

ISSN 1347-4588
UDC 551.501.8
551.588.82
629.7.018.7

独立行政法人

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1469

小型超音速実験機(NEXST-1)の飛行実験における気象観測

川上 浩樹 ・ 又吉 直樹 ・ 村上 義隆

2003年8月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

目次

1. はじめに	2
2. 気象観測体制	4
2.1 概要	4
2.2 気象予報	4
2.2.1 射点の気象予報	5
2.2.2 高層気象予報	5
2.3 気象観測装置	7
2.3.1 射点における気象観測	7
(i). 観測装置の配置	7
(ii). 射点気象観測装置	9
(iii). 射点20m風観測装置	10
(iv). バルーン・トラッキング	11
(v). 雲の観測	12
(vi). BoM気象レーダ	13
2.3.2 回収点における地上風観測	13
2.3.3 実験機計測空域における高層気象観測	15
(i). GPSゾンデによる高層気象観測	15
(ii). VHFレーダによる高層風観測	15
2.4 気象観測データのモニタ体制	18
3. 飛行実験時の気象観測	20
3.1 気象観測手順	20
3.2 第1回飛行実験時の状況	22
4. 観測データの解析・評価	31
4.1 実験実施可能確率の評価	31
4.2 射点20m風の突風率の検討	31
4.3 1日の気象変化の評価	32
4.4 回収点地上風の評価	37
4.5 射点地上500mまでの風の変動量の評価	40
4.6 VHFレーダの性能評価	40
4.6.1 風速データの信頼性評価	40
4.6.2 飛行試験による風速データの精度評価	43
4.6.3 まとめ	46
5. おわりに	46
付録 VHFレーダ風観測精度検証飛行試験報告書	49

小型超音速実験機(NEXST-1)の飛行実験における気象観測*

川上浩樹[†] 又吉直樹[†] 村上義隆[†]

Weather Monitoring for NEXST-1 Flight Experiment*

KAWAKAMI HIROKI[†], MATAYOSHI NAOKI[†], MURAKAMI YOSHITAKA[†]

ABSTRACT

The first flight trial of the non-powered supersonic experimental airplane (NEXST-1) was conducted by the National Aerospace Laboratory of Japan (NAL) on July 14, 2002 at Woomera, Australia. To acquire weather data for the Go/No-Go decision for the flight trial and for the post-flight analysis, a weather monitoring system was constructed at Woomera by NAL. The automatic weather station and the ultrasonic wind sensor were installed at the launch site and at the retrieval point, respectively. A radar tracking balloon and VHF radar were used to acquire wind data for a height of up to 20km, where the NEXST-1 experiment was to be performed. Since VHF radar has not been firmly established as a wind monitoring method, another flight test was conducted to confirm its performance. In addition to the NAL weather observations, the Bureau of Meteorology of Australia provided NAL with various weather information including weather forecasts and GPS sonde data released from the Woomera observation site. Using this weather monitoring system, the NEXST-1 flight trial was conducted once all weather criteria had been fully satisfied. Useful information for the next flight trial was also extracted from the analysis of the observed weather data.

Keywords : Flight Test, Weather Monitoring, VHF Radar, NEXST-1

概 要

独立行政法人航空宇宙技術研究所により豪州ウーメラで実施された小型超音速実験機の第1回飛行実験では、主に実験機装備品の制限と飛行安全上の要求により、射点付近の地表面から計測空域の成層圏に至るまで気象の制限が設けられた。また、実験後の飛行データ解析においても計測空域の成層圏の気象データが必要とされた。このため、実験実施可否判断および飛行データ解析に必要な気象データを提供することを目的として、ウーメラ現地での気象観測体制を整備した。射点に気象観測装置、実験機回収点に風向・風速計を設置して地表面付近の気象観測を行なうとともに、バルーンのレーダ・トラッキング、GPS ソンデおよびVHF レーダにより射点上空および計測空域の気象観測を行なった。また豪州気象庁から各種の気象情報・予報の提供を受けた。気象観測体制は実験に先立ち整備・運用され、観測装置の評価を行なうとともに現地の気象データを蓄積した。特にまだ研究的要素が強いVHF レーダに関しては別途飛行試験を実施しその性能を評価した。これらの観測体制により、飛行実験時には全ての気象の制限が満たされていることを確認した上で実験が実施された。さらに現地の気象データの解析・評価を通じて次回飛行実験に有益な幾つかの知見が得られた。

* 平成15年8月21日受付

† 次世代超音速機プロジェクトセンター

(Next Generation Supersonic Transport Project Center)

1. はじめに

豪州ウーメラ実験場で行なわれた独立行政法人航空宇宙技術研究所(NAL)による小型超音速実験機(NEXST-1)飛行実験は、図1に示すような飛行プロファイルを有する^[1]。実験機は動力を持たず、固体ロケット・ブースタにより高度約20km、速度マッハ2まで打ち上げ・加速される。ブースタと分離後、実験機は滑空しながら高度約18.5kmで計測フェーズに入り、ピッチ姿勢を変化させながら空力・構造データを取得する。計測終了後、高度・速度を落としながら回収点付近まで近づき、十分に速度が落ちたところでパラシュートを開傘・降下し、最後はエアバッグを展開して接地する。打ち上げから接地までの飛行時間は約10分間である。本飛行実験に際しては、主に実験機装備品の制限と飛行安全上の要求から、表1に示すように地表面から成層圏に至るまで気象の制限が設けられた。また飛行実験準備段階でも、屋外作業に際しては、同じく表1に示す気象の制限が設けられた。

本飛行実験における気象観測の第一の目的は、これらの制限が満たされているか判断するための気象情報を提供することである。準備作業では、射点の地表面付近の気象情報が必要となる。本実験の場合、実験機搭載バッテリーの制限等から、気象条件待機の日数が6日間に制限されており、この6日間で実験が実施できない場合、再度実験準備が整うまで約2週間を要する。したがって、実験実施の約2週間前から開始される準備最終段階の時点で、気象待機期間内に実験実施可能か判断する必要が

あり、長期の気象予報が要求された。一方実験実施時は、飛行安全および計測フェーズでの要求諸元達成のため、特に風に対する条件が厳しくなっており、射点20m風から成層圏の風まで広い範囲の風情報が必要となる。

気象観測の第二の目的は、実験後の飛行データ解析に必要な気象情報を提供することである。データ解析においては、計測空域の成層圏の気象情報、特に風の情報が重要となる。本実験で要求される計測精度を達成するには、計測空域の風の乱れ、特に上下風の乱れの情報を提供できることが望ましい。

これらの目的を達成するため、ウーメラ実験場に各種気象観測装置を設置して気象観測を行うとともに、豪州気象庁(Bureau of Meteorology; BoM)の協力を得て、気象予報および観測データの提供を受けた。1997年にNALと宇宙開発事業団(NASDA)によりウーメラ飛行場で実施されたALFLEXの自動着陸実験でも同様な気象観測が行われたが^[2]、ALFLEXに比べてNEXST-1の実験空域は格段に広いため、気象観測体制もより大規模なものとなっている。

気象観測体制は実験に先立ち整備・運用され、観測装置の評価を行なうとともに現地の気象データを蓄積した。2002年7月14日に実施された第1回飛行実験は、全ての気象の制限が満たされていることを確認した上で実験が実施された。しかし、ロケット点火とほぼ同時に実験機がロケットから分離、落下し、予定されていた飛行データの取得は実施できなかった。2003年7月現在、すでに失敗原因が明らかとなり^[3]、2004年3月に予定されている第2回飛行実験に向け改修・準備作業が進め

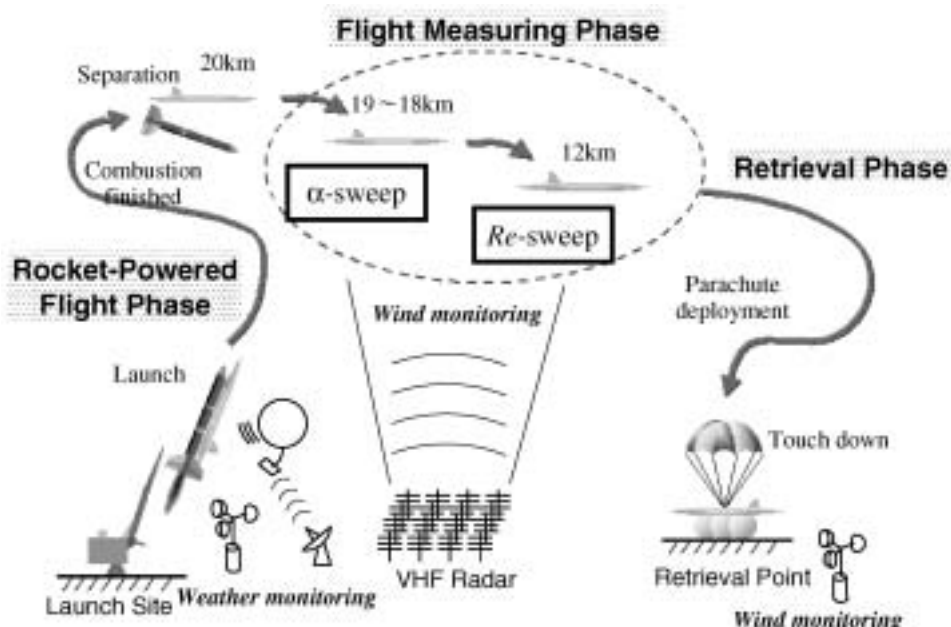


図1：飛行実験概要

表1：気象に関する実施条件
(a) 屋外での実験準備作業

項目	条件	理由	判断材料
降水	降水がないこと	実験機の非防水性	射点気象観測装置, BoM レーダ
温度	32 以下	装備品の熱制限	射点気象観測装置
相対湿度	85 %以下	装備品の制限	射点気象観測装置
射点6m 風	7m/s 以下	M/S 開閉時の制限	射点気象観測装置

(b) 飛行実験

項目	条件	理由	判断材料
降水	降水がないこと	実験機の非防水性	射点気象観測装置, BoM レーダ
温度	32 以下かつM/S 内の露点 +2 以上	装備品の熱制限, 結露防止	射点気象観測装置
相対湿度	85 %以下	装備品の制限	射点気象観測装置
雲	飛行経路上に雲がないこと	実験機表面の結露防止	モニタカメラ
視程	5km 以上	機体の飛行監視のため	モニタカメラ
射点6m 風	定常風が5m/s 以下	ランチャ離脱直後の機体の姿勢変化を抑えるため	射点気象観測装置
射点20m 風	定常風が5m/s 以下	ランチャ離脱直後の機体の姿勢変化を抑えるため	射点20m 風観測装置
地上500m までの風	定常風145 °成分の高度500m までの平均値が6m/s 以下	異常飛行時の機体の落下域を制限するため	バルーン・トラッキング
高層風	定常風が風モデルの3σ 以内	実験時の要求諸元を達成し, 飛行経路の拡散を防ぐため	GPS ソンデ, VHF レーダ

られている。

本報告ではウーメラ実験場での気象観測体制および現地気象観測データの評価結果について報告するとともに、評価結果から得られた次回の実験に有益な幾つかの知見を示す。本報告の次章以降の構成は以下の通りである。第2章では気象観測装置やBoMからの気象情報など、ウーメラ実験場における気象観測体制を示す。第3章では気象観測手順および第1回飛行実験(2002年7月14日)の気象観測結果を報告する。第4章では現地で得られた気象観測データの解析・評価結果について報告する。第5章では全体の総括とともに次回飛行実験への提言をまとめる。

略号

ADS Air Data System
ALFLEX Automatic Landing Flight Experiment
ARA Airborne Research Australia
ARDU Aircraft Research and Development Unit
ATRAD Atomospheric Radar Systems Pty. Ltd.
BAT Best Aircraft Turbulence

BoM Bureau of Meteorology
FCC Flight Control Computer
GPS Global Positioning System
IB Instrumentation Building
LA1 Launch Area 1
LA2 Launch Area 2
LAN Local Area Network
METAR Meteorological Aviation Report
M/S Movable Shelter
MSL Mean Sea Level
NAL National Aerospace Laboratory of Japan
NASDA National Space Development Agency of Japan
NEXST National Experimental Supersonic Transport
R1 Radar Site 1
RMS Root Mean Square
S/N Signal/Noise
SOLO Safety and Operations Liaison Officer
TAF Terminal Aerodrome Forecast

TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UTC	Coordinated Universal Time
VHF	Very High Frequency

2. 気象観測体制

2.1 概要

気象観測項目の一覧とその用途を表2に、観測装置の配置を図2に示す^[4]。

気象観測は、大別して射点付近、計測空域(実験機とブースタの分離地点)付近、回収点の3か所で行なった。射点付近には、気象観測装置および射点20m風を観測する風向・風速計が設置され、実験時に屋内から雲を観測するためにモニタカメラも設置した。さらに実験実施時には、地上500mまでの風観測を行なうためにレーダによるバルーン・トラッキングを実施した。これら射点付近での観測データは、BoM提供の気象情報と併せて、主に実験実施可否判断に用いた。射点から北西に約25km離れた分離地点付近には、上空20kmまでの風向、風速を観測可能なVHFレーダを設置し、計測空域の高層風観測を行なった。同じく高層気象観測として、射点から南東に約40km離れたBoMウーメラ観測所から放たれるGPSゾンデの観測データが提供された。また実

験の実施条件にはなっていないが、回収点の地上風も機体回収の成否に大きな影響を与えられられるため、射点から西に約15km離れた回収点に風向・風速計を設置し、地上6m風の観測を行った。これら計測空域付近および回収点での観測データは、実験後の飛行解析・空力解析において、実験機が遭遇した気象条件を明らかにする重要なデータとして主に用いられる。

気象予報は、全データをBoMから提供を受けた。予報内容は、表1の気象の制限に対応するものとし、射点の気象予報の他に高層気象、特に風に関する予報を用意した。

気象観測体制の整備は、飛行実験の半年前の2002年1月からウーメラ現地での準備作業が進められ、機器の調達、調整が遅れた回収点地上風観測装置およびVHFレーダ以外は4月中に観測を開始し、現地の気象データの収集を行なった。回収点地上風観測装置およびVHFレーダについても、6月には運用を開始した。現地での気象データから得られた知見は第4章にまとめられている。

以下、各項目の詳細を示す。

2.2 気象予報

気象予報は、射点の地表面付近の予報と計測空域の高

表2：気象観測項目

機関	項目	観測手段	用途
NAL	射点の気象観測データ(気温, 相対湿度, 気圧, 風向・風速(射点6mと20m), 日照, 日射, 雨量)	射点気象観測装置, 射点20m風観測装置	準備作業, 実施可否判断
	射点地上100~500mの風向, 風速	バルーン・トラッキング	実施可否判断
	飛行経路上の雲の有無	モニタカメラ	実施可否判断
	分離地点付近上空1~20kmの風向, 風速(上下風を含む)	VHFレーダ	実験後データ解析
	回収点の風向, 風速	回収点地上風観測装置	実験後データ解析
BoM	7日先までの射点の気象予報(風向, 風速, 気温, 相対湿度)		準備作業, 実施可否判断
	翌日の予想天気図		準備作業, 実施可否判断
	TAF		準備作業, 実施可否判断
	2日先までの射点上空0.5~20kmの高層風予報		準備作業, 実施可否判断
	翌日の高層気象情報(晴天乱流, 雷雲, ジェット気流, 圏界面等)		実施可否判断
	翌日の射点周辺250km四方の上空20kmまでの気象予報データ(風向, 風速, 気温, 相対湿度)		実験後データ解析, 実施可否判断
	METAR		準備作業, 実施可否判断
	ウーメラ実験場周辺の雨域	レーダ	準備作業, 実施可否判断
	ウーメラ飛行場付近の高度20kmまでの気象観測データ(風向, 風速, 気温, 相対湿度)	GPSゾンデ	実施可否判断, 実験後データ解析

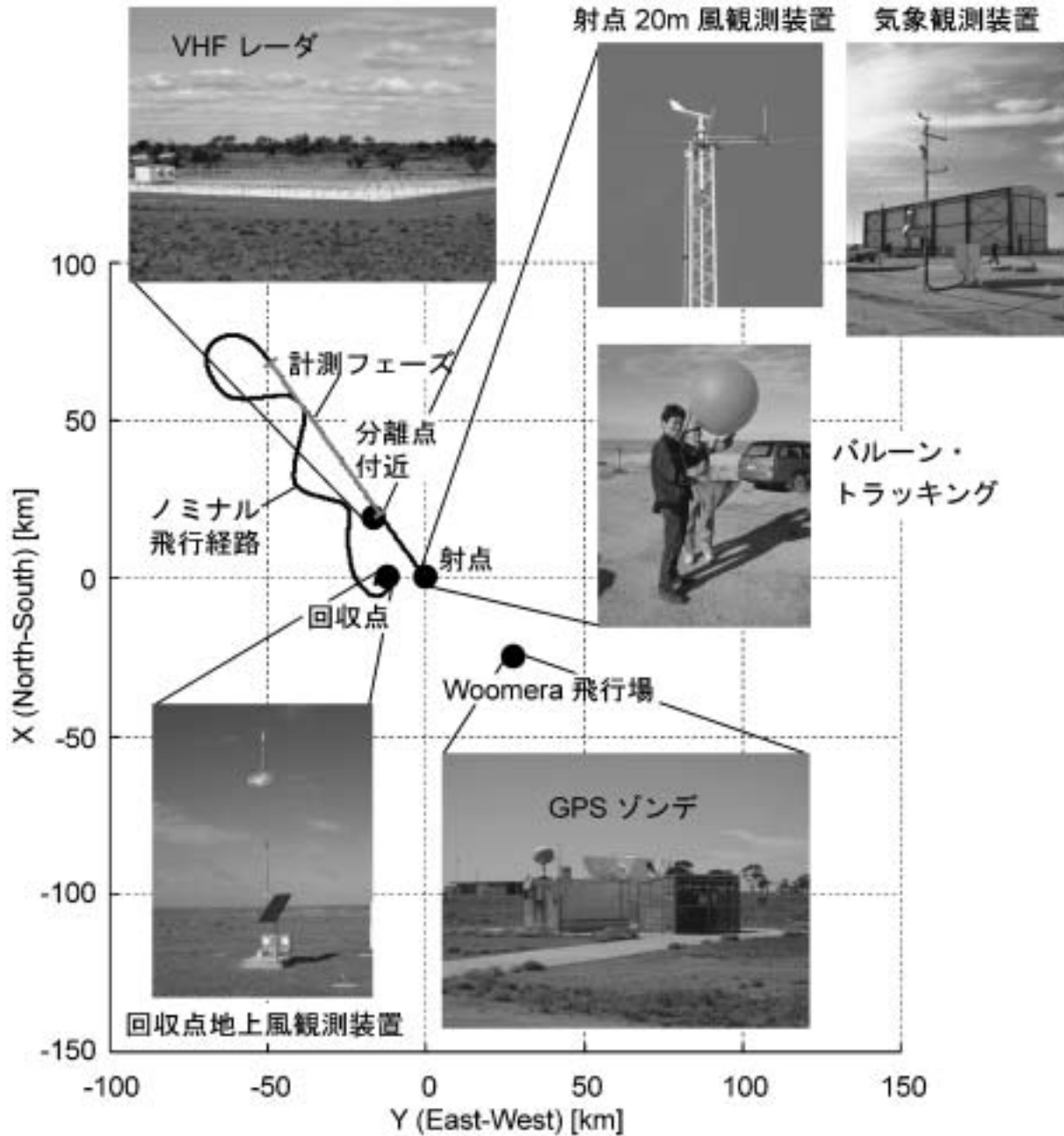


図2：観測装置の配置（座標の原点は射点）

層気象予報に大別される．気象予報情報の一覧を表3に示す．

2.2.1 射点の気象予報

表3の「1）射点の気象予報」の内容は表1の実施条件に対応して，降水の有無，風向，風速，気温，相対湿度とした．予報の一例を表4に示す．飛行実験準備段階では，射点の気象予報が最も重要な気象情報であり，天気図，TAF(Terminal Aerodrome Forecast)，METAR(Meteorological Aviation Report)は気象予報を理解する参考情報として入手した．

予報の期間は，飛行実験準備の全体スケジュール作成

に役立つように1週間先までとした．当初は2週間先までの予報を検討していたが，1週間より先は正確な予報が期待できないため断念した．また翌日の予報に関しては，表4に示すように3時間ごとの細かい予報を入手し，1日の作業スケジュールの作成に役立てるようにした．さらに実験実施日には，これとは別に1時間ごとの詳細な予報を入手し，打ち上げ準備作業に利用した．

2.2.2 高層気象予報

表3の「4）高層風予報」は，2日先までの射点上空0.5～20kmの高層風および気温の予報であり，前日の段階での実験実施可否判断に使用されるとともに，実験

表3：BoMから提供された気象予報

気象情報	内容	提供時期, 手段
1) 射点の気象予報	7日先までの射点の気象予報 (降水, 風向, 風速, 気温, 相対湿度)	前日 15時までにEmail
2) 予想天気図	翌日の予想天気図(MSL, 850hPa, 750hPa, 500hPa, 400hPa, 300hPa, 250hPa)	前日 15時までにFAX
3) TAF, METAR	ウーメラ周辺の空港のTAF, METAR	BoMのWebページで 随時確認
4) 射点上空0.5 ~ 20kmの高層風予報	2日先までの射点上空0.5 ~ 20kmの高層風および気温の予報	前日 15時までにEmail
5) 高層気象情報	翌日発生が予想される晴天乱流, 雷雲, ジェット気流, 圏界面などに関する情報	前日 15時までにFAX
6) 射点周辺250km四方の上空20kmまでの気象予測データ	射点の周囲約250km四方の範囲における50km四方の格子点について, 高度20kmまでの風, 温度, 相対湿度を数値シミュレーションで算出. 計算対象となる時刻は当日(解析)と翌日(予報)の9時半	前日 15時までにEmail

表4：BoM気象予報の一例

Forecast for Launch Site 30.94 deg South, 136.52 deg East

Forecast issued: 2002/07/13

Weather Discussion for		14-Jul			
At Midday on Saturday a vigorous cold front was making it's way across the south east of South Australia. A high pressure ridge was moving across the west coast of Western Australia and is forecast to move over the Woomera area during Saturday night to be centred just north of Woomera by Sunday night. Another cold front was moving east and at Midday Saturday was approaching the west coast of Eyre Peninsula in the southwest of SA. Winds should ease overnight Saturday and remain in the westerly quarter. Computer models indicate that at least until 1200cst Sunday, wind speeds will be within limits for your proposed launch. Winds will freshen during the evening and veer to the NW as another front approaches the southwest of South Australia. Low cloud should decrease during Sunday, with an increase in high cloud as the second front gets closer to the area. We have revised our thinking about morning drizzle or light rain and now forecast no precipitation, although low stratus in the morning is still possible. Wind speeds in the 10/12km layer are forecast to very slowly decrease during Sunday.					

Surface Conditions					
Day	14-Jul	14-Jul	14-Jul	14-Jul	14-Jul
Local Time	0630	0930	1230	1530	1830
Weather	Cool Poss Low Stratus	Cloud Clearing	Fine	Fine	
Cloud Octas/Type/Height	Bkn Low Sct Middle	Bkn Low Sct Middle	Sct Low Few Middle Few High	Sct Low Bkn High	Bkn Low Bkn High
Temperature (C)	8	11	14	16	15
Relative Humidity (%)	75	65	55	45	50
Wind Direction	270	280	270	280	290
Wind Speed m/s	6	6	7	8	6
Gust (m/s)	9	11	11	11	8

Upper Level Wind Forecasts					
Day	14-Jul	14-Jul	14-Jul	14-Jul	14-Jul
Local Time	0630	0930	1230	1530	1830
0.5km Direction	240	245	255	270	285
0.5km Speed (m/s)	8	6	6	4	5
5km Direction	265	260	260	260	260
5km Speed (m/s)	24	25	25	22	19
10km Direction	265	270	265	265	265
10km Speed (m/s)	42	45	41	37	36
12km Direction	275	275	270	270	275
12km Speed (m/s)	59	60	55	52	49
14km Direction	280	275	270	270	275
14km Speed (m/s)	25	25	25	22	20
20km Direction	260	260	265	265	265
20km Speed (m/s)	18	17	18	16	16

Note 1: NAL has special concerns about winds >7m/s

Note 2: Nal needs indication of whether rainfall will occur, detail of this will be included in discussion and in weather area

Note 4: Cloud Amount; 1/8 = few, 2/8 to 4/8 = sct, 5/8 to 7/8 = bkn, 8/8 = overcast

Note 3: Cloud Height; Low Cloud = surface to 2500m, Middle = 2500 to 6000m, High = greater than 6000m

機のア・データ・システム(ADS)の故障時に対気速度の算出に用いる風モデルとして、実験機のフライト・コントロール・コンピュータ(FCC)に搭載された。

搭載にあたり、予報精度をGPSゾンデによる観測値を用いて評価した。観測値を正として予報値の誤差(風のベクトル差; Error of Forecast)を高度ごとに算出した。比較のために、ウーメラ定常風モデル(過去7年間のウーメラ気象観測データから、高度ごとの平均値と標準偏差を算出したもの)についても、モデルの平均値と観測値との差(Error of Wind Model)を算出した。結果を図3に示す。左のグラフは各高度における誤差の最大値、右は誤差の平均値である。また、図中には定常風モデルの各高度における標準偏差の値(Wind Model(σ))も示されている。予報値の誤差は定常風モデルのそれより小さく、誤差の平均値は高度20km以下で定常風モデルの標準偏差以下であるため、FCC搭載風モデルとして予報値を採用した。なお、高度20km以上で予報値の誤差が大きくなっているのは、予報値が高度20kmまでしかなく、それ以上は一定値として処理したためである。

「5) 高層気象情報」は、翌日発生が予想される晴天乱流(clear air turbulence)、雷雲、ジェット気流、圏界面などに関する情報であり、前日の段階での実験実施可否判断に使用された。

「6) 射点周辺250km四方の気象予測データ」は実験実施可否判断ではなく、実験後の飛行データ解析に用いることを主な目的として入手した。予報内容は「4) 高層風予報」と同じく上空0.5~20kmの高層風および気温の予報であるが、予報地点が射点周辺250km四方の

36地点に増えているのが特徴である。これにより風の空間分布を把握できるとともに、補間を行なうことで飛行経路に沿った風データを推定することが可能となる。このデータをGPSゾンデやVHFレーダによって得られた観測結果を用いて補正することで、より精度の高い風データの推定が可能になると考えられる。気象予測データの計算対象となる時刻は、当日(解析)と翌日(予報)の9時半の2つあるが、後者が予報であるのに対し、前者は9時半の実際の観測結果を基に解析し直した結果であり、予報より精度が向上していることが期待される。実験後のデータ解析には前者の解析結果を使用する。今後、前日の予報と当日の解析との比較、あるいはGPSゾンデやVHFレーダによって得られた観測結果との比較により予報の精度が確認できれば、この予報を実験可否判断あるいはFCC搭載風モデルとして使用する予定である。

2.3 気象観測装置

気象観測装置の観測仕様の一覧を表5に示す。

2.3.1 射点における気象観測

射点における気象観測は、射点気象観測装置、射点20m風観測装置、バルーン・トラッキング、モニタカメラによる雲観測およびBoM気象レーダのモニタによって構成される。

(i) 観測装置の配置

飛行実験の中核となる本部建物や射点が集まるレンジヘッド(Range Head)の施設配置図と上空から撮影した

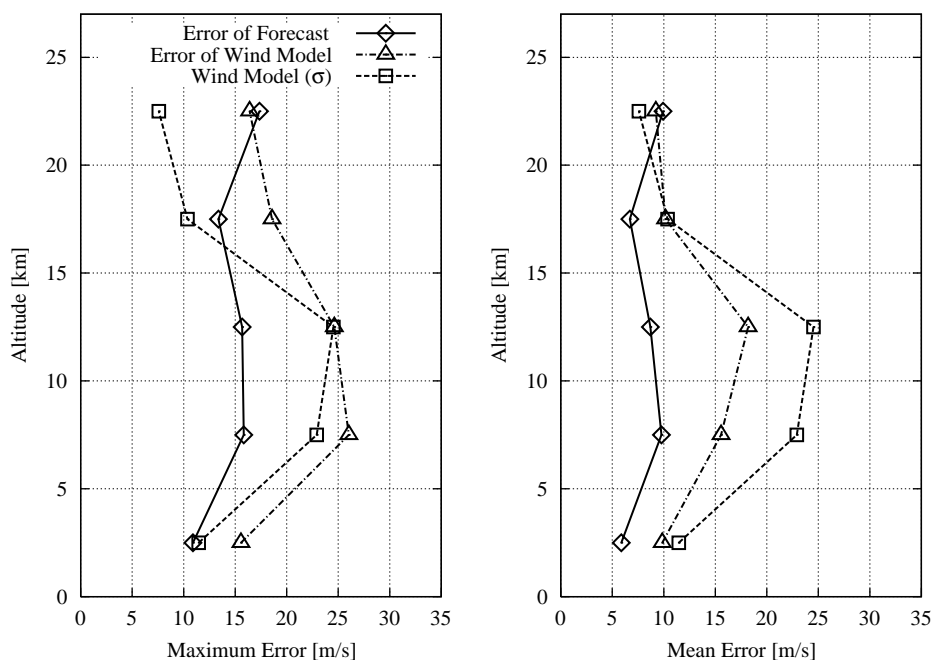


図3：高層風予報の精度評価

表5：気象観測機器の観測仕様一覧

(a) 射点気象観測装置

項目	観測範囲	観測精度	サンプリング間隔
風向	全方位	± 5 °以内	1s
風速	2 ~ 90m/s	10m/s以下：± 0.5m/s以内 10m/s以上：± 5%以内	1s
温度	-30 ~ +70	± 0.5 °以内	6s
相対湿度	0 ~ 100 %	± 5 %以内	6s
雨量	0 ~ 100mm/H	20mm/H以下：± 0.5mm以内 20mm/H以上：± 3 %以内	入力毎
日射	0 ~ 1.2kW/m ²	± 3 %以内	6s
日照	0 ~ 18H/D	± 5 %以内	6s
気圧	800 ~ 1060hPa	± 0.3hPa以内 (20 °における)	6s

(b) 射点20m風観測装置

項目	観測範囲	観測精度	サンプリング間隔
風向	全方位	± 1.4 °	0.25s
風速	0.5 ~ 90m/s		0.25s

(c) バルーン・トラッキング

項目	観測高度	観測精度
風向	0.1 ~ 20km	± 2 °
風速	0.1 ~ 20km	

(d) 回収点地上風観測装置

項目	観測範囲	観測精度	分解能	サンプリング間隔
風向	全方位	± 2 °	1 °	0.2s
風速	0 ~ 65m/s	± 0.135m/s	0.1m/s	0.2s

(e) GPSゾンデ

項目	観測範囲	観測精度	サンプリング間隔
高度	0.1 ~ 30km程度		2s
気圧	3 ~ 1060hPa	0.5hPa	2s
気温	-90 ~ +60	0.2 ~ 0.4	2s
相対湿度	0 ~ 100 %	3 %	2s
風速		0.2 ~ 0.5m/s	2s

(f) VHFレーダ

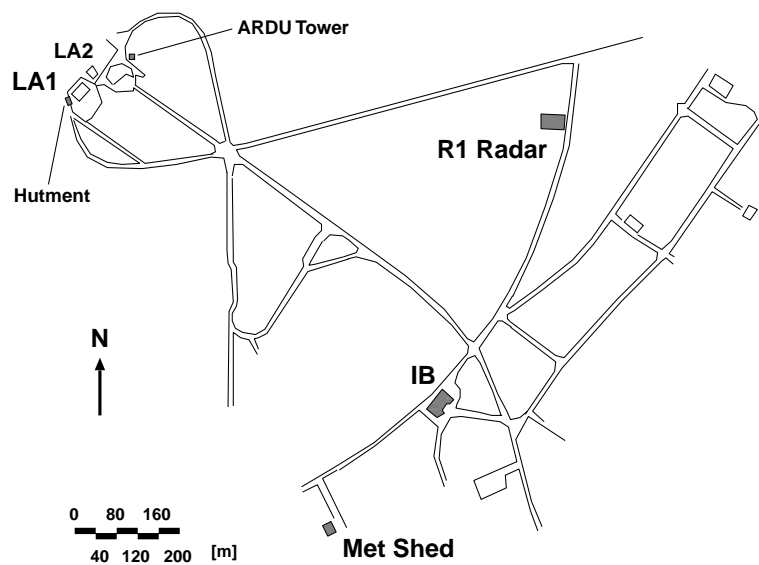
項目	観測高度	分解能	サンプリング間隔
風速 (水平方向)	1 ~ 20km (150m間隔)	0.5m/s	5min
風速 (垂直方向)	1 ~ 20km (150m間隔)	0.1m/s	5min

写真を図4に示す。IB(Instrumentation Building)は管制室、オフィス、居室などがある実験の中心となる建物である。LA1(Launch Area 1)は実験機の打ち上げを行なう場所であり(射点)、ランチャ(Launcher; 発射台)が存在する。打ち上げ前に実験機をランチャごと格納するものがムーバブル・シェルタ(Movable Shelter; M/S)で、打ち上げ時にはシェルタが移動してランチャを露出させる。LA1には、ランチャから約30m離れたところに打ち上げに必要な機器を収めたハットメント(Hutment)と呼ばれる小屋が位置し、射点気象観測装置はハットメントのわきに備え付けられている。また、

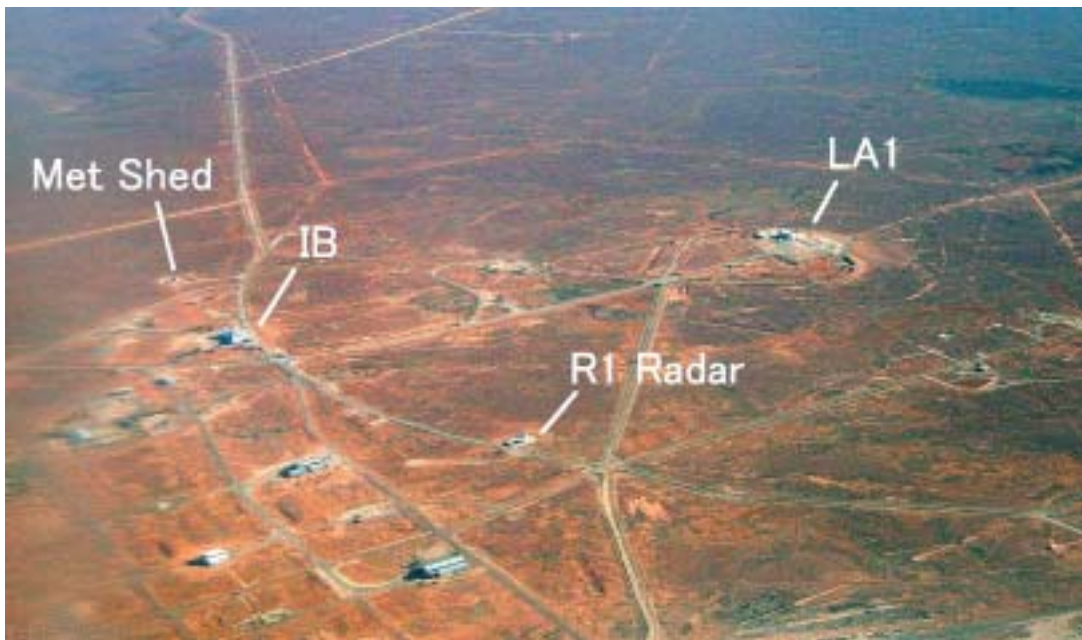
射点20m風観測装置は、ランチャから約100m離れたLA2に立つ鉄塔(ARDUタワー)の先端に備え付けられている。IBから約500m離れたMet Shedは、後述するバルーン・トラッキングのためのバルーンを準備、放球する場所であり、ここから放球されたバルーンはIBから約600m離れた場所にあるR1レーダによりトラッキングされ、その位置を観測される。

(ii) 射点気象観測装置

射点気象観測装置は、風向・風速計、温度計、相対湿度計、雨量計、日照計から構成され(図5)、風向、風速、気温、相対湿度、日照、日射、雨量を観測する。風向・



(a) 施設配置図



(b) 北東方向からの上空写真

図4：Range Head

風速計の設置位置は地上6mである．これらの気象情報はIBのテレメトリ・ルーム内にある記録装置および表示・記録用コンピュータ(図6)に、光ファイバによる専用回線を通してリアルタイムに送信され、モニタ/記録される．

(iii) 射点20m 風観測装置

ARДУタワーの先端、地上20mに位置する(図7)．この装置により得られたデータは、専用回線を通してIBにあるパソコンにリアルタイムに送信され、モニタ/記録される．モニタ上では、平均風向・風速、最大



(a) 全景



(b) 風向・風速計, 日照計



(c) 雨量計, 百葉箱(温度計, 相対湿度計)

図5：射点気象観測装置



(a) 射点気象記録装置(左)と表示用コンピュータ



(b) コンピュータ上のリアルタイム表示

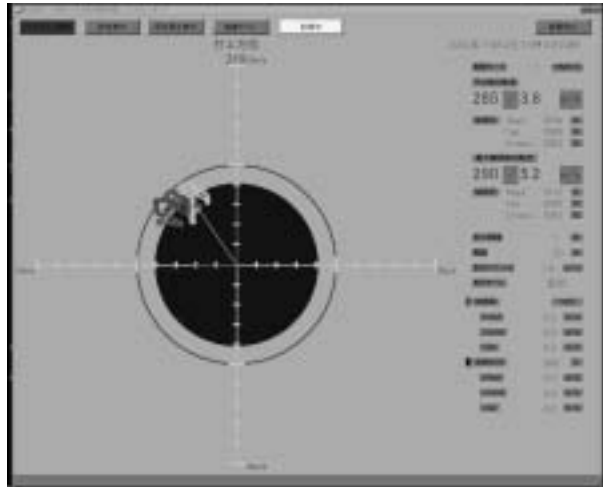
図6：テレメトリ・ルーム内の射点気象表示・記録表示



(a) ARDU タワー全景



(b) 風向・風速計



(c) テレメトリ・ルーム内の表示

図7：射点20m 風観測装置

瞬間風向・風速を数値で示すとともに、平均風向・風速（平均時間は選択可能）をベクトル表示することにより状況判断を容易にしている（図7(c)）。また、ベクトル図では過去30分の風向、風速の履歴も表示され、風の変動の傾向が把握できる。

(iv) バルーン・トラッキング

気象観測用バルーンに反射板をつけたものを放球し、R1レーダでトラッキングすることにより高度500mまでの風向、風速を観測する。

使用する気象観測用バルーンは重量80gで、準備作業はMet Shedで行なう（図8(a), 8(b)）。バルーンの上昇率を毎分300m程度に設定するため、バルーンの大きさが毎回一定となるようにヘリウムガスを注入する（図8(c)）。

このバルーンにレーダ波を反射するための反射板（段

ボール素材に反射フィルムが貼ってある）を結び付け放球する。放球場所はMet Shedの外、風向きにより建物に接触しない場所まで移動する。放球の指示は、レーダを運用するARDU（Aircraft Research and Development Unit；豪州空軍航空機研究開発部隊）のレーダ・コーディネータがIB内管制室から行なう（図8(d)）。コーディネータとはインターカムを介して情報の伝達を行なう。コーディネータはR1レーダとタイミングを合わせ放球指示を出し、Met Shedではそれに従い放球する（図8(e)）。レーダがトラッキングに失敗した場合は、直ちに予備のバルーンを再度放球する。

放球後数分でバルーン的位置データが得られ、レーダ・コーディネータからディスクでNAL担当者に渡される。バルーン位置データをNAL側で数値微分し、バルーン速度、すなわち風速を算出する。風速データ



(a) Met Shed 全景



(b) バルーンへのヘリウムガス注入作業



(c) 規定のバルーンの大きさ



(d) レーダ・コーディネータ



(e) 放球直後

図8：バルーン・トラッキング

が得られるのは、トラッキングが安定する高度100～150m以降である。また、トラッキングによるバルーンの位置はスパイク状のノイズを含むため、約0.05Hzをカットオフ周波数とするローパス・フィルタをかけた後に数値微分を行なう。

(v) 雲の観測

打ち上げ直後の低速時に実験機が雲を通過すると、機体表面のセンサへの水滴の付着によりセンサの故障、誤動作を引き起こす可能性がある。このため、空力加熱により水滴付着の可能性がなくなる速度($M = 1.4$)に達するまでの軌跡上の雲の有無を、IBに設置したモニタカ

メラ(図9(a), 9(b))によりリアルタイムにモニタする。映像例を図9(c)に示す。

(vi) BoM 気象レーダ

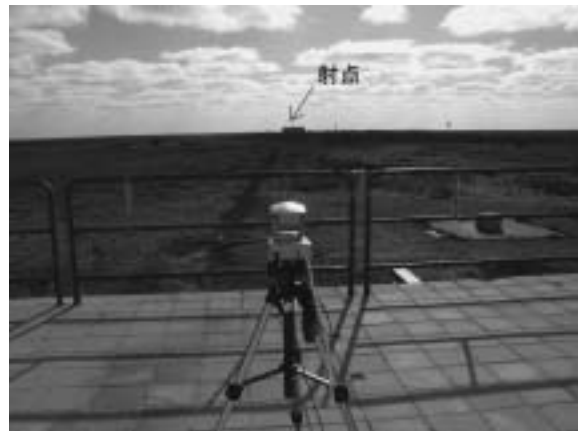
BoM ウーメラ観測所の気象レーダで捕えた雨域分布画像を, BoMのWebサイト[‡]からインターネット経由で取得する(図10)。更新間隔は10分であり, 実験場の降雨や雨域の移動の予測に利用する。

2.3.2 回収点における地上風観測

実験機回収点の地上風を, 回収予定地域中心点の地上6mに設置した超音波風向・風速計により観測する。観測データはマイクロ波回線でIBにリアルタイムに送信し, モニタ/記録する(図11)。風向・風速計, マイクロ波送受信機などの機器には, 太陽電池により電力を供給する。



