



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	宗谷暖流域におけるサブメソスケール波動に関する研究 I : 実態の把握
Author(s)	大島, 慶一郎; OHSHIMA, Keiichirou
Citation	低温科学. 物理篇, 47, 117-129
Issue Date	1989-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18569
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p117-129.pdf



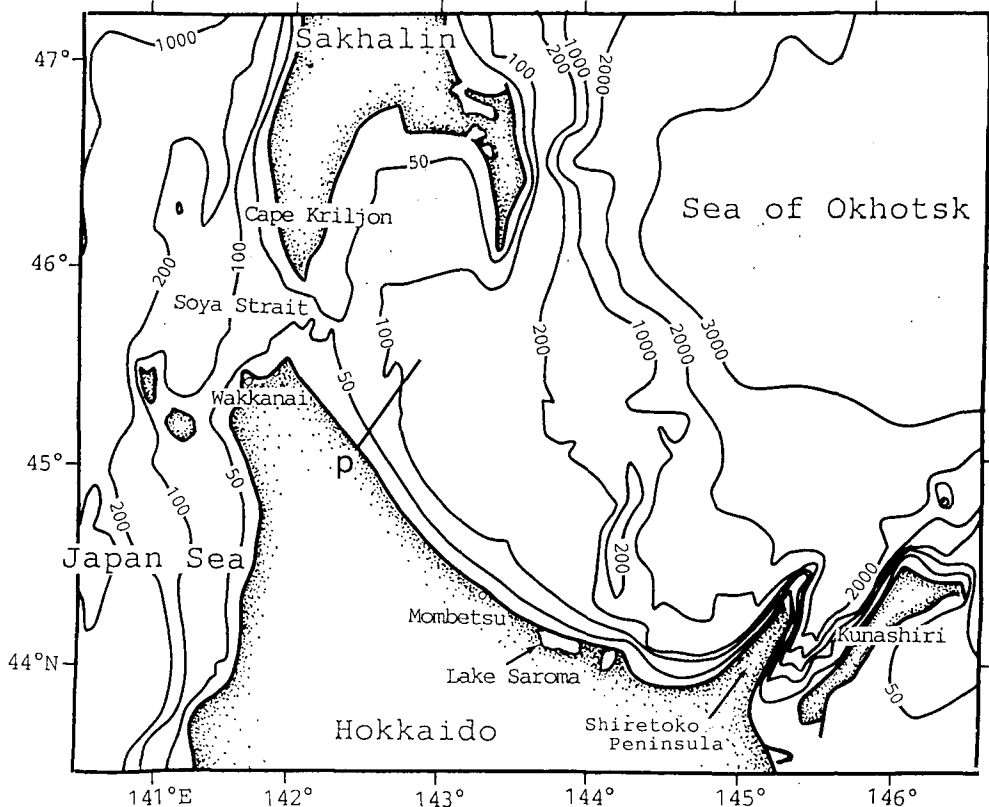
宗谷暖流におけるサブメソスケール 波動に関する研究 I*

— 実態の把握 —

大島 慶一郎
(低温科学研究所)
(昭和63年11月受理)

I. はじめに

近年、人工衛星からの熱赤外線画像 (IR) によって海面の温度分布等がわかるようになり、海洋中のさまざまなスケールの波動や渦を捉えることができるようになった。従来よ



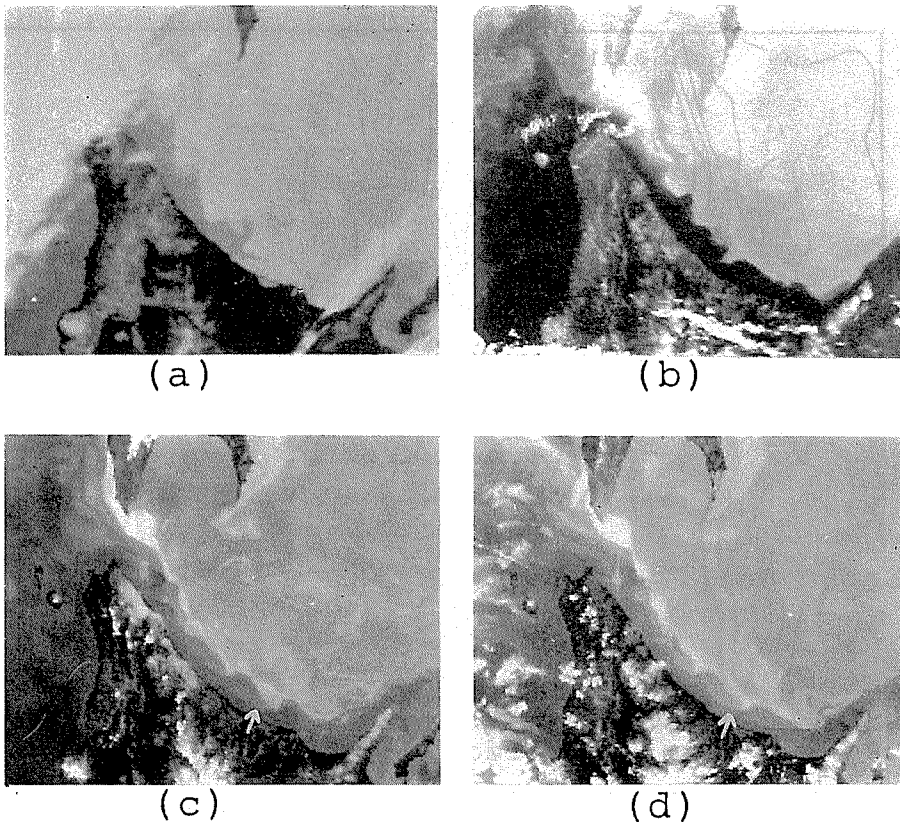
第1図 オホーツク海南西部の海底地形図。等値線に付した数値は水深 (m) を表わす

