

平成 21 年 6 月 20 日現在

研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19560417
 研究課題名（和文） 渦流成分を含む局所的風速ベクトル場の遠隔音波トモグラフィ計測
 研究課題名（英文） Acoustic tomographic remote sensing of localized wind flow vector fields consisting of vortex component

研究代表者 山田 晃 (Akira Yamada)
 東京農工大学・大学院生物システム応用科学府・教授
 研究者番号：20159213

研究成果の概要： 本研究は、鉄橋等の交通路上の監視領域内の渦状の突風風速場を非侵襲、遠隔的に測定できる音波トモグラフィ計測法の実現に向けた検討を行った。そのために、交通路の両サイドに数mおきの荒い間隔で設置した音波センサ間の送受信伝搬時間データから、領域内に回転対称な渦が一つだけ存在するという仮定のもとに、領域水平断面内の渦の風速ベクトル場を再現するトモグラフィアルゴリズムを考案した。最初に、提案法に基づいたシミュレーション評価試験を行い、種々の前提条件（風速場の2次元近似、音波の直線経路伝搬モデルなど）の妥当性や、監視可能な渦の風速場の範囲、センサの設置間隔と風速場の再現精度の関係、などの最適構成条件を明らかにした。さらに、監視領域の両サイドに10対の音波送受信センサを配置した構成の1/250モデルの模擬試験装置（路幅50cm, 路長40cm）を構築した。本装置では多チャンネル経路間の伝搬時間をリアルタイム測定するために、多チャンネルデジタル信号処理ハードウェア回路を実装した。本試験装置を用いて、伝搬時間の取得精度や時空間的に変動する渦の風速場の再現性能を検証した。特に、実際の場合を想定して、監視領域上を通過する渦の風速場の再現試験を行った結果、想定される突風の通過時間内(1[s]～2[s]程度)に渦の風速場を準リアルタイムで精度よく再現できる性能を確認した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・計測工学

キーワード： 計測システム

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の進行に伴ない竜巻やダウンバーストなどの局所的突風による被害が多発しており、そのための有効な監視手段の実現が望まれている。とりわけ、2005年12月に起きたJR羽越線特急脱線事故の教訓を受けて、鉄橋などの危険性の高い場所での、数十m規模の小規模な突風竜巻被害の防止対策が急がれている。従来、この問題に対して通常の風速計を用いる監視対策がとられているが、無数に多くの風速計が必要になってしまう。加えて、列車が通過する線路上に風速計を設置できない問題があり、十分な機能を果たすことができていない。一方、気象観測用に配備されているドップラーレーダーを用いる方法も考えられるが、その分解能は数百m規模までが限界であり、数十m規模の小規模な突風の検知は難しい。また、三次元的な風速分布を取得するのに長い時間を要してしまうことや、雨雲（水滴）を伴わない突風は検知できないなどの問題がある。さらに、狭隘で複雑に入り組んだ地形の多い日本国内においては、無数の多くのレーダーが必要になってしまいコスト的にも見合わない。このように、小規模で変化の激しい竜巻・ダウンバーストを監視するための有効な手段を講じることができない現状にある。

2. 研究の目的

時間的に非定常で、なおかつ場所的に不均一な風速場を測定するためには、風速場の時空間分布をリアルタイムで映像化する手段が必要になる。トモグラフィ法はこの要求に答えることのできる方法であり、断面内の流速分布情報を得るために、媒質周囲の多方向から遠隔・非侵襲的に観測した音波受信データを収集する。本手法を実現するに当たって次のような問題がある。その一つは、風速場がベクトル場であり、通常のポテンシャル場に比べてはるかに複雑な問題となることである。もう一つは、体内の血流や管内の液流のような小さな計測対象と違って、屋外の広い空間に適用するためには、音波の送受信器の設置台数や設置場所の制約が厳しくなる。さらにまた、渦の風速場は乱流成分が多く、空間的、時間的に変動の激しい風速場であり、各々を高速かつ高精度に計測する必要がある。これらの問題に対処するための構成として、本研究では、交通路の両脇に数十オードの少数の送受信器を配置する。その際の測定領域を挟んで対向配置した送受信器間の音

