

「No.19 プロブレム」と呼ばれる GPS 衛星の故障

福島 莊之介*

1 はじめに

本文では、今まであまり話題にならなかった「No.19 problem (ナンバー・ナインティーン・プロブレム): 19 番衛星問題」と呼ばれる GPS 衛星の故障について、その経過と、国際民間航空機関 (ICAO) を中心に検討されている GNSS (全地球的衛星航法システム) での対応について述べる。この故障は、最近まで、断片的な情報や数例の文献 [1, 2] があるだけで、まとまった解説がされたことがなかった。これは当時、この特殊な故障の影響規模が小さかったためと思われる。筆者は、最近ようやくこの故障の経過を詳細に解説した文献 [3] に出会った。そこで、本文では、既知の断片的な情報とこの文献、さらに引用された過去の文献も含め、この問題について、なるべくわかりやすく全体を解説してみる。また、この故障を含む概念の拡大として、最近発表されている「エビル・ウェーブフォーム (Evil Waveform; 不良波形)」と呼ばれるコンセプトとこれを検知する SQM (Signal Quality Monitor; 信号品質モニタ) についても簡単に述べる。

2 故障状況とその影響

この GPS 衛星の故障が発見されたのは、GPS の民間利用が宣言される以前の 1993 年 3 月頃と言われている。GPS の初期運用段階 (IOC: Initial Operating Capability) が宣言されたのは、この故障中の 1993 年 12 月 8 日であり、故障の復旧は翌月の 1994 年 1 月であった。このことから当時この故障の重要度が低かったことが想像できる。GPS の民間利用が正式に宣言されたのは、同 1994 年 2 月 17 日であり、24 衛星配置が完成したのは、1994 年 3 月 10 日のブロック II 衛星の打ち上げによる。この故障の特徴は、GPS 単独測位を使う多くのユーザには全く影響がなく、DGPS (ディファレンシャル GPS) で 19 番衛星を受信している時間帯だけに、数メートルから十メートル程の誤差が発生するという特殊な現

象にある。しかも、DGPS の基準局とユーザ局に異なったタイプの受信機を使った場合にだけ、この故障は発生した。当時の実験結果では、この誤差の垂直成分が 3~8 メートルであると報告 [2] されている。また、この故障が大きく取り上げられなかったもう一つの理由は、GPS 衛星の運用が米空軍の管理下であり、衛星故障に関する詳細な情報が公開されなかったことも、その一因と思われる。このとき、米軍が正式に GPS 衛星の故障情報を通知する NANU (Notice Advisory to NAVSTAR Users) に、この故障の記述はなかった。当時、この故障は、航空宇宙関係の雑誌のコラムでトリンプル社や大学関係者の報告として報じられただけである (図 1) [4, 5, 6]。

この故障が最近、話題になり始めたのは、民間航空に GPS を応用し、特に sole means (単独) 航法として、精密進入システム利用する場合に、問題となる可能性を持つからである。過去に 1 度、しかも正式運用前に発生したにも係わらず、この故障が民間航空で懸念される理由は、「単独の GPS 受信機を使った従来の方法で、この故障が瞬時に検出できない」ことにある。近年、DGPS を民間航空に利用するための静止衛星型及び地上型補強システム (SBAS; Satellite Based Augmentation System, GBAS; Ground Based Augmentation System) が米国、欧州、日本などを中心に研究開発されており、特に、SBAS については運用直前の段階にある。また、ICAO は、この補強システムを含む GNSS を導入し、航空路から精密進入までの運航に、将来航法システムを導入するための国際標準案を 1994 年から検討してきており、近々カテゴリ I 精密進入までの国際標準が発行される予定である。

これらシステムやその国際標準で、最も重要な要求要件は、航法装置が満足すべき測位精度だけでなく、その航法信号を使って航空機が航法した場合の安全性に関する信頼度 (「インテグリティ (完全性)」、「コンティニュイティ (連続性)」と呼ばれる) である。特に、インテグリティは、

