第Ⅲ部　地上気象観測機器の現状と将来像

6. 国内における気象観測測器の現状

6.1 組織的な気象業務の始まり

6.1.1　気象測器と気象業務

気象測器の原点は、1490 年にレオナルド ダ ビンチ（Leonardo da Vinci）が温度計を、イタリアの物理学・天文学者 ガリレオ ガリレイ（Galileo Galilei）も 1597 年頃同様に温度計を考案し、1643 年ドイツの物理学者 キルヒャー（A.Kircher）が、実用的な水銀を利用した温度計を考案したと云われている。1643 年イタリアの物理学者 エヴァンジェリスタ トリチェリ（Evangelista Torricelli）が大気圧を実験で証明し、1800 年頃、フランスの器械技師 フォルタン（Nicolas Fortin）が水銀気圧計を製作した。また、湿度計は 1783 年スイスのソシュール（H.B.Saussure）が空気中の湿度で、毛髪が伸縮することを発見したことが原点となり、1890（明治 20 年末）年代にフランスのリシャール社が実用化し、1887 年ドイツの気象学者リヒャルト アスマン（Richard Assman）が乾湿計を発明するなど、多くの科学者が関与して今日に至っている。

当時の日本は外国との交易はなく、唯一、長崎の出島でオランダと交易を行っており、その交易の中でヨーロッパやアジア等の情報が国内に入って来た。

それまでは、生活の中で気象現象を見つつ経験則を導き、地域毎にことわざ“夕焼けは晴れ”等、いわゆる観天望気が生まれ、日常生活の中で農業や漁業活動に役立て、また、中国からも気象に係る情報、二十四節気等の知識も輸入され、1687（貞享 4）年 貝原 益軒の「日本歳時記」は中国の情報を元に、日本の実情に沿ったものに改変されている。その他、1774（安永 3）年に発行した 杉田玄白の「解体新書」のように、ヨーロッパの気象学専門誌の翻訳本も発行されている。さらに造船技術の発達により広域航海の時代になり、航海に必要な技術も順次発達し、その中で気象情報も重要な役割を果たすようになった。また、航海時の目標となる燈台、または燈台に類した施設が設置されるようになり、これらに関わる技術の大部分は外国技術者の雇用に頼っていた。

組織的な気象業務（国が実施する公的な気象業務）は、明治政府になってからで、1872（明治 5）年以降の函館気候測量所や工務部鉱山寮の観測等が挙げられるが、国の観測ではあるものの、国民のための観測というより、特定の目的のための観測と見受けられる。

このような状況で、工部省測量司は、1871（明治 4）年 7 月、皇居内の測量を行ない、その時の測量技師長は、イギリス人マクビーン（Collin Alexander Mc Vean）、測量助手のイギリス人ジョイネル（Henry Batson Joyner ）であった。このジョイネルが気象観測の重要性を建議し、この建議を受けて内務省地理寮量地課は 1875（明治 8）年 6 月 1 日、東京の赤坂葵町三番地に東京気象台を設立して気象庁の基礎を作り、この 6 月 1 日は今日の気象記念日となっている。

当時使用した気象観測機器はイギリス カセラ社製でロンドン郊外のキュー気象台の検定合格品やフランス リシャール社製等の輸入気象測器であり、外国気象測器の模写などを経て、順次、国産化へと移行している。

また、観測の基本となる気象観測法は 1880（明治 13）年に刊行され、統一した観測方法の重要性を意味するものである。得られる観測結果の質が、同一時刻で、同一の観測機器を使用して、得られ

たデータが信頼できるに繋がっている。東京気象台が使用した観測機器が検定品を使用していることをみると、当初から測器の性能を重要視し、この思想は今日も引き継がれている。

東京気象台は、1887（明治 20）年 1 月に中央気象台と改称され、同年 10 月には地方測候所として 51 ヶ所が指定されている。その後、1895（明治 28）年に内務省から文部省に、そして 1943（昭和 18）年に運輸通信省に、1956（昭和 51）年気象庁に昇格し、現在は国土交通省に属している。

一方、国際的には、1873（明治 6）年に国際気象機関（IMO ; International Meteorological Organization）が政府間組織として設立され、気象事業の国際的標準化や気象情報の交換等が任務とされてきた。その後 IMO は解消し、1950（昭和 25）年に世界気象機関（WMO : World Meteorological Organization）が設立されて、日本は 1953（昭和 28）年 8 月に加盟している。　WMO では基礎組織委員会、測器・観測法委員会、水文委員会、大気科学委員会、航空気象委員会、農業気象委員会、気候委員会、合同海洋・海上気象委員会の 8 委員会があり、加盟各国から委員が参加し、気象事業について、それぞれの委員会で検討され、その結果は加盟各国に還元され、重要な案件は勧告の形で周知されている。これらの情報や勧告を受けて、各国は国内の気象事業を国情や国内法を鑑み、観測設備の刷新、通信網の整備等が行われている。

中でも気象測器や観測法を担当するのは、測器・観測法委員会、通称 CIMO（Commission for Instruments and Methods of Observation）で気象観測に関わる議論がなされている。

6.1.2　気象業務法と気象測器の検定制度

現在の気象業務は 1952（昭和 27）年 6 月に公布され、途中幾多か改正されて今日に至っている。気象業務法では公的に実施する気象業務に関わる事項を定めるものであり、私的や研究目的の気象観測等を制限するものではない。また、気象業務で使用する観測機器は、気象測器検定規則に定める検定に合格することを定めている。気象以外の分野でも、計量法等の法律で精度に関わる事項を定めており、客観的に計測機器の性能が保障されることになる。

国や自治体が防災に寄与するために実施する気象観測に供する気象測器は、気象測器検定規則に基づいた検定合格測器を使用することが義務付けられている。

気象現象の計測は、現象を如何に忠実に測定するかが基本であり、そこには当然観測測器の性能等も重要な検討課題の一つなる。一方、気象庁が主務として実施する気象観測は、単に日常的な気象現象の把握だけではなく、気候変化や国際間の気象情報交換等も含まれているため、計測論だけでは解決出来ない課題もある。

歴史的に気象測器をみると、当初は目視や器械的な観測機器にはじまり、電子技術の発達により、アナログ的な観測機器からデジタル技術を使用した気象測器へと変貌している。

国内をみても時代と共に気象測器も進歩おり、その測定結果は当然議論の的となることが避けられない。また、国際的な気象情報交換等で、開発途上国をみると組織的な気象観測の歴史も浅く、使用している観測機器も古典的な種類も少なくはなく、脆弱であると云わざるを得ない。

国内だけの議論であれば、最先端の高性能な気象機器を使用することは、経済的な課題はあるものの不可能ではないが、開発途上国内の気象情報も自国の気象情報の精度向上にとって重要であり、時には地球全体の情報、即ち広域な情報が必要となる。

このことが、以前から云われている気象に国境はないということになろう。当然、使用する気象情報の品質は揃っていることが重要であり、ここでWMO等の位置づけが重要となる。

また、防災に係る気象観測は、気象庁が実施する気象観測の補完的な意味合いが強く、当然、周辺の公的な気象情報を利用することとなり、使用する気象観測機器の性能は議論するまでもなく、気象測器検定規則に合格した気象測器が望ましいとことになろう。

まず、気象業務の根幹である気象観測は、気象業務法 第2章の観測第6条で、

第6条 気象庁以外の政府機関又は地方公共団体が気象の観測を行う場合には、国土交通省令で定める技術上の基準に従ってこれをしなければならない。但し、左に掲げる気象の観測を行う場合は、この限りでない。

一　研究のために行う気象の観測

二　教育のために行う気象の観測

三　国土交通省令で定める気象の観測

2　政府機関及び地方公共団体以外の者が次に掲げる気象の観測を行う場合には、前項の技術上の基準に従ってこれをしなければならない。ただし、国土交通省令で定める気象の観測を行う場合は、この限りでない。

一　その成果を発表するための気象の観測

二　その成果を災害の防止に利用するための気象の観測

と、規定している。

第6条の技術上の基準とは、気象観測を実施する時に使用する気象測器の種類や性能で、気象測器検定規則に合格した測器を意味している。

第6条1項一から三の規定のように、研究、教育その他の目的では、検定から除外しているが、この除外と気象測器の性能とは無関係で、除外されているからと云って、性能が悪い訳ではなく、研究・教育であっても目的を達成するための精度維持は重要であることは論ずるまでもない。

各気象測器の許容誤差等は気象業務法第 9 条の検定の対象となる気象測器の検定の合格基準を定める告示[3)]を参照されたい。

この検定制度は、該当する測器の性能を客観的に評価でき、安心して使用出来る点―が大きなメリットであるが、対象外の気象測器、または計測機器の性能確認は何らかの方法で客観的に行うことが不可欠で、このプロジェクトの発足も一つの手段になろう。

6.1.3 観測目的の違い

気象庁の主務としている気象業務は、国民の社会活動の支援情報であり、どうしても居住地、またはその周辺に観測場所が点在している。さらに、寒暖に関係なく、休みなく観測するために、観測機器やデータの管理の効率化のため、おのずと観測場所も限定され、長期に渡って安定的に気象情報を得ることや経済効果を考えると、居住地やその付近に点在することはやむを得ないことであろう。

一方、気象業務以外の気象観測は気象現象の解明が主な目的であり、大きく目的が異なる。
当然、使用する気象測器も、それぞれの目的に沿った気象測器を選択することになろう。
気象測器を選択する上で、対象とする大気現象のスケールによって気象測器の性能が要求され、同時に観測で得られるデータ量も決定される。

このスケール議論は、自然現象を精度良く計測する上で、重要な検討課題の一つであり、対象とする大気現象の変化度合、すなわち、その大気現象が有する周波数より高い周波数に応答性能を有する気象測器でなければ、その現象を把握することはできない。これらにはサンプリングの定理など様々な理論が適用されるものの、時として技術的課題より経済的条件や観測場所の確保が観測を実施する上で大きな障害となるケースもある。

さらに、気象業務と研究目的では、直面した目的は違うものの、その根底は気象現象の解明という部分で相互関係にある。研究調査で解明されたものが、気象業務に取り入れられ、また、気象義務上の気象学的な課題が、研究調査を行うことによって解明される。さらに、気象業務範囲から逸脱する業務については、研究調査が担当する等、切っても切れない関係にある。このように研究調査は、気象業務以外の分野で、気象業務の補完的役割、建築・土木・観光等の特定目的でも活躍していることを忘れてはならない。

国内の気象測器は、殆ど気象業務が対象であり、斬新的な気象測器は殆ど誕生していない。情報のグローバル化が進み、何処ででも地球上に存在する気象測器や観測技術等を容易に導入することが可能であるが、我が国の気象測器は、他国製品に比べ長期間にわたって安定動作する等、製品に対する信頼性は高いと云えるが、必ずしも世界の先頭に位置する訳ではない。研究調査で使用する気象測器は、気象業務と同じ気象測器も使用するが目的に沿わない場合もあり、海外に目を向けざるを得ないのが現状であろう。

参考文献

1) 気象庁編集：気象百年史・同資料編，日本気象学会,1975,全般
2) 鈴木宣直編集：気象測器-地上気象観測篇，気象研究ノート,第 185 号，1996,全般
3) 気象業務法等法律関係はインターネットでも開示されている。

6.2 観測要素と気象測器

6.2.1 風の観測

風の観測機器はいずれもセンサーが空気の流れを受けて、何らかの方法で電気信号に変換して、その電気信号と風とを風洞で比較検査をして使用に供されることになる。このような機械的検出方法では構造上や電子回路上の誤差等が避けられず、いかなる計測機器であっても検出部の特性により避けられない誤差である。空気の流れに影響することなく、風速 0 m/s から精度良く瞬時に測定できることが理想であるが、風に関係する計測機器で野外の使用に耐え、全天候で稼働する観測機器は極めて限定される。

風の観測機器のない時代は、地物が風の影響を受ける様を見て、風の向きと風の強さを判断していた。歴史を振り返るに、産業革命以降、蒸気機関等産業技術の発達と共に、大規模な交易がはじまり多くの技術が飛躍的に発達している。中でも有名なのは、イギリスのフランシス ボーフォート（Francis Beaufort）海軍提督（少尉）時代に、航海日誌に風と波の関係を自身で定義して 1839 年から実用に供したビューフォート風力階級が挙げられ、現在も一部では使用されている。交易がはじまると海外から日常品たけではなく、多くの情報や技術を輸入するようになり、気象の分野も少なからず外国の影響を受け、明治時代初期の気象測器はじめ観測技術は、ヨーロッパやアメリカから人材も含めて輸入に頼っていた。その後、先人たちの尽力により、気象業務も順次充実するが、観測測器は輸入または輸入品の模写などで国内調達が可能となったが、飛躍的に進歩したのは、やはり第二次世界大戦終結以降であろう。

東京気象台が業務を開始した当時、すべての観測機器は輸入した測器を使用し、1886（明治 19）年、風速の観測するために風杯が 4 個ついた図 6-1 のロビンソン風圧計を正式に採用し、約 80 年の長きにわたって気象業務に使用された。風の観測の起源について、佐貫は著書 [1)]の中で、1752 年のドイツの Schober に遡ると記している。しかし、これは実用までには至らなかったようで、実用風速計となれば実績からみてもアイルランドのロビンソン（John Thomas Romney Robinson）が 1846（弘化 3）年頃考案した風圧計が挙げられよう。考案者の名前からロビンソン風圧計と称し、現在も開発途上国の一部でも使用されている。ロビンソン風速計は一定時間内の風程（空気の移動距離）に応じて、観測値を読み取ったり、パルス信号を発する機械式の風速計で、慣性モーメントや摩擦抵抗も大きく平均風速の測定に用いられた。これとは別に 1750 年代にイギリス ビラムが考案したビラム微風速計がある。この風速計が気象業務に使用されたかどうか定かでないが、微風観測用気象測器の評価は高く、現在も多方面で使用されている。

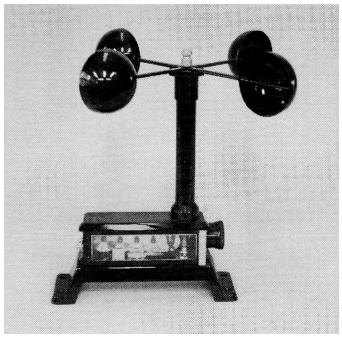


図 6-1 ロビンソン風圧計

気象業務での瞬間風速の観測は、1937（昭和 12）年から 1960（昭和 35）年まで使用されていたダインス自記風圧計が上げられる。しかし、1937（昭和 12）年以前の 1900 年前後に一時観測した記録もあるが、試験的な観測に止まったものと思われる。

このダインス自記風圧計は、風向に正対した時の風速変化を動圧と静圧の差圧変化に変換して、そ

の変化を水面変化に伝え、その水面に浮いている浮きの上下運動を機械的に記録して風速を求めるものある。瞬間風速の観測は可能なものの、水を使用しているために寒冷地では管理が難しく不評であったが、他の風力計では平均風速の観測であったが、数秒程度の追従性能であるものの瞬間風速が得られ、気象学的には意味のある気象測器と云える。

一方、風向の観測は、煙の流れる方向を観測員が視認しする目視観測や、風見鶏に似た矢羽式風信器が用いられ、観測技術の発達により観測員による目視観測から、自動観測へと移行すると共に、風向用観測機器は風信器と、風速用観測測器は風圧計と呼ばれていたが、1950（昭和 25）年に観測測器の呼称が変更され、風を観測する測器の名称も風向計・風速計に統一された。

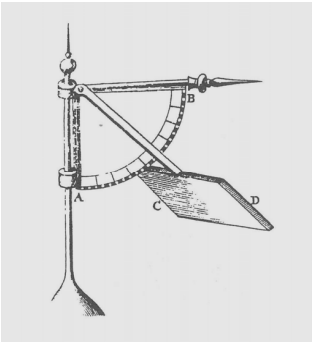


図 6-2　Hook の風速計

この他、支点で支えた平板を風の方向に正対させ、その平板が風圧で傾いた角度から風速を換算する図 6-2 に示すような風圧板型風速計もある。この風圧板型風速計には Pressure plate anemometer と英名もあり、開発途上国で現在も使用されているとの情報もあるが、現在の日本国内の実績は殆どない。

光田 [2] は、この風圧板型風速計で、風圧を受ける板の材質や大きさを変えて風洞実験を行なったが、一つの板では測定範囲が狭く、風速に応じた板を選択が重要であると報告している。

また、業務で開発途上国に出かけた本研究会のメンバ複数人が、風圧板型風速計を気象業務で使用していることを確認している。図 6-3 は開発途上国で実際に使用されている風圧板型風速計（図中〇部分）である。

話によると、風圧板型風速計 2 台（詳細は不明、弱風と強風か？）ポールの先端に設置されているものもあり、目視観測により風圧板の角度から風の強さ（風力？）を観測していたとのこと。

日本からみればかなり遅れた観測方法ではあるが、見方を換えれば、風景を見ながら観測員の主観で風を目視観測するより、古典的な機械ではあるものの、観測員の主観に依存せず客観的に観測値が得られることでは意味があろう。

図 6-3 現役の風圧板風速計

風向は、V 型の矢羽根風向計が東京気象台の業務開始以来使用されている。プロペラ型風向風速計が飛行機の胴体に似た形になっているのは、風の抵抗を小さくするためと、尾翼に相当する部分で風向を検出している。当然、円運動となり、風向の変動に応じて、常に風に対して正対することになり、この円運動を検出して風向に置き換えている。

当初の風向計は、矢羽根型風向計のみで風向による矢羽根の方向を観測員が視認したり、矢羽根の円運動を機械的に取り出して専用の記録器で記録する方法で観測されていた。

1945（昭和 20）年後半以降の国内混乱期に、気象研究所をはじめ公的機関の研究開発した気象測器の成果を気象測器メーカに提示して、国産化に移行した。中でも気象研究所 佐貫らの研究成果が大きく寄与しており、気象測器のみならず、観測上の問題点も指摘している。

現在国内で多く利用されているプロペラ型風向風速計の実用測器は、アメリカ ベンディックス社製プロペラ型風向風速計、通称エーロベェーンと称される風向風速計とされている。

しかし、このエーロベェーンは国産のプロペラ型風向風速計を開発するにあたり、参考にした記録はあるものの、気象業務に使用されたかどうかは定かでない。

気象業務で使用する測器は内製を原則とし、内部で研究開発されたものは付属機関の測器製作部門等で試作し、その試作品で耐久性や特性試験を重ね、最終的に、その試作機の設計図面や仕様書を基に気象測器メーカに発注する方式を採っている。

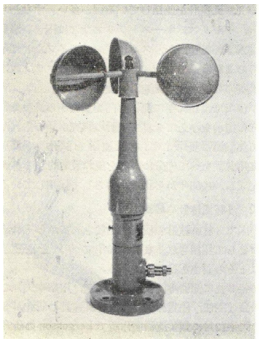


図 6-3a 三杯風速計感部 FC-1 型

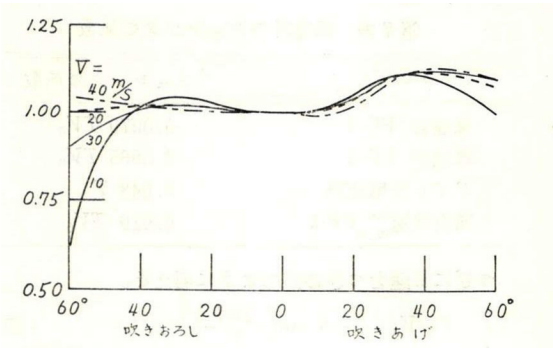


図 6-3b FC-1 型,風の角度特性

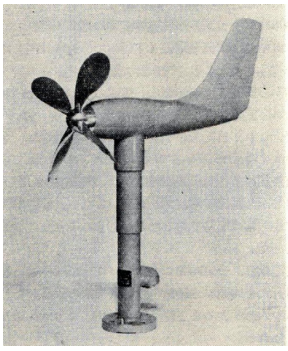


図 6-4a プロペラ型風向風速計感部 FF-1 型

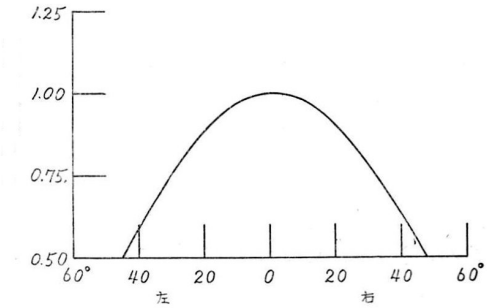


図 6-4b FF-1 型プロペラ型,風の角度特性

図 6-3a から図 6-4b は、気象業務用に 1950（昭和 25）年代に開発 [3]した三杯風速計とプロペラ型風向風速計で、1960（昭和 35）年より常用気象測器となり、気象官署に配備している。

1960～1970 年代は、国産のプロペラ型風向風速計でありながら、エーロベェーンと呼ぶ関係者も少なくはなかった。ロビンソン風圧計は新たに開発された三杯風速計に置き換えられ、気象業務から姿を消したが、暫くの間、気象業務以外の学校等で使用されていたが、最近は殆ど姿を目にすることはない。

自然界の風は整流ではなく乱流であり、風速計に正対する気流の流れだけはなく、三次元的に変化する中であらゆる方向の風を計測することになる。この観測値は、感部の形状に依存することになる。プロペラ型はプロペラの形状にもよるが、定性的には概ね Cos 曲線に近い特性を示し、三杯風速計は風杯の淵を工夫することで、全風向に対して概ね直線に近い特性を示すものの、風杯に対して吹き上げの風は実際より大きい値を示し、全体としては過大評価となるため観測値の扱いには注意を要する。風速の角度特性は本来個別に表記すべきものであるが、形状や構造が同じであれば、その個体のバラつきを含めて概ね一定範囲に収まり、器差または公差として公表されている。勿論、観測目的によっては、個体毎に誤差（器差）を調べる必要もあるが、通常はメーカの示す精度または誤差を利用している。図 6-4b の FF-1 型の風の角度依存性は、Cos 曲線に近いとされていたが、1975（昭和 50）年に三杯型風速計を廃止し、平均風速、瞬間風速をプロペラ型風向風速計で観測することになり、その時、誤差が議論され、調査や実験が行われた結果、プロペラの角度特性は Cos^2 曲線とほぼ一致すると報告されている。しかし、角度特性が問題になるような観測には、これらの気象測器は使用することは極力避けるべきで、三次元の風速が測定可能な測器、例えば、三次元の超音波風速計等が適しており、目的に適した測器を選択するのも重要であり、手元の気象測器が総てに適用出来るとは限らない点に注意を要する。

風速計の風杯またはプロペラの回転を始める時の風速を起動風速と言うが、当然、起動風速は小さいことが理想であるが、機械的な構造を採る限り機構上の負荷でゼロにはならない。

さらに、検出部が風速に応じた回転数を得た後、その回転数を電気信号に変換する新たなセンサーが必要となる。そのセンサーは小型発電機が使用され、この発電機の回転トルクも回転部の摩擦抵抗等ともに、起動風速を大きくする要因になる。逆に、風速が弱まった時に速やかに風速に対応して減衰するのか等、慣性モーメント等、動特性を向上させるかが、これら機械式風速計の課題であろう。

気象業務で使用している気象測器は、社会動向を考慮しながら、内部の開発研究や改良を実施しており、その結果は、気象測器検定規則に反映される。測器検定規則に合格することは、公的に技術的な証明が得たことにもなるが、これらの気象測器は日常的に十分管理されていることが前提条件となることを忘れてはならない。

気象業務以外では、林[5]は三杯風速計の動特性を調査して超音波風速計との比較を含め報告している。また、森らは[6]~[8]プロペラ型風向風速計の動特性について調査した結果、図 6-4b と同様に角度特性が Cos^2 曲線で得られたと報告している。これらの報告では周波数応答特性や起動特性そして減衰特性を詳細に調査し報告している。

この種の報告は、組織内や学会、そして大学内部の定期刊行物に掲載されており、不特定の人々が入手するには、残念なことであるが、それなりの努力が必要となる。なお、気象庁監修の測候時報や研究時報は、市販されていると同時に気象庁の図書室で閲覧することができる。

風向についても同様で、V 型矢羽根型風向計やプロペラ型風向風速計が横風を受けたときに、風向に正対する動きの検出に、シンクロナス モーター（交流同期モーター,セルシン モーターとも言う。セルシン モーターはアメリカ GE 社の商品名）が使用され、現在も一部で使用されている。

2 台一つ組みのシンクロナス モーターの固定子の同じ端子を接続し、同様に二つ回転子を接続して、その回転子に交流 100V を印加することで、片方が回転するともう一方も同じ動作する特性を利用している。このことから、2 台一つ組みのシンクロナス モーターの一つを風向計に、もう一つは、指示

器または専用の記録器に取り付けることで、風向の記録を可能とし、このアナログ時代の成果は、現在も一部で活躍している。

気象業務ではWMOの下部組織 、CIMOの第10回委員会の勧告に基づいて、1990（平成2）年から1994（平成6）年に風向風速計の開発と実用試験を行っており、1994（平成6）年にこれら開発経過を踏まえて共通仕様を作成したと守屋らは報告[9]している。この報告ではスリップリングの記述はないものの、風向・風速の検出を接触方式から無接触方式に変更していることが読み取れる。

無接触方式をブラシレスと称するメーカもあり、スリップリング方式ではなく、非接触で信号の受け渡しを可能にしているようであるが、その詳細は開示されていない。

いずれにしても、非接触で信号の受け渡しを行っているならば、スリップリングとブラシを使用して信号の受け渡しよりは、接触抵抗や部材の摩耗抵抗、そして、接点部で生じるスパークやノイズの問題が解消され、同時に多少ではあるが動特性向上に寄与していると考えられる。

また、守屋らの報告の中でプロペラや本体、尾翼にポリカーボネイやグラスファイバーを使用することが記述されており、プロペラ型風向風速計の本体の改良も検出部同様に議論している。

ポリカーボネイト（Lexan樹脂）は1953（昭和28）年アメリカ ダニエルWフォックスの発明で、電線の絶縁体を開発している過程で偶然ビーカーに付着したネバネバした物質が起源と云われている。衝撃や耐久性、透明度に優れて、日常生活のあらゆる部分で使用されている。

ポリカーボネイトはアルミダイキャストに比べ軽く、慣性モーメントが小さくなり、結果的に起動風速を小さくする等、全体的に動特性の向上に寄与する等メリットも大きい。

一方では、それまでのアナログからデジタルに移行することになり、デジタル技術力と共に、検出部に使用する電子部品などの耐環境対策が要求されることになる。

気象業務での気象観測は、恒久的で電源や観測場所も十分検討して決定するが、研究調査でも観測期間が気象業務に比べたら短いものの、観測機器を野外にさらした時の耐環境という点では同じであり、予定の観測場所で商用電源が得られず、仮設電源や電池を使用するケースも多く、電源確保も観測場所を選択する上で、重要な課題でもある。最近の気象測器は、電源も直流12V等が使用され、直流電源動作によって停電時のバックアップ電源の確保が容易となり、電源障害による欠測率の改善に大きく寄与しているものの、更なる低消費電力に期待したい。

この他、超音波風速計の議論もあるが第6章3項に記載しており、ここでは省略する。

上記以外にも、熱線風速計、サーミスタ風速計等風速の計測機器は数多く使用されているが、今回の評価観測では使用しておらず省略した。

●プロペラ型風向風速計 W855-Z1 型

今回の評価観測で使用したプロペラ型風向風速計は、小松製作所製の図 6-5 に示す W855-Z1 型である。気象業務の共通仕様（CIMO の第 10 回委員会の勧告が基本）に準拠するもので、気象測器検定規則に適合しており検定証が交付されている。

図 6-5 W855-Z1 型

風速はプロペラが 1 回転すると 60 パルスを得られ、パルス数は、風速と比例関係にあり、パルスの数を数えることで風速を得ることとなる。一方、風向は、8 bit ロータリー エンコーダを使用しており、風向の角度分解能は 360/256 で 1 デジット当たり 1.41°となる。

風向風速計本体は、日本で最初にポリカーボネイト樹脂とグラスファイバー、そして尾翼はポリエステル樹脂とカーボンクロスを使用して軽量化を実現している。

結果として、特性の向上に大きく貢献している。中でも、スリップリングを使用したブラシ方式から、電子的に伝送するノンブラシ方式に変えたこともあって、アルミダイキャスト、発電機、シンクロナス モーターを使用したプロペラ型風向風速計に比べ、

器械的負荷や慣性モーメントが改善されて性能向上に寄与するとともに、経済的にもコストの軽減を実現した。

このシリーズでは信号処理機能（統計処理、伝送機能等）を内蔵したタイプも用意されているが、今回は各検出器の出力を加工せず、一般的なオープン コレクター形式で出力しており、受信側でどのようにも加工出来るのも特徴の一つである。

W855-Z1 型はプロペラの直径は 25 cm、長さ 61.3 cm、高さ 63 cm、起動風速 0.4 m/s、重量 約 3 kg、精度は 6 m/s 以下は±0.3 m/s 以内、6 m/s 以上では±5 % 以内、そして電源は 10～13.5VDC、消費電流は約 90 mA である。以前の起動風速 2m/s 程度の風速計からみれば、飛躍的に性能が向上している。

