



Title	氷の固着現象の研究 I : 氷球と氷板の間の付着力の測定
Author(s)	山田, 知充; YAMADA, Tomomi; 大浦, 浩文 他
Citation	低温科学. 物理篇, 27, 31-39
Issue Date	1970-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18099
Type	departmental bulletin paper
File Information	27_p31-39.pdf



氷の固着現象の研究 I*

— 氷球と氷板の間の付着力の測定 —

山田知充・大浦浩文**

(低温科学研究所)

(昭和44年8月受理)

I. 緒言

氷の粒子を互いに接触させておくと 0°C 以下の温度でも接触部は容易に固着し、時間と共に固着面積は増大してゆく。この現象を氷の固着現象と云う。氷の固着現象は積雪の変態や地吹雪の時の飛雪粒子の挙動に重要な役割を果す物理現象である。氷の固着現象に関しては黒岩¹⁾や Jellinek²⁾ の総合報告からわかるように多くの研究がなされているが、まだその本質は明らかでない。我々は比較的短時間(数秒~数十秒)の固着現象を調べるため 0°C 以下で氷球の大きさを色々変えて氷の平らな板に軽く接触させ、固着させてから、その固着面を引きはなすに要する力(付着力)を測定した。この場合固着面積を直接測定することは困難であったから、付着力を測定することによって氷同士の固着の度合を知ろうとしたのである。

これまで氷の付着力の測定は中谷と松本³⁾及び Jensen⁴⁾らによって行なわれた。彼らは細い糸に吊り下げた2つの氷球をできるだけ力を加えないで接触させた後、糸の上端を水平方向に引張り、氷球を引き離すときに必要な力を付着力と定義した。このような付着力の測定法では、2つの氷球を引きはなす直前に氷球は付着したまま互いに逆方向に回転するという現象が起る。この現象は 0°C 以下の温度でも氷の表面に Liquid-like Layer (水様膜と呼ぶことにする)が存在するという有力な証拠になっているが、付着力の測定という立場から云えば回転など起さないで単純な引張りによって氷球を引きはなす方が望ましい。そこで我々の実験では氷球を鉛直に懸垂し、これに平らな氷の板を接触させて固着させてから、氷板を鉛直にある時間かけて引き下げることによって、付着力を測定した。こうすれば、氷球が氷板から離れる直前に回転する恐れはない。

II. 実験装置と測定方法

Fig. 1は実験装置の模式図である。氷球は細い糸でテコの先に吊され、テコの他の端は力を測るためのストレインゲージにつながっている。氷球に接触させる平らな氷の板は、ネジ a を回すことによって鉛直に上下に移動できる台 b の上に載せてある。測定の主要部は氷で内張

* 北海道大学低温科学研究所業績 第982号

** 昭和44年3月11日死去

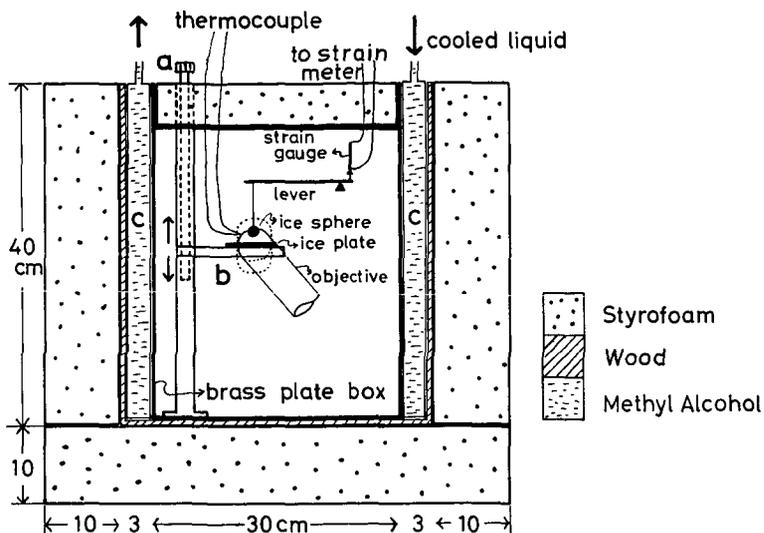
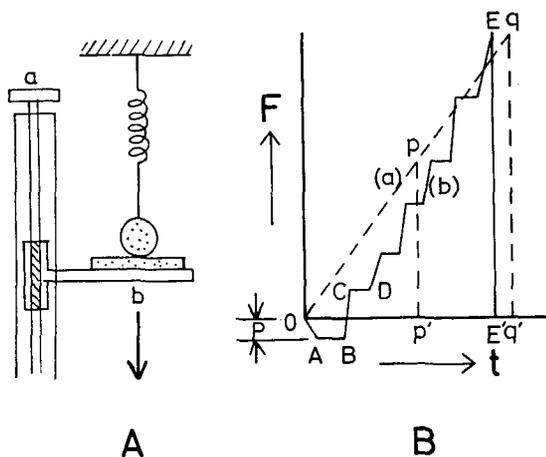


