HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流氷の慣性周期運動
Author(s)	小野, 延雄
Citation	低温科學. 物理篇, 37, 107-113
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18375
Type	bulletin (article)
File Information	37_p107-113.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Nobuo ONO 1978 Inertial Period Motions of Drifting Sea Ice. *Low Temperature Science, Ser. A, 37.* (With English Summary p. 113)

流 氷 の 慣 性 周 期 運 動*,**

小 野 延 雄
(低 温 科 学 研 究 所)

(昭和53年10月受理)

I. 緒　　言

北海道オホーツク海岸の紋別市にある流氷研究施設では，沿岸沖合およそ60 kmまでの流氷の分布や移動をレーダーを使って観測している。

流氷のレーダー像をコマ撮り映画にして眺めると，流氷が分散したり，集中したり，渦を巻いたりしながら，刻々と姿を変えつつ流れている様子が直観的に把握できる。しかし，そのような動きの激しい複雑な渦動が見られるときでも，氷野内の特徴的な個々の標点の動きを追跡してみると，比較的単純ないくつかの型の流跡が得られることが多い。それらは，沖に凸の弓型を連ねたものや，ゆるく蛇行するS字型や，弓型の継ぎ目で時計廻りのループを描くもの，アルファ文字型，馬蹄形型などに分類できる流跡である。

このような流跡は，いずれもトロコイド曲線によく似ている。流氷の流跡からこのような動きの周期を調べると，17～18時間のものが多く，観測域の緯度(約45° N)での慣性周期にほぼ一致していることがわかった。

この論文は，慣性周期運動を反映させたトロコイド曲線で流氷の流跡を近似し，その形を特徴づける無次元量を求めて，それと風や海流との関係を調べようとするものである。

II. 流氷の慣性振動

流氷に作用する水平方向の力の成分が地球自転の偏向力だけであるとすると，直交座標を考え，$\dot{x}$, $\dot{y}$および$\ddot{x}$, $\ddot{y}$をそれぞれx, y方向の速度成分および加速度成分とするとき，運動方程式は

$$\left.\begin{aligned}\ddot{x} &= 2\omega \sin\varphi \cdot \dot{y} \\ \ddot{y} &= -2\omega \sin\varphi \cdot \dot{x}\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

で与えられる。ここで，ωは地球自転の角速度，φは緯度であり，$2\omega \sin\varphi$はコリオリ係数と呼ばれ，fで示される。

この式を解いて時間tの原点を適当に選べば，

$$\left.\begin{aligned}\dot{x} &= v \sin(ft) \\ \dot{y} &= v \cos(ft)\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1969号

** 北海道大学低温科学研究所　流氷研究施設研究報告　第69号

となり，vを円周上速度とするような円運動をすることがわかる。この円は慣性円と呼ばれ，その半径rは円周上速度vに比例して

$$r = v/f \tag{3}$$

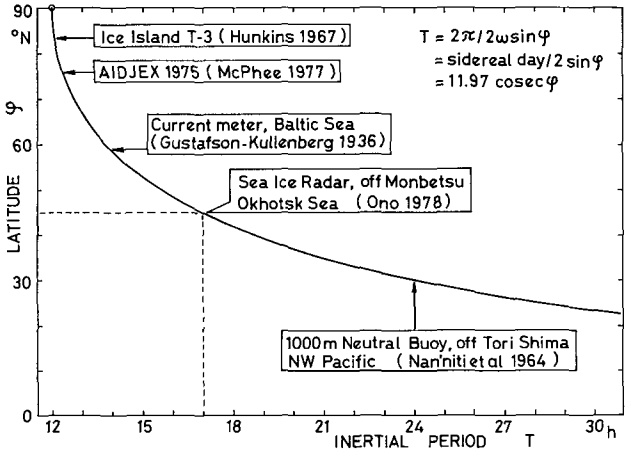
となる。円運動の周期Tは慣性周期と呼ばれ，円周上速度vによらず一定であり，

$$T = 2\pi/f \tag{4}$$

となって緯度のみの関数である。

海水の慣性振動は，Gustafson-Kullenberg の 1933 年 8 月のバルト海における観測[1]や，南日ら (1964) の烏島沖での 1,000 m 中立浮きによる観測[2]をはじめとして，多くの観測例を見出すことができる。

