

30 m 鉄塔で観測された風速変動と 気圧変動の長周期スペクトル*

甲斐憲次**

要旨

従来の研究をレビューし、気象要素の変動の長周期パワースペクトルに関する諸問題を整理し、今後の研究の方向を展望した。ついで、筑波大学水理実験センターの 30 m 鉄塔で得られた風速 (地上 29.5 m) および気圧の 1 年間の連続データを用いて、 10^{-8} ~ 10^{-4} Hz (周期 2 時間~1 年) の周波数領域における風速変動および気圧変動のパワースペクトル分布を求めた。スペクトル計算には、最大エントロピー法 (MEM) を用いた。風速変動の長周期パワースペクトルには、12 時間、1 日、3~5 日の周期にエネルギーピークがある。日変化および半日変化のピークは、鋭いスペクトルラインになる。また、数時間周期のところにはスペクトルギャップがある。気圧変動の長周期パワースペクトルには、大気潮汐による 8 時間、12 時間、1 日の周期およびシノプティックスケールの 3~10 日の周期にエネルギーピークがある。変動エネルギーの大半は、シノプティックスケールの領域に集中している。大気潮汐による 3 つのピークは、いずれも鋭いスペクトルラインになる。10 日以上長周期変動は、風速と気圧ともに認められなかった。

1. はじめに

筑波大学水理実験センターでは、従来のオフライン方式の観測(古藤田ほか, 1978)に代わるものとして、オンライン・リアルタイム処理方式の気象日報作成装置(古藤田ほか, 1983)を開発し、1981年6月よりルーチン観測を開始した。筆者はこの長期連続データを用いて、気象要素の変動の長周期パワースペクトル(以後単にスペクトルと称する)に関する研究に着手した。今回、資料整理が一段落した風速と気圧の1年間の連続データ(1982年)を用いて、 10^{-8} ~ 10^{-4} Hz(周期2時間~1年)の周波数領域における風速変動および気圧変動のスペクトル分布を求めたので、その結果を報告する。この論文ではまず従来の研究をレビューし、長周期スペクトルに関する諸問題を整理し展望した。そうして研究上の問題点を指摘する。すなわち、第1の問題は、スペクトル計

算法にある。これまでの研究の大半は Tukey 法を用いているため(Blackman・Tukey, 1958)、スペクトルの計算量はデータ数のべき乗に比例して増大する。そのため、長周期スペクトルを一度に計算することは不可能で、適当な周波数帯ごとに独立にスペクトル計算を行い、それらを継ぎ合わせるという方法がとられていた(石崎ほか, 1968)。しかし、この継ぎ目にスペクトルのパワーが十分にある場合には、スペクトル分布を解釈する上で問題となる。第2の問題は、同一地点で同一期間の資料を用いて、風速変動と気圧変動の両方の長周期スペクトルを求めた研究例が極めて少ないことである。これは、シノプティックスケールのエネルギーピーク(以後単にピークと称する)を解釈する際に問題となる。

そこで、本研究では、第1の問題に対しては、低周波側の分解能のよい最大エントロピー法(MEM)を導入することで解決した。また、第2の問題については、風速のほか気圧の連続データより長周期スペクトルを計算し同時に示した。

本報は気象要素の変動の長周期スペクトルに関する研究の第1報である。今後の研究の方向を展望するため、次章ではレビューを試みた。

* Power spectra of long-period fluctuations of horizontal wind speed and atmospheric pressure measured at the 30-m meteorological tower.

** Kenji Kai, 筑波大学水理実験センター(現気象庁産業気象課)。

——1983年12月19日受領——

——1984年2月16日受理——

2. 長周期スペクトルに関する従来研究

1950年代後半、誤差論に基づいた合理的なスペクトル計算法として、Tukey法が提案され、各分野に普及して行った(Blackman・Tukey, 1958). 気象学の分野でスペクトル解析が具体的な成功をおさめた最初の例は、Van der Hoven (1957) であろう。彼は Brookhaven の 125 m 鉄塔で得た風速の観測資料より長周期スペクトルを計算し、マイクロスケールのピーク(周期約1分)とシノプティックスケールのピーク(周期4~5日)との間にスペクトルギャップ(周期約1時間)が存在することを示した。この研究は、次の点において重要である。気象学におけるスケールの概念を観測事実に基づいて定量的に表現することに成功したこと。また、微気象観測においては、観測時間(sampling duration)と評価時間(averaging time)を合理的に決定するのに役立てられている。

