

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1356

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

村上 義隆 ・ 柳原 正明 ・ 稲葉 基之

1998年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

ABSTRACT	1
1. まえがき	1
2. 風計測データによる飛行可否判断の条件	3
3. 風計測データ及び飛行可否判断手法	3
3.1 地上風計測装置と判断手法	4
3.1.1 地上風計測結果	6
3.2 上空風計測装置と判断手法	6
3.2.1 上空風計測結果	9
3.3 ADS_IMU より算定した推定値	9
4. 計測データの解析・評価	16
4.1 上空風とADS_IMU 推定値	16
4.2 地上風とADS_IMU 推定値	18
5. 結論及び今後の課題	30
6. あとがき	30
参考文献	30



写真1 地上風計測高度6mをファイナルフレア中のALFLEX実験機

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*

村上 義隆*¹ 柳原 正明*² 稲葉 基之*³

Technique of Flight GO-NOGO Decisions and Results of Analysis Using Wind Measured Data in ALFLEX Flight Trials *

Yoshitaka MURAKAMI *¹, Masaaki YANAGIHARA *²
and Motoyuki INABA *³

ABSTRACT

The flight trials of the **ALFLEX** (Automatic Landing Flight Experiment) vehicle were successfully concluded on August 15, 1996, at Woomera Airfield in South Australia. The flight trials were held in winter under especially bad weather conditions such as cross winds and tail winds for the ALFLEX vehicle approaching runway 18. Therefore, wind measurement was extremely important. This paper describes the technique of making flight GO-NOGO decisions according to wind restrictions for ALFLEX trials based on both the wind speed data of **Real Time Vector Representation Equipment (RTVRE)** of surface wind and analysis of upper surface wind measurement data using OMEGA SONDE and GPS SONDE. It also compares these wind measurement results with the wind speed estimated using ADS and IMU sensors that were onboard the ALFLEX vehicle.

Keywords: Wind Measurement, Flight Testing

概 要

ALFLEXの自動着陸実験は南オーストラリア州、ウーメラ飛行場において実施され、1996年8月15日迄に計画した飛行実験を全て成功裡に終了した。特に実験を実施した期間は実験機の進入方向RWY18に対して殆どが横風背風進入となる悪条件の冬季であり風計測の持つ意味はきわめて重要なものとなった。本稿ではALFLEX設計制限風の判断に地上風実時間ベクトル表示装置(RTVRE)、上空風計測装置(OMEGA SONDE, GPS SONDE)を用いて飛行可否判断(GO-NOGO)を行った手法について述べる。又計測したこれらの風データと実験機から計測、算定された風推定値との解析、比較結果について述べる。

1. まえがき

航空宇宙技術研究所(NAL)と宇宙開発事業団(NASDA)は共同して無人の有翼往還機HOPEの研究を進めている。その一環として、HOPE本機の自動着陸技

術の確立を目指した小型自動着陸実験(ALFLEX)が南オーストラリア州、ウーメラ飛行場において実施され、1996年5月から8月迄に計画した飛行実験を全て終了した。自動着陸実験では、母機ヘリコプタにより合体形態で懸吊された実験機は離陸後高度1500mまで上昇して水平飛行に移行し、8字の周回飛行を1回行い、進出経路で制御ON、1本吊りの形態に移行し、最終進入経路RWY18滑走路進入端から2700m、高度1500mの位置で分離が行なわれた(図1)。ALFLEXの飛行実験実施においては機体に対する着陸時(フレア、接地)の風の影響が大きいため地上風の制限風が設けられた。この事により、

* 平成10年2月26日受付(received 26 February 1998)

* 1 飛行実験部 (Flight Research Division)

* 2 制御部 (Control Systems Division)

* 3 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

実時間でその制限風が判断できる装置が自動着陸実験を実施する上で必要条件となり、地上風実時間ベクトル表示装置(RTVRE)が開発された。そして実験は無風(Wind Calm:1kt以下)、設計制限風の60%以内をフェーズ1とし、100%以内、或いは100%を越える場合をフェーズ2として、段階的に条件緩和を行い実験を実施する計画が設定された。又上空風は高度1500mから地上までの制限風が設けられ、上空風計測装置(OMEGA SONDE, GPS SONDE)を用いて実験機の分離約1時間前の風を計測して、計測したデータが100%制限風内にある事を確認の上、実験実施可能かどうか(以下GO-NOGO)の判断を行った。特に実験機分離直前の判断においては、地上風実時間ベクトル表示装置が適切、且つ的確な飛行実験を効率良く実施するために効果的に用いられた。本稿においては、これらの計測データを用いてALFLEXの設計制限風に対して飛行可否判断を行った手法について述べる。又ALFLEX自動着陸実験に用いた風計測データの妥当性の検証のため、実施された13回の着陸実験について計測解析されたこれらの風データと実験機に搭載されたエアデータセンサー(ADS)、慣性計測装置(IMU)で計測推定された風(以下ADS_IMU)との比較を定常風について行った。これらの結果得られた成果と今後の飛行実験計画への反映点について報告する。

記号

H 高度(m)

H_m	SONDE 計測高度 (m)
K_{Hm}	SONDE 計測高度制限風関数
L	ALFLEX のスケール比
n	線形補間数
S_{Li}	風速の線形補間値
S_n	計測された風速 (m/sec)
t	時刻 (sec)
t_n	計測された時刻 (sec)
$U_{6.1}$	高度 6.1m (20ft) での全天候着陸システムの要求値 (MIL-F-9490D)(m/s)
U_{hml}	SONDE 計測高度における計測値方位の100%制限風 (m/s)
$U_{0.6hml}$	SONDE 計測高度における計測値方位の60%制限風 (m/s)
u	高度 6.1m (20ft) での ALFLEX の設計制限値(m/s)
u_{head}	高度 6.1m (20ft) での向風制限風 (m/s)
u_{tail}	高度 6.1m (20ft) での追風制限風 (m/s)
u_{cross}	高度 6.1m (20ft) での横風制限風 (m/s)
u_{hl}	SONDE 計測高度での向風制限風 (m/s)
u_{tl}	SONDE 計測高度での追風制限風 (m/s)
u_{cl}	SONDE 計測高度での横風制限風 (m/s)
U_w	滑走路座標系における前後方向の風速 (m/s)
V_w	滑走路座標系における左右方向の風速 (m/s)
W_w	滑走路座標系における上下方向の風速 (m/s)
	地上高 6.1m (20ft) 滑走路座標系における風向 (rad)

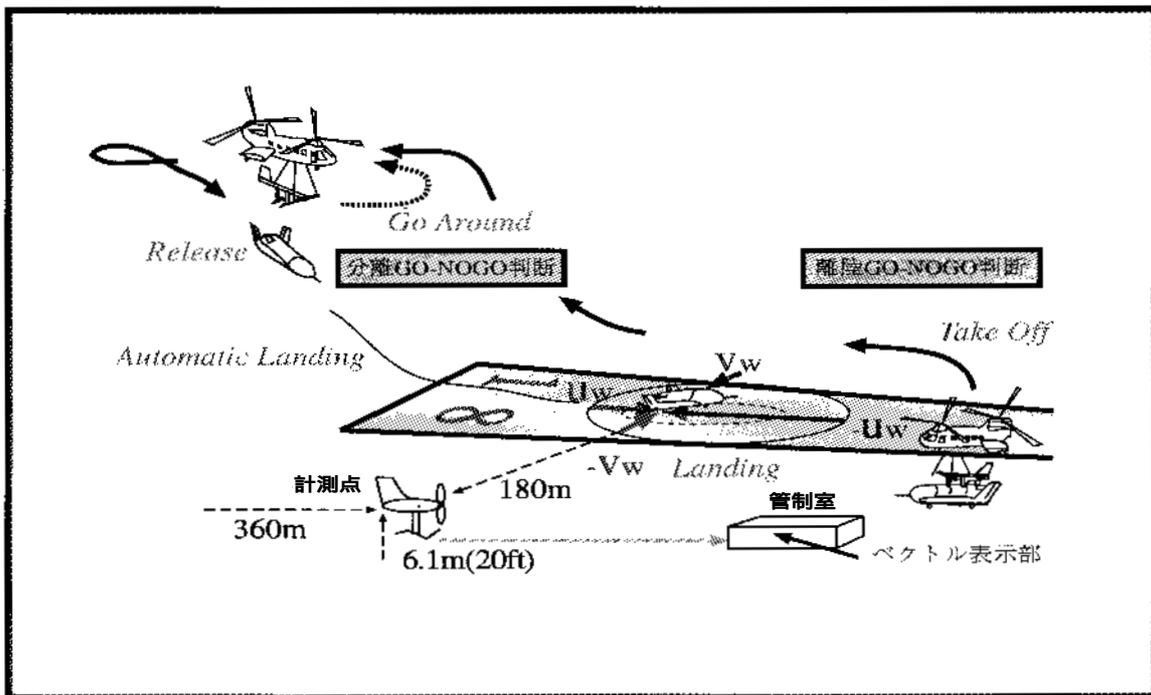


図1. 自動着陸飛行実験と地上風計測の概要

h	SONDE 計測高度滑走路座標系における風向 (rad) 地上高 6.1m (20ft) での真北に対する風向 (真方位) (deg)
h	SONDE 計測高度での真北に対する風向 (真方位) (deg)
RWY	ALFLEX 進入方位 (真方位) (deg)

略 語 等

ADS	Air Data System
BOM	Bureau of Meteorology
FCF	Flight Control Facility
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
LT	Laser Tracker
MLS AZ	Microwave Landing System Azimuth
OMEGA	Omega
RWY18	Using Runway 180°
SOWIND	Optical Theodolite Equipment

2. 風計測データによる飛行可否判断の条件

最終的な実験機分離の飛行可否判断は実験機の分離, 着陸進入, フレア, 接地時における風条件により決まる。特に着陸時において実験機が風の影響を受けるのは接地時の速度, 姿勢, 沈下率である。ALFLEX実験機は機体の特性上, 横風をクラブのみで修正し横経路角 (MLS AZ) を保ち接地するように制御則がつけられている事から, 制限値以上の横風によるタイヤのバースト, 脚の破壊に対しては注意を払う必要がある。又上空風については,

ALFLEX 実験機が無推力であることから前後左右の強風に対しては実験機の自動着陸時の経路角制御が困難になる。横風追風の多い気象条件の中, ALFLEXの自動着陸実験は風条件緩和を段階的に行い実験を実施する計画が設定された。これらの飛行実験を効率良く適切に行うため下記飛行条件を設定し, 実験実施可能かどうかの GO-NOGO 判断を行った。

- 1) 地上風は, フェーズ1において地上風計測装置で表示される制限風の60%以内, フェーズ2においては100%以内で行う。
- 2) 上空風は1時間前に放球されたSONDEの計測値を用いて解析された制限風の100%以内で行う。
- 3) 実験機離陸前にはSONDEで計測された地上から1500mまでの風データを用いてシミュレーションを行い, 飛行可能かどうか毎回確認する。
- 4) 地上風計測値及び上空風計測値が設計制限風を一時的に逸脱する(100%以上)場合はシミュレーションの結果により判断する。

3. 風計測データ及び飛行可否判断手法

ALFLEXの飛行実験における風計測データは地上風実時間ベクトル表示装置 (RTVRE), 上空風計測装置 (SONDE) 及び飛行中に得られたADS_IMUより計測算定された推定値の3つにより構成される。この内飛行可否判断に用いたのは地上風実時間ベクトル表示装置と上空風計測装置の風計測データの2つの風計測データである。実験機で計測して得られた推定風は4.計測データの解析評価において比較・検証を行うのに使用している。それぞれの計測精度は表3に示す。

表3 風計測装置の計測精度

地上風 (Real Time Vector Representation Equipment of Surface Wind)	
RS232C Output Value	
Wind Velocity	±0.1 m/s (Range: 0~20 m/s)
Wind Direction	±1.0 deg (Range: 0~360 deg)
上空風 (Upper Surface Wind Equipment)	
OMEGA SONDE	
Wind Vector	1.0 m/s (Sampling Rate: 10 sec)
GPS SONDE	
Wind Vector	0.1 m/s (Sampling Rate: 0.5 sec)
実験機 (Air Data System (ADS))	
CAS	±2.1 m/s (Range: 25.7~103 m/s)
Angle of Attack	±0.3 deg (Range: -25~25 deg)
Side Slip Angle	±0.3 deg (Range: -25~25 deg)

3.1 地上風計測装置と判断手法

地上風実時間ベクトル表示装置のハードは風向風速発信器, 距離延長器(モデム), 風向風速指示器(距離延長復調器, RS232C 出力を追加改修), 実時間ベクトル表示部により構成する。本装置は地上走行試験, 懸吊試験, 自動着陸のフェーズ1・フェーズ2の飛行実験期間すべての試験ケースにおける地上風のデータを収録, 自動着陸実験の全試験ケースにおいて, ALFLEX 設計制限風に対する飛行実験実施のGO-NOGO判断に使用し効果的であった。

本装置は実験機のノミナル接地点近傍の地上風を計測する装置で, 滑走路中心高6.1m(20ft)の高さの風向風速を4Hzのサンプリング周波数でデータを取り込む事ができる。風向風速発信器はRWY18の滑走路進入端より内側に360m, 滑走路中心線より西真横180mの位置に設置された(図1)。ALFLEX 設計制限風は MIL-F-9490D の定常風の算定式より, HOPE 本機に適用する全天候着陸システムの要求値 向風12.86m/s(25Kt), 追風5.144m/s(10Kt), 横風7.716m/s(15Kt)を満足するようにALFLEXのスケール比L(0.37)を考慮した制限風の式(1)が設定された。そして高度6.1m(20ft)滑走路全方位(真方位)の設計制限風は NASA-CR-114401 斜め方向の風の近似式(2)を用いて, (1)式から算定された向風, 追風, 横風の制限風を代入し100%, 60%制限風が設定された。

$$u = \sqrt{L} U_{6.1} (0.46 \log \frac{H}{L} + 0.64) \tag{1}$$

$$U_{6.1} = u_{cross} + \frac{1}{2} (u_{head} - u_{tail}) \cos \theta + \frac{1}{2} (u_{head} + u_{tail} - 2u_{cross}) \cos^2 \theta \tag{2}$$

$$U_{0.6} = 0.6 U_{6.1}$$

ここで $\theta = (- RWY)_{180}$

これらの設計式より得られた各高度に対する制限風プロフィール, 制限値を図3.1-1, 表3.1に示す。地上風の設計制限風に用いたのは地上高6.1mの制限風である。式(1)において, u は地上高6.1mにおける向風 u_{head} , 追風 u_{tail} , 横風 u_{cross} の設計制限風を表し, $U_{6.1}$ はRWY18滑走路進入方位($\theta_{RWY} = 185.816^\circ$)に対する斜め方向の100%設計制限風を表す。本装置は表示した上記全方位の制限風上に取り込んだ風向風速の生データの1分間平均値を実時間でベクトル表示(図3.1-2, 上の図)し, 滑走路ノミナル接地点近傍の地上風が実験機の制限風内に有るか否かを実時間で判断できる。同時に過去30分の履歴を表示させる事によって将来の予測が出来るようになっている。又本装置は4Hzの生データを最大3時間記録する事が可能であり, 実験中及び終了後タイムヒストリ表示

