

第3章 データの比較と考察

3.1 レーウィンゾンデとオメガゾンデ

3.1.1 飛揚方法による比較

同時観測の方法として二通りの飛揚の仕方をした。一つは別々の気球につなげて同時飛揚する方法とゾンデ同士を約1mの棒に固定して一つの気球であげる連結飛揚である。4期にわたる観測の中で、連結飛揚と同時飛揚がほぼ同数の第2期と第3期のデータで比較する。偏差の絶対値の平均で言うと、時刻はレーウィンゾンデの観測記録の全てのデータを使いオメガは対応する時刻の補間したデータを使うが、風向差は連結が約8.6°，同時が約10°，風速は約1.6m/s，約2.2m/sとなり、ともに連結飛揚の方が良くなっている。温度差と湿度では温度が0.3℃と1.1℃，湿度が差5.9%と6.5%となり、それぞれ連結の方がよい(表3.1)。

このことは二つのゾンデが同時飛揚では上空に行くにしたがって、異なった空間に達してその場所の大気の状態を測定するのに対して、連結飛揚では同じ空間の大気の状態を測定するためと考えられる。

表3.1 ゾンデの2通りの飛揚法による観測値の差の絶対値の平均

	風向の差(°)	風速の差(m/s)	温度の差(℃)	湿度の差(%)
連結飛揚	8.6	1.6	0.3	5.9
同時飛揚	10	2.2	1.1	6.5

3.1.2 気圧計と相互比較

ゾンデの高度は気圧と温度によって求められているので、気圧計の比較は連結観測の時間軸での比較が適当である。連結飛揚のデータを見ると、飛揚直後にマイナス偏差になる場合とプラスの偏差になる場合があるが、飛揚後200秒から2000秒にかけては、プラスの偏差がめだってくる。さらに上空に行くにつれて、偏差はマイナス側にシフトして、ある一定の値に収束する場合が多かった。この偏差の大きさは数hPaになる。図3.1に例を示す。この例で、14時31分の観測では約0.8hPa、20時30分の例では約0.5hPaになる。全連結飛揚観測のうち約3/4の観測は飛揚後約1500秒から約1800秒の間にそれぞれの一定値に収束しているが、この時間は地上気温との差が50℃から70℃となる高度に達して、それ以後の温度変化が少なくなる状況に対応している。例えば、第二部131ページ1989年3月13日14時30分のデータで、約2000秒で気温の傾きが変わっているが、

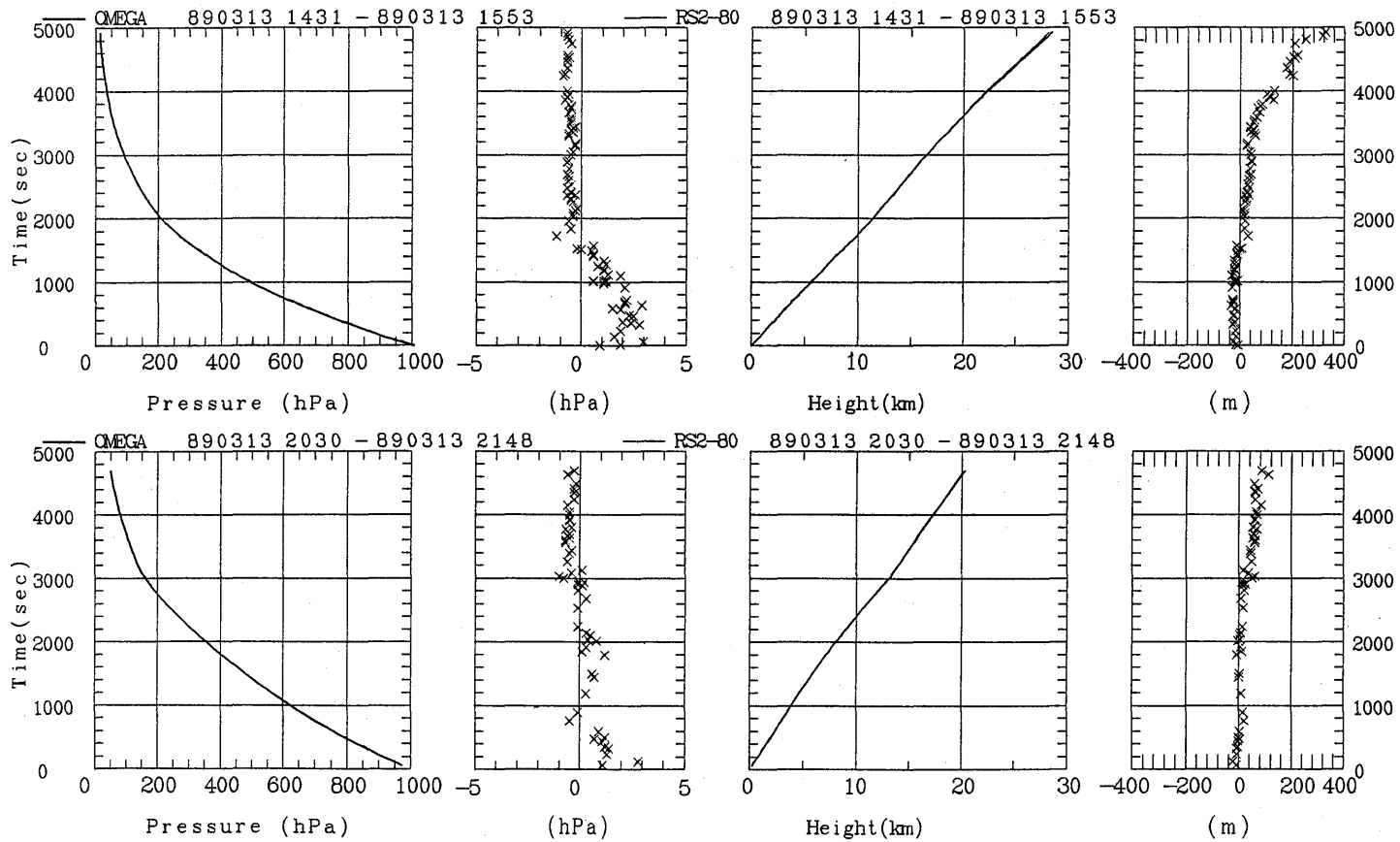


図3.1 連結飛揚の時間軸による気圧・高度の観測例

187ページの約2000秒で気圧の偏差が一定値になっているのと良い対応関係にある事が判る。以上のことから、気圧計を相互比較した結果は、飛揚直後の数分間を除けば、気圧計の偏差量は気温との間に良い相関関係があることを示唆している。

この気圧計の数 hPa に及ぶ系統的偏差を解明する一助とするために、オメガゾンデの気圧計を検定槽に入れて、検定を行った。4個のオメガゾンデの結果からは、振動式気圧計と比較して最大で0.5hPaの差となっている。これはオメガゾンデの方が低い値であり、大多数の気圧面で0.0hPa から0.3hPa 低い傾向にある。ちなみに、水銀気圧計と振動式気圧計の比較結果によると、振動式は0.1hPa と0.3hPa の範囲でやや高めであり、常温でテストしたかぎりオメガゾンデの気圧計の精度は良好である。表3.2に検定の一例を載せた。オメガゾンデの気圧がレーウィンゾンデと比較して1から3hPa 低くなる系統的なズレの生ずる理由は、このオメガゾンデの気圧計検査の結果からは説明する事ができないと思われる。レーウィンゾンデは温度による気圧補正をしておらず、低温時に問題がある可能性はのこる。そのほか、レーウィンゾンデの気圧計のメーカーによって、高い高度の偏差の値の大きさが一定の傾向がある事がわかっている。すなわち、ある特定のメーカーの偏差が大きい。

表3.2 振動式気圧計とオメガゾンデの気圧計の比較例 (1989年8月22日10時30分～, 現地気圧1015.4 hPa, 気温26.0℃)

指定気圧	振動式	オメガゾンデ	補正值(1hPa 単位)
850	850.7	850.6	+0.1
500	499.9	500.1	-0.2
300	300.0	300.1	-0.1
200	200.1	200.1	0.0
100	99.8	100.0	-0.2
70	70.0	70.3	-0.3
50	50.0	50.3	-0.3
30	30.2	30.5	-0.3
20	20.0	20.3	-0.3
15	15.0	15.2	-0.2
10	10.1	10.3	-0.2
8	8.0	8.2	-0.2
7	7.1	7.3	-0.2
6	6.0	6.2	-0.2
5	5.0	5.2	-0.2
last	4.7	4.9	-0.2

※参考までに8月21日に実施した水銀気圧計と振動式気圧計の比較結果は、-0.1~-0.3hPaの範囲で振動式気圧計はやや高めである。

3.1.3 温度計の比較

第二部123～155ページの全データの図によると、温度計は上空に行くほど偏差は大きくなる事が多い。29例の連結観測の結果では、高い高度で偏差がプラス側にふれる例が20例と多かった。これ以外に、マイナスになるのが4例、その他が5例あったが、全て15時のデータであった。プラスになるのはオメガの方が大きいという事である。これは二種のゾンデの温度計の放射特性の違いによるものであると考えられる。温度の高度別相関係数を表3.3に示す。また時間軸上での温度の相関係数を表3.4に示す。かなり高い相関値が得られている。

表3.3 ゾンデの温度・湿度の高度別相関係数

高度 (m)	500	1,500	3,000	5,000	10,000
温度	0.997	0.998	0.998	0.999	0.966
湿度	0.984	0.982	0.985	0.989	0.586

表3.4 ゾンデの連結飛揚の時間軸上での温度・湿度の相関係数と分散

放球後の 時間 (秒)	温度の 相関係数	温度の データ数	湿度の 相関係数	湿度の データ数	温度差 の分散	湿度差 の分散
500	0.9988	29	0.9856	29	0.1457	18.71
1000	0.9996	29	0.9761	28	0.07800	68.12
1500	0.9993	29	0.9629	23	0.1104	95.59
2000	0.9985	29		2	0.1156	
3000	0.9940	29		0	0.1973	
4000	0.9818	28		0	0.4402	

3.1.4 湿度計の比較

大部分の湿度偏差は、高湿度でプラス側であるが、低湿度域では逆にマイナス側になっている。特に雨天の観測時地上付近の100%近い高湿度層を10分以上も通過する場合には、プラスの湿度偏差が時間とともに増大する(図3.2)。また、上空で20%以下の低湿度層を通過する際には、オメガゾンデの湿度計が0%近い乾燥状態を示している場合でも、レーウィンゾンデの湿度計は20%以下にはならずデータが追従せず、偏差が逆転する観測がめだっている。これらの原因としては、レーウィンゾンデのカーボン式湿度計が下層の高湿度通過の際にカーボン面が高湿度により変質した場合に、その湿度特性が大きく変化して高湿度に対しては乾燥側に、また低湿度に対しては湿潤側にシフトするためであると考えられる。高度別の湿度の相関を調べてみた(表3.3)。時間軸で連結観測のデータを処理すると(表3.4/図3.3a～f)となる。500秒は観測毎に異なるが、約

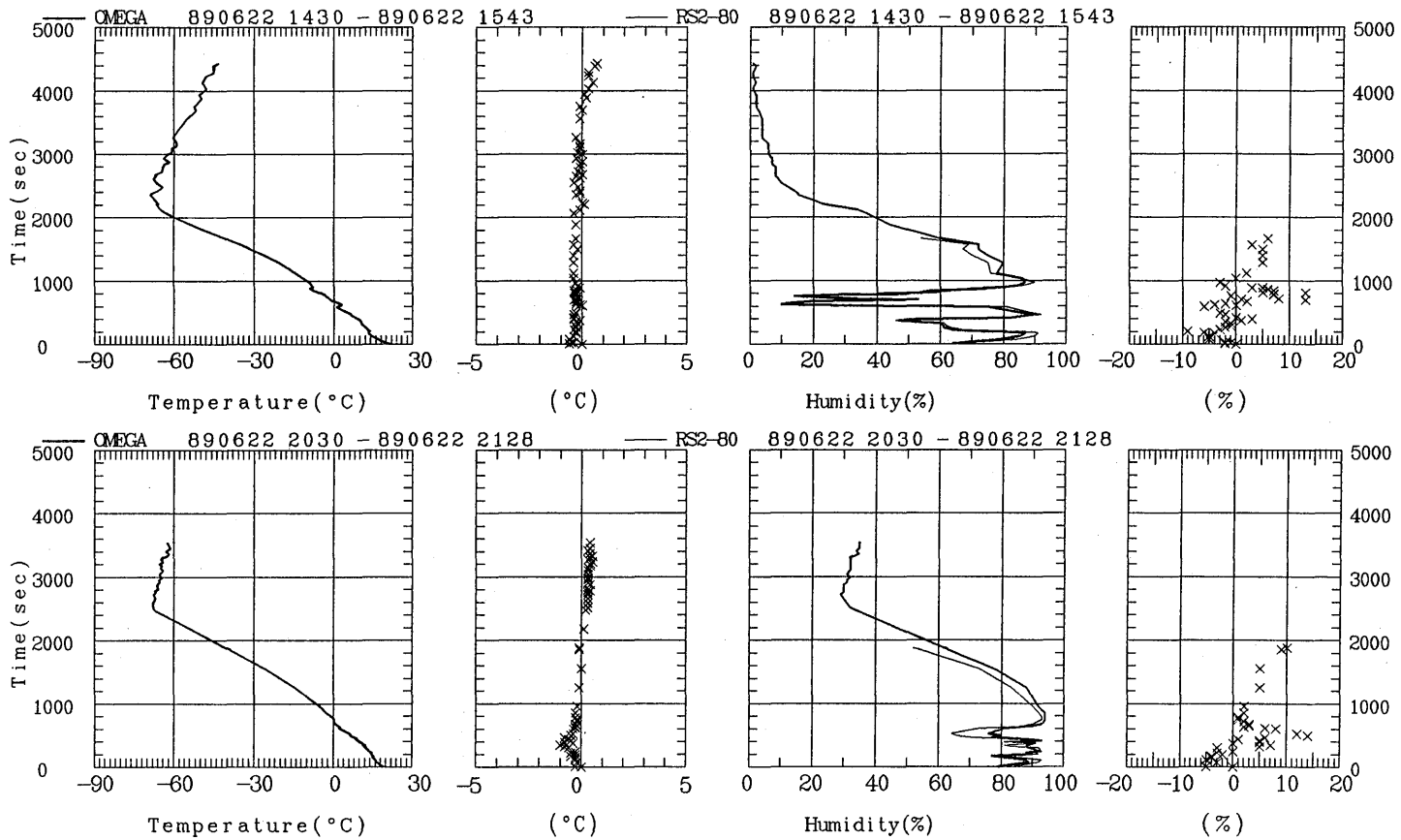


図3.2 連結飛揚の時間軸による温度・湿度の観測例

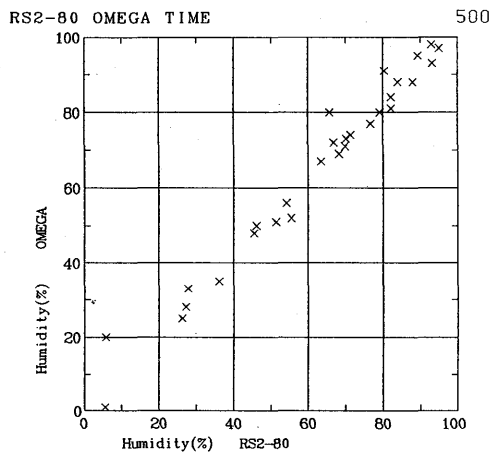
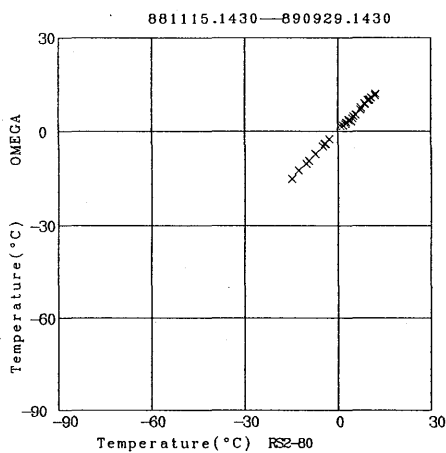


図3.3a ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (500秒)

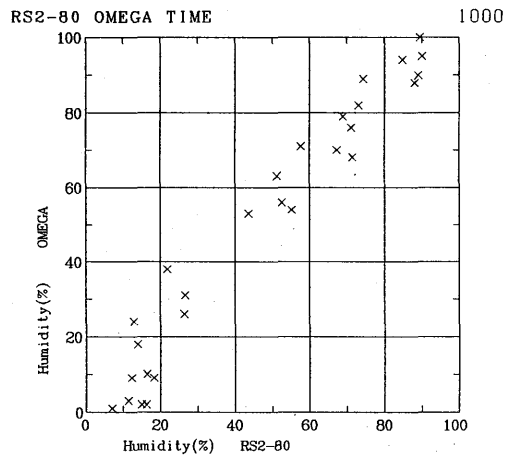
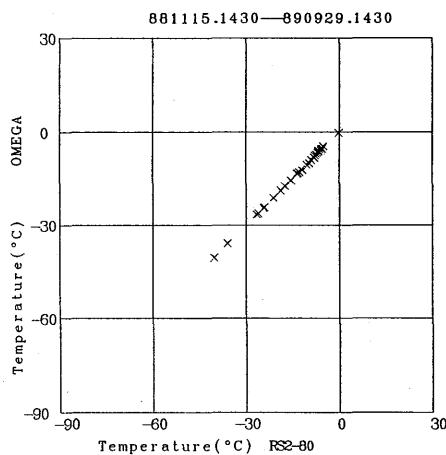


図3.3b ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (1000秒)

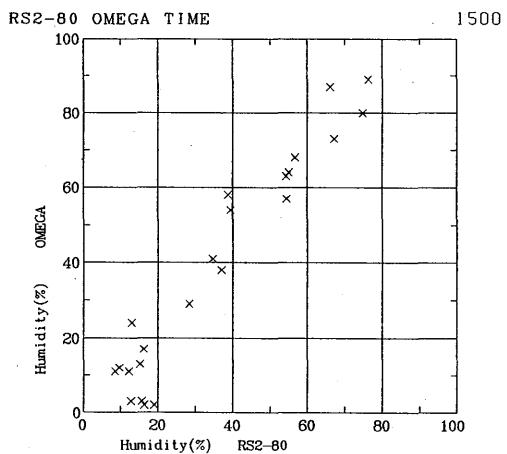
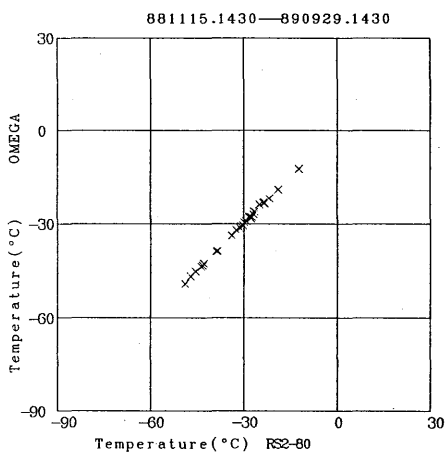


図3.3c ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (1500秒)

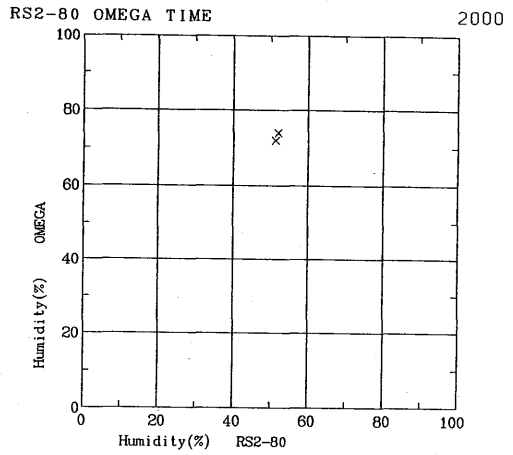
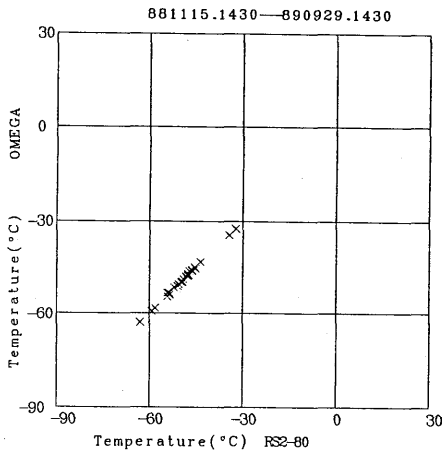


図3.3d ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (2000秒)