* 国土交通省 電子航法研究所 航空施設部, 〒181-0011 三鷹市新川 6-38-1

WISCONSIN TRANSPORTATION DEPT. found accuracy degradations while conducting differential GPS precision landing tests at Oshkosh, Wis., which appear to show a problem with Navstar satellite PRN19. Using Trimble 4000SSE survey-grade receivers with enhanced performance, investigators noted errors in the C/A differential solutions, with a bias of about 4 meters, and traced them to PRN19. Trimble has several other discrepancy reports. Falcon Air Force Station, Colorado Springs, has no confirmation and reports the satellite's operating parameters appear normal. Anomalies that might not affect normal GPS use would be highlighted by DGPS, according to a Trimble official.

(a) 1993.7.26

THE UNIVERSITY OF LEEDS has found abnormal signals transmitted by Navstar satellite PRN19, which may help investigators find the cause of D-GPS accuracy degradations using that satellite [AW&ST July 26, p. 53]. Spectrum analysis using a 3-meter dish showed that the signal spectrum at the upper (L1) frequency is not normal. The carrier should be completely suppressed, but there is a residual signal +11 dB. above the maximum spectrum of the C/A code. Prof. Peter Daly said he also found two anomalous small spikes, one at each of the first code nulls, and evidence of spectrum skewing around the carrier. Since a satellite would not be launched with such defects, it is usually surmised they result from the large vibrations at launch, he said.

(b) 1993.8.30

ANOMALIES WITH THE GPS SIGNAL from satellite PRN19 have now been corrected, according to an official at the CAA Institute of Satellite Navigation in the United Kingdom. A carrier signal spike had been observed and problems found when using GPS receivers with different architectures in differential mode with that satellite [AW&ST Aug. 30, 1993, p. 55]. A normal spectrum was observed on Jan. 4, after the satellite was switched to a redundant part of the payload.

(c) 1994.2.14

図 1: アビエーション・ウィークリー誌の記事 ([4, 5, 6])

「航法システムが要求精度を満足しなくなった場合に、ユーザに瞬時に警報を通知する機能が完全に動作する確率」であり、非常に高いシステムの動作の信頼度が要求されている（例えば、カテゴリ I では 1-10 の 7 乗 = 99.99999 そこで、もし将来これと同様の故障がある衛星に発生した場合、精密進入中に「警報なしに、航法システムの誤差が必要な精度を越えてしまう危険な状態 (HMI: Hazardously Misleading Information または MI: Misleading Information と呼ばれる) に陥る可能性がある」と懸念される訳である。ICAO の GNSS では、GPS が民間航空の航法システムに不足する機能を補強システムで補うことをシステムの基本方針としている。このことから、補強システムでは、GPS 衛星（及び地上制御システム）が故障した場合の監視及び警報という難しい機能が要求されている。

3 衛星の番号

この故障の名前となっている「19 番」とは、GPS 衛星に割り振られた番号である。衛星の番号には 2 種類あり、1 つは GPS 衛星のシリアル番号とも言える SVN (Space Vehicle Number)、もう 1 つは GPS 衛星が使う擬似雑音符号のパ

