



Title	海氷の消散係数について
Author(s)	青田, 昌秋; AOTA, Masaaki; 石川, 正雄 他
Citation	低温科学. 物理篇, 40, 127-135
Issue Date	1982-03-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18443">https://hdl.handle.net/2115/18443</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	40_p127-135.pdf



## 海水の消散係数について<sup>\*,\*\*</sup>

青田昌秋・石川正雄

(低温科学研究所)

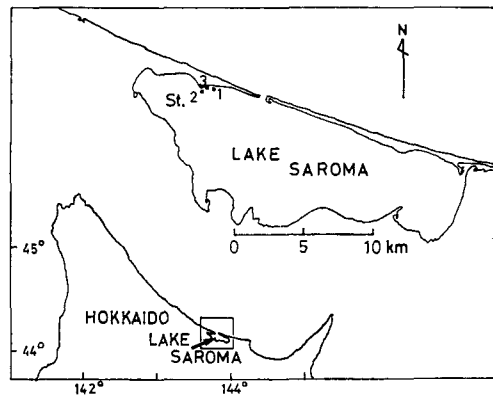
(昭和56年10月受理)

### I. ま え が き

北海道沿岸の流氷中にも藻類などの微小生物が生息し、そのために形成される着色層が存在することがよく知られている<sup>1)</sup>。また流氷付近にはこれら微小藻類を直接、間接に利用する小動物の群集があり、さらにこれらを捕食する魚類が存在する。流氷の生成は海洋の生産力に如何なる影響を及ぼしているのであろうか。

海洋の生産は植物性プランクトンによる光合成を通じて行なわれ、太陽からの放射エネルギーに依存しているといえる。この太陽エネルギーのうち可視部領域の光(400~700 nm)が植物性プランクトンの光合成に関係する。海氷域の海洋生産力を考察するためには、海氷の生成、成長によって、海氷下の日射量が如何に変化するかを知ることが必要である。

近年、いくつかの海氷の光学的研究の報告がなされている<sup>2)</sup>。しかしこれらは主として極域の海氷についてであり、比較的薄くかつ積雪量の占める割合の大きいオホーツク海の海氷域での研究はなされていない。筆者らは1979~81年、国立極地研究所との共同研究——海氷中に生息する藻類をとりまく環境条件の測定——の一環として可視部領域の光に対する海氷の消散係数の測定を行なった。測定はオホーツク海と通じているさろま湖で行なった。測定中度々の豪雪のため充分な観測は果せなかったが得られた観測結果を報告する。



第1図 観測地点

測定1, 3は港外、測定2は港内である

### II. 測定方法

さろま湖の水は外海のオホーツク海と通じており潮流によって外海水との交換が行なわれるためその塩分量は約31‰で冬のオホーツク海水の表層水のそれに近い値である。従ってさろま湖の湖水の物理的性質はオホーツク海南西域の流氷のそれとほぼ等しいとみなし得る。こ

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2392号

\*\* 北海道大学低温科学研究所 流氷研究施設研究報告 第96号

の湖の氷は大きな流動を受けないため水平方向構造の変化は小さい。しかし鉛直(成長)方向の構造の相違は著しく異なる。すなわち湖水の成長と同時に降雪がありそれに湖水が浸透して雪氷が形成される。

### 1. 平均消散係数の算出

氷野に到達した太陽放射エネルギーは氷野の表面で一部反射され、残りは氷板内部で散乱、吸収によって減衰しながら氷の底面に達する。いま氷野の表面へ達した日射量を  $\Phi_0$ 、アルベドを  $r$ 、氷板底面での日射量を  $\Phi$ 、全氷厚を  $D$  とすると、この氷板全体の平均消散係数  $\bar{a}$  は

$$\Phi = \Phi_0(1-r) \cdot e^{-\bar{a} \cdot D} \quad (1)$$

によって定義される。すなわち(1)式から平均消散係数  $\bar{a}$  は

$$\bar{a} = \frac{1}{D} \cdot \ln \frac{\Phi_0(1-r)}{\Phi} \quad (2)$$

となる。

### 2. 各構造毎の消散係数の算出

さきに述べたように氷板の結晶構造は均一ではなく、かつその構造は時期、海域によっても異なっている。氷下に達する日射量を推定するには各構造毎の消散係数を知ることが必要である。いま光学的性質が均一とみなせる氷層で(1)式が成り立ち、かつアルベド  $r$  が一定とすると、この層の消散係数  $\alpha$  は(3)式で表わされる。

