(昭和 53 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

ビルジキールの直圧力に関する一考察

正員 藤 野 正 隆* 正員 伊 田 力*
正員 前 当 孝 夫** 正員 沼 田 敏 晴***

A Consideration on the Hydrodynamic Normal Forces Acting on the Bilge Keel

by Masataka Fujino, *Member* Tsutomu Ida, *Member*
Takao Maeto, *Member* Toshiharu Numata, *Member*

Summary

A brilliant development of the theory of waves generated by a body oscillating in the free surface has remarkably improved theoretical prediction of ship motion in waves. However, there is yet room for improvement of the accuracy of predicting the rolling motion, because the damping coefficient for rolling is still estimated by a semi-empirical formula. This paper is devoted to improving the estimation of roll-damping force for real ships with usual hull-forms. By the way, Yuasa et al. investigated the hydrodynamic forces acting on an oscillating flat plate immersed enough in the fluid in both cases where the flat plate has forward speed and not.

On the contrary, this paper deals with the hydrodynamic normal forces to the surface of bilge keel, which damps the rolling motion of a ship. However, for bilge keels attached to three-dimensional bodies, some effects which need not be considered for an oscillating flat plate should be taken into consideration. Among such effects, the effect of mirror image of a bilge keel with respect to the hull surface and the effect of increase of relative flow speed at the bilge are especially important. By taking account of both effects, the authors succeed in relating the damping force acting on the bilge keel without forward speed to that on an oscillating flat plate, and also estimating approximately the damping force of the bilge keel with forward speed by low aspect ratio wing theory for uniform motion.

1 緒 言

ビルジキールは最も簡単で、かつ有効な動揺軽減法として早くから広く使用せられており、その減揺効果についても数多くの研究者によって研究され、実用的な実験公式もいくつか発表されている¹⁾。さて、船体動揺理論は、造波理論の飛躍的發展の結果、いちじるしく改善され実用的な運動予測という点では十分な推定値を与えるようになってきたが、そのうち横揺れ運動に関してのみは、純然たる理論的推定だけでは正確な推定値を与えず、運動方程式の一部の係数には実験結果に裏付けられた近似推定値を用いることが行なわれている。このような現状を改良するために、横揺れ減衰力の理論的推定法の見直しをあらためてクローズアップされ、各種研究機関で精力的に研究が行なわれている²⁾。振動平板に関す

る研究をビルジキールに応用し、その直圧力が period parameter によってうまく整理できるという観点から、池田らは前進速度をもたない場合のビルジキールに作用する直圧力に対する推定式を示した³⁾。一方、湯浅らは⁴⁾、振動平板に作用する流体力に及ぼす前進速度影響をも検討するために、前進する小アスペクト比平板翼に関する実験的・理論的研究を行なった。その結果直圧力のうち振動速度と同位相の成分（運動に抗する減衰力となる成分）は前進速度の増加とともに一旦は若干減少するが、さらに前進速度が増加するとともにほぼ $1/K$ (K : reduced frequency $= \omega l / 2U$) に比例して増加する傾向があることを明らかにするとともに、前進速度 0 のときの減衰力を Riabouchinsky の死水モデルと関連づけて説明する試みを行ない、また前進速度がある場合の全直圧力を簡単な流体力モデルで表現することを試みたが、前述の減衰力成分が $1/K$ とともに一旦は減少したのち増加するという傾向を明確に説明するには至らなかった。

本論文は、この湯浅らによる単独振動平板での結果を船体にとりつけられたビルジキールに働く直圧力（とく

* 東京大学工学部船舶工学科

** いすゞ自動車(株)(研究当時 東京大学工学系大学院)

*** 東京大学工学系大学院

に減衰力成分)の推定へと拡張する方向で研究を進めたもので、完全に満足のいく推定法を確立するまでには至っていないところも一部にはあるが、ここに報告し大方の御批判をあおぎたいと思う。