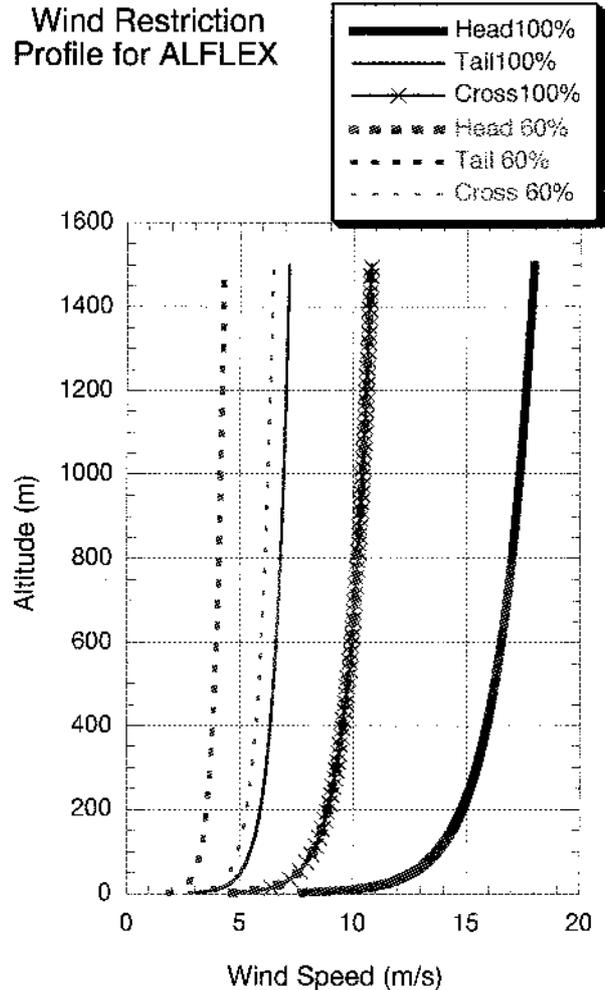


図3.1-1 設計制限風プロフィール

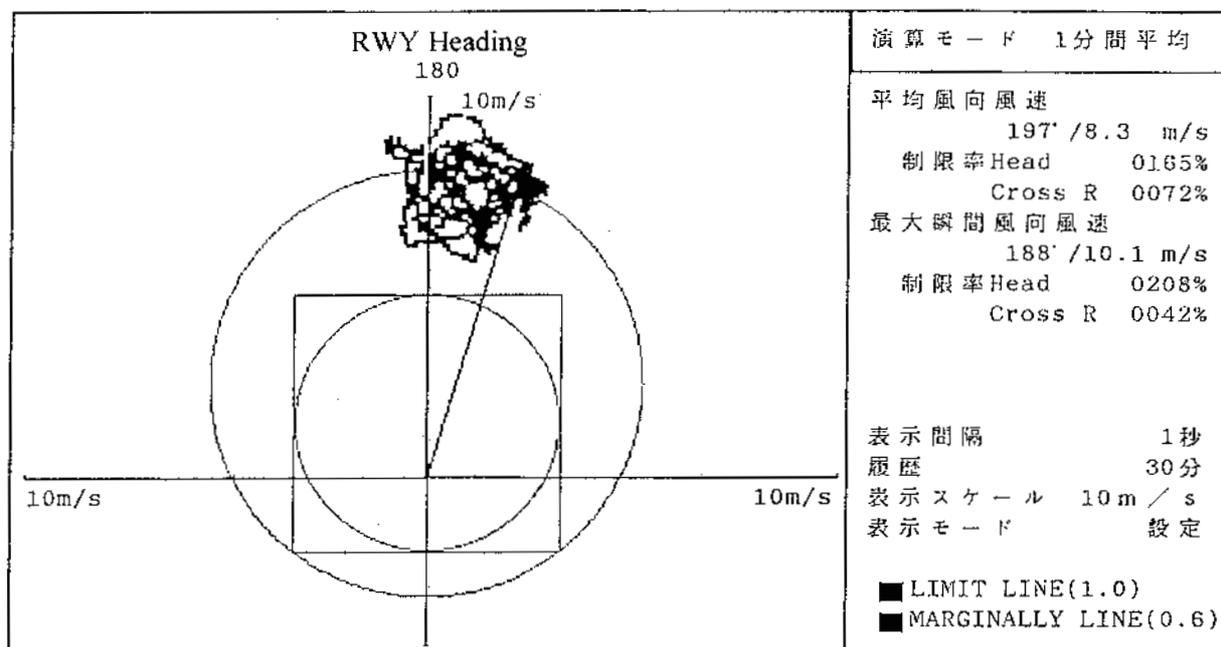
(図3.1-2, 下の図), プレイバックにより結果の再現及び評価, 解析を行う事ができる。ここで本装置を用いた飛行可否判断の具体例を図3.1-2, 上の図を用いて以下に示す。図の上方(RWY Heading 180)が実験機の進入方位であり, 実験機はクロスパーの中央にあり, 右前方から約10m/sの風を受けて進入を行っているようすを表している。内側の円が60%の制限風, 外側が100%の制限風である。外側の円の上方に示す複数の点(履歴)のように, このF004のケースは向風の強い日で, 時折向風設計制限

表3.1 設計制限風

ALT(m)	100% (m/s)			60% (m/s)		
	Head	Tail	Cross	Head	Tail	Cross
6.1	9.38	3.75	5.63	5.63	2.25	3.37
100	13.75	5.50	8.25	8.25	3.30	4.95
500	16.27	6.50	9.76	9.76	3.90	5.85
1000	17.35	6.94	10.41	10.41	4.16	6.24
1500	17.98	7.19	10.79	10.79	4.31	6.47

Vector Expression of Surface Wind (F004)

分離時刻 14:11:42



Time History Expression of Surface Wind (F004)

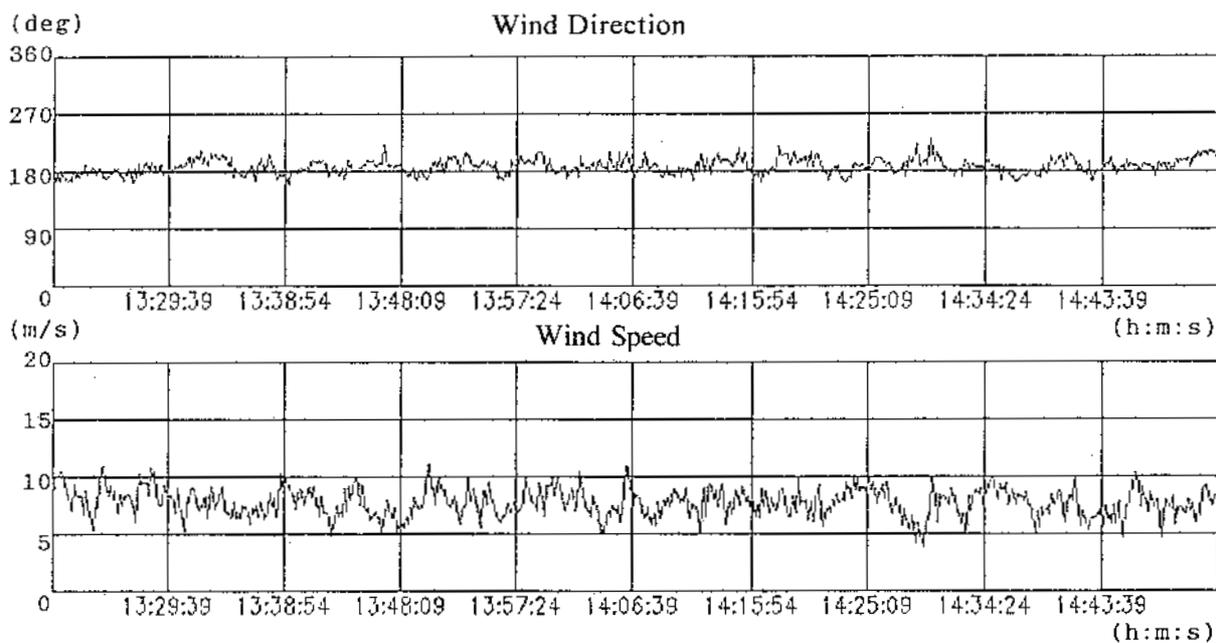


図 3.1-2 地上風実時間ベクトル表示装置画面 (F004)

風を越える日であった。しかしこれらの履歴データは10m/s付近で安定している事を示しており、過去30分間のデータ分布中心は100%以内に入っていた。従って分離の機会はあると判断し、実験機の離陸はGOになった。周回・懸吊飛行時には制限風を越えたが、分離直前に制限風内に入ったので分離を行った。このように本装置を用いた事により適切、且つ的確な飛行実験が効率よく実施できたと云える。

3.1.1 地上風計測結果

表3.1.1に13回のフライトで得られた地上風計測結果を示す。この表はALFLEXの自動着陸実験時における分離から接地までと進入高度10mから接地まで計測した地上風を u_w, v_w 成分に分離を行い、その平均値を制限風に

表3.1.1 地上風計測結果

FLT No.	実験機分離から接地までの平均値		実験機進入高度 10m からの平均値	
	Uw, Vw 成分 (m/s)	制限風に対する割合(%)	Uw, Vw 成分 (m/s)	制限風に対する割合(%)
F101	H4.1	44.1	H3.0	32.0
	R1.8	31.2	R0.6	10.0
F002	H3.7	39.8	H5.4	58.0
	R2.6	45.8	R0.9	17.0
F103	T1.5	40.0	T1.9	50.0
	R2.6	46.1	R3.1	55.0
F004	H7.9	84.6	H9.1	98.0
	R2.4	43.1	R1.9	34.0
F005	T5.6	149.7	T5.7	154.0
	R3.6	64.8	R3.3	61.0
F006	T2.7	71.3	T2.8	75.0
	R3.0	52.8	R4.2	77.0
F007	T2.4	64.6	T1.4	38.0
	R1.8	31.3	R2.2	39.0
F008	H3.1	32.5	H3.7	40.0
	R5.5	97.8	R4.9	87.0
F009	H6.1	65.2	H3.6	39.0
	L1.0	17.2	L0.4	6.0
F010	T0.6	15.9	H0.5	12.0
	L0.0	0.7	L0.2	2.6
F011	T5.1	136.0	T4.0	107
	R2.1	36.6	R3.0	54.0
F012	H3.1	33.0	H2.6	28.0
	L0.1	1.0	R0.1	1.0
F013	H6.4	70.0	H6.3	68.0
	R0.8	14.0	R0.9	16.0

Note; H.....Head Wind, T.....Tail Wind,
R.....Right Cross Wind, L.....Left Cross Wind

対して割合を示したものである。この結果より、13回の自動着陸は殆どが西よりの右横風の条件で実施されている。そして進入高度10mから接地までの平均値を見るとF004, F006, F008のように向風、横風、追風制限風の100%に近い実験を実施できたことが判る。又F005, F011においては100%を越える条件緩和の着陸実験を実施する事ができた。これらの結果からALFLEXの自動着陸における風に対する性能データは機体の対称性を考慮すると十分取得できたと云える。

3.2 上空風計測装置と判断手法

上空風計測は豪州気象庁BOM(Bureau of Meteorology)の器材及び労務借り上げ契約により実施した。その器材はVaisalaの器材を使用しており、システム構成は図3.2-1(参考文献7)より引用)に示す。採用したSONDEの種類はOMEGA SONDEとGPS SONDEであり、基本的に飛行1時間前にOMEGA SONDE、着陸後10分程度後にGPS SONDEを放球(写真2)してデータを計測した。計測精度の高いGPS SONDEを飛行前に採用できなかったのは放球前及び上昇中に衛星ロックオフが発生し、データが得られなくなる場合があり、飛行前の実験機離陸可否判断の器材として信頼が得られなかった理由による。計測された地上から3000m(10000ft)までのデータはウーメラ航空気象台に設置されたパソコンに取り込まれ解析処理(写真3)され、高度方向の風向風速としてプリンタとフロッピーに出力された。これらのデータはALFLEXの管制室(FCF)に運ばれた。フロッピーに記録され、管制室に持ち込まれた上空風データは、ノート型パソコン(Mac Power Book)にインストールされた表計算ソフトを用いて、地上風にも用いたALFLEX制限風の設計式から、下記の手法により、地上から1500m(5000ft)上空迄の風計測値のベクトルに対して100%、60%制限風内に有るか否かを解析し、風プロファイルを作成、飛行可否の判断に用いられた。SONDEで計測された各高度における向風、追風、横風の設計制限風は以下の式(3),(4),(5)による。又その制限値は図3.1-1、表3.1の通りである。

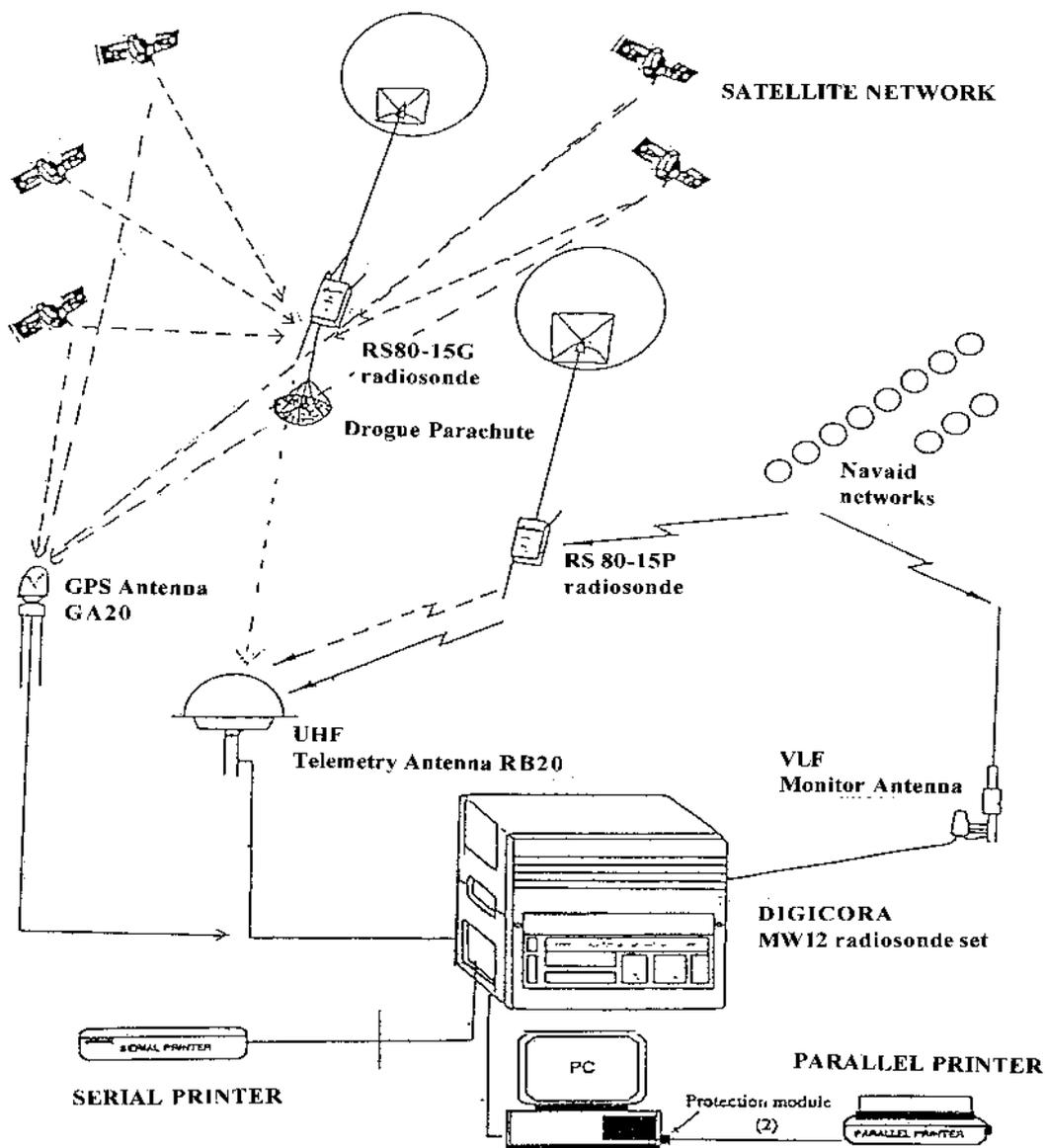
$$u_{hl} = \sqrt{L} U_{6.1h} + K_{Hm} \quad (3)$$

$$u_{tl} = \sqrt{L} U_{6.1t} + K_{Hm} \quad (4)$$

$$u_{cl} = \sqrt{L} U_{6.1c} + K_{Hm} \quad (5)$$

ここで $K_{Hm} = 0.46 \log\left(\frac{H_m}{L}\right) + 0.64$

これらの計測された高度における制限風を下記斜め方向



Vaisala GPS receiver system consists of a local GPS antenna and a GPS processor card. The local signal is connected from the antenna to the GPS processor. The remote GPS signal is detected in the radiosonde GPS receiver and transmitted in digital form to the ground station.