一方，氷の慣性振動の観測例は，Hunkins (1967) の氷島 T-3 での観測[3]と，McPhee (1977) の AIDJEX-'75 基地での観測[4]が報告されているだけである。第 1 図の緯度と慣性周期との関係からわかるように，北氷洋では慣性周期が 12～12.5 時間と半日潮周期 (12.4 時間) に近いために，両者を分離したり，慣性周期と決定したりするのが極めてむずかしい。Hunkins は，周期運動の振幅が風速とよい相関を示すこと，運動の位相が時と共に不規則に変ること，動きが氷や表層水によって拘束されることを，観測した周期運動が慣性振動であるとする根拠に用いている。



第 1 図 慣性周期の緯度変化と慣性振動の観測例

流氷レーダーの観測域は，緯度約 45° N で慣性周期は約 17 時間であり，半日潮周期，日潮周期のいずれからも充分離れているので，流氷の慣性周期運動を調べるのに適している。

III. トロコイド流跡

このような慣性周期運動が流氷の動きに含まれていると考えて，流氷の流跡を運動学的に取扱うことを試みた。

円が一本の線上をすべらないで転がるとき，その円の半径上またはその延長上の任意の一点が描く軌跡をトロコイドという。いま直線上を転がる円を考えることにし，その直線をx軸に，それに垂直にy軸をとる。円の半径をR，考える点の円中心からの距離をrとすれば，トロコイドの式は

$$\left.\begin{aligned} x &= R\theta - r\sin\theta \\ y &= R - r\cos\theta \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

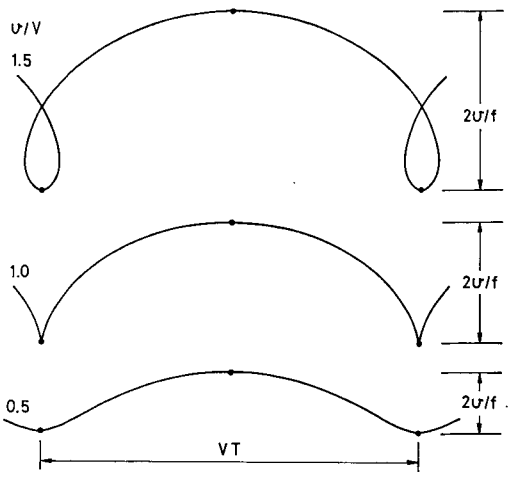
となる。ここでθは円中心から直線におろした垂線と動径ベクトル$\vec{r}$とのなす角である。円周

上の点すなわち $r=R$ の点の軌跡はサイクロイドである。

前節でのべた慣性周期 T, 慣性円半径 r の時計廻りの円運動をする氷が x 軸方向に速度 V で運ばれる場合を考えると, その氷の流跡は, VT を円周とする半径 R の円が x 軸を転がるとき, その円の中心から r の距離にある点が描くトロコイド, すなわち (5) 式となる。この円の円周 $2\pi R=VT$ と (4) 式 $T=2\pi/f$ とから $R=V/f$ であり, (3) 式の $r=v/f$ とともに (5) 式に代入すれば, トロコイド流跡の式は

