

一体型地上気象観測機器 Compact Weather Sensor(CWS)の 性能評価

CWS 5 器種の風洞・野外での評価実験



評価観測プラットフォームに設置した観測機器 2011年7月28日

2013年2月

気象測器研究会



写真-1 風洞実験中のプロペラ型風向風速計

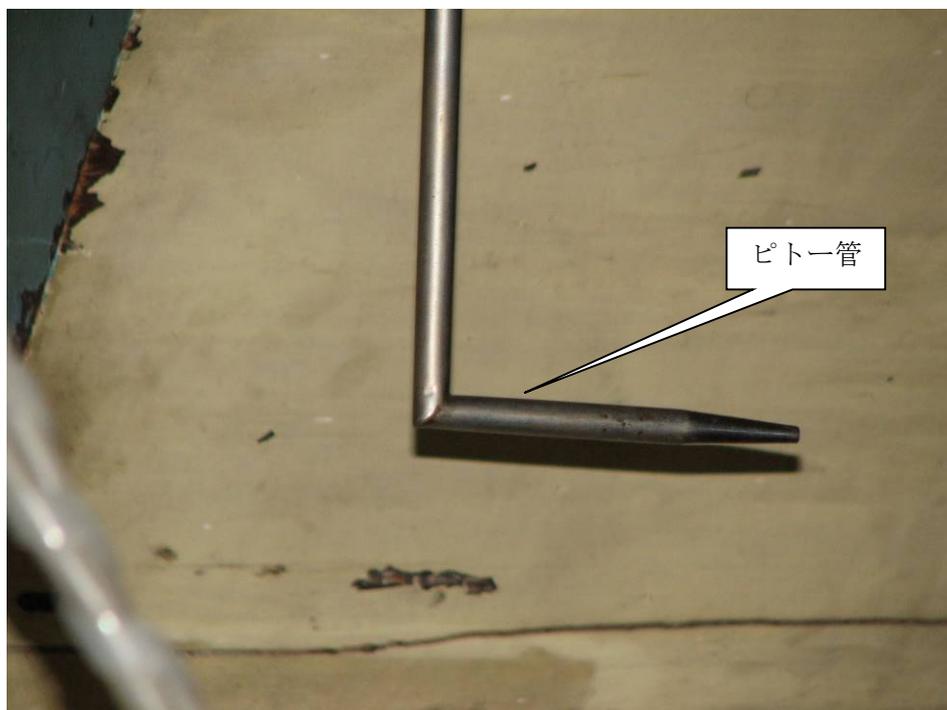


写真-2 ピトー管

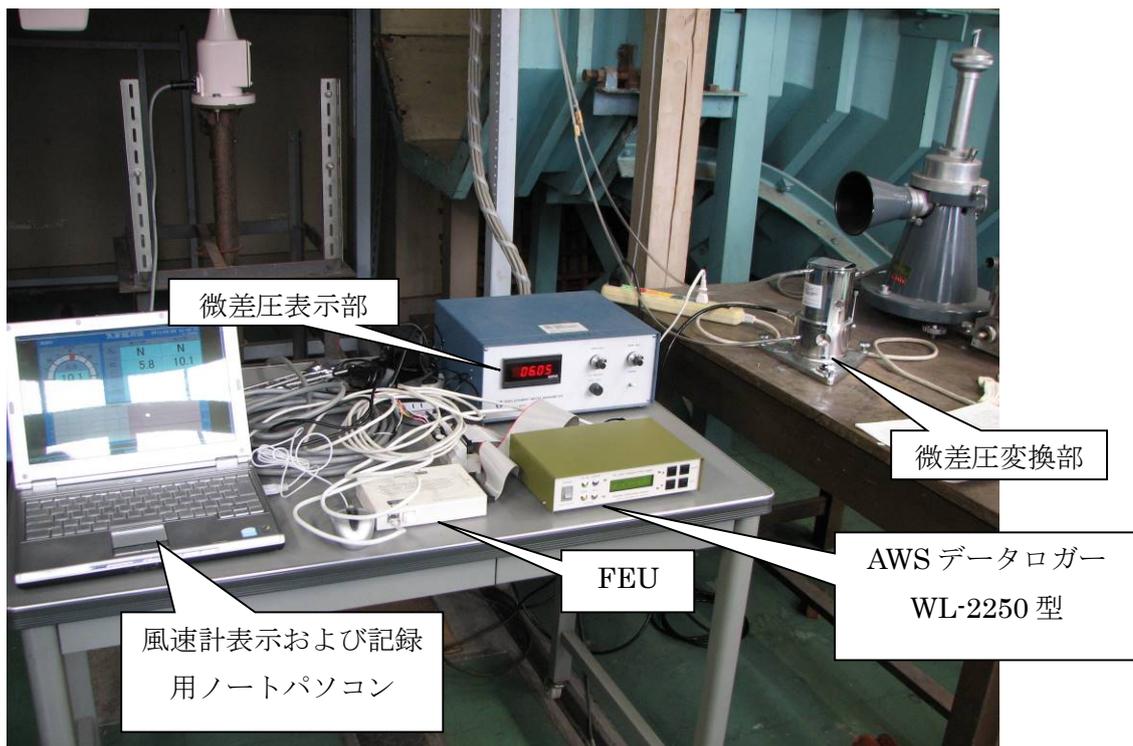


写真-3 風洞実験の際の風洞風速測定用の精密微差圧計およびデータ収録装置

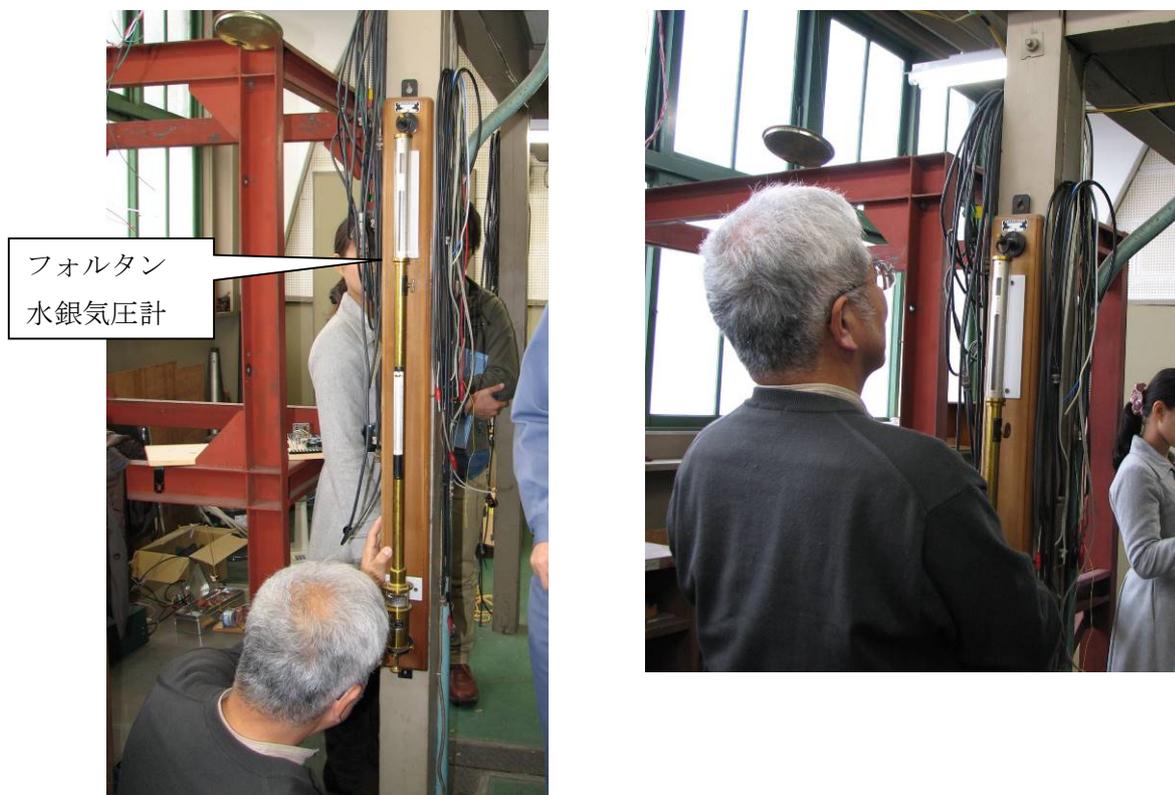


写真-4 フォルトン水銀気圧計 右 初期設定 左 気圧の読みとり



写真 5 潮岬風力実験所

CWS 一覧

All-In-One CWS



WS-600

MetPak II



WXT520



150WX



※ CWS の並びは、型名の ABC 順および数字とした

一般気象観測用測器 一覧

W855-Z1



DAT-600



KET-2, HMP155, TH-500



R1-502



序 文

最近、地上気象観測において、広範囲の空間で多地点の同時気象観測の必要性が大きくなり、設置や保守が容易な計測機器の開発について要求が高まってきている。この要求に応えるものとして、複数の気象センサーを一体化した CWS (Compact Weather Sensor) が多方面で使用されるようになってきた。これらの 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、しかも安価に観測に資する点では、利用者にとってそのメリットは大きく、魅力的な測器の一つである。しかし、その精度や性能に関する情報は、現在の CWS が外国製であるために、一部製造メーカーが技術報告や本体に付属している取扱説明書で情報開示しているものの、仕様以外の資料は極めて少ない。

著者らは、国内外で観測目的に応じて、これまでもこれらの CWS を使用してきているが、多くの利用者同様、メーカーの仕様を器種選択の指標にしているのが実情である。しかし、外国には日本のように、気象測器に対する検定制度はなく、その性能の情報は製造メーカーが提示する仕様に頼ることになる。

CWS に限らず、気象測器の性能を確認するには、実験施設をはじめ、時間と経費を伴うために、簡単には、実施できない。一方、製造メーカーも出荷する以上、製品の性能や動作については、ある程度の確認作業を実施していると推測する。これらの CWS は、各気象要素測定のための原理や構造、観測後のデータ処理方法が異なっていて、それぞれ特徴を有している。これらの特徴を認識した上で使用しないと、気象測器のもつ本来の性能が発揮できないことになる。そこで、それぞれの CWS は、どのような設計思想で設計製造され、どのような検査を行って出荷されるかなどの情報を把握することは極めて意味のあること考える。

以上のような状況下で、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 社が、以上の主旨を理解し、CWS の良否を議論するというよりは、まずは、利用者の立場で、その性能を確認し、どのような目的に使用可能であるかを把握するという観点に立ち評価計画を策定した。製造メーカーおよび国内の販売代理店の協力を得て、プロジェクトチーム‘気象測器研究会’を発足した。

2011 年 4 月に、CWS 評価に関する調査組織を立ち上げ、具体的な評価方法について議論を進めた。風測定については、今回対象とした全機種が超音波風速計を採用していて、風向風速の特性については風洞実験を行うこととし、支持柱などの計測機器の構造上の影響について調査した。その他の気象要素である、気温、湿度、気圧、降水量については、既存の気象測器を基準器として、野外で比較観測を実施することにした。いずれも、京都大学防災研究所附属の共同利用施設で実施した。野外実験を実施した期間は、2011 年 7 月中旬から 9 月末までの 2 か月である。このため、CWS が長期間にわたって安定して動作するかどうかの確認は必ずしも十分ではなく、少なくとも 1 年以上の連続観測 (春夏秋冬) が必要であるが、ここでは、製造メーカーは耐久性、耐候性試験などはすでに行っていると考え、今回の実験・観測では安定動作の確認を除外した。一連の実験では、基準器となる気象観測機器、観測データをリアルタイムで収録伝送するデータロガー、観測データを伝送するための通信技術などは、参加機関企業が保有する資材や技術を持ち寄った。さらに、観測データを受信する設備、観測データの解析等を、参加企業の得意とする分野を分担することにした。

一部の CWS の器種については、日本の代理店に提供をいただき、長期貸し出しを受けた。

実験・観測の結果の一部は、すでに 2012 年気象学会の春季大会 (つくば) と秋季大会 (札幌) で発

表した。これらの成果は貴重な資料であり、現在の CWS の利用者、これから観測に導入を計画される利用者にとって、より詳細な情報を公表することは有意義であると判断して、この報告書を作成することを計画した。2012 年 4 月に報告書作成の目的で第 1 回会合を開催し、それぞれの担当分野を決定した。業務などの関係で、当初計画より若干の遅れはあったものの、2012 年 11 月末に本報告書を完成することができた。

この報告書の内容は、今回使用した CWS について、一連の評価実験・観測で得られたデータの解析結果、使用測器ならびにデータの取得に用いた器材の概要紹介、および参考資料の構成である。

最後に、この報告書が CWS で気象観測を実施する時に役立つことを願うと共に、試材用 CWS を提供して戴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心より感謝の意を表したい。

2012 年 12 月

プロジェクトリーダー 林 泰一

京都大学 防災研究所 准教授
流域災害研究センター
流域圏観測領域

目 次

第 I 部 CWS の特性

章	題 名	頁
	口 絵	i
	序 文	vi
1.	概 要	3
1.1	経 緯	3
1.2	参加組織とメンバ	4
1.3	評価観測に使用した気象観測機器	5
1.4	実験・観測の概要	6
1.4.1	風洞実験	6
1.4.2	野外での評価観測	7
1.5	観測データの取得と伝送	8
2.	評価方法	11
2.1	風洞実験	11
2.1.1	実験環境	11
2.1.2	実施時期	13
2.2	野外評価観測	14
2.2.1	潮岬風力実験所の立地環境	14
2.2.2	観測期間中の潮岬付近の天候	17
3.	評価実験および観測結果	20
3.1	風洞実験結果	20
3.1.1	プロペラ型風向風速計 W855-Z1 の風速特性	21
3.1.2	All-In-One CWS	22
3.1.3	MetPak II	26
3.1.4	WS-600	28
3.1.5	WXT520	30
3.1.6	150WX	33
3.2	野外観測結果	36
3.2.1	All-In-One CWS	36
3.2.2	MetPak II	43
3.2.3	WS-600	48
3.2.4	WXT520	54
3.2.5	150WX	60
3.2.6	最大瞬間風速の調査	65
3.2.7	乱流特性の調査	69

目 次

第 II 部 実験に用いた観測機器

章	題 名	頁
4.	観測器材の概要	77
4.1	CWS の仕様全般	77
4.1.1	All-In-One CWS	79
4.1.2	MetPak II	80
4.1.3	WS-600	82
4.1.4	WXT520	84
4.1.5	150WX	87
5.	観測データの収集方法	92
5.1	評価観測に用いたデータロガーの概要	92
5.2	測器信号の取り込みと量子化およびデータ形式について	94
5.3	データ収録とホストコンピュータへのデータ伝送のしくみ	94

目 次

第Ⅲ部 地上気象観測機器の現状と将来像

章	題 名	頁
6.	国内における気象観測機器の現状	99
6.1	組織的な気象業務の始まり	99
6.1.1	気象測器と気象業務	99
6.1.2	気象業務法と気象測器の検定制度	100
6.1.3	観測目的の違い	101
6.2	観測要素と気象測器	103
6.2.1	風の観測	103
6.2.2	温湿度の観測	109
6.2.3	雨量の観測	114
6.2.4	設置環境	117
6.3	超音波風向風速計	122
6.3.1	概 要	122
6.3.2	特徴と用途	122
6.3.3	測定原理	123
6.3.4	プローブ（測定部）の特性と種類	125
6.3.5	使用上の注意点	127
6.3.6	超音波風速計のまとめ	127
6.4	気象測器の出力信号	131
6.4.1	これまでの変遷	131
6.4.2	国内での利用例	131
7.	海外における気象観測とその将来展望について	133
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	133
7.1.1	概要	133
7.1.2	WMO の指針と ISO の規格	133
7.1.3	AWS 技術の進展の状況	136
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	140
7.2.1	各国における気象観測の実情	140
7.2.2	気象観測における問題点	141
7.2.3	自動気象観測の必要性	142
7.2.4	その他の問題点	143
7.2.5	まとめ	143
7.3	海外における自動気象観測装置の事例	145

目 次

第Ⅲ部 地上気象観測機器の現状と将来像

章	題 名	頁
	7.3.1 インドの自動気象の観測	145
	7.3.2 バングラデシュの自動気象観測	146
	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	147
8.	CWS を用いた気象観測システムの提案	149
8.1	今後の気象観測に求められる方向性	149
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	149
8.1.2	気象観測の自動化が重視される事情	150
8.1.3	社会構造的な背景	151
8.2	気象観測センサーとそのインターフェースの動向	151
8.2.1	気象観測センサー	151
8.2.2	センサーとデータロガー間のインターフェース	152
8.2.3	各種の有線インターフェースの信号規格	153
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	156
8.3	データロガー	158
8.3.1	背景と現状	159
8.3.2	信号サンプリングと観測時刻の同期	161
8.3.3	データロガーの将来像	163
8.4	データ伝送システム	165
8.4.1	IP 網の利用と伝送の形態	165
8.4.2	ネットワークの分類と特徴	166
8.5	観測場所における課題	171
8.5.1	電源の問題	171
8.5.2	その他の問題と今後の課題	172
8.6	予測シミュレーション	172
8.6.1	予測シミュレーションとは	172
8.6.2	予測シミュレーションとデータ同化について	173
8.6.3	数値モデルWRFにおけるデータ同化	173
8.6.4	今後の課題	174
9.	まとめ	175
	編集後記	178

第 I 部 CWS の特性

1. 概 要

1.1 経 緯

近年の気象測器は μ CPU や電子部品そして電子技術の発達により、大きく変貌している。我が国は、気象観測に使用する観測測器は、研究や私的な気象観測以外は、気象業務法¹⁾第 28 条に定める気象測器検定規則²⁾に合格した気象測器を使用することと規定しており、これらに合格した測器は、適正な保守を行うことで一定期間の性能が維持されることになっている。

この検定制度は一定の技術基準に準拠した観測機器を使用することが目的であり、合格すれば検定証書が交付される。詳しくは関連法規を参照されたい。気象測器の検定は、すべての観測業務に適用されるものではなく、研究目的や教育目的、私的な気象観測で観測データを公表しない気象観測に使用する測器は第 28 条の適用を気象業務法第 6 条で除外されている。

しかし、CWS (Compact Weather Sensor) のような複合型の気象測器は、現法の気象測器検定規則では規定されておらず、検定の対象外となっており客観的な証明を得る状況にはない。

現在、CWS の性能の情報は付属する製造メーカーの取扱説明書や仕様書であり、利用者は、それを根拠に使用しているのが実態である。中には、既存の気象測器との比較や、所有している風洞などの設備で CWS の性能を確認している場合もあるようであるが、それらの情報のすべてが開示されているとは言い難い。

CWS の性能が、利用者の観測目的を十分満足させるものであり、必要なデータが得られるならば、それぞれ、観測目的に応じて、観測測器の選択を検討し、気象観測測器として CWS を選択することは、設置や保守の容易さから、自然な流れであろう。

今回の CWS 評価観測の発端は、気象測器に関しての雑談の中で、「CWS の性能は大丈夫か？」という素朴な疑問が浮かび、「それなら風洞で性能を確認しようか。」ということが、今回のプロジェクト発足につながった。当初は、手持ちの 2 器種の CWS を風洞で評価することになったが、議論の過程で、実際に使用するのは自然風 (乱流) 場であり、野外での評価観測も試みる必要があると、また、このような機会は中々ないので、それぞれ各社ができるだけの CWS を集める努力をした結果、5 つの製造メーカー、5 器種について風洞と野外評価実験を行うことになった。

風洞実験は京都大学 防災研究所 風洞実験室の風洞を、そして、野外の評価観測を同研究所附属施設、潮岬風力実験所で実施することにした。

2011 年 5 月から 7 月上旬に風洞実験を、同年 7 月末より同年 9 月末まで、野外の評価実験、同年 10 月より得られたデータの解析を行ない、2012 年の気象学会、春季大会 (つくば)³⁾と、秋季大会 (札幌)⁴⁾で評価結果の一例を、それぞれ発表した。2012 年 1 月、気象学会大会発表だけでは諸々の制約で、すべてを開示出来ないため、一連の実験を冊子 (本報告書) で公開することになり、風洞実験および評価観測に参加したメンバが担当分野を執筆し報告書を作成することとなった。

1.2 参加組織とメンバ

一連の報告書作成は、プロジェクトと同じメンバであり、表 1-1 に参加組織とメンバを示す。

表 1-1 プロジェクト参加組織・担当者

組織名	役職	氏名	担当分野	備考
京都大学 防災研究所	准教授	林 泰一	プロジェクトリーダー	実験総括指揮 報告書監修
㈱ソニック	専務	伊藤 芳樹	設置・実験・解析	超音波風向風速計メー カ、解析、試材提供
	部長	松島 悟	設置・実験	
東洋電子工業㈱	社長	林 夕路	データロガー総括	データロガーメーカ
	課長	田村 直美	設置・実験	データ収集と通信技術、 試材提供
	主任	太田 行俊	設置・実験	
㈱プリード	課長	川島 賢一	試材提供	CWS の提供
㈱セネコム	社長	齋藤 和興	試材提供	CWS の提供
㈱小松製作所	営業担当	小松 亮介	設置・実験	気象機器メーカ
気象情報通信㈱ 事務局	会長	渡邊 好弘	技術顧問	データ解析・処理および 報告書のまとめ、一般気 象観測用測器提供
	社長	橋波 伸治	事務局長	
	所長代理	寺地 雄輔	設置・実験	
	主任	江原 正彦	解析処理	
	技術担当	吉田 大紀	設置・実験・解析	

すべての実験には、一部業務の都合で参加できなかったメンバもいるが、プロジェクトリーダー、データロガー関係者、事務局の一部は原則すべての工程に参加した。

表 1-1 のメンバの他に、風洞実験や潮岬風力実験所で試材の設置や機器の操作方法で、表 1-2 に示す技術職員の方々の支援を受けた。

表 1-2 実験を支援した技術職員

機関名	役職	氏名	実験項目	内容
防災研究所	技術職員	加茂 正人	風洞実験	風洞実験技術
潮岬風力実験所	技術職員	河内 啓	野外評価観測	観測機器設置・撤去
潮岬風力実験所	元技術職員	河内 伸治	同上	同上
白浜海象観測所	技術職員	久保 輝広	同上	同上

1.3 評価観測に使用した気象観測機器

風洞実験および評価観測に資した CWS を表 1-3 に示す。

表 1-3 CWS 一覧

No.	型名	メーカー名	提供会社
1	All-In-One CWS	未公表 (米国製)	借用品
2	MetPak II	Gill	借用品 株式会社 プリード
3	WS-600	Lufft	借用品 株式会社 セネコム
4	WXT520	Vaisala	東洋電子工業株式会社
5	150WX (試作品)	Airmar	東洋電子工業株式会社

※ CWS の並びは型名の ABC および数字順

各 CWS の測定要素を表 1-4 に示した。尚、詳細仕様は第 4 章、および、各 CWS の取扱説明書を参照されたい。尚、150WX のみリリース前の試作品を使用した。

表 1-4 CWS の観測要素一覧

型名	風向	風速	気圧	気温	湿度	雨量	方位	GPS	出力
All-In-One CWS	○	○	○	○	○		○		RS-485
MetPak II	○	○	○	○	○				RS-232C
WS-600	○	○	○	○	○	○	○		RS-485
WXT520	○	○	○	○	○	○			RS-232C、RS-485
150WX (試作品)	○	○	○	○	○		○	○	RS-485

※ ○印は装備、無印は無装備を示す。

風向風速・全器種とも超音波風向風速計

気温・・・自然通式と強制通風式の二種

雨量・・・雨滴を計測する方式と電波方式の二種

方位・・・マグネットコンパス装備

GPS・・・GPS : Global Positioning System (アメリカの全球測位システム)

出力・・・各 CWS は RS-232C、RS-422、RS-485 形式の出力を 1 種類または複数装備
器種により、テキスト形式とバイナリ形式とがある。

電源・・・5 VDC から 30 VDC の範囲、今回は 12 VDC で使用

表 1-3 の他、風洞実験の風洞風速の計測には、ピトー管、精密微差圧計 Model ISP-350 (柴田科学器械工業)、風洞室内の既設のフォルタン水銀気圧計および温湿度計を用いてピトー管の差圧から風速を算定することとした。詳細は、第 2 章を参照されたい。

この他、CWS と既存の気象測器との評価実験に用いた一般気象観測用測器を表 1-5 に示した。

本来、測定原理の異なる気象測器の結果を評価することは慎重に行うべきであるが、ここでは、一般気象観測に使用されている既存の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使用した。さらに超音波風向風速計も使用した。

表 1-5 一般気象観測用測器一覧

No.	測 器 名	型 名 (メーカー名)	仕 様
1	プロペラ型風向風速計	W855-Z1 (小松製作所)	検定証付 風向 0~360° センサー 8 bit ロータリエンコーダ 出力 オープンコレクタ 風速 0~60 m/s センサー 光パルス方式 出力 オープンコレクタ
2	超音波風向風速計	DAT-600:本体 TR-61A: 120°交差型プローブ (ソニック)	風向 0~540° 超音波式 (3成分対向方式) 出力 RS-232C 風速 0~60 m/s 超音波式 (3成分対向方式) 出力 RS-232C
3	強制通風式温湿度計	KET-2:温度計 HMP155:湿度計 TH-500:強制通風筒 (小松製作所)	検定証付 (強制通風筒を除く) 温度計 4線式白金抵抗測温体 0°C 100 Ω 湿度計 静電容量式 0~100 % 出力 0~1 VDC
4	転倒ます型雨量計	R1-502 (小松製作所)	検定証付 0.5 mm 計

1.4 実験・観測の概要

実験は、まず風洞による整流場の CWS 性能把握を 2011 年 4 月~7 月、次に自然風の場合、即ち、乱流場での評価観測を同年 7 月末より 8 月末迄 (実際には 9 月末まで実施)、その後はデータ処理を行ない、2012 年気象学会の春および秋の大会で成果の一部を公表することとした。

なお、試材調達の関係で野外実験前に風洞実験が出来なかった CWS は、野外の評価観測終了後に当該 CWS のみ風洞実験を行うこととした。

1.4.1 風洞実験

今回使用する風洞は京都大学 防災研究所のゲッチングン型風洞である。この風洞は送風機の回転数を制御して目的の風速を得る回流型の極めて一般的な風洞である。

風洞の能力は 1.0 m/s～60.0 m/s であるが、風洞使用時間の制約や CWS の設置環境を考慮して、自然風の出現頻度が高い 25 m/s 以下での風速特性と、CWS を回転しての角度特性、および CWS を傾けての傾斜特性を確認することにした。

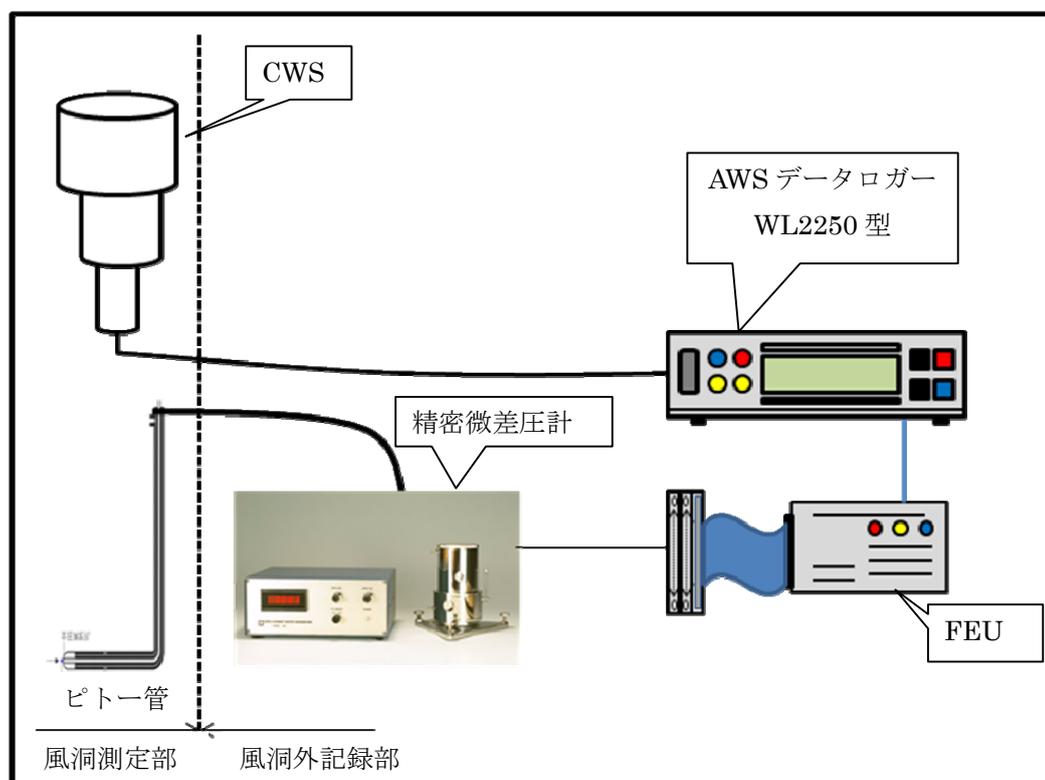


図 1-1 風洞実験の構成

風洞の風速測定は、一般的なピトー管と精密微差圧計を使用し、精密微差圧計の表示部の差圧を読み取ることにしたが、実験を重ねる過程で、精密微差圧計から差圧に相当する直流電圧出力が得られることが分かり、CWS の出力信号と共に、AWS (Automated Weather Station) データロガー WL2250 型 (第 5 章を参照) に収録する方式を採用することとした。この収録方式は、野外における評価観測時のデータ取得時を考慮したもので、野外においても基本的構成は変わらない。風洞実験時は、1 台毎の CWS の実験になるため、CWS を変えるたびに接続を変えて実験を行うことにした。

1.4.2 野外での評価観測

野外の評価観測は、図 1-2、1-3 に示す京都大学 防災研究所 潮岬風力実験所において実施した。潮岬風力実験所 (1966 年設立) は和歌山県東牟婁郡串本町潮岬の西部に位置し、建物の屋上に CWS の設置できるプラットホームをはじめ、電源・通信環境等、観測設備環境は整っている。

野外の評価観測は長期間行うことが望ましいが、当初、機器の借用期間等諸般の事情で 2011 年 8 月の 1 か月間を計画した (途中、試材提供社の好意により 1 か月延長し、9 月末迄実施)。



図 1-2 和歌山県 京都大学 防災研究所 潮岬風力実験所⁵⁾



図 1-3 野外評価観測場所とその周囲の環境

1.5 観測データの取得と伝送

気象観測で重要な要素の一つとして、正確な時間管理が挙げられる。複数の観測地点や同一観測地点での観測データの時間管理をどうするかが問題になったため、AWS データロガーの時刻校正を正しく行ない、CWS 5 器種のデータを同時収録する方式を採用した。AWS データロガーの時刻校正はネットワーク機器において標準的に利用されている通信プロトコル NTP (Network Time Protocol) を利用して適時校正を行なった。

5器種のCWSの出力信号はデジタル信号ではあるものの、出力信号の仕様が異なることやAWSデータロガーの標準仕様と一致しない部分があり、各CWSの出力信号の通信形式やフォーマットを考慮し、AWSデータロガーに実装するプログラム等を一部改修した後、図1-4に示す構成で、2台のAWSデータロガーで、一般気象観測測器1式と超音波風速計1台、そしてCWS5器種の出力データを同時収録した。AWSデータロガーを2台使用したのは、1台に装備しているI/Oポートが不足するための処置である。さらに収録したデータは参加者にリアルタイムで伝送し、適時データのチェックを行ない同時に通信手法の確認も行うことにした。

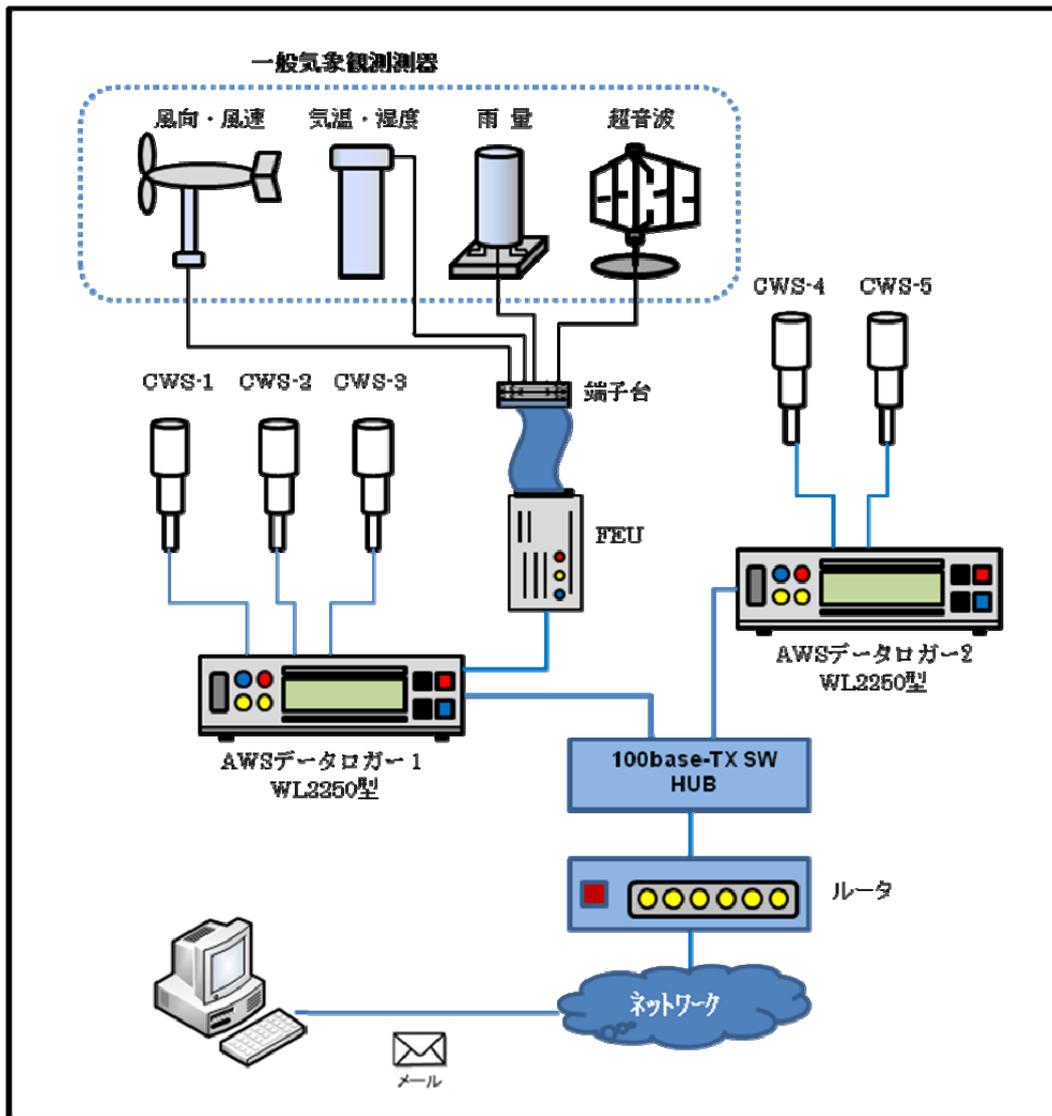


図 1-4 CWS および一般気象観測用測器の観測データ収集構成図

参考文献

- 1) 気象庁：気象業務法。
参照先: <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S27/S27HO165.html>
- 2) 気象庁：気象観測施設の届出・気象測器の検定
参照先: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/shinsei/kentei/index.html>
- 3) 吉田大紀、寺地雄輔、橋波伸治、渡邊好弘、林夕路、田村直美、太田行俊、小松 亮介、伊藤芳樹、松島悟、林泰一：一体型気象センサーの野外比較観測. 日本気象学会 2012 年度春季大会予稿集 P141.
- 4) 吉田大紀、寺地雄輔、橋波伸治、渡邊好弘、林夕路、田村直美、太田行俊、小松 亮介、伊藤芳樹、松島悟、林泰一：一体型気象センサー（CWS）の風向風速特性. 日本気象学会 2012 年度秋季大会予稿集.P104.
- 5) 国土地理院：電子国土ポータル, Retrieved from 標高が分かる Web 地図.
参照先 <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse2/index.html>.

