

西南日本における水蒸気ラジオメータ観測に基づいた Wet Mapping Function の包括的な解析

ムサ アシュラフ・田中寅夫

A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF WET DELAY MAPPING FUNCTIONS BASED ON WATER VAPOR RADIOMETER OBSERVATION AT SOUTH-WEST JAPAN

By *Ashraf* MOUSA and *Torao* TANAKA

Synopsis

The major error source that limits the accuracy in the Global Positioning System (GPS) as well as other modern space techniques, such as Very Long Baseline Interferometry (VLBI), is the mis-modeling of the tropospheric delay. This delay is experienced by radio waves in propagating through the electrically neutral atmosphere. The tropospheric delay is usually divided into two components, called hydrostatic (or dry) and wet delays. Both hydrostatic and wet delays are usually described as a product of the delay at the zenith and a mapping function. The mapping function models the elevation dependence of the propagation delay. In the couple of decades, a number of mapping functions have been developed for use in the analysis of space geodetic data. Using the water vapor radiometer observation at the south-west Japan, an evaluation of the accuracy of most of the wet delay mapping functions has been performed. This analysis includes those developed by Moffet, Black, Davis (CfA-2.2), Ifadis, Herring (MTT), Niell (NMF) as well as a locally optimized one (Mousa-1). The water vapor radiometer measurements cover selected elevation angles down to 5°. These measurements are mainly taken at Uji (as an inland site) and Shionomisaki (as a seashore site). Small campaigns at both Shigaraki and Izu-Hanto are also included. Except Mousa-1, all the wet mapping functions studied here are globally designed. Since the Japanese climate condition (especially the vapor content of the troposphere) is not taken into account properly in the design of the global wet delay mapping functions, their performance is very poor especially at elevation angles lower than 15°. It is to be noted here that Mousa-1 was optimized based on data taken at Shionomisaki only. But its performance is superior for other Japanese sites to the global mapping functions.

1. はじめに

大気中を通過するマイクロ波は、真空中のように幾何学的な直線 (G) にそって進行しない¹⁾。伝播経路は曲線 (S) となり、また時間的な遅れも生ずる。GPS (Global Positioning System) のような宇宙測地におけるデータ解析では幾何学的な直線 G

$$G = \int_{r_s}^a dG \quad \dots\dots\dots (1)$$

を使うのが便利である。ここで、 r_s は地球の表面の地心半径、 r_a は大気層上端の地心半径である。

しかしながら、Fermat の原理から、伝播時間が最も短い経路長 (L) は

$$L = \int_{r_s}^{r_a} n dS \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここで、 n は大気層の屈折率である。

式 (1) と (2) から、真空中とくらべた経路長の $\text{excess path length } L-G$ は

$$L - G = \int_{r_s}^{r_a} (n - 1) dS + (S - G) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。(3) 式は伝播誤差が 2 つの部分、すなわち曲がり ($S - G$) と伝播遅延に分けられることを示している。

伝播遅延 (l) は大気の屈折率に直接関係しており取扱いが面倒である。 l は

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表され、

$$l = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_a} N dS \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表される。

大気中における伝播遅延をモデル化するためには、衛星から受信点までの伝播経路に沿って N の積分値を求める方法を開発しなければならない。大気層は、電離層と電氣的に中性の下層の 2 つに分けられる。これら 2 層は、その性質も積分をモデル化することの容易さにおいても大きい違いがある。

電離層はマイクロ波に対して分散性の媒質であり、その中での遅延は振動数の 2 乗には逆比例する。従って、この遅延は 2 周波観測によってかなり消去できる。そのため、本稿ではこれ以上取り上げないこととする。

対流圏は大部分の中性大気質量と実際的には全ての水蒸気を含んでいるから、「対流圏遅延」という言葉が中性大気の効果を表すのに使われる。電離層とちがって対流圏はマイクロ波帯では非分散性であるため、遅延を消去するのに多周波観測は役立たない。従って、対流圏遅延は直接測定するか、推定するしか方法がない。モデル化には、伝播経路に沿う N の積分を推定することが要請される²⁾。Smith and Weintraub³⁾ は N と圧力 P (mbar)、温度 T (kelvin) および水蒸気分圧 e (mbar) との関係を

$$N = 77.6 \times P/T + 3.73 \times 10^5 \times e/T^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と与えた。(6) 式は hydrostatic (または dry) component (N_d) と wet component (N_w) の和

