

GPS における週番号の決定と時刻表現に関連する諸問題

坂井 丈泰* a)

Determination of Week Number and Problems Regarding Representation of Time in GPS Applications Takeyasu SAKAI* a)

あらまし GPS をはじめとする衛星航法システムでは、受信機の現在位置のほかに現在時刻及び日付を得ることができる。特に時刻については高い精度で知ることができ、すでにネットワーク基地局間の時刻同期などに広く利用されている。ところで、GPS の航法メッセージにおける現在時刻の表現は有限の情報量しかなく、週番号の取扱いにおいて約 20 年の周期の不確定性をもつことが知られている。本論文は、週番号の不確定性を決定する方法を述べるとともに、潜在的な不具合要因となり得る GPS の時刻表現における問題について整理した。

Abstract GPS and other satellite navigation systems give users the current time and date as well as the current position. The time derived by the satellite navigation system is very accurate, which has been used for time synchronization between network stations. By the way, the current time is represented by the limited amount of information in the navigation message of GPS and the uncertainty of week number induces 20-year period ambiguity. This paper describes some methods for determination of week number ambiguity and summarizes possible problems regarding representation of time in GPS applications.

キーワード GPS, 航法メッセージ, 週番号, 2038 年問題

Keyword GPS, navigation message, week number, year-2038 problem

1. まえがき

GPS をはじめとする衛星航法システムを用いると、ユーザ受信機の位置と同時に、正確な時刻も求められる。これは、衛星航法システムは一般に航法衛星が送信した測距信号がユーザ受信機に到達するまでの伝搬時間を測定していることから、正しい位置が判明した時点でこれに対応した時刻も計算できることによる。GPS の測位精度は一般に数 m~10m 程度であるから、時刻についても 10ns~数十 ns の精度で知ることができる。GPS のこのような性質は離れた地点間での時刻同期に有用であって、すでにネットワーク基地局間の時刻同期や大陸間の時刻比較といった分野で広く利用され、時刻同期専用の受信機も市販されている。

一般に、衛星航法システムでは受信機の現在位置のほかに現在時刻及び日付を得ることができる。これは、衛星航法システムの場合は航法衛星の軌道情報を含む航法メッセージをユーザに対して放送する必要があり、これに日付や時刻といった情報が含まれているからである。GPS の場合は UTC (universal time coordinate: 協定世界時) との対応関係を表す情報も航法メッセージに含まれており、GPS により得た時刻を UTC に変換できるよう配慮されている。

ところで、GPS の航法メッセージにおける現在時刻の表現は有限の情報量しかなく、週番号の取扱いにおいて約 20 年の周期の不確定性をもつことが知られている。本論文は、この不確定性を除いて週番号を決定する方法を述べるとともに、潜在的な不具合要因となり得る GPS の時刻表現における問題について整理することを目的とする。以下、第 2 章で GPS における時刻の表現方法について述べ、第 3 章では約 20 年の周期の不確定性をもつ GPS 週番号の決定方法を示す。第 4 章では時刻表現に関連する潜在的な問題を検討することとする。

2. GPS における時刻の表現

GPS の測距信号には航法メッセージと呼ばれる情報が重畳されており、航法メッセージを放送している GPS 衛星自身の軌道及びクロックに関する情報のほか、軌道上にあるすべての GPS 衛星の概略の軌道及びクロック情報が放送されている。前者は、GPS 衛星の測距信号により測定した距離を用いてユーザ受信機の位置を計算する際に使用できる精度を有しており、エフェメリス情報と呼ばれる。後者は GPS 衛星の捕捉に利用される粗い精度の情報であり、アルマナック情報という。GPS 衛星が放送している航法メッセージに含まれている軌道・クロック情報の有効期間は長いもので 6 日間に及び、GPS の時間管理においては 1 週間がもっとも大きな単位とされている。

GPS における時刻表現の基本単位は、1.5 秒エポックで動作している Z カウント (Z-count) である[1]。Z カウントは 29 ビットで構成され、このうち上位 10 ビットは週番号 (week number)、下位 19 ビットは TOW (time of week) カウントと呼ばれる。

*独立行政法人 電子航法研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23

Electronic Navigation Research Institute

7-42-23 Jindaiji-Higashi, Chofu-shi, Tokyo, 182-0012

a) sakai@enri.go.jp

表 1 GPS 週番号に対応する日付の例

Table 1 GPS week numbers and the associate dates.

WN	Date	WN	Date	WN	Date
0	80-01-06	1664	11-11-27	1684	12-04-15
1	80-01-13	1665	11-12-04	1685	12-04-22
2	80-01-20	1666	11-12-11	1686	12-04-29
1023	99-08-15	1667	11-12-18	1687	12-05-06
1024	99-08-22	1668	11-12-25	1688	12-05-13
1025	99-08-29	1669	12-01-01	1689	12-05-20
1650	11-08-21	1670	12-01-08	1690	12-05-27
1651	11-08-28	1671	12-01-15	1691	12-06-03
1652	11-09-04	1672	12-01-22	1692	12-06-10
1653	11-09-11	1673	12-01-29	1693	12-06-17
1654	11-09-18	1674	12-02-05	1694	12-06-24
1655	11-09-25	1675	12-02-12	1695	12-07-01
1656	11-10-02	1676	12-02-19	1696	12-07-08
1657	11-10-09	1677	12-02-26	1697	12-07-15
1658	11-10-16	1678	12-03-04	1698	12-07-22
1659	11-10-23	1679	12-03-11	1699	12-07-29
1660	11-10-30	1680	12-03-18	1700	12-08-05
1661	11-11-06	1681	12-03-25	2048	19-04-07
1662	11-11-13	1682	12-04-01	3072	38-11-21
1663	11-11-20	1683	12-04-08	4096	58-07-07

