

沖合い観測塔の風・波浪データに基づく海面せん断応力の評価

ギャリーワトソン*・山下隆男**・林 泰一***・芹澤重厚****

1. 緒 言

高潮現象は大気、波浪、海洋の流れの相互作用として捉えられる。特に、波浪を通じての大気・海洋の境界過程は、高潮に限らず運動量、物質の輸送機構の解明に重要であり、興味深い現象である。海面での抵抗係数を得るという問題は、今さらと思われるくらい古くから議論されてきた問題 (Smith & Banke, 1975; Smith et al., 1992; Anderson, 1993; Yelland & Taylor, 1996) であるが、波浪 (砕波、波齡) との関係が明確にされていないばかりでなく、海面でのせん断応力の推定方法に大きな誤差が介入しているという問題が残されている (Yamashita & Watson, 1996)。

本研究は、風域、波浪特性の時間変化が激しい台風中心が通過する海域での沖合い観測塔の風のデータから誤差の少ない方法で海面せん断応力を求め、風域場の時間変化が激しい場合の、風速と抵抗係数の関係を求めることを目的としている。さらに、得られた抵抗係数、海面せん断応力と波浪パラメータとの関係を検討する。

2. 海面せん断応力の推定方法

定常観測用の風速計の設置位置が 23 m と高いため、海面せん断応力を渦相関法 (eddy-correlation method) で推定すると大きな誤差を生じる。渦相関法では、計測時間 T (min)、観測高さ H (m)、平均風速 U (m/s) の間の関係 $TH/U < 15 \sim 20$ を満足しない場合には推定精度が悪くなる。観測塔での定常観測は $T=20$ min, $H=23$ m なので風速 25 m/s 以上の強風時のみ推定が有意となり、通常のせん断応力の観測には不向きである。そこで、短時間記録でも比較的高い精度で海面せん断応力が推定できる慣性減衰法 (TDM: turbulent dissipation method) を用いた (Yelland et al., 1994)。この方法は、風下側の風の乱れエネルギーは高周波側の乱流エネルギーの散逸比 ϵ に支配されていると仮定し、式 (1) のよ

うな $-5/3$ 乗則の周波数スペクトル形を仮定する。

$$S(f) = K \epsilon^{2/3} f^{-5/3} \left(\frac{U}{2\pi} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、風の周波数スペクトル $S(f)$ と平均風速 U がわかれば、乱流エネルギー散逸比 ϵ が得られ、式 (2) によりせん断応力を求めることができる。

$$\tau = \rho_a (k_v \epsilon z)^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k_v は von kármán 定数 (0.4) である。また、抵抗係数 C_{D10} は式 (3) から求められる。

$$\bar{\tau}_s = \rho_a C_{D10} |\bar{U}_{10}| |\bar{U}_{10}| \dots\dots\dots (3)$$

3. 観測塔のデータによる海面せん断応力の推定

(1) 観測データ

用いた観測データは、(1) 1994 年の台風 9426 号時に紀伊水道の田辺湾内の沖合い観測塔 (水深 30 m) で観測された、3 成分超音波風速計 (カイジョー製) と波浪の毎正時 20 分間データ (通常観測)、(吉岡ら 1995) および (2) 1997 年 4 月 17 日から 5 月 5 日の特別観測データである。図-1 に波高計⑨、超音波風速計 2 台 (④, ⑤), プロベラ風速計②, ③, ⑥の設置位置を示す。台風観測期間では、5 分間平均の最大風速は 24 m/s、最大の有義波高は 5 m であった。また、台風の前は観測点のすぐ南方を通過した。図-2 に 20 分間の風のスペクトル、 $-S(f)f^{5/3}$ を、台風の前接近時の 19:00 と通過後の 23:00 について示す。これより、前者は turbulent dissipation method で仮定しているスペクトル形状、 $-S(f)f^{5/3}$ が適用できるが、後者ではできないことがわかる。すなわち、台風のように風向きが激しく変化する場での計測には、現状の風速計では風向きに起因する障害があることがわかる。何れにしても、これが観測塔本体の影響によるものか、風速計周辺の障害物に寄るものかを明らかにしておく必要があるため、以下では風観測における障害物の影響を明らかにする。

