HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流氷野における氷魂相互作用の研究　II ： 慣性周期運動にともなう氷野の水平発散の周期的変動
Author(s)	滝沢, 隆俊; 納口, 恭明
Citation	低温科學. 物理篇, 38, 153-159
Issue Date	1980-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18400
Type	departmental bulletin paper
File Information	38_p153-159.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Takatoshi TAKIZAWA and Yasuaki NOHGUCHI 1979 Studies on Interaction Between Ice Floes II. —Periodical Change in Horizontal Divergence of an Ice Field Accompanied by Inertial Periodical Motion— *Low Temperature Science, Ser. A, 38.* (With English Summary p. 158)

流氷野における氷塊相互作用の研究 II*,**

——慣性周期運動にともなう氷野の水平発散の周期的変動——

滝沢隆俊
(低温科学研究所)
納口恭明
(北海道大学大学院 理学研究科)

(昭和54年10月受理)

I. まえがき

これまで流氷研究施設に設置されている流氷観測レーダーにより，沿岸沖合およそ60 kmまでの流氷の分布や移動の様子が調べられてきた。その結果，流氷野は単純に移動しているのではなく内部に絶えず変形を起しながら移動していることがわかった[1~4]。

氷野の変形の表現の1つである水平発散については河村の報告がある[3,4]。その中でも，1977年2月の解析結果[4]によると，氷の漂流速度に約18時間周期の変動が見られ氷野の発散にも明確ではないが同じ様な変動が見られる。

一方，小野は河村と同じ期間の流氷の運動を解析し，この期間の流氷の運動には慣性周期運動が顕著に認められることを示した[5]。したがって，河村の指摘した約18時間周期の速度変動は，紋別付近の緯度約45° Nでの慣性周期約17時間に相当するものであろう。

また，滝沢も河村，小野と同じ期間について氷塊の相互作用の解析を行った[6]。それによると，この期間の氷野の水平発散には明らかに十数時間周期の変動が見られた。

したがって，これらの事を考え合わせてみると，氷野の発散の周期的変動と流氷の慣性周期運動との間に何らかの関係があることが推察される。この報告はその関係について調べてみようとするものである。

II. 氷野の水平発散

水平発散 Q は，u, v をそれぞれ x, y 方向の速度成分とすると次式で定義される。

$$Q = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (1)$$

また，水平発散は単位時間当りの面積変化率としても定義される。

---

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2180号

** 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設 研究報告第85号

$$\bar{Q} = \frac{1}{S}\frac{DS}{Dt} \qquad (2)$$

ここで$\bar{Q}$はQの面積Sにおける平均値でありD/Dtは物質微分を表わす。

実際に流氷野の水平発散を求める方法は，レーダー画像に現われた氷野内の特徴的な点をいくつか選び出し，それらの点(x_i, y_i)を結んだn角形を考える。その面積Sは

$$S = -\oint y dx = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) \qquad (3)$$

により計算される。したがって，Δt時間だけ離れた同じn角形の面積が求まれば(2)式により$\bar{Q}$が計算される。

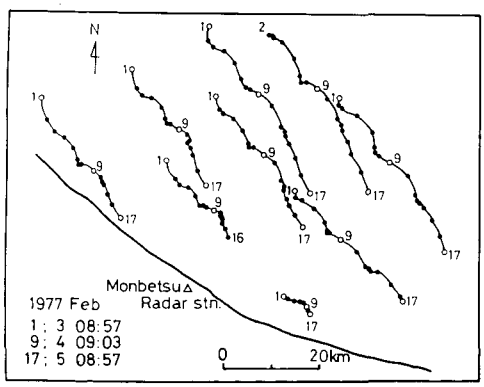
$\bar{Q}$の周期的変動が見られる例を2つ以下に示す。

1. 1977年2月3日～5日　紋別沖

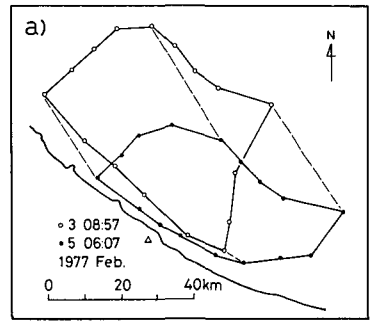
この期間は先に述べた様に流氷の運動には慣性周期運動が顕著に見られる事が小野[5]により示されている。この時の主な点の流跡を第1図に示す。第2-a)図に示した16角形を考えて約3時間毎の面積変化より求めた発散の値を第2-b)図に示した。図から明らかな様に，約12～18時間周期での変動が見られる。