彼の先駆的な研究以来、スペクトルギャップ付近の周期を含む長周期変動の解析結果が数多く発表されている。これらの研究の多くは、大筋において、Van der Hoven 型のスペクトル分布の特徴を支持している。第1表は、気象要素(風速・気圧・気温)の長周期スペクトルに関する研究をまとめたものである。スペクトルには波数に対するスペクトルと周波数に対するスペクトルとがあるが、ここでは後者に限定した。また、マイクロスケールの変動および年々変動に関する研究は、対象外とした。1970年代までの研究の総合報告として、Panofsky (1969), Fiedler・Panofsky (1970) および花房 (1977) がある。

長周期スペクトルに関する従来研究をレビューした結果、今後の研究の方向および問題点は、次のように要約される。詳細については、前述の総合報告を参照されたい。

2.1. スペクトル分布と周期性

各気象要素の変動のスペクトル分布は Van der Hoven 型のスペクトル形をほぼ満足するが、詳細についてはなお研究の余地がある。特に、半日変化、日変化、10~20日程度の変化、年変化等は、場所や時期によって現れ方が異なっている(石崎ほか, 1968; Byshev・Ivanov, 1969; Oort・Taylor, 1969; 森, 1975; Vinnichenko, 1970)。

2.2. スペクトル気候学

従来研究の多くは、中・高緯度地方に集中していた。今後は、緯度帯・海陸分布・季節によるスペクトル

分布の差異に着目した研究が行われるべきである。世界各地で長期間にわたる資料の蓄積が行われれば、Harrington・Heddinghaus (1974) が指摘した“Spectrum climatology”という新しい研究分野への道が開けるであろう。スペクトル気候学を指向した研究として、Polowchak・Panofsky (1968) がある。彼らはスペクトルから気候指標として rhythm index を定義し、北米大陸における気温変動の地域性を定量化しようと試みた。

2.3. メソスケールの領域の定式化

メソスケールの領域におけるギャップのふるまいについては、あまり理論的な取り扱いが行われていない。わずかに、Monin-Obukhov の相似則を導入した Smedman-Högström・Högström (1975) の研究がある。実験的研究としては、甲斐(1982, 1983)がある。今後、理論と実験の両方から研究を行い、メソスケールの領域の定式化をはかる必要がある。

2.4. 熱帯の長周期スペクトル

熱帯における気象要素の変動の長周期スペクトルを求めた例は少なく、わずかに Hwang (1970), Mori (1980) の研究がある。中緯度の結果と比較して、熱帯では半日変化、日変化、シノプティックスケールの変化のピークの現れ方に特徴がある。今後は、スペクトル気候学と関連して、熱帯における資料の収集と解析を進める必要がある。

2.5. スペクトル計算法

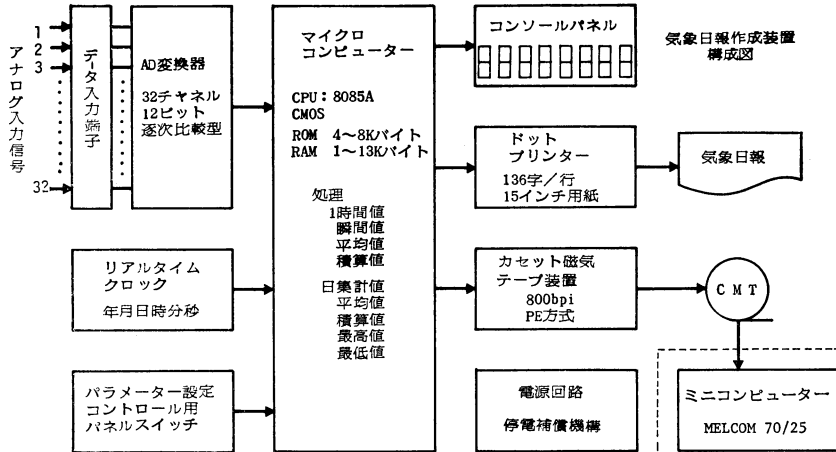
スペクトルの計算法として、代表的なものに、Tukey法、FFT法、MEM法がある。分散法もあるが、これは著しく精度が劣る。Tukey法は取り扱う周波数領域が広くなれば計算量がぼう大になり、1回の計算ではスペクトルを求めることができないという欠点がある。また、低周波側の分解能が低いという欠点もある。これらの点を補う方法として、FFTとMEMが最近よく使用されるようになった。半日変化や年変化のピークを調べる際には、分解能のよいMEMが有効な方法になるであろう。MEMの弱点は、スペクトルのピークの有意性および予測誤差フィルターの打ち切り項数 m を決定する合理的な基準のないことである。しかし、 m の決定は赤池の理論に根拠をおくことにより、実用上問題はない(日野, 1977)。