(2) 観測塔または障害物の影響

観測塔の直接的な影響のため、風の動力学的な特性が大きく変化することは当然ではあるが、観測塔の風のデータを用いて海面せん断応力を求めるために、その量

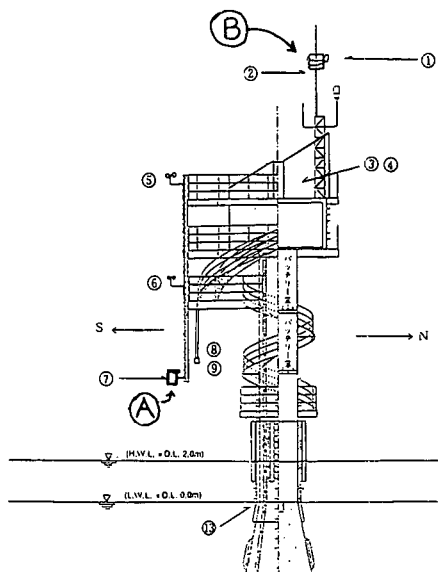
* 正会員 Ph.D. 京都大学 COE 非常勤研究員 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

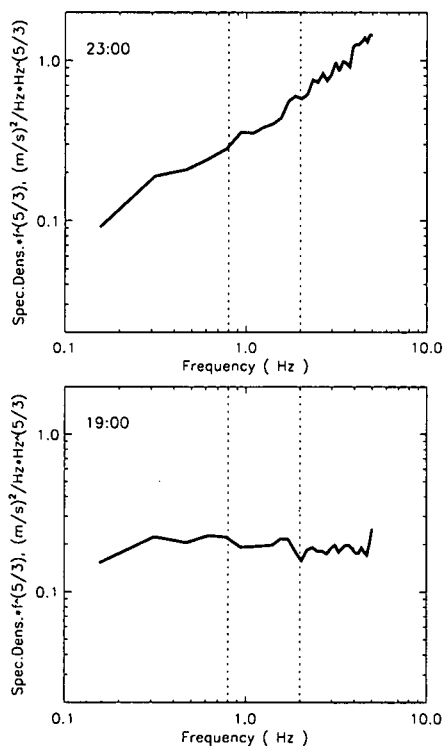
*** 理博 京都大学助手 防災研究所

**** 京都大学助手 防災研究所

的な程度を明らかにしておく必要がある。そこで、長期間の超音波風速計の特別観測を行った。この観測では2台の超音波風速計を用いた。1台は海面上23 mの位置



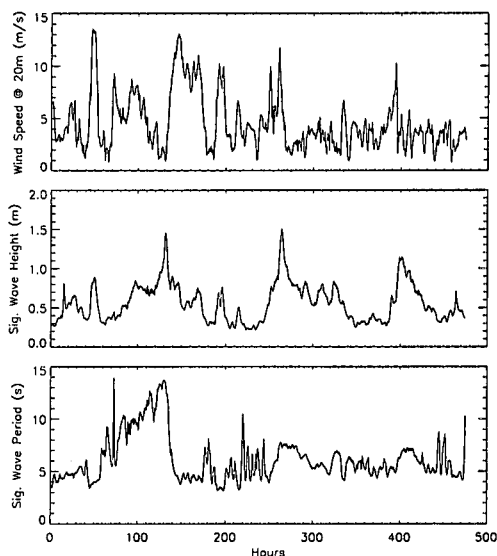
図一 波高計②、超音波風速計(A, B)、プロペラ風速計①の設置位置



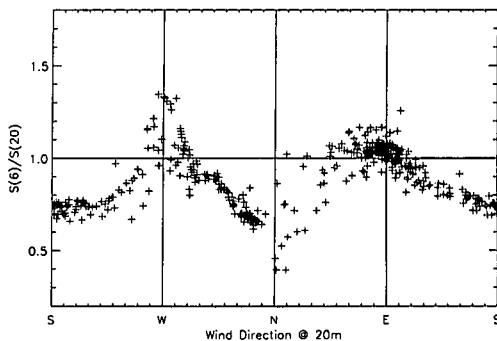
図二 20 分間の観測で得られた風のスペクトル, $-S(f)f^{\frac{5}{3}}$ (台風 9426 号の観測)