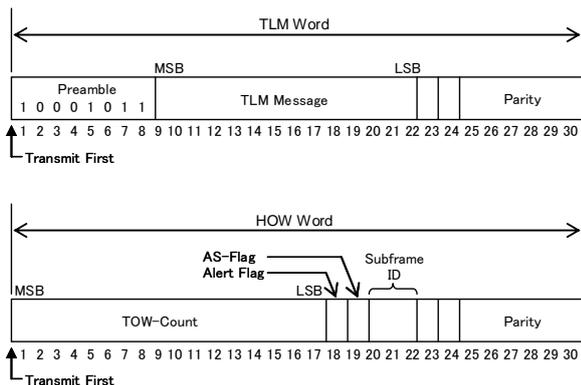


図1 航法メッセージのTLMワードとHOWワード

Fig. 1 TLM and HOW words in GPS navigation message.

GPSにおける「週」は、毎週日曜日の0時に始まり、土曜日の24時に終わる。週番号とは、1980年1月6日(日曜日)に始まる週を第0週として数えた通し番号であって、週番号と日付の対応は表1のとおりである(年月日の表記はYY-MM-DD形式による。他の表も同様)。Zカウントでは週番号に10ビットしか割り当てられていないから、Zカウントに保持されているのは本来の週番号の下位10ビットである。

TOWカウントとは、週の初めからの経過時間を1.5秒を単位として表した整数である。1週間は604,800秒であるから、TOWカウントの範囲は0~403,199である。

GPS衛星が送信する信号のうち、Pコードは週が切り替わる際にリセットされることから、週が始まる瞬間をPコードエポックという。また、Pコードを生成する回路に含まれるX1レジスタは1.5秒(Pコードの15,345,000チップに相当)を周期として動作しており、週の初め(Pコードエポック)から1.5秒毎のタイミングをX1エポックという。Zカウントは、このX1エポックのたびにカウントアップしていくということである。

さて、GPSは衛星位置の計算に必要な軌道情報をはじめとするさまざまな情報を航法メッセージとして放送している。航法メッセージの変調速度は50bpsで、1500ビットのフレームと呼ばれるブロックが30秒毎に繰り返される。各フレームは5つのサブフレームから構成されており、サブフレーム1~5が順に送信される。サブフレームの大きさは300ビットであるから、その伝送にはそれぞれ6秒を要する。サブフレームの先頭には30ビットのTLMワード、これに続いて同じく30ビットのHOWワードが配置されており、これらの内容は図1のとおりである。

HOWワードの先頭17ビットに現在時刻をあらわすTOWカウントの上位17ビットが格納されており、当該サブフレームの送出終了時点(すなわち、次サブフレームの送出開始時点)における時刻をあらわしている(ただし、最終サブフレームでは100800の代わりに0となる)。この時刻は週の初めからの経過時間を6秒を単位として表現しているのであるから、HOWワードに含まれる17ビットのTOWカウントは、その週に送出されたサブフレームの総数(当該サブフレームを含む)と解釈して

もよい。

現在の週については、サブフレーム1のHOWワードの次の第3ワードに10ビットのWN(week number)が格納されている。これはZカウントに含まれる週番号であり、1980年1月6日に始まる週を第0週として数えた週番号の下位10ビットである。

3. 週番号の決定

GPSの航法メッセージに含まれる週番号WNは、Zカウントの上位10ビットである。GPSの航法メッセージにおいては、このWNがもっとも長い周期をもつ時刻情報であるが、週番号の11ビット目以上の情報は得られない。このため航法メッセージの週番号WNは1023を超えると0に戻ってしまい、GPSでは0週目と1024週目の区別がつかない。すなわち、航法メッセージの週番号WNには1024週≒19.6年(ここでは「サイクル」と呼ぶことにする)の不確実性がある。

この不確実性を除いて週番号を決定する方法を整理すると、次のとおりである。3.1~3.7節は放送されているGPS信号のみから判定する方法、3.8節は受信機側のハードウェアに依存する方法である。なお、航法メッセージの週番号が0に戻れることを、週番号ロールオーバーということがある。表1には、最初の4回のロールオーバーが起きる日付を記載してある。

3.1 うるう秒情報 周知のとおり、UTCにはうるう秒(leap second)が存在する。これは、原子時にもとづいてつくられるUTCと地球の自転にもとづく世界時(UT1)の間の差を抑えるためのもので、地球の自転が完全に均一ではないことから必要とされる。うるう秒の実施はIERS(国際地球回転事業)が決定し、通例では年末あるいは6月30日に23:59:60という時刻

表 2 これまでに実施されたうるう秒
Table 2 Leap seconds applied up to now.

Date	Δt_{LS} [s]	WN	Tow [s]
80-01-06	0	0	0
81-07-01	1	77	259200
82-07-01	2	129	345601
83-07-01	3	181	432002
85-07-01	4	286	86403
88-01-01	5	416	432004
90-01-01	6	521	86405
91-01-01	7	573	172806
92-07-01	8	651	259207
93-07-01	9	703	345608
94-07-01	10	755	432009
96-01-01	11	834	86410
97-01-01	12	886	259211
99-01-01	13	990	432012
06-01-01	14	1356	13
09-01-01	15	1512	345614

$$\Delta t_{LS} = t_{GPS} - t_{UTC}$$

が挿入される。

UTC にはうるう秒が存在する一方で、GPS 時刻にはうるう秒はない。1980 年の第 0 週の時点では両者が表す時刻に差はなかったが、2010 年前半までに 15 回のうるう秒が実施されており、現時点では GPS 時刻は UTC に比べて 15 秒進んでいる。現在までに実施されたうるう秒の一覧を表 2 に示す。

