

# 風路つき試験水槽の特性

田宮 真・渡辺 弥幸

風路つき試験水槽の特性について現在まで調査した結果について報告した。造波機によって発生する波の高さ、長さ、速さ、周期の関係をまずのべ、送風機による気流速度の分布を次にのべてある。さらに風と波との相互干渉について記し、最後に改良すべき点、今後の調査事項をあげた。

## まえがき

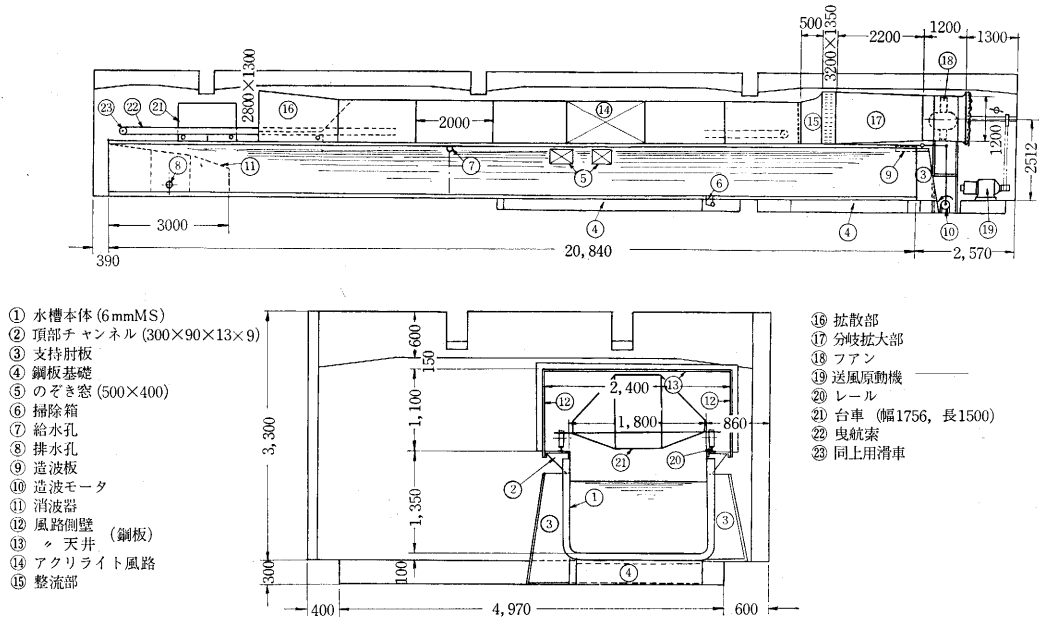
昭和 39 年 2 月に風路つき試験水槽が石川島播磨重工の施工で完工し、つづいて上杉車両 KK の手で計測用台車および駆動装置が 40 年 3 月に設備された。その後昨年の本誌 6 月号にのべたように、本水槽の造波、送風特性の調査を行ってきたが、この間に風浪中の船体運動に関する実験等を行ない、これらの調査研究中の経験により当研究室員の手でさらに若干の改装、設備の増設を行なって、一応各種模型実験を行なう準備がととのつ