水中深く没水させた振動平板と実用船型にとりつけられたビルジキールに働く直圧力との間には、

- 船体表面によるビルジキールの鏡像効果
- ビルジ部をまわる流速増加の影響
- 自由表面の存在によるビルジキールによる造波の効果
- 船体表面上に形成される境界層の影響

などにより、差異が現われると思われるので、これらの a)~d) を斟酌すれば、没水振動平板の結果からビルジキールの効果をかなりの精度で推定できるのではないかと期待できる。そこで船型の異なる3隻の模型船(紡錘体、巡視船型、肥大船型)にビルジキールを取り付け(ただし肥大船型については、計測される流体力の精度を確保するために本来のビルジキールよりアスペクト比の大きいものが付いている)、強制横揺れ装置により横揺れさせ、ビルジキール全体に働く直圧力とコード方向の直圧力分布(紡錘体、巡視船のみ)を計測した。この結果に a)~d) を考慮すれば、船体に取り付けられたビルジキールに働く直圧力と単独振動平板の直圧力に脈絡がつけられるわけであるが、そのうち c) については、動揺するビルジキールが起こす波はかなり小さいと思われるので(参考文献 2)のうち No.291, p.40), 造波による減衰力を考慮しないものとし、また d) についてもその影響はかなり小さいこと³⁾が明らかにされているので、これも特に考慮しないこととする。したがって、a), b) についてのみ考慮した。その結果、ビルジキールに働く減衰力の成分は単独振動平板の結果から、かなりよく推定できることがわかった。

2 強制横揺れ実験

2.1 供試模型船

実験に使用した船型は緒言でも述べたように、紡錘体、巡視船型、肥大船型の3隻で、それらの主要目を Table 1 に、紡錘体の形状を Fig. 1, 肥大船型と巡視船型の body plan を Fig. 2, 3 にそれぞれ示した。紡錘体については断面形状による b) の効果はないが、巡視船型、肥大船型では b) の効果があり、とくにビルジサークルの小さい肥大船型では b) の効果が巡視船型よりも顕著に現われることが期待される。このような b) の影響の現われ方に相違が予想されたことが、これら3船型を供試模型船として選んだ理由である。ビルジキールに働く全流体力を計測するための一体ビルジキールは、3船型のいずれに対しても長さ 1m, 幅 20mm と

Table 1 Principal particulars of models

	full-hull form	patrol-boat
L_{pp} (m)	3.0	2.5
B (m)	0.493	0.329
D (m)	0.279	0.182
d (m)	0.194	0.109(at ∞)
Displacement (kg)	237.60	46.00
C_b	0.8243	0.501
C_m	0.9975	0.848

Fig. 1 Outline of spindle-shaped body

Fig. 2 Body plan of full-hull form

Fig. 3 Body plan of patrol-boat

したが、紡錘体に対してはアスペクト比(A)の影響を調べるために、幅 30mm, 40mm のものを追加した。ビルジキールの船長方向の取付け位置は下記のとおりである。

紡錘体：中央の前後に 500 mm ずつ振分け

巡視船型：S. S. $2\frac{1}{2} \sim 6\frac{1}{2}$

肥大船型：S. S. $3\frac{1}{3} \sim 6\frac{2}{3}$

Table 2 Experimental conditions

	Spindle-shaped body	full-hull form and patrol-boat
Aspect ratio of bilge keel (A)	0.02, 0.03, 0.04	0.02
a (m)	0.04, 0.06, 0.07, 0.08	0.02, 0.03, 0.04, 0.05
T (sec)	1.5, 2.5	2.5, 3.0
U (m/sec)	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	

