



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	薄氷域の大気境界層の観測（第3報）：氷海観測塔による1990年冬の観測
Author(s)	白澤, 邦男; SHIRASAWA, Kunio; 青田, 昌秋 他
Citation	低温科学. 物理篇, 49, 25-36
Issue Date	1991-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18592
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p25-36.pdf



薄氷域の大気境界層の観測 (第3報)*,**

—氷海観測塔による1990年冬の観測—

白澤邦男・青田昌秋・高塚 徹

(低温科学研究所)

(平成2年11月受理)

I. はじめに

海氷の生成、成長、融解の過程における、海氷を通しての大気と海洋間の運動量、熱、ガス等の輸送機構の研究は、気候変動予測のための基礎的研究として重要である。とくに、氷縁海域は地球の冷源と熱源の境界域にあたり、ここでの物理的素過程の研究は重要である。しかしながら、氷縁域の海氷は薄く、流動的で、その上での連続観測は困難かつ危険であり、観測資料は充分でない。

オホーツク海は冬期間のみ海氷で覆われる季節氷域であり、また北海道オホーツク海沿岸は氷縁海域でもある。北大流水研究施設は、1986年秋、オホーツク海に面する紋別港に、“氷海域気象・海象観測システム”(氷海観測塔と略称)を設置した¹⁾。本研究の目的は、この塔周辺海域で、結氷期とその前後の気象、海象現象を連続観測し、大気—海氷—海洋間の運動量、熱輸送機構を解明することにある。

1988年、89年、90年とも平年に比べ、著しい暖冬で、オホーツク海の北海道沿岸の流氷は劣勢であった^{2,3,4)}。1988年には塔周辺は高々数cmの沿岸結氷が生じたのみであり⁵⁾、1989年は外海から塔周辺に氷塊群が数日間流入した程度であった⁶⁾。1990年も塔周辺での沿岸結氷は見られず、外海から流入した薄氷板が2週間ほど存在した程度であった。

1988年(第1報)⁵⁾、1989年(第2報)⁶⁾に引続き、1990年も塔上に設置した3成分超音波風速計によって、流氷到来時とその前後の開氷期の風速、気温の連続観測を行った。ここでは、第3報として、薄氷群の去就に注目し、運動量、熱輸送過程の変化について報告する。

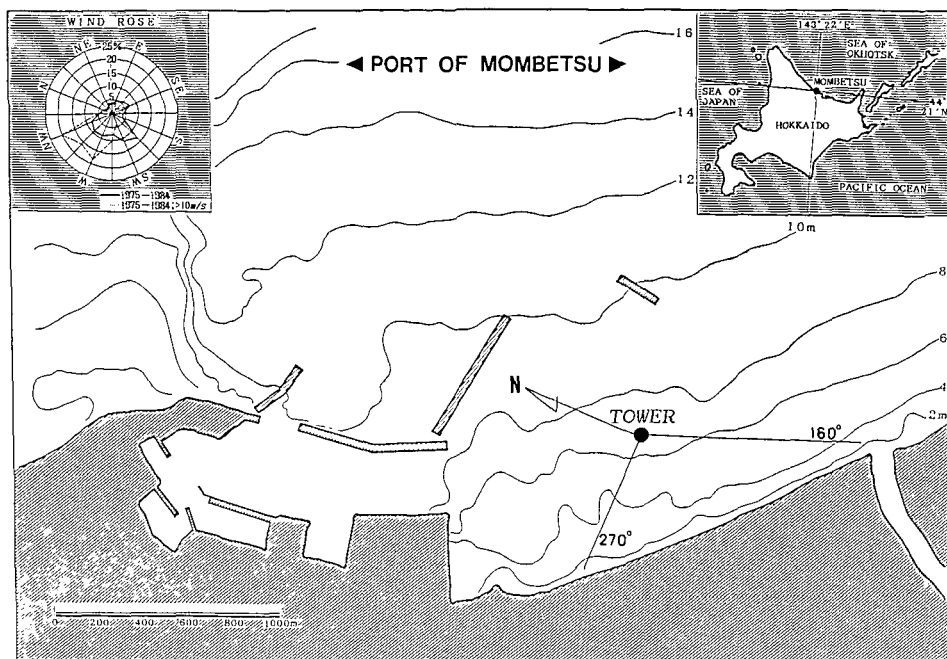
II. 氷海観測塔による観測

1. 観測位置

氷海観測塔はオホーツク海に面する紋別港湾の海岸から約650m沖合、水深6.5m点に設置されている¹⁾(第1図)。この塔上、海面から15.9mの高さに設置した3成分超音波風速計

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3406号

** 北海道大学低温科学研究所流水研究施設研究報告 第132号



第1図 氷海観測塔の位置

(海上電機社製 DAT-310) によって、流水期前の開水面、流水上、流水退去後の開水面の風速、気温の測定を行った。本研究では1990年1月30日から2月19日までの測定結果を用いて議論する。

