

博多湾の風と波

— 冬期季節風による結果 —

光 易 恒*

1. 緒 論

博多湾の波および風の特徴を調べるために、観測塔が、昭和41年に博多湾のほぼ中央部に建設された。この塔を利用した観測が、運輸省第四港湾建設局博多港工事事務所との共同のもとに、昭和42年度より昭和45年度にかけて行なわれた。この観測施設の詳細ならびに予備観測の結果に関してはすでに発表が行なわれている^{1), 2)}。今回の報告は、主として、昭和44年11月より、昭和45年1月にかけて得られた比較的風速の速い冬期季節風およびそれによって発生した風波に関する観測資料を解析して得られた結果に関するものである。玄界灘に面した博多湾においては、西北西のいわゆる冬期季節風がもっとも支配的な風のひとつと考えられるので、今回得られた結果は実用的な面でも有用なものと考えられる。

2. 施設および観測方法の概要

観測施設および観測方法に関しては、すでに詳細な報告^{1), 2)}がなされているので、今回はその概要のみを述べると次のとおりである。

波および風の観測は、1辺5mの正三角形を形成するように海底に打ち込まれた3本の鋼管(φ:0.5m)より成る観測塔を利用して行なわれ、この塔の位置は図-1にTowerと示されたところである。この地点の水深は約5mであるが、湾内の能古島以東の部分は比較的水深が一樣で、5m前後のところが多い。したがって、

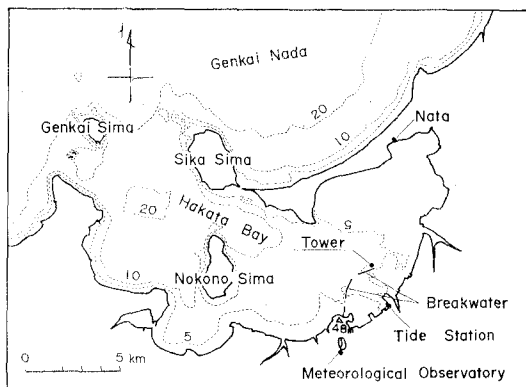


図-1 博多湾平面図および観測地点

湾内で発生した周期2~3秒の風波の多くは近似的に深海波とみなすことができる。今回、解析を行なった測定量は、塔に補助支柱を利用して取り付けられたロビンソン型風速計によって測定された風速の鉛直分布、ならびに塔に5m間隔の正三角を形成するように取り付けられた3本の容量型波高計のうちの1本によって測定された波である。データは、大部分、自動観測によって得られたもので、2時間間隔の偶数時刻に、風速が設定値(約8m/sec)を越えたときのみ測定されたそれぞれ約10分間の長さのデータである。

3. 測定期間中の気象概況

一部のデータを除くと、今回使用した大部分のデータは、日本海の北部を通過する低気圧、あるいは、西高東低の気圧配置による典型的な冬期季節風によるもので、天気図の一例は図-2に示されている。観測期間中の天候は、晴、曇、にわか雨、にわか雪、雪などさまざまであった。気温および水温の自動測定装置が、今回の観測期間中には取り付けられていなかったため、温度に関するデータは、観測塔では得られなかった。そこで奈多漁港(図-1参照)で毎日朝10時に測定された水温、福岡気象台で毎時測定された気温、それに観測員が観測塔に断片的に出かけた際測定した塔付近の気温ならびに水温のデータ、などを総合して検討した結果、今回の観測期間を通じて水温のほうが2~3°C高い場合が多く、大気はわずかに不安定な場合が多かったことが推定された。しかしながら、この程度の温度差は、風速が10m/secを越えるような、比較的高風速時には、海面近くの風速分布にはあまり影響はないものと考えられる。

4. 観測結果

(1) 海面上の風の鉛直分布

各観測時刻に測定された約10分間の風速の値と、風速計の高さを湾内で測定された潮位に応じて補正して求めた各風速の測定点の海面上の高さをもとにして、約10分間の平均風速の海面上の鉛直分布を求めた。それらの代表的な例は、図-3に示されている。図-3より明らかなように、風速の鉛直分布は、海面上2~7mの範囲で大部分、対数分布にきわめて近い。図に示された以外の分布も大部分図-3に示されたもの以上によく対数

