

NOAA / AVHRR データと可降水量

中村 真^{*1}, 木下紀正^{*2}, 飯野直子^{*3}
幸野淳一^{*4}, 菊川浩行^{*1}

NOAA / AVHRR Data and the Amount of Precipitable Water

Makoto Nakamura^{*1}, Kisei Kinoshita^{*2}, Naoko Iino^{*3},
Jun-ichi Kohno^{*4}, and Hiroyuki Kikukawa^{*1}

Keywords : NOAA / AVHRR, Precipitable water, Water vapor, Split window method, Brightness temperature difference

Abstract

Using the upper layer air meteorological data at Kagoshima and Naze, the amount of precipitable water was estimated, and then it was compared with the NOAA / AVHRR channel 4-5 CCT value. The regression line was found as precipitable water (kg/m^2) = $0.8854 (\text{ch4} - \text{ch5}) + 3.3961$ with a regression coefficient of 0.845, and was significant for 99% confidence level. Thus the NOAA / AVHRR channel 4-5 CCT value can be used to estimate the amount of precipitable water.

衛星データを用いて水蒸気量や可降水量を求める試みにはいくつかの方法がある。TRMM 衛星はまさに降雨そのものを観測する。また、GPS に与える水蒸気量の影響を逆に利用して、GPS データの大気遅延量から水蒸気量を求める試み¹⁾がなされていて、日本列島における3時間ごとの水蒸気量の分布がインターネットで公開²⁾されている。しかし、海上の水蒸気量を知りたい場合にはGPSを利用することはできない。また、海洋観測衛星MOS-1に搭載されている可視熱赤外放射計(VTIR)の第2, 4波長帯や^{3,4)}静止気象衛星GMSによっても⁵⁾ある程度の水蒸気量の評価が可能であることが報告されている。GPS やいろいろな衛星によってそ

れなりに水蒸気量をもとめることはできるが完全なものはない。この論文ではアメリカ海洋大気庁の戦略の1つとなっている気象観測衛星NOAAによる水蒸気量評価の可能性を探り、衛星による水蒸気量評価の多様性を高めることを目的とする。

1995年に鹿児島大学連合大学院にNOAAの受信・解析システムが設置された。NOAA衛星の改良型高分解能放射計(AVHRR)のデータから水蒸気量を推定できれば、1日に4回以上の観測が可能で、海上でも利用できて都合がよい。NOAA衛星データから水蒸気量を推定する方法としては、channel 5の方がchannel 4よりも水蒸気による吸収が大きいことを用いる。channel 4

*1 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

*2 鹿児島大学教育学部物理学講座 (Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University, 20-6 Korimoto 1, Kagoshima, 890-0065 Japan)

*3 鹿児島大学工学部機械工学科 (Department of Machinery, Faculty of Engineering, Kagoshima University, 21-40 Korimoto 1, Kagoshima, 890-0065 Japan)

*4 鹿児島県環境技術協会 (Kagoshima Environmental Research and Service, Masago-cho 2-7, Kagoshima, 890-0066 Japan)

と channel 5 の CCT 値 (CCT は Computer Compatible Tape の略) の差 (channel 4 - channel 5, 今後 ch45 とする) が水蒸気量と関係していることは一般に受け入れられているが, 文献⁶⁾は少ない。ここでは, 鹿児島と名瀬の 9:00 と 21:00 の高層気象データから可降水量を計算し, ch45 と比較して互いの関係を明らかにする。

可降水量の算出

本論文で使用した高層気象観測データは, 気象庁によって CD-ROM で刊行された「高層気象観測年報1997年版」である。高層気象観測年報にはレーウィンゾンデ・レーウィン観測資料, 気象ロケット観測資料, 気象観測船資料の3つの資料とその利用プログラムが収録されている。レーウィンゾンデ・レーウィン観測資料は国内の高層気象観測所において実施されているレーウィンゾンデ観測およびレーウィン観測で得られたのものである。レーウィンゾンデは気球につるして飛揚し, 地上から高度約30 km までの気温, 湿度, 風向, 風速等の観測を行う観測機器で, 9時と21時に観測が行われる。レーウィンも同様に3時と15時に飛揚され, 気圧, 風向, 風速の観測を行う。これらの観測は国内20地点 (自衛隊基地を含む), 世界の約900地点で同時に行われる。観測データは即時に世界各国間で交換され, 毎日の天気予報や長期予報に使用されている。この資料は, 指定気圧面資料, 月統計値資料, 気温湿度観測点資料, 風観測点資料, インデックスで構成されており, それぞれバイナリーシークエンシャルファイル形式で月別に収録されている。本論文ではレーウィンゾンデ観測の気温湿度観測点資料を用いて可降水量の算出を行う。

