

# 台風接近時に 30 m 鉄塔で観測された 強風のスペクトルについて\*

甲斐 憲次\*\*

## 要 旨

台風接近時に、筑波大学水理実験センターの 30 m 鉄塔で超音波風速温度計による乱流観測を行い、 $10^{-5}$  ~  $10^{-1}$  Hz の周波数領域における強風のスペクトル特性を調べた。その結果、水平成分のスペクトル分布には、スペクトルギャップを境としてマイクロスケールのピークとメソスケールのピークに分離されるという特徴がみられた。また、鉛直成分  $w$  のスペクトル分布にはメソスケールのピークはなく、大半のエネルギーは高周波側に集中している。高度間の  $u$  成分のコスペクトルは、パワースペクトルにみられる分布とほぼ同様であった。周波数領域における高度間の変動の相関は、メソスケールの領域で大きく、周波数が増すにつれて減少する。

## 1. はじめに

筆者はすでに台風眼通過現象(台風8115号)の解析結果を報告した(甲斐, 1982)。主要な結果は次の2点である。

- (1) 台風眼通過時における風速変動の広域スペクトルの分布には、2つの主要なピークがある。1つはマイクロスケールのピークで、他は台風眼の通過に起因するピーク(メソスケールのピーク)である。両ピークの間には、スペクトルギャップが存在する。
- (2) 台風眼通過時に観測された乱気流特性は、通常の中立時の場合と大差なく、従来の研究で得られた実験式を適用して推定することができる。

ここで、メソスケールのピークとは、台風域内の平均的な風速分布に対応するものである。この風速分布は、ランキン渦とよく類似している。すなわち、風速は台風の内域では中心からの距離  $r$  に比例して増大し、外域では  $r$  に逆比例して減少する。今、台風を一つの渦とみなし、ある観測地点を通過したとすると、台風域の風速分

布は風速の時間変化として観測される。台風による強風の寿命は台風の空間スケールと移動速度との関係から決まり、通常数時間から半日、長くて1日程度である。風速の時間変化をスペクトル解析すると、メソスケールの周波数領域にピークが出現する。このピークを、本研究ではメソスケールのピークと呼ぶ。

従来、台風通過時の気象学的特性については、多くの事例解析がある。それらの多くはシノプティック解析あるいは統計解析であり、強風の微細構造に立ち入った研究は相馬(1964)、光田ほか(1973)、甲斐(1982)の他はほとんどない。

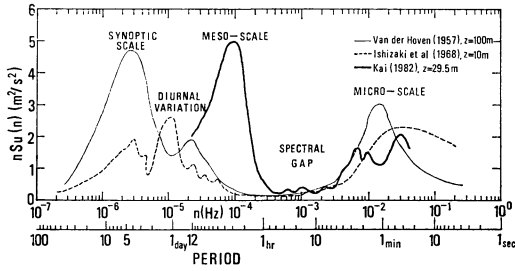
今回さらに台風接近時の強風観測資料をスペクトル解析したので、その結果を報告し、従来の研究との比較検討を行う。

## 2. 問題設定および従来の研究

地表付近の風速変動には、様々な時間スケールの変動が含まれている。しかも、すべての周期の変動が連続的に分布しているのではなく、いくつかの特徴的な周波数帯にスペクトルのピークをもっていることは、よく知られている事実である。例えばマイクロスケールの変動、日変化、シノプティックスケールの変動、スペクトルギャップなどがある。このうち、マイクロスケールの変動のスペクトルは比較的多く研究され、Monin-Obukhov の

\* Spectra of high winds observed at the 30-m meteorological tower during the passage of typhoons.

\*\* Kenji Kai, 筑波大学水理実験センター。  
——1983年7月29日受領——  
——1983年10月3日受理——



第1図 広い周波数領域の風速のパワースペクトル。

相似則を応用して整理されている(例えば, Kaimal *et al.*, 1972). スペクトルギャップ付近の周期を含む長周期変動については, Van der Hoven (1957) の先駆的研究以来, 多くの人達によって実験や理論づけが行われるようになった(石崎ほか, 1968; Oort・Taylor, 1969; Fielder・Panofsky, 1970; 森, 1975; Smedman-Högström・Högström, 1975).

