

超音波技術を使った気象観測機器

Meteorological Instruments Using Ultrasonic Technology

伊藤 芳樹^{*1} 林 孝明^{*2} 平井 重雄^{*2} 宮崎 真^{*2}
Yoshiki ITO Takaaki HAYASHI Shigeo HIRAI Shin MIYAZAKI

1. はじめに

超音波技術を使った気象観測機器には、超音波風向風速計、ドップラーソーダ、超音波積雪深計がある。超音波は電波や光に比べると、距離減衰は大きいが伝搬速度が遅く大気の変動に対する感度がよいので、地表付近や大気境界層下部の計測に適している。また比較的簡易で安価な装置で分解能のよい測定ができることが特長である。

2. 超音波風速計

2. 1 開発の歴史

超音波を利用して風速を測る研究は1950年代から主として米国で行われていた。Suomi and Businger¹⁾、Kaimal and Businger²⁾は試作した装置で風速の鉛直成分の測定を試みた。日本においては、京都大学の光田ら³⁾が図1のようなスパン長 1.2m、超音波周波数 80kHz、応答速度 200Hz の超音波風速計を試作し、鉛直風速変動を記録することに成功した。その後スパン長 50 cmの汎用型の開発で風速 30m/s まで測定が可能な超音波風速計となった⁴⁾。測定原理はいずれも互いに対向させた一対の超音波振動子の間に超音波パルスを交互に逆向きに伝搬させ、それぞれの伝搬時間の差をとれば風速が、和をとれば気温（音仮温度）が測定できるというものである。

当時は真空管を使った大型の機器であったが、1960年代半ばにはトランジスタ化されて小型で扱いやすくなり、研究面においても速い応答速度を生かして、乱流輸送の

観測が盛んになった。機器の開発や研究分野での競争が日米間で行われ、1965～1967年にBusinger, Kaimal, 光田らが日米共同観測を実施して、微細気象分野での超音波風速計の活用が飛躍的に進んだ⁵⁾。機器としては位相差検出の米国方式よりもパルス検出の日本方式の優位性が実証され、NCAR（米国国立大気研究センター）の飛行機にも搭載されて広域観測が行われた。

1970年代には超音波風速計と乱流強度を計算するアナログ演算器を組み合わせた大気拡散観測システムが電力会社向けに開発された。また南極の昭和基地とみずほ基地には越冬隊が超音波風速計を設置し、-40℃の極寒の地で気水圏観測の一翼を担って活躍した。

日本の超音波風速計は開発当初から当時の海上電機（現ソニック、以下ソニックと称する）が担当しており、欧米製の実用機が市場に出回る1990年代までは日本製の“KAJIO SONIC”が世界市場を凌駕することになった。



超音波風速計の国産試作1号機

* 1 株式会社ソニック 取締役 yoshiki-ito@u-sonic.co.jp
Dr. Sci., Director, SONIC CORPORATION
* 2 株式会社ソニック
SONIC CORPORATION

1980年代に入ると超音波振動子の伝搬パスを2ヘッド対向から1ヘッド切替え方式にし、回路を集積化することで、超音波の伝搬誤差や回路のドリフト誤差が抑制されて、測定値の安定・高精度化が図られた⁹⁾。またマイコン化が進められて、信号検出にパルス伝搬時間逆数差方式を採用することにより、音速すなわち温度による誤差や検定に依存する項目もなく、通常1～2%程度の演算精度で風速を測定することができるようになった。顕熱輸送量の測定に用いるパルス伝搬時間逆数差は同様に温度（音仮温度）の測定精度を高めることができた。

超音波風速計の国際規格 ISO 16622:2002（気象—超音波風速温度計の受容試験方案）⁷⁾において、1ヘッドのパルス伝搬時間逆数差方式が推奨されており、2000年代以降には世界標準の測定方式となった。1ヘッドで小型化された測風プローブではあったが、高精度になるにつれて振動子が流れを歪めて風向依存性が表れる Flow distortion と呼ばれる精度を低下させる問題が指摘されるようになった⁸⁾。流体 CFD を利用して影響を極小化するプローブ形状の設計が行われるとともに、ISO 規格では流れの遮蔽影響を補正することが推奨された。風速 60m/s 以上の強風速域では、超音波の減衰が大きくなり直接の信号検出が難しくなるので、集積回路 FPGA の高速化で可能になった相関法による時間差検出など統計手法を用いた信号処理が併用されるようになった。