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3184号

り、数百 km のスケール (メソスケール: mesoscale) の現象, 例えば海洋中規模渦 (mesoscale eddy) などについては, 多く研究されているが, 最近になって, メソスケールよりさらに小さい数十 km のスケール (サブメソスケール: submesoscale) の現象が IR 画像や海洋観測でしばしば見つかるようになってきた (McWilliam¹⁾, D'Asaro²⁾)。グリーンランド沖の氷縁域でよく観測される流水渦 (ice-ocean eddy) など同様のスケールをもつ現象である (Johannessen *et al.*³⁾)。

宗谷暖流域においても, IR 画像より暖流のフロントに数十 km のスケールの波動パターンがしばしば現れることが報告されている (JAMSTEC & IBM⁴⁾, Hatakeyama *et al.*⁵⁾)。さらに Sonu & Aota⁶⁾ は北大の流水レーダにより, 暖流のフロント域に流水渦が出現することを報告している。

このようなスケールの渦や波動がどのような機構で生じるのかは, 地球流体力学の視点からも最近の興味深いテーマの一つとなっている⁷⁾。ただし, これらの現象は各々局所的な海岸地形, 海底地形, あるいは成層場と密接に関連しているようであり, 一概して生成機構を論じることには無理がある。そこで典型的な例をもってして, その生成機構を調べることは意義深



第2図 宗谷暖流域における NOAA 熱赤外線画像 (日本気象協会製作)

(a) 1987年4月23日5時40分, (b) 1987年10月16日5時53分,
(c) 1986年9月15日4時51分, (d) 1986年9月16日4時40分

いと思われる。宗谷暖流域は非常にはっきりとした波列が現れるという点で非常によい研究対象域となりうる。

第1図にオホーツク海南西部の海底地形図を示した。日本海の水は宗谷海峡を通してオホーツク海に流れ込み、宗谷暖流として北海道沿岸に沿って流れる。宗谷暖流水はオホーツク海の水に比べ高温・高塩であるため、IR画像において、はっきりとしたフロントをつくる(第2図)。宗谷暖流が流れている海域は、第1図に見られるように海底地形が単純で岸沿い方向におおむね一様な構造となっている。このような状況は、観測と理論との比較研究領域としては絶好の場となっている。また、この海域に1月~4月に現れる流氷も、海洋の流れを可視化するトレーサーと考えれば、観測するうえで大きな武器となりうる。

本研究の目的は、宗谷暖流域に現れるサブメソスケール波動の実態を把握し、その生成機構を解明することにある。まず本論文I.において、IR画像、流氷レーダ、測流データ等を用いて、この波動の実態の把握に努めた。論文II⁷⁾においては、その生成機構を数値モデルを用いて議論する。本論文の構成は以下のようになる。第II章で、IR画像より各季節ごとに宗谷暖流のフロントの特徴をまとめる。次に、波動パターンが顕著になる、春及び夏における波動の性質の特徴をそれぞれ第III章及び第IV章で述べる。第V章ではまとめと議論を行なう。

