



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 氷野に及ぼす風の応力の研究                                                                     |
| Author(s)           | 白澤, 邦男                                                                            |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                             |
| Degree Name         | 博士(理学)                                                                            |
| Dissertation Number | 甲第1688号                                                                           |
| Issue Date          | 1981-06-30                                                                        |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/32532">https://hdl.handle.net/2115/32532</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                   |
| File Information    | 1688.pdf                                                                          |



# 氷野に及ぼす風の応力の研究

白 澤 邦 男

# 氷野に及ぼす風の応力の研究

## I 緒 言

## II 風の応力の測定

### II - 1. 測定の 3 方法

i) Drag-meter 法

ii) 渦相関法

iii) 風速の鉛直分布から応力を求める方法

iv) 測定方法の比較の意義

### II - 2. 表面が平坦な氷野

i) 測定

ii) Drag-meter法と 渦相関法の結果の比較

iii) 風速の鉛直分布法の吟味

### II - 3. 表面に人工的に凹凸をつけた氷野

i) 測定

ii) 風速の鉛直分布法の吟味

### II - 4. 結論

### Ⅲ 氷野の抵抗係数

Ⅲ - 1. 抵抗係数の定義

Ⅲ - 2. 抵抗係数と平均風速の関係

Ⅲ - 3. 抵抗係数と表面形状

i) 表面が非常に平坦な氷野の抵抗係数

ii) 表面が非常にでこぼこした氷野の  
抵抗係数

iii) 表面形状の表わし方

Ⅲ - 4. 結論

### Ⅳ 結 語

謝 辞  
文 献

## I. 緒 言

北海道のオホーヅリ海沿岸では、冬になると、海水が凍結し、多量の海氷が見られる。海面に浮遊する海氷は、主に風と海流による力を受けて移動、漂流する。このように海面上を移動、漂流する海氷を流氷と呼ぶが、この流氷の漂流を考える場合に、流氷に及ぼす風の力を知ることは、必要不可欠である。

流氷に及ぼす風の力については、北極海の多年氷では、Untersteiner and Badgley<sup>1)</sup>を始め、いくつかの研究<sup>2~6)</sup>がある。しかし、オホーヅリ海の流氷は総て一年氷で、その厚さ、表面の形状は、北極海の多年氷とは著しく異なっている。そのために、上記の北極海での研究結果を、オホーヅリ海の流氷の漂流や運動の問題に適用することはできない。

一年氷に及ぼす風の応力については、セント・ローレンス湾において、Smith et al.<sup>7)</sup>やSmith<sup>8)</sup>が、超音波風速計を使用した渦相関法による測定を、また Seifert and Langleben<sup>9)</sup>は、

風速の鉛直分布から風の応力の測定を行った。オホーツク海では、鈴木<sup>10)</sup>、Suzuki<sup>11)</sup>が、紋別港内に張りつめた平坦な氷野に、円形のプールを作り、その中に浮かんだ氷の円板に働く風の力を、直接測定した。また、Каретини и Тимохов<sup>12)</sup>は、ラドガ湖に張りつめた氷板で、先の鈴木、Suzuki<sup>11)</sup>と同様の方法を用いて、氷板に働く風の力を測定した。しかし、このように、測定方法はまちまちであり、しかも、種々の氷の表面状態と風の応力との関係が系統的に整理されていなかった。筆者は、北海道オホーツク海沿岸で、色々の表面状態の氷野について、種々の測定方法を用い、風の応力の測定を行ってきた。<sup>13,14)</sup> 本研究では、先ず、Ⅱ章で、各種測定方法の比較検討を行ったうえ、Ⅲ章で、種々の表面状態の氷野での風の応力と風速の関係を論じ、また氷野の表面形状を定量的に表わし、風の応力との関係について議論した。

## Ⅱ. 風の応力の測定

### Ⅱ-1. 測定の3方法

#### i) Drag-meter 法

氷野に働く風の力を測定するための drag-meter を、図式的に第1図に示す。氷野上の4点、A, B, C, O は、正三角形の頂点および外心点である。円形プール内に浮かぶ氷の円板は、風および水の力と、OA, OB, OC 間に張ってあるワイヤによる力を受けて運動するが、第1図で、円板に働く風の力は、円板の重心Oを通る力  $\vec{F}$  (ベクトル量) で表わされる。風の巨視的構造のほとんど変わらないある時間について平均をとると、水の抵抗力は消え、またO点の移動は小さいことを考えると、

$$\bar{\vec{F}} = - ( \bar{\vec{F}}_A \cdot \vec{n}_A + \bar{\vec{F}}_B \cdot \vec{n}_B + \bar{\vec{F}}_C \cdot \vec{n}_C ) \quad (1)$$

を得る。ここに、 $\bar{\quad}$  は時間平均、 $\bar{\vec{F}}_A$ ,  $\bar{\vec{F}}_B$ ,  $\bar{\vec{F}}_C$

はそれぞれ  $A$ ,  $B$ ,  $C$  点のワイヤの張力,  $\vec{n}_A$ ,  $\vec{n}_B$ ,  $\vec{n}_C$  はそれぞれ設置時の  $OA$ ,  $OB$ ,  $OC$  方向の単位ベクトルである。氷の円板の受ける空間的・時間的平均応力  $\tau$  は、円板の半径を  $R$  とすれば、

$$\tau = |\vec{F}| / \pi R^2 \quad (2)$$

である。

## ii) 渦相関法

この方法は、超音波風速計を用いて、風速の水平方向の変動成分  $u'$  と、同じく鉛直方向の変動成分  $w'$  を、測定して、両者の相関の時間平均から、レイノルズ応力  $\tau$  を求める方法である。レイノルズ応力  $\tau$  は次の(3)式で定義される。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{\quad}$  は時間平均であり、 $\rho$  は空気の密度である。



### iii) 風速の鉛直分布から応力を求める方法

接地境界層内で、大気の成層が中立状態の時には、風速の鉛直分布は、対数法則

$$\bar{U}_z = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

で表わされることが知られている。ここで、 $\bar{U}_z$  は氷の表面からの高さ  $z$  での平均風速、 $k$  はカルマン定数で、一般に  $k=0.4$  が用いられている。 $\tau$  はレイノルズ応力、 $\rho$  は空気の密度、 $z_0$  は粗度定数である。種々の高さ  $z$  での平均風速の鉛直分布が(4)式を満足する時、その勾配からレイノルズ応力  $\tau$  を推定できる。

### iv) 測定方法の比較の意義

i) の drag-meter 法は、氷が風によって受けた力を直接測定する最も確かな方法であるが、例えば、凹凸のある氷野中に設置することが難しく、また平らな氷野で行うとしても、

設置に手数がかかる欠点があり、実用的な方法ではない。

ii) の渦相関法は、i) の drag-meter 法より、簡単に測定ができ、より実用的な方法である。しかし、風が定常的であれば、超音波風速計の設置高で測定したレイノルズ応力は、氷に働く風の応力を示すことになるが、実際には、風は厳密には定常ではないので、実際に渦相関法により求めたレイノルズ応力と、i) の drag-meter 法により直接求めた風の応力とを、比較した。II-2-ii) 節で、それについて述べる。

iii) の風速の鉛直分布から応力を求める方法は、i) の drag-meter や ii) の超音波風速計の設置が困難な、表面がでこぼこした沖の流水野でも、比較的簡単に測定できるという大きな利点があり、最も実用的な方法である。しかし、(4)式で、一般に用いられているカルマン定数  $k = 0.4$  は、管および平面溝中の流れや平板上の境界層の実験から求められた値であり、野外の接地境界層での実験では、現在までのと

ころ、 $k = 0.4$ が完全に証明された訳ではない (Monin and Yaglom<sup>16)</sup> 参照)。そこで、このカルマン定数の値を決定する必要がある。表面が平らな氷野、及び表面に人工的に凹凸をつけた氷野で、超音波風速計および風速の鉛直分布の同時測定を行い、II-2-iii) および II-3-ii) 節で、それぞれの氷野に対して渦相関法から求めたレイノルズ応力 $\tau$ を、(4)式に当てはめて決定した、カルマン定数 $k$ について、議論する。

## II-2. 表面が平坦な氷野

### i) 測定

### a) 測定場所

前節で議論したように、drag-meter法と渦相関法の比較をするための、又風速の鉛直分布から風の応力を求めるために必要なカルマン

定数 $\alpha$ の値を決定するための測定を、第2回に示した北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖の平坦氷上で、1976年2月16日から22日まで<sup>13)</sup>と、1977年3月12日から14日まで行<sup>14)</sup>った。サロマ湖は、オホーツク海と連結しており、冬期間、湖面は結氷し、オホーツク海沿岸の平坦な定着氷と全く同じ海氷ができる。第2回に示されるように、1976年の測定は、湖岸の防波堤から約650 m沖へ向かった所で、drag-meter, 超音波風速計, 及び、風速分布を測定するための三杯風速計を設置して行い、1977年には、湖岸から約300 m沖へ向かった場所で行った。

1976年の予備実験では、<sup>13)</sup> 第1回に示したdrag-meterの、張力の測定をばねばかりの読みによって行い、求めた応力は、1 mの高さの風速が5.6 m/sの時、0.76 dyne/cm<sup>2</sup>で、5.1 m/sの時、0.52 dyne/cm<sup>2</sup>で、それぞれ、渦相關法から求めたレイノルズ応力、0.55 及び 0.54 dyne/cm<sup>2</sup> とよ

く一致していた。1977年には、張力の測定を、ロード・セルによって行い、連続記録を得たので、今後、1977年の測定について述べる。

## b) Drag-meter法による測定

1977年の測定に使用した drag-meter を第3図に示す。氷の円板の半径  $R$  は  $313\text{ cm}$ ,  $AB = 686.5\text{ cm}$ ,  $BC = 675.0\text{ cm}$ ,  $CA = 676.3\text{ cm}$ , 無風時で  $O$  点が静止している時,  $OA = 392.4\text{ cm}$ ,  $OB = 392.0\text{ cm}$ ,  $OC = 391.6\text{ cm}$  であり,  $OB$  は北から  $41^\circ$  東に偏っていた。氷板の平均の厚さは  $56\text{ cm}$  であり, 表面上に深さ  $5\text{ cm}$  の積雪層があった。この付近の湖の水深は約  $2\text{ m}$  であり, 測定時に、水の流れはなかった。

測定は、風向が南から南東で、湖の中央部から吹いて来る十分な吹送距離をもった風の時に行い、1回の測定時間は約30分間で、全部で10回行った。ワイヤの張力の測定は、第1図に示した、 $A$ ,  $B$ ,  $C$  点に固定したロー

ド・セルによって行い、ペン・レコーダーに連続記録した。張力の記録の一例を才4図に示す。図には、 $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ の時間変化が示されているが、周期的に変動しているのがわかる。その周期は、無風時の氷板の振動の測定から得た氷板の固有振動24.7秒に、ほぼ一致している。この記録から $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ の値を1秒周期で読み取り、(1)式の時間平均を計算した。

### C) 渦相関法による測定

3成分型超音波風速計(海上電機, PAT-311)を、drag-meterから約10m離れに氷面上1.55mに設置した。測定は、drag-meter法と同時に、10回行い、1回の測定時間は約5分間から30分間であった。超音波風速計の出力は、データレコーダ(共和電業, RTP-500A)に記録した。測定終了後に、記録計からの再生信号を11.2 Hzの低域フィルターに通してのち、データレコーダ(TEAC R-400)に収録し、次に、北

海道大字汎用シミュレータ共同利用施設で、データ採集時間 0.05 秒で A/D 変換し、さらに、分散と共分散を求め、(3)式のレイノルズ応力の計算を行った。

渦相関法の解析の際に、超音波風速計の軸の傾きを考慮せねばならぬ。文字・水間<sup>15)</sup>や Smith et al.<sup>16)</sup>等によれば、超音波風速計の軸が、平均風速の方向から鉛直方向に  $\theta_v$  傾いている時に、レイノルズ応力は次の(5)式によって補正できる。

$$\overline{u'w'} = \overline{u_m w_m} (1 - 2 \sin^2 \theta_v) + (\overline{w_m^2} - \overline{u_m^2}) \sin \theta_v \cdot \cos \theta_v \quad (5)$$

ここで、 $\overline{u'w'}$  は正しい値、 $u_m, w_m$  は測定された水平及び鉛直方向の風速変動成分である。10 例の測定のうち、補正值が 40% をこえた 2 例は、後の drag-meter 法との比較には用いなかった。

#### d) 風速の鉛直分布の測定

風速の鉛直分布を測定するために、超音波

風速計の設置点近くに、理工研式小型ロビンソン風速計を4個、41, 121, 231, 451 cmの高さに、取付けた。測定は、渦相關法と同時に行い、1回の測定時間は5分間であった。

対数法則(4)式は、大気の安定度が中立の時に成り立つと言われる。そこで先ず、場の安定度の考察を行った。超音波風速計の鉛直方向の風の変動成分 $w$ と気温の変動成分 $\theta$ から $\overline{w\theta}$ を計算し、次の(6)式より、場の安定度を表わすモーニン・オブ・フの長さ $L^{(6)}$ を計算することが出来る。

$$L = -T u^{*3} / g k \overline{w\theta} \quad (6)$$

ここで、 $T$ は平均気温を絶対温度で表わしたもの、 $g$ は重力加速度、 $k$ はカルマン定数であり、 $u^*$ は摩擦速度で次の(7)式から求められる。

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho} \quad (7)$$

ここで、 $\tau$ はレイノルズ応力、 $\rho$ は空気の密度である。大気の成層が安定の時、 $L > 0$ であり、不安定の時、 $L < 0$ であり、中立の時、 $|L|$



は無限大つまり  $1/L$  は 0 となる。

## ii) Drag-meter 法と渦相関法の結果の比較

第 5 図に、drag-meter 法から得た風の応力  $\tau_{D.M.}$  と、渦相関法から得た  $\tau_{E.C.}$  を示した。図中の、○印は、1つの測定 of 長さ 30 分間の平均値であり、5 分間ごとの平均値を用いて計算した標準偏差を、縦と横のうでの長さで表わしてある。うでの小さい○印は、1つの測定 of 長さ約 5 分間の平均値である。測定時間が 5 分間と比較的短い場合でも、 $\tau_{D.M.}$  と  $\tau_{E.C.}$  は、良い一致を示している。標準偏差を比べると、 $\tau_{D.M.}$  の方が、 $\tau_{E.C.}$  より、小さめであり、より落ち着いた値を得ることを示している。

渦相関法を用いる場合に、測定時間の長さが問題になるが、文字・水間<sup>(5)</sup>によると、接地気層で気象変化の少ない日中では、測定時間を、10 分から 30 分とすることをすすめているので、30 分間の平均値を用いて比較をする

ことにした。全体に  $\tau_{D.M.}$  と  $\tau_{E.C.}$  はよく一致している。従って、測定時間30分間で、渦相関法から求めたレイノルズ応力を、氷野に働く風の応力と考えるとよいことが、判った。

$\tau$  が大きくなると、 $\tau_{D.M.}$  は  $\tau_{E.C.}$  より大きめの値を示しているが、これは、第3図に見られる様に、drag-meter法では、氷の円板の縁や雪面上の凹凸の影響を受けているためであろう。今われわれは、数kmにもわたって連続した氷野に及ぼす風の応力を問題にしているので、縁の影響が現われる drag-meter法により得た風の応力  $\tau_{D.M.}$  の値は用いずに、渦相関法から得たレイノルズ応力  $\tau_{E.C.}$  を、氷野に及ぼす風の応力として、今後の議論に用いることにする。

### iii) 風速の鉛直分布法の吟味

先ず、場の安定度の考察を行った。超音波風速計の設置高さで、モーニンオブツフの長

さしを無次元化した  $z/L$  を用いて、 $z/L < 0.1$  の時を、大気の成層が中立に近い場合と考えることにする。この条件を満足する18例の風速の鉛直分布を、 $\text{Fig. 6}$  および  $\text{Fig. 7}$  に示す。各々の風速分布は、5分間の平均風速に基づいて作られにものである。図から、この場合、風速の鉛直分布が対数法則をほぼ満足していること、すなわち、 $z/L < 0.1$  が対数法則(4)式の成立の十分条件であることが判る。

この18例の風速分布から、カルマン定数  $k$  の値を、次のように決定した。 $\text{Fig. 6}$  および  $\text{Fig. 7}$  において、各々の風速分布の勾配は、(4)式から、 $k\sqrt{\frac{\rho}{\tau}}$  である。 $k$  を決めるために、(7)式の関係を用いて、(4)式を次のように書き変える。

$$\frac{\bar{U}_z}{u^*} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

渦相關法から得たレイノルズ応力  $\tau_{E.C.}$  を、(7)式の関係を用いて計算すると、 $u_{E.C.}^*$  が得られる。この  $u_{E.C.}^*$  の値を(8)式に用いて、 $\text{Fig. 6}$  お

よび第7図をそれぞれ書き直すと、第8図および第9図になり、そこで、最小自乗法を用いて、各々の直線の勾配 $k$ を求めた。図中のアルファベットのそれぞれ、第6図および第7図のそれに、対応している。第8図および第9図から、 $k$ の値は、0.389から0.449までの範囲にあり、18個の平均値は0.42、標準偏差は0.02であった。

このように、表面が平坦で均質な氷野で、超音波風速計から求めた $u_{E.C.}^*$ を用いて、風速分布から、 $k$ の値を決定すると、 $k = 0.42 \pm 0.02$ となり、一般に用いられている値 $k = 0.4$ よりやや大きい値を示す。

### II-3. 表面に人工的に凹凸をつけた氷野

#### i) 測定

表面がでこぼこした氷野で、風速分布が対数法則を満たしているかどうかを調べるため

9. またカルマン定数 $k$ の値を決定するための測定を、第2図に示した、サロマ湖の湖岸の防波堤から約1.2km沖へ向かった場所で、1980年2月16日から20日まで行った。平坦な氷野の表面に積った雪を、スノー・モビルで引っ張った機で除雪し、畝のようなでこぼこを作った。第10図に、雪の畝の様子を示す。約100mの距離に40本の畝を作り、1本の畝の長さは約100mであった。畝間の溝の幅は、約60cmであった。第10図に見られるように、畝の縁は、雪が盛り上がり、角張っている。溝の深さは、約15cmであった。この畝の端に、超音波風速計（海上電機、PAT-311）を設置し、また、三杯風速計（牧野応用測器、AC-750P）6個を、高さ0.47, 0.99, 1.99, 4.99, 6.99および、10.39mに取付けて、風速の鉛直分布を測定した。測定期間中の超音波風速計の設置高は、0.9から3.4mまでであった。測定は、主風向が北西で畝を横切り、風速計が風下になるような場合に行った。

## ii) 風速の鉛直分布法の吟味

大気の成層が中立に近く、対数法則(4)式をほぼ満足する時の、風速の鉛直分布を、第11図に示す。各々の測定時間は、5~10分間である。各々の風速分布は、0.47mから10.39mまで、比較的よく直線に乗っている。この時、 $z/L \leq 0.03$ であった。

カルマン定数 $k$ を決めるために、II-2-iii)の平らな氷野の場合と同様に、渦相関法から得られた $u_{E.C.}^*$ を用いて、第11図を書き直すと、第12図を得る。両図中の記号は、それぞれ対応する。第12図から、 $k$ の値は0.398から0.476であった。

次に、風速分布が、ほぼ対数法則を満足していると思われるが、氷の表面に近いところで、若干直線からはずれる例を、第13図に示す。図中の各々の実線は、氷の表面に近い0.47mの値を除外し、高さ10.39mから0.99mまでの値を用いて、最小自乗法により求めた、