2. データの収録および解析

超音波風速計で測られた風速の南北、東西、鉛直成分および気温の電圧出力は、信号変換ユニットによって、4~20 mAの電流信号に変換され、海底ケーブルによって陸上の観測室へ伝送される。これらの信号は、10 Hzのローパス・フィルターを通り、50 msのサンプリング・インターバルでA/D変換され、コンピューターに収録される¹⁾。観測終了後デジタル化された各信号を、各物理量に再変換し、それぞれの時系列データを作った。この時系列を1時間毎に区分けし、最初の10分間の時系列を用いて風速成分および気温の平均値を計算し、主風向に座標軸を回転し、主風向、横方向、鉛直方向、気温のそれぞれの変動成分を求め、分散、共分散の計算を行った。

3. 運動量および熱フラックスの測定方法

接地境界層は、constant flux layerとも呼ばれ、運動量や熱の鉛直方向のフラックスが地表での値と等しいと見なされる気層のことである。種々の観測から、少なくとも地上20~30 mまではこの接地層に属しているといえる。本研究では、超音波風速計は海面上15.9 mに設置されたので、接地層の中での観測と見なせる。接地層での運動量の鉛直方向のフラックスは水平方向の摩擦応力にほかならない。摩擦応力(あるいはレイノルズ応力)は、

$$\tau = -\rho \overline{uw} \quad (1)$$

である。ここで ρ は大気密度で、 u は平均風の主風向の変動成分、 w は鉛直方向の変動成分であり、 $\bar{\quad}$ は時間平均を意味する。高度 10 m を基準にした抵抗係数は、

$$C_{10} = \frac{\tau}{\rho U_{10}^2} = \frac{-\overline{uw}}{U_{10}^2} \quad (2)$$

ここで、 U_{10} は高度 10 m の平均風速である。

熱フラックスは、

$$H = \rho C_p \overline{tw} \quad (3)$$

ここで、 C_p は大気の定圧比熱、 t は気温の変動成分である。

熱フラックスが、海面あるいは海水面の温度 (T_s) と気温 (T_a) の差、平均風速に比例すると考えると、乱流による熱フラックス係数は、

$$C_t = \frac{\overline{tw}}{(T_s - T_a) U_{10}} \quad (4)$$

で表される。

抵抗係数、熱フラックス係数は、表面の凹凸の度合や大気の安定度に依存する。安定度は z/L で表わされる。 L はモーニン・オブコフの長さで、

$$L = -T_a u_* / g k \overline{tw} \quad (5)$$

であり、 T_a は気温の絶対温度、 $u_* = |\overline{uw}|^{\frac{1}{2}}$ は摩擦速度、 $k \sim 0.4$ はカルマン定数、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ は重力加速度である。

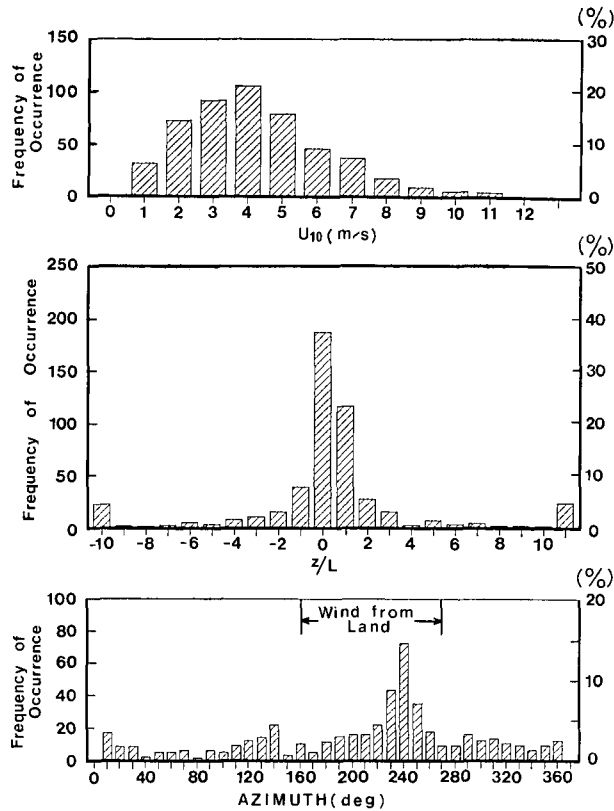
超音波風速計の風速変動 3 成分 (u , v , w) と気温変動 (t) から、運動量フラックス (\overline{uw}) と熱フラックス (\overline{tw}) が求められる。

III. 観測結果および考察

1. データの抽出基準

第 1 報 (1988 年)⁵⁾ では、塔周辺の薄い平坦な新生氷と結氷前後の開水面との比較研究を、また第 2 報 (1989 年)⁶⁾ では、外海から流入した氷塊群の密接度が異なる場合の乱流輸送量について報告した。本研究では、外海から流入した薄く平坦な流氷群、および流氷退去後の開水面上の運動量、熱フラックス、抵抗係数、安定度等について報告する。

