



Title	流水野の発散と回転について
Author(s)	河村, 俊行; KAWAMURA, Toshiyuki; 青田, 昌秋 他
Citation	低温科学. 物理篇, 33, 179-190
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18284
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p179-190.pdf



流氷野の発散と回転について^{*,**}

河村俊行・青田昌秋・田畑忠司

(低温科学研究所)

(昭和50年10月受理)

I. ま え が き

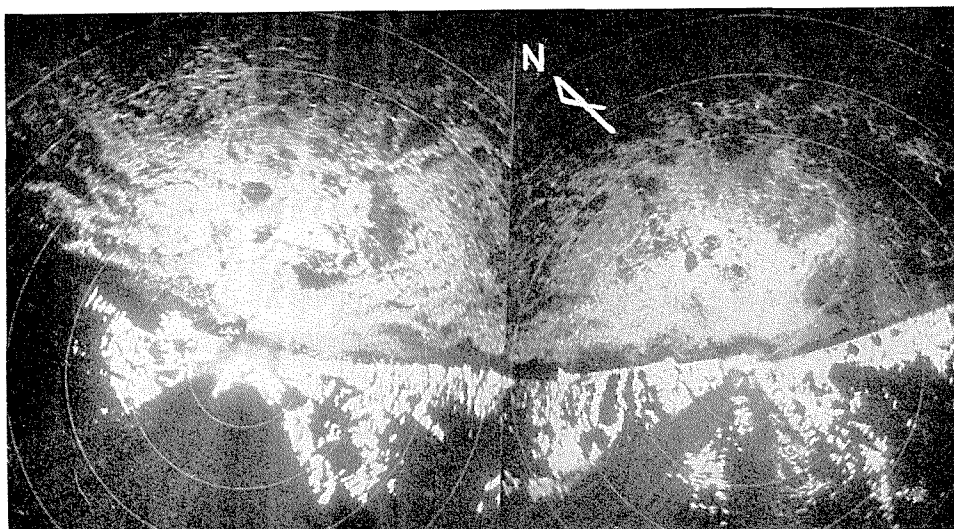
北海道オホーツク海沿岸に設置されている流氷観測レーダーによる流氷観測の結果、これまでに流氷は漂流中に内部でたえず複雑な変形が起っていることが確かめられた^{1,2)}。この様子はレーダーブラウン管の駒撮り映画でもっともよくみられる。変形の大きさを示す流氷野の歪の一例はすでに求められ、流氷野内の各部分の歪は空間的にも時間的にも激しく変動していることが知られた²⁾。

この報告では、変形の定量化の指標として流氷野の移動の流向・流速及び氷野内の発散、回転をレーダー観測のデータを用いて求めた結果について報告する。

II. 流氷の動きの観測と発散、回転

a. 1973年3月10日～14日、枝幸、紋別沖の例

第1図はレーダーによって得られた1973年3月11日18時30分の枝幸沖および紋別沖の

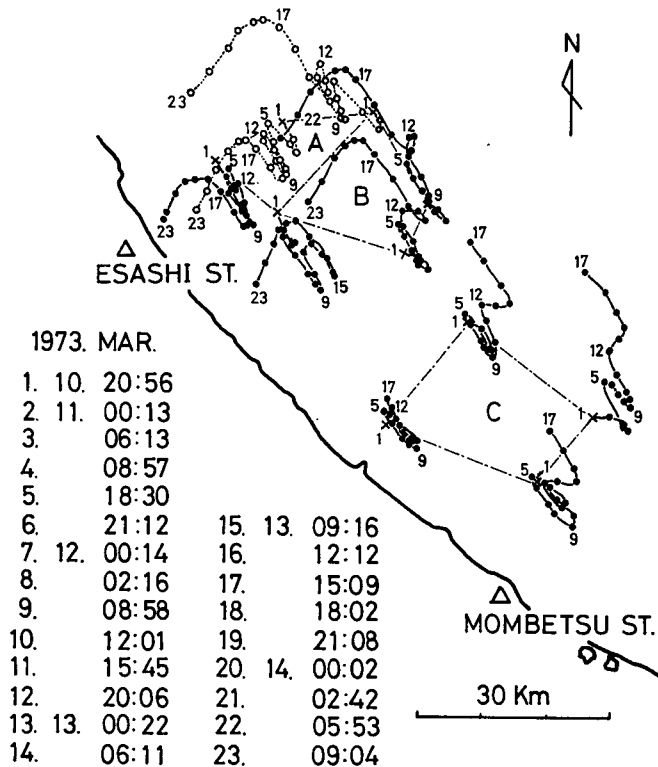


第1図 1973年3月11日18時30分の枝幸、紋別沖の流氷分布 (半径30哩)

