

超音波風速計を用いた 多点型ワイヤレス風観測システムに関する研究

Study on multipoint wind observation system using wireless transmission of sonic anemometer data

玉城 磨^{*1}
Maro TAMAKI

内山 真司^{*2}
Shinji UCHIYAMA

伊藤 芳樹^{*3}
Yoshiki ITO

玉城 史朗^{*4}
Shiro TAMAKI

Abstract

In this study, the multipoint observation system using wireless transmission was developed to observe the strong wind during the typhoon raid, and the feature of the sonic anemometer was examined from the comparison with the wind mill anemometer. It was shown that sonic anemometer is able to measure the strong wind during the storm. This system can be used enough range more than 300m. Moreover, this system can synchronize the data from 11 sonic anemometers by up to 50Hz sampling rate. We can use this system even in the field where the electric power cannot be secured. Two solar cells and two deep cycle batteries were used for the power supply on the client side. As a result, the system can be operated continuously about 100 hours.

キーワード：台風，超音波風速計，ワイヤレス，多点観測

Keywords : typhoon, Sonic anemometer, Wireless, Multipoint observation

1. はじめに

台風来襲時における地表面近傍の風挙動観測結果は農作物や低層建築物の多い農業施設などの台風対策を検討する上で重要な情報となる。防風施設を用いた台風対策は、一般的には風洞実験結果や国や県が定める設計指針などをもとに検討される。しかし、地表面近傍の風環境は立地条件の影響を受けやすいことから、台風対策を検討するには風洞実験などの資料に加え、現地観測結果も有用な資料になると考えられる。現地観測では、これまで風杯型風速計や風車型風速計などが用いられてきたが⁽¹⁾、風杯型風速計では、吹き上げ風の場合に実際の風速よりも高い風速を示す一方、風車型風速計では、吹き下ろし風または吹き上げ風の角度が増加するにつれ、実際の風速よりも観測値の低下率が大きくなることが指摘されている⁽²⁾。農作物や園芸施設は、地表面近傍で生じる吹き上げや吹き下ろし風の影響を強く受けると考えられるため、風速や高さ方向の風向（仰角）について正確に評価できる機器が必要と考える。この仰角を検出できる測器として、近年は向かい合った発信部と受信部間で超音波の伝搬時間を測定する

ことにより風速を検出する超音波風速計が利用されるようになってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。超音波風速計の利点は、従来の機器よりもサンプリングタイムが短く、瞬間風速の評価が行いやすくなったことである。また、3組の発信部および受信部で成分ごとの測定を行い、ベクトルとして表せることから、風向風速の3次元評価が可能であることもあげられる。性能に優れた機器の中には雨天時の観測も可能であるものもあり、台風のように豪雨を伴う環境下においても風観測が行えるようになった。しかしながら、地表面近傍の風挙動を広く、より正確に評価するには風速計は複数必要となる。さらに、現地観測ともなると機材の設置方法が大きな課題となる。

例えば、台風来襲時の風挙動や防風施設の防風効果を実証試験において評価するためには、地形条件も加味した風速分布を評価できるような多点観測が有効と考えられ、すでにいくつかの報告がある⁽¹⁾⁽⁵⁾。しかし、農地を対象とした観測では農業機械が走行するため、ケーブルを地表に露出した有線観測では断線事故が度々生じる。これを防ぐにはケーブルを地中に埋設するか、電線のように電柱を介して空中で繋ぐ方法が考えられるが、農家が利用しているような畑地において、合計数 km にもおよぶケーブルを地中に埋設することは、埋設工事が営農に支障を来すことやコスト面からも現実的ではない。一方、電線のようにケーブルを空中で繋ぐには、台風来襲

^{*1} 沖縄県農業研究センター主任研究員（〒901-0336 沖縄県糸満市真壁 820）e-mail: tamaki mr@pref.okinawa.lg.jp

^{*2} 株式会社ソニック

^{*3} 株式会社ソニック取締役専務

^{*4} 琉球大学工学部情報工学科教授
（原稿受付：2010 年 6 月 10 日）

時を想定した電柱の強度確保が必要である。有線観測において農作業の支障を来さず、また費用もできるだけ抑制して断線も防ぐためには、観測を数日間終了し、ケーブルを都度回収することになる。

このような問題を解消するためには、多点型風観測システムのワイヤレス化が必要である。サンプリング周期が短く、同期を重視した研究については複数存在し、近年では気流の挙動を観察するための計測システムの報告などがあるが⁽⁶⁾、本研究のような野外観測に適用した報告は少ない。また、野外観測では無線 LAN によるインターネット接続も可能な気象ロボットの報告があるが⁽⁷⁾、観測値の同期を重視した多点観測に関する報告事例はほとんどない。

本報では、まず製作したワイヤレス風観測システムの概要を整理した。次に、超音波風速計と風車型風速計の観測値を比較し、従来の測器との観測値の差異と雨天時の使用の可能性について検証した。さらに、無電源地帯を想定して装備したソーラーパネルの耐用時間の検討結果、ワイヤレスにおける計測可能距離の評価結果について整理した。最終的に 11 台の超音波風速計を用いた現場観測の結果を得て、実用化への目処をつけた。以上について報告する。

