

風車の羽根に付着する氷片の飛散領域

大 亀 衛 中 谷 昌 亨
中 津 裕 之

岡山理科大学理学部応用物理学科

(昭和62年 9 月30日 受理)

摘 要

風車の向きが変化する場合とそれが定まっている場合について、氷片の飛散領域が調べられた。使用された羽根は板羽根である。その形は中心角の小さい扇形か扇の紙形であり、エネルギーを消費する部分が削除されている。

先ず、氷片の運動方程式が求められた。氷片に作用する力は重力と大きさが空気に対する氷片の速さの2乗に比例する抵抗力である。抵抗力を求めるとき、羽根の後流が考慮されている。

次に、氷片の運動方程式が数値計算によって解かれた。氷片の落下密度と羽根の傾きや風車の高さや氷片の大きさの変化による氷片の飛散領域やその面積の変動が解明された。

更に、氷片の飛散領域の面積と得られるエネルギーとの比が求められている。

1. はじめに

我が国のエネルギー資源はそのほとんどを輸入にたよっており、エネルギー自給率の向上が必要である。また、円高や生産過剰によって、これらのエネルギー資源特に化石エネルギーは価格の低下をきたしている。しかし、これらのエネルギー資源は枯渇へ向かっており、近い将来に価格の高騰が予測される。プラズマのエネルギーが利用できればエネルギー問題は解決するが、これはかなり先のことと思われる。従って、地熱のエネルギーや波のエネルギーや風のエネルギー等の利用に関する研究開発が必要である。なかでも、風のエネルギー利用の歴史は長く、蓄積された技術は多い。新エネルギーの利用を化石エネルギーの利用と共存させるため、新エネルギーの単価の低減が現在要求されている。氷片の飛散による風力発電所の危険領域を定めることによって、風のエネルギー利用が前進する。

飛行機のプロペラに関する運動量理論¹⁾, 翼素理論²⁾, 渦の理論^{3~6)}は風車の羽根の研究においても利用できる。最近, これらの考え方をを用いて羽根のひねり⁷⁾, 羽根の受ける風圧⁸⁾, 可変ピッチ羽根⁹⁾, 羽根の形状¹⁰⁾, 羽根の枚数¹¹⁾等が論じられている。用いる理論は同じであっても, 得られたこれらの結果は飛行機のプロペラのものとは異なっている。次に, 羽根に付着する氷片の飛散領域。(多くの場合, これが氷片の飛散による危険領域となる。)を求める。

2. 基礎式と数値解

a) 基礎式

先ず, 中心角の小さい扇形の板羽根を考える。この羽根の長さを d とする。次に, エネルギーを最も多く取り出させるようにエネルギーを消費する羽根の部分を削除すると, その形は扇形か扇の紙形となる¹⁰⁾。この内径を r_1 とし, 外径を r_2 とする。羽根の水平な回転軸方向を風速 v_1 の風向と一致させる。鉛直に立てられた風車の支柱上で上向きに z 軸を取り, 地面上に x 軸と y 軸をとる。 y 軸の向きを風向と一致させる。氷片が羽根から離れて, 時間が t 経過したときの氷片の座標を (x, y, z) とする。更に, 羽根の回転軸の高さを h , 羽根の回転軸からの距離を r , 羽根の角速度の大きさを ω , 羽根の後流の角速度の大きさを ω_2 , 羽根の後流の速度の y 成分を v_2 , 風速 v_1 の風の速度とこれに面している羽根の面に立てた法線とのなす角を α , 重力の加速度の大きさを g とする。

氷片の運動方程式は $r_2^2 \geq x^2 + (z-h)^2 \geq r_1^2$ のとき

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 x}{dt^2} = -k \left| \frac{dx}{dt} - (r\omega_2)_x \right| \left\{ \frac{dx}{dt} - (r\omega_2)_x \right\}, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = -k \left| \frac{dy}{dt} - v_2 \right| \left(\frac{dy}{dt} - v_2 \right), \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = -k \left| \frac{dz}{dt} - (r\omega_2)_z \right| \left\{ \frac{dz}{dt} - (r\omega_2)_z \right\} - g, \\ (r\omega_2)_x = -r\omega_2 \sin \left(\tan^{-1} \frac{z-h}{|x|} \right), \\ (r\omega_2)_z = r\omega_2 \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{|z-h|} \right), \\ r\omega_2 = -v_1 \sin 2\alpha - 2\omega \sin^2 \alpha \sqrt{x^2 + (z-h)^2} \quad 7), \\ v_2 = -v_1 \cos 2\alpha - \omega \sin 2\alpha \sqrt{x^2 + (z-h)^2} \quad 7) \end{array} \right. \quad \textcircled{1}$$

となり, $r_2^2 < x^2 + (z-h)^2$ または $x^2 + (z-h)^2 < r_1^2$ のとき

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -k \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -k \left| \frac{dy}{dt} - v_1 \right| \left(\frac{dy}{dt} - v_1 \right), \\ \frac{d^2z}{dt^2} = -k \left| \frac{dz}{dt} \right| \frac{dz}{dt} - g \end{cases} \quad (2)$$

となる。ここで、 k は氷片の大きさ等によって定まる定数であり、サフィックス x と z はそれぞれの成分であることを表わしている。また、氷片は球であるとし、揚力は作用していないものとする。

なお、初期条件は $t=0$ で

$$\begin{cases} x = -r \cos \gamma, \\ y = 0, \\ z = r \sin \gamma + h \end{cases} \quad (3)$$

であり、従って

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = r \omega \sin \gamma, \\ \frac{dy}{dt} = 0, \\ \frac{dz}{dt} = r \omega \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

である。ここで、 γ は羽根の長さの方向向きが x 軸の方向でその負の向きとなす角度である。

無次元量

$$\begin{cases} X \equiv \frac{\omega}{v_1} x, & Y \equiv \frac{\omega}{v_1} y, & Z \equiv \frac{\omega}{v_1} z, \\ T \equiv \omega t, & R \equiv \frac{\omega}{v_1} r, & R_1 \equiv \frac{\omega}{v_1} r_1, \\ R_2 \equiv \frac{\omega}{v_1} r_2, & D \equiv \frac{\omega}{v_1} d, & G \equiv \frac{1}{v_1 \omega} g, \\ H \equiv \frac{\omega}{v_1} h, & K \equiv \frac{v_1}{\omega} k, & V_2 \equiv \frac{1}{v_1} v_2, \\ \Omega_2 \equiv \frac{1}{\omega} \omega_2, & S \equiv \left(\frac{\omega}{v_1} \right)^2 s \end{cases} \quad (5)$$

を導入する。ここで、 s は氷片の飛散領域の面積である。

無次元量⑤を用いて、式①と式②はそれぞれ $R_2^2 \geq X^2 + (Z-H)^2 \geq R_1^2$ のとき

$$\left[\begin{aligned} \frac{d^2 X}{dT^2} &= -K \left| \frac{dX}{dT} - (R\Omega_2)_x \right| \left\{ \frac{dX}{dT} - (R\Omega_2)_x \right\}, \\ \frac{d^2 Y}{dT^2} &= -K \left| \frac{dY}{dT} - V_2 \right| \left(\frac{dY}{dT} - V_2 \right), \\ \frac{d^2(Z-H)}{dT^2} &= -K \left| \frac{d(Z-H)}{dT} - (R\Omega_2)_z \right| \left\{ \frac{d(Z-H)}{dT} - (R\Omega_2)_z \right\} - G, \\ (R\Omega_2)_x &= -R\Omega_2 \sin\left(\tan^{-1} \frac{Z-H}{|X|}\right), \\ (R\Omega_2)_z &= R\Omega_2 \sin\left(\tan^{-1} \frac{X}{|Z-H|}\right), \\ R\Omega_2 &= \sqrt{\sin 2\alpha - 2\sin^2 \alpha \sqrt{X^2 + (Z-H)^2}}, \\ V_2 &= -\cos 2\alpha - \sin 2\alpha \sqrt{X^2 + (Z-H)^2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