プロペラ軸に、発電機のかわりにスリット付きの円盤とフォトカップラで構成するパルスを発生する機構が組み込まれている。その光パルス検出部を図 6-6 に示した。

プロペラ軸に取り付けられている円盤はプロペラの回転よってスリットを光が通過するごとに光パルスが発生する。

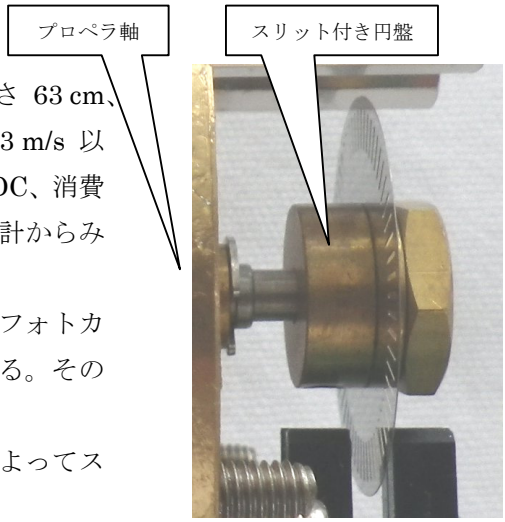


図 6-6 光パルス検出部

図 6-6 の下部に円盤を挟んで黒い部品がフォトカップラで、円盤のスリットを通過した光は、パルス信号に変換されるが、プロペラの回転数が増すと、パルス幅は狭くなり、このままでは次段の信号処理に不都合が生じるたるために波形整形処理等を行う。

また、フォトカップラ周辺の電子部品は、風向風速計本体内部に実装されており、間接的ではあるものの、厳しい気象条件下で安定した機能が期待され、環境を考慮した厳選した部品で構成することは論じる迄もない。

また、この機構で変換したパルス信号は回転トランスを使用したブラシレス方式で伝送される。

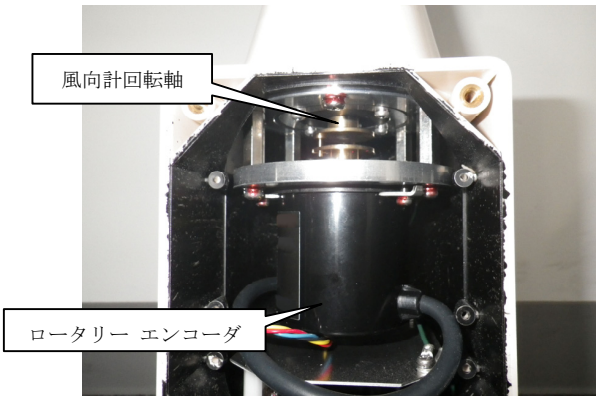


図 6-7 回転軸に取り付けたロータリー エンコーダ

風向は、図 6-5 のプロペラと反対側の尾翼部分に風を受けて常に風の方向に正対する。その回転軸下部に、シンクロナスモータの代わりに、アブソリュート型の光ロータリー エンコーダの軸と回転軸を接続して風向を得ている（図 6-7）。

このままでは、信号線や電源供給用電線等の信号線本数が多くなるが、これらの信号線はすべて AWS データロガーの FEU に接続するため、すべての信号線を敷設する必要はない。

通常、FEU は風向風速計や温湿度計など気象測器近傍に設置するため、10 数 m 以内で収まる。また、電源の供給も FEU を通じて行ない、FEU と AWS データロガー間は UTP（Unshielded Twist Pair cable）で接続し、その距離は数 100 m 離れて設置することも可能である。

6.2.2 温湿度の観測

気象業務では、気温は、その国の国民の平均身長を鑑み、顔の位置する大気の温度を気温としている。しかし、研究となれば、目的により顔の位置が適当とは言い難いが、空気の温度を計測するという点では、顔の高さで観測するかは別にして同様と考えてよい。

気象業務での温度は、当初はガラス製温度計が使われ、最初に輸入されて間もなく、輸入品を模写して国産化が図られた。ガラス製温度計も単に温度を計る温度計から、最高最低気温を測定する専用の温度計、アスマン乾湿計用の温度計等、多種類が使用された。

当然、観測員が温度計の目盛りを読み取る目視観測であったが、バイメタルを利用した自記バイメタル温度計やバイメタルの部分をヨーロッパの女性の毛髪に置き換えた、自記毛髪湿度計などが使用されてきた。現在の気象業務では殆ど使用されていないが、今日でも一部の分野では活躍している。

気象業務では、白金抵抗測温体 いわゆる Pt 100 は、気象観測用というより、工業関係の計測が最初のようである。この他、熱電対温度計やサーミスタ温度計が挙げられるが、熱電対温度計は金属線が 2 本あれば容易に温度計測ができ、日本では 1920（大正 9）年頃、白金線と白金ロジウム合金線をイギリスから輸入して、国産化したのが最初と云われている。現在でも産業界では多く使用されている。

サーミスタは温度計測素子としては、白金抵抗測温体に比べ電気抵抗も大きく、扱いも容易であったが、国内で実用化された当初は殆どハンドメイドに近く、特性の安定性に欠けることがあって嫌われた時期もあつたが、近年は製造技術が飛躍的に向上して優れた温度センサーの一つとして挙げられる。今回の CWS の中にはサーミスタを気温測定に使用している器種がある。

サーミスタ（Thermistor）は、電気抵抗が負の温度係数をもったマンガン、コバルト、ニッケル、銅等の金属酸化物粉末を混合して、1000～1350 ℃の高温で焼結した一種の半導体である。サーミス

タの形状によって、ビート形、ロット形、ディスク形、ワッシャ形などの直熱形、そしてサーミスタ素子の近くにヒータを配置した傍熱形と称する製品もある。

元々、サーミスタは熱に敏感な抵抗体（Thermally sensitive resistor）から生まれたもので、1930年代後半に実用化された。温度特性から負の温度特性を持つ NTC（Negative Temperature Coefficient Thermistor）、ある温度付近で電気抵抗が急増する正特性を持つ PTC（Positive Temperature Coefficient Thermistor）、そして、PTC とは逆に、ある温度付近で電気抵抗が急減する CTR（Critical Temperature Resistor）の 3 種類があり、温度計測用としては NTC タイプのもので、通常サーミスタと呼んでいる。その中でもビート形が多く使用されており、特別な場合はロット形も使用することがある。サーミスタは開発実用化以来、電子回路の温度補償に多く用いられ、現在も重要な位置を占めている。一方、PTC や CTR は家電や火災報知器などで利用している。

サーミスタは小型で電気抵抗も大きく時定数が短い等メリットはあるが、温度特性が温度に対する抵抗変化は非直線であるがため、計測する温度範囲が広くなると電気抵抗と温度の関係の直線性が損なわれることや、固体の電気抵抗にバラツキがあって、互換性に乏しいなどのデメリットもあるが、特性を十分理解して扱えば、優秀な温度計測センサーの一つである。

サーミスタ素子の電気抵抗のバラツキは、サーミスタ素子 2 個を並列または直列に接続する素子互換方式、サーミスタ素子 1 個に対して 3 個の抵抗をπの字ように接続（π回路）したものや Y の字ように接続（Y 回路）する合成抵抗式、素子に 3 線を接続して、3 個の抵抗を接続した比率方式などの互換回路が実用化されているなど、デメリットの一つは解決される。さらにデジタル技術を駆使することで、擬似的ではあるものの直線性の問題も解決されよう。

サーミスタの温度抵抗の関係は、

$$R=R_0 \exp B \ (1/T-1/T_0) \cdots\cdots (1)$$

ここに

R ： 温度 T（K）のサーミスタ抵抗値

R_0 ： 基準温度 T（K）のサーミスタ抵抗値

B ： サーミスタ定数

である。

式の B は B 定数と言われるもので、サーミスタの材料や熱処理によって決定される。この B 定数が小さければサーミスタ素子の温度係数は小さく、大きければ、温度係数は大きくなる。
また、最近はサーミスタの製造術が飛躍的に進歩し、初期にくらべて安定しており、過去にあった突然抵抗値が変化する現象は殆どない。また、製造技術の向上により経年変化も改善された。使用に当たっては、サーミスタに流す電流によって発熱する自己加熱に注意し、抵抗値の温度係数も大きいことで信号処理が容易なこともあって、ラジオゾンデ等にも使用されている。
研究調査でもサーミスタのメリットを生かして、それぞれ観測目的は違うものの、温度計測に数多く使用されている。

●白金測温抵抗体

測温抵抗体は、金属が温度変化によって電気抵抗が増加する性質を利用したもので、気象関係では、白金測温抵抗体（以下 Pt 100 という）、いわゆる白金温度計センサーが使用されている。

白金は元素であり使用温度範囲では温度と電気抵抗の関係が安定し、恒久的なセンサーとして温度計測に使用されている。特に互換性に優れている。温度係数が大きいとは言っても、サーミスタに比べれば小さい。測温抵抗体が JIS（日本工業規格）に制定されたのは 1954 年 2 月である。しかし、この制定は産業界の実情に合わないということで、1957 年に改正された。

この改訂では、測温抵抗体は金（Pt）、銅（Cu）、ニッケル（Ni）の 3 種類で、0℃の電気抵抗を 25 Ω、50 Ω、100 Ωとし、R100/R0 の抵抗比を白金は 1.3910、と規定し、流す電流も 5~20 mA の範囲で 5 mA 間隔に規定している。その後、産業活動の活発化に伴って、需要も多種多様になり、1960 年に再度改訂するなど、現在に至るまで幾多の改訂がなされ、現在は、1997 年に改訂した JIS C 1604-1997、この改訂時に 1990 年国際温度目盛（ITS-90）をも反映している。

いわゆる新 JIS ではＲ100/Ｒ0 の抵抗比は 1.3851 と規定し、温度測定時の許容差以下のように規定している。

表 6-1 Pt100 の許容差

温度	A クラス		B クラス	
℃	℃	Ω	℃	Ω
-100	±0.35	±0.14	±0.8	±0.32
0	±0.15	±0.06	±0.3	±0.12
100	±0.35	±0.13	±0.8	±0.30

任意の温度 t に対する抵抗値 Rt は-200 ℃~ 0 ℃では下記の(1)式を、0 ℃~ 850 ℃では(2)式を使用するとしている。

$$Rt=R0\,[1+At+Bt^2+C\,(t-100)\,t^3] \quad \cdots\cdots(1)$$

$$Rt=R0\,(1+At+Bt^2) \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに

$A=3.9083\times10^{-3}℃^{-1}$

$B=-5.775\times10^{-2}℃^{-2}$

$C=-4.183\times10^{-12}℃^{-4}$

である。　(JIS C1604-1997 より引用)

上記の式は、基準抵抗値であって、個体の抵抗値は実測をしなければ求めることが出来ない。

また、JIS では Pt 100 に流す電流値を 0.5 mA、1 mA、2 mA の三種類と規定している。

Pt 100 の内部導線の結線方式も 2 線導線式、3 線導線式、4 線導線式の三種類としている。

当初、Pt 100 は、ブリッジ回路を利用して温度よる Pt 100 の抵抗変化を電圧に変換していたが、ブリッジ回路を構成する固定抵抗の温度係数が計測に影響し、正確に計測するには固定抵抗の温度係数を如何に小さくするかで努力を要した。多くの場合、マンガニン線をベークライト等の絶縁物製のボビンに無誘導になるように巻きつけ、高温の油などを使用してエージングする方法等がとれていた時代もあった。

その後、温度係数の小さな金属皮膜固定抵抗が出現し、それらを使用するようになった。さらに、

直流の定電圧を利用したブリッジ回路から、定電流用の集積素子が出現し、４線式の定電流作動に移行し、現在は殆どが定電流で作動する４線式 Pt 100 が使用されている。この定電流で作動させることで Pt 100 の出力を接続する電子回路にもよるものの、Pt 100 と変換器を結ぶ導線の温度係数の影響は解消される。同時に最近デジタル機器を接続することが容易になり、アナログでは成しえなかった細かい温度計測や直線性の補正を同時に処理することも可能となっている。

評価観測で使用した Pt 100 は、新 JIS に適合し、且つ、測器検定規則にも適合している。
野外で観測するため Pt 100 はステンレス製の保護管に封入されており、その形状と大きさ、そして内部構造が時定数を左右することは避けられない。

表 6-2 シース型 Pt 100 の時定数　63.2 %応答時間

m/s ＼ mm	水　中				空　気　中				
	0	0.2	0.5	1	0	1.0	2.0	3.5	5.0
8.0 φ	19.6	13.1	13	12.7	390	154	125	93.2	78.2
6.4 φ	12.9	9.4	9.3	8.8	292	107	82.3	66.4	56.4
4.8 φ	6.9	4.9	4.9	4.6	240	70.7	54.9	44.6	39.4
3.2 φ	2.5	2.1	2.1	1.8	125	39.6	30	23.9	21.1
1.8 φ	1.7	1.5.	1.5	1.4	44.9	14.1	10.7	8.4	7.7

単位 sec 小松製作所提供

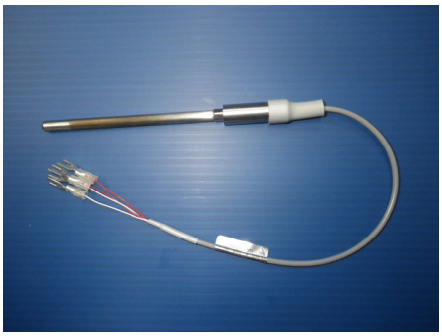


図 6-8 評価観測に使用した Pt100 と同型

今回、使用した図 6-8 の Pt 100 は、外形は約 6 mm シース（スンレス製）の長さ 150 mm の 4 線式タイプ、空気中の時定数で 300 sec 以下と割合長い。これには理由があって、今回使用した Pt 100 は気象業務で使用することが主目的であり、気象観測値の継続性が重要視され、過去の温度計測の時定数が考慮されており、むやみに時定数の短いセンサーを使用することは得策ではないというところに行き着く。

気象観測では Pt 100 そのものを大気中に晒すことはなく、日射や輻射熱での誤差を防ぐ必要があり、シェルタに格納して使用する。このシェルタは自然通風式と強制通風式があり、後者の強制通風式が圧倒的に多い。自然通風式は、通風に動力は使用せず、日射等を遮断したシェルタの中に Pt 100 を格納して、風を利用して Pt 100 に常に空気があたる構造になっている。

したがって、日中の日射があって無風時はシェルタ内部の空気が入れ替わらず、測定値が実際の温

度よりやや高めになり、その誤差は 3 ℃に達することもある。一方、強制通風筒は、図 6-9 に、評価観測でプラットホームに設置したシェルタを示した。Pt 100 は二重のパイプに囲まれた中に位置し、シェルタ上部に装備されている電動ファンによって常に外気を吸い込み、日射や輻射熱に関係なく温度を測定可能な構造になっており通風速度は 5 m/s 以上としている。

通風することで、センサーと、センサーに接する空気間の熱交換効率が高まり、表 6-2 に示すように時定数は短くなる。

図 6-9 強制通式シェルタ

●強制通風式温湿度計　シェルタ TH-500 型、温度計 KET-2

今回の評価観測に使用したシェルタ TH-500 型は小松製作所製で、Pt 100 と湿度センサーの二種類を格納するタイプである。

各メーカで形状や材質に違いがあるものの、機能は同じと考えて良い。尚、シェルタは気象測器検定規則の対象にはなっていない。

このシェルタのサイズは、格納するセンサーの大きさに依存するため、Pt 100 の形状を小型にすれば、時定数は短くなると共に、シェルタも小型化が可能であろう。また、時定数が短くなることが問題になるならば、今日のデジタル技術をもってすれば、時定数を統計的に操作することも技術的に可能であろう。

また、シェルタは気象測器の中でも遅れている部分であり、他の気象測器が直流電源で作動している中で、電動ファンに直流電源を使用している器種もあるものの、商用電源で動作する電動ファンを使用する器種が圧倒的に多く、観測者の立場からみれば早急な対策を望む処である。このシェルタには、センサー1 個を格納する小型タイプも用意されている。

●湿度の観測

湿度の計測は、当初から乾湿球湿度計（現在の乾湿球温度計）が使用されて、当初は検湿器と呼ばれていたようである。1886（明治 19）年、に気象観測法にレギョー（H.V.Regnault）の湿度計算表が掲載され、翌 1887（明治 20）年から使用を開始し、1889（明治 28）年頃から毛髪自記湿度計が実用に供している。そして、1937（昭和 12）年に通風式乾湿計が完成し、気象官署に配置されている。その後、改良されて 1950（昭和 25）年に実用化した通風式乾湿計を常用測器として、全国に展開している。また、同年、アメリカ フォックスボロー（Foxboro）社から塩化リチューム露点計を輸入し、試作を経て 1961（昭和 36）年、航空気象観測で実用に供すると共に、1971（昭和 46）年、隔測温湿度計と共に全国に展開している。しかし、静電容量式湿度計の出現により、1996（平成 8）年からは、この静電容量式湿度計が常用測器として全国に順次展開している。

静電容量式湿度計の起源はアメリカ Dunmore と言われており、1930 年代にラジオゾンデの開発が始まった頃で、Dunmore は、物質が吸脱湿によって電気的特性が変化することを利用して静電容量型高分子膜湿度計が誕生した。さらに開発改良が重ねられ、現在の実用化に至っている。

毛髪自記湿度計は、毛髪の湿度による張力を機械的に拡大し、時計が内蔵されている円筒形の記録部に記録紙を巻きつけて記録している。この毛髪自記湿度計は、現在も多くの分野で使用されている。気象業務に静電容量式湿度計が採用される頃から、気象業務以外でも積極的に利用するようになった。

現在、気象関係に使用されている静電容量式湿度計の多くは、R 社と V 社の製品が多く使用され、いずれも気象測器検定規則に適合しているが、温度のような精度を得るまでには至っていない。今回の評価観測で使用した湿度計 HMP155 は V 社製で、多くの資料が開示されており、ここでは省略した。

6.2.3 雨量の観測

雨の観測や記録は、必ずしも気象学に限るものではなく、日本でも古くから観測したという記録が残っている。しかし、これらは産業等一つの目的のためで、その目的を達成すると観測は終ってしまう。気象業務開始当時は、観測技術を指導する方々が外国人であったこともあって、輸入に頼っていた。また、雨量計の形も国によって様々で、大きいものでは直径 1 m から 10 cm まで数多くあったが、日本では、直径 20 cm または 10 cm の受水口が使用され、概ね 20 cm が多かったようで、現在は 20 cm に統一している。1890 年代にはすでに自記雨量計の使用を開始している。1910 年代以降、サイフォン式雨量計やヘルマン式自記雪量計等が使用されたものの、殆どは貯水式雨量計で、観測員が一定時間毎に貯水ビンに溜まった雨水を雨量ますと称するメスシリンダーで計量する方法が採られていた。

一方、現在多く使用されている転倒ます型雨量計は誰によって考案されたのかは定かではないが、佐貫は著書の中で、カナダの 1953（昭和 28）年にミッドルトン（Middleton）がカナダ気象局設計の転倒ます型雨量計を紹介している。時期を同じくして気象業務の中でも開発試作が行われ、有線・無線ロボット雨量計などに使用された。その後、幾多の変遷があったが、1964（昭和 39）年に気象業務に採用されている。当初転倒ますが転倒する時に発する信号（ON・OFF のパルス）を得るために水銀スイッチが使用されていたが、水銀が社会問題になって以来、順次廃止されてリード スイッチに置き換えられた。

●転倒ます型雨量計 R1-502 型

今回使用した図 6-10 の転倒ます型雨量計の R502 型は小松製作所製で、内部に図 6-11 示す構造が格納されている気象測器検定規則の適合品の 0.5 mm 計である。

雨量ますは 2 個装備されており、片側が満水になると、その雨水の重みでシーソーのように下がり、排水されると同時に、片方の空いている雨量ますに雨水が貯まる、この繰り返しになる。雨量ますが転倒する時に磁石とリードスィッチによって、無電圧の接点信号を発する。R502 型の接点電力容量は 15 W となっている。以前は、水銀をガラス製の容器に封入し、電極 2 極つけた水銀スィッチを使用していた。

しかし、2000 年前後に水銀スィッチに代わって、現在の磁石とリードスィッチが使用されている。水銀スィッチは、チャタリングや故障の発生率が低く、扱いやすい部品であったが、水銀が人体に悪影響を及ぼすことが社会問題となって使用を止めた。

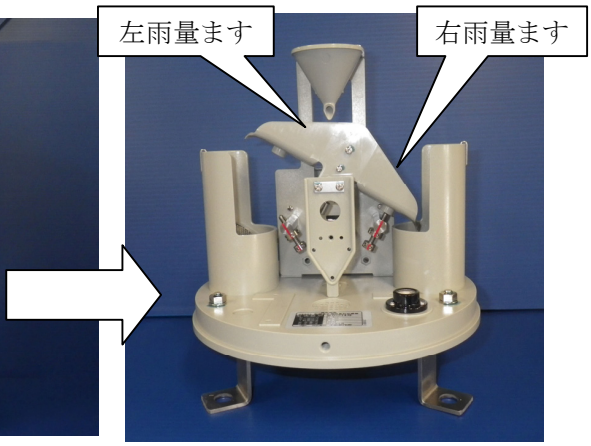


図 6-10 転倒ます型雨量計外観　　図 6-11 転倒ますの機構部

構造上、「雨量ます」が転倒中に水平状態になる瞬間、雨水が左右の「雨量ます」に注がれ、計測誤差の原因の一つになるが、その誤差は小さいとされている。

当初は、この「ます」の材質は金属であったが、この雨量計では外筒と漏斗の部分を除いて、ポリカーボネイト樹脂を使用し、計量化とコスト軽減を実現している。

雨量ますの容量により、0.5 mm 計、1.0 mm 計等があるが、0.5 mm 計が多く使用されている。WMO では 0.1 mm 計も規定し、海外では 0.1 mm 計を使用しているが、豪雨の時は雨量ますの転倒が激しくなって計測誤差が大きいとも云われている。

雨量ますの容積は受水口の直径 20 cm であるから、0.5 mm 計では 15.7 cm^3 に、1 mm 計では 31.4 cm^3 となる。精度は、雨量 20 mm までは 0.5 mm 以内、20 mm を超える時は 3 % 以内としている。また、寒冷地では、内部に商用電源を電源とするリボーンヒータを装備した凍結対策済の寒冷地仕様タイプも多く使用されている。

表 6-3　基準器の機器仕様

風　速	測定方式	光パルス	降水量	測定方式	転倒ます
	測定範囲	0～60 m/s		精　度	雨量 20mm まで 0.5mm 以内 雨量 20mm を超える時 3%以内
	精　度	6m/s 以下±0.3m/s 以内 6m/s を超える範囲 ±5%以内		分解能	0.5mm
	分解能	0.01948 m/s	出　力	風　向	8 ビットグレイコード
風　向	測定方式	ロータリー エンコーダ		風　速	60 パルス/1 回転
	測定範囲	0～360°		気　温	抵抗値　0℃=100Ω Pt100
	精　度	±3° 以内		湿　度	±1 VDC
	分解能	1.4°		雨　量	無電圧接点
温　度	測定方式	Pt 100Ω 強制通風型	電　源	電　圧	風向風速：DC10～13.5V 温湿度（通風筒(湿度電源含)）：AC100V
	測定範囲	-50℃～+80℃		消費電力	風向風速：約 90mA 温湿度（通風筒(湿度電流含)）：40VA
	精　度	±0.15℃（0℃の時）	使用環境条件	温　度	風向風速：-30～+50℃（プロペラ部に氷結、積雪なきこと） 温度：-50～+80℃ 湿度：-80～+60℃ 通風筒：-10～+70℃ 雨量：5～+50℃
	分解能	演算器側に依存		湿　度	0～100 %
湿　度	測定方式	静電容量式			
	測定範囲	0～100　%			
	精　度	±(1.0+0.008×読み値)%RH　(-20 ～+40℃)			
	分解能	0.1%			

6.2.4 設置環境

前節までは各種測器自体の特性について述べたが、本節では観測測器を設置する上で適切な設置環境や取り付け方法について述べる。

気象観測を実施する上で、目的に即した気象センサーの選択は重要な項目であるが、その気象センサーを設置する場所も考え方によっては一つの気象センサーである。
設置場所の選択は、気象業務（気象庁の実施する気象観測業）の地上気象観測法に規定事項に添って選択を行っていた歴史的経緯があるが、この地上気象観測法も昨今の規制緩和などもあって、必ずしも厳守されていない。一つには気象業務以外の気象観測では、観測目的が明確に定義されており、最低限その目的が達成可能な気象センサーと観測場所の選択が重視される。

また、気象観測場所も、以前は観測員が百葉箱の中のガラス温度計や地温を測定する曲管ガラス温度計、貯水式雨量計の計量、バイメタル自記温度計の記録紙等の目視観測や交換作業等の観測のため、地面も芝生を張り柵で囲み、気象測器の管理も含め、安定した気象観測が継続されるようにした露場と称する場所を利用していたが、多くの観測要素の計測に電子技術を応用した気象センサーの導入により、露場の概念も変化している。

ここでは、気象業務に相当する気象観測を行う上で必要事項について議論することとした。
特に、気候調査や防災気象に関する気象観測は、民間が観測する場合も気象業務の補完的意味合いもあり、気象業務での地上気象観測法に準拠することが望ましい。

● 気象測器設置環境について

気象観測の手引き[10]によると、

『風の観測は、周囲の地形の影響を受けやすいので、地域の代表的な観測を行う必要がある場合には、平坦な地形で行ない、測器を設置する高さは地面状態に左右されないよう一定の高さ（6～10 m）が必要である。降水量の観測については、地形の影響の他に周囲の構造物の影響を受けやすい。この影響は、構造物から構造物の高さの 2 倍以上離れた場所で観測すれば少なくできる。これが不可能な場合でも 10m 以上構造物から離した方がよい。また、降水量、気温、湿度の観測においては、自然風を妨げない柵などで仕切って測器への不慮の障害を避け、芝を植生して日射の照り返し、雨滴の跳ね返りを少なくすることが一般的である。この設置場所を露場という。露場の面積は広い方が望ましく、アメダス観測所においては、概ね 70 ㎡ 以上の面積を確保している。また、気象庁では、気象測器の設置部分（7×5 m 程度）に人工芝を敷設した場合においても、気象観測への影響がないことを確認しており、雑草対策などに活用できる。』

と記載されている。

また、大田・篠原（1981）によると、

『日陰にならない水はけのよい平坦地を選んで露場を作る。近くに建物があるときは、その南側がよい。広さは測器の種類や数にもよるが、大体 50 ㎡くらいは必要であろう。』

と記載されており、露場内の測器の配置例も記載されていた（図 6-12）。

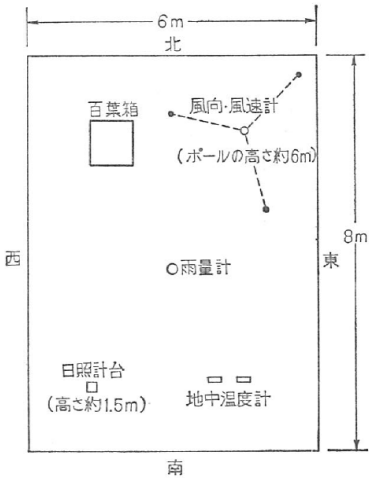


図 6-12 露場内の測器配置の一例（大田・篠原,1981）

このことから、適切な観測を行うためには 50 ㎡～70 ㎡ 程度の広い露場が必要であり、定期的にメンテナンスを行わなければならない。

● 測器の設置高さについて

1.風速計の場合

気象業務では、WMO は風速計の高さは開けた地形上の地上 10 m を標準的な高さと規定しているが、開けた地形とは、風速計と障害物との距離が少なくとも障害物の高さ 10 倍である領域としている。開けた地形の観測が難しい場合、地表面から測風塔を建てたり、屋上に設置台や支柱を設けることで観測する。測風塔または設置台からは、支柱によりさらに 2 m 以上の高い位置に測器を取り付け、風の乱れが観測に出来るだけ影響しないようにする。設置する高さは周辺にある建物の高さ、形状、配置を考慮して決定する。

測風塔では一般的には最も高い建物の 1.3～1.5 倍以上（屋上に支柱を設置する場合はその高さは建物の高さの 0.35 倍以上）の高さが目安としている。また、屋上に設置する場合は風の乱れが小さい建物の中心付近に設置する。我が国の気象業務でも WMO の勧告に基づいて、プロペラ型風向風速計の高さの基準は、プロペラ軸の中心を 10 m としている。

また、WMO では気象観測に使用する気象センサーの技術基準も規定し、それぞれ国情に添って勧告を実現しており、日本では風向風速の観測に、同一空間で風向風速を同時観測可能なプロペラ型風向風速計を使用しているが、外国では、風向に矢羽根型風向計を、風速計に風杯型風速計を使用している例が多い。