2. ワイヤレス台風観測システムの仕様

2.1 超音波風速計の概要

超音波風速計は、一般家屋内の換気⁽⁸⁾や自然環境の計測⁽⁹⁾に利用されている(株)ソニック製 SAT-550 を使用した(Fig.1)。測定間隔は最大 50Hz、測定精度は $\pm 2\% + 0.05\text{m/s}$ である。本機は、固定された経路を反対方向に進む超音波の伝達時間から軸方向の風速成分を算出する⁽¹⁰⁾。A 軸の①②間における風速の演算を例に説明する。風速は超音波の伝達時間の逆数差を用いた次式により算出できる。センサー①から②へ超音波が伝達する時間は $T_{①②}$ およびセンサー②からセンサー①に伝達する時間 $T_{②①}$ はそれぞれ (1)式と(2)式で示される。(1)式と(2)式から(3)式を導くことで A 軸方向の風速 V_A が算出される。

$$T_{①②} = \frac{L}{(C + V_A)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$T_{②①} = \frac{L}{(C - V_A)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$V_A = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_{①②}} - \frac{1}{T_{②①}} \right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、C は音速、L はセンサー間距離である。本機は 3 成分、すなわち 3 次元の風速を評価する

ため、3 組のセンサーで構成される。A 軸、B 軸、C 軸間で得られた風速 V_A 、 V_B 、 V_C は、(4)式、(5)式、(6)式を用いて、それぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸の成分風速に置換される。

$$V_x = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (V_B - V_C) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$V_y = \frac{\sqrt{2}}{3} (2V_A - V_B - V_C) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$V_z = \frac{\sqrt{2}}{3} (V_A + V_B + V_C) \quad \dots \dots \dots (6)$$

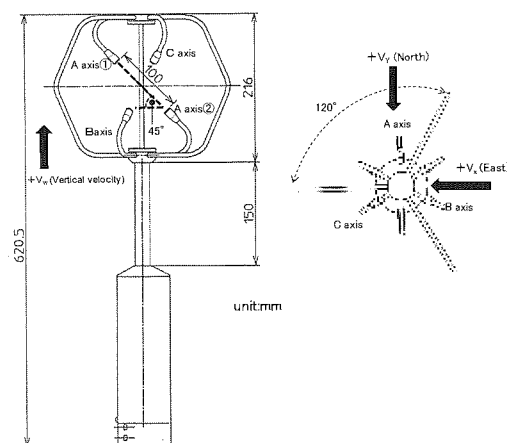


Fig.1 Outline of sonic anemometer

図 1 超音波風速計の外形

2.2 ワイヤレス台風観測システム

本観測システムは、超音波風速計による観測値を送信するクライアント (Fig.2) と観測値を受信し、データファイルとして保存するサーバー (Fig.3) に分かれる。超音波風速計のデータは無線 LAN に接続されたコンピュータで収集し、ハードディスクに記録する。サーバー側の電源は AC 電源を利用し、停電時には無停電電源装置と発電機で対応する。一方、クライアント側の電源システムはバッテリーとソーラーパネルで対応する。

電力の設計容量は次のとおりである。まず、これまでの台風観測の経験からシステムの連続使用期間は 3 日間と考えた。各機器の消費電力は、超音波風速計が 4W、422/232 コンバータが 1.2W (DC10~30V)、風速計の出力値を LAN に接続するための信号変換器である S/IP コンバータ (以下、S/IP という) は 2W (DC5V400mA)、無線 LAN ユニットは 7.2W (実測に基づく)、DC/DC コンバータの電力効率を 80% とすると、システム全体の消費電力は、 $4\text{W} + (2\text{W} \div 0.8) + (7.2\text{W} \div 0.8) + 1.2\text{W} = 16.7\text{W}$ となる。一方、3 日間動作させるためのバッテリー容量は、システム

全体に流れる電流を機器の消費電力 16.7W とバッテリー電圧 12V から計算し、72 時間の連続使用と安全率 2.0 を考慮すると $200.4\text{Ah} \div 2 = 100.2\text{Ah}$ となった。そこで、耐久性に優れた 100Ah のディープサイクルバッテリー 12V100Ah を 2 台備えることとした。

一方、ソーラーパネルについては、バッテリー容量を考慮し、動作電圧が 12V(85W)、最大動作電流が 5.02A の製品を 2 枚採用した。ソーラーパネルの傾斜角は、(財)日本気象協会が(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究により作成した MONSOLA05 (801)を用いて検討した。方位角を真南とした時の那覇市における最適傾斜角は、8 月の場合 10° であり、日射量は $5.4\text{kWh}/\text{m}^2$ であった。一方、12 月においては 40° であり、日射量は $3.0\text{kWh}/\text{m}^2$ であった。本システムは台風来襲時の観測を主目的としているが、季節風が吹き付ける冬場の風況情報も営農現場には有用な情報である。傾斜角を 40° に設定した場合の 8 月の平均日射量は $4.8\text{kWh}/\text{m}^2$ であり、十分な日射量を得られると考え、傾斜角は 40° に設定した。また、1 日の発電量を見積もるために必要な 1 日あたりの日射時間換算値は、那覇市における 2009 年 6 月 1 日から 2010 年 5 月 31 日までの年間平均日照時間である 1688.1 時間(11)(12)(13)(14)を 365 日で除し、さらに気象変動などを考慮して安全率 70%を乗じた 3.2 時間とした。パネルの汚れ係数、充放電効率、製品個体差などは考慮していない。バッテリーが完全に放電した状態から満充電までの時間を計算すると、バッテリー容量 200Ah を最大動作電流 10.04A($5.02\text{A} \times 2$)で除し、さらに 3.2h/日で除した結果、満充電には約 6.3 日を要する結果となった。台風が 1 週間以内に 2 度来襲したことはほとんどないことから、機器の電源を OFF にすることで十分な充電が可能と判断した。