となり、 $R_2^2 < X^2 + (Z-H)^2$ または $X^2 + (Z-H)^2 < R_1^2$ のとき

$$\left[\begin{aligned} \frac{d^2 X}{dT^2} &= -K \left| \frac{dX}{dT} \right| \frac{dX}{dT}, \\ \frac{d^2 Y}{dT^2} &= -K \left| \frac{dY}{dT} - 1 \right| \left(\frac{dY}{dT} - 1 \right), \\ \frac{d^2(Z-H)}{dT^2} &= -K \left| \frac{d(Z-H)}{dT} \right| \frac{d(Z-H)}{dT} - G \end{aligned} \right. \quad (7)$$

となる。

また 無次元量⑤を用いて、式③と式④はそれぞれ $T=0$ で

$$\left[\begin{aligned} X &= -R \cos \gamma, \\ Y &= 0, \\ Z &= R \sin \gamma \end{aligned} \right. \quad (8)$$

となり、

$$\left[\begin{aligned} \frac{dX}{dT} &= R \sin \gamma, \\ \frac{dY}{dT} &= 0, \\ \frac{d(Z-H)}{dT} &= R \cos \gamma \end{aligned} \right. \quad (9)$$

となる。

b) 数値計算と数値解

初期条件式⑧と式⑨を用いて、式⑥と式⑦が数値計算された。数値計算の方法は Runge-Kutta-Gill 法である。計算の範囲は

$$\begin{cases} v_1 = 4.00 \text{ m/s} \sim 2.00 \times 10 \text{ m/s}, \\ \omega = 5\pi/6 \text{ 1/s} \sim 5\pi \text{ 1/s}, \\ \alpha = \pi/2 \sim \pi \end{cases} \quad \text{⑩}$$

とし、 $k = 3\rho_a C_D / 8d_i \rho_i$ は

$$\begin{cases} C_D = 4.40 \times 10^{-1}, \\ \rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3, \\ \rho_i = 9.17 \times 10^2 \text{ kg/m}^3, \\ d_i = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m} \sim 5.00 \times 10^{-2} \text{ m} \end{cases} \quad \text{⑪}$$

から求めた。ここで、 C_D は抵抗係数、 ρ_a は空気密度、 ρ_i は氷片密度、 d_i は氷片半径である。さらに、

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \text{⑫}$$

を用いた。

図1～図10はこの計算で得られたグラフである。

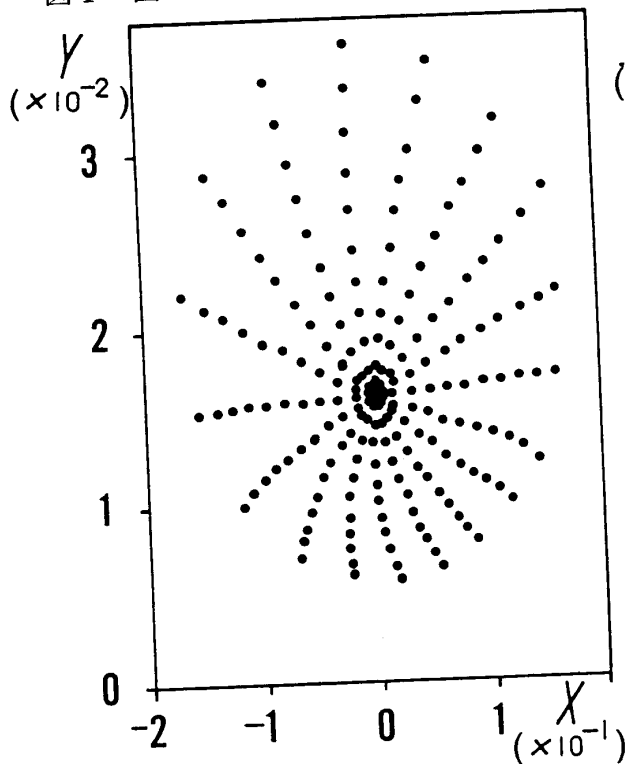


図1-1 氷片の落下密度 (風車の向き一定, $G = 1.56 \times 10^{-1}$, $H = 2R_2$, $1/K = 6.75 \times 10$, $\alpha = 19\pi/36$)

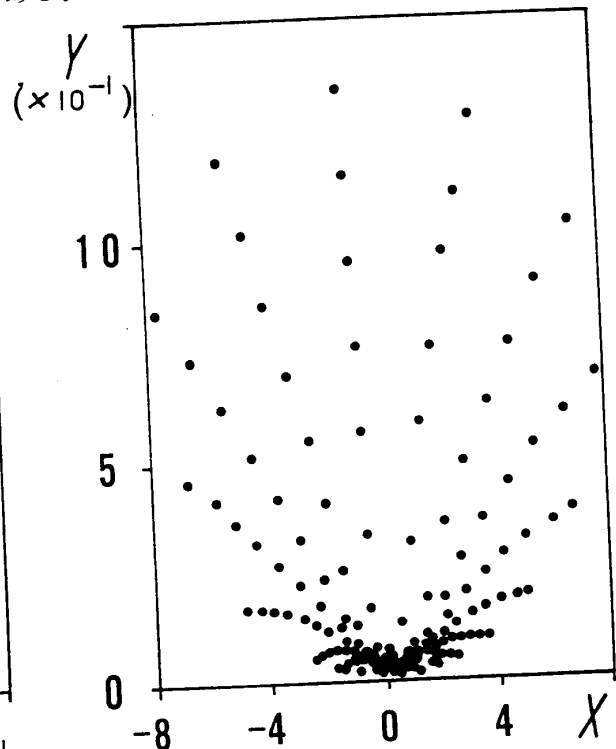


図1-2 氷片の落下密度 (風車の向き一定, $G = 1.56 \times 10^{-1}$, $H = 2R_2$, $1/K = 6.75 \times 10$, $\alpha = 27\pi/36$)

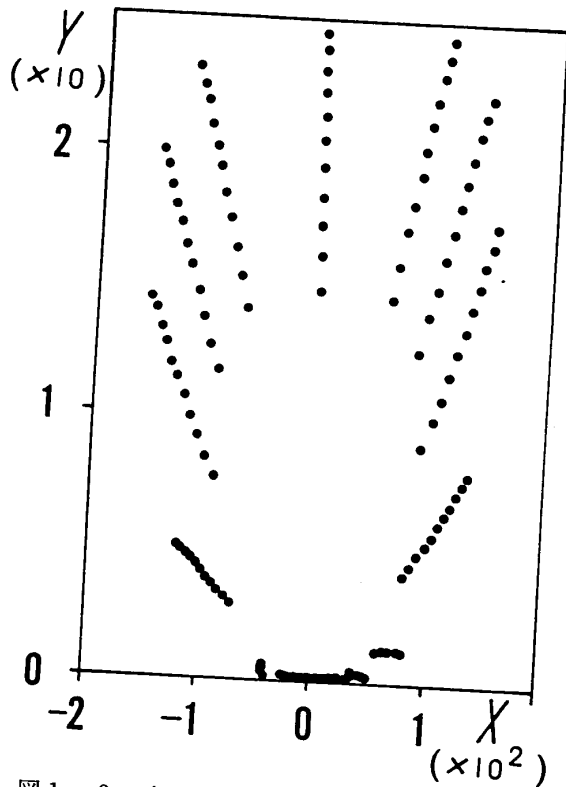


図1-3 氷片の落下密度 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $1/K=6.75 \times 10$, $\alpha=35\pi/36$)

