解説・総説

MOS MESSR による南極海水の特徴

石田 邦光¹⁾, 大島慶一郎²⁾

要 旨

衛星リモートセンシングデータの中で、多くのデータ蓄積があるにもかかわらず、利用されずにいるデータの一つが MOS データである。3つの異なったセンサによる同時観測という優れた特性を有しながら、取得されたデータが広く研究に利用されることはなかった。しかしながら、雪氷研究においては、観測対象域が極域に多くあることから、少ないながらも利用されてきたといえる。特に、南極域においては、昭和基地において精力的に受信されたことから、貴重なデータを数多く得ることができた。MOS の一つのセンサである MESSR によって観測された範囲は昭和基地沖周辺に限られるが、これらの画像からは、南極季節海水域のさまざまな特徴を知ることができる。a) 定着氷から氷縁に向かって氷野内の海水分布構造がいくつかの特徴的な領域に分類できること。b) 沿岸ポリニヤの定常的な出現やポリニヤ内における海水移動の特徴を知ること。c) 氷縁だけでなく氷縁内部まで形成されるアイス・バンド構造を理解できることなどである。ここでは、これらの研究成果を紹介することで、MOS MESSR データの海水観測における有効性を示した。

キーワード：可視近赤外放射計，南極海，沿岸ポリニヤ，アイス・バンド

Key words: MESSR, Antarctic Ocean, coastal polynya, Ice band

1. はじめに

日本の海洋観測衛星 MOS (Marine Observation Satellite) は、3つの異なるセンサを搭載し、これらのセンサで同一地域を同時に観測できることが最大の特徴であった。このため、海水や大陸氷の研究においても非常に有効であると期待された。しかし、残念ながら、海水を含め、海洋を対象とした MOS データによる研究は少なく、南極域を対象とした研究においても、MOS を利用したものは数えるほどしかない。

しかしながら、MOS によって得られた莫大なデータは、今後の海水研究においても貴重であり、大いに活用できるものである。そこで本報では、MOS データの一つである MESSR (Multi-spectral Electronic Self Scanning Radiometer:

可視近赤外放射計) に焦点を当て、南極の海水観測におけるその有効性を示す。第2章では MOS および MESSR の概要と昭和基地での受信およびデータ保存の状況を示す。そして、第3章でこれまでの主な海水研究例を紹介し、第4章でこれまでに得られてきた南極海における海水野の形状的な特徴を述べる。

2. 海水観測における MESSR データの取得状況

MOS は我が国初の地球観測衛星で、MOS-1 が 1987 年 2 月 18 日に打ち上げられ、1995 年 11 月 29 日に運用を停止した。その後継機である MOS-1b は 1990 年 2 月 7 日に打ち上げられ、1996 年 4 月 14 日に運用を停止した。MOS-1 は、地球観測の基本技術確立を目指し、主にセンサの機能と性能を確認することが目的であったが、MOS-1b は観測データの収集を主な目的とした。両者は設計寿命 (2 年) を大幅に更新して、海洋を中心とする

1) 鳥羽商船高等専門学校

〒517-8501 鳥羽市池上町 1-1

2) 北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

地球観測に従事した。その軌道は両者とも太陽同期準回帰軌道(高度 909 km, 周期 103.2 分)で、回帰周期は 17 日である。搭載していたセンサは両者とも同じで、先に紹介した MESSR のほかに以下の 2 つのセンサを搭載していた。また表 1 に各センサの主な性能を示す。

- ・VTIR (Visible and Thermal Infrared Radiometer: 可視熱赤外放射計)
- ・MSR (Microwave Scanning Radiometer: マイクロ波放射計)

南極昭和基地における MOS データの受信については, Yamanouchi *et al.* (1991) 及び神沢 (1993) で報告されている。MOS-1 のデータ受信は 1989 年 2 月から開始された。ただし, 1990 年 11 月からは主に MOS-1b を受信した。MESSR は可視近

赤外センサであることから、原則として夏半年はほぼ毎日 1 パス、冬半年は 3 日に 1 パスが受信された。また、MOS の回帰日数が 17 日であることから昭和基地では原則としてパス 54 から 70 までを順番に繰り返し受信した。なお、1 パスで約 60 シーンの画像が得られている (図 1)。

