

「さきがけ」「すいせい」トラッキングデータの解析による
ドップラー計測システムの性能評価

山本 善一・鳥山 学*・廣澤 春任

(1989年12月5日受理)

Performance Evaluation of the Doppler Measuring System
by the Analysis of the Tracking Data of
“SAKIGAKE” and “SUISEI”

By

Zenichi YAMAMOTO, Gaku TORIYAMA
and Haruto HIROSAWA

Abstract: This paper evaluates the performance of the Doppler measuring system at Usuda Deep Space Center. The system is used for the tracking of Japanese deep spacecraft “SAKIGAKE” and “SUISEI”. It will be very important to evaluate the system performance since the tracking accuracies of the spacecraft are very sensitive to the Doppler frequency error. Here we evaluate the system performance by the analyses of the tracking data of “SAKIGAKE” and “SUISEI”.

1. はじめに

ハレー彗星の探査を目的として1985年に相次いで打ち上げられたMS-T5, PLANET-Aは、順調に軌道に乗り、それぞれ「さきがけ」、「すいせい」と命名された。わが国初の深宇宙探査機となった「さきがけ」、「すいせい」は、1986年にハレー彗星との会合を無事果たし、数多くの貴重なデータをもたらした。その後、両探査機は軌道変更を受け、地球とほぼ同じ公転軌道上を回る人工惑星となり、1989年現在も順調に飛行を続けている。

両探査機は地球からの距離が最大で2 AU 近くに達し、従来のKSCのアンテナでは通信を確保するのが不可能となるため、直径64mの大型パラボラアンテナを有する臼田宇宙空

* 東海大学

間観測所が長野県南佐久郡臼田町に建設された。ちなみに同観測所のアンテナは、送信機能を有する可動型のアンテナとしては、東洋一の大きさと性能を有しており、ごく最近直径70mにグレードアップされたNASAのアンテナと比較しても、性能的にはむしろ優位にある。「さきがけ」、「すいせい」のトラッキングが順調に行われてきたのも、同アンテナを含めた臼田宇宙空間観測所のトラッキング設備の働きによるところが大きい。同観測所では、MUSES-A等の探査機のトラッキングも予定されており、臼田局のトラッキング設備の性能評価を行うことは極めて重要であると考えられる。

そこで本論文では、トラッキング設備の中でも、特に軌道決定精度に大きな影響を及ぼすとされるドップラー計測システムの性能を、理論によるノミナルな値だけではなく、実際に取得されたドップラーデータのシンチレーション成分の解析結果を基に評価する。

2. 臼田局ドップラー計測システムの構成

臼田宇宙空間観測所に設置されているドップラー計測システムの基本構成を図1に示す。同システムは、インテグレートド・ドップラー計測方式と称する方式を採用している。これは、その名が示す通り、抽出したドップラー周波数を積分して連続的に計測する方式である。図1における入力信号は、ヘテロダイン受信機内で数段の周波数変換を経た後に抽出された $2\text{MHz} + f_d$ (f_d : ドップラー周波数) なる信号であり、これには雑音成分が付加している。これが同システムに入力されると、PLL (Phase-Lock Loop) が100通倍された周波数にロックし、周波数 $200\text{MHz} + 100f_d$ のきれいな (見かけ上雑音のない) 正弦波が得られる。これに150MHzの周波数をミキシングしてビートを取り、その結果得られる $50\text{MHz} + 100f_d$ なる周波数によって36段のバイナリ・カウンタを駆動する。そしてこのバイナリ・カウ

