

## 余部峡谷における局地的強風の性状について

樋口 宗彦・山田 道夫・光田 寧

### CHARACTERISTICS OF LOCAL STRONG WIND IN AMARUBE AREA

By Munehiko HIGUCHI, Michio YAMADA and Yasushi MITSUTA

#### Synopsis

Characteristics of local strong wind in Amarube area were studied from the results of a wind survey for three years in this area. The topography of this area is a deep gorge flowing out to Japan Sea crossing a small mountain range parallel to the coastal line. Wind direction in the gorge is forced towards the parallel to the center line from the general wind. Wind coming into the gorge straightly parallel to the center line from the sea is strengthened by the topography. The wind flowing into the gorge with a little angle from the center line shows large intensity of turbulence. And power spectrum of wind in such a case shows wide energy peak.

#### 1. は じ め に

複雑地形上の強風の性質に関する一連の研究の一つとして JR 余部橋梁付近における風の特性に関する調査を行った。兵庫県北部日本海沿岸にあるこの橋梁では 1986 年 12 月に列車が風によって転落するという事故が発生し、事故調査<sup>1)</sup>の後にさらに詳しい風の調査の必要が認められた。深い谷が海岸線から直角に延びているという特殊な地形のため、この谷に吹き込む風が強化されるということが考えられたが、これは地形による風の変形についてのシミュレーションによっても認められた<sup>2)3)</sup>。また風の乱れを調べるために新しいスペクトル解析法を用いることも試みられたが、はっきりした結果は得られなかった。本報では橋梁上に取り付けられた風速計による数年間にわたる観測の結果についての解析結果を述べる。

#### 2. 地形と観測方法

兵庫県北部の海岸には山が海に迫っているが、余部峡谷はこの山を横切って南北に流れており、両岸は 300 m 程度の山でその間を巾 300 m ほどの峡谷が南北に延びている。その地形は Fig. 1 に示すとおりである。この峡谷の北側の出口に近いところを高さ 40 m ぐらいで JR 橋梁が谷を横断している。橋梁の渡る部分の谷の断面は Fig. 2 のとおりで、橋梁上の図に示した 4 ケ所に風速計が取り付けられている。A, B および C は運転用の 3 杯型風速計で福知山まで FM 信号で伝送された後、1 Hz でデジタル化され 20 m/s 以上の瞬間風速が見られた強風時のみ記録が、6 時間分フロッピーディスクに残される。また S は 3 次元超音波風速計で、こちらの記録は瞬間風速が 14 m/s 以上となった場合にその 1 時間前から 2 時間後までの記録が現地で 1 Hz でデジタル化されフロッピーディスクに残される。

超音波風速計は 1988 年 8 月下旬から 2 年 3 月ほどの間に延べ約 2000 時間分のデータが取得されており、風杯風速計については 1988 年 5 月から約 2 年半に約 840 時間分のデータが得られている。この間観測さ

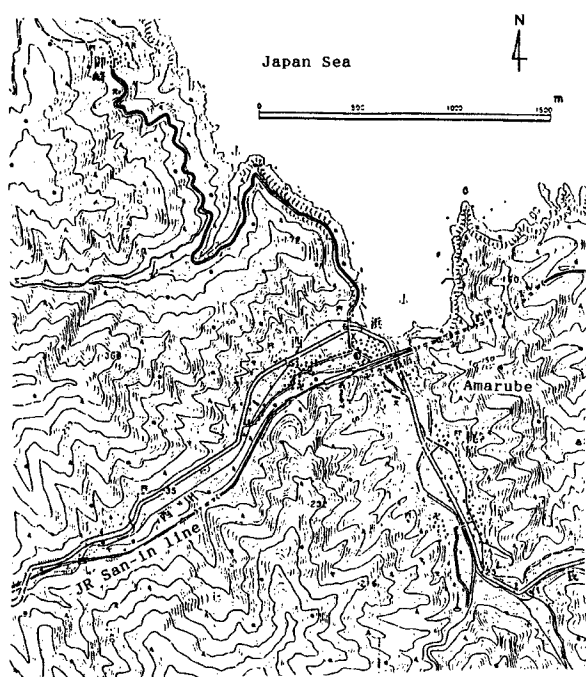


Fig. 1. Topography of Amarube Area.

