

## II-1 波浪による氷盤の運動に関する研究

北大工学部 学員 〇泉山 耕  
正員 佐伯 浩  
正員 尾崎 晃

### 1. はじめに.

冬季に流氷のおし寄せする北洋の沿岸においては、流氷による種々の問題が発生する。漁業の面では、流氷の侵入、流氷が海底をこする事などのためにひき起こされる養殖魚介類の被害があり、土木事業という立場に立つと、流氷の衝突、又はその氷圧による構造物の損傷、破壊の問題が挙げられる。これらの問題は、波に起因する流氷の運動が原因となるものが大部分を占める。

過去、ブイ、浮防波堤などの波浪中の運動に関する研究はいくつか例がある。しかし、氷板のような自由に運動する板状浮体についての研究はほとんど行われていない。本研究は、これら波による浮体の運動に関する研究の一つとしての意味も含め、氷板の波浪中における挙動についての実験による基礎的研究である。

実験により得られた結果は、主として次の二点についてまとめた。一つは、浮体の運動の形状についてであり、もう一つは、その水平最大変位についてである。

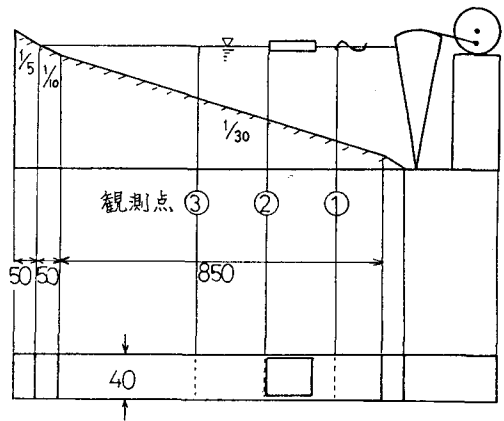
### 2 実験

実験は図-1に示すように長さ約10m、幅40cmの水路水槽を用いて床勾配を1/30として行った。水路中に三ヶ所の観測点①、②、③と設け、波の周期T、波高H、浮体の水路方向の長さLを変化させ、浮体の運動の観測を行った。波高は各周期につき、破壊しない範囲で最大6種類変化させ、抵抗線式波高計でその値を測定した。実験条件の範囲を表-1に示す。浮体はポリ塩化ビフェニル製の板で、幅 $B=39\text{cm}$ 、厚 $S=1.5\text{cm}$ は実験全体を通じて一定である。またその比重は海水と対応させて、0.9とした。

観測方法について多少説明を加える。板の運動は、衝突の場合を考えて波の進行方向最先端部をもって代表させた。この点に光点をとりつけ、これに上方から

図-1 実験装置(単位 cm)

a. 水路水槽



b. 浮体

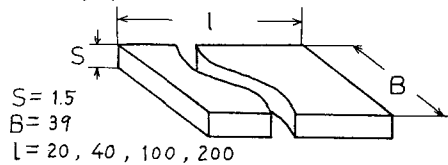


表-1 実験条件

| 観測点 | h (cm) | H (cm) | H/L     |
|-----|--------|--------|---------|
| ①   | 30.00  | 1.62   | 0.00560 |
|     |        | 12.80  | 0.09325 |
| ②   | 23.33  | 1.81   | 0.00699 |
|     |        | 13.20  | 0.10347 |
| ③   | 16.67  | 2.04   | 0.00914 |
|     |        | 10.85  | 0.09386 |

T = 1.0, 1.3, 1.5, 1.8 sec

ストロボにより断続的に光をあて、その動きをカメラのシャッターを開放にして撮影した。また側壁ガラス上に5mm間隔の格子を描いておき、これにより解析時の縮尺を決定した。撮影は反射光の影響を避けるために、4〜10波目の間とし、個々のケースについて2回ずつ行った。解析は更紗により得られたネガフィルムを、スライド式影写機により紙上に投射して光点軌跡を写しとって行った。