GPS の航法メッセージには、GPS 時刻と UTC の差を記述する UTC パラメータが含まれている。これにはうるう秒に関する情報も含まれ、 Δt_{LS} がうるう秒による GPS 時刻と UTC の差をあらわす。UTC パラメータを利用すれば、 Δt_{LS} が 12 秒以下であればサイクル 0、14 秒以上であればサイクル 1 と判定できる。 Δt_{LS} が 13 秒の場合は、週番号 WN が 990 以上であればサイクル 0、そうでなければサイクル 1 である。

この方法は、航法メッセージをリアルタイムに受信している状況では適用可能であるが、UTC パラメータはサブフレーム 4 のページ 18 にあるため、12 分 30 秒間に一度しか放送されない点に注意が必要である。RINEX ファイルを処理する場合、航法ファイルのヘッダ部にうるう秒に関する情報が記載されていればよい。

なお、うるう秒については、UTC の連続性が損なわれるとの理由から廃止の可能性が検討されている[2]。実際に廃止されることとなれば、この方法は将来的なサイクル判定には使用できなくなる。

3.2 SV Config 情報 航法メッセージのサブフレーム 4 のページ 25 には、PRN 1~32 の各衛星について、それぞれの機能構成を表す情報が含まれている。このうち、SV Config 情報の意味は表 3 のとおりであって、各衛星が (i) ブロック I、(ii) ブロック II/IIA/IIR、(iii) ブロック IIR-M、(iv) ブロック IIF、のいずれのタイプであるかを知ることができる[1][3]。この区別は、SA (selective availability: 選択利用性) 及び Anti-Spoofing (欺

表 3 SV Config 情報
Table 3 Representation of SV Config.

SV Config	Satellite Type	Function Availability				
		SA	A-S	L2C	L5	L1C
000	Block I	No	No	No	No	No
001	Block II/IIA/IIR	Yes	Yes	No	No	No
010	Block IIR-M	Yes	Yes	Yes	No	No
011	Block IIF	Yes	Yes	Yes	Yes	No
100	Block IIIA	No	Yes	Yes	Yes	Yes

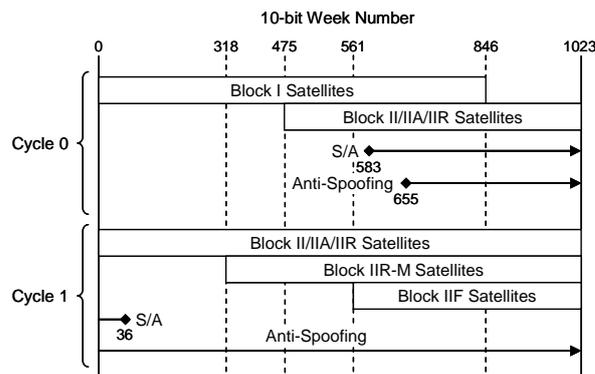


図 2 週番号サイクルと主要イベント
Fig. 2 Week number cycle and major events.

瞞防止)の機能の有無、ならびに L2C 信号・L5 信号・L1C 信号の有無と対応している。

もっとも初期型であるブロック I 衛星のうち最後まで運用されていたのは SVN 10 衛星 (PRN 12) であって、1996 年 3 月 26 日 (週番号 846 の火曜日) に運用を終了した。このことから、SV Config が 000 の衛星が含まれていればサイクル 0 と判定できる。SV Config が 000 の衛星がない場合は、週番号 WN が 846 以下であればサイクル 1 と判定する。

また、ブロック IIR-M 衛星の初号機 SVN 53 衛星 (PRN 17) は 2005 年 9 月 26 日 (週番号 1342 の月曜日) に打ち上げられているから、SV Config が 010 の衛星が含まれていればサイクル 1 と判定できる。SV Config が 010 の衛星がない場合は、週番号 WN が 318 (= 1342 - 1024) 以上であればサイクル 0 と判定する。ブロック IIF 衛星の初号機 SVN 62 衛星は 2010 年 5 月 28 日 (週番号 1585 の金曜日) に打ち上げられており、同様の判定に利用できる。

これらの関係をまとめると図 2 のとおりとなり、軌道上にある全衛星の SV Config 情報がわかればサイクルを判定することができる。この方法は、航法メッセージをリアルタイムに受信している状況では適用可能であるが、SV Config はサブフレーム 4 のページ 25 にあり、12 分 30 秒間に一度しか放送されない。RINEX ファイルを処理する場合はこの方法は使えない。

3.3 軌道傾斜角 ブロック I 衛星とブロック II 以降の衛星では軌道傾斜角が異なっており、前者は 63 度であったが、後者は 55 度とされている。このことを利用すると、SV Config 情報を参照しなくてもブロック I 衛星を識別することができる。すなわち、軌道傾斜角が 59 度以上であればブロック I 衛星、そうでな

ければブロック II 衛星と判定する。軌道面内ではほぼ同じ円軌道を描くため、軌道傾斜角以外の要素ではブロック I 衛星とブロック II 衛星を区別することはできない。

実際に 1991 年以降の航法メッセージを用いて調査したところ、ブロック I 衛星の有無に対応する軌道傾斜角の分布は図 3 のとおりであった。ブロック I 衛星のある時期 (1996 年まで) には軌道傾斜角が 60 度以上の衛星があるが、すべてのブロック I 衛星が運用を終了した後ではそれが見られなくなっている。