2.評価方法

2.1 風洞実験

2.1.1 実験環境

風洞実験は、京都大学 防災研究所のゲッチンゲン型風洞で行なった。この風洞は写真 1（口絵参照）および図 2-1 に示したように、胴が正八角形断面の回流型で、測定部分は開放方式である。吹出口の断面は対辺間の距離が 1 m の正八角形で、測定部長 1.3 m である。風洞風速の制御範囲は 1.0 m/s から 60.0 m/s で、測定部の乱れ強さは 0.5 % 以下である。今回の実験は、整流場で CWS 出力と風洞風速の評価であり、風洞風速の測定は一般的なピトー管を使用した。

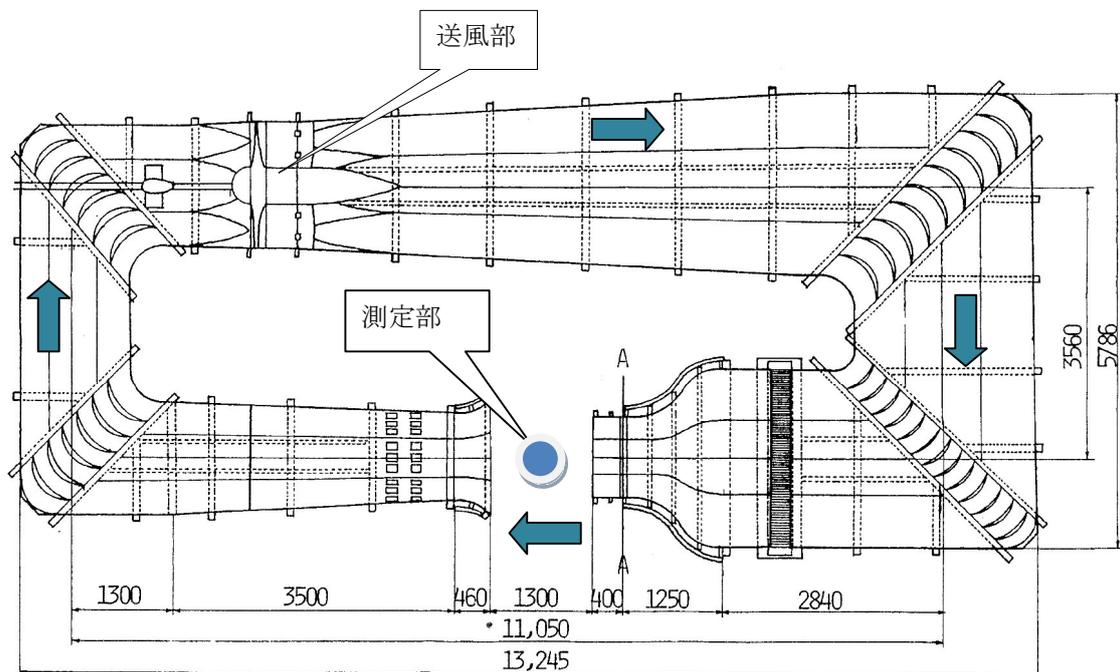


図 2-1 京都大学 防災研究所 風洞平面図（単位 mm）¹⁾

風洞実験は、測定部に CWS をポールに固定して設置し、送風機の回転数を想定風速に相当する風速になるように調整し、ピトー管出力を確認しつつ送風機の回転数の微調整を行って目的風速を設定することにした。その時のピトー管の動圧と静圧は、パイプで精密微差圧計に接続し、表示部に表示する差圧を読み取ると共に、精密微差圧計の電圧出力を CWS の出力と共に AWS データロガーに入力し、AWS データロガー本体の記憶部に収録し、記録用ノートパソコンに伝送した（図 1-1 参照）。

風洞内の気流の流れ、対気速度（風速）の算出は、ピトー管の総圧（全圧と同義語）と静圧の差からベルヌーイの定理により求めることが出来る。

総圧を P_t 、静圧孔の圧力・静圧を P_s 、空気密度を ρ 、対気速度を u とすれば、次式の関係にある。

総圧 P_t は

$$P_t = \frac{1}{2}\rho v^2 + P_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

となり、(1) 式から対気速度 v 得るには、

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = P_t - P_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式となる。

空気密度 ρ は風洞室内に設置されているフォルタン水銀気圧計（写真4口絵参照）と温湿計により、測定した気圧、気温、湿度から算出した。

風洞測定部の面積の関係で1台毎の測定になるが、図2-2のように、測定部に測器を取り付けるポールを立て、測器のセンサー部が風洞の中心に位置するようにポールの高さを調整して実施した。

尚、CWSの風向特性を確認する時は、ポールが回転した時の角度が視認できるように角度目盛を付ける方法と、図2-3に示すように回転台を使用する二つの方法で実施することにした。

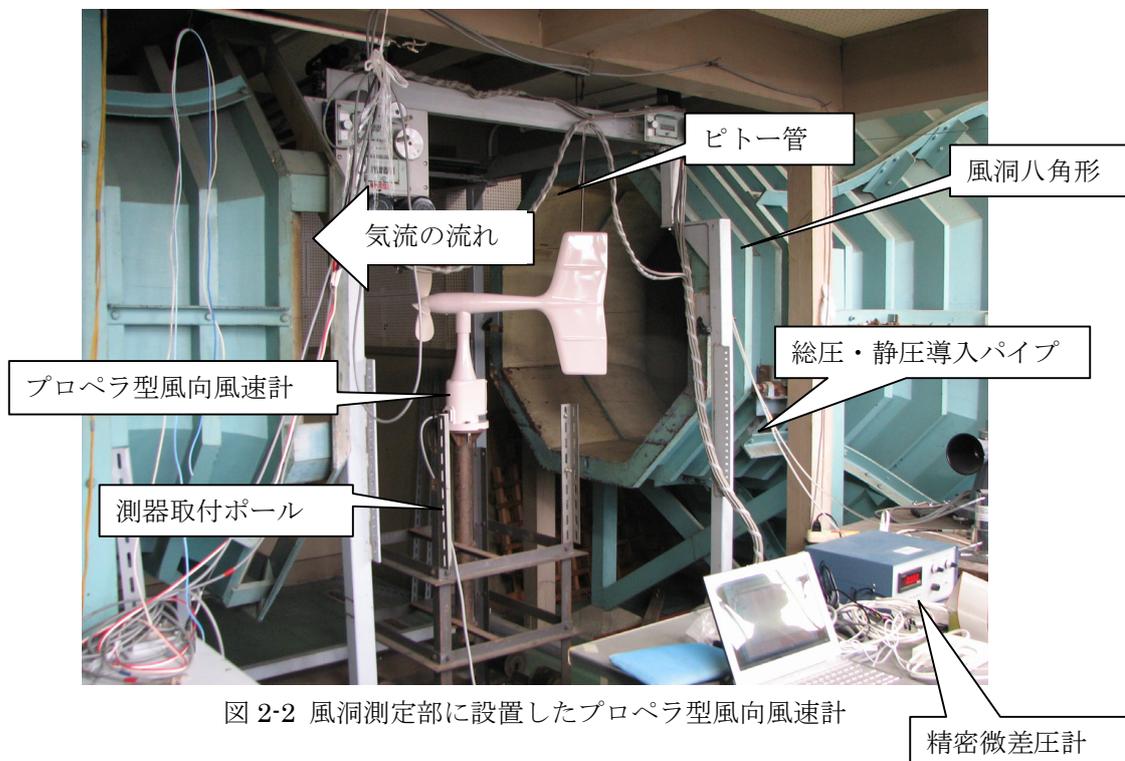


図 2-2 風洞測定部に設置したプロペラ型風向風速計

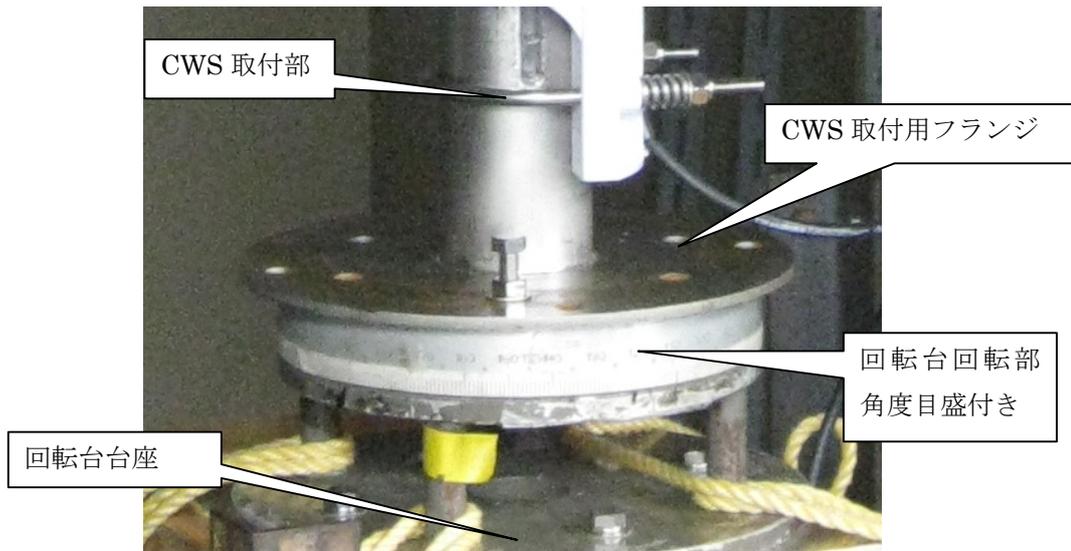


図 2-3 回転台

最初に、基準器となるプロペラ型風向風速計の風速特性を確認することにし、その後 CWS 一台毎に、風洞内の気流が乱れず、日常において出現率が高い風速 2 m/s から 20 m/s の範囲で、弱風→強風→弱風を 1 セットとし、各測器の出力とピトー管の出力の比較を行うとともに、角度特性を確認するため、CWS を回転して、必要なデータを取得した。

2.1.2 実施時期

第 1 回目の風洞実験は、2011 年 4 月 8 日 13 時より実施した。基準器のプロペラ型風向風速計と CWS の WXT520 および 150WX (リリース前の試作品) の 3 種類の測器について行なった。

その後、野外での評価観測が検討され、可能であれば国内で入手可能な CWS の打診を行ない、All-In-One CWS、MetPak II、WS-600 の 3 種類を追加し、CWS は 5 台となった。

しかし、CWS の調達の関係で、第 2 回の風洞実験には MetPak II が入手できない事が判明し、やむを得ず、野外評価観測の終了後に第 3 回の風洞実験を行なった。今回風洞実験を行なったプロペラ型風向風速計および CWS の風洞実験時期を表 2-1 に示した。

表 2-1 風洞実験実施時期一覧

No.	実施時期	器種	備考
第 1 回	2011 年 4 月 8 日	プロペラ型風向風速計、WXT520、150WX	13 時より実施
第 2 回	2011 年 7 月 6・7 日	All-In-One CWS、WS-600、WXT520、150WX	6 日午後および 7 日午前・午後実施
第 3 回	2011 年 9 月 29 日	MetPak II	午前実施

2.2 野外評価観測

乱流場の評価観測は、当初1か月間の予定であったが試材提供社の理解が得られ、2011年7月末から同年9月25日まで約2か月にわたって実施した。この評価観測期間に日本列島に台風第12号、台風第15号と二つの台風が上陸し、貴重なデータを得る事ができた。

2.2.1 潮岬風力実験所の立地環境

評価観測場所は、標高50mにある潮岬風力実験所で行なった。この施設は1966年に創設され、その名前のとおり風に関する各種実験や研究が行われ、数多くの成果発表や研究者が育っている。

図2-4、2-5に、風力実験所の配置図を示す。施設には研究室本館と観測室の2ヶ所の屋上に、それぞれ観測用プラットホームが設置されており、今回は、観測室屋上のプラットホームを使用し、5つのCWSを地上高11.8mで風向風速計センサーの高さを揃えて設置し、同時に一般気象観測用に使用しているプロペラ型風向風速計、強制通風式温湿度計、屋上に転倒ます型雨量計0.5mm計を基準器として設置した。

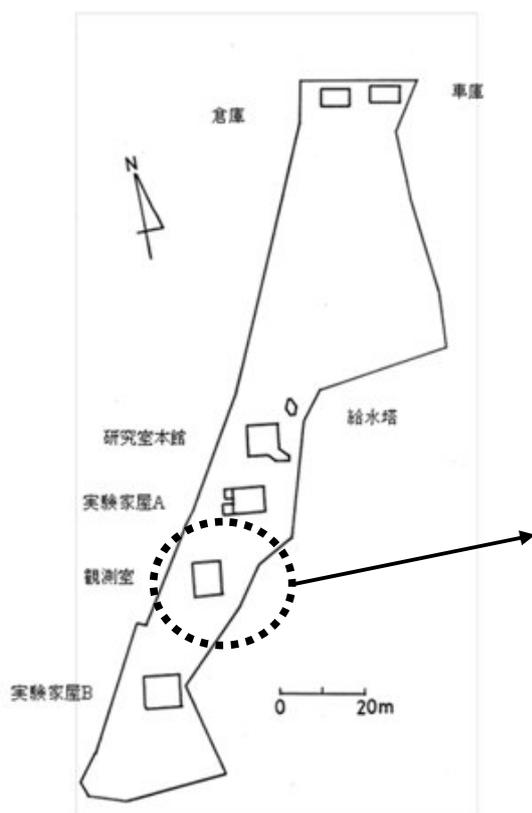


図 2-4 潮岬風力実験所構内 配置図



図 2-5 観測室の外観 屋上プラットホーム

図 2-6 に設置した CWS と一般気象観測用測器の配置を、そして図 2-7 に、プラットフォーム下の屋上に設置した転倒ます型雨量計をそれぞれ示した。

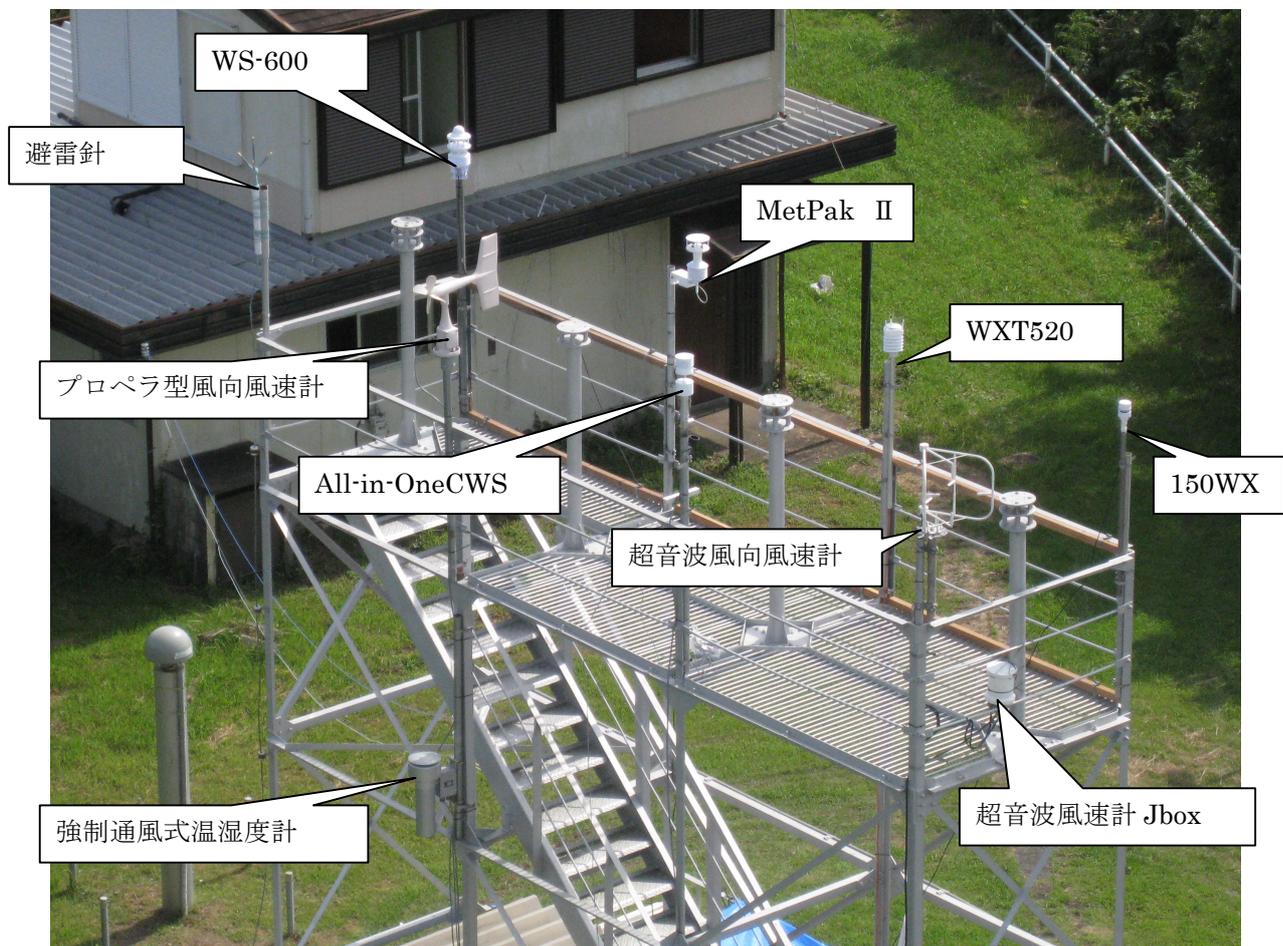


図 2-6 プラットホームに設置した観測機器

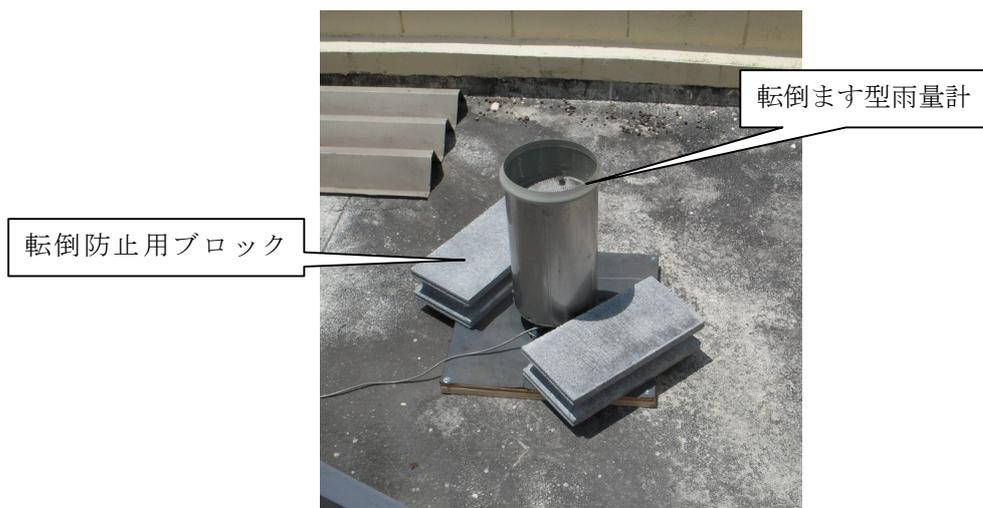


図 2-7 転倒ます型雨量計

プラットフォームに設置したプロペラ型風向風速計、強制通風式温湿度計、超音波風向風速計、CWS および屋上に設置した転倒ます型雨量計の各出力信号は図 1-4、図 2-9 に示す、2 台の AWS データロガーに入力し、それぞれ 1 秒間隔で収録した。



図 2-8 プラットホーム下に設置した野外収納ボックス

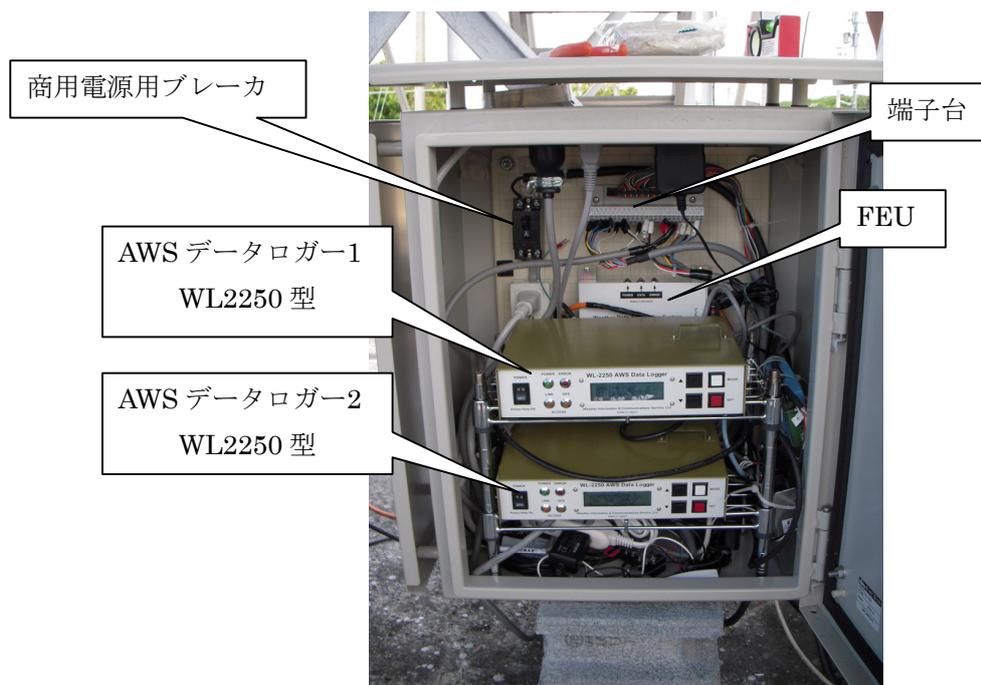


図 2-9 野外収納ボックス内部

収録したデータは、一定期間 AWS データロガー本体内のフラッシュメモリへ保存するとともに、所定のフォーマットに編集し、60 分単位のデータにまとめてファイル化し、1 時間に 1 回の間隔で参加者のメールアドレス宛てにリアルタイムで伝送した。このリアルタイムの伝送では、AWS データロガーのネットワーク機能を利用し、HUB・ルータを通じ、潮岬風力実験所内の京都大学のネットワークに接続することで実現した。

2.2.2 観測期間中の潮岬付近の天候

観測期間中の潮岬付近の天候についてまとめた。野外での観測期間は、2011年7月27日午後から9月27日午前の2か月間であった。この期間中の天候を確認するため、以下の資料を用いた。

(ア) 気象庁特別地域気象観測所 潮岬の気象月表 2011年7~9月²⁾

(イ) 日本付近の天気図 2011年7~9月^{3)~5)}

(ウ) 台風経路図 2011年台風第12号および第15号^{3)~5)}

次に、評価観測場所である京大防災研潮岬風力実験所と気象庁潮岬特別地域気象観測所（旧潮岬測候所）の位置関係を、図2-10に示す。潮岬特別地域気象観測所は、潮岬風力実験所の北東約600mに位置し、潮岬周辺を代表する気象観測地点である。



図2-10 潮岬風力実験所と潮岬特別地域気象観測所の位置関係⁶⁾

● 7月下旬の天候

野外観測を開始した7月下旬は、期間の前半に台風第6号が日本の南海上を南東に進み、その後24日には温帯低気圧となった。これに合わせて、上空には寒気が流れ込み大気の状態が不安定となり、27~30日にかけては、前線が停滞し新潟・福島で豪雨が発生した。

一方、潮岬周辺は、太平洋高気圧におおわれ晴れて気温の高い日が多かった。設置作業を行なった27日当日も、雲は多いながら晴れ間もある天気、設置作業は順調に進んだ。



図 2-11 設置当日、7月 27 日の天気 プラットホームより南南東方向を望む

● 8月の天候

上旬は、太平洋高気圧の勢力が弱まり、気温は低めであった。上空に寒気が流れ込んだ影響で、西日本から東日本にかけては大気の状態が不安定であった。

潮岬周辺でも、前半は雲におおわれ 1 日は未明から明け方にかけて、ややまとまった雨を観測した。中頃からは、太平洋高気圧におおわれ晴れて気温が高くなったが、5 日前後は、台風第 9 号の影響を受けて曇りや雨の日があった。

中旬になると、太平洋高気圧におおわれ晴れて気温が高く、最高気温が 30℃を超える真夏日が多くあった。12 日には、観測期間中で一番の最高気温 32.2℃ を観測している。

中旬になると、寒気を伴った気圧の谷が日本列島を通過し前線が南下したため、暑さは一段落した。

下旬は、本州付近に停滞した前線や湿った気流の影響で曇りや雨の日が多く、25 日は、明け方から午前中にかけてまとまった雨となり、日降水量 146 mm を観測した。後半は高気圧におおわれて天候も一旦回復したが、その後、台風第 12 号の影響で再び雨となった。

● 9月の天候

上旬は、台風第 12 号が日本の南海上を北上し、3 日に高知県に上陸後、ゆっくりと北上して 4 日には日本海へ出た。この台風の影響で、南からの暖かく湿った空気が入り紀伊半島を中心に西日本～関東で大雨となった。

潮岬でも、1 日から 5 日にかけての総降水量は 400 mm を超えた。また、3 日 7 時頃には、最大瞬間風速 32.1 m/s を観測している。その後は、再び太平洋高気圧におおわれ、晴れる日が多く気温も高めに経過した。

中旬になると、13 日に発生した台風第 15 号の動きが遅く、16 日から 19 日にかけて南大東島の西

海上に停滞する中、日本海からは前線が南下したため、16日、19日は潮岬でもまとまった雨が降った。その後、台風第15号は、北東に進み、20日夜遅くに速度を速め四国の南海上を北東へ進んだ。その後、21日には紀伊半島に最接近し静岡県に上陸した後、強い勢力を保ったまま関東甲信地方、東北地方を通り福島県沖に抜け、22日に千島近海で温帯低気圧となった。

この台風第15号は21日の朝、潮岬沖に最も接近し、7時10分頃に、最大瞬間風速31.6 m/sを観測した。台風が去った後は、移動性高気圧におおわれ秋晴れの日が多かった。

参考文献

- 1) 河井宏允：高層建築物に作用する風圧力に関する研究，京都大学大学院工学研究科学位論文，1982，pp.377.
- 2) 気象庁：気象統計情報>過去の気象データ検索。
参照先：気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 3) 日本気象学会：2011年7月の日本の天候，天気，Vol.58.9.
- 4) 日本気象学会：2011年8月の日本の天候，天気，Vol.58.10.
- 5) 日本気象学会：2011年9月の日本の天候，天気，Vol.58.11.
- 6) 国土地理院：電子国土ポータル。
参照先：標高が分かるWeb地図：<http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse2/index.html>

3. 評価実験および観測結果

3.1 風洞実験結果

5器種のCWSについて、表2-1で示した日程で風洞実験を行なった。それぞれの実施日によって、実験手順は若干異なるが、各CWSにおいて(1)風向特性、(2)風速特性、(3)傾斜時の特性の3種類の実験を行なった。それぞれの実験内容を以下に示す。

(1) 風向特性

風向特性の実験は、風洞測定部に図3-1-aに示すように、回転台にCWSを取り付けて、回転台の角度を変え(図3-1-aの矢印)、風洞の風速を変えて実施した。この時の風洞の風速は、図3-1-bに示す送風機の回転数を設定する操作盤のダイヤルで設定した。

風向の設定は、CWSの管体に印された真北を風洞の気流に正対するようにセットした場合を設定風向 0° とし、CWSを反時計回りに 30° 回転させた場合を設定風向 30° と称した。また、設定風速とは、送風機の回転数を目的風速近傍の風速になるように調整した値を設定風速と呼ぶこととした。



図 3-1-a 風向特性実験の様子



図 3-1-b 送風機操作盤

風向特性の計測は、設定風速を 2 m/s 、 5 m/s 、 10 m/s の3種類とし、図3-2に示すような設定風向ととした。まず、設定風速 2 m/s のみ、設定風向 $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を 30° 毎に12点を計測して特性の概要を把握しつつ、3種類の設定風速に対して、設定風向 0° を起点として $\pm 45^\circ$ の範囲は 5° 毎に19点の計測。同様に $\pm 90^\circ$ 範囲から $\pm 45^\circ$ を除いた範囲は 15° 毎に8点の計測することを基本とした。

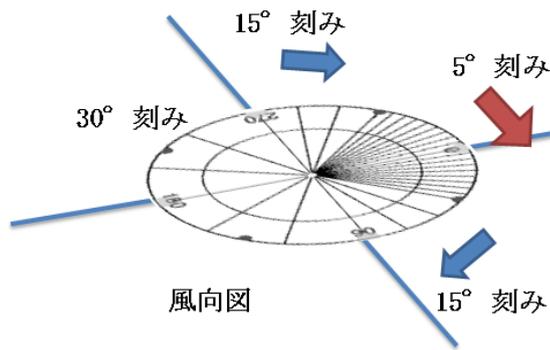


図 3-2 設定風向の詳細

(2) 風速特性

風速特性の実験は、実施日によって計測した風速値が異なる。WXT520、150WX は、設定風速を 5 m/s から 25 m/s までに対して、5 m/s 毎に風速を変えながらデータの取得を行なった。W855-Z1、All-In-One CWS、Met Pak II、WS-600 は、設定風向 2 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s について計測を行なった。

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する特性

CWS に対して仰角、伏角を持ち、相対的に吹き上げ、吹き降ろす場合の風に対する特性を確認するため、CWS を固定した架台を傾斜させ、データの取得を行なった。傾斜角 α は $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ を目安とした。図 3-3 は WXT520 の $\alpha = -10^\circ$ の計測を示した。



図 3-3 CWS を傾けた状態

(1)、(2)、(3) いずれの実験においても、それぞれの設定風速および設定風向について、1 秒間隔で約 1 分間計測を行ない、ベクトル平均し風向 θ 、風速 U を算出した。また風速の比較対象として、ピトー管の値より基準風速 U_{ref} を算出した。

以下では、CWS 毎に、(1) 風向特性、(2) 風速特性、(3) 傾斜時の特性の 3 種類の結果を示す。なお、CWS の並びは、型名のアルファベットおよび数字の順とした。