次に、観測システムについて説明する。クライアントからサーバーまでの距離は最長 500m 程度を想定してシステムを構築した。クライアント側には指向性アンテナを、サーバー側には無指向性アンテナを使用した。サーバー側の無線 LAN ユニットの使用温度は $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 、最大通信速度は 54Mbps、通信距離は 500m 以上に対応しているものを採用した。

観測用プログラムの作成にはナショナルインスツルメンツ社の LabView を用いた (Fig.4)。プログラムの画面では風速の時間変化を成分ごとに確認できる。観測後のデータ整理の利便性を考慮し、1 ファイルあたりのデータ収録間隔は 1 分、5 分、10 分、20 分、30 分、60 分のいずれかを選択できるように

した。データ収集時の同期を優先したシステムであることから、同期あわせはファイル更新ごとに行うことができる。ただし、デメリットとしてはファイル更新時に瞬間的に通信を切断するため、0.6 秒程度 (50Hz データでは 30 点程度)の欠落が発生する。通信が切断された場合、本システムでは一定間隔ごとに再接続を行う。通信切断を判断し、再接続処理を開始するまでの時間 (通常は 2 秒) および再接続回数は任意に設定できる。ただし、再接続では 30 秒程度の時間を要する。通信切断時の日時も画面上に表示される。

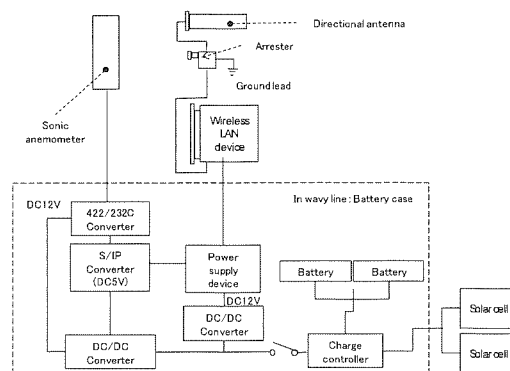


Fig.2 Wind observation system (Client)

図 2 風観測システム (クライアント側)

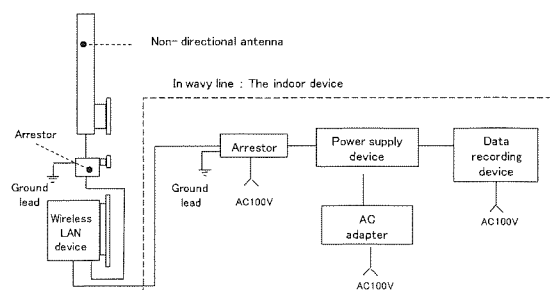


Fig.3 Wind observation system (Server)

図 3 風観測システム (サーバー側)



Fig.4 Wind observation system collection display situation

図 4 風観測システム収録画面

3. 事前評価結果

3.1 評価項目

ワイヤレス台風観測システムを製作するにあたり、下記に示す試験を実施した。まず、観測システムに用いる通信機器およびデータ処理の精度を確認するため、ダミーデータを用いて試験を実施した。次に、超音波風速計の特性を確認するため、晴天時および雨天時において風車型風速計との風速値の比較を行った。電波強度と通信速度については実際の測定を考慮して野外観測による評価も行った。さらに、バッテリーの使用可能時間についても実際の観測から算定した。

3.2 室内試験による通信データの処理状況の確認

通信データの処理と同期について確認するため、以下の試験を行った(Fig.5)。データが欠落することなく、正確な受信状態を保つことを確認することが目的であることから、風速計の代わりにダミーデータとして1~9999 数値を順番に送信するパーソナルコンピュータ(PC)を用意した。ダミーデータはこの分配器(Distributor)を通じ、クライアント側となる11台のS/IPへ同期がとられた状態で送信される。ダミーデータは無線LAN(W-LAN)を経由して、11台分のデータとしてサーバー側のPCに送信される。11台分の送信データの配列に異常が見られなければ、通信やソフトが正常に動作したと判断できると考えた。実験の結果、データ配列に異常は確認されず、システムが正常であることを確認した。

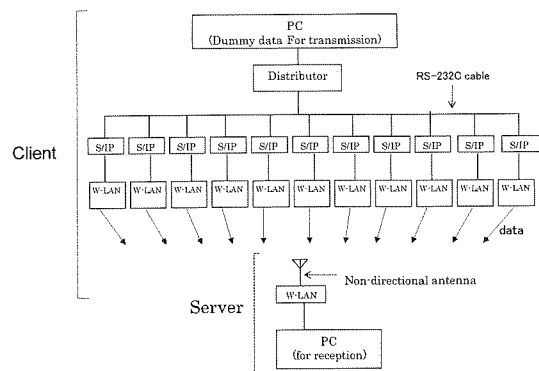


Fig.5 Outline of laboratory experiment

図5 室内実験の概要

3.3 超音波風速計と風車型風速計の比較

超音波風速計の性能についてはすでにいくつかの文献で紹介されており⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、超音波風速計が従来の風車型風速計や風杯型風速計に比べて応答性能に優

