

[I] 緒言 海洋構造物には大きく分けて着床式、半着床および浮遊式の3種類がある。このうち前者は比較的浅い所まで有利であるのに対し、浮遊式は大水深海域において高い経済性と機能性を持っている。最近の海洋開発技術の発展は目ざましく、さらに深い海域へとその対象を広げつつあり、浮遊式構造物に関する研究もさまざまな分野で行なわれている。浮遊式構造物の場合には、一般の海洋構造物の場合と同様にそれに伴う流体力が問題となると同時に、風・波・潮流等による運動特性の解明が非常に重要となる。本文では、波浪中の浮遊式構造物の運動解析の一つとして直立円柱浮体を取り上げ、理論計算および模型実験によって自由浮体の運動について検討した。

[II] 実験概要 今回行なった実験は、自由直立円柱浮体の動揺に対する既往の各種計算法の検証および漂流速度の測定を目的としている。

実験水路は幅1.5 m、高さ1.5 m、長さ40 mで水路床は水平である。水路側壁の一部は強化ガラスで出来ており、外から水路内を観察できるようになっている。浮体の運動の測定は、浮体の運動が非常に微少なものであるため外力により大きく変化する場合があります。これを考慮し、X-Yアナライザーと呼ばれる装置を用いた。この装置はテレビと同様のものがあるが画面上にX-Y座標をとっており、カメラの視野内の最も明るい点の位置をその座標で表わし電圧に変換することが出来る。したがって、周囲を暗くして浮体に明るい光源を付け、それをカメラでとらえれば浮体の運動を測定できるので、浮体にはまったく影響を与えずにその運動を測定することが出来る。

円柱浮体の運動を支配するパラメーターは、浮体の形状については円柱の半径 a と水深 h との比 a/h 、吃水と水深の比および重心の相対位置 $\bar{z}_0/h$ の3つである。そこでこれらのパラメーターが運動に及ぼす影響をみるために、半径と吃水を変えた5種類の模型をアクリル樹脂で作製した。また重心の位置は、各模型とも吃水の半分のところになるように垂錘(鉄製の円板)の高さによって調節した。水深は模型寸法との対応を考慮して40 cmとした。

なお、今回の実験では1台のX-Yアナライザーで浮体の運動を測定したため2方向の運動しか測定できない。そこで水平および鉛直方向の運動を測定することとし、横揺がそれらの測定記録に影響を及ぼさないように光源である豆電球は円柱浮体の重心の位置に取付けた。

図-1に模型円柱の形状を示し、また表-1には各模型の諸元をまとめて示してある。

実験に用いた波は規則波であり、入射波高は浮体動揺の計算法が微小振幅波および微小運動の仮定に基づいていることを考慮してほぼ1 cmと2 cmの2種類とした。また周波数としては、 $f = 0.56 \sim 1.60$ Hzの波を用いた。

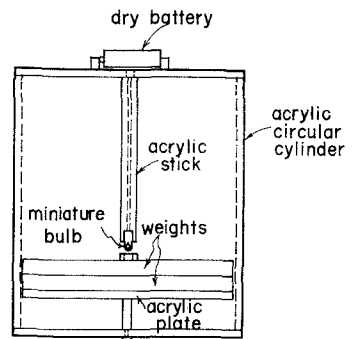
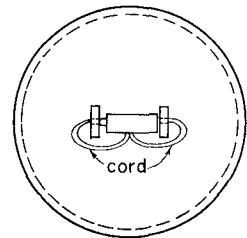


図-1 模型円柱浮体

表-1 模型の諸元

		模 型				
		I	II	III	IV	V
半 径	a (cm)	5	5	10	10	10
吃 水	qh (cm)	30	20	30	20	10
重 心 位 置	$\bar{z}_0$ (cm)	-15	-10	-15	-10	-5
上下揺固有周期	T_{θ} (sec)	1.16	0.95	1.23	1.02	0.76
横 揺	T_{θ} (sec)	6.35	3.17	2.32	1.56	0.97
上下揺固有周期	T_{θ} (sec)	1.17	0.95	1.23	1.05	0.78
減衰定数	β_{θ}	0.0257	0.0416	0.0371	0.0421	0.0618
横揺固有周期	T_{θ} (sec)	7.71	5.06	2.30	1.80	1.02
減衰定数	β_{θ}	0.0367	0.0315	0.0225	0.0310	0.0448

