



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海氷の研究（第6報）：海氷の厚さの増加について
Author(s)	福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu; 楠, 宏 他
Citation	低温科学, 3, 171-186
Issue Date	1950-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17432
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_p171-186.pdf



海水の研究(第6報)

海水の厚さの増加について*

福富孝治, 楠 宏, 田畑忠司

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和 22 年 11 月受理)

I. 緒 言

河海の結氷の理論に関しては Stefan¹⁾, 藤原博士²⁾, 野満教授, 齋藤兩氏³⁾, 福富⁴⁾ 等の研究がある. 河川に於ては水温が常に上下均一に近うことはよく知られて居り, 村上氏⁵⁾ は松花江の水温が結氷期中常に零度になつてゐることを實測によつて確めてゐる. 海の場合でも沿岸結氷下の水深の浅い場合には水温が底まで殆んど結氷温度となつてゐることは筆者等⁶⁾ もこれを確めた. 深い海でも風波の強い寒海の表層數十米, 少くとも十數米は殆ど均一温度となつてゐる⁷⁾. 従つて結氷問題を考へる際に海水の温度は全部結氷點になつてゐると考へて先づ差支へない. 又海氷下の海水が過冷却してはゐないかと云ふ問題もあるが, 筆者等の觀測の結果では⁸⁾ 特別な場合(昭和 20 年結氷の最盛期の網走港附近に於て沿岸海氷下 1m 位の淡鹽分層中に於て 0.3°C 位の過冷却が觀測された)を除き過冷却の現象は見られなかつた.

従つて河川又は湖海に於て水温が結氷點になつてをり, 気温が結氷點下 T' 度で一定に保たれてゐる場合を考へる. 實際には勿論気温の變化はあるが, 冬季結氷開始期以後上昇臨界日までの平均気温を T' 度とすればそれで近似解は得られる筈である.

今第 1 圖に於て表面より下方に z 軸をとり, 水面に氷が張り出した瞬間を時間の原點とし, t 時間後に厚さが I となつてゐる場合に氷中で z の深さに於ける温度(結氷温度を基準として負の方向に測つたもの, T' に就いても同様)を θ とすれば, 氷の中の熱傳導の基本式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k}{\rho_i c'} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

で與へられる. 但し k は氷の熱傳導度, ρ_i 及び c' は氷の密度及び比熱である.

氷温 θ の境界條件として, 氷の表面では T' であり, 氷の下面では氷と水が接觸してゐるから水の結氷温度に等しい. 即ち時間 t の如何なる値に對しても次式が成立する.

$$\theta_{z=0} = T' \quad (2)$$

$$\theta_{z=I} = 0 \quad (3)$$

* 北海道大學低温科学研究所業績 第 59 號. 昭和 22 年 5 月 9 日 日本物理學會年會に於て發表.

次に氷の下面では上方に奪ひ去られる熱により融解潜熱 l に應ずるだけ氷が厚さを増すから

$$l\rho_i \frac{dI}{dt} = k \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=I} = k \frac{T'}{I} \quad (4)$$

なる関係がある。

Stefan¹⁾ は氷の中の温度の傾斜が一樣であると見なして (Malmgren の北氷洋に於ける観測によれば平均温度に就て氷厚 2m 位までは温度の傾斜は一樣であると見做し得ることが知られてゐる), (1) 式を近似的に解いて氷厚 I と積算寒度 $T't$ との間に次の関係のあることを明らかにした。

$$\text{第 1 近似式 : } I^2 = \frac{2k}{l\rho_i} T' \cdot t \quad (5)$$

$$\text{第 2 近似式 : } I^2 = \frac{\frac{2k}{l\rho_i}}{\left(1 + \frac{c'}{3} \frac{T'}{l}\right)} T' \cdot t \quad (6)$$

野満教授、齋藤兩氏²⁾ は (1) 式の厳密な解を求め

$$\theta = -T' \left\{ 1 - \frac{\phi\left(\frac{\alpha}{2\kappa} \cdot \frac{z}{I}\right)}{\phi\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right)} \right\} \quad (7)$$

$$I = \alpha \sqrt{t} \quad (8)$$

を得た。但し κ は氷の温度傳導率で $\kappa^2 = \frac{k}{\rho_i c'}$ である。又 α は

$$\left. \begin{aligned} \phi\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\alpha}{2\kappa}} e^{-\mu^2} d\mu \\ \phi_1\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right) &= \frac{d\phi}{d\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

とすれば

$$\frac{2l}{c'} \left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right) \frac{\phi\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right)}{\phi_1\left(\frac{\alpha}{2\kappa}\right)} = T' \quad (10)$$

から求められる値である。

而してこの場合も気温があまり低くなければ氷厚と積算寒度との近似的関係は (5) 又は (6) 式で表はされることは申す迄もない。

以上の問題は気温が一定の場合であるが、気温があまり低くなければ氷厚は

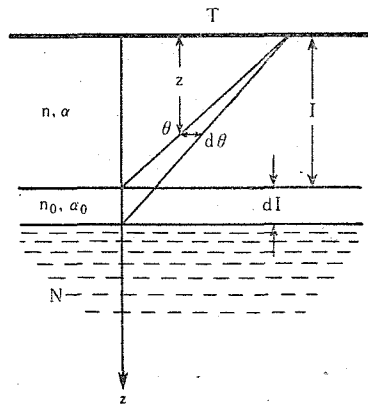
$$I^2 = \mu^2 \int_0^t T'(t) dt \quad (11)$$

で表はすことが出来る。μ は略し、常數であるから氷厚係數と呼ぶことにする。第 1 近似では $\mu^2 = \frac{2k}{l\rho_i}$ である。 $\int_0^t T'(t)dt$ はいはば積算寒度とも云ふべきものである。

筆者等は昭和 19 年 20 年, 21 年北海道オホツク海岸の網走, 紋別に於て沿岸海水の觀測を行つたが, この際氣温と海水の厚さの増加の關係についても研究を行つた。その結果海水に就いては (11) 式又は (5) 式をそのまま用ふることは問題であることがわかつたので, これらに補正を施した式を導入して氣温と氷厚の増加との間の定量的な關係をしらべた。この結果につき以下に報告して大方の御批評を乞ふ次第である。

