



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アラスカ、エルソン、ラグーンにおける開水面、海水、及び雪面上の運動量及び熱フラックスの観測
Author(s)	白澤, 邦男; SHIRASAWA, Kunio; 高塚, 徹 他
Citation	低温科学. 物理篇, 50, 45-56
Issue Date	1992-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18603
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p45-56.pdf



アラスカ、エルソン・ラグーンにおける開水面、 海水及び雪面上の運動量及び熱フラックスの観測^{*,**}

白澤 邦男・高塚 徹・池田 光雄

(低温科学研究所)

(平成3年10月 受理)

I. はじめに

海水が凍結する寒冷海域では、海洋の表面がどのような状態にあるかにより、海洋と大気との熱、運動量、物質交換過程は異なる。秋から冬にかけては、気温が海水温より低いことによる乱流熱交換により海は大気へ熱を放出して冷却を続け、対流により混合層の水温を下げながら、混合層の厚さを増していく。冬に混合層の水温が結氷温度に達してから、更に熱が奪われると、結氷が始まる。海氷生成後は、大気海洋間のエネルギー交換は海水を通して行われるが、氷の厚さや海水上の積雪状態により、その交換過程は顕著に異なる。また、厳冬期においても、海水域中に polynya (氷湖) や lead (水路) などの開水面が形成されるが、南北両極の全氷域面積の約 10% は開水面や薄い氷によって占められており、この 10% の面積の海洋から大気へ運ばれる熱量は、厚い氷からなる残りの 90% の面積を通して大気へ輸送される熱を上廻るといわれている (小野他¹⁾)。しかし結氷域における開水面や薄氷上の熱交換が重要であるにもかかわらず、表面状態が頻繁に変化し、しかも薄氷上での観測は非常に難しく、現場観測は少ない。北極海では、AIDJEX Lead Experiment (ALEX) (Andreas and Paulson²⁾) や海氷上に人工的に開水面を作ったの観測 (小野他¹⁾)、また、北海道サロマ湖では、結氷した湖面上に実験プールを作ったの観測 (石川・小林³⁾、小野・牛尾⁴⁾) 等がある。

本研究では、定着氷上の開水面や薄氷上の熱交換過程を実験的に研究するために、定着氷上に人工的な開水面の実験プールを作り、プール上に設置した 3 次元超音波風速計により開水面や薄氷の表面の運動量、熱フラックスの観測を、更に周囲の積雪面上の観測結果と比較を行った。

II. 観測方法

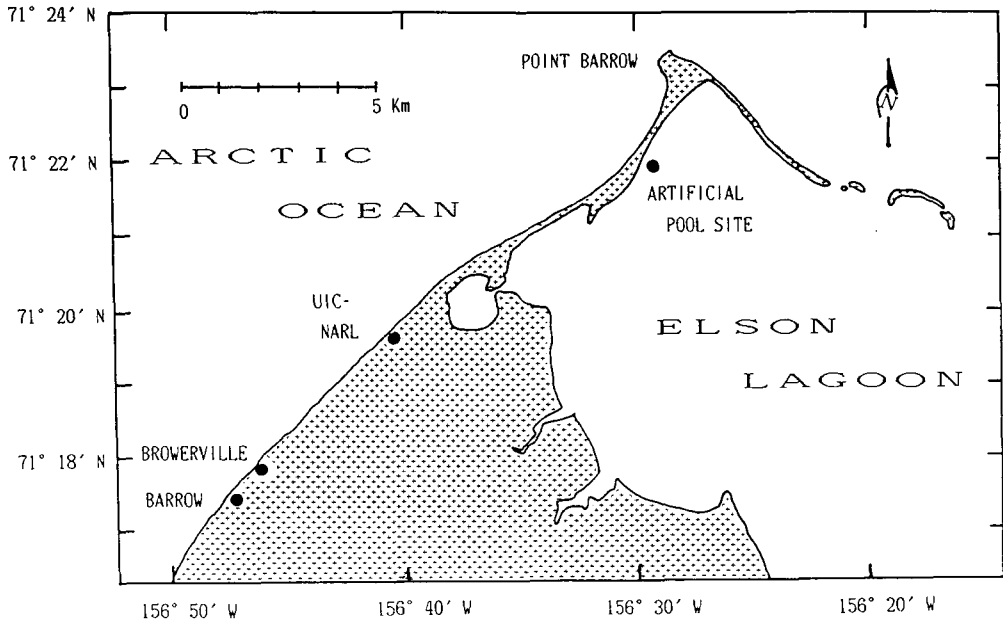
1. 観測位置

観測は、1991 年 5 月 7 日から 13 日まで、アラスカの Elson Lagoon の定着氷上で行われた。アラスカの北端に位置する Elson Lagoon は Beaufort Sea とつながっており、瀉の水は外海の

