

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651208

研究課題名(和文) 上空の強風層の降下による地上での災害の発生とその予測に関する研究

研究課題名(英文) Study for the occurrence and forecasting of strong wind disasters at the surface induced by the downward movement of the high-speed layer in the higher levels

研究代表者

堀口 光章 (Horiguchi, Mitsuaki)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：60190253

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：上空の強風層の降下により地上で強い風が吹く現象を解析するため、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーで観測を行った。その結果、中立に近い状態で、大きな規模の乱流構造が顕著に現れ、それに伴って地表近くでも強い風が吹く場合があることが示された。また、日中の不安定時でも大きな規模の上昇流の構造の通過後に地表近くで強い風が吹く現象を観測から見出すことができた。これらは大きな規模の構造によって、上空の強風層の運動量が下方へ輸送されたことによるものであり、荒天時にも同じような現象が起きる可能性があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to analyze the phenomena in which strong winds at the surface are induced by the downward movement of the high-speed layer in the higher levels, observations have been made in the Ujigawa Open Laboratory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. As a result, in the near-neutral conditions, sometimes large-scale turbulence structures predominantly occur and corresponding strong winds blow at the surface. Strong winds at the surface were also observed after the passage of the ascending large-scale structure in the unstable conditions of the daytime. These phenomena are due to the downward transport of momentum from the high-speed layer in the higher levels. It is likely that similar phenomena are possible in the severe weather.

研究分野：気象学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，自然災害科学

キーワード：強風災害 大気境界層 乱流構造 運動量輸送

1. 研究開始当初の背景

中立な大気境界層の上方に位置している大きな規模の乱流構造が地表面に向かって侵入してくることにより地上近くで大きな乱れを引き起こすことが示唆されている。また、日中に不安定になった大気境界層は鉛直方向にかき乱され、風速が強い上空の空気が下降し、地上近くでも風速が強くなる。このように乱流構造や大気境界層の鉛直構造の変化により地上で強風がもたらされる。

上記のような原因による地上での強風は、長く継続し、広範囲にわたり、その影響は大きなものとなる。しかし、乱流から大きな気象場まで、多様なスケールの現象の相互作用によって生じ、その発生、変化の機構が明らかにされていないため、この現象の予測は困難である。

2. 研究の目的

災害に結びつく地上における強風は、以下のような要因による上空の強風層の降下により引き起こされる場合がある。

- ・安定層の崩壊、あるいは混合層の発達など大気境界層構造の変化による上空の強風層の地上付近への侵入
- ・大気境界層の乱流構造、降水、寒気の下降に伴う上空の強風層の降下

この研究では、観測とデータ解析により、地上での強風の出現状況と気象条件を調べ、その発生機構を解明し、それを予測する手法の開発を目指す。

3. 研究の方法

観測とデータ解析により地上での強風をもたらず気象条件とその機構を調べる。観測については、京都大学防災研究所の宇治川オープンラボラトリー（京都市郊外）にある高さ 55m の観測鉄塔の超音波風速温度計に加え、地上 200m までの風速 3 成分を測定できるドップラーライダーを設置して、地上から大気境界層にかけて風速と運動量輸送についての観測を行う。

4. 研究成果

(1) 中立に近い条件での観測

まず、1 回目の観測は、2012 年 12 月から 2013 年 3 月の冬季から春季にかけての時期に行われ、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー（京都市伏見区）に建てられている気象観測鉄塔（高さ 55 m）の 2 高度（40 m と 25 m）に設置されている超音波風速温度計（カイジョー製、DAT-600）（以降、超音波風速計と呼ぶ）を使用した。観測データについては、風速 3 成分と温度の変動がサンプリング周波数 10 Hz で記録された。また、超音波風速計は、主風向限定型のプローブ（TR-61A）を使用していて、北方向にそのプローブが向けられている。風が北方面から吹く際にプローブの支柱や鉄塔の塔体の影響が少なく良好なデータが得られるので、解析

例としては 40 m での平均風向（30 分の平均化時間で評価）が真北から 60 度以内である状態が継続した場合を選んでいる。

大気境界層での乱流の条件を分類するのに重要な接地層での不安定度の指標 z/L (z は測定高度、 L は Obukhov の長さ) は、地表の粗度物体による影響が比較的小さい高さ 40 m における測定から評価する。この不安定度の指標 z/L の値（絶対値）は、近似的に浮力による乱流生成率とシアーによる乱流生成率の比に相当し、浮力による寄与が小さい場合（中立に近い条件）にはその値が 0 に近くなる。また熱フラックスが上向きになる不安定成層時にはマイナスの値となる。