2. 2 超音波風速計の発展と現状

超音波風速計は風の微細な構造を解明するための研究用途としてはもちろん、今日まで微風から強風までの広い風速範囲で乱れの測定も必要とされる発電所や橋梁・建築物への風圧力の作用を測定監視する用途などに幅広く用いられてきた。橋梁や列車軌道付近の吹上げ流の監視は、鉛直風が測れる超音波風速計の特長を生かしたものであり、交通の安全運行管理に有用である。1ヘッド方式のプローブが実用化された1980年代以降には、土木建築研究のための風洞用風速計、道路トンネル用風速計、半導体工場の気流管理のためのクリーンルーム用風速計などプローブの小型化が進んで図2のような形状の超音波風速計が様々な用途に使われるようになった。

機械的な可動部がないため耐久性に優れ、かつ凍結対策が可能のため、米国においては地上気象観測システム（ASOS）に、日本では2020年以降、アメダス用風速計として超音波風速計の採用が進められている。

世界気象機関(WMO)の観測指針 WMO No. 8 (CIMO Guide)⁹⁾に準拠した風速 75m/s レンジの超音波風速計は世界の

数社から市場投入されているが、日本の気象庁が要求する風速 90m/s を満足する2次元および3次元超音波風速計はソニックの製品が使われている。特性の経年変化が無く定期的な校正が不要なため、気象庁においては超音波式の検定有効期限は無期限（2018年7月以降）、機械式風速計（プロペラ式、カップ式）は有効期限5年とされている。気象庁による評価に基づき改良を重ねた結果、図2のSA型2次元風速計は降雪のある厳寒地から台風襲来地域まで広範囲に使えるように凍結防止用ヒータを装備し強風域 90m/s まで測ることができるようになった。気象庁アメダスに採用されて既に日本国内 400 ヶ所以上の地点で5年以上の稼働実績を有している。

風力発電のための風況精査にはカップ式の風速計が従来は使われていたが、風の乱れと複雑地形での吹上げ吹下し流等の評価の必要性から超音波風速計が使われるようになった。洋上風力発電調査のための北九州、銚子沖、福島沖のNEDOプロジェクトではカップ式風速計と3次元超音波風速計が合わせて20台程度の規模で使われた¹⁰⁾。陸上からの砂塵や洋上の海水分に晒される環境下で、可動部がない超音波風速計の耐久性の良さが実証された。

2017年の国際規格 IEC 61400-12-1（発電用風車の性能試験法）¹¹⁾の改訂で超音波風速計が規格認定されるようになって以来、発電用風車のナセル（発電機）に搭載する風速計も耐風・耐振動性に優れた超音波風速計に置き換えが進んでいる。



3次元研究用(DA型)



3次元汎用(SAT型)



2次元アメダス仕様(SA型)



クリーンルーム/風洞用(WAT型)

図2 種々の超音波風速計（写真と諸元）

伝統的な機械式風速計と比べた場合の超音波風速計の特長を纏めると次のとおりである。

- (1) 速い応答速度(20Hz 以上)で風向風速が測れる
- (2) 鉛直成分を含む風速3成分が測れる
- (3) 微風(≒0m/s)から強風まで直線性よく測れる
- (4) 可動部がないため磨耗する部品がなく堅牢で保守性、耐久性に優れる
- (5) センサ寿命が長く、かつ定期的な校正や交換が不要で省力化できるのでトータルコストに優れる
- (6) 融雪ヒータを組み込むことにより凍結対策が可能である
- (7) WMO No. 8 (CIMO Guide)、ISO16622:2002、IEC 61400-12-1 などガイドラインや国際規格が明確である

2. 3 超音波風速計の検定校正と国際規格

ソニックでは種々の用途の超音波風速計のニーズに応え、強風仕様の超音波風速計を開発するために風速100m/sを吹送できる風洞装置を、また工業用途のために微風用の風洞装置を設備して対応している。気象庁検定では所定の風速範囲で精度±5%以内が確保できているか否かで合格判定を行う。超音波式は明確な原理で高精度な測定ができるので、ISO 準拠で設計された風速計は通常はこの検定基準を満たしており、改めての校正は不要である。工業技術院計量研究所(当時)は2000年代初頭に各国の風洞設備の性能評価のために風洞用超音波風速計を準器として持ち回り試験を行った。各国が基準とする風洞設備の評価において、0.5%程度の不確かさがあることが明らかになった¹²⁾。