II. 理論的考察

今第 1 圖に於て結氷の表面から鉛直下方に z 軸をとり, 結氷の表面から z の深さの氷温を θ, 氷の表面温度を T (θ 及び T は海水の結氷温度を 0 として負方向に測る) とする。又 L, ρ を夫々純水の融解の潜熱 (80 cal), 密度とし, α, α₀ を夫々 z の深さ及び結氷の下面の單位容積の海水中の純水の容積とする。最初氷厚が I であつたのが dI だけ厚さを増したために温度の傾斜が變り, z の深さに於て dθ だけ温度が下り, 最初 α であつた純氷部分が Brine 中から氷が晶出して dα だけ増したとする。このため dz の部分で放出されるべき熱量は ρLdα となる。この際氷及び Brine 自身を冷やすためにも多少の熱は放出されるが, これは融解潜熱の項に比較すれば極めて小であるから度外視する。故に z に就て 0 から I までの氷の層中で放出される總熱量は $\rho L \int_0^I (\alpha d) dz$ となる筈である。従つて海水の場合には氷結の基本式として (4) 式の代りに



第 1 圖

$$L\alpha_0\rho dI + \rho L \int_0^I (\alpha d) dz = k \left. \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=0} dt \doteq k \frac{T}{I} dt \quad (12)$$

が近似的に得られる。

此の式を解くために次の様な條件を導入する。

1) Stefan の場合と同様に氷中の温度分布は直線的であり, 氷の表面及び下面に於て夫々 (2) 及び (3) 式を満足するものとする。但し (2) 式の T' の代りに T とする。然し風速が相當に大であれば $T = T'$ として差支へない。

故に

$$\theta = T - \frac{T}{I} z \quad (13)$$

$$d\theta = \frac{T}{T^2} z dI \tag{14}$$

2) 海氷中の鹽分の分布は種々の型があり決して簡単ではないが、第 1 近似として垂直方向にも時間的にも一様であるを見做して考へを進めることとする。

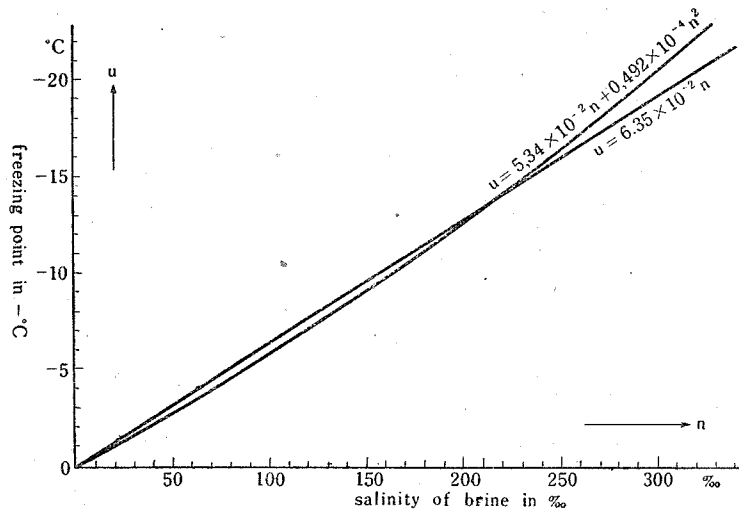
今 n, n_0 を夫々氷中で z の深さ及び氷の下底部の Brine 中の鹽分含量 (%), N 及び C を海水中の鹽分含量及び海氷中の平均鹽分含量 (%) とする。Brine の密度は氷の中層に於ても下底に於ても近似的には不変と見做しても差支へないからこれを ρ_0 とし、海氷の密度を ρ_i とすれば

$$(1-\alpha)\rho_0 n = (1-\alpha_0)\rho_0 n_0 = \rho_i C \tag{15}$$

又 $c \equiv \frac{\rho_i}{\rho_0} C$ と置けば c は常數である。

$$\text{故に } d\alpha = \frac{c}{n^2} dn \tag{16}$$

3) 次に氷中の Brine の鹽分濃度 n はその部分の氷温を結氷温度とする飽和の濃度にあると考へられる。海水の結氷温度 u と鹽分濃度 n との関係は⁹⁾ $-u = En + Fn^2$ ($E = 5.34 \times 10^{-2}$, $F = 0.492 \times 10^{-4}$) で表はされるが、温度が $0^\circ \sim -17^\circ\text{C}$ 位の範囲では



第 2 圖 Brine の濃度と結氷點の關係

第 2 圖に示す如く $-u = Bn$ (但し $B = 6.35 \times 10^{-2}$) と置いても概略の目的には差支へない。今 u を氷温と考へて、下の海水の鹽分濃度 N に對する結氷温度を基準として負方向に測る様に書き換へれば

$$\left. \begin{aligned} \theta &= A \left(\frac{n}{N} - 1 \right) \\ \text{但し } A &\equiv BN \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

となる。

$$\text{故に} \quad dn = \frac{N}{A} d\theta \quad (18)$$

(14) 式を (18) 式に代入すれば

$$dn = \frac{N}{A} \frac{T}{I^2} dI \cdot z \quad (19)$$

此の式と (17) 式を (16) 式に代入すれば

$$d\alpha = \frac{\frac{Ac}{NT} dI \cdot z}{(D-z)^2} \quad (20)$$

$$\text{但し} \quad D = I \left(1 + \frac{A}{T}\right)$$

$$\text{故に} \quad \int_0^I (d\alpha) dz = \frac{Ac}{NT} dI \int_0^I \frac{z}{(D-z)^2} dz = \frac{Ac}{NT} \left\{ \frac{T}{A} + \log_e \left(\frac{A}{T+A} \right) \right\} dI \quad (21)$$

故に (21) 式を (12) 式に代入すれば、氷結の基本式は次の式で近似的に與へられる。

$$\left[\rho\alpha_0 L + \rho L \frac{Ac}{NT} \left\{ \frac{T}{A} + \log_e \left(\frac{A}{T+A} \right) \right\} \right] dI = k \frac{T}{I} dt \quad (22)$$

$$\text{故に} \quad I^2 = \frac{2k}{\rho\alpha_0 L} \int_0^t \frac{T}{1 + \lambda \left\{ 1 + \frac{A}{T} \log_e \left(\frac{A/T}{1+A/T} \right) \right\}} dt \quad (23)$$

$$\text{此所に} \quad \lambda = \frac{c}{N\alpha_0} = \frac{\rho_i C}{\alpha_0 \rho_0 N} \quad (24)$$

