

1 2. GPS L5 信号の新航法メッセージの利用可能性

航法システム領域 ※北村 光教, 麻生 貴広, 坂井 丈泰

1 背景

1.1 GNSS の近代化

近年、人工衛星を利用して位置標定する全地球航法衛星システム（GNSS: Global Navigation Satellite Systems）の近代化が進められている。具体的には、米国 GPS の第 3 民間用測位信号（L5）の放送や、露国 GLONASS が放送する従来の FDMA 方式信号に対して新しい CDMA 方式信号の追加、また欧州の Galileo や中国の BeiDou といった新しい GNSS の展開等である。

1.2 SBAS の次世代化

GNSS の近代化が進む中、静止衛星型衛星航法補強システム（SBAS: Satellite Based Augmentation System）の次世代規格の検討が行われている。

衛星航法補強システムとは、GNSS の異常状態を監視することで GNSS 測位を補強し、その安全性と信頼性を担保するシステムである。航空機が航法において GNSS 測位を利用する際には、衛星航法補強システムによる測位の補強が必須である。SBAS とは、衛星航法補強システムの一つであり、GNSS 測位信号の誤差や異常状態を地上に設置した受信機ネットワークを用いて監視し、その情報を静止軌道上の衛星を介して航空機（ユーザ）に通知することで GNSS 測位を補強するシステムである。

現行の SBAS では、GPS の L1 帯測位信号を監視することで補強情報を作成し、ユーザに伝送している。それに対して次世代 SBAS は、補強する GNSS を増やすマルチコンステレーション化することで衛星数の増加による測位率の向上を図り、また、測位信号に新しく L5 帯を利用する 2 周波化することで、電離圏擾乱時等の測位精度の向上を図る。このような次世代化によって、SBAS による補強測位の利用可能性の向上が期待されている。

1.3 次世代 SBAS の検討課題

次世代 SBAS は、その規格化に向けた多くの課題の検討が欧米諸国主導のもと目下進められ

ている。本報では、それら検討課題の 1 つとして、GPS の L5 帯測位信号に重畳されて放送されている新しい航法メッセージ（CNAV: Civil Navigation Message）の次世代 SBAS における利用可能性について議論する。そして、現行 SBAS でも利用している従来の航法メッセージ（LNAV: Legacy Navigation Message）と CNAV のどちらが次世代 SBAS の補強に適する航法メッセージであるのかを明らかにする。

評価の方針として、CNAV の衛星軌道・時計精度を評価することで、LNAV に対する CNAV の優位性を評価する。ここで、CNAV の衛星軌道・時計精度に関する評価は既に行われており、LNAV に対する優位性は明らかにされている [1][2]。しかしながらそれらの多くは、CNAV を GPS の単独測位で利用するという観点から評価が行われている。本報では、次世代 SBAS における補強で利用するという観点から CNAV の衛星軌道・時計精度の評価を実施する。また、CNAV を次世代 SBAS で利用することで、衛星軌道・時計精度以外で生じる影響として、L5 帯 I-Q 相信号の選択に関する問題についても言及する。

2 SBAS とは

2.1 現行 SBAS

現行の SBAS 規格は、国際民間航空機関（ICAO）が衛星航法補強システム規格の一種 [3]として定めており、航空航法において GPS を利用する際には、衛星航法補強システムにより適切な補強を施して測位の安全性と信頼性を確保することとしている。

現行 SBAS は GPS の L1 帯信号（L1-C/A）を利用した 1 周波測位を補強するために、地上に設置された受信機ネットワークによって GPS の測位信号を監視し、GPS 衛星の異常状態や測位の誤差情報を、補強情報として静止衛星を経由してユーザに放送している（図 2.1）。ここで誤差情報とは、航法メッセージから計算

することができる衛星の位置や、搭載している原子時計と GPS が基準とする時刻系（GPST）との差に関する誤差情報である。また、1 周波測位で問題となる電離圏伝搬遅延に対して、伝搬遅延量マップも補強情報として放送している。ユーザはこれらの補強情報を GPS 測位に適用することで測位精度の向上を図る。