SVN #	PRN #	Mission #	Launch	Slot	Ops date	Mon Opnl	Yrs Opn	IRON #
1	4	I-1	22-Feb-78	**	29-Mar-78	21.9	1.825000	5111
2	7	I-2	13-May-78	**	14-Jul-78	25.5	2.125000	5112
3	6	I-3	06-Oct-78	**	09-Nov-78	161.3	13.441667	5113
4	5	I-4	11-Dec-78	**	06-Jan-79	93.6	7.800000	5114
5	8	I-5	08-Feb-79	**	27-Feb-79	45	3.750000	5115
6	9	I-6	26-Apr-80	**	16-May-80	126.8	10.566667	5116
7	11	I-7	18-Dec-81	**	10-Aug-83	116.8	11.458333	5117
8	11	I-8	14-Jul-83	**	14-Jul-83	0	0	9784
9	13	I-9	13-Jun-84	**	19-Jul-84	115.2	9.600000	9521
10	12	I-10	08-Sep-84	**	03-Oct-84	133.5	11.125000	9783
11	3	I-11	09-Oct-85	**	30-Oct-85	99.9	11.458333	8374
						78.29	YEARS	
						7.12	YEARS	
SVN #	PRN #	Mission #	Launch	Slot	Ops date	Mon Opnl	Yrs Opn	IRON #
14	14	I-14	14-Feb-89	E1	14-Apr-89	137.5	11.458333	1742
13	2	I-2	10-Jun-89	B3	12-Jul-89	134.5	11.208333	2567
16	16	I-16	17-Aug-89	E5	13-Sep-89	132.5	11.041667	6738
* 19	19	I-19	21-Oct-89	A4	14-Nov-89	138.5	10.875000	2272
17	17	I-17	11-Dec-89	D3	11-Jan-90	128.6	10.716667	4373
18	18	I-18	24-Jan-90	B2	14-Feb-90	127.5	10.625000	3028
20	20	I-20	29-Mar-90	B5	19-Apr-90	72.7	6.058333	3310
21	21	I-21	16-May-90	E2	31-Aug-90	126.9	10.575000	5661
15	15	I-15	01-Oct-90	D2	20-Oct-90	119.3	9.941667	8639
23	23	I-23	26-Nov-90	E4	10-Dec-90	117.8	9.800000	8986
24	24	I-24	03-Jul-91	D1	30-Aug-91	108.9	9.075000	5661
25	25	I-25	23-Feb-92	A2	24-Mar-92	102.1	8.508333	1920
28	28	I-28	09-Apr-92	C5	25-Apr-92	101.1	8.425000	2941
26	26	I-26	07-Jul-92	C2	23-Jul-92	98.2	8.183333	3055
27	27	I-27	09-Sep-92	A3	30-Sep-92	95.9	7.991667	2524
32	1	I-1	22-Nov-92	F1	11-Dec-92	93.6	7.800000	6809
29	29	I-29	18-Jan-93	H4	05-Jan-93	92.8	7.733333	3639
22	22	I-22	02-Feb-93	B1	04-Apr-93	89.8	7.483333	8800
31	31	I-31	30-Mar-93	C3	13-Apr-93	89.5	7.458333	4780
37	7	I-7	15-May-93	C4	12-Jun-93	87.5	7.291667	9689
39	9	I-9	26-Jun-93	A1	21-Aug-93	86.2	7.183333	9631
35	5	I-22	30-Aug-93	B4	20-Sep-93	84.3	7.025000	7948
34	4	I-23	28-Oct-93	D4	01-Dec-93	81.9	6.825000	9802
36	6	I-24	16-Mar-94	C1	16-Mar-94	78	6.500000	4715
33	3	I-25	28-Mar-96	C2	09-Apr-96	53.6	4.466667	3365
40	10	I-26	16-Jul-96	E3	15-Aug-96	49.4	4.116667	8006
39	19	I-27	12-Sep-96	B2	01-Oct-96	47.9	3.991667	3320
38	8	I-28	06-Nov-97	A5	18-Dec-97	33.3	2.775000	3722
						224.63	YEARS	
						8.02	YEARS	
SVN #	PRN #	Mission #	Launch	Slot	Ops date	Mon Opnl	Yrs Opn	IRON #
42	12	IR-1	17-Jan-97	**	**	0	0.000000	**
43	13	IR-2	22-Jul-97	F5	31-Jan-98	31.9	2.658333	8456
40	11	IR-3	06-Oct-99	B2	03-Jan-00	8.8	0.758333	1597
51	20	IR-4	10-May-00	E1	01-Jun-00	3.9	0.325000	1436
44	28	IR-5	16-Jul-00	B5	17-Aug-00	1.40	0.116667	8443
						3.83	YEARS	
						0.14	YEARS	

図 2: GPS 衛星に履歴 (2001.1 現在, NAVCEN[7] から)

