

次世代 SBAS で利用する GPS 航法メッセージの検討

北村 光教^{†a)} 麻生 貴広[†] 坂井 丈泰[†] 星野尾一明[†]

Consideration of GPS Navigation Message Used by Next-Generation SBAS

Mitsunori KITAMURA^{†a)}, Takahiro ASO[†], Takeyasu SAKAI[†],
and Kazuaki HOSHINO[†]

あらまし 静止衛星型衛星航法補強システム (SBAS) は, 航空航法において衛星測位システム (GNSS) を用いた測位の安全性と信頼性を担保する補強システムの一つとして利用されており, 更に近年では次世代規格の検討も行われている. その中で, 航法メッセージの選択が課題の一つとして挙げられている. 具体的には, 現行 SBAS でも利用している従来の航法メッセージ (LNAV) と新しい航法メッセージ (CNAV) から, 次世代 SBAS における補強に適する航法メッセージを選択する必要がある. そこで本論文では, これらの航法メッセージの内容や, その衛星軌道・時計の精度について評価することで, 次世代 SBAS の補強対象として適当な航法メッセージを明らかにする. 評価の結果, 次世代 SBAS において LNAV と CNAV はいずれも十分な衛星軌道・時計精度を有しているため有意な差が見られず, また高精度な測位信号である L5 帯 Q 相信号の利用に要するコストを勘案すると, 次世代 SBAS では LNAV を補強することが適当との結論を得た.

キーワード GPS, GNSS, SBAS, CNAV, LNAV

1. ま え が き

近年, 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. SBAS とは, 航空機のための衛星航法補強システムの一つであり, 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) を監視することで, その測位の安全性と信頼性を担保 (補強) するシステムである. 航空航法において GNSS 測位を利用する際には, このような衛星航法補強システムの利用が必要である.

現行の SBAS は, GNSS の一種である GPS の L1 帯測位信号を監視・補強している. それに対して次世代 SBAS では, 現行 SBAS をベースとして, 複数 GNSS の補強によって衛星数の増加を図り, また, L5 帯を新しく利用する測位信号の 2 周波化によって, 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.

本論文では, 次世代 SBAS の規格化のための検討課題の一つとして, 航法メッセージの選択について議論する. すなわち, 次世代 SBAS では L1 帯測位信号で放送される従来の航法メッセージ (LNAV: Legacy Navigation Message) と, L5 帯測位信号で放送される新しい航法メッセージ (CNAV: Civil Navigation Message) のいずれもが利用可能なことから, 補強システムにおける利用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, これらを評価する.

本論文の構成として, **2.** では, 現行と次世代の SBAS について述べ, **3.** では航法メッセージとして LNAV と CNAV について述べる. また **4.** では, LNAV と CNAV を評価することで, 次世代 SBAS で利用する適切な航法メッセージについて考察する.

2. 静止衛星型衛星航法補強システム

2.1 現行 SBAS

現行の SBAS 規格は, 国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) が衛星航法補強システム規格の一つとして国際民間航空条

[†] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所, 調布市

National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Electronic Navigation Research Institute, 7-42-23 Jindaijihigashimachi, Chofu-shi, 182-0012 Japan

a) E-mail: kitamura@mpat.go.jp

DOI:10.14923/transcomj.2016JBP3052

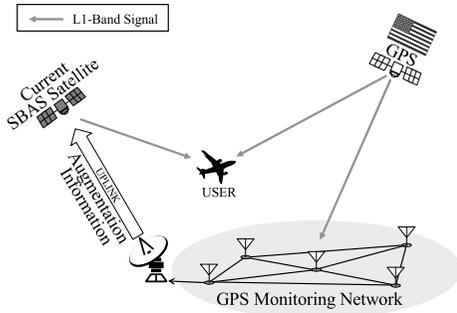


図 1 現行 SBAS の構成
Fig. 1 Current SBAS.

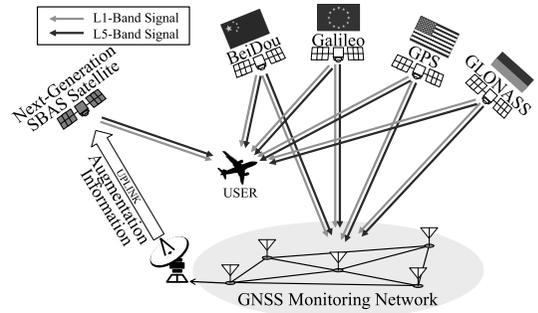


図 2 次世代 SBAS の構成
Fig. 2 Next-generation SBAS.

