

# 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

## The accuracy of the precipitable water estimated from the infrared radiation data of GMS.

阿部 勝 宏

Katsuhiko Abe

### Abstract

The precipitable water over the ocean can be estimated by the comparison of the brightness temperature inferred from the GMS infrared radiation data with the sea surface temperature observed by ships.

The precipitable water derived from the satellite data is less than that from the nearby radiosonde data by 2.4 mm on the average with the root mean square error, 6.0mm. The estimated precipitable water derived from GMS IR data shows good agreement with the ground truth data over ocean.

In the same manner, the monthly mean precipitable water is estimated from the satellite data during the period from 1978 through 1979, and compare with the other results.

### 1. はじめに

大気中の水蒸気の量を知ることは、気象学上、非常に重要である。この水蒸気量は、数値予報の入力要素の1つで、また衛星搭載の赤外放射計（例えば10.5~12.5 $\mu\text{m}$ ）により観測される輝度温度に、大気減衰効果として大きく影響を与えることもよく知られている（Barnett et al., 1979; Maul and Sidran, 1973等）。

北半球日本付近の陸上では、高層気象観測所が密にあり、ラジオゾンデにより大気中の水蒸気の量を知ることができるが、南半球や海洋上では大変困難である。

全球的に水蒸気量を求める方法として、衛星搭載の水蒸気チャンネル、またはマイクロ波チャンネルの放射測定から求める方法などがある。

本稿では、GMS 搭載の赤外放射計で測定した観測輝度温度と、船舶により観測された海面水温の差が、主として大気中の水蒸気による減衰効果と仮定して、緯・経度1度メッシュの海洋上の水蒸気の量（可降水量）を推定した。

この衛星算出の可降水量と、北半球太平洋のラジオゾ

ンデによる実測の可降水量を比較して精度を求めると共に、GMS 算出範囲の月平均可降水量を求め、他の調査結果と比較した。

### 2. 大気減衰補正量

赤外放射計によって得られた放射エネルギーを等価黒体温度に変換した観測輝度温度は、放射源の射出率、放射源から衛星までの間の大気による放射エネルギーの減衰によって、観測視野内の放射源の真の温度とは異なったものになる。この温度の差が減衰量であり、放射源の真の温度にするための補正量を、大気減衰補正量と称している。

今、この放射源が海面であれば、その射出率は1.0に近く、観測視野内が晴天の時は、大気による減衰量だけを補正すればよい。

一方、この大気による減衰は、GMS 赤外放射計の波長域（10.5~12.5 $\mu\text{m}$ ）では、大気の散乱、再射出などは無視できるほど小さく、大気の吸収による減衰のみ考慮すれば十分である。さらに、GMS 赤外放射計の測定波長域は、Fig. 1に見られるように、いわゆる『大気

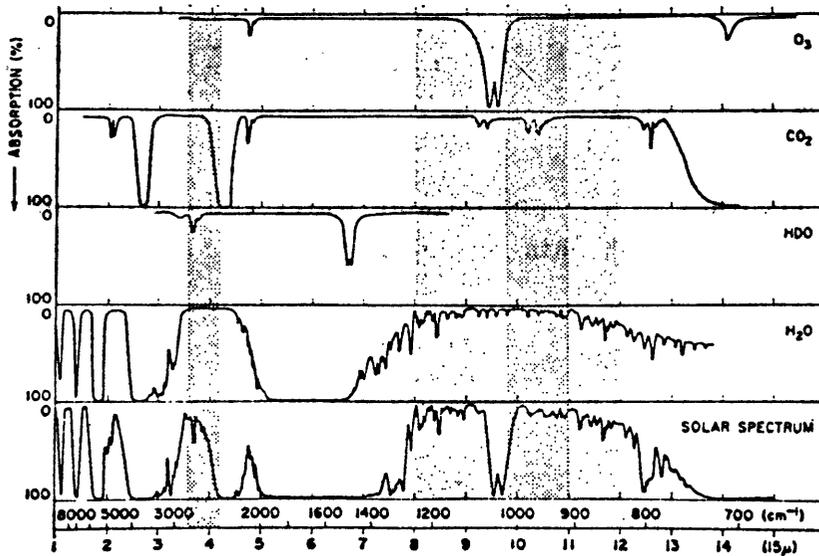


Fig. 1 Absorption spectrum of the infrared radiation by gases in the atmosphere (after Howard, 1965).

窓』と呼ばれ、非常に透過率の高い領域の1つである。しかし、この領域でも大気中の種々の物質による吸収があり、多少減衰を受ける。その内、水蒸気と炭酸ガスによる減衰が主たるものと考えられる。炭酸ガスは、大気中に約0.03%の体積混合比で一様に分布していて、かつ、水蒸気による減衰に比べて、かなり小さい。それ故、この波長域の減衰量を考える場合、水蒸気の量を変動量と見なして補正量を算出すればよい。

ここでは、放射理論（放射伝達式の解）を用いて計算した大気減衰の効果を考えるが、衛星による地表面の赤外放射の測定の場合、衛星直下点から離れるにしたがって大気を透過する距離が長くなるので、水蒸気量の他に、衛星天頂角を考慮して大気減衰補正量を求める必要がある。第(1)式は、水蒸気量（可降水量）、衛星観測輝度温度、および観測点と衛星の間の距離を表わす衛星天頂角と、大気による減衰補正量の関係を統計的に求めた補正近似式である。

$$\Delta T = \sec \theta \{ 0.189 \cdot A(T_{BB}) \cdot W + (1.0 - A(T_{BB})) \cdot 4.0 \} \quad (1)$$

$$A(T_{BB}) = \frac{1400}{(3100 - T_{BB})^2 + 1400}$$

$\Delta T$ : 大気減衰補正量 (°K)  
 $\theta$ : 衛星天頂角 (度)  
 $T_{BB}$ : 衛星観測輝度温度 (°K)  
 $W$ : 可降水量 (mm)

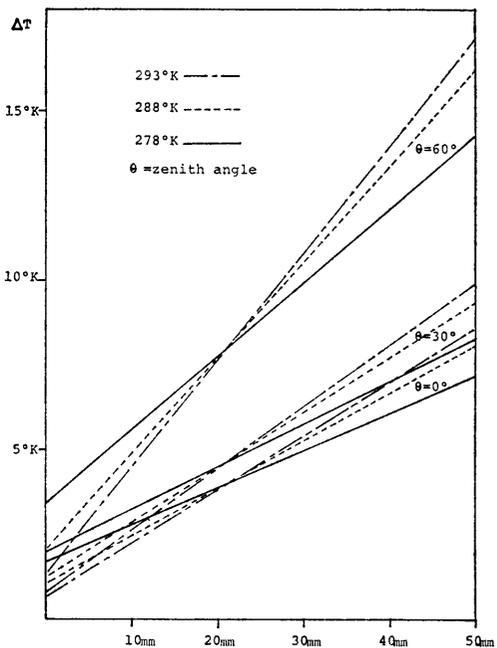


Fig. 2 Atmospheric attenuation correction.

