3. 雪片の融解に関する実験

これまでに，雪片の融解の微物理的過程を観察した例は非常に少なく，雪片の表面で融解により生成した水の挙動，雪片の融解中の分裂の有無などは全くわかっていない。この章では，実験によって雪片の融解過程を調べた結果，およびその結果求められた雪片の融解速度の実験式について述べる。

3.1 実験方法

1979年1月29日の夕方から30日の早朝にかけて，東京に降雪があった。落下する雪片をビロードで覆った木板に受け，実験の試料とした。雪片の形態は立体的であり，表面は全く融けてはおらず，構成する結晶はほとんどが樹枝状結晶であった。

試料雪片を垂直風洞内に取り付けたナイロン網の上に置き，速度100 $cm \cdot sec^{-1}$，温度5.5 ℃の気流中で融解させた。使用した風洞と実験装置の概略を図7に示す。垂直風洞の高さは180 cm，風管

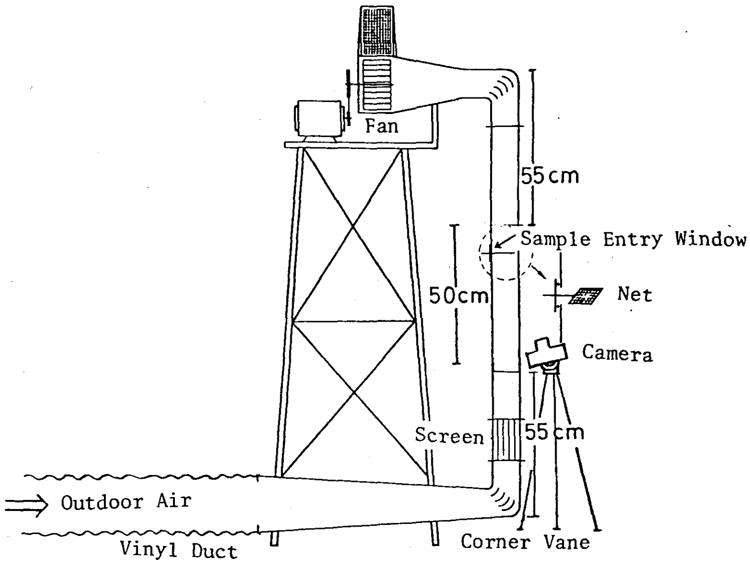

図7　Design of wind tunnel used to observe the melting of snowflakes.

の断面積は四角で15×15㎠である。ナイロン網は，直径100 μmの糸を4.2 ㎜の間隔に縦と横にはったものを使用している。外気を直径25㎝，長さ10 mのビニールダクトを通して風洞内へ導く。外気の気温と相対湿度は実験期間中あまり変動がなく，それぞれの平均値は0.3 ℃，94%であった。これから外気の水蒸気密度を求めてみると，$4.71 \times 10^{-6}\,gr \cdot cm^{-3}$ となり，0 ℃の水の飽和水蒸気密度 $4.85 \times 10^{-6}\,gr \cdot cm^{-3}$ にほぼ等しかった。

ビニールダクト中の外気は，暖かい室内に置かれたダクト内で，徐々に暖められ実験が行なわれ

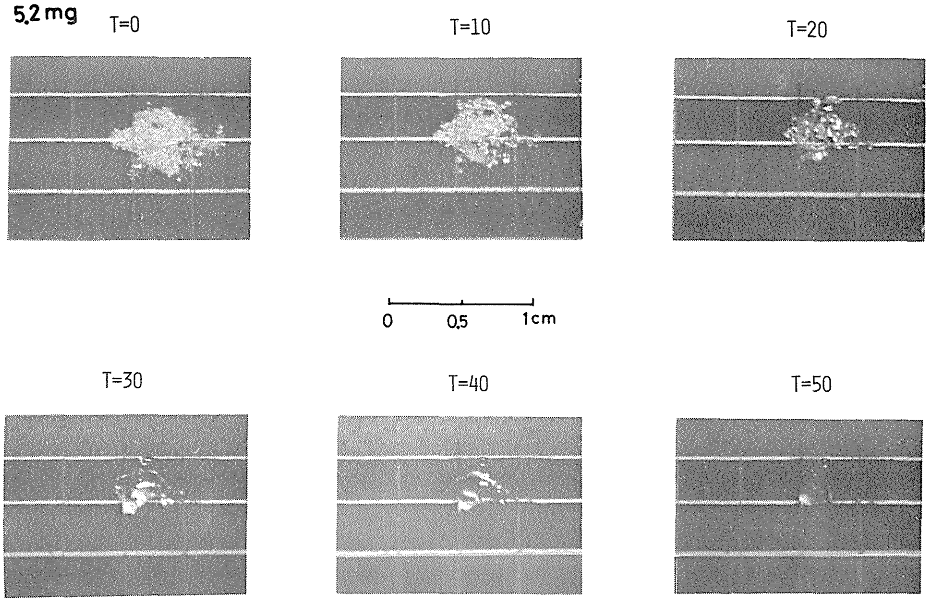

図8(a)　Photographs taken every ten seconds showing the shrinkage of snowflakes by melting. White horizontal and vertical lines are threads of a nylon net. Mass of the snowflakes is indicated in the upper left-hand corner. Experimental conditions of airstream are 5.5 ℃ in temperature and 100 cm sec^{-1} in air velocity.

