



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ハドソン湾南東部海氷下海洋境界層の観測的研究 II : 運動量フラックスおよび乱流強度の観測
Author(s)	白澤, 邦男; SHIRASAWA, Kunio; Ingram, R. Grant
Citation	低温科学. 物理篇, 48, 91-101
Issue Date	1990-03-12
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18586">https://hdl.handle.net/2115/18586</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	48_p91-101.pdf



Kunio SHIRASAWA and R. Grant INGRAM 1989 Measurements in the Boundary Layer under Landfast Ice in the Southeast Hudson Bay II. —Observations of Momentum Flux and Turbulence Intensity—. *Low Temperature Science, Ser. A, 48*. (With English Summary p. 100)

## ハドソン湾南東部海水下海洋境界層の観測的研究 II

—運動量フラックスおよび乱流強度の観測—\*,\*\*

白 澤 邦 男

(低温科学研究所)

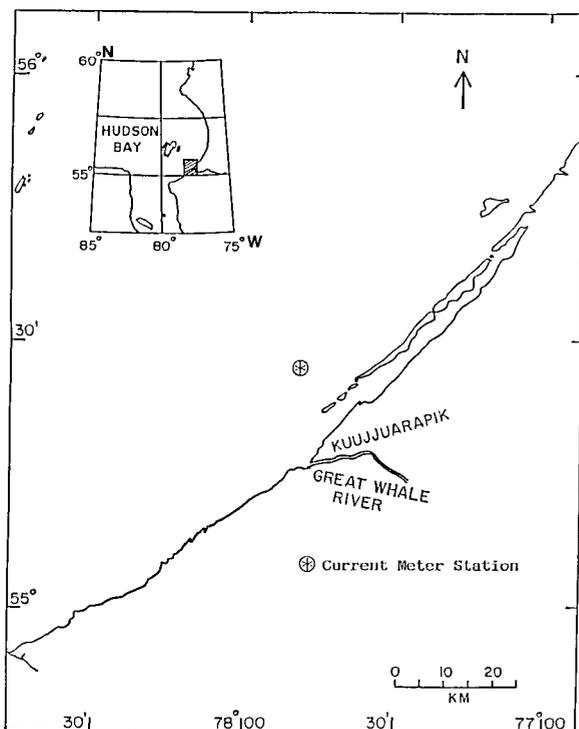
R. Grant Ingram

(マギル大学気象学科)

(平成元年 10 月受理)

### I. はじめに

ハドソン湾南東部の Great Whale River (第 1 図参照) の沖合では、沿岸定着水海洋境界層の混合過程や海水と海水との境界面の物理機構の研究が行われている<sup>1,2)</sup>。また、融氷期の ice algae の挙動が海水と海水の境界面の物理機構と密接な関係にあることが示唆されている<sup>3,4)</sup>。その機構解明のために、カナダ海洋漁業省の Maurice Lamontagne Institute, McGill 大学, Laval 大学の共同で、「Recruitment of Anadromous Fish in Arctic Waters: Regulation by Underice Hydrodynamics and Microalgal Production」の研究が進められており、北大流氷研究施設も 1988 年 4 月～5 月にかけて参加し、海水下の流速や水塊構造の観測を行った<sup>2)</sup>。3 成分超音波流速計を用いての観測から海水下約 1.5 m の均質な層の平均流速は約 2 から 6 cm/s であり、深さ 1 m での抵抗係数は



第 1 図 流速観測基地の位置

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3307 号

\*\* 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設研究報告第 130 号

0.0001 から 0.0074 であった<sup>2)</sup>。著者らは 1989 年 4 月から 5 月にかけて、前年 (1988 年) と同様に、超音波流速計を用いて海水下境界層の流速や乱流強度の測定を行った。また、融氷期の海氷と海水の境界面の物理環境と生物環境の関係を調べるために、今回は先ず長期間 (約半日程度) の運動量フラックスの連続測定を試みた。本研究ではその結果の一部を報告する。

## II. 運動量フラックスおよび乱流強度の測定方法

海水下海洋境界層が中立状態で定常流であるならば、海水が海氷底面に及ぼすせん断応力、すなわち Reynolds (レイノルズ) 応力  $\tau$  は、

$$\tau = -\rho \overline{u_1 u_3} = \rho u_*^2 = \rho C_z \bar{U}_z^2 \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $\rho$  は海水の密度、 $-\overline{u_1 u_3}$  は底面における運動量フラックスで平均流の流向の変動成分 ( $u_1$ ) と鉛直方向の変動成分 ( $u_3$ ) との積の時間平均、 $u_*$  は摩擦速度、 $C_z$  は深さ  $Z$  での抵抗係数、 $\bar{U}_z$  は深さ  $Z$  での平均流速である。超音波流速計のように流速の変動を測定することができる計測器を用いれば、運動量フラックスを直接求める (渦相関法) ことができる。