(a) 設置されたモニタカメラ



(b) モニタカメラ撮影方向



(c) パソコン上での画面

図9：雲観測用モニタカメラ

[‡] <http://www.bom.gov.au/>

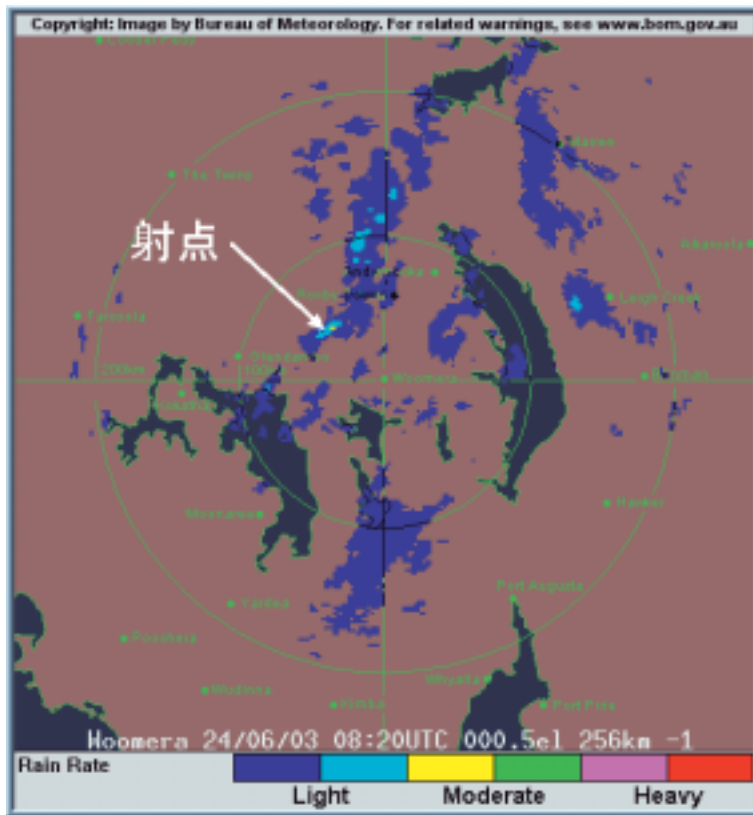
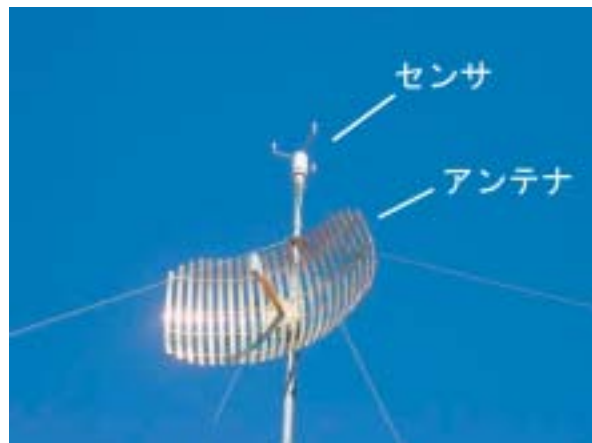


図 10 : BoM 気象レーダ画像



(a) 全景



(b) センサ部および通信用アンテナ



(c) テレメトリ・ルーム内の表示

図 11 : 回収点風観測装置

2.3.3 実験機計測空域における高層気象観測

実験機計測空域における高層気象観測は、BoM ウーメラ観測所のGPSゾンデおよびVHFレーダによって構成される。

(i) GPSゾンデによる高層気象観測

射点から南東40kmにあるBoM ウーメラ観測所(図12(a))が1日2回、定時(11:00UTC, 23:00UTC)に上げるGPSゾンデにより、高層大気の気象データを取得する。GPSゾンデはあらかじめ自動放出装置(図12(b), 12(c))にセットされており、定時に自動的に放球・トラッキングがなされ、観測結果はインターネット経由で送付される。

航空機による観測以外に直接的な観測手段のない高層風観測においては、GPSゾンデは最も信頼性が高く確実に観測データが得られる手法であり、風以外にも気温、

気圧、相対湿度などの気象情報も得られる。放球地点と射点は40km離れており、さらにゾンデは風に流されるため、得られた観測結果は厳密な意味での射点および計測空域の風向、風速ではないものの、ウーメラ付近の地形は起伏が少なく局所的な風向、風速の違いは小さいと考えられるため、本実験ではこのGPSゾンデによる観測結果を高層気象観測の基準とし、実験実施可否判断に使用した。

(ii) VHFレーダによる高層風観測

VHFレーダ(豪州ATRAD社[§]製)は、計測空域である成層圏の風をリアルタイムに観測する目的で導入され、最大観測高度は20kmを目標としている。設置位置は計測フェーズ中のノミナル飛行経路に比較的近く、射点から北西に25kmの地点である(図2)。

レーダは50m四方に正方形に並べられた144本



(a) BoM ウーメラ観測所



(b) 自動GPSゾンデ放出装置



(c) ゾンデ放出装置内部

図12：GPSゾンデ(BoMウーメラ観測所)

§ <http://www.atrad.com.au/>



(a) 全景



(b) アンテナおよびハットメント

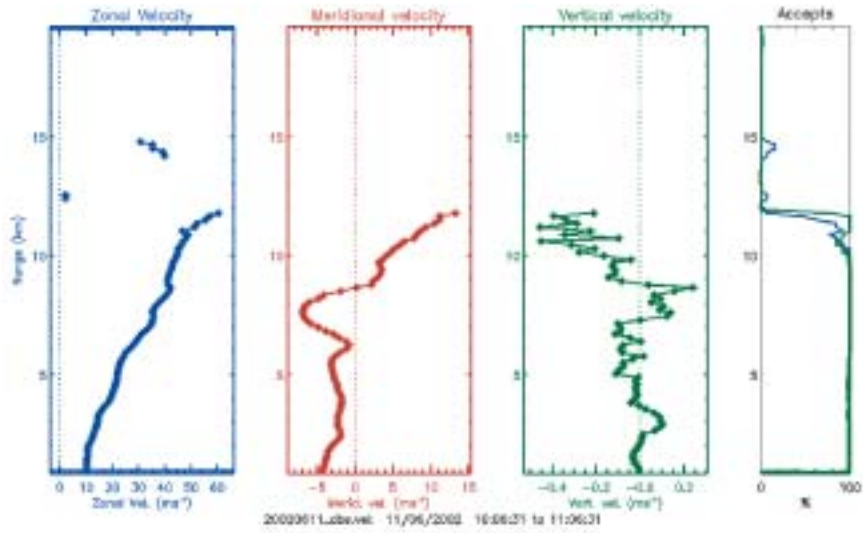
図13：VHFレーダ

表6：運用時のVHFレーダの設定

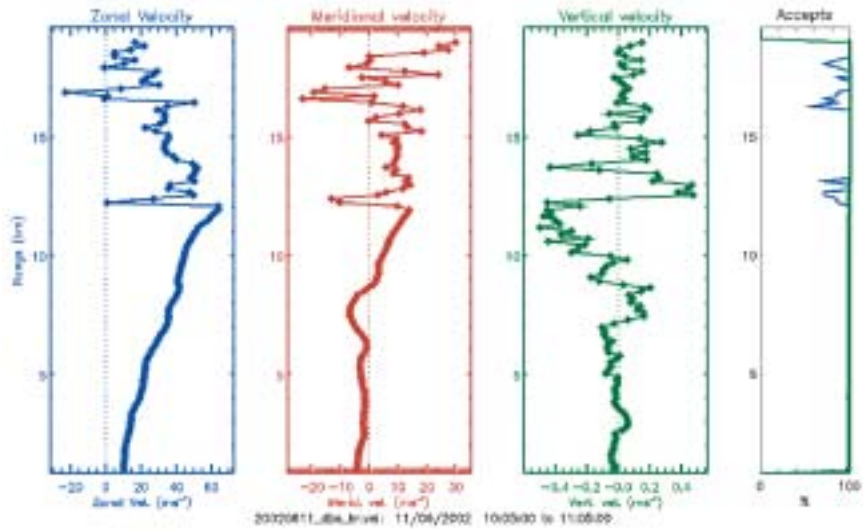
パラメータ	設定値
最低観測高度	1,000m
最高観測高度	19,600m
高度間隔	150m
Pulse Width	600m
Pulse Shape	Gaussian
Pulse Repetition Frequency	6,720Hz
Number of Coherent Integration	336点
Number of Data Points	1,100点
Pulse Coding	Not Used
Receiver Filter Width	72.5kHz

(12 × 12本)の八木アンテナから構成され(図13), アンテナごとに位相をずらす(フェーズドアレイ)方式によりVHF波(周波数55.0MHz, 出力ピーク値100kW)の出力方向を垂直方向に加えて東西南北に12.5°傾けることができ, 各方向の反射波のドップラ変調から上空の風を3次元的に観測する。

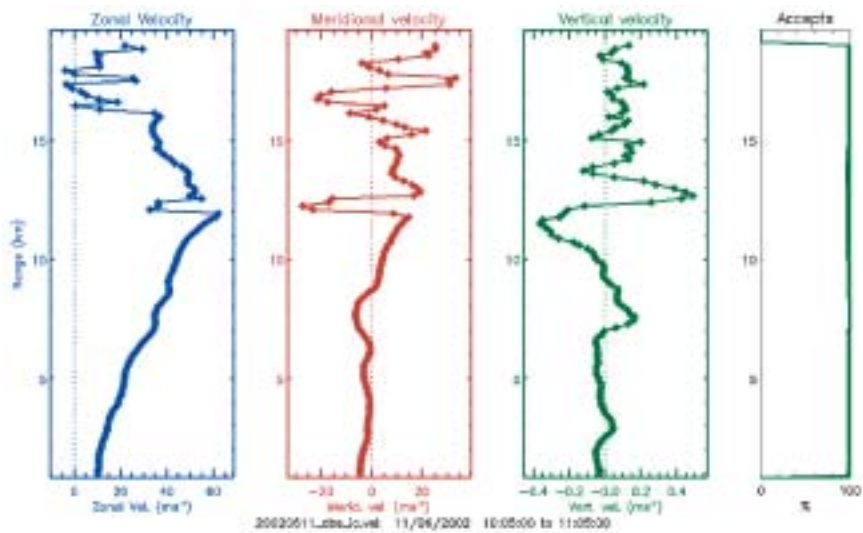
各方向の電波照射時間は1分間であり, 5分ごとに上下風を含む3軸方向の平均風速(5分間平均値)が出力される。運用時のレーダ設定を表6に示す。図14(a)は5分間平均の観測データの例である。縦軸が高度であり, 左から風速の東西, 南北, 上下成分, 右端がデータの取得率である。高度10km以上ではS/N比が悪いためデータの取得率が低く, 風速データが得られないことが多い。このため観測高度範囲を広げるために, 過去1時間のデータを平均しS/N比を向上させた風速データも5分ごとに出力する。単純に風速データを時間平均する



(a) 5分間平均



(b) 1時間平均 (vel)



(c) 1時間平均 (spec)

図14：各方式による観測データの例

vel方式と、反射波のスペクトルを時間平均してスペクトルデータを作り直し、風速を再計算するspec方式の2種類がある。後者は反射波のスペクトルに含まれるノイズが低減されるため、ドップラ変調を特定しやすくなるという利点がある。図14(b), 14(c)にvel方式, spec方式の風速データの例を示す。観測高度が20km近くまで伸びており、5分間平均値より改善されている。これらの風速データは、マイクロ波回線でIBに送信され、図14と同じフォーマットでリアルタイムモニタが可能である。

VHFレーダは、それ自体が必ずしも確立された観測手法ではなく、その観測高度や精度は設置地点の気象条件にも大きく左右される。このため、飛行実験前にGPSゾンデとの比較や別途飛行試験によりその性能を評価した。その詳細は4.6節に示す。

2.4 気象観測データのモニタ体制

ウーメラ実験場での気象観測は、IB内においてすべてモニタできる体制を整えている。気象観測装置のモニタ用機器、コンピュータは管制室に隣接するテレメトリ・ルーム(図15)に設置され、実験実施日はこの部屋で気象データの監視を行なう。

射点気象観測装置は専用の光ファイバケーブルを介して、射点20m風観測装置は専用ケーブルを介して、ま

た回収点風観測装置とVHFレーダはマイクロ波を用いたLANを介して、それぞれテレメトリ・ルーム内の表示/記録用コンピュータと接続されている。バルーン・トラッキングに関しては、ディスクでデータを受け取る。

テレメトリ・ルーム内の各表示/記録用コンピュータ同士は実験場のネットワークによって接続されている(図16)。IBには100Base-TXを用いたLANが整備されており、このLANは通信衛星を用いたインターネット接続サービスを利用し、外部との通信を行なうことができる。BoMからの情報はこのインターネット回線を通じて取得する。また前述したように、遠方に存在する気象観測装置との通信用にマイクロ波を用いたTCP/IP接続を行なっている。IBから約25km離れたVHFレーダサイトとは、その中間に位置する小高い丘(Knollと呼ばれる)に設置したマイクロ波中継機器を介して通信を行なう。回収点地上風観測装置とも、Knollを介して通信を行なう。このマイクロ波によるTCP/IP接続は、ユーザからは透過的に1つのLANとして扱うことができる。すなわち、VHFレーダサイトに設置されているコンピュータや回収点の観測装置もIBからは同じLAN上に存在する機器としてアクセスすることが可能である。



(a) 全景



(b) 気象観測モニタ用機器

図15：IB内テレメトリ・ルーム

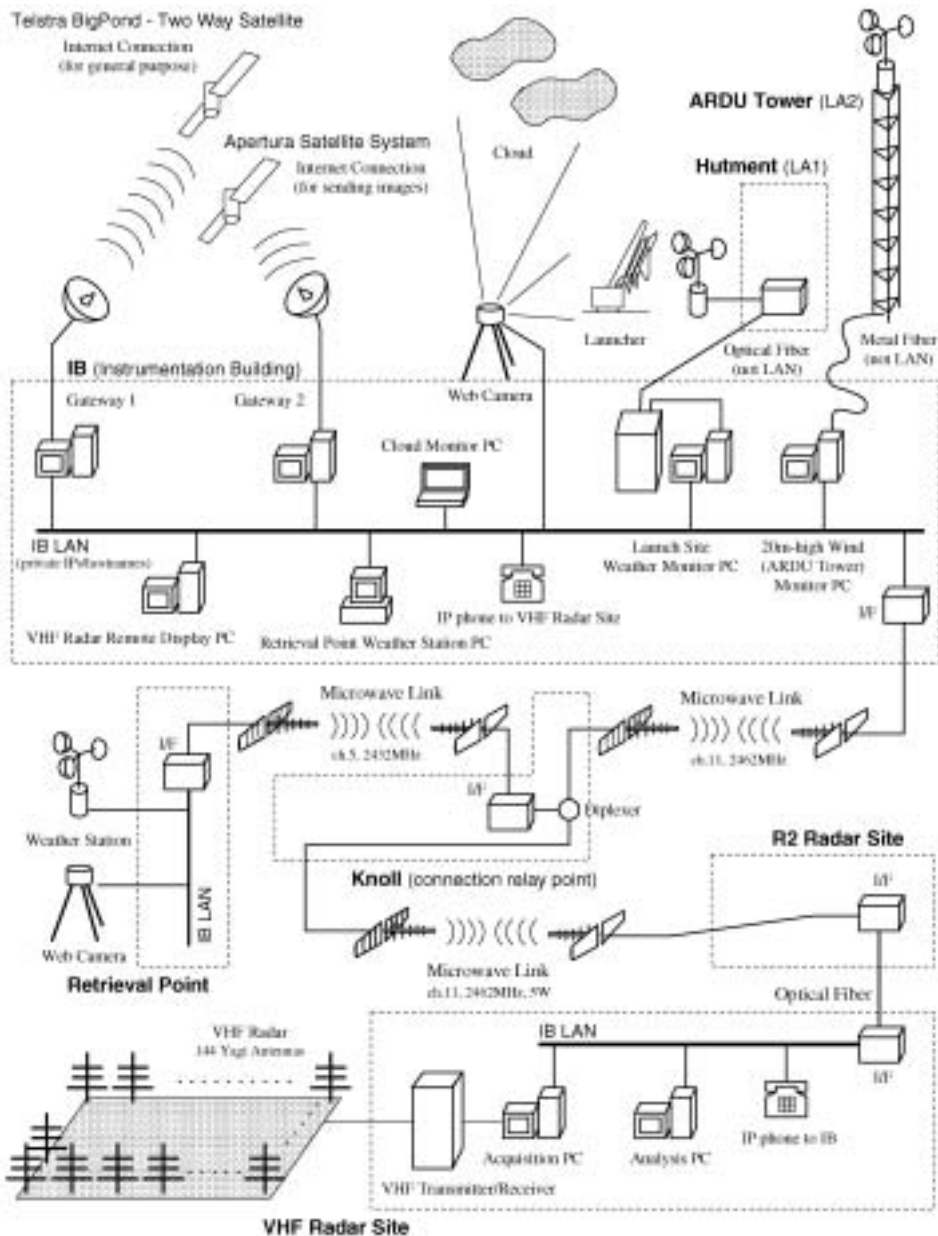


図16：気象観測装置のネットワーク

3. 飛行実験時の気象観測

本章では実験実施日の気象観測手順および第1回飛行実験時の状況について述べる。

3.1 気象観測手順

実験実施日には、実施予定時刻の約7時間半前に実験開始判定会議が開かれ、準備状況や気象状態等に基づき実験実施可否判断がなされる。この判定会議では、BoMから提供された気象予報が重要な判断材料の1つとして使われる。ここで実験開始が決定されると、一連の打ち上げタイム・シーケンスが開始される。このタイム・シーケンスは打ち上げ予定時刻をT・0(分)としており、340分前であるT・340からカウントダウンが開始される。タイム・シーケンス中は2名が気象観測を担当し、IBのテレメトリ・ルーム内で気象観測データをモニタしながら、準備作業の節目ごとに気象条件の判定を行なう^[5]。以下、時系列に沿ってその詳細を述べる(表7)。なお、カウントダウン表記(T・)の後ろに、打ち上げ時刻を午前9時(9:00)とした場合の時刻を併記した。

T・340 (3:20)

気象観測開始

打ち上げタイム・シーケンス開始と同時に気象観測を開始する。全気象観測機器が正常に動作していることを確認する。

T・240 (5:00)

気象条件判定(1回目)

今後の準備作業の続行を判断するために、1回目の気象条件判定を行なう。判定項目は降水、気温の条件。

GPSゾンデの放球(1回目)

高層風の判定条件に必要な高層気象データを得るため、BoMウーメラ観測所からGPSゾンデを放球する(放球はBoMに依頼)。

T・240 ~ 150 (5:00 ~ 6:30)

M/S開放時の外気温下限値の算出

実験機が格納されているM/S内の気温、相対湿度の報告を受ける。T・150でM/Sを開放する際に実験機表面および機内に結露が生じないように、報告された値を基にM/S開放時の外気温の下限値(M/S内の露点+2)を算出しておく。

最新の気象予報の入手

BoMから当日の詳細な気象予報をEmailで受領し、今後の気象の動向を把握する。

T・150 (6:30)

気象条件判定(2回目)

2回目の気象条件判定を行なう。判定項目は降水、気温、相対湿度、射点地上風の条件。M/Sを開放し実験機を屋外に出す判断をするために、相対湿度、射点6m風、射点20m風の条件が新たに加わる。ただし、この時点での地上風の制限はM/S庫開閉時の制限であり、定常風速7m/s以下である。この条件が満たされるまではM/Sを開放できず、この先のシーケンスに進むことはできない。

T・90 (7:30)

GPSゾンデ観測データによる高層風の条件判定

T・240で放球したGPSゾンデ観測データをEmailで受領し、高層風の条件判定を行なう。

FCC搭載風モデルの妥当性評価

実験機FCCに搭載されている前日の予報値の妥当性をGPSゾンデ観測データとの比較により確認する。

VHFレーダ観測データの妥当性評価

VHFレーダの観測データの妥当性をGPSゾンデ観測データとの比較により確認する。

T・60 (8:00)

バルーン放球準備開始

気象観測担当の1名がIBからMet Shedへ移動し、T・26のバルーン放球の準備を開始する。

T・39 (8:21)

気象条件判定(3回目)

3回目の気象条件判定を行なう。判定項目は降水、気温、相対湿度、射点6m風、射点20m風、視程の条件。視程の条件が新たに加わる。

T・26 (8:34)

レーダによるバルーン・トラッキング

Met Shedからバルーンを放球し、レーダでトラッキングを行なう。バルーン・トラッキングは実験機追尾と同じレーダを用いるため、シーケンス中の他の作業と干渉する。このため、放球をこれ以上打ち上げ時刻に近づけることはできない。

気象条件判定(4回目)

4回目の気象条件判定を行なう。判定項目は降水、気温、相対湿度、射点6m風、射点20m風、視程の条件。同時に夜が明けていることおよび飛行経路上に雲がないことを確認する。

T・26 ~ 15 (8:34 ~ 8:45)

バルーン観測要員の待避

バルーン・トラッキング終了後、放球担当者は速やかにテレメトリ・ルームに待避する。

射点上空風の算出

豪州側からバルーン的位置データを受け取り、射

表7：打ち上げシーケンスにおける主な気象関連項目

時刻 (T・)	項目	判定条件	他の主な作業
340	気象観測開始		打ち上げシーケンス開始
240	気象条件判定(1回目) GPSゾンデの放球(1回目)	降水：ないこと 気温：32 以下	実験機システム起動，搭載機器動作チェック
240 ~ 150	M/S開放時の外気温下限値の算出 最新の気象予報の入手		
150	気象条件判定(2回目)	降水：ないこと 気温：32 以下かつM/S内の露点+2 以上 相对湿度：85%以下 射点6m風：定常風が7m/s以下 射点20m風：定常風が7m/s以下	M/S開放
90	GPSゾンデ観測データによる高層風の条件判定 FCC搭載風モデルの妥当性評価 VHFレーダ観測データの妥当性評価	高層風：定常風が風モデルの3σ以内	ランチャ起立
60	バルーン放球準備開始		
39	気象条件判定(3回目)	降水：ないこと 気温：32 以下かつM/S内の露点+2 以上 相对湿度：85%以下 射点6m風：定常風が7m/s以下 射点20m風：定常風が7m/s以下 視程：5km以上	機器動作チェック 実験機↔R1レーダ通信チェック
26	レーダによるバルーン・トラッキング(1回目) 気象条件判定(4回目)	降水：ないこと 気温：32 以下かつM/S内の露点+2 以上 相对湿度：85%以下 射点6m風：定常風が7m/s以下 射点20m風：定常風が7m/s以下 視程：5km以上，および夜が明けていること 雲：飛行経路上にないこと	機器動作チェック R1レーダはバルーンをトラッキング
26 ~ 15	バルーン放球担当者の待避 射点上空風の算出		
10	VHFレーダ送信停止		
7	気象条件判定(最終)	降水：ないこと 気温：32 以下かつM/S内の露点+2 以上 相对湿度：85%以下 射点6m風：定常風が5m/s以下 射点20m風：定常風が5m/s以下 視程：5km以上，および夜が明けていること 雲：飛行経路上にないこと 射点500mまでの風：定常風145°成分の高度500mまでの平均値が6m/s以下	R1レーダは実験機をロック システム最終チェック
7 ~ 0	気象観測データのモニタ		
T+0 ~			ロケット点火 飛行安全監視作業へ移行
実験終了後	レーダによるバルーン・トラッキング(2回目) GPSゾンデ放球(2回目) VHFレーダ送信再開 気象観測データのバックアップ 気象観測データの速報作成		実験機回収 飛行後解析

点上空風を算出する。

T・10 (8:50)

VHF レーダ送信停止

実験機がVHFレーダ上空を飛行する際の電磁干渉を避けるため、実験終了までVHFレーダの送信を中断する。中断はテレメトリ・ルーム内からリモートで行なう。

T・7 (8:53)

気象条件判定(最終)

気象条件の最終判定を行なう。判定項目は降水、気温、相対湿度、射点6m風、射点20m風、視程の条件。この時点から、射点地上風の制限は打ち上げ時の制限である定常風速5m/s以下となる。同時にバルーンで計測した射点地上500mまでの風についても判定を行なう。条件が満たされない場合は、しばらく待機した後に、バルーンを放球する時点からやり直す。

T・7 ~ 0 (8:53 ~ 9:00)

気象観測データのモニタ

気象観測データのモニタを継続する。実施条件を逸脱した場合は直ちに報告する。

実験終了後

レーダによるバルーン・トラッキング(2回目)

実験後のデータ解析に用いる高層風データを得るため、再びMet Shedからバルーンを放球し、レーダでトラッキングを行なう。

GPS ソンデ放球(2回目)

実験後のデータ解析に用いる高層風データを得るため、再びBoM ウーメラ観測所からGPS ソンデを放球する(放球はBoMに依頼)。

VHF レーダ送信再開

VHF レーダの送信を再開する。再開はテレメトリ・ルーム内からリモートで行う。

気象観測データのバックアップ

実験終了までの気象観測データのバックアップを行う。

気象観測データの速報作成

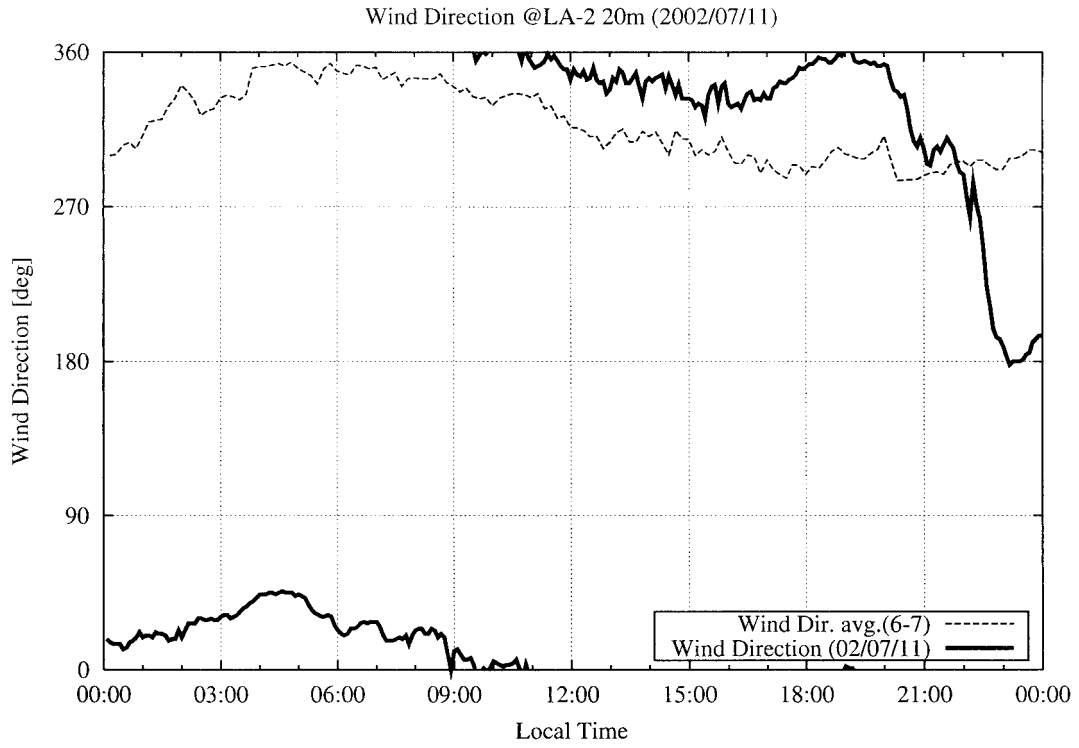
実験終了後1時間以内を目処に、実験時の射点および回収点の気象観測データを速報する。

3.2 第1回飛行実験時の状況

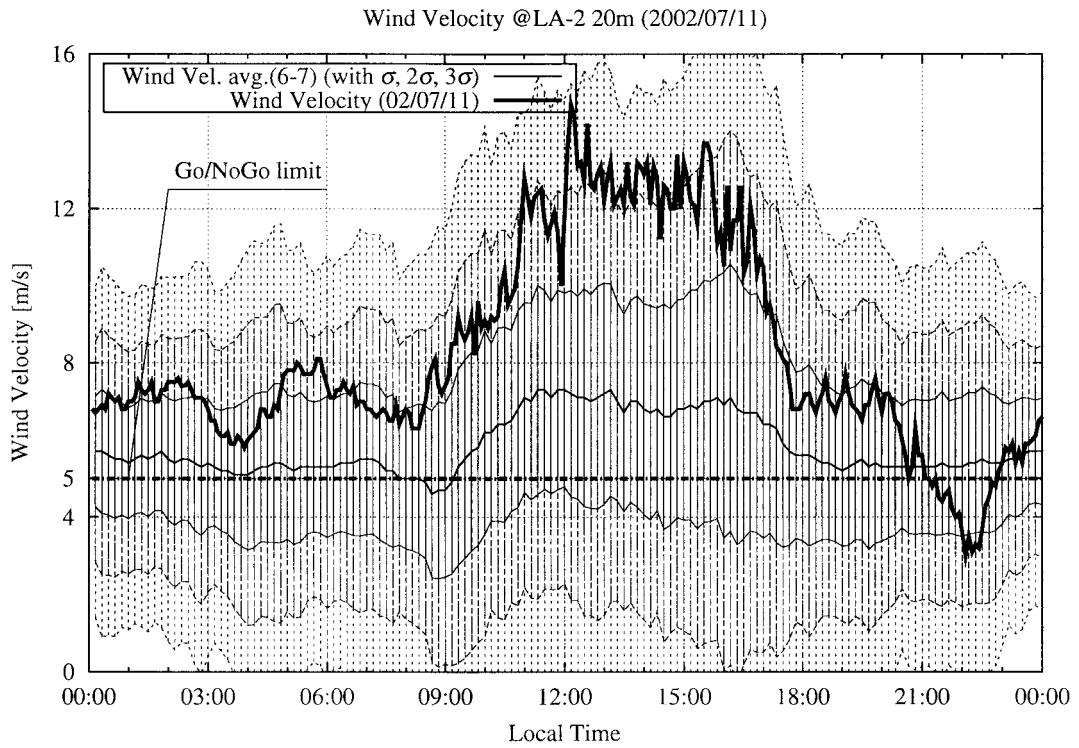
第1回飛行実験は2002年7月11日午前9時(現地時刻)に予定され、同日午前1時30分からの実験実施判定会議で実施が決定された^[3]。午前3時から打ち上げタイム・シーケンスが開始されたが、午前7時ごろ(発射予定時刻の約2時間前)、地上風条件の「射点20m定常風の風速が5m/s以下(表1)」を満足せず、回復の見通しが立たないという判断で午前8時に延期が決定された。次の打ち上げ日時は、気象予報等に基づく判断から7月14日午前8時に再設定された。図17は射点20m風観測装置により得られた7月11日の風向、風速値のプロット図である。風速図(図17(b))には併せて6~7月の風速の平均値と標準偏差(σ)およびその2倍(2σ)、3倍(3σ)の範囲を示している(詳細は4.3節参照)。

7月14日は午前0時30分の判定会議で、相対湿度が高い以外は全ての気象条件を満たすことが確認され、日の出とともに気温が上昇すれば相対湿度が下がることが予想されたため、実施が決定された(図18~21)。午前2時から打ち上げタイム・シーケンスが開始されたが、途中M/S開放の条件である「相対湿度85%以下(表1)」を満たすまで約3時間待機した。夜が明け、気温の上昇とともに午前8時ごろから相対湿度が下がり始め、午前9時ごろ相対湿度が85%を下回ったところで作業が再開され、打ち上げ予定時刻は午前11時とされた。以降の作業は順調に進み、午前11時1分11秒に打ち上げが実施された。しかし、実験機とブースタの早期分離により実験機の計測が行われなかったため、打ち上げ後に予定していた2回目のバルーンおよびGPSソンの放球は実施しなかった。

打ち上げ時の射点気象データを図22および表8に、T・26で放球したバルーンによるトラッキング・データを解析して得られた上空500mまでの風向、風速を図23に示す。また、午前8時半のGPSソンのデータおよびVHFレーダ(spec方式)の観測データを、条件判定に用いる風モデルの 3σ の範囲とともに図24に示す。これらより、飛行実験の実施条件(表1(b))が満たされていたことが確認できる。

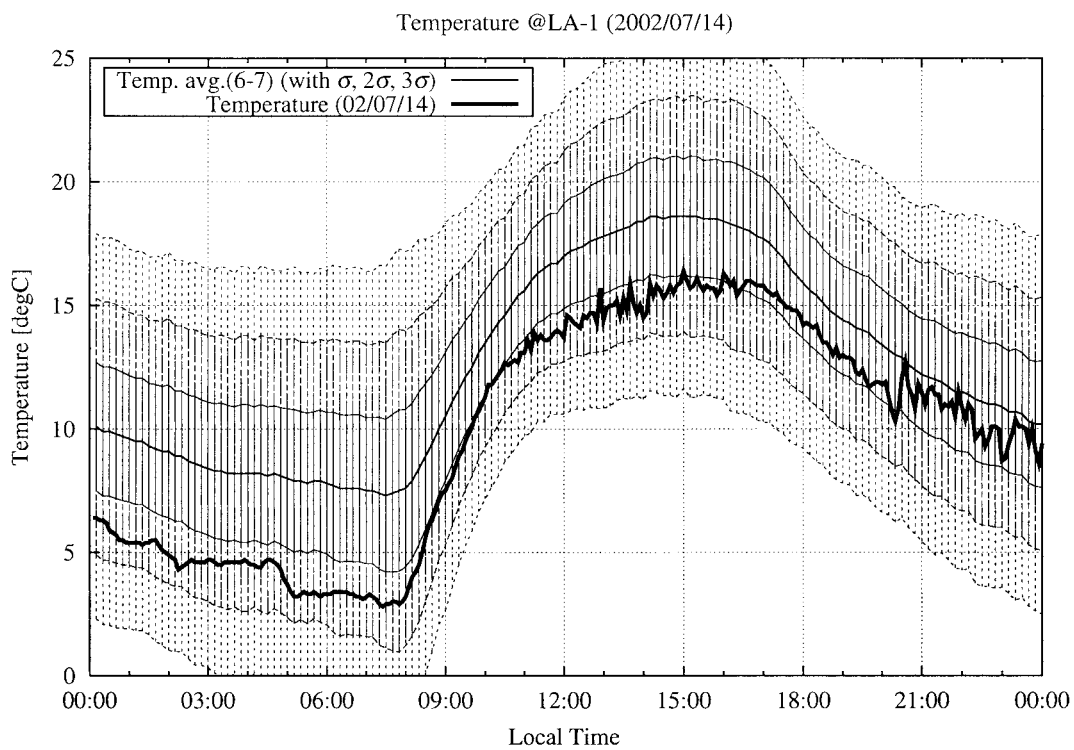


(a) 風向

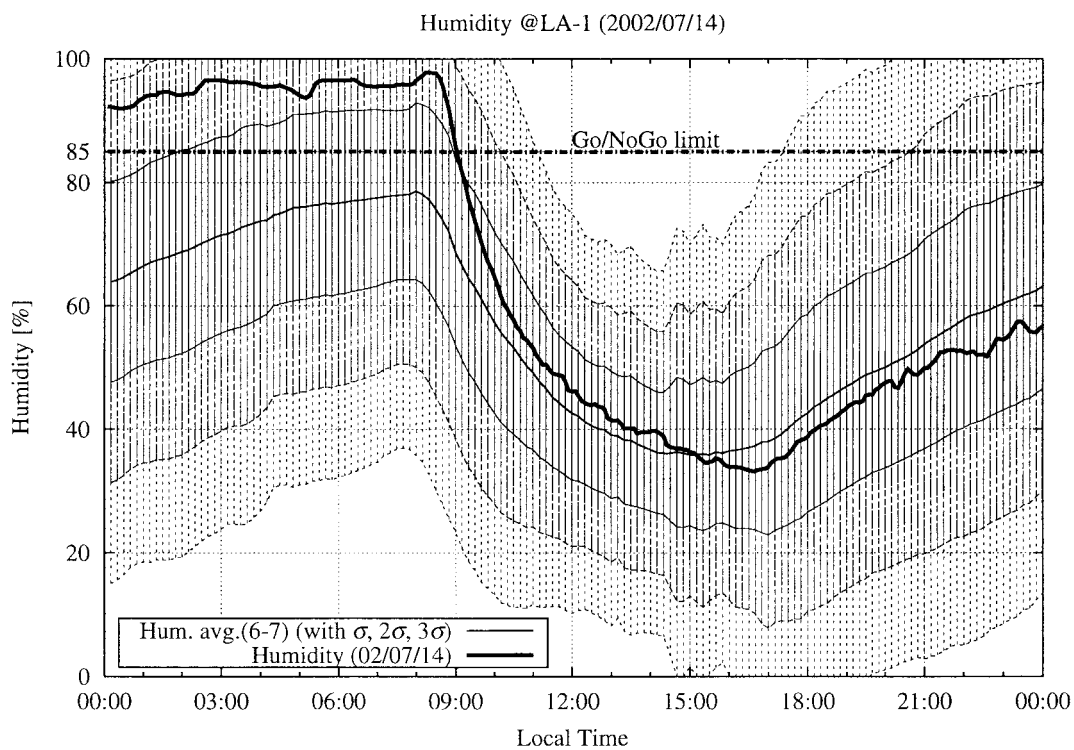


(b) 風速

図17：7月11日の射点20m 風向，風速

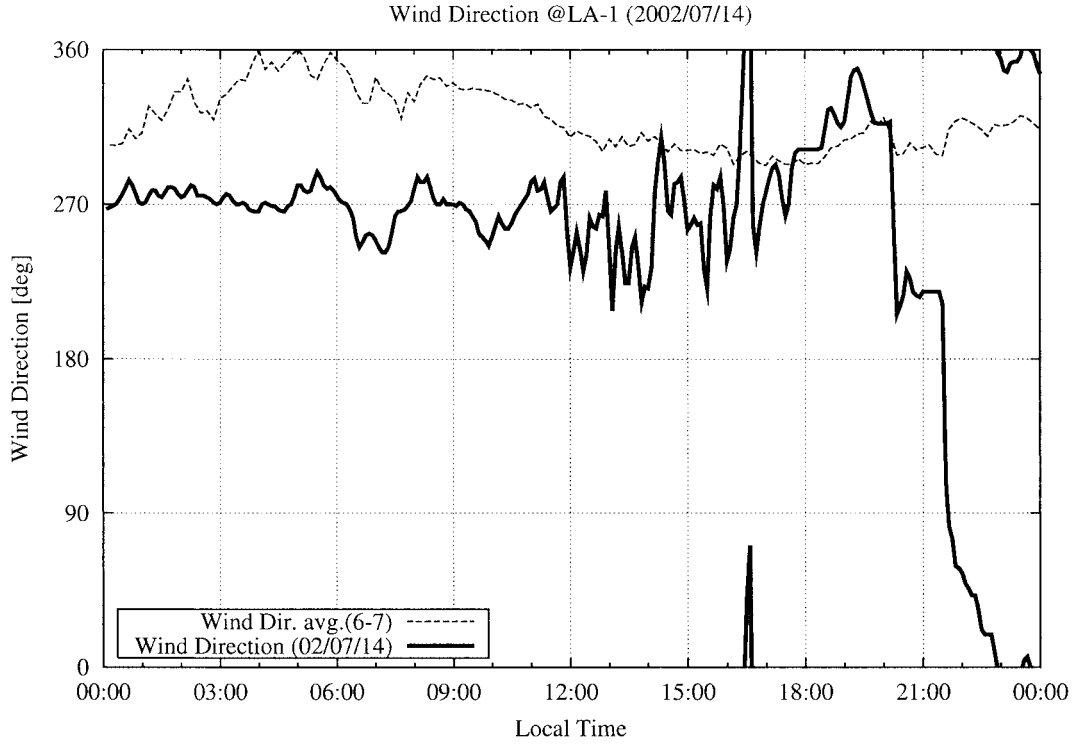


(a) 気温

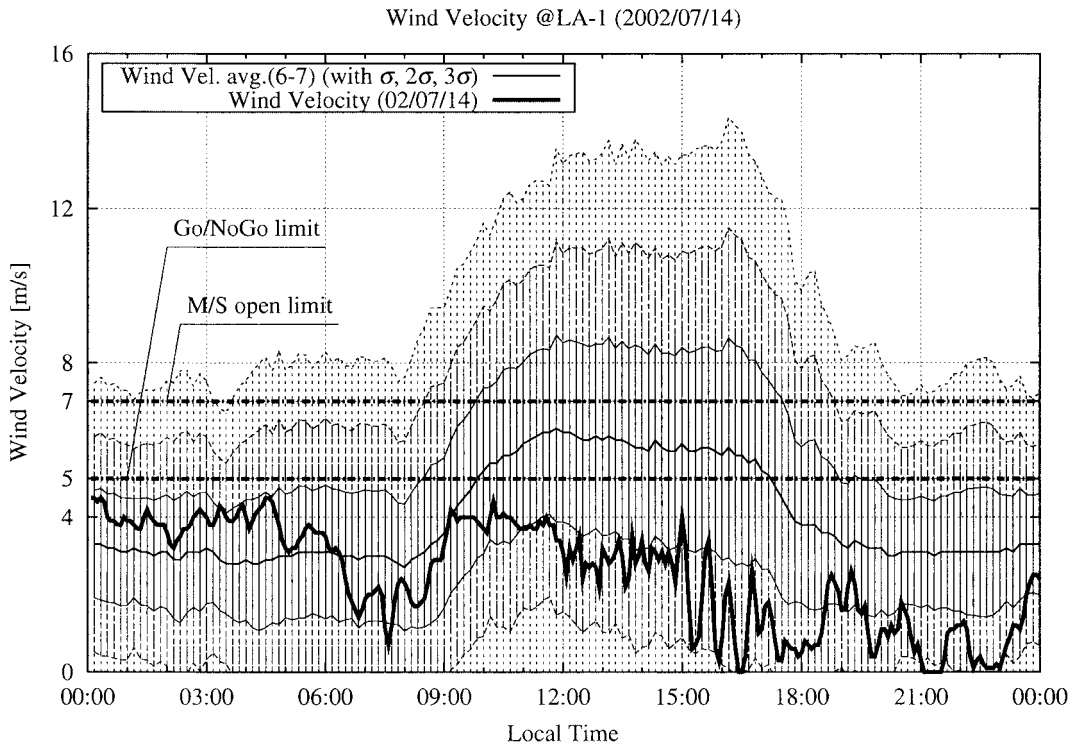


(b) 相对湿度

図18：実験実施日（7月14日）の射点6mの気象状態（気温，相对湿度）

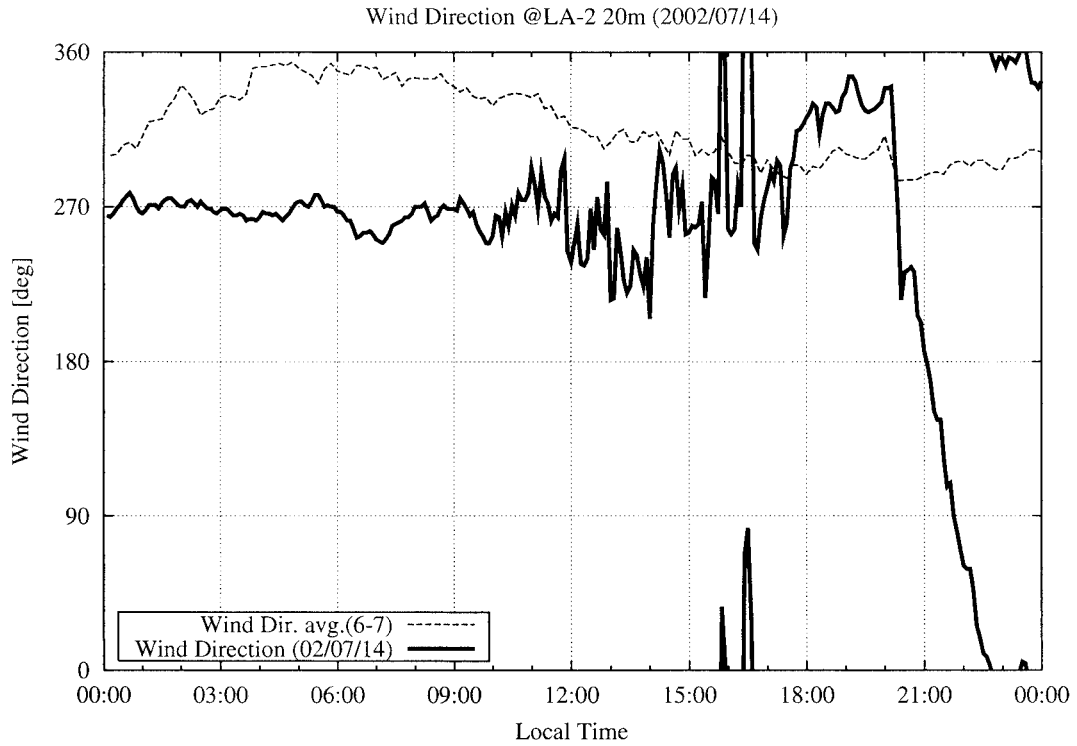


(a) 風向

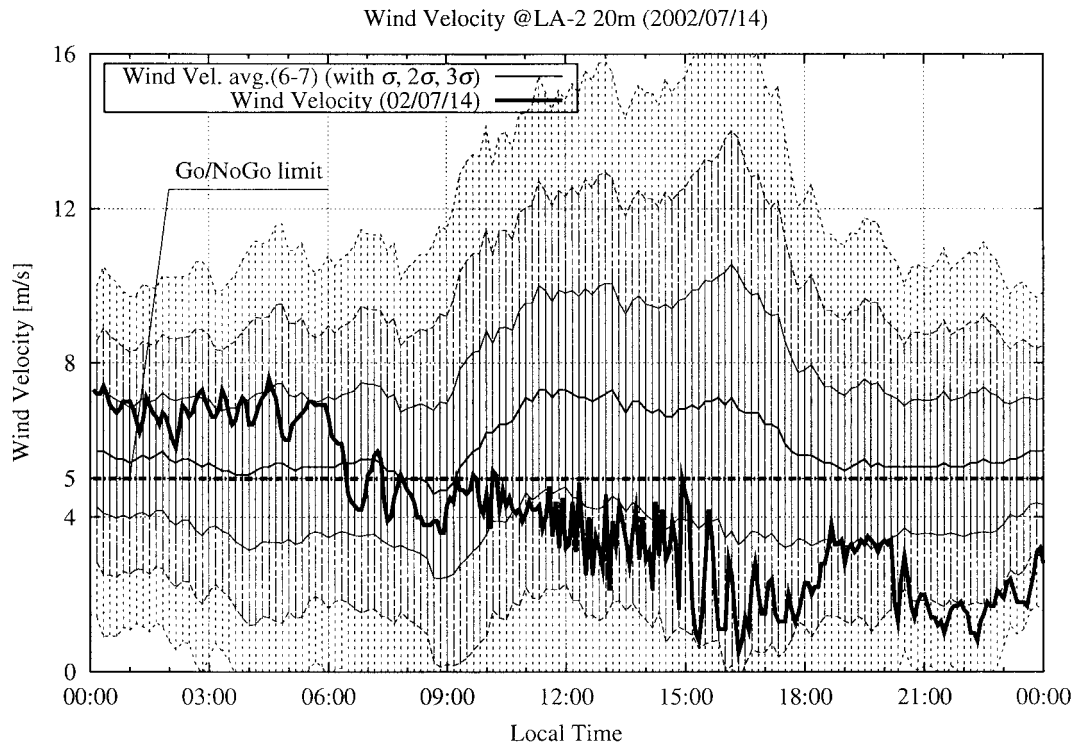


(b) 風速

図19：実験実施日(7月14日)の射点6mの気象状態(風向, 風速)