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1718号

** 北海道大学低温科学研究所附属流氷研究施設研究報告 第43号

流氷分布である。この時には紋別の東方に大きな開水面がある他は、ほぼ一面流氷でおおわれ、ところどころにいろいろな大きさの氷湖が存在していた。流氷の状況は観測期間中、この図のものとはあまり大きな変化はなかった。氷湖のような特徴のある点に注目して、3月10日20時56分から14日9時4分までの流氷の動きで追跡した結果が第2図である。この時にははじめのうちはすべての点が何度も向きを変えながらもほぼ海岸線に沿って運動しており、しかも全ての点がほぼ同一時刻に方向を逆転している。ただし海岸に近い点はこの点と比べてあまり動きが著しくない。その後13日18時頃からは海から陸に向かって動いている。



第2図 氷野の各点の移動径路図 (1973年3月10日
20時50分～14日9時4分)

追跡した点のうち図に示した4点によって形成される四角形A～Cの中心の流速・流向の時間変化を第3図(a)に示した。図には同時に枝幸、紋別両測候所で観測された風速・風向をも示した。

図から明らかなように、詳細に見れば枝幸の風と紋別のそれとは必ずしもよく一致していない。それにも拘わらず流氷の流速・流向の変化と風速・風向のそれはよく一致していると言うことができよう。すなわち、風速は12日15時頃までは5m/sec以下でしかも変動しており、その変動に追従して流速も変化している。時間のおくれはほとんどないようである。13日0時前後は風は弱くなっているが流速はそれほど落ちてない。このことは、流氷がそれ以前の時間に与えられた慣性力か或いは風以外の力によって動いているかを示している。しかしこの

場合には流向が変化しているのので、慣性力で動いているとは考えられない。この海域は夏には沿岸に沿って南東へ向う宗谷暖流が存在していることが知られている^{3,4)}。冬季間にもこのような海流があることが予想されており^{1,2,5)}、ここでの運動もこの海流が原因であろう。13日9時から風は急に強くなって10 m/secの風も吹いている。これに伴って、即座に流速も大きくなった。詳細に見ると、流氷の動きは前半は紋別の風速変化と、後半は枝幸のそれとの非常によい一致がみられる。このことから、このような範囲の海域の風は、ある時は枝幸で、又ある時は紋別で代表させる風が吹いているようである。

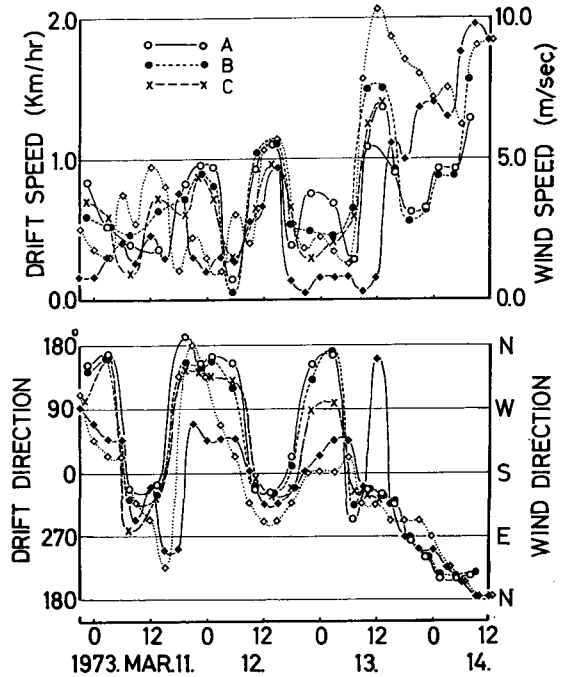
風向と流向の関係も、非常によい一致がみられた。ただ南西の風つまり陸から海へ向って吹く場合は、このときには風速が小さいことが多かったのであるが、流氷は南東に動いており風下の方向からの偏りが大きかった。(流向は北を基準として時計廻りの角度で表わした。)これも沿岸に沿う海流の影響によるためであろうと思われる。

以上のようにして各時刻における各点の位置および流速が求められた。任意の4点で形成される四角形の発散、回転は次のようにして求めることができる。

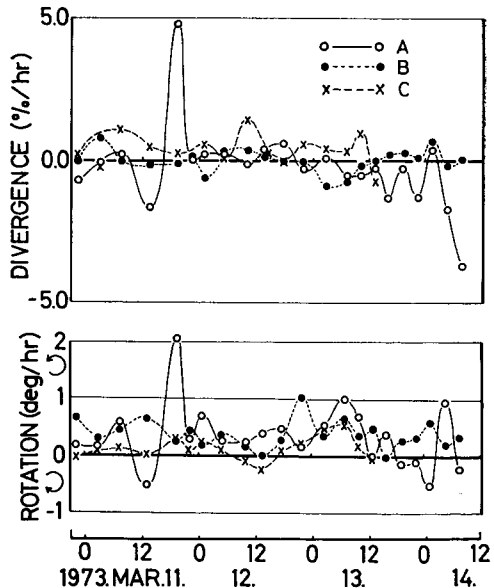
すなわち、任意の点 (x, y) の速度 (u, v) が、 x, y の関数であるとする、 $u = u(x, y)$ 、 $v = v(x, y)$ であり、基準の点を (x_0, y_0) とすると、 u, v は、