である。

さて (23) 式の積分の分母は T の値が $2.2 \sim 15^\circ\text{C}$ の範圍の値に對して $N=35\%$ としても $(1+0.31\lambda)$ から $(1+0.70\lambda)$ の範圍の値を示す。又一般に λ は 0.3 以下の値であるから $\lambda \left\{ 1 + \frac{A}{T} \log_e \left(\frac{A/T}{1+A/T} \right) \right\}$ は 0.1 乃至 0.2 以下の値で補正項に相當するのである。従つて勿論嚴密な意味では不都合であるが、近似的に t が $0 \sim t$ の範圍での T の平均値 T_0 を用ひて分母の T を置きかへれば

$$I^2 = \frac{\frac{2k}{\rho\alpha_0 L}}{1 + \lambda \left\{ 1 + \frac{BN}{T_0} \log_e \left(\frac{BN/T_0}{1+BN/T_0} \right) \right\}} \int_0^t T dt \quad (25)$$

となつて (11) 式と全く同じ形の式となるのである。但し淡水の氷の場合には $\alpha_0=1$ であるから氷厚係數 μ が

$$\mu_1^2 = \frac{2k}{\rho L} \quad (26)$$

で表はされるに對し、海氷の氷厚係數 μ_2 は近似的に

$$\mu^2 = \frac{2k/\rho\alpha_0 L}{1 + \lambda \left\{ 1 + \frac{BN}{T_0} \log_e \left(\frac{BN/T_0}{1 + BN/T_0} \right) \right\}} \quad (27)$$

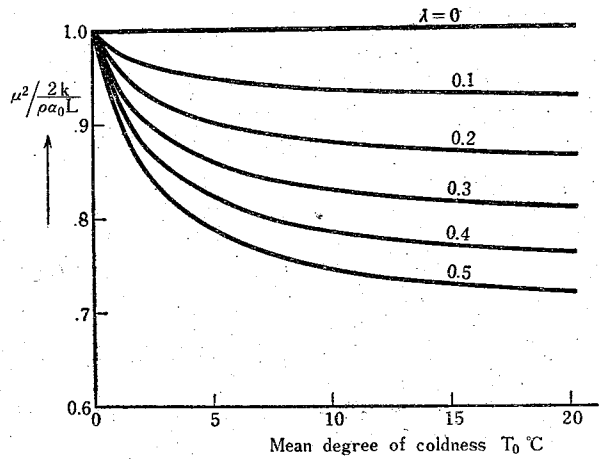
となるのである。即ち海水の氷厚係数は $\sqrt{\frac{2k}{\rho L}}$ から計算した値と比較して多少小さい値となるのである。此の関係を定量的に吟味するために、縦軸に $\mu^2/\frac{2k}{\rho\alpha_0 L}$ の値をとり、横軸に平均寒度 T_0 又は λ の値をとつて

両者の関係を (27) 式から計算して第 3 圖及び第 4 圖に示した。

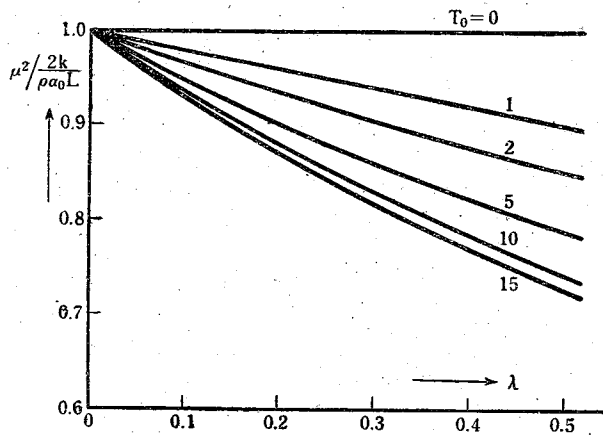
一般に海の結氷に於てはその中の鹽分が少いか多いかにより $\rho_i = 0.92 \sim 0.95$, $\rho_0 = 1.0 \sim 1.1$, $\alpha_0 = 1 \sim 0.63$ ($C > 3\%$ 即ち $N > 7\%$ 位では α_0 は一定で 0.63 位である) であり、 $\frac{C}{N}$ の値も α と氷の成長速度と氷の古さの函數で 0~1 の間に變化する筈であるが

實際に多く觀測される範圍では $\frac{C}{N} = 0 \sim 0.3$ である。従つて (24) 式から λ の値は $\lambda = 0 \sim 0.4$ (純氷では $\lambda = 0$ である) 位である。

第 3 圖又は第 4 圖から氣温が低い程、又 λ 即ち海水中の平均鹽分濃度 C の値が大きい程氷厚係數 μ は小となることが判る。



第 3 圖 λ = 一定の時の $\mu^2/\frac{2k}{\rho\alpha_0 L}$ と T_0 の關係

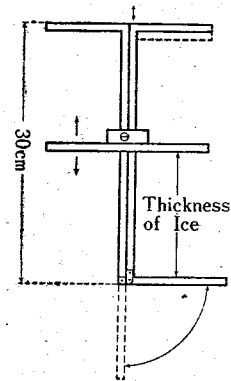


第 4 圖 T_0 = 一定の時の $\mu^2/\frac{2k}{\rho\alpha_0 L}$ と λ の關係

III. 氷厚増加の實測

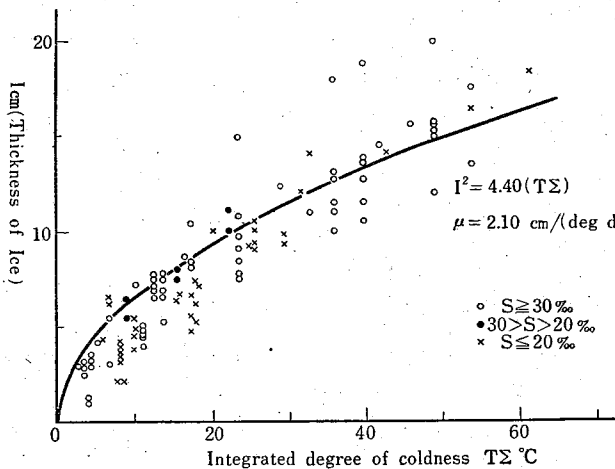
筆者等は昭和 19 年~21 年の 3 ケ年の冬北海道オホツク海沿岸の網走、紋別に於て沿岸海水の研究を行つたが、此の際日々の氷厚の増加を次の方法により測定した。第 1 の方法としては、結氷に 1m×1m 位の面積の穴を開けて新しく海面を露出し、その海面に新に生じた海水に就て毎日その穴の中心部の結氷に穿孔機で小さい穴をあけ、第 5 圖に示した様な鐵製