3.1.1 プロペラ型風向風速計 W855-Z1 の風速特性

CWS の実験結果を示す前に、基準器として用いたプロペラ型風向風速計 W855-Z1 の実験の様子を図 3-4 に示す。計測は、2011 年 4 月 8 日、第 1 回目の風洞実験で行なった。風洞の設定風速を 5 m/s 刻みで、5 m/s から 25 m/s まで増速させた後、25 m/s から 5 m/s まで減速させて行ない、それぞれの

設定風速において1分間程度計測を行ない、風速に対する特性を調査した。

なお、本実験では準備の都合からプロペラ面に正対する気流の流れのみ計測を行ない、風向特性および傾斜時の特性の調査は行っていないが、プロペラ型風向風速計において、一般に角度特性があることは知られている（図 6-4b 参照）。

図 3-5 に実験結果を示す。横軸はピトー管出力より算出した基準風速 U_{ref} を、縦軸は W855-Z1 の平均風速 U を示す。各点の上下にある横棒は W855-Z1 の風速変動の標準偏差 σ_U を示す。今回の計測では、標準偏差 σ_U は 0.02 m/s 程度で非常に小さい値であった。表 3-1 に、 U と U_{ref} についての統計計算の結果を記載した。計算に用いたデータ数 N は 9 点であるが、 U と U_{ref} の相関係数 R はほぼ 1.0 ときわめてよくあっている。 U と U_{ref} の相関関係を示す、線形回帰直線をオフセットがないと仮定した場合（青色：回帰直線 1）とオフセットを考慮した場合（水色：回帰直線 2）の 2 通りについて、最小二乗法で算出した。また、グラフには、それぞれの色で線形回帰直線を記載してある。いずれの場合も相関係数 R は約 1.0 であり W855-Z1 の U は、 U_{ref} と非常に良く一致していると言える。

W855-Z1 の機器仕様（詳細は表 6-3 に記載した）にて風速精度を確認すると、風速 6 m/s 以下で ± 0.3 m/s 以内、風速 6 m/s 以上で $\pm 5\%$ 以内と記述されており、この仕様を満たしている。

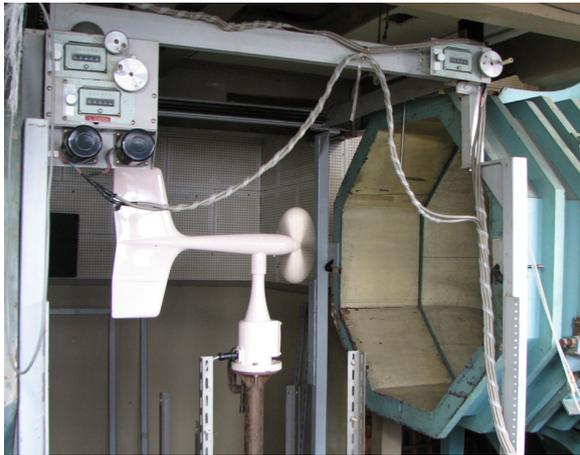


図 3-4 W855-Z1 の実験

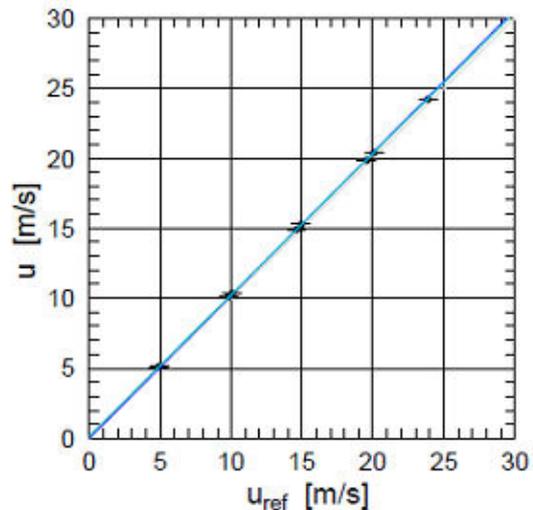


図 3-5 W855-Z1 の風速特性

表 3-1 W855-Z1 の風速特性

N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
9	1.00	$y = 1.02x$	$y = 1.01x + 0.19$

3.1.2 All-In-One CWS

(1) 風向特性

図 3-6 に All-In-One CWS の風向特性の結果を示す。図の左に CWS の平均風速 U について、図の右に平均風向 θ について、それぞれ測定結果を整理した。図 3-6 左に基準風速に対する CWS の平均風速の比 U/U_{ref} を示す。CWS を回転し設定した設定風向 θ_{ref} を図中では方位角で表し、平均風速の比 U/U_{ref} を動径の大きさを示している。

例えば、半径 1.0 の同心円状に点があるとき、風速 U は基準風速 U_{ref} とは一致しており、点が同心円状の内側になると CWS の風速が小さく ($U < U_{ref}$) になっていることを、外側になると風速が大きくなる ($U > U_{ref}$) になっていることを意味している。

なお、各点の記号と色は風洞の設定風速を示しており、凡例の通り、丸・水色が設定風速 2 m/s、ひし形・青が 5 m/s、三角・赤が 10 m/s の場合である。円周上の 4 か所 (45、135、225、315°) の黒丸は、CWS の風速計測部の支持柱のある位置を示し、グレーの丸は超音波振動子の設置された位置を示す。

実験結果を以下に示す。どの設定風速の場合にも共通する傾向として、0° を中心に ±20° 付近での U/U_{ref} は大きな値を示し、90°、270° 付近での U/U_{ref} は小さな値を示した。平均風速の比 U/U_{ref} は、2 m/s の弱風では ±10 % 以内で変化したが、設定風速が 5 m/s、10 m/s と風速が大きくなるにつれて、 U/U_{ref} のばらつきが収まる傾向を示した。また、設定風向 0° を中心として、右回りの 0° ~ 90° 方向と左回りの 0° ~ 270° との方向は、 U/U_{ref} の値が必ずしも左右対称に分布せず、0° ~ 90° 方向のばらつき度合いが大きい結果となった。さらに、設定風向 90° から 180° にかけては、平均風速の比 U/U_{ref} は、1 に近い値を示したのに対し、180° から 270° にかけては小さい値となった。

図 3-6 (右) は CWS の計測した平均風向 θ と CWS の真北の位置を風洞の吹出口の方向に向けた場合を 0° とし、その位置からの平均風向 θ と設定風向 θ_{ref} との差を示したものである。但し、All-In-One CWS には、マグネットコンパスが内蔵されているため計測した風向 θ は磁北を 0 とする絶対風向で出力されるが、図を整理する都合上、実験開始値を図の真上にとするため、 θ_{ref} の代わりに $\theta_0 = 270^\circ$ を中心としてプロットし、図の縦軸は他の図の $\theta - \theta_{ref}$ と区別するため $\theta - \theta_0$ と表記した。図からわかるように設定風速 2 m/s、設定風向 330° から 345° について、+10° と差が大きくなっているが、その他については概ね ±5° 程度に収まり、表 4-2 の機器仕様の風向精度の値と同等の結果となった。

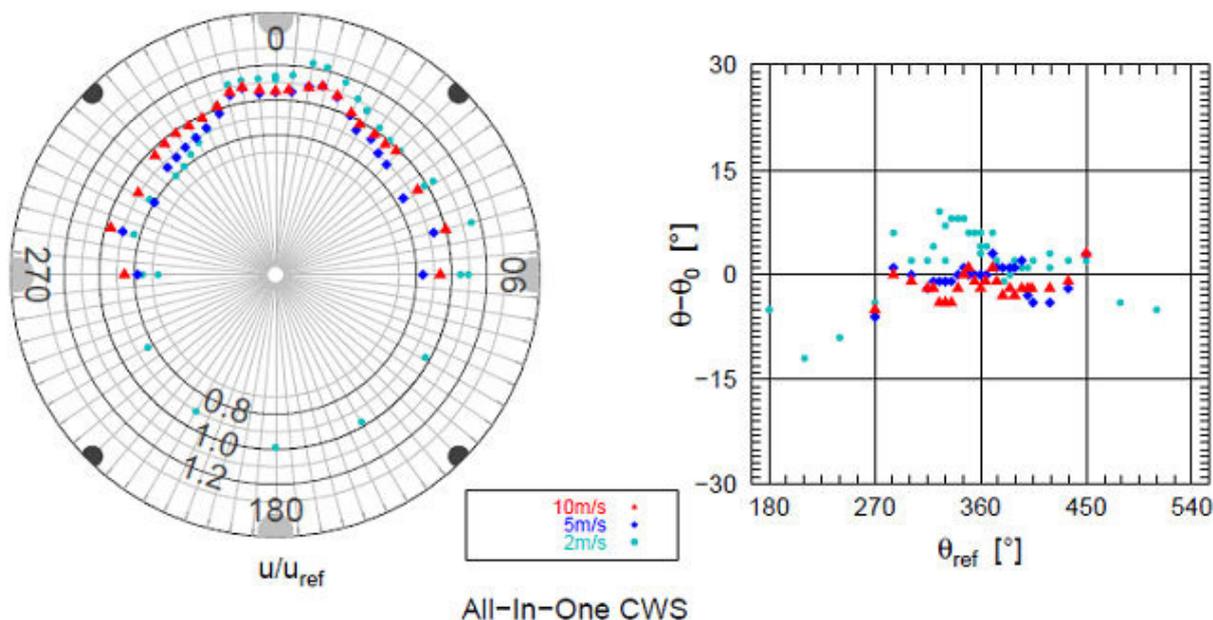


図 3-6 All-In-One CWS の風向特性実験結果。設定風向 θ_{ref} 別に算出した風速比 U/U_{ref} (左)、および風向のずれ $\theta - \theta_0$ (右)

(2) 風速特性

前項の風向特性の調査において風向 2 m/s、5 m/s、10 m/s の特性を調査しているが、さらに強風域での特性調査を行うため、設定風速 15 m/s および 20 m/s の計測を追加した。なお風速特性の実験では、All-In-One CWS の真北となる向きを風洞の吹出口に向け、設定風向 θ_{ref} は 0° として実験した。

ここで、計測結果を示す前に時系列変化を図 3-7 に示す。設定風速を徐々に上げていったところ、風速が 18.0 m/s を超えたところで突然、CWS から出力される風向・風速の値が、共に異常値を示しているのが図から分かる。設定風速を徐々に減速して 18.0 m/s を下回ったところで、CWS の出力値は再び正しい値に回復した。異常となった時間帯については、風向が逆転し、風速が 2 倍となっている。原因は不明であるが、今回実験で使用した All-In-One CWS 個体固有に起因する問題で発生したものと思われ、野外実験においても風速が強い場合は注意が必要であることが分かった。

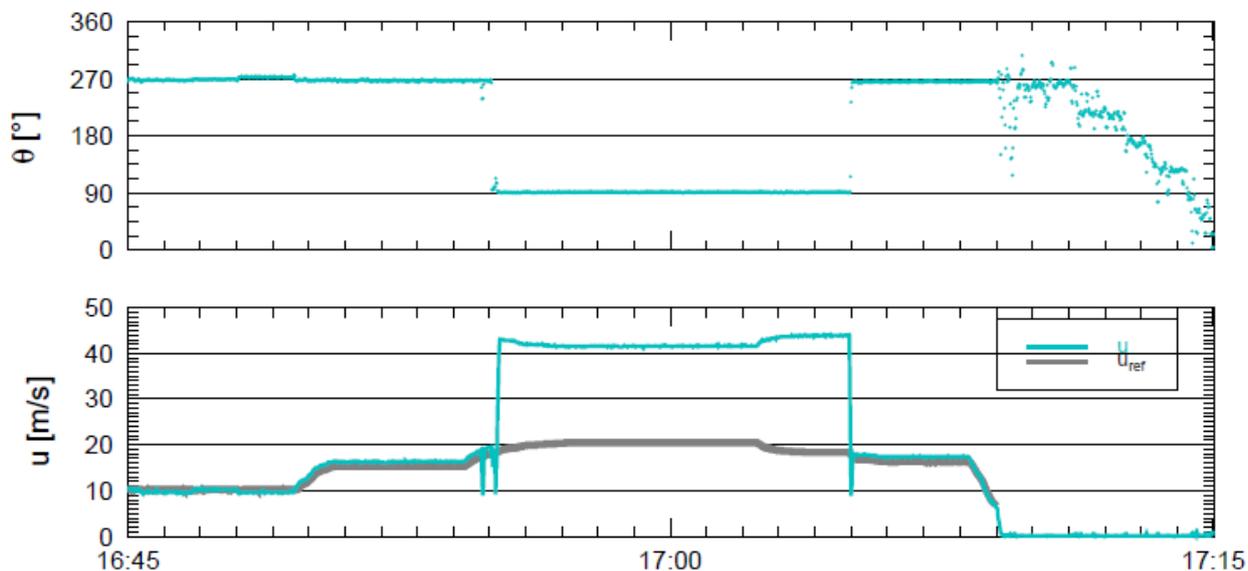


図 3-7 All-In-One CWS の設定風速 15 m/s、20 m/s で計測した際の風向（上）、風速（下・青）および風洞の基準風速（下・灰色）の時系列変化。

風速特性実験の設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ 、設定風速 2 m/s から 20 m/s までの計測結果を図 3-8 および表 3-2 に示す。風速は 2 m/s、5 m/s、10 m/s、および 15 m/s、20 m/s で実験したが、明らかに異常となった 20 m/s の結果は除いた。このため、2 m/s から 15 m/s までの計測個数 N で 6 点について、プロペラ型風速計と同様、 \mathbf{U} と \mathbf{U}_{ref} の相関を調べ、線形回帰直線の算出を行なった。

相関係数 \mathbf{R} はほぼ 1.0、回帰直線の係数は約 1.06 で、設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ の場合、2 m/s～20 m/s の計測範囲で実際の風速値より約 6 % 値が大きく計測される結果となった。

表 4-2 の機器仕様の風速精度の値をみると $\pm 5 \text{ m/s}$ または $\pm 5\%$ と書かれており、仕様と比較すると 1 % ほど大きな値ではあるが、ほぼ同等の性能が確認された。

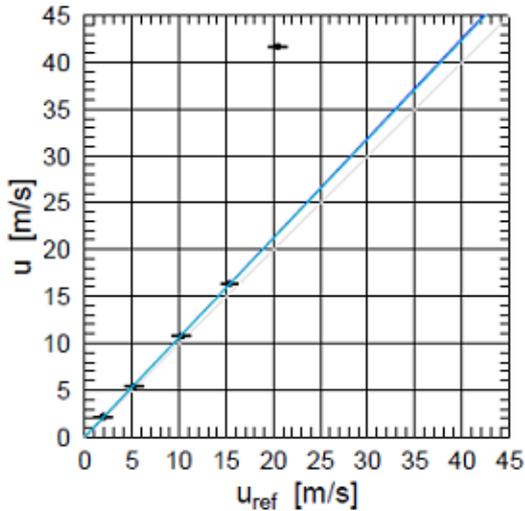


図 3-8 All-In-One CWS の風速特性。

表 3-2 All-In-One CWS の風速特性

N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
6	1.00	$y = 1.06 x$	$y = 1.06 x + 0.09$

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する応答

CWS を設置した架台を傾斜させて、上昇風および下降風に相当する環境を設定し、データの取得を行なった。傾斜角 α は、風の流れてくる側に傾斜した場合を $\alpha > 0$ 、逆側に傾斜した場合を $\alpha < 0$ として表現するものとした。

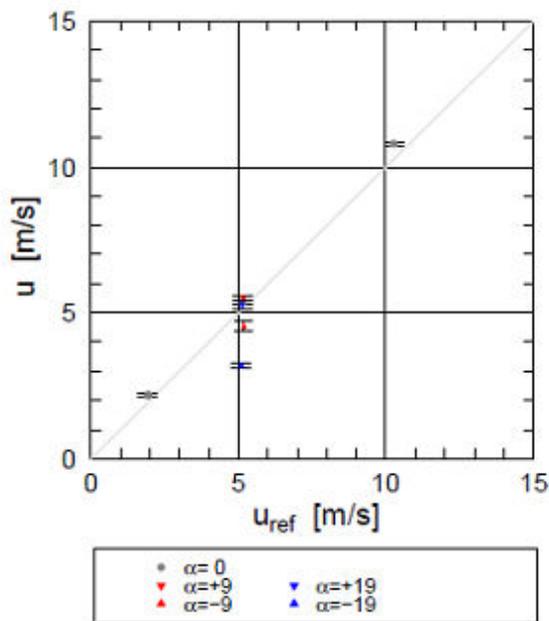


図 3-9 All-In-One CWS 傾斜時の風速比較図

表 3-3 All-In-One CWS 傾斜時の風速比較結果

α [°]	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	5.3	5.1	1.03
+9	5.5	5.2	1.07
0	5.4	5.1	1.04
-9	4.5	5.2	0.87
-19	3.2	5.1	0.63

風洞の風の流れは水平であるので、 $\alpha > 0$ の場合は、センサーに対し吹き降ろす風となり、その角度は傾斜角 α と一致する。 $\alpha < 0$ の場合は、センサーに対して吹き上げる風となる。

実験では、設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ 、設定風速 5 m/s について、 $\alpha = \pm 9^\circ$ 、 $\pm 19^\circ$ で計測を行なった。

結果を図 3-9 および表 3-3 に示す。なお、図 3-9 の各点の上下に記載した幅は標準偏差の値を示す。図 3-8 と比較して標準偏差が大きくなっており、計測値のばらつきが大きいことがわかる。

理論的には、傾斜角 α で流れる風速 U の風の水平成分は $U \cdot \cos \alpha$ である。

したがって、 $\cos 9^\circ \approx 0.99$ 、 $\cos 19^\circ \approx 0.95$ であり、傾斜角 α が 19° に傾くと約 5% 値が小さくなることが予想される。表 3-3 において、 0° では、 U/U_{ref} の値が 1.0 付近、 $+19^\circ$ および -19° 傾けた場合の U/U_{ref} の値が 0.95 付近になることが理論的であるといえるが、実際の結果ではプラス側とマイナス側で U/U_{ref} の値が対称とはならなかった。

この理由を考察するため、 $\alpha > 0$ の場合と $\alpha < 0$ の場合を分けて考える。

$\alpha > 0$ の場合は、風速 U の値は、 α が 0° 、 $+9^\circ$ 、 $+19^\circ$ でそれぞれ、5.4、5.5、5.3 m/s を示し、風速値は、傾斜角に対しそれほど影響を受けていないことがわかる。一方、 $\alpha < 0$ の場合は、 α が 0° 、 -9° 、 -19° でそれぞれ、5.4、4.5、3.2 m/s を示し、極端に値が小さくなっている。この結果から $\alpha > 0$ の場合は、傾斜角への影響が小さいと言える。

他方 $\alpha < 0$ の場合は、 U/U_{ref} の値が理論値より大きくずれて影響が出ていることがわかった。All-In-One CWS の風速計測部は、超音波振動子が上底面に設置されており、外縁部の細い支持柱のほかには突起物等がない上下対称の形状であるが、吹き上げの風と吹き降ろしの風で結果が異なるようである。CWS の構造との関連が予想されるものの、その原因は把握していない。

3.1.3 MetPak II

(1) 風向特性

図 3-10 に図 3-6 と同様に MetPak II の風向特性実験結果を示した。図 3-10 の左には風速比 U/U_{ref} を示し、同図右に風向の比較をそれぞれ示した。図の右について、縦軸は設定風向との差 $\theta - \theta_{ref}$ を示す。その結果、設定風向による違いは見られず、全体を通してやや小さい値を示した。

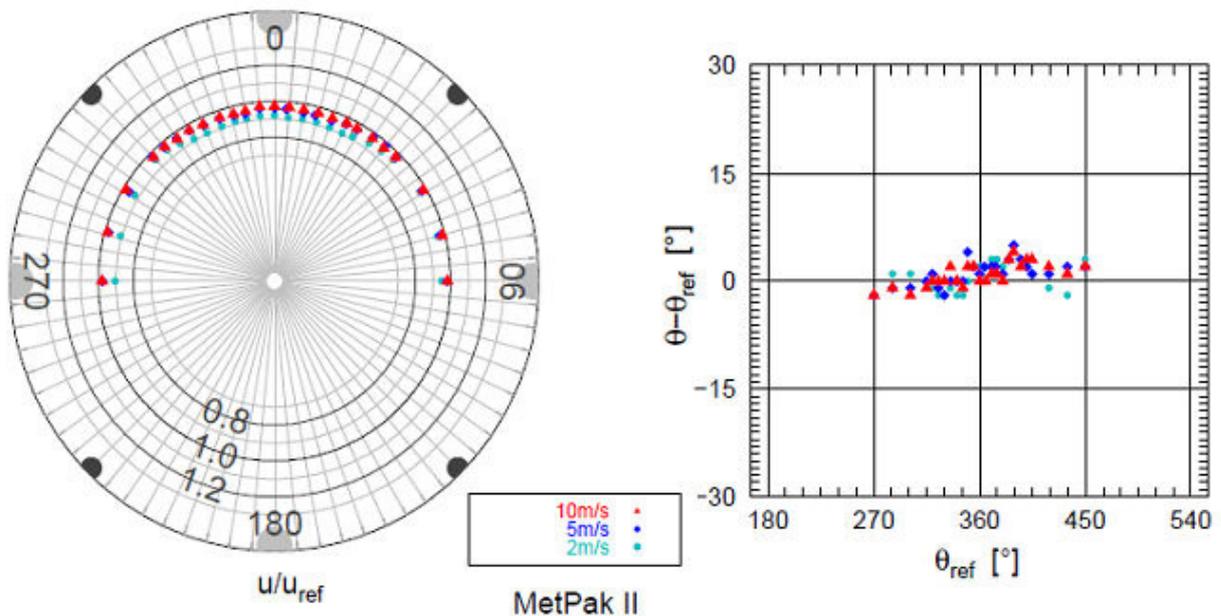


図 3-10 MetPak II の風向特性

値のばらつきについては、設定風速 2 m/s で 10 % 程度、その他の風速では 5 % 程度の差である。表 4-3 の機器仕様の風向精度では、12 m/s にて $\pm 2\%$ と記述されている。設定風速 10 m/s での実験結果を見ると、仕様の精度が確認できた。

風向差 $\theta - \theta_{\text{ref}}$ についてみると、設定風向による傾向が表れることはなく、支持柱の影響は見かけ上みられないことがわかる。弱風から強風まで設定風向との差 $\theta - \theta_{\text{ref}}$ は $\pm 5^\circ$ 程度の範囲内に安定して収まっているといえる。

(2) 風速特性

前項の風向特性で行なった 2 m/s、5 m/s、10 m/s に加えて、設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ にて、15 m/s および 20 m/s の計測を行なった。図 3-11 に風速 U と基準風速 U_{ref} の比較、表 3-4 に相関係数 R 、線形回帰直線の算出結果を示す。形式はそれぞれ図 3-5、表 3-1 と同様である。

計測個数 N は 5 点であり、相関係数 R はほぼ 1.0、回帰直線の係数は 0.98 で、実際の風速値より約 2 % 値が小さく計測される結果となった。表 4-3 の機器仕様の風速精度の値をみると 12 m/s にて $\pm 2\%$ と記述されているので、仕様と同等の性能が確認できたといえる。

表 3-4 MetPak II の風速特性

N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
5	1.00	$y = 0.98x$	$y = 0.99x - 0.15$

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する応答

θ_{ref} を 0° に固定し架台を傾斜させ、吹き上げ、吹き降ろしの風となった場合の影響を計測した。傾斜角 $\alpha = \pm 9^\circ$ 、 $\pm 19^\circ$ について、設定風速を 5 m/s および 10 m/s に変化させ 8 例を計測した。計測結果を図 3-12 および表 3-5 にまとめた。

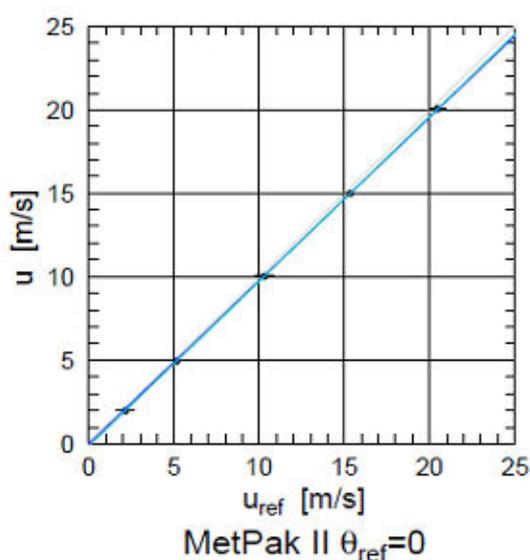


図 3-11 MetPak II の風速特性結果

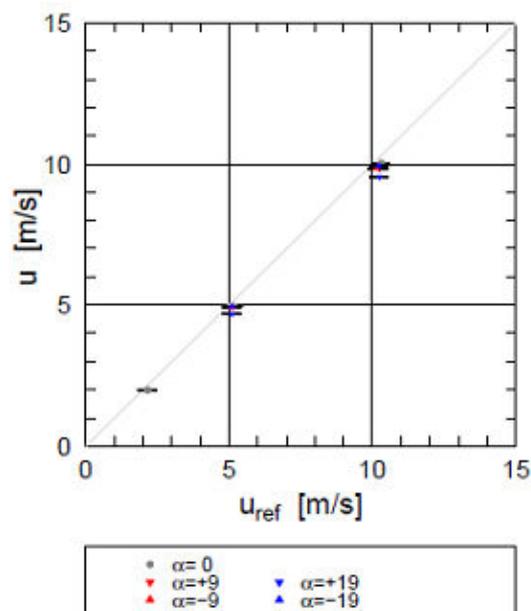


図 3-12 MetPak II 傾斜時の風速比較図

設定風速が 5 m/s および 10 m/s いずれの場合も $\alpha > 0$ の場合は、傾斜が大きくなるとともに、 U/U_{ref} の値が減少し $U \cdot \cos \alpha$ に近い値を示したが、 $\alpha < 0$ の場合は、 U/U_{ref} の値に変化はみられず、吹き上げ、吹き降ろしの場合の違いは、CWS 筐体の構造上の特性から生じていると思われる。

表 3-5 MetPak II 傾斜時の風速比較結果

α [°]	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	4.7	5.1	0.92
+9	4.9	5.1	0.96
0	5.0	5.2	0.96
-9	5.0	5.1	0.97
-19	5.0	5.1	0.97

α [°]	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	9.6	10.2	0.93
+9	9.8	10.2	0.96
0	10.0	10.3	0.97
-9	9.9	10.1	0.97
-19	9.9	10.2	0.97

3.1.4 WS-600

(1) 風向特性

図 3-13 に、WS-600 の実験結果を示す。実験方法はそれぞれ前節と同様である。但し、設定風速 2 m/s についての実験では、 30° 刻みで 0° から 360° までの計測において、設定不備により瞬間風速を出力していなかったため、図には含まれていない。以下に実験結果を示す。

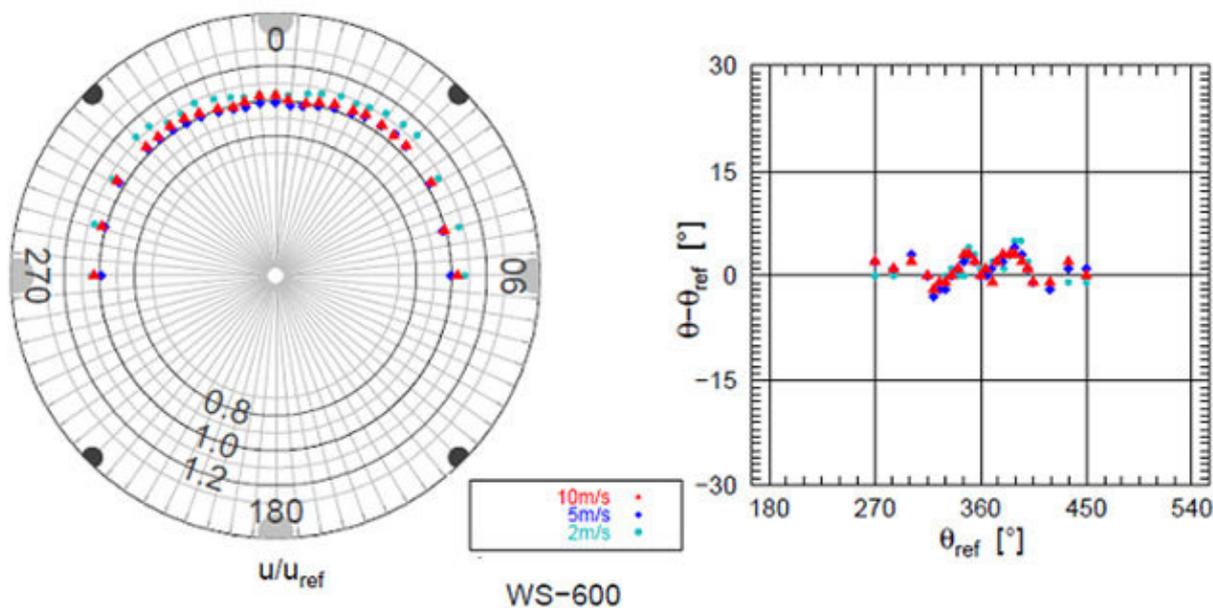


図 3-13 WS-600 の風向特性。左：風速比 U/U_{ref} 、右：風向差 $\theta - \theta_{ref}$

風速比 U/U_{ref} は、設定風速 2 m/s の弱風時には全体に大きな値を示しているが、設定風速 5 m/s および 10 m/s では、風速比 U/U_{ref} は 1 に近づき、角度によっては 1 以下になる場合もあった。風向差 $\theta - \theta_{ref}$ については、全体を通して $\pm 5^\circ$ 程度に収まっている。

表 4-4 の機器仕様の風向精度を見ると、 $\pm 3\%$ であることから、風速 2 m/s の弱風では $\pm 3\%$ を超える場合もあるが、 5 m/s および 10 m/s では、性能通りの結果と言える。

さらに結果を詳細にみると、風速比 U/U_{ref} については、設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ で U/U_{ref} の値が ほぼ 1.0 であるのに対し、 $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$ および 315° の図中の黒丸（支持柱）の周辺では設定風速 2 m/s で U/U_{ref} の値が 1.1 以上と大きくなっており、 0° を中心に対称なパターンが見られる。風向差についても、 45° 付近で $\theta - \theta_{\text{ref}} \sim +5^\circ$ 、 315° 付近で $\theta - \theta_{\text{ref}} \sim -5^\circ$ と対称に振れており、風速比が大きくなるのに対応しており、超音波風向風速センサー周辺の構造上の特性から生じていると予想できる。

(2) 風速特性

前項の風向特性で行なった 2 m/s 、 5 m/s 、 10 m/s に加えて、設定風速 15 m/s および 20 m/s について計測を行なった。さらに、前項の風向特性の調査中に確認した $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$ で風速値が大きくなる現象に対する風速の影響を確認するため、 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ に加え、 $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$ でも計測を行ない、それらをまとめたのが図 3-14 である。左に設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ の結果、右に $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$ の結果を示す。設定風速 2 m/s から 20 m/s までのデータを用いた線形回帰直線の算出結果を表 3-6 に示す。計測個数 N は 5 点であり、相関係数 R はほぼ 1.0 、回帰直線の係数は $1.04\sim 1.05$ で、実際の風速値より約 $4\sim 5\%$ 程度、風速値が大きく計測される結果となったが、設定風向 $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ と $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$ との違いは、顕著になることはなかった。表 4-4 の機器仕様の風速精度の値をみると、風速 $0\sim 35\text{ m/s}$ で、 $\pm 0.3\text{ m/s}$ または $\pm 3\%$ となっている。仕様と比較すると、全体的に $1\sim 2\%$ 大きな値となる結果であったが、仕様で規定している範囲である。

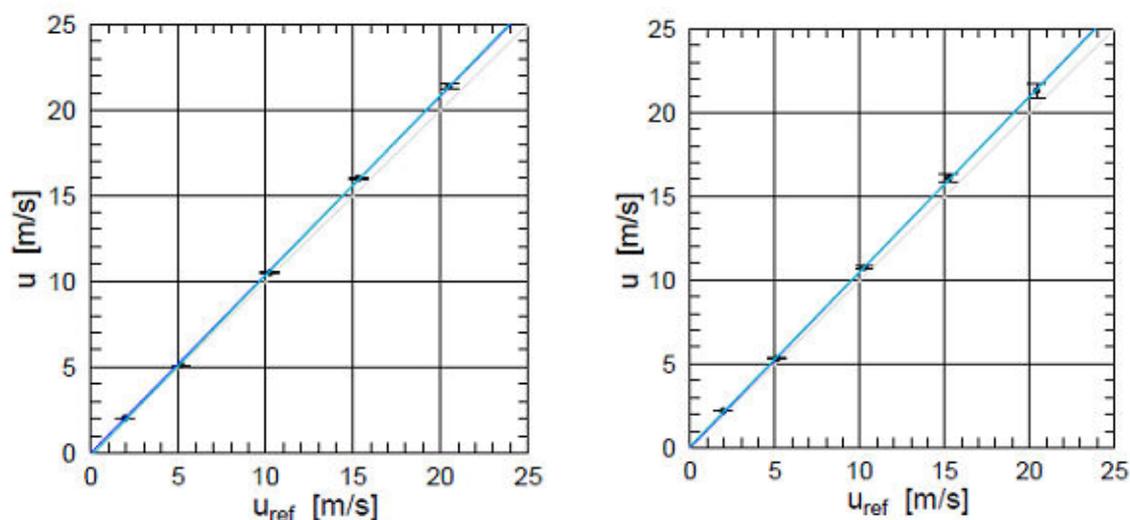


図 3-14 WS-600 の風速特性。左: $\theta_{\text{ref}} = 0^\circ$ 右: $\theta_{\text{ref}} = 45^\circ$

