

## 複雑地形上の気流の乱流特性——野外観測と 風洞実験の比較\*——

加藤 真規子\*\*・萩野谷 成徳\*\*・花房 龍男\*\*\*

### 要 旨

複雑地形上の気流が、風洞実験においてどの程度良く再現されるか、また、その再現方法を見いだすために、複雑地形上の橋梁で行った風の観測結果と縮尺1/1500の模型上の対応する場所で行った風洞実験の結果を比較した。

風洞実験によって得られた平均風速と乱流強度の分布は野外観測と比較的に一致することがわかった。風洞実験で調べた結果、橋梁に対応する場所の風向は一般流の風向と異なっており、また、乱流のエネルギースペクトルの形は一般流の風向によって異なることがわかった。

野外観測で得たエネルギースペクトルの大部分は無次元周波数で規格化すると、風洞実験で得た風向別スペクトルのいずれかに形が一致した。したがって、野外と風洞で得たスペクトルの形を比較することによって観測時の一般流の風向を推定することができた。

野外と風洞で得たスペクトルの形が一致したことから、野外と風洞における気流で乱流の構造は相似になっていると考えられ、風洞での気流は、平均風速や乱流強度だけでなく、乱流の構造上からも野外の気流を再現できたと考えられる。風洞内に再現された現象の時間スケールは、長さの縮小率と同程度となった。

中立状態の野外の気流における乱流は、平均風速および乱流強度の分布を相似にし、レイノルズ数を  $3.8 \times 10^4$  以上の十分大きな値に設定することにより、風洞内に野外と相似な乱流を再現できることがわかった。

### 1. はじめに

わが国の国土は、平坦な地形が少なく複雑な地形を呈しているところが多い。しかも「日本は風の国」という表現があるように(吉野, 1989), 年中種々様々な風が吹いている。したがって、例えば汚染物質の拡散や原子力施設の設置等に関して、複雑地形上の気流と地形との関係を調べる必要がしばしば起こる。その場合には、野外観測が多く時間と多額な費用を要するため、また、

乱流拡散等における数値シミュレーションでは詳細な乱流を表現できないため、風洞実験がよく利用されている。

風洞実験による複雑地形上の気流に関する最近の研究では、北林ら(1986)が野外の観測資料に基づいて、安定時の温度と風速の分布を風洞内に再現する実験を行って、比較的よい結果を得ている。しかし一般には、複雑地形上の風の観測資料がきわめて少ないために、風洞でつくられた気流がどの程度自然風を再現しているかどうか調べる手立てがない場合が多い。

本研究では、1987年3～5月の約2カ月間に、複雑地形上に設置されている橋梁で得られた、強風を対象とした風の観測結果を風洞実験結果と比較し、地形の影響を受けた野外の気流がどの程度風洞内に再現されるか、また、その再現方法について調べることを目的とした。

\* Characteristics of turbulent flow over a complex terrain—Comparison between a field observation and a wind tunnel experiment—.

\*\* Makiko Kato & Shigenori Haginoya, 気象研究所物理気象研究部.

\*\*\* Tatsuo Hanafusa, 気象庁観測部統計室。  
——1989年8月20日受領——  
——1989年12月20日受理——

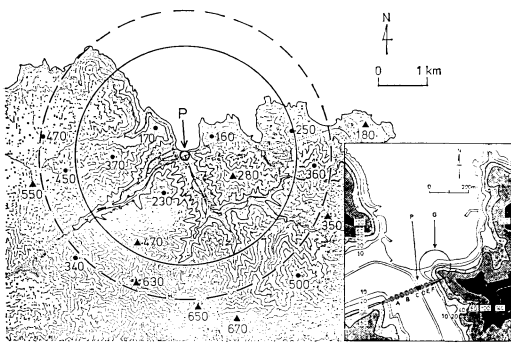
2. 風の観測

2.1 風の観測

風の観測を行った場所は山陰本線余部鉄橋上である。橋梁は峡谷上約 41 m、ほぼ東西の方向に架けられていて、全長は 310 m である。周囲の地形は峡谷が南と西の方向に延びていて、三方を標高 200~600 m の山に囲まれ、北から北東の方向のみが海に面した複雑な地形となっている。周辺の地形図と橋梁周辺の詳しい地形図を第 1 図に示す。

風の観測は、橋梁上約 4 m の高さの海側に超音波風速計を 5 台設置して行った。観測した位置は第 2 図に示す A~F の 6 カ所で、観測位置 A, B, D, F は 2 成分、C と E は 3 成分の超音波風速計である。座標は地点 P を原点として橋梁の方向に x 軸をとった。

測定は、平均風速 5 m/s 以上の風について、時間間隔 0.1 秒で磁気テープに収録した。収録の設定は平均風速



第 1 図 風の観測を行った周辺の地形図と橋梁周辺の地形図。

5 m/s でスイッチが作動し、3 m/s 以下で切れるようにした。

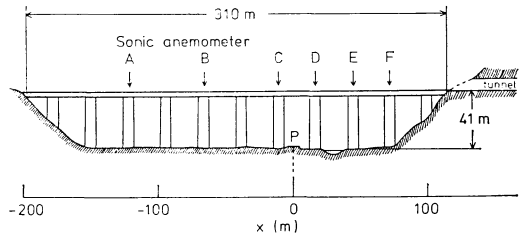
2.2 観測の結果

解析は、平均風速が約 6 m/s 以上で、少なくとも 30 分間以上安定した風向と風速で吹いたデータを対象とした。

解析したデータは、北方向からの風（以後簡単のため「北風」と略す）が 5 ラン、南方向からの風（以後簡単のため「南風」と略す）が 4 ランである。

乱流統計量を求めるに当たっては、各ランの観測値は 1 秒間平均したデータとし、まず、各観測時間内における平均風向を求めてその方向を流れの方向とした。この流れの方向、すなわち U の方向に対して水平な横方向を V、鉛直方向を W の方向とした。

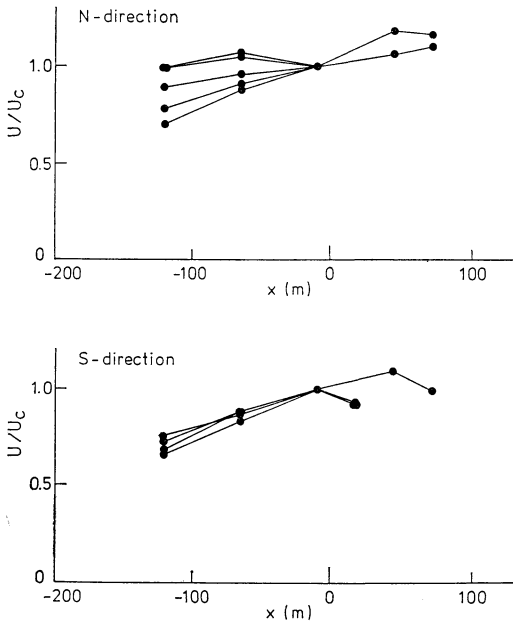
各ランの平均風速は、データを 10 分間ずつ区切って 10 分間平均の風速を求めた後、各ラン毎に平均した風速を求めた。橋梁上の平均風向と平均風速の観測結果を第 1 表に示す。風向 N-NNW は風向 N と風向 NNW の中間風向を表す。また、5 台の超音波風速計のうち正常に動作しなかったものは欠測としてある。



