HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	いろいろな風速下における氷の昇華速度と全放出熱の測定
Author(s)	東海林, 明雄; 若浜, 五郎
Citation	低温科学. 物理篇. 資料集, 33, 7-16
Issue Date	1976-03-15
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18680
Type	bulletin (article)
File Information	33_p7-16.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Akio TŌKAIRIN and Gorow WAKAHAMA 1975 Measurements of the Sublimation-evaporation Rate of Ice and the Total Heat Loss from the Ice Surface under Various Wind Speeds. *Low Tempreature Science, Ser. A, 33. Data Report.*

いろいろな風速下における氷の昇華速度と全放出熱の測定*

東海林明雄**
（北海道教育大学釧路分校）
若浜五郎
（低温科学研究所）

（昭和51年1月受理）

I. はじめに

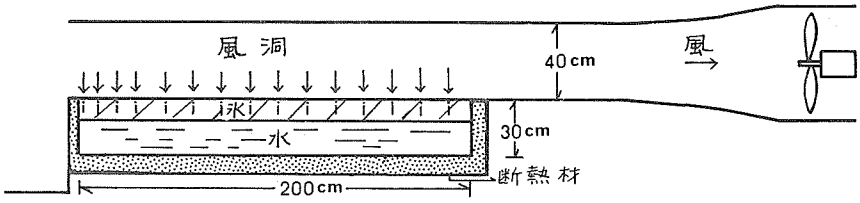
地表面と大気との熱交換の一部をになう水蒸気の蒸発による熱放出は，水蒸気蒸発量の測定が困難なために，その正確な決定を期し難い。しかし，地表面が氷ならば，水蒸気蒸発量が容易に測定される。氷の表面は平坦で固いため，蒸発による表面の後退距離をダイヤルゲージを用いて直接かつ正確にはかることができるからである。また，氷の熱伝導率は確定しているから，氷のなかの温度勾配を熱電対で測定すれば，氷の表面から大気に放出される全熱量も正確に決定できる。かくして，この放出全熱量から，放射と水蒸気蒸発とによる放出熱量を差引けば，空気の対流による熱伝達量が求められることになる。

筆者のひとりである東海林は，過去数年にわたり毎冬，北海道釧路市にある春採湖の結氷面で熱交換の研究をおこなってきた。その結果，ダイヤルゲージによる氷面後退距離の測定が，野外の自然条件のものにおいても行ないうることを確認した。それで，低温科学研究所の低温実験室内で，上記氷面後退距離測定法を利用して，風速，気温，湿度と空気の対流による熱放出量との関係を実験的に定めることにした。その結果を野外の自然結氷面での熱交換の研究に用いることが主要な目的である。しかし，この結果は，熱交換の理論の検討にも役立つであろう。理論的研究は，多くの場合，平坦な固体表面に関しておこなわれているからである。本文のあとに，この実験でえられた直接測定の結果およびそれをもとにして計算した諸種の放出熱量の値をあげる。

II. 実験方法

第1図が-8℃ないし-10℃の低温実験室内においた，水槽と風洞とからなる実験装置の縦断面である。水槽上部に張った厚さ約10 cmの氷の表面から，その上を吹きすぎる風洞内の空気に熱が放出される。縦の矢印は，氷の表面の後退距離と氷の温度との15箇の測定点の位置を示す。第2図が

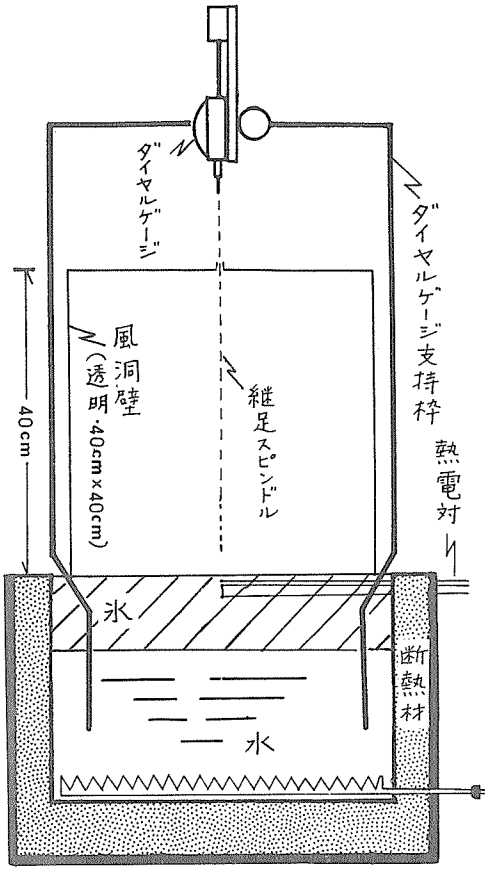
* 北海道大学低温科学研究所業績　第1758号
** 低温科学研究所内地研究員　昭和45年度



