

土 木 研 究 所 資 料

福上湖湖面蒸発量観測調査解析報告書

平成6年1月

建設省土木研究所
水工水資源研究室

Copyright © (1994) by P.W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全文又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

福上湖湖面蒸発量観測調査解析報告書

建設省土木研究所ダム部

水工水資源研究室

室長	高須修二
研究員	廣瀬昌由二
	松山兼二

要 旨

流域の水循環を考える上で、蒸発散量を把握する事は非常に重要な課題である。本報告書は、その内、貯水池湖面からの蒸発量を把握するために沖縄総合事務局福地ダム貯水池である福上湖で夏期に蒸発量の観測を行い、その結果についてとりまとめたものであり、

- (1) 湖面蒸発量の算出法の検討（渦相関法、バルク法）
- (2) 湖面蒸発量のモデル化と年蒸発量の推定
- (3) 湖面蒸発量、貯水池流入量、流域からの蒸発散量それぞれの比較検討等について報告するものである。

キーワード：福地ダム、福上湖、湖面蒸発量、渦相関法、バルク法

まえがき

流域の水循環を考える上で、蒸発散量を把握する事は非常に重要な課題である。特にダムによって水資源開発を行う場合、広い水面を持った貯水池からの蒸発量は、水管理上重要な因子であると思われるが、今までのところ十分な知見が得られていなかった。

そこで、沖縄県福地川に位置する沖縄総合事務局福地ダム貯水池である福上湖で夏期に蒸発量の観測を行ったので、その結果について報告する。

平成6年1月

目 次

第Ⅰ章 調査の概要

1.1 調査の目的	1
1.2 調査対象地域	1
1.3 調査対象期間	2
1.4 調査内容	2

第Ⅱ章 調査の方法

2.1 調査の方針	3
2.2 調査の方法	3
2.2.1 連続観測	3
2.2.2 特別観測	3
2.2.3 データ収集	3
2.3 解析方法	11
2.3.1 湖面蒸発量の真値の算出とバルク係数の算出	11
2.3.2 湖面及び周辺気象環境の特徴の把握	12
2.3.3 連続観測のデータより湖面蒸発量の算出（バルク法）	12
2.3.4 既存の気象観測データからの蒸発量の推定と その流域蒸発散量及び貯水池流入量との比較	12

第Ⅲ章 調査結果と考察

3.1 各気象要素の特徴	14
3.1.1 気温	14
3.1.2 水蒸気圧，湿度	14
3.1.3 日射量，日照時間	15
3.1.4 風向，風速	15
3.1.5 水温	16
3.2 湖面蒸発量	36
3.2.1 特別観測結果	36
3.2.2 連続観測結果	56
3.3 観測地点の代表性の検討	70
3.4 湖面蒸発量のモデル化と年蒸発量の推定	87
3.4.1 湖面蒸発量のモデル化	87
3.4.2 年蒸発量の推定	90
3.5 湖面蒸発量と流域からの蒸発散量の比較	93
3.6 貯水池年流入量と湖面蒸発散量	93

第Ⅳ章 調査結果のまとめ

第I章 調査の概要

1.1 調査の目的

ダム湖からの蒸発量を定量的に評価することにより，沖縄地方における水深の深い水体からの湖面蒸発量を把握するとともに，今後のダム湖の水管理に資することを目的とする。

1.2 調査対象地域

図1-2-1に福地ダムの位置，表1-2-1に福地ダム及び福上湖の諸元を示す。

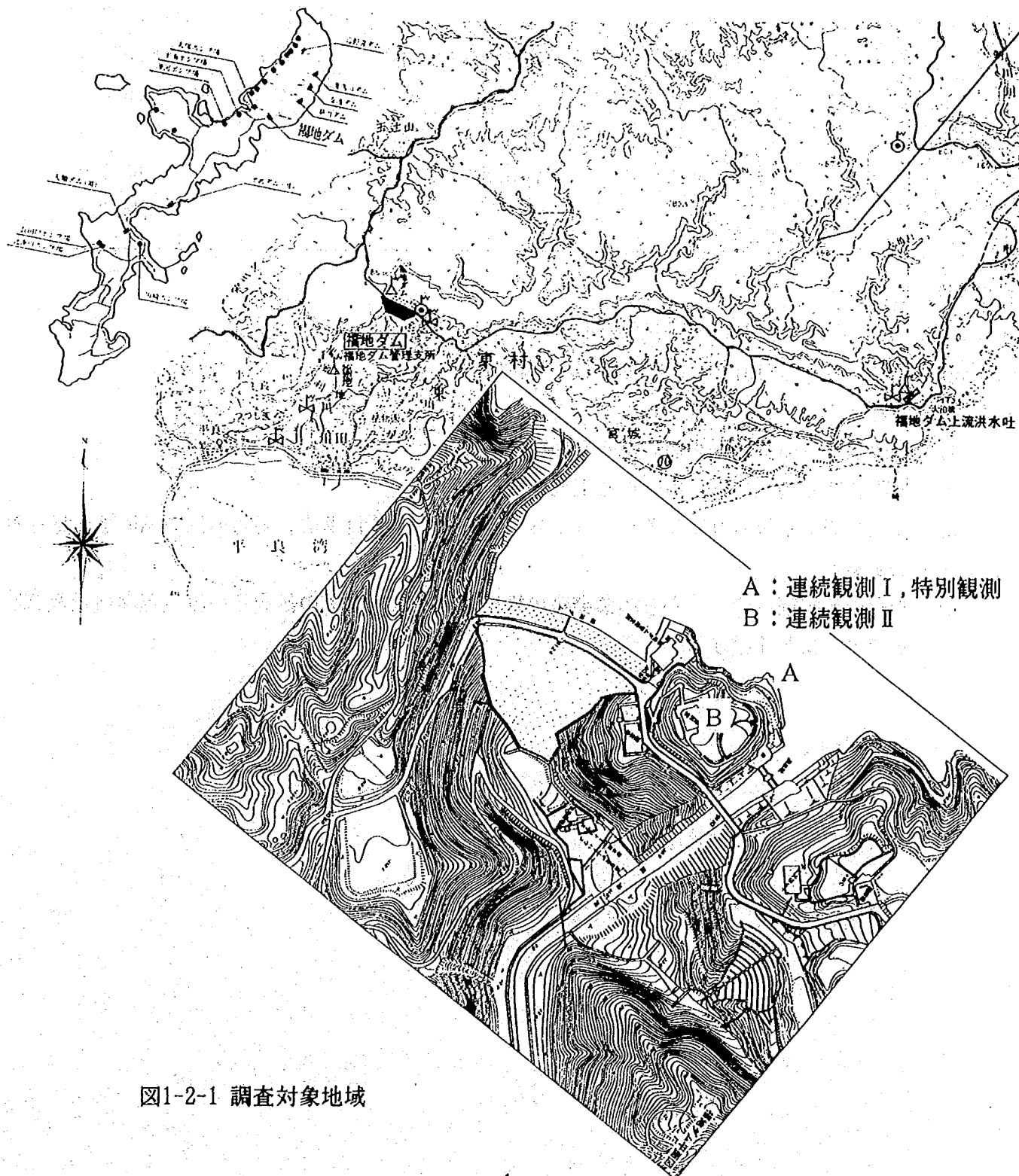


図1-2-1 調査対象地域

表1-2-1 福地ダムの諸元

ダ		ム	貯		水	池
河 川 名		福地川水系福地川（2級）		湛 水 面 積	2.54km ²	
位 置		沖縄県国頭郡東村字川田		総貯水容量	55,000,000m ³	
集水面積		32.0 km ²		有効貯水容量	52,000,000m ³	
形 式		ロックフィルダム		堆 砂 容 量	3,000,000m ³	
堤 高		91.7 m		洪水調節容量	（サーチャージ*）	7,300,000m ³
堤 長		260.0 m		利 水 容 量	（不特定）	2,000,000m ³
堤 体 積		1,622,400 m ³			（水 道）	31,400,000m ³
放 流 設 備	洪水吐	サイフォン（上流洪水吐） H5.0×B7.0×6門 ドラムゲート（下流洪水吐） H5.2×B15.0×2門			（工 水）	11,300,000m ³
	利水放流	ジェットフローゲート φ900×1門 φ150×1門			サーチャージ* 水位	EL86.5m
				常時満水位	EL83.5m	
				最低水位	EL44.6m	

1.3 調査対象期間

連続観測 平成 4年 7月12日 ～ 平成 4年11月 5日

特別観測 平成 4年 7月13日 ～ 平成 4年 7月22日

1.4 調査内容

- 1) 湖面蒸発量の真値を求め、バルク係数の算出する。
- 2) 湖面及び周辺気象環境の特徴を把握する。
- 3) 連続観測より得られた気象データからバルク法により日単位，半旬単位で湖面蒸発量を算出する。
- 4) 既存の気象観測データからの蒸発量の推定式を作成し，その値をその流域蒸発散量及び貯水池流入量と比較する。

第Ⅱ章 調査の方法

2.1 調査の方針

湖面蒸発量の評価方法（観測方法）として、最も真値に近い値を期待できる方法は渦相関法である。しかし、渦相関法に用いる観測機器は長期にわたる連続観測に適していない。そこで、長期の連続観測が行える測器を用い、渦相関法について精度よく蒸発量の評価（観測）が可能なバルク法を用いて蒸発量の評価（観測）を行った（以下連続観測）。

ただし、バルク法を用いるにあたって、バルク係数を決定しておく必要がある。正確なバルク係数の算出には蒸発量の真値が必要である。そこで、蒸発量の真値は、短期間であれば観測可能な渦相関法から求めることにした（以下特別観測）。

2.2 調査の方法

観測地点は、以下の項目に注意して決定した（図1-2-1を参照）。

- ① 風上側に十分な水面が広がっている。
- ② なるべく湖面全体の風系を網羅する。
- ③ 設置、撤収が容易で安全である。

2.2.1 連続観測

1) 連続観測Ⅰ

福上湖湖岸において、表2-2-1に示す計測器によりバルク法で連続観測を行い資料の収集を図った。図2-2-1に測器の取り付け概念図、図2-2-2に測器構成図、写真2-2-1に実際の取り付け状況を示す。

2) 連続観測Ⅱ

湖上の気象環境の特徴を把握するためには、周辺の気象環境を把握しておくことが大切である。そこで、福上湖周辺において、表2-2-1に示す計測器により連続観測を行い資料の収集を図った。図2-2-3に測器の取り付け概念図、図2-2-2に測器構成図、写真2-2-2に実際の取り付け状況を示す。

2.2.2 特別観測

バルク法により湖面蒸発量求めるには、バルク係数を決定する必要がある。バルク係数は渦相関法で湖面蒸発量の真値を得ることにより求めることができる。そこで、表2-2-1に示す計測器により特別観測（渦相関法）を行い資料の収集を図った。図2-2-4に測器の取り付け概念図、図2-2-5に測器構成図、写真2-2-3に実際の取り付け状況を示す。

2.2.3 その他気象データ収集

観測年と観測地点の気象特性を把握し、年間の湖面蒸発量を推定するために名護気象観測所と福地ダム管理事務所で観測されている気象データを収集した。表2-2-2にその一覧表を示した。

表2-2-1 観測機器一覧表（連続観測Ⅰ，Ⅱ，特別観測）

観測対象	観測区分	観測項目	使用 測 器	取得データ	データ記録器		データ記録器	記録CH	データ記録器	記録CH
					データ記号	データ規格				
湖面蒸発場 (N法)	連続観測Ⅰ	風向風速	光電式矢羽根三杯型風向風速計 風向センサー部:VF-216 風速センサー部:AF-750 変換記録部:MX-C131 [牧野応用測器]	10分平均風向 10分平均風速	WD1 WS1	4bit/16方位 12bitBinary(0.1m/s/bit)				
		気温湿度 湖面水温	気温センサー:白金抵抗気温計 N-59 [NEI] 湿度センサー:塩化リチウム露点計 HS-310 [小笠原] 水温センサー:白金抵抗水温計 N-66 [NEI] 変換器:複合温度変換器 J-6904 [東洋電子] データ演算器:デジタル平均器 J-6902 [東洋電子]	10分平均気温 10分平均露点 10分平均水温 ゼロレファランス	T1 D1 WT1 01	-20~40°C/0~1V -40~40°C/0~1V -20~40°C/0~1V (0V)	1 2 3 4	メモリアルックデータロガー D-5250 [東洋電子]	1 2 3	打点式記録器 μR-180 [横河電気]
一般場	連続観測Ⅱ	風向風速	光電式矢羽根三杯型風向風速計 風向センサー部:VF-216 風速センサー部:AF-860 変換記録部:MX-C131 [牧野応用測器]	10分平均風向 10分平均風速	WD3 WS3	4bit/16方位 12bitBinary(0.1m/s/bit)				
		気温湿度	気温センサー:白金抵抗気温計 N-59 [NEI] 湿度センサー:塩化リチウム露点計 HS-310 [小笠原] 変換器:複合温度変換器 J-6904 [東洋電子] データ演算器:デジタル平均器 J-6902 [東洋電子]	10分平均気温 10分平均露点 ゼロレファランス	T3 D3 03	-20~40°C/0~1V -40~40°C/0~1V (0V)	1 2 3	メモリアルックデータロガー D-5250 [東洋電子]	1 2	打点式記録器 μR-180 [横河電気]
湖面蒸発場 (滴相関法)	特別観測	瞬時鉛直風速 瞬時気温	超音波風速温度計 プローブ:TR-41 シヤクシヨウボックス:OA-40 本体:DAT-100 [海上電機]	瞬時鉛直風速 瞬時超音波仮温度	W TS	0~±10m/s/0~±1V 0~±50°C/0~±1V	1 2	デジタルデータロガー DR-F1 3台 [TEAC]		2チャンネル VP-6723A [松下通信]
		瞬時水蒸気量	赤外線水蒸気変動計 model E009 [アドバンス]	瞬時水蒸気変動量	E	0~±20g/kg/0~±5V	3		*	
		準瞬時乾球温度 準瞬時湿球温度	センサー:熱電対乾湿計 (特別製作品) 増幅器:DC777 TYPE3131 2器 疑似零点:サーモユニット TYPE3111 [横河電機]	準瞬時乾球温度 準瞬時 乾湿差	Td dt	0~40°C/0~0.806V 0~-20°C/0~-0.79V *熱起電力表により ノリニ7精密補正	4 5		*	
				(0点)	0	(0V)	6			

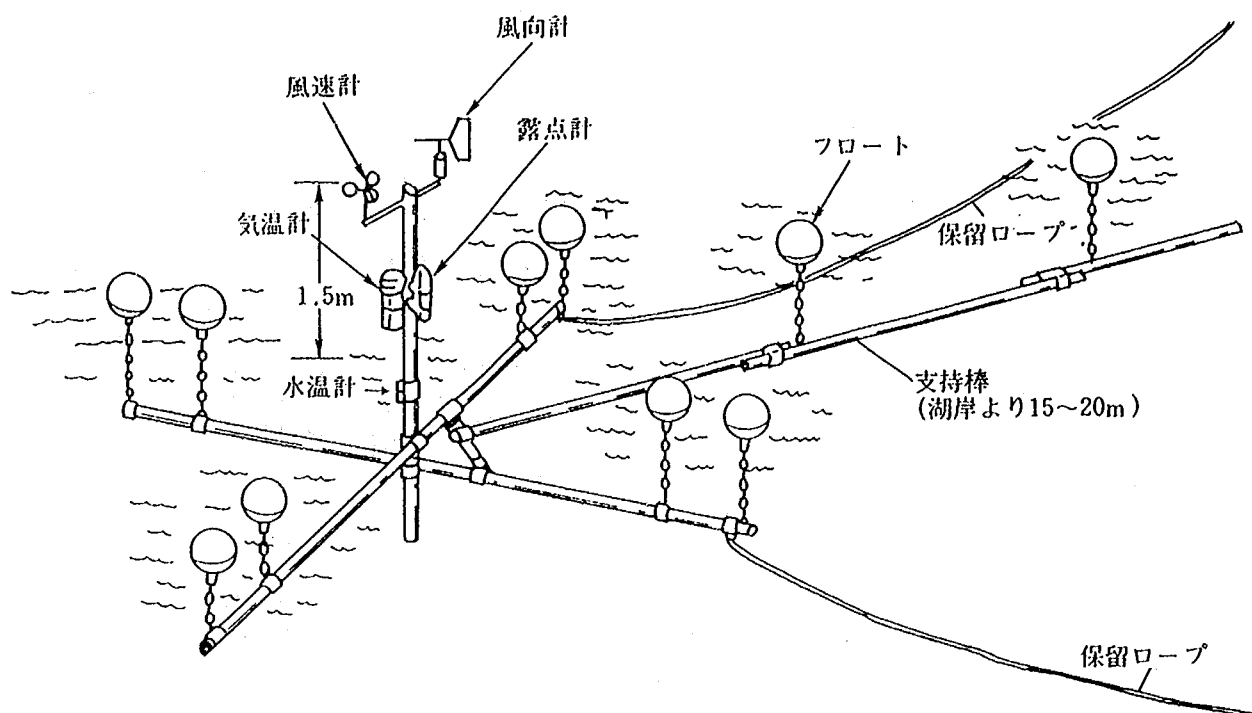


図2-2-1 測器取り付け概念図（連続観測Ⅰ）

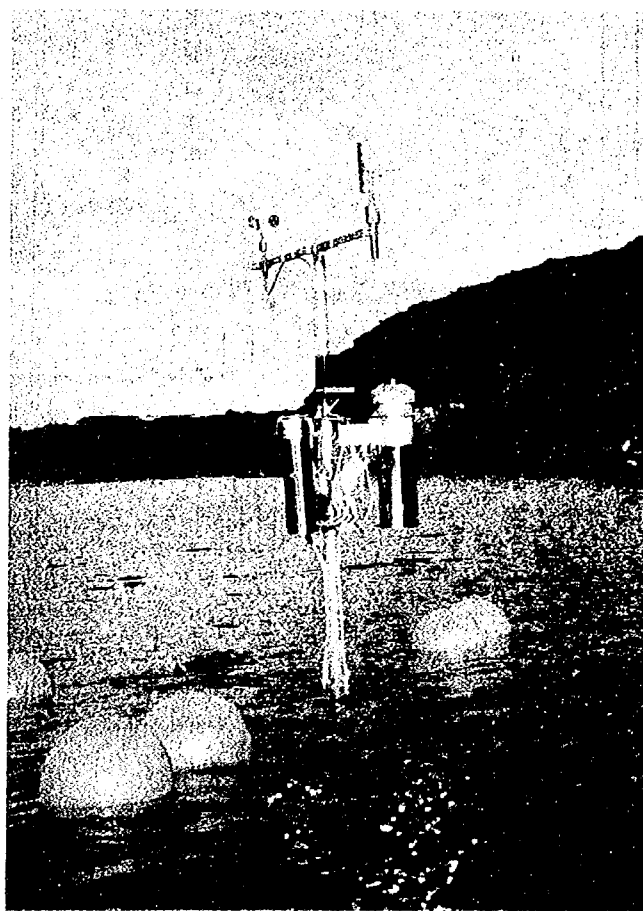
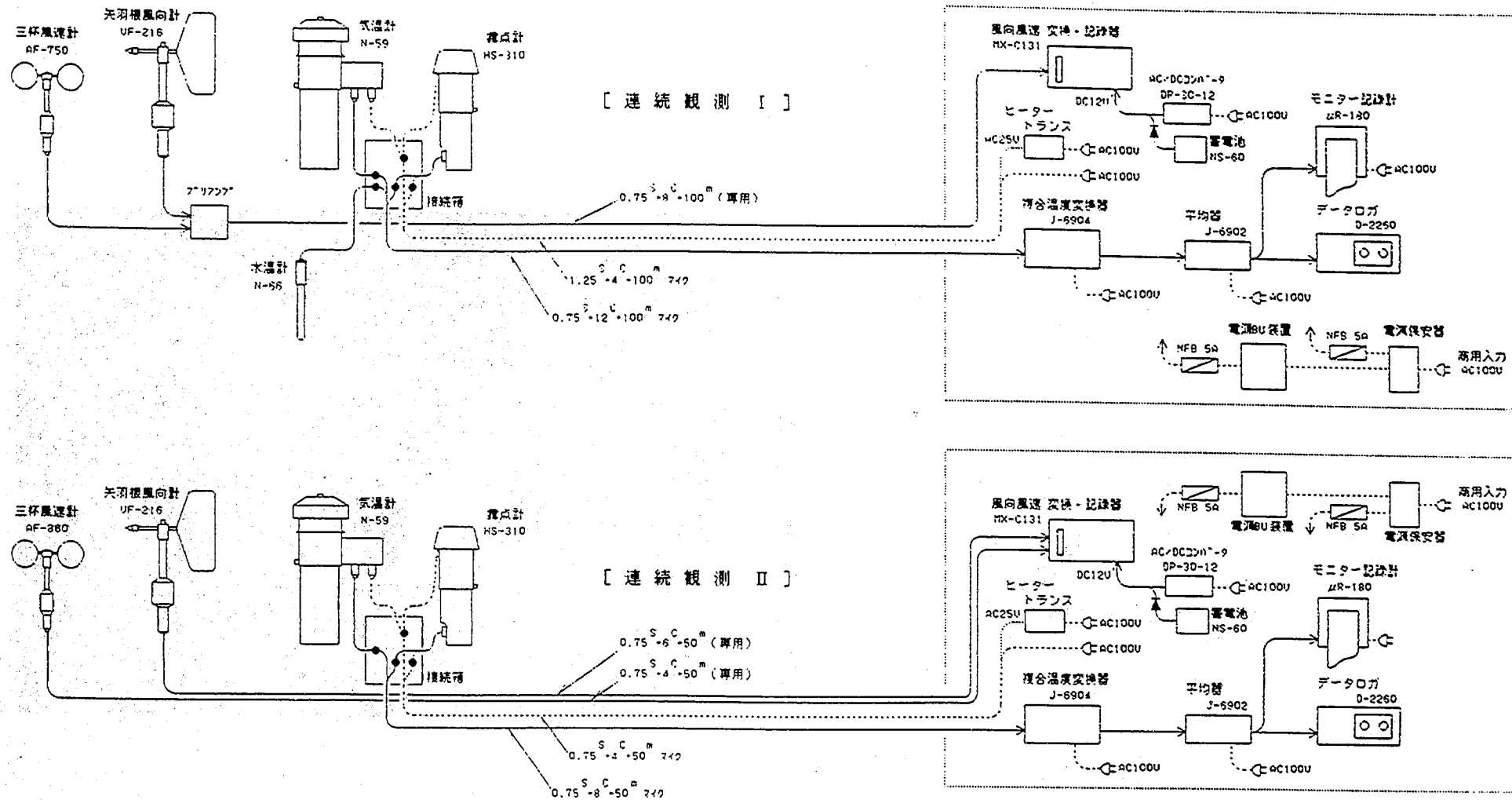


写真2-2-1 湖面に設置した測器（連続観測Ⅰ）



福地ダム 湖面蒸発量観測 連続観測 機器系統図

平成4年6月

(財)日本気象協会関西本部

図2-2-2 測器構成図 (連続観測 I, II)

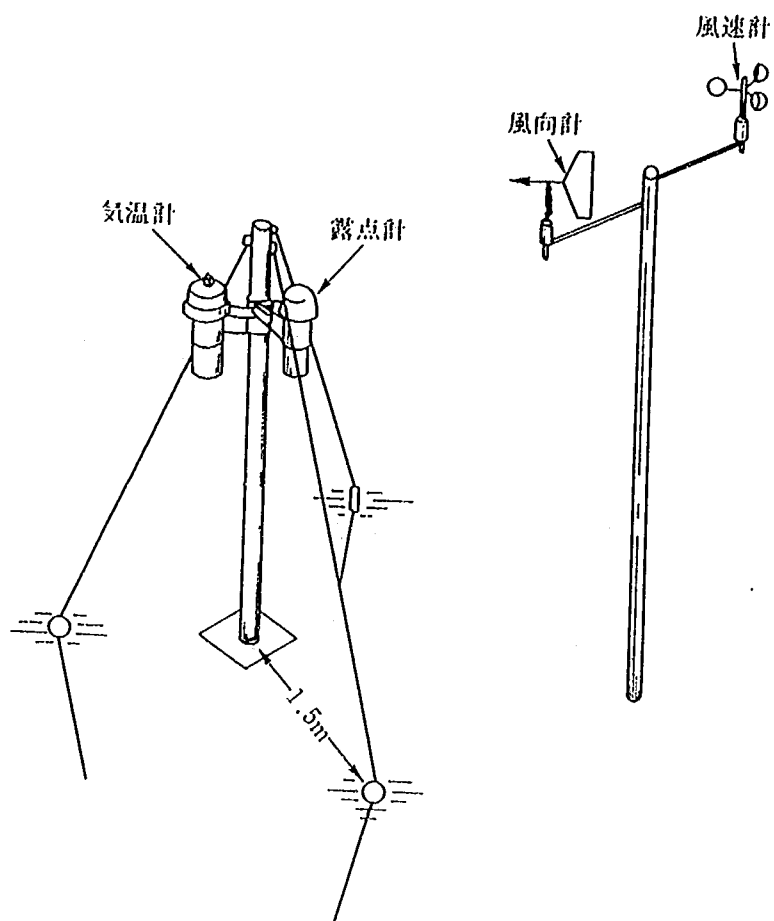


図2-2-3 測器取り付け概念図（連続観測Ⅱ）

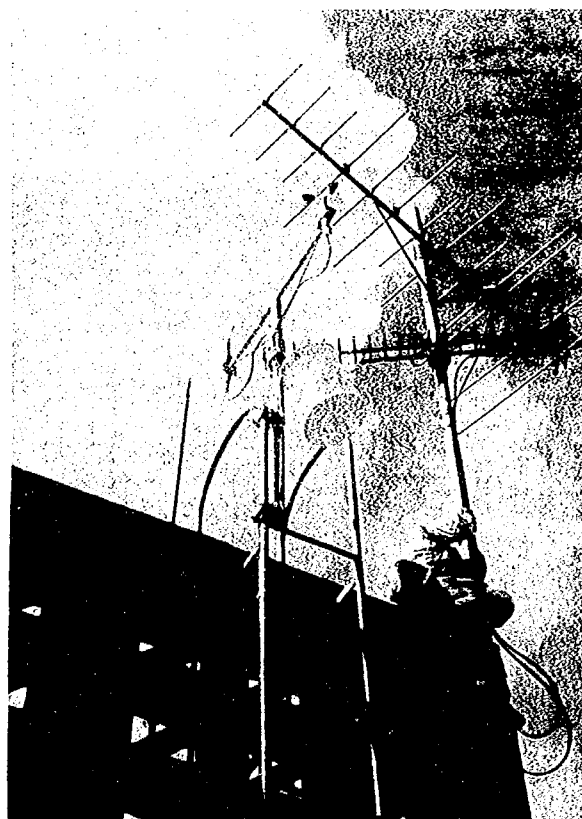
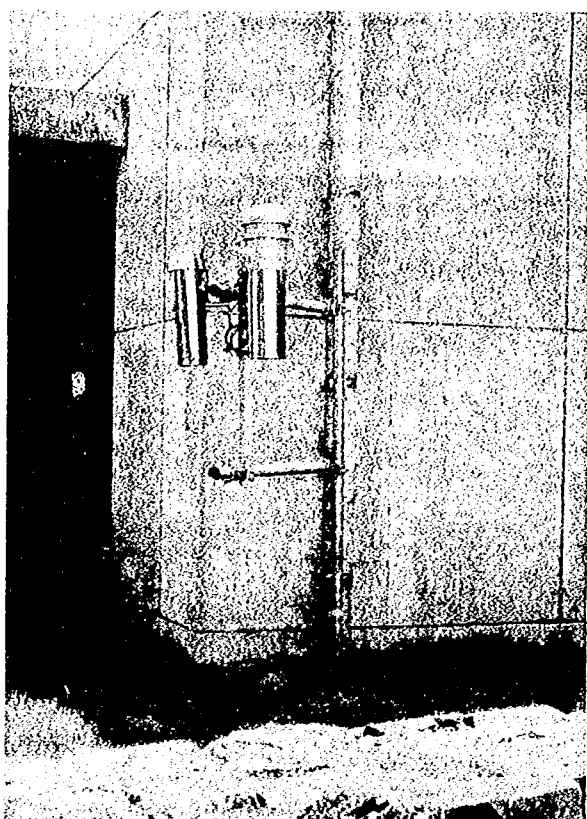


写真2-2-2 陸上に設置した測器（連続観測Ⅱ）

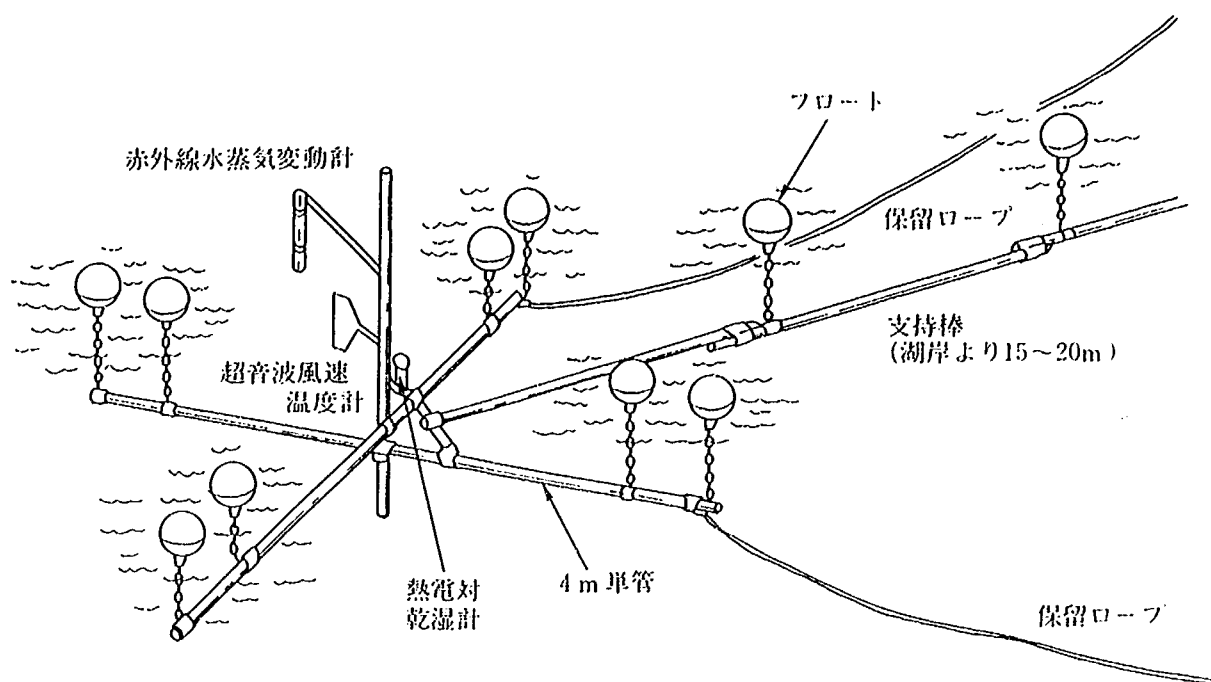


図2-2-4 測器取り付け概念図（特別観測）

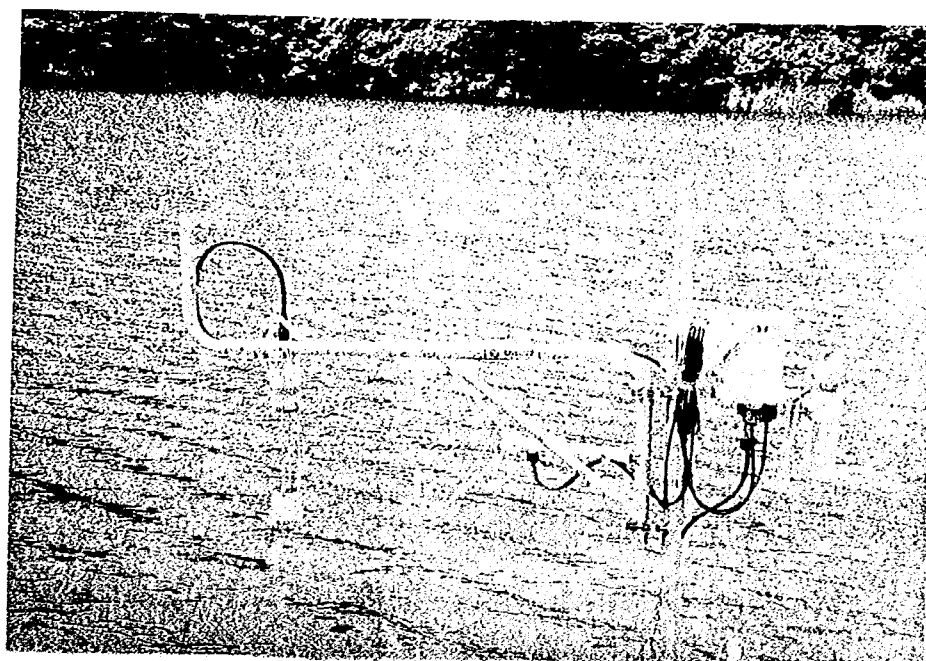
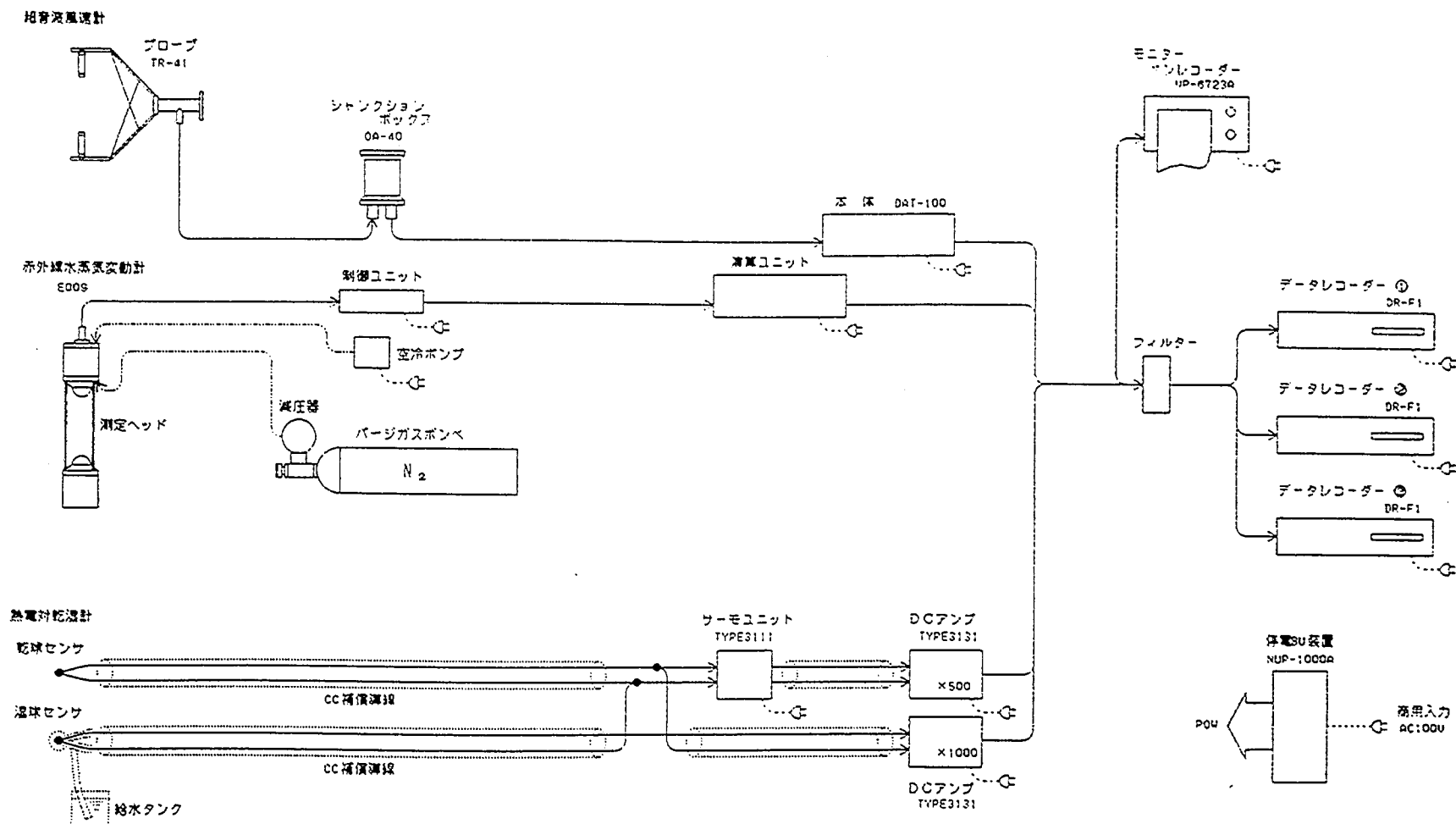


写真2-2-3 湖上に設置した測器（特別観測）



福地ダム 湖面蒸発量観測

特別観測 機器系統図

平成4年6月

(財) 日本気象協会関西本部

図2-2-5 測器構成図 (特別観測)

表2-2-2 気象データ収集一覧表

地点	気象要素	期 間	単 位	所管
名 護	風 向	1992/1～1992/12	毎時	気 象 台
	風 速	"	"	
	気 温	"	"	
	水蒸気圧	"	"	
	湿 度	"	"	
	日照時間	"	"	
福 地 ダ ム	風 向	1992/1～1992/12	毎時(7月だけ)と日	管 理 事 務 所
	風 速	"	"	
	気 温	"	"	
	水 温	"	"	
	湿 度	"	"	
	日照時間	1992/7	毎時	
	日 射 量	"	"	
	蒸 発 量	1992/1～1992/12	毎時(7月だけ)と日	
	水 位	1992/7～1992/11	日	

2.3 解析方法

全体的な解析フローを図2-3-1に示した。

2.3.1 湖面蒸発量の真値の算出と、バルク係数の算出

特別観測で得られたデータから(1)式を用いて蒸発量の真値を算出する。また、(4)式におけるバルク係数(C_e)を蒸発量の真値と特別観測期間中の連続観測データとから求める。

以下に、渦相関法とバルク法による蒸発量観測手法について説明する。

・渦相関法

渦相関法は、大気境界層での乱渦による熱、水蒸気、炭酸ガスなどの物理量と風速の微変動を、応答の早い測器によって測定し、それから直接的に輸送量を求める方法である。そのため渦相関法は、乱流変動法あるいは直接測定法ともよばれる。

$$E = \rho \overline{l w' q'} \quad (1)$$

E : 水蒸気の鉛直フラックス (蒸発量の真値) ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} = \text{ly}/\text{s}$)

q : 比湿 (g/kg) , ρ : 空気密度 (g/cm^3) ^{ラングリー}

w : 風の鉛直成分 (cm/s) , l : 気化潜熱 (cal/g)

($'$) : ダッシュ; 平均値からの偏差

($\bar{}$) : 時間平均 (600秒を平均時間とした)

上述したように、 ρq に風速を掛けたものが風によって運ばれる $\rho q w$ の量を表しており、水蒸気輸送量 (蒸発量) である。鉛直風速を w と表したとき、 $\rho q w$ は水蒸気の鉛直輸送量である。安定した境界層内では、鉛直風速は平均的にはゼロである。ところが風は上下に時々刻々と変動しており、 w の瞬間値はゼロではない。これを乱流変動と呼んでいる。そこで、風速や比湿を平均量と平均量からのずれの和としてそれぞれ $q = \bar{q} + q'$ 、 $w = \bar{w} + w'$ と表すと平均的な蒸発量は、

$$\begin{aligned} \rho q w &= \overline{(\bar{\rho} + \rho') \cdot (\bar{q} + q') \cdot (\bar{w} + w')} \\ &= \overline{\bar{\rho} \bar{q} \bar{w}} + \overline{\bar{\rho} q' \bar{w}} + \overline{\bar{\rho} \bar{q} w'} + \overline{\bar{\rho} q' w'} + \overline{\rho' \bar{q} \bar{w}} \\ &\quad + \overline{\rho' q' \bar{w}} + \overline{\rho' \bar{q} w'} + \overline{\rho' q' w'} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式右辺において、まずプライムを付けた量を一つだけ含む項 (第2, 3及び5項) は、変動量の平均はゼロという定義からして除かれる。次に ρ の変動部分を含む項 (第6, 7及び8項) は下層大気では空気密度は実地上一定と見なせるから、変動部分はないとして省略できる (第6, 7, 8項が除かれる)。次に観測は特定の鉛直運動が卓越することのない均一な地勢の場合に限るなら (安定な境界層の中) 平均鉛直速度を含む項も省略できる。従っ

て、(1)式が導かれる。¹⁾²⁾よって、10分間蒸発フラックスの計算は、0.1秒毎の風速と比湿のデータを用いて次式のようになる。

$$E = \rho l \sum_{i=1}^{6000} (w - \bar{w}) \cdot (q - \bar{q}) \quad (3)$$

q : 比湿 (g/kg) の瞬時値 (0.1秒単位) ,

w : 風の鉛直成分 (cm/s) の瞬時値 (0.1秒単位)

($\bar{\quad}$) : 時間平均 (10分間平均 (6000個) を平均した)

・バルク法

この方法の原理は、金属内を流れる熱流量を知る方法に類似しており、大気中を鉛直上方に運ばれる水蒸気の流れ (すなわち蒸発量 E) を知る場合は、水面とある高度の水蒸気量の差を測定することで定量化する方法である。つまり、ある高さ z の単位体積中に含まれる水蒸気量を q 、水面の飽和水蒸気量を q_s とすれば、蒸発量は次式で表される。³⁾

$$E = \rho l C_e U_z (q_s - q_z) \quad (4)$$

U_z : 高さ z での風速 (cm/s) , q_s : 水面での飽和比湿 (g/kg)

q_z : 高さ z での比湿 (g/kg) , C_e : バルク輸送係数

計算は10分間単位 (平均値) で行った。

2.3.2 湖面及び周辺気象環境の特徴の把握

湖面上と周辺地域との気象データ (風向風速、気温、水蒸気圧等) の比較を行う。また、その変化傾向の比較を行う。そして、観測地点 (福地ダム) の気象環境の特徴を把握すると同時に、平年値との比較により本年度 (観測期間中の) の特徴を把握する。

2.3.3 連続観測より得られた気象データからバルク法により日単位、半旬単位で湖面蒸発量を算出

2.3.1で検討を行ったバルク係数の推定式を用い (4) 式から連続観測期間中の湖面蒸発量を日単位、半旬単位で求め、他地点で評価されている蒸発量との比較を行うことにより変化傾向などその特徴を把握する。また、蒸発量の増減に影響があると考えられる気象要素との比較から、この地点での蒸発量の増減要因を明らかにする。

2.3.4 既存の気象観測データからの蒸発量の推定

今後、福地ダムおよび周辺地域のダム湖の水管理に資するように、ダム湖周辺で観測を行っている気象データから蒸発量の推定方法について検討を行う。推定式は重回帰分析によって行う。

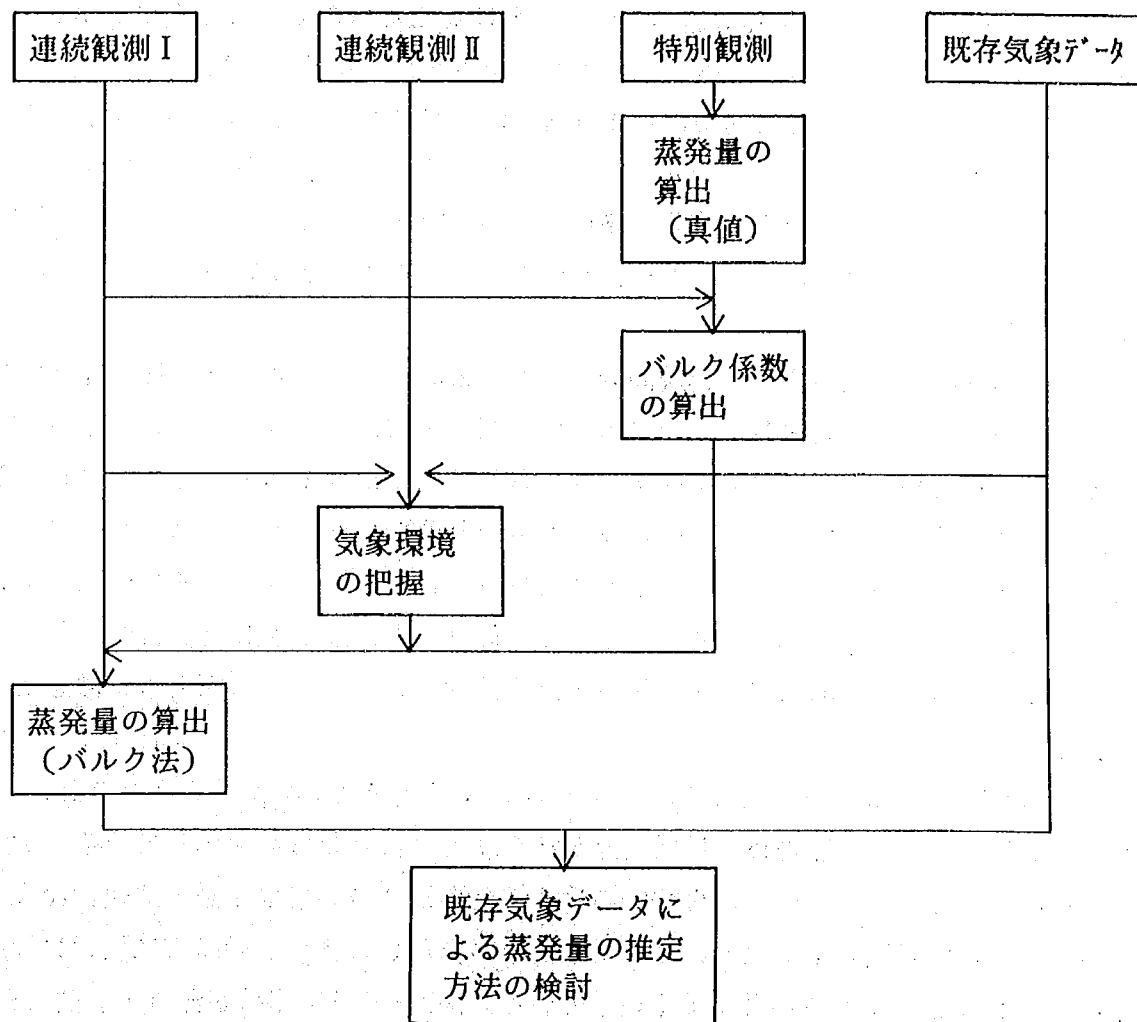


図2-3-1 調査解析フロー

第Ⅲ章 調査結果と考察

3.1 各気象要素の特徴

3.1.1 気温

図3-1-1に最寄りの測候所である名護の1992年における主な気象要素の年変化を示している。冬期の平均気温は15℃から20℃程度と温暖で東京の4月から5月上旬並みの気温であり、3月には既に20℃を超えている。暖候期は6月初めから10月初めまで25℃を越える高温の日が続いている。表3-1-1、図3-1-2では1992年（12月のみ1991年）と平年における名護の月別気候値を示している。ここで示す平年値は名護測候所が現在の位置に移転した1987年7月から1992年6月までの5年間の平均値である。平均気温については2月は平年より低く3月は平年より高いが、それ以外の季節についてはほぼ平年並みといえる。