* 周期に添字0をつけたものは、ポテンシャルの微分法による周期、1をつけたものは自由減衰記録から読みとった周期を表わす。

図-2のような座標系をとると、円柱浮体は2次元運動すなわち x - z 平面内で運動する。横波を受ける場合を考えることにすれば、 x 方向の左右揺(swaying)、 z 方向の上下揺(heaving)、 y 軸まわりの横揺(rolling)および x 方向への漂流(drifting)が起こり、測定記録は一般に図-3のようになる。

〔Ⅲ〕実験および計算結果と考察 浮体の運動に対する運動方程式は、波および浮体の運動振幅を微小と仮定すれば非線形力が無視でき、次のように書ける。

$$(M+C_1)\ddot{x} + C_2\dot{x} + C_3x = F_F + F_D \quad (1)$$

ここで M : 浮体の質量あるいは慣性係率

C_1 : 付加質量あるいは付加慣性係率

C_2 : 粘性減衰力の係数

C_3 : 静水圧的復元力の係数

x : 浮体の変位(水平、鉛直および回転変位)

F_F : 浮体によって乱されな入射波の場における圧力の浮体の全浸水表面における積分値(Froude-Kriloff's force)

F_D : 固定浮体に働く散乱波による波力(diffraction wave force または scattered wave force)で、水粒子速度および加速度に比例する力にかけられる。

式(1)左辺の各流体力係数および右辺の波浪強制力の計算法は今までに幾つか発表されている。本文では、井島らによる粘性形ポテンシャル理論の厳密解法¹⁾、減衰的定常波に相当する項を省略した伊藤らによる近似解法²⁾、および流体力係数は実験的に求め波浪強制力をストリップ法³⁾の考え方によって計算する方法³⁾の3種類の計算法を用いて浮体の運動を計算し、実験値と比較することによってまず各計算法の比較検討を行なった。このうち井島法は、流体域を円柱の外側の領域と内側の領域とに分け、各領域における速度ポテンシャルを求め流体力を計算する領域分割法の一つである。また伊藤法は井島法と同様の手法をとりつつ、減衰的定常波に相当する無限級数部分を省略したもので、計算の精度は当然落ちるが計算時間を大幅に減少させることができ、波および物体の諸元が計算結果に与える影響を容易に把握できるという利点を持っている。一方ストリップ法は3次元物体を2次元的に取扱うもので、3次元流体理論の立場からみれば厳密ではない。しかしその有効性は実験的に確かめられており、特に複雑な形状をした海洋構造物に対しては有用な計算法である。なお計算に用いた各流体力係数は、表-1に示した固有周期および減衰定数から求めた。

以上に述べたような計算法に従って式(1)を解くと、周期的運動である左右揺、上下揺および横揺を計算することが出来る。計算結果と実験結果を比較した一例が図-4(1)、(2)である。図の ξ はそれぞれ左右揺および上下揺の半振幅、 h は入射波高である。また、 $\sigma^2 h/g$ (g :

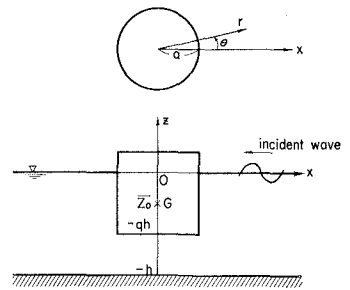


図-2 座標系

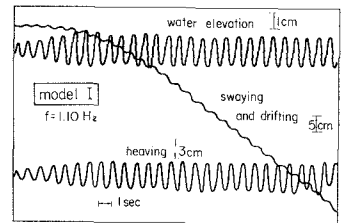


図-3 運動の測定記録例

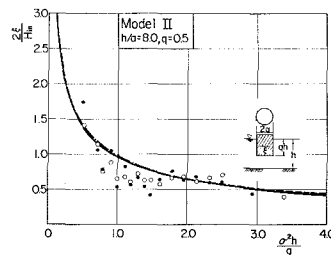
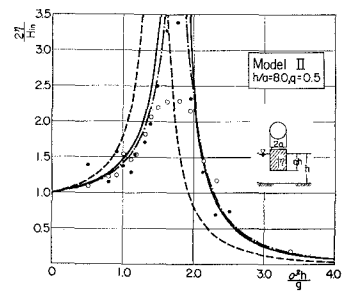