Fig. 2 は、第(1)式により、衛星観測輝度温度、天頂角、および可降水量と、大気減衰補正量の関係を図示したものである。

3. 衛星による可降水量の算出

今、船舶の観測した海面水温と衛星で観測した輝度温度の差が大気減衰補正量  $\Delta T$  と考えれば、第(1)式から可降水量を推定することができる。衛星天頂角は、GMSが静止気象衛星なので、その注目する観測点では一定で、既知である。緯・経度1度メッシュの海洋上の衛星観測輝度温度の抽出の方法は、1日4回の VISSR 観測の赤外放射データを合成したヒストグラムから求めるが、この詳細は阿部・山本(1979)を参照されたい。ただし、1度メッシュの観測域で雲が卓越して海面からの情報が少ない場合には、ここで言う衛星観測輝度温度は求まらない。

4. ラジオゾンデによる可降水量の算出

高層気象観測所のラジオゾンデによる実測露点温度を  $t_d(^{\circ}\text{C})$  とすると、飽和水蒸気圧  $e(\text{mb})$  は、第(2)式で表わすことができる。

$$e = 6.11 \cdot 10^{a \cdot t_d / (b + t_d)} \quad (\text{Tetens の式}) \quad (2)$$

$a, b$  は定数

また、混合比  $q(\text{g/kg})$  は、気圧を  $P(\text{mb})$  とすると、第(3)式で求まる。

$$q = \frac{622 \cdot e}{P - e} \quad (3)$$

したがって、これから可降水量  $W(\text{mm})$  は、400mb以下の可降水量を無視すれば第(4)式で計算できる。

$$W = \sum_{\text{地上気圧}}^{400\text{mb}} 0.010 \cdot \bar{q} \cdot \Delta P \quad (4)$$

$\bar{q}$  : 2層間の平均混合比

$\Delta P$  : 2層間の気圧差

5. 衛星算出とラジオゾンデ算出の可降水量の比較

北半球における1979年冬期(2月), 夏期(8月), および秋期(11月)の衛星算出可降水量と, Fig. 3に示す高層気象観測所のラジオゾンデによる可降水量を表わしたのが, Table 1~Table 3である。Table 1からわかるように、冬期では、WAKE, GUAMでは差が少し大きい、他では概して差が小さく、よく一致している。Table 2は夏期であるが、TRUK 以外は、他のすべての算出結果が非常によく合致している。また、Table 3に示した秋期の比較結果では、冬期、夏期に比べて全体に差が大きく、特に、中緯度で大きな差が見られる。Fig. 4, Table 4は、Table 1~Table 3のデータに基づく精度の評価を図と表にしたものである。

Table 4からわかるように、ラジオゾンデによる実測可降水量に対する衛星算出可降水量の、冬・夏・秋期における平均誤差と平均平方差(RMSE)は、それぞれ+4.1mmと6.7mm、-0.7mmと3.6mm、および+2.7

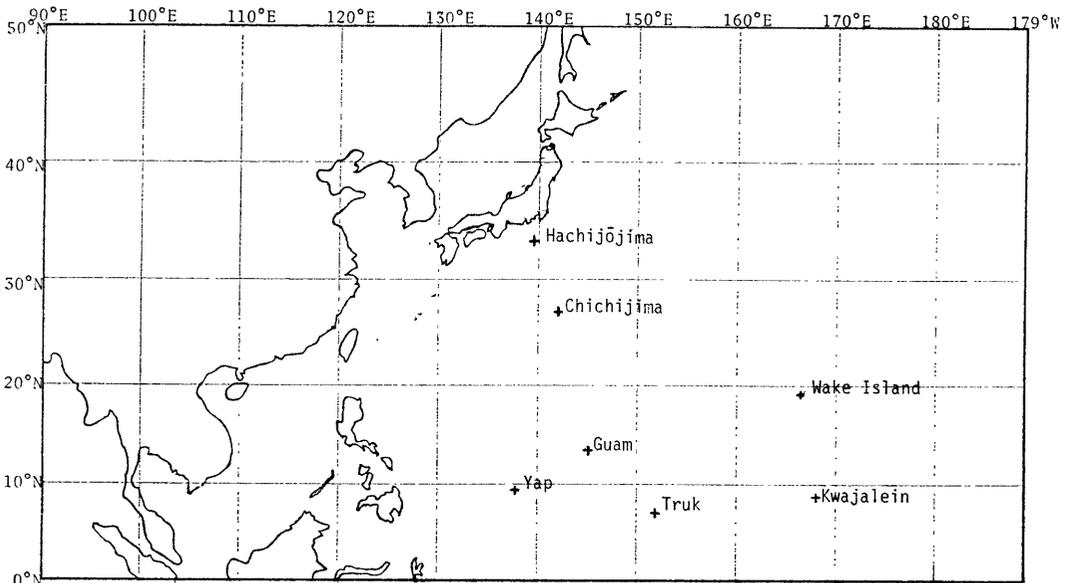


Fig. 3 Map of upper air observation stations.



(単位 mm)

Table 2 Same as Table 1, but for August.

観測所名	八丈島		父島		WAKE		GUAM		YAP		KWAJALEIN		TRUK		
	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均			
観測所位置	33°06'N, 139°47'E		27°05'N, 142°11'E		19°17'N, 166°39'E		13°33'N, 144°50'E		09°29'N, 138°05'E		08°43'N, 167°44'E		07°28'N, 151°51'E		
衛星位置	33°N, 140°E		27°N, 142°E		19°N, 167°E		14°N, 145°E		09°N, 138°E		09°N, 168°E		07°N, 152°E		
算出方法	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	実測	日平均	衛星		
11日	00z 12z	51.2 44.5	47.9 41	60.5 54.0	57.3 54	48.3 48	51.8 44.7	48.3 48	52.9 55.4	54.2 —	58.0 —	59.8 —	58.1 —		
12日	00z 12z	49.4 42.3	45.9 —	53.1 42.6	47.9 50	39.8 45	42.6 37.0	39.8 45	61.5 58.9	60.2 —	53.7 —	71.4 —	57.1 —		
13日	00z 12z	54.5 38.5	46.5 47	49.2 44.3	46.8 —	37.3 41	31.4 43.1	37.3 41	55.0 46.3	50.7 51	47.0 —	52.7 —	56.3 —		
14日	00z 12z	46.6 53.2	49.9 46	44.9 53.2	49.1 —	— 56	55.5 —	— 56	50.3 48.3	49.3 54	52.0 —	53.2 —	60.6 —		
15日	00z 12z	41.7 49.4	45.6 41	59.9 53.9	56.9 —	47.4 —	47.4 —	50 50	57.0 60.0	58.5 63	54.2 —	57.5 —	59.9 —		
16日	00z 12z	42.5 42.9	42.7 41	62.4 53.8	58.1 —	46.3 34.3	40.3 40	40.3 40	53.2 59.1	56.2 —	53.3 —	52.9 —	52.5 —		
17日	00z 12z	45.0 59.2	52.1 —	58.8 52.5	55.7 —	49.0 42.8	45.9 —	45.9 —	59.9 54.8	57.4 —	53.7 —	58.3 —	47.0 —		
18日	00z 12z	64.7 61.7	63.2 —	49.8 49.5	49.7 —	48.8 49.6	49.2 —	49.2 —	50.2 55.8	53.0 —	51.0 —	47.7 —	4.9 —		
19日	00z 12z	60.6 54.4	57.5 —	50.0 49.7	49.9 —	58.8 65.6	62.2 —	62.2 —	51.1 45.7	48.4 —	50.9 —	45.7 —	52.1 —		
20日	00z 12z	68.3 63.1	65.7 —	57.6 52.0	54.8 —	46.6 53.4	50.0 —	50.0 —	46.7 52.3	49.5 56	49.6 —	51.0 —	54.3 —		
旬平均	算回数	51.7	5回	52.6	2回	47.6	6回	53.7	4回	52.3	2回	55.0	2回	55.3	1回
衛星算出日平均		46.5	43.2	52.6	52.0	44.8	46.7	52.0	56.0	51.7	51.5	46.7	46.5	52.1	58.0
差		+3.3	+0.6	-1.9	-4.0	+0.2	+0.2	-5.9							

(單位 mm)

Table 3 Same as Table 1, but for November.