各衛星の軌道傾斜角は航法メッセージのサブフレーム 4 及び 5 にアルマナック情報として含まれており、SV Config 情報と同様に 12 分 30 秒間に一度の頻度で放送されている。アルマナック情報では軌道上の全衛星の軌道傾斜角が得られるから、ブロック I 衛星が含まれていればサイクル 0、そうでない場合は週番号 WN が 846 以下であればサイクル 1 と判定できる。

また、軌道傾斜角は航法メッセージのサブフレーム 3 にもエフェメリス情報として含まれており、こちらは 30 秒間に一度の頻度で受信できる。エフェメリス情報を参照することでブロック I 衛星が含まれていることがわかれば、週番号サイクル 0 と判定できる。ただし、エフェメリス情報を含む航法メッセージを受信できるのは可視衛星だけであるから、可視衛星にブロック I 衛星が含まれていない場合であっても、ただちにブロック I 衛星が存在しないものと判断することはできない。

3.4 Anti-Spoofing フラグ 精密測位サービス (precise positioning service: PPS) で使われる P(Y) 信号は P コードにより変調されるが、Anti-Spoofing モードにおいては P コードの代わりに Y コードが使用される。P コードの仕様は IS-GPS で公開されているが、Y コードについては公開されていない。市販されている二周波受信機はコードレスあるいはセミコードレスと呼ばれるタイプであって、Y コードを知らずとも P(Y) 信号を捕捉できるよう工夫されている。

Anti-Spoofing は偽信号の送信による妨害行為を防ぐために用いられるもので、SA と同じくブロック II 衛星から導入された機能である。実際には、1992 年 8 月から 1993 年 5 月にかけて Anti-Spoofing 機能の試験が行われており、1994 年 1 月 31 日 00:00 からブロック II 衛星を対象として実施された (NANU 050-94042)。その後は、現在に至るまで継続されている。

航法メッセージの各サブフレームの第 2 ワードである HOW ワードには、その航法メッセージを送信している衛星自身が Anti-Spoofing モードにあるか否かを示すフラグが含まれている。Anti-Spoofing モードは 1992 年 8 月 1 日より前には実施されていないから、Anti-Spoofing モードで動作している衛星があるならば、1992 年 8 月 1 日 (週番号 655 の土曜日) 以降であるものと判断できる。ただし、HOW ワードを受信できるのは可視衛星だけであるから、Anti-Spoofing フラグが ON となっている衛星が見えていない場合でも、Anti-Spoofing モードの実施前であると判断することはできない。RINEX ファイルを処理する場合は、観測データファイルに含まれるいずれか (あるいはすべて) の観測値の小数点以下第 4 桁に Anti-Spoofing フラグがある。

また、航法メッセージのサブフレーム 4 (ページ 25) には、軌

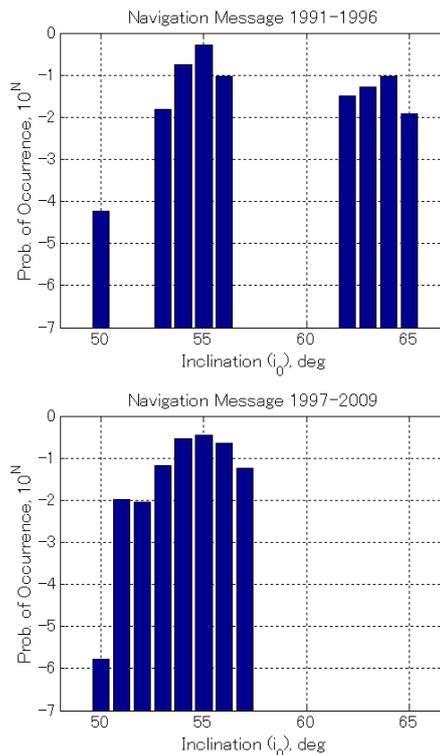


図 3 軌道傾斜角の分布

(上) 1991~1996 年, (下) 1997~2009 年

Fig. 3 Distribution of inclination angle.

(Upper) years 1991 to 1996; (Bottom) years 1997 to 2009.

道上の各衛星が Anti-Spoofing モードであるか否かを示すフラグが含まれている。ブロック I 衛星には Anti-Spoofing の機能はないから、Anti-Spoofing モードではない衛星があるならば、1996 年 3 月 26 日 (週番号 846 の火曜日 = 最後のブロック I 衛星の運用終了日) 以前であることがわかる。すべての衛星が Anti-Spoofing モードでないならば、1992 年 8 月 1 日 (週番号 655 の土曜日) 以前である。ただし、サブフレーム 4 のページ 25 は、12 分 30 秒に一度しか放送されない。RINEX ファイルを処理する場合はこの方法は使えない。

3.5 PRN 番号の妥当性 サイクル 0 の特に前半においては利用可能な GPS 衛星が少なかったことから、衛星の有無によりサイクルを判定できる。すなわち、それぞれの GPS 衛星が利用可能であった期間はわかっているから、処理中のデータに含まれる PRN 番号の妥当性を調べればよい。

PRN 番号に対応する GPS 衛星を整理すると、表 4 のとおりである。SVN (space vehicle number) は各衛星に固有の識別番号であり、製造された順に付されている (打上げ順序とは必ずしも一致しない)。一度運用が開始された衛星の PRN 番号は基本的には変更されないが、例外的に PRN 番号が変更された場合 (SVN32) や一度運用を終了したのちに PRN 番号を変更して復活した例 (SVN23, 35, 37) がある。なお、表 4 には打上げに失敗した衛星は含めていない。

PRN 番号 1~32 のそれぞれが利用可能であった時期を図示すると、図 4 のようになる。サイクル 0 の前半には PRN3~13

表4 PRN番号に対応するGPS衛星

Table 4 PRN numbers and the associate GPS satellites.