● 支柱による気流の影響

設置環境が整ったら、次は観測測器を設置するわけだが、観測測器自体とそれを支える支柱やワイヤ等との位置関係にも気を配らければならない。

風向風速計の取り付けに関しては、国際エネルギー機関（IEA : International Energy Agency）の報

告書[11] に詳しく記述されている。
また、報告書の日本語解説として谷垣[12] がまとめたものが一般社団法人 日本風力発電協会の Web ページにも記載されているので、併せて参照していただきたい。

図 6-13 は、気流が左から右方向に流れて支柱にぶつかったとき、風速がどのように変化するかを表わしているものである。基準風速を 1.00 とし、1.00 より大きい値を示している領域では風速が強まっている領域。反対に 1.00 未満の領域では風速が弱まっている領域を示している。
また、図中のスケールは支柱直径の倍数を示している。

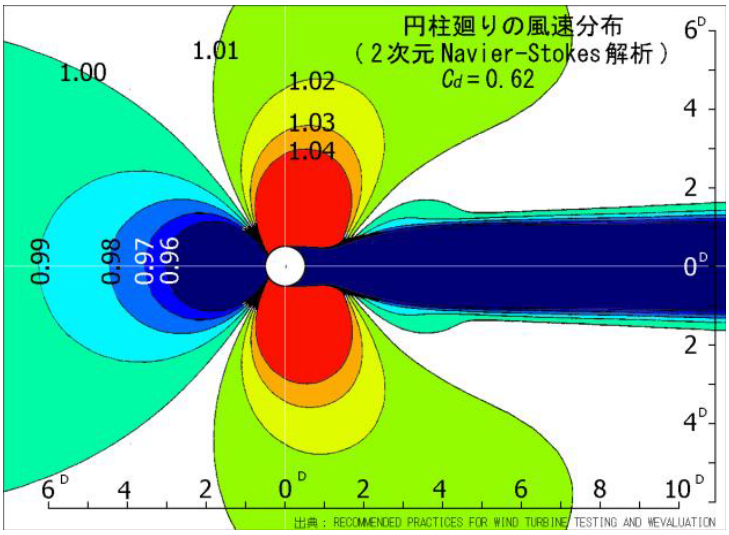


図 6-13 気流におよぼす支柱の影響（谷垣,2008）

支柱上流および下流では、概ね 1.00 以下となっており風が弱まっていることが分かる。
反対に図の上下の領域（つまり風の流れに対して垂直方向）では、風が強まっていることが分かる。風が強まる領域は垂直方向だけでなく後方斜め 45 度方向にまで及んでいることから、広範囲に影響を与えていることも示唆している。これにより、正確な風速を測る上で支柱から離れた位置で測定しなければならず、おおよそではあるが支柱直径の約 7 倍程度離れた位置に風速計を設置すれば、後方斜め 45 度方向の風も 1％ の誤差以内で測定可能になることを示している。

● 取り付け方法による影響

前項では、支柱による風速への影響について述べたが、本項では観測測器自身の取り付け方法による乱れの影響について述べる。前述の IEA の報告書に取り付け方法の良い例と悪い例が記載されているので、図 6-14、図 6-15 で簡単に紹介する。

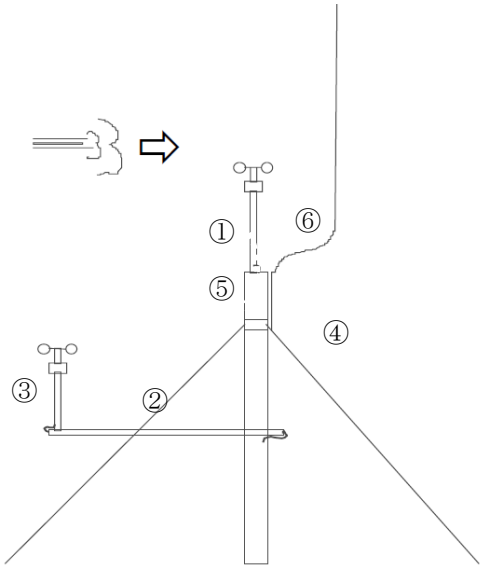


図 6-14 良い設置方法

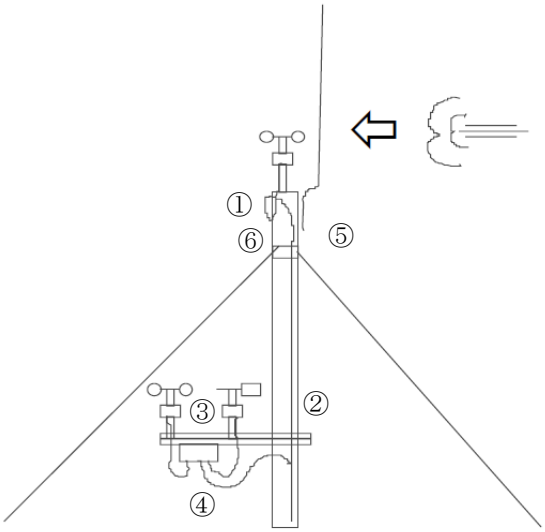


図 6-15 悪い設置方法

図 6-14：良い設置方法

① タワー頂上にある風速計は、タワーの影響が出ないくらい支柱を高くして風速計を取り付けること。

② タワーの低いところにある風速計は、水平方向にブームを伸ばしタワーやワイヤの影響が出ないようにすること。

③ 少なくともブームの直径約 15 倍程度支柱を高くした位置に風速計を取り付けること。

④ 卓越風向を測る際、乱れの影響を最小限に抑えること。

⑤ ケーブル、コネクタ、クランプなどによる不要な突起による影響を受けないこと。

⑥ 避雷針によって引き起こされる軽微な影響を風速計が受けないこと。

図 6-15：悪い設置方法

① タワー頂上の風速計は、支柱が低すぎてタワーに近すぎるため、乱れの影響が出てしまう。

② タワーからの距離が近く、ブームの断面が鋭角や山型であるもの。

③ 低い風速計において、ローターとブームとの距離が近すぎること。

④ 低い風速計において、ワイヤやその他の接続部に近すぎること。

⑤ 卓越風向を測る際、大きな乱れを発生させるような取り付け方法。

⑥ ケーブルやコネクタ、クランプなどの突起による乱れの影響を軽視した取り付け方法。

2.温度計の場合

WMO では、一般的な気温の観測は、地表面による日射の影響を受けないように地上 1.2～2.0 m の高さとしており、我が国の気象業務では地上 1.5m としている。冬季の積雪がある場合は、雪面からの高さが 1.5m になるよな工夫がなされている。定性的には温度センサーの高さ、強制通式通風筒を用いた観測では通風口を 1.5 m になるようにする。

また、湿度の観測は、電気式湿度計を用いる時は、温度計と同じ強制通風筒に格納するケースが多

く、温度計と同等に扱うものとする。

この観測高度、地上 1.2～2.0 m と規定しているのは、国民の身長を考慮したもので、国民の平均的な顔の高さを想定していると云われている。このことは、気象業務は国民の社会生活に資することを目的としているものである。

3.その他

雨量計は、設置場所の地形や地上構造物の影響がないこととするが、風の影響を受けると捕捉率が変わるため、ほぼ風向風速計の観測場所選定と同じと考えてよい。日射に関する気象センサーは、独立した場所もさることながら､風向風速計の支柱に取り付けることが多い｡日の出から日の入りまで、日射が地上構造物の陰にならないようする。

以上より、測器の精度が良くても取り付け方法が悪い場合、正確に観測することが出来ず、誤差を含んだ値を真として受け止めてしまう可能性も否定できないため、設置環境のみならず測器の取り付け方法にも注意が必要である。

参考文献

1) 佐貫亦男：地上気象器械,1953,共立出版
2) 光田寧：風を計る-計測器・計測システム,日本風工学会誌,No.42,1990.
3) 矢島幸雄：風向・風速計，特集・気象測器・地上気象測器,気象研究ノート,No14.2, 1963,
4) 徳植 弘・染谷 清：風車型風向風速計の特性と観測値について,研究時報,29.11-12,1977.
5) Taiichi Hayashi : Dynamic Response of a Cup Anemometer, Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology Vol.4.No 2,AMS,1987.
6) 森 征洋，堀口光章，大月道弘：風速計の特性について（Ⅱ）,香川大学教育学部研究報告Ⅱ,45,17-34,1995
7) 森 征洋，堀口光章，渡辺孝行：風速計の特性について（Ⅲ）矢羽根の動特性,香川大学教育学部研究報告Ⅱ,46,61-74,1996
8) 森 征洋：風車型風向風速計の動特性について,1999,香川大学教育学部研究報告Ⅱ,49,21-41
9) 守屋義信，田森俊彦：風向風速計の開発と試験,測候時報,No63.5,1996.
10) 気象庁：気象観測の手引き,1998
11) IEA Wind : RECOMMENDED PRACTICES FOR WIND TURBINE TESTING AND EVALUATION 11. WIND SPEED MEASUREMENT And USE OF CUP ANEMOMETRY,1 Edition 1999, R.S.Hunter,Renewable Energy Systems Ltd, et al.
12) 谷垣三之介：役立つページ 風況よもやま話―教科書に載っていない風の話しあれこれ―,一般財団法人日本風力発電協会,2008.
13) 気象ハンドブック編集委員会：気象ハンドブック,朝倉書店,1979.
14) 編集 鈴木 宣直：気象測器-地上気象観測篇,気象研究ノート No185,日本気象学会,1996.
15) 和達清夫監修：気象の辞典,東京堂出版,1970
16) 編集委員長 小倉義光：気象科学事典,日本気象学会編,東京書籍,1998.
17) 大田正次・篠原武次 編著：実地応用のための気象観測技術,地人書館,1981.

6.3 超音波風向風速計

6.3.1 概 要

超音波風向風速計は、1950 年代に Suomi、Corby、Schortland らによって研究開発が進められ[1)]、1960 年代に入って京都大学の光田 寧 氏（京都大学 名誉教授・故人）が真空管式の電子回路とオシロスコープと 35 mm カメラの記録器からなる世界で最初の実用機を製作した[2)]。

1967 年にはトランジスタ方式のものが商用化され、1980 年代以降はマイクロコンピュータ制御方式となって、室内気流測定用の小型のものや、航空機搭載用の高風速レンジのものなど多用途に使われるようになった。従来は測定が難しかった微風域を測定できることが超音波式の大きな特徴であり、適正な値付けをすることによって ISO 7726 の推奨精度をも満足している[3)]。

近年は回路の高集積化と信号処理のデジタル化が進み、消費電力 1～2 W 以下で動作するものが製作され、大量生産によるコストダウンも進んだ。

その結果、超音波風速計の特徴を生かした用途だけでなく、可動部がない保守性の良さに着目して機械式の風向風速計に置き替わって AWS（Automatic Weather Station）に組み込まれるようになってきた。

今回、評価を行なった CWS にはすべて小型の 2 成分型の超音波風向風速計が使われている。

6.3.2 特徴と用途

超音波風速計は向かい合う超音波振動子間を逆方向に伝播する音響信号の伝播時間の差から空気の動きすなわち風速を測定し、伝播時間の和から温度（正確には音仮温度）を測定するものである。
可動部がないため他方式の風速計・温度計に比べて以下のような特徴がある。

(1) 速い応答速度（20～100 Hz）で風速と（音仮）温度が計れる
(2) 鉛直成分を含む風速 3 成分が計れる
(3) 微風（≒ 0 m/s）から強風（強風仕様では 90 m/s）まで直線性よく計れる
(4) 温度測定における輻射熱の影響がない

このような特徴を生かして、渦相関法によるフラックス測定などの大気境界層の観測研究や建物や橋梁などの建築構造物に与える 3 次元的な風作用や乱流の影響の測定などに寄与してきている[4)]。このような学術的な利用以外にも道路・鉄道気象における車両運行の管理や電力気象における大気拡散モニタリング、自治体での環境計測や防災気象用途など実用的にも幅広く利用されている。振動子間スパン 3 ～ 5 cm の小型のものは風洞や地表面付近を測る農業気象用途のほか、半導体製造設備のクリーン ルームや印刷・化学工場の工程管理等工業用途にも使われている[5)]。

6.3.3 測定原理

超音波風速計の測定原理は図 6-16、図 6-17 に示すようにスパン l 離れた一組の送受波振動子の順方向と逆方向に送信される超音波パルスの伝播時間 t_1, t_2 の差を用いる。

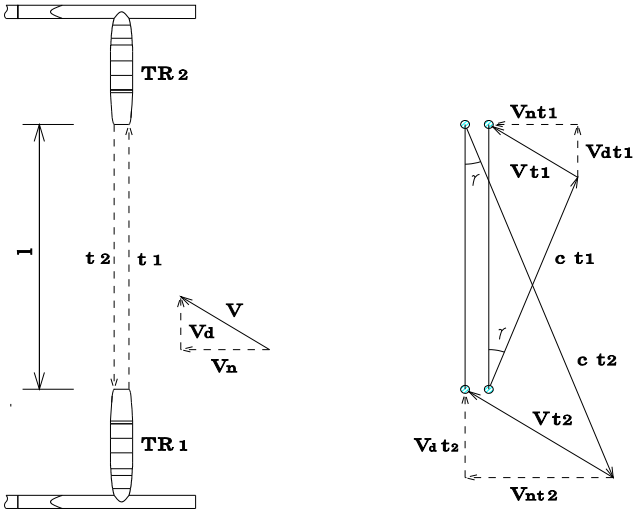


図 6-16 超音波風速温度計の音波伝搬経路と風ベクトル

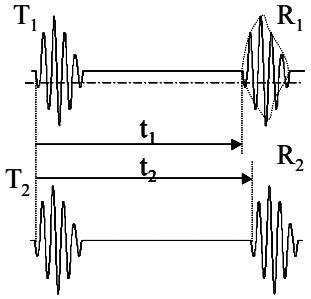


図 6-17 超音波パルス波の伝播波形図

超音波パルスの伝播時間 t_1, t_2 は

$$t_1 = \frac{l\left(\sqrt{C^2 - V_n^2} - V_d\right)}{C^2 - V^2} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$t_2 = \frac{l\left(\sqrt{C^2 - V_n^2} + V_d\right)}{C^2 - V^2} \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここに、

C ：音速

Vd : 音波伝播方向成分の風速

Vn : 直角方向風速　$V^2=Vd^2+Vn^2$

である。

実際には風速についてはパルス伝播時間逆数差法を用いることにより、(3) 式のとおり音速 C を含む項が消去されて、音速 C に依存しない測定をすることができる。

$$\Delta 1/t = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{C^2 - V^2}{l(\sqrt{C^2 - V_n^2} - V_d)} - \frac{C^2 - V^2}{l(\sqrt{C^2 - V_n^2} + V_d)} = \frac{2V_d}{l} \cdots\cdots (3)$$

$$\therefore V_d = \frac{l}{2}\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right) \cdots\cdots (4)$$

ここで風速測定の誤差は送受信兼用振動子の t_1 と t_2 の切替え時間内の音速 C の変化による誤差であり、通常±１％以下である。

(4) 式の送受波振動子間の風速成分 V_d から 2 軸あるいは 3 軸の超音波振動子対を組み合わせることにより風向風速および 3 軸の場合は鉛直を含む風速 3 成分の測定ができる。

超音波によって測定される温度は空気中の音速が温度によって変化することを利用しており、水蒸気圧 e と気圧 p の影響を受けるため、厳密な温度 T とは区別して音仮温度 T_{SV}（Sound virtual temperature ）と呼ばれる。温度の測定にはパルス伝播時間逆数和法を用いる。

$$\Sigma 1/t = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2\sqrt{C^2 - V_n^2}}{l} \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$C = A\sqrt{T(1 + 0.3192e/p)} \equiv A\sqrt{T_{SV}} \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

$$\therefore T_{SV} = T(1 + 0.3192e/p) \approx \frac{l^2}{4A^2}\left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}\right)^2 + \frac{V_n^2}{A^2} \approx \frac{l^2}{4A^2}\left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}\right)^2 \cdots\cdots (7)$$

A=20.067

温度測定誤差（音仮温度と温度との差）は $0.3192\ e/p \ll 1$ の仮定（水蒸気圧、気圧による誤差）であり、図 6-18 に示すように、気温 30 ℃ にて相対湿度が 0～100 % の間で変われば音仮温度と温度との差は 0～4 ℃、0～30 ℃の飽和蒸気圧間では 0.5～4 ℃ の差となる。温度変動分の測定誤差は小さいのでフラックス観測等には問題なく利用できる。

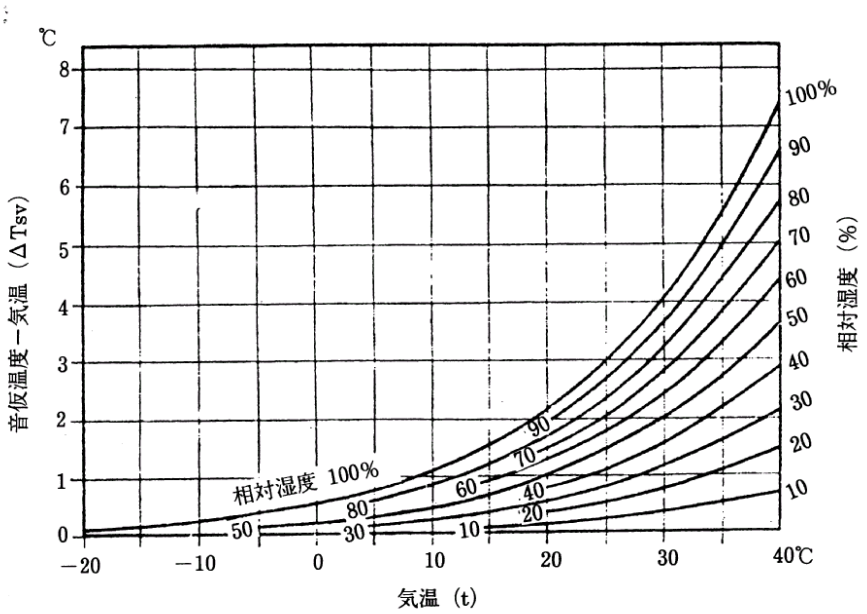


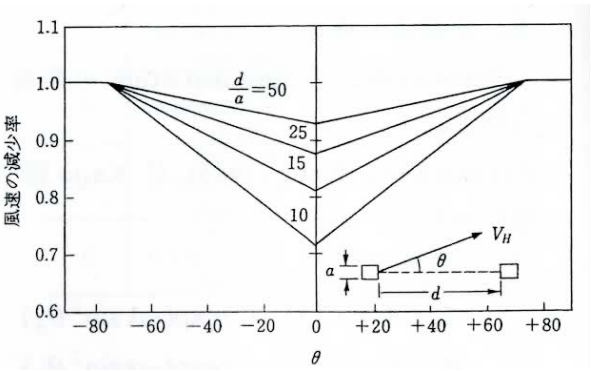
図 6-18 音仮温度（Tsv）と気温（T）の差（ΔTsv）の気温・相対湿度依存 [2)]

6.3.4 プローブ（測定部）の特性と種類

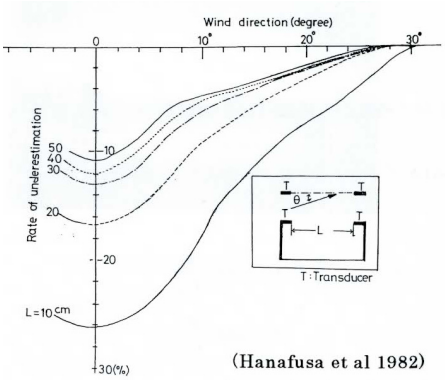
超音波風速計は微風から強風まで応答良く測れるが、超音波振動子が流れを遮蔽（Shadow effect）したり、プローブ自体が流れの歪み（Flow distortion）を引き起こす場合がある。

Shadow effect についてはスパンと振動子ヘッド径の比に依存した図 6-19 のような影響があることが風洞試験で調査されており [4]、補正方法の提案もなされている [6]。しかしながら図 6-20 に示すように層流に近い風洞中では風向によってはShadow effect と Flow distortion 合わせて 10 数%の減速域が認められるものの、自然風中での影響は軽微であることがわかる [7]。

ISO 16622 の超音波風速温度計の試験方案では風洞中で測定される試験結果を元に補正する機能を組み込めるようにすることを推奨している [8]。

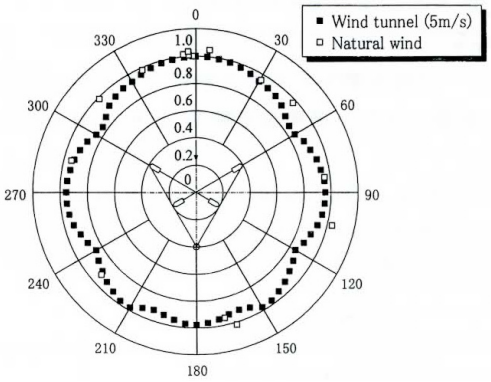


文献 4)



文献 5)

図 6-19 超音波風速計のセンサーヘッドの陰の影響（Shadow effect）



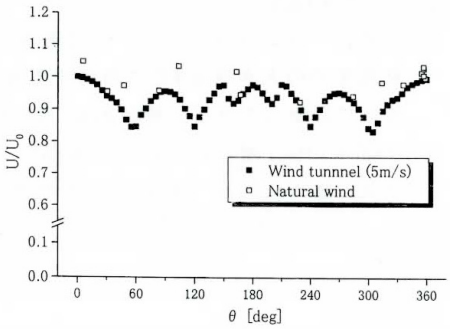


図 6-20 風洞 5 m/s および自然風中での風速測定値の風向依存性 U/U_0（Flow distortion）[7]

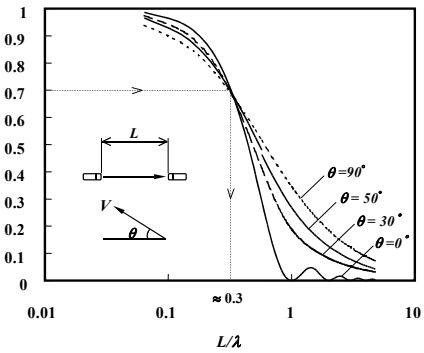
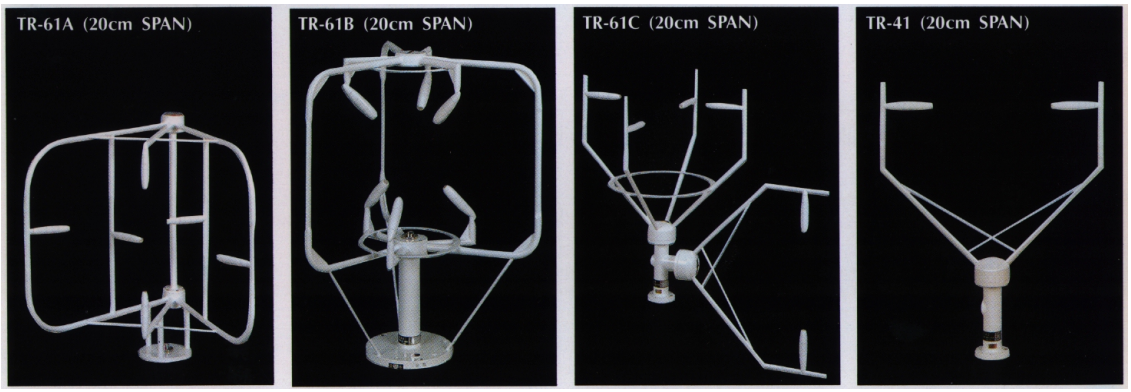


図 6-21 音波伝播路による風の平均化

超音波振動子間のスパンは図 6-21 に示すような伝播路平均をもたらすので、測ろうとする渦スケールに合ったスパンと形状をもつ測定部とサンプリング間隔を選択する必要がある。

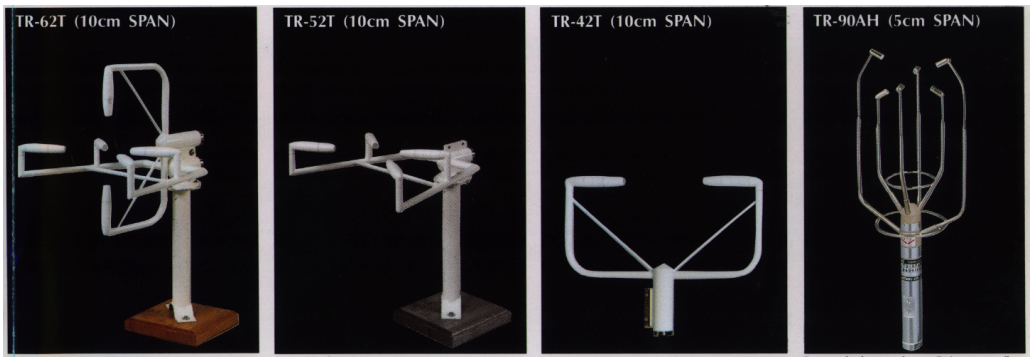
むやみにサンプリング間隔を短くしてもスパンで既定される空間平均化の影響があるので意味がない。

超音波風速計のプローブは、測定目的に応じて図 6-22 に示すように様々な形状のものがある。野外の気象観測用は 2 軸（2 成分）または 3 軸（3 成分）で構成され、スパンは 10～20 cm 程度である。2 成分型は反射式のものが CWS に多く用いられている。120° 交差型は主風向 120° の範囲内では測定部自体が引き起こす流れの歪み（Flow distortion）が最も少ない構造であり、相互比較の基準器となってきた。斜め交差型は一般的に使われている形状であり測定部構造が水平風に与える影響が少なく、強風まで測ることができる。3 軸直交型は風速 3 成分が直接、かつ鉛直成分が誤差なく測れるので、120° 交差型と同様にフラックス測定に適している。室内気流や農業気象における植生内気流の測定には狭い空間で微風の測定ができるスパン 3～5 cm の小型のものが用いられる。



120° 交差型　　斜め交差型　　3 軸直交型　　1 軸型

野外観測用プローブ スパン長 20 cm



風洞用　スパン長 10 cm　　室内・農業気象用

3 成分普及型

2 成分反射型

2 成分対向型

図 6-22 超音波風速計の種々の測定部形状

6.3.5 使用上の注意点

超音波風速計を用いて風速測定する場合には以下の点に注意が必要である。

(1) プローブの選択と形状の維持

前述したスパンによる空間の平均化の影響やプローブ毎の Flow distortion 特性などを考慮して測定目的にあった特性をもつプローブ形状を選択し、設置や輸送･取扱い時にぶっけたり、形状歪みを起こさないように注意すること

(2) 設置における注意

① 測定場所と測定高度

測定目的に応じて領域代表性と測定高度、測定周波数、さらには機器の保守、周囲構造物の流れ場への影響を考慮して設置場所を選定すること

② センサーの配置

フラックスの測定など他のスカラーセンサー（湿度、炭酸ガス等）と組み合わせて用いる場合には同一空間を測るように近い空間距離と機器間の Flow distortion に注意して配置すること。文献[9]が参考になる

③ 超音波風速計の姿勢（水平度）の確保

鉛直流を測定する場合には特に設置の水平度を保つこと

水平度の誤差が与える各測定項目への影響は表 6-4 のようになる

④ ゼロ風速調整

ゼロ風速近傍の微風（特に数 cm オーダーの鉛直流）を計る場合にはゼロ風速調整を行うことにより測定精度が保確される。ゼロ風速調整はプローブ部分を無風箱に入れるか、現場においては袋物を被せてゼロ風速を作り出し出力調整する。超音波風速計はゼロ点と、もう 1 点の風速点を較正して合わせれば、測定原理上直線性が保たれて誤差なく測れる。

表 6-4 風速計プローブの鉛直軸が角度 α だけ傾いた場合の測定誤差

項　　目	誤　差　近　似　式	誤差 α=1'のとき
1.水平風速 V	1・cos　(Max)	0.015 %　(Max)
2.鉛直風速 W	$V\sin\alpha/W$	V の 1.7 %が W に混入
3.運動フラックス τ	$2\alpha(\sigma u^2 \cdot \sigma w^2)/u^2 \fallingdotseq 2\sim3.5\alpha$	4～7%
4.スカラー量フラックス ξ	$\alpha\sigma u/\sigma u \fallingdotseq 2\alpha$	4%

3,4 の誤差算定は近藤（1982）による

6.3.6 超音波風速計のまとめ

1. 超音波による風速の測定は伝播時間逆数差方式で伝播距離は 10～20 cm が一般的である。
2. 温度は伝搬時間逆数和方式を用いる。平均温度は湿度の影響を受ける点で推奨できない。
3. 気温変動値は実用的価値がある。
4. 測定目的に応じて、設置高度、必要な応答速度、測定場所を決め、適合するプローブの形状･タイプを選択すること。
5. 周囲構造物や領域代表性を考慮して測定場所を選定し､センサー配置を決め水平度を確保して設置すること。

今後の課題としては凍結、強雨、強風（>60 m/s）など酷環境下での測定能力の向上、微細領域・微細現象の測定のための微小超音波センサーの開発などである。

●DAT-600 型の仕様と特性

今回の評価観測において風向風速の平均値は気象庁検定付きのプロペラ型風向風速計を基準器として使用したが、すべての CWS は超音波式の風向風速計が組み込まれており、超音波式の特性評価、乱流計測値評価に備えて、3 成分型超音波風向風速計をもう 1 つの基準器として準備した。