前報⁵⁾ では、使用するデータの基準として、1) 安定度が $|z/L| \leq 1$ 、2) 風向が $0^\circ \sim 160^\circ$ または $270^\circ \sim 360^\circ$ 、3) 風速が 1 m/s 以上であった。本研究でも同様の基準を用いてデータの抽出を行うが、先ずその基準を満たすデータの出現頻度を考察した。第 2 図に観測期間中 (1 月 30 日から 2 月 19 日まで) の風速、風向、安定度に対する度数分布を示す。風速は 3~4 m/s の範囲の出現頻度が高く、約 20% であった。風速 5~6 m/s 以上の場合は頻度が低く、11 m/s 以上の風は吹かなかった。安定度では、ほぼ中立状態の時の出現率は高く、 $|z/L| \leq 1$ の出現率は約 60% であった。風向では、特に $230^\circ \sim 240^\circ$ の出現率が高いが、 $160^\circ \sim 270^\circ$ の陸からの風が卓越した。第 1 図に風配図が示されているが、NW から SSW つまり陸からの風が卓越している



第2図 風速, 安定度, 風向の度数分布図

のがわかる。本研究の観測期間中は、比較的弱い陸風で、中立からやや安定状態が卓越していたといえる。このデータの中から前述の基準を満たすデータを抽出し、以下の議論に用いた。

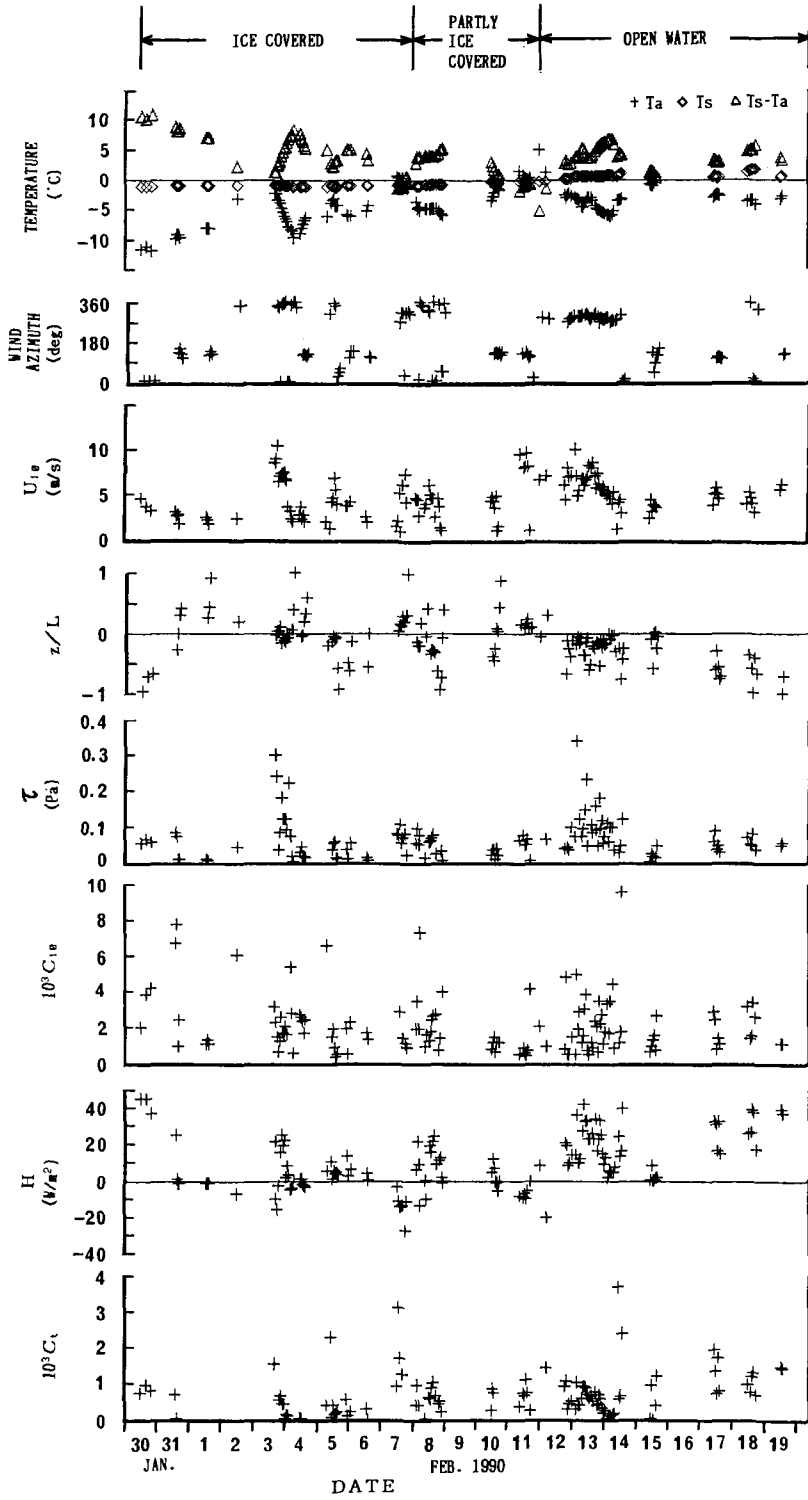
2. 気象要素の時間変化

第3図に観測期間中の、気温 (T_a)、海水温 (T_s)、海水温と気温の差 ($T_s - T_a$)、風向、平均風速 (U_{10})、安定度 (z/L)、レイノルズ応力 (τ)、抵抗係数 (C_{10})、顕熱フラックス (H) および熱フラックス係数 (C_t) の時間変化を示した。