約の第 10 附属書 (Annex 10) に国際標準及び勧告方式 (SARPs: Standards and Recommended Practices) [1] 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。

現行の SBAS は GPS の L1-C/A 信号を利用した 1 周波測位を補強している。そのために、地上に設置された受信機ネットワークによって GPS の測位信号を観測することで、GPS 衛星の異常状態や測位の誤差情報を監視し、それらの情報を補強情報として静止衛星を経由して航空機 (ユーザー) に放送している (図 1)。ここで誤差情報とは、航法メッセージに含まれる衛星の軌道及び時計情報 (エフェメリス) 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 周波信号による測位では、測位信号の電離圏伝搬時の遅延が問題となるため、電離圏による伝搬遅延量マップも補強情報として放送している。ユーザー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っている。

しかしながら、日本のような中—低緯度地域では電離圏の変動が激しく、大きな補正誤差が頻発するため、SBAS 補強によっても十分な測位精度を得られない場合がある。こうした状況は、現行 SBAS による GPS 補強測位の利用可能性低下の要因となっている。

2.2 次世代 SBAS

次世代 SBAS 規格は、ICAO や欧米諸国主導による SBAS 相互運用性会議 (IWG: Interoperability Working Group) において検討が進められている、新しい衛星航法補強システムである。本論文では、SBAS IWG で提出された次世代 SBAS に関するインタフェース管

理文書 (ICD: Interface Control Document) のドラフト版 [2] を元に議論する。

次世代 SBAS の現行 SBAS からの主な変更点は、補強する GNSS がマルチコンステレーション (MC: Multi-Constellation) に対応する点と、2 周波 (DF: Dual-Frequency) 測位に対応する点である (図 2)。

MC 対応によって、1990 年代から運用しており、十分な数の衛星が打ち上げられている米国の GPS と露国の GLONASS に加え、比較的新しい GNSS であり今後も衛星の打上げや測位精度の向上を計画 [3], [4] している欧州の Galileo や中国の BeiDou を利用できるようになる。これによって、衛星数が増加することとなり、測位不可能な時間帯の低減や衛星配置の改善による測位精度の向上が期待されている [5]。また、DF 対応することで、新しく L5 帯測位信号が利用可能になり、ユーザーによる高精度な電離圏遅延の推定が可能になるため、測位精度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。ただし、DF 化によって高精度な電離圏遅延の推定が可能となるため、電離圏遅延補正は放送されない見込みである。また放送する補強情報について、L1 帯で現行 SBAS の補強情報を放送し、L5 帯で次世代 SBAS 用の補強情報を配信する。なお、L5 帯信号のみを用いた 1 周波測位は補強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。本論文では、それら検討課題の一つとして、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。

現行 SBAS では、GPS の L1 帯信号 (L1-C/A) で

表 1 SBAS における測位信号の利用

Table 1 Relationship between navigation signals and SBAS.

測位信号	周波数 MHz	航法 メッセージ	SBAS における利用			
			測距機能		航法メッセージ	
			現行	次世代	現行	次世代
L1-C/A	1575.42	LNAV	○	○	○	△
L5I5	1176.45	CNAV	—	△	—	△
L5Q5	1176.45	—	—	△	—	—

○: 利用する, △: いずれかを利用する

放送されている LNAV 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 (L5I5, L5Q5) を新たに利用するため、L5 帯で放送される CNAV と従来の LNAV の二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 (SBAS における各周波数帯信号の利用の関係を表 1 に示す)。しかしながら、次世代 SBAS の伝送速度は最大 250 bps で大量の補強情報伝送には不向きであり、両方の航法メッセージについて補強情報を放送することは現実的ではない。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。

3. 航法メッセージ

GPS の一般的な測位手法である単独測位では、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。そのため、GPS は各衛星の位置情報と、搭載されている原子時計の GPST に対する誤差情報を航法メッセージとしてユーザに伝送している。L1-C/A 信号と L5 信号で放送される航法メッセージは、それぞれ LNAV と CNAV と呼ばれる。

3.1 Legacy Navigation Message (LNAV)

LNAV は GPS の L1 周波数帯 (1575.42 MHz) で放送されている L1-C/A と呼ばれる測位信号に 50 bps で重畳されており、従来の GPS 単独測位や、現行 SBAS の補強対象として利用される。

航法メッセージに含まれる衛星の軌道情報 (エフェメリス) は、表 2 に示す 15 個の衛星軌道要素とエフェメリス元期 t_{oe} で表現されており、これらを用いて衛星位置が計算できる。また、衛星時計の GPST からの差は、2 次の補正式及び時計補正の元期 t_{oc} から計算することができる。衛星位置・時計誤差の計算に関する詳細は GPS のインタフェース仕様書 [6] に記載されている。また、LNAV は航法メッセージの発行番号

表 2 LNAV 衛星軌道・時計要素

Table 2 Orbital & clock parameter (LNAV).

M_0	平均近点角	単位: 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_0	衛星時計バイアス	s
a_1	衛星時計ドリフト	s/s
a_2	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), *: CNAV では放送されない

(IOD: Issue of Data) を放送しており、これを利用することで、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) で放送されている L5I5 と呼ばれる測位信号に伝送速度 50 bps で重畳されている。CNAV は L5 帯測位信号を利用した単独測位の高精度化を目的としており、2013 年から実際に放送テストが行われている [8]。CNAV に関する詳細は、L5 帯信号に関するインタフェース仕様書 [7] に記載されている。

ここで、L5 帯では L5I5 (データ) 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。L5Q5 信号はデータが重畳されないパイロット信号とも呼ばれる信号であり、高精度な測距能力が期待されている [9]。つまり、CNAV を利用した測位を行う場合は 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、更にトラッキンググループの追加が必要である。

L5I5 信号と L5Q5 信号の測距精度の例として、Early-Late Power (EMLP) 弁別器を使用した場合

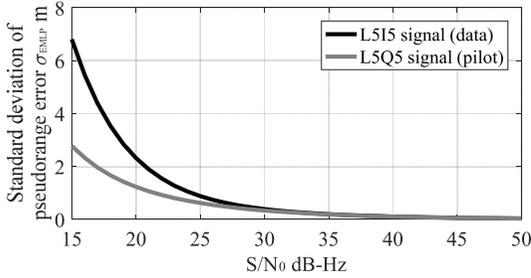


図3 L5I5 信号と L5Q5 信号の測距誤差比較

Fig. 3 Comparison of L5 pseudorange accuracy using data and pilot signals in only receiver thermal noise.