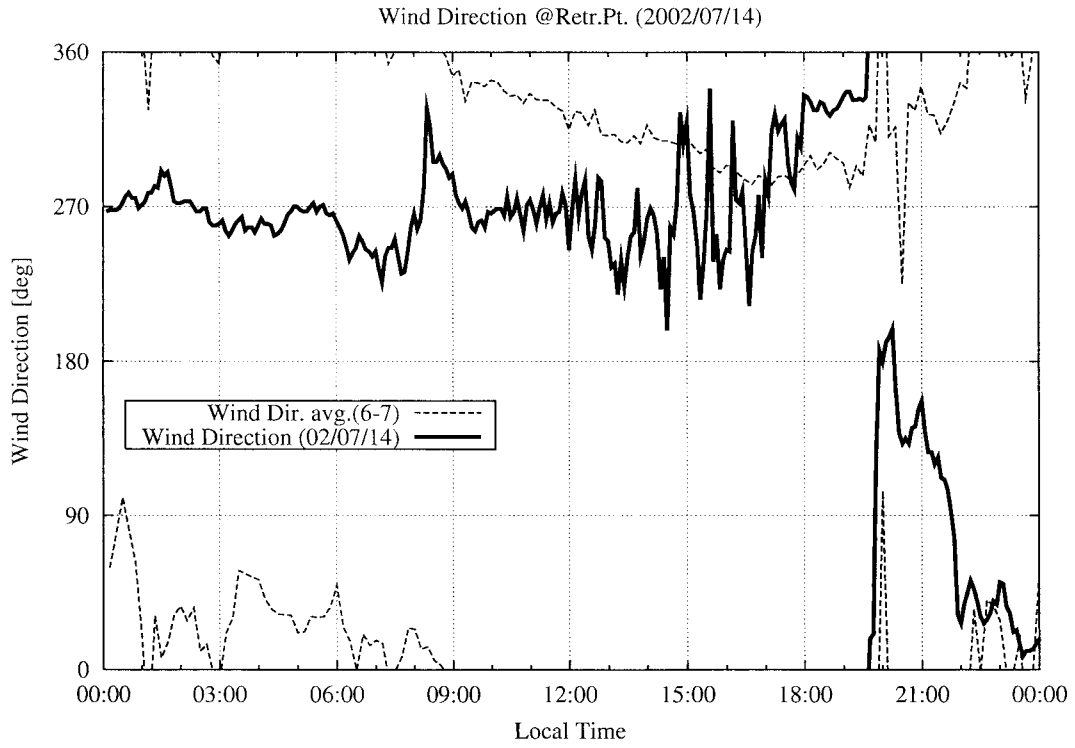


(a) 風向

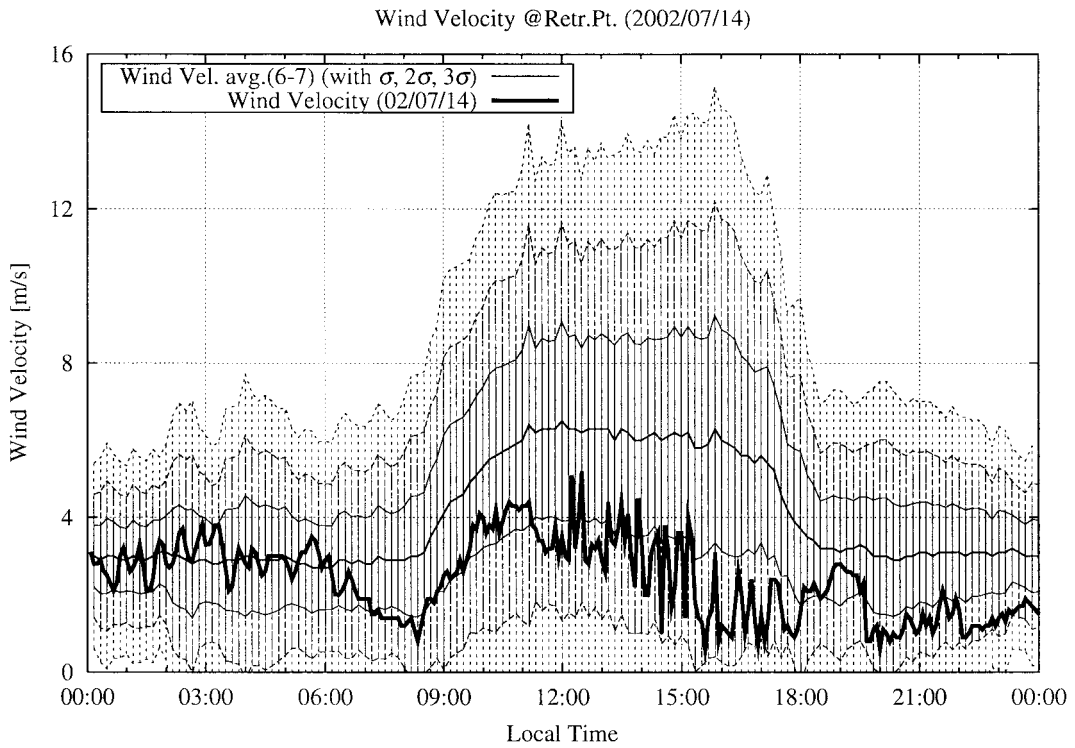


(b) 風速

図20：実験実施日（7月14日）の射点20mの風向，風速



(a) 風向



(b) 風速

図21：実験実施日（7月14日）の回収点の風向，風速（参考）

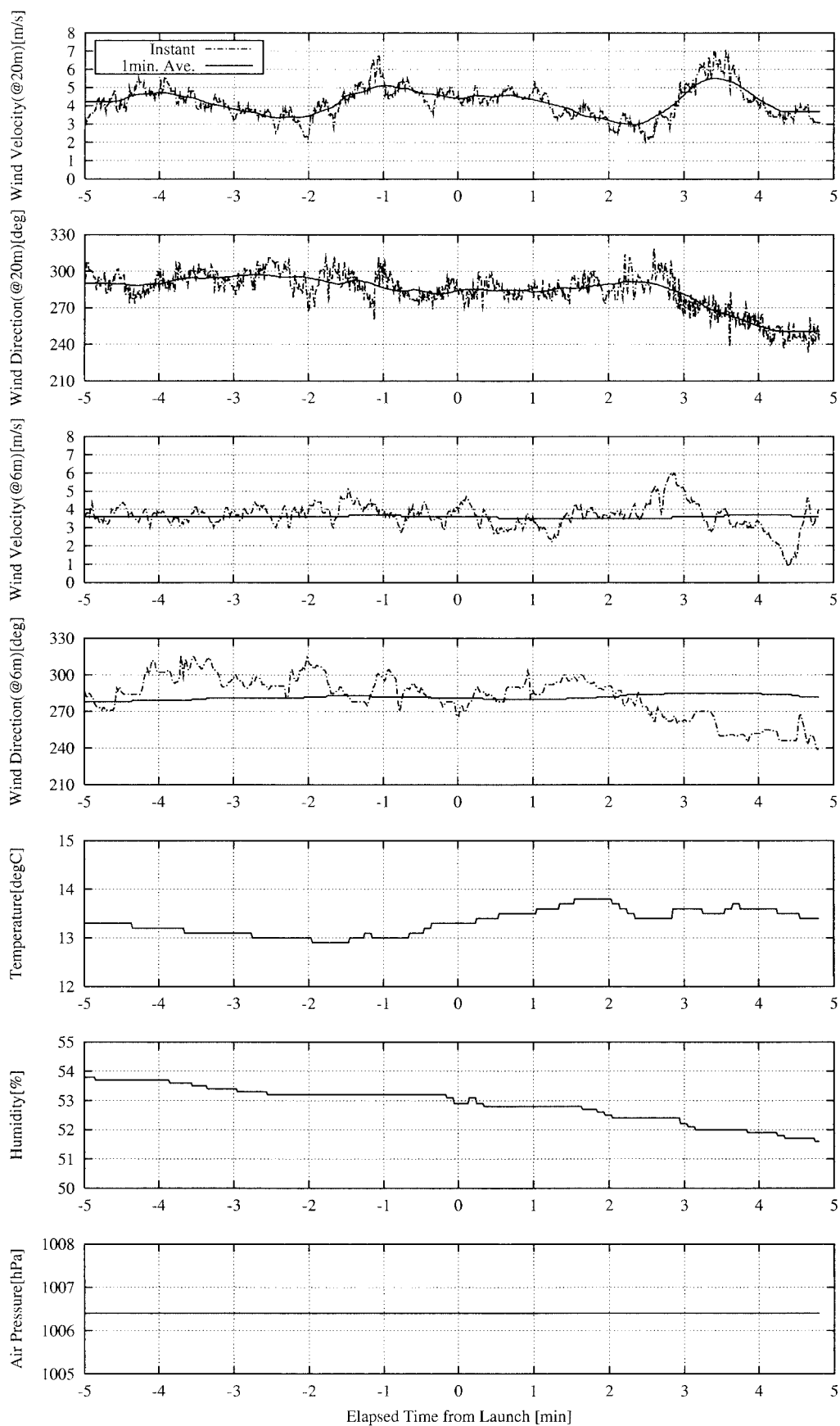


図 22 : 発射前後 10 分間の気象データの時歴

表8：打ち上げ時の気象データ

項目	状態
天候	晴れ
気温	13.3
気圧	1006.4hPa
相対湿度	52.9%
射点6m風	風速3.6m/s, 風向282 (1分間平均値, 制限判断に使用) 風速3.9m/s, 風向266 (1Hz瞬間値)
射点20m風	風速4.4m/s, 風向284 (1分間平均値, 制限判断に使用) 風速4.4m/s, 風向261 (4Hz瞬間値)
地上500mまでの風	定常風145 成分の高度方向平均値1.4m/s
視程	10km以上

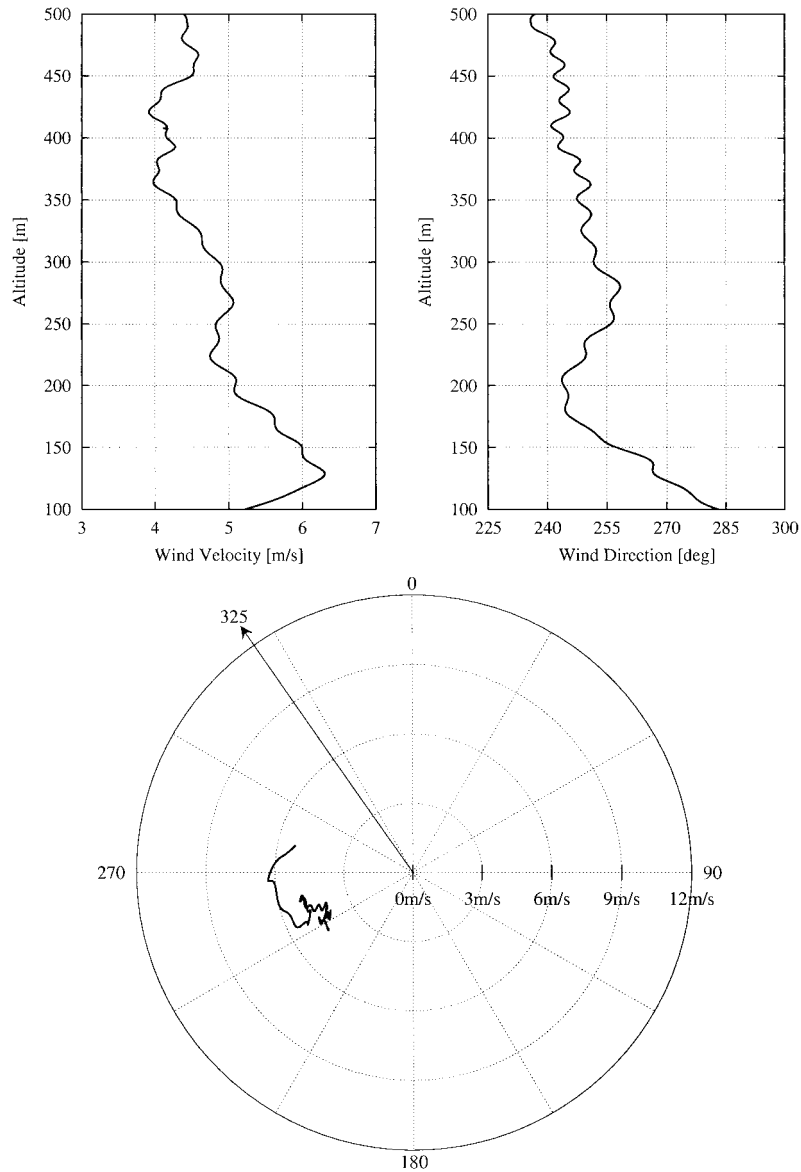
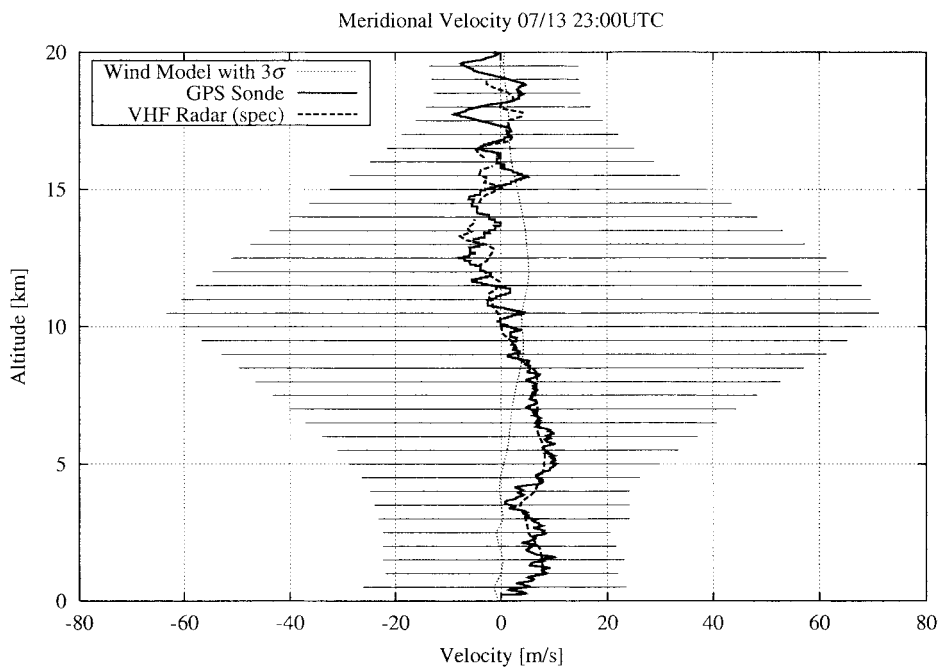
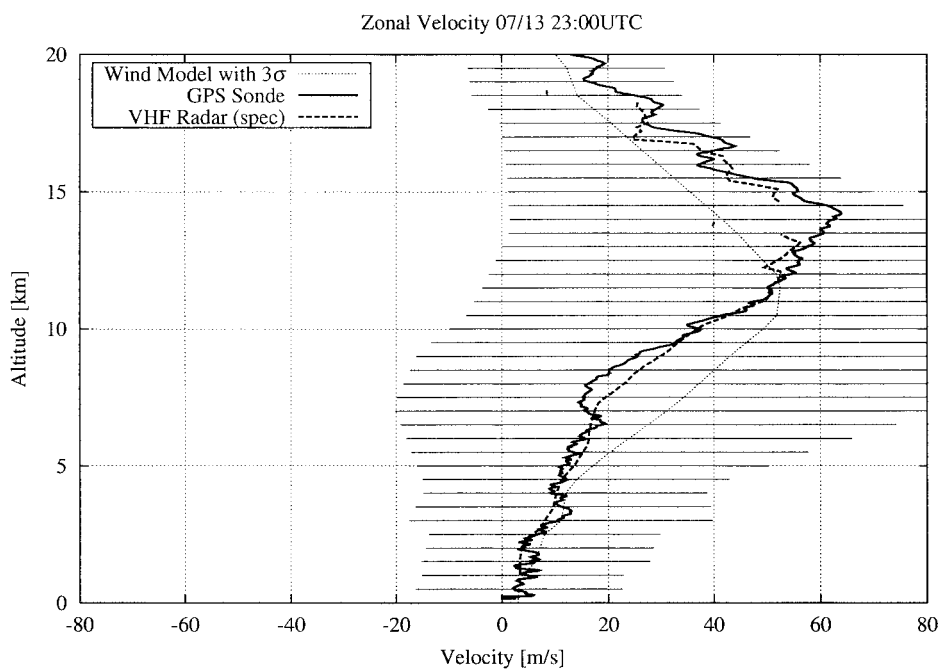


図23：発射直前のバルーン・トラッキングによる射点上空データ



(a) 南北方向成分 (北向きが正)



(b) 東西方向成分 (東向きが正)

図24 : GPSゾンデとVHFレーダによる上空風データ (2002年7月14日8:30)

4. 観測データの解析・評価

本章では、ウーメラ現地での気象観測データの解析・評価を通じて得られた知見をまとめる。

4.1 実験実施可能確率の評価

第1章で述べたように、本実験の気象条件待機の日数は6日間であり、極力この期間中に実験を行なうことが望ましい。ここでは、表1に示した実験の実施条件が待機期間の6日間で満たされる確率を評価する。評価にはBoMウーメラ観測所における2000年7月から2001年6月の1年間の観測結果(観測時刻は現地時間午前11時)を用い、この期間の連続した6日間ずつを取り出して、実施条件が満たされる確率を算出した。評価結果を図25に示す。3～10月はほぼ90%以上の確率で条件が満たされるが、現地の夏に当たる12～2月は確率が低くなっている。これは主に射点20m風の制限が満たされないことに起因している。図26に示す通り、ウーメラ観測所における地上平均風速は9～2月にかけて強くなり、射点20m風の制限値5m/sを超えている。2003年3月に予定される次回の飛行実験に際しては、次に述べる突風率の見直しにより射点20m風の制限を緩和するか、待機期間を長くする必要が考えられる。

4.2 射点20m風の突風率の検討

射点20m風の風制限は、表1に示すようにランチャ離脱時の機体の姿勢変化を抑えるために設定されており、最大瞬間風速10m/s以下というのが本質的な制限である。しかし、最大瞬間風速を直接評価することは難しいため、突風率(最大瞬間風速と平均風速の比)を2.0と仮定して、平均風速5m/sの制限を設けている。突風率は平均風速、地形および計測高度等によって変化するが、平均風速10m/s程度で平坦な地形の場合、地面付近では1.4～1.6の値を取るとされ^[6]、風制限で用いて

いる2.0は安全側の値であると考えられる。ここでは射点20m風観測装置による観測結果を用いて、突風率2.0の仮定の妥当性を検討する。

評価対象は、射点20m風観測装置による2002年4～6月の約1か月半の観測データである。観測装置の4Hz風向・風速データから1分間平均値(打ち上げ時にモニタする値)を算出し、平均を取った時間帯の最大瞬間風速(4Hz瞬間値)と比較した。

風観測装置の動特性は、1次遅れ系で近似した際の時定数が風速10m/sに対して約0.4秒であり(風速が大きくなるほど時定数は小さくなる)、風速10m/sを超える風速変化が1秒程度持続すれば観測できる。持続時間が1秒未満のごく瞬間的な風速変化は機体の姿勢変化に大きな影響を与えないと考えられるため、風制限として考慮すべき姿勢変化を生じ得る風速変化は、この風観測装置で十分評価可能である。

評価結果を図27に示す。図27には、最大瞬間風速が突風率以下になる確率が示されている。最大瞬間風速が突風率2.0を超える確率は0.01%程度であり、突風率2.0は十分安全側の仮定である。また、最大瞬間風速を

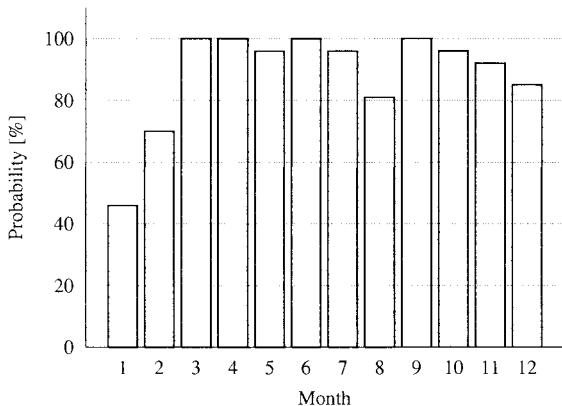


図25：6日間に実験の実施条件を満たす確率

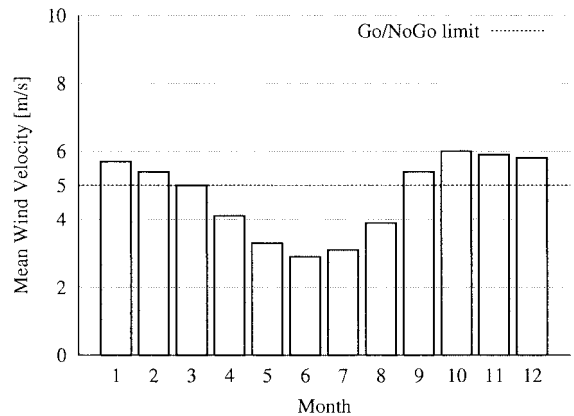


図26：ウーメラ観測所における地上平均風速(1949～2001年の平均、観測時刻は午前9時)

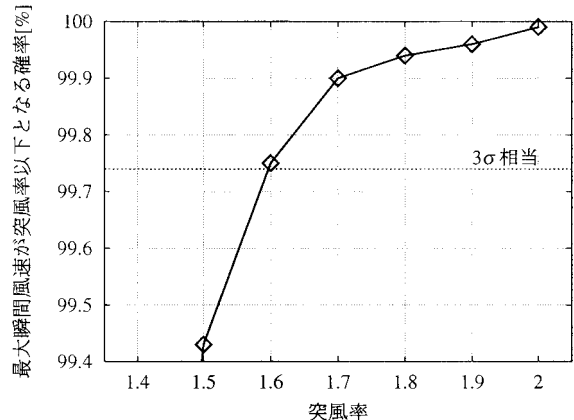


図27：射点20m風の突風率の評価

3σ (99.7%)の確率で予測するならば、突風率を1.6と見なすのが適当であり、突風率を見直すことで風制限を緩和できる可能性もある。しかし、今回評価した現地観測の期間が1か月半と短いため、実際に制限を緩和するには、より長期間の現地観測が必要と考えられる。

4.3 1日の気象変化の評価

ウーメラ実験場の1日間の気象変化の傾向を知るとは、実験準備、特に実験実施日の作業スケジュールを立案する上で非常に有用である。以下では、第1回飛行実験の行なわれた冬季(6~7月)の観測データを基にその挙動を検討する。

図28, 29は、射点気象観測装置により2002年6月1日から7月20日の間に得られた気温、相対湿度、風向、風速について時刻ごとに平均と標準偏差(σ)を求め、平均値と σ , 2σ , 3σ の範囲をプロットしたものである。同様に図30は、射点20m風観測装置により2002年6月1日から7月17日の間に得られた風向、風速について、また図31は回収点地上風観測装置により2002年6月14日から7月24日の間に得られた風向、風速について先と同じ処理を施したものである。これらのデータより以下の定性的事項を読み取ることができる。

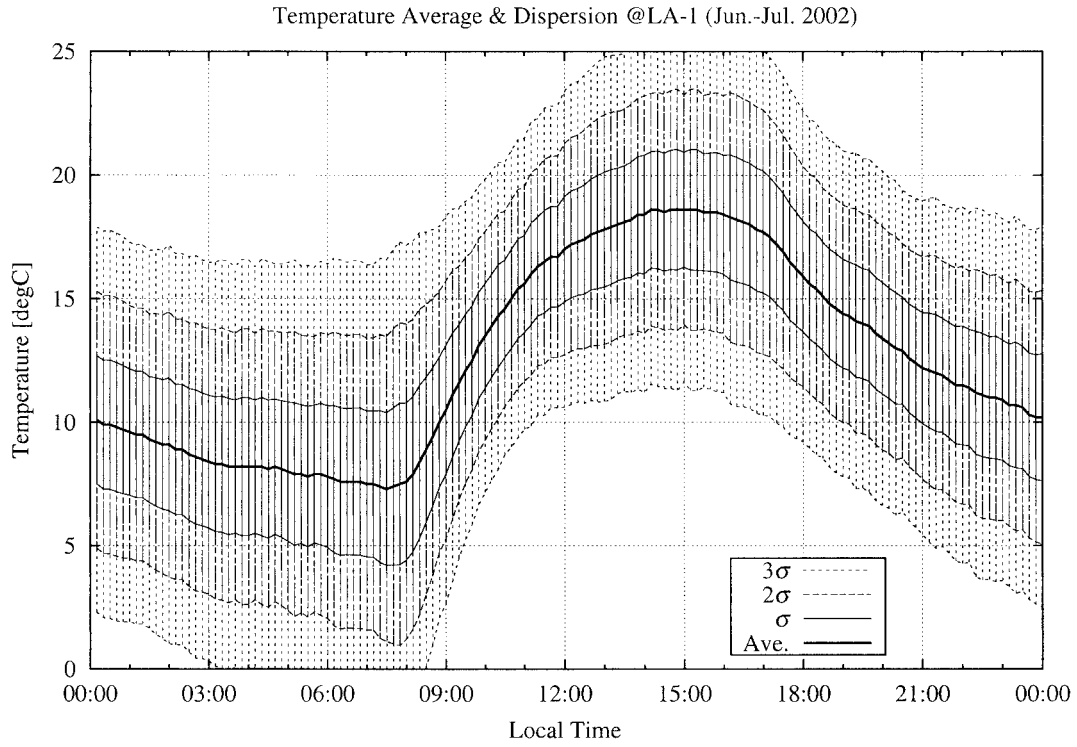
日の出(7:30ごろ)とともに気温の上昇が始まり、気温の上昇に伴い相対湿度が下がり始める(図28(a), 28(b))。気温の上がり始めと相対湿度の下が

り始めには約30分のタイムラグが存在する。また気温、相対湿度の標準偏差は時刻による変動がほとんどない。

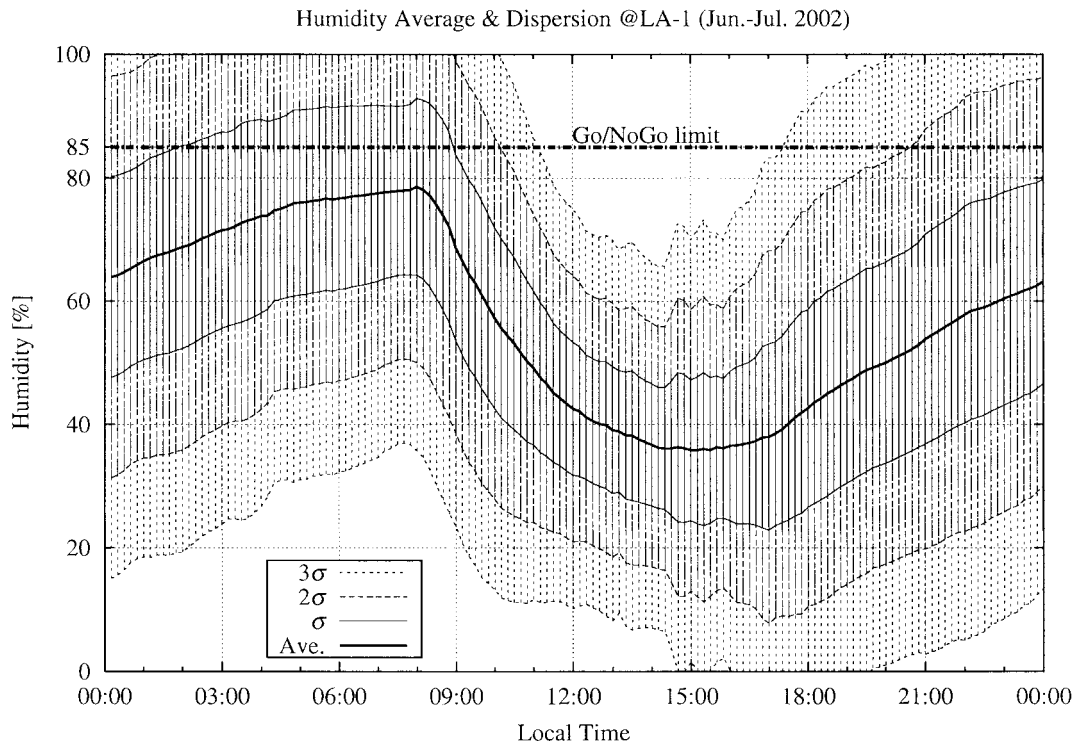
射点6m, 射点20mおよび回収点ともに、風は日の出から正午まで徐々に強くなり、そのまま日没(17:00ごろ)まで平均風速は一定、日没とともに弱まる(図29(b), 30(b), 31(b))。また風速の標準偏差は、日中風が強いときは大きく、夜間風の弱いときには小さい。

射点6mおよび射点20mでは、1日を通して風向は北~北西である(図29(a), 30(a))。また、回収点の風向は日中は北~北西、夜間は北~北東に変化している(図31(a))。ただし風向に関しては分散が大きく、 2σ でほぼ全方向を網羅してしまう。

実験実施日の準備作業において有用な情報として、図28(b)より、午前9時に相対湿度の 1σ 域がM/S開放に必要な相対湿度条件(85%以下)を満たすことから、正規分布を仮定すると午前9時にM/Sを開放できる確率は約84%(=平均値より低い確率50% + 平均値以上で σ 内の確率約34%)である。また図30(b)より、射点20mでの風速の平均値はほぼ常時5m/sを越えており、表1(b)の実験実施条件である「定常風が5m/s以下」を満たす確率は1日中50%以下であることが予想される。

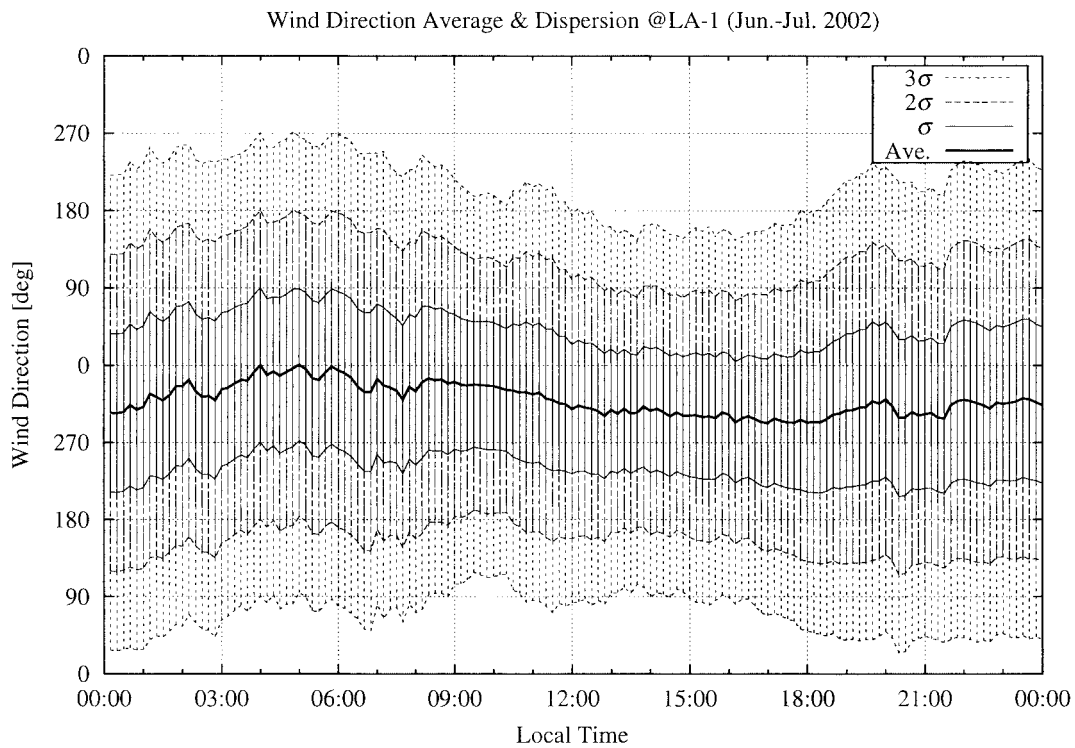


(a) 平均気温

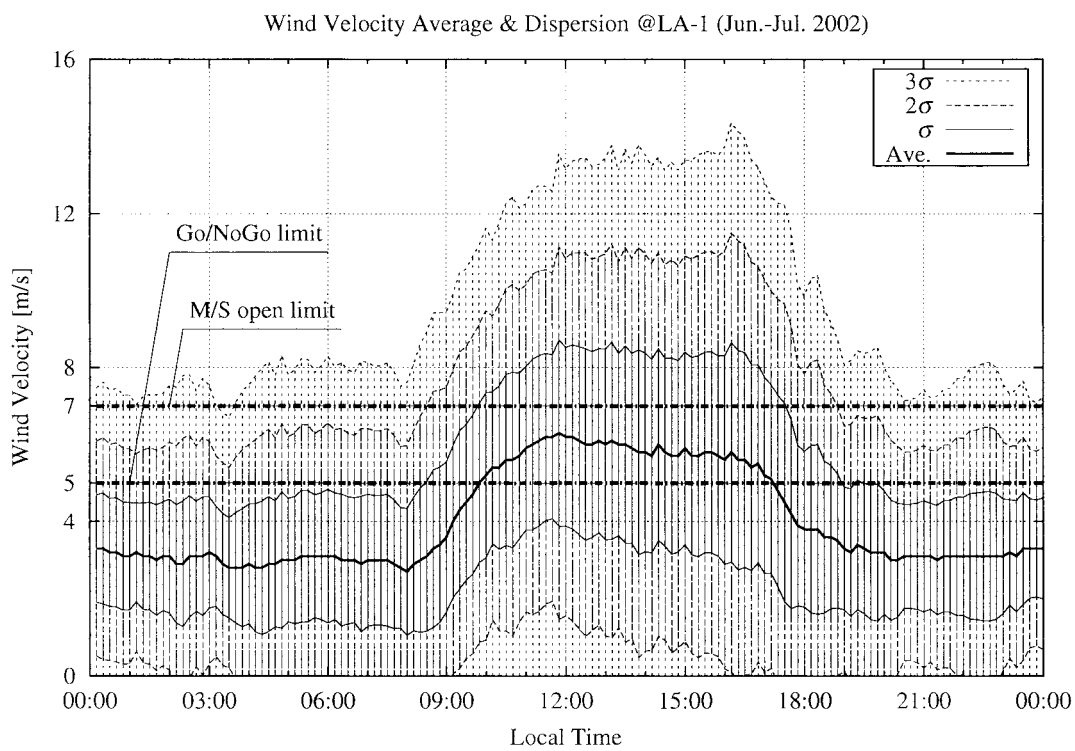


(b) 平均相対湿度

図28：射点6mの気温，相対湿度の1日の変化（6～7月の平均および分散）

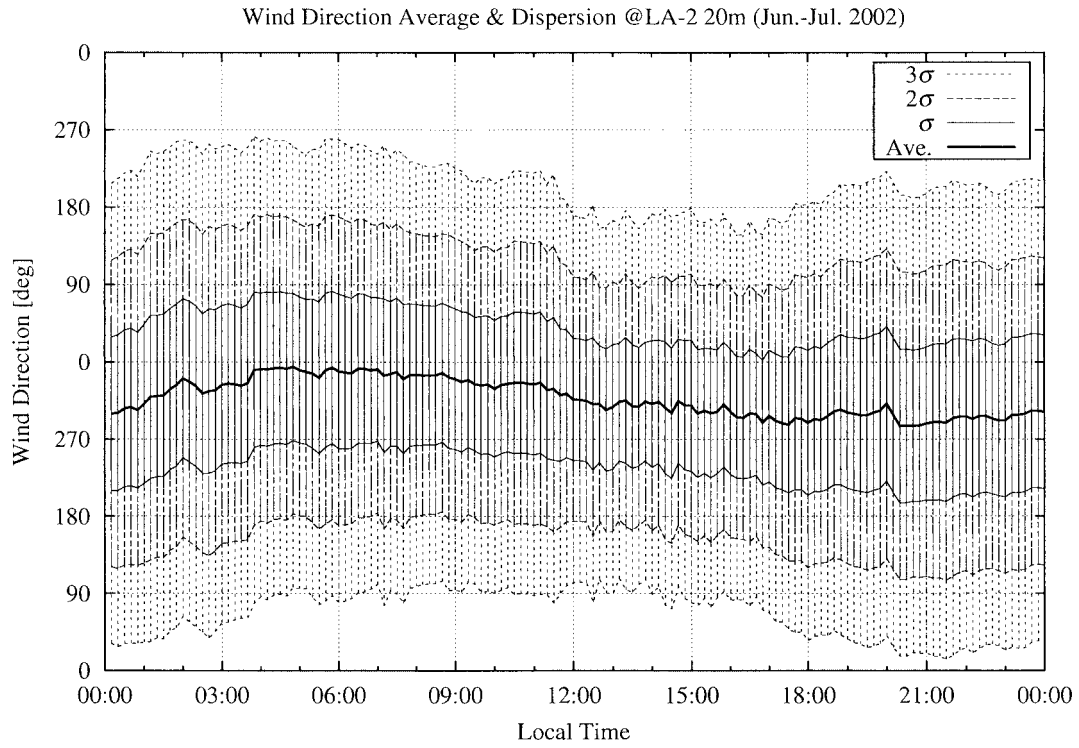


(a) 平均風向

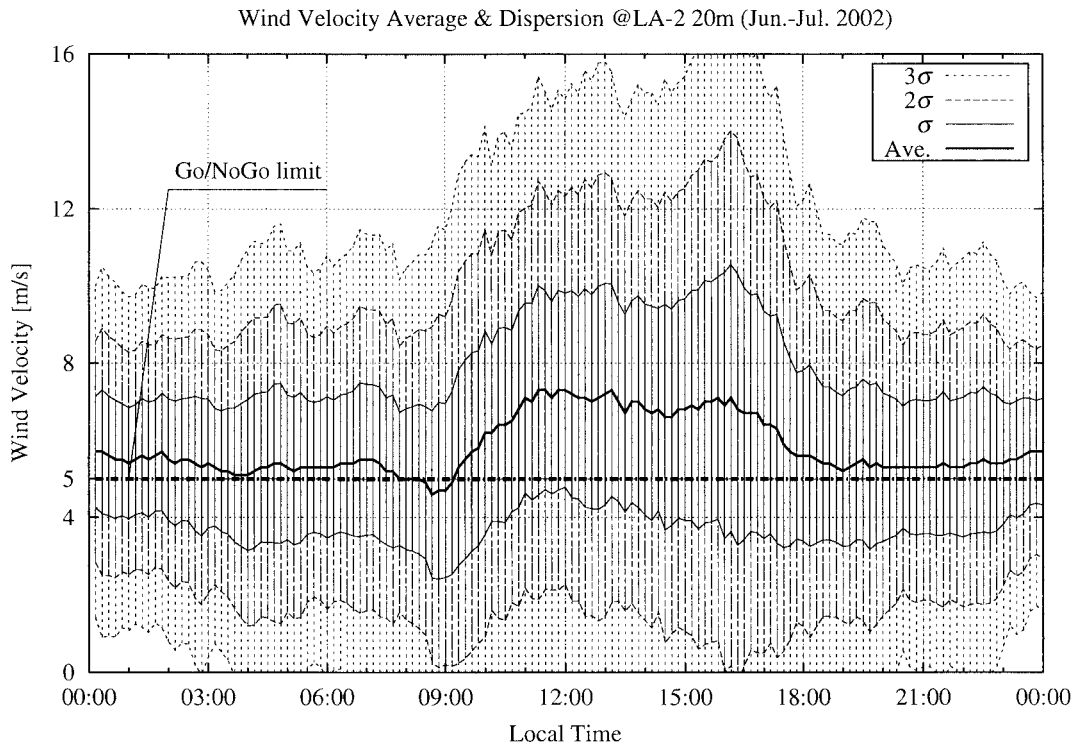


(b) 平均風速

図29：射点6m風の1日の変化(6~7月の平均および分散)

