

振動流による底部摩擦の測定について

正 員 新 井 泰 澄*

正 員 村 井 怜**

正 員 〇 佐 伯 浩***

1. 緒 論

振動流、即ち波動運動のように、時間的に流れが変化する流体運動により起こされる、底部摩擦を見積る事は、重要な問題である。これを解決する事は、(1)浅海域における海底摩擦による波の変形、(2)海底物質の運動機構の解明、のような問題を解決するに必要であると思われる。

(1)の問題に関してみれば、design wave を決める場合、深海波においては、S.M.B法等により、波浪の推算が行なわれ、浅海域に波浪が入ってくると、Bretschneider, 岩垣, 井島等の方法を用いて、波浪の推算を行ない、design wave を決定する事がなされているが、未だその減衰機構の解明に努力されているが、底部摩擦機構がはっきりしてないため、その減衰機構は、はっきりしていない。

(2)の問題に関しても、多数の研究結果が発表されているが、波動が底部物質に及ぼす剪断力等の問題に関しては、確立してはいないように思われる。

波動による底部摩擦の研究は、かなり古くから行なわれている。初期の研究は、Lamb が行なったように、静水中において底部の板を振動させ、その振動板上の層流境界層の問題を取り扱っている。その後 Huon Li, Manohar, Longuet-Higgins の研究成果が発表されている。また進行波による、層流境界層の問題に関しては、Grosch が境界層方程式の非線形項を含めての計算を行ない、境界層方程式の線形理論と非線形理論について検討を加えている。

とにかく、振動流による層流境界層の理論解は数多く得られている。しかしそのほとんどが、微小振幅波理論に対する解である。

以上述べてきたように、波動による層流境界層理論のいくつかの Model が提案されてきたわけであるが、し

かし、底部剪断応力の測定に関しては、Eagleson, 岩垣の研究があるのみであり、前の理論の検証がなされているが、実験上の困難もあり、理論値が正しいのか、測定値が正しいのか、その判定は極めて困難である。よって我々は、より精度の高い底部剪断応力の測定を行なう事により、種々の境界層モデルの妥当性を検討するために、振動流に対する、底部剪断応力測定装置を試作したわけである。

2. 波動による底部剪断応力測定法 (流速分布より)

(1)一般に流体が底部に及ぼす剪断応力の測定は困難であるが、定常流においては、次の方法が用いられる。

イ) 流れが層流の場合、つまり慣性項が粘性項に較べて無視できるような場合には、(1)式によって底部剪断力は表わされる。

$$\tau_0 = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} \quad (1)$$

ロ) 流れが乱流の場合、つまり慣性項に較べて粘性項が無視できる場合は、(2)式で表わされる。

$$\tau = -\rho u'v' \quad (2)$$

ハ) 流れが層流から乱流へのせん移領域の場合は次式で表わされる。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} - \rho u'v' \quad (3)$$

ニ) Prandtl の混合距離理論、Kármán の相似性の仮設によると、流速分布式は次の(4)式で表わす事ができる。

$$\frac{u}{u_*} = A + B \log \frac{y}{C} \quad (4)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (5)$$

(1), (4)式では、鉛直方向の流速分布を測定する事により、 τ_0 を見積る事ができるし、(2), (3)式においては、平均流速の鉛直分布と、剪断応力を求めようとする点の、時間的な変動流速 u' , v' を求める事によって、 τ_0

* 愛知県土木部 港湾課

** 宮城県土木部 河川課

*** 北大工学部 土木工学科

を求める事ができる。尚 (3) 式中の $\overline{v'u'}$ は時間平均を意味している。

波動のように u が時間と共に変化する場合は、流速 u を測定する事が困難であり、一般に、流動の場合は境界厚が小さく、底部近傍の流速分布を正確に測定する事は、極めてむづかしい。よって波動のような非定常な流体運動の剪断応力の測定には、上記の流速分布から求める方法はあまり適当ではない。

3. 底部摩擦の測定法

(1) 風が地表面に及ぼす剪断応力を直接測定したのは、Sheppard (1947) であり、その後、その方法は Pasguill (1950), Rider (1954) に受けつがれた。その図を Fig.1 に示す。Fig に示すように、 f が平板で水中に浮いてい