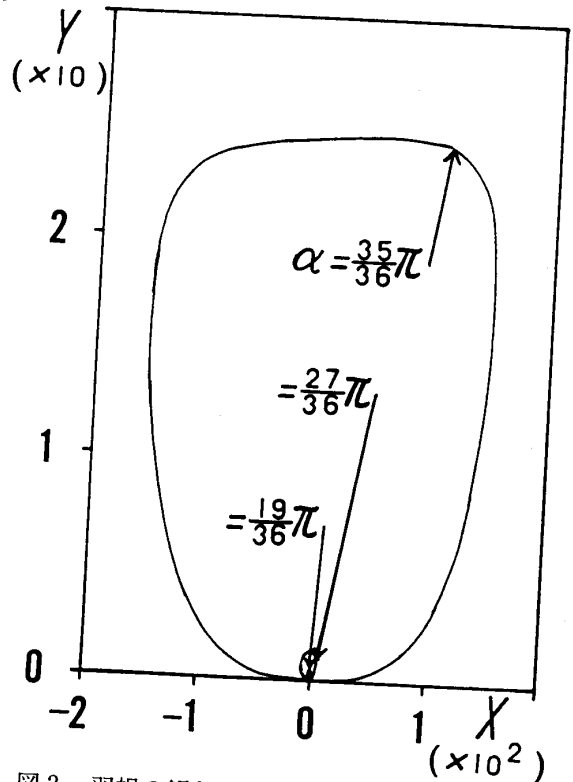


図2 羽根の傾きをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $1/K=6.75 \times 10$)

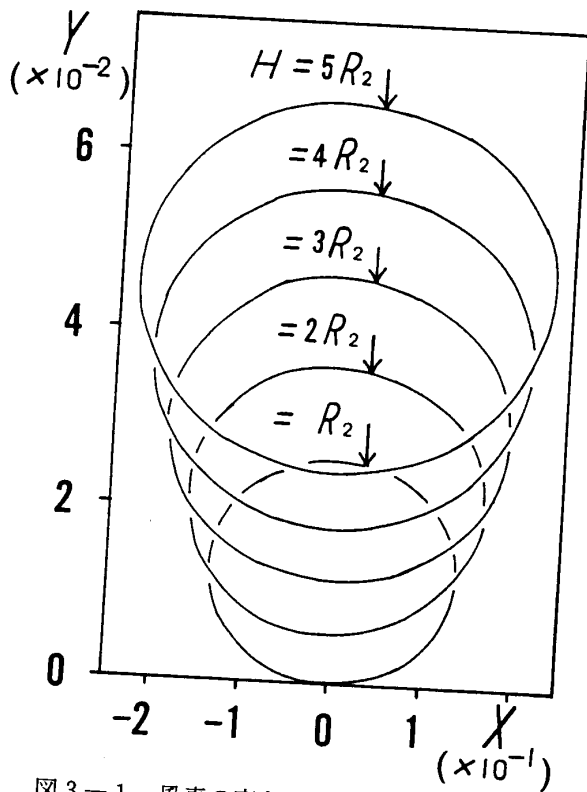


図3-1 風車の高さをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K=6.75 \times 10$, $\alpha=19\pi/36$)

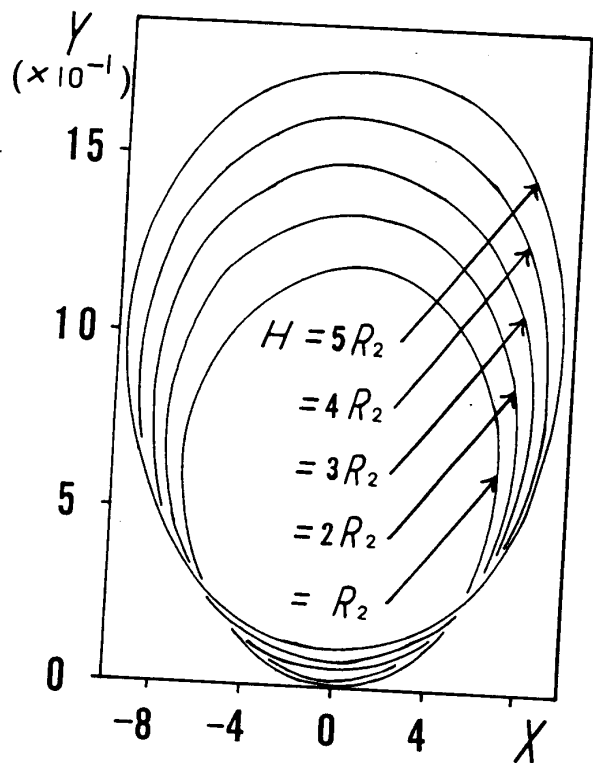


図3-2 風車の高さをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K=6.75 \times 10$, $\alpha=27\pi/36$)

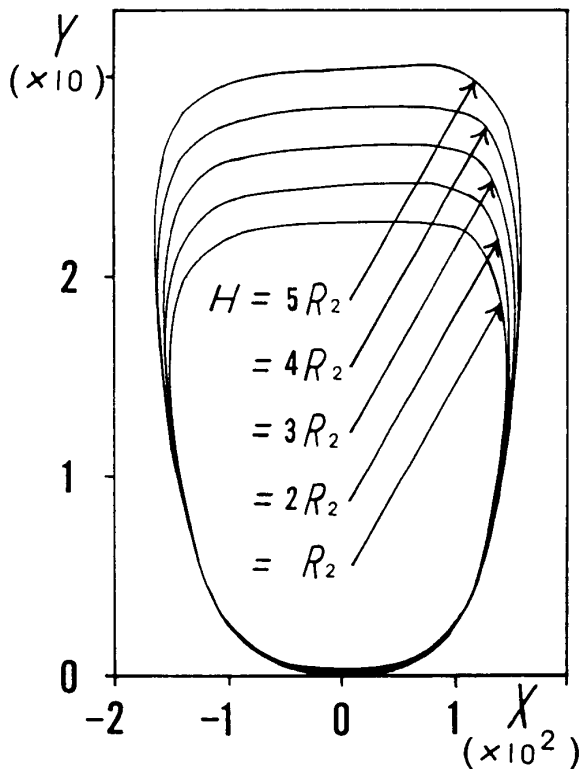


図3-3 風車の高さをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K=6.75 \times 10$, $\alpha=35\pi/36$)

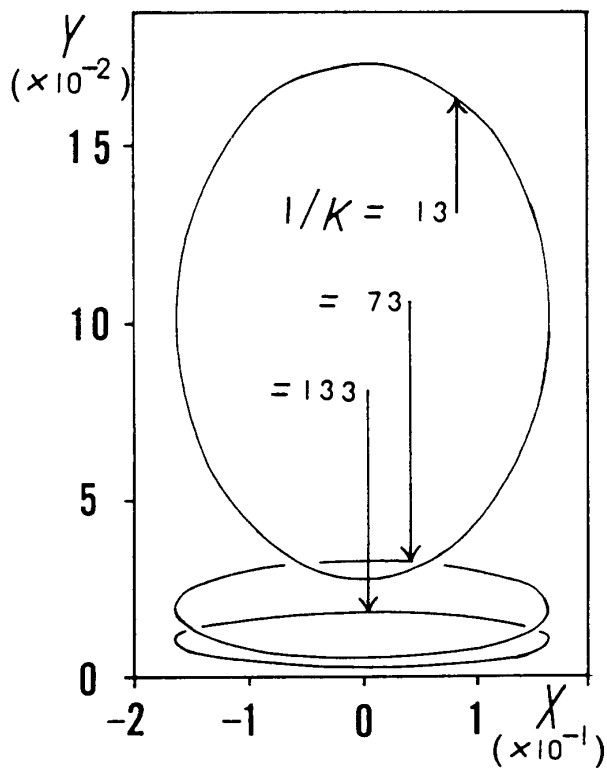


図4-1 氷片の大きさをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $\alpha=19\pi/36$)