觀測所名	八丈島		父島		WAKE		GUAM		YAP		KWAJALEIN		TRUK		
	觀測位置	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均
觀測位置	33°06'N, 139°47'E	27°05'N, 142°11'E	19°17'N, 166°39'E	13°33'N, 144°50'E	09°29'N, 138°05'E	08°43'N, 167°44'E	07°28'N, 151°51'E								
衛星位置	33°N, 140°E	27°N, 142°E	19°N, 167°E	14°N, 145°E	09°N, 138°E	09°N, 168°E	07°N, 152°E								
算出方法	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星	實測	日平均	衛星
11日	00z 12z	34.7 23.5	29.1	17	49.7 46.7	48.2	—	31.6 51.5	41.6	32	42.4	—	41.4	—	51.7
12日	00z 12z	15.2 22.2	18.7	—	47.1 38.3	42.7	37	53.6 59.5	56.6	—	59.7	—	43.7	—	61.8
13日	00z 12z	20.9 18.3	19.6	—	41.2 41.2	41.2	—	59.8 58.0	58.9	—	—	—	48.6	—	—
14日	00z 12z	10.2 8.5	9.4	—	46.3 38.6	42.5	—	33.9 40.1	37.0	40	50.5	—	53.8	—	—
15日	00z 12z	15.9 20.6	18.3	—	44.8 39.5	42.2	—	52.7 31.6	42.2	30	44.9	—	57.3	—	46.1
16日	00z 12z	20.2 19.6	19.9	—	42.4 37.3	39.9	—	30.9 30.5	30.7	25	45.9	—	49.9	—	—
17日	00z 12z	25.0 30.9	28.0	—	35.2 41.9	38.6	—	32.3	—	—	46.1	—	47.0	—	61.0
18日	00z 12z	42.9 39.2	41.1	—	35.8 17.9	26.9	17	34.1 22.9	28.5	24	—	—	54.9	—	48.2
19日	00z 12z	26.4 14.5	20.5	—	22.5 31.9	27.2	18	41.0 33.8	37.4	36	53.1	—	55.9	—	—
20日	00z 12z	19.4 27.9	23.7	—	46.9 41.6	44.3	—	36.1 49.1	42.6	—	40.2	—	55.0	—	50.7
旬平均	算回 出教	22.8	1回	3回	39.3	3回	38.7	40.8	6回	47.9	6回	50.8	5回	53.3	2回
衛星算出日平均		29.1	17.0	24.0	38.7	33.9	38.7	36.2	31.2	46.8	50.7	47.3	45.4	47.2	51.0
差		+12.1	+8.3	+4.8	+5.0	-3.9	+1.9	-3.8							

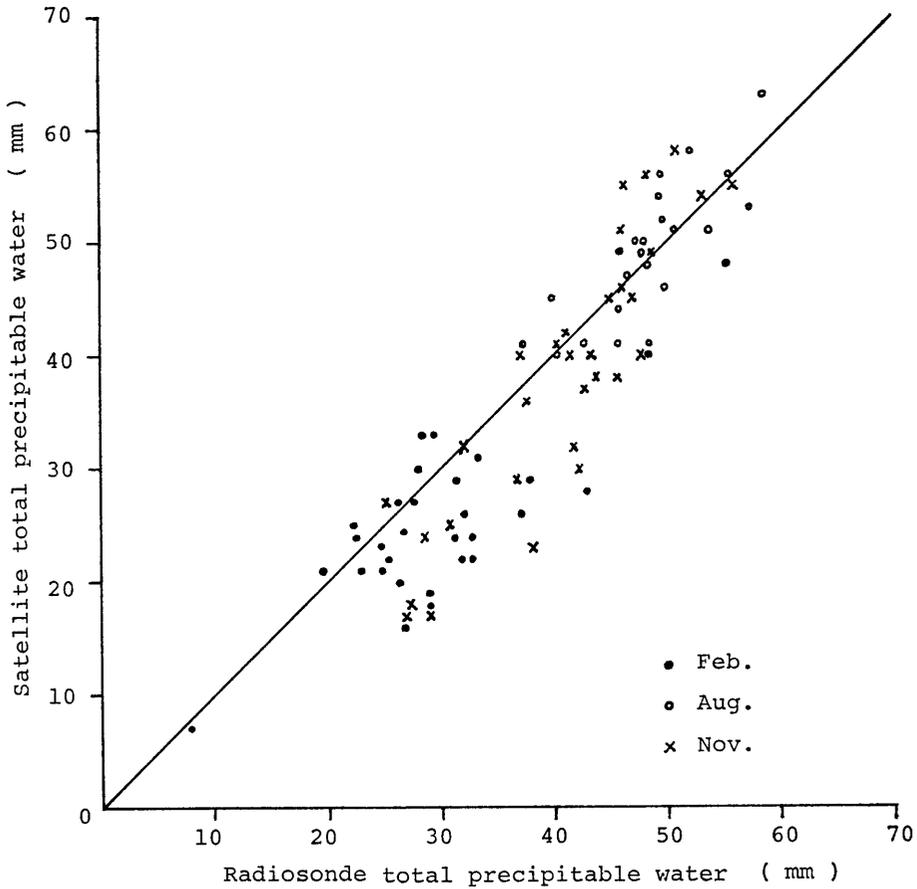


Fig. 4 Scattered diagram of estimated precipitable water from GMS IR data and observed precipitable water from radiation data for February, August and November, 1979.

Table 4 Statistic compariton of satellite estimated precipitable water and radiosonde observed precipitable water for winter, summer and autumn over the northern hemisphere. (単位：mm)

調査年月	観測種別	データ数	平均可降水量	平均誤差	平均誤差の標準偏差	平均平方差
1979. 2	ラジオゾンデ	31	30.2	+4.1	5.2	6.7
	衛星		26.1			
1979. 8	ラジオゾンデ	22	48.3	-0.7	3.6	3.6
	衛星		49.0			
1979. 11	ラジオゾンデ	31	40.8	+2.7	6.0	6.6
	衛星		38.1			
全 年	ラジオゾンデ	84	38.9	+2.4	5.5	6.0
	衛星		36.5			

mm と 6.6mm である。

また、全期間の全データによる比較では、平均誤差と平均平方差は、+2.4mm と 6.0mm で、衛星算出可降水量が精度よく推定できることを示したとも言える。このことは、観測空白域の低緯度太平洋域でも、かなり精度よく可降水量を推定することが可能であることを示している。

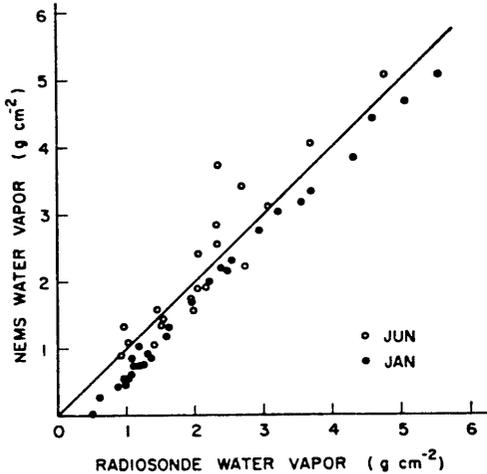


Fig. 5 Comparison of water vapor abundances derived from NEWS and from nearby radiosondes for January and June, 1973 (after Staelin et al., 1976).