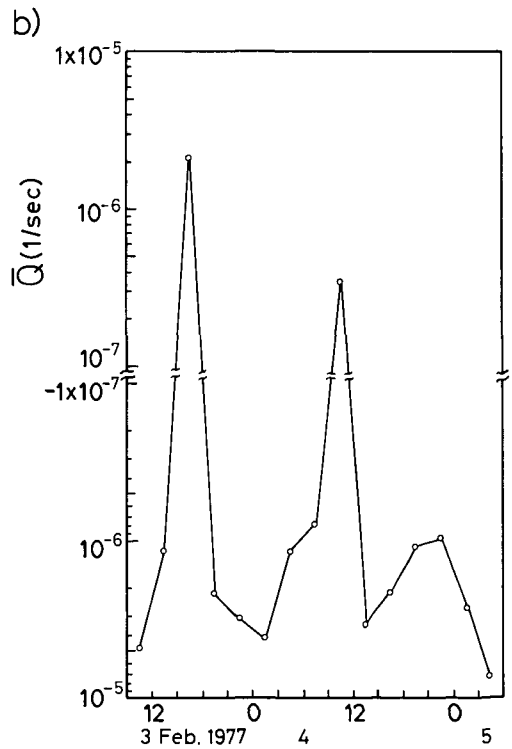
2. 1970年3月27日～29日　紋別沖

この例でも先の例に比べてはっきりはしないが慣性運動と思われる流跡を示している(第3図)。第4-a)図に示した4角形の面積変化により計算した発散の値を第4-b)図に示した。

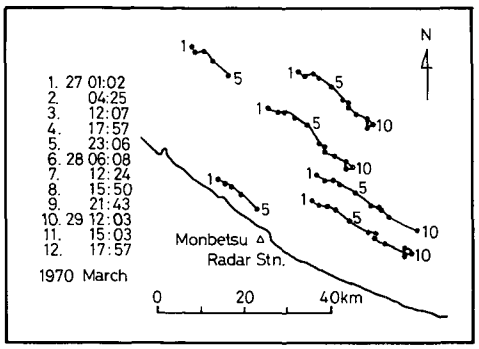


第1図　氷野の主な点の移動経路図
(1977年2月)

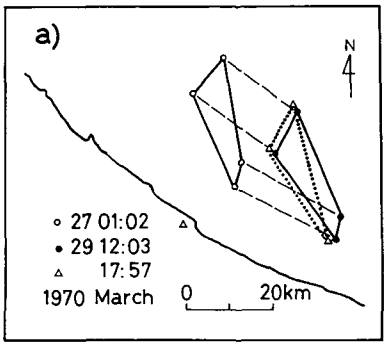


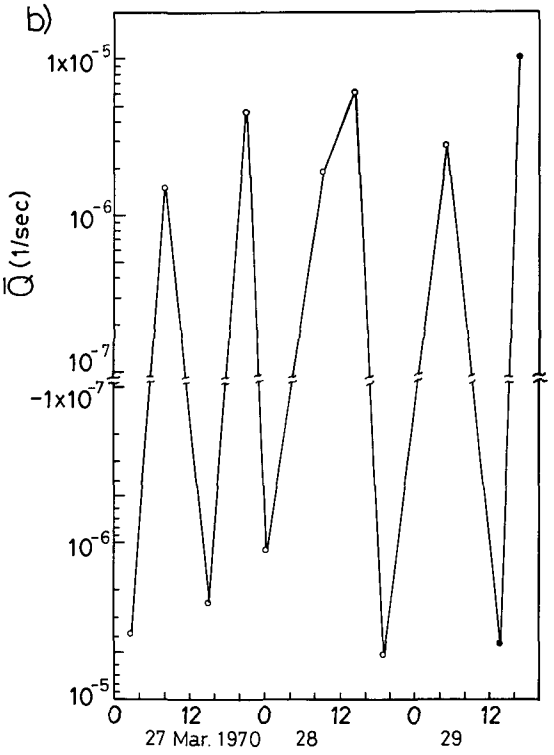


第2図　a) $\bar{Q}$の計算に用いた16角形の移動
b) 氷野の水平発散$\bar{Q}$の変動



第3図 氷野の各点の移動経路図
(1970年3月)