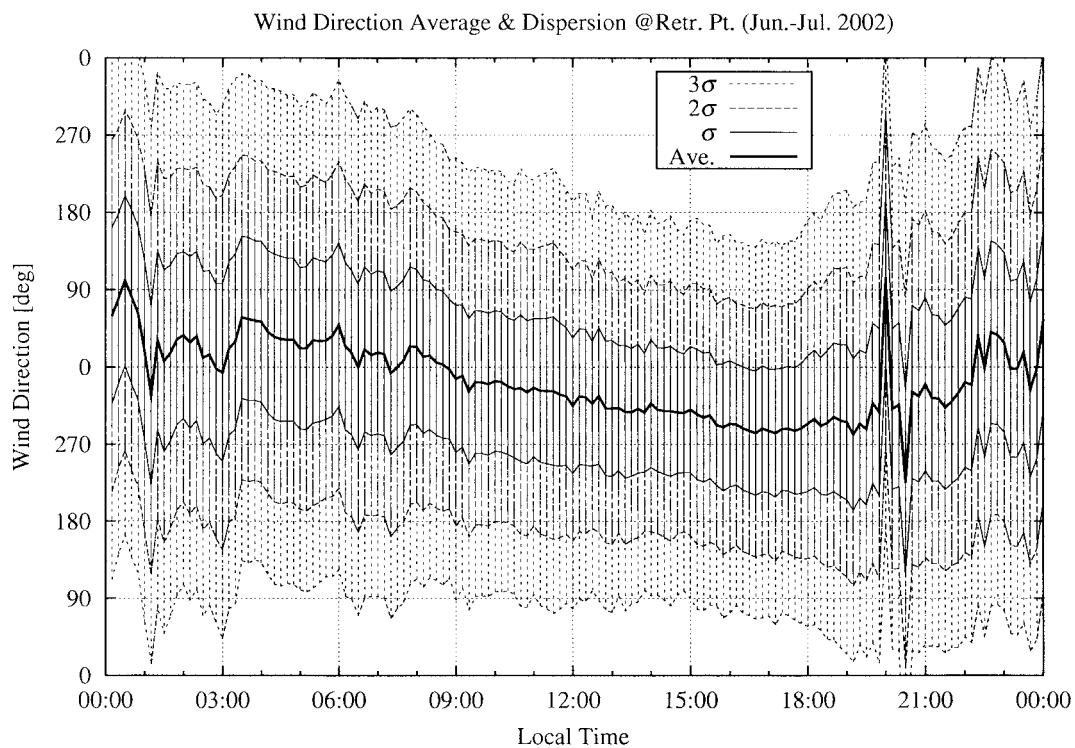


(a) 平均風向

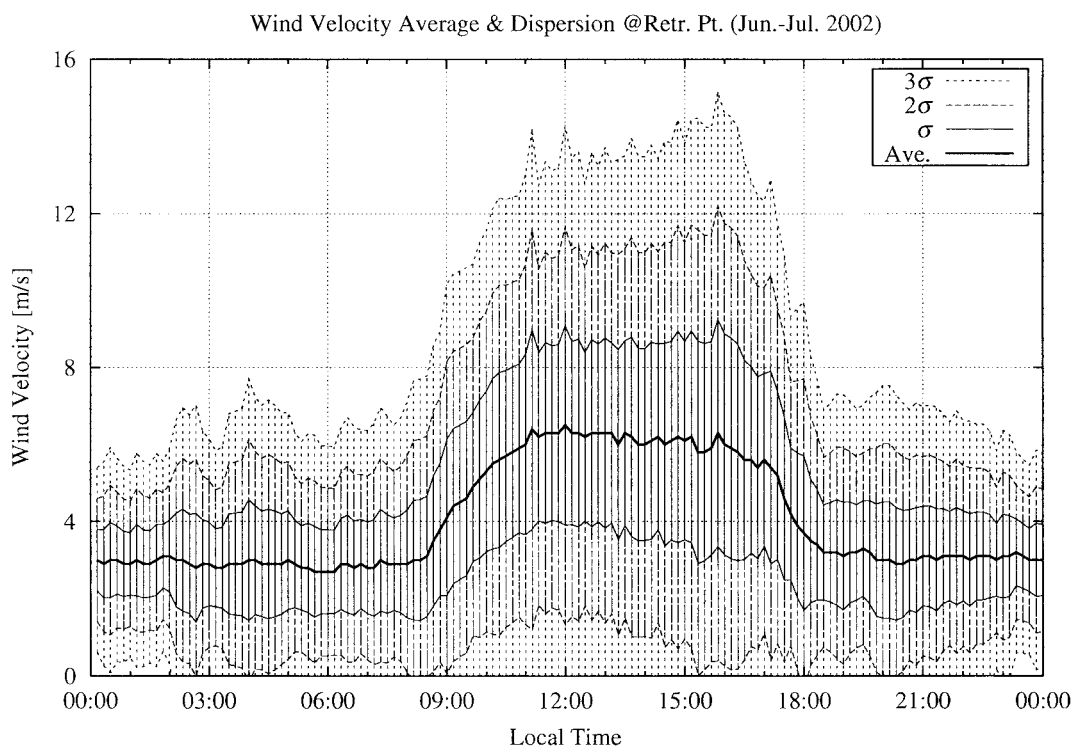


(b) 平均風速

図30：射点20m風の1日の変化(6~7月の平均および分散)



(a) 平均風向



(b) 平均風速

図31：回収点の風の1日の変化（6～7月の平均および分散）

4.4 回収点地上風の評価

第2章の冒頭で述べたように、回収点の地上風は機体回収の成否に大きく影響すると考えられ、できるだけ風速が小さいことが望まれる。回収点の地上風は、第1回飛行実験の段階では実験の実施条件に入っていなかったが、次の飛行実験の際は条件に追加される可能性があり、その場合は射点での風速制限である5m/s以下と同等以上の厳しい制限となることが予想される。実験機が回収点に到達するのは打ち上げの約10分後であり、風速制限を設定する際には、その10分間の風の変動量を評価し、変動量が多い場合はその分のマージンを含んだ制限値を設定する必要がある。ここでは現地観測データを用いて地上風の時間的変動を評価する。また、回収点と射点の地上風の相関度についても評価を行ない、回収点の風観測が何らかの理由で不可能になった場合に、射点の地上風観測データで回収点の地上風を推定可能かどうか評価する。

2002年6月14日から7月24日の間に得られた回収点地上風の観測データを、ある観測時刻の風速を横軸に、10分および20分後の風速を縦軸にプロットしたものを図32に示す。射点6m風についても、2002年6月1日から7月20日の間に得られた観測データを同様にプロットしたものを図33に示す。また両地点の地上風の10分間、20分間の変動の平均値、標準偏差(σ)、95%確率値、99.7%確率値の値を表9に示す。両地点ともに、変動量の95%確率値は標準偏差のほぼ2倍で正規分布の性質に近く、信頼性が高いと考えられる。しかし、 3σ 値に相当する99.7%確率値は 3σ 値より大きな値となっており、同数値を算出するにはデータ数が足りない恐れがある。両地点の変動量はほぼ同等であり、時間間隔が長くなるにつれて増加する。回収点の地上風速の変動量として95%確率値を採用した場合、10分間の変動量は1.3m/sであり、制限を設ける際に考慮すべきオーダの変動であると考えられる。

次に、射点と回収点の同時刻の風向・風速データを用いて、両者の相関度を評価する。2002年6月14日から7月20日の期間について射点の風速を横軸に、回収点の風速を縦軸にプロットしたものが図34である。また、両地点の風速の差の平均値、標準偏差(σ)、95%確率値、99.7%確率値の値を表10に示す。両地点の風速には高い相関が見られるが95%確率値で風速差が2.3m/sあり、20分間の風速変動量より大きい。したがって、射点6m風をもって回収点の地上風を代表させるのは適当でないと考えられる。

表9：地上風の10～20分間の風の変動量

(a) 回収点地上風の変動量

時間	項目	変動量の平均値	変動量の標準偏差(σ)	変動量の95%確率値	変動量の99.7%確率値	データ数
10分間	風向[°]	-0.8	16.4	26.0	116.0	10785
	風速[m/s]	0.0	0.62	1.3	2.7	
20分間	風向[°]	-1.4	21.3	36.0	158.0	10785
	風速[m/s]	0.0	0.78	1.6	3.2	

(b) 射点6m風変動量

時間	項目	変動量の平均値	変動量の標準偏差(σ)	変動量の95%確率値	変動量の99.7%確率値	データ数
10分間	風向[°]	-0.6	12.5	20.0	84.0	13911
	風速[m/s]	0.0	0.54	1.1	2.2	
20分間	風向[°]	-1.1	17.9	29.0	119.0	13911
	風速[m/s]	0.0	0.75	1.5	2.9	

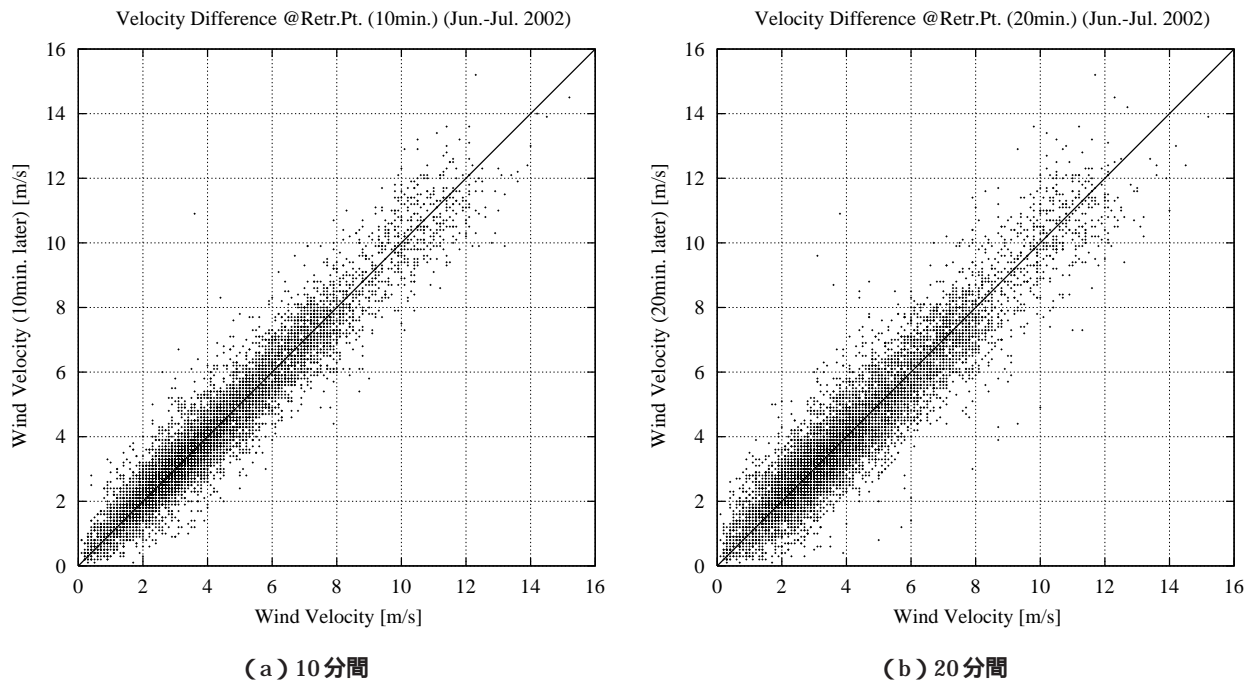


図32：回収点地上風の時間変化

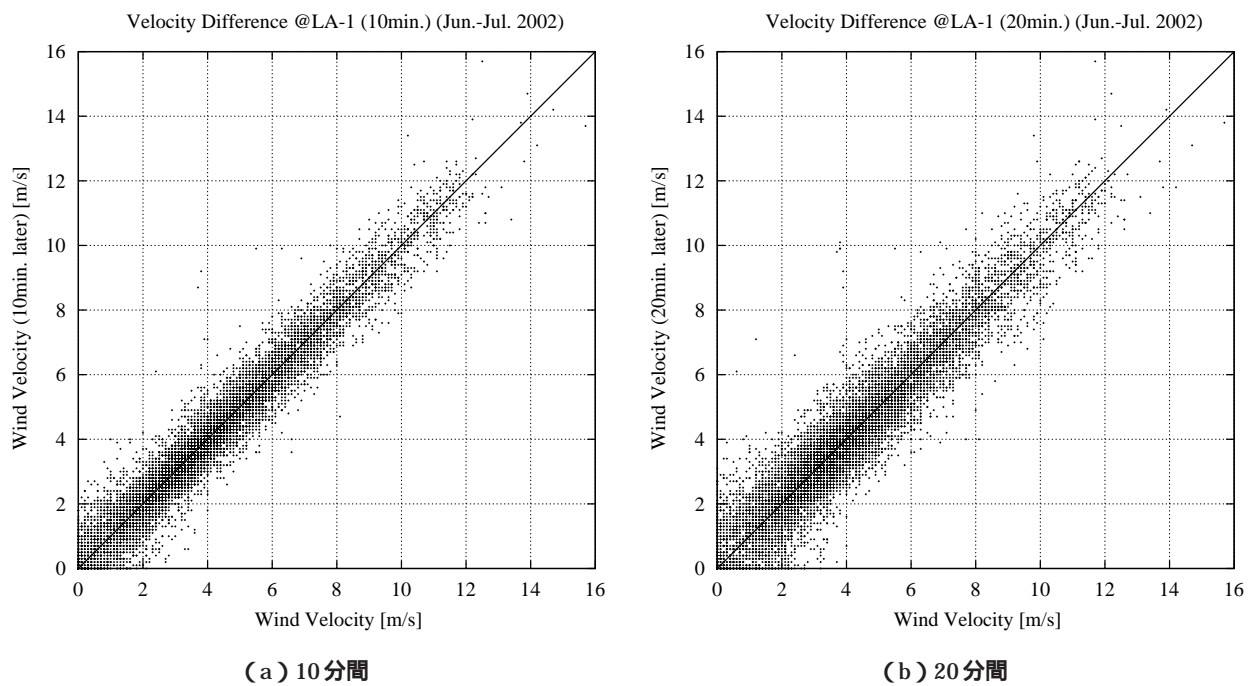


図33：射点6m風の時間変化

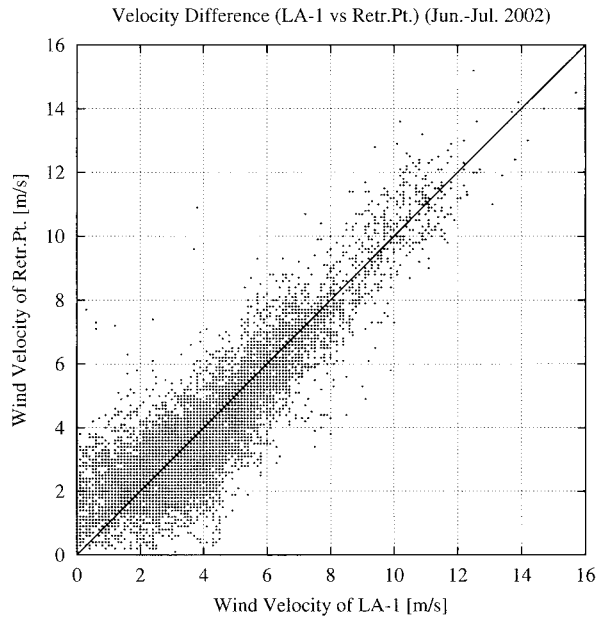


図34：回収点と射点の地上風の相関図

表10：回収点と射点の地上風の差

項目	差の平均値	差の標準偏差(σ)	差の95%確率値	差の99.7%確率値	データ数
風向[°]	-2.3	26.1	47.0	165.0	9446
風速[m/s]	-0.1	1.11	2.3	3.7	

4.5 射点地上500mまでの風の変動量の評価

第3章で述べたように、射点地上500mまでの風の観測手段として用いたレーダによるパルーン・トラッキングは、打ち上げ時の他の準備作業と干渉するため、風観測を打ち上げ直前ではなく30分前に実施する必要があった。ここでは、風観測から打ち上げまでの30分間に風がどの程度変動し得るか、現地観測データを用いて検討する。評価には、5分おきに出力されるVHFレーダの風向・風速の5分間平均値(2002年6月8から29日までの22日間分)を用いた。ただし、VHFレーダは高度1km以上が観測範囲であるので、高度1~2kmの範囲を対象として風の変動を評価した。

評価結果を表11に示す。変動量は、時間間隔が長くなるにつれてわずかに増加する。評価データの観測期間は22日と短い、変動量の95%確率値は標準偏差のほぼ2倍で正規分布の性質に近く、信頼性が高いと考えられる。しかし、 3σ 値に相当する99.7%確率値は極端に大きな値となっており、同数値を算出するにはデータ数が足りない恐れがある。風の変動量として95%確率値を採用した場合、風向の変動量は 20° 前後と比較的小さいが、風速の変動量は 3m/s 前後と風制限の 6m/s に対して大きく、風制限の設定に際して考慮する必要があると考えられる。

4.6 VHFレーダの性能評価

第2章で述べたように、VHFレーダの性能評価のため、別途飛行試験の実施等の手段により観測結果の信頼性や精度を評価した。ここではその詳細を示す。なお、ここで評価対象とするのは、より高々度まで信頼性の高い風速データが得られるvel方式、spec方式の風速データ(1時間平均値)である。

4.6.1 風速データの信頼性評価

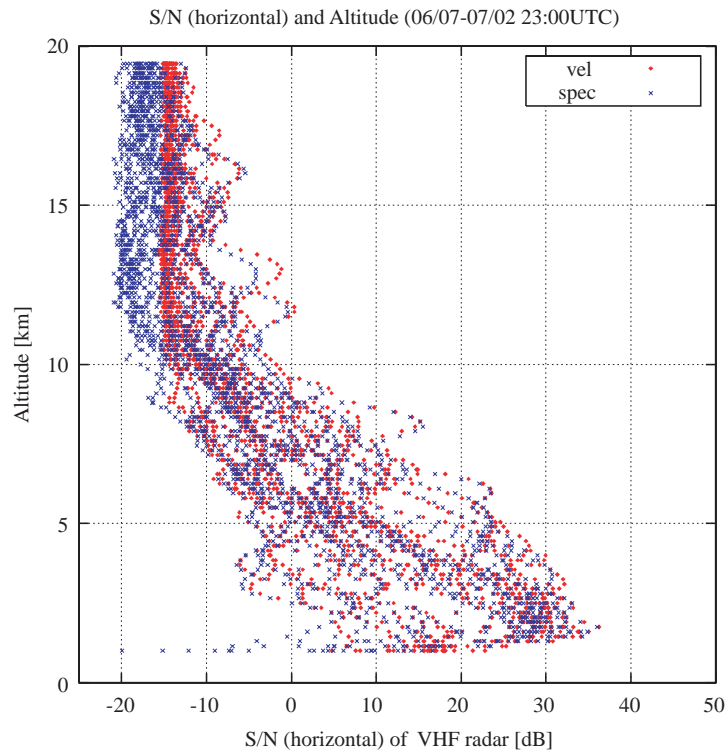
VHFレーダの風速データは、観測高度が高くなるとS/N比が悪化し信頼性が低下する。レーダの製造元であるATRAD社からは、信頼性のある風速データを得る

にはvel方式でS/N比・13dB以上、spec方式でS/N比・20dB以上が必要との見解を得ている。現地観測データから得られたS/N比と高度の関係を図35に示す。水平面内の風速については、高度10~12kmでS/N比が信頼性の閾値以下となっており、それ以上の高度の信頼性が低いことが予想できる。一方、上下風速については、全般に水平面内の風速に比べてS/N比が高く、高度15km程度まで信頼性の高い結果が得られる可能性が高い。これは風観測に用いるレーダの反射波のS/N比が、出力波の照射方向により変化することに起因する。すなわち、垂直に照射するとS/N比が最も高く、照射方向を傾けるとS/N比は低下する。したがって、垂直照射の反射波だけで算出される上下風速は、照射方向を傾けた反射波のデータを用いる水平面内の風速よりS/N比が良く信頼性が高くなる。

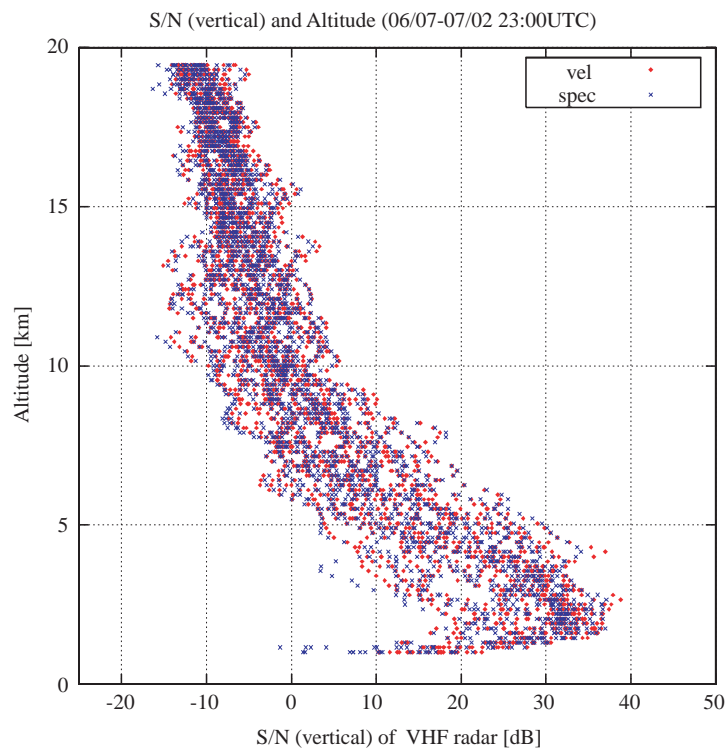
次にGPSゾンデの観測データとの比較により、水平面内の風速データの信頼性を評価する。ゾンデの放球地点はレーダから約60km離れており、その観測データは必ずしもレーダ上空での風向、風速とは一致しないが、ウーメラ付近の地形は起伏が少なく局所的な風向、風速の違いは小さいと考えられる点と、ここで行なう評価は定量的な精度評価ではない点を考慮して、評価基準として使用した。GPSゾンデとVHFレーダの水平面内の風速データの差の絶対値を高度ごとに整理したものが図36である。なお、VHFレーダの風速データはGPSゾンデの観測時刻に合わせて時間方向に補間している。vel方式、spec方式ともにS/N比が閾値以下となることが多い高度10km以上では、両者の差のばらつきが大きくなっている。また、両者の差がある一定値以内に収まる確率を高度ごとに算出した結果を図37に示す。両者ともに比較的信頼性が高いと思われる高度5km以下の風速データの差が 6m/s 以内にほぼ収まっていることから、信頼性の目安を両者の差が 6m/s 以下とすると、その確率はvel方式、spec方式ともに高度10kmまで約80%、10~12kmで約60%、12~15kmで約40%、15~20kmで20%以下である。

表11：地上1~2kmにおける10~30分間の風の変動量

時間	項目	変動量の 平均値	変動量の 標準偏差(σ)	変動量の 95%確率値	変動量の 99.7%確率値	データ数
10分間	風向[$^\circ$]	-0.4	11.7	19.3	85.4	4721
	風速[m/s]	0.0	1.45	2.62	8.1	
20分間	風向[$^\circ$]	-1.0	12.1	20.7	81.6	4682
	風速[m/s]	0.0	1.6	2.9	8.9	
30分間	風向[$^\circ$]	-1.4	12.7	22.2	82.5	4642
	風速[m/s]	0.0	1.7	3.2	9.3	



(a) 水平方向のS/N比



(b) 垂直方向のS/N比

図35：高度とS/N比の関係

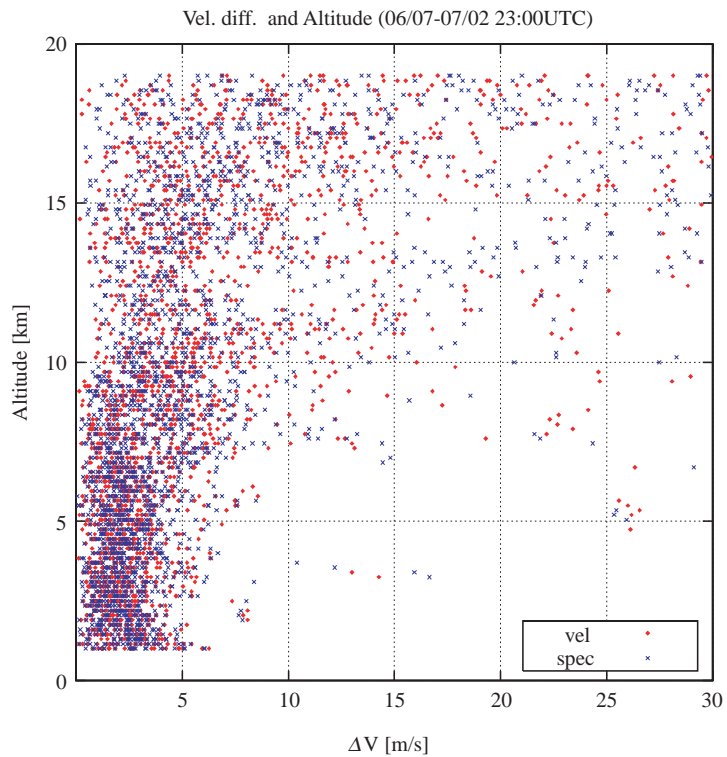


図36：VHF レーダ風速のGPS ソンデデータとの差と高度の関係

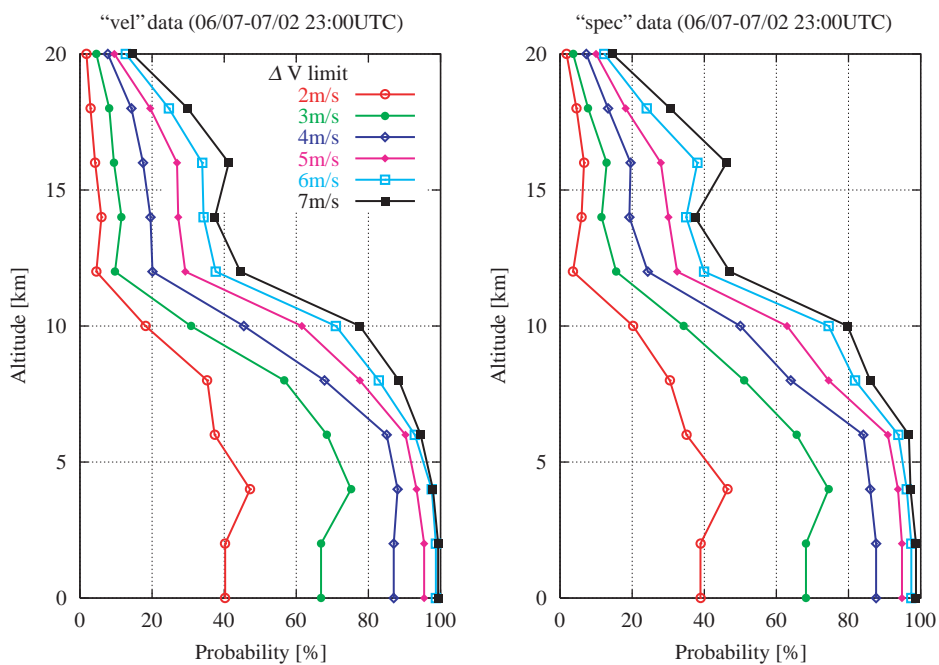


図37：GPS ソンデとの風速差による高度に対する信頼性

4.6.2 飛行試験による風速データの精度評価

前節でも述べたように、GPS ソンデの観測空域は VHF レーダのそれと 100km 以上異なる可能性があるため、VHF レーダの風観測精度を定量的に検証するには不十分と考えられる。このため、より VHF レーダ直上に近い点で風観測が可能な航空機を用いた飛行試験を実施した。飛行試験では、高々度の風観測が可能な豪州 Airborne Research Australia (ARA) 社¹⁾の高々度観測機 Egrett (図 38)を用いた。同機は高度 16km まで上昇して 4 時間以上の滞空が可能な性能を有し、GPS および ARA 社が開発した風観測用プローブ (BAT (Best Aircraft Turbulence) プローブ) を組み合わせたシステムにより 50Hz のレート、約 1m/s の精度で風観測が可能である。飛行試験は 2002 年 6 月 22 から 28 日の期間に 4 フライト実施し、VHF レーダ上空高度 15km までの風観測を実施した。飛行試験の詳細は、付録の ARA 社から納入された飛行試験報告書を参照されたい。ここでは、飛行試験により得られた VHF レーダの風観測精度について述べる。

VHF レーダの風観測精度を検証するには、VHF レーダ直上の高度ごとの平均風速が必要となる。しかし、風観測を行なう航空機は、時々刻々と機体位置を変化させており VHF レーダ直上に留まることはできないので、飛行試験結果から定点上空の平均風速を算出するには、水平面内で風が変化しないという仮定がやはり必要となる。ただし、航空機の移動範囲は GPS ソンデに比べて小さくすることができ、今回の飛行試験では VHF レーダの半径 60km 以内で風観測を行なった。VHF レーダ直上の平均風速は飛行試験結果を移動平均することで算出するが、航空機による風観測は上昇/降下のケースを含むため、移動平均中の航空機の高度変化が VHF レー

ダの観測高度間隔 150m の範囲に収まるよう、移動平均時間は 1 分間とした。比較する VHF レーダの観測結果は、得られた平均風速の観測時刻、高度と合うように線形補間する。

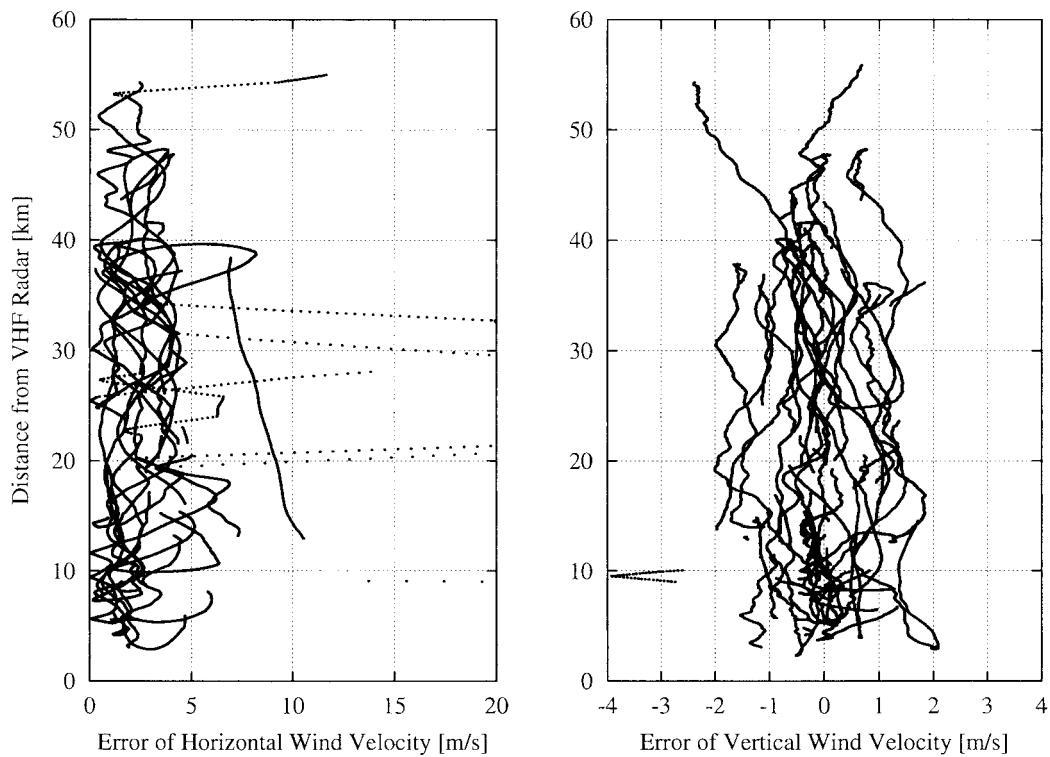
飛行試験結果から得られた平均風速を正として両者の差をとり、VHF レーダからの距離に対して整理した結果を図 39 に示す。縦軸が VHF レーダからの距離、横軸が両者の差である。VHF レーダから半径 60km 以内では、両者の差は距離に対して変化しておらず、この範囲の水平面内で風が変化しないという仮定は妥当であると考えられる。したがって、飛行試験結果の移動平均値を VHF レーダ直上の平均風速とみなすことができ、飛行試験結果と VHF レーダの観測結果の差をもって VHF レーダの観測精度と定義する。また、実験機の計測空域も VHF レーダの半径 60km 以内に含まれるため、計測空域で遭遇する風を VHF レーダの観測結果から推定することは可能であると考えられる。

次に、観測精度を高度に対して整理した結果を図 40 に示す。縦軸が高度、横軸が観測精度である。前節でも述べたように、上下風速が高度 15km 付近まで観測できているのに対し、水平風速は vel 方式、spec 方式ともに高度 10km 以上では S/N 比が悪くほとんど観測できていない。しかし、高度 10km 以下で S/N 比が閾値以上であれば、観測精度は高度によらず安定しており、時折発生する電波のサイドロープの反射によると思われる大きな誤差を除けば、観測精度の RMS は vel 方式、spec 方式ともに水平面内の風速で 3.0m/s、上下風速で 0.8m/s であった。

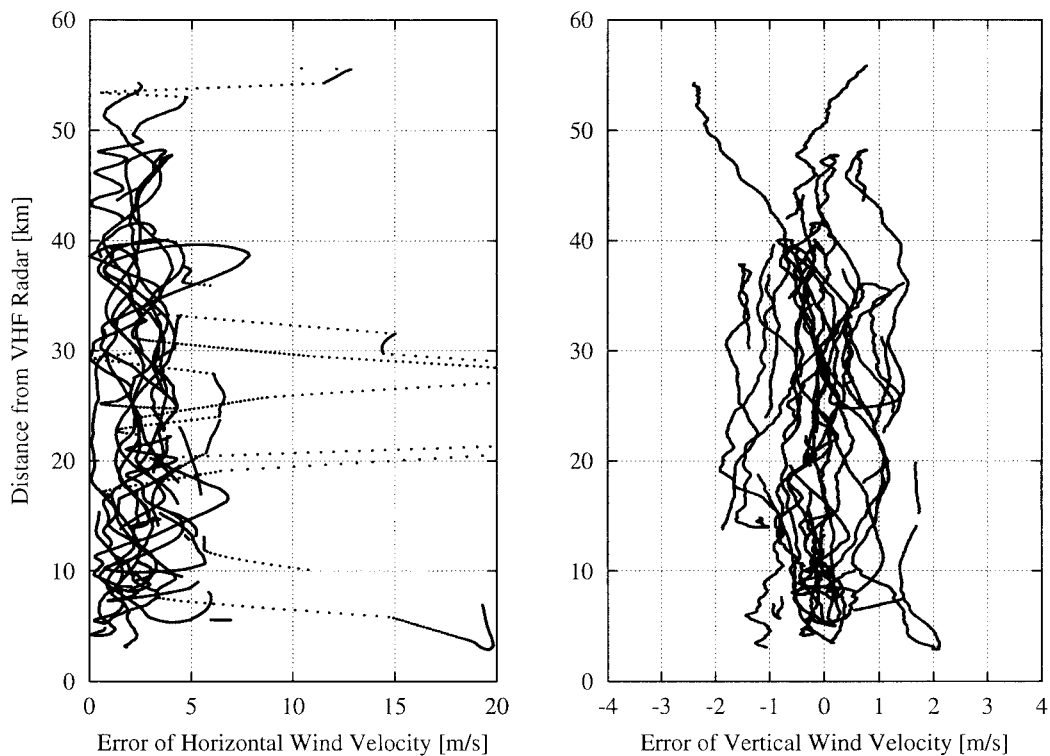


図 38 : 高々度観測機 Egrett

¹⁾ <http://www.airborneresearch.com.au/>

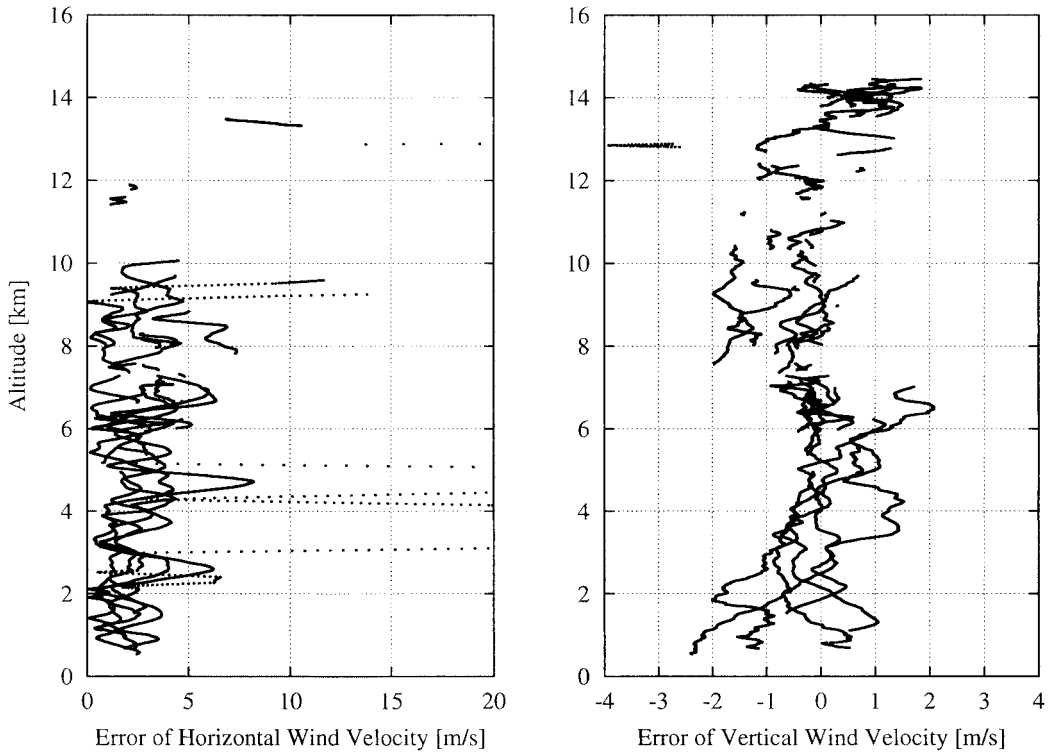


(a) vel方式

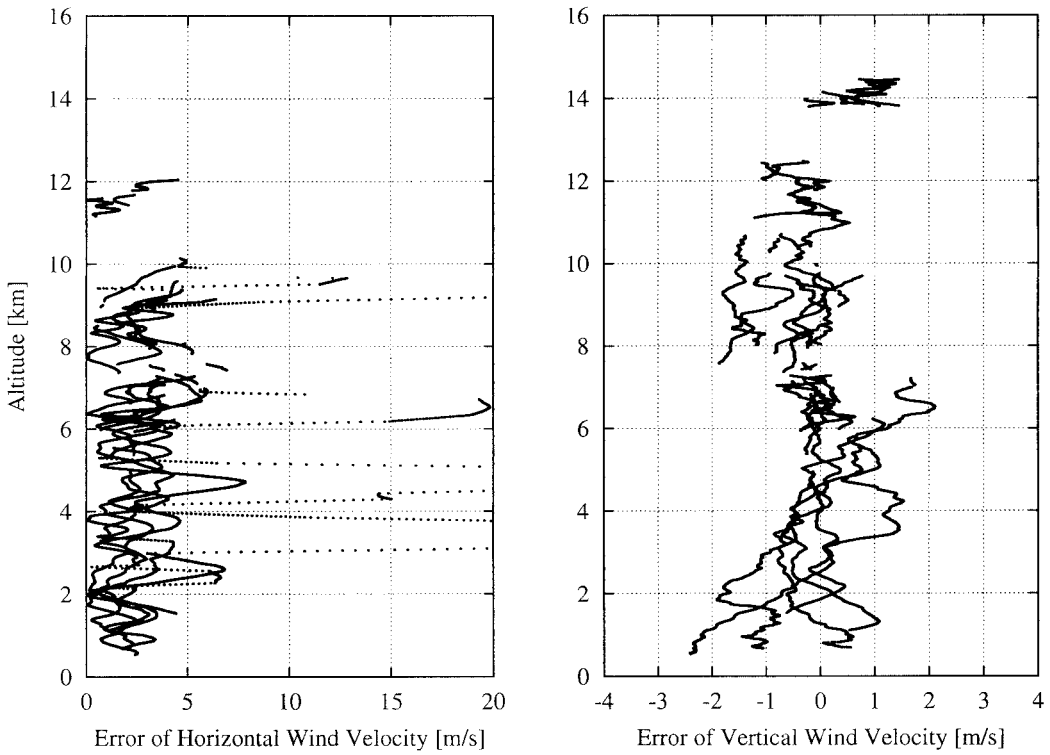


(b) spec方式

図39：VHFレーダ計測精度と距離の関係



(a) vel方式



(b) spec方式

図40：VHFレーダ計測精度と高度の関係

4.6.3 まとめ

GPS ソンデ、飛行試験との比較による性能評価の結果をまとめると以下ようになる。

VHF レーダの水平面内風速データの信頼性は、vel 方式、spec 方式ともに高度 10km まで約 80 %、10 ~ 12km で約 60 %、12 ~ 15km で約 40 %、15 ~ 20km で 20 % 以下である。15km 以上の高々度では S/N 比が悪く、データの信頼性が低い。一方、上下風速データは、水平面内風速データより S/N 比が高く、信頼性が高いと考えられる。

VHF レーダの計測結果の信頼性は S/N 比で評価できる。S/N 比が基準値以上である場合、その精度は vel 方式、spec 方式ともに水平面内 3.0m/s、鉛直面内 0.8m/s である。この精度は計測空域全域で適用可能である。ただし、時折サイドローブの反射による大きな誤差が発生する。

本評価の結果から、VHF レーダは高度 20km までの風計測という要求を必ずしも満たしておらず、以下の性能向上が必要であると考えられる。

高々度での S/N 比を改善し、データ信頼性を向上させる。レーダ設定(表 6)の最適化により改善の可能性がある。抜本的な改善を行うには、送信出力の増大やアンテナ本数の追加等のハードウェアの改善を含めた改修が必要となる。