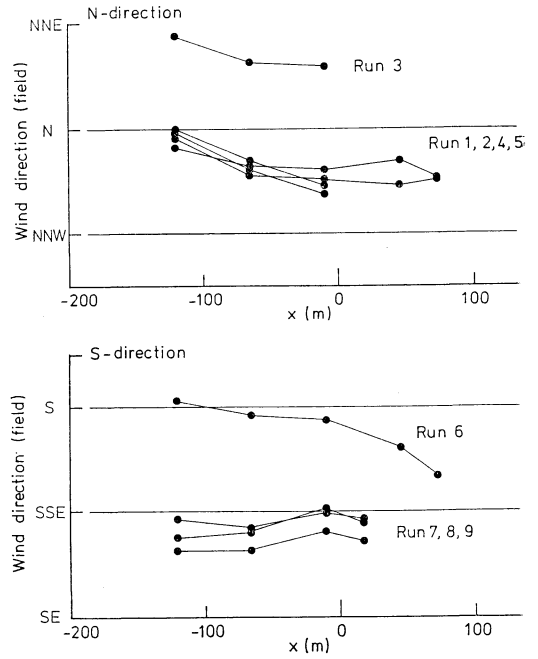
第 2 図 橋梁の断面図と風速計を設置した位置。

第 1 表 野外観測により得られた橋梁上平均風向と平均風速。

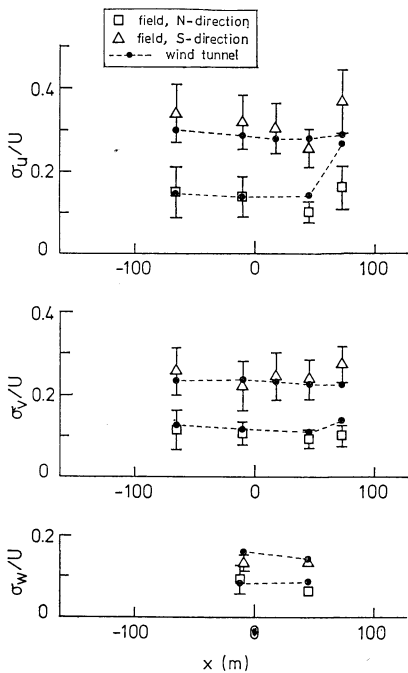
Run	月日	観測時刻	10分間 データ数	風向 (橋梁上)	平均風速 (m/s)					
					A	B	C	D	E	F
1	3/20	3:33~5:23	11	N-NNW	9.9	10.7	10.0	—	11.8	11.6
2	3/20	8:57~10:17	8	N-NNW	7.0	7.6	7.9	—	8.4	8.7
3	4/26	11:08~14:48	22	NNE	8.5	9.0	8.6	—	—	—
4	5/3	9:50~13:10	20	N-NNW	5.9	6.9	7.6	—	—	—
5	5/3	16:30~17:00	3	N-NNW	6.2	7.7	8.8	—	—	—
6	4/9	14:52~17:32	16	S	6.9	8.8	10.6	—	11.6	10.5
7	4/21	13:21~15:41	14	SSE	8.0	10.4	11.8	11.0	—	—
8	4/21	16:57~19:27	15	SSE	11.4	13.9	15.8	14.5	—	—
9	4/30	20:00~22:30	15	SSE	8.2	9.5	10.9	10.0	—	—



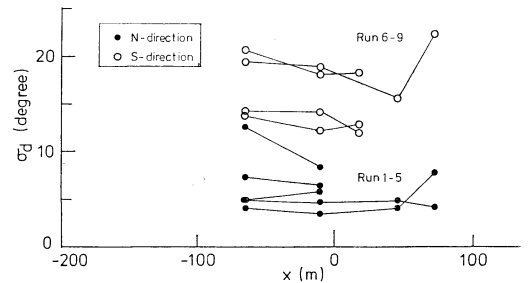
第3図 橋梁上の平均風速の分布 (野外観測).



第5図(a) 橋梁上の平均風向の分布 (野外観測).



第4図 橋梁上の乱流強度の分布 (野外観測と風洞実験).



第5図(b) 橋梁上の風向変動の標準偏差  $\sigma_d$  の分布 (野外観測).

平均風速の分布を位置 C の風速で規格化して示すと第3図のようになる。実線は各ラン毎に結んである。北風、南風とも  $x=50$  m 付近の風速が強く、また、北風では  $x=-100$  m 付近の風速に多少の幅が認められる。

乱れの標準偏差は平均風速と同様に10分間毎に区切ったデータについて乱流強度として求めて、北風と南風について平均した。北風と南風の乱流強度の分布は、観測値の標準偏差とともに示すと第4図のようになる。南風の乱流強度は北風の約2倍となっていることがわかる。

橋梁上で観測した平均風向の分布を第5図(a)に示す。橋梁上で観測した風向は位置による変化がほとんど

なく、北風は風向 NNE または風向 N と NNW の中間の風、南風は風向 S または風向 SSE の風であった。風向変動の標準偏差  $\sigma_d$  は第 5 図 (b) に示すように南風の方が大きく平均 16 度で、北風は平均 6 度であった。第 5 図 (a), (b) の実線は観測したラン毎に結んである。

### 3. 風洞実験

#### 3.1 風洞実験の概要

風洞実験では、第 1 図の複雑地形の地点  $P$  を中心とした地形模型 (縮尺 1/1500) を使用した。模型 (直径 3.0 m) は第 1 図の実線の円形部分で、点線部分は粗い模型とした。さらに外周の地形部分は、幅 80 cm の整流板を製作して気流が模型の端の影響を受けないように工夫した。模型は、各方位の風に対して実験ができるように分割し、表面には植生を考慮してスポンジラバーの地面粗度を付加した。

実験には、気象研究所の大型気象風洞 (西山ら (1980); 測定部の大きさは幅 3.0 m × 高さ 2.0 m × 長さ 18.0 m) を使用し、風洞風速を 6 m/s とした。成層に関しては、観測した風速が比較的強い資料を対象としたので、温度成層の影響は小さいと考えて中立成層で実験した。

乱流境界層の形成には、測定部前縁に高さ 47 cm、幅 10 cm の公害資源研究所型乱流発生素子 (花房, 1985) を 10 基等間隔に並べ、その下流 9~12 m の位置の風速分布を一般的な海よりの風の風速分布 (塩谷 (1979); べき法則で、そのべき指数は約 1/9) に設定した。この場合、乱流強度は高さ 30 m で約 0.1 となり、海よりの風に対する値に一致する。風速の 95% 値で定義した乱流境界層の厚さは現地換算で約 600 m であった。

乱流境界層の厚さから求めた風洞気流のレイノルズ数は  $Re = 1.7 \times 10^5$  である。Townsend (1976) や北林 (1985) によると、このように十分大きなレイノルズ数の流れでは、乱流特性はもはやレイノルズ数に強くは依存しない状態となっていて、中立成層の場合、風洞内に大気中の気流を再現するためには平均風速と乱流強度の分布を一致させればよい。