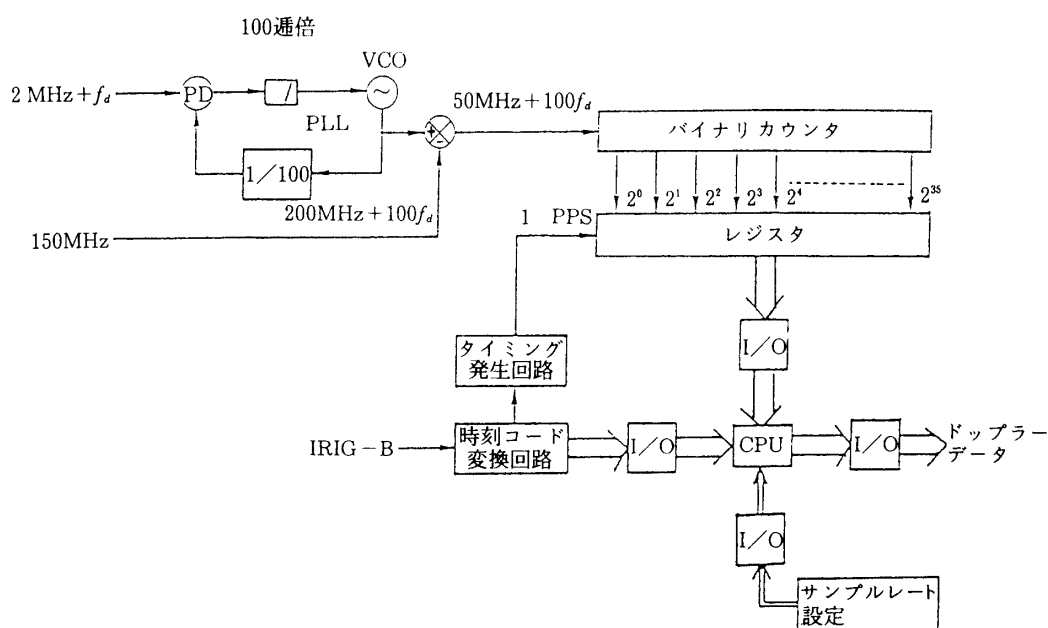


図1 臼田局のドップラー計測システム

データの内部状態を適当な時間間隔（1秒，10秒，60秒の中から1つを選択可能）で読み出し，データとして記録する。

これがいわゆるインテグレートッド・ドップラー・データ（あるいはドップラー・カウント・データ）と呼ばれるものであり，これからドップラー周波数を求めるには，以下の関係式を用いる。

$$f_d = \frac{\Delta I / \Delta t - 5 \times 10^7}{100} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

但し，

$\Delta I (= I_2 - I_1)$: インテグレートッド・ドップラー増分値

I_2 : 時刻 t_2 におけるドップラー・カウント値

I_1 : 時刻 t_1 におけるドップラー・カウント値

$\Delta t (= t_2 - t_1)$: 時間差（秒）

式(1)により得られるドップラー周波数 f_d は時刻 t_1 , t_2 間の平均のドップラー周波数である。データ取得間隔は，「さきがけ」，「すいせい」の打ち上げ直後は1秒に設定されたが，通常は10秒に設定して運用されている。インテグレートッド・ドップラー方式の利点は，データが積分形のまま抽出されるので，取得されたデータを何個おきかに取り出せば，式(1)における Δt の値を大きくとる事が可能で，これによりドップラー周波数の計測精度（分解能ではない）を必要に応じて高める事ができる，と言う点である。本論文では，この利点を生かして解析データの精度を高めているが，これについては後で詳しく述べる。

ところで，図1において，PLLで100通倍した周波数にロックさせているのは，ドップラー周波数の最小計測分解能を1秒間隔計測時において0.01Hzとするためである。また，50 MHz + 100 f_d なる周波数でバイナリ・カウンタを駆動している都合上，本システムで計測できる負のドップラー周波数は-500kHzまでである。なお，図1におけるバイナリ・カウンタは36段であるから，通常は20分程度でカウンタのオーバーフローが発生するが，これはドップラー周波数算出の段階で補正する事が可能である。

3. ドップラー計測システムの理論上の計測精度^[1]

実際に得られたドップラー周波数データによるシステムの評価に先立ち，ここでは，理論式によるドップラー計測システムの計測精度について紹介する。インテグレートッド・ドップラー計測システムの精度に影響を及ぼすランダムな変動成分として考えられているのは，

- 1) ダウンリンク熱雑音による変動成分
- 2) VCO 内部雑音による変動成分
- 3) ドップラー抽出系スプリアスによる変動成分
- 4) ドップラー計測系内部雑音による変動成分
- 5) 量子化雑音による変動成分
- 6) 基準周波数変動による変動成分

の6つである。以下では，各変動成分の大きさがどの程度になるかについて具体的に検討する。

3.1 ダウンリンク熱雑音による変動成分

一般に、ダウンリンク信号には種々の熱雑音が付加する。これがドップラー計測システムに入力されると、付加雑音によってPLLの出力周波数がふらつき、ランダムな変動成分が生ずる。この変動成分の大きさ（標準偏差）は、次式で与えられる。

$$\sigma_{DL} = (P_s / 2P_n)^{-1/2} / 2\pi\tau \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

但し、

P_s : 受信信号電力 (W)

P_n : 雑音電力 (W)

τ : 積分時間 (秒)

式 (2) から明かなように、 σ_{DL} の大きさは観測時の SN 比の値によって左右される。SN

表1 ダウンリンク熱雑音による変動成分（「すいせい」）

① 1987年			② 1988年		
月	SN 比 (dB)	σ_{DL} ($\times 10^{-4}$ Hz)	月	SN 比 (dB)	σ_{DL} ($\times 10^{-4}$ Hz)
1	27.3	1.61	1	27.2	1.63
2	26.8	1.71	2	27.1	1.66
3	25.9	1.90	3	28.3	1.45
4	26.5	1.77	4	28.1	1.48
5	26.5	1.77	5	28.5	1.40
6	28.9	1.35	6	30.5	1.12
7	※1 参照		7	33.5	0.80
8	27.2	1.64	8	36.8	0.55
9	データなし				
10	27.1	1.66			
11	26.9	1.69			
12	27.1	1.66			

※1 太陽オカルテーション時の σ_{DL}

日	雑音温度 (K)	SN 比 (dB)	σ_{DL} ($\times 10^{-4}$ Hz)
	40	31.1	1.04
16	400	21.0	3.33
17	6160	9.1	13.12
18	29050	2.4	28.49
19	2500	13.0	8.36
20	297	22.2	2.88
	40	31.1	1.04

表 2 ダウンリンク熱雑音による変動成分（「さきがけ」）

1987年		
月	SN 比 (dB)	σ_{DL} ($\times 10^{-4}\text{Hz}$)
5	26.1	1.86
6	25.6	1.96
7	26.4	1.81
8	26.2	1.85