気温湿度観測点資料のうち, 気圧, 気温, 相対湿度を用いる。可降水量 W (kg/m^2) は次式で与えられる。

$$W = \int_0^{\infty} \rho_w(z) dz, \quad (1)$$

$$\rho_w = \frac{100P_w}{R_w T(z)}, \quad (2)$$

$$P_w = e_s(T) \frac{RH}{100}, \quad (3)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{at/(b+t)}, \quad (4)$$

上式で z は高度 (m), $\rho_w(z)$ は水蒸気密度 (g/m^3), $T(z)$ は気温 (K), $t(z)$ は気温 ($^{\circ}\text{C}$), $R_w = R/M_w = 0.4615$ ($\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}$), R は気体定数 ($\text{J}/\text{K} \cdot \text{mol}$), M_w は水の分子量, P_w は水蒸気圧 (hPa), RH は相対湿度(%), e_s は飽和水蒸気圧 (hPa), a, b は定数で, 水では $a = 7.5$, $b = 237.3$, 氷では $a = 9.5$,

$b = 265.3$ である。(2) 式の P_w の前の数字100は P_w が hPa で与えられているので, Pa の単位にするためのものである。飽和水蒸気圧についてはクラウジウス・クラペイルンの式を用いることもできるが, 今回は理科年表の飽和水蒸気圧をより正確に再現するテューテンスの式を採用した。しかし, どちらの式を用いても以下の計算結果にはほとんど差が現われない。

気温湿度観測点資料では気温 T は高度 z の関数としてではなく, 大気圧 p の関数として与えられるので

$$dp = -g dz = -g \frac{p M_{air}}{RT} dz \quad (5)$$

を用いて, (1) 式を以下のように書き換える。

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\infty} \rho_w(z) dz = \int_0^{\infty} \frac{100P_w}{R_w T} dz \\ &= - \int_{P_h}^0 \frac{100e_s RH}{R_w T 100} \frac{RT}{g p M_{air}} dp \\ &= \frac{6.11 M_w}{M_{air} g} \int_0^{P_h} RH(p) 10^{at/(b+t)} \frac{dp}{p} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし, M_{air} は大気分子量, g は重力加速度である。また, P_h は地上の大気圧を表す。

(6) 式の積分には台形公式を用いた。Excel ワークシートの例を Table 1 に示す。衛星データが存在する日の9時と21時の可降水量の計算結果を Table 2 に示す。Table 2 の結果を春季 (3月~6月), 夏季 (7月~9月), 秋季 (10月~12月) に分けて平均の可降水量を見たものを Table 3 に示す。Table 3 を見ると, 可降水量の大きさは夏季, 春季, 秋季の順になっていて, 春季, 秋季では鹿児島よりも名瀬の方が大きく, 夏季は鹿児島の方が大きくなっている。また, 秋季を除いて, 9時の方が21時よりも可降水量が小さい。

衛星データの解析

鹿児島大学大学院連合農学研究科では1997年の春から本格的に NOAA 衛星データのアーカイブが始まった。この論文では1997年3月31日から12月31日までの衛星データを利用し, 「高層気象観測年報1997年版」から求めた可降水量と比較した。この期間の衛星画像で鹿児島を確認できたものは79個あり, 名瀬を確認できたものは39個であった。NOAA 受信システムで受信したデータのキャリブレーションを行った後, 鹿児島と名瀬が入る領域を 1024×1024 ピクセルのサイズで切り出す。切り出したデータを10ビットから16ビットデータに変換し, Visual Basic で書かれた画像解析ソフト⁷⁾を16ビット用に修正して解析を行った。

Table 1 An example of Excel work sheet to calculate precipitable water using Eq.(6) from upper layer air meteorological data