回帰直線であり、点線は、実線を外挿して引かれている。表面に近い点か、上から引かれた直線からはずれるのは、第10図に見られるように、凹凸が規則的なために、多少の風向の変動等によって、局所的な影響が現われているからであろう。

前節と同様に、渦相関法からの  $u_{E.C.}^*$  を用いて、第13図の風速分布を書き直し、第14図に示す。ここで、各々の直線は、高さ 10.39m から 0.99m までの値を用いて、最小自乗法により求めた回帰直線であり、外挿して、0.47m まで、点線を引いた。図中の記号は、それぞれ、第13図のそれと対応している。この時、カルマン定数の値は、0.391 から、0.450 であった。

以上述べてきたように、表面が畝のようにでこぼとした氷野でも、風速分布は、比較的よく対数法則を満足させている。また、表面に近いところで対数法則からはずれる場合でも、凹凸の高さ約 15cm の 6 倍以上の高さでは、対数法則が成り立っており、それらの直線の

勾配から、レイノルズ応力を見積ることができるといことが判った。才12図と才14図から求めた、カルマン定数 $k$ の値の平均値は、0.42で、標準偏差は、0.03であった。

風速の鉛直分布を測定する場合に、測定地点の風上側の吹送距離も考慮されなければならない。例えば、Munn<sup>(17)</sup>によれば、経験的に風上側の広さは、測定最高点の20倍以上あることが望ましいであろうとされているが、今回の測定は、才2図に見られる数kmにわたる均質で平坦な氷野に、才10図で示した規則的な雪の畝が約100m続いている場所で行われたが、結果は、才11図および才13図からわかるように、約10mの高さまで、比較的よく対数法則を、満足させるものであった。

## Ⅱ-4. 結論

Ⅱ-2-iii)で、表面が平らで均質な氷野で渦相関法から求めたレイノルズ応力 $\tau_{EC}$ （又は、



摩擦速度 ( $u_{E.C.}^*$ ) を用いて、18例の風速分布から、カルマン定数  $k$  の値を決定し、 $k=0.42 \pm 0.02$  を得た。また、II-3-ii) の、表面に規則的な雪の畝を作った氷野では、10例の風速分布から、 $k=0.42 \pm 0.03$  を得た。すなわち、表面が平らでも、でこぼこでも、 $k$  の平均値は同じく 0.42 であった。そこで次に、風速分布の勾配から、 $k$  の平均値 0.42 を用いて、レイノルズ応力  $\tau_p$  を計算する。Fig 15 に、表面が平らな氷野での、渦相関法から求めたレイノルズ応力  $\tau_{E.C.}$  を横軸に、 $k=0.42$  とし、風速分布から求めたレイノルズ応力  $\tau_p$  を縦軸に、示す。この図で、1:1 の直線をはさむ2本の直線は、10% の誤差を示しているが、その誤差の範囲内で、 $\tau_{E.C.}$  と  $\tau_p$  は、よく一致しているのがわかる。次に、表面に規則的な凹凸をつけた氷野の場合を、Fig 16 に示すが、ここでも、Fig 15 と同様、10% の誤差の範囲内で、 $\tau_{E.C.}$  と  $\tau_p$  は、よく一致しているのがわかる。

以上から、風速の鉛直分布からレイノルズ

応力を求める場合に、表面が平らな氷野でも、でこぼこした氷野でも、カルマン定数  $k$  の値は 0.42 を用いればよく、渦相関法から得たレイノルズ応力との比較から、10% の誤差の範囲内で、風速の鉛直分布からのレイノルズ応力を見積ることが、できると言うことがわかった。

また、表面がでこぼこした氷野では、表面に近接した高さの風速が、上層からの対数分布からはずれる場合があるものの、凹凸の高さ 15cm の 6 倍以上の高さでは、対数分布が成立しており、その直線の勾配から、レイノルズ応力を、見積ることができる。

このような結果から、実際の沖の表面の凹凸の度合がもっと大きい氷野上での測定にも、風速の鉛直分布からレイノルズ応力を求める方法を、適用できると、考えられる。

### Ⅲ. 氷野の抵抗係数

#### Ⅲ-1. 抵抗係数の定義

前章では、氷野に及ぼす風の応力の測定方法を論じ、実際に氷野の表面が平らな場所、また、でこぼこした場所で、風の応力の測定を行ってきた。

ところで、われわれは、沖にある実際の流氷の漂流問題を取扱うために、現場の氷野に及ぼす風の応力を知りたいわけである。従って実用的には、比較的簡単に入手できる、ある一つの高さの平均風速を使って、ある氷野に及ぼす風の応力を推定する必要がある。

そこで、風の応力 $\tau$ と、ある高さ $z$ での平均風速 $\bar{U}_z$ との、関係を次のように記述する。

$$\tau = \rho C_{Dz} \bar{U}_z^2 \quad (9)$$

ここで、 $\rho$ は空気の密度であり、 $C_{Dz}$ は高さ $z$ の風速に対する氷野の抵抗係数と呼ばれ、無次元の係数である。係数 $C_{Dz}$ は、風の応力と平

均場の風速との関係を成立させる量であり、平均風速や、氷野の形状等に、依存していることが、考えられる。そこで、抵抗係数  $C_{DZ}$  と、風速との、及び氷野の表面形状との関係について、議論する。

## Ⅲ-2. 抵抗係数と平均風速の関係

氷野に及ぼす風の応力  $\tau$  を(9)式で記述したが、 $\tau$  と  $\rho \bar{U}_Z^2$  との関係を調べることにより、 $C_{DZ}$  が風速に依存するかどうかを、調べる。

先ず、Ⅱ-2 で議論した、表面が平らな氷野で、渦相関法から求めたレイノルズ応力  $\tau_{E.C.}$  と、超音波風速計の高さ 1.55m での平均風速  $\bar{U}_{1.55}$  を用いて計算した  $\rho \bar{U}_{1.55}^2$  との、関係を、才17図に示す。図から、 $\tau_{E.C.}$  と  $\rho \bar{U}_{1.55}^2$  とは、ほぼ比例している。つまり、(9)式で、抵抗係数  $C_{D1.55}$  は、風速に依存せず、一定の値であることがわかる。

次に、Ⅱ-3 で議論した、表面に人工的に凹

凸をつけた氷野で、測定期間中の超音波風速計の高度は  $0.9\text{m}$  から  $3.4\text{m}$  までであったが、最高点と最低点の幾何学的平均  $1.7\text{m}$  を高さの代表として、平均風速  $\bar{U}_{1.7}$  を用いて計算した  $\rho\bar{U}_{1.7}^2$  と、渦相関法から求めた  $\tau_{E.C.}$  との関係を、第18図に示す。  $\tau_{E.C.}$  と  $\rho\bar{U}_{1.7}^2$  とが、比例関係にあることがよくわかり、ここでも、抵抗係数は、風速に依存していない。

次に、第17図と第18図を、抵抗係数と風速で書き直し、第19図、第20図を得る。第19図で、表面が平らな氷野での抵抗係数  $C_{D1.55}$  は、高さ  $1.5\text{m}$  の超音波風速計で求めた平均風速  $\bar{U}_{1.55}$  が、約  $3 \sim 8.5\text{ m/s}$  の範囲内で、風速に依存していないことを、表わしている。その平均値は  $C_{D1.55} = 3.02 \times 10^{-3}$  で、標準偏差は  $0.34 \times 10^{-3}$  であった。第20図では、表面に人工的に凹凸をつけた氷野の抵抗係数  $C_{D1.7}$  は、高さ  $1.7\text{m}$  の平均風速が約  $3 \sim 6.5\text{ m/s}$  の範囲内で、多少のばらつきはあるものの、風速には依存せず、平均値  $C_{D1.7} = 3.50 \times 10^{-3}$ 、標準偏差  $0.37 \times 10^{-3}$  であった。

ここで、高さ  $z$  をある値に統一して  $C_{Dz}$  を議論する必要がある。一般に、 $10m$  が用いられる。(4)式の対数法則が成り立つ時、(9)式を用いて、 $10m$  の高さの抵抗係数  $C_{D10}$  は、次の式で表わせる。

$$C_{D10} = \left( C_{Dz}^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{k} \ln \frac{10}{z} \right)^{-2} \quad (10)$$

ここで、 $k$  はカルマン定数であり、II-4.の結論から  $0.42$  を用いればよい。(10)式を用いて、第19図の  $C_{D1.55}$  を  $C_{D10}$  に換算すると、 $10^3 C_{D10} = 1.95 \pm 0.18$  となり、第20図の  $C_{D1.7}$  では、 $10^3 C_{D10} = 2.24 \pm 0.19$  となる。

以上から、表面の凹凸の度合が増すと、 $C_{D10}$  が大きくなる傾向にあることが予想されるので、次に、 $C_{D10}$  と表面形状との関係を調べる。

### III-3. 抵抗係数と表面形状

前節では、サロマ湖の、表面が平らな氷野、および表面に人工的に凹凸をつけた氷野での、

抵抗係数を求め、表面形状に依存することを示した。抵抗係数と表面形状との関係を更に調べるため、ここでは、先の2例に加えて、表面の凹凸の度合がより大きい沖の氷野で、また、才3図からわかるように、サロマ湖の氷の表面は平坦で均質であるが、足跡や数cm程度のでこぼこはあったので、表面がより平らな氷野でも、風速の鉛直分布の測定から、抵抗係数を求めた。

## i) 表面が非常に平坦な氷野の抵抗係数

### a) 測定および解析

才21図に示す、北海道オホーツク海沿岸の能取湖の氷上で、風速の鉛直分布の測定を行った。能取湖は、巾約200mの湖口を通してオホーツク海とつながっており、潮汐により海水が流入する汽水湖である。冬期間には、湖面が結氷し、その表面状態はオホーツク海沿

岸の平坦な定着氷とほぼ同じである。測定は、1979年2月26日から3月1日まで、能取湖の湖口から約2kmの地点で行った。

第22図に示されるように、氷の上に立てた7mの支柱に、3杯型風速計（牧野応用測器、AC-750P）、および白金抵抗温度計（千野製作所）各々5個を、氷の表面から、25, 60, 150, 300, 680cmの高さに、またそれらの先端には風向計を、設置し、それぞれの連続記録を得た。測定期間中、風向は、風の比較的弱い時は南から東、強い時は北寄りであったが、数kmにわたり全方向障害物はなく、吹送距離は十分であった。また、第22図に見られるように、氷の表面は非常に均質で平らであった。

大気の成層が中立に近く、対数法則(4)式をほぼ満足する時の、風速の鉛直分布61例を、第23-(a), -(b), -(c), -(d)図に示す。各々の測定時間は10分間である。場の安定度の考察は、Ⅱ-2.とⅡ-3.では、モーニン・オブコフの長さ $L$ を用いて行ったが、ここでは、次の(11)式で



定義されるリチャードソン数<sup>16)</sup>を用いて行った。

$$Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{d\bar{\theta}/dz}{(d\bar{U}/dz)^2} \quad (11)$$

ここで、 $g$ は重力加速度で、 $T$ は平均気温を絶対温度で表示したもの、 $\bar{\theta}$ は平均気温、 $\bar{U}$ は平均風速である。大気の成層が安定の時、 $Ri > 0$ で、不安定の時、 $Ri < 0$ 、中立の時、 $Ri = 0$ である。61例の風速分布の時、 $|Ri| \leq 0.01$ であった。II-4.で求めたカルマン定数 $k = 0.42$ を用いて、各々の風速分布の勾配から、抵抗係数を求めた。

## b) 抵抗係数と風速

高さ10mの、平均風速 $\bar{U}_{10}$ と抵抗係数 $C_{D10}$ の関係を、Fig. 24に示す。 $\bar{U}_{10}$ が約1.5~11m/sまでの範囲の、 $C_{D10}$ を得たが、比較的弱い風速の時に、強い時と比べて、ばらつきが大きいものの、風速依存性は見られず、61例の $C_{D10}$ の平均値は、 $1.55 \times 10^{-3}$ で、標準偏差は、 $0.18 \times 10^{-3}$ であった。

以上述べたように、才22図の、表面が非常に平らな能取湖の氷野の抵抗係数は、才3図の、表面に数cm程のでこぼこがあるサロマ湖の氷野の  $10^3 C_{D10} = 1.95$  より、若干小さい  $10^3 C_{D10} = 1.55$  であった。

## ii) 表面が非常にでこぼこした氷野の抵抗係数

### a) 測定場所

実際の沖の流氷野では、氷盤が他の氷盤の上に重なり起伏したり、氷塊が互いに不規則に積み重なり氷丘を形成した、いわゆる起伏氷も多い。そこでこのような起伏氷に対する抵抗係数を求めるために、才25図に示す、北海道オホーツク海沿岸の沙留町の沖の、表面の凹凸が大きい定着氷上で、風速の鉛直分布の測定を、1978年2月19日から23日まで行なった。才26図に、測定地点付近の様子を示す。

沖から海岸まで流氷が密に詰まっており、海岸近くの浅瀬では、流氷が座礁し定着氷となっていた。岸から約700m沖へ離れた場所に、10mの支柱を設置し、風速計および温度計を取付けた。測定は、主に沖から吹いてくる風、つまり才26図に示されるような表面の形状が、数km以上続いていく氷野上を吹いてくる風の時に、行なった。

才26図に示されるように、氷野の表面は氷塊が積み重なっているのので、凹凸の度合を知るための測量調査を行なった。風速計用支柱の設置点を基準にし、主風向の風上である北に向かい、2m間隔で400mまでの表面高度を測定した。才27図に、支柱の設置点を基準にした表面高度を縦軸に、支柱から風上に向かっての距離を横軸に示した。測線に沿って数10cmの高さの凹凸が多く見られるが、1m以上の氷丘もある。400mまでの200個の値から計算した平均高度は29cmで、標準偏差は30cmであった。目で見た感じや空中からの写真によれ

ば、凹凸の状態は全方向同じであったので、後の解析の際に、測線から多少変動した風向の風速分布も、測線の風向のものと同等に扱った。

## b) 風速の鉛直分布

才26図に示されるような表面の氷野上で風速の鉛直分布を測定する場合に、基準にとる高さを決めることは重要である。Monin and Yaglom<sup>16)</sup>によれば、平均的高さ $h$ の突起をもつ粗壁上の風速分布には、高さ $z$ の始点は壁の突起の谷と頂点との間で任意に選ぶことができその選ぶ方によって結果に目立った変化はないが、自然界の種々のタイプの表面での測定結果から、始点の高さは $h$ と同じオーダーをとり、 $h$ と $h/2$ の間に選ぶのがよいとしている。才26図の氷野では、突起の平均的高さ $h$ は明確ではないが、才27図で求めた表面高度の標準偏差30cmを $h$ と考え、始点の高さとする。このよ

うにして決めに始点からの風速計の高さは、  
 0.36, 0.86, 1.36, 2.36, 5.36, 9.36 m であり、1回の  
 測定時間は5分から10分間であった。同時に、  
 白金抵抗温度計を高さ、0.05, 0.86, 2.36, 5.36 および  
 9.36 m に設置し、気温分布の測定も行なった。大  
 気の成層状態が中立に近く、対数法則(4)式を  
 ほぼ満足する時の風速の鉛直分布48例を、才  
 28-(a), -(b), -(c), -(d)図に示す。この時、(11)式  
 を用いて計算したリチャードソン数は、 $|Ri| < 0.02$   
 であった。

Ⅱ-3.で、表面に人工的に凹凸をつけた氷野  
 上の風速分布について議論し、表面に近いと  
 ころで風速分布は対数法則からはずれる場合  
 があるが、対数法則の適用の下限を表面ので  
 こばこの高さの5~6倍にとれば、上層の風速  
 分布の勾配から、レイノルズ応力を見積れる  
 ことが判った。この結果を、才28-(a)から-(d)  
 図の風速分布において、適用すると、下限は  
 1.5m ~ 1.8m 位と考えられる。しかし、才28-(a)  
 から-(d)図では、約0.4mまで対数法則を満足

している風速分布も見られ、さらに他のものも、少なくとも  $1\text{m}$  から  $1.5\text{m}$  位までは対数法則を満足しているので、 $9.36\text{m}$  から  $1.36\text{m}$  までの値を用いることにする。最小自乗法により直線の勾配を決定し、図中の直線で示したが、直線からはずれるところは、破線で外挿した。

### C) 抵抗係数と風速

才 28-(a) から -(d) 図に示した 48 例の風速分布から求めた抵抗係数  $C_{D10}$  と、 $10\text{m}$  の高さの平均風速  $\bar{U}_{10}$  との関係を才 29 図に示す。測定期間中に降雪があり、氷の表面はうっすらと新雪におおわれたので、降る前と降った後の抵抗係数を記号で区別した。降雪後の抵抗係数  $C_{D10I}$  は、降雪前のそれより若干小さめである。 $\bar{U}_{10}$  が、約  $2.5 \sim 6\text{m/s}$  の範囲で、 $C_{D10}$  の風速依存性は見られず、全体の  $C_{D10}$  の平均値は  $2.72 \times 10^{-3}$  で、標準偏差は  $0.55 \times 10^{-3}$  であった。

才 29 図の  $C_{D10}$  は、今までの場合より、ばらつ

きが大きいから、これは、際立った氷丘等による複雑な風の乱れが影響を及ぼしたためであろう。

### iii) 表面形状の表わし方

表面の形状が色々異なる氷野の抵抗係数を求めたので、それらの値を、才1表に示す。表面のでこぼこの度合が増加すると、 $C_{D10}$ が増加する傾向にあるのかわかる。ここでは、この表面の凹凸の度合を記述するパラメータについて考え、抵抗係数との関係を調べる。

才27図に、沙留町沖のでこぼこした氷野の表面高度の分布を示したが、その平均値および標準偏差は、それぞれ、29cm, 30cmであった。また、才10図の、表面に人工的に凹凸をつけた氷野を、模式的に記述し、才30図に示すと、平均値は7cm, 標準偏差は5cmである。

表面高度の平均値は、でこぼこの度合を表

現する量ではない。ここで、凹凸の度合を記述するパラメータとして、標準偏差を用いてみる。第31図に、抵抗係数  $C_{D10}$  と、表面高度の標準偏差  $S$  との関係を示す。表面が非常に平坦な能取湖の氷野での  $S=0\text{cm}$ ,  $10^3 C_{D10}=1.55$  を○印で表わし、サロマ湖の平坦な氷野での  $S=2\text{cm}$ ,  $10^3 C_{D10}=1.95$  も同じく○印、人工的に凹凸をつけた氷野での  $S=5\text{cm}$ ,  $10^3 C_{D10}=2.24$  を□印で、また、非常にでこぼこした沖の氷野での  $S=30\text{cm}$ ,  $10^3 C_{D10}=2.72$  を△印で表わした。また、それぞれの記号からの腕の長さで、抵抗係数の標準偏差を示した。 $C_{D10}$  は、 $S=0\text{cm}$  から  $S$  の増加とともに、初めは急激に増加し始めるが、増加の割合は徐々に減少し、一定の値に漸近する傾向にある。このようにして得に、抵抗係数  $C_{D10}$  と標準偏差  $S$  との関係から、表面高度の標準偏差を測定することにより、その氷野の抵抗係数を、見積ることができるという結論を得た。



### Ⅲ-4. 結論

種々の表面の氷野で抵抗係数を求め、どの表面でも、抵抗係数は風速依存性がなく、それぞれ一定の値をとることがわかった。抵抗係数は表面形状に依存するが、表面の凹凸の度合を表わすパラメータとして表面高度の標準偏差を用いて、抵抗係数との関係を記述し、つまり、表面高度の標準偏差を知ることにより、その氷野の抵抗係数を見積ることができるという結論を得た。