た。以下に現状における本水槽の波および風に関する特性の概要を報告する。

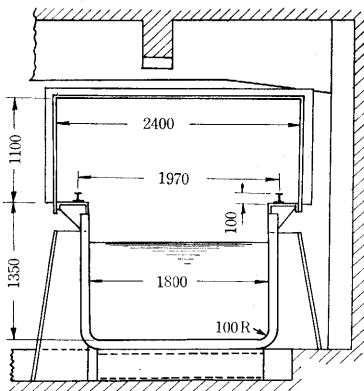
## 1. 試験水槽の概要

### (1) 水槽本体

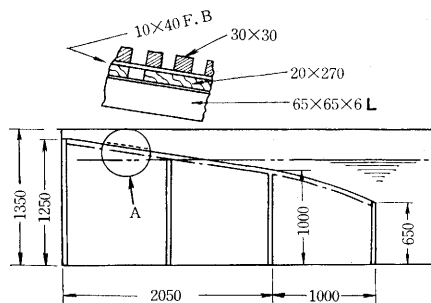
風路つき試験水槽の全体配置を図・1 に示す。⑭の亚克力風路の部分は最初天井高さを高くしてあったが、図示のように平坦にした。水槽は長さ 20.84m、幅 1.80m、深さ 1.35m、常用水深は 1.06m で、厚さ 6mm の鋼板製である。本水槽の主体は、大正 12 年の関東大



図・1 全体配置



図・2 断面図



図・3 消波装置

震災で被災した築地の海軍技術研究所試験水槽の臨時代替として平賀中将（後の東大総長）が応急製作せしめたもので、これを使用して行なわれた平板の摩擦抵抗に関する論文は世界的に有名である。

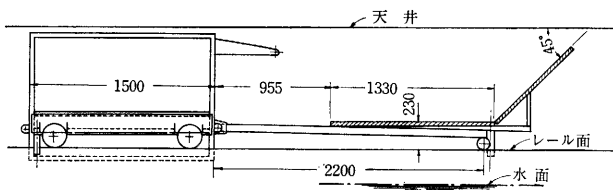
図・2 にその断面図を示す。建屋の構造上水槽を床面下におくことができなかつたため全体を実験室コンクリート床面上におき、ブラケットで支持している。水槽壁上端には溝型鋼が縦通し、この上に台車走行用のレールが敷設されている。給水には 1.5~2 時間を要する。排水は排水ポンプによる。実験室が半地下で日光が直射しないために水槽水は比較的清浄である。

(2) 消波装置

造波装置については後にのべる。消波装置を図・3 に示す。オランダ水槽等で使用したものと同形で、図のスロープの右端 1m は 2 次曲線、他は直線になっている。消波効率(=1-[反射波高/入射波高])は計測していないが、使用波長の範囲では十分有効と認められる。A 部詳細に示すように 30mm 角檜材を 30mm 間隔に配し、10mm 厚の平鋼板 3 枚で間隙をつくり、その下に 20mm x 270mm の板材を配してある。

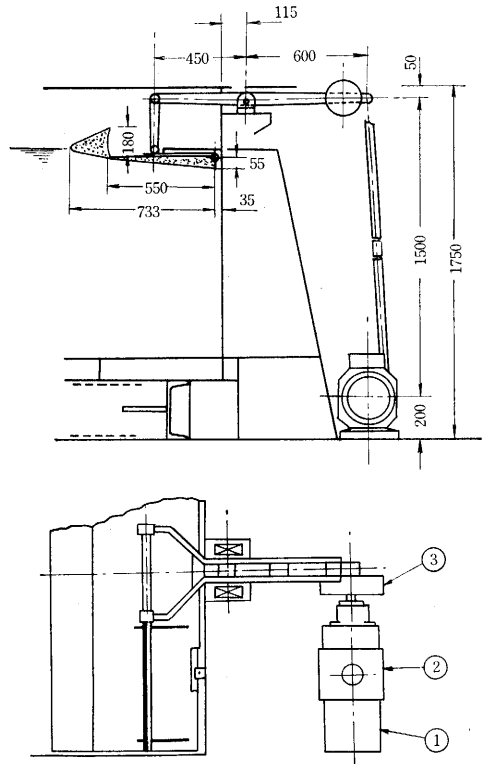
(3) 台車

台車は外径 40mm 鋼管製とし、長さ 1.50m、床幅 1.756m、横方向には床面は 3 分割されて中央部 550mm は上下可能となっている。車輪の外径は 200mm であるが、防振のため硬質ゴム被覆を施してある。軌条両端に滑車をもうけ、ワイヤロープをまわして、1PS 電動機で曳引する。走行距離が小さいので、速度は最大 50cm/sec で十分である。図・4 に台車の側面図が示されている。図の左端と、右方副台車（直径 100mm 車輪つき枠