Mw=	18.085	Mw * Pwo / (Mair * g) =		0.3915085			
Mair=	28.8						
g=	9.8						
Pwo=	6.11						
a(ice)=	9.5						
b(ice)=	265.3						
a(water)=	7.5						
b(water)=	237.3						
P(hP)		dP	all(°C)	RH(%)	Tetens		
		16.8					
1024.4	1007.6	41.7	10.3	62	127.17	0.12414158	2.08557857
990.8	965.9	32.9	7.7	69	118.73	0.11983326	4.99704699
941	933	20.5	7.0	56	91.85	0.09761086	3.21139713
925	912.5	19.5	5.7	60	89.97	0.09726026	1.99383541
900	893	17.5	3.6	66	85.43	0.09492511	1.85103972
886	875.5	16.5	2.6	57	68.73	0.07757557	1.35757256
865	859	7.5	5.1	10	14.38	0.01662574	0.27432467
853	851.5	23.5	5.4	10	14.68	0.01721566	0.12911744
850	828	25	5.3	10	14.58	0.01715659	0.40317992
806	803	13	3.0	11	13.65	0.01693131	0.42328279
800	790	50	3.3	11	13.94	0.01742491	0.22652382
780	740	58	4.1	10	13.41	0.01719045	0.85952268
700	682	50	-3.5	12	8.96	0.01279611	0.7421742
664	632	48.5	-6.9	13	7.25	0.01091689	0.54584433
600	583.5	50	-11.0	15	5.82	0.00970528	0.47070605
567	533.5	83.5	-13.9	16	4.77	0.00841935	0.42096731
500	450	56	-22.2	17	2.31	0.00461248	0.38514226
400	394	12.5	-36.5	20	0.61	0.00152565	0.08543627
388	381.5	6.5	-38.4	20	0.49	0.00127187	0.01589833
375			-39.3	20	0.45	0.00118852	0.0077254
							8.02056614

Table 2 Precipitable water at Kagoshima and at Naze calculated from Eq.(6)

	Kagoshima		Naze			Kagoshima		Naze	
	9:00	21:00	9:00	21:00		9:00	21:00	9:00	21:00
Mar. 31	4.980	5.561	15.263	24.167	29	45.982	45.850	36.876	34.526
Apr. 1	4.962	13.715	19.836	28.701	30	39.415	44.387	37.908	37.293
7	10.228	10.602	7.638	10.002	31	42.566	48.940	35.207	37.452
11	13.167	11.616	22.858	14.600	Sep. 1	42.617	48.688	38.341	44.345
19	19.109	16.270	23.758	27.519	10	13.384	23.423	38.919	37.507
20	15.266	25.283	26.180	28.916	11	28.710	34.970	23.527	26.783
24	8.576	14.872	26.154	28.782	17	38.835	35.783	34.498	31.297
25	11.786	7.349	27.478	31.567	18	35.276	33.447	27.169	32.607
26	11.131	18.918	31.451	36.039	Oct. 6	11.169	17.940	16.589	19.024
May. 4	19.716	23.257	16.069	21.233	7	15.656	12.767	27.367	23.939
5	22.831	25.169	25.066	32.381	8	11.046	10.474	21.690	11.434
20	16.745	14.032	17.619	15.931	10	15.779	13.331	23.732	26.558
25	12.625	15.837	11.837	13.550	11	24.552	8.932	16.984	9.303
26	18.255	22.917	16.227	16.852	17	15.722	13.256	25.295	21.501
27	14.748	17.380	18.032	20.318	24	22.062	19.774	27.186	18.952
31	21.326	13.343	16.841	13.304	25	11.554	21.581	15.048	16.489
Jun. 1	11.452	22.365	13.343	14.341	Nor. 5	12.539	11.382	14.585	14.275
30	25.195	38.697	45.226	50.360	6	5.181	9.890	10.319	10.309
Aug. 3	47.117	47.226	43.318	49.163	7	10.692	14.149	9.642	11.564
13	56.011	54.824	45.325	44.337	Dec. 14	5.750	10.166	14.017	15.036
14	43.181	46.622	32.973	36.634	15	12.578	8.162	18.761	26.342
19	51.764	52.768	48.862	45.495	25	6.915	8.920	9.973	15.405
20	45.140	38.842	41.900	54.143	26	9.534	15.192	14.408	16.469
21	40.562	48.838	46.573	53.614	27	10.392	8.694	14.778	12.262
23	39.482	35.722	36.666	37.069	30	15.982	6.998	30.488	15.501
27	42.762	38.065	41.437	50.033	31	4.446	6.314	14.225	18.660
28	37.169	44.438	34.593	41.254					