れ、乱流計測に適した測器であることは周知されている。しかし、本観測に用いた超音波風速計とこれら従来型の風速計の観測値について、降雨時を中心に比較した報告はほとんどない。また、超音波風速計は複数のメーカーが考案しており、中には雨天時での使用は困難な製品も存在する。そこで、本観測で用いる超音波風速計と従来型風速計との観測値の比較検証を行うため、高さ15mの建造物の屋根上に高さ6mのポールを設け、その頂上に超音波風速計と風車型風速計を設置し、降雨時の観測値について比較を行った。両器間距離は1.5mであり、南側に風車型風速計((株)日本エレクトリック・インスルメント, N-800S)、北側に超音波風速計を設置した。

観測は日降雨量187mm(沖縄県農業研究センター内の観測値)を記録した2007年12月21日に実施した。両計測器の比較は、15:40から23:00までの観測値を10分間平均風速で整理し、さらに、10区間分の移動平均として示した結果を用いて行った(Fig.6)。その結果、両計測器の風速と測定時間の関係は非常に近似しており、相関係数は0.99と高い値が得られた。また、超音波風速計の雨天時の使用では観測値の欠落が懸念されたが、18:30から19:30までの降雨量は75.5mmを記録したにもかかわらず、観測値に欠落はなかった。しかし、降雨時には超音波風速計の振動子表面に雨滴が付着し、観測値に異常をもたらすことが懸念されたことから、振動子間の伝播速度の特性についても確認をした。その結果、まれに振動子表面への雨滴付着が原因と考えられる観測値の乱れが数秒程度確認されたが、Fig.6で示したように平均風速として整理する場合にはほとんど問題はなかった。

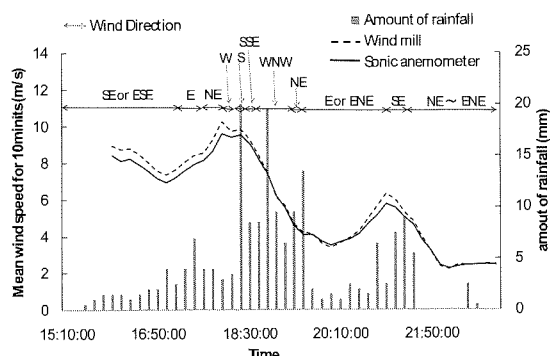


Fig.6 Comparison of average wind velocity for ten minutes of sonic anemometer and wind mill (Included the duration of the rainfall)

図6 超音波風速計と風車型風速計の10分間平均風速の比較(降雨時も含む)

3.4 野外における電波強度と通信速度の評価

沖縄県農業研究センター内において、サーバー設置予定位置から 250m 離れた位置にクライアント側アンテナを簡易的に設置し、本観測システムで使用予定の無線 LAN の通信速度と電波強度を確認した。その結果、晴天時の通信速度は 56Mbps、雨天時においても 46Mbps を確保でき、十分な観測が可能であることを確認した。一方、電波強度は天気にかかわらず安定して高い信号レベルを維持できた。観測システムを設営後、電波強度及び伝送速度の低下が確認されたが、この原因はクライアント側アンテナケーブル（無線 LAN ユニット付近）内への水滴の浸入であることが確認でき、十分な対策を施した。

3.5 バッテリー使用可能時間の評価

観測システムのクライアント側電源には、5 時間率容量 100Ah、電圧 12V のバッテリーを使用している。台風来襲時の観測では無日照で 3 日間程度の連続観測が必要と考えられたことから、観測システムを設置後、観測システム作動時におけるバッテリーの電圧変化の推移をテスターで測定し、連続使用が可能な時間について検証した。日射量測定には(株)プリード製 PCM-03E を用いた。

測定は 2007 年 4 月 6 日 11:30 を観測開始時刻とし、16 日 17:00 まで実施した。例として 4 台のバッテリーの推移を示す(Fig.7)。No.2, No.3, No.4 は観測前までシステムが作動中であつたため、記録開始時の電圧はそれぞれ、11.3V, 10.8V, 11.4V であつた。

測定開始 1 日から 7 日までは充電期間とした。充電期間 6 日間のうち、4 日は降雨が観測され、日射量日平均値は 0.27kW/m^2 であつた。そのため、充電が緩やかに行われ、6 日目に No.2, No.3, No.4 は満充電の目安である 12V を超えた。以上の結果から、本システムにおいては充電日数として 6 日を要すれば、天候不順な状態であってもバッテリーをほぼ満充電とすることが可能であることが示された。

7 日目から観測システムを作動し、電圧の低下状況を確認した結果、電圧勾配には差が見られ、No.4 の電圧が観測開始から 5 日目に許容値とした 10.8V に到達した。その時の No.2 の電圧は 11.0V, No.3 は 11.3V, No.1 は 11.7V であつた。観測期間中の平均日射量は 0.37kW/m^2 であり、充電のために十分な日射量を得たとは考えにくい。そのような状況下でも、観測開始から 3 日後の電圧は、電圧勾配が直線であつたならばいずれも 11V を超えていたと考えられた。以上から、台風来襲時においても少なくとも