また、境界層中の乱流強度は、

$$\sigma_1 / \bar{U} = \sqrt{\overline{u_1^2}} / \bar{U} \quad (2)$$

$$\sigma_2 / \bar{U} = \sqrt{\overline{u_2^2}} / \bar{U} \quad (3)$$

$$\sigma_3 / \bar{U} = \sqrt{\overline{u_3^2}} / \bar{U} \quad (4)$$

で定義される。式 (2), (3), (4) はそれぞれ主流向、横方向、鉛直方向の乱流強度を表している。

本研究では、3 成分超音波流速計を用いて海水下境界層の流速 3 成分を測定し、運動量フラックスや乱流強度を求めた。

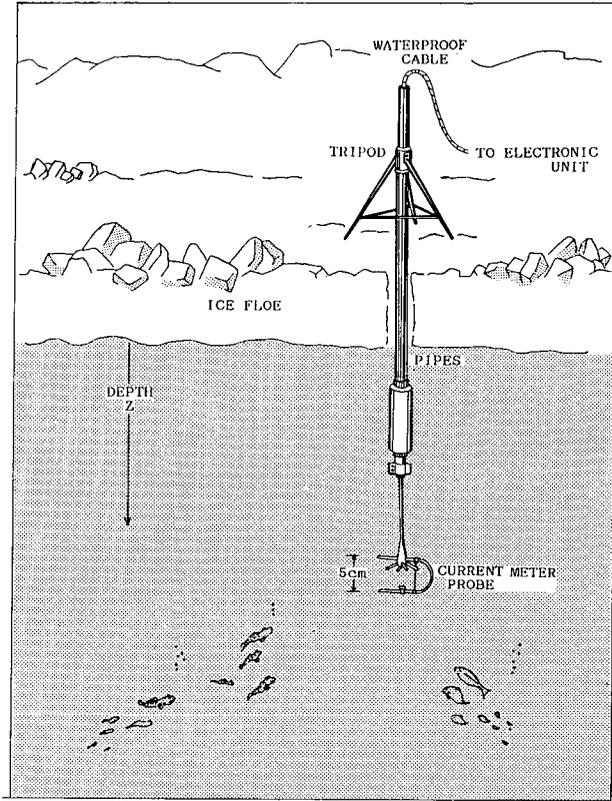
## III 観測および解析

1989 年 4 月下旬から 5 月上旬まで、ハドソン湾南東部の Great Whale River 河口の Kuujuarapik (第 1 図参照) にある Laval 大学所有の北方研究センターに滞在した。観測は第 1 図の (⊗) で示される河口から約 20 km 沖の氷上基地で 4 月 29 日から 5 月 3 日にかけて行われた。基地にはテントを張り発電器も備えた。センターから氷上基地までの輸送はスノーモービルとヘリコプターで行った。観測点付近は氷厚 1.3 m の平坦な定着氷であり、少なくとも数 100 m 以内には氷丘は存在していなかった。

観測は、境界層の成層状態を調べるための CTD (電気伝導度・温度・水深) プロファイラーによる測定、水温の連続測定、3 次元超音波流速計による流速 3 成分の測定とから構成された。

4 月 29 日から 5 月 3 日の観測期間中に数回、テントの中に開けられた氷の穴から CTD プロファイラー (Sea-Bird 社製 Model SBE-19) を海中に投入し、全層の温度と塩分の鉛直分布を測定した。サーミスター温度計を用い海水下底面より 50 cm の層の水温を連続記録 (Grant

社製 SQ-1201 データ・ロガー) した。使用した 3 次元超音波流速計 (ユニオン・エンジニアリング製 Model SD-10) のサンプリング周波数は 50 Hz, 分解能は 1 mm/s, 測定精度は流速が 50 cm/s 以下の時  $\pm 5$  mm/s である。プローブの大きさは約  $4 \times 5 \times 9$  cm である。流速計を第 2 図に示すように、テントの外に開けられた小さな穴から氷下に固定した。流速計の出力電圧は、水中ケーブルを通してテントのなかに設置された計測器本体に、更にデータ・ロガーやアナログ・データ・レコーダに記録された。プローブを氷の底面を基準 ( $Z=0$  m) にして、 $Z=0.03$  m から 4.18 m (底面からプローブの中心までの距離) の間数カ所で固定し、それぞれの深さで約 3 分間の流速 3 成分を記録した。また、約半日間の運動量フラックスの連続測定を行った。