*正会員 理博 九州大学教授 応用力学研究所

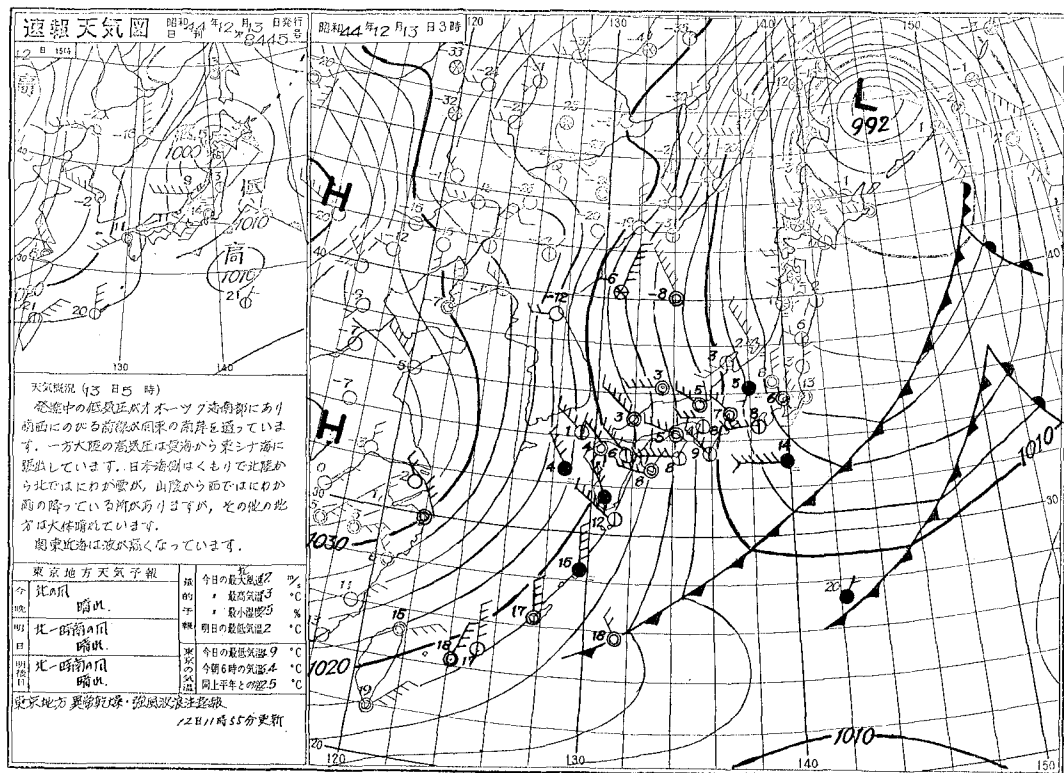


図-2 観測期間中の天気図の一例

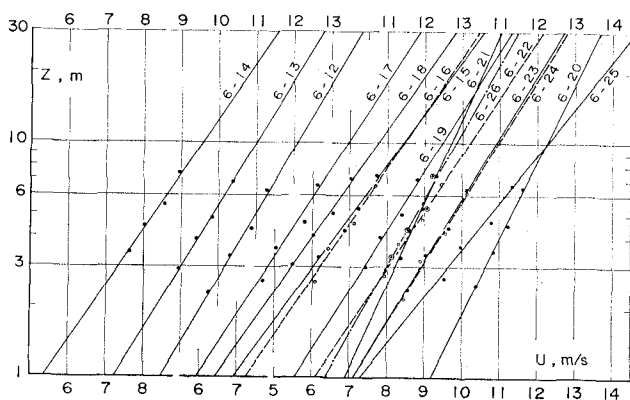


図-3 海面上の風速分布

分布にしたがっていることが確かめられた。したがって、よく使用される次の対数分布の式を適用して $U(z)$ の測定値をもとにして最小自乗法で u_* および z_0 を決定した。

$$U(z) = (u_*/\kappa) \log_e z/z_0 \quad (1)$$

ここに、 $U(z)$ は、海面と z の高さにおける風速、 κ は Kármán 定数 (≈ 0.4)、 z_0 は海面の粗度定数、そして、 u_* は次式で定義される風の摩擦速度である。