観測開始時のバッテリー電圧が 12V を超えていれば、目標とする 3 日間の連続観測は十分に可能と判断した。

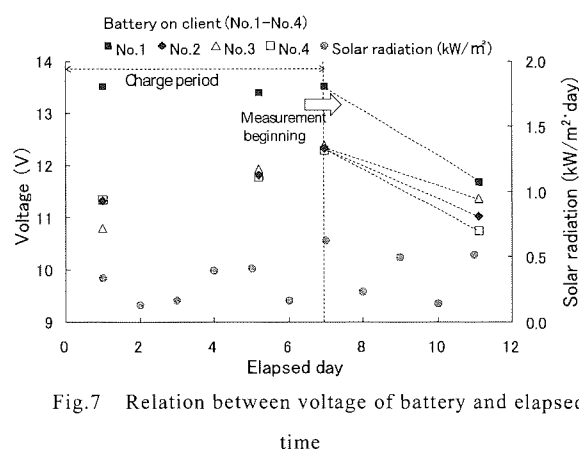


Fig.7 Relation between voltage of battery and elapsed time

図 7 バッテリーの電圧と経過時間の一例

4. 実証試験

4.1 測定条件

観測システムは沖縄県農業研究センター内に設置した。構成したクライアント側の測定システムの一例を Fig.8 に示す。風速計 No.と設置高さは Fig.9 に示した。クライアント側からサーバーまでの最長の距離は 310m, その間に大きな障害物ない。観測場所周辺は裸地もしくはサトウキビ畑として利用されている。なお、観測場所は北側から南側に向かって 2%の下り勾配があり、道路は畑地よりも 1m 程度低い。道路から畑地に向かって緩やかな法面が形成されている。観測点が集中する畑地の南側道路は畑地よりも 2m 程度低い位置にある。

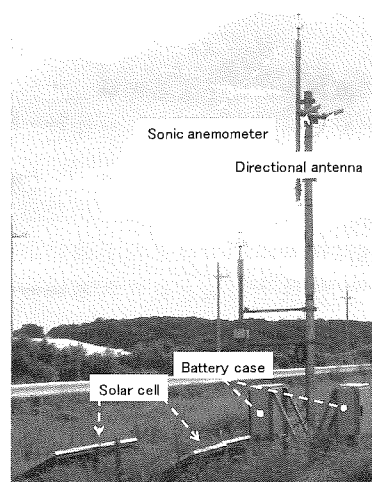


Fig.8 Wind observation system (Client)

図 8 観測システム (クライアント側)

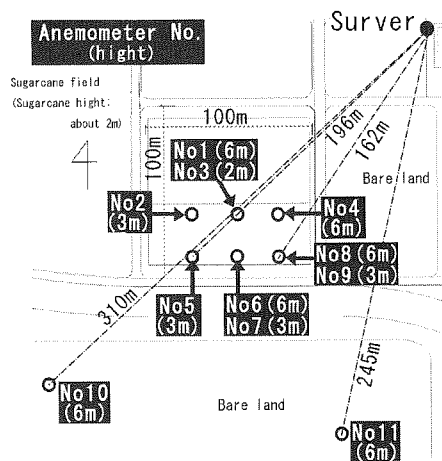


Fig.9 Observation field

図 9 観測場所

4.2 観測結果

台風 0704 接近時である 2007 年 7 月 12 日の 18:20 から 19:30 において観測を実施した。観測中、降雨は 18:20 から 18:40 間で観測され、降雨量は 2.0mm/20min であった。観測値の妥当性は観測値の欠落の可否、平均風速、乱れの強さ、パワースペクトルから確認した。パワースペクトルは FFT 法により求めた。

観測値の妥当性はパワースペクトルの形状から簡易的に検討できる。具体的には慣性小領域（パワースペクトルが高周波数に向かうに従って直線的に低下する領域）の勾配の近似性から判断する。勾配が $-5/3$ 乗よりも小さいと、データ内に高周波ノイズが含まれるか、大きなスパイクが入った可能性があると言われている一方、傾きが $-2/3$ 乗よりも大きい場合は、測器の応答が不十分、もしくは測定部スパンが慣性小領域の渦スケールに比べて大きすぎると言われている⁽¹⁷⁾。パワースペクトルが高周波数に向かうに従って直線的に低下する領域、すなわち、慣性小領域の勾配は一般的に $-5/3$ 乗に比例し、大気乱流中においてはその性質が満足される⁽¹⁸⁾。Fig.10 に本観測におけるパワースペクトルの一例を示す。スペクトルの形状は観測点間でほとんど違いが見られなかった。また、慣性小領域と見られる周波数域の勾配は $-5/3$ 乗と近い値を示したことから、適切な観測値が得られたと判断した。

一方、観測値の欠落に関して分析した結果、No.1 では 10 秒程度の観測値の欠落が数回にわたり観測された(Fig.11)。図中の風速は 10 秒間平均値である。欠落の理由には、振動子に水滴が付着し、超音波の伝播が測定レベル以下になったこと、または、水滴

以外の異物が振動子間に侵入したことが原因と考えられたが、観測値からは原因の特定は困難であった。従って、超音波風速計の利用では観測値の欠落が生じる可能性を否定できないが、この現象が No.1 のみに生じたものであったこと、他の観測日においては異常値が観測されなかったこと、事前評価結果も合わせて考慮すると、異常値の判別さえ正確に行えれば、超音波風速計の使用は風挙動の分析に有効と考えられた。

次に、各観測点における水平風向、仰角、平均風速、乱れの強さから観測場の気流性状について検討した。乱れの強さとは、乱流のもつエネルギーの大きさを表す尺度であり、変動成分の標準偏差を平均風速で除した値である。この観測場は地表面が平坦であることから、観測高さが同値な場合、平均風速や乱れの強さは接近すると考えられる。水平風向は 16 方位で整理し、N を 0° として時計回りに方位を算出した。例えば E は 78.75° から 101.25° の範囲内となる。主風向はサーバー設置箇所の東側に位置する 15m の高さの建造物の屋根上に高さ 6m のポールを設け、ポールの頂上に設置された風車型風速計で測定した。その結果、台風 0704 来襲における測定時間帯の主風向は NE もしくは ENE であった。