本実験で設定した海よりの風は北風の場合の実験では上記のことを満足する。しかし、南風に対する実験も北風と同様の風の設定で行った。これは、南風の場合、測定位置の模型中心部では、与えられた風速分布にあまり関係なく近傍の地形の影響を受けた風速分布が形成されるであろうという考えに因っている。

風速は、直径 5  $\mu\text{m}$ 、長さ 1.3 mm タングステン線の X 型熱線センサーを使用し、定温度型熱線風速計 (DAN-

TEC 5600 型計測システム) により測定した。

一般に、X 型熱線センサーを用いる風速計は、流れの方向とそれに直角な方向の 2 成分の風速を検出できるのが特徴である。乱れが大きい場合には検出できた風向の範囲は熱線センサーの中心軸に対して  $\pm 20 \sim 25$  度までであった。しかし、今回、乱れが大きい複雑地形上の箇所の測定においては、風向の測定範囲を  $\pm 10$  度以下に抑えないと、 $V$  成分と  $W$  成分を検出するセンサーを用いたときの両者の流れ方向の風速  $U$  の値が異なり、また、風向の検出にも誤差を生じることがわかった。したがって、各測定位置における気流は、局所の流れの方向に対して  $10$  度以内になるように熱線センサーをある角度  $\theta$  回転させて 2 成分の風速を求め、実際の風向は角度  $\theta$  を加算して決定した。

風洞実験で測定した風速は 3 成分の平均風速 ( $U, V, W$ ) と変動風速 ( $u, v, w$ ) であるが、座標は観測値と同様に空間に固定した座標とは関係なく、流れの方向に  $U, U$  に直角な水平方向に  $V$  (ただし  $V=0$ )、鉛直上方に  $W$  をとった。

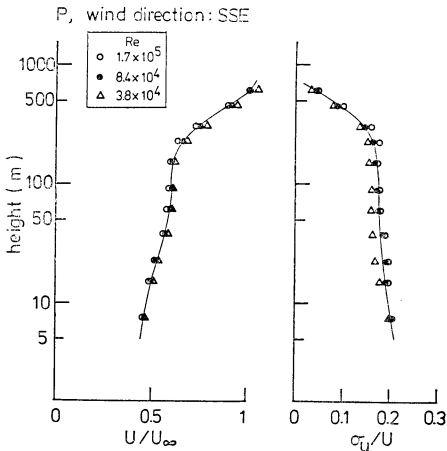
平均風速は、0.72 秒毎、200 回のサンプリングにより求めた。変動風速の標準偏差  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  は、変動風速の二乗平均根をシグマメータにより演算処理し、平均風速と同様に 0.72 秒毎、200 個のデータの平均値として求めた。データ処理の周波数範囲は 0.1~500 Hz である。

風洞における乱流のエネルギースペクトルはアナログスペクトル解析装置 (海上電機 MK 1300 型) を使用して求めた。この装置は、周波数範囲 0.04 Hz ~ 2.5 kHz までを 12 チャンネルに対数的に等分し、各チャンネルはバンドパスフィルターを通過して乱流のエネルギーが求められるようになっている。各チャンネルのバンドパスフィルターは低周波遮断周波数と高周波遮断周波数の比、つまり帯域幅が 2.5 倍と狭く、減衰特性は  $-96 \text{ dB/Oct}$  と鋭く設計されている。乱流のエネルギーは各チャンネルの中心周波数に対してプロットすることにより得られる (Kato, 1982)。中心周波数で示した解析可能な周波数範囲は 0.06 Hz ~ 1.6 kHz である。データ収集時間は 4 分間とした。

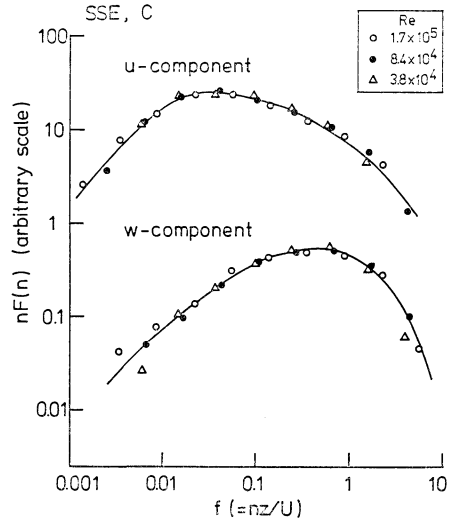
風速の測定は、橋梁上の風速計を取り付けた高さ (地上約 45 m) で  $x$  方向について行った。ただし、橋梁は無架設とした。

#### 3.2 乱流構造のレイノルズ数の依存性について

Townsend (1976) や北林 (1985) に述べられている、乱流の構造がレイノルズ数に強く依存しない状態となる臨界のレイノルズ数に関しては、 $10^5$  程度以上とされて



第6図(a) 風向 SSE, 地点 P においてレイノルズ数を変化させたときの平均風速と乱流強度の鉛直分布. レイノルズ数は  $3.8 \times 10^4$ ,  $8.4 \times 10^4$ ,  $1.7 \times 10^5$ .



第6図(b) 風向 SSE, 橋梁位置 C 点でレイノルズ数を変化させたときの  $u$  成分と  $w$  成分のエネルギースペクトル. レイノルズ数は  $3.8 \times 10^4$ ,  $8.4 \times 10^4$ ,  $1.7 \times 10^5$ .

いるのみである。

本実験でのレイノルズ数は、風洞風速  $U_\infty$  を代表風速とし、風洞風速の95%値を示す乱流境界層の厚さを代表長さとして求めて  $Re=1.7 \times 10^5$  となっているが、臨界のレイノルズ数がどのくらいかを知るために、風洞風速を6.0 m/s, 3.0 m/s, 1.35 m/s の3種類とした時の風速と乱流のエネルギースペクトルを測定した。風速を変化させることによりレイノルズ数は  $1.7 \times 10^5$ ,  $8.4 \times 10^4$ ,  $3.8 \times 10^4$  となる。

測定は第1図の地形模型に対する風向を SSE とし、中心点 P における鉛直方向の平均風速と乱流強度の分布および橋梁位置 C 点の  $u$  成分と  $w$  成分のエネルギースペクトルを求めた。

平均風速と乱流強度の分布を第6図(a)に示す。風向が南風のため、低い高さでは山の影響で風速は小さくなっているが、平均風速と乱流強度はレイノルズ数によらず相似な分布を示している。 $u$  成分と  $w$  成分のエネルギースペクトルは第6図(b)に示す。 $w$  成分については低周波域で多少ばらついているがほとんど相似な分布と見ることができ、レイノルズ数に因る差は見られない。第6図における実線はそれぞれの分布の単なる平均を示している。