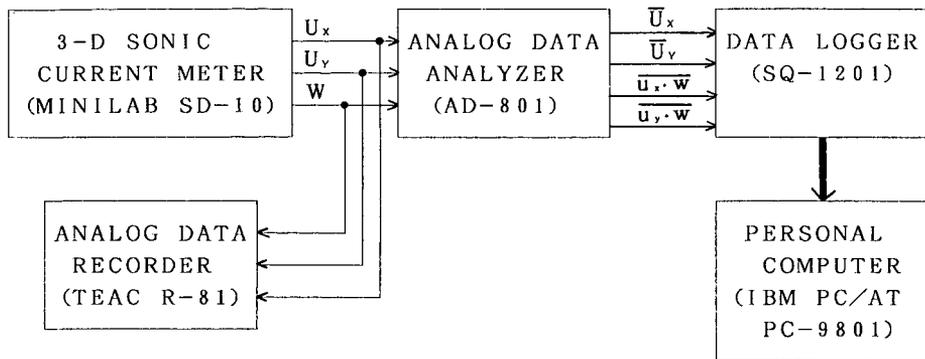


第 2 図 流速測定装置の概念図

観測現場での流速記録の収録方法を第 3 図に示す。計測器本体 (Minilab SD-10) の流速 3 成分 ( $U_x, U_y, W$ ) はアナログ・データ・レコーダ (TEAC R-81) に収録され、後に解析された。同時に、3 成分はアナログ・データ・アナライザ (海上電機製 AD-801) に入る。AD-801 はミーン・メータとフラックス・メータとから構成されている。ミーン・メータは入力電圧 (ここでは流速の 2 成分  $U_x$  と  $U_y$ ) の直流成分の 10 分間の移動平均、つまり ( $U_x, U_y$ ) の 10 分間移動平均値 ( $\bar{U}_x, \bar{U}_y$ ) をアナログ出力する。フラックス・メータは 2 つの入力電圧の交流成分の積の 10 分間の移動平均値をアナログ出力する装置である。ここでは、2 つの入力電圧 ( $U_x, W$ ) の変動成分 ( $u_x, w$ ) の積 ( $u_x \cdot w$ ) の 10 分間の移動平均値 ( $\overline{u_x \cdot w}$ )、つまり運動量フラックスの  $X$  成分の 10 分間移動平均値を計算することになる。同様に、( $U_y, W$ ) の変動成分 ( $u_y, w$ ) の積 ( $u_y \cdot w$ ) の 10 分間移動平均 ( $\overline{u_y \cdot w}$ ) も計算され、 $Y$  成分も求められる。以上のアナログ出力はデータ・ロガー (Grant 社製 SQ-1201) にデジタルの時系列として収録された。

データ・ロガーに収録された流速記録は、後に研究室のパーソナル・コンピュータで処理された。ロガーに収録された記録を用いて、平均流速や運動量フラックスが次の式

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{U}_x^2 + \bar{U}_y^2} \quad (5)$$



第3図 データ収録および解析システム

$$-\overline{u \cdot w} = \sqrt{(\overline{u_x \cdot w})^2 + (\overline{u_y \cdot w})^2} \quad (6)$$

から計算された。

また、(2), (3), (4) 式の乱流強度は、先ず  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $W$  の3成分の時系列データからそれぞれの成分の平均値を計算し、主流向を求め、主流向に座標軸を回転し、主流向の変動成分 ( $u_1$ )、横方向の変動成分 ( $u_2$ )、鉛直方向の変動成分 ( $u_3$ ) を求め、計算された。

#### IV. 結果および考察

海水下の水塊の成層状態を調べるために、CTD プロファイラーにより水温、塩分量の鉛直分布の観測を行った。観測期間中数回全層にわたり観測したが、上層部約 10 m はほぼ均質で塩分量 27.8‰、水温  $-1.5^\circ\text{C}$  であり、この期間まだ結氷温度であった。また、水温の連続記録も  $-1.5^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$  の精度) で一定であった。このことから、本研究の測定は中立状態で行われたといえよう。

##### 1. 乱流強度

第1表に、平均流速、流向、(2), (3), (4) 式から求めた乱流強度などを示す。表の結果は測定時間が約3分間である。海水底面からの深さ 0.03 m から 4.18 m の範囲で、平均流速は 0.7 から 7.0 cm/s であった。観測基地は定着氷上であり、動きはなかった。深さ 0.03 m から 4.18 m (Run No. 3- のシリーズ) まで往復するのに約2時間かかったが、流向は、底面から約 1.5 m までは西からであり、それ以深北に向きを変え 4 m では北北東であった。

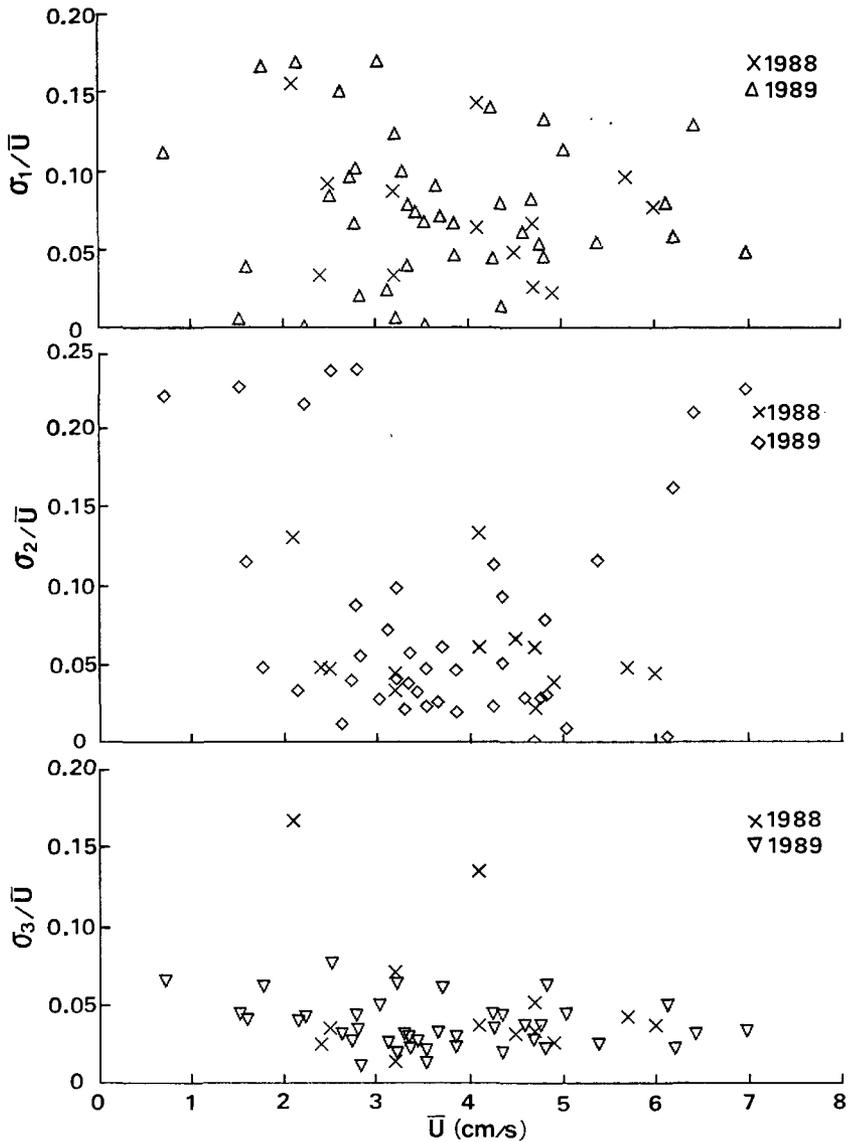
Run No. 6- のシリーズでも 4 m まで往復するのに約2時間かかったが、流向は約 1.5 m までは西からで、それ以深北に向きを変えた。