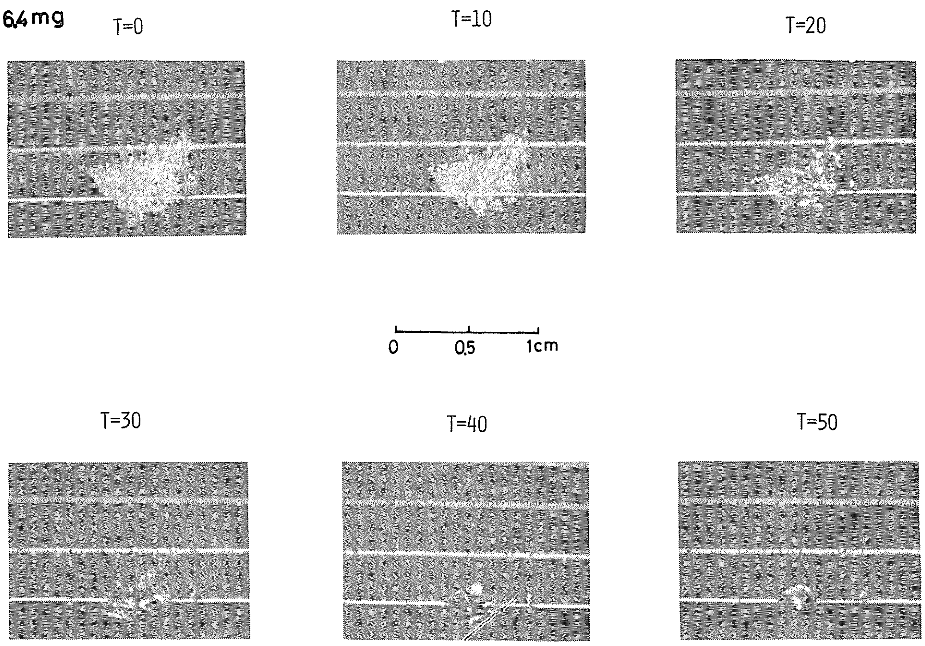

図8(b)　Same as Fig. 8(a), except for snowflake mass.

る風洞部では5.5℃にまで昇温した。外気を導入した理由は，実験中，雪片の表面で起こる水蒸気の蒸発あるいは凝結の効果をできるだけ小さくしたいためである。融解中の雪片の温度は0℃と考えられるので，ほぼ0℃で飽和した外気を導入することにより，水蒸気の相変化に伴う熱の交換を極力おさえることができる。垂直風洞内の気流の水蒸気密度を，実験中，時々垂直風洞の吹き出し口付近で通風乾湿計によって調べた。平均の水蒸気密度は $4.97\times10^{-6}\,gr\cdot cm^{-3}$ となり，ほぼ外気の水蒸気密度（$4.71\times10^{-6}\,gr\cdot cm^{-3}$）に等しかった。このことから，風洞内の気流の水蒸気密度はほぼ0℃の水の飽和水蒸気密度に等しくなっていたということができる。

このような条件の下で，融解中の雪片の形態変化を，望遠レンズ（f＝200㎜）を取り付けたニコンFモータードライブカメラを用いて，10秒間隔で斜め下から撮影した。図8(a),(b)に撮影例を示す。雪片は，融解によって小さくなり，最後には水滴となっている。融解が完了した後，水滴の大きさをウォーターブルーを付着させた沪紙で測定し，これから雪片の質量を求めた。各時刻の雪片の断面積は，印画紙上の雪片の断面積を面積計で計ることにより算定した。

融解実験は，17個の落下した雪片について行なった。この中で，3個の雪片は非対称性が大きいため，これらのデータは融解速度式を求めるデータから除外した。図9に，残り14個の試料雪片の初期断