気温 (T_a) は、高度 15.9 m に設置された超音波風速計により測定されたもので、10 分間の平均値である。水温 (T_s) は紋別港奥部の水面下 2 m にある紋別測候所の水温計による。

1月30日に、薄い流水群が港外から塔周辺海域に流入した。2月7日までは、港外の流水は一部移動し開水面が見えたが、港内は100%流水で覆われていた。2月7日から11日までは、塔から陸側には流水が停滞していたが、海側と港外は開水面であった。2月12日以降は、流水は港から消え去り、視界内にも流水は見られなかった。

1月30日から2月7日まで水温は -1.2°C から -0.9°C で、結氷温度には至ってない。気温は約 -13°C から徐々に上昇し、それに伴い安定度は不安定から安定状態へと変化した。熱フラックスは、式(4)に示されるように、温度差 ($T_s - T_a$) と風速に比例しており、フラックスの変動の様子は温度差と風速の変動の様子に対応している。レイノルズ応力は 10 m/s 前後の



第3図 気象要素の時間変化

風の時に $0.3 P_a$ 程度の応力があったが、他はほぼ $0.1 P_a$ 程度であった。

2月7日から11日までは、塔から陸側のみ流氷が存在し、海側および港外は開水面であったし、また本研究では、海風のデータのみで議論しており、この期間中は開水面上の風と考えてよい。水温は -1.0°C から -0.4°C まで上昇したが、気温と水温の差はあまり大きくなく、安定度は中立、安定、不安定にまたがっていた。港内の半分が流氷で覆われていたことによる影響は明らかでない。

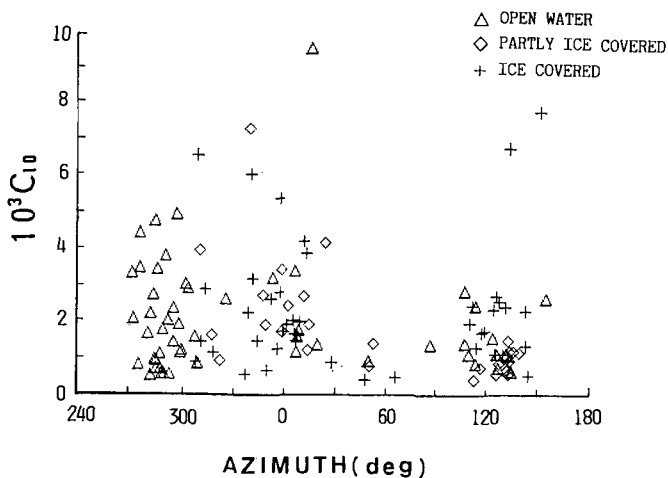
2月12日には流氷が消え去り、それ以降は開水面であった。水温の上昇により残された薄氷の融解が進み、また流動したものと思われる。2月12日以降、水温は -0.4°C から 1.7°C まで上昇した。2月12日から19日までは、安定度は中立と不安定状態であった。熱フラックスは0から $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲でばらついていた。1989年(第2報)⁶⁾の2月中旬に、塔周辺海域は開水面であったが、今回と同じような状況であり、約 $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 程の熱フラックスが観測された。

3. 抵抗係数

先にも述べたように、1990年冬の紋別港内の水温は結氷温度以上で、港内結氷は無かった。港内には、沖合の薄い流氷のみが流入した。ここでは、流氷の有無による抵抗係数の相違を考察する。

1) 抵抗係数と風向

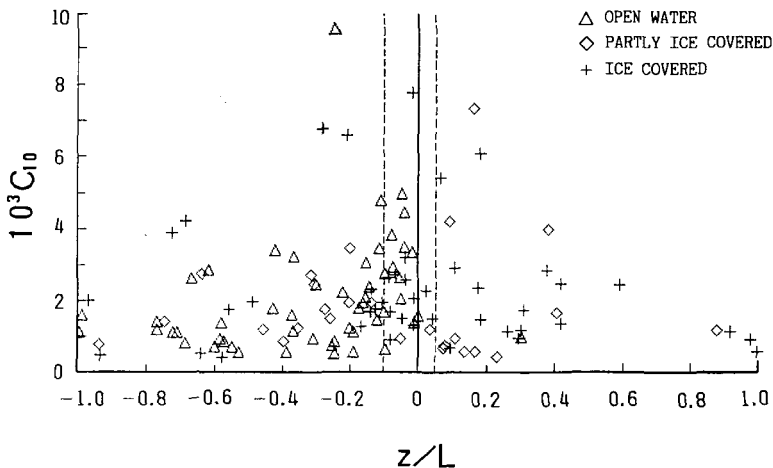
先にも述べたように、陸風 ($160^{\circ} \sim 270^{\circ}$) は除外したが、塔が港湾の中に位置するので(第1図参照)、地形の影響を見るために抵抗係数を風向別に見る。第4図に抵抗係数と風向の関係を示す。風向が $270^{\circ} \sim 30^{\circ}$ までは、流氷の有無にかかわらず抵抗係数はばらつきが大きい。これは、第1図からもわかるように、港の複雑な地形の影響を受け、吹送距離が短いためと思われる。風向が $30^{\circ} \sim 160^{\circ}$ は、障害物の影響もなく、吹送距離も長く、抵抗係数のばらつきが小さい。また、流氷の有無による差異は顕著でない。