表 3-6 WS-600 の風速特性

θ_{ref}	N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
0°	5	1.00	$y = 1.04x$	$y = 1.05x - 0.17$
45°	5	1.00	$y = 1.05x$	$y = 1.04x + 0.12$

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する応答

設定風向 $\theta_{\text{ref}}=0^\circ$ 、設定風速 5 m/s について、傾斜角 $\alpha = \pm 9^\circ$ 、 $\pm 19^\circ$ の 4 例で吹き上げ・吹き降ろしの計測を行なった。結果を図 3-15 および表 3-7 に示す。 U/U_{ref} の値は、傾斜角 α が 0° を中心に対称にはならなかった。

$\alpha > 0$ の場合は、傾斜が大きくなるとともに、 U/U_{ref} の値が減少する傾向は示さなかった。一方、 $\alpha < 0$ の場合は、 $U \cdot \cos \alpha$ に近い値で減少しているのがわかる。やはり、CWS の構造上の特性から生じていると思われる。

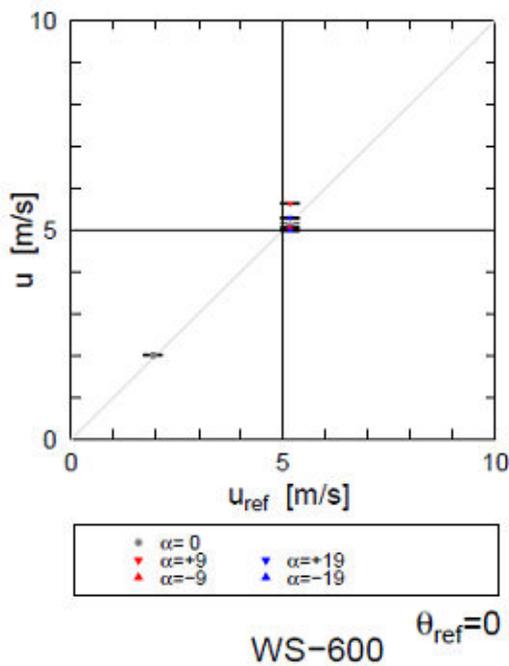


表 3-7 WS-600 傾斜時の風速比較結果

$\alpha [^\circ]$	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	5.3	5.2	1.03
+9	5.6	5.2	1.09
0	5.1	5.2	0.99
-9	5.1	5.2	0.98
-19	5.0	5.2	0.97

図 3-15 WS-600 傾斜時の風速比較図

3.1.5 WXT520

(1) 風向特性

図 3-16 は、WXT520 の計測結果である。WXT520 は他の 4 器種と異なり、超音波のセンサー一部が支持柱の上部 90° 、 210° および 330° の 3 か所に取り付けられており、また、上部は開放された構造である (図 4-4 参照)。今回の実験の目的の一つとして、支持柱の影響による風の乱れがに着目しており、計測開始位置で、どの向きで CWS を固定するかの検討を行なった。

WXT520 の筐体には、真北を示す印が表示されているが、この方向を風洞の吹出口の方向に向けた場合、3 本の支持柱が風の向きに対して左右対称とならない。そこで、本実験では、3 本の支持柱が左右対称となる位置、すなわち超音波センサーが搭載されている支持柱の一つを、風洞の吹出口と正反対の方向に向けた位置を、計測開始位置とした。CWS をこのようにセットした場合 θ_{ref} は 30° となる。したがって図 3-16 では、 $\theta_{\text{ref}} = 30^\circ$ が、最上部に表示されているので注意願いたい。計測は $\theta_{\text{ref}} = 30^\circ$ を中心とする $\pm 90^\circ$ の区間について、時計回りに 300° から 330° を 15° 刻み、同じく時計回りに 330° から 90° を 5° 刻み、 90° から 120° を 15° 刻みで行なった。

結果を以下に示す。図 3-16 左は U/U_{ref} の結果であり、風速の差は設定風速の値によらず、ほとんどが $\pm 0.2 \text{ m/s}$ の範囲に収まっている。但し、 θ_{ref} が 350° 付近でのみ、計測値に顕著な乱れが見られた。念のため θ_{ref} が 350° から、 120° 離れた $\theta_{ref} = 110^\circ$ 、 230° でも注意深く計測を行なったが、 θ_{ref} が 350° ほど値が乱れることはなかった。

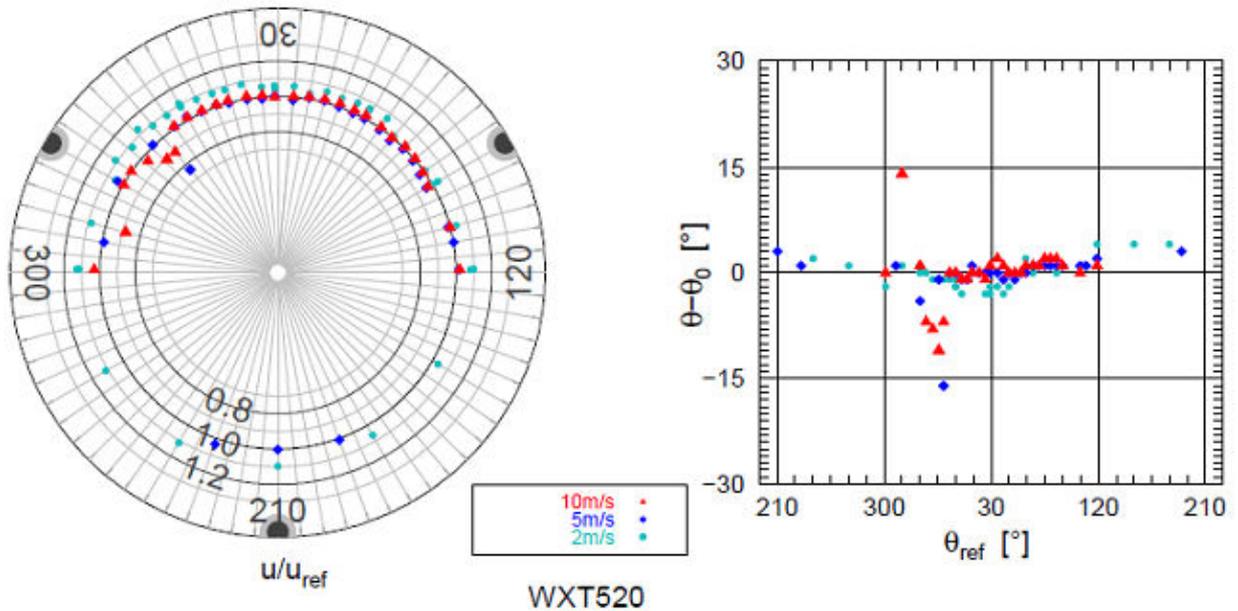


図 3-16 WXT520 の風向特性

図 3-16 右に示した風向差 $\theta - \theta_{ref}$ についても風速値と同様、ほとんどの設定風向では $\pm 2 \sim 5^\circ$ 以内の結果が得られたが、風速値が乱れる θ_{ref} が 350° 付近では、風向も大きく乱れる結果になった。表 4-5 の機器仕様の風向精度を見ると $\pm 3^\circ$ となっており、 2 m/s の弱風や θ_{ref} が 350° では、 $\pm 3^\circ$ を超える値もあるが、その他の広い範囲では、仕様の範囲内に収まっていることが確認された。

(2) 風速特性

WXT520 の風速特性実験は、設定風速 5 m/s から 25 m/s まで、続いて 25 m/s から 5 m/s まで、それぞれ 5 m/s 刻みで計 9 回の計測を実施した。このとき設定風向 θ_{ref} は 173° であった。

図 3-17 および表 3-8 にその結果を示す。計測個数 N は 9 点であり、相関係数 R は 0.99、回帰直線の係数は 0.99 で、実際の風速値とよく一致している結果となった。但し、散布図を詳細にみると、 U_{ref} が 10 m/s 付近では値が大きくなり、 U_{ref} が 15 m/s 以上では値が小さくなる結果となった。

表 4-5 の機器仕様の風速精度を見ると、 $0 \sim 35 \text{ m/s}$ にて $\pm 0.3 \text{ m/s}$ または $\pm 3\%$ となっており、実験結果は仕様の範囲内に収まっていることが確認できた。

表 3-8 WXT520 の風速特性

N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
9	1.00	$y = 0.99 x$	$y = 0.93 x + 0.98$

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する応答

図 3-18 と表 3-9 に傾斜時の計測結果を示す。設定風向 θ_{ref} を 0° とし、設定風速 5 m/s および 10 m/s について、傾斜角 $\alpha = \pm 10^\circ$ 、 $\pm 19^\circ$ で計測を行なった。また、 $\alpha = -19^\circ$ については、実験中に確認した瞬間値の変動が大きかったため、念のため $\alpha = -15^\circ$ でも計測を行ない、その結果を、図 3-18 に示す。傾斜角 $\alpha > 0$ の場合も、 $\alpha < 0$ の場合も、 U/U_{ref} の値は、小さくなっているが、 α が -19° の際の U/U_{ref} の値は 0.79 と小さく、また、標準偏差（各点の上下に記載した幅）の値は、他と比べて明らかに大きい値を示し、 U/U_{ref} の値は傾斜角 0° を中心に、左右対称とならなかった。

また、標準偏差（各点の上下に記載した幅）の値は、大きくばらつくことが確認された。

この結果は、WXT520 の形状が、関係していると思われる。風速計測部が筐体の上端にあり、上部は開放されている構造であることから、筐体を大きく傾けた場合、計測部底面側で風が遮られることで減速されることなどが、結果に影響していると考えられる。

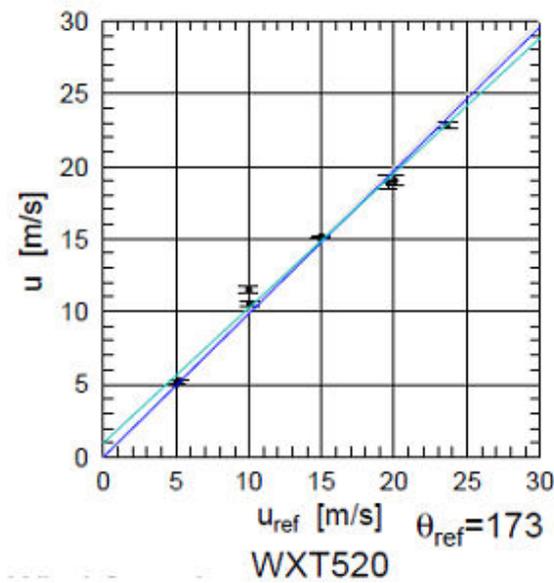


図 3-17 WXT520 の風速特性

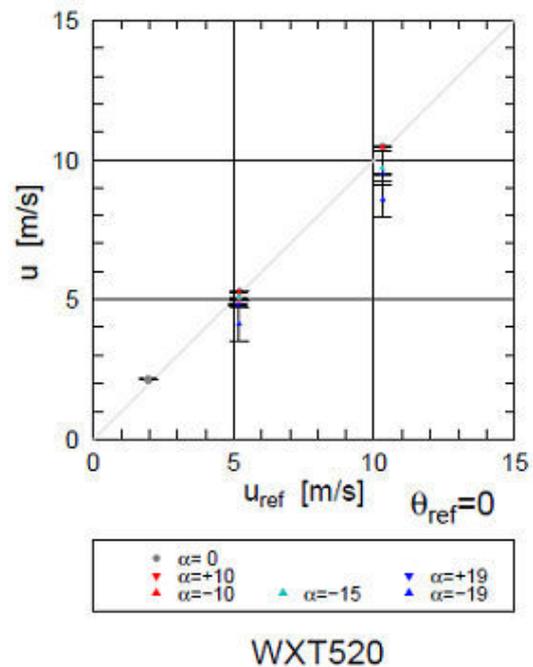


図 3-18 WXT520 傾斜時の風速比較図

表 3-9 WXT520 傾斜時の風速比較結果

α [°]	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	4.8	5.2	0.94
+10	5.0	5.2	0.97
0	5.3	5.2	1.02
-10	5.2	5.2	1.01
-15	5.1	5.2	0.98
-19	4.1	5.2	0.79

α [°]	U [m/s]	U_{ref} [m/s]	U/U_{ref}
+19	9.5	10.3	0.92
0	10.5	10.3	1.02
-10	10.5	10.3	1.02
-15	9.7	10.3	0.94
-19	8.6	10.3	0.83

3.1.6 150WX

(1) 風向特性

図 3-19 に 150WX の風向特性実験の結果を示すが、今回実験に用いた 150WX は、リリース前の試作品であることを考慮する必要がある。4.1.5 で詳しく述べるが、150WX は GPS とマグネットコンパスを内蔵しており、設置時には筐体を真北に合わせる必要がなく、筐体には真北を示す印はない。しかし、風洞実験においては、評価のために測定開始位置を 0° から始めることとし、CWS を回転台へ設置する際に、手で 0° に合わせてから計測を開始した。

設定風速 2 m/s の弱風の場合、風速比 U/U_{ref} (左) の変動は $\pm 20\%$ を超える場合があった。風向差 $\theta - \theta_{ref}$ (右) についても一部で 15° 以上の差が生じた。設定風速 2 m/s の結果を詳細にみると、 0° から 270° 側の半円で風速比 U/U_{ref} は大きくなり、 0° から 90° 側の半円では、小さい値となった。また風向差は 0° を中心とする半円でマイナス、 180° 側半円でプラスの値となっている。この傾向は設定風速が強くなると抑えられ、5 m/s では 2 m/s の場合と比べると変動は小さい。さらに、設定風速 10 m/s では風速比 U/U_{ref} は $\pm 10\%$ 以下におさまる結果を得た。

表 4-6 の機器仕様の風向精度を見ると、 $\pm 3^\circ$ であり、今回使用した CWS では、残念ながらカタログ仕様ほどの性能は確認できなかったが、風速 10 m/s での結果を見ると、一定の性能が得られているため、製品版では大いに期待できるものである。

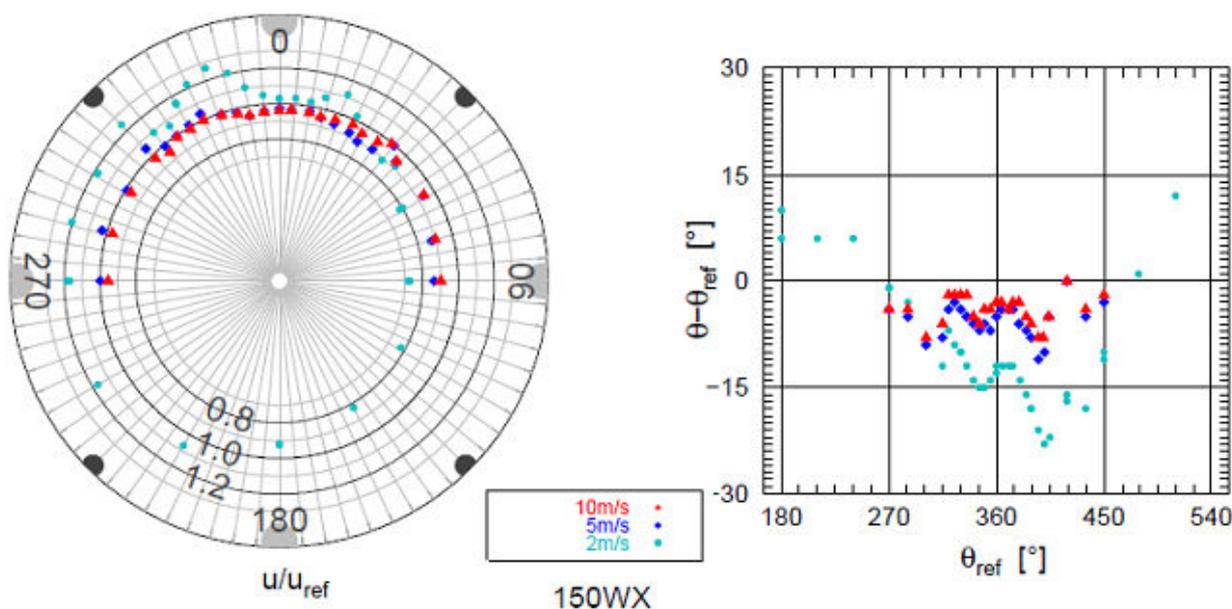


図 3-19 150WX の風向特性

(2) 風速特性

150WX の風速特性実験は、設定風速 5 m/s から 25 m/s まで、続いて 25 m/s から 5 m/s まで、それぞれ 5 m/s 刻みで計 9 回の計測を実施した。なお設定風向は $\theta_{ref} = 173^\circ$ であった。

結果を図 3-20 および表 3-10 に示す。計測個数 N は 9 点であり、相関係数 R は 1.00、回帰直線の係数は 1.1 で、実際の風速値よりも 10% 程度大きな値を示す結果となった。

表 4-6 の機器仕様の風速精度を見ると、0～35 m/s にて±0.3 m/s または±3 % となっており、仕様を超える結果となった。

表 3-10 150WX の風速特性

N	R	回帰直線 1	回帰直線 2
9	1.00	$y = 1.10 x$	$y = 1.11 x - 0.11$

(3) 吹き上げ、吹き降ろしに対する応答

図 3-21 および表 3-5 に、吹き上げ、吹き降ろしに対する応答を示す。設定風向 θ_{ref} を 0° とし、設定風速 5 m/s および 10 m/s で計測を行なった。また実験での傾斜角 α は $+10^\circ$ 、 $+20^\circ$ 、 -10° 、 -19° とした。さらに、設定風速 2 m/s でも計測を行っている。

結果を表 3-11 に示す。傾斜角 0° を中心に U/U_{ref} の値が小さくなるような傾向はみられなかった。150WX は、風の取り込み口の隙間が狭い構造となっており、そのことが傾斜角を傾けてもあまり影響が出ない理由であると思われる。

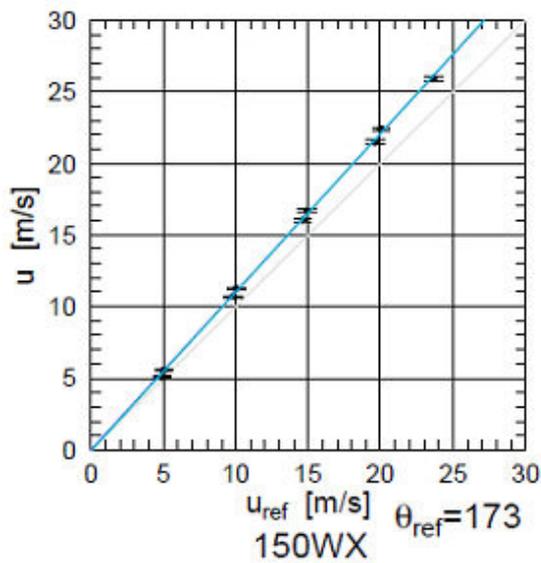


図 3-20 150WX の風速特性

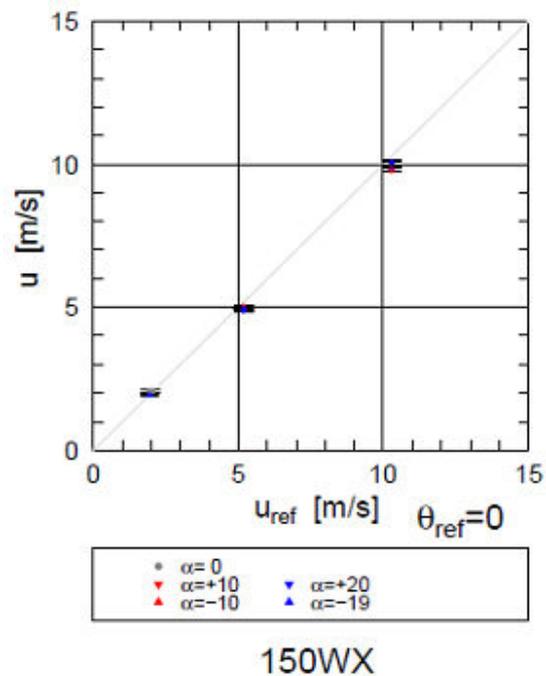


図 3-21 150WX 傾斜時の風速比較図

表 3-11 150WX 傾斜時の風速比較結果

α [°]	U [m/s]	U _{ref} [m/s]	U/U _{ref}
+20	4.9	5.2	0.94
+10	4.9	5.2	0.94
0	5.0	5.1	0.97
-10	5.0	5.2	0.97
-19	4.9	5.2	0.95

α [°]	U [m/s]	U _{ref} [m/s]	U/U _{ref}
+20	9.9	10.3	0.96
+10	9.8	10.3	0.95
0	9.8	10.3	0.96
-10	10.0	10.3	0.97
-19	10.1	10.3	0.98

α [°]	U [m/s]	U _{ref} [m/s]	U/U _{ref}
0	2.0	1.9	1.03
-19	1.9	1.9	0.99

3.2 野外観測結果

第2章で述べた通り、5器種のCWSの野外評価観測を、2011年7月28日から2011年9月27日までの約2か月間にわたって、京都大学 防災研究所潮岬風力実験所において実施した。

観測データは観測終了後に、現地気圧・風向風速・気温・相対湿度の各要素について、それぞれ10分平均値を算出し、基準器のデータとの比較を行なった。また雨量については、10分積算値、1時間積算値、24時間積算値を算出し比較したが、表記は積算を省略した。なお、気圧については、基準値として気象庁潮岬特別地域気象観測所の現地気圧データを利用した。気象庁の気圧計の設置高度は75.5mである。10分平均値の比較対象期間は、2011年7月28日12時10分から2011年9月27日12時50分までである。但し、9月4日3時10分については、台風第12号による停電が発生しデータが約4分間取得出来なかったため欠測とした。

以下に、それぞれのCWSについて観測結果を示すが、風洞実験の結果と同様CWSの並びは型名のABCおよび数字順で記述する。

結果の整理においては、各要素とも基準器との比較を行なったが、その他、現地気圧、風向、気温、相対湿度については、周囲の風速の変化による影響についても評価を行なった。

3.2.1 All-In-One CWS

All-In-One CWSで観測された、現地気圧、風向風速、気温、相対湿度について、各要素の基準器との比較結果を以下に示す。

なお、原因は不明であるが、風向風速および相対湿度については、観測期間の後半において観測データに異常が見られたため、その期間のデータは解析から除外した。

(1) 現地気圧

上述したが、気圧の比較については、基準値として気象庁潮岬特別地域気象観測所の現地気圧データを利用した。設置場所および標高が異なるため、観測データには一定のオフセットが含まれる。

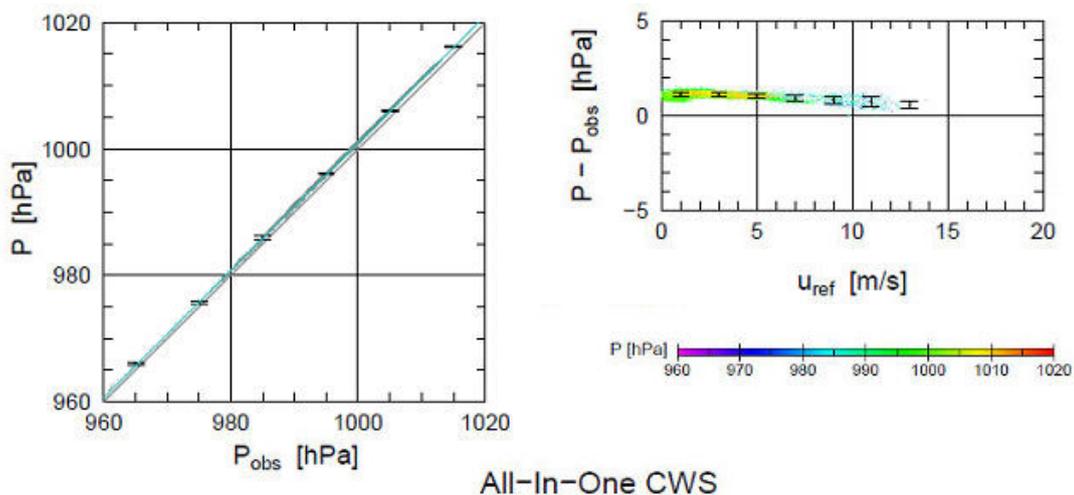


図 3-22 All-In-One CWS と基準値との 10 分平均気圧の比較

CWS と基準器の高度差は約-13.7 m であり、温度変化の影響を無視できるとした場合、気圧の差は、約+1.6 hPa となる。

図 3-22 に現地気圧の比較結果を示す。図 3-22 左は、基準値 P_{obs} と All-In-One CWS の現地気圧 10 分平均値 P の比較結果である。基準値 P_{obs} は、気象庁潮岬特別地域気象観測所の現地気圧データ 10 分値を利用した。図の横軸は P_{obs} 、縦軸は P を示し、10 分毎の値をグレーの点で示した散布図である。また P_{obs} の値 10 hPa 毎の区間で算出した、 P の平均値と標準偏差の値を図中に黒で示してある。これらは 3.1 風洞実験の節で、風速特性を示した図 3-5 などと同じ形式である。図には、 P と P_{obs} について最小二乗法で求めた回帰直線（水色）と、 $P = P_{obs}$ となる直線（灰色）についても示した。回帰直線の式は表 3-12 に他の統計量とともに示した。

図 3-22 右は縦軸に CWS の観測値と基準値の差 $P - P_{obs}$ 、横軸に同時刻の基準器の風速 U を示した散布図である。各点の色は、同時刻の P の値を示し、図の下段にカラーバーで示している。また、基準風速 U_{ref} の値 2 m/s 毎に算出した、平均と標準偏差を黒で示した。

CWS の観測値と基準値の差 $P - P_{obs}$ は、全体を通して約 1h Pa でほぼ一定である。これは CWS を設置した観測点と気象庁観測点の位置や高度の違いが影響していると考えられる。また、風速 U_{ref} が上昇するにつれて、 $P - P_{obs}$ の値が低くなる傾向も見てとれる。これは CWS 筐体の周囲を強い風が流れることで P の値が内部で減圧された効果と考えられるが、変化幅は 0.5 hPa 程度と小さい。

表 3-12 に P と P_{obs} についての統計計算の結果を示す。各列はそれぞれ、算出に用いたデータ数 N 、相関係数 R 、回帰直線の式（図 3-22 左に示したもの）、 $P - P_{obs}$ の平均 Δ 、および $P - P_{obs}$ の標準偏差 σ である。 Δ については、CWS と基準器の高度差と設置環境の差が反映されている。今回の観測結果では Δ は約+1.1 hPa という結果であり、高度差を考慮した場合より 0.5 hPa 程度低い値となっている。表 4-2 機器仕様の気圧精度を見ると ± 0.35 hPa であることから、今回の実験結果で σ が 0.14 hPa という値が得られているので、仕様を満たしていると言える。

表 3-12 All-In-One CWS と基準値との 10 分平均気圧の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [hPa]	σ [hPa]
8788	1.00	$y = 1.01 x - 6.08$	+1.06	0.14

(2) 風向風速

All-In-One CWS により観測された風向風速について、図 3-24 に 8 月 21 日から 9 月 3 日の 2 週間の時系列変化を示す。上から風向、風速、10 分雨量の順に、All-In-One CWS の値を青色で、基準器の値を灰色で出力した。図からわかるように期間中、風向風速が大幅に異なる値になる箇所が複数あり、いずれも雨量が観測されている時間帯に対応している。これらの期間は、正しく測定できていない可能性が高いため、現象の発生した 8 月 21 日 23 時以降のデータは無効とした。なお、8 月 21 日 23 時以前の弱雨時のデータについては、明らかな値のずれは認められなかったため、解析対象とした。

また、3.1.2 で述べた通り、今回借用した All-In-One CWS は、風洞実験で風速が 18 m/s を超えた場合、風速値が 2 倍になる現象が確認されている。今回の野外観測期間においても All-In-One CWS の値が、基準器の値と比較して大きな値を記録する場所が見られたため、期間中において最大瞬間風速が 18 m/s を超えた場合のデータについても無効とした。

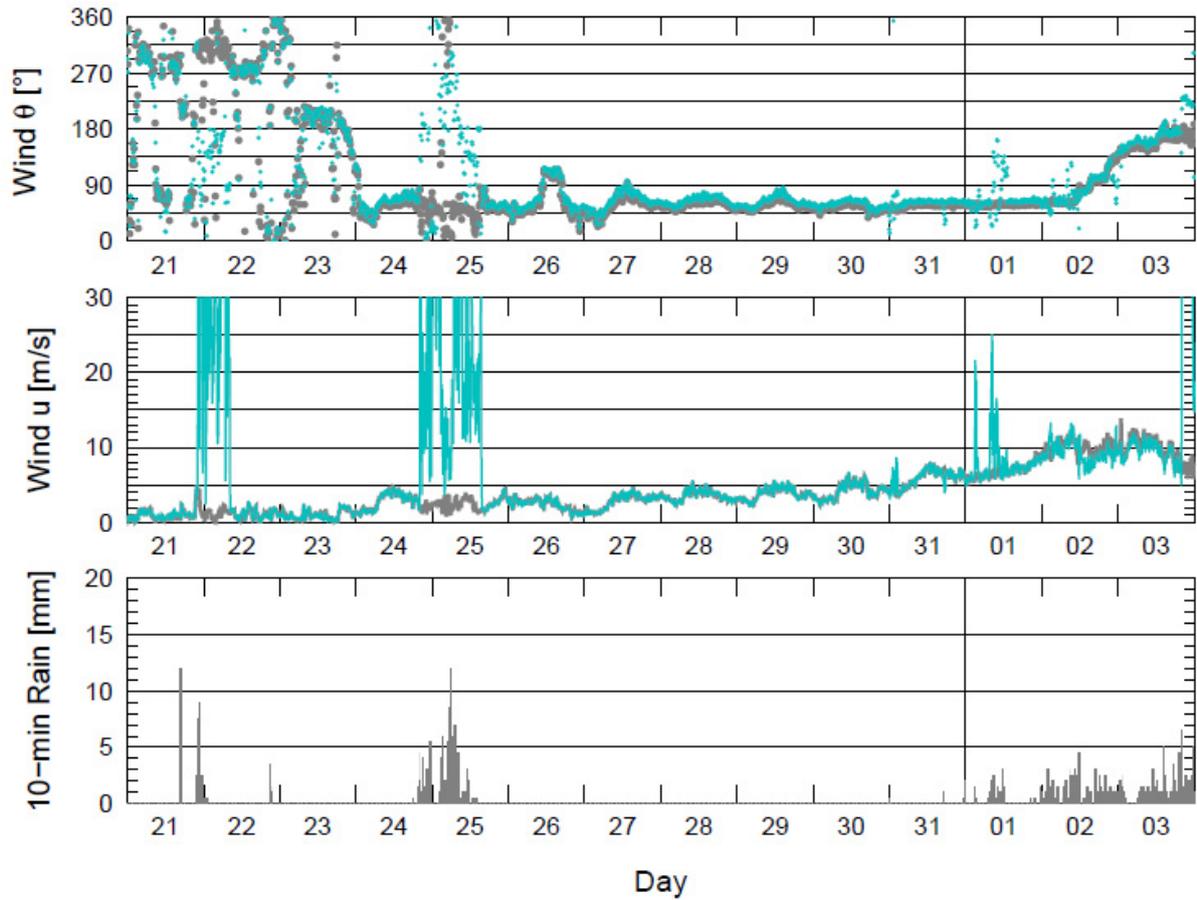


図 3-23 All-In-One CWS により観測された風向風速 (青) と、基準器により観測された風向風速 (灰) および 10 分雨量の時系列変化 (8 月 21 日から 9 月 3 日までの抜粋)