海水観測に利用できるシーン数は、1989 年 2 月から 1996 年 3 月までで、約 1000 パス、約 4500 シーンである。4 月中旬から 8 月中旬までは、太陽高度の関係から可視チャンネルが利用できないために、取得データはない。月及び年別のシーンを図 2 に示す。年別では 1992 年と 1995 年が少なく、1991 年も 11 月を除くと少なくなっている。月別に見ると、9 月から 12 月にかけて多くのデータが利用可能である。

受信された MESSR データについては、受信時に QL (Quick Look) 画像が写真に撮られており、そのネガフィルムが国立極地研究所に保管されている。本研究で使用した画像も、基本的にはそのネガをプリントしたものである。また、現在では、NASDA (現 JAXA) においてコンピュータ処理されたデータも数多くあり、同研究所の極域情報基盤センターに保管されている。

表 1 MOS 搭載センサの主要諸元

センサ名	波長域／周波数	空間分解能	観測幅
MESSR	0.51～0.59 μ m	50m	100km×2
	0.61～0.69		
	0.72～0.80		
	0.80～1.10		
VTIR	0.5～0.7 μ m	0.9km	1,500km
	6～7	2.7km	
	10.5～11.5		
	11.5～12.5		
MSR	23.8 GHz	31km	317km
	31.4 GHz	23km

図 1 観測範囲。MOS-1 のディセンディング軌道とパスおよびロウを示している。シェイドをかけた領域が昭和基地で受信された範囲 (パス: 54-70) である。シェイドのかかった四角は図 14 で示した沿岸ポリニアの位置である。左上に南極における位置を示した。

図 2 1989 年 3 月～1996 年 3 月までの海水を観測できるシーン数。

3. 南極を対象とした海水研究における MESSR の利用

MESSR は、その分解能の高さから、砕氷船「しらせ」の航海において、大利根水路等のリードや開水面の観測に威力を発揮してきた（渡辺ら、1996）。一方、利用された主な研究を以下に概観する。

長ら（1990）や Nishio *et al.*（1993）は、MESSR と TM を組み合わせて白瀬水河の変動観測を行い、南極における海水や陸水の変動を定量的に議論する上で、MESSR が貴重なデータであることを示した。

高橋ら（1995）は、SAR 画像の雪氷研究への応用を議論する中で、MESSR 画像との複合解析が有効

な手段であることを示した。特に、海水のタイドクラックの様子や氷床上の裸氷やモレーン周辺の様子を詳しく観測する上で有効であることを示した。

Ushio *et al.*（1999）は、MESSR によるブライド湾の画像を示し、そこに形成される沿岸ポリニヤの観測において、その詳細な氷状を調べる上で貴重であることを示した。

石田ら（1996a, 1997a）は、南極昭和基地周辺における南極海水検知における MESSR の有効性を示した。石田ら（1997b）と石田・大島（1998）は、昭和基地沖における沿岸ポリニヤの特徴を MESSR によって示した。そして、石田ら（1996b, 1997c）、Ishida *et al.*（1999）、石田・大島（2004）では、南

図 3 1989 年 12 月 5 日～12 月 11 日 (パス 56E～62E) のモザイク (Ishida *et al.*, 1999).

極季節海水域において頻繁に出現するアイス・バンドの特徴を MESSR によって明らかにしてきた。次章では、これらの研究成果を中心に紹介する。

4. MESSR による南極海水の観測研究

4.1 海水野の構造

図 3 は、1989 年 12 月 5-11 日、Path 56E-62E の 51 シーンによるコンポジット画像である (Ishida *et al.*, 1999)。このように雲の影響が少なく、連日観測されることは少ないが、観測できた場合は海水野内の状態を詳細に知ることができる。氷野の構造は、定着氷から氷縁に至るまで、幾つの特徴的な構造を持っていることが分かる。定着氷から、1) 沿岸ポリニヤ域 A, 2) いろいろなスケールの氷盤を含んだ氷盤域 B, 3) クラックが多く見られる密接度の高い領域 C, 4) クラックから虫食い模様の領域 D, 5) アイス・バンド E といった構造になっている。場所や時期によって、3), 4) の構造がない場合があるが、一般的にはこうした構造を持っていると考えられる。また、アイス・バンドは全季節を通じて広範囲に見られるものである。