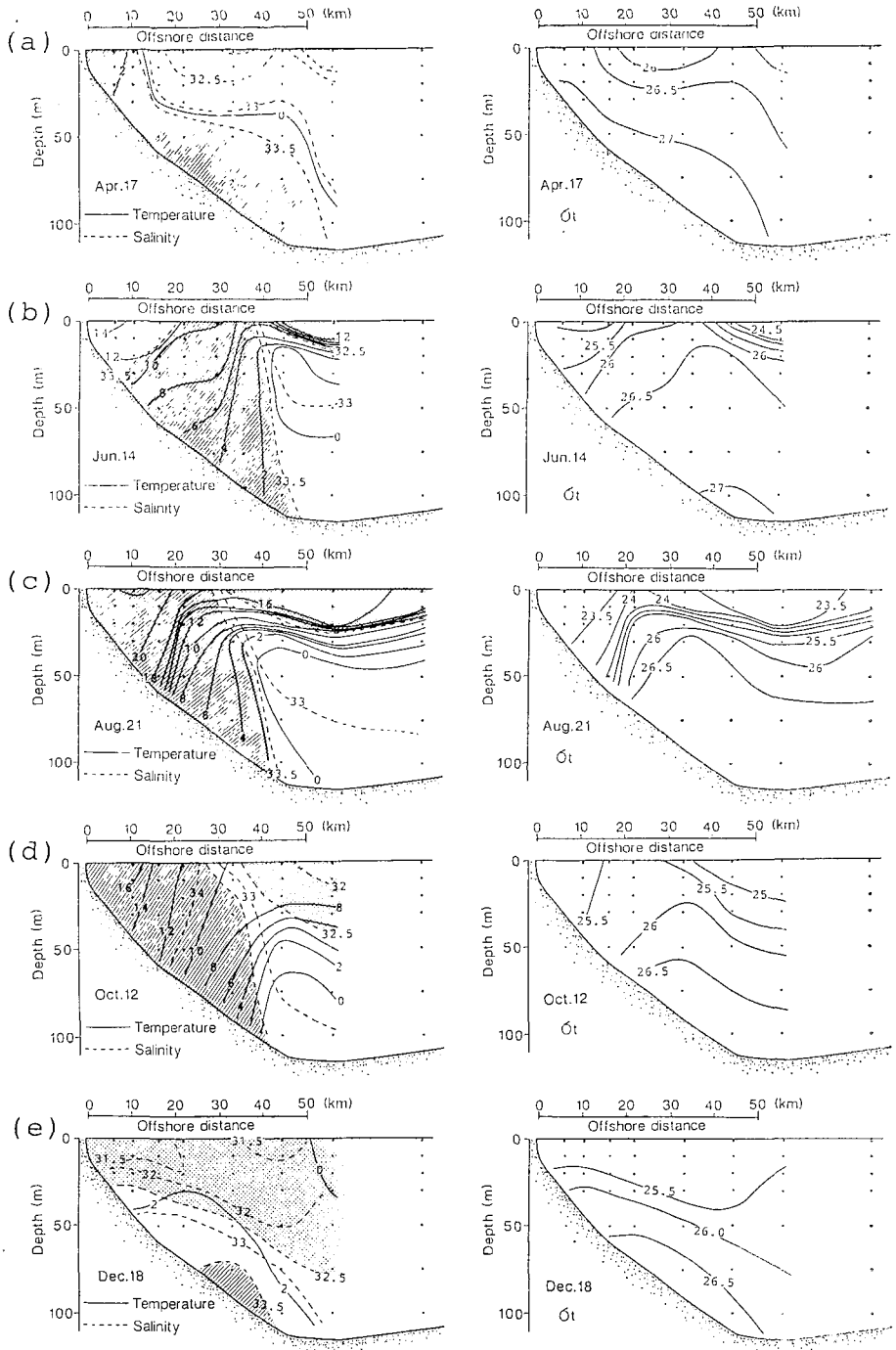
II. 季節ごとのフロントの様子

宗谷暖流域の季節変化に関しては、青田^{8,9)}、青田・河村¹⁰⁾、Takizawa¹¹⁾等によって詳しく調べられているが、以後の議論のために、この海域の季節別の海洋構造を示すことにする。第3図は、第1図のp線における温度・塩分・ σ_t の鉛直断面図で、1984年の、4, 6, 8, 10, 12月のものを示したものである。尚、この観測は北海道立稚内水産試験場によるものである¹²⁾。この海域の水塊は、宗谷暖流水、オホーツク表層水、中冷水のおおむね3つに分けることができる^{8,9,11,13)}。第3図では塩分33.5‰以上の水に斜線、32.5‰以下の水にドットを施したが、これらはそれぞれ宗谷暖流水、オホーツク表層水に相当し、その中間のものは中冷水と考えてよい。

本章では、各季節ごとのIR画像より、それぞれの季節による宗谷暖流のフロントの特徴をまとめる。IR画像は、気象協会製作のもので、1985年から1988年の4年間にとられたもののうち、雲がなくフロントがはっきり見えるもの87枚を用いた。第2図がその中の4枚で、4月、9月、10月のものを示している。これらの画像を見ると、すべてフロントに波動パターンを伴っているが、その形状はかなり異なっていることがわかる。そこで、画像をフロントの特徴の類似性から5つの期間に分け、それぞれの期間ごとのフロントの特徴を、特にその波動性に着目してみていくことにする。5つの期間とは、春(3月、4月及び5月前半)、初夏(5月後半、6月、7月)、夏(8月、9月)、秋(10月、11月)、そして冬(12月、1月、2月)で、それぞれ第3図の5つの観測時に対応する。

1. 春(3月、4月、5月前半)

第3図からわかるように、4月から10月までは宗谷暖流水が沿岸より40km程度まで占めているが、春の場合第3図(a)に示されるように、宗谷暖流水が中冷水より若干重いため、表



第3図 水温・塩分(左)と σ_t (右)の鉛直断面図

第1図のA線におけるものですべて1984年にとられた。(a)4月17日, (b)6月14日, (c)8月21日, (d)10月12日, (e)12月18日に, 北海道立稚内水産試験場によって行われた観測による。斜線は塩分33.5‰以上を示し, ドットは塩分32.5‰以下を示す

層に現れるフロントの位置は岸に近くなる。

第2図(a)の画像はこの時期に典型的なものである。非常にはっきりした後方砕波 (backward wave breaking) のパターンが流れが海峡を通り抜けた直後より発生している。この時期の24例の画像のうち、20例がほぼ同様な波動パターンを示していた。ここで波動という言葉は、パターンが少なくとも連続して2波以上続く場合に使うことにする。残る4例のうち3例は、波動にはなっていないが海峡付近では砕波を示す。尚、ほとんどの場合、砕波は2~4波程度しか続かず、サロマ湖より下流まで続くことはまれである。

以上のように、この時期は波動パターンが顕著にみられるときであり、詳しい解析は第III章で行なう。この時期は流水が訪れる時期でもあり、波動と流水との関連等についても第III章で触れる。

2. 初夏 (5月後半, 6月, 7月)

第3図(b)で示されるように、この時期は宗谷暖流水が昇温して中冷水より軽くなり、表層に現れるフロントは春に比べ沖の方へ移動する。この時期には、春に顕著であった後方砕波パターンは、春程ははっきりとはしなくなる。それでも21例のうち8例までが流れが海峡を抜けたあとには砕波を示していた。また、いくつかの画像は、次で示す夏に現れる波動パターンと同様なものが見られた。しかし、概してこの時期は、波動パターンは顕著に現れないようである。

3. 夏 (8月, 9月)

第3図(c)で示されるように、この時期には非常に成層が強くなる。第2図(c), (d)にこの時期に典型的な画像を示す。この時期には、17例のうち、10例がこのようにきれいな波動パターンを示していた。この時期の波動パターンは春のものとはその様子が大きく異なっている。砕波とは逆に、宗谷暖流水のフロントは前にのめったようなパターンになっている。ただし、第2図を注意深く見ると、宗谷暖流水の沖側にある冷水帯には後方砕波的なセンスのパターンがやや見られることがわかる。また、波動パターンは下流に行くに従ってよりはっきりしてくるように見える。そして、このパターンは知床半島に至るまで、ずっと続いている。この時期の波動の詳しい解析は第IV章で行なう。