$$u_* = \sqrt{\tau_0/\rho} \quad (2)$$

ここに、 τ_0 は海面に作用する風の応力、 ρ は空気密度である。さらに、このようにして決定された u_* および

z_0 の値を用いて、式 (1) をもとにして得られる式

$$U_{10} = (u_*/\kappa) \log_e 10^3/z_0 \quad (3)$$

により、海面上の高さ 10 m における代表風速 U_{10} を決定した。これらの値をもとにした議論は、後ほど 4. (4) に述べられる。

(2) 海面上の風と隣接した市街地上の風

風波や高潮の計算においては海面上の風速に関する正確なデータが要求されるが、海上において長期間風の観測を行なった例は比較的少ない。このため、隣接した陸上の観測点における風のデータをもとにして海上風を推定せざるを得ない場合が多い。このような場

合に参考となる資料を提供するために、博多湾の観測塔で得られた風速 U_{10} と、観測塔より南西に約 4.5 km 離れて市街地の中にある福岡気象台で測定された風速 $U_{24.3}$ との比較を行なった。気象台の風速計の高さは基準面上 24.3 m、観測塔において今回使用した一番上の風速計の高さは 8.16 m であるので、同一高さでの風速の比較は不可能である。対数分布を延長して外挿して、湾における高さ 24.3 m の風速を求めることも形式的には可能であるが、風速分布を、測定範囲の外にあまり延長することには問題があるので、一応、海面上 10 m の高さの風速 U_{10} との比較を行なった。 U_{10} を選定した理由

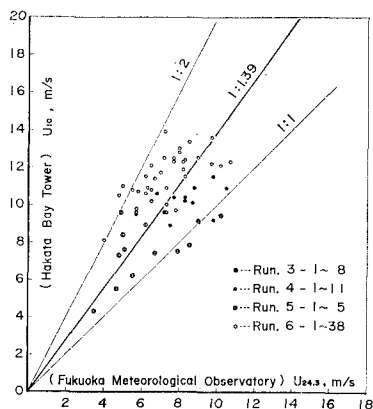


図-4 海上風と陸上風との関係(風速)
(以後の図においてもRun No.に対応する
記号としては同じものが使用されている)

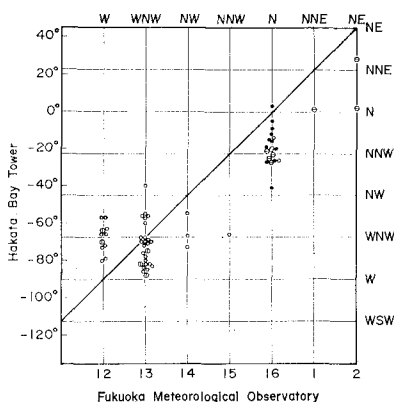


図-5 海上風と陸上風との関係(風向)

は、 U_{10} が多くの場合波の推算に利用されるためであるが、 U_{10} の代わりに $U_{8.16}$ を選んでも以下述べる結果に定性的な差は生じないことが確かめられた。

結果は図-4 および図-5 に示されている。なお、海上風の風向は基準面上 7.16 m で測定されている。図-4 に示された結果によると、陸上風と海上風との比は、1:1 と 1:2 との間に散乱しており、平均値としては 1.39 で、陸上風に比して海上風がかなり速いことがわかる。Hunt (1956)³⁾ は Okeechobee 湖およびその周辺において測定した風速のデータを解析して、湖より陸に向かう風について、79:100 すなわち、1:1.3 という結果を報告している。したがって、今回の結果は、Hunt の結果に比較的近いものである。

図-5 は風向について同様な比較を行なったものである。これより、風向については両地点で、それほど大きな変化がないが、湾上で NNW の風向が気象台では N に近くなっていること、博多湾で測定された風向が、今回の観測期間には大部分 NNW および WNW に集中しており、Run 3 および Run 4 のデータが NNW の付近に、Run 5 および Run 6 のデータが WNW の付