2.2 次世代 SBAS

次世代の SBAS 規格は、近代化が進む GNSS を利用した新しい衛星航法補強システムであり、ICAO や欧米諸国主導による SBAS 相互運用性会議（IWG: Interoperability Working Group）において、規格化のための検討が進められている。本報における次世代 SBAS の仕様は、SBAS IWG で提出された次世代 SBAS に関するインターフェイス管理文書（ICD: Interface Control Document）のドラフト版[4]を元に議論する。

現行 SBAS からの主な変更点は、補強対象の GNSS として、現行の GPS に GLONASS、Galileo、BeiDou という新しい GNSS を追加するマルチコンステレーション（MC: Multi-Constellation）に対応する点と、現行の L1 帯測位信号に、新しく L5 帯測位信号を追加する 2 周波（DF: Dual-Frequency）測位に対応する点である（図 2.2）。MC 対応による衛星数の増加と、DF 対応による高精度な電離圏遅延推定が期待できるため、航空航法における GNSS 測位の利用可能性の向上が期待されている。

次世代 SBAS における測位精度向上のための補正方式は、現行 SBAS と基本的に同様であり、航法メッセージに含まれる衛星軌道・時計の誤差情報を放送することで測位精度の向上を図る。なお、DF 測位に対応することでユーザが電離圏伝搬遅延量の推定が可能になるため、電離圏遅延補正は放送されない見込みである。

2.3 次世代 SBAS の検討課題

SBAS IWG では、次世代 SBAS の規格化に向けた多くの課題について目下検討が進められている。本報では、それら検討課題の 1 つとして、次世代 SBAS が補強する航法メッセージの選択について議論する。本課題は、現行 SBAS では航法メッセージとして、GPS の L1-C/A 信号で放送されている従来の航法メッセージ（LNAV: Legacy Navigation Message）のみ利用可能であ

るため、その誤差情報を推定・放送している。それに対して次世代 SBAS では、L5 帯測位信号を新たに利用することができるため、それに重畳された新しい航法メッセージ（CNAV: Civil Navigation Message）と LNAV の 2 つの航法メッセージに対して補強情報を作成することが可能である。そのため、どちらの航法メッセージに対して補強情報を作成し放送するか決定する必要があるという検討課題である。

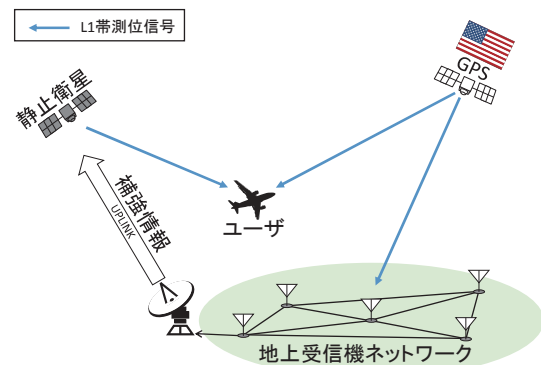


図 2.1 現行 SBAS の概要

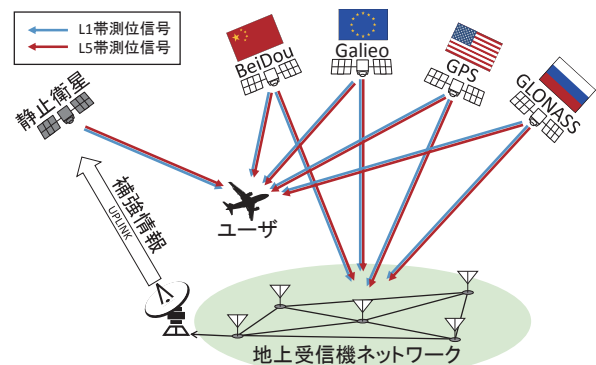


図 2.2 次世代 SBAS の概要

3 航法メッセージ

航法メッセージとは、GPS 衛星の位置情報や、搭載している原子時計の GPST に対する誤差情報である。これらは測距信号に重畳されユーザに放送されており、L1-C/A 信号と L5 信号で放送される航法メッセージをそれぞれ LNAV と CNAV と呼ぶ。