今回の CWS の実験に乱流測定の基準器として用いた超音波風速計は 120° 交差 TR-61A 型のプローブを用いた DAT-600 型でソニック製（図 6-23）である。このプローブは、1970 年代から大気乱流の計測に多くの使用実績があり、前記のような Flow distortion 特性とその補正方法がよく研究されている。仕様性能は表 6-5 に示すように研究用の超音波風速計として標準的な諸元をもっており、出力応答速度（測定繰り返し間隔）20 Hz は野外の地表付近の接地境界層における測定においても十分な応答速度といえる。

図 6-23 TR61A プローブ

表 6-5 120° 交差 TR-61A プローブ・超音波風向風速温度計の仕様

項　目	方　　式	仕　　様
風　　速	測定方式	時分割送受切替超音波（3 成分）
	測定範囲	0～60 m/s
	精度	±1 %　内部演算精度
	分解能	5 mm/s
風　　向	測定範囲	0～540°
	精度	3°
	分解能	1°
温度　音仮温度	測定方式	超音波伝搬時間逆数和演算方式
	測定範囲	±50 ℃
	精度	1 %　内部演算精度
	分解能	0.025 ℃
出　　力	測定項目	3 成分風速、風向風速、温度（音仮温度）
	応答速度	20 Hz
	出力 I/F	RS-232C／±1 VDC

●乱流の計測

プロペラ型風向風速計や風杯式風速計は、一般的に測定の容易な風速の瞬間的な大きさの絶対値の時間平均としてのスカラー平均風速を測定するのに対して、超音波風向風速計は物理的に合理的で乱流量において水平方向の非等方性がわかるベクトル平均風速を測定することが多い。

大気拡散分野において物質の移動量などを測定する場合は、例えば、ある一定時間北風が吹き、次の時間に南風に変わった場合、南に流れた空気は、また戻ってくることになり、平均的には移動していないのと同じであることから、ベクトル平均を行なう必要がある。

スカラー平均風速 Us とベクトル平均風速 Uv の関係は次式で表すことが出来る。

$$\overline{Us} = \overline{Uv}\left\{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_u}{\overline{Uv}}\right)^2\right\} \quad \cdots(1)$$

ここで　$\frac{\sigma_u}{\overline{Uv}}$: 乱れの強さ　(I)

ベクトル平均風速とスカラー平均風速では原理的にスカラー平均の方がベクトル平均より大きいことがわかる。自然大気中においては、乱れの強さ I の値は 0.1 ～ 0.3 程度であるので、両者の平均風速の差が 4～5 % に達する場合もある。“平均　風速”と言う場合には、平均化処理がいずれの方式に依るものであるかを示しておくべきである。

超音波風向風速温度計で測定する乱流諸量は下記の定義式に依っている。

東西水平成分 X、南北水平成分 Y、風向 θ として、

$$\overline{Uv} = \sqrt{\overline{X} + \overline{Y}}, \qquad \overline{\theta} = \tan^{-1}\frac{\overline{X}}{\overline{Y}} \qquad \cdots(2)$$

主風向方向の風速標準偏差 σ u、主風向直交方向の風速標準偏差 σ v は

$$\sigma_u{}^2 = \sigma_X{}^2 \sin^2\overline{\theta} + \sigma_Y{}^2 \cos^2\overline{\theta} + 2\sin\overline{\theta}\cos\overline{\theta}\overline{(X-\overline{X})(Y-\overline{Y})}$$
$$\sigma_v{}^2 = \sigma_X{}^2 \cos^2\overline{\theta} + \sigma_Y{}^2 \sin^2\overline{\theta} - 2\cos\overline{\theta}\sin\overline{\theta}\overline{(X-\overline{X})(Y-\overline{Y})} \qquad \cdots(3)$$

と表される。ここで、

$$\sigma_X = \sqrt{(X-\overline{X})^2}, \qquad \sigma_Y = \sqrt{(Y-\overline{Y})^2}$$

である。

また風向標準偏差 σ_θ は主風向直交方向の風速標準偏差を用いて

$$\sigma_\theta = \tan^{-1}\frac{\sigma_v}{\sqrt{\overline{X}^2 + \overline{Y}^2}} \qquad \cdots(4)$$

となる。

参考文献

1) Suomi,V.E.and Businger,J.A. : Sonic Anemometer-Thermometer Geophys.Res.Paper.,No.59 (Project Praivie Grass, A Field Program in Diffusion,3,Chap.14),1959

2) Yasushi Mitsuta : Sonic Anemometer-Thermometer for General Use, J. Meteorol. Soc. Japan 44, 12-24 1966

3) 寺尾吉哉：市販微風速計の計測値の信頼性の評価、計量研究所報告、Vol.47, 21-24, 1998

4) J.C.カイマル著、光田寧・山田道夫訳：微細気象学、技報堂出版 116pp 1993

5) Hanafusa,T.,Fujitani,T.,Kobori,Y.,Mitsuta,Y.：A New Type Sonic Anemometer-thermometer for Field Operation ,Papers in Meteorology and Geophysics,Vol.33, No.1, 1-19, March 1982

6) 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

7) 伊藤芳樹、林泰一、玉川一郎：超音波風速温度計 TR-61A(120°交差)型プローブ特性試験、京都大学防災研究所一般共同研究 12G-15「熱・水収支の高精度評価に関する研究」平成 12 年度報告書、1-9,June 2001

8) INTERNATIONAL STANDARD ISO 16622：Meteorology —Sonic anemometers/thermometers — Acceptance test methods for mean wind measurements, Reference number, ISO 16622:2002 (E)

9) IEC61400-12-1 : Wind turbines –Part12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Annex G, 2011

6.4　気象測器の出力信号

6.4.1　これまでの変遷

当初の気象測器の出力はパルス信号が多く、自記電接計数器を使用していた。その後、電子的な測器があらわれたが、専用の記録器を使用する測器が多かった。さらに工業計器の発達により、それらを採用することで、打点記録器を使用するようになって、0~10 m VDC の時代が訪れ、同時に隔測技術が発達し、テレメータ用として 0~5 VDC が多く使用された時代もある。
その後、データレコーダーなどを使用した短期間の観測が各地で行われ、0~1 VDC または±1 VDC 等も出現し、さらに、環境問題等で気象観測装置の出力信号が、産業の計装にも接続されるようになって、隔測技術はさらに高度化を求められるようになった。その隔測技術の中で、工業系で使用されている電流伝送規格 4~20 mA も取り入れられ、これらはアナログ時代を象徴するものであろう。

デジタル技術の発達に伴って、気象測器も少なからず影響を受けているものの、ニーズ毎に対応しているのが実情である。通信もアナログの電話通信からデジタルのインターネットへと移行しているものの、気象関係ではデジタルに対する統一規格はない。
特に、気象測器にもマイクロ コンピュータ等が多く採用されるようになり、アナログ時代の比べ、感部と受信側の境目が不明確になっている。気象測器側で統計処理を行っている測器もあり、どのような信号処理をして統計処理をしているのかはブラックボックスに近く、時として、同じ処理を気象測器側と受信側で行う事態も考えられ、使用する気象測器や受信側の設備の選択は十分検討することが必要であろう。

標準的な通信規格として、RS-232C や RS-422、RS-485 等の規格に準拠してはいるものの、中には名称だけで規格に程遠いものもなくはない。これらは通信の手順を規定するものであって、内部のデータフォーマットとは直接関係はなく、それぞれの機器によってデータフォーマットは統一性がないのが現状であり、ある程度の規則は必要と感ずる。

また､現在の多くの観測システムの時間管理が気になる｡気象観測と時間管理は重要な課題であり、多数の観測場所を持つ観測システムでは正確な時間管理の重要性は論じるまでもない。
近年、GPS や JJY（日本の標準時を放送する無線局のコールサイン）標準電波の時刻データが容易に利用出来るようになり、これらの時刻データを観測の時間管理に利用することは、それほど難しいことではない。また、インターネットを利用するのであれば、ネット上のタイムサーバを適時参照すれば、±1 sec 以下の精度を保つことは不可能ではない。

6.4.2 国内での利用例

国内で販売されている気象測器では、アナログ出力を標準的に採用しているものが多い。今回の評価実験で用いた基準器についても、温度計、湿度計はアナログ出力である。一方、プロペラ型風向風速計や超音波風向風速計は、デジタル出力またはアナログ出力を選択できる。その他の国内の気象測器を見ても、デジタル出力を有するものはごく一部に限られており、国内の気象観測の仕様を強く意識していることが、少なからず影響していると思われる。

気象測器を実際に利用する際に、デジタル出力とアナログ出力の違いを比較した場合、違いとして挙げられるのが伝送可能なデータ量である。アナログ出力は、1 つのアナログ伝送経路につき 1 要素

データの伝送しか行うことが出来ないが、デジタル出力はその伝送速度に見合ったデータ容量であれば、多数の要素データを 1 つの伝送経路に載せることが可能である。

例えば、超音波風向風速計 DAT-600 型では、センサー本体にて信号処理・統計処理が行われ、北風成分、東風成分、垂直風速成分、水平風速、水平風向、気温について、それぞれ瞬間値、平均値の 12 項目が計算される。アナログ出力の場合は、出力のための信号ケーブル 4 本が標準仕様である事から 12 項目の内、4 項目を選んで出力することになる。一方、デジタル出力の場合は、12 項目を同時に出力できるという特徴がある。

また、プロペラ型風向風速計 W855-Z1 型では、伝送手順は RS-232C と RS-422 を選択できるようになっている。RS-232C は、パソコンに標準で実装されている場合が多く、測器の観測データをパソコンで受信し、パソコン内のプログラムでデータ処理や解析・表示等を簡単に行う場合には非常に有用である。一方、RS-422 は、RS-232C より長距離伝送が可能で、伝送速度も速くノイズにも強い通信規格であるため、センサーを屋外に設置し、距離の離れた場所である室内のパソコンと接続する場合は RS-422 が有効である。特に、風向風速計は 10 m 程度のポールの上や高所に設置するため、ケーブル長は最低でも 15 m 以上となり、RS-232C では伝送距離が足りなくなることがあり、その場合は RS-422 を選択する。しかし、一般的にパソコンに搭載されているシリアルポートは RS-232C 規格であるため、このままでは接続できない。そこで、実際に接続する場合は、パソコンの RS-232C ポートへ接続する直前で RS-422／RS-232C 変換器を介してパソコンへ接続する。また、最近のパソコンではシリアルポートが実装されていない機種も増えており、その場合は、RS-422／USB 変換器を介してパソコンの USB ポートへ接続する場合も多い。

今後は、さらに気象観測が高度化されるとセンサーとデータロガーの役割分担が見直されることも予想されるが、これらの話題は第 8 章に記すこととする。

7. 海外おける気象観測とその将来展望について

7.1 国際機関における気象観測の標準化動向と AWS の現状と提言

7.1.1 概要

WMO では 1954 年に最初の気象観測用測器と観測法についての指針を策定して以来、測器・観測法委員会（CIMO）の活動として標準化作業を進めて定期的に指針を改版し、2008 年に全面改定された第 7 版が策定された（2010 年に更新）[1)]。この指針は第 I 部「気象要素の測定」、第Ⅱ部「観測システム」、第Ⅲ部「品質保証と観測システムの管理」から成っており、測定要素毎にセンサーが具備すべき要件、データ処理法、観測環境、較正と保守などについて検討されている。

一方、国際規格を策定する民間組織である国際標準化機構（ISO）の大気専門技術委員会（TC146）の気象分科会（SC5）では、風速計（ベーン・風杯、超音波風速計）と温度計の輻射遮蔽筒（強制通風筒、シェルター）の規格、試験方法を定めている [2)]。上述の CIMO の WMO 指針策定と ISO/SC5 の規格策定を共同で行なうことを 2012 年より両者が協議を始めた。

また最近においては、WMO と国際度量衡局（BIPM）は 2010 年に計量学の視点から気象測定の諸問題に取り組むことを合意している。気象データの信頼性と均一性を高めて測定値の不確かさを減らすことを目的としたものである。

2011 年には欧州計量学共同研究プロジェクト「MeteoMet－気象学のための計量学」[3)] を立ち上げて、欧州 18 カ国の国家計量研究機関などが参加しており、日本の機関も協力者（collaborator）となって参画することを期待されている。このプロジェクトではセンサーの構造や精度に関わる事項、校正手順、不確かさの評価など、将来的には気象測器の検定に関係する事項が検討されることになる。従来型の気象センサーのほか CWS についても評価が進められている。WP（Working Package）ごとに活動が組織され（WP1：高層、WP3:地上気象など）、今後数年を掛けてプロジェクトが進められることになるので、気象の測定に関わる関係者は注視していく必要がある。

AWS については 2010 年に WMO の基本システムのための委員会（Commission for Basic Systems）の専門家チーム（Expert Team）が AWS 技術の進展の状況と提言について、最終報告書 [4)]を取り纏めている。

7.1.2 WMO の指針と ISO の規格

WMO の気象観測用測器と観測法についての指針の第 7 版で策定されている内容のうち、CWS を用いた測定に関係する項目と記載されている内容の概略は表 7-1 のとおりである。

気象の測定要素毎に測定範囲や精度などの要求事項や測定法、測定誤差と補正、較正と保守の方法などが過去の経験と改善策に基づいて記載されており、気象センサーの設計や観測に携わる関係者にとっては拠り所となる指針である。

全体としては表 7-2 に示すように個々の気象要素の測定についての現状は、要求される精度近傍にまで達成できており、測器の設置環境と設置方法を含む露場品質の確保が今後の課題となっている。

表 7-1　WMO／CIMO　Guide[1)] の要約

部	項　　目	記 載 内 容 の 概 略
第Ⅰ部	気象要素の測定	
1 章	概要	指針の目的、観測する気象要素と単位、露場の等級付け（等級 1～等級 5）、測器の設置方法、測定の不確かさ
2 章	気温の測定	要求事項(測定点、精度、応答速度)、測定法(機械式、電子式)、誤差要因、較正、輻射遮断
3 章	気圧の測定	測定単位、要求事項(測定範囲、分解能、精度)、測定法(水銀式、電子式アネロイド・ピエゾ・円筒共振)、誤差、設置環境・設置法、比較・較正・保守、気圧の値補正
4 章	湿度の観測	要求事項(測定範囲、分解能、精度)、測定法(露点、乾湿球、吸収、光式)、時定数、保護フィルタ、測定手順、誤差、較正と保守
5 章	地上風の測定	平均風向風速、peak、gast(最大値)、風向風速の標準偏差、測器と測定法、データ処理法、粗度と測定高度および各種補正、校正と保守
6 章	降水の観測	降水の定義、測定法(雨・雪・水その他、貯水、重量式、転倒ます、フロート)、降水ゲージの形状、測定環境、較正と保守、誤差と補正
7～17 章	省略	記載項目 放射、日射、視程、蒸発、土壌水分、上空の気圧・気温・湿度、上空の風、現在・過去天気、雲、オゾン、大気の組成
第Ⅱ部	観測システム	
1 章	AWS 自動気象観測局	AWS の種類、センサー、CPU(データ収集、処理、伝送)、周辺機器、ソフトアェア(システム・アプリケーション)、ネットワークデータ処理、保守、較正、訓練
2～12 章	省略	記載項目 航空気象、飛行機観測、海洋観測、対流境界層の観測、ロケット観測、雷の位置観測、衛星観測、レーダー、気球、都市での観測、道路気象
第Ⅲ部	品質保証と観測システムの管理	
1 章	品質管理	データ品質の保証、ISO9000 シリーズに基づく品質管理、データ品質に影響する要因、データの均質性とメタデータ、ネットワーク管理
2 章	サンプリング	サンプリングの考え方、観測時間、サンプリング間隔・周波数、平滑化とフィルタ、時系列解析とパワースペクトル、測器の応答、サンプリング技術
3 章	データ管理	データ整理の手順、サンプリングとフィルタリング、較正、線形化、平均化と気象統計処理、グリッドポイントデータの変換
4 章	試験、較正と比較	精度・不確かさ・再現性・環境試験(温湿度・気圧・雨・風・日射・気圧・輸送・電磁ノイズ)、較正基準・トレーサビリティ、測器の相互比較のガイドライン、報告書リスト
5 章	教育訓練	教育訓練の必要性と WMO の教育訓練システム、訓練の方法の実際 (訓練携帯、プロセス、WMO その他での支援内容)

露場の環境については 5 段階の等級付けを行っており、温湿度と風観測については等級 1 （100 m 以上の開放空間を持つ平坦地、障害物高さの 30 倍以上の離隔距離）、等級 2（同 30 m 以上、15 倍以

上)、等級 3（同 10 m 以上、5 倍以上）までが適合とされ、5 年毎の等級付けの見直しが提言されている。露場環境の等級付けについては ISO の規格に反映させる動きがあり、今後 WMO/CIMO と ISO/SG5 の活動は連携をとって進められることになっている。

ISO の気象観測に関する規格は SC5 の WG1～6 に定められている。CWS に関係するのは WG1（風向計および回転式風速計）、WG2（超音波風速温度計）、WG3（輻射遮蔽の性能比較法）である。WG1～2 では風速計の風洞試験法を詳しく記述している[2)]。

ISO 以外にも国際電気標準会議（IEC）の規定がある。IEC は風力エネルギー算定のために使用する風速計について規定したものである[5)]。IEC では ISO の試験方案に加えて厳しい耐環境試験を課している。風杯式風速計について記述されているが、2012 年には超音波風速計も追記した改定案が起案されている。風況観測は測定精度の要求が厳しく、よく制御された風洞で 1％ 台の誤差範囲に収まる精度を要求している。

表 7-2　WMO／CIMO　Guide[1)] におけるセンサーへの要求事項

項目	測定範囲	要求精度	現状の精度	応答速度
気温	通常：-30～+45℃ 高温：-30～+50℃ 低温：-40～+40℃	<0.2K →0.1K at 10℃span 0.2K →0.1K at 10℃span 0.3K→0.1K at 10℃span	0.2K	20 秒/出力 1 分
気圧	500～1,080ｈPa	0.1hPa	0.15hPa	20 秒/出力 1 分
湿度	湿球温度：-10～+35℃ 相対湿度：5～100% 露点温度：-60～+35℃	0.1K（高湿）、0.2K（中湿） 1%（高湿）、5%（中湿） 0.1K（高湿）、0.5K（中湿）	0.2K 3～5% 0.5K	20 秒/出力 1 分 40 秒/出力 1 分 20 秒/出力 1 分
地上風	風速：0～75m/s 風向：0～360°	風速： 0.5m/s for ≦5m/s 10%　for ≧5m/s 風向：5°	風速： 0.5m/s for ≦5m/s 10%　for ≧5m/s 風向：5°	風速距離定数： 2～5m （出力 3 秒 for gust） 風向減衰比：0.3
降水	日降水：0～500mm 積雪深：0～25m 降水強度： 0.02～2,000mm/h	降水：0.1mm for ≦5mm 2% for > 5mm 積雪深：1cm for ≦20cm 5% for > 20cm 降水強度： 0.1mm/h for 0.2-2mm/h 5% for ≧2mm/h	降水：5% or 0.1mm 積雪深：1cm 降水強度： 5% for ≧2mm/h 2%　for ≧10mm/h 5mm/h or　5% ≧ 100mm/h	降水：n/a 積雪深：<10 秒 降水強度：<30 秒

7.1.3 AWS 技術の進展の状況（文献[4]の要約）

ET-AWS の session 5 が AWS 技術における進展と限界について取り纏めている。主に進展したのは通信手段とメンテナンスを最適化する内部診断機能に関するものである。センサー開発における進歩は少ないと認識されている。

しかし AWS のコストが低減して AWS は使い易くてなっており、AWS のコストがネットワークの初期費用とランニング・コストに比較して安くなっていることを認識し、ネットワーク管理、メンテナンス、較正とトレーニングが不足することによる投資の無駄を避けることが非常に重要となっている。

1. AWS 技術における進展のレビュー

1.1 プラットホーム

地表面観測のための AWS には広範囲な用途がある。例えば空港や気候応用などのハエンドシステムは、非常に多くのユーザ向けの用途がある。また海洋観測のための AWS は、ブイや船で使用される。技術の進歩およびセンサーとデータロガーのコストの低減により、コンパクトで低コストのウェザーステーション(→CWS)の発展につながった。主にインターネットで、リアルタイムに、複数地点からのデータを収集して表示することができる点が有用である。

コンパクトな AWS（→CWS）が農業や都市気象学のために使われているが、これらは未評価の安価なセンサーを使っている。 大部分のこれらの AWS は、インテグレーターの資産であるプログラムされたデータ処理アルゴリズムを含んでいる。手頃なコストで、設置が容易で、フットプリントが小さく、用途が広いので、これらのプラット ホームは、いろいろなアプリケーションに気象データを提供して市場で大きなシェアを獲得するチャンスを持っている。

利点

- コンパクトで必要なものを内蔵している
- 低コストで簡単に展開可能
- ネットワーク化とデータの空間統合ができる最新の通信形態により密なネットワークが確立できる
- リアルタイムなデータのオンサイト記録
- フル実装した AWS のサブセット（例えば温度と降水）として使える

欠点

- 測定性能（センサー、処理アルゴリズム）が未知（未評価）であること
- データ処理と設置場所がシステム構成に依存する→データ処理の標準化、設置基準の明確化がなされていない
- 現時点では設置と保守のための基準が未確立

1.2 遠隔通信

GSM、GPRS、WIMAX、衛星通信（インマルサット、Iridium など）多くのデータ通信手段が利用できる状況にあり、データ伝送の頻度はデータの必要性と通信コストとのバランスにより選択可能となっている。通常 1 時間毎、1、5 または 10 分毎でも利用でき、通信周期は通信の費用を最

適化するために切り替えられる。

AWS は IP（Internet Protocol）認識され、ネットワークの管理を容易にするが、IT Security 面には注意が必要である。

遠隔診断、トラブルシューティング、処理アルゴリズムのアップグレードのために双方向通信を有効に活用することによりメンテナンス・コストを最小にできるとともに、通信サービスと通信機材のコストが低減しているので、自動データ伝送が利用できる。また帯域幅が増大し、多量のデータ（例えば処理されたデータと生のセンサー・データ）の伝送を可能にしている。

1.3 電源

遠隔地に AWS を配備する場合は、ソーラや風力などの代替電源利用ができるが、ヒータが必要なセンサーは商用電源が近くに利用できる場所に限られる。AWS が必要とする電源は、測定センサー部、CPU、補助装置（ヒータ、クーラ、汚染除去装置など）、個々のセンサーと CPU の間の通信線、データロガーである。これにシステム損失分が加わる。

電源は AWS が必要とする量と供給の適切なバランスに依って決めることになる。一次電源は、例えばグリッド送電網、風力、ディーゼル、ソーラまたは組合せ電源を使用して AWS およびバッテリを維持するのに十分な電源を供給する。二次電源は 通常、一次電源が利用できないときにバックアップ電力を供給するバッテリ（充電式または非充電式）式のものである。バッテリ使用時は通気やヒータは使用せず消費電力の低減を図ることが必要である。

1.4 データ収集

エレクトロニクスの進歩は、AWS の処理部を大きく改善し、非常に高い安定性と制御手順で AWS の収集システムは較正が不要となった。データ処理の能力と速度が増して、複数のセンサーからのデータを統合し、先進のデータ処理アルゴリズム（例えばセンサー冗長性、先進のデータ・フィルタリング、複数のセンサー統合、付加データ、センサー/システム診断処理と出力等）を搭載することが可能になった。またデータ容量が大きく増大してデータをより長い期間に備えて蓄えるので、長期データが必要な気候学などに役立つようになった。

1.5 センサー

多くのセンサーには内部の診断機能があり、遠隔診断を促進して、メンテナンス管理と関連経費を最適化することは重要である。しかしながら予算の制約のために、新しいセンサーを開発する多くの気象局の努力が低下した結果、センサーの進化は 10 年前より遅くなっている。

3 年のテクノロジー サイクルでは、センサーの設計安定性を考えると気候応用などデータ均一性を長期間確実に維持することは難しい。寒さや氷結など“視覚的観測”のためのセンサーはかなりの電力供給を必要とし、太陽電池パネル システムでは足りない。したがって、インフラ経費は非常に高くなる場合がある。例えば北極などの遠隔地域では、これらのセンサーを使えない。

1.6 測定の品質

現行のセンサーや AWS を用いた観測では、人間の観測に介在する主観性を排除して繰り返し観測が可能である。その結果、AWS は標準化を支援し、時空間一貫性があるデータを取得できる。

またAWSの現在の処理能力は、現場で測定しながら先進のデータ品質検査を実行できるものである。

1.7 インフラ、設置場所、メンテナンス

設置においては、等電位性の確保と雷災保護、仕損じとその矯正のためのメンテナンスを最小化することに注意すること。有人観測に必要なインフラをAWSは必要とせず、柔軟な設置場所の選択が可能であるが、AWS は、１年以上（時々はセンサーと場所により、それより短い期間となるが）放置はできない。

1.8 ネットワーク

ネットワークが密な地域では、新しいユーザニーズへの対応は必ずしも新しい局を設置することなく、例えば降水レーダーや雨量計を統合して空間同化した観測を行ってもよい。高性能で複雑なAWS からなる主要な階層とそれに続く多様な性能と構成を持つ階層で、ネットワークを複数階層で構築することにより、定性的・定量的データの提供ではなく特定の目的（事象の発生と終了の認知など）で使用されるネットワークオプションを提供することができる。

1.9 コスト

AWS を入手して設置するためのコストは、それを運営するためのコストと比較して小さい。AWSを既存のネットワークに加えることは、システム寿命におけるライフサイクル コストと期待される性能に基づいて判断されなければならない。AWS のコストは低減しており、ネットワークの全体のイニシャルとランニング コスト（インフラ、メンテナンス、較正、管理およびトレーニング コスト）と比較して小さいと言える。データ収集システム、センサー、通信システムの複雑さが増大したために、伝統的な（手動の）観測局に比べるとメンテナンスのために必要とされる技術のレベルは高くなっている。

2. 現在におけるギャップ

測定値を完全に値づけするために、各々の測定要素に対するセンサー、センサー構成、データ収集と処理の不確かさを含むAWSシステム レベルの不確かさの評価が不充分である。
低コストの CWS はますます使われるようになってきており、本格的なシステムまたは温度と降水量などのサブシステムの実施動作を管理することが重要である。これは、システム構成、アルゴリズムの公表、測定性能、メンテナンス、設置についての管理を含むものである。ビデオ画像デバイスを使って、視覚的な観測や画像データのデジタル解析の方法を開発することも考える必要がある。
AWSアルゴリズムの範囲内で、例えば雷、レーダ・データなどの遠隔域測定を統合していくこと、種々の AWS プラットホームを通してセンサーの相互運用するためのガイドラインを策定すること、データの一貫性を確保するためにインテグレーターによって実装される AWS 処理アルゴリズムの文書の標準化を行うことなどが不足していることとしてあげられる。

参考文献

1) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No.8, 2008 edition Updated in 2010

2) INTERNATIONAL STANDARD ISO 16622 : Meteorology —Sonic anemometers/ thermometers — Acceptance test methods for mean wind measurements, Reference number, ISO 16622: 2002（E）

3) http://www.meteomet.org/

4) WMO, Commission for Basic Systems: OPAG on Integrated Observing Systems: Expert Team on Requirements and Implementation of AWS Platforms: Annex VIII Advances in AWS Technology, p51-54, 2010

5) IEC61400-12-1 : Wind turbines –Part12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Annex G, 2011

7.2 海外の開発途上国における気象観測の実態と近年の状況

7. 2. 1 各国における気象観測の実情

海外、中でもASEANを中心とする開発途上国では、いずれの国もそれぞれの国土に対する国内の気象観測網は非常に少数かつ脆弱であり、それらの多くが観測員による手動観測で運用されている実情がある。

実際にWMOと気象庁とで 2011 年 6 月に実施された28カ国に対する調査の結果報告[1)] によると、それらすべての国で、風、降水量、気温、湿度および気圧という地上気象観測の必須要素が観測されている。日照時間や日射量についても多くの国で観測されており、また、それらの大部分では、雲量や雲形種別、視程、現在天気と過去天気という有人の視界観測も実施されている。
地中温度と蒸発量の観測も一般的であるが、積雪深については、寒冷地域の国の冬季に限って観測されている。