第1図　測定装置縦断面の略図。風は左から右にむかう。縦の矢印は測定位置を示す。

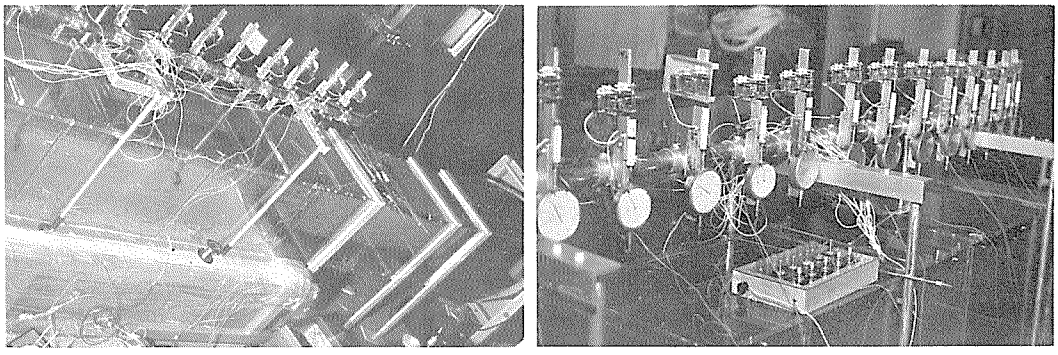
測定点における実験装置の横断面である。

氷の表面の後退距離測定用のダイヤルゲージは，第2図のように，鉄棒をまげて作った丈夫な支持枠の上部中央にとりつけてある。支持枠の両脚は氷で支えられている。したがって，ある時間の前後に，ダイヤルゲージに継足したスピンドルの下端を氷の表面に接触させてその位置をきめれば，ふたつの位置の差から氷の表面のその時間内での後退距離，すなわち，昇華蒸発量がわかる。スピンドルはダイヤルゲージ支持枠とおなじ材質の鉄棒で，氷の表面に接するその下端は直径5mmの円形平面に磨いてある。氷の表面の位置測定は100分以上の時間をおいておこない，あい次ぐ位置測定のあいだはスピンドルをダイヤルゲージから取外した。なお，氷の表面の3箇所に1cm角のガラス板をはりつけておき，その表面の位置をおなじ方法で測定した。ガラス板は，その下の氷の蒸発を阻止するから，後退しないはずである。よって，ガラス板表面の位置に時間的変化が見られなければ，裸の氷の表面の後退距離測定が正確に行なわれていると考えてよい。

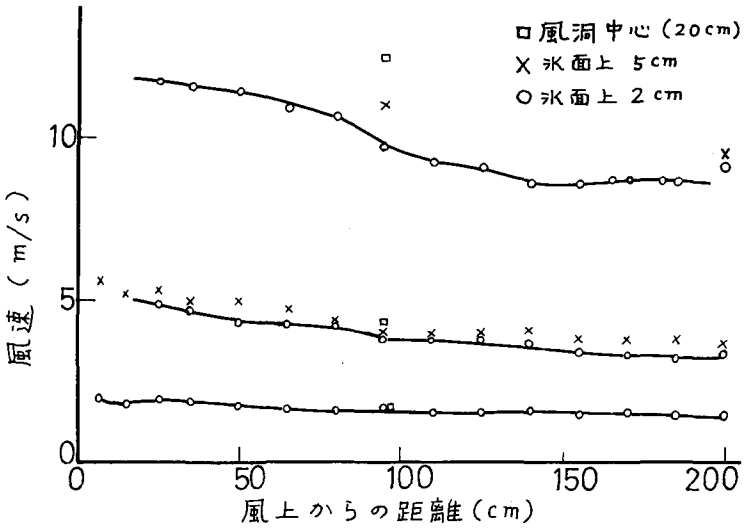


第2図　測定装置の横断面。継足スピンドルは氷の表面の位置を測定するときだけ取付ける。

第3図の写真に以上のべた風洞の外観およびダイヤルゲージを取り付けた状況を示す。



第3図　風洞の外観（左）とダイヤルゲージの取り付け状況（右）。



第4図　平均風速が1.7，4，10 m/sのばあいの，氷面上2 cm（○印），5 cm（×印）および風洞断面の中心附近の風速（□印）。

氷の温度は，第2図に示すように，蒸発量の測定点の真下に，それぞれ銅・コンスタンタンの熱電対を2対埋めこんで測定した。上部の熱電対は，それが埋めこまれた点の温度を測定し，両接合点が埋めこまれた下部熱電対は氷のなかの温度勾配を決定する。上部熱電対の位置と氷の表面との間隔と下部熱電対で定められる温度勾配とから，氷の表面の温度を計算によって知ることができる。