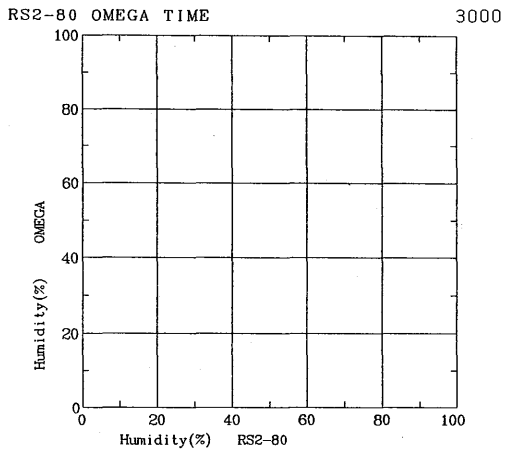
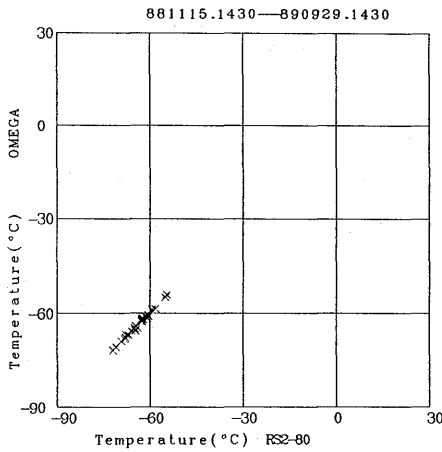


図3.3e ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (3000秒)

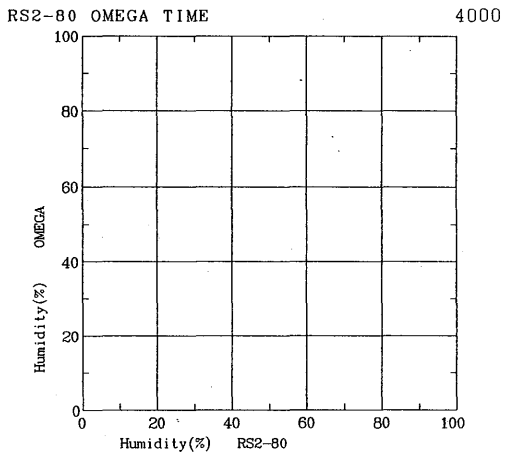
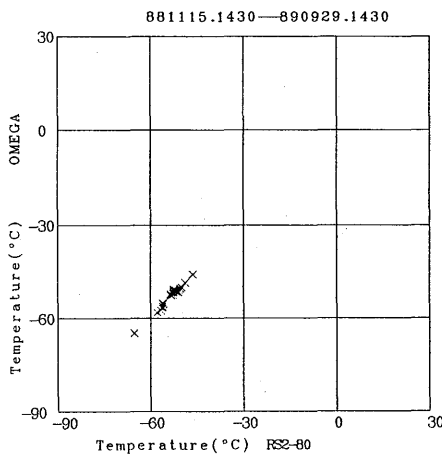


図3.3f ゾンデの連結観測、時間軸での温度・湿度の相関図 (4000秒)

3 kmの高度であり、温度湿度の相関値は高度（つまり気圧）によるものと大体同じである。

3.1.5 風向・風速の比較

全データ65例のデータ（第二部90ページから122ページ）のうち明らかにおかしい例2個（1例はオメガゾンデの時間が異常になっていて、高度で処理すると正常と思われる）を除いて比較した、各高度における風速差の絶対値の平均、風向差の絶対値の平均、風速の相関係数を表3.5に示す。これらを図に示したのが、図3.4 a～dである。風速については、図3.5 bに示すとおり、高度500m～10500mでは1～1.5m/s、11000～11500m及び20000～29500mでは1～2 m/s、14000～19500mでは2.1～2.7m/sの風速差になる。14000～19500mでの偏差が特に大きくなっているのは、平均風速の最も大きいところが11000～12000mで、高度19000m位のところから風が弱くなっている事からゾンデが流されて水平距離が大きくなり、観測点からみたゾンデの仰角が低くなるのが偏差の原因ではないかと思われる。参考に1988年11月14日9時のゾンデの仰角の変化を図3.6に示す。

風向については、平均風速の大きい高度8000～14000mでは2°以内の偏差で良くあっている。一方、平均風速が10m/s以下である2000mより下の高度と22500m以上では、約10～20°位の偏差となっている（図3.5 a）。

表3.5 全ゾンデ観測の高度毎の風速の相関係数と分散

高 度	デ - タ 数	風速偏差の絶対値の平均(m/s)	風向偏差の絶対値の平均(°)	風速の相関係数
500m	63	1.18	15.54°	0.908
1000m	63	1.08	10.82°	0.920
1500m	63	1.15	10.80°	0.928
2000m	63	1.14	9.26°	0.944
3000m	63	1.13	5.86°	0.967
4000m	63	0.96	3.82°	0.985
5000m	63	1.12	2.59°	0.979
10000m	62	1.45	1.31°	0.996
20000m	57	1.40	15.65°	0.975

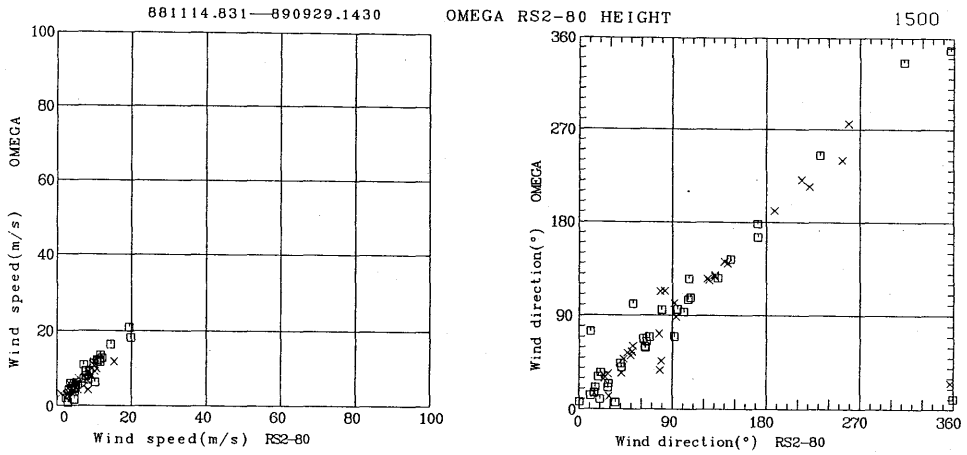


図3.4 a ゾンデの高度別の風速・風向の相関図1500m (□：同時飛揚，×：連結飛揚)

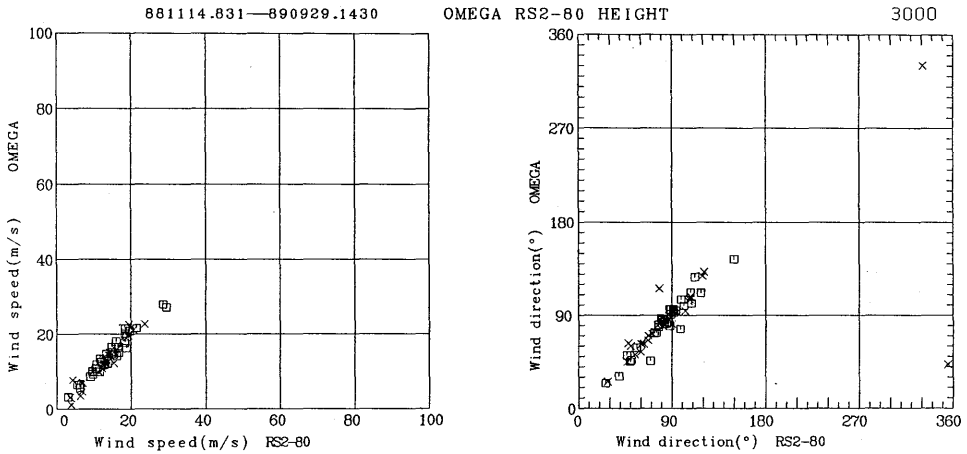


図3.4 b ゾンデの高度別の風速・風向の相関図3000m (□：同時飛揚，×：連結飛揚)

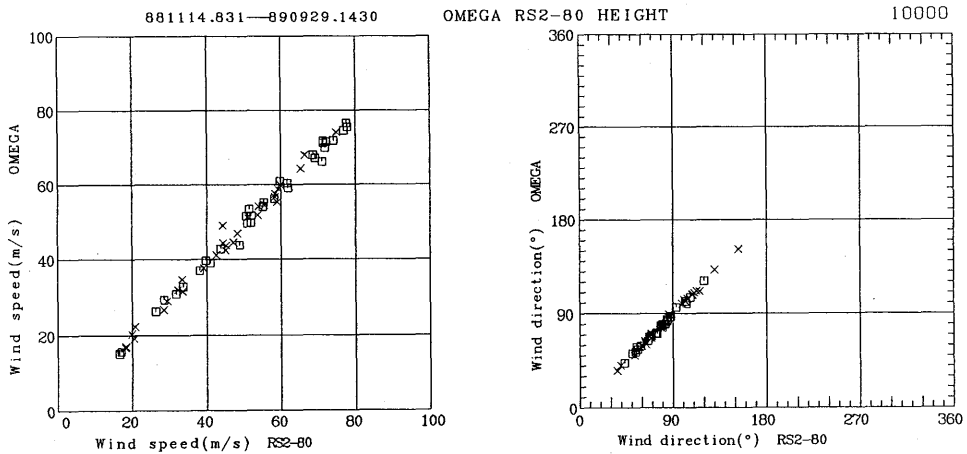


図3.4 c ゾンデの高度別の風速・風向の相関図10000m (□：同時飛揚，×：連結飛揚)

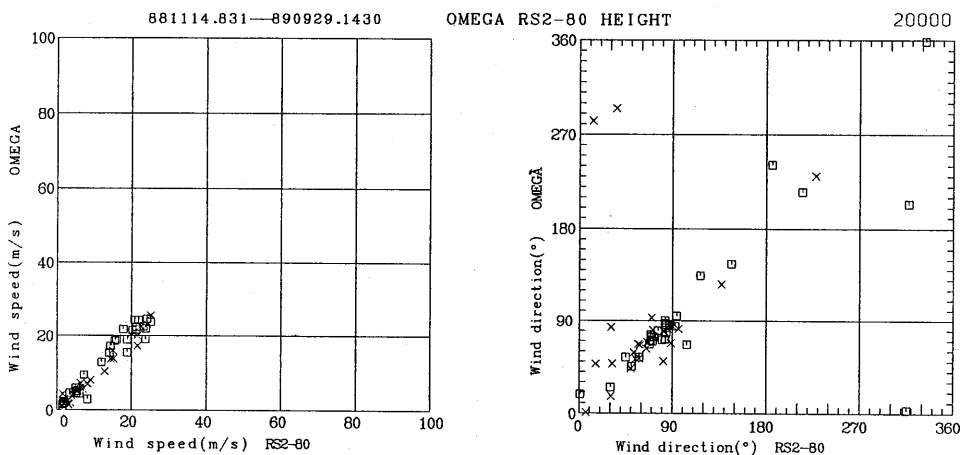


図3.4 d ゾンデの高度別の風速・風向の相関図20000m (□：同時飛揚，×：連結飛揚)

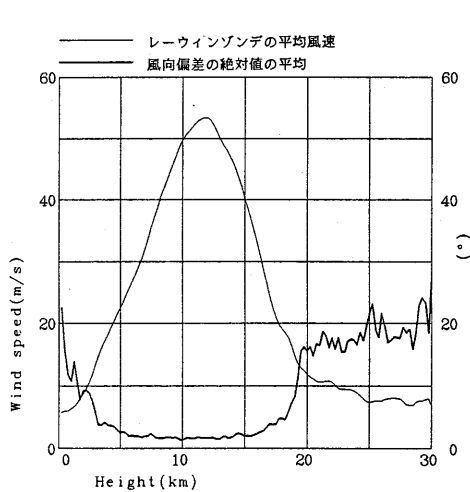


図3.5 a レーウィンゾンデの平均風速と風向差の絶対値の平均

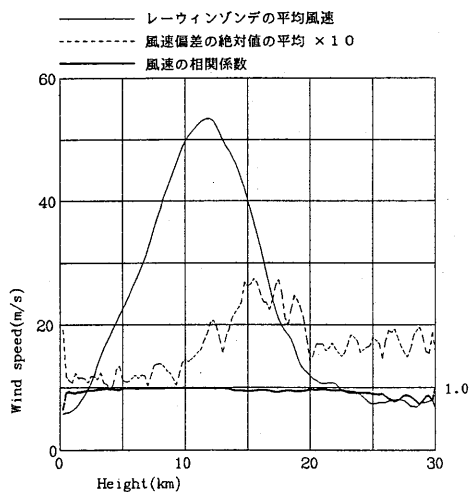


図3.5 b レーウィンゾンデの平均風速と風向差の絶対値の平均と風速の相関係数

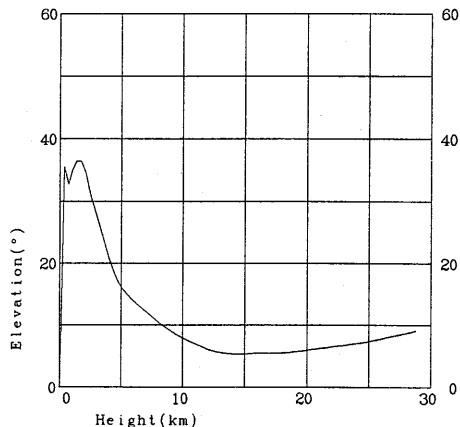


図3.6 レーウィンゾンデの高度とアンテナ仰角の例 (1988年11月14日9時の観測)

3.2 ウィンドプロファイラとゾンデ

3.2.1 測定原理の差異による観測値の取扱上の注意

レーウィンゾンデとウィンドプロファイラでは、測定の方法が異なる。したがって、両データを比較する際に、以下のような両者の違いがある事を念頭に置いて置く必要がある。レーウィンゾンデは風に流される気球を追跡して、その移動量より風向風速を求めるラグランジュ的な測定になる。それに対してウィンドプロファイラでは、大気中の渦や水蒸気や圧力の乱れ等から散乱する電波のドップラーシフトより風向風速を求める。気象研究所のウィンドプロファイラは、地上に固定されたアレイアンテナにより三方向の速度成分を求め、水平風と鉛直風速を求める。したがって、いつも同じ空間の風成分を見ていることになり、オイラー的測定になる。このことは時間の分解能が高い事もあり、ウィンドプロファイラは風に関していえば、数値予報の初期値になじみ易いのではないと思われる。なお、研究所の400MHzのウィンドプロファイラは、性能的には0.5kmから16kmまでの高度を測定できるが、この比較観測中には、ウィンドプロファイラシステムが完全な状態ではなかったため、10km程度の観測にとどまっている。今回利用したウィンドプロファイラのデータは、1時間の平均風である。ウィンドプロファイラは毎正時から1時間の平均をその正時の観測値としている。ただし、高度500mなど明らかに異常な測定データは、人間の判断によって取り除いてある。一方、ゾンデは正時前30分に放球し、約80分間かけて観測する。

3.2.2 データの相互比較

観測例を示す。比較的一致している例(図3.7a)、比較的一致していない例(図3.7b)。観測期間中に比較的安定してデータが取得できた高度750mから6000mまでのデータについて比較した。全期間の82観測データについて、各高度毎の風速の差の絶対値の平均、風向差の絶対値の平均、風速の相関係数、及びレーウィンゾンデ観測による平均風速を表3.6に示す。これらを図にしたものが、図3.8a, bである。風速については、1~1.6m/s程度の差であり、レーウィンゾンデとオメガゾンデ観測の高度750mから6000mまでの風速差1~1.3m/sとはほぼ近い値になっている。風向については、平均風速が10m/s以下である高度2000m以下では、7~15°位の風向差になっている。一方、大気の流れが比較的安定して一定時間大気の流れが一様であるとするウィンドプロファイラの仮定を良く満たす高度(図3.10a, b参照)3000~6000mでは、約4~5°の風向差であり、同高度におけるゾンデ相互の風向差約2~6°にはほぼ近い値となっている。

高度1000m, 1500m, 2000mの各高度における風速、風向の相関図を図3.9に示した。

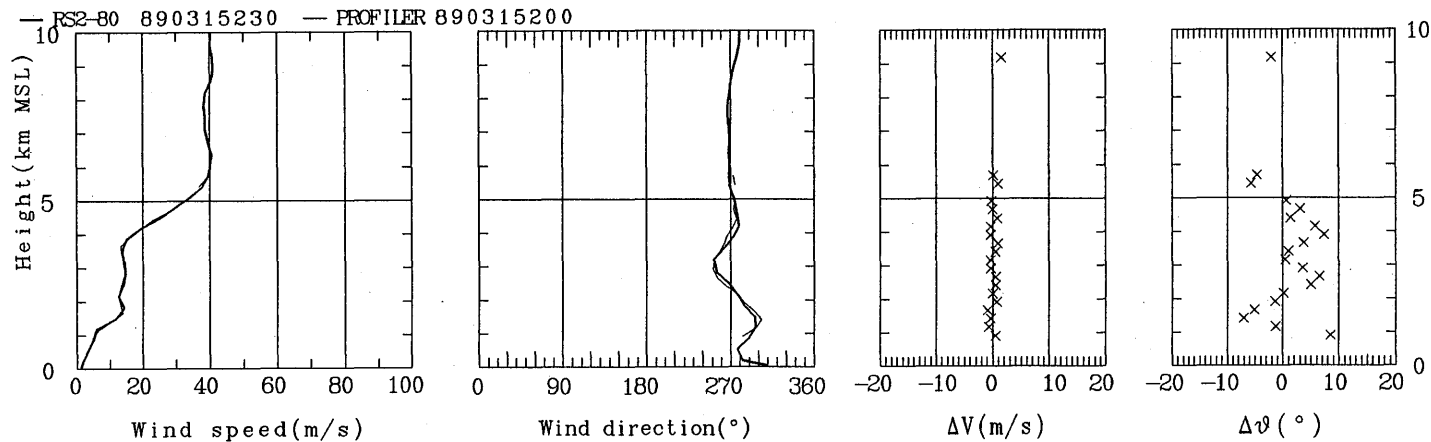


図3.7a ウィンドプロファイラとレーウィンゾンデの比較 (良くあっている例)

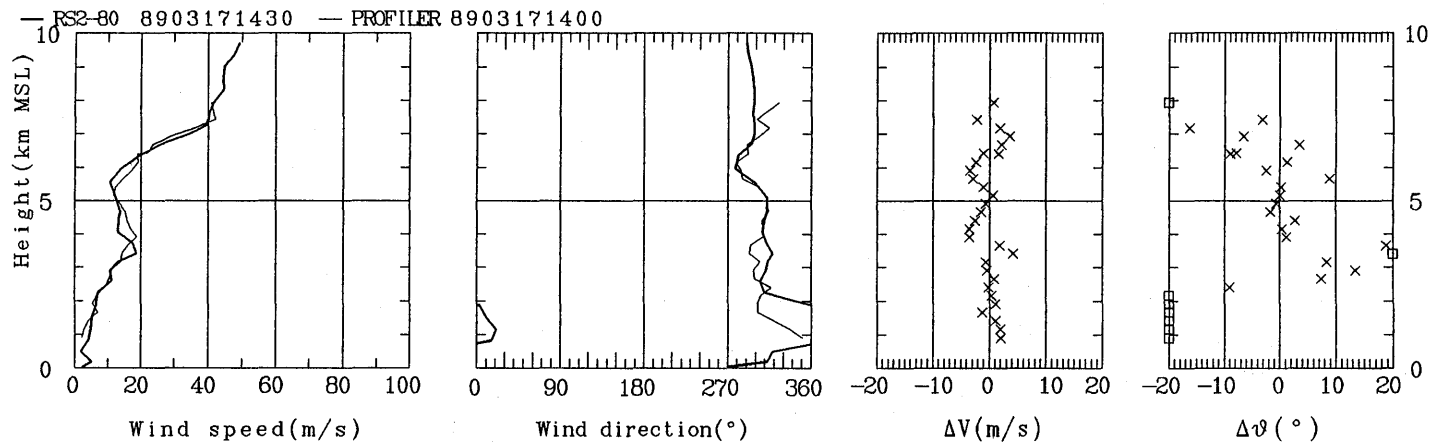


図3.7b ウィンドプロファイラとレーウィンゾンデの比較 (余りあっていない例)

表3.6 ウィンドプロファイラとレーウィンゾンデ (風速差：偏差の絶対値平均, 風向差：偏差の絶対値平均, 風速相関：風速の相関係数, 平均風速：レーウィンゾンデの風速平均)

高度 (m)	風速差(m/s)	風向差 (°)	風速相関	平均風速(m/s)	データ数
750	1.1	15	0.87	5.3	40
1000	1.3	13	0.88	6.1	82
1500	1.4	12	0.84	7.4	82
2000	1.1	7.4	0.92	9.1	79
2500	1	7.7	0.93	11	77
3000	0.9	4.5	0.97	13	67
3500	1	5.3	0.98	15	59
4000	1	3.9	0.98	18	52
4500	1	4.1	0.98	20	44
5000	1.1	4.6	0.98	22	43
5500	1	3.5	0.99	24	44
6000	1.6	4.1	0.98	26	44