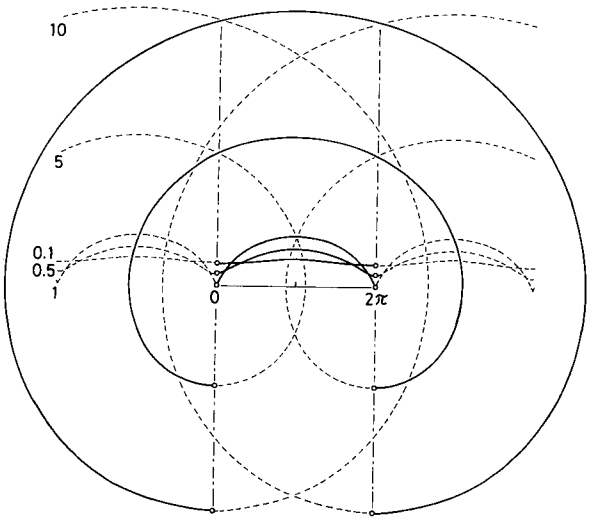
$$\left.\begin{aligned} fx &= V\theta - v\sin\theta \\ fy &= V - v\cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

と書くことができる。



第2図　トコロイド流跡の分析法

第2図に示すように, $v=V$ のときサイクロイド, $v>V$ のときループをもつトロコイド, $v<V$ のとき蛇行型のトロコイドとなる。そして, このような流跡の波長から V, その振幅から v の値を知ることができる。両者の比をとると, トロコイドの形はこの v/V の値で表現することができる。



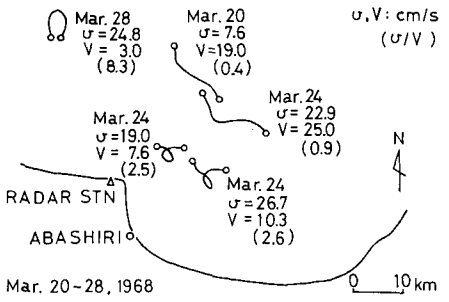
第3図　種々の v/V 値のトロコイド

第3図には, 種々の v/V 値のトロコイドを示した。この値が極めて大きくなると点 $(\pi, 0)$ を中心とする円に近づき, また極めて小さくなると x 軸に平行な直線に近づく。

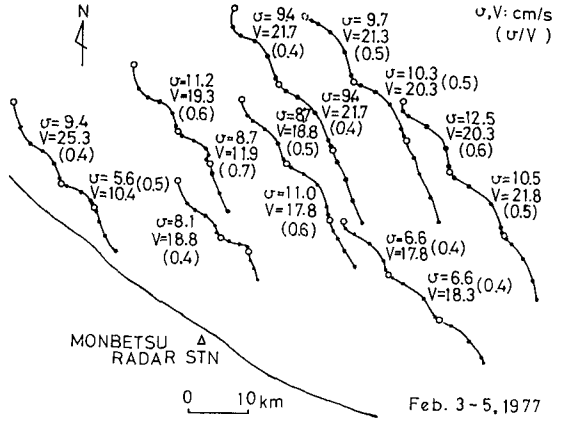
IV. 流氷のトロコイド流跡例

流氷レーダーが設置された1967年冬いらい, レーダー像上にあらわれた氷野内の特徴的な点に着目して, その動きを追跡したり, そのような点を何点か選んでそれらの点で囲まれた氷野の変形を調べたりする研究が続けられてきた。

田畑ら (1969) の論文[5]には, 1968年冬の網走沖における氷野内の特徴点の動きを追跡した数多くの流跡が示されている。それらの流跡は3時間ごとの観測をもとに描かれているので, 慣性周期以上にわたる流跡を適当な18時間で区切ると, トロコイドに類似した曲線を得ることができた。そのような流跡を, 第2図の方法で求めた v および V の値や v/V 値と共に, 第



第4図 種々の v/V 値の流跡例
○印から○印までがほぼ慣性周期，v, V の単位は cm/s，( ) 内の数値は v/V



第5図 流氷の流跡の分析例
○印から○印までがほぼ慣性周期 (18時間)