第1図は, Van der Hoven (1957), 石崎ほか (1968) および甲斐 (1982) の結果をまとめたものである。図の縦軸は対数スペクトル  $nS_u(n)$  ( $m^2/s^2$ ), 横軸は周波数 (Hz) と周期 (sec, min, hr, day) である。Van der Hoven (1957) の結果は地上約 100 m で測定したものであり, 大気境界層における風速のスペクトル分布を表す。石崎ほか (1968) は測定高度 10 m であり, 接地層のスペクトル分布を表す。これらのスペクトルは, 約2年間の観測資料から計算されたものである。両者に共通する点は,

- (1) シノプティックスケールのピーク(周期4~5日)とマイクロスケールのピーク(周期約1分)があること。
- (2) 両ピーク間にスペクトルギャップ(周期約1時間)があること。

である。また相異点は, 接地層の結果ということから, 石崎ほか (1968) には日変化のピークが顕著に現れていることである。

以上2つは, それぞれ大気境界層および接地層の平均的なスペクトルを表している。メソスケールの領域がスペクトルギャップとなっていることは, この領域では風速変動の原因となるものが存在しないことを示している。現実にはメソスケールの現象に対応して風速変動はあるはずだが, 平均的に(2年間の記録を用いて)みると, 日変化・マイクロスケールの変動・シノプティックスケールの変動よりは小さく, 表面には現れないということである。

台風接近時の強風の子予測等の防災上の見地からみると, このメソスケールの変動とマイクロスケールの変動とのかかわり合いが, 現実の問題として重要になる。両者の関係が近似的に線型とみなせるのか, あるいは非線型なのか。—このような問題意識で強風の長時間データを解析したのが, 甲斐 (1982) である。それによると, 前章でもふれたように, マイクロスケールおよびメソスケールのピークがあることがわかる。スペクトルギャップは, 台風の通過に起因するメソスケールのピークがあるために, Van der Hoven (1957) および石崎ほか (1968) よりもその範囲は狭くなっているが, はっきりと認められる。このことはメソスケールの変動とマイクロスケールの変動を分離して考えることの妥当性を示している。

甲斐 (1982) は, 典型的な台風眼通過現象の結果であるが, さらにほかの台風接近時の例についても解析を行い, このことが確認できるかどうか調べてみた。

### 3. 資料と観測方法

#### 3.1. 観測方法

1981年以来, 台風接近時に筑波大学水理実験センターの 30 m 鉄塔で特別観測を実施してきた。その中で, 風速の1時間平均値が 10 m/s 以上でかつ強風が数時間持続する例を選んで, 解析を行った。台風接近時の最大風速(10分平均値), 強風(10分平均値 > 10 m/s)の持続時間(積算値), 卓越風向および降水量を, 第1表に示す。風速の水平成分  $u$  および鉛直成分  $w$  は鉄塔の4高度 1.6, 4.3, 12.3, 29.5 m に設置した超音波風速温度計で測定した。測器の出力はいったんアナログデータレコーダーでアナログテープに集録し, 0.5秒間隔でAD変換を行った後, 大型計算機による統計処理を施した。観測時間は12時間である。その他の気象要素はルーチン観測資料を用いた(甲斐, 1982)。

台風接近時の雨による超音波風速温度計のノイズについては, 観測およびデータ処理の際, 以下のノイズ対策をとった。雨がノイズの原因となる場合は, 表面張力によって超音波風速温度計のプロブヘッドに雨滴が付着するケースである。これに対しては, プロブヘッドに雨滴を誘導する溝とひもを付けることで防止することができる。経験上, この方法でノイズの大半を防ぐことができる。

万が一, 雨によってノイズが生じた場合には, データ処理の際, 補正を行った。雨によって生じるノイズは,

第 1 表 台風接近時の強風観測資料 (1981~1982 年).