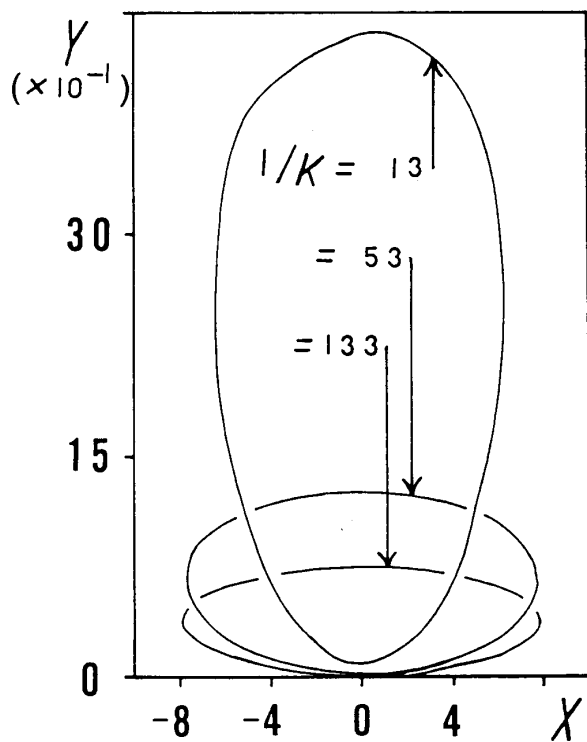


図4-2 氷片の大きさをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $\alpha=27\pi/36$)

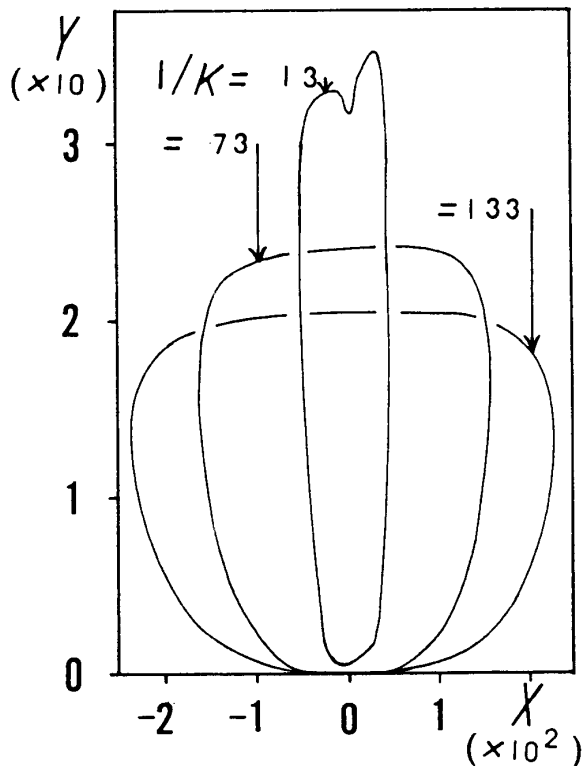


図4-3 氷片の大きさをパラメーターとした氷片の飛散領域 (風車の向き一定, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $\alpha=35\pi/36$)

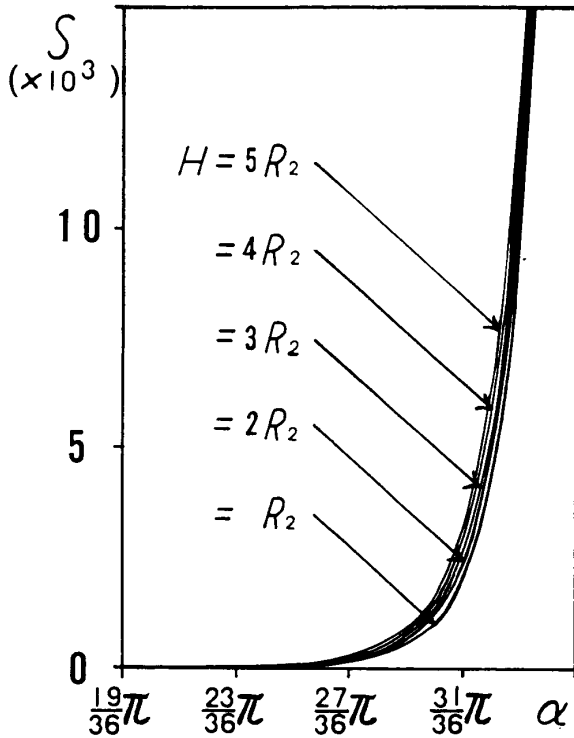


図5 羽根の傾きの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, H パラメーター, $1/K=6.75 \times 10$)

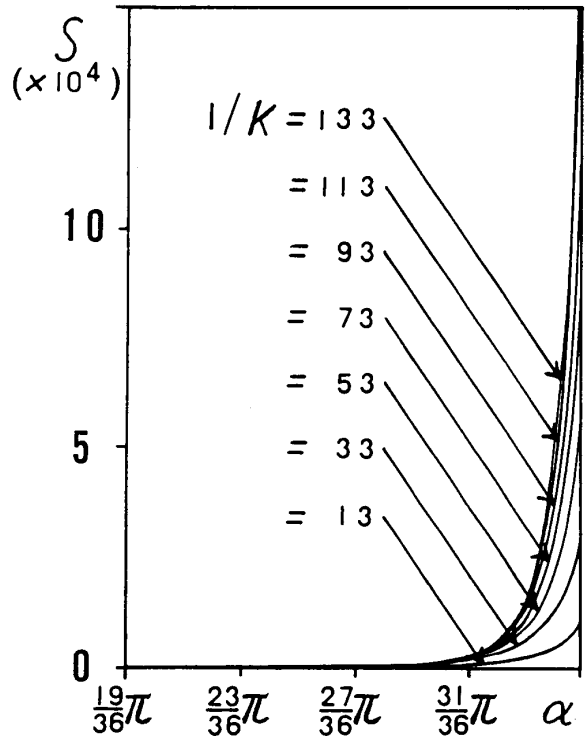


図6 羽根の傾きの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, $1/K$ パラメーター)

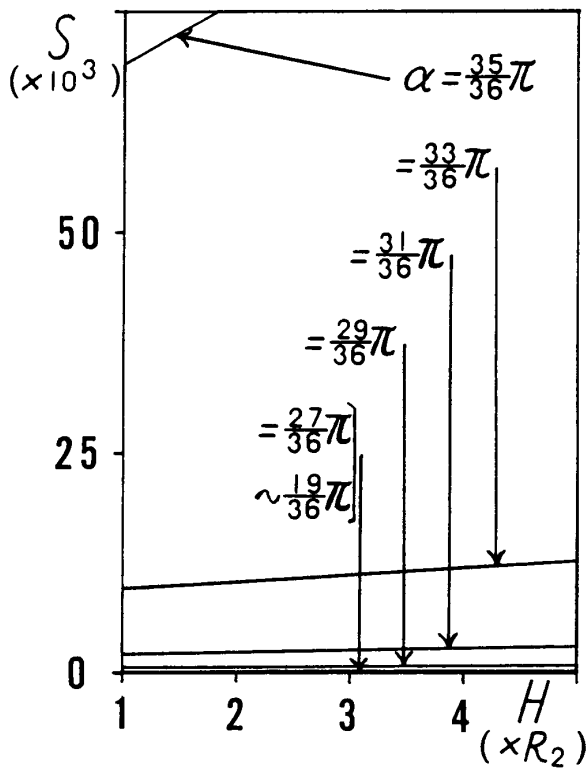


図7 風車の高さの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K=6.75 \times 10$, α パラメーター)