Fig. 1 Experimental apparatus

りした真鍮の箱の中におさめてある。このため実験は完全に氷で飽和した空気中で行なうことができた。温度は -5°C に固定し、一定温度に保つため真鍮製の箱の側面に接触させた銅板製のタンク c に、あらかじめ一定温度にしたメチルアルコールを循環させた。温度は試料のすぐ近くに取り付けた熱電対で測定した。冷媒のメチルアルコールの蒸気が装置内へ漏れ、試料表面を汚染することがないように厳重に注意した。

水平顕微鏡で氷球と氷板の接触部を箱の外から観察しつつネジ a を回して台 b を鉛直上方に移動させ、氷板を氷球にかかるく接触させる。接触を確認してからすぐに台 b を下方に下げ

始め、氷板を氷球から引離し始める。氷球は氷板に付着したまま下方に引張られ、接触させてからある時間経った後に、あるところまで下がって離れる。離れる瞬間の力(付着力)はテコに取り付けた非接着性ストレインゲージを通して記録計(ラピコダー、時定数 0.01 秒)に記録される。氷板を氷球に接触させ、それを引離す過程での力のかかり方を模式的に示したのが Fig.2 である。Fig.2 A でバネの部分にはストレインゲージを意味する。我々の用いたストレインゲージの特性は正確に直線的であったからストレインゲージの変位量は氷球と氷板の固着面にかかる力に正比例している。もし氷板を一定速度で下方に連続的に下げると、



Relationship between applied force and time

- A) A method of application of force
- B) a) Constant speed application
- b) Real application

Fig. 2

固着面にかかる力 F , (すなわちストレインゲージの変位) と時間 t との関係は第 2 図 B の点線 a で示すように直線的に上昇し, ある値に達して破断が起るであろう。従って氷板を一定速度で下げた時に測定される付着力はこの直線のどこかに乗っていることになる。例えば p に達して破断が起った時, 付着力は pp' であり, q に達して破断した時は qq' である。しかし我々の実験では連続的に一定速度で力かけるといことはできなかつた。氷球にかかる力を模式的に描くと b のように階段的になっている。氷板を下から氷球に接触させると氷球を持ち上げて記録計は逆方向に若干振れることになる。これを OA で示した。A から時間軸に下した垂線の長さ P は接触面にほぼ瞬間的にかかる氷球の重力よりは大きくない初期外力である。AB は接触させてからラピコダーのスイッチを入れて引離しにかかるまでの時間で 2~4 秒かかった。BC はネジ a を回し, 台 b を下方に下げて固着面に力を加える過程 (力の方向は固着面を引離す方向), CD はネジ a を持ち代えて次に回すまでに要した時間で, その間固着面にかかっている力は一定値にとどまる。以下同様にして固着面に加えてゆく力は階段状に増加してゆく。そしてある力 E に達した時, 固着面は破断する。その時の力 EE' をもって付着力とした。階段の傾きはネジを回す早さによって異なるが, なるべく一定速度で回すように努めたのでそう大きくは違わない。

氷球は次のようにして作った。写真用セメンダインを細く引延してよく乾燥させた合成樹脂の糸に蒸溜水を噴霧して小さな水滴を懸垂させ, それを凍らせた。糸の太さをいろいろ変えることによって半径 47μ から 1250μ の範囲の氷球を作ることができた。Fig. 3 にその一例を示す。

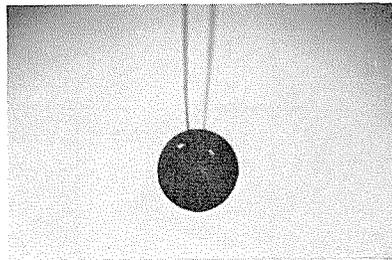


Fig. 3 An ice sphere used in the experiment

付着力の測定は同一氷球につき 3~9 回くり返して行なったが, これと接触させる氷板の接触面はそのつど新しい面を用いた。2 回目以後に付着力を測定する氷球の接触面は前回の測定で引離された後の破断面を使ったことになる。