熱線風速計で風洞内の風速分布を測定した。第4図に，風洞の中心軸をふくむ鉛直面内にあって氷の表面上2 cm，5 cmの高さに横たわる直線上の風速の変化が示してある。代表風速としては，風洞の横断面の中心附近における風速の値を用いた。

風洞の空気の湿度はアスマン通風乾湿計，および毛髪自記湿度計を用いて観測した。

III. 熱量の算出

氷面上の各測定点で，いろいろな風速のもとで得られた測定結果，およびそれらを用いて求めた氷面の熱収支に関する諸量を第1表にまとめた。

昇華放出熱 Q_E，すなわち，氷の蒸発による放出熱は，ダイヤルゲージによって測定された氷の昇華量に昇華熱（−4℃〜−10℃で678 cal/gr）を乗じて求めた。

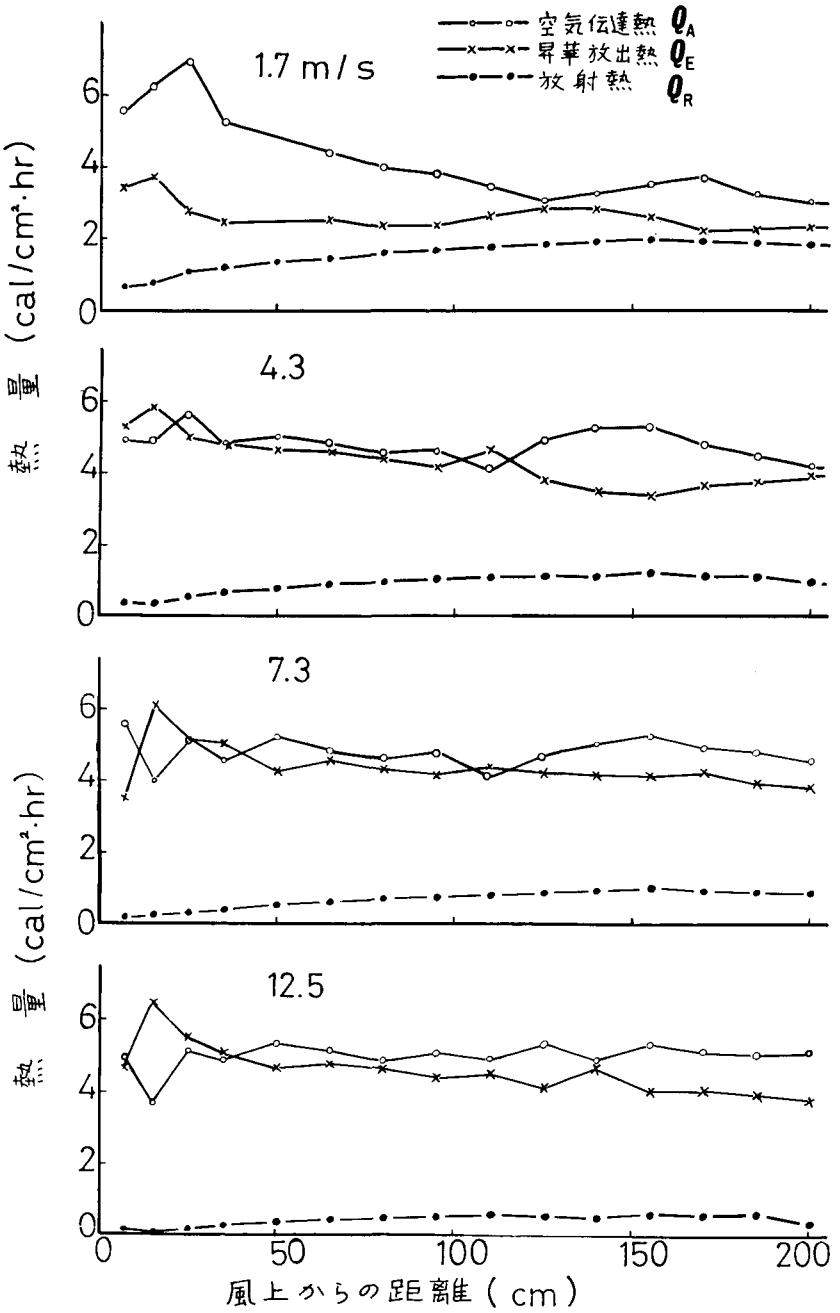
放射による放出熱 Q_R は，氷面および風洞内の空気の絶対温度 Ts と Ta との測定値を用いて，次の（1）式によって算出した。

$$Q_R = \sigma T_s^4 - \sigma T_a^4 \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