ターン (C/A コード) に対応した PRN (Pseudo-Random Number) である。PRN は、36 種類で、1~32 番が GPS 衛星に使用されることになっており、サービスを停止した GPS 衛星の番号は新しい GPS 衛星で再使用されている。通常、GPS 受信機で表示される衛星番号のはこの PRN である。図 2 に米国沿岸警備隊ナビゲーションセンター (NAVCEN) の WWW ページ [7] に掲載されている GPS 衛星の履歴を示す。この図から、現在までに打ち上げられた全ての GPS 衛星に SVN と PRN の 2 つの番号が付与されていることがわかる。問題の 19 番衛星というのは、1989 年 10 月 21 日に打ち上げられ、1989 年 11 月 14 日に A プレーンの 4 スロットで運用を開始した 4 番目のブロック II 衛星, SVN19/PRN19 衛星 (図 2 中の*) のことである。この衛星はそれ以後 10 年以上、現在も稼働中である。

4 誤差の発生原因

米国トリプル社のカルファス氏は、文献 [2] において、「ある異なったタイプの GPS 受信機を用いて DGPS を行った場合、垂直方向に 8m の誤差が発生する場合があります、この現象は 19 番衛星が受信されているときに発生する」ことを指摘し、実験結果とその原因を考察している。図 3 はこの文献で発表された 20 時間の観測結果であり、縦軸である固定受信位置の高度に 19 番衛星

が見えている時間帯（約6時間）だけ、最大8m程度のゆっくりと変化する誤差が生じていることを示している。この実験で使用された2つのタイプのトリンプル社製受信機とは、受信信号を逆拡散するときの相関処理の方式が異なる従来型のものであった。実験は、基準局（地上側）とユーザ局（航空機側）の両方に従来型または新型を使用する場合、新型と従来型を混在して使用した場合について行われた。この結果、基準局とユーザ局の両方に同じタイプの受信機を使った場合には誤差は生じず、異なったタイプの受信機で実験したときのみ誤差を生じることが判明した。また、似たような現象は、海軍大学院大学（Naval Postgraduate School）の行った実験でも生じたとの記述もある。このとき使用された受信機は、異なった製造メーカーのものであった。

通常 GPS 受信機では、ディレイロックループ（DLL）と呼ばれる回路を使い、受信機の内部時計に同期して発生させた PRN コードと受信信号の相関をとる。そして、相関値が最大になるように、フィードバックループにより、PRN コードの位相をずらす。この位相のずれの量から受信信号の位相すなわち送信時刻がわかり、受信時刻との差をとることにより擬似距離が測定できる。文献の記述に従えば、従来型の相関方式はピークから 3dB 低下点付近で動作し（標準相関器と呼ばれている）、新型はピーク付近で動作する（ピーク相関器と呼ばれている）。このため、何らかの原因が相関波形を非対称（図 4 下）にし、擬似距離に誤差を生じて DGPS の測位誤差となったと結論している。一昨年、筆者はカルファス氏にメールを送り、この原因について問い合わせた。このとき返事の主旨は、「原因は 19 番衛星のパワーアンプの故障であり、これにより送信スペクトルが非対称になったことである」であった。また、彼によれば、「19 番衛星はその後、パワーアンプの予備への切り替えにより復旧している。しかし、この現象は軍用の GPS の仕様が民間の仕様を満足しないひとつの例であり、今後モニタが必要になる」とのことであった。