この結果、紡錘体においてはビルジキールのスパン中心線は完全な直線であり、肥大船型でも後端に近いところでごくわずかに湾曲するがほとんど直線であったが、巡視船型ではスパン中心線は全長にわたって湾曲したものとなり、最大湾曲量は前後端におけるスパン中心点を結ぶ直線からの最大湾曲点のスパン中心までの距離で 25 mm であった。また、直圧力のコード方向分布を調べるための分割ビルジキールは、全長 1000 mm を一端から 100, 200, 100, 200, 100, 200, 100 mm の 7 区画に分割したもので、計測は長さ 100 mm の 4 カ所について行なった。

2.2 計測方法および実験状態

一体ビルジキールおよび分割ビルジキール部は船体表面との隙間を極力小さくして歪ゲージ使用の検力梁を介して船体にとりつけられ、作用する流体力は上述の歪ゲージで検出した。船体は前後 2 カ所で横揺れのみを許すガイドにより曳航台車に取り付けられ、強制動揺装置によって横揺れさせられた。実験は、前進速度 U 、横揺れ周期 T 、船体表面でのビルジキールの横揺れ振幅 a を Table 2 に示すように変えて実施された。

2.3 実験結果の解析

ビルジキールに働く直圧力 F は湯浅らの表示方法にしたがい、次のように表わせると仮定する。

$$F = C_m \rho \nabla \ddot{z} + \frac{1}{2} \rho b l \{C_1 U \dot{z} + C_2 \dot{z}|\dot{z}|\} \quad (1)$$

ただし、 C_1, C_2, C_m は係数、 ρ : 流体密度、 b : ビルジキール幅、 l : ビルジキール長、 z : ビルジキールの横変位、 $\nabla = \pi b^2 l / 2$ とする。

船体横揺れにともなうビルジキールの横変位は、ビルジキールの船体表面上と先端とで異なるが、以下の解析では船体表面における変位で代表させることにする。

$$z = a \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi/T \quad (2)$$

また、等価線形の近似を用いれば (1) 式は

$$F = -C_m \rho \nabla a \omega^2 \sin \omega t + \frac{4}{3\pi} C_{dt} \rho b l a^2 \omega^2 \cos \omega t \quad (3)$$

ただし

$$C_{dt} = \frac{3\pi}{8} C_1 \frac{U}{a\omega} + C_2$$

となる。そこで、計測された直圧力の記録 3 周期を 1 周

期あたり 50 点サンプリングしてフーリエ解析し、計測された直圧力を

$$F = -A \sin \omega t + B \cos \omega t + \dots \quad (4)$$

とすれば

$$C_m = \frac{A}{\rho \nabla a \omega^2}, \quad C_{dt} = \frac{3\pi B}{4 \rho b l a^2 \omega^2} \quad (5)$$

のごとく C_m, C_{dt} が求まる。ただし以下では、直圧力のうちもっぱら減衰力に相当する C_{dt} について検討することにする。

3 実験結果

実験の結果得られた C_{dt} の値は、period parameter に相当する a/b_I および前進速度と横揺れ速度の比に相当する $1/K = 2U/\omega l$ で整理することにした。緒言で述べたように、船体に取り付けられたビルジキールに働く直圧力を評価するにあたり、a) 鏡像の効果を見込む必要がある。そこで、船体各所でのビルジサークルの局所的な曲率半径 r を半径とする円に関する鏡像を考えて相当ビルジキール幅 b_I とした。すなわち

$$b_I = b \left(1 + \frac{r}{r+b} \right) \quad (6)$$

この b_I を用いて period parameter を考えたのが前述の a/b_I なる parameter である。3 船型につき、相当ビルジキール幅 b_I を求めた結果を Table 3 に示す。ただし巡視船型のように、ビルジキール装着個所でのビルジ半径が一定でない場合には、ビルジキール装着個所でのビルジ半径の平均値を用いて算出した。

3.1 一体ビルジキール

前進速度 $U=0$ の場合の $C_{dt}-a/b_I$ の関係を、Fig. 4, 5 に示した。ただし Fig. 4 に示した紡錘体の場合には、実験結果はアスペクト比 A にあまりよらない傾向が