の氷厚測定器を挿入して氷厚を測定した。又第 2 の方法は海水の割目に新しく生じた結氷に就き毎日殆ど同じ場所の結氷を切り取つて直接その厚さを測定するのである。多少の降雪があつたり又風による積雪があつた場合には出来るだけ除雪を行つた。観測中積雪の多かつた場合にはその観測値は捨てたが、積雪が 2cm 以下の場合には採用した。従つて多少其の影響のあることは認めなければならない。斯様な方法で毎日數ヶ所宛氷厚を測定した。測定に際しては時々海水の資料及び下の海水を採水瓶にとり、持ち歸つてその鹽分含量を普通の海水分析の方法を用ひて測定した。海水上に於ては常に相當の風速があるので、結氷の表面温度は氣温と殆んど一致してゐるものと



第 5 圖 氷厚測定器

して、個々の場所で結氷の表面温度の變化を測定するかはりに氣温を測定してこれを以て代用した。即ち、當時の氣温は海水上に通風を良くし、日射を防ぐ様に自記寒暖計を設置しその記録を読みとつて用ひた。自記計は時々棒状標準寒暖計の讀取値と比較して檢定を行つたことは申す迄もない。氣温の讀取値から相次ぐ氷厚測定間の平均氣温を求め、これを海水の結氷温度を零とした値に換算し、これらの値からその結氷が始まつて以來の積算寒度 ΣT を計算した。その結果は第 1 表に示した。第 6 圖は縦軸に測定された氷厚 I をとり横軸にはそれに對應する積算寒度 ΣT をとつてその關係を圖示したものである。圖中の白丸は海水鹽分 $S \geq 30\text{‰}$ 、黒丸は $30 > S > 20\text{‰}$ 、 \times 印は $S \leq 20\text{‰}$ の場合である。



第 6 圖 氷厚と積算寒度との關係 (網走, 紋別)

根室測候所員により昭和 18 年及び 19 年に根室港内の結氷に就て氷厚を毎日測定せられた資料があるので、この資料と日平均氣温から ΣT を求め (第 2 表) 筆者等の測定の場合と

第1表 氷厚増加測定結果(網走, 紋別)(mは測定日数)

A 紋別 (Monbetsu)

	Station	Feb. 1946 (Date)									
		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
I cm μ	1	3.5 1.32	6.9 1.95	6.9 1.95	8.4 1.87	14.9 2.03	10.8 3.08	18.0 1.95	18.9 3.00	20.0 2.85	—
I μ	2	2.9 1.09	6.8 1.83	6.7 1.82	10.4 2.41	8.4 1.73	7.8 1.41	11.6 1.93	11.5 1.82	15.1 2.13	—
I μ	3	3.4 1.24	6.5 1.84	5.2 1.41	6.2 1.49	6.7 1.37	7.1 1.27	10.0 1.67	10.5 1.66	12.0 1.71	—
I μ	4	3.4 1.26	7.7 2.19	7.4 2.01	8.3 2.00	9.7 2.00	7.0 2.20	13.1 2.19	13.8 2.19	15.5 2.21	17.6 2.39
I μ	5	3.4 1.28	7.1 2.01	7.6 2.07	8.3 2.00	10.8 2.20	6.9 1.25	12.8 2.14	13.7 2.17	15.7 2.24	13.5 1.84
I μ	6	3.5 1.30	7.5 2.13	7.7 2.09	7.0 1.69	7.7 1.59	10.1 1.83	11.0 1.84	12.7 2.01	15.3 2.18	—
ΣT		7.03	12.41	13.54	17.19	23.45	30.55	35.93	39.74	49.04	54.10
$\Sigma T/m$		7.03	6.21	4.51	4.29	4.69	5.09	5.13	4.97	5.45	5.41
I μ $\Sigma T^{\circ}C$ (T/m) $^{\circ}C$	7	— —	4.1 1.76 5.38 5.38	5.4 2.12 6.51 3.26	7.2 2.26 10.16 3.34	8.6 2.12 16.40 4.10	7.6 1.56 23.52 4.70	12.4 2.31 28.9 4.81	11.0 1.92 32.71 4.67	14.5 2.24 42.01 5.25	15.6 2.30 46.07 5.11

B 紋別

	Station	Feb. 1946 (Date)			
		25	25	26	27
I μ	II ₁	—	2.6 1.41	—	4.2 1.26
I μ	II ₂	—	2.9 1.57	1.0 0.50	4.7 1.41
I μ	II ₃	—	2.7 1.46	1.0 0.50	4.5 1.35
I μ	II ₄	3.5 1.66	2.9 1.57	1.1 0.55	5.0 1.67
I μ	II ₅	3.5 1.61	2.9 1.57	1.1 0.55	5.0 1.67
I μ	II ₆	3.4 1.61	3.0 1.63	1.1 0.55	4.7 1.41
I μ	II ₇	3.0 1.42	2.8 1.52	—	4.1 1.23
I μ	II ₈	3.3 1.56	2.4 1.57	1.0 0.50	4.8 1.44
ΣT = $\Sigma T/m$		4.46	3.39	4.02	11.13

