

地表付近における強風の空間構造と運動量輸送に関する研究

川端康弘*・林泰一・佐々浩司**・谷脇和博**
鈴木博人***・加藤亘***・三須弥生***

* 気象庁高知地方气象台
** 高知大学理学部
*** 東日本旅客鉄道

要 旨

地表付近で吹く強風は時々大きな災害をもたらすことがある。この局地的な風の構造を空間的に把握するためには、現地観測を行ってその性質を調べる必要がある。ここでは、超音波風速計を多点に配置した観測に基づく結果を報告する。風向横方向の風速変動の空間相関係数は距離とともに減少し、約200 m程度で相関は無くなる。乱渦の2次元水平構造は、縦横比が 5 : 3 の長円を示す。間欠的に発生する突風は風速の急速な増加と同時に、運動量の大きな下向き輸送を伴っており、上空からの強風の下降を示唆している。

キーワード: 強風, 突風, 空間構造, 相関, 運動量輸送, 超音波風速計

1. はじめに

これまで地表付近における風の乱れに関する研究は数多く行われてきた。強風の性質を知る目的で、構造物の耐風性の観点から風速変動を統計的に調べたものに、塩谷ほか (1970)、岩谷ほか (1976) がある。この研究では大気乱流の空間的性質を調べるため、風速計を直線上に複数配置して観測を行った。構造物の耐風設計においては、風速変動の横方向の関連性を求める必要があり、その方法として、風速変動の相関解析を行った。その結果、各観測点の距離が離れるほど相関は小さくなり、相関係数の空間パターンは風向方向に細長い楕円であることを示した。このパターンは、Hayashi (1991) が風速計を 2 次元的に配置して行った研究においても同様の結果となった。また、風速計を直線上に配置して観測を行ったものに塚本 (1978) がある。この研究では、沖縄県多良間島において、特に台風時における強風の乱れの空間的性質を調べている。風向が測定線と平行な場合には、相関は距離と共に緩やかに減少するが、測定線と直角な場合には、平行な場合と比べ距離と共に急激に相関係数の値は小さくなる結果を示した。

風は時間的にも空間的にも一様でなく、大きく変

動していて、非常にきまぐれな振る舞いをしている。このような現象は、風の変動に対応していると考えられ、空間に風の強い領域と弱い領域があつて、風速が急に变化するような一つの面が存在する。このような現象を突風前線 (Gust Front) と呼び、Hayashi (1991, 1992) はその現象の存在を確認し、構造や性質を実験的に研究した。突風前線は空間的な広がりを持つ現象であるため、風速計を 2 次元的に配置し、風の乱れの微細な構造を調べた。その結果、突風前線の発達は、突風の通過の短い時間において運動量と密接に関係しており、下向き運動量が効果的に輸送されていることを示した。

これまでの研究の中で、風の乱れの空間構造を調べるために行った観測は複数の三杯型風速計を使用したものである。また、急速な風速の立ち上がり、すなわち突風のような間欠的に発生する現象を運動量の鉛直輸送の観点から調べたものは、1 点での 3 次元超音波風速計を用いたものである。そこで、本研究では多点に設置された 3 次元超音波風速計を用いて、風の乱れの空間的性質を調べることにした。また、時々刻々と変化する風速場の中で、突風のような非定常な現象の微細構造と運動量の水平・鉛直輸送について調べ、その突風の拡がりを解析した。

2. 観測および解析の概要

観測は山形県庄内平野において行われた。多点の3次元超音波風速計（KAIJO SAT-530）を鉄道沿線に南北に水平配置し、風速3成分を0.25秒ごとのサンプリング間隔で観測した。観測期間は2006年3月～5月である。

海岸から観測点までの距離は約10 kmである。観測点の西側は平野が広がっており、日本海側からの西風が最上川に沿って吹き込んでくる場となっている。観測地点周辺は畑が広がっており、平坦で一様な場である。本研究で扱う超音波風速計は、地上約5 mの位置に、直線上に配置されているものである。したがって、解析に用いる超音波風速計は9つであり、No.1, No.4, No.6, No.7, No.8, No.9, No.10, No.11, No.12である。No.1からNo.12までの水平距離は1170 mである。観測点の配置はFig.1に示すとおりである。超音波風速計が配置されている測定線は、ほぼ南北に走っており、冬季の季節風の西よりの強風は、この測定線に直角に吹くことになる。

データ解析はFig.2のような手順で行った。0.25秒ごとの各風速計における風速記録について、エラーデータの除去および補間を行った。全ての風速計の記録において、補間を施して修正可能であったものを解析に用いた。ノイズ除去などの不良データの処理は玉川ほか（1991）に従った。超音波風速計の座標変換は塚本ほか（2001）に従って、風向方向の風

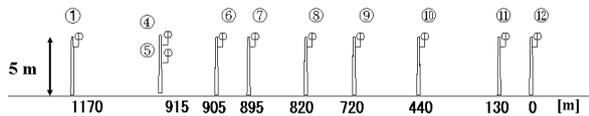


Fig.1 Arrangement of sonic anemometers. Values are the distance [m] from the anemometer ⑫.

