



Title	結氷初期の海水の射出率の現場測定
Author(s)	青田, 昌秋; AOTA, Masaaki; 白澤, 邦男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 47, 187-195
Issue Date	1989-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18574
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p187-195.pdf



結氷初期の海水の射出率の現場測定^{*,**}

青田昌秋・白澤邦男・池田光雄

(低温科学研究所)

山田俊郎

(東海大・海洋学部)

(昭和63年10月受理)

I. はじめに

世界の気候変動予測研究の一環として、氷海域の研究は重要である。オホーツク海のように冬期間だけ流水に覆われる季節海水域や、また、氷縁域は、地球の冷源である極域の境界域に当り、そこでの、観測・研究は、とくに重要である。

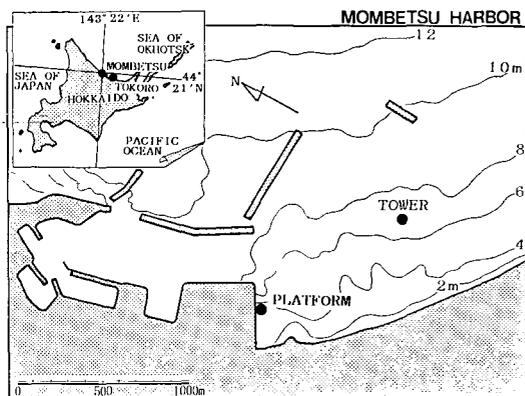
典型的な氷縁域である北海道オホーツク海沿岸の海水は、たかだか30~40 cm程度の薄い氷であり、薄い海水に関する種々の性質を調べるのに適している。小野ら¹⁾は、北海道オホーツク海沿岸のサロマ湖の平担海水に人工的な開水面を造り、微気象観測を行ない、熱交換過程を調べた。

北大流水研究施設では、1987年冬から、北海道オホーツク海沿岸に設置した、氷海域気象・海象観測塔周辺を氷縁域のモデル海域として、薄氷域の大気-海水-海洋相互作用の研究を開始した²⁾。

氷縁域の海水は、極域の海水と異なり、薄く流動的であり、とくに、結氷初期の薄氷の表面温度の現場測定は、氷上での直接測定が困難な場合が多く、非接触による測定、たとえば、放射温度計等のリモート・センシングによる測定によらざるを得ない。

近年、航空機あるいは人工衛星による氷海域の観測も盛んに行なわれるようになった^{3,4)}。これらの観測では、赤外放射温度計、マイクロ波放射温度計による海水表面の輝度温度の測定が行われる。輝度温度から海水面の真の温度を知るためには、使用する放射計の波長領域の波長に対する海水の射出率を知る必要がある。

筆者らは、薄氷表面の温度測定に赤外



第1図 測定場所

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3189号

** 北海道大学低温科学研究所附属流水研究施設研究報告 第125号

放射温度計を使用するが、この赤外領域の射出率(ϵ)の測定はあまりなく、大雑把な値として、氷、雪、水に対して $\epsilon > 0.98^8)$ がある程度であり、結氷初期、とくに、結氷直後の射出率の実測はほとんどなされていない。本研究の目的は、現場測定によって、結氷初期の薄氷の射出率を求めることにある。はじめに、観測に用いる赤外放射温度計のキャリブレーションを低温実験室で行った上で、オホーツク海沿岸の紋別港内、常呂港外の海水の輝度温度と真温度の現場測定を行なった。ここでは、これらから求めた射出率について報告する。

II. 測定方法

1. 射出率の定義

一般の物体は、完全放射体ではなく、これから放射されるエネルギーは同温度の黒体のそれより低く、両者の比を射出率(emissivity)という。赤外領域では、放射エネルギーは、ほぼ温度に比例するので、物体の真温度を T_s とし、同一放射エネルギーを放射する黒体の温度、すなわち、物体の輝度温度 T_B との比をもって射出率(ϵ)が定義される⁹⁾。