風力発電の風況調査の分野では、カップ式が安価で多用されてきた。2005年版のIEC61400-12-1「発電用風車の性能試験法」までは、唯一の性能試験用の風速計として位置づけられてきたが、風速の鉛直成分の乱れに依る出力誤差やカップの‘過回転’の問題があった。またプロペラ式と同様に機械式の回転機構を持つため、摩耗に依る特性の経年変化があり、定期的な校正が推奨された。測定精度の検証と校正方法の検討が進められて、2017年版のIEC61400-12-1 (Ed. 2)からは超音波式も性能試験用の風速計として規定に組み込まれた。

風力発電の分野で風速計の校正ができる審査認定機関MEASNETとしての審査認定ができる国内の機関はなく、国際規格への対応が遅れている。図3の風洞は気圧計等の校正機器や風洞開口断面の風速偏差は調整済みでハードウェアとしては十分な精度を有しているが、校正ビジネスが成立する土壌が残念ながら日本にはまだない。

気象の要素(気温、気圧、風向風速、湿度、降水)の測定法やデータ品質の管理については、WMOの気象観測技術委員会(CIMO guide)に定められており、ISO/TC146/SC5(気象)はこれに基づいてセンサの試験方法を定めている。この試験方法は一般気象用を想定してメーカーがデータ品質を保証するための規定であるが、発電量の正確な予測のニーズに基づいてユーザーの視点で定めた発電用風車の性能試験方法IEC-61400-12の精度基準は風速計を等級付けすることなど厳しく定めている。

超音波風速計の測定精度や応答速度、厳しい自然環境下での耐用性、耐久性などは種々の風速計の中でも、高い評価と優位性がユーザーに認知されており、使用目的に合った機種を選定と規格に沿った校正と保守を行うことで、今後ますますの利活用が進むものと期待される。



図3 90m/sの風速が校正可能な風洞設備(ソニック)

3. ドップラーソーダ

3. 1 開発の歴史

音波を使って大気下層の気象現象を探知する試みは豪州のMcAllister(1968)¹³⁾らが初めて行い米国の波動伝搬研究所(WPL: Wave Propagation Laboratory)のLittle(1969)¹⁴⁾によって体系化され、WPLを中心に研究が行われた。日本では郵政省電波研究所(現通信総研)で福島ら(1971)¹⁵⁾が直径16mのコンクリートパラボラを使用して上空の逆転層探知に成功した。

測定原理は周波数2~4kHzの音波パルスを上空の送受波器から上空に向けて発射し、上空に自然に存在する気温や風速の変動領域からの散乱波を受信する。周波数は可聴音であるが、計測用に用いる音波を“超音波”と称する。この原理により、大気境界層下部500m程度以下の

- ・地形性および構造物による気流乱れ／乱流
- ・低層の鉛直流／ダウンウォッシュ
- ・下層ジェット／おろし風

- ・風速鉛直分布の特異点／ガストフロント

- ・接地逆転層の生成、崩壊過程

を地上からリモートセンシングすることに適している。

可搬型の商用機は1973年にソニックから京都大学防災研究所や通産省公害資源研究所(現産総研)に納入され気象研究や大気汚染調査研究に利用された。

測風機能を付加した音波探査装置(ドップラーソーダ)はWPLのBeranら(1972)¹⁶⁾が初めて実験を試みた。音波散乱を与える上空の大気が静止していれば、受信周波数は送信周波数と同じであるが、大気が動いているとドップラー効果が生じ、受信周波数は送信周波数とずれる。このずれの周波数(ドップラー偏移周波数)を検出して、上空の大気の動態、すなわち風向・風速を測定するという測定原理である。商用機は仏の電力公社が原子力発電所の大気拡散モニタリングのために開発し導入した。日本では1980年に京都大学と気象研究所が当社製の装置で研究を開始し、1982年には東京電力とNECおよび当社が共同で火力発電所の拡散モニタリングのための実用化研究を開始した。本研究は電気事業連合会が立案し、日本気象協会が編成した専門家委員会(気象研究所・小平信彦委員長)で3年間の評価の後にドップラーソーダが高度500m程度までの風向風速の測定に実用になることが実証された¹⁷⁾。当時はミニコンでなければFFTのリアルタイム処理ができなかったが、1986年頃には高速のプロセッサボードが安価に使用できるようになり、信号処理部のパソコン化が可能になった。測定原理や活用例は文献¹⁸⁾に詳しい。