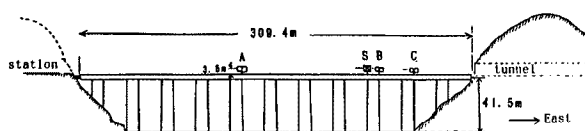


Fig. 2. Distribution of anemometer on the Amarube bridge.

布するがこれは瞬間風速が 14 m/s 以上になった時点の前 1 時間、後 2 時間の記録が得られており、その全ての解析を行った結果によるもので、全時間を考えると風の弱いところにはもっと点が存在するはずである。

この図からも明らかなように、強い風の吹くのは北を中心とした  $330^{\circ} \sim 20^{\circ}$  と南南東を中心とした  $140^{\circ} \sim 190^{\circ}$  の 2 つの風向帯に限定されている。そして強風の約 80% は北寄り、20% は南寄りの風である。この方向は丁度谷の走向と一致するものであり、谷の中の強風は谷筋に平行なものだけしか吹かないということになる。これはこの谷の地形のため北寄りの風は

れた最大風速は 1988 年 11 月 18 日の 30.0 m/s であり超音波風速計による最大瞬間風速は 1990 年 6 月 9 日の 39 m/s であった。また瞬間最大 20 m/s を越えた日は 128 日に達した。これは全期間の 15% ぐらいに当たる。

この他に湖山駅に風向風速計を参考用に設置し、また気象庁のアメダスの記録も必要に応じて入手した。最も近い観測点は東 6 km ほどにある香住 AMeDAS である。

### 3. 余部峡谷における風の特徴

やや風に強い時 (4 m/s 以上) の場合の香住 (1 時間毎の風速記録しかない) と同時の余部での平均風速との対比をした結果が Table 1 である。

両者の回数直線を求めると

$$(\text{余部風速}) = 1.3 \times (\text{香住風速}) + 1.0$$

となり、余部での風速は平均的に見て香住での風速の 1.3 倍ぐらいになっていると言える。

しかしこの統計は風向に関係なく作られたものであるが、余部での風はその風向の発現頻度に非常に大きな偏りがある。余部における S 点での超音波風速計により観測された風向風速 (10 分間平均) の発現頻度分布を作ると Fig. 3 のようになる。風速の低いところにも点が分

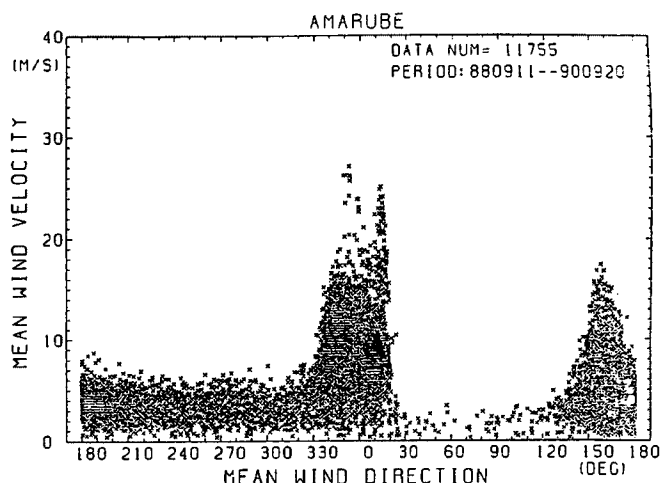


Fig. 3. Distribution of mean wind speed and direction on the bridge (Point S) for the whole observation.