すなわち、射出率は、

$$\epsilon = T_B/T_s \quad (1)$$

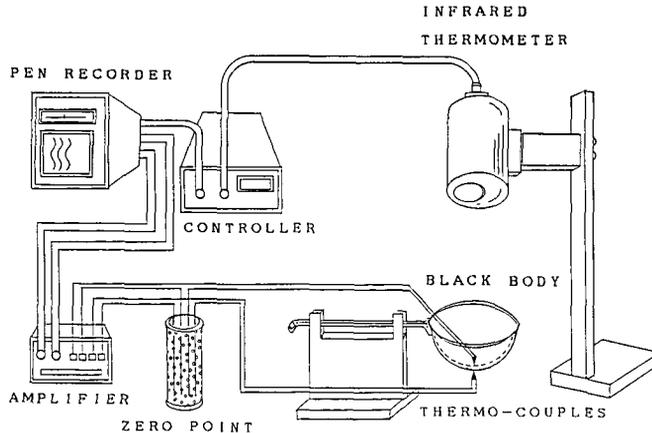
で表わされる。

様々な海水面に対する ϵ を知れば、放射計による T_B の測定値から、式(1)によって T_s を求めることができる。

2. 赤外放射温度計の仕様概要とキャリブレーション

本研究で用いた赤外放射計は、MINARAD SYSTEMS INC. 製 REMOTE SENSING THERMOMETER (MODEL RST-10)で、検出器は pyroelectric lithium tantalate detector、波長域は $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 、視野角 2° 、測温範囲は $-50 \sim +50^\circ\text{C}$ 、感度は 0.05°C である。輝度温度 T_B は、出力部にデジタル表示されると同時に、信号出力端子を用いて別の記録計で連続記録をとることも出来る。

野外水上での観測の前に、赤外放射計の検出部、増巾部、デジタル表示部の測定系全体



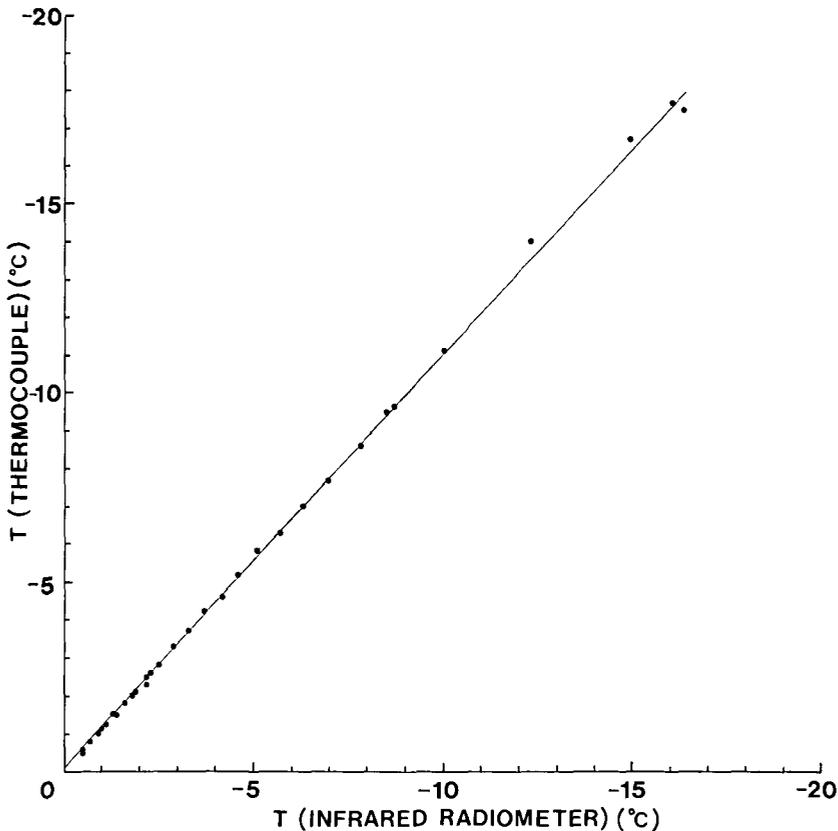
第2図 低温実験室内の赤外放射計検定装置の概要

の精度をみるために流氷研究施設の低温実験室においてキャリブレーションを行なった。

第2図に示すような、半径10 cmのステンレス製の半球型の容器の内、外面に各1点ずつ直径0.3 mmの銅-コンスタンタン熱電対を付着させた。次に、容器の内、外面にニトロセルローズ、合成樹脂、顔料でできた黒色のラッカーを塗り、さらにその表面を、松煙で覆って黒体面とした。赤外放射温度計は容器の凹部中心に向けて、50 cm離して固定し、デジタル表示を読み取ると同時に記録計で連続的に記録した。一方、熱電対による温度記録は、微小電圧増幅器で増幅し、連続的に記録した。