近にそれぞれ集中していることがわかる。この Run 3 は、昭和 43 年 10 月 22 日に得られた随時観測(測器の調整のために観測員が出かけた際行なった観測)による唯一のデータで、秋日和のよい天気の日海風によるもの、Run 4 は、昭和 44 年 11 月 4 日より 5 日にかけて、日本列島の太平洋側を台風 16 号が通過した場合の風によるもので、いずれも冬期季節風とは見做し得ない例外的なものである。したがって、冬期季節風に対応する Run 5 および Run 6 のデータよりみて、冬期季節風の風向がほとんど WNW であることがわかる。ここで、もう一度図-4 に立ち返って、注意深く図を見ると Run No. によって風速比が少し変化していることがわかる。すなわち Run 3 は比が 1:1 のまわりに集中しており、Run 4 は 1:1 と 1:1.39 との間に Run 5 および Run 6 は 1:1.39 と 1:2 との間にそれぞれデータが散乱していることがわかる。したがって、前述の風向に関する結果と対比すると風速比がある程度風向に関係していることがわかる。

海上風と、隣接した地点の陸上風との差の原因の 1 つは、境界層下面の粗度の差と考えられるので、粗度が不連続に変化した場合の新しい境界層の発達を取り扱った最近の研究の結果⁴⁾を利用してこの問題を解析することが原理的には可能である。この問題に関しては今後検討してみる予定である。

(3) 湾内で発生した風波

従来の研究の一つにおいて、博多湾の観測塔で測定された風波の資料、ならびに、大型水槽で得られた風波の資料をもとにして、次のような風波の推算式が導かれた⁵⁾。

$$gH_{1/3}/U_{10}^2 = 2.15 \times 10^{-3} (gF/U_{10}^2)^{0.504} \dots\dots (4)$$

$$gT_{1/3}/2\pi U_{10} = 5.07 \times 10^{-2} (gF/U_{10}^2)^{0.330} \dots (5)$$

これらの式の精度を確かめるために、今回得られた比較的高風速の冬期季節風による風波のデータを用いて検討を行なった。前回の博多湾の波のデータは、大部分 N 方向よりの風によるものであったので、吹送距離として対岸距離をとっても大差がなかった。しかしながら、今回のデータには W~WNW~NW 方向よりの風によるものが含まれているので、図-1 よりわかるように吹送距離を対岸距離としたのでは適切でない。そこで便宜的に、“Shore Protection Planning and Design”⁶⁾ に示された方法によって、有効吹送距離 F_e を求めてこれを吹送距離として用いた。

このようにして求められた F_e を式 (4) および式 (5) の F に使用し、波および風の観測値をもとにして、無次元量を求め、上述の推算式と比較した。結果は図-6 に示されている。図-6 にみられるように、周期に関する推算式と今回の結果との一致はきわめて良好である。波高に関するデータは少し散乱しているが、式 (5) はほ

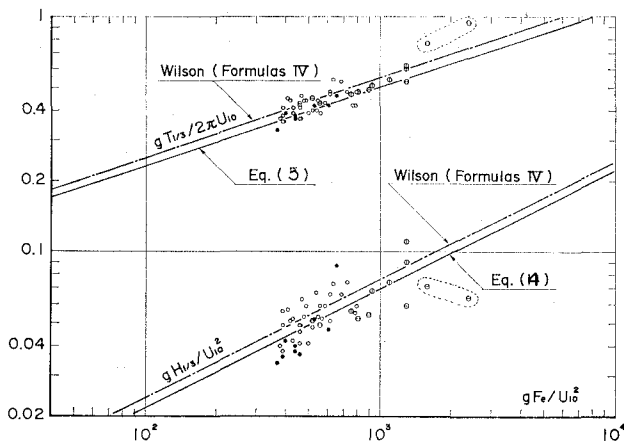


図-6 有限吹送距離における風波の推算式

ばデータの中央部を通っている。比較のために Wilson のIV型の式⁷⁾が図中に記入してあるが、両者の差はきわめてわずかである。点線で囲んだ2つのデータは、著しく式よりはずれているが、これは風の吹きはじめに得られたもので、風波の発達が十分でなく、波高は低いと周期の長い外部よりの侵入波の影響を受けたためと考えられる。したがって、式(4)および式(5)は、十分精度の高い風波の推算式であることがわかる。