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_0 x + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_0 y \\ v &= v_0 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_0 x + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_0 y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表わされる。ここでは二次以上の項は省略した。ところで、発散・回転は



第3図(a) 氷野の流向、流速の時間変化 (●●は枝幸、○◇は紋別における風速、風向)



第3図(b) 氷野の発散、回転の時間変化

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{V} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ \operatorname{rot} \mathbf{V} &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表わされる。ここで \mathbf{V} は速度ベクトルである。

四角形を形成する4つの点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) についての(1)式(合計8つの式ができる)から, u_0, v_0 を消去すると,

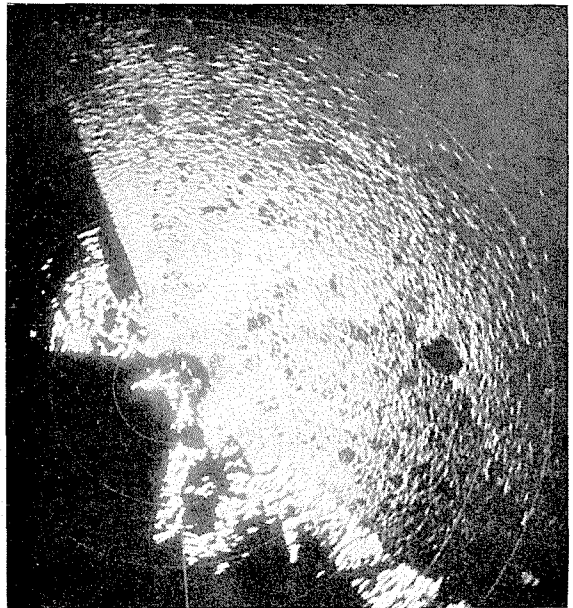
$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{(u_2 - u_4)(x_1 - x_3) - (u_1 - u_3)(x_2 - x_4)}{(y_2 - y_4)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_2 - x_4)} \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{(v_2 - v_4)(x_1 - x_3) - (v_1 - v_3)(x_2 - x_4)}{(y_2 - y_4)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_2 - x_4)} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{(v_1 - v_3)(y_2 - y_4) - (v_2 - v_4)(y_1 - y_3)}{(y_2 - y_4)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_2 - x_4)} \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{(v_1 - v_3)(y_2 - y_4) - (v_2 - v_4)(y_1 - y_3)}{(y_2 - y_4)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_2 - x_4)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

が得られる。これと(2)式より4点で形成する四角形の発散 $\operatorname{div} \mathbf{V}$, 回転 $\operatorname{rot} \mathbf{V}$ を求めることができる⁶⁾。

発散は単位時間当りの面積変化率であるから, 1時間当りの変化をパーセントで表現した。正(負)のはの符号はそれぞれ面積の増加(減少)を示す。

回転は $\frac{1}{2} \operatorname{rot} \mathbf{V} = \omega$ (ω は角速度) であるから, $\operatorname{rot} \mathbf{V}$ (渦度) の代りに角速度(1時間当りの回転角度)として表現した。正(負)の符号それぞれは反時計廻り(時計廻り)の回転である。

以上のようにして求めた, 発散・回転の時間変化を第3図(b)に示す。まず目につくのは第2図で見たようにこの期間の移動の方向と速さがめまぐるしく変化しているにもかかわらず, 発散・回転の値が, 時間的に変動はしてはいるが, 予想外に小さいことである。ということは, ここでとった四角形の大きさ15~20kmの範囲では, 流氷はほぼ均一に動いて, その形状もほとんど変化していないことを示している。発散は正の値をもつことが多い。四角形Aでは, 14日3時以降, 発散が負の大きな値をもっている。これは氷野が海から陸に向かって動き, 陸地にはげしくおしつけられたためである。



第4図 1975年2月22日12時19分の枝幸沖の流氷分布(半径30哩)

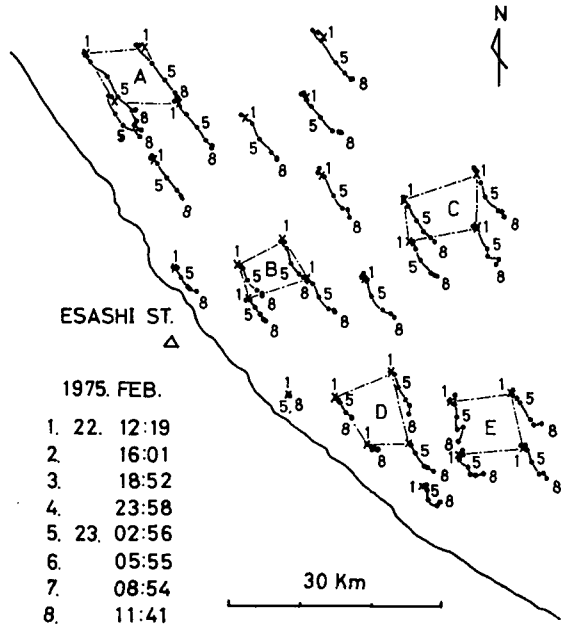
発散・回転の変化と風速および風向の変化との間の関係は、はっきりした関係が見出されない。

b. 1975年2月22日～23日，枝幸沖の例

第4図はレーダーで得られた1975年2月22日12時19分の枝幸沖の流氷分布である。半径30 漉の円内はほぼ一様に流氷でおおわれており，所々に開水面をもつ多くの氷湖が点在していた。これらの特徴ある点をほぼ3時間毎のレーダー写真から約1日間追跡し，その主な点の経路を第5図に示した。