実験は、1987年9月20~23日、低温室の室温を、約40時間の間に、約+3°Cからゆるやかに約-18°Cまで下げ、再び、+2°Cまで上げて1時間毎のそれぞれの値を読み取った。赤外放射温度計、熱電対とも、その感度はおおよそ0.05°Cである。熱電対によるステンレス容器の内外面の温度はほとんど等しかったが、両者の平均値を黒体の真温度とした。第3図に、熱電対による黒体の真温度(y)と同一物体(黒体)の放射計による輝度温度(x)の関係を示す。 x と y の間の相関係数は $r=0.999$ で、よい相関を示している。両者の間の関係を回帰直線で表わすと、

$$y = 1.095x - 0.032 \tag{2}$$



第3図 熱電対で測定した真温度と赤外放射計で測定した輝度温度との比較

となる。真温度 (y) とこの放射計の読み値 (x) との差は、このセンサーおよび増幅部による計器誤差として、現場測定でも、放射温度計の読み値を式(2)で補正して、輝度温度とした。

3. 海水面の真温度、輝度温度の現場測定

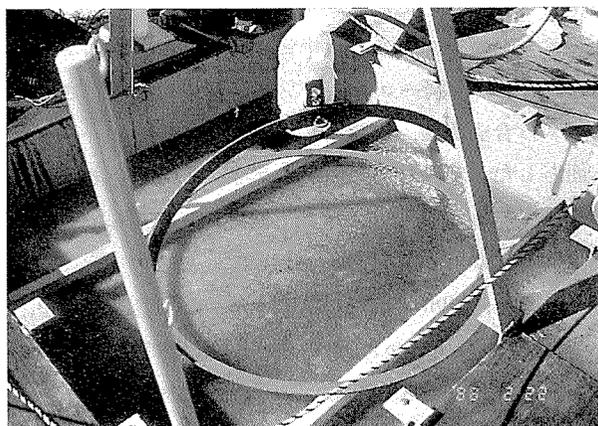
先に述べたように、赤外領域の海水の射出率の測定はほとんどないが、Dozier and Warren⁷⁾によると雪面の場合、入射角の変化が射出率に影響を与えると報告している。当研究では、とくに、結氷初期の薄氷の射出率およびそれに対する入射角の影響に測定の重点を置いた。氷上観測は、1988年2月21日から3月7日の間は、オホーツク海沿岸の紋別港内に設置した氷海プラットフォーム上で、また、2月28日には常呂港外のやや発達した沿岸定着氷上で行なった(第1図)。

紋別港内での観測期間中の氷厚

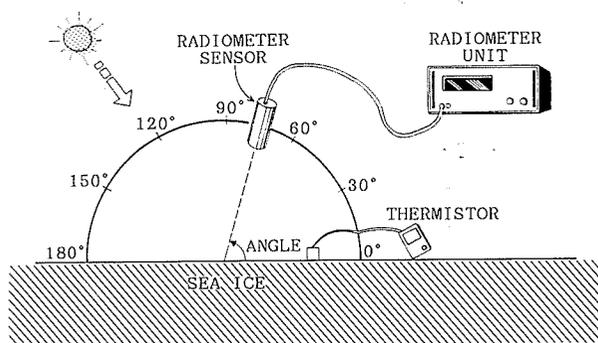
は、高々10数cmで氷上に直接乗ることはできなかった。測定では、第4図に示すような特製の氷海プラットフォームを用いた。プラットフォームは一辺3.6mの正方形で、中央部に一辺2mの正方形の穴がある。プラットフォームは結氷前から海面に浮かしてあり、内部の穴の部分の海水の自然結氷後、氷厚の変化にしたがって、随時測定を行った。なお、観測期間中プラットフォームの底から、外部の海氷が入り込んだためプラットフォームの海氷を取り除き、再び結氷するのを待って新しい氷について観測を行なった。