σ はステフアン・ボルツマン定数（1.37×10^{-12} cal/cm^2・s・deg^4）である。

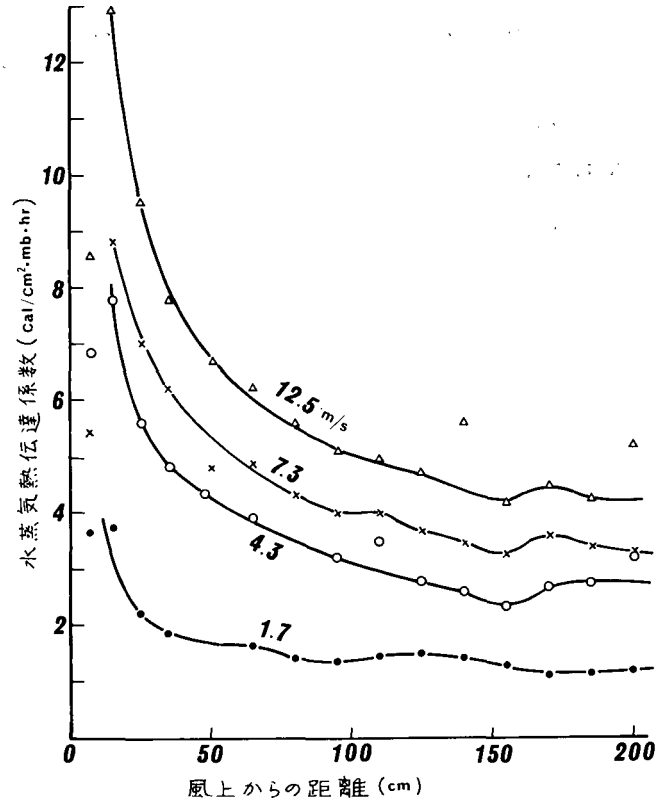
氷面からの全放出熱量 Q_W は，氷の中の温度勾配に氷の熱伝導率を乗じて得られる。これから昇華放出熱と放射熱を差引いて，空気伝導熱 Q_A を求めた。すなわち，