観測データは、30 分間（1 パートとする）ごとに乱流統計量を求め解析に使用する。ここでは、中立に近い状態、基準として z/L の大きさが 0.2 未満である条件が 7 パート（3 時間 30 分）継続した観測例（全部で 12 例）についての結果を示す。今回解析した観測例では、7 パートの平均として中立に近いものの、やや不安定寄りの値 ($z/L < 0$) を示す例が 6 例見られる。水平風速は $3.5 \sim 6.2 \text{ m s}^{-1}$ の範囲であり、観測例間で大きな違いはない。

図 1 は、2012 年 12 月 26 日 18 時から 21 時 30 分における例について、その始めの 30 分間における平均流方向風速成分 u の時間変化である。なお、ここでの風速成分 u は、高さ 40 m における（水平面内）平均流方向に取った風速成分であり、高さ 25 m でも同じ方向に取っている。

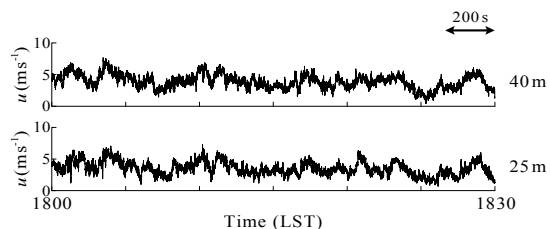


図 1 各高度超音波風速計による平均流方向風速成分 u の時間変化

図 1 によれば、小さな規模の乱れに重なって、100 ~ 200 秒程度の時間スケールを持った比較的大きな規模の風速変動（強風域）が現れている。またそのような風速変動は上下の観測点間で良く対応しており、鉛直方向にも大きな広がりを持っていることが分かる。

同じ時間帯での鉛直方向風速成分 w を見ると、大きな規模の強風域の直前の時間に比較的大きな時間スケールを持った弱風域が存在し、そこでは上向きの鉛直風速となっている。大きな規模の（水平方向の）風速変動と関連して鉛直風速の変動が存在し、運動量輸送に寄与していることが分かる。

不規則に現れる風速変動（乱流構造）を抽出するために Mexican Hat 関数を用いた連続ウェーブレット変換を平均流方向風速成分 u に対して行う。さらに、不規則に現れる変動

のスケール分布を調べるために、ウェーブレット変換によるウェーブレット分散スペクトルを作成する。このウェーブレット変換による解析においては、変動のスケールに対応する値として「時間スケール」が使用され、Mexican Hat 函数の場合にはその中心前後の、ウェーブレット函数の値がプラスの範囲の長さに相当する。

2012年12月26日18時から21時30分における例の各高度の風速成分 u についてウェーブレット分散スペクトルを調べると、100秒以上の時間スケールを持った大きな乱流構造が顕著に存在することが確かめられる(図2)。この例で、高さ40mの風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルのピーク(解析している全時間スケールでの最大)は204秒の時間スケールに位置している。なお、平均の u (3.4 m s^{-1}) の値から換算すると、およそ690mの空間スケールに対応している。

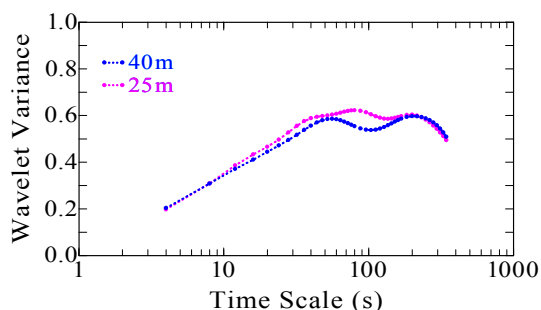


図2 各高度の超音波風速計による平均流方向風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトル

高さ25mでの風速成分 u についてのウェーブレット分散スペクトルは、時間スケール80秒でその分散がピーク(最大)となっているが、より大きな時間スケール(196秒)でもスペクトル分布の極大を示し、これは上の高度(40m)でのスペクトルピークに対応している。これは、より低い高度(25m)でも大きな規模の乱流構造が現れていることを示している。これらのウェーブレット分散スペクトルにより解析される大きな乱流構造は、図1で見られる100~200秒程度の時間スケールを持った比較的大きな規模の風速変動に対応しているものと考えられ、大きな時間スケールにピークが見られる場合は、顕著に大きな規模の乱流構造が存在していることを示している。