乱流強度と平均流速の関係を第4図に示す。図には第1表の  $\sigma_1/\bar{U}$  を ( $\Delta$ ) で、 $\sigma_2/\bar{U}$  を ( $\diamond$ ) で、 $\sigma_3/\bar{U}$  を ( $\nabla$ ) で示し、1988年の測定で求めた値<sup>2)</sup> を ( $\times$ ) で示した。主流向の乱流強度 ( $\sigma_1/\bar{U}$ ) は高々 0.17 であり、1988年の値 ( $\times$ ) と同程度である。また、顕著な流速依存性はみられない。 $\sigma_2/\bar{U}$  と  $\sigma_3/\bar{U}$  は共に、若干の大きい値を除き 1988年と本研究とで同程度である。 $\sigma_3/\bar{U}$  は他と比べばらつきが小さい。

第1表 超音波流速計の測定結果 (1989年4月30日~5月1日, ハドソン湾)

Run No.	測定日	測定開始時間 (EST)*	深さ $z$ (m)	流向 (deg T)	流速 $\bar{U}_z$ (cm/s)	乱流強度 $\frac{\sigma_1}{\bar{U}}$	乱流強度 $\frac{\sigma_2}{\bar{U}}$	乱流強度 $\frac{\sigma_3}{\bar{U}}$
3-2	April 30	16:44	0.03	272	2.2	0.169	0.033	0.040
3-3	April 30	16:50	0.13	262	3.3	0.100	0.021	0.031
3-4	April 30	16:55	0.33	263	4.7	0.082	0.001	0.028
3-5	April 30	17:01	0.68	271	3.5	0.067	0.023	0.021
3-6	April 30	17:07	1.18	325	2.2	0.001	0.216	0.043
3-7A	April 30	17:13	1.68	347	3.2	0.007	0.040	0.019
3-7B	April 30	17:16	2.18	340	3.5	0.002	0.047	0.013
3-8	April 30	17:18	2.18	348	4.4	0.014	0.093	0.019
3-9	April 30	17:24	2.68	351	4.3	0.044	0.114	0.035
3-10	April 30	17:29	3.18	353	5.4	0.055	0.116	0.025
3-11	April 30	17:35	3.68	26	6.4	0.129	0.210	0.031
3-12	April 30	17:43	4.18	24	7.0	0.048	0.225	0.033
3-13	April 30	17:49	3.68	20	6.2	0.058	0.163	0.022
3-14	April 30	17:54	3.18	358	4.8	0.045	0.079	0.022
3-15	April 30	18:00	2.68	335	2.8	0.102	0.238	0.034
3-16	April 30	18:06	2.18	309	2.5	0.084	0.237	0.077
3-17	April 30	18:11	1.68	276	3.2	0.123	0.099	0.064
3-18	April 30	18:17	1.18	263	4.8	0.133	0.030	0.062
3-19	April 30	18:23	0.68	254	6.1	0.080	0.004	0.050
3-20	April 30	18:28	0.33	249	5.0	0.113	0.009	0.044
3-21	April 30	18:34	0.13	258	4.2	0.140	0.023	0.044
3-22	April 30	18:39	0.03	263	3.0	0.170	0.028	0.050
6-2	May 01	17:38	0.03	280	1.8	0.167	0.048	0.061
6-3	May 01	17:43	0.13	269	2.7	0.096	0.040	0.027
6-4	May 01	17:50	0.33	259	3.4	0.079	0.057	0.022
6-5	May 01	17:55	0.68	263	3.8	0.066	0.020	0.023
6-6	May 01	18:00	1.18	277	3.4	0.074	0.032	0.027
6-7	May 01	18:06	1.68	286	3.3	0.039	0.037	0.029
6-8	May 01	18:11	2.18	313	2.8	0.066	0.088	0.043
6-9	May 01	18:16	2.68	326	1.6	0.038	0.116	0.041
6-10	May 01	18:21	3.18	313	0.7	0.111	0.222	0.065
6-13	May 01	18:36	3.68	330	1.5	0.006	0.227	0.044
6-15	May 01	18:47	2.68	342	2.8	0.020	0.055	0.011
6-16	May 01	18:53	2.18	302	3.1	0.024	0.072	0.026
6-17A	May 01	18:58	1.68	281	3.8	0.046	0.047	0.030
6-18A	May 01	19:03	1.18	293	3.7	0.071	0.061	0.061
6-19A	May 01	19:08	0.68	276	4.8	0.054	0.028	0.037
6-20A	May 01	19:14	0.33	262	4.6	0.061	0.029	0.037
6-20B	May 01	19:16	0.33	266	4.4	0.079	0.051	0.043
6-21	May 01	19:18	0.13	271	3.7	0.091	0.025	0.032
6-22	May 01	19:23	0.03	272	2.6	0.151	0.012	0.032