Table 1. Correlation diagram of wind speed at Amarube and Kasumi

| Amarube wind speed (m/s) |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                          | 0 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 30                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 29                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 28                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 27                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 26                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 25                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 24                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 23                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 22                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 21                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 20                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 19                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 18                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | 1  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 17                       | — | —  | —  | —  | 1  | —  | —  | 1  | 1  | 2  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 16                       | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | 1  | 3  | 2  | —  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 15                       | — | —  | —  | —  | —  | 2  | 1  | 2  | 3  | 9  | 7  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 14                       | — | —  | —  | —  | 1  | 1  | —  | 3  | 3  | 11 | 4  | 3  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 13                       | — | 1  | —  | 1  | 1  | —  | 1  | 3  | 12 | 7  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 12                       | — | —  | —  | —  | —  | 4  | 6  | 14 | 13 | 6  | 2  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 11                       | — | —  | 1  | 2  | —  | 4  | 13 | 17 | 9  | 3  | 5  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 10                       | — | —  | 4  | 1  | 4  | 7  | 21 | 19 | 6  | 4  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 9                        | 5 | —  | 6  | 6  | 6  | 18 | 30 | 15 | 1  | 2  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 8                        | — | 2  | 3  | 5  | 23 | 26 | 21 | 8  | 3  | 1  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 7                        | 3 | 3  | 4  | 8  | 20 | 18 | 7  | 3  | —  | 2  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 6                        | 2 | 3  | 11 | 11 | 27 | 14 | 9  | 5  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 5                        | 1 | 4  | 10 | 19 | 26 | 12 | 6  | 4  | 1  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 4                        | 1 | 6  | 31 | 34 | 24 | 28 | 12 | 2  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 3                        | 3 | 14 | 23 | 27 | 22 | 10 | 3  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 2                        | 4 | 10 | 11 | 18 | 8  | 2  | 3  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 1                        | 1 | 12 | 5  | 1  | 1  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| 0                        | — | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  | —  |
| Kasumi wind speed (m/s)  |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                          | 0 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |

330° ~ 20° の範囲の風向に偏向されて谷を流れ、また南寄りの風は 140° ~ 190° の範囲に偏向するものと考えられる。湖山での風を見ると北寄りの強風と南寄りのそれとの比はほぼ上に述べたものと同じであるが、風向の分布はもっと広い範囲に分布する。

このように海岸の外側での北寄りの一般風がこの峡谷の中では風向が狭い風向に偏ることは先のシミュレーション<sup>3)</sup>によっても得られており、その結果によると Fig. 4 のようになり風向が偏ると同時に風速が変化する。そして風速が強くなるのは一般風が 330° から 30° までの範囲で谷の中では風向が 345° ~ 15° の範囲内に偏っている。そして風向が谷の走行と一致する時には 12% 程度増強されることになる。シミュレーションでは実測に比べて風速が小さく出るようなので増強比少しは小さく出ていると言わざるを得ないが定性的には良く観測結果を示している。

この図のように谷の向きと一致した風向では一番強い風が吹いている。これは地形による増強によるものであると考えてよいであろうが、風の乱れの強さを示す乱れの強さ(=風速変動の偏差/平均風速)と風向の関係を先の風速 7 m/s 以上の場合について作ってみると Fig. 5 のような結果が得られた。この図

によると北風の場合は  $50^\circ$  ほどの巾に分布しているがその分布は両側で大きいU字型の分布を示している。一方、南風の時には風の分布の巾が  $30^\circ$  ぐらいで狭い上にあまり風向によらず全体に分布の巾が狭く、北風の時の谷の中央部を通る風向の時とはほぼ一致している。

橋梁は峡谷の北の端に近いので南からの風は谷筋に沿って長く流れて来たもので風の変動巾も狭く、そして風の乱れもそろっている。それに反して北風の場合は風は少し巾が広い範囲で吹き込んで来るが、斜めに吹き込む風は谷の壁に衝突するためか、谷入口の角の部分を通して来るからか、乱れが強くなっていると言えるようである。谷の筋に沿って吹く風は平均風速は大きい乱れは小さく南風と同じような状態になっているようである。これによって峡谷の流れに対する影響が推測できる。