Table 3 Averaged precipitable water in spring, summer and autumn

	Kagoshima		Naze	
	9:00	21:00	9:00	21:00
Spring	14.561	17.621	21.16	23.809
Summer	40.586	42.52	37.888	40.797
Autumn	12.308	12.107	18.06	16.835

このソフトでは選んだ領域内の各チャンネルの CCT 値を表示することができる。ここでは、観測点を含む約 8 km 四方の領域を選び、その領域内の CCT 値の平均を求めて使用した。観測点上の 1 ピクセルの CCT 値を読むことも試みたが、カーソルの位置と観測点の間の誤差や、周りのピクセルの影響などを考えるとあまり正確ではないと判断し、採用しなかった。

このようにして求められた ch4, ch5, ch45 の値を Table 4 に示す。

結果および考察

Table 4 からわかるように、NOAA 衛星データは 2 時, 6 時, 14 時, 18 時頃のものである。対して、レーウィンゾンデによる気温湿度観測は 9 時と 21 時に行われている。そこで、6 時, 14 時の衛星データを 9 時の気温湿度観測と、2 時, 18 時の衛星データを 21 時の気温湿度観測と比較することとした。気温湿度観測資料から求めた鹿児島と名瀬をあわせた可降水量と ch45 の CCT 値との関係を Fig. 1 に示す。Fig. 1 では回帰関係は可降水量 (kg/m^2) = $0.8854(\text{ch45}) + 3.3961$ という式で与えられた。相関係数は 0.845 であり 99% の信頼度で有意である。このことから ch45 の CCT 値によって可降水量の評価が可能であることがわかった。

Fig. 2 は鹿児島の、Fig. 3 は名瀬のデータについて、それぞれ可降水量と ch45 の CCT 値との関係を示したものである。鹿児島のデータが多い (79 個) ので、Fig. 1 と Fig. 2 にはあまり違いは見られないが、データの少ない (39 個) 名瀬の回帰直線の傾きは Figs. 1, 2 と比べて 13% ほど大きくなっている。Fig. 2 と Fig. 3 の回帰直線から、ch45 の CCT 値が 20 以下の場合には鹿児島と名瀬の可降水量の差はほとんどないが、ch45 の CCT 値が 50 ほどになると可降水量にして 10% 程度の差が出てくることになる。

NOAA/AVHRR の観測幅は 2800 km と広いので、真下を観測しているか観測帯の端に観測点があるかで空気層の通過距離も異なる。通過距離による補正も試みたが、

かえって可降水量と ch45 の相関係数は少し下がって 0.820 になった。相関係数の 99% 信頼区間は 0.720~0.885 であり、通過距離による補正をしない場合の相関係数 0.845 を含むので、通過距離による補正はこの解析の誤差の範囲内であると思われる。

鹿児島大学大学院連合農学研究科で 1997 年の春から本格的に NOAA 衛星データのアーカイブが始まったことと、高層気象観測年報 1997 年版を用いたため、今回は 1997 年 3 月 31 日から 12 月 31 日までの衛星データのみを解析を行い、冬季 (1 月から 3 月) の解析を行っていない。年間データの解析が望ましいが、冬季は一般に乾燥しているため ch45 の値は 20 以下であることが多いと思われ、可降水量と ch45 の CCT 値との関係にはあまり影響しないと考えられる。

参考文献

- 1) S. Businger, S.R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. Anthes, C. Rocken, R. Ware, T.M. Exner, T. Van Hove, and F. Solheim (1997): The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bull. Ame. Meteor. Soc.*, **77**, 5-18.
- 2) Center for environmental remote sensing, Chiba University: <http://133.82.233.178/gpsmet/>.
- 3) 嘉納宗靖, 向井幸男 (1990): VTIR 赤外バンドによる全可降水量の評価. *日本リモートセンシング学会誌*, **10**, 29-35.
- 4) 柴田 彰 (1998): 水蒸気量の算出. MOS-1 衛星検証 MESSR, VTIR, MSR ワークショップ報告書, 宇宙開発事業団地球観測センター, pp. 181-185.
- 5) 安部勝宏 (1980): 静止気象衛星 GMS の赤外放射データにより推定した可降水量の精度. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, **2**, 77-93.
- 6) T. Inoue (1990): The relationship of sea surface temperature and water vapor amount to convection over the tropical Pacific revealed from split window measurement. *J. Meteorological Soc. Japan*, **68**, 589-606.
- 7) 藤野詠光, 菊川浩行, 上田耕平, 木下紀正, 石黒悦爾 (1997): 地球観測衛星データ処理のための画像作成・解析ソフトウェアの開発. *鹿児島大学水産学部紀要*, **46**, 1-9.