III. 実験結果及び考察

実験結果を Table 1 に示す。表で a, b, c, ... は, 同一の氷球についてくり返した測定の順序を示す。氷の固着現象に関与する機構は, a) 圧力融解で生じた融解水の再凍結による固着, b) 氷を互いに接触させた時, 氷に狭まれた水様膜がより安定な氷の分子配列を取ることにによる固着, c) 焼結による固着面積の増大の 3 つが考えられる。したがって測定された付着力 F は最終固着面積 S を破断するに要する力であると考えられるから

$$F = \sigma S \quad (1)$$

である。 σ は氷の抗張力でその値はおよそ, $\sigma = 17.1 \times 10^6 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ である (International Critical Table)。この最終固着面積 S は先に述べた 3 つの固着現象の機構によって生じたもので $S = S_p + S_L + S_S$ である。

Table 1—1

試料	半徑 R (μ)	付着力 F (dyn)	初期外力 P (dyn)	接觸時間 t (sec)	最 終 固着面積 S ($\times 10^2 \mu^2$)	弾性歪 接觸面積 S_p (μ^2)	水様膜の 凍着面積 S_f (μ^2)	
1	a b c d e f g h i	47	319	} $\approx 0^*$	25	18.7	} ≈ 0	3.34
			92		12	5.38		
			100		10	5.85		
			38		9	2.22		
			22		8	1.29		
			9.5		5	0.556		
			21.5		8	1.26		
			24		8	1.40		
			20		7	1.17		
2	a b c d e f g	122	7	0.065	5	0.409	0.25	8.66
			5	$\approx 0^*$	5	0.292	≈ 0	
			9	0.033	6	0.526	0.16	
			2	0.033	4	0.117	0.16	
			6	0.033	5	0.351	0.16	
			4	0.065	4	0.234	0.25	
			12	0.065	6	0.702	0.25	
3	a b c d	125	12	0.065	7	0.702	0.25	8.88
			25	0.033	12	1.46	0.16	
			54	$\approx 0^*$	10	3.16	≈ 0	
			20	0.033	9	1.17	0.16	
4	a b c	166	96	0.065	11	5.61	0.30	11.8
			57	0.065	10	3.33	0.30	
			38	0.065	9	2.22	0.30	
5	a b c d e f g h i	169	10	$\approx 0^*$	4	0.585	≈ 0	12.0
			10	0.033	5	0.585	0.18	
			10	0.065	5	0.585	0.30	
			7	0.033	5	0.409	0.18	
			14	0.033	5	0.819	0.18	
			15	0.033	6	0.877	0.18	
			16	$\approx 0^*$	5	0.936	≈ 0	
			21	0.033	6	1.23	0.18	
			18	0.033	5	1.05	0.18	
6	a b c d e	250	82	0.098	9	4.80	0.51	17.8
			35	0.065	7	2.05	0.39	
			37	0.065	7	2.16	0.39	
			39	0.065	7	2.28	0.39	
			33	0.033	7	1.98	0.25	