第5図によると流氷野は一般に，22日19時頃まではほとんど動かなく，その後南東方向へ動きはじめ，22日夜半にもっとも速くなり，その後再び動きは鈍くなっている。各点は全体としてはほぼ同じような動きをしているようである。しかし海岸に極めて近い所では，観測期間中ほとんど動かない点もあり，海岸近くの流氷は一般に動きが鈍い。

注目した点で形成される四角形のうち，空間的に代表的であると思われる10 km 四方ほどの四角形A～Eの流向，流速の時間変化を第6図(a)に示す。図の中には，枝幸測候所で観測された風向・風速をも示した。



第5図 氷野の各点の移動経路図

風速は3 m/sec 以下であり，特に23日3時以降は1.5 m/sec 以下と非常に弱い。流氷の流速は風速の最も大きい時に最大ではあるが，それ以外のときの流氷の流速と風速の変化は一致していない。特に観測期間の初期には，風と比べて流氷の流速が小さく，しかも，この時には風向は北寄りでほとんど変化がないにも拘わらず流向は各四角形まちまちで，しかも風に逆らって動いているものもある。22日21時頃から，風下とほぼ同じ方向に動き，それに伴ない流速も大きくなっているようである。このような流氷の動きの変動の原因は現在ある風の資料からは説明がつかない。あるいは現場における風が観測された風と違っているのかも知れない。23日3時以後，風速が弱くなるとともに，風向も北から西，南，北東と回転しているが，流氷はすべてそれ以前と同じ南東方向に流れている。これは風が弱いので，海岸線に沿って南東方向に流れる海流の影響が大きく出たためであろう。

空間的にはAとCが速く，D，Eが遅いようで，一般に海岸線に近いところは遅く，離れるに従って速くなっている。海岸に近い四角形Aが速いのは，レーダー写真だけからははっきりと分らないが，氷の形状および回りの氷の状態が動きやすい状態にあったと思われる。

第6図(b)に発散・回転の時間変化を示す。発散は時間的にも空間的にも激しく変動して

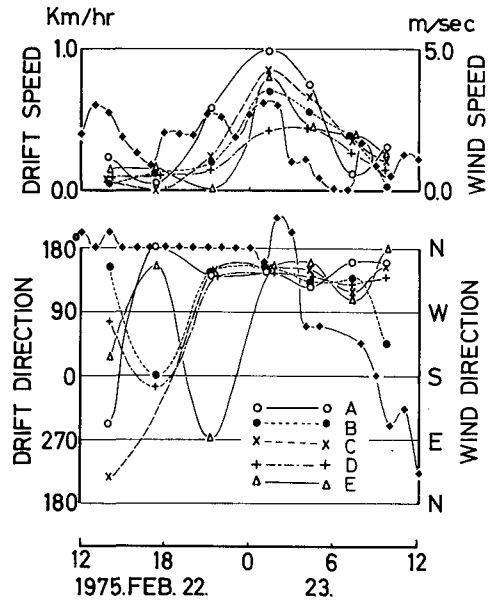
いる。全体的にみれば負の値をとるものが多く、流水野は面積を減少し、密接化していることが分る。特に四角形Aについては流速が大きかった23日0時~6時で大きな値となっている。

回転は、はじめ正の小さい値であるが、その後、時計廻りの回転をするものが多い。

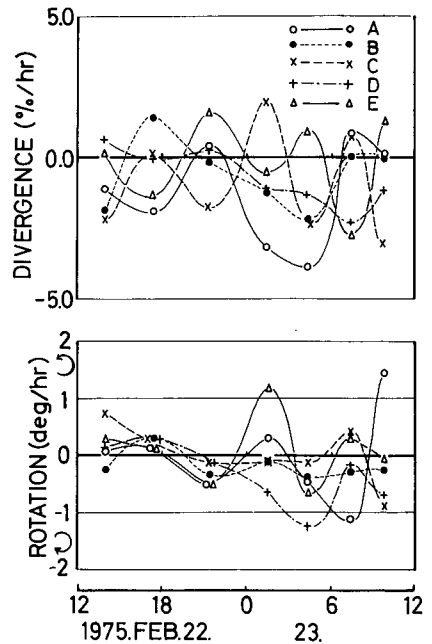
それらの発散・回転と、風とのあいだには、前の例と同様に、あまりはっきりした関係は見出せない。ただし流向とは関係があるようで、北から北西に流れるときには、反時計廻りの回転をするものが多く、発散は正、すなわち面積拡大又は変化なしとするものが多い。南東に向って流れる場合には、回転は時計廻りのものが多くなっている。これらのことも海岸から離れるに従い、流速が大きくなっていることと関係がある。