比の値を変化させる要因としては、通常、探査機までのスラントレンジの変化による受信信号電力の変化が考えられるが、探査機が太陽オカルテーションを起こした時期（「すいせい」の場合1987年7月）には、太陽がアンテナパターン内に入る事による熱雑音の急激な上昇も無視できない。これらの点を考慮した上で、 $\tau=60$ 秒とした場合の σ_{DL} の値を表1、表2に示す。

3.2 VCO 内部雑音による変動成分

これは、図1におけるVCO (Voltage Controlled Oscillator) の内部で発生する熱雑音の影響でPLLの出力周波数が変動する事により生ずる成分であり、その大きさの標準偏差は次式で与えられる。

$$\sigma_v = \{ \int \Phi_0(\omega) |1-H(\omega)|^2 d\omega / \pi \}^{1/2} / \tau \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

但し、

$\Phi_0(\omega)$: VCO 位相雑音スペクトル密度

$H(\omega)$: PLL ループ伝達関数

τ : 積分時間 (秒)

「さきがけ」, 「すいせい」のドップラー計測システムの場合、 $\tau=60$ 秒とすると、

$$\sigma_v = 3.30 \times 10^{-4} \text{Hz} \quad (4)$$

となる。

3.3 ドップラー抽出系スプリアスによる変動成分

図1に示したドップラー計測系への入力信号を抽出するドップラー抽出系では、周波数変換、通倍、分周が行われるが、この際に発生するスプリアス信号によってランダムな変動成分が生ずる。臼田局に設置されたシステムの場合、その大きさは、

$$\sigma_s = 1.89 \times 10^{-4} \text{Hz} \quad (5)$$

であった。

3.4 ドップラー計測系内部雑音による変動成分

ドップラー計測系内部においては厳重なシールドを行っているが、それでも異なる周波数の信号同士で微弱な干渉が起こり、これが原因でドップラー計測値に変動が生ずる。図1のシステムの場合、その大きさは、

$$\sigma_I = 7.07 \times 10^{-5} \text{Hz} \quad (6)$$

である。

3.5 量子化誤差による変動成分

図1に示したドップラー計測システムでは、 $50\text{MHz}+100f_d$ なる周波数を36段のバイナリカウンタで計測している。従って、カウンタの最小桁がカウントアップするか否かで量子化誤差が生ずる。この量子化誤差により発生する変動成分の大きさは、

$$\sigma_Q = \gamma_P / (\sqrt{6} \tau) \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

但し、

γ_P : 位相計測分解能 (cycle)

τ : 積分時間 (秒)

で与えられる。「さきがけ」、「すいせい」のドップラー計測システムでは、ドップラー周波数を100通倍した上でカウンタを駆動しているので、

$$\gamma_P = 0.01 \text{ cycle} \quad (8)$$

となる。従って、 $\tau = 60$ 秒とすると、

$$\sigma_Q = 6.80 \times 10^{-5} \text{ Hz} \quad (9)$$

となる。

3.6 基準周波数変動による変動成分

これは計測の対象となるダウンリンクキャリア自身に含まれるランダム変動成分であり、ダウンリンクキャリアを発生する際の基準周波数発生装置の周波数変動によってもたらされる。この変動成分の大きさは次式で与えられる。

$$\sigma_T = 2f_0 S (T/\tau)^{1/2} \quad (0 \leq T < \tau) \quad (\text{Hz}) \quad (10)$$

$$\sigma_T = \sqrt{2} f_0 S (\tau \leq T < \infty) \quad (\text{Hz}) \quad (11)$$

但し、

f_0 : ダウンリンクキャリア周波数 (Hz)

「すいせい」: $f_0 = 2.29315 \times 10^9 \text{ Hz}$

「さきがけ」: $f_0 = 2.29389 \times 10^9 \text{ Hz}$

S : 基準周波数発生装置の τ 秒の安定度

T : 伝搬遅延時間 (秒)

τ : 積分時間 (秒)

基準周波数発生装置は、2-WAY モード（地上局からアップリンクを上げ、探査機搭載のトランスポンダでダウンリンクを送り返すモード）の場合には臼田局の標準時刻装置（現時点ではセシウム原子時計）であるが、1-WAY モード（ダウンリンク信号を探査機で発生させて地球に送信するモード）の場合には各探査機搭載のオンボード発振器（通常は水晶発振器）となる。従って、 $\tau = 60$ 秒に対する周波数安定度はそれぞれ、

$$S = 1 \times 10^{-12} \quad (2\text{-WAY モード}) \quad (12)$$

$$S = 1 \times 10^{-9} \quad (1\text{-WAY モード, 公称値}) \quad (13)$$

となる。なお、2-WAY モードの場合には探査機搭載のトランスポンダで生ずる位相ゆらぎも考慮する必要があるが、通常この大きさは全く問題にならないレベルにあるので、ここでは無視する。

1987年、1988年における「すいせい」、「さきがけ」の軌道データより求めた探査機-地球間の距離を表3(a), (b)に示す。これより、両探査機までの距離の最小値は、