Table 1—2

試料	半徑 R (μ)	付着力 F (dyn)	初期外力 P (dyn)	接触時間 t (sec)	最終固着面積 S ($\times 10^2 \mu^2$)	弾性歪 接触面積 S_P (μ^2)	水様膜の 凍着面積 S_L (μ^2)	
7	a	364	58	0.19	8	3.39	1.02	25.8
	b		39	0.26	7	2.28	1.26	
	c		51	0.75	7	2.98	2.54	
	d		16	0.78	5	0.936	2.61	
	e		32	0.98	4	1.87	3.04	
8	a	397	27	0.13	6	1.58	1.06	28.2
	b		49	0.13	8	2.87	1.06	
	c		206	0.19	14	12.0	1.08	
	d		10	0.13	7	0.585	0.84	
	e		372	0.065	18	21.8	0.53	
	f		300	$\approx 0^*$	16	17.5	≈ 0	
9	a	435	169	$\approx 0^*$	20	9.88	≈ 0	30.9
	b		396	0.16	25	23.2	1.02	
	c		141	2.66	13	8.25	6.70	
	d		65	0.33	13	3.80	1.66	
	e		454	0.59	26	26.5	2.44	
	f		91	$\approx 0^*$	8	5.32	≈ 0	
10	a	645	189	1.4	12	11.1	5.65	45.8
	b		374	1.04	18	21.9	4.62	
	c		378	7.5	17	22.1	17.3	
	d		359	1.4	20	21.0	5.65	
	e		360	1.5	19	21.1	5.91	
11	a	890	700	2.5	36	40.9	10.3	63.2
	b		420	2.0	23	24.6	8.9	
	c		700	10.0	28	40.9	26.0	
	d		280	1.2	19	16.4	6.3	
	e		200	1.2	13	11.7	6.3	
	f		210	$\approx 0^*$	13	12.3	≈ 0	
	g		530	0.5	25	31.0	3.5	
	h		250	0.5	15	14.6	3.5	
12	a	944	427	4	17	25.0	14.7	67.0
	b		235	13.5	11	13.7	32.7	
	c		240	1.85	19	14.0	7.1	
	d		444	3.5	15	26.0	13.4	
	e		368	0.58	21	21.5	4.1	
	f		442	0.78	21	25.8	4.9	

* ≈ 0 は $P < 0.033$ dyn を意味する。

Table 1—3

試料	半径 R (μ)	付着力 F (dyn)	初期外力 P (dyn)	接触時間 t (sec)	最終固着面積 S ($\times 10^2 \mu^2$)	弾性歪接触面積 S_P (μ^2)	水様膜の凍着面積 S_L (μ^2)	
13	a	1000	195	5.5	15	1140	18.9	71.0
	b		414	5.1	22	2420	17.9	
	c		380	2.8	21	2220	12.0	
	d		177	0.5	12	1040	3.9	
	e		297	3.4	17	1740	13.7	
	f		398	6.8	23	2330	21.7	
	g		394	2.2	—	2300	—	
14	a	1250	310	2.5	12	1810	12.9	88.8
	b		330	1.2	14	1930	7.9	
	c		195	3.2	9	1140	15.2	

Experimental results

R ; radius of ice sphere sample

F ; cohesive force between ice sphere and ice plate

P ; initial applied force

t ; contact time

S ; final contact area calculated by eq. (1)

S_P ; contact area produced by initial applied force

S_L ; frozen area of liquid-like layer calculated by eq. (2)

従って、 $F = \sigma S = \sigma S_P + \sigma S_L + \sigma S_S = F_P + F_L + F_S$ である。ここで S_P , F_P は圧力融解作用による固着面積と付着力, S_L , F_L は水様膜の凍結による固着面積と付着力, S_S , F_S は焼結による固着面積と付着力である。 S_P と S_L (又は F_P と F_L) は時間に関係しないが, S_S (又は F_S) は時間と共に増大する。この S , S_P , S_L は Table 1 に示してある。

まず我々の実験で最初に氷板を接触させた瞬間に圧力融解が生じたかどうかを検討する。 -5°C の水が圧力融解を起すに必要な圧力は 560 気圧 $\approx 6 \times 10^8 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ である (International Critical Table)。氷を完全弾性体と仮定すると、初期圧力 P で半径 R の氷球を氷板に接触させた時、氷球が弾性的に歪んでできる接触面積の半径 r は Hertz⁵⁾ によって

$$r = 1.1 \sqrt[3]{PR/E}$$

で与えられている。

初期圧力 P と氷のヤング率を $E = 5 \times 10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ として計算した弾性歪による接触面積 (圧力融解作用があればこの面積だけ固着すると考える) $S_P = \pi r^2$ (Table 1 からわかるように $S_P \ll S$) との比 P/S_P は氷球と氷板の接触部の単位面積あたりにかかった平均圧力であるが、その最大値といえども $10^7 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度でとうてい圧力融解を起すに十分な圧力でなかったことがわかる。氷に $10^5 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ より大きな圧力がかかると実際の氷は塑性変形してしまうことが実験的に知られている。だから瞬間的に S_P まで弾性変形した氷球は次いで塑性変形して接触面積が増大してゆくから、単位面積あたりの圧力は増々小さくなってゆく。このことから圧力融解はほとんど問題にならない。従って $S_P \approx 0$ であるから $S = S_L + S_S$ である。