に定常的に設置されている超音波風速計③, 他の1台は塔の南側の海面上6.5 mに設置した同型の超音波風速計④である。ここでは、これらによるデータを解析し、風速、風向、風によるせん断応力および抵抗係数の相違を量的に比較する。

a) 風速、風向：観測期間の20 m高度(実際は23 m)の風速計の時間平均風速、有義波高、有義波周期の時系列を図-3に示す。また、20 m高度での風速で規格化した6 m高度(実際は6.5 m)での風速を図-4に示す。この図より、風向きにより有意な差があることは歴然であり、2風速計の時系列データを詳細に検討してみると、北向きの風では6 m高度の風速計は塔の陰に隠れ弱くなり、南からの風の場合にも塔の影響を受けて20 m高度の風速より約25%小さくなることがわかった。さらに、西からの風の場合には、 $S(6)/S(20)$ が30%以上大きくなるが、これについては超音波風速計③の真西に設置



図三 20 m 高度の風速計の時間平均風速、有義波高、有義波周期の時系列 (特別観測)



図四 20 m 高度での風速で規格化した6 m 高度での風速

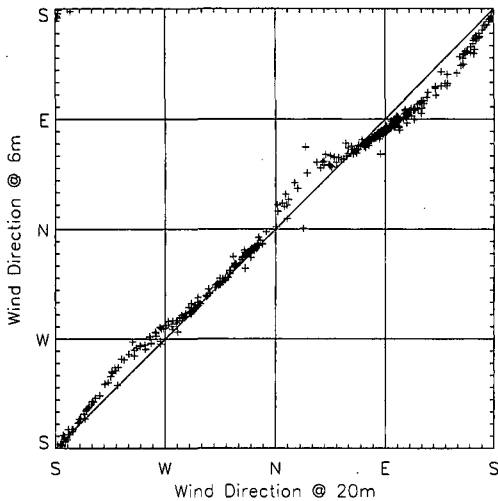


図-5 6 m と 20 m 高度の風速計の風向データの相関

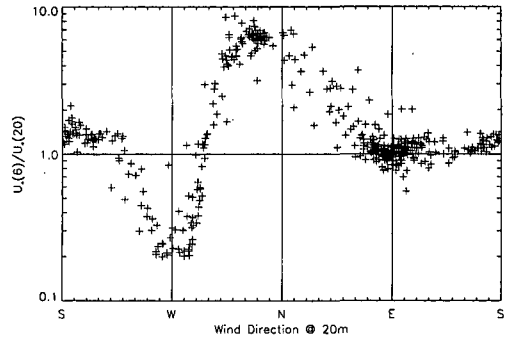


図-6 6 m と 20 m の風速計のデータを TDM で推定した摩擦速度の比と風向との関係

されたプロペラ風速計②の影響であろうと推測される。図-5 には、6 m と 20 m 高度の風速計の風向データの相関を示した。両者は、 20° 以内で、良い一致を示しているが、両者の相違の傾向は、前述した障害物の影響でほぼ説明できるようである。

b) 風によるせん断応力：6 m と 20 m の風速計のデータを TDM で推定した摩擦速度の比を 20 m 高度の風向との関係で示すと図-6 のようである。図中、東-