表3 CNAV で追加された衛星軌道要素

Table 3 Additional orbital & clock parameter (CNAV).

ΔA	軌道長半径の基準 A_{REF} からの差	単位: m
\dot{A}	軌道長半径の時間変化率	m/s
Δn_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} 及び IOD は放送されない		

の受信機熱雑音に対する擬似距離の分散 [10], [11] を式 (1) に示し, 図 3 に式 (1) より求めた測距誤差の比較を示す.

$$\sigma_{EMLP}^2 = \frac{\lambda^2 B_L d}{2aS/N_0} \left[1 + \frac{2}{a(2-d)S/N_0 T} \right] \quad (1)$$

ここで, σ_{EMLP} : EMLP 弁別器を使用した場合の受信機熱雑音に対する擬似距離誤差の標準偏差 [m] (1σ) である. また, 次世代 SBAS に関する検討 [12] を参考に各変数は以下の値とする. λ : 測距コードのチップ幅 (約 29.3m), B_L : ループ雑音のバンド幅 (0.125 Hz), d : コリレータチップ幅 (1.0 chip), S : L5 帯全受信電力 [W], N_0 : 熱雑音のスペクトル密度 [W/Hz], a : S に対する測距信号の受信電力の比 (1/2). T : 積分時間は, L5I5 信号の場合 CNAV データ (100 symbol/sec) のシンボル幅の拘束を受けるため, 最大の 10 ms とし, L5Q5 信号の場合データが重畳されておらず上記拘束を受けないため, 比較的長期の 100 ms とする.

式 (1) 及び図 3 より, L5Q5 信号は積分時間 T を長く設定することで雑音による 2 乗損失を低減可能であるため, 低 S/N_0 時の測距精度が良いことが分かる.

CNAV の衛星時計・軌道情報は, LNAV を元に高精度化が図られている. 主な変更として, 表 2 に示す LNAV の衛星軌道要素に, 表 3 に示す軌道要素が新たに追加されている. ただし, LNAV には含まれてい

る IOD が CNAV では発行されない点に注意を要する. これらの軌道要素は, 時刻 t_k における軌道長半径 A_k と平均運動 n_k を, それぞれ式 (2), 式 (3) に示すように, エフェメリス元期 t_{oe} から求める際に利用される.

ここで, 表 2 の軌道長半径の根 \sqrt{A} は, 式 (2) に示すように基準長半径 A_{REF} ($= 26,559,710$ m) からの差 ΔA を用いた表現 ($A_{REF} + \Delta A$) に変更されている. 式 (3) における n_0 は元期 t_{oe} における軌道長半径 $A_{REF} + \Delta A$ から計算される平均運動 [SC/s] である. また Δn_0 は計算された平均運動 n_0 に対する補正值であり, LNAV 及び CNAV が同様に放送する. なお, 一般に式 (3) 右辺第 3 項の 1/2 のような係数は $\Delta \dot{n}_0$ に含めて表現される場合が多いが, インタフェース仕様書 [7] によると下記のとおり分けて表現される.

$$A_k = A_{REF} + \Delta A + \dot{A}(t_k - t_{oe}) \quad (2)$$

$$n_k = n_0 + \Delta n_0 + \frac{1}{2} \Delta \dot{n}_0 (t_k - t_{oe}) \quad (3)$$

4. 航法メッセージの評価

次世代 SBAS による補強に適する航法メッセージを明らかにするために, CNAV を補強対象として利用することが可能であるか, また補強することで得られるメリット及びデメリットについて評価する.

具体的には, 4.1 において CNAV を SBAS の補強対象として利用することの可否を, 航法メッセージの内容について議論することで評価する. 次に, 4.2 では, 衛星軌道・時計精度を評価する. ここで, 従来研究によって CNAV が LNAV と比較して良好な衛星軌道・時計精度を有している [13], [14] ことが既に明らかにされているが, 2014 年と 2015 年の 1~2 月で, CNAV の精度が向上していることも報告されている. 本章では 2015 年 11 月の CNAV を評価対象としており, その後の精度向上も考えられる. そこで 4.2.1 では, 従来研究と同様に精度評価をすることで, 4.2.3 における評価の条件を明確にする. また, 4.2.2 では, 次世代 SBAS が補強する航法メッセージを選択するにあたって, 今後 CNAV の技術が LNAV に反映されることで, LNAV の精度が CNAV と同様に良好となる可能性について考察する. 具体的には, CNAV の精度向上の要因を考察する. ここで, 4.2.1, 及び 4.2.2 における評価は, 単独測位のような航法メッセージを単純に利用することを前提としている. SBAS では, 航法メッセージ自体の誤差は高頻度で補正されるた