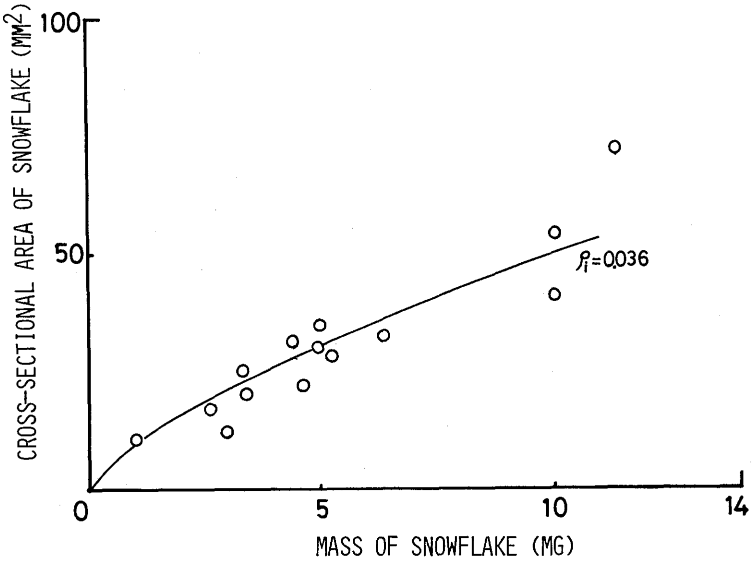

図9　Relation between snowflake mass and cross-section area. Each point is an observation and a solid line is a line of constant average density obtained assuming spherical symmetry.

面積（融解が起っていない時）と質量との関係を示す。雪片が球であると仮定すると，平均密度 ρi は0.036となる。

3.2　融解過程の観察

融解例（図8(a),(b)）にも示されているように，融解がかなり進行した状態を除いて，雪片の表面には凸凹した氷が露出している。詳細に観察すると，表面で生成した水は雪片の内部へしみ込んで行くことがわかった。雪片は種々の結晶の混合体であり，多くの隙間や孔を持っている。雪片は，氷の骨格をした穴だらけの構造を持っているともいえる。このような状態では，水は毛細管の作用によって間隙や孔の中に容易にしみ込んで行くと考えられる。これは，氷球や雹の融解過程とは大きく異なる点である。

氷球や雹の場合，融解した水は内部にしみ込まなくて，表面に蓄積される。この場合，外気から氷球へ輸送される熱は，まず表面の液層を昇温させるために使われ，その後熱伝導によって内部の氷に運ばれ，氷の融解に使われる。このような過程では，内部の氷が融解する速度（氷球の融解速度）は，結局，空気と液層との温度差に依存した外気からの熱輸送速度に依存している。一方，雪片が融解する場合，上に述べたように，表面には液層が存在しないので，外気から輸送される熱がそのまま雪片の融解に使われる。したがって，雪片の融解速度は空気と雪片表面との温度差に依存する外気からの熱輸送速度によってきまる。熱輸送速度をきめる温度差は，同じ外気条件（気温，相対湿度）でも，氷球の場合と雪片の場合とでは異なるので，融解速度も氷球と雪片の場合とでは

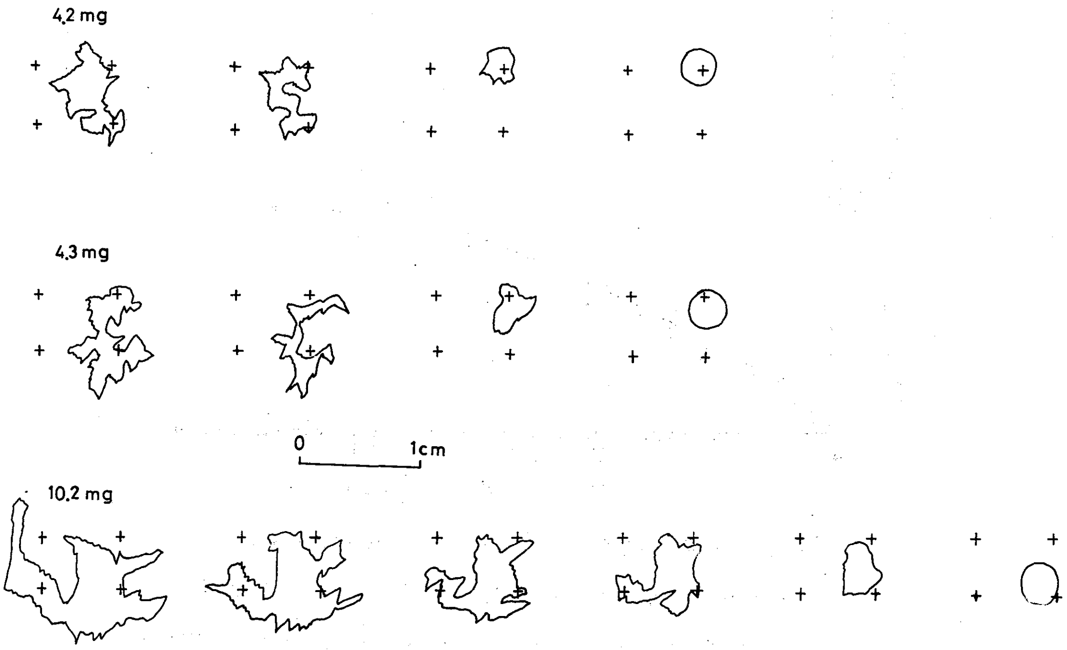

図10　Three examples of schematic drawing of time change in the perimeter of melting asymmetrical snowflakes observed at ten seconds intervals. Symbols plus indicate crossings of the threads.