$$Q_A = Q_W - (Q_E + Q_R) \cdots\cdots\cdots (2)$$

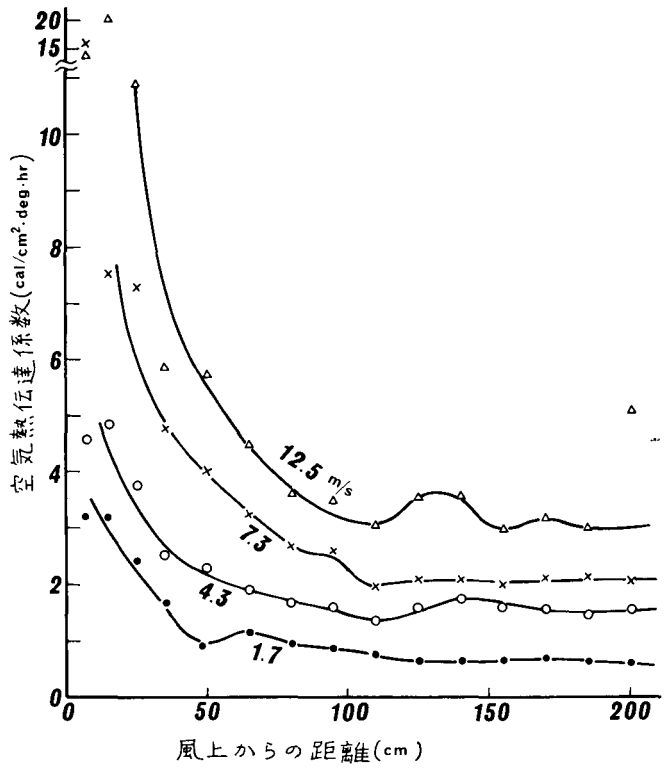


第5図 いろいろな風速のものでの氷面からの放出熱量。

○；空気伝達熱 Q_A，×；昇華放出熱 Q_E，●；放射熱 Q_R。



第6図　いろいろな風速のもとにおける空気熱伝達係数の分布。



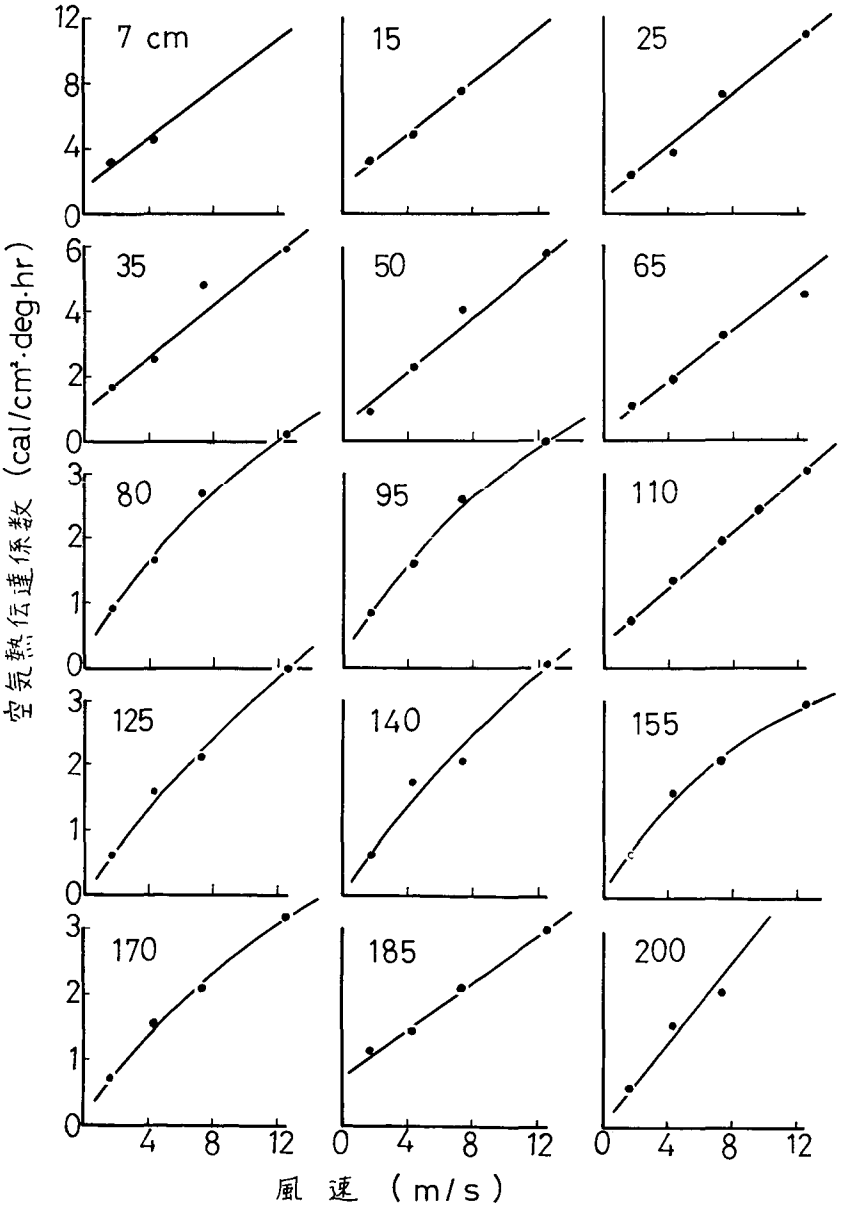
第7図　いろいろな風速のもとにおける水蒸気熱伝達係数の分布。

このようにして算出した空気伝達熱 Q_A，昇華放出熱 Q_E，放射熱 Q_R の全放出熱量 Q_W に対する百分比を（Q_A ／ Q_W : Q_E ／ Q_W : Q_R ／ Q_W）の形で第２表に示した。また，第５図に，いろいろな風速に対して求めた Q_A，Q_E，Q_R の値を，風上からの距離に対して記入した。