第6図(b)から発散・回転が時間的に激しく変動しているとともに、空間的にも変動していることが分った。そのことをさらに詳しく見るために、それらの空間分布を画いたものが第7図である。第7図では、第5図に示したすべてこの点を適当に組合わせて得られた四角形の発散・回転を示している。発散と回転の大きさはそれらの数値に比例した半径をもつ黒と白の円であらわした。黒い円は発散のときには負の値を、回転のときには時計廻りの回転とあらわし、白い円はそれぞれ正の値と反時計廻りをあらわしている。また図中には各点の速度を矢印であらわしたが、流速が0.1 km/hの場合には省略した。このような図がほぼ時間ごとに得られたが、ここでは22日16時01分から翌日の2時56分までの例を示す。16時から19時のあいだでは31個の四角形は風に逆って北西方向に平均0.07 km/h、14個が南西に0.09 km/hで動いていた。その後流水はすべて風下の南西方向に動いた。19時から24時のあいだでは平位流速は0.23 km/hで、24時から3時ではもっとも速く0.76 km/hであった。

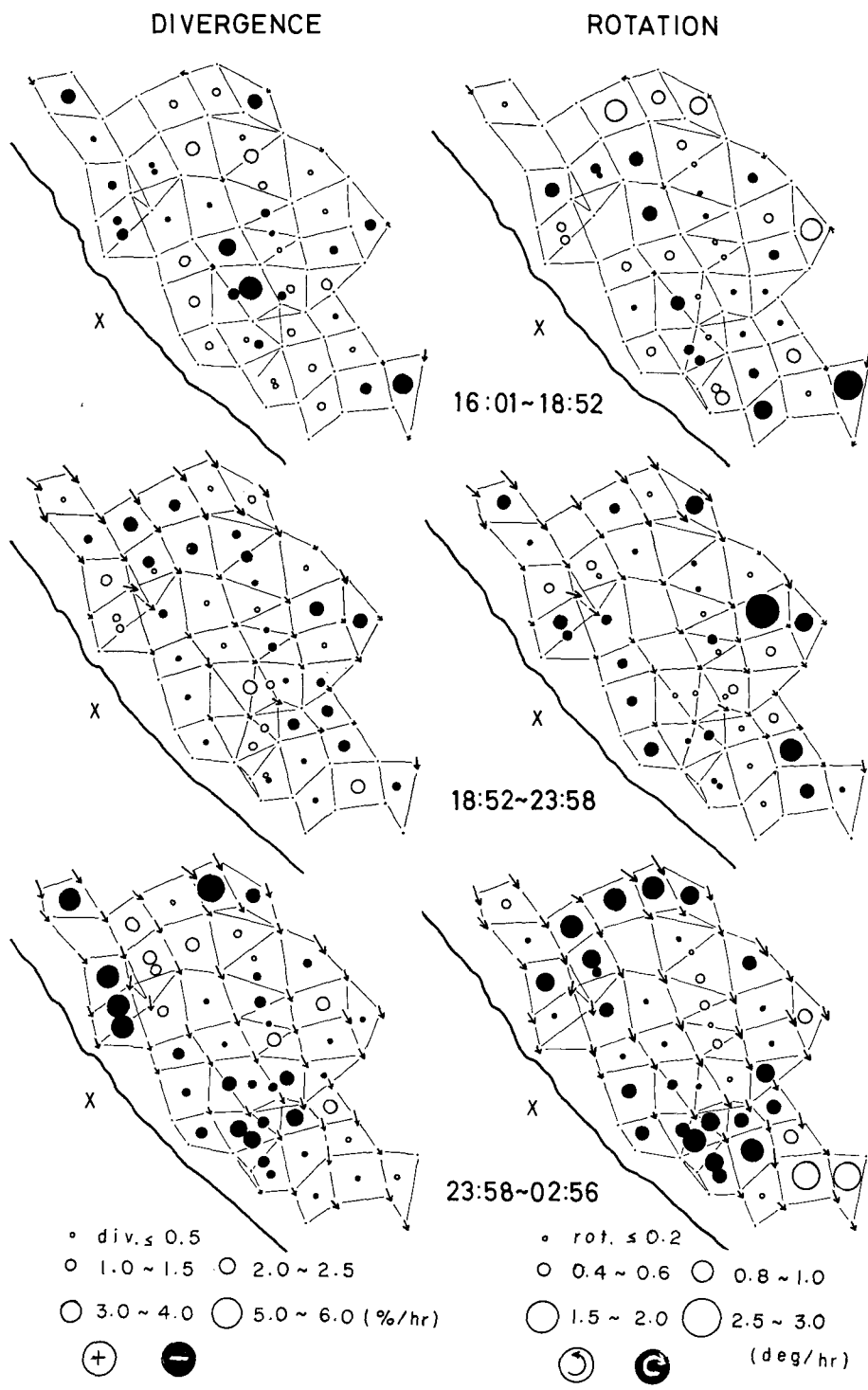
これらの3つの時間帯のものを第7図に示した。図から氷野の発散・回転が空間的にもま