台風名	期 間	最大風速 (10分平均)	強風の 持続時間	風 向	降水量
T 8115	81. 8. 22~23	17.4 m/s	9 hr	E-W	58 mm
T 8124	81. 10. 22~23	17.4 m/s	6 hr	E-N-NW	166 mm
T 8210	82. 8. 1~3	17.7 m/s	27 hr	E-S	64 mm
T 8218	82. 9. 11~13	16.2 m/s	10 hr	NNW-S	153 mm

記録上、オーバースケールとなって現れる。これはペンレコーダーでモニターすることによって発見できる。また、ペンレコーダーの応答速度よりも速いノイズに対しては、AD 変換後のデータにノイズ処理を施した。まず、連続した時系列データを10分ごとの区間データに分割し、各区間データの平均値  $\bar{U}$ 、標準偏差  $\sigma_u$ 、最大値  $U_{max}$ 、最小値  $U_{min}$  を計算する。 $U_{max}$  ( $U_{min}$ ) が  $\bar{U} + 3\sigma_u$  以上 ( $\bar{U} - 3\sigma_u$  以下) であれば、そのデータの前後の値をプリントし、ノイズであるかシグナルであるかを調べる。そして、必要ならば補正する。

### 3.2. スペクトル解析

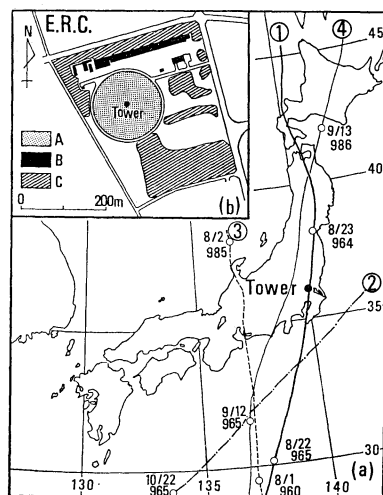
スペクトル解析には、高速フーリエ変換法 (FFT) を用いた。資料の評価時間  $\Delta t$  は10秒で、観測時間  $T_d$  は12時間である。データ数  $N$ 、ナイキスト周波数  $f_N$  および基本周波数 (分解能)  $\Delta f$  は、それぞれ次のようである。

$$N=4096, f_N=1/(2\Delta t)=0.05 \text{ Hz},$$

$$\Delta f=1/(N\Delta t)=2.44 \times 10^{-5} \text{ Hz}$$

計算に用いた10秒値は、エリアシングの影響を避けるよう、0.5秒間隔で AD 変換したデータを20個ずつ区間平均して得た。FFT により得られる生のスペクトルの個数は、総データの半分 ( $N/2$ ) である。これらの生のスペクトルを平滑化して図示した。

一般に、安定したスペクトルの推定値を得るためには、目的とする周期の5倍程度のデータ長が必要とされる。したがって、観測時間が12時間の場合、2~3時間よりも短い周期成分のスペクトル値については、推定精度上問題はない。2~3時間以上の長周期成分については、どうであろうか。笹木ほか (1983) と日野 (1977) によると、データ長と一致する波形すなわち12時間周期の波形では、スペクトルの分解能は減少するもののピーク的位置はシフトしないことが確かめられている。本研究の主目的はスペクトルギャップ付近を含む長周期成分の解析にあるので、2~3時間以上の長周期成分のスペク