GPS の一般的な測位手法である単独測位では、航法メッセージから計算できる衛星の位置と時計が正確に既知であると考えて、衛星-受信機間の距離を信号の伝搬時間から推定することで、受信機位置を測位する。

3.1 Legacy Navigation Message (LNAV)

LNAV は GPS の L1 周波数帯（1575.42 [MHz]）の L1-C/A と呼ばれる測位信号で伝送速度 50 [bps]で放送されており、従来の GPS 単独測位や、現行 SBAS で利用されている。

航法メッセージは、表 3.1 に示す 15 個の衛星軌道要素（エフェメリス）とエフェメリス元期 t_{oe} 、3 次の衛星時計補正項および時計補正の元期 t_{oc} を放送している。衛星位置・時計誤差の計算に関する詳細は GPS の ICD[5]に記載されている。また、LNAV は航法メッセージの発行番号（IOD: Issue of Data）を放送しており、これを利用することで、ユーザはエフェメリスの軌道要素の値が変更（更新）された場合の判別や、エフェメリスの情報セットのバージョン管理などが可能である。

3.2 Civil Navigation Message (CNAV)

CNAV は L5 周波数帯（1176.45 [MHz]）の I 相（In-phase）で L5I5 と呼ばれる測位信号で伝送速度 50[bps]で放送され、2013 年から実際に放送テストが行われている[7]。また、CNAV に関する詳細は、GPS の L5 帯信号に関する ICD[6]に記載されている。

ここで、L5 帯では L5I5 信号とは別に、Q 相（Quadrature-phase）において、L5Q5 と呼ばれる測位信号も放送されている。この内、CNAV は L5I5 信号のみに重畳されており、L5I5 信号はデータ信号とも呼ばれる。それに対して、L5Q5 信号はデータが重畳されないため、パイロット信号とも呼ばれ高精度な測距能力が期待されている[8]。つまり、CNAV を利用した測位を行う場合、L5I5 信号のトラッキングが必要であり、高精度な測距が期待されている L5Q5 信号を利用するためには、更に信号追尾ループの追加が必要である点、注意を要する。CNAV の衛星時計・軌道情報は、LNAV を元に高精度化が図られており、主な変更として、表 3.1 に示す LNAV の衛星軌道要素に、表 3.2 に示す軌道要素が新たに追加されている。なお、表 3.1 の軌道長半径の根 \sqrt{A} は、基準長半径 A_{REF} (= 26,559,710 [m]) からの差 ΔA を用いて式(3.1)のように変更されている。また、LNAV が発行している IOD が CNAV では発行されない点に注意を要する。

$$(\sqrt{A})^2 \approx A_{REF} + \Delta A \tag{3.1}$$

新たに追加された表 3.2 の軌道要素は、それぞれ式(3.2)、式(3.3)に示す様に、時刻 t_k における軌道長半径 A_k と平均運動 n_k をエフェメリス元期 t_{oe} から時間伝播して求める際に利用される。なお、 n_0 は元期 t_{oe} における平均運動 [SC/s]である。

$$A_k = A_{REF} + \Delta A + \dot{A}(t_k - t_{oe}) \tag{3.2}$$

$$n_k = n_0 + \Delta n_0 + \frac{1}{2} \Delta \dot{n}_0 (t_k - t_{oe}) \tag{3.3}$$