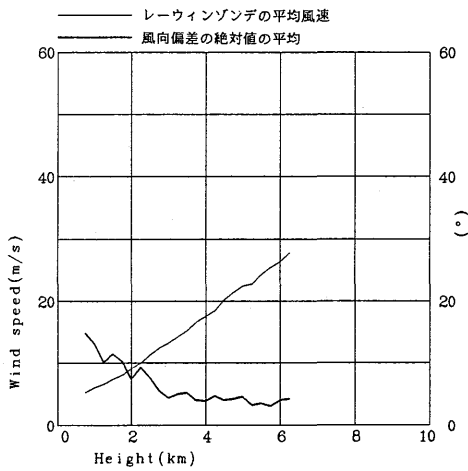


図3.8 a レーウィンゾンデの平均風速と風向偏差の絶対値の平均

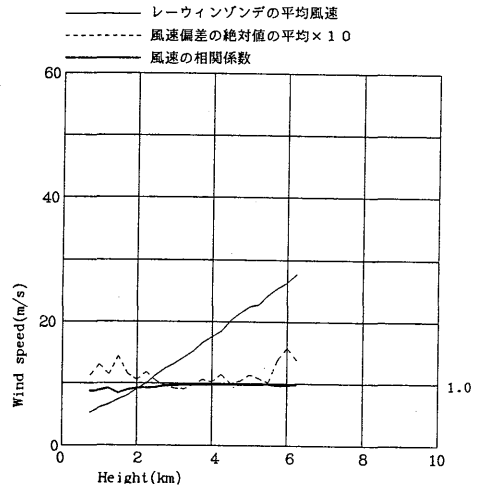


図3.8 b レーウィンゾンデの平均風速と風速差の絶対値の平均と風速の相関係数

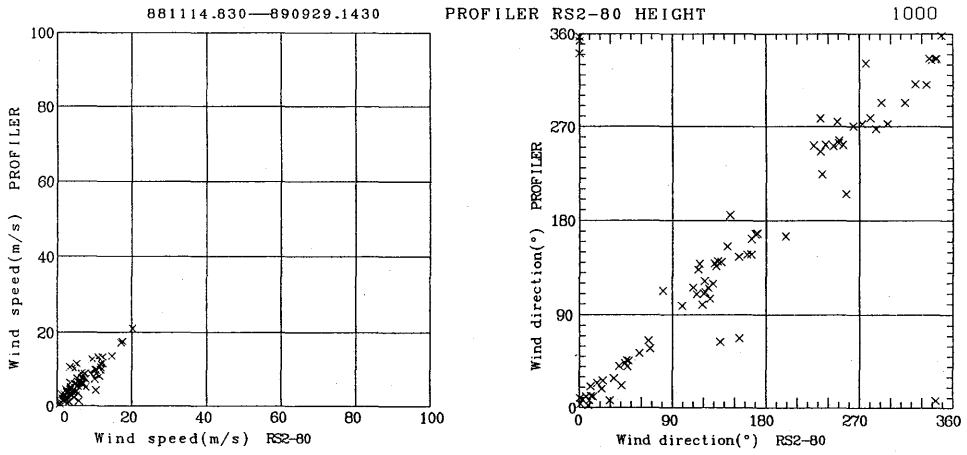


図3.9a レーウィンズンデとウィンドプロファイラの風速・風向の相関 (1000m)

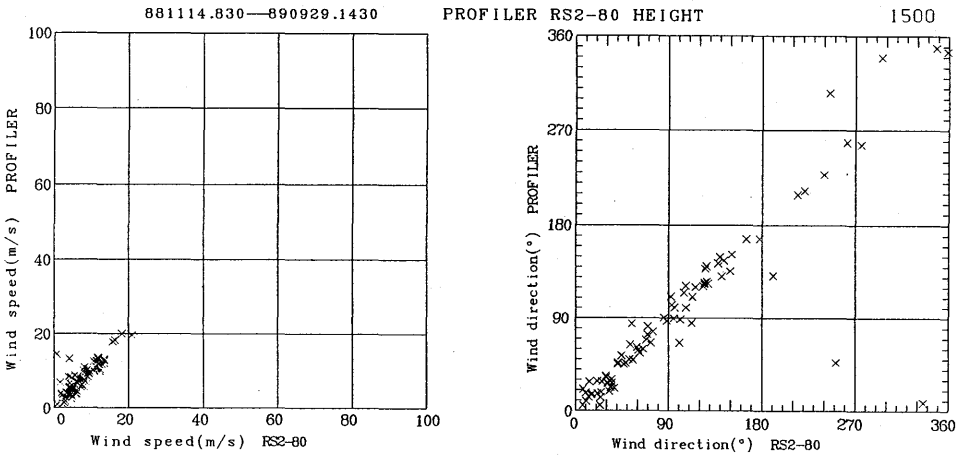


図3.9b レーウィンズンデとウィンドプロファイラの風速・風向の相関 (1500m)

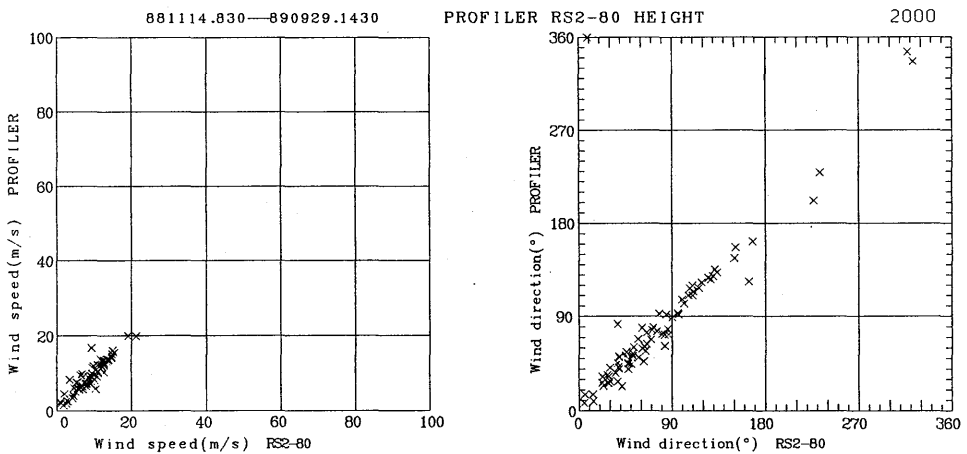


図3.9c レーウィンズンデとウィンドプロファイラの風速・風向の相関 (2000m)

03/13/89 GMT
 36.05 N
 140.12 W
 27 m MSL
 Frq. = 404.37 MHz
 Acq. Mode = LOW
 PRP = 100.0 us
 Vert. Res. = 250 m
 Vert. Spac. = 250 m
 Lowest Hgt. = 201 m AGL
 Data Type = 6 Min. Avg.

KEY TO SPEED IN M/S

0	2.5	5	10
15	20	25	30
35	40	45	50

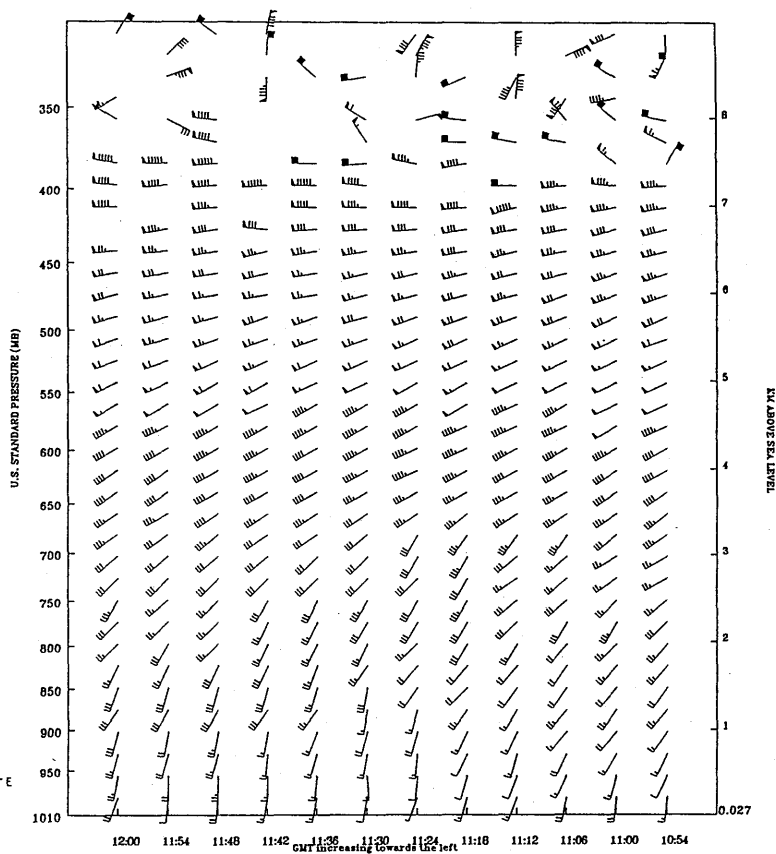
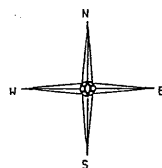


図3.10 a ウィンドプロファイラによる風のプロフィール (日本時間1989年3月13日19時54分から21時0分まで6分毎のデータ)

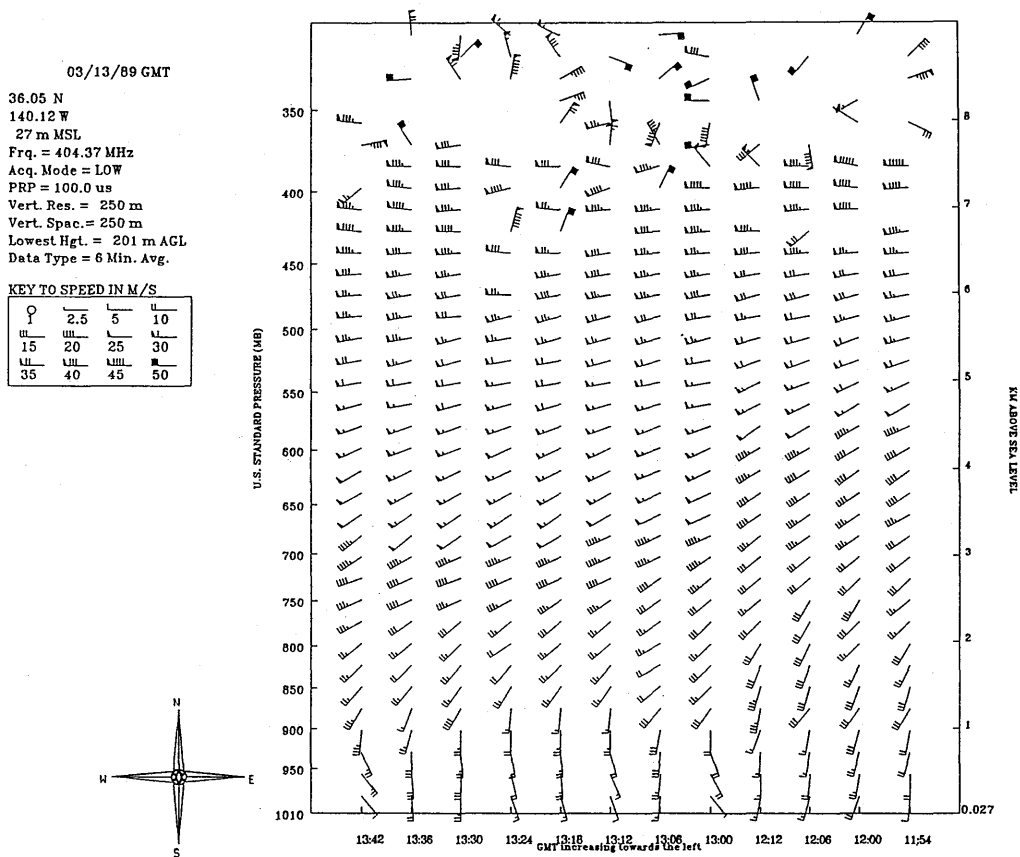


図3.10 b ウィンドプロファイラによる風のプロファイル (日本時間1989年3月13日20時54分から22時42分まで6分毎のデータ)

3.3 ウィンドプロファイラとドップラーレーダ

ウィンドプロファイラもドップラーレーダの一種であり、その風の測定原理はCバンドレーダ、Xバンドレーダと同様である。レーダの上空の風速が水平方向に一樣と仮定して通常のドップラーレーダでは、鉛直プロファイルを求めるために、VADと呼ばれる方法で、多方向のデータを使うのに対して、同様な仮定によりウィンドプロファイラでは、3方向のデータを利用して風向、風速を測定する。ドップラーレーダでは、1回転1分間のデータを使う。

気象研のウィンドプロファイラは、周波数400MHzであるが、大気の流れによる散乱のほかに、降水粒子の影響も受ける。この時大気の動きが降水粒子の動きと混じりあって測定され、ドップラースペクトルにダブルピークが見られる事もある。比較的高い周波数のレーダでは、大気への反射は降水粒子の後方散乱に対して無視できるので、Cバンドレーダでは、降水粒子の速度を主として測定していることになる。

風が一樣に近いと思われる1989年3月13日20時から21時30分の間で、レーダ約13分毎のデータ、6分毎のウィンドプロファイラのデータを比較した。この時のウィンドプロファイルは図3.10 a, bであり、ほぼ一樣の風が吹いていると思われる高度を比較する。この時の約2900m高度の風向、風速、鉛直速度を表示したのが図3.11 a, b, cである。鉛直速度はほぼ -1 m/s であり、21時のゾンデ温度データを見ると、この高度約2900mでは $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下で、 -1 m/s は雪氷

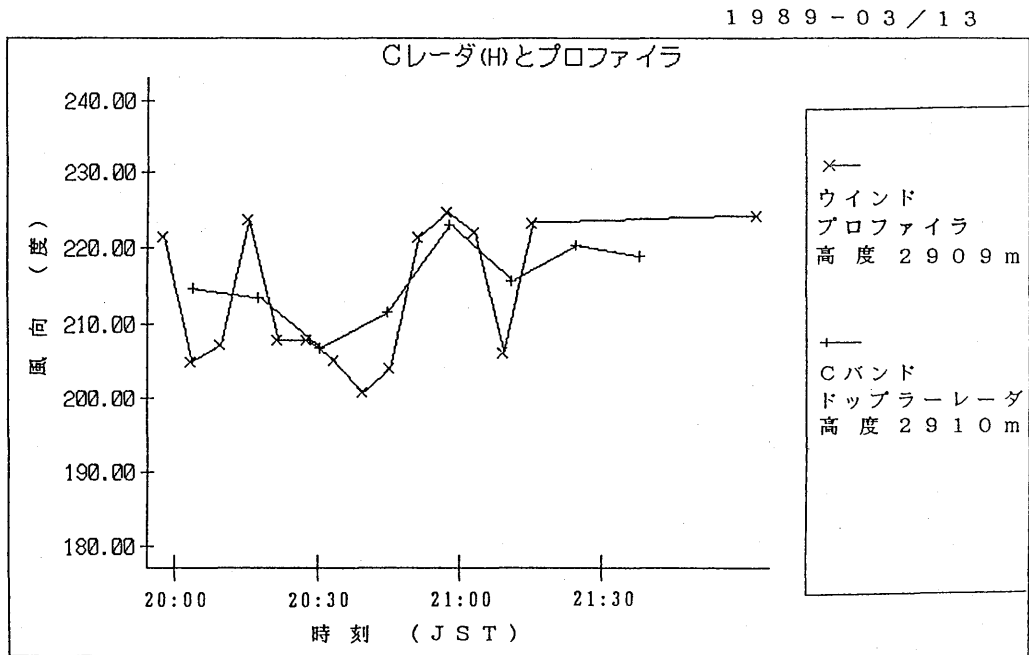


図3.11 a ウィンドプロファイラとCバンドドップラーレーダの高度2900mの比較 (風向)

粒子の落下速度であると思われる。風向は $\pm 10^\circ$ 程度の差、風速は ± 2 m/s程度であり、偏差について特別な傾向はないようである。

1989-03/13

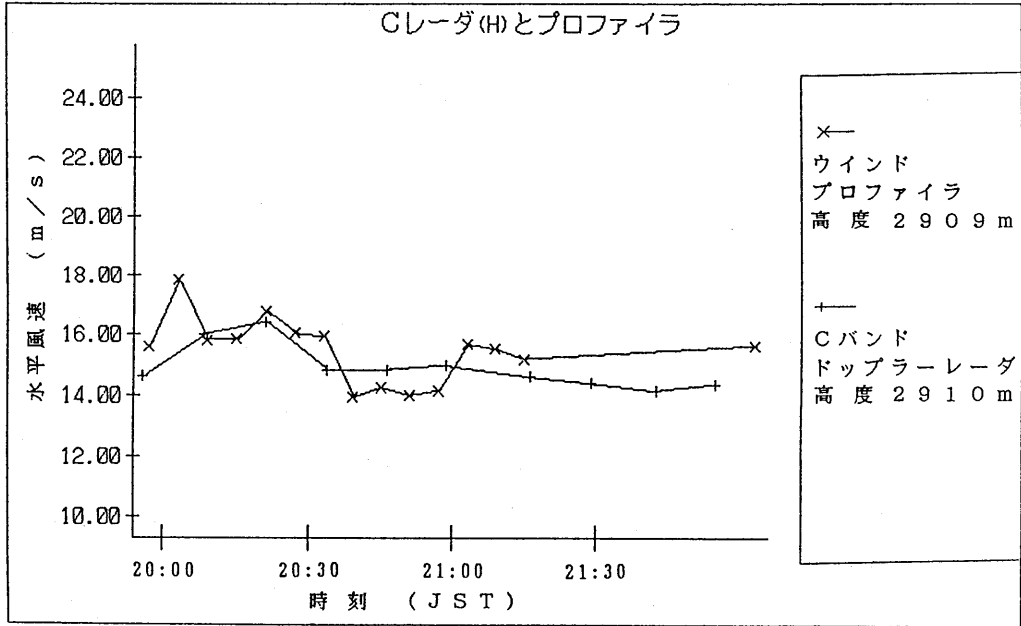


図3.11b ウィンドプロファイラとCバンドドップラーレーダの高度2900mの比較 (風速)

1989-03/13

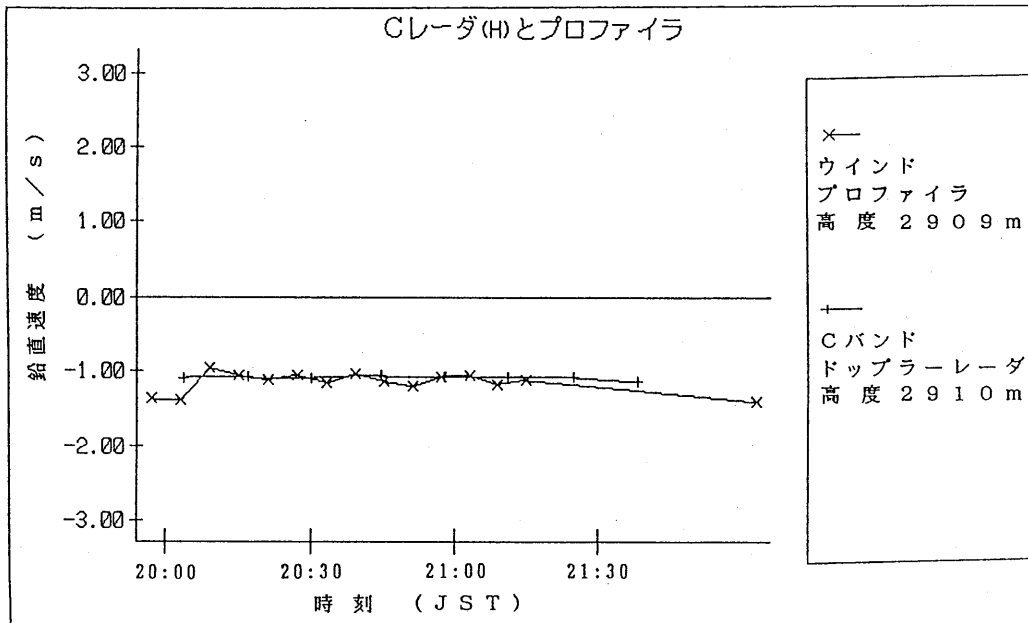


図3.11c ウィンドプロファイラとCバンドドップラーレーダの高度2900mの比較 (鉛直風速)

同様に1989年6月22日20時から22時のデータをプロットしてみる。この時の風のプロファイルは、図3.12 a, bとなる。一様風と考えられる約4000mの高度は、ゾンデの温度によると、0℃以上であり、鉛直速度は主に雨滴の落下速度であると思われる。21時で鉛直速度は、 -2.5m/s ぐらいになる(図3.13 a, b, c)。鉛直流の偏差は、 $\pm 0.5\text{m/s}$ 以内にある。風向は細かい変動を繰り返すが、変動幅は若干ウィンドプロファイラの方が大きい。水平風速はウィンドプロファイラの方が小さめである。

一方、ドップラーレーダの1時間平均風とウィンドプロファイラの1時間平均風について、250m毎に風速の相関を取ってみると、3500mから7500mまで0.87~0.99程度になっている。1000mから1750mでは、0.33~0.60になる。(図3.14 a~e) 高度の低いところで相関係数が悪い(表3.7 a)。高度の低いところでは、風が弱く、また、風向の変化が図3.10より判るように大きいと思われる。表3.7 bに高度差250mで 150° 以上、風向変化があったデータを取り除いて、