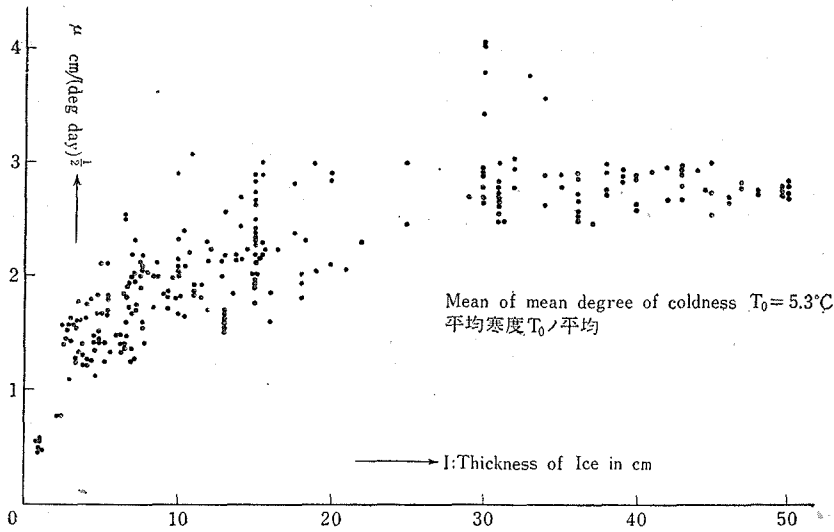
C 網走 (Abashiri)

	Station	(17~24th) Feb. 1944						
		17	18	19	20	22	23	24
I	1	3.8	5.2	9.2	9.8			
μ		1.21	1.24	1.84	1.81			
ΣT		9.8	17.8	25.4	29.3	—	—	—
$\Sigma T/m$		9.79	8.88	8.47	7.33			
I	2	5.3	7.3	10.5	12.1	14.1	16.4	18.3
μ		1.69	1.75	2.09	2.24	2.16	2.24	2.32
ΣT		9.9	17.7	25.3	29.1	42.6	53.7	61.6
$\Sigma T/m$		9.9	8.9	8.4	7.3	7.1	7.7	7.3
I	3	4.6	6.2	9.3	9.3			
μ		1.47	1.47	1.85	1.72			
ΣT		9.8	17.7	25.3	29.2	—	—	—
$\Sigma T/m$		9.8	8.9	8.4	7.3			
I	2'	2.2	6.4			12.0	14.0	17.8
μ		0.78	1.66			2.14	2.46	2.81
ΣT		7.86	15.4	—	—	31.5	32.4	40.3
$\Sigma T/m$		7.9	7.7			6.3	5.4	5.8
I	2''				3.5	3.5		
μ					1.79	1.33		
ΣT		—	—	—	3.9	17.2	—	—
$\Sigma T/m$					3.9	6.4		
I	12					4.1	4.7	
μ						1.26	1.13	
ΣT		—	—	—	—	10.6	17.2	—
$\Sigma T/m$						10.6	8.6	

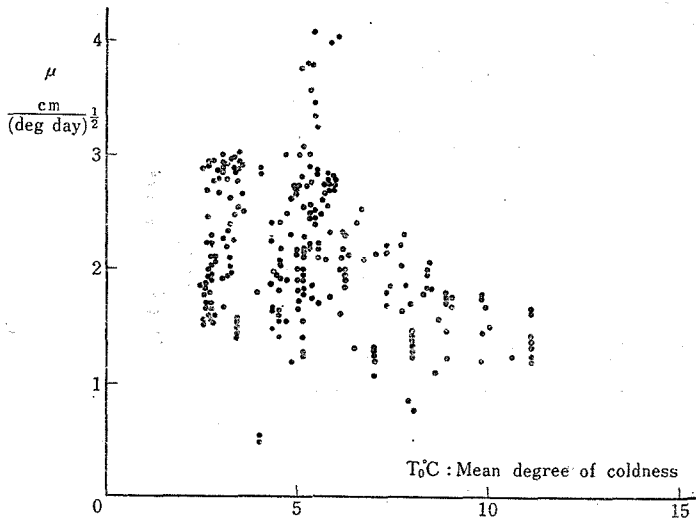
D 網走

Station		Feb. 1944			Station		Feb. 1944		
		17	18	19			17	18	19
4	I	5.3	6.6	9.3	8	I		2.2	6.8
	μ	1.69	1.58	1.86		μ		8.1	7.9
	ΣT	9.8	17.4	25.0		ΣT	—	8.1	15.6
	$\Sigma T/m$	9.8	8.7	8.3		$\Sigma T/m$		8.1	7.8
5	I	5.4	8.0	10.1	9	I			6.5
	μ	1.83	2.04	2.16		μ			2.54
	ΣT	8.7	15.4	21.9		ΣT	—	—	6.6
	$\Sigma T/m$	8.7	7.7	7.3		$\Sigma T/m$			6.6
6	I	5.4	7.5	11.1	10	I			6.5
	μ	1.81	1.89	1.88		μ			2.54
	ΣT	8.9	15.7	22.3		ΣT	—	—	6.6
	$\Sigma T/m$	8.9	7.8	7.4		$\Sigma T/m$			6.6
7	I	4.8	7.2	10.1	11	I			4.3
	μ	1.51	1.71	2.01		μ			1.79
	ΣT	10.0	17.9	25.2		ΣT	—	—	5.8
	$\Sigma T/m$	10.0	9.00	8.4		$\Sigma T/m$			5.8

厚係數とは可成り異なつた値を示し後者が大きい値を示すが、これは上に述べた氷厚の影響の外に網走、紋別の平均寒度 T_0 が根室の T_0 よりも低温であつたことにもよるのではないかと考へられる。これらの事實を確めるために、第 1 表、第 2 表の個々の値から $\mu = \frac{I}{\sqrt{\Sigma T}}$ により μ の値を計算し、この値を縦軸にとり、それに對應する氷厚 I 又は平均寒度 $T_0 = \frac{\Sigma T}{m}$ (m は測定日數) を横軸にとつて網走、紋別、根室の個々の値を一緒にして圖示して第 8 圖及び第 9 圖を得た。即ち第 8 圖から平均寒度 T_0 の平均が 5.3°C 位の場合氷厚係數 μ は



第 8 圖 氷厚係數 μ と氷厚 I との関係



第 9 圖 氷厚係數 μ と平均寒度 T_0 との関係

E (網走)(1944年観測)

	Station	Feb. 22.		Station	Feb. 22.		Station	Feb. 22.	
A	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	4.0 1.41 8.0		D	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	4.0 1.61 8.0	G	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	4.2 1.48 8.0
B	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	3.6 1.27 8.0		E	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	3.8 1.34 8.0	H	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	4.0 1.41 8.0
C	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	3.7 1.31 8.0		F	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	3.9 1.38 8.0	I	I μ $\Sigma T = \Sigma T/m$	4.0 1.41 8.0