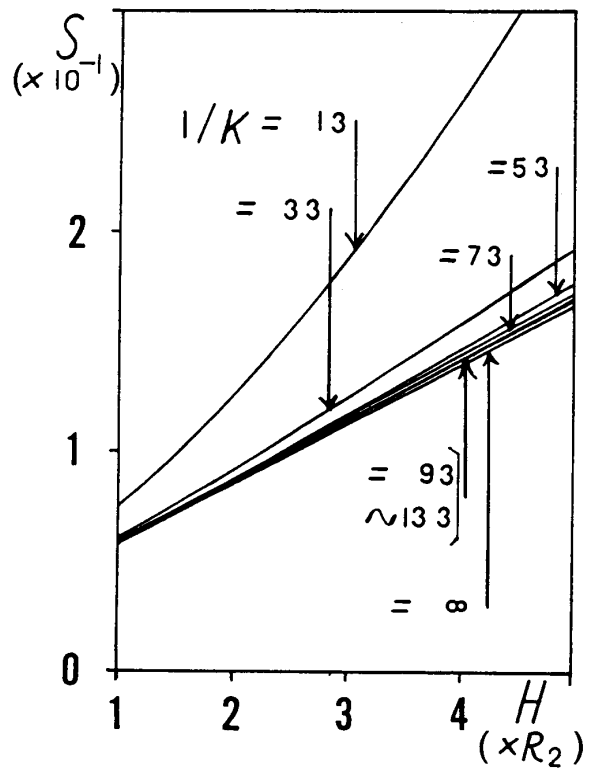


図8-1 風車の高さの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K$ パラメーター, $\alpha=19\pi/36$)

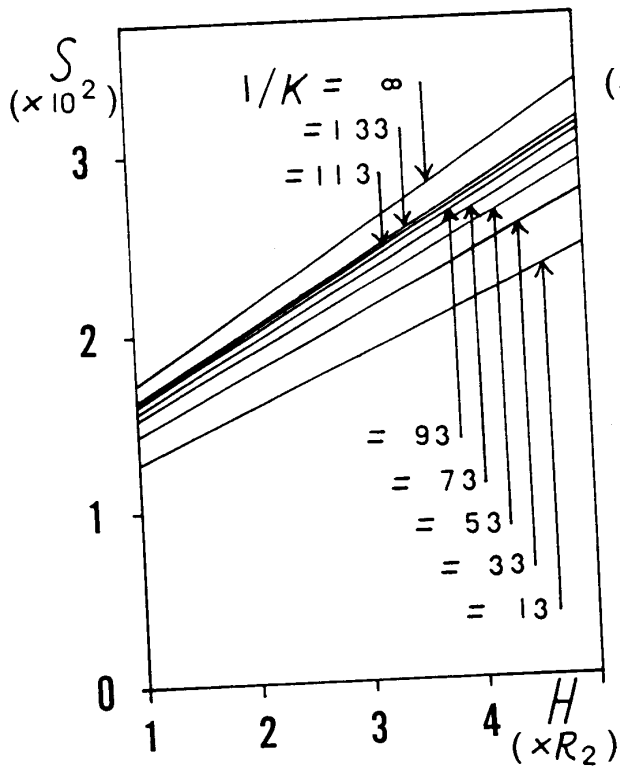


図8-2 風車の高さの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K$ パラメター, $\alpha=27\pi/36$)

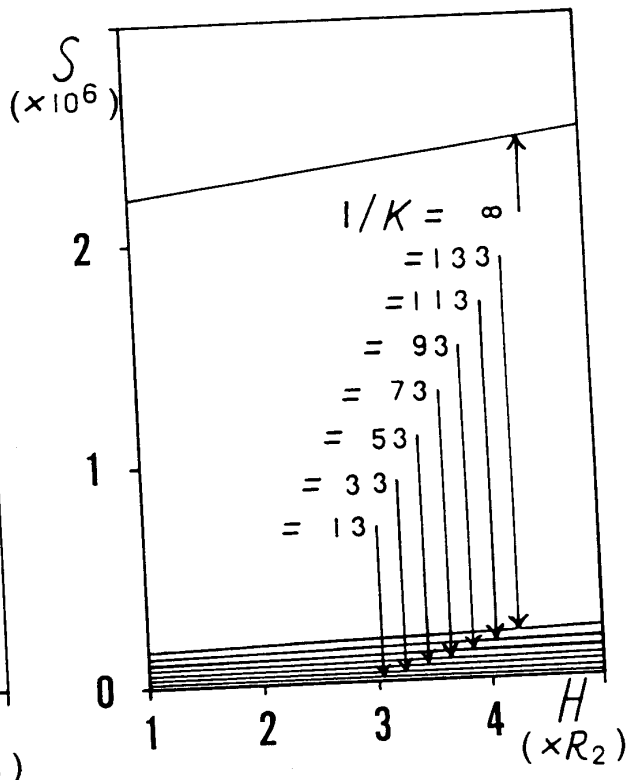


図8-3 風車の高さの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $1/K$ パラメター, $\alpha=35\pi/36$)

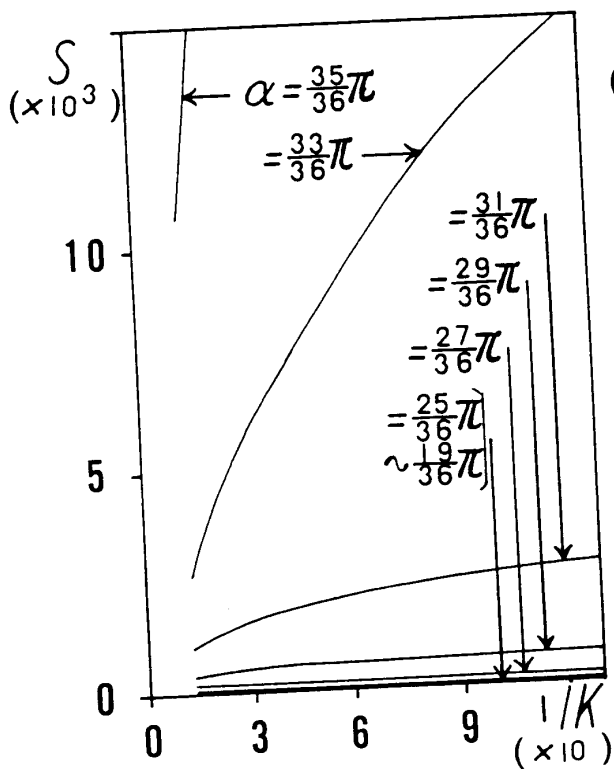


図9 氷片の大きさの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2R_2$, α パラメター)

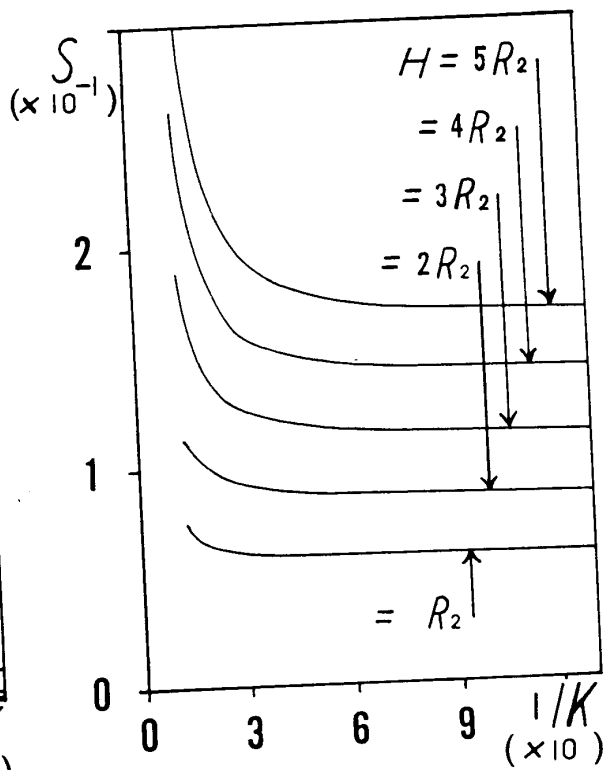


図10-1 氷片の大きさの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, H パラメター, $\alpha=19\pi/36$)