図 4 は、同時期に撮られた NOAA AVHRR 画像 (1989 年 12 月 10 日, Ch. 2, 分解能 2.2 km) である。氷野内の構造はコントラストが弱く、MESSR 画像で見られた領域 C や領域 D の構造

を識別することはできない。また、氷縁の綿毛のように見えるものがアイス・バンドであるが、NOAA 画像ではその分解能からいって、これらの特徴を調べることは難しく、分解能の高い MESSR が有効である (Ishida *et al.*, 1999)。

図 4 1989 年 12 月 10 日に昭和基地で受信された NOAA AVHRR 可視画像 (北海道大学深町博士提供)。線で囲んだ部分が図 3 で示した MESSR モザイクに相当する (Ishida *et al.*, 1999)。

図 5 1990 年から 1992 年における融解期のプリンスオラフ海岸沖に出現する開水面。

4.2 沿岸ポリニヤの特徴

4.2.1 融解期における規則的な開水面の出現

図5は融解期にあたる1990年2月15日, 1991年2月16・17日および1992年1月23日のプリンスオラフ海岸沖の画像である。ほぼ同じ季節に撮られた画像で, 開水面の位置に類似点があることが分かる。そこで, これらの開水面の位置と等深線を重ね合わせて示したものが図6である。各年の開水面の位置はほぼ一致し, さらに海底地形が谷状になっている場所と良い一致を示している

ことが分かる。このことから, これらの定常的な開水面の形成要因の一つとして海底地形の影響が示唆される(石田・大島, 1998)。

4.2.2 沿岸ポリニヤ内およびその周辺の海水移動

昭和基地で受信されたMESSR画像の場合, 隣のパスと約50kmのオーバーラップがある。これを利用することで, 1日における海水の移動を測定することができる。そこで, 連日観測できたポリニヤの画像を検索し, それらからポリニヤ内およびその周辺における海水の移動を調べた(石田・大島,

図6 プリンスオラフ海岸沖の等深線と開水面の位置。等深線は200m間隔で描いてある。

図 7 沿岸ポリニヤ内およびその周辺における海水移動の検出例。氷盤群が密接度の高い場合。

1998)。

図 7 は、氷盤群が密接度の高い場合で、各氷盤の移動できる自由度は低い。このため、検出できたベクトルはこの領域における氷野全体の動きをある程度代表していると考えられる。

図 8 は、開水面が大きく、ポリニヤ内の海水移動にとっては自由度の高い状況にある。こうした状況下では周辺にある氷野の移動速度に比べて約 2 倍程度の大きさになっていた。なお、ここに示

図 8 沿岸ポリニヤ内およびその周辺における海水移動の検出例。開水面が大きい場合。1991 年 9 月 24, 25 日 (パス 59W, 60W)。

図 9 沿岸ポリニヤ内およびその周辺における海水移動の検出例。開水面が大きい場合。1990 年 11 月 22, 23 日 (パス 59W, 60W)。

した沿岸ポリニヤ内の海水の動きは、Ohshima *et al.* (1996) が指摘するところの西向きの沿岸流をトレースしていることが示唆される。

図 9 は、ポリニヤ内の流水側氷縁が波打っている形状の場合の例である。ポリニヤ内の海水を除いて、移動速度は小さく移動方向はランダムであ

る. これらのベクトルはポリニヤ内の流水側氷縁に形成される流水の渦や波動を表出しているものと考えられる.

図 10 は, 流水域が大きく後退しているときの例である. 沖の氷縁にはアイス・バンドが形成されている. アイス・バンドは基本的に沖出しの風によってできることから, 海水の北方 (沖) への移動は, 風による効果が大きいことが推測できる.

なお, 昭和基地における風のデータと各ケースの関係を検証したが, 対応は見られなかった.

4. 2. 3 沿岸ポリニヤ形成位置の特徴

図 11 にマラジョージナヤ基地沖における 1990 年から 1992 年における同時期の画像を示す. 毎年ほぼ同じ位置に沿岸ポリニヤが形成され, なおかつ, 定着氷側は同じような形で破碎していることが分かった. そこで, この海域を明瞭に捉えた他の画像についても調べたところ, やはり同様の結果を得た (図 12). さらに, 定着氷の氷縁位置がほぼ 1000m 等深線に一致していることが分かった (石田・大島, 1998).