輝度温度の観測には、第4図に示す、直径1.2mの土台となる部分と、半径0.6mの半円状の枠からなる放射計用架台を用いた。放射計は可動にして、海水面に対する放射計の覗き角度を変えられるようになってきている(第5図)。放射計の軌動面を太陽光線と一致させる向きにして架台底面を静かに薄氷上に配置した。

海水面の真温度の測定には、宝工業株式会社製のサーミスター温度計(ポケットブル複合モード温度計(DIGIMULTI D611))を用いた。この温度計は、2つの感温部を有し、2点温度差も表示し得るようになっており、分解能は 0.1°C である。現場では、一方の感温部(針状センサー)を零点ジャーにいれ、他方の直径1cmの薄い円板状の接触型感温部を、海水面に接触



第4図 紋別港氷海プラットフォームと赤外放射計による輝度温度測定装置



第5図 紋別港氷海プラットフォームでの射出率測定の概要

させて、零点との差として海水表面の温度を測った。両感温部には直射日光をさけるように注意した。

III. 測定結果と考察

1. 紋別港“氷海プラットフォーム”における測定

1回の測定は、赤外放射温度計、サーミスター温度計ともに、示度が安定した後の数分間に5~10回の読み取りを行ない、それぞれの平均値を求めた。輝度温度に関しては、赤外放射温度計の読み値を式(2)によって補正した。第1表に、測定時の諸条件、真温度、輝度温度(ともに平均値)と、それから求めた射出率を示す。なお、表中の“角度”は、第5図に示されるように、氷水面と放射計の光軸のなす角度(放射計の目標海水点に対し、太陽方向と反対側の氷水面の角度を0°、放射計が鉛直下方を向く角度を90°とする)である。

観測時の海水および海水の塩分量の測定を行なった。表中の海水は海水直下の海水であり、銀滴定法により塩素量(Chlorinity)を求め、塩分量(Salinity)に換算したものである。海水のサンプル(氷厚×12cm×12cm)から採集したブライン、およびそのブラインの抜けた氷の塩分量も、海水と同様の方法で求めた。

観測時太陽高度は33°から39°であった。この時、放出率の角度依存性は見られなかった。放射計の光軸が水平面に近い時(角度が20°以下)に射出率が0.995以下となる場合がある

第1表 紋別港氷海プラットフォームでの観測結果

年月日	時間	角度 (°)	真温度 (K)	輝度 温度 (K)	射出率 ε	太陽 高度 (°)	天候	気温 (°C)	氷厚 (cm)	塩 分 量			備 考								
										海水 (‰)	ブ ラ イ ン (‰)	ブ ライ ン ぬ け 氷 (‰)									
1988. 2. 21	13:09	50	271.06	270.99	1.00 ₀	34	○	-4.6	3.3	34.80 ₀	12.50 ₁										
		60	271.06	270.47	0.99 ₈																
		70	271.06	270.45	0.99 ₈																
		80	270.96	270.45	0.99 ₈																
		90	270.86	270.02	0.99 ₇																
		100	271.16	269.84	0.99 ₅																
		110	271.16	269.54	0.99 ₄																
		120	271.16	269.44	0.99 ₄																
		2. 22	10:50	10	270.36								269.35	0.99 ₆	37	○	-3.7	5.1	31.50 ₆		
				20	270.36								268.40	0.99 ₃							
30	270.36			268.92	0.99 ₅																
40	270.36			296.13	0.99 ₅																
50	270.46			269.41	0.99 ₆																
60	270.26			269.57	0.99 ₇																
70	270.26			269.79	0.99 ₈																
80	270.26			270.03	0.99 ₉																
90	270.46			270.42	1.00 ₀																
100	270.41			270.05	0.99 ₉																
110	270.46			270.11	0.99 ₉																
120	270.46			270.22	0.99 ₉																
130	270.46			270.27	0.99 ₉																
140	270.46			270.29	0.99 ₉																
150	270.49			269.89	0.99 ₈																