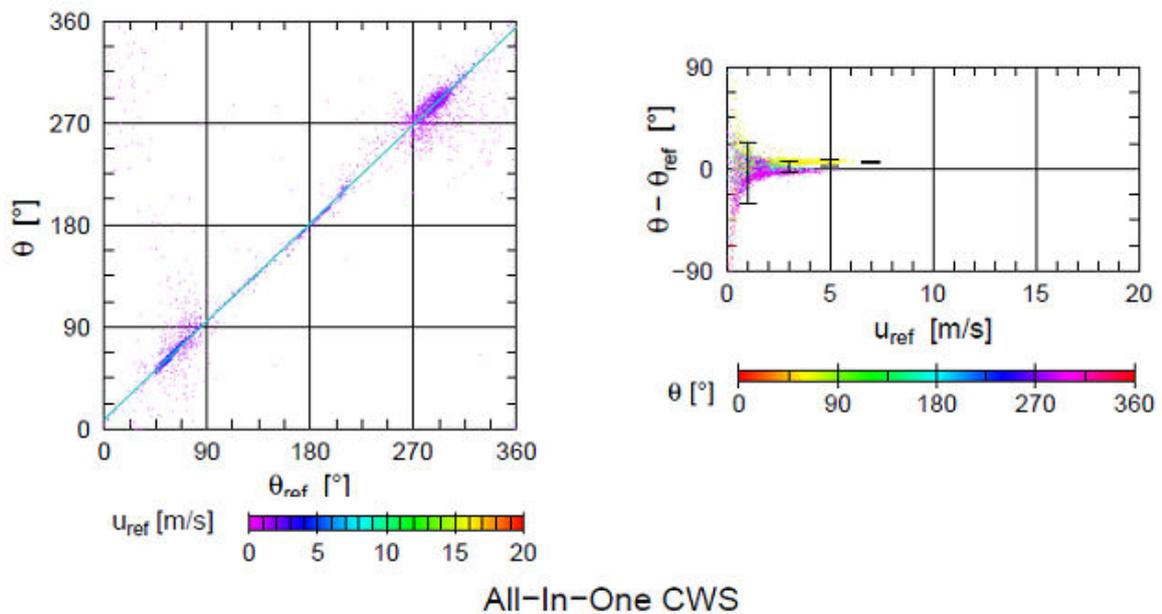


図 3-24 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均風向の比較

図 3-24 に風向の比較結果を示す。散布図は無効期間を除く全データをプロットしてあるが、統計計算では $U_{ref} \geq 2.0$ m/s の風速のみ、つまり、弱風域である 2.0 m/s 未満の風速データについては除外して求めている。

図 3-24 左は、横軸は基準器により観測された風向 θ_{ref} を、縦軸は All-In-One により観測された風向 θ を示す。各点の色は図の下部に示したカラーバーに従い、同時刻の風速 U_{ref} を表す。

統計計算の結果を表 3-13 に示す。使用したデータ数 N は 1356 で、相関係数 R は、ほぼ 1.0 という結果となった。風向差の平均 Δ は $+2.81^\circ$ 、標準偏差 σ は 4.65° となった。

図 3-24 右は、風向の値の差 $\theta - \theta_{ref}$ について、基準風速 U_{ref} の値を横軸にとり整理した結果である。散布図の各点の色は、風向 θ を示す。図を見ると、風速が強まるにつれて風向の値の差も小さくなっていることがわかる。風向の差は、基準風速 $U_{ref} \geq 2.0$ m/s では収束し、標準偏差は 5° 未満となっている。表 4-2 機器仕様の風向精度を見ると、風速 2.2 m/s 以上で 5° となっており、今回の実験結果では、ほぼ仕様の範囲であることが確認できた。

表 3-13 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均風向の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°]	σ [°]
1356	1.00	$y = 0.96x + 8.53$	+2.81	4.65

図 3-25 は風速の比較結果である。図 3-25 左は、横軸に基準器の値 U_{ref} 、縦軸に All-In-One CWS の値 U を示しており、形式は図 3-22 左と同様である。期間は前述の通り 8 月 20 日までで、統計計算に用いたデータ数 N は 3516 個となっている。相関係数 R は 0.99、線形回帰直線の係数もほぼ 1.0 と非常によく一致している。次に、降雨時における風速への影響を確認するため、図 3-25 右は左とほぼ同じ形式で、基準器の転倒ます雨量計にて雨量が観測された時刻のみを抽出し作図したものである。各データ点は、カラーバーに従い同時刻の 10 分雨量の強度を色で示す。

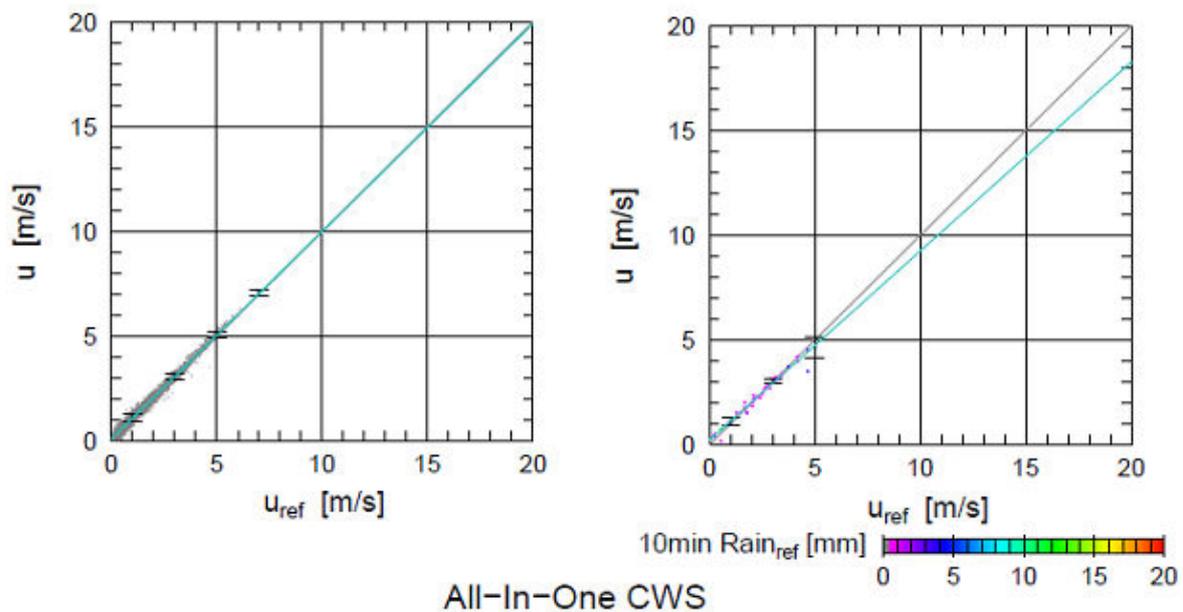


図 3-25 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均風速の比較

雨量観測時のデータ数 N は 43 個と少ないが、降水なしの事例も含めた図 3-25 左の結果とそれほど大きな違いがないことがわかる。

それぞれの統計計算結果を表 3-14 に示す。上段が全てのデータの場合 (図 3-25 左)、下段は雨天のみの場合 (図 3-25 右) である。いずれの場合も、風速差の平均 Δ は、 ± 0.1 m/s 以下、差の標準偏差 σ は 0.2 m/s 前後である。表 4-2 機器仕様の風速精度を見ると ± 0.5 m/s または 5% となっており、仕様を満たす結果を得ることができた。

表 3-14 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均風速の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [m/s]	σ [m/s]
全データ	3516	0.99	$y = 0.99x + 0.10$	+0.08	0.17
雨天のみ	43	0.98	$y = 0.90x + 0.21$	-0.01	0.24

(3) 気温

図 3-26 に気温についての比較結果を示す。形式は、風向の比較結果を示した図 3-24 と同様である。なお、図 3-26 右の各点の色は、All-In-One CWS の気温の 10 分平均値 T を示している。表 3-15 に示す通り、気温の観測値 T と基準値 T_{ref} の相関係数 R は 0.99 となった。

気温の差 $T - T_{ref}$ は平均すると $+0.6^\circ\text{C}$ 程度である。CWS は自然通風式を採用しており、日中の無風時に筐体が熱せられ、シェルター内部の空気が外気と交換されず、測定値が実際の温度よりやや高めになることが考えられ、図 3-27 左で日射による影響を確認した。

気温が 30°C 近くまで上昇した場合、基準風速 u_{ref} が 2.0 m/s 未満で、やや $T - T_{ref}$ の値が大きくなる傾向があるが、値の差は大きくて 2°C 程度であった。表 3-15 に統計計算の結果を示す。気温の差の平均 Δ は $+0.42^\circ\text{C}$ 、差の標準偏差 σ は 0.22°C であった。表 4-2 機器仕様の温度精度を見ると素子精度で $\pm 0.2^\circ\text{C}$ であり実際の観測での精度ではないが、仕様をほぼ満たしているといえる。

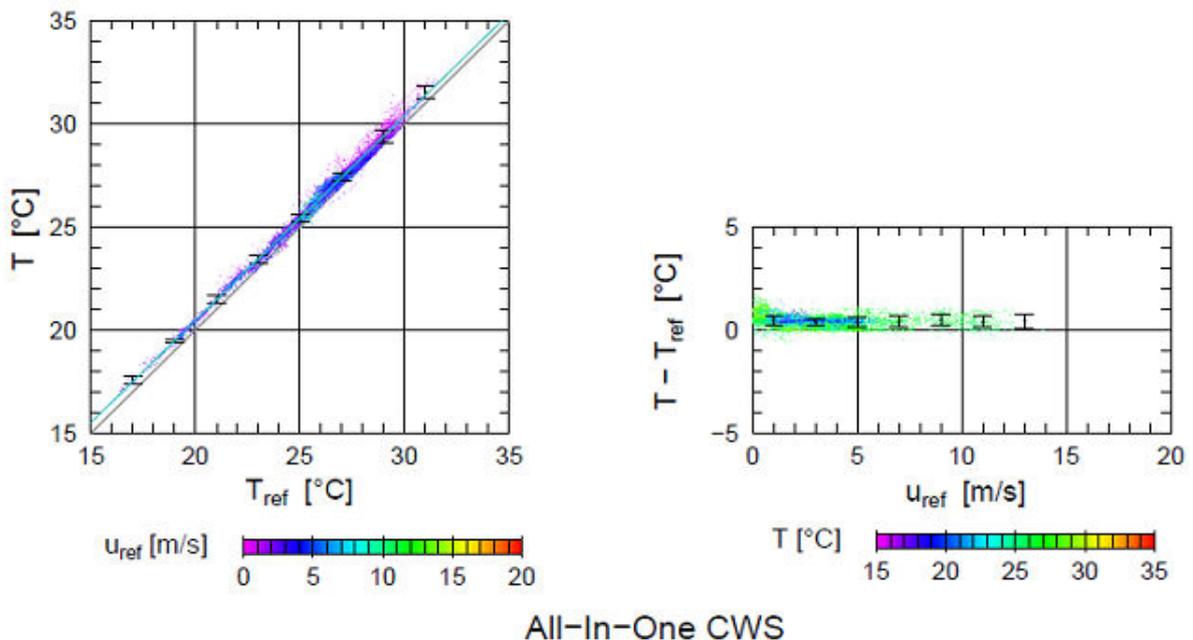


図 3-26 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均気温の比較

表 3-15 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均気温の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°C]	σ [°C]
8788	0.99	$y = 0.99x + 0.64$	+0.42	0.22

(4) 相対湿度

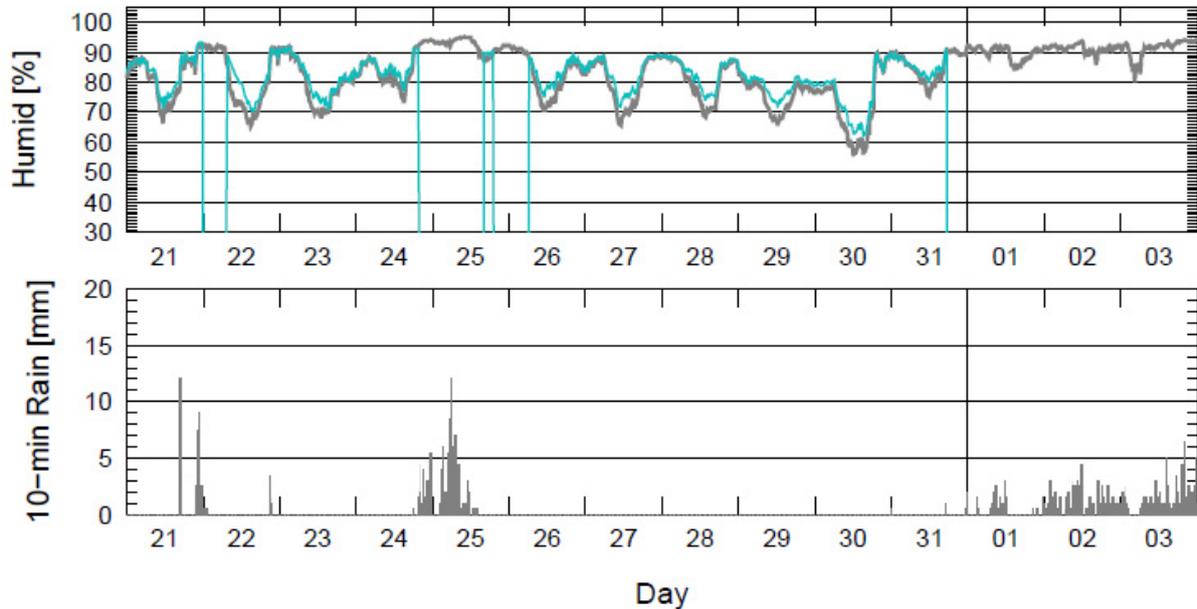


図 3-27 All-In-One CWS により観測された相対湿度 (青) と、基準器により観測された相対湿度 (灰) および 10 分雨量の時系列変化 (8 月 21 日から 9 月 3 日までの抜粋)

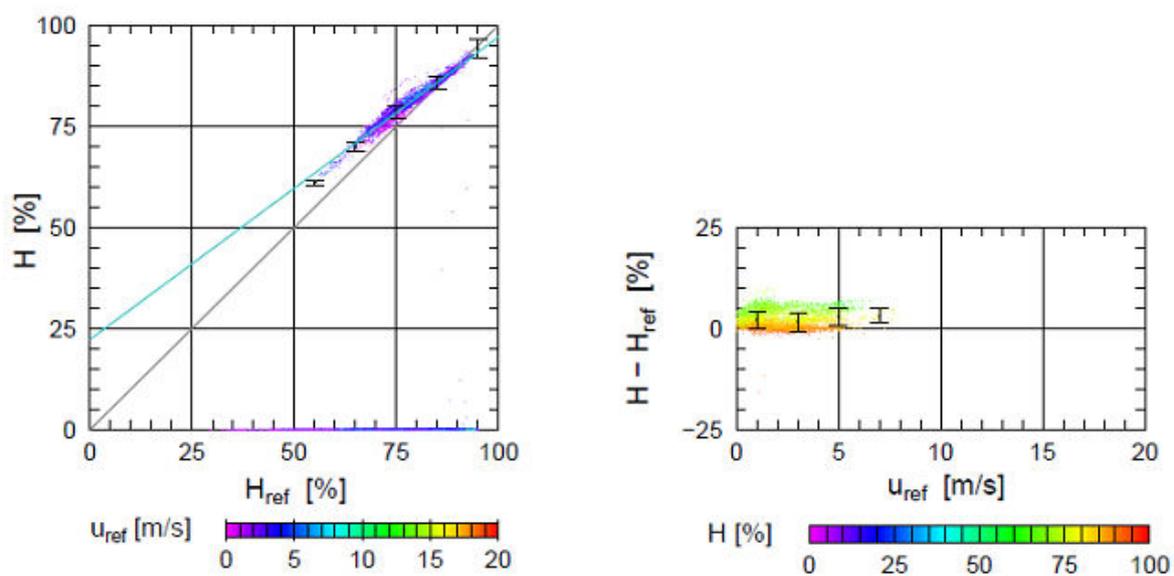
All-In-One CWS により観測された相対湿度について、図 3-27 に 8 月 21 日から 9 月 3 日の 2 週間の時系列変化を示す。

8 月 21 日の夜遅くから、相対湿度の値が 0 % となる事例が 3 回発生し、さらに、8 月 31 日 17 時 20 分を最後に、残りの期間のデータが全て 0 % となった。

詳しい原因等は不明であるが、不調の期間は降雨時間帯と対応していることがわかっている。これらの期間については、CWS が何らかの不具合を生じたものと判断し、統計計算の対称期間から除外した。

図 3-28 および表 3-16 に相対湿度の比較結果を示す。形式は気温の結果を示した図 3-26 と同様である。先に述べた通り一部期間を統計計算の対象外としたので、データ数 **N** は 4695 個と気圧や気温に比べて少なくなっている。All-In-One CWS による相対湿度の 10 分平均値 **H** と基準器による値 **H_{ref}** の相関係数 **R** は 0.96 以上を示したが、回帰直線の係数は 0.75 という結果となり、相対湿度が 90 % 近くでは良く一致しているが、相対湿度 50 % から 75 % の範囲では、値が大きくなることがわかった。

図 3-29 右の相対湿度の値の差 **H - H_{ref}** を基準器の風速 **U_{ref}** 別に整理した結果を参照すると、周囲の風の強さに対する相対湿度の影響はほとんど見られなかった。表 4-2 機器仕様の湿度精度をみると ±3 % であることから、仕様を満足する結果とはならなかった。使用した CWS 個体固有の問題である可能性が高いと思われる。



All-In-One CWS

図 3-28 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均値湿度の比較

表 3-16 All-In-One CWS と基準器との 10 分平均値湿度の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [%]	σ [%]
4695	0.97	$y = 0.75 x + 22.32$	+2.03	2.28

3.2.2 MetPak II

MetPak IIで観測された値と、基準器により観測されたデータの比較結果を示す。前節と同じ形式で、個々の要素について順に示す。

(1) 現地気圧

図 3-29 に現地気圧の比較結果を示す。左が MetPak II により観測された現地気圧の 10 分平均値 P と基準値 P_{obs} の比較散布図、右がその差 $P - P_{obs}$ を同時刻の基準器の風速 U_{ref} の値毎に整理した結果である。統計計算の結果は、表 3-17 に示した。 P と P_{obs} について、相関係数 R は、ほぼ 1.0 となった。差の平均 Δ は約+1.87 hPa で、高度差に由来する値、約+1.6 hPa を考慮した場合、差は+0.3 hPa 程度と言える。 σ は 0.15 hPa であり、表 4-3 機器仕様の気圧精度を見ると ± 0.5 hPa となっていることから、仕様を満たしていると言える。また、風速 U_{ref} が上昇するにつれて、 $P - P_{obs}$ の値が低くなる傾向も見てとれるが、変化幅は 0.5 hPa 程度と小さいことがわかった。

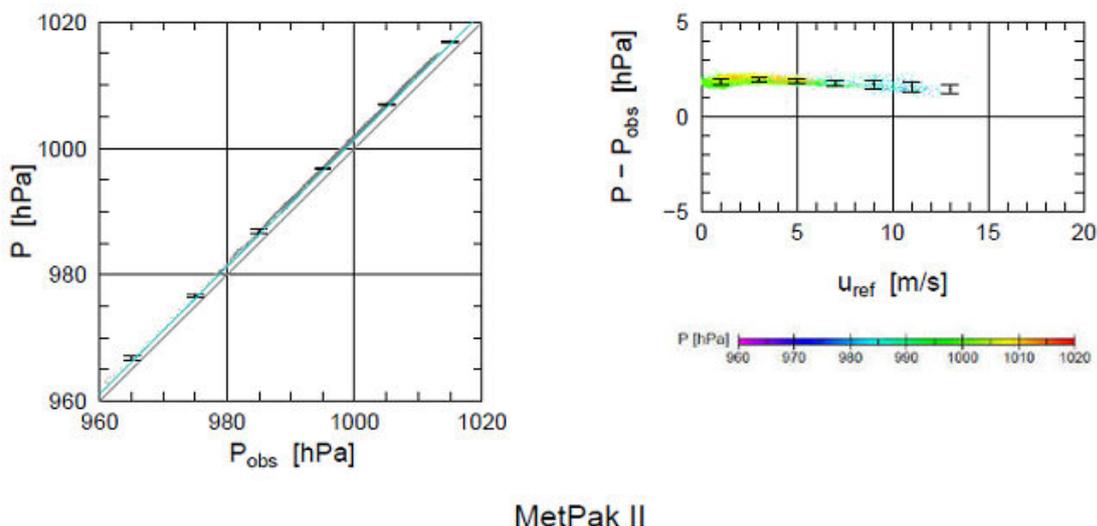


図 3-29 MetPak II と基準値との 10 分平均気圧の比較

表 3-17 MetPak II と基準値との 10 分平均気圧の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [hPa]	σ [hPa]
8788	1.00	$y = 1.01x - 5.62$	+1.87	0.15

(2) 風向風速

MetPak II による風向風速の観測について、一部の期間で、データの収録が不調となった。図 3-30 に 8 月 21 日から 9 月 3 日までの観測結果を示す。10 分平均値を算出する際に用いる 1 秒ずつ収録したデータが 80 % 未満であった時間帯を、水色の背景で示した。図では 8 月 21 日の夜遅く、および 24 日の夜から 25 日の午前にかけてが、これに該当している。なお、同時間帯は、比較的強い雨が観測されたことがわかっているが、9 月 1 日以降の期間は雨天でも計測できており、取得率の低下と雨量との関連は今のところ不明である。以下の統計処理では、取得率が 80 % 未満となった期間を除いて算出を行なった。これは全観測期間の約 0.9 % にあたる。

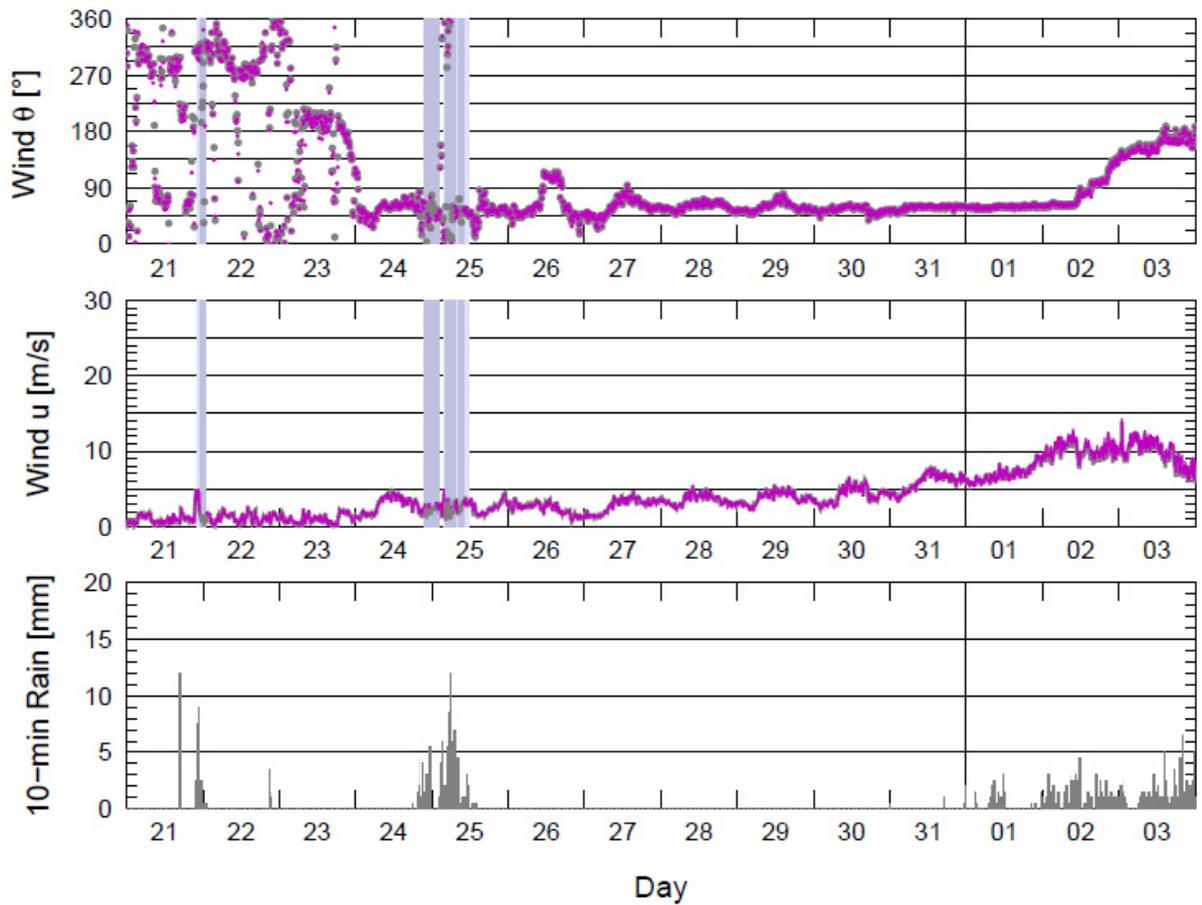


図 3-30 MetPak II により観測された風向風速（紫）と、基準器による風向風速および雨量の観測結果（灰）（期間は 8 月 21 日から 9 月 3 日まで）

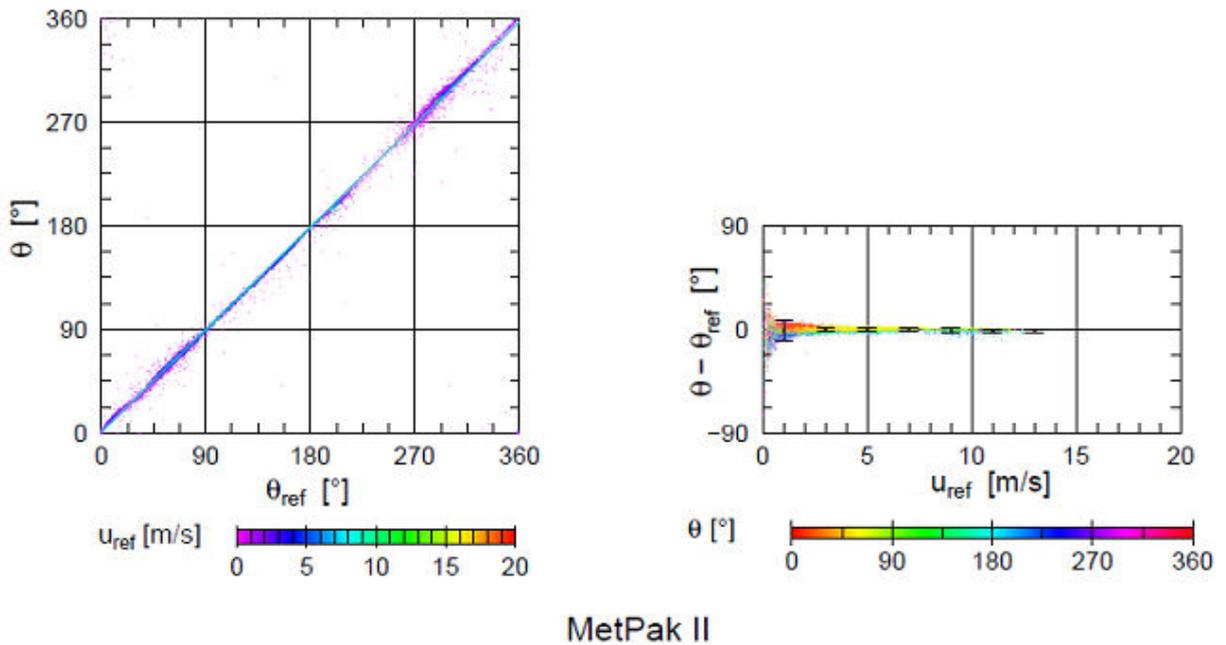


図 3-31 MetPak II と基準器との 10 分平均風向の比較

図 3-31 に風向の比較結果を示す。散布図は期間中の全データをプロットしてあるが、統計計算は U_{ref} が 2.0 m/s 以上の風速で行なった。

図 3-31 左を見る限り U_{ref} が 2.0 m/s 未満でややばらつきが目立つが、その他の風速では、 θ と θ_{ref} の値はよく一致している。図 3-31 右に示す $\theta - \theta_{ref}$ については、 U_{ref} が 2.0 m/s 以上では標準偏差は 2° 未満、 $U_{ref} < 2.0$ m/s でも標準偏差は 12° 程度に収まっている。

統計計算の結果を表 3-18 に示す。使用したデータ数 N は 5099 で、相関係数 R は、ほぼ 1.0 という結果となった。風向差の平均 Δ は -0.27° 、標準偏差 σ は 1.58° となった。表 4-3 機器仕様の風向精度を見ると、風速 12 m/s 以上で $\pm 3^\circ$ となっており、今回の実験結果でもその精度が確認できた。

表 3-18 MetPak II と基準器との 10 分平均風向の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°]	σ [°]
5099	1.00	$y = 0.99x + 0.95$	-0.27	1.58

風速の結果を図 3-32 に示す。形式は図 3-25 と同じである。表 3-19 によると、 U と U_{ref} は高い相関を示し良く一致しているが、図 3-32 左によると U_{ref} が 10.0 m/s 前後を超えるとやや値が大きくなる傾向が見られる。

次に、降雨時における風速への影響を確認するため、図 3-32 右に雨天の場合の散布図を示したが、全データと比べて特に大きな違いは見い出せない。

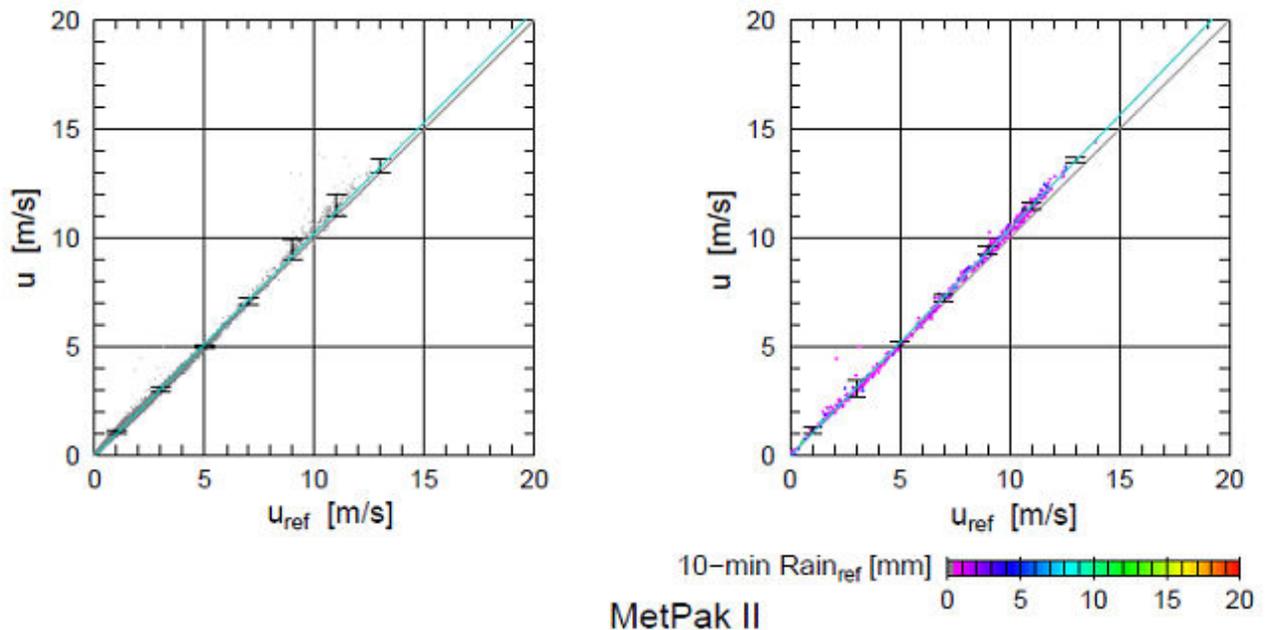


図 3-32 MetPak II と基準器との 10 分平均風速の比較

統計計算の結果を表 3-19 に示す。全データの場合で、風速差の平均 Δ は $+0.04$ m/s、標準偏差 σ は 0.17 m/s であり、表 4-3 機器仕様の風速精度を見ると風速 12 m/s の時で $\pm 2\%$ となっており、仕様を満足していることが確認できた。

表 3-19 MetPak II と基準器との 10 分平均風速値の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [m/s]	σ [m/s]
全データ	8710	1.00	$y = 1.02x - 0.02$	+0.04	0.17
降雨時	469	1.00	$y = 1.04x - 0.03$	+0.27	0.26

(3) 気温

図 3-33 に気温の比較結果を示す。図 3-33 左に示した横軸 T_{ref} 、縦軸 T の散布図では、大部分のデータは回帰直線上に分布している。

T_{ref} が 25°C を超える場合では、 $U_{ref} < 2.0 \text{ m/s}$ のデータが少しばらつく事象もみられるが、全体的にはよく一致している。

図 3-33 右に示した、気温差 $T - T_{ref}$ の基準風速 U_{ref} 別分布によると、ばらつきが大きい風速 2.0 m/s 以下の場合でも、差は 1°C 未満に抑えられており、よく一致していると言える。

統計計算の結果を、表 3-20 に示す。差の平均 Δ は $+0.16^{\circ}\text{C}$ 、差の標準偏差 σ は 0.15°C である。

表 4-3 機器仕様の気温精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ となっており、仕様を少し超える結果ではあるが、実用上は良い結果であると云える。

