

直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重に及ぼす断面形状の影響について

Vertical Ice Load Acting on Pile Structures with Various Cross-sections

寺島貴志*・西畑昭史*・成田恭一**・川合邦広***・本田秀樹****・佐伯 浩*****

Takashi Terashima, Akifumi Nishihata, Kyo-ichi Narita, Kunihiro Kawai, Hideki Honda, Hiroshi Saeki

In cold regions, natural ice sheets adfreeze to piles, bridge piers, oil-rigs, etc. constructed in the sea and the ocean. Due to changes in the water level, vertical ice loads act on the structures. These ice loads need to be studied to design pile structures affected by natural ice sheets.

Ice loads acting on pile structures with circular cross-sections have been explained analytically. However, ice loads acting on pile structures with other cross-sections have never been researched. In this report, we study ice loads acting on pile structures with elliptical or rectangular cross-sections theoretically and experimentally.

Keywords: vertical ice load, cross-sections of pile structures, adfreezing failure, flexural failure

1. はじめに

寒冷地における海岸、海洋、湖沼などに建設される栈橋、係船杭、石油掘削リグ、取水塔などの直立構造物に氷盤が凍着している状態で、潮汐などに伴う水位変動があると、構造物に鉛直上下方向の氷荷重が作用する。過去に我が国で、この氷荷重により水位観測塔が引き抜かれたり、取水塔が倒壊した例がある。また米国の五大湖で、この氷荷重により栈橋の杭が引き抜かれる被害がよく発生する。したがって、氷荷重の作用を受ける海洋構造物を設計する際には、この鉛直方向氷荷重を十分に考慮する必要がある。しかし、この鉛直方向氷荷重の理論解は得られているものの、実験的検証がほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、鉛直方向氷荷重を計測する実規模での野外実験を初めて実施し、理論解析と比較することにより、鉛直方向氷荷重に及ぼす構造物の断面形状の影響について明らかにする。

2. 理論解析

2-1. 断面が円形の場合

断面が円形の場合の氷荷重は、1) 氷盤破壊前の氷荷重、2) 初期クラックが発生する場合の氷荷重、3) 最終クラックが発生する場合の氷荷重及び4) 凍着破壊が起こる場合の氷荷重の4つに大別することができる。以下に、各々の氷荷重の算定式を示す。

1) 氷盤破壊前の氷荷重

Kerr¹⁾ は氷盤を弾性床上の無限に大きな薄い平板と仮定して、弾性学的に氷荷重 P_1 を次式のように表した。

$$P_1 = 2\pi a D \lambda^3 \Delta \frac{[kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2}{kei(\lambda a) ker'(\lambda a) - kei'(\lambda a) ker(\lambda a)} \quad (2-1-1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2-1-2)$$

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{k_w}{D}} \quad (2-1-3)$$

ここで、 k_w は淡水または海水の単位体積重量、 D は氷盤の平板剛度、 E は氷盤の曲げ弾性率、 h は氷盤の厚さ(氷厚)、 ν は氷のポアソン比、 ker と kei は Kelvin 関数、 a は断面半径、 Δ は水位変動量である。

2) 初期クラックが発生する場合の氷荷重

佐伯ら²⁾ は、初期クラック発生時点の氷荷重 P_{max1} を次式のように表した。

$$P_{max1} = \frac{\pi \sigma_f h^2}{3} \frac{\lambda a \{ [kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2 \}}{kei'(\lambda a) kei(\lambda a) + ker'(\lambda a) ker(\lambda a)} \quad (2-1-4)$$

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ (株)

** 正会員 島田建設 (株)

*** 正会員 (株) 西村組

**** 学生会員 北海道大学大学院

***** 正会員 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北 13 条西 8 丁目)

ここで、 σ_f は氷盤の曲げ強度である。

一方、Christensen³⁾によると、初期クラック発生後の氷荷重 P_2 は次式で表される。

$$P_2 = \frac{2\pi k_w \Delta}{\lambda^2 [Dn_2(\lambda a) Dn_3''(\lambda a) - Dn_2''(\lambda a) Dn_3(\lambda a)]} [Dn_3'''(\lambda a) I_2 - Dn_2'''(\lambda a) I_3] \quad (2-1-5)$$

$$I_2 = 0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_2(x) dx \quad I_3 = -0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_3(x) dx$$