ところで、オホーツク海の氷野では、Ⅱ-3-ii) で述べた、標準偏差  $s=30\text{cm}$  の、表面が非常にでこぼこした沖の氷野の場合が、凹凸の度合としては最大級と思われる。それ故、オホーツク海の流氷の漂流のシミュレーションを行う場合の、平均的な抵抗係数としては、実用的には、比較的平坦な氷野で  $10^3 C_{D10} = 1.8$ 、でこぼこした氷野で  $10^3 C_{D10} = 2.5$  を用いればよいことが判った。

次に、オホーツク海の一年氷で求めた抵抗係数と、北極海の多年氷での抵抗係数を比べる。Banke et al.<sup>6)</sup> は、北極海の種々の多年氷で、次の(12)式で定義した量を用いて、表面形状を記述し、その量と抵抗係数との関係を調べた。

$$\sigma^2 = \int_{k_1}^{k_2} \phi(k) dk \quad (12)$$

ここで、 $\phi(k)$  は波数  $k$  で表示した表面高度のパワー・スペクトルである。積分定数  $k_1$  と  $k_2$  を、それぞれ 0 と  $\infty$  にとると、 $\sigma^2$  は分散になり、従って、この時  $\sigma$  は標準偏差となる。これは、風の応力にほとんど寄与しないと思われる、大きなうねりのような低周波の部分と、 $\cdot$  でこぼこの波長の短い高周波の部分とを、標準偏差から除いた量である。Banke et al.<sup>6)</sup> の北極海の測定では、 $k_1 = 0.5 \text{ rad/m}$  (波長にして約 13 m),  $k_2 = 3.1 \text{ rad/m}$  (波長 2 m), 或いは  $k_2 = 1.6 \text{ rad/m}$  (波長 4 m) が、用いられた。 $k_1$  は、目視によって決められた値であり、 $k_2$  は、表面高度の分布を測定する際のサンプリング間隔により

決まる値である。この北極海で求められた値の値と、筆者のオホーツク海での値を比較するために、筆者の場合も、 $k_1 = 0.5 \text{ rad/m}$ ,  $k_2 = 1.6 \text{ rad/m}$ を用いた。

才32図に、抵抗係数と $\epsilon$ の関係を示す。図中の記号は、才31図で用いた記号と対応する。Banke et al.<sup>6)</sup>が北極海で求めた値を、黒丸(●)で示す。才32図の筆者の値と才31図の標準偏差 $S$ とを比べると、サロマ湖の平らな場合に、 $S = 2 \text{ cm}$ に対し $\epsilon = 1 \text{ cm}$ 、人工的な凹凸の場合に、 $S = 5 \text{ cm}$ に対し $\epsilon = 4.3 \text{ cm}$ 、沙留町沖のこぼこの場合に、 $S = 30 \text{ cm}$ に対し $\epsilon = 22.1 \text{ cm}$ と、 $\epsilon$ の定義から明らかのように、 $\epsilon$ は $S$ より小さい値である。

才32図で、オホーツク海の氷野では $\epsilon$ の値は0から22 cmまでの範囲であるが、北極海の氷では3から13 cm位であり、オホーツク海の氷の方が $\epsilon$ の大きい値を示している。つまりオホーツク海的一年氷の方が北極海の多年氷より、波長にして2 mないし4 mから13 mまでので

こほこが卓越していることを示している。

次に、才32回の抵抗係数の値を比べると、実線のオホーツク海の一年氷の方が、破線の北極海の多年氷のより大きい。これは、同じ値でも、オホーツク海の一年氷の表面は、急峻な峰のよう形でこほこでおおわれ、北極海の多年氷の表面は、風食作用により峰が丸みを帯びているため、オホーツク海の  $Co_{10}$  の方が大きい値を示すと考えられる。このことは、Hoerner<sup>18)</sup>による、風洞実験から、半球および三角形の断面を持つ峰の form drag coefficient がそれぞれ、0.8 および 1.0 であり、表面が角張った峰の方が抵抗係数が大きいという結果から推測できる。

#### IV. 結 語

本研究では、北海道オホーツク海沿岸の一年氷の漂流や運動にとって重要な働きをする、氷野に及ぼす風の応力の、測定方法について

論じ、さらに、種々の氷野で求めた抵抗係数と、表面形状との関係を議論し、以下のことが判った。

1. 風の応力を測定する方法の検討を行なった。Drag-meter法から求めた風の応力と渦相関法から求めたレイノルズ応力とは、比較的よく一致しており、渦相関法からのレイノルズ応力が、氷野に及ぼす風の応力を示していると考えてよい。

2. 表面が平坦な氷野で、渦相関法から求めたレイノルズ応力を用いて、風速の鉛直分布から、カルマン定数  $k = 0.42 \pm 0.02$  を得た。また、人工的に凹凸をつけた氷野では、 $k = 0.42 \pm 0.03$  を得た。 $k = 0.42$  を用いれば、風速の鉛直分布の測定から、レイノルズ応力を、10%の誤差の範囲内で、見積ることができる。

3. 表面に凹凸のある氷野上の風速分布で、表面付近では風速の対数法則からはずれる場合があるものの、上層の風速分布の勾配からレイノルズ応力を見積れる。

4. 種々の表面の氷野での抵抗係数を求め、どの表面でも、抵抗係数は、風速依存性がなく、それぞれ一定の値をとることが判った。表面が非常に平らな氷野で  $10^3 C_{D10} = 1.55 \pm 0.18$ , 平坦な氷野で  $1.95 \pm 0.18$ , 人工的に凹凸をつけた氷野で  $2.24 \pm 0.19$ , 非常にでこぼこした氷野で  $2.92 \pm 0.55$  であった。

5. 表面の凹凸の度合を表わすパラメータとして、表面高度の標準偏差を用いて、抵抗係数と表面形状との関係を記述した。表面高度の標準偏差がわかれば、この関係を用いて、抵抗係数を推定できる。

6. オホーツク海の一年氷の漂流のシミュレーションを行なう場合の、平均的な抵抗係数としては、実用的には、比較的平坦な氷野で、 $10^3 C_{D10} = 1.8$ , でこぼこした氷野で  $10^3 C_{D10} = 2.5$  を用いればよい。

7. 北極海の多年氷での抵抗係数と、オホーツク海の一年氷で求めた抵抗係数を、比べると、表面が急峻な峰におおわれているオ

ホーヅワ海の一年氷の方が、風食作用を受けた北極海の多年氷のものより、大きい値であった。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、北海道大学低温科学研究所の、田畑忠司教授、鈴木義男助教授、石田完教授、小野延雄助教授に、多大の御指導と御助言をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。また、野外観測に際して御協力下さった流氷研究施設の青田昌秋助教授、河村俊行助手、大井正行技官、石川正雄技官、福土博樹技官、並びに海洋学部門の若土正暁助手、滝沢隆俊助手、大学院生納口恭明氏、斎藤隆氏に、資料整理を手伝って下さった堀江佳澄嬢、高階保子嬢、また計算に際し有益な御助言や御協力を下さった北大工学部汎用シミュレータ室の丸山澄夫技官に、厚く感謝申し上げます。

計算は、北大汎用シミュレータ室、同大型計算機センター (FACOM-230-75.及び HITAC M-200H)、流氷研究施設 (PDP 11/34) で行なった。

本研究は、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」によった。また、研究の一部は、著者が昭和53年度日本学術振興会奨励研究員期間中に行なったことを記して、謝意を表します。

## 文 献

- 1) Untersteiner, N. and Badgley, F. I. 1965 The roughness parameters of sea ice. J. Geophys. Res., 70, 4573-4577.
- 2) Banke, E. and Smith, S. D. 1971 Wind stress over ice and over water in the Beaufort Sea. J. Geophys. Res., 76, 7368-7374.
- 3) Langleben, M. P. 1972 A study of the roughness parameters of sea ice from wind profiles. J. Geophys. Res., 77, 5935-5944.
- 4) Banke, E. and Smith, S. D. 1973 Wind stress on arctic sea ice. J. Geophys. Res., 78, 7871-7883.
- 5) Langleben, M. P. and Pounder, E. R. 1975 On the air drag of an arctic ice floe. Geophys. Res. Letters, 2, 15-18.
- 6) Banke, E., Smith, S. D. and Anderson, R. J. 1976 Recent measurements of wind stress on arctic sea ice. J. Fish. Res. Board Can., 33, 2307-2317.
- 7) Smith, S. D., Banke, E. G. and Johannessen, O. M. 1970 Wind stress and turbulence over ice in the Gulf of St. Lawrence. J. Geophys. Res., 75, 2803-2812.
- 8) Smith, S. D. 1972 Wind stress and turbulence over a flat ice floe. J. Geophys. Res., 77, 3886-3901.
- 9) Seifert, W. J. and Langleben, M. P. 1972 Air drag coefficient and roughness length of a cover of sea ice. J. Geophys. Res., 77, 2708-2713.
- 10) 鈴木義男 1964 氷板のうける風の力の測定.  
低温科学, 物理篇, 22, 155-170.
- 11) Suzuki, Y. 1966 Wind-and water-drag of an ice floe. In Physics of Snow and Ice, Part I (H. Oura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 661-666.
- 12) Карелин, И. Д. и Тимохов, Л. А. 1971 Экспериментальное определение силы ветра, действующей на ледяной покров. Тр. Аркт. и антаркт. ин-та, Т. 303, 155-165.

- 13) 白澤邦男・田畑忠司 1977 海氷に及ぼす風の応力測定について I. 低温科学, 物理篇, 35, 241-248.
- 14) 白澤邦男・鈴木義男 1979 氷野に及ぼす風の応力の研究 自然災害特別研究研究成果「沿岸海域における流水の運動予測の研究」 No. A-54-1, 81-91.
- 15) 文字信貴・水間涵郎 1976 風・温度・湿度及び乱流輸送量の測定. 気象研究ノート, 第130号, 19-52.
- 16) Monin, A.S. and Yaglom, A.M. 1971 Statistical fluid mechanics. Vol.1, MIT Press, 769pp.
- 17) Munn, R.E. 1966 Descriptive Micrometeorology. Academic Press, 245pp.
- 18) Hoerner, S.F. 1965 Fluid-dynamic drag. New York, N.Y. 454pp.

Table 1. List of Drag Coefficients

| Surface              | Location         | No.<br>of<br>Runs | Drag Coefficient<br>$10^3 C_{D10}$ |       |
|----------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-------|
|                      |                  |                   | Mean                               | S.D.* |
| Very Flat Ice        | Lake Notoro 1979 | 61                | 1.55                               | 0.18  |
| Flat Ice             | Lake Saroma 1977 | 18                | 1.95                               | 0.18  |
| Surface Modified Ice | Lake Saroma 1980 | 10                | 2.24                               | 0.19  |
| Rough Ice            | Saruru 1978      | 48                | 2.72                               | 0.55  |

\* S.D. : Standard Deviation

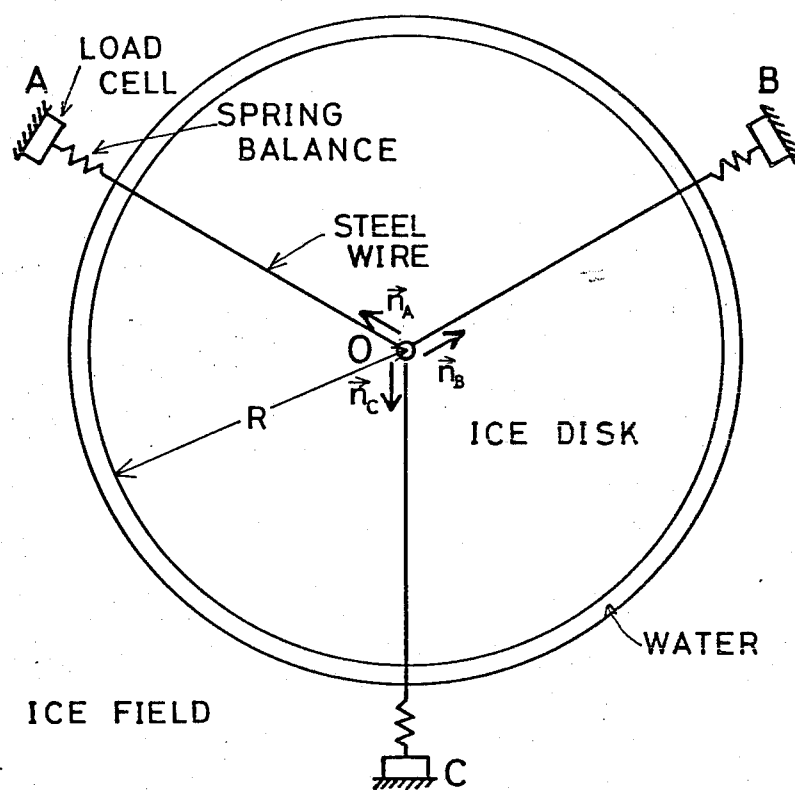


Fig. 1 Drag-meter の原理図

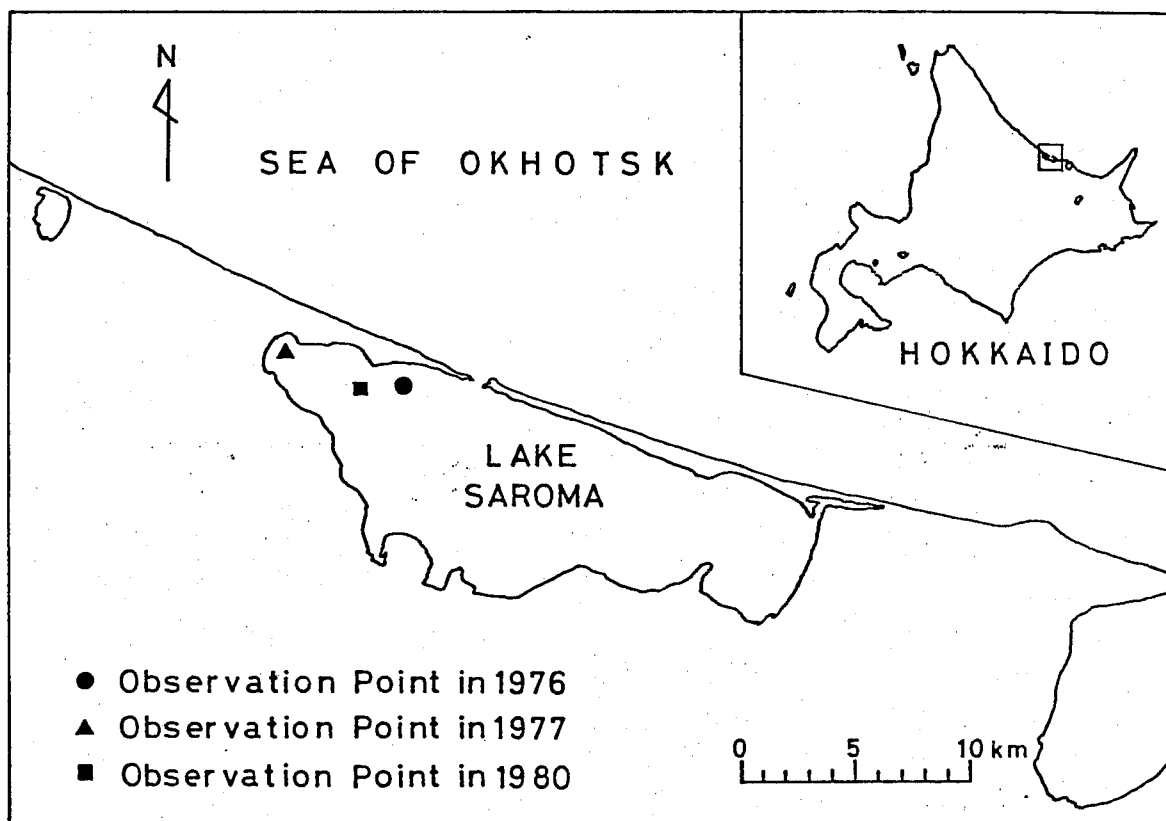


Fig. 2 サロマ湖での測定場所

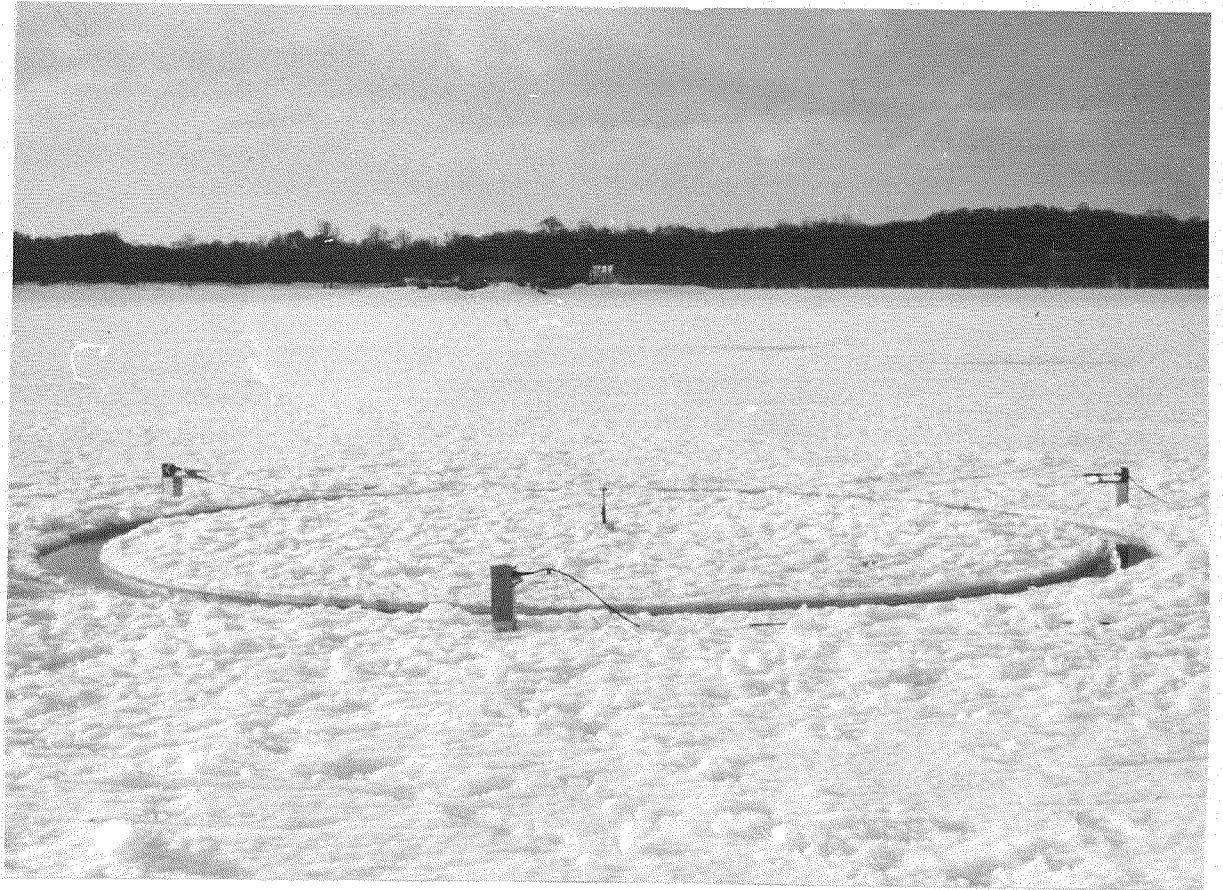


Fig. 3 氷野に適用した drag-meter (1977年3月, タロマ湖)