表 3(a) 「すいせい」と地球の距離

① 1987年		② 1988年	
年／月／日	距離 ($\times 10^6 \text{km}$)	年／月／日	距離 ($\times 10^6 \text{km}$)
87／01／01	271.98	88／01／06	264.96
87／01／11	277.51	88／01／16	265.32
87／01／21	282.25	88／01／26	264.67
87／01／31	286.14	88／02／05	262.93
87／02／10	289.15	88／02／15	260.04
87／02／20	291.27	88／02／25	255.92
87／03／02	292.50	88／03／06	250.50
87／03／12	292.85	88／03／16	243.76
87／03／22	292.37	88／03／26	235.61
87／04／01	291.11	88／04／05	226.04
87／04／11	289.16	88／04／15	215.05
87／04／21	286.62	88／04／25	202.69
87／05／01	283.60	88／05／05	189.17
87／05／11	280.21	88／05／15	174.93
87／05／21	276.63	88／05／25	160.52
87／05／31	272.95	88／06／04	146.63
87／06／10	269.29	88／06／14	133.92
87／06／20	265.74	88／06／24	122.86
87／06／30	262.32	88／07／04	113.78
87／07／10	259.00	88／07／14	106.84
87／07／20	255.74	88／07／24	102.01
87／07／30	252.47	88／08／03	99.16
87／08／09	249.22	88／08／13	98.08
87／08／19	246.16	88／08／23	98.45
87／08／29	243.56	88／09／02	99.93
87／09／08	241.68	88／09／12	102.20
87／09／18	240.75	88／09／22	104.90
87／09／28	240.85	88／10／02	107.73
87／10／08	241.93	88／10／12	110.42
87／10／18	243.88	88／10／22	112.69
87／10／28	246.52	88／11／01	114.31
87／11／07	249.57	88／11／11	115.05
87／11／17	252.85	88／11／21	114.67
87／11／27	256.11	88／12／01	113.00
87／12／07	259.13	88／12／11	109.84
87／12／17	261.74	88／12／21	105.03
87／12／27	263.73	88／12／31	98.47

表3 (b) 「さきがけ」と地球の距離

① 1987年		② 1988年	
年/月/日	距離 ($\times 10^6$ km)	年/月/日	距離 ($\times 10^6$ km)
87/01/01	216.52	88/01/06	269.65
87/01/11	220.03	88/01/16	271.98
87/01/21	224.25	88/01/26	274.62
87/01/31	229.03	88/02/05	277.52
87/02/10	234.22	88/02/15	280.61
87/02/20	239.68	88/02/25	283.78
87/03/02	245.23	88/03/06	286.97
87/03/12	250.73	88/03/16	290.08
87/03/22	256.09	88/03/26	293.02
87/04/01	261.17	88/04/05	295.71
87/04/11	265.89	88/04/15	298.08
87/04/21	270.20	88/04/25	300.06
87/05/01	274.01	88/05/05	301.59
87/05/11	277.29	88/05/15	302.65
87/05/21	280.02	88/05/25	303.18
87/05/31	282.15	88/06/04	303.19
87/06/10	283.69	88/06/14	302.68
87/06/20	284.64	88/06/24	301.63
87/06/30	285.02	88/07/04	300.10
87/07/10	284.84	88/07/14	298.09
87/07/20	284.16	88/07/24	295.66
87/07/30	283.02	88/08/03	292.85
87/08/09	281.48	88/08/13	289.75
87/08/19	279.64	88/08/23	286.38
87/08/29	277.56	88/09/02	282.85
87/09/08	275.34	88/09/12	279.23
87/09/18	273.10	88/09/22	275.57
87/09/28	270.93	88/10/02	271.99
87/10/08	268.92	88/10/12	268.77
87/10/18	267.21	88/10/22	265.38
87/10/28	265.85	88/11/01	262.54
87/11/07	264.92	88/11/11	260.15
87/11/17	264.48	88/11/21	258.27
87/11/27	264.54	88/12/01	257.00
87/12/07	265.10	88/12/11	256.38
87/12/17	266.18	88/12/21	256.40
87/12/27	267.70	88/12/31	257.07

「すいせい」: $98.08 \times 10^6 \text{ km}$

「さきがけ」: $216.52 \times 10^6 \text{ km}$

である。従って、伝搬遅延時間 T はそれぞれ、

$$T = 654 \text{ 秒 (「すいせい」 2-WAY モード)} \quad (14)$$

$$T = 327 \text{ 秒 (「すいせい」 1-WAY モード)} \quad (15)$$

$$T = 1,443 \text{ 秒 (「さきがけ」 2-WAY モード)} \quad (16)$$

$$T = 722 \text{ 秒 (「さきがけ」 1-WAY モード)} \quad (17)$$

となる。従って、 $\tau = 60 \text{ 秒}$ とすると、いずれの場合も σ_T は式(11)により計算され、各モードに対する値は、「すいせい」、「さきがけ」とともに以下ようになる。

$$\sigma_T = 3.24 \text{ Hz (1-WAY モード)} \quad (18)$$

$$\sigma_T = 3.24 \times 10^{-3} \text{ Hz (2-WAY モード)} \quad (19)$$

4. ドップラー計測システムの評価

前節に示した各変動成分の結果から明かなように、ドップラー計測システムに起因するランダムな変動成分の中で最も支配的なのは、基準周波数変動による変動成分であることが判明した。特に、1-WAY モードでは、基準周波数変動による影響が顕著に現れていることが判明した。従って、現時点でのドップラー計測システムの精度は、2-WAY モードの場合は臼田局の時刻設備の安定度により制約を受けており、1-WAY モードの場合には、探査機搭載の水晶発振器の安定度により制約を受けていることになる。2-WAY モードの方に関しては、1990年2月には水素メーザ原振が導入されるため、ドップラー計測システムの精度が更に向上するものと期待される。