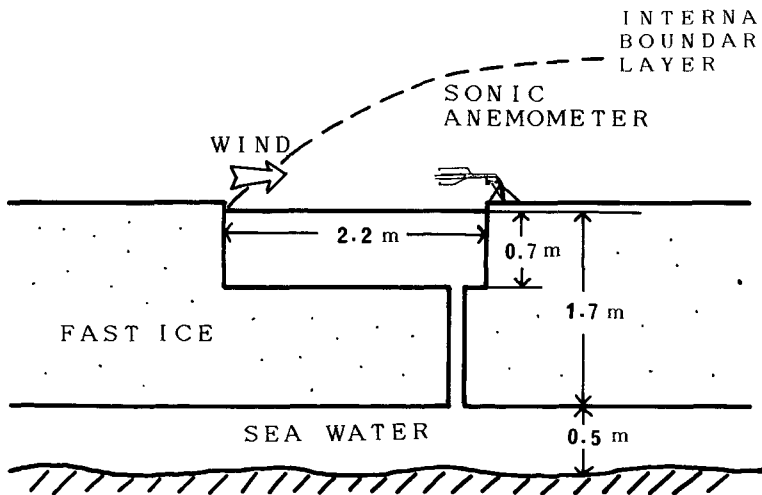
* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3511 号

** 北海道大学低温科学研究所流氷研究施設研究報告 第 135 号

海水と交換, 混合している。水深は浅く, 深いところでも 3.5 m 程である。第 1 図に観測地点を示した。観測点は岸より 350 m 程潟の中心に向かった地点で, 水深は 2.2 m 程であった。測定開始時の氷厚は 1.7 m であった。第 2 図に示されているように, 平坦海水上に 2.2×2.2 m, 深さ約 0.7 m のプールを掘り切り, 底の氷に穴をあけて下の海水を入れ, 人工的に水面を作った。海水の塩分量は 32.8 ‰であった。海水の成長に伴う運動量, 顕熱フラックスの変化を観測するために, プールの風下側に超小型 3 次元超音波風速温度計(海上電機製 WAT-395)を設置した。サ



第 1 図 観測基地の位置



第 2 図 プールでの実験観測の概念図

ーミスター温度計(Grant社製)により海水表面、海水中及び海水温度の測定を行った。また、開水面、海水面と積雪面上との比較を行うために、風速計を積雪面上に移し、プール上と同様の観測を行った。

2. 運動量及び顕熱フラックスの測定方法

接地境界層は、constant flux layer と呼ばれ、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。本研究では、第2図に示されるように、海水に一辺2.2 mのプールが作られ、プール上には internal boundary layer (内部境界層) が形成されたと思われる。内部境界層の高さは、風上側とプール上の安定度に依存するが、プールあるいは開水面の距離を x とすると大体 $x^{0.4}$ に比例すると言われている (Andreas and Murphy⁵⁾)。この内部境界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)は渦相関法を用いて下記の式により直接求められる。

$$\tau = -\rho(\overline{u_1 u_3} + i \overline{u_2 u_3}) = \rho u_*^2 \quad (1)$$

である。ここで ρ は大気密度で、 u_1 , u_2 はそれぞれ平均風の主風向と横方向の変動成分、 u_3 は鉛直方向の変動成分であり、 $\overline{\quad}$ は時間平均を意味し、 u_* は摩擦速度である。

高度10 mを基準にした抵抗係数は、

$$C_{10} = \frac{\tau}{\rho U_{10}^2} = \frac{u_*^2}{U_{10}^2} \quad (2)$$

ここで、 U_{10} は高度10 mの平均風速である。本研究では、プール上の内部境界層の高さは10 mにも達していないと思われるが、一般的に用いられている10 mを基準にした値を用いて議論する。 U_{10} は対数法則を用いて外挿して求めた。

熱フラックスは、

$$H = \rho C_p \overline{t u_3} \quad (3)$$

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、海水面あるいは雪面の表面温度(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、

$$C_t = \frac{\overline{t u_3}}{(T_s - T_a) U_{10}} \quad (4)$$

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 で表される。 L はモーニン・オブコフの長さで、

$$L = -T_a u_*^2 / gk \overline{t u_3} \quad (5)$$

であり、 T_a は気温の絶対温度、 $k \sim 0.4$ はカルマン定数、 $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$ は重力加速度である。

超音波風速温度計の風速変動3成分(u_1 , u_2 , u_3)と気温変動(t)から、運動量フラックス($\overline{u_1 u_3}$, $\overline{u_2 u_3}$)と熱フラックス($\overline{t u_3}$)が求められる。

III. 観測結果および考察

海水の成長に伴う運動量や熱フラックスの変化を観測するために、海氷上にプールを作り開水面を作り出し氷を成長させた。プールの表面が開水面、氷厚がそれぞれ 1.7, 1.8, 4.3, 7.1, 7.4 cm の海水面、海水が約 1 cm の新雪に覆われた時、また積雪面(プール周辺の海水の氷厚約 1.7 m のうち、上層 7~35 cm 位は積雪層である)の時に測定を行った。第 1 表に測定結果をまとめてある。測定は 5 月 7 日から 13 日まで、1 回の測定は 30 分間で、全部で 33 回行った。プール上の観測では、風速計が内部境界層に入るように表面上 0.39~0.96 m 内に設置した。観測期間中は、絶えず風速 5~12 m/s で北東から南東の方向から吹いて来る吹送距離の長い風であった。気温は -4.5~-8.3 °C であった。大気の安定度は全ての測定に対して中立状態 ($-0.1 \leq z/L \leq 0.05$) であった。