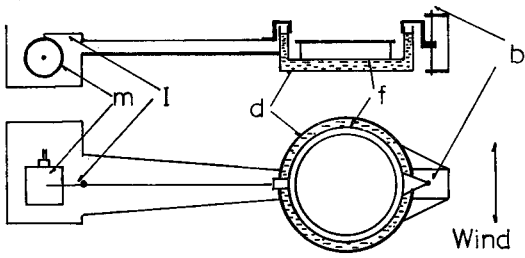


Fig 1 Rider's Shear Measurement Apparatus (1954)

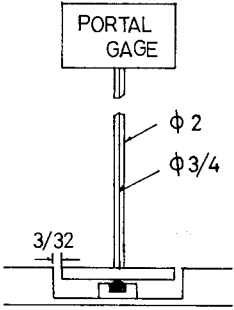
て、その表面は、地面とはほぼ一致させ、その上に、地表面と同じ状態とする。 b は torsion head であり、風による shear を受けている。平板の変流を、Pen I で drum, m に記録するという簡単な装置である。後で述べるが、我々の装置も、この方法に非常に似かよっている。

(2) Eagleson の方法

Eagleson の底部剪断応力の測定法は、(3) の岩垣博士等の方法と非常に似かよっている。Fig.2 に示されるように、構造は三つの部分よりなる。これは直接剪断応力を受ける Shear plate とその変位を伝える, Supporting Shaft と、その力を測定する portal gage よりなっている。Shear plate の大きさは、 $24\text{in} \times 6\text{in} \times \frac{1}{8}\text{in}$ or $\frac{1}{6}\text{in}$ でこれは、(3) に述べる 岩垣博士等が用いた Shear Plate よりかなり大きくできている。なお、Shear Plate の下には、Mercury channel を設けて、Shear Plate の下の水流子が出来ただけ移動しないように心掛けている。これによって測定された摩擦係数は理論値よりはるかに大きくできているが、その原因等については詳しくは述べられていない。また Calibration の方法についても詳しく述べられていない。

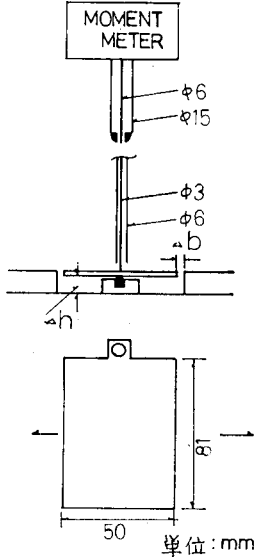
(3) 岩垣、士屋博士等の測定法

岩垣博士等の方法は、(2) に述べた Eagleson の方法とほとんど同じであるが、Eagleson がその剪断力を Portal gage で測定したのに対して、岩垣等は、Moment gage を用いている。概略図を Fig.3 に示す。岩垣博士等は、



単位: inch

Fig 2 Eagleson's Shear Measurement Apparatus (1962)



単位: mm

Fig 3 Iwagaki's Shear Measurement Apparatus (1964)

まず Shear plate の大きさによって、得られる剪断応力が異なる事を見出し、その Shear plate と τ_0 の関係を見出した。

その結果を要約すると次の如くなる。

- a) Shear plate が水底面より、上に出ると plate 側面に作用する drag force により、 τ_0 が大きく出るが、低い場合には、その影響は顕著でない。
- b) Shear plate 下の空隙 dh が大きくなると τ_0 の値は小さくなり、理論値に近づく。
- c) Shear plate と底面との間隔 dh が小さいほど τ_0 は理論値に近づく。
- d) Shear plate の厚さ d が小さいほど、 τ_0 は理論値に近づく。
- e) Shear plate の面積を小さくし、Supporting Shaft を軽くすると、 τ_0 は理論値に近づく。
- f) 幅 b の影響はないが、あまり小さくするとシールド管の影響を受ける。