第6図の結果から、乱流の構造がレイノルズ数に依存

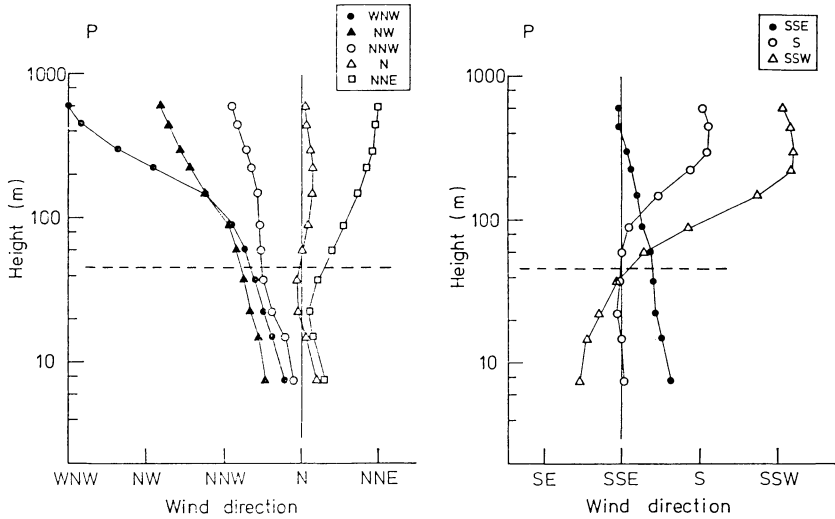
しなくなる下限のレイノルズ数を決めることはできないが、少なくとも  $3.8 \times 10^4$  以上での乱流の構造がレイノルズ数に因らなくなっていることがわかった。レイノルズ数は代表風速と代表長さを何にとるかによっても変わり、臨界のレイノルズ数もある程度幅があると思われるが、一つの指標は得られたと考えられる。

### 3.3 風向と風速の測定結果

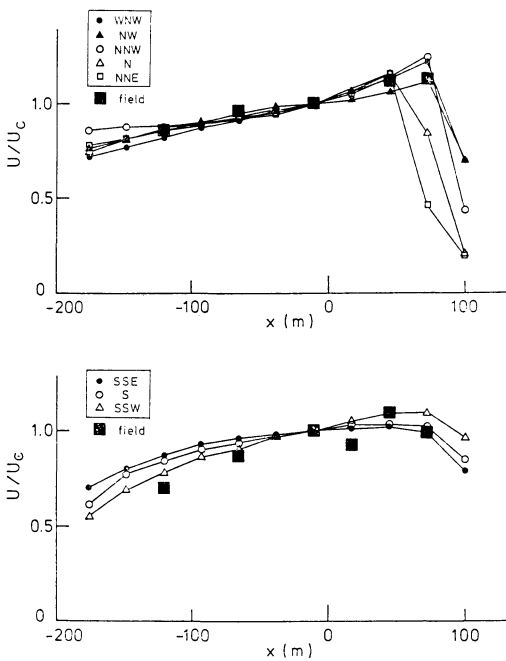
地点 P の風向を鉛直方向に測定した結果を第7図に示す。北風の場合、一般風 WNW~NNE の風が橋梁(点線の高さ)では風向 N を中心とする風となって吹き込み、南風の場合は、一般風 SSE~SSW の風が風向 SSE の風となって吹くことがわかる。特に、一般風 WNW と SSW の場合には、地上と上層 600 m で約 60 度も風向が変化している。したがって、橋梁上で測定した風向から一般流の方向を定めることはできない。

風洞での実験風向は、北風が風向 WNW~NNE の 5 風向、南風は風向 SSE~SSW の 3 風向とした。

各実験風向に対して、橋梁上の位置の平均風速と乱流強度の分布をそれぞれ第8図と第9図に示す。平均風速分布は観測値と同様に位置 C の風速で規格化して示してあるが、ほとんど風向によらない分布が得られた。北風、南風とも、風速分布は  $x=50$  m 付近の風速が強く、ともに観測で得た分布の傾向と一致している。平均した



第7図 地点Pでの風向の鉛直分布. 点線は風速計設置の高さ. (風洞実験)



第8図 橋梁上の平均風速の分布 (風洞実験). 黒い四角印は第3図の野外観測結果の平均値.

観測値の風速を第8図に黒い四角印で示してある. 第3図の北風で,  $x = -100$  m 付近のばらついている風速は平均すると風洞実験結果にほぼ一致する.

乱流強度 (第9図) は全体として南風の方が値が大きいが, これは南風の場合, 測定点が山の風下側になっているために地形の影響を受けた結果といえる. 北風では, 風向 NNW, N, NNE のときには, 海をわたってくる風になるので乱流強度が特に小さい. また, 北風の場合に  $x = 100$  m 付近の風速が弱く乱流強度が大きいのは, 第1図における G の部分の地形の影響である.

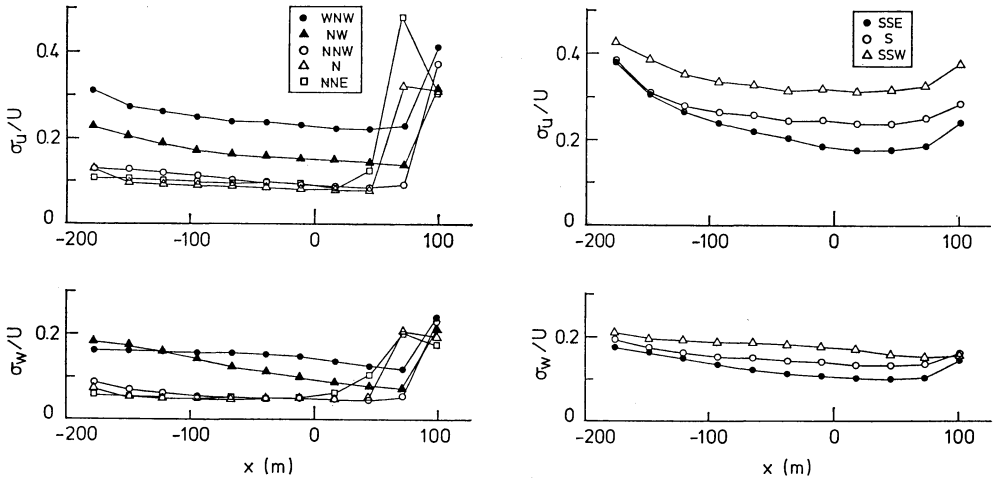
各実験風向に対する橋梁上の風向は, 第5図 (a) の観測結果と同様に測定した位置によらずほぼ一定であった. その風向は第7図に示されている.

### 3.4 乱流のエネルギースペクトル

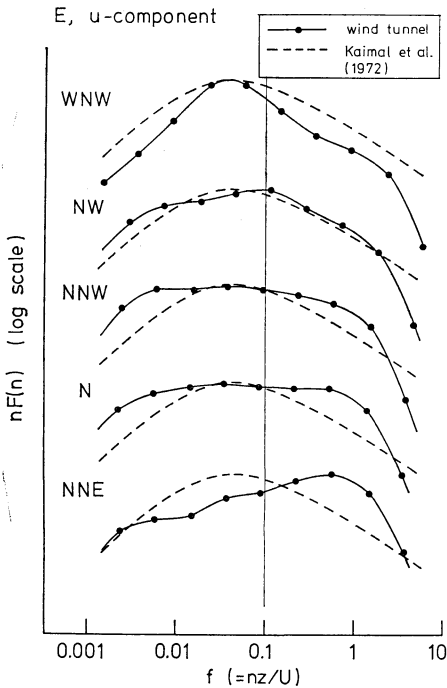
風洞実験では, 北風5風向, 南風3風向について変動風速  $u, v, w$  を測定し, 乱流の渦がエネルギーを含んでいる周波数領域のエネルギースペクトルを調べた.