4. 秋 (10月, 11月)

この時期は、第3図(d)に見られるように、まだ宗谷暖流水は中冷水より軽い、成層は夏に比べかなり弱くなっている。第2図(b)がこの時期に典型的な画像である。この時期の画像11例のうち、8例がほぼ同様なパターンを示す。すなわち、波長が夏のものより少し短いのが特徴で、平均すると34 kmになり、夏の2/3になっている。また、3例がフロントに砕波パターンを示していた。Hatakeyama *et al.*⁵⁾の画像もこの時期のもので、砕波パターンを示している例である。

5. 冬 (12月, 1月, 2月)

第3図(e)に見られるように、この時期、表層はオホーツク表層水に覆われ、宗谷暖流水はオホーツク海に入った直後に、オホーツク表層水及び中冷水の下にもぐってしまう。これは11月以降の東サハリン海流の強勢と関連があり、この時期のオホーツク表層水は東サハリン海

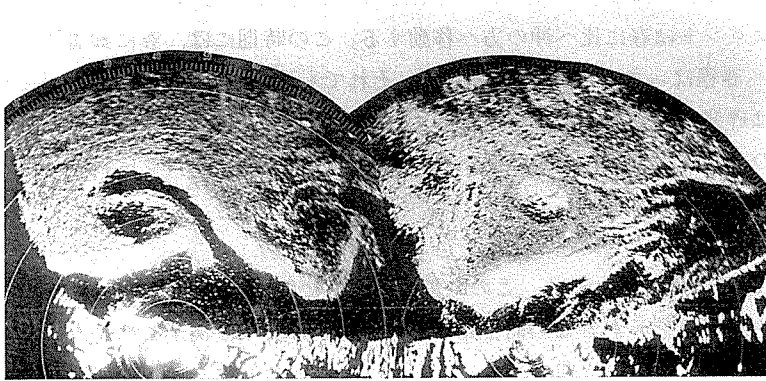
流によって運ばれたものと考えられる (Watanabe)¹⁴⁾。従ってこの水を東サハリン海流水と呼ぶ場合もある¹¹⁾。

IR 画像によると、表層では宗谷暖流水は海峡から北海道沿岸に沿う 50 km 程度までしか見られないが、14 例のうち 3 例が海峡付近で後方砕波らしきものを示していた。

III. 春季における波動

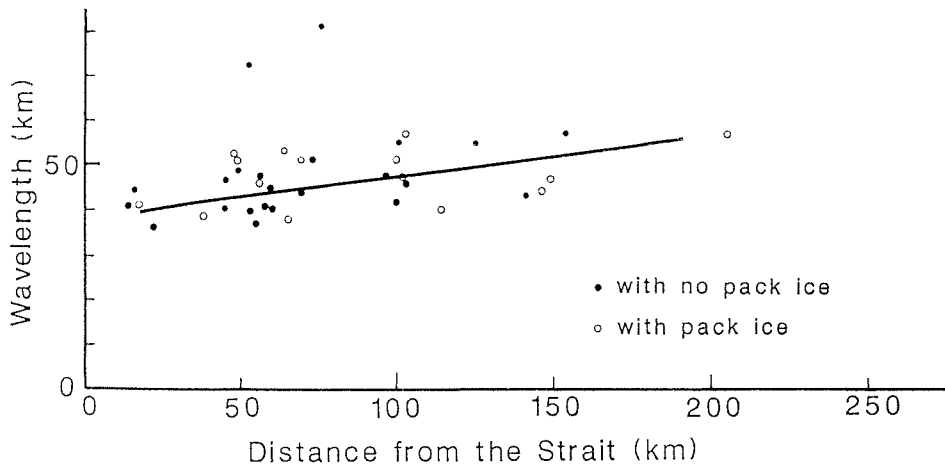
以上第 II 章で、波動パターンは春季と夏季において特に顕著に見られること、しかしその様子は季節によりかなり違うことがわかった。この章では春季の波動を、次章では夏季の波動について詳しく調べることにする。

第 2 図 (a) において春季に典型的な IR 画像を示したが、実はこの画像に見られるものと同様な砕波パターンは、本研究所流水研究施設の流水レーダーによっても、しばしば捉えられて



第 4 図 流水レーダーによる画像

1984 年 4 月 16 日 0 時に枝幸局及び紋別局において撮られたもの

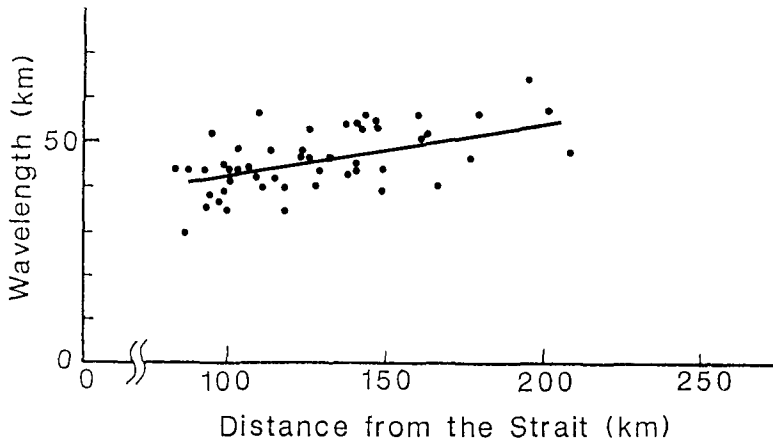


第 5 図 IR 画像より求めた、春季における波動の位置と波長の関係

波長は波の峰と峰の距離とした。波動の位置は峰と峰の中間点の海峡からの距離として示した。黒丸は流氷がない場合、白丸は流氷がある場合を示す

いることがわかった。第4図がその1例である。流氷を海洋のトレーサーと考えれば、流氷の挙動から多くのことを知れる可能性がある。そこで本節では、IR画像に加え、流氷レーダー画像も用いて、波動の実態を調べた。