図-4 (1) 左右揺振幅に関する実験値と理論値の比較



(2) 上下揺振幅に関する実験値と理論値の比較

Legend	
—	by strict method
- - -	by approximate method
- . - .	by strip method
○	(H(in)) _u
●	(H(in)) _s experiment

重力加速度, $\theta = 2\pi$ () は一種の相対水深で, その値が π より小さい波が浅海波 ($h/L \leq 0.5$), π より大きい波が深海波に対応している。模型 I ~ V について計算値と実験値を比較したところ⁴⁾, 井島法による計算結果が実験結果と最も良く合うことがわかり, 以下に述べる漂流について計算に用いる変動圧力, 浮体の変位および水位変動の計算式はすべて井島法による計算式を用いることにした。ただし図-4(2)の上下揺共振付近をみとみるとわかるように, 非線形抵抗力を考慮しない計算値は実験値に比べて過大となることに注意する必要がある。

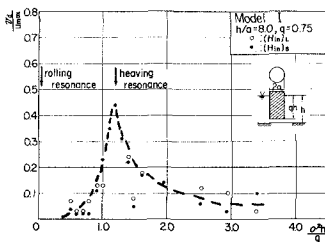
さて, 上に述べた計算法はいずれも同期運動のみを対象としており, 当然のことながら得られる解は往復運動だけである。ところが図-3からも明らかのように, 自由円柱浮体は波浪中において往復運動の他に漂流する。漂流速度 U の測定値を示すと図-5(1)~(5)のようになる。漂流速度は水面における水平水粒子速度の最大値 $U_{max} = \frac{H_0}{2} \omega \cosh kh$ (k : 波数, $k = 2\pi/L$) を基準値として無次元化してあり, 漂流速度が U_{max} の 80% 以上に達する場合が認められる。また図中には上下揺および横揺の共振を矢印で示してあるが, その付近で漂流速度が大きくなっており, かつ上下揺の方が横揺よりも漂流に与える影響の大きいことがわかる。なお図の破線は, 測定値の平均的な値を示したものである。

今回の実験では, 規則波中における漂流速度は, 円柱浮体の運動が定常状態に達したのちは一一定であった。したがって浮体には時間とともに変動する周期的な流体力のほか, 時間的に変化しない漂流力が働いていると考えることができる。上にも述べたように漂流現象は浮体の上下揺および横揺と密接な関係を持っている。そこで本文では, 漂流現象は波および浮体の動揺との間の非線形効果によるところが大であると仮定して漂流力を計算した。すなわち, 円柱浮体に作用する水平力を計算する場合に, z 方向の積分範囲は線形理論では止水から静水面までよいが, 非線形効果を考慮するために積分範囲を浮体の変位および水位変動を考慮して定め, それを時間平均したと主に残る定常項として漂流力を求めるものである。この場合考慮すべき変位は上下揺と横揺であるが, 表-1からわかるように今回の円柱模型は横揺の共振周期が長いので実験の対象とした波の周期の範囲からはずれることが多いこと, また上下揺による漂流力の方が横揺による力よりも大きいことから, 浮体の変位としては上下揺変位のみを考慮した。

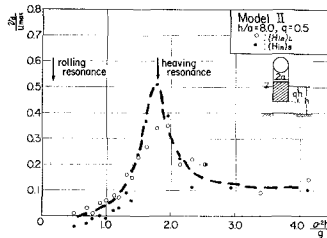
いま時刻 t における水位変動を ζ , 浮体の上下変位を z , 線形理論による流体の円柱側面における変動圧力を p , とすれば, 水平方向に働く全流体力は次のように表わすことができる。

$$F_x = - \int_{-2h}^{\zeta} \int_{-\pi}^{\pi} a p \cos \alpha \, d\alpha \, dz$$

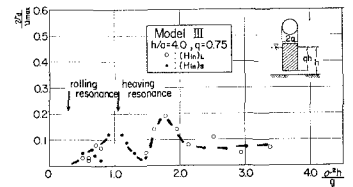
$$= - \int_0^{\zeta} \int_{-\pi}^{\pi} a p \cos \alpha \, d\alpha \, dz + \int_{-2h}^{\zeta} \int_{-\pi}^{\pi} a p \cos \alpha \, d\alpha \, dz$$