サイドローブによる誤差を除去する。電波出力の位相調整やソフトウェアの改修が必要となる。

現在、これらの性能向上の可能性について検討を進めているが、同時に VHF レーダにより風の乱れを推定する機能の付加についても検討を進めている。本飛行試験では計測空域での風の乱れが計測精度に大きな影響を与えるため、風の乱れも推定できることが望ましい。乱れ推定機能の開発・検証には、風の乱れが算出可能な高レート風の計測データが不可欠であり、今回の風計測精度検証飛行試験で得られた 50Hz の風データはその 1 つとなる。

5. おわりに

小型超音速実験機の第 1 回飛行実験における気象観測について報告した。実験実施可否判断および実験後の飛行データ解析に必要な気象データを提供するために現地での気象観測体制を確立し、地表面から成層圏に至る広範囲に定められた全ての気象条件が満たされていることを確認した上で実験を実施することができた。また、現地の気象観測データの解析から、次回の実験に有益な以下の知見を得た。

1. 射点 6m 風、射点 20m 風の制限「定常風速 5m/s 以下」は、他の条件に比べて満たされる確率が低

い。特に次回飛行実験が予定される夏期は平均地上風速が大きく、気象条件待機期間中に確実に実験を実施するには、射点地上風の制限緩和か待機期間の延長が必要と考えられる。

2. 2002 年 4 ~ 6 月の射点地上風の突風率は 3σ 確率値で 1.6 である。第 1 回飛行実験時には突風率 2.0 を使用して射点地上風の制限値を設定しており、突風率の見直しにより制限を緩和できる可能性がある。
3. 飛行実験前 3 か月間の観測で得られた射点の 1 日の気象変化の評価は、実験実施日の作業スケジュールの立案に極めて有効であった。次回飛行実験においても、同様の解析・評価が必要である。
4. 2002 年 6 ~ 7 月の回収点における地上風速の 10 分間の風速変動は 95 % 確率値で 1.3m/s であり、回収点の風速に対して制限を設ける際は、打ち上げから回収点に到達するまでの時間変動を考慮すべきである。また、射点と回収点の風速は高い相関があるものの、風速差は 95 % 確率値で 2.3m/s あり、回収点の風速計測は必要である。
5. 2002 年 6 月の地上 1 ~ 2km における 30 分間の風向、風速変動は 95 % 確率値で 22 ° および 3.2m/s であり、射点地上 500m までの風の変動量も同程度あると考えられるため、風制限の設定に際して考慮が必要である。
6. VHF レーダは高度 20km までの風観測という要求を必ずしも満たしておらず、改善が必要である。

ただし、2. ~ 5. については現地の秋 ~ 冬に当たる 4 ~ 6 月の観測データに基づいており、次回の実験の実施予定時期(3月)とは観測時期が異なる。したがって定量的な評価については、次回の実験においても実験実施の数が月前から現地で気象観測データを収集し、同様の解析を行なうことが望ましい。

また、今回の評価で性能不足が判明した VHF レーダは、4. 6 節で述べたように性能向上を目的とした改修を検討している。さらに射点上空 500m までの風観測装置として、レーダによるバルーン・トラッキングに替わりドップラ・ソーダを導入する予定である。レーダを用いる関係上観測時期が打ち上げ 30 分前に制限されるバルーン・トラッキングと異なり、音波を用いるドップラ・ソーダは打ち上げ直前まで風観測が可能である。また、上下風速も含めた 3 軸の平均風速および乱れの標準偏差が得られる点でも優れている。

謝 辞

SOLO(豪州政府派遣の安全運用連絡担当官) である Peter Nikoloff 氏には豪州側スタッフとの全体的な調整

に、ARDU(豪州空軍航空機研究開発部隊)のJack Herlihen氏, Lapmun Leung氏にはバルーン・トラッキングのレーダ調整に, BoM(豪州気象庁)ウーメラ観測所のStephan Adorian氏には気象情報入手に, また他の多数の豪州政府関係者には直接・間接に多大な協力をいただいた。豪州ATRAD社にはVHFレーダの設置やソフトウェア改修に, 豪州ADI社には観測装置の設置に, 豪州ARA社には高々度観測機によるVHFレーダ検証飛行に尽力していただいた。また, 今回の飛行実験を担当した三菱重工業(株), 川崎重工業(株), 富士重工業(株), (株)IHIエアロスペースの各社には実験全般にわたり惜しみない協力をいただいた。

ここに各氏・各社に対し, 感謝の辞を述べる次第である。

参考文献

- [1] 坂田公夫:「次世代超音速機技術の研究開発」, ながれ, Vol. 18, No. 5, 日本流体力学学会(1999)。
- [2] 村上義隆, 柳原正明, 稲葉基之:「ALFLEX飛行実験における風計測データを用いた飛行可否判断の手法と解析評価の結果」, 航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-1356(1998)。
- [3] 原因調査委員会:「小型超音速実験機(ロケット実験機)飛行実験失敗原因調査報告書」(2002)。
- [4] 中野英一郎, 村上義隆, 滝沢実, 進藤重美, 大貫武:「小型超音速実験機実験場整備及び地上支援設備の概要」, 平成13年度次世代超音速機技術の研究開発成果報告会前刷り集, pp. 39-42, 航空宇宙技術研究所(2001)。
- [5] 第1回小型超音速実験機実験隊気象班:「気象観測・判定手順書」, G-WT-G1(2002)。
- [6] 塩屋雅生:「強風の性質」, 開発社(1979)。

付録 VHF レーダ風観測精度検証飛行試験報告書

本文4.6節で述べたVHFレーダ風観測精度検証のための飛行試験は、NALが豪州Airborne Research Australia (ARA)社に飛行試験作業を発注し、ARA社が実施した。ここでは、飛行試験の詳細を示す目的で、ARA社からNALに納入された飛行試験報告書の全文をそのまま転載する。VHFレーダが設置されている地点の上空で高々度までの風擾乱計測を実施した例は世界的にもほとんど無く、本報告書で示されている風擾乱データは、今後のVHFレーダを含む高層風のリモート・センシング技術開発において、極めて有用なデータとなることが期待される。

**WIND AND TURBULENCE MEASUREMENTS
FOR THE NAL/NEXST PROJECT
AT WOOMERA/SOUTH AUSTRALIA
IN JUNE 2002**

FINAL REPORT

J.M. Hacker

12 July 2002



**Airborne Research Australia / Flinders University
PO Box 335
Salisbury South, 5106
Australia**

ARA Technical Report No. 05-2002



Airborne Research Australia



The Flinders University of South Australia

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION	53
2. MEASUREMENTS	54
3. INSTRUMENTATION	62
3.1 Air Data Instruments	62
3.2 Global Positioning Systems	63
3.3 Other systems	63
3.4 GPS Base Station	66
3.5 Data acquisition and real-time monitoring system	66
4. DATA PROCESSING	69
4.1 Aircraft data	69
4.2 GPS Base Station data	71
5. RESULTS	72
5.1 Accuracy of aircraft-derived wind	72
5.1.1 Wind Circles	72
5.1.2 Wind Square	75
5.1.3 Pilot-induced pitch variations	76
5.1.4 Comparison with GPS radiosondes	78
5.2 Turbulence	80
5.3 Comparison with the profiler data	91
5.4 Differential correction for the GPS data	102
6. ACKNOWLEDGEMENTS	106

1. INTRODUCTION

The National Aerospace Laboratory of Japan (NAL) is developing a supersonic transport aircraft of the next generation under the acronym NEXST. To test the aerodynamic configuration of the SST, a 11m-long unpowered model of the aircraft will be launched by a rocket to approximately 20km altitude and then glide back to the ground performing various manoeuvre. The tests will take place within the Woomera Test Range in South Australia in July and August 2002.

For these tests, it is important to know exactly the state of the atmosphere through which the aircraft flies. For this purpose, a VHF wind profiler was installed near the launch site. The wind profiler can measure wind speed and direction to altitudes of about 20km. It also is capable to detect layers of turbulence, the existence and strength of which is also very important for the flight trials.

To verify the profiler measurements, flights were carried out with ARA's high altitude research aircraft, the Grob G520T *Egrett* which is equipped with high resolution wind and turbulence sensors and can reach altitudes up to 14.7km.

In June 2002, three research flights of approximately 5 hours duration each, plus one 1-hour instrumentation test flight were carried out over the Woomera area for this purpose.

In addition to the wind measurements, the *Egrett* was also equipped with two transponders, supplied by NAL, identical to the ones that will be used in the SSTmodel aircraft. Parts of the flights were used to test the tracking equipment and instrumentation at the Woomera Test Range, as well as to give the tracking operators an opportunity to test their skills in a real situation.

In the following, the flights and the instrumentation of the *Egrett* will be described in detail (Section 2 and 3). Section 4 describes the data processing strategy and algorithms used and Section 5 describes the results.

2. MEASUREMENTS

Between 22 and 28 of June 2002, four flights were carried out in the vicinity of Woomera/SA. A total of 16 hours was flown during these missions.

The following patterns were flown:

- tracking pattern to test and calibrate the NAL tracking and radar facilities
- ascents and descents up to FL470 (47,000ft, 14.7km) to derive vertical profiles of wind and turbulence
- circles at constant altitudes with constant bank angle to derive the highest accuracy wind measurements and to calibrate the wind sensing system
- some other dedicated wind calibration patterns

Details for the flights are given in *Table 1* and *Table 2*, the flight track and GPS altitude traces are shown in *Figure 1* to *Figure 8*.

Date	Take-off / Landing	Purpose	Data files
23 Jun 2002	03:59:28 – 04:41:49UTC 13:29:28 – 14:11:49LT	Instrumentation test flight	020623_1327
24 Jun 2002	00:05:27 – 05:01:19UTC 09:35:27 – 14:31:19LT	Aborted tracking pattern, then wind measurements	020624_0925
26 Jun 2002	00:09:02 – 04:58:20UTC 09:39:02 – 14:29:02LT	Tracking patterns, then wind measurements	020626_0931 020626_1025 020626_1038 020626_1047
27 Jun 2002	00:03:33 – 04:52:54UTC 09:33:33 – 14:22:54LT	Tracking patterns, then wind measurements	020627_0919 020627_1009 020627_1044

Table 1: Overview of flights

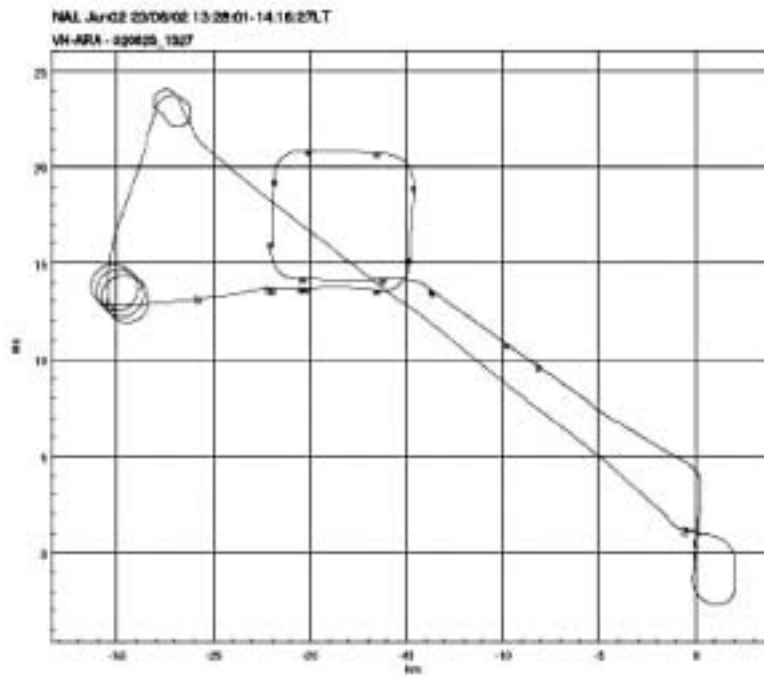


Figure 1: Flight track for flight on 23 June 2002. Distances in km from Woomera Airfield. Also shown are event markers along the flight track.

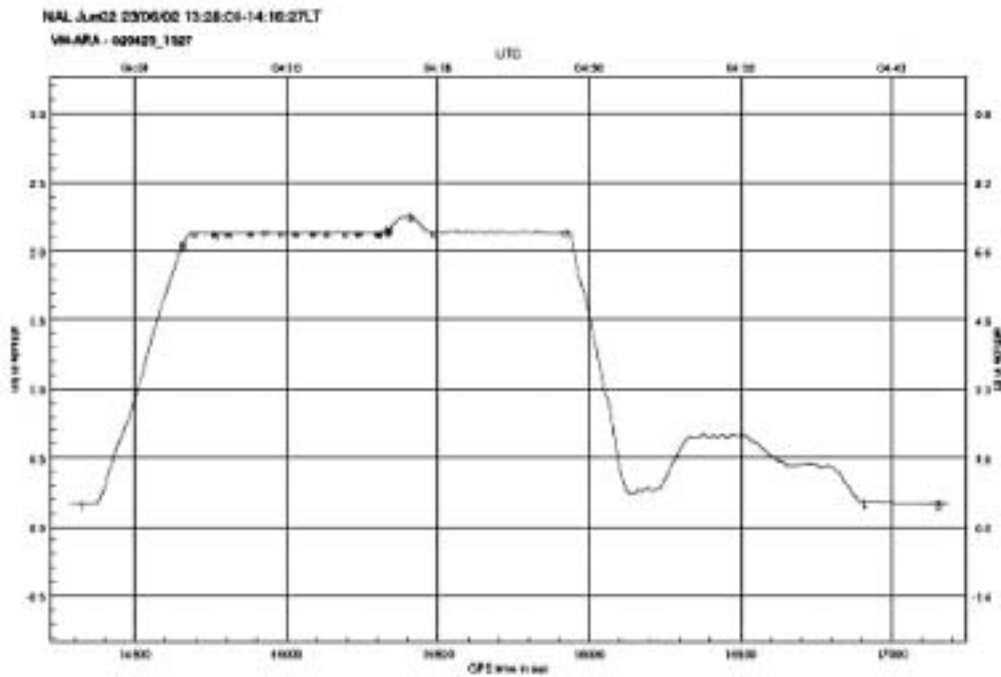


Figure 2: GPS altitude trace of the flight on 23 June 2002. Altitudes are given in km above MSL (l/h axis) and kft above MSL (r/h axis). Time is given in GPS seconds (bottom axis) and UTC (top axis). Also shown are event markers along the altitude trace.

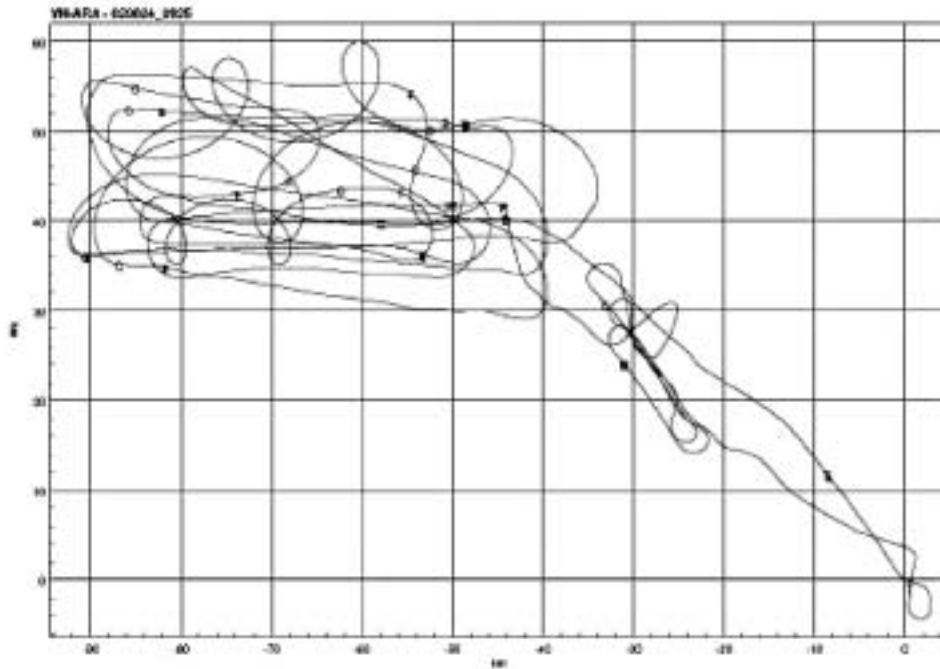


Figure 3: As Figure 1, but for flight on 24 June 2002.

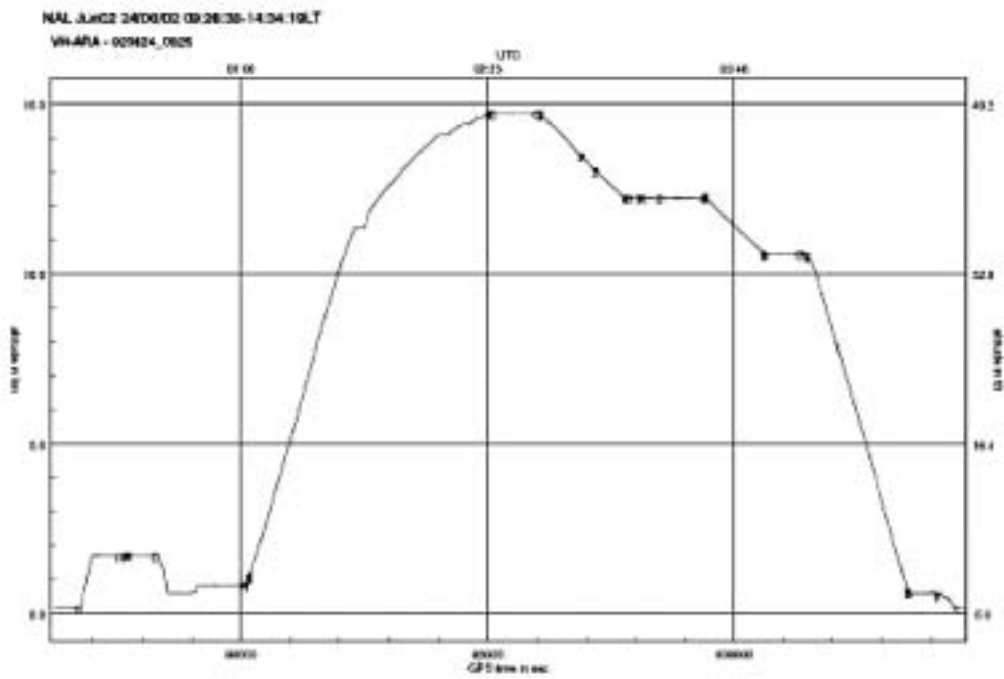


Figure 4: As Figure 2 , but for flight on 24 June 2002.

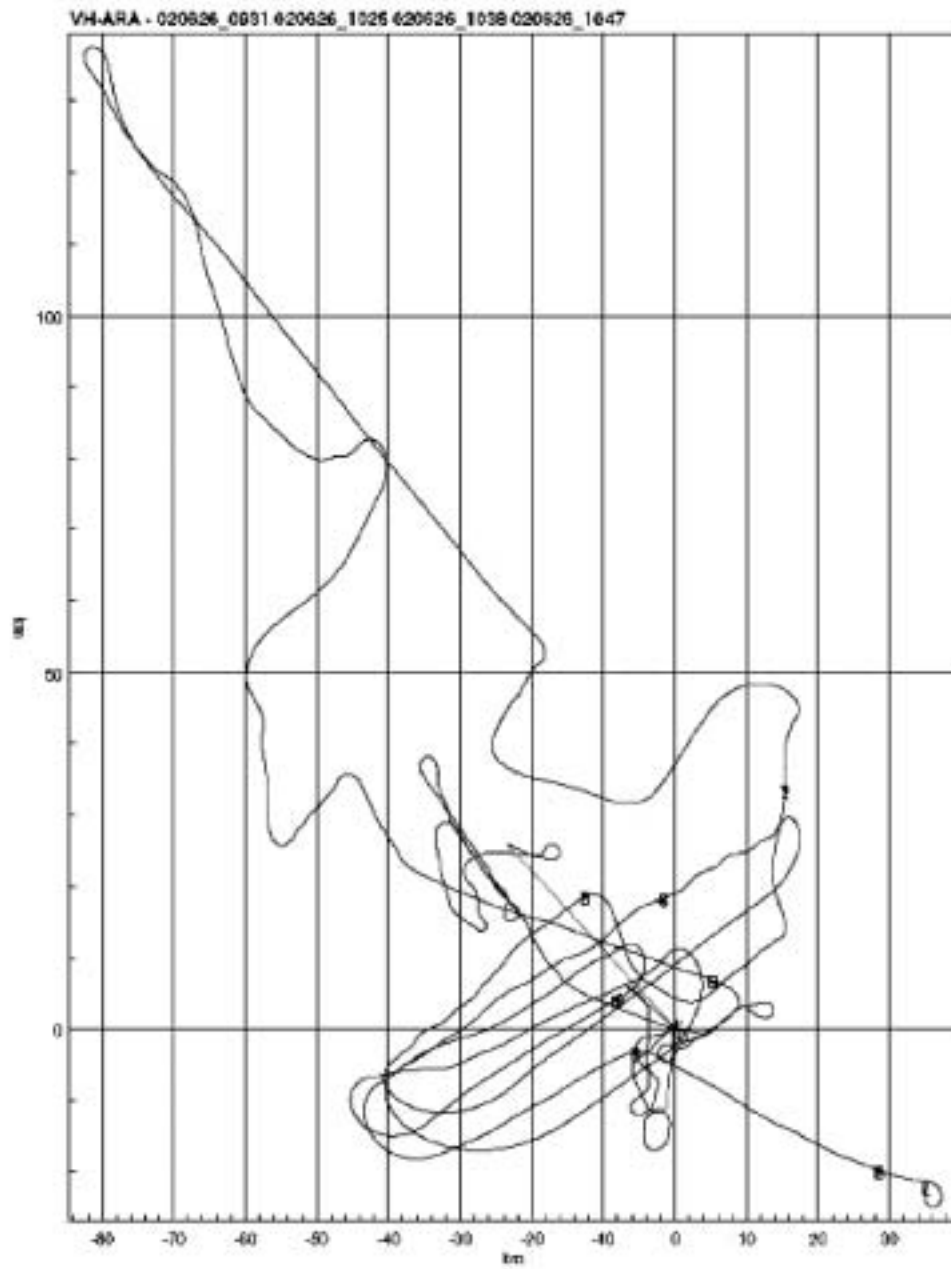


Figure 5: As Figure 1, but for flight on 26 June 2002.

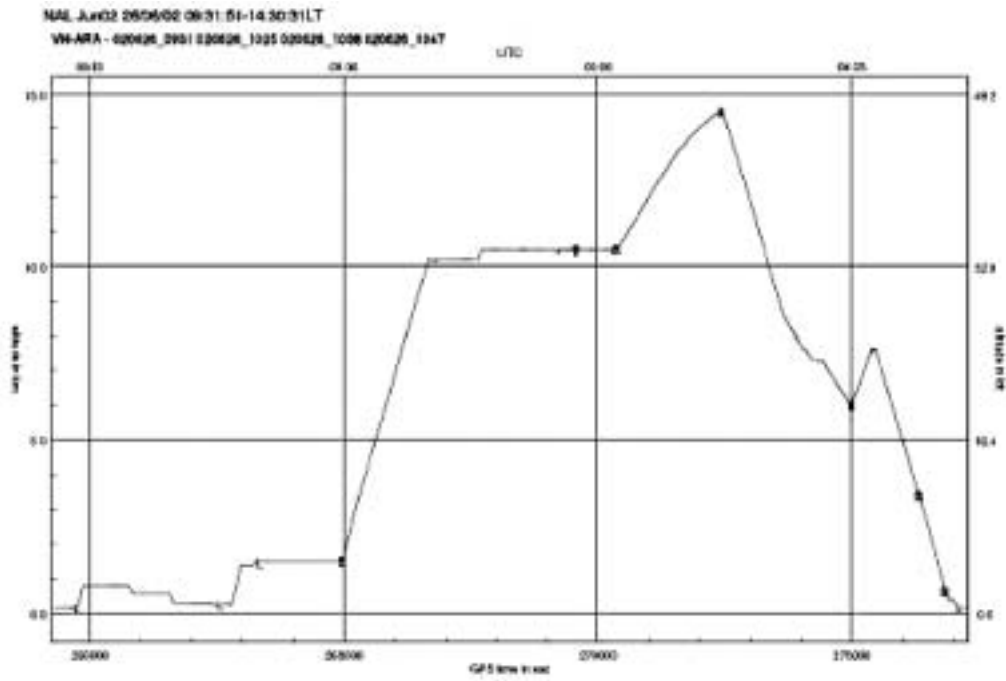


Figure 6: As Figure 2, but for flight on 26 June 2002.

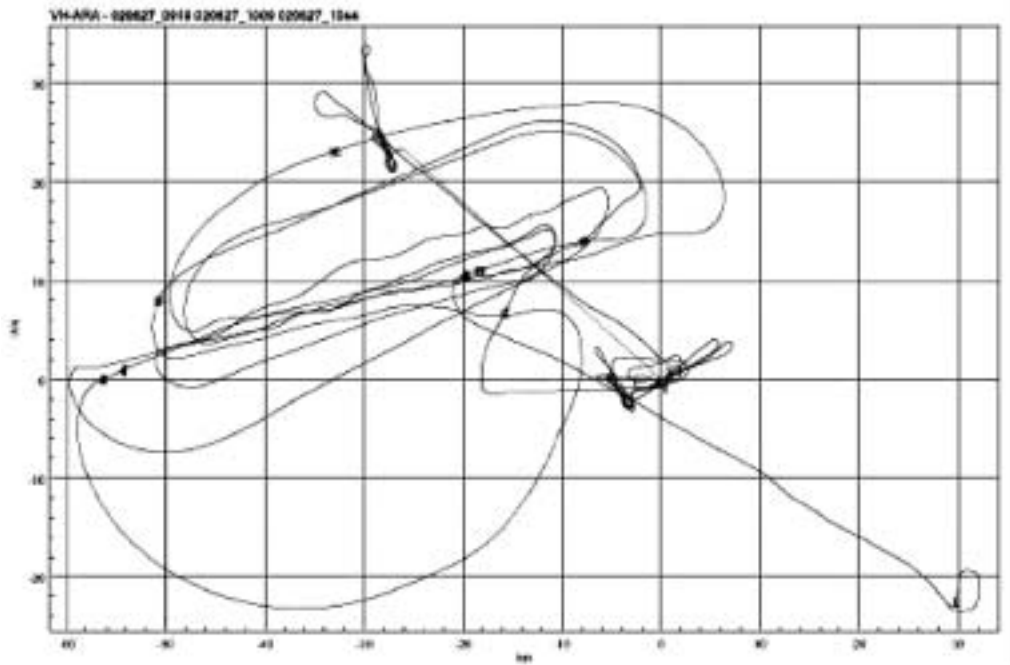


Figure 7: As Figure 1, but for flight on 27 June 2002.

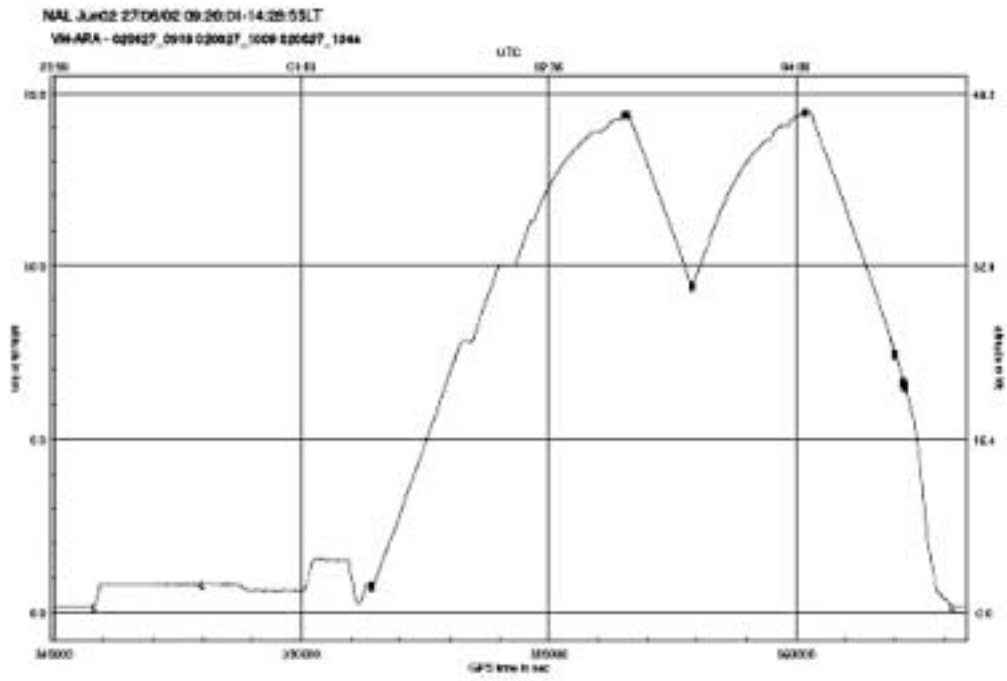


Figure 8: As Figure 2, but for flight on 27 June 2002.

Date	Run name	Time segment	Purpose	Altitude AMSL
23 Jun 2002	sq	04:06:02 – 04:15:02UTC 13:36:02 – 13:45:02LT	Wind calibration square	2,140m
	ab	04:14:31 – 04:17:50UTC 13:44:31 – 13:47:50LT	Alpha/beta test	2,140m
	c060	04:18:06 – 04:25:21UTC 13:48:31 – 13:55:21LT	wind calibration circle	2,140m
24 Jun 2002	s1a	01:02:30 – 01:17:12UTC 10:32:30 – 10:47:12LT	ascent	1,055m – 5,297m
	s1b	01:17:17 – 01:23:43UTC 10:47:17 – 10:53:43LT	ascent	5,324m – 7,313m
	s1c	01:24:17 – 02:23:45UTC 10:54:17 – 11:53:45LT	ascent	7,479m – 14,699m
	e470	02:25:26 – 02:39:44UTC 11:55:26 – 12:09:44LT	wind circle @ FL470	14,690m
	s2	02:41:19 – 03:09:51UTC 12:11:19 – 12:39:51LT	descent	14,665m – 12,225m
	c390	03:22:54 – 03:36:28UTC 12:52:54 – 13:06:28LT	wind circle @ FL390	12,230m
	s3a	03:36:57 – 03:41:23UTC 13:06:57 – 13:11:23LT	descent	12,238m – 11,842m
	s3b	03:42:15 – 03:56:56UTC 13:12:15 – 13:26:56LT	descent	11,769m – 10,558m
	c335	03:57:01 – 04:08:35UTC 13:27:01 – 13:38:35LT	wind circle @ FL335	10,550m
	s4a	04:11:18 – 04:17:50UTC 13:41:18 – 13:47:50LT	descent	10,516m – 8,965m
	s4b	04:17:59 – 04:21:04UTC 13:47:59 – 13:51:04LT	descent	8,921m – 7,996m
	s4c	04:22:13 – 04:45:36UTC 13:52:13 – 14:15:36LT	descent	7,664m – 635m
26 Jun 2002	na11	00:09:30 – 00:56:01UTC 09:39:30 – 10:26:01LT	tracking pattern	222m – 813m
	na12	00:56:18 – 01:08:24UTC 10:26:17 – 10:38:24LT	tracking pattern	241m – 1,500m
	na13	01:09:20 – 01:18:05UTC 10:39:20 – 10:48:05LT	tracking pattern	1,490m
	na14	01:18:20 – 03:06:07UTC 10:48:20 – 12:36:07LT	tracking pattern	1,485m – 10,499m
	s1a	01:35:55 – 01:54:34UTC 11:05:55 – 11:24:34LT	ascent	1,490m – 7,273m
	s1b	01:55:03 – 02:04:40UTC 11:25:03 – 11:34:40LT	ascent	7,414m – 10,222m
	330	02:04:41 – 03:06:07UTC	tracking pattern @ FL330,	10,090m – 10,500m

		11:34:41 – 12:36:07LT	used for wind also	
	s2	03:06:07 – 03:40:07UTC 12:36:07 – 13:10:07LT	ascent	10,480m – 14,495m
	s3a	03:40:07 – 04:04:21UTC 13:10:07 – 13:34:21LT	descent	14,496m – 8,061m
	s3b	04:06:07 – 04:08:44UTC 13:36:07 – 13:38:44LT	descent	7,785m – 7,503m
	s3c	04:08:45 – 04:22:57UTC 13:38:45 – 13:52:57LT	descent	7,500m – 5,993m
	s4	04:22:58 – 04:29:36UTC 13:52:58 – 13:59:36LT	ascent	5,993m – 7,562m
	s5a	04:31:23 – 04:36:25UTC 14:01:23 – 14:06:25LT	descent	7,488m – 6,005m
	s5b	04:36:26 – 04:53:54UTC 14:06:26 – 14:23:54LT	descent	6,000m – 680m
27 Jun 2002	nal1	00:03:58 – 00:39:27UTC 09:33:58 – 10:09:27LT	tracking pattern	230m – 836m
	nal2	00:40:12 – 01:14:46UTC 10:10:12 – 10:44:46LT	tracking pattern	616m – 845m
	s1a	01:37:08 – 02:01:54UTC 11:07:08 – 11:31:54LT	ascent	764m – 6,528m
	s1b	02:05:39 – 02:07:14UTC 11:35:39 – 11:37:14LT	ascent	7,468m – 7,808m
	s1c	02:10:48 – 02:20:17UTC 11:40:48 – 11:50:17LT	ascent	7,801m – 10,020m
	s1d	02:25:26 – 02:26:41UTC 11:55:26 – 11:56:41LT	ascent	10,022m – 10,319m
	s1e	02:31:48 – 02:51:28UTC 12:01:49 – 12:12:28LT	ascent	11,303m – 13,865m
	s1f	02:54:21 – 03:02:23UTC 12:24:21 – 12:32:23LT	ascent	13,870m – 14,405m
	s2	03:03:13 – 03:24:33UTC 12:33:13 – 12:54:33LT	descent	14,416m – 9,463m
	s3	03:25:03 – 04:03:10UTC 12:55:03 – 13:33:10LT	ascent	9,439m – 14,474m
	s4a	04:04:52 – 04:31:42UTC 13:34:52 – 14:01:42LT	descent	14,424m – 7,991m
	s4b	04:33:04 – 04:36:38UTC 14:03:04 – 14:06:38LT	descent	7,598m – 6,549m

Table 2: Flight segments

3. INSTRUMENTATION

Accurately measuring turbulence from aircraft is a technologically demanding task. It involves, in general, the measurements of air temperature, pressures and the 3D-wind vector with high accuracy and at sampling rates of tens of Hertz. Wind measurements from an aircraft require observation of the wind velocity relative to the sensors and the velocity of the sensors relative to the Earth. The 3D-wind vector is then found as the small resultant vector sum of these two large vector velocities.

None of the two large vector velocities can be measured directly, but require the measurement of a number of other parameters, amongst them, the angles of attack and sideslip of the aircraft, the aircraft's heading and its pitch and roll angles, 3D accelerations of the aircraft, its angular rates and more. All measurements have to be combined in a very careful manner, without phase shifts or other inconsistencies between them, to derive the two large vector quantities. For most applications, it is also essential to know the position of the aircraft accurately at all times.

3.1 Air Data Instruments

To measure airspeed, static pressure and the angle of attack and angle of sideslip, the aircraft was equipped with a Rosemount 858 five-hole-probe mounted on the tip of a mast under the right-hand wing (see *Figure 9*). The mast was mounted on a pylon underneath the wing. The datum of the probe in the aircraft's reference frame is listed in *Table 4*.

The pressure ports of the probe were connected to Rosemount pressure transducers (Rosemount 1221 for differential pressures, Rosemount 1201 for absolute pressure) located inside the pylon.

Air temperature was measured by a Rosemount reverse flow Pt500 sensor mounted to the side of the pylon (see *Figure 10*).



Figure 9: Rosemount 858 five-hole-probe mounted underneath the r/h wing of the Egrett

3.2 Global Positioning Systems

Three GPS receivers were installed in the aircraft's mission bay, a 12-channel NovAtel system for position and velocity measurements with the capability to use differential technology and two independent Trimble TANS Vector systems for aircraft attitude (pitch, roll and heading) using two different antenna arrays (see *Figure 11*). For the location of the antennas refer to *Table 4*. For the current study, only the data from the small antenna array were used.

3.3 Other systems

As some of the sensors might be affected by transmissions on the aircraft radios, a radio transmission monitoring system was installed in the Egrett recording the periods of transmission on each of the three radios, VHF#1, VHF#2 and UHF.

In addition to the ARA sensors as described above and listed in *Table 3*, two transponder systems supplied by NAL were installed in the U-Bay. For details about the transponders, see separately supplied material, as well as *Table 4*. No data was

recorded from these units on the aircraft data system.



Figure 10: Rosemount 102 reverse flow Pt500 temperature sensor mounted on the pylon underneath the r/h wing.



Figure 11: NovAtel and Trimble TANS GPS antennas. For further information refer to Table 4.

Sensor	primarily used for	Range Sampling Rate	Accuracy	Comments
Rosemount 858 five-hole probe	<ul style="list-style-type: none"> • IAS • static pressure • angle of attack • angle of sideslip 	n/a	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • mounted at the tip of a 2.5m mast underneath the r/h wing
Rosemount 1201 absolute pressure sensor	<ul style="list-style-type: none"> • static pressure 	1050 – 100hPa 55Hz	0.2hPa	<ul style="list-style-type: none"> • mounted in pylon underneath r/h wing
Rosemount 1221 differential pressure sensors (3)	<ul style="list-style-type: none"> • IAS • angle of attack • angle of sideslip 	± 50hPa 55Hz	0.05hPa	<ul style="list-style-type: none"> • mounted in pylon underneath r/h wing
Rosemount 102 PT500 temperature sensor	<ul style="list-style-type: none"> • OAT 	-100 to 100°C 55Hz	<0.1°C	<ul style="list-style-type: none"> • mounted on pylon underneath r/h wing
Novatel 12-channel GPS receiver	<ul style="list-style-type: none"> • position • 3D-ground speed • time 	n/a 1Hz	<5m RMS <0.5m/s RMS 1 ms	<ul style="list-style-type: none"> • for antenna location refer to <i>Table 4</i>
Trimble TANS GPS attitude system	<ul style="list-style-type: none"> • pitch angle • roll angle • aircraft heading 	0 – 360° 10Hz	± 0.05°	<ul style="list-style-type: none"> • two independent systems (small antenna array / large antenna array); • for antenna locations refer to <i>Table 4</i>
3D-accelerometers	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-accelerations 	± 5g 55Hz	<0.02g	<ul style="list-style-type: none"> • #1: in l/h wing • #2: in fuselage • #3: in r/h wing • for locations, refer to <i>Table 4</i>
Radio transmission indicators	<ul style="list-style-type: none"> • indication of times of radio transmissions 	n/a 55Hz	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • one indicator each for VHF#1, VHF#2 and UHF radios

Table 3: Sensors and systems used for measurements

Attitude Sensing Systems:**Small TANS array antennae**

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
Front	10300	40 right	3480
Rear	11350	40 right	3480
Right	10450	380 right	3420
Left	10450	380 left	3420

Large TANS array antennae

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
Front	7545	0	4370
Rear	11150	40 right	3480
Right	7020	4545 right	2980
Left	7020	4545 left	2980

Positioning System:**Novatel fast GPS**

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
Fuselage	9560	0	3750

Wind Sensing Systems:**Rosemount 5-hole probe**

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
Right pylon	4430	6295 right	2770

Aircraft acceleration sensors

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
Fuselage	11680	0	3380
Right wing	7000	6110 right	2810
Left wing	4915	6110 left	2810

NAL 2.285 GHz transmitter antenna

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
U-bay bottom	9780	0	2030

NAL 5.600 GHz transponder antenna

Location	x- coordinate	y-coordinate	z-coordinate
U-bay bottom	8005	0	2030

Table 4: Datums of sensors and other systems in the aircraft reference frame. All measurements given in mm.

3.4 GPS Base Station

To enable differential correction of the GPS measurements, a NovAtel 12-channel base station was set up at Woomera Airport. Data from this station was logged onto a notebook computer. The location of the base station was determined as:

- latitude -31° 08' 47.911"
- longitude 136° 48' 19.742"
- altitude 175.17m

When attempting to combine the data from the GPS base station with the aircraft GPS data using the procedure described in Section 4.2, it was found that there were frequent data outages, interruptions and inconsistencies in the data sets which prevented a reliable differential correction for some periods of the flight. It is not totally clear what caused these problems, but we suspect that there were on-going GPS jamming trials by the Military in progress in the Woomera area which interfered with our systems. We had a similar problem, when we operated out of Boscombe Downs RAAF Base in the UK in May 2000 and the suspected cause was later confirmed from independent sources.

Due to these problems, it was decided not to use a differential correction for the processing of the wind data. Tests for flight sections where the differential correction appeared to be reliable and valid showed that there was a negligible effect on the wind measurements (for details and examples, see Section 5.4), as had also been shown in the measurements in the UK mentioned above.

3.5 Data acquisition and real-time monitoring system

The data system installed in the Egrett consisted of

- a 19" rack EMI-proof Pentium PC with dedicated EISA interface cards for communication with the REM-Boxes (remote analogue/digital converter units), MUX-box (digital multiplexer unit for REM-boxes) and the three GPSs
- a 166MHz Pentium CPU, 64Mb of memory, a 2Gb hard disk, an Ethernet

networking card

- a TFT screen in the rear cockpit
- a small keyboard
- a built-in IOMEGA ZIP-drive for data exchange

The PC runs under the DOS 6.0 operating system.

The FIAMS/ARA real-time data acquisition program

DAMS and the testing program REMTEST, both written in the PASCAL-Language are installed and used to collect the data and to test the installation. A watchdog timer is implemented in the system to monitor gaps in the incoming data stream and report any failures to the operator for action.

The A/D system was developed by FIAMS/ARA to provide high speed, high resolution, multi-channel data logging. The system consists four REM-units, each containing two filter boards boards with an anti-aliasing filter for each of eight channels combined with an 8 channel multiplexer, and an intelligent 16 bit A/D board. The three boards in each REM-unit together comprise a signal conditioned, 16 channel, 16 bit A/D system with serial output, yielding a total of 64 analogue input channels in the overall system. A custom ISA serial board provides an intelligent interface to the PC. The noise level on the 16 bit A/D converters is less than 1 bit RMS.

The hardware and firmware are configured to provide 55Hz data output from the 64 channels. Each of the channels is first conditioned by the 8 pole 30Hz low pass (antialiasing) filter. Then it is interrogated or over sampled 32 times by the 16 bit A/D.

The resulting data is averaged and then serially transmitted and timed tagged to ±1ms based on the 1sec pulse available from the GPS receiver.

The raw data is logged onto a 20Gb hard disk.