第4図 a) $\bar{Q}$ の計算に用いた4角形の移動。但し29日12:03から17:57の間は3角形により計算した
b) 氷野の水平発散 $\bar{Q}$ の変動

この期間，欠測の数が多く $\bar{Q}$ の計算時間が不規則にならざるを得なかったので，変動周期は1の例に比べて信頼はできないであろうが十数時間の周期で $\bar{Q}$ が変動しているのがわかる。

III. 考　　察

流氷の運動に周期的変動を与える力としては海流（潮流），風，地球自転の偏向力（慣性振動）がある。

紋別沖の流氷下の海流測定は1976～77年の冬から行われており，その解析結果によると潮流成分は冬季間を通じて1日周期，特に O_1（主太陰日周潮），K_1（日月合成日周潮）が卓越している。また長周期の Mm（太陰月周潮）や MSf（日月合成半月周潮）分潮が比較的大きく，特に流氷到来期，退去期には O_1，K_1 潮と同程度の値を示している[7]。1970年の測定はないが1977年，1978年と状況が大きく異るとは考えられない。

第5-a)，b)図は先に示した2つの例の期間の紋別での風速であるが，これより十数時間周期の変動を与える要因は見当らない。したがって，海流・風ともに発散の周期的変動の原因とは考え難い。

残る可能性は慣性運動によるものである。第5-a，b)図を見ると $\bar{Q}$ の計算期間の直前で風

速が大きく，計算期間は弱くなっている。したがって計算期間は流氷を動かす主要な外力である風の応力が小さく，慣性運動が目立つ状況にあったと言える。簡単な模型を考え，慣性運動と発散の周期的変動との関係について調べてみよう。

1つの氷塊を考え，それに作用する水平方向の力が地球自転の偏向力だけであるとすると，氷塊の運動方程式は

$$\left.\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= fv \\ \frac{dv}{dt} &= -fu\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

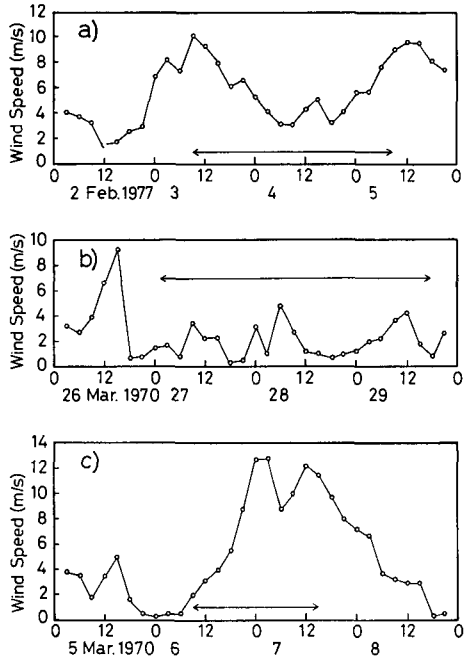
で表わされる。ここで u, v はそれぞれ x, y 方向の速度であり，f はコリオリ係数で ω を地球自転の角速度，φ を緯度とすると

$$f = 2\omega \sin\varphi$$

である。(4)式の解は

$$\left.\begin{aligned}u &= C_0 \sin(ft+\psi) \\ v &= C_0 \cos(ft+\psi)\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

で与えられ，その流跡は C_0 を円周上速度とする慣性円を描き，その周期 T は慣性周期と呼ばれ $T=2\pi/f$ で与えられる。(5)式は，氷塊に何らかの擾乱が与えられた時に擾乱の大きさやその時刻に対応した C_0 と ψ で氷塊が円運動をすることを示している。擾乱は場所により異ると考えられるので当然 C_0, ψ は場所の関数である。但し，今ここで考えている領域では緯度 φ は一定であるとする。



第5図 紋別における3時間毎の風速
a) 1977年2月2日～2月5日
b) 1970年3月26日～3月29日
c) 1970年3月5日～3月8日
図中の矢印の区間は氷野の発散の計算を行った期間である

今，個々の氷塊について考えているので水平発散 div $\boldsymbol{V}$ を差分型で表わすことにする。

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{V} = \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

(5)式を用いると

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{\Delta C_0}{\Delta x}\sin(ft+\psi) + C_0\cos(ft+\psi)\frac{\Delta \psi}{\Delta x}$$