北風のエネルギースペクトルは,  $u, v, w$  の3成分とも, 一般流の風向によってスペクトルの形が異なった. 例えば, 測定位置 E の  $u$  成分スペクトルを示すと第10図のように風向によって異なっている. すなわち, 北風では風向によって乱流の状態がかなり変化している. 第10図の横軸は無次元周波数  $f (=nz/U)$  で, 縦軸の対数スペクトル  $nF(n)$  はピーク値を一致させてある.  $n$  は周波数である. 点線は平坦地形上の乱流のスペクトル分布の実験式 (Kaimal ら, 1972) で, 複雑地形上のスペクトルの形が平坦地形上と異なっていることがわかる.

北風の一般風 WNW と NNW の場合, 測定位置 B, C, E における  $u$  と  $w$  成分のスペクトルを示すと第11図



第9図 橋梁上の乱流強度の分布 (風洞実験)。



第10図 風向 WNW-NNE, 測定位置 E の  $u$  成分エネルギースペクトル (風洞実験)。

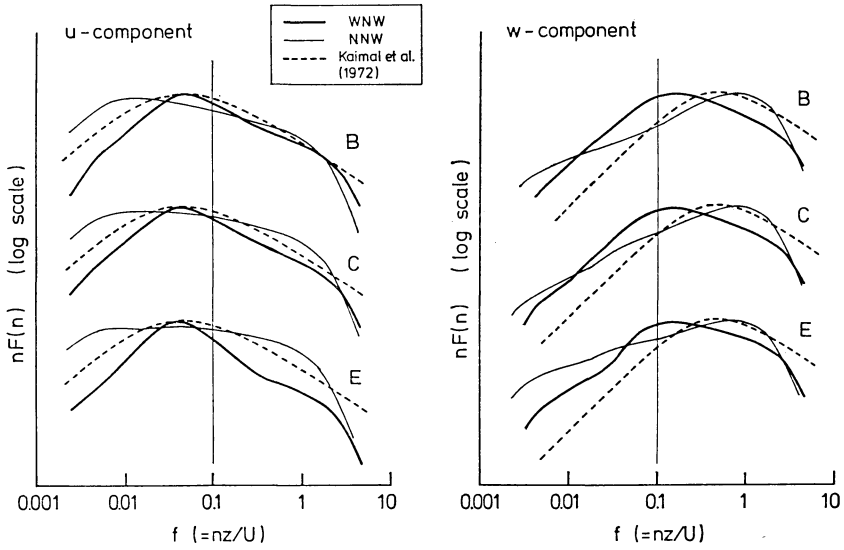
位置は一致しているが、スペクトルの形が尖っている。すなわち、ピーク周波数付近の乱れのエネルギーが相対的にかなり大きい。これに対して、風向 NNW の場合はかなり一様な分布となっている。

第11図の  $w$  成分のスペクトルでは、風向 WNW の場合は、Kaimal らの分布と形はあまり変わらないがスペクトル全体が低い周波数へ移動した分布となっている。風向 NNW の場合は、Kaimal らのスペクトルとピーク的位置はほぼ一致しているが、低い周波数でのエネルギーが大きく、 $u$  成分と同様に広く分布している点が異なる。

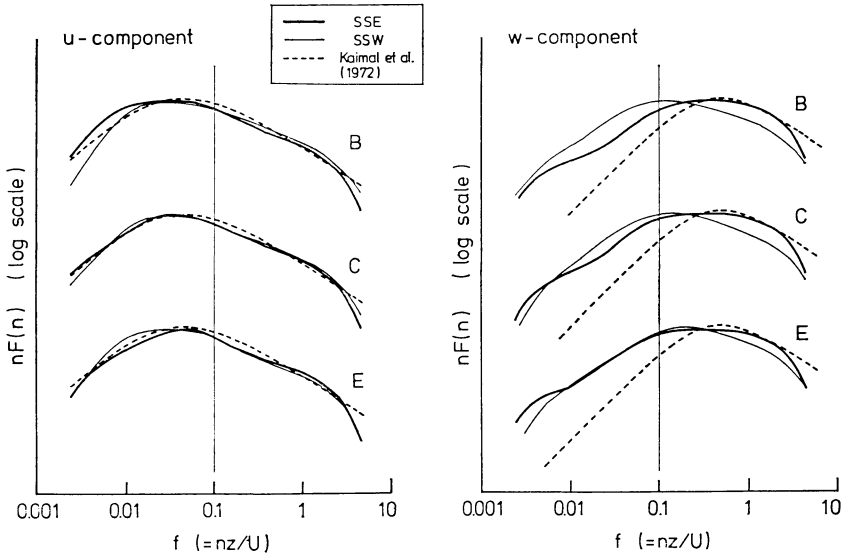
南風のスペクトルは、測定的位置による大きな差は見られなかった。南風のスペクトルの例は、風向 SSE と SSW の場合について第12図に示す。点線は第10図と同じく Kaimal らの分布である。南風の場合、風向によるスペクトルの形の差は北風の場合ほど顕著ではない。 $u$  成分のスペクトルは Kaimal らの分布と比較的よく一致しているが、 $w$  成分のスペクトルは北風と同様に、低い周波数域でもエネルギーが大きく、また、分布の周波数域が広がっている。

エネルギースペクトル全体として、複雑地形上のスペクトルが平坦地形上と異なるのは地形の影響と考えられる。また、北風のスペクトルが風向によって顕著に異なるのは、北風の場合は、地形の影響によって乱れが発生した直後のまだ発達しきっていない風(特に風向 WNW)から風向 N を中心とした海をわたってくる風と、風向が少し変わるだけで乱流の状態が大きく変化するためと考

のようになる。Kaimal らの実験式は第10図と同じく点線で示したが、風洞実験でのスペクトルは Kaimal らの分布には一致していない。 $u$  成分のスペクトルを Kaimal らの分布と比較すると、風向 WNW の場合は、ピークの



第11図 風向 WNW, NNW の場合,  $u, w$  成分のエネルギースペクトル (風洞実験).



第12図 風向 SSE, SSW の場合,  $u, w$  成分のエネルギースペクトル (風洞実験).

えられる。南風の場合に風向によるスペクトルの変化が小さいのは、乱れが発生してからある程度時間が経過し、発達して平均化した乱流状態になっているためと考えられる。

また、風洞実験では、すべての成分のスペクトルについて、無次元周波数が約3以上になるとエネルギーは急

速に減少して、慣性小領域の帯域が大気中のように広がらない結果が現れている。

#### 4. 野外観測と風洞実験結果の比較

##### 4.1 乱流のエネルギースペクトルの比較

本節では、風の観測で得た風速のデータから乱流のエ



第2表 スペクトル解析ランにおける解析時間と推定した一般流の風向

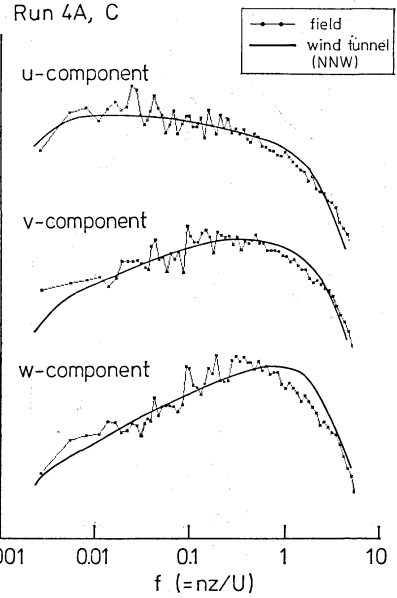
Run	風向 (橋梁上)	スペクトル解析		
		時刻	時間	推定した一般流風向
1A	N-NNW	4:45~5:15	0.5	WNW
2A	N-NNW	9:00~10:00	1.0	WNW
3A	NNE	11:00~12:30	1.5	NNE
3B	NNE	13:25~14:55	1.5	NNE
4A	N-NNW	10:00~13:00	3.0	NNW
5A	N-NNW	16:30~17:00	0.5	WNW
6A	S	15:00~16:00	1.0	SSE
7A	SSE	13:30~15:30	2.0	SSW
8A	SSE	17:30~19:00	1.5	SSW
9A	SSE	20:15~20:45	0.5	SSW
9B	SSE	21:55~22:25	0.5	SSW