(4) 海面に作用する風の応力と水面粗度

海面に作用する風の応力 τ_0 は、次のように表現される場合が多い。

$$\tau_0 = \rho r_{10}^2 U_{10}^2 \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 r_{10}^2 は海面の抵抗係数と呼ばれ、海面上の高さ $z=10$ m における風速 U_{10} と対応するものである。 r_{10}^2 の値に関しては、非常に多くの観測値があるにもかかわらず、データの散乱が多く、あまり明確な関係式は得られていない⁸⁾。前回得られた博多湾での資料によると、風速 $U_{10}: 2 \sim 9$ m/sec の範囲で、 r_{10}^2 は大部分 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ の間にあって、風速とともにわずかに増大の傾向を示すものが多かった^{1), 2)}。今回得られた比較的高風速時のデータを使用して、この問題の検討を行った。

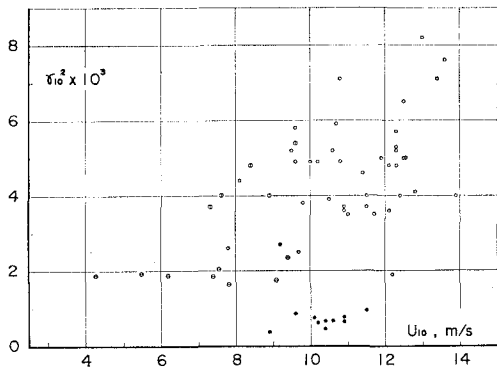


図-7 海面の抵抗係数 r_{10}^2 と基準風速 U_{10} との関係

式(2)および式(6)によると次式

$$u_*^2 = r_{10}^2 U_{10}^2 \dots \dots \dots (7)$$

が得られるので、4.(1) で述べた方法で決定された u_* および U_{10} の値をもとにして、 r_{10}^2 を求めた。得られた r_{10}^2 の値を U_{10} に対して示したものが、図-7 である。図-7 にみられるように測定値の散乱はかなり著しく、しかも一群のデータはかなり小さな値を示しているけれども、冬季節風による大部分のデータについては、 r_{10}^2 が $U_{10}=7$ m/sec 付近より急速に増大し、 $U_{10}=14$ m/sec 付近で $r_{10}^2 \approx 8 \times 10^{-3}$ と、これまで海洋では測定されることがないような大きな値に達することを示している。4.(1) で述べたように、風速分布は、かなり忠実に対数

法則にしたがっているので今回得られた r_{10}^2 の値の精度はかなり高いものといえる。このような非常に大きな r_{10}^2 の値が得られた例としては、国司・今里⁹⁾ が高速風洞水槽で得たものがある。ただし、この場合の最高風速は、 $U_{10} \approx 80$ m/sec にも達している。

最近、鳥羽・国司¹⁰⁾は、粗度レイノルズ数 $u_* \bar{H} / \nu$ を導入して、 r_{10}^2 と $u_* \bar{H} / \nu$ との間に、かなり普遍的な関係のあることを実験水槽で得られたデータをもとにして確かめた。ここで、 $\bar{H}$ は風の作用のもとに発生した風波の平均波高、 ν は空気動粘性係数である。図-8 は今回博多湾で得られたデータを整理して、鳥羽・国司の

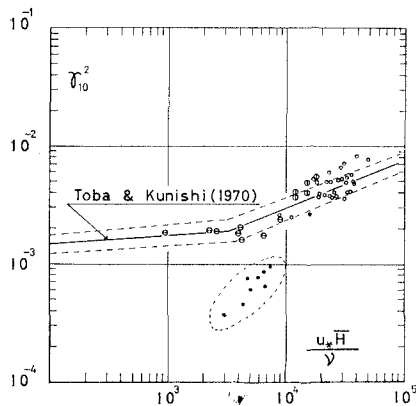


図-8 海面の抵抗係数 r_{10}^2 と粗度レイノルズ数 $u_* \bar{H} / \nu$ との関係

データと比較したものである。ただし、図の錯綜をさせるため鳥羽・国司のデータはデータのほぼ中心を通る実線と、散乱の範囲を示す破線とで示されている。著しくはずれている一群のデータを別とすると、今回得られたデータが、鳥羽・国司の結果とかなりよく一致していることがわかる。室内の風洞水槽で得られた風速自体は非常に高風速であるが風波のスケールは非常に小さい現象に関する結果と、実際の海で得られた結果とが、このようによく一致することは、粗度レイノルズ数 $u_* \bar{H} / \nu$