Fig. 5 は、NIMBUS-5 の 2 個のマイクロ波のチャンネルを用いて計算した水蒸気量と、ラジオゾンデによる水蒸気量を比較したものである (Staelin et al., 1976)。この精度比較結果によると、1973年1月および6月の平均誤差と平均平方差は、それぞれ  $+0.35\text{g/cm}^2$  と  $0.12\text{g/cm}^2$ 、および  $-0.09\text{g/cm}^2$  と  $0.44\text{g/cm}^2$  である。

Fig. 6 は、Haydu and Krishnamurti (1978) によって、NIMBUS-6 のマイクロ波チャンネルのデータから計算し求めた可降水量と、北緯45度～南緯25度の海洋域のラジオゾンデによる実測の可降水量との比較を表わしたもので、この平均平方差は  $0.92\text{g/cm}^2$  とかなり大きい (二宮, 1980)。これらのマイクロ波による可降水量の算出結果と比較しても、GMS 赤外放射データによる算出結果が良い精度で求まっていることがわかる。

## 6. 月平均可降水量

Fig. 7～Fig. 12 は、1978年および1979年の GMS データから求めた月平均の可降水量を表わしたものである。(奇数月については図の掲載を省略する。) GMS 海

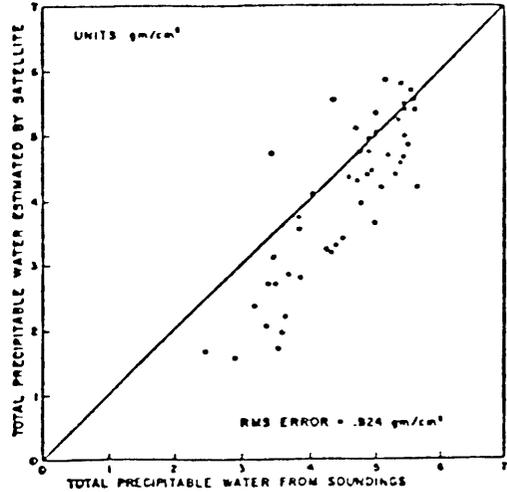


Fig. 6 Relation between precipitable water estimated by NIMBUS-6 microwave spectrometer and precipitable water from soundings.

面水温算出の全領域について図示しているが、南半球については船舶の観測が少ないため気候値の海面水温から大気減衰補正量を求めて、月平均の可降水量を推定している。

調査の結果、この領域における最大月平均可降水量は、6月の北緯0度～北緯5度、東経120度～東経150度の区域の70mmで、最小月平均可降水量は、1月の北緯50度、東経140度付近の1mmである。

Kubota (1969) は、北半球における1958年～1962年の月平均露点温度から、月平均可降水量を算出している。この結果では、最大月平均可降水量は、7月の北緯20度、東経90度の69.5mmで、最小のそれは、1月の極付近の1.4mmである。

気象衛星センターでは、観測輝度温度から海面水温、雲頂高度および雲量の算出のために、GMS 用の標準大気を作成し、これを GMSSA (GMS Standard Atmosphere) と称している。

Fig. 13 および Fig. 14 は、2月および8月における衛星算出月平均可降水量と、GMSSA から計算した月平均可降水量の差を示したものである。

これらの図によれば、2月は、低緯度において、衛星算出の量の方が最大10mm少なく、8月では、逆に衛星算出の量の方が最大10mm多いという結果となっている。

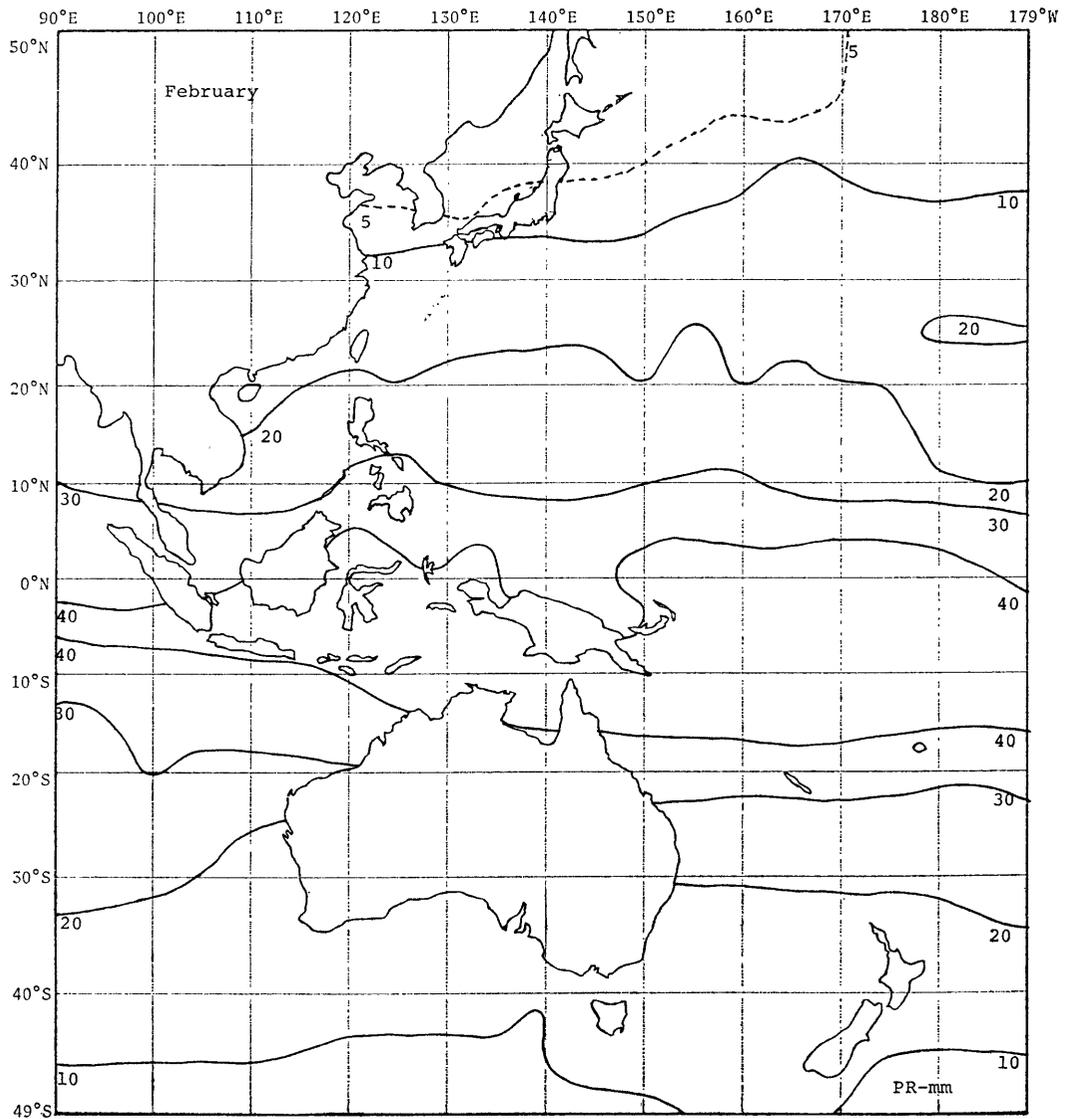


Fig. 7 Monthly mean precipitable water estimated by GMS infrared radiometer in February.