図・4 台車

組) の位置に内径 1 インチのパイプが装備されている。図示されていないがこれに滑車つきの鉛直棒が嵌入されて、船体の船首揺れを拘束するナイロン糸のガイドを行なう。枠組の上面に厚さ 30mm の木材で遮風板が形成されて気流を絞り、整流増速を行なう。これを設置するまえには風速分布は横方向に大幅に変動し、実験値に信頼がおきにくかつた。なお対地速度および車輪回転速度はマイクロスイッチで計測される。また台車上で造波機、送風機、台車駆動モータの制御が可能である。ワイヤロープ駆動のため、台車速度に周期的変動があるが、目下の実験にはさしつかえない。



図・5 造波装置

①電動機 ②変速機 ③偏心輪

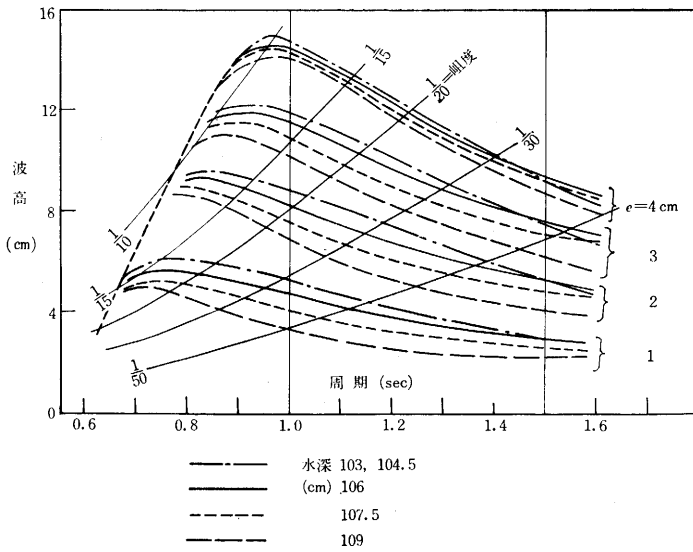
(4) 風路

水槽上面から実験室天井までの高さが小さいため、風路の高さは図・2 のようにに 1100mm に制限され、台車上の作業等に不便であり、また同図⑬の部分における絞り比は 0.611 にすぎない。アクリライト製風路部は観測上便利であるが、ライトの熱のため多少の変形をおこしており、防撓材がはずれかけた所もある。台車に遮風板を設けた機会に既述のように、この部分の風路高さも 1100mm とした。図ではこの風路は開放型のようにみえるが、気流は吹出口から実験室内を循環してファンにもどっている。風路は音声を遮断するため、アクリライト壁付近では台車側と実験室側との連絡が困難で不便を感じている。

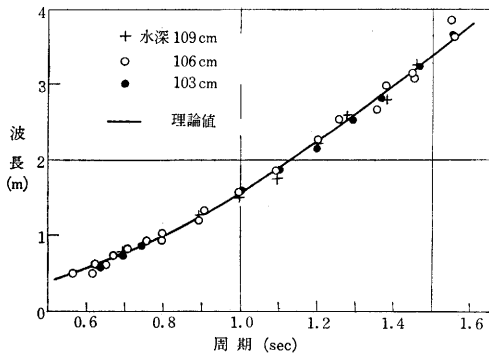
2. 波の特性

(1) 造波装置

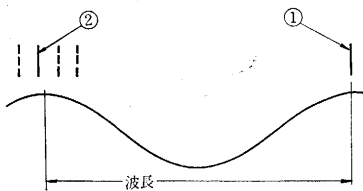
造波装置の概要を図・5 に示す。リングコーン無段変速機つき 3PS 電動機によって偏心輪を回転し、連結棒を介して、水平フラップ型造波板を動かす。造波板は最初長さ 550mm の平板であったが、後に図のように延長し、また下面をゆるやかな曲面とした。整形は硬質ビニール板によって行なつた。短周期で偏心を大きくして運転すると造波機側水槽壁が周期的に変形するので後に水平桁を溶接して補強した(図示してない)。