4. 2. 4 沿岸ポリニヤ内のアイス・ストリーマ

Ishida *et al.* (1999) では, MESSR によって沿岸ポリニヤ内に観測されたアイス・ストリーマに

図 10 沿岸ポリニヤ内およびその周辺における海水移動の検出例. 流水域が大きく後退した時期, 1992 年 3 月 13-15 日 (パス 60W-62W).

図 11 マラジョージナヤ基地沖に定常的にできる沿岸ポリニヤ例. いずれもパス 59E.

図 12 マラジョージナヤ基地沖に定常的に形成される沿岸ポリニヤの水縁位置と等深線。

ついてその特徴を詳述している。

ブライド湾は、NOAA 画像によっても観測されており、その形成と維持機構は Ishikawa *et al.* (1996) によって議論されている。図 13 は MESSR によって観測されたもので、NOAA では検知できない詳細な様子を知ることができる (石田ら, 1997a, 1997b, 1997c)。

図 14 (a) は、海氷が生成し始める時期におけるブライド湾の画像である。西に流れる筋状のもの (これをアイス・ストリーマと呼ぶ) が見られ、その幅は 0.4–1.6 km, 筋同士の間隔は 0.8–1.81 km で平行に何本もできていている。このアイス・ストリーマの方向は基本的には風によって決まるものと考えられる。しかしながら、アイス・ストリーマは沖に行くほど西偏している。これは、この場所のローカルな風の場がそうになっているのかもしれないが、湾の沖にある西向きの海洋の流れ (Ohshima *et al.*, 1996; 宮川・大島, 1997) を反映

している可能性が示唆される。

図 14 (b) は、1989 年 10 月 30 日の定着氷に沿ってできたポリニヤの画像である。場所はおおよそ 66°S, 57°E の付近で、ブースビー岬の西側沖に相当する。ポリニヤの幅は 6–10 km である。ここに見られるアイス・ストリーマは、幅が 0.1–0.8 km, 筋同士の間隔が 0.9–2.7 km である。

これらの画像に見られるような定着氷の水縁形状の形成には、図 15 に示すような過程を推測することができる。本来、水縁形状が滑らかでないところの東側の辺に沿って徐々に新成氷が押し寄せられていき、それが西向きの風ないし海洋の流れによって辺の先端部分に寄せられていく。やがて先端部分からポリニヤへ流出していく。こうした過程によって、尖った水縁の先端がやや西向きに偏った形となる。

こうした現象は、夏季以外でも見ることができ、それらについても計測したところ、アイス・スト

図 13 ブライド湾の画像例.

図 14 沿岸ポリニヤ内におけるアイスストリーマの様子.
図 1 にこれらの画像の位置を示した (Ishida *et al.*, 1999).

図 15 定着氷の鋭い氷縁形状が形成される過程
(Ishida *et al.*, 1999).

リーマの平均的な幅は 0.1-1.0 km, 筋同士の間隔は 0.5-1.8 km であった。一方, 牛尾ら (1993) によって, 昭和基地沖のポリニャでは風の方向に沿って数 10 m のスケールでフラジルアイスの列が観測されており, これは Martin (1981) が指摘したラングミュアー循環によるものと考えられている。MESSR の分解能は航空機観測に劣ることから, 必然的に検知されるスケールがラングミュアー循環より 1~2 オーダー大きくなったことは十分に考えられる。従って, この現象をラングミュアー循環が組織化されたものとも考えることもできるが, deep-reaching convection (Kämpf and Backhaus, 1998) に伴うブルームによって生じた現象と考えることも可能である。いずれにせよ, 詳しく説明するために現場観測が必要である。

4.3 アイス・バンド構造

アイス・バンドは, 南極海に限らず, 季節海水域の水縁に見られる現象の一つである。アイス・バンドに関する研究の多くはベーリング海におけるもので, その典型的なサイズは長さが 10 km, 幅が 1 km とされる。現在, アイス・バンドの明確な定義はないが, ここでは図 3 の領域 E に示す