一方、Fig.9 に示す地上高 6m 以下の地表面近傍の観測点では、ENE または E の風向が比較的高い頻度で観測された。また、観測時間中 18:20 から 19:30 までの各観測点の平均風速と乱れ強さを Table.1 に示す。各測定箇所の風向の一例として 18:30 から 18:40 までの観測結果を Fig.12、仰角の平均値と標準偏差を Table.2 に示す。

まず、乱れの強さが 0.25 と他の観測点よりも低い No.10 に着目した。No.10 では水平風向頻度の 85% が E または ENE であった。平均風速は 9.6m/s であり、他の観測地点よりも高い値を示した。以上の結果から、No.10 が最も地形の影響を受けずに安定した観測値を得られたと考えられたので、No.10 を基準に他点との比較を行った。

地表面からの高さ 6m における観測結果について検討した結果、No.1, No.4, No.6, No.11 は平均風速がそれぞれ 8.9m/s, 9.0m/s, 9.3m/s, 9.1m/s、乱れの強さは 0.33, 0.3, 0.28, 0.3 であった。No.10 よりも平均風速は低下し、乱れの強さは若干高いが、各観測値は接近していた(Table.1)。

一方、地上からの高さ 3m、もしくは 2m に設置された No.3, No.7, No.9 は高さ 6m よりも平均風速が低下し、乱れの強さは増加した。そのうち、No.1 と

No.3, No.6 と No.7 では、観測値は異なっても風挙動は近い傾向を示すと考えられたことから、測定点ごとの偏相関係数と無相関検定から観測精度について検討した。その結果、相関係数は No.1 と No.3 は 0.42, No.6 と No.7 は 0.65, 無相関検定でも有意水準 1% の相関が認められた。以上の結果から、主風向が NE の場合、No.1, No.4, No.6, No.10, No.11 が設置された観測点では、観測値の相対的評価が可能と考えられた。

仰角の平均値は No.9 以外の観測点において 4° 未満であり、正の値を示した (Table.2)。また、観測点が地表面に近いほど、仰角のばらつきは大きくなる傾向にあった。観測高さ 2m の No.3 における仰角の頻度分布では、ごく少数ではあるものの、 70° 以上の仰角が観測された (Fig.12)。また、仰角の標準偏差は 13.1 と比較的大きい値となった。そのような観測結果がある一方、No.5 は高さ 3m での観測にもかかわらず、乱れの強さは 0.27 であった。仰角は -40° から 50° の範囲以内で観測され、標準偏差 7.3 と比較的小さかった。しかし、No.5 から北方向に 30m の位置にある No.2 は、乱れの強さは 0.26 と低いものの、仰角が観測された角度の範囲が広く、頻度は少ないが、全ての水平風向で 70° 以上の値を記録した。乱れの強さについては No.2 と No.5 に相違は示されていないが、仰角のばらつきが生じる理由については今後検討したい。

本観測では、No.9 (地上高 3m) の乱れの強さが、他の観測点よりも高かった。また、特に水平風向において、他の観測点では 10% 以上の頻度割合を示した水平風向は NE から E までであったのに対し、No.8 と No.9 では NE から ESE へと広がった。両観測点については地形的要因が影響したと考えられる。No.8 と No.9 の東側通路は南北方向に傾斜しており、畑地の南東側隅角部においては通路よりも 1.5m 程度高かった。そのため、風上となる北東方向からの風に対し、No.8 と No.9 の観測値はこの高低差の影響を受け、複雑な風挙動を示したと考えられた。

以上の結果、本観測場では主風向が NE の場合、No.8 と No.9 を除いた地点では、観測点間の相対評価が行える観測値が得られた。また、風向を 3 次元的に評価することにより、立地特性を詳細に評価できる可能性が示された。降雨に伴い、若干の観測値の欠落も生じたが、地表面近傍の風挙動を評価できる観測値が十分に得られたと考えられ、本観測システムの有効性が確認できた。

本研究の目的は超音波風速計を用いたワイヤレス

型の多点観測システムの構築であったことから、観測値の解析は風況特性を簡単に示すことができる水平風向、仰角、平均風速、乱れの強さにとどめた。今後は、本システムを電源が確保できないような南西諸島の離島地域の台風対策で活用したいと考える。

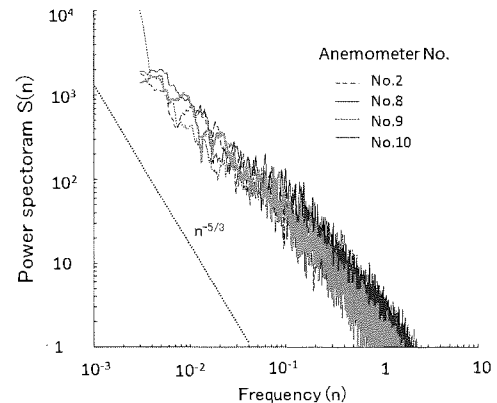


Fig.10 Power spectrum density of wind fluctuations

図 10 パワースペクトル密度の比較

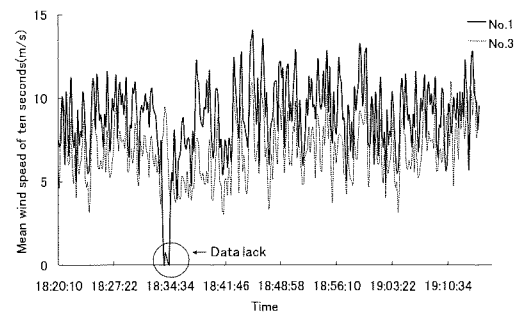


Fig.11 Time series of average velocity of the wind

図 11 平均風速の時間変化

Table.1 Mean wind speed and turbulent intensity of each observation point (18:20-19:30)