### 3 運動形状

#### 1) 運動形状の分類

浮体先端部の運動形状を、大きく次の6個の型に分けた。これらを依に、A〜F typeと名づける。それぞれの特徴は次のとおりである。

A type: 軌跡が閉じている。

B type: 軌跡が閉じず、波の進行方向への輸送がみられる。

C type: B type より輸送が顕著となる。

D type: 軌跡が交叉しない。

E type: 軌跡の交叉がなく、後退部もない。

F type: 全体としての移動方向が斜め下方となり、最終的には板先端部が水底床部まで達する。  
(以下これを「沈む」と表現する。)

それぞれの type の代表的な光点の軌跡形状の例を、図-2に示す。

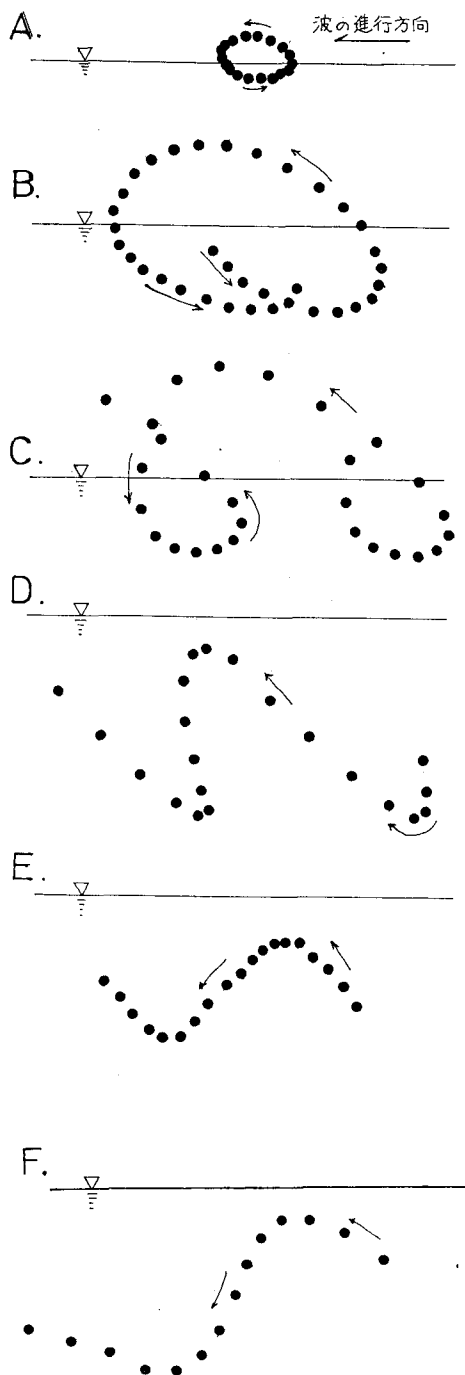
ここで各運動形状を水粒子のそれと比べると次のような事が言えよう。A type と B type はそれぞれ、浮体が微小振幅波とみなせる波と有限振幅波により運動している状態と考えられる。また D, E, F type は水粒子運動には見られない形状であり、浮体が波動に 응답できなくなった状態と考えられる。

#### 2) 各 type の発生領域

波は各波動理論の適用にあたり、アーセル数  $U = H/L$  により分類される。また更紗より経験的に、板長が長い程、周期が小さい程 D, E, F type の運動が起こる事がわかった。そこで  $U$  と  $l/L$  を用い各 type の発生領域を表わしたのが図-3である。なお本研究において波長は、文献1)により求めている。