観測された大きな規模の乱流構造は、中立に近い状態で例えば Gao et al. (1989) により森林上で観測された構造や気象研究所気象観測鉄塔において観測された構造(Horiguchi et al., 2012)のような下降する強風の組織的乱流構造に対応するものと考えられる。しかし、高さ40mの風速成分 u に対してウェーブレット分散を調べると、大きな時間スケールの風速変動があまり顕著ではない例も見られ

る。

全ての観測例について、高さ40mの風速成分 u に対するウェーブレット分散スペクトルを調べると、12例のうち3例で大きな時間スケール(100秒以上)に最大のピークが現れ、別の3例では大きな時間スケールにおいて(分散の値は調べた時間スケール内で最大ではないが)スペクトル分布の極大となっている。

大きな規模の乱流構造が与える影響を評価するために、上下(高さ40, 25m)の平均流方向風速成分についてその変動の相関を調べると、相関係数が0.7以上の大きな値を示す場合は、大きな時間スケール(100秒以上)の乱流構造が顕著に見られる場合に対応している。

この観測では、今回の観測場所のように比較的高い粗度物体に囲まれた都市近郊の接地層においても、中立に近い状態で、大きな規模の乱流構造(組織的乱流構造)が顕著に現れる場合があることが確かめられた。

(2) 不安定な条件での観測

次いで、2回目の観測として、2013年6月から7月、日中には浮力による乱流の生成が大きく不安定な状態が主となる夏季に、同じく京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーで大気境界層の観測を行った。

今回は、観測鉄塔の高さ25mと40mに設置された超音波風速計に加えて、新たに波長1.54 μm のレーザーを使用したドップラーライダー(Leosphere社製 WINDCUBE WLS7)を設置し、上空40mから200mまで20mおきの高さにおける風速3成分を約4秒おきに測定した。この型のドップラーライダーは、レーザーパルスを天頂から傾けられた上空4方向に発射し、空気中の粒子(エアロゾルなど)によって後方散乱された光のドップラー変位から、各高度における風の一様性を仮定して風速3成分を求めている。

ドップラーライダーについて、レーザーパルス発射角度は天頂より約28度傾けられ、約1秒ごとに、北、東、南、西の各方向のサンプリングを行っている。風速データについても、約1秒おきに風速3成分が出力されているが、4方向のサンプリングで一組のデータが計算されるので、風速データの実質的な時間間隔は約4秒である。

天候が良く、 z/L の値が30分間の各パートで-1.3~-0.3の不安定な状態が継続した2013年6月7日13時30分から17時における観測例を示す。この日、午後2時過ぎに北寄りの風が強くなり、鉄塔の高さ55mの風車型風向風速計では、15時10分からの10分間平均で 8.6 m s^{-1} に達している。これは、大気境界層の上下に良く物理量が混じり合った状態である混合層の発達により、上空の強く吹く風の運動量が乱流により下方へ輸送され、地表近くでも風速が強くなったと考えられる。

図3に14時から30分間のドップラーライダーと超音波風速計(高さ40m)による(水平面内)平均流方向風速成分 u と鉛直方向風速成分 w の時間変化を示す。なお、高さ40mの超音波風速計による(水平面内)平均流方向にドップラーライダー各高度での風速成分 u を取っている。図3では、地表近くから上空200mまで上向き鉛直風速を示す長さ100数十秒にわたる大きな構造が見られ、地表付近の大気が暖められることにより生じた上昇流域であるプリュームの構造と考えられる。なお、上昇流の強さは高度200mで 4.1 m s^{-1} に達している。上空でのこの構造の通過直後、地表付近での風が強くなり、高さ40mの超音波風速計で風速成分 u は 8 m s^{-1} 程度に達している。