3. 資料と方法

解析に用いた資料は、1982年1月1日0時より1983年1月1日0時までの風速および気圧の1時間平均値であ

第1表 長周期スペクトルに関する従来の研究。
 表中の記号は次の通りである。U=スカラ風速、(u, v, w)=風速のベクトル成分、T=気温、P=気圧、SBL=接地層、ABL=大気境界層、FA=自由大気、3-cup=三杯風速計、SAT=超音波風速温度計。

著者	年	場所	観測項目	測定高度	測器	評価時間	観測時間	計算法
1. Griffith <i>et al.</i>	1956	Univ. Park Pennsylvania	T	地上	Acroplane	1日	20年	Tukey
2. Panořky • Van der Hoven	1956	Brookhaven, N.Y.	U	ABL, 91 m		39時間	1週間	Tukey
3. Van der Hoven	1957	Brookhaven, N.Y.	U	ABL, 100 m	Acroplane	2秒~5日	1年	Tukey
4. Bushnell • Huss	1958	Tallmadge, Ohio (ほか6地点)	U	SBL, 49 m, 61 m	Acroplane	1秒	3年	Variance
5. Chiu	1960	北米11地点	U, T	FA, 50~850 mb	Rawinsonde Radiosonde	1日	3年	Tukey
6. Gossard	1960	San Diego, California	P		Microbarograph	0.2秒, 30分	1週間	Tukey
7. Mantis	1963	Midwestern, USA	U	FA	Constant-altitude balloon	2分	3.3時間	Tukey
8. Kolepnikova • Monin	1965		T, U	地上		2日	20年	Tukey
9. Byzova <i>et al.</i>	1967	Obninsk	U	SBL, ABL 25~300m		2秒	40時間	Tukey
10. 石崎ほか	1968	潮岬 (33°N, 136°E)	U	SBL, 10 m, 14 m	3-cup, 光進ベーン	2秒, 1分, 6分, 1時間, 1日	2年	Tukey
11. Polowchak • Panořky	1968	北米17地点	T	地上		2日	48日	Tukey
12. Byshev • Ivanov	1969	南・北大西洋	U, T, P	SBL		2秒	6.3年	Tukey
13. Oort • Taylor	1969	Caribou, Maine (ほか5地点(42~47°N))	U	SBL, 9~24 m		1分, 1時間	10年	FFT
14. Hwang	1970	Palmyra 島 (5.8°N, 162.2°W)	U, P	SBL, 1.8 m, 12 m	3-cup	4秒, 20秒, 1分, 1時間	42日	Tukey
15. Vinnichenko	1970	USA • USSR, 40°N 付近	u, v	FA, 3~20 km	Rawinsonde Aircraft Balloon	1秒	5年	FFT
16. Hess • Clarke	1973	Hay, Australia (30.5°S)	u, v, w uv, vw, uw	ABL, 250~1,500 m		1時間	42日	FFT
17. Harrington • Heddinghaus	1974	Columbia, Missouri	U, u, v	SBL, 8.5 m	Belfort type L 風速計	10分, 5分	3年	
18. 森	1975	潮岬	U	SBL, 15 m	3-cup	10分, 1日	14年	Tukey
19. Smedman • Högström • Högström	1975	Marsta, Sweden (60°N)	U, T	SBL, 0.5~30 m	Strain-gage 風速計 など	4分, 1秒	10~20時間	FFT, Tukey
20. Mori	1980	南島島 (24°18'N, 153°58'E)	u, v	SBL, 13 m	3-cup, Aerovane	3時間	3年	Tukey
21. 甲斐	1982	筑波研究学園都市 (30°06'N, 140°06'E)	U	SBL, 29.5 m	SAT	10秒	12時間	FFT
22. 甲斐	1983	筑波研究学園都市	U, w	SBL, 29.5 m	SAT	10秒	12時間	FFT