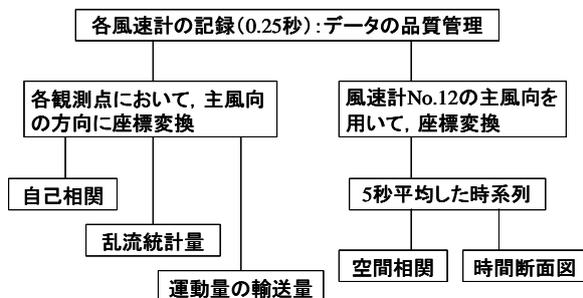


Fig.2 The flowchart of the analysis.

速時系列を作成した。直交座標成分風速（東西風 X 、南北風 Y ）の値を用いて、直交座標から風向方向への座標変換を行うと以下ようになる。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{Y}}{\bar{X}}\right) \quad (1)$$

$$U = X \cos \bar{\theta} + Y \sin \bar{\theta}$$

$$V = -X \sin \bar{\theta} + Y \cos \bar{\theta}$$

ここで、主風向 θ は X 、 Y の平均値から求める。

以上の処理を行った上で、乱流統計量の算出や相関解析、運動量輸送量の評価を行った。ここで、空間相関係数の算出および突風の構造を調べるため時間断面図の作成においては、それぞれの風速記録の時間同時性を確保するため、5秒平均した時系列を作成し、それをもとに解析を進めた。

3. 風速場の統計的性質

3.1 観測期間内の風向・風速分布

風速計No.12において風向別平均風速階級別頻度を計算し、月ごと（3, 4, 5月）の風配図をFig.3に示す。3月において、平均風速10 m/s以上の強風はほとんど西風である。また、最多風向は西北西であり、平均風速の割合は30%となっている。また、3月には平均風速15 m/s以上の時が存在する。その時の風向はほぼ測定線に直角な西風である。これらの強風時の気象場は、日本海側からの季節風が卓越したときである。

一方、4月、5月は東風の頻度が高い。特に、4月において最多風向は東南東であり、割合は28%である。5月の最多風向も東南東であり、23%となっている。平均風速10 m/s以上の強風は3月に比べて、4月、5月とも割合が少なくなっているが、東風においても現われている。平均風速1 m/s以下の静穏な状況は、3月で4.1%、5月で5.2%と、3月の1.7%に比べて割合が多くなっている。

3.2 突風率と乱れの強さ

観測期間中の突風率と乱れの強さが平均風速とどのような関係になっているかを調べた。

突風率 G および乱れの強さ I をそれぞれ以下の式で表す。

$$G = u_{max}/\bar{u} \quad (2)$$

$$I = \sigma_u/\bar{u} \quad (3)$$

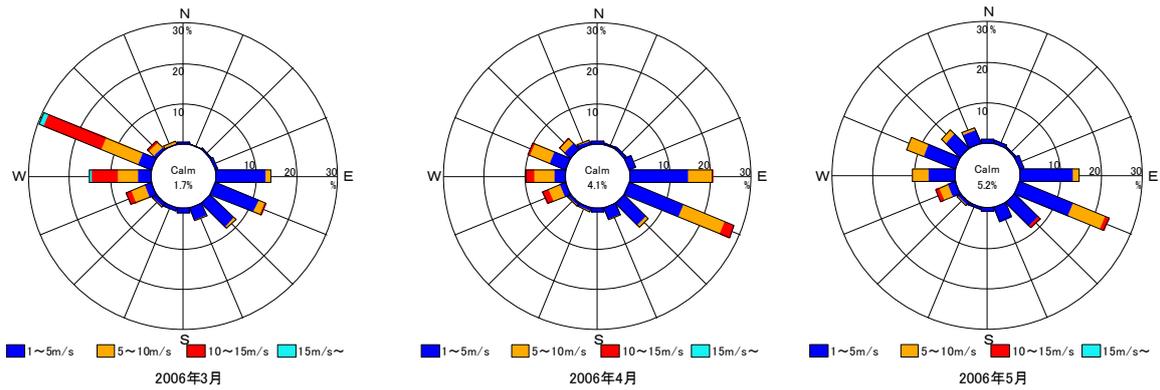


Fig.3 Wind roses of the anemometer No.12 in March, April and May.

ここで、 u_{max} は最大瞬間風速、 \bar{u} は10分間平均風速、 σ_u は風速の標準偏差である。

Fig.4 (a), (b), (c) にそれぞれ風速計No.12の平均風速と突風率の関係、平均風速と乱れの強さの関係、乱れの強さと突風率の関係を示す。Fig.4 (a) からわかるように、平均風速が強くなるに従って突風率は小さくなり、一定の値に近づいていく。平均風速が10 m/sを超える強風時には、突風率は2以下となる。風が弱いときには突風率は大きい方にばらつく。この結果は、沖縄県多良間島で行われた台風観測の結果と似た分布を示す (Mistuta et al., 1989)。多良間島で行われた観測では三杯型風速計およびプロペラ型風速計を用いているため、風速計の応答特性を考慮に入れて、評価時間を1.5秒としている。しかし、本研究では超音波風速計を用いているため、このような風速計の応答特性を考えず、サンプリング間隔0.25秒そのままの値を用いている。Mistuta et al.