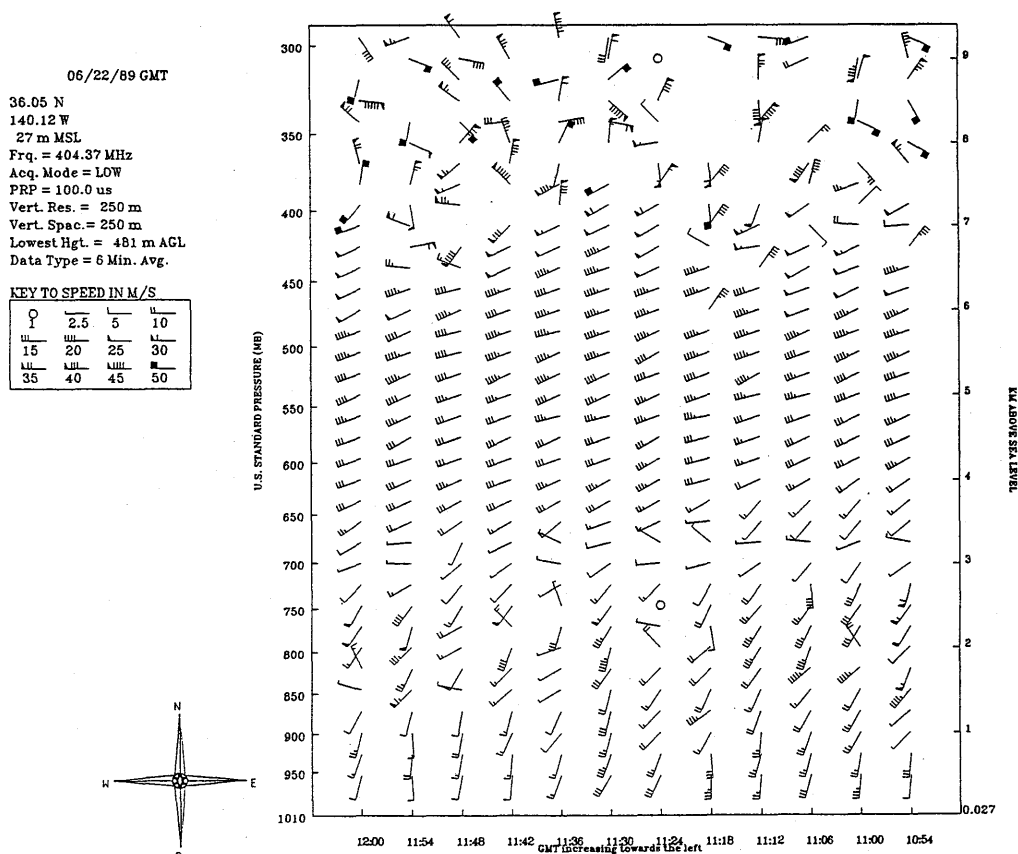


図3.12 a ウィンドプロファイラによる風のプロファイル (日本時間1989年6月22日19時54分から21時0分)

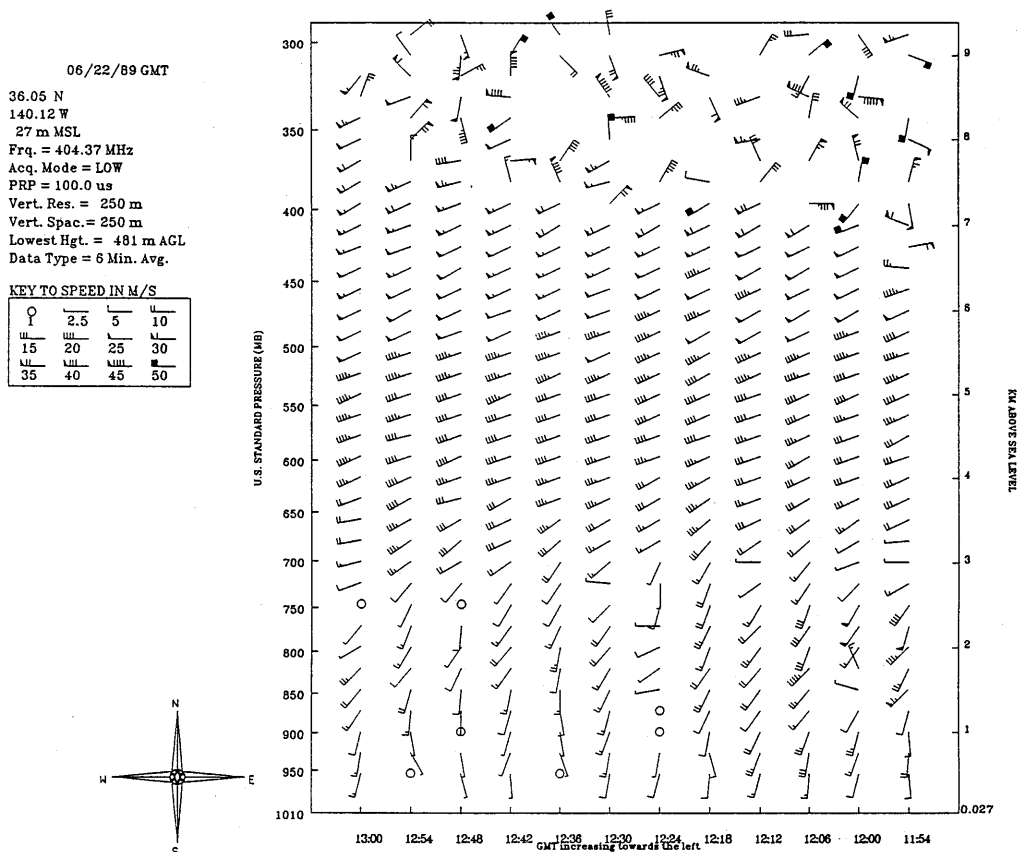


図3.12 b ウィンドプロファイラによる風のプロファイル (日本時間1989年6月22日20時54分から22時0分)

1時間平均したC-バンドレーダとウィンドプロファイラの1時間平均の相関係数を載せた。若干相関係数は良くなる。

X-バンドレーダの場合、観測データは他の研究計画の都合により、約1日分のデータしか得られなかった。またRFアンプの故障により受信感度が下がっているため、余り高い高度のデータは得られていない。1989年3月13日のデータを図にしたのが図3.15 a, bである。風向は、 $\pm 10^\circ$ 、風速は $\pm 1 \text{ m/s}$ 程度の差になっている。C-バンドレーダとの比較とほぼ同じ様な結果である。

1989-06/22

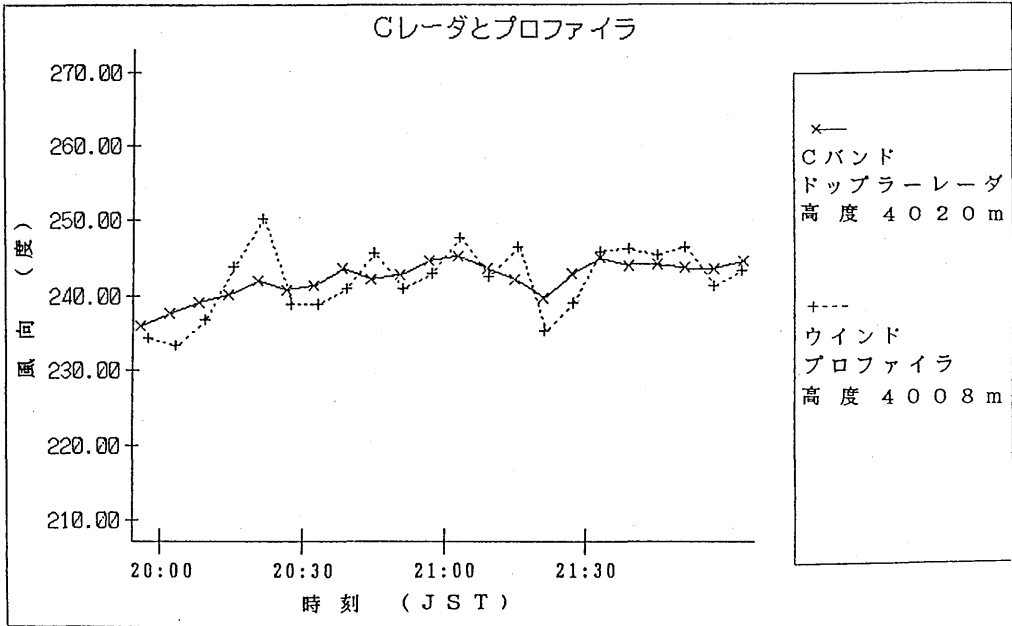


図3.13a ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの高度4000mの比較 (風向)

1989-06/22

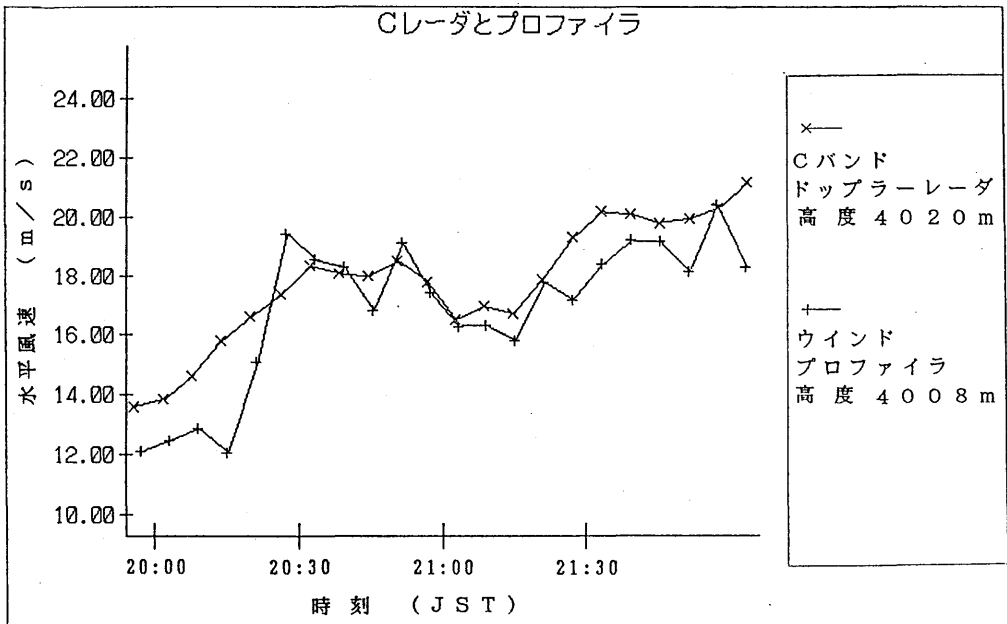


図3.13b ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの高度4000mの比較 (風速)

1989-06/22

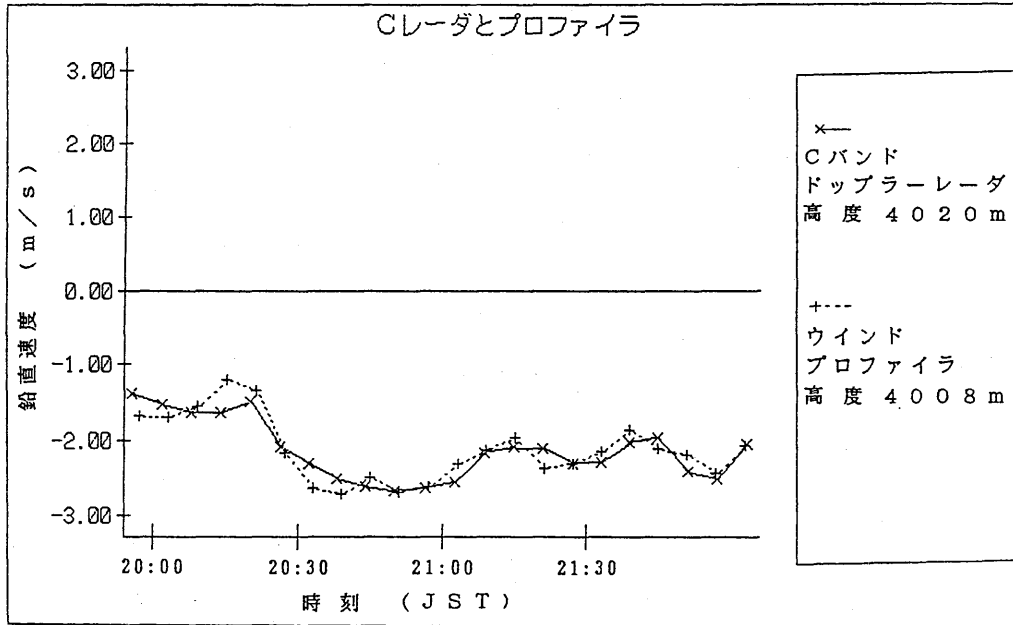


図3.13c ウィンドプロファイラとCバンドドップラーレーダの高度4000mの比較 (鉛直風速)

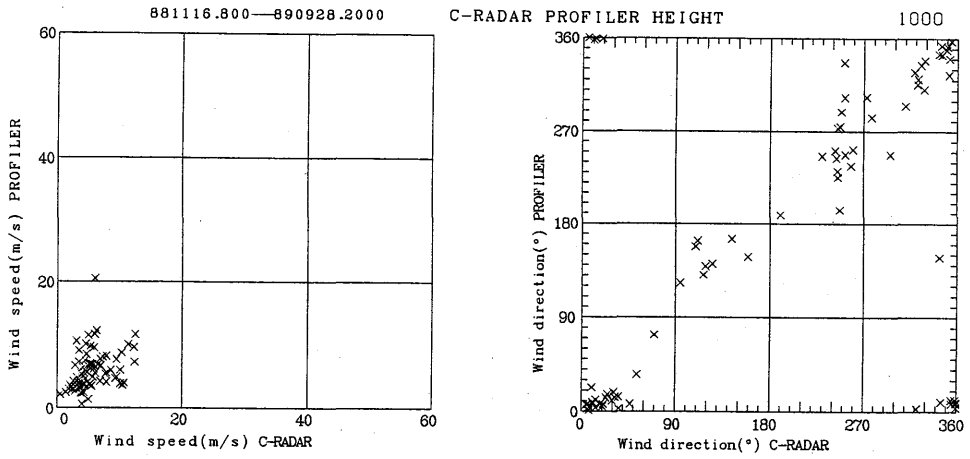


図3.14a ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの相関図 (1000m)

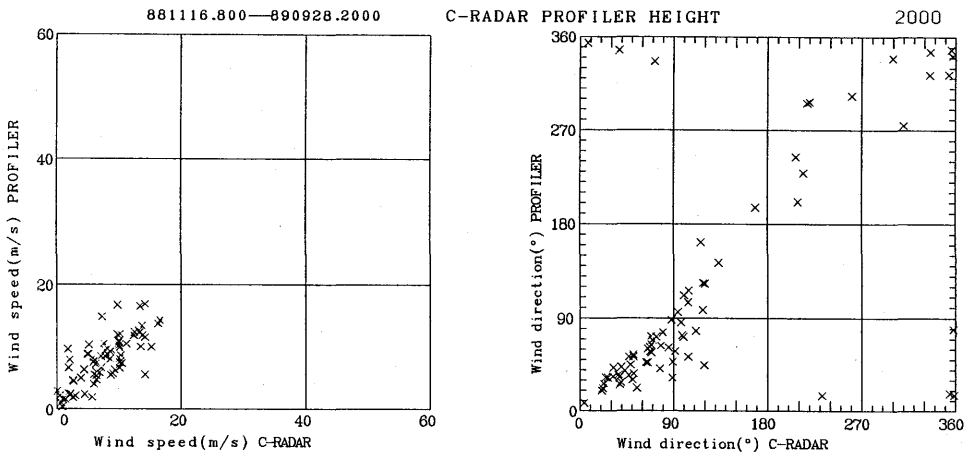


図3.14b ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの相関図 (2000m)

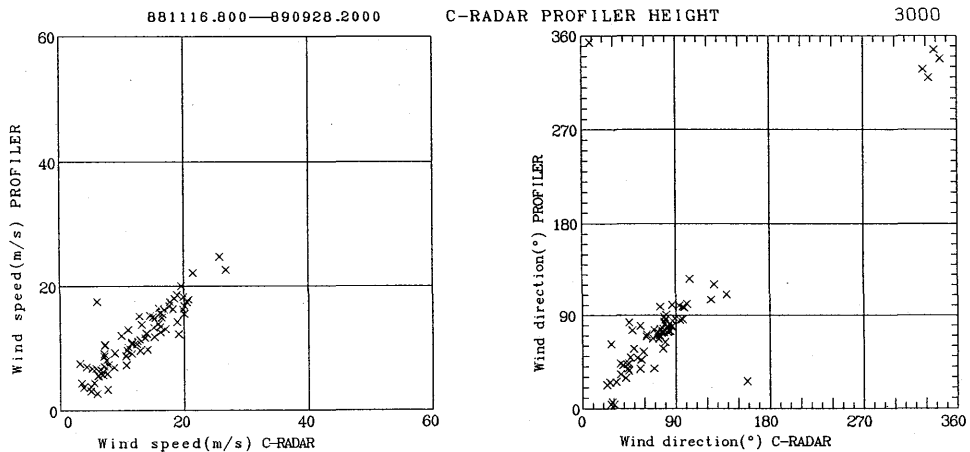


図3.14c ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの相関図 (3000m)

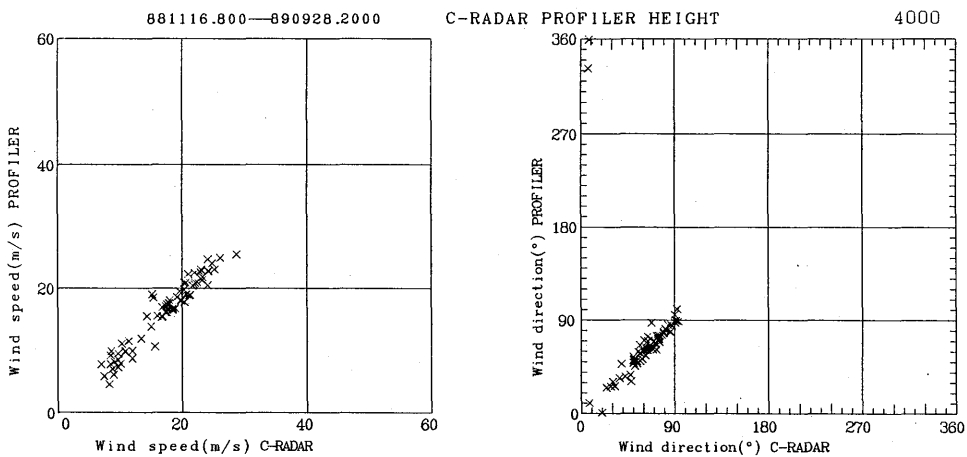


図3.14d ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの相関図 (4000m)

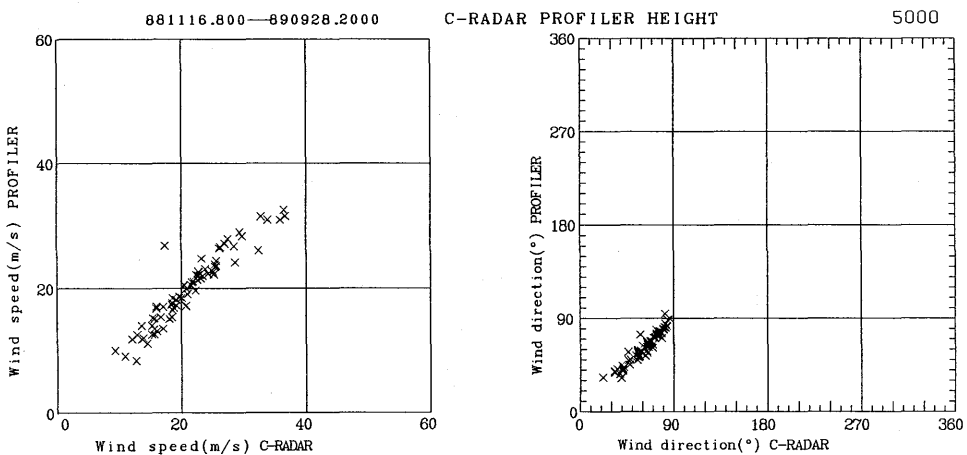


図3.14e ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの相関図 (5000m)

表3.7a ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの風速とその相関係数(全データ)

高 度 (m)	データ数(個)	風速の平均 (m/s) (C-レーダ)	風 速 の 相 関 係 数
750	55	5.0	0.38
1000	70	5.6	0.33
1250	68	5.9	0.54
1500	69	6.0	0.48
1750	71	7.5	0.60
2000	70	7.3	0.82
2250	66	8.0	0.80
2500	67	9.3	0.86
2750	71	10.6	0.90
3000	73	12.0	0.87
3250	72	14.0	0.62
3500	70	15.0	0.94
3750	70	15.8	0.98
4000	69	16.9	0.97
4250	70	17.6	0.96
4500	72	18.7	0.94
4750	74	19.9	0.93
5000	73	21.3	0.97
5250	72	22.1	0.97
5500	72	23.4	0.97
5750	71	24.7	0.97
6000	73	25.9	0.97
6250	70	27.0	0.98
6500	66	28.5	0.98
6750	65	30.2	0.99
7000	61	31.0	0.97
7250	53	31.1	0.93
7500	45	29.6	0.87
7750	40	28.9	0.79
8000	34	27.8	0.99
8250	32	27.5	0.98
8500	24	25.0	0.96
8750	22	25.4	0.97
9000	16	25.9	0.98