All data from the sensors and systems, as well as derived parameters such as flight track, vertical profiles, wind and turbulence can be monitored on the screen in the rear cockpit. The derived parameters are not logged.

The operator has a facility to insert time-tagged event marks into the data stream to mark special events or sections of the flight.

Examples of screens available to the operator are shown in *Figure 12*.

DAHS 6.6		ARA 2000		xy buffer : xy (on) xy2 (on)		00:00:26 replay	
No waypoints selected							
1	crll (deg)	2	cpch (deg)	3	tdHL degC	4	tdHL degC
	0.7855		6.191		23.083		8.818
5	trHL 1/ 5 (degC)	6	taRC 1/ 6 (degC)	7	psAC 1/ 7 (hPa)	8	tskl 1/ 8 (degC)
	-		24.514		1012		21.810
9	Hdd deg	10	Hff kts	11	psAC 1/ 2 (hPa)	12	psAC 1/ 1 (hPa)
	210.900		21.201		-0.2763		0.0066
13	cnhdg (deg)	14	Halt (ft)	15	Tthdg (deg)	16	iasAC 1/ 9 (m/s)
	-149.139		49.272		9999		10.785
				Files / Data			
				..\01091009 1			
				Dsk 212160KB			
				Samples			
				Analog : 2618			
				Trinble : 0			
				Nov : 159			
				AHRS : 3955			
				Trinble			
				GPS-Status: ??????			
				GPS-Mode : ??????			
				UTC : 00:99:99			
				AHRS			
				Status : valid			
				Attitude : valid			
				Heading : valid			
				slaved ground Rev			
				Miscellaneous			
				Event :			
				n : 27			
F1..F6, cF1..cF4, sF2; Alt-H (Help Lists); ESC (Clear Cmd); Alt-X (Stop)							

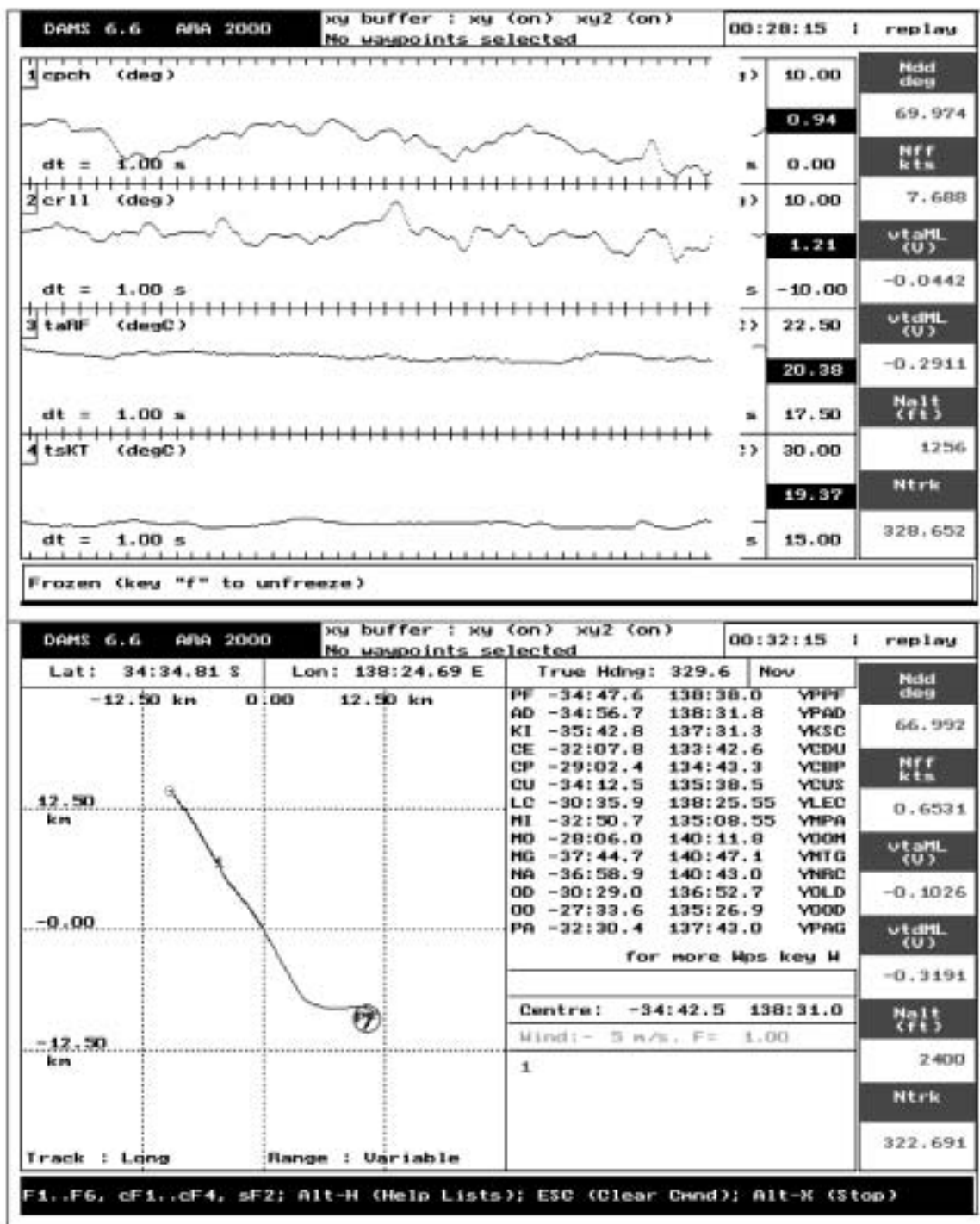


Figure 12: Examples of screens of the data monitoring system available to the operator. Top to bottom: "F1"-display showing 16 individual channels or derived parameters on the l/h side and status information on the r/h side of the screen. "F2" screen showing time traces of four channels or derived parameters on the l/h side of the screen and numerical values of six further channels or parameters on the r/h side. "F4"-display showing the flight track and waypoint information, as well as event markers on the l/h-side of the screen, waypoint details and some other information in the right centre, and six channels/parameters on the r/h side of the screen. There are several other screens available.

4 DATA PROCESSING

4.1 Aircraft data

Most of the data processing was carried out using Version 12 of the ARA/FIAMS software package RAMF.

The original version of RAMF (*Routinen zur Auswertung Meteorologischer Forschungsflüge, Routines for the Processing of Meteorological Research Flights*) was developed by J.M. Hacker at the Meteorological Institute of the University of Bonn/Germany, to process data from research flights with three motor-gliders owned by the DLR's (German AeroSpace Agency) Institute for Atmospheric Physics. Today it is used at a number of sites to process data from meteorological research aircraft as well as a multitude of other more general time series applications.

The following processing steps were carried out:

- Convert the sensor voltages into basic physical units using the calibration data base
- correct/eliminate periods of radio transmissions which interfere with the sensors
- correct the pressures for position and other errors
- correct temperatures for airspeed
- compute movement vector of aircraft in inertial system using GPS measurements combined with attitudes and accelerometers
- compute 3D-air speed vector
- rotate air speed vector into Earth-fixed system
- compute 3D-wind speed from the above
- apply final filters and corrections

This gives the quality-controlled basic data set with the parameters as listed in *Table 5*. All parameters have been transferred to a data rate of 55Hz.

All positions and speeds refer to the location of the Novatel GPS antenna as specified in *Table 4*.

All of these parameters are then plotted for further visual quality control (not shown) and are available in ASCII-files on the accompanying CD-ROM.

Parameter name	Description
GPSsec	GPS seconds (seconds after midnight on previous Sunday)
UTCdate	UTC date (in YYMMDD, from GPS)
UTCtime	UTC time (in HHMMSS.dec, from GPS)
Nlat	latitude (in decimal degrees, from GPS)
Nlon	longitude (in decimal degrees, from GPS)
Nalt	altitude (in m, from GPS)
Nu	W/E speed of aircraft (in m/s, from GPS)
Nv	S/N speed of aircraft (in m/s, from GPS)
Nw	vertical speed of aircraft (in m/s, from GPS)
Mpch	aircraft pitch angle (in deg, combination of GPS and accelerometers)
Mroll	aircraft roll angle (in deg, combination of GPS and accelerometers)
Mthdg	aircraft heading (in deg true, combination of GPS and accelerometers)
TAflag1	flag for GPS attitude availability (should be approximately 1, if attitude valid)
Mprt	aircraft pitch rate (in deg/s, combination of GPS and accelerometers)
Mrrt	aircraft roll rate (in deg/s, combination of GPS and accelerometers)
Myrt	aircraft yaw rate (in deg/s, combination of GPS and accelerometers)
RMNu	W/E speed of Rosemount probe head (in m/s, from GPS and accelerometers)
RMnv	S/N speed of Rosemount probe head (in m/s, from GPS and accelerometers)
RMnw	vertical speed of Rosemount probe head (in m/s, from GPS and accelerometers)
RMpx	dynamic pressure (in hPa, central hole of Rosemount probe)
RMpy	beta pressure diffence (in hPa, left/right hole of Rosemount probe)
RMpz	alpha pressure diffence (in hPa, upper/lower hole of Rosemount probe)
RMps	static pressure (in hPa)
RMt5	raw air temperature (in deg C)
RMtrec	corrected air temperature (in deg C)
RMuair	W/E wind speed (in m/s)
RMvair	S/N wind speed (in m/s)
RMwair	vertical wind speed (in m/s)
RMff	horizontal wind speed (in m/s)
RMdd	horizontal wind direction (in deg true)
RMtas	true air speed (in m/s)
RMias	indicated air speed (in m/s)
RMalfa	angle of attack (in deg, as measured at the probe)
RMbeta	angle of sideslip (in deg, as measured at the probe)
vhfl	transmission indicator for VHF radio #1

vhf2	transmission indicator for VHF radio #2
uhf	transmission indicator for UHF radio
Lacx	longitudinal acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in l/h wing)
Lacy	lateral acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in l/h wing)
Lacz	vertical acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in l/h wing)
Facx	longitudinal acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in fuselage)
Facy	lateral acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in fuselage)
Facz	vertical acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in fuselage)
Racx	longitudinal acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in r/h wing)
Racy	lateral acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in r/h wing)
Racz	vertical acceleration of aircraft (in m/s^2 , from accelerometers in r/h wing)

Table 5: Parameters in basic data set.

4.2 GPS Base Station data

The data from the GPS Base Station was processed using the software packages *WINSAT* and *C3NAV*. *WINSAT* is supplied together with the NovAtel GPS receivers and converts the data files into the format that is required as input to *C3NAV*. *C3NAV* is a program available from the University of Calgary/Canada which combines the code and carrier signals from the GPS satellites as logged by the GPS Base Station and the mobile station into a differentially corrected data set for the mobile station. *C3NAV* is basically a “black box” in our application, as no source code is available to us, but we have used it for many years successfully for the purpose. With the cancellation of GPS Selective Availability, the non-differential GPS positions and velocity fixes are now so good that the use of *C3NAV* has become much less important for our measurements.

For the current project, we applied *C3NAV* in the usual way, but found problems with the differential corrections. After some tests, as described in Section 5.4, it was decided not to use differentially corrected GPS data for the wind processing.

5 RESULTS

5.1 Accuracy of aircraft-derived wind

To establish the validity and accuracy of the aircraft-derived wind and turbulence measurements, three different flight patterns were used:

- circles at constant altitude and constant bank angle;
- a wind square consisting of five legs flown in the four cardinal compass directions (270°, 0°, 90°, 180° and 270° again);
- pilot-induced pitch variations.

The first two patterns test the horizontal wind measurements only.

5.1.1 Wind Circles

For the circles, the horizontal wind vector can be derived using two nearly independent methods:

- **Displacement Method:** deriving the horizontal wind purely from the displacement of the aircraft during the circle (only possible for circles flown at constant altitude and angle of bank); ie. the only parameters used for this method are the GPS positions and times.
- **Normal Method:** the normal method subtracting the 2D-groundsPEED from the 2D-airSPEED using the standard algorithms as for the final data processing;

As specified in *Table 2* and shown in the flight tracks depicted in *Figure 13* to *Figure 16*, circles were flown at FL470, FL390, FL335 and FL060, ie. at 14,690m, 12,230m, 10,550m and 2,140m MSL. The average of the horizontal wind components and the standard deviations for the two methods are given in *Table 6*.

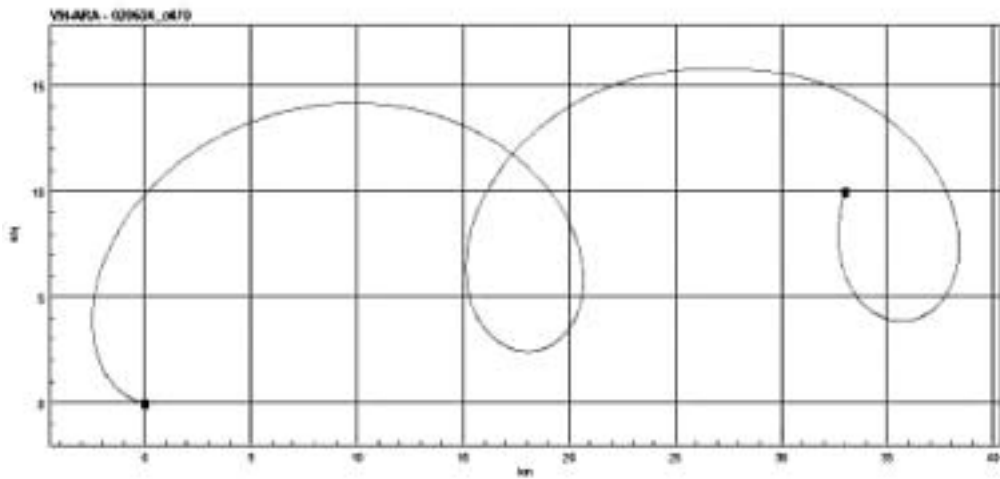


Figure 13: Ground track of wind circles flown at FL470.

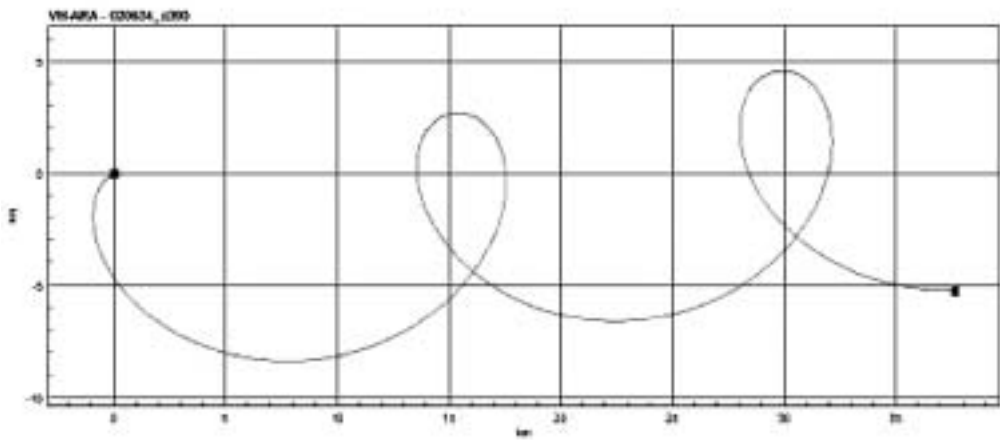


Figure 14: Ground track of wind circle flown at FL390.

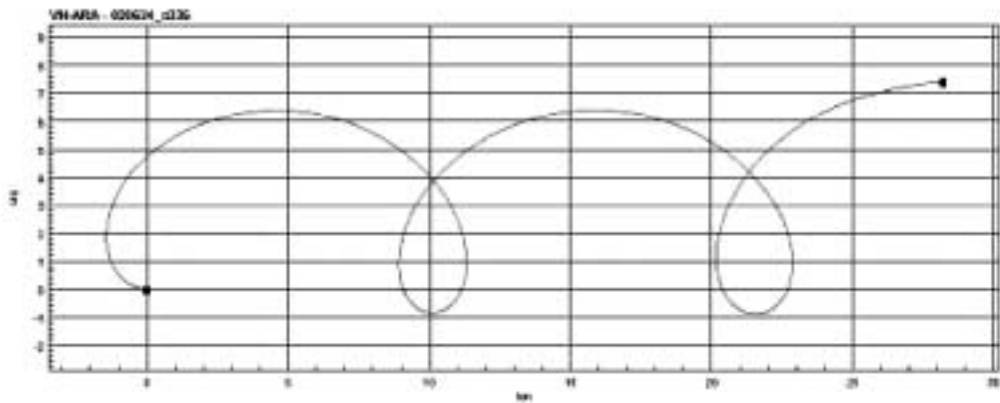


Figure 15: Ground track of wind circle flown at FL335.

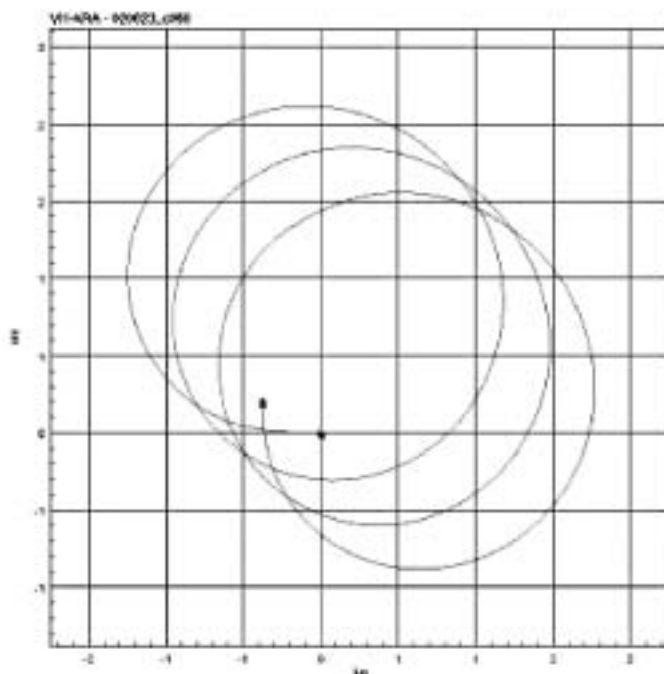


Figure 16: Ground track of wind circles flown at FL060.

<i>Displacement</i>	mean(dd)	sd(dd)	mean(ff)	sd(ff)
c470	264.73	0.710	45.94	0.379
c390	262.86	0.354	44.04	0.408
c335	270.38	0.987	41.07	0.978
c060 1&2	313.36	1.750	3.11	0.078
c060 2&3	315.17	2.504	3.05	0.108
<i>Normal</i>	mean(dd)	sd(dd)	mean(ff)	sd(ff)
c470	264.45	0.971	42.17	0.476
c390	262.55	2.498	43.79	1.667
c335	269.76	1.330	41.70	0.730
c060 1&2	325.30	4.694	3.22	0.535
c060 2&3	326.03	5.450	3.06	0.328

Table 6: Mean values and standard deviations for horizontal wind direction (dd in deg true) and speed (ff in m/s) for the two methods as described in the text

As can be seen in Table 6, the winds as determined by the two (nearly) independent methods agree very well and show very little scatter individually. The values agree better and the scatter for individual circles is lower, at the higher altitudes, in particular for wind direction, but this can easily be explained by the much higher wind speed there. The higher the wind

speed, the more reliable is the determination of the wind direction which obviously would become undefined for a zero wind speed . There is no easy method to determine the absolute accuracy of the wind measurements from aircraft, because too many parameters contribute to the computation. However, the comparison as discussed

here can be used as an indicator for the accuracy of the measurements. In this sense, we can state that the absolute accuracy of the wind speed is around 1m/s and that of the wind direction about 1-2 degrees. This is in line with the expectations on a system such as the one installed in the Egrett. In Section 5.1.4, the aircraft wind measurements will also be compared with the GPS-sondes launched by the Bureau of Meteorology at Woomera.

5.1.2 Wind Square

To fly wind squares is another method to assess the accuracy of aircraft-derived winds. A wind square was flown at FL060 on 23 June 2002 during the instrumentation test flight. The square consisted of five 1-minute straight and level sections flown in the cardinal compass directions, West, North, East, South and West again. The flight track is shown in *Figure 17*, the results are given in *Table 7*.

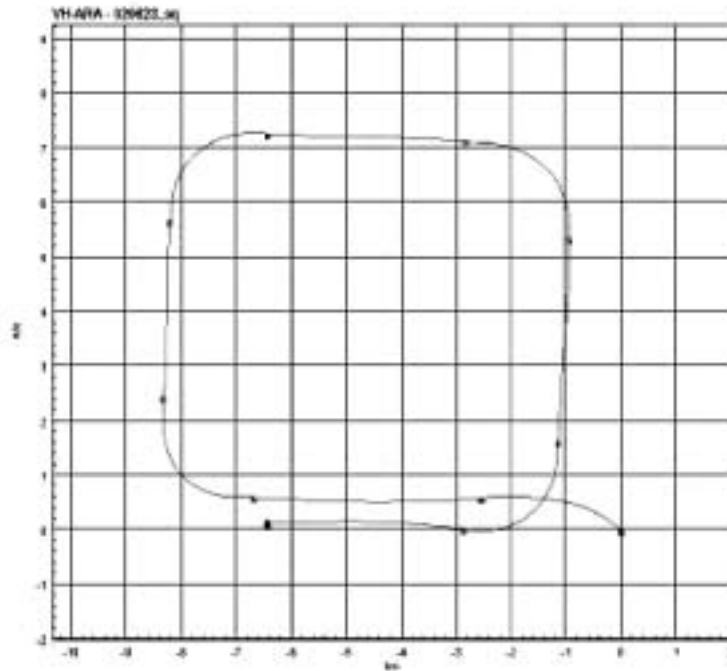


Figure 17: Ground track of the wind square flown at FL060 (2,100m MSL).

	to West	to North	to East	to South	to West
wind speed (m/s)	3.49	3.63	3.96	3.94	3.60
wind direction (°t)	293.8	305.6	307.0	310.6	298.3

Table 7: Wind speed and direction for the five legs of the wind square flown at FL060.

The results in *Table 7* confirm the accuracy estimates derived from the wind circles described in Section 5.1.1.

5. 1. 3 Pilot-induced pitch variations

The methods described in Section 5.1.1 and 5.1.2 can be used to assess the accuracy of the horizontal wind measurements. To test the algorithm for the computation of the vertical wind component and to get an estimate of the accuracy, pilot-induced pitch variations were flown leading to large variations in the vertical speed of the aircraft.

As this test was flown in smooth air, in the ideal case, the computed vertical wind speed should be approximately zero.

For the test case, the standard deviation for the computed vertical wind was 0.44m/s.

The graphs of the relevant parameters are shown in *Figure 18*. As can be seen, the algorithm for the computation of the vertical wind works well, even under severely unsteady conditions.

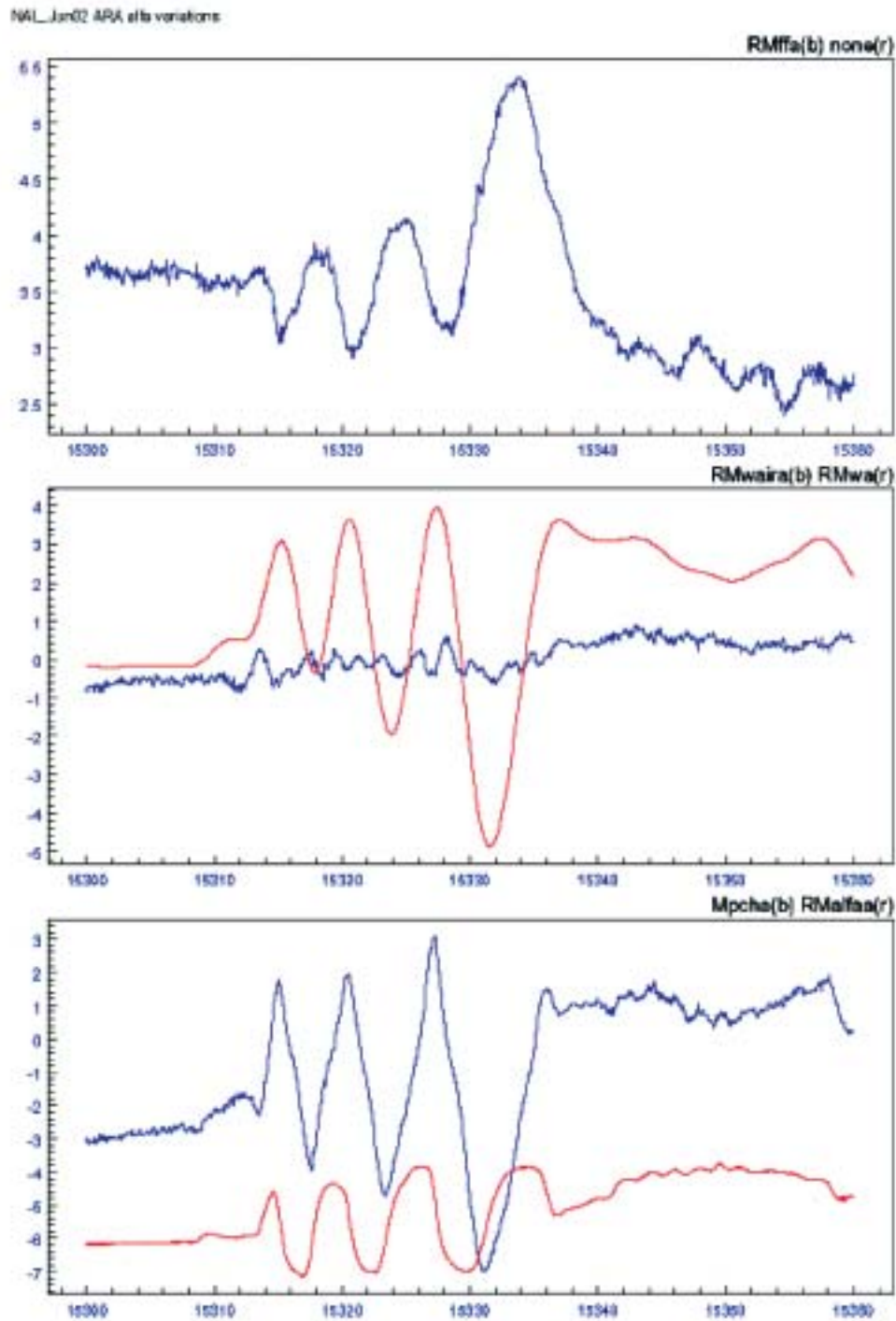


Figure 18: Pilot-induced pitch variations. Graphs show, from top to bottom: horizontal wind speed in m/s (blue); vertical speed of the aircraft (red) and computed vertical wind in m/s (blue); aircraft pitch angle (blue) and angle of attack (red) in degrees. For clarity, the angles in the bottom panel were scaled. Time on the abscissa is in GPS seconds.

5. 1. 4 Comparison with GPS radiosondes

The Bureau of Meteorology launches regular GPS radiosondes from Woomera. The launch point is close to the airport. Sondes are launched twice a day, at 23:30UTC and at 11:30UTC. The sonde takes approximately 30 minutes to reach an altitude of 15km. As all three measurement flights commenced at approximately 09:30LT (ie. 00:00UTC), the initial ascent normally coincided well with the radiosonde.

Figure 19 to Figure 21 show the aircraft wind and air temperature profiles plotted together with those from the GPS-sondes. The profiles agree remarkably well taking into account the time differences between the radiosonde flights and the aircraft flights, ie. approximately 2 - 4 hours. The larger the time difference, the larger the differences in the profiles.

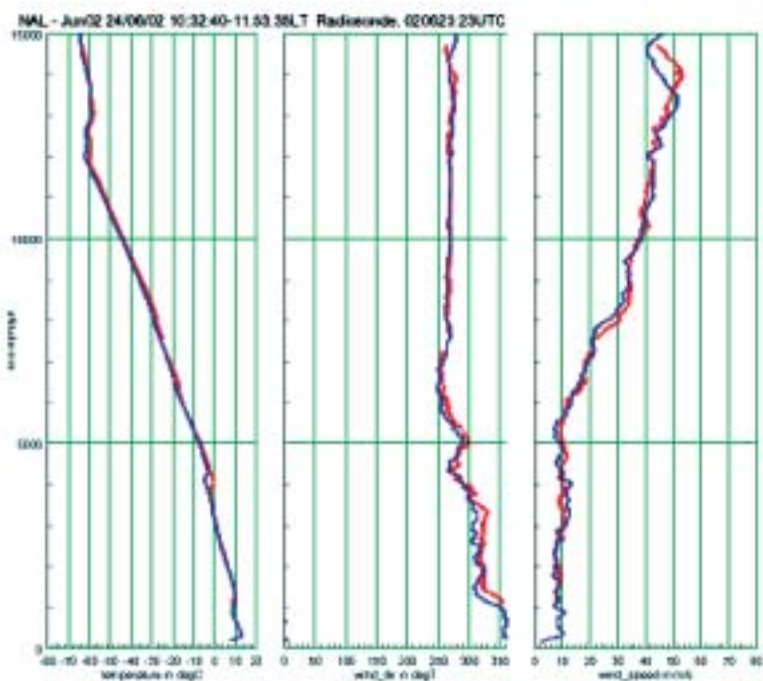


Figure 19: Radiosonde data from launch at 23:30UTC on 23/06/2002 (blue) and corresponding aircraft data for period 01:02 - 02:23UTC on 24/06/2002 (red). Shown are, from left to right: air temperature in °C; wind direction in °true; and horizontal wind speed in m/s.

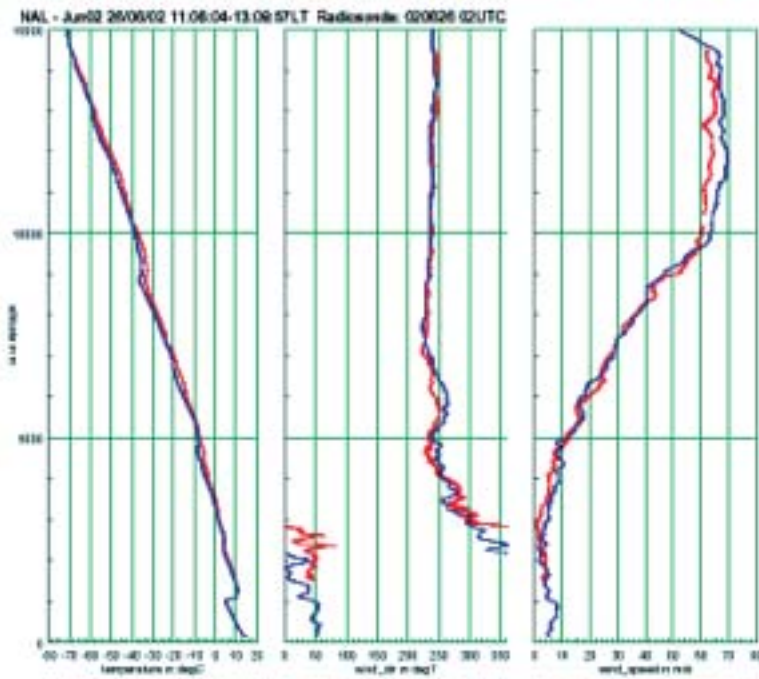


Figure 20: As Figure 19, but for radiosonde launched at 02:30UTC on 26/06/2002 and aircraft period 02:36 - 03:39UTC on 26/06/2002.

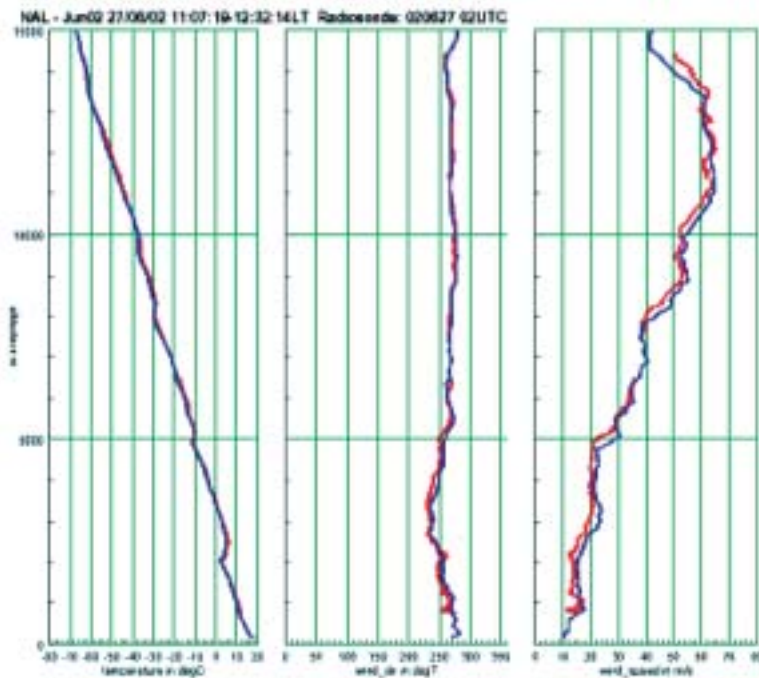


Figure 21: As Figure 19, but for radiosonde launched at 02:30UTC on 27/06/2002 and aircraft period 01:37 - 03:02UTC on 27/06/2002.

5.2 Turbulence

There was very little turbulence encountered during the flights, except in the planetary boundary layer, i.e. up to about 2km altitude. Therefore no valid comparison of the aircraft turbulence measurements with the VHF profiler estimates was possible.

Turbulence is best derived in a quantitative way by flying constant-altitude legs for several minutes. As no layers of turbulence were encountered during the flights at higher altitude, no such legs could be flown. During the ascents and descents, occasionally very weak turbulence was encountered, but it never lasted long enough, nor was it strong enough, to warrant an interruption of the ascent/descent. A turbulence analysis will therefore only be presented for ascents/descents.

Turbulence can be described in terms of a parameter such as standard deviations of the wind components σ_u , σ_v , σ_w or Turbulent Kinetic Energy (TKE), which is proportional to $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}$, where $\bar{u}^2, \bar{v}^2, \bar{w}^2$ denote the squares of deviations from the means of the three components of the wind. However, this works best for data from constant-level flight legs. Alternatively, the accelerations measured in the aircraft itself are a good (qualitative) measure for turbulence.

Figure 22 to Figure 31 show vertical profiles of turbulence in terms of all three above mentioned parameters. Data from subsequent flight segments have been combined to composite ascents and descents. For the definition of the segments, see *Table 2*.

Parameters were computed as follows:

At first, a band-pass filter with cut-off frequencies of 0.2Hz and 10Hz, resp. was applied to the 55Hz time series of *RMff*, *RMuair*, *RMvair*, *RMwair*, *Lacx*, *Lacy*, *Lacz*, *Facx*, *Facy*, *Facz*, *Racx*, *Racy* and *Racz* (see *Table 5*). Then all data was sub-sampled to 11Hz. Next, for each data point, running standard deviations were calculated using deviations from a running mean over 5s. In other words, each data point of the time series of standard deviations then represents the standard deviation from a mean over 2.5s on each side of this data point. Finally, the same “running” process was used to find the maximum

standard deviation for each 5 seconds.

- TKE¹ (turbulent kinetic energy): as defined above;
- s_{ff} (standard deviation of horizontal wind speed): $\sqrt{ff^2}$, with ff defined as the deviation from a running mean of the horizontal wind speed as described above;
- s_{wair} (standard deviation of vertical wind): as s_{ff} , but for the vertical wind speed;
- s_{acc} (standard deviation of accelerations): rms sum of deviations from running means for all nine accelerometers (as defined above).

It is important to note that the turbulence levels for all displayed flight segments were very low. The only more significant turbulence was detected in the planetary boundary layer (see for instance *Figure 23* below 1,500m). Weak turbulence was encountered during flight segments *s3c* on 26 Jun 2002 at around 7,000m (see *Figure 25* and consistently again during *s5a* on the same flight (see *Figure 27*). As the turbulence data from the VHF profiler is not yet available, no comparison is possible at this stage.

¹ The common definition for TKE is different from the one here. The definition used here, however, is better suited for the purpose, but does not have the physical dimension of “energy”.

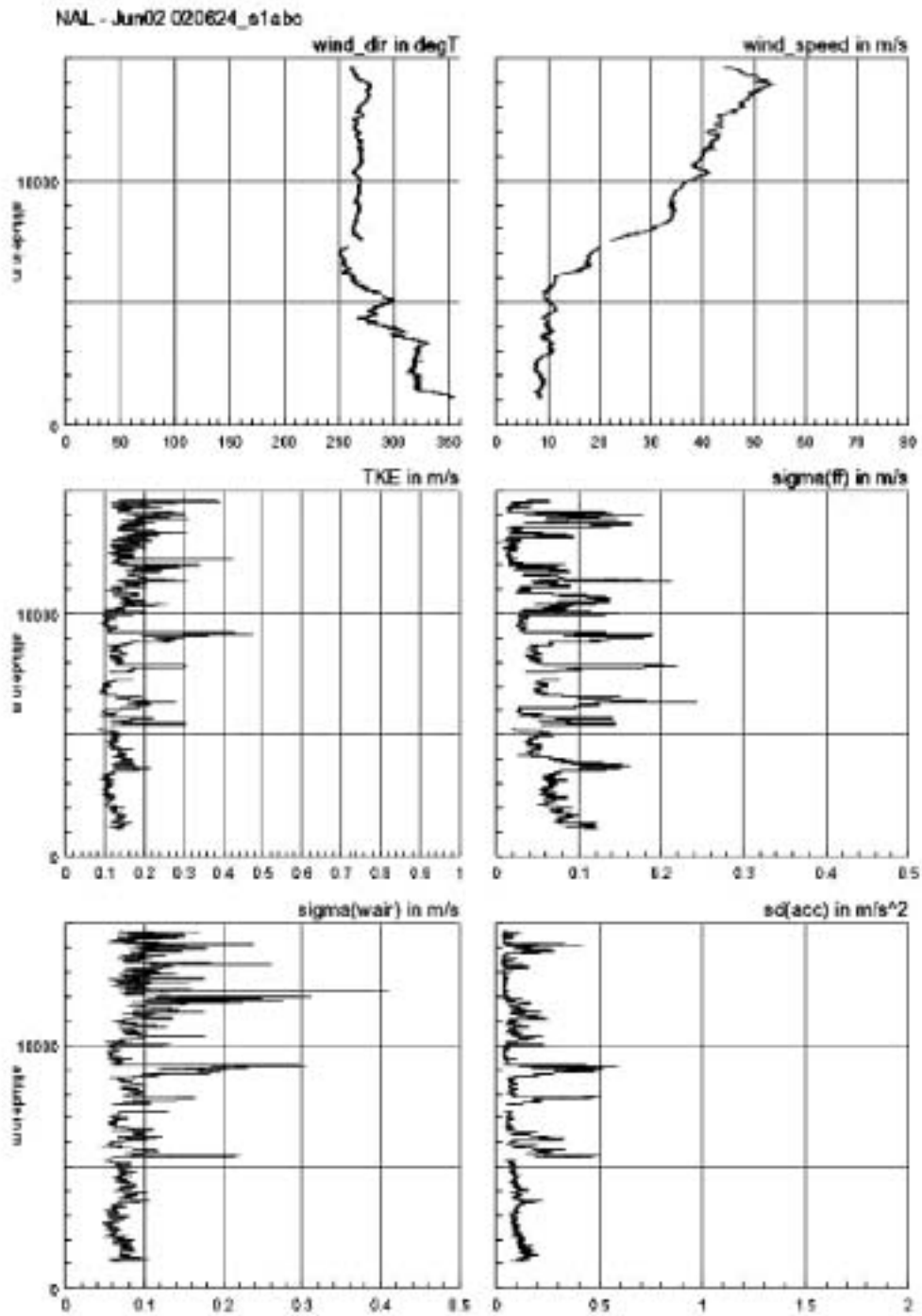


Figure 22: Wind profile and turbulence parameters for flight sections s1a, s1b and s1c on 24 Jun 2002. Top left: wind direction in degrees true; top right: wind speed in m/s; centre left: Turbulent Kinetic Energy (TKE) in m/s; centre right: standard deviation of horizontal wind speed in m/s; bottom left: standard deviation of vertical wind in m/s; bottom right: sum of standard deviations of aircraft accelerations in m/s². For definitions and further details, see text.

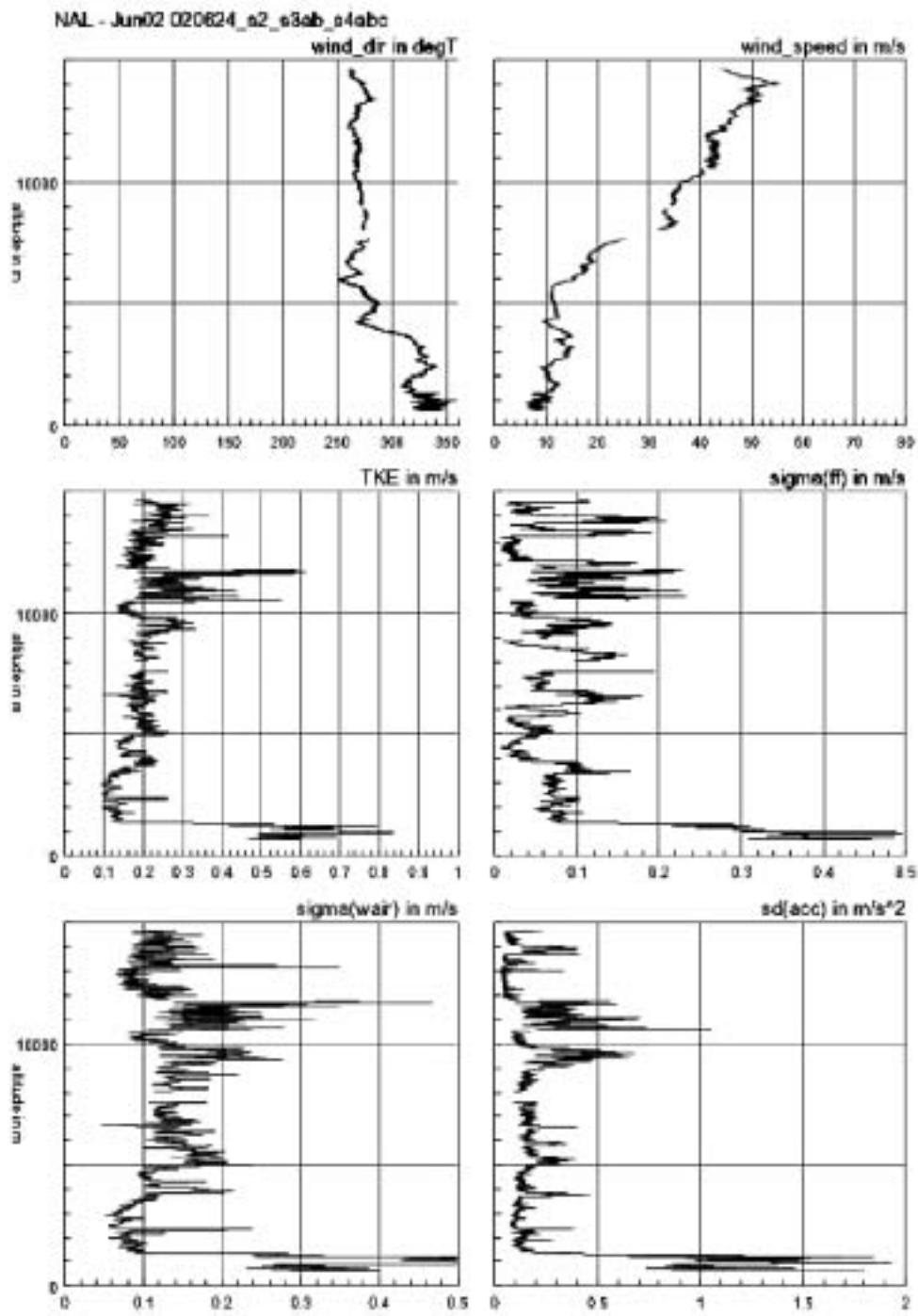


Figure 23: As Figure 22, but for flight sections s2, s3a, s3b, s4a, s4b and s4c on 24 Jun 2002.