め、上記の議論で補強対象とする航法メッセージを選択することはできない。そこで 4.2.3 では、SBAS による補正間隔における衛星軌道・時計誤差の変動量を評価することで、SBAS による補正がなされた上での LNAV と CNAV の比較評価を行う。最後に、4.3 では、CNAV を利用する場合の衛星軌道・時計精度以外の評価として、測位に必要な信号のトラッキングについて議論する。

4.1 航法メッセージの内容評価

SBAS による航法メッセージの補強において、SBAS が補強する航法メッセージのセットを、ユーザが識別可能であることが必要である。つまり、ノミナル 2 時間の更新周期をもつ航法メッセージは、ある時刻の衛星位置・時計を計算する際に、複数の航法メッセージセットが利用可能な場合がある。その場合、同じ時刻の衛星位置・時計に対して、これら複数の航法メッセージセットはそれぞれ異なる誤差をもっている。そのためユーザは、SBAS 衛星から受信した補強情報が、どの航法メッセージセットの誤差について作成されたものかを判別できる必要がある。

現行 SBAS における航法メッセージセットの識別は、セット内のいずれかの情報が更新された場合に更新される発行番号 (IOD) を用いている。具体的には、補強する LNAV セットの IOD を SBAS 衛星からも放送し、ユーザは SBAS 衛星から受信した IOD と、GPS 衛星から受信した複数の LNAV セットの IOD を比較することで、一致する LNAV セットを判別している。

それに対して、CNAV は IOD を放送しないため、LNAV と同様の上記手法で航法メッセージセットを判別することができない。そこで、IOD によらない航法メッセージセットのユーザへの指定方法を考える。

IOD の代わりとする識別子の条件は、航法メッセージセットに対して一意であり、複数のセットの中から目的のセットを識別可能なことである。その条件を満たす情報として、航法メッセージの元期 t_{oe} があげられる。CNAV に関するインタフェース仕様書 [7] によると、元期 t_{oe} は航法メッセージ内のいずれかの情報 (衛星軌道要素や時計ドリフト情報等) に変更があった場合に、必ず異なる時刻に更新するとされている。そのため、航法メッセージのセットに対して一意であり、IOD の代替として利用可能である。

ただし、CNAV の元期 t_{oe} の情報量 11 bit に対して、現行の SBAS 規格 [1] では航法メッセージセットの識別子は 8 bit である。次世代 SBAS においても同

表 4 IGS 最終暦の仕様

Table 4 Specification of precise ephemeris (IGS Final).

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

等の bit 数であると考え、単純に元期 t_{oe} を識別子として利用することはできない。しかし、元期 t_{oe} は 300 秒ごとに 1 増加する整数であるため、下位 8 bit は約 21 時間の期間に対して一意である。これは、現行の IOD が 6 時間で一意 [1] であるのに比して十分であり、SBAS が補強する CNAV を一意に判別可能であると考え。すなわち、CNAV の元期 t_{oe} の下位 8 bit を航法メッセージセットの識別子として利用可能である。

4.2 衛星軌道・時計精度評価

次世代 SBAS における利用において、衛星軌道・時計精度の観点で適切な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 を評価する。

具体的には、IGS (International GNSS Service) [15] が提供する精密暦 (最終暦: IGS Final) と呼ばれる高精度な衛星軌道及び衛星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 LNAV と CNAV の衛星軌道・時計精度を評価する。表 4 に最終暦の仕様を示す。なお衛星軌道について、ECEF (Earth Centered, Earth Fixed) 座標系における衛星軌道のラジアル方向 (地球中心からの視線方向) 誤差を、軌道誤差のうち最も測位に影響する要素として評価する。また衛星時計について、航法メッセージで補正した衛星搭載原子時計の時刻の GPST に対する誤差に、光速を乗じて距離の次元として評価する。

4.2.1 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 に示す。なお、図 4 に示す衛星は、GPS Block-IIRM 衛星 (7 機, PRN: 05, 07, 12, 15, 17, 29, 31) 及び Block-IIIF 衛星 (10 機, PRN: 01, 03, 06, 08, 09, 24, 25, 26, 27, 30) である。これらの衛星は、L2C 信号若しくは L5 信号を用いて CNAV を放送しており、CNAV が提供する軌道情報も上記の衛星についてのみ放送される。また、それぞれの衛星軌道誤差の RMS

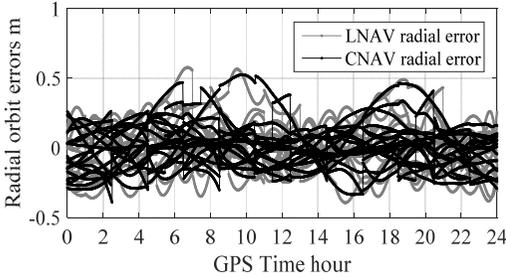


図 4 全衛星のラジアル方向誤差の比較

Fig. 4 Comparison of radial orbit errors (all satellites).

表 5 衛星軌道・時計誤差 (RMS)
Table 5 RMS of radial orbit & clock errors.