違ってくると考えられる。

図10に，速度式を得るためのデータから除外した3例の非対称性雪片の融解に伴う形態変化を示す。対称性の良い雪片と比較して，非対称性の強い雪片は融解による形態変化を観察するのに適している。雪片は融解によって小さくなるが，その間，融解前の形態を良く保っていることがわかる。また，融解中に雪片が分裂した形跡は見当たらない。これは雪片の氷の骨格構造が一般に予想されるより融解によって壊れにくいことを示している。

3.3 融解過程に関する理論的取り扱い

雪片の融解過程に関係する熱は，外気から熱伝導で輸送される熱と，雪片表面で起こる水の相変化に伴う潜熱である。物体と空気の間で起こる熱輸送や物質輸送の過程は，伝熱理論として古くから研究が行なわれている。形が簡単な球，円柱，楕円体への熱および物質の輸送速度は伝熱理論によって詳細に調べられている。雲物理学の分野では，水滴や氷球を球形とみなし，伝熱理論の応用として，その蒸発速度や融解速度が室内実験によって求められている（Ranz and Marshall, 1952; Macklin, 1963; Goyer et al., 1969; Pruppacher and Rasmussen, 1979）。

理論によれば（Macklin, 1963; Goyer et al., 1969），氷球の表面へ単位時間に外気から輸送される熱輸送量H'は次式で与えられる；

$$H' = 4\pi R'(\tilde{a} K \Delta T + L_v \tilde{b} D \Delta\sigma) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここでR'は氷球の半径，Kは空気の熱伝導率，ΔTは氷球と氷球から充分離れた場所の外気との温度差，L_vは水の蒸発の潜熱，Dは空気中における水蒸気の拡散係数，$\Delta\sigma$は球の表面と表面から充分離れた所の外気との水蒸気密度差である。右辺第1項は熱伝導による外気から氷球への熱輸送量を，第2項は水蒸気の輸送に伴う潜熱の輸送量を示している。係数$\tilde{a}$，$\tilde{b}$は，それぞれ熱輸送，水蒸気輸送に関するventilation係数である。Yuge（1960）の実験によれば，完全な球（金属球）の場合，$\tilde{a}$はレーノルズ数が10～1,800の間において次式で表わされる；

$$\tilde{a} = 1 + 0.275\, Pr^{1/3}\, Re^{1/2} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここでPrはプラントル数，Reはレーノルズ数を示す。水滴や氷球の場合も同様な式で表わされ，式の中の係数も金属球（0.275）の場合とほぼ等しい。

氷球の場合と違って，雪片へ外気から単位時間に輸送される熱量については，現在の所，全くわかっていない。そこで，氷球に対する熱輸送理論を雪片へ拡張して使用する。雪片は完全な球でもなく，表面も凸凹が多く多孔的性質を持っている。氷球と異なったこれらの性質が熱輸送速度に影響を与えることは充分考えられる。そこで，ここでは雪片に対する熱輸送速度をHとして，この事を考慮して氷球の熱輸送速度H'を補正したものを考える。この場合，熱伝導による輸送熱量（(1)式右辺第1項）に対する水蒸気の輸送に伴って発生する潜熱量（右辺第2項）の比率は，熱輸送と物質

輸送の物理過程の類似性を考慮すると，氷球と雪片の場合とで異なることは考えられないので，1つの補正係数εを用いて，次のように考えることにする；

$$H=\varepsilon H'=4\pi\varepsilon R\ (\tilde{a} K \Delta T+L_v \tilde{b} D \Delta\sigma) \quad \cdots\cdots (3)$$

ここでRは雪片を球形と仮定した時のその球の半径を示す。εは氷球の理論を雪片に適用した時の補正係数である。係数εは実験的に求める必要がある。

水蒸気輸送に関するventilation係数$\tilde{b}$は，熱輸送と同じように与えられるものとして次のように仮定する；

$$\tilde{b}=1+0.275\ Sc^{1/3}\ Re^{1/2} \quad \cdots\cdots (4)$$

ここでScはシュミット数である。空気のPr数，Sc数は通常，0.71と0.60の値であるので$Pr^{1/3}$と$Sc^{1/3}$はほぼ同じ値となる。ここでは$Pr^{1/3}$，$Sc^{1/3}$として0.87を用いる。したがって，$\tilde{a}$と$\tilde{b}$はいずれも次式で与えられることになる；