表3.7b ウィンドプロファイラとC-バンドドップラーレーダの風速とその相関係数（高度差250mで150°以上風向変化のあるものを除した場合）

高度 (m)	データ数 (個)	風速の平均 (m/s) (C-レーダ)	風速の相関係数
750	49	4.6	0.59
1000	60	5.4	0.45
1250	60	5.7	0.59
1500	60	5.5	0.57
1750	61	6.1	0.62
2000	60	7.1	0.82
2250	59	8.0	0.80
2500	59	8.9	0.86
2750	58	10.1	0.89
3000	59	11.6	0.88
3250	59	13.0	0.97
3500	60	14.4	0.97
3750	60	15.7	0.98
4000	59	15.9	0.97
4250	59	18.5	0.96
4500	58	19.6	0.96
4750	58	20.8	0.97
5000	58	21.8	0.97
5250	58	22.7	0.98
5500	58	23.5	0.97
5750	58	24.3	0.97
6000	59	25.5	0.97
6250	56	27.0	0.98
6500	52	26.9	0.98
6750	51	28.0	0.99
7000	47	28.0	0.97
7250	40	28.0	0.95
7500	34	27.0	1.00
7750	32	26.6	1.00
8000	29	24.6	0.99
8250	28	24.8	0.98
8500	23	24.5	0.96
8750	21	23.9	0.79
9000	15	23.8	0.77

1989-03/13

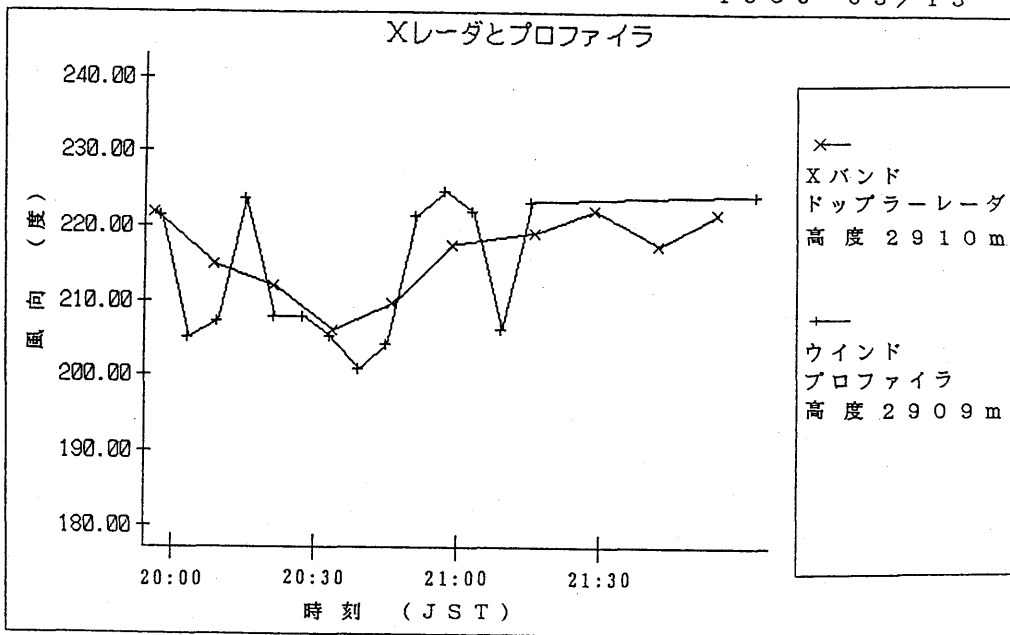


図3.15 a ウィンドプロファイラとX-バンドドップラーレーダの高度2900mの比較 (風向)

1989-03/13

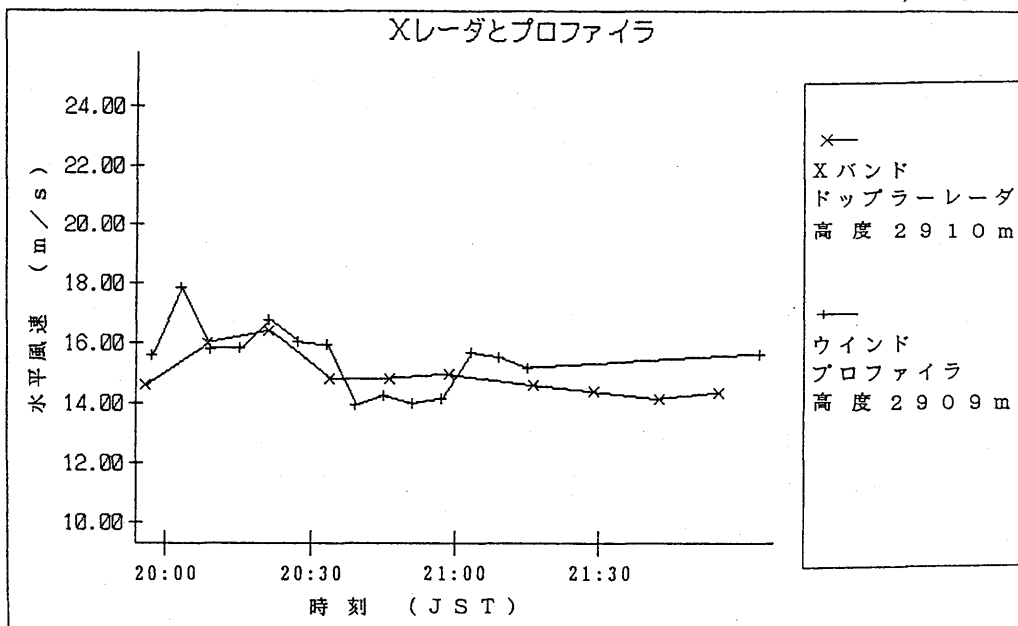


図3.15 b ウィンドプロファイラとX-バンドドップラーレーダの高度2900mの比較 (風速)

3.4 ドップラーレーダ

C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダのVAD法による比較を行う。VAD法は、仰角を一定にして収集した全方位（X-バンドレーダで360方向、C-バンドレーダで256方向）のドップラー速度のデータを、各高度（使用するデータは、水平な円周上に分布している）での風の間が一様であるとして理論曲線を当てはめることにより、風向・風速・鉛直速度などを算出する方法である。この場合、高度が高くなるに従って、レーダからの水平距離も大きくなることから、VAD法で得られる風向・風速等はその高度に対応する水平距離のスケールで平均した値とみなせる。

VAD法により得られた水平風のデータを使って、対応する時刻での高度プロファイルの比較および対応する高度での時間変化傾向を見る。

1989年3月13日の時点では、C-バンドレーダが地形エコー除去フィルターを備えているのに対して、X-バンドレーダは備えておらず、地形エコーの影響を受けている。

比較にあたっては、両レーダとも、仰角23.6度のものを使用した。

1) 理論的な誤差評価

VAD法の誤差の要因としては

- ①測定値に含まれる偶然誤差。ターゲットが多数の粒子からなることにより、ドップラースペクトルが広がりを持つために生じる測定誤差も含む。
- ②観測値が有限桁で表現されることによる量子化誤差
- ③ターゲットの鉛直速度の不均一
雲内の複雑な気流によるものと、落下速度の不均一によるものがある。
- ④風の間の一様性（時間、空間）
発散や渦、前線、その他の原因による風の間の一様性の時間・空間的な変化。

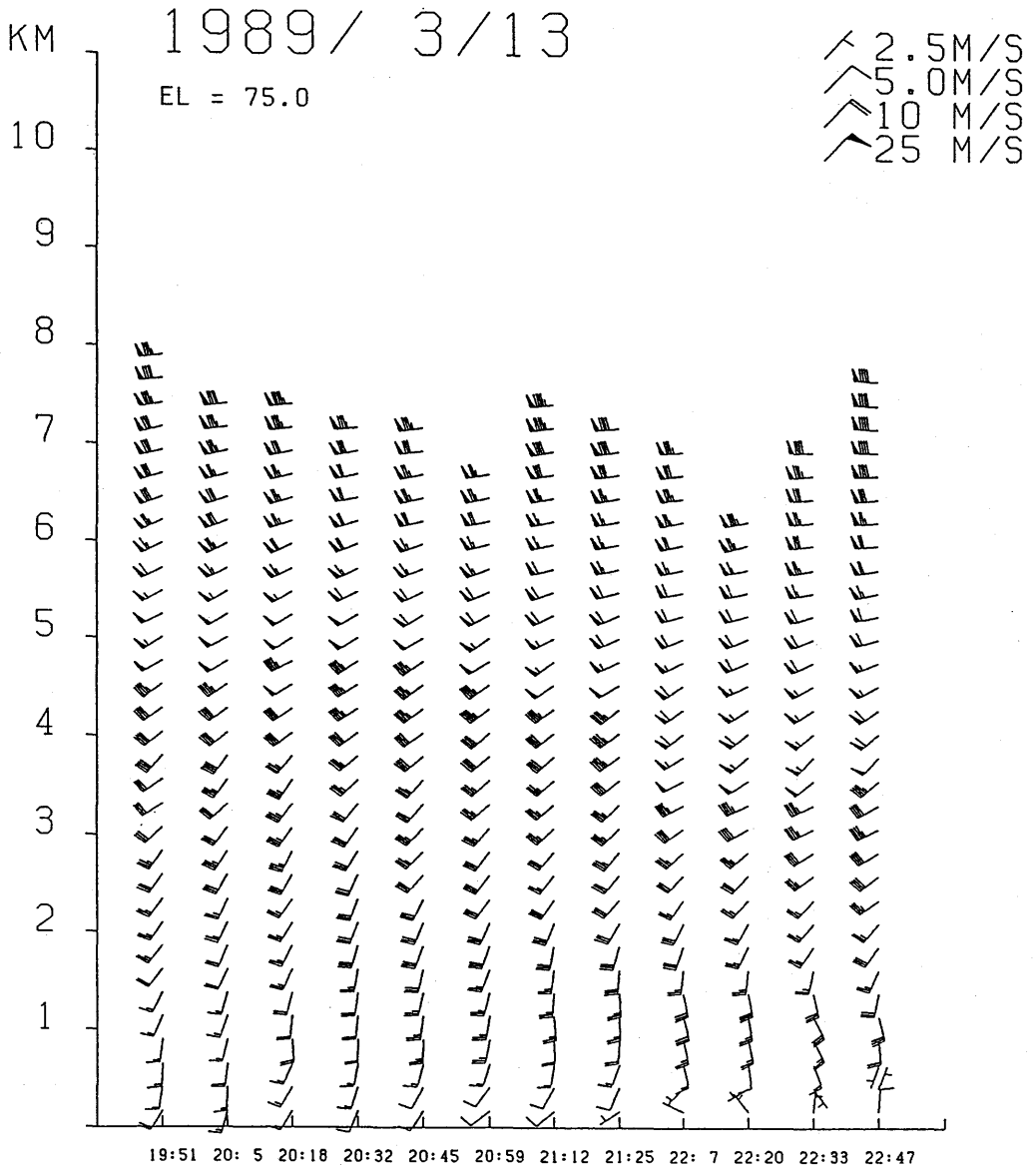
2) 観測データからの見積り

1989年3月13日の20～22時の間に得られたデータにより比較する。ウィンドプロファイルの時系列からみて、この時の風の変化は比較的穏やかであった（図3.16）。

この時間帯では、高度2km付近にブライトバンドがあり、これより上空ではターゲットは雪（落下速度約1m/s）、下では雨（落下速度約6m/s）である（図3.17）。

①高度プロファイルでみた差

地上から4.5km付近までの風のプロファイルによると、風速は単調に増加して4km付近で20m/sを越える（図3.18）。X-、C-バンドレーダ間の差を見ると、風速は平均値で0.18m/s程度C-バンドレーダによる観測値の方が大きく、標準偏差は0.45m/sとなっている（図3.19a）。風向では、平均値で約1度、標準偏差でも約1度の差が生じている（図3.19



WIND PROFILE

図3.16 1989年3月13日のC-バンドドップラーレーダによる風のプロファイル

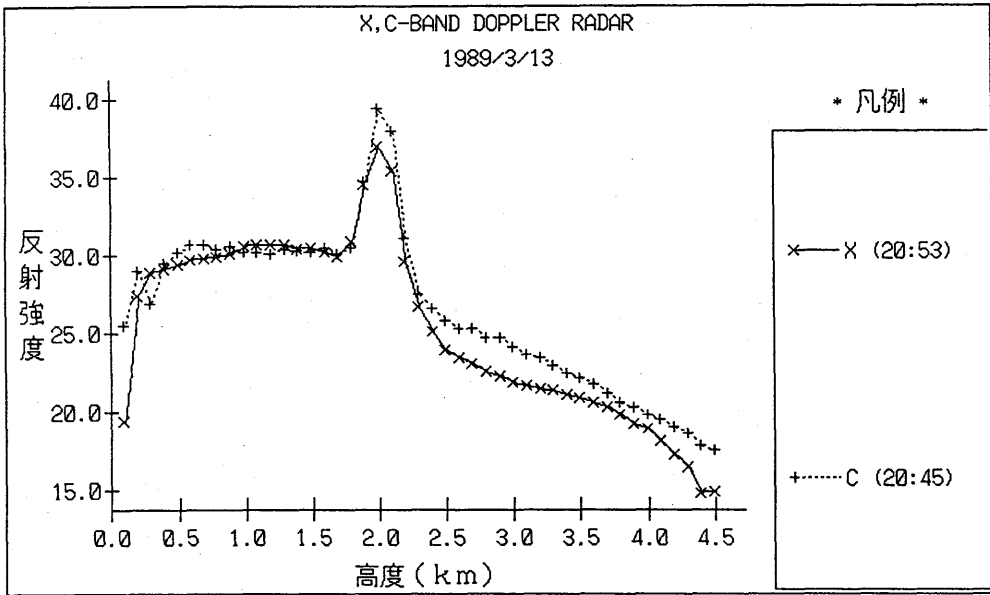


図3.17 C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの高度別反射強度

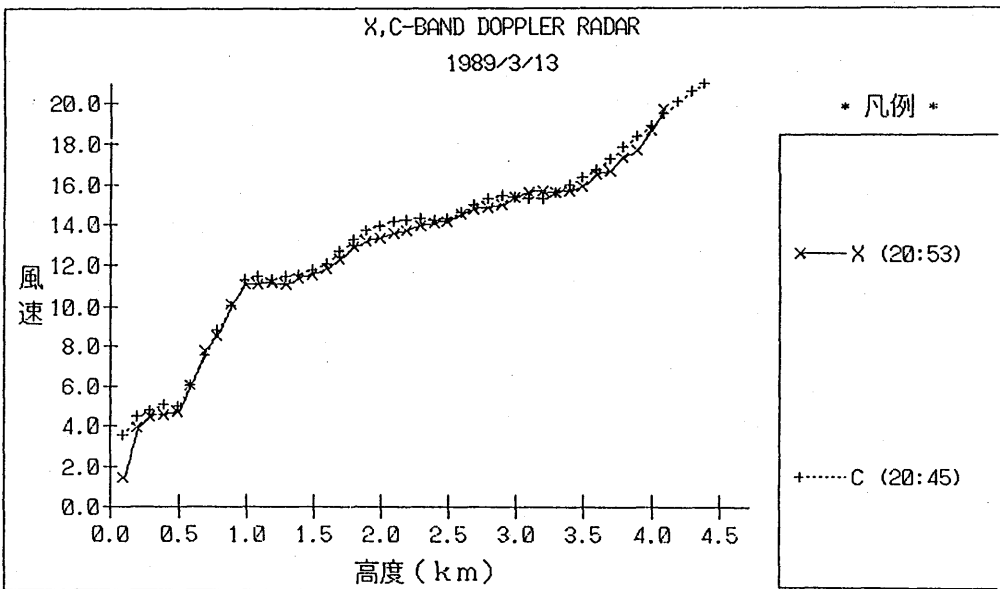


図3.18 C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの1989年3月13日20時50分頃の高度軸上での比較 (風速)

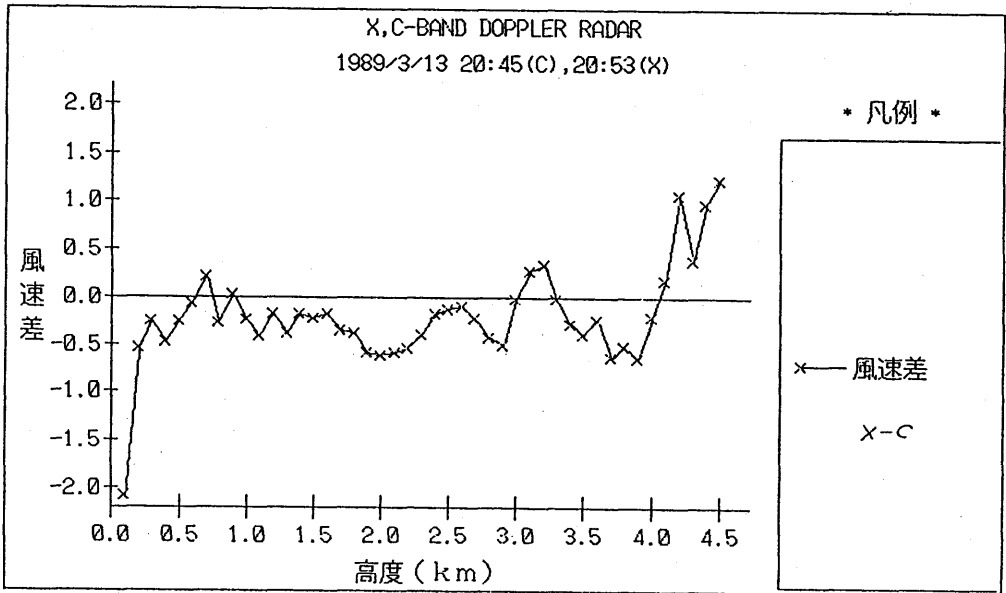


図3.19 a C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの高度軸の1989年3月13日20時50分頃の比較（風速）

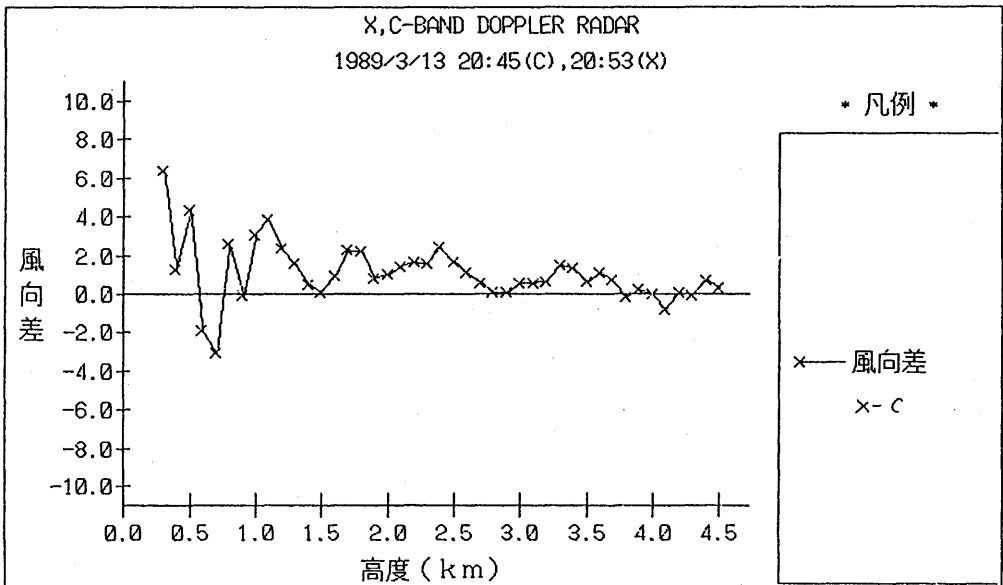


図3.19 b C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの高度軸の1989年3月13日20時50分頃の比較（風向）

b)。

地上から0.5km付近までの差が大きいのは、この観測の際にはX-バンドレーダのデータが地形エコーの影響を受けていることによる。

以上から、比較的一様な風の場合では、実際の観測で0.5m/s程度の差で風速が測られているとみてよい。

②時間変化でみた差

気象研究所のC-, X-バンド両レーダを研究所構内において比較した結果、風の場合が一様な場合の両レーダによる観測値の差の標準偏差は観測では0.5m/s程度であった。穏やかな時でも結構変化が多いことが見て取れるが、10分程度の時間変化の項が差のオーダーと同じ位であるため、実際の差はもっと小さいはずである。

比較的長時間変化の穏やかな高度(2.9kmを採用)で、時系列を見た(図3.20 a, b)。20~22時のデータでは、前項①と同様な値が得られる。時間変化傾向も当然ながらよく一致している。