表 3.1 LNAV 衛星軌道・時計要素

M_0	平均近点角	SC
Δn_0	平均運動の補正值	SC/s
e	離心率	-
\sqrt{A}	軌道長半径の根	\sqrt{m}
Ω_0	昇交点赤経	SC
i_0	軌道傾斜角	SC
ω	近地点引数	SC
$\dot{\Omega}$	昇交点赤経の時間変化率	SC/s
\dot{i}	軌道傾斜角の時間変化率	SC/s
C_{uc}	緯度引数の余弦調和補正項の振幅	rad
C_{us}	緯度引数の正弦調和補正項の振幅	rad
C_{rc}	軌道半径の余弦調和補正項の振幅	m
C_{rs}	軌道半径の正弦調和補正項の振幅	m
C_{ic}	軌道傾斜角の余弦調和補正項の振幅	rad
C_{is}	軌道傾斜角の正弦調和補正項の振幅	rad
t_{oe}	エフェメリスの元期	s
a_{t0}	衛星時計バイアス	s
a_{t1}	衛星時計ドリフト	s/s
a_{t2}	衛星時計ドリフトレート	s/s ²
t_{oc}	衛星時計情報の元期	s
IOD	航法メッセージの発行番号	-
SC: semi-circles (1 SC = 180 deg = π rad)		

表 3.2 CNAV 衛星軌道要素の変更点

ΔA	軌道長半径の基準 A_{REF} からの差	m
\dot{A}	軌道長半径の時間変化率	m/s
$\Delta \dot{n}_0$	平均運動補正值の時間変化率	SC/s ²
LNAV とは異なり \sqrt{A} および IOD は放送されない		

4 CNAV の評価

CNAV の次世代 SBAS における利用可能性評価として、衛星軌道・時計精度を評価することで、CNAV を補強することのメリットを評価し、CNAV の利用に伴うデメリットの評価として、L5 帯 I-Q 相の信号選択の問題について述べる。

4.1 衛星軌道・時計精度評価

次世代 SBAS において CNAV を補強することによって得られるメリットを明らかにすることを目的として、CNAV の衛星軌道・時計精度を評価する。

具体的には、IGS（International GNSS Service）[9]が提供する精密暦（IGS Final）と呼ばれる、表 4.1 に示す様に高精度な衛星軌道・時計情報をリファレンスとして、2015 年 11 月 9 日 0:00～24:00（GPST）における CNAV の衛星軌道・時計精度を評価する。評価に用いる衛星は、GPS Block-IIRM 衛星（7 機、PRN: 05, 07, 12, 15, 17, 29, 31）および Block-IIF 衛星（10 機、PRN: 01, 03, 06, 08, 09, 24, 25, 26, 27, 30）である。これらは、CNAV を重畳している L2C 信号もしくは L5 信号を放送している衛星であり、CNAV は上記の衛星についてのみ放送される。

評価では衛星軌道誤差のうち最も測位に影響する要素として、軌道のラジアル方向誤差を評価する。また衛星時計について、航法メッセージで補正した衛星に搭載された原子時計の時刻と GPST の差を、光速を乗じて距離の次元として評価する。

評価の構成として、第 4.1.1 項において従来研究[1][2]と同様に、GPS 単独測位で用いることを想定した単純な衛星軌道・時計精度の評価を行い、第 4.1.2 項において次世代 SBAS における CNAV 補強の効果について評価する。

4.1.1 衛星軌道・時計精度

a) 衛星軌道精度評価

LNAV と CNAV の各衛星軌道のラジアル方向誤差を図 4.1 に示す。また、それぞれの衛星軌道誤差の RMS（Root Mean Square）を表 4.2 に示す。図 4.1、表 4.2 によると、LNAV と CNAV は 1 日の長時間の範囲では大きな差が見られないことがわかる。

次に、LNAV と CNAV の差の一例として、図 4.1 中の GPS の 6 番衛星（PRN06）について、その軌道のラジアル方向誤差を図 4.2 に示し、RMS 誤差を表 4.2 に合わせて示す。なお、図中縦の一点鎖線で示す時点は、それぞれ LNAV と CNAV の各航法メッセージの元期 t_{oe} を表している。