$$\tilde{a}=\tilde{b}=1+0.24\ Re^{1/2}. \quad \cdots\cdots (5)$$

外気から雪片の表面へ輸送される熱は，主に表面に露出した氷を融解するために使われるが，熱の一部は，表面に残った少量の水を0℃以上に昇温させるために使われることが考えられる。しかし，昇温に使われた熱は，最終的には熱伝導によって水から0℃の氷に運ばれ，氷の融解に使われる。水の熱伝導率は，空気の熱伝導率に比べかなり大きいので，この過程は外気からの熱輸送の過程に比べて，充分速く起こると考えられる。ここで，これら2つの過程の熱輸送速度の違いを簡単に算定してみる。いま単位時間に雪片の単位表面積に外気から熱伝導で輸送される熱量は，$Qa=\varepsilon\tilde{a}K\Delta T/R$ で与えられるとする。一方，表面に存在する0℃以上に昇温した水から単位時間に単位面積の氷に熱伝導によって運ばれる熱量は，$Qw=Kw\Delta T/\ell$で表わされる。ℓは表面に存在する水と氷との平均的な距離であり，この場合，少し大きく見積って半径Rの1/10程度とする。ここでKとKwは空気と水の熱伝導率で，$Kw/K\simeq 25$となる。温度差ΔTは2つの過程でほぼ同じと考え，$\varepsilon\tilde{a}$も実験条件から10程度を与えると，2つの過程の熱輸送速度の違いは，$Qw/Qa=Kw/K\simeq 25$となる。このように，水と氷の間で起こる熱の移動は，外気からの熱伝導に比べ非常に速く起こることがわかる。

外気から輸送される熱の一部は，また，熱伝導によって雪片の内部へ運ばれ，雪片全体を昇温させるために使われることも考えられる。しかし，融解中の雪片は，生成した水のしみ込みによって，氷と水がよくまじった状態となっており，表面と内部との温度差は極めて小さいとみられる。水と氷との間で起こる速い熱の移動が，温度差を小さくするものと考えられる。したがって，融解中の雪片の温度は一様に0℃であると近似してもよく，雪片全体を昇温させるために使われる熱の影響は考慮する必要がないと考えられる。

このように，外気から輸送される熱は，すべて雪片の表面に露出した氷を融解させるために使われると仮定することは妥当であろう。 Δt 時間に融解する表層の氷の厚さを ΔR とすると次式が得られる；

$$4\pi\varepsilon R(\tilde{a}K\Delta T+Lv\tilde{b}D\Delta\sigma)\Delta t=-4\pi R^2\rho i\,Lf\,\Delta R \quad \cdots\cdots (6)$$

ここで，Lf は氷の融解の潜熱，ρi は雪片の密度である。

融解実験中，気流の水蒸気密度（$4.97\times10^{-6}\ gr\cdot cm^{-3}$）は０℃の水の飽和水蒸気密度（$4.85\times10^{-6}gr\cdot cm^{-3}$）にほぼ等しくなっていたため，(6)式の左辺第２項は小さく，無視できる（この実験では第１項の３％程度）。左辺第２項を省略して(6)式を書き直すと，融解に伴う雪片半径Ｒの減少速度は次式で表わされる；

$$\frac{dR}{dt}=-\frac{K\Delta T}{Lf\rho i}\frac{1}{R}\varepsilon\left(1+0.24\left(\frac{2RV}{\nu}\right)^{1/2}\right) \quad \cdots\cdots (7)$$

ここで，ν は空気の動粘性係数である。 ρi は融解していない雪片の密度であるが，氷の骨格構造が融解中壊れないとすると，融解中一定とおける。ε を一定と仮定した場合の微分方程式(7)式の解を(8)式に示す。

$$t=\frac{2Lf\rho i}{\alpha^4K\Delta T}\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{1}{3}\alpha^3(R_0^{3/2}-R^{3/2})-\frac{1}{2}\alpha^2(R_0-R)\right.$$

$$\left.+\alpha(R_0^{1/2}-R^{1/2})-\ln\frac{1+\alpha R_0^{1/2}}{1+\alpha R^{1/2}}\right) \quad \cdots\cdots (8)$$

ここで，α は $0.24(2V/\nu)^{1/2}$， R_0 は初期雪片半径，Ｖは気流の速度である。規格化した断面積 $S=\pi R^2/\pi R_0^2$ と実験の設定値を用いて，各定数の値を代入して(8)式を書きかえると，

$$t=\frac{2.36}{\varepsilon}\left(\frac{1}{3}B^3(1-S^{3/4})-\frac{1}{2}B^2(1-S^{2/4})\right.$$

$$\left.+B(1-S^{1/4})-\ln\frac{1+B}{1+BS^{1/4}}\right). \quad \cdots\cdots (9)$$

ここで，Ｂは $\alpha R_0^{1/2}$ である。代入した数値は以下の通りである。

$K=5.66\times10^{-5}\ cal\cdot cm^{-1}\cdot sec^{-1}\cdot ℃^{-1}$

$Lf=79.9\ cal\cdot gr^{-1}$

$\nu=0.13\ cm^2\cdot sec^{-1}$

$\Delta T=5.5\ ℃$

$\rho i = 0.036 \mathrm{gr \cdot cm^{-3}}$

$V = 100 \mathrm{cm \cdot sec^{-1}}$

ここで，ΔTは空気と雪片の温度差であり，融解中の雪片の温度を0℃と仮定した。(9)式から，融解に伴う雪片断面積の時間変化を測定すれば，補正係数εを求めることができる。