以上の(a)~(e)までの結果から明らかなように装置表面の状況は、できるだけ底部の状態と同一にすると、波動による Shear stress τ_0 が場所的、時間的に異なるので、Shear plate の面積は小さい方がよい結果を生む事を示している。しかし、この Shear plate の面積を小さくする事は、後でも述べるが、Calibration に非常に困難を伴うのである。岩垣博士等の τ_0 の測定には、以上の事を鑑み Shear plate の大きさは、 $5\text{ cm} \times 8.1\text{ cm} \times 0.2\text{ mm}$ とした。

4. 我々の底部摩擦測定法

我々の底部摩擦の測定法は以上の Rider, Eagleson, 岩垣, 土屋等の研究結果を調べ、その測定法の欠点をできるだけ除くように心がけた。我々が振動流の底部摩擦応力(τ_0)の測定装置で心掛けた事を要約すると次の点である。

- 1) Eagleson 岩垣博士等の場合、Shield pipe を通して、supporting shaft により、Shear plate の変位を伝達しているが、これによって、水中の流況を変える。これは岩垣博士等も指摘してる事であるが、その影響を小さくするために Shear plate の大きさを、必要以上に大きくしている。よって水中には測定装置が入らないようにする。
- 2) Shear plate の運動は水平面上を動くようにする。Eagleson, 岩垣博士の方法では、Shear plate は、鉛直面上で、振子のような運動をするから、底面と同じ Level に Shear plate の位置を保つと、当然、抗力を受ける事になる。
- 3) Shear plate の大きさは出来るだけ小さく、厚さを

薄くする。この Shear plate の面積は τ_0 の測定値にかなり敏感に作用する。よって出来るだけ小さくする。しかし余り小さくすると Calibration に困難が生じる。

また、抗力を小さくするために Shear plate の形は円形とする。

以上の条件を満たすように、作り出したのが、Fig. 4 に示す剪断応力測定装置である。Fig.5 にその配線図を示す。我々の剪断応力測定装置の原理について詳しく述べる。

原理は Shear plate と薄いバネ(板)を接続し、Shear plate の変動をバネの歪量に変換し、その歪量を電氣量にかえてとり出した。バネの厚さは 0.075 mm 、幅 1.97 mm 、長さ 110 mm である。バネの一端は固定し、Cantilever の方式で、自由端に Shear plate を接続し、固定端の根元に Strain gage をはりその歪量を Strain Meter でとり出し、電礎オシログラフに記録した。Shear plate はバネから 1 cm 上方に離して接続し、Shear plate の上面は水槽の底面と同一面にある様にし、下面とそれに接続しているバネは水槽の中にうめ込んだ Box の中に沈む様にした。Box の中はテトラブromエタン(四臭化エタン)で満たされ、Shear plate の上面だけが水と接している事になる。Shear plate は直径 20 mm 、厚さ 0.3 mm の塩化ビニールの円形の板である。次に Shear plate とバネとの接続はバネとの荷重を加えない様に軽い塩化ビニールを用い、寸法は厚さ 0.3 mm 、幅 2 mm 、長さ 10 mm で、液体中の運動で、抵抗を少なくするため、Shear plate の進行方向に対して、厚さ 0.3 mm の面が向いとる様にした。バネの歪を大きくとり出すため、同定点の根元のすぐ近

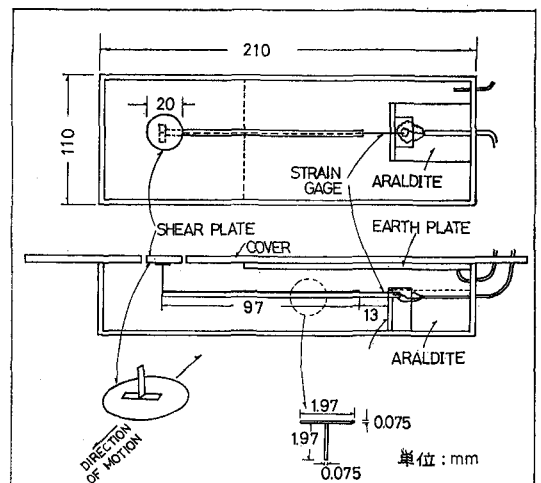


Fig 4 Author's Shear Measurement Apparatus (1970)