ここで、ドップラー計測システムの性能を実際の解析結果と比較・評価するために、実際に取得されたドップラーシンチレーションデータを図2と図3に示す。解析に要したデータは、1987年の通年分である。ただし、3月のデータは、追尾データの入手が不可能であったためプロットしていない。

先ず、前節の基準周波数変動による変動成分の計算結果によると、1-WAY モード時のドップラー計測系に起因する変動成分の大きさは、実際に取得されたドップラー・シンチレーションデータ(図2)の大きさより大きいことになる。しかしながら図2と図3を比較すれば明らかなように、1987年7月における1-WAY モードのデータは太陽風プラズマの影響をそれなりに反映した結果になっている。このことから1-WAY モード時の σ_T の値は、実際には、

$$\sigma_T = 0.15 \text{ Hz (1-WAY モード)} \quad (20)$$

程度はあるものと推察される。従って、実際の各探査機搭載のオンボード発振器の安定度は公称値よりかなり良く、式(11)より逆算すると、

$$S = 4.6 \times 10^{-11} \text{ (1-WAY モードの推定安定度)} \quad (21)$$

程度はあるものと思われる ($\tau = 60 \text{ sec}$)。

ところで、オカルテーションの時期には、ダウンリンク熱雑音が上昇し、これにより

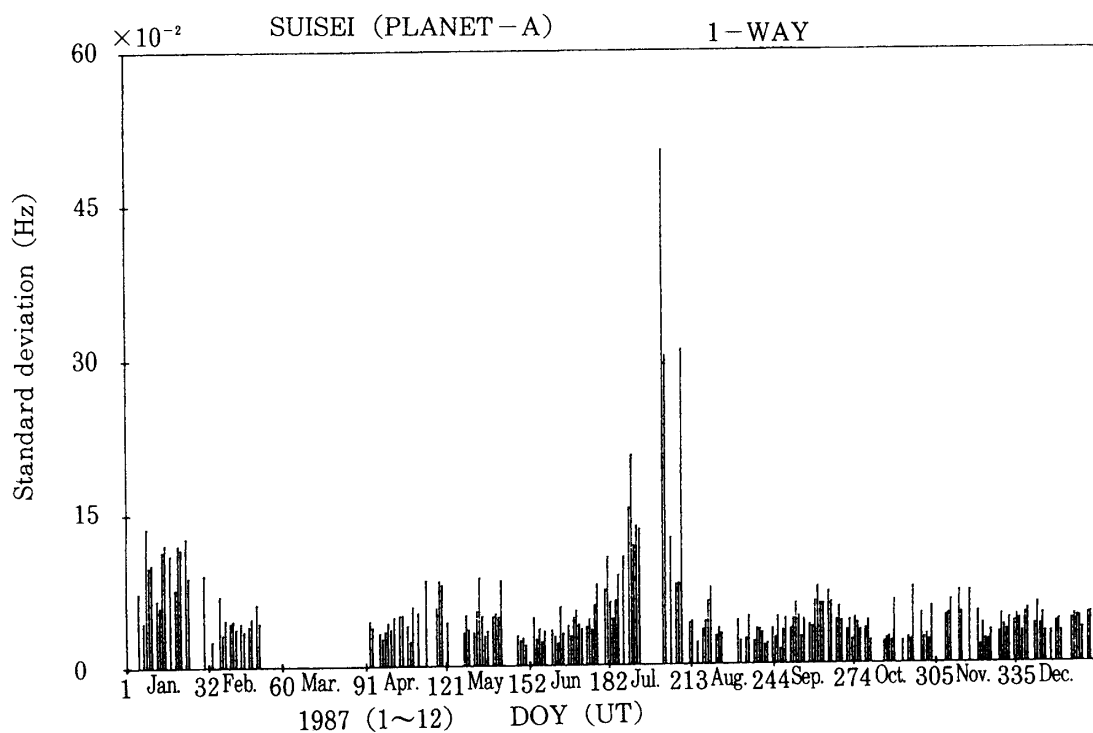


図2 「すいせい」の1987年の経年変化図 (1-WAY)