空気熱伝達係数 h と水蒸気熱伝達係数 k は，それぞれ次の（３），（４）式によって求めた。

$$h=\frac{Q_A}{T_s-T_a} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

$$k=\frac{Q_E}{e_s-e_a} \quad \cdots\cdots\cdots (4)$$

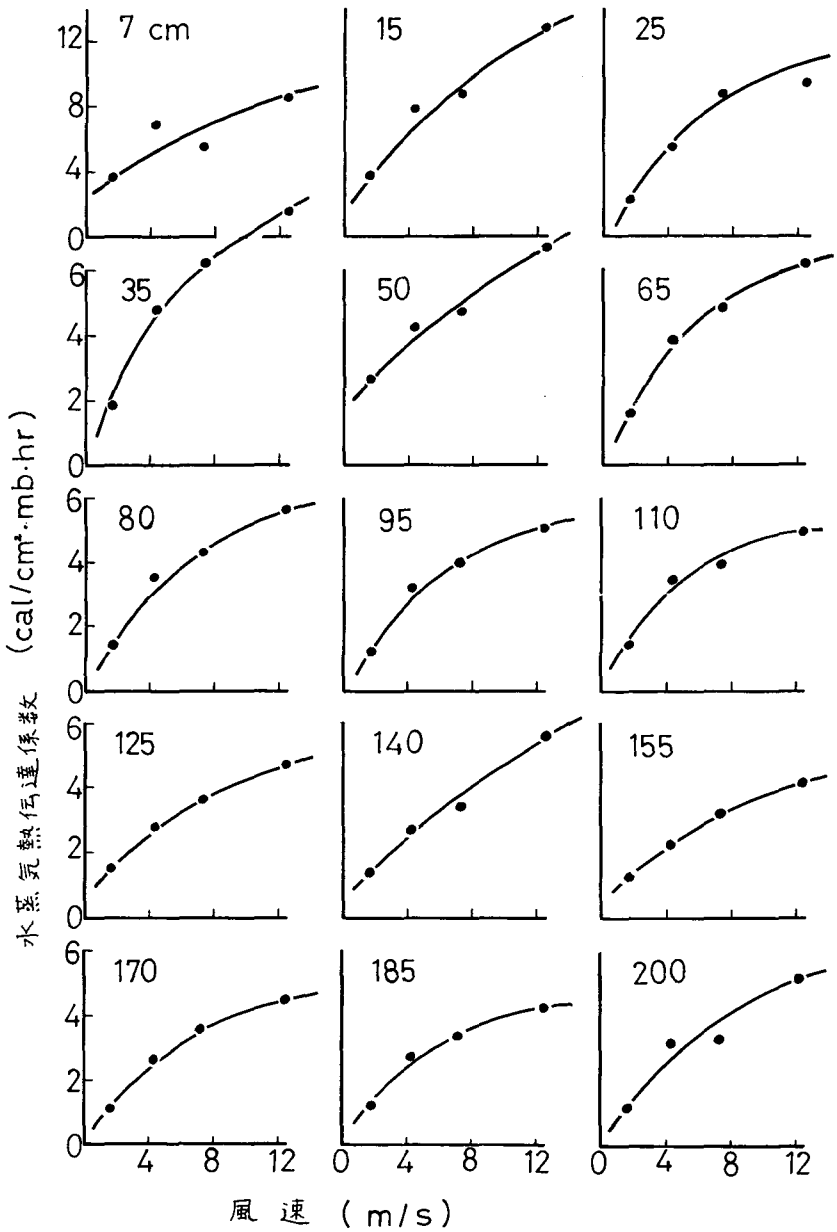


第８図　風速と熱伝達係数の関係。各図の数値は風上からの距離（cm）。

式（4）で，e_s は氷面の飽和水蒸気圧，e_a は風洞内の空気中の水蒸気圧である。

第6図，第7図には，それぞれ，空気熱伝達係数，水蒸気熱伝達係数を風速をパラメーターにして示した。

第8図，第9図には，風速に対する空気熱伝達係数，水蒸気熱伝達係数を各測定点ごとに示した。



第9図　風速と水蒸気熱伝達係数の関係。図中の数値は風上からの距離（cm）。

Ⅳ. 謝　　辞

この実験は著者のひとり東海林明雄が，低温科学研究所の昭和45年度の内地研究員として行なったものである。吉田順五教授はじめ，応用物理学部門の研究員の方々に，終始，協力していただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