$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{\phi'_1/\phi_1}{\phi'_2/\phi_2} \quad (3)$$

ここで  $\phi_1$ ,  $\phi'_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi'_2$  はそれぞれ氷板の厚さが  $d_1$  および  $d_2$  のときの入射および透過のエネルギーである。すなわち光学的に均一な氷板で厚さの異なる2組の入射光と透過光のエネルギーが得られれば消散係数  $\alpha$  は(3)式によって求められる。

## III. 観測結果

### 1) 1979年の観測結果

#### a) 氷野の結晶構造による消散係数の違い

1979年3月10日第1図に示すさるま湖北西部のトエトコ(測定1)で観測を行なった。湖水の全氷厚は約45cmで底面から24.5cmが短冊状の結晶構造で、底面から24.5~39.5cmが雪氷、その上が海水の浸透の少ない積雪であった。

この氷野から一辺約60cmの四角形の氷板を切り出し、短冊状の結晶構造をなす部分(以下海水と呼ぶ)(厚さ約24cm)と雪氷部分(厚さ15cm)に分離し、その各々の氷板を水面に浮べて氷板表面への入射光と氷板を透過した日射量を測定した。次に表面の状態を同じに保ったまま、底面から数cmずつ厚さを減じながら入射および透過する日射量を測定した。また表面の積雪については水の浸透をさけるため木枠の上に積雪板を乗せて測定した。用いた測定器は離合社製水中照度計(2501-A)であるが、英弘精機ネオ日射計(MS-4型)との比較、較正によって日射量に換算して計算した。波長は400~700nmの可視部領域である。なお測定時の天候

第1表 氷野の結晶構造別の消散係数

	1979年3月3日 時刻	太陽高度 (度)	厚さ (cm)	日射量 (cal·cm <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )		
				氷上	氷中	
海氷	10:20	37	23.8	0.91	0.042	
	11:19	38	19.8	0.96	0.050	
	11:59	39	15.9	0.97	0.060	
	12:39	39	12.3	0.94	0.067	
	13:00	38	8.7	0.82	0.072	
雪氷	14:24	30	11.0	0.44	0.021	
	14:46	29	5.0	0.46	0.037	
積雪	14:55	26	13.5	0.54	0.0012	
	15:01	25	8.0	0.50	0.0027	
	厚さ (cm)	12.3	15.9	19.8	23.8	
海氷	8.7	0.059	0.049	0.047	0.043	消散係数 (cm <sup>-1</sup> )
	12.3	—	0.038	0.042	0.038	
	15.9	—	—	0.045	0.038	
	19.8	—	—	—	0.031	
雪氷	5.0	0.092	消散係数			
	11.0					
積雪	8.0	0.16	(cm <sup>-1</sup> )			
	13.5					

は快晴、太陽高度は南中時をはさむ 25~39° であった。

(1) 式から明らかなように分離する氷板の数によって  $\frac{1}{2}n(n-1)$  組の値が得られる。第1表に各測定値と結晶構造別の消散係数を示した。海水についてはすべての組合せから得られる消散係数を記した。