図・6 波高, 偏心, 波周期の関係



図・7 波周期と波長



図・8 波長の計測

①定置波高計 ②移動波高計

(2) 波高と波周期の関係

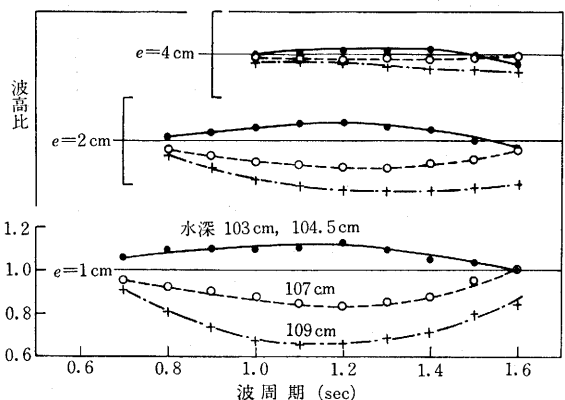
偏心を一定とし、造波板の運動周期を変化して波高の変化を計測した。波高の計測は間隔 4 mm の接点式くし型波高計 2 台を用いて、間隔 2 mm で波高の読取が可能ないように配置した。造波板が水平に近い場合、水深の影響が大きいことは計測結果が示すとおりであるが、実験は水深 103~109cm の範囲で行なった。結果をまとめて図・6 に示す。周期を短くするにつれて波高は漸次高くなるが、偏心量によってきまる最大値があり、その周期をこえてさらに短周期とすると波高は急激に減じ、ほぼ 0.55 sec で 0 となる。水面に水平方向に分布する周期的圧力変化をあたえて波を発生する場合、圧力分布の幅に

よってきまる一定周期では波高が 0 になる。すなわち波が発生しないことは理論的に推測されるが、本装置の寸法から予測される波なし周期は前記 0.55 sec に一致しない。今のところ波高が急低下するあたりの現象を説明することは困難である。またこのあたりでは波高や波形が著しくバラつく。図には後に示す波長の計算値をもちいて波高波長比(波組度)の値を求め併示してある。この値の理論的最大値は 1/7 となっているが、本水槽ではその以前に波形がくずれている。

図・7 に波長と波周期の関係を示す。波長の計測には波高計を予想波長程度はなしで 2 台設置し、うち 1 台を前後に数点動かして波高の同時記録をオシロ紙上にかかせ、波形の位相差 0 の位置を見出す方法によった(図・8)。図・7 には偏心の差は全部無視して水深ごとに同じ符号で計測値を示し、同時に理論値(水深 = 106 cm)を曲線でかきいれてあるが、理論値と計測値はよくあっている。水深を 103~109 cm にかえても波長と周期の関係は理論計算によっても無視できる程度である。ただし水深無限大の場合とくらべると周期 1.2 sec 以上でわずかの差を生ずる。

事実のぞき窓から観察すると長周期の波をおこすと、水槽底に周期的水平動が認められる。

水深の影響を図・9 の形に表示した。横軸は波周期縦軸は任意水深における波高と、常用水深 106 cm における波高との比を、偏心  $e$  の値 3 種について示したものである。波は水の表面に発生し、圧力変化の源泉が水面近くにあるほどその造波効果は大きいと考えられるから、水深が小さい方が波高の大きいことは傾向的には妥当である。しかしさらに水深を減ずると造波板の接水長さが減じて波高は減ずるのである。長周期において上記の傾



図・9 水深による波高の変化 (偏心  $e$ ) = 1 cm, 2 cm, 4 cm)