第1図 気象日報作成装置の構成図。

る。風速は 30 m 鉄塔の高さ 29.5 m に設置した超音波風速温度計 (海上電機 K.K. 製 PAT-311A 型) で測定した。測器のアナログ出力は、遮断周波数 0.000733 Hz のローパスフィルターを内蔵するベクトルシンセサイザーに通し、スカラー風速を得た。高さ 30.5 m には、もう 1 台の超音波風速計 (海上電機 K.K. 製 SA-200 型) が設置されている。この値は、29.5 m の測器の故障時には、補正用に使用した。気圧はアネロイド型自記気圧計 (横河電機 K.K. 製 6226 型) で測定した。気圧計の時定数は約 1 分で、感度は 0.12 mb である。停電等による欠測率は、1.5% である。連続した時系列データを得るため、次の補正を行った。数時間の欠測は直線で内挿し、6 時間以上の欠測は前日の値を用いてサイクリックに補正した。

第 1 図に、気象日報作成装置の構成図を示す。本装置は総計 30 チャンネルのアナログ信号をもとに、平均・積算・スケール変換等の演算処理をオンラインで実行し、気象日報を自動的に作成する装置である (古藤田ほか, 1983)。AD 変換速度は 20 ± 4 msec/ch で、1 時間ごとに各チャンネルの瞬間値・平均値・積算値を算出する。さらに、毎時の処理結果から 1 日の平均値・積算値・最高値・最低値を計算する。処理結果はプリンターに出力すると同時に、カセット磁気テープにも収録され、電算機によるデータ処理が可能である。本装置には、停電時の補償として、停電復帰・オートリスタート機構が装備されている。すなわち、停電時には基本的に処理を中止するが、復電後の正時から自動的に処理を再開する。パネルスイッチの設定値およびリアルタイムクロックの動作

は、停電の際、設定値が消失したり経時機能がまひしたりしないように、いずれも NiCd 電池でバックアップされている。このような停電復帰・オートリスタート機構により、長期連続観測が可能になった。

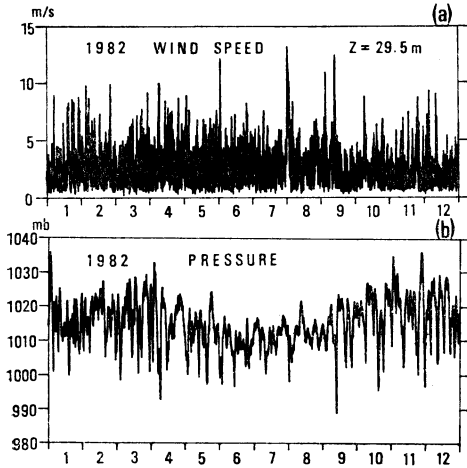
スペクトル解析には、低周波側における分解能を考慮して、最大エントロピー法 (MEM) を用いた (日野, 1977)。時系列のデータ長 N は 8,760 個 ($=365 \times 24$)、予測誤差フィルターの打ち切り項数 m は 200 とした ($m \approx (2 \sim 3) \sqrt{N}$)。解析した周波数領域は、 3.17×10^{-8} Hz (周期 1 年) $\sim 1.39 \times 10^{-4}$ Hz (周期 2 時間) である。