(1989) では、平均風速 5 m/s以上では突風率は2以下であるが、本研究では2を超えるようなものも存在する。これは、風速の評価時間が小さいため、最大瞬間風速がより精度よく評価できたためである。

10分間平均風速と乱れの強さの関係を示すFig.4 (b) を見ると、突風率と同様、風速が強くなればなるほど乱れの強さは小さくなる。平均風速が10 m/s以上の強風時には、乱れの強さは0.5以下の値を示している。風速が弱いほど乱れの強さは大きく、平均風速に対する変動が大きいことがわかる。この結果に関しても、高い応答の風速変動が得られたことにより、弱風時も風速変動の標準偏差が大きく評価できたためである。観測地点の最大風速を考える際、次式のように平均風速と風速の標準偏差の倍数で表すことがある。

$$u_{max} = \bar{u} + k\sigma_u \quad (4)$$

ここで、 k はピークファクターと呼ばれているものである。ピークファクターは標準偏差の何倍であるかを示しており、これに平均風速を加えることにより最大風速を見積もることができる。式 (4) を、突風率の式 (2) に代入すると、

$$G = \frac{u_{max}}{\bar{u}} = 1 + k \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (5)$$

となり、突風率を統計的に求めることができる。式 (5) の右辺第二項は、ピークファクターと乱れの強さを掛けたものである。このことから、Fig.4 (c) の乱れの強さと突風率との関係を見てもわかるように、乱れの強さと突風率には多少ばらつきはあるものの、直線的な関係が見てとれる。式 (5) から明らかなように、ピークファクターはグラフの傾きを示すことになる。直線の傾きを求めると2.70となる。Mistuta et al. (1989) が行った、三杯型風速計から求めたピークファクターは、評価時間が短くなるほど大きくなる結果を示している。評価時間が1.5秒では、ピークファクターは2.66であり、本研究のサンプリング間隔0.25秒から求めた値2.70も加えると妥当な結果といえる。突風率や乱れの強さは風速によって変化し、風速が弱いほどこれらの値は増加する。しかし、ピークファクターは風速に関してほとんど変化しないことを示しており、このことは、Mistuta et al. (1989) で述べられていることと一致する。

3.3 強風事例の抽出と大気乱流統計量

風速計No.12の風速記録から強風時を抽出した。本研究では、10分間平均風速10 m/s以上を強風とした。強風が観測されるのは日本海側から吹いてくる西風の場合が多い。また、測定線の東には障害物がある観測点が存在し、その影響を受けないのは西風が吹いたときである。西風(北から時計回りに270度)は、

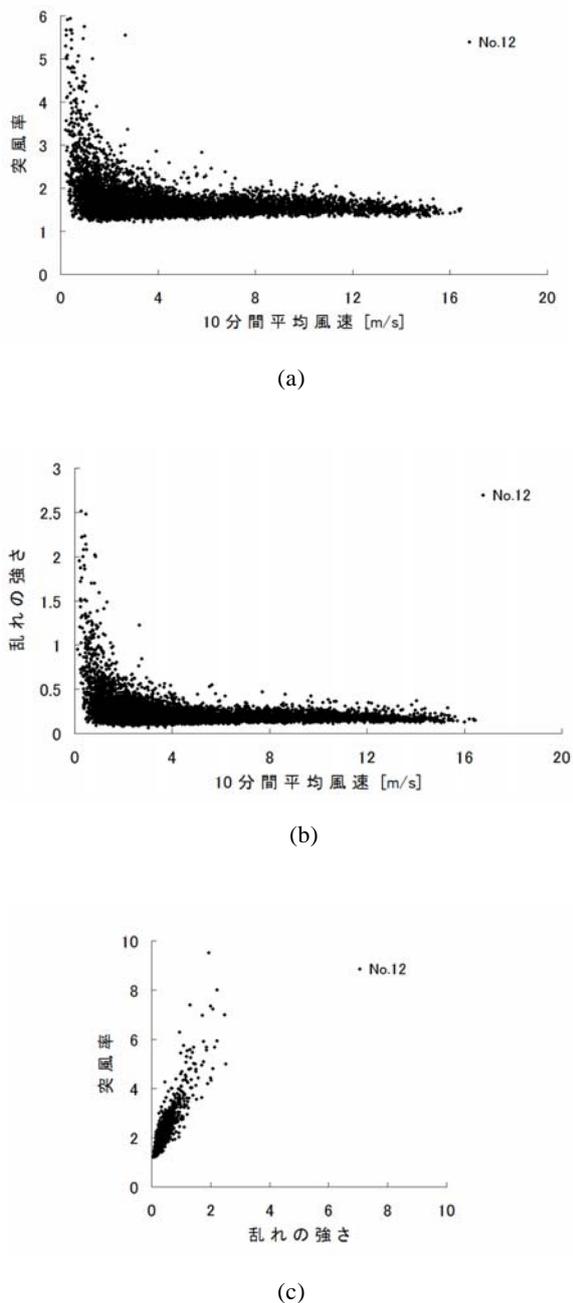


Fig.4 (a) Gust factor as a function of mean wind speed. (b) Intensity of turbulence as a function of mean wind speed. (c) Gust factor as a function of intensity of turbulence.