図3-1-3(a)から図3-1-3(e)までは連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱにおける各月の各気象要素の経時変化を示している。7月から8月にかけての連続観測点Ⅰでは気温はおおむね25℃から30℃の間で変化しており、連続観測点Ⅱにおいては7月から8月下旬にかけて最高気温が30℃を超えている。9月に入ると連続観測点Ⅰではその特徴は夏季と変わりはないが、連続観測点Ⅱにおいては次第に気温は減少傾向で、9月下旬には最低気温が25℃以下の日が多い。10月は連続観測点Ⅰ、連続観測点Ⅱともに気温は徐々に減少傾向にあり、下旬には最高気温が25℃を超える日が少なくなっている。全般に、連続観測点Ⅰは気温の日較差や年較差が比較的小さいという水面上の特徴をよく表しているといえる。

表3-1-2には名護と連続観測点Ⅰ、連続観測点Ⅱの夏日（最高気温が25℃以上の日）、真夏日（最高気温が30℃以上の日）、熱帯夜（最低気温が25℃以上の日）の日数を示している。欠測期間を除くと、夏日については3点ともほぼ日数は等しく、真夏日については名護と連続観測点Ⅱはほぼ一致しているが、連続観測点Ⅰでは他の2点より日数が少ない。また、熱帯夜は反対に連続観測点Ⅰで多くなっており、水面上の特徴をよく表している。図3-1-1では連続観測点Ⅰ、連続観測点Ⅱの各気象要素の半旬平均値の経時変化も併せて示しており、図3-1-4と図3-1-5は名護と各点のデータの散布図である。経時変化図から名護と連続観測点Ⅱにおける気温の季節変化はほぼ一致しているといえ、散布図からその相関は各月共非常に高いことがいえる。連続観測点Ⅰでは名護と比較して気温の変化幅が小さいが、相関はよい。これらのことから名護の気温はダム周辺の気温を代表するといえ、ダム周辺の気温の推定等を比較的高精度で行えると思われる。

3.1.2 水蒸気圧、湿度

図3-1-1より1992年冬期の水蒸気圧は15mb前後で、3月から次第に高くなり6月中旬から8月まではほぼ30mbを維持している。相対湿度の年変化は大きくないが暖候期で70～85%、寒候期にはやや低く60～75%であることがわかる。参考までに東京の冬期では50～60%、夏季では70～80%程度である。図3-1-2より、この年の水蒸気圧および相対湿度は3月を除くと平年（過去5年間）に比べて全般に低い傾向にある。

図3-1-3(a)から図3-1-3(e)より、連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱはともに7月、8月において水蒸

気圧に大きな変動はなく、常に30mb前後を維持している。相対湿度についても70%以上を維持しており、夜間は90%を超える日がほとんどである。9月から10月にかけては水蒸気圧、湿度とも次第に値が小さくなり全般に値の変動幅は大きくなっている。特に秋季においては水蒸気圧や相対湿度は風向に關与していると思われる。つまり、南東よりの風が卓越している期間は比較的高く、北西よりの風が卓越している期間では低くなっている。

図3-1-1より、3点における水蒸気圧と相対湿度の経時変化を比較すると、連続観測点Ⅰ、連続観測点Ⅱでは名護より少々高めであるが、変動の傾向はよく一致している。図3-1-6と図3-1-7に示す水蒸気圧の散布図では、夏季にはその変動幅が小さく名護との相関は必ずしも良いとはいえないが、秋季特に10月には非常に高相関を示しており、全期間を通してかなり高い相関があるといえる。図3-1-8と図3-1-9は湿度の散布図であり、水蒸気圧と同様夏にばらつきが大きく、秋に相関が高くなる傾向にある。

3.1.3 日射量、日照時間

福地ダムの観測では日照時間の測定は行っておらず、図3-1-1では名護の日照時間のみ表示している。夏季の期間中は年間をとって最も日照時間が長く、この期間中は晴天日の続いていることが理解できる。表3-1-1と図3-1-2より、曇天日の多かった3月と6月を除いては日照時間はほぼ平年並みといえる。

3.1.4 風向、風速

名護の1992年の風向の特徴を図3-1-12の風配図からみると、12月から2月までと10月、11月の寒候期においては北よりの風が卓越しており、3月から5月の春季においては北よりの風が卓越しているが、南よりの風も吹いている。6月と7月は南よりの風が卓越しており、8月の風向は定まっていない。図3-1-1より、名護の1992年の風速は12月から6月までは3～5 m/s程度、7月中旬から9月上旬にかけては3 m/s以下である。ただし、8月上旬と下旬にそれぞれ台風10号、台風16号が接近したため、一時的に風速は大きくなっている。9月中旬から11月にかけて風速は3～6 m/sと、この1年を通じて大きい。表3-1-1と図3-1-2より、1992年の風速は5月、7月については平年より小さく、2月、10月、11月については平年より大きいことがいえる。

図3-1-3(a)から図3-1-3(e)の経時変化図と図3-1-13の風配図より、7月の連続観測点Ⅰでは東南東方向の風が卓越しており、連続観測点Ⅱでは東と南方向の風が卓越している。風速はともに5 m/s以下で弱い。8月には連続観測点Ⅰの風向に欠測が多く、その風配図はこの地点の特徴を示しているものとは思えない。連続観測点Ⅱでは東から東北東の風が卓越している。8月上旬と8月下旬にはそれぞれ台風10号、台風16号の影響で風速10 m/sを越える日があった。9月には東よりの風が卓越している期間と、北から北西の風が卓越している期間にきれいに分かれ、その頻度は同程度である。風速は月初め以外は比較的弱い。10月には連続観測点Ⅰでは北西より、連続観測点Ⅱでは北から東よりの風が卓越しており、南成分の風はほとんど無い。同じ地域ではあるが連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱで風向の異なることが多い。この理由としては連続観測点Ⅰはダムの背面であるため、その影響の大きいことが考えられる。

風向は局地地形に大きく作用されるため、名護とダム周辺の特徴は異なるが双方ともに夏季は風

向は定まらず，秋季は南系の風の頻度が小さい。図3-1-10と図3-1-11は風速について名護と連続観測点を比較したものである。風向と同様風速も局地地形の影響を大きく受けるため，名護と比較して全般に小さいが相関は良い。

3.1.5 水温

図3-1-3(a)から図3-1-3(e)よりダム湖面の水温は日変化がきわめて小さく，7月は30℃以上，8月と9月は30℃前後を維持しており，10月になってようやく次第に低くなっていることがわかる。連続観測点Ⅰの気温が連続観測点Ⅱに比べて低下が遅れるのはこの影響が強いと考えられる。

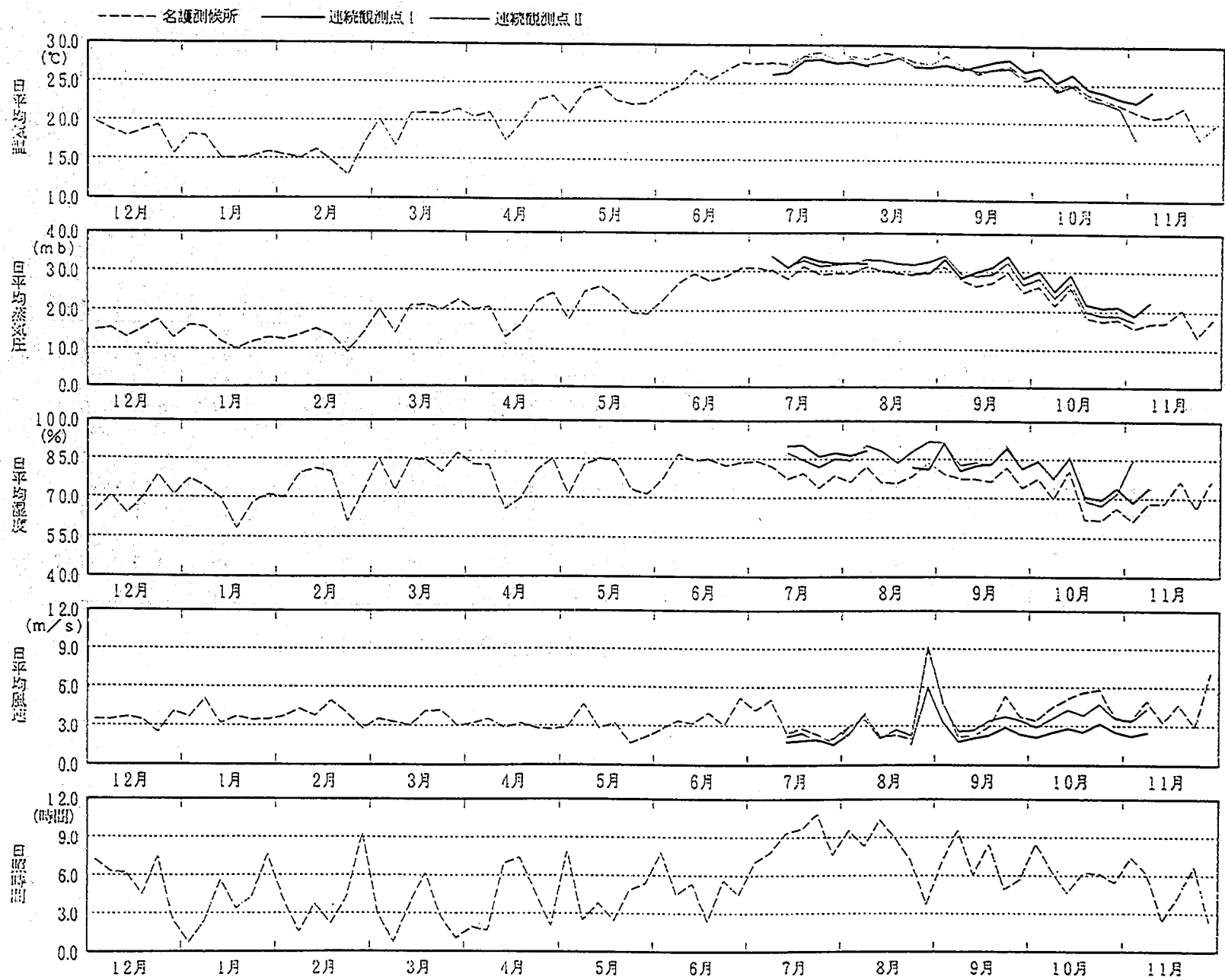


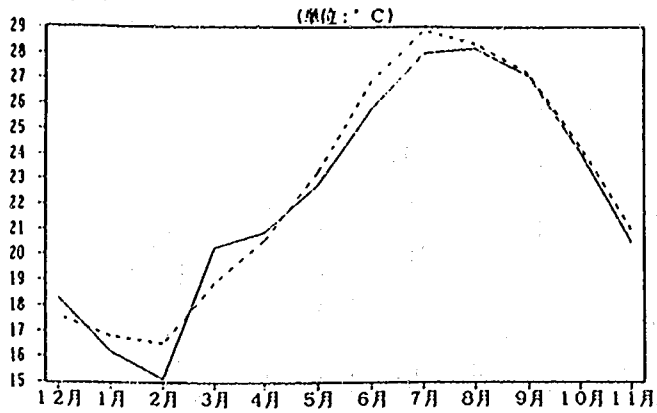
図3-1-1 各気象要素の半月平均経時変化比較

表3-1-1 名護における月別気候値

		12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
平均気温 (°C)	1992年	18.3	16.2	15.1	20.3	20.9	22.8	25.8	28.0	28.2	27.1	24.1	20.5
	平年	17.6	16.8	16.5	18.9	20.6	23.3	26.9	28.9	28.4	27.2	24.3	21.0
水蒸気圧 (m b)	1992年	14.7	13.1	12.9	19.9	19.5	21.7	27.7	29.8	30.0	27.8	21.1	16.9
	平年	13.9	14.3	14.2	17.4	19.1	23.4	29.8	31.5	31.2	28.6	22.7	18.0
湿度 (%)	1992年	70	70	74	82	78	78	83	79	79	78	69	70
	平年	68	73	74	78	77	81	84	79	81	79	74	71
日照時間 (h)	1992年	163.7	112.8	85.0	59.2	111.5	117.5	124.7	261.1	221.1	198.5	191.4	126.8
	平年	144.8	89.7	98.7	91.5	107.4	140.6	180.6	284.6	220.4	186.0	173.5	135.2
平均風速 (m / s)	1992年	3.5	3.8	4.0	3.5	3.1	2.9	3.6	3.0	3.8	3.6	4.7	4.5
	平年	3.6	3.9	3.7	3.6	3.3	3.4	3.8	3.6	3.7	3.7	4.2	4.1

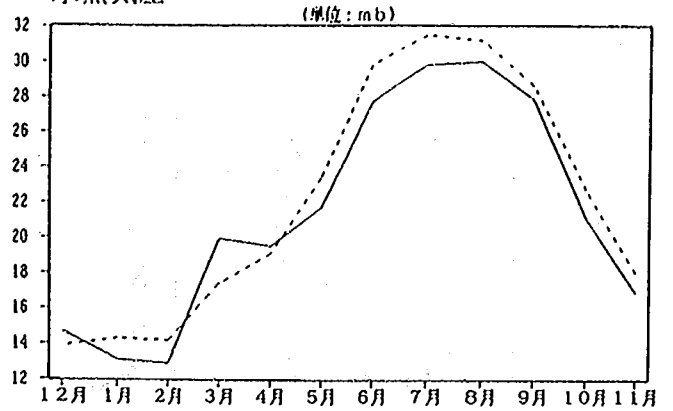
12月は1991年の値

平均気温



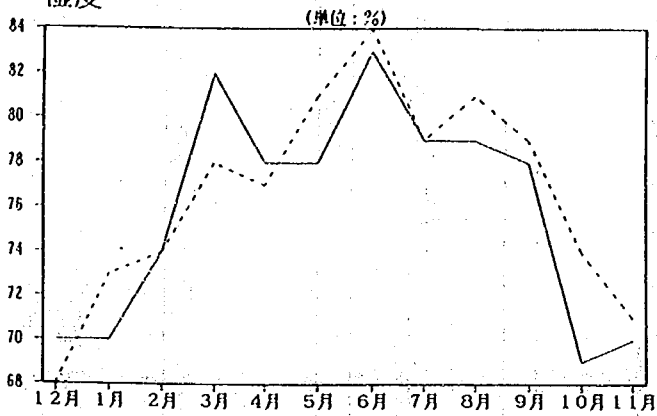
— 1992年 -- 平年

水蒸気圧



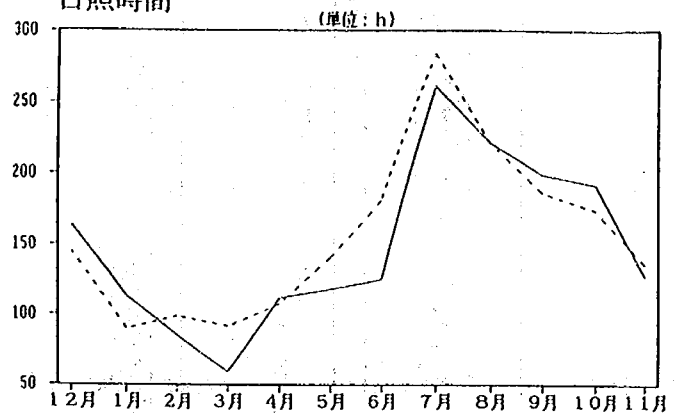
— 1992年 -- 平年

湿度



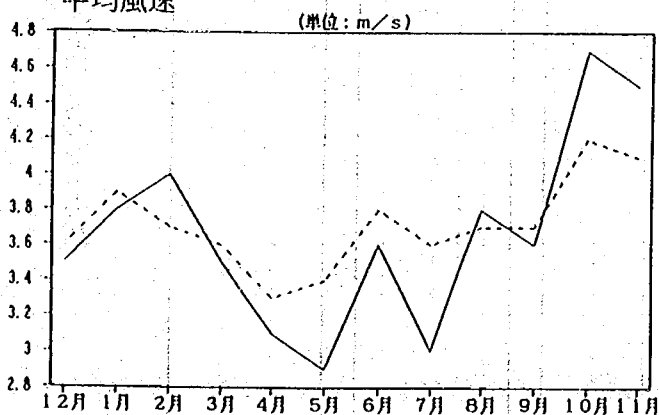
— 1992年 -- 平年

日照時間



— 1992年 -- 平年

平均風速



— 1992年 -- 平年

図3-1-2 名護における1992年と平年の月別気象要素

(1992年: 1991年12月～1992年11月 平年: 1987年7月～1992年6月)

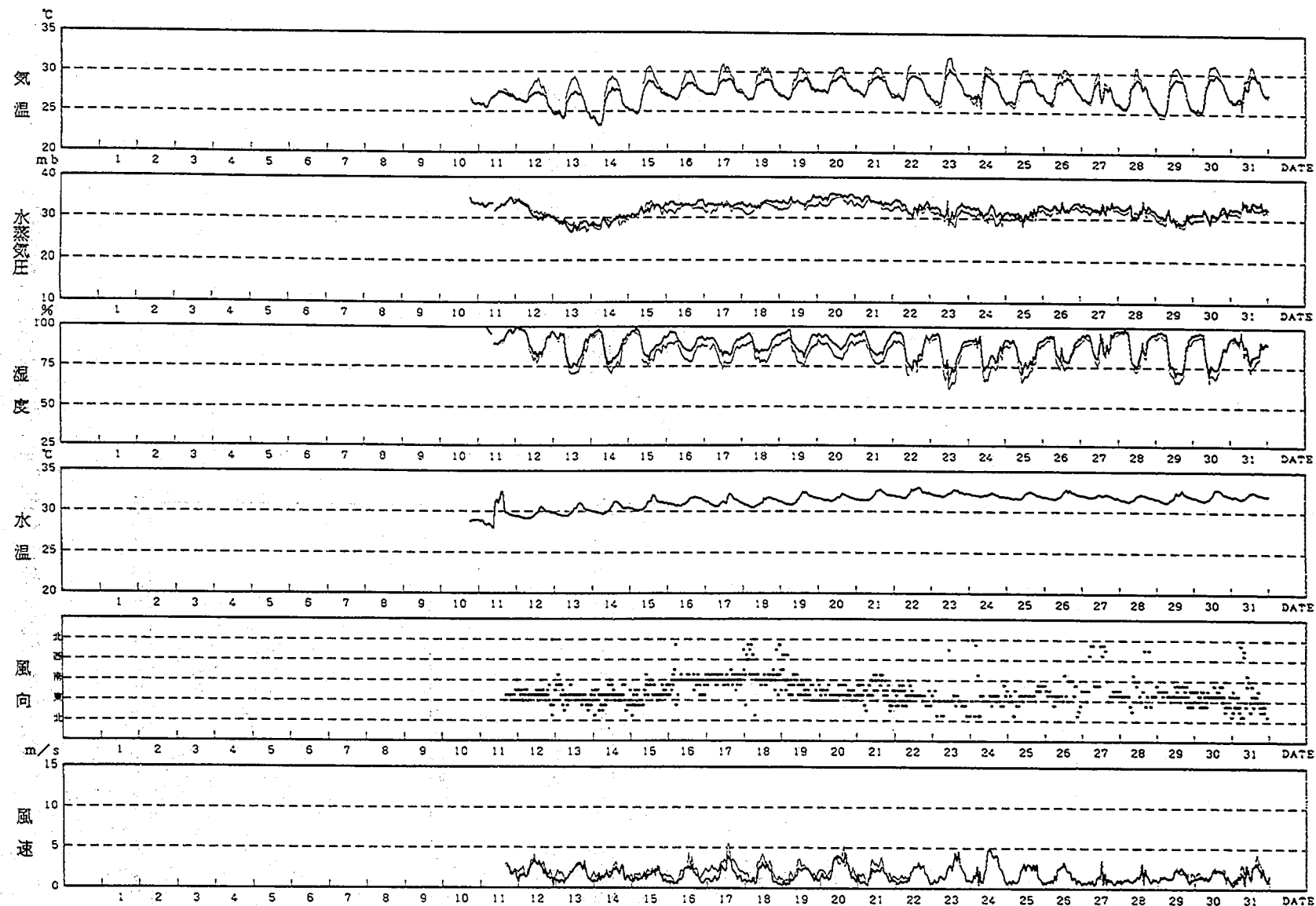


図3-1-3(a) 連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱの経時変化図 (1992年7月)

太線、四角は連続観測点Ⅰ 細線、白丸は連続観測点Ⅱの経時変化

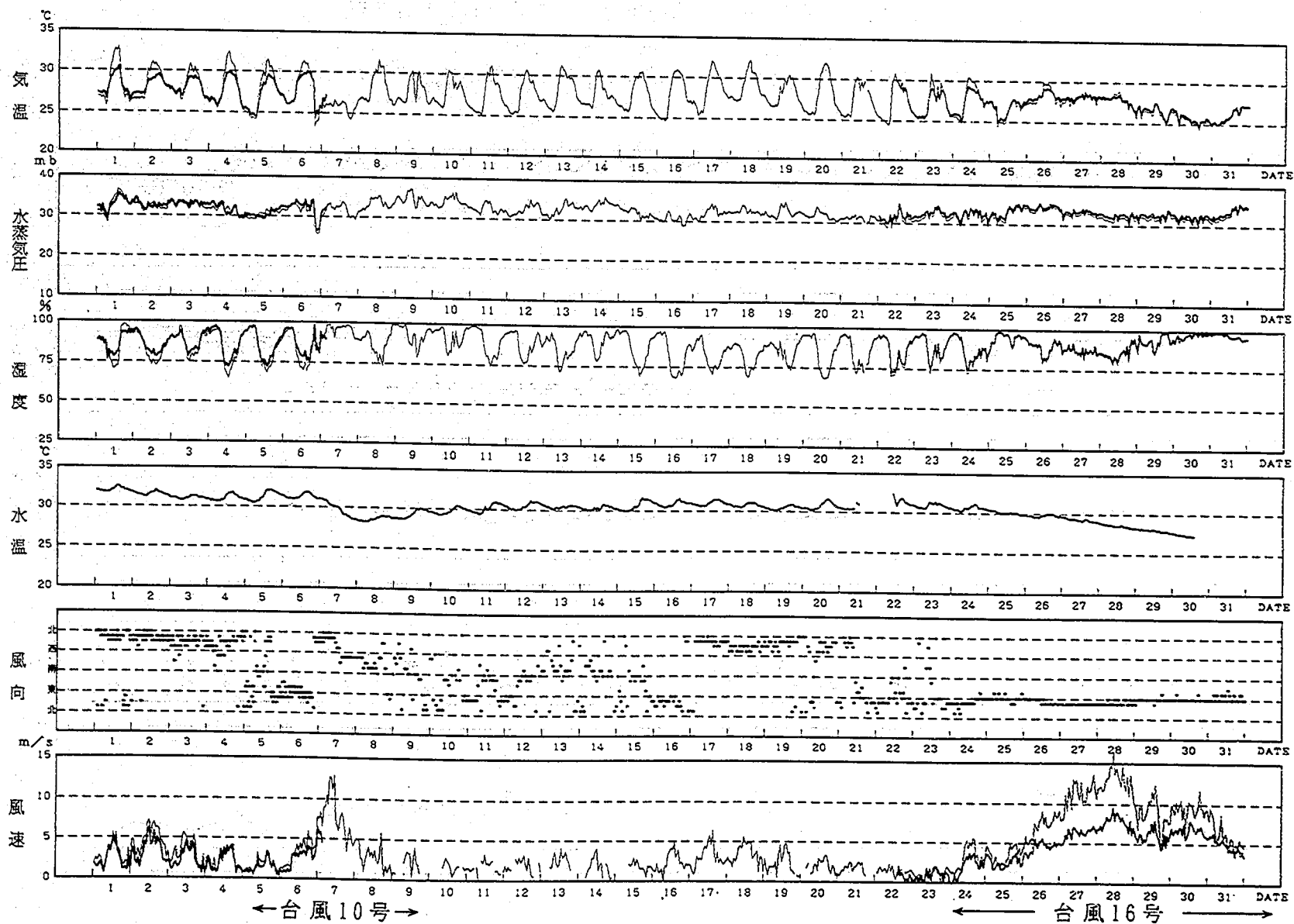


図3-1-3(b) 連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱの経時変化図 (1992年8月)

太線、四角は連続観測点Ⅰ 細線、白丸は連続観測点Ⅱの経時変化

※ 8月22日15時以降の連続観測点Ⅰの水蒸気圧、湿度は連続観測点Ⅱのデータから推定した。

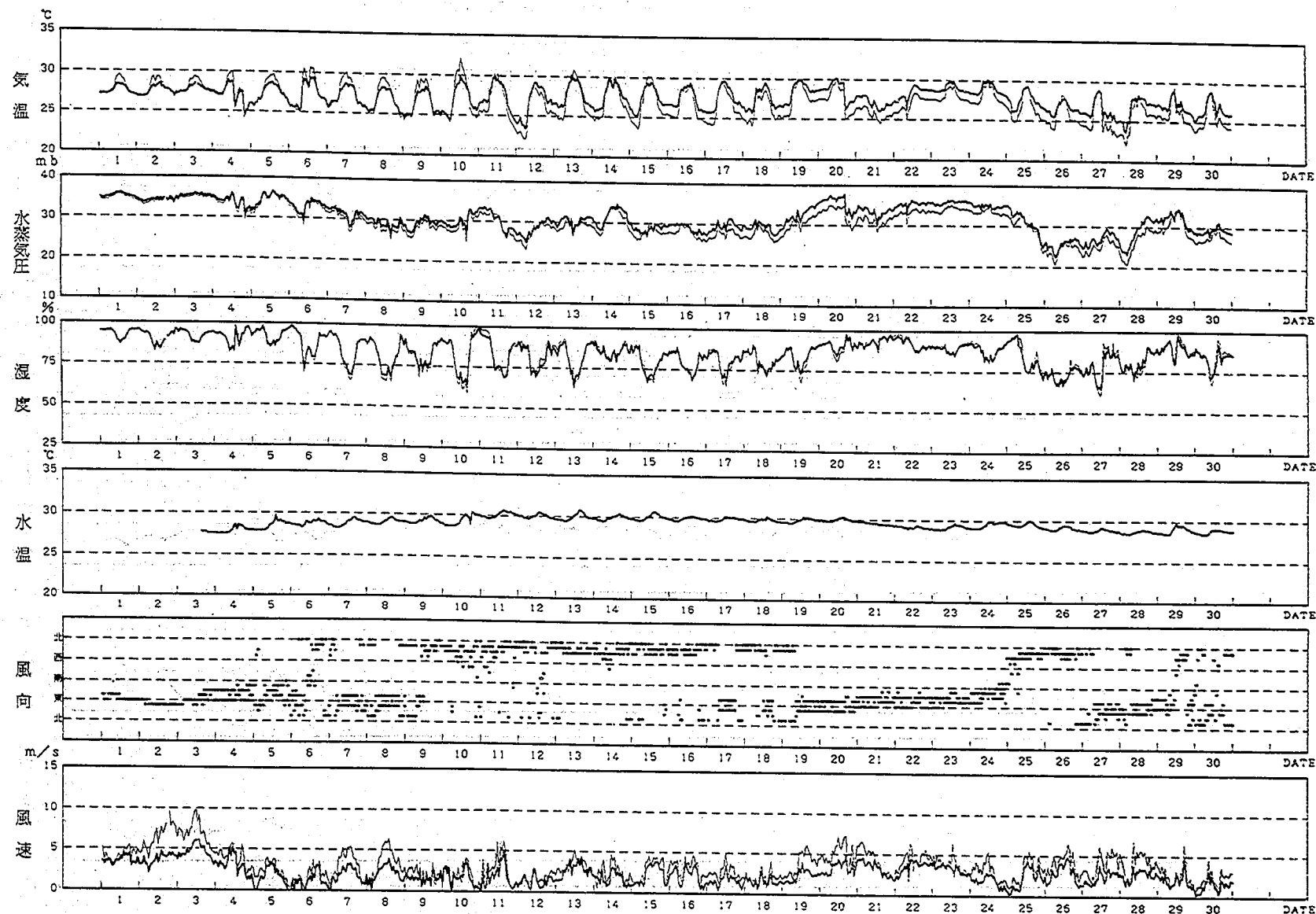


図3-1-3(c) 連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱの経時変化図 (1992年9月)

太線、四角は連続観測点Ⅰ 細線、白丸は連続観測点Ⅱの経時変化

※ 9月10日18時以前の連続観測点Ⅰの水蒸気圧、湿度は連続観測点Ⅱのデータから推定した。

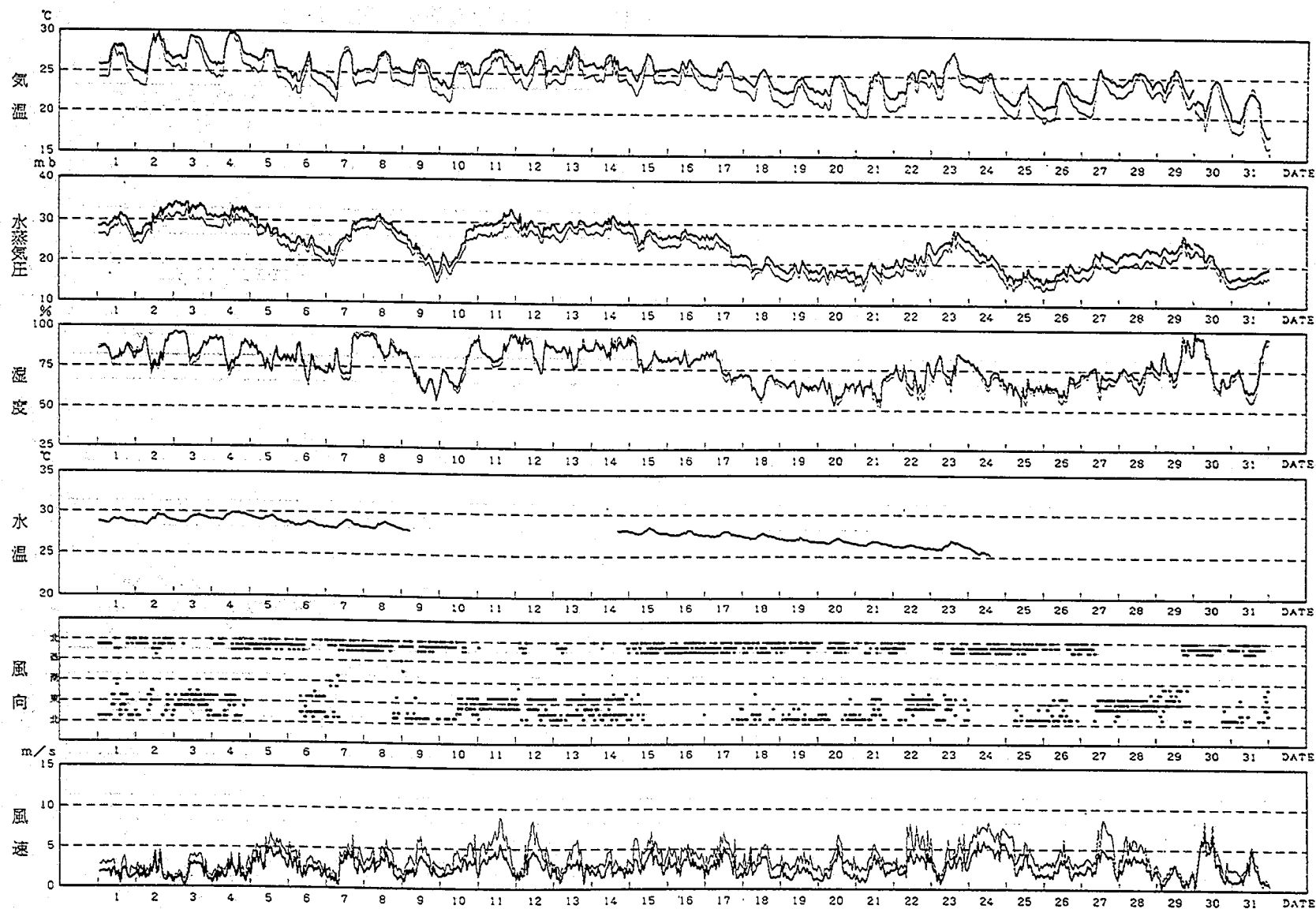


図3-1-3(d) 連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱの経時変化図 (1992年10月)

太線、四角は連続観測点Ⅰ 細線、白丸は連続観測点Ⅱの経時変化

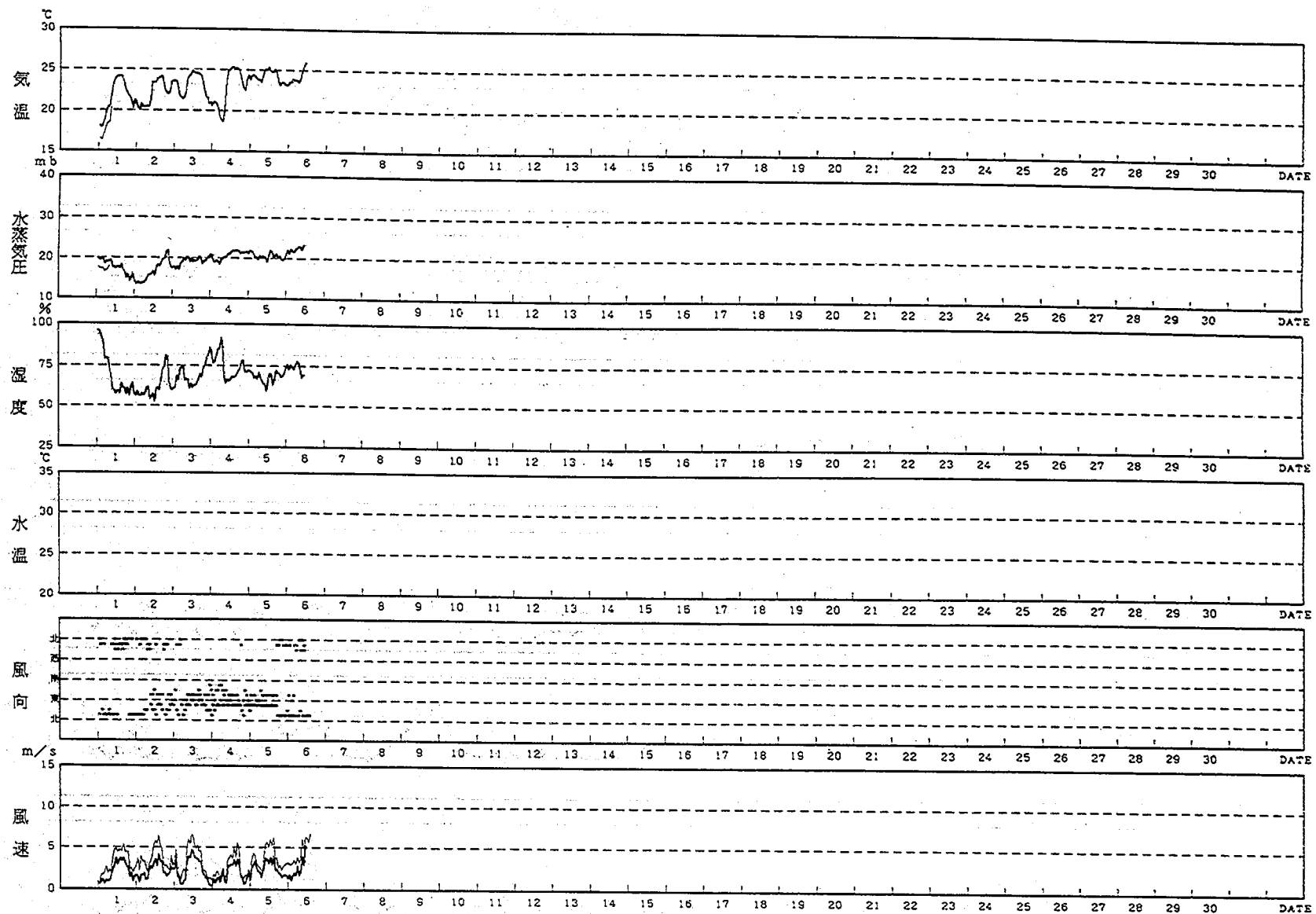


図3-1-3(e) 連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱの経時変化図 (1992年11月)

太線、四角は連続観測点Ⅰ 細線、白丸は連続観測点Ⅱの経時変化

表3-1-2 各点の夏日，真夏日，熱帯夜の日数

		夏日 ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$)			真夏日 ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)			熱帯夜 ($T_{\min} \geq 25^{\circ}\text{C}$)		
		名護	連 I	連 II	名護	連 I	連 II	名護	連 I	連 II
7月	上旬	10	0(10)	0(10)	4	0(10)	0(10)	8	0(10)	0(10)
	中旬	10	10	9(1)	10	0	6(1)	7	6	5(1)
	下旬	11	11	11	11	2	11	9	10	10
	計	31	21(10)	20(11)	25	2(10)	17(11)	24	16(10)	15(11)
8月	上旬	10	6(4)	10	9	3(4)	9	7	4(4)	7
	中旬	10	0(10)	10	10	0(10)	10	9	0(10)	9
	下旬	11	9(2)	11	7	0(2)	4	8	7(2)	5
	計	31	15(16)	31	26	3(16)	23	24	11(16)	21
9月	上旬	10	10	10	9	0	4	7	7	6
	中旬	10	10	10	3	3	3	1	8	2
	下旬	10	10	11	1	1	1	5	8	3
	計	30	30	31	13	4	8	13	23	11
10月	上旬	10	10	10	1	0	1	0	4	0
	中旬	9	9	10	0	0	0	0	4	0
	下旬	7	7	10	0	0	0	0	0	0
	計	26	26	30	1	0	1	0	8	0

※名護は名護測候所、連 I、連 II はそれぞれ連続観測点 I、連続観測点 II。T_{max}、T_{min}はそれぞれ日最高気温、日最低気温。() 内の数字は欠測または無観測の日数。

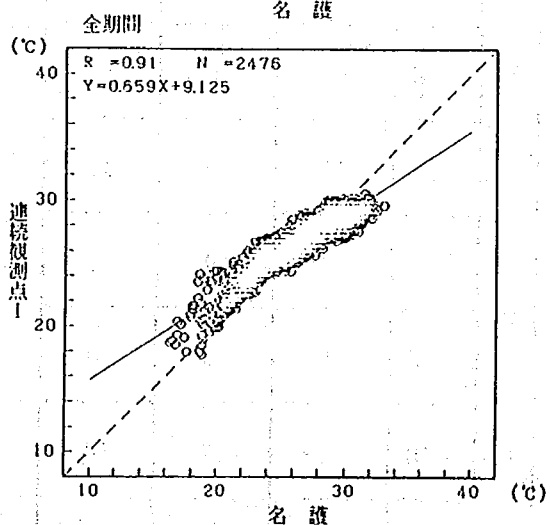
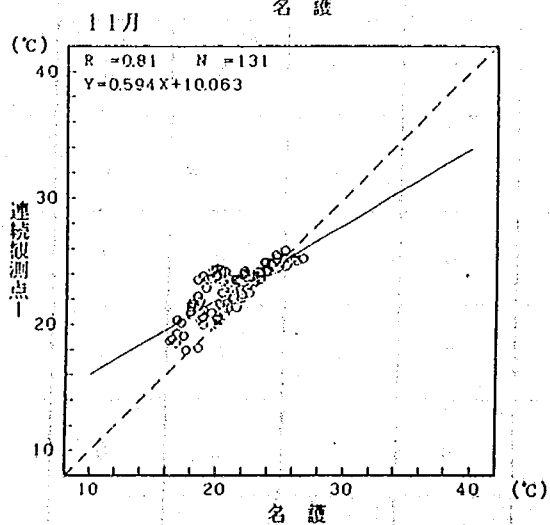
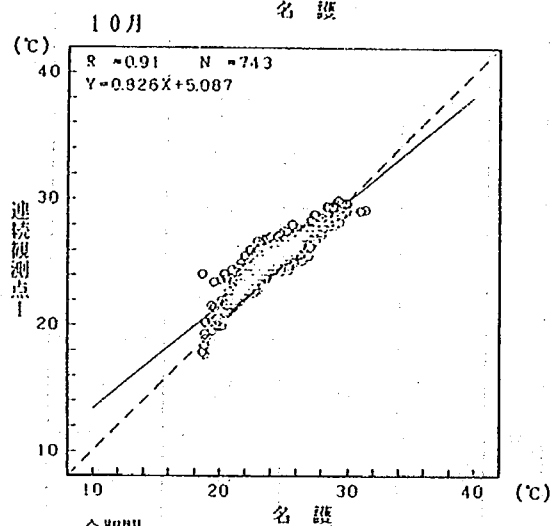
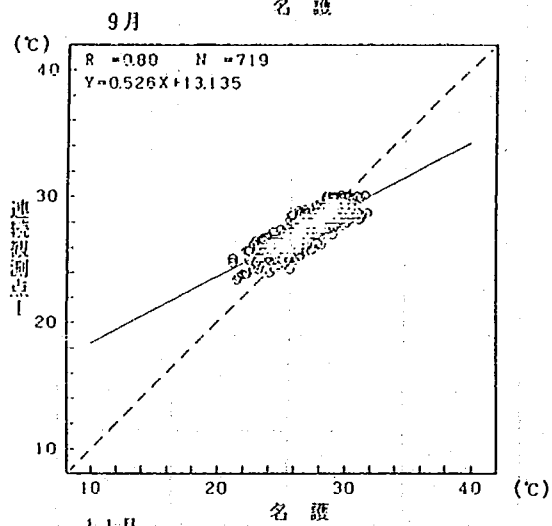
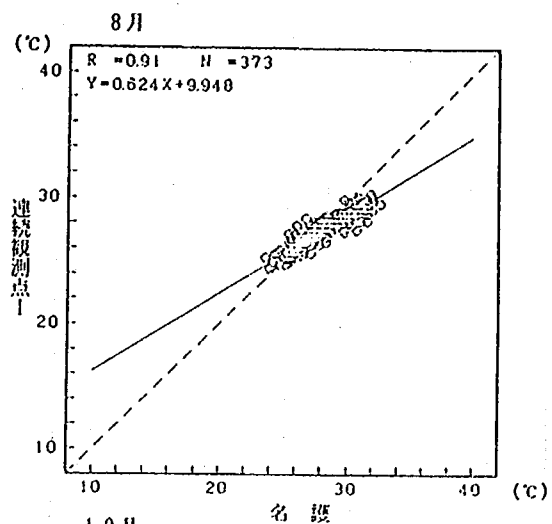
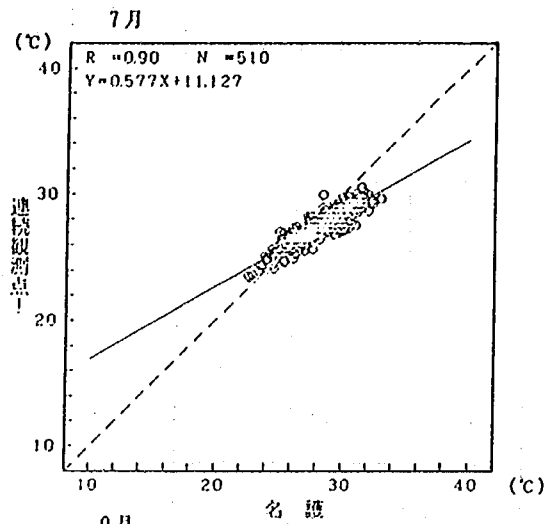