 Table 3 Values of effective breadth b_I of bilge keel

	b_I (m)
spindle-shaped body $A=0.02$	0.0382
$A=0.03$	0.0561
$A=0.04$	0.0733
full-hull form $A=0.02$	0.0291
patrol-boat $A=0.02$	0.0345

Fig. 4 C_{dt} vs. a/b_I relations for spindle-shaped body without forward speed

Fig. 5 C_{dt} vs. a/b_I relations for patrol-boat and full-hull form without forward speed

Fig. 7 C_{dt} vs. $1/K$ relations for patrol-boat with forward speed

(a) Aspect ratio $A=0.02$

(b) Aspect ratio $A=0.04$

Fig. 6 C_{dt} vs. $1/K$ relations for spindle-shaped body with forward speed

Fig. 8 C_{dt} vs. $1/K$ relations for full-hull form with forward speed

あるため、図の見やすさから $A=0.03$ の場合は省略してある。また Fig. 4, 5 両図の実線は単独振動平板の実験結果の平均線を示したもので、このときの a/b_I は a/b そのものである。

さて、いずれの船型の場合も単独振動平板の C_{dt} の値を上まわり、かつ船型によってかなりの相違が現われており、単独平板との差異は肥大船型で最大で、 C_{dt} の値では単独平板の約 2 倍程になっている。この差異については後に詳しく検討する。

また、前進速度を有する場合の $C_{dt}-1/K$ の関係は Fig. 6, 7, 8 に示した。いずれの船型の場合も、今回の実験範囲での振動周期では周期の差異による C_{dt} の値の違いは明確でなく、このことは先の湯浅らの単独平板の実験でもみられた。また C_{dt} の $1/K$ に対する定性的傾向も単独平板と同様の傾向を示し、 $1/K$ の増加とともに一旦減少するが、さらに $1/K$ が大きくなると C_{dt} の値も増加する。本実験での $1/K$ の範囲では紡錘体、巡視船型、肥大船型の順で C_{dt} の $1/K$ による変化の程度が大であることがわかる。実用的な観点から見ると紡錘体のビルジキールに働く減衰力は $1/K$ によらずほぼ一定といえるが、実用船型では（とくに肥大船では） $1/K$ による相違は無視できない程度である。

なお、紡錘体については一体ビルジキールを紡錘体の最深部船底に 1 枚のみ取り付け付けた場合と、鉛直線に対し 45° の角度で左右 2 枚取り付け付けた場合を比較のため実験した。その結果、横揺れ角が極端に大きく、横揺れ中ビルジキールが水の表面のごく近くまでくるとなると、後者の場合の一体ビルジキールの直圧力は船底中心線に設けられたビルジキールの直圧力と差異が生ずる

が、通常の横揺れ角程度であれば両者の差はほとんどなかった。Fig. 4, Fig. 6 に示してあるのは、いずれも前者の場合に得られた結果である。

3.2 分割ビルジキールによる直圧力分布

前進速度を有する場合の直圧力コード方向分布を調べるために実施された分割ビルジキールによる計測結果のうち、減衰力コード方向分布 dC_{dt}/ds の計測例の一部を Fig. 9, 10 に示す。紡錘体における減衰力分布を示す Fig. 9 と巡視船型における分布を示す Fig. 10 では、コード方向分布に明らかな相違がみられる。紡錘体では前縁における減衰力が後縁に向かって急速に減少したのち、ふたたび増加するのに対し、巡視船型では前縁から後縁に向かってゆるやかに減少する。