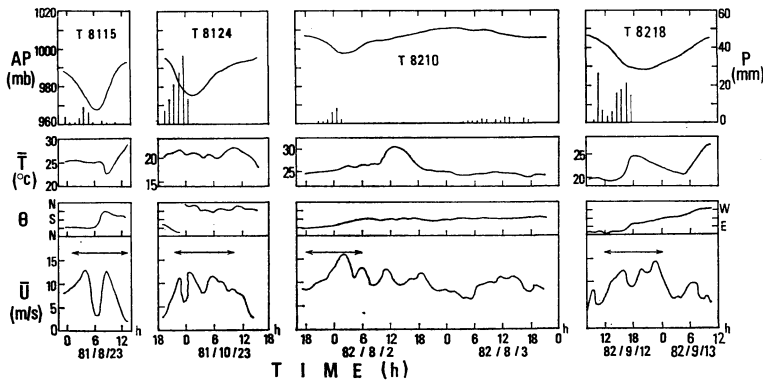


第 2 図 台風の経路図 (a) と気象観測塔の位置 (b). ①台風8115号, ②台風8124号, ③台風8210号, ④台風8218号. 記号○は9時の台風的位置を示す. 数字は日付 (上段) および中心気圧 (mb) を示す. A = 観測圃場, B = 建屋, C = 松林, E.R.C. = 筑波大学水理実験センター.

トルもあえて示した。次章のスペクトルの図を解釈する際には、上記のことに留意していただきたい。

### 3.3. 台風の経路と気象要素の時間変化

台風8115号, 8124号, 8210号, 8218号の経路図および30 m 鉄塔の位置を第2図に示す。第3図に、気象要素 (気圧・降水量・気温・風向・風速の1時間値) の時間変化を示す。その概略は次の通りである。①台風8115号は16年ぶりに関東に上陸し、東日本を縦断した。水理実験センターでは、典型的な台風眼通過現象が観測された。②台風8124号は10月22日夜~23日早朝に関東



第3図 台風接近時の気象要素の時間変化。AP: 気圧, P: 降水量,  $\bar{T}$ : 気温,  $\theta$ : 風向,  $\bar{U}$ : 風速。各値は1時間値。記号  $\leftrightarrow$  はスペクトル解析した期間を示す。

の太平洋岸にかなり接近し、東日本に記録的な大雨を降らせた。前面通過時(10月22日18時~23日0時)に大雨となり、166 mm を記録した。③台風8210号は8月2日0時頃、渥美半島付近に上陸し、本州中部を横断し同日15時に日本海中部で温帯低気圧となった。風は1日夜に入って次第に強まり、2日2時に最大 17.7 m/s を記録した。この強風は3日の夜まで続き、強風の持続時間は27時間であった。④台風8218号は9月12日18時頃御前崎付近に上陸し、東日本を縦断した。前面通過時に大雨となり、153 mm を記録した。風は9月12日13時頃より強くなり、約10時間持続した。

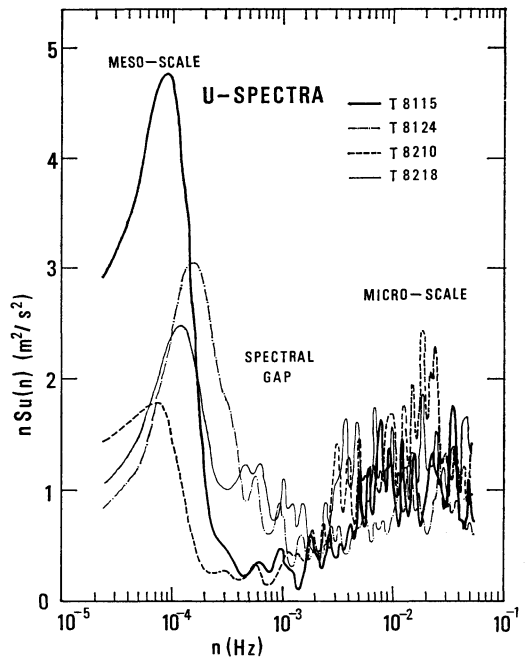
#### 4. 解析結果

##### 4.1. パワースペクトル

第1表に掲げた台風接近時の強風観測資料より、 $10^{-5}$  ~  $10^{-1}$  Hz の周波数領域における水平成分  $u$  および鉛直成分  $w$  のパワースペクトルを調べた。

台風 8115号, 台風 8124号, 台風 8210号, および 台風 8218号にともなう強風のパワースペクトルを、第4図に示す。図の縦軸には対数スペクトル  $nSu(n)$ , 横軸には対数周波数  $n$  (Hz) と周期(sec., min., hr.)をとった。評価時間は10秒で、観測時間は12時間である。各 Run に共通する特徴は、次の通りである。