$$N = N_d + N_w \quad \dots\dots\dots (7)$$

として表される (例えば、Mendes and Langley⁴⁾)。hydrostatic component は遅延全体の 90 % に達するが、Hopfield²⁾ は乾燥大気が理想気体の法則に従い、また静水学的平衡にあるものと仮定して、地表気圧の測定値 (P) のみによってモデル化できることを示した。このモデリングによって精度はミリメートルの桁に達する (例えば、Ichikawa⁵⁾) ので、hydrostatic component はここではこれ以上考察しないこととする。wet component は hydrostatic component より小さいものの、対流圏中での水蒸気分布は時間的変化が大きく、対流圏での wet delay l_{wet} は地表での気象データ (SM) との相関がよくない (例えば、Dodson et al.⁶⁾)。このため正確にモデル化することは困難である。

水蒸気による伝播遅延のモデル化では、天頂方向の l_{wet} を与えるのが普通である。しかしながら、衛星はさまざまな高度角で観測されるから、任意の高度角に対する l_{wet} が求められなければならない。これは l_{wet}

に mapping function を乗じて計算する。この場合, mapping function による誤差は低高度角になるほど大きくなり, wet component の推定に系統的な誤差を生ずる。この誤差は推定位置の上下成分の精度に直接影響を及ぼすと考えられる (例えば, Niell⁷⁾)。宇宙測地関連のデータ解析における, より良い mapping function の必要性がこの研究の動機であり, 水蒸気ラジオメータ (WVR) との比較により 10 例の mapping function の評価を行った。Mapping function の式の形, 本論文中で使用した記号などは Table 1 に示した。

Table 1. List of the studied mapping functions. (note that BI, B & I, Mof are all based on the Hopfield [1969]⁸⁾; Chao, Dav, Her, Ifad, Niell and Mousa-1 are based on the continued fraction form of Marini [1972]⁹⁾; while the Bernese map is based on a uniform plane atmosphere.) rs and h are the earth's radius and the sum of the earth's radius and the site height, respectively.

CODE	Form	References
BI**	$1/\text{SQRT}(1 - (\cos\theta/(1 + (1 - 0.85) \times h/rs))^2)$	Black (1978) ¹⁰⁾
B&I	$1/\text{SQRT}(1 - (\cos\theta/(1 + 0.001)^2)$	Black and Eisner (1984) ¹¹⁾
Chao	$1/(\sin\theta + a/(\tan\theta + b))$	Chao (1972) ¹²⁾
Dav*	$1/(\sin\theta + a/(\tan\theta + b/(\sin\theta + c)))$	Davis et al. (1985) ¹³⁾
Her*	$1 + a_w/(1 + b_w/(1 + c_w))/(\sin\theta + a_w/(\sin\theta + b_w/(\sin\theta + c_w)))$	Herring (1992) ¹⁴⁾
Mof	$1/\text{SQRT}(\sin(\theta^2 + 2.25))$	Moffet (1973) ¹⁵⁾
Ifad*	$1/(\sin\theta + a/(\sin\theta + b/(\sin\theta + c)))$	Ifadis (1986) ¹⁶⁾
Niell**	$1 + a_w/(1 + b_w/(1 + c_w))/(\sin\theta + a_w/(\sin\theta + b_w/(\sin\theta + c_w)))$	Niell (1996) ¹⁷⁾
Ber	$1/\sin\theta$	Bernese soft M. F.
Mousa-1	$1/(\sin\theta + a/(\tan\theta + b))$	Mousa and Tanaka (1995) ¹⁸⁾

* means it depends upon SM data through its parameter.

** means it depends on the site.

Saastamoinen (1973)¹⁹⁾, Baby et al. (1988)²⁰⁾, Marini and Murray (1973)²¹⁾, Lanyi (1984)²²⁾, Santerre (1987)²³⁾, Yionoulis (1970)²⁴⁾, および Hopfield (1969)⁸⁾ による mapping function はこの解析には含めなかった。先の 4 個は wet と dry component を分離していないため, あとの 2 個は Saastamoinen の式を含め, mapping function として式が明示されていないため, 今回の評価には含めなかった。また, Hopfield の関数は 4 倍精度を要するため解析しなかった。