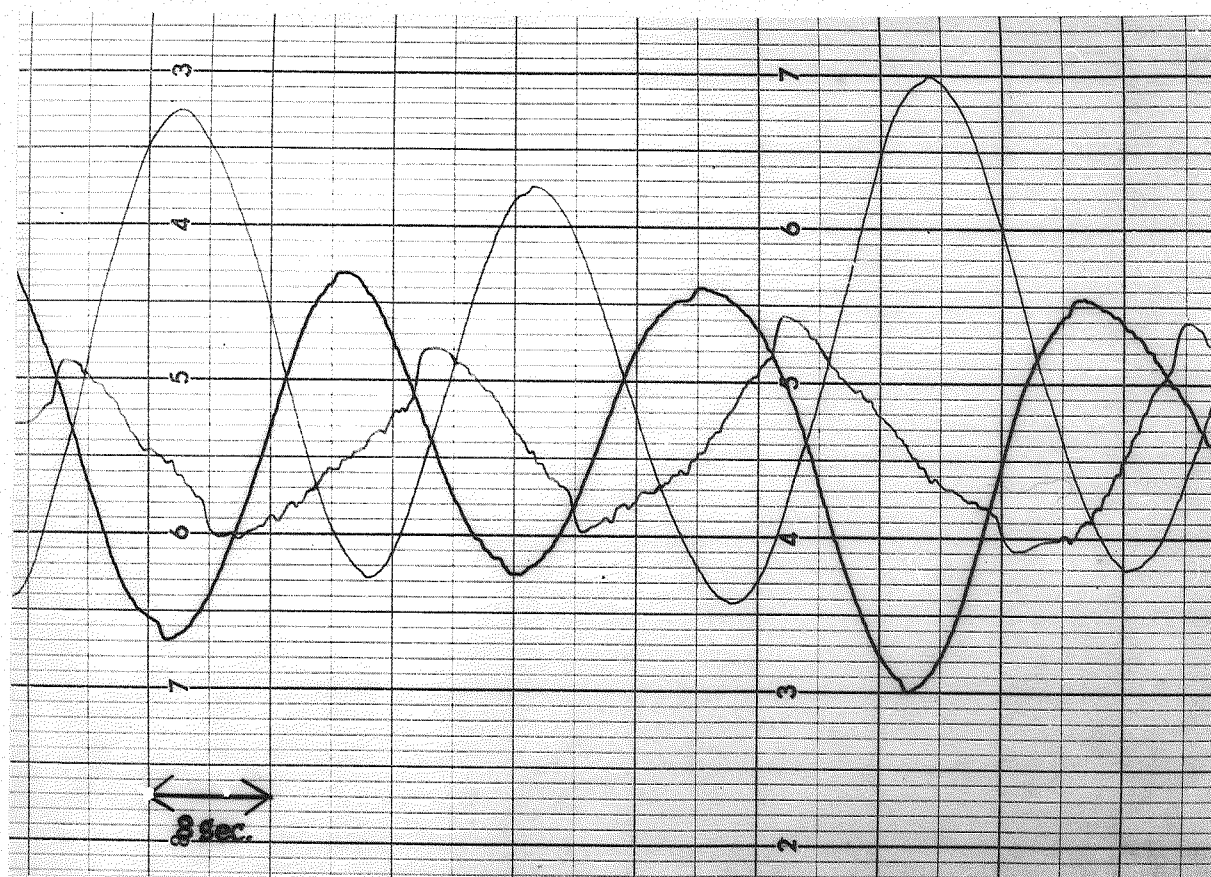


Fig. 4 ロード・セルによる張力の記録の一例.



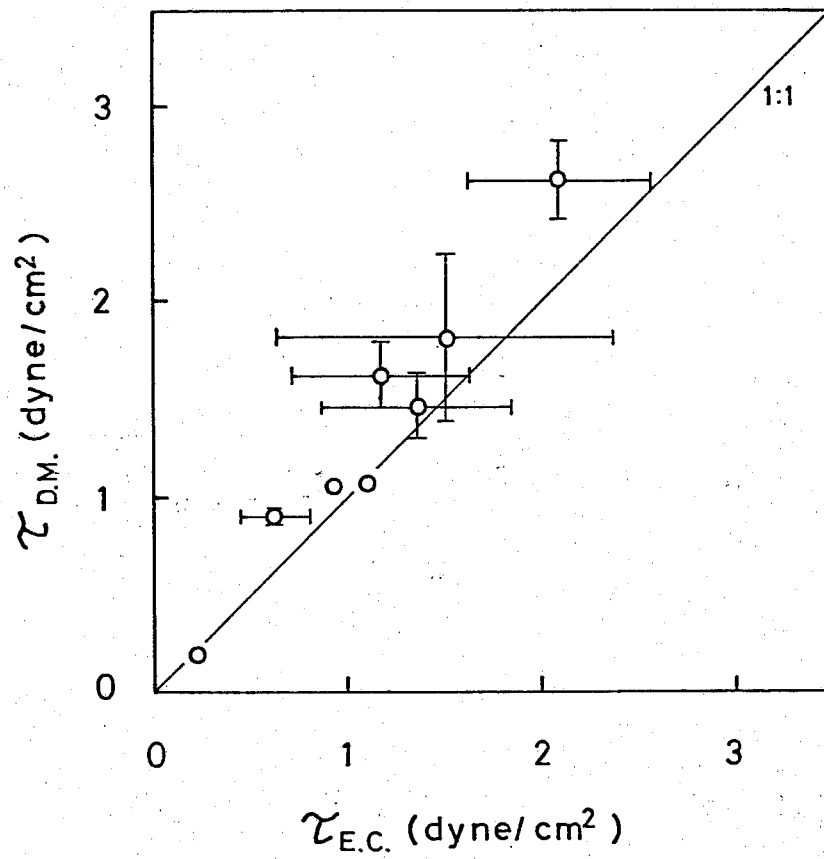


Fig. 5 Drag-meter 法 から求めた風の応力  $\tau_{DM}$  と  
渦相関法から求めたレイノルズ応力  $\tau_{EC}$  との関係.

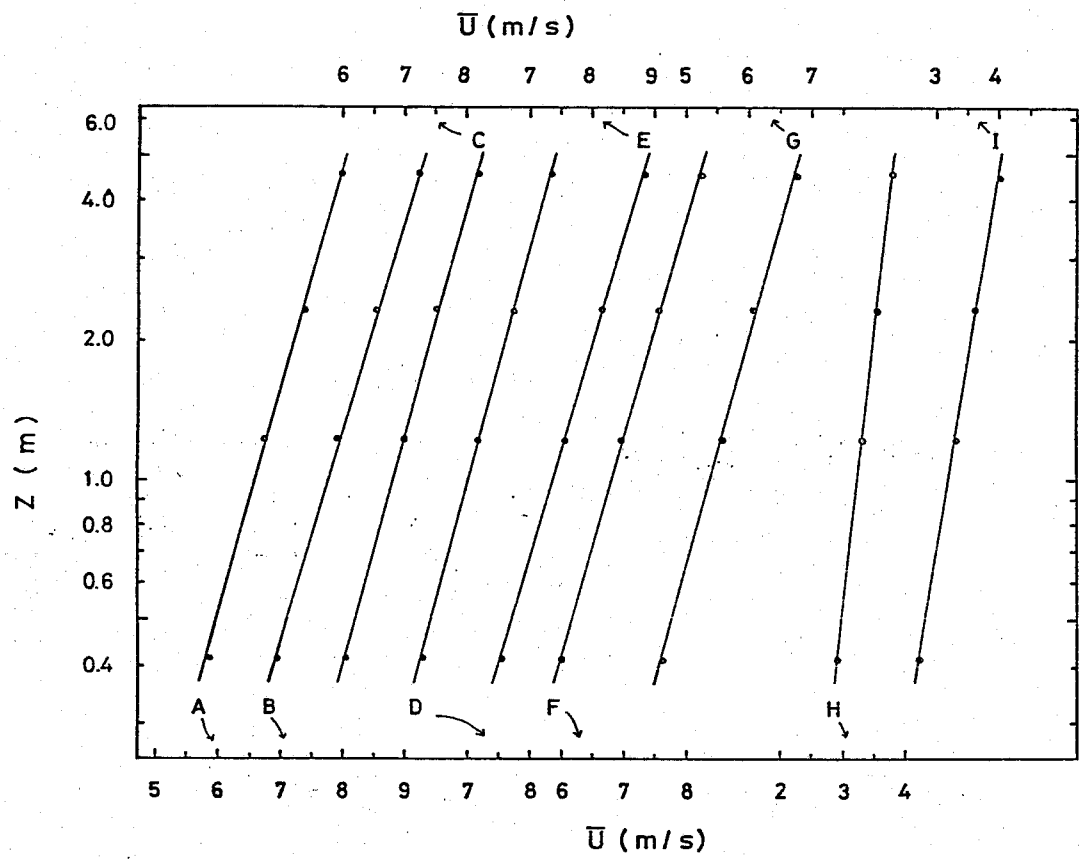


Fig. 6. サロマ湖の平坦水野での風速の鉛直分布.

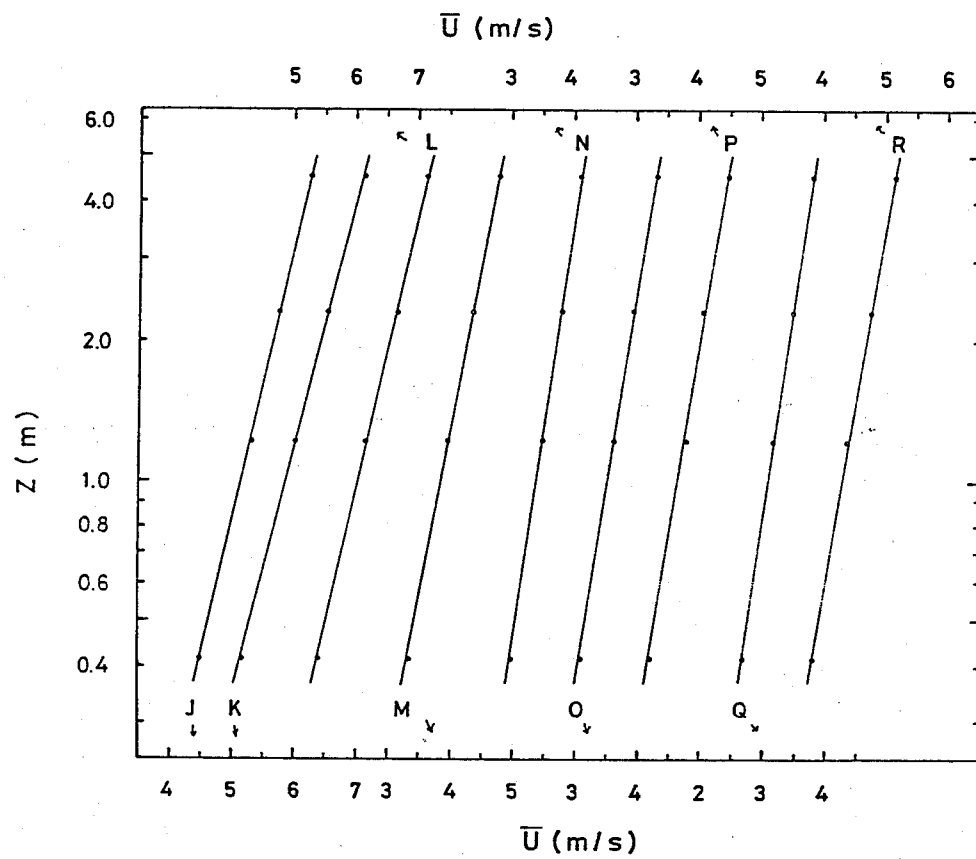


Fig. 7 サロマ湖の平坦氷野での風速の鉛直分布.

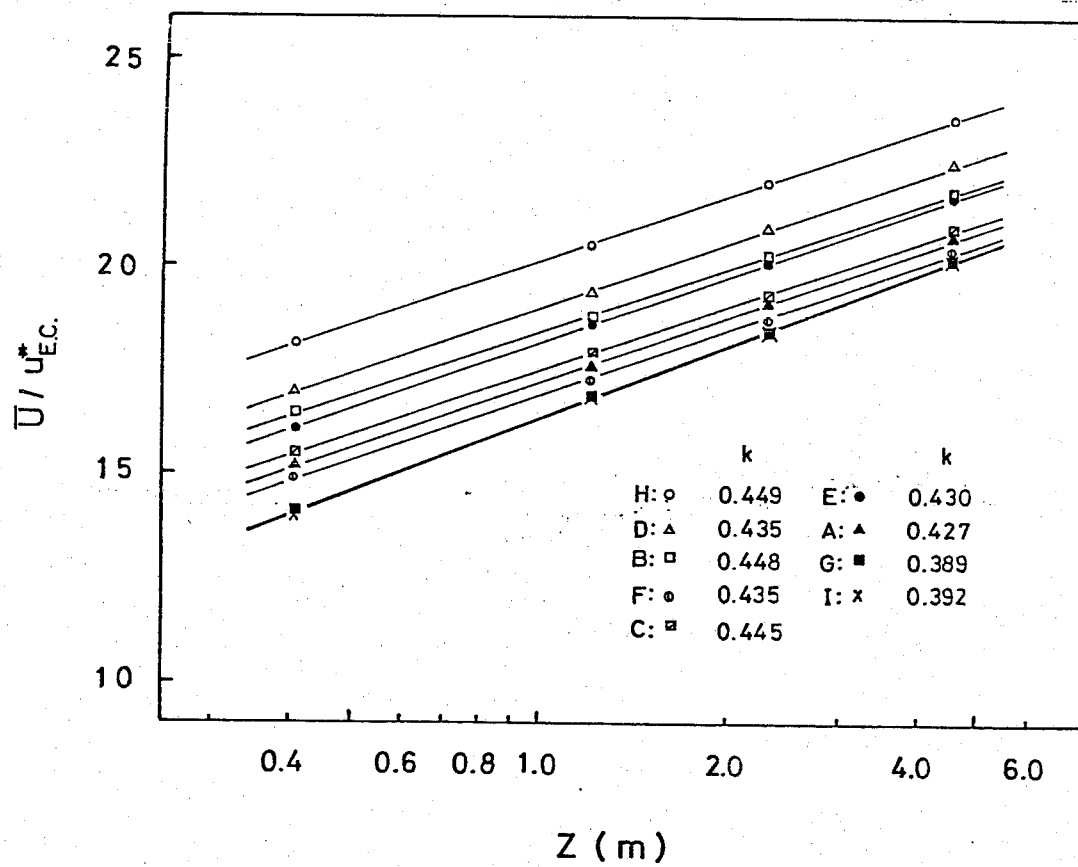


Fig. 8 渦相関法から求めた摩擦速度で無次元化した風速と高さの関係.

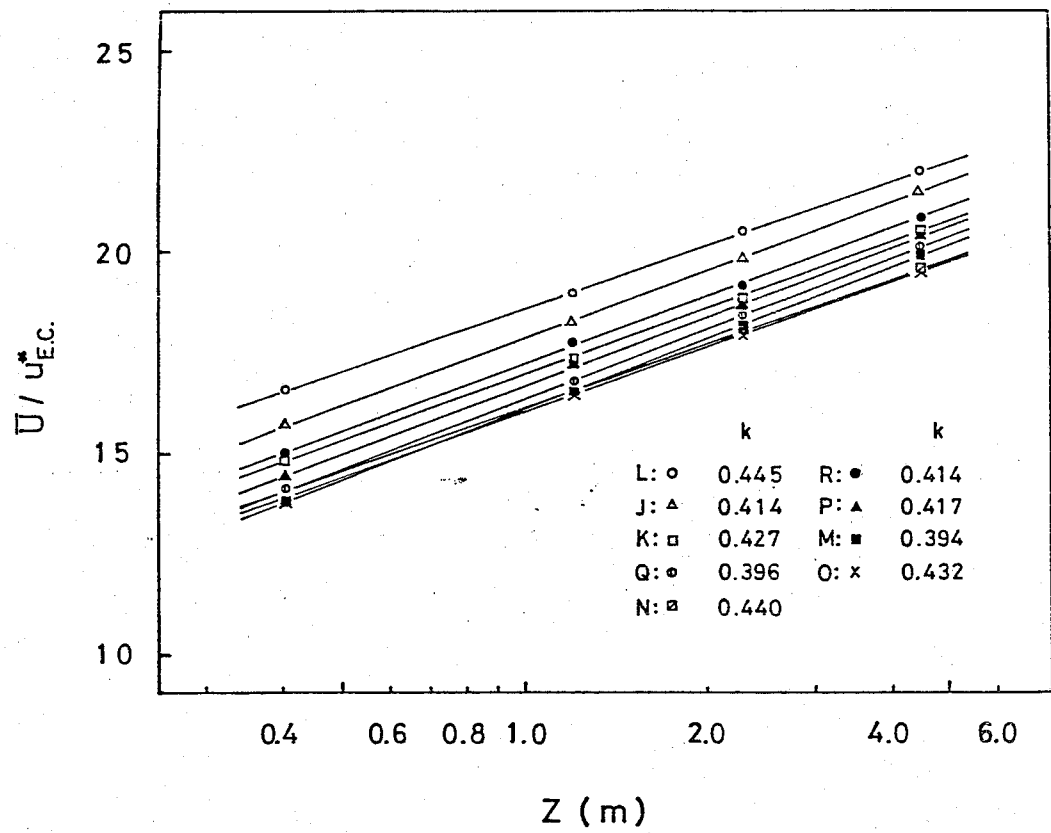


Fig. 9 渦相関法から求めた摩擦速度で無次元化した風速と高さの関係.



Fig. 10 表面に人工的に凹凸をつけた氷野.  
(1980年2月, サロマ湖)

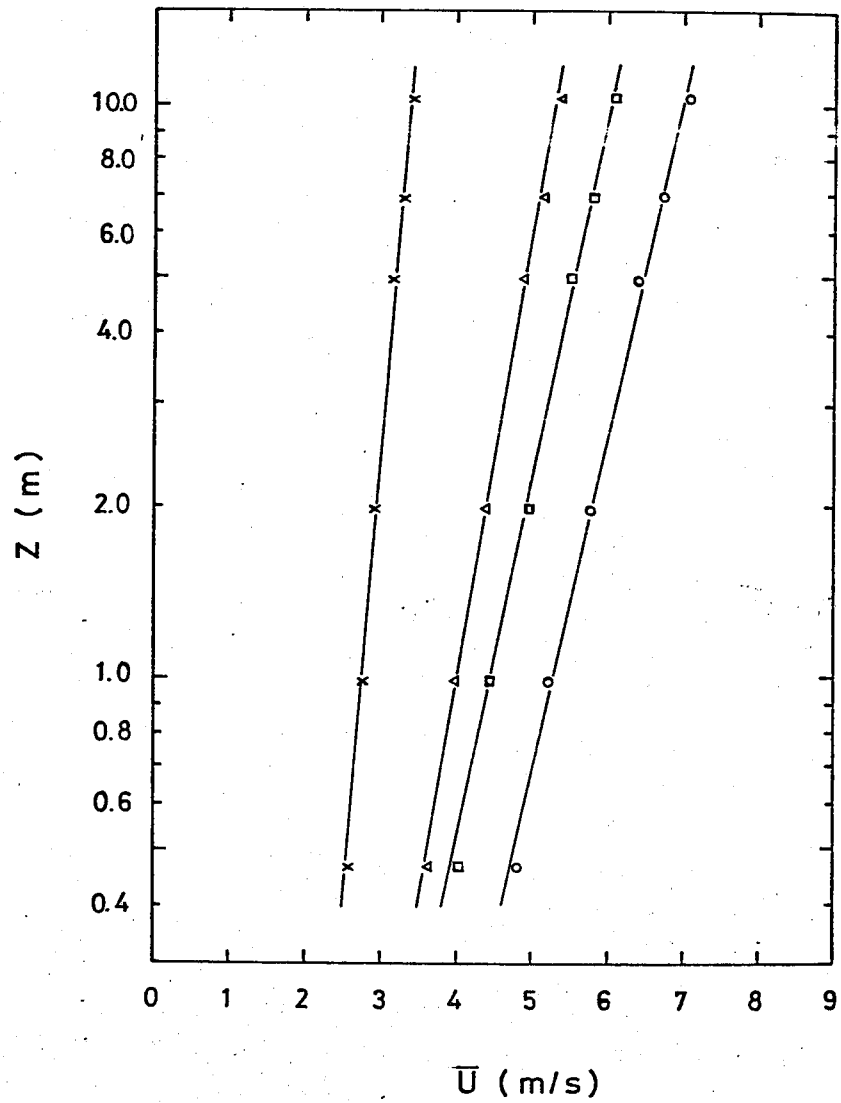


Fig. 11 サロマ湖で、表面に人工的に凹凸をつけた氷野  
での風速分布.