	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

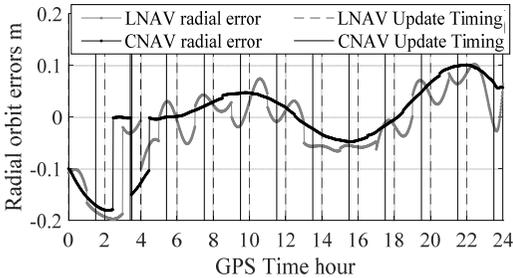


図 5 衛星軌道誤差の比較 (PRN06)

Fig. 5 Comparison of radial orbit errors (PRN06).

(Root Mean Square) を表 5 に示す. 図 4, 表 5 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分かる.

次に, LNAV と CNAV の差の一例として, 図 4 中の GPS の 6 番衛星 (PRN06) について, その軌道誤差を図 5 に示し, RMS 誤差を表 5 に合わせて示す. なお, 図中縦の破線及び実線で示す時点は, それぞれ LNAV と CNAV の各航法メッセージの元期 t_{0e} を表している. 各時点の衛星軌道は元期 t_{0e} 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_{0e} 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に生じている.

図 5 及び表 5 の PRN06 衛星の例から分かるように,

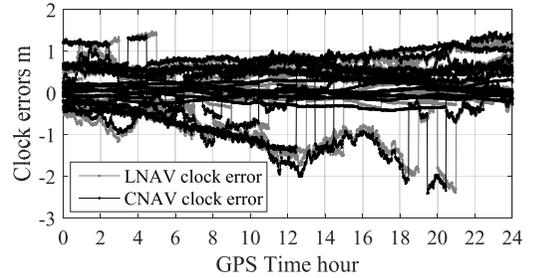


図 6 全衛星の時計誤差の比較

Fig. 6 Comparison of clock errors (all satellites).

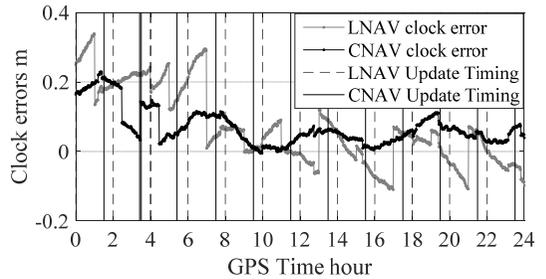


図 7 衛星時計誤差の比較 (PRN06)

Fig. 7 Comparison of clock errors (PRN06).

LNAV と CNAV は長期的には同様の誤差傾向をもつものの, 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.

b) 衛星時計精度評価

LNAV と CNAV の各衛星時計の誤差を図 6 に示す. なお, 図に示す衛星は, 図 4 と同様に GPS Block-IIRM 衛星及び Block-IIF 衛星である. また, それぞれの RMS 誤差を表 5 に合わせて示す.

図 6, 表 5 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分かる. しかしながら, 図 6 中の Block-IIRM 衛星, 及び一部の Block-IIF 衛星 (PRN: 08, 24, セシウム原子時計を搭載) 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ため, 例として, 図 7 に時計ノイズの小さい Block-IIF 衛星 (PRN: 06) について, その衛星時計誤差の比較を示す. なお, 図 7 に示す縦の破線及び実線は, 図 5 と同様に各航法メッセージの元期 t_{0e} を表す. また, その RMS 誤差を表 5 に合わせて示す.

図 7, 表 5 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もつものの, CNAV は誤差変動が小さいことが分かる.

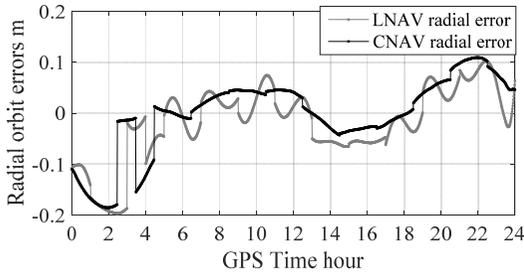


図8 LNAV と劣化させた CNAV の衛星軌道比較
Fig.8 Comparison of radial orbit errors of LNAV & resolution degraded CNAV.

以上から、既存研究と同様に、CNAV の衛星軌道・時計精度が LNAV と比較して高精度であることを確認した。特に、LNAV と CNAV は長期的には同様の傾向をもつものの、CNAV は短期（元期 t_{oe} を中心とした前後 1 時間）の誤差変動が小さく、短期精度が良好であることが明らかとなった。

4.2.2 CNAV の精度向上の要因

4.2.1 に示すとおり、CNAV の短期精度は LNAV と比較して良好である。本項では、これらの精度の差について原因を考察することで、今後、LNAV でも同様の精度向上効果が見込めるかを考察する。具体的には、LNAV と比較して CNAV は分解能が高いため、CNAV の分解能を故意に劣化させて評価する。

a) 衛星軌道

図8にCNAVの軌道分解能をLNAVと同等まで劣化させた場合の軌道誤差とLNAVの軌道誤差の比較を示す。図5と図8を比較すると、CNAVは分解能の向上によって軌道誤差の短期精度が向上したことが分かる。しかし図8によると、依然としてLNAVとCNAVの軌道誤差の短期精度は大きく異なっている。この差異は、図5に縦の破線で示したLNAVの元期 t_{oe} において、LNAVとCNAVの軌道誤差の差異が小さく、時間経過によって増大する傾向にあることから、CNAVが新しく放送している軌道の時間変化項（軌道長半径の時間変化率 \dot{A} [m/s] と平均運動の時間変化率 $\Delta\dot{n}_0$ [SC/s²]) による効果と考える。