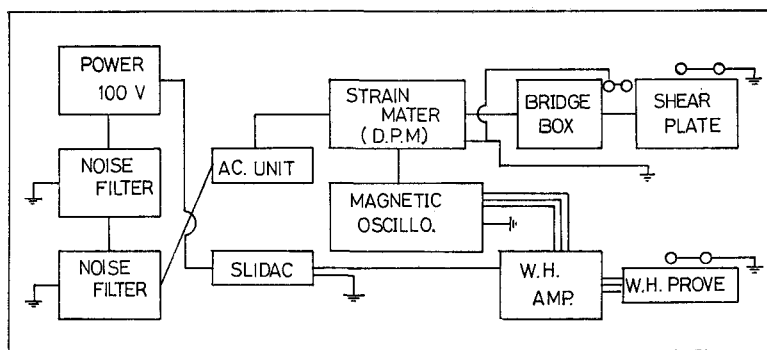


Fig 5

くに Strain Gage をはりつけ、固定点側の Strain Gage の一部を両側からはさみ、固定させ Strain Gage が固定部の一部にうめこまれる様にした。

又、他の部分は、同じ材料のバネを直角(T字型)にはりつける事によって剛度を増し、変位を小さくし、根元の Flexible な部分に応力が集中するようにした。又、バネの変位の方向には、幅1.97mmの面が向く様にした。バネは、この方向に対しては、極めて敏感に変位するが、長さ100mm、厚さ0.075mmの面に対しては、同一荷重では、極めて小さい。この特性を利用して、水深方向の圧力変動に対しては、影響をほとんど受けず、水平方向の力のみ、大きく取り出す事ができる。

次に、Shear plate が円滑に水平運動を行ない、かつ Shear plate の上面のみが剪断応力を受け、流れによる形の抵抗や揚力を受けぬよう、Shear plate の上面の高さまで、液体で満たした。この液体の持つべき性質としては、(イ)比重が水より大きい、(ロ)圧縮性がない、(ハ)付着力がない事、(ニ)水に溶けない事、(ホ)アクリルなど、装置に使用している物質と化しない事、(ヘ)空気中に放置しても蒸発して濃度がかわる事がない事、(ト)人体に無害である事、(チ)電気的絶縁性が高い事、があげられる。

今回、我々が使ったものは、テトラブロムエタンで、芳香族化合物で、比重2.96、無色透明である。この測定器の中に入れる液体については、上に述べた条件を満足するような液体を捜したわけであるが、最初は Eagleson 岩垣博士等と同じように、水銀を用いたが、水銀は粘性が非常に小さいために、波動による水粒子の振動により、水銀自身も振動するため使用しなかった。そのほか四塩化炭素、四塩化炭素+発泡ポリステロール等を使用した芳ばしくなく、テトラブロムエタンを用いた。またテトラブロムエタンは電気的絶縁性が高いので我々の装置が水底にあるため好都合であった。

直径20mmの Shear plate の囲い2.5mm間隔をあけて、直径25mmの穴のあいた板〔0.5mm厚の透明のアクリル板

(280mm×400mm)〕をかぶせた。これは Shear plate の上面と板の上面が同一面上になるように取り付けられている。この Box は径25mmの穴の部分を除いて、全て密封し、中に入れる液体の流出を防ぐとともに、波動の圧力変動がこの液体をとおして、Shear plate に及ばないようにした。

バネの両側にはりつけた Strain Gage は自己温度補償付きの箔ゲージで、ゲージ率1.9、抵抗値120Ωである。サイズは、ゲージ長0.3mm、ベース長3.5mm、ベース幅2.5mmである。2枚を両側にはりつける事により、感度をあげ、かつ温度補償の作用もする。

Strain Gage とバネの接着剤はPC-12を使用した。Strain Gage を3芯のビニール被膜のコードで接続し、Bridge Box に接続し、そこから5芯のシールド線で Strain Meter に接続されている。これを電磁オシログラフに記録した。又、Boxの中にアース板を組み込み、高周波の雑音を少なくした。配置図はFig.5に示している。

5. Calibration の方法

今回の実験は、動的な応力を測定するものであるが、外力及びそれによる変位が極めて小さいため、静的方法で行なわざるを得なかった。後に静的な量と動的な量との評価を行なう。我々の用いた方法はFig.6、に示す如く、滑車を用いて荷重を与えた。また Calibration は実