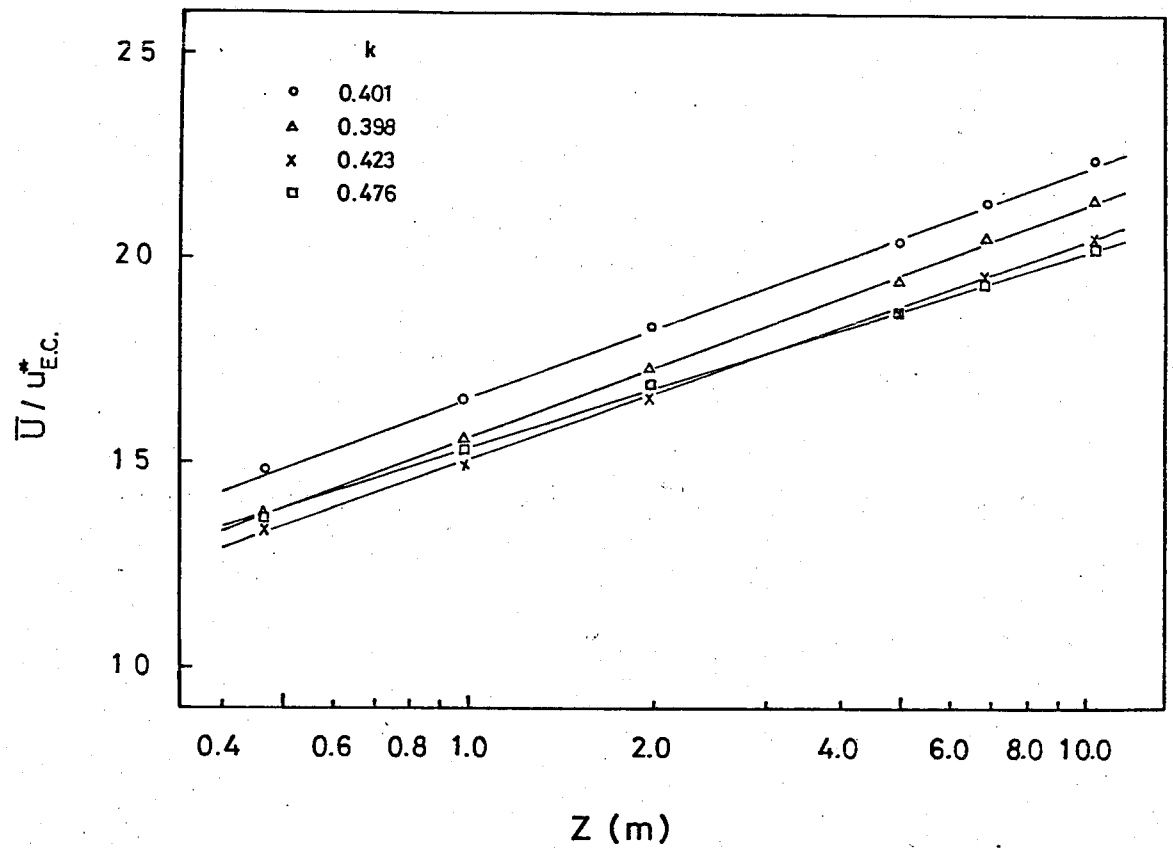


Fig. 12 カマ湖の、表面に人工的に凹凸をつけた氷野での、  
漏相関法から求めた摩擦速度が無次元化した風速と、  
高さの関係。



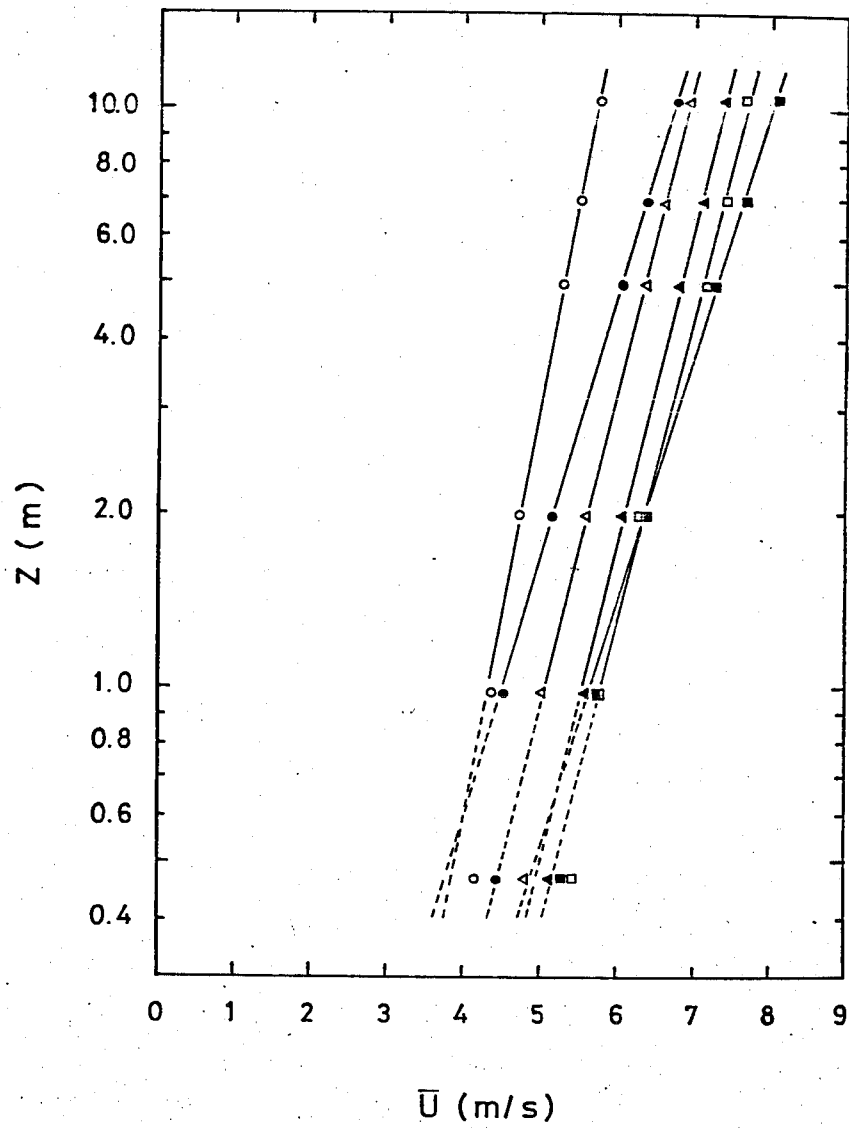


Fig. 13 ガラマ湖Z, 表面に人工的に凹凸をつけた氷層Zの  
風速分布.

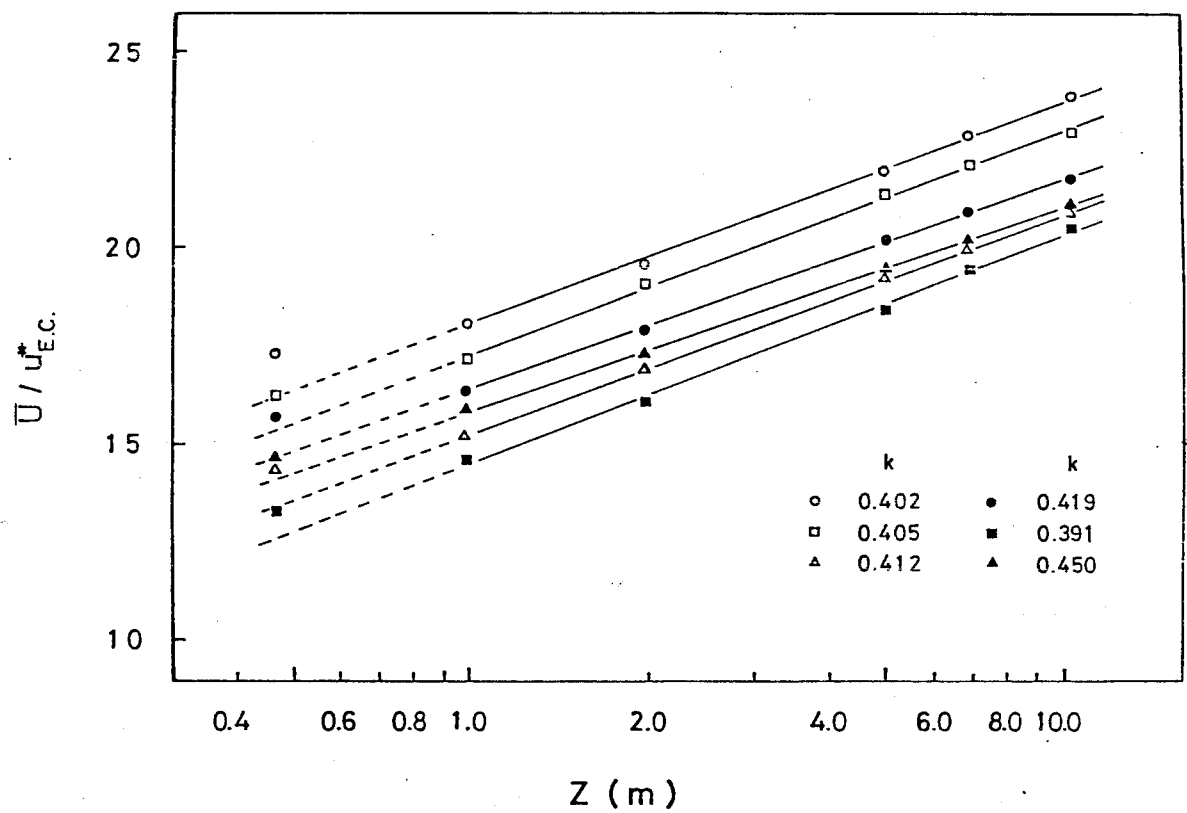


Fig. 14 サロマ湖で、表面に人工的に凹凸をつけた氷野での、渦相関法から求めた摩擦速度で無次元化した風速と高さの関係。

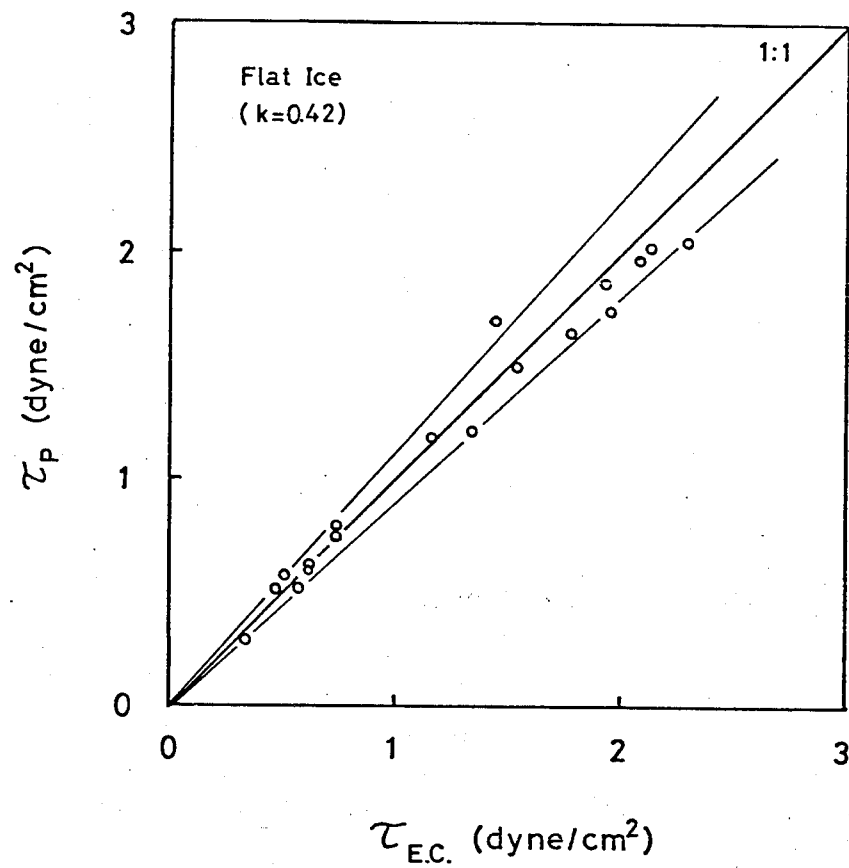


Fig. 15 渦相関法から求めたレイルズ応力 $\tau_{E.C.}$ と  
風速の鉛直分布から求めたレイルズ応力 $\tau_p$   
との関係 (サロマ湖の平坦な氷野の場合)

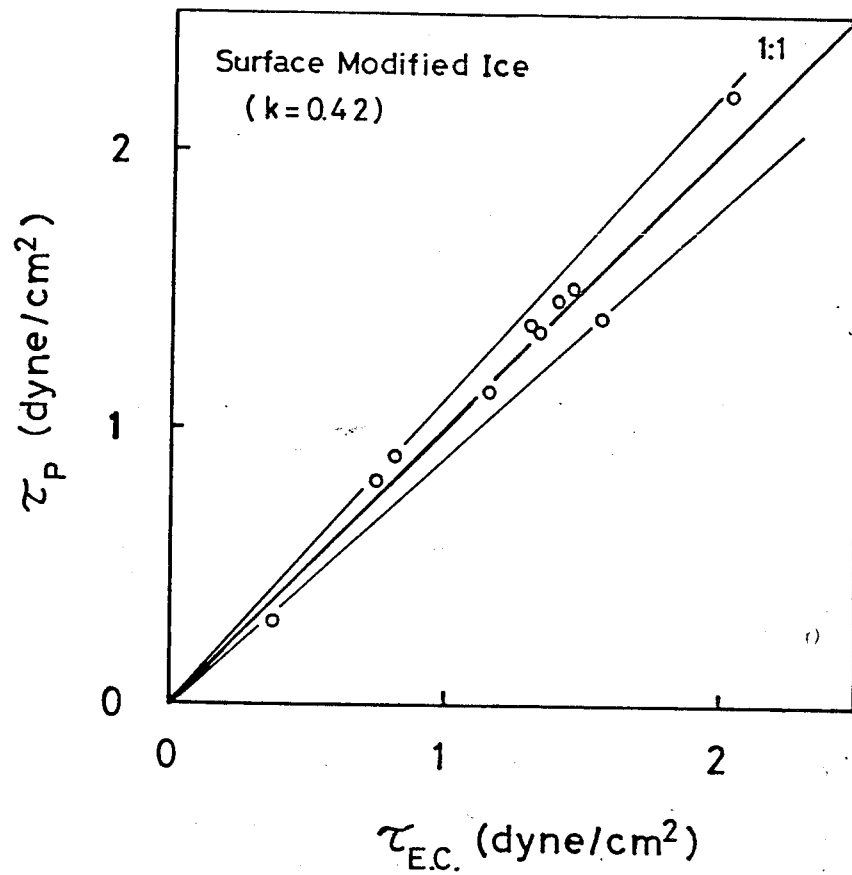


Fig. 16 渦相関法から求めたレイルズ応力  $\tau_{EC}$  と  
風速の鉛直分布から求めたレイルズ応力  $\tau_P$  と  
の関係 (ヤマト湖で、表面に人工的に凹凸を  
つけた氷野の場合)。

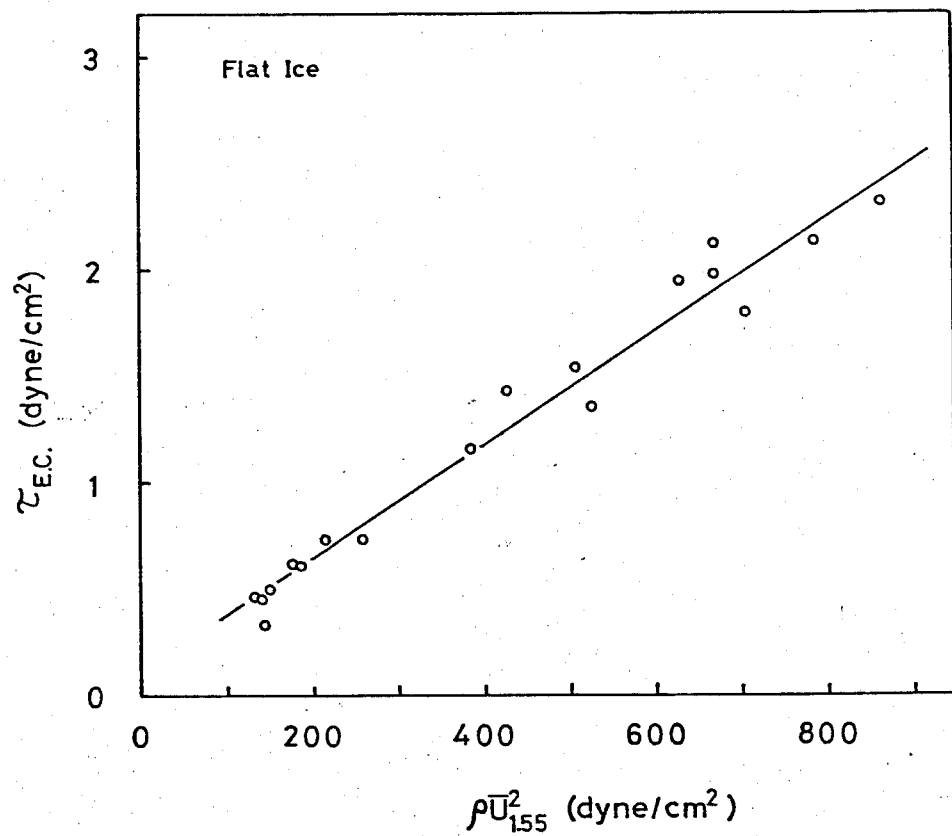


Fig. 17 渦相関法から求めたレイルズ応力  $\tau_{EC}$  と  
風速の自乗  $\rho U_{155}^2$  との関係  
(サロコ湖の平坦な氷野の場合)