ここで、 Dn_2 と Dn_3 は Nevel によって定義された関数である。

3) 最終クラックが発生する場合の氷荷重

最終クラック発生時点の氷荷重 $P_{\max 2}$ は Nevel によると、近似的に次式のように表される。

$$P_{\max 2} = 1.154 \sigma_f h^2 [1.05 + 2\lambda a + (\lambda a)^3 / 2] \quad (2-1-6)$$

4) 凍着破壊が起こる場合の氷荷重

凍着破壊が起こる時点の氷荷重 P_B は次式のように表される。

$$P_B = 2\pi a h \tau_B \quad (2-1-7)$$

ここで、 τ_B は構造物表面と氷盤の凍着強度である。

2-2. 断面が楕円形の場合

2-1. で円形断面の場合に円柱座標が用いられているのに対して、木岡ら⁶⁾が楕円形断面の場合に楕円柱座標を用いて解析したものを以下に述べる。

氷盤破壊前の氷荷重 P_1 は次式で表される。

$$P_1 = 2\pi N D \lambda^3 \Delta \frac{[kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2}{kei(\lambda a) ker'(\lambda a) - kei'(\lambda a) ker(\lambda a)} \quad (2-2-1)$$

ここで、 A は断面の短径、 B は断面の長径、 $N (= (A+B)/2)$ は長径と短径の平均長である。

初期クラック発生時点の氷荷重 $P_{\max 1}$ は次式で表される。

$$P_{\max 1} = \frac{4\pi \lambda N K^2 \sigma_f h^2}{3(K+1)^2} \frac{[kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2}{ker(\lambda N) ker'(\lambda N) + kei(\lambda N) kei'(\lambda N)} \quad (2-2-2)$$

ここで、 $K (= A/B)$ は楕円形断面の扁平率である。

初期クラック発生前に凍着破壊が起こる時点の氷荷重 P_{B1} は次式で表される。

$$P_{B1} = \frac{4\pi N K \tau_B h}{K+1} \quad (2-2-3)$$

初期クラックが発生した後は構造物境界に沿って氷盤のせん断力の分布は均等になると考えられる。したがって、初期クラック発生後に凍着破壊が起こる時点の氷荷重 P_{B2} は氷盤と構造物の接触面積および凍着強度から次式となる。

$$P_{B2} = (\text{楕円形断面の周長}) \cdot h \cdot \tau_B \quad (2-2-4)$$

3. 野外実験

3-1. 実験方法

1997年1月に、潮汐の影響を受けない網走湖の呼人漁港で実規模の野外実験を実施した。野外実験では、直立杭状構造物をモデル化したスチール製で中空の杭を使用した。表3-1-1に示すように、その断面形状は円形、楕円形及び正方形の3種類である。円形は半径（断面積）の異なるものを大小2種類、正方形は円形と断面積が同じものを大小2種類、楕円形は円形（大）と断面積が同じで長径と短径の比（扁平率 K ）が異なるものを2種類、合計6タイプの模型杭を使用した。

以下に、実験の手順を示す。

- 1) 漁港内の水面が凍結する前に、岸壁から10m程度離してモデル杭を浮かべた。
- 2) 港内が結氷して杭に氷盤が凍着後、図3-1-1に示すように、杭を鉛直方向に速度0.13mm毎秒でクレーンで引き上げた。これは実現象における潮汐による水位変動速度に近い値である。この時に、クレーンと杭との間にロードセルを介して杭の引き抜き力を計測した。同時に、杭の設置地点、設置地点より2m、4m、6

mの4地点において、5秒間隔で杭の変位とその周囲の氷盤の変位をレベルで計測した。ここで、杭の引き抜き力と杭の変位はそれぞれ、実際の現象における氷荷重と水位変動量に相当するものとする。