図3.21 a~eに風速、風向の相関図を示した。高度の高いところほど変化が少なくなる。250m毎のデータ、サンプリングで対応する高度がない場合、上下データの内挿によってデータを得ている。最多で36個のデータがあるが、500mから2250mまで0.9程度の相関がある。

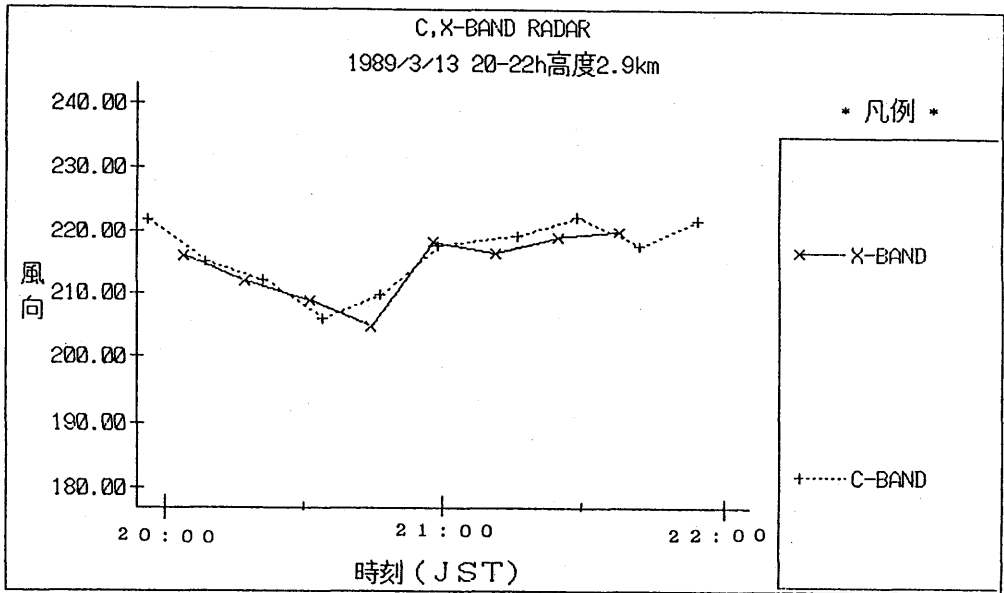


図3.20 a C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの高度2900mの1989年3月13日20時から22時までの時間変化 (風向)

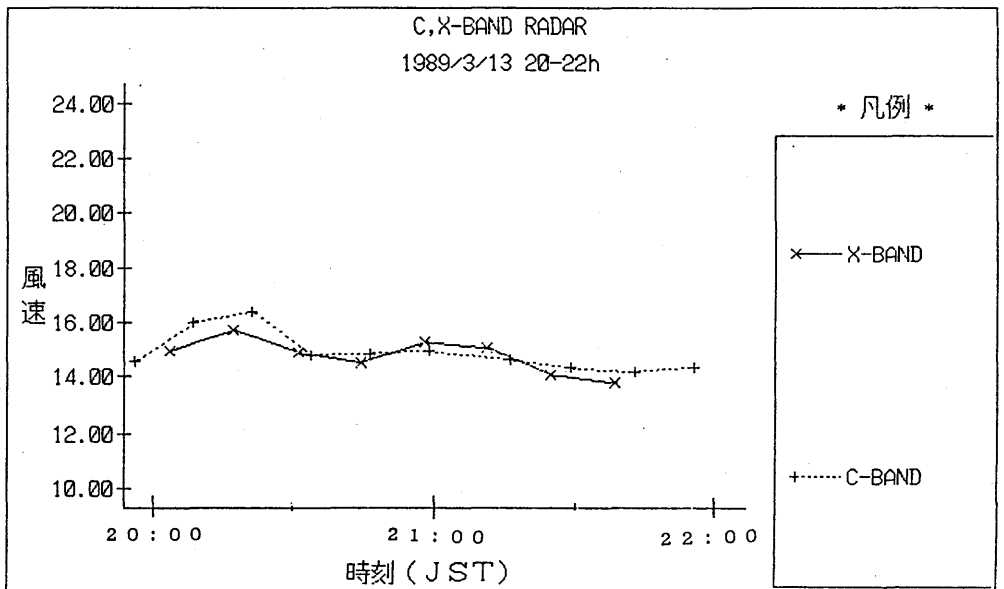


図3.20 b C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの高度2900mの1989年3月13日20時から22時までの時間変化 (風速)

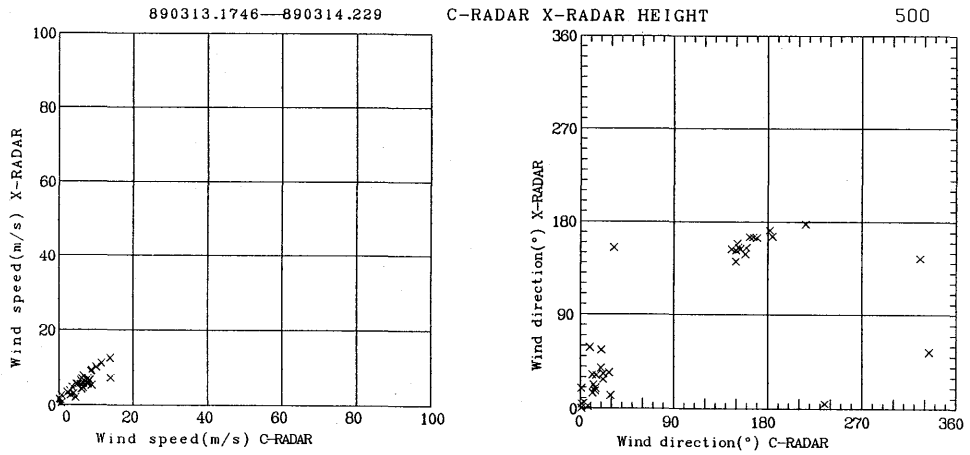


図3.21 a C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの風向・風速の相関図 (500m)

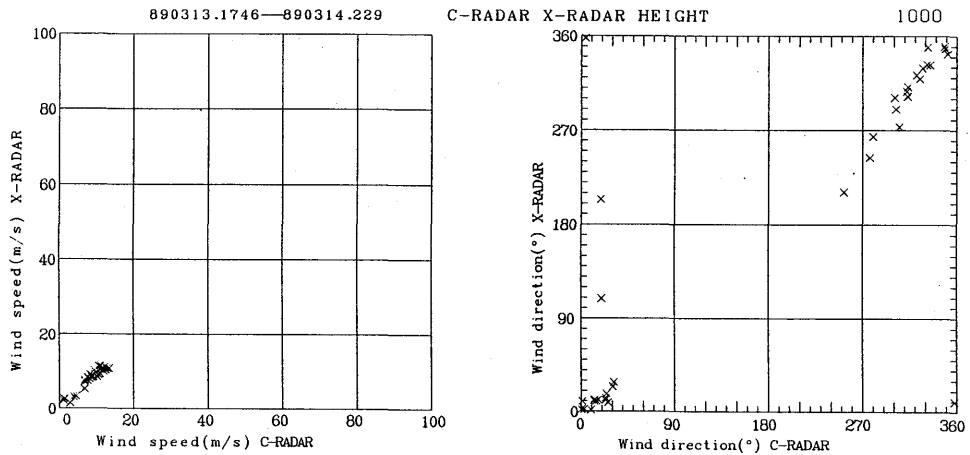


図3.21 b C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの風向・風速の相関図 (1000m)

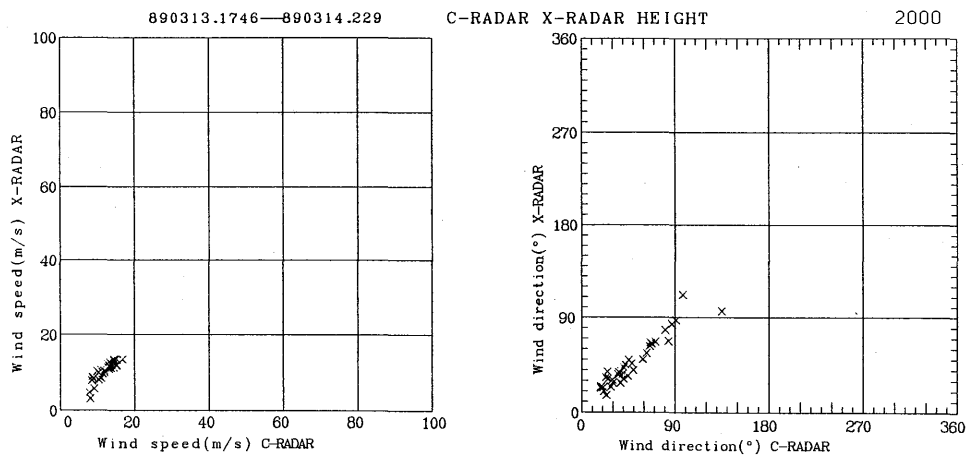


図3.21 c C-バンドドップラーレーダとX-バンドドップラーレーダの風向・風速の相関図 (2000m)

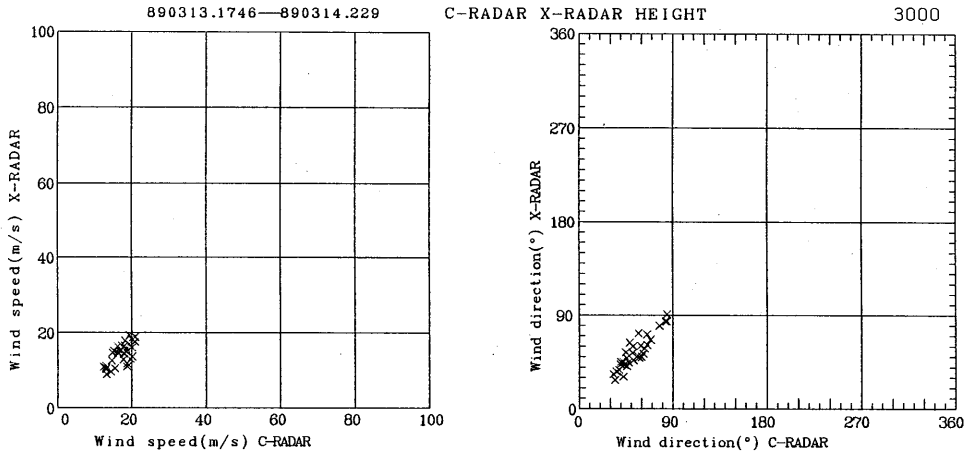


図3.21 d CーバンドドップラーレーダとXーバンドドップラーレーダの風向・風速の相関図 (3000m)

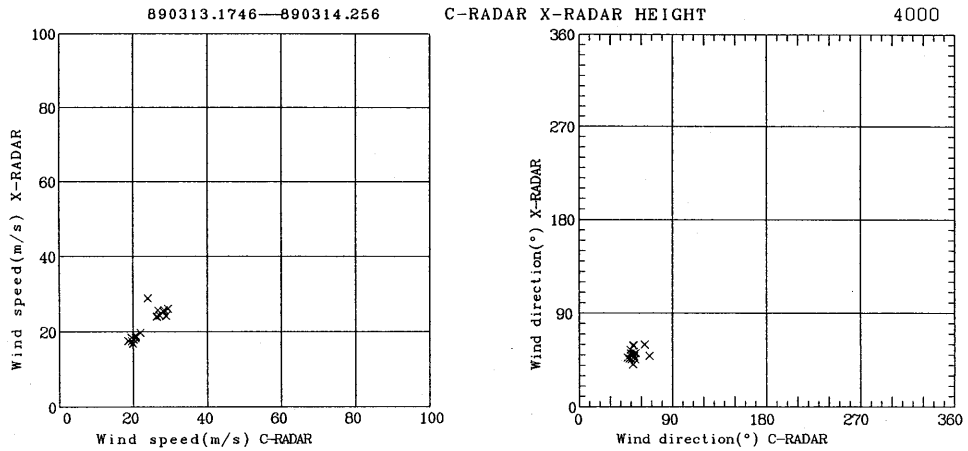


図3.21 e CーバンドドップラーレーダとXーバンドドップラーレーダの風向・風速の相関図 (4000m)

表3.8 ドップラーソーダと鉄塔の風速の相関係数、風向の差の絶対値の平均

方位	0~90°			90~180°			180~270°			270~360°		
	風速の 相関係数	風向の 差の平均	データ数	風速の 相関係数	風向の 差の平均	データ数	風速の 相関係数	風向の 差の平均	データ数	風速の 相関係数	風向の 差の平均	データ数
50m	0.65	25.5	560	0.54	37.3	122	0.83	43.6	184	0.71	23.5	321
150m	0.94	8.6	584	0.90	20.0	135	0.96	18.4	114	0.91	15.9	341

3.5 ドップラーソーダと鉄塔

ドップラーソーダは鉛直方向と水平面から60度の仰角で3方向に1600Hzの音波のパルス（幅0.2秒）を5秒間隔で送信している。空気密度の揺らぎから来る散乱音波ドップラシフトから風の3方向の成分を求める。測定高度は50m間隔で最高700mになるように観測パラメーターを設定した。高度の増加にしたがって、音波面が広がり、測定空間が大きくなると同時に2本の60度傾いたビームの中心は、鉛直軸と高度700mで約400m離れる。従って、それだけ大きな空間を一樣の風が吹いているという仮定を置く事になる。更に今回の場合、ソーダは鉄塔と約250m離れていて、しかも反対の方向を見ているのでかなりの異なった空間を測定している。しかし、ソーダのデータは10分間平均なので、ある程度の卓越風が検出できる。鉄塔との比較は50m, 100m, 150m, 200mの各高度について安定したデータが得られた第2期と第3期について行う。

鉄塔のデータは10分間平均を使う。各高度毎の相関図は図3.22 a～dに示すとおりである。図3.22 aの50m高度は相関係数は0.70になり、かなりばらついている。図を見ると特にソーダが低くでている。50mでソーダと鉄塔のデータをソーダの方位角90°毎のデータを部分表示すると、方位角によりばらつきが異なる事が分かる（図3.23 a～d）。風速の相関係数でいうと、表3.8で90°～180°が0.54で特に低い。150mでもこの傾向が残っている。また風向の差の平均も多少大きくなっている。この方向はソーダからみて、研究本館に当たる。

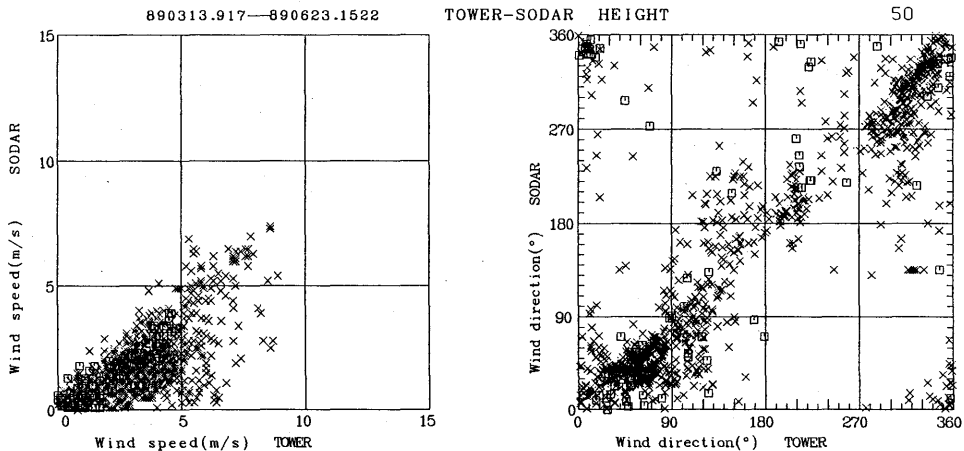


図3.22 a ドップラーソーダと鉄塔の風向・風速の高度別の相関図50m (□：降水時, ×：非降水時)

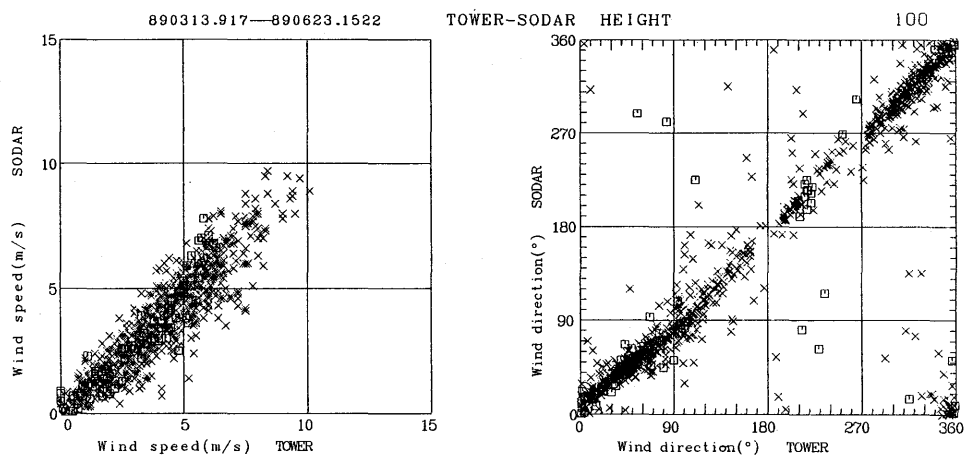


図3.22 b ドップラーソーダと鉄塔の風向・風速の高度別の相関図100m (□:降水時, ×:非降水時)

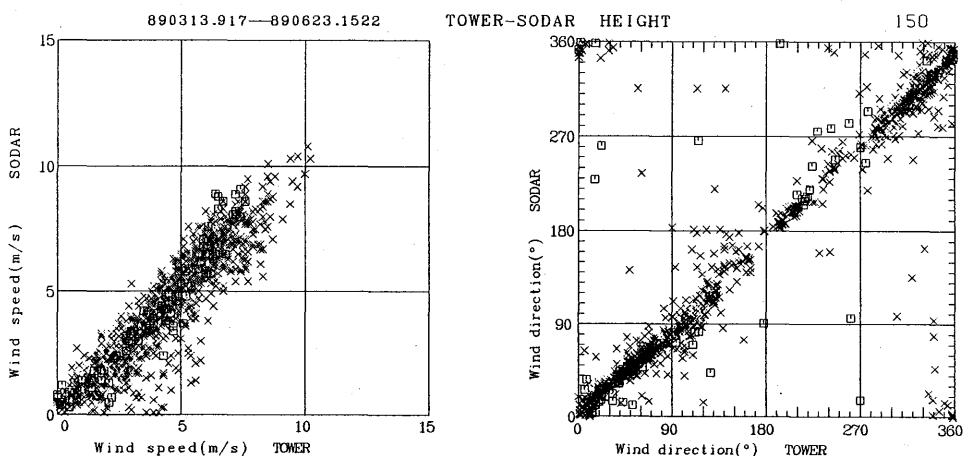


図3.22 c ドップラーソーダと鉄塔の風向・風速の高度別の相関図150m (□:降水時, ×:非降水時)

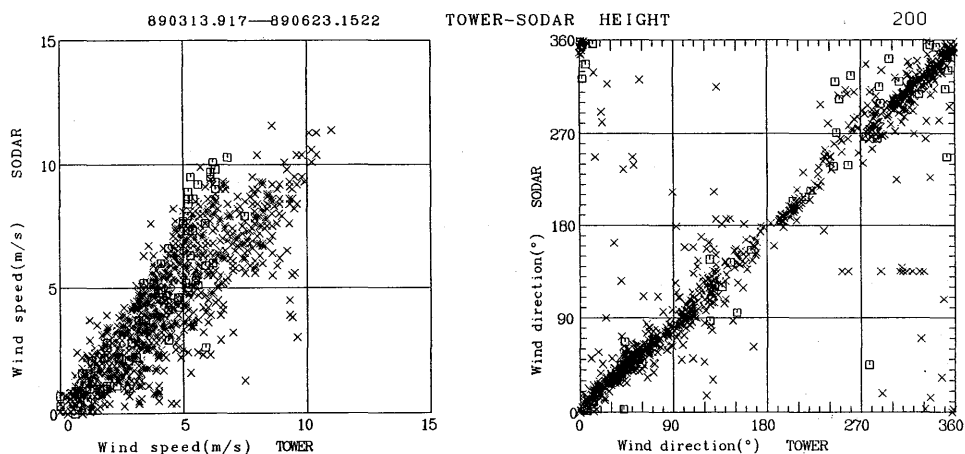


図3.22 d ドップラーソーダと鉄塔の風向・風速の高度別の相関図200m (□:降水時, ×:非降水時)