図3.2-1 上空風計測装置 (SONDE) のシステム構成

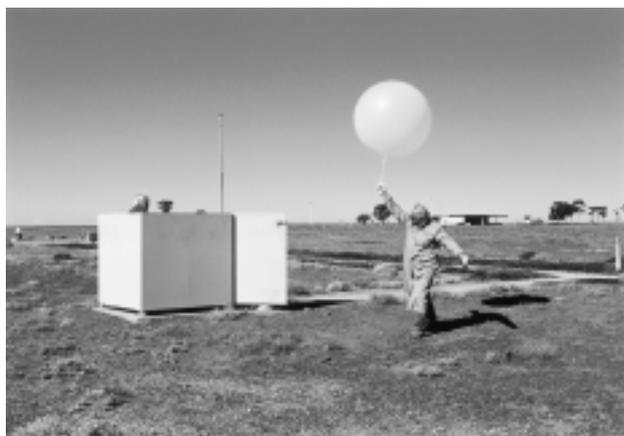


写真2. GPS SONDE 放球直前の様子



写真3. 上空風データ収録解析処理中のBOM内の様子

の近似式(6)に代入して、計測値の単一風向に対して設計制限風を求めた。

$$U_{hmi} = u_{ci} + \frac{1}{2}(u_{hi} - u_{di})\cos \theta_h + \frac{1}{2}(u_{hi} + u_{di} - 2u_{ci})\cos^2 \theta_h \quad (6)$$

$$U_{0.6hmi} = 0.6U_{hmi}$$

$$\theta_h = (\theta_h - RWY) 180$$

(6)式で求めた100%と60%の制限風と計測値を地上から1500mまで高度方向にプロファイルを描いて比較する。この様にSONDE計測値の風向(単一ベクトル)に対して制限風を算定し、2次元プロファイルにより計測データと比較しGO-NOGO判断を行った。3次元プロファイルも試みたが前者の方が迅速明解の点で優れており、2次元プロファイルを採用した。

計測した飛行前後のデータのトレンドとこの手法により実際に飛行可否判断を行った代表的な例F101を図3.2-2に示す。図中、上のトレンドに見られるように飛行前後の上空風の計測はいずれもSOWIND(写真4)との併用方式としている。このSOWINDとSONDEとのトレンドは、計測値の風向、風速をそのままプロットしてGO-NOGO判断に用いているSONDEデータの信頼性を確認すると、飛行前後の風の変化傾向を把握するために行った。ここで実際GO-NOGO判断を行った具体例について図3.2-2下の図の2つのウインドプロファイルを用いて示す。左の図がトライアルGOを行ったF101(初飛行)の場合で、OMEGA SONDEの地上から1500mまでの計測値が100%、60%の制限風より内側にあることが良く判る。一方右側の図は計測値が100%の制限風を越えており、このケースの場合はNOGOとなった。



写真4. Optical Theodoliteを用いた上空風計測・記録の様子

3.2.1 上空風計測結果

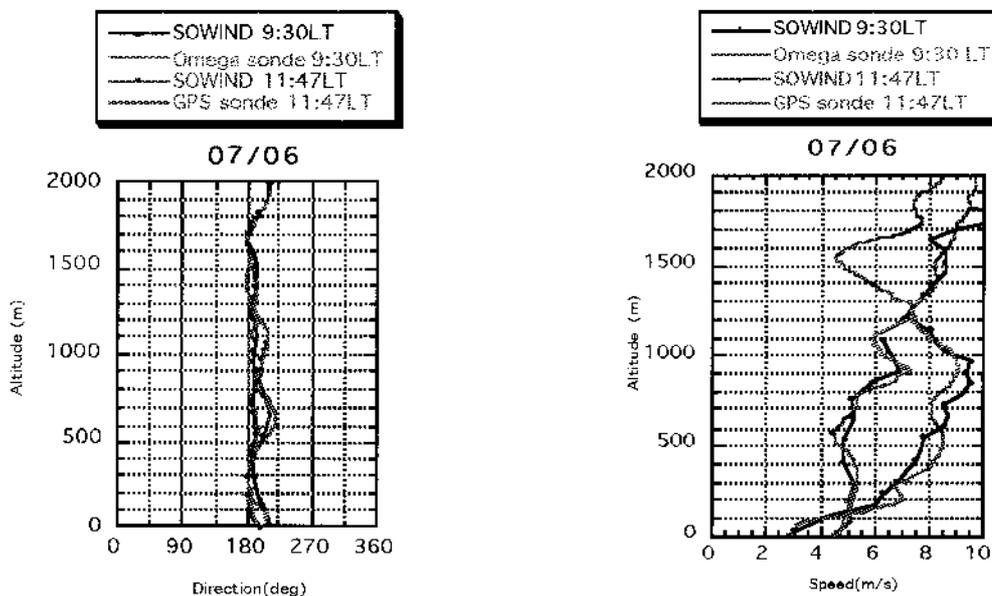
上空風を用いてGO判断を行った13フライト全ての飛行前後のプロファイルを図3.2.1-1~7に示す。ここで、飛行前に実験機離陸のGO-NOGO判断に用いたSONDEはOMEGA SONDEである。そして着陸後はGPS SONDEを使用した。しかし、図3.2.1-3、F006の着陸後のデータがOMEGA SONDEのプロファイルになっていることから判るように、このケースの場合は着陸後GPS SONDE放球で衛星ロックオフによる計測不良により、やむなくOMEGA SONDEに切り換えて計測を行った。この事は自動着陸実験に入る前、事前にSONDEの評価試験を行った結果を反映し、計測精度の高いGPS SONDEをあえて実験シーケンスに直接影響のない着陸後に採用したことが間違っていなかったことを証明している。

計測されたSONDEデータの解析で注意すべき点はいくつかある。図3.2.1-5、F101着陸後のケース高度500m~800m間のプロファイルが示すように、計測値が風速0.5m/s以下の場合、アルゴリズム(BOM)の中で風向、風速は0度、0m/sと定義されてしまう。この事により風向に不連続点が生じるので線形補間で補う必要がある。

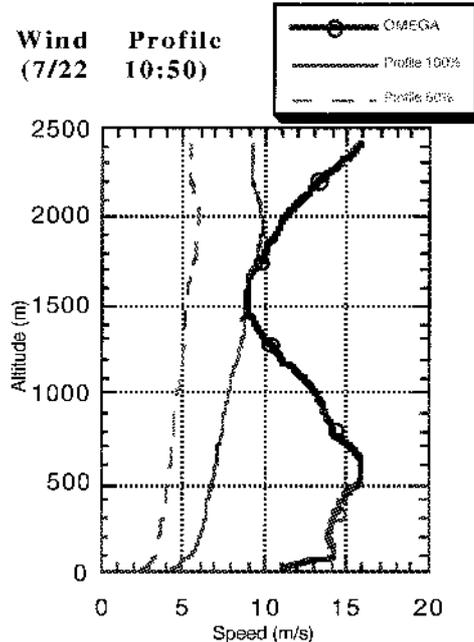
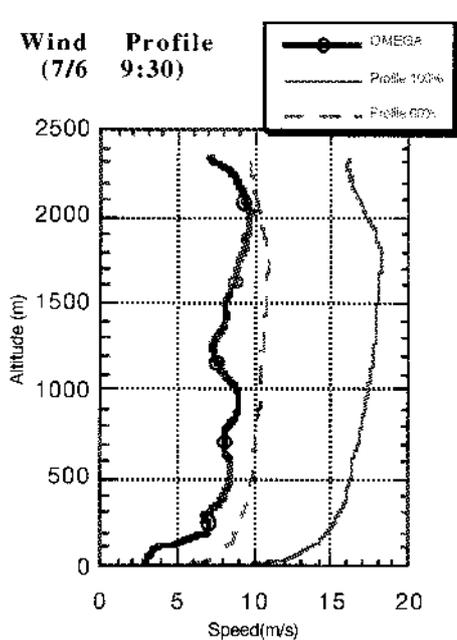
もう一点は計測された低高度(0~100m)のSONDEデータは信頼性が低いといえる。それはF004、F005、F008、F012、F013の飛行前のOMEGAのプロファイルにあらわれている。原因はSONDEのシステムとそのアルゴリズムにあると考えられる。従って上空風データの低高度における疑わしき制限風逸脱の場合(図3.2.1-3、F005)計測された上空風データを用いたシミュレーション結果により、制限風を逸脱した場合でもNOGOとは判断せず、計測中の地上風のデータと比較し、総合的にGO-NOGOの判断を行った。実験期間中、SONDE評価及びGO-NOGO判断の為に放球、上空風計測はSONDE評価試験で15回、自動着陸飛行実験で27回実施された。

3.3 ADS_IMUより算定した推定値

ADS_IMUからの風推定は機体対気速度=機体慣性(対気)速度-大気擾乱(風速)なる関係式を用いて風を推定している。機体の対気速度はADS出力の静圧、動圧と機体外気温度を用いて真対気速度を求め、それをADS出力の迎角、横滑り角を用いて機体座標成分のかたちで表す。一方の機体慣性速度はIMU出力の機体加速度、機体角速度及び機体姿勢角とLTより得られた機体位置に対してカルマンフィルタを適用する事により、同じく機体座標成分として得られる。これらの差をとれば大気擾乱(風)の速度が機体座標成分のかたちで推定され、それをIMU出力の機体姿勢を用いて滑走路座標成分に変換する。



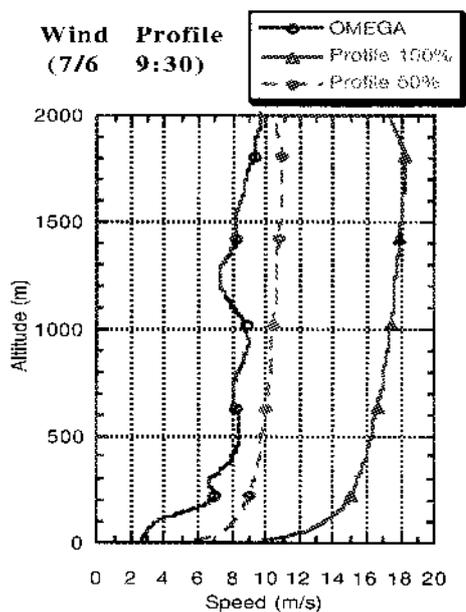
Trend of Upper Surface Wind (F101)



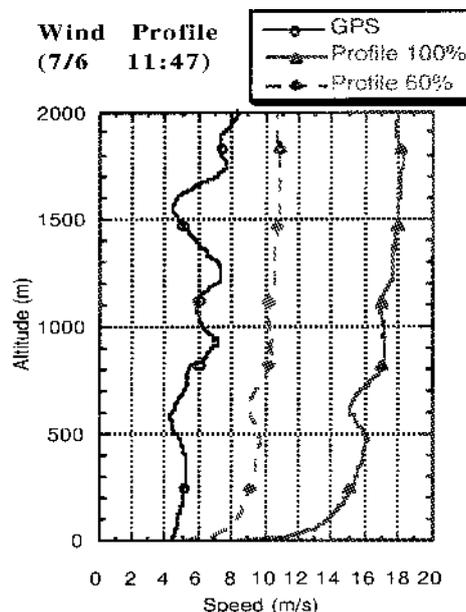
Wind Profile of GO Decision (F101)

Wind Profile of NOGO Decision

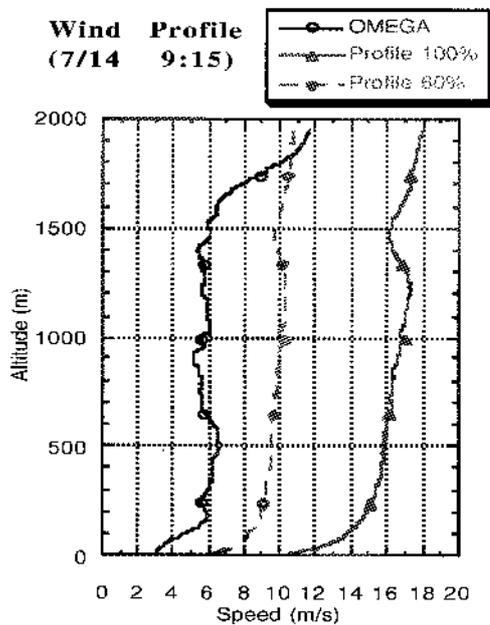
図 3.2-2 飛行前後上空風のトレンドと飛行可否判断手法プロファイル



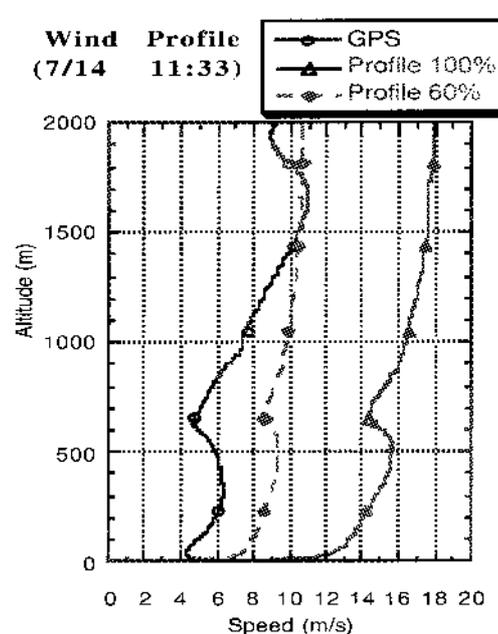
Before Release (F101)



After Landing (F101)

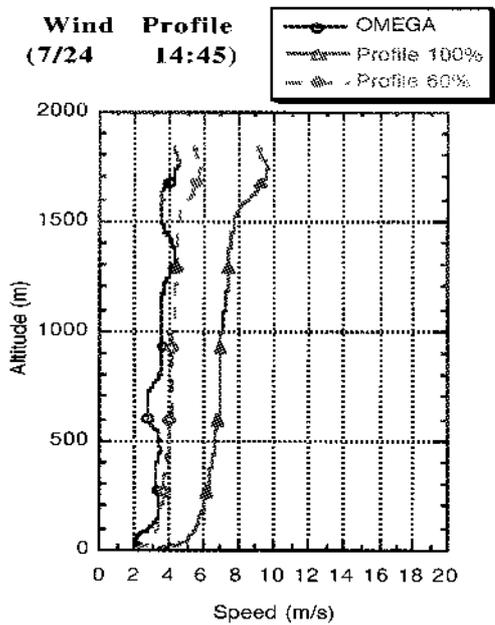


Before Release (F002)

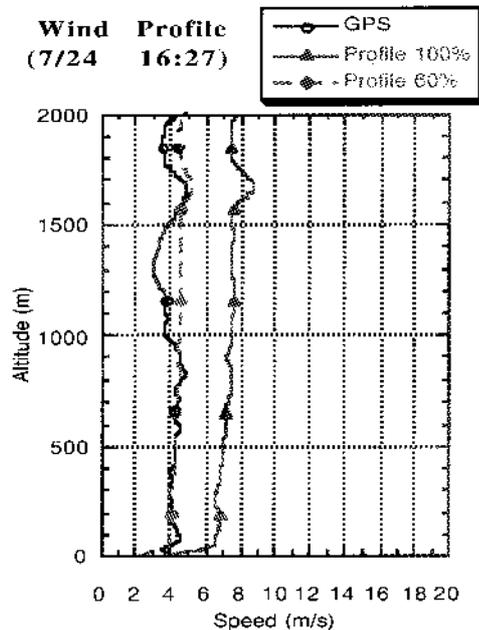


After Landing (F002)

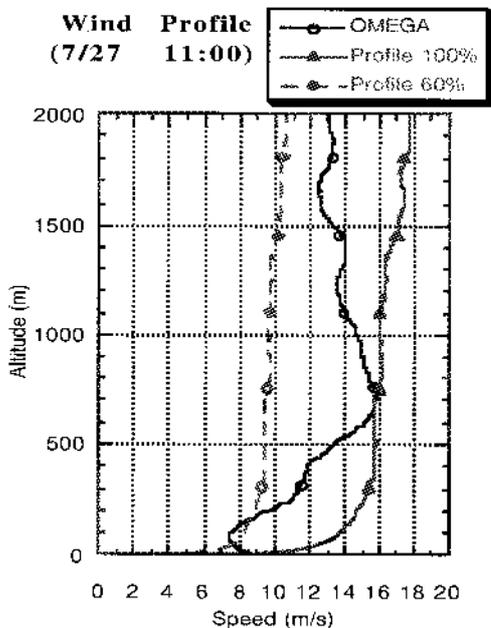
図 3.2.1-1 飛行前後の上空風プロファイル (F101,F002)



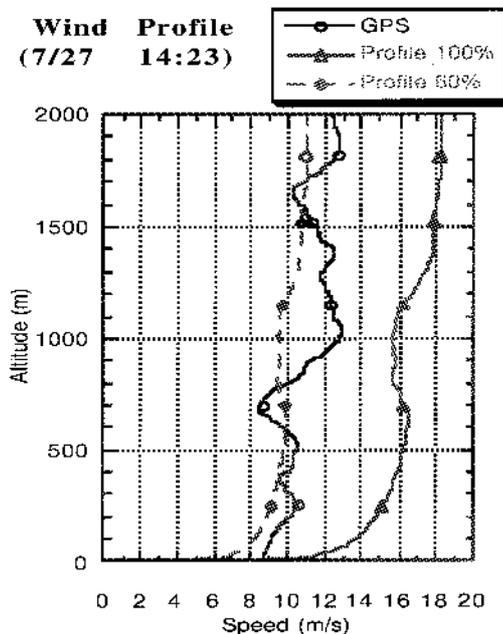
Before Release (F103)



After Landing (F103)

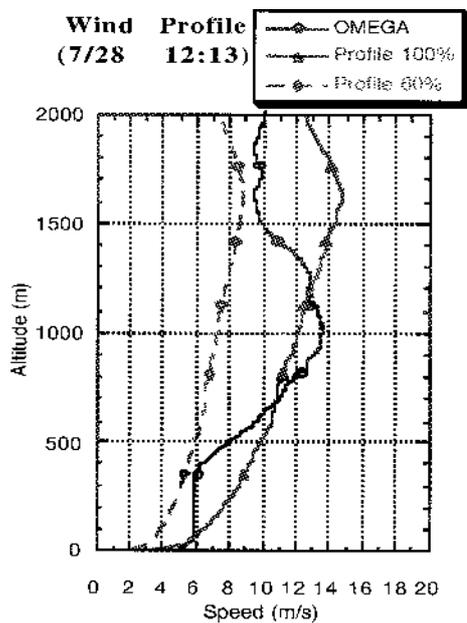


Before Release (F004)