図3-1-4 1992年名護と連続観測点 I における気温の散布図

Rは相関係数
 Nはデータ数

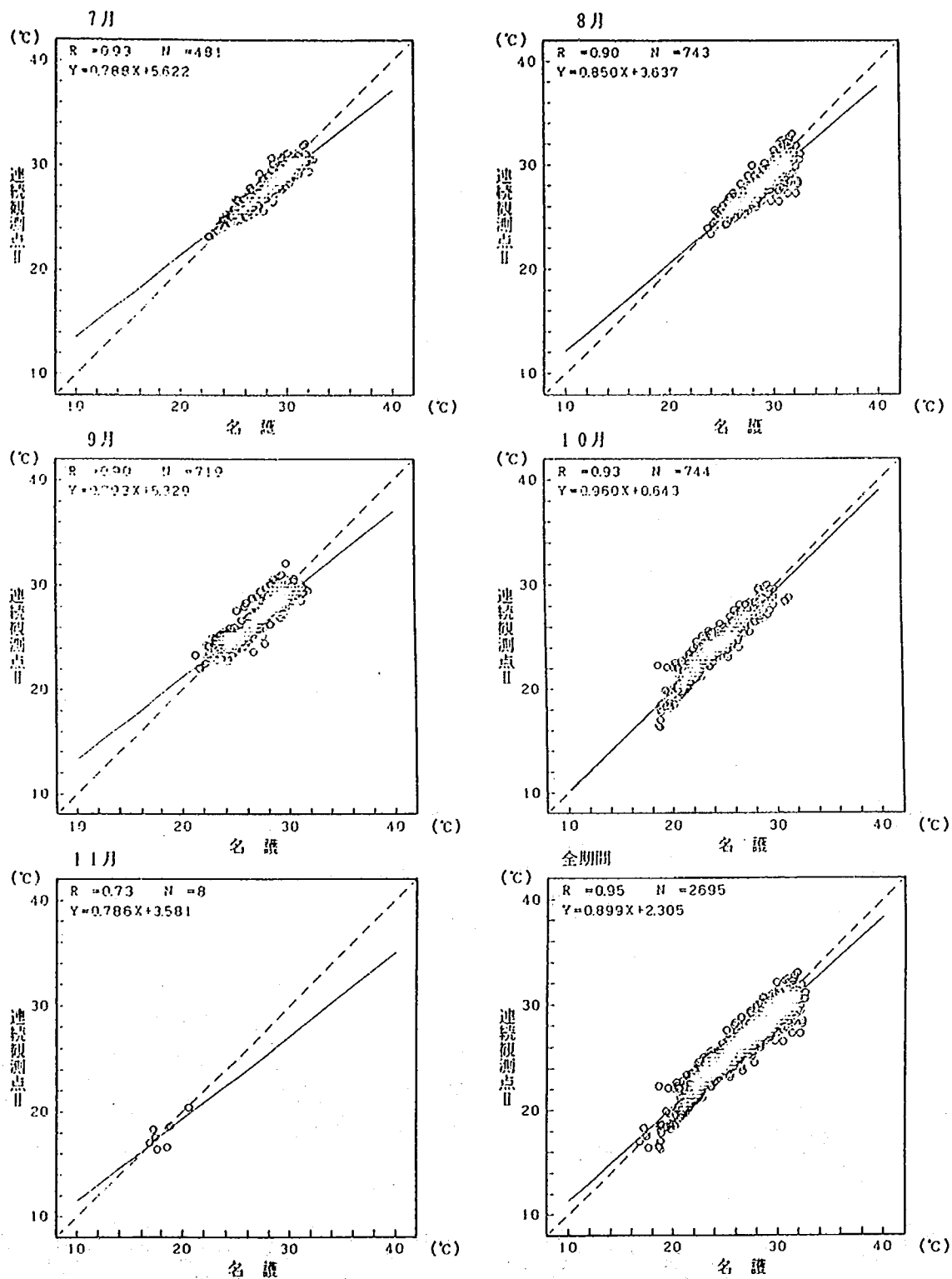


図3-1-5 1992年名護と連続観測点Ⅱにおける気温の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数

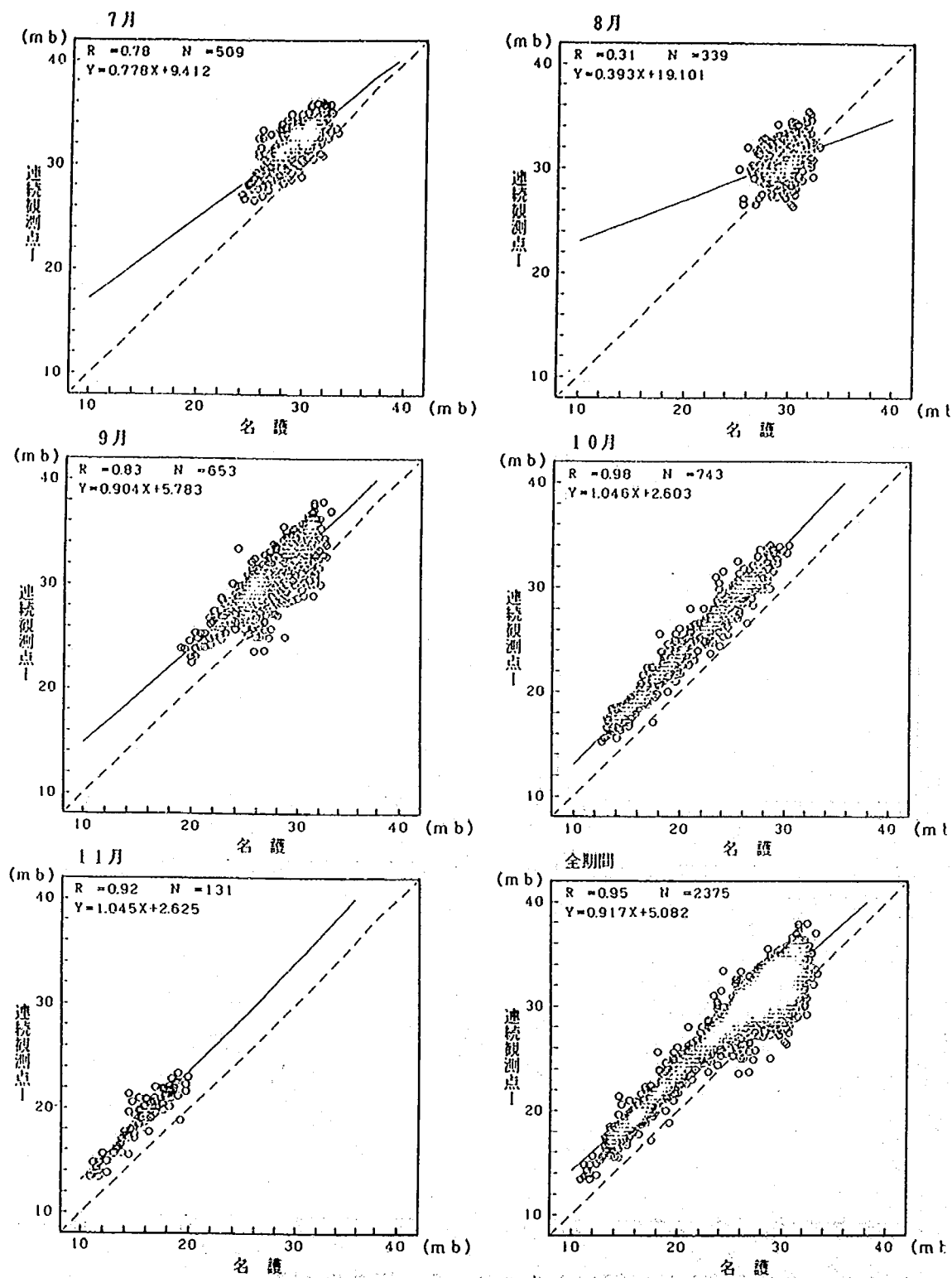


図3-1-6 1992年名護と連続観測点 I における水蒸気圧の散布図

Rは相関係数
 Nはデータ数

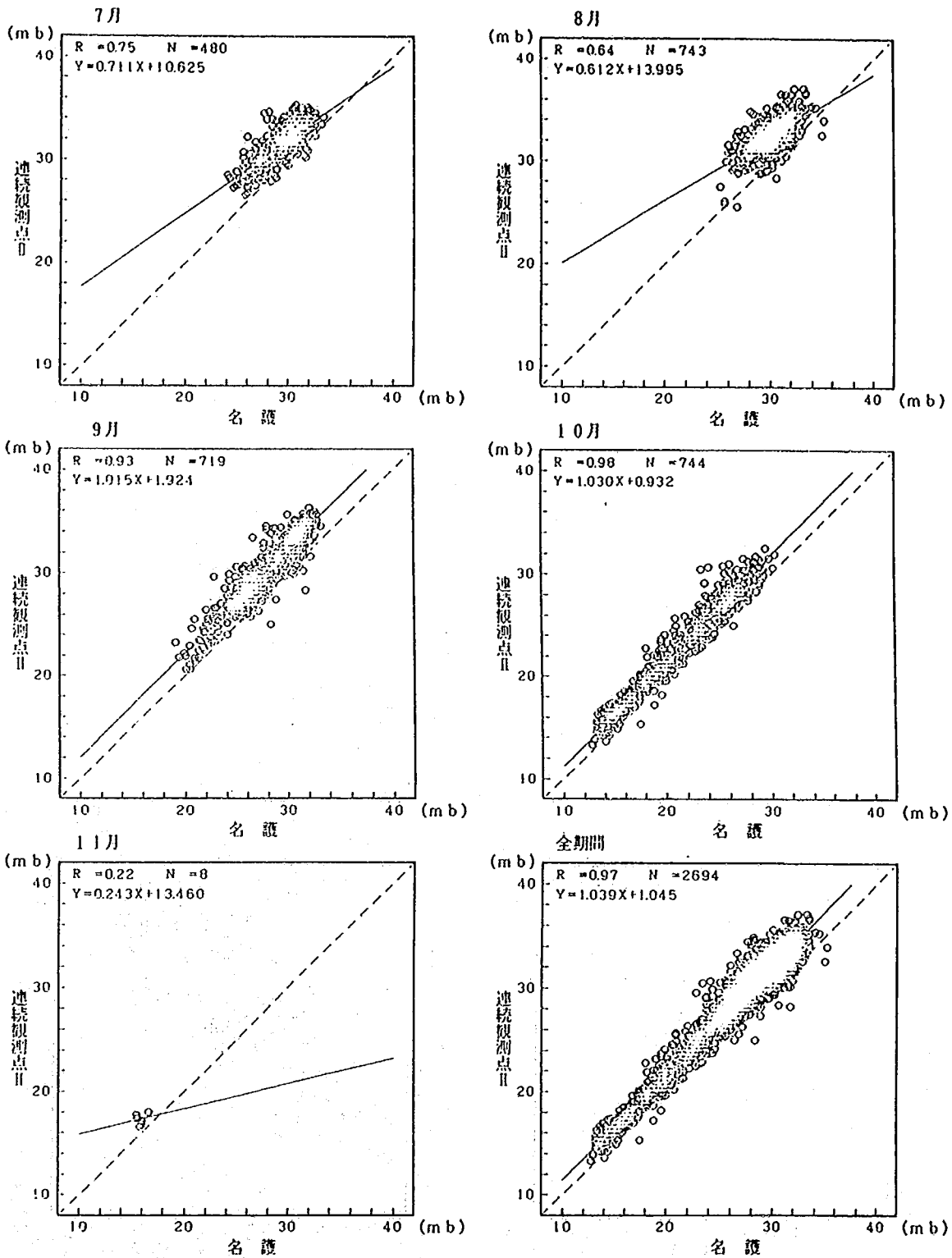


図3-1-7 1992年名護と連続観測点IIにおける水蒸気圧の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数

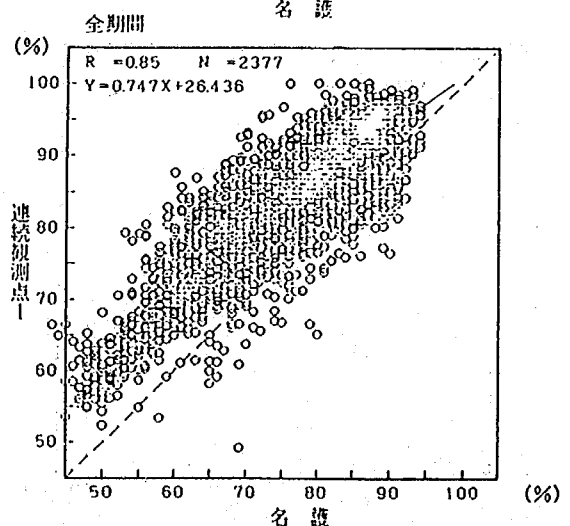
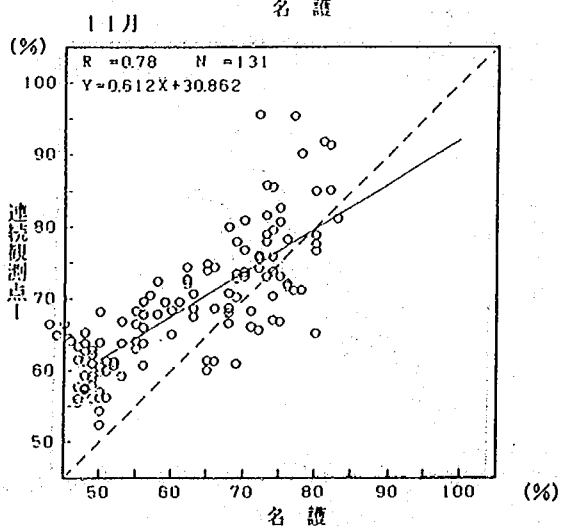
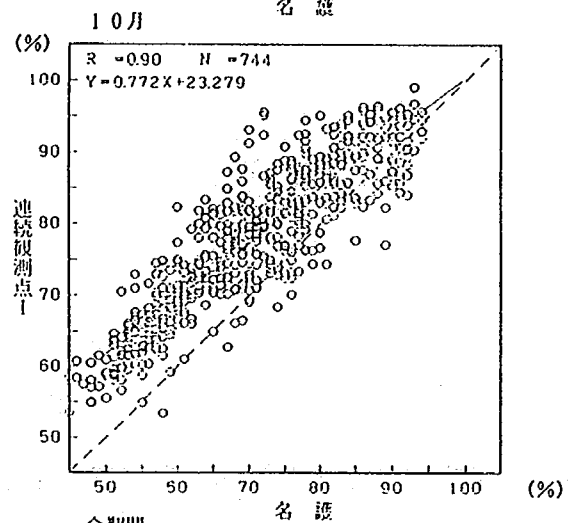
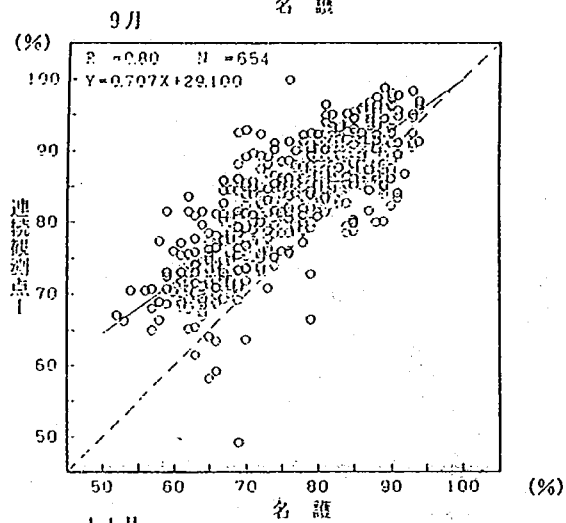
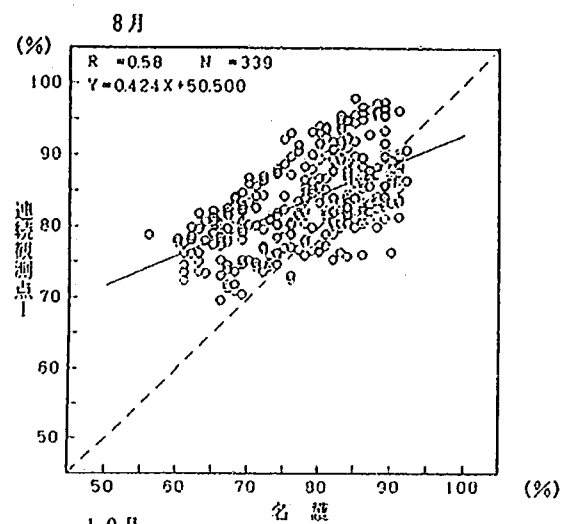
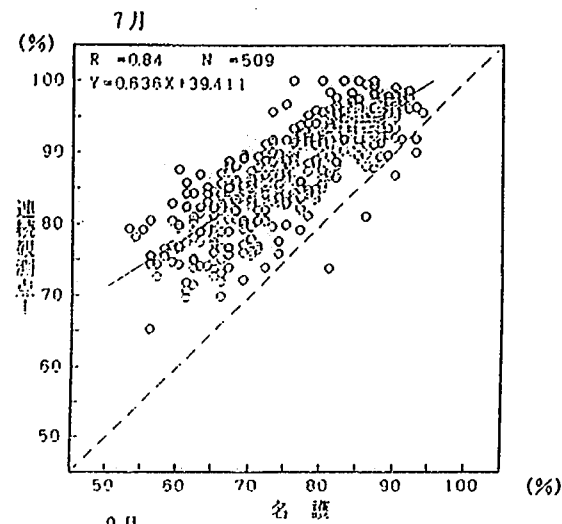


図3-1-8 1992年名護と連続観測点 I における湿度の散布図

Rは相関係数
 Nはデータ数

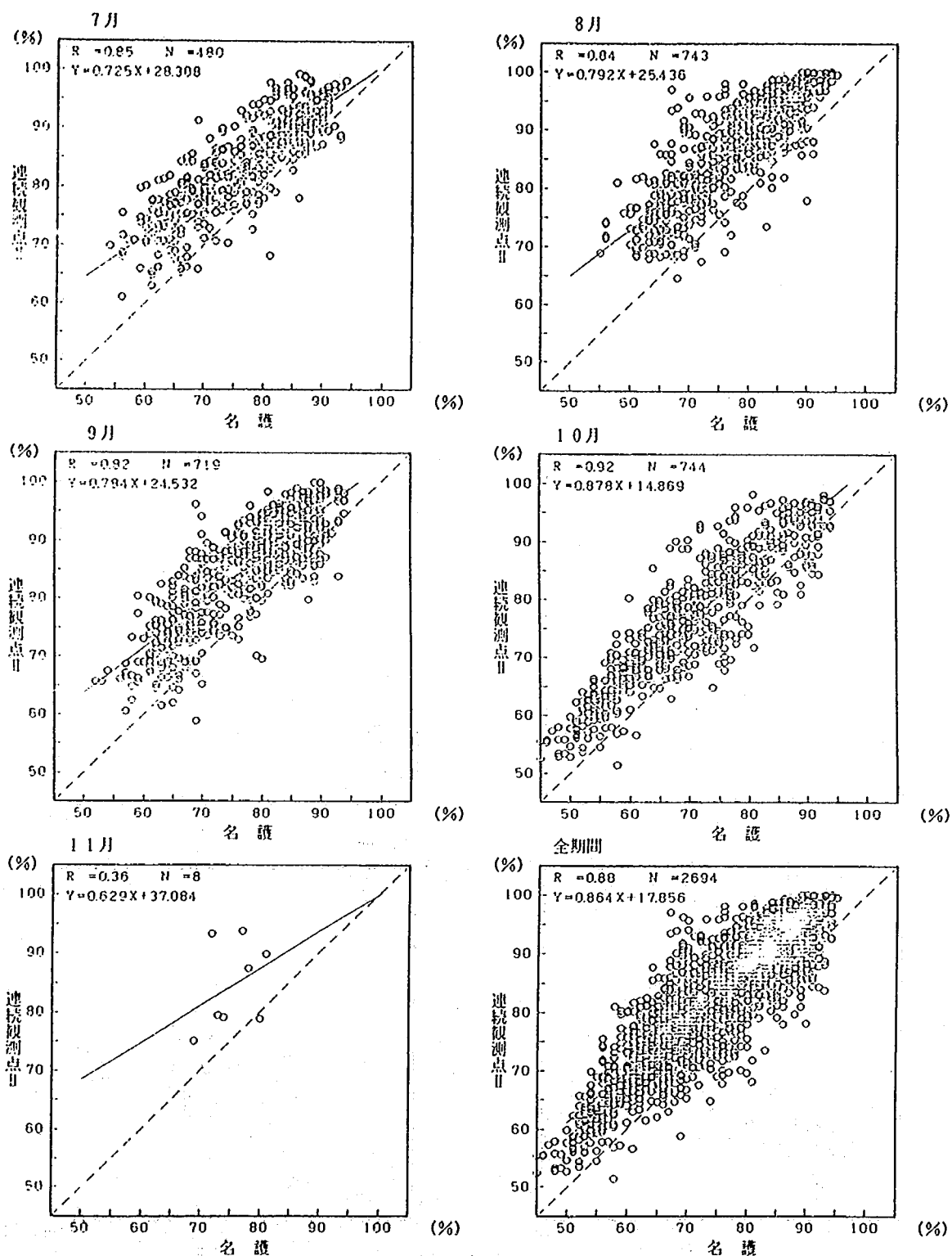


図3-1-9 1992年名護と連続観測点IIにおける湿度の散布図

Rは相関係数
 Nはデータ数

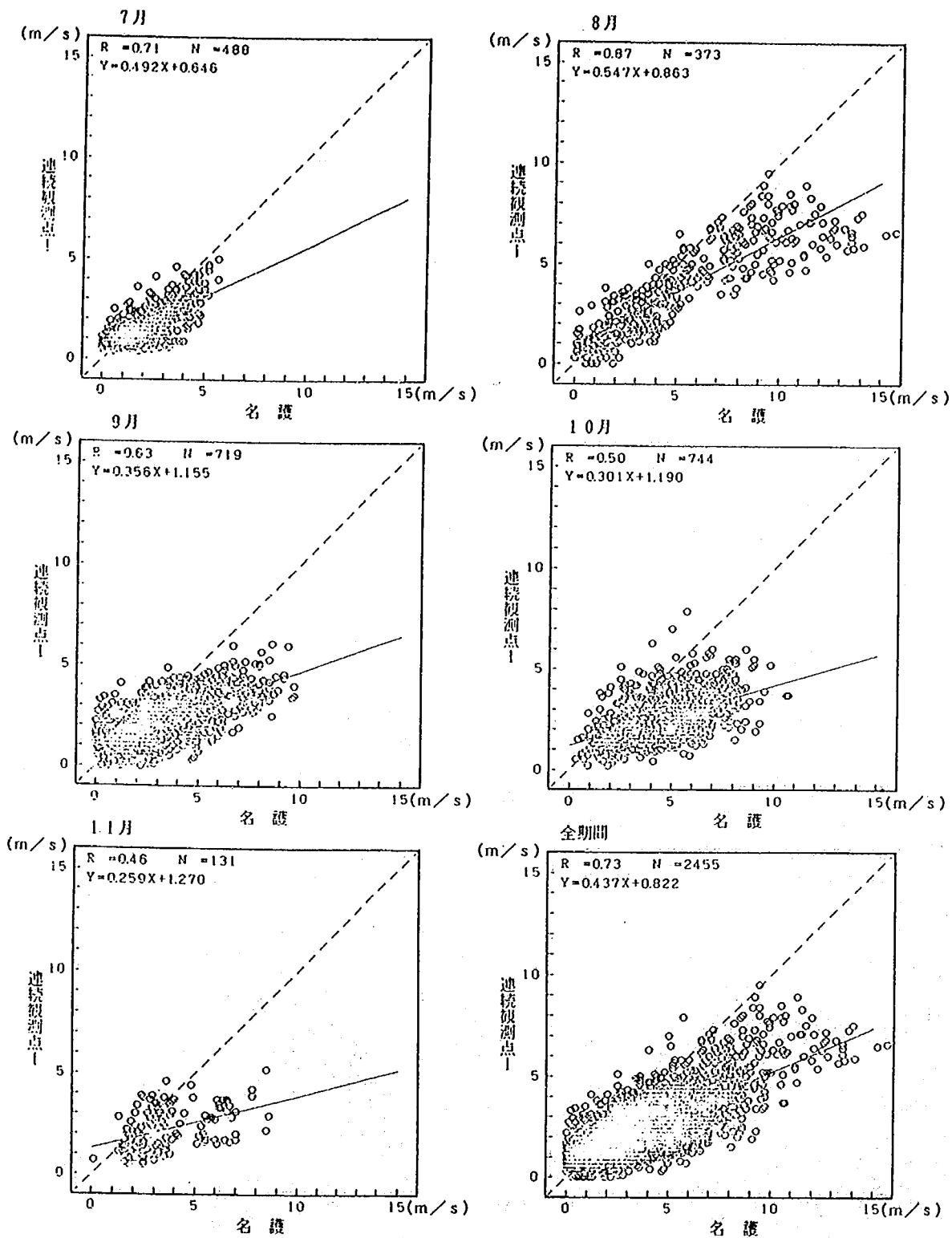


図3-1-10 1992年名護と連続観測点Iにおける風速の散布図

Rは相関係数
 Nはデータ数

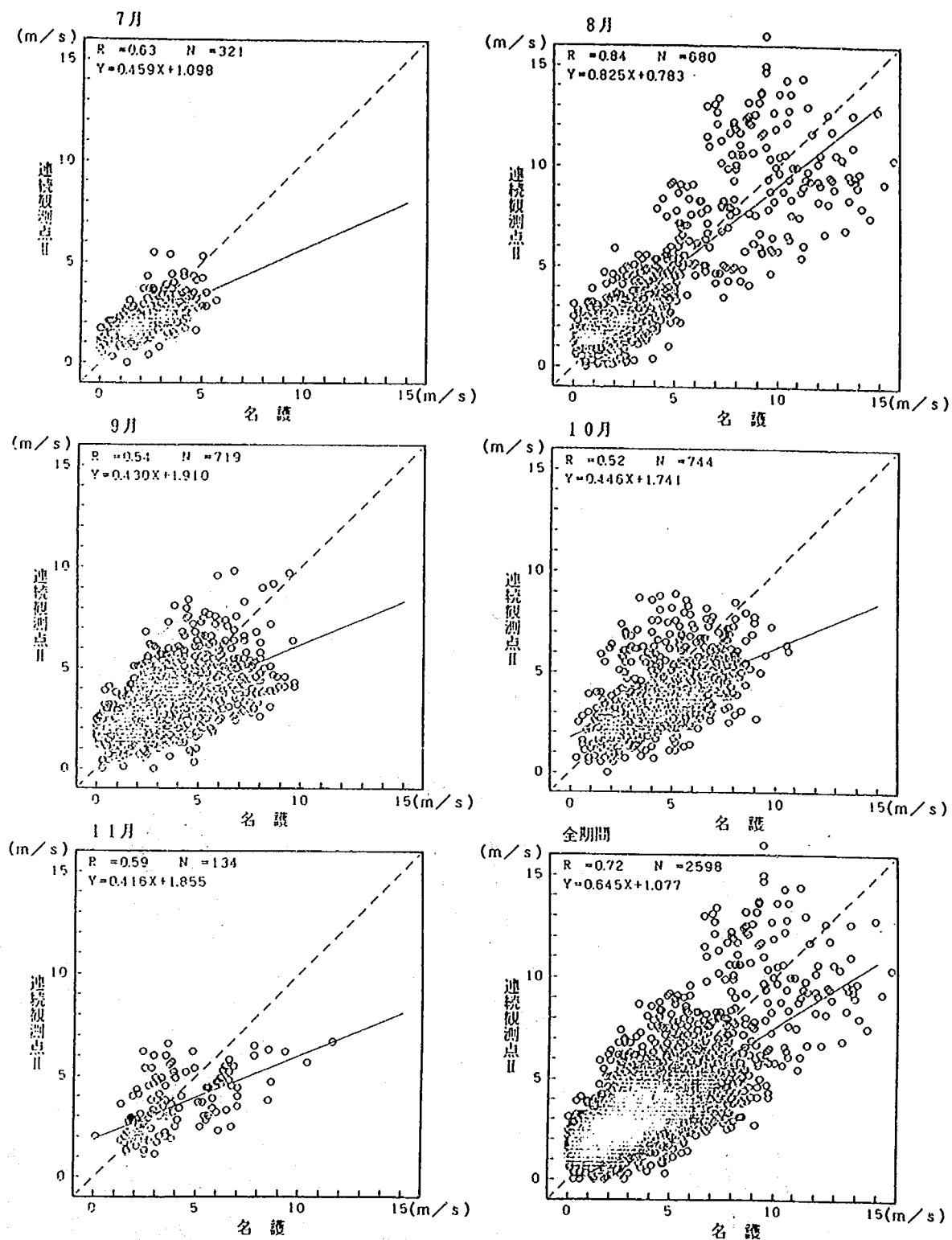


図3-1-11 1992年名護と連続観測点IIにおける風速の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数

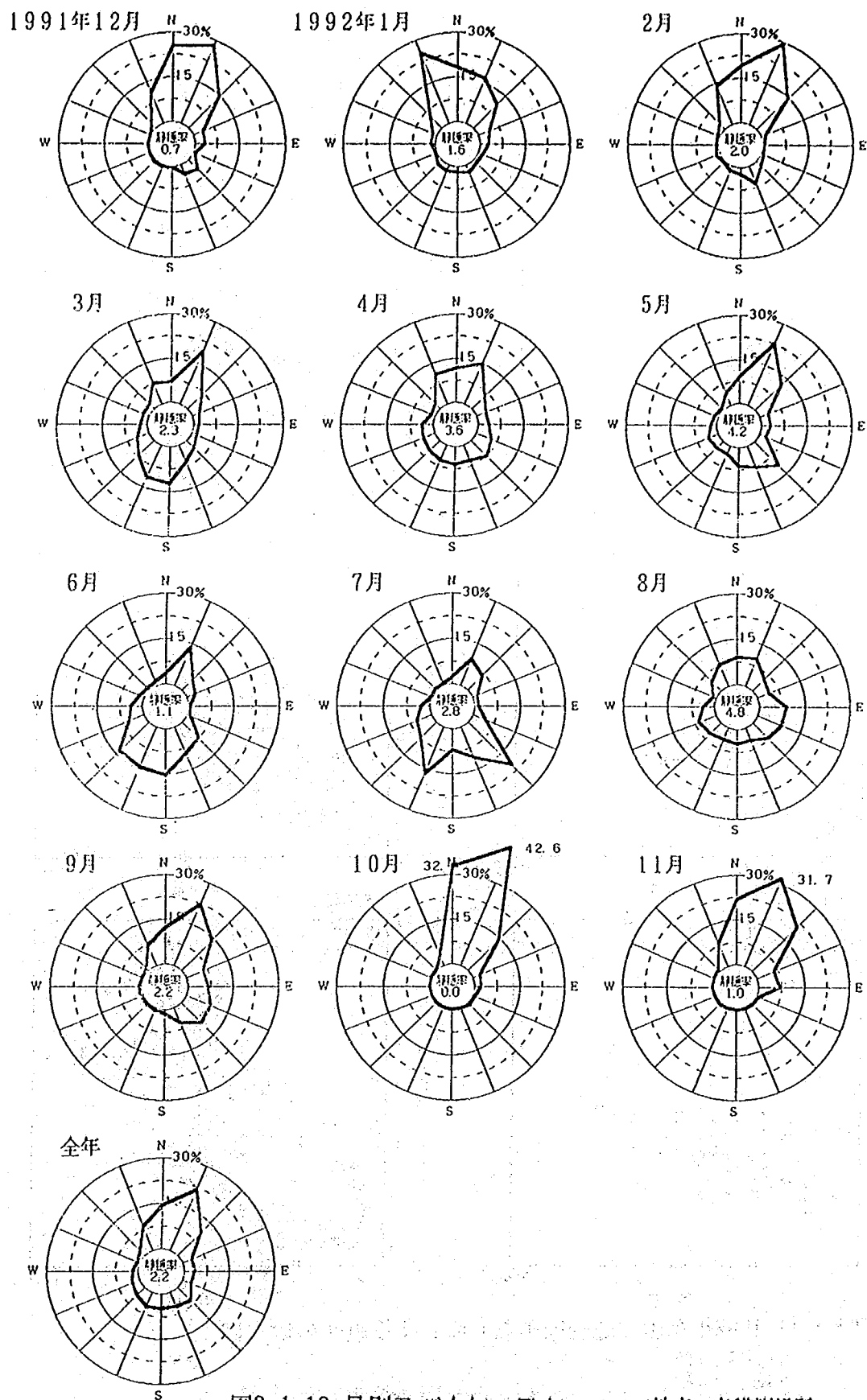
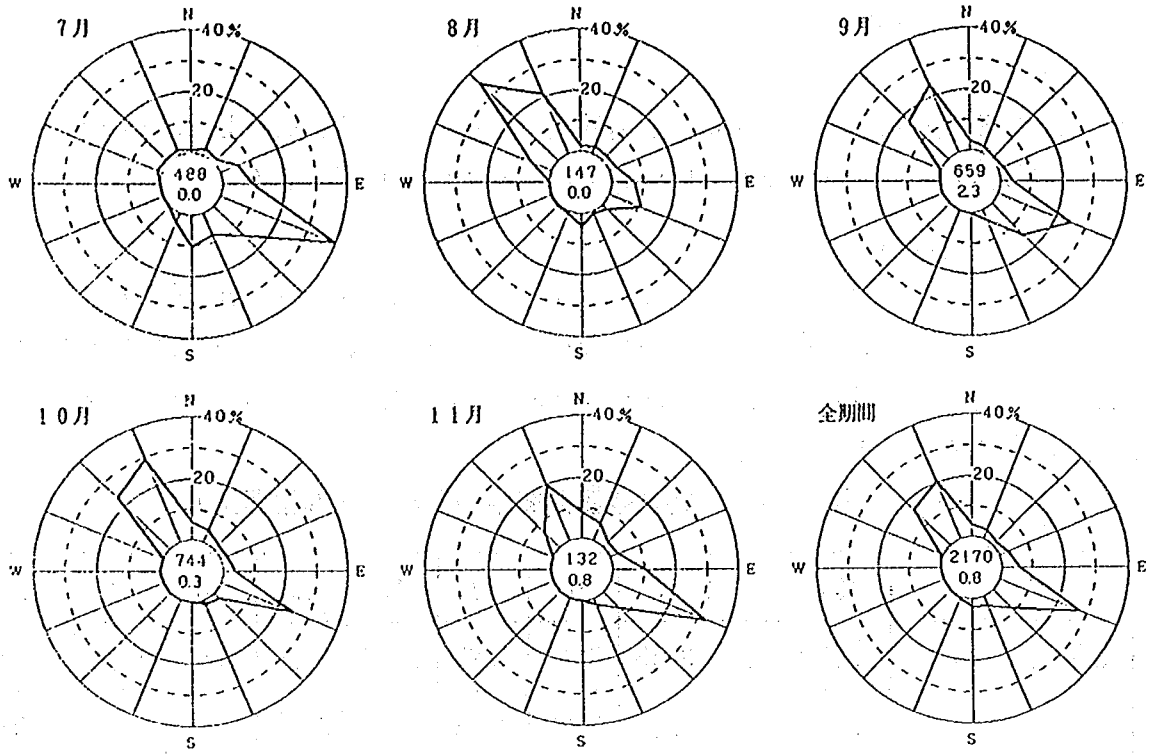


図3-1-12 月別及び全年の風向

地点：名護測候所

連続観測点 I



連続観測点 II

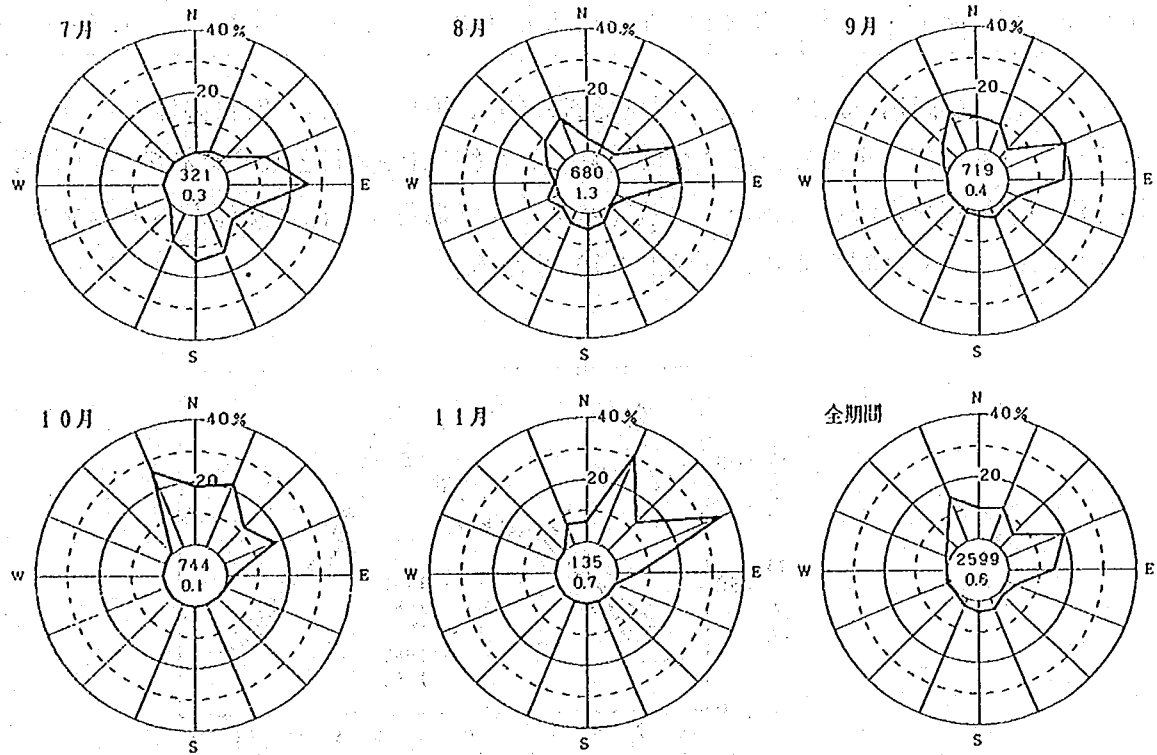


図3-1-13 1992年各月における風配図

(円内の数値は上段がデータ数、下段が静穏率)

3.2 湖面蒸発量

3.2.1 特別観測結果

1) 湖面蒸発量の特徴

i) 実蒸発量

特別観測で測定した気象データから、潜熱（蒸発量）と顕熱を求めた。潜熱フラックスは、2.3で示した様に算出し、顕熱フラックスについては、次式により算出する。

$$H = C_p \rho \overline{w' t'} \quad (5)$$

H : 顕熱輸送量 ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) , t' : 気温の変動値 ($^{\circ}\text{C}$)

C_p : 空気の定圧比熱 ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$) , w' : 風の鉛直方向成分の変動値 (cm/s)

日蒸発量は表3-2-1に示すように3.43mm~4.93mmであった。尚、潜熱フラックスより蒸発量の算出は、気化潜熱で除する事で算出する。

表 3-2-1 特別観測期間中の蒸発量（渦相関法）

	13*	14	15	16	17	18	19	20	21	22*	平均
蒸発量 (mm)	0.93	4.26	3.45	3.46	4.28	3.43	3.65	4.93	3.86	1.18	3.92
ボーエン比	0.05	0.18	0.18	0.20	0.16	0.18	0.18	0.18	0.19	0.08	0.18
日照時間 (時)	11.8	10.8	8.20	10.9	11.2	10.4	10.3	11.3	11.2	11.3	10.5

注) *印13日は18時から、22日は9時まで、平均は14日~21日の値で計算

蒸発量の日平均値を単純に月蒸発量に換算すると約121mm/月となり宮崎の浅い水面からの蒸発量（福上湖からの蒸発が浅い水体からの蒸発パターンであるか、深い水体からの蒸発パターンであるかは後で議論する）に相当する値（図3-2-1）となる。

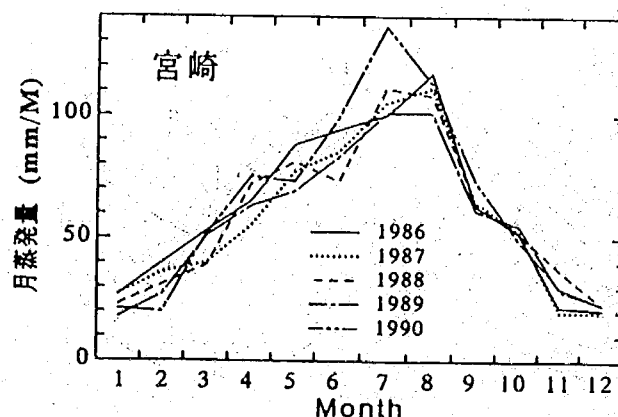


図3-2-1 宮崎における蒸発量の季節変化の年々変動⁴⁾

ii) ボーエン比

湖面上でのボーエン比（顕熱と潜熱の比率）は，湖によって異なり，気温に依存している。表3-2-2(a)での気温とボーエン比との関係と表3-2-2(b)の那覇でのボーエン比の推定値（浅い水体）からみて，ここでのボーエン比0.18は妥当な数値といえる。

表3-2-2(a) 日本の深い湖の年間蒸発量と年間ボーエン比の比較⁶⁾

	北海道 摩周湖	青森・秋田県 十和田湖	鹿児島県 池田湖
平均気温 (°C)	3.5	8.0	16.3
蒸発量 (mm)	418	756	828
ボーエン比	1.03	0.60	0.31

表3-2-2(b) 水面蒸発量（那覇）⁶⁾

	6月	7月	8月
顕熱 (mm)	18	20	16
潜熱 (mm)	98	134	113
ボーエン比	0.18	0.15	0.14

図3-2-2に気温とボーエン比との関係を示した。水面における顕熱と潜熱の比率（ボーエン比）は気温に依存することが分っている。図は多少のバラツキはあるものの気温が低い方で大きく，高い方で小さくなる関係を示している。このことは，高温のとき水面でのエネルギーは蒸発の潜熱に分配される比率が大きいことを示している。

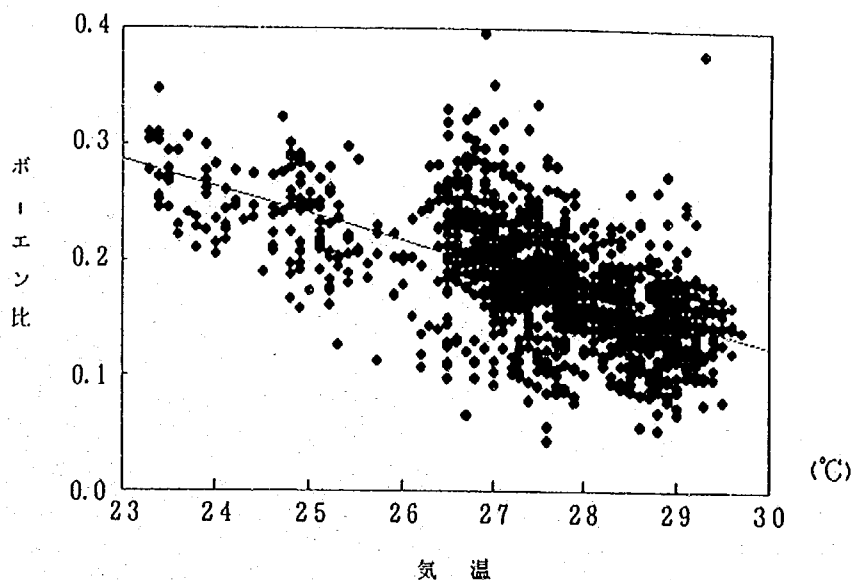


図3-2-2 気温とボーエン比との関係

iii) 蒸発量と各気象要素との関係

① 経時変化図からみた特徴

図3-2-3に顕熱フラックスと潜熱フラックス（蒸発量）とそれらの増減に係のある気象要素の経時変化を示した。全体的な特徴として、潜熱、顕熱も含め各気象要素の日変化の小さいことがあげられる。特に、顕熱フラックスと気温は、日変化が小さかった。これは、観測期間中の天候が安定していたことと、沖縄は海に囲まれている上観測地点が海に近いことから気温の日変化が小さい（水温は当然水の熱容量の関係で日変化は小さい）ことなどによるものと考えられる。またボーエン比（顕熱／潜熱）も安定した日変化を示した。