今回、紡錘体で計測された前述のコード方向分布の定性的傾向は、先に湯浅らによって求められた単独振動平板による減衰力分布 (Fig. 14) のそれとほぼ同一である。このような紡錘体と巡視船型における減衰力分布の違いは、主としてビルジキールの平面形状によるものと推測される。紡錘体ビルジキールは平面形状が完全な矩形であるのに対し、巡視船型ビルジキールは矩形ビルジキールを弓形に湾曲させた平面形状を有することは先に述べた。Lawrence⁵⁾ の手法にならって極小アスペクト比矩形翼と三角翼についてコード方向揚力分布を計算した例で示されたように⁹⁾、矩形翼では揚力が前縁付近に集中しているのに対し、前縁が後端まで続いていると考えられる三角翼では揚力は前端から後端まで後端に向かってむしろ強くなるように分布する。この事実を本実験結果に照らしてみると、巡視船型ビルジキールの減衰力分布が前縁付近で急速に減少する傾向をとらないのは、

Fig. 9 Chordwise distribution of damping force acting on bilge keel of spindle-shaped body

Fig. 10 Chordwise distribution of damping force acting on bilge keel of patrol-boat

弓形に湾曲することによって前半部の翼端がいわゆる前縁としての効果をもつためと考えられる。

4 船体に固着されたビルジキールの効果の推定

単独平板と船体に取り付けられたビルジキールとの相違点として考えられた *a*), *b*) のうちの *a*) については、幾何学的に船体表面による鏡像を考えればよい。 *b*) の船体横揺れ運動によるビルジ部での相対流速については個々の船型について、しかもビルジキールが装着されて

いる部分の船体断面形状の相違を考慮に入れて個別に検討する必要がある。船体運動による相対流速の増加には、横揺れ運動によるもの以外に、前進運動による長手方向の相対速度の増加も考えられる。流体中を一樣速度で前進する船体について Hess and Smith の方法でビルジ部の流速を計算したところ、流速はほぼ一樣速度と等しく、このような意味での流速増加は実用上は無視してさしつかえない程小さいことがわかった⁷⁾。そこで流速増加としては横揺れによるビルジ部の相対流速の増加

Fig. 11 Tangential component of relative flow speed in the proximity of bilge keel (Todd's series 60, $C_b=0.6$, midship section); h =distance from hull surface

を考えればよいといえる。ビルジキールの装着箇所は船体中央部であるので横揺れによる流速増加としては、流れが船体横断面内で起こると仮定しても大差はないと思われるので、2次元流れ場解析による結果を用いることとした。すなわち、供試模型船の裸殻の2次元横断面について、有限要素法を用いてビルジキール位置での流速を計算した⁸⁾。Fig. 11はToddのSeries 60, $C_b=0.6$ 模型の中央横断面におけるビルジ部の接線方向相対流速の分布を船体表面からの垂直距離に対して示したものである。図中○印は池田ら(文献2)のうちNo.291)によって、同模型船を空気中につるし、自由表面位置には剛体壁を置いて横揺れさせたとき、船体ビルジ部に固定された熱線流速計によって計測された相対流速であり、×印は有限要素法による計算値である。また、図中の細い直線は横揺れによる回転速度である。計算値と計測値は非常によい一致を示している。なお、計測値は船体表面近傍における境界層の存在を明らかに示しているが、これは空気中での計測のため水中では境界層の存在は無視できる程度であることは緒言にふれた。

なお、有限要素法による計算に際して用いた流体領域は船体幅方向に船幅の約10倍、深さ方向に喫水の約8倍であった。また、自由表面条件を生かして計算も行なってみたが、ビルジ部の相対流速に関するかぎりは剛体壁($\omega=0$)としても ω が有限でもほとんど変わらないことがわかった。

前述のように、計算による流速の値が有効であることがわかったので、巡視船型および肥大船型について相対流速を計算した結果がFig. 12, 13である。図の表示法は縦軸が船体表面における横揺れの回転速度を1とした

Fig. 12 Rate of increase μ of tangential relative flow speed in the proximity of bilge at midship section (full-hull form); h =distance from hull surface

Fig. 13 Rate of increase μ of tangential relative flow speed in the proximity of bilge (patrol-boat); h =distance from hull surface