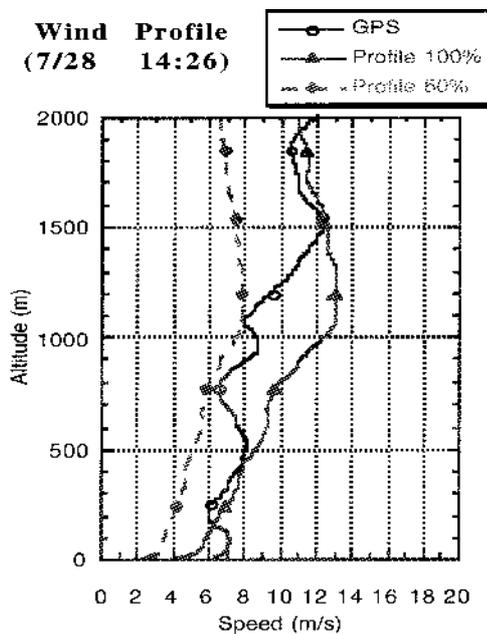


After Landing (F004)

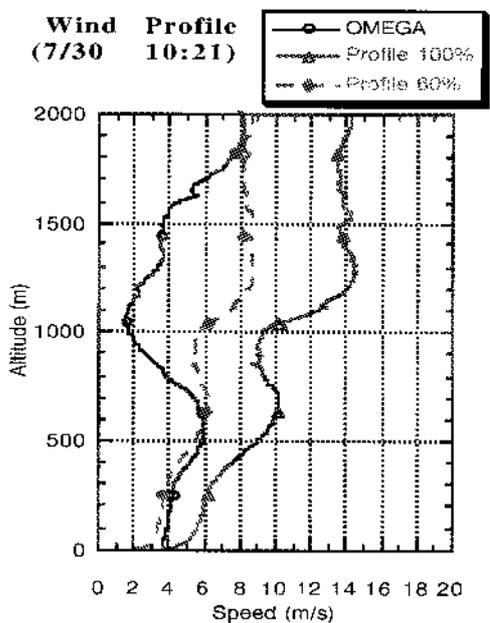
図 3.2.1-2 飛行前後の上空風プロファイル (F103,F004)



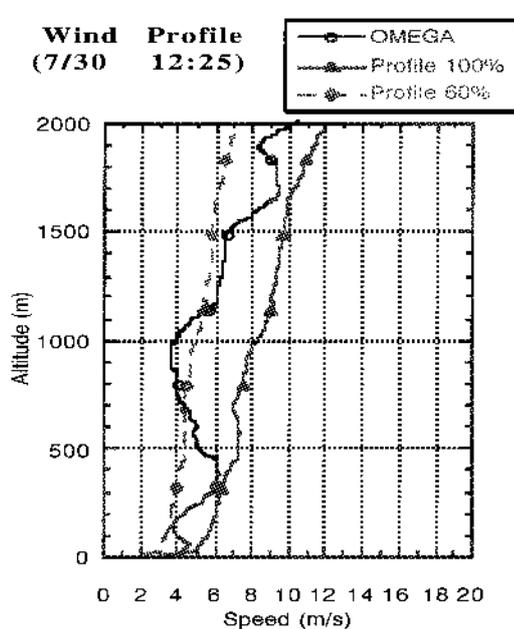
Before Release (F005)



After Landing (F005)

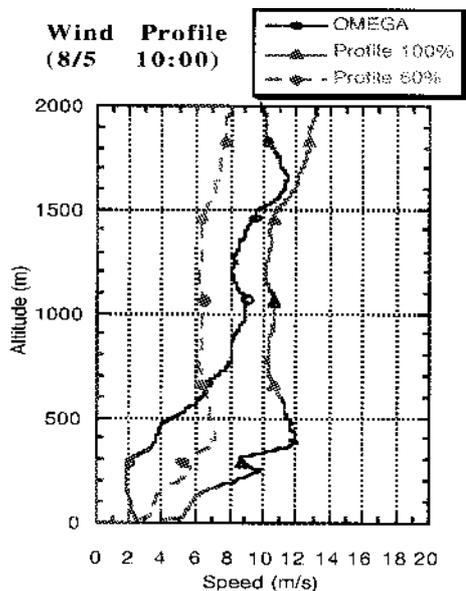


Before Release (F006)

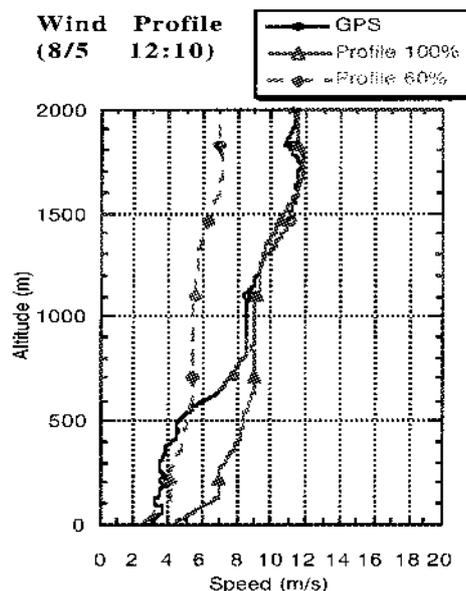


After Landing (F006)

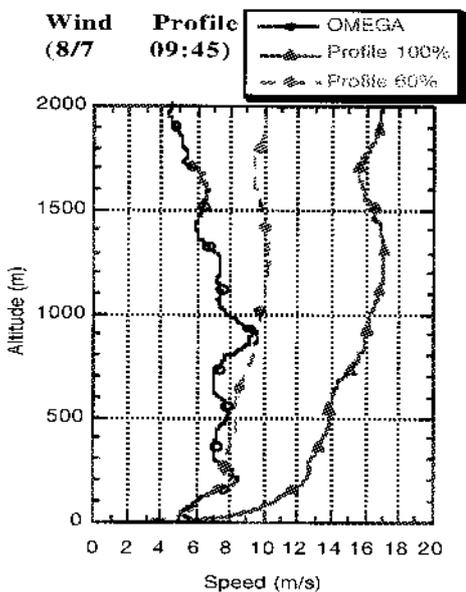
図 3.2.1-3 飛行前後の上空風プロファイル (F005,F006)



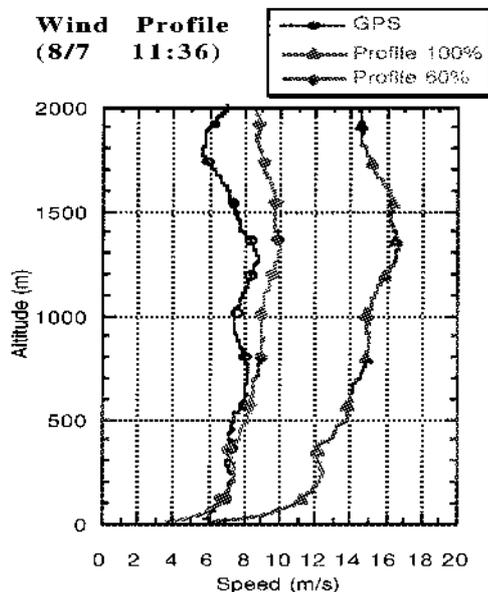
Before Release (F007)



After Landing (F007)

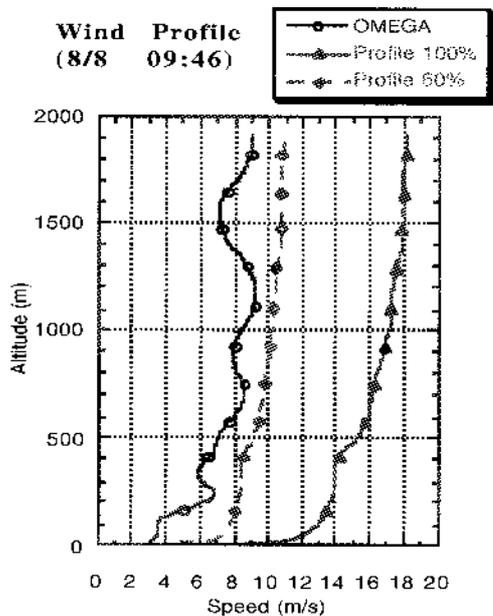


Before Release (F008)

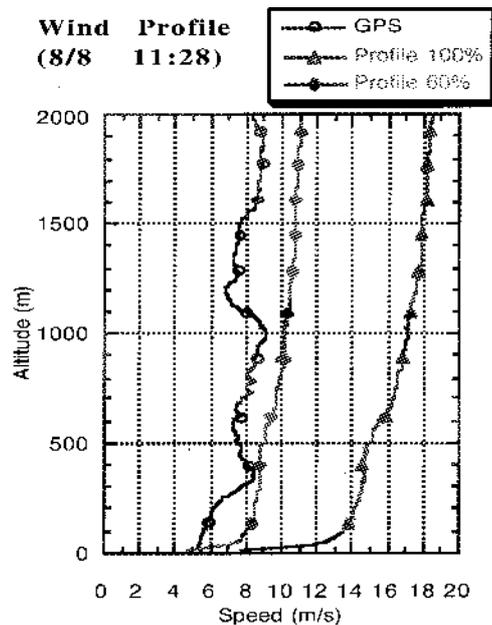


After Landing (F008)

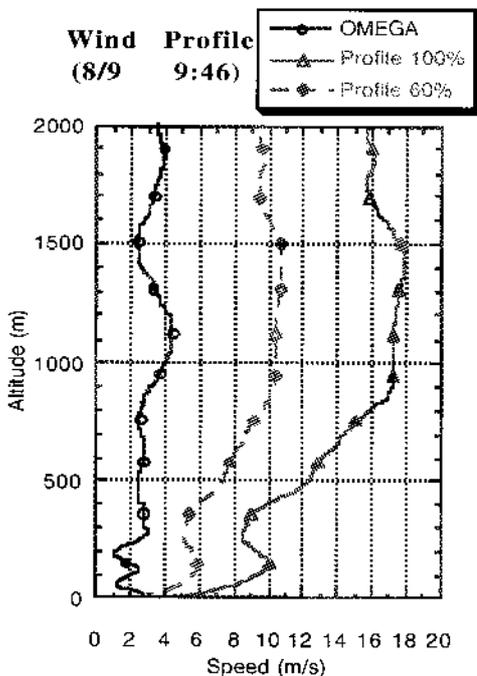
図 3.2.1-4 飛行前後の上空風プロファイル (F007,F008)



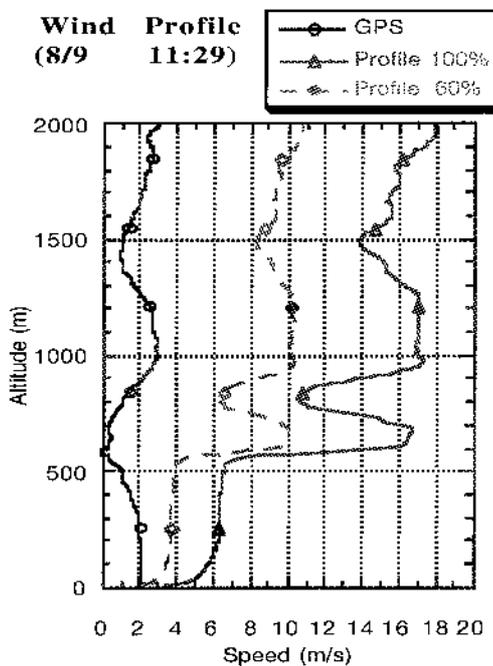
Before Release (F009)



After Landing (F009)

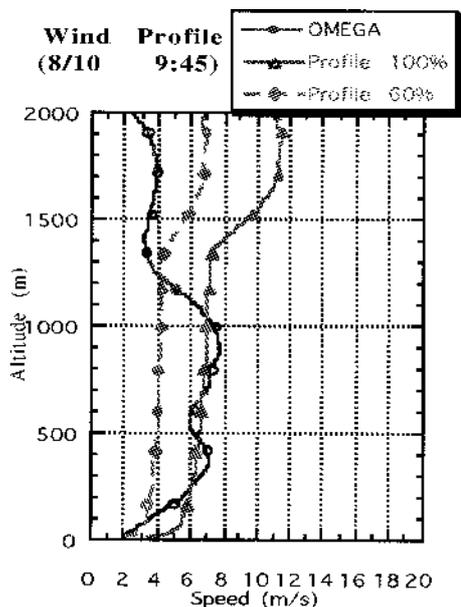


Before Release (F010)

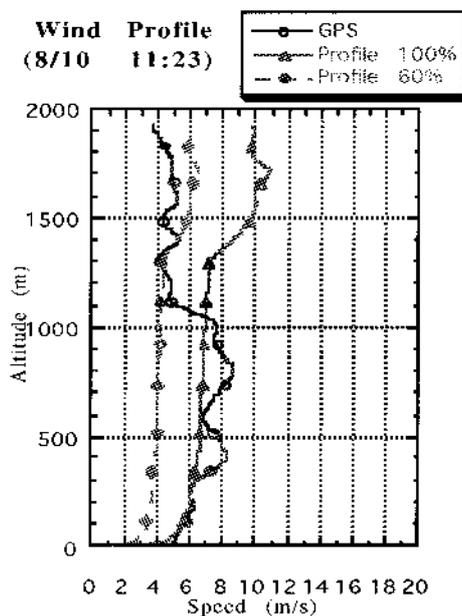


After Landing (F010)

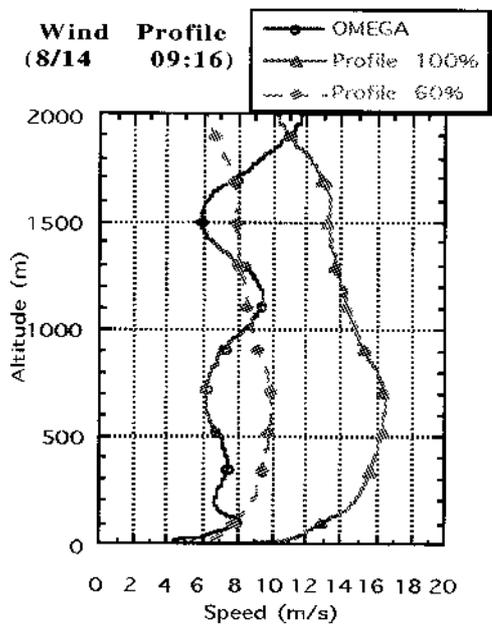
図 3.2.1-5 飛行前後の上空風プロファイル (F009,F010)



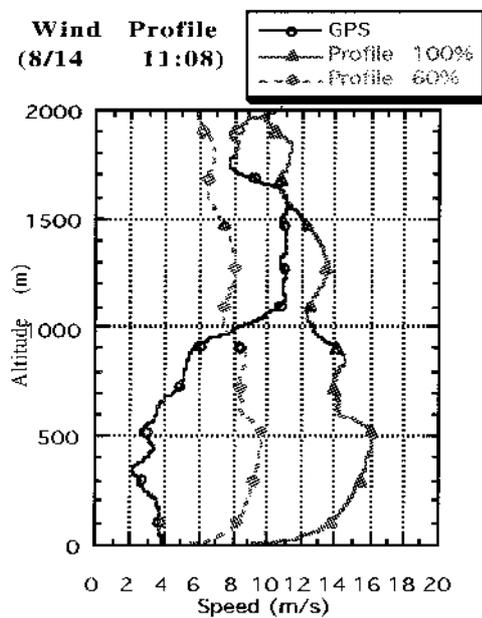
Before Release (F011)



After Landing (F011)



Before Release (F012)



After Landing (F012)

図3.2.1-6 飛行前後の上空風プロファイル (F011,F012)