波伝搬時間の測定データから、領域内の渦の二次元風速分布の時空間変化を、リアルタイムに定量計測できるシステムの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、ヘルムホルツ分解定理に基づいて、経路間の双方向伝搬時間差を、渦（ベクトルポテンシャル）の回転微分の経路積分として表現する。その結果に、フーリエ切断面定理に基づいたトモグラフィ計算を適用することにより、渦の風速ベクトル分布を再現する。その際、そのままでは測定対象に様々な方向から計測する必要があり、屋外測定の現実性や処理時間の観点から実現が難しい。そこで本研究では、二次元測定領域内に一つの回転対称な渦の風速場が存在するという前提条件のもとに、左右両サイド間の一方向の平行ビーム伝搬時間データだけで再現可能なトモグラフィ計算法に拡張した。本手法を交通機関における小規模な竜巻突風監視システムに応用して、走行路の両脇に複数の音波センサを設置したシステムを提示する。最初の検討として、シミュレーション計算により、測定領域上のセンサ数及びセンサ間隔と再現精度の関係、渦風速場の監視可能範囲など、風速トモグラフィ突風監視システムの最適設計条件を明らかにする。さらに、提示された装置の有効性を検証するために、並列10チャンネル送受信器を配置した1/250モデルの図1のような模擬試験装置を構築する。二次元平面測定領域(360mm×360mm)の上下辺に、双方向観測用の中心周波数40kHzの超音波送受信器10対を、40mm間隔で対向配置した。渦の風源として、測定領域直下の距離120mmの位置に、直径190mmのファンを上方に向けて設置した。ファン前面近傍においてファンの回転に伴って、測定領域水平断面内に円形渦状の風速場が形成される。10チャンネルの送受信器を順番に切り替えながら、各々の経路上の風速場中を通過する音波を双方向観測する。ここでは、多チャンネルの伝搬時間データをリアルタイムで高速測定するために、デジタル信号処理素子(DSP素子)を組み込んだ専用並列ハードウェア回路を構築している。DSP素子内で、受信波の平均化処理、1/2周期の到着区間の抽出処理、相関計算の手順を経て、双方向受信波の伝搬時間差をリアルタイムで算出する。複数チャンネルの伝搬時間差データはPCに転送され、PC上でトモグラフィ

ィ計算が行われ、GUI環境で操作できる風速監視ソフトウェアの画面上に表示される。本研究の最後では、以上の模擬試験装置を用いて、伝搬時間差データの取得精度の検証および時空間的に変動する渦の風速場の再現性能の評価試験を行なう。さらに、実際の竜巻監視を想定して、監視領域上を通過する渦の風速場の再現試験を行ない、提案手法の有効性を検証する。

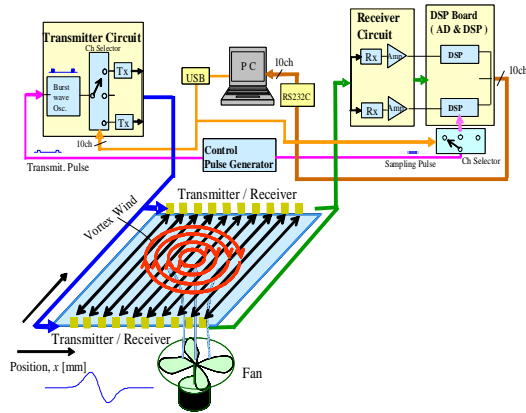


図1. 突風監視トモグラフィシステムの装置構成

4. 研究成果

(1) 屋外の 90m 四方の領域の監視システムを想定したシミュレーション試験を行った。送受信器間隔を $d=10, 5, 2.5$ m (送受信器数 $M=10, 19, 37$) の 3 種類に選んだ場合に、再現される渦の風速の最大値 v_{max} と、渦の寸法の設定値 W との関係を図 2 に示す。 $M=10$ 程度の少ない数の送受信器を用いた場合であっても、渦の幅が 20-100m の広い範囲にわたって、風速を定量精度よく測定できる結果が示されている。

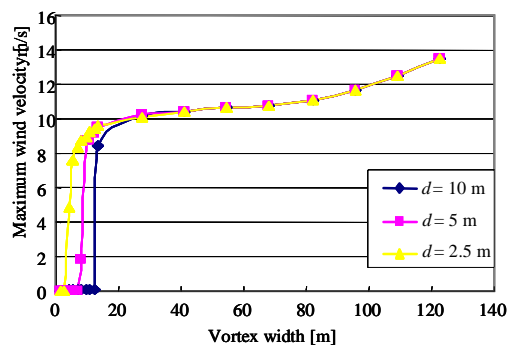


図2. センサの設置条件と再現性能の関係

(2) 模擬試験装置を用いた、風源の設定風速を変化に対する渦の最大風速の測定値との関係を図 3 に示す。風速の設定値によく比例した測定結果が得られている。また、

図中のエラーバーで示した測定値の標準偏差は、0.5~1m/s 程度であり、精度の良い測定が実現されている。また、風速が強くなるにしたがって、乱流成分が大きくなるため幾分ばらつきも大きくなっている様子が分かる。また、風源風速の設定値 13[m/s] における 10 経路の測定データに対するトモグラフィ計算により風速分布 $v(x,y)$ を再