この成果は原子力気象に引き継がれ、1989年から2年間の通年評価に基づいて、気象庁・通産省・科学技術庁の各委員会の審議を経て、1993年に気象観測塔に替わる排気塔高さの大気拡散モニタリング測器として採用された¹⁹⁾。以来、30年以上に亘り観測のランニングコストの低減に寄与するとともに、欠測の少ない安定した風向風速データを提供し続けている。日本国内の約20ヶ所の原子力発電関連施設の3分の2以上の地点で稼動中である。



図4 電力気象用のドップラーソーダ

3. 2 ドップラーソーダの発展と現状

電力気象用のドップラーソーダとしては図4のようなパラボラ反射器を使用した高出力で探知能力に優れた3軸モノスタティック型を用いるが、風力発電の風況調査用には小型低価格化が必要であり、2003年に図5のようなフェーズドアレイ型を開発した。音響素子100個程度を平面状に配列し、位相合成することによって上空3～5方向に音響ビームを送受信することができる²⁰⁾。陸上風車の風況調査ではこの型のドップラーソーダが使われたが、その後は風況調査の分野で欧州が先行し、小型化が容易で洋上風調査やナセル搭載が可能な光技術を使ったドップラーライダが多用されている。ドップラーソーダには電力気象での長年の実績と装置が安価である(ドップラーライダの1/3程度)、低高度(≒20m)からの測定が可能であり、高度分解能が良い(≒10m)の特長があり、再評価されてよいものと思われる。

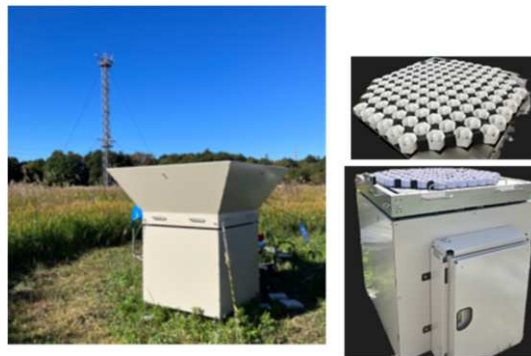


図5 フェーズドアレイ型ドップラーソーダ

ソニックでは2009年度から3年間、東京都重点戦略プロジェクトとして空港用の風鉛直分布遠隔観測装置の開発を行った。この装置は一般気象用に使用されているモノスタティック型とフェーズドアレイ型のドップラーソーダの技術を利用して空港上空の低層風乱流を観測するバイスタティック型の装置である²¹⁾。2015年からは宇宙航空研究開発機構(JAXA)との共同研究として、空港の低層風情報提供システム(SOLWIN: Sodar-based Low-level Wind Information System)の開発に着手した²²⁾。

JAXAでは羽田、成田の大空港には空港用ドップラーライダを使用したALWIN(Airport Low-level Wind Information)、地方空港用のセンサとしてドップラーソーダ(風鉛直分布遠隔観測装置)を使用したSOLWINを用いて航空機の離着陸支援システムを構築した²³⁾。

日本国内の地方空港は、山岳部や島嶼部の崖が近くにある複雑地形であることが多く、2009年に(財)航空保安研究センターの調査において、国内96空港の内、50%に

あたる48空港において低層でのウィンドシアや乱気流の風問題があることが乗員アンケートで指摘された²⁴⁾。SOLWINは高度範囲に限られるが離着陸に有用な風情報が提供可能であり、かつ導入コストが大幅に抑えられる。また飛行に影響が大きい上下流の情報提供も可能である。

SOLWINは2016年度に完成し2017年には1年間大分空港でJAXAと航空局が連携して試験運用評価を行った。その後鳥取空港、庄内空港、八丈島空港で試験運用を行い、鳥取空港では2019年から本運用に入っている。