#### b) 太陽高度による平均消散係数の変化

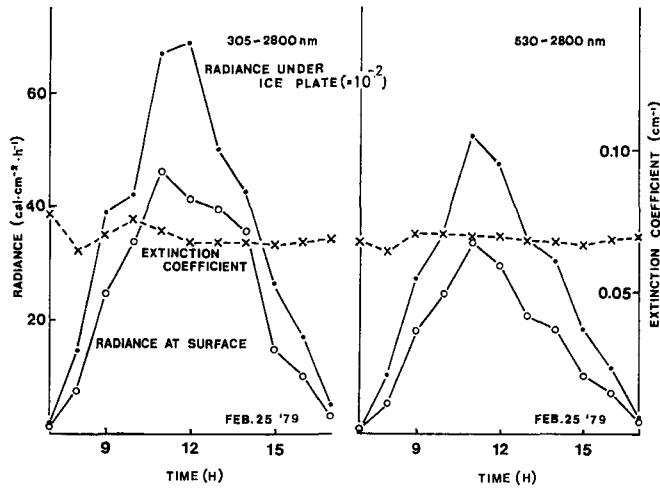
2月25、26日第1図に示したトエトコ港外の測点2において前記共同研究者の一人星合<sup>1)</sup>は水中氷下の生物環境条件研究のため氷上および氷下の日射量の連続測定を行なった。ここではその結果を用いて(2)式によって平均消散係数を算出した。

2月25、26日の測定周辺の氷状は全氷厚約40cmでそのうち約24.5cmが海氷、13.5cmが雪氷、表面1~2cmが2月23日に降った積雪で覆われていた。

用いた測器は英弘精機製波長別日射計 SM-800 (波長域 305~2800 nm および 530~2800 nm) である。計器の破損のため 695~2800 nm の長波長域の測定はできなかった。

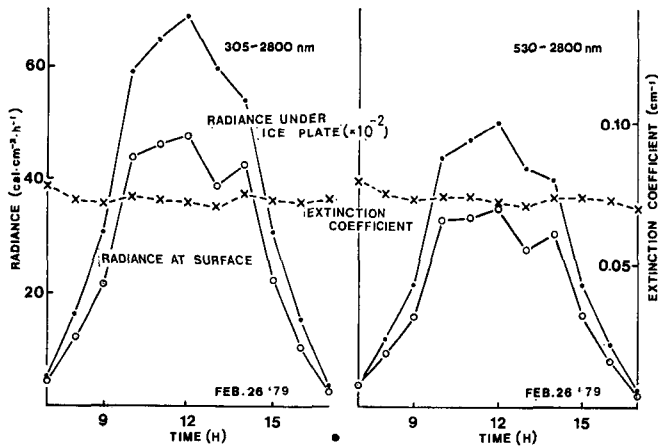
水中用日射計は測点から充分離れた場所に穴を開け、受光部を細ひもでつるして水中に入れ、氷板に細い鋸目を入れて測点へ導き、氷の底面下20cmの水中に設置した。

また25、26日の両日も午前10時、12時および午後2時頃、測定周辺で同社製示差輻射



第2図 太陽高度による平均消散係数の変化 (1979年2月25日)

白丸は氷上, 黒丸は氷の底面下の日射量, ×印は平均消散係数を示す



第3図 太陽高度による平均消散係数の変化 (1979年2月26日)

白丸は氷上, 黒丸は氷の底面下の日射量, ×印は平均消散係数を示す

計 (CN-1) (波長域 300~2800 nm) によってアルベドの測定を行なった。さらに測点近くの開水面で水中日射計の深度を変えながら日射量の変化を調べ、水による光の吸収係数を求めた。アルベドは安定しており75%内外であり、水による光の吸収係数は約  $0.008 \text{ cm}^{-1}$  であった。以下に示す消散係数の算出にはこれらの値を用いた。