前述の各 type に対する考察を用い、図-3 は次の3領域に分ける事ができよう。各領域の名称は筆者によ

(図-2) 光点の軌跡形状



る仮称である。

#### 1) 安定領域 ( $\ell/L \leq 0.4$ )

浮体が「波に乗って」運動している状態。U、 $\ell/L$  が共に小さな値の時には波による輸送がみられない場合もある。

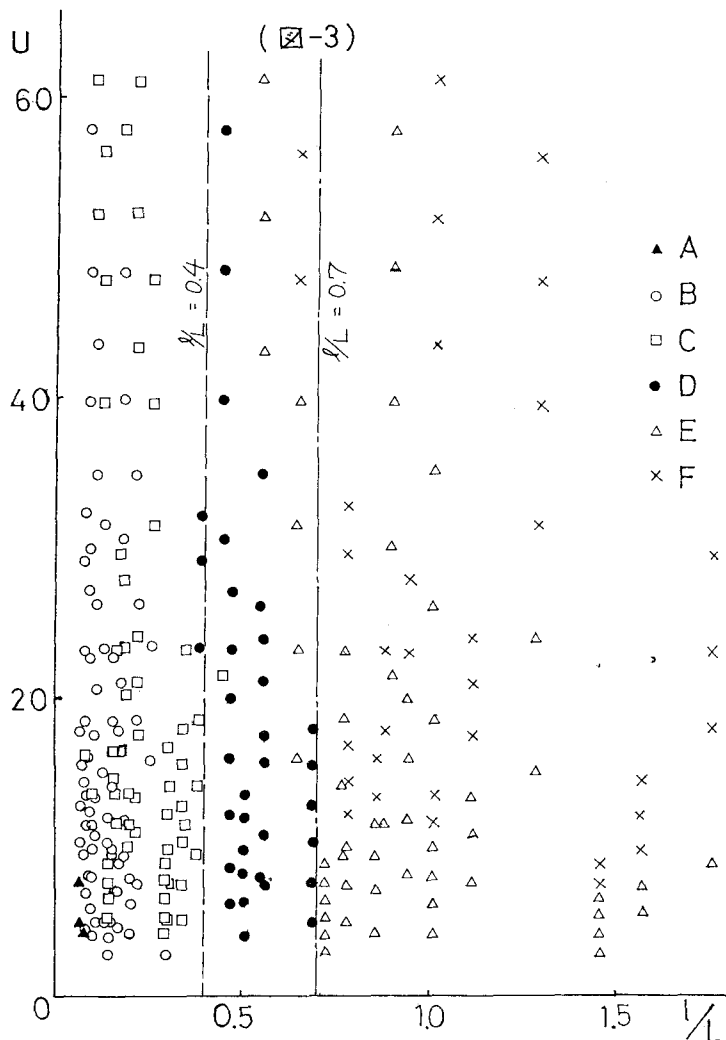
#### 2) 不安定領域 ( $0.7 \leq \ell/L$ )

浮体が波動に追いつかず、水平方向には波の進行方向への速度成分しか持たず、アーセル数が10程度以上になると沈む場合も見られる。

#### 3) 遷移領域 ( $0.4 \leq \ell/L \leq 0.7$ )

1) と 2) の中間領域。沈み状態はみられないが、波動に対する浮体の応答はかなり悪い。

以上が図-3 における3領域である。ただし各領域の境界値は本実験の範囲内 ( $3.0 \leq U \leq 67.9$ ) では成立すると考えられる値で、アーセル数がさらに大きな場合には異なる値(アーセル数の増加に伴い、徐々に小さな値になると予想される。)となろう。また本研究において密度は0.9で一定であり、木材のようにもっと密度の小さな浮体の場合は、違った結果が得られるかもしれない。



#### 4 水平最大速度

##### 1) Michel による衝撃力の式<sup>2)</sup>

Michel は氷板の舷に及ぼす衝撃力を、次のようにして求めている。

$$\text{衝撃力 } F = \sigma_i y_0 b \quad (1)$$

$$\text{エネルギー } E = m V^2 / 2 = A \sigma_i b \quad (2)$$

上式において各記号は図-4のとおりである。舷と頂角  $2\alpha$  を持つくさび型とし、その対称軸方向から氷板が衝突すると仮定すると

$$A = x_0 y_0 / 2 = y_0^2 / 4 \tan \alpha \quad (3)$$

上式を2)式に代入して、

$$F_i S b V^2 / 2 = y_0^2 \sigma_i b / 4 \tan \alpha \quad (4)$$

ゆえに、

$$y_0 = \sqrt{2 F_i S V^2 \tan \alpha / \sigma_i} \quad (5)$$

1) 式に代入して、

$$F = V b \sqrt{2 F_i S \sigma_i \tan \alpha} \quad (6)$$

6) 式が氷板が舷に及ぼす衝撃力についての Michel の基本式である。

式において

$$S = \beta \ell^2 \quad (7)$$

とおくと、式は次のように変形できる。

$$F = V b \ell \sqrt{2 \beta F_i \sigma_i \tan \alpha} \quad (8)$$

また、エネルギー E、運動量 M は、それぞれ次となる。

$$E = \beta R b l^2 V^2 / 2$$

$$M = \beta R b l^2 V$$

9)