1. 乱流強度

大気の乱流状態を記述する量として変動量の標準偏差がある。風速の 3 成分 (u_1, u_2, u_3) の標準偏差を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とする。ここで定義により、 $\sigma_1 = (\overline{u_1^2})^{1/2}$, $\sigma_2 = (\overline{u_2^2})^{1/2}$, $\sigma_3 = (\overline{u_3^2})^{1/2}$ である。標準偏差を平均風速で無次元化した量 $\sigma_1/U, \sigma_2/U, \sigma_3/U$ を乱流強度と定義する。第 1 表から、 σ_1/U は雪面上で 0.115~0.158, 海氷上で 0.145~0.275, σ_2/U では雪面上で 0.095~0.133, 海氷上で 0.101~0.196, σ_3/U では雪面上で 0.048~0.056, 海氷上で 0.056~0.117 と、水平、鉛直いずれの乱流強度も雪面上より海氷上の方が大きい。乱流強度は表面形状や凹凸の程度により異なると思われるが、今回得られたデータから雪面上の方が海氷面上より流体力学的に滑らかであった。また、抵抗係数も同様に表面形状や凹凸の度合を記述する量であるが雪面に対する抵抗係数の方が海水のより小さい。今回得られた海水の乱流強度の値は青田他⁶⁾ のオホーツク海の海氷上で測定された nilas や開水面上の値と同程度である。

2. 抵抗係数と熱フラックス係数

先に述べたように、今回の観測では全ての測定に対して大気の安定度が中立状態であったので(第 1 表参照)、ここでは中立状態での抵抗係数、熱フラックス係数について議論する。

1) 抵抗係数、熱フラックス係数と風速

第 3 図に抵抗係数と風速の関係を氷状別に示す。雪面上の抵抗係数の値は 5~12 m/s の範囲内で風速依存性はみられず、ほぼ一定の値である。海氷上の値は雪面上の値よりばらつきが大きく、かつ値も大きい。顕著な風速依存性は見られない。白澤他⁷⁾ のオホーツク海の中立状態の薄氷上での測定でも顕著な風速依存性は見られなかった。白澤・田畑⁸⁾ や白澤⁹⁾ によると海氷上に新雪が積ると抵抗係数が減少する傾向が見られたが、今回の測定からも同様の傾向がみられた。開水面上の値は少ないが、Shirasawa and Aota¹⁰⁾ のオホーツク海の氷海観測塔周辺の値と同程度である。

熱フラックス係数と風速の関係を氷状別に第 4 図に示す。雪面上の熱フラックス係数の値は若干海氷上のより大きい。今回の観測では、海水の氷厚が 1.7 から 7.4 cm で比較的薄い氷であった。今回得られた薄い海氷上の値は Shirasawa and Aota¹⁰⁾ のオホーツク海の nilas ($10^3 C_t = 0.61$) と同程度であるが、Andreas¹¹⁾ の提示した海氷上の値 ($10^3 C_t = 1.0 \sim 1.5$) より小さい。今回

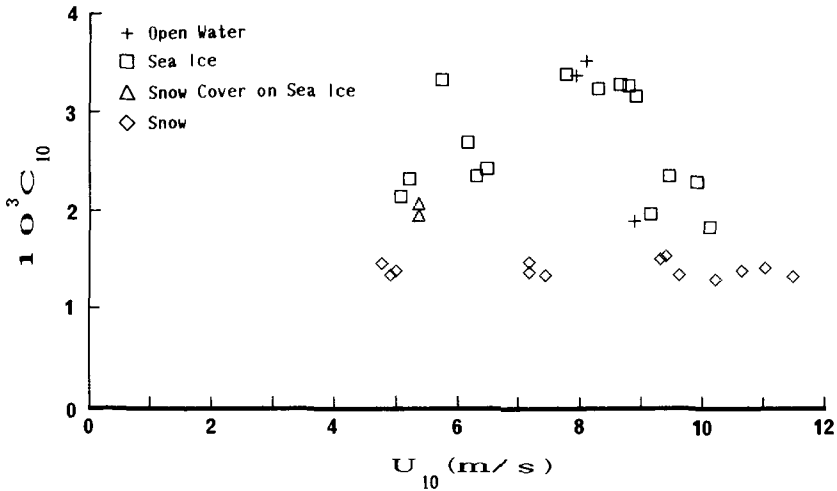
の雪面上の値は Andreas and Murphy⁹⁾, Andreas¹¹⁾ や Joffre¹²⁾ の値と同程度である。開水面上の値は少ないが, Shirasawa and Aota¹⁰⁾ のオホーツク海の氷海観測塔周辺の値と同程度である。熱フラックス係数 C_t は, (4)式から示されるように, 熱フラックス tu_3 と $(T_s - T_a) U_{10}$ との比から求められる。第5図に tu_3 と $(T_s - T_a) U_{10}$ の関係を氷状別に示す。最小二乗法により求めた回帰直線は, 雪面上の場合