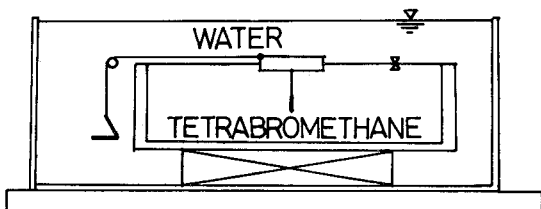


Fig 6

験の条件と同じテトラブロムエタンを入れた Shear plate 設置の Box を水中に沈めて行なった。単位荷重には、化学天秤用の分銅を用いた。材質はアルミニウムで比重 2.70 で水中重量に換算して、Calibration した。分銅は 2 mg, 5 mg, 10 mg を使用した。糸は、種々の物を用いたが予備実験の結果、直径 0.075 mm の Nylon 糸を用い、滑車の代りに $d = 0.41 \text{ mm}$ の針を Fig. 6 の如くして用いた。

Calibration は片側ずつ 2 mg, 5 mg, 10 mg について夫々 20 回以上行ない、その平均値を用いた。Calibration の結果を Fig. 7 (a)(b) に示す。

Fig. 7 から明らかなように、結果は linear となっている。尚 Calibration は全て、水中で行ない、実験で行なう水温と同じになるよう心掛けた。尚、滑車には針を代用したが、最初ミニチュアベアリング等を用いて行なったが、我々の用いた Calibration の方法が一番精度が

良かった。

6. 測定時の障害について

(a) ゼロ点移動について

初期平衡調整後に歪をかけない状態で時間と共に 0 点が移動する。この原因として次の四つが考えられる。

- (1) Gage の温度補償が十分でない場合
- (2) Bridge Box 内蔵の固定抵抗の安定度が悪い場合
- (3) Gage あるいはリード線の絶縁抵抗が低下している場合
- (4) 測定器自体の 0 点移動がある場合

(1) については 2 Gage 法により解決できるし、(2) については Bridge Box を取りかえてみたが、やはり 0 点移動がおこったので (1)(2) は問題ないと思われる。