各時点の衛星軌道は元期 t_{oe} が最も近い航法メッセージを使用して求めているため、元期 t_{oe} を中心とした 2 時間間隔の航法メッセージの切り替えが、図中に誤差が不連続な点として表れている。また、LNAV では 04:00、CNAV では 03:30 の元期付近で生じている誤差の不連続点は、この時点で短い間隔で航法メッセージの更新が行われたため生じている。

図 4.2 および表 4.2 の PRN06 衛星の例から分かるように、LNAV と CNAV は長期的には同様の誤差傾向を持つものの、CNAV は元期を中心とした前後 1 時間の誤差変動が LNAV に比べて小さいことが分かる。

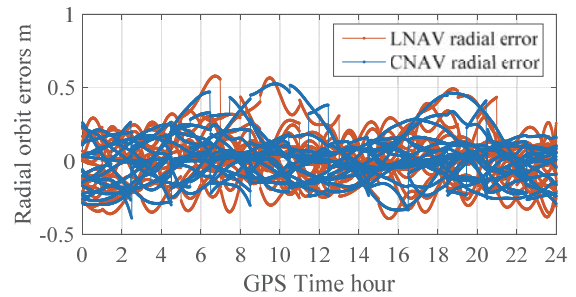


図 4.1 全衛星のラジアル方向誤差の比較

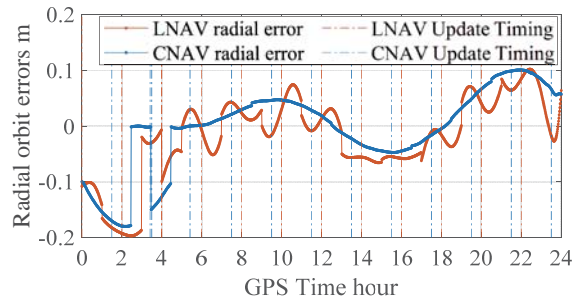


図 4.2 衛星軌道誤差の比較（PRN06）

表 4.1 IGS 精密暦の仕様

衛星軌道精度	～2.5 cm
衛星軌道更新周期	15 min
衛星時計精度	RMS : ～75 ps (≒2.3 cm) SDev : ～20 ps (≒0.6 cm)
衛星時計更新周期	30 s

表 4.2 衛星軌道・時計誤差（RMS）

	LNAV		CNAV	
	軌道 m	時計 m	軌道 m	時計 m
全衛星	0.155	0.534	0.148	0.534
PRN06	0.073	0.129	0.071	0.087

b) 衛星時計精度評価

LNAV と CNAV の各衛星時計の誤差と、その RMS を図 4.3, 表 4.2 に示す。図 4.3, 表 4.2 によると、CNAV と LNAV は 1 日の長時間の範囲では大きな差が見られないことがわかる。しかしながら、図 4.3 中の Block-IIRM 衛星、およびセシウム原子時計を搭載する一部の Block-IIF 衛星 (PRN: 08, 24) については、搭載されている原子時計のノイズが大きく、LNAV と CNAV の比較が困難である。そこで例として、図 4.4 に時計ノイズの小さい Block-IIF 衛星 (PRN: 06) の衛星時計誤差の比較を示し、表 4.2 にその RMS 誤差を合わせて示す。なお、図 4.4 に示す縦の一点鎖線は、図 4.2 と同様に各航法メッセージの元期 t_{oe} を表す。PRN06 衛星の例から分かるように、LNAV と CNAV は長期的には同様の誤差傾向を持つものの、CNAV は元期 t_{oe} を中心とした前後 1 時間の誤差変動が小さいことが分かる。