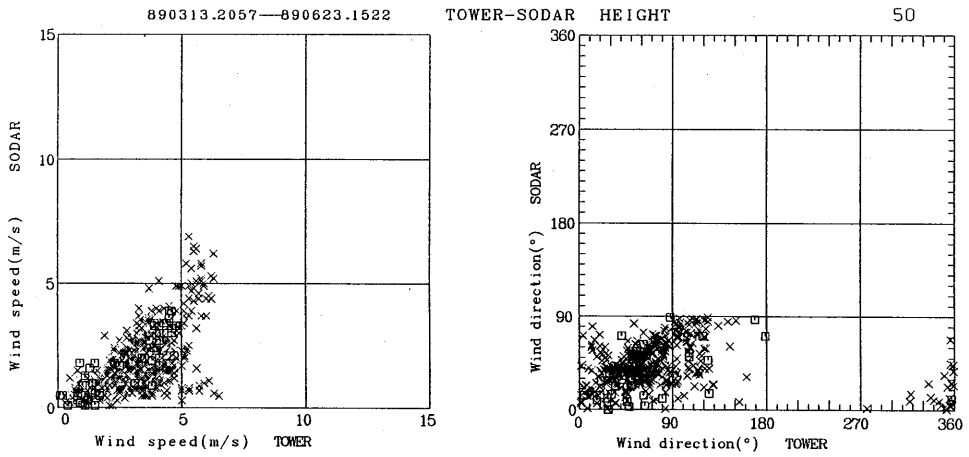


図3.23 a ドップラーソーダと鉄塔でソーダ方位角90° 毎の風向だけ取りだした相関図 (0° ~90°)

(□ : 降水時, × : 非降水時)

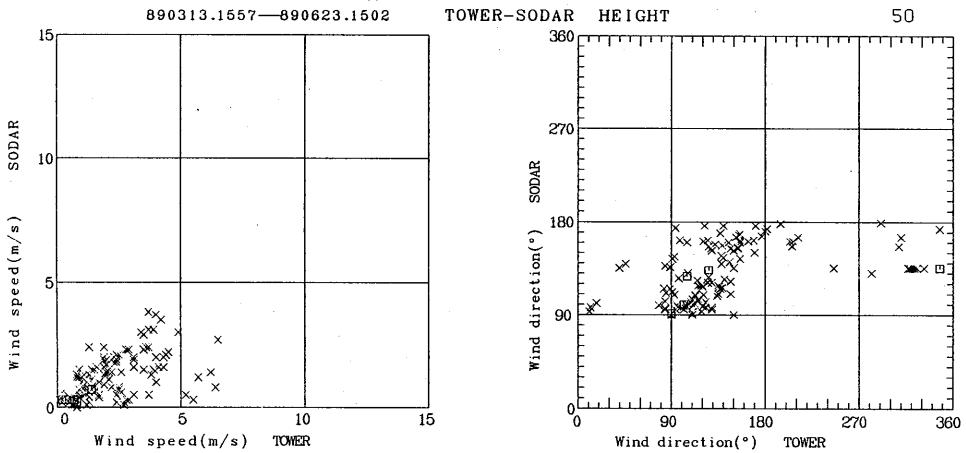


図3.23 b ドップラーソーダと鉄塔でソーダ方位角90° 毎の風向だけ取りだした相関図 (90° ~180°)

(□ : 降水時, × : 非降水時)

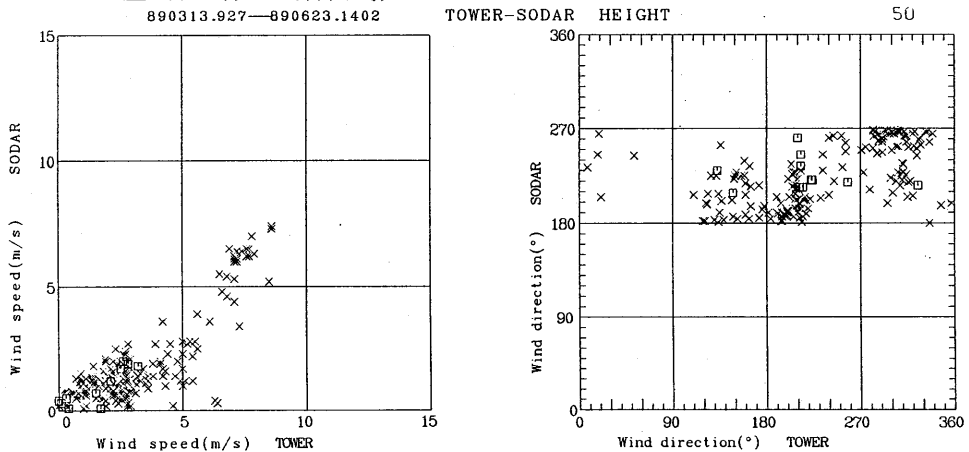


図3.23 c ドップラーソーダと鉄塔でソーダ方位角90° 毎の風向だけ取りだした相関図 (180° ~270°)

(□ : 降水時, × : 非降水時)

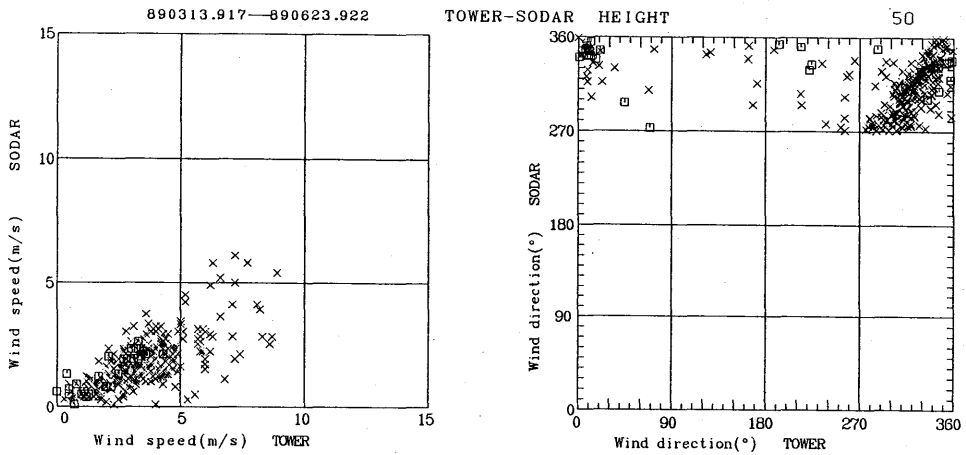


図3.23 d ドップラーソーダと鉄塔でソーダ方位角90° 毎の風向だけ取りだした相関図 (270° ~360°)
 (□:降水時, ×:非降水時)

表3.9 ドップラーソーダと鉄塔の高度別全データの風速の相関と降水時の風速の相関係数

高 度	全 デ ー タ		降 水 時 だ け	
	風速の相関係数	データ数	風速の相関係数	データ数
50 m	0.70	1189	0.88	99
100 m	0.92	1189	0.94	99
150 m	0.93	1185	0.96	94
200 m	0.85	1164	0.91	75

降水時のデータだけを取り出してみると、図3.24 a ~ d の様になる。表3.9によると雨だけの方が風速の相関が高い。観測期間中では雨は最高1.0mm/10分間が1回であった。その他の期間の10分間雨量は0.5mm以下である。この程度の雨ならば、200mにまでに限って言えばソーダ観測は可能であるといえる。

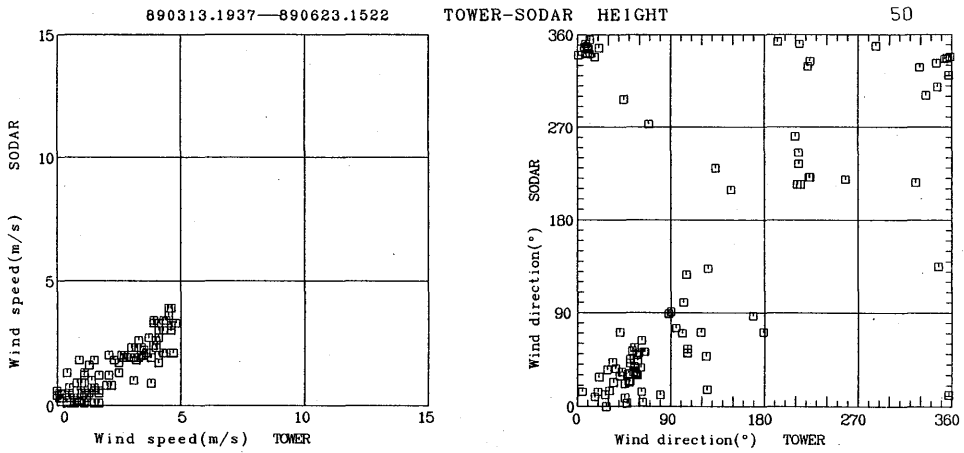


図3.24 a ドップラーソーダと鉄塔で降水時だけを選んだ高度別の図 (50m)

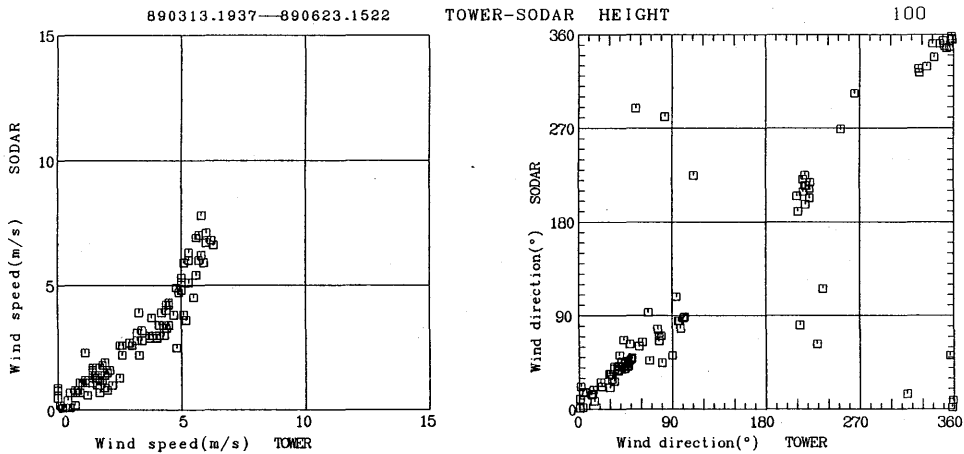


図3.24 b ドップラーソーダと鉄塔で降水時だけを選んだ高度別の図 (100m)

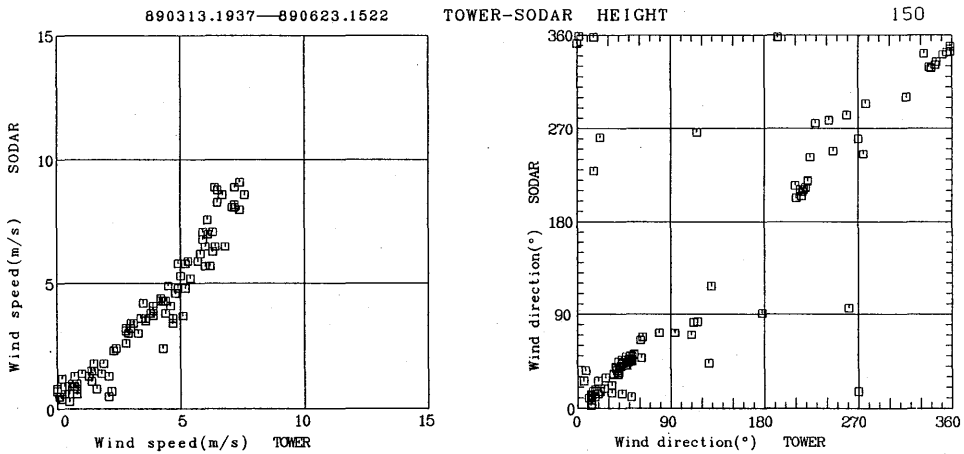


図3.24 c ドップラーソーダと鉄塔で降水時だけを選んだ高度別の図 (150m)

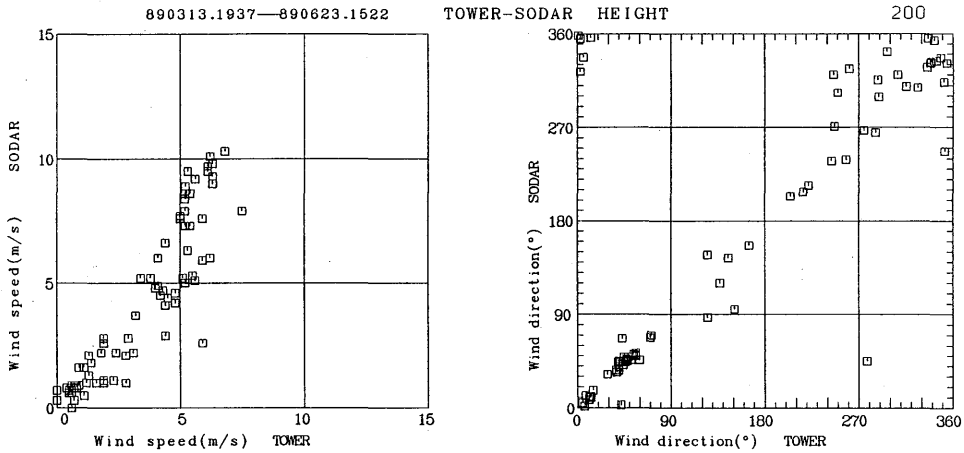


図3.24d ドップラーソーダと鉄塔で降水時だけを選んだ高度別の図 (200m)

3.6 係留気球

係留気球の全データについて考える。ソーダは10分毎の平均データがあるので対応するデータと比較する時に、係留気球の観測開始時刻に近いソーダのデータを選んだ。相関は図3.25 a～fとなる。この時、高度50mの係留気球とソーダの風速の相関係数は0.44である(表3.10)。相関図を見ると、係留気球の方が風速が大である。一方、鉄塔の10分平均と係留気球の場合、高度50mの風速の相関係数は0.81(表3.11)。観測時刻が多少違うが、鉄塔とソーダの風速では0.70となっているので、50mのソーダのデータに問題がありそうである。ちなみに、鉄塔と副鉄塔の高度25mの風速の相関係数は、約300m離れているにもかかわらず、0.92ある(図3.26)。地表面の影響がより大きいと思われる25mでこの程度なので、50mでは鉄塔はあまり周囲の影響を受けていないと思われる。200mまでのソーダと係留気球の風速の相関係数は50m以外の高度で0.79から0.87ぐらいで、鉄塔と係留気球が0.85から0.92であるのに比較して、多少低くなっている(図27 a～d)。係留気球と鉄塔の温度は相関係数が0.99台できわめて高い(図3.26)。湿度も0.87から0.89で比較的高い(図3.28 a～d)。プロファイルからも分かるが、係留気球の方が湿度は10%程度高い事が多い。50mから200mにかけて湿度が回帰直線から大きくずれている1点があるが、このデータは、ある同一時刻のデータからくるものであり、このデータをのぞけば相関係数はもっと高くなると思われる。

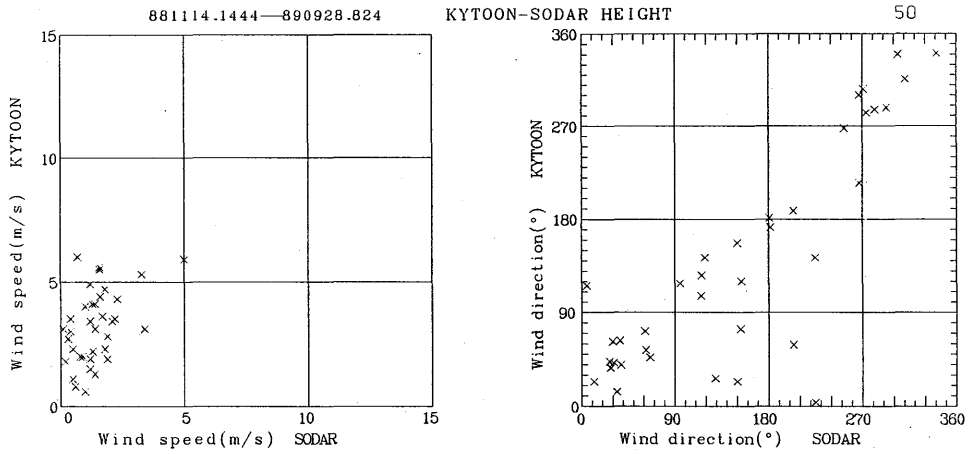


図3.25 a 係留気球とドップラーソダの高度別の相関図 (50m)

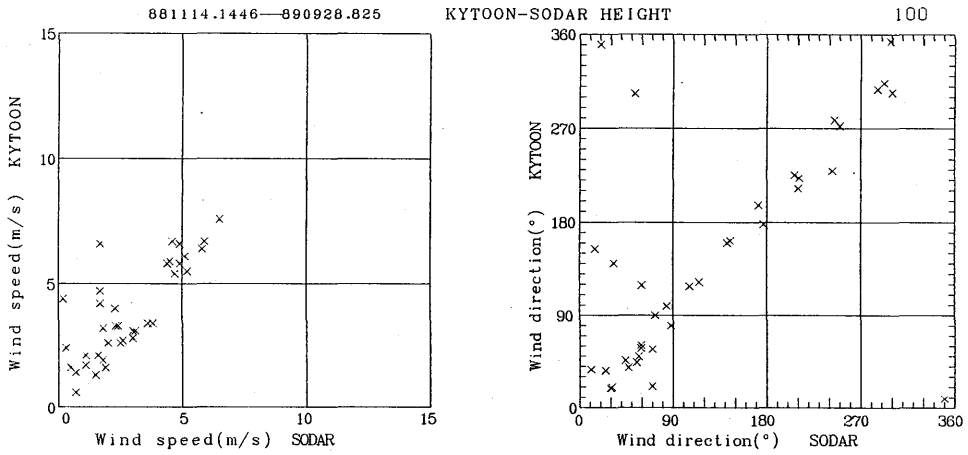


図3.25 b 係留気球とドップラーソダの高度別の相関図 (100m)

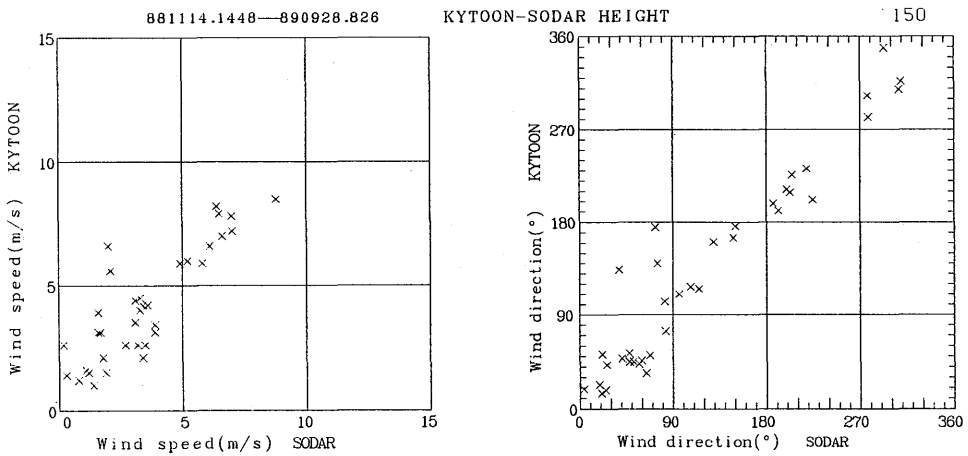


図3.25 c 係留気球とドップラーソダの高度別の相関図 (150m)

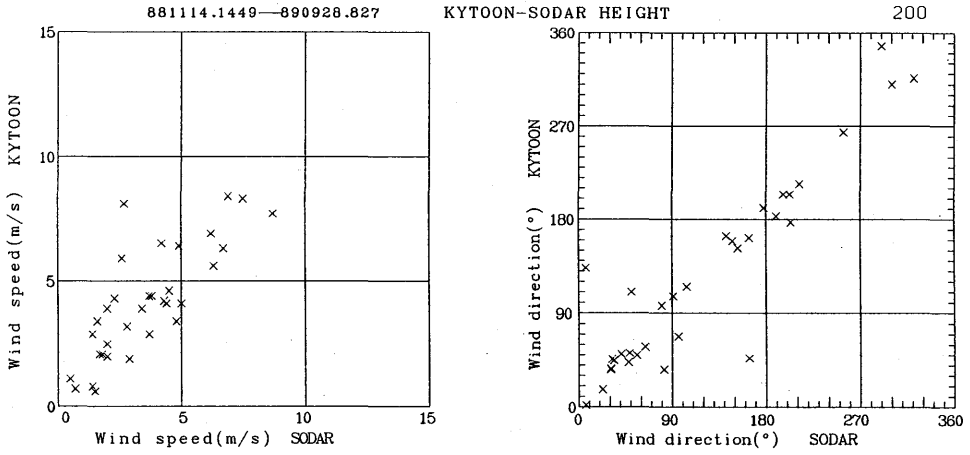


図3.25d 係留気球とドップラーソーダの高度別の相関図 (200m)