南-南西の範囲内では、両風速計によるせん断応力の推定値は良い一致を示しているが、6 m 高度の風速計により推定された摩擦速度が約 14% 大きい。しかしながら、その他の風向きでは、両者の相違はさらに大きく、特に、北から左右に 45° の範囲では、6 m 高度の風速計で推定される摩擦速度は 20 m 高度のそれよりも約 9 倍ほど大きくなっている。この相違は、塔の風下で乱れエネルギーが生成されることに起因していると考えられる。また、西を中心とする左右 45° の範囲内では、6 m 高度による摩擦速度は、20 m 高度のその 0.2 まで小さくなっており、これらの範囲内での摩擦速度の推定値は使えないことがわかる。後者の理由は、20 m 高度の風速計はプロペ

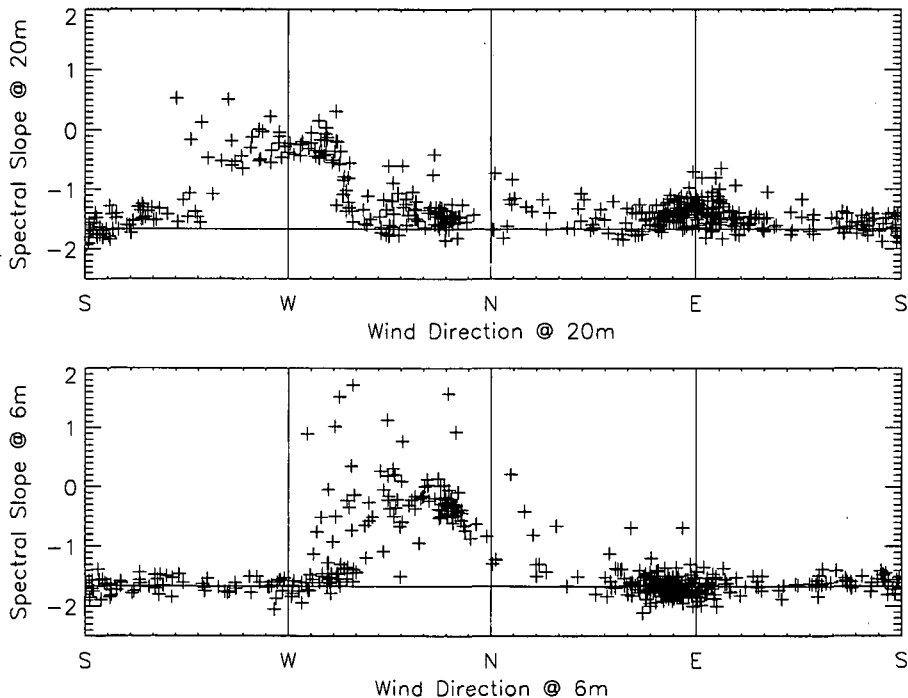


図-7 2 台の風速計で計測されたスペクトル勾配と風向との関係

ラ風速計によって生成された乱れのために摩擦速度が大きく推定されているためである。以上の解釈が正しいならば、2つの風速計の計測結果が大きく異なる場合には小さいほうの摩擦速度を用いればよいことになる。このことは、使用できるデータの範囲を大幅に広げてくれる