風速計No.12の平均風向が270度±22.5度の範囲にあるものとする。この観測では気温の測定は行っていないため、大気の熱的な安定度の評価はできないが、風速が10 m/s以上と大きいことから、ほぼ中立状態であると考えられる。

西風時の強風は、観測期間中で500例抽出できた。観測期間中、風速計No.12の10分間平均風速が西風で最も強かった事例は、2006年3月20日 8:50~9:00の10分間である。この時間帯における風速場の統計的特徴を風速計ごとのグラフに表したものがFig.5である。9点の各風速計の風向は平均的には286.20度であり、その標準偏差は3.06度である。このことから、9つの風速計の場所においてほぼ同じ風向から風が吹いていたことがわかる。基準とした風速計No.12の平均風速は16.37 m/sである。10分間平均風速を9点の風速計において平均すると13.11 m/sとなる。最大瞬間風速は各風速計で最も強かったもので24.73 m/sである。突風率は1.42~1.70の範囲にある。乱れの強さは9点の風速計において0.20前後であり、標準偏差は0.03である。このことから、平均的な乱れの程度は一様とみることができる。9点の風速計の歪度を平均すると0.00、尖度は2.78であり、風速の頻度分布の山は、ちょうど平均風速の位置にあり、正規分布よりは平坦である。この結果から、各風速計において風速変

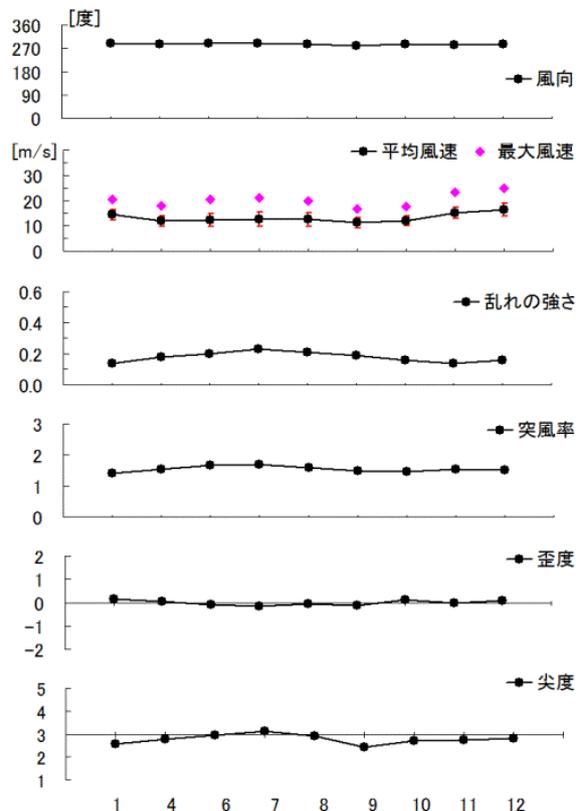


Fig.5 Turbulent statistics every each anemometers.

動に差はなく、頻度分布からも観測点周辺は空間的に一様と考えられる。したがって、風速計No.12を9点の風速計の記録を代表しているものとする。前節の突風率と乱れの強さにおいて、風速計No.12のデータを用いたのはこの理由による。

4. 強風時における大気乱流の時空間構造

複数の超音波風速計が設置された観測点の場が一様であることから、風速計同士の相関を求め、風速変動の空間的広がり を考察した。ある乱渦とすぐ隣の乱渦はほとんど同一の動きをするのに対して、遠くに離れた流体粒子の動きは全く無関係に見える。どの程度の範囲まで、どの程度の関係があるかを測る尺度となるものが時空間相関係数である。

解析に用いるデータは、前章で述べた風速計No.12の10分間平均風速が10 m/s以上の強風で、さらに西風であるものとする。日本海側から吹く西風を対象とするので、測定線にほぼ直角に吹いてくることになる。

4.1 時空間相関係数

風向方向 (x) と風向横方向、すなわち風向直角方向 (y) の2つの軸をもつような直交座標系を考える。原点Aにおける風速を u_A 、点B (ξ, η) における風速を u_B とすると、時空間相関係数 R_{AB} は次式で表される。

$$R_{AB}(\xi, \eta, \tau) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_B(t + \tau)}}{\sigma_{uA} \cdot \sigma_{uB}} \quad (6)$$

ここで、 τ は時間遅れ、 σ_{uA} 、 σ_{uB} は各々 u_A 、 u_B の標準偏差である。

風の乱れの空間的な広がり を示すパラメータとして、乱れのスケールがある。これは乱渦の平均的な大きさを表す尺度として用い、方向により異なる値をもつ。相関係数 R を、その変数である時間遅れまたは距離差で積分して求めるもので、相関係数が1に相当する時間または距離を表すことになる。 x 方向の乱れのスケールを $L(x)$ は次式で表現される。

$$L(x) = \int_0^{\infty} R(x) dx \quad (7)$$

時間スケール $T(\tau)$ も同様に求められる。自己相関係数から求めた積分スケールは、平均的な渦が観測点を通過する時間を示す。または、自分自身の渦

で高い相関をもつ長さ と考えることもでき、渦の時間的な広がり を示す。一方、空間相関係数から求めた積分スケールは、平均的な乱渦の大きさを示す。これは、同じ速度の空気の固まりのイメージとして考えることができる。乱れの積分スケールは、相関係数の実測値をもとにして、最小二乗法を用いて指数関数近似することにより求めた。