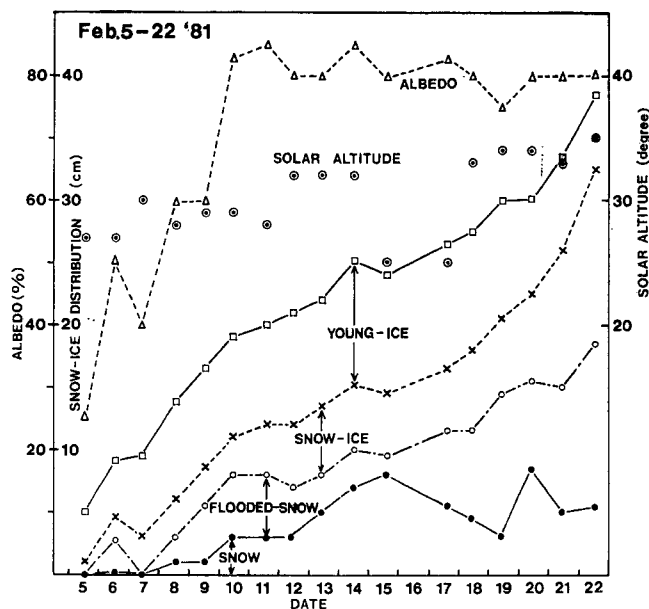
第2, 3図には2月25, 26日の日の出から日没までの波長別の氷上, 氷下の日射量および(2)式によって求めた平均消散係数の変化を示した。なお(2)式による平均消散係数の算出に当たっては、後に述べる理由によって、両波長領域とも同じアルベドを用いた。

2) 1981年の観測結果

1981年2月4日さろま湖トエトコ港内(第1図測点3)の水野に4×4mの四角形の開水面

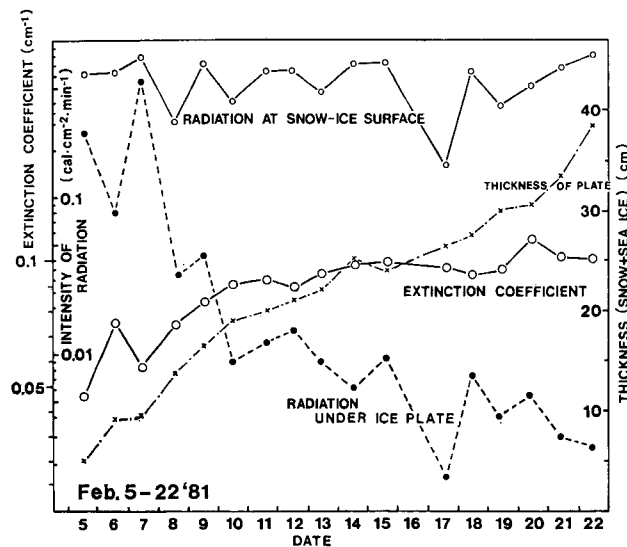
を作り、氷上と水面直下に前記の波長別日射計 (305~2800, 530~2800, 695~2800 nm)、水面上 50 cm に示差輻射計およびネオ日射計を設置した。これによって氷の生成、成長、氷状の変化にともなう氷上および氷下の日射量、アルベドの連続観測を行なった。測定期間は 1981 年 2 月 4 日~22 日の 18 日間で、毎日 1 回南中時頃に氷厚、結晶構造の観測を行なった。

a) 氷厚の増大、変質による消散係数の変化



第 4 図 測点 2 の結晶構造の変化 (1981 年 2 月 5~22 日)

氷状観察時の海水、雪氷、濡れ雪、積雪の分布、アルベドおよび太陽高度を示す



第 5 図 平均消散係数の変化 (1981 年 2 月 5~22;日)

第 4 図で示した氷状観察時の氷上、氷下の日射量、全氷厚および平均消散係数の変化を示す

第4図に氷状(全氷厚, 海氷, 雪氷, 積雪等の割合), アルベド, 氷状観察時の太陽高度を示す。

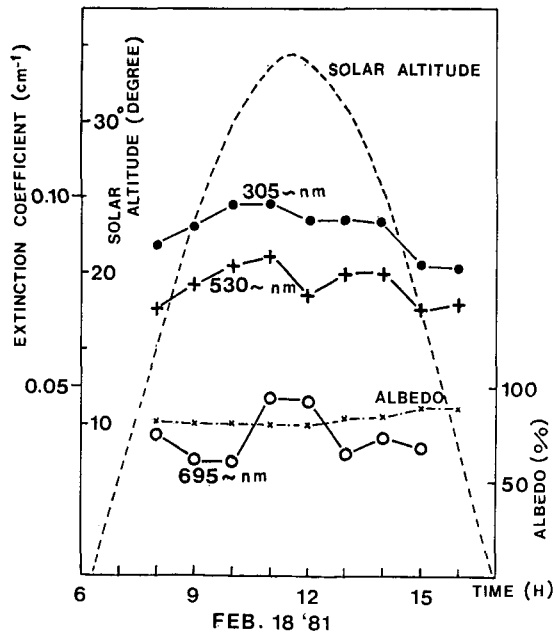
また第5図には氷状観察時の氷上, 氷下の日射量(波長域 305~2800 nm) および(2)式によって求めた平均消散係数を示す。