第2表 氷厚増加測定結果(根室)

Date	1943			1944			Data	1943			1944		
	Icm	μ	$\Sigma T/m^{\circ}C$	Icm	μ	$\Sigma T/m^{\circ}C$		Icm	μ	$\Sigma T/m^{\circ}C$	Icm	μ	$\Sigma T/m^{\circ}C$
I-1	0	—	—	4	4.48	0.8	II-5	22	2.31	2.7	38	2.74	5.4
2	0	—	—	5	2.11	2.8	6	22	2.25	2.7	36	2.58	5.3
3	4	1.62	6.1	10	2.90	4.0	7	16	1.61	2.8	36	2.52	5.4
4	7	2.00	6.1	13	3.01	4.7	8	18	1.82	2.6	36	2.51	5.3
5	10	2.33	6.2	15	2.90	5.3	9	21	2.08	2.7	37	2.49	5.6
6	10	2.09	5.7	15	2.42	5.4	10	25	2.46	2.6	40	2.64	5.6
7	10	2.06	4.7	15	2.34	5.8	11	30	2.95	2.6	40	2.60	5.7
8	13	2.58	4.2	20	2.93	5.9	12	30	2.92	2.6	42	2.69	5.7
9	15	2.84	4.0	29	4.01	5.8	13	30	2.90	2.5	43	2.69	5.8
10	15	2.74	3.7	30	4.07	5.4	14	29	2.70	2.6	45	2.76	5.9
11	15	2.68	3.5	30	4.06	5.0	15	32	2.95	2.7	43	2.81	6.0
12	15	2.64	3.2	30	3.81	5.2	16	31	2.79	2.8	47	2.84	5.9
13	15	2.50	3.3	25	3.00	5.3	17	32	2.79	2.9	47	2.80	5.9
14	15	2.40	3.2	30	3.46	5.4	18	31	2.68	2.9	46	2.70	5.9
15	15	2.36	3.1	33	3.77	5.1	19	34	2.89	2.9	46	2.68	5.9
16	15	2.29	3.0	35	3.80	5.3	20	35	2.91	3.0	48	2.78	5.9
17	15	2.20	3.1	34	3.58	5.3	21	36	2.93	3.0	48	2.76	5.8
18	15	2.11	3.2	32	3.26	5.4	22	35	2.80	3.1	50	2.85	5.8
19	15	2.03	3.2	33	3.26	5.4	23	36	2.87	3.0	50	2.82	5.8
20	15	1.98	3.2	31	3.01	5.3	24	38	3.01	3.0	50	2.78	5.9
21	15	1.96	3.1	32	3.05	5.3	25	38	2.94	3.1	50	2.78	5.8
22	15	1.94	3.0	30	2.79	5.3	26	39	2.95	3.2	50	2.77	5.7
23	13	1.67	2.9	31	2.83	5.2	27	39	2.89	3.3	50	2.75	5.7
24	13	1.71	2.6	30	2.74	5.0	28	39	2.85	3.3	50	2.74	5.7
25	13	1.68	2.6	30	2.71	4.9	29	—	—	—	50	2.72	5.6
26	13	1.65	2.6	31	2.75	4.9	III-1	40	2.90	3.3			
27	13	1.61	2.6	31	2.69	4.9	2	40	2.89	3.3			
28	13	1.57	2.7	31	2.64	4.8	3	41	2.94	3.2			
29	13	1.57	2.5	31	2.56	5.1	4	42	2.97	3.3			
30	13	1.56	2.5	31	2.49	4.7	5	43	2.99	3.3			
31	15	1.78	2.4	32	2.50	5.3	6	43	2.95	3.4			
II-1	16	1.86	2.5	34	2.64	5.2	7	43	2.92	3.4			
2	18	2.02	2.6	36	2.74	5.2	8	45	3.03	3.4			
3	19	2.05	2.7	36	2.67	5.3	9	44	2.94	3.4			
4	20	2.11	2.7	38	2.76	5.4	10	42	2.77	3.4			

全く同様に氷厚と積算寒度との関係を圖示して第 7 圖を得た. 第 6 圖に於て I と ΣT の關係は海水鹽分 S によりさほど異なつた關係は見られないから全部を同一に取扱つて

$$I^2 = \mu^2 \Sigma T \quad (28)$$

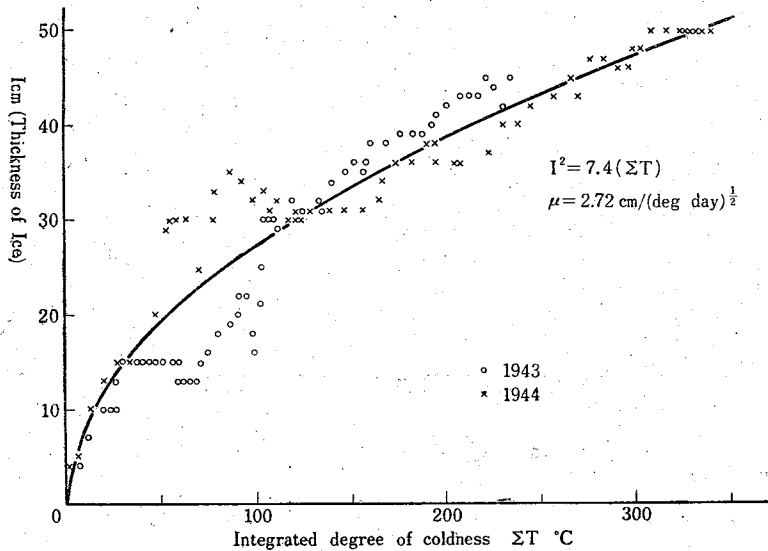
が成立つものと考へて μ^2 の値を求めた. その結果は第 6 圖中に實線で示した様に $\mu^2 = 4.40$ 即ち氷厚係數の平均として

$$\bar{\mu} = 2.10 \text{ cm}/(\text{deg day})^{1/2} \quad (\text{網走, 紋別港附近})$$

を得た. 但し平均寒度 T_0 の平均値 $\bar{T}_0 = 6.3^\circ\text{C}$, 海氷中の平均鹽分含量の平均値 $\bar{C} = 3.48\%$ であつた. 全く同様にして根室に對しては $\mu^2 = 7.4$ 即ち

$$\bar{\mu} = 2.72 \text{ cm}/(\text{deg day})^{1/2} \quad (\text{根室港内})$$

を得た. 但し $\bar{T}_0 = 4.2^\circ\text{C}$ で \bar{C} は觀測されてゐない.