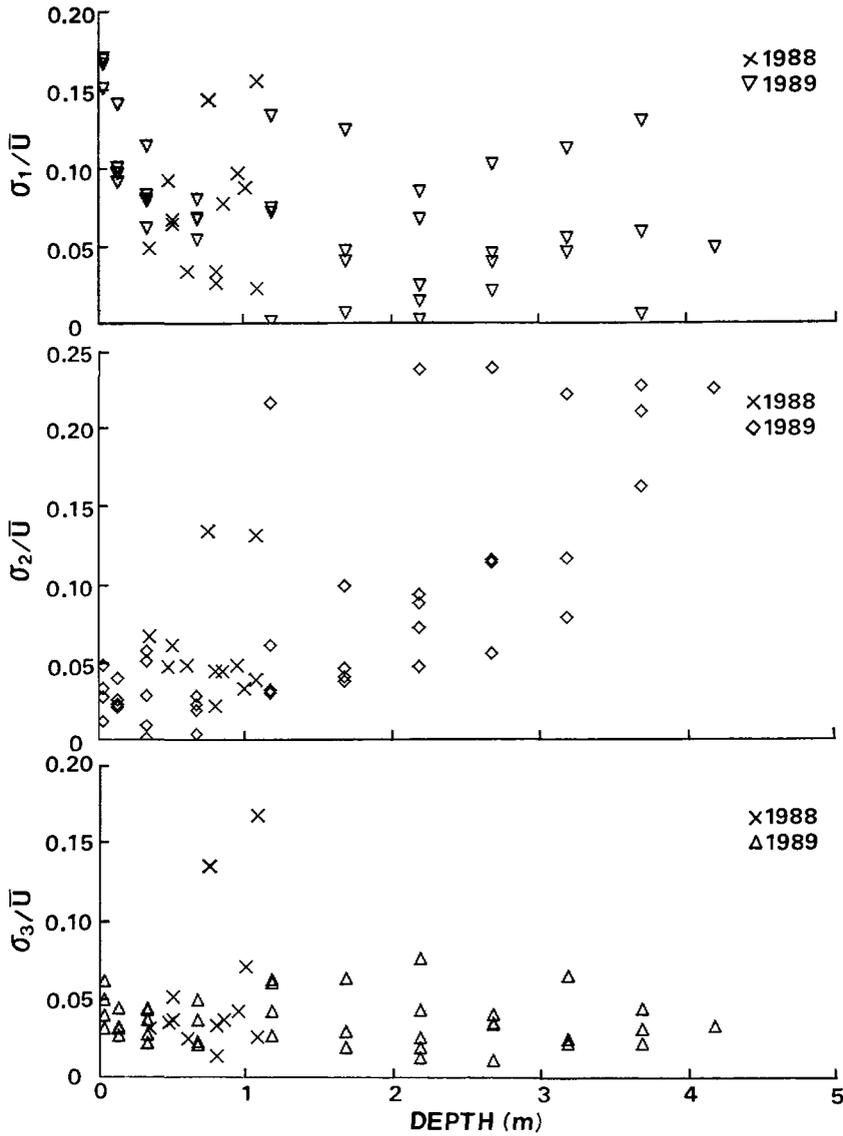
\* EST: Eastern Standard Time (東部標準時)



第4図 乱流強度と流速の関係

本研究で求めた乱流強度の値を他の研究結果と比べてみよう。Gordon<sup>5)</sup>は彼自身の南極のマクマード・サウンドの定着氷下での観測結果と、北極の漂流中の海水下境界層、また海底境界層での測定結果と比較している。深さが0.3から4mの範囲で、 $\sigma_1/\bar{U}$ は0.08から0.20、 $\sigma_2/\bar{U}$ は0.05から0.43、 $\sigma_3/\bar{U}$ は0.02から0.10であり、本研究の結果はこれらの範囲内であった。

次に乱流強度と深さの関係を第5図に示す。第4図と同じ記号を用いて第1表の $\sigma_1/\bar{U}$ 、 $\sigma_2/\bar{U}$ 、 $\sigma_3/\bar{U}$ を深さに対してプロットした。1988年は海水下約1.5mのほぼ淡水層での測定であったが、本研究では海水下約10mまで均質な海水層であった。深さ約1mまで $\sigma_1/\bar{U}$ 、 $\sigma_2/\bar{U}$ 、 $\sigma_3/\bar{U}$