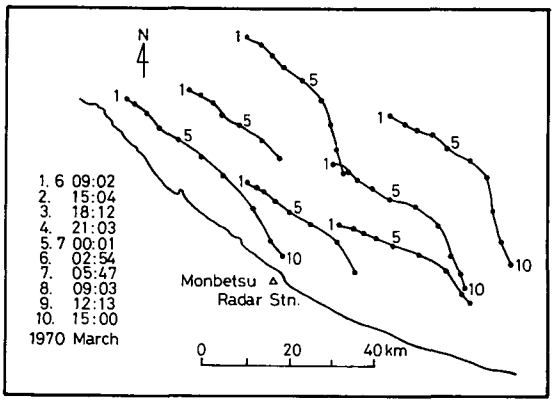
$$\frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{\Delta C_0}{\Delta y}\cos(ft+\psi) - C_0\sin(ft+\psi)\frac{\Delta \psi}{\Delta y}$$

したがって

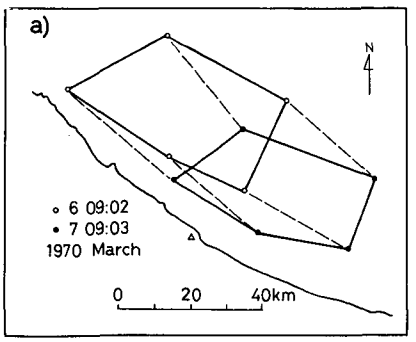
$$\left.\begin{aligned}\mathrm{div}\,\boldsymbol{V} &= A\sin(ft+\psi') \\ A &= \left(\left(\frac{\Delta C_0}{\Delta x} - C_0\frac{\Delta \psi}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_0}{\Delta y} + C_0\frac{\Delta \psi}{\Delta x}\right)^2\right)^{1/2} \\ \tan\psi' &= \frac{\dfrac{\Delta C_0}{\Delta y} + C_0\dfrac{\Delta \psi}{\Delta x}}{\dfrac{\Delta C_0}{\Delta x} - C_0\dfrac{\Delta \psi}{\Delta y}}\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

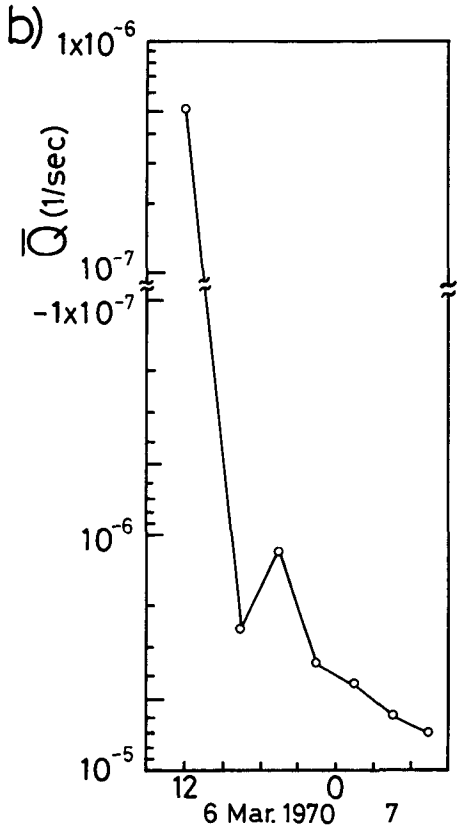
(6)式より明らかな様に div $\boldsymbol{V}$ は慣性周期で変動する。

以上簡単に示された様に外力が比較的小さく慣性周期運動が流氷の流跡に明らかに認められる際には，氷野の水平発散にも慣性周期での変動が認められることがわかった。比較のために風が強い時の例を次に示す。第5-c)図に示した強風時の流跡と発散を第6図，第7図に示した。図から明らかな様に先の例とは違って流跡に慣性周期運動らしきものは見られず，発散も周期的変動はない。



第6図 氷野の各点の移動経路図
(1970年3月)