4.2 自己相関

強風西風における自己相関を調べた。自己相関は0.25秒ごとの風速記録を用いて計算した。9点の風速計の記録から求めた自己相関係数の平均とその標準偏差を求めたものがFig.6である。時間遅れが大きくなるほど相関係数は小さくなり、各観測点の相関係数にはばらつきがあるが、時間遅れが60秒で相関係数の値は0になる。時間遅れが5秒以上になると0.07程度の標準偏差を示す。

また、この測定結果から乱れの積分スケールを求めると、13.5秒となる。

4.3 空間相関

ここでは、測線上の各観測点の5秒平均した風速変動の値から、主風速 u の空間相関係数を求めた。この場合、同じ水平距離に対していくつもの観測点の組み合わせが可能であるが、ここではそのすべての組み合わせについて求める。強風西風の場合について平均を行い、距離ごとの平均値とその標準偏差をFig.7に示す。風向が西風の場合を考えているので、測定線に直角、つまり風向横方向の相関係数を求めることになる。Fig.7から明らかのように、相関係数は距離とともに減少していく。200 mほどの距離まで急激に相関係数の値は小さくなり、それ以上では距離による変化はあまり見られない。また、個々のばらつきが大きく、エラーバーで示した標準偏差は水平距離が100 m以上では0.18~0.20となっている。

次に、風速変動の関連性の大きさを量的に示す尺度として乱れの積分スケールを求めた。強風西風における積分スケールを求めると82.0 mとなる。この結果は、Hayashi (1990) が三杯型風速計を用いて、評価時間1.5秒として求めた結果である25 mよりも大きな値となっている。Hayashi (1990) の研究によれば、評価時間を大きくすると積分スケールも大きくなる結果を示している。評価時間が10秒であれば約35 m、30秒であれば約50 m、60秒であれば約70 m という結果を出している。評価時間を大きくすれば、より大きな渦を評価していることになるので、渦の積分スケールも大きくなると考えられる。

北風、つまり風向方向の空間相関も求めることができるが、観測期間中に測定線方向に強風が吹く状

況というのは、エラーデータの影響もあってサンプル数が少ない。そのため本研究では得られていないが、Shiotani (1976) は、風向横方向と風向方向の空間相関を求めている。地表面近くで観測した風速記録から、風向方向の相関の方が、それと直角方向の相関よりも大きい結果となっている。すなわち、流れの方向に乱流渦が伸びていることを示している。また、乱渦の空間的な広がりや形状について、2次元的な相関係数の空間パターンを求めており、相関係数の等値線は風向方向に細長い楕円となる結果を示している。

風向方向の相関係数は、定常な乱れの場合の統計的特性が下流方向に急激な変化はせず、渦がそのまま一定速度 u で下流に移流されるというTaylorの凍結乱流の仮説を用いることによって、一地点においても求めることができる。自己相関係数から求めた乱れの積分スケールに、平均風速を掛けて風向方向のスケールを近似する。自己相関係数から求めた積分スケールは13.5秒である。これに、風速計No.1～

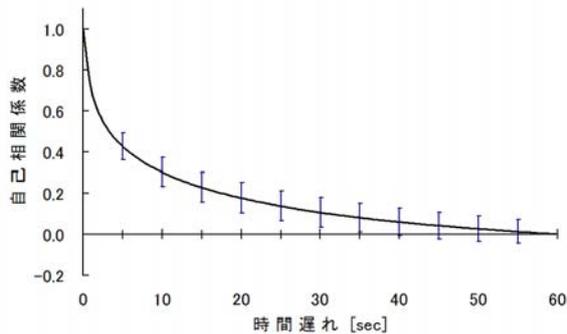


Fig.6 Averaged auto correlation coefficient with standard deviation values.

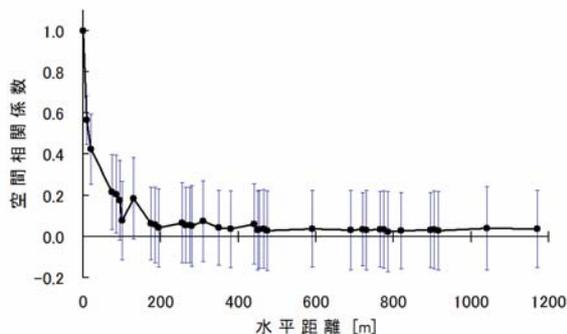


Fig.7 Averaged space correlation coefficient with standard deviation on 9 observation points.

No.12における西風強風時の平均風速10.5 m/sを掛けると、風向方向の積分スケールは142.3 mとなる。また、風向直角方向の積分スケールは、前節より82.0 mである。風向方向を x 、風向横方向を y とすると、スケールは、 $x:y = 142.3:82.0 \approx 5:3$ となる。相関係数の分布の形状は、風向方向に伸びた楕円に近い形をしていることが報告されており (Shiotani, 1976)、本研究の日本海側における強風時の乱渦の構造は、縦横比が $5:3$ の楕円を示す。

Hayashi (1991) は2次元的に配置した風速計の記録から、 $x:y = 75\text{ m}:25\text{ m} \approx 3:1$ という結果を得ており、空間相関係数の水平分布が楕円になるような表現式を導いている。また、Naito et al. (1974) は海面近くの風速変動を観測し、渦の三次元構造を求めている。乱渦のスケールは、 $x:y:z = 201\text{ m}:48\text{ m}:37\text{ m} \approx 11:3:2$ という結果を得ている。