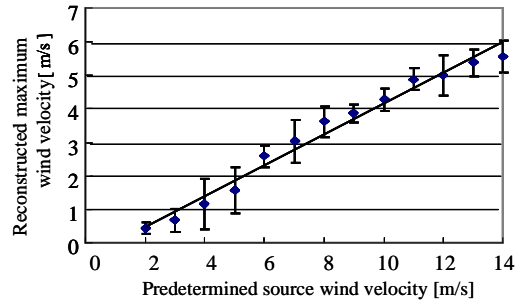


図3. 設定風速と最大風速の再現値の関係

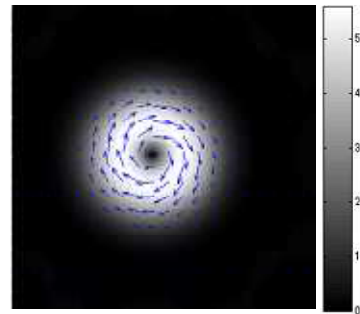


図4. 渦の風速ベクトル場の再現例

現した結果を図 4 に示す (風速の絶対値を濃淡画像で、風速ベクトルを矢印で示す)。風源の位置や大きさが設定値に一致する形で、渦の風速場が設定通りに再現されている様子が確認できる。

(3) 図 5 は、設定風速 5.0[m/s] の状態で、渦の中心位置を、観測直線上で 220[mm] ~ 220[mm] の間で 20[mm] 間隔で移動させた場合の最大風速の再現結果を示している。渦の中心が測定領域 (-180[mm] ~ 180[mm]) の内側にある場合は、渦の風速の再現精度は、10[%] 以内の誤差におさまっており、定量精度の良い測定が行われている。一方で、渦の中心が測定領域外にある場合は、測定精度がそれに比べて悪くなるのが分かる。風速場の監視ソフトウェアでは、この点を考慮して渦の進入検知を行うことにする。

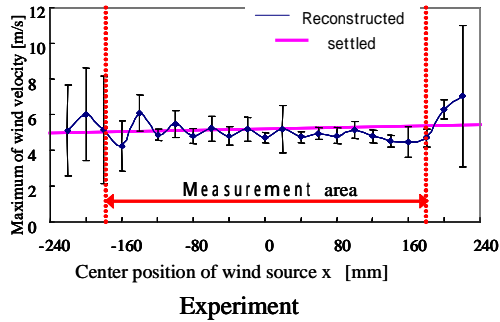


図5. 風源の位置を変化させた時の測定精度

(4) 渦の風源を時間的に変化させた場合の再現された渦風速の最大値を測定した結果を図6に示す。風源の風速の時間変化に追従した良好な時間応答特性が得られていることが確認できる。

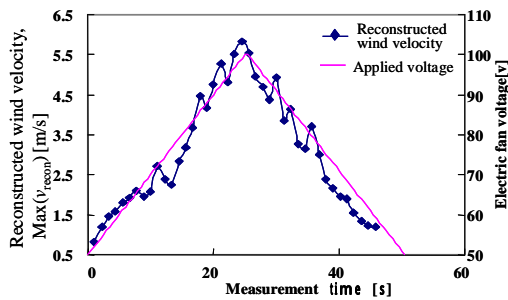


図6. 風源の駆動電圧を時間的に変化させた時の最大風速の測定結果

(5) 風源をモータ駆動により一定速度で運動させることにより、渦の風速場が監視領域の左端から進入して、右側から通り抜けていく際の風速場をリアルタイム測定した。風源の移動速度と再現された風速値との関係を図7に示す。本研究では経路間の送受信時間に時間遅れがあるため、そのままでは、渦の位置測定に誤差が発生してしまうので、その誤差を

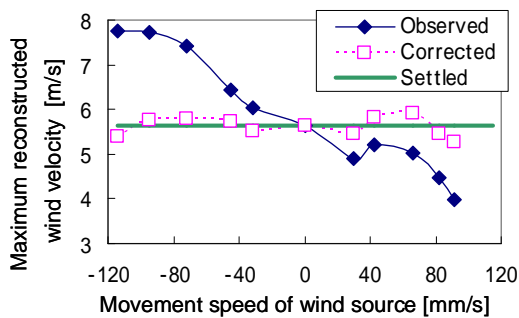


図7. 渦の移動速度(横軸)と再現された渦の最大風速(縦軸)の関係

なくするための補正計算を取り入れている。青色のデータは補正前の結果であり、ピンク色は補正後の結果である。渦の風速の再現値が一定値(5.6[m/s])に補正されており、補正計算が正しく行われていることが確認できる。