ここで、単純な \dot{A} の有無による影響評価は困難である。CNAVは、LNAVにおける軌道長半径の正弦及び余弦調和補正項の振幅係数 C_{rs} 、 C_{rc} では不十分な軌道長半径のモデル化を、新たに線形補正項 \dot{A} を追加することで高精度化を図っている。そのため、 \dot{A} の有無による影響を単独で評価することができない。実際

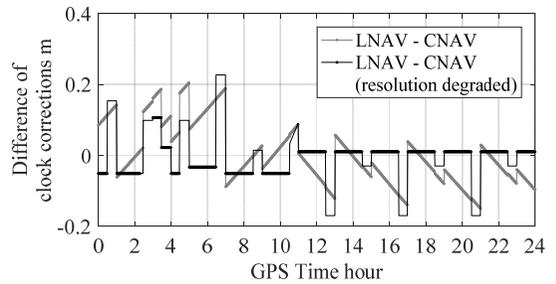


図9 LNAV と CNAV の衛星時計補正の差. CNAV の分解能劣化による影響比較

Fig.9 Difference of clock corrections of LNAV & CNAV or resolution degraded CNAV.

に、CNAVにおいて \dot{A} を考慮せずに軌道計算を行うと各元期 t_{oe} の中点において数メートル級の軌道誤差が生じてしまうことを確認した。

また、平均運動の時間変化率 $\Delta\dot{n}_0$ [SC/s²] は、軌道のアロングトラック方向誤差への影響が支配的であるため、本評価では影響が少なく、実際の測位における影響も無視できるほど小さいと思われる。

b) 衛星時計

衛星軌道の場合と異なり、CNAVの時計補正は新しい要素が追加されていないため、LNAVとCNAVを直接比較する。具体的には、LNAVとCNAVのそれぞれの時計補正值の差と、時計補正分解能をLNAVと同等まで劣化させたCNAVとLNAVのそれぞれの時計補正值の差をとり、図9に合わせて示す。

図9中に灰色で示した単純なLNAVとCNAVの差は、補正量の差から大きな勾配をもつことが分かる。それに対して、図中に黒色で示したLNAVと分解能を劣化させたCNAVの差は、特にプロットに注目すると、11:00以前は5cm程度のバイアスがあるものの、全体としてよく一致していることが分かる。

なおプロット部で大きなバイアスのある3:00~4:30は、短時間の航法メッセージの切り替えが起きている時刻であるため変動が大きく、また黒の細線で示した時刻は、LNAVとCNAVの元期が通常30分の差があることから、2時間ごとに30分間の大きなバイアス差が見られる。これらは、どちらもLNAVとCNAVの元期の差が大きいため生じている。

分解能を落としたCNAVがLNAVと良く一致し、同等の精度とみなせることから、CNAVの精度の向上は、LNAVと比較して分解能が向上したためと言える。

以上から、CNAVの良好な精度は、航法メッセージ

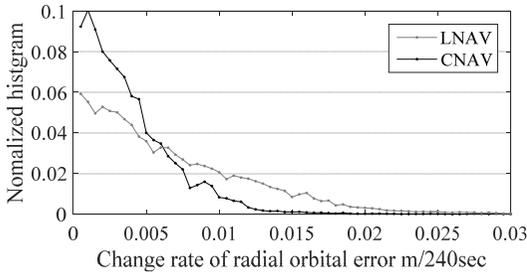


図 10 240 秒間の衛星軌道誤差変動量のヒストグラム
Fig. 10 Normalized histogram of change rate of radial orbit error in 240s.

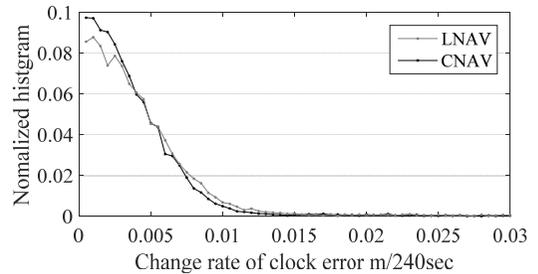


図 11 240 秒間の衛星時計誤差変動量のヒストグラム
Fig. 11 Normalized histogram of change rate of clock error in 240s.