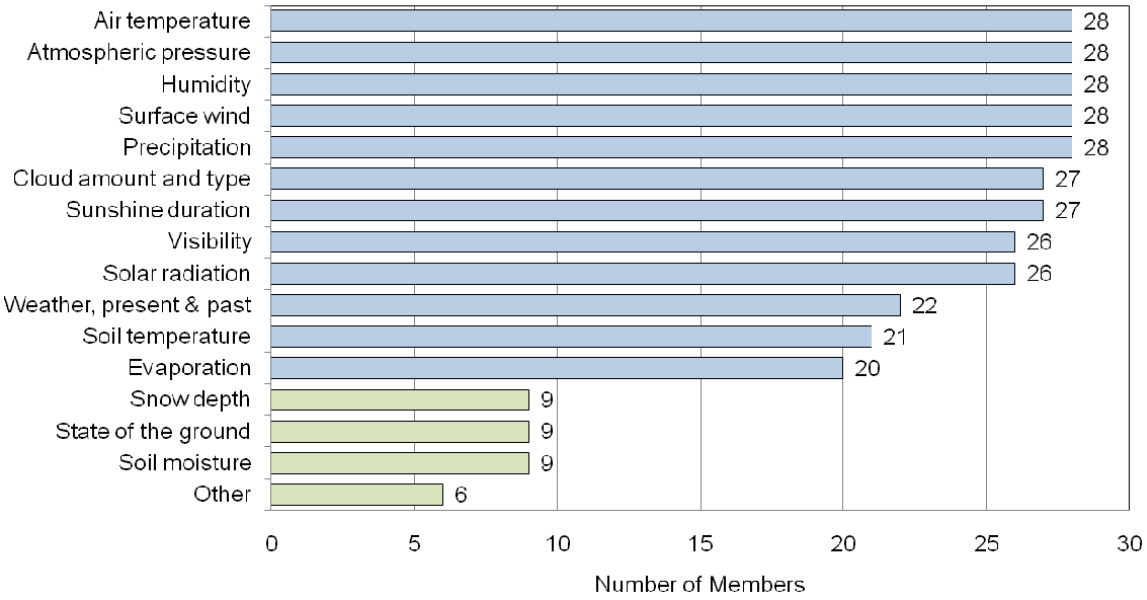


図7-1 国家気象局で実施される地上気象観測の観測要素（全28カ国）

手動観測の場合、観測の実行頻度が通常1日8回（UTC 時刻の00Z、03Z、06Z、09Z、12Z、15Z、18Z、21Z の 3 時間毎）が主流であり、メインの定時観測として観測結果がGTS網へ通報される。いくつかの国では、そのメインの定時観測であっても欠測が発生したり、1日4回あるいは2回になったりする国もある。但し、この観測は本庁所在地など主要都市の観測所などに限定された拠点についての調査であるため、注意が必要である。

中でも、上記の調査対象のうち、10カ国では毎時観測が実施され、1日あたり24 回の通報がすでに実施されているという。但し、それらの補足観測は、台風やサイクロンなど、卓越した気象の場合に限って実施される場合もある。

さらに空港に隣接している観測所では、うち4カ国について、30 分間隔で観測を実施しており、

METER（定時航空通報式の総称: Aviation routine weather report）として通報しているという。

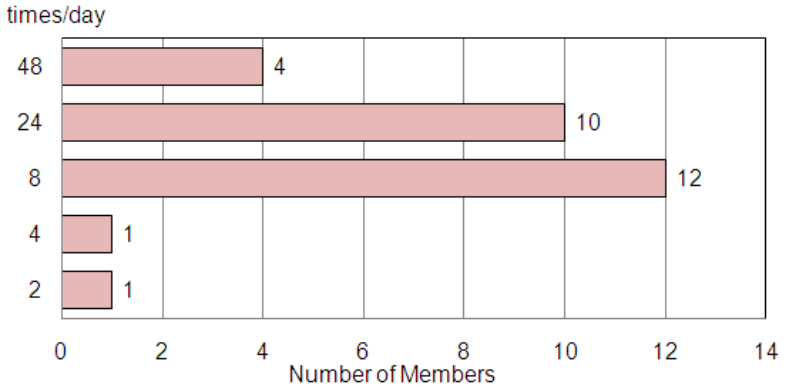


図7-2 1日あたりの観測実施頻度

7.2.2 気象観測における問題点

上記の調査では、WMO が求めている品質の観測を実施できない理由として、どういう傾向があるかについても同時に調査された。

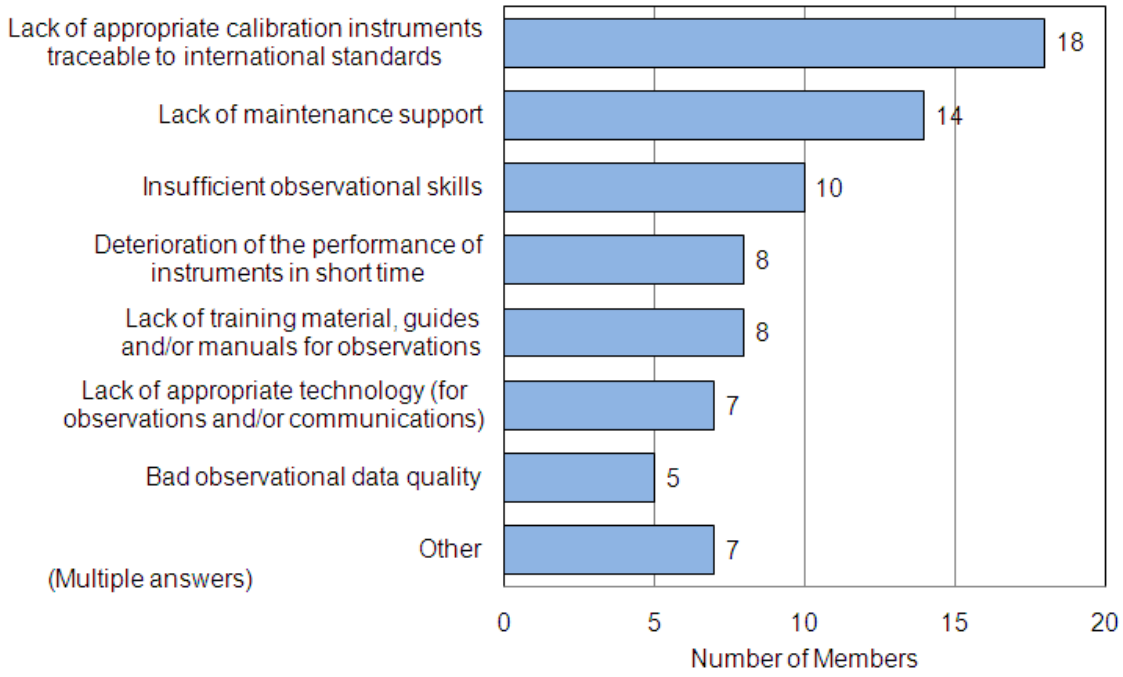


図 7-3 求められる観測の実施において障害となる理由（複数選択）

図 7-3 から分かるように、もっとも大きな問題は、国際標準規格に基づく適正な較正機器が全般的に不足していることであり、その事情が多数を占めている。また、それ以外の共通問題として保守サポートの不足が挙がり、観測に対する技能不足も指摘されている。

測器の老朽化による性能劣化も指摘されており、十分な保守が実施できていない実情が浮き彫りになっている。いずれも気象局における予算的な制約が一義的な事情と考えられる。

中でも、観測の従事者に対する十分な観測技能の教習ができていないという技術、技能的な問題も多く、とりわけオンライン系の自動観測システムでは、全般的に通信技術に関する知識や技能不足が顕著、かつ深刻と言える。
逆に、観測結果に悪影響を及ぼしている原因としては、図7-4 のような要素が挙げられている。

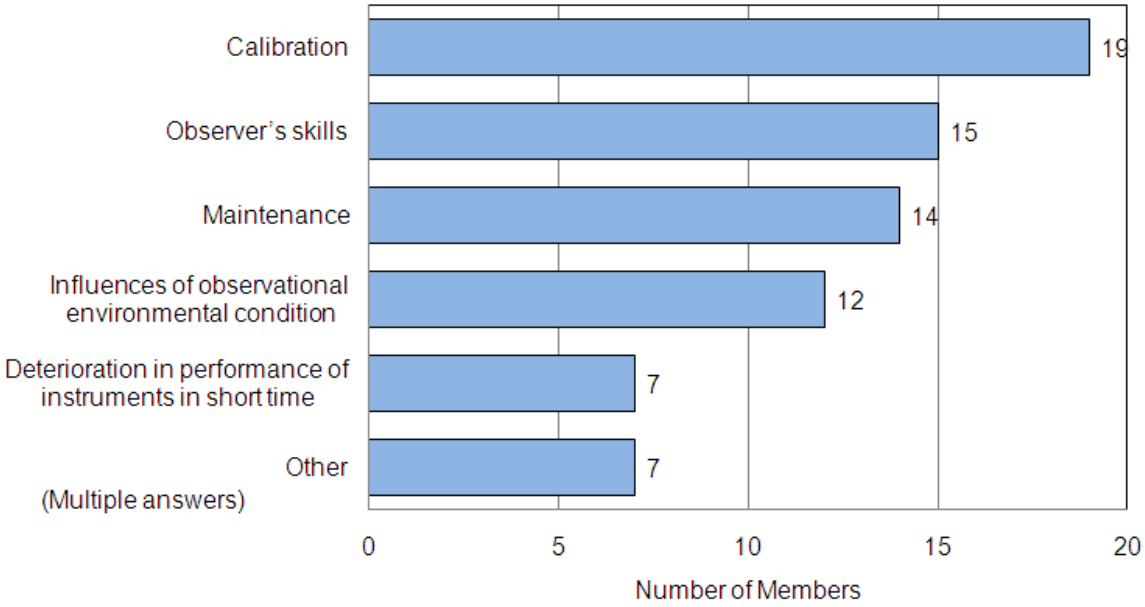


図7-4 データ品質劣化に影響を与えている主要原因（複数回答）

こうした実情を踏まえると、観測者の対応労力におけるスキルの問題も含め、使用されている測器の性能や品質、管理状態にもばらつきがあり、それらの観測結果をスクリーニング処理なしに予報の初期値として利用するにはいささか問題が多いことがわかる。

7.2.3 自動気象観測の必要性

数値モデルによるグローバルな予測が実施される今日、その初期値となる気象観測には地球規模での同時性が求められる。しかし、手動観測に起因する観測時刻のばらつきや、観測結果のGTS 網への通報の遅れは情報品質を劣化させる要因となっており、世界規模で改善が求められる重要課題となっている。

それらの実態を考慮すると、少なくとも各国の現有の観測拠点における設備を十分な信頼性を有する自動観測システムへ置換していくことが重要であり、またそうした自動観測地点の増強（高密度化）が予報の改善にとって必要不可欠な課題となっている。

数値予報計算は初期値となる領域内の実況観測に大きく左右されるが、途上国では基礎的な観測データの収集能力が脆弱であり、わが国の気象庁などが行う数値予報に必要なデータが取得できているとは云えない。

また、基礎的なインフラ整備の必要性の高い開発途上国においては、都市化や人口の密集化などがあいまって、洪水、暴風雨、異常気温などに起因する社会的、経済的被害を防止する必要性が高まっており、そうした各国の地域的な予報という面でも気象観測網の充実化、整備が非常に重要な課題になって

いると言える。

多くの国では手動による気象観測にともなう労力の問題は、観測の高密度化、高頻度化の大きな足かせとなるのは疑う余地がない。その意味でも観測の自動化に対する必要性を広く訴え、打開策のマイルストーンを共有していくことが重要と考える。

7.2.4 その他の問題点

2011年6月に気象庁と WMO との共同で実施された各国の地上観測システムに関する調査では、3カ国のメンバ国から以下のような指摘と問題提起がなされたという。

それは、人口が密集する都市領域やその周辺地域での観測データへの影響であるが、そうした特異な環境が気象観測の結果に影響を及ぼしている可能性の問題についてである。

それらの国々の観測は順調に継続しているかのように見えるが、そうした環境条件のもとで収集されているデータは、実際にいかなる誤りが含まれていても、その可能性について、否定することができないと指摘されている。

そして、都市化に関連する気象観測の問題について、分析と適切な対策方法の究明に対する協力が求められたという。

この問題は、わが国においても例外ではなく、国際的見地で究明に取り組む必要があると考えられる。一方、上記の調査では、参加した国の 3 分の 1 以上が観測データを利用する上で何らかの障害に直面することがあるという。

その内容は、図7-5 に示すように、最も深刻な問題が、やはりデータの品質そのものである。第 2 位は、通信回線の障害などによって適宜オンタイムにデータを入手できないときがあること、第 3 位はデータ内容の不具合と続いている。

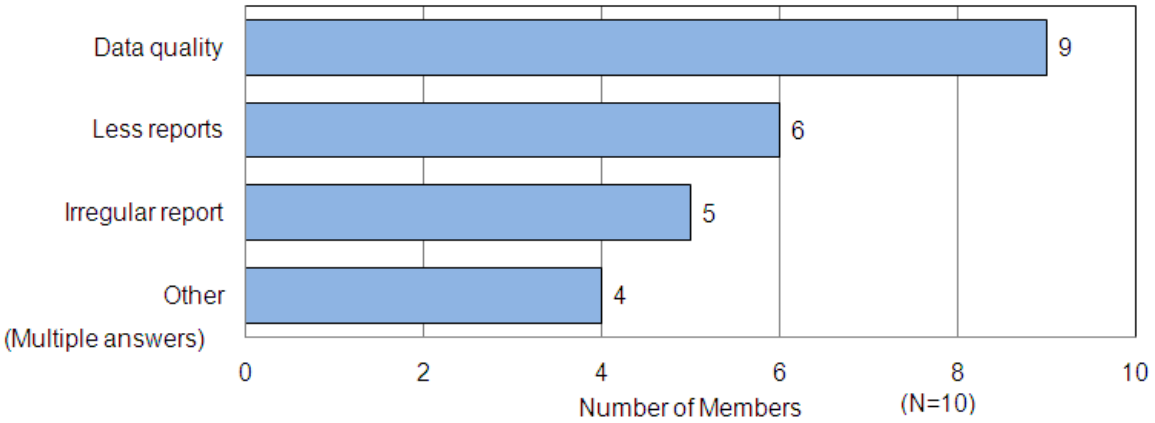


図7-5 観測データを利用する上で障害となる問題点（複数回答）

7.2.5 まとめ

以上のような状況を踏まえ、気象測器研究会では、観測の自動化、高精度化を中心に、各国の気象観測システムの整備、設備の強化・促進が重要であると考え、それに寄与するアプローチを共有するものである。

また、上記の都市化の影響に関する問題などについても、何らかの取り組みにつながり、貢献の可能

性が期待されるところである。その問題は、NWP の技法を利用する場合に、とりわけ重要な課題として浮上すると思われる。

しかしながら、各国ともにそうした一般認識は共有できるものの、十分な資金的裏づけや技術的バックグラウンドが不足している現実があり、先進国からの経済援助や技術的支援なしには問題解決のメドが立たない場合が多いのが実情である。

そうした状況を踏まえ、それらの国々で自動気象観測網を展開する上で重要なことは、測器そのものの観測精度の保証もさることながら、気象観測機器全般に関する知識や取り扱い上の技術、保守技能の不足に起因して発生する二次的な障害リスクを回避する手立てを担保することを過小評価してはならないということではないか。

したがって、機材設置工事や運用の容易性、そして保守の簡便性を十分に発揮するシステムの開発が重要であり、その意味ではオールインワンタイプの CWS を利用する意義は小さくない。その要件は、わが国などの先進諸国の国内問題としても例外ではないと思われる。

参考文献

1) Survey on the Surface, Climate and Upper-air Observations and Quality Management in RA II (Asia), June 2011 (DRAFT) , Japan Meteorological Agency and World Meteorological Organization

7. 3 海外における自動気象観測装置の事例

海外における自動気象観測の具体例として、インドおよびバングラデシュの事例を以下にまとめた。

7.3.1 インドの自動気象の観測

インド気象局 IMD（Indian Meteorological Department, website: http://www.imd.gov.in/）が、気象官署での地上気象を総括し、自動気象観測に関わる装置の開発を担当してきた。マハシュトラ州の Pune 気象台（IMD, Pune, website：http://www.imdpune.gov.in/index.html）に自動気象観測研究センター（AWS research centre）があり、インド独自の AWS を開発するとともに、海外を含めた多数の AWS の比較実験を実施している（図 7-6、図 7-7）。しかしながら、現在のところ、気象センサーやロガーは外国製のものを組み合わせて、AWS を組み上げている状態である。
現在のところ、インド製の気象測器は、精密な設計が不十分なものも見受けられる。
精度のいい観測に適用が出来ず、耐候性も十分ではないと思われる。

図 7-6　IMD の AWS 研究センター

図 7-7　設置された AWS の例

一方、インド宇宙 ISRO（Indian Space Research Organaization, website:http://www.isro.org/）では、独自に AWS の開発展開を行っており、北東宇宙応用センター　NASAC（North Eastern Space Application Centre,　website: http://www.nesac.gov.in/dos_centers.htm）では、インド北東部の AWS の展開を担当し、図 7-8 のように、インド北東部のアッサム、メガラヤ、ナガランド、マニプール、ミゾラム、トリプラ、アルナチャールプラデシュ、シッキムの 7 つの州で、80 台の AWS を設置した。この AWS 観測網は 2005 年位から計画されて、最近完成をみた(http://nesac.gov.in/spsc_instruments.htm)。

この AWS 観測網では、風向風速、気圧、気温、湿度、降水量を観測している。時間間隔は 1 分程度である。これらの気象要素の信号は全て衛星経由で収集されている。

大きな人口を抱えるインドでは農業生産は重要な課題であり、農業気象への関心が高い。このため、一般の気象要素の加えて、幾つかの深度の地中温度、土壌水分を測定する AWS も普及している。

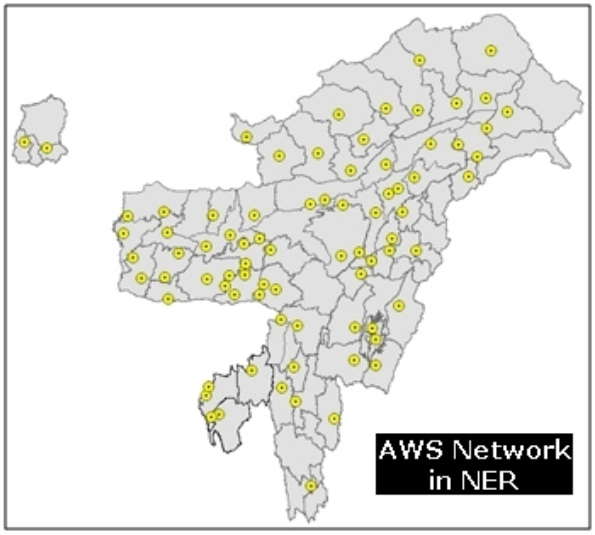


図 7-8　インド北東部の AWS の設置地点

図 7-9　ISRO-NESAC の AWS

7.3.2 バングラデシュの自動気象観測

バングラデシュ気象局 BMD（Bangladesh Indian Meteorological Department, website: http://www.bmd.gov.bd/index.php）では、日本の国際協力事業団 JICA によって、７つの地点に AWS が設置され、一般の気象要素がダッカの気象局で無線によって収集されることになった（図 7-10）。

雨量計については、この７カ所以外にも数カ所にも設置されて、この記録もダッカで遠隔で収集されるようになった。

このように、地方の気象官署の観測データが、少しずつではあるが、ダッカにおいてリアルタイムで把握できるようになった。

バングラデシュにおいても、大きな人口を抱え、農業生産への関心が高く、近い将来、農業気象要素を含む AWS の設置が計画されている。

図 7-10　BMD の AWS

7.3.3　インド北東部での京都大学防災研究所の気象観測

京都大学防災研究所では、1992 年から JICA による「バングラデシュにおける洪水対策」に関する研究課題の中で、バングラデシュ北東部のシレット地区に多数の雨量計を設置して雨量の自動計測を実施してきた。その後、科学研究費補助金、地球観測システム構築推進プラン(GEOSS)、21 世紀 COE、京都大学防災研究所、生存圏研究所、東南アジア研究所、生存基盤ユニット、総合地球環境学研究所、京大財団の共同研究の予算で、インド亜大陸北東部のアッサム、メガラヤ、バングラデシュに雨量計、AWS を設置して、気象観測網を充実完成させた（図 7-11）。

インド製の雨量計をインドのアッサム州に 15 台、メガラヤ州に 5 台、日本製の雨量計をバングラデシュに 16 台を設置した。風向、風速、気圧、気温、湿度、降水量を各計測機器で測定する AWS をバングラデシュの 6 地点に設置した。そのうち、3 台は WTX520 CWS である。

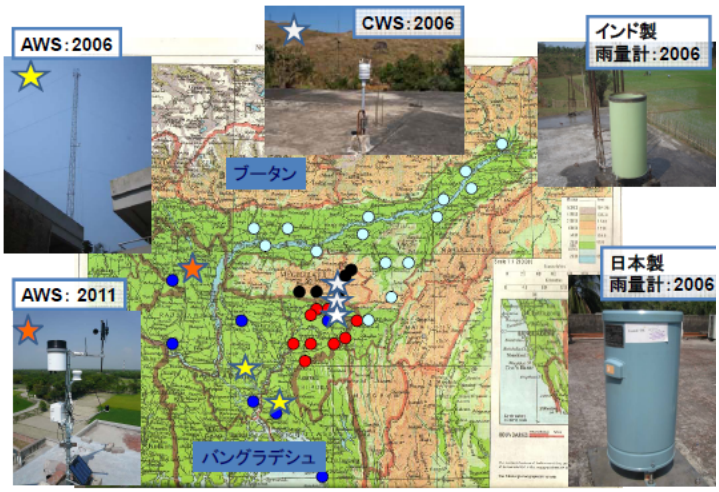


図 7-11　インド亜大陸北東部の地上気象観測網
（○は雨量計、☆は AWS および CWS の設置場所）

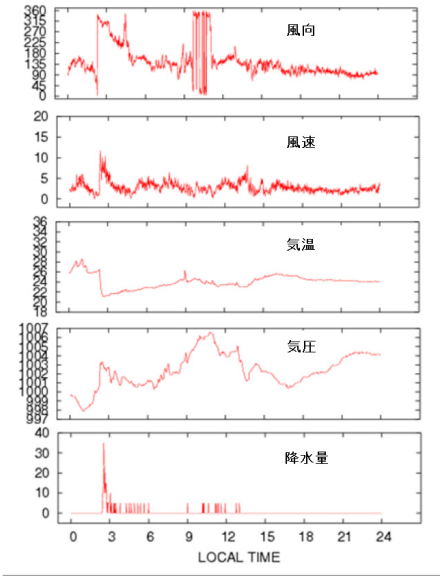


図 7-12　AWS で観測されたメソ擾乱
（現地時間 3 時頃に通過）

この観測網の AWS によって観測されたメソ気象擾乱の一例を図 7-12 に示す。この擾乱はスコールラインを形成していて、現地時間午前 3 時頃に通過して、短時間に風向の急変、風速の急増、気温の急低下、気圧の急増、急な降水が観測された。これらは、極めて短時間に発生するメソ擾乱特有の現象であり、この AWS における 1 分毎の観測でとらえることができた。通常の気象局の 3 時間間隔での観測ではとらえることができない。

この地域に設置した CWS は V 社製の WXT520 であり、データロガーは東洋電子工業㈱ 制作の DL5150 である。設置のようすを図 7-13 に示す。この例はインドのメガラヤ州のチェラプンジ（公式にはソーラ）で、1 年間の平均降水量が 12,000 mm に達する世界最大の豪雨地域の一つである。
この観測地点に数年前からこの CWS を設置して観測を開始し、当初は電力を商用電源で行なった。しかし、プレモンスーン期の落雷によって、CWS のセンサーおよびデータロガー全てが焼けて破壊してしまう被害に遭い、電源を太陽電池に変更した。

さらに、データロガーを気密性の高いプラスチックの箱に入れて設置したところ、湿度の低い乾季には順調に動作をしたが、湿度が高くなる雨季には箱の中に入った水蒸気が結露して水がたまり、データロガーが停止していた（図 7-14）。現在は箱の底に小さな穴を複数空けることによって、空気が流通するようにして設置をした。

図 7-13　チェラプンジに設置した CWS とロガーボックス

図 7-14　ロガーボックスの上部に結露した水が付着した状態

このように、海外で観測を展開する場合には、雷や強風などの発生が多いなど、気象環境が厳しいだけでなく、商用電源が確保できない、確保できたとしても電圧が極めて不安定など、設備の環境が劣悪な場合が多い。このため、上記のように、予想もしなかった事態が発生するが、遭遇するたびごとに一つ一つ問題を解決していくしかない。

8. CWS を用いた気象観測システムの提案

8.1 今後の気象観測に求められる方向性

第 6 章でも述べたように、気象観測システムの歴史は、手動観測による測定にはじまり、自記紙タイプなど機械仕掛けの自動化を経て、電子的な観測へと発展した。今日ではその検出方法も、検知素子の物質的な特性や機械変位、運動などを電気信号に変換するものから、光線や音波、電波などを利用して間接的に計測するものへと発展している。

この章では、そうした発達の著しい新タイプのセンサーも含めて、選択肢が広がった各種のセンサーを効果的に活用するという視点から気象観測のあり方を捉えなおし、中でも CWS を活用した新世代の気象観測システムとしてどんな可能性があり、また適当な方法は何かとの問いに対して、主に技術的背景を見ながらあるべき方向性を模索し、その回答を探ってみることにする。

われわれが利用する気象観測システムは、大きく感部、データロガー、通信機器、ネットワーク、データ収集および処理用パソコンなどから構成される。

その形態は、コンピュータやネットワーク技術の発達に応じて徐々に変遷し、現在では本書の主題でもある CWS や様々なネットワークと融合するような形が求められるようになってきた。中でもインターネットに関する技術は、この議論に欠かすことのできない要素であるのは言う迄もない。

この章では、今後の気象観測のあり方として、CWS を用いた観測やデータ収集に関する要素技術に焦点を当て、これからの観測システムでは何が求められ、どういう技術が利用できるかについて明らかにする。まずは、その前提として、気象観測にまつわる実情や動向に触れ、新しい観測システムに求められる条件を探ってみる。

8.1.1 気象観測システムに求められる期待像と方向性の考察

これまでに述べられた、気象観測システムに関する国際機関の動向や世界の絶対多数を占める海外途上国における実情の分析などを踏まえつつ、今後の気象観測システムに求められる期待像、あるべき方向性について考察する。

考察の前提としては、もちろんわが国におけるシステムの将来像を第一義として、その必要性や求められる形態、性能目標などを明らかにすることになるが、以下に述べるように気象予測の高度化という最終目標の究明においては、国境という地政学的境界を越えた空間領域の把握や分析が重要不可欠となることが明らかである。したがって、ここでも前章に引き続いてシステムや測器の検討や考察の対象を気象学的空間という観点に置き、国内だけでなく、海外を含めた方向性や目標の具体化を模索するものとする。

国民の情報に対する要望や期待、そして国民に対する情報伝達手段としてテレビ、ラジオなどのマスコミ、インターネット、携帯通信網の発展によって、国民の Public Weather Service（PWS）に対する要望が多様化し、期待も増大した。

その情況については、途上国においては、わが国などの先進国に比べて歴史こそ浅く、文字通り発展途上と見ることができるかもしれないが、その動向という点では共通したものがある。PWSに対する具

体的かつ個々の期待内容については、わが国を初めとする世界の先進諸国については、世界中の多数を占める発展途上の国々のレベルと比較すると、メディア、インフラや産業構造の状況などを含め、特別なケースと考えるほうがむしろ正確かもしれない。
但し、暴風雨や洪水、干ばつなど、卓越した気象条件により発生する自然災害については、国々の特徴や地域性によるところが多く、比較や優劣にという関連において区別する意味があるとは思えない。

したがって、そういう観点において、的中する天気予報、当てになる災害警戒情報への期待から予警報の精度や質の改善が求められるという条件は、万国共通の事情と捉えて支障ないだろう。すなわち、気象や水文の実況観測についての重要性は、そうした事情を背景として、概して以前より高まっていると見ることができる。

8.1.2　気象観測の自動化が重視される事情

かつて、気象観測の自動化は、業務の合理化や要員配置の観点から検討された時代があった。その事情は、今日でも必要性が少なくなったということではないが、観測の高密度化、多要素化、高精度化が求められるようになった昨今では、むしろ以前にも増して自動化の必然性が高まったという見方ができるかもしれない。

しかし、近年では予報手段の支援ツールとしての数値予報モデルの技術が普及したことにより、計算の初期値として用いる実況データの精度や品質の均衡性がより重要になっただけでなく、観測周期の高頻度化、それに同期性も重視されるようになっている。すなわち、手動観測にみられるような、観測時間の不均一性や観測者の主観を排除する再現性が求められ、標準化された時空間の一貫性が求められている。そういう意味で、近代的なセンサー素子を用いた自動観測のメカニズムとオンサイト データの品質保証の必要性が高まったと言える。

近年、観測の自動化の必要性の背景には、業務従事者の確保あるいはその人件費の負担という事情以上に、そうした技術的理由が大きく関係していると見るのがむしろ正確だろう。この観測の同期性や品質の相対的均一性については、観測ネットワークというシステム全体としての観点からの検証もさることながら、個々の観測ステーションで使用される気象測器そのものを再検証し、その性質や性能をきめ細かく分析して正しく補償するところまで掘り下げていく必要があると思われる。