PRN	SVN	Type	Launch	Usable	Unusable	PRN	SVN	Type	Launch	Usable	Unusable
1	32	IIA	—	93-01-28	08-03-17	15	55	IIRM	07-10-17	07-10-31	—
	37	IIA	—	08-10-23	09-01-06		16	16	II	89-08-18	89-10-14
	49	IIRM	09-03-24	—	11-05-06	56		IIR	03-01-29	03-02-18	—
	35	IIA	—	11-06-01	—	17	17	II	89-12-11	90-01-06	05-02-23
2	13	II	89-06-10	89-08-10	04-05-12		53	IIRM	05-09-26	05-12-16	—
	61	IIR	04-11-06	04-11-22	—	18	18	II	90-01-24	90-02-14	00-08-18
3	11	I	85-10-09	85-10-30	94-04-13		54	IIR	01-01-30	01-02-15	—
	33	IIA	96-03-28	96-04-09	—	19	19	II	89-10-21	89-11-23	01-09-11
4	1	I	78-02-22	78-03-29	85-07-17		59	IIR	04-03-20	04-04-05	—
	34	IIA	93-10-26	93-11-22	—	20	20	II	90-03-26	90-04-18	96-07-22
5	5	I	80-02-09	80-02-27	84-05-11		51	IIR	00-05-11	00-06-01	—
	35	IIA	93-08-30	93-09-28	09-03-26	21	21	II	90-08-02	90-08-22	03-01-27
	50	IIR	09-08-17	09-08-27	—		45	IIR	03-03-31	03-04-12	—
6	3	I	78-10-06	78-11-13	92-05-18	22	22	IIA	93-02-03	93-04-04	03-08-06
	36	IIA	94-03-10	94-03-28	—		47	IIR	03-12-21	04-01-12	—
7	2	I	78-05-13	78-07-14	81-07-16	23	23	IIA	90-11-26	90-12-10	04-02-13
	37	IIA	93-05-13	93-06-12	07-12-20		60	IIR	04-06-23	04-07-09	—
	48	IIRM	08-03-15	08-03-24	—	24	24	IIA	91-07-04	91-08-30	—
8	4	I	78-12-10	79-01-08	89-10-14		25	IIA	92-02-23	92-03-24	09-12-18
	38	IIA	97-11-06	97-12-18	—	25	35	IIA	—	10-02-10	10-03-01
9	6	I	80-04-26	80-05-16	91-03-06		62	IIF	10-05-28	10-08-27	—
	39	IIA	93-06-26	93-07-21	—	26	26	IIA	92-07-07	92-07-23	—
10	40	IIA	96-07-16	96-08-15	—	27	27	IIA	92-09-09	92-09-30	—
11	8	I	83-07-14	83-08-10	93-05-04	28	28	IIA	92-04-10	92-04-25	97-08-15
	46	IIR	99-10-07	00-01-03	—		44	IIR	00-07-16	00-08-17	—
12	10	I	84-09-08	84-10-03	96-03-26	29	29	IIA	92-12-18	93-01-05	07-10-23
	58	IIRM	06-11-17	06-12-13	—		57	IIRM	07-12-20	08-01-02	—
13	9	I	84-06-13	84-07-19	94-06-20	30	30	IIA	96-09-12	96-10-01	—
	43	IIR	97-07-23	98-01-31	—	31	31	IIA	93-03-30	93-04-13	05-10-24
14	14	II	89-02-14	89-04-15	00-04-14		52	IIRM	06-09-25	06-10-12	—
	41	IIR	00-11-10	00-12-10	—	32	32	IIA	92-11-22	92-12-11	93-01-28
15	15	II	90-10-01	90-10-15	07-03-14		23	IIA	—	07-04-02	—

しか使われていないから、これ以外のPRN番号の信号が受信されているのであればサイクル0の後半と判定できる。具体的な方法としては、処理中のデータに含まれるPRN番号のそれぞれについて、サイクル0及びサイクル1のそれぞれを想定した場合に信号が存在し得るかどうかを調べ、あり得ない信号が受信されているようであればそのサイクルではないと判定する。ただし、受信機には軌道上のすべての衛星が可視なわけではないことに注意する。

この方法は、航法メッセージがなくても適用可能である。受信機あるいは処理ソフトウェアの内部に、表4に相当するデータベースが必要となる。

3.6 SVN番号の妥当性 前節と同様であるが、SVNが与えられている状況であれば、SVNの妥当性を調べることでよりサイクルを判定できる。

GPS衛星の設計寿命は7.5年であり、実際には15年程度に

わたり運用される衛星も存在するが、いずれにしてもGPS週番号の1サイクル(約20年)に比べて短い。したがって、処理中のデータに含まれるGPS衛星のSVNがわかれば、対応するサイクルを判定することが可能である。

航法メッセージにはSVNに関する情報は含まれていないから、この手法を適用可能な応用は限られる。SEMアルマナックファイルの先頭に記述されている週番号は10ビットであることからサイクルの判定が必要となるが、同ファイルではSVNが記載されていることから、この方法を適用できる。

また、表4からもわかるように、PRN番号とSVNの対応関係は時期により異なる。このことから、SVNが与えられている状況であれば、SVNとPRNの組合せを調べることでよりサイクルを判定することが可能である。

3.7 その他の方法 その他にも、GPSが放送している信号から現在の時期を特定する方法としては、たとえばSAの有無

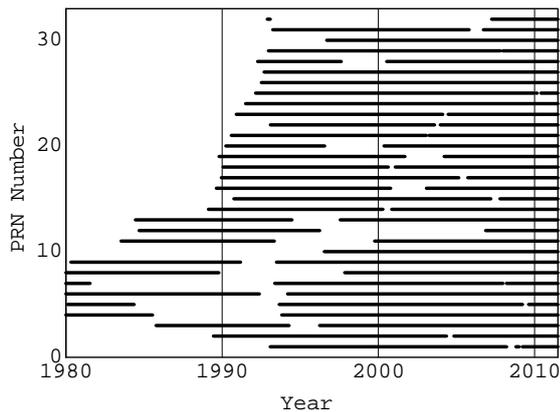


図4 PRN 番号の有効期間
Fig. 4 Availability of PRN numbers.