気温通減率は 6.5 K/km, 圏界面の高さは 11231 m とした。

2. 観測について

WVR は 2 つ以上の周波数で大気の大気湿度を測定し, 水蒸気と水滴の量を求めるリモートセンシング機器の一つであり, l_{wet} を推定するのに利用されている (例えば, Elgered¹⁾)。防災研究所で使用している WVR は 23.8 および 31.4 GHz の湿度を測定し, l_{wet} を次式によって推定している²⁵⁾。

$$l_{\text{wet}}(\text{cm}) = A + B \times T_{23} + C \times T_{31}$$

ここで, T_{23} および T_{31} は 23.8 および 31.4 GHz における湿度温度, A (cm), B (cm/K) および C (cm/K) は retrieval coefficient である。

retrieval coefficient はメーカーによって提供されているが, 場所に固有の値であると考えられるため, 防災研究所では Ohba²⁶⁾ と Mousa and Tanaka¹⁸⁾ が計算を行った。係数の値自体は両者で大きく異なっているが, これは計算アルゴリズムの違いに由来するものである。ただし, ラジオメータ (WVR) の検定法として採用されている tipping calibration の繰り返しは Ohba の場合やや少なく, これが原因となって 2-3 cm の誤差を生じた可能性もある²⁷⁾。2 台のラジオメータを並べて観測した結果が示すように, Mousa and Tanaka による係数の方がより正確であると結論できる¹⁸⁾。最近では tipping calibration は規則的に実施してきている。

いくつかの mapping function は計算に地表での気象観測値 (SM) を必要とする。防災研究所では小松製

作所製の気象観測装置を使用して、気圧、気温および相対湿度を測定している。

3. データ解析と結果

今回の解析では潮岬と宇治における1年間の観測データと、信楽および伊豆半島での臨時観測データを利用した。これらのデータ解析期間は、潮岬が1994年5月から95年5月まで、宇治が1995年2月から96年2月まで、信楽が1995年11月14日から16日まで、伊豆半島は1995年6月20日から23日までである。Fig. 1 はこれらの観測地点を示す。北および南からの高度角5, 10, 15, 30, 50, 70, および天頂90°の方

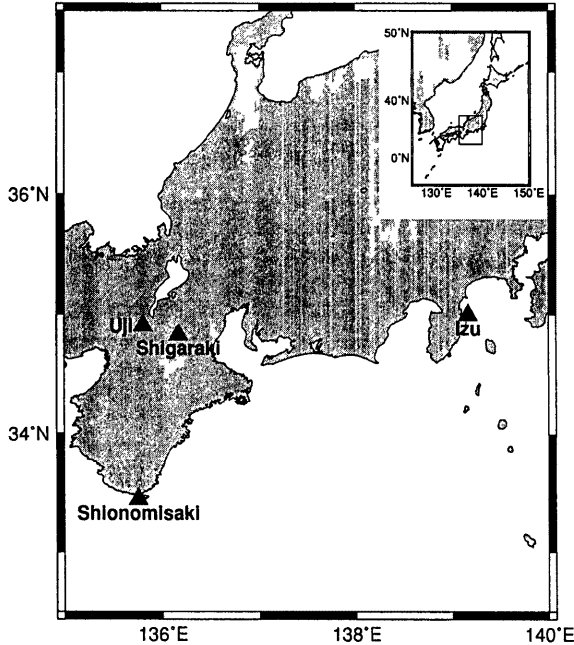


Fig. 1 Location of observation sites; Uji, Shionomisaki, Shigaraki and Izu-Hanto on the map of central Japan.

向でWVRによって測定された I_{wet} を使用した。ただし、5および10°のデータ解析期間は短く、潮岬では1995年12月のみ、宇治については1995年10月から96年1月までである。これらの結果を直接の観測値とみなして、以下におけるmapping functionの評価に使用した。

本稿で評価したmapping functionは、地表データ(SM)を利用するタイプとしないタイプに分類できる。Dav, Her, Ifad mapping functionが利用するタイプ、Bl, B & I, Chao, Mof, Niell, Ber, Mousa-1が利用しないタイプである。なお、BlとNiellは場所依存型である。これらのmapping functionの評価は、直接観測した I_{wet} と、天頂方向の観測値からmappingした値との差を比較することで行った。これによってmapping functionだけによる誤差を調べることができる。さらに、この差からの平均自乗分散をmapping functionの安定性のチェックに使用した。

得られた結果を30, 15, 10および5°の高度角についてTable 2から9に示した。高度角が大きい場合は含まれていないが、これは30°以上ではほとんど違いが無くなるためである。また季節依存性を調べるため

Table 2. Mean of mapped delay errors in cm at the elevation angle of 30 degree.