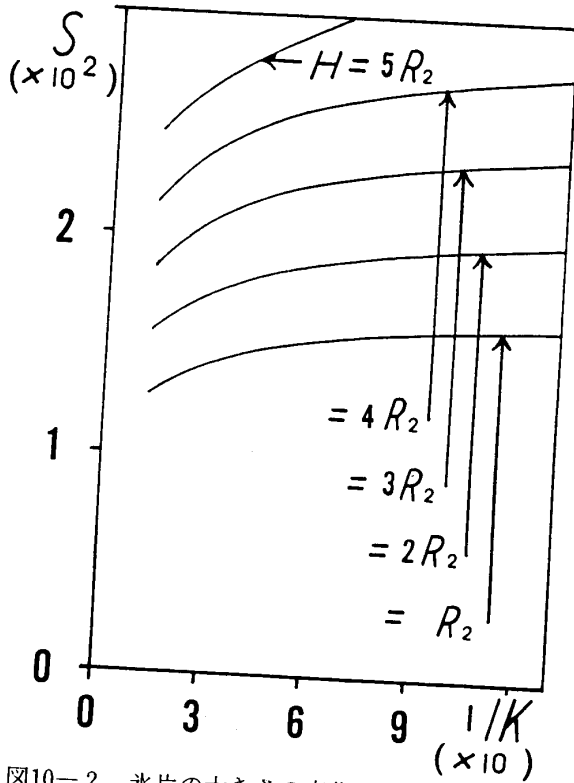


図10-2 氷片の大きさの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, H パラメーター, $\alpha = 27\pi/36$)

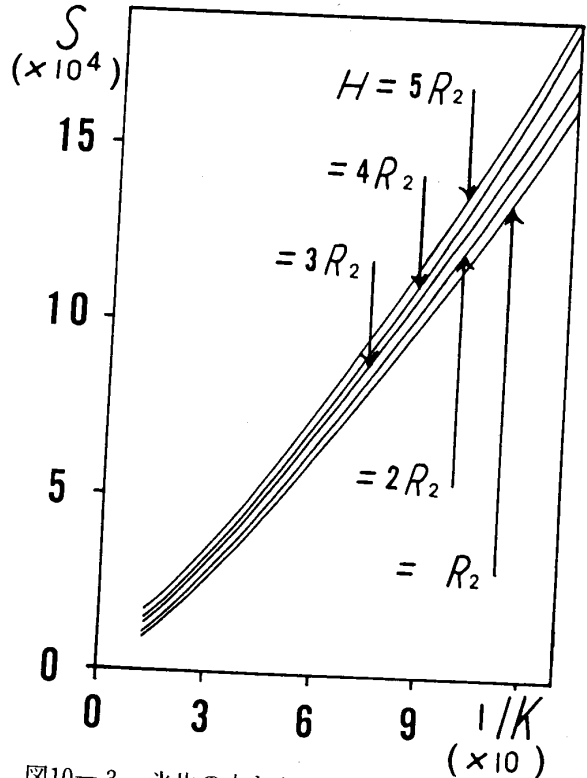


図10-3 氷片の大きさの変化による氷片の飛散領域の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, H パラメーター, $\alpha = 35\pi/36$)

3. 考察

a) 解の妥当性と限界

ここで得られた結果は運動方程式と連続の式 (無次元量 V_2 と $R\Omega_2$ を求めるときに使用⁷⁾) と特性式 (空気の密度 $\rho_a = \text{const.}$) から求められている。従って、氷片の受ける抵抗力の大きさが常に氷片と空気の相対速度の大きさの2乗に比例し、空気の粘性を無視して得られた無次元量 V_2 と $R\Omega_2$ が使用でき、羽根の後流の不連続線に対する仮定が許されるとき⁷⁾、ここで得られた結果は実現する。

b) 板羽根の形

風によって扇形の板羽根が回転するとき、エネルギーを取り出す羽根の部分とエネルギーを消費する羽根の部分とがある。より多くのエネルギーを取り出すためにはこのエネルギーを消費する部分を削除すればよい。削除されたこの板羽根の形は扇形か扇の紙形である¹⁰⁾。この板羽根の内径を含む無次元量 R_1 と外径を含む無次元量 R_2 は次の式¹³⁾で表わされ、これらは羽根の傾き α のみの函数となっている。

$$\begin{cases} R_1 = \frac{-\sin 3\alpha + \sqrt{\sin^2 3\alpha - \sin 2\alpha \sin 4\alpha}}{2\sin\alpha \sin 2\alpha}, \\ R_2 = \frac{-\sin 3\alpha - \sqrt{\sin^2 3\alpha - \sin 2\alpha \sin 4\alpha}}{2\sin\alpha \sin 2\alpha}. \end{cases} \quad (13)$$

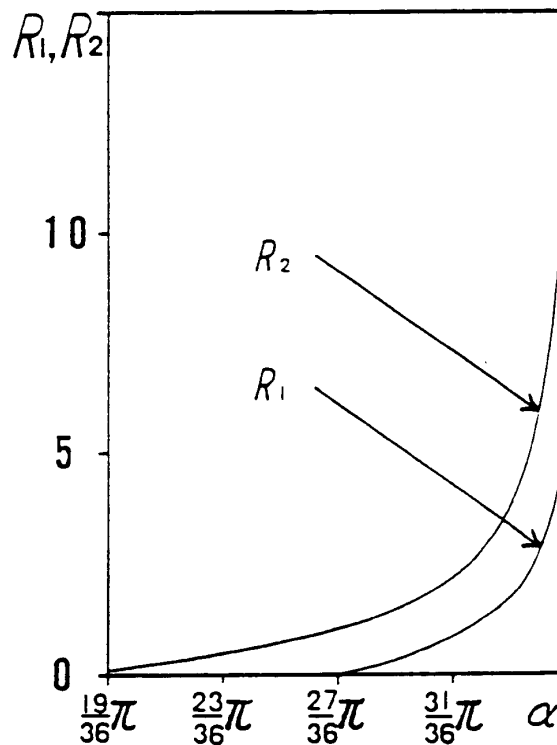


図11 羽根の傾きの変化による羽根の内径と外径の変動

図11はこの様子を示したグラフである。

c) 無次元化

式⑤からわかるように、無次元化は風速 v_1 と羽根の角速度の大きさ ω と羽根の長さ d を用いてなされている。そして、羽根の長さ d を無次元量 D のみに含ませている。また、 $D \geq R_2 \geq R \geq R_1 \geq 0$ であり、無次元量 D は無次元量 R_2 の上限である。風速 v_1 と羽根の角速度の大きさ ω を一定と考え、更に α (従って、 R_2 または D) を羽根の大きさを表わす無次元量、 S を飛散領域の面積を表わす無次元量、 H を風車の高さを表わす無次元量、 $1/K = \omega/v_1$ $k = 8d_1 \rho_i \omega/3C_D \rho_a v_1$ を氷片の半径を表わす無次元量、……のように考えると、有次元量間の関係が得られたグラフから理解されやすい。式⑤の無次元化の方法は風車の大型化による問題を調べるのによい。

d) 数値計算に使用した値

式⑩で与えられている風速 v_1 と羽根の角速度の大きさ ω の範囲は我が国に設置された大型風力発電所における値を調べて定めた。羽根の傾き α はすべての範囲で変化させた。式⑪の抵抗係数 C_D は実測値である。空気の密度 ρ_a は 0°C 1気圧で相対湿度50%における値であり、氷の密度 ρ_i は 0°C 1気圧における値である。氷片の半径 d_1 の範囲をこれに定めた理由は特にない。式⑫の g は国際標準重力式から求めた。この値は緯度 45° で海面からの高さ 0 m におけるものである。

e) 風車の向きが変化しないときの氷片の飛散

図1は羽根へ等間隔に付着した11個の氷片が $\gamma = n\pi/9$ ($n=1, 2, \dots, 18$) でそれぞれ飛散したときの落下点を重畳して記載したものである。同じ飛散領域でも場所によって飛散密度が異なっている。