向が一部逆転している理由は明らかでない。

実験に際しては図・6 をベースとして周期に対応する偏心を定めるが、波高の記録はできるだけ行なって不時の特性の変動に対処しようとしている。

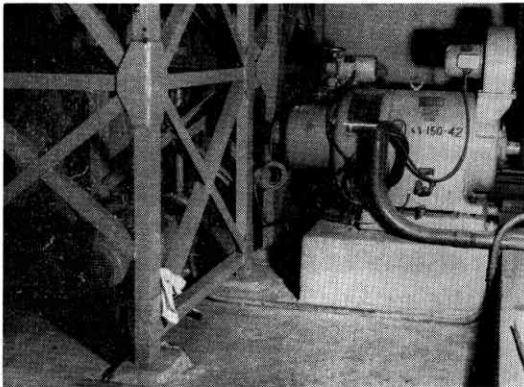
この特性曲線から最初意図した最小周期 0.6 sec は実施困難で、0.7 sec がほぼ限度と考えられる。

なお原動機容量は十分に余裕があり、始動後 2~3 周期でほぼ一定の波形に達する。

### 3. 風速分布

#### (1) 送風装置

原動機は 11 kW, 210V 超分捲整流子電動機で、押しボタン式速度調整装置がついている。原動機軸の回転は V ベルトで 2 基の軸流ファンに伝えられる。ファンは外径 1200 mm, ボス直径 480 mm, 最大回転数 955 rpm, 動翼 9 枚をそなえ、その後に静翼 10 枚をもっている。吸込口にはあらい金網が取り付けられており、整流部(図・1 ㊟)は格子と 2 mm 目金網とからなっている。ファンおよびその外筒をささえる型鋼製ヤグラ 2 基のため、造波装置の調整はかなりきゆうくつになった(写真・1)。風量は最大 24 m<sup>3</sup>/sec であるが、遮風板をつけたためやや低下していると思われる。しかし台車前方(図・4)で右方水面上 15 cm で 15 m/sec 以上の風速がえられることは確認されている。ファンの回転数が 700/min. をこえると騒音がひどくなるが、比較的低周波成分にエネルギーが卓越しているようで、実験室外はあまり被害をあたえない。



写真・1 造波用および送風用電動機

#### (2) 横断面内の風速分布

熱線風速計を使用してアクリル風路の中心部後方 2 m で風速分布を計測した。風速計の位置は静水面上 2.5, 5, 10, 15, 25 cm (水深 106 cm) としたが、風速の大きいときは発生した風波や、水滴の吹送で熱線のきれるおそれがあるので、最低位置を水面上 4 cm とした。

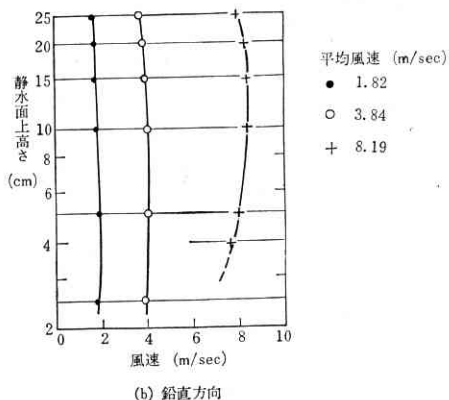
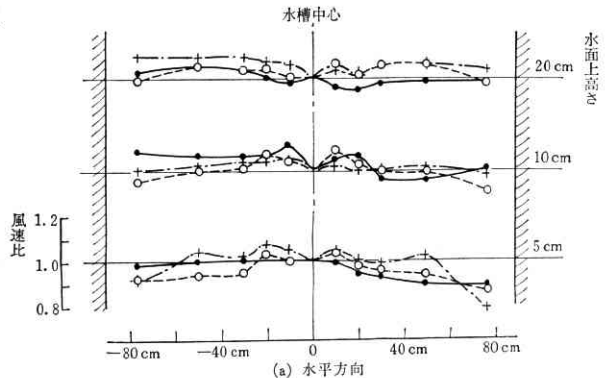
図・10(a)には 3 種類の平均風速における水平方向風速分布を、水槽中心の値を 1 として示してある。横座標の正は、計測位置よりファンの方向をむいて左手を示す。一般に水槽中心の値がその近傍より低目に出ているのは