図6に空港用SOLWINと低層風情報提供のフローを示す。

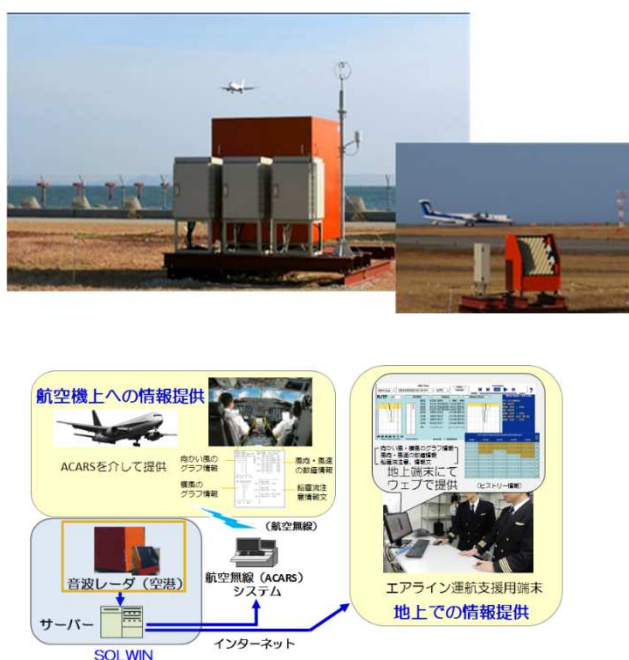


図6 空港用SOLWINと低層風情報提供のフロー

2030年に向けて商用飛行を目指している空飛ぶクルマ(eVTOL 電動垂直離着陸機)は、小型飛行体で低空を低速で飛行するために既存の航空機より気流変化の影響を受けやすい。離着陸場上空の気流乱れを検知し運航の安全を確保するために、当社では空港で運用されている低層風情報提供システムSOLWINを小型化したeVTOL離着陸場向けの小型SOLWINを開発した²⁵⁾。

図5のフェーズドアレイ型ドップラーソーダに図6の低層風情報提供の機能を組み合わせたシステムである。市街地の多くの離着陸場に設置されることを想定して空港用に比べて設置面積1/4、コスト1/2以下で維持管理が容易なシステムである。周波数を高周波化して音漏れの低減を図っている。ドローンフィールドとヘリポートで実証実験を行い、従来は観測データがなかった離着陸場上空の風情報について、ユーザーから具体的な役立ち度

の評価を得ている。空飛ぶクルマの離着陸場インフラの課題として管制・通信・騒音問題と並んで重要な低層の気象情報をリアルタイムで運航関係者やeVTOLオペレーターにインターネットブラウザで提供開示する社会性・公益性の高いシステムづくりを行っている。ユーザーからのニーズは高いが技術的に困難な低層風のナウキャストについても、観測データを蓄積することによって、AI技術などを利用した取り組むべき課題がある。

4. その他の超音波観測機器

超音波を使用した気象観測機器として超音波風速計とドップラーソーダを紹介したが、これらの“速度”を測る以外に、“距離”を測る超音波観測機器は古くからある。超音波積雪深計は気象庁アメダス向けに1977年に採用された。道路気象用を含めて累計1000台以上が納入されて使われてきた。水資源用途では河川やダムの水位監視のための超音波水位計、沿岸波浪観測のための超音波式波高計が1970年代から、ドップラー式の海底設置型海象計は海中の流速分布と水位変動が同時に計測できるシステムとして港湾局の全国港湾海洋波浪情報網ナウファスに1980年代初頭に採用されている。

超音波風速計は小型のセンサの工業用途のニーズが増えており、応答速度が速く微風から測れて耐環境性がよいので、半導体や食品製造工程のプロセス管理に使われている。最近ではMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)1チップセンサを利用した超小型の超音波風速計も開発されつつある。

超音波風速計は1990年以降、赤外線式の水成分計や炭酸ガス計と組み合わせて、水分量輸送や炭酸ガス収支の観測に使われてきた²⁶⁾。最近の重要テーマである線状降水帯や気候変動の解明にも寄与している²⁷⁾。

超音波技術は気象や海象の自然観測分野のみならず、工業、医療の分野で幅広く利活用されている。

5. あとがき

超音波技術は流速(時間差、ドップラー)、距離を計測する観測機器が実用化されているが、超音波の反射散乱、吸収減衰を利用した気象現象のモニタリング、光との相互作用を利用した光音響技術の利用、気象要素とMEMSによる超音波特性変化を利用したマイクロ気象現象(気水相変化等)の解明など超音波技術が寄与できる可能性がある。最近の先進技術を組み合わせることで成果が期待できる分野は多いと考えられる。