5. 突風の構造と運動量輸送過程

時々刻々と変化する風速の中には、突風のような間欠的に風速が増加する時がある。ここでは、非定常な現象を、風の乱れの組織的な構造を持つ微細構造を調べた。

また、突風などの現象が間欠的に発生する時には、運動量の輸送は大きな輸送となっている (Hayashi, 1992)。運動量の時系列で見ると、スパイク上の変動として見ることができる。本研究では、風速が急に増加する現象を時間断面図で示し、その構造について述べる。次に、運動量輸送の間欠性について、条件付採集法を用いて解析した結果を述べる。

5.1 突風の構造

突風の構造が空間的にどのくらい広がっているかを調べるために、時間断面図を作成した。ここで突風とは、9点の風速の時系列から、急な風速の増加が存在したものとし、これを目視で判断した。Fig.8は、西風場の事例である。

風速 u について見てみると、風速の強い大きい領域は、水平距離0~400 mと700~1200 mの範囲にあり、風速が10 m/s以上の強くなる時間帯は2つの領域で異なっている。前者(距離0~400 m)は150秒から風速が15 m/s以上となり、200秒まで続いている。15 m/s以上の強風の継続時間は50秒である。風速10 m/s以上の領域はそれより後の500秒まで続いているが、その幅は徐々に小さくなっている。最初風速が5 m/sであったものが、150秒の間に10 m/s以上の風速になっている。この一連の風速の変化を見てみると、風速の立ち上がりは急であるが、その後は徐々に減少していつている。これは、Hayashi (1992) が行った

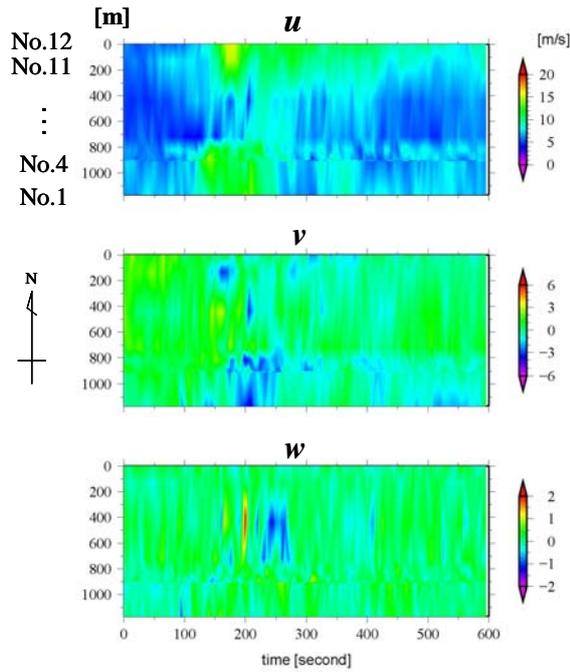


Fig.8 Time section of u , v , w .

突風前線の観測と似た様子を示している。一方、後者（距離700～1200 m）に関しては120秒から風速が10 m/s以上となり、その領域は250秒まで続いている。風速10 m/s以上の強風の継続時間は130秒となっている。この領域では風速13 m/s程度の風がほぼ同じ風速で130秒間吹いている。特に風速計No.4, No.6において風速の立ち上がり特に大きく、前者よりも急である。前者と後者の突風は異なる形状をしていたものと思われる。

5.2 運動量の輸送過程の分類

条件付採集法とは、注目しているある顕著な現象が間欠的に発生するときに、一連の変動の記録からその現象のみを取り出すための方法である。この方法をHayashi (1992) は運動量の輸送過程に応用して、地表面近くの運動量の下向き輸送は、次に示すsweepによるものが大きいことを観測で確かめた。本研究ではこの運動量の輸送過程を、急に風速が増加する突風現象の時について調べた。

運動量の輸送の形態を、4つの事象に分類し、その各事象が担っている運動量の輸送量 $u'w'$ を評価する。瞬間瞬間の $u'w'$ を、 (u', w') 平面において、 u' と w' の符号によって次のように4つの事象分類する。

- i=1) $u' > 0, w' > 0$: outward interaction
- i=2) $u' < 0, w' > 0$: ejection

- i=3) $u' < 0, w' < 0$: inward interaction
- i=4) $u' > 0, w' < 0$: sweep

さらに、

$$|u'w'| = H \left| \overline{u'w'} \right| \quad (8)$$

であるような曲線で区切られるような原点を中心とする領域をholeとする。バー ($\overline{\quad}$) は時間平均を表し、 H は定数でhole sizeという。この条件を加えて、瞬間瞬間の $u'w'$ について区分けをして、発生頻度と平均輸送量に対する寄与を H の関数として求める。

風速計No.12における風速変動 u' , v' , w' および運動量 $u'v'$, $u'w'$, $v'w'$ の時系列をFig.9に示す。風速変動 u' を見てみると、120秒あたりから風速の急速な増加が認められる。風速の立ち上がり前後において、風速変動の差は12 m/sもあり、60秒間の間に急速な変化となっている。風速変動の積である運動量について見てみると、風速変動が最大になった領域で、運動量の変化が大きいことがわかる。この時に運動量が活発に輸送されていることを示している。 $u'v'$ に関しては -15 (m/s)^2 , $u'w'$ に関しては -8 (m/s)^2 となっており、横方向の輸送が大きい。 $v'w'$ には顕著な輸送は見られない。特に、 $u'w'$ は風速変動 u' のピークの時に大きな負の値を示しており、運動量が下向きに輸送されている。