補正係数εは理論と実験をつなぐ重要な係数である。εの物理的意味を考える時，εの値を変化させうる要因をはっきりさせておく必要がある。融解の問題は結局，(1)外気からどのよう速度で熱が輸送され，(2)輸送された熱が融解にどのような割合で使われるか，という問題につきるので，εの中には，(1)と(2)の過程に関して雪片について行なったすべての仮定の影響が含まれることになる。即ち，(i)雪片の形は完全な球ではない。したがって，これを球と仮定し，球の ventilation 係数$\tilde{a}$，$\tilde{b}$を用いることによって生じる影響があげられる。雪片の形が球形からずれることによってεの値が変化することが考えられる。(ii)雪片の表面の粗度(凹凸)によって， ventilation 係数がなめらかな氷球のものと違う可能性がある。雪片の表面粗度の影響がεの中に含まれることが考えられる。(iii)雪片の表面は凸凹しており，空隙部分もかなりあるとみられる。これは，表面がなめらかでつまった氷球とは，熱を受け取る実質的な表面積が異なることを意味している。雪片表面の凸凹の度合によってεの値が変化することが考えられる。(iv)外気から雪片表面へ輸送された熱は，すべて表面の氷を融かすために使われると仮定した。厳密には，若干の熱が雪片の表面や内部にある水や氷を昇温させるために使われることを考える必要がある。しかし，前にも述べたように昇温に使われる熱の移動速度は，外気からの熱輸送速度に比べて25倍も速いのでこのような仮定の影響がεの中に存在するとしてもそれは極めて小さいものと考えられる。

このように補正係数εの中には，氷球と異なる雪片のいろいろな性質の影響が含まれており，その物理的意味は複雑である。

3.4　実験結果

図11は規格化した雪片断面積Sの融解による時間変化を示す。D_0は雪片を球形と仮定した時の初期直径である。初期直径が3.8～8.6㎜までの14個の雪片の融解例が示されている。図の下方に示される破線は，融解が完了した時のSの値である；$S = (Rr / R_0)^2 = \rho i^{2/3}$。Rrは生成する水滴の半径である。ここでは，S＝0.11として示されている。融解が完了する直前の測定はデータから除いてある。この時点の雪片は表面が水でおおわれ，明らかに(9)式の適用には問題がある。初期直径が6.4㎜の雪片の場合には測定値が2回しか得られなかったが，これは，融解中の雪片が糸から落下したために起こったものである。

規格化断面積Sと時間tとの関係を(9)式に代入し，各測定時における補正係数εを求める。これを時間に対してプロットしたものを図12に示す。直径8.0～8.6㎜と大きな雪片の場合，εは時間と共にわずかに減少する傾向が見られるが，多くの雪片で補正係数εは融解中ほぼ一定である。