5 故障の発見と復旧経過の詳細

文献 [3] によれば、故障の発見と復旧の経緯は次のようである。SVN19 は、1989 年 10 月 21 日

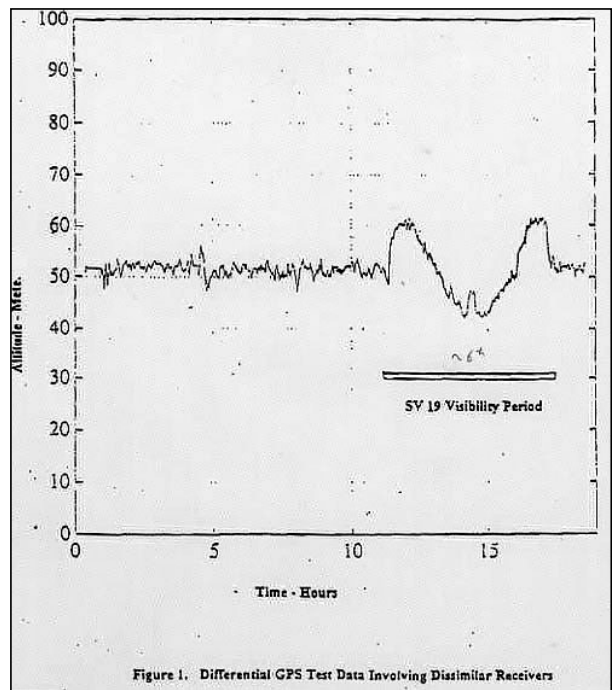


図 3: 19 番衛星受信時の垂直誤差（文献 [2]）

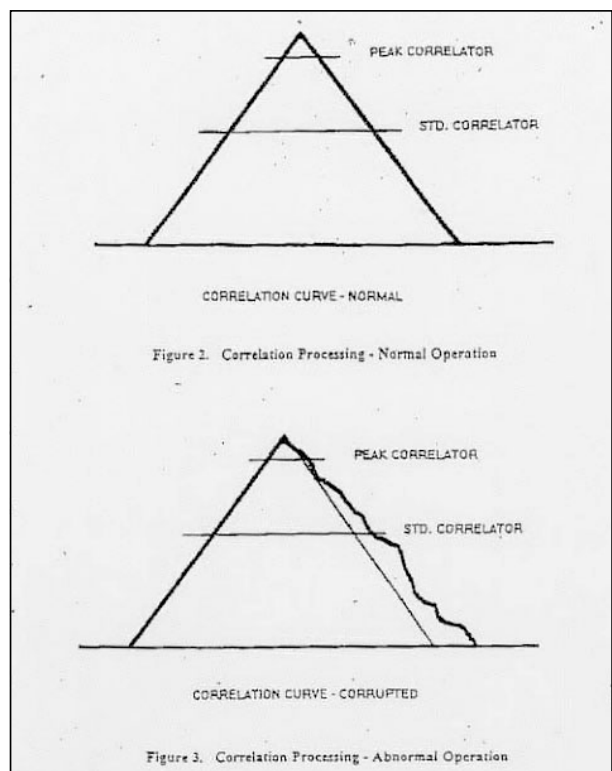


図 4: GPS 信号の相関波形（上は正常時、下は歪みが生じた場合）（文献 [2]）

に打ち上げられ、同年 11 月 14 日に運用を宣言した。その約 8ヶ月後、L1 信号スペクトルにキャリア漏れ（carrier leakage）による故障が発生した。この故障が最初に見つかったのは、1990 年 7 月 31 日にキャンプパークス（Camp Parks）で

行われた，RF 試験システムでのデータ収集の際であった．また，翌年 7 月に行われた RF スペクトラムの測定では，L1 位相の変調がアンバランスで 10dB のキャリア漏れがあることがわかった．しかし，このときユーザの装置に異常があったという報告はなく，運用への影響はないと考えられた．しかし，1993 年 3 月に行われた FAA の着陸装置のためのフィールド試験でこの影響は報告された．また，アビエーション・ウィーク誌 (Aviation Week & Space Technology) では，1993 年 7 月 26 日号で，GPS を使った精密進入のテストの際に 19 番衛星に問題があり，DGPS で 4m の誤差を生じることを，トリンブル社の見解として報じている (図 1 上)．その後，トリンブル社は米空軍 (USAF Space Command 2SOS) に SVN19 の C/A コードの調査を正式に要請した．米空軍による障害の調査が開始され，キャンプパークスとリード (Leeds) 大学のペーター・デリー (Peter Daly) 教授によって再びスペクトルの測定が行われた．