#### 4. 風速変動のスペクトル

このように峡谷の中を流れる気流がその入口近くで少し軸に対して斜めに吹いている時は、軸に平行に吹き込む気流に比して乱れが大きいという結果が得られたが、それならばその乱れの性質がどのように異なっているのかをスペクトル解析によって調べてみた。ここではA点での風杯型風速計の記録10分間

毎をFFTによるパワースペクトルを作り風向、風速の階級毎に全ての場合を平均した結果をFig. 6に示す。横軸は波数  $k=f/u$  によって正規化してある。縦軸は  $kF(k)/\sigma^2$  で両軸とも対数で目盛ってある。図中斜めの点線は  $-2/3$  の勾配を示したもので、慣性小領域においては図のスペクトルはこれに平行になるはずである。

スペクトルは全て波数  $10^{-2}$  程度より大きいところでスペクトル密度が急速に減少しているが、これは風杯型風速計の距離定数が10 m程度であるところから、これぐらいの波数で時定数と周期が一致し、それ以上の波数では動特性のために応答しなくなることによると考えられる。中立な安定の時、風速のスペクトルの山は  $k=0.05/z$  ぐらいの位置に生じると考えられている<sup>4)</sup>ことから、平地ではこの高さで波数  $1.1 \times 10^{-3}$  ぐらいの位置にスペクトルの山が生じるということになる。今回の結果でも波数  $10^{-3}$  ぐらいのところに山があり風速および風向によってあまり差はない。そして峡谷の中心に近いA点では風向が

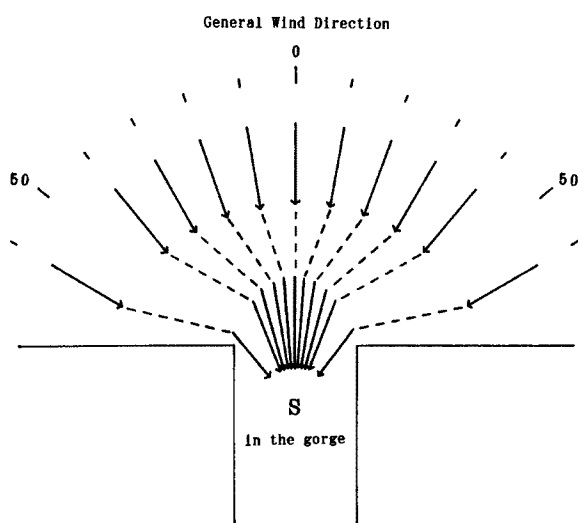


Fig. 4. Wind modification in the gorge.

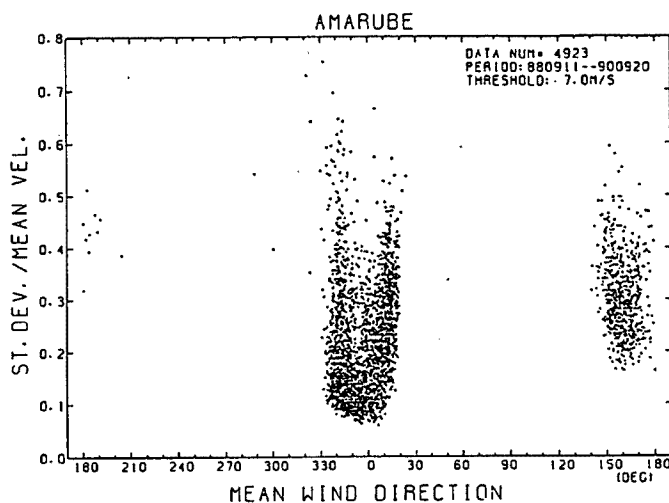


Fig. 5. Distribution of intensity of turbulence with wind direction on the bridge (Point S).