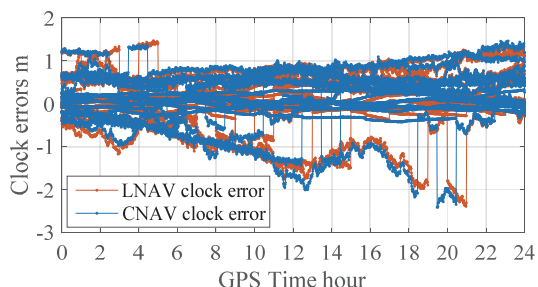


図 4.3 全衛星の時計誤差の比較

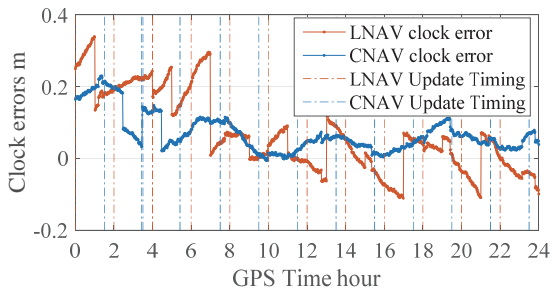


図 4.4 衛星時計誤差の比較 (PRN06)

以上から、通常の単独測位における利用を前提とした評価において、既存研究と同様に、CNAV は衛星軌道・時計誤差の短期変動が LNAV と比較して小さく、高精度であるため有用であることが明らかとなった。

4.1.2 SBAS における CNAV の効果

本項では SBAS における利用の観点から CNAV を評価する。SBAS では衛星軌道・時計誤差を補正する機能を持つため、第 4.1.1 項で明らかとなった、LNAV と CNAV の誤差の差はそれぞれ補正され、問題にならない。問題になるのは、SBAS による補正の更新間隔における誤差変動量の大きさである。そこで、図 4.1 と図 4.3 に示す衛星軌道・時計誤差について、SBAS による補正の更新間隔における誤差変動量を評価する。具体的には、次世代 SBAS の ICD ドラフト版[4]によると、補正メッセージの有効期限が 240 秒であることから、補正の更新周期を 240 秒と仮定する。そしてその間の誤差変動量を、任意の時刻とその 240 秒後の衛星軌道・時計誤差の差から求め、そのヒストグラムをそれぞれ図 4.5, 図 4.6 に示す。

図 4.5, 図 4.6 によると、CNAV の誤差変動量は LNAV と比較して小さいが、その大部分が 1~2 [cm]以下であることが分かる。

これらが次世代 SBAS における軌道の位置補正分解能 0.0625 [m]と時計補正分解能 0.03125[m]よりも小さいことから、CNAV 利用による衛星軌道・時計の誤差変動の改善効果は小さく、次世代 SBAS において、CNAV 利用のメリットが大きくないことが分かる。