第4図 抵抗係数と風向の関係

2) 抵抗係数と安定度

抵抗係数と安定度の関係を第5図に示す。図中の縦の破線の間 ($-0.1 \leq z/L \leq 0.05$) が中立状態である。開水面では、ほとんど中立と不安定である。中立時の方が不安定時より、ばらつきが大きいようである。港内の半分が流氷に覆われた時は、安定、中立、不安定にまたがっているが、ばらつきは安定時に大きいようである。完全に流氷に覆われた時は、安定も不安定もばらつきは大きいようである。安定度の増加に従い、抵抗係数は減少する傾向にある。この傾向は前報⁶⁾でも見られ、また開水面の場合⁷⁾や比較的平坦な海水面の場合⁸⁾とも同様である。



第5図 抵抗係数と安定度の関係

3) 抵抗係数と風速

抵抗係数と風速の関係を第6図に示す。抵抗係数は風速に依存し、風速の低下に従って増大することが知られており、前報⁶⁾でもその傾向が見られた。第6図には、a) 中立、b) 安定、c) 不安定に分類した抵抗係数と風速の関係を示した。中立の時、データ数が充分でないため、あまり明白ではないが、開水面上も流氷上も顕著な風速依存性はみられない。安定の時もデータ数は充分でないので明白ではないが、風速依存性はみられ、風速の増加に従い抵抗係数は減少する。不安定の時も、風速の増加に従い抵抗係数の減少傾向がみられる。

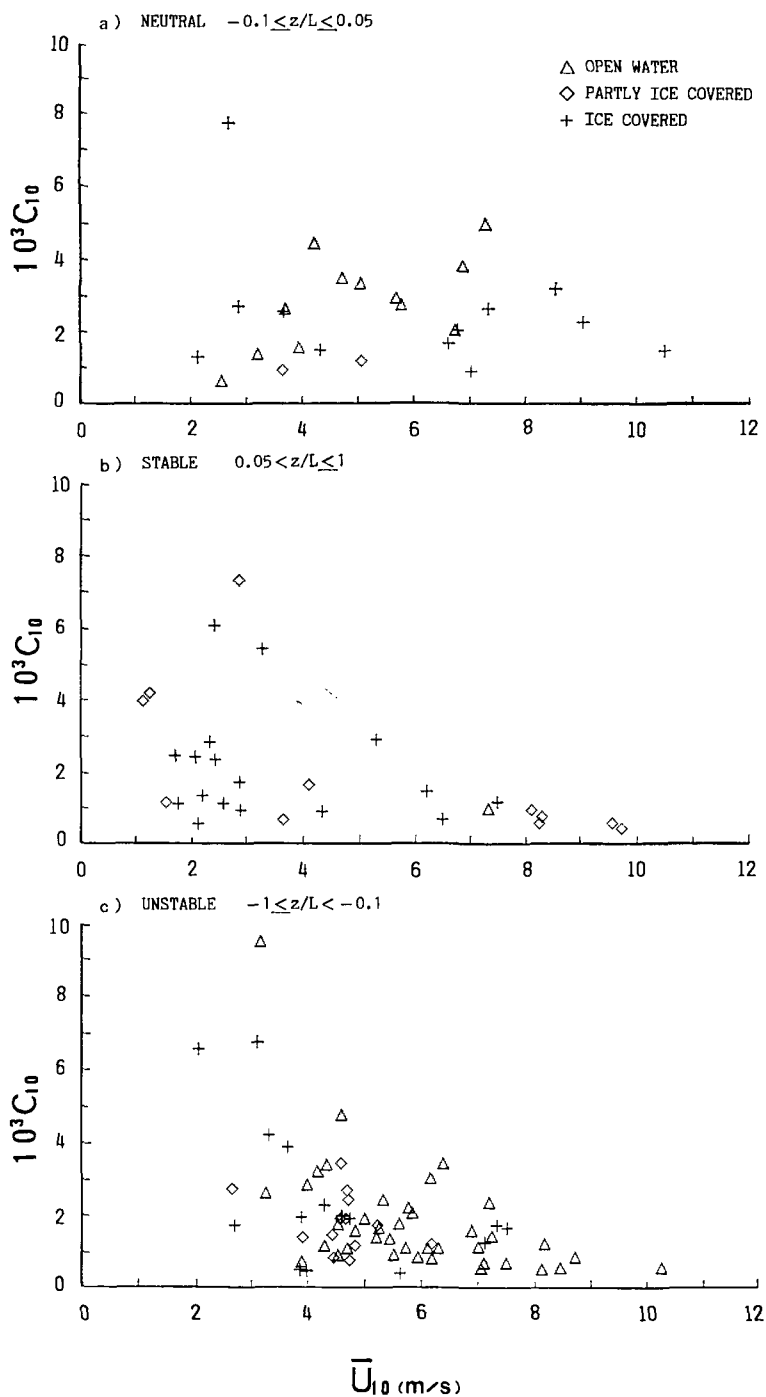
中立の時の開水面の抵抗係数は、1989年の観測から求められた値 $10^3 C_{10} = 2.4 \pm 1.4^9$ と同程度と思われる。この値は、吹送距離の長い外海での値⁷⁾よりは若干大きい、吹送距離が5 km程度の氷縁域の開水面¹⁰⁾とは同程度である。