(3) については、Strain Gage を水中使用するため、防水が完全でないために起こる。3 芯コードには、ビニー

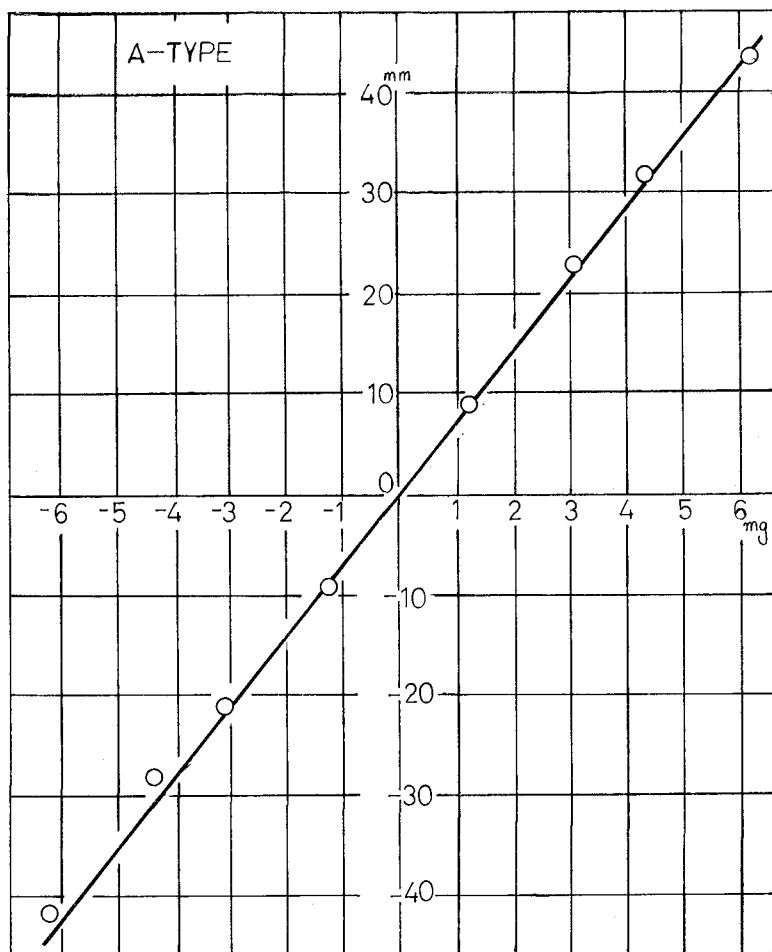


Fig 7 (a) Calibration Curve

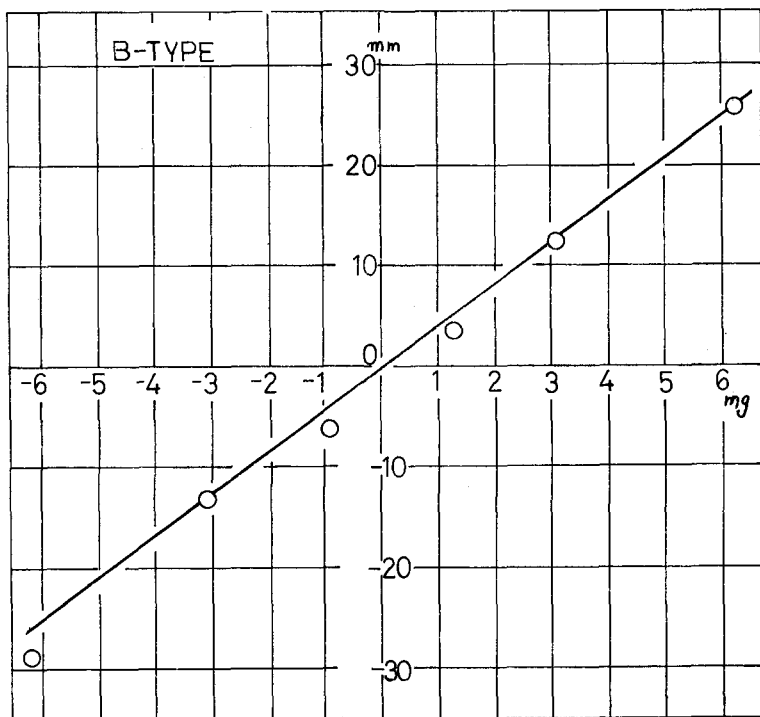


Fig 7(b) Calibration Curve

ル被膜があり、リード線と、それとの接続にはハンダ付けをしたあと、ハマタイトでコーティングし、その上をアラライトを厚く塗り、防水には充分注意した。しかし問題は Gage の表面を Coating する材料が flexible でなければならない。Gage の水中使用の例はあるが、これは応力の大きいものに限られている。我々のように微小な応力には Coating する事により、flexibility が悪くなり、大きな障害となる。しかし我々の場合、そういう防水の事も考え、絶縁性の大きい、テトラブromエタンを用いた。完全に防水できたか否か明確ではない。

(4)については、Strain Gage の接着剤 (PC-12) のクリープ現象が考えられるが、これに関しては、予備実験でそういう現象がない事が確かめられた。またテトラブromエタンは有機溶媒としても用いられる事から、PC-12を溶かす事も考えられるが、これについては明確ではない。とにかく、この 0 点移動がいかなる原因で起こるか明確にできなかった事は残念であり、このため、実験データを数多くとれなかった。

7. 実験結果と考察

6 で述べたように、0 点移動があるために、一つの測定装置を長時間使用する事ができなかった為に、得られ

たデータの数はいくつか、全部で 18 ケであった。その結果を Table—1, Table—2 に示す。Table—1 は、測定装置 A で実験を行なったものであり、Table—2 は、測定装置 B で行なったものである。

Table—1, Table—2 にある、 h は水深、 T は周期、 H は波高、 L_M は実験波長、 L_T は微小振幅浅水波理論による波長で $\tau_{0H \cdot max}$ は実験により得られた。底部剪断応力の最大値、 $\tau_{0T \cdot max}$ は岩垣博士等が求めた理論より計算した値を示している。