第 7 圖 氷厚と積算寒度との關係(根室)

IV. 論 議

1) 實測の結果から求められた氷厚係數 μ の値として, 網走, 紋別では平均して $\bar{\mu} = 2.10$, 根室では平均して $\bar{\mu} = 2.72$ なる値が得られた. Stefan は諸探檢家により測定された北氷洋の海氷の厚さと月平均氣温から¹⁰⁾ 氷厚係數の値を求め, その平均として $\mu = 3.18$ なる値を得てゐる. 斯様に場所により氷厚係數が可成り異なる理由につき論議して見ようと思ふ.

第 6 圖, 第 7 圖を見れば氣付くことであるが, 共通して氷厚 I の小さい所では ΣT の値が實線で示した平均の μ の値に對する計算値よりも大きい, 換言すれば I の小なる所では μ の値が平均値より小さいといふ事實がある. 又上に得た網走, 紋別の氷厚係數と根室の氷

氷厚が 5cm 位であれば $\mu=1.5$ 位の値であるが、氷厚が 30~35cm 位に増大すれば $\mu=2.8$ 位に増加し、次第に一定値に近づくことが判る。北氷洋では氷厚が 2m にも達することがあるのであるから $\mu=3.18$ 位の値になるのもうなづけるのである。筆者等の観測結果¹¹⁾によれば、氷厚が増加すると氷の生長速度が小となつて海氷の最下層の鹽分含量は減少し、又結氷が古くなると即ち氷厚が増加すると次第に氷中の鹽分が脱落して、従つて平均鹽分含量 C が減少することが判つてゐる。従つて (24) 式に於て C の値が小になると λ の値も小になるから (27) 式又は第 4 圖から知られる様に μ の値が大となる筈である。即ち第 8 圖の μ と I との関係は氷厚係数が (24) 式に示される様に λ 即ち $\frac{C}{N}$ と密接な関係をもつことを示すものと思はれるのである。網走・紋別の場合には氷厚の測定を行つた場所で同時に氷中の鹽分含量 C 並に下の海水の鹽分含量 N を測定したものがあるので (第 3 表)、縦軸に氷厚係数を

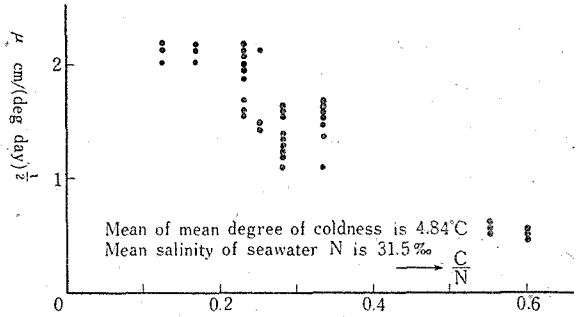
第 3 表 氷厚係数 μ と C/N の關係

I cm	1.0	1.1	3.0	3.3	5.6	8.0	13.0	14.5
$C\%$	10.56	9.70	5.94	4.97	4.45	3.96	2.14	2.98
$N\%$	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.10	17.10	17.62
$\frac{C}{N}$	0.603	0.554	0.339	0.284	0.254	0.231	0.125	0.168
μ	0.50 0.50 0.50	0.55 0.55 0.55	1.57 1.57 1.63 1.57 1.52 1.42 1.09	1.66 1.61 1.61 1.56 1.32 1.30 1.28 1.26 1.24	2.12 1.49 1.49	2.19 2.13 2.09 2.07 2.00 2.00 1.87 1.73 1.59 1.56	2.19 2.14 2.01	2.24 2.13 2.03
mean μ	0.50	0.55	1.48	1.43	1.70	1.92	2.11	2.13

とり、横軸に $\frac{C}{N}$ をとつて其の値を黒點で記入すれば第 10 圖が得られる。即ち $\frac{C}{N}$ の値が増せば μ の値が減少することが明らかに見られ、上に述べた如く (27) 式の関係が定性的には正しいことが判るのである。又第 9 圖に於ては氷厚の影響が加はつてゐるのでその関係はあまり明らかではないが、平均寒度 T_0 が増すと μ の値は減少する傾向があり、これも (27) 式又は第 3 圖の關係が近似的に正しいことを示してゐる。

2) 純氷の熱傳導度は C.G.S 單位では $0.0055(-10^\circ\text{C}$ に對し)¹²⁾ で密度 $\rho=0.917$, 融解の潜熱 $L=79.9$ cal であるからこれを (26) 式に代入して純氷の氷厚係数を計算して見ると $\mu=3.60\text{cm}/(\text{deg day})^{\frac{1}{2}}$ となる。天然の淡水氷の氷厚係數に就ては村上氏¹³⁾ が滿洲松花江

の結氷の厚さの毎日観測を行つてその結果から $\mu=2.7\sim 2.1$, 平均として $\mu=2.32$ cm/deg day)^{1/2} を得てゐる. 又侯徳封氏及吉村博士によつて集められた北支及び蒙疆地方の河川の凍結の資料¹⁴⁾から氷厚係数の平均を求めて見ると $\mu=2.14$ が得られる. 即ち天然の淡水氷の氷厚係数は蒸溜水の氷厚係数と比較して可成り小なる値を示すが, これは結氷上の積雪の影響や氷の中に気泡を含むためと思はれる.



第 10 圖 氷厚係数 μ と C/N との関係 (海水の平均鹽分 $N=31.5\%$)

筆者等が紋別の氷池 (冷凍用水採取のための人工池) に於て観察¹⁵⁾した淡水氷の中には明らかに層状に気泡の存在を認められた. 海水でも氷丘として空中に曝されたものの中には気泡が認められるが, 結氷の中には殆ど気泡は認められない. 従つて海の結氷の氷厚係数が淡水氷の氷厚係数より大なる値を持つ場合のあることも了解出来る. 勿論蒸溜水の氷の氷厚係数より小なる値を示すことは (27) 式から判る通りであつて, 實際にも確かにこの問題は満足せられてゐる.