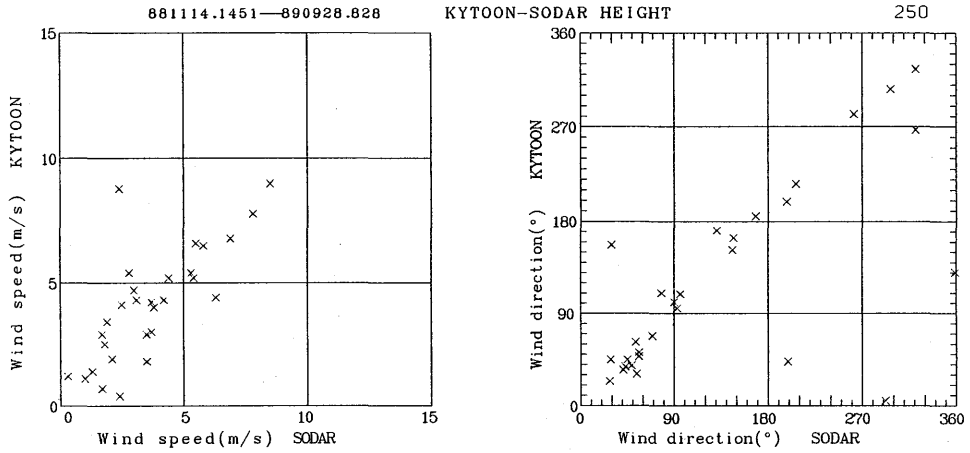


図3.25e 係留気球とドップラーソーダの高度別の相関図 (250m)

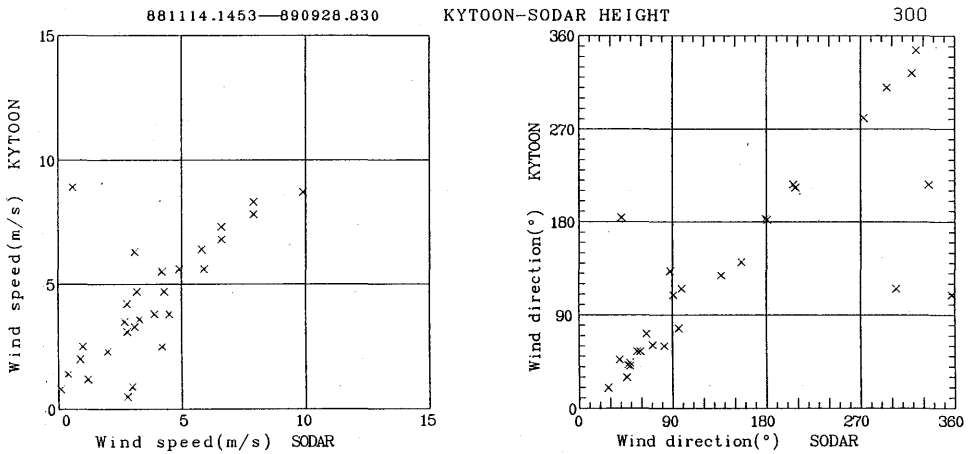


図3.25f 係留気球とドップラーソーダの高度別の相関図 (300m)

表3.10 係留気球とドップラーソーダの風速の相関係数と風向の差の絶対値の平均

データ種別 高度	風速の相関係数	風向の差の絶対 値の平均 (°)
50m	0.444	34.5
100m	0.796	25.3
150m	0.865	20.3
200m	0.794	20.3
250m	0.753	27.9
300m	0.711	28.7

表3.11 係留気球と鉄塔の風向・温度・湿度の相関係数と風向の差の絶対値の平均

データ種別 高度	風速の相関係数	風向の差の絶対 値の平均	温度の相関係数	湿度の相関係数
50m	0.813	14.3	0.997	0.869
100m	0.923	14.4	0.998	0.872
150m	0.880	15.5	0.996	0.890
200m	0.848	18.2	0.996	0.891

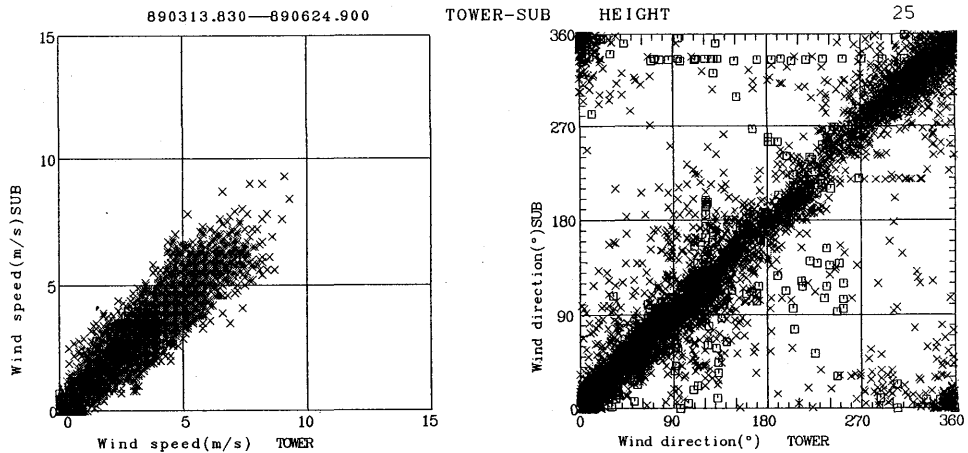


図3.26 鉄塔と副鉄塔の高度25mの風速・風向の相関図 (□：降水時，×：非降水時)

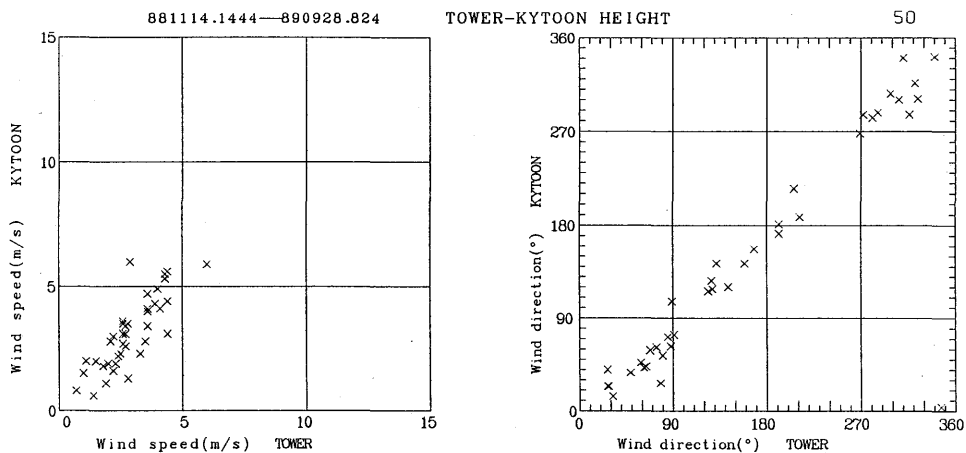


図3.27 a 鉄塔と係留気球の高度別の風速・風向の相関図 (50m)

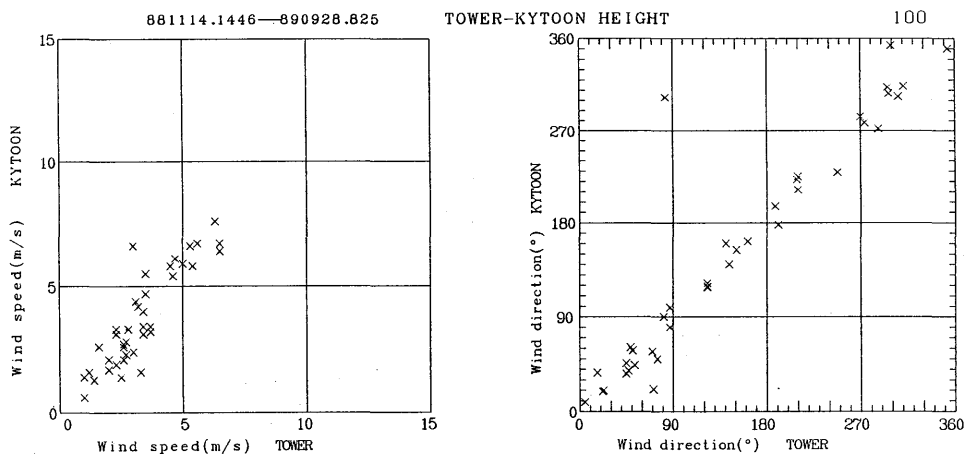


図3.27 b 鉄塔と係留気球の高度別の風速・風向の相関図 (100m)

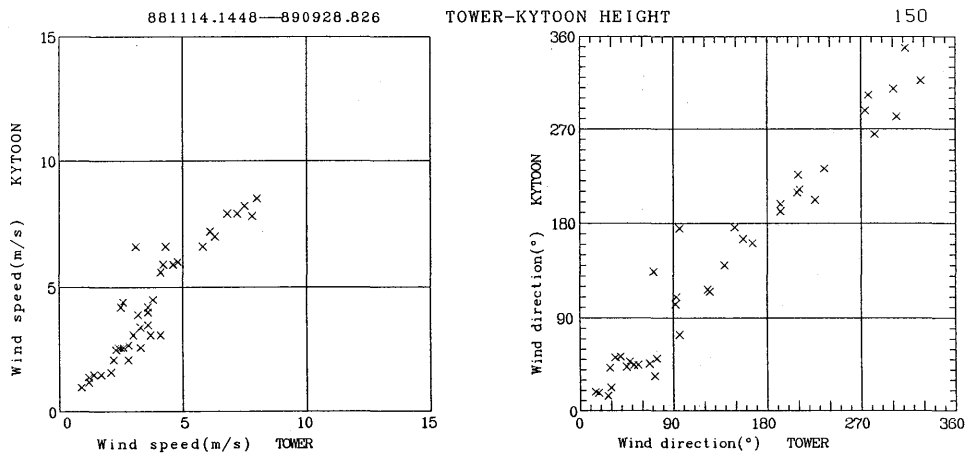


図3.27 c 鉄塔と係留気球の高度別の風速・風向の相関図 (150m)

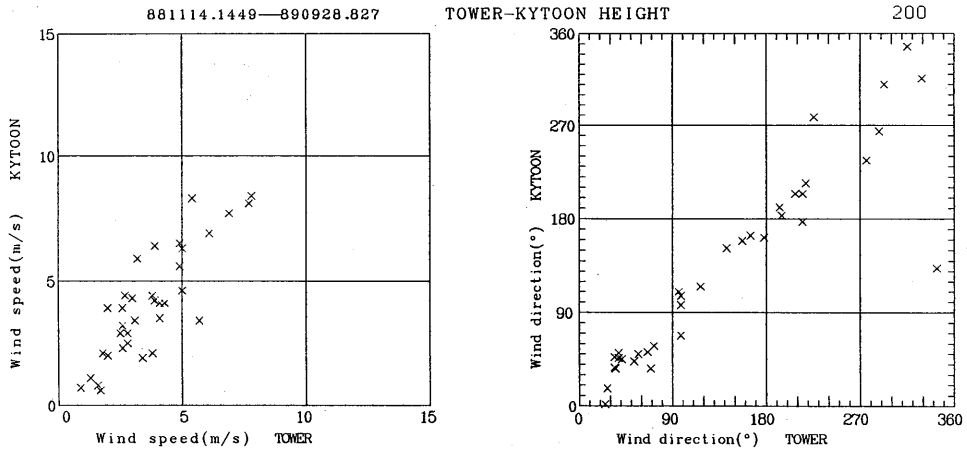


図3.27 d 鉄塔と係留気球の高度別の風速・風向の相関図 (200m)

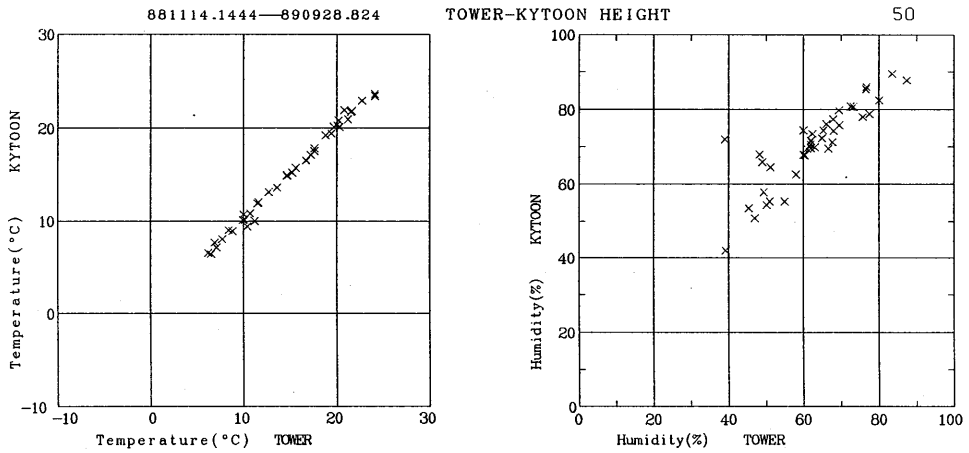


図3.28 a 鉄塔と係留気球の高度別の温度・湿度の相関図 (50m)

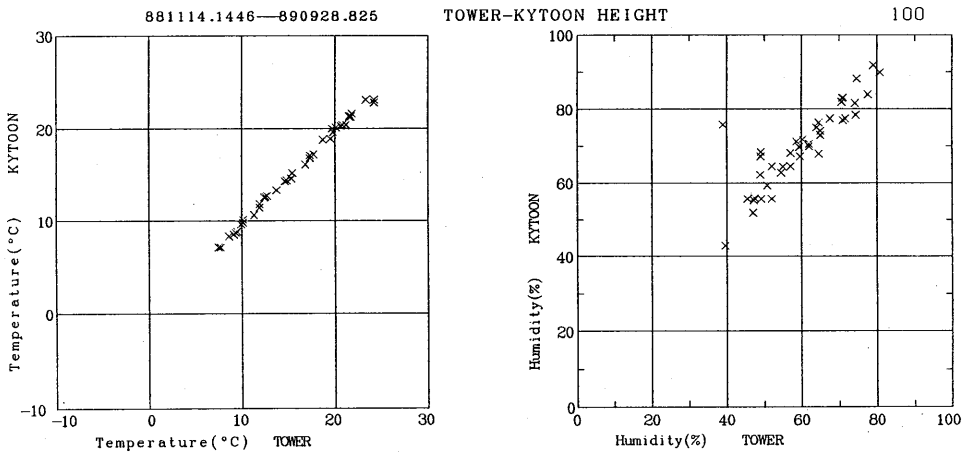


図3.28 b 鉄塔と係留気球の高度別の温度・湿度の相関図 (100m)

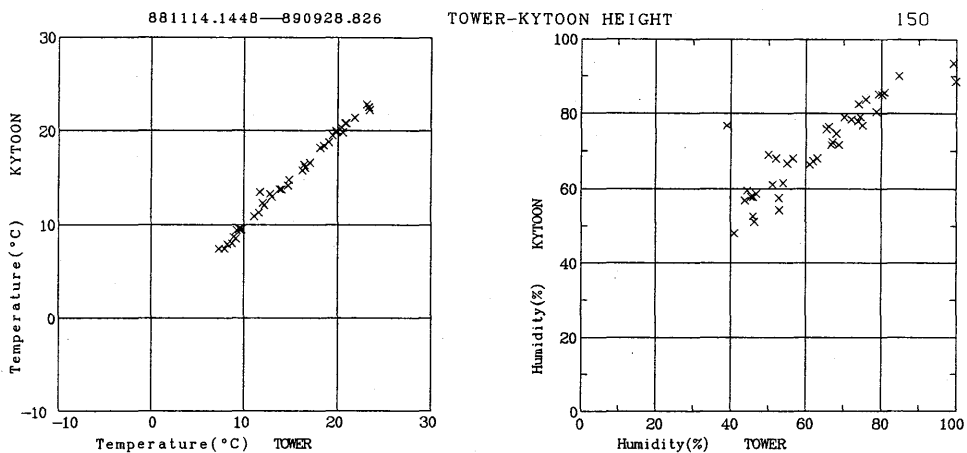


図3.28c 鉄塔と係留気球の高度別の温度・湿度の相関図 (150m)

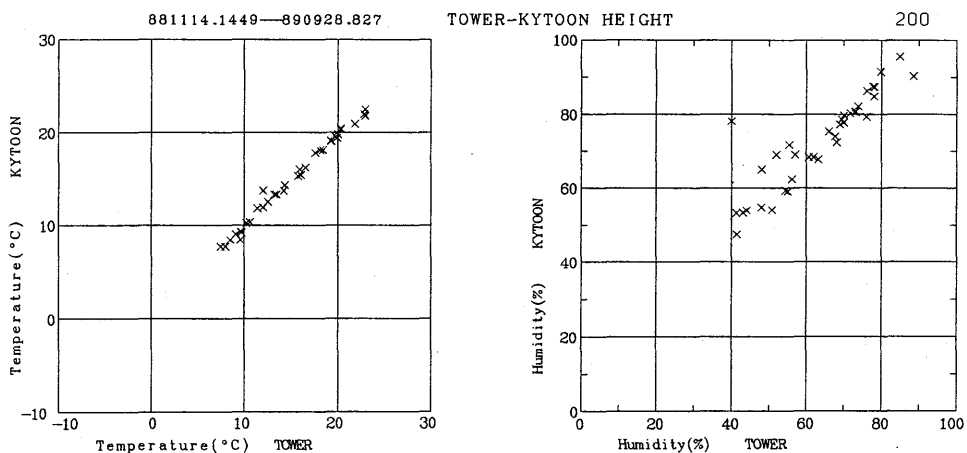


図3.28d 鉄塔と係留気球の高度別の温度・湿度の相関図 (200m)

参 考 文 献

- 気象研究所, 1990: 各種観測方法による同時観測について. 測器技術資料第0215号.
- 観測部高層課, 1987: 高層気象観測の自動化. 測候時報, 551. 501. 7.
- 海洋気象部海上気象課, 1987: 新長風丸の船用自動高層気象観測装置の概要. 測候時報, 551. 46. 07: 551. 508. 8.
- 渡邊清光, 1990: わかる気象機械. 定文堂, pp. 440.
- 村山信彦, 1983: これからの気象観測. 東京堂出版, pp. 212.
- 日本気象学会, 1992: シンポジウム「新しい観測システム」資料. pp. 84.
- Balsley, B. B. and D. T. Farley, 1976: Auroral zone winds detected near the tropopause with the Chatanika UHF Doppler radar. *Geophys. Res.Lett.*, **3**, 525.
- Chintawongvanich, P., R. Olsen and C. A. Biltoft, 1989: Intercomparison of wind measurements from two acoustic Doppler sodars, a laser Doppler lidar, and in situ sensors. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **6**, 785.
- Farley, D. T., B. B. Balsley, W. E. Swarts and C. La Hoz, 1979: Tropical winds measured by the Arecibo radar. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 227.
- Fukao, S., T. Sato, N. Yamasaki, R. N. Harper and S. Kato, 1982: winds measured by a UHF Doppler radar and rawinsondes: Comparisons made on 26 days (August–September 1977) at Arecibo, Puerto Rico. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1357.
- Kitchen, M., J. Nash and J. F. Ponting, 1985: Evaluation of temperature, pressure and geopotential measurements obtained during Phase I of the WMO international radiosonde comparison. *Instruments and observing methods*, Report No.22 (WMO/TD-No.50), pp.13.
- Larsen, M. F., 1983: Can a VHF Doppler radar provide synoptic wind data? A comparison of 30 days of radar and radiosonde data. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 2047.
- Lawrence, T. R., B. F. Weber, M. J. Post, R. M. Hardesty, R. A. Richter, N. L. Abshire and F. F. Hall, Jr., 1986: A comparison of Doppler lidar, rawinsonde, and 915MHz UHF Wind Profiler measurements of tropospheric winds. *NOAA Tech. Memo.*, ERL WPL-130, Boulder, Colorado, pp.36.
- Nash, J., 1990: WMO radiosonde comparison Phase III: Dzhambul, USSR. *VAISALA News*, **121**, 20.
- Nash, J. and F. Bond, 1989: An operational evaluation of wind measurements by two Doppler sodars. *Instruments and observing methods*, Report No.35 (WMO-No.303), pp.407.
- Robitaille, F. E., S. D. Whitaker, D. L. Holladay and D. B. Call, 1989: An intercomparison of angular tracking performance between radar and radiotheodolite. *Instruments and observing methods*, Report No.35 (WMO-No.303), pp.401.
- Schmidlin, F. J., and F. G. Finger, 1985: Report of Phase 2 of the CIMO international radiosonde comparison conducted from Wallops island, Virginia, U.S.A.. *Instruments and observing methods*, Report No.22 (WMO/TD-No.50), pp.19.
- Strauch, R. G., 1981: Radar measurement of tropospheric wind profilers. Preprints, 20th Conference on

- Radar meteorology. *Boston, Amer. Metero. Soc.*, pp.430.
- Uddstrom, M. J., 1989 : A comparison of Philips RS4 and Vaisala RS80 radiosonde data. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **6**, 201.
- Weber, B. L. and D. B. Wuertz, 1990 : Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **7**, 157.
- WMO, 1982 : Manual of the global observing system. Vol. 1 (Annex V to the WMO technical regulations), 1981 edition, WMO-No.544.
- WMO, 1983 : Guide to meteorological instruments and methods of observation. Fifth edition, WMO-No.8.
- WMO, 1988 : Commission for basic systems. *Abridged final report of the ninth session*. WMO-No.699.
- WMO, 1990 : Commission for instruments and methods of observation. *Abridged final report of the tenth session*. WMO-No.727.