必要である。これについては今後の課題としたい。

(日本大学工学部)：研究課題「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究(研究代表：小野沢元久)」の一環として実施した。また、科学研究費補助金基盤A(代表：澤本正樹)の援助を受けた。盛川流量は岩手県大船渡地方振興局土木部鷹生ダム建設事務所より賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史(2000)：大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価，港湾技術研究所報告，第39巻，2号，pp. 73-98。
- 片岡真二・田中昌宏・小林英一・小島 洋・Marinus Bokhorst (1998)：大船渡湾における流況・水質の現状再現と養殖カキの役割について，海岸工学論文集，第45巻，pp. 1006-1010。
- 片岡真二・田中昌宏・小林英一・小島 洋(1999)：数値シミュレーションによる閉鎖性湾の浄化対策の検討—大船渡湾を対象として—，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1106-1110。
- 豊田政史・日比野忠史・細川恭史・鶴谷広一(1999)：大船渡湾における窒素・リン分布の季節変動特性，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1061-1065。
- 永田 豊(1982)：湾内水温の急変現象と外洋条件，沿岸海洋研究ノート，19(2)巻，pp. 103-111。
- 日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一(1999)：海面水位の変動が内湾域への水環境に及ぼす影響—大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構—，港湾技術研究所報告，第38巻，3号，pp. 91-124。
- 藤原建紀・山尾 理・高橋鉄哉・笠井亮秀・杉山陽一・原田一利(1999)：一次生産量の時空間分布の算定手法，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1211-1215。
- 細田 尚・細見知彦(2002)：琵琶湖北湖の水質鉛直分布の季節変化に関する簡易モデルと温暖化の影響への適用，河川技術論文集，第8巻，pp. 495-500。
- Lalli, C. M. and T. R. Parsons(2005)：生物海洋学入門第2版，講談社サイエンティフィク，p. 15。

謝辞：本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業