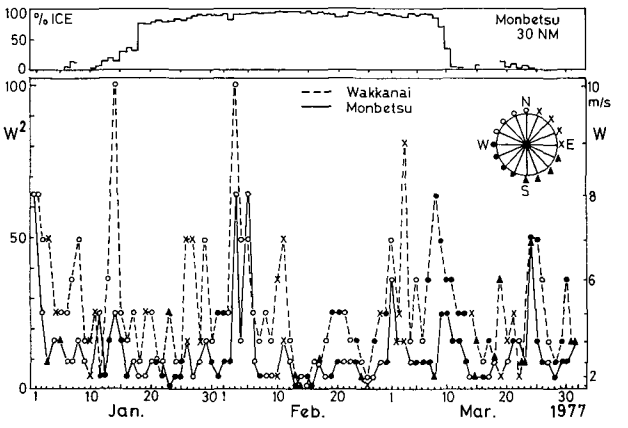
4図に示した。得られた v/V の値は 0.4 から 8.3 にわたり，$v<V$ と $v>V$ のいずれの例をも見ることができた。

第5図は，河村 (1977) の論文[6] 中の流跡について同様の試みを行なったものである。広い範囲にわたって同じ型の流跡が見られ，v/V 値も 0.4～0.6 とほぼ一定の値をとっていた。

V. 考　　察

第5図の流跡が得られた1977年冬には，流水到来前の12月末に流向流速計を設置し，流氷退去後の3月末に回収するという方法で，紋別港の北東4.8海里点と7.6海里点の水面下25mで，流氷の下の海潮流の測定を行なっていた。この測流結果と沿岸の風の資料とを用いて，第5図の流跡の考察を試みる。

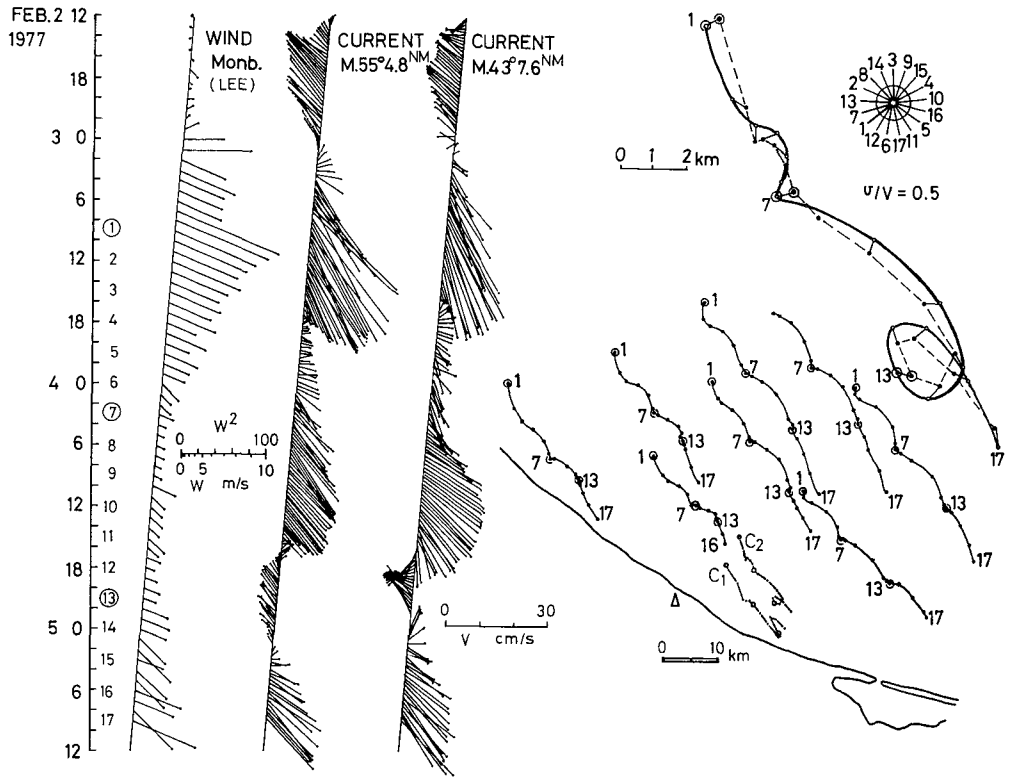
北海道のオホーツク海岸では，北西の季節風のとき，陸上地形の影響を受けて南西風が吹くことが知られている[7]。それゆえ，沖合の風を推測するにあたって，最寄りの紋別測候所の風の資料と，南西風への変化がない稚内地方気象台の風の資料とを用いることにした。流氷におよぼす風の応力は風速の2乗に比例するから，第6図には，1977年1～3月の稚内および紋別の日平均風速の2乗を縦軸にとって示した。その各点は，日最大風速時の風向を4方位に分けて，それぞれの記号で表わした。第6図の上の図は，紋別レーダー局から30海里内の海域面積に対する流氷域面積の割合を百分率で示したものである。この図から，2月3日には紋別および稚内でこの冬最大の北西風が吹き，4日には少し