第5図 乱流強度と水深の関係

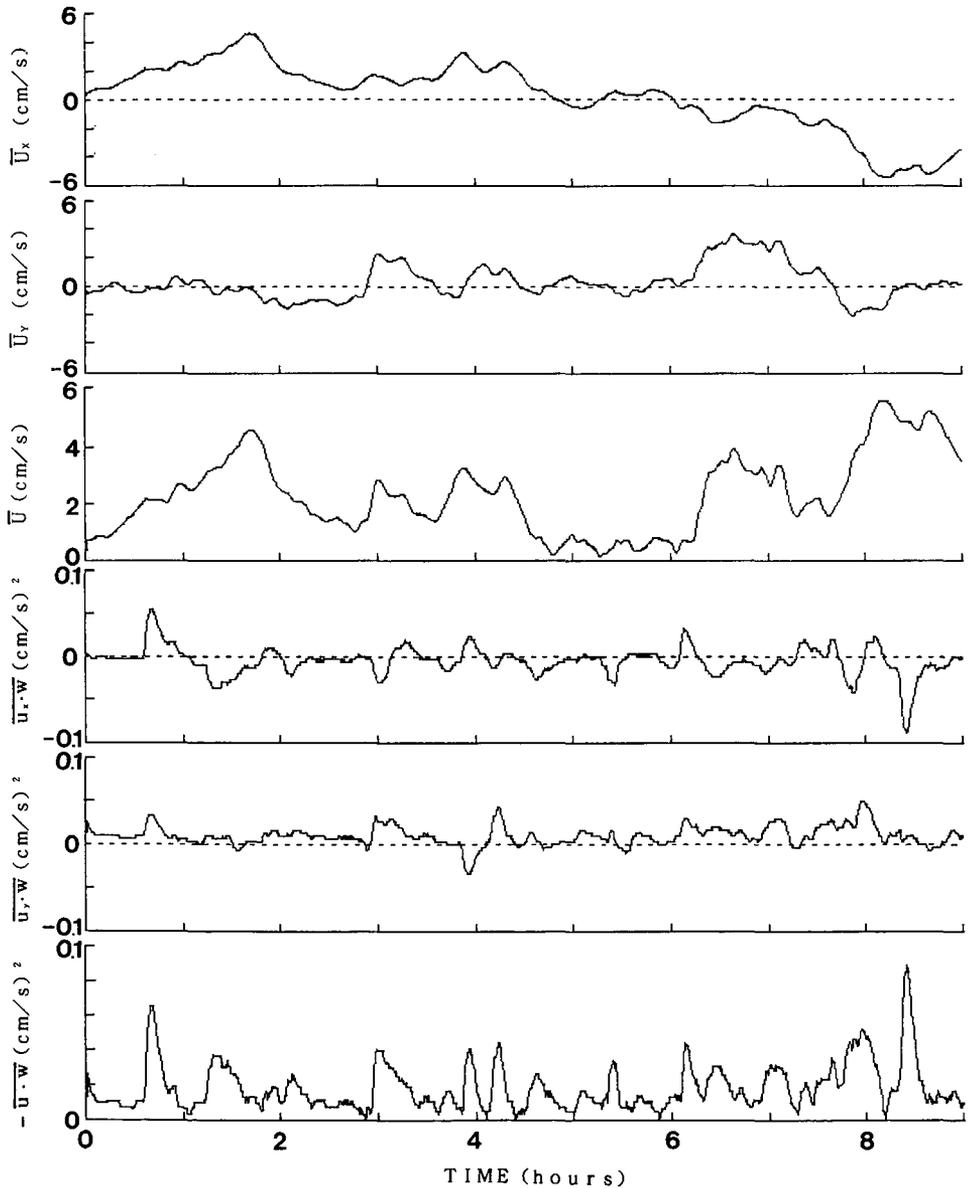
$\bar{U}$ とも1988年と本研究とは同程度である。 $\sigma_1/\bar{U}$ は海氷底面近傍で0.17と高い値を示し、深さの増加と共に減少する傾向が見られる。 $\sigma_2/\bar{U}$ は深さと共に増加の傾向が見られるが、他の場合と比べばらつきが大きい。 $\sigma_3/\bar{U}$ は深さの増加に共いゆるやかに減少する傾向がみられる。

潮汐により流速が変動する海底での乱流強度の場合は<sup>6)</sup>、海底から約7 mまで遠ざかるに従い $\sigma_1/\bar{U}$ の乱れが弱くなる。また、 $\sigma_3/\bar{U}$ の場合もゆるやかではあるが減少の傾向にあり、本研究も同様であった。

本研究では海氷下約4 mの深さまでの乱流強度のプロファイルを測定したが、海氷下境界層（大気の場合の接地境界層に対応する）の厚さを検討してみよう。境界層（いわゆる運動量

フラックスが一定の層と呼ばれている)の厚さは中立状態の時  $0.045 u_* / f$  ( $f$  は Coriolis parameter) で表わせる<sup>7)</sup>。 $u_*$  が 0.3 から 1.0 cm/s で  $f = 1.2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$  (55°N) の時、厚さは約 1 から 4 m となる。今回の測定では海水下約 1.5 m 付近から流向がスパイラルになっているように見える。また、第 5 図の乱流強度と深さの関係では、ばらつきは大きいものの  $\sigma_1 / \bar{U}$  と  $\sigma_2 / \bar{U}$  は  $Z > 1.5$  m で深さと共に増加の傾向が見られる。このことから、境界層の厚さは約 1.5 m であっ