$$10^3 tu_3 = 4.3 + 0.77 (T_s - T_a) U_{10} \tag{6}$$

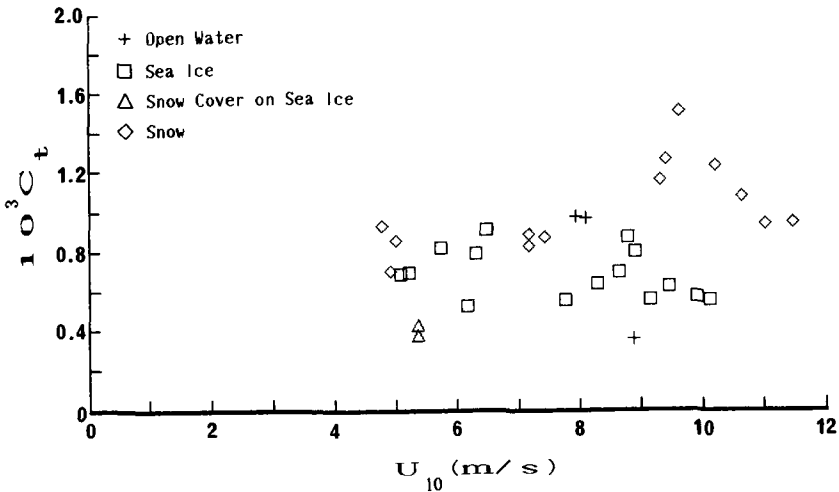
で, 相関係数 0.65 (13 測定) である。海氷上の場合,

$$10^3 tu_3 = 3.7 + 0.54 (T_s - T_a) U_{10} \tag{7}$$

で, 相関係数 0.87 (15 測定) である。これからは, 雪面上の熱フラックスの方が海氷上のより若干大きいのがわかる。



第3図 抵抗係数と風速の関係



第4図 熱フラックス係数と風速の関係

第1表 超音波風速温度計による測定結果
(1991年5月7日~13日, Alaska, Elson Lagoon)

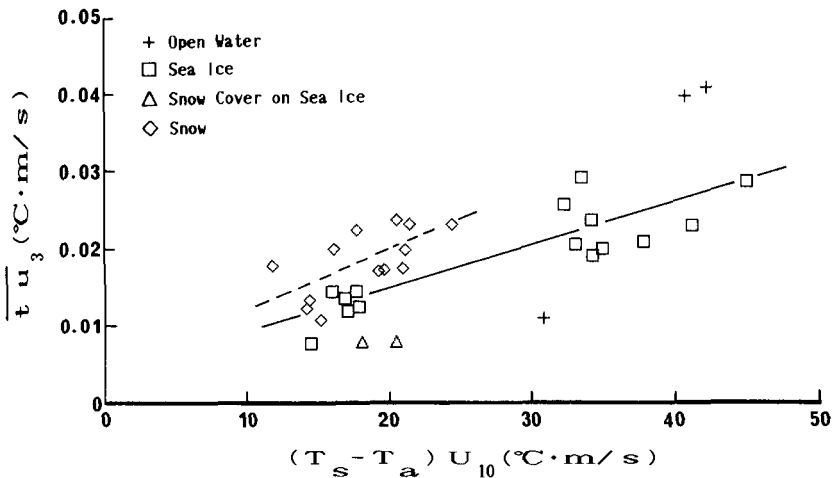
Run No.	Date	Start time (AST)*	Duration (min)	Anemometer height h (m)	Surface characteristics	Ice thickness (cm)	Wind speed U_0 (m/s)	Wind direction (deg T)
1	7 May	14:40	30	0.960	Sea ice	1.8	9.1	130
2	7 May	15:30	30	0.960	Sea ice	1.8	10.1	135
3	7 May	16:30	30	0.960	Open water		8.9	129
4	8 May	10:15	30	0.390	Sea ice	1.7	7.8	167
5	8 May	11:00	30	0.390	Sea ice	1.7	8.3	156
6	8 May	12:30	30	0.390	Open water		7.9	160
7	8 May	13:15	30	0.390	Open water		8.1	179
8	8 May	16:00	30	0.710	Snow		10.2	151
9	8 May	16:40	30	0.710	Snow		9.6	145
10	9 May	13:20	30	0.415	Sea ice	1.8	9.9	22
11	9 May	14:00	30	0.415	Sea ice	1.8	9.5	19
12	9 May	14:55	30	0.760	Snow		11.5	130
13	9 May	15:45	30	0.760	Snow		11.0	145
14	10 May	11:30	30	0.395	Sea ice	4.3	8.6	177
15	10 May	12:15	30	0.395	Sea ice	4.3	8.8	173
16	10 May	13:00	30	0.395	Sea ice	4.3	8.9	177
17	10 May	13:50	30	0.745	Snow		9.3	203
18	10 May	14:40	30	0.765	Snow		10.7	58
19	10 May	15:30	30	0.765	Snow		9.4	177
20	12 May	11:30	30	0.425	Snow cover on sea ice		5.4	115
21	12 May	12:10	30	0.425	Snow cover on sea ice		5.4	108
22	12 May	13:35	30	0.425	Sea ice	7.4	5.7	88
23-1	12 May	14:15	30	0.425	Sea ice	7.4	5.2	85
23-2	12 May	14:45	30	0.425	Sea ice	7.4	5.1	90
24-1	12 May	15:40	30	0.725	Snow		4.9	162
24-2	12 May	16:10	30	0.725	Snow		4.8	174
24-3	12 May	16:40	30	0.725	Snow		5.0	154
25-1	13 May	10:40	30	0.390	Sea ice	7.1	6.2	56
26-1	13 May	11:15	30	0.390	Sea ice	7.1	6.3	57
26-2	13 May	11:45	30	0.390	Sea ice	7.1	6.5	55
27-1	13 May	12:45	30	0.773	Snow		7.2	119
27-2	13 May	13:15	30	0.773	Snow		7.2	143
27-3	13 May	13:45	30	0.773	Snow		7.4	124