1.(3) においてのべた副台車につけた模型支持棒の後流の影響である。遮風板をつけるまえには、2 基のファンからの導風管が中心線上で一致する所にできる後流の影響が同様にあきらかに認められたが金網の挿入によって改善された。本水槽で使用する模型長さはたかだか 1.3 m 程度と考えられるので、この風速分布は一応使用可能とみてよい。

図・10(b)はこれをもとに、水槽中心 ±30 cm の平均風速の鉛直分布を半対数紙上に示したものである。低風速の場合にはほとんど様な分布を示しており、風速が大きいとき、わずかに水面上境界層の影響らしいものがある。境界層が発達するに十分な距離が不足しているためとも考えられるが、計測断面を前に 2 m, 後に 4 m うつしても著しい変化がないことは後述のとおりである。縦軸を対数目盛としたのは自然風の風速の鉛直分布が

$$U/u_0 \propto \log(z/z_0); U = \text{風速}, z = \text{水面上高さ}$$

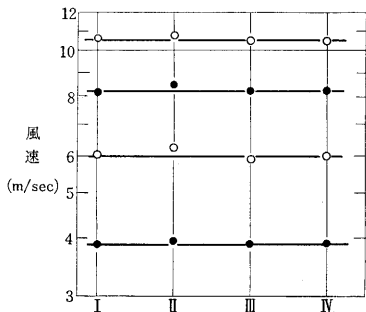
とあらわされるとされているからである。もっとも海面上でこの法則が実際になりつつか、波の大きいときはどうかといった点については、資料があまりないようであり、水面近くにさらに金網を増設するなどして風速分布を変形させることが、合理的か否かは、にわかに断定できないと考えている。なお 2 mm 目の金網をいれても、波高、波形等には影響しない。



図・10 風路横断面内風速分布

(3) 水槽長さ方向の風速分布

水面からの距離 15 cm における平均風速をアクリル風路断面を I とし、そこから後流 2 m ごとに II, III, IV 3 断面で求め、長さ方向の風速分布として図・11 に示す。これによると水面上 15 cm では風速はほとんど均等にたもたれている。現在までに経験した漂流速度は最高 35 cm/sec 程度であったから、規則波上の実験を行なうかぎり、計測距離および時間は十分と考えられる。なおここ



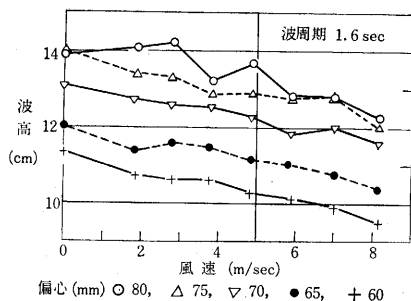
図・11 長さ方向の風速分布 (水面上 15 cm)

に示していないが、各面における横方向の分布も長さ方向に互いにはほぼ相似である。

4. 波と風との相互干渉

(1) 風による波の変化

静かな水面に風が吹くと、波の発生することはよく知られている。当水槽では風と無関係に図・6 の範囲で波



図・12 風速による波高の変化

を発生することができるが、このような人工波の上に風があたるとき、もとの波はどのように変化するであろうか。

水槽の長さが十分に長く、気流のエネルギー漏洩がなければ人工波は漸次気流速度によってきまる風浪に変化してゆくと想像されるが、実際には水槽の長さは有限であり、実験水面としてはたかだか 15m 程度の吹送距離にすぎない。この場合風速 2 m/sec 程度でも 10 秒くらいで風浪の発達はとまってしまい、その波高、波長とも時間の経過による変化はなくなる。風速が大となれば、さらに急速に風浪は完全発達の状態に達する。吹送距離に