RUN NO. 4 (30 APRIL 1989 22:28-01 MAY 1989 07:28 EST)



第 6 図 10 分間移動平均の流速 ( $\bar{U}_x$ ,  $\bar{U}_y$ ,  $\bar{U}$ ) および運動量フラックス ( $\overline{u_x \cdot w}$ ,  $\overline{u_y \cdot w}$ ,  $-\overline{u \cdot w}$ ) の時系列 (水深 1.98 m)

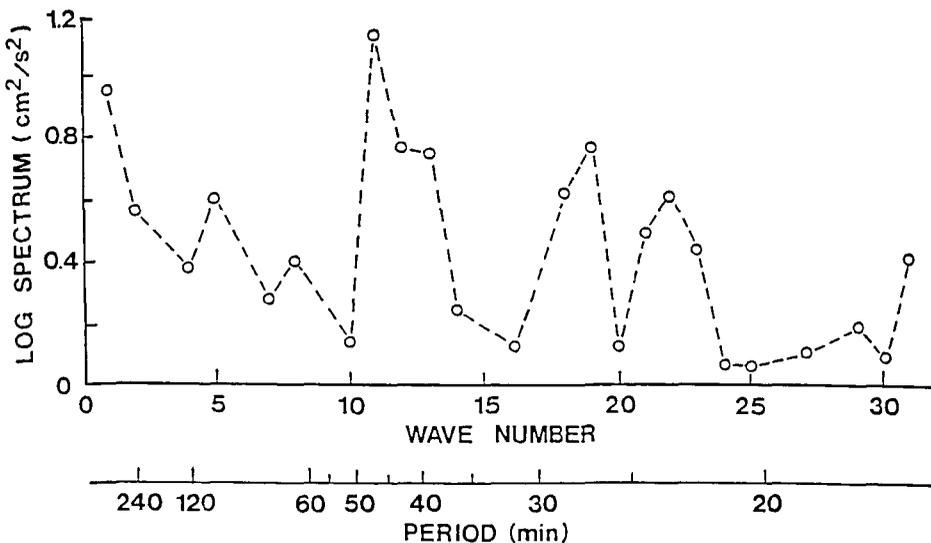
たと思われる。

## 2. 運動量フラックス

式(5)、(6)より求めた流速および運動量フラックスの時系列を第6図に示す。図の上からそれぞれ流速の  $X$ 、 $Y$  成分、式(5)により合成した流速、運動量フラックスの  $X$ 、 $Y$  成分、式(6)により合成したフラックスである。図には、10分間の移動平均したアナログ信号を30秒毎にデータ・ロガーで読取った9時間の時系列を示した。測定は海氷底面より1.98 mの深さで行われた。最大流速は約6 cm/sであった。運動量フラックスは時間のずれが見られるものの平均流速に対応しているようである。潮流成分に短周期の成分が重ね合っているようである。

次に、運動量フラックスの時系列データのスペクトル解析を行い、周波数依存性を見る。第6図には10分間移動平均した運動量フラックス ( $-\overline{u \cdot w}$ ) が示されているが、このうち1024個の時系列データ(約8.5時間)を用いてFFTによりスペクトル解析を行った。第7図にパワースペクトルと波数の関係を示す。波数11(約47分)、19(約27分)、22(約23分)にスペクトルのピークが見られる。これらの周期が潮汐に関連しているとは思われない。また、測定点が定着氷上であり、水平の動きはなかったと思われるが、氷板自身の振動等の測定はないので、詳しい議論はできない。

Mitchell and Bye<sup>8)</sup> は南極のマクマード・サウンドで融氷期の海氷下境界層の乱流輸送量の測定を行った。運動量、熱、塩のフラックスを測定し、1~2時間の時系列データから、融解に大きく寄与するのは10分以上の周期の変動であると報告している。著者の本研究では、観測期間中に融解はまだ始まっていなかったと思われる。本研究の数10分周期の運動量フラックスが何と関連しているのかは現在明らかではないが、今後は、海氷板の運動や、海水と海水面での熱および塩の輸送機構や生物環境との関係を含め研究を進める予定である。



第7図 運動量フラックス(第6図下段  $-\overline{u \cdot w}$ )の時系列のパワースペクトルと波数の関係

## V. おわりに

沿岸定着氷下約 4 m の均質な層の流速 3 成分を測定した。流速の最大は 7 cm/s であったが、乱流強度の顕著な流速依存性は見られなかった。海水下約 1.5 m の層では、流向はほぼ一定であった。また、乱流強度の水深に対する依存性も見られ、境界層の厚さは約 1.5 m であったと思われる。運動量フラックスの時系列データ (約 8.5 時間) のスペクトル解析から数 10 分周期のスペクトルのピークが見られた。今後はこれらの運動量フラックスと海氷の運動や熱および塩のフラックスとの関係を調べる必要がある。