3) 氷盤の曲げ破壊または氷盤と杭の凍着破壊が起こり、杭が完全に引き抜かれるまで計測を継続した。この間に、曲げ破壊時の氷盤からの発生源と氷盤のクラックパターンを目視とビデオ撮影により観察した。

4) 現場の氷盤から直方体の供試体（供試体寸法：15cm×15cm×100cm）を切り出して、単純桁の3点曲げ試験から曲げ弾性率と曲げ強度を求めた。また、同時に現場の氷厚を計測した。

5) 今回の実験における氷盤と杭表面の凍着強度を、中澤ら⁴⁾による過去の系統的な実験のデータから推定した。

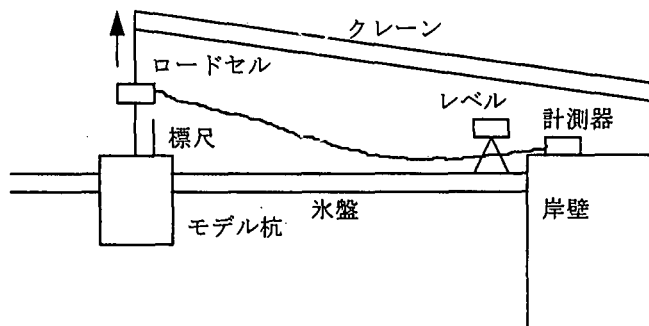


図 3-1-1; 実験状況

表 3-1-1; 杭の断面スケール

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5	タイプ 6
断面形状	円形	円形	楕円形	楕円形	正方形	正方形
断面スケール	半径 25.4cm	半径 40.0cm	短径 28.3cm 長径 56.6cm 扁平率 1/2	短径 23.1cm 長径 69.3cm 扁平率 1/3	辺長 45.0cm	辺長 70.9cm
断面積	2027cm ²	5027cm ²	5026cm ²	5026cm ²	2027cm ²	5027cm ²
周長	160cm	251cm	275cm	310cm	180cm	284cm

3-2. 実験結果

1) 氷盤の破壊形態

図 3-2-1 に杭の断面形状が円形、楕円形及び正方形の場合の氷盤の破壊形態を示す。

図 3-2-1(a)のように、円形断面の場合には、はじめに6本の放射状のクラックが発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。理論的には図に示しているように、放射状のクラックの発生に引き続いて同心円状のクラックが発生する場合もあるが、本実験では同心円状のクラックは発生しなかった。

図 3-2-1(b)のように、楕円形断面の場合にも、円形断面と同様に、はじめに6本の放射状のクラックが発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。理論的には図に示しているように、放射状のクラックの発生に引き続いて同心円状のクラックが発生する場合もあるが、本実験では同心円状のクラックは発生しなかった。

図 3-2-1(c)のように、正方形断面の場合には、はじめに4本の初期クラックが隅角部から発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。理論的には図に示しているように、放射状のクラックの発生に引き続いて最終クラックが発生する場合もあるが本実験では最終クラックは発生しなかった。