年月日	時間	角度 (°)	真温度 (K)	輝度 温度 (K)	射出率 ϵ	太陽 高度 (°)	天候	気温 (°C)	氷厚 (cm)	塩分量			備考									
										海水 (‰)	ブライ ン (‰)	ブライ ン ぬけ 氷 (‰)										
1988. 2. 26	10:50	30	270.56	269.56	0.99 ₆	36	☉	-3.5	2.2	32.23 ₄	14.23 ₆											
		40	270.56	269.65	0.99 ₇																	
		50	270.56	270.03	0.99 ₈																	
		60	270.56	270.24	0.99 ₉																	
		70	270.56	269.70	0.99 ₇																	
		80	270.56	269.62	0.99 ₇																	
		90	270.50	269.56	0.99 ₇																	
		100	720.56	270.05	0.99 ₈																	
		110	270.56	270.08	0.99 ₈																	
		120	270.61	269.87	0.99 ₇																	
		130	270.61	269.92	0.99 ₇																	
		2. 27	10:09	10	269.86								269.01	0.99 ₇	33	☉	-4.6	4.3	32.58 ₁	41.98 ₁	12.20 ₀	
				20	269.86								269.19	0.99 ₈								
30	269.96			269.37	0.99 ₈																	
40	270.00			269.44	0.99 ₈																	
50	269.94			269.61	0.99 ₉																	
60	269.86			269.60	0.99 ₉																	
70	269.91			269.84	1.00 ₀																	
80	269.96			269.64	0.99 ₉																	
90	269.86			269.45	0.99 ₈																	
100	269.86			269.61	0.99 ₉																	
110	269.96			269.32	0.99 ₈																	
120	269.96			269.47	0.99 ₈																	
130	269.96			269.56	0.99 ₉																	
140	269.86			269.44	0.99 ₈																	
150	269.86			269.54	0.99 ₉																	
160	269.86			270.30	1.00 ₂																	
170	269.86			271.40	1.00 ₆																	
2. 29	11:00	90	269.86	269.59	0.99 ₉		☉☼	-6.3	3.1	32.70 ₄	40.18 ₇	11.80 ₆	雪面 雪面 海水面									
		90	269.86	269.61	0.99 ₉																	
		90	271.66	271.00	0.99 ₉																	
3. 06	11:35	20	271.16	269.50	0.99 ₄	39	○	-4.8	2.8	32.61 ₇	11.86 ₂											
		30	271.16	269.68	0.99 ₅																	
		40	271.16	269.87	0.99 ₅																	
		50	271.21	270.18	0.99 ₆																	
		60	271.16	270.34	0.99 ₇																	
		70	271.16	270.40	0.99 ₇																	
		80	721.21	270.35	0.99 ₇																	
		90	271.20	270.70	0.99 ₈																	
		100	271.23	270.98	0.99 ₉																	
		110	271.26	270.83	0.99 ₈																	
		120	271.26	270.87	0.99 ₉																	
3. 07	13:17	90	270.96	270.30	0.99 ₈	37	☉	-1.1	3.9	31.37 ₁	9.91 ₈	1回目 2回目										
		90	270.96	270.00	0.99 ₆																	

が、角度が90°付近では、大体0.997から1.000である。温度測定精度が0.1°Cであることを考慮すると、小数点3桁目の議論は難しい。

赤外放射計で測定する輝度温度は、海氷の表面のほんの表皮の温度である。薄氷が成長し、氷厚が増加する時、氷の表面は変質する。例えば、河西、小野⁸⁾は、ブライン排水孔を通るブラインが上方へ移動することにより、薄氷表層1mmの塩分量が母海水の塩分量(約32‰)を上回り、最大42.4‰を示したと報告している。本研究では海氷の表の表層の塩分量の測定はないが、氷厚が2.2から5.1cmの時、海氷のブラインの平均塩分量は31.4から42‰であった(第1表)。海氷の表面は高塩分のブラインで覆われていた可能性は充分考えられるが、第1表の射出率は、氷厚の依存性を示しておらず、ほぼ一定した値であり、表面の塩分量に依存してないと考えられる。