次に水様模による固着面積を評価する。氷表面の水様模は連続的に氷の結晶格子に移行してゆくものであるが、結晶格子の乱れの激しい部分の厚さは温度が一定ならば一定の厚さを持っていると考えられる。このような一定の厚さの水様模を持つ氷球と氷板とを外圧を加えずに接触させると、その間隔が水様膜の厚さの2倍を越えない部分 (Fig. 4の斜線部分) の水様模は完全な氷の結晶配列をとり凍り付いてしまうと考えられる。なぜならば温度が一定なら水様膜はどの場所でも一定の厚さをとるべきだからである。ここでは近似的に完全な結晶構造を持つ氷の表面が一定の厚さの水様模で覆われていると仮定した。凍った部分の半径を x

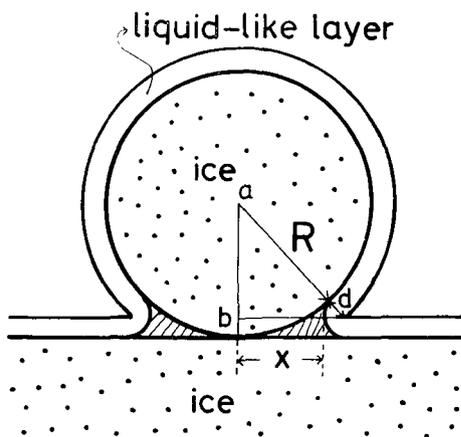


Fig. 4 Cohesion due to freezing of liquid-like layer. The shaded area indicates that the liquid-like layer froze immediately after the contact

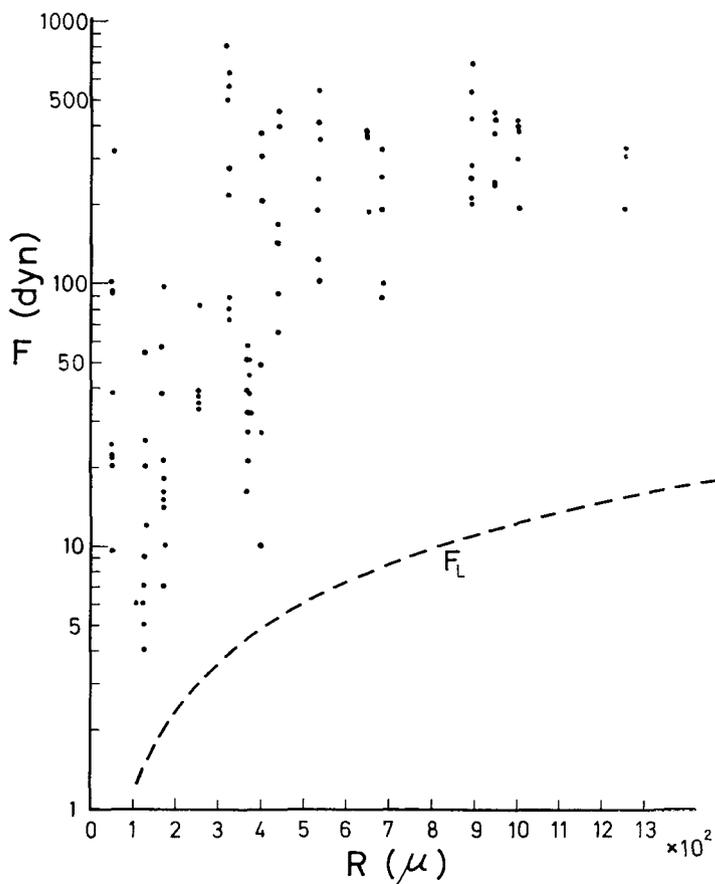


Fig. 5 Relationship between cohesive force F and radius of ice sphere R . Broken line indicates the cohesive force calculated by $F_L = \sigma S_L$ (σ ; tensile strength of ice = 17.1×10^6 dyn-cm⁻²). Note our experimental results are distributed above this broken line

とすると簡単な幾何学的計算から

$$(x+d)^2+(R-d)^2=(R+d)^2$$

より $x=2\sqrt{Rd}-d$ となり、凍結部分の面積 S_L は

$$\begin{aligned} S_L &= \pi x^2 \\ &= \pi \{4Rd - 4d\sqrt{Rd} + d^2\} \end{aligned}$$

ここで $R \gg d$ であるから

$$S_L \approx 4\pi R d \quad (2)$$

となる。一方 Fletcher⁶⁾ が熱力学的に求めた -5°C の氷表面の水様膜の厚さ d は $d \approx 57$ (Å) である。これを (2) 式に代入すると、 $S_L \approx 7.1 R \times 10^{-2} (\mu^2)$ となる。従って S_L は R の一次関数として増大する。