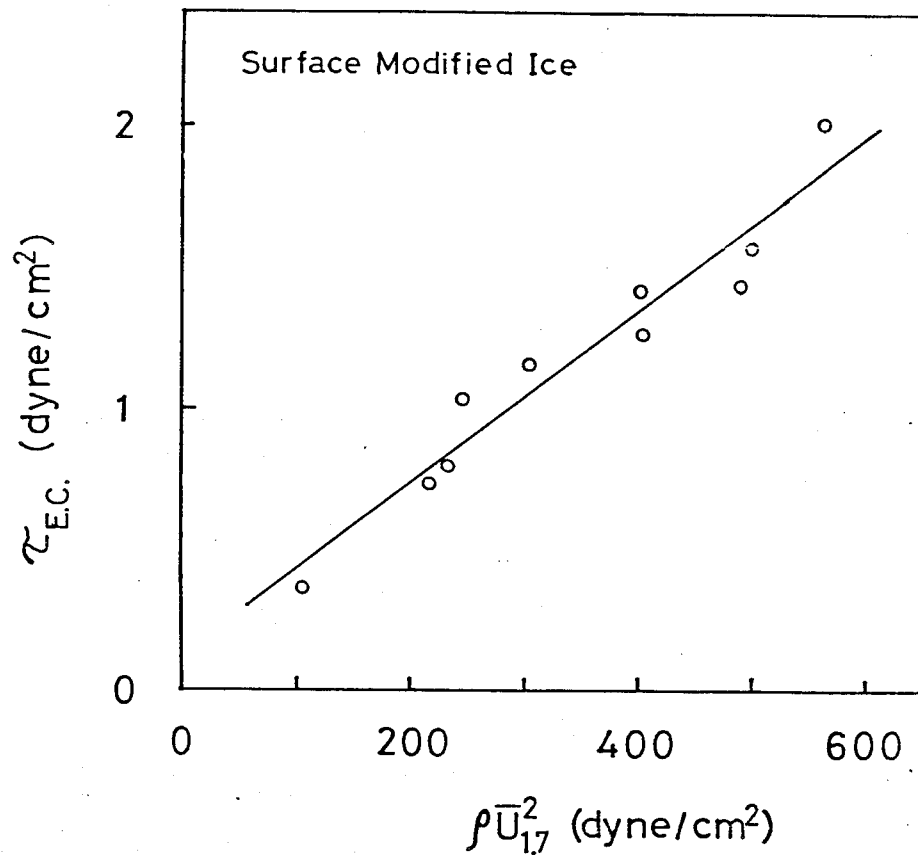


Fig. 18 渦相関法から求めたレイノルズ応力  $\tau_{E.C.}$  と  
 風速の自乗  $\rho U_{17}^2$  との関係  
 (カマ湖で、表面に人工的に凹凸をつけた氷野の場合)

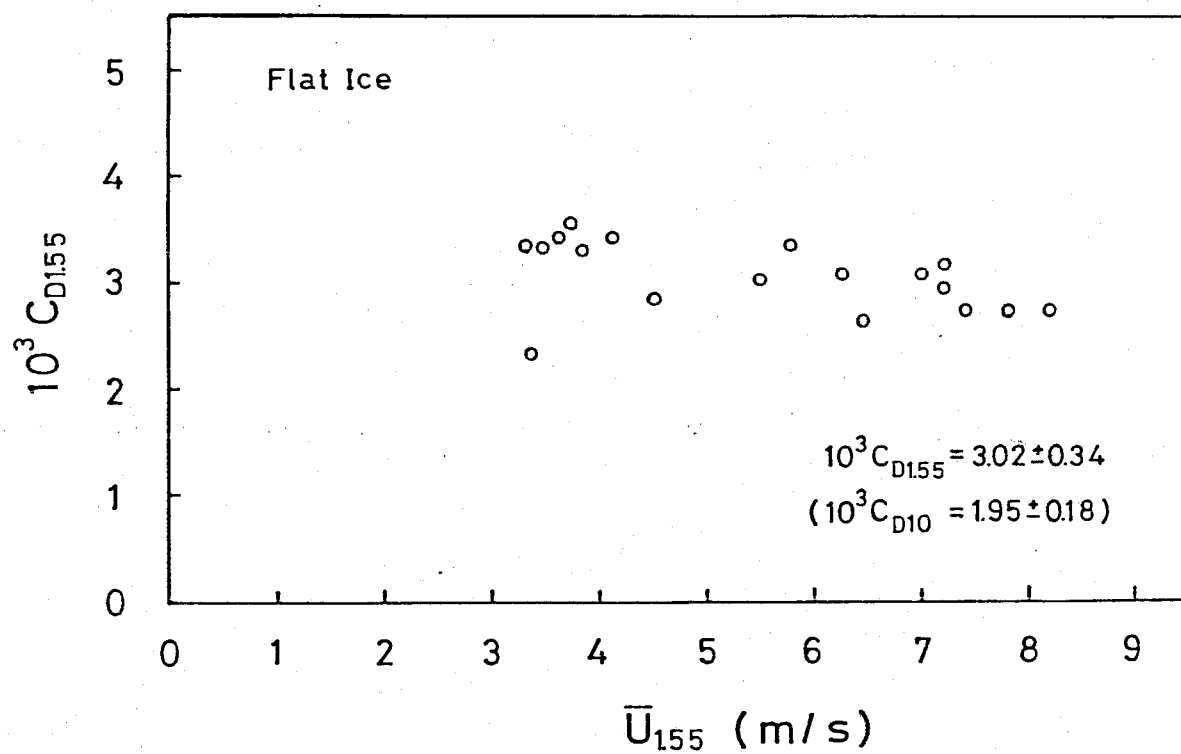


Fig. 19 抵抗係数と平均風速の関係.  
 (サロマ湖の平坦な氷野の場合).

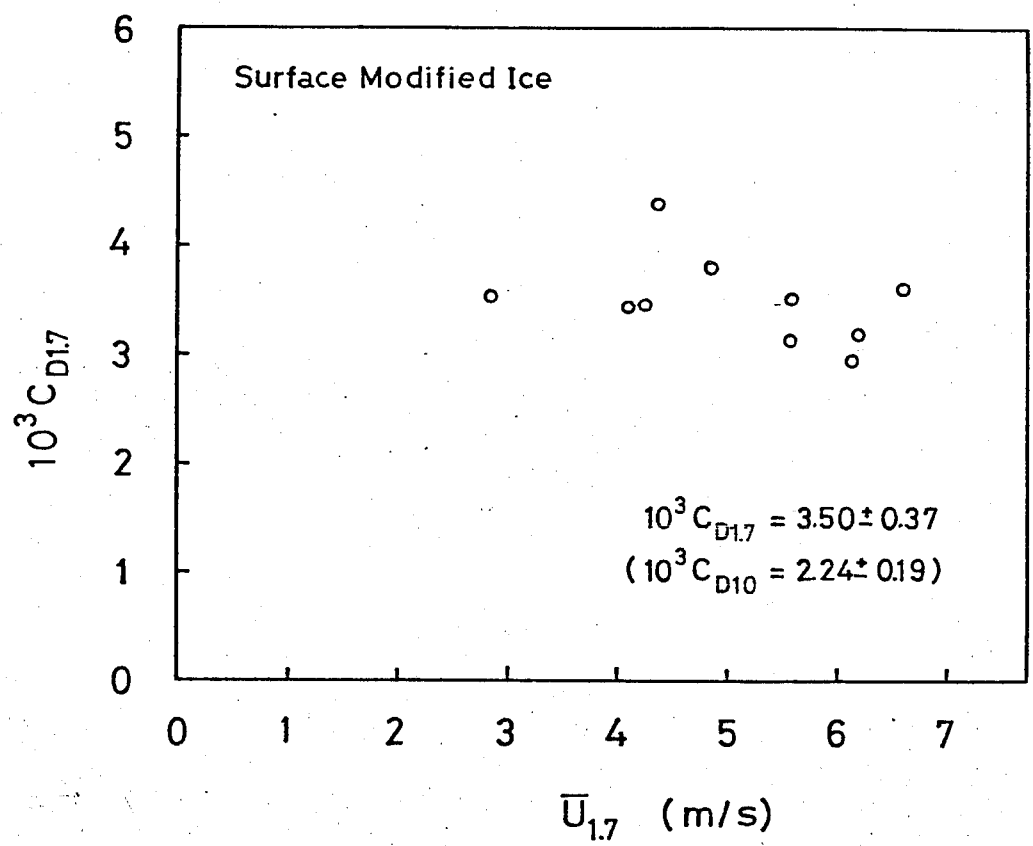


Fig. 20 抵抗係数と平均風速の関係  
 (ガマ湖で、表面に人工的に凹凸をつけた氷野の場合)



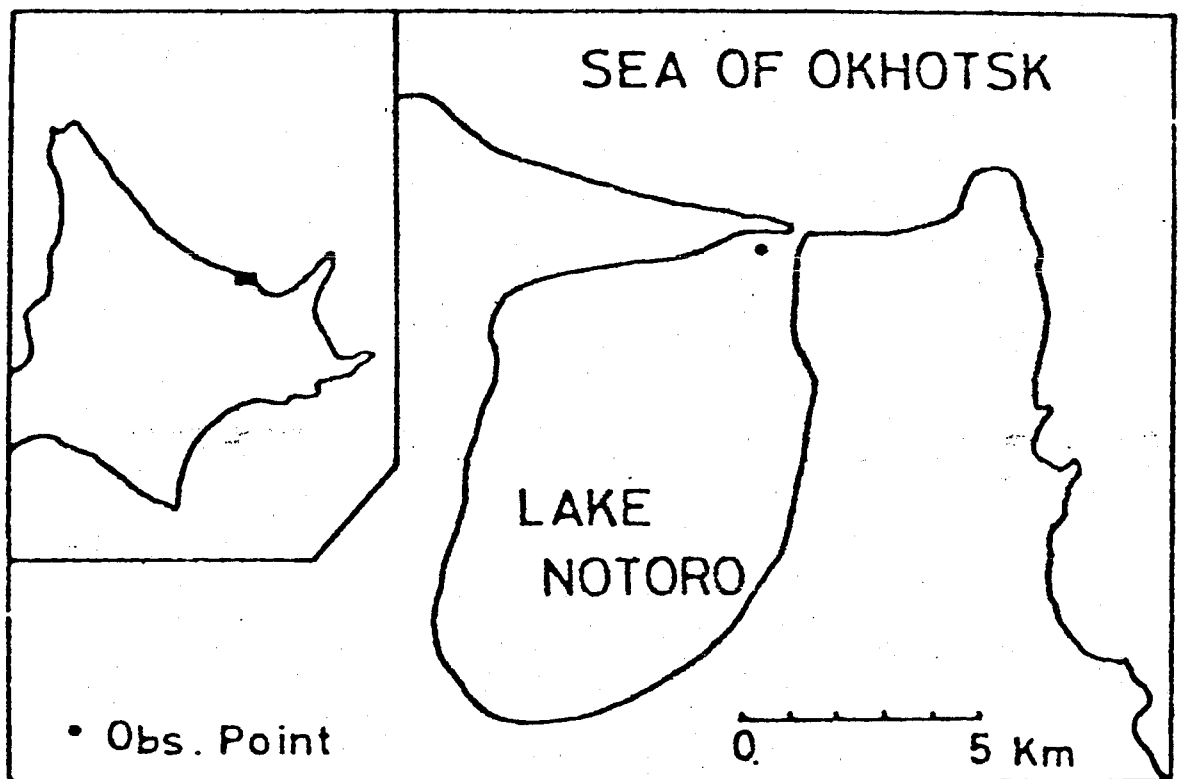


Fig. 21 北海道オホーツク海沿岸の能取湖での測定場所  
(1979年2月)



Fig. 22 能取湖の測定場所付近の表面状態.  
(1979年2月)

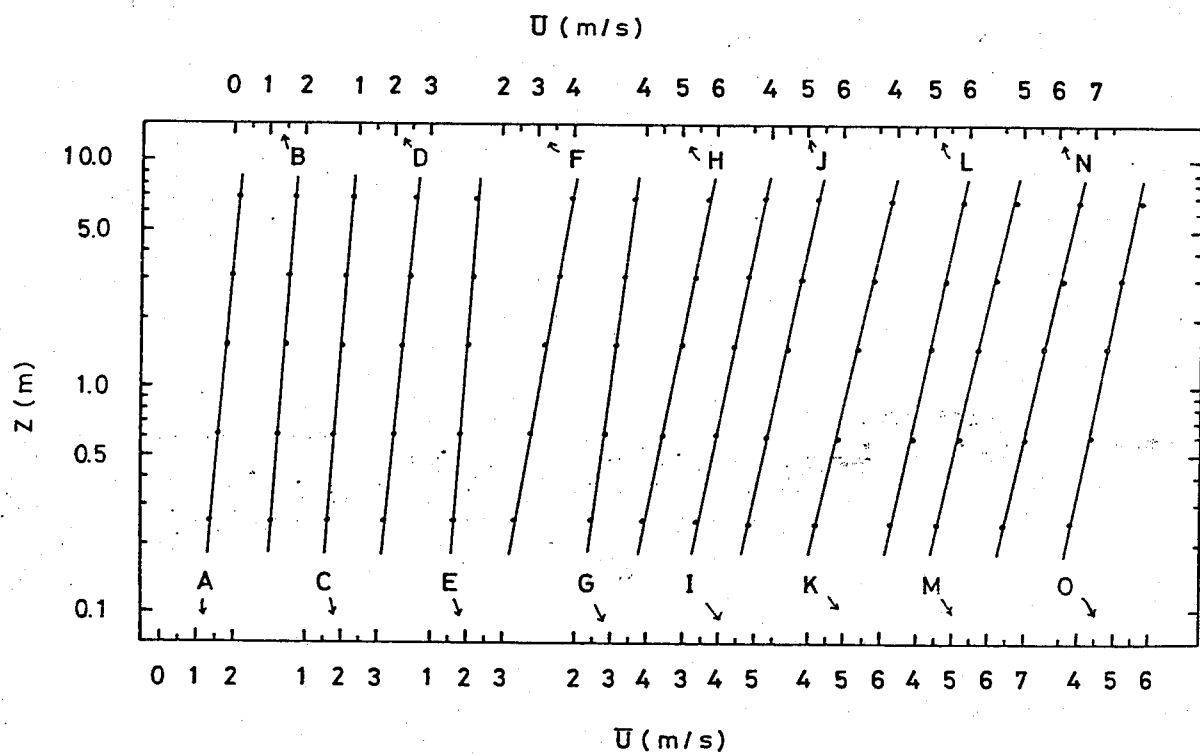


Fig. 23-(a) 風速の鉛直分布 (能取湖の非常に平らな水野の場合)

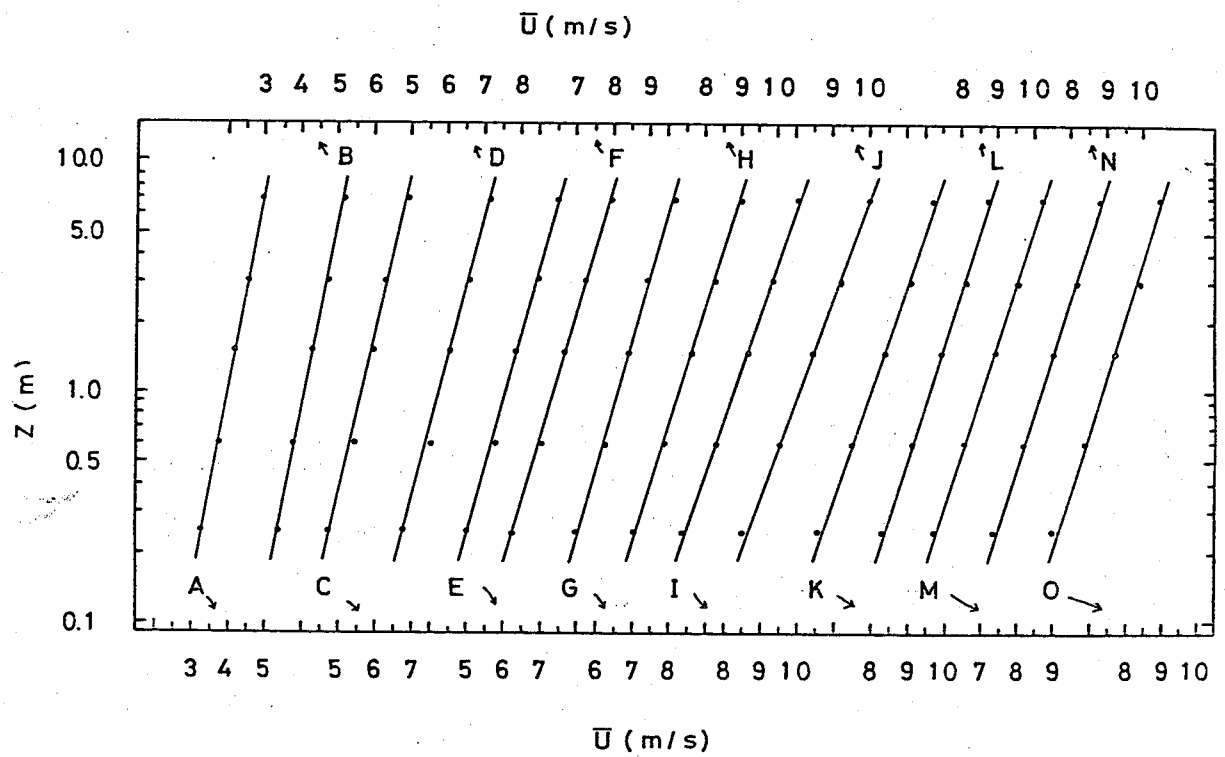


Fig. 23-(b)

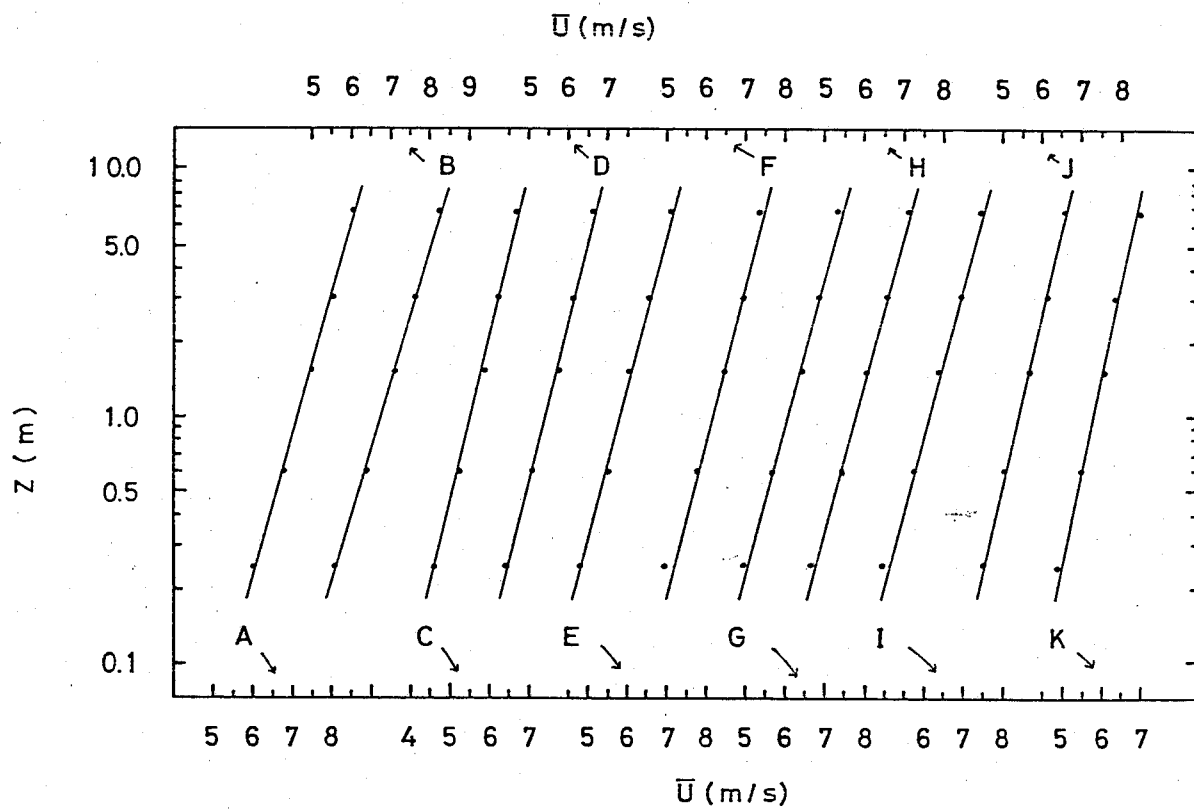


Fig. 23-(c)