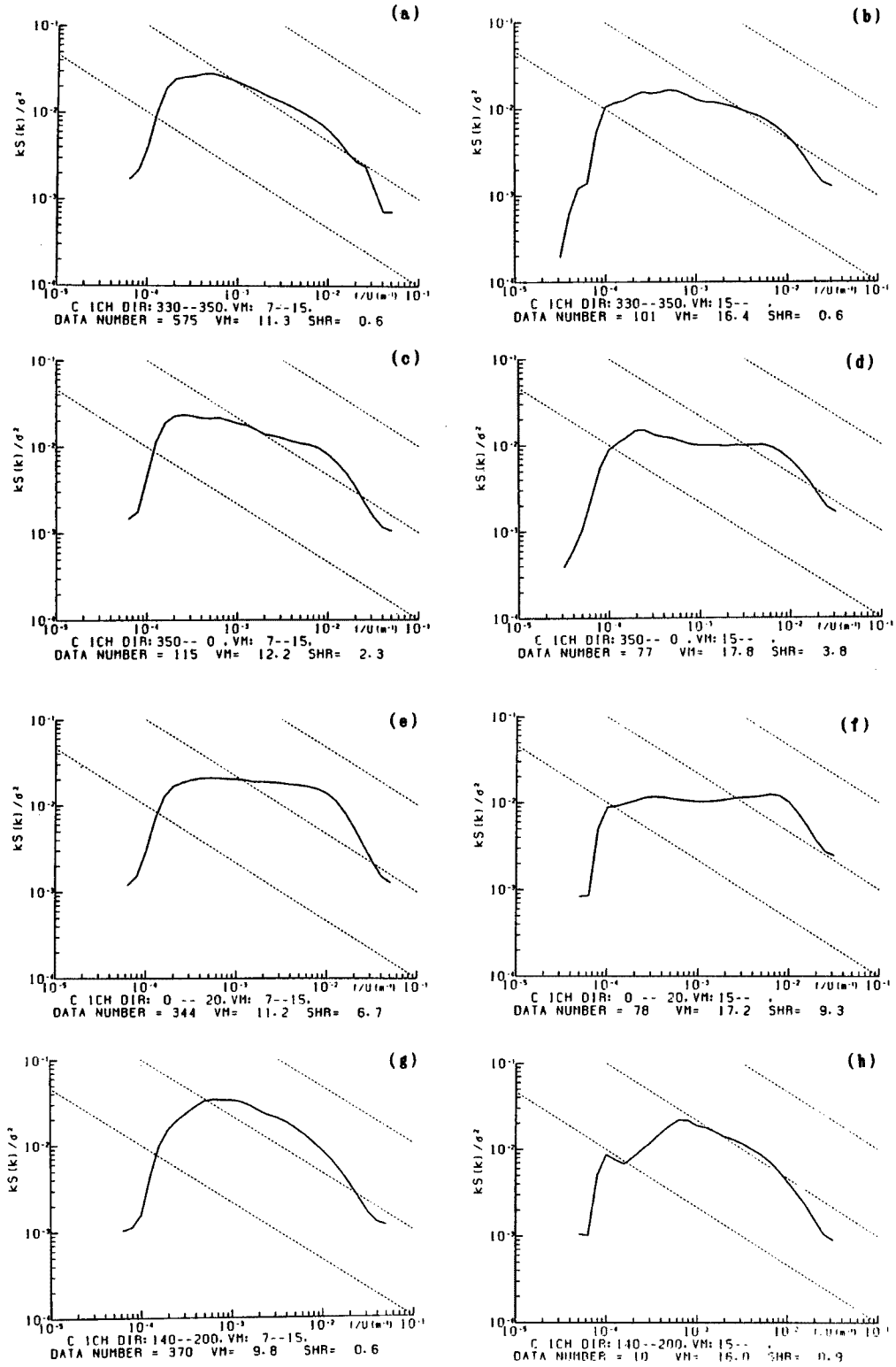


Fig. 6. Power spectra of wind speed at Point A, for wind direction; 330°~350°; a, b, 350°~0°; c, d, 0°~20°, e, f and 140°~200°; g, h, and a, c, e and g are for wind speed 7~15m/s and b, d, f and h are for 15m/s and above.