エネルギースペクトルを求め、風洞実験で得たスペクトルと比較を行った。

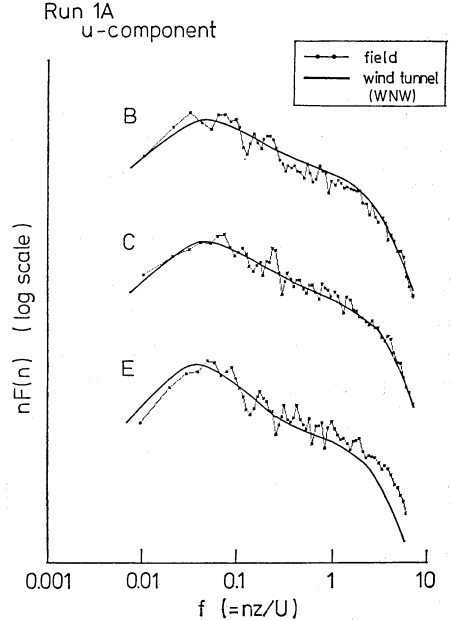
観測データのスペクトル解析は、各ランにおいて風向と風速が安定している時間帯を選んで、Blackman-Tukey法(日野, 1977)によって求めた。今回の解析では、エネルギーを含む周波数領域のスペクトルを求めるために、解析時間はできるだけ長くとした。解析をした時間は各ランの観測した全時間ではないので、スペクトル解析でのラン番号にはA, Bの符号を付けて第2表に示した。

解析の前処理として0.1秒間隔で測定したデータは、移動平均を行って高周波数成分を除去した。移動平均はその平均時間を  $s$  とすると、遮断周波数  $1/2s$  のカットオフフィルターをかけたことになる。平均時間  $s$  は以下のようにして決めた。

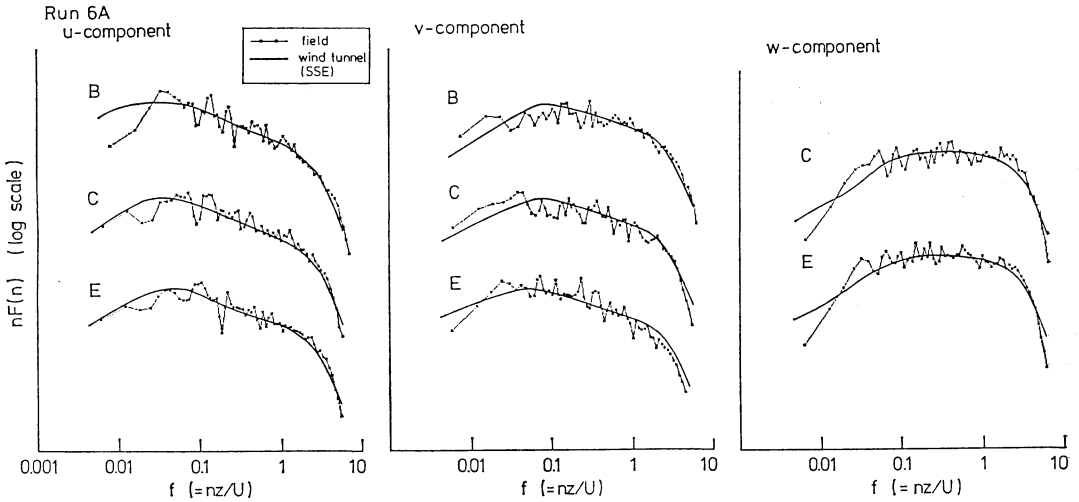
風洞で測定できる乱流渦の下限の大きさは、測定に使用する熱線センサーの長さによって限定される。いま、測定可能な最小の渦の大きさをだまかにセンサーの長さ(1.3 mm)の約5倍程度と仮定して見積ると、その大きさは直径7 mm程度となる。これは、野外では約10 m (~7 mm × 1500)の渦の大きさに相当し、観測したデータについては大きさ10 m以下の渦に対してフィルターをかけるのと同様である。したがって、平均風速を  $U$  (m/s) とすると、移動平均時間  $s$  は  $s \sim 10(m)/2U(m/s)$  となる。スペクトル解析の各ランのデータについては、観測位置Cの平均風速によって時間  $s$  を決めた。時間  $s$  は0.4~0.7秒となった。



第13図 Run 4Aの場合、野外観測の位置Cにおける  $u, v, w$  成分のエネルギースペクトル。実線は風洞実験で得た風向NNWのスペクトル。



第14図 Run 1Aの場合、野外観測の位置B, C, Eにおける  $u$  成分のエネルギースペクトル。実線は風洞実験で得た風向WNWのスペクトル。



第15図 Run 6A の場合、野外観測の位置 B, C, E における  $u, v, w$  成分のエネルギースペクトル。実線は風洞で得た風向 SSE のスペクトル。

風速成分に対する方向は、各ラン毎に平均風向を求めてその方向に流れ方向  $U$  をとり、 $U$  に直角な水平方向に  $V$ 、鉛直方向に  $W$  をとった。

観測データから得た乱流のエネルギースペクトルを無次元周波数で規格化して、風洞実験で風向別に得たスペクトルと比較すると、その形は風洞で得たスペクトルのいずれかに一致した。

スペクトルの比較の例を示すと、北風では、Run 4 A の位置 C における 3 成分のスペクトルを第13図に示す。これらは風洞で得た風向 NNW の場合の C 点のスペクトル（実線）と良く一致する。この  $u$  成分のスペクトルは第11図にも示したように、Kaimal らの分布とは形が大きく異なっているものである。さらに、第11図で示した風洞風向 WNW の  $u$  成分のスペクトルは、ピークの位置で尖った形をしているが、これは、Run 1 A で観測したスペクトルと非常によく一致する（第14図）。

南風の例では、Run 6 A の位置 B, C, E における 3 成分のスペクトルを第15図に示す。これらは第12図に示した風洞風向 SSE の場合のスペクトルとよく一致する。