Fig.10は運動量 $u'w'$ の輸送過程において、瞬間瞬間の運動量輸送がどの事象によって発生しているか（指標関数）を示したものである。上から $H = 0$, $H = 5$, $H = 10$, $H = 15$ を表し、hole size別の数字は各象限を表している（1 : outward interaction, 2 : ejection, 3 : inward interaction, 4 : sweep）。図からわかるようにhole sizeを大きくしていくと、どの事象の発生頻度も少なくなる。しかし、 $H = 15$ において、残っているものはsweepによるものが多い。また、その時間帯は風速変動 u' の最大値周辺である。つまり、突風が吹いているような時には、当然風速変動が大きくなる。そして、その時には運動量輸送 $u'w'$ も活発になると同時に、その寄与はsweepによるものが大きい。このことは上層の速度の大きい領域が、下層に向かって降りてくる現象を示している。

また、突風が通過した時、すなわち風速のピークの前後にどれくらい運動量が輸送されているかを定量的に調べる。9点におけるすべての風速計において、運動量の鉛直輸送 $u'w'$ を考える。Fig.11は9点における各風速計の風速変動 u' がピークの時の運動量 $u'w'$ の平均的なトレースを示す。すなわち、それぞ

れの風速変動 u' のピークがちょうど原点になるようにして、その前後10秒についてのトレースを重ね合わせて平均したものである。運動量 $u'w'$ の値は変動しているが、風速変動 u' のピークの時には、平均的に運動量 $u'w'$ は負である。 u' の極大の前後0.5秒ずつ計1秒間の $u'w'$ の平均値は -2.53 (m/s)^2 である。この値は10分間の $u'w'$ の平均値である -0.24 (m/s)^2 と比較すると10.59倍もある。ここで求めた風速変動のピークを中心とする1秒間は、時間の割合としては、解析期間10分間のわずか0.17%にすぎない。しかし、この運動量の輸送に対する寄与は、10分間の総輸送量の2.21%を占める。したがって、突風時の運動量の鉛直輸送量を評価した結果、輸送が効率的に行われていることを示している。

6. おわりに

複数の超音波風速計を用いて風を観測し、強風の

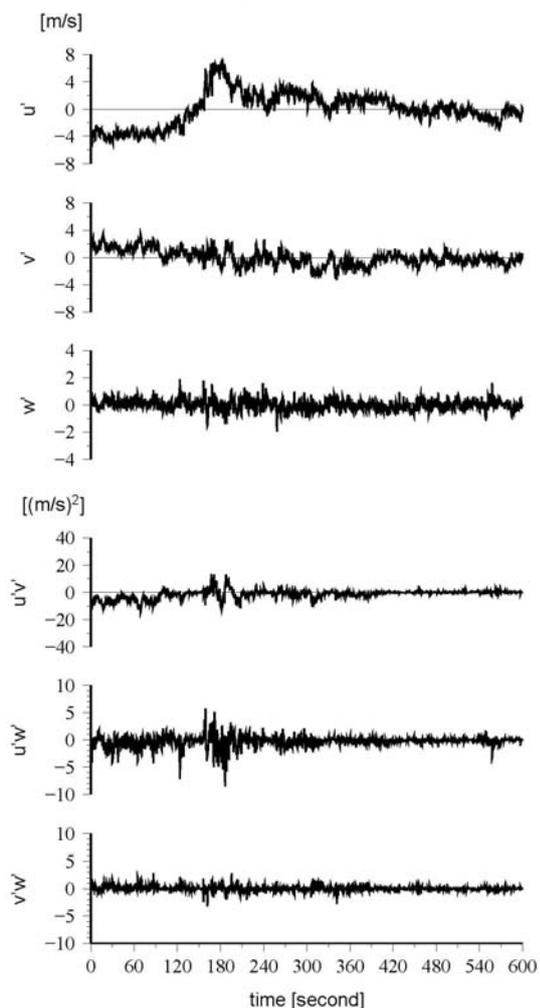


Fig.9 Time series of wind fluctuations and momentum.

性質および風速の急速な増加が認められる突風の微細構造を調べた。

観測点の場が統計的に一様であっても、時々刻々で見ると風の吹き方は場所によって異なる。複数の風速計から細かな突風の構造を捉えることができた。突風のような間欠的に発生する現象において、どの方向に運動量の輸送が卓越しているか調べるため、運動量を4つの輸送過程に分類した。その結果、風速のピークの時、鉛直輸送 ($u'w'$) は大きな下向き輸送となっていた。輸送過程は sweep による寄与が大きく、上層の強風が下層に吹き降りてきたものと考えられる。また、突風の通過時には、効率的に運動量が輸送されていた。このことは突風のメカニズムに大きな役割を果たしていると思われる。