によりGPSの測距精度は大きく異なるから、ユーザ測距精度を示すURA (user range accuracy) インデックスからSA解除の前後いずれかを判定できる可能性がある。SAが実施されていた期間は、1990年3月25日(週番号533の日曜日)から2000年5月2日(週番号1060の火曜日)までである。ブロックI衛星及びSVN 15衛星にはSAがなかったことが知られている。

実際に1991年以降の航法メッセージを用いて調査したところ、SA解除の前後におけるURAインデックスの分布は図5のとおりであり、明らかな差異がみられる。ただし、URAインデックスにはしばしば大きな値が設定されることがあり、またSAの施されていた時期においても2~2.8mとされることがあった。従って特定の時刻におけるURAインデックスの値をもってSAの有無を判定することはできず、この方法によりサイクルを判定するのは実用的ではない。

また、ブロックIIAまでのGPS衛星はセシウム(Cs)及びルビジウム(Rb)の二種類の周波数標準を搭載しており、時期によっていずれか一方が使用されている。このことを利用して時期を特定することも考えられるが、どちらの周波数標準を使用しても航法メッセージに含まれる衛星時刻補正パラメータ a_{10} ~ a_{12} には大きな違いはなく、航法メッセージから周波数標準の種類を区別することはできない。

3.8 不揮発性メモリの利用 最後に、放送されているGPS信号のみによらず、不揮発性メモリを利用して週番号サイクルを判定することを考える。

週番号は連続的に変化して減少することはないから、最後にGPS信号の処理を行った週番号を保存しておくことができれば、週番号サイクルの不確定性をほぼ取り除くことができる。すなわち、保存されている前回処理時の週番号 WN_0 と現在の週番号 WN の関係が、 $WN > WN_0$ であればこれらは同一サイクル、 $WN < WN_0$ なら WN は WN_0 の次のサイクルに属しているものと判断できる。この方法では、週番号サイクルの1周期分に相当する約19.6年間以上にわたり電源が入れられなかった受信機はサイクル判定を誤ることとなるが、そうでない限り問題は起こらない。GPS受信機は一般にアルマナック情報

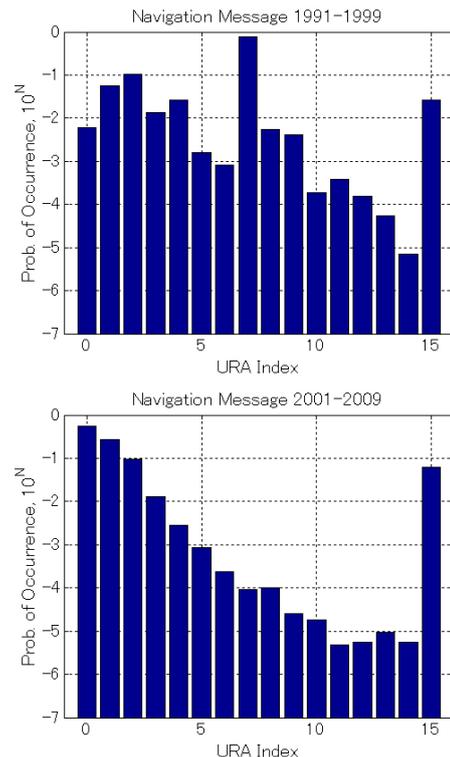


図5 URA インデックスの分布
(上)1991~1999年, (下)2001~2009年

Fig. 5 Distribution of URA index.

(Upper) years 1991 to 1999; (Bottom) years 2001 to 2009.

の保存のために不揮発性メモリを備えているから、このような判定処理を追加するのは大きな負担ではない。

また、受信機がリアルタイムクロックを備えている(あるいは受信機外部から時刻情報を取得できる)場合は、その時刻情報を利用して週番号サイクルを判定することができる。

4. 時刻表現の諸問題

GPS受信機及びその応用システムは、一般にマイクロコンピュータあるいは汎用コンピュータにより実装される。時刻情報は有限のビット長で表現されることとなるから、表現可能な時間範囲には限りがある。ここでは、時刻表現に関連して将来的に顕在化し得る問題を検討することとする。

4.1 桁あふれ:GPS エポックが起点の場合 GPSが時刻表現に用いているZカウントの起点は、前述のとおり1980年1月6日00:00:00(これをGPSエポックと呼ぶことがある)である。GPS応用システムの内部における時刻情報の表現方式として、GPSエポックからの経過秒数が用いられることがある。

現在利用されているCPUで広く共通して取扱いが容易な整数変数(C言語における整数型のうちint型あるいはlong型)のビット長は32ビットであり、経過秒数の処理もこれによることが多い。32ビット符号付整数により表現可能な数値の上限は $0x7fffffff=2147483647$ (C言語のlimits.hヘッダファイル中で記号定数INT_MAXとして定義されている)であり、経過秒数がこの値を超えると問題を起こすこととなる。