- (1) 各スペクトル分布には、2つの主要なピークがみられる。一つはマイクロスケールのピークで、 $4 \times 10^{-2}$  ~  $10^{-1}$  Hz (周期4分~10秒)の周波数帯に位置する。
- (2) もう一つのピークは台風の通過あるいは接近に起因するメソスケールのもので、約  $10^{-4}$  Hz (周期数時間)

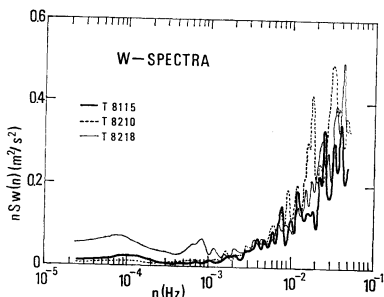


第4図  $u$  成分のパワースペクトル。

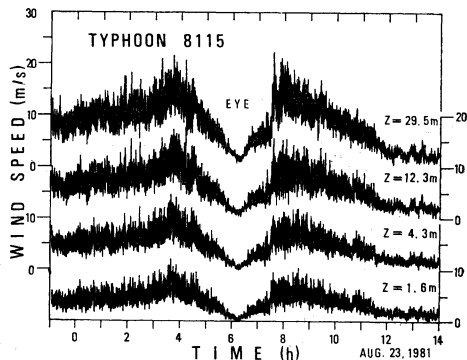
に位置する。ピークの値は、各 Run ごとに大きく変わる。

- (3) 両ピークの間には、スペクトルギャップが存在する。その領域は、 $4 \times 10^{-4}$  ~  $3 \times 10^{-3}$  Hz (周期40~5分)の周波数帯である。特に台風8115号と台風8210号の場合、スペクトルギャップが明瞭に現れている。

以上の結果より、個々の台風によって多少形状が異なる



第5図  $w$  成分のパワースペクトル。



第6図 台風8115号通過時の風速変動の記録。

るものの、スペクトルギャップを境にしてマイクロスケールのピークとメソスケールのピークとに分けられるという基本的な特徴は変わらないと考えられる。

次に、 $w$  成分のスペクトルをみてみよう。第5図に  $w$  成分のパワースペクトルを示す。測定高度、評価時間、観測時間等は、第4図と同じである。なお、台風8124号の  $w$  成分にはノイズの影響が認められたので、計算から除外した。 $w$  成分の特徴は、 $10^{-2}$  Hz (周期 100秒) 以上の高周波側にエネルギーの大半が集中している点にある。

また、低周波側には  $u$  成分にみられたようなメソスケールのピークは認められない。

#### 4.2. 高度間のクロススペクトル

台風8115号の観測資料を用いて、2高度間の風速変動をクロススペクトル解析し、乱れの空間的構造を調べた。

クロススペクトルは複素数で、実数部と虚数部からなる。距離  $l$  だけ離れた2点間の変動を  $x$ 、 $y$  とすると、クロススペクトル  $S_{xy}(n)$  は、次式で与えられる。

$$S_{xy}(n) = C_{xy}(n) - i Q_{xy}(n) \quad (1)$$

ここで、 $C_{xy}(n)$  はコスペクトル、 $Q_{xy}(n)$  はクワドラチャスペクトル、 $i$  は虚数単位である。コスペクトルは、周波数領域における  $x$  と  $y$  の共分散を表す。

コヒーレンス  $Coh_{xy}(n)$  は、次のように定義される。

$$Coh_{xy}(n) = \frac{C_{xy}^2(n) + Q_{xy}^2(n)}{S_x(n) \cdot S_y(n)} \quad (2)$$