330° ~ 0° および 140° ~ 200° では乱れの強さにかかわらず山より波数の大きいところの高波数側では  $-2/3$  ぐらいの勾配でスペクトル密度が減少している。すなわち慣性小領域が存在し平地での結果とよく似た結果となっている。しかし、風向が 0° ~ 20° という場合、スペクトル密度の減少が小さく、勾配 0 すなわち  $S_n(u) \propto k^{-1}$  という形のスペクトルになっている部分が山の高周波数側に広がっているように見える。すなわちこの周波数範囲では慣性小領域とは異なった乱れの性質を持っている領域があると言わねばならない。先に行った特定の例についてのウェーブレット解析<sup>5)</sup>においても特異な性質があることが見られたが、観測された全ての資料について計算された今回の結果でもこのような結果を得られたことは意味深い。これは谷の軸より東に偏っている風向の場合に、谷の入口のところの谷の側壁の岩角を廻る時に何らかの乱れが発生しそれがこの波数領域に含まれているとの考えが出来る。その場合慣性小領域はもっと高波数のところのしか見られないことになり、この風速計では検出できない。南風の場合にはこのようなことは見られない。

またこのような型のスペクトルになることによって当然その積分値として得られる乱れの強さも大きくなるから先の点での風向が谷の軸から離れた時乱れの強さが大きくなることはこのようなことが原因になっていると考えてよさそうである。

## 5. 結 語

このようにこの場所のように山脈のある部分を一定の巾の峡谷が直角に切って延びているような場合、谷の中の風は強風時ほとんど谷の軸に並行なものとなり、一般風が斜めに吹くような時でも谷の中では風向は谷の軸に平行な向きに近づく。そして風向が谷の軸に平行に近い時には谷の中の風速は一般風よりも増速される。そして平行に吹く時に乱れの性質は平地の場合に近いが、入口付近で風が少し斜めに吹き込む時は入口の角のところで新しい乱れが発生しているようで、谷の入口に近いところでの風の乱れのスペクトルは波数の  $-1$  乗に比例するような領域が本来慣性小領域 ( $-5/3$  乗となる) と期待される領域の低波数側に生じ、スペクトルの山が広がったように見え、乱れの強さも大きくなるらしいことが見られた。この点についてはさらに詳しい調査が必要であると思われる。

## 謝 辞

この研究は鉄道総合技術研究所の委託により行われたものである。現地観測は全て同研究所によって行われた。

## 参 考 文 献

- 1) 余部事故技術調査委員会：余部事故技術調査委員会報告，鉄道総合技術研究所，1988，p. 75.
- 2) 光田寧・山田道夫・堀口光章・樋口宗彦：小地形での気流の数値的シミュレーションについて，京都大学防災研究所年報，第32号 B-1，京都大学防災研究所，1989，pp. 389-398.
- 3) 佐々木嘉和・樋口宗彦・邊田有理江・光田寧：小地形上の気流のシミュレーションについて，京都大学防災研究所年報，第33号 B-1，京都大学防災研究所，1990，pp. 249-257.
- 4) Panofsky, H. A. and J. A. Dutton: Atmospheric Turbulence, John Wiley & Sons, 1984, p. 189.
- 5) 山田道夫・樋口宗彦・林泰一・光田寧：風速変動のウェーブレット解析，京都大学防災研究所年報，第33号 B-1，京都大学防災研究所，1990，pp. 285-295.