SITE	UJI				SHIO				SHG	IZU
SEASON	WNT	SPR	SMR	FLL	WNT	SPR	SMR	FLL	FLL	SMR
Mof	17.3	17.5	19.9	18.1	7.8	7.4	6.9	9.1	13.4	23.4
B&I	21.9	22.6	26.9	23.3	10.5	11.4	12.7	13.6	17.6	30.4
Bi	20.0	20.5	24.0	21.1	9.3	9.8	10.3	11.7	15.9	27.5
Chao	19.9	20.3	23.7	20.9	9.2	9.6	10.1	11.6	15.7	27.2
Mousa-1	11.2	10.8	10.5	11.1	4.2	2.1	-0.8	3.1	7.9	14.1
Niell	20.0	20.4	24.0	21.1	9.3	9.8	10.3	11.7	15.8	27.5
Ber	20.1	20.5	24.1	21.2	9.4	9.8	10.4	11.8	15.9	27.6
Ifad	20.0	20.4	24.0	21.1	9.3	9.8	10.3	11.7	15.8	27.5
Her	20.0	20.4	24.0	21.1	9.3	9.8	10.3	11.7	15.8	27.5
Dav	19.9	20.3	23.8	21.0	9.3	9.7	10.1	11.6	15.7	27.3

Table 3. Root mean square scatters about the mean error in Table 2.
(Elevation angle: 30 degree)

SITE	UJI				SHIO				SHG	IZU
SEASON	WNT	SPR	SMR	FLL	WNT	SPR	SMR	FLL	FLL	SMR
Mof	3.7	2.9	3.9	4.9	8.1	19.	14.	8.5	9.2	4.1
B&I	4.3	3.6	4.6	5.5	9.4	23.	16.	10.	11.	4.8
Bi	4.0	3.3	4.3	5.2	8.9	21.	15.	9.6	11.	4.5
Chao	4.0	3.3	4.3	5.2	8.8	21.	15.	9.6	11.	4.5
Mousa-1	3.0	2.1	3.1	4.1	6.3	15.	11.	7.1	7.4	3.3
Niell	4.0	3.3	4.3	5.2	8.9	21.	15.	9.6	11.	4.6
Ber	4.0	3.3	4.3	5.2	8.9	21.	15.	9.6	11.	4.6
Ifad	4.0	3.3	4.3	5.2	8.9	21.	15.	9.6	11.	4.6
Her	4.0	3.3	4.3	5.2	8.9	21.	15.	9.6	11.	4.6
Dav	4.0	3.3	4.3	5.2	8.8	21.	15.	9.6	11.	4.6

Table 4. Mean of mapped delay errors in cm at the elevation angle of 15 degree.

SITE	UJI				SHIO				SHG	IZU
SEASON	WNT	SPR	SMR	FLL	WNT	SPR	SMR	FLL	FLL	SMR
Mof	50.2	52.4	60.5	51.9	20.8	40.7	19.0	26.8	44.4	65.9
B&I	60.1	62.6	80.1	64.2	27.1	57.1	37.3	40.0	47.2	86.8
Bi	56.9	59.1	75.2	60.6	25.3	53.6	33.3	36.8	44.4	81.9
Chao	55.6	57.7	73.2	59.2	23.5	50.3	29.5	35.6	43.2	80.0
Mousa-1	14.0	12.3	9.8	12.3	0.5	7.4	-19.2	-4.6	45.9	17.1
Niell	56.6	58.8	74.7	60.3	25.1	53.3	32.9	36.6	44.1	81.5
Ber	57.3	59.5	75.7	61.0	25.5	54.0	33.8	37.2	44.7	82.5
Ifad	56.6	58.8	74.7	60.3	25.1	53.3	32.9	36.6	44.1	81.5
Her	56.6	58.8	74.7	60.3	25.1	53.3	32.9	36.6	44.1	81.5
Dav	55.8	58.0	73.6	59.4	24.7	52.5	32.0	35.8	43.4	80.3

Table 5. Root mean square scatters about the mean error in Table 4.
(Elevation angle: 15 degree)