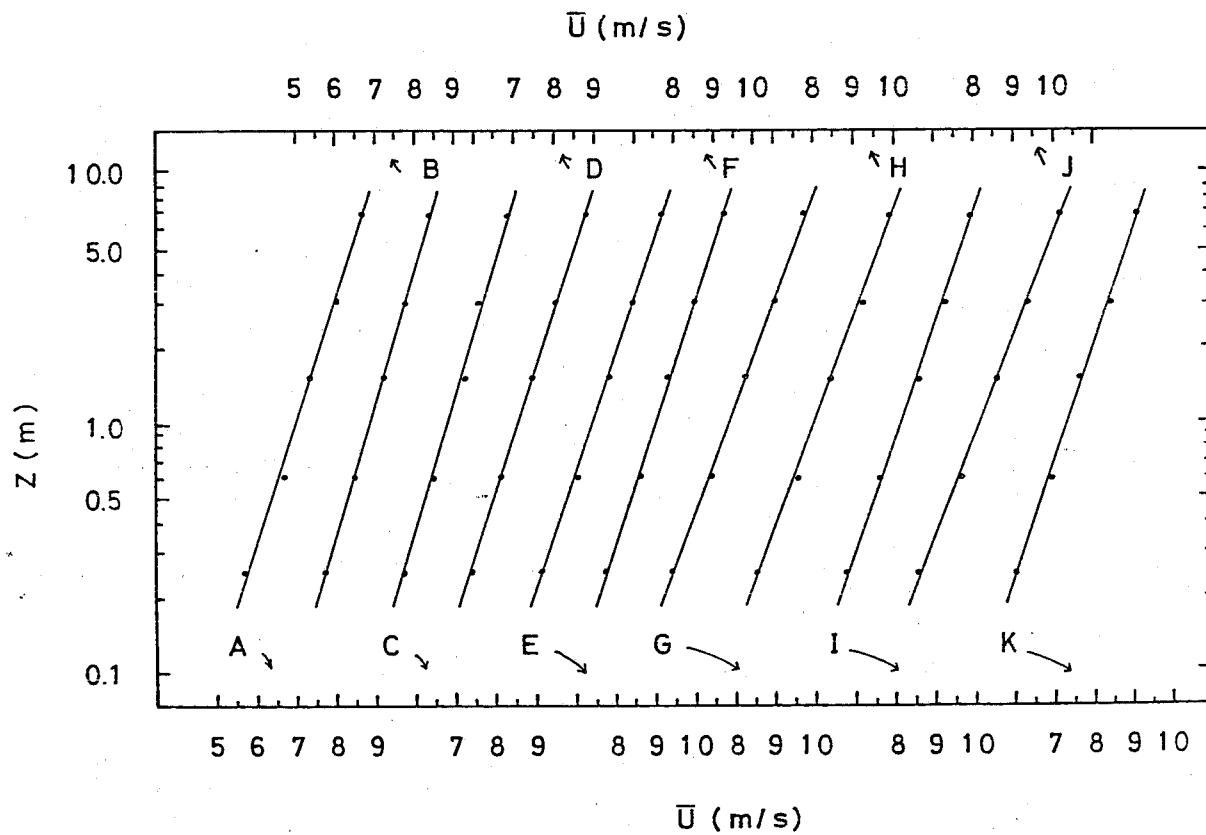


Fig. 23-(d)

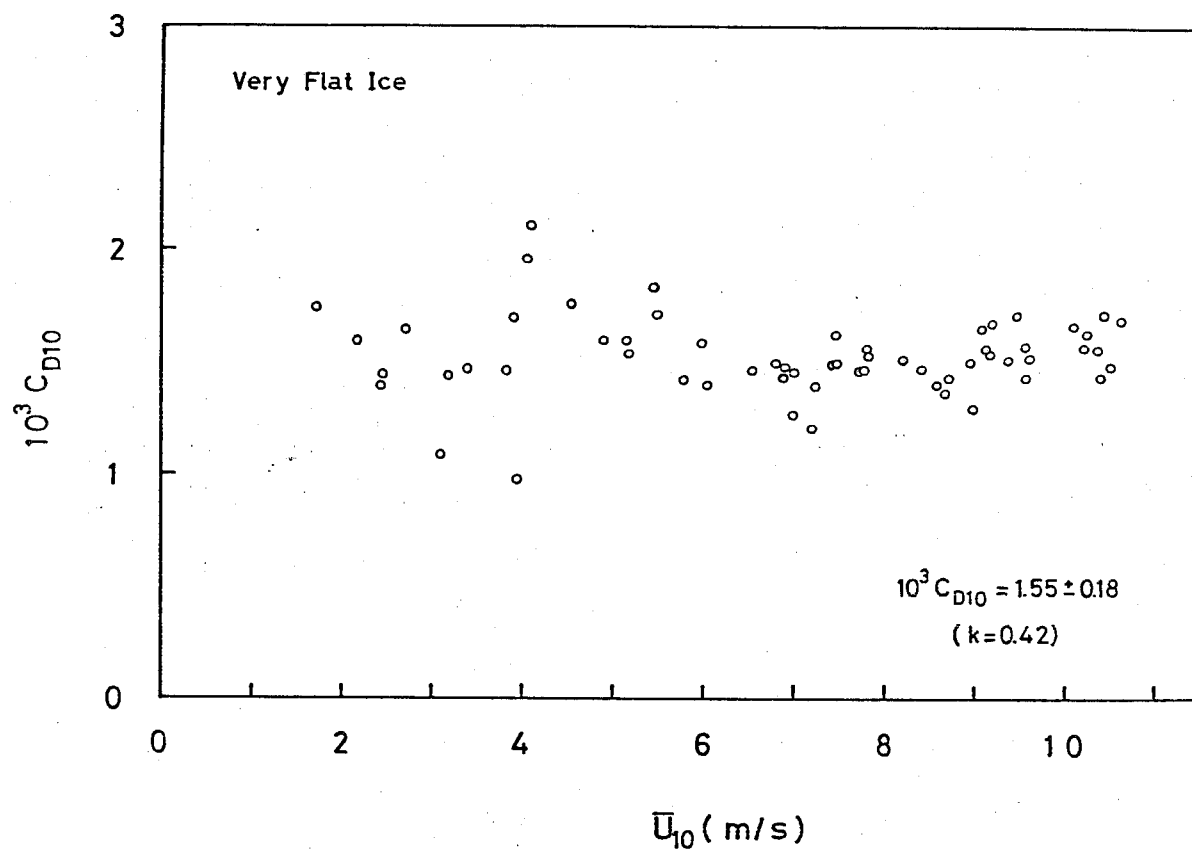


Fig. 24 抵抗係数と平均風速の関係  
(能取湖の、非常に平らな氷野の場合)

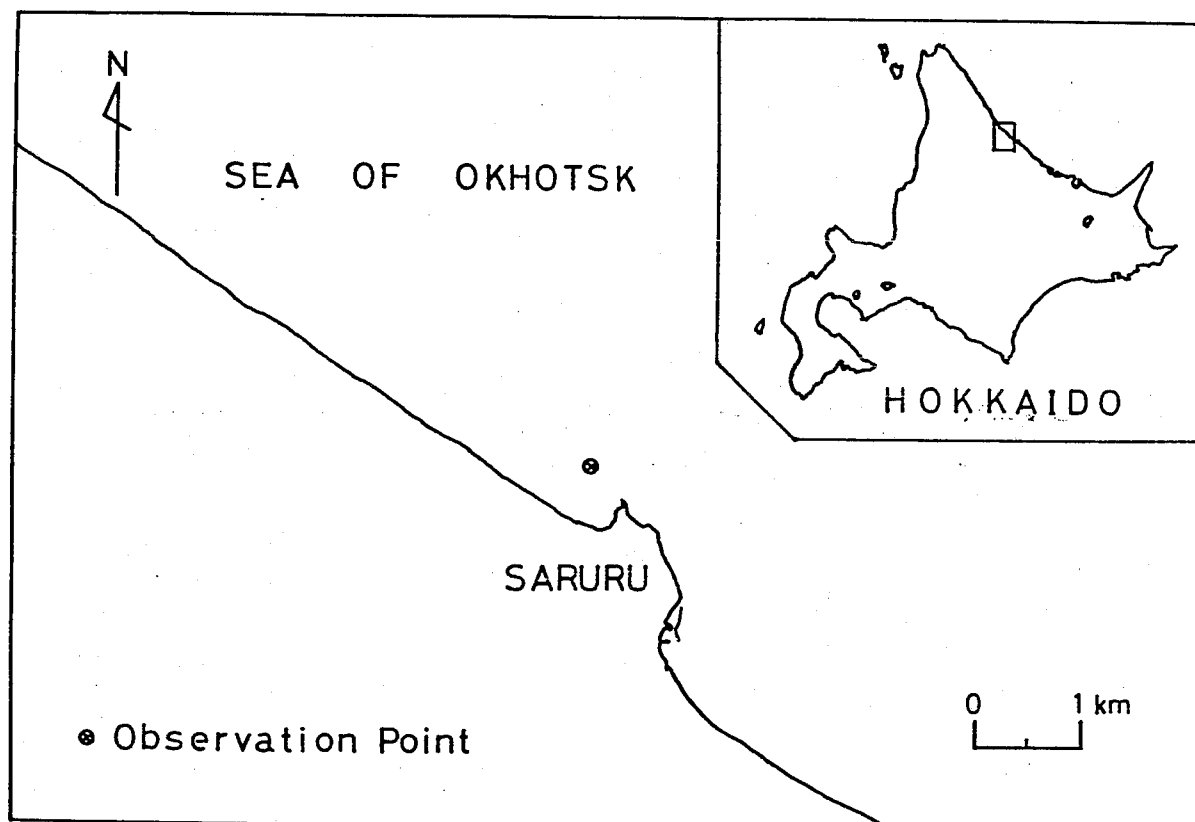


Fig. 25 北海道オホーツク海沿岸の沙留町 沖の観測場所



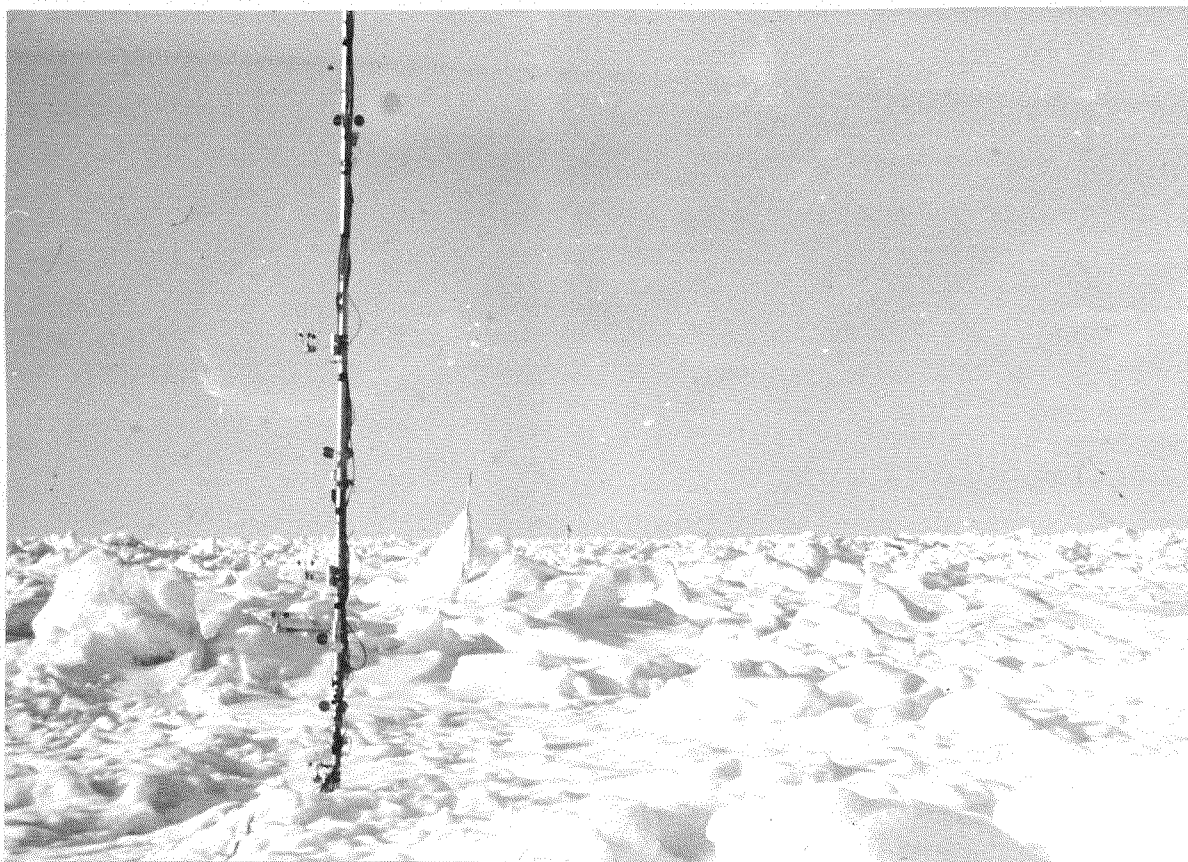


Fig. 26 沙留町沖の定着氷の表面状態  
(1998年2月)

Mean : 29 cm  
Standard Deviation : 30 cm

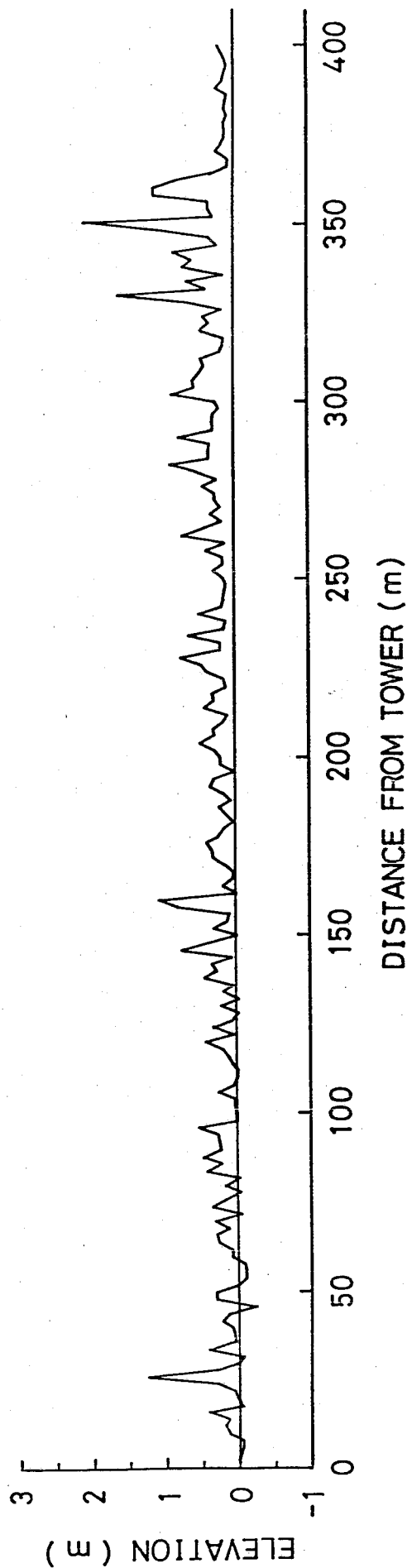


Fig. 27 風速計用支柱の設置点から風上に向かった距離と表面高度の関係。  
(1978年2月, 北海道オホーツク海沿岸シロロ町沖の定着氷)

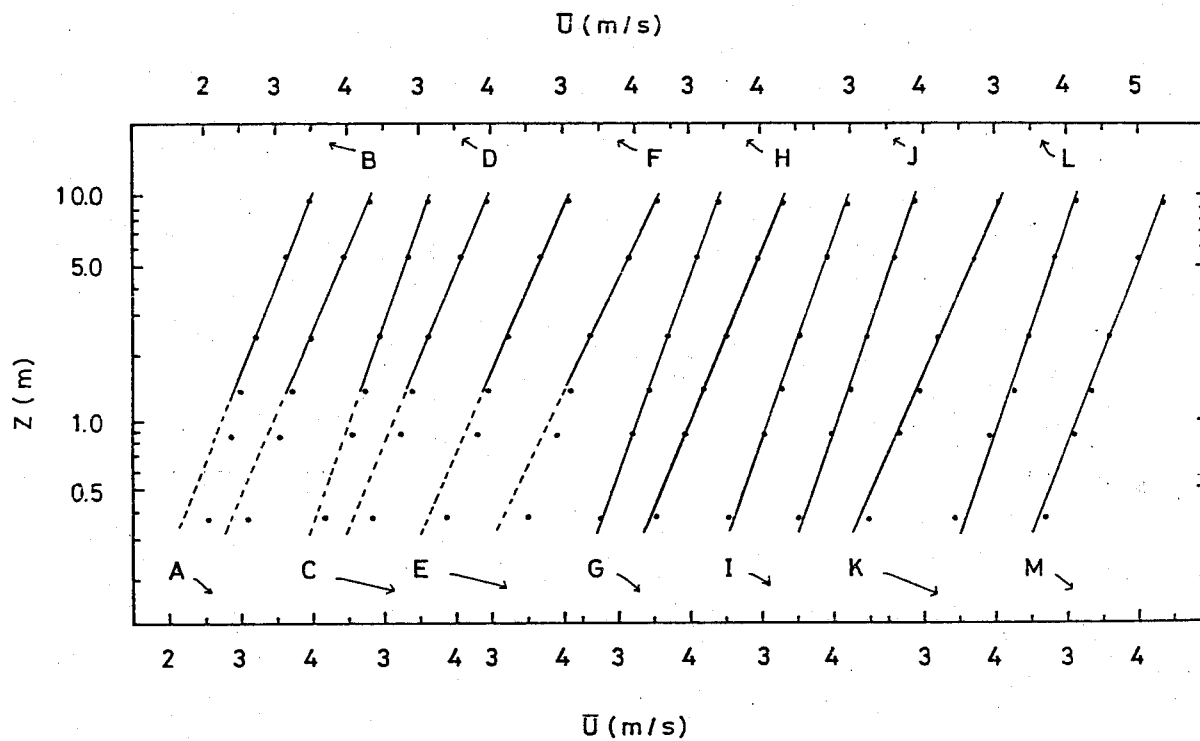


Fig. 28-(a) 風速の鉛直分布 (沙留町沖の定着氷)