表 1 平均風速と乱れの強さ(観測時間帯 18:20-19:30)

Anemometer No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
Anemometer height (m)	6	3	2	6	3	6	3	6	3	6	6
Mean wind speed (m/s)	8.9	9.0	6.7	9.0	8.8	9.3	8.0	8.5	5.0	9.6	9.1
Turbulent intensity	0.33	0.27	0.36	0.30	0.27	0.28	0.30	0.33	0.65	0.25	0.30

Table.2 Mean elevation and standard deviation of each observation point (18:30-18:40)

表 2 仰角の平均値と標準偏差(観測時間帯 18:30-18:40)

Anemometer No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
Anemometer height (m)	6	3	2	6	3	6	3	6	3	6	6
Mean elevation ($^\circ$)	1.0	2.3	3.4	1.4	2.6	2.2	0.6	1.0	-1.3	2.7	1.9
Standard deviation	6.1	13.1	13.1	9.3	7.3	9.3	9.1	11.9	15.8	7.9	8.3

5. まとめ

本研究では、超音波風速計の特徴を風車型風速計との比較から検討し、雨天時の観測も可能であることを示した。また、台風来襲時の風挙動を観測できるワイヤレス多点観測システムを製作した。評価結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)本システムではサーバー側から 310m の範囲内において風向風速の多点観測が行えた。また、観測値のサンプリング周期が 50Hz 以下においては、超音波風速計 11 台を用いた多点観測においても、高い精度で同期をとることができる。ただし、同期精度を確保するため、通常、10 分間隔でファイルを更新し、各クライアント側の測定時間の同期合わせを行う。その際、瞬間的に通信を切断するため、0.6 秒程度 (50Hz データでは 30 点程度) の欠落が発生する。現状の観測では支障がないが、10 分間以上の瞬時データが必要な場合はファイル更新時間を延長することで対応できる。
- (2) 本システムで用いた超音波風速計で観測された平均風速は、降雨時においても風車型風速計とほぼ同等の観測精度が得られることが確認できた。
- (3) 本システムで用いた超音波風速計は、降雨時において 10 秒程度の観測値の欠落もしくは異常値が発生する可能性が示された。しかし、本研究で観測した範囲では、観測値の欠落も補正可能な範囲であり、解析にはほとんど支障がなかった。
- (4)本システムは電力が得られない地域での使用を想定した装置である。そのため、クライアント側にはソーラーパネル 2 枚とディープサイクルバッテリー 2 台を併用した。これにより、少なくとも 3 日間の連続観測が可能である。
- (5)観測値をもとに平均風速、水平風向、仰角、乱れの強さについて整理した結果、本システムが地表面近傍かつ狭小な領域における風挙動を把握する上で有効であることが示された。

6. 謝辞

本研究は全国中小企業団体中央会の委託事業である「園芸施設用「通風カーテン」の適正な配置方法に関する性能評価」に関する研究の一環として実施されたものである。

本研究の実施にあたり、拓南伸線株式会社の金城翔一氏、農業研究センター主任研究員與儀喜代政氏、研究員伊波聡氏、農業技術補佐員宮平守邦氏、安谷

屋賛氏には観測現地の設営ならびに現地観測において多大な協力をいただいた。また、拓南伸線株式会社の臼井高江氏にはデータ解析にご協力いただいた。これらの方々に心より感謝の意を表する。なお、本研究は日本学術振興会科研費 (22560837)および (22310056)の助成をうけたものである。ここに深く謝意を表する。

7. 参考文献

- (1)台風研究委員会、多良間島における台風観測研究贈号報告書 (1980)、中央電力協議会、東京。
- (2)農業技術協会、農業気象の測器と測定法(1988)、日本農業気象学会、85-86、東京。
- (3)玉川一郎他、熱・水収支観測の高精度評価に関する研究、京都大学防災研究所 (2001)、12G-15、1-25、京都。
- (4)丸山敬・谷口徹郎・岡崎充隆・谷池義人、接地境界層中に置かれた 2.4m 立方体周りの気流・風圧性状、日本風工学会論文集、99 (2004)、227-240。
- (5)武田勝昭・安田喜世史・竹内政夫・金田安弘、防風・防雪柵の性能に関する風洞実験、日本風工学会誌、25 (1985)、15-32。
- (6)利光和彦・徳安達士・小出貴士・三浦雄亮、振動翼周りに非定常流れの同期画像粒子流速測定システムの構築、大分工業高等専門学校紀要、46 (2009)、7-11
- (7)Masayuki Hirafuji, Dongxian He, A Concept of Advanced IT Agriculture in Japan, Proc. International Conference on Agricultural Science and Technology (2001), 57-63, Beijing.
- (8)羽原宏美・三浦尚志・細井昭憲・西澤繁毅・澤地孝男、夏期および中間期における通風冷房行為の再現による RC 集合住宅の室内温熱環境および冷房消費電力量に関する研究 住宅のための省エネルギー手法の実験的研究に関する研究 その 2、日本建築学会環境系論文集、73-633 (2008)、321-329。
- (9)森脇 亮・神田 学・木本由花、都市接地層における乱流プロファイルの大気安定度依存性、水工学論文集、47 (2003)、1-6。
- (10)副島潤一郎、超音波の基礎、カイジョー技報、8-12 (2003)、51-52。
- (11)沖縄気象台、平均気温・降水量・日照時間の平年差(比)と階級、沖縄地方の天候-平成 22 年 3 月~5 月-、(2010) 2。
- (12)沖縄気象台、平均気温・降水量・日照時間の平年差(比)と階級、沖縄地方の天候-平成 21 年 12 月~平

成 22 年 2 月 -, (2010) 2.