が r_{10}^2 に対する支配的なパラメーターとして適切であることを示しているものと解釈することができる。しかしながら、従来多くの研究者により報告されている海洋における計測データの中には、今回測定した風速以上に高風速の場合のデータがあるにもかかわらず r_{10}^2 の値としてただか 3×10^{-3} 程度の値しか得られなかった原因ははっきりしない。

5. 結 語

今回、博多湾において、観測された主として冬期季節風による風および波のデータを解析して得られた主要な結論は次のごときものである。

(1) 海面上の風速の鉛直分布は大部分のものについて測定が行なわれた $z=2 \sim 7$ m の範囲で対数分布にきわめて近い。

(2) 観測塔で計測された海面上の風速 U_{10} と、塔より約 4.5 km 離れた市街地にある福岡気象台で計測された風速 $U_{24.3}$ とを比較すると、平均して前者が後者の約 1.4 倍で、海上風のほうがかなり速い。

(3) 前回の研究の 1 つで導かれた波の推算式 (4) および式 (5) は、比較的高風速時の今回の観測結果に対してもよくあてはまる。ただし、今回は有効吹送距離が使用された。

(4) 風速分布に対数法則を適用することによって得られた海面の抵抗係数 r_{10}^2 は、風速 7 m/sec 付近より急速に増大し、 $U_{10}=14$ m/sec 付近で $r_{10}^2 \doteq 8 \times 10^{-3}$ と従来計測されたことのない非常に大きな値を示すことが見出された。とくに興味あることは、 r_{10}^2 が鳥羽・国司により導入された粗度レイノルズ数 $u_* \bar{H} / \nu$ と密接な関係を有し、今回得られた r_{10}^2 と $u_* \bar{H} / \nu$ との関係が、鳥羽・

国司が室内の風洞水槽で得た関係とほとんど一致した事実である。

謝辞：この観測を進めるにあたっては、各種施設の利用、その他について、運輸省第四港湾建設局、ならびに同局博多港工事事務所より絶大なる援助を受けた。ここに記して、謝意を表わします。また、長期間にわたる観測を定常的に遂行するに際して、たえまない協力を受けた応用力学研究所の江藤賢次氏ならびに前職員の中山竜三、および小森利雄などの諸氏に対して、謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 光易 恒：博多湾の風と波——低風速時の一例——第 15 回海岸工学講演会講演集，1968，58-64.
- 2) 光易 恒・中山竜三：博多湾における波および風の観測，応用力学研究所 所報第 33 号，1969，33-66.
- 3) Hunt, H.: Wind Effect on Water Surface, La Houille Blanche, 4, 1956, 575-607.
- 4) Taylor, P.A.: Wind and Shear Stress Profiles above a Change in Surface Roughness, Quart. J. Roy. Met. Soc., 95, 1969, 77-91.
- 5) Mitsuyasu, H.: On the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Waves (1), Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. XVII, No. 55, 1968, 459-482.
- 6) Shore Protection Planning and Design, B.E.B. Tech. Rep. No. 4, Dept. Army, Corps of Engineers, U.S.A., 1961, pp. 401.
- 7) Wilson, B.W.: Numerical Prediction of Ocean Waves in the North Atlantic for December 1959, Deutsche Hydrogr. Zeit., 18(3), 1965, 114-130.
- 8) Roll, H.U.: Physics of the Marine Atmosphere, Academic Press, N.Y. & London, 1965.
- 9) 国司秀明・今里哲久：高速風洞水槽による風波の発達について，京都大学防災研究所年報第 9 号，1966，300-309.
- 10) Toba, Y. and Kunishi, H.: Breaking of Wind Waves and Sea Surface Wind Stress, J. Oceanogr. Soc. Japan, 26, 1970, 71-80.