この Table—1, 2 から判断すると、我々が得た実験値と、岩垣博士等が求めた理論は、割合よく一致している。

Eagleson の実測値が理論値の十数倍、岩垣博士等の実測値 (圧力の補正をしない時) が理論値より数倍大きい事を考えれば、良い結果が得られた事になる。これは我々の装置が 4 で述べたように、剪断力測定装置の具備すべき条件を出来るだけ実現したからであると思われる。

しかし我々の装置の欠点は、Calibration を行なう時に静的な Calibration しか行っていない事である。我々の測定装置は、Shear plate と板バネよりなる、一種の振子である。よって外力が周期的であれば、当然 Ca-

Table 1 (Type A)

h (cm)	T (sec)	H (mm)	L_E (cm)	L_T (cm)	$\tau_{OE,max}$ (mg/cm ²)	$\tau_{OT,max}$ (mg/cm ²)
10	0.42	14	25.9	24.7	0.520	0.660
15	0.40	15	26.1	24.9	0.177	0.221
15	0.40	12	26.1	24.9	0.294	0.180
15	0.44	18	31.4	30.1	0.376	0.450
20	0.42	19	27.4	27.4	0.196	0.121
20	0.44	20	31.0	27.4	0.133	0.181
20	0.48	23	37.5	35.9	0.178	0.345
20	0.55	21	46.6	46.8	0.262	0.574
20	0.55	22	46.6	46.8	0.255	0.602

Table 2 (Type B)

h (cm)	T (sec)	H (mm)	L_E (cm)	L_T (cm)	$\tau_{OE,max}$ (mg/cm ²)	$\tau_{OT,max}$ (mg/cm ²)
10	0.38	11	25.3	22.4	0.597	0.463
10	0.42	15	26.3	27.0	0.002	0.897
10	0.42	19	28.0	28.0	0.478	1.113
15	0.38	14	23.0	20.6	0.236	0.125
15	0.43	18	30.9	27.5	0.740	0.595
15	0.46	22	31.5	31.4	0.376	0.410
20	0.36	10	21.2	14.1	0.133	0.001
20	0.485	24	37.3	36.7	0.796	0.420
20	0.46	21	34.1	31.6	0.686	0.212

libration は、動的な Calibration を行なわねばならないはずであるが、そのような装置がないため静的 Calibration しか行なわなかった。しかし、テトラブROMエタンがかなりの粘性を持っているためそれほど増幅されるとは思えない。

また液体中を振動するために、仮想質量力も当然考えねばならないが、今回の実験では、それらは無視した。

共振の問題仮想質量力の問題等を考えると、やはり、動的な Calibration が是非とも必要である。

これは今後に残された問題となるであろう。

8. む す び

我々はここに報告した。剪断応力測定装置以外に約10種類の装置を試作した。それは、7でも述べたように、振子的な運動で剪断応力測定には、動的 Calibration が必要で、これをなくするために、最初、剪断応力を直接、Strain Gage で取り出すよう努力したが、その結果は、あまり良いものではなかったので、やむなく、板バネを用いたわけである。

本研究を行なうにあたり、御教示戴いた、北大工学部、尾崎、晃教授、池田郁雄教授に謝意を表するとともに、実験法等に適切なアドバイスをして戴いた北大工学部酒井謙太郎氏に謝意を表する次第であります。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・井上雅夫：海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(1)
第8回海岸工学講演会講演集 昭36年9月
- 2) 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(2)
—底面摩擦力の測定について—
岩垣雄一，土屋義人，坂井順行
第11回海岸工学講演会講演集 昭39年11月
- 3) 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(3)
岩垣雄一，土屋義人，陣 治雄
第12回海岸工学講演会講演集 昭40年11月
- 4) 岸 力，海岸堤防に関する研究(5)
土木研究所報告 昭29年
- 5) Eagleson : The Damping of Oscillatory Waves by Laminar Boundary Layers
1959 proc. A. S. C. E. vol. 88 HY3
- 6) Lami Hydrodynamics, 6th ed. Cambridge
1957
- 7) Grosch. Laminar Boundary Layer under a wave, Physics of Fluids Vol.5
No.10, 1962
- 8) チモセンコ 工業振動学