の時間変化項の追加と、分解能の向上によって得られており、CNAV のメッセージフォーマット特有のものであると思われる。こうした改善は、LNAV の今後の軌道・時計推定アルゴリズムの改良等では期待できず、CNAV の LNAV に対するメリットであると考ええる。

4.2.3 SBAS における精度評価

4.2.1, 4.2.2 において、CNAV の精度が良好であり、またそれは CNAV に固有なメリットであることが明らかとなった。しかしながら上記の評価は、通常の単独測位における利用を前提とした評価である。本項では SBAS における利用の観点から評価する。

SBAS では衛星軌道・時計誤差を補正する機能をもつため、4.2.1 で明らかとなった、LNAV と CNAV の誤差の差異はそれぞれ補正され、問題にはならない。SBAS の補正值は一定の間隔をもって放送されるため、補正值の更新間隔における誤差の変動が問題となり得る。そこで、図 4 と図 6 に示した LNAV と CNAV の衛星軌道・時計誤差について、SBAS による補正值の更新間隔における誤差変動量を評価する。具体的には、現行 SBAS の補正メッセージの有効期限が 240 秒であることから、補正值の更新周期を 240 秒と仮定する（実際にはより高周期で更新される）。そしてその間の誤差の変動量を、図 4 と図 6 に示した衛星軌道・時計誤差の任意の時刻とその 240 秒後の差から求める。誤差変動量のヒストグラムをそれぞれ図 10, 図 11 に示す。また、95%値を表 6 に示す。図 10, 図 11, 表 6 によると、LNAV と比較して、CNAV の誤差変動が小さいことが分かる。しかしながら、LNAV, CNAV ともに誤差変動の大部分は 1~2 cm 以下であり、その差も 1 cm 程度と小さいことが分かる。

この値は、次世代 SBAS で想定されている軌道の位置補正分解能 0.0625 m と速度補正分解能 4.88 ×

表 6 240 秒間の衛星軌道・時計誤差変動量 (95%)
Table 6 Change rate of radial orbit and clock error in 95th percentile.

		LNAV	CNAV
Orbit error	cm	1.87	1.06
Clock error	cm	1.23	1.00

10^{-4} m/s (240 秒で 0.117 m)、及び時計補正分解能 0.03125 m と時計ドリフト補正分解能 2.44×10^{-4} m/s (240 秒で 0.059 m) のいずれよりも小さく、また次世代 SBAS の将来的な達成目標として検討されている航空機の精密進入 (CAT-I) が要求する垂直測位精度 4.0 m (95%) と比較しても十分小さいことが分かる。

CNAV の今後の性能向上の可能性について、GPS 単独測位における利用ではその影響が直接的に現れるため非常に興味深いですが、SBAS 利用の観点からは既に十分な性能を有しており、その影響は有意な差として現れないため考慮しない。

以上から、LNAV, CNAV とともに、次世代 SBAS で利用するに当たって十分な性能をもっており、その差も小さいため、どちらの航法メッセージを利用しても測位精度に有意な差を与えないことが分かる。

4.3 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。

3.2 でも述べたように、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る。この場合、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いか、若しくは L5Q5 信号向けのトラッキンググループの追加が必要である。

これらの比較のために、式 (1) によって求めた受

表 7 IFLC 擬似距離誤差 (95%)、受信機熱雑音と衛星軌道・時計の誤差変動 (240 秒)

Table 7 IFLC pseudorange errors in thermal noise and change rate of radial orbit and clock errors in 95th percentile.

Navigation message		LNAV		CNAV	
L5 ranging signal		L5I5	L5Q5	L5I5	L5Q5
Tracking signals		L1-C/A L5I5	L1-C/A L5Q5	L1-C/A L5I5	L1-C/A L5I5 L5Q5
Number of tracking channel		$N_{\text{sat}} \times 2$	$N_{\text{sat}} \times 2$	$N_{\text{sat}} \times 2$	$N_{\text{sat}} \times 3$
S/N ₀ dB-Hz	40	0.49m	0.49m	0.49m	0.49m
	25	25.13m	25.07m	25.13m	25.07m

信機熱雑音下の擬似距離測距精度と表 6 の LNAV と CNAV の短期誤差変動の合成を表 7 に示す。なお、擬似距離は L1-C/A 信号と L5 帯信号の電離層フリー線形結合 (IFLC: Ionosphere-free linear combination) を利用するものとし、L1-C/A 信号についても次世代 SBAS に関する検討 [12] を参考に、式 (1) の d : コリレータチップ幅 (0.1 chip), λ : 測距コードのチップ幅 (約 293.1 m), T : 積分時間 (10 ms) とする。また、データとパイロット信号の比較のために S/N₀ が良好な 40 dB-Hz と劣悪な 25 dB-Hz の場合について示す。また実際には、IFLC で除去しきれない高次の電離圏遅延量、対流圏遅延のモデル化誤差、マルチパス誤差等が生じ、またキャリアスムージングによるノイズ除去が実施されるが、これらは L5I5 信号と L5Q5 信号で同じ傾向を示すため、含めていない。また、トラッキングが必要な測位信号と、必要になるトラッキンググループ数を受信衛星数 N_{sat} で合わせて示す。

表 7 によると、4.2.3 で明らかにした LNAV と CNAV の差は有意な差として現れず、L5I5 信号と比較して L5Q5 信号を測距信号として利用した方が、S/N₀ が低い場合精度が若干良いという傾向が見られた。しかしながら、CNAV を利用する際に L5Q5 信号を利用するとトラッキングに必要なチャンネル数が衛星数 N_{sat} 分増加することが分かる。

一般に、市販の測量級受信機は十分なチャンネル数を有しており、上記のトラッキンググループの増加は問題とはならない。しかしながら、現行の SBAS 規格に準拠する多くの航空用 GNSS 受信機は 12 ch 程度と少なく、また航空機搭載品としての厳しい要求に対する様々な検証作業の必要性等もあり、そのような中で、L5Q5 信号用のトラッキンググループの追加は、受信機コストの増大を招く恐れがある点に注意が必要である。