第6図(a) 氷野の流向、流速の時間変化 (◆—◆は枝幸における風速、風向)



第6図(b) 氷野の発散、回転の時間変化



第7図 氷野の発散・回転の空間分布 (枝率沖)

た時間的にも著しく変化していることがよくわかる。16時～19時の例では流速そのものは小さいが、流氷の大部分は風に逆って、北西方向に動き、他の一部分が逆の方向に流れたりしているために比較的大きい負の発散、すなわち氷野の圧縮が一部分でみられる。回転では時計まわりと反時計まわりの回転が互に入り混っており、回転の方向と発散の値とのあいだにはっきりした関係はなさそうである。

次の19～24時のあいだでは平均流速は前の時間帯よりも大きいが流向はほぼ南東、すなわち沿岸に沿う海流の方向を向いておりしかもこの方向はほぼ風下の方向である。このために氷野の発散も小さく、回転も一部のものをのぞくときわめて小さい。前の時間帯の例と比較すると、発散の様子は逆になっているのが注目される。回転についても、回転の方向が逆になっているものが多い。

0～3時の例では中央の部分は両者の値がいずれも小さくなっており、ほぼ均一な動きをしているようである。発散は沿岸部分が負の値となっており、流氷が沿岸に押しつけられている様子が見られる。また回転の大きい所では発散の値も大きく、時計廻りの回転をして面積を縮小している四角形が多い。特に枝幸の東方の沿岸近くと、北方に両者の値の大きい四角形がたまって存存していて、それらは20kmほどの大きさをためているようである。値の小さい範囲もその程度の大きさである。また他の例でもこのような傾向がみられる。

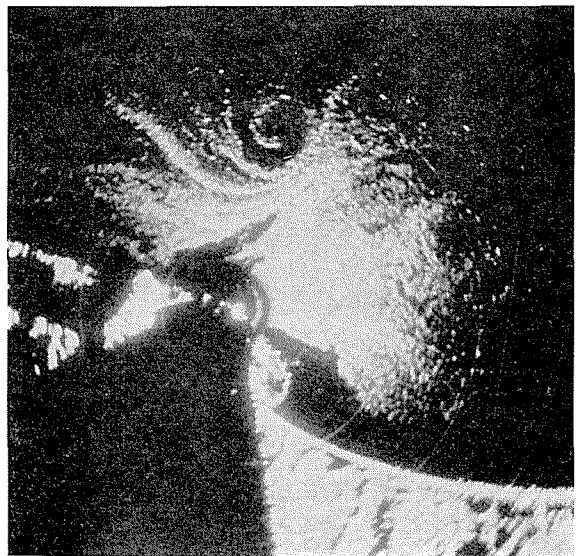
このことから、この海域では大体20kmぐらいの範囲で発散・回転があるまとまった値を持っているようである。気象・海象および氷の状況もこのぐらいの範囲ごとに変っていることによるものと考えられる。

c. 1975年1月28日の網走沖の例

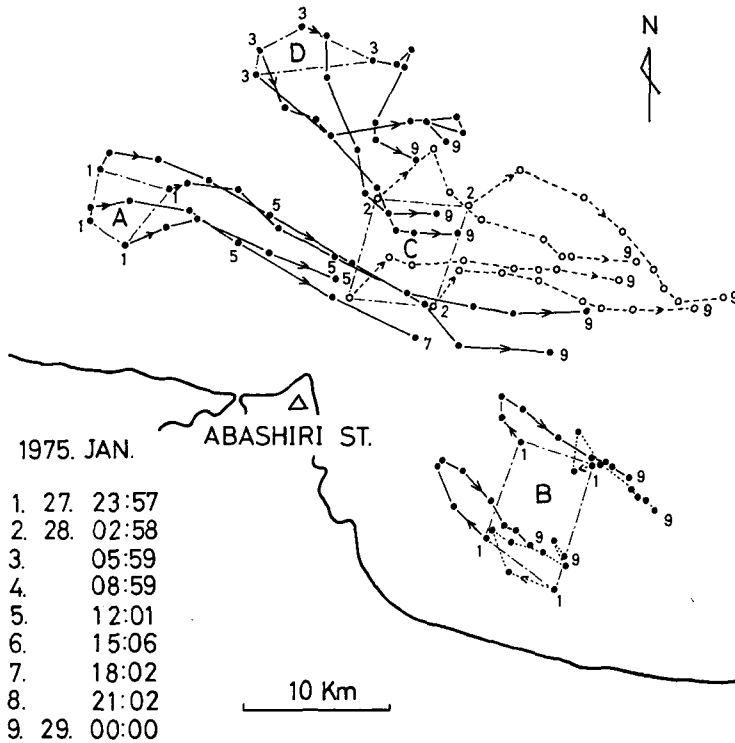
第8図は1975年1月28日8時59分の網走沖のレーダー写真である。この時には沿岸付近に開水面があり、15哩以遠も流氷がなく、流氷は孤立氷野に近いものであった。また、この冬、流氷が網走のレーダーにとらえられた初日は1月26日で⁷⁾、これはその僅か2日後の初期の流氷なので密接度がそれほど大きくなく、疎な分布をしているように思われる。