第1表　いろいろな風速のもとで，風上からの各距離で得られた昇華放出熱 Q_E，放射熱 Q_R，空気伝達熱 Q_A，全放出熱 Q_W などの測定ならびに計算結果。

	風下距離 (cm)	昇華放出熱 Q_E (cal/cm²·hr)	氷面温度 (°C)	対射熱 Q_R (cal/cm²·hr)	氷中温度勾配 (°C/cm)	氷面全放出熱量 Q_W (cal/cm²·hr)	空気伝達熱 Q_A (cal/cm²·hr)	空気熱伝達係数 (cal/cm²·℃·hr)	水蒸気熱伝達係数 (cal/cm²·mb·hr)
	7	3.44	−8.32	0.65	0.510	9.64	5.55	3.17	3.65
	15	3.71	−8.10	0.73	0.566	10.70	6.26	3.18	3.75
	25	2.75	−7.18	1.07	0.570	10.77	6.96	2.41	2.21
	35	2.46	−6.90	1.17	0.472	8.92	5.30	1.67	1.85
	50	3.91	−6.42	1.35	0.454	8.58	3.32	0.91	2.64
	65	2.54	−6.08	1.47	0.446	8.43	4.42	1.11	1.62
風速 1.7(m/s)	80	2.39	−5.73	1.60	0.422	7.98	3.99	0.92	1.41
気温 −10.1(°C)	95	2.39	−5.52	1.68	0.420	7.94	3.87	0.85	1.36
湿度 73(%)	110	2.64	−5.31	1.76	0.416	7.86	3.46	0.73	1.44
	125	2.85	−5.10	1.82	0.410	7.75	3.08	0.62	1.50
	140	2.82	−4.88	1.91	0.424	8.01	3.29	0.63	1.43
	155	2.63	−4.70	1.98	0.430	8.13	3.52	0.66	1.29
	170	2.21	−4.88	1.91	0.414	7.82	3.70	0.71	1.12
	185	2.29	−4.93	1.89	0.394	7.45	3.27	0.64	1.17
	200	2.35	−5.00	1.86	0.382	7.22	3.01	0.59	1.21
	7	5.28	−8.22	0.38	0.560	10.58	4.92	4.55	6.86
	15	5.86	−8.30	0.36	0.584	11.05	4.83	4.83	7.81
	25	5.98	−7.77	0.55	0.594	11.23	4.70	3.73	5.60
	35	4.80	−7.37	0.70	0.546	10.33	4.83	2.51	4.80
	50	4.62	−7.10	0.80	0.552	10.42	5.00	2.27	4.28
	65	4.59	−6.76	0.93	0.546	10.30	4.80	1.89	3.89
風速 4.3(m/s)	80	4.37	−6.57	0.99	0.522	9.87	4.51	1.66	3.52
気温 − 9.3(°C)	95	4.15	−6.39	1.05	0.520	9.84	4.64	1.59	3.22
湿度 75(%)	110	4.64	−6.26	1.11	0.520	9.84	4.08	1.34	3.49
	125	3.79	−6.18	1.13	0.520	9.84	4.92	1.58	2.79
	140	3.47	−6.28	1.10	0.520	9.84	5.27	1.75	2.61
	155	3.33	−5.97	1.21	0.520	9.84	5.30	1.59	2.33
	170	3.63	−6.20	1.12	0.502	9.48	4.73	1.55	2.69
	185	3.73	−6,20	1.12	0.494	9.34	4.49	1.45	2.76
	200	3.91	−6.64	0.96	0.478	9.03	4.16	1.56	3.23
	7	3.56	−9.25	0.20	0.496	9.37	5.61	16.04	5.43
風速 7.3(m/s)	15	6.12	−9.07	0.26	0.548	10.36	3.98	7.51	8.80
気温 − 9.6(°C)	25	5.15	−8.90	0.32	0.560	10.58	5.12	7.31	7.00
湿度 72(%)	35	5.01	−8.65	0.42	0.526	9.94	4.51	4.75	6.21

	風下距離 (cm)	昇華放出熱 Q_E (cal/cm²·hr)	氷面温度 (°C)	放射熱 Q_R (cal/cm²·hr)	氷中温度勾配 (°C/cm)	氷面全放出熱量 Q_W (cal/cm²·hr)	空気伝達熱 Q_A (cal/cm²·hr)	空気熱伝達係数 (cal/cm²·°C·hr)	水蒸気熱伝達係数 (cal/cm²·mb·hr)
	50	4.26	−8.30	0.55	0.530	10.02	5.20	4.00	4.76
	65	4.59	−8.10	0.62	0.532	10.06	4.84	3.23	4.86
	80	4.31	−7.88	0.70	0.510	9.64	4.63	2.69	4.29
	95	4.18	−7.75	0.75	0.516	9.75	4.83	2.61	3.99
風速 7.3(m/s)	110	4.39	−7.55	0.82	0.514	9.72	4.51	1.96	3.97
気温− 9.6(°C)	125	4.22	−7.34	0.89	0.520	9.83	4.72	2.09	3.65
湿度 72(%)	140	4.16	−7.17	0.95	0.536	10.13	5.02	2.07	3.45
	155	4.12	−7.00	1.02	0.548	10.36	5.22	2.01	3.27
	170	4.22	−7.27	0.92	0.532	10.06	4.92	2.11	3.59
	185	3.91	−7.34	0.89	0.508	9.60	4.80	2.12	3.39
	200	3.82	−7.33	0.90	0.496	9.37	4.65	2.05	3.31
	7	4.63	−7.90	0.14	0.514	9.74	4.97	14.2	8.57
	15	6.47	−8.07	0.07	0.540	10.21	3.67	20.4	12.94
	25	5.52	−7.77	0.18	0.572	10.81	5.11	10.9	9.52
	35	5.07	−7.54	0.26	0.540	10.21	4.88	5.87	7.80
	50	4.67	−7.32	0.34	0.548	10.36	5.35	5.75	6.68
	65	4.78	−7.10	0.43	0.548	10.36	5.15	4.47	6.21
風速12.5(m/s)	80	4.65	−6.90	0.50	0.530	10.02	4.87	3.61	5.60
気温−8.25(°C)	95	4.39	−6.79	0.54	0.530	10.02	5.09	3.49	5.10
湿度 78.5(%)	110	4.51	−6.63	0.60	0.530	10.02	4.91	3.03	4.95
	125	4.15	−6.73	0.56	0.532	10.06	5.35	3.52	4.71
	140	4.70	−6.87	0.51	0.536	10.12	4.91	3.55	5.59
	155	4.05	−6.44	0.67	0.532	10.06	5.34	2.95	4.17
	170	4.07	−6.63	0.60	0.520	9.83	5.16	3.18	4.47
	185	3.96	−6.57	0.62	0.508	9.62	5.04	3.00	4.26
	200	3.79	−7.24	0.37	0.490	9.27	5.11	5.06	5.19