Fig. 5 の点線は $F_L = \sigma S_L$ を図示したものである。Table 1 の F と R の関係を示す点が全て F_L の点線より上に位置している。この実験値を示す点と F_L との差が有限な接触時間の間の焼結で接触面積が増大することによって生じる付着力 $F_s = \sigma S_s$ を示しているのである。接触時間が測定毎に違うため測定値は大きなバラつきを示すが、それにもかかわらず氷球が大きくなるにつれて付着力も大きくなってゆくという傾向がみられる。付着力の半径依存性は Fig. 5 からわかるように、破断時間を一定にしないと本来よくわからないし、焼結の時間依存性も氷球の半径と温度をパラメーターにとってある一定時間接触させておいてから、一気に固着面を破断するような方法で付着力を測定しないとわからない。我々は次の実験でこの点を明らかにする予定である。又、水様膜の凍結現象に関してはその可能性のある一つの凍着モデルを提案するに止めた。これも今後詳しく調べるつもりである。

終りに低温科学研究所の黒岩大助教授には論文の推敲に関して、若浜五郎助教授には実験方法や得られた結果の検討に関して多くの時間を割いていただきました。ここに厚く感謝の意を表します。また、実験装置の作成にあたっては低温科学研究所付属工場の皆様にお世話になりました。

文 献

- 1) 黒岩大助 1968 氷の表面の液状層と焼結 (積雪の変態に関するシンポジウム). 雪氷, **30**, 131-141.
- 2) Jellinek, H. H. G. 1967 Liquid-like (transition) layer on ice. *J. Colloid Sci.* **25**, 192-205.
- 3) Nakaya, U. and Matsumoto, A. 1954 Simple experiment showing the existence of "liquid water" film on the ice surface. *J. Colloid Sci.* **9**, No. 1, 41-49.
- 4) Jensen, D. C. 1956 On the Cohesion of Ice. Pennsylvania State University, M. S. Thesis, State College, Pennsylvania, 39 pp.
- 5) Timoshenko, S. and Goodier, J. N. 1951 Theory of Elasticity. 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 506 pp.
- 6) Fletcher, N. H. 1963 Surface structure of water and ice. *Phil. Mag.* **7**, 255-269.

Summary

When two ice spheres are brought into contact with each other, they freeze together at the contact point and ice bonds begin to grow with time at temperatures under the melting point of ice. In this case, the force required to separate the two ice spheres is called the cohesive force. The present authors measured the cohesive force as a function of the size of ice spheres.

This is necessary as a preliminary step to find a criterion concerned with the initiation of blowing snow or blizzard. Hitherto, the cohesive force between two ice spheres has been measured by several authors, but the attempts were unsuccessful in obtaining the normal cohesive force, that is to say the force required to separate ice spheres perpendicularly at the contact area, because they used the methods caused a mutual counter rotation before the separation took place. Though this rotation itself has been accepted as proof of the existence of liquid-like layer on the ice surface, the above workers could not obtain the normal cohesive force between the icespheres.

In our experimentation the following simple method was used. A small ice sphere was suspended from one end of a sensitive lever as shown in Fig. 1. A flat ice plate placed on a horizontal movable stage was carefully brought into contact with this ice sphere, and then the ice plate was moved downward until separation occurred. At the moment of separation, the normal cohesive force was successfully measured by a non-stick type strain gauge connected to the other end of the lever. The cohesive force was measured in the air saturated with respect to ice at -5°C , using ice spheres of a radius ranging from 47 to 1250 μ .

The experimental results are shown in Table 1 and Fig. 5. As seen in these figures, the observed values of cohesive force showed a wide dispersion, on the radius of ice spheres and contact time, but it may be seen that the cohesive force increased with increasing radius of ice spheres.

The cohesion between ice spheres may be explained by the following possible mechanisms; pressure melting and refreezing by initial applied pressure, freezing of "liquid-like layer" and ice-bond growth by sintering.

Among them, the pressure melting theory was not applicable for explaining our experimental results, because the initial applied force (Table 1) was too low to melt the ice at the contact area. The liquid-like layer theory seems to be applicable to explain the cohesion between the ice sphere and the plate at the moment of contact, but further growth of the contact area must be explained by the so-called sintering process.