*Alaska standard Time

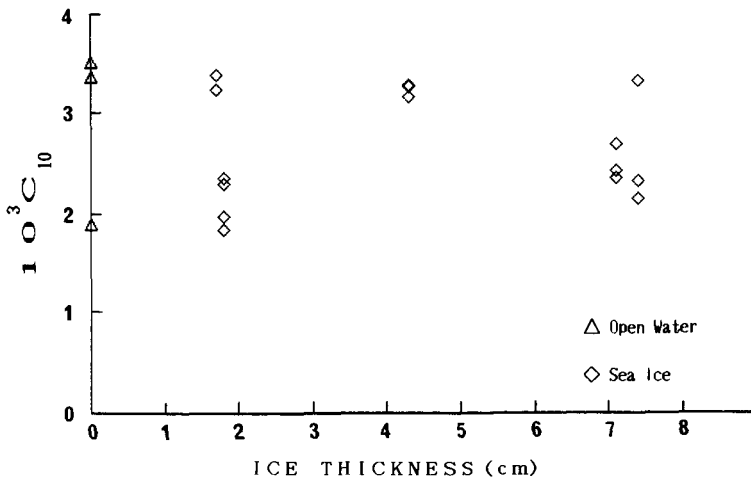
Turbulence level			Drag coef- ficient $10^3 C_{D_0}$	Air tempe- rature T_a (°C)	$T_s - T_a$ (°C)	Heat flux H (W/m ²)	Heat flux coef- ficient $10^3 C_f$	Stability z/L
$\frac{\sigma_1}{U}$	$\frac{\sigma_2}{UU}$	$\frac{\sigma_3}{U}$						
0.147	0.101	0.058	1.96	-4.79	3.74	24.7	0.55	-0.004
0.145	0.101	0.056	1.84	-4.83	3.73	27.3	0.55	-0.004
0.163	0.099	0.059	1.89	-4.56	3.46	14.3	0.36	-0.003
0.244	0.148	0.102	3.38	-7.00	5.30	29.9	0.56	-0.001
0.240	0.152	0.098	3.24	-7.12	5.42	37.3	0.64	-0.002
0.240	0.156	0.101	3.37	-6.73	5.13	51.8	0.98	-0.002
0.246	0.161	0.107	3.52	-6.81	5.21	53.1	0.96	-0.002
0.137	0.095	0.048	1.30	-6.09	1.59	26.0	1.23	-0.004
0.137	0.114	0.050	1.35	-5.73	1.23	23.2	1.51	-0.004
0.201	0.125	0.073	2.29	-6.63	3.53	25.9	0.57	-0.001
0.199	0.130	0.074	2.34	-6.49	3.49	26.7	0.62	-0.001
0.137	0.100	0.049	1.33	-6.72	2.12	30.1	0.94	-0.003
0.144	0.099	0.051	1.41	-6.62	1.92	25.9	0.94	-0.003
0.268	0.196	0.117	3.28	-8.25	3.95	31.0	0.69	-0.001
0.273	0.193	0.114	3.27	-8.01	3.81	38.0	0.87	-0.001
0.275	0.196	0.115	3.15	-7.82	3.62	33.5	0.80	-0.001
0.156	0.132	0.057	1.51	-7.80	2.20	30.9	1.16	-0.006
0.144	0.107	0.050	1.39	-7.71	2.01	30.1	1.08	-0.004
0.158	0.133	0.056	1.53	-7.49	1.89	29.2	1.26	-0.005
0.148	0.104	0.067	1.95	-7.10	3.80	10.0	0.38	-0.004
0.154	0.098	0.065	2.06	-6.76	3.36	10.1	0.43	-0.003
0.191	0.132	0.107	3.32	-6.28	3.08	18.9	0.82	-0.002
0.158	0.111	0.076	2.32	-6.04	3.44	16.1	0.69	-0.005
0.153	0.108	0.069	2.15	-5.98	3.38	15.3	0.69	-0.006
0.119	0.118	0.052	1.34	-5.81	3.11	13.9	0.70	-0.020
0.115	0.121	0.053	1.46	-5.71	3.01	17.4	0.93	-0.024
0.118	0.111	0.053	1.39	-5.54	2.84	15.8	0.85	-0.020
0.192	0.180	0.084	2.69	-5.34	2.34	9.9	0.52	-0.001
0.177	0.145	0.074	2.34	-4.98	2.68	17.5	0.79	-0.003
0.183	0.168	0.072	2.42	-4.76	2.46	18.8	0.91	-0.003
0.129	0.116	0.050	1.48	-4.71	2.91	22.6	0.83	-0.009
0.127	0.120	0.049	1.37	-4.48	2.68	22.2	0.88	-0.010
0.130	0.131	0.050	1.35	-4.45	2.65	22.4	0.87	-0.010