まず波長特性を調べる。第5図は、波動パターンが出現した20例のIR画像をもとに、波動の位置とその波長の関係を示したものである。ここで、波の峰と峰の距離を波長として、その中間点の位置を海峡からの距離で示している。この図より、波長はおおよそ35~55 kmの範囲内にあり、平均すると45 km程度となることがわかる。また波長は下流に行くにつれ少し長くなる傾向がある。第6図は第5図と同様のものを、流氷レーダーによる流氷分布から示したものである。尚、この解析は低温科学資料集^{15,16)}より、35例をもとに調べたものである。IR画像のものとはほぼ同様な結果を得る。



第6図 流氷分布より求めた、波動の位置と波長の関係

次に、この波動が流氷の存在とどう関わっているのかを考察する。波動の見られた20例のIR画像のうち、13例が流氷が存在しないときで、7例が流氷が存在するときのもので、両者にはっきりとした違いは見られなかった。第5図において、黒丸は流氷がない場合、白丸は流氷がある場合を示しているが、波動の性質も両者に顕著な違いはなさそうである。従って、流氷がアクティブに海洋中の波動に関与するというよりは、海洋に対しパッシブなトレーサーとして働いていると考えられる。

次に波動の周期及び位相速度を調べる。そのためには時系列の画像が必要になる。北大流氷レーダーの画像は3時間ごとにフィルムとして保存されているので、この画像を用いて伝播特性を調べた。波動性が顕著である6例についてまとめたものが第1表である。この表によると、周期は、5.3日というものもあるがだいたい2~3日程度であることがわかる。

第1表 流氷レーダーより得られた波動の性質

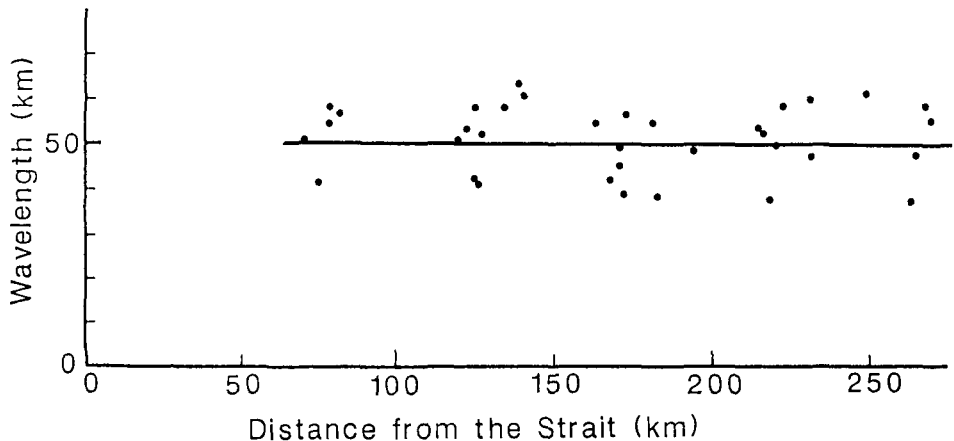
期 間	波 長 (km)	周 期 (日)	位相速度 (cm/s)
1978, 1/13~15	40	2.3	20
1979, 4/15~17	54	5.3	12
1979, 5/02~05	53	2.6	23
1982, 2/20~23	34	1.7	23
1984, 3/29~31	39	2.3	20
1984, 4/14~16	45	3.0	17

位相速度は 12 cm/sec というのを除けばほぼ 20 cm/sec 程度、波長は 40~50 km 程度である。

IV. 夏季における波動

この章では夏季における波動の性質を時系列の IR 画像及び係留による測流データより詳しく調べる。

まず、波長特性を波動が顕著に見られる 10 例の IR 画像より調べる。第 7 図は、第 5 図と同様に波動の位置と波長の関係を示したもので、この場合は谷と谷の距離を波長として示している。波動は春季の場合と違ってかなり下流まで伝播しているのが読みとれる。また、波長は 40~60 km の範囲で、平均 50 km 程度であること、下流にいても波長はあまり変化しないことなどがわかる。