1993 年 10 月 14 日，米空軍による最初の復旧処置が行われた．これはスペクトルのアンバランスを改良することを目的とした，変調コンポーネントの切り替えであり，予防保守に数分間の運用停止を追加して行われた．この保守は，NANU 324-93287 に記述がある (図 5 上)．この結果 DGPS にあるバイアスは当初の半分以下になり，トリンブル社によって 2m 以下になったことが確認された．同時にデリー教授はキャリア漏れが 9dB から 2dB に減ったことを示し，キャンプパークスでも同様の結果を確認した．2 回目の復旧動作は 1994 年 1 月 3 日に実施された．これはナビゲーションシステムのベースバンド切り替えであり，NANU 343-93294 と 396-93337 に記述がある (図 5 中，図 5 下)．1 回目の復旧動作から 2 回目までに約 2ヶ月を要しているのは，2 回目の作業が大変難しいもので事故が心配されたためと言われる．このため，2 回目の復旧動作は次の原子時計の予防保守の時期に一致させ，24 時間の作業時間を計画して実施された．この後，位相のアンバランスとキャリア漏れがなくなったことがリード大学などのサイトで確認された．また，トリンブル社はオフセットが 25cm と報告した．デリー教授もまた，スペクトルが正常に戻ったこ

```
---324---
NOTICE ADVISORY TO NAVSTAR USERS (NANU) 324-93287
SUBJ: FORECAST MAINTENANCE ON PRN19 DAY 287/0600 UTC TO DAY
287/0800 UTC
1. CONDITION: PRN19 (SVN19) IS SCHEDULED FOR MAINTENANCE ON DAY
287/0600 UTC UNTIL DAY 287/0800. DURING THIS TWO HOUR WINDOW,
USERS MAY EXPERIENCE A LOSS OF LOCK FOR 2-3 MINUTES. OTHERWISE
THE VEHICLE WILL BE USABLE DURING THIS MAINTENANCE WINDOW.
2. USERS OF GPS ARE CAUTIONED THAT THE SYSTEM IS NOT YET FULLY
OPERATIONAL. SIGNAL AVAILABILITY AND ACCURACY ARE SUBJECT TO
CHANGE DUE TO AN INCOMPLETE CONSTELLATION AND OPERATIONAL TEST
ACTIVITIES.
3. POC: CAPT THOMPSON AT (719) 550-6378 OR DSN 560-6378.
```

(1回目のコレクティブアクション)

```
---343---
NOTICE ADVISORY TO NAVSTAR USERS (NANU) 343-93294
SUBJ: PRN 19 COURSE ACQUISITION (CA) CODE DEFICIENCY
1. CONDITION: ALTHOUGH THE PERFORMANCE OF PRN 19 HAS BEEN NOMINAL FOR
THE MAJORITY OF PRECISION AND CA CODE USERS SINCE THE BEGINNING OF
ITS MISSION, SOME DIFFERENTIAL USERS MAY HAVE ENCOUNTERED DEGRADED
PERFORMANCE WHEN USING THIS VEHICLE. ANALYSIS AND TROUBLE SHOOTING IS
ONGOING. THE ESTIMATED TIME FOR CORRECTION IS 30 NOV 93.
2. USERS OF GPS ARE CAUTIONED THAT THE SYSTEM IS NOT YET FULLY
OPERATIONAL.
```

```
---396---
NOTICE ADVISORY TO NAVSTAR USERS (NANU) 396-93337
SUBJ: PRN 19 COURSE ACQUISITION (CA) CODE DEFICIENCY
REF: NANU 343-93294 DTG 212030Z OCT 93
1. CONDITION: ALTHOUGH THE PERFORMANCE OF PRN 19 HAS BEEN NOMINAL FOR
THE MAJORITY OF PRECISION AND CA CODE USERS SINCE THE BEGINNING OF
ITS MISSION, SOME DIFFERENTIAL USERS MAY HAVE ENCOUNTERED DEGRADED
PERFORMANCE WHEN USING THIS VEHICLE. ANALYSIS AND TROUBLE SHOOTING IS
STILL ONGOING. THE PREVIOUS ESTIMATED TIME FOR CORRECTION OF 30 NOV
93 HAS BEEN EXTENDED TO 15 JAN 94.
2. USERS OF GPS ARE CAUTIONED THAT THE SYSTEM IS NOT YET FULLY
OPERATIONAL.
3. POC: CAPT THOMPSON AT COMMERCIAL (719) 550-6378 OR DSN 560-6378.
```