2) 抵抗係数, 熱フラックス係数と氷厚

海水上のプールを開水面の状態から氷を成長させた時の抵抗係数と氷厚の関係を第6図に示す。それぞれの氷厚でのばらつきは大きいですが, 抵抗係数の顕著な氷厚依存性は見られない。抵抗係数は表面形状に依存すると思われ, 今回の場合氷厚が1.7から7.4 cmまで成長する間に表面形状に顕著な変化がなかったと思われる。第2表には, 抵抗係数を氷厚別に, また表面形状別にまとめている。熱フラックス係数と氷厚の関係を第7図に示す。開水面(氷厚が0の時)が結氷後, 熱フラックス係数は若干減少するように思える。その後, 氷厚が1.7から7.4 cmに成長する間に熱フラックス係数は氷厚の増加に伴い多少増加するように見える。これは海水生成により表面からの熱輸送が抑制される方向に働いたためと思われるが, 海水生成直後のデー



第5図 温度フラックス $\overline{t u_3}$ と $(T_s - T_a) U_{10}$ との関係。回帰直線の式は, 雪面に対する破線は第6式で, 海水に対する実線は第7式である



第6図 抵抗係数と氷厚の関係

タがなく、また全体にデータ数が少ないので詳細な議論はできない。それぞれの氷厚での熱フラックス係数の平均値は第2表にまとめてある。

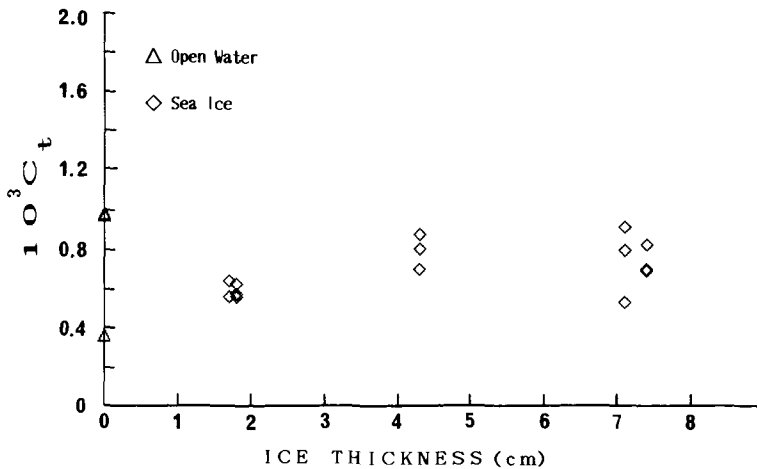
3) 抵抗係数, 熱フラックス係数と内部境界層

抵抗係数と風速計の高さとの関係を第8図に示す。約0.4 mの高さの抵抗係数の値は雪面上の値より大きい。十分に長い吹送距離の雪面上を吹いてきた風は、プール上で内部境界層の影響を受ける。つまり、もしプール上約0.4 mの高さに設置した風速計が内部境界層の中にあつたならば、滑らかな雪面上(抵抗係数が小さい)を吹いて来た風はプール上の内部境界層では荒い海水(抵抗係数が大きい)の影響を受け、かつ境界層外では滑らかな雪面上の性質をまだ保持していたと思われる。その中間の層では両方の性質が混じっていると思われる。プール上高さ0.96 mの抵抗係数の値は高さ0.4 mの値より若干小さいが、これは抵抗係数の値の小さい雪面上の影響を受けていると思われる。今回の測定では正確な内部境界層の高さは観測されてないが、Andreas and Murphy⁵⁾のleadやpolynyaの場合を適用すると、今回のプール上の内部境界層の高さは大体0.9~1 mと思われ、高さ0.96 mの値はほぼ境界層の限界であつたと思われる。