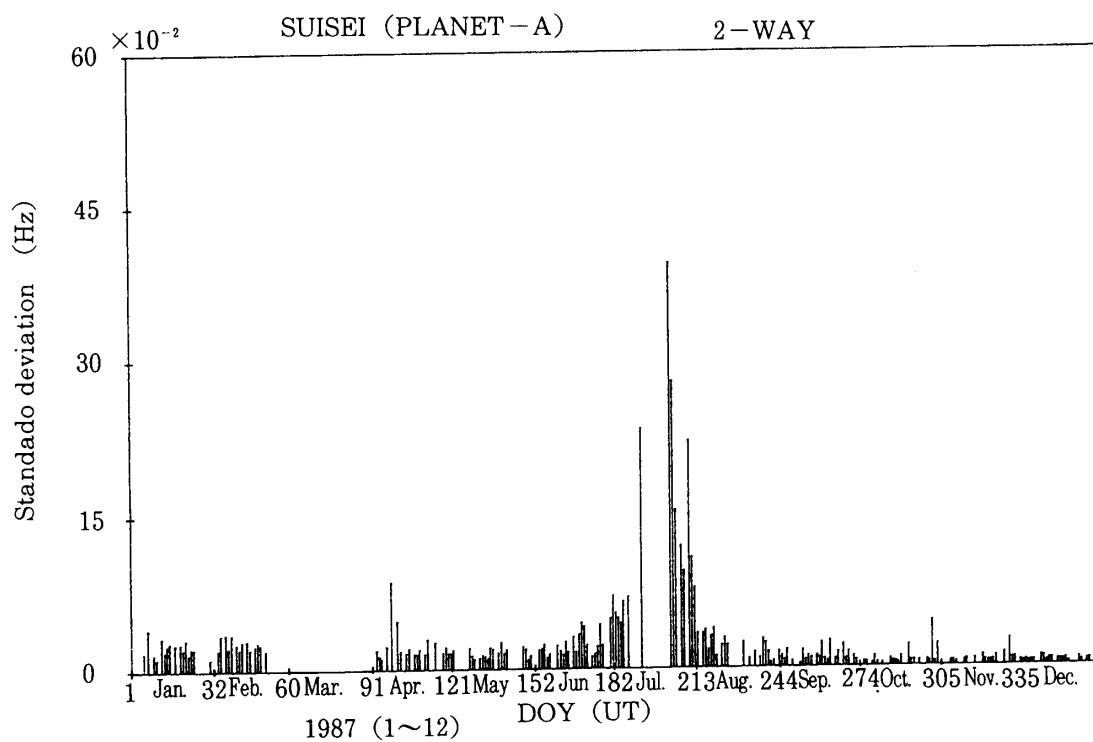


図3 「すいせい」の1987年の経年変化図 (2-WAY)

表4 システムに起因するランダム変動成分

① すいせい (1987年)

年/月/日	標準偏差の総和 $\sigma_{SYS}(\times 10^{-3}\text{Hz})$
1987/ 1/1-31	3.27
1987/ 2/1-28	3.27
1987/ 3/1-31	3.27
1987/ 4/1-30	3.27
1987/ 5/1-31	3.27
1987/ 6/1-30	3.27
1987/ 7/1-15	3.27
7/16	3.28
7/17	3.52
7/18	4.33
7/19	3.37
7/20	3.28
7/21-31	3.27
1987/ 8/1-31	3.27
1987/ 9/1-30	3.27
1987/10/1-31	3.27
1987/11/1-30	3.27
1987/12/1-31	3.27

② すいせい (1988年)

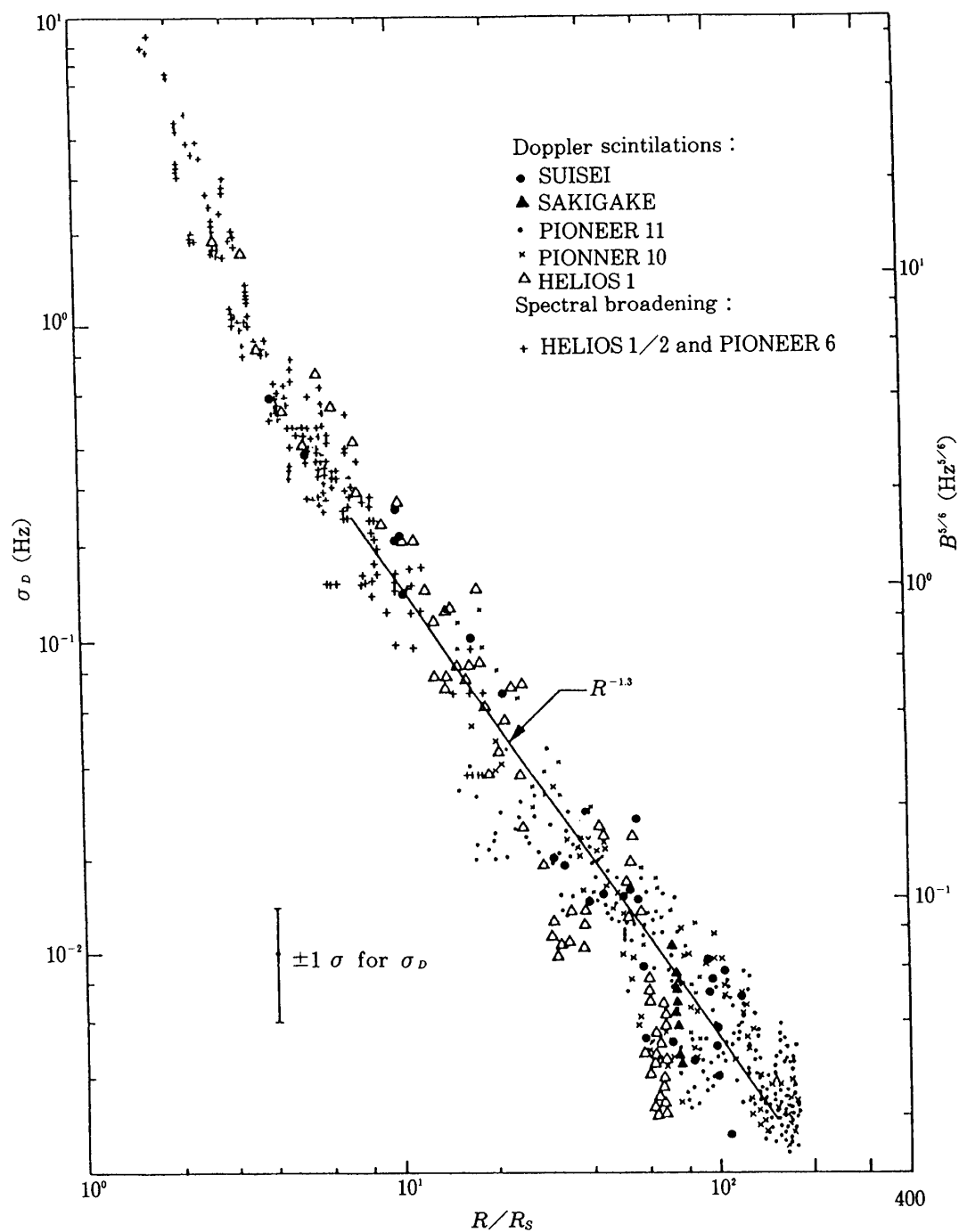
年/月/日	標準偏差の総和 $\sigma_{SYS}(\times 10^{-3}\text{Hz})$
1988/1/1-31	3.27
1988/2/1-28	3.27
1988/3/1-31	3.27
1988/4/1-30	3.27
1988/5/1-31	3.27
1988/6/1-30	3.27
1988/7/1-31	3.26
1988/8/1-31	3.26