ような, 氷縁域に形成されるバンド状の海水が平行に並んだ構造 (数 m~20 m 程度の大きさの氷盤が集まって一つの带状の集団を作り, それらがある間隔の開水面を伴って規則的に連なった構造) を指している。また, アイス・バンドの形成機構についてもいくつか提案されている。しかしながら, 南極海におけるアイス・バンド構造については, 研究事例がほとんどなく, ここでは MESSR 画像を使って解析したアイス・バンド構造の特徴 (Ishida *et al.*, 1999) を述べる。

図 16 は 1990 年の 8 月末から 12 月末までのアイス・バンドが鮮明に捉えられている画像例を示している。そこで, この期間におけるアイス・バンドについて, 鮮明に捉えられている画像を使ってバンド幅とバンド間隔および氷縁からの分布距離を計測した。なお, バンド間隔とは, あるバンド幅の中心と隣のバンド幅の中心を結んだ距離である。その結果を表 2 に示す。この表から, 南極においては 8 月から 12 月にかけてバンド幅およびバンド間隔が徐々に小さくなっていることがわかる。こうしたスケール現象の季節変化は, 他年についても同様の結果を得ている。また, 図 17 に

図 16 1990 年 8 月~12 月におけるアイス・バンドの画像例。Ishida *et al.* (1999) の Fig. 5 を改変。

表 2 1990 年 8 月～12 月のアイス・バンドの特徴

月 日	8/29	10/13	11/2	11/8	11/22	12/2	12/16	12/26
バンド幅 [km]	2.3-8.0	1.0-6.0	0.7-4.5	0.4-4.5	0.4-3.0	0.4-3.0	0.3-1.6	0.2-0.6
バンド間隔 [km]	10-15	2-13	2-9	2-15	2-10	1-8	1-6	-
バンド域 [km]	-	150~	300~	310~	120~	200~	270~	130~

図 17 1990 年 8 月～1991 年 4 月までに、アイス・バンドを捉えた MESSR シーン的位置。氷縁位置はコロラド大学の雪氷データ・センターから CD-ROM で提供を受けている SSM/I データから NASA チーム・アルゴリズムによって求めた海水氷密度 15% の位置とした (Ishida *et al.*, 1999)。

示すように、その分布域は、基本的には氷縁から海水野内部に広がっており、その緯度方向への広がり数は 100 km にも及んでいることが分かった。従来、海水のバンド構造は氷縁付近だけに形成されるものと考えられていたが、南極ではかなり内部までその形成域が広がっており、このことが他の海域との構造的大きな違いである。

5. まとめ

MESSR データの利用状況を示すとともに、観測事例として、昭和基地沖の季節海水域における海水分布の特徴を中心に報告した。

沿岸ポリニヤについては、SAR 画像を併用することでさらに詳細な解析が可能であると考えている。また、アイス・バンドスケール変動や分布

の特徴については、風との関係においてある程度説明できることが分かってきた (石田・大島, 2004)。

また、MESSR の分解能を前提とした氷盤のスケール分布特性や現場観測から得られた氷盤スケールデータと本稿で示した現象の関係を明らかにしていくことが、今後の課題である。

謝 辞

本研究の多くは、北海道大学低温科学研究所および国立極地研究所との共同研究による成果であり、関係諸氏に感謝いたします。また、本稿の執筆を薦めていただき、適切なご助言を頂いた日本雪氷学会衛星観測分科会幹事の皆様に感謝の意を表します。

使用した MESSR 画像は、国立極地研究所に保存されている Q/L 画像を使わせていただきました。図 4 は、北海道大学低温科学研究所の深町康博士から提供して頂きました。ここに、記して感謝いたします。また、Ishida *et al* (1999) は、著作権が日本海洋学会にあることから、図 3, 4, 14, 15, 16, 17 は当学会より転載許諾を受けて掲載させて頂きました。