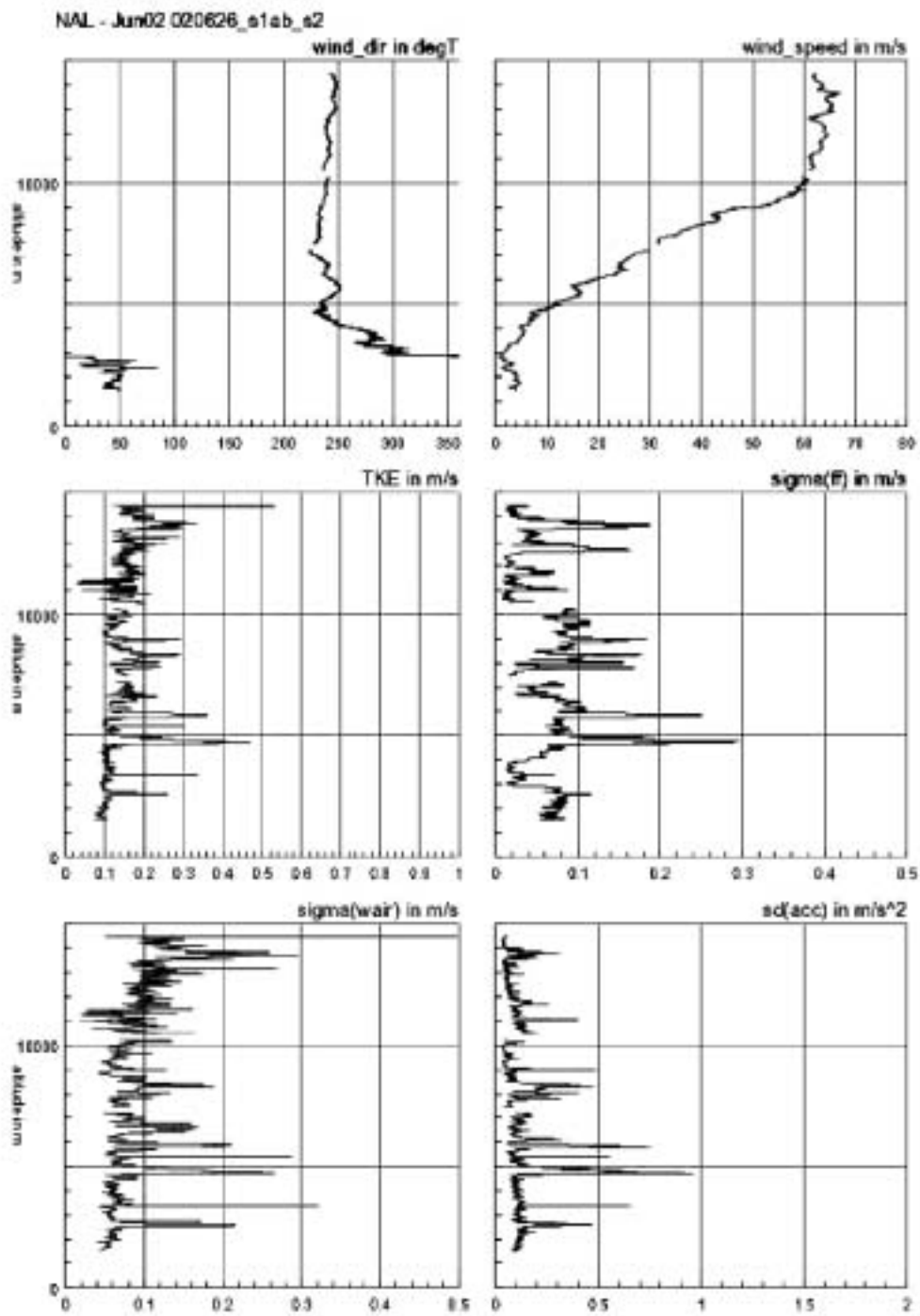


Figure 24: As Figure 22 , but for flight segments s1a, s1b and s2 on 26 Jun 2002.

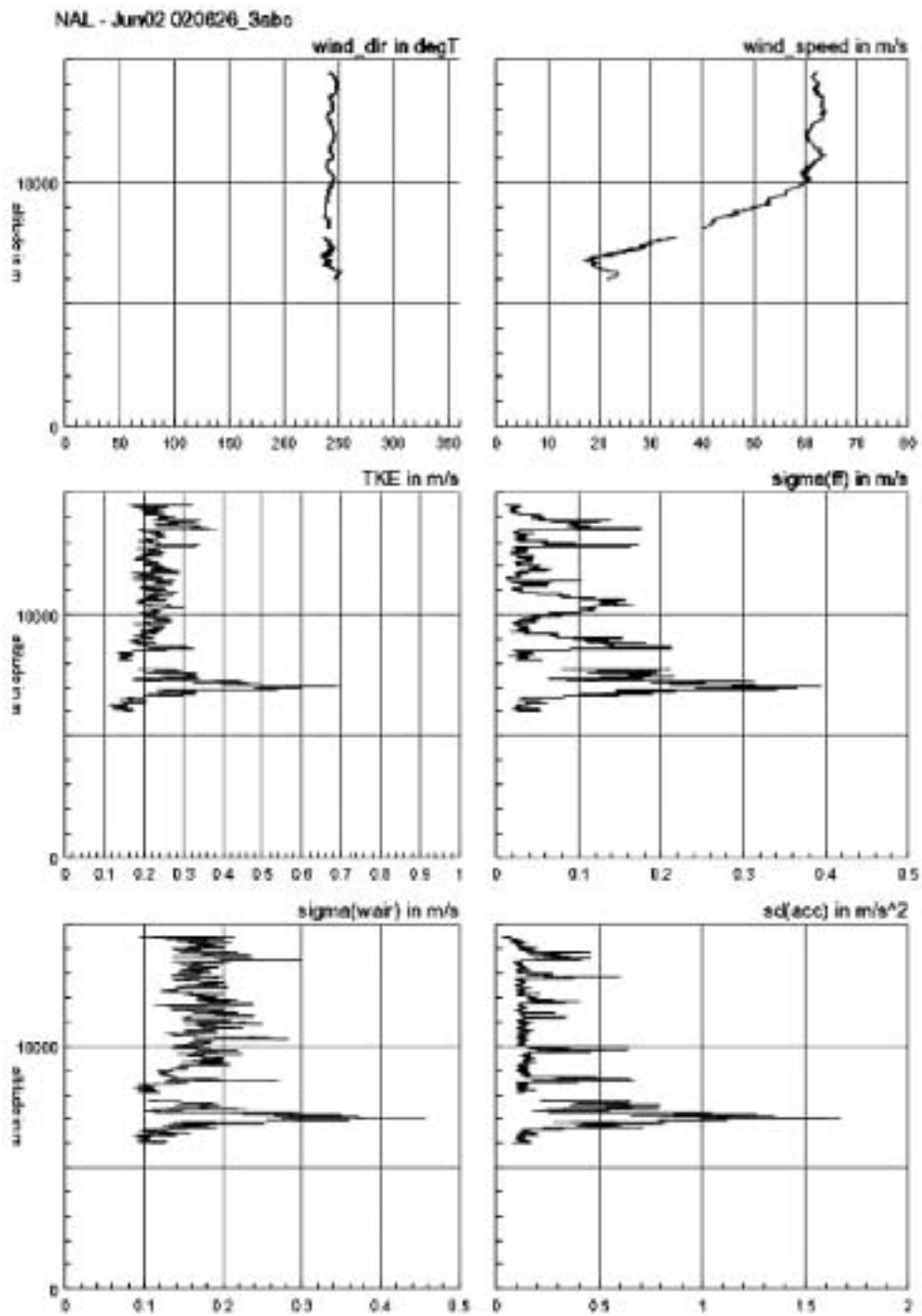


Figure 25: As Figure 22., but for flight segments 3a, 3b and 3c on 26 Jun 2002

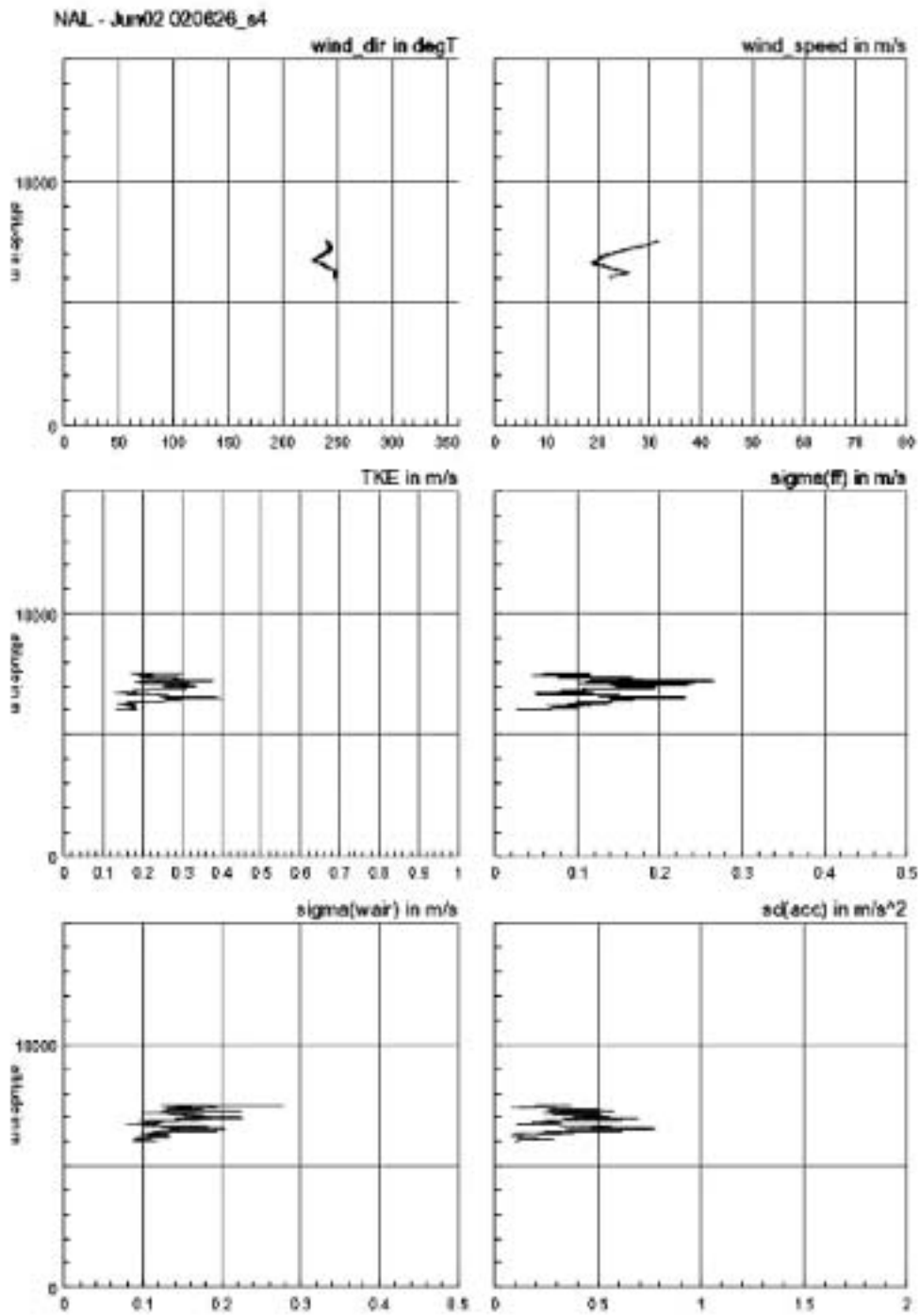


Figure 26: As Figure 22, but for flight segment s4 on 26 Jun 2002.

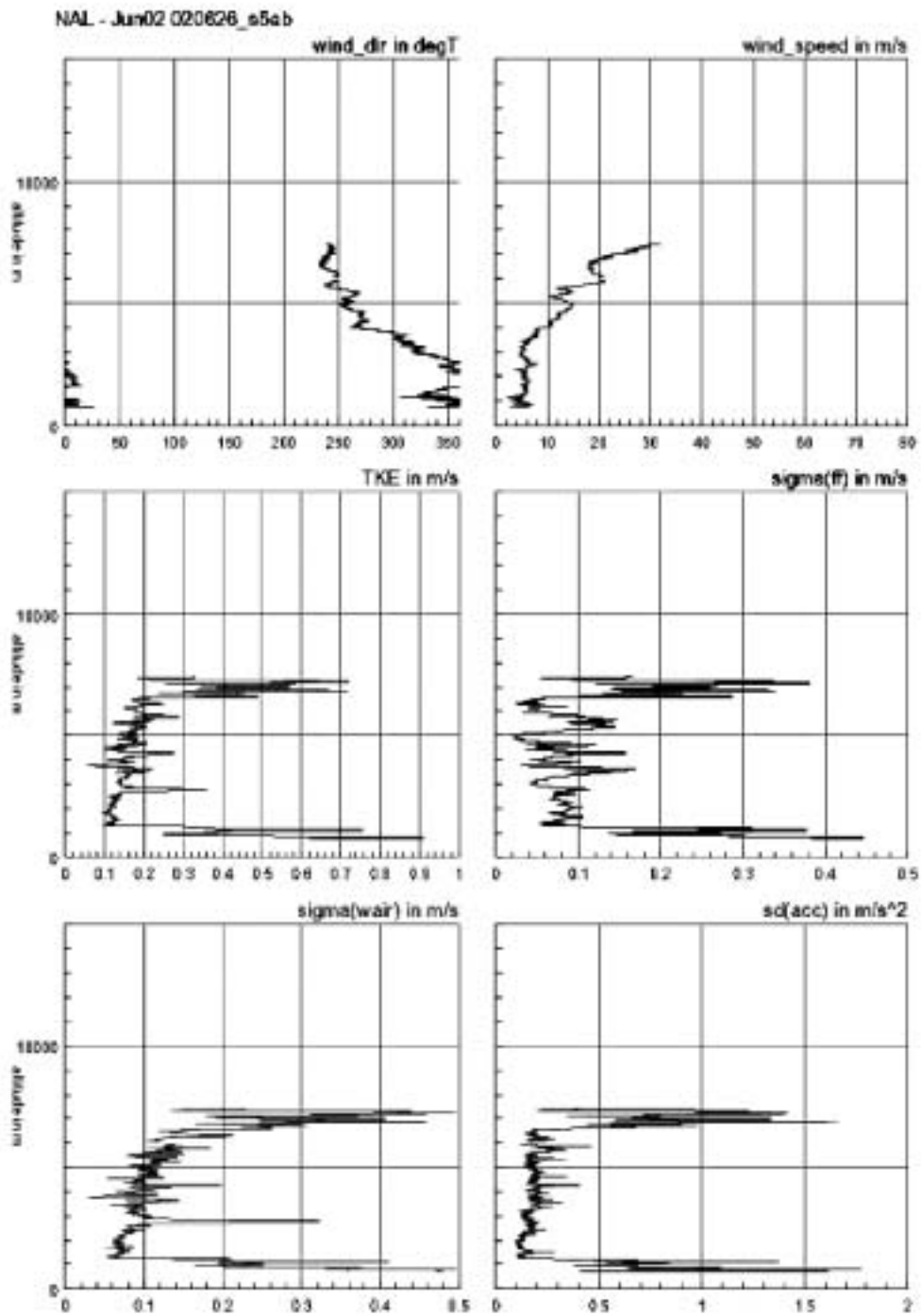


Figure 27: As Figure 22 , but for flight segments s5a and s5b on 26 Jun2002.

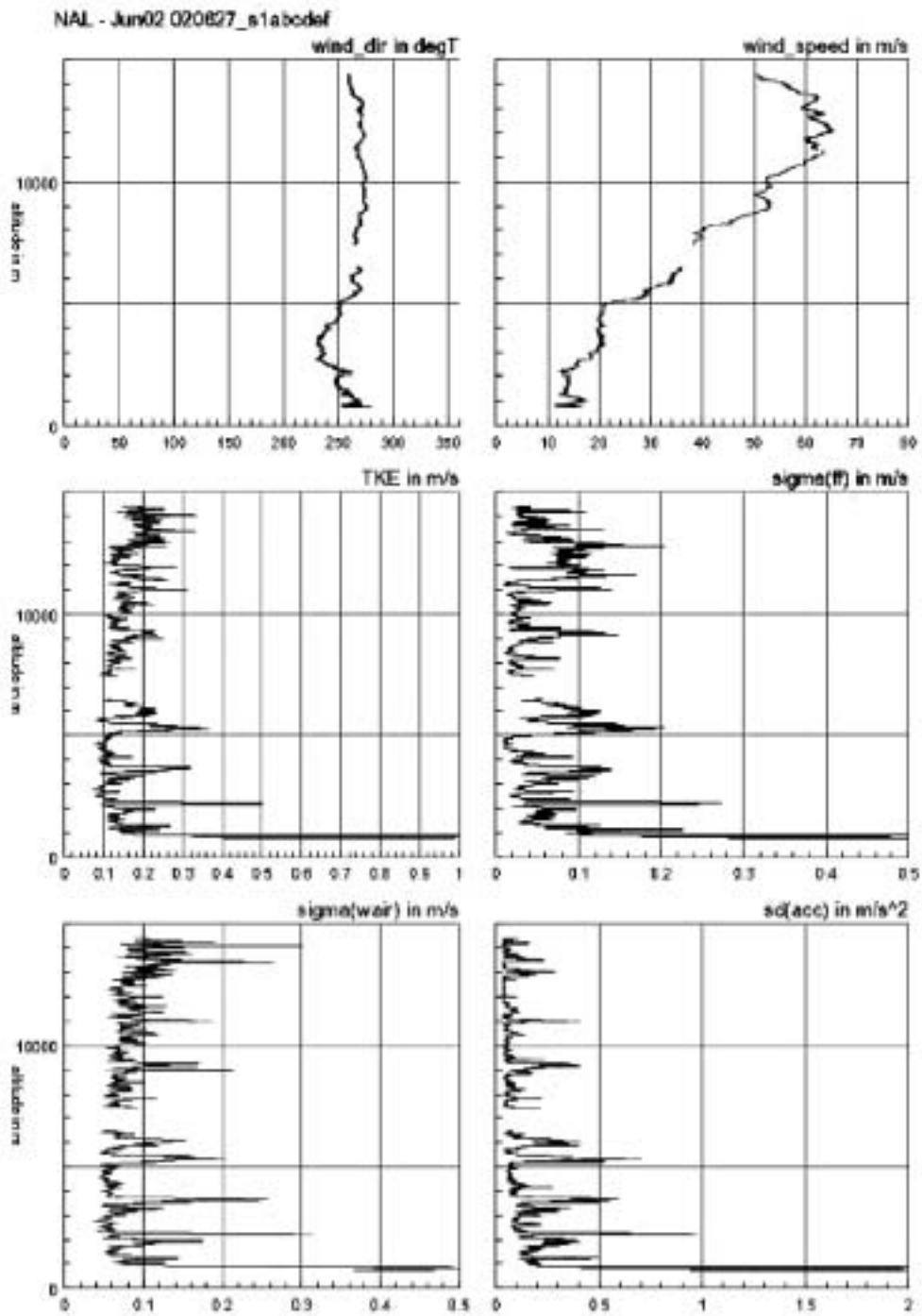


Figure 28: As Figure 22, but for flight segments s1a to s1f on 27 Jun 2002.

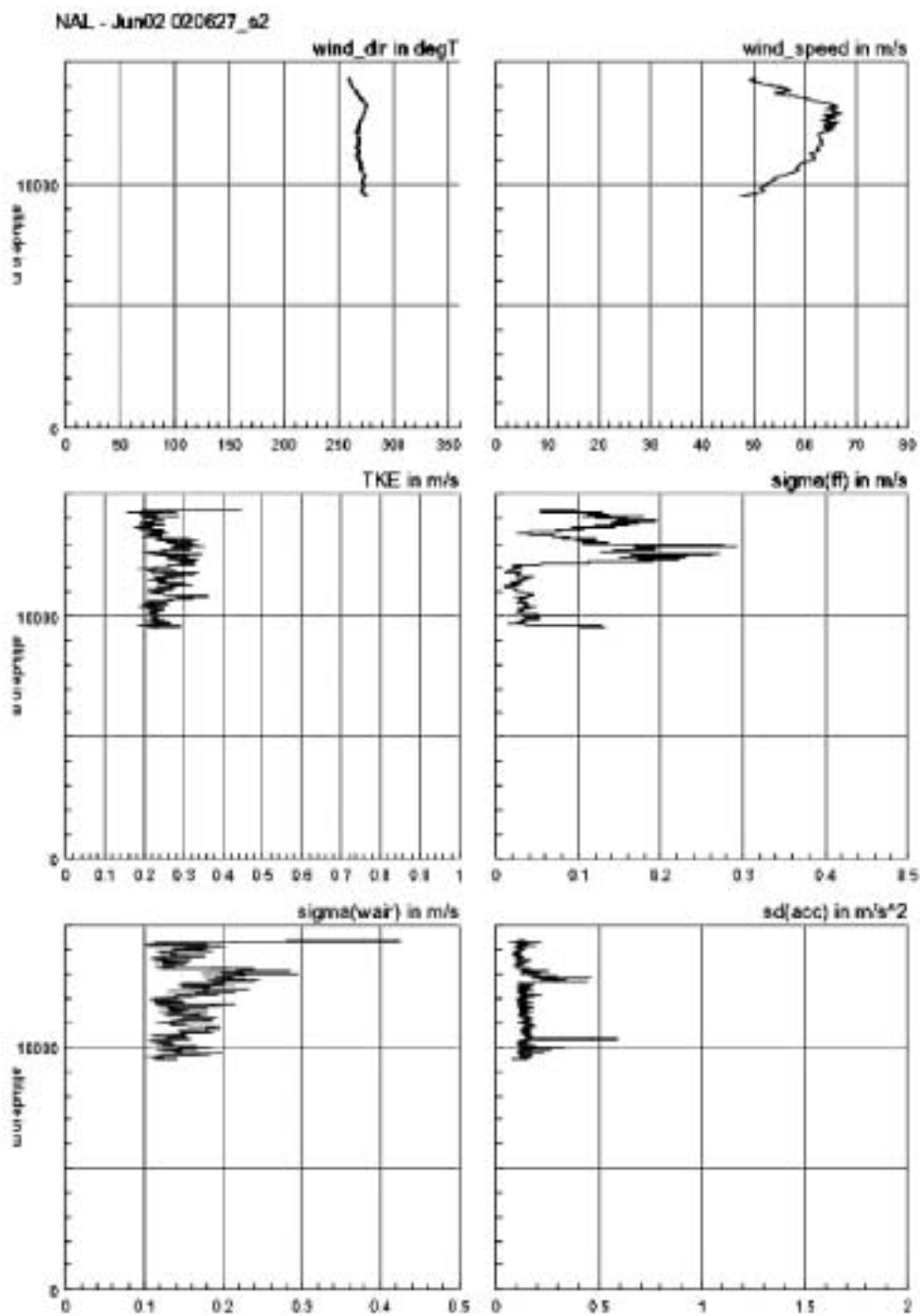


Figure 29: As Figure 22, but for flight segment s2 on 27 Jun 2002.

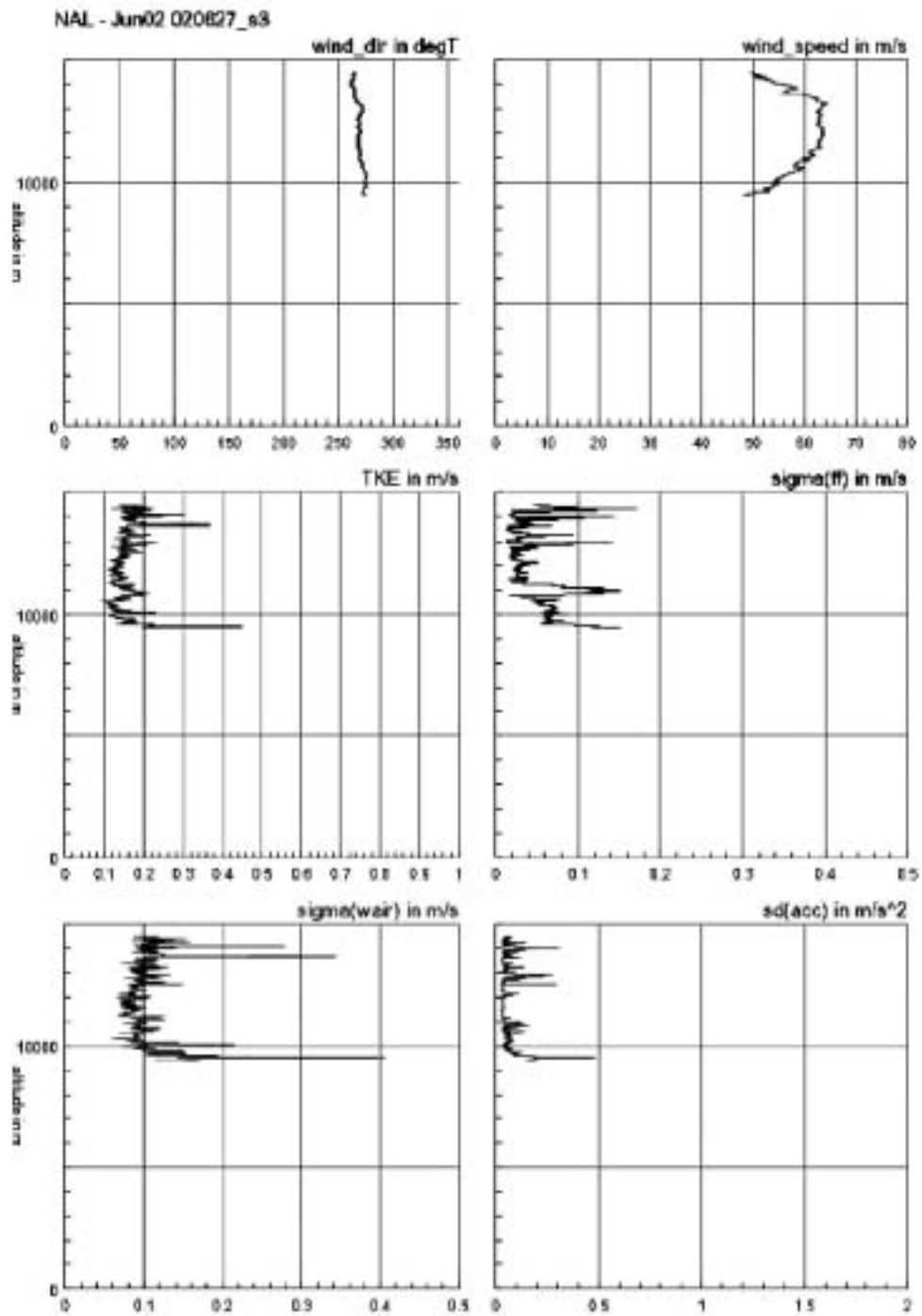


Figure 30: As Figure 22, but for flight segment s3 on 27 Jun 2002.

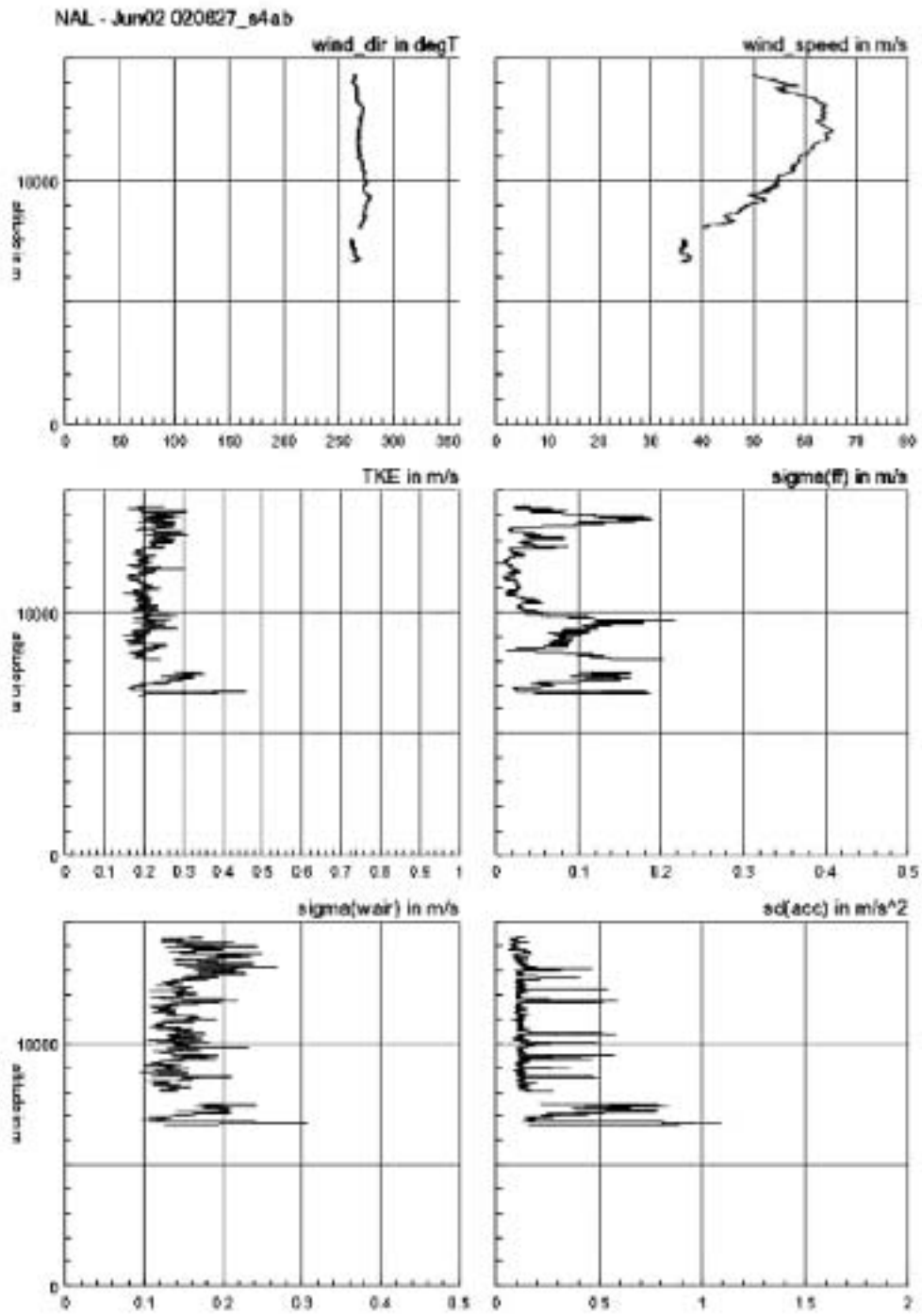


Figure 31: As Figure 22, but for flight segments s4a and s4b on 27 Jun 2002.

5.3 Comparison with the profiler data

The ultimate aim of this project was to compare the wind data from the VHF-profiler with the wind data from the aircraft.

Profiles of wind direction and speed are available from the VHF profiler every 10 minutes. Profiles falling into the same time periods as ascents/descents of the aircraft were selected and plotted together with the aircraft data in *Figure 32* to *Figure 41*.

Profiler measurements with a Signal-To-Noise Ratio smaller than -13.0 were not used.

As can be seen in the Figures, the data agrees reasonably well. However, at altitudes above 10km, there seem to be an increasing number of faulty estimates from the profiler. Sometimes there are also spurious deviations between the profiles at lower altitude.

It is assumed that further processing of the profiler data will yield a parameter which can be used to assess the validity of the estimates.

A closer inspection of the profile shows that the VHF profiler does not resolve the vertical structure of the wind as well as the aircraft, but gives a smoother vertical profile. This was to be expected, as the vertical resolution of the profiler is about 150m.

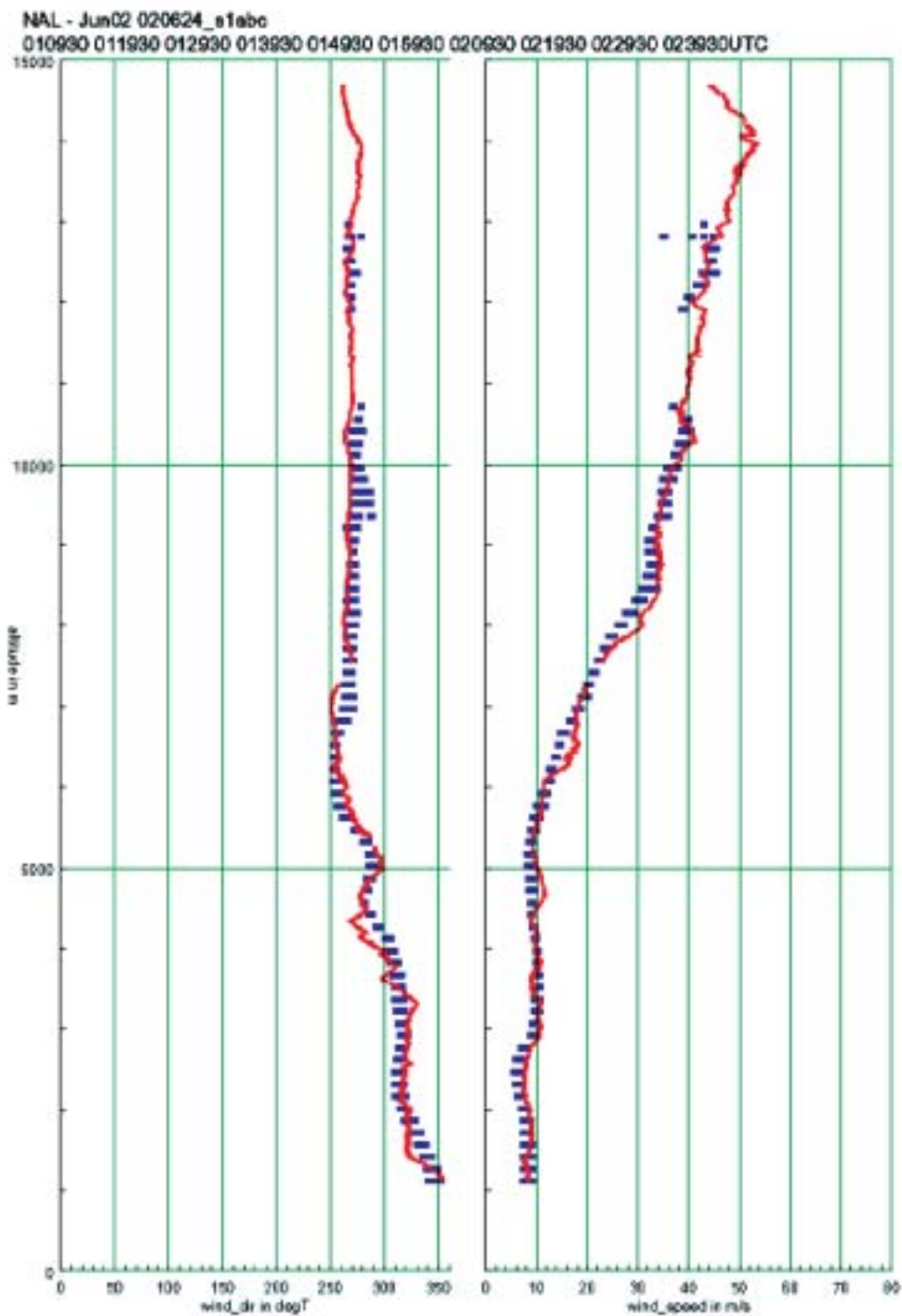


Figure 32: Wind profiles as measured from the aircraft (red) during flight segments s1a, s1b and s1c on 24 June 2002 between 010230UTC and 022345UTC and the VHF-Profiler during the same time period (blue). Times for the profiles from the VHF profiler are every 10 minutes from 010930UTC to 023930UTC. Profiler measurements with a Signal-To_Noise Ratio smaller than -13.0 are not plotted.

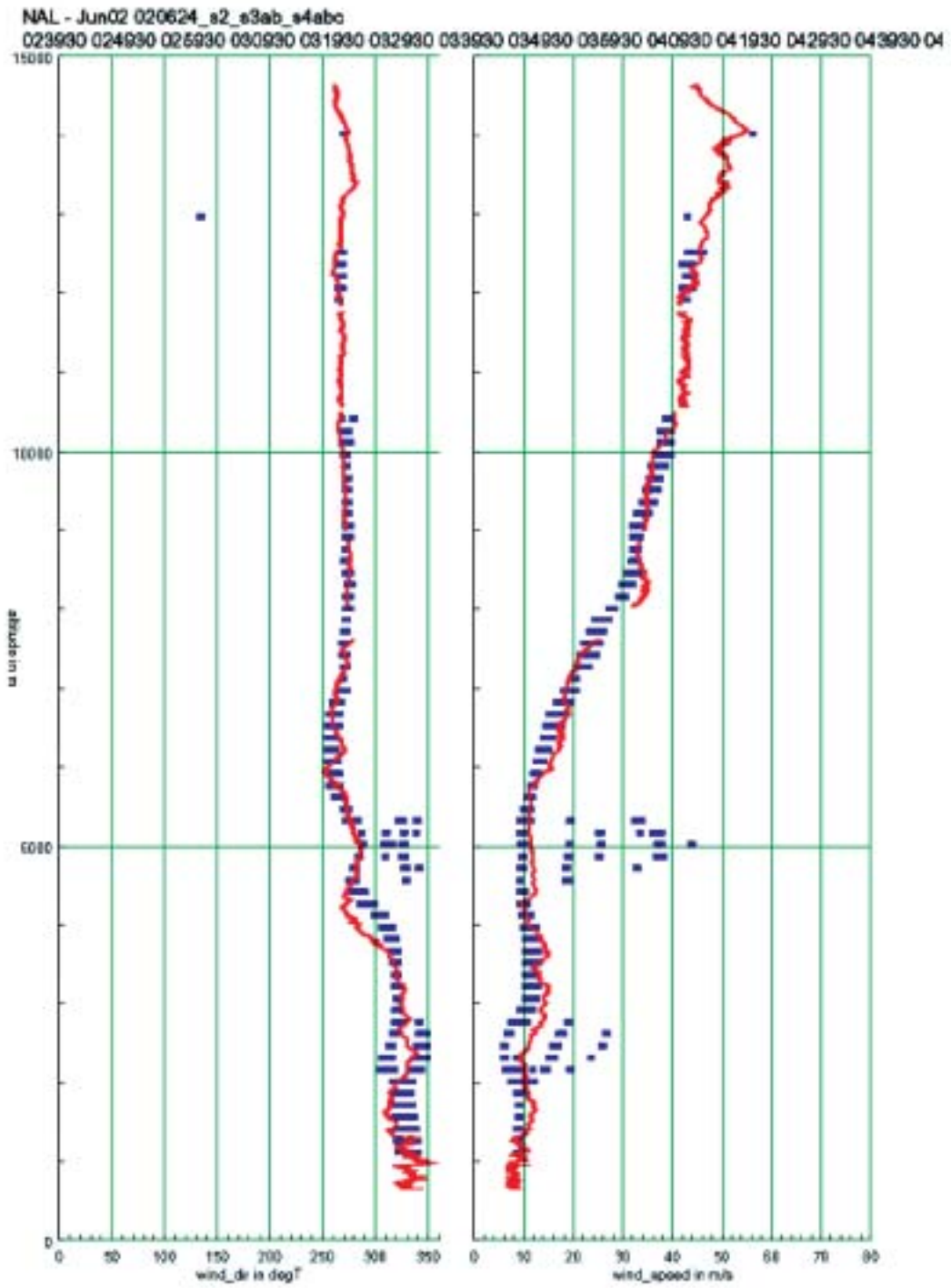


Figure 33: As Figure 32, but for flight segments s2, s3a, s3b, s4a, s4b and s4c on 24 June 2002 between 024119UTC and 044536UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 023930UTC and 044930UTC.

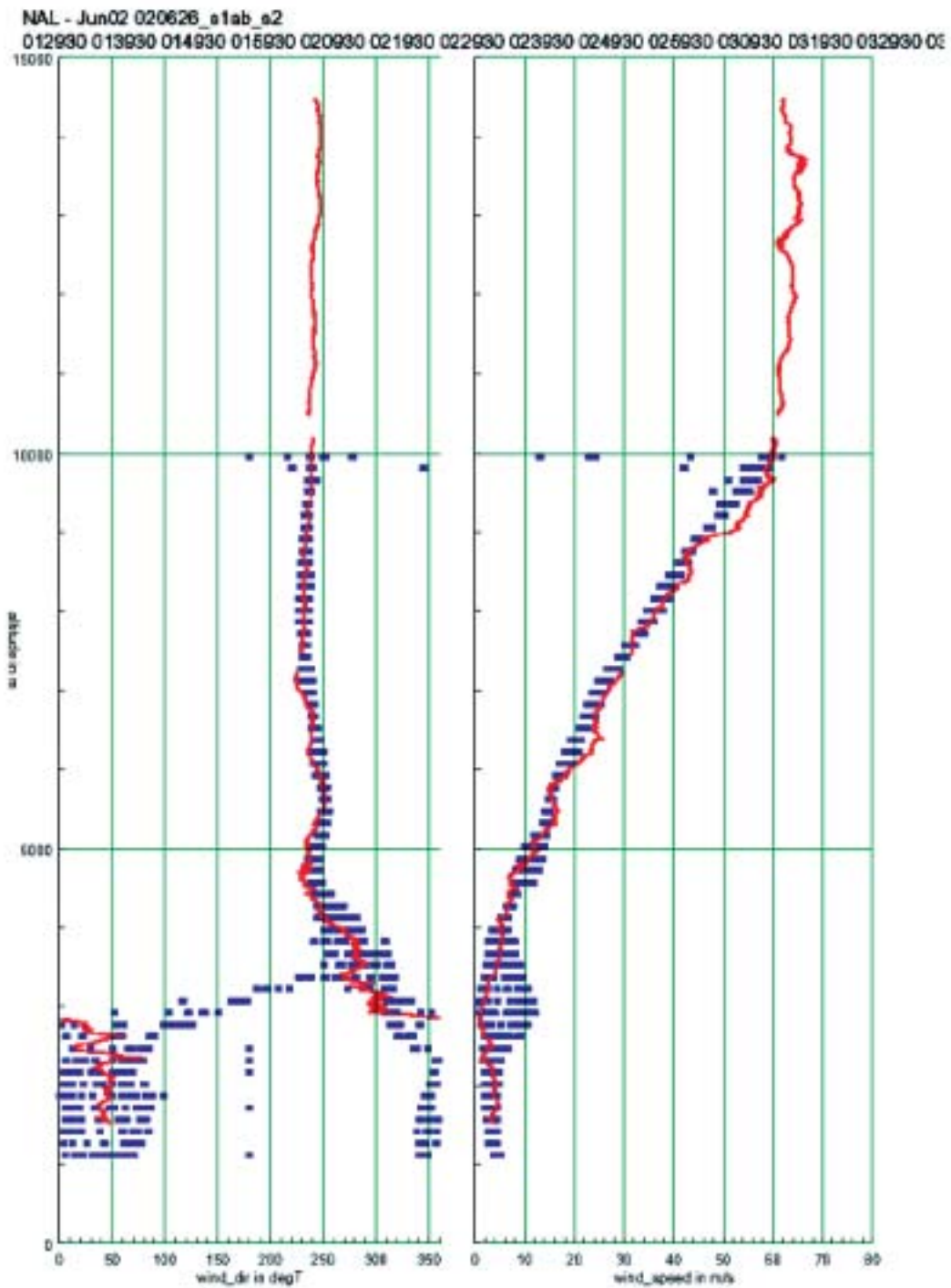


Figure 34: As Figure 32, but for flight segments *s1a*, *s1b* and *s2* on 26 June 2002 between 013555UTC and 034007UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 012930UTC and 033930UTC.