SITE	UJI				SHIO				SHG	IZU
SEASON	WNT	SPR	SMR	FLL	WNT	SPR	SMR	FLL	FLL	SMR
Mof	7.0	6.9	9.3	8.0	16.	23.	18.	18.	19.	9.4
B&I	9.2	10.	10.	13.	11.	22.	31.	23.	26.	13.
Bl	8.8	9.4	12.	11.	21.	30.	22.	24.	25.	12.
Chao	8.7	9.2	12.	11.	20.	28.	22.	24.	25.	12.
Mousa-1	4.1	3.4	5.4	5.1	8.2	12.	9.9	9.5	26.	5.5
Niell	8.8	9.4	12.	11.	21.	29.	22.	24.	25.	12.
Ber	8.9	9.5	12.	11.	21.	30.	23.	24.	25.	12.
Ifad	8.8	9.4	12.	11.	21.	29.	22.	24.	25.	12.
Her	8.8	9.4	12.	11.	21.	29.	22.	24.	25.	12.
Dav	8.7	9.3	12.	11.	21.	29.	22.	24.	25.	12.

Table 6. Mean of mapped delay errors in cm at the elevation angle of 10 degree.

SITE	UJI		SHIO	SHG
SEASON	WNT	FLL	WNT	FLL
Mof	94.0	99.7	45.0	70.6
B&I	97.1	103.1	47.0	73.5
Bl	94.1	99.8	45.1	70.7
Chao	90.1	95.5	42.6	67.1
Mousa-1	7.3	5.7	-9.5	-7.1
Niell	93.1	98.7	44.5	69.8
Ber	95.3	101.2	45.9	71.8
Ifad	93.1	98.7	44.5	69.8
Her	93.1	98.7	44.5	69.8
Dav	90.8	96.2	43.0	67.8

Table 7. Root mean square scatters about the mean error in Table 6.
(Elevation angle: 10 degree)

SITE	UJI		SHIO	SHG
SEASON	WNT	FLL	WNT	FLL
Mof	13.	18.	25.	41.
B&I	14.	18.	11.	43.
Bl	13.	18.	10.	42.
Chao	13.	17.	9.5	40.
Mousa-1	4.7	6.1	3.3	9.8
Niell	13.	17.	9.8	41.
Ber	14.	18.	11.	42.
Ifad	13.	17.	9.8	41.
Her	13.	17.	9.8	41.
Dav	13.	17.	9.6	40.

Table 8. Mean of mapped dealy errors in cm at the elevation angle of 5 degree.

SITE	UJI		SHIO	SHG
SEASON	WNT	FLL	WNT	FLL
Mof	203.8	218.6	98.9	164.7
B&I	195.3	209.3	92.2	157.1
Bl	204.7	219.6	99.5	165.5
Chao	179.8	192.5	83.8	143.1
Mousa-1	-12.3	-15.6	-37.3	-29.4
Niell	198.5	212.9	95.6	160.0
Ber	214.3	230.0	105.6	174.2
Ifad	198.7	213.1	95.7	160.2
Her	198.8	213.2	95.4	160.2
Dav	184.1	197.2	86.3	147.0

Table 9. Root mean square scatters about the mean error in Table 8.
(Elevation angle: 5 degree)

SITE	UJI		SHIO	SHG
SEASON	WNT	FLL	WNT	FLL
Mof	26.	36.	25.	87.
B&I	26.	34.	24.	85.
Bl	27.	36.	25.	88.
Chao	24.	32.	22.	79.
Mousa-1	4.6	5.5	2.1	7.7
Niell	26.	35.	25.	86.
Ber	28.	37.	26.	92.
Ifad	26.	35.	25.	86.
Her	26.	35.	25.	86.
Dav	24.	33.	23.	80.

に、季節に分けて示した。さらに、遅延の方位依存性について調べるため北と南の両方の観測を行った。**Table** から分かる通り、季節による違いがあるものの、Mousa-1 が最良の結果を与えており、潮岬で高度角 5° の場合 (**Table 8**) の差が最も大きく、37 cm となっている。この結果は、Mousa-1 が潮岬だけを対象として 15° までの高度角について決定したものであることから、予測される場所である。他の mapping function はいずれの場所、季節についても、Mousa-1 より誤差は大きく、 30° でも 20 cm の差を生じている (**Table 2**)。低い高度角ではいっそう差が大きくなり、 5° で 200 cm に達するものもある (**Table 8**)。