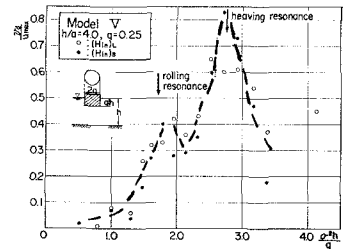
(1) 模型 I—



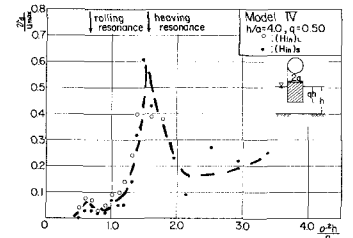
(2) 模型 II—



(3) 模型 III—



(4) 模型 IV—



(5) 模型 V—

図-5 漂流速度の測定値

$$-\int_{-zh}^0 \int_{-\pi}^{\pi} a p_1 \cos \theta d\theta dz \quad (2)$$

上式の右辺の項は流体理論における水平力であり、周期的に変化するのてその時間平均は0となる。すなわち漂流力と関係があるのはオ1項とオ2項である。まずオ1項であるが、後述振揺波理論による変動圧力、

$$p_1 = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g z \quad (\rho: \text{流体密度}, \phi: \text{速度ポテンシャル}) \quad (3)$$

を水位が正のときに適用するのは波力を過大に評価する可能性があり問題があるので、式(3)のオ1項を除き静水圧的な分布をするオ2項だけを用いた。したがって、式(2)オ1項による漂流力は、入射波の周期をTとすれば次のようになる。

$$F_{d1} = -\frac{1}{2} \rho g a \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-\pi}^{\pi} s_t |s_t| \cos \theta d\theta dt \quad (4)$$

次に式(2)オ2項の積分区間は浮体の水中部分であるため式(3)をそのまま用いることができ、漂流力は次式によって計算される。

$$F_{d2} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-zh}^{-zh+1_t} \int_{-\pi}^{\pi} a p_1 \cos \theta d\theta dz dt \quad (5)$$

以上から全漂流力は

$$F_d = F_{d1} + F_{d2} \quad (6)$$

となる。しかし実際に計算を行なったところ $F_{d1} \ll F_{d2}$ となり、漂流力は円柱浮体の上下撓変位と波との非線形効果によるものが支配的であった。

ここで問題となるのは座標系である。なぜならば、解析は空間固定座標を用い、浮体は原点のまわりに往復運動をするという仮定のもとに行なっているのに対し、実際には浮体が漂流するために入射波との位相差が時々刻々変化するからである。すなわち、ある速度で漂流している浮体に対しては、厳密には入射波との位相の変化を考慮して解析を行なうべきであろうと思われる。ただし今回の実験結果をみると、漂流速度と波速の比は最大で0.058であってかなり小さいので、本文のように位相の変化を考慮しない計算法によってでも、漂流力を定性的に把握することは充分可能であると考えられる。また現在では漂流力は浅海修正を施した丸尾理論⁵⁾⁶⁾によって計算されるのが一般であり、何等かの方法によって発散波および散乱波を求めることができれば漂流力が計算できる。本文で用いた漂流力の計算法は、渡辺による漂流力理論⁷⁾と同じ考え方に立っているが、結果的には丸尾理論と同様に漂流力は流体力の2次項の定常項となる。

図-6は、漂流力 F_d の計算結果である。 F_d は $\rho g a S_0$ (S_0 : 入射波振幅) で割って無次元化してある。縦軸は対数目盛であり、非常にシャープな形をしていることがわかる。ただし固定円柱浮体に作用する波力 F_{xt} と F_d とを各ピーク値で比べてみたところ、今回の模型については F_d は F_{xt} の約10%程度であり、非常に小さな力であった。また上下撓の同調周期で F_d は極大値を持っている。なお、式(2)で s_t , 1_t および p_1 は入射波高に比例するので、漂流力は入射波高の2乗に比例することになる。

次に漂流速度について考えてみる。いま漂流速度で移動する座標系で浮体の運動をみてみると浮体はもはや漂流せず、往復運動だけをしていることになる。すなわち漂流力は0となる。このことから、逆にいまは座標系をたまごまな速度で移動させて漂流力を計算し、それが0になるような速