流氷分布で特徴的なことは網走の北10～15哩のところにも渦が形成されていることである。そしてその渦は流氷の動きとともに移動し、渦に向かっていくつもの放射状の割目のような模様が形成されたり消滅したりしている。

第9図が、前2例と同様にして得た代表点の径路図である。流氷は全体として東に流れているが、網走湾内にあるも



第8図 1975年1月28日8時59分の網走沖の流氷分布 (円の間隔は5哩)



第9図 氷野の各点の移動径路図

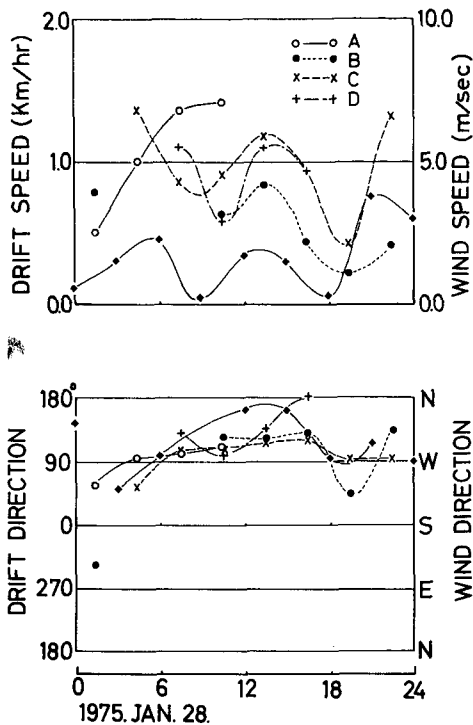
のは最初全体の流れに逆らって北西に流れ、その後全く逆に東南東へ方向を変えている。その速度は他のものに比べて遅い。さらに既にのべた渦運動をしている部分もあり、流氷はかなり複雑な運動をしているようである。

大きさが大体5 km程度の四角形A~Dの流速・流向の時間変化を第10図(a)に示す。網走で観測された風速は4 m/sec以下であり、ここでも風速の変動と流速の変動はよい一致がみられる。風向は観測期間中北から西の間であまり変動がなく、各四角形は互に平行にしかも風と同じ方向に動いている。ただし前2つの例と違って風速が弱いにもかかわらず流速がかなり速く、風圧係数(流速/風速)も0.15をこすこともあった。今までの測定からそれは0.02~0.09といわれており⁵⁾、この時の値はかなり大きいものである。これは、風が弱いので海流の影響が強く現われているためと、流氷野が孤立し、疎な分布をしていて、動きやすいためであろう。

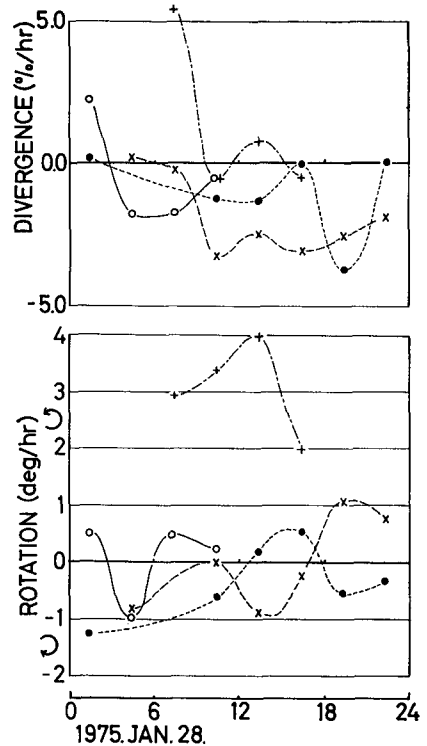
四角形は最初は風向および全体の流れと逆の方向へ動いていたが、その後反転している。これは湾という特殊な地形のために反流ができたり、消えたりするためであろう。また流速は他の四角形のものに比べて常に小さい値をとっている。

発散および回転の時間変化を第10図(b)に示す。発散は負のものが多く、おしつけられているようである。渦の部分でははじめ面積を拡大している。

回転は変動がはげしく、特に渦の部分は大きい正の値をもっており、反時計廻りの回転である。(長時間追うことができなかった四角形の中では20°/hrほどの値をもつものもあった。)一見はげしく回転しているように見える四角形Bの値も小さい。このことからBでは四角形



第10図(a) 氷野の流向, 流速の時間変化
(◆◆は網走における風速, 風向)