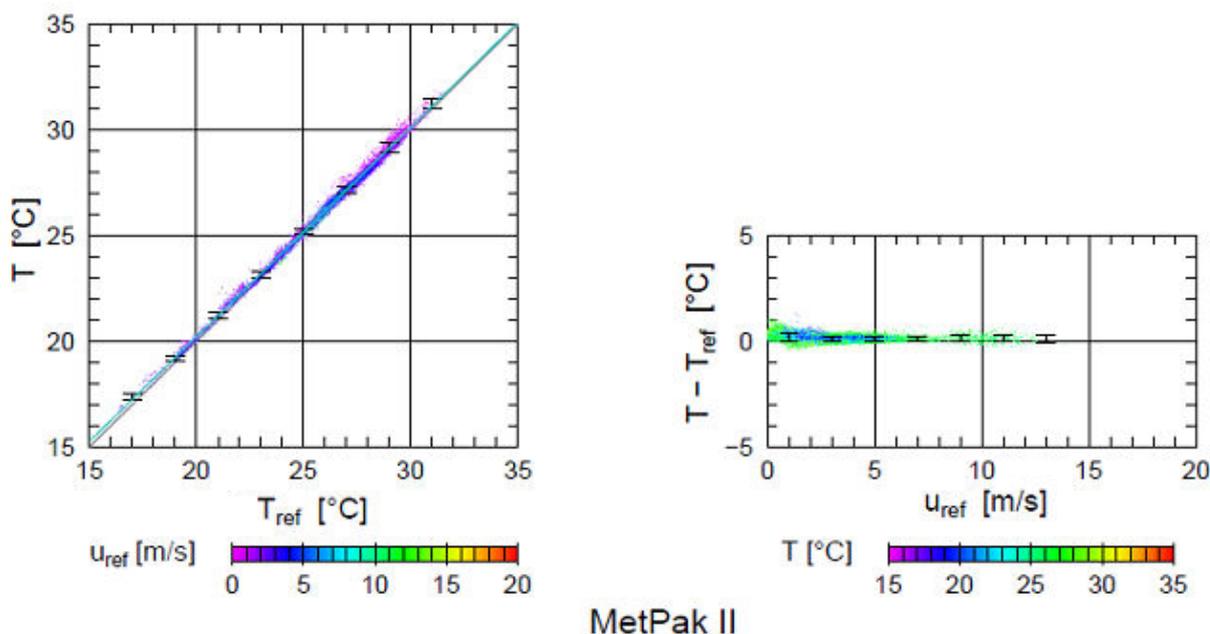


図 3-33 MetPak II と基準器との 10 分平均気温の比較

表 3-20 MetPak II と基準器との 10 分平均気温の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [$^{\circ}\text{C}$]	σ [$^{\circ}\text{C}$]
8788	1.00	$y = 0.99x + 0.39$	+0.16	0.15

(4) 相対湿度

相対湿度の比較結果を図 3-34 に、統計計算の結果を表 3-21 に示す。相関係数 **R** は 0.99 となったが、回帰直線については、傾きは 1.01 と良いがオフセットが 3.81 となり、約 4 % 湿度の値が大きくなるという結果になった。

表 4-3 機器仕様の湿度精度が 23 °C において ±0.8 % であるが、ここまでの精度は確認できなかった。今回使用した CWS の個体に何らかの問題があった可能性もある。

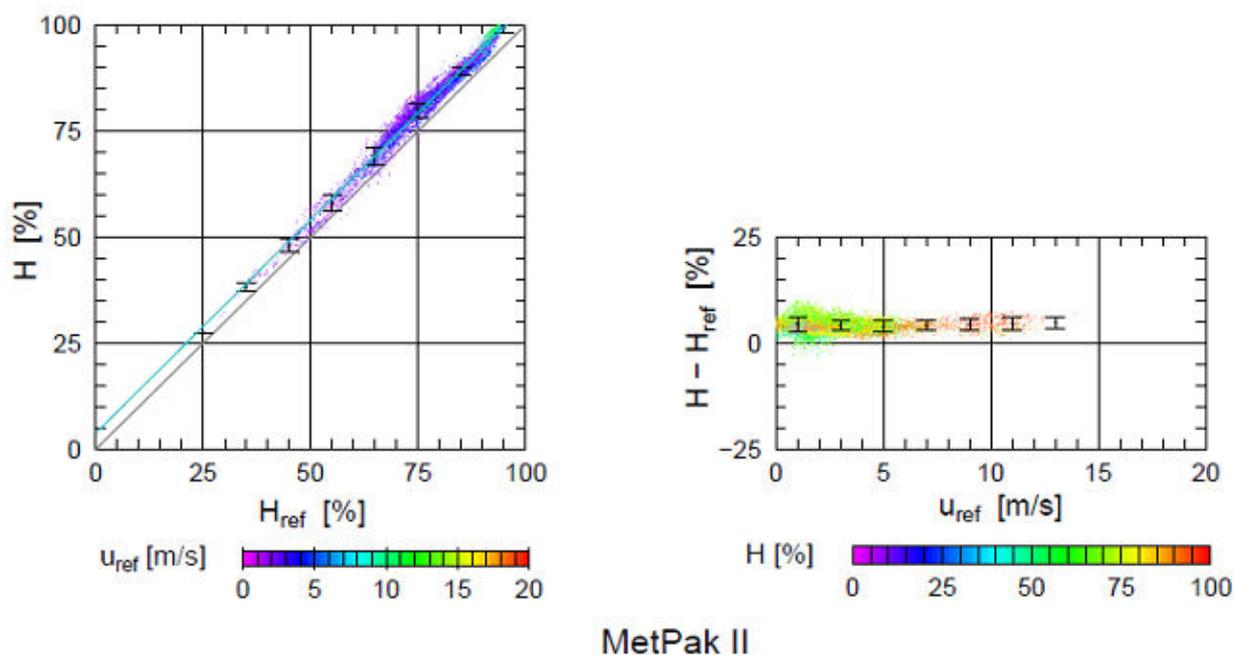


図 3-34 MetPak II と基準器との 10 分平均湿度の比較

表 3-21 MetPak II と基準器との 10 分平均湿度の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [%]	σ [%]
8788	0.99	$y = 1.01 x + 3.81$	+4.27	1.48

3.2.3 WS-600

WS-600 の観測値と基準器により観測された値の比較結果を示す。形式はこれまでに示した 2 つの CWS とほぼ同様であるが、WS-600 では雨量についても比較を行なった。

(1) 現地気圧

図 3-35 は、現地気圧 P と基準器の値 P_{obs} の比較結果である。統計計算の結果は表 3-22 に示す。観測値と基準値の差 $P - P_{obs}$ の平均 Δ は +1.4 hPa 程度で、高度差による値 +1.6 hPa を少し下回った。風速別に整理した図 3-36 右によると、基準器の風速 U_{ref} が上昇すると、 $P - P_{obs}$ はやや減少する傾向がある。標準偏差は最大でも 0.5 hPa 程度と小さいものであった。

表 4-4 機器仕様の気圧精度を見ると ± 1.5 hPa となっていることから、仕様を十分満たしていることが確認できた。

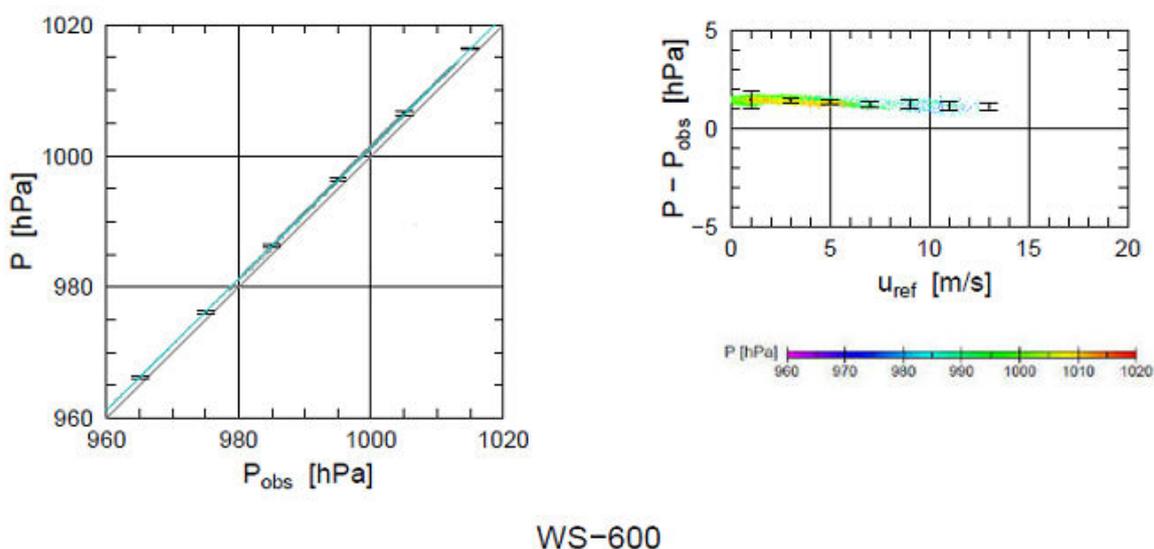


図 3-35 WS-600 と基準値の 10 分平均気圧の比較

表 3-22 WS-600 と基準値の 10 分平均気圧の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [hPa]	σ [hPa]
8788	1.00	$y = 1.00x - 1.73$	+1.41	0.31

(2) 風向風速

風向の比較結果を図 3-36 に示す。比較は期間中の全データを図示してあるが、統計計算は U_{ref} が 2.0 m/s 以上の風速のみで行なった。統計計算の結果を表 3-23 に示す。 θ と θ_{ref} の相関係数 R はほぼ 1.00 と高い値を示し、弱風時を除くと、基準器の観測結果と非常によく一致している。

図 3-36 右に示した風向差 $\theta - \theta_{ref}$ で見ても、特に基準器の風速 $U_{ref} \geq 2.0$ m/s に於いて、風向差の値、誤差ともに小さく、表 4-4 機器仕様の風向精度を見ると ± 3 % であり、仕様の範囲内であることがわかった。

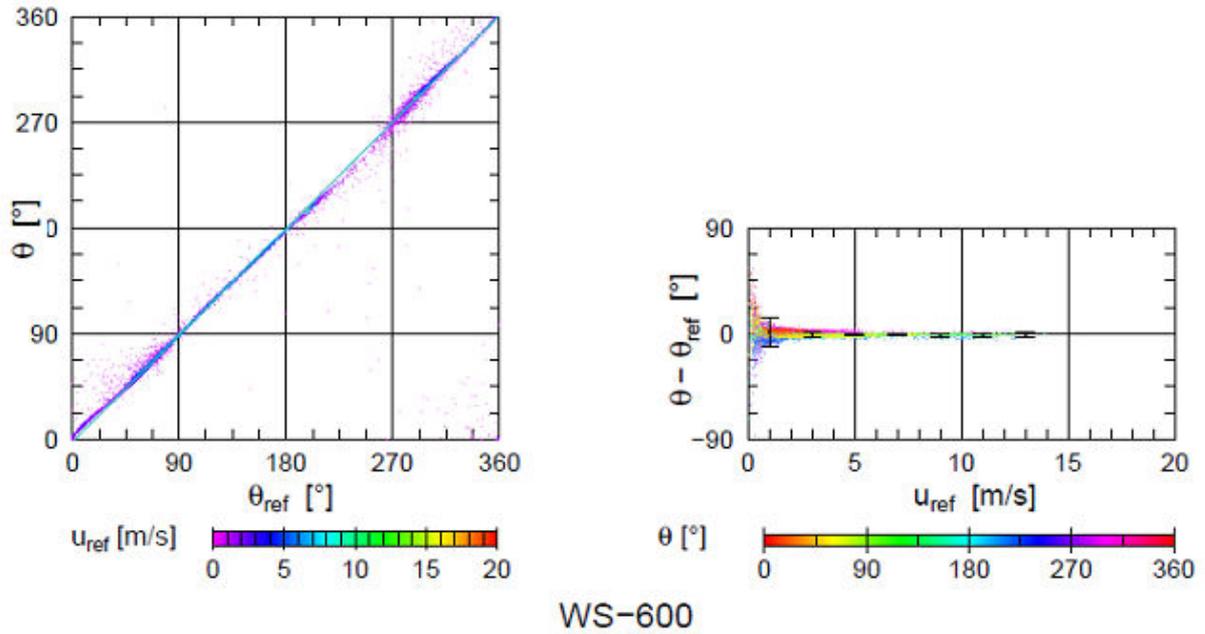


図 3-36 WS-600 と基準器との 10 分平均風向の比較

表 3-23 WS-600 と基準器との 10 分平均風向の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°]	σ [°]
5147	1.00	$y = 1.01x - 1.79$	-0.86	1.58

図 3-37 および表 3-24 は風速の比較結果である。風速 U と U_{ref} の相関係数 R はほぼ 1.00 と高い値を示しているが、 U は U_{ref} に対して約 15% 値が大きく観測されている結果となっている。

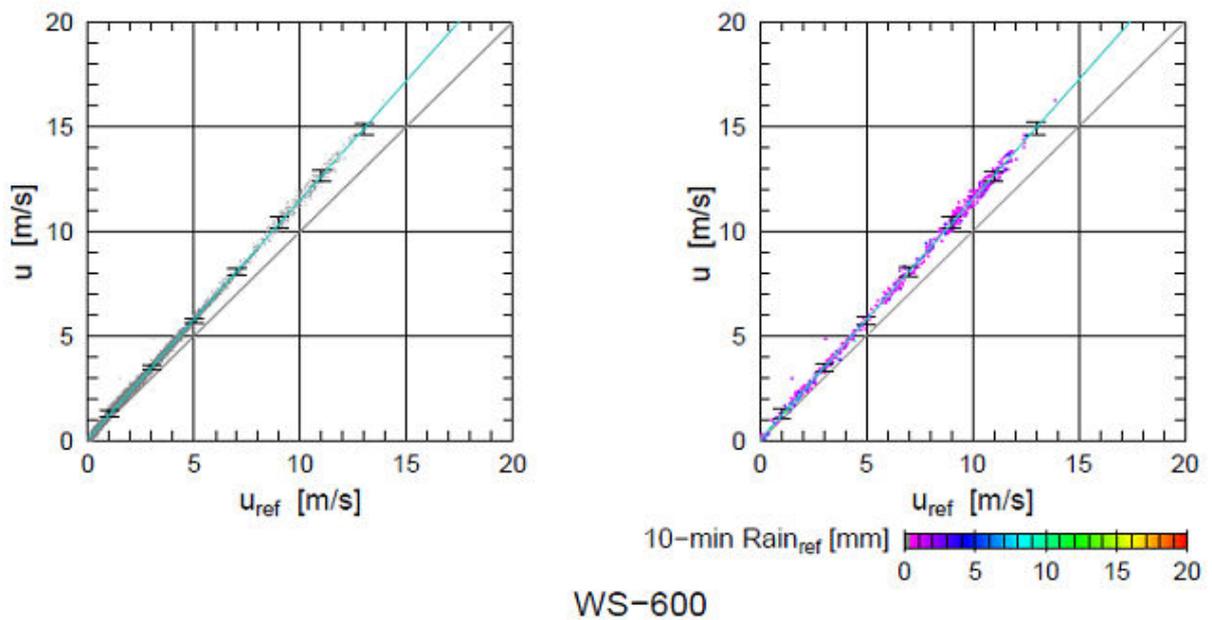


図 3-37 WS-600 と基準器との 10 分平均風速の比較

3.1.4 で示した風洞実験の結果でも、風速が基準風速に対して高い値を示す傾向が見られたが、風洞実験ではその差は 10 % 以下であった。

今回の野外観測では、回帰直線の係数は 1.14 と約 14 % 値が大きく観測され、風洞実験の時と同様の結果となった。図 3-37 右は雨天時の風速データについて比較した結果である。

図 3-37 左に示した結果と比べて、傾向に大きな差異は見受けられないが、 Δ 、 σ いずれもやや増加した。表 4-4 機器仕様の風速精度を見ると、0~35 m/s の範囲で ± 0.3 m/s または ± 3 %であることから、仕様を満足する結果とはならなかったが、今回使用した CWS の個体固有の問題である可能性が高いと思われる。

表 3-24 WS-600 と基準器との 10 分平均風速の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [m/s]	σ [m/s]
全データ	8788	1.00	$y = 1.14x + 0.09$	+0.49	0.34
降雨時	516	1.00	$y = 1.15x + 0.06$	+1.01	0.55

(3) 気温

気温の比較結果は図 3-38、表 3-25 に示した通り、 T と T_{ref} の相関係数 R はほぼ 1.00、回帰直線の係数も 0.96 とよく一致している。図 3-38 右に、観測値の差 $T - T_{ref}$ の風速 U_{ref} 別分布を示す。

WS-600 は強制通風型を採用していることもあり、弱風時でも差が大きくなることはなく、差の平均はほぼ 0 °C、ばらつきの範囲も ± 1.0 °C以下に収まっており、弱風時でも気温の観測が安定して行われていたことがわかる。

表 4-4 機器仕様の気温精度を見ると ± 0.2 °Cであり、ここまでの精度は確認できなかったが、統計結果の σ が 0.23 であることから、実用上の精度として問題ないと思われる。

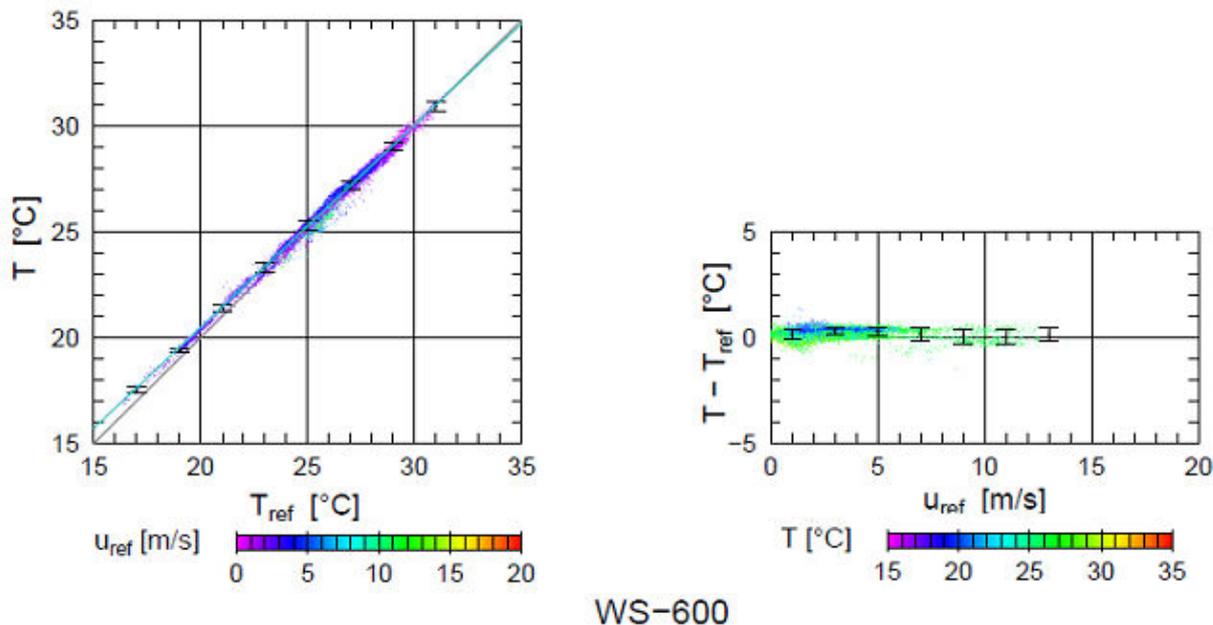


図 3-38 WS-600 と基準器との 10 分平均気温の比較

表 3-25 WS-600 と基準器との 10 分平均気温の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°C]	σ [°C]
8788	1.00	$y = 0.96 x + 1.34$	+0.21	0.23

(4) 相対湿度

相対湿度の比較結果を図 3-39 および表 3-26 に示す。 H と H_{ref} の相関係数 R は 0.98 となったが、回帰直線の係数では、傾きが 0.96 であるのに対し、オフセットは 9.2 と常に値が高くなる結果となった。図 3-39 右に示した相対湿度の差 $H - H_{ref}$ を基準風速 U_{ref} で整理した結果も、平均は全体を通して 5~7 % 程度過大となっている。比較的低風速かつ低湿度の場合に、ややばらつきが大きくなる傾向が見られるが、周囲の風の強さに対する相対湿度の影響はほとんどないと言える。

表 4-4 機器仕様の湿度精度を見ると $\pm 2\%$ となっており、仕様を満足する結果とはならなかった。全体的に 9 % 程度高めの値を示しており、今回使用した CWS 個体固有の問題の可能性も高い。

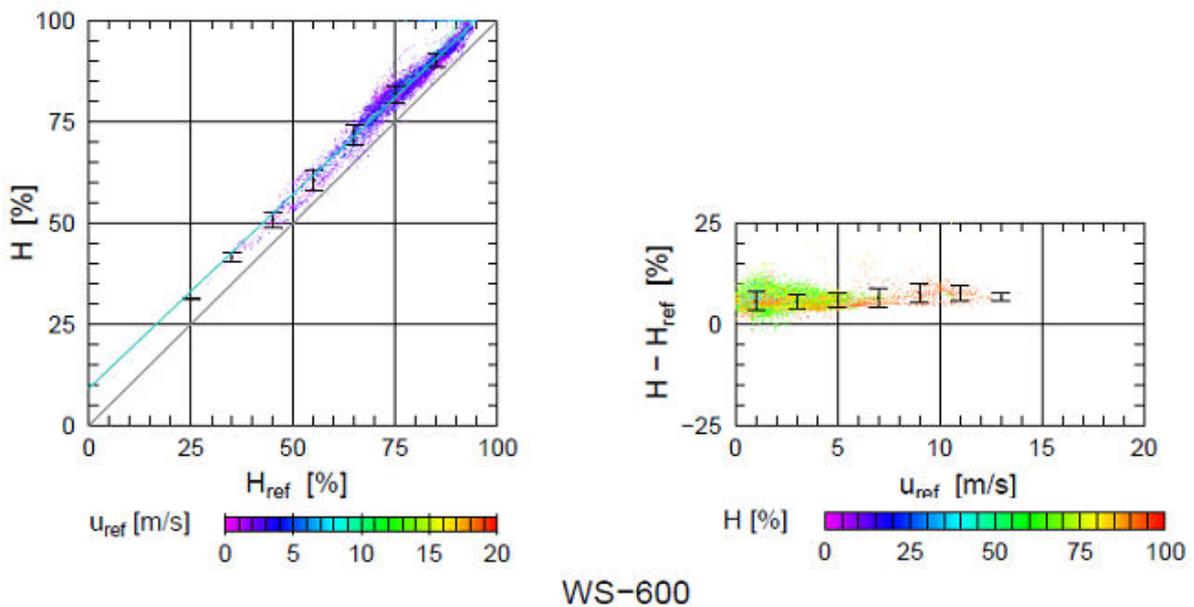


図 3-39 WS-600 と基準器との 10 分平均湿度の比較

表 3-26 WS-600 と基準器との 10 分平均湿度の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [%]	σ [%]
8788	0.98	$y = 0.96 x + 9.20$	+5.79	2.08

(5) 雨量

図 3-40 および表 3-27 に雨量の比較結果を示す。図 3-40-1 は 10 分雨量について示した。横軸に基準器により観測された雨量データから算出した 10 分雨量を示し、縦軸に WS-600 により観測された雨量データから算出した 10 分雨量を示す散布図である。2 つの測器のいずれかで雨量を観測した場合について集計を行なった結果、データ数 $N = 936$ となった。

全体的な傾向として、基準器で 5.0 mm を超えた雨量の場合、WS-600 で計測された雨量値が小さいことがわかる。

一方、基準器の分解能は 0.5 mm (図では 0 mm の縦軸) で、WS-600 は最大で約 3.0 mm の雨量を観測した例があった。WS-600 は小型ドップラーレーダによる計測であり、このような計測原理が全く異なった測器による観測結果を単純に比較することは困難を伴う。基準器の計測方式は、転倒ます方式であり、0.5 mm に満たないと計測できず、0.5 mm 以下の雨量では例え積算雨量が 0.5mm を超えても原理的に難しい。特に、時間をかけて霧雨や小雨のように短時間の降水量は少ないが、長時間に渡って同じ気象状況では、誤差が大きくなることが想定出来る。そこで、基準器や WS-600 とともに、同じ計測状況を考慮し、積算雨量で比較検討することとした。

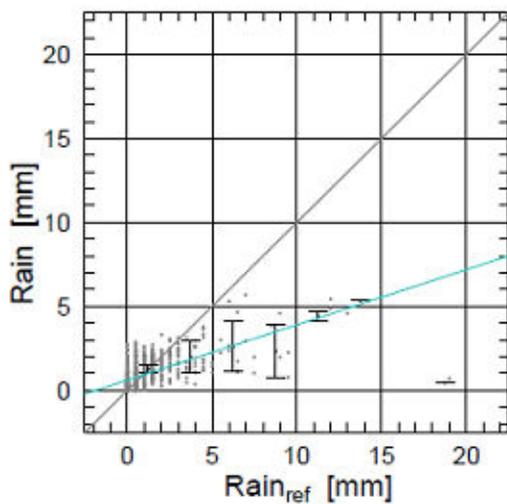


図 3-40-1 WS-600 と基準器との 10 分間雨量の比較

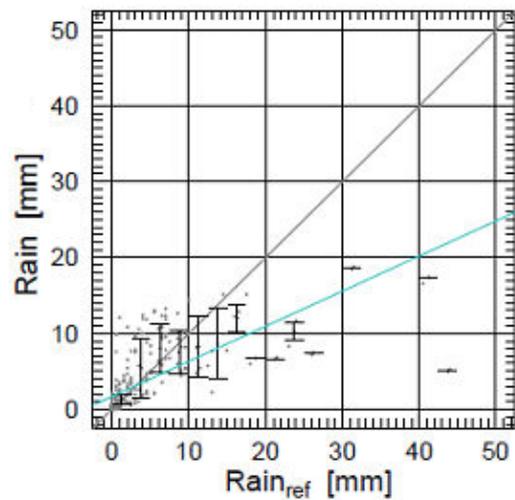


図 3-40-2 WS-600 と基準器との時間雨量の比較

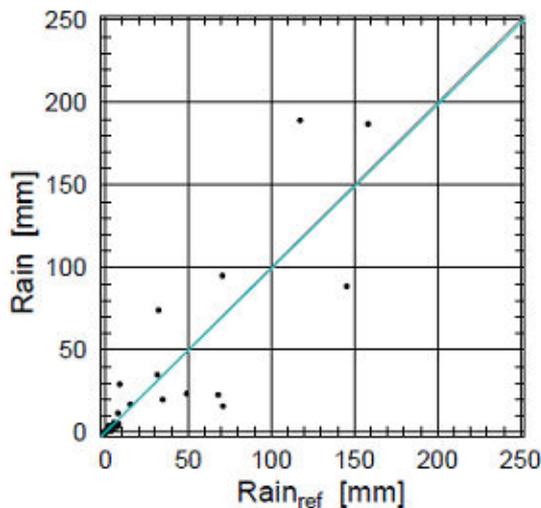


図 3-40-3 WS-600 と基準器との日雨量の比較

そのため、雨量の比較では、10分雨量での比較に加え、時間雨量（毎正時まで1時間の積算）、そして日雨量（毎日24時まで24時間の積算）を計算し比較をおこなった。

表 3-27 WS-600 と基準器との雨量観測値の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [mm]	σ [mm]
10分雨量	936	0.60	$y = 0.33x + 0.60$	-0.01	1.30
時間雨量	263	0.67	$y = 0.46x + 1.71$	-0.05	4.41
日雨量	34	0.87	$y = 0.99x - 0.16$	-0.34	23.06

その結果を、図 3-40-2、図 3-40-3 および表 3-27 に示す。10分雨量の散布図では、WS-600 の値が小さくなる傾向が見られる。相関係数 **R** は 0.60、回帰曲線の傾きも 0.33 となり相関は良くない。

時間雨量の散布図では相関係数 **R** は 0.67、回帰曲線の傾きは 0.46 となり、10分雨量の場合と比べ相関がよくなっている。特に、15 mm 以下の降水量では相関は高い。

さらに日雨量の散布図では、相関係数 **R** は 0.87、回帰曲線の傾きも 0.99 と相関は良くなるが、この結果のみで WS-600 の雨量観測の評価を論じることは難しく、もう少し長期間のデータが必要であろう。

また、観測期間中、基準器では9月4日2時50分に、最大10分雨量19.0 mmを観測したが、WS-600では同時刻および前後の時間帯も0.7 mmから0.8 mmしか記録されておらず、大幅に異なる値となっている。激しい雨の場合の比較についてもさらなる確認が必要である。

雨量に関わらず、観測手法を変更するときは、慎重な検討が必要であることは論ずるまでもない。

3.2.4 WXT520

WXT520 の観測値について、基準器により観測された値の比較結果を示す。なお、WXT520 も雨量を観測しており、各図表の形式は WS-600 と同様である。

(1) 現地気圧

図 3-41 および表 3-28 に現地気圧の比較結果を示す。

現地気圧データ P と、基準データ P_{obs} は、相関係数 R がほぼ 1.00 と高い相関を示すが、図 3-41 左では $P_{obs} = 990$ hPa 前後に、やや値のばらつきが見られる。図 3-41 右では両者の差 $P - P_{obs}$ を基準器の風速 U_{ref} で整理したところ、 U_{ref} が 5.0 m/s 未満ではその差は約 2 hPa でほぼ一定し、標準偏差も小さいが、 U_{ref} が 5.0 m/s 以上では風速が大きくなるにつれて、差が 1.0 ~ 1.5 hPa と小さくなり、ばらつきは大きくなる傾向が表れる。その変動幅はせいぜい 1 hPa 程度である。差の平均 Δ は約 +1.9 hPa であり、高度差による値+1.6 hPa を考慮すると+0.3 hPa となる。

差の標準偏差 σ は 0.15 hPa であり、表 4-5 機器仕様の気圧精度では 0 ~ +30 °C において ± 0.5 hPa と記述されており、実験結果はこれを満たしている。

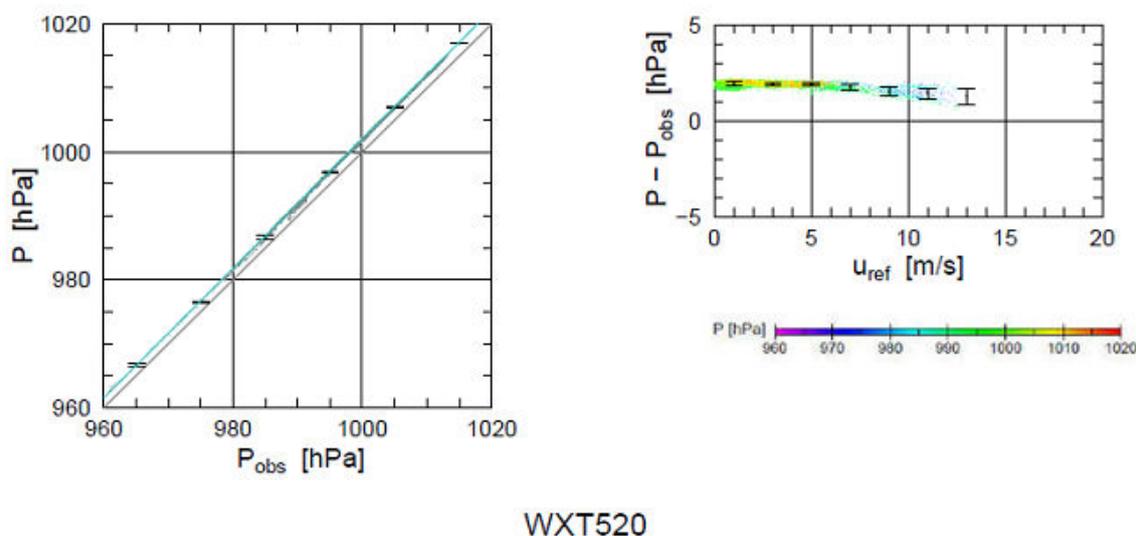


図 3-41 WXT520 と基準値との 10 分平均気圧の比較

表 3-28 WXT520 と基準値との 10 分平均気圧の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [hPa]	σ [hPa]
8788	1.00	$y = 1.01x - 9.06$	+1.89	0.15

(2) 風向風速

図 3-42 に、風向の比較結果を示す。散布図は期間中の全データ、統計計算は U_{ref} が 2.0 m/s 以上の風速のみで行なった。WXT520 の風向風速の観測では一部データの収録が不調となった期間があったが、降雨時との対応などは見られなかった。不調となった現象は、10 分平均値の算出で使用した 1 秒毎の収録データが全て取得できないものであり、発生原因は不明である。10 分平均を行う際に、1 秒毎の収録データの取得率が 80 % 未満となった場合には、以下の統計処理の対象から除いた。不調となった期間は、全観測時間の約 15 % にあたる。

統計計算の結果を表 3-29 に示す。 θ と θ_{ref} の相関係数 R は 0.99 以上、回帰直線の係数もほぼ 1.0 と、良く一致している。風向の差 $\theta - \theta_{\text{ref}}$ については、平均 Δ は約 $+3^\circ$ 、標準偏差 σ も約 3° となった。基準器の風速 U_{ref} が 1.0 m/s 以上ではばらつきも小さく、良好な結果と言える。