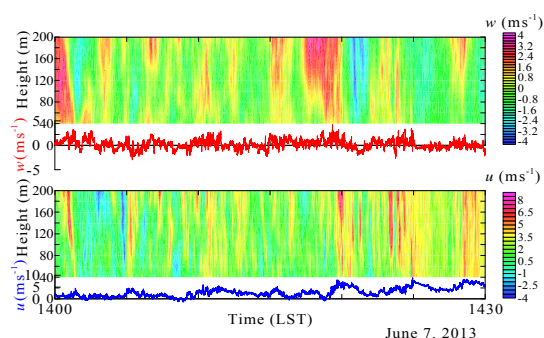


図3 ドップラーライダー(時間高度断面図)と高度40m超音波風速計(折れ線グラフ)による風速成分 u と w

全時間にわたる風速成分 u と w に対してウェーブレット変換を行い、乱流構造の時間スケールを調べる。図4は高さ40mの超音波風速計によるデータについてのウェーブレット分散スペクトルであり、風速成分 u に対するピークは104秒の比較的大きな時間スケールに位置している。また、 w に対する大きなスケール側の(極大の)ピークは64秒に位置している。高さ40mの超音波風速計による風速成分 u の平均は 5.0 m s^{-1} であり、ピークの時間スケールを空間スケールに換算するとそれぞれ520mと320mの大きさに相当する。

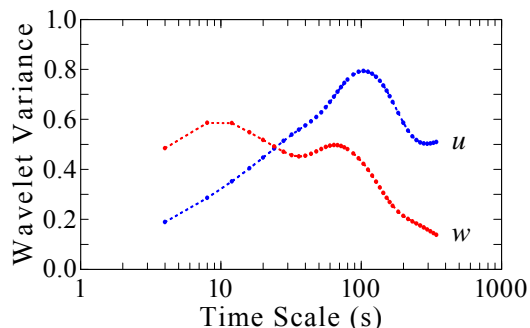


図4 超音波風速計(高さ40m)風速成分 u 、 w についてのウェーブレット分散スペクトル

ドップラーライダー観測による風速成分 w についても、ウェーブレット分散スペクトルで大きな時間スケールにピークが見られ、高度40mでは時間スケール108秒に位置している。この時間スケールについて、各高度のウェーブレット係数から時間高度断面図を作成すると、大きなスケールの構造が鉛直方向にも大きな拡がりを持って出現している様子が明らかになる。また、その様相は時間変化しており、次第に風が強くなっている14時30分頃までの時間帯には上昇流、下降流の顕著な構造が交互に出現し、下降流の構造に対応して高さ40mの超音波風速計での風速成分 u が大きくなっている。大きな乱流構造に伴って上空の運動量が下方へ輸送されていると考えられる。この交互に出現する上昇流と下降流の構造は、プリュームの上昇流域とその後方の下降流域が一对となっている構造が連続して起こっていることに対応していると考えられる。

この観測では、日中の不安定な状態で、大きな規模の上昇流の構造が現れ、地表付近の風の変化とも密接に関係していることが確認された。

(3) まとめ

中立に近い場合と不安定な場合の両方の条件で、大きな規模の風速変動をもたらす構造(強風域あるいは上昇流の構造)が出現し、地表近くの強い風の発生と関係していることが確かめられた。今後も、地表近くでの強風の発生に関係する解析を継続すると共に、今回と同様に上空の風を観測できるリモートセンシング機器を使用した研究を進める予定である。

〔参考文献〕

- Gao, W., Shaw, R.H. and Paw, U.K.T. (1989): Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 47, pp. 349-377.
- Horiguchi, M., Hayashi, T., Adachi, A. and Onogi, S. (2012): Large-scale turbulence structures and their contributions to the momentum flux and turbulence in the near-neutral atmospheric boundary layer observed from a 213-m tall meteorological tower, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 144, pp. 179-198.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

堀口光章, 都市近郊における大気境界層の観測 不安定時の乱流構造, 京都大学防災研究所年報, 査読無, 57巻, 2014年, 投稿中.

堀口光章・辰己賢一，都市近郊における大気境界層の観測—接地層における乱流の性状—，京都大学防災研究所年報，査読無，56巻，2013年，pp. 291–298．

〔学会発表〕(計2件)

堀口光章，不安定時の大気境界層における乱流構造—都市近郊における観測より—，日本気象学会，2014年5月23日，横浜情報文化センター

堀口光章，中立に近い状態での接地層乱流の性状—都市近郊における観測より—，日本気象学会，2013年5月18日，国立オリンピック記念青少年総合センター

6．研究組織

(1)研究代表者

堀口 光章 (HORIGUCHI, Mitsuaki)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：60190253

(3)連携研究者

竹見 哲也 (TAKEMI, Tetsuya)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10314361