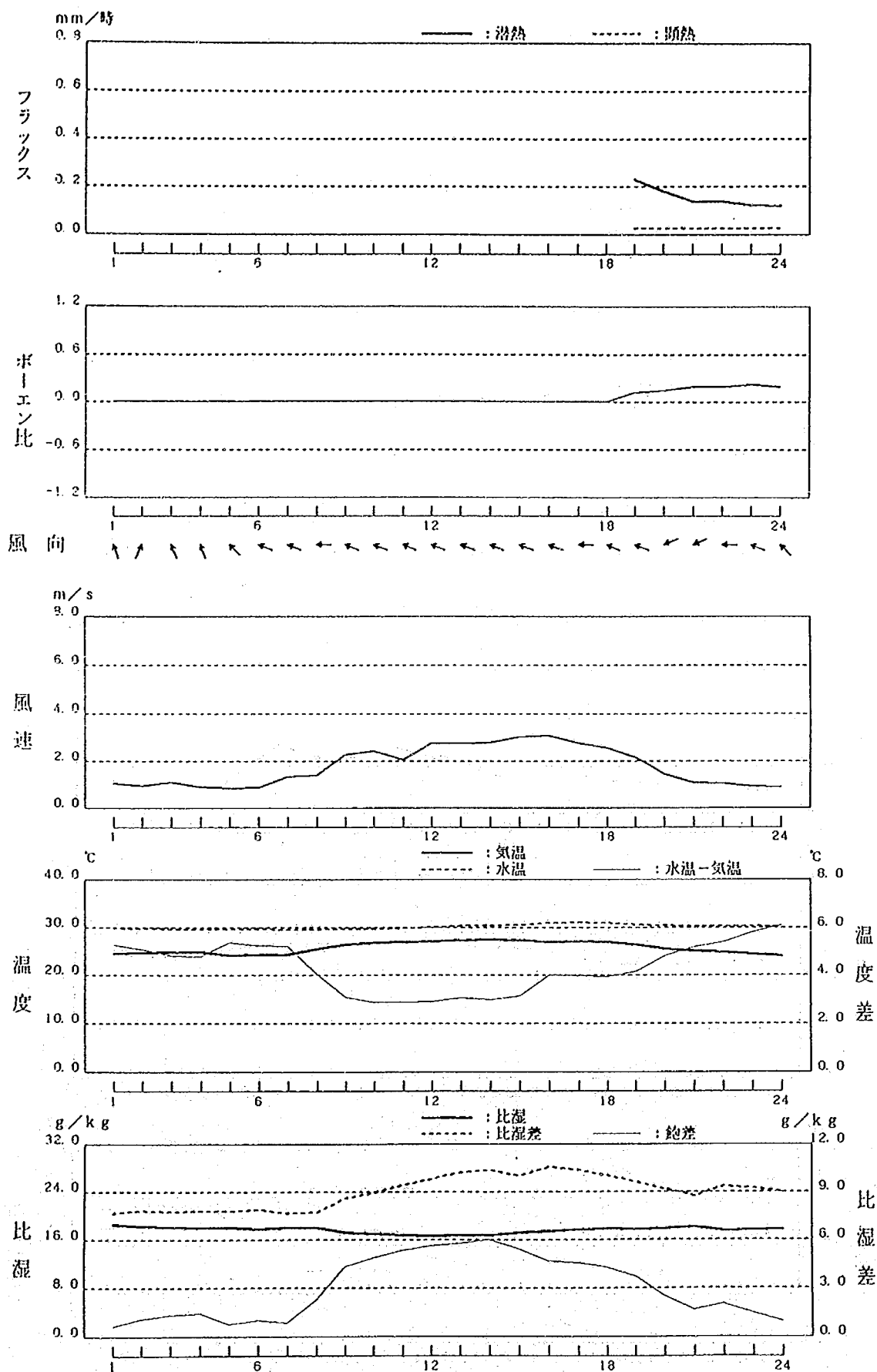


図3-2-3(a) 特別観測経時変化図
【7月13日：福地ダム】

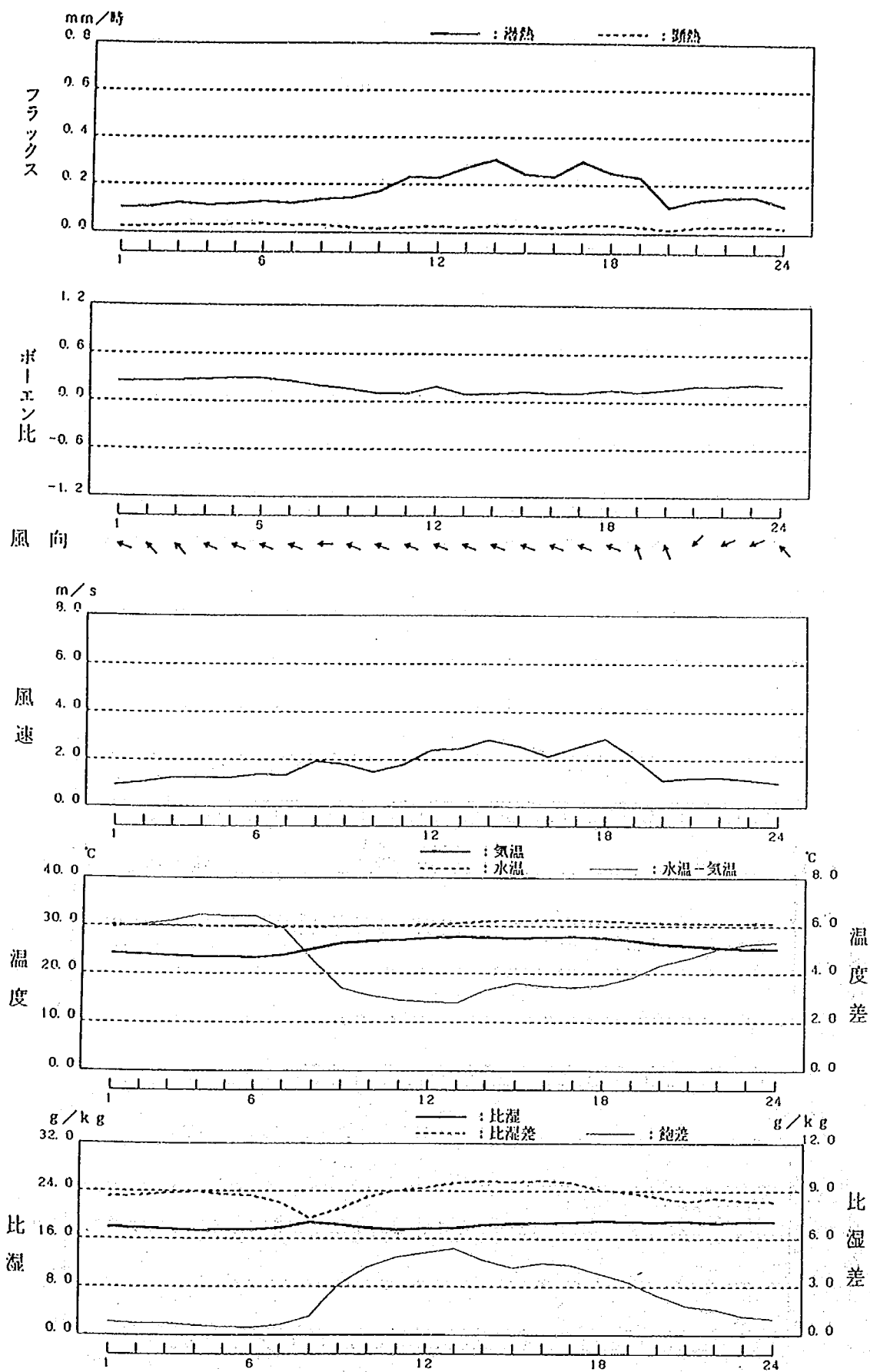


図3-2-3(b) 特別観測経時変化図
【7月14日：福地ダム】

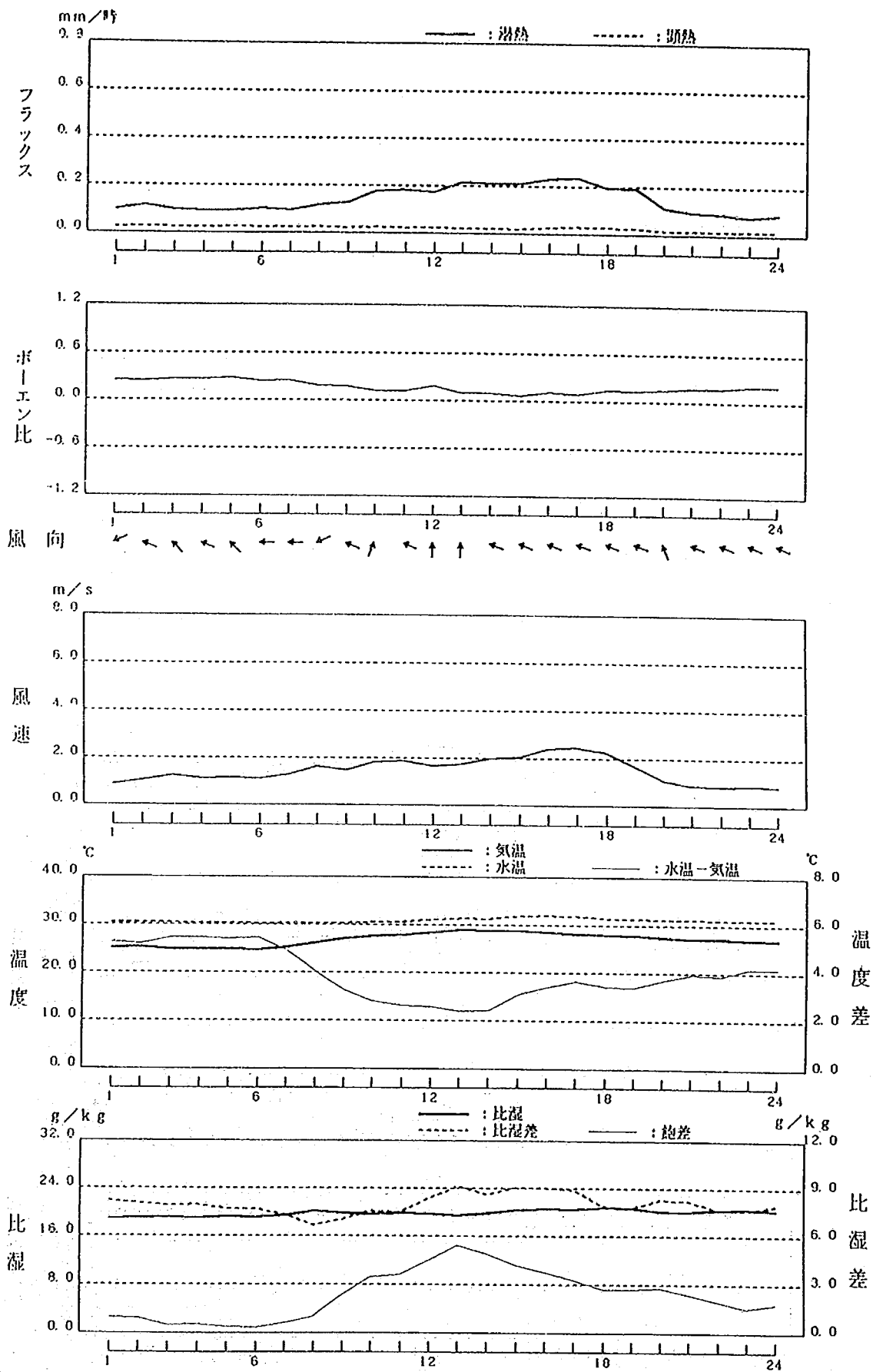


図3-2-3(c) 特別観測経時変化図
【7月15日: 福地ダム】

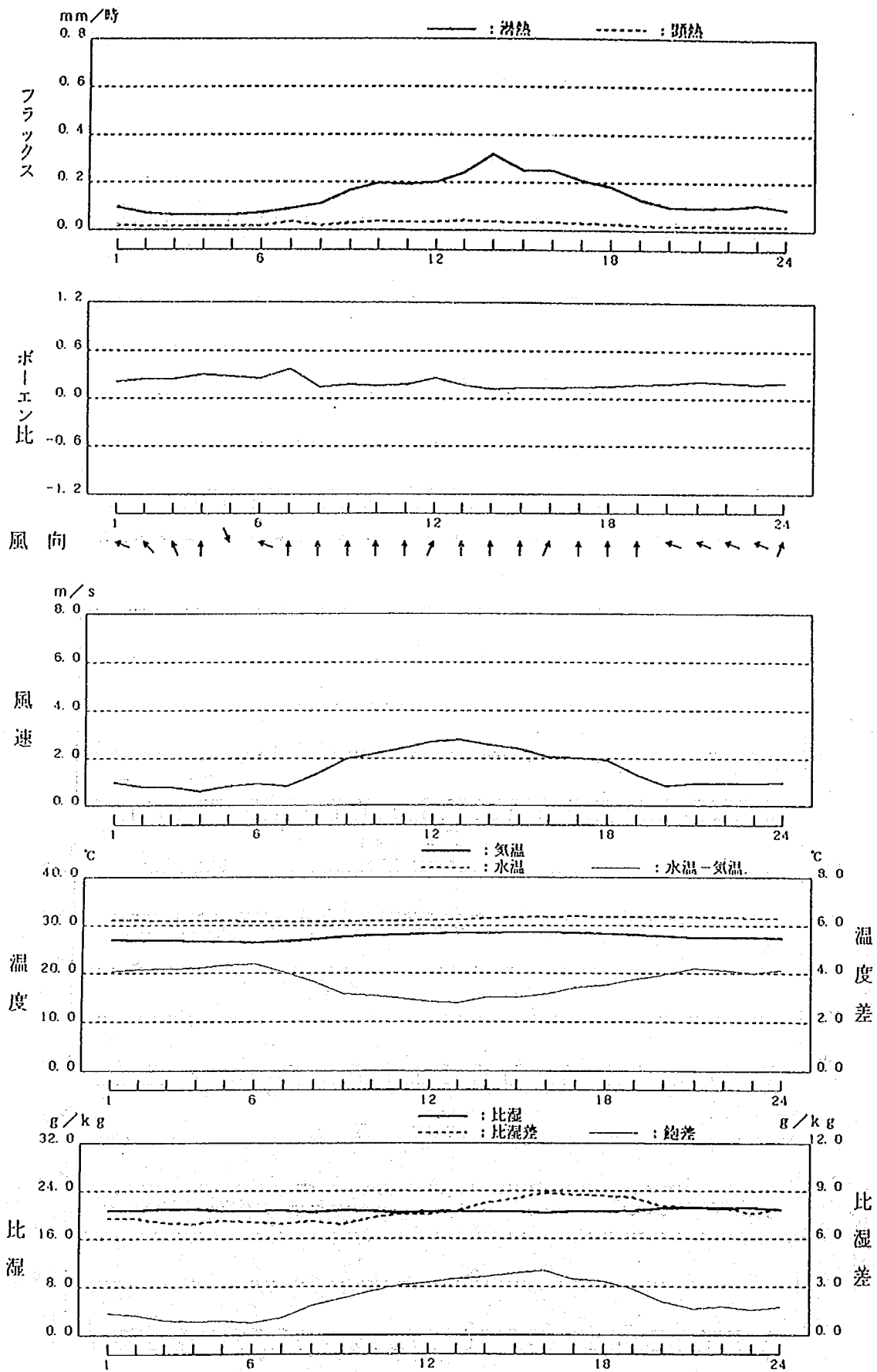


図3-2-3(d) 特別観測経時変化図
【7月16日：福地ダム】

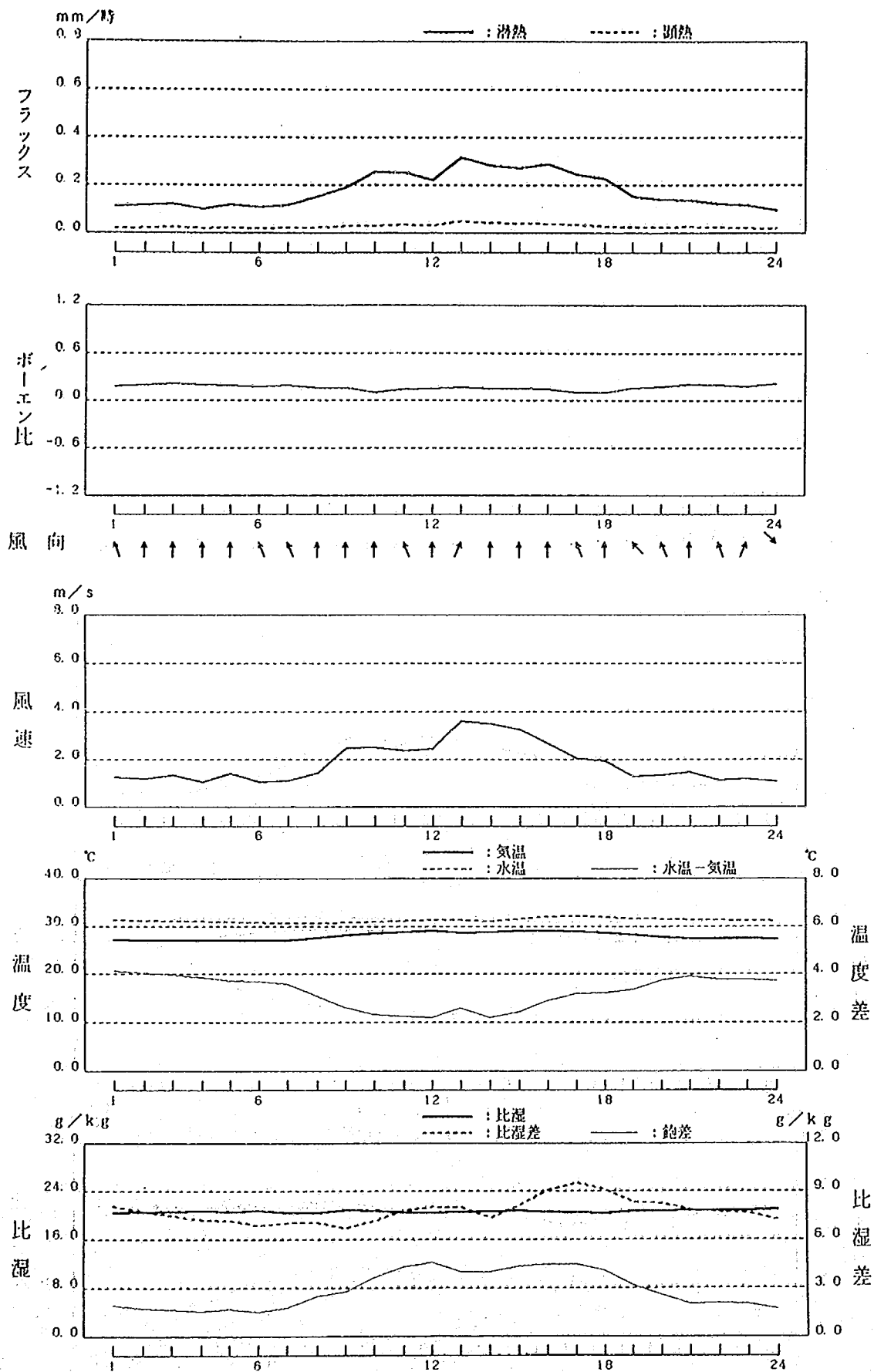


図3-2-3(e) 特別観測経時変化図
【7月17日：福地ダム】

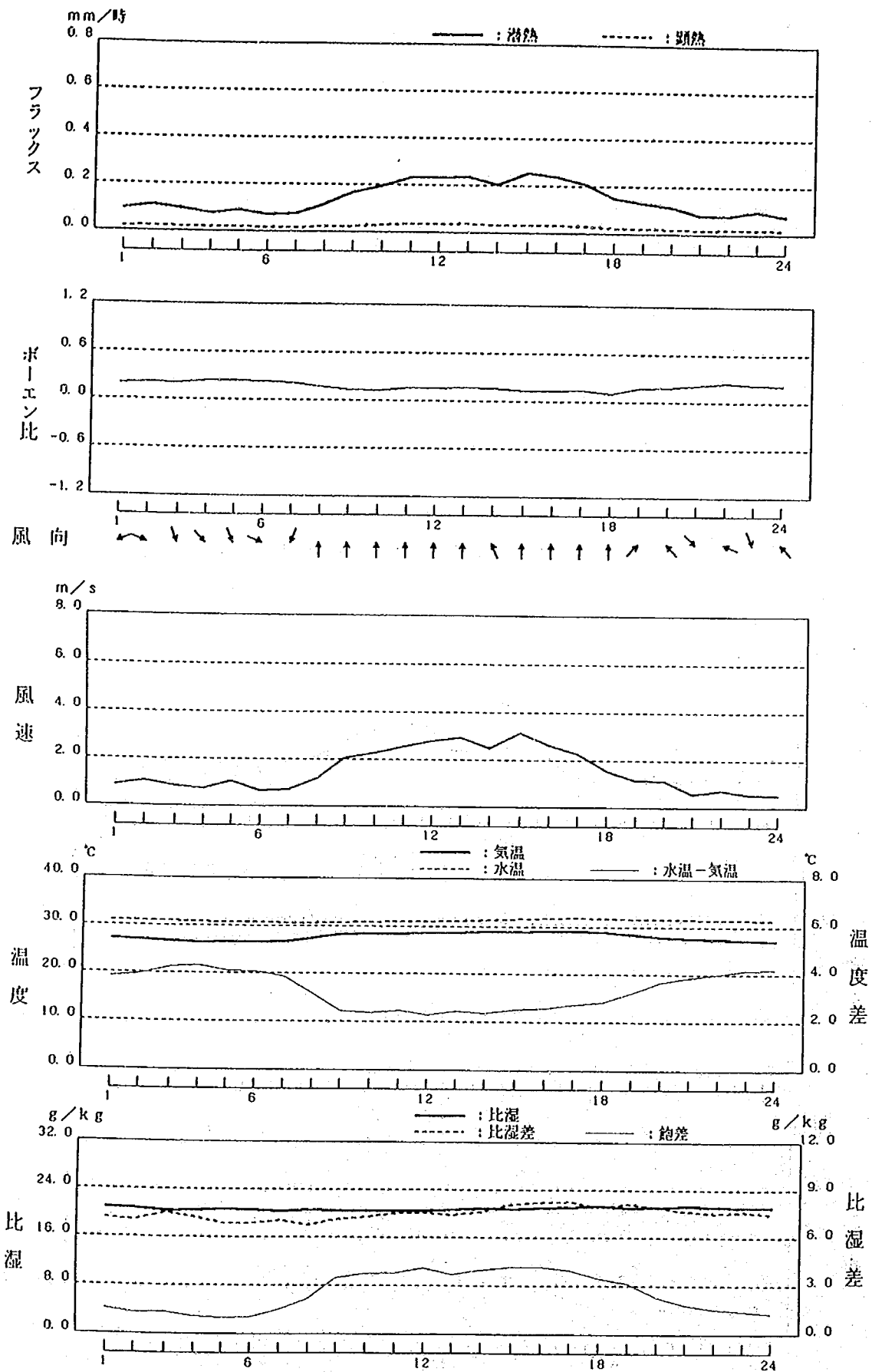


図3-2-3(f) 特別観測経時変化図
【7月18日：福地ダム】

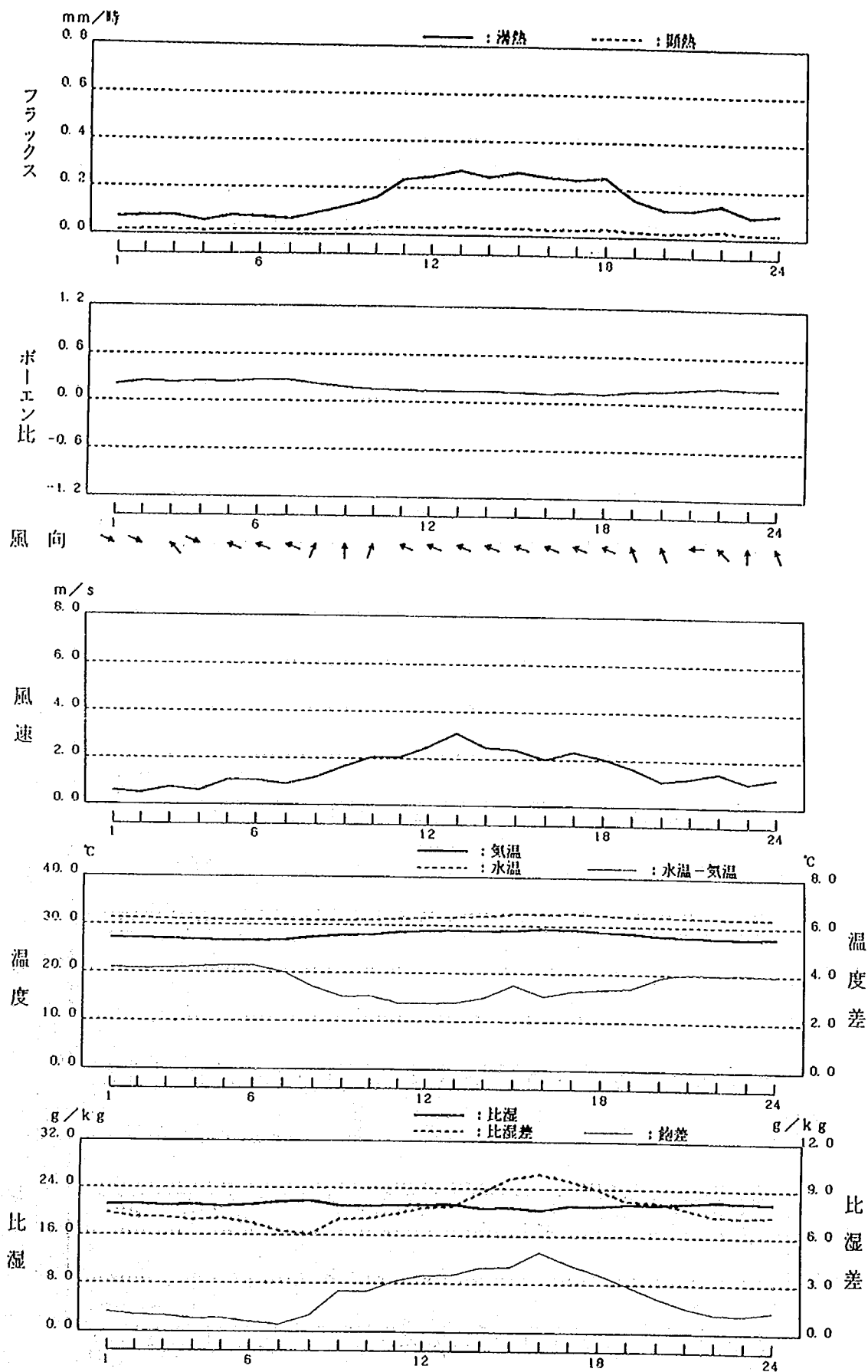


図3-2-3(g) 特別観測経時変化図
【7月19日：福地ダム】

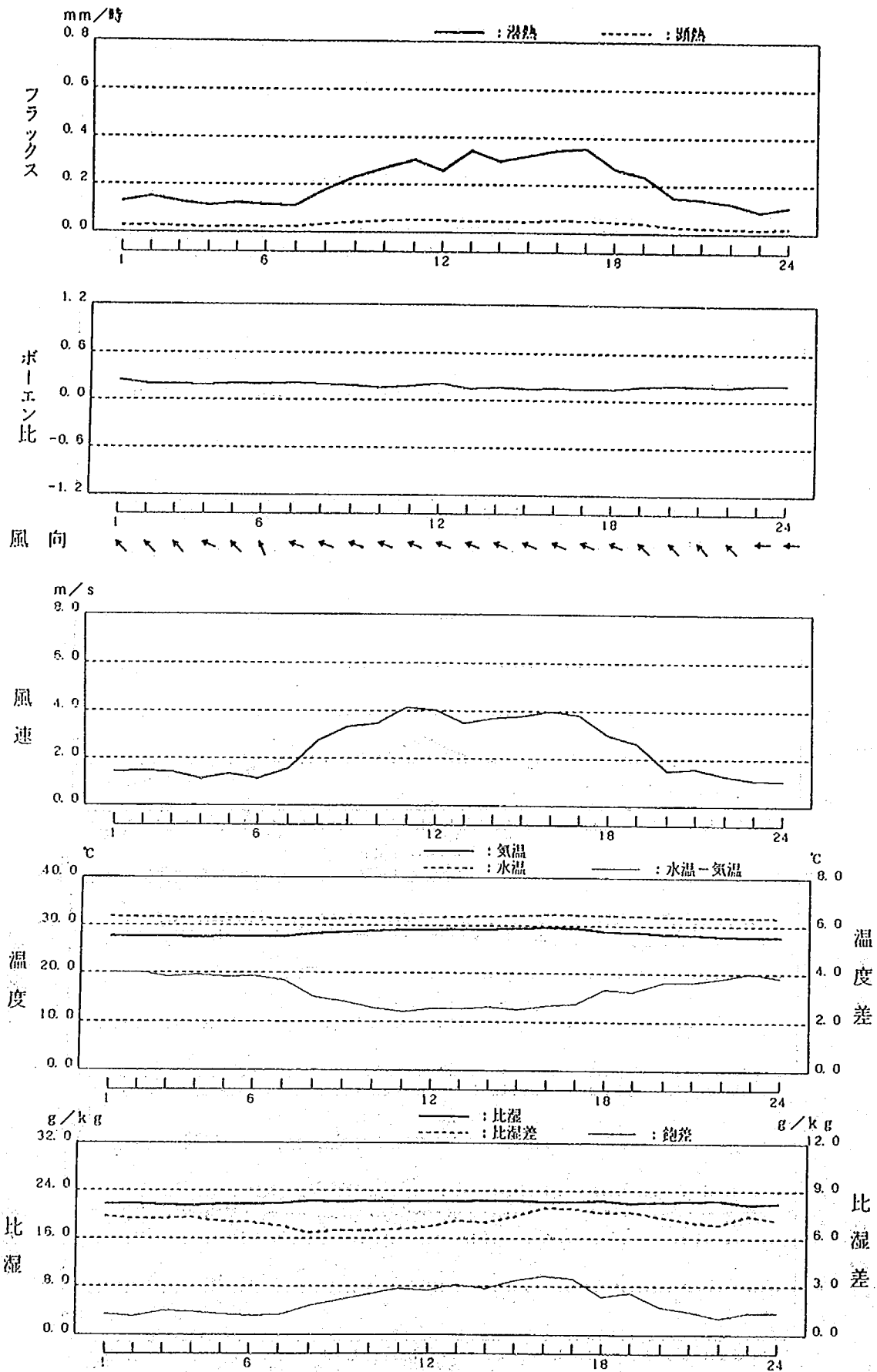


図3-2-3(h) 特別観測経時変化図
【7月20日：福地ダム】

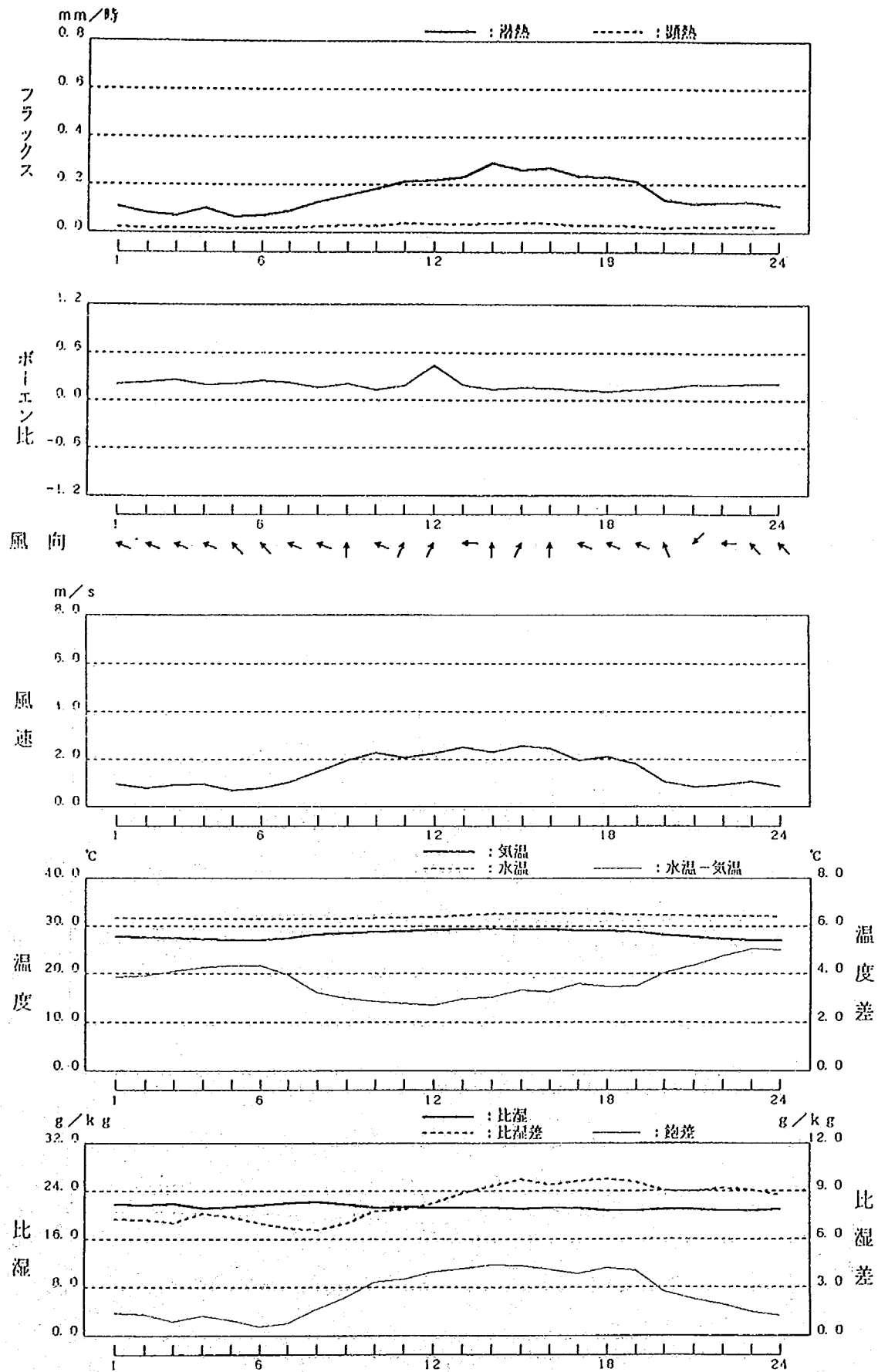


図3-2-3(i) 特別観測経時変化図
【7月21日：福地ダム】

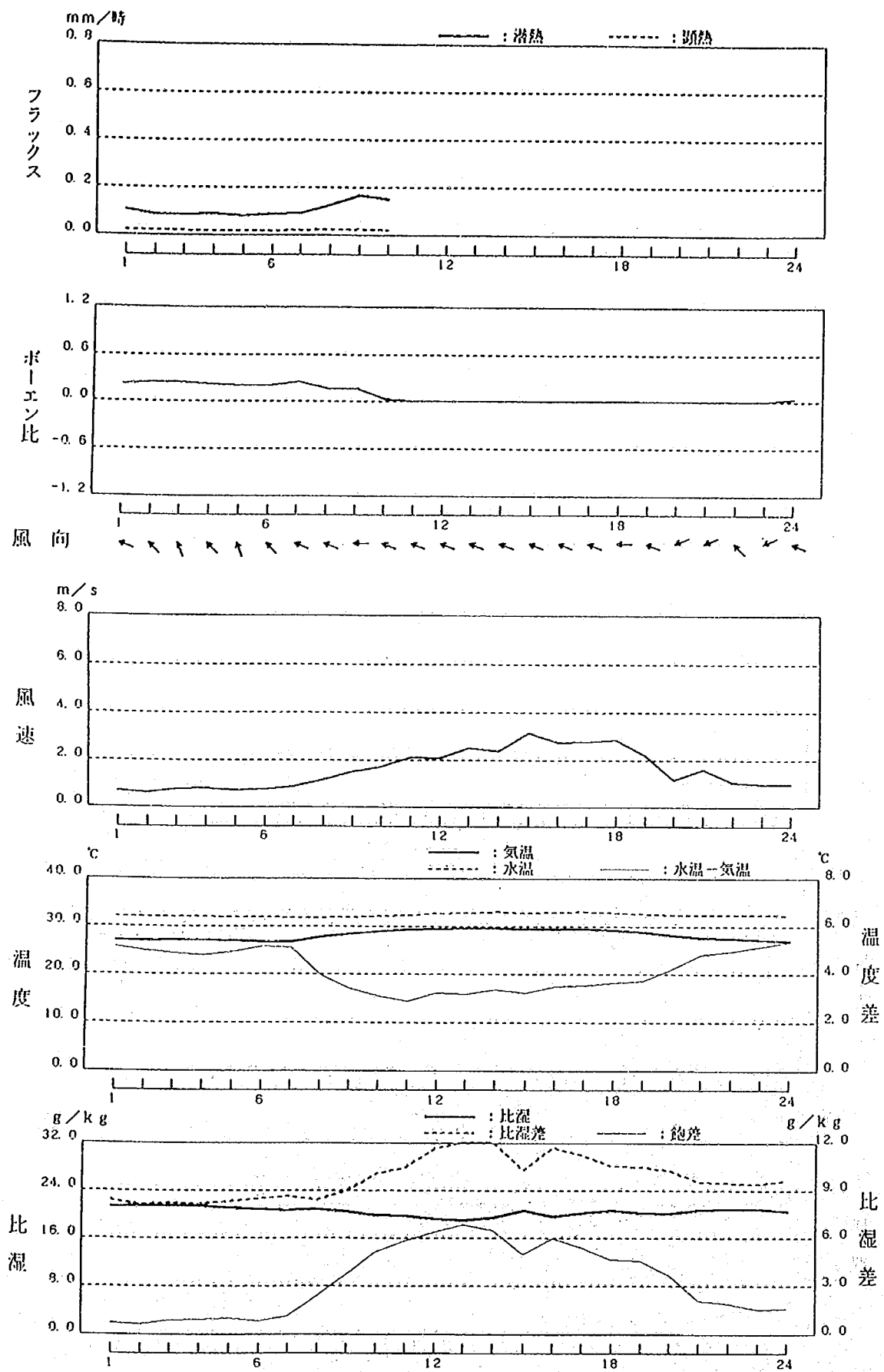


図3-2-3(J) 特別観測経時変化図
【7月22日：福地ダム】

② 10分間データからみた特徴

潜熱フラックス（蒸発量）と各気象要素との関係を10分間データからみた。図3-2-4に風速と潜熱フラックス（蒸発量）との関係，図3-2-5に比湿差（湖面温度での飽和比湿－大気中の比湿）と潜熱フラックス（蒸発量）との関係，そして，図3-2-6に水温気温差（湖面水温－気温）と潜熱フラックス（蒸発量）との関係をそれぞれ大気の安定度別に示した。

大気の安定度を示す指標として，(6)式で示すリチャードソン数を用いた。

$$R_i = g(T_E - W_T) / ((T_E + W_T) / 2 + 273.16) \cdot Z / W_s^2 \quad (6)$$

g : 重力加速度 (cm/s^2)， T_E : 高度 Z (cm) での気温 ($^{\circ}\text{C}$)

W_T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)， W_s : 高度 Z (cm) での風速 (cm/s)

ここに， 不安定 ($R_i \leq -0.2$)

弱不安定 ($-0.2 < R_i \leq -0.03$)

中立 ($-0.03 < R_i \leq 0.03$)

弱安定 ($0.03 < R_i \leq 0.1$)

安定 ($0.1 < R_i$)

図より，湖面蒸発量は，特に風速との相関が高いことがわかった。これは，以下の理由によるものと考えられる。

- ・ (4) 式からも分るように蒸発量に影響する気象要素として，風速や比湿差（湖面温度での飽和比湿－大気中の比湿）さらに水温気温差（湖面水温－気温）が考えられる。
- ・ 観測地点（ダム湖）が海に近いことから，気温，比湿の日変化が小さい。そのため，比湿差，水温気温差の日変化が小さい。
- ・ その結果，風速の強弱がより直接的に蒸発量の増減に影響した。

また，同様な理由（気温，水温差の日変化が小さい）から大気の安定度（リチャードソン数）も，ほとんど風速の強弱に左右されていた。ただ，これは全体的な傾向であり，図3-2-5からわかるように風速が弱いとき（＝不安定，弱不安定）に，比湿差の大小が蒸発量の増減に影響する傾向が見られた。比湿差と蒸発量との相関係数は，不安定：0.56，弱不安定：0.62，中立：0.15であった。

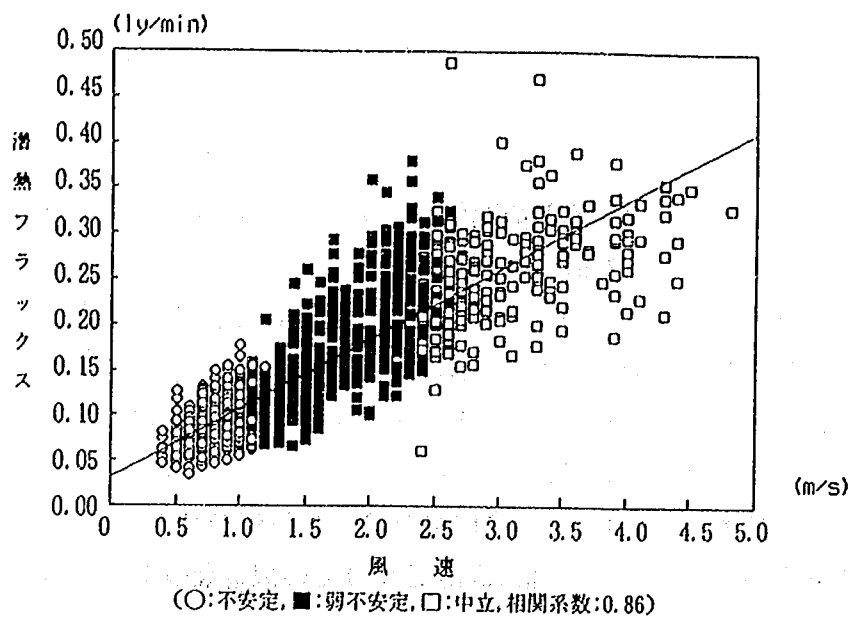


図3-2-4 風速と潜熱フラックスとの関係

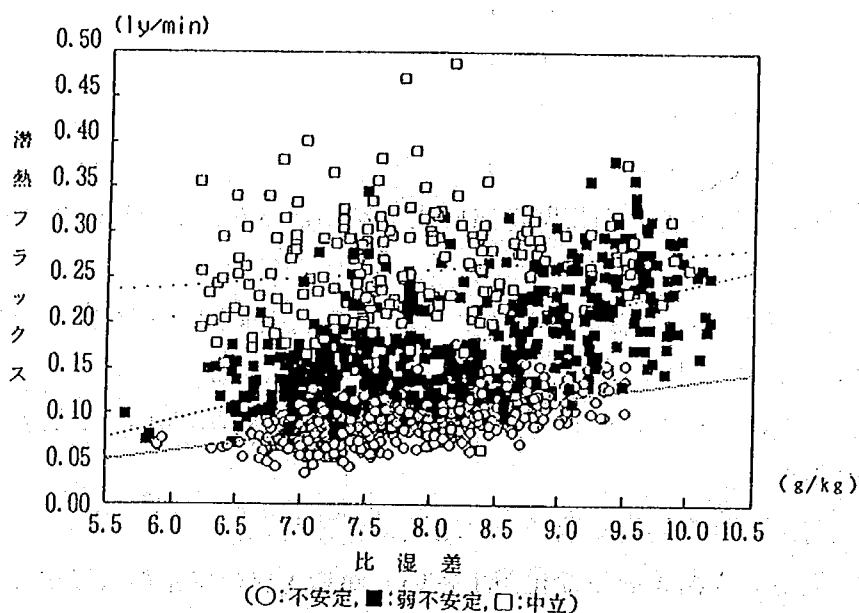


図3-2-5 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と潜熱フラックスとの関係

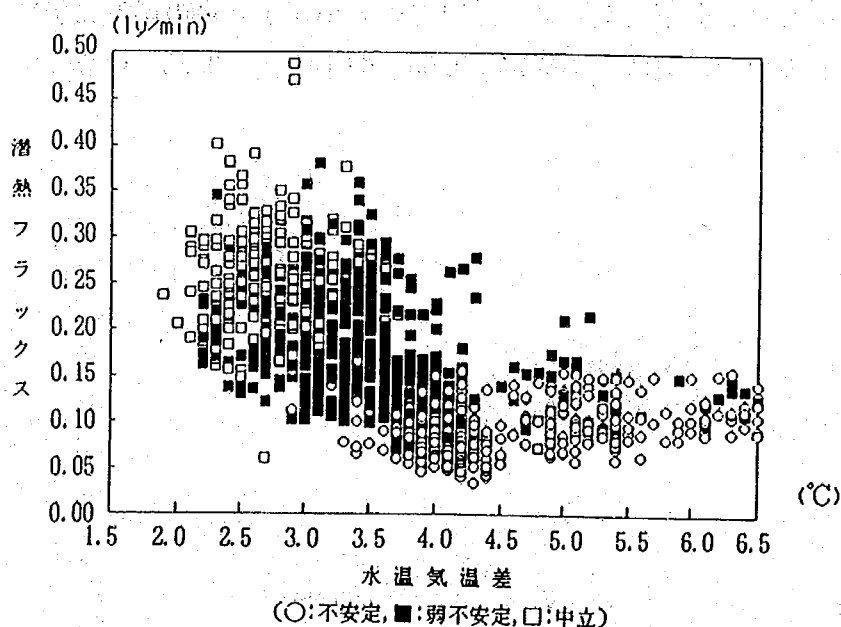


図3-2-6 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と潜熱フラックスとの関係

③ 1時間データからみた特徴

潜熱フラックス（蒸発量）と各気象要素との関係をもっと視覚的にとらえるために、3次元的な比較を試みた。ただし、10分間データだとデータ量が多いので1時間データで行った。まず、その前に1時間データによる風速と潜熱フラックス（蒸発量）との関係（図3-2-7）、比湿差（湖面温度での飽和比湿－大気中の比湿）と潜熱フラックス（蒸発量）との関係（図3-2-8）そして、水温気温差（湖面水温－気温）と潜熱フラックス（蒸発量）との関係（図3-2-9）を示した。