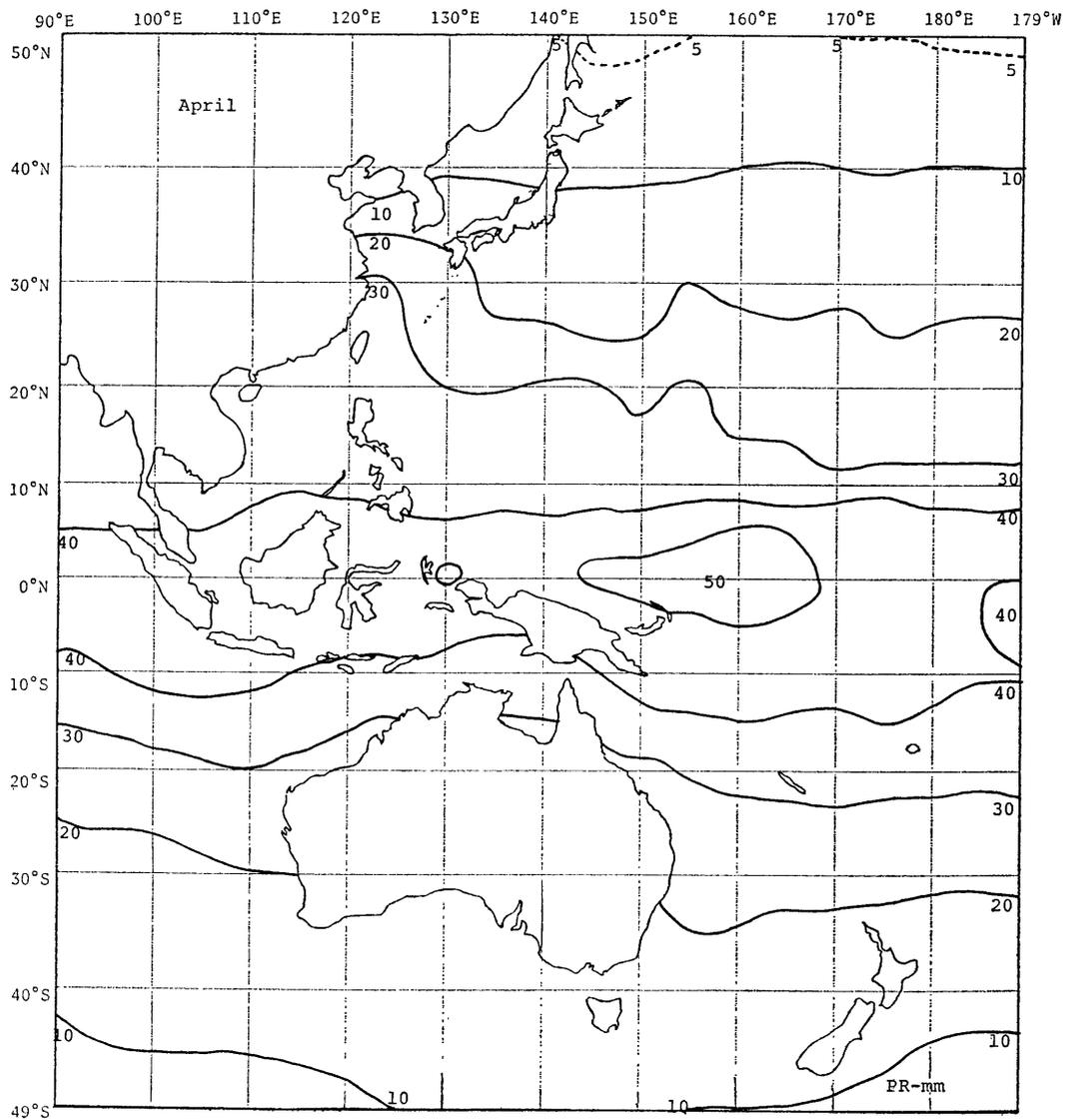


Fig. 8 Same as Fig. 7, but for April.

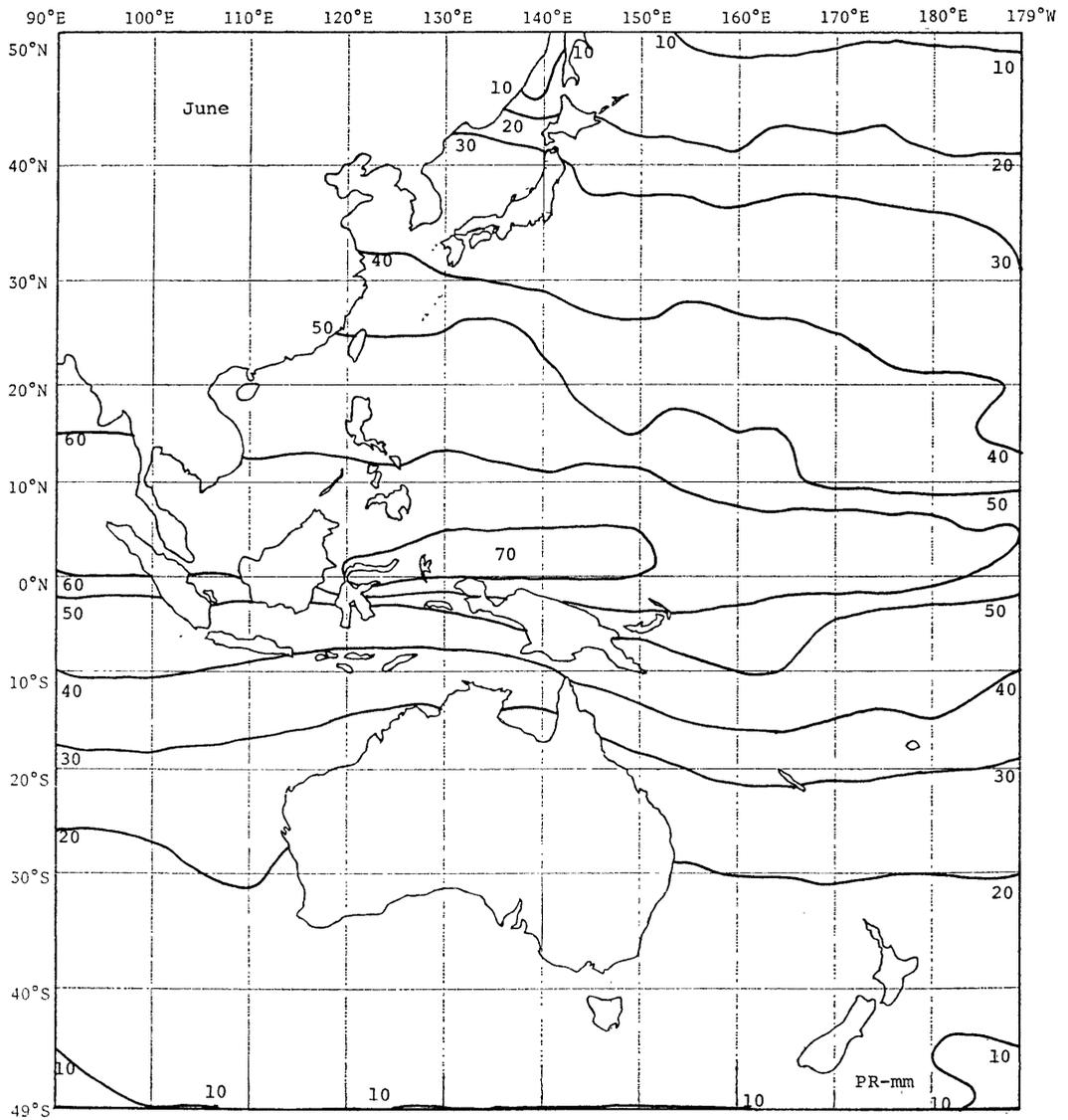


Fig. 9 Same as Fig. 7, but for June.