Mousa-1 はまた、平均からのばらつきに関しても最も良い結果を与えている。高度角 15° での Mousa-1 のばらつきは、**Table 5** に見られる通り、他の mapping function のほぼ半分である。また、Mousa-1 でのばらつきが高度角に関係なくほぼ一定であるのに対し、他の mapping function では高度角が低くなるとばらつきが大きくなっている。例えば、Mousa-1 の場合、宇治での高度角 15° でばらつきは約 4 cm (**Table 5**)、 5° では 5 cm (**Table 9**) であるのに対して、他の mapping function の場合は、ばらつきが約 4 倍になっている場合もある (**Table 5** および **9**)。

4. 議論

ほとんどの mapping function はカナダ、ヨーロッパ、米国に適合するように決められている (例えば、Mendes and Langley⁴⁾) ため、前節で示した通り、近畿、伊豆半島各地に対してあまり良い結果を与えない。理由は日本上空の大気の構造、とくに対流圏での水蒸気分布によると考えられる。Wanninger²⁸⁾ が示した電離層の地域性もこれを示唆している。

mapping function に起因する誤差は、他の宇宙技術による測位と同様、GPS の上下位置決定にも影響を及ぼすことに注意を払う必要がある⁶⁾。これは、解のばらつきの原因であると同時に、実際の値からのずれ (基線長が 100 km 程度ではほとんど無視できる) の原因にもなる¹⁷⁾。日本における GPS などによる上下地殻変動の精密な決定が困難な理由の一つは mapping function にあるともいえる。

季節変化は、潮岬の高度角 15° の場合を除き明瞭ではない。この誤差は、宇治の場合のように、低高度角で大きくなる。Mousa-1 の場合、高度角 30° で 1 cm 以内である (**Table 2**) が、 15° では 4 cm に達する (**Table 4**)。

5. 今後の計画

これまで mapping function のほとんどはわが国の気象条件を考慮されずに決定されてきた。このため、日本に適合する mapping function を決めることが必要である。潮岬について決めた Mousa-1 に関する本研究の結果は、対象とする地域に適した mapping function を使うことが、wet component の補正に有効であることを示している。今後、著者はさらに関西地域により良く適合する mapping function を求める計画である。これには高度角 5° までのデータを使用し、季節的な変化も考慮に入れる計画である。関西全域をカバーするためには、海岸地域として潮岬、内陸部としては宇治のデータを使用することになろう。いくつかのモデルを提唱するとともに、場所依存性も検討して行きたい。

6. 結論

潮岬、宇治、信楽、伊豆半島におけるラジオメータ (WVR) 観測で得られた wet delay に基づいて、10 例の wet mapping function の評価を試みた。最良の結果を与えたのは Mousa-1 であり、潮岬では高度角 15° まで非常に良好な結果を与える。これは潮岬のデータを用いて mapping function の最適化を行ったものであるから当然であるが、その他の場所についても 15° まで良い結果を与えている。 15° より低い角度では

誤差が大きくなるものの、やはり Mousa-1 が最良の結果を与える。他の mapping function では、 15° で 80 cm, 5° で 200 cm など、大きな差になっている。

終わりに臨み、この研究を行うに当たって多大のご支援を下された、潮岬風力実験所の林 泰一博士、河内伸治技官、尾崎壽秀技官、名古屋大学の平原和朗教授、地震予知研究センターの細 善信技官に心から感謝の意を表します。