これらの図をみると1時間データによる相関も10分データの場合とほとんど同じであった。次に、蒸発量と比湿差、風速との関係（図3-2-10）、蒸発量と水温気温差、風速との関係（図3-2-11）をみた。

a) 蒸発量と比湿差、風速との関係

比湿差、風速はバルク式（(4)式）を構成している気象要素であり、蒸発量の増減に直接影響のある気象要素と考えられる。しかし、図より、比湿差の大小にあまり関係なく風速の強弱が蒸発量の増減に影響していることがわかる。ただ、風速が強く比湿差が大きい場合のデータが少ないためはっきりしたことは言えないが、全体的な傾向としては、『風速弱and比湿差小』から『風速強and比湿差大』にかけて蒸発量が増加している傾向があると推察できる。

b) 蒸発量と水温気温差、風速との関係

水温気温差4℃を境にこれ以下では、水温気温差の減少に伴い蒸発量が増加し、また逆にそれ以上では、若干ではあるが水温気温差の増加に伴い蒸発量が増加している。これは、水温気温差4℃以下の場合、風速が強かったために、空気が拡散（強制対流の増加）され蒸発量が増加し、結果的に水温気温差が減少したという関係によるものと考えられる。また、水温気温差4℃以上の場合、風速が小さい場合に温度差増加とともに自由対流効果あるいは比湿差の増加の効果が増加し、蒸発量が増加したという関係によるものとする。

a), b) の関係を図3-2-13と図3-2-14に模式的に示した。

* 強制対流と自由対流

強制対流：外部の原因によって生じた流れが支配して起こる対流の事で、熱膨張による局所的な密度差による流れは無視できる場合。

自由対流：温度差で生じた密度差によって重力による力が作用する以外に流れを生じさせる原因がない場合。

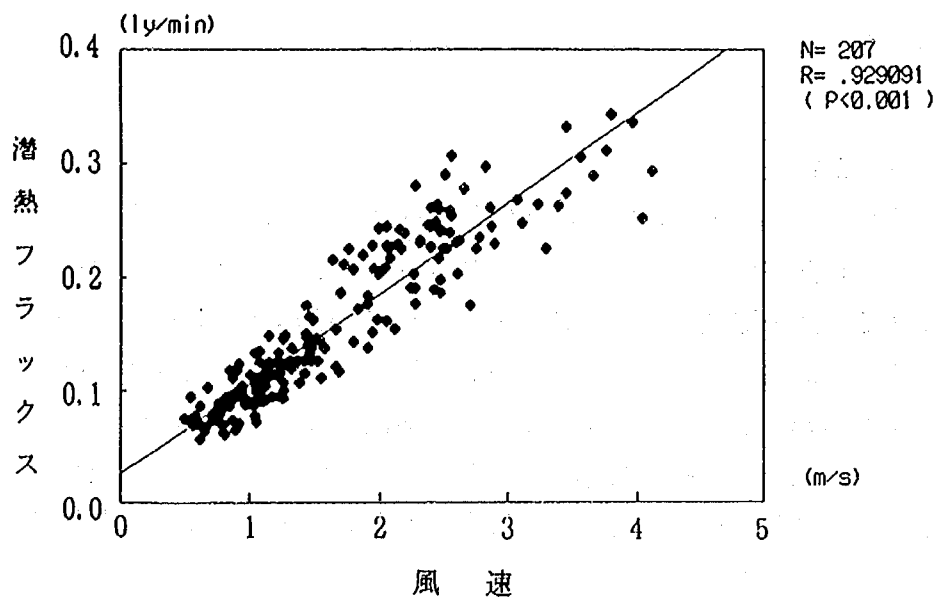


図3-2-7 風速と潜熱フラックスとの関係

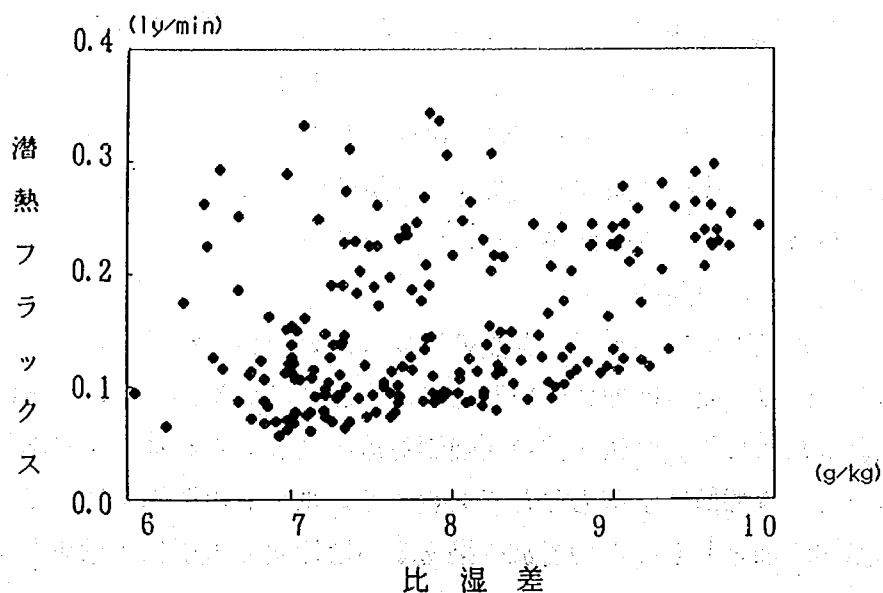


図3-2-8 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と潜熱フラックスとの関係

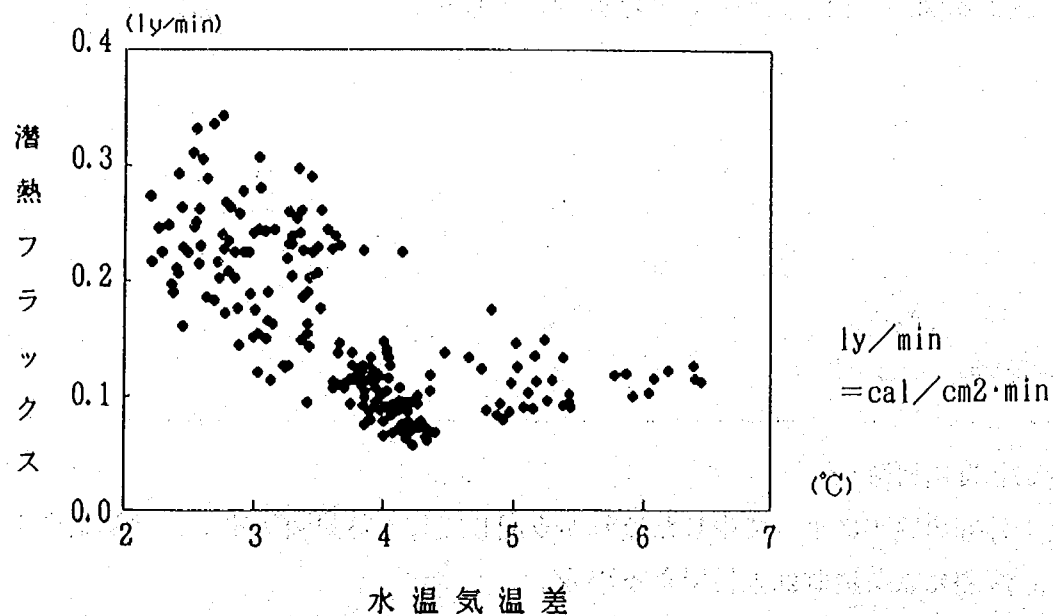


図3-2-9 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と潜熱フラックスとの関係

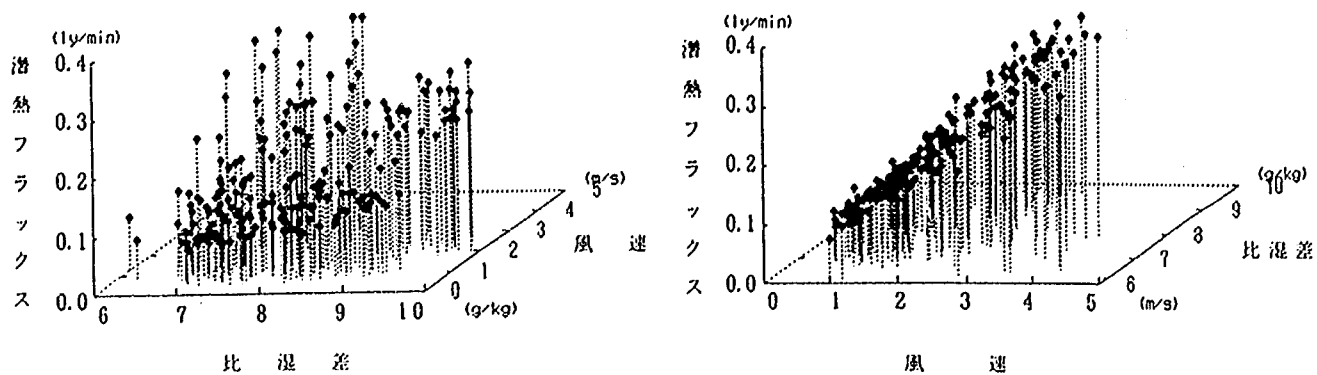


図3-2-10 潜熱フラックス(蒸発量)と比湿差(湖面温度での飽和比湿－大気中の比湿), 風速との関係

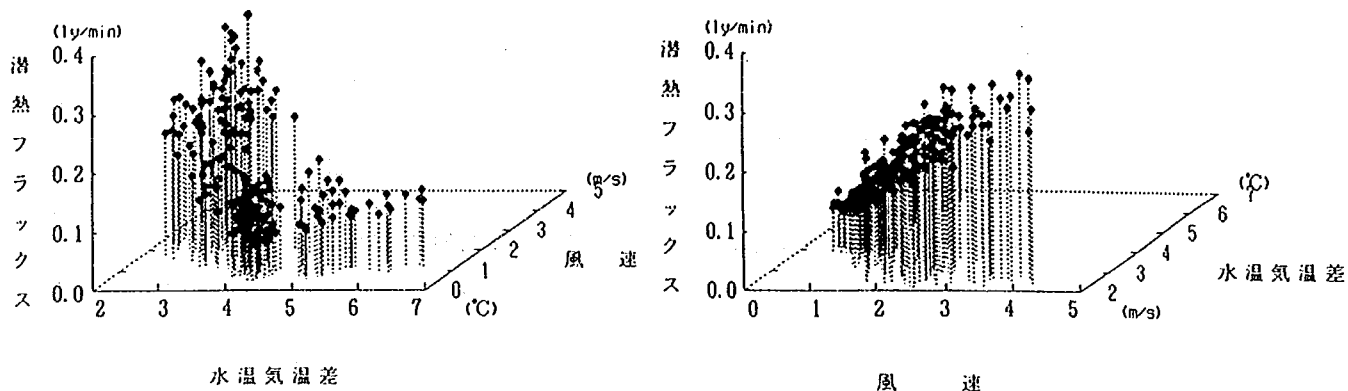


図3-2-11 潜熱フラックス(蒸発量)と水温気温差(水温－気温)、風速との関係

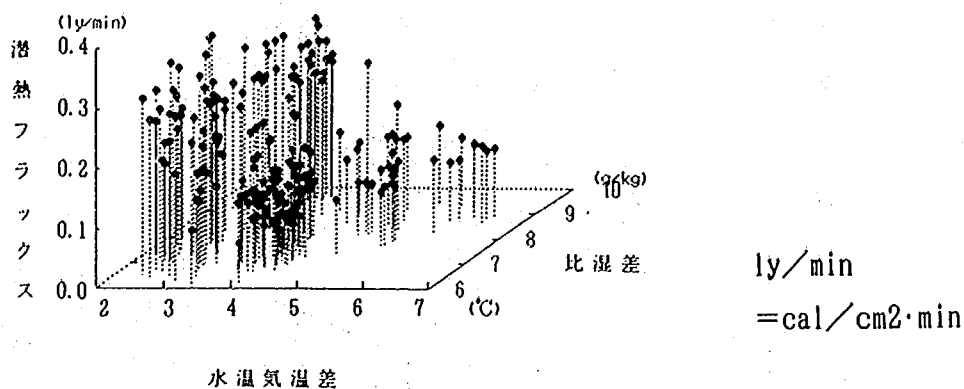


図3-2-12 潜熱フラックス(蒸発量)と水温気温差(水温－気温), 比湿差(湖面温度での飽和比湿－大気中の比湿)との関係

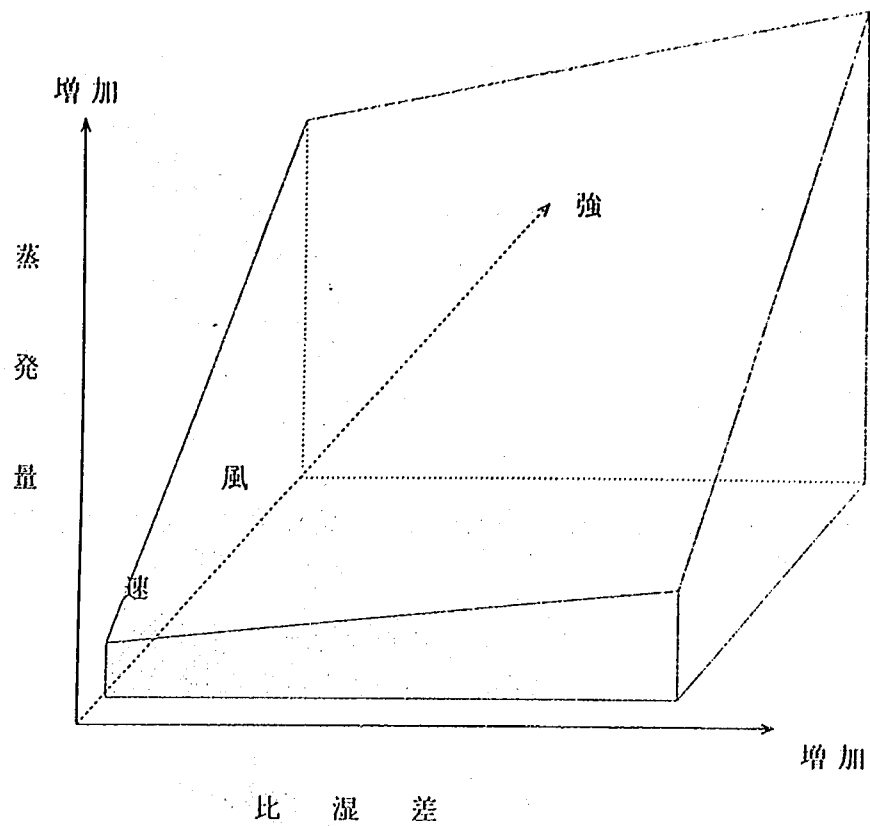


図3-2-13 蒸発量と比湿差，風速との関係の模式図

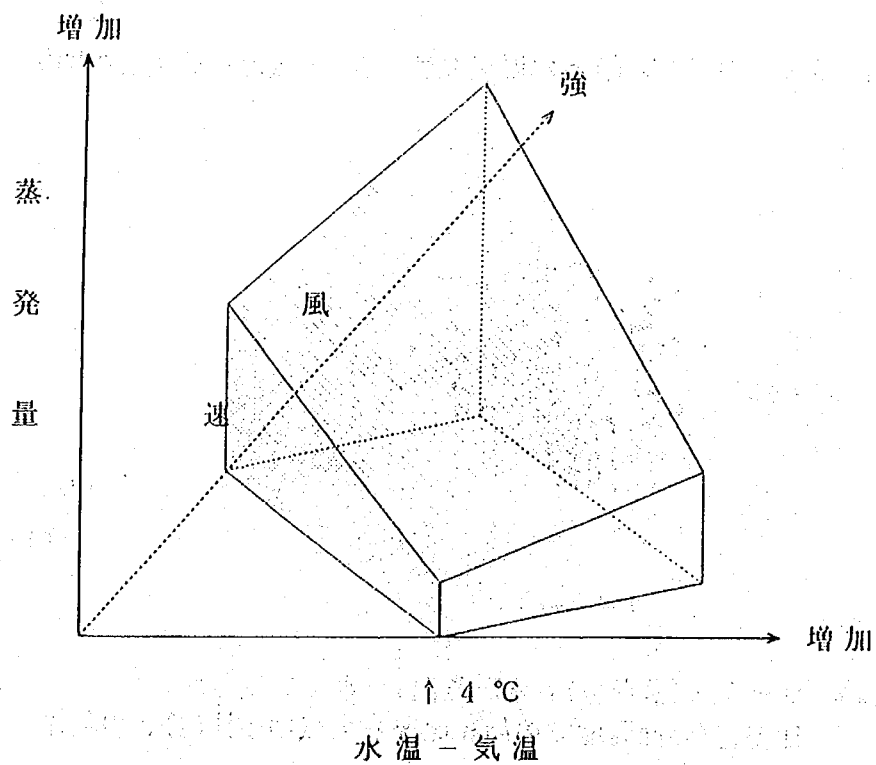


図3-2-14 蒸発量と水温気温差，風速との関係の模式図

2) バルク係数の算出

(4)式を用いて連続観測期間中の蒸発量を評価するためには、バルク係数を決定しておく必要がある。図3-2-15に風速とバルク係数との関係を示した。図より、バルク係数は、風速0.2m/sから1m/sにかけて急激に減少し、1m/s以上では、ほぼ 2.6×10^{-3} あたりの値となっている。一般的に、水面蒸発のバルク係数は、観測高度2.5m程度するとき 約 1.6×10^{-3} とされている。一般的な値から比べると少し高い値といえる。この理由として、①観測高度が風速が1.9m、気温・比湿が1.2mと低いこと（観測高度が低いほどバルク係数は大きくなる）と、②前記の 1.6×10^{-3} という値は、十分広い水面での値であるが、観測地点は風向により湖岸からの距離が短くなる場合があり、フェッチの長さ（風下距離）の影響（フェッチが短いほどバルク係数は大きくなる）があることなどが考えられる。ここでは、バルク係数を次式に示す風速の関数とした。

$$C_e = P_1 \times U / (U P_2 - P_3) + P_4 \quad (7)$$

C_e ：バルク係数， U ：風速

P_1 ： 5.49×10^{-1} ， P_2 ：2.85

P_3 ： -1.60×10^{-3} ， P_4 ：2.67

図3-2-15の実線は(7)式から求めたバルク係数である。

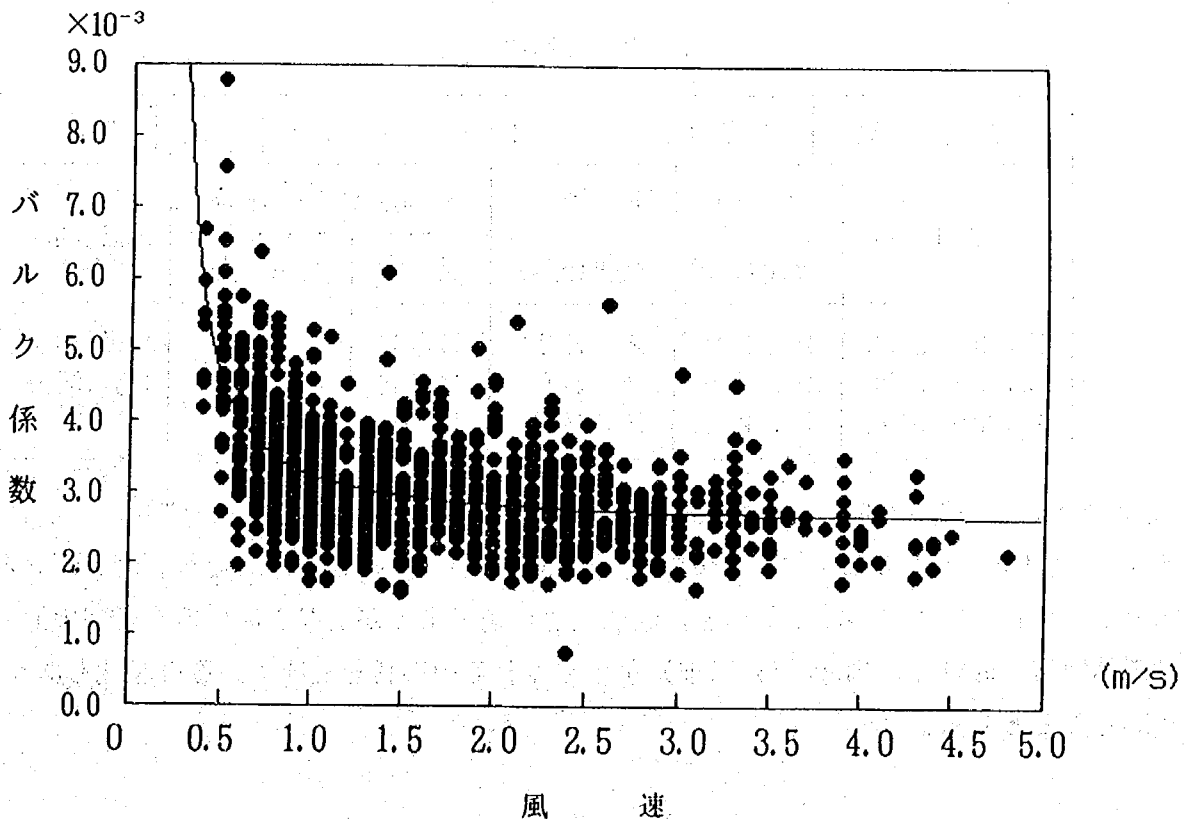


図3-2-15 風速とバルク係数との関係

3.2.2 連続観測結果

1) べき指数

風速、水蒸気圧は、境界層内で対数分布をしている。そのため、3.2.1の2)で算出したバルク係数は、特別観測期間中の観測高度での値である。9月3日までは観測機器をフロー式にしていたため、観測高度は一定であったが9月3日以後は固定式に変更したため、湖水位の変化に伴って測器高度が変化した。そのため、9月3日以降、湖面蒸発量を算出するにあたっては、観測高度の変化に伴ってバルク係数を変化させるか、気象データ（風速）を9月3日以前の観測高度に評価しなおして、計算する必要がある。ここでは、風速データを高度1.9mの値に換算しなおして湖面蒸発量の評価を行うこととした。そのためには、可変する観測高度での風速を高度1.9mでの値に換算する方法を決めておく必要がある。ここでは、風速データの評価はべき法則(8)式を用いることとした。

$$U_{zu} = (Z_u / Z_D)^\alpha * U_{zD} \quad (8)$$

U_{zu} : 高度 $Z_u (=1.9\text{m})$ での風速 (m/s)

U_{zD} : 高度 Z_D (任意:m) での風速 (m/s)

α : べき指数

ここで、べき指数 (α) を決定する必要がある。べき指数は、特別観測期間中の2高度の風速データから決定した。そのときの、観測データを表3-2-3に示した。

表3-2-3 風速の高度分布

観測実施日時		7月20日 15:10~15:40		天気	晴れ
観測時間	上層	下層	連測観測(I)記録		記事
	風速(m/s)	風速(m/s)	風向	風速(m/s)	
15:10~15:20	2.68	2.37	ESE	3.6	上層:100cm 下層:60cm
15:20~15:30	3.25	2.85	ESE	4.0	
15:30~15:40	3.24	2.83	ESE	3.9	

(8)式を用い表3-2-3から、べき指数を算出すると $\alpha \approx 1/3.5$ であった。一般的に、水面上のべき指数は $\alpha \approx 1/8.5$ とされている。ここでの $\alpha \approx 1/3.5$ は一面に障害物がある場所、例えば、森林地帯、灌木地帯とされている。観測したべき指数は大きい値であるが、ダム湖の地形（谷地形）と周辺環境（森林地帯、砂糖きび畑orハップル畑）を考えるとその影響を受けている可能性もありこの観測値を用いることとした。

2) 湖面蒸発量

(7) 式のパルク係数の推定式と (4) 式のパルク式から連続観測期間中の蒸発量の評価を行った。

表3-2-4に蒸発量の月表を示した。また、図3-2-16(a)～(b)に蒸発量と蒸発量の増減に影響があると考えられる気象要素の経時変化図を示し、図3-2-17～図3-2-36にそれらの相関図を示した。相関図は、全期間と各月ごとに示した。

表より、7月～10月の蒸発量は100mm/月～140mm/月の範囲と推定できる。この蒸発量は、那覇での気候値から推定した水面蒸発量に近いが少し高めの値を示している。那覇での年蒸発量が863mm(浅い水体：気候値から推定)であることから、年間の蒸発量は那覇の年蒸発量より多いと考えられる。

次に、各気象要素との関係をみた。蒸発量と各気象要素との相関係数を表3-2-5にまとめて示した。

表3-2-5 各気象要素毎の蒸発量との相関係数

	全期間	7月	8月	9月	10月
風 速	0.47	0.70	0.68	0.00	0.60
湿 度	-0.42	-0.81	-0.15	-0.76	-0.74
比湿差	0.53	0.65	-0.22	0.80	0.74
水温気温差	0.37	0.29	-0.53	0.50	0.51

全期間でみると、全体的に相関係数は低かった。しかし、月別にみると、蒸発量との相関が現れている。ただし、月によってその影響の程度が変化しているのが特徴的であった。

ここで、8月の相関係数であるが、比湿差と水温気温差の値がマイナスとなっている。これは一般的な概念からすると、逆(普通は比湿差、水温気温差が大きければ蒸発量も多いという正の関係)のようである。この原因として以下の理由が考えられる。

- ・台風時、その強風が、蒸発量の増加に作用した。
- ・台風時は、曇天、降雨により、比湿差、水温気温差が小さかった。

以上のことから、蒸発量と気象要素との関係について以下のことが考えられる。

- ①：基本的(理論的)には、上述の各気象要素と蒸発量との間には相関関係がある。
- ②：蒸発量の増減にどの気象要素が直接的に影響するかは、各気象要素のタイムスケール別変化傾向による。言い替えると、蒸発量の増減は観測期間中の各気象要素の変化量の程度の差に影響を受ける。

ここで、図3-2-37～図3-2-41にパルク式((4)式)に用いられている風速と比湿差と蒸発量との三次元散布図を示した。図より、風速と比湿差が相乗的に蒸発量の増減に影響していることが分かる。

表3-2-4 蒸発量月表

単位 : mm

\ 月		7	8	9	10
1			6.10	1.12	2.40
2			8.55	2.02	2.50
3			5.20	1.72	1.84
4			5.25	2.28	2.43
5			4.25	1.27	6.22
6			6.87	1.78	5.14
7			欠 測	3.11	4.45
8			"	4.52	3.19
9			"	3.39	5.40
10			"	3.47	4.82
11			"	3.89	3.14
12		3.81	"	3.19	3.10
13		4.81	"	4.80	2.58
14		4.45	"	2.59	2.16
15		3.54	"	4.99	4.19
16		3.52	"	4.14	3.83
17		4.16	"	3.16	4.75
18		3.47	"	2.97	5.78
19		3.64	"	2.94	4.66
20		4.84	"	2.60	5.89
21		3.83	"	3.45	5.25
22		4.82	"	2.01	5.75
23		6.40	2.06	1.62	3.20
24		6.96	3.90	1.27	7.96
25		5.52	4.27	3.66	6.79
26		4.61	5.66	5.95	4.89
27		3.41	7.63	4.46	4.72
28		3.60	8.18	4.01	3.80
29		5.19	6.28	2.25	1.96
30		5.02	5.92	2.32	4.66
31		4.83	2.26		3.96
上旬	前半	0.00	29.35	8.41	15.39
	後半	0.00	6.87	16.27	23.00
中旬	前半	16.61	0.00	19.46	15.17
	後半	19.63	0.00	15.81	24.91
下旬	前半	27.53	10.23	12.01	28.95
	後半	26.66	35.93	18.99	23.99
月 計		90.43	82.38	90.95	131.41

140.17
134138^{注1)}
113

92

74

← 月換算値の
← 那覇候値^{注2)}

注 1) 欠測期間中の値が9月の値と同じとして算出

注 2) 日本の水文気象(1):放射量と水面蒸発、近藤純正・桑形恒男、水文・水資源学会誌Vol.5 NO.2 PP13

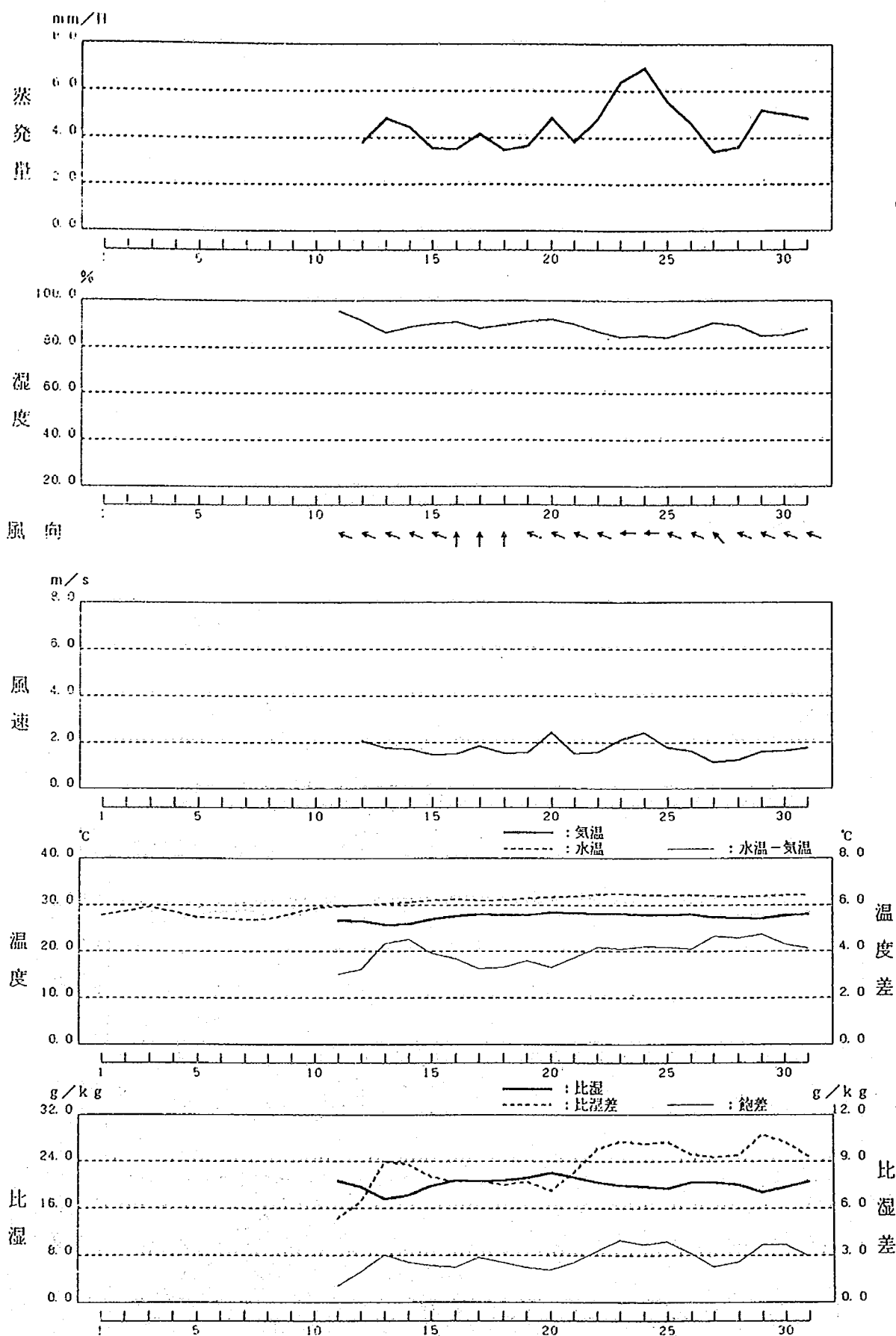


図3-2-16(a) 連続観測経時変化図
【7月：福地ダム】

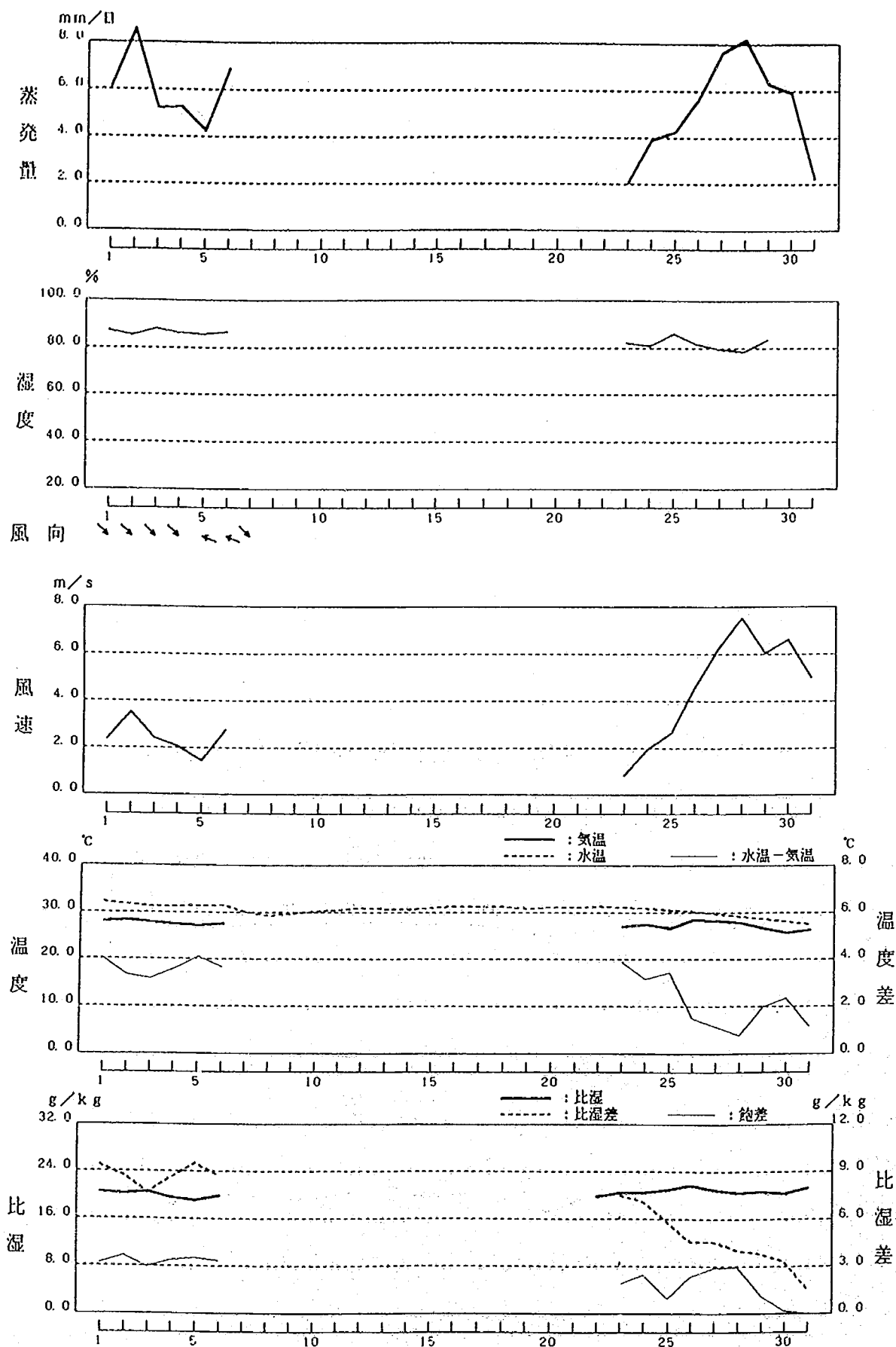


図3-2-16(b) 連続観測経時変化図
【8月：福地ダム】

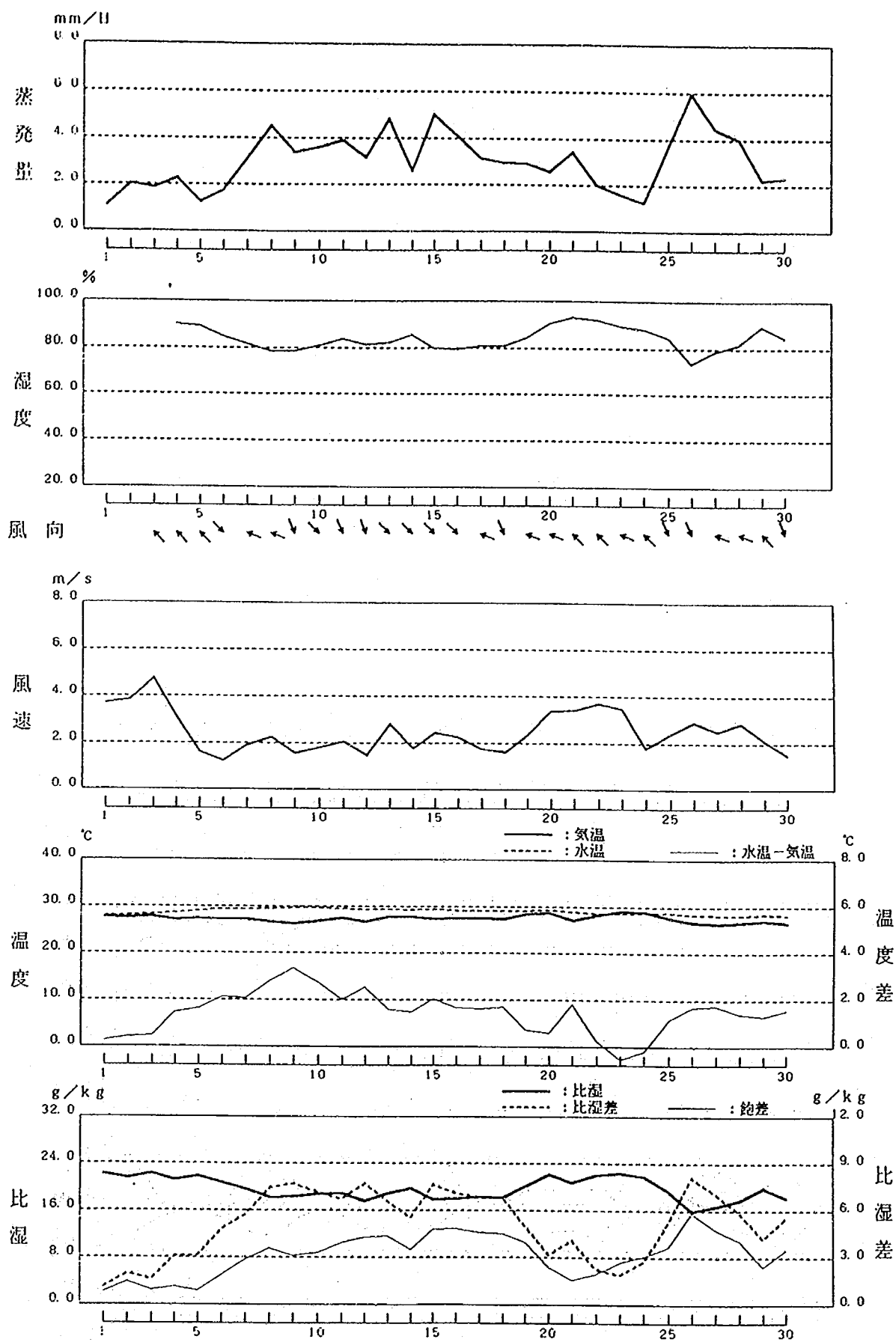


図3-2-16(c) 連続観測経時変化図
【9月：福島ダム】

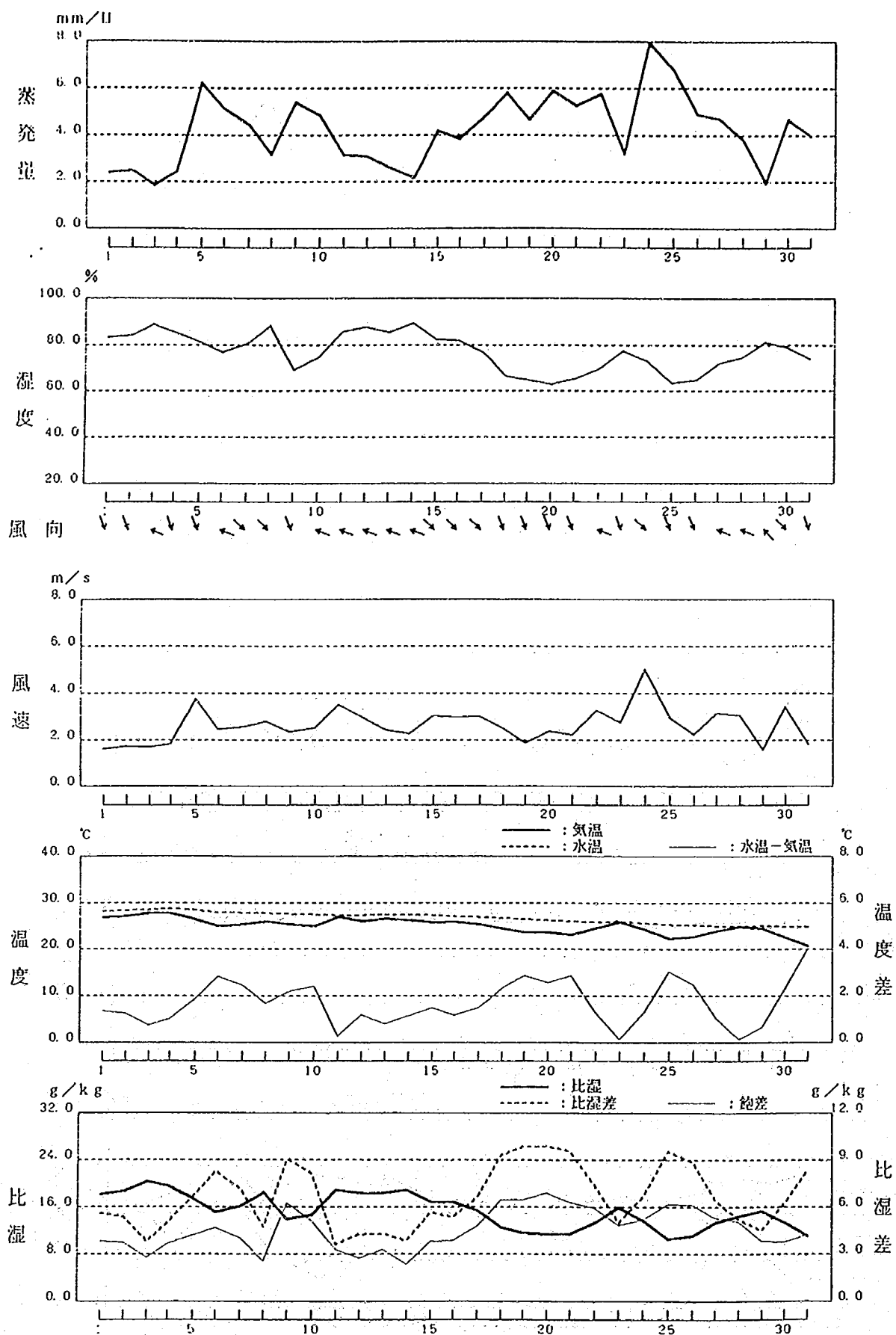


図3-2-16(d) 連続観測経時変化図
【10月：福地ダム】

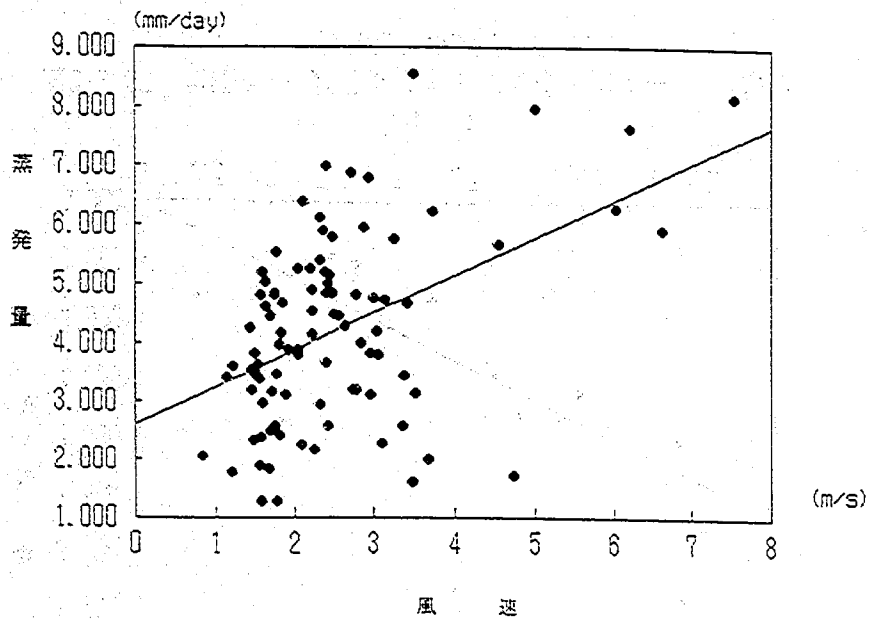


図3-2-17 風速と蒸発量との関係 (全期間)

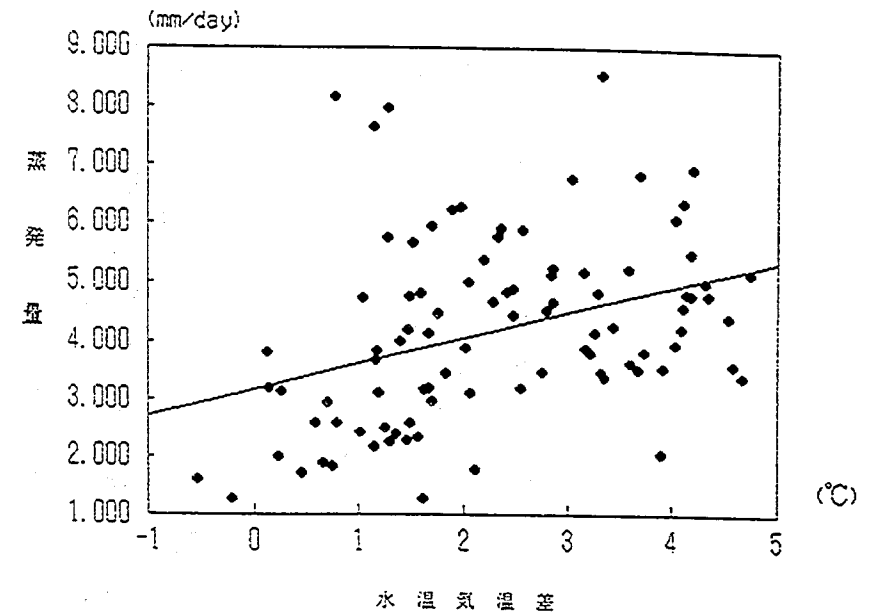


図3-2-19 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と蒸発量との関係 (全期間)

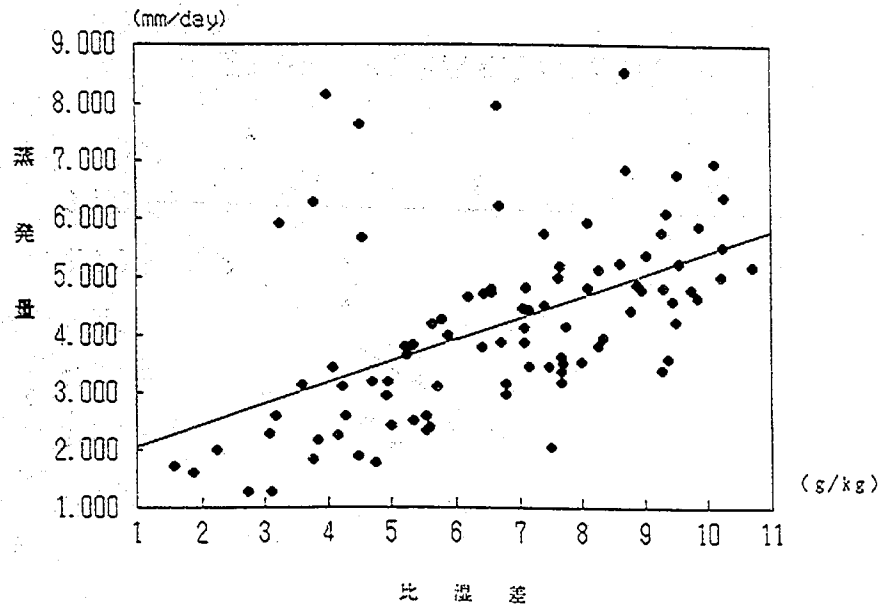


図3-2-18 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と蒸発量との関係 (全期間)