謝辞

日本における超音波風速計の開発において先駆者となり、世界の乱流計測研究の発展に大きく寄与された故・光田寧京都大学名誉教授および各界においてご指導を頂いた諸兄に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Suomi, V.E. and Businger, J.A., "Sonic Anemometer-Thermometer", Geophys. Res. Paper., No. 59 (Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion, 3, Chap. 14), (1959)
- 2) Kaimal, J.C., Businger, J.A., "A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer", J. Applied Meteorology, Vol. 2 (Feb.), 156-164, (1963)
- 3) 光田寧, 水間満郎, 「超音波風速計とその試作」, 天気, Vol. 11, No. 2, 33-40, (1964)
- 4) Yasushi Mitsuta, "Sonic Anemometer-Thermometer for General Use", J. Meteorol. Soc. Japan 44, 12-24, (1966)
- 5) Japan-U.S. Joint Study Group, "Development of Sonic Anemometer-Thermometer and Its Applications to the Study of Atmospheric Surface Layer (Final Report)", Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 250pp, (1971)
- 6) Hanafusa, T., Fujitani, T., Kabori, Y., Mitsuta, Y., "A New Type Sonic Anemometer-thermometer for Field Operation", Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. 33, No. 1, 1- 19, (1982)
- 7) International Standard ISO 16622, "Meteorology —Sonic Anemometers/Thermometers — Acceptance Test Methods for Mean Wind Measurements", Reference number, ISO 16622:2002(E), (2002)
- 8) Shimizu, T., Suzuki, M., Shimizu, A., "Examination of a Correction Procedure for the Flow Attenuation in Orthogonal Sonic Anemometers", Boundary-Layer Meteorology 93: 227-236, (1999)
- 9) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8), CIMO, (2014)
- 10) <https://www.u-sonic.co.jp/product/category/detail/sid:66530aa6-816c-4a15-a781-38bbb65d7232/pid:66530a04-6a6c-4749-b0ff-38aeb65d7232>
- 11) International Standard IEC61400-12-1 Ed. 2, "Wind Turbines-Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines", (2017)
- 12) Yoshika Terao et al., "Final Report on the CIPM Air Speed Key Comparison (CCM.FF-K3)", Metrologia 44, (2007)
- 13) McAllister, L.G. J.R. Pollard, A.R. Mahoney and P.J.R. Shaw; "Acoustic Sounding -A new Approach to the Study of Atmospheric Structure", Proc. IEEE vol. 57 No. 4 579-587, (1969)
- 14) Little, C.G., "Acoustic methods for Remote Probing of the Lower Atmosphere", Proc. IEEE, 57, 571-578, (1969)
- 15) 福島圓, 「ソーダによる対流圏観測」, 気象研究ノート, 116 483-497, (1973)
- 16) Beran D.W. and S.F. Clifford, "Acoustic Doppler Measurements of the Total Wind Vector", AMS Second Symp. on Meteor. Observ. Instru. 100- 110, (1972)
- 17) 伊藤芳樹, 渡辺好弘, 水越利之, 花房龍男, 吉川友章, 内藤恵吉, 小平信彦, 「ドップラーソーダの開発と大気境界層観測への応用」, 天気 vol. 33, No. 8, 375-385, (1986)
- 18) Ed. S.P. Singal, "Acoustic Remote Sensing Applications", Narosa Publishing House, 585pp, (1997)
- 19) (財) 原子力安全研究協会, 「原子力気象に関する調査研究, 平成 6 年度～7 年度 (最終報告書)」, (1996)
- 20) Yoshiki Ito, "Design and Performance of an Acoustic Antenna for a Phased Array Doppler Sodar", Meteorol. Appl. 5, 149-156, (1997)
- 21) 伊藤芳樹, 「低層ウィンドシア監視装置の開発」, 航空管制, No. 4, 89-93, (2013)
- 22) 伊藤芳樹, 宮崎真, 「地方空港向け低層風情報提供システム (SOLWIN) の開発」, 航空技術, No. 736, 34-40, (2016)
- 23) (公財) 航空輸送技術研究センター, 「国内空港への低層風情報提供システムの整備に関する調査報告書 (平成 30 年度)」, 国立研究開発法人 JAXA 宇宙航空研究開発機構, (2019)
- 24) (財) 財航空保安研究センター, 「空港ターミナルエリア内で発生する悪天候の航空機運航への影響調査報告書」, (2009)
- 25) 又吉直樹, 飯島朋子, 伊藤芳樹, 「低層風情報提供システム SOLWIN の開発」, 第 56 回飛行機シンポジウム講演予稿集, 講演番号 2D08, (2018)
- 26) 塚本修, 文字信貴, 伊藤芳樹, 「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, 第 199 号, 19-56, (2001)
- 27) 加藤輝之, 荒木健太郎, 中村啓彦, 立花義裕, 宮崎真, 「黒潮海域での顕熱・潜熱フラックス観測: 品質管理手法と気象庁メソモデル予報値との比較」, 気象学会 2024 年度予稿集, (2024)