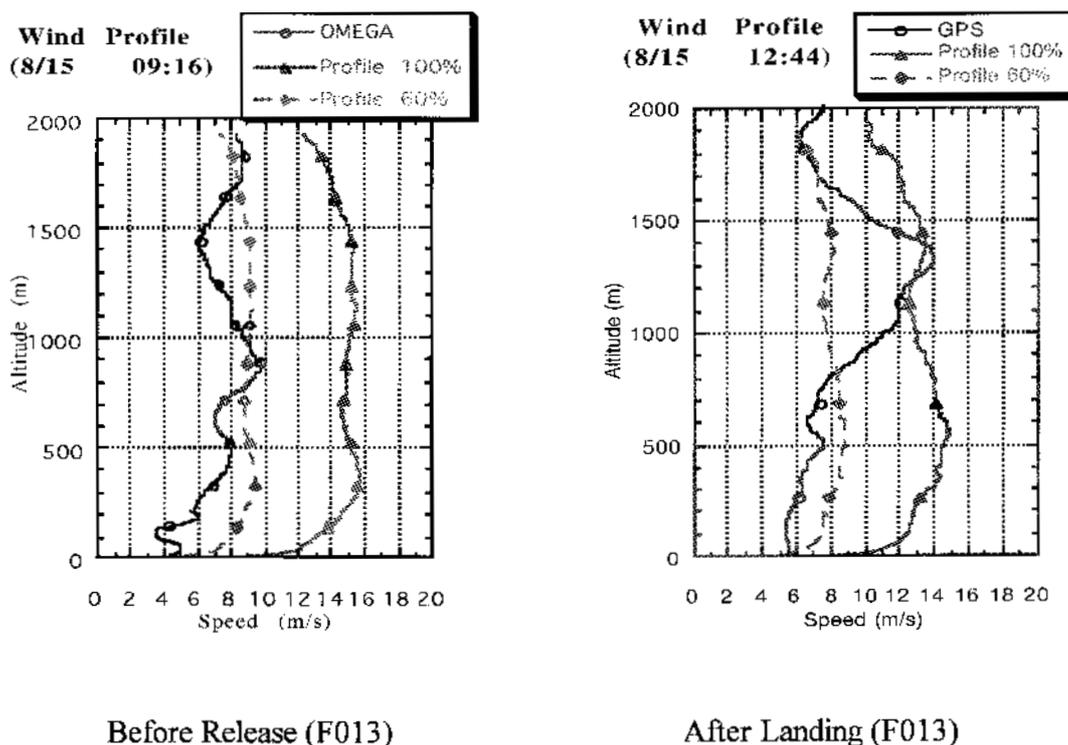


図 3.2.1-7 飛行前後の上空風プロファイル (F013)

4. 計測データの解析・評価

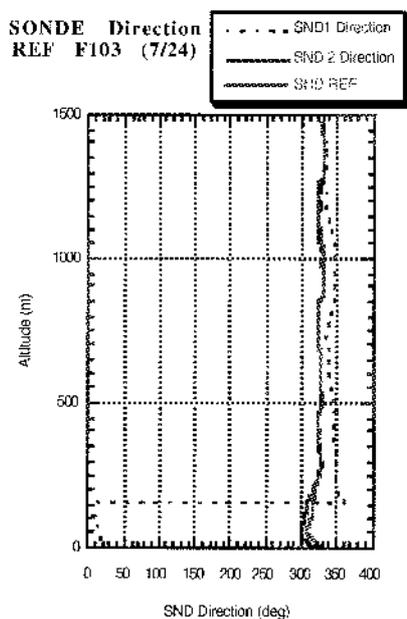
ここでは3つの方法により得られた風計測、推定値を用いて、実験機で推定された風と計測された地上風、上空風との比較検証を行った。それぞれの風計測データ間との比較は、地上風計測装置がGPS時刻（非同期）、上空風計測装置がUTC時刻、ADS_IMU推定風がGPS（同期）時刻に対して計測を行った事で、これらの計測データは完全には同期していないことを考慮しなければならないが、解析の手法としてはそれぞれの風の u_w, v_w 成分について実験機の分離時刻から着陸までの同一時系列データ（ADS_IMU:80Hz）に時刻補間する。サンプリング周波数の小さい上空風（0.5Hz）、地上風（4Hz）のデータは線形補間(7)式によりデータ数を揃える事により評価を行った。

$$S_{Li} = \frac{(S_n - S_{n-1})}{(t_n - t_{n-1})} (t - t_{n-1}) + S_{n-1} \quad (7)$$

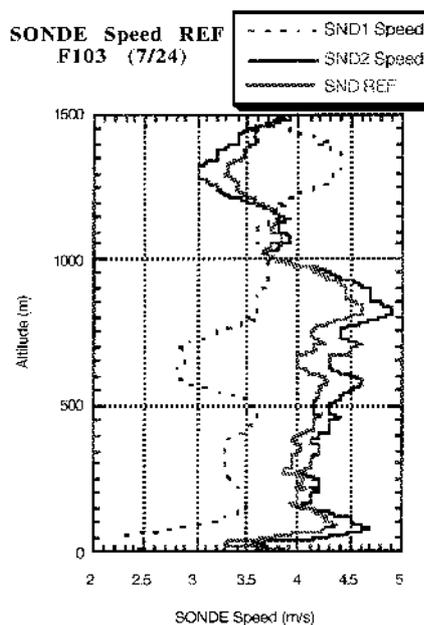
そして実験機のフレアから接地の瞬間迄の低周波乱流の評価については同一滑走路座標でのそれぞれの計測点の座標、波動の移動時間を考慮し比較を行った。ただし W_w については論じていない。

4.1 上空風とADS_IMU推定値

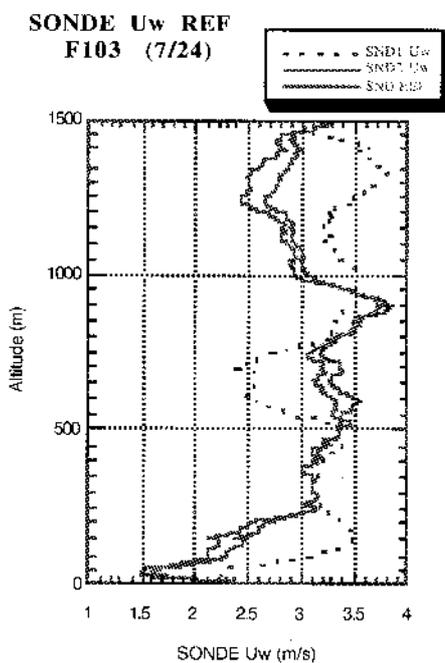
ここでSONDEで計測した飛行前後同一高度の風は時間的に一様に变化するものと仮定し、地上から上空1500m迄の自動着陸前後のSONDE計測データを実験機分離から接地時刻までに時刻補間（内挿）した推定値と実験機ADS_IMUより推定された風との比較を行った。実験機分離高度1500mから接地迄計測されたSONDEの時刻補間の結果としてF103のケースを用いて図4.1-1に示す。この図は飛行前後に計測された風を用いて実験機の飛行時刻に時刻補間を行ったプロファイルである。上の図は風向と風速について時刻補間を行った結果である。下の図は計測された風向、風速を u, v 成分に分離し、時刻補間を行った推定値を比較した図である。 u_w, v_w ともに推定値SND REFは実験機着陸後の計測値SND2に強く補間されている。そして、これらのSONDEの時刻補間を行った推定値と実験機ADS_IMUより推定された風の比較検証結果は図4.1-2に示すように u_w, v_w ともに良く一致している。ここで同様の手法で u_w について時刻補間を行った全13フライトについて、SONDEデータと実験機ADS_IMU推定値の相関について調べた結果を図4.1-3-1~4に示す。これらは実験機分離から接地までの全データの相関図であり、実験機ADS_IMU推定値は地上付近



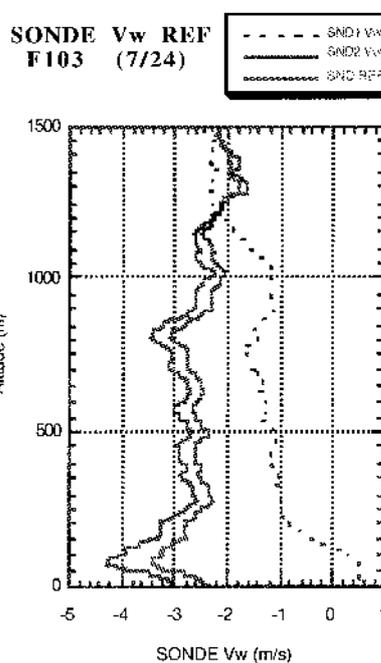
Time Interpolation of Direction



Time Interpolation of Speed



Time Interpolation of U_w



Time Interpolation of V_w

図 4.1-1 飛行前後上空風による時刻補間（内挿）の結果

において振動的なエラーが発生する事から、相関図に部分的な差異が見られる（データが飛んでいる部分）ものの、全ケースとも u_w について2つのデータには相関が見られ風速は良く一致している。 v_w については改めて相関図として紹介していないが、図 4.1-2 に示したように、SONDE の時刻補間を行った風と実験機 ADS_IMU 推測値の風は13フライトの全ケースにおいて上空1500mから地上まで良く合っている。このように全く異なった2つの計測推定方法で得られた結果が全ケースにおいて良く一致している事から、自動着陸前後に SONDE で計測されたデータ及び時刻補間を行った推定値は真値に近いと考えられる。そして、この時刻補間を用いた定常風の推定手法は地衡風、山岳風の影響の少ない連続性のある区間で短時間の条件を付す事によって有効な手法として妥当性があると云える。

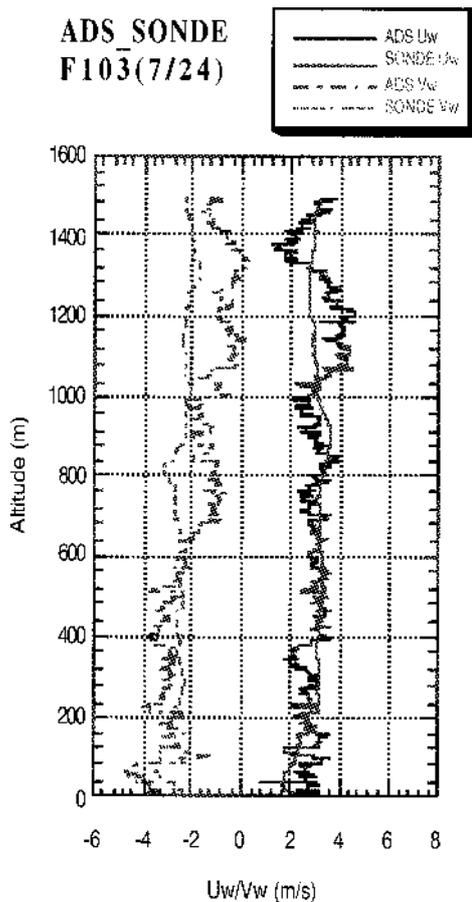


図 4.1-2 上空風推定値（内挿）と実験機 ADS_IMU 推定値の比較

4.2 地上風と ADS_IMU 推定値

地上風計測装置と ADS_IMU から推定された風向風速は同一滑走路座標で表現できる。又その時間軸は同じ GPS タイムで計測されている事から比較的風の強いケース F005 を選び高度 6.1m (20ft) で計測された地上風計測装置の風と高度 10m から接地迄の実験機 ADS_IMU 推定値の風について u_w, v_w 成分の比較を行った。その結果は、図 4.2-1 下の図の通り、 u_w, v_w ともある程度相関が現れており、実験機通過高度 6m (X 軸 42 秒の点) においては u_w, v_w ともに良く一致している。少なくとも本ケースにおいては実験機接地直前における地上風計測装置の計測値と実験機で推定された風データは同じ波動を計測できたことが云える。しかし、その図の RTVRE u_w の線形的な時歴からも判るように、地上風計測装置のサンプリングレートが不足していることが伺える。このことは発信器の応答性の向上、同期の改善にリンクする今後の課題でもある。ここで同じ GPS 時刻で計測された地上風計測装置と実験機 ADS_IMU から計測推定された風について、実験機進入高度 10m から接地までの全 13 フライトの u_w, v_w について比較した結果を相関図として図 4.2-1 ~ 7 に示す。この結果から、 v_w 横風成分は ADS 計測精度前後で推移する事から、推定はかなり難しいことが判る。しかし、 u_w については各ケースとも相関がみられ、風速はいくつかのケースを除いて良く合っている。しかし、この検証の結果、時空間での波動の移動時間差を考慮して着陸の際の風を正確に推定し、自動着陸実験に供するためには計測点を追加し、フレア空間の風モデル化を行うことが望まれる。

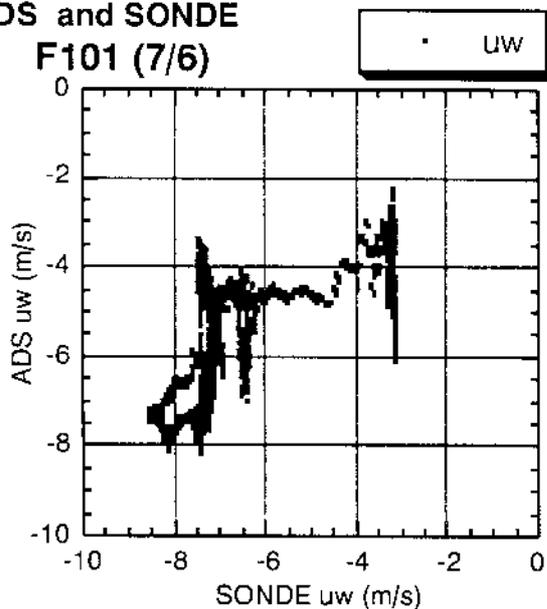
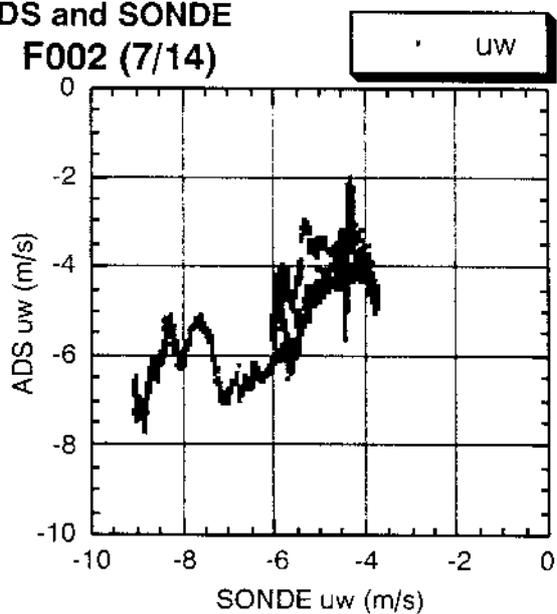
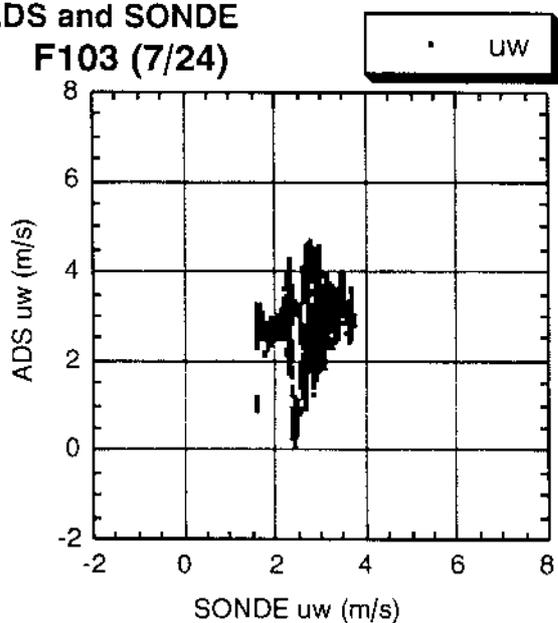
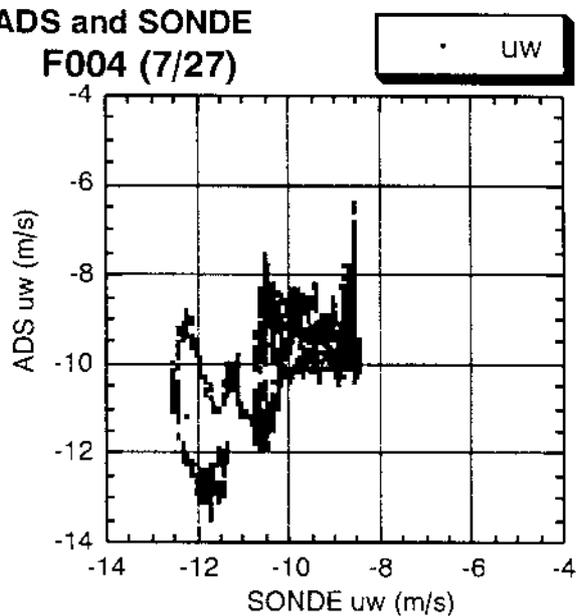
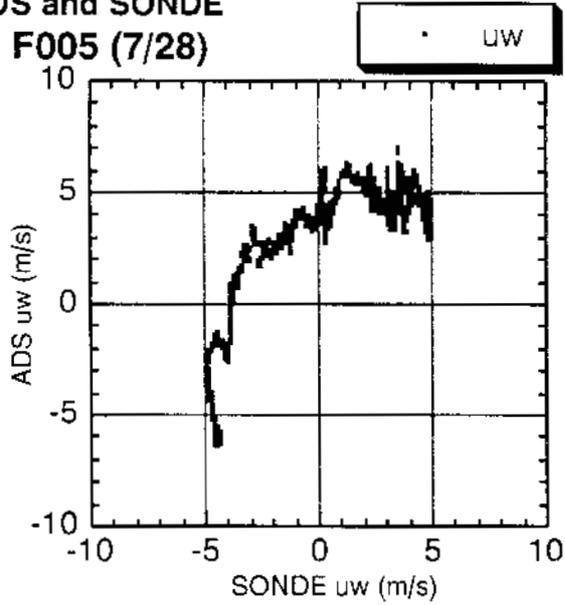
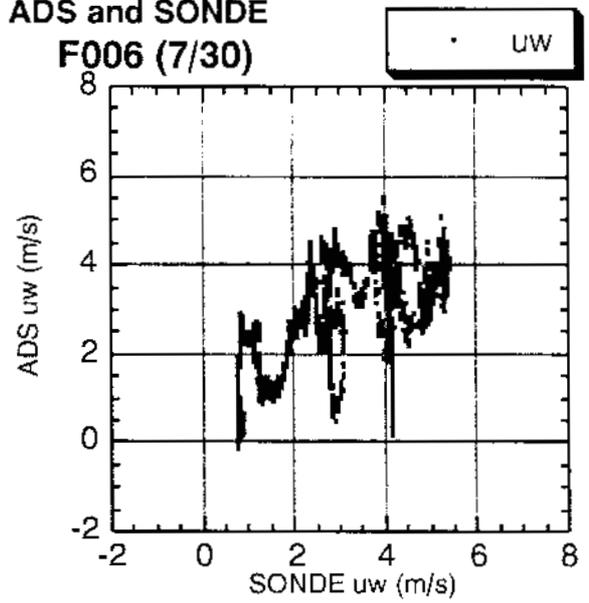
Correlation with
ADS and SONDE
F101 (7/6)Correlation with
ADS and SONDE
F002 (7/14)Correlation with
ADS and SONDE
F103 (7/24)Correlation with
ADS and SONDE
F004 (7/27)