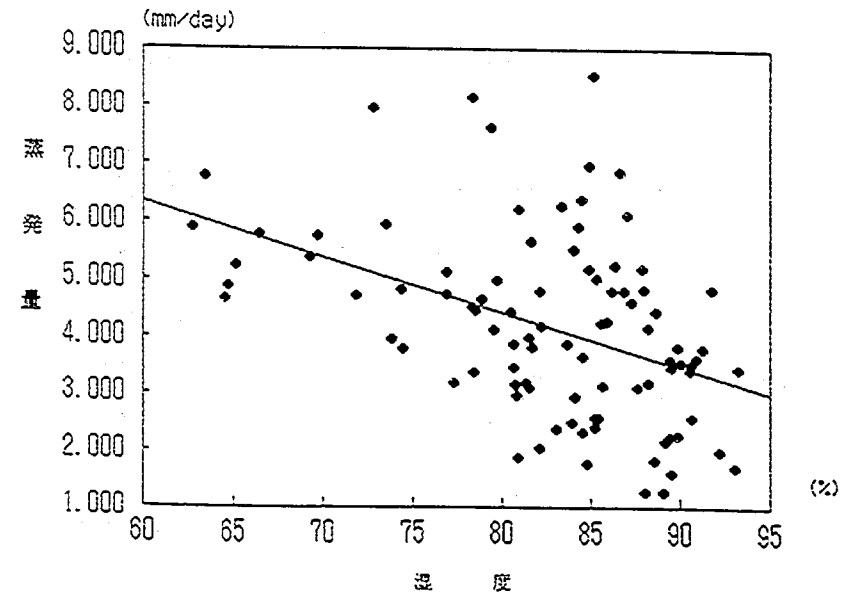


図3-2-20 湿度と蒸発量との関係 (全期間)

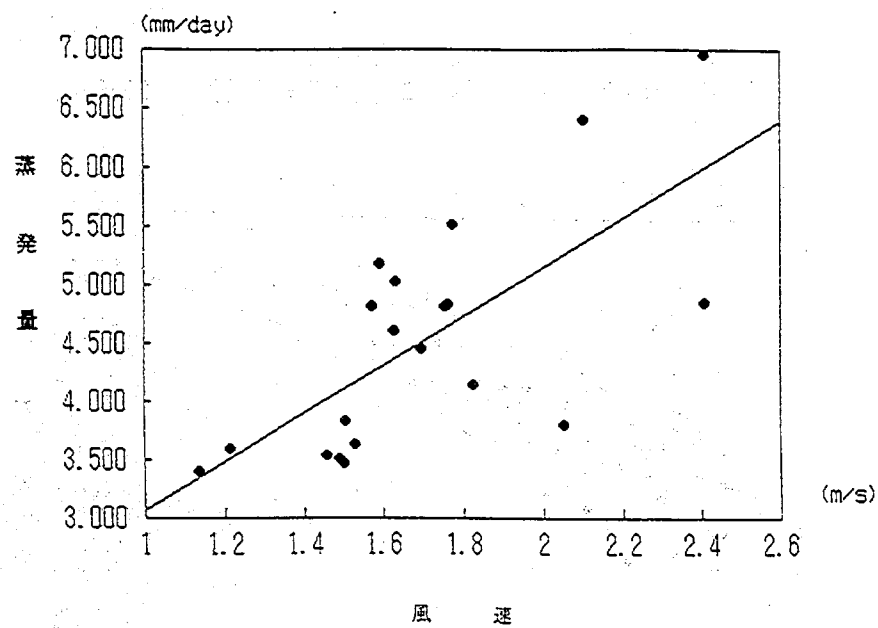


図3-2-21 風速と蒸発量との関係 (7月)

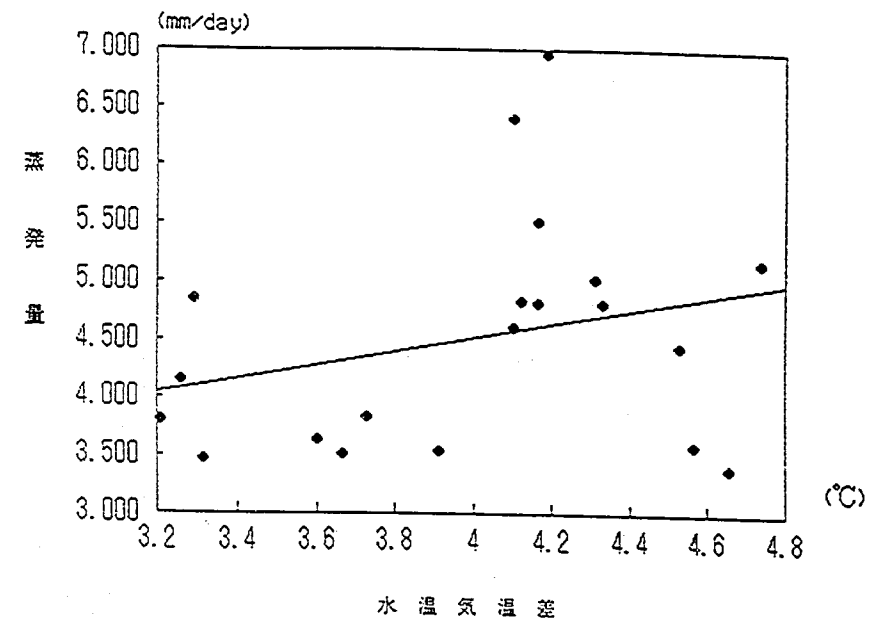


図3-2-23 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と蒸発量との関係 (7月)

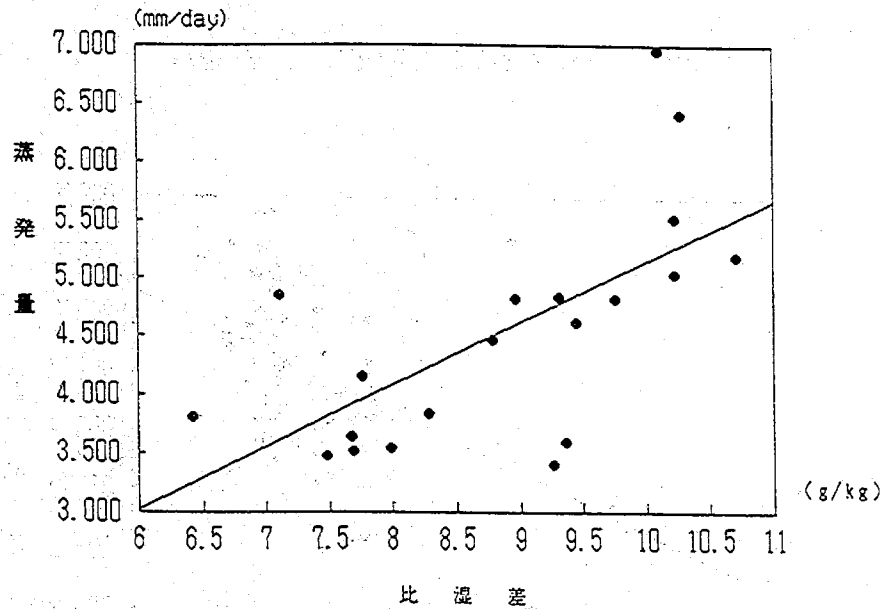


図3-2-22 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と蒸発量との関係 (7月)

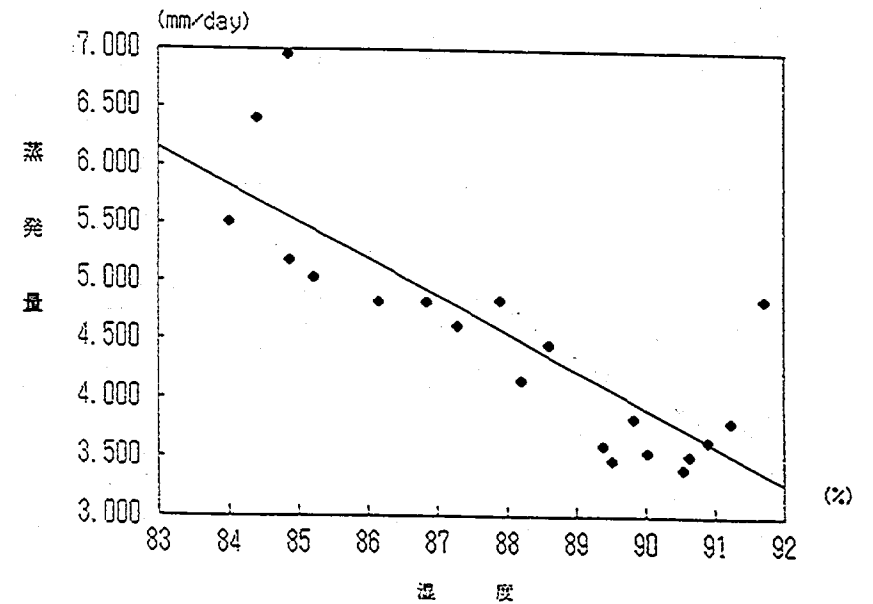


図3-2-24 湿度と蒸発量との関係 (7月)

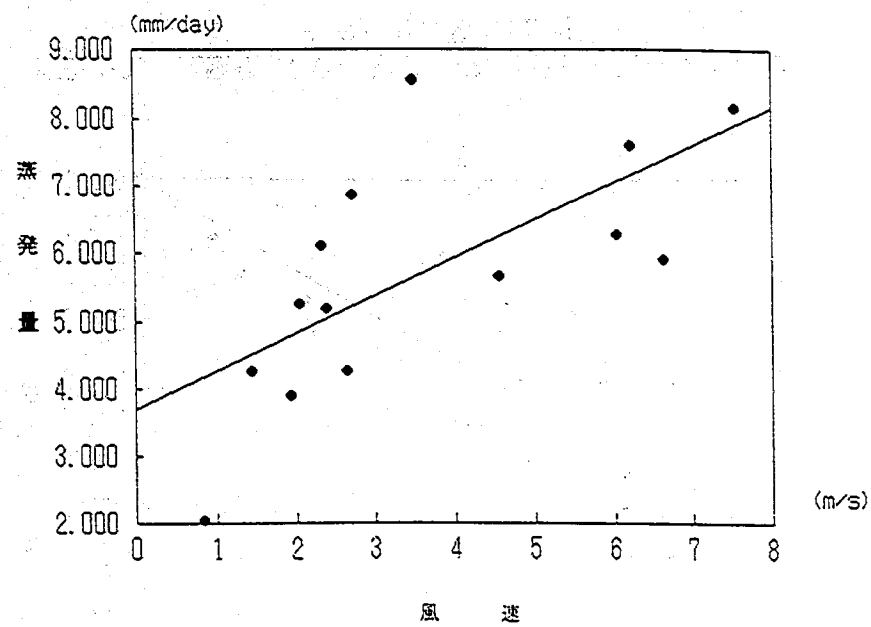


図3-2-25 風速と蒸発量との関係 (8月)

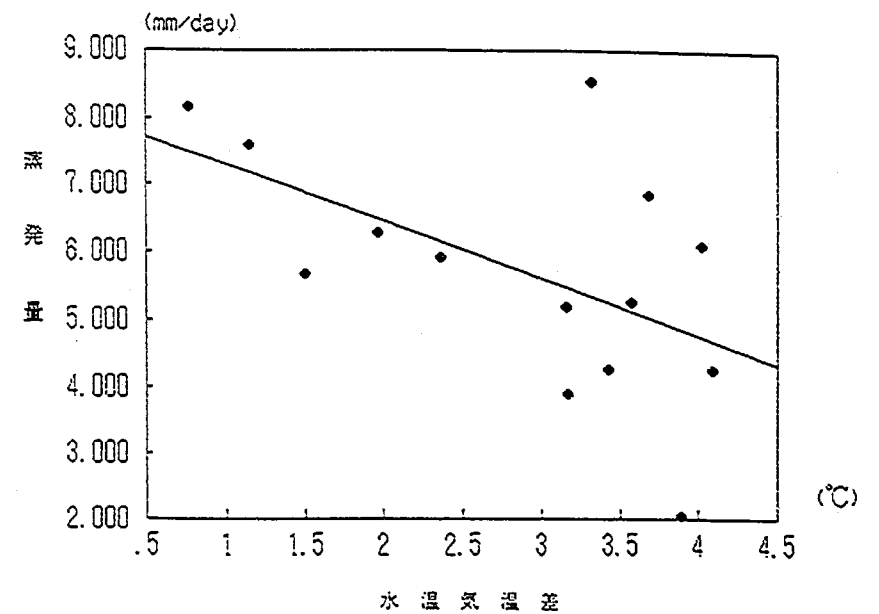


図3-2-27 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と蒸発量との関係 (8月)

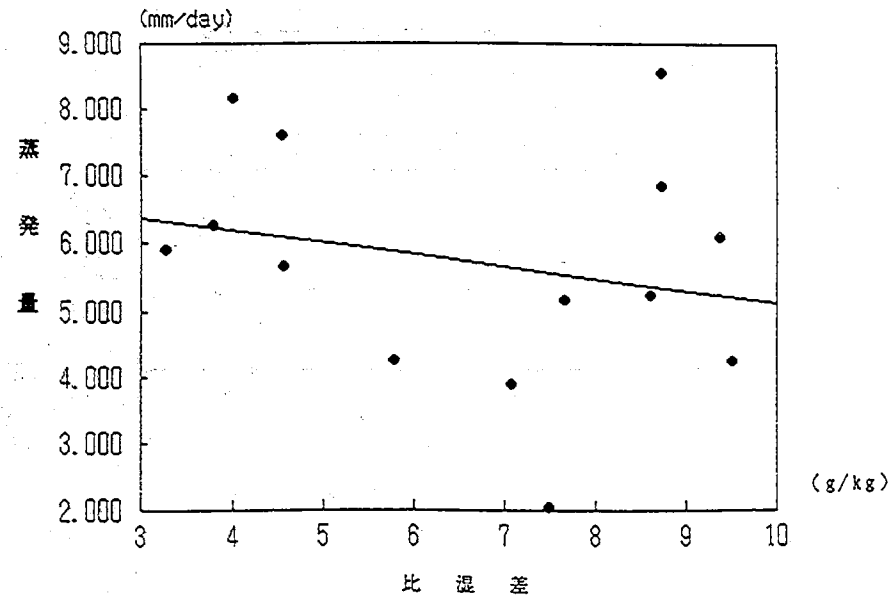


図3-2-26 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と蒸発量との関係(8月)

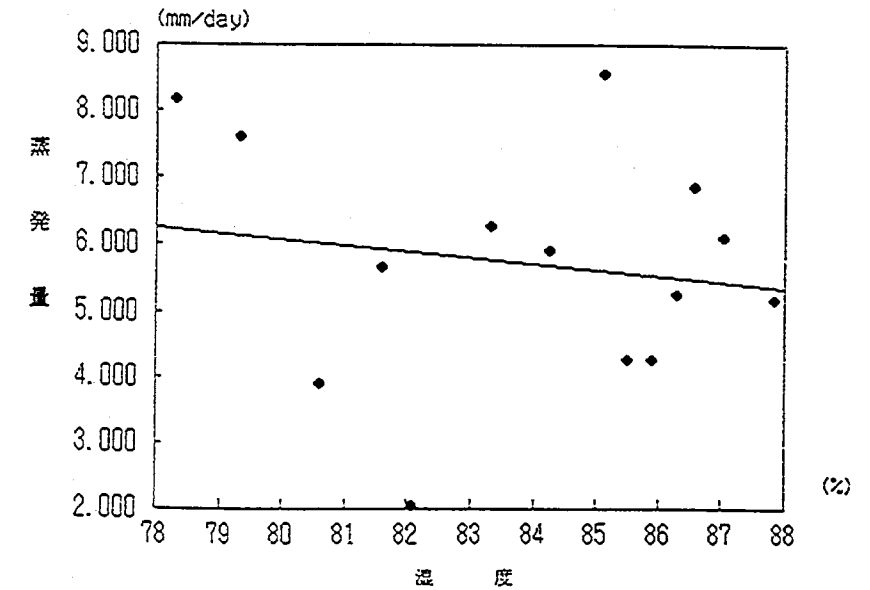


図3-2-28 湿度と蒸発量との関係 (8月)

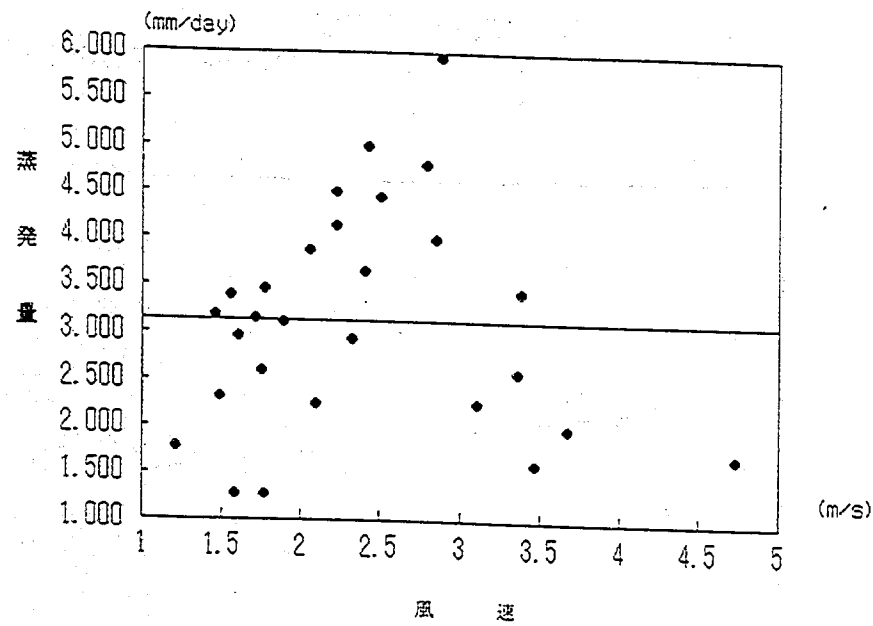


図3-2-29 風速と蒸発量との関係 (9月)

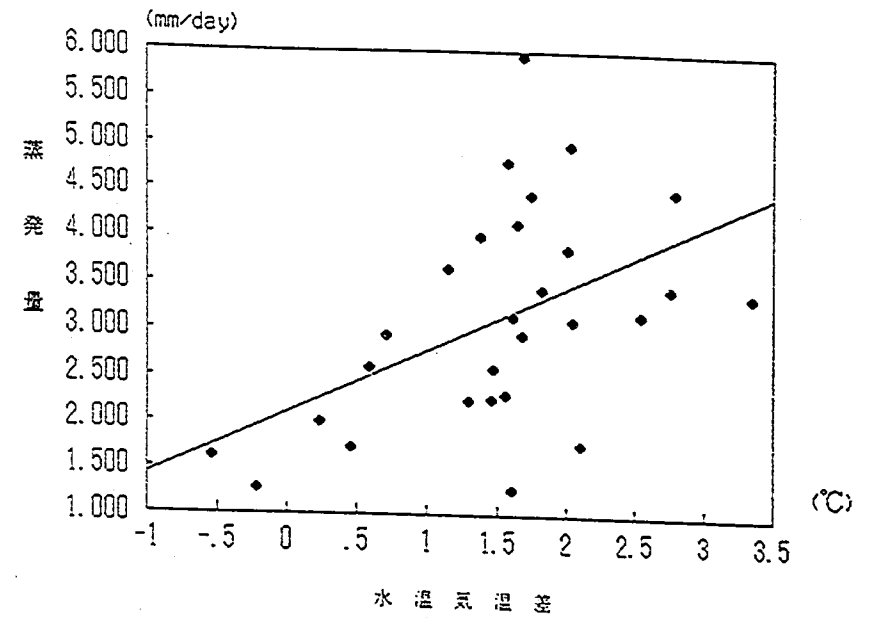


図3-2-31 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と蒸発量との関係 (9月)

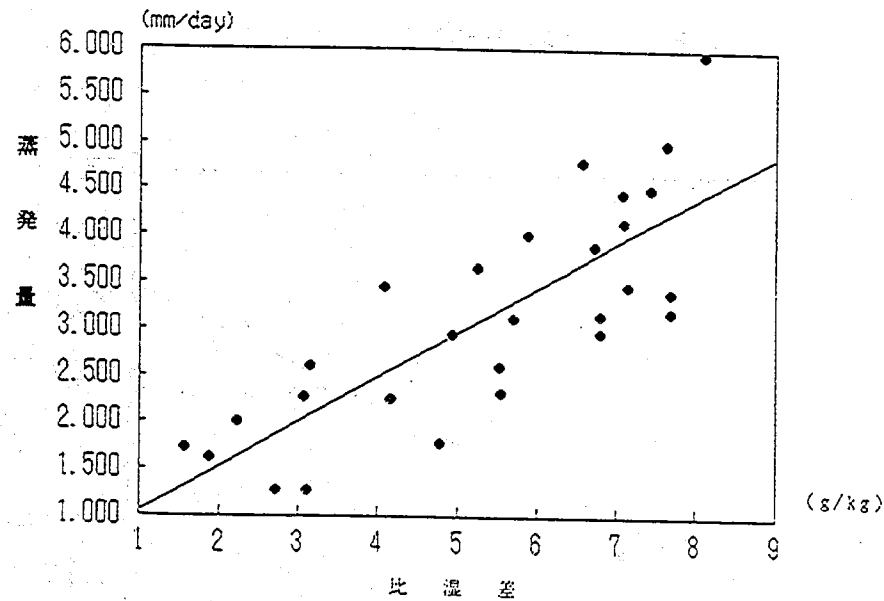


図3-2-30 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と蒸発量との関係 (9月)

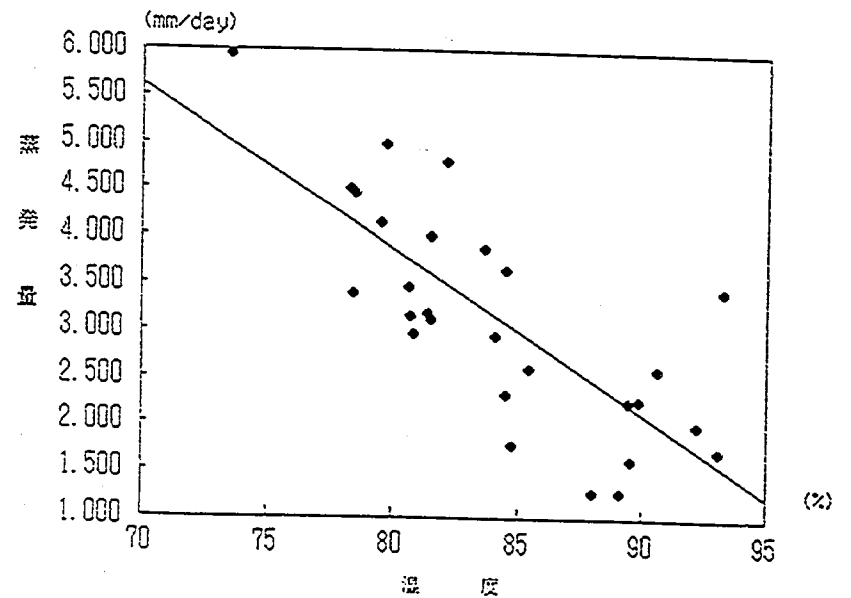


図3-2-32 湿度と蒸発量との関係 (9月)

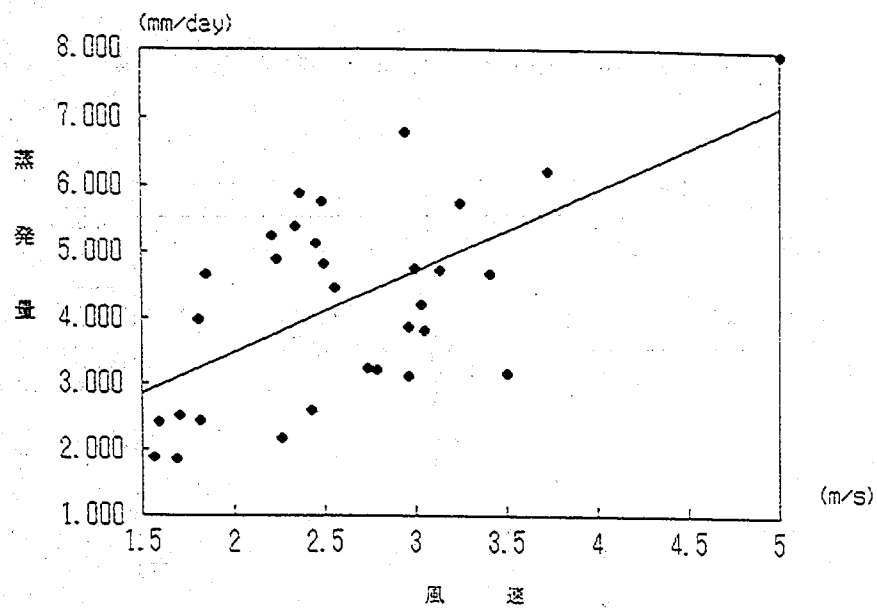


図3-2-33 風速と蒸発量との関係 (10月)

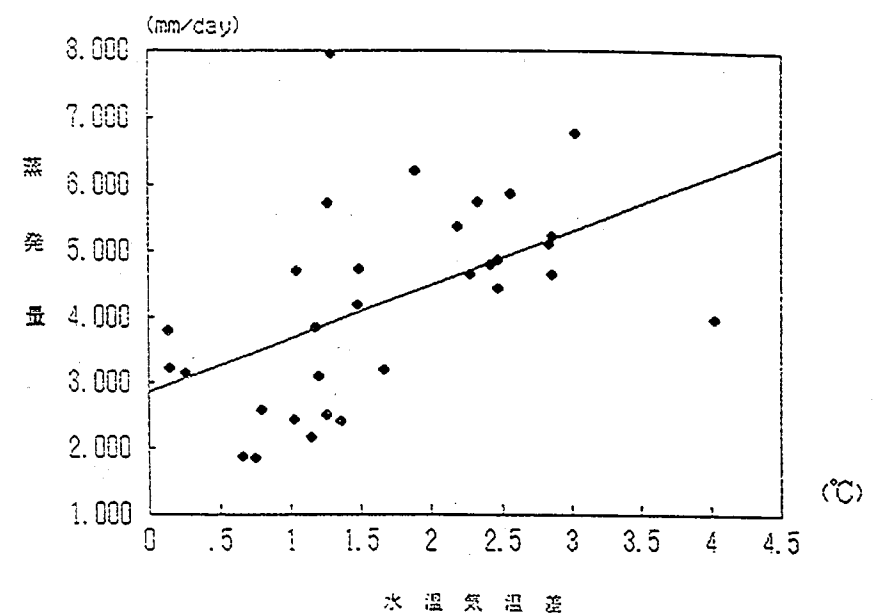


図3-2-35 水温気温差(湖面の表面水温-気温)と蒸発量との関係 (10月)

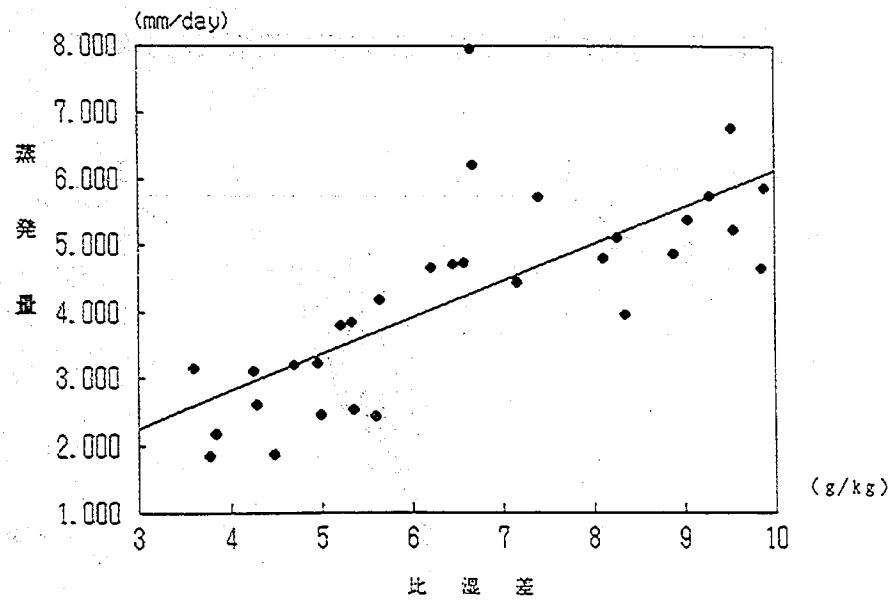


図3-2-34 比湿差(湖面温度での飽和比湿-大気中の比湿)と蒸発量との関係 (10月)

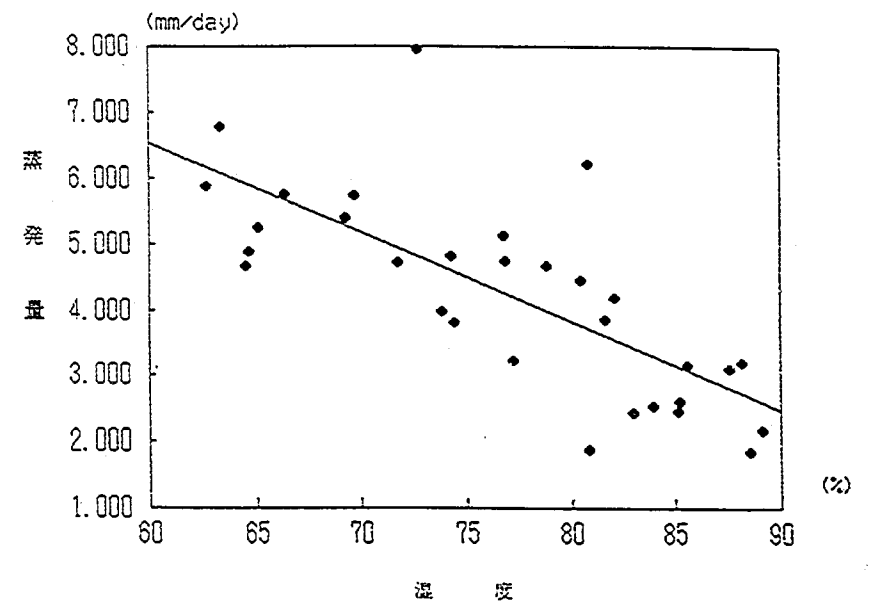


図3-2-36 湿度と蒸発量との関係 (10月)

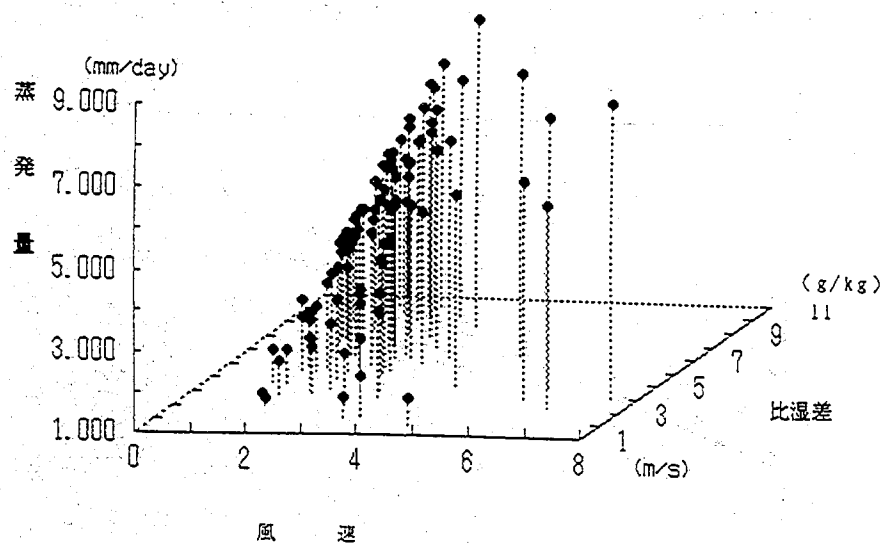


図3-2-37 風速，比湿差と蒸発量との関係（全期間）

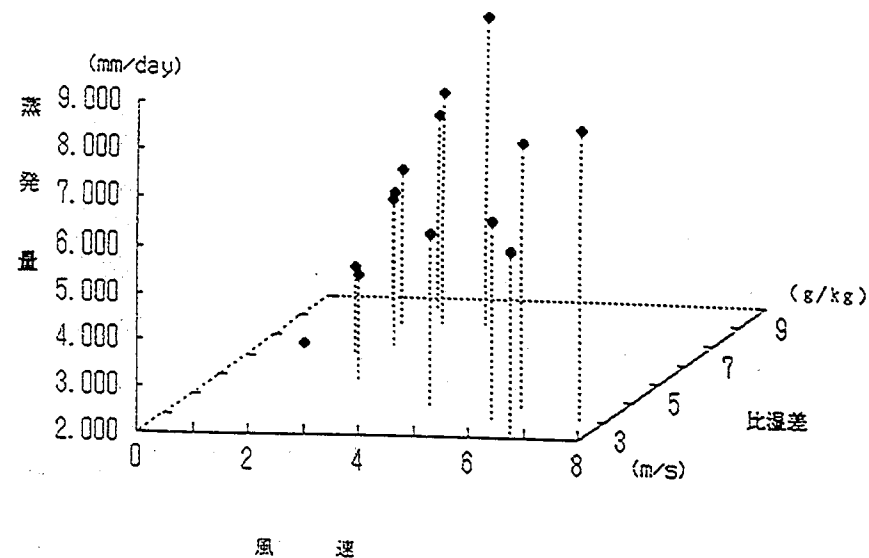


図3-2-39 風速，比湿差と蒸発量との関係（8月）

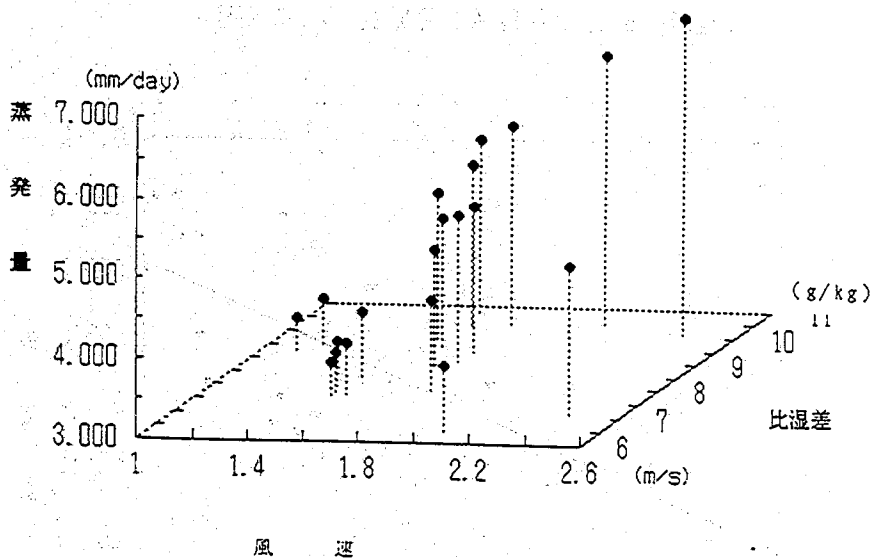


図3-2-38 風速，比湿差と蒸発量との関係（7月）

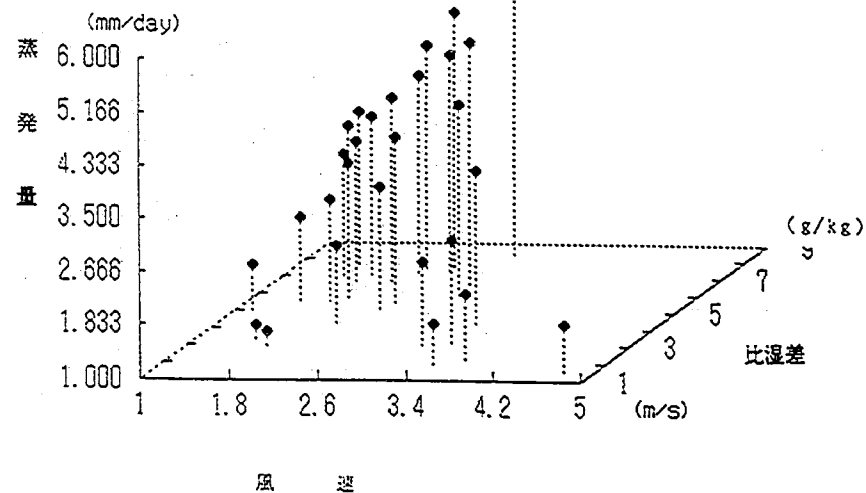


図3-2-40 風速，比湿差と蒸発量との関係（9月）

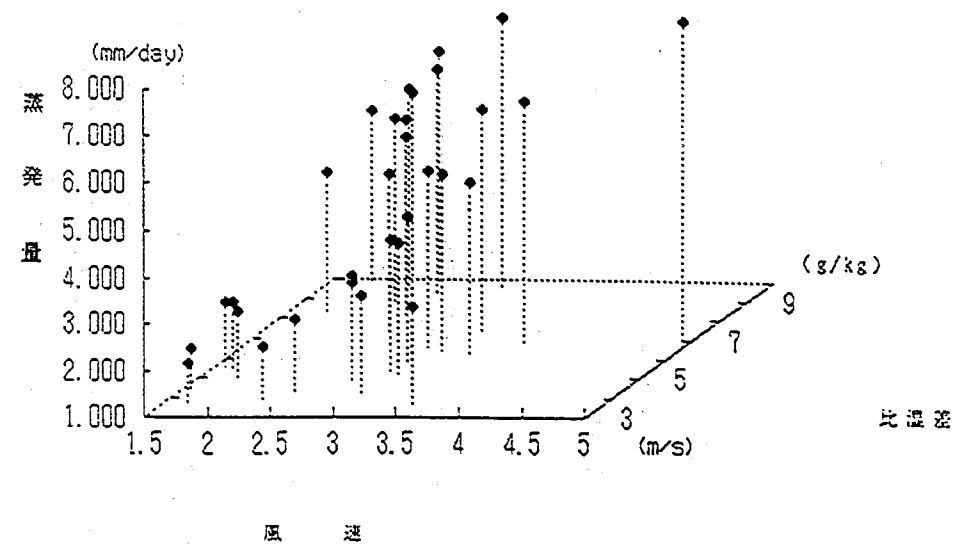


図3-2-41 風速，比湿差と蒸発量との関係（10月）

3.3 観測地点の代表性の検討

7月19日から7月21日の特別観測期間中、7月16日、17日と、7月19日から7月21日の5日間、午前11時頃から正午頃にかけて図3-3-1に示す湖岸の5地点で、ビラム式風向風速計と低層ゾンデ用センサーを用いて風向風速、気温等の地上移動観測を行った。また、7月17日午後2時頃から午後3時頃にかけて湖上を船で移動しながら、図3-3-1に示す22地点で、低層ゾンデ用センサーを用いて気温等の湖上移動観測を行った。観測の様子を写真3-3-1に示す。地上移動観測の結果を表3-3-1と図3-3-2(a)から図3-3-2(e)に、湖上移動観測の結果を表3-3-2と図3-3-3に示す。但し、図中の水蒸気圧については連続観測点Ⅰ及びⅡは露点温度から、各移動観測点は湿球温度からそれぞれ算出している。

先ず、地上移動観測点と連続観測点を比較してみる。5地点の地上移動観測点では気温は湖面に近い①、⑥のグループと湖面からやや離れた②、③、④の二つのグループに大別される。水蒸気圧、相対湿度も気温を使って計算するため、同様の傾向がある。後者のグループは観測場所が湖面から離れるのと南西斜面に位置するため、太陽の直射の影響がより強く出たと考えられる。特に、風の弱かった7月19日から7月21日の観測の際、地表近くの空気が強烈な太陽の直射で暖められ、このグループ化の傾向が顕著である。風向風速については地形の影響が出易いものではあるが、風向、風速ともに連続観測点と同様な変化傾向を示している。

以上、気温等については連続観測点は通風型測器、地上移動観測点は自然風のみという違いがあり、風向風速については観測高度の違い、そして、地上移動観測点は簡易型の風向風速計である点等を考え合わせれば、個々の差は小さく、連続観測点Ⅱは福上湖周辺を代表する地点であると言える。

次に、湖上移動観測点と連続観測点を比較してみる。湖上移動観測では低層ゾンデ用センサーを船首に突き出し、通風型測器と同じ条件になるように出来るだけ定速で移動した。太陽の直射や風で湿球センサーが乾燥し易く、水蒸気圧、相対湿度のデータにややバラつきが見られるが、変化傾向は連続観測点Ⅰによく追従している。特に、気温は連続観測点から約5km程度離れた地点まで移動しても、連続観測点Ⅰとほとんど差はない。ダム湖上は他の部分と気温が異なるような特異な部分はない。他の項目についても同様にほぼ一様の分布をしていると考えられ、連続観測点Ⅰは福上湖上を代表する地点と言える。

そして、次に、連続観測点Ⅰ、Ⅱと名護測候所との相関関係については前節で述べた通りであるが、ここではそれぞれ福上湖湖上を代表する連続観測点Ⅰ、福上湖周辺を代表する連続観測点Ⅱの相関関係について検討する。連続観測点Ⅰと連続観測点Ⅱにおける各項目別の散布図を図3-3-4(a)から図3-3-4(e)に示す。

風向は別として各項目とも全観測期間でみれば、相関係数0.9以上と非常に良い相関関係にある。項目毎に見ていくと、気温は28.9℃を境に連続観測点Ⅰ、Ⅱの大小関係が逆転し、境界以下では連続観測点Ⅰが高く、それ以上では連続観測点Ⅱが高くなる。地表よりも温度変化の小さいダム湖水の水面上にある連続観測点Ⅰ付近の大気は、強烈な日射で気温の上がる日中はダム湖水に熱量を供給し、気温の下がる夜間は逆にダム湖水からの熱量の供給を受けているためにこの様な現象が起きていると考えられる。水蒸気圧はダム湖面上にある連続観測点Ⅰの方が連続観測点Ⅱよりもわずか

に高い。盛夏の7, 8月は連続観測点Ⅰ, Ⅱ共に高く, ほとんど日変化がない状態である。相対湿度も水蒸気圧と同様にダム湖面上にある連続観測点Ⅰの方が連続観測点Ⅱよりもわずかに高い。そして風速は標高の高い連続観測点Ⅱの方が連続観測点Ⅰよりも強い関係にある。風向は地形の影響を受け易く, 連続観測点Ⅰもこの例外ではない。湖面にある連続観測点Ⅰは湖面長の長い方向, すなわち東南東に延びる谷に沿った風が多くなる。標高が高く, 周りに障害物のない連続観測点Ⅱはダム湖周辺を代表すると考えられるが, この地点での東寄りの風が連続観測点Ⅰでは約2方位ずれ, 東南東を中心とする谷筋方向の出現が多い。また北寄りの風が約-1方位ずれており, これも北北西方向の湖面が開けている影響を受けている。総じて, 各項目は連続観測点Ⅰはダム湖面上の観測点, 連続観測点Ⅱはダム湖周辺を代表する観測点という観測地点の立地上の相違点による特性を持ちながら, 非常に良い相関関係を持ちながら連動している。