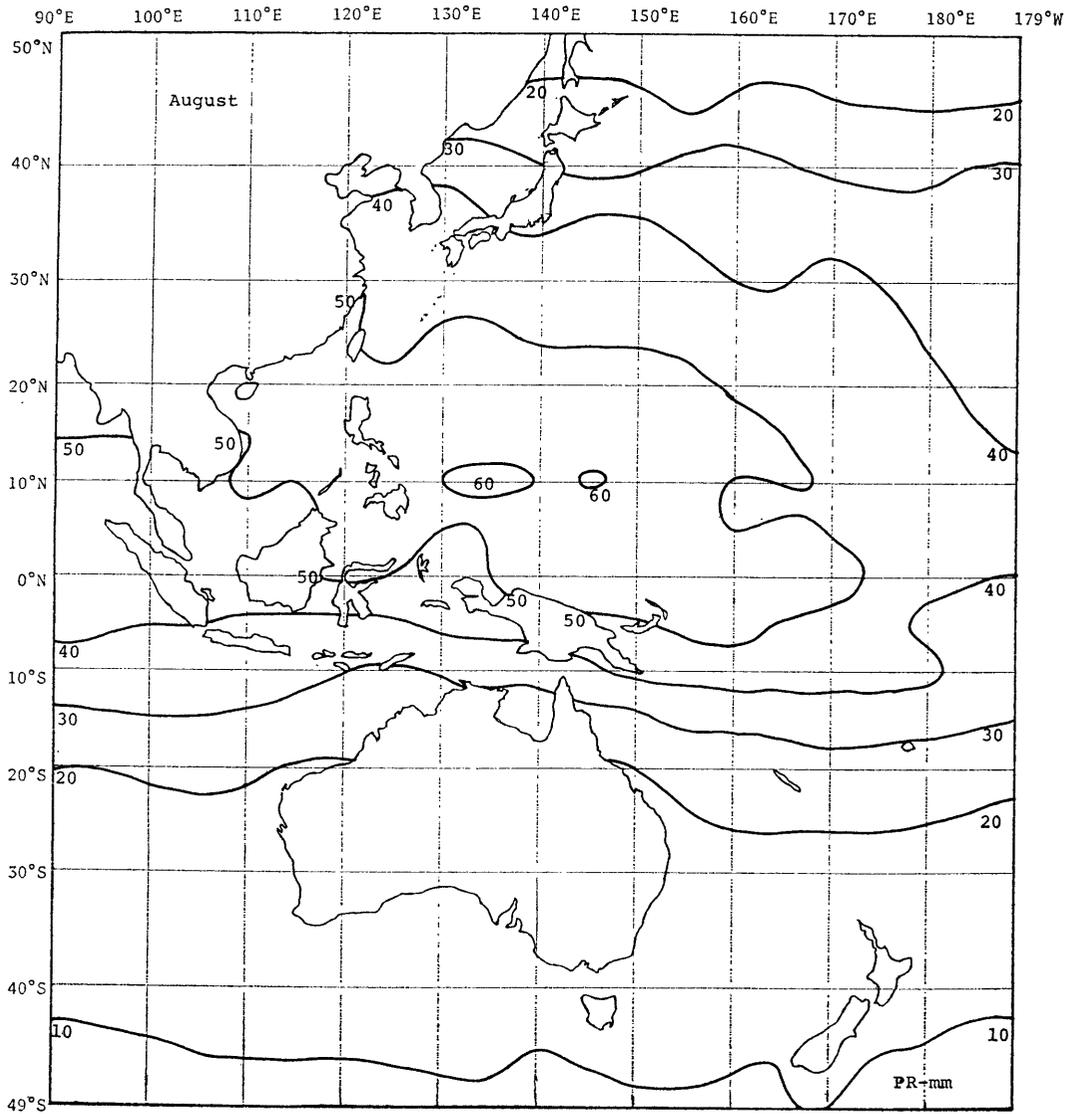


Fig. 10 Same as Fig. 7, but for August.

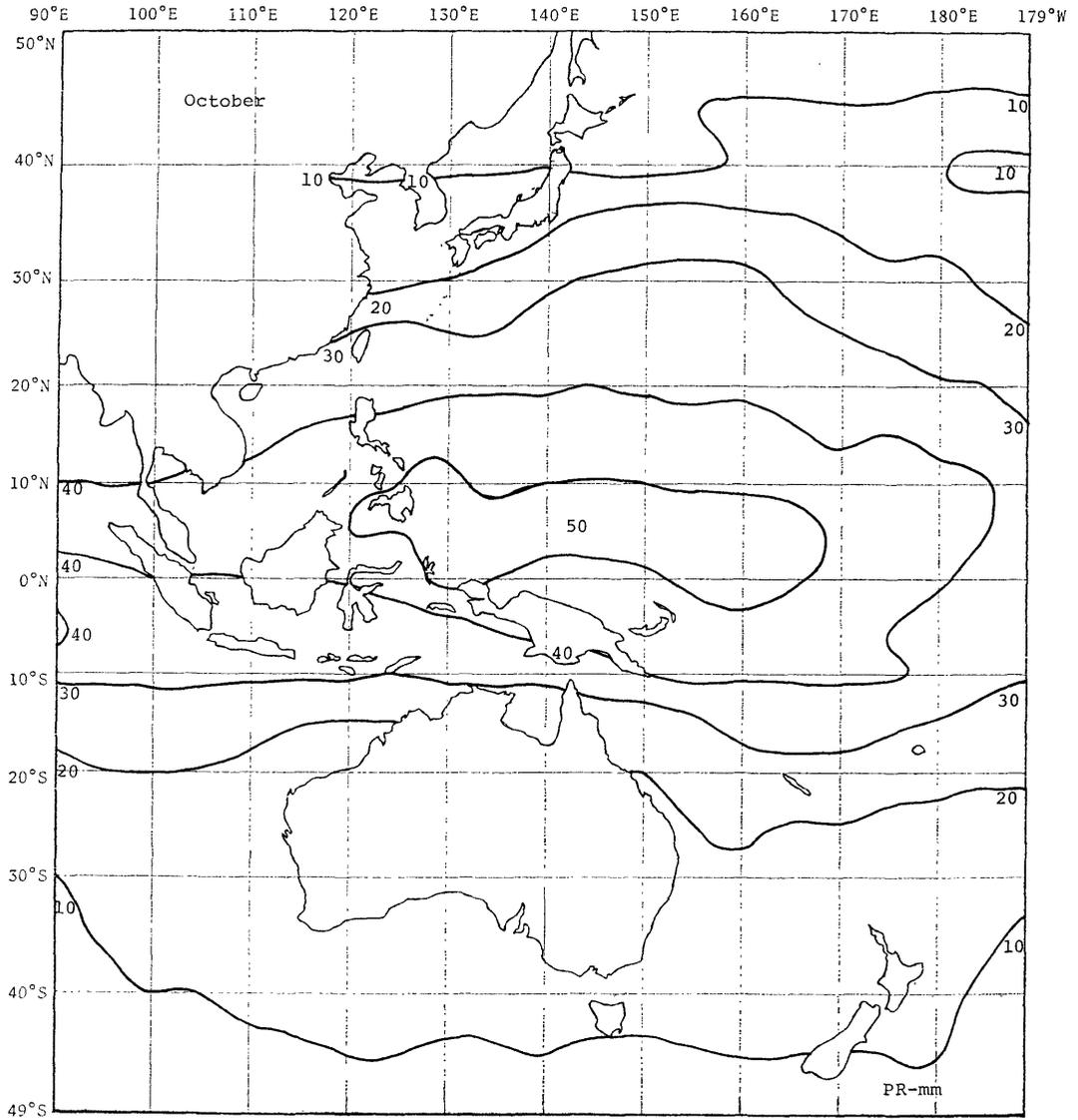


Fig. 11 Same as Fig. 7, but for October.