図 4.1-3-1 SONDE と実験機 (ADS_IMU) 推定値の相関図 (F101,F002,F103,F004)

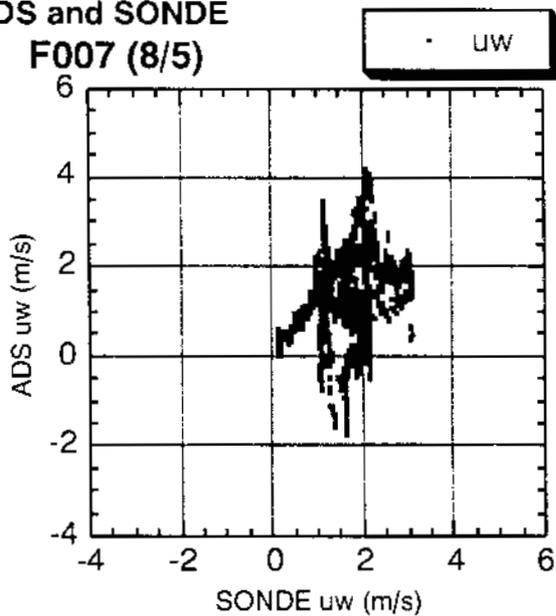
Correlation with
ADS and SONDE
F005 (7/28)



Correlation with
ADS and SONDE
F006 (7/30)



Correlation with
ADS and SONDE
F007 (8/5)



Correlation with
ADS and SONDE
F008 (8/7)

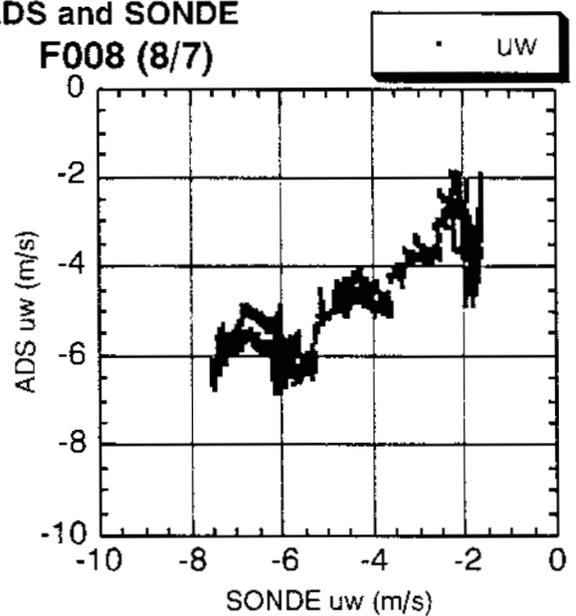


図 4.1-3-2 SONDE と実験機 (ADS_IMU) 推定値の相関図 (F005,F006,F007,F008)

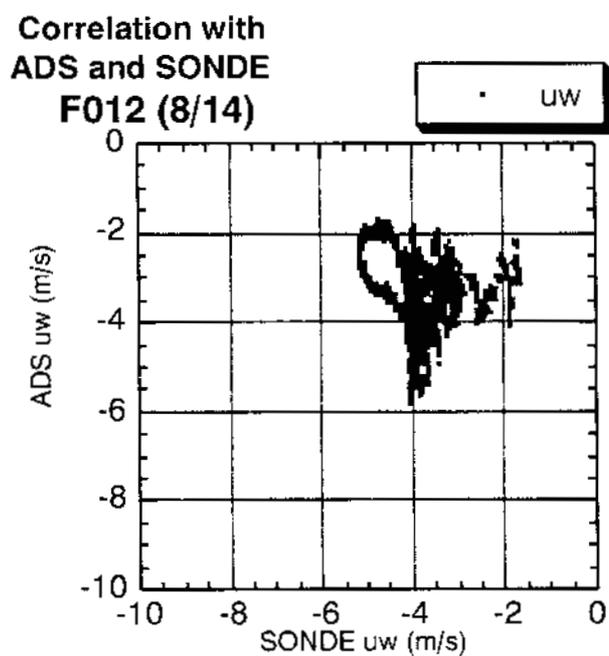
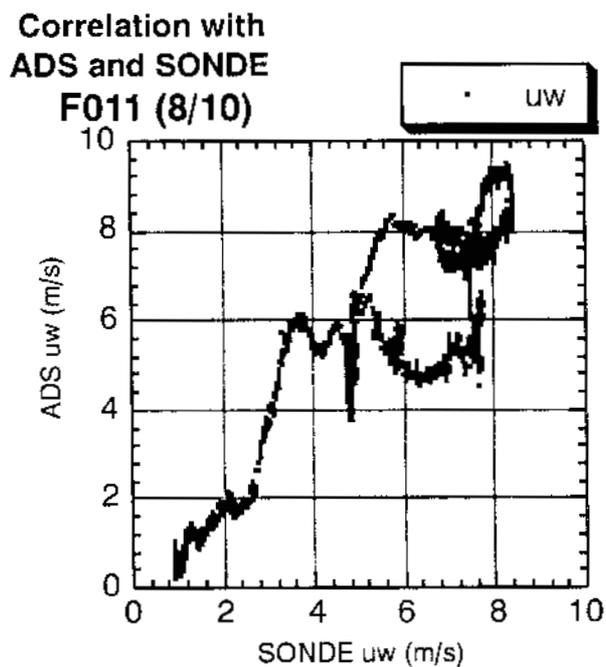
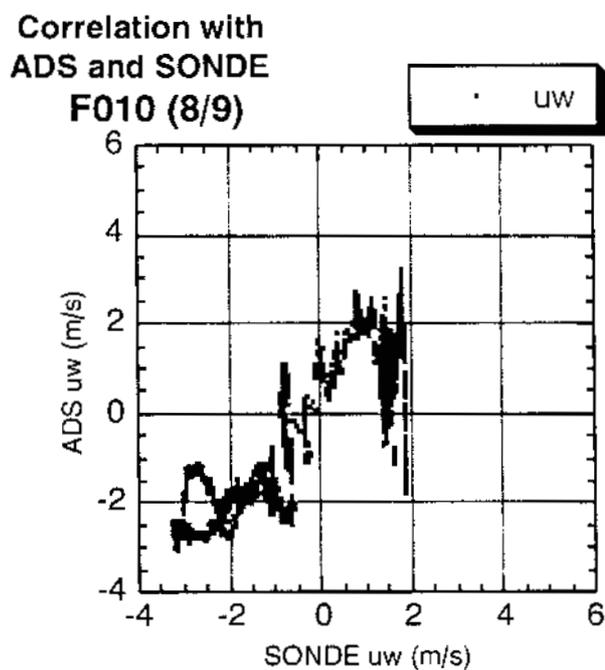
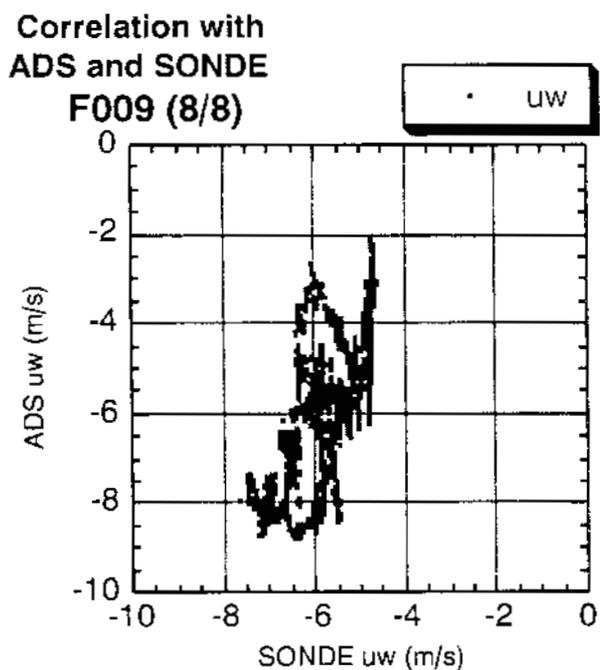


図 4.1-3-3 SONDE と実験機 (ADS_IMU) 推定値の相関図 (F009,F010,F011,F012)

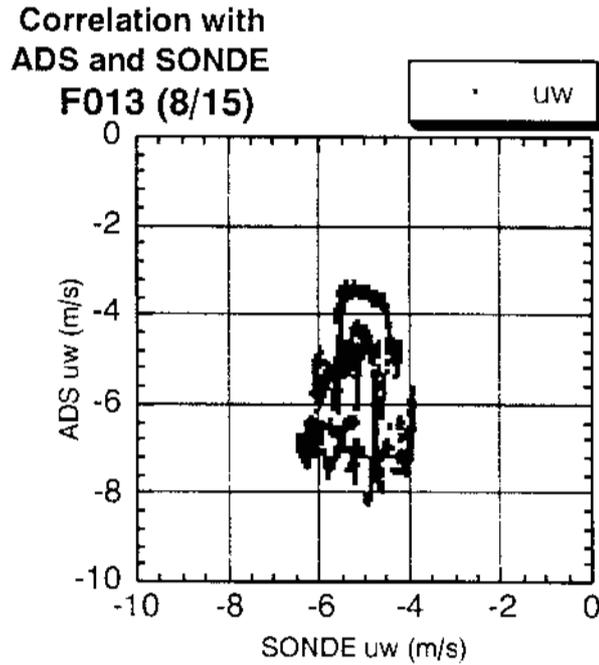
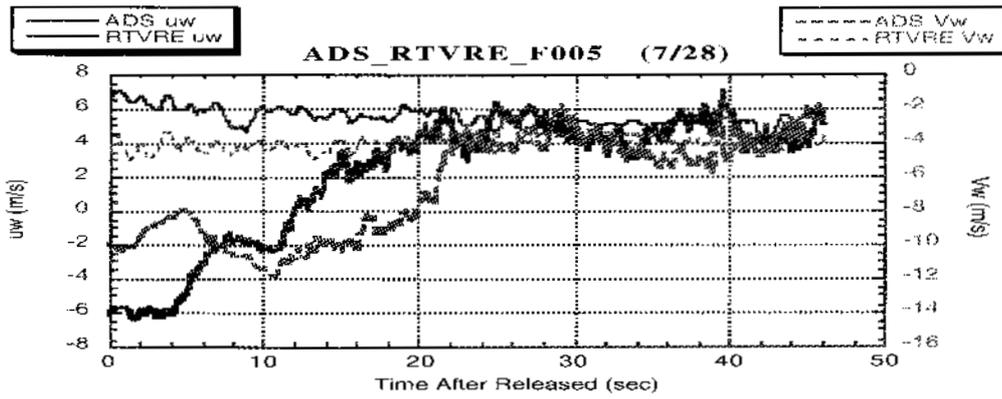
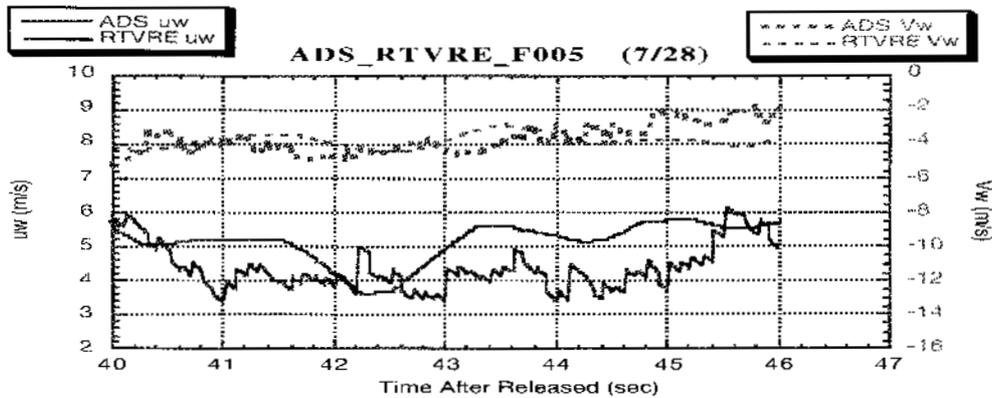


図 4.1-3-4 SONDE と実験機 (ADS_IMU) 推定値の相関図 (F013)



Comparison of surface wind u_w/V_w with ADS_IMU Estimation (F005)



Time History of u_w/V_w between Altitude 10 m and T/D (Enlarged Upper Graphcopy)

図 4.2-1 地上風計測値と実験機 ADS_IMU 推定値の比較 (F005)