第6図 紋別と稚内における日平均風速の2乗および紋別沖30海里内の氷域百分率

おさまったが，5日には再び強くなったこと，氷量は2月2日に若干減少していたが3日以後は増加しており，氷野が動きうる状態であったことがわかる。2月3日から5日にかけての第5図の流跡は，このような状況下で生じた氷の動きを示している。

第7図の左側には，上から下へ時間軸をとり，2月2日から5日にかけての，紋別の毎時の風速の2乗を風下側に示した風ベクトルと，紋別沖4.8海里および7.6海里における海面下25 mの海潮流ベクトルとを示した。ただし，海潮流ベクトルは磁北を基準に描いてあり，偏角(磁北は真北より8°50′W)の補正は行なっていない。上述の風速推移と，海岸線にほぼ平行な潮流楕円の特徴が顕著に見られる。



第7図　トロコイド流跡の解析例

第7図の右下には第5図の流跡を示し，それと同期間の測流結果を用いて，それぞれの流速計位置から3時間ごとの流程ベクトルを連ねたものを C_1, C_2 として描いてある。氷の流跡は，その形はこの流程ベクトルの形にほぼ似ているが，その大きさは1.5～2倍大きいことがわかる。流跡の3時間ごとの観測時刻につけた番号は，左側の時間軸にも記入してあり，それぞれの時刻に対応する。海潮流が海岸に平行な南東流を示さず北西流をしていた2月4日の16時頃から5日の2時頃にかけて，すなわちこの番号の12から14のあいだでも，氷は停滞気味であるが北西には動いていない。このことは弱い風ではあったが，風による南東方向への動きとこの海潮流とがほぼ打消しあっていたと考えることができる。

いま氷の流跡がトロコイド流跡で近似でき，もし前述の v や V を独立に風や海流と関係づ

けることができれば，流氷の運動を考える上で極めて有効である。それで，Vは発達した吹送流を含む海潮流で，氷の底面下ある深さの境界層の下の水の動きに関係すると考え，vは定常的吹送流に達するまでの過渡過程で風速変化が主要因であると考える。

一例として，$r=600$ mの慣性周期の等速円運動が，時間的に方向と速度とが変化する$V(t)=C_2$の流程ベクトルで運ばれる場合の合成流跡を求めると，第7図右上の実線となる。円運動を図中に示した17方位の1の方向から始めると，合成曲線は1～10の期間で流氷の流跡を海流の流程ベクトルよりも一層よく似た形で与えることがわかる。11以後はループを描いて北西流を示して合わなくなるが，これは若干半径を変え位相をずらすと北西流が消え停滞するようになる。

合成流は区間最大流速 $v+V(t)$，区間最小流速 $V(t)-v$ をもつことになる。風が弱いときでもある区間をとったとき，氷の流速が海流よりも大きいのはこれで説明ができる。しかし，全期間の流跡が流程ベクトルよりも1.5～2倍大きいのは，これでは説明つかず，氷の下の流速が吹送流を含んで25 m深の流速より大きいことを示していると考えねばならない。