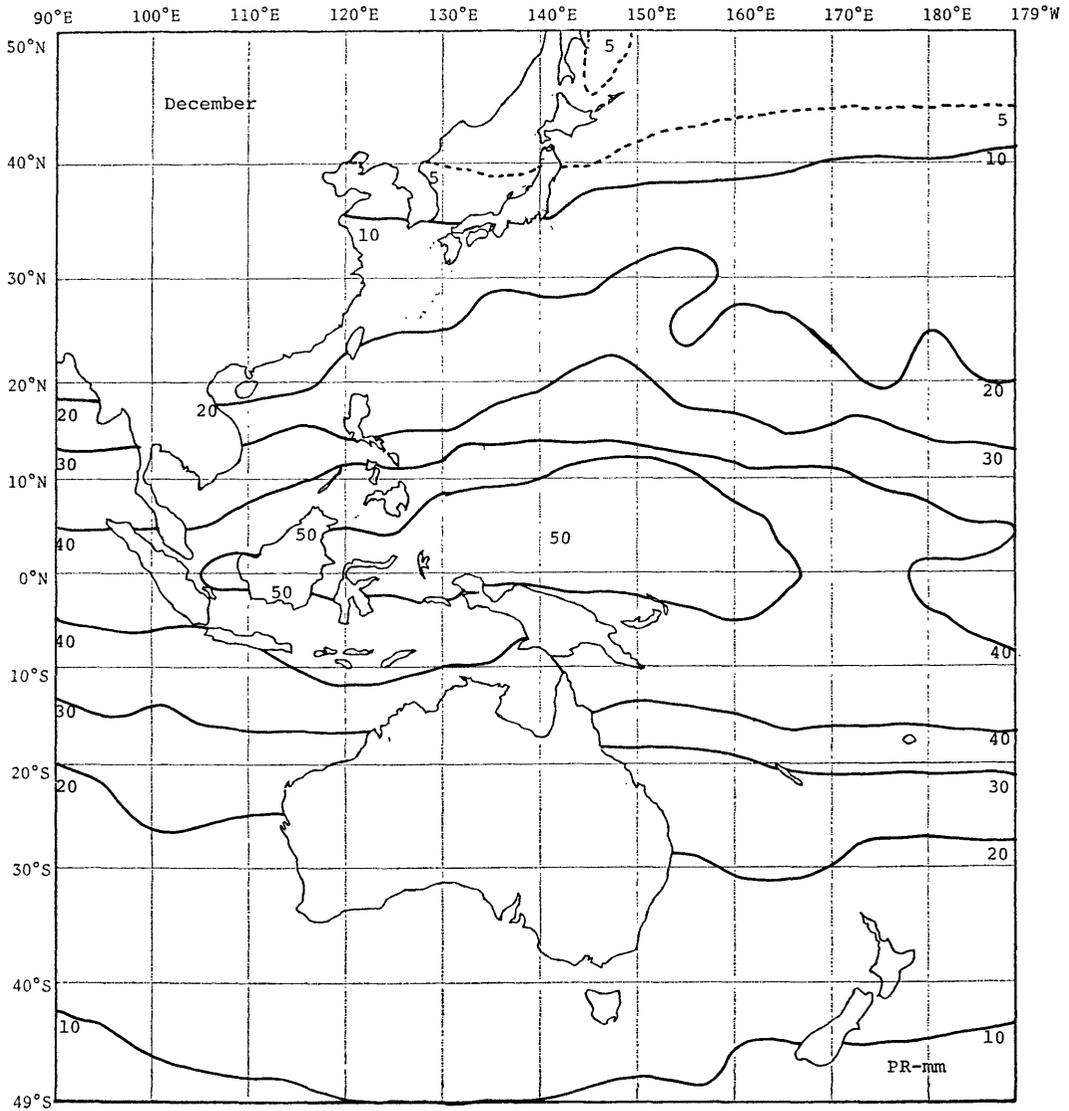


Fig. 12 Same as Fig. 7, but for December.

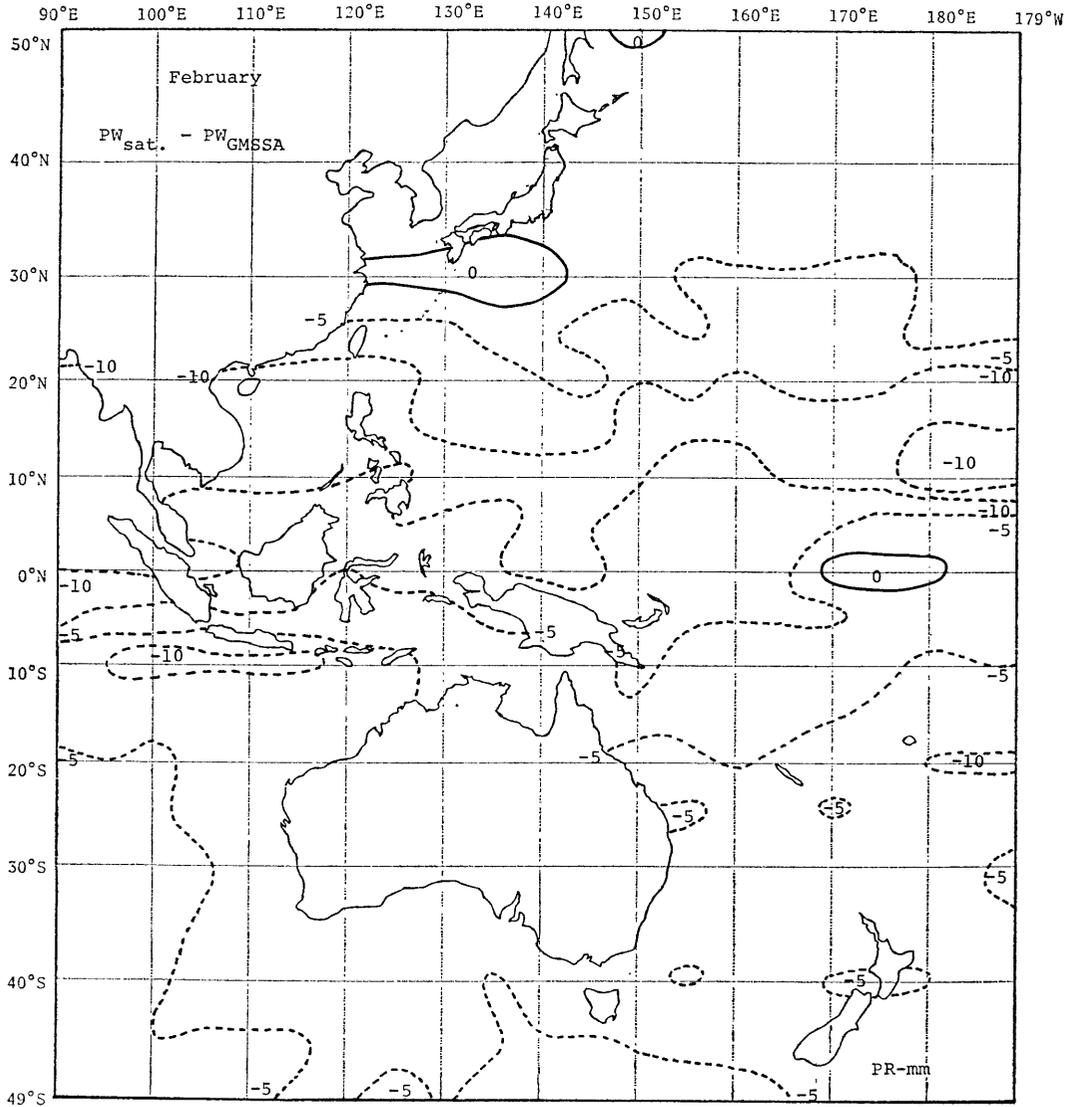


Fig. 13 Monthly mean precipitable water difference between estimated by GMS infrared radiometer and from GMSSA dew-point temperature in February.