表 4-5 機器仕様の風向精度では $\pm 3^\circ$ となっており、仕様の範囲に入っていることが実験結果でも確認できた。

また、風洞実験の風向特性では、特定の角度で値が基準値から外れる事例があったが、今回行った野外観測では、特にそれらしい影響は確認されなかった。

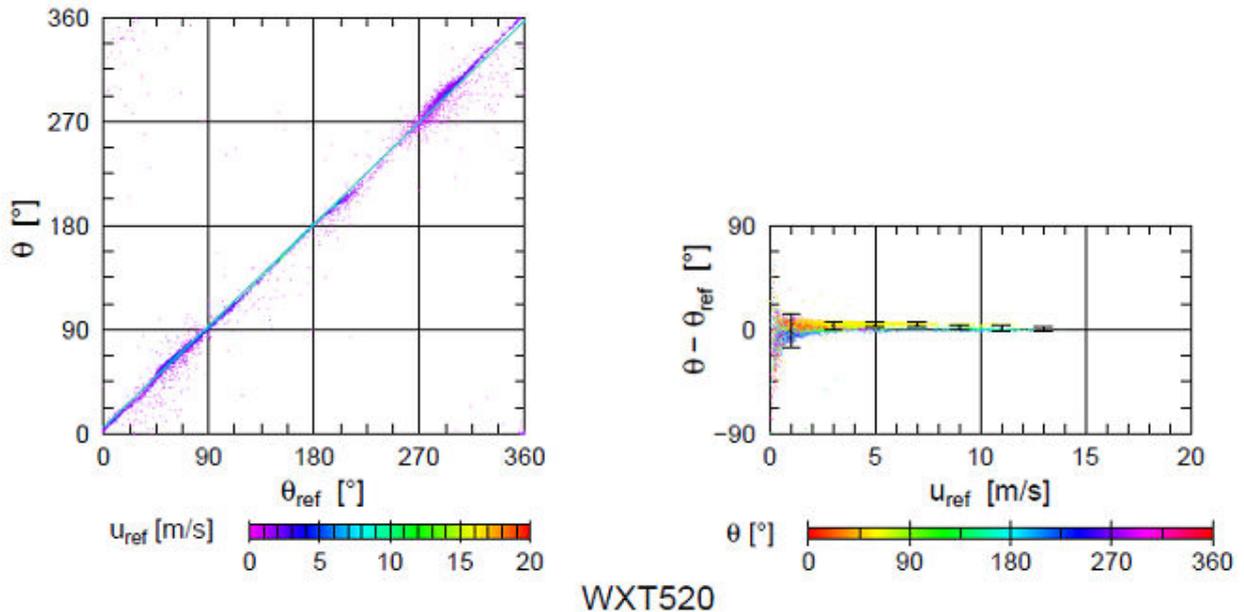


図 3-42 WXT520 と基準器との 10 分平均風向の比較

表 3-29 WXT520 と基準器との 10 分平均風向の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°]	σ [°]
4061	0.99	$y = 0.98x + 5.76$	+3.37	2.69

図 3-43 および表 3-30 は風速についての比較結果である。 U と U_{ref} の相関係数 R は 0.99 以上であり良く一致しているが、回帰直線の係数を見ると 1.03 であり 3% 程度、高めの値を示す結果となった。差の平均 Δ は $+0.14$ m/s、標準偏差 σ は 0.18 m/s であった。

表 4-5 機器仕様の風速精度では、 ± 0.3 m/s または $\pm 3\%$ となっており、仕様の範囲に入っていることが実験結果で確認できた。

また、図 3-43 右および表 3-30 下段は雨天時のデータのみ抽出し比較した結果である。全データを使用した場合と比較して、標準偏差 σ の値が大きくなっているが、降雨による影響はほとんどないことがわかる。

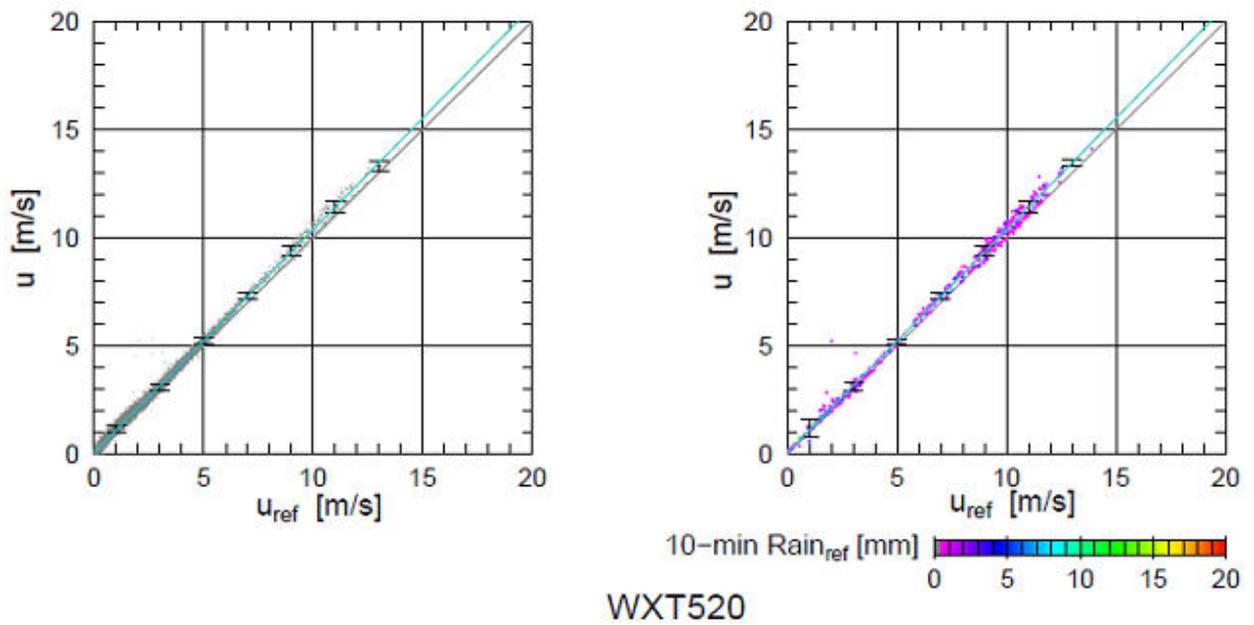


図 3-43 WXT520 と基準器との 10 分平均風速の比較

表 3-30 WXT520 と基準器との 10 分平均風速の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [m/s]	σ [m/s]
全データ	7479	1.00	$y = 1.03x + 0.06$	+0.14	0.18
降雨時のみ	424	1.00	$y = 1.03x + 0.07$	+0.28	0.29

(3) 気温

図 3-44 および表 3-31 に気温についての比較結果を示す。

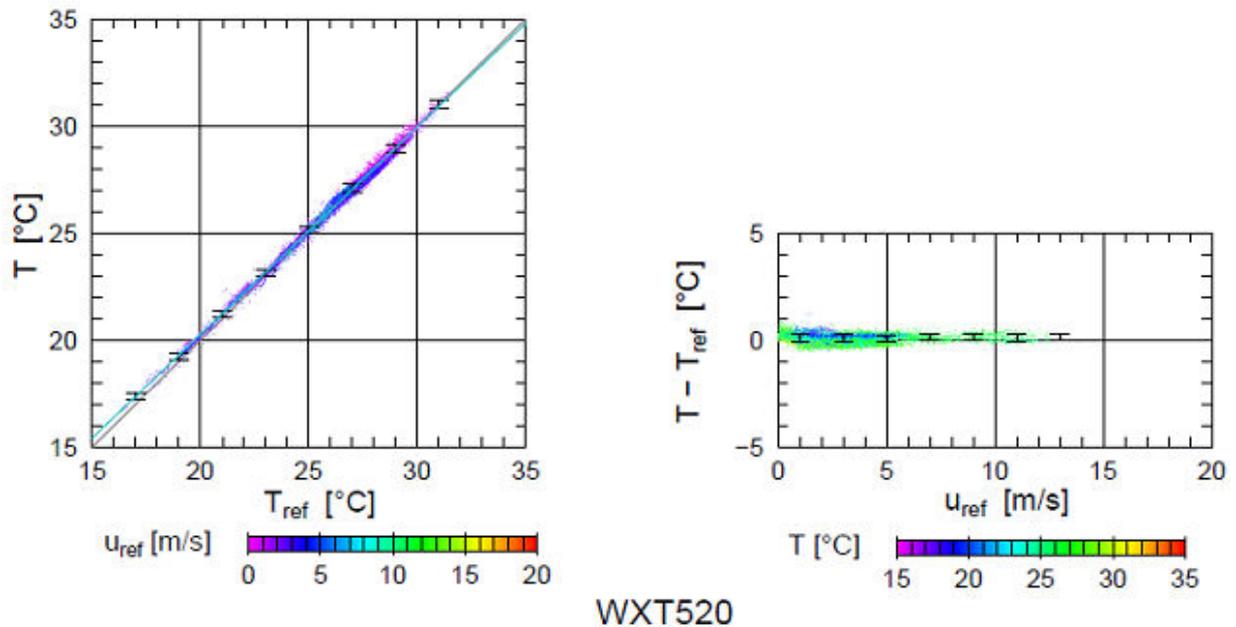


図 3-44 WXT520 と基準器との 10 分平均気温の比較

T と T_{ref} の相関係数 R は 0.99 以上、回帰直線の係数も 0.97 と良く一致していると言える。

図 3-44 右は、気温の差 $T - T_{ref}$ を基準器の風速 U_{ref} 別に示した散布図である。WXT520 は自然通風型であるが、弱風時でも差は 1 °C 以内に収まっており、高温で風の弱い環境においても、一定の性能が出ている。差の平均 Δ は +0.1 °C、標準偏差 σ は約 0.2 °C であり、表 4-5 機器仕様の気温精度を見ると、+20 °C において ± 0.3 °C であり、仕様を満足していると言える。

表 3-31 WXT520 と基準器との 10 分平均気温の相関

N	R	回帰直線	Δ [°C]	σ [°C]
8788	1.00	$y = 0.97 x + 0.90$	+0.10	0.19

(4) 相対湿度

図 3-45 および表 3-32 は相対湿度（以下湿度と言う）についての比較結果である。形式はそれぞれ図 3-29、表 3-12 と同じである。 H と H_{ref} は相関も良く、差の平均 Δ は約 +0.7 %、標準偏差 σ は約 1.4 % と、良く一致していると言える。

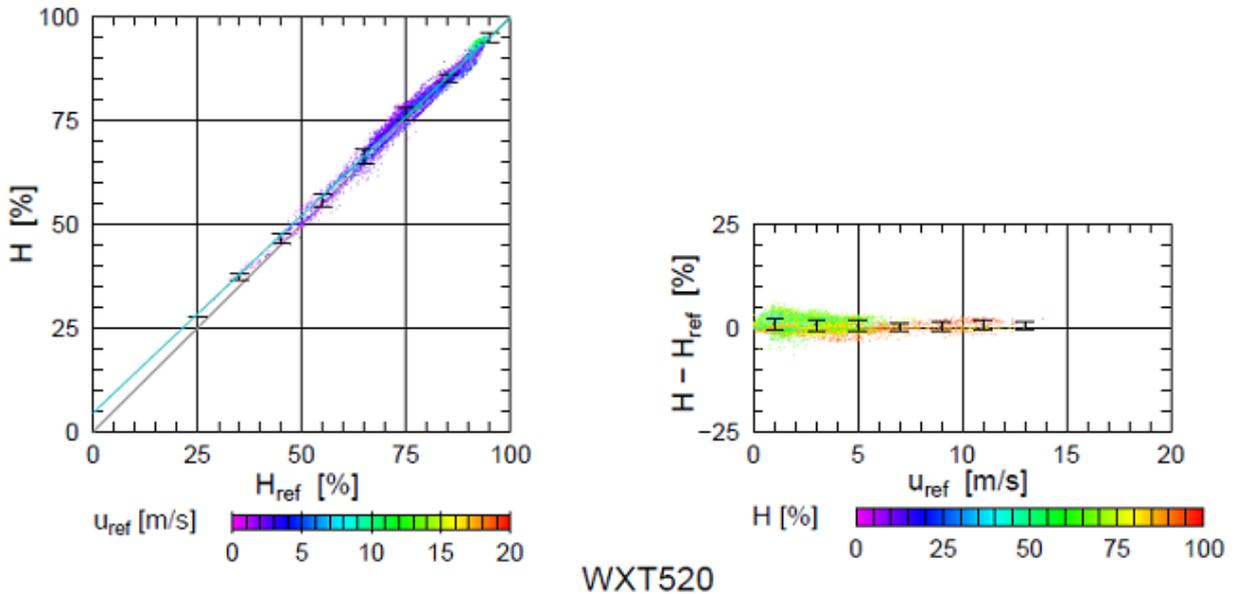


図 3-45 WXT520 と基準器との 10 分平均湿度の比較

図 3-45 右に示すように、値の差 $H - H_{ref}$ を基準風速 U_{ref} 別の散布図で見ても、差は +2.5 ~ 5.0 % に収まっており、周囲の風の強さに対する相対湿度の影響はほとんど見られなかった。表 4-5 機器仕様の湿度精度を見ると湿度が 0 ~ 90% において $\pm 3\%$ となっており、今回の観測結果は仕様の範囲内に収まっている。

表 3-32 WXT520 と基準器との 10 分平均湿度の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [%]	σ [%]
8788	0.99	$y = 0.95 x + 4.50$	+0.70	1.41

(5) 雨量

図 3-46 および表 3-33 は雨量の比較を行なった結果である。基準器および WXT520 のいずれかで、雨量を観測した場合にデータを抽出した。WXT520 の雨量センサーは雨滴の衝撃を検知する方式(4.1.5 を参照)で、分解能は 0.01 mm である。

基準器の転倒ます雨量計は、計量すに溜まった雨量を計量する方式であり、WXT520 の検出方式と異なること、また、分解能も異なることなどから、観測値の比較には注意を要する。

しかし、ある程度の時間内の積算雨量は、計測原理の違いはあるものの、概ね一致するはずである。そこで、積算雨量による比較を試みた。

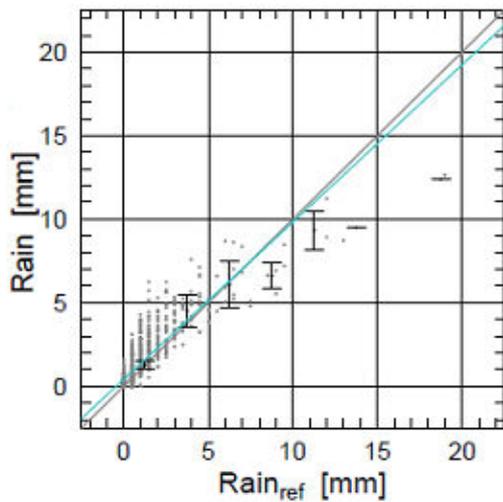


図 3-46-1 WXT520 と基準器との 10 分間雨量の比較

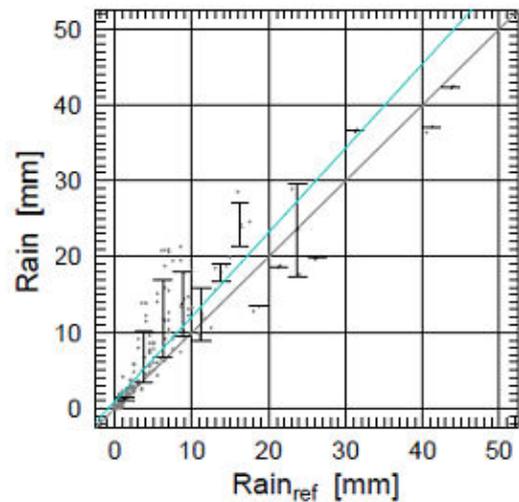


図 3-46-2 WXT520 と基準器との時間雨量の比較

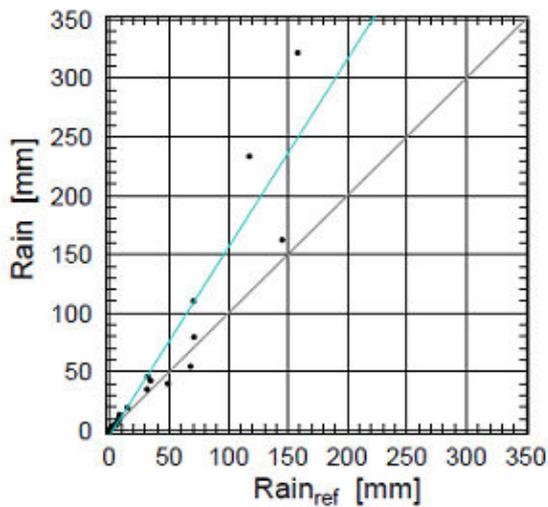


図 3-46-3 WXT520 と基準器との日間雨量の比較

10分雨量について雨量を観測した場合の全データによる統計処理を行なった結果を図 3-46-1 および表 3-33 上段に示す。相関係数 **R** が 0.87、回帰直線の係数が 0.94 と計測原理は異なることを考慮すると、良く一致する結果と言える。

図 3-46-2 を詳細にみると、雨量が 0~5 mm の範囲の場合は WXT520 の雨量値が同時刻の転倒ます雨量計の値より大きくなる傾向がみられた。雨量が 10 mm を超えると WXT520 の雨量値が同時刻の転倒ます雨量計の値より小さくなる傾向がみられる。

一方、雨量が 10 mm を超える非常に激しい雨では、雨粒の大きさによる雨量強度への影響なども、ばらつきの要因となっているかもしれないが、一定の傾向を論じるには、もう少し長期間のデータを見る必要がある。

また、観測期間中に基準器では 9 月 4 日 2 時 50 分に最大 10 分雨量 19.0 mm を観測したが、WXT520 についても同時刻に、最大 10 分雨量 12.6 mm を記録した。激しい雨の場合の比較についても、さらなる確認が必要である。

結果の整理では、10分雨量での比較に加え、時間雨量、そして日雨量も計算し比較をおこなった。結果を図 3-46-2、図 3-46-3 および表 3-33 下段に示す。10分雨量での結果に比べ、積算時間を長くすると WXT520 の雨量値が同時刻の転倒ます雨量計の値より大きくなり、回帰直線の係数が 0.94 から 1.11 となった。

表 3-33 WXT520 雨量観測値の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [mm]	σ [mm]
10分雨量	973	0.87	$y = 0.94x + 0.43$	+0.38	0.85
時間雨量	271	0.90	$y = 1.11x + 1.00$	+1.35	3.17
日雨量	36	0.95	$y = 1.60x - 4.18$	+10.18	32.84

さらに、日雨量で比較すると、WXT520 の雨量値が同時刻の転倒ます雨量計の値より、さらに大きくなる傾向が表れた。この結果を見る限り、WXT520 では、10分雨量値においては、基準器の観測とほぼ同等の結果が得られたが、積算時間が長時間になると、分解能や計測方法の違いに因る差が顕著になると言える。

3.2.5 150WX

150WX の観測結果について、基準器データとの比較結果を示す。要素は、現地気圧、風向風速、気温、相対湿度である。なお、150WX は発売前の試作品であったことを付け加える。

(1) 現地気圧

図 3-47 と表 3-34 に、現地気圧の比較結果を示す。図 3-47 左に示す通り、 P と P_{obs} は高い相関を示した。差の平均値 Δ は約+1.9 hPa であり、高度差による値+1.6 hPa を考慮すると、+0.3 hPa となる。差の標準偏差 σ は 0.16 hPa であり、表 4-6 機器仕様の気圧精度を見ると ± 1 hPa となっていることから、仕様の精度を満たす結果となった。

図を詳細にみると、一部 $P_{obs} = 990$ hPa 付近で線形回帰直線の下に表示されたばらつきがみられたが、これは、図 3-47 右に示した、観測値と基準器の値の差 $P - P_{obs}$ でも顕著である。基準器の風速 U_{ref} が 7 m/s 未満では、差は約 2 hPa で一定していて、標準偏差も小さい。他方で、 U_{ref} が 7 m/s 以上では、差が小さくなるデータ点が多く見られ、値のばらつきが大きくなっているが、風速が弱い場合は安定している。

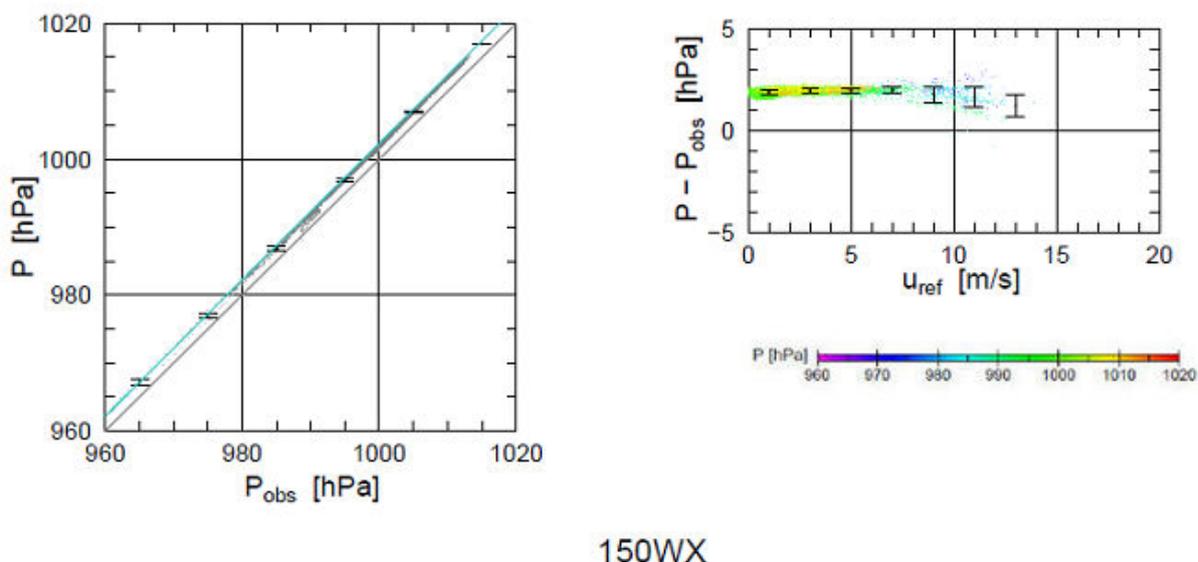


図 3-47 150WX と基準値との 10 分平均気圧の比較

表 3-34 150WX と基準値との 10 分平均気圧の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [hPa]	σ [hPa]
8788	1.00	$y = 1.00 x - 2.66$	+1.92	0.16

(2) 風向風速

150WX の風向風速比較結果について示す。150WX は、GPS 受信機およびフラックスゲート式方位磁石を搭載しており、真北および磁北を 0 とする時計回りの角度で、風向を出力することが可能であり、設置時に筐体の向きを真北に合わせなくてもよいという簡便性がある。

但し、今回観測で用いた 150WX では残念ながら方位磁石が不調となり、収録したデータが正しい風向の値でないことが観測終了後に判明した。

そこで、以下の解析では、収録した真北を0とする絶対風向の値をそのまま使用せず、相対風向の値を補正して使用することとした。

相対風向の値の補正方法を以下に述べる。設置時に筐体の向きや、相対風向の基準となる方位の確認を行わなかったため、収録データから設置時の筐体の向きを推定し観測結果を補正した。補正值は150WXの相対風向 θ と、基準器の風向 θ_{ref} の観測結果から推定した。 $\theta - \theta_{ref}$ を、基準器の風速 U_{ref} 別に整理したところ、強風時に 115.2° に収束したため、 $\theta' = \theta - 115.2^\circ$ を補正式とした。

図3-48および表3-35に、補正後の風向 θ' と基準器の風向 θ_{ref} の比較結果を示す。散布図は期間中の全データを出力してあるが、統計計算は U_{ref} が2.0 m/s以上の風速のみで行なった。

その結果、 θ' と θ_{ref} の相関係数 R は0.95以上と良く、差の平均 Δ も $+0.27^\circ$ と一致していると言える。但し、差の標準偏差 σ は 16.1° と大きくなっている。図3-48右では、基準風速 U_{ref} が8 m/s以下では差のばらつきは大きく、 U_{ref} が5 m/sでも標準偏差は 10° 近くある。

なお、 U_{ref} が8 m/sを超えると、 $\theta' - \theta_{ref}$ はよく収束している。

表4-6機器仕様の風向精度は、降水の有無、気温などの条件によって $2^\circ \sim 8^\circ$ と異なるが、今回の結果は、仕様より悪い結果となってしまったが、方位磁石の不調などもあり今回使用したCWSの個体固有の問題である可能性も高い。

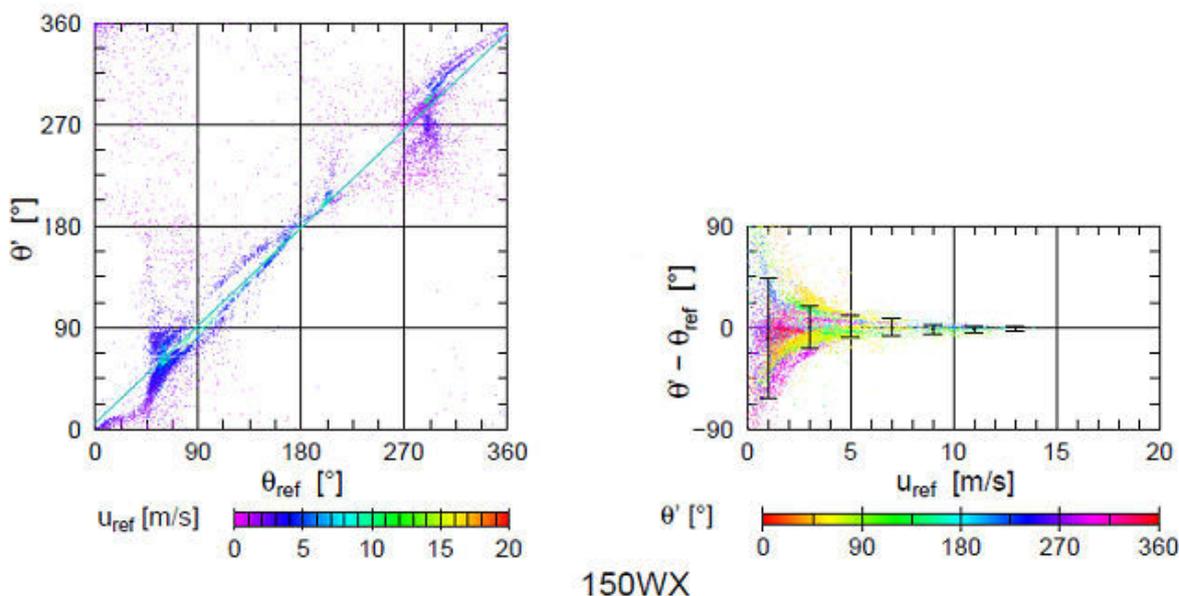


図 3-48 150WX と基準器との 10 分平均風向の比較

表 3-35 150WX と基準器との 10 分平均風向の相関

N	R	回帰直線	Δ [°]	σ [°]
5147	0.95	$y = 0.96x + 5.61$	+0.27	16.10

風速の比較結果を、図3-49および表3-36に示す。 U と U_{ref} の相関係数 R は0.94、差の平均 Δ は $+0.3$ m/s未満となったが、標準偏差 σ は 0.8 m/s程度でばらついている。雨天時の比較結果は図3-49右に示す。全データの結果図3-49左と比べて、標準偏差が2倍程度となり、ばらつきが大きくなるが、全体の傾向としては変わらない。

表 4-6 機器仕様の風速精度は、降水の有無、気温などの条件によって異なるが、0～5 m/s では、±0.5 m/s または 10 %、5～70 m/s では、±1 m/s または 5 % であり、今回の結果は、仕様より悪い結果となってしまった。上記、風向の結果同様、今回使用した CWS の問題である可能性も高い。

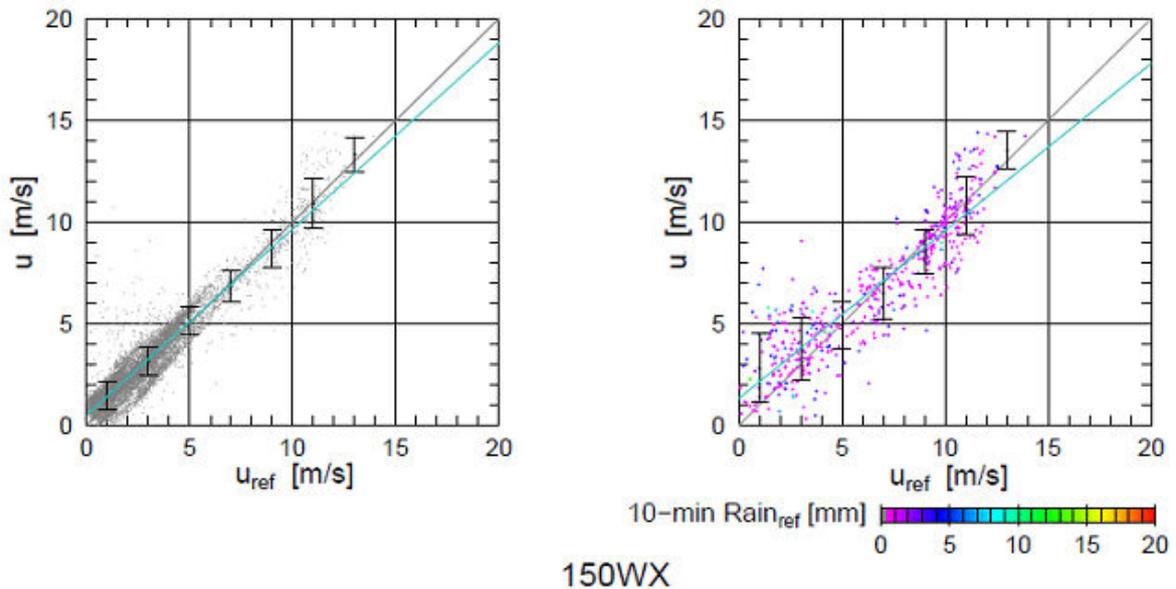


図 3-49 150WX と基準器との 10 分平均風速の比較

表 3-36 150WX と基準器との 10 分平均風速の比較結果

項目	N	R	回帰直線	Δ [m/s]	σ [m/s]
全データ	8788	0.94	$y = 0.92x + 0.50$	+0.26	0.76
降雨時	517	0.90	$y = 0.82x + 1.32$	+0.16	1.57

(3) 気温

図 3-50 および表 3-37 に、気温の比較結果を示す。

回帰直線の係数は、傾きが 1.18、オフセットが -4.93 であり、 T_{ref} が 27 °C 付近を境に、低温では値が低く、高温では値が高くなった。また風速 U_{ref} が 5 m/s 以下の場合に、150WX の値が高くなっていることがわかる。

図 3-50 右は気温の差 $T - T_{\text{ref}}$ の風速別分布を示す。150WX は自然通風型であり基準器の風速 U_{ref} が 5 m/s 以下かつ高温の場合はばらつきが顕著となっている。特に気温 T が 25 °C を超えるの場合に高くなる傾向が見られた。全体では、差の平均 Δ は約 -0.4 °C、標準偏差 σ は約 0.8 °C である。

表 4-6 機器仕様の気温精度を見ると、風速 2 m/s において ±1 °C であるが、今回の実験では、仕様を満足しているとは言えない結果となったが、使用した CWS は試作品であることを考慮する必要がある。

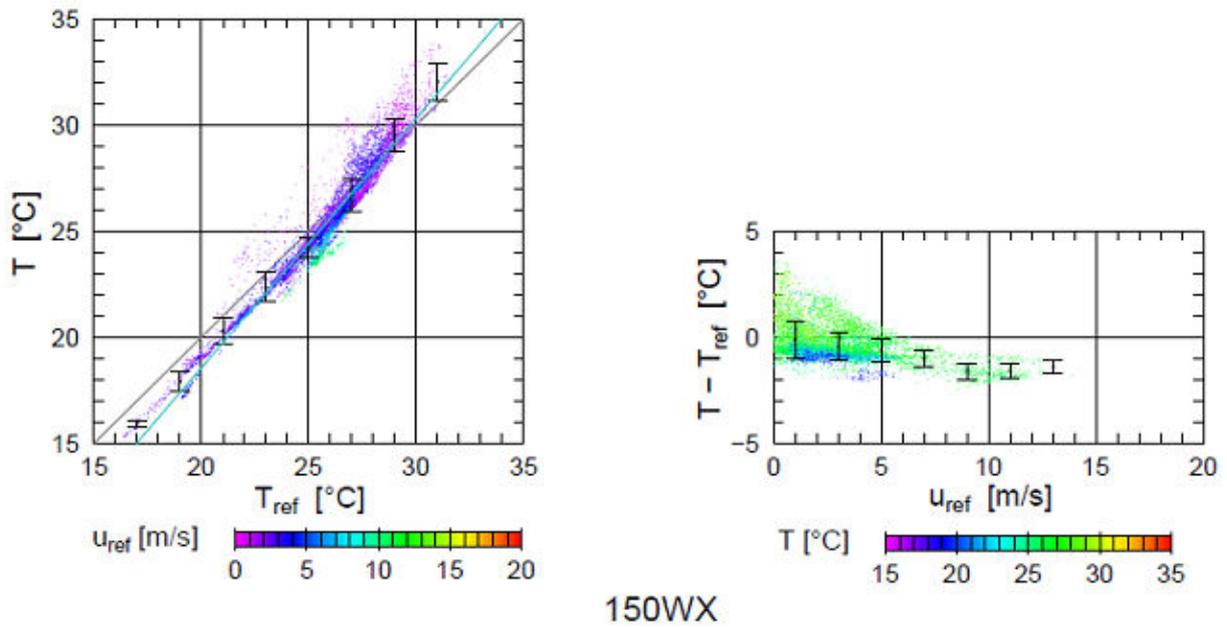


図 3-50 150WX と基準器との 10 分平均気温の比較

表 3-37 150WX と基準器との 10 分平均気温の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [°C]	σ [°C]
8788	0.97	$y = 1.18x - 4.93$	-0.40	0.81