なお、この研究の一部は、文部省科学研究費補助金総合研究 (A) 課題番号 7304036 によって行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) Elgered, G. : Tropospheric Radio-Path Delay from Ground-Based Microwave Radiometry, Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, John Wiley & Sons, Inc., 1993, pp.215-258.
- 2) Hopfield, H.S. : Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range : Prediction from Surface Weather Data, Radio Science, 1971, vol. 6, No. 3, pp.357-367.
- 3) Smith, E.K. and S. Weintraub : The Constants in the Equation of Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies, Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1953, Vol. 41, No. 8, pp.1035-1037.
- 4) Mendes, V.B. and R.B. Langley : A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data, Paper Presented at KIS94, Banff, Canada, August 30-Sept. 2, 1994.
- 5) Ichikawa, R. : Assessment of Wet Tropospheric Delay from Numerical Prediction Data and its Implications for Space Geodesy, Ph.D. Thesis, Faculty of Science, Hokkaido University, 1994.
- 6) Dodson, A.H., P.J. Shardlow, L.C.M. Hubbard, G. Elgered, and P.O.J. Jarlmark : Wet Tropospheric Effects on Precise GPS Height Determination, Journal of Geodesy, 1996, Vol. 70, pp.188-202.
- 7) Niell, A.E. : Personal Communication, 1994.
- 8) Hopfield, H.S. : Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, Journal of Geophysical Research, 1969, Vol. 74, No. 18, pp.4487-4499.
- 9) Marini, J.W. : Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile, Radio Science, 1972, Vol. 7, No. 2, pp.223-231.
- 10) Black, H.D. : An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction, Journal of Geophysical Research, Vol. 38, No. B4, 1978, pp.1825-1828.
- 11) Black, H.D. and A. Eisner : Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects, Journal of Geophysical Research, 1984, Vol. 89, No. D2, pp.2616-2626.
- 12) Chao, C.C. : A Model for Tropospheric Calibration from Daily Surface and Radiosonde Balloon Measurements, JPL Technical Memorandum 391-350, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 1984.
- 13) Davis, J.L., T.A. Herring, I.I. Shapiro, A.E.E. Rogers, and G. Elgered : Geodesy by Radio Interferometry : Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length, Radio Science, 1985, Vol. 96, No. B1, pp.643-650.
- 14) Herring, T. A. : Modelling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data, Symposium of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geod. Commis. Ser. 36, Ned. Comm. Voor Geod., Delft, 1992, pp.157-164.
- 15) Moffet, J.B. : Program Requirements for Two Minute Integrated Doppler Satellite Navigation Solu-

- sion, Technical Memorandum TG 816-1, Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins Univ., Laurel, MD, 1973.
- 16) Ifadis, I. : The Atmospheric Delay of Radio Waves : Modelling the Elevation Dependence on a Global Scale, Tech. Rep. 38L, School of Electrical and Computer Eng., Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, Sweden, 1986.
- 17) Niell, A.E. : Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths, the Journal of Geophysical Research, 1996, Vol. 101, No. B2, pp.3227-3246.
- 18) Mousa, A.K. and T. Tanaka : A Modified Chao Mapping Function Based on a Preliminary Analysis of Water Vapor Radiometer Observation at Shionomisaki, Southwest Japan, Paper Presented at the XXI General Assembly of IUGG, July 2-14, 1995, Colorado, USA.
- 19) Saastamoinen, J. : Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction, in Three Parts. Bulletin Geodesique, 1973, No. 105, pp. 278-298; No. 106, pp. 383-397; No. 107, pp.13-34.
- 20) Baby, H.B., P. Gole, and J. Laverbnat : A Model for the Tropospheric Excess Path Length of Radio Waves from Surface Meteorological Measurements, Radio Science, 1988, Vol. 23, pp.1023-1038.
- 21) Marini, J.W. and C.W. Murray : Correction of Laser Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevations above 10 Degrees, Goddard Space Flight Center Report X-591-73-351, NASA GSFC, Greenbelt, MD 1973.
- 22) Lanyi, G. : Tropospheric Delay Effects in Radio Interferometry, Telecommunications and Data Acquisition Progress, JPL Technical Report 42-78, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 1984, pp.152-159.
- 23) Santerre, R. : Modification to the Goad & Goodman Tropospheric Refraction Model, Unpublished Internal Report of the Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada, 1987.
- 24) Yionoulis, S.M. : Algorithm to Compute Tropospheric Refraction Effects on Range Measurements, Journal of Geophysical Research, 1970, Vol. 75, No. 36, pp.7636-7637.
- 25) Mousa, A.K. and T. Tanaka : Tropospheric Wet Delay of Microwaves at Shionomisaki, Southwest Japan, and a Preliminary Evaluation of Mapping Functions, Paper Submitted to the Journal of Geodetic Society of Japan, 1996.
- 26) Ohba, M. : On Improvement of GPS Surveying Precision Using Water Vapor Radiometer, M. Sc. Thesis, Faculty of Science, Kyoto University, 1994.
- 27) Solheim, F. : Personal Communication, 1996.
- 28) Wanninger, L. : The Occurrence of Ionospheric Disturbances above Japan and Their Effects on Precise GPS Positioning, Proceedings of the CRCM'93, Kobe, Japan, Dec. 6-11, 1993, pp.175-179.