GPS エポックから INT_MAX+1 秒を経過する日は、2048 年 1 月 24 日である。

また、Z カウントが 1.5 秒を単位としていることから、これを秒数に変換するために 1.5 を乗じる処理が行われることがある。整数型変数に対してそのような演算を行うには 3 倍してから 1/2 とすることとなるから、Z カウントの 3 倍が INT_MAX を超える状況であれば問題が発生し得る。Z カウントが INT_MAX の 1/3 となるのは、GPS エポックから INT_MAX/2 秒が経過したときであり、その時刻は 2014 年 1 月 14 日に到来する。

他にも、GPS エポックからの経過秒数を十進数で取り扱っている場合に、その桁数が問題となることが考えられる。1983 年以來これは 9 桁となっているが、2011 年 9 月 14 日に 10 桁となるため、経過秒数を十進数の文字列に変換するような処理がある場合には注意が必要である。なお、Z カウントにならって 1.5 秒単位で表した経過時間が 10 桁になるのは、2027 年 7 月 19 日のことである。

4.2 桁あふれ:その他のエポックが起点の場合 UNIX/POSIX 系 OS のシステム時刻や C 言語標準ライブラリの時刻系関数では、時刻は 1970 年 1 月 1 日 00:00:00UTC(これを UNIX エポックということがある)からの経過秒数として表現される。使用される time_t 型変数は一般に 32 ビット符号付整数であることから、4.1 節と同様の問題がさらに早期に生じることとなる。システム時刻が INT_MAX 及び INT_MAX/2 を超えるのは、それぞれ 2038 年 1 月 19 日と 2004 年 1 月 10 日である。また、システム時刻が十進数で 10 桁となるのは、2001 年 9 月 9 日であった。UNIX 系システムや C 言語により開発されているシステムは広範に及ぶため、システム時刻が INT_MAX を超える問題は 2038 年問題として認識されつつある。

最近の処理系は time_t 型変数を 64 ビットに拡張することでこうした問題を避けているものが多い。ただし、内部フォーマットの一部に 32 ビットの time_t 型変数の使用が規定されているファイル形式があり、処理系や OS の変更によっても 2038 年問題を回避できないので注意が必要となる。圧縮ファイル形式として用いられる gzip 形式や LHA 形式(H2 以降)などが該当する。

ネットワーク経由での時刻同期に利用される NTP(network time protocol)では、1900 年 1 月 1 日 00:00:00 からの経過秒数として時刻が表現されている。表現形式としては 32 ビット符号なし整数が用いられていることからその上限は 4294967295 秒であるが、この値に達するのは 2036 年 2 月 7 日のことである。マイクロソフト Excel も、1900 年 1 月 0 日 00:00:00 からの経過日数により時刻を表現する。

その他にも、最近開発されたシステムでは 2000 年 1 月 1 日 00:00:00 を起点として処理をするものもある。GPS エポックを含め、いくつかのエポックについて問題を生じる可能性のある時刻(2011 年以降のみ)を計算した結果を、表 5 にまとめた。

4.3 うるう秒の扱い 先に 3.1 節でも述べたとおり、UTC では地球自転の不規則性を補償するためにうるう秒が設けられているが、GPS 時刻にはうるう秒は存在しない。現在までに実施されたうるう秒は表 2 のとおりで、2011 年 7 月の時点では

表5 桁あふれ問題の発生する日時

Table 5 Potential problematic dates due to overflow.

Epoch	Offset	Unit	Date/Time
1980-01-06 (GPS Epoch)	1000000000	s	2011-09-14 01:46:40
	0x40000000	s	2014-01-14 13:37:04
	0x80000000	s	2048-01-24 03:14:08
	16384	days	2024-11-14 00:00:00
	1000000000	1.5 s	2027-07-19 02:40:00
1970-01-01 (UNIX Epoch)	0x40000000	1.5 s	2031-01-19 08:25:36
	0x80000000	s	2038-01-19 03:14:08 ^{*1}
	16384	days	2014-11-10 00:00:00
	20000	days	2024-10-04 00:00:00
2000-01-01	1000000000	1.5 s	2017-07-14 02:40:00
	0x40000000	1.5 s	2021-01-14 08:25:36
	0x20000000	s	2017-01-04 18:48:32
	4096	days	2011-03-20 00:00:00
	8192	days	2022-06-06 00:00:00
1900-01-01	10000	days	2027-05-19 00:00:00
	0x10000000	1.5 s	2012-10-04 08:06:24
	0x20000000	1.5 s	2025-07-08 16:12:48
1900-01-01	0x100000000	s	2036-02-07 06:28:16 ^{*2}
	65536	days	2079-06-07 00:00:00

*1 time_t 型変数の一般的な上限 *2 NTP の処理の上限

GPS 時刻は UTC に比べて 15 秒進んでいる。

航法メッセージに含まれている UTC パラメータを用いると GPS 時刻と UTC の差分を計算することができ、これにはうるう秒に関する情報も含まれている。近い将来にうるう秒が挿入(あるいは削除)される場合はその予報が含まれており、GPS 受信機はうるう秒を正しく処理して UTC 時刻を出力できる([1], 20.3.3.5.2.4)。すなわち、うるう秒が挿入される場合は 23:59:59 と 00:00:00 の間に 23:59:60 という時刻が追加され、うるう秒が削除される場合は 23:59:58 の次が 00:00:00 になる。

なお、GPS 受信機がうるう秒を正しく処理して UTC 時刻を出力したとしても、これを受け取る側でもうるう秒の存在を想定すべきであることには注意を要する。たとえば、時刻情報を時分秒に分けて出力する場合、23:59:60 という時刻をエラーとしてはならないし、23:59:58 の次が 23:59:59 でなく 00:00:00 とする可能性もある(ただし、実際には負のうるう秒が実施されたことは一度もない)。時刻情報をその日の初めからの秒数として出力する場合、86400 秒はエラーではなく、かつこれを 24:00:00 ではなく 23:59:60 と表示する必要がある。また、負のうるう秒により 86399 秒が抜ける可能性もあるので、連続性のチェックをする場合には注意を要する。