4. 結果

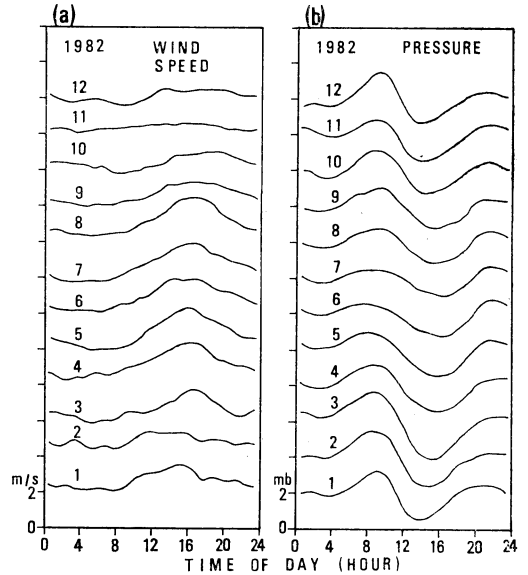
4.1. 1 年間の変化およびヒストグラム

第 2 図 (a), (b) に、風速と気圧の変化を示す。1982 年の 1 年間のデータ (1 時間平均値, 8,760 個) を、XY プロッターで作図したものである。風速は平均して 2.7 m/s 前後である。8 月上旬に大きなピークがみられるが、これは台風 8210 号によるものである。気圧についてみると、全体として寒候期に高く、暖候期に低い傾向がある。風速と気圧を比較すると、前者は、一見して、乱流のようにみえる変動が主であるのに対して、後者は数日を周期とする変動が卓越している。

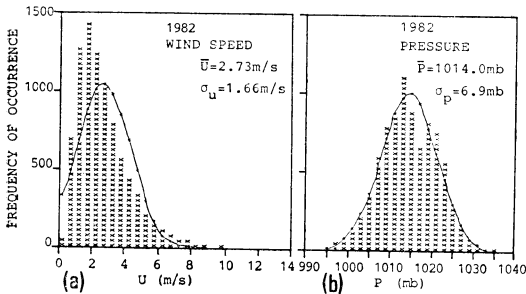
第 3 図 (a), (b) に風速と気圧のヒストグラムを示す。縦軸は度数で、図中の記号 \times は度数 30 に相当する。風速の年平均値 \bar{U} は 2.73 m/s, その標準偏差 σ_u は 1.66 m/s である。図の実線は、標本平均と標本標準偏差から求めた正規分布曲線である。風速の場合、正規分布よりもむしろガンマー分布に近いことがわかる。これは、風



第2図 1年間の風速と気圧の変化(1982年).
(a) 風速, (b) 気圧. 図の値は1時間平均値.



第4図 風速と気圧の月平均日変化.
(a) 風速, (b) 気圧.



第3図 風速と気圧のヒストグラム.
(a) 風速, (b) 気圧.

速をスカラーで求めたことと関係している。気圧の年平均値 \bar{P} は 1014.0 mb で、その標準偏差 σ_p は 6.9 mb である。気圧はほぼ正規分布している。詳しくみると、平均値付近でくぼみがあり、Bimodal の分布をしていることがわかる。これは、気圧の年変化の影響である。

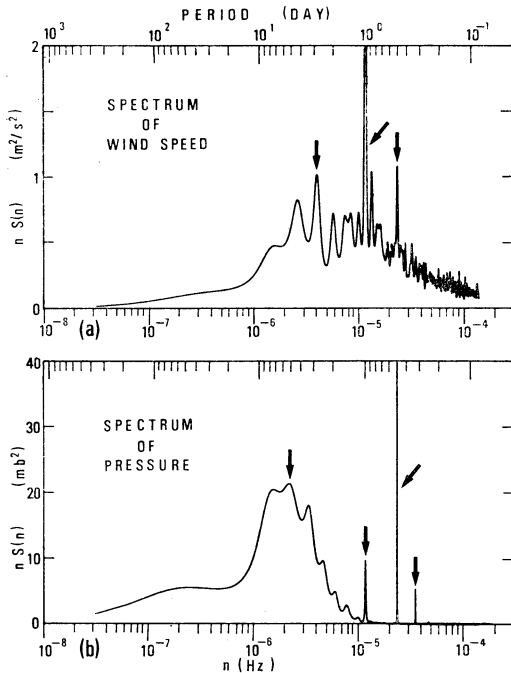
4.2. 月平均日変化

第4図 (a), (b) に風速と気圧の月平均日変化を示す。横軸は、1日の時刻である。図中の単位区間は、風速が 2 m/s, 気圧が 2 mb に相当する。気圧の日変化は、月平均値からの偏差で示してある。

風速は日中大きく夜間小さいという日変化がみられる。特に4~8月、顕著に現れている。9~12月は、日変化が小さい。気圧は各月に共通して、日変化よりも半日変化が卓越している。その振幅は 2 mb 前後で、大潮汐によるものと考えられる。