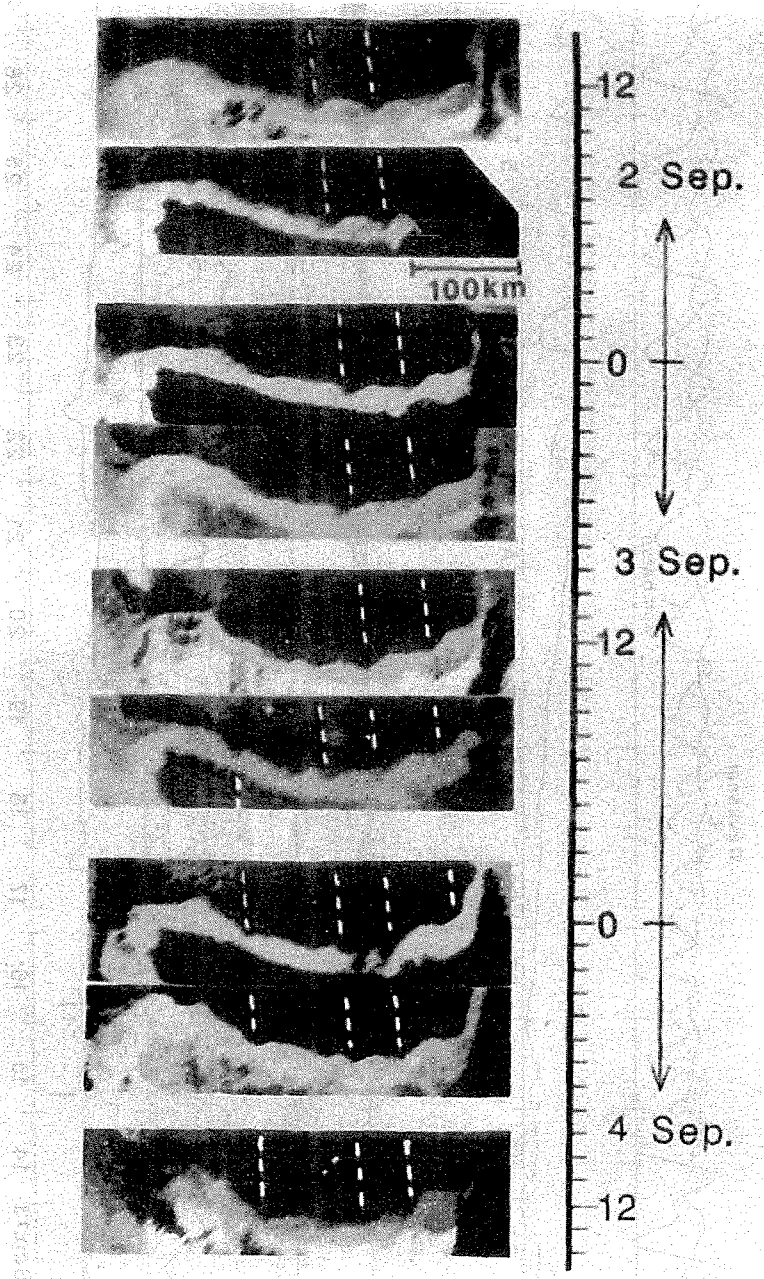
第 7 図 IR 画像より求めた、夏季における波動の位置と波長の関係
波長は波の谷と谷の距離

次に周期と位相速度を IR 画像の時系列を用いて調べた。第 8 図は 1987 年の 9 月 2 日から 9 月 4 日までの時系列である。これらの画像は、本研究所降雪物理学部門の NOAA 受信受画装置 (IBC 社製) により印画されたものである。波動パターンが下流方向に伝播しているのがわかる。この例では、波長、周期、位相速度がそれぞれ平均して 50 km, 1 日, 55 cm/sec となる。同様な解析を 1987 年の 9 月 22 日から 9 月 24 日についても行ったが、ほぼ同様な結果が得られた。

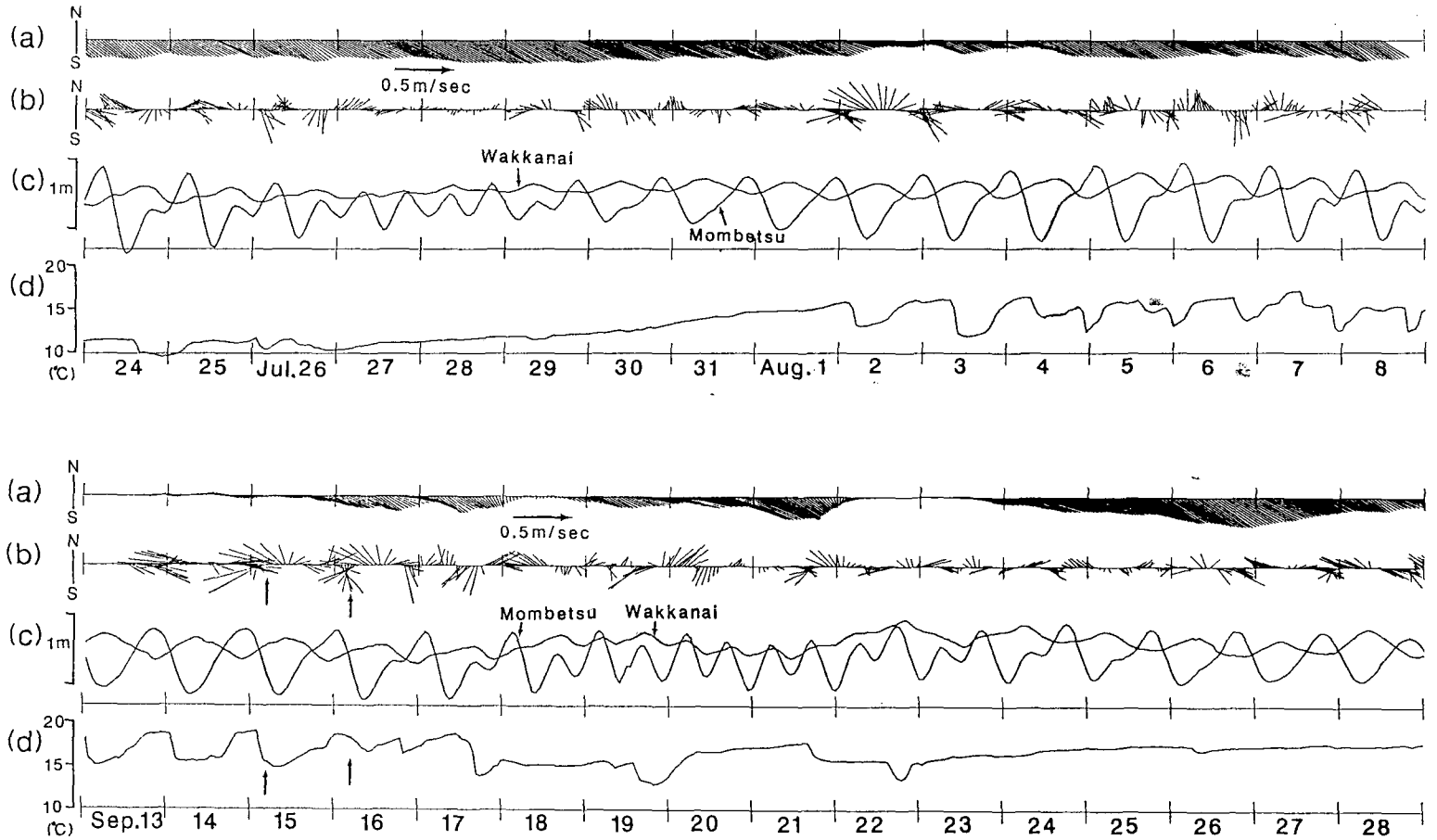
第 2 図の (c) 及び (d) は、1 日においてとられた画像であるが、ちょうどこの時に、第 2 図で矢印を示した地点でアンデーラ流速計による係留測流が行なわれていた。観測は、湧別漁業協同組合及び三洋水路測量株式会社によって行なわれた。第 9 図は 1986 年 7 月 24 日から 8 月 8 日までと、9 月 13 日から 9 月 28 日までの測流結果を示したものである。(a) は 25 時間移動平均した流速ベクトルのスティックダイアグラム、(b) はその残差である変動成分、(d) は水温、そして (c) に、紋別と稚内の沿岸潮位を示した。