10)

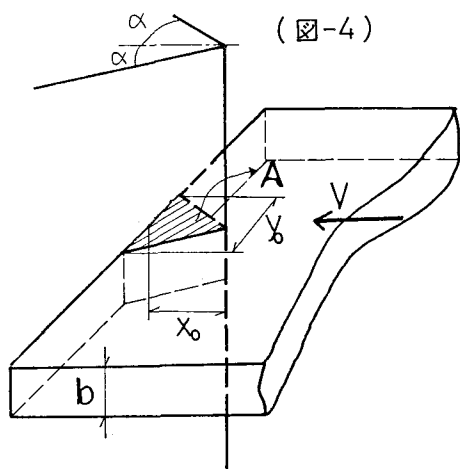
式において、貫入深さ $z_0$ 、貫入幅 $y_0$ がその結果に入らない。これは杭の断面形状をくさび型と仮定したためであり、他の断面形状を仮定すると、 $z_0$ 、 $y_0$ がその結果の中に入って来る。例えば、矩形断面の杭について土質と同様の方法で氷の衝撃力を求めると次となる。

$$F = V \cdot b \cdot l \sqrt{\beta R \sigma_i B / 2 z_0}$$

11)

ただし $B$ は杭の幅でありすなわち、 $B = y_0$ である。

本研究においては、8)式を使用する。



氷の面積： $S$

氷の強度： $\sigma_i$

氷の密度： $\rho_i$

## 2) 水平最大速度と板長

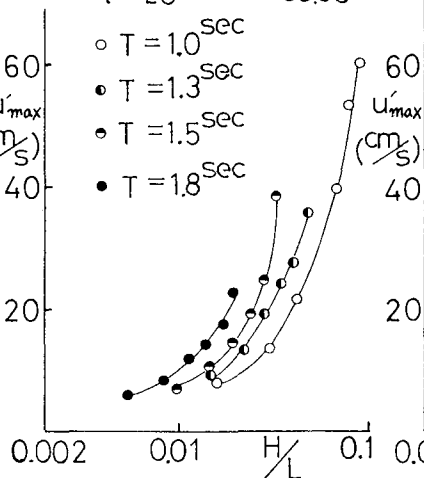
実験により得られた、板先端の水平最大速度 $U_{max}$ を板長 $l$  (図-5) ごとに、周期をパラメータとして、 $H/L$ で整理した図が図-5 ~ 8 である。これらの図より、 $U_{max}$ は、 $l$ 、 $T$ 、 $H/L$ すべてに依存し、 $l$ が小さい程、 $T$ が小さい程、 $H/L$ が大きくなると値をとることがわかる。ただしこの場合、 $l$ は2の結果から考えても $l/L$ の形で影響すると考えられる。

以上の諸量をまとめるため、板先端の水平最大速度を、その場所の水粒子の水平最大速度 $U_{max}$ で割った値を考える。

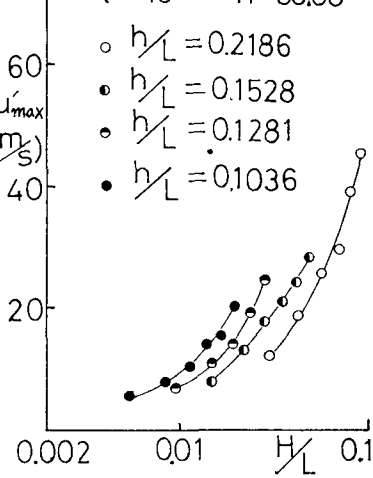
Skjeltbreia によると波衰中の水粒子の水平速度 $U$ は、次式で与えられる。<sup>3)</sup>

$$U = C \left[ F_1 \cosh 2\pi(h+z)/L \times \cos(2\pi x/L - 2\pi t/T) + F_2 \cosh 4\pi(h+z)/L \times \cos(4\pi x/L - 4\pi t/T) + F_3 \cosh 6\pi(h+z)/L \times \cos(6\pi x/L - 6\pi t/T) \right]$$