中立の時の流氷上の抵抗係数は、1989年⁹⁾の Nilas ($10^3 C_{10} = 1.8$) と同程度であり、compact pack ice (3~5) より小さい。

4. 熱フラックス係数

式(4)の熱フラックス係数の算出に当たっては、 T_s として開水期では海表面温度を使用すべきであるが、ここでは水面下2 mの水温をもって代用した。紋別港奥部の測候所の水温計による水面下2 mの水温と、塔に近い港の岸壁の表面および水面下3 mの水温とは極めてよい相関があり、2 mの水温を T_s としたことによる誤差は小さいと思われる。また、海氷上では

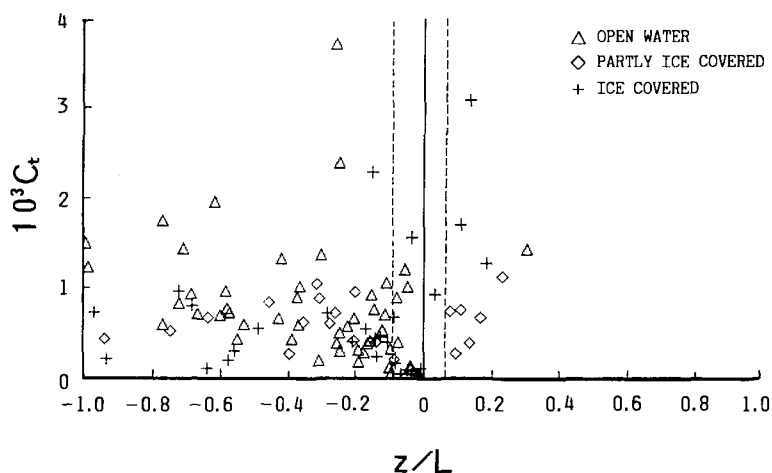
海氷表面の温度を用いるべきであるが、海水温で代用した。冬期は海水の鉛直混合が盛んであること、また流入した海水の表面は氷塊の動揺、暖気によって常に海水に濡れていることから、 T_s として海水温を用いたことによる C_t の誤差は小さいと思われる。



第6図 抵抗数係と風速の関係

1) 熱フラックス係数と安定度

熱フラックス係数と安定度の関係を第7図に示す。第5図と同様に、縦の破線で中立状態を区切った。開水面では不安定が卓越していた。データ数が充分でないため、あまり明白ではないが、中立時は不安定時より係数が小さいようである。流氷上も開水面と同様の傾向が見られる。



第7図 熱フラックス係数と安定度の関係

2) 熱フラックス係数と風速

熱フラックス係数と風速の関係を第8図に示す。a) は中立, b) は安定, c) は不安定の時である。中立では、データが少ないが、薄氷の有無による差異は明らかでない。中立の開水面では、1989年の値 $10^3 C_t = 1.0 \pm 0.8^9)$ より小さい。不安定ではばらつきは大きいものの、1989年の $10^3 C_t = 0.69 \pm 0.43^9)$ と同程度である。