この図をみると、8 月 2 日から 8 月 8 日、及び 9 月 13 日から 9 月 17 日の期間に、非常に特徴的な様子を示しているのがわかる。すなわち、流速ベクトルがほぼ 1 日周期で時計回りの

センスで回転し、それに伴って温度も大きな振幅で変動している。ちょうどこの時期(第9図で矢印を施した時刻)に第2図の画像がとられており、第9図にみられる水温の下降は、第2図(c)及び(d)において測流点付近に沖から冷たい水が貫入していることに対応しているのでは



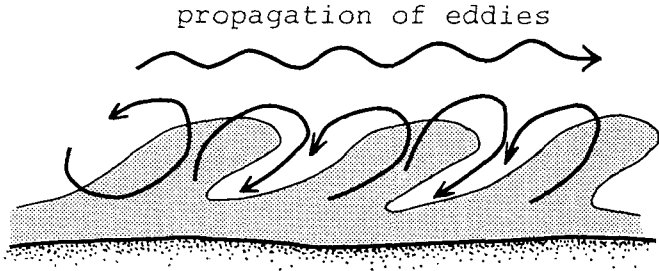
第8図 1987年9月2日~9月4日におけるIR画像の時系列。各画像は右に示した時間に対応する時に取られた。本研究所属物理学部門 NOAA 受信受画装置 (IBC 社製) による



第9図 アンデラ流速計による測流結果と沿岸潮位の時系列

上図は1986年7月24日から8月8日。下図は1986年9月13日から9月28日。(a)は25時間移動平均した流速ベクトルのスティックダイアグラム。(b)は生のデータから(a)を引いた残差。(c)は紋別と稚内の沿岸潮位。(d)はアンデラ流速計で同時にとられた水温。

ないかと思われる。また、この季節には、波動パターンが1日周期で下流に伝播するという事実を考えれば、第2図の(c)から(d)の間に、ちょうど1波長分波動パターンが下流に伝播したと考えられそうである。



第10図 夏季における波動に関する予想模式図

以上の考察をもとに、この季節に波動が出現しているとき

の状況を模式的に予想したのが第10図である。渦的な動きが約1日周期で下流に伝播し、それに伴って温度場も変動すると考えた。また、こう考えると、岸側の地点では流速ベクトルが時計回りの回転を示すことの説明がつく。

さらに第9図から言えることは、波動を示唆するような特徴的な動きは、紋別の潮位の振幅が大きいために顕著であるということである。このような流速変動や水温変動が、第10図に示したような波動によるものなのか、あるいはそれとは直接関係ない潮流によるものなのかは、今後さらに観測によって確かめる必要がある。もし第10図のような波動によるものだとすれば、この季節における波動は1日周期の潮汐と密接に関係している可能性がある。

V. まとめと議論

本研究では、IR画像、測流データ、流水レーダ等を用い、宗谷暖流域に発生するサブメソスケール波動の性質を調べた。春季と夏季はともに波動が顕著に出現する季節であるが、そのパターンの特徴や性質は異なることがわかった。これらの季節の波動の特徴を簡単にまとめたのが第2表である。

第2表 春季と夏季における波動の性質及び特徴

	波 長	周 期	位 相 速 度	特 徴
春 季	約 45 km	2~3 日 (2倍もあり)	約 20 cm/s (1/2 もあり)	<ul style="list-style-type: none"> • 後方砕波が顕著 • 海峽付近より2~4波 • 流水の有無とは無関係
夏 季	約 50 km	ほぼ 1 日	50~60 cm/s	<ul style="list-style-type: none"> • 前のめりのパターン • 知床半島まで何波も続く • 日周潮の潮汐と関係?