**b) 平均消散係数の波長特性および太陽高度との関係**

1979年の観測2)では計器の破損のため, 波長域による平均消散係数の相違については充

第2表 波長別の平均消散係数の変動

1981年 2月 18日	太陽高度 (度分)	アルベド (%)	日射量 (cal·cm <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )						波長別平均消散係数 (cm <sup>-1</sup> )		
			λ: 305~2800 nm		λ: 530~2800 nm		λ: 695~2800 nm		波長 (nm)		
			氷上	水中 (×10 <sup>-3</sup> )	氷上	水中 (×10 <sup>-3</sup> )	氷上	水中 (×10 <sup>-3</sup> )	305~ 2800	530~ 2800	695~ 2800
時刻 (時)											
8	15°25'	81	0.26	3.4	0.15	3.0	0.040	2.0	0.087	0.071	0.037
9	23°34'	80	0.44	5.2	0.26	4.6	0.052	3.2	0.092	0.077	0.031
10	29°48'	80	0.53	5.3	0.32	4.9	0.050	3.2	0.098	0.082	0.030
11	33°25'	80	0.75	7.4	0.44	6.4	0.062	2.5	0.098	0.084	0.047
12	33°51'	85	0.76	7.4	0.44	6.3	0.076	2.4	0.099	0.074	0.046
13	31°03'	83	0.66	6.2	0.39	5.4	0.070	3.6	0.094	0.079	0.032
14	25°27'	84	0.48	4.3	0.28	3.7	0.060	2.5	0.093	0.080	0.037
15	17°44'	89	0.28	2.4	0.17	2.1	0.044	1.4	0.082	0.070	0.034
16	8°36'	89	0.11	1.0	0.07	0.8	0.036	—	0.081	0.072	—



第6図 波長別の平均消散係数の変化(1981年2月18日)

それぞれ黒丸は 305~2800 nm, +印は 530~2800 nm, 白丸は 695~2800 nm の光に対する平均消散係数, 点線は太陽高度を示す

分な比較をなし得なかった。ここでは再び平均消散係数の波長特性および太陽高度との関係を知るため、降雪の無かった2月18日を選び、日の出から日没までの1時間毎の日射量、アルベドおよび(2)式から得られる平均消散係数を求めた。波長領域についてはさきに記したように305~2800, 530~2800, 695~2800 nmの3波長領域である。

この日(2月18日)の氷状は第4図に示すように全氷厚は27.5 cmで、その内海水部分が9.5, 雪氷6.5, 濡れ雪7.0, 浸透水の少ない積雪が4.5 cmである。測定結果を第2表に記した。また、第6図にはアルベド、太陽高度および各波長別の平均消散係数を示した。なお波長別の消散係数の算出に当っては各波長別のアルベドの相違を考慮しなければならないが、これまでの研究で、この波長域でのアルベドの差は小さい。この理由によりここでは305~2800 nm領域の値をもって各波長域のアルベドとした。

#### IV. まとめと考察

##### 1) 太陽放射エネルギーに対する氷野の消散係数

###### a) 氷野の結晶構造による消散係数の違い

結晶構造による可視部領域の消散係数の違いについては1979年の観測1)の結果第1表に示した。

###### 海氷

海水部分の消散係数は第1表から $0.03\sim 0.06\text{ cm}^{-1}$ である。この値は(2)式によって得たものであり、この氷板内では光学的性質が均一という仮定に立っている。第1表にみられるように氷厚の組合せによって値のばらつきがみられる。これは均質とみなした海水板が実際には層(深さ方向)によって不均質であることを示している。しかし平均的には海水部分の消散係数は $0.04\sim 0.05\text{ cm}^{-1}$ とみなし得るであろう。