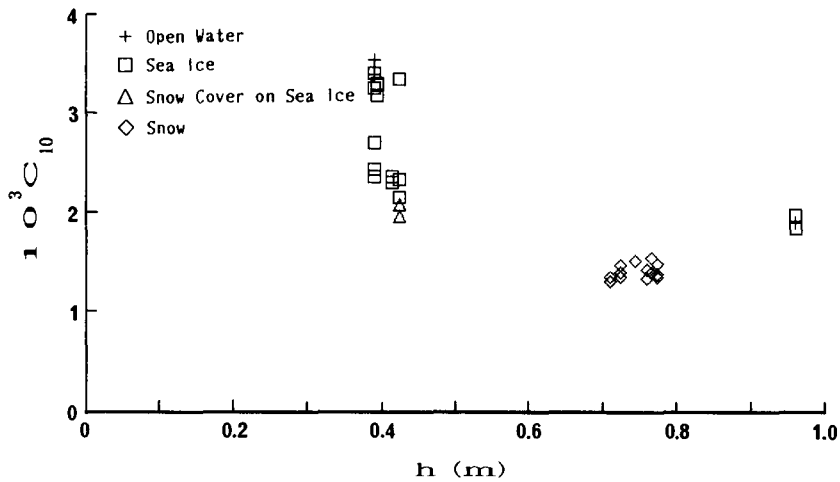
熱フラックス係数と風速計の高さとの関係を第9図に示す。雪面上の熱フラックス係数の

第2表 様々な表面形状における抵抗係数と熱フラックス係数

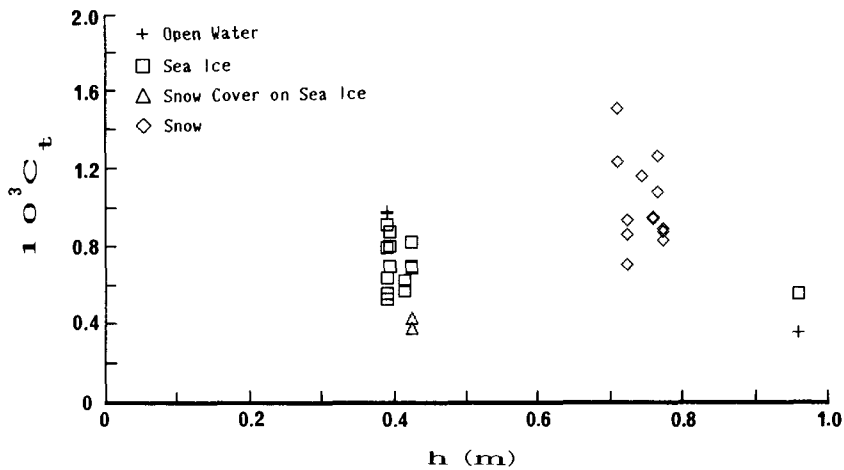
Surface characteristics	Ice thickness (cm)	$10^3 C_o$	$10^3 C_i$	No. of data
Open water		2.9	0.8	3
Sea ice	1.8	2.5	0.6	6
	4.3	3.2	0.8	3
	7.3	2.5	0.7	6
Snow cover on sea ice		2.0	0.4	2
Snow		1.4	1.0	13



第7図 熱フラックス係数と氷厚の関係



第8図 抵抗係数と風速計の高さ h の関係



第9図 熱フラックス係数と風速計の高さ h の関係

値はばらつきが大きいプール上の値より若干大きい。このばらつきの原因は確かではないが、表面状態また積雪層やその厚さ等の不均一による影響を受けていると思われる。今後はこれらの点も考慮しデータを増やして検討する必要がある。

おわりに

海氷の成長に伴う運動量や熱フラックスの変化を観測するために、海氷上にプールを作り、氷を成長させ、薄氷上の抵抗係数および熱フラックス係数と氷厚、風速、安定度、内部境界層との関係を調べた。観測期間中は絶えず風速 5~12 m/s の風が吹き、気温は -4~-8℃ で、大気の安定度は中立状態であった。

プールの大きさは一辺約 2.2 m であったが、風速計はプールの風下側に表面から高さ 0.39~0.96 m までの間に設置した。プール上では内部境界層が発達すると思われるが、内部境界層の高

さは0.9~1 m位と思われる。高さ約0.4 mに設置した風速計はプール上の運動量や熱フラックスを測定していると思われるが、高さ0.96 mに設置した風速計は風上側の雪面上の影響を受けていると思われる。

抵抗係数、熱フラックス係数共に、海水が7.4 cmまで成長する間に顕著な氷厚依存性が見られなかった。海水生成により熱フラックスは変化すると思われるが、特に結氷初期に注目する必要がある。今後は氷、積雪、海水の温度分布から水中、積雪中の熱輸送を考慮して考察を進めたい。また、プールの大きさ、内部境界層の影響等に注目して、運動量や熱フラックスと開水面、海水の厚さの違い、積雪の影響、雪面との関係を研究する予定である。