一方で、L5 帯信号のみの一周波測位を補強する場合には CNAV の利用が必須であるが、次世代 SBAS では L5 帯一周波測位は補強対象とされないことから、CNAV を使用しないこととする規格化も可能である。このことから、4.2.3 で考察したように LNAV に対して CNAV を補強対象とするメリットが小さいことを考えると、次世代 SBAS における補強では LNAV を利用することが適切と考える。

5. むすび

本論文では、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 の評価を行い、その結果を述べた。

航法メッセージの衛星軌道・時計精度を評価した結果、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・時計の精度の違いが与える影響は SBAS の補正分解能や GPS の観測ノイズと比較して小さく、LNAV と CNAV で有意な差が現れないものと見込まれる。一方で、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、若しくは L5Q5 信号利用のために更に信号追尾ループの追加が必要となるデメリットがある。また、次世代 SBAS では L5 帯一周波測位は補強されないことから、CNAV を使用しないこととする規格化も可能である。

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 信号の利用にあたりコスト増となることから、次世代 SBAS における補強では LNAV を利用することが適切と考える。以上の結果を SBAS IWG における議論に反映し、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。また、次世代 SBAS で利用可能な GPS 以外の GNSS についても、DF 化によって二つの異なる航法メッセージが利用可能な場合、本研究と同様の検討を行い、規格化する必要がある。

文 献

- [1] International Standards and Recommended Practices, Annex 10 to the Convention on Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, vol.I, 6th Ed., July 2006.
- [2] SBAS IWG, "Draft IWG SBAS L5 Interface Control Document (SBAS L5 DFMC ICD)," Issue 1, Rev.1 Draft 036, March 2015.
- [3] E. Chatre, "Galileo programme status update," Proc.

ION GNSS+ 2015, pp.1222–1240, Tampa, Florida, Sept. 2015.

- [4] J. Shen, J. Ma, and J. Yang, “Updated on Development of BeiDou Navigation Satellite System,” Proc. ION GNSS+ 2015, pp.1264–1290, Tampa, Florida, Sept. 2015.
- [5] M. Stanisak, U. Haak, and A. Schwithal, “Different positioning strategies using multi-frequency/multi-constellation GNSS measurements,” Proc. ION GNSS+ 2015, pp.2654–2668, Tampa, Florida, Sept. 2015.
- [6] GPS Interface Specification (IS-GPS-200H)
- [7] GPS Interface Specification (IS-GPS-705D)
- [8] “Global positioning system modernized civil navigation (CNAV) live-sky broadcast test plan,” Navigation Center (USCG), 30 May 2013.
- [9] 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 2009, pp.2942–2955, Savannah, GA, Sept. 2009.
- [10] A.J. Van Dierendonck, “Global Positioning System: Theory and Applications,” vol.I, Chapter 8: GPS Receivers, pp.329–407, 1996.
- [11] C.J. Hegarty, “Evaluation of the proposed signal structure for the new civil GPS signal at 1176.45 MHz,” The MITRE Corporation, Working Note WN99W0000034, McLean, Virginia, June 1999.
- [12] J. Samson, “Assumptions on the DFMC SBAS MOPS,” SBAS IWG, Issue 0.6, Oct. 2015.
- [13] P. Steigenberger, O. Montenbruck, and U. Hessels, “Performance evaluation of the early CNAV navigation message,” NAVIGATION, J. Institute of Navigation, vol.62, no.3, pp.219–228, Fall 2015.
- [14] H. Yin, Y.T. Morton, M. Carroll, and E. Vinande, “Performance analysis of L2 and L5 CNAV broadcast ephemeris for orbit calculation,” NAVIGATION, J. Institute of Navigation, vol.62, no.2, pp.121–130, Summer 2015.
- [15] International GNSS Service, <http://www.igs.org/>
- [16] JAXA, 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ーミーティング, 2010.

(平成 28 年 7 月 8 日受付, 11 月 16 日再受付,
12 月 13 日早期公開)



北村 光教 (正員)

2010 早大理工学部機械工学科卒。2015 同大大学院博士課程修了。博士課程では都市部環境下における衛星測位の高精度化に関する研究に従事。現在、電子航法研究所において SBAS の次世代化に関する研究に従事。



麻生 貴広 (正員)

1993 運輸省入省。1995 航空保安大学校卒。2009 茨城大学大学院修士課程修了。国土交通省では MSAS の運用、航空機装備品の型式及び運航承認の業務に従事。現在、電子航法研究所において衛星航法システムの航空機応用に関する研究に従事。



坂井 文泰 (正員)

平 8 運輸省電子航法研究所入所。以来、衛星航法システムによる航空航法システムの研究に従事。博士(工学)。平 10 本会第 10 回回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞, 平 17 IEEE AES Japan Chapter 優秀論文賞, 平 19 ION GNSS 2007

Best Presentation Award.



星野尾一明

1972 年 3 月岡山大学工学部電子工学科卒。同年 4 月運輸省電子航法研究所入所。航空衛星用の測距方式、通信方式の研究に従事。1993 年より GPS の広域補強(SBAS)に関する研究に従事。2009 年 4 月より電子航法研究所特任研究員。