③ さきがけ (1987年)

年/月/日	標準偏差の総和 $\sigma_{SYS}(\times 10^{-3}\text{Hz})$
1987/5/1-31	3.27
1987/6/1-30	3.27
1987/7/1-31	3.27
1987/8/1-31	3.27

σ_{SYS} も増加する(表4)。しかしながら、この結果を実際に取得されたドップラー・シンチレーションデータ(図3)と比較すれば明かなように、2-WAYモードにおけるドップラー・シンチレーションデータは、ドップラー計測システムのランダム変動成分の影響をほとんど受けていない事が分かる。従って、現時点でのドップラー計測システムは、科学的に有益なデータを取得するだけの性能を十分に備えたものと言える。

最後に、本論文でシステムの評価に用いたドップラー・シンチレーションデータ自身の有効性について論ずる。先ず、本システムで取得されたドップラー・シンチレーションデータの標準偏差から σ_{SYS} レベルの変動成分を除去したものを、米国等の深宇宙探査機により測定されたドップラー・シンチレーション解析結果[2]と比較したものを図4に示す。図4における横軸は、深宇宙探査機と地球を結ぶレイパスの太陽からの距離(R)を太陽半径(R_s)で正規化した値(Solar-Offset)である。同図をみると、本システムで得られたドップラー・シンチレーションデータは、米国等の深宇宙探査機により得られた結果と非常によく一致しており、本データの科学的な有効性が立証された。次に、 Kp インデックス[3]と呼ばれる太陽活動を示す指標(地球上で観測されたデータであり、太陽風プラズマの速度に比例するもの)と比較する。比較対象としたデータは、1986年2月のデータである。図5と図6を