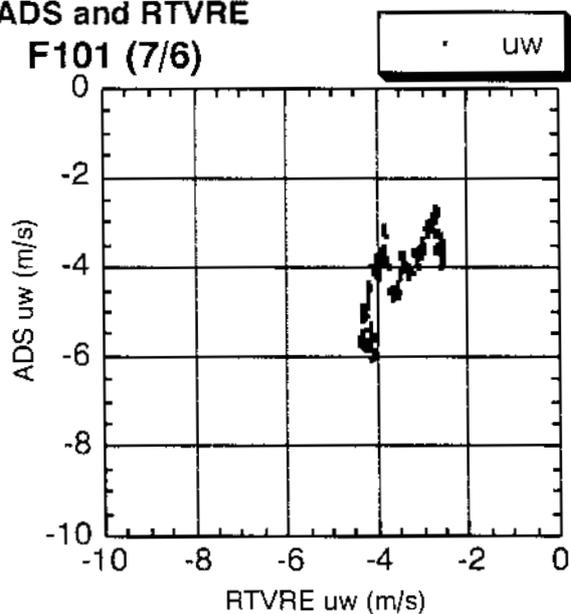
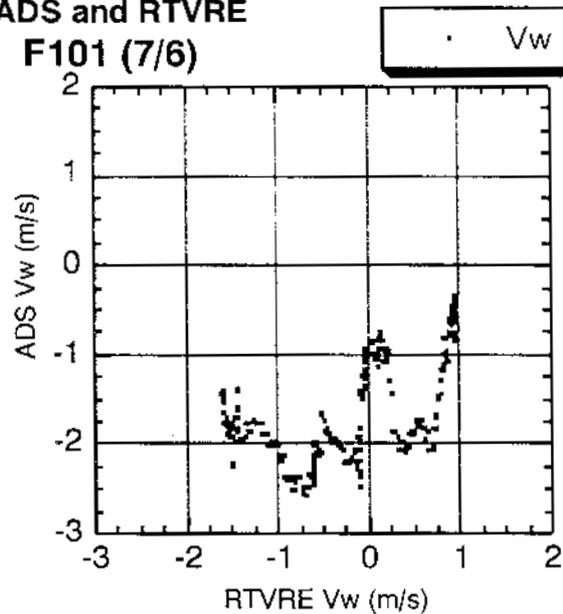
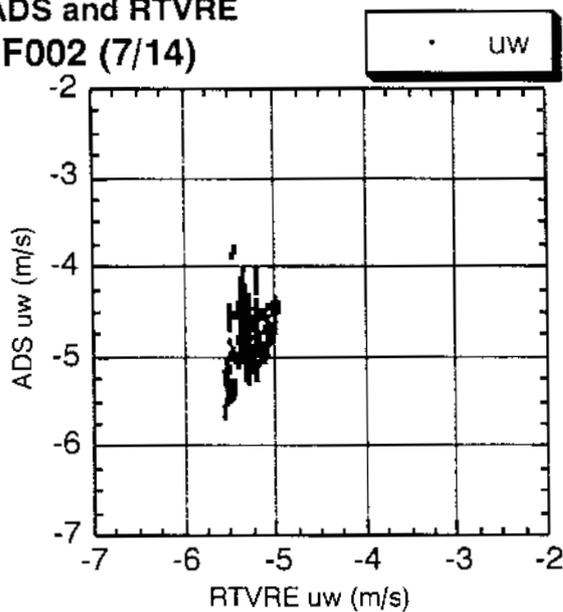
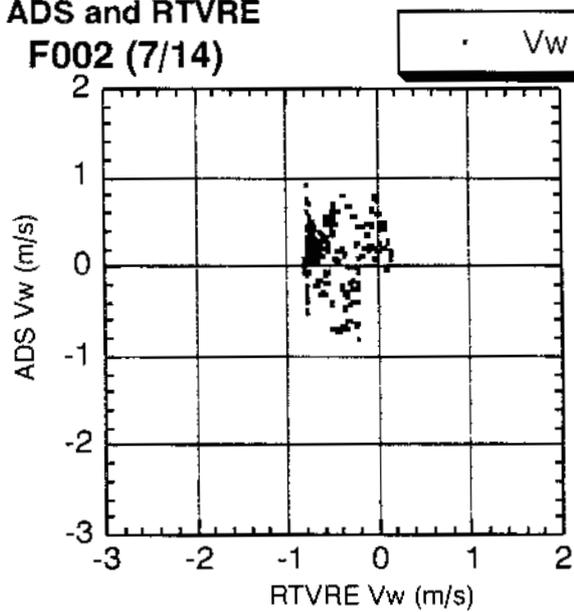
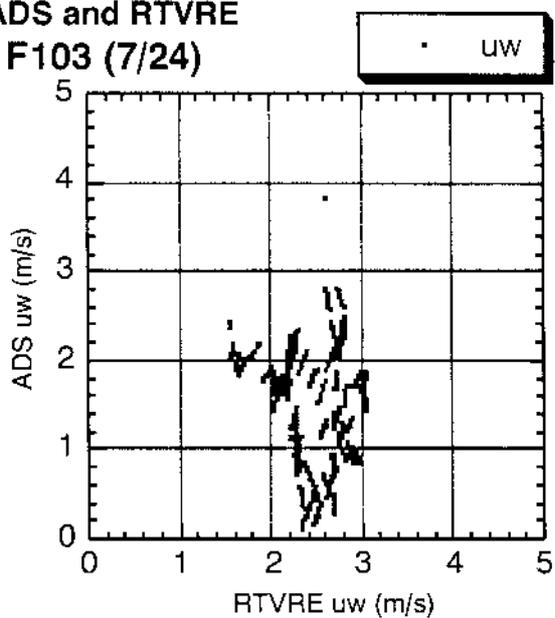
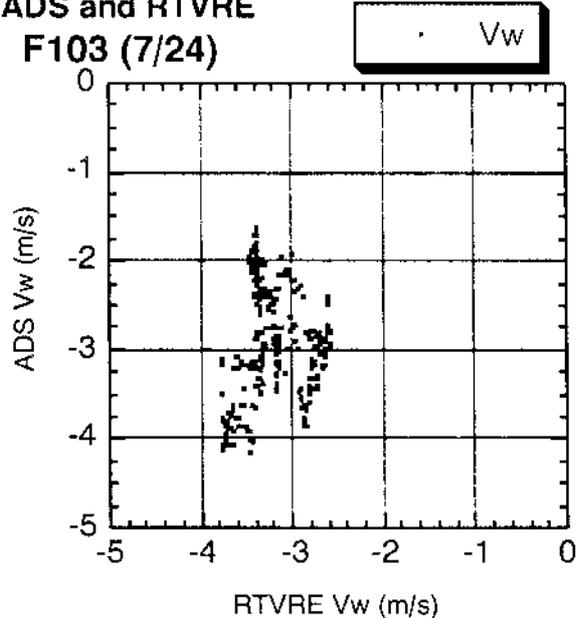
Correlation with
ADS and RTVRE
F101 (7/6)Correlation with
ADS and RTVRE
F101 (7/6)Correlation with
ADS and RTVRE
F002 (7/14)Correlation with
ADS and RTVRE
F002 (7/14)

図 4.2-2-1 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F101,F002)

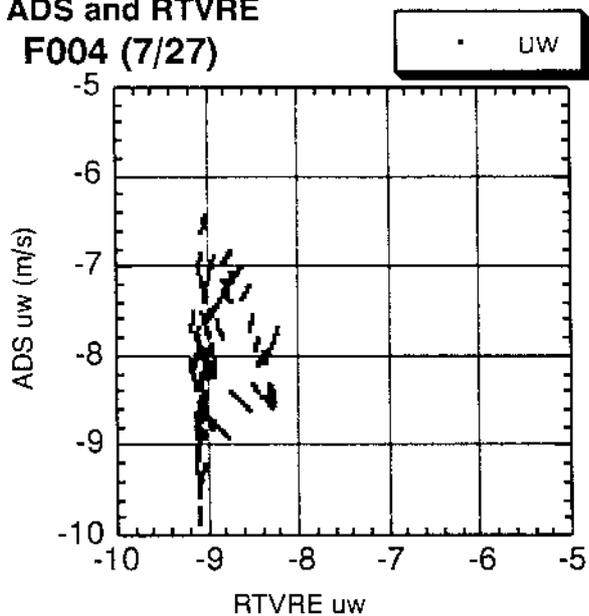
Correlation with
ADS and RTVRE
F103 (7/24)



Correlation with
ADS and RTVRE
F103 (7/24)



Correlation with
ADS and RTVRE
F004 (7/27)



Correlation with
ADS and RTVRE
F004 (7/27)

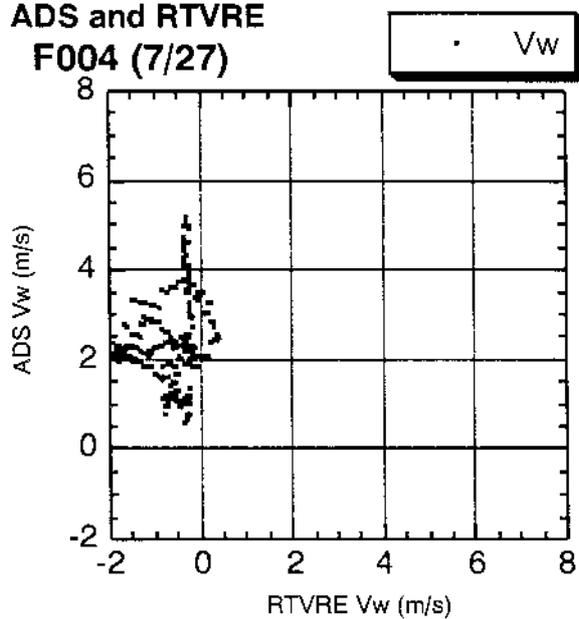


図 4.2-2-2 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F103,F004)

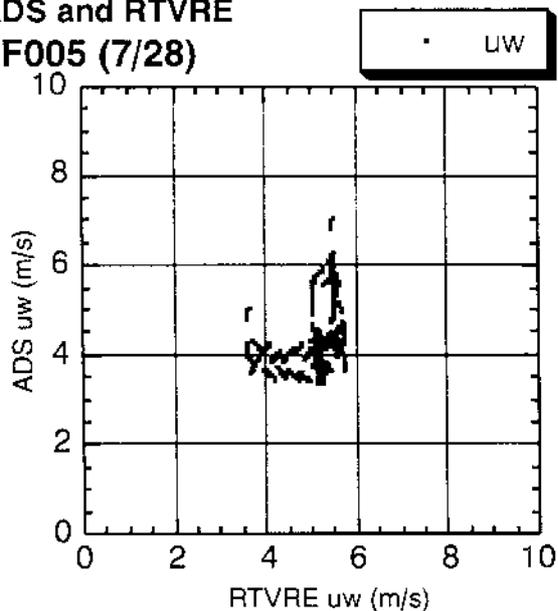
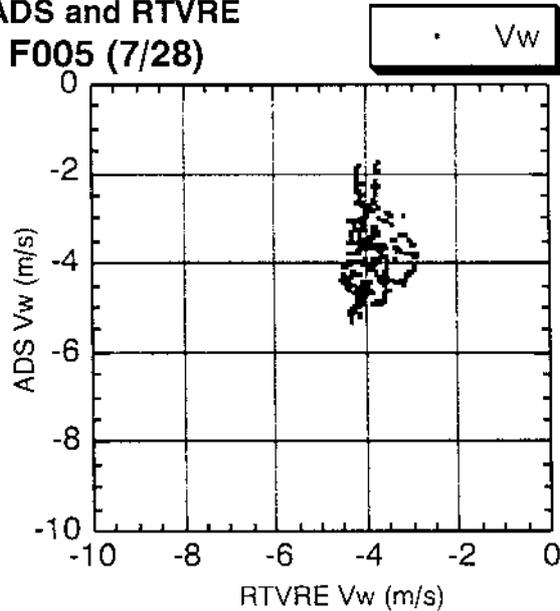
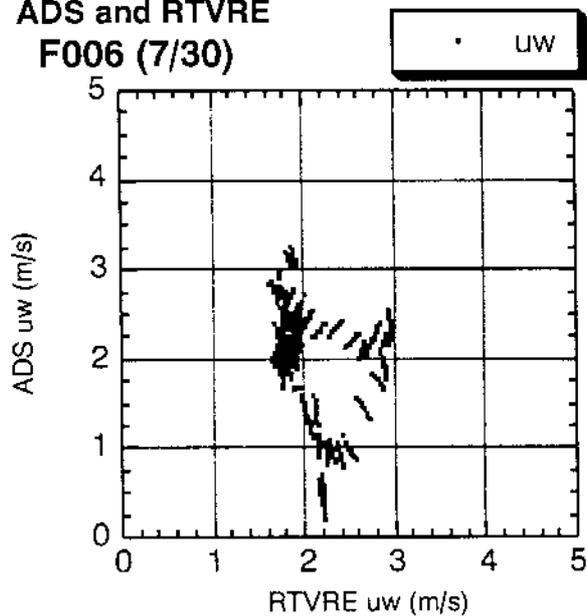
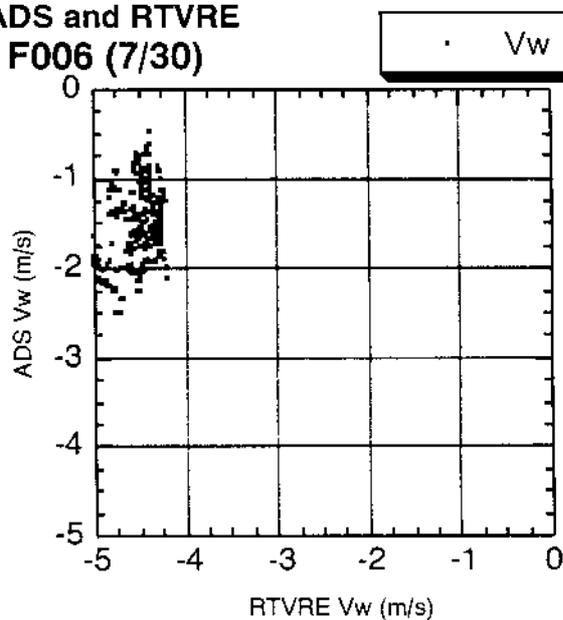
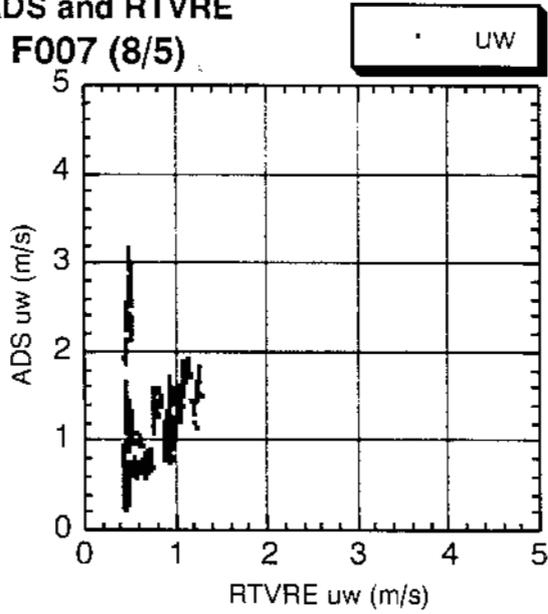
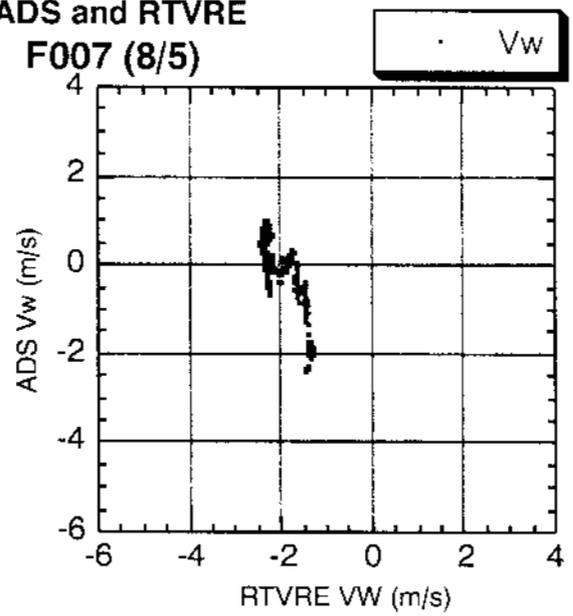
Correlation with
ADS and RTVRE
F005 (7/28)Correlation with
ADS and RTVRE
F005 (7/28)Correlation with
ADS and RTVRE
F006 (7/30)Correlation with
ADS and RTVRE
F006 (7/30)

図 4.2-2-3 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F005,F006)

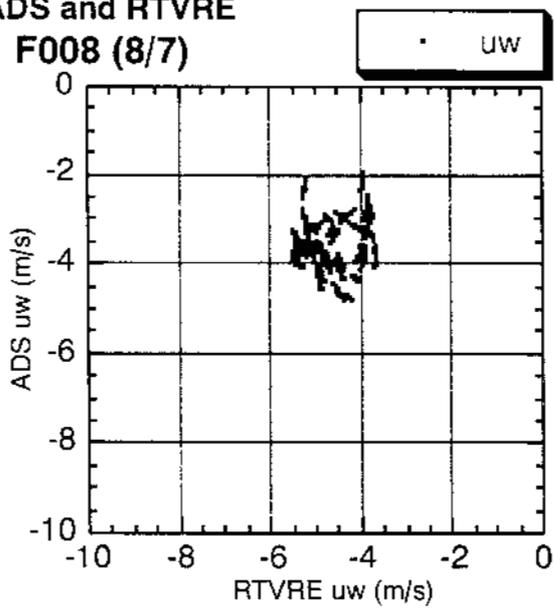
Correlation with
ADS and RTVRE
F007 (8/5)



Correlation with
ADS and RTVRE
F007 (8/5)



Correlation with
ADS and RTVRE
F008 (8/7)



Correlation with
ADS and RTVRE
F008 (8/7)