ときの相対流速の大きさ μ を表わしている。Fig. 12, 13から明らかのように巡視船型と肥大船型の相違による増速率 μ の違いは、はなはだ顕著であることがわかる。増速率 μ はビルジキール幅方向に変化するので、幅方向の平均値をとることとした。また、巡視船型ではビルジキールの前後端位置および船体中央の3断面についての増速率 μ の計算から、ビルジキール長さ方向にも平均し

た。この結果、肥大船型では $\mu=1.83$ 、巡視船型では $\mu=1.13$ であった。

4.1 前進速度 $U=0$ の場合

前進速度をもたない振動平板の直圧力に関しては Keulegan and Carpenter⁹⁾ をはじめとする多数の研究者らによって実験的に研究され、それらの実験値をもとに池田ら³⁾、湯浅ら⁴⁾ によって減衰力の推定式が導かれている。本節では、これら単独振動平板の減衰力係数の値を基にして実用船型にとりつけられたビルジキールの減衰力係数 C_{dt} の推定を行なう。

本来、period parameter は $U_{\max} \cdot T/D$ (D は物体の大きさを表わす) と定義されたもので、振幅 a 、角周波数 ω で振動する平板の場合には、 $U_{\max} \cdot T/D = a\omega \cdot \frac{2\pi}{\omega} / b = 2\pi a/b$ となることから、本来の period parameter の代わりに a/b を用いてきた。したがって流速が μ だけ増速された場合には運動振幅は a であっても period parameter としては $\mu a/b$ とする必要がある。すなわち、船体の存在による増速流の中にあるビルジキールの period parameter は a/b ではなく $\mu a/b$ と考える。よって、ビルジキールの減衰力 D は $C_{dt}(\mu a/b_I)$ を period parameter $\mu a/b_I$ に対する平板の抗力係数とすると

$$D = \frac{4}{3\pi} \rho b l C_{dt} \left(\mu \frac{a}{b_I} \right) (\mu a \omega)^2 \quad (7)$$

と書き表わせる。一方、Fig. 4, 5 に示された減衰力係数の実験値は速度として $a\omega$ を用いて得られたものであるので、(7) 式の減衰力に対する減衰力係数 C_{dt} は、

$$C_{dt} = \frac{3\pi D}{4\rho b l (a\omega)^2} = C_{dt} \left(\mu \frac{a}{b_I} \right) \mu^2 \quad (8)$$

となる。 $C_{dt}(\mu a/b_I)$ の実験公式として池田ら³⁾ によって与えられたものを用いれば、(8) 式は

$$C_{dt} = \left(3.58 \frac{b_I}{\mu a} + 2.4 \right) \mu^2 : 0.6 < a/b_I < 3.18 \quad (9)$$

となる。本方法によりビルジキールの減衰力係数を推定した結果が Fig. 4, 5 に示された破線、一点鎖線で、これらを実験結果と比較してみると本推定法がかなりよく実験結果を推定していることがわかる。

4.2 前進速度を有する場合

前進速度がある場合の振動平板の全減衰力を湯浅らは (1) 式中の C_1, C_2 として、それぞれ揚力傾斜 $dC_L/d\alpha$ (C_L : 揚力係数, α : 迎角), $U=0$ での抗力係数 C_D を用いることとし、(1) 式によって表わせるモデルに基づいて計算した。この方法では C_{dt} が $1/K$ に対して一旦減少するという傾向を説明できなかったが、流れモデルに修正を加えることによって、実験結果をある程度説明できることを示した。一方、Reissner and Stanton¹⁰⁾ は非定常運動をする有限アスペクト比翼の揚力特性にお