よる変化はもちろん存在し、消波装置に近いところでは波長が 10 cm をこえる波がみられる。しかしこのような風浪は船の運動にはほとんどなんらの影響もおよぼさないことが知られている。したがって普通の船体運動に関する実験に際しては、気流によって生じた波を考慮する必要はないと考えられた。

しかるに波の粗度を一定とし、風速を変化して船の横揺運動を計測するため、実際に波高を計測したところ、図・12 の結果がえられた。造波機は周期約 1.6 sec で運転し、計測された記録をしらべても、波周期は風速によって変化していないのに、波高は一般に風速増大とともに減少している。波周期 0.75 sec の場合の計測も同じ傾向を示した。

この計測は図・11 の断面 II の近くで行なったものである。常識的には波はその進行方向に気流でおされてエネルギーを吸収し、波高が増大すると予測されるのであるが、事実は風速の 1~2 乗に比例した波高減量がみられる。この現象については波周期のみならず波長についても、また風浪についても水槽長さ方向にさらに詳細な計測を行なってみないとはっきりした説明をつけることはむづかしいが、筆者は今のところ、人工波が気流に対して粗面の作用を呈し、このため波の谷における気圧上昇の度が低下し水面が上昇して波高減少をきたしたものであるのではないかと考えている。

上記の現象を見出したので、風を吹かせて実験するときは、波周期一定でも、風速に応じて偏心をかえないと波高(波粗度)を一定に保つことができない。

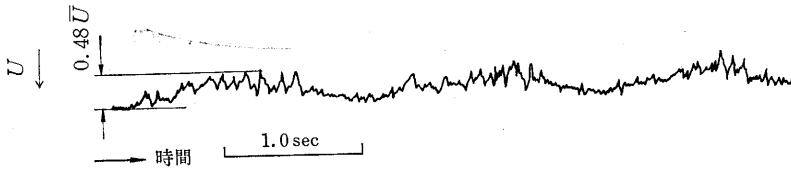
(2) 波による風速の変動

前節にのべたように波は水面粗度であって、気流を阻害すると考えられるので、波面上一定高さの点の風速は波と同じ周期で変動すると思われる。また静止水面から一定の高さの点で風速をはかっても、周期的な変動が波面近くでは存在するであろう。これについては本誌 40 年 6 月号にも実測の 1 例を示しておいたが、風速計の指示に不具合のあることがわかって最近信頼のおけるものにとりかえたので、これによる計測例を図・13 に示した。風速計ピックアップは静水面上 15 cm においてある。波高は約 12 cm であるから、波面からの距離は 9~21 cm に変動する。図・10 (b) によればこの間風速はほとんど一定であるが、これは人工波のない時の計測値であって、図・13 は波による風速変動が意外に大きいことを示している。図においては  $U$  は瞬間風速、 $\bar{U}$  は平均風速である。波高の低いときの計測も行なわれているが、このときの変動量が図・13 より小さいのは当然である。

$$U = \bar{U}(1 + \delta \cos \omega t)$$

とした場合、平均 2 乗風速は

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} U^2 dt = \bar{U}^2 \left( 1 + \frac{\delta^2}{2} \right)$$



図・13 波による風速変動 (波周期 1.6 秒; 波高波長比 1/30)

となり、 $\delta=0.5$  のときでも  $U^2$  の平均 (風圧の平均) に対する影響は一般に小さい。しかし船体の横揺れでは同調付近において横揺れの振幅は非常に大きくなり、小さな風圧変動も無視できない差を生じうる可能性がある。

遮風板と静止水面との間隔が 60 cm 程度であることもこの変動を大きくしていると思われるので、図・13 をそのまま大洋上の風速変動に拡大することは不合理であるが、今後検討すべき課題であろう。