春季においては、後方砕波が顕著で、そのパターンは主に流れが海峡から抜けた直後に発生するケースが多く、あまり下流域までは続かない。これに対して、夏季のフロントは前のめりのパターンが顕著で、知床半島までずっと続く場合が多い。波動の波長は春季と夏季ではほぼ同程度であるが、周期や位相速度は異なる。夏季の場合はほぼ1日周期であるのに対し、春季の場合の周期はだいたい2~3日程度で、なかには5日というものもある。春季においては、流水

の存在が波動の発生やその性質に大きくは関係しないことが示唆された。一方、夏季においては、日周潮の潮汐との関連が示唆された。

最後に、この波動の生成機構に関する考察を行なう。まず年間を通して特徴的なのは、流れが海峡を抜け、クリリオン岬を剝離した直後に波動が発生している場合が多いということ、そしてその際に後方碎波パターンがしばしば見られることである。従って、この波動が流れの剝離に大きく関連していると思われる。殊に、後方碎波はシア不安定に特徴的なパターンであることから、波動の生成機構として、流れの剝離に伴なうシア不安定という機構が浮かび上がってくる。言い方を換えて、流れの剝離によるカルマン渦列と考えてもよい。論文 II.⁷⁾では以上の考えに立って数値モデル実験を行なう。

他に考えうる波動の生成機構としては、傾在不安定があげられる。特に夏季においては、第3図(c)に見られるように、高温の軽い水がオホーツク海に入り込み、有効位置エネルギーを多く獲得することになる。このエネルギーの解放によって波動が生ずるという考え方である。その他には、夏季の波動は日周潮の潮汐に関係している可能性が示唆されているので、潮汐による強制あるいは共鳴といった機構も考えられる。

実際にはこれらの機構が混成したものになっているかもしれない。現実の生成機構を解明するには、論文 II.⁷⁾で行なうような理論的・数値的な研究とともに、より有機的にデザインされた観測が不可欠であろう。

謝 辞

本研究を進めるに当たっては、多くの方々のお世話になった。特に、研究の間じゅう、有益な御助言、暖かい励ましを頂いた、金成誠一教授、小野延雄教授には、心から感謝の意を表します。本研究で用いた測流データは、湧別漁業協同組合、及び三洋水路測量株式会社によって取得されたものである。ここに貴重なデータを提供して頂いた、両社ならびに湧別漁協の大友正英氏、三洋水路の上橋美久氏に深い感謝の意を表します。流水研究施設の青田昌秋教授、ならびに白沢邦夫博士、石川正雄氏には、流水レーダに関する資料、フィルム等に関していろいろとお世話になりました。ここに深い感謝の意を表します。本研究で用いた時系列の IR 画像は本研究所降雪物理学部門ならびに藤吉康志博士の御好意によって撮られたものである。ここに深い感謝の意を表します。その他の IR 画像は日本気象協会製作のものであり、その際にお世話になりました齊藤誠一博士に深い感謝の意を表します。最後に、この研究に際し、いろいろと議論して下さい、若土正暁博士、竹内謙介博士に深い感謝の意を表します。なお、本研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費奨励研究 (A) 研究課題番号 62740229 より支弁された。

文 献

- 1) McWilliams, J. C. 1985 Submesoscale, coherent vortices in the ocean. *Rev. Geophys.*, **23**, 165-182.
- 2) D'Asaro, E. A. 1988 Observations of small eddies in the Beaufort Sea. *J. Geophys. Res.*, **93**, 6669-6684.

- 3) Johannessen, J. A. *et al.* 1987 Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments. *J. Geophys. Res.*, **92**, 6754-6772.
- 4) 海洋科学技術センター, 日本アイ・ビー・エム(株)企画・編集 1984 「宇宙からの海洋学 II」, p. 359.
- 5) Hatakeyama, Y., Tanaka, S., Sugimura, T. and Nishimura, T. 1985 Surface currents around Hokkaido in the late fall of 1981 obtained from analysis of satellite images. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 327-338.
- 6) Sonu, C. J. and Aota, M. 1985 Characteristic ice floe movements as revealed by shore-based radar. The 17th Annual Offshore Technology Conference, 353-358.
- 7) 大島慶一郎 1988 宗谷暖流域におけるサブメソスケール波動に関する研究 II. 一数值モデル実験一. 低気科学, 物理篇, **47**, 131-145.
- 8) 青田昌秋 1975 宗谷暖流の研究. 低温科学, 物理篇, **33**, 151-172.
- 9) 青田昌秋 1982 宗谷暖流潮境の水塊構造(序報). 低温科学, 物理篇, **41**, 207-215.
- 10) 青田昌秋・河村俊行 1978 北海道オホーツク海沿岸の冬季の海況について. 低温科学, 物理篇, **37**, 93-105.
- 11) Takizawa, T. 1982 Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**, 281-292.
- 12) 北海道立稚内水産試験場昭和59年度事業報告書.
- 13) Iida, H. 1962 On the water masses in the coastal region of the south-western Okhotsk Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 20th Anniversary Vol., 272-278.
- 14) Watanabe, K. 1963 On the reinforcement of the East Sakhalin Current preceding to the sea ice season off the coast of Hokkaido. *Oceanogr. Mag.*, **14**, 117-130.
- 15) 田畑忠司・他 1972, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981 レーダー観測による北海道オホーツク海岸沖の流水分布. 低温科学, 物理篇, 資料集, **31, 34, 36, 37, 38, 39, 40**.
- 16) 青田昌秋・他 1982, 1983, 1984 レーダー観測による北海道オホーツク海岸沖の流水分布. 低温科学, 物理篇, 資料集, **41, 42, 43**.

Summary

On the Soya Warm Current, the wave-like pattern which has the scale of tens of kilometers (submesoscale) is sometimes observed in NOAA IR images. This pattern becomes eminent both in spring and summer. However, the configuration of the pattern and the properties of the waves are different between the two seasons.

In spring, backward wave breaking develops soon after the current separates from Cape Kriljon, which suggests shear instability induced by the flow separation. This pattern does not continue far downstream. The wavelength is about 45 km on the average and the period is from two to five days. Pack ice, which covers this region from January to April, does not seem to be substantial for the occurrence of the waves.

In summer, the pattern shows that the phase of wave offshore leads that of wave near-shore and the waves continue for several cycles far downstream. The wavelength in summer is similar to that in spring. However, both of the time series of IR images and the current measurements suggest that the period in summer is about one day, which is much shorter than in spring. The current measurements also suggest that the waves in summer are related with the diurnal tide.