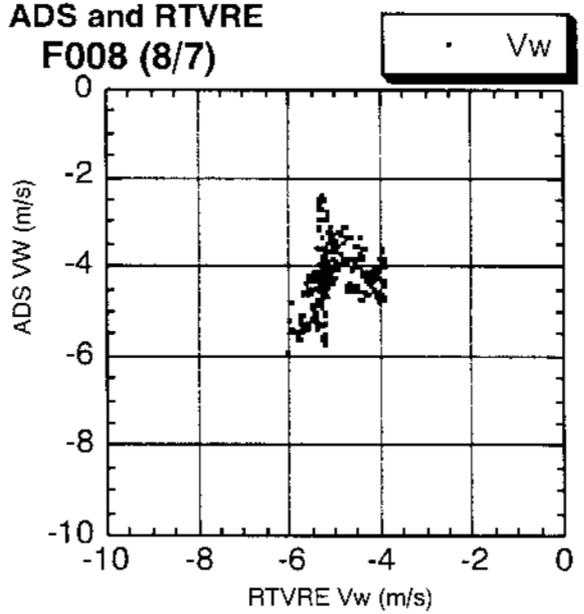
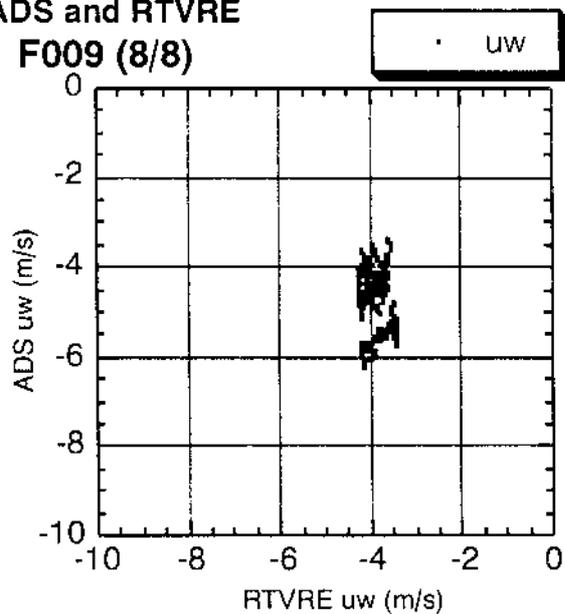
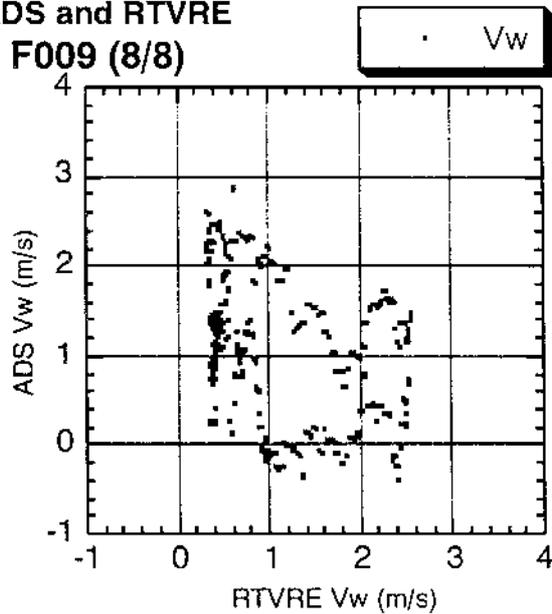


図 4.2-2-4 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F007,F008)

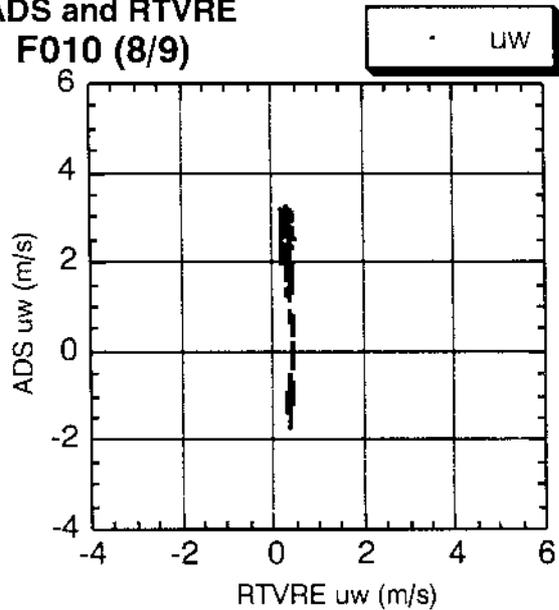
Correlation with
ADS and RTVRE
F009 (8/8)



Correlation with
ADS and RTVRE
F009 (8/8)



Correlation with
ADS and RTVRE
F010 (8/9)



Correlation with
ADS and RTVRE
F010 (8/9)

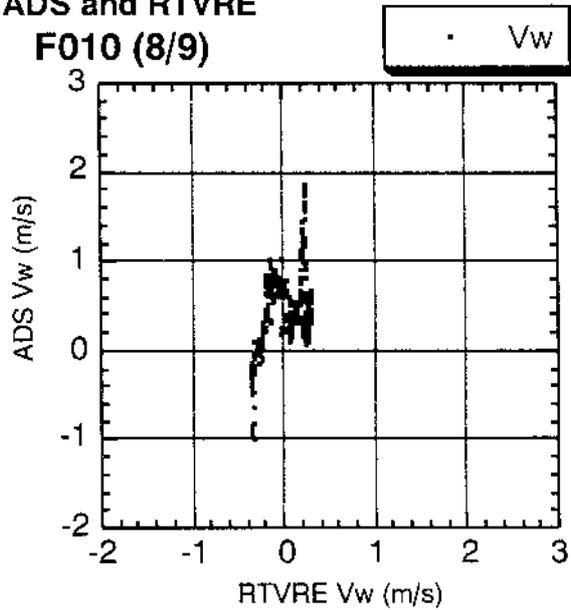
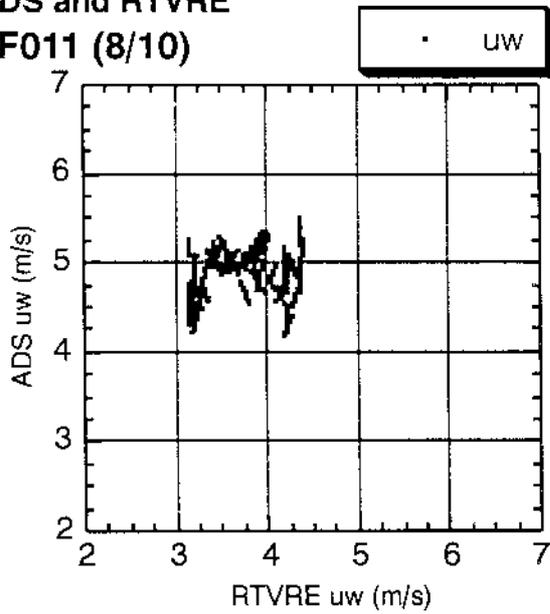
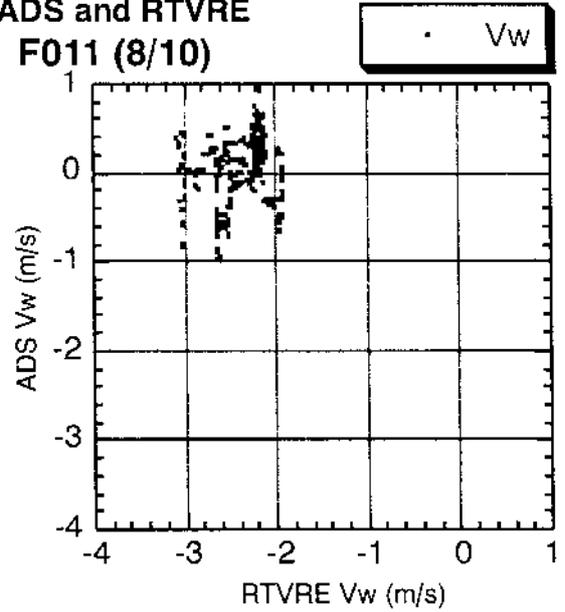


図 4.2-2-5 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F009,F010)

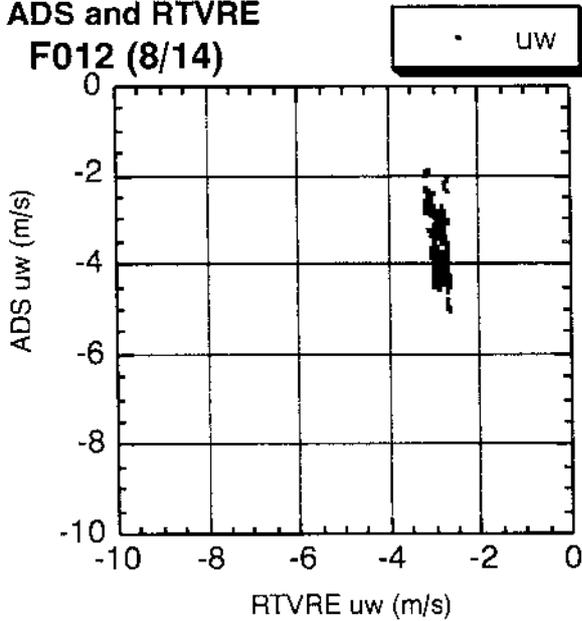
Correlation with
ADS and RTVRE
F011 (8/10)



Correlation with
ADS and RTVRE
F011 (8/10)



Correlation with
ADS and RTVRE
F012 (8/14)



Correlation with
ADS and RTVRE
F012 (8/14)

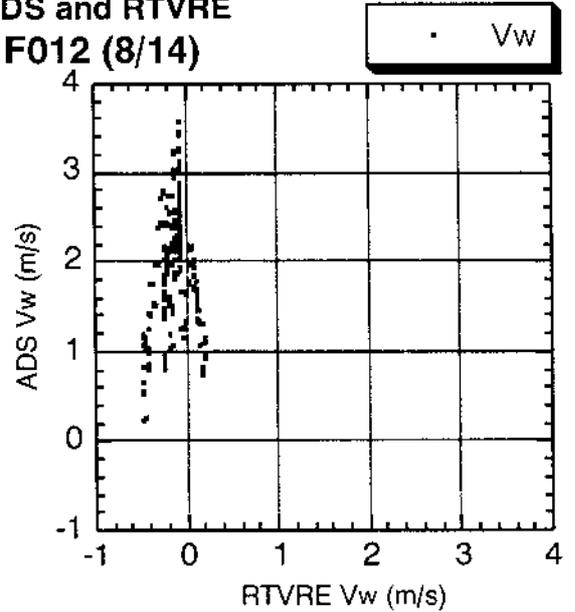


図 4.2-2-6 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F011,F012)

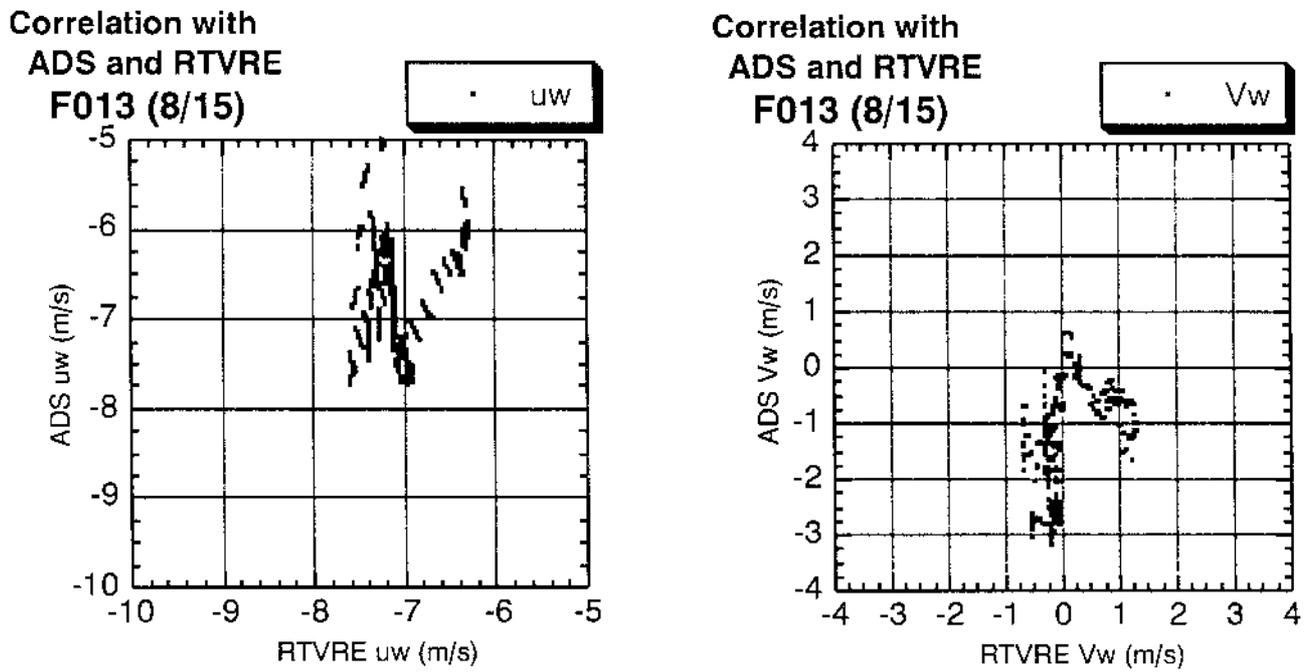


図 4.2-2-7 地上風と実験機 (ADS_IMU) 推定値の比較 (F013)

5. 結論及び今後の課題

豪州ウーメラでALFLEXの自動着陸実験を実施した期間は季節的に南半球が秋から冬になる時期であった。北半球に位置する日本と異なり、南半球に位置するウーメラはコリオリフォースにより高気圧、低気圧の風の吹きだし、吹き込みの方向は反対になる。実験スケジュールの遅れから、自動着陸実験が始まった頃には、西から東へ移動する高気圧の緯度は北上し、風向は北西の日が多くなり、RWY18に着陸進入を行う実験機にとって右横風、追風の地上風が多くなった。又上空には強いジェットストリーム(偏西風)が入り込み、3000m(10000ft)以下の上空まで影響を及ぼした。これらの悪条件の中、ALFLEX 制限風の判断データとして使用した地上風計測装置、上空風計測装置は、ALFLEXの飛行可否判断に必須の装置となり、実際の運用を通して極めて有効なものであることが示された。そして、これらの計測した風データと実験機ADS-IMU 推定値との比較を行った結果から以下のようないくつかの知見が得られた。

- 1) 本自動着陸実験は新規開発した地上風実時間ベクトル表示装置(RTVRE)を用いたことにより、適切、且つ的確な飛行実験を効率よく実施することができた。
- 2) SONDEで計測した各高度の風向に対して設計制限風を算定した風速のプロファイルと実際計測された風速を、2次元プロファイルで比較する手法により、飛行GO-NOGO判断を迅速明解に問題なく実施できた。
- 3) 地表の障害物の影響の少ないウーメラのような飛行実験環境においては、飛行前後に計測されるSONDEの計測データを時刻補間する事によって、定常風の場合、上空風の真値に近い値を導き出す事が可能であり、この手法は、連続性のある区間で短時間の条件を付す事によって、有効な推定手段として今後の飛行実験計画に反映できると思われる。
- 4) フレア時、実験機の飛行特性に影響を及ぼす低周波乱流成分を解析評価する為には、地上風計測装置の同期の改善、発信器の応答性の向上、サンプリング周波数4 Hzをさらにあげる事などが必要である。
- 5) 地上風計測値と実験機ADS-IMUの推定値とを比較した結果、実験ケースによってはその波動はほぼ一致してはいるものの相関係数をとる迄には至らなかった。時空間での波動の移動時間差を考慮して着陸の際の風をより正確に計測推定して自動着陸実験に供する為には地上風の計測点が進入滑走路の左右にある事が望まれる。

6. あとがき

ALFLEXの飛行実験は当初の実験計画をすべて実施することができた。本邦初の自動着陸飛行実験において、風計測データを用いた飛行可否判断の手法は、解析評価の結果、本報告に述べた通り、適切、且つ的確な飛行実験を効率よく実施することができたといえる。いくつかの課題もふくめ、解析の結果得られた成果は、自動着陸飛行実験における新しいノウハウの蓄積となり、今後のHOPEの開発及び他の飛行実験にも適用する事ができると確信する。この成果は多くの人々の支援によって成し遂げられた。ALFLEXに携わった川崎重工業KKのスタッフの方々は勿論のこと、特に豪州での飛行実験にともない、豪州気象庁BOMには全面的にご支援をいただいた。その中心となって活動されたWoomera 航空気象台の所長 Mr. Joe Hopkins, スタッフの Mr. Neville Martin, Mr. Roelof Hoebee, Ms. Lynda Garlic, Ms. Colette Warlzynski, Mr. Rob Barclay の方々に謝意を表したい。

参考文献

- 1) 村上義隆, 柳原正明, 稲葉基之: ALFLEX 飛行実験における風計測結果について, ALFLEX/HOPE シンポジウム講演前刷集, 1996.12.10
- 2) Y. Murakami, M. Yanagihara, M. Inaba: Proceedings of the ALFLEX Symposium, University of New South Wales Sydney, Australia, Feb. 28 1997
- 3) 村上義隆, 小野孝次, 稲葉基之, 水藤貴靖: ALFLEX 飛行実験で用いた地上風実時間ベクトル表示装置の開発と運用結果, 第35回飛行機シンポジウム講演集, 1997.10.17
- 4) Flight Control Systems-Design, Installation and Test of Piloted Aircraft, General Specification for MIL-F-9490D, 1992
- 5) Osder S, Keller R: Study of Automatic and Manual Terminal Guidance and Control System for Space Shuttle Vehicle, NASA-CR-114401, Aug. 01 1971
- 6) Military Specification, Flying Qualities of Piloted Airplanes, MIL-F-8785C, 1980
- 7) VAISALA: Digicora Handbook
- 8) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1986年6月

航空宇宙技術研究所報告1356号

平成10年7月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)47-5911 ㊦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

©禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