### (3) 人工波と人工風との組合せの意義

大洋上に気象条件、海洋学的条件によって発生する波風の構造やその組合せと、実験室において人工的に発生させた波、風とが力学的の模型として果して適合しているか否かは根本的に重要な問題であり、詳しく考えればもちろん両者はかなり異なった性格をもつものと思われる。しかし船体運動の解明を主とするわれわれの立場からすると、この差異はかならずしも本水槽の意義を失わせるものではない。自然界においても、いわゆる風浪 (sea) については、そのとき、その海面に吹く風との間に密接なつながりがあるが、これがウネリに転化した場合、あるいは未発達段階においては、短時間の現象としてみれば風と波とを独立に組み合わせたとして大きなあやまちにはならないであろう。

むしろわれわれは風路および水槽幅が小さく、水槽長さも短いため、模型の大きさにはなほだしく制限をうけ、このため寸法効果が著しくなって、実船との対応に誤差の生ずることをおそれている。たとえば模型の幅を 20 cm とすると、風速 5 m/sec で幅を使ったレイノルズ数は約  $10^5$  の程度であって、甲板上の構造が比較的かどばっているため寸法効果が小さいと推定はしているが、大型模型との対比を実際に行なってみないと、その定量的な判断は困難である。さらに対水運動においては、漂流速度を 10 cm/sec とすると  $2 \times 10^4$  程度のレイノルズ数となり、ここにもかなり疑問点が残っている。さいわい最近国内、国外の大型水槽にもブローを装置する所がふえてきたから、このことについての比較試験が可能となるであろう。

### あとがき

以上風路つき試験水槽の特性調査結果について、概要をのべた。ここに記した特性の現状はけっして十分満足すべきものとは考えていないが、一応の実験研究には支

障がないであろう。また他に例のない型式であるから、その特色を生かして使用するならば、精度の点で多少粗雑であっても十分有益な資料を得ることができると信じている。今後改善すべき点は次の諸項であろう。

- 1) 水平フラップ方式は造波装置として最適とは考えられない。特に波なし周波数をもつことは不便である。この点さらに考究して機構簡単で有効な造波装置を開発したい。
- 2) 波高計は研究室員の手製のもので一種の Digital 型であり、較正を要しない点はすぐれているが、今のところ記録はオシロに感光される方式で、このため現像後でない記録が確実にとれたか、使用可能かはっきりしない。ビジコードが入手できれば、この点は解決されるが、さらに精度、追縦性よく、較正が簡単に記録も簡易にできる廉価な波高計が望まれる。超音波波高計も短波長、大粗度の波には多少の問題が残っているようであるし、まだ高価でもある。
- 3) 風速分布についてさらに改良を行なう必要がある。ただし、そのまえに、実際の海洋風について信頼できる資料のえられることが望ましい。
- 4) 計測用台車は、わずかの校費で、たんに走行可能という程度を目標に製作し、駆動電動機も手持の中古品を使用している。抵抗水槽におけるような高度の速度制御は望まないが、原動機の馬力も大きくし、追縦性をあげて遠隔操縦の可能なものにした。
- 5) 遮風板形状の改善

以上は予算の関係もあり、早急な解決はのぞめないが、今後水槽の特性調査として次のような項目を考えており、これは実験のあいまをみて逐次実施する予定である。

- a) 偏心量を 4 cm 以上としたときの波高計測
- b) 造波機作動時の水槽水の運動
- c) 断面 II 以外における風速の鉛直分布の計測、特に水面近傍の詳細な計測
- d) 風による波の変形の広範囲にわたる調査
- e) 風によっておこされる波の調査
- f) 波による風速変動の広範囲にわたる調査
- g) 水槽水温度分布の調査

これらの調査項目については、完了次第また報告する機会があるであろう。

終りにこの調査の遂行に協力した石井善一、小村隆士、小村紅子 3 君に感謝の意を表して稿をとじる。

(1966年2月3日受理)