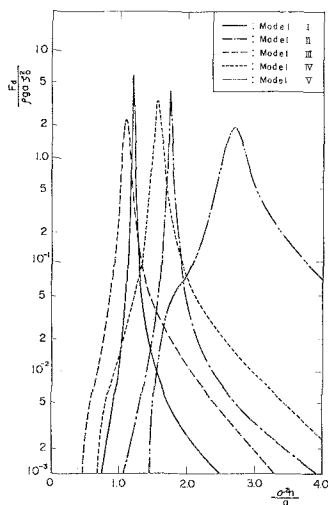


図-6 漂流力の計算結果

度が求められれば、その速度を漂流速度とすればよいということになる。しかしこの方法によって実際に漂流速度を計算するのはなかなか困難であり、また前にも述べたように漂流速度は波速に比べて非常に小さかったため本文では上に述べた方法で計算された漂流力と模型実験による漂流速度の測定値との定性的な関係を求めた。規則波中での漂流速度は一定であり加速度は0であったので、漂流力とある抵抗力がつり合っていると考えことにする。この抵抗力としては、抗力のように漂流速度の2乗に比例する力であると仮定し、次式のように表わす。

$$R_d = -\rho C_d a g h v_d^2 \quad (7)$$

ここで R_d : 漂流力とつり合う抵抗力

C_d : 漂流運動に対する抵抗係数

上式の R_d と式 (6) の F_d とがつり合っているものとすれば、 F_d が入射波の2乗に比例することから漂流速度は波高に比例することになる。図-7は、波高と漂流速度との関係を定量的に調べたものである。図中の曲線は回帰曲線であり、測定結果をみると漂流速度は波高に比例するというよりも波高の1.5乗程度に比例するようであるので $v_d = a H^{1.5}$ (a : 定数) の回帰曲線を引いた。ただし曲線の勾配がゆるいので、波高が小さいときには漂流速度は波高に比例するものとみなすこともできる。すなわち、本文で述べた漂流力および漂流速度の計算法は、入射波高が小さい場合に適用できる方法であるといえる。また漂流力の計算には、さらに高次の非線形力まで考慮する必要があることを示唆していると考えられることもできる。

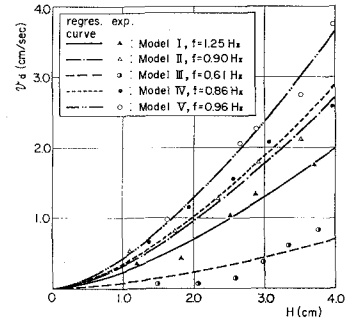
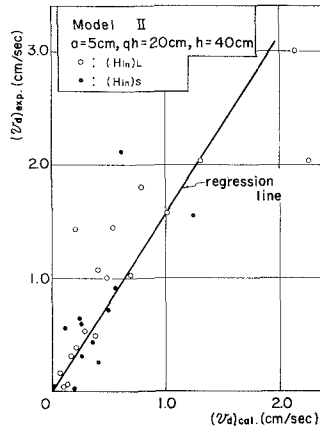
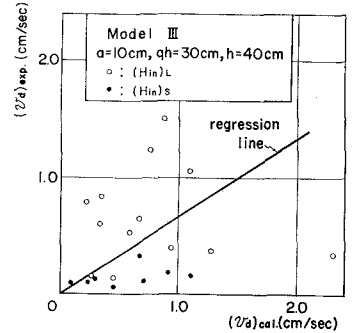


図-7 波高と漂流速度

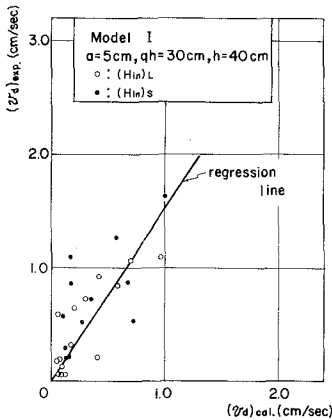
さて、漂流運動について $F_d = R_d$ という運動方程式が成り立つものとすれば、漂流に対する抵抗係数 C_d がわかれば簡単に漂流速度を計算することができる。しかし現在までのところ C_d の測定例もなく、どのような値をとるべきかわかっていない。