第2表 いろいろな風速のもとで，風上からの各測定点で得られた氷面の全放出熱量 Q_W に対する空気伝達熱 Q_A，放射熱 Q_R，昇華放出熱 Q_E の比。

	風上からの距離 (cm)	Q_A/Q_W (%)	Q_R/Q_W (%)	Q_E/Q_W (%)		風上からの距離 (cm)	Q_A/Q_W (%)	Q_R/Q_W (%)	Q_E/Q_W (%)
	7	57.6	7.4	35.7		7	46.5	3.6	49.9
	15	58.5	6.8	34.7		15	43.7	3.3	53.0
	25	64.6	9.9	25.5		25	41.8	4.9	53.3
	35	59.2	13.1	27.4		35	46.8	6.8	46.5
	50	38.7	15.7	45.6		50	48.0	7.7	44.3
	65	52.4	17.4	30.1		65	46.4	9.0	44.6
風速 1.7(m/s)	80	50.0	20.1	29.9	風速 4.3 (m/s)	80	45.7	10.0	44.3
気温−10.1(°C)	95	48.7	21.2	30.1	気温− 9.3(°C)	95	47.1	10.7	42.2
湿度 73(%)	110	44.0	22.4	33.6	湿度 75(%)	110	41.5	11.3	47.2
	125	39.7	23.5	36.8		125	50.0	11.5	38.5
	140	41.1	23.8	35.2		140	53.6	11.2	35.3
	155	43.3	24.4	32.3		155	53.9	12.3	33.8
	170	47.3	24.4	28.3		170	49.9	11.8	38.3
	185	43.9	25.4	30.7		185	48.1	12.0	39.9
	200	41.7	25.8	32.5		200	46.1	10.6	43.3

	風上からの距離 (cm)	Q_A/Q_W (%)	Q_R/Q_W (%)	Q_E/Q_W (%)		風上からの距離 (cm)	Q_A/Q_W (%)	Q_R/Q_W (%)	Q_E/Q_W (%)
	7	59.9	2.1	38.0		7	51.0	1.4	47.5
	15	38.4	2.5	59.1		15	35.9	0.7	63.4
	25	48.4	3.0	48.7		25	47.3	1.7	51.1
	35	45.4	4.2	50.4		35	47.8	2.5	49.7
	50	51.9	5.5	42.5		50	51.6	3.3	45.1
	65	48.3	6.2	45.6		65	49.7	4.2	46.1
風速 7.3(m/s)	80	48.0	7.3	44.7	風速12.5(m/s)	80	48.6	5.0	46.4
気温− 9.6(℃)	95	49.5	7.7	42.9	気温−8.25(℃)	95	50.8	5.4	43.8
湿度 72(%)	110	46.4	8.4	45.2	湿度 78.5(%)	110	49.0	6.0	45.0
	125	48.0	9.1	42.9		125	53.2	5.6	41.3
	140	49.6	9.4	41.0		140	48.8	5.1	46.7
	155	50.4	9.8	39.8		155	53.1	6.7	40.3
	170	48.9	9.1	41.9		170	52.5	6.1	41.4
	185	50.0	9.3	40.7		185	52.4	6.4	41.2
	200	49.6	9.6	40.8		200	55.1	4.0	40.9