$$[\sigma_D = (\sigma_{D0}^2 - \sigma_{SYS}^2)^{1/2}]$$

σ_{D0} : ドップラー・シンチレーションの標準偏差

σ_{SYS} : システムに起因するランダム変動成分の標準偏差

図4 Solar-Offsetに対する「さきがけ」・「すいせい」の
ドップラー・シンチレーション σ_D

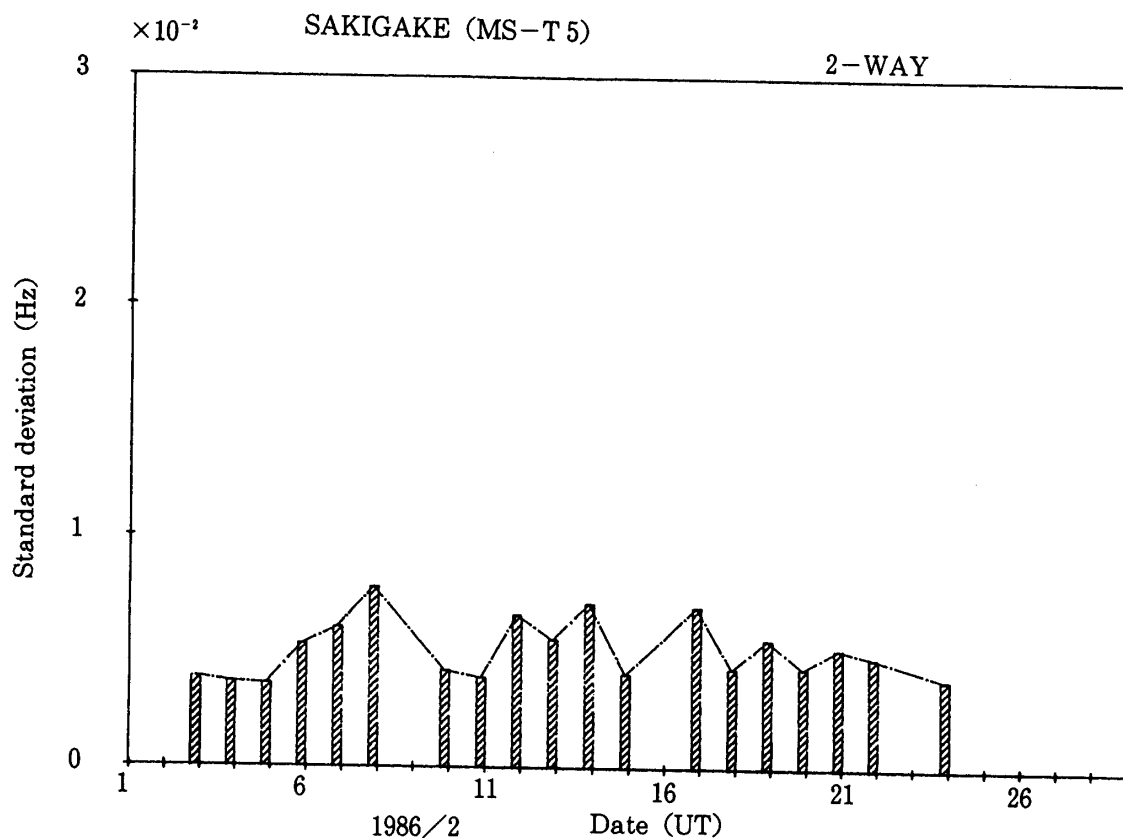


図5 1986年2月のドップラー・シンチレーションの日変化
(「さきがけ」2-WAY データ)

Planetary 3-hour-range indices (K_p) by 27-day solar rotation interval

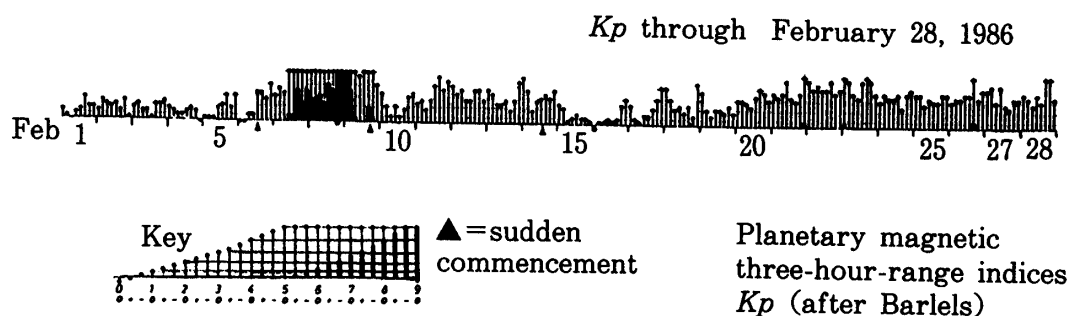


図6 1986年2月の K_p インデックス

比較すると明らかなように、本データの日変化と、 K_p インデックスの日変化とはかなり良く対応している。ドップラーシンチレーションの大きさは、太陽風プラズマの速度と密度の積に比例するため、両者は完全に一致するべきものではないが、かなりの相関が見られるこ

とは、本データが科学的に有効なものであることの一つの証拠であると考えられる。

5. む す び

「さきがけ」、「すいせい」追跡用のドップラー計測システムの性能を、理論によるノミナルな値のみで評価した結果、いくつもあるランダム変動成分の中でドップラー計測システムの精度に顕著に影響を及ぼすものが、基準周波数変動によるものであることが判明した。このことより、基準周波数発生装置の周波数安定度の改善が、システムの性能向上にとって極めて大きな要素になっていることが判明した。現在、臼田には水素メーザ原子時計が導入されており2-WAYモードでは、精度が更に向上するものと期待される。今後は、深宇宙探査機を人工の電波源とする電波科学観測の重要性が増して行くものと思われるが、この様な意味からも今後のミッションに搭載するオンボード発振器は可能な限り安定度の高いものを選ぶ必要性があろう。

謝 辞

本論文に関する資料を提供して頂いた宇宙科学研究所の井上浩三郎助手に深謝する。

参 考 文 献

- [1] Develet, "Fundamental Accuracy Limitations in a Two-Way Coherent Doppler Measurement System", *IRE trans. on SET*, p.80, 1968.
- [2] R. Woo, "Radial Dependence of Solar Wind Properties Deduced from HERIOS 1/2 and PIONEER 10/11 Radio Scattering Observations", *Ap. J.* 219, p.727, 1978.
- [3] Solar-Geophysical Data prompt reports, noaa, from (No.510, Part 1, 1987) to (No.529, Part 1, 1988).