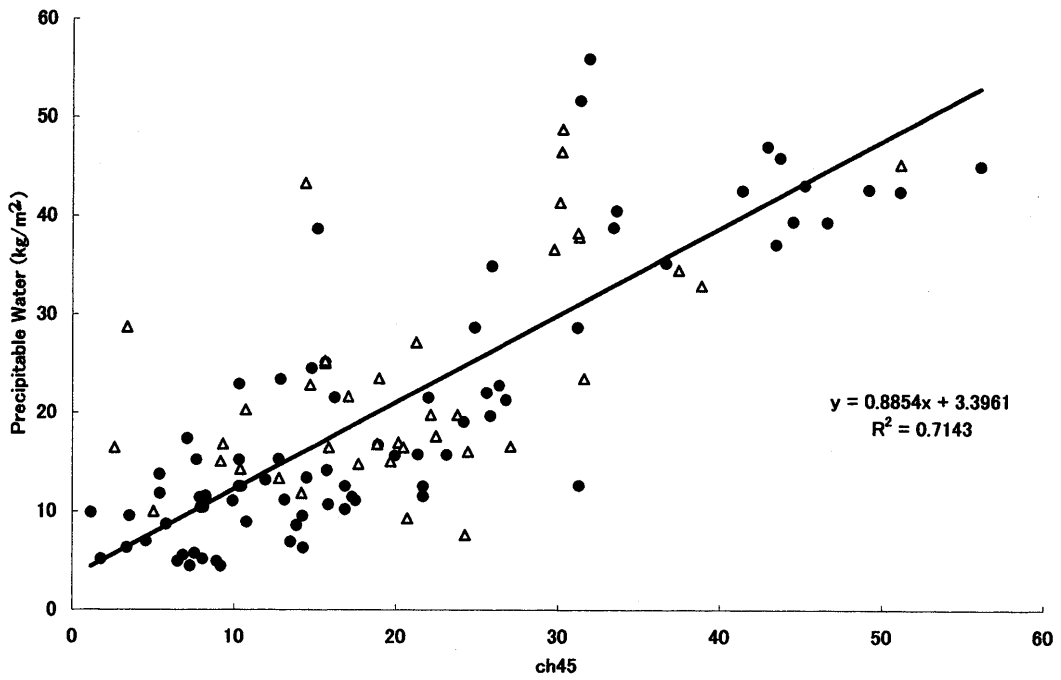


Fig. 1 Relation between precipitable water and ch45 with the data at Kagoshima (●) and at Naze (△).