4.3. 風速変動と気圧変動の長周期スペクトル
第5図 (a) に風速変動の長周期スペクトルを示す。図の縦軸には対数スペクトル $nSu(n)$, 横軸には周波数 $n(\text{Hz})$ をとった。上の目盛は周波数に対応する周期で、単位は日である。図中の矢印は、顕著なピークを示す。まず高周波側からみてゆくと、 10^{-4}Hz (周期 2, 3 時間) 付近にいわゆるスペクトルギャップの領域 (Van der Hoven, 1957) がある。半日周期および1日周期のピークは、鋭いスペクトルラインとなっている。3~5日の周期帯には、天気の変化に対応するシノプティックスケールのピークがみられる。10日以上 of 長周期成分による寄与は少ない。Van der Hoven (1957) (測定高度約100 m) と比較すると、日変化のピークが大きいことがわかる。半日変化については、Van der Hoven (1957) は偶然に現れたピークとしているが、今回の解析でははっきりとその存在が認められる。半日変化の原因としては、霞ヶ浦による湖陸風あるいは鹿島灘からの海陸風のうちのいずれかであろう。しかしながら、一般風の影響を取り除いていないこと、および風速をスカラーとして評価したことにより、半日変化の原因を、現時点では、特定できない。

第5図 (b) に気圧変動の長周期スペクトルを示す。変動エネルギーの大半は、周期 3~10日の領域に集中している。そのほか 8 時間, 12 時間, 1 日の周期が卓越し



第5図 風速変動と気圧変動の長周期スペクトル。
(a) 風速, (b) 気圧。

ている。特徴的なことは、半日変化のピークの方が日変化のピークよりも大きいことである。これは、前述の第4図(b)の月平均日変化からもわかることである。このような鋭いスペクトルラインは、何の原因によるものであろうか。Fairbridge (1965), Chapman・Lindzen (1970)によると、大気潮汐説が有力である。大気潮汐による周期的変化として、24時間、12時間、8時間、6時間がある。廣田(1983)の解説によると、これらの周期のうち最も大気中に伝播しやすいのは、12時間周期である。今回の解析に現れた結果は、この大気潮汐によるものと考えられる。なお、第5図(b)をよくみると、6時間周期もわずかではあるが、存在するようである。

風速変動と比較すると、気圧変動のスペクトル分布は比較的単純な分布、すなわち大気潮汐による3つのスペクトルラインとシノプティックスケールのピークからなる分布という点に特徴がある。また、両スペクトルとも10日以上長周期成分による寄与は少ない。

本研究では、風速変動の半日変化と日変化、また気圧変動では大気潮汐による周期的変化を、明瞭なスペクトルラインとして検出することができた。この結果は、幾分MEMを用いたことによる点が多いのではないかと

と筆者は考えている。年変化のピークについては、風速変動と気圧変動とも、検出することができなかった。この原因は、データ長が短いことによると考えられる。

5. まとめ

従来の研究をレビューし、気象要素の変動の長周期スペクトルに関する諸問題、すなわち、①スペクトル分布と周期性、②スペクトル気候学、③メソスケールの領域の定式化、④熱帯の長周期スペクトル、⑤スペクトル計算法を整理し、今後の研究の方向を展望した。ついで、筑波大学水理実験センターの30 m鉄塔で得られた風速(地上29.5 m)および気圧の1年間の連続データを用いて、長周期スペクトルを求めた。その結果、次のことがわかった。

(1) 風速変動の長周期スペクトルには、12時間、1日、3~5日の周期にピークがある。日変化および半日変化のピークは、鋭いスペクトルラインになる。また、数時間周期のところにはスペクトルギャップがある。

(2) 気圧変動の長周期スペクトルには、大気潮汐による3つのスペクトルライン(周期8時間、12時間、1日)とシノプティックスケール(周期3~10日)のピークがある。10日以上長周期変動は、風速と気圧ともに認められなかった。

(3) 風速(スカラー)のヒストグラムは、ガンマー分布である。気圧のヒストグラムは正規分布に近いが、Bimodalの傾向がある。

今回解析したのは風速と気圧だけであるが、今後は気温その他の気象要素についても解析を進める予定である。本報は、その第1報である。

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。古藤田一雄助教授(筑波大学)、田宮兵衛主任研究官、青木孝主任研究官(気象研究所)、ならびに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。気象日報作成装置の製作にあたっては、東洋電子工業K.K.の林夕路氏のご協力を得た。ここに記して感謝いたします。観測資料の解析には筑波大学学術情報処理センターの大型計算機FACOM-M200を使用した。