一方、オンライン式の自動気象観測が再び注目されるようになった背景には、通信やネットワーク技術、パソコンの普及、地上ライン、携帯波、衛星通信網の発達と普及、そしてそれらのコスト低減があることを見逃せない。ICT に関連するその傾向は全世界で同時並行的に急進展しており、今後の自動気象観測システムでは、そうしたデファクト標準の技術や製品の採用、あるいは活用を見逃すことができない。

そういう意味で、世界に誇るわが国の気象観測網と云えるAMeDAS（Automated Meteorological Data Acquisition System）などで利用されてきた独自のネットワークやプロトコル、そしてデータ形式や処理方式などの構成技術においては、今後のこの種のシステム開発等で、そのままモデルとして流用するには明らかに無理があり、見直しが避けられない情勢である。

もちろん、その基本的なシステムポリシーや堅牢なシステム構造など、教訓にすべき要素は多々存在するのは言うまでもない。それらのノウハウをベースとして、これからの時代に適した発展形を目標に据えるべきだろう。

8.1.3　社会構造的な背景

他方において、実況観測が重要化しているもうひとつの理由として忘れてならないのは、世界の各地で都市の近代化が進み、人口増加とその集中が顕著化し、自然災害に対して脆弱な社会構造に変化してきているという事情があげられる。そうした都市構造の肥大化の副作用として、社会メカニズムの自然災害に対する防災行動のレスポンスが相対的に鈍化し、警戒情報の早期化や、より長い見通しの予警報情報が必要になっている。それに伴い、当然ながら、実況把握の即時性や正確さ、予測精度の向上が求められるという必然性につながっている。

8.2 気象観測センサーとそのインターフェースの動向

8.2.1　気象観測センサー

自動気象観測で利用できる観測機器にはさまざまなタイプや製品があり、それぞれに長所や短所、利用上の制約などがある。また、用途としては、WMO の地上気象観測点やわが国のAMeDAS などの観測点で利用されるハイエンドシステムから、工事現場や農業気象観測など特定目的に利用される簡易な気象観測装置などがある。

それらを設置する環境においても、さまざまな条件が存在する。たとえば観測地における商用電源の利用の可否や接続できる通信網の選択肢などである。もちろん、センサーを設置できる露場の条件などもあるだろう。

本書では、巻頭で述べているように、地上気象観測に利用できる統合型の小型気象センサー（CWS）に焦点を当て、その機能や性能を含む観測システムのあり方について総合的に検討を進める。

近年のマイクロプロセッサを中心とするエレクトロニクス技術の進歩は、気象観測の分野にもいち早く波及し、コンパクトでローコストな気象センサーやデータロガーの実現を可能にした。特に複合要素をコンパクトなハウジングに組み込んだ CWS は、そうした最新技術を効果的に活用した成果と言えよう。内蔵のマイクロプロセッサによるセンサー信号の非線形処理やノイズの除去など、先進的なデジタル信号処理技術が利用可能なセンサー素子の選択肢を広げ、その測定結果に劇的な改善をもたらした。以前なら考えが及ばないような小型の超音波風向風速計や、V社の WXT520 CWS にみられるようなピエゾ圧電素子による雨量センサーの実用化などがそれらの好例である。しかし、それらはまだ開発されてからの歴史が浅く、十分な性能評価や特性の把握がなされているとはいえない。採り上げたサンプルが限定されているとは言え、本書第Ⅰ部および第Ⅱ部に記述した評価実験でその性能が明らかになった。いろいろな問題解決には相応の時間がかかるだろう。

したがって、CWS は、当面、農業用途や、建設工事現場、都市における気象観測という、いわば特別な国家検定を必要とせず、またローコストさが求められる特定分野での普及が先行することになるだろう。そして、その特性や特徴に関する十分な知識や対応策の蓄積が行われた結果、いずれ既存の基幹的観測手段にも利用できるセンサーに発展する可能性を秘めていることも指摘しておかねばならない。本研究会が実施したこの評価実験は、その可能性を加速する役目を担うことになるだろう。

一方、コンパクトさを特長とする一体型複合センサーによる設置作業の簡易性やメンテナンス面の優位性に加え、そうした安価な機材コスト、さらには自己完結性という旧来型センサーにまさる特長を有する CWS は、気象データを必要とする従来の多くの利用分野にとどまらず、これまでは実現すら難し

かった分野などの新しいアプリケーション分野への利用展開や市場性の拡大を促し、時間経過とともにしかるべきシェアを占めていく可能性を有していることも見逃せないだろう。

しかし、一体型複合センサーという形態的な条件によって宿命的に生じる測定空間の位置的な制約は、旧来の気象観測の概念を転換する必要に迫られる。例えば、風向風速や気温、雨量などの各要素がほとんど同一の空間、すなわち同じ地上高での測定が余儀なくなるという問題である。少なくとも従来の気象庁や WMO の観測手法のガイドラインからの転換は避けられず、その検証と新しい理論の確立が求められることになる。

さらに CWS においては、そうした事情から派生するさまざまな制約を解決するために、メーカ毎に考案される独自のセンサー信号の処理アルゴリズムが商業的理由などから非公開、あるいは不透明になりがちな問題がある。それらは、今後、何らかの形で解決されていかねばならないだろう。その意味では業界組織が連携して気象庁や WMO に於ける測器関連委員会などの活動との連携を強化し、その技術情報の開示を積極化していく行動が求められる。

また、データロガーの機能との組み合わせによって、センサーの動作状態を自動診断したり、必要に応じて自動校正（キャリブレーション）を行うような機能を組み込むことが可能となっていることも注目すべきである。さらには観測の品質や信頼性を高める手段についても目を向けなければならない。冗長なセンサーの組み込みや、同じ目的で種類の異なるセンサーを使用して並列計測を行ない、それらの結果を比較することによって観測値の品質を自動認証したり、その相互監視による異常発生の早期発見を行うなど、より高度な品質保証を実現する機能の組み込みも実用化の段階を迎えつつある。

こうした自動診断や補償機能は、観測結果のデータ品質や信頼性を維持するのに貢献するだけでなく、最終的には観測網全般の維持管理のためのコストや運用コスト抑制にも役立つことにつながる。データ品質という意味では、とりわけ気候監視関連のアプリケーションにおけるデータの同質性が重要であるが、CWS にみられる新しい観測メカニズムなどは、とくに旧来の観測手法との差異や相関に注意すべきである。その点の保証については、何らかの客観的解析や検証が求められることになる。

8.2.2　センサーとデータロガー間のインターフェース

風向・風速や温度など、従来の測定においては、個々のセンサーからそれぞれアナログ信号やパルス信号を個別に引き込んで専用の変換器やデータロガーで量子化し、そして物理値へ換算する方式が一般的である。

その場合、個々の測器信号をそれぞれ並列に引き込んで接続することから、観測要素の数に比例して電極数が多くなり、それによって配線材の量もさることながら、設置工事や保守で発生する工数がコストを圧迫し、システム普及の足かせになってきた現実がある。

また屋外で実施される気象観測の宿命として、導線を用いる限り、雷サージや空電インパルスなど、ノイズや電気的破壊の問題がついて回り、その対策に悩まされることが多い。
電極数の増加は、すなわち耐雷アレスタなど保安器の必要数に直結し、そうしたことがシステムコストや施工コスト、保守コストの抑制を阻害する要因となっている。

一方、CWS の場合は、単体もしくは少数のハウジングの中に、複数の測定要素を組み込むことから、個別の信号線を引き出すのはあまりに非効率である。そこで、CWS の場合はほとんど例外なく、センサーの中に A/D 変換器やマイクロプロセッサを組み込み、処理後の集約データとして単一のシリ

アル信号ラインを通じてデータロガーへ観測結果を伝送する方式を採用することになる。

その場合は、配線の接続電極数だけでなく、上記の保安器、すなわち耐雷アレスタの使用数も最少化できるため、コスト削減に役立つことは論ずるまでもない。

そのセンサーとデータロガーとの接続は、有線で行う場合と無線で行う場合とがある。
有線の場合は、そのラインを通じてセンサーへの電源供給が可能であるが、無線式の場合は、センサー側にソーラ パネルや電池を内蔵するなどして電源供給の仕組みの確立が不可欠となる。有線のシリアル信号としては、RS-232、RS-422、RS-485、SDI-12、USB などの標準規格が一般的であり、メーカが独自に定めた仕様を用いる場合もある。そうしたハードウェアインターフェースの上でデータロガーからセンサーに対する設定やデータ要求などのコマンド、そしてセンサーから測定結果のデータ列などが伝送される。

以下に代表的なシリアルインターフェース規格について採り上げる。

8.2.3　各種の有線インターフェースの信号規格

● 有線系インターフェースの信号規格

前述のように、シリアル伝送信号として普及している規格には、RS-232C、RS-422A、RS-485 などがあり、これらは米国電子工業会 EIA（Electronic Industries Alliance）によって標準化された通信規格である。これら先頭の RS の意味は、Recommended Standard（推奨標準規格）の頭文字である。その他、センサーの接続に特化された SDI-12 規格、そして最近めざましい広がりを見せる NMEA-0138 プロトコルについても触れる。

中でも RS-232C は、モデム用のインターフェースとして普及し、気象観測機器でも広く利用され、馴染の規格である。この他、シリアル伝送に分類されるインターフェースには、USB や IEEE-1394、Ethernet 等もあるが、ここでは、センサーとデータロガーとの接続に利用しやすい代表的な標準規格に絞り、その他については他稿に譲ることにする。

① RS-232

RS-232 は少し前の世代のパソコンには、ほとんど全てに標準搭載されるなど、最も広範に利用されてきたシリアルインターフェースと云える。現在でも一般的に“RS-232C”と呼ばれているが、正式な規格名は EIA-232E である。各信号線の目的やタイミングのほか、使用するコネクタやそのピン配置も規定されており、モデムに使用される D-SUB 25 ピンと、パソコン等でよく利用される D-SUB 9 ピンとがある。伝送信号は、グランドレベルの電極を基準として±12 V のスイングを基本とする不平衡信号で、最高通信速度は 115.2 kbps、ケーブルの最大長は約 15 m とされている。ただし、その最大長は伝送速度に依存して決まる。

② RS-422

前記の RS-232C では伝送距離と伝送速度に制約があり、その改良版として標準化されたものが RS-422 である。RS-422 の伝送信号は 1 組のペア線で±5 V に交互スイングさせる平衡伝送信号が使われる。そのため、最高通信速度は 10 Mbps、ケーブルの最大長は 1.2 km まで利用でき

るようになった。伝送路の上りと下りは分離しており、上り下りで同時に交信する全二重通信が可能である。現在の規格では EIA-422A と呼ばれ、RS-232C と違って接続コネクタの規定はなく、機器などへの組み込みの自由度が高い。

③ RS-485

RS-485 は RS-422 の上位規格として標準化されたものである。信号レベルなどは基本的に RS-422 の規格が踏襲されているが、送信ラインと受信ラインを共通にするバス方式の接続を可能にしている。それによって、1 台の親局（たとえばデータロガー）に対して複数の子局（例えばセンサー）を並列に接続することが可能で、最大 32 台までマルチドロップ式に接続ができる。上り下りの伝送路を単一にした場合は、もちろん同時交信はできず、交互の半二重通信になる。最大伝送ケーブル長や伝送速度は RS-422 と同様で、10 Mbps、1.2 km までとされている。コネクタの規定はない。

④ SDI-12

SDI-12 プロトコルは、センサーとデータロガーとのシリアル接続のために制定された標準規格で、Serial Digital Interface at 1200 baud の頭文字から命名された。文字通り、伝送速度が 1200 bps 固定のシリアルインターフェースである。

SDI-12 には物理インターフェースとしての規格と、伝送フレームの内容を定めたプロトコルの意味がある。

SDI-12 の電気的インターフェースは、コモンのグランド線に対して 1 本の双方向シリアル信号ライン、および 12VDC の電源供給ラインの 3 線で構成されている。

シリアル信号線は、基本的に 0/5 V でスイングされ、RS-232C レベルへの変換も容易にできるようになっている。信号は、センサーとロガーとの間の接続を想定して最適化されており、不平衡信号ではあるが、伝送速度を 1200 bps に制限して 60 m までの伝送を可能にしている。また SDI-12 は、1 本のバス線に 1 台の親局（データロガー）と 10 個までの子局（センサー）を並列に接続してロガーからセンサーへの電源供給とデータ収集ができる。

12 VDC の電源線は、電池電源のアプリケーションなどを含めてローコストの観測装置を実現するのに役立つ。特に CWS のような統合型センサーには向いた仕様と云えるかもしれない。SDI-12 としてのコネクタは特に規定されていない。

● 無線系インターフェースの信号規格

センサーとデータロガー間を接続するもうひとつの手段に近距離無線系リンクがある。代表的なものが無線 LAN の通信方式の一種で、アクセスポイントを介すことなく、機器同士で直接通信を行うアドホックネットワークと呼ばれるものである。自立分散型無線ネットワークと呼ばれることもあり、センサーとデータロガーとの間を無線で直接接続してコマンドやデータのやりとりをする場合に有効である。アドホックネットワークの場合、同時に複数局とは通信ができないため、複数のセンサーを利用する場合は、順次呼び出してセッションを確立、切断するような制御が必要である。

このほか、赤外線を利用した近距離データ通信の技術標準もある。さらに手順としての標準化はさ

れていないが、数十メートルの距離を免許不要の無線通信リンクとして 2～2.4 kbps で簡易に接続できる特定小電力無線（400 MHz 帯）、微弱無線通信（300 MHz 帯）、さらに超音波を利用したものなどもあり、選択肢を広げている。

無線センサーと言えば、かつて NASA のジェット推進研究所 JPL が惑星や人が行き着けない地球上の調査を目的として開発した Sensor-Web という技術が有名になった。
各種のセンサーを組み込んだポッドと呼ばれるセンサー箱が作られ、実験までされたと報道されたことがあるが、その後の動向はあまり聞かない。Sensor-Web は、広域に多数網羅されたポッドが次から次へとデータをリレーし、最終的にはインターネットに載せて任意の場所でデータ収集ができるという概念であった。

その発想は、わが国の総務省が 2004 年に u-Japan として提唱したユビキタス ネットワークと呼ばれる自律連携ネットワークに通じるものがある。ユビキタスは、家電製品や道路の案内板などの社会基盤、スーパーマーケットや量販店などで販売される商品、日用品や書籍など、さまざまなところに利用して便利な社会を実現するというコンセプトで、ユビキタスコンピューティングとして構想が提唱され、この種の近距離データ通信が注目されたことがある。　その構想は今でも引続き進行しているが、一時ほどの勢いはなくなっている。

以下にそうした代表的な無線伝送の標準方式について見ていくことにする。

① ZigBee

ZigBee は、家電向けの短距離無線通信用として開発された規格の一つである。Bluetooth と同種の技術で、Bluetooth よりも低速で到達距離も短い代わりに省電力で、組み込みが容易なため、低コストで実現できるという利点がある。

ZigBee では無線 LAN 規格の IEEE 802.11b と同じ 2.4 GHz 帯の周波数が利用され、16 チャネルが使われる。海外では 2.4 GHz 帯のほか、900 MHz 前後の帯域を利用できる国もある。物理層のインターフェースには IEEE 802.15.4 が用いられる。

そのデータ転送速度は最大 250 kbps で、最長の伝達距離は 30 m 程度とされている。一つのネットワーク内で 255 台までの機器アドレスを割り振ることができる。非常に低消費電力であることが特長で、気象観測データのように、とくに高速・大容量を必要としない伝送のアプリケーションには向いている。

② Bluetooth

Bluetooth は、携帯情報端末での利用を前提として開発された短距離無線通信規格である。
携帯端末や周辺機器など数 m 程度の距離の機器間接続に用いられる。ケーブルを使用せずに音声や画像データ、プリンタの印刷イメージなどを転送でき、今後の携帯端末や家電系での普及が見込まれている。

Bluetooth は、無線 LAN や ZigBee と同様に、免許なしで自由に使うことのできる 2.4 GHz 帯の電波を利用し、最大 24 Mbps までの通信速度で接続することができる。

元々スウェーデンの Ericsson 社が開発した通信技術がベースになっており、同社と IBM、Intel、Nokia、東芝などが中心となって設立した Bluetooth SIG が仕様策定や機器への組み込みの推進を担っている。IEEE でも IEEE 802.15.1 として標準化された。

Bluetooth はいろいろな用途での利用が想定されており、その利用方法によって実装すべき機能やプロトコルを Bluetooth プロファイルとして個別に定義できるようになっている。

ZigBee に比べると扱いが多少煩雑であり、気象センサーのように、大容量データの伝送を必要とせず、大量生産志向でない製品への組み込みには不向きかもしれない。

③ IrDA

IrDA は、Infrared Data Association の略称で、赤外線を利用した近距離データ通信の技術標準を策定する業界団体の名称である。そのままプロトコルの名称として用いられている。

IrDA は、主には携帯端末やノートパソコン、デジタルカメラなどの外部通信機能としてよく利用されている。

IrDA にはポイント・ツー・ポイントで 1 対 1 の高速なデータ通信を行うためのものと、複数の機器間を接続して双方向に通信を行うための 2 種類の規格が存在している。携帯端末などに組み込まれているものは一般的に前者が多い。

最新バージョンの v1.4 では 1 m 程度までの距離で 16 Mbps までの通信が可能とされている。

IrDA の場合、ZigBee や Bluetooth と違って、赤外線を利用するため、間に障害物があると通信できない。また送信には赤外発光ダイオードを駆動する必要があるため、無線式に比べると消費電流が大きいのが欠点である。ただし、電気的なノイズへの心配はなくなる。

④ NFC

NFC は Near Field Communication の頭文字である。NFC は 13.56MHz の電波を用いて、10cm 以内というごく近距離で 100～400kbps の双方向通信を行う近距離無線通信技術で、2003 年 12 月に ISO/IEC 18092 として国際標準の勧告が採択された。

Suica や Icoca などの鉄道用非接触 IC カードが有名であるが、アンテナの近くにかざすように近づけるだけで通信ができる。カードには電池や電源が不要で、本体側アンテナから発射される電波の電磁誘導エネルギーを電源として利用し、通信やデータの書き換えができるというのが特長である。NFC は、非接触 IC カードだけでなく、最近は携帯端末やスマートフォンなどでも組み込まれるようになった。

8.2.4 データ収録のためのプロトコルとデータフォーマット

伝送制御手順（プロトコル）やデータフォーマットは、メーカが固有に定めたもののほか、ISO や国家レベル、あるいは業界や NPO 組織によって標準化されたものが存在している。

それらについては次項以下で詳述するが、システムコンポーネントの開発や製造の分業化が進展する傾向にある現在、標準プロトコルの存在がますます重要化し、採用されるケースが増加している。ここでは CWS に向いたプロトコルに限定して代表的な例を採り上げてみる。

① SDI-12

SDI-12 は、電気的な信号インターフェースの標準規格であると同時に、伝送手順やデータ形式を定めた規格でもある。

SDI-12 で使用されるプロトコルは、シンプルな半二重通信のコマンド レスポンスが基本であ

り、連続的にデータを送出する伝送モードもある。コードには ASCII 文字コードが使われ、偶数パリティ符号つきの 7 ビットコード、そしてストップビット 1 ビットの調歩同期フレームが使用される。データ構成やプロトコルが非常に単純なため、ソフト開発を含め、機器への組み込みを容易に実現できるのが特長でもある。

2012 年 9 月現在の最新版は SDI-12 v1.3 であり、この規格は多くのセンサーに採用され、普及が進みつつある。

② NMEA-0138

NMEA は米国海洋電子機器協会（National Marine Electronics Association）というその名の通りの NPO 組織が制定した伝送規格で、本来は海洋ナビゲーション機器間の通信用として開発されたシリアル通信プロトコルである。NMEA は、もともと GPS データのようにリアルタイムに出力される航法データをエラーフリーで通信することを主旨としていた。

しかし、そのフォーマットが拡張性に優れて自由度が高く、リアルタイムに発生するさまざまなデータを容易かつ柔軟に組み込むことができるという特長から、今では海洋ナビゲーション用途に限らず、広範な測定器や観測機器の伝送プロトコルとして普及するようになった。SDI-12 と同様に電気的インターフェースと伝送プロとコルが規定されている。

現在の NMEA-0183 は、前身の NMEA-0180 や NMEA-0182 という規格から発展したもので、伝送速度や通信パラメータが改善されてきた。それらそれぞれの世代間には互換性がない。

現在の NMEA 標準プロトコルとしては NMEA 0138 v3.0 が一般的であり、さらに新しい NMEA 2000 という規格も制定されているが、両者には互換性がないため、相互の直接乗り入れや共存はできない。新旧のインターフェースを同時に利用する必要がある場合は、Actisense NGW と呼ばれるゲートウェイを仲介して接続しなければならない。

NMEA-0183 では、すべての伝送コードが ASCII テキストのセンテンスという形で送られる。1 本のバス上に複数のセンサーをマルチドロップで並列接続する機能もサポートしている。

NMEA-0183 は、単一のバスラインに、一つの親局（通常はデータロガー）と複数の子局（センサー）が接続される。バス上で親局をダイナミックに切り替えて通信するような使い方は許されていない。伝送路にはシールドされたツイストペア線の使用が推奨されている。

NMEA-0183 の基本的な通信仕様は、パリティビットなしの 8 ビット符号で、1 個のストップビットを持つ調歩同期の ASCII キャラクタが用いられる。標準伝送速度は 4,800 bps とされている。ただし、Version 3 では伝送速度が 38,400 bps まで利用できるが、制約がある。

NMEA-0183 の伝送フレームはセンテンスと呼ばれ、先頭が“$”または“!”の文字コードで始まり、<CR><LF>の復帰改行コードで終端する。その 1 行は「パケットフォーマット」とも呼ばれる。そのセンテンスには 3 種類の基本形態があり、親権限のトーカ・センテンス、要求を発するクエリー・センテンス、それにバスを占有するバースト・センテンスである。

前記のスタート文字に続けて測器の識別符、データ種別が明示され、それ以降にカンマ区切りのデータ列が続く。そして終端の<CR><LF>の直前には、“＊”コードに続く 2 文字でエラーチェックのためのチェックサムコードが挿入される。

③ NMEA 2000

NMEA-2000 は、NMEA のワーキンググループで制定された新しい規格であるが、前述にもあるように、NMEA-0183 との互換性はない。

NMEA-2000 は、シリアルバス上に複数の親局および子局が存在するシステムで自由度の高い相互通信を実現したプロトコルである。したがって、NMEA-2000 は、NMEA-0183 のような専属の親局を必要としない用途に使用できる。

NMEA に関する詳細情報は下記から得ることができる。会員になるには協会に加盟し、会費の納付が必要となる。

NMEA - National Marine Electronics Association
7 Riggs Avenue Severna Park, MD 21146 USA
Telephone: +1（410）975 9422, Fax: +1（410）975 9450
E-mail: info@nmea.org　Website: www.nmea.

8.3 データロガー

最近のデータロガーの情況についても前に述べたセンサーと同様のことが言える。近年のマイクロプロセッサを中心とするエレクトロニクス技術の進歩は、高度なネットワーク機能を組み込んだ、コンパクトで高性能なデータロガー実現への道を開いた。しかも、全世界で破竹の勢いの普及が進む一般の携帯端末系機器用の半導体部品が大きな影響を及ぼしている。携帯端末系機器向けに開発された超低消費電力な半導体部品によって、データロガーの動作に必要な電力の劇的な低減とともに処理性能の確保が可能になり、商用電源が確保できない場所などへの展開も容易に実現できるようになった。

同様に大容量フラッシュメモリや CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）メモリの発達とローコスト化は、十分な容量の観測データの蓄積に止まらず、データロガーの基本ソフトや応用プログラムの登録というハードディスクに代わる仮想記憶手段を提供した。
その結果、ソフトウェアのアップグレードなどにともなうコードの書き換え（保守）が非常に容易に実施できるようになったり、また、データ通信回線等の障害時でも長期間、安定したオンサイトの連続データ収録が可能になったりした。そのバックアップ収録は、とりわけ欠測を嫌う気候変動などの用途では大いなる助けとなる機能である。

また、インターネットを軸とするネットワーク技術の進歩は、かつての AMeDAS や WMO 観測網のような専用通信回線による多地点の観測データの収集をより高速に、しかも非常にローコストな運用（通信）コストで実現する手段を提供した。

この節ではデータロガーを構成する重要かつ主な要素機能についてそれぞれ触れていくが、今やこのネットワーク技術の活用なくして、新たな気象観測システムを語ることはできない。

8.3.1　背景と現状

データロガーは、もともと手動観測の観測簿や自記紙による記録を電子的な記録に置換するところから始まった。時代的な経緯としては、測器の出力信号をアナログレベルで記録するデータロガーも一時的に出現したことはあるが、一般的に長期間の観測が必要な気象観測の分野ではあまり利用されることはなく、特殊な気象条件下での架橋の設計や風圧の解明等に資する観測データ収集等、限定された観測目的に利用された。

アナログ記録では、分解能の不足やドリフトなど時間的な安定性の欠如が利用の足かせとなっていたが、一方では気象センサーの開発の遅れもあり、目的とする気象データを電気信号で得ることすら困難な時代であった。

ほどなくデータロガーのデジタル化が進み、アナログ方式の欠点が解決されて、データ収録から処理の自動化への移行が加速されることになる。データの記録は量子値または物理値で行われるため、気象測器から出力されるアナログ信号を A/D 変換し、そのデータを記憶媒体に収録するのがデータロガーの主な機能であった。データを収録する記憶媒体は、コストの関係から、当時、磁気メディアが主流であった。

1970 年代にはバイポーラ型の半導体技術が進歩し、1980 年代に入って大容量の CMOS メモリが普及すると、観測データを半導体メモリに記録するデータロガーが生まれた。

その後、電話通信網の発達によって、公衆通信回線やアナログ専用線とモデムを使用したオンラインタイプのデータロガーが生まれることになる。それが現在の気象観測用データロガーの原型である。

そして、その後のパソコンの出現と相まって、LSI を中心とする NMOS（N-type Metal Oxide Semiconductor）から CMOS 半導体技術の著しい発達によって実装の高密度化、大容量化、高速化、低消費電力化が著しく進展し、またインターネットの出現によって通信機能に IP（Internet Protocol）技術が組み入れられたことから、データロガーの性能や通信の接続形態は様変わりした。今日のデータロガーは、そうした時代背景の中で改善が進み、成長してきた。

しかし、その基本的な機能や構成形態は、1980 年代前半に誕生したオンライン型データロガーの原型から大きくは変化したことがない。

そうした最近の技術革新と、本章で述べているような通信手段の多様化を背景として、データロガー、そして CWS のような気象センサーが、これから再び新しい時代に入ろうとしている。今、まさにその新世代化へのターニングポイントの渦中の時期にあると言えよう。

● 何がどう変わったか

従来の気象観測システムでは、発信器と呼ばれるセンサー、変換器、データロガー、そしてネットワークや処理装置という構成には、それぞれに比較的明確な役割が存在し、その区分や定義に疑念を挟む余地はあまりなかった。

しかし、最近ではそうした概念の見直しが迫られるような事態が生じつつある。それは、前述のような近年のマイクロチップ技術の発展が、そうしたコンポーネントそれぞれにマイクロコンピュータやマイクロコントローラーの組み込みを可能にし、これまでの弱点や欠点を改善する役目を果たすようになってきたことと関係している。たとえば、気象センサーでは、測定結果に生じる出力の非直線性や器差の問題があるが、マイクロコントローラーの組み込みによって、そうした問題が克服できる

ようになった。さらに具体的に言えば、たとえば温度計センサーの場合で言えば、以前であればISOやJISという標準特性からの偏差やバラツキの少なさが重要であり、クラス選定の指標とされた。しかし、感部そのものへマイクロコントローラーの組み込みが可能になった現在、センサーレベルへの高度で能動的な補正処理の実装が可能になり、そうした物性的な直線性や性質のバラツキが主要な問題ではなくなってしまった。今、もっとも重要とされるのは、そうした特性や器差の問題よりも、センサーの性質の解明であり、経年に対する安定性であり、また再現性である。要するに、優れたセンサーを実現するために注目すべき点が変化したのである。

このように、現在では、1 個の半導体チップにコンピュータシステム全体を集積したマイクロコントローラーが出現したことにより、それをあらゆるコンポーネントに組み込んで利用する方向へ道が開かれた。また、そのチップの性能は飛躍的に向上し、複雑で高度な処理でも簡単に組み込めるようになった。データロガーはもちろん、ネットワーク機器でも、ソフト・アルゴリズムが製品の性能を決定づける時代に入ったと言える。たとえば、通信において発生が避けられない伝送エラーは、もはや伝送の再試行を促すためにその発生を検知するというものではなく、受け側でエラーを訂正して再試行することなく利用するために検出するのである。

こうした技術革新の結果、どういう影響が発生し、何が変わろうとしているのだろうか。それは、マイクロコントローラーのコンポーネントへの組み込みで話が終わることはないということである。それほど近年のマイクロコントローラーの性能向上は著しい。