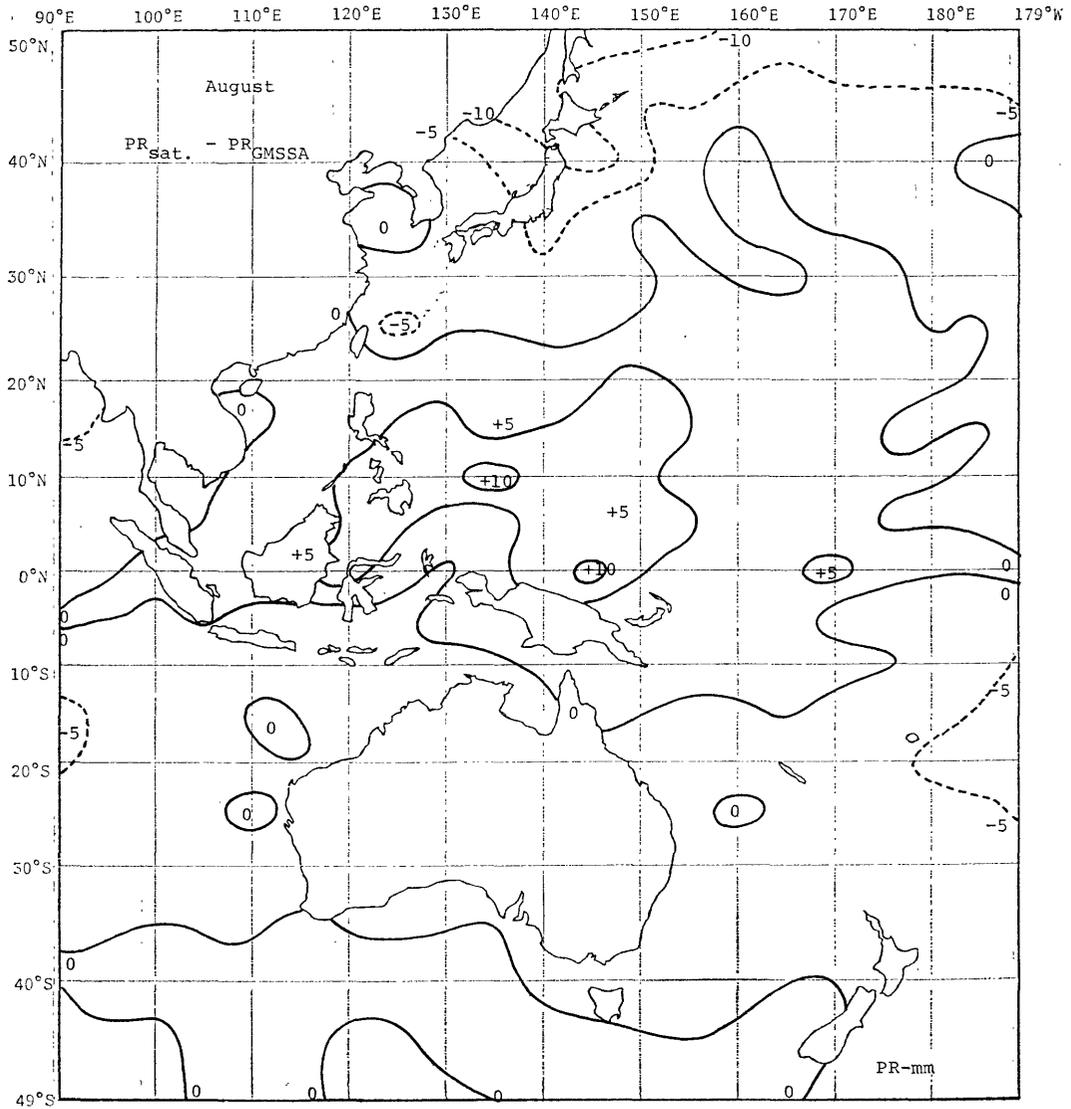


Fig. 14 Same as Fig. 13, but for August.

## 7. まとめ

中緯度から高緯度にかけては気象現象の変化が激しく、海洋上で雲が卓越して可降水量の算出ができない区域が生じるといった欠点がある。しかし、ラジオゾンデによる観測時刻の00zと12zでも10mm以上の差がある場合(表中の太字)を考慮すると、全年の平均誤差2.4mm、平均平方差6.0mmの精度で可降水量が算出できるということは、衛星による観測が、高層観測データの入手困難な太平洋上では非常に有効となる。

## 8. あとがき

今回の調査で使用した海面水温値は、船舶で観測した実測値に基づき、気象庁海洋課で旬平均値として作成されたものである。中緯度から低緯度の太平洋上では、海洋の特性により海況変動が小さく、この旬期間の海面水温変化が少ないものとして取り扱った。

また、ラジオゾンデの露点温度は、気象庁発刊の「天気図」の指定気圧面の気温と飽差から求めた。

Kubota (1969) は、北半球の月平均可降水量を求める際に、本調査で使用した Tetens の式の代わりに Magnus の式を用いているが、両式による計算の結果では、高々±0.1mmの差しかなく、いずれの式を用いても結果はほとんど変わらない。

## 9. 謝辞

本調査にあたり、気象衛星センターの鈴木哲夫管制課長および原田知幸氏に適切な助言を頂き、気象庁海洋課の長坂昂一技術専門官からは資料を頂きました。また、電子計算機使用に際し、気象衛星センターデータ処理課の方々に色々お手伝い頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## References

阿部勝宏・山本孝二 (1979) : 海面水温。気象衛星センター技術報告, 特別号II-2, 59-82。

阿部勝宏・山本孝二 (1979) : 静止気象衛星“ひまわり”の赤外放射データによる海面水温の算出。天気, 26, 493-507。

阿部勝宏 (1980) : 静止気象衛星「ひまわり」の赤外放射データによる可降水量の算出。日本気象学会春季予稿集。

気象ハンドブック編集委員会編 (1979) : 気象ハンドブック第1版, 朝倉書店, 661-664。

久保田効・遠藤有礼 (1980) : 気象衛星資料と数値予報。電子計算室報告, 別冊第26号, 30-33。

二宮洗三 (1980) : 気象衛星資料と数値予報。電子計算室報告, 別冊第26号, 34-43。

Barnett, T. P., (1979) : Climatological usefulness of satellite determined sea-surface temperatures in the tropical Pacific. Bull. A. M. S., 60, 197-205.

Haydu, K. J. and T. N. Krishnamurti (1978) : Moisture analysis from radiosonde and microwave spectrometer data. Report No. 78-6 Dep. Met. Florida State Univ.

Howard, J. N., (1965) : Transmission and detection of infra-red radiation. Handbook of Geophysics and Space Environments, McGraw-Hill Book Comp. Inc., Sec. 2 in Chapt. 10.

Kubota, I. (1969) : Distribution of monthly mean precipitable water in the northern hemisphere and its time change. Climatological notes, Hosei Univ., 28pp.

Maul, G. A., and M. Sidran (1973) : Atmospheric effects on ocean surface temperature sensing from the NOAA satellite scanning radiometer. J. Geophys. Res., 78, 1909-1916.

Staelin, D. H., et al. (1976) : Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus 5 microwave spectrometer. J. App. Met., 15, 1204-1214.