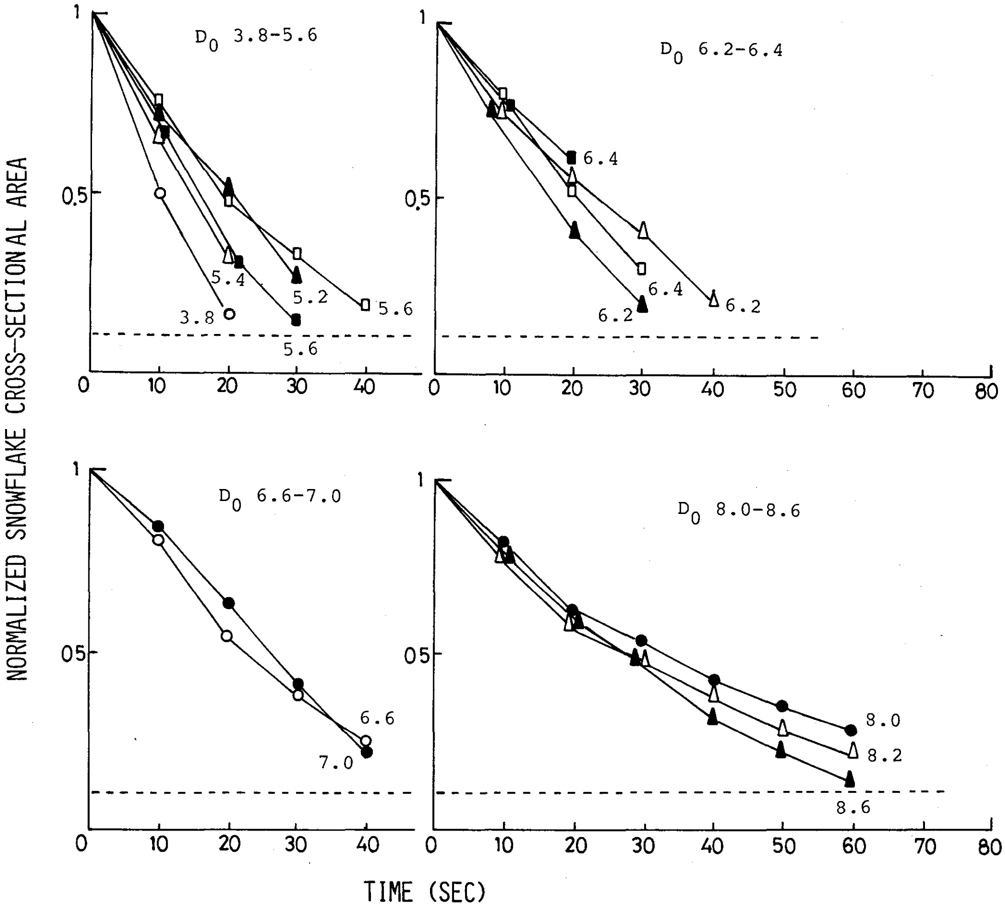

図11　Variation of normalized cross-sectional area caused by melting with time for various initial snowflake diameters D_0.

融解中の平均の補正係数εmと初期直径との関係を図13に示す。個々のεmは，1.4～2.1の間の値を取るが，初期直径によらずほぼ一定であり，平均すると1.75の値となる。補正係数εを定数と仮定することはほぼ妥当なものであるということができる。個々のεmが試料雪片によってばらつく原因は，試料雪片によって異なる形，表面粗度，多孔性の度合によるものと考えられる。雪片の融解に関する補正係数εは，初期直径にそれほどよらず，また融解中ほぼ一定の値をとり，平均すると1.75の値であると結論できる。

融解に伴う雪片半径の減少速度dR/dtは，雪片を球形と仮定すると次式で表わされる；

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\varepsilon \tilde{a}}{L_f \rho_i} \frac{1}{R} (K \Delta T + L_v D \Delta \sigma). \quad \cdots\cdots (10)$$

εの値は上で述べたように1.75の値である。今後（10）式を雪片の融解速度式と呼ぶことにする。

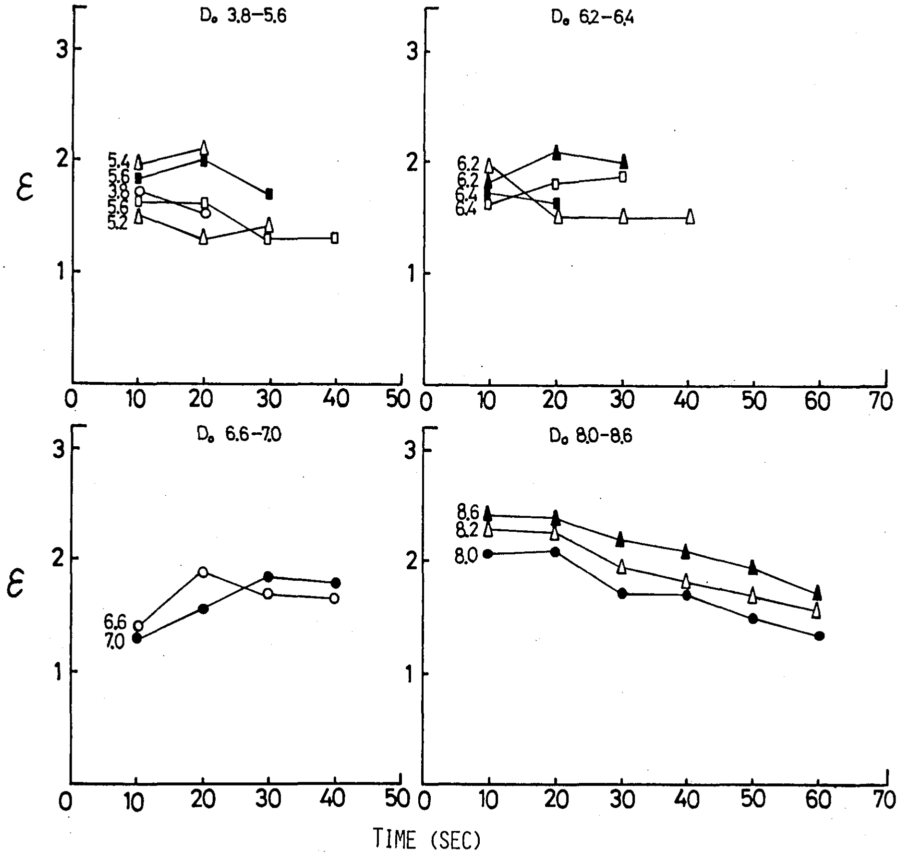

図12　Variation of adjustable parameter with time for various snowflake diameters D_0. Numbers indicate the initial snowflake diameters.