よぼす運動周波数の影響——いわゆる Theodorsen's function¹¹⁾——を、アスペクト比 1.5 から 6 までの楕円翼について示した。その結果、アスペクト比が減少するにしたがい、揚力特性におよぼす運動周波数の影響はいちじるしく小さくなることを示した。この Reissner らの結果が本論文で対象としている極小アスペクト比平板にも成り立つと仮定して、ビルジキールをスパン b_I 、コード長 l の矩形翼に置き換えたときの一定迎角の垂直力を計算した。解析の手法は翼端からの自由渦の流出を考慮に入れた Bollay の非線形翼理論によった¹²⁾。渦度分布 $\gamma(\xi)$ を決める積分方程式は、翼への流入速度を V 、迎角を α 、自由渦の流出角を Θ とすれば次式で表わせる。

$$V \sin \alpha = \frac{b_I}{4\pi} \int_0^l \frac{\gamma(\xi)}{x-\xi} K(x, \xi) d\xi \quad (10)$$

ただし

$$K(x, \xi) = \frac{(x-\xi) \cos \Theta + \sqrt{(x-\xi)^2 + (b_I/2)^2}}{(x-\xi)^2 \sin^2 \Theta + (b_I/2)^2} \quad (11)$$

この積分方程式の具体的解法としては種々のものがあるが、ここでは菅井¹³⁾の方法にしたがって解くものとする。まず、循環密度分布 $\gamma(\xi)$ を Kutta の流出条件を満たすように次式で表わす。

$$\gamma(\theta) = V \cdot A(\theta) \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} \quad (12)$$

ただし

$$\xi = \frac{l}{2} (1 - \cos \theta), \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (13)$$

ここで未知関数 $A(\theta)$ を $n+2$ 項のフーリエ級数で表わせるものとし、コーシー積分を実行したのち、 $n+2$ 元の一次方程式を解いて $\gamma(\theta)$ を求める。自由渦の流出角は Bollay の第一次近似である $\Theta = \alpha/2$ とし、迎角および流入速度は次式のように定めた。また、今回の計算では $n=48$ とした。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\mu a \omega}{U} \right) \quad (14)$$

$$V = \sqrt{U^2 + (\mu a \omega)^2} \quad (15)$$

このようにして得られた垂直力 N から

$$N = \frac{4}{3\pi} \rho b_I l C_{dt} (a\omega)^2 \quad (16)$$

として C_{dt} を求めて、図示したのが Fig. 6, 7, 8 での右上りの線である。紡錘体でのビルジキールの C_{dt} の推定値は実験値に比べて一様に小さいが、巡視船型、肥大船型においては $1/K$ の大きいところで ($1/K$ が大きくなるにしたがい変動迎角の振幅が小さくなる) 推定値は実測値とかなり良い一致を示す。したがって、 $1/K$ の大きいところでは、前述の定常翼理論でかなり減衰力が説明できることがわかる。

Fig. 14 Chordwise distribution of pressure (in phase with velocity) for an oscillating plate (Yuasa et al. [4]) $\lambda=0.03$

さらに (12) 式で決定されるコード方向垂直力分布を Fig. 9, 10, 14 に示し実測値と比較している。Fig. 14 は湯浅らによる単独振動平板の結果との比較であるが、コード中央より後端側の圧力については、その推定は十分とはいえないが、前縁から後端にわたる圧力分布の定性的傾向はよくとらえているといえる。このことは、紡錘体についてもほぼ同様であるが、巡視船型では実測の揚力分布と計算によるものはかなりの差がある。この相違の原因の一つは、実際のビルジキールは湾曲した平面形状を有するのに対し、計算は相当する矩形平板で近似した結果であると思われる。

5 結 言

船型の異なる 3 隻の模型船にとりつけられたビルジキールに働く直圧力計測実験を行ない、その推定法に対する検討を試みたところ次のような結論を得た。

- 1) ビルジキールに働く直圧力のうち減衰力成分は前進速度の有無にかかわらず船型によって大きな差異が現われる。この差異はビルジサークルの大小による鏡像効果とビルジ部をまわる流速増加の相違によるところが大きい。
- 2) ビルジ部をまわる流れの流速増加は、横揺れのみ