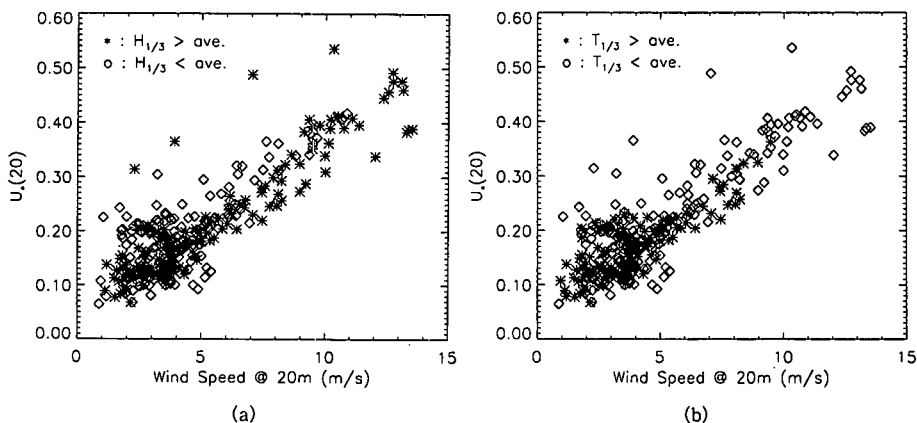
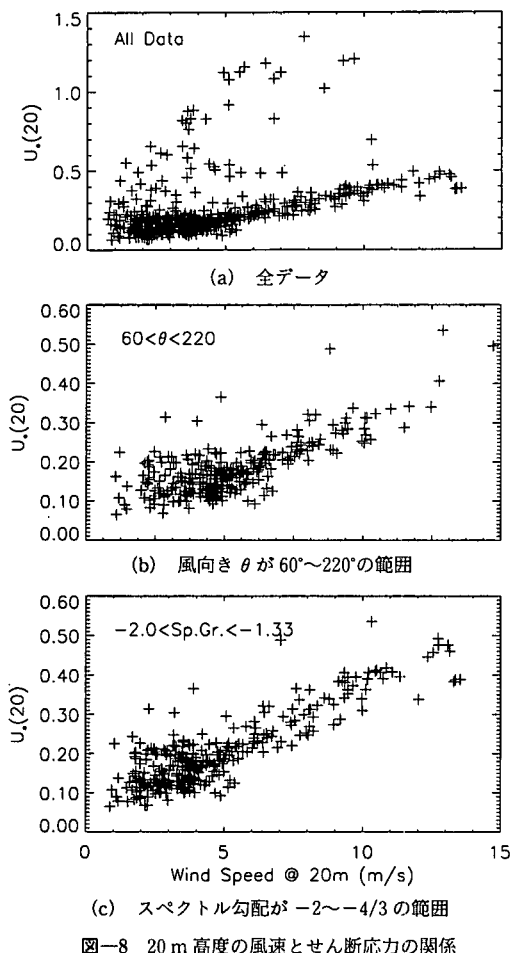
が、今後の詳細な検証が必要であるため、ここでは安全に、風速に対しては $50^\circ \sim 110^\circ$ 、摩擦速度に関しては $60^\circ \sim 220^\circ$ のデータは信頼性が高いものと解釈して、摩擦速度および風速の両方の結果から、式(3)で推定される抵抗係数を求める場合には、風向 $60^\circ \sim 110^\circ$ の観測データのみを用いることとする。

c) 風のスペクトル勾配：TDMでは、風の乱流スペクトルに、 $-5/3$ 乗則を仮定しているが、必ずしもこの法則が適用できるとは限らない。特に、風速計が障害物の風下にある場合には例外のケースが多い。すなわち、2台の風速計のスペクトル勾配が異なる場合には、どちらの風速計が障害物の影響をうけている可能性が高い。図-7に2台の風速計で計測されたスペクトル勾配を風向との関係で示した。前述したように、6m高度の風速計は北ないし北西の風(塔の風下に入る場合)にはスペクトル勾配が緩やかになるが、20m高度の場合には西風(プロペラ風速計の風下に入る場合)にスペクトル勾配が緩くなる。このように、スペクトル勾配は推定されたせん断応力の信頼性を評価するパラメーターとして有用である。

d) せん断応力：2台の風速計のデータのばらつきを比較することにより、計測誤差の発生要因を明らかにすることができる。図-8(a)は20m高度の風速とせん断応力の関係を全データについて示したもので、(b)は風向き θ が $60^\circ \sim 220^\circ$ の範囲についてのみ示したもので、(c)はスペクトル勾配が $-2 \sim -4/3$ の範囲について示したものである。これらのデータから、摩擦速度の推定には有効なパラメーターを選定し信頼できるデータを用いることが重要であることがわかる。

4. せん断応力に及ぼす波浪の影響

図-9(a), (b)は図-8のデータを波浪パラメーター(有義波高, 有義波周期)によって分類したものである。(a)