第10図(b) 氷野の発散, 回転の時間変化

自身が回転しているのではなく、4点全体が平行運動をしながら流れの方向を変えていることが分る。それ以外の点でも渦運動している部分をのぞいて、ここでとった四角形の程度の大きさでは、各点はおおむね平行に動いているようである。

発散・回転と風との間の関係はここでもよく分らなかった。

III. ま と め

レーダーによって得られた流氷野の連続写真から、特徴のある点を追跡し、それをもとにして代表的な点で、構成される四角形の平均速度および発散・回転を求めた結果について述べた。

その結果、流氷の流向・流速の変化は風向・風速の変化とほぼ一致しており、あまり時間の遅れがなく応答している場合が多かった。流氷野の変形の大きさを表わす発散・回転の値は、移動の経路図から予想されるものと異なる場合が多かった。その値は時間的にも空間的にも複雑に変動しており、風との間にははっきりした関係は見出せなかった。空間的には20kmほどの範囲ごとにとまとめた値をもった領域が存在していることが分った。このことは、それぐらいの規模で気象・海象および氷の状態が変化していることを示唆しているように思われる。また流向・流速および発散・回転の値から、冬季間も沿岸に沿って南東に向う海流の存在を示す事実がみられた。

今後は現場の風と海潮流を測定し、それと発散・回転との関係を求めることが必要である。また更に流氷の凹凸の分布も実測し、これらの三要素と氷野発散・回転との対応を研究する必要があるものとおもわれる。

おわりにのぞみ、レーダー写真の撮影ならびにデータ解析に終始御協力をいただいた当研究所流氷研究施設の大井正行、石川正雄、福士博樹の各技官の方々に深く感謝いたします。また風の資料を快よく提供された枝幸、紋別両測候所および網走地方气象台に対し心からお礼申し上げます。

文 献

- 1) 田畑忠司・青田昌秋・大井正行・石川正雄 1969 レーダーによる流氷の動きの観測. 低温科学, 物理篇, **27**, 295-315.
- 2) 田畑忠司 1971 北海道沿岸の流氷野の歪の測定. 低温科学, 物理篇, **29**, 199-211.
- 3) 青田昌秋 1968 北海道オホーツク海沿岸沖における海況変動の研究 I. 低温科学, 物理篇, **26**, 351-361.
- 4) 青田昌秋 1975 宗谷暖流の研究. 低温科学, 物理篇, **33**, 151-172.
- 5) 田畑忠司・大井正行・石川正雄・福士博樹 1970 レーダーによる流氷の動きの観測 II. 低温科学, 物理篇, **28**, 301-310.
- 6) Волков Н. А., З. М. Гудкович И В. Д. Углев 1971 Результаты изучения неравномерности дрейфа льда в арктическом бассейне. Тр. Аркт. и антаркт. ин-та, **303**, Л., Гидрометеонедат, 76-89.
- 7) 田畑忠司・ほか 1975 レーダー観測による北海道オホーツク海岸沖の流氷分布—1975年1月~4月. 低温科学, 物理篇, **33**; 資料集, 印刷中.

Summary

Radar images and their analyses were used for a study of movement of ice field off the Okhotsk Sea Coast of Hokkaido. Figure 1, 4 and 8 show each an example of a radar image of a pack ice field. Drift ice is represented by the white patterns in the upper portion of Fig. 1 and the upper righthand portions of Figs. 4 and 8. The black areas or spots seen in the ice fields are identified with open water or polynya, which can be used as targets in tracing the ice fields for the measurement of drift.

Figures 2, 5 and 9 describe the tracks of movement of such targets, which show how the ice fields moved in the course of a few days. Figures 3(a), 6(a) and 10(a) show the changes of drift speed and direction of some typical ones among quadrilaterals each formed in the square at the beginning by connecting four nearby targets as labeled in Figs. 2, 5 and 9, together with the wind velocity observed at the meteorological observatory in the coast. The changes of drift velocity show sometimes a fairly good response to that of wind.

Divergence and rotation which stand for deformation of an ice field can be calculated from eqs. (2) and (3). Calculated values of divergence and rotation for the squares seen in Figs. 2, 5 and 9 are shown in Figs. 3(b), 6(b) and 10(b) respectively. The value of divergence sometimes reaches 5% per hour and the rotation frequently exceeds 1 degree per hour.

It is obvious from the figures that divergence and rotation change remarkably

with time, and have very little correlation to the change of wind.

To see the ununiform movement and deformation of an ice field, about 45 squares were watched as to the change of configuration and orientation as shown in Fig. 5. The movement, divergence and rotation of each of them were calculated and shown in Fig. 7. The velocity, divergence and rotation changed with space and time remarkably. Any relation between these values and wind cannot be seen. But it is seen from the figure that there is a limited domain of about 20 km in diameter where a uniform deformation is taking place. This suggests that the overall influence due to the wind, the ocean current and the topography of an ice field may constitute such a dimension. The analyses of drift velocity, divergence and rotation of an ice field ascertain the evidence that the ocean current moves towards the southeast, which is parallel to the coast line, throughout the sea-ice season.