による船体表面に平行な流速の増加を 2 次的に計算することによって、よく評価できることがわかった。

3) 前進速度のない場合のビルジキールの減衰力係数 C_{dt} は、ビルジキールの鏡像効果をビルジキール位置でのビルジ半径を半径とする円に対する鏡像で評価し、さらに上述の流速増加を考慮すれば単独平板の C_{dt} の値から、良く推定できることがわかった。

4) 前進速度がある場合、ビルジキールの減衰力係数 C_{dt} には明らかな前進速度影響が現われる。このときの減衰力およびその分布は、平面形状が矩形のものでは極小アスペクト比矩形翼の定常運動時の揚力および揚力分布で実用的には推定できることがわかった。

しかし、湾曲した平面形状をもつ巡視船型のビルジキールについての推定精度は必ずしも十分ではないし、前進速度 0 の場合と前進速度がかなり大きく、変動迎角の振幅が小さい場合との中間的な状態で $C_{dt} \sim 1/K$ の図で C_{dt} が $1/K$ の増加にともない一時的に減少する範囲については C_{dt} の推定はできていない。今後のこの方面の研究を期待したい。

なお、本研究は日本造船研究協会第 161 研究部会による研究の一部として実施されたものであり、部会長 中村彰一教授ならびに元良誠三教授をはじめとする委員の方々の御討論、御指導に対し厚く御礼申し上げる。

また、実験結果の解析にあたり御指導いただいた東京大学船舶工学科 小山健夫助教授、渡辺岩夫助手、また本論文の一部を卒業論文として担当した高田道広、森本洋二の両氏、実験に関して多大の御助力をいただいた同運動性能研究室 石井裕司技官、並びに関係各位に深く感謝の意を表する。

フーリエ解析にあたっては、船舶工学科 FACOM U-200、数値計算は東京大学大型計算機センター HITAC 8800/8700 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田中紀男：動揺軽減法 (1) ビルジキール，第 1 回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会 (昭 44.7) p.143.
- 2) 日本造船研究協会：船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書，研究資料 No. 257 (昭 51.3)，No. 275 (昭 52.3)，No. 291 (昭 53.3).
- 3) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男：横揺れ減衰力について—摩擦成分とビルジキールの直圧力成分—，関西造船協会誌，第 161 号 (昭 51.6).
- 4) 湯浅和昭，藤野正隆，元良誠三：前進速度を有する小アスペクト比振動平板翼に作用する流体力について，日本造船学会論文集，第 142 号 (昭 52.12).
- 5) Lawrence, H. R. and Gerber, E. H.: The Aerodynamic Forces on Low Aspect Ratio

- Wings Oscillating in an Incompressible Flow, Jour. Aeronaut. Scie., Vol. 19, No. 11 (Nov. 1952) pp. 769~781.
- 6) 湯浅和昭：小アスペクト比振動翼に関する基礎的研究，東京大学修士論文，(1977)。
- 7) 前当孝夫：ビルジキールの効果に関する基礎的研究，東京大学修士論文，(1978)。
- 8) 高品純志：有限要素法による流体力の計算，東京大学修士論文，(1974)。
- 9) Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H. : Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, Jour. of the Reserch of the National Bureau of Standards, Vol.60, No. 5 (1958).
- 10) Reissner, E. and Stanton, J. E. : Effect of Finite Span on the Airload Distributions for Oscillating Wings II—Methods of Calculation and Examples of Application, N.A.C. A. T. N. 1194 (1947)。
- 11) Bisplinghoff, R. L., Ashley, H. and Halfman, R.H. : Aeroelasticity, Addison-Wesley Pub. (1955)。
- 12) Bolland, W. : A Non-Linear Wing Theory and its Application to Rectangular Wings of Small Aspect Ratio, Z. A. M. M., (1939)。
- 13) 菅井和夫：小縦横比揚力面に対する新しい線型近似法，造船協会論文集，第117号 (昭 40.5)。
-