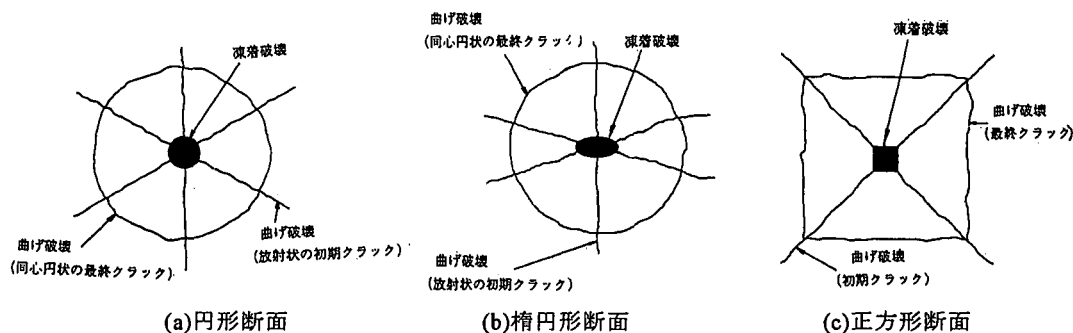


図3-2-1; 氷盤の破壊形態

2) 氷荷重の理論値と実験値の比較

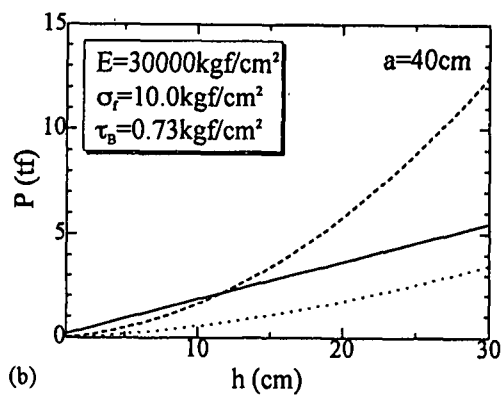
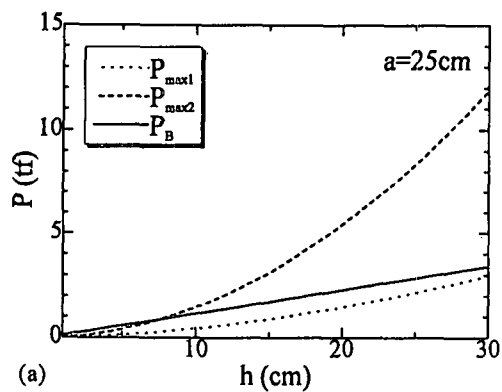


図 3-2-2; h と P_{max1} , P_{max2} , P_B の関係

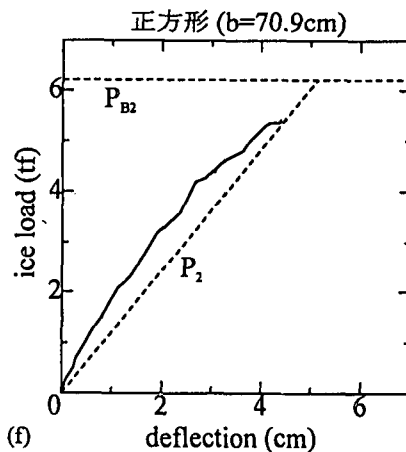
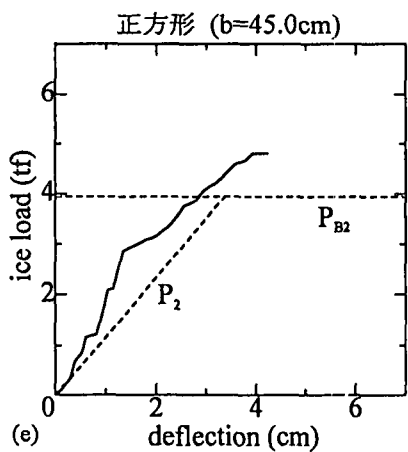
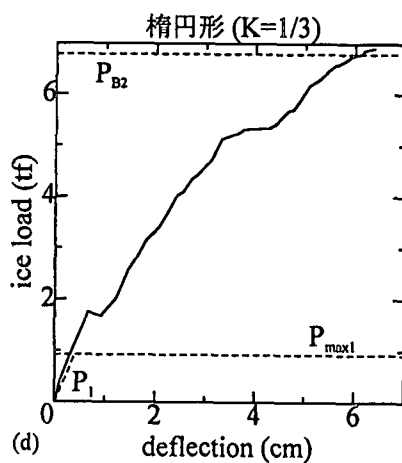
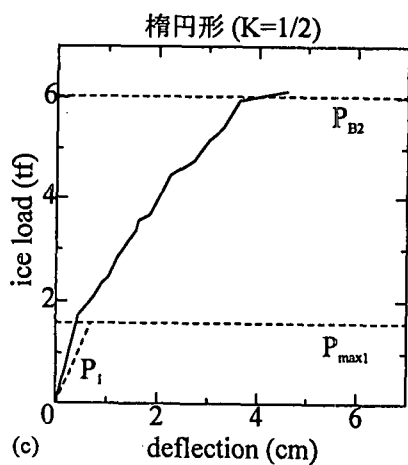
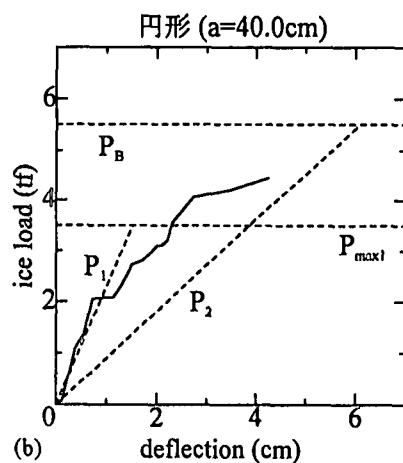
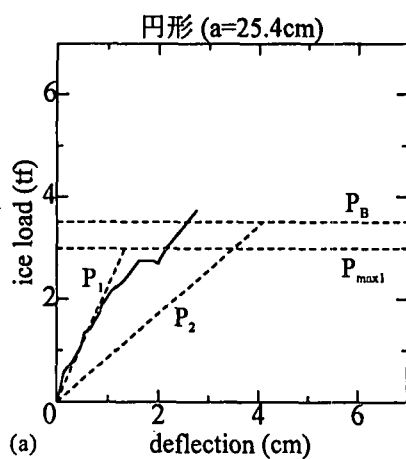