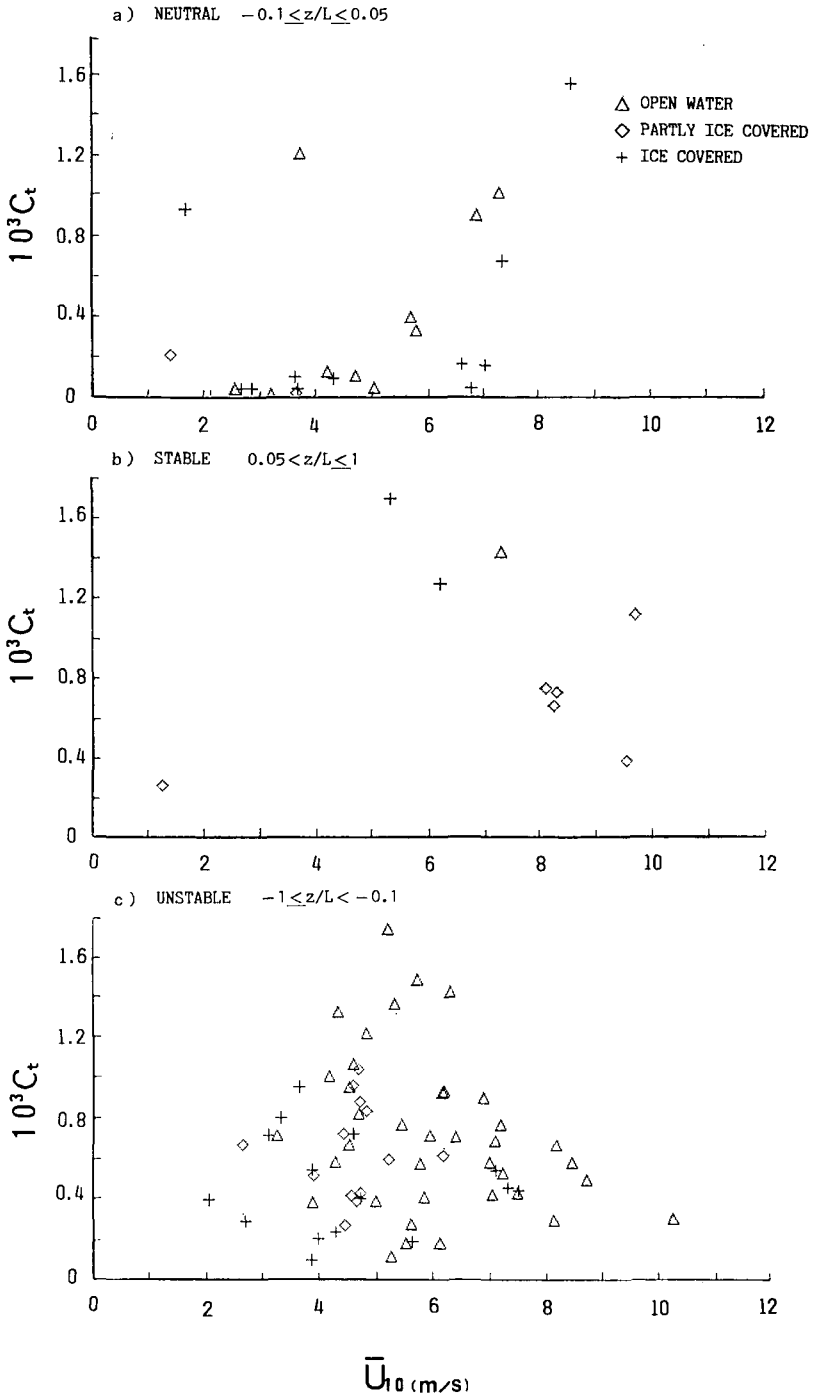
流氷上では、中立の時、今回の熱フラックス係数は1989年⁹⁾の Nilas ($10^3 C_t = 0.61$) や compact pack ice (0.38) より小さい。不安定の際は、1989年⁹⁾の Nilas (0.11~0.56) と今回の値とは同程度である。

今回の薄氷の、また1989年の砕氷域の値^{6,9)}と他の研究から得られた値を比べてみる。Thorpe 他¹¹⁾は AIDJEX および Robeson Channel での観測で、それぞれ $10^3 C_t = 1.2, 1.0$ (安定時)を得ている。また、Joffre⁸⁾や Andreas¹²⁾は海氷上の値として $10^3 C_t = 1.0 \sim 1.5$ を報告している。これら高緯度域の海氷の C_t と比較すると、著者らの得た薄氷域での値はそれらよりは小で、破氷域の値は、Thorpe 他¹¹⁾, Joffre⁸⁾ および Andreas¹²⁾らの値とほぼ同じといえる。

IV. おわりに

第1, 2報に引続き、氷海観測塔に設置した超音波風速計によって、塔周辺海域の運動量、熱フラックス等の乱流輸送量の測定を行った。

今回は、港内結氷が無く、塔周辺海域に外海から薄い流氷群が流入したのみであった。流



第8図 熱フラックス係数と風速の関係

氷の有無に注目し、抵抗係数や熱フラックス係数の風速依存性、また安定度依存性について考察した。今回の薄氷域での熱フラックス係数は、他の海域での値よりは小さかったが、データが不十分であった。

また、吹送距離の長い外海から塔に吹く風の出現頻度は低く、データは充分でなかった。今後もデータの蓄積を行い、風速、安定度、氷状、吹送距離等と抵抗係数、熱フラックス係数との関係を明らかにしたい。

おわりに、現場観測およびデータ整理に御協力いただいた流氷研究施設の石川正雄、池田光雄、石川敬子、田中久美子、植松恵理子、佐々木順子の皆様、水温の記録を提供下さった紋別測候所、塔への輸送に御協力いただいた磯西村紋別支店、磯オホーツク設計の皆様にあわせてお礼申し上げます。

なお、この研究費用の一部は、文部省科学研究費(総合(A))“氷縁海における大気・海洋間の熱輸送機構と氷野の運動についての研究”(研究代表者 青田昌秋)、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”(研究代表者 青田昌秋)、北海道大学特定研究“海水の動特性と局地気候の形成に関する研究”(研究代表者 小野延雄)によった。