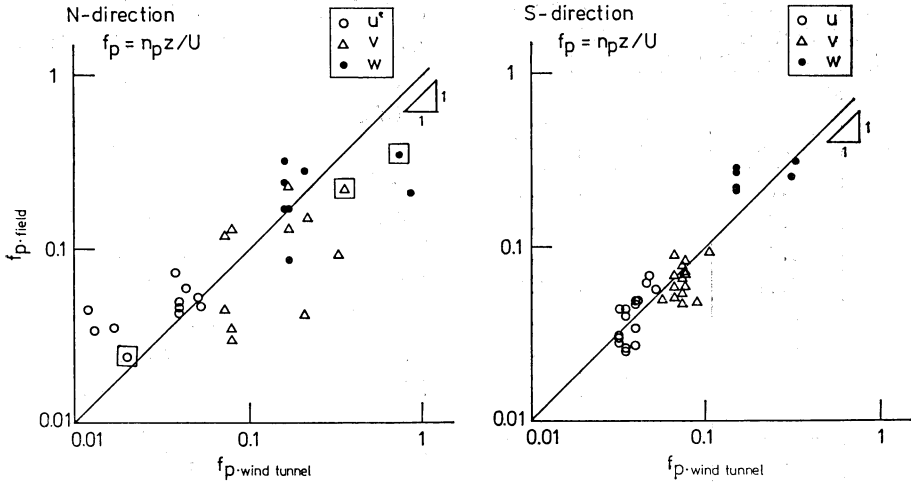
以上のように、野外で得たスペクトルを風洞のスペクトルと比較することによって、観測時の一般流の風向を推定することができる。比較に際しては主として  $u$  成分スペクトルの形を比較して一般流の風向を推定した。推定した風向を第2表に示してある。

このように比較した野外と風洞のスペクトルについて、

両者のスペクトルの無次元ピーク周波数  $f_p$  を求めその結果を第16図に示す。

無次元ピーク周波数  $f_p$  は、一般の自然風や風洞風のスペクトルで得られているように、 $u$  成分が最も低く、ついで  $v$  成分、 $w$  成分の順となっている。南風の場合、野外と風洞の  $f_p$  はよく一致している。これに対して、北風は少しばらつきが大きい。このばらつきは、一般流の風向、測定的位置および解析時間の長短（0.5~3.0時間）と特に関係はなかった。北風の  $f_p$  のばらつきは、野外における北風のスペクトルが、地形的に風向が少し変化することによってスペクトルの形も変化しやすいことに起因しているのではないかと考えられる。また、平坦な形を示すスペクトルの場合、 $f_p$  を求める際に誤差が大きくなる可能性はそれ程大きくはない。例えば、第13図で比較した野外と風洞のスペクトルの  $f_p$  は第16図に四角い印を付した程度となっている。

以上のように、野外と風洞のスペクトルの形が一致することは、野外と風洞の気流において乱流の構造が相似になっていることを意味し、野外での乱流が風洞内にも再現されていることを示している。このことは、Townsend (1976) が述べている、レイノルズ数が十分大きくなると乱流の構造はレイノルズ数には大きく因らない、ということを実証している。したがって、風洞での乱流を野外と相似にするには、平均風速や乱流強度の分布の相似とともに、レイノルズ数を十分大きな値、3-2 節の結果から少なくとも  $3.8 \times 10^4$  以上、に設定することが



第16図 野外と風洞のエネルギースペクトルの無次元ピーク周波数  $f_p$  の比較。四角印で囲んだデータは第13図におけるスペクトルの  $f_p$ 。

必要である。

野外と風洞で、乱流のスペクトルのエネルギーを含む領域が無次元周波数でほぼ一致する結果 ( $f_{pf} \sim f_{pw}$ ) から、

$$n_{pf} \cdot z_f / U_f \sim n_{pw} \cdot z_w / U_w \quad (1)$$

である。ここで、添え字  $f$  と  $w$  はそれぞれ野外と風洞を表し、 $n_p$  はスペクトルのピーク周波数である。

したがって、風洞における長さの縮尺率を  $\alpha$  (いまの場合  $\alpha = 1/1500$ )、風洞と野外の風速比を  $\beta$  とすると、 $z_w = \alpha z_f$ 、 $U_w = \beta U_f$  であるから、 $n_{pw}$  は

$$n_{pw} \sim \beta / \alpha \cdot n_{pf} \quad (2)$$

(2) 式は、風洞での時間スケールが野外の時間スケールの  $\alpha/\beta$  倍に縮小されていることを示している。一般に  $\beta$  は、今回の実験もそうであるが、 $\beta \approx O(1)$  で実験を行うことが多く、その場合には、風洞内の現象は長さスケールと同程度に縮小された時間スケールで再現される。この結果は井上 (1959) が風洞実験での時間縮率について予測した結果と一致する。例えば、第13図に示した例では、 $U_f = 7.6 \text{ m/s}$ 、 $U_w = 4.3 \text{ m/s}$ 、無次元周波数  $f = 0.1$  は  $n_f = 0.017 \text{ Hz}$ 、 $n_w = 14.5 \text{ Hz}$  なので、風洞の現象の時間スケールは野外での約  $1/1000$  となっている。

いままでは、乱流のエネルギースペクトルをエネルギーを含む周波数領域について考察してきた。

一方、野外と風洞における気流の相似に関しては、Nemoto (1968) が、エネルギーを含む周波数領域の相似ではなく、慣性小領域における最小渦の大きさと速度に

着目して乱流の構造の相似を論じた。Nemoto は野外と風洞の流れの代表風速に対して次の相似関係を得ている。

$$U_{\infty w} / U_{\infty f} = (\varepsilon_w / \varepsilon_f)^{1/3} (L_w / L_f)^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 $U_{\infty}$  は流れの代表風速 (例えば一般流の風速)、 $\varepsilon$  はエネルギー消散率、 $L$  は代表長さである。

エネルギー消散率  $\varepsilon$  は慣性小領域においてスペクトルの周波数と次式の関係で与えられる。

$$nF(n) / \sigma_u^2 = \gamma \cdot U^{2/3} / \sigma_u^2 \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot n^{-2/3} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma$  は定数で、 $u$  成分スペクトルの場合は  $0.15$  とされている (Panofsky & Dutton, 1984)。

いままで解析して得たエネルギースペクトルは、その慣性小領域が野外と風洞ともに十分広くないので、(3) 式によるスペクトルの検討は厳密にはできないが大まかにはすることができる。

野外と風洞における位置  $C$ 、 $E$  の  $u$  成分スペクトルから (4) 式によって求めたエネルギー消散率  $\varepsilon$  を (3) 式に代入し、(3) 式から求めた風速比 ( $(U_w / U_f)_{\text{cal}}$ ) を第3表に示す。(3) 式の  $L$  に関する項は模型の縮尺率に等しく、 $L_w / L_f = \alpha = 1/1500$  である。今回の野外観測と風洞実験における代表風速比 ( $(U_w / U_f)_{\text{act}}$ ) は簡単のため橋梁上の風速比にとって同じく第3表に示した。両者の比 ( $R$ ) をとってみると、北風ではばらついているが、南風では比較的同じような値になっている。その平均値と標準偏差は、北風では  $R = 1.6 \pm 1.0$ 、南風では  $R = 1.0 \pm 0.3$  である。第3表の結果から、北風についてはば

第3表 位置 C, E の  $u$  成分エネルギースペクトルのエネルギー消散率  $\epsilon$  から計算した野外と風洞の風速比と, 実際の野外と風洞の橋梁上風速化