ここで、 $S_x(n)$  と  $S_y(n)$  は、それぞれ  $x$  と  $y$  のパワースペクトルである。コヒーレンスは周波数領域における  $x$  と  $y$  の相関の程度を表すもので、最大1から最小0までの値をとる。 $Coh_{xy} = 1$  は  $x$  と  $y$  の変動のパターンが完全に一致していることを、 $Coh_{xy} = 0$  は両者が全く関連のない変動をしていることを示す。

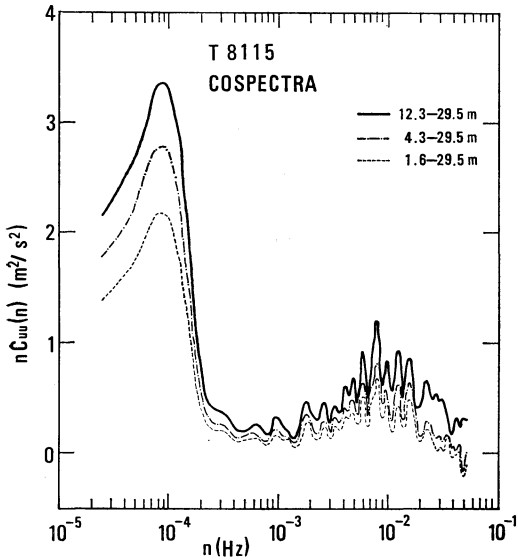
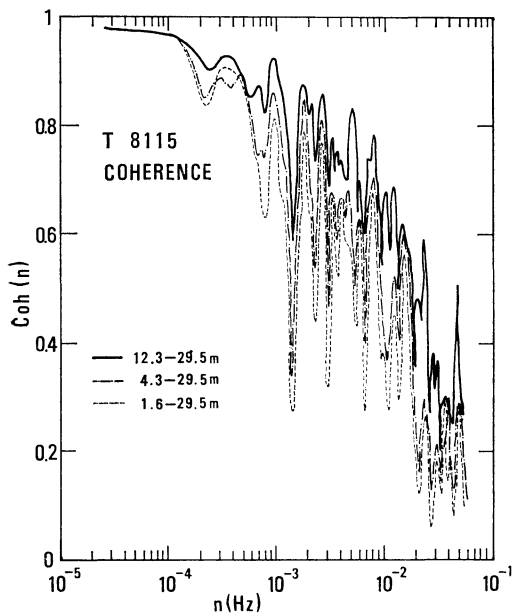
解析に用いた風速変動の記録の一例を、第6図に示

す。これは台風8115号の台風眼通過時に超音波風速温度計で測定した水平成分  $u$  の変動で、測定高度は1.6, 4.3, 12.3, 29.5 m の4高度である。平均化時間は10秒である。各高度の風速変動には、台風眼通過前後に2つの主要なピークがあり、それぞれ3時50分および8時に出現している。これらのピークは、台風の内域と外域の境界円上に現れる風速最大域に対応する。台風眼の無風域は、6時20分に出現している。台風の移動速度を75 km/h と仮定して空間的な分布になおした風速分布から決まる台風内域の半径は、約160 km となる。また、台風の後面では前面と比較して早く風速が減衰している。これは、台風8115号が加速しながら通過したことを示している。さらに、一見して、風速分布がランキン渦とよく似ていることがわかる。すなわち、風速は、台風の内域では中心からの距離  $r$  に比例して増大し、外域では  $r$  に逆比例して減少する。

解析は、高度29.5 m の風速変動に対して、他の高度1.6, 4.3, 12.3 m の風速変動が周波数領域でどのような相関関係にあるかという観点で行った。第7図に、高度間のコスペクトルを示す。その特徴は、以下の通りである。

- (1) マイクロスケールのピーク (約  $10^{-2}$  Hz) とメソスケールのピーク (約  $10^{-4}$  Hz) があること。
- (2) 両ピークの間にはコスペクトルのギャップが存在し、その領域は  $u$  成分のスペクトルギャップとほぼ一致する。
- (3) コスペクトルの値は、高度間の距離が離れるに従って減少する。高周波側では、負の値もみられる。