おわりに、Barrowでの観測にあたっては、現地のUIC-NARLとNorth Slope Borough, Dept. of Wildlife ManagementのArctic Research Facilityの施設利用と観測支援とを受けた。所長のBen Nageak氏、Tom Albert博士、Robert Suydam博士、Jo Young嬢をはじめ所員の方々には色々とお世話になりました。また、アラスカ大学のV. Alexander教授とJ. Kelley教授には御協力、御助言とを頂いた。データ整理には流水研究施設の皆様に御協力いただいた。ここに記し、あわせて感謝の意を表わします。

なお、この研究に要した経費は、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)、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)、文部省科学研究費一般(C)“流水下の海洋乱流境界層の観測及び研究”(研究代表者・白澤邦男)、流水研究施設外国地域観測旅費(文部省)によった。

文 献

- 1) 小野延雄・若土正暁・河村俊行 1980 極域厳寒期における海面凍結過程 I. 低温科学, 物理編, **39**, 159-166.
- 2) Andreas, E. L. and Paulson, C. A. 1979 Velocity spectra and cospectra and integral statistics over Arctic leads. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **105**, 1053-1070.
- 3) 石川信敬・小林俊一 1984 薄い海水上における熱収支の特性. 雪氷, **46(3)**, 109-119.
- 4) 小野延雄・牛尾収輝 1986 薄い海水を通しての海洋熱流量. 低温科学, 物理編, **45**, 37-43.
- 5) Andreas, E. L. and Murphy, B. 1986 Bulk transfer coefficient for heat and momentum over leads and polynyas. *J. Phys. Oceanogr.*, **16(11)**, 1875-1883.
- 6) 青田昌秋・白澤邦男・高塚 徹 1988 薄水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, 物理編, **47**, 177-185.
- 7) 白澤邦男・青田昌秋・高塚 徹 1990 薄水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—, 低温科学, 物理編, **49**, 25-36.
- 8) 白澤邦男・田畑忠司 1977 海水に及ぼす風の応力測定について I. 低温科学, 物理編, **35**, 241-248.
- 9) 白澤邦男 1981 氷野に及ぼす風の応力の研究. 低温科学, 物理編, **40**, 101-118.
- 10) Shirasawa, K. and Aota, M. 1991 Atmospheric boundary layer measurements over sea ice in the Sea of Okhotsk. *J. Mar. Syst.*, **2**, 63-79.
- 11) 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.
- 12) Joffre, S. M. 1982 Momentum and heat transfers in the surface layer over a frozen sea. *Boundary-Layer Meteorol.*, **24**, 211-229.

Summary

From turbulence measurements by a three-dimensional ultrasonic anemometer-thermometer estimates of momentum and heat fluxes were derived over both an artificial pool and over relatively smooth, snow-covered ice on a lagoon. The measurements over the pool were made within an internal boundary layer resulting from a large step change in surface temperature and surface roughness. These were compared with those obtained over an undisturbed smooth, snow-covered ice of the lagoon.

The experimental site was located about 350 m offshore of Elson Lagoon near Barrow, Alaska (Fig. 1). The pool was constructed on the ice of the lagoon, by raising sea water into a basin approximately 2.2×2.2 m and 0.7 m deep. It was built on about 1.7 m thick ice of the lagoon (Fig. 2). The sampling was done over both the pool and snow-covered ice of the lagoon from May 7 to 13, 1991. Because Elson Lagoon is an isolated basin, its ice cover is very smooth. The winds during the experiment were from the northeast and southeast, so there was always at least several kilometers of smooth, snow-covered ice upwind of the experimental site. The three-dimensional ultrasonic anemometer-thermometer (Kaijo Denki Co., Ltd., Model WAT-395) was installed above the pool within 1 m of the surface in order to measure momentum and heat fluxes in the internal boundary layer over the pool.

Sonic anemometer data are summarized in Tables 1 and 2. All data runs during the experiment were conducted under neutral conditions (Table 1). Drag coefficient and heat flux coefficient were discussed as functions of wind speed, ice thickness and anemometer height. Variations in drag and heat flux coefficients as a function of wind speed are shown in Figs. 3 and 4, respectively. Values of the drag coefficient over snow surface were smaller and scattered less widely than those over both open water and newly formed thin ice on the pool. For the heat flux coefficient, values over the snow surface were slightly larger than those over both the open water and thin ice.

No significant difference was found in drag coefficient as a function of ice thickness between measurements over open water and thin ice (within 7.4 cm thick ice) formed on the pool (Fig. 6). The heat flux coefficient values over open water were slightly larger than those over thin ice (Fig. 7). It may be considered that the heat flux coefficient decreased after sea ice was formed on the pool, and that it then increased gradually with an increase in ice thickness.

The drag and heat flux coefficients as a function of anemometer height are shown in Figs. 8 and 9, respectively. Values of the drag coefficient over thin ice obtained at the 0.4 m height were larger than those obtained at the 0.96 m height. It can be considered that the measurements at 0.4 m height were made within the internal boundary layer over the pool. This may reflect the characteristics of the surface of thin ice on the pool, while those at the 0.96 m height might be affected by the smooth, snow-covered ice upwind of the experimental site.