文 献

- 長 幸平・武田 要・西尾文彦・山内 恭, 1990: MOS-1 データによる海水、大陸水のリモートセンシング。日本リモートセンシング学会誌, **10** (4), 93-99.
- 石田邦光・大島慶一郎, 1998: MOS-1/1b MESSR 画像による南極昭和基地沖の沿岸ポリニャ観測 (1989.2-1993.1)。第 13 回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム講演要旨集, 129-135.
- 石田邦光・大島慶一郎, 2004: 南極海における Ice Band の特徴と大気場との関係。2004 年日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 175.
- 石田邦光・大島慶一郎・山内 恭, 1996a: MOS-1/1b・MESSR による南極昭和基地周辺の海水について—海水検知の可能性を中心に—。第 11 回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム講演要旨集, 122-127.
- 石田邦光・大島慶一郎・山内 恭, 1996b: 衛星画像による昭和基地沖の Ice Band の検知 (1)。1996 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 88.
- 石田邦光・大島慶一郎・山内 恭・神沢 博, 1997a: MOS-1/1b MESSR に見られる南極海水の特徴—1。日本リモートセンシング学会 第 22 回学術講演会論文集, 241-244.
- 石田邦光・大島慶一郎・山内 恭・神沢 博, 1997b: 衛星画像による昭和基地沖の沿岸ポリニャの特徴 (1)。1997 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 34.
- 石田邦光・大島慶一郎・山内 恭・神沢 博, 1997c: MOS-1/1b MESSR に見られる南極海水の特徴—Ice Bands と Coastal Polynya の例—。1997 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 51.
- Ishida, K., Ohshima, K.I., Yamanouchi, T. and Kanzawa, H., 1999: MOS-1/1b MESSR observations of the Antarctic sea ice: Ice bands and ice streams. *Journal of Oceanography*, **55**, 417-426.
- Ishikawa, T., Ukita, J., Ohshima, K.I., Wakatsuchi, M., Yamanouchi, T. and Ono N., 1996: Coastal polynyas off East Queen Maud Land observed from NOAA AVHRR data. *Journal of Oceanography*, **52**, 389-398.
- Kämpf, J. and Backhaus, J.O., 1998: Shallow, brine-driven free convection in polar oceans: Nonhydrostatic numerical process studies. *J. Geophys. Res.*, **103**, 5577-5594.
- 神沢 博, 1993: 衛星と地上・無人観測比較による極域大気・雪氷圏解析に関する研究小集会報告。南極資料, **37**, 196-204.
- Martin, S., 1981: Frazil ice in rivers and oceans. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 379-397.
- 宮川卓也・大島慶一郎, 1997: 南極クイーンモードランド沖の海水の漂流特性。南極資料, **41**, 347-354.
- Nishio, F., Cho, K., Seko, K. and Takahashi, S., 1993: Disintegrating ice front of Shirase Glacier, East Antarctica. *Proc. of Int. Symp. on ISY Polar Ice Extent*, NASDA, 105-114.
- Ohshima, K.I., Takizawa T., Ushio S. and Kawamura T., 1996: Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lutzow-Holm Bay. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20617-20628.
- 高橋 晃・藤井理行・長 幸平・西尾文彦・古川晶雄・渡辺興亜, 1995: 南極域における合成開口レーダー (SAR) 画像の雪氷研究への応用。南極資料, **39**, 205-232.
- 牛尾収輝・瀧澤隆俊・大島慶一郎・河村俊行, 1993: 昭和基地沖に形成される沿岸ポリニャの水温構造。南極資料, **37**, 252-259.
- Ushio, S., Takizawa, T., Ohshima, K.I. and Kawamura, T., 1999: Ice production and deep-water entrainment in shelf break polynya off Enderby Land, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **104**, 29771-29780.
- 渡辺研太郎・斎藤隆志・白岩孝行・横山宏太郎, 1996: 昭和基地での MOS-1/MESSR QL 画像による海水のモニタリング。第 11 回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム講演要旨集, 120-121.
- Yamanouchi, T., Kanzawa H., Ariyoshi H. and Ejiri, M., 1991: Report on the first MOS-1 data received at Syowa Station, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **4**, 22-30.

Some features of the Antarctic sea ice observed in MOS MESSR imagery

Kunimitsu ISHIDA¹⁾, Kay I. OHSHIMA²⁾

1) Toba National College of Maritime Technology,

1-1, Ikegami-cho, Toba-shi, Mie 517-8501

2) The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,

Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819

(2006 年 6 月 29 日受付, 2006 年 10 月 10 日受理)