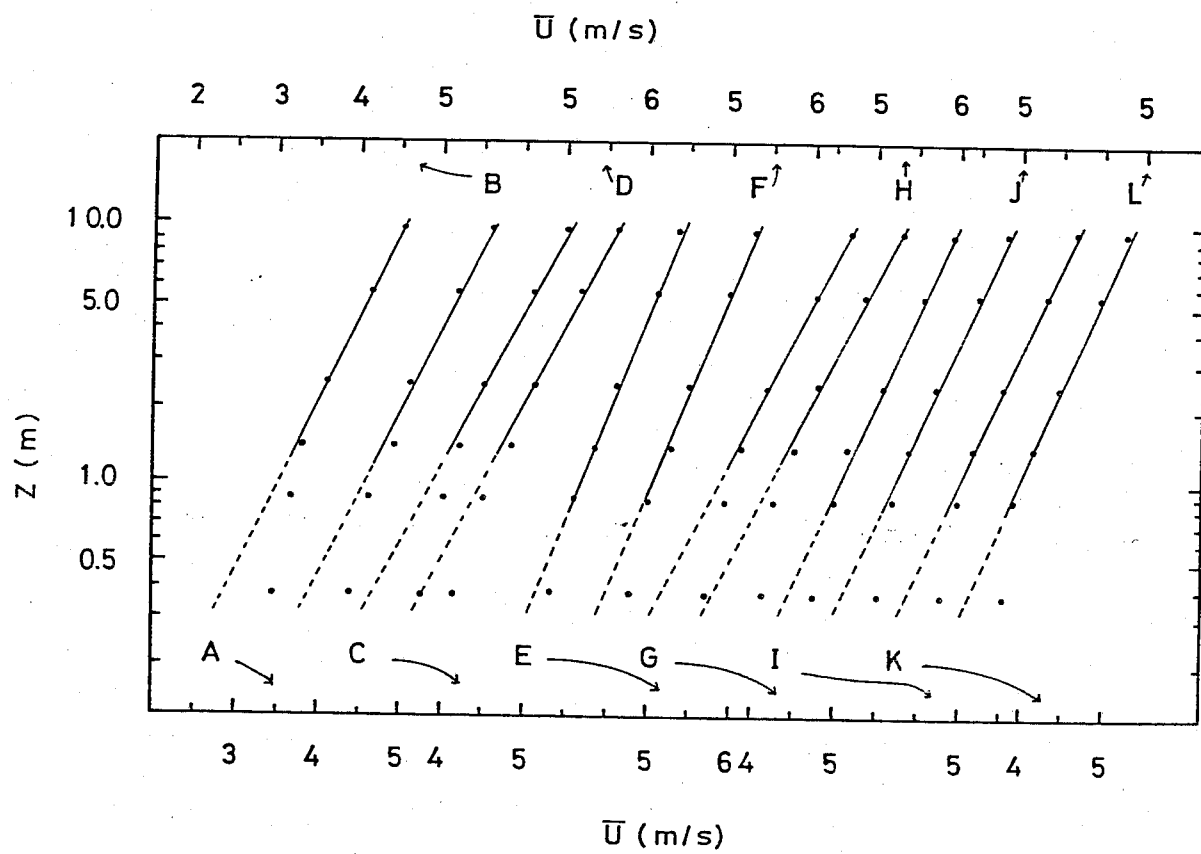


Fig. 28-(b)

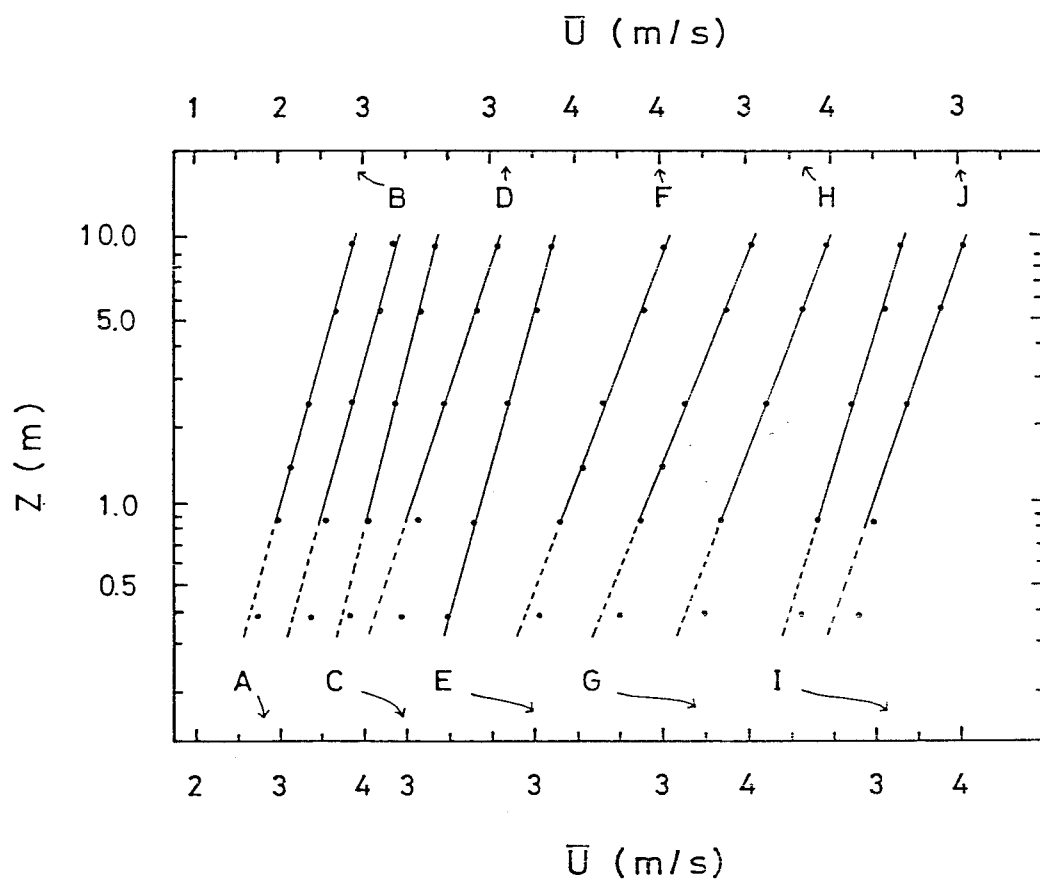


Fig. 28-(c)

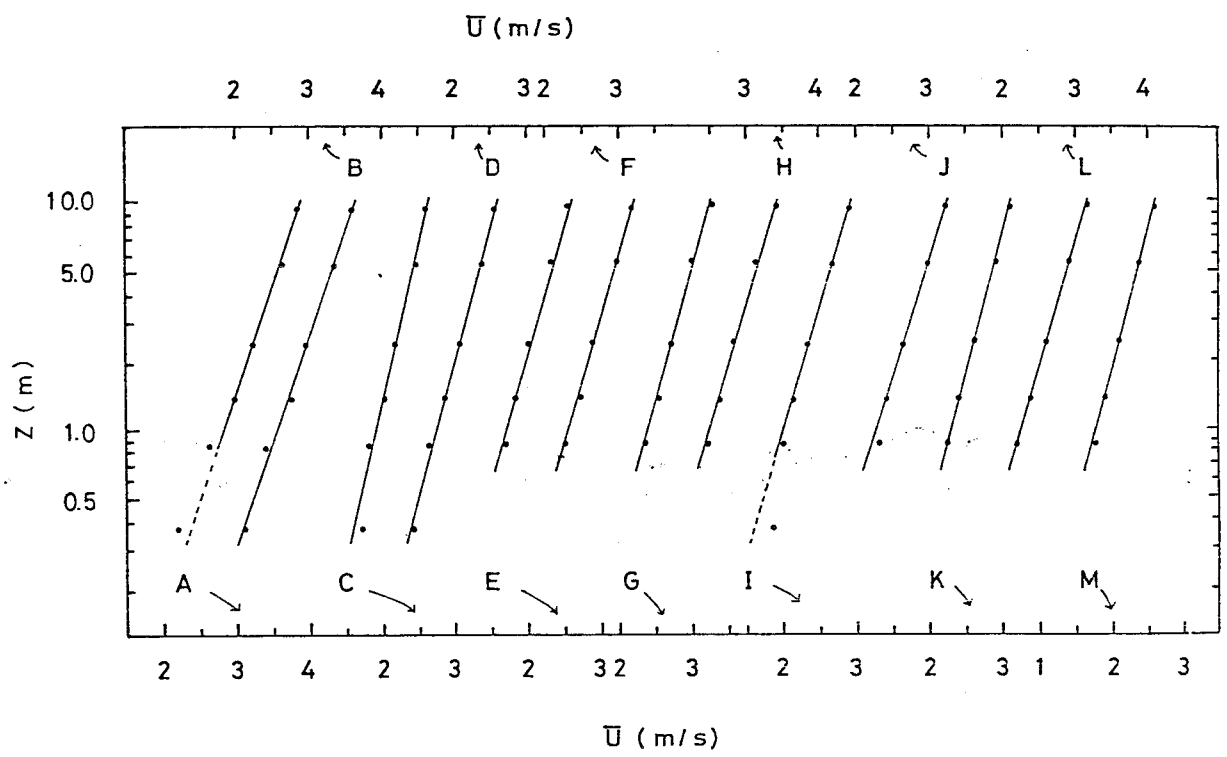


Fig. 28-(d)

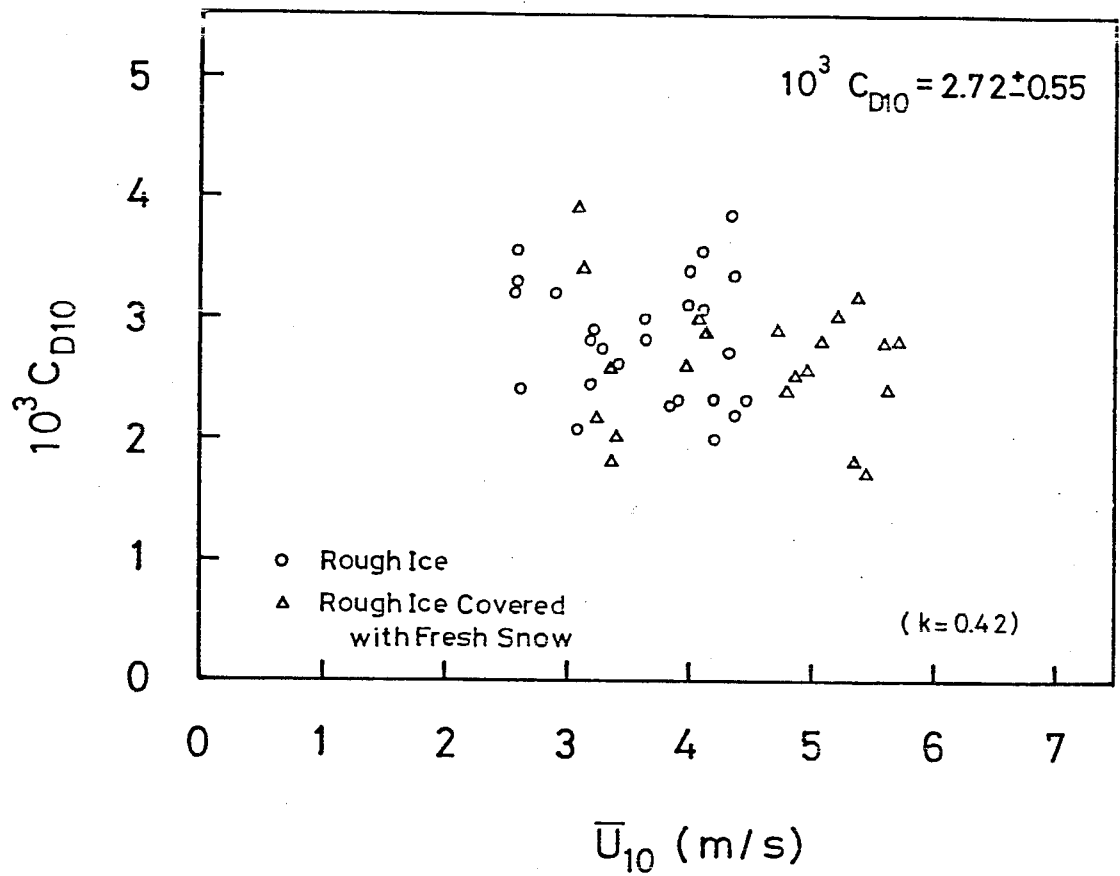


Fig. 29 抵抗係数と平均風速の関係  
(沙留町沖の、ごぼこした定着氷の場合)

Mean Height : 7cm  
Standard Deviation : 5cm

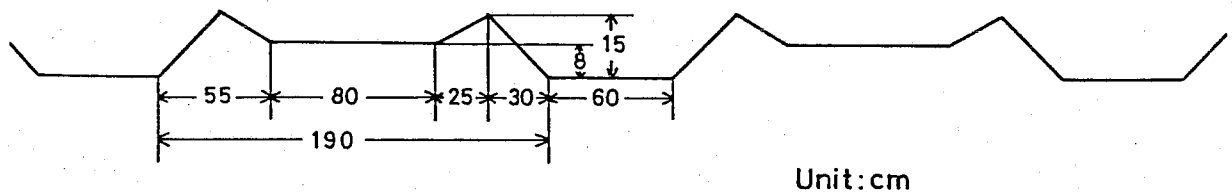


Fig. 30 表面に人工的に凹凸をつけた米野の表面高度



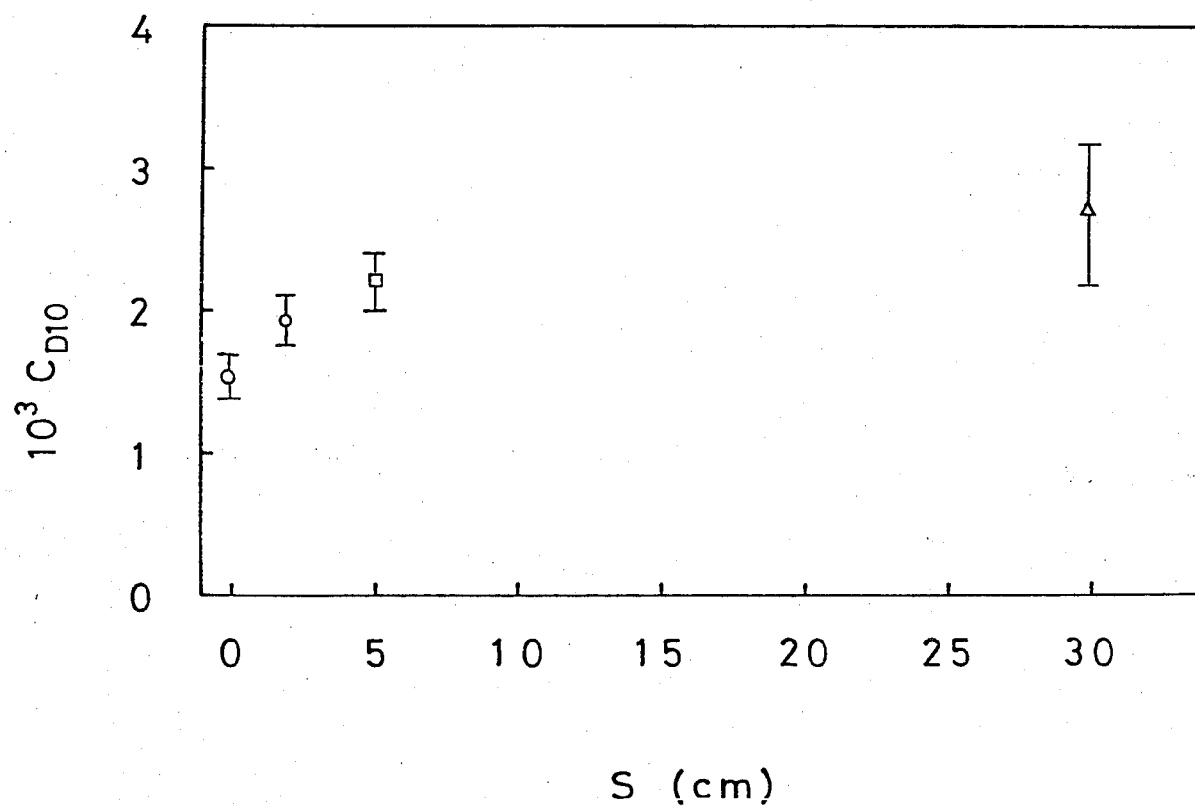


Fig. 31 抵抗係数と表面高度の標準偏差の関係.

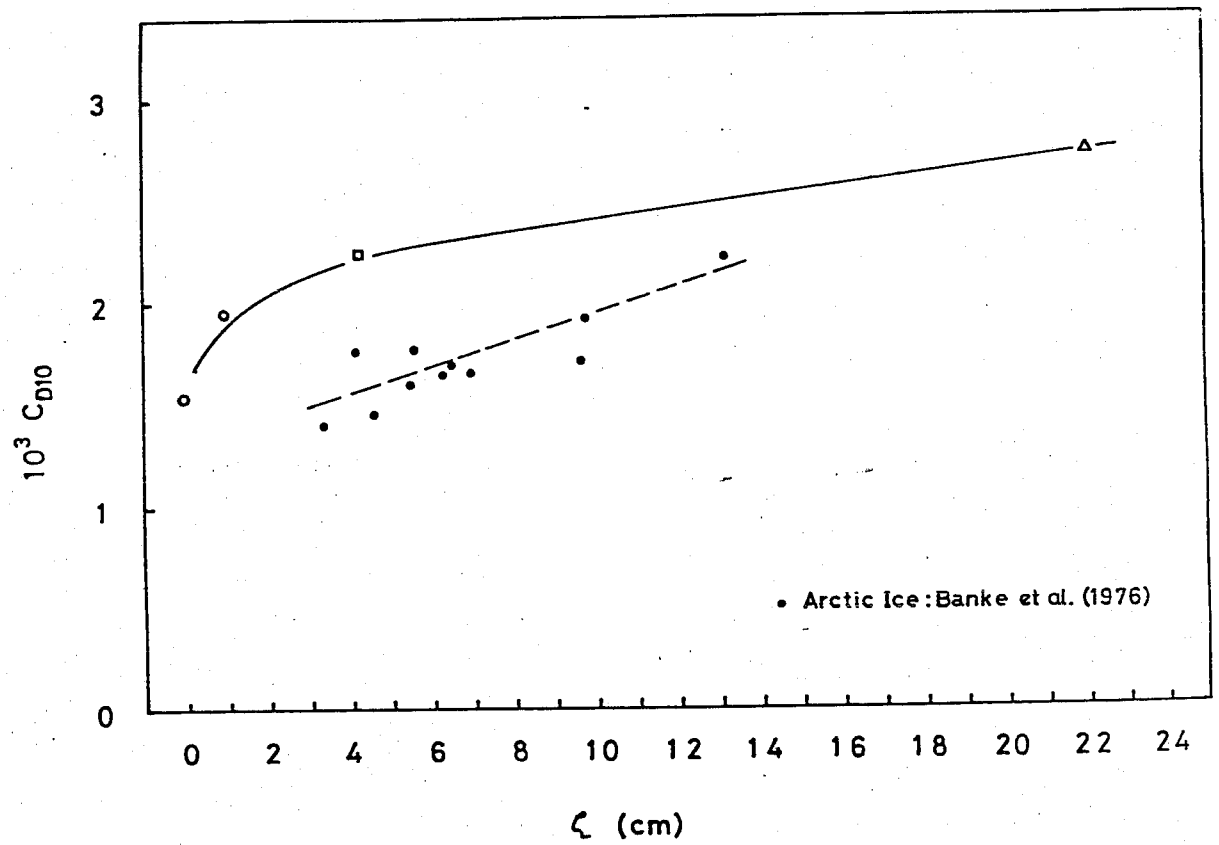


Fig. 32 抵抗係数  $C_{D10}$  と  $L$  との関係.