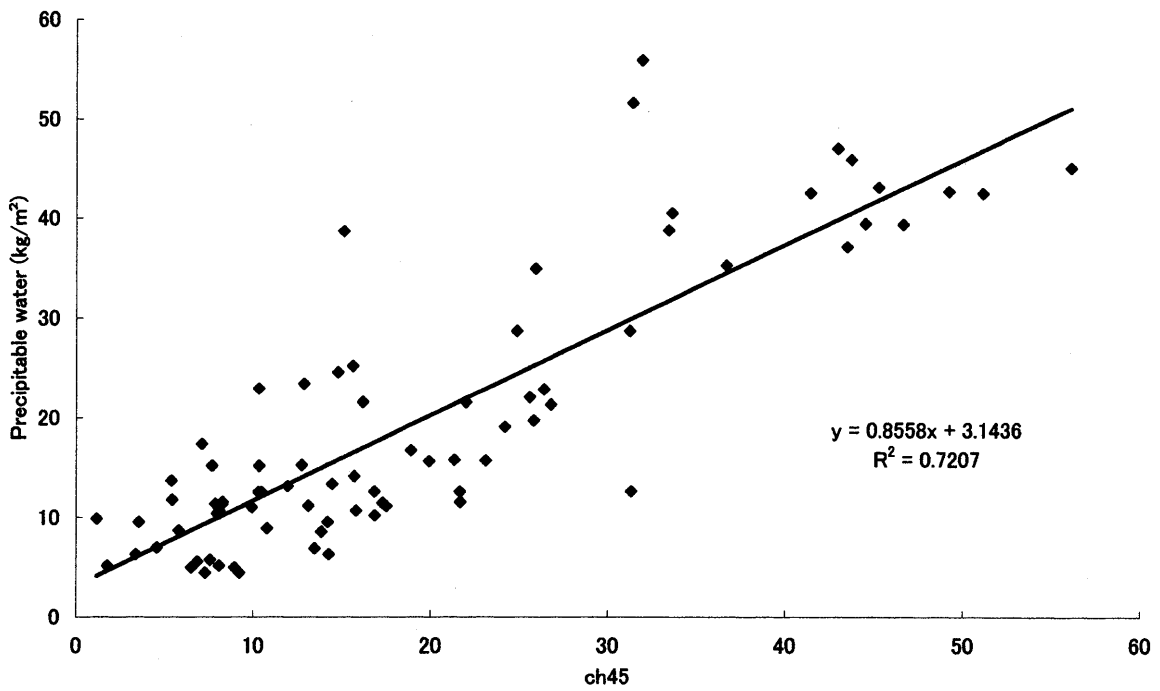


Fig. 2 Relation between precipitable water and ch45 with the data at Kagoshima.

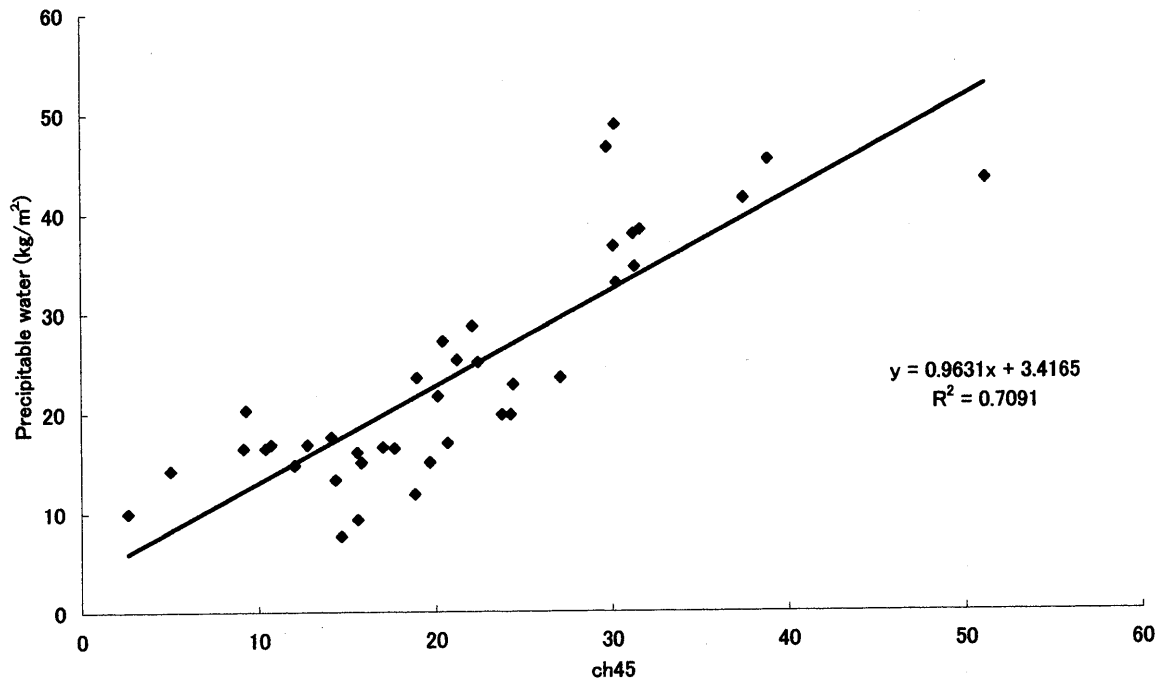


Fig. 3 Relation between precipitable water and ch45 with the data at Naze.