図2～図4はパラメーターをそれぞれ羽根の傾き α (羽根の大きさを表わす無次元量 R_2)、風車の高さを表わす無次元量 H 、氷片の大きさ(半径)を表わす無次元量 $1/K$ としたときの氷片の飛散領域を示す。氷片の飛散領域は羽根の先端に付着した氷片の落下点をつないで作られる。氷片の飛散領域は羽根の傾きによって大きく変化している(図2)。また、羽根の傾きの大きい風車による氷片の飛散領域の位置は当然のことながら風車の高さによる影響が少ない(図3)。さらに、羽根の傾きの小さい風車では小さい氷片ほどその飛散領域は広く、羽根の傾きの大きい風車では大きい氷片ほどその飛散領域は広い(図4)。そして、羽根の傾きの大きい風車による氷片の飛散領域の横幅は氷片の大きさに強く影響されている(図4)。

f) 風車の向きが変化するときの氷片の飛散

図5～図10は羽根の傾き α (羽根の大きさを表わす無次元量 R_2)、風車の高さを表わす無次元量 H 、氷片の大きさを表わす無次元量 $1/K$ の変化による氷片の飛散領域の変動を示す。風車の向きの変化しない場合における氷片の最大飛散距離を半径とする円の面積がこの場合の氷片の飛散領域のそれである。氷片の飛散領域の面積は羽根の傾きによって大きく変化し、風車の高さによる影響は少ない(図5)。羽根の傾きの大きい風車ほど、氷片の飛散領域の面積に及ぼす氷片の大きさによる影響は大きい(図6)。氷片の飛散領域の面積と風車の高さは羽根の傾きや氷片の大きさにかかわらず直線関係にある(図7, 図8)。羽根の傾きの小さい風車における氷片の飛散領域の面積は小さい氷片ほど大きく、羽根の傾きの大きい風車におけるそれは大きい氷片ほど大きい(図8)。氷片が大きくなると氷片の飛散領域の面積は一定値に近づく(図9)。氷片の大小によるその飛散領域の面積変動を最小にする羽根の傾きが存在する(図10)。例えば、 $G=1.56 \times 10^{-1}$ のときのその値は約 $121\pi/180$ である。

g) 風車の高さ

無次元式 $H = nR_2$ ($n=1, 2, \dots, 5$) が使用されている。羽根の外径を表わす無次元量 R_2 と羽根の内径を表わす無次元量 R_1 は羽根の傾き α で変化するから、羽根の傾きの異なるものの比較は相似形の風車における比較である。

h) その他

単位中心角あたりの羽根より単位時間に得られるエネルギーを表わす無次元量

$$W_T \equiv \frac{1}{\delta} \int_{R_1}^{R_2} WR dR, \quad (14)$$

$$W = -\sin 2\alpha (\cos \alpha \cos 2\alpha \cdot R + \sin 3\alpha \cdot R^2 + \sin \alpha \sin 2\alpha \cdot R^3)^n$$

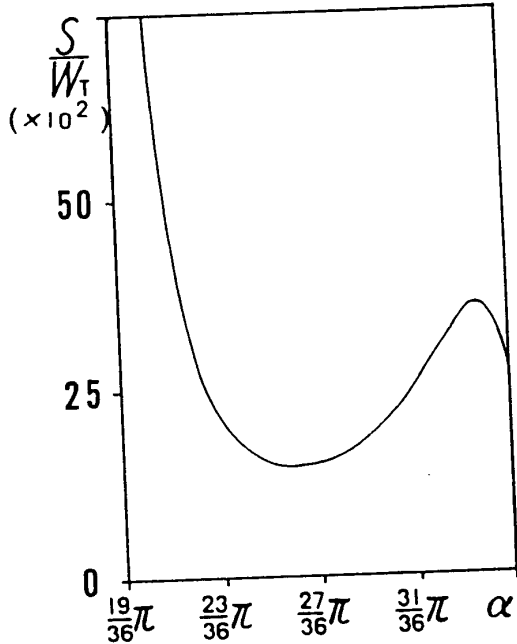


図12-1 羽根の傾きの変化による、氷片の飛散領域の面積と羽根の単位中心角あたり単位時間内に得られるエネルギーとの比の変動 (風車の向き変化, $G=3.75 \times 10^{-1}$, $H=2$, $R_2, 1/K=2.81 \times 10$) ($v_1=1.00 \times 10$ m/s, $\omega=5\pi/6$ 1/s, $d_1=2.50 \times 10^{-2}$ m)

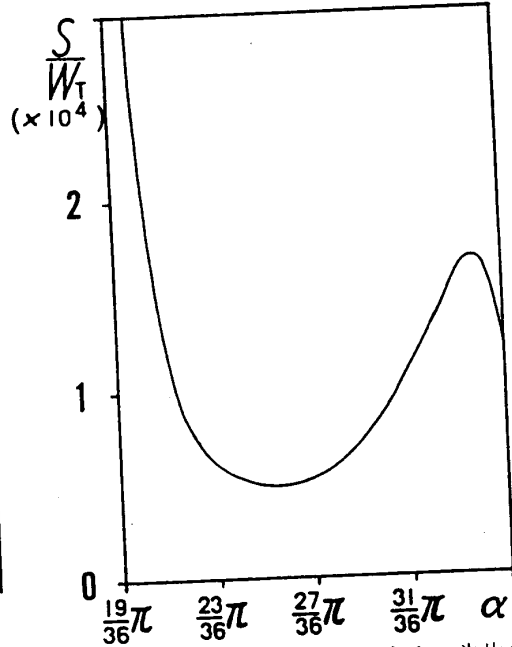


図12-2 羽根の傾きの変化による、氷片の飛散領域の面積と羽根の単位中心角あたり単位時間内に得られるエネルギーとの比の変動 (風車の向き変化, $G=1.56 \times 10^{-1}$, $H=2$, $R_2, 1/K=6.75 \times 10$) ($v_1=1.00 \times 10$ m/s, $\omega=2\pi$ 1/s, $d_1=2.50 \times 10^{-2}$ m)

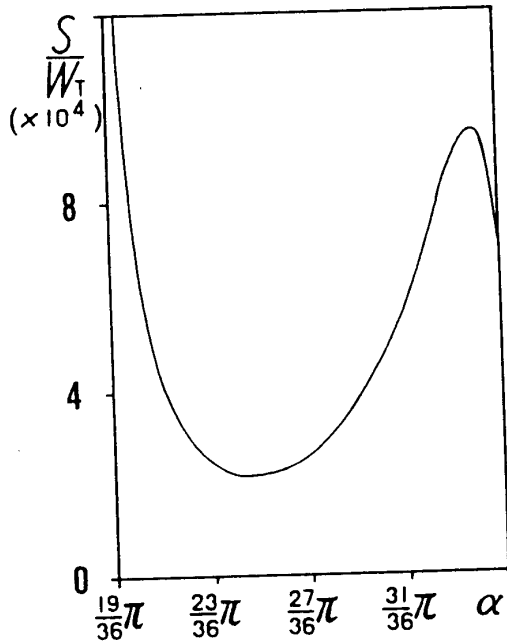


図12-3 羽根の傾きの変化による、氷片の飛散領域の面積と羽根の単位中心角あたり単位時間内に得られるエネルギーとの比の変動 (風車の向き変化, $G=6.24 \times 10^{-2}$, $H=2$, $R_2, 1/K=1.69 \times 10^2$) ($v_1=1.00 \times 10$ m/s, $\omega=5\pi$ 1/s, $d_1=2.50 \times 10^{-2}$ m)