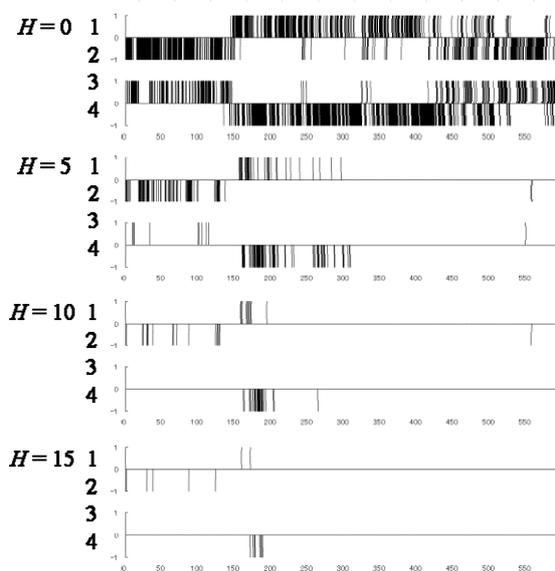


Fig.10 Time series of indicator function.

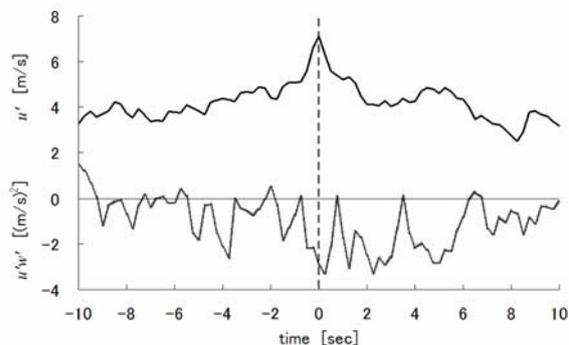


Fig.11 Averaged trace of u' and $u'w'$ in the peak gust.

参考文献

- 岩谷祥美・塩谷正雄・黒羽罔夫 (1976) : 大気乱流の風向に沿った方向の空間的性質について, 日本大学生産工学部報告, 9-2, 121-126.
- 佐々浩司・谷脇和博・林泰一・川端康弘・鈴木博人・加藤亘・三須弥生 (2008) : 2007年12月2日の酒田市突風災害発生時に観測されたガストフロント, 第20回風工学シンポジウム論文集, 181-186.
- 塩谷正雄・岩谷祥美 (1970) : 強風時における変動風速の水平方向の相関, 日本大学生産工学部報告, 3-1, 117-129.
- 玉川一郎・今木和裕・光田寧 (1991) : 新しい乱流輸送観測装置について, 京都大学防災研究所年報, 34B-1, 19-27.
- 塚本修 (1978) : 強風時における風速変動の空間相関について, 京都大学防災研究所年報, 21B-1, 427-436.
- 塚本修・文字信貴 (2001) : 地表面フラックス測定法, 第3章, 乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱(水蒸気)のフラックス測定, 気象研究ノート, (199), 日本気象学会, 19-55.
- Hayashi, T. (1991) : The horizontal distribution of correlation coefficients in the atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 55, 125-140.
- Hayashi, T. (1992) : Gust and downward momentum transport in the atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 58, 33-49.
- Mitsuta, Y. (1962) : Gust factor and analysis time of gust, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 40, 242-244.
- Mitsuta, Y. (1967) : Some results of direct measurement of momentum flux in the atmospheric boundary layer by sonic anemometer, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 46, 29-35.
- Mitsuta, Y. and Tsukamoto, O. (1989) : Studies on spatial structure of wind gust, *Journal of Applied Meteorology*, 28, 1155-1160.
- Naito, G. (1982) : Three-dimensional space structure of turbulent eddies in the atmospheric boundary layer above the ocean, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60, 1299-1315.
- Naito, G. and Kondo, J. (1974) : Spatial structure of fluctuating components of the horizontal wind speed above the ocean, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 52, 391-399.
- Shiotani, M. and Iwatani, Y. (1971) : Correlations of wind velocities in relation to the gust loadings, *Proceedings 3rd International Conference : Wind effects on buildings and structures*, September, Tokyo, 1970, 57-67.
- Shiotani, M. and Iwatani, Y. (1976) : Horizontal space correlations of velocity fluctuations during strong wind, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 54, 59-67.
- Shiotani, M., Iwatani, Y. and Kuroha, K. (1978) : Magnitude and horizontal correlations of vertical velocities in high winds, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 56, 35-42.

Study of the Spatial Structure of High Winds and the Momentum Transport near the Surface

Yasuhiro KAWABATA*, Taiichi HAYASHI, Koji SASSA**, Kazuhiro TANIWAKI**,
Hiroto SUZUKI***, Wataru KATO*** and Yayoi MISU***

* Kochi Local Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency

** Faculty of Science, Kochi University

*** East Japan Railway Company

Synopsis

The spatial structures of the high winds were investigated based on the results of the intensive observation near the ground. Several sonic anemometers were installed in the horizontal line. Spatial correlation was evaluated up to 200 m along wind lateral direction and the shape of the turbulent eddy was similar to the ellipse with the ratio of streamwise and lateral scale of 5 to 3. The gust showed the sudden increase of wind speed and the downward transport of the vertical momentum was detected simultaneously in short duration.

Keywords: high wind, gust, spatial structure, correlation, momentum transport, sonic anemometer