雪片の表面において水蒸気の蒸発，凝結がない場合は，次式で与えられる；

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\varepsilon \tilde{a}}{Lf\rho i}\frac{1}{R}K\Delta T. \qquad (11)$$

融解速度式は，速度 100 cm・sec^{-1}，温度 5.5 ℃の気流中で，主に樹枝状結晶からなる立体的な雪片について得られた。もし，速度式がこれらの条件によって変化するならば，この式を一般的に適用するのに問題がでてくる。速度式の中では，流速の変化は ventilation 係数 $\tilde{a}$ の中の Re 数によって，温度の変化は ΔT で表現されている。伝熱理論によれば（甲藤，1979），ventilation 係数は一般に Pr 数（あるいは Sc 数）と Re 数の関数で表現することができ，物体の形が同じであれば，流速や温度を変化させても係数（球の場合 0.275）も含めて式の表現は変わらない。これは実験的にも確かめられている。ventilation 係数の式表現や係数に変化が起こるのは，雪片の形が融解中に変化する場合である。しかし，すでに述べたように，雪片は全体的には融解中も最初の形を保つ傾

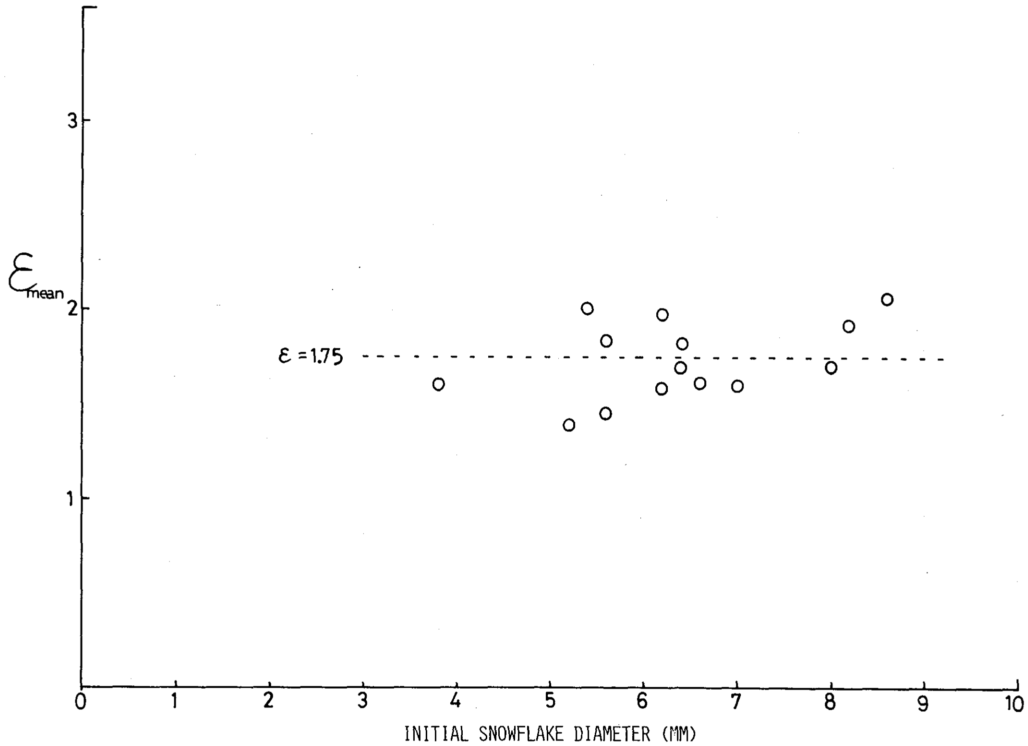

図13　Mean value of ε of adjustable parameters as a function of the initial snowflake diameter.

向にあるので，速度式が流速と温度によって大きく変わることはないと考えてよい。

実験に使用した雪片と著しく性質の異なる雪片に対しては，速度式の中の補正係数εの値が大きく変わる可能性がある。補正係数εの値を変化させる因子として，雪片の形，表面粗度，多孔性等が考えられる。事実，データから除いた非対称性の3つの雪片は，同質量の対称性のよい雪片より早く融解する傾向があった。一般的には，実験でも示されているように，これらの因子の影響は，補正係数εにして1.4～2.1の間におさまるものと考えられる。しかし，氷晶もしくは2～3個の氷晶からなる小雪片については，得られた速度式の直接的な適用には問題がでてくる。Knight（1979）の実験にも見られるように，氷晶もしくは2～3個の氷晶からなる雪片では，融解によって生成した水は結晶の表面にたまるだけで移動しない。これは，多くの結晶からなる雪片とは融解の過程が本質的に異なるわけで，このような雪片には，明らかにこの実験で得られた速度式は適用できない。