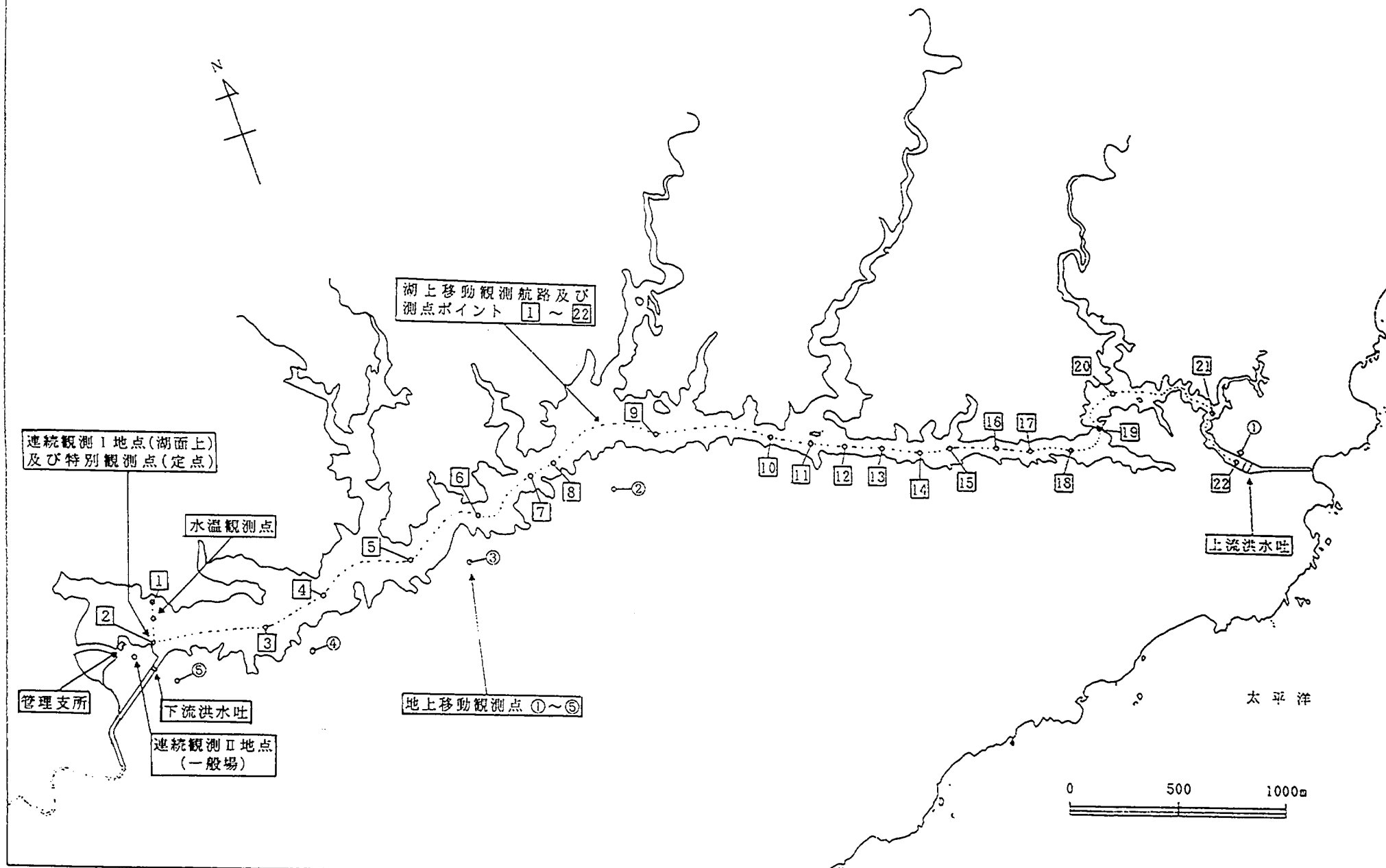


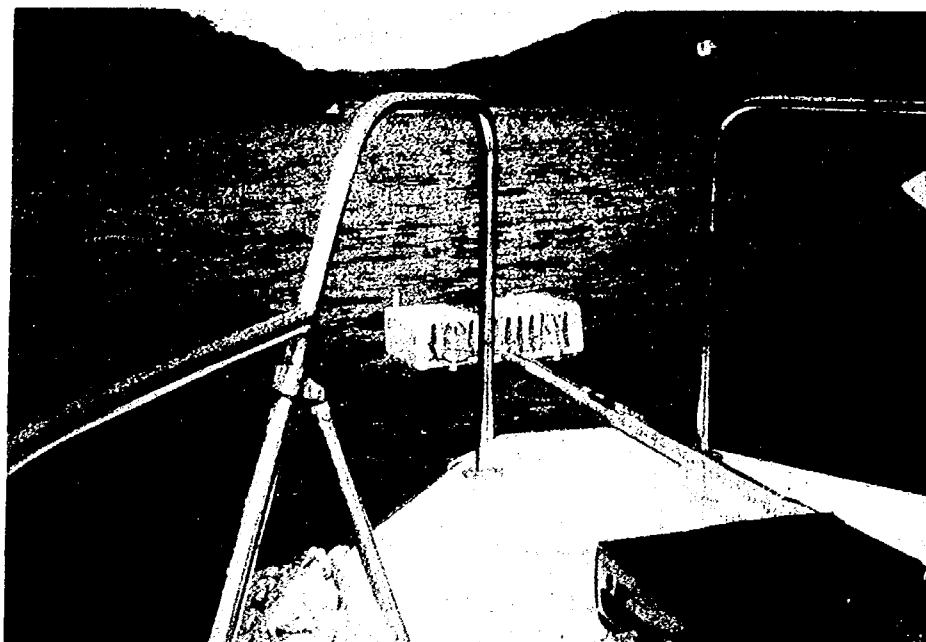
図3-3-1 ダム湖面蒸発量観測調査（沖縄県福地ダム）測点位置



地上移動観測点⑤



湖上移動観測



写3-3-1 移動観測実施状況

表3-3-1 ダム湖面蒸発量観測調査（沖縄県福地ダム）特別観測

《 地上移動観測 》

観測実施日	7月16日 11:10~12:30	天気	晴れ	ソリデセンサーNO.	乾球 3742 湿球 H6675
観測点 NO.	観測時間	アスマン		観測地点周辺状況	
		乾球 °C	湿球 °C		
1	11:19~11:24	28.1	25.7	ダム湖岸、7ｽﾌｧﾙﾄより70cm横の水上、約3mの所。	
2	11:42~11:47	28.8	26.1	7ｽﾌｧﾙﾄ道路西 1m、赤土、小砂利上50cm。	
3	11:56~12:01	29.7	26.0	7ｽﾌｧﾙﾄ道路南70cm、赤土、小砂利少々雑草上50cm。	
4	12:07~12:12	30.2	26.3	7ｽﾌｧﾙﾄ道路より木を隔て南へ2m、パイナップル畑上50cm。	
5	12:20~12:25	28.3	26.1	一面芝生の上50cm。	
観測実施日	7月17日 11:00~12:15	天気	晴れ	ソリデセンサーNO.	乾球 3742 湿球 H6675
観測点 NO.	観測時間	アスマン		ピラム	
		乾球 °C	湿球 °C	風向	風速 %
1	11:05~11:10	29.4	26.3	ESE	4.70
2	11:29~11:34	29.3	26.4	SW	5.20
3	11:45~11:50	31.5	26.3	SSE~SSW	3.81
4	11:56~12:01	31.7	26.7	SW~S	3.43
5	12:07~12:12	28.9	26.2	S	5.29
観測実施日	7月19日 10:50~12:00	天気	晴れ	ソリデセンサーNO.	乾球 3742 湿球 H6675
観測点 NO.	観測時間	アスマン		ピラム	
		乾球 °C	湿球 °C	風向	風速 %
1	10:57~11:02	28.5	26.0	E	3.02
2	11:17~11:22	31.3	26.6	NW	2.07
3	11:28~11:33	31.6	26.9	SE	1.69
4	11:38~11:43	30.8	26.6	SSE	1.96
5	11:49~11:54	28.7	25.9	NE	2.20
観測実施日	7月20日 11:10~12:10	天気	晴れ	ソリデセンサーNO.	乾球 3742 湿球 H6675
観測点 NO.	観測時間	アスマン		ピラム	
		乾球 °C	湿球 °C	風向	風速 %
1	11:12~11:20	29.3	27.0	ESE	1.60
2	11:31~11:36	31.2	27.4	SE	1.86
3	11:41~11:46	31.3	27.2	SE	2.41
4	11:51~11:56	30.9	27.3	SSE	2.43
5	12:01~12:06	29.0	26.6	SSE	3.03
観測実施日	7月21日 10:55~12:00	天気	晴れ	ソリデセンサーNO.	乾球 3742 湿球 H6675
観測点 NO.	観測時間	アスマン		ピラム	
		乾球 °C	湿球 °C	風向	風速 %
1	11:00~11:05	29.0	26.3	ESE	2.34
2	11:19~11:24	31.6	27.1	S	1.50
3	11:31~11:36	30.4	26.7	SE	2.11
4	11:41~11:46	30.7	27.1	S	1.96
5	11:52~11:57	28.7	26.0	SSE	2.20
【記事】：観測実施日は、すべて直射あり。					
：アスマンの測定値は観測時間の終了時。					
：7月16日観測分のみ NO.3……7ｽﾌｧﾙﾄ道路北側70cmで測定、赤土、小砂利少々、雑草上70cm。また、全地点ピラム測定実施せず。					

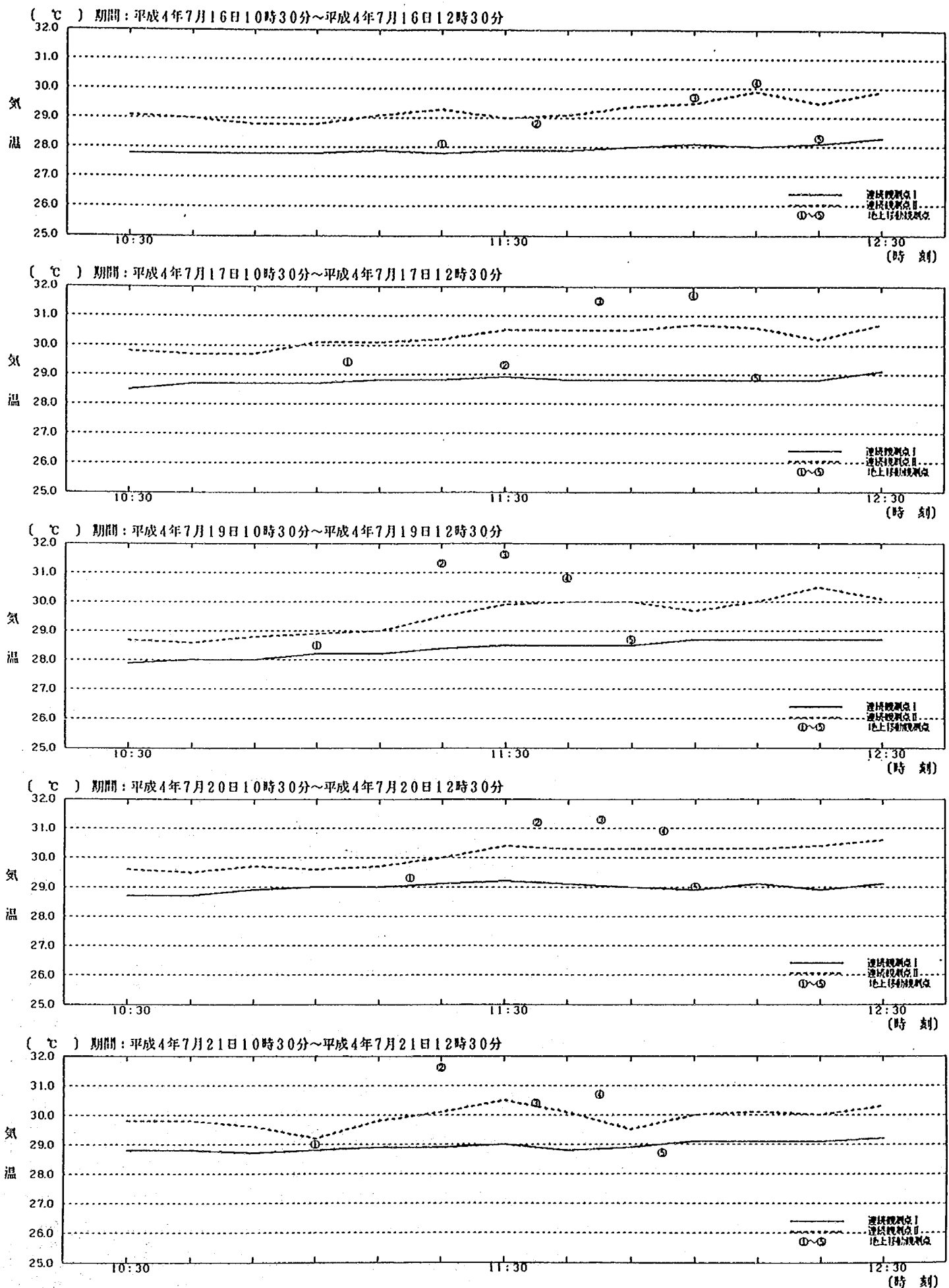
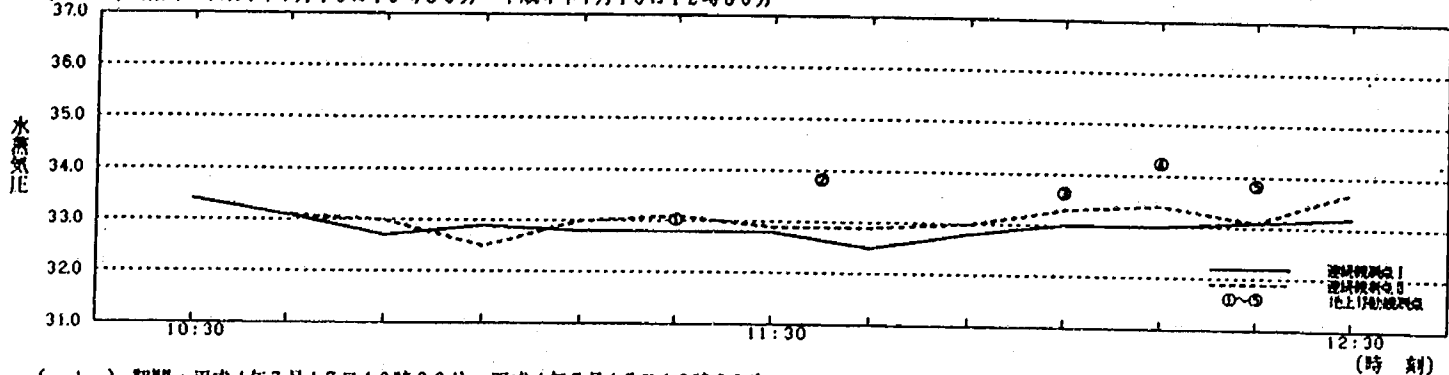
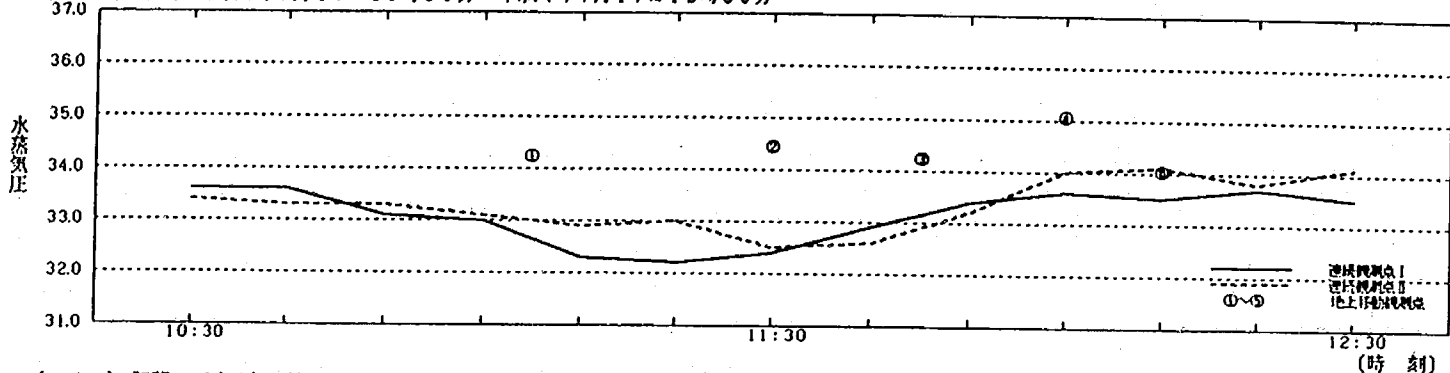


図3-3-2(a) 地上移動観測時の経時変化【気温】

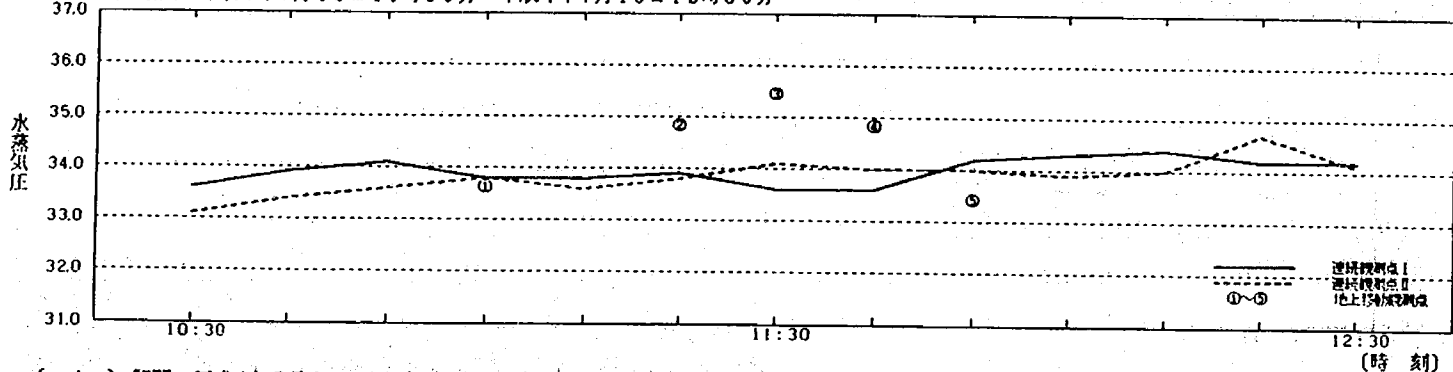
(mb) 期間：平成4年7月16日10時30分～平成4年7月16日12時30分



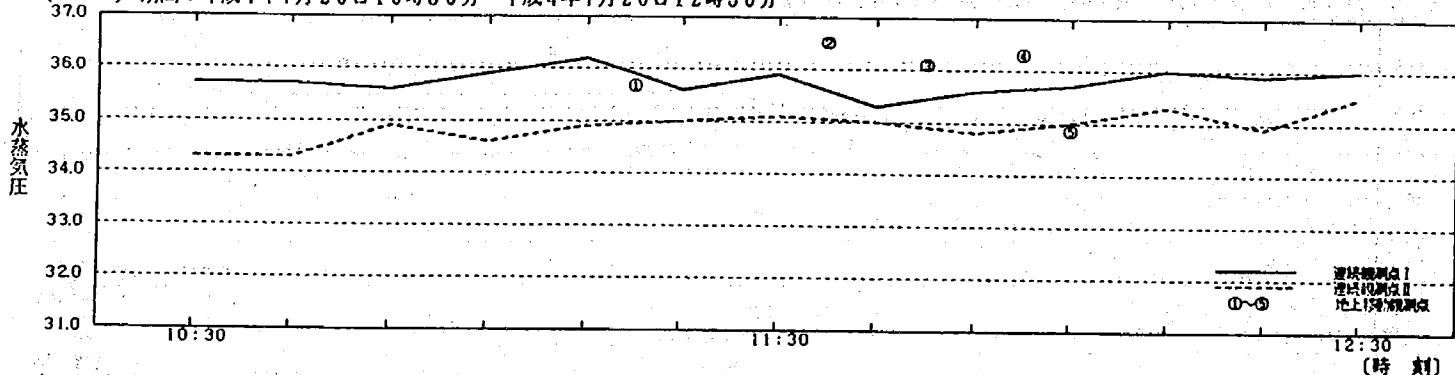
(mb) 期間：平成4年7月17日10時30分～平成4年7月17日12時30分



(mb) 期間：平成4年7月19日10時30分～平成4年7月19日12時30分



(mb) 期間：平成4年7月20日10時30分～平成4年7月20日12時30分



(mb) 期間：平成4年7月21日10時30分～平成4年7月21日12時30分

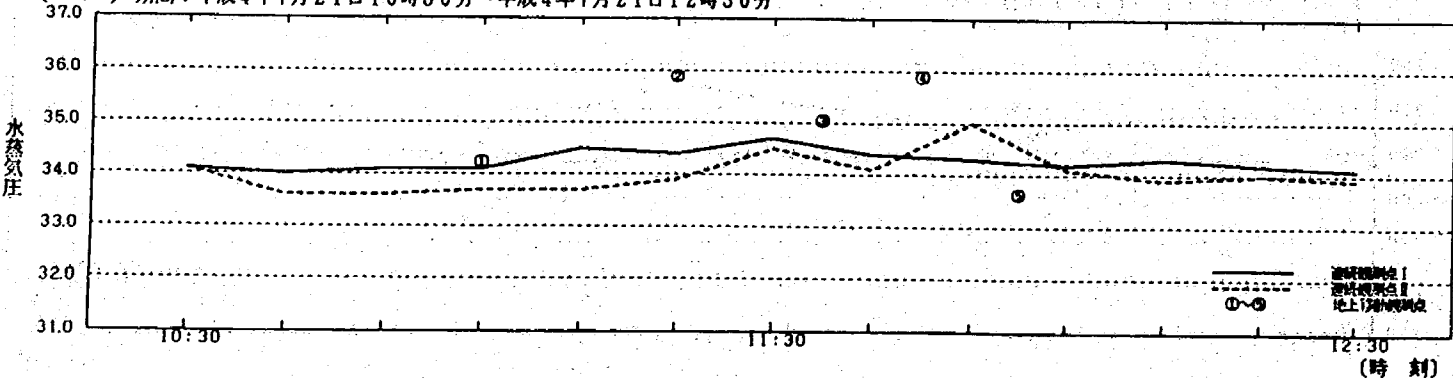


図3-3-2(b) 地上移動観測時の経時変化【水蒸気圧】

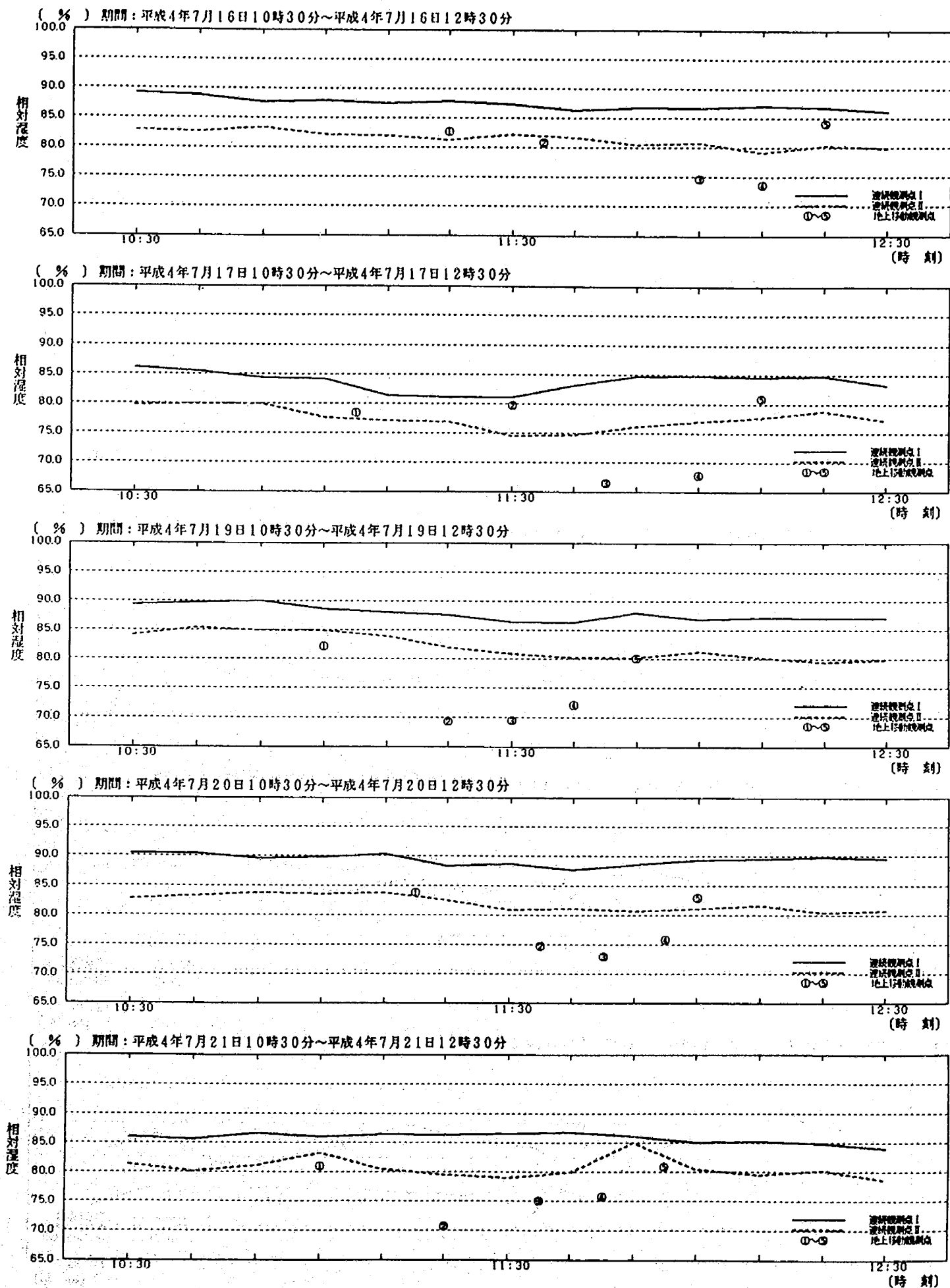
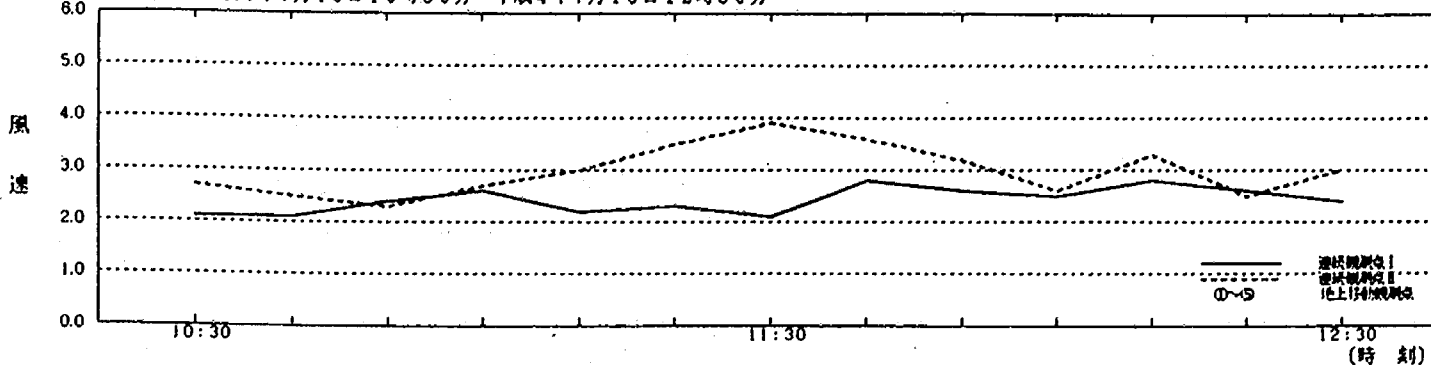
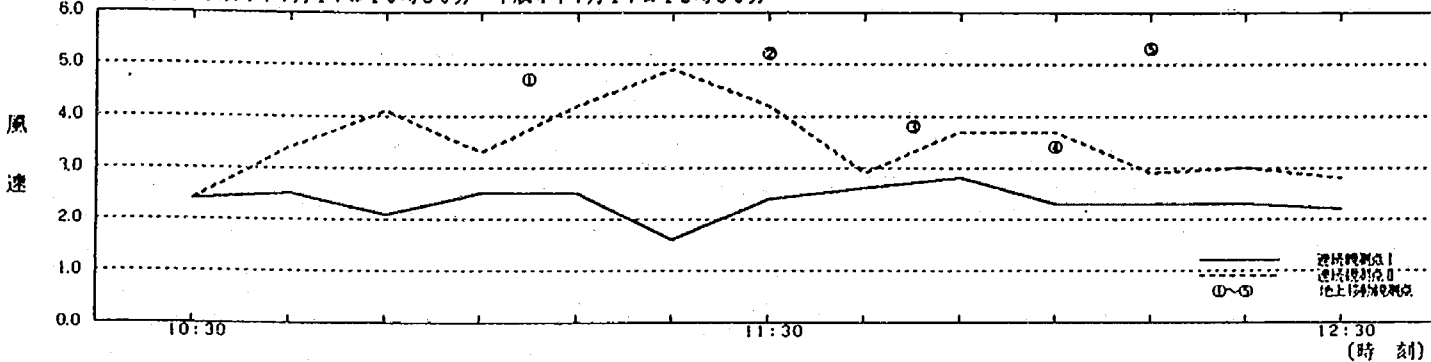


図3-3-2(c) 地上移動観測時の経時変化【相対湿度】

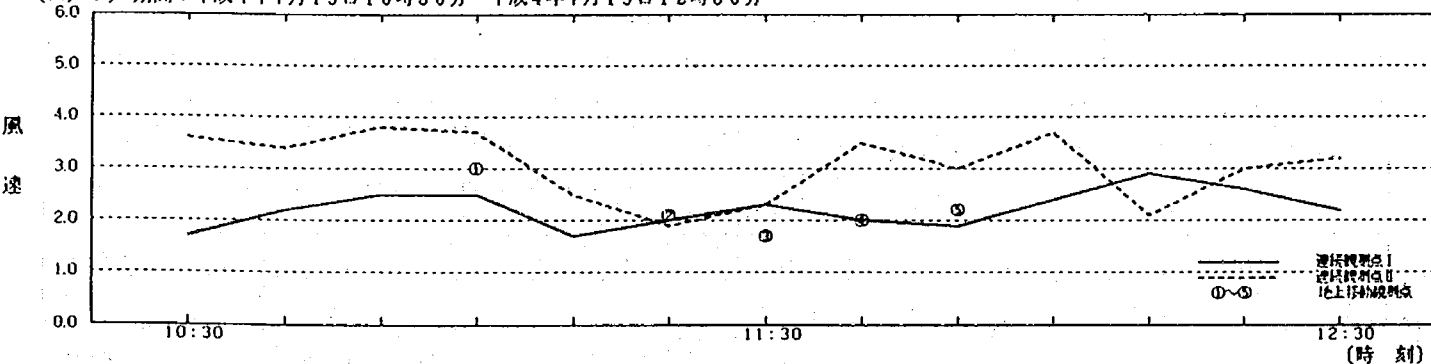
(m/s) 期間：平成4年7月16日10時30分～平成4年7月16日12時30分



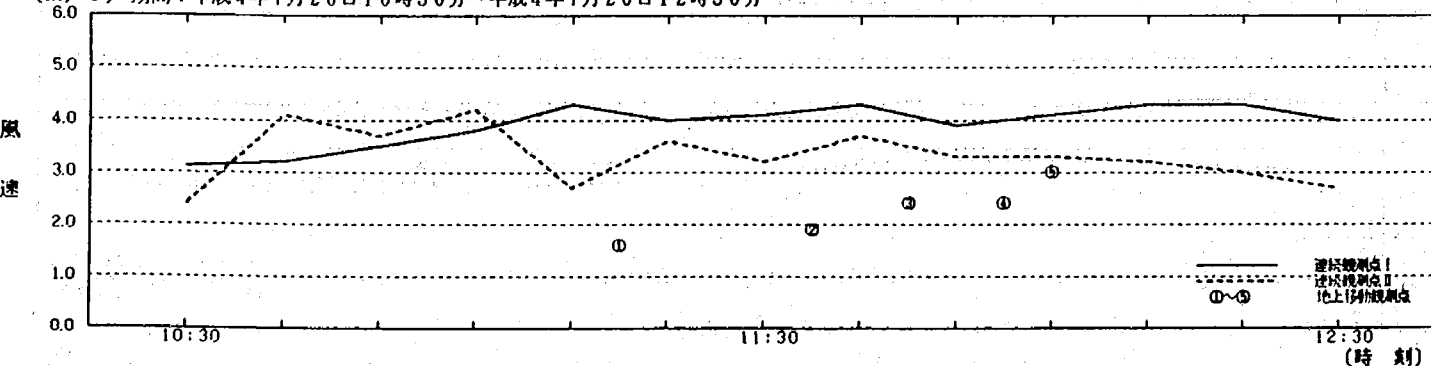
(m/s) 期間：平成4年7月17日10時30分～平成4年7月17日12時30分



(m/s) 期間：平成4年7月19日10時30分～平成4年7月19日12時30分



(m/s) 期間：平成4年7月20日10時30分～平成4年7月20日12時30分



(m/s) 期間：平成4年7月21日10時30分～平成4年7月21日12時30分

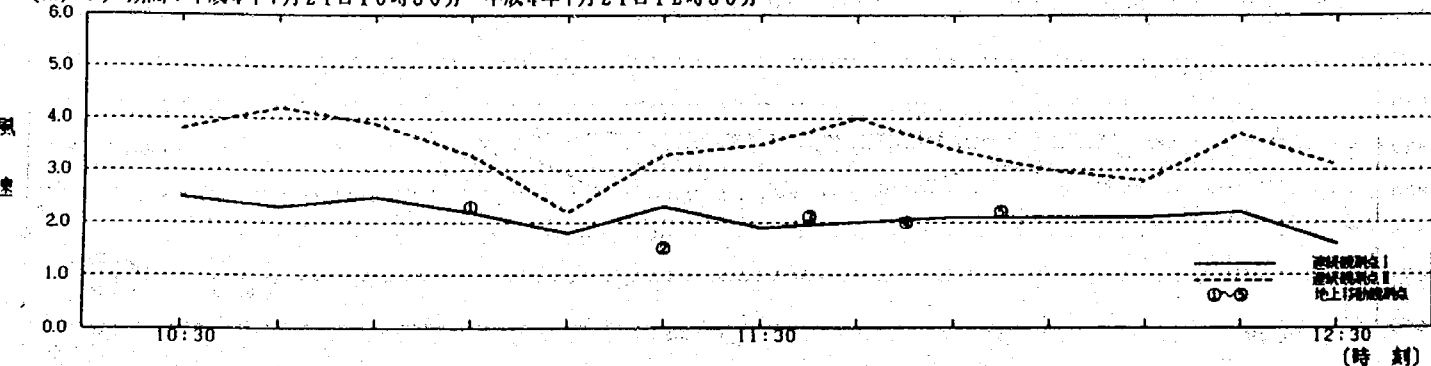
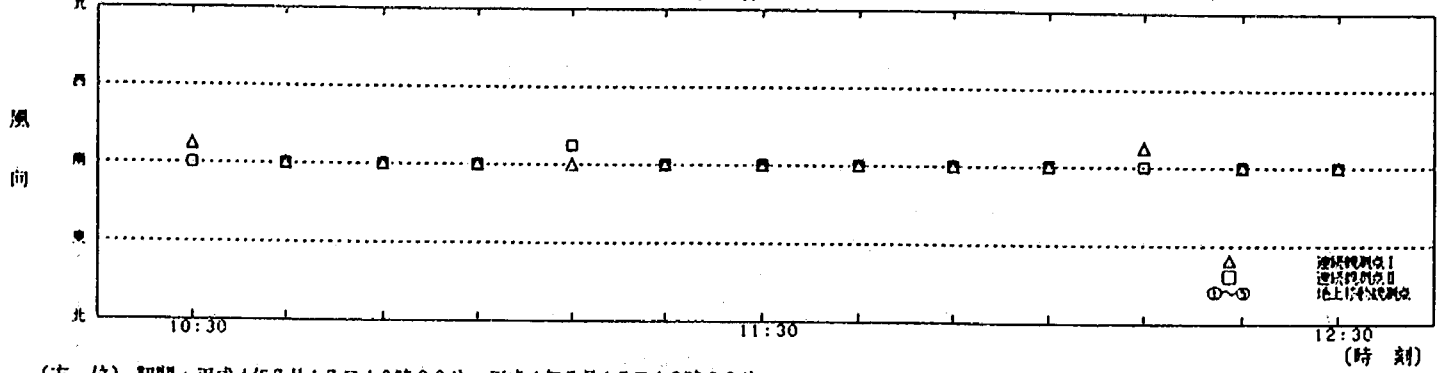
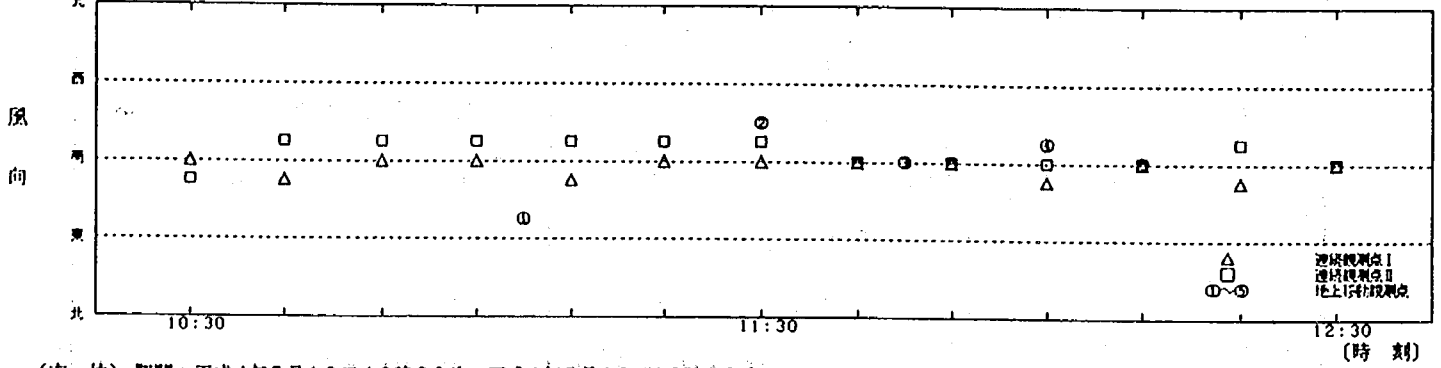


図3-3-2(d) 地上移動観測時の経時変化【風速】

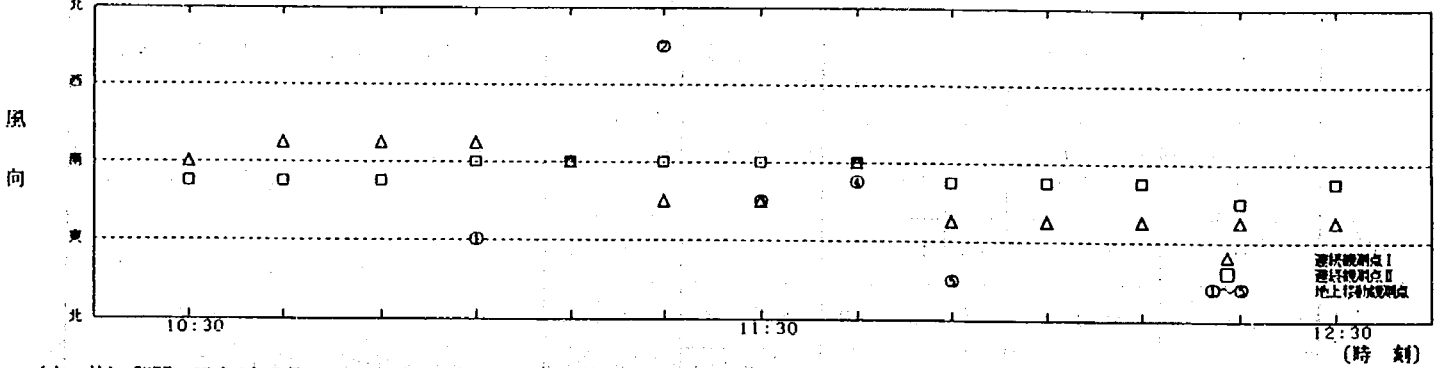
(方 位) 期間：平成4年7月16日10時30分～平成4年7月16日12時30分



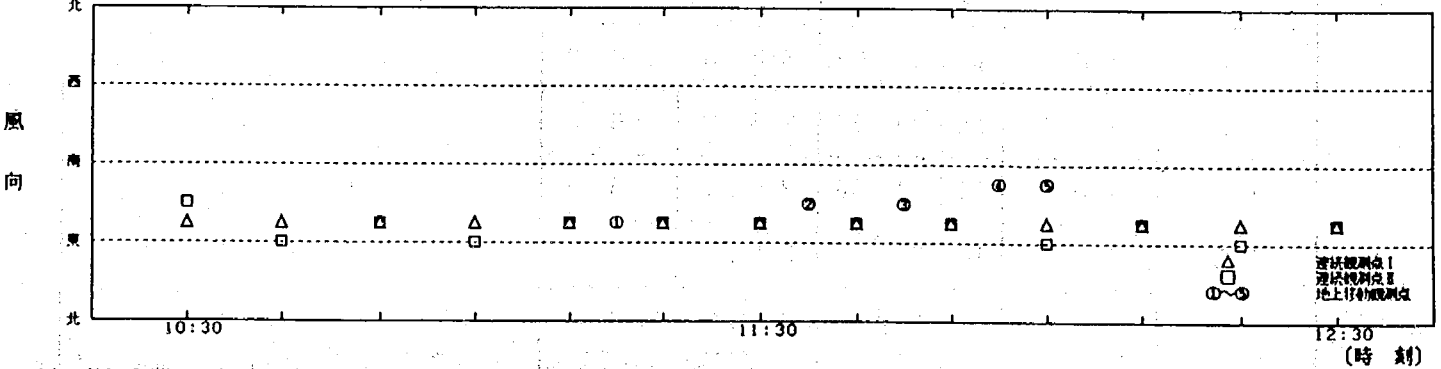
(方 位) 期間：平成4年7月17日10時30分～平成4年7月17日12時30分



(方 位) 期間：平成4年7月19日10時30分～平成4年7月19日12時30分



(方 位) 期間：平成4年7月20日10時30分～平成4年7月20日12時30分



(方 位) 期間：平成4年7月21日10時30分～平成4年7月21日12時30分

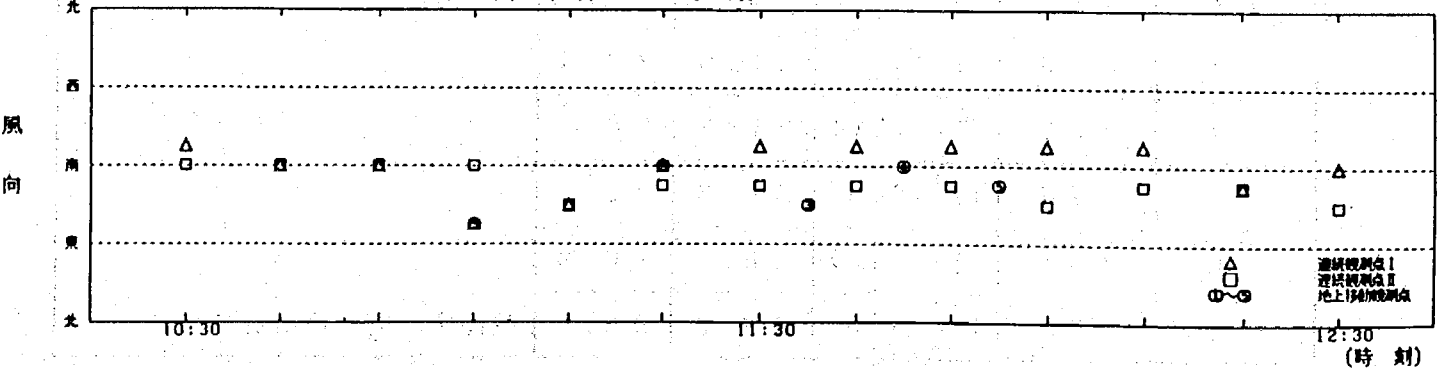


図3-3-2(e) 地上移動観測時の経時変化【風向】

表3-3-2 ダム湖面蒸発量観測調査（沖縄県福地ダム）特別観測

《 湖上移動観測 》

観測実施日時		7月17日 13:56~14:44			天気	晴れ	ソノデセンサ-NO.	乾球3742 湿球H6675
ポイント 地点 NO.	テ ー プ カウ ン ト	通 過 時 間			ア ス マ ン		記 事	
		時	分	秒	乾球(℃)	湿球(℃)		
1	0 0 0	13	56	00	—	—	連続観測1地点にてボートを 停止して3分間定点測定。	
2	—	13	58	00	—	—		
2	0 8 0	14	01	00	2 8 . 4	2 5 . 8		
3	1 3 8	14	05	30	2 8 . 3	2 5 . 9		
4	1 7 0	14	07	30	2 8 . 5	2 5 . 3	NO.5~NO.7まで この間、ソノデ湿球の乾きに 注意。	
5	2 2 6	14	11	00	2 8 . 4	2 6 . 1		
6	2 8 0	14	14	00	2 8 . 8	2 6 . 3		
7	3 3 3	14	16	30	2 8 . 7	2 6 . 1		
8	0 0 0	14	18	00	—	—	収録テープ、交換し再スタート	
9	0 4 6	14	22	00	2 8 . 9	2 6 . 3		
1 0	0 9 0	14	25	30	2 8 . 9	2 6 . 2		
1 1	1 0 9	14	26	30	2 8 . 8	2 6 . 1		
1 2	1 2 2	14	28	00	2 8 . 8	2 6 . 3	観測中、全て直射有り。	
1 3	1 3 8	14	29	00	2 8 . 9	2 6 . 3		
1 4	1 5 7	14	30	30	2 9 . 1	2 6 . 4		
1 5	1 7 4	14	31	30	2 8 . 9	2 6 . 1		
1 6	1 9 1	14	33	00	2 8 . 9	2 6 . 4		
1 7	2 1 3	14	34	30	2 8 . 8	2 6 . 2		
1 8	2 3 0	14	35	30	2 8 . 9	2 6 . 3		
1 9	2 5 3	14	37	00	2 9 . 2	2 6 . 6		
2 0	2 7 7	14	38	30	2 8 . 8	2 6 . 4		
2 1	3 5 1	14	42	30	2 8 . 8	2 6 . 2		
2 2	3 7 3	14	43	30	2 8 . 9	2 6 . 2		