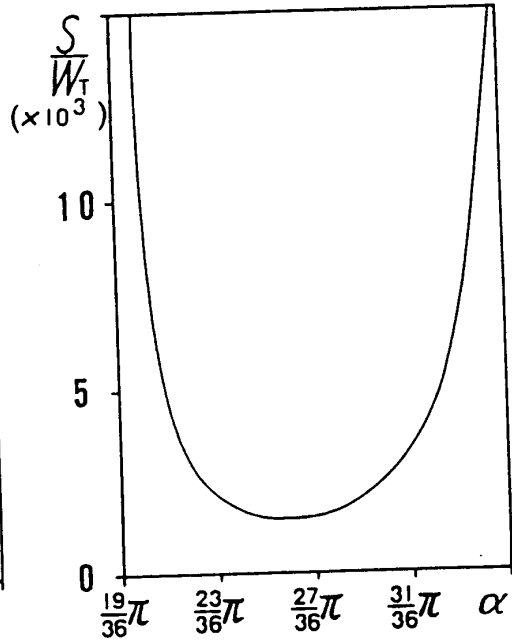


図12-4 羽根の傾きの変化による、氷片の飛散領域の面積と羽根の単位中心角あたり単位時間内に得られるエネルギーとの比の変動 (風車の向き変化, $G=3.90 \times 10^{-1}$, $H=2$, $R_2, 1/K=1.69 \times 10^2$) ($v_1=4.00$ m/s, $\omega=2\pi$ 1/s, $d_1=2.50 \times 10^{-2}$ m)

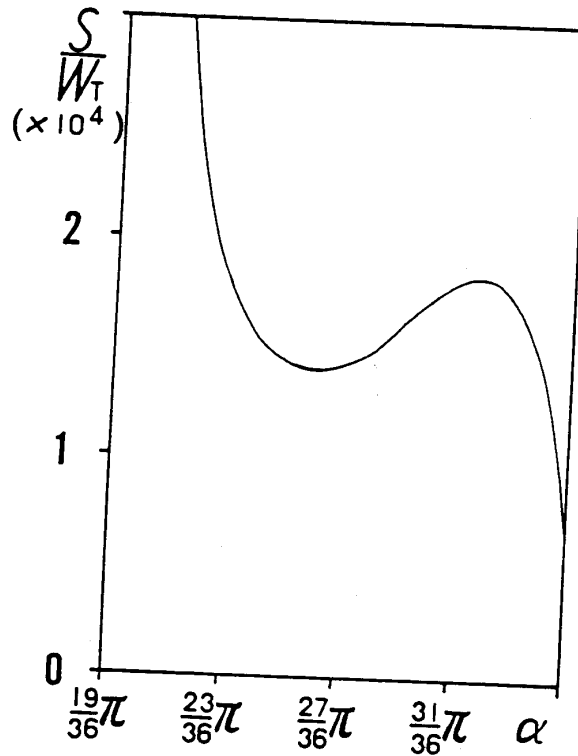


図12-5 羽根の傾きの変化による、氷片の飛散領域の面積と羽根の単位中心角あたり単位時間内に得られるエネルギーとの比の変動 (風車の向き変化, $G=7.80 \times 10^{-2}$, $H=2$, $R_2, 1/K=3.38 \times 10$) ($v_1=2.00 \times 10$ m/s, $\omega=2\pi$ 1/s, $d_1=2.50 \times 10^{-2}$ m)

を導入する。ここで、 δ は羽根の中心角である。

図12は氷片の飛散領域を表わす無次元量 S と式⑭で求めた無次元量 W_T の比が羽根の傾き α (羽根の大きさを表わす無次元量 R_2) によってどのように変化するかを示している。無次元量 G と $1/K$ の変化は風速 v_1 と羽根の角速度の大きさ ω の変化によるものである。無次元量 S/W_T に極小値をとらしめる羽根の傾き α が存在し、この値は式⑩の範囲で約 $32\pi/45 \pm \pi/36$ である。この値の風速 v_1 による変化量は少なく、風車の角速度の大きさ ω による変化量はやや多い。風速 v_1 が大きいと、この極小値の他により小さい最小値が $\alpha \rightarrow \pi$ に現われる。風速 v_1 が約 16 m/s 以上になると風車の角速度の大きさ ω の値にかかわらずこの最小値が極小値より小さくなり、風速 v_1 が約 15 m/s ~ 14 m/s で風車の角速度の大きさ ω が約 $\pi \sim 5\pi/6$ のときも最小値が極小値より小さい。

4. むすび

ひねり羽根についての同様な計算、抵抗力の大きさが氷片と空気の相対速度の大きさの2乗に常には比例しない場合の計算、空気の粘性を考慮して得られた後流の速度を用いた計算等が将来の問題として残されている。

参考文献

- 1) W. J. M. Rankine: Trans. Inst. Naval Architects **6** (1865) 13
- 2) W. Froude: Trans. Inst. Naval Architects **19** (1878) 47
- 3) S. Goldstein: Proc. Roy. Soc. **A 123** (1929) 440
- 4) T. Moriya: J. Fac. Engineering Tokyo Imp. Univ. **20** (1933) 147
- 5) S. Kawada: Rep. Aero. Res. Inst. Tokyo Imp. Univ. **172** (1939)
- 6) K. Kondo: Memo. Fac. Engineering Kyusyu Imp. Univ. **4** (1942)
- 7) 大亀 衛・久保 宏・岸山 剛: 岡山理科大学紀要 第17号 **A** (1981) 35
- 8) 大亀 衛・渡辺 修・雨崎博文: 岡山理科大学紀要 第18号 **A** (1982) 59
- 9) 大亀 衛・田中義範: 岡山理科大学紀要 第19号 **A** (1983) 103
- 10) 大亀 衛・長渡靖典・森 正樹: 岡山理科大学紀要 第20号 **A** (1984) 87
- 11) 大亀 衛・窪川久芳: 岡山理科大学紀要 第22号 **A** (1986) 83

Scatter-Domain of the Ice-Fragment Adhering to the Blades of a Wind-Turbine

Mamoru OHKAME, Masayuki NAKATANI and Hiroyuki NAKATU

*Department of Applied Physics, Okayama
University of Science*

Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1987)

For the cases of the rotating axis of the blades varying in all directions and of their rotating axis being fixed in the constant direction, the scatter-domain of the ice = fragment is analytically and numerically studied. A plate-blade is used. It is the shape of a sector or the shape bounded by two circles and one sector with a common center. Those parts of the blade which spend the energy are removed.

First of all, the equations of the motion for the ice-fragment are formed by means of analytical calculation. The forces acting on the ice-fragment are the gravity and the resistance against the air, which is proportional to square velocity of the ice-fragment. When the resistance was calculated, the wake of the blade is considered in the calculation.

Next, the equations of the motion for the ice-fragment are solved by means of numerical calculation. The variation of the scatter-domain for the tangent of blade, that for the height of the wind-turbine, and that for the size of the ice are obtained. The fall-density of the ice-fragment is also obtained.

The area of the scatter-domain of the ice-fragment, which is divided by the energy obtained from the blades, is also investigated.