Run	位置	$(U_w/U_f)_{cal}$	$(U_w/U_f)_{act}$	$R^*$
1A	C	0.64	0.24	2.7
	E	0.45	0.25	1.8
2A	C	1.02	0.37	2.8
	E	0.71	0.39	1.8
3A	C	0.29	0.47	0.6
3B	C	0.45	0.54	0.8
4A	C	0.36	0.57	0.6
5A	C	—	0.33	—
6A	C	0.18	0.28	0.6
	E	0.22	0.31	0.7
7A	C	0.18	0.20	0.9
8A	C	0.15	0.14	1.1
9A	C	0.22	0.18	1.2
9B	C	0.25	0.21	1.2

$$*: R = (U_w/U_f)_{cal} / (U_w/U_f)_{act}$$

らつきが大きいものの, (3) 式の関係はオーダー的には成り立っていると考えられる。したがって, 野外と風洞の気流における乱流の構造はエネルギーを含む領域において相似であると同時に, 慣性小領域においても相似になっていると考えられる。

#### 4.2 橋梁上の乱流強度の水平分布の比較

平均風速分布に関しては, 風洞で風向別に得た規格化風速分布が風向によらずほぼ一致しているので (第8図), 分布の傾向を観測値と比較できた。乱流強度に関しては, その水平分布が一般流の風向によって異なるので (第9図), 第4図の観測値と比較するには, 風洞実験値に風向別データ数の割合を加重して分布を求める必要がある。

風の観測で得た10分間平均の風速のデータ数は, 第1表と第2表から一般流の風向別に見ると, 北風の場合は風向 WNW, NNW, NNE が 1:1:1 の割合になっており, 南風の場合は風向 SSE と SSW がほぼ 1:3 となっている。風洞実験の乱流強度の測定結果 (第9図) に風向別データ数の割合を加重して乱流強度の分布を求めると, 第4図に図示した黒丸印と点線になる。風洞実験から求めた値は観測値の標準偏差内にだいたい収まっている。

流れ方向の乱流強度  $\sigma_u/U$  に対する  $\sigma_v/U$  と  $\sigma_w/U$  の

値は, 野外と風洞の差, 北風と南風の差がほとんどなく, その比は 1.0:0.7~0.8:0.5~0.55 で, 野外平坦地で得られている値 (Panofsky & Dutton, 1984 b) と一致した。

#### 5. まとめ

複雑地形上の気流に関して, 橋梁上の風の観測結果と風洞実験の結果を北風と南風に分けて比較考察をした。その結果, どちらの風についても観測と風洞実験との間に比較的よい一致を得た。

北風と南風についてみると, 南風の場合は, 野外観測と風洞実験の結果は特によく一致した。北風の場合には, 風向変動や風速変動の標準偏差が南風の場合に較べて小さいにもかかわらず, 乱流のエネルギースペクトルに関する観測結果と風洞実験の一致は南風の場合より良くない。これは, 北風の場合は, 野外での乱流の状態が地形的に少しの風向変化に対しても大きく変化しやすいことに因ると考えられる。

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 中立状態における複雑地形上の風洞気流について, その乱流の構造を調べた結果, 少なくともレイノルズ数が  $3.8 \times 10^4$  以上ではレイノルズ数に依存しないことがわかった。

(2) 観測した複雑地形の特性として, 橋梁上の風向は一般流の風向とかなり異なることが風洞実験によりわかった。また, 地形の影響を受けた乱流のエネルギースペクトルは, 一般流の風向によってその形が変化し, 平坦地形上のスペクトルとも異なった。

(3) 風の観測結果と風洞実験の結果では, 橋梁上の平均風速と乱流強度の分布は一致し, 乱流のエネルギースペクトルも無次元周波数で一致した。

(4) エネルギースペクトルの形が一般流の風向によって異なることから, 橋梁上の風の観測ではわからない観測時の一般流の風向は, 風洞で得たスペクトルとその形を比較することによって推定することができた。

(5) 乱流の構造に関して, 野外と風洞のエネルギースペクトルが無次元周波数で一致することから, 野外の気流における乱流と相似な乱流を風洞内に再現することができた。その際, 風洞における時間スケールは野外での時間スケールの  $\alpha/\beta$  に縮小される。ここで,  $\alpha$  は風洞での長さの縮尺率,  $\beta$  は風洞での風速の野外に対する比である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、複雑地形上の風観測資料を快く提供して下さいました、(財)鉄道総合技術研究所基礎・共通技術研究室 小澤 智室長に感謝いたします。

文 献

花房龍男, 1985: 地形性気流の風洞実験, 気象研究ノート No. 152, 51.  
 日野幹雄, 1977: スペクトル解析, 朝倉書店, 184-192  
 井上栄一, 1959: 温度成層を考慮に入れた自然風現象の風洞模型実験について, 農業気象, 15, 41-45.  
 Kaimal, J.C., J.C. Wyngaard, Y. Izumi, and O.R. Cote, 1972: Spectral characteristics of surface layer turbulence, Q.J.R. Meteorol., 98, 563-589.  
 Kato, M., 1982: An application of electrical filters to spectrum analysis, Pap. Met. Geophys., 33,

137-147.  
 北林興二, 1985: 模型実験の相似律, 気象研究ノート No.152, 6-12.  
 ———, 吉門 洋, 近藤裕昭, 横山長之, 1986: 複雑地形上の安定成層気流の観測と風洞実験, 公害, 21, 117-127.  
 Nemoto, S., 1968: Similarity between natural local wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel, Pap. Met. Geophys., 19, 131-230.  
 西山 宏, 花房龍男, 藤谷徳之助, 1980: 新設された大型風洞装置について, 気象学会講演予稿集, 38, 234.  
 Panofsky, H.A. and J.A. Dutton, 1984: Atmospheric turbulence, John Wiley & Sons, 178-182, 159-160.  
 塩谷正雄, 1979: 強風の性質, 開発社, 40-46, 65-69.  
 Townsend, A.A., 1976: The structure of turbulent shear flow, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 53-59.  
 吉野正敏, 1989: 風の世界, 東京大学出版, 4.

堀内基金奨励賞候補者の推薦募集

日本気象学会の堀内基金奨励賞は、気象学の境界・周辺及び未開拓の分野における調査・研究・著述等により気象学及び気象技術の向上に寄与しているものに贈られる賞です。これまでに過去2回（4件、5名）の顕彰が行なわれ、平成2年度はその3回目に当たります。

堀内基金奨励賞候補者推薦委員会は同賞受賞者選定規定に基づき、候補者を理事会に推薦します。

つきましてはこの規定の趣旨に沿う最も適切な候補者を選定するための参考資料として、下記のとおりひろく会員からの推薦を募りますので御協力をお願い申し上げます。用紙はなるべくB5版横書きを希望します。

平成2年4月28日(土)

2. 宛 先

〒100 東京都千代田区大手町 1-3-4  
 気象庁内, 日本気象学会  
 堀内基金奨励賞候補者推薦委員会

3. 推薦書記入事項

- (a) 候補者所属氏名
- (b) 推薦する業績
- (c) 推薦理由 (主たる論文リストを含む)
- (d) 推薦者所属氏名印

日本気象学会堀内基金奨励賞候補者推薦委員会  
 廣田 勇 (担当理事), 駒林 誠, 田中正之,  
 深尾昌一郎, 松野太郎, 山形俊男

記

1. 推薦期限