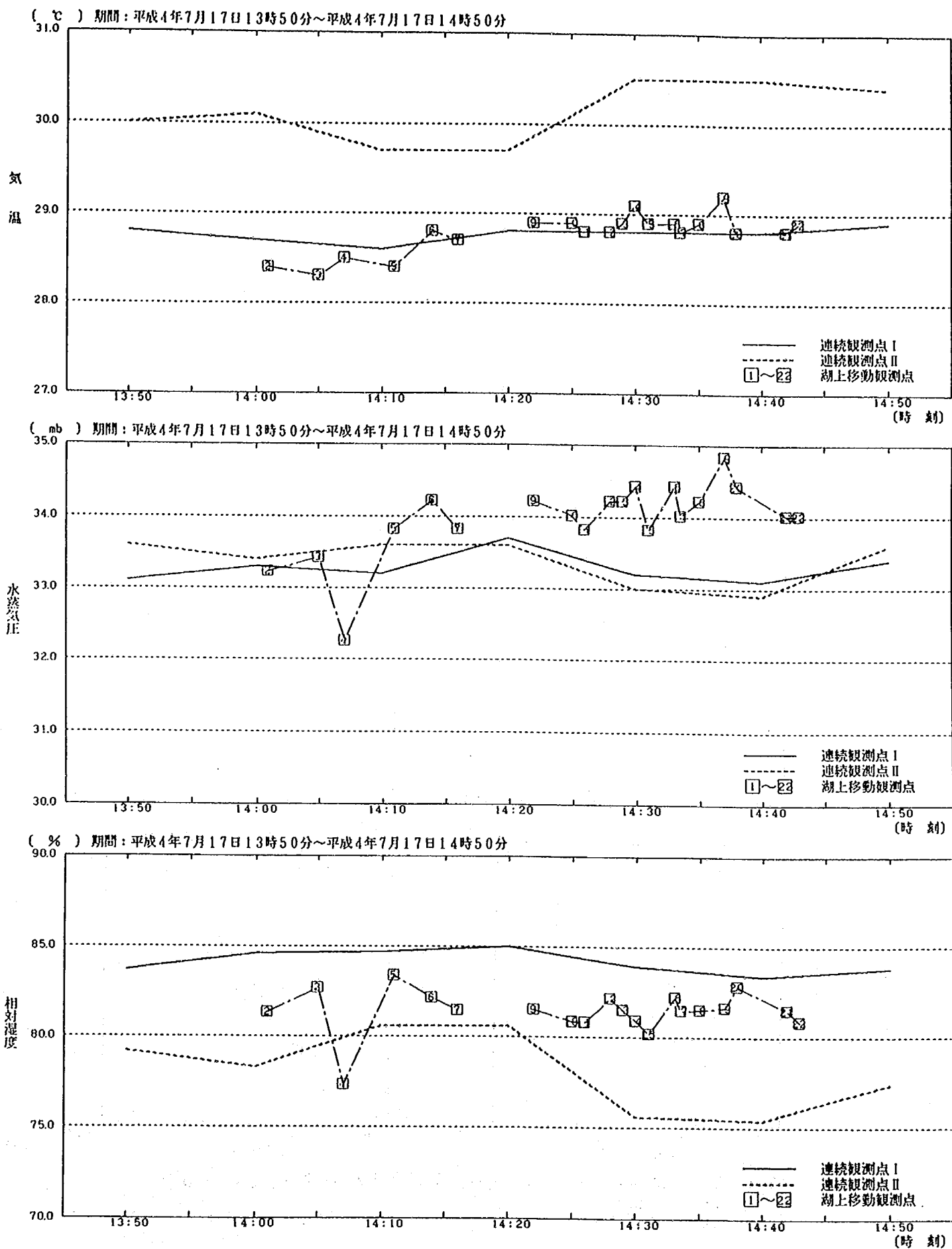


図3-3-3 湖上移動観測時の経時変化

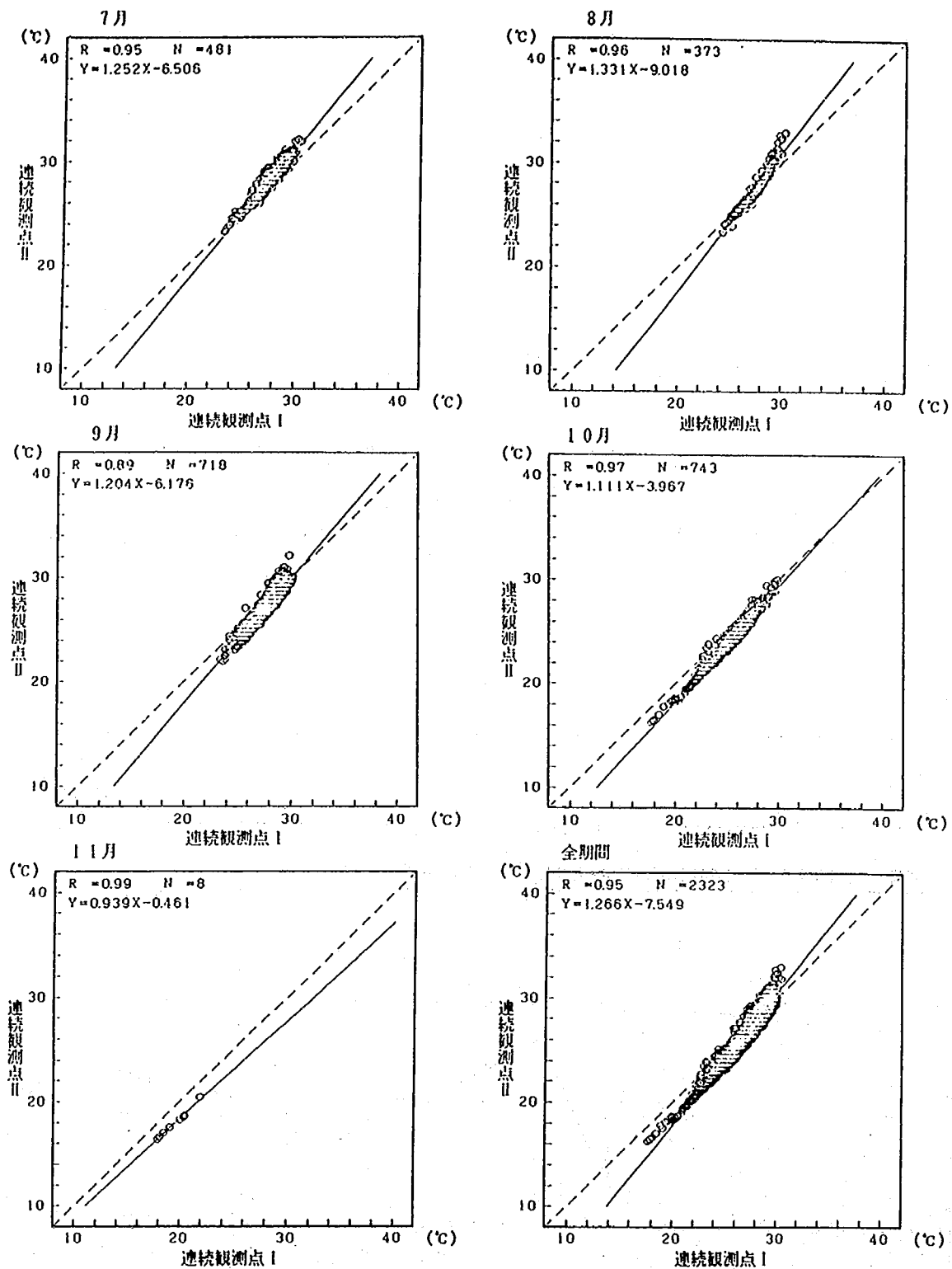


図3-3-4(a) 1992年連続観測点 I と連続観測点 II における気温の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数

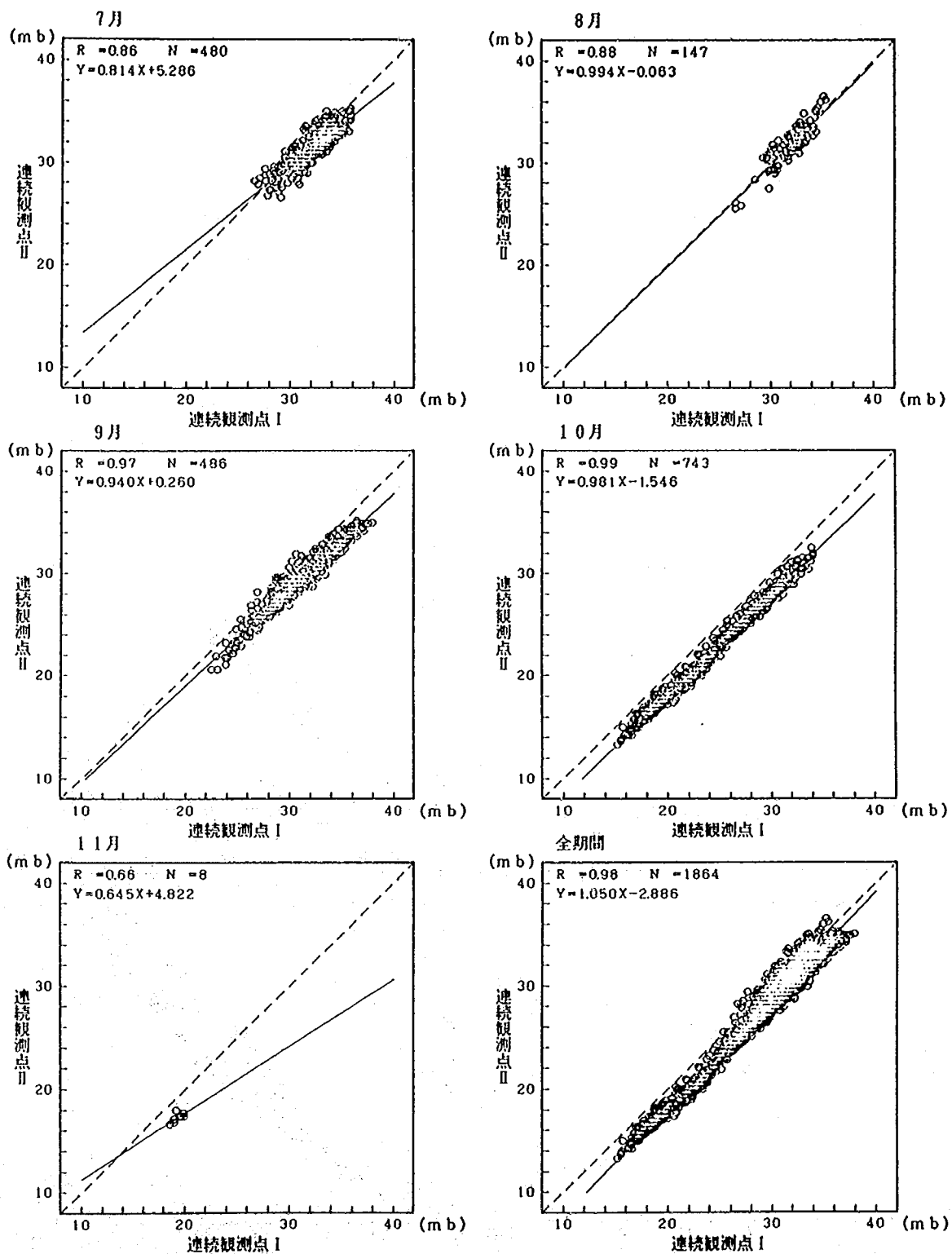


図3-3-4(b) 1992年連続観測点 I と連続観測点 II における水蒸気圧の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数
8月22日から9月10日18時までのデータは除外する。

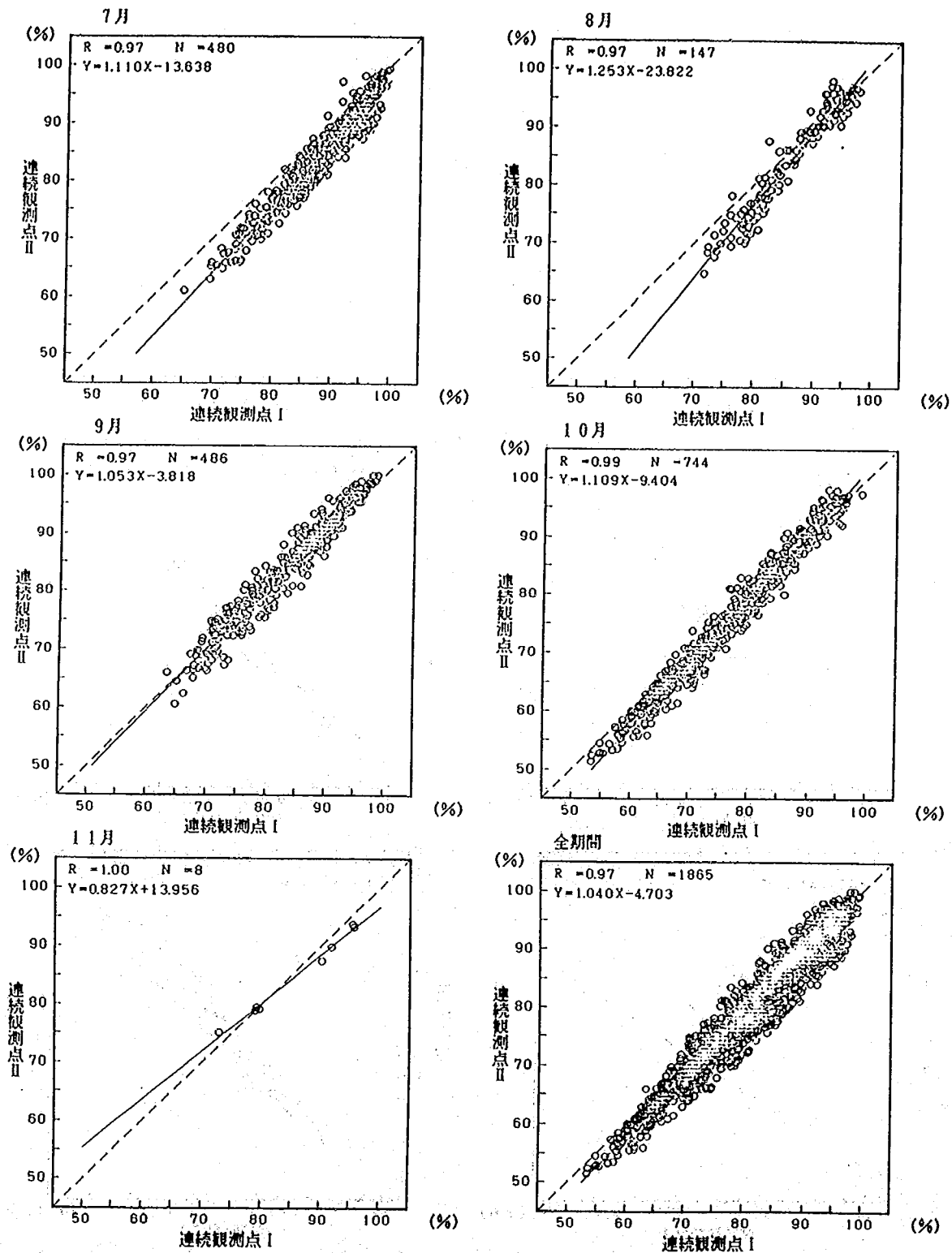


図3-3-4(c) 1992年連続観測点 I と連続観測点 II における相対湿度の散布図

R は相関係数 8月22日から9月10日18時までのデータは除外する。
N はデータ数

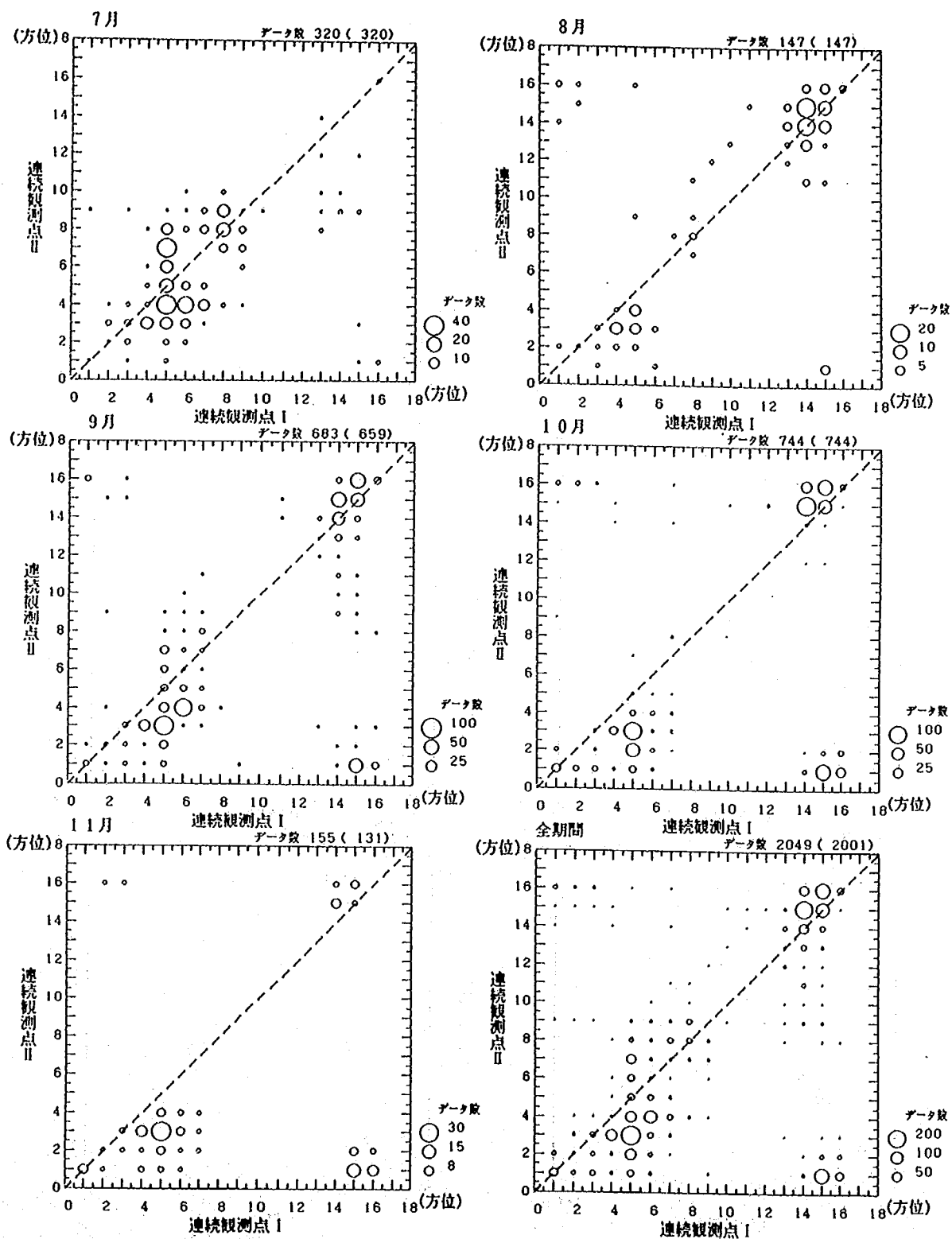


図3-3-4(d) 1992年連続観測点 I と連続観測点 II における風速の散布図

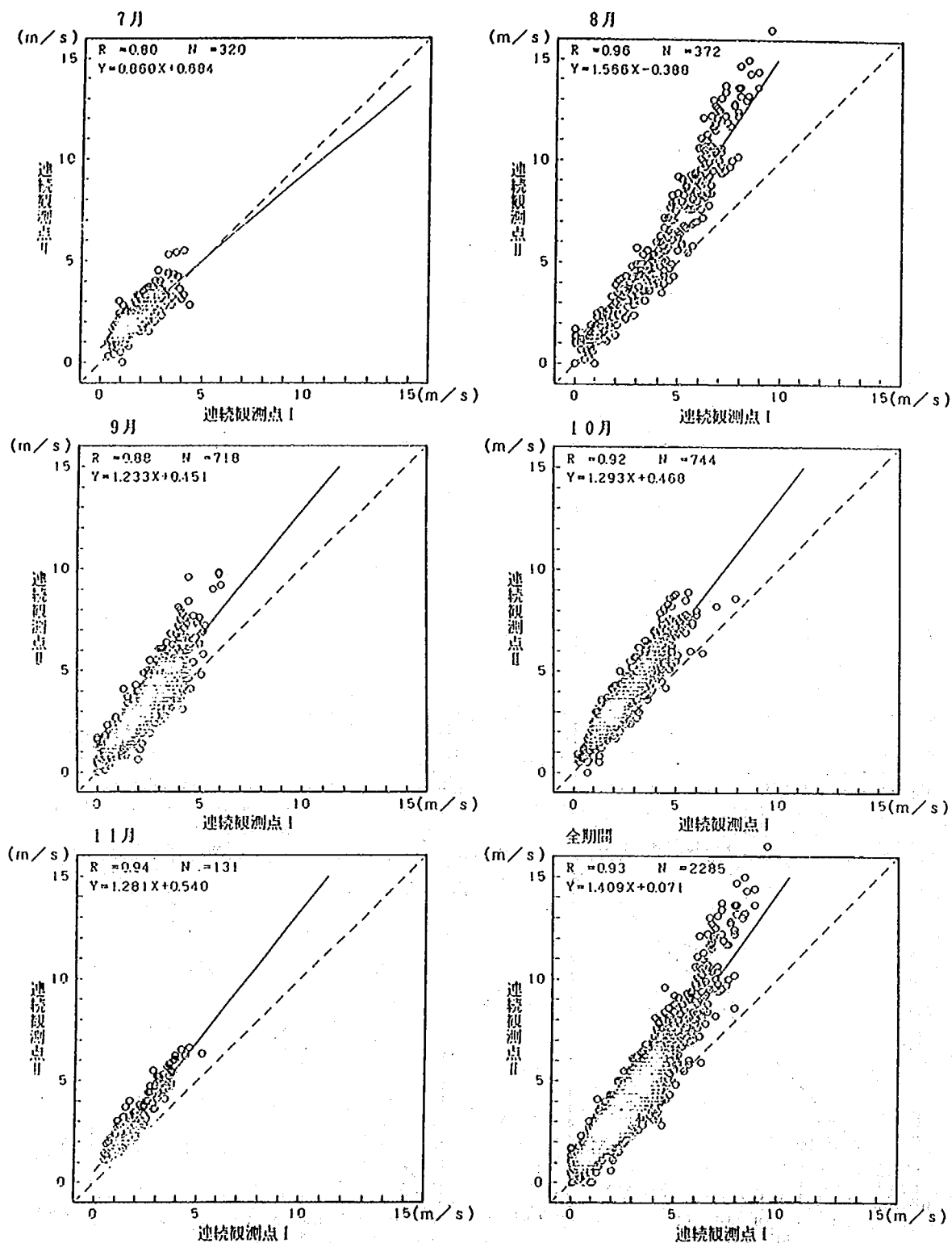


図3-3-4(e) 1992年連続観測点 I と連続観測点 II における風向の散布図

Rは相関係数
Nはデータ数

3.4 湖面蒸発量のモデル化と年蒸発量の推定

3.4.1 湖面蒸発量のモデル化

今後の水管理に資するため福地ダムの管理事務所で観測を行っている気象データから蒸発量を推定できるモデルを作成した。モデルの作成にあたって、蒸発量と蒸発量の増減に影響のある気象要素との相関関係をみた。(図3-4-1～図3-4-4)

図より、風速との正の相関、湿度との負の相関が高いことが分った。したがって推定モデルには、この風速と湿度を取り込むこととし重回帰分析を行った。非説明変数は毎時の蒸発量(7月のデータ)、説明変数は毎時の気象データである。

以下、重回帰式を示す。

$$E_H = A_0 + A_1 \cdot W_s + A_2 \cdot T_E + A_3 \cdot H_u + A_4 \cdot Q_D \quad (9)$$

E_H : 蒸発量(mm/時) , W_s : 風速(m/s)

T_E : 気温(℃) , H_u : 湿度(%)

Q_D : 水蒸気圧差(水温での飽和水蒸気圧－空気中の水蒸気圧:mb)

$A_0 = -3.67 \times 10^{-2}$, $A_1 = 3.77 \times 10^{-2}$

$A_2 = 9.34 \times 10^{-3}$, $A_3 = -3.71 \times 10^{-3}$

$A_4 = 1.36 \times 10^{-2}$

(相関係数: 0.90 , 標準誤差: 0.04(mm/時))

各気象要素に掛かる係数をみると、風速は正、気温は正、湿度は負そして水蒸気圧差は正となっており現象を正しく反映(風速が大きくなると蒸発量は増加する。気温が高くなると蒸発量は増加する。水蒸気差が大きくなると蒸発量は増加する。湿度が高くなると蒸発量は減少する。)することができると考えられる。図3-4-5にこの重回帰式で推定した蒸発量と蒸発量の観測値(全て重回帰式作成に用いたデータ)との関係を示した。

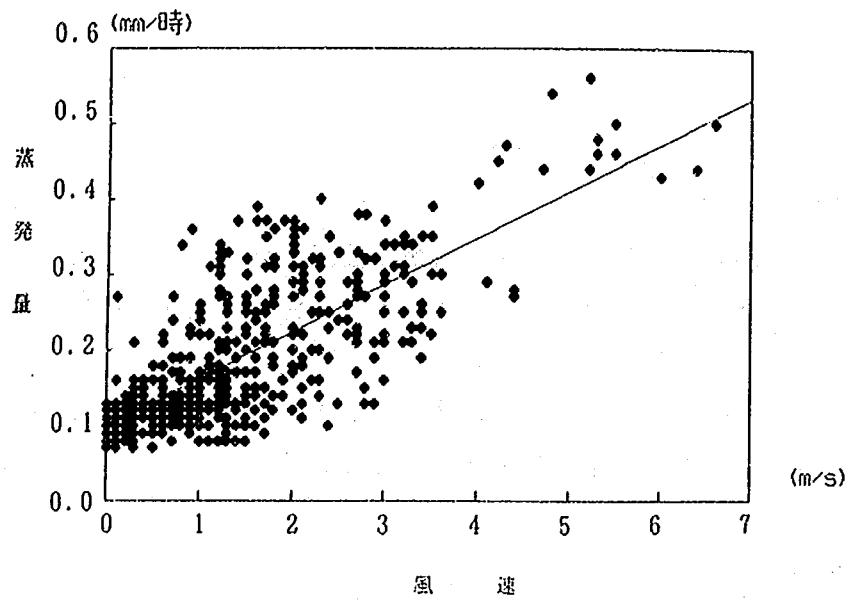


図3-4-1 風速(毎時)と蒸発量(ハル法:毎時)との関係

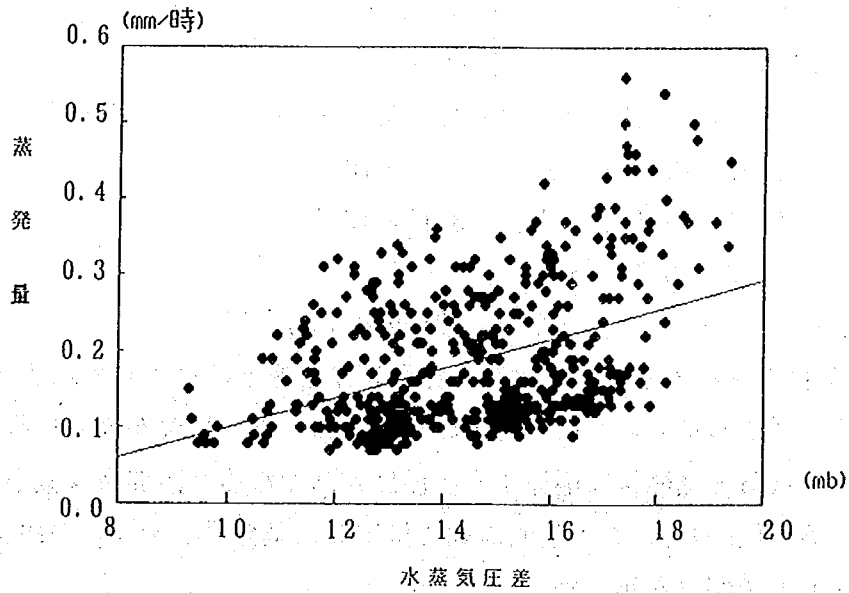


図3-4-2 水蒸気圧差(湖面温度での飽和水蒸気圧-大気中の水蒸気圧:毎時)と蒸発量(ハル法:毎時)との関係

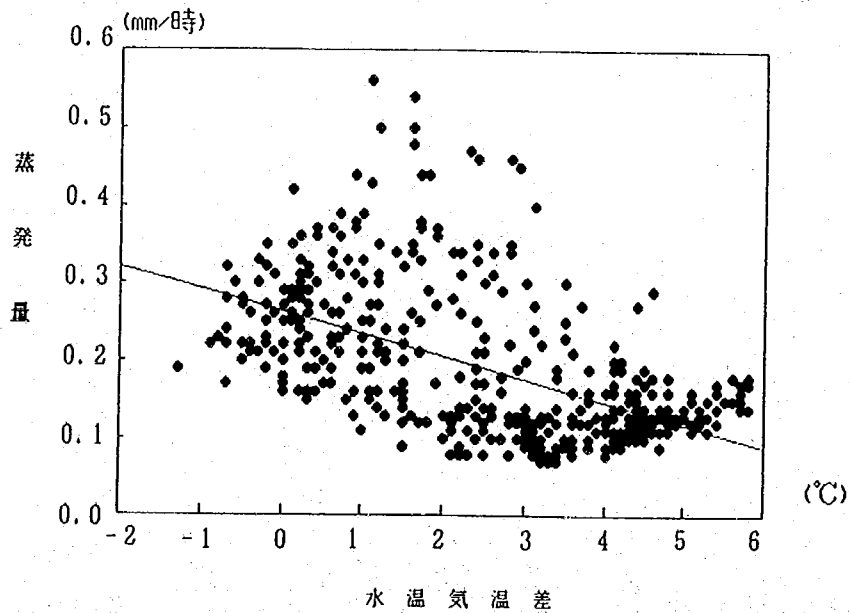


図3-4-3 水温気温差(湖面の表面水温-気温:毎時)と蒸発量(ハル法:毎時)との関係

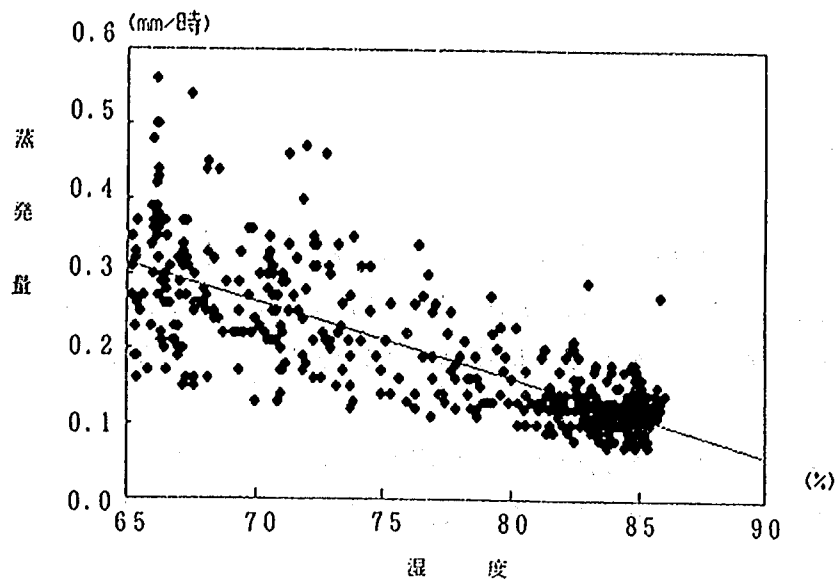


図3-4-4 湿度(毎時)と蒸発量(ハル法：毎時)との関係

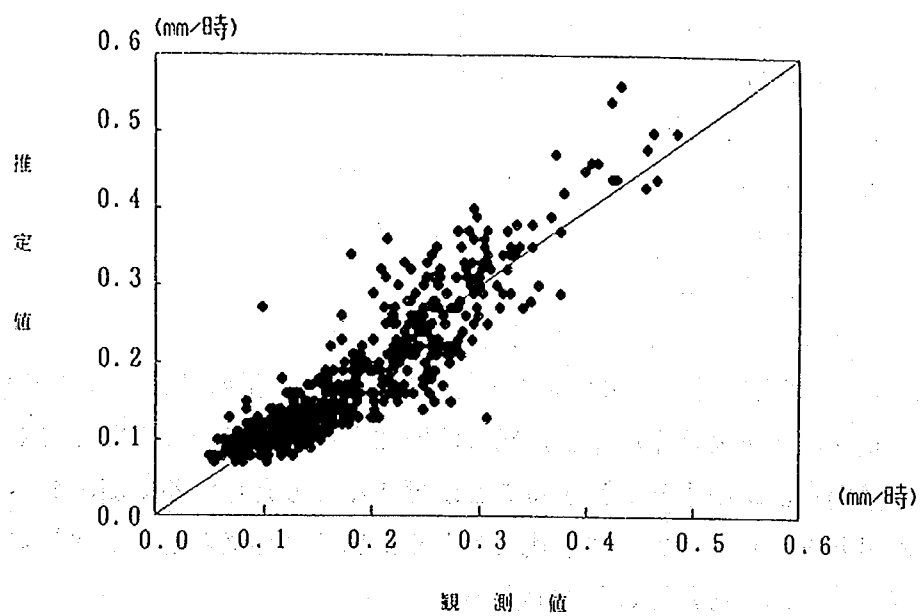


図3-4-5 蒸発量の観測値(ハル法)と推定値との関係

3.4.2 年蒸発量の推定

1) 年蒸発量

ダム湖の年蒸発量がどのくらいになるかを把握することは、水管理の上で重要である。基本的には、3.4.1の重回帰式から年蒸発量を推定することができるが、この式は毎時データから蒸発量を求める式である。1年間の気象データとしては日単位（9時日界）であるため現時点では(9)式では算出できない。

そこで、特別観測データから日蒸発量（9時日界）を計算し、このデータと福地ダムの気象データ（日単位（9時日界））から推定式を作成し湖面蒸発量を推定することにした。

以下に、重回帰式を示す。

$$E_D = A_0 + A_1 \cdot W_s + A_2 \cdot T_E + A_3 \cdot H_u + A_4 \cdot Q_D \quad (10)$$

E_D : 蒸発量(mm/日) , W_s : 風速(m/s)

T_E : 気温(℃) , H_u : 湿度(%)

Q_D : 比湿差(g/kg)

$$A_0 = -3.13 \quad , \quad A_3 = -1.12 \times 10^{-2}$$

$$A_1 = 9.07 \times 10^{-1} \quad , \quad A_4 = 5.83 \times 10^{-1}$$

$$A_2 = 7.15 \times 10^{-2}$$

(相関係数: 0.87 , 標準誤差: 0.7(mm))

3.4.1と同様に各気象要素に掛かる係数をみると、風速は正、気温は正そして湿度は負となっており現象を正しく反映（風速が大きくなると蒸発量は増加する。気温が高くなると蒸発量は増加する。湿度が高くなると蒸発量は減小する。）することができると考えられる。表3-4-1に(10)式から推定した福上湖の蒸発量とを示した。表には、比較のため那覇の蒸発量と那覇、名護の降水量を示した。蒸発量は年降水量1/2～1/3にあたることがわかる。

表3-4-1 蒸発量の推定値と観測値（1992年）

単位: mm

月		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
蒸 発 量	推定値	40	25	18	46	72	68	123	149	110	125	81	30	886
	実測値							140		91	131			
	那 覇	33	35	52	64	82	98	134	113	92	74	47	39	863
降 水 量	名 護	136	209	268	245	115	292	68	443	127	227	127	96	2353
	那 覇	139	259	207	226	97	195	65	376	60	63	114	96	1897

2) 福上湖の年蒸発量の特徴

次に、福上湖から蒸発量の特徴について検討を行った。図3-4-6に湖の深さ別による湖面蒸発量の年変化図を示した。また、図3-4-7には、ここで推定を行った福上湖の蒸発量と比較のため那覇、琵琶湖での蒸発量を示した。図中の(a)は十和田湖(平均水深80m)、(b)は野尻湖(平均水深21m)、(c)は霞ヶ浦(平均水深3m)そして、(d)は鹿児島地方気象台にある大型蒸発計(直径120cm)であり、それぞれ深い湖、中深湖、浅い湖、そして浅い水体に相当する。また参考のため表3-4-2に水深別の蒸発量を示した。

図3-4-7の那覇は浅い水体からの蒸発量であり図3-4-6の(d)(=年変化が7月を最高、1月を最低にしたサインカーブとなる)に対応する。また、琵琶湖は、平均水深が40mであることから深い湖からの蒸発量であり図3-4-6の(a)と(b)の中間(=年変化が9、10月を最高、3、4月を最低にしたサインカーブとなる)に対応する。実際、蒸発量の年変化を比較してみると良く対応していることがわかる。ここで、福上湖の蒸発量の年変化をみると、(b)(=年変化が8、9月を最高、2、3月を最低にしたサインカーブとなる)の中深湖の年変化に似ていることがわかる。福地ダムは、最大水深が80m程度であり、平均水深も20m~40mと推察できることから水深(表3-4-2)からみても中深湖に相当するものと考えられる。

表3-4-2 日本の主な湖の年間蒸発量と年間ボーエン比⁷⁾

湖 名	平均気温 (C)	平均水深 (m)	蒸発量 (mm)	ボーエン比 (H/IE)
深い湖 ^{**}	5.0	60 [*]	449	0.88
屈斜路湖	3.5	160 [*]	418	1.03
摩周湖	6.0	244	510	0.70
支笏湖	7.3	115	512	0.56
洞爺湖	7.3	80 [*]	549	0.61
倶多楽湖	8.0	80	756	0.60
十和田湖	9.2	227	698	0.56
猪苗代湖	10.1	50	549	0.51
沼沢湖	10.1	65	686	0.47
中禅寺湖	5.4	95	571	0.81
本栖湖	9.6	60 [*]	785	0.42
琵琶湖	13.6	40 [*]	754	0.35
池田湖	16.3	160 [*]	828	0.31
中深湖 ^{**}				
野尻湖	8.7	21	617	0.41
水月湖	14.1	20 [*]	919	0.25
河口湖	10.1	10	891	0.33
芦ノ湖	10.9	25	912	0.38
浜名湖	15.1	10 [*]	1039	0.17
浅い湖				
厚岸湖	5.2	3 [*]	450	0.36
鷹架沼	9.4	3 [*]	727	0.21
伊豆湖	10.9	3	636	0.29
霞ヶ浦	13.7	3	850	0.27
諏訪湖	9.1	4	635	0.37
穴道湖	13.8	3 [*]	889	0.26

^{*}は、概略値

^{**}Yamamoto et al., 1972による。

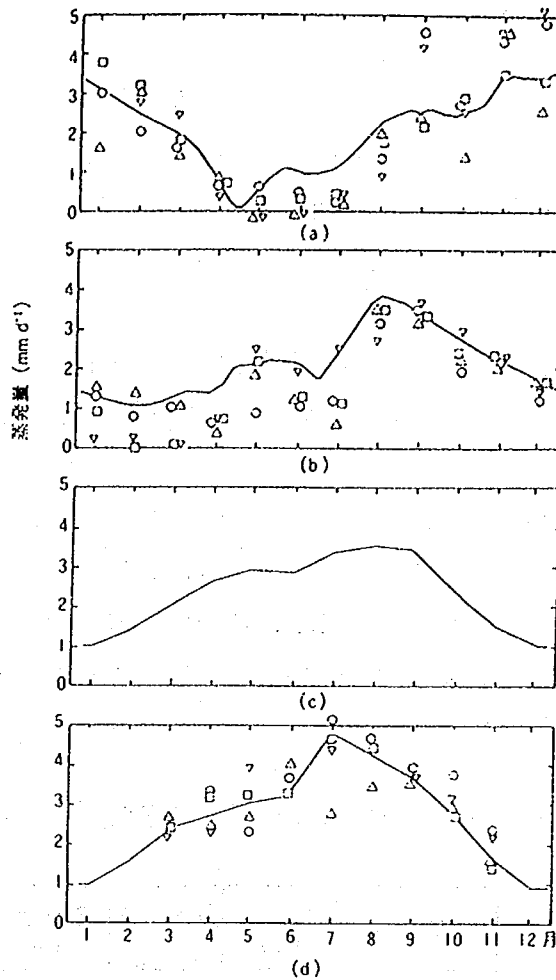


図3-4-6 蒸発量の年変化¹⁾ (a)十和田湖, (b)野尻湖, (c)霞ヶ浦
(d)鹿児島 of の直径120cm蒸発計 (各記号は観測値, 実線は計算値)

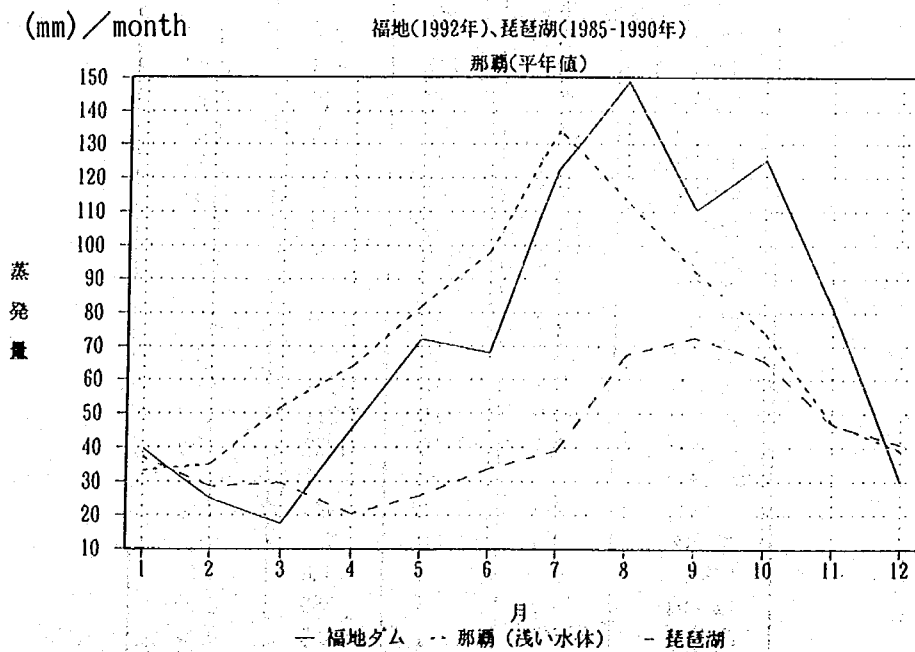


図3-4-7 福上湖における湖面蒸発量の年変化図

3.5 湖面蒸発量と流域からの蒸発散量の比較

沖縄総合事務局北部ダム統合管理事務所で、昭和62年度から63年度にかけてライシメータ法より地表面からの蒸発量が、ヒートパル法により森林からの蒸散量が観測されている。その結果によると、蒸発量が約500mm、蒸散量が約450mmで流域からの蒸発散量は約950mmに達している。本検討で得られた湖面からの年蒸発量の推定値は、900mm弱であり、対象手法が異なるため単純に比較はできないが、湖面からの蒸発量は、概ね等しいかやや少ない程度であろうと思われる。よって水循環をマクロにみた場合、損失という観点からは、流域森林と貯水池水面を区別して取り扱う必要はないと思われる。

3.6 貯水池年流入量と湖面蒸発散量

福上湖への流入量は、平成4年8月平均 $4.35\text{m}^3/\text{s}$ 、最小 $1.32\text{m}^3/\text{s}$ であった。日総流入量に換算すると平均で $375,840\text{m}^3$ 、最小で $114,048\text{m}^3$ となる。今回の観測によると8月の湖面からの日蒸発量は、5mm程度であり湛水面積を乗じると湖面からの日蒸発量は、 $12,700\text{m}^3$ になる。日総流入量との比をみると、対平均値で3.39%、対最小値で11.14%となる。したがって最大では、日流入量の1割の湖面からの日蒸発量が見込まれる。実際、日流入量は、貯水位の変動量と放流量の合計値として算出されており、湖面からの蒸発量は、貯水位の変動量に含まれる事になる。よって流入量は、湖面蒸発量に相当する量だけ過小に評価されている事になる。例えば8月の月蒸発散量は、149mm（約 $0.14\text{m}^3/\text{s}$ ）であるため、その分を観測流入量に上乗せすると実際の8月の平均流入量は、 $4.49\text{m}^3/\text{s}$ であった事がわかる。

第Ⅳ章 調査結果のまとめ

福上湖における、湖面蒸発量の評価を行った。蒸発量の評価方法としてバルク法を用いた。観測期間は1992年7月～1992年11月であった。ただ、バルク法により蒸発量を評価するためにはバルク係数を決定する必要がある、特別観測期間を設け渦相関法で蒸発量の真値を評価することにより決定した。

バルク係数は、弱風域（風速1 m/s以下）では、風速の低下に伴い急激に大きくなった。一方、弱風域以外（風速1 m/s以上）では、風速の変化に関係なくほぼ 2.6×10^{-3} 前後の値を示していた。バルク係数は、風速の関数で表現できた。

観測地点のデータから蒸発量を評価し、議論するにあたって注意すべきこととして観測地点の代表性の問題があった。これに対し、特別観測期間中湖上と周辺地域での移動観測を行い、気温、水蒸気圧の面的比較を行うことによって検討を行った。湖面上において、気温、水蒸気圧とも面的に一様であり、また、その時間変化も面的に変化していた。このことから、観測地点での気象データは湖面上を代表する値と考えられ、このデータから求めた湖面蒸発量は面的な代表値といえる。

観測期間中の蒸発量は、100mm/月～140mm/月の範囲であった。この値は、沖縄（那覇）における浅い水体からの蒸発量の平年値より少し多い程度であった。

福地ダムの管理事務所で観測を行っている気象データから蒸発量（毎時値）を推定できるモデル（重回帰式）を作成した。相関係数：0.90，標準誤差：0.04(mm/時)であった。

福上湖の年蒸発量の推定を行った。年蒸発量としては約900mmで年降水量の1/2～1/3に相当することがわかった。また、福上湖の蒸発は水体として中深湖からの蒸発と位置づけることができた。また、別途観測された流域森林から蒸発散量と比較すると概ね同じ程度であることが分かった。さらに、8月の貯水池水位から算出した流入量と湖面蒸発量を比較すると湖面蒸発量は流入量の3%強を占める事が分かった。

参考文献

- 1) オーク境界層の気候：朝倉書店
- 2) 水の気象学：東京大学出版会
- 3) 身近な気象の科学：東京大学出版会
- 4) 近藤純正・桑形恒男：日本の浅い水面からの蒸発量，水文・水資源学会1992年度研究発表会要旨集，pp. 204～pp. 207，1992．
- 5) 身近な気象の科学：近藤純正
- 6) 近藤純正・桑形恒男：日本の水文気象(1)：放射量と水面蒸発，水文・水資源学会誌，VOL. 5 NO. 2，pp. 13～pp. 27，1992．
- 7) 大気科学講座 1 地表に近い大気：東京大学出版会

福上湖湖面蒸発量
観測調査解析報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3251号
平成6年1月(1994)

高須修二, 廣瀬昌由, 松山兼二

要旨

流域の水循環を考える上で、蒸発散量を把握する事は非常に重要な課題である。本報告書は、その内、貯水池湖面からの蒸発量を把握するために沖縄総合事務局福地ダム貯水池である福上湖で夏期に蒸発量の観測を行い、その結果についてとりまとめたものであり、
(1) 湖面蒸発量の算出法の検討(渦相関法, バルク法)
(2) 湖面蒸発量のモデル化と年蒸発量の推定
(3) 湖面蒸発量, 貯水池流入量, 流域からの蒸発散量それぞれの比較検討等について報告するものである。

キーワード: 福地ダム, 福上湖, 湖面蒸発量, 渦相関法, バルク法



郵便はがき

郵便切手
はって
下さ
い

3 0 5 -

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
水工水資源研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3251号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印