(4) 相対湿度

図 3-51 および表 3-38 に、相対湿度（以下湿度と言う）の比較結果を示す。**H** と **H_{ref}** の相関係数 **R** は 0.98、回帰直線の傾きは 0.97、オフセットは 6.62 であり、全体を通して高い値を計測していることがわかる。

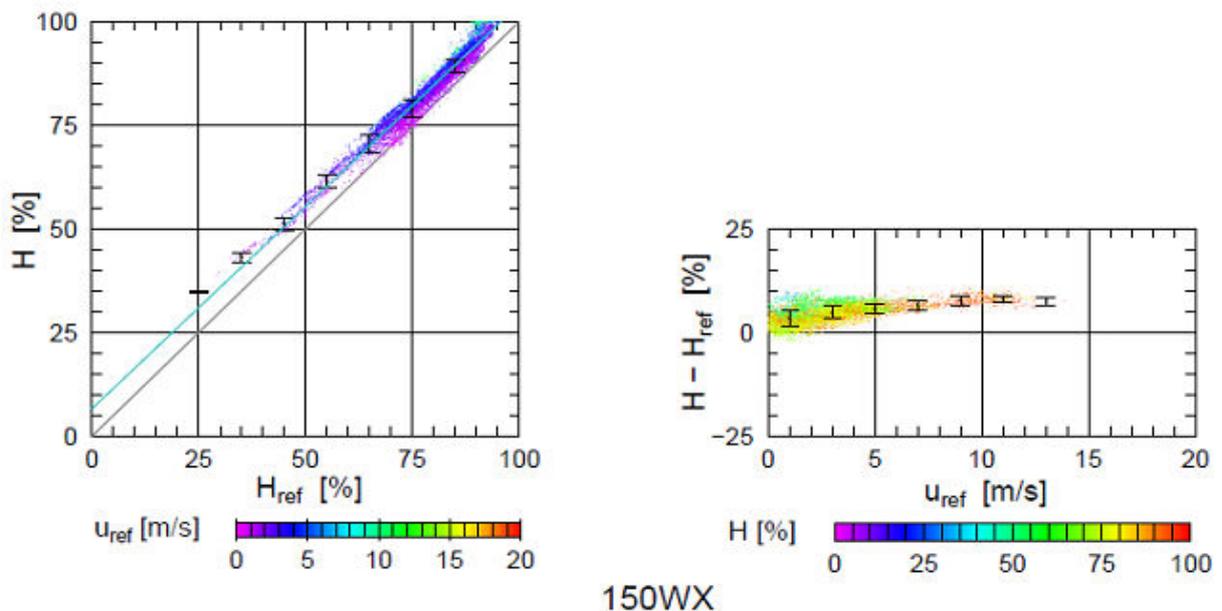


図 3-51 150WX と基準器との 10 分平均湿度の比較

図 3-51 右に示す湿度差 $H - H_{\text{ref}}$ の風速別分布および差の平均 Δ をみると、差は約 +5 % である。

基準器の風速 U_{ref} が 5 m/s 以下且つ湿度 H が 75 % 以上の場合に、ばらつきが小さくなる傾向があるが理由はわかっていない。

表 4-6 機器仕様の湿度精度を見ると $\pm 4\%$ であるが、全体的に 6 % を超えるオフセットがあるため、仕様を満足しているとは言えない結果となった。但し、使用した CWS は試作品であったことを考慮する必要がある。

表 3-38 150WX と基準器との 10 分平均湿度の比較結果

N	R	回帰直線	Δ [%]	σ [%]
8788	0.98	$y = 0.97x + 6.62$	+4.59	1.99

3.2.6 最大瞬間風速の調査

3.2の野外観測では、基準器に対して風速は10分平均風速値の比較を行なった。しかし、風の観測では瞬間風速も重要な要素であり、各CWSにおいて瞬間風速の結果についても気になるところである。

そこで、同時観測を行なった超音波風向風速計 DAT-600 を基準器として、最大瞬間風速の測定値を評価した。

評価するに当たり、各測器にてセンサーの応答速度および出力信号の時間が一定ではないため、必要に応じて統計処理を行ない比較した。各測器の応答速度は表 3-39 のとおりである。

表 3-39 各測器の応答速度一覧

測器名	①DAT-600	②W855	③AIO	④MetPak II	⑤WS-600	⑥WXT520	⑦150WX
応答速度	20Hz	-	1Hz	1Hz	0.1Hz	4Hz	1Hz
備考		プロペラ型			出力 1Hz		

2.2.1 項で述べたが、観測に用いた超音波風速計、プロペラ型風向風速計、各 CWS の各出力信号は 2 台の AWS データロガーに入力し、1 秒値として収録した。1 秒値の内容を詳しく見ると、表 3-39 の①、②については 10 Hz サンプル値を AWS データロガーにて統計処理し 1 秒値を収録した。③、④、⑦については 1 秒毎に出力される CWS 出力値を、そのまま 1 秒値として収録した。⑤についてセンサーのサンプリング間隔は、10 秒に 1 回 (0.1Hz) であるが、CWS からの出力としては 1 秒毎に出力されるため、CWS 出力値をそのまま 1 秒値として収録した。⑥は、センサーでは 4 Hz サンプルを行っているが、センサー内部で統計処理され、出力は 1 秒値となっているため、そのまま 1 秒値として収録した。

比較期間は、降雨の少なかった前半と、台風が接近および襲来した強風強雨を含む後半に分けた。期間前半は 2011 年 7 月 28 日から 8 月 20 日までとした。降雨があった日数は 5 日間あり、10 分雨量は最大でもすべて 5 mm 以下であった。後半は、8 月 21 日から 9 月 27 日までとした。2.2.2 項で述べた通り、台風 12 号、台風 15 号の影響で、10 分雨量が 5 mm 以上を記録した日が 11 日間あった。

(1) W855-Z1

CWS の評価の前に、まずは、基準器 DAT-600 と W855-Z1 との比較結果を図 3-52 に示す。横軸に基準器 DAT-600 の最大瞬間風速、縦軸に W855-Z1 の最大瞬間風速をプロットした。

期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 1.02 と 1.05、相関係数が 0.94 と 0.99 で一致度は良好であった。W855-Z1 はプロペラ型風向風速計であるが、最大瞬間風速値の指示応答の差異は小さい結果となった。

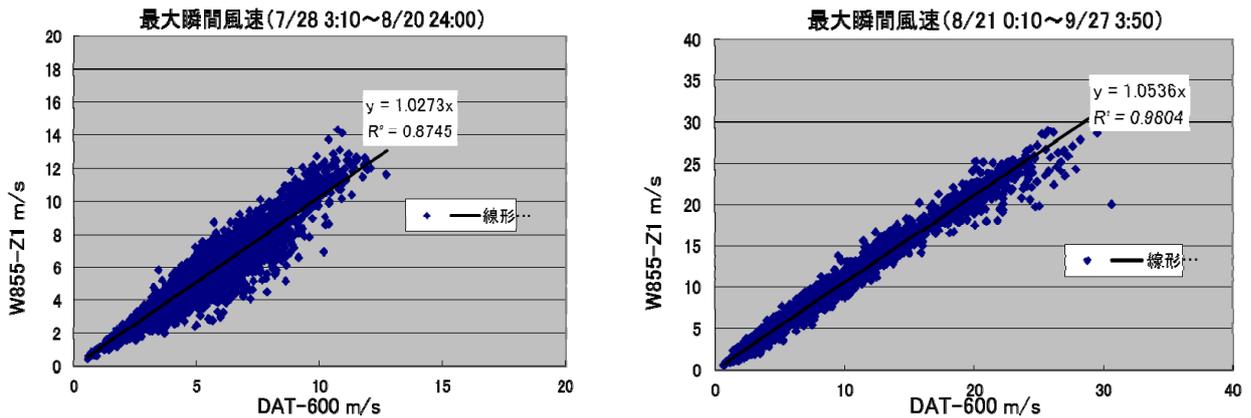


図 3-52 W855-Z1 の最大瞬間風速比較 期間前半 (左)、期間後半 (右)

(2) All-In-One CWS

All-In-One CWS との最大瞬間風速の比較結果について、図 3-53 に示す。期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 1.05 と 1.59、相関係数が 0.94 と 0.40 であった。後半は降雨時の測定値出力に異常値が混入しており、降雨時の瞬間風速のデータは利用できない。

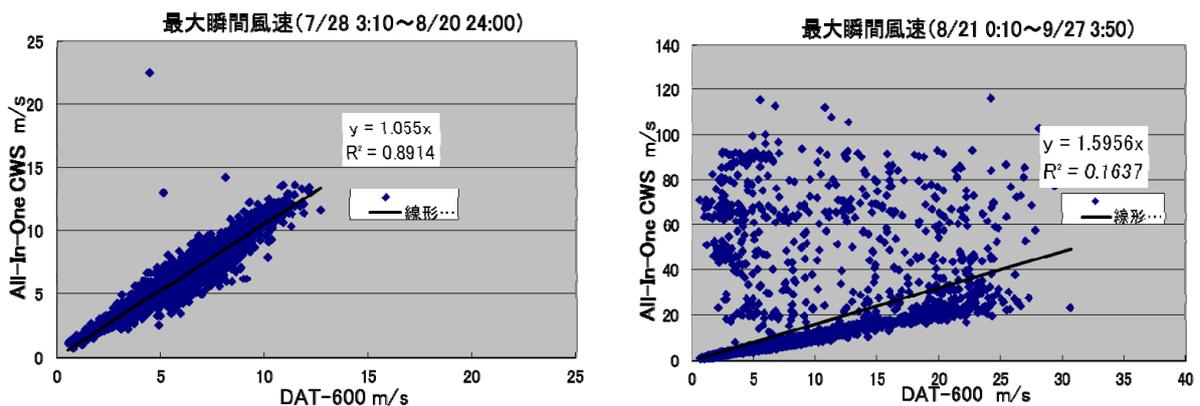


図 3-53 All-In-One CWS の最大瞬間風速比較 期間前半 (左)、期間後半 (右)

(3) MetPak II

MetPak II との最大瞬間風速の比較結果について、図 3-54 に示す。期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 1.08 と 1.10、相関係数が 0.94 および 0.98 で一致度は概ね良好であった。後半は強雨のあった 8 月 24 日～25 日に欠測が発生した（図中、赤丸で囲った部分）。CWS 内部で欠測判定を行っており、降雨中でも測定出力されている値には明らかな異常値は認められない。

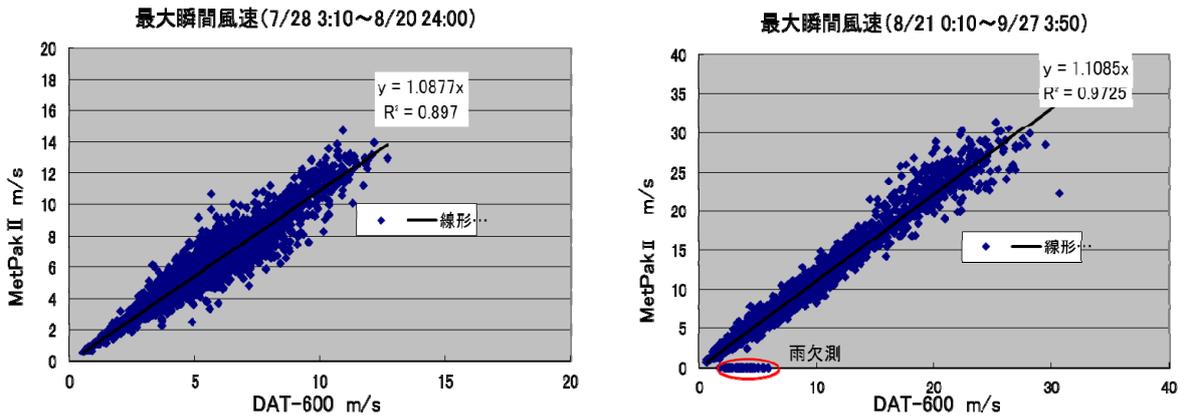


図 3-54 MetPak II の最大瞬間風速比較 期間前半（左）、期間後半（右）

(4) WS-600

WS-600 との最大瞬間風速比較結果について、図 3-55 に示す。期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 1.18 と 1.17、相関係数が 0.93 および 0.98 で一致度は良好であった。強風強雨のあった後半にも欠測や異常値が発生することはなかった。

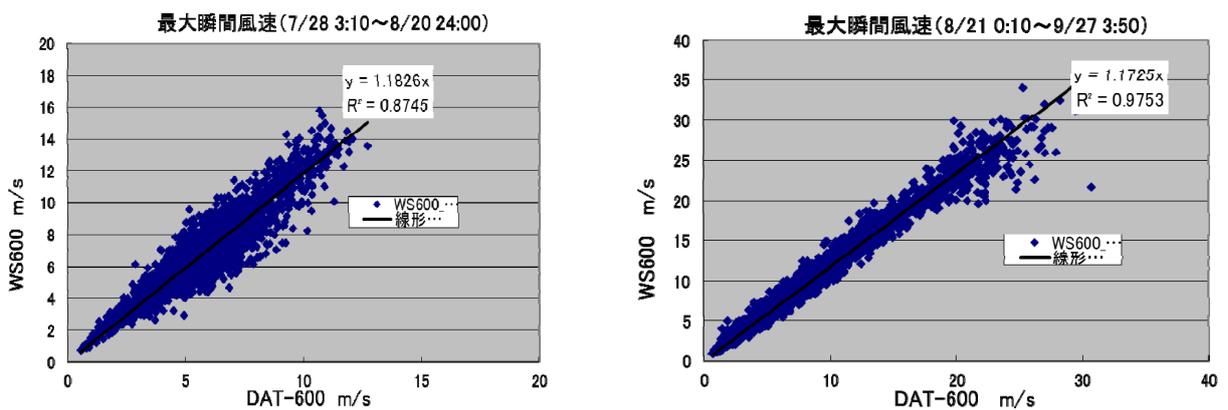


図 3-55 WS-600 の最大瞬間風速比較 期間前半（左）、期間後半（右）

(5) WXT520

WXT520 との最大瞬間風速の比較結果について、図 3-56 に示す。期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 0.97 と 0.87、相関係数が 0.94 と 0.83 であった。後半は 9 月 14 日以降にデータ取得率が低下し、9 月 14~16 日、9 月 19~21 日に欠測が発生して（図中、赤丸で囲った部分）データを悪くした。この欠測は降雨の有無に関係なく発生しているようであり詳細は不明である。

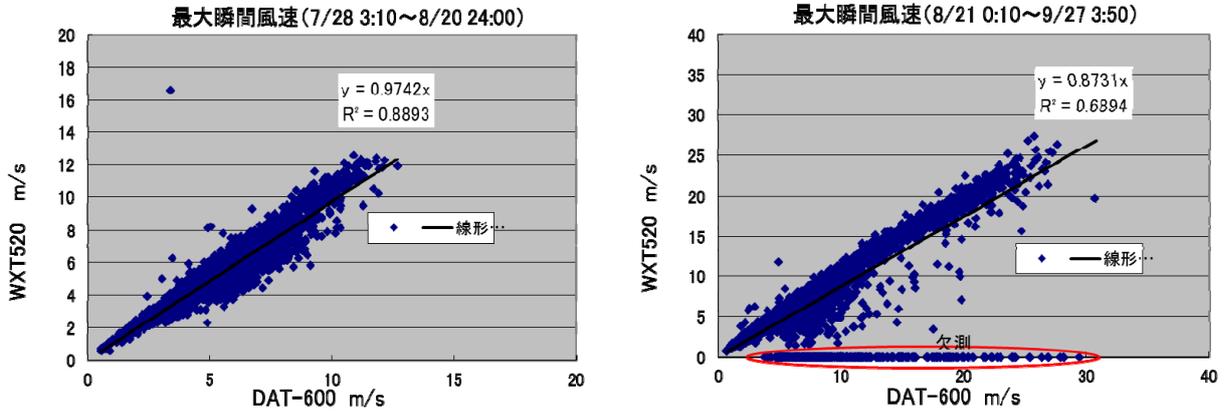


図 3-56 WXT520 の最大瞬間風速比較 期間前半（左）、期間後半（右）

(6) 150WX

150WX との最大瞬間風速の比較結果について、図 3-57 に示す。期間前半と後半の最大瞬間風速は回帰直線の係数がそれぞれ 1.19 と 1.15、相関係数が 0.87 と 0.93 であった。降雨時には明らかな過大値が出力されることがある。

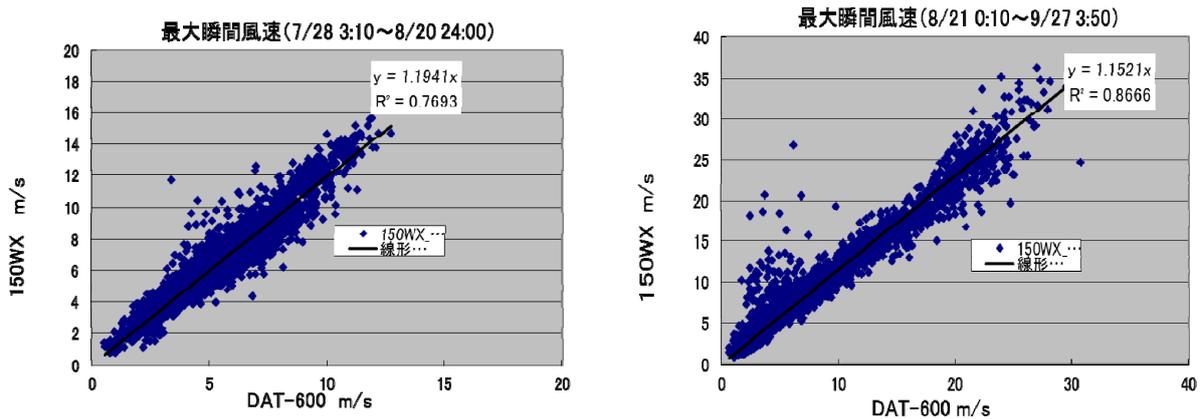


図 3-57 150WX の最大瞬間風速比較 期間前半（左）、期間後半（右）

3.2.7 乱流特性の調査

ここでは5器種のCWSの野外評価観測結果について、乱流の測定値について結果を紹介する。基準器としてソニック製超音波風向風速温度計DAT-600を使用し、水平風速の標準偏差 σ_u と風向の標準偏差 σ_θ について比較を行なった。なお、 σ_u 、 σ_θ の算出方法については、6章に記載した。

σ_u の比較期間は、3.2.6と同様に、降雨の少なかった前半と、台風が接近および襲来した強風強雨を含む後半に分けた。期間前半は2011年7月28日から8月20日までとした。降雨があった日数は5日間あり、10分雨量は最大でもすべて5mm以下であった。後半は、8月21日から9月27日までとした。2.2.2で述べた通り、台風12号、台風15号の影響で、10分雨量が5mm以上を記録した降水日が11日間あった。なお σ_θ については、期間前半のみで比較を行なった。

(1) All-In-One CWS

期間前半の σ_u 、 σ_θ は回帰直線の係数が1.10および0.98、相関係数が0.97および0.97で一致度は良好であった。後半は降雨時の測定値出力に異常値が混入しており、降雨時の風向風速に関するデータは利用できないことがわかった。

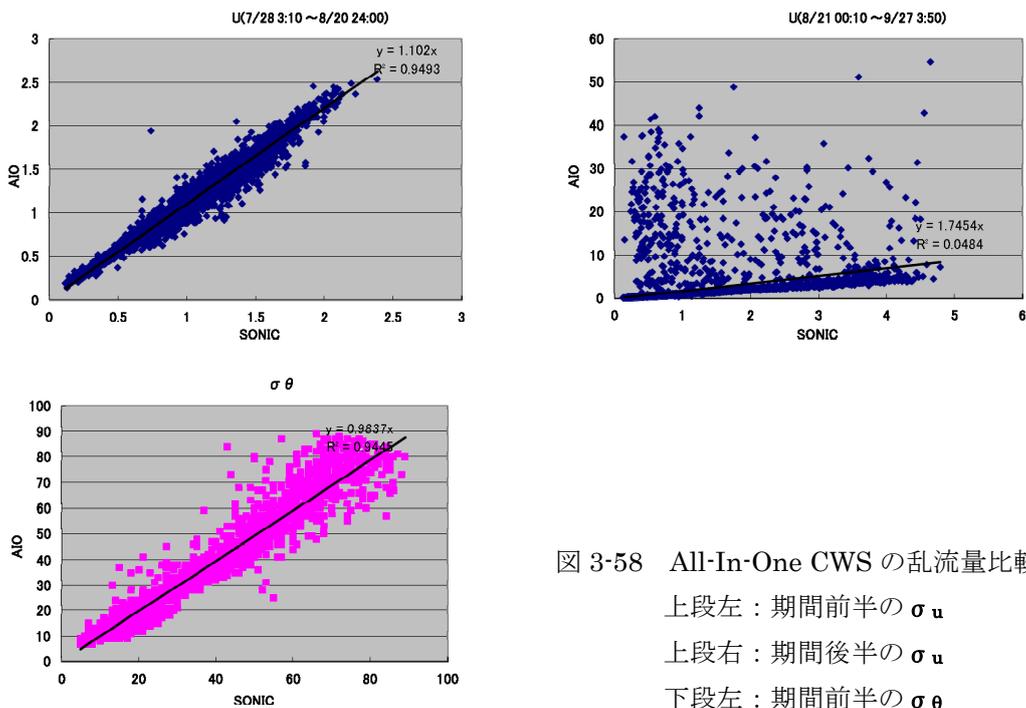


図 3-58 All-In-One CWS の乱流量比較
 上段左：期間前半の σ_u
 上段右：期間後半の σ_u
 下段左：期間前半の σ_θ

(2) MetPak II

期間前半の σ_u 、 σ_θ は回帰直線の係数が 1.10 および 1.05、相関係数が 0.97 および 0.96 で一致度は良好であった。後半は強雨のあった 8 月 24~25 日に欠測が発生した。CWS 内部で欠測判定を行っており、降雨中でも測定出力されている値には明らかな異常値は認められない。

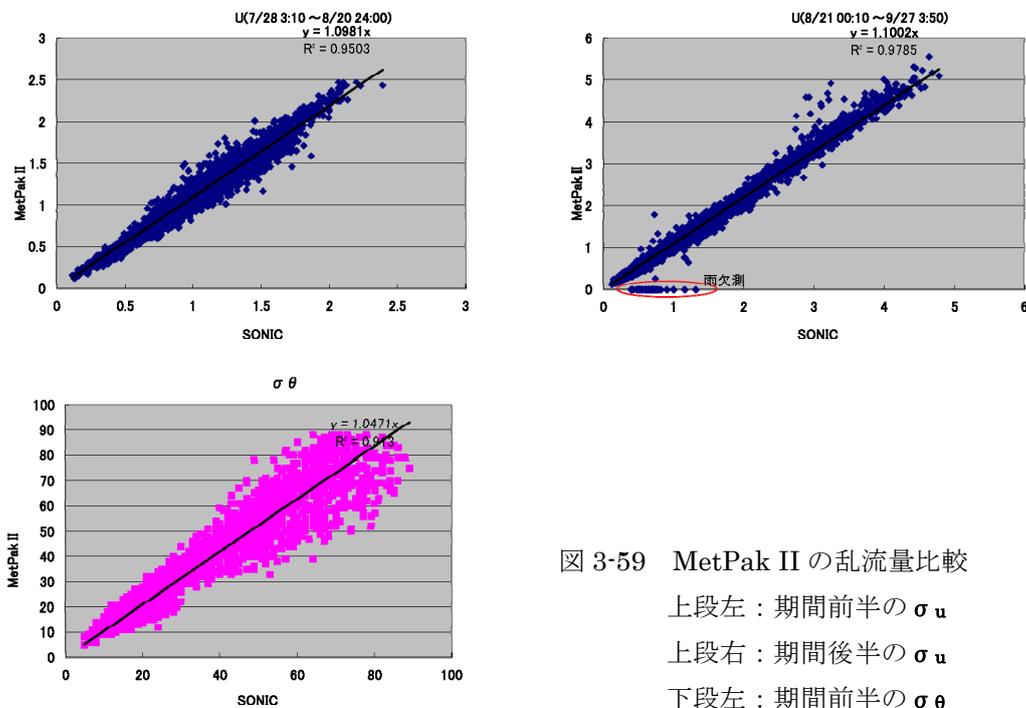


図 3-59 MetPak II の乱流量比較
上段左：期間前半の σ_u
上段右：期間後半の σ_u
下段左：期間前半の σ_θ

(3) WS-600

期間前半の σ_u 、 σ_θ は回帰直線の係数が 1.21 および 1.03、相関係数が 0.96 および 0.93 で一致度は概ね良好であった。強風強雨のあった後半にも欠測や異常値を発生することなく、 σ_u の回帰直線の係数は 1.14、相関係数は 0.99 で一致度は良好となった。

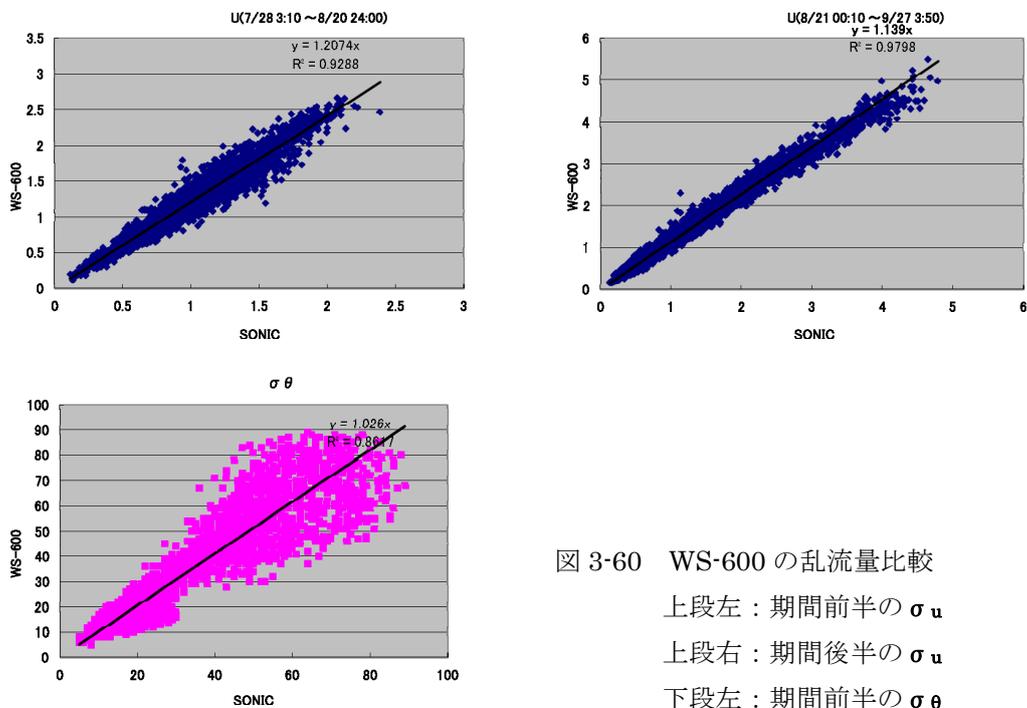


図 3-60 WS-600 の乱流量比較
上段左：期間前半の σ_u
上段右：期間後半の σ_u
下段左：期間前半の σ_θ

(4) WXT520

期間前半の σ_u 、 σ_θ は回帰直線の係数が1.02および0.98、相関係数が0.97および0.98で一致度は良好であった。後半は9月14日以降にデータ取得率が低下し、9月14～16日、9月19～21日に欠測が発生した。降雨の有無に関係なく発生しているようであり詳細は不明である。

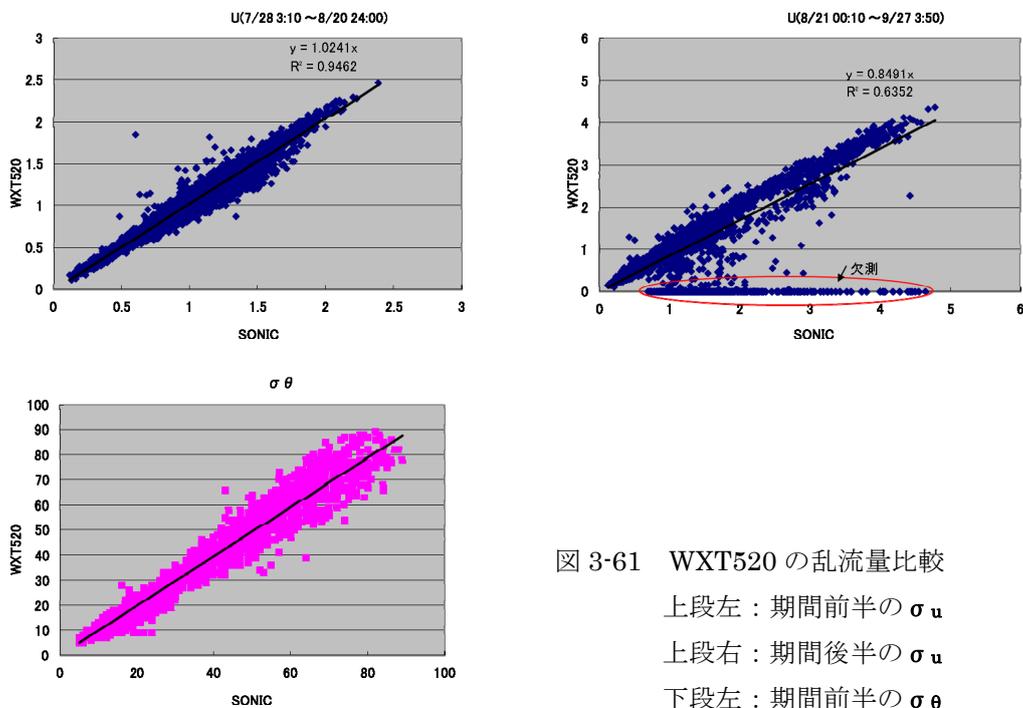


図 3-61 WXT520 の乱流量比較
上段左：期間前半の σ_u
上段右：期間後半の σ_u
下段左：期間前半の σ_θ

(5) 150WX

期間前半の σ_u は回帰直線の係数が1.16、相関係数が0.94で一致度は概ね良好であった。 σ_θ は回帰直線の係数が0.87、相関係数が0.84でばらつきが大きい結果となった。降雨時には σ_u に異常値が出力されることがあり、散布図上でも明らかな過大値が認められた。

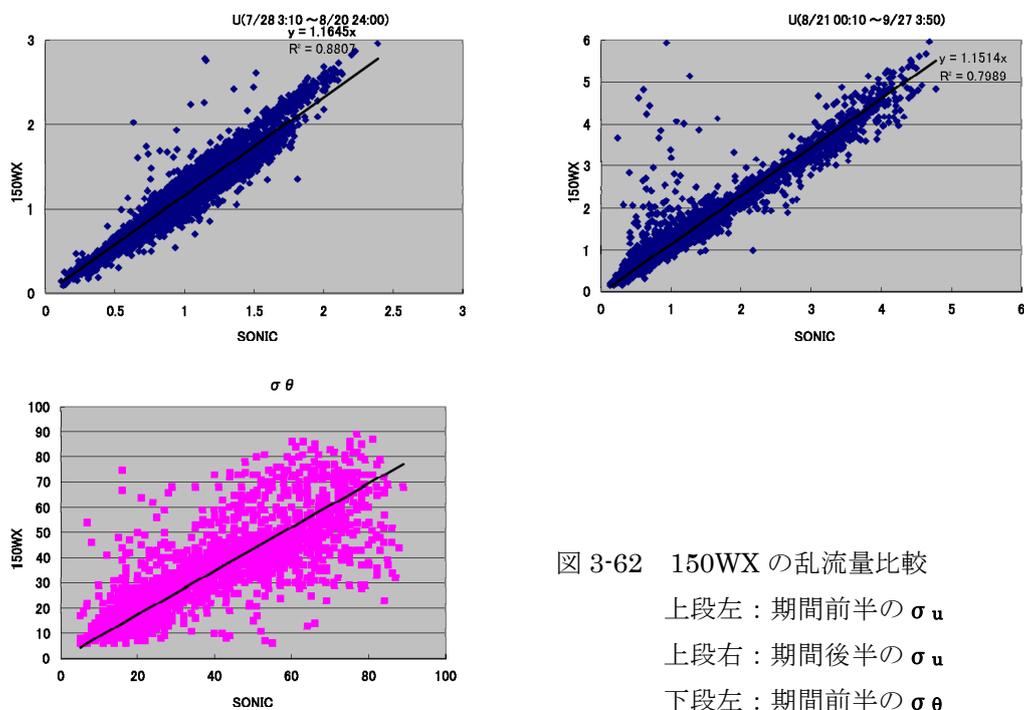


図 3-62 150WX の乱流量比較
上段左：期間前半の σ_u
上段右：期間後半の σ_u
下段左：期間前半の σ_θ