たとえば、センサーに組み込まれる 1 個千円余りのマイクロコントローラーの処理能力は、本来なら検査落ちが余儀ないようなセンサーを第一級品に生まれ変わらせるだけではない。それだけではまだ余力が残りすぎることになる。

その結果、そのセンサーは単に正しい測定結果を出力するだけでなく、その余力の処理性能を利用して、さらに別の機能を搭載することを可能にする。すなわち、これは、これまで暗黙に定義されてきた旧来のコンポーネントの役割区分を大きく変えることになる可能性をはらんでいるということになる。そうなると、まさにセンサーとは何か、データロガーとは何か、ネットワーク機器とは何かについて、既定の観念を捨ててもう一度問い直さなければならなくなる。

それでは、そうしたマイクロチップの世界がどのように発展しているか、例を挙げながら見てみよう。

● マイクロコントローラーの発展

マイクロプロセッサというと、コンピュータを構成する中央演算処理装置を指し、その機能を 1 個の半導体チップに集積した LSI 部品ということになり、CPU と呼ばれてきた。それを中心として、メモリ、入出力回路、タイマー回路、割込み制御回路など、必要な機能を組み込んでコンピュータシステムを構成する。

機能が分かれるのはウェハの設計が煩雑になるからだけではない。発熱の問題や不良の発生による歩留まりの問題から実用上の集積度には限界があった。膨大なセル部品で構成される LSI は、その中のたった 1 個の不良でチップ全体が不良品になってしまうため、製造レベルの問題として実用化が難しかったからである。

しかし、現在では LSI 技術の中でも、回路の低消費電力化の技術とともに、ウェハの中の不良部品を見分けて自ら修復させる技術が、高集積化の限界を突破する方向へ道を開いた。

他にも幾つかの要因はあるが、それらの技術が 1 個の半導体チップにコンピュータ システム全体を集積することを可能にした主因と言えるだろう。

現在では､単一のチップでコンピュータとしての完成した機能を有するものが続々と誕生している。ここではそのコンピュータシステムをマイクロコントローラーと呼ぶことにする。

また、フラッシュメモリの存在も忘れてはならない。フラッシュメモリは、データの消去・書き込みを自由に行うことができ、電源を切ってもデータが消失しない半導体メモリである。

もちろん、これにもエラー修復技術が用いられている。

当然のことながら、マイクロコントローラーにもフラッシュメモリが組み込まれ、プログラムやデータの格納に用いられる。

処理性能面では、CPU ブロックの能力が不足する場合は、ひとつのチップに複数の CPU コアを収容して並列処理によって性能を向上させる手段が使われる。今やパソコンでは当然のようになったマルチコアやクラスターコンピューティングの並列処理技術は、もはやマイクロコントローラーの単一チップ上で実現する段階に到達しつつある。

また、最近では、そうしたシングルチップ上ですべてのコンピュータ機能を構成するマイクロコントローラーに対して、さらにアナログ信号処理回路までを一体化する技術が開発され、すでに実用段階に入っている。

これまでであれば、アナログやデジタルなど、目的に応じたさまざまな半導体デバイスを選定し、それらをプリント基板上に並べて必要とする機能を実現してきた。言うまでもなく、それらのアナログ回路や周辺回路は、用途に応じた回路設計が必要であり、回路定数もその目的によって千差万別であるため、それができない限り実用にならない。

フィールドプログラマブルと呼ばれるマイクロコントローラーは、チップの入出力や ADC（アナログ／デジタル変換)、DAC（デジタル／アナログ変換）と言った用途別の端子を自由なピンに配置して利用できるのは以前から実用化されている。

しかし、今やオペアンプ回路、アナログフィルタなどと言ったリニア回路の設計までを単体の半導体チップ上で自由に設計、配置できるようになった。しかも、それはカスタム IC と呼ばれる専用デバイスではなく、あくまで汎用デバイスの話である。

要するにアナログ回路やデジタル周辺機能、そして回路定数などが通常の処理プログラムと同様の方法でソフトウェア プログラミングによって再配置できるというものである。

これは、今後の回路設計が、アナログやデジタルを問わず、プリント基板というハードウェアのパターンレベルで行う時代から、チップ上で、しかもソフトウェアによって行う時代へ移行したことを意味している。

8.3.2 信号サンプリングと観測時刻の同期

第 5 章でも触れたように、気象や水文観測では多地点で行われる観測データを収集、処理する上で時刻同期が非常に重要な要件となる。その時刻管理は通常、AWS データロガーで行われるが、その内容には異なる 2 種類の要素が存在していることに注意しなければならない。

その第一の要素は、センサー信号を標本化するタイミングに関するものである。アナログ信号をデジタル信号へと変換（量子化）する際に、どういう時間周期でサンプリングすれば元のセンサーの信号を忠実に再現できるかという問題がある。連続信号の標本化においては、原信号に含まれる最大の

周波数成分に対し、少なくともその 2 倍、また、パワースペクトル等の高度な周波数解析には、5～10 倍の周波数で標本化するとも云われいる。これの法則は、ナイキスト定理、ナイキスト・シャノンの定理、またはシャノン・染谷の標本化定理と呼ばれ、センサーによって捕捉された測定信号は、この定理に基づいてサンプリングする必要がある。
これは、言い換えれば観測信号をサンプリング定理に従って安定した周期を保持しながら量子化することを意味し、そのサンプリング周期の一定性を保証するためのクロック機構が重要ということになる。万一、その周期性が崩れると、標本化したデータの品質に直接的な劣化が現われることになる。そのため、AWS データロガーには安定したクロック源が必要である。

また、こうしたサンプリング クロックとは別に、第二の要素として多地点の観測ステーション間の時間同期に関する問題がある。気象観測は地域内、国家単位、あるいは全球で行われ、日々の解析に利用されるが、厳密に言えば、すべての気象観測は同一のサンプリングタイムで実施されるべきものと言える。
現実には異なる地点で標本化のタイミングまで一致させるのは容易ではないため、観測データの一次処理後の代表値を決めるタイムスタンプを揃えることになる。そのタイミングを観測時刻と呼んでいる。

通常、観測データのサンプリングは AWS データロガーの内蔵タイマーで制御され、収録の時刻管理が行われるが、ここで注目しなければならないことは、その内蔵時計に発生するドリフトやジッタの誤差をどうやって補正するかということになる。

AWS データロガーで高精度な原子時計などを使用できれば問題ないが、通常は安価な水晶発振子による時計が用いられる。その場合、時計の誤差としては 1 か月あたり±10 秒程度までであれば温度補償などによって比較的容易に実現できるが、それ以上の精度を求めようとすると困難な条件に直面し、コストも指数関数的に上昇する。月差±10 秒程度の性能であれば、年間では最大 2 分ほどの誤差となり、補正なしに通年観測に利用することができない。

そこで考えられるのが、外部の高精度な基準時刻によって内部時計のズレが生じないように補正する手段である。補正の方法には以下のように幾つかの方法がある。

① NTP サーバによる補正

AWS データロガーを使用する環境において、ネットワーク接続が可能であれば、インターネットまたはローカルネットワーク上のタイムサーバにアクセスして時刻の補正を定期的に自動実行するようにするのが最も容易である。ただし、当然のことながら、この場合、ネットワーク上にアクセス可能な NTP サーバが存在し、そのプロトコルを遅延なく通過させることができるという環境が必要になる。その条件が満たされるなら、毎時間とか、1 日に 1 回から数回とか、NTP サーバから定期的に正確な時刻情報を取得し、内蔵時計を自動修正する。
この NTP サーバによる時刻校正も、例えネット環境が整っていても、ネット管理者により、容易に利用できないケースも多々あり、十分時間管理されているパソコンの時刻で時刻校正を行うケースもある。さらに、屋外等で、NTP サーバへのリアルタイムアクセスが無理な場合は GPS 受信機、あるいは JJY 等の標準電波受信機を用いて標準時刻を取得し、内部時計を補正することになる。しかし、実際に採用するとなれば、AWS データロガーの設置環境やシステム管理上解決しなければならない幾多の課題に遭遇するため、技術的に可能であっても実現できないケース

も多々ある。

② GPS 衛星による補正

GPS 衛星の時刻情報を利用する場合は AWS データロガーに GPS 受信機を装備する。
GPS 衛星の情報は標準時と位置情報（緯度、経度、高度）である。この場合も 1 日に 1 回から 24 回（毎時）程度、GPS 受信機を都度起動して時刻情報を取得し、それに基づいて内部時計を修正する。通常、GPS 受信機はトラッキング等のために連続受信が必要な場合を除いて、情報受信後、その回路を切断するのが一般的である。それは AWS データロガーの消費電力を節約するためである。なお、GPS 時刻を利用する場合は、言う迄もなく GPS アンテナを設置する場所が GPS 衛星の電波を確実に捕捉できなければならない。
CWS によっては、GPS 受信機を内蔵（150WX シリーズの場合など）したものもあるが、既存のシステムでも GPS 受信器を装備したものは数は少ないものの、既に稼働している。

③ JJY 標準電波による補正

JJY 標準電波は、わが国の情報通信研究機構が発信している高精度な原子時計をベースとしたタイムコード電波で、それを受信することにより協定世界時（UTC）に基づく日本標準時（JST）の時刻情報と周波数の標準を取得できる。JJY の場合、40kHz（福島県）や 60kHz（佐賀県）という長波帯の電波が使われ、その東西 2 局で日本国内全域をカバーしている。その精度は国家標準に基づくものとされている。この場合も AWS データロガーの近傍で JJY 電波を受信できる環境が必須であるが、JJY の使用電波は長波帯のため、電気ノイズの影響を受けやすいという弱点があり、利用に当たっては注意が必要である。

以上のように、AWS データロガーの時刻合わせを実行する場合、前記のサンプリング周期に乱れが発生するようなことがあったり、あるいは処理時刻の“飛び”や、同一時刻の“重複”の出現による二次障害が発生することがないよう注意しなければならない。

また、サンプリングの要件とは異なるが、センサーの計測方式によって生じるデータ発生のタイムラグの違いの問題についても考慮しなければならない。例えば雨量観測の場合、転倒ます型雨量計では、‘ます’に貯留した雨量によって計測されるため、その貯留時間がタイムラグとなる。一方、第 4 章で紹介した V 社製の WXT-520 のようにピエゾ素子による雨滴の衝撃信号から降水量を換算するようなもの、あるいは L 社の WS-600 CWS のようにレーダーのドップラー エコーから降水量を捕捉するものは、雨滴の落下時点、あるいは地表に到達する前の空間を落下中の雨滴を捉えるものと比較すると、当然のことながら実際の観測結果としては、現象に対して大きな時間差が生じ、その差は降水量によっても変化する。

これらの問題については雨量以外の要素にも内在しており、データ処理において適切な考慮が不可避である。そのために、センサーからデータロガー、そしてその後の処理へと何らかのパラメータの引渡しが必要となろう。

8.3.3 データロガーの将来像

上記のような技術背景の中で、気象観測の中枢を担うデータロガーが、今後どのような影響を受け、形が形成されていくかを考えてみよう。

従来の気象観測システムにおけるセンサー、信号変換器、データロガー、ネットワーク機器というカテゴリー分けは、その出現や発展過程において、それなりの必然性が認められた。その基本的な機能的概念は現在でも変わらない。ただし、最近では、多くの場合、信号変換器はセンサー側、もしくはデータロガー内に一体化して組み込まれるようになり、装置としては姿を消しつつある。

そういう観点でデータロガーのあるべき方向を考えるとき、さらに幾つかの技術的課題が克服されれば、独立した機器として存在する理由が失われることに気づく。

そのことは、ネットワーク機器についても同じことが言える。データロガーの機能をセンサーやルータの中に組み込むことを否定する理由は見当たらない。

ルータでさえ、センサーの中に組み込んではいけないという理由は根拠を持ち得ないだろう。すなわち、将来の形態を想定するとき、データロガーやルータなどのネットワーク機器は姿を消し、すべてをセンサーの中に組み込んで一体化してしまうイメージが浮かび上がる。

その傾向の一端は、すでに発表されている一体型 CWS センサーの中に見出すことができる。このように、気象センサーとデータロガーとの間に存在する垣根は、今後ますます低くなり、最終的には解消されてしまうかもしれない。

組み込みの形態はともかく、第 4 章に紹介したような現在の CWS を想定した場合、それに対応するデータロガーの機能的な構成例を参考として図 8-1 に示す。こうした構成に対して GPS 受信機や JJY 標準電波受信機を付加したものがスタンドアロン型の AWS ロガーの原型となるだろう。

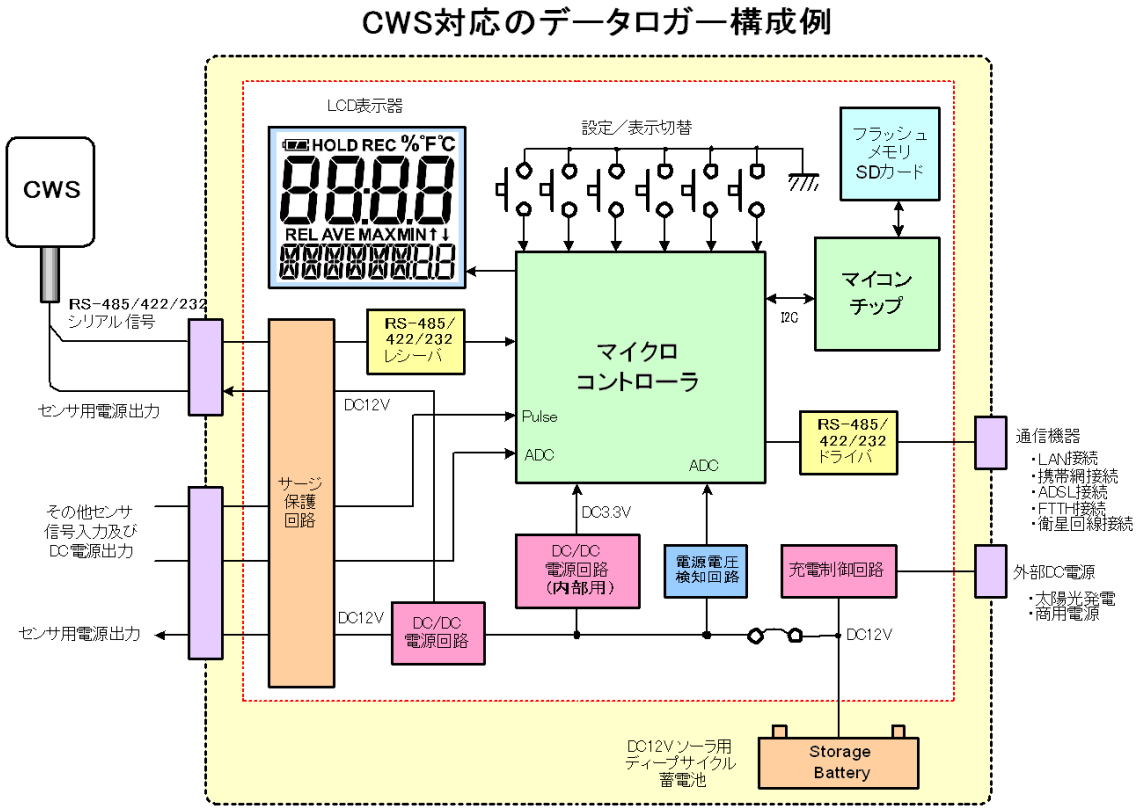


図 8-1 CWS 用のデータロガー機能構成図

8.4 データ伝送システム

CWSで観測された気象データは、データロガーに内蔵されたフラッシュメモリ（SDカード等）に記録する一方、IP ネットワークを通じて周期的あるいは、リアルタイムに伝送する形態が観測装置の基本形である。

近年の急速な ICT 技術の発展と共に、気象観測データの伝送手段として利用可能な通信媒体も非常に多岐に広がり、それぞれに実用性が高まっている。

たとえば ADSL（Asymmetric Digital Subscriber Line）や FTTH（Fiber To The Home）などの地上回線による IP 接続はもとより、GSM（Global System for Mobile Communications）/GPRS（General Packet Radio Service）、WCDMA （Wideband Code Division Multiple Access）、WIMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）などのパブリックな携帯通信網、数年後の実用化が期待される高速無線通信の LTE(Long Term Evolution)、そしてインマルサットやイリジウム、IP スターなどの衛星パケット通信などが一例である。

それらのメディア（媒体）を利用してマシン to マシン間（M2M）の通信リンクを確立し、国境すら意識しないような自由度の高い IP ベースの観測網が容易に構成できるようになった。
そのM2M通信とは、従来の携帯電話やスマートフォンなどのように、人間同士の通信を前提とした形態に対し、たとえば観測ステーションのデータロガーとデータ収集用パソコンとの間というように、マシン～マシン間のデータ通信を前提として利用する専用のネットワーク技術という意味で名づけられた。

気象観測システムにおいては、広域なネットワーク構成が不可欠である。用途に応じて地域や府県、国家、ひいては全球を網羅する必要があるというのは以前から変わるものではない。

8.4.1 IP 網の利用と伝送の形態

今日の観測ネットワークでは、可搬性や互換性、柔軟性という面で、基本的に IP （インターネットプロトコル）がベースとなる。そのため、安価な市販機器を利用して、効率よく、可搬性の高いグローバルなデータ収集網を構築できるほか、その双方向性を利用してデータ収集ホストから各地の観測サイトに対するリモート管理や保守機能も容易に実現することができる。もちろんネットワークの選択は択一ではなく、適材適所の組み合わせが妥当であり、同一のプロトコルによる相互乗り入れが可能である。

観測データの収集方法は、回線やシステム設計上の重要なポイントであるが、オンサイトのデータロガーから主体的にデータを収集ホストに対して PUSH する方式で発信するタイプと、収集ホストから観測サイトのデータロガーにリクエストを発呼して必要なデータを GET するタイプに大別される。それぞれの方式に一長一短があり、適宜使い分けや混合した利用方法が使われる。使用する伝送プロトコルとしては、基本的にはネットワーク上で発生するエラーのリカバリが自動的に行われる TCP（Transmission Control Protocol）をベースとした各種のアプリケーション層が利用されることが多い。

観測サイトからのデータ回収の頻度としては、データの必要性および通信コストのバランスを考慮して適宜選択することになる。最近ではセッションの常時接続が負担なく実現できるようになったことや、都度接続を行う方式の場合でも非常に短時間にリンクの確立が可能になり、一般的には 10 分毎、5 分毎、または 1 分毎でデータ収集されるケースが多い。

場合によっては必要なときのみ高頻度にデータ回収を実行し、卓越したデータの変化がないときは伝送頻度を減らして平均的、総量的な通信パケット量を抑制するような技法も用いられることがある。

こうしたデータ回収にともなって、観測サイトと収集ホスト側では各種機材の稼動状態を示す情報が常に交換され、システムの健康状態またはデータの状態を常に監視し、情報の品質管理、または保守管理に用いる。また、ネットワークのシームレス化と利用可能なバンド幅の広帯域化によって、使用機材に対する高度なリモート診断機能の組み込みも可能になり、通常の保守対応の負担軽減や、障害発生時の対応の迅速化に対して威力を発揮している。

さらに観測ステーションにおけるセンサーの較正機能や演算パラメータの変更、あるいはファームウェアや処理プログラムの更新などのリモートコントロール機能が充実し、保守対応の迅速化や保守コストの削減に大きな効果をもたらすようになった。さらに最近では観測サイトに Webカメラを設置し、動画やスチル画像という可視化情報によって現地状況をリモート監視することさえ可能になった。もちろん、それらの情報は同一のネットワーク上で観測結果とともに一元的に伝送され、管理される。

一方、IPネットワークを利用するに当たっては、ネットワークのセキュリティについての十分な考慮と注意が重要である。考慮すべきセキュリティの要件としては、① 情報の秘匿性の保持、② ハッキングや改ざん等の防止、③ 帯域占有による通信障害の回避、④ ウィルスやスパムによる動作障害の回避などへの対策が不可欠となる。これらの詳細については別稿に譲る。

8.4.2 ネットワークの分類と特徴

観測サイト内、あるいは局レベルで利用するローカル通信技術については、すでに見てきた。ここでは、主に観測ステーションと広域データを収集するセンター局との間で利用する通信技術の現状や動向について触れる。

広域な通信ネットワークとしては、有線系システムとして、ADSL などのメタルワイヤ系や FTTH などの光ファイバー系、そして、無線系システムとして、特定専用波によるリンク、モバイル通信系、無線 LAN 系、そして衛星通信系のリンクが考えられる。下記にそれぞれのシステムについて順次触れる。

また、有線系や無線系にかかわらず、インターネット網としては、汎用的なオープンインターネット接続と MPLS（Multi-Protocol Label Switching）と呼ばれる閉域網のサービスなどがある。MPLSはフレームやパケットの前にラベルと呼ばれる識別子を付加して転送を行うもので、通信の経路決定のオーバヘッドを減らし、高速化をはかったものである。
すなわち、本来は IPパケットを転送する際には、伝送経路を決定するルーティング情報としてIPヘッダを利用するが、MPLS ではその代わりに「ラベル」と呼ばれる短い固定長の識別符号を利用する。それによってパケットのルーティング処理の効率が改善され、高速化が実現した。

現在のインターネットでは MPLS が主流の技術となっている。

また、MPLS と伝送上の暗号化技術を利用して実現されたものに、VPN（Virtual Private Network）や QoS（Quality of Service）があり、擬似的な専用接続モードとして、信頼性が求められるネットワークに適することから、気象観測網でも普及が進んでいる。

図8-2に気象観測網において利用可能な各種データ伝送手段と経路の模式図を示す。

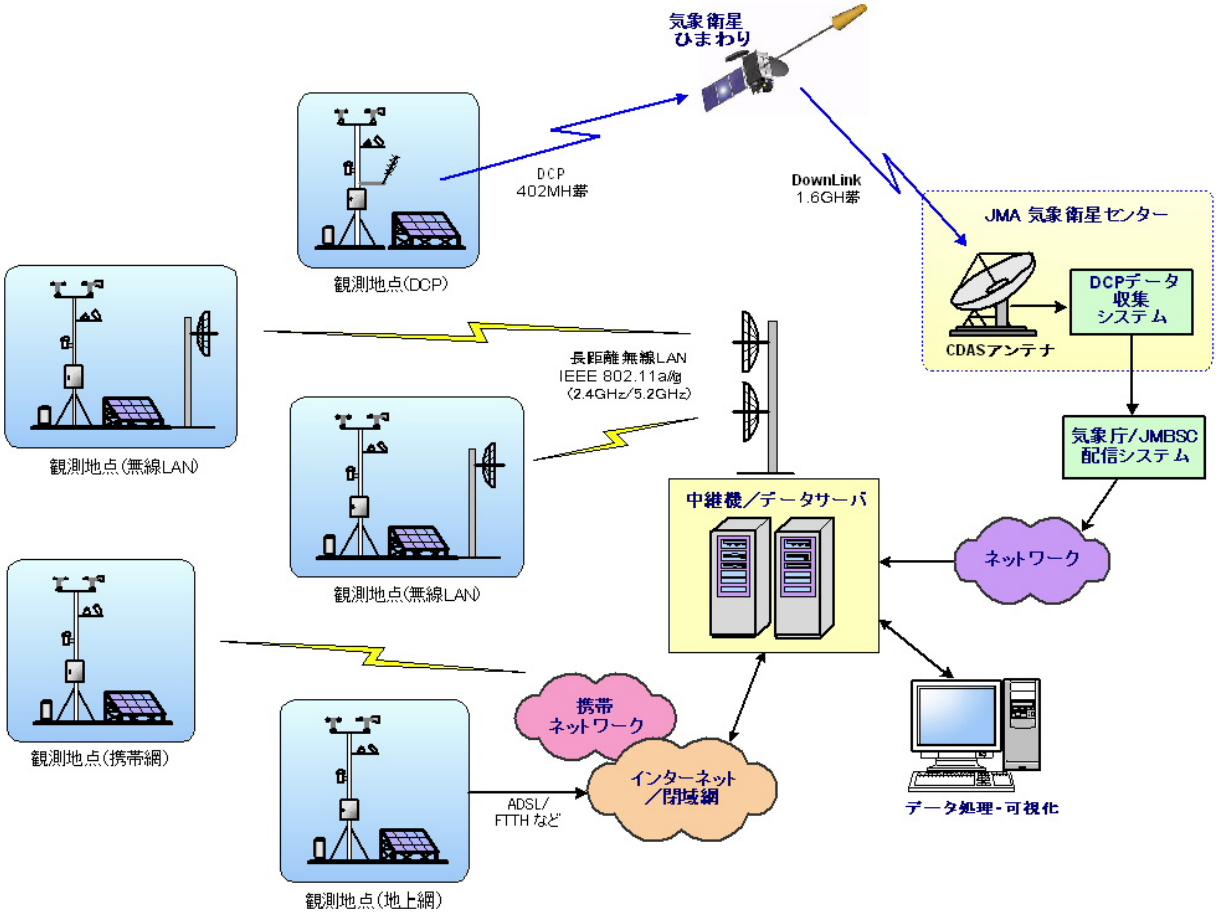


図 8-2 気象観測データの収集に利用される各種のネットワークと経路

● 有線系通信システム

地上通信回線網としては、メタルワイヤ網の専用線や交換回線で利用されたアナログモデムを利用した低速通信があったが、帯域の利用効率の悪さから、今日ではほとんど利用されることはなくなった。

今日、かろうじて残っているものとしてデジタル専用線やフレームリレー回線、ISDN 交換回線などがあるが、それらも急速に姿を消しつつある。

有線網としては、ADSL 等のメタル系または FTTH 等の光系のインターネット回線が昨今の主流となっている。中でも光通信回線の普及は世界的に凄まじい。

● 携帯系ネットワーク

携帯網は、無線通信による移動可能な通話用の電話機からスタートした。有線ネットワークとの中継点となる基地局から端末までが 800 MHz から 2 GHz 帯の無線通信で接続され、さまざまな通信サービスが受けられる。代表的なサービスとして、GSM / GPRS / WCDMA / LTE などの汎用携帯通信サービスがあり、次世代高速携帯通信網の出現もめざましい。

基地局とのその電波による通信方式によって世代が分類されており、世界に普及する携帯網サービスは大きく 4 つの世代に分類することができる。それでは代表的なサービスについて、それぞれの内

容を少し詳しくみてみよう。

① 第 1 世代（1G）

1G の携帯電話は、アナログ携帯電話と呼ばれた FDMA（Frequency Division Multiple Access）方式によるもので、自動車電話用として出てきた。このサービスはわが国にはもうなくなったが、海外ではまだ利用されているところもある。

② 第 2 世代（2G）

2G の携帯電話では通信のデジタル化が行われ、電波の利用効率が改善された。
わが国では、TDMA（Time Division Multiple Access）方式による PDC（Personal Digital Cellular）と呼ばれるサービスが主流で、ヨーロッパや日本以外のアジア各国で広く採用された GSM のサービスがこの世代にあたり、世界中に爆発的な普及をもたらした。
PHS（Personal Handy-phone System）と呼ばれるサービスもこの分類に入る。

その後、KDDI が少し遅れて第 2 世代の弱点を改良し、CDMA 方式を採り入れたサービスを開始した。それは第 3 世代との中間という意味で第 2.5 世代（2.5G）と呼ばれることもある。

そして、GSM 方式を採用していた多くの国では、その後、通信速度を改善した GPRS のサービスへと移行した。それは、それまでの音声通話が中心であったサービスに対し、データ通信を重視し高速化と効率化をはかったものである。

GPRS は、既述の通り General Packet Radio Service の頭文字から取られた名称で、基本的な通信方式は GSM を使う。GSM の最大通信速度は 9.6kbps とされたが、GPRS ではパケットによるデータ送受信が可能になり、通信速度は最大 115kbps まで高速化された。
携帯機器からのインターネット・アクセスは GPRS によって実用化されたと言いうこともできる。この方式は KDDI の CDMA 方式と同様に GSM の第 2 世代に対して第 2.5 世代（2.5G）と呼ばれることもある。ヨーロッパ、日本を除くアジア各国、アフリカ、大洋州で普及している。

現在、世界の趨勢としては、GPRS のサービスがもっとも多数派となっている。

また、GSM や GPRS サービスの上で、文字通り短い文字メッセージを携帯電話のダイヤル指定で直接送受信できる SMS サービス（Short Message Service）がある。

通常、SMS は、一通の伝送で 140 バイトくらいの通信が可能なため、簡単な気象観測データであれば、それで伝送可能であり、それを実際の観測網で実用化している国もある。
SMS のプロトコルは GSM 規格として制定され、広範な国で互換性のある通信が可能なのが特長である。

③ 第 3 世代（3G）

2000 年代になると、さらなる高速化と高品質を実現した携帯無線通信として 3G が始まった。
3G では、CDMA や W-CDMA という方式が用いられる。
その高速データ通信機能は携帯網からインターネット アクセスする場合に威力を発揮する。ただし、3G サービスは世界的には殆ど普及しておらず、2012 年現在、利用出来るのは、まだ日本と韓国くらいに限られるという。