文献

- Blackman, R.B. and J.W. Tukey, 1958: The measurement of power spectra, Dover Publications Inc., 190p.
- Bushnell, R.H. and P.O. Huss, 1958: A power spectrum of surface winds, *J. Met.*, 15, 180-183.
- Byshev, V.I. and Yu. A. Ivanov, 1969: The time spectra of some characteristics of the atmosphere above the ocean, *Izv. Acad. Sci. USSR, Atmos. Oceanic Phys.*, 5, 8-13.
- Byzova, N.L., V.N. Ivanov, and S.A. Morozov, 1967: Characteristics of the wind velocity and temperature fluctuations in the atmospheric boundary layer, Moscow Symposium on Atmospheric Turbulence and Radio Propagation, Nauka, Moscow, 76-92.
- Chapman, S. and R.S. Lindzen, 1970: Atmospheric tide, D. Reidel Publishing Company, 200p.
- Chiu, Wan-Cheng, 1960: The wind and temperature spectra of the upper troposphere and lower stratosphere over North America, *J. Met.*, 17, 64-77.
- Fairbridge, R.W. (ed.), 1965: The encyclopedia of atmospheric sciences and astrogeology, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., 97-105.
- Fiedler, F. and H.A. Panofsky, 1970: Atmospheric scales and spectral gaps, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 51, 1114-1119.
- Gossard, E.E., 1960: Spectra of atmospheric scalars, *J. Geophys. Res.*, 65, 3339-3351.
- Griffith, C.L., H.A. Panofsky, and I. Van der Hoven, 1956: Power-spectrum analysis over large ranges of frequency, *J. Met.*, 13, 279-282.
- 花房龍男, 1977: スペクトル解析の方法と気象要素のスペクトル, *気象研究ノート*, 131, 1-60.
- Harrington, J.B. and T.R. Heddinghaus, 1974: Determinism in mesoscale wind spectra at Columbia, Missouri, *J. Atmos. Sci.*, 31, 727-737.
- Hess, G.D. and R.H. Clarke, 1973: Time spectra and cross spectra of kinetic energy in the planetary boundary layer, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 99, 130-153.
- 日野幹雄, 1977: スペクトル解析, 朝倉書店, p. 93.
- 廣田 勇, 1982: 地球をめぐる風, 中央公論社, 164-181.
- Hwang, H.J., 1970: Power density spectrum of surface wind speed on Palmyra Island, *Mon. Wea. Rev.*, 98, 70-74.
- 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.
- , 1983: 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, *天気*, 30, 583-589.
- Kolesnikova, V.N. and A.S. Monin, 1965: Spectra of meteorological field fluctuations, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 1, 653-669.
- 古藤田一雄, 佐倉保夫, 林 陽生, 甲斐憲次, 1978: 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について, 筑波大学水理実験センター報告, 2, 65-89.
- , 甲斐憲次, 中川慎治, 1983: 気象日報作成装置について, 筑波大学水理実験センター報告, 7, 75-85.
- Mantis, H.T., 1963: The structure of winds of the upper troposphere at mesoscale, *J. Atmos. Sci.*, 20, 94-106.
- 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.
- Mori, Y., 1980: Spectrum of long-period fluctuations of surface wind at Marcus Island, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1456-1461.
- Oort, A.H. and A. Taylor, 1969: On the kinetic energy spectrum near the ground, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 623-636.
- Panofsky, H.A., 1969: Spectra of atmospheric variables in the boundary layer, *Radio Sci.*, 4, 1101-1109.
- and I. Van der Hoven, 1956: Spectra and cross-spectra of velocity components in the mesometeorological range, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 81, 303-306.
- Polowchak, V.M. and H.A. Panofsky, 1968: The spectrum of daily temperatures as a climatic indicator, *Mon. Wea. Rev.*, 96, 596-600.
- Smedman-Högström, A-S. and U. Högström, 1975: Spectral gap in surface-layer measurements, *J. Atmos. Sci.*, 32, 340-350.
- Van der Hoven, I., 1957: Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour, *J. Met.*, 14, 160-164.
- Vinnichenko, N.K., 1970: The kinetic energy spectrum in the free atmosphere—1 second to 5 years, *Tellus*, 22, 158-166.