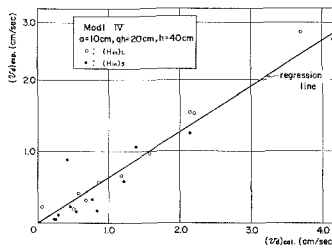
(2)一模型II一



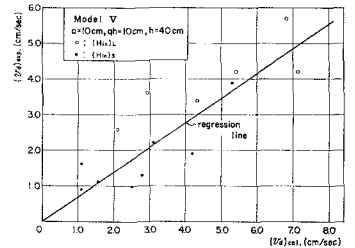
(3)一模型III一



(1)一模型I一



(4)一模型IV一



(5)一模型V一

図-8 漂流速度の測定値と計算値

そこで、漂流速度の実験値と $C_d=1$ と仮定したときの計算値を比較して、逆に C_d についての平均的な値を求めてみることにする。図-8(1)~(5)は、漂流速度の計算値 $(v_d)_{cal}$ と測定値 $(v_d)_{exp}$ との相関々係をみたものである。ばらつきもあるが、図-8(3)を除いてはまじりした相関がみられる。図中の実線は原点を通ることを条件として最小自乗法で求めた回帰直線であり、これからモデルに対する平均的な C_d の値を計算すると表-2のようになる。なお表-2には各国の相関係数も示した。これを見ると C_d の値はどれもあまり関係せず、円柱浮体の半径によってほぼ一定のようである。また $(v_d)_{cal}$ と $(v_d)_{exp}$ との間にはまじりとした相関々係があることから、抵抗係数 C_d として用いるべき適当な値がわかれば、漂流速度を計算によって求めることができることがわかる。

また図中には現われているが、上下揺の共振域付近では漂流速度の計算値は実験値に比べて非常に大きな値となる。これは前にも述べたように線形理論では共振域付近の運動を過大に評価してしまうからであり、回帰直線および相関係数の計算ではそれらの点を除いている。

表-2 漂流の抵抗係数および漂流速度の実験値と計算値の相関係数

模 型	I	II	III	IV	V
C_d	0.43	0.41	2.24	2.43	2.06
相 関 係 数	0.78	0.90	0.26	0.89	0.83

[IV] 総 語 浮遊式構造物の波浪中の運動解析の一つとして直立円柱浮体を取り上げ、規則波中の運動を測定しその特性を調べた。その結果、往復運動はその共振域付近を除き、井島によるポテンシャル理論の厳密解法によって精度よく計算できることが実験的に確かめられ、さらに漂流現象についていくつかの興味ある結果が得られた。本文が、浮遊式構造物の運動解析のための一助となれば幸いである。

なお今回用いた計算法および実験は、すべて規則波を対象としたものである。しかし実際の海の波は不規則波であり、slow drift oscillationなど不規則波特有の問題も起こってくる。したがってより現地の現象に近づけるためには不規則波を用いた解析が必要である。また浮遊式構造物一般については、今後に残された最も大きな技術的問題は係留に関する問題であり、これらについては今後も研究を続けていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・田淵幹彦・湯村やす：有限水深の波による円柱状浮体の運動，土木学会論文報告集，才206号，1972年10月，pp. 71~84.
- 2) 伊藤喜行・木原 力：円柱の動揺に伴う造波抵抗——抗の波力応答と円型浮体の挙動への応用——，港湾技術研究所報告，才11巻 才3号，1972年9月，pp. 37~58.
- 3) Tasai F., Arakawa, H. and M. Kurihara : A study on the motions of a semi-submersible catamaran hull in regular waves, Kyusu Univ. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. XVIII, No. 60, 1970, pp. 9~32.
- 4) 合田良実・鈴木康正・笹田 正：波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動，港湾技術研究所報告，才15巻 才2号，1976年6月，pp. 167~210.
- 5) Maruo, T. : The drift of a body floating on waves, Jour. Ship Research, Vol. 4, No. 3, Dec. 1960, pp. 1~10.
- 6) 野矢信弘：規則波中の2次元流体に働く漂流力に関する研究，西部造船会々報，才51号，1976年.
- 7) Watanabe, Y. : Some contributions to the theory of rolling, T.I.N.A., Vol. 80, 1938.