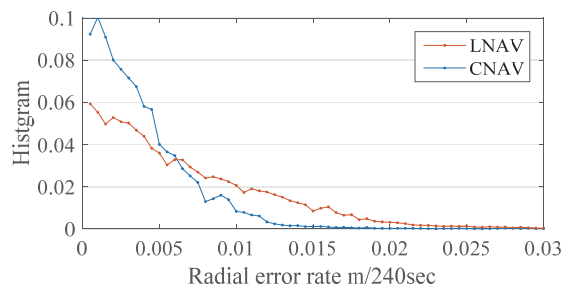


図 4.5 240 秒間の軌道誤差変動のヒストグラム

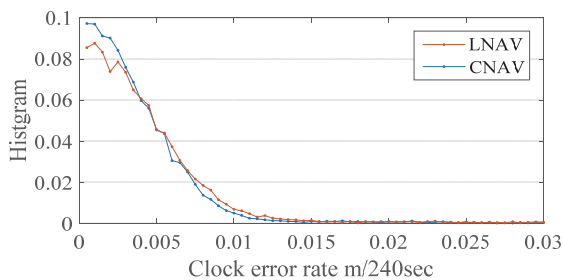


図 4.6 240 秒間の時計誤差変動のヒストグラム

4.2 CNAV 利用の影響評価

CNAV を利用することで生じる、衛星軌道・時計精度以外の影響について述べる。

第 3.2 節でも述べるように、CNAV は L5 帯 I 相信号 (L5I5) で放送されているため、CNAV を利用する場合には L5I5 信号のトラッキングが必須であり、L5 帯のもう一つの測位信号である Q 相信号 (L5Q5) を利用することができなくなる。しかしながら、L5Q5 信号は、データを重畳しないパイロット信号であるため、高精度な測距能力を有しており、測位精度向上のために積極的な利用が望まれている信号である。そこで、CNAV を利用し、更に L5Q5 信号を利用しようとするためには、信号追尾ループを新たに追加する必要がある。しかしながら、次世代 SBAS は DFMC 化によって、同時に 30 機を超える衛星[10]の 2 周波信号の受信が必要な場合が想定される。そのような中で、L5Q5 用の信号追尾ループを更に追加することは、受信機製造コストの増大を招くと考える。

つまり、次世代 SBAS において CNAV を利用することは、高精度な L5Q5 信号が利用できなくなるか、もしくは L5Q5 信号用の信号追尾ループを新たに追加する必要があり、受信機コストの増大を招くというデメリットがある。

5 結言

本報では、次世代 SBAS における補強に適する航法メッセージを明らかにすることを目的として、LNAV と CNAV の評価を行った。

衛星軌道・時計精度評価の結果、CNAV は LNAV と比較して高精度であり、単独測位における有用性が明らかとなった。しかしながら、SBAS では航法メッセージの誤差を補正するため、衛星軌道・時計の精度差が与える影響は小さく、LNAV と CNAV で有意な差が現れないことが明らかになった。また、CNAV の利用によって生じる影響を評価した結果、CNAV を利用することで、高精度な L5Q5 信号が利用できなくなるか、もしくは L5Q5 信号利用のために更に信号追尾ループの追加が必要であるというデメリットが明らかになった。

以上から、LNAV と CNAV は、その精度において有意な差が現れず、また、CNAV の利用

は高精度な L5Q5 信号の利用が困難になるというデメリットがあるため、次世代 SBAS における補強では LNAV を利用することが適切であると考えられる。

本研究では、以上の結果を SBAS IWG に提言し、今後は LNAV を利用した次世代 SBAS の開発を実施する予定である。

参考文献

- [1] P. Steigenberger, O. Montenbruck, and U. Hessels, "Performance Evaluation of the Early CNAV Navigation Message", NAVIGATION, Vol. 62, No. 3, pp. 219-228, Fall 2015.
- [2] H. Yin, Y.T. Morton, M. Carroll, and E. Vinande, "Performance Analysis of L2 and L5 CNAV Broadcast Ephemeris for Orbit Calculation", NAVIGATION, Vol. 62, No. 2, pp. 121-130, Summer 2015.
- [3] International Standards and Recommended Practices, Annex 10 to the Convention on Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Vol. I, 6th Ed., July 2006.
- [4] SBAS IWG, "Draft IWG SBAS L5 Interface Control Document (SBAS L5 ICD)," Issue 1, Rev. 1 Draft 036, March 2015.
- [5] IS-GPS-200H, Interface Specification: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces.
- [6] IS-GPS-705D, Interface Specification: Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces.
- [7] "Global Positioning System Modernized Civil Navigation (CNAV) Live-Sky Broadcast Test Plan," NAVCEN, 30 May 2013.
- [8] J.H. Won, M. Anhileri, B. Eissfeller, A. Schmitz-Peiffer, and J.J. Floch, "Optimum Data Rate and Signal Power Split for Next Generation GNSS Architectures," Proc. ION GNSS, pp. 2942-2955, September 2009.
- [9] International GNSS Service (<http://www.igs.org/>)
- [10] アジア・オセアニア地域 GNSS ワークショップと共同実験構想, 第 5 回準天頂衛星システムユーザミーティング, 2010.