図 3-2-3; 杭の変位（水位変動量）と引き抜き力（氷荷重）の関係

図3-2-2は今回の実験における杭周辺の氷盤の破壊モードを推定するために、2-1.の理論から半径 $a=25\text{cm}$ と $a=40\text{cm}$ の円形断面の場合について氷厚 h を変化させて $P_{\max1}$ と $P_{\max2}$ と P_B を計算した結果である。理論式に用いたパラメーターのうちで、ヤング率 E と曲げ強度 σ_f は単純桁の3点曲げ試験から、 $E=30000\text{kgf/cm}^2$ と $\sigma_f=10.0\text{kgf/cm}^2$ の値を得た。また凍着強度 τ_B は過去の系統的な実験のデータから、 $\tau_B=0.73\text{kgf/cm}^2$ と推定された。現場では実測により $h=30\text{cm}$ であったため、図3-2-2(a)から $a=25\text{cm}$ の場合について理論的には、まず氷荷重が $P_{\max1}$ に達した時点で氷盤に杭近傍から放射状のクラック（初期クラック）が発生する。その後に杭から離れたところで同心円状のクラック（最終クラック）が発生する時点の氷荷重 $P_{\max2}$ は非常に大きくなるため、その前に氷荷重が P_B に達した時点で氷盤と杭表面の剝離（凍着破壊）が起こると予想された。図3-2-2(b)から、 $a=40\text{cm}$ の場合も同様の破壊モードになると理論的には予想された。

図3-2-3は杭の変位（水位変動量）と引き抜き力（氷荷重）の関係を示したもので、曲線は今回の実験における実測値、直線は前述の理論による計算値である。

円形の場合については図3-2-3(a)(b)に示し、 P_1 は理論による初期クラック発生前の杭の変位に対する氷荷重で、 P_2 はその後の氷荷重である。初期クラック発生の前と後の実測値の曲線の傾きがそれぞれ、 P_1 および P_2 の傾きとおおむね一致した。また、理論上の $P_{\max1}$ の付近で実際に放射状のクラックが発生し、それに続いて理論上の P_B の付近で実際に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、その時点の氷荷重が最大となった。結局、 $P_1, P_2, P_{\max1}, P_B$ の理論式の妥当性が確認された。

楕円形の場合については図3-2-3(c)(d)に示し、同じ断面積の円形の場合に比べて早期に、理論上の $P_{\max1}$ の付近で放射状のクラックが実際に発生した。そして、同心円状のクラックが発生する前に、理論上の P_{B2} の付近で実際に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、その時点の氷荷重が最大となった。この最大氷荷重は同じ断面積の円形の場合より大きく、特に $K=1/2$ より $K=1/3$ の楕円形の場合の方が大きくなった。また、初期クラック発生前の実測値の曲線の傾きと理論上の P_1 の傾きがおおむね一致した。結局、 $P_{\max1}, P_{B2}, P_1$ の理論式の妥当性が確認された。