(13) 沖縄気象台, 平均気温・降水量・日照時間の平年差(比)と階級, 沖縄地方の天候-平成 21 年 9 月~11 月 -, (2010) 2.

(14) 沖縄気象台, 平均気温・降水量・日照時間の平年差(比)と階級, 沖縄地方の天候-平成 21 年 6 月~8 月 -, (2010) 2.

(15) 牛山素行, 超音波風速温度計を使った観測, 身近な気

象・気候調査の基礎(2000), 76-79, 古今書院, 東京.

(16) 光田 寧・山田道夫訳(J.C カイマル著), 微細気象学(1993), 52-77, 技報堂出版, 東京.

(17) 塚本修・文字信貴, 気象研究ノート第 199 号-地表面フラックス測定法-(2001), 49, 日本気象学会, 東京.

(18) 社団法人日本鋼構造協会編, 構造物の耐風工学(1997), 389-390, 東京電気大学出版局, 東京.

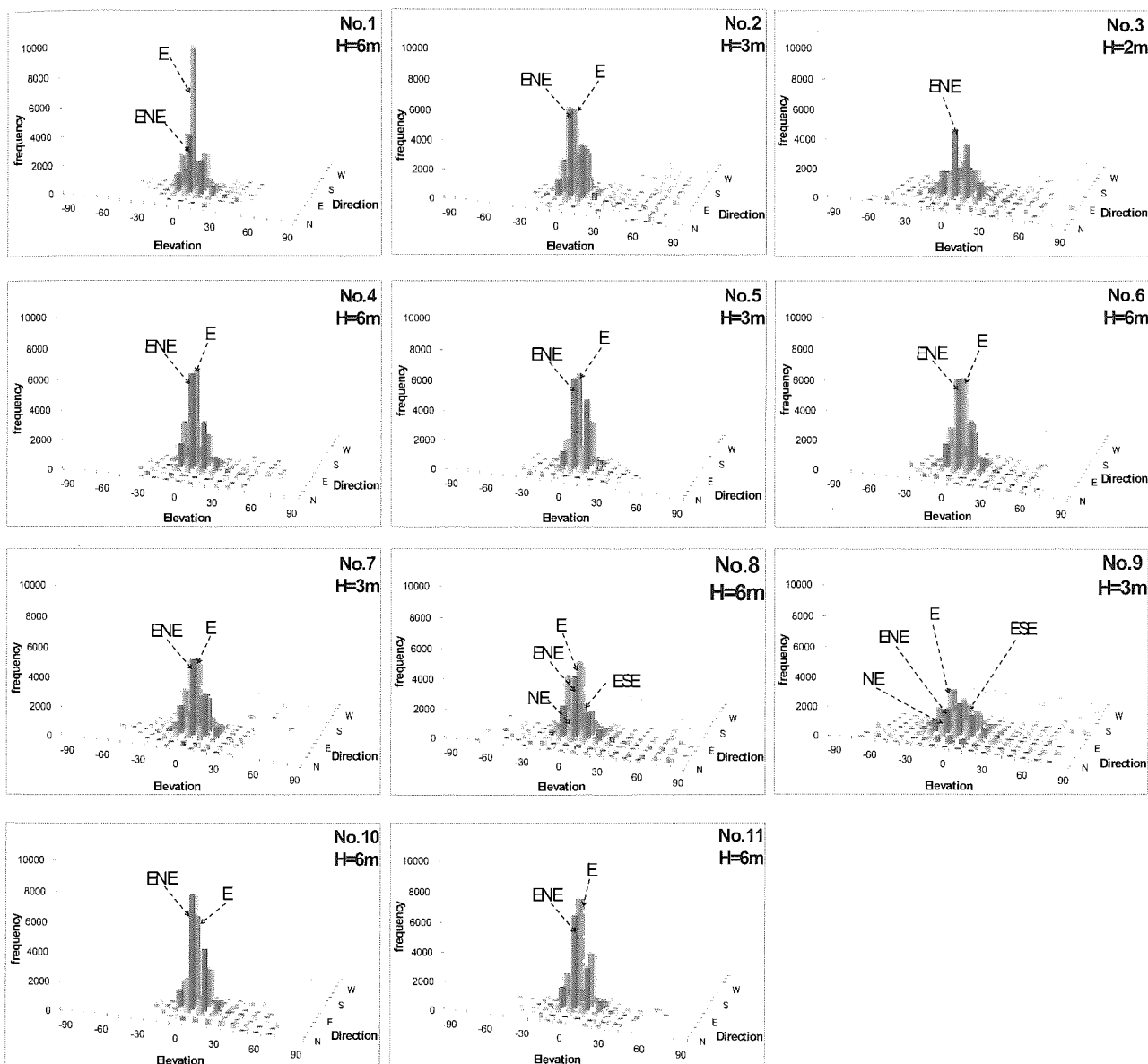


Fig.12 Frequency distribution concerning elevation for wind direction (18:30-18:40)

図 12 水平風向と仰角に関する頻度分布(観測時間帯 18:30 から 18:40)