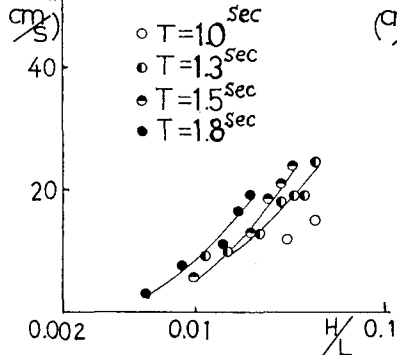
$l = 20 \text{ cm}$   $h = 30.00 \text{ cm}$  (図-6)



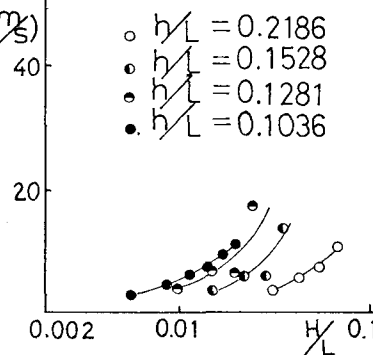
$l = 40 \text{ cm}$   $h = 30.00 \text{ cm}$



$l = 100 \text{ cm}$  (図-7)



$l = 200 \text{ cm}$  (図-8)



そこで

$$F_1 = \frac{2\pi a}{L} / \sinh \frac{2\pi h}{L}$$

$$F_2 = \frac{3\pi a^2}{L^2} / \sinh^4 \frac{2\pi h}{L}$$

$$F_3 = \frac{3\pi a^3}{8L^3} \left( 11 - 2 \cosh \frac{4\pi h}{L} \right) / \sinh \frac{2\pi h}{L}$$

$$a = \frac{H}{2} - \frac{3}{128} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 H^3 / \sinh^6 \frac{2\pi h}{L} \times (8 \cosh^6 \frac{2\pi h}{L} + 1)$$

以上の式は  $u$  が  $1/4L$ ,  $1/2L$  の関数である事を示している。従って  $U_{max}/U_{max}$  は、 $1/4L$  ( $T$ ),  $1/2L$  を含むことを意味する。以上のような考察より、 $U_{max}/U_{max}$  と  $1/4L$  を整理したグラフが図9である。

### 3) 試算

図9より、波の諸元及び板長  $L$  を与えるとその板の持ち得る水平最大速度が求められる。この値及び式8), 10)を用いて氷板の持ち得る最大の衝撃力、運動量を試算する。

波の諸元は次のように与え、氷板は正方形 ( $\rho = 1.0$ ) とする。

CASE-1.

$$T = 5 \text{ sec} \quad h = 5 \text{ m} \quad H = 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 \text{ m}$$

CASE-2

$$T = 10 \text{ sec} \quad h = 10 \text{ m} \quad H = 5, 4, 3, 2, 1 \text{ m}$$

氷の諸元

$$\rho_i = 0.9 \text{ t/m}^3 / 9.8 \text{ m/sec}^2 = 0.0918 \text{ t sec}^2/\text{m}^4$$