航空用 GPS 受信機の規格である GPS/WAAS MOPS (DO-229) [4] や GPS/ABAS MOPS (DO-316) [5] では、ARINC429 バスに出力すべき情報の一つとして UTC 時刻が定められている。ただし、うるう秒は考慮されておらず、86399 秒の次は(翌日の)0 秒であると記述されている。

船舶用機器の入出力フォーマットを規定している NMEA-0183[6]では、位置情報に付される時刻は UTC とされ

ている。うるう秒の有無については特に触れられていないが、時分秒をそれぞれ 2 桁の ASCII 文字で表現するため、23:59:60 という時刻の出力は可能である。

4.4 うるう年の扱い 地球が太陽のまわりを一周する平均周期、すなわち平均回帰年が約 365.24 日であることから、太陽暦では季節に暦を一致させるためうるう年が設けられる。うるう年の置き方にはバリエーションがあるが、現在広く普及しているグレゴリオ暦では、西暦年が 4 で割り切れてかつ 100 で割り切れないか、あるいは 400 で割り切れるならうるう年とすることとされている。

周知のとおり、400 で割り切れる年をうるう年とする規則を実装していないプログラムは 2000 年問題を起こした。当面は 4 で割り切れる年をうるう年とする処理だけでも問題を生じないが、直近のうるう年のみを直接指定しているような実装では問題となることが考えられる。

4.5 年号の表示 多くのコンピュータや家電製品は、リアルタイムクロック (RTC, カレンダークロックとも呼ばれる) を備えている。これは CPU が使用するシステムクロックとは別のクロックにより時刻情報を保持するもので、本体側装置の電源が入ってなくてもバッテリーにより動作し続けることで時刻情報をカウント、維持する。

現在普及している RTC 用 IC チップは、年号を 2 桁の BCD コードとして保持するものが多い。これをどのように解釈するかはコンピュータ側の問題であり、たとえば 69 以下を 2000~2069 年、70 以上を 1970~1999 年と解釈する実装では、2070 年初頭に問題を生じることとなる。また、年号を 2 桁で保持する RTC IC は、2099 年まではうるう年の処理を正しく行のが普通である。すなわち、00 年はうるう年として扱われるのであって、2100 年は誤ってうるう年とされることとなる。

いわゆる電波時計が時刻合わせに利用している標準電波 (JJY) は、情報通信研究機構 (NICT) により放送されている。標準電波は西暦年の下 2 桁を BCD 符号で表現しており、RTC IC の場合と同様の問題があり得る。

RINEX ファイルのファイル名は拡張子に年号の下 2 桁を付すのが普通であるが、ここでも同様の問題がある。

多くの UNIX/POSIX 系 OS のファイルシステムでは、タイムスタンプを 32 ビットの `time_t` 型変数として保持するため、4.2 節と同様に 2038 年に問題を生じる。Windows OS で使用されているファイルシステム (FAT) では、年号は 1980 年からのオフセット分が 7 ビットで表現されている。この方式では、2107 年まで表現できる。

4.6 日付の表記 日付を表記する際に、我が国では YY/MM/DD (YY は年号の下 2 桁, MM は月, DD は日を表す) の順とすることが多いが、米国では MM/DD/YY, 欧州では DD/MM/YY の書式が使われる。1932~1999 年の間は少なくとも年号については誤解の恐れはなかったが、現在ほどの順番であるかを明確にしておかないと解釈に齟齬を生じる可能性がある。

日時の表記法には国際標準規格があり、ISO 8601:2000 により定められている。我が国では日本工業規格の JIS X 0301[7]

がこれに対応しており、いずれにおいても年月日を表示する場合は YYYY-MM-DD あるいは YYYYMMDD の形式で表記することとされている。

5. むすび

GPS における時刻の表現について述べ、週番号の不確定性を決定する方法を検討するとともに、時刻の表現に起因して将来的に顕在化し得る問題を整理した。

GPS はすでに社会インフラとして広く応用されており、万が一受信機が不具合を生じた場合の影響は年々大きくなってきている。時刻に関連した問題は、多くの受信機に対して同時に不具合を生じさせることとなり、GPS 応用システムにとっては予測しにくい脅威となり得る。このような問題があることを予見し、中長期的に所要の対策を講じておく必要があるものとする。

(平成 23 年 7 月 19 日受付)

文献

- [1] Navstar Global Positioning System Interface Specification, IS-GPS-200, Rev. E, June 2010.
- [2] Wlodzimierz Lewandowski, Report from Timing Subcommittee, 47th Civil GPS Interface Committee, Fortworth, TX, Sept. 2007.
- [3] Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification, 2nd Ed., June 1995.
- [4] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA, DO-229, Rev. D, Dec. 2006.
- [5] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Aircraft Based Augmentation System Airborne Equipment, RTCA, DO-316, April 2009.
- [6] Standard for Interfacing Marine Electronic Devices, NMEA 0183, Version 3.01, Jan. 2002.
- [7] 情報交換のためのデータ要素及び交換形式 - 日付及び時刻の表記, JIS X 0301:2002.

著者紹介

坂井 文泰 (正員) 平 8 早大院修士課程了。同年電子航法研究所入所。現在、同所通信・航法・監視領域主幹研究員。平 14~15 米国スタンフォード大学客員研究員、平 18~東京海洋大学客員准教授。衛星航法システムの航空機応用に関する研究に従事。平 18 IEEE AES 優秀論文賞、平 19 米国航法学会 ION GNSS 優秀論文賞。博士(工学)。