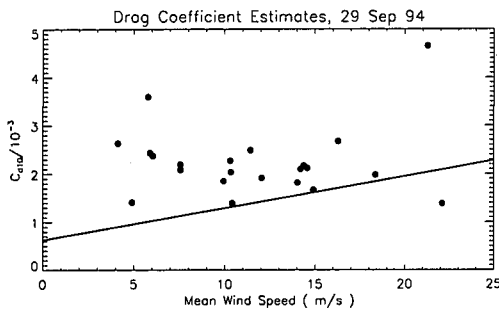


図-10 1994年の台風時の抵抗係数と風速の関係

は有義波高がその平均値より高い場合と低い場合との風速-摩擦速度関係であるが、両者に有意な差異は認められない。また、(b)は有義波周期について同様の分類を試みたものであるが、これにも有意な差異は認められない。ただし、今回の観測では高波浪時の現象が観測できなかったことのほか、波向きが計測されていないので、うねり成分と風波成分の分類や波齢による検討はできなかった。このため、海面のせん断応力に波浪の影響が無視できると結論づけることはできないので、台風による高波浪時を対象とした観測を行い、波浪パラメータとの関係を明確にする必要がある。

また、図-10は1994年の台風時の抵抗係数と風速の関係で、図中の直線はSmuth et al. (1992)のHEXOSでの外洋における観測から得られた経験式である。この時の観測値は、HEXOSの経験式より大きい値 2.2×10^{-3} の周りにばらついているが、観測時間が短いこと、観測塔の影響を考慮していないこと等のため、推定された抵抗係数 C_{D10} には問題があり、風速依存性が明確に出ていない。

5. 結 語

沖合い観測塔の風のデータから誤差の少ない方法で海面せん断応力を求め、風域場の時間変化が激しい場合の、風速と抵抗係数の関係を求めることを目的とし、観測風速、風向、海面せん断応力、抵抗係数の推定方法について詳細に検討するとともに、これらと波浪パラメータとの関係を検討した。その結果、以下の成果を得た。

(1) TDM法により短時間の観測データでも精度良

いせん断応力の推定が可能であることが確認できた。

(2) 観測塔の側壁に設置した6m高度の風速計で推定される摩擦速度は、塔の風下で乱れエネルギーが生成されるため、観測塔頂上の20m高度のそれよりも約9倍ほども大きくなっている。

(3) 20m高度の風速計はすぐ西側にあるプロペラ風速計による影響を大きく受けており、影響のない6m高度の風速計による摩擦速度の5倍の大きさになっている。

(4) 塔本体の影響を抽出するためには、複数台の風速計のデータのばらつきを比較すればよいことがわかった。特に、スペクトル勾配は推定されたせん断応力の信頼性を評価するパラメータとして有用であることが示された。

(5) 今回の観測では高波浪時の現象が観測できなかったため、海面せん断応力に及ぼす波浪の影響を、せん断応力の評価誤差以上のレベルで明確にすることができなかった。

なお、本研究は文部省科学研究費(基盤研究C-(2)、研究代表者 山下隆男)の研究成果の一部であることを明記するとともに、観測に参加していただいた防災研究所災害観測実験研究センターの諸官に謝意を表する。

参 考 文 献

- 吉岡 洋他(1995): 台風9426号の高潮について、京大防災研年報, 38, B-2, 581-598.
- Anderson, R. J. (1993): A study of wind stress and heat flux over the open ocean by the inertial dissipation method. J. Phys. Oceanogr. 23, 2153-2161.
- Smith, S. D. and Banke, E. G. (1975): Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 101, 665-673.
- Smith, S. D. et al. (1992): Sea surface wind stress and drag coefficients: the HEXOS results. Boundary-Layer Meteorology 60, 109-142.
- Yamashita, T. and G. Watson (1996): Wind-wave-surge interaction in storm surge prediction, PACON 96.
- Yelland, M. J. et al. (1994): The use of the inertial dissipation technique for shipboard wind stress determination. J. Atmos. Oceanic Technology, 11, 1093-1108.
- Yelland, M. J. and Taylor, P. K. (1996): Wind stress measurements from the Open Ocean. J. Phys. Oceanogr., 26, 541-558.