本研究は、McGill 大学—Laval 大学—Maurice Lamontagne Institute (カナダ海洋漁業省) による協同研究計画の一端を担うものであり、現場観測に当たっては各機関の多大な御協力、御援助、また諸々の便宜を与えていただき、心より感謝いたします。とくに McGill 大学の Paul Peltola, Eric Hudier, Thierry Renaud には現場観測において御協力、御尽力いただきました。また、流水研究施設の皆様、とくに池田光雄、高塚 徹氏にはデータ解析に御協力いただきました。併せて深く感謝の意を表します。本研究を遂行するに当たり必要不可欠であった超音波流速計を快くお貸し下さった小野延雄教授には心より感謝いたします。この調査に要した経費は Natural Sciences and Engineering Research Council Canada, FCAR (カナダ), Donner Canadian Foundation (カナダ), 流水研究施設外国地域観測旅費 (文部省), 文部省科学研究費 (国際学術研究) “北極海・氷縁域の海水生成が海況および海洋生物に与える影響についての比較研究” によった。

## 文 献

- 1) Shirasawa, K. and Ingram, R. G. 1988 Oceanic boundary layer measurements under landfast ice. *In Proc. Third Intl. Symp. Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, 789-796.
- 2) 白澤邦男・R. G. Ingram・青田昌秋 1988 カナダ・ハドソン湾南東部海水下海洋境界層の観測的研究。低温科学, 物理篇, **47**, 213-221.
- 3) Legendre, L., Ingram, R. G. and Poulin, M. 1981 Physical control of phytoplankton production under sea ice (Manitounuk Sound, Hudson Bay). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **38**, 1385-1392.
- 4) Legendre, L., Ingram, R. G. and Simard, Y. 1982 Aperiodic changes of water column stability and phytoplankton in an Arctic coastal embayment, Manitounuk Sound, Hudson Bay. *Naturaliste Can.*, **109**, 775-786.
- 5) Gordon, S. H. 1981 Boundary layer flow under an Antarctic ice sheet. Flinders Inst. for Atmos. and Mar. Sci. Res. Rep. **37**, 144 pp.
- 6) Gordon, C. M. and Dohne, C. F. 1973 Some observations of turbulent flow in a tidal estuary. *J. Geophys. Res.*, **78**(12), 1971-1978.
- 7) Shirasawa, K. 1986 Water stress and ocean current measurements under first-year sea ice in the Canadian Arctic. *J. Geophys. Res.*, **91**(C 12), 14305-14316.
- 8) Mitchell, W. M. and Bye, J. A. T. 1985 Observations in the boundary layer under the sea ice in McMurdo Sound. *In Oceanology of the Antarctic Continental Shelf*, Antarctic Res. Ser., **43**, 167-176.

### Summary

Measurements were made of three-dimensional current regime in the frictional boundary layer under landfast ice in the southeast Hudson Bay from the last day of April to the first day of May 1989. The experimental site was located about 20 km offshore of the mouth of the Great Whale River (Fig. 1).

For this purpose a three-dimensional ultrasonic current meter (Union Engineering Ltd., Minilab Model SD-10) was installed on a frame fixed to the ice (Fig. 2). The instrument traversed vertically from the ice-water interface down to a depth of about 4 m beneath the 1.3 m thick flat ice. During this experiment, measurements were taken at fixed depths between 3 and 418 cm from the bottom surface of the ice. Time series of the current regime, ranging from about 3-min to 9-hours in length, were collected at the desired depths. Shorter records were used to calculate turbulence intensities ( $\sigma_1/\bar{U}$ ,  $\sigma_2/\bar{U}$ ,  $\sigma_3/\bar{U}$ ). Time series of 10-min moving averaged currents and momentum fluxes were recorded on a data logger after analysis (Fig. 3). Longer records of current speeds and momentum fluxes were sampled at a fixed depth of 1.98 m (Fig. 6).

The upper 10 m layer of the water column at the experimental site was well mixed with a salinity of 27.8‰ and a temperature of  $-1.5^\circ\text{C}$ .

Summarized in Table 1 are the mean current speeds and directions, and turbulence intensities. The current direction was almost constant over the 1.5 m deep layer below the ice bottom.

The turbulence intensity is shown as a function of the current speed in Fig. 4. The values of  $\sigma_1/\bar{U}$  are scattered from 0.001 to 0.170 in a range of current speeds between 0.7 and 7.0 cm/s. The values of the vertical turbulence intensity,  $\sigma_3/\bar{U}$ , are less scattered than those of the horizontal ones,  $\sigma_1/\bar{U}$  and  $\sigma_2/\bar{U}$ . Comparison with data collected in 1988 at the almost same site<sup>2)</sup> is also shown. The currents ranged from 2 to 6 cm/s.

The turbulence intensity is shown as a function of depth in Fig. 5. The turbulence intensity,  $\sigma_1/\bar{U}$ , decreases with the depth down to about 1.5 m. Thereafter, it increases gradually with the depth. This suggests that the thickness of the skin frictional boundary layer was about 1.5 m. This is further substantiated by the almost constant current direction over the 1.5 m layer, as described above. Comparison with data collected in 1988 at the almost same site<sup>2)</sup> is also shown. The depths ranged from 0.35 to 1.075 m.

Shown in Fig. 7 is the power spectrum of momentum flux ( $-\overline{uw}$ ) of the data plotted in Fig. 6. There are some peaks in the spectrum at wave numbers of 11, 19 and 22, which correspond to about 47, 27 and 23 min, respectively.