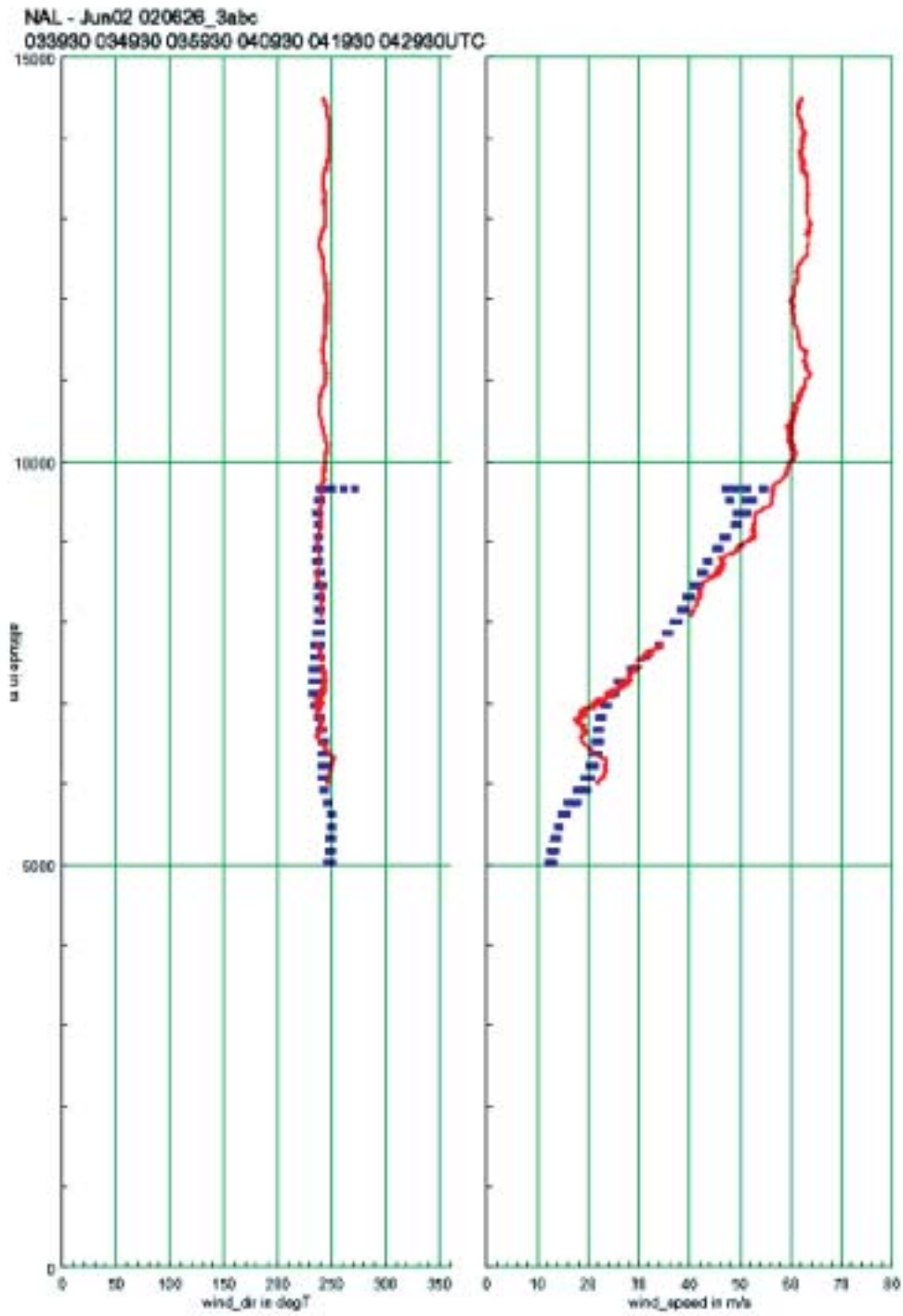


Figure 35: As Figure 32, but for flight segments s3a, s3b and s3c on 26 June 2002 between 034007UTC and 042257UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 033930UTC and 042930UTC.

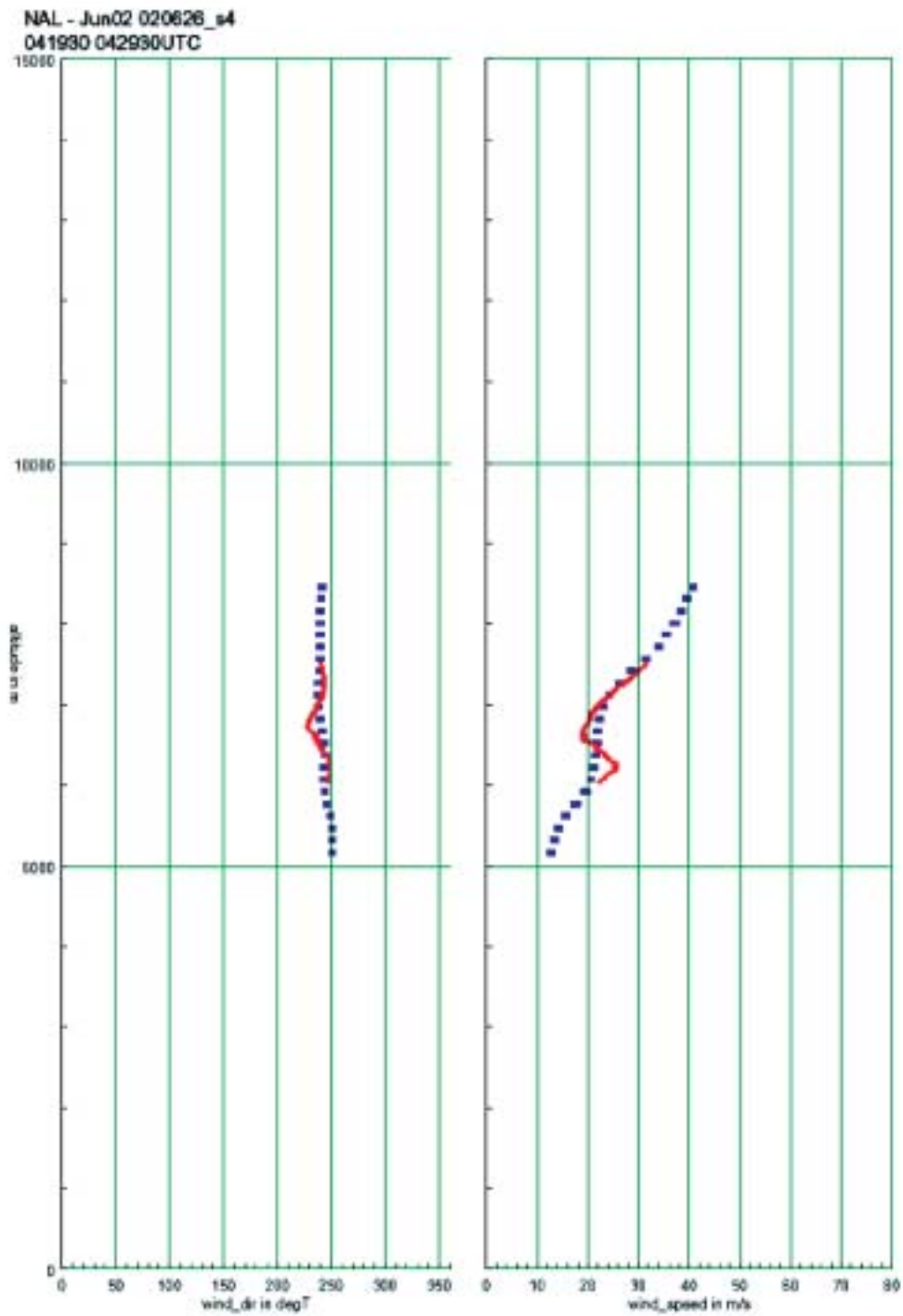


Figure 36: As Figure 32, but for flight segment s4 on 26 June 2002 between 042258UTC and 042936UTC and profiler measurements taken at 041930UTC and 042930UTC.

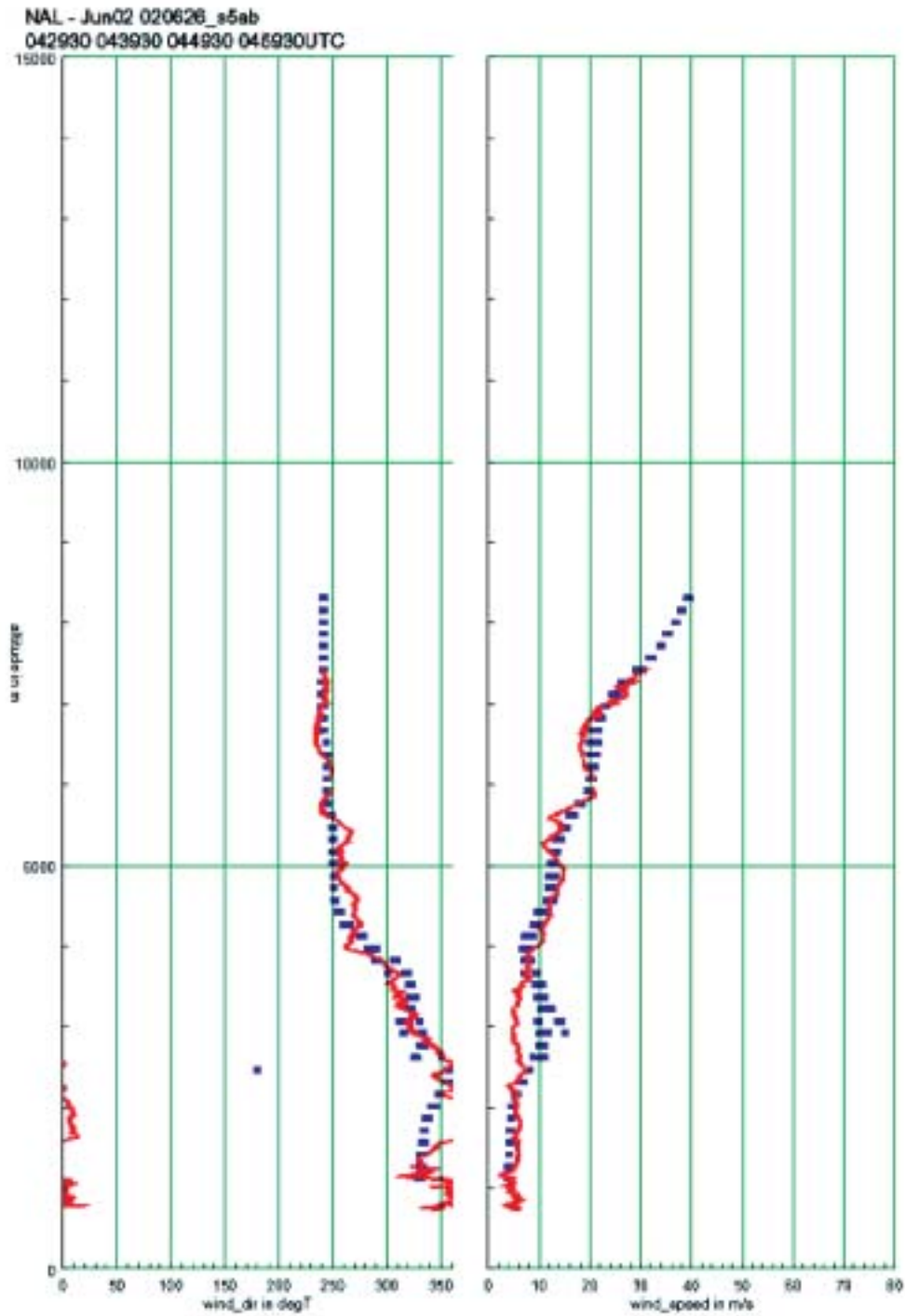


Figure 37: As Figure 32, but for flight segments s5a and s5b on 26 June 2002 between 043123UTC and 045354UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 042930UTC and 045930UTC.

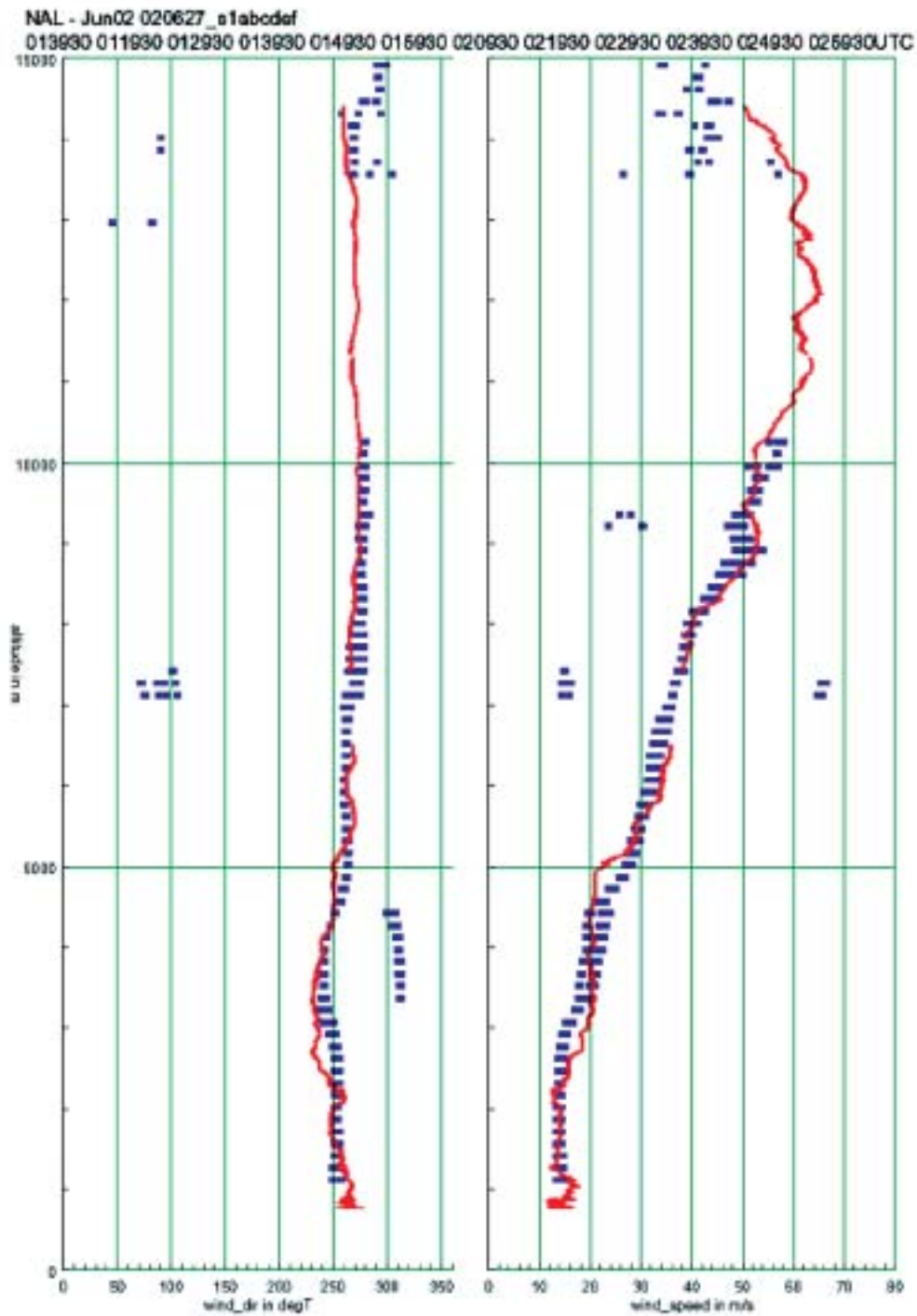


Figure 38: As Figure 32, but for flight segments *s1a* to *s1f* on 27 June 2002 between 013708UTC and 030223UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 013930UTC and 030930UTC.

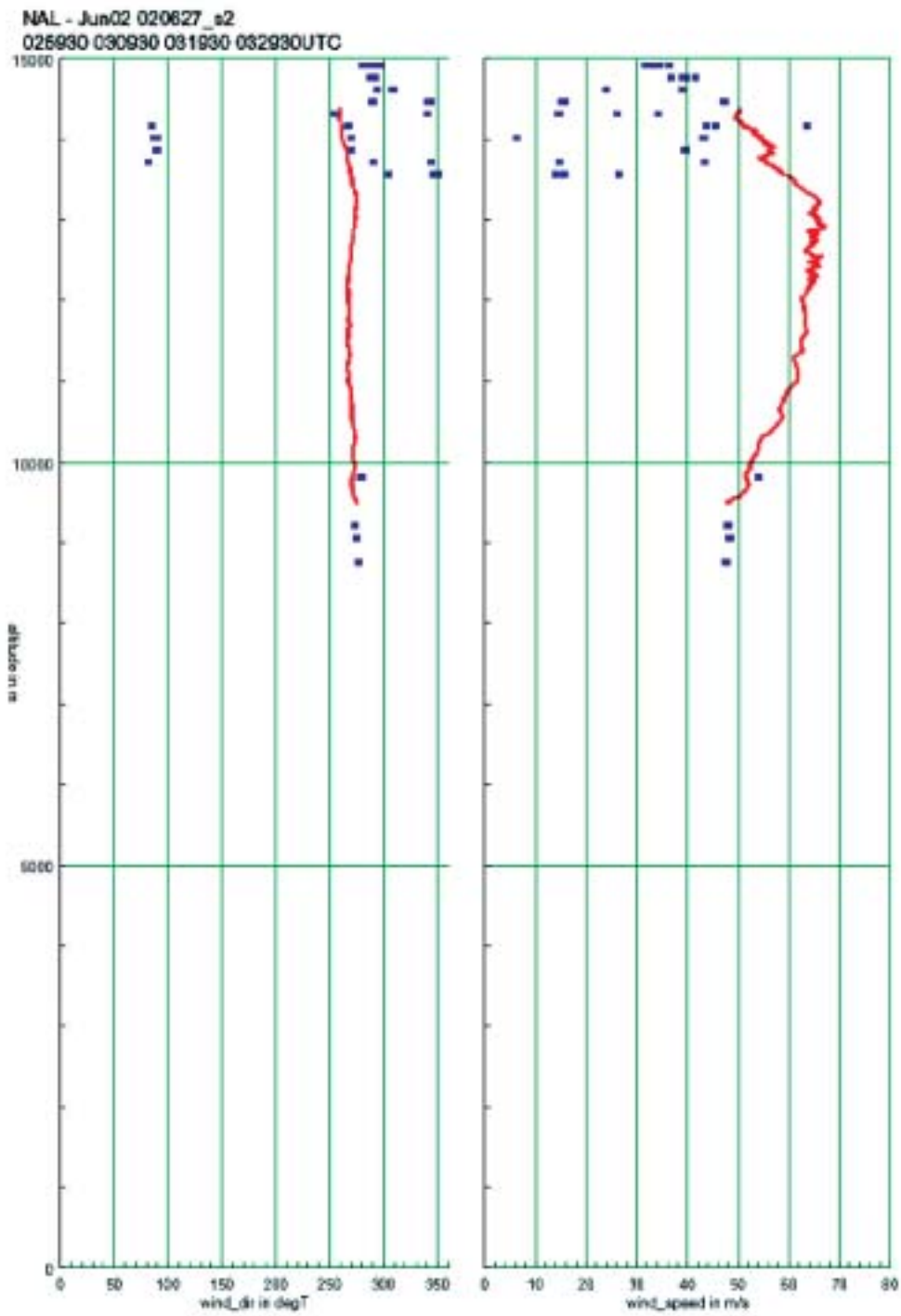


Figure 39: As Figure 32, but for flight segment s2 on 27 June 2002 between 030313UTC and 032433UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 025930UTC and 032930UTC.

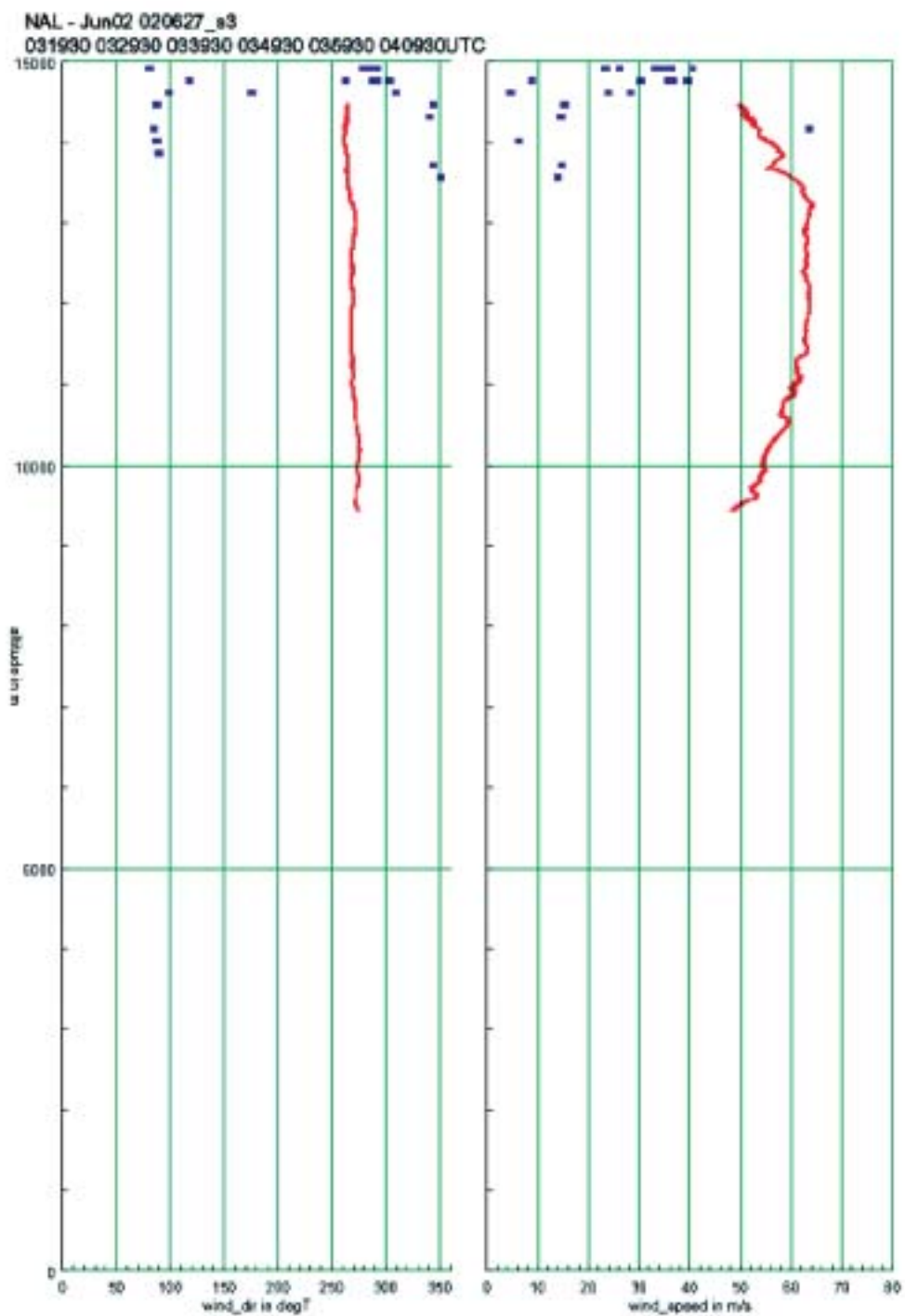


Figure 40: As Figure 32, but for flight segment s3 on 27 June 2002 between 032503UTC and 040310UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 031930UTC and 040930UTC.

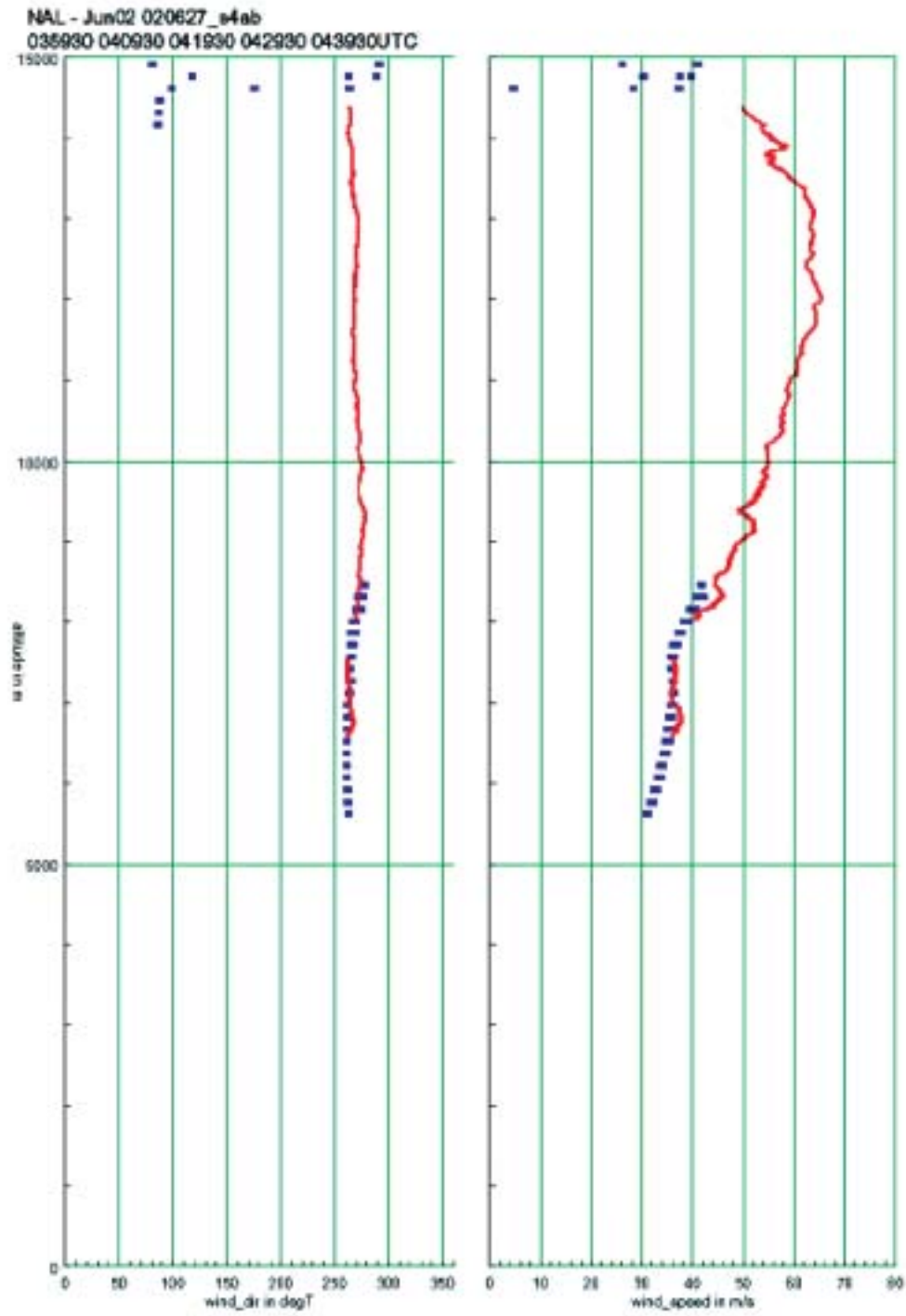


Figure 41: As Figure 32, but for flight segments s4a and s4b on 27 June 2002 between 040452UTC and 043638UTC and profiler measurements taken every 10 minutes between 035930UTC and 043930UTC.

5.4 Differential correction for the GPS data

As already outlined in Sections 3.4 and 4.2, the differential correction for the GPS data was not used for the final results, because the correction procedure did not improve the data enough to warrant its use and was also occasionally inducing errors and inconsistencies. To confirm the quality of the non-corrected data and compare it with differentially corrected data, some tests were performed and are described here.

Figure 42 and *Figure 43* shows plots of differentially corrected data versus differentially non-corrected data from the instrumentation test flight on 23 Jun 2002.

At the beginning of the altitude graph in *Figure 42*, between GPS seconds 14,400 and 14,500, it can be seen that the differentially corrected data (in red) suddenly jumps and then disappears altogether, while the non-corrected data (in blue) remains reliable. This is a typical manifestation of the problems with the GPS Base Station data as referred to earlier. As the software for the correction (C3NAV) is only available as a “black box”, it could not be established what causes this behaviour other than the assumption that there were GPS jamming trials in progress somewhere in the vicinity of Woomera.

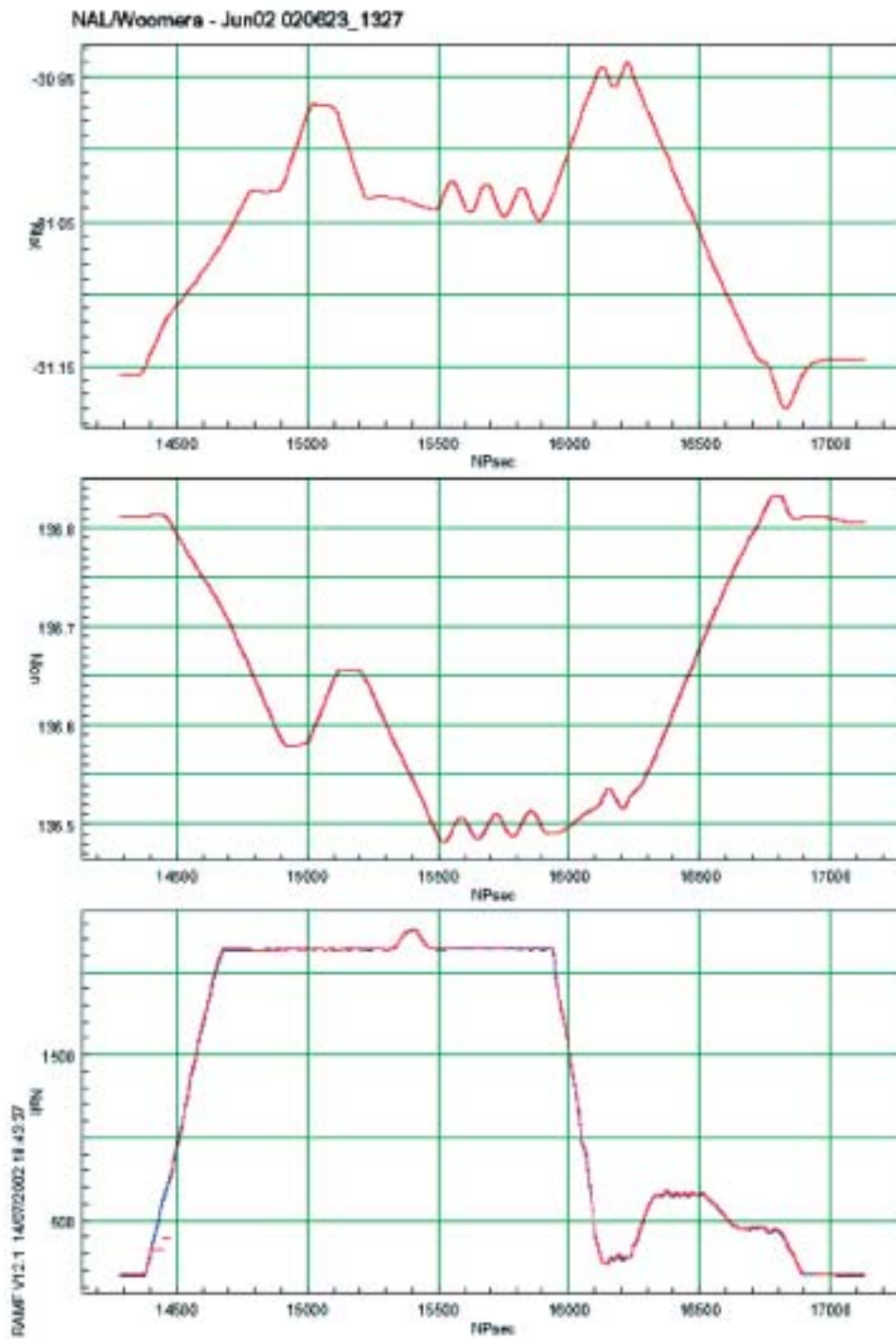
In *Figure 43*, the first and last part of the data was omitted, as these parts are obviously affected by random spikes and jumps in the differentially corrected data.

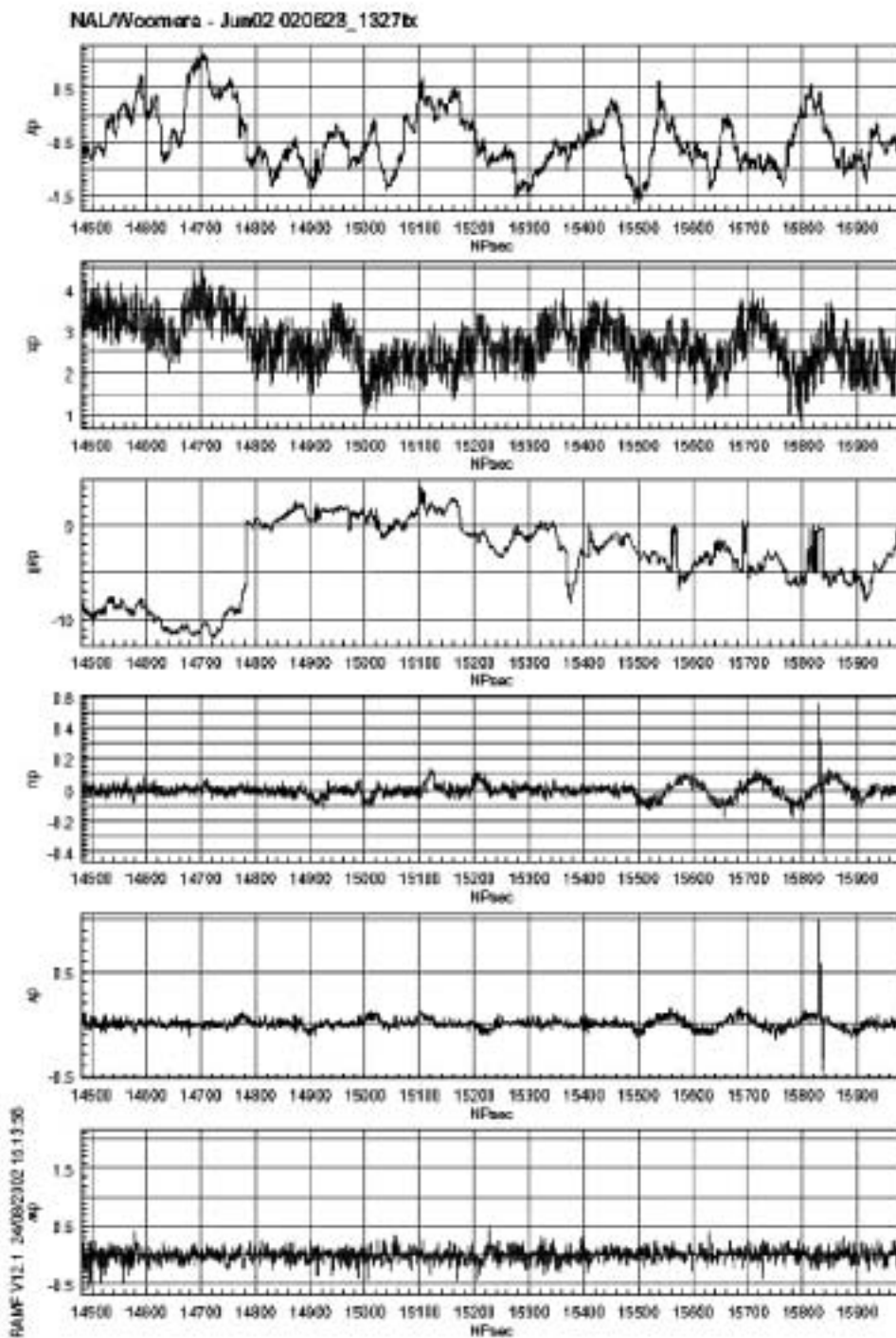
The plotted unaffected data shows excellent agreement. For position and altitude, the maximum error is around $\pm 5\text{m}$, for velocities around 1m/s . This is in accordance with the overall accuracies for the wind measurements as specified in Section 5.1.

Figure 44 shows similar data for the taxi and take-off phase of the flight on 24 June 2002. The same features are visible, with “jumps” caused by the differential correction. The differences for this flight segment are also in a similar order of magnitude.

Similar results were found for the other flights.

Finally, some the wind was computed for some segments of the flights using differentially corrected GPS data. The differences in the wind values to the ones computed with non-corrected data was found to be generally less than 0.2m/s .





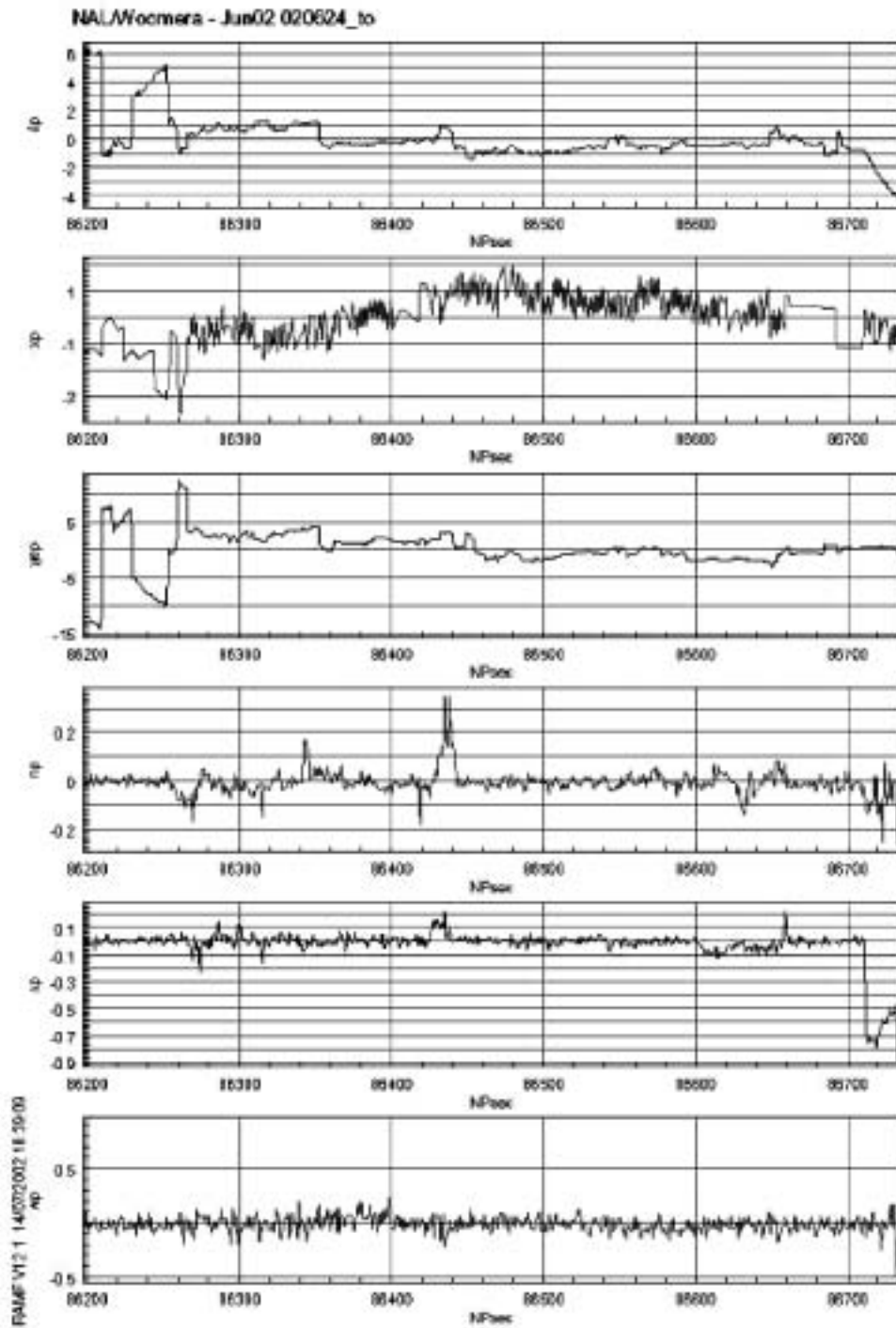


Figure 44: As Figure 43 , but for taxi and take-off phase of the flight on 24 June 2002. For explanations, see text.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank NAL for the opportunity to be involved in the exciting NEXST project. In particular, we wish to express our thanks to NAL's liaison person to us, Mr. Naoki Matayoshi. We admired the most competent way he dealt with all issues arising before and during the measurements.

Showa Aviation of Osaka acted as ARA's agent in Japan for this project. We wish to thank Mr. Hiroo Sasaki, the CEO of Showa Aviation, for his friendly effort in this matter.

The *Egrett* was based at the ARDU-Hangar at Woomera Airport making use of the infrastructure there. We wish to express our thanks to Mr. Peter Nikoloff for arrange this for us.

独立行政法人航空宇宙技術研究所報告1469号

平成15年8月発行

発行所 独立行政法人 **航空宇宙技術研究所**

東京都調布市深大寺東町7 - 44 - 1

電話(0422)40 - 3935 〒182 - 8522

印刷所 株式会社 **実業公報社**

東京都千代田区九段北1 - 7 - 8

© 2003 独立行政法人航空宇宙技術研究所

本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡下さい。

本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