また、第1表から、海水面の射出率は0.998と1.000であり、海氷が雪で覆われている時では、0.999であった。

2. 常呂港外の沿岸定着氷による測定結果

1988年2月28日、常呂港外の氷状は厚さ13~20cmの定着氷やそれらが2~3層重なった氷板、氷丘などで覆われていた。第2表に常呂港外の現場測定の結果を示す。現場氷上の輝度温度の測定では、放射計は手持ちで行ない、角度は90°に保った。

また第2表には、常呂港の平坦氷域から厚さ13cm、35cm×40cmの氷塊を切り取り、流氷研究施設の庭で、その表面状態を人為的に変えながら測定した結果も同時に示した。

氷厚14cmの常呂港外の定着氷上の観測では、海氷が雪で覆われている時の射出率は0.982であり、雪を取り除いた裸氷上で1.000であった。また氷丘の表面では0.997であり、表面状態を変えたことにより、射出率の値に若干の差が見られた。

第2表 沿岸定着氷の観測結果

年月日	時間	角度	真温度 (°C)	輝度 温度 (K)	射出率 ε	天候	気温 (°C)	氷厚 (cm)	海氷上 の積雪 (cm)	備	考
I. 常呂港外での観測											
1988. 2. 28	14:40	90	270.71	265.74	0.98 ₂	☉☔	-7.8	14.0	3~4		
		90	270.71	265.74	0.98 ₂					サーミスター温度計をかくおいたとき	
		90	269.61	265.74	0.98 ₆					積雪(3cm)を除いた裸氷上	
		90	271.32	271.78	1.00 ₁					さらに表面を1cm削り取る	
		90	269.06	268.39	0.99 ₇					乾いた氷丘の表面	
注) 塩分量(‰): 0.39 ₇ (表面1cmの雪), 3.06 ₈ (3~4cm全積雪層), 4.79 ₃ (積雪下約0.5cmの海水)											
II. 流氷研での観測(2.28の常呂港外の海氷)											
2. 29	16:00	90	267.91	265.25	0.99 ₀	☉☔	-6.0	13.0	0.7(新雪)		
		90	267.91	265.39	0.99 ₁						
		90	267.96	265.64	0.99 ₁					雪を取り除く	
		90	267.36	265.68	0.99 ₄					鉄鋸で表面を削る	
		90	267.13	265.96	0.99 ₆					かんなで削る(表面テカテカ)	
		90	267.13	265.97	0.99 ₆					氷を90度回してみる	

流氷研究施設の庭での観測では、氷厚 13 cm の定着氷上に 0.7 cm の新雪が積もった時の射出率は 0.990, 雪を取り除いた時には, 0.991 から 0.996 であり, 若干の差が見られた。

温度測定精度が 0.1°C という点を考慮すれば, 雪で覆われた定着氷の射出率は 0.98~0.99, 氷丘では 0.99~1.00 といえる。

IV. ま と め

北海道オホーツク海の紋別港内に、氷海プラットフォーム (特製の鉄製いかだ) を浮かべ、その中央部の海水面にできる薄氷の赤外線領域の射出率を求めた。また常呂港外定着氷についてもその射出率を測定した。

サーミスター温度計による真温度、赤外放射計 (波長 8~14 μm) による輝度温度をそれぞれ 0.1°C の精度で測定したが、この測定精度内では、新生氷 (氷厚 2~14 cm の平坦氷) の射出率は、①氷厚によらず、②太陽高度が 33° から 39° の時、海氷面に対する受光面の角度によらず、0.99~1.00 である。また、③2~3 cm の雪で覆われた氷丘氷の射出率は 0.98~0.99 で、その表面の雪を除いた裸氷、さらに、その表面を平滑に成形した場合は、0.99~1.00 であった。

今回の実験から、数 m 程度離れた高さから赤外放射計を用いて薄氷の表面温度を求めるためには、射出率 0.99~1.00 を用いればよいことが明らかとなった。これによって、結氷初期から薄氷表面の温度を観測することが可能となった。今後は赤外放射温度計による海氷面温度と氷上の気温、風速の変動を測定することによって、氷縁海域の熱輸送機構の研究を行なう計画である。