(2回目のコレクティブアクション)

図 5: 19 番衛星の故障復旧のため，実施されたメンテナンス (NANU: 米軍からの GPS の運用情報: [8] による)

とを報告した．

6 最近の動き

最近この故障は，さらに一般化された「エビル・ウェーブフォーム」という，新しいコンセプトで，RTCA や ICAO の GNSS 関連の会議でも議論されており，米国の大学関係者や受信機の製造メーカーによる開発研究も始まっている．現在 ICAO の専門家会議が検討する GNSS の国際標準案では，航空の要求要件に不足する GPS (衛星及び地上のシステム全体を指す) の機能を補強システムで補うこととしており，この故障を検知し瞬時に警報を発するモニタ機能 (SQM) を補強システムに組み込む方針が採用されている．このコンセプト [9] を提唱しているのは，スタンフォード大のエンゲ (Per Enge) 教授らであり，19 番衛星問題に限らず，衛星の NDU (ナビゲーションデータユニット) 内の故障で発生し，受信機相関波形を不良にする信号波形をエビル・ウェーブフォームと呼ぶ．このコンセプトには，パルスのチップ長が変化するデジタル的な現象，パルスがリングングやダンピングを起こすアナログ的な現象が含まれ，これにより相関波形は，ピー

クがフラットになったり、歪んだり、複数になったりする。また、この不良波形を検出するための受信機（SQM 機能を備える）の研究開発 [10] も、ノバテル社などで始まっており、今後は、不良波形信号発生器の開発、ベンチ試験、フィールド試験などの実施が期待される。

7 まとめ

「ナンバー 19 プロブレム」について、故障発生
の経緯を中心に、民間航空での GNSS への影響、
対応策として補強システムに SQM を採用するこ
となどを紹介した。GPS 衛星の故障については、
これ以外にも「BLOCK-II 衛星の瞬断」[11, 12]
が有名である。この現象は、エフェメリスの切り
替え時に起こる衛星の動作不良（3 日に 1 回程
度）で、瞬間的（数秒間）に GPS 信号が途絶え
る現象である。この現象は、BLOCK-II 衛星だけ
に存在し、BLOCK-IIA, IIR にはないと言われて
いる。しかし、BLOCK-II はまだ現役の衛星で現
在 5 基（SVN13-21 まで）存在する。これについ
てもまた機会があれば紹介したい。また、本文
に関してご意見・ご質問がありましたら、電子
メールでお願いします。

参考文献

- [1] P. Daly, etc., “Recent advances in the implementation of GNSS,” Proc. ION GPS-93, pp.433-440, 1993.
- [2] R. M. Kalafus, “A new error source in differential GNSS operations,” DGNSS error phenomenon, July 1993.
- [3] C. Edgar, etc., “A co-operative anomaly resolution on PRN-19,” Proc. ION GPS-99, Sept. 1999.
- [4] Aviation Week & Space Technology, p.53, July 26, 1993.
- [5] Aviation Week & Space Technology, p.55, Aug. 30, 1993.
- [6] Aviation Week & Space Technology, p.54, Feb. 14, 1994.
- [7] Internet document, “GPS constellation history and status,” <http://www.navcen.uscg.mil/gps/geninfo/costell.htm> .

- [8] Internet document, “Notice Advisory to Navstar Users (NANU) Archives (1990-1997),” <ftp://ftp.navcen.uscg.mil/GPS/archives/nanu/>.
- [9] A. M. Mitelman, J. Jung, P. Enge, “LAAS monitoring for a most evil satellite failure,” Proc. ION NTM-99, pp.129-134, Jan. 1999.
- [10] A. Jakob, “An approach to GPS satellite failure detection,” Proc. ION GPS-99, pp.751-759, Sept. 1999.
- [11] H. S. Cobb, etc., “Observed GPS signal continuity interruptions,” Proc. ION GPS-95, pp.793-795, 1995.
- [12] P. Daly, “Ranging Signal Anomales on GPS Block II satellites,” GPS World, pp.68, 76, Sept. 1998.