第7図 a) $\bar{Q}$ の計算に用いた5角形の移動
b) 氷野の水平発散 $\bar{Q}$ の変動

IV. まとめ

流氷の水平発散の値の十数時間周期での変動は流氷の慣性周期運動の周期に対応するものであることがわかった。理想的には，紋別付近の緯度での慣性周期約17時間の周期変動が観測されるはずである。しかし，この現象は常に見られるのではなく風の応力が大きい場合には，慣性周期運動は流氷の流跡からは見られなくなり，それとともに発散の周期的変動も認められなくなる。したがって，ここに示された様な発散の周期的変動の例は外力が比較的小さく流跡に慣性周期運動が認められる様な時に観測されるのであろう。

また，(6)式からわかることは，与えられる擾乱により規定される C_0 や φ が0であったり，

場所による変化がなければ発散の値も0である。故に，発散の変動は場の乱れの程度，即ち不均質の度合を反映していると言える。したがって，流氷の流れの場の不均質性の目安として氷野の水平発散をさらに調べることは重要なことであろう。

おわりにのぞみ，有益な御助言をいただきました小野延雄助教授に深く感謝いたします。また，レーダー観測の資料は田畑忠司教授及び河村俊行助手から提供いただきました事をここに記し心からお礼を申し上げます。

なお，種々の計算にあたっては快く計算機の使用を御許可いただきました藤岡敏夫教授に厚く感謝いたします。

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) 河村俊行・青田昌秋・田畑忠司 1975 流氷野の発散と回転について. 低温科学, 物理篇, **33**, 179–190.
4) 河村俊行 1977 流氷野の発散と回転について II. 低温科学, 物理篇, **35**, 259–266.
5) 小野延雄 1978 流氷の慣性周期運動. 低温科学, 物理篇, **37**, 107–113.
6) 滝沢隆俊 1979 流氷野における氷塊相互作用の研究 I. 低温科学, 物理篇, **38**, 143–152.
7) 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.

Summary

Studies on movement and deformation of sea ice off the Okhotsk Sea coast of Hokkaido have been made, using a sea-ice radar system. On the analyses of interaction between ice floes during the period from 3 to 5 February 1977, a periodical change was seen in horizontal divergence of an ice field[6]. Meanwhile, Ono[5] has pointed out that during this period inertial periodical motions were seen in trajectories of drifting sea ice floes. Because the period of the change in horizontal divergence was close to the inertial period of about 17 hours in this region, it is anticipated that some relation exists between the periodical change in divergence and the inertial period. Then, further investigations on the horizontal divergence were made.

The horizontal divergence $\bar{Q}$ was calculated from the time change of S (an area of a polygon) on the basis of equation (2). The bar of $\bar{Q}$ denotes the areal mean of Q on S. Figures 2-b) and 4-b) show examples of the periodical change of $\bar{Q}$. It is seen from the figures that $\bar{Q}$ changes with the period of some dozen hours.

Factors which cause the periodical change in $\bar{Q}$ include tidal current, wind and deflecting force of the earth's rotation.

Current measurements under sea ice floes off Monbetsu have been carried out since winter of 1976–1977. A harmonic analysis shows that diurnal constituents (O_1, K_1) and long-period constituents (Mm, MSf) are predominant in winter[7]. Figures 5-a) and b) show the wind speed observed at the Monbetsu meteorological observatory, corresponding to Figs. 2-b) and 4-b) respectively. Therefore, judging from these results, the tidal current and wind are hardly regarded as the factors which cause the periodical change in $\bar{Q}$.

If the deflecting force of the earth's rotation is the only acting force, the motion of an ice floe is given by equation (4). The solution is given by equation (5), where C_0 is the impulse

of disturbance and is called a circumferential velocity, and ψ is the phase. The C_0 and ψ are functions of co-ordinates. Using equation (5), divergence is expressed by equation (6) finally. It is clear from equation (6) that divergence changes with the inertial period T ($T=2\pi/f$).

Thus, it is proved that the period of change in $\bar{Q}$ is the same as the inertial period. However, this periodical change is not always seen. An example with no periodical change in $\bar{Q}$ is shown in Fig. 7-b). And the wind speed in Fig. 5-c) corresponds to Fig. 7-b).

By comparison of Fig. 5-c) with Figs. 5-a), b), it is recognized that in Fig. 5-c) the wind is strong in the period during which the $\bar{Q}$ was calculated. In other periods (Figs. 5-a), b)) the wind is weak. Therefore, it may be concluded that when external force, which is mainly wind stress, is relatively small, inertial periodical motions can be observed clearly and also, as accompanied by it, a periodical change in horizontal divergence may be seen.