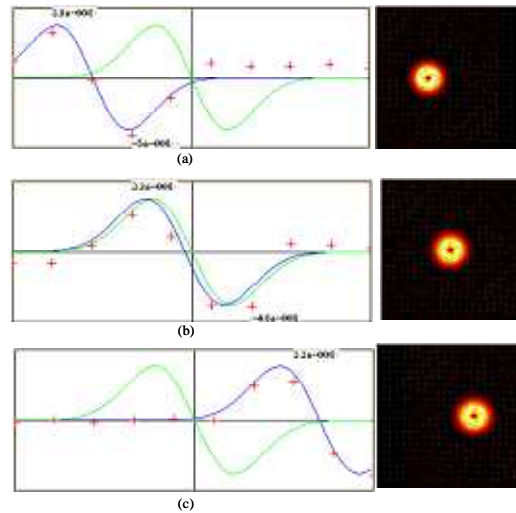


図8 渦の風速場が通過した際の監視プログラム画面、各々は(a)渦の進入直後、(b)中心に到達、(c)通り抜け直前の様子を示す。

(6) 図8に示すようなPC上で動作する風速測定ソフトウェアを構築した。本ソフトは、一連の処理をGUI環境で操作する。測定開始操作により、10経路の超音波の送受信と、DSPボードからの伝搬時間差データの受信、風速場のトモグラフィ計算、風速分布の画像表示、最大風速の表示、等の一連の処理を繰り返す。例えば、渦が監視領域内に左側から侵入し(図8(a))、中央を通過し(図8(b))、右側から通り抜ける様子(図8(c))を準リアルタイムで監視する。その際、図8(a),(c)の例のように渦の風速場の一部しか測定できない場合であっても、曲線当てはめ計算を施して欠落データを補う。これにより、測定領域に渦が半分程度侵入した状態で、渦の風速場全体を推定できるようにしている。

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)

(1) H.Li, T. Ueki, K. Hayashi and A.Yamada: "High-Speed Vortex Wind Velocity Imaging by Acoustical Tomography", *Acoustical Imaging*, **29**, pp.347-352(2008)(査読有)。

(2) H.Li and A.Yamada, "Imaging of time and space variation of vortex wind

velocity fields using acoustic tomography”, Jpn.J.Appl.Phys., 47, pp.3940-3945 (2008) (査読有).

研究者番号：20159213

(2)研究分担者
なし

[学会発表](計 7 件)

(1) H.Li and A.Yamada, “Tomographic vortex airflow imaging from single view acoustic travel time data”, IEEE Int.Ultrason. Symp., P2M124-07, Beijing, China, (Nov.2008)(査読有).

(3)連携研究者
なし

(2) H. Li, T.Ueki, K.Hayashi and A.Yamada, “High speed vortex wind velocity imaging by acoustic tomography”, 29-th Int. Symp. Acoust. Imag., Shonan Village, Japan, p-20(Apr 2007) (査読無).

(3) 植木 尊昭, 李 海悦, 林 和裕, 山田 晃, “音波トモグラフィ法による渦風速場の高速測定”, 2007 春季研究発表会, 東京都江東区(芝浦工大), 2-P-28(CD-ROM) (2007年3月) (査読無).

(4) K. Hayashi, H. Li, T.Ueki, A.Yamada, “Imaging of the vortex airflow profile by acoustic tomography”, 27th Symp. Ultrason. Elec., 名古屋市, P3-19 pp.441-442(2006 Nov.) (査読無).

(5) H.Li, T. Ueki and A. Yamada, “Imaging of time and space variation of vortex wind velocity fields using acoustic tomography”, 28th Symp. Ultrason. Elec., つくば市, 2-03P-18, pp.229-230 (2007 Nov)(査読無).

(6) 植木尊昭、李海悦、瀧川聡洋、有山祥子、山田晃：“音波トモグラフィ法による時間的および空間的に変化する渦の風速分布の映像化”，日本音響学会 2007 秋季研究発表会，甲府市(山梨大)，2-P-18(CD-ROM) (2007年9月) (査読無).

(7) 李海悦, 山田晃, “渦の風速場のオンサイト音波トモグラフィ映像装置”, 電子情報通信学会超音波研究会, 静岡市(東海大) (2008年11月) (査読無).

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 晃 (Yamada Akira)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授