VI. 結　　語

レーダーでとらえた流氷の流跡には，慣性振動が含まれていることがわかった。このような流跡を慣性円運動が速度$V(t)$で運ばれる場合の軌跡，トロコイド流跡として近似し，運動学的な分析を試みた。

適当な半径の慣性円運動を実測した25 m深の海潮流流程ベクトルに沿って動かすと，約1日にわたって実際の流氷の流跡とよく似た合成曲線が得られた。

この研究は，文部省科学研究費自然災害特別研究「沿岸海域における流氷の運動予測の研究」(代表者　田畑忠司) の分担課題のひとつとして現在継続中のものである。ここに記して謝意を表します。

文　　献

1) Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming 1942 The oceans, their physics, chemistry and general biology. Prentice-Hall, 1087 pp. 参照.
2) Nan'niti, T., H. Akamatsu and T. Nakai 1964 A further observation of a deep current in the East-North-East Sea of Torishima. *Oceanog. Mag.*, **16**, 11-19.
3) Hunkins, K. 1967 Inertial oscillations of Fletcher's Ice Island (T-3). *J. Geophys. Res.*, **72**, 1165-1174.
4) McPhee, M. G. 1977 A simulation of inertial oscillations observed in the drift of manned ice stations. *AIDJEX Bull.*, **36**, 65-85.
5) 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.
6) 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.
7) 気象庁 1977　風向別・風速階級別度数表 (1967～1976). 気象庁観測技術資料第42号，321 pp.

Summary

Observations of drift and deformation of sea ice off the Okhostk sea coast of Hokkaido have been made since 1967, using a sea-ice radar system at the Sea Ice Research Laboratory. A time-lapse motion picture of moving sea ice tracked on the radar screen indicates that the ice changes its form with such movements as packing, loosing, eddying and rotating. Even when the motion picture shows a complicated ice motion, the trajectory of each ice target selected in the image of an ice field indicates a simple curve resembling a trochoid. The period of the trochoidal trajectory of sea ice, which is estimated to be about 17 to 18 hours, is closely equal to the inertial period in this region.

Consider that an ice target makes an inertial circle movement with a circumferential velocity of v and that the center of the circle with a velocity V is carried along the x-axis. The trochoidal expression of the trajectory of the ice target is

$$\left.\begin{aligned} fx &= V\theta - v\sin\theta \\ fy &= V - v\cos\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

where $f=2\omega\sin$ (latitude) is the Coriolis parameter. The trajectory becomes a cycloid when $v=V$, a looped trochoid when $v>V$, and a waved trochoid when $v<V$, as shown in Figs. 2 and 3. The magnitudes of v and V are obtained respectively from the amplitude and the wave length of the trajectory, as illustrated in Fig. 2.

Examples of the trochoidal trajectory are shown in Figs. 4 and 5, with the values of v, V and v/V (ranging from 0.4 to 8.3, as obtained in Fig. 4).

Should the values of v and V be relatable to a function of wind and/or current independently, it will be a great advantage to the understanding of the drift of sea ice.

Illustrations in the left-hand side of Fig. 7 represent the leeward vectors of the square of the wind speed observed hourly at the Monbetsu meteorological observatory and the vectors of current speed observed under the ice at the depth of 25 m from the sea surface at locations 4.8 and 7.6 nautical miles northeastward from Monbetsu.

The progressive current vectors C_1 and C_2 of these current data are shown in a chart of trajectories of ice targets in the right-hand side. It is recognized from the figure that the velocity of the ice is greater than that of the current under the ice even under a condition of the weak wind. An attempt is made to draw a curve which superimposes the circumferential velocity v of inertial cricle motion on the progressive current vextor $C_2=V(t)$, as shown in the upperright-hand side of the figure. The resultant velocity is obtained as $v+V(t)$ at its maximum, while the shape of the resultant curve becomes more similar to the trajectory of ice than the shape of the progressive current vector, C_2 itself.