④第 4 世代（4G）

最近では、2012 年 2 月に ITU-R（国際電気通信連合）が、第 4 世代（4G）の無線移動体通信方式として次世代の国際標準を勧告した。4G は、「LTE-Advanced」および「WiMAX 2」と呼ばれる方式であり、最終的には光ファイバーに匹敵する数百 Mbps から 1 Gbps という通信速度を携帯網で実現するという。ちなみに、LTE とは、Long Term Evolution の頭文字である。2012 年 9 月現在、日本国内では各携帯電話会社が LTE サービスを提供し普及しつつあるが、この LTE は、第 3 世代携帯電話（3 G）と将来登場する第 4 世代携帯電話（4 G）との間の技術であるため、第 3.9 世代携帯電話（3.9 G）とも呼ばれている。4G サービスが具体的に出現するのはもう少し先の話になる。

● 無線 LAN 系通信システム

無線 LAN は、もともと構内通信網（LAN）を無線化したもので、2.4 GHz または 5 GHz の帯域で IEEE 802.11 と呼ばれる規格に基づく伝送を行うものである。無線 LAN は、アクセスポイントと呼ばれる中継器（無線 LAN ルータと呼ばれることもある）を経由して無線機能を持ったパソコンなどが接続され、ローカルネットワークのリンクを形成するものである。

しかし、中継器を介さずに直接対向に接続して通信を行うものもある。それは長距離無線 LAN と呼ばれる無線伝送リンクで使われる。長距離無線 LAN は免許不要で自由に利用できる電波を使いながら、アンテナのビーム制御と効率化技術により、50 km～70 km という伝送距離を実現したものまである。安価に長距離の高速通信リンクを実現できることから、以前のマイクロ波通信に代わる通信手段として、各種の観測システムや SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）テレメータでの利用が期待されている。

● 自営無線系通信システム

パブリックオープンでない自営の無線通信網としては、VHF やUHF などの専用波による古典的な無線通信の方式や、長距離無線LANのように免許不要な小電力データ通信がある。

専用波による通信は、独占的な電波による長距離でかつ独占可能な通信網を構成できるという特長の反面、基本的に国家の無線免許を取得する必要があり、警察や消防、防災用などという公共性の高い特別な用途以外では、免許取得などの手続きが難しく実用性が乏しい。

長距離無線LANでは、2.4 GHz 帯域（IEEE 802.11b：13ch）や5 GHz 帯域（IEEE 802.11a/n/h：9～19 ch）の電波が利用され、指向性が鋭く、効率のよいアンテナにより、数 km～数十 km の到達距離が達成されている。この電波の場合、免許の取得を必要とせず、安価に専用リンクを構成できることから、従来のマイクロ波による通信網に代わるものとして期待されている。免許を取得して専用波を利用するものもある。

この他、前の8.2 節でも紹介したが、自由度の高い近距離用のローカルワイヤレスリンクとして、ZigBee、Bluetooth、WiMax など、IEEE802 系の無線ネットワーク技術がある。それらはセンサーとデータロガーの間、あるいは、データロガーと処理端末の間などの無線化への利用として期待できる。

● 衛星通信系ネットワーク

衛星通信回線としては、商用通信衛星を利用するものと、気象衛星による DCS（Data Collection System）を利用するケースがある。衛星のトランスポンダ構成を指して DCP（Data Collection Platform）とも呼ばれる。

衛星通信の場合、上空がオープンの場所であれば、地域を選ばず信頼性の高い通信リンクを確立できるという特長がある。商用通信衛星を利用する場合、導入が容易で自由度が高い反面、通信コストが発生する。最近では、パケット通信のサービスが増え、気象や水文観測のようなデータ量の少ない用途では地上回線や携帯網サービスに引けをとらないコストで利用できるサービスも出てきた。衛星のトランスポンダの一部を借り、パケットサービスとして再販する二次的なプロバイダがそうしたサービスを提供している。観測局からのアップリンクだけ衛星を利用し、インターネット経由でそのデータを回収するサービスもあり、逆のケースもある。

もちろん、衛星プロバイダと直接契約して衛星のトランスポンダの特定帯域を占有する契約も可能であるが、一般的に非常に高額な利用料金が必要なため、大規模な利用の場合でなければ実用性が乏しいと云えるかもしれない。

気象衛星による DCP は、WMO の勧告に基づいて衛星保有国が運用するものであり、原則的に通信費は無料である。日本の場合は、気象庁長官が利用の裁量権を有している。

DCP は観測局からのアップリンク専用とも言え、そのアップリンクには 400 MHz 帯の UHF 波が使われる。また DCP の伝送速度は、通常100 bps または 300 bps である。
そのため送信設備の設置も比較的容易で、機材も安価である。

一方、多地点の観測点から気象衛星の DCP に対して送信されたデータは、Lバンドのパラボラアンテナを利用して気象衛星からのダウンリンクを直接受信して回収することも可能ではあるが、通常は、GTS 回線または、インターネット経由でデータ回収を行うことになる。

DCP の仕様は世界各国の気象衛星で統一されており、1つの気象衛星に対してそれぞれ100チャネルと航空機や船舶など全球をまたいで航行する移動体地点からの利用を想定した国際共通チャネルが 33 個あり、合計133 チャネルで構成されている。それぞれのチャネルでは、複数の観測ステーションが電波送出の時間を割り振りして制御し、時分割で利用する。

8.5 観測場所における課題

8.5.1　電源の問題

気象観測を行う場所の選定は、本来であれば電源供給や通信サービスというインフラの整備範囲という枠内に制限すべきではないのは言う迄もない。しかしながら、実際にはそうした制約を受けざるを得ない。

但し、通信インフラに関しては、最近では携帯通信網のような無線通信や衛星パケットサービスなどの実用化が進んだため、通信に関するそうした制約はほとんど解消したと言えるようになった。

電源については、観測装置の低消費電力化と充電バッテリの高性能化が相まって、太陽光や風力発電という商用電源に替わる手頃な代替電源によって、利用可能な地域の制約が緩和されつつある。問題は、寒冷地など、センサーの凍結対策としてヒータの使用が必要なケースや自然エネルギーによる発電が困難な地域、そして季節的条件である。また雲量測定など、人間の視覚による観測が必要な場合なども、観測項目として制約を受けざるを得ない。

観測システムに対する供給電源としては、以下のような要素を考慮しなければならない。

① 強制通風筒などを含むセンサー用電源
② 信号変換など処理装置用電源
③ データロガー（上記の ② を含む場合が多い）
④ 通信機器（ルータやモデム、無線機器など）
⑤ 補助装置（たとえば環境観測の場合の洗浄や較正のための電源）または全般的ロス
⑥ センサーの凍結防止用加熱ヒータの電源

観測ステーションにおける電源容量の設計においては、上記のような観測場所全体で必要とされる合計消費電力と、他方、供給可能な電力（発電量）との関係において、正しくバランスされたものでなければならないことは論ずるまでもない。

とりわけ太陽光発電や風力発電を用いる場合には、無日照や無風により発電が途切れる場合の供給電力が重要な問題となる。通常、それらの電源には充電式バッテリを用いて連続給電を行うが、その放電エネルギーが、想定される最長期間にわたって無充電で供給し続けられる電力容量の確保を保証する必要がある。その場合、放電後に再びバッテリをフル充電の状態へ復帰させておく必要があるが、その場合には観測ステーションへの電力供給に加え、充電のための電力の合計量を確保しなければならないことは論ずるまでもない。

また、充電電池を用いる場合は、過充電、過放電を防止する充放電制御が極めて重要である。バッテリの過充電、過放電は一度でも発生させると電池寿命は著しく棄損し、それ以降の安定利用が不可能になるため、適切な制御が不可欠である。したがって、自然エネルギーを用いる場合は、いずれにしても安定供給の点で問題を抱えることになるので、商用電源の利用が無理な場合は、万一の場合を想定して小型発電機や燃料電池などを用いて非常時にバックアップや充電を行なったり、さらなる二次電源によるバックアップを考慮する必要があるだろう。

なお、バッテリ電源の残量が所定のレベルを下回った場合には、観測や通信機能を縮退させるなどして、消費電力を必要最小限まで減らすようにするようなメカニズムなども効果があるかもしれない。

8.5.2　その他の問題と今後の課題

通年で安定した気象観測を実現するには、特に観測サイトを重点とした雷被害の対策を忘れてはならない。落雷や誘導雷、空電によるインパルスサージは、電子部品に致命的なダメージを与え、気象観測機器や通信機器を故障に至らしめる。

そのため、雷や空電のインパルスサージが侵入しにくいようなセンサーや機材の設置条件を工夫するのはもちろん、電子機器に対しては、SPD（Surge Protection Device）と呼ばれるサージ防護デバイスを適宜信号線や電源線に挿入して侵入してきた雷サージを大地に放電させ、電子機器の破壊を防止するようにしなければならない。

SPD は保安器、避雷器、あるいはサージプロテクタなどと呼ばれ、不活性ガス入りの放電管の中にマイクロギャップを構成してアーク放電により高電圧を短絡させるものと、ツェナーダイオード（アバランシェ・ダイオード）やバリスタのように半導体の非直線性を利用して一定以上の電圧をクランプするタイプの 2 種類に分類される。それぞれに特徴があり、回路の条件に応じて適宜使い分けたり組み合わせたりして用いる。

いずれにしても、信号線や電源線に侵入する電圧が所定のレベルを超えると侵入した高電圧を、サージアブソーバを通じて大地に逃がして放電させ、機器に直接そのサージが侵入するのを防止するものである。

ここで注意すべきことは、避雷対策には、人体への感電を防止することを主目的とする場合と、機器の故障防止を優先する場合とでは、SPD の使い方や接地線の接続方法などに多少の違いが出てくることに留意しておかねばならない。

8.6 予測シミュレーション

8.6.1　予測シミュレーションとは

予測シミュレーションとは、過去や現在における事象から未来に起こるであろう事象を予測するものであり、気象分野では他分野よりも先駆けて予測シミュレーションが行われてきた。
古くは 1922 年のイギリスで、リチャードソンが天気予報のシミュレーションを試みたが、6 時間後の気圧差が 144 mb（hPa）という現実離れの計算結果になってしまい、残念ながら失敗に終わってしまった。

その後、計算機や気象学の発展などにより予測シミュレーションは格段に向上してきた。
現在では短期予報のみならず中長期予報の精度も良くなっている。図 8-3 は気象庁全球モデルの 500 hPa における気圧差の予報誤差を表したものである。 2010 年の 72 時間先の予報誤差は、1985 年の 24 時間先の予報誤差と同程度まで向上していることが見てとれる。

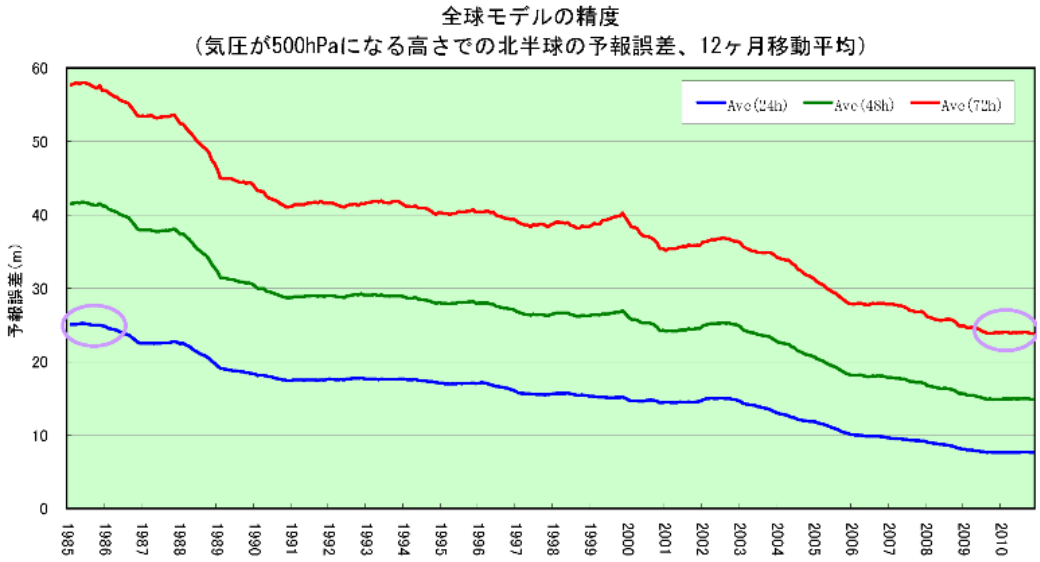


図 8-3 全球モデルの予測精度（気象庁 web ページより）

8.6.2 予測シミュレーションとデータ同化について

まず全球で観測されたさまざまなデータを収集し品質管理をおこない、不均等な観測地点のデータを格子点上に展開する。次に展開された初期値をもとに時間積分を行うのが予測シミュレーションであり、第一推定値において観測データの値を反映させることをデータ同化と呼ぶ。

また、第一推定値を観測データで同化して初期値を作り、その予報を次の第一推定値とすること解析予報サイクルと呼ぶ。

データ同化手法の種類は最適内挿法や変分法、アンサンブルカルマンフィルタなどがある。より詳しいデータ同化手法については三好・本田(2007) [1)]を参照されるとよい。

8.6.3 数値モデルWRFにおけるデータ同化

ここでは数値モデル WRF における処理について述べる。

図 8-4 は、WRF における処理フローを示している。

図中の「WPS」は土地情報や気象データから計算領域を切り出す処理、「REAL」は「WPS」で作成されたデータから初期値・境界値を計算する処理。「WRFDA」はデータ同化を行う処理である。そして、「ARW MODEL」は積分計算し、実際に予測シミュレーションをする項目である。

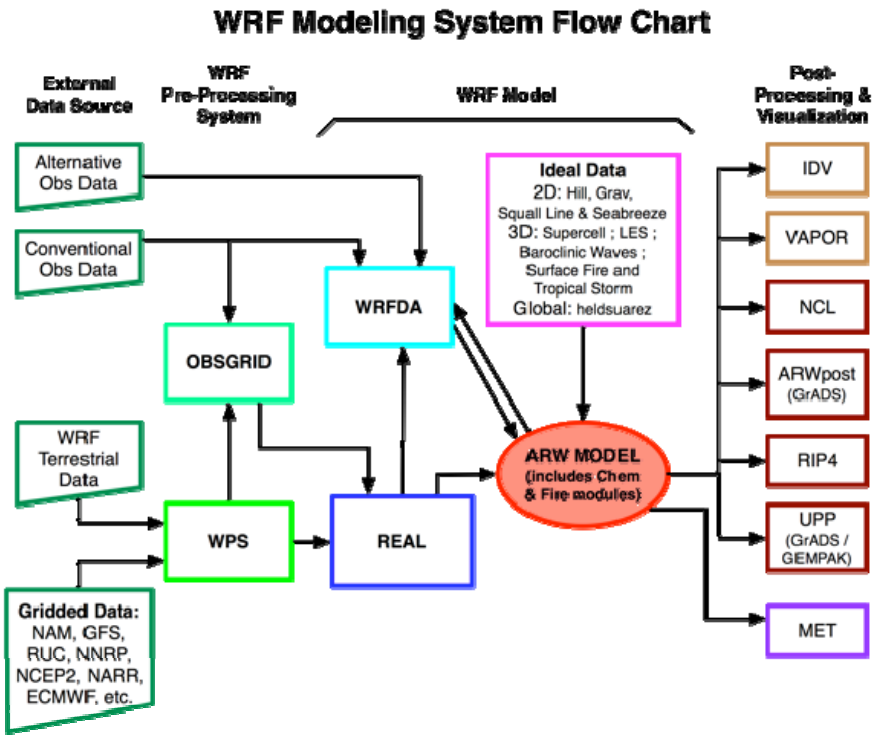


図 8-4 WRF の処理フロー（WRF web ページより）

8.6.4　今後の課題

より良い予測シミュレーションを行うためには、品質の高い観測データを増やすことが非常に重要となる。観測データが増えれば、数値モデルの精度を向上させることができる。

また、観測データは、広範囲かつデータが不足しているところに重点的に展開されることが望ましい。

そういう意味においても、設置や保守が容易な CWS が、今後広く普及することで気象予測の精度向上に大きく貢献するものと期待される。

また、数値モデルでは、数多くのスキームからシミュレーションの目的に沿ったものを選択することも重要であるが、選択するには一定の知識と経験を積んだ技術者が必要となる。

WRFに限らず領域モデルでは計算領域の取り方によって結果が大きく変わってしまうので、注意が必要である。今後も、予測シミュレーションは、計算機の性能向上と共にますます発展すると思われ大いに期待できる分野であるが、そのモデルを扱う技術者の養成も合わせて行わなければならない。

参考文献

1）三好建正・本田有機：2007: 気象学におけるデータ同化. 天気

9.まとめ

今回の「一体型地上観測機器 CWS の性能評価　報告書」は、2011 年 4 月から 9 月にかけて実験した結果を 2012 年 4 月から 10 月にかけてまとめたものであり、本報告書は 3 部構成となっている。

第 I 部では実験結果の整理を進め基準器との比較を、第Ⅱ部では各 CWS の特徴や性能を整理した。そして第Ⅲ部では、気象測器のこれまでの発展の歴史、国内外の事情、そして今後の CWS の将来像について議論の結果を記載した。

CWS を用いた実験は、3 回の風洞実験と 2 カ月間の野外観測を実施することができ、これだけの CWS を一堂に集めて評価した例は、現在のところ、国内外でも例のないものと思われる。

一連の評価観測を実施するにあたり、個々の CWS を比較し優劣をつけることを目的とするのではなく、CWS の利用者の立場で、それぞれの CWS の性能を確認することに主眼を置いた。そこで、現在および将来、CWS は一般地上気象観測に用いることが多いと判断し、現在、国内で一般地上気象観測に使用されているプロペラ型風向風速計、強制通風式温湿度計、転倒ます型雨量計を基準器として、其々の CWS の観測結果とで評価することにした。

第 I 部の風洞実験は、京都大学防災研究所ゲッチンゲン型小型風洞で実施し、風洞の風速を変化させての風速特性の計測に加え、CWS の構造に起因する思われる風向特性についても CWS を回転させながら性能を確認した。また、自然風速場を想定し、吹き上げ、吹き降ろしの風に対する影響についても確認した。

風速特性および風向特性については、各 CWS とも仕様性能を裏付ける結果が得られた。
ただ、5 器種のうち 1 器種はリリース前の試作品であったこともあり仕様を若干超える結果となったが、製品版では機器仕様の範囲に収まっているのではないかと予想できる結果を得ることができた。

また、吹き上げ、吹き降ろしの風に対する特性については、CWS の構造によって、特性に影響がみられる現象は確認できたが、風洞使用時間の制約もあり、詳細な解明には至らなかったことは心残りである。風洞実験での結果を見る限り、各 CWS とも機器仕様の範囲内で動作することが確認でき、その後の野外観測に弾みをつける大きな一歩であったと言えよう。

野外での評価観測は、風洞実験と違い乱流場であり、CWS の設置場所の違いなどが問題にならないよう、基準器ならびに CWS もほぼ同一の観測環境が得られるプラットホームで、且つ、評価観測が可能な場所として潮岬風力実験所の施設を使用した。評価観測期間は、2011 年 7 月末から 9 月末という残暑厳しい期間に、基準器と 5 器種の CWS ともプラットホームに設置し、基準器および CWS に装備されているすべての観測要素を AWS データロガーに収録するともに、観測値をメール形式に変換してプロジェクトメンバに伝送することも試みた。

風向風速については、実験開始前は、自然風速場で強風域の観測が期待出来るのか心配であったが、評価観測期間中に台風第 12 号、台風第 15 号が日本付近に襲来し、潮岬で強風が吹いた。2011 年 9 月 2 日 19 時 22 分に、W855-Z1 が最大瞬間風速 28.9 m/s を観測し、風速 30 m/s 近くまで評価を行うことができた。

気圧については、期間中、960 hPa から 1015 hPa（基準器：気象庁特別地域気象観測所潮岬のデータ）の範囲で気圧が変化し、比較的広範囲での評価を行うことができた。

気温については、期間中、基準器 KET-2 が、最低気温 16.2 ℃から最高気温 31.7 ℃ の範囲で変化し、約 15 ℃のスパンで評価観測が行われた。本来であれば、冬期を含めた通年観測で、より広範囲な温度での評価が望ましいところであるが、メーカで確認されていると判断し、今回は除外した。

湿度については、期間中、基準器 HMP155 が 35 %から 95 %の範囲で観測し、実用的範囲での評価を行うことができた。

雨量については、測定原理の相違から、瞬間値の比較は原理的に無理があると考え、積算雨量での評価観測を行なった。期間中 10 分雨量値で、最大 19 mm という激しい雨を観測することができたが、2 カ月間という期間では大きな降水の事例は限られ、性能の定量的な評価には事例数が少ないため、十分な評価までには至らなかった。

以上ように、気温の 16 ℃以下低温域は評価観測が夏季で評価が不能であったこと、積算雨量値の事例数が不足であることを除けば、2 カ月間という短い実験期間ではあったが、当初、想定した以上の成果を得ることが出来た。

また、評価結果についても、概ね各 CWS とも機器仕様を満たしていることが確認できたことは大きな収穫であった。

この結果から言えることは、今後、利用者が CWS 導入を検討する場合は、それぞれのカタログスペックで示された計測範囲や精度を確認し、適正な CWS を選択することで目的に合った観測が行えるものと期待できよう。

複数の気象センサーを一体化した CWS は、従来の気象測器に比べて小型軽量であり、設置や保守が容易で、しかも、安価に入手できるという点では、利用者にとってメリットは大きく、魅力的な測器の一つとなっている。これに加えて、今回の実験から、その性能の確かさについても、評価観測の成果は得られたと判断出来よう。

第Ⅱ部では、代理店および開発メーカの協力ものと、各 CWS の情報を可能な限りとりまとめた。各気象要素測定の原理やセンサー構造、観測後のデータ処理方法について可能な範囲で調査を行なったが、ブラックボックスのままで、データ処理方法については各メーカ独自のノウハウがあり、残念ながら今回は十分な情報を得ることはできなかった。しかし、各 CWS の概要、測定原理と特徴、使用方法と保守については、情報の得られた範囲でまとめることができたので、今後、CWS の利用を検討されている方は、参考にしていただきたい。

第Ⅲ部では、気象測器のこれまでの歴史から国内外の現況、そして今後の CWS を用いた気象観測の将来像についてまとめた。これまでの国内向け気象測器の特徴は、堅牢で精度は高いが、複数要素の観測では、それぞれの観測要素ごとにセンサーを購入する必要があり、導入コストも高額で設置場所もそれに応じた広さのスペースが必要であった。一方、CWS では、導入コストも前者より格段にリーズナブルであり、複数の気象要素の観測を 1 台で行うことができる。また、電子化が進んでいるため、今後も ICT 技術を取り込みながら、さらなる性能向上が進む可能性を秘めている。

したがって、CWS において精度や耐久性がある程度保障されていれば、従来の気象測器に十分対抗できる製品であると認識しなくてはならないであろう。

しかし、周辺技術の進歩をそのまま気象観測システムに採用するには、技術的問題だけでなく、得られたデータの継承性や、気象観測システムの更新時の様々な課題を解決する必要もあるが、最も重要なのは、日本の気象測器は測器検定基準を前提とした製品およびシステムが多数を占め、気象業務以外の気象観測では、殆ど観測者自身が観測方法や観測機材の調達を行っており、時には、市販の国内外の気象センサーを用いて、独自の観測システムを構築しているケースも多々ある。

これらは気象業務とは別の流れで、外国の CWS のような小型で安価な観測機器が現れると、気象業務で想定しているような観測形態とはかけ離れた観測システムが構築される。このような観測システムを否定することは不可能であり、観測結果の信頼性、精度等を確保するためにも何らかの方策を検討すべきではないだろうか。

また、日本の気象測器業界は、気象観測は気象業務だけではなく、ニーズに応じた観測システムを構築するためには、ニーズに即した気象センサーが要望されている事実を再認識する必要があろう。特に、世界の中で我が国の気象センサー技術の位置づけを明確にするには、従来の意識を改革する必要があると考える。

今回の評価観測で、唯一残念であったのは、2012 年 12 月時点では、国産の CWS が存在しないことである。現在の日本の気象測器製造技術をもってすれば、今回評価した CWS と同等あるいはそれ以上の CWS に類似する気象センサーの開発能力を保有している事実を誰しも否定しないであろう。

近い将来、日本の気象測器メーカ製の CWS が発売されることがあれば、ぜひ、同様の評価を行ってみたいと切に願うものである。

編集後記

プロジェクトチーム‘気象測器研究会’は、気象測器に関しての雑談の中で、「CWS の性能は大丈夫か？」というこれまで漠然と感じていた疑問に端を発し、「それなら風洞で性能を確認しようか。」また「折角の機会だから、自然風場でも観測してみよう。」という話で盛り上がり、当初は数名で始まった試みであったが、検討を重ねる過程で趣旨に賛同するメンバも増え、最終的には十数名のメンバで活動するに至った。

当初、実験結果はプロジェクトチームの内部資料という位置づけであったが、折角観測した貴重なデータと、その評価結果を公開し、今後 CWS を利用する方の参考になればという強い思いが本報告書を執筆した次第である。また、このプロジェクトチーム メンバは、通常業務の合間で行なったボランティア活動であり、学術的な興味の成果として本報告書に繋がっている。

今回の「一体型地上観測機器 CWS の性能評価 報告書」は、2011 年 4 月から 9 月にかけて実験した内容をプロジェクトチームでまとめたものであるが、性能評価実験は、評価手法そのものが手探りの部分もあり、事前に関係者で議論を重ねることから始まった。

最初に行なった風洞実験では、風速特性の計測の他、風向特性や傾斜特性の調査を行なった。これらの実験を重ねる中で、精密微差圧計からの出力電圧を、CWS の出力信号と共に AWS データロガーに取り込み自動化を行なったり、また、回転台を用意して実験効率を改善したことなどは、参加メンバで創意工夫を進め貴重な経験となった。また、第 2 回の実験は 7 月上旬という季節であり、参加者が汗だくになりながらも時間を忘れて実験に集中したことも思い出深い。

次に、野外での評価観測では、先ず、大変であったのは、事前準備であった。特に、5 台の CWS と一般気象観測測器 1 式（風向風速、温度、湿度、雨量）と超音波風速計 1 台の観測データを、同時に効率的に取り込む必要があり、プロジェクトチームで検討を重ねた。5 台の CWS は、それぞれの測器の出力部の接続形態や出力形式が異なるため、すべての測器を同時にデータ収録し、且つ、リアルタイムに配信することは容易ではなかった。

しかし、今回使用した AWS データロガーの一部改修と基本機能を最大限の活用することで、2 台の AWS データロガーで、すべての測器のデータを同時に収録し、リアルタイムに配信できたことは画期的であった。

また、観測期間中、台風第 12 号の影響で通信回線に深刻なダメージを受け 10 日間に渡りリアルタイム伝送が停止し、関係者の間で不安が広がった。潮岬風力実験所の技術職員の方にご協力いただき現地の状況を確認したところ、通信回線の障害であることが分かり、AWS データロガーは正常に動作しデータも収録していることがわかり、関係者全員で胸をなで下ろしたことを覚えている。
10 日後には通信回線は復旧し、通信回線が停止していた期間のデータは、オンラインで入手できた。実際にデータが欠測したのは、台風第 12 号の影響で停電が発生した約 4 分間のみであり、大きなトラブルなく観測が行えたことは思い出深い出来事になった。

2012 年 4 月に本報告書をまとめるにあたって、報告書作成のための第 1 回会合を開催し、プロジ

ェクトリーダ 林 泰一 准教授のもと、プロジェクトチームで報告書の内容検討および執筆作業の分担を行なった。その後、4 回の会合を重ね、同 11 月末に完成を迎えることができた。原稿執筆の際には、プロジェクトチーム各位には惜しみない協力をいただき、改めてお礼申し上げたい。

最後に、2011 年春に、京都大学 防災研究所と気象業務に関わる企業 4 社で立ち上げた気象測器研究会では、関係各位の理解と協力のもと、最新の CWS の性能評価実験を無事終え、さらに本報告書を取りまとめることができた。試材用 CWS を提供して頂いた製造メーカ並びに代理店各位、風洞実験ならびに評価観測時に支援戴いた京都大学の技術職員各位には、改めて感謝申し上げ、本報告書の結びとしたい。

2012 年 12 月

気象測器研究会

事務局長　**橋波　伸治**

気象情報通信株式会社　代表取締役

※ 本書の著作権は 特定非営利活動法人 気象システム技術協会が有するが、学術的な目的で第三者の使用を妨げるものでない。但し、本書を利用することによって生じる一切のトラブルは特定非営利活動法人 気象システム技術協会には責任がないものとする。

書　名　一体型地上気象観測機器
Compact Weather Sensor(CWS)の性能評価
発行日　初版　2012 年 12 月
第 2 版 2013 年 2 月
出　版　特定非営利活動法人 気象システム技術協会
U R L　www.mest-japan.or.jp
住　所　東京都豊島区南池袋 2-8-5 MI ビル 4F
T E L　03-6907-2186