正方形の場合については図3-2-3(e)(f)に示し、同じ断面積の円形の場合に比べて早期に、放射状のクラックが隅角部から発生した。そして、最終クラックが発生する前に、計算上の凍着力 P_{B2} （接触面積に凍着強度をかけた値）の付近で実際に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、その時点の氷荷重が最大となった。この最大氷荷重は同じ断面積の円形の場合より大きくなった。

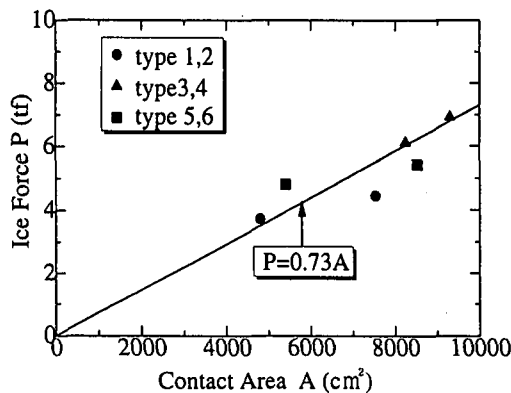


図 3-2-4; 接触面積と最大氷荷重の関係

図3-2-4は杭と氷盤の接触面積と杭に作用した最大氷荷重の関係を全種類の杭に対してまとめたものである。今回はいずれの断面形状の杭に対しても最大氷荷重は凍着破壊時に作用することになった。それらの最大氷荷重は凍着強度 $\tau_B=0.73\text{kgf/cm}^2$ を傾きとする直線上にほぼ一致して分布している。

4. おわりに

以上の計算と実験の結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) これまで、初期クラックが発生するとすぐに最終クラックが発生すると考えられていたが、氷盤が厚い場合には $P_{\max2}$ が $P_{\max1}$ に比べてかなり大きくなることが分かった。この事実から、最大氷荷重の決定はより複雑であることが明らかとなった。
- 2) 今回の実験では氷厚が30cmと厚く、 $P_B < P_{\max2}$ となったため、最終クラック発生前に凍着破壊が起こって杭が引き抜かれ、その時点の氷荷重が最大となった。
- 3) 正方形断面の場合には、実験では凍着破壊時に最大氷荷重が作用することになり、同じ断面積の円形の場合に比べて杭と氷盤の接触面積が大きくなるため、最大氷荷重が大きくなることが分かった。

- 4) 楕円形断面の場合についても、同じ断面積の円形の場合に比べて3)と同様に最大氷荷重が大きくなることが分かった。
- 5) 氷荷重に関わるパラメーター（氷厚、断面のスケールおよび形状、曲げ弾性率、曲げ強度、凍着強度）のうちで、人工的に制御できるものは構造物の断面のスケールおよび形状と凍着強度のみであり、同じ断面積の構造物に作用する最大氷荷重を軽減するためには、3)と4)のことから断面形状を円形にし、さらにその材料表面に凍着強度の小さい塗料（INERTA160やZEBRONなど）や合成材料を被覆して、凍着破壊を起こりやすくする方法が考えられる。

参考文献

- 1) A. D. Kerr; Ice Forces on Structures Due to a Change of the Water Level; Proceedings of The 3ed International Symposium on Ice Problems (1975), pp. 419-427.
- 2) 佐伯浩、小野敏行、山田満、尾崎晃；直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究；第28回海岸工学講演会論文集（1981）, pp. 396-400.
- 3) F. T. Christensen; Interaction between Floating Ice Sheets and Vertical Structures Due to Water Level Fluctuations; Technical University of Denmark (1986).
- 4) 中澤直樹、五十嵐昇、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩；海氷と構造物材料表面間の凍着強度について；第1回寒地技術シンポジウム講演論文集（1985）, pp. 172-177.
- 5) 西畑昭史、木岡信治、成田恭一、寺島貴志、佐伯浩；楕円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重；第12回海洋開発論文集（1996）, pp. 349-354.