###### 雪氷および積雪層

雪氷および積雪に関しては各2層しか測定し得なかった。雪氷層の消散係数は $0.09\text{ cm}^{-1}$ で海水部分の約2倍、氷野の表面を覆っている積雪層の消散係数は $0.16\text{ cm}^{-1}$ で海水部分の約3倍と大きな値を示している。

###### b) 氷野の平均消散係数について

氷野の平均消散係数については第2, 3図(1979年の観測結果)および第5図(1981年の観測結果)に示した。1979年2月25, 26日の結果では平均消散係数は約 $0.07\text{ cm}^{-1}$ である。一方1981年の結果第5図では氷厚の増大に従って平均消散係数が変化していく過程をみることができる。結氷開始から数日以内の2月5~7日の平均消散係数は $0.02\sim 0.04\text{ cm}^{-1}$ である。これは先の海氷のそれとほぼ一致している。これ以後雪氷および積雪の割合が増大するに従って平均消散係数は次第に増大し $0.09\text{ cm}^{-1}$ 台に達している。また降雪の著しかった2月20日には一時的に $0.11\text{ cm}^{-1}$ を示しているが1日後にはほぼ $0.1\text{ cm}^{-1}$ に戻っている。これは降雪による自重の増加による氷板の沈下、潮汐による海水の浸透で新雪層が濡れ雪、雪氷へと安定していくためと考えられる。1979年と81年の平均消散係数は $0.07$ および $0.09\sim 0.1\text{ cm}^{-1}$ で $0.02\sim 0.03\text{ cm}^{-1}$ の差がある。これは前者が港外で比較的海水部分の占める割合が大きかったためである。

すなわち 1979 年港外の測点 2 の氷状は海水部分 61.3%, 雪氷 33.8%, 積雪 3.8% であるが, 一方 1981 年の測点 3 の氷状を平均消散係数が約  $0.09 \text{ cm}^{-1}$  で安定している 1981 年 2 月 18 日の例でみると海水部分 34.5%, 雪氷 23.6%, 濡れ雪 25.4%, 積雪 16.4% である。

#### c) 太陽高度と平均消散係数の関係

第 2, 3 図に 1979 年 2 月 25, 26 日, 第 6, 8 図に 1981 年 2 月 18 日の日の出から日没 (太陽高度  $0 \sim 35^\circ$ ) までの平均消散係数の変化を示した。

1979 年 2 月 25, 26 日の結果では両波長領域とも平均消散係数はほぼ一定で太陽高度による差は認められない。一方, 1981 年 2 月 18 日の結果は平均消散係数は多少変動しているが, 太陽高度との有意な関係は認められない。すなわち, この沿岸のように雪氷, 積雪の占める割合の大きい氷野での平均消散係数は太陽高度によらずほぼ一定と考えられる。