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職員の皆様、氷海プラットフォームの使用に際して御協力いただいた株式会社西村組、株式会社オホーツク設計の皆様にあわせて感謝の意を表します。

文 献

- 1) 世界気候にかかわる海水のモデル化のための基礎研究 1984 昭和 58 年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 B) 研究成果報告書 (課題番号 56460037, 代表者 小野延雄) 178 pp.
- 2) 青田昌秋・白澤邦男・大井正行・石川正雄・福士博樹 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.
- 3) 赤川正臣 1982 海水の観測. 気象研究ノート, **145**, 247-277.
- 4) Parkinson, C. L. Comiso, J. C., Zwally, H. J., Cavalieri, D. J., Gloerson, P. and Campbell, W. J. 1987 Arctic sea ice, 1973-1976: Satellite passive-microwave observations. NASA SP-489 NASA Scientific and Technical Information Branch, NASA, Washington, D. C. 296 pp.
- 5) Carsey, F. D. and Zwally, H. J. 1986 Remote sensing as a research tool. The Geophysics of Sea Ice (edited by N. Untersteiner), NATO ASI Series B: physics Vol. **146**, 1021-1098.
- 6) Hall, D. K. and Martinec, J. 1985 Remote Sensing of Ice and Snow. Chapman and Hall, N. Y. 189 pp.
- 7) Dozier, J. and Warren, S. G. 1982 Effect of viewing angle on the infrared brightness temperature of snow. Water Resources Res. **18**(5), 1424-1434.
- 8) 河西 孝・小野延雄 1984 薄い海氷中におけるブラインの上方移動に関する実験的研究. 低温科学, 物理篇, **43**, 149-155.

Summary

Emissivity of thin sea ice was calculated as a ratio of the brightness temperature to the physical temperature, both of which were obtained in the Mombetsu harbour and another off the Tokoro harbour, Hokkaido, in February and March, 1988 (Figure 1). The brightness temperature of the surface was measured by an infrared radiometer (Minarad Systems Inc., Model RST-10) with specifications: 8 to 14 microns in spectral bandpass, 2° in field-of-view, -50 to 50°C in ambient temperature limit and $\pm 0.05^\circ\text{C}$ in accuracy. Meanwhile, the physical temperature of the surface was measured by a thermister (Takara Co., Digimulti D611) with 0.1°C in resolution.

The infrared radiometer was calibrated in a range of ambient temperatures between -18 and 2°C in a dark cold room (Figure 2). Shown in Figure 3 is a correlation between the brightness temperature and the surface temperature which was measured by thermocouples with an accuracy of 0.05°C , and was defined as the true temperature. Values of the brightness temperature measured in situ were adjusted by an equation derived from a regression line in Figure 3 with the correlation coefficient of 0.999.

Shown in Table 1 is a summary of the emissivity as a function of the angle and the ice thickness, measured in a square platform with a base of $3.6\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ and a depth of 0.5 m , with a square hole ($2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.5\text{ m}$) in the center (Figure 4), floating in the Mombetsu harbour (Figure 1). The angle of the radiometer sensor is defined in Figure 5. The values of emissivity were 0.998 at angles near 90° for thin ice from 2.2 to 5.1 cm in thickness (Table 1). The emissivity was 0.999 for both open water and sea ice covered with a thin snow layer (Table 1).

Shown in Table 2 is a summary of the emissivity for various surface conditions, measured on a 14 cm thick flat landfast ice sheet near the Tokoro harbour (Figure 1). The values of emissivity were 0.982 and 0.986 for sea ice covered with a snow layer, 1.000 for bared ice and 0.997 for rafted ice. As for an experiment made on the ground of Sea Ice Research Laboratory, ice blocks were used, which were covered with new snow, after having been taken out of a landfast ice sheet in Tokoro (Table 2). The values of 0.990 were obtained for a 13 cm-thick landfast ice covered with new snow 0.7 cm deep and 0.991 to 0.996 for sea ice after the surface snow layer was artificially removed.