以上のことから、高度間のコスペクトルの分布は  $u$  成分のパワースペクトルの分布とほぼ一致することがわかった。

第7図  $u$  成分の各高度間のコスベクトル。第8図  $u$  成分の各高度間のコヒーレンス。

第8図にコヒーレンスを示す。各高度間のコヒーレンスの値は、第4図および第7図においてメソスケールのピークが存在する領域で大きく、変動のパターンが各高度間ではほぼ一致していることがわかる。周波数が増すにつれて、コヒーレンスは減少し、 $10^{-2}$  Hz よりも高周波

側では0.1~0.4程度である。これは、周波数が増すと乱れのスケールが高度間の距離よりも小さくなるためと考えられる。

第7図と第8図を比較すると、コスベクトルにはギャップが存在し、コヒーレンスにはギャップが存在しないことがわかる。これは次のように考えた。第8図より、コスベクトルのギャップの領域における乱れのスケールはマイクロスケールのそれよりも大きく、高度間の変動の相関が高い。ところが、このギャップの領域においては、変動の絶対量そのものが小さいので、相関は高いにもかかわらず、共分散の値は小さくなる。

### 5. まとめ

(1) 台風接近時の強風資料をスペクトル解析した結果、メソスケールとマイクロスケールのピークが存在することがわかった。また、いずれの解析例においても、両ピークの間にはスペクトルギャップが認められた。

(2) 台風8115号を代表例として、乱れの空間的構造を調べた結果、 $u$  成分の高度間のコスベクトルはパワースペクトルにみられる分布とほぼ同様であった。また、コヒーレンスはメソスケールの周波数領域で大きく、周波数が増すにつれて減少した。

以上の結果より、メソスケールの変動とマイクロスケールの変動を分離して考えてもよいという結論が得られる。このことは、防災上あるいは強風を予測する上で、大きな意味をもつ。すなわち、メソスケールの変動は気圧分布を解析することで予測できる。また、マイクロスケールの変動については、中立時のスペクトル分布からある程度予測することができる。この2つの変動を線形に重ね合わせるにより現実に近いかたちで、最大風速や突風率等を推定することができる。

### 謝辞

本研究をまとめるにあたり、ご指導をいただいた吉野正敏教授(筑波大学)、花房龍男室長(気象研究所)に感謝いたします。河村武教授、古藤田一雄助教授、水理実験センターの教職員の方々には有益なコメントをいただいた。ここに記して感謝の意を表します。観測資料の解析は、筑波大学情報処理センターの大型計算機 FACOM M-200 を使用して行った。

### 文献

Fielder, F. and H.A. Panofsky, 1970 : Atmospheric

- scales and spectral gaps, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **51**, 1114-1119.
- 石崎潑雄, 光田 寧, 花房龍男, 1968: 風速変動の長周期成分について, 京都大学防災研究所年報, **11**, 489-497.
- 甲斐憲次, 1982: 台風8115号通過時に 30 m 鉄塔で観測された気象特性, *天気*, **29**, 1143-1151.
- 日野幹雄, 1977: スペクトル解析, 朝倉書店, p 93.
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and O.R. Coté, 1972: Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **98**, 563-589.
- 光田 寧, 森 征洋, 1973: 潮岬において観測された台風眼通過時の風の特性について, 京都大学防災研究所年報, **16**, 285-291.
- 森 征洋, 1975: 潮岬における風速変動の長周期成分のスペクトル解析, 香川大学教育学部研究報告, **25**, 31-40.
- Oort, A.H. and A. Taylor, 1969: On the kinetic energy spectrum near the ground, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 623-636.
- 笹木敬司, 河田 聡, 南 茂夫, 1983: 最大エントロピー法 (MEM), *インターフェース*, **69**, 276-285.
- Smedman-Högström, A-S. and U. Högström, 1975: Spectral gap in surface-layer measurements, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 340-350.
- 相馬清二, 1964: 強風の乱流的構造, *気象集誌*, **42**, 372-396.
- Van der Hoven, I., 1957: Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycle per hour, *J. Met.*, **14**, 160-164.