#### 4. 平均消散係数の波長特性

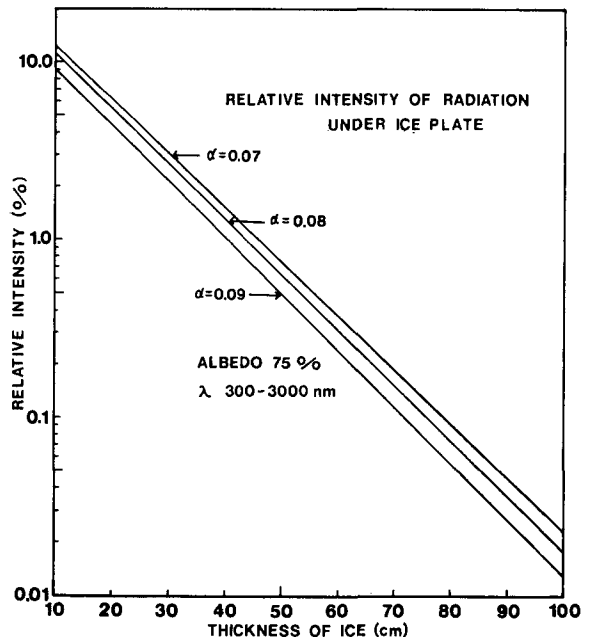
1979 年の観測では計器の破損のため  $305 \sim 2800$ ,  $530 \sim 2800 \text{ nm}$  の 2 波長域の比較しかできなかった。この 2 つの波長域では消散係数の差はほとんど認められない。1981 年 2 月 18 日の観測結果の第 6 図では  $305 \sim 2800$ ,  $530 \sim 2800$ ,  $695 \sim 2800 \text{ nm}$  の 3 波長域の平均消散係数の日変化を示す。これによると  $305 \sim 2800 \text{ nm}$  の波長領域の方が  $530 \sim 2800 \text{ nm}$  の波長領域の消散係数より多少大きな傾向を示し,  $695 \sim 2800 \text{ nm}$  の波長領域の平均消散係数は前の値の約  $1/2$  となっている。これは北極における Grenfell, Maykut<sup>2)</sup> の測定結果と逆の傾向を示している。これは筆者等の測定の不備に起因するか否かは不明である。

#### d) 流水の下の相対日射量

以上の観測によってこの沿岸の流水野の可視部領域の光に対する消散係数は  $0.07 \sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$  であることがわかった。流水下の微小植物性生物の環境条件として流水下の日射量の推算が必要である。ここでは, さきに得られた流水の平均消散係数を用いて, 地上の日射量から氷下の日射量を求めるための計算図表を第 7 図に示す。なおアルベドは 75% として計算した。

### V. あとがき

オホーツク海の海洋生産力は流水の存在と大きな関わりをもつものと考えられる。ここでは, 流水下の植物性プランクトンの光合成に関する可視領域の太陽光に対する流水の消散係数について報



第 7 図 流水下の日射量の推定図

平均消散係数が  $0.07 \sim 0.09 \text{ cm}^{-1}$  の氷野の下に達する相対日射量 (%), ただしアルベドは 75% とした

告した。

この研究は極地研究所，星合孝男教授との共同研究——海氷中に生息する藻類をとりまく環境条件の測定——の一環として行なったものである。研究費用の一部は同研究所，所外共同研究費用によった。

また現場測定においては湧別漁協および同漁協，三浦定志氏，幾島武夫氏に多大の御協力を得た。ここに合せてお礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) 星合孝男 1979 海水と生物群. 沿岸海洋研究ノート, **17**, 25-32.
- 2) Thomas, C. Grenfell and Gary A. Maykut 1977 The optical properties of ice and snow in the arctic basin. *J. Glaciol.*, **80**, 445-463.

#### Summary

Solar radiation transmission through an ice-field is source of the energy used by photosynthetic organisms in the underlying layers of the ocean. In this paper we deal with the optical properties of sea ice of the Okhotsk Sea.

Measurements were made of solar radiation transmission on sea ice in lake Saroma, which is connected with the Okhotsk Sea, in February-March 1979, and February 1981 (Fig. 1). Extinction coefficients in a visible region (300-700 nm) were determined for shore ice, snow-ice (granular) and a snow cover in 1979.

To calculate the coefficient from irradiances at the upper surface and beneath the ice plate, we drew on the Bouguer-Lambert law, which assumes that irradiance decreases exponentially through a homogeneous material. The obtained extinction coefficient is summarized in Table 1.

Type of ice	Extinction coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ )
Sea-Ice	0.04-0.05
Snow-Ice (granular)	0.09
Snow Cover	0.16

Dependence of bulk extinction coefficient on the solar elevation was studied on a snow-covered ice field in 1979 and 1981. The result shows that the coefficient remained nearly constant independently of the solar elevation (Figs. 3, 6).

Variations in bulk extinction coefficient with changes in thickness and structure of the ice plate were observed (Figs. 4, 5).

We may conclude within the limits of these observations that the bulk extinction coefficient of snow-covered ice in this region ranges from 0.07 to 0.1  $\text{cm}^{-1}$  (300-2800 nm).