V. 結 語

淡水の結氷の厚さ I の増加の問題に關しては従來 $I^2 = \mu^2 \int_0^t T dt$ (μ : 氷厚係数, $\int_0^t T dt$: 積算寒度) なる式が近似的に成立つことが知られてゐる. 但し $\mu^2 = \frac{2k}{L\rho}$ (k : 熱傳導率, L : 融解の潜熱, ρ : 密度) である. 然し海水の場合には純水の場合に比較して一般に氷厚係数が小さい値を示し, 近似的には

$$\mu^2 = \frac{2k/\rho\alpha_0 L}{1 + \lambda \left\{ 1 + \frac{BN}{T_0} \log_e \left(\frac{BN/T_0}{1 + BN/T_0} \right) \right\}}$$

α_0 : 海水下層部の單位容積中の純氷比, $B=6.35 \times 10^{-2}$, T_0 : μ を求めた期間の平均寒度, $\lambda = \frac{\rho_i C}{\alpha_0 \rho_b N}$, ρ_i : 海水の密度, ρ_b : Brine の密度, C : 海水の平均鹽分含量 ‰, N : 氷の下の海水の鹽分含量 ‰)

で表はさるべきことを指摘した.

又北海道オホーツク海岸の網走, 紋別の沿岸海水に就て氷厚の實測を行つてそれと根室の結果から, 氷厚係数の平均として $\bar{\mu}=2.10$ cm/(deg day)^{1/2} (網走, 紋別), $\bar{\mu}=2.72$ (根室) を得た. 又實測の結果から氷中の平均鹽分含量の多いか少いか (換言すれば同じ場所では氷厚が小であるか大であるか), 又は平均寒度が大きい小さいかにより夫々氷厚係数が小となつ

たり大となつたりすることを確め、上の關係式が近似的に正しいことを示した。

終りに臨み、現地觀測に際しては筆者等と同行された當時の函館海洋氣象臺長中野猿人博士、吉田敬一、長島富雄の兩理學士、齋藤光郎、吉田英三、櫻井常吉の3君、松浦艶子、富田靜の兩嬢の協力と現地の方々の援助に負ふ所が少なくない。又根室測候所による氷厚測定資料並に日平均氣溫の資料は當時の札幌管區氣象臺長佃十吉博士、八鍬利助博士の御好意により見せて戴いた。又研究に要した費用の一部は文部省科學研究費、日本學術振興會研究費及び服部報公會研究費によつた。此所に記して厚く感謝の意を表する次第である。

文 獻

- 1) Stefan, J. 1890. Ueber die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien A., 98, 965
- 2) Fujiwara, S. 1910. Note on the problem of ice formation. Bull. Cent. Meteor. Observ. Japan., 3, 9.
- 3) 野滿隆治, 齋藤泰一 1942. 河海結氷の理論. 地球物理, 6, 110.
- 4) 福富孝治, 1948. 海氷の研究(第3報) 沿岸海氷生成に就いての理論的考察. 低温科學, 3, 132.
福富孝治, 楠宏 1950. 海氷の研究(第7報) 氣溫の週期的變化に伴ふ氷層中の溫度分布; 同誌 3, 185.
- 5) 村上政嗣 1941. 松花江の凍結. 雪氷, 3, 333.
- 6) 7) 8) 福富孝治, 楠宏, 田畑忠司 1948. 海氷の研究(第8報) 網走紋別に於ける沿岸海水下の海水の溫度鹽分に就いて. 低温科學, 3, 193.
- 9) 福富孝治, 吉田敬一 1944. 凍結により海水鹽分を濃縮する實驗. 低温科學, 1, 133.
- 10) Stefan, J. 1890. 1)と同じ.
- 11) 福富孝治, 楠宏, 田畑忠司, 網走紋別に於ける沿岸結氷の鹽素量に就いて 1947年5月9日 日本物理學會年會にて發表. 低温科學 6, 發表豫定.
- 12) Arzybyschew u. Parfianowitsch による(Landoltの表記載).
- 13) 村上政嗣, 1941. 前出3).
- 14) 吉村信吉, 1941. 北支に於ける河川湖沼の結氷狀態. 東亞研究所報告. 候德封, 1937. 黄河誌(第一篇).
- 15) 福富孝治, 1948. 海氷の研究(第10報) 陸水の氷厚增加率と氣溫の週期的變化との關係. 低温科學, 4, 37.

Takaharu FUKUTOMI, Kou KUSUNOKI and Tadashi TABATA; Study of Sea-Ice (The 6th Report). On the Increase of the Thickness of Sea-Ice.

Résumé

By the studies of Prof. Stefan and Prof. Nomitsu, the relational equation

$$I^2 = \mu^2 \int_0^t T dt \quad (1)$$

was obtained between the thickness of pure-ice I and the integrated degree of coldness $\int_0^t T dt$, where $\mu = \frac{2k}{L\rho}$ the ice-thickness-factor, k the heat conductivity of ice, ρ the density, L the latent heat.

In the case of sea-ice, the formation of ice occurs not only in the lower surface, but in the middle layer of the ice. In the equation (1) the latter effect is not considered, then the writers obtained approximately the following equation considering the above mentioned both effects.

$$I^2 = \frac{2k\rho\alpha_0 L}{1 + \lambda \left\{ 1 + \frac{BN}{T_0} \log_e \left(\frac{BN/T_0}{1 + BN/T_0} \right) \right\}} \int_0^t T dt \quad (2)$$

where α_0 the pure-ice ratio in the unit volume of the lowest layer of sea-ice.

$B = 6.35 \times 10^{-2}$, T_0 the mean degree of coldness, N the salinity of sea water,

$\lambda = \frac{\rho_i C}{\alpha_0 \rho_b N}$, ρ_i the density of sea-ice, ρ_b the density of brine, C the mean salinity content in the sea-ice.

From the results of measurement of thickness of the coastal land-ice of Abashiri and Monbetsu in 1944—1946, the writers get the mean ice-thickness-factor $\bar{\mu} = 2.10$ cm/(deg day)^{1/2}. And also from the results of observation at Nemuro by the Nemuro Meteorological Observatory in 1943 1944, we get $\bar{\mu} = 2.72$.

From the results of measurement, we discussed the relation between the values of μ , C/N , the mean degree of coldness T_0 , and recognized that the above-mentioned formula (2) is approximately correct.