文 献

- 1) 青田昌秋・白澤邦男・大井正行・石川正雄・福土博樹 1987 北大氷海域気象・海象観測システムとそれによる研究計画について. 低温科学, 物理篇, **46**, 179-183.
- 2) 青田昌秋・石川正雄・高塚 徹・池田光雄・白澤邦男 1988 レーダ観測による北海道オホーツク海岸沖の流水分布—1988年1月~5月—. 低温科学, 物理篇, **47**, 資料集, 35-64.
- 3) 青田昌秋・石川正雄・高塚 徹・池田光雄・白澤邦男 1989 レーダ観測による北海道オホーツク海岸沖の流水分布—1989年1月~4月—. 低温科学, 物理篇, **48**, 資料集, 71-82.
- 4) 青田昌秋・石川正雄・高塚 徹・池田光雄・白澤邦男 1990 レーダ観測による北海道オホーツク海岸沖の流水分布—1990年1月~4月—. 低温科学, 物理篇, **49**, 資料集(印刷予定).
- 5) 青田昌秋・白澤邦男・高塚 徹 1988 薄氷域の大気境界層の観測—氷海観測塔による1988年冬の観測—. 低温科学, 物理篇, **47**, 177-185.
- 6) 青田昌秋・白澤邦男・高塚 徹 1989 薄氷域の大気境界層の観測—氷海観測塔による1989年冬の観測—. 低温科学, 物理篇, **48**, 79-89.
- 7) Smith, S. D. 1980 Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 709-726.
- 8) Joffe, S. M. 1982 Momentum and heat transfers in the surface layer over a frozen sea. *Boundary-Layer Meteorol.*, **24**, 211-229.
- 9) Shirasawa, K. and Aota, M. 1990 Atmospheric boundary layer measurements over sea ice in the Sea of Okhotsk. *J. Marine Systems* (印刷中).
- 10) Guest, P. S. and Davidson, K. L. 1987 The effect of observed ice conditions on the drag coefficient in the summer East Greenland Sea marginal ice zone. *J. Geophys. Res.* **92** (C7), 6943-6954.
- 11) Thorpe, M. R., Banke, E. C. and Smith, S. D. 1973 Eddy correlation measurements of evaporation and sensible heat flux over Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, **78**(18), 3573-3584.
- 12) Andreas, E. L. 1987 A theory for the scalar roughness and the scalar transfer coefficients over snow and sea ice. *Boundary-Layer Meteorol.*, **38**, 159-184.

Summary

Measurements were made of an atmospheric boundary layer over open water and over thin ice around the Air-Sea-Ice Observation Tower, standing in water 6.5 m deep and about 600 m off the shore near the Mombetsu harbour (Fig. 1), from January 30 to February 19, 1990. A three-dimensional ultrasonic anemometer-thermometer (Kaijo Denki Co., Ltd., Model DAT-310) was installed on the frame at the top of the tower 15.9 m high above the sea surface. Air temperature (T_a), water temperature (T_s), wind azimuth, 10-m wind speed (U_{10}), stability (z/L), Reynolds stress (τ), drag coefficient (C_{10}), sensible heat flux (H) and heat flux coefficient (C_t) were obtained during the period of the experiment (Fig. 3), where the moderate wind from land within the stability condition of ($-1 \leq z/L \leq 1$) was predominant (Fig. 2). The drag coefficient and heat flux coefficient obtained over open water and over thin ice are discussed as functions of wind speed and of stability in this study.

The drag coefficient as a function of wind azimuth is shown in Fig. 4, where the values of drag coefficient are scattered widely for shorter fetches of about 0.8 to 1 km between the tower and such obstacles as breakwaters, while for longer fetches during a period of inshore winds the values are scattered less widely.

No significant difference was found in drag coefficient for the nearly neutral condition ($-0.1 \leq z/L \leq 0.05$) and the unstable condition ($-1 \leq z/L < -0.1$) between measurements over open water and thin ice (Fig. 5). Values of the drag coefficient over both open water and thin ice are scattered more widely at the nearly neutral condition than at the stable and unstable conditions.

The drag coefficient decreased with an increase in wind speed for the stable [Fig. 6-b)] and unstable [Fig. 6-c)] conditions, while it remained almost constant for the nearly neutral condition [Fig. 6-a)].

Variations in heat flux coefficient as functions of stability and of wind speed are shown in Figs. 7 and 8, respectively. Values of heat flux coefficient for the nearly neutral condition are smaller than those for the unstable condition over both open water and thin ice. For neutral open water, the values obtained in 1990 were smaller than $10^3 C_t = 1.0 \pm 0.8$, which was obtained in 1989⁹⁾, while the 1990 data for the unstable condition were similar to $10^3 C_t = 0.69 \pm 0.43$ of 1989⁹⁾. The 1990 values for neutral thin ice were smaller than $10^3 C_t = 0.61$ for nilas and 0.38 for compact pack ice both of 1989⁹⁾, while those for the unstable condition were similar to 0.11–0.56 for nilas of 1989⁹⁾.