$$\sigma_i = 35 \text{ kg/cm}^2 = 350 \text{ t/m}^2$$

$$b = 0.5 \text{ m}$$

なお、計算は図-9の上側包絡線(破線)を用いて行なう。

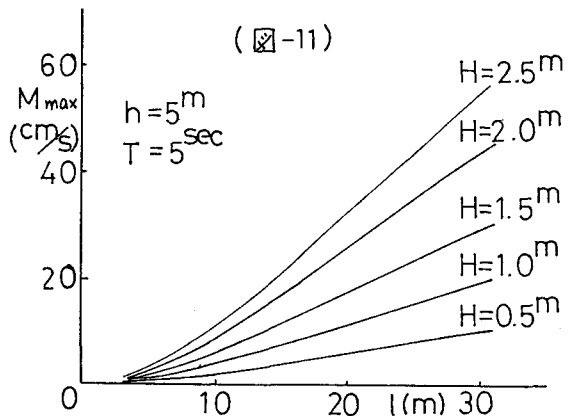
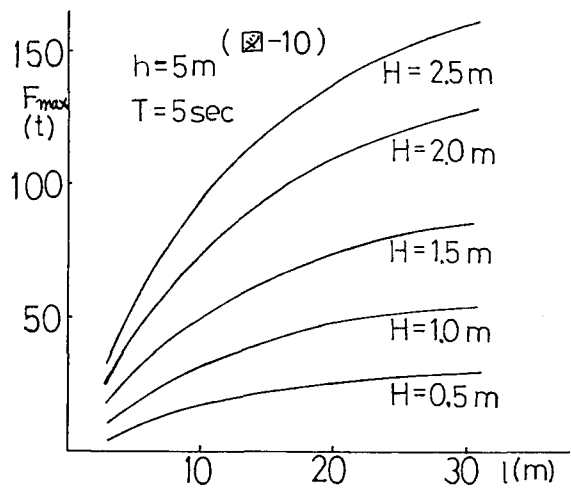
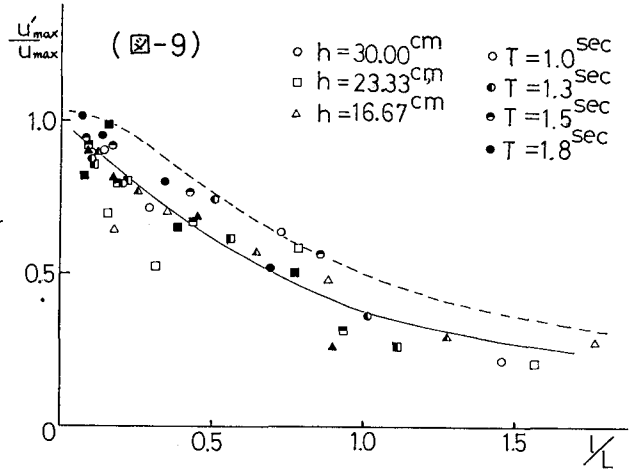
最大運動量  $M_{max}$

$$M_{max} = b \rho_i^2 U_{max} \\ = 0.5 \text{ m} \times 0.0918 \text{ t sec}^2/\text{m}^4 \times U_{max}$$

最大衝撃力

杭断面はくさび型とし、式 における  $\alpha$  は  $45^\circ$  とする。

$$F_{max} = b U_{max} \sqrt{l^2 2 \tan \alpha \rho \sigma_i}$$



$$= 0.5^m \times U_{max} \ell \times \sqrt{64.26}$$

以上の式より各ケースについて  $M_{max}$ ,  $F_{max}$  を計算し、 $\ell$  によりグラフ化した図が図-10~13である。

佐伯らによると、海氷の杭に及ぼす衝撃力と貫入速度の関係は、必ずしも Michel の式を満足するものではなく、貫入速度のある値で衝撃力は最大値を示し、その後はある一定値に近づく。この事は氷の破壊機構の変化、氷の強度がひずみ速度、応力速度により変化する事のためであるとされている。このような氷の物性をも考慮に入れると、図10, 12のグラフはさうにおさえられたいものとなることが予想される。

## 5. おわりに、

本研究においては、浮体の運動について文中3, 4に書かれた2点についてまとめたが、その他項のようなことも観察された。

- 1)  $\lambda/L$  の増加に伴い、浮体運動の平均位置が低下する。
- 2) 波浪条件が同じであれば、 $\lambda/L$  の増加に伴い浮体の没による輪差距離は増加する。

これらについても水平最大速度と同様な整理を試みたが、うまくゆかなかった。他の因子の影響と考えられる。また、過去の研究ではきつ水深と水深の比が浮体運動に影響するパラメータの一つであると考えられているが、本研究の場合は浮体が板状であるためこの効果を無視した。

## 参考文献

- 1) 運輸省港湾技術研究所報告。
- 2) Michel, B. Ice Pressure on Engineering Structures Monograph III-Bbb, Cold Reg. Res. and Eng. Lab., U.S. Army Corps of Eng. Hanover N.H, U.S.A.
- 3) Skjelbreia, L.: Stokes' third order approximation, Table of function, Concl on Wave Research, The Engineering Foundation, 1958.
- 4) H. Saeki Ice Forces on Piles IUTAM Symposium Physics and Mechanics of Ice Aug 1979

