GPS 補強衛星の最適軌道配置^{*1} Optimal Constellation Design for Satellite Based Augmentation System

河 野 功^{*2}
Isao KAWANO

Key Words: Global Positioning System (GPS), Wide Area Augmentation System (WAAS), Satellite Based Augmentation System (SBAS), Constellation Design

Abstract: Global Positioning System (GPS) is widely utilized in daily life, for instance car navigation. Wide Area Augmentation System (WAAS) and Local Area Augmentation System (LAAS) are proposed so as to provide GPS better navigation accuracy and integrity capability. Satellite Based Augmentation System (SBAS) is a kind of WAAS and Multi-functional Transportation Satellite (MTSAT) has been developed in Japan. To improve navigation accuracy most efficiently, augmentation satellites should be so placed that minimize Geometric Dilution of Precision (GDOP) of constellation. In this paper the result of optimal constellation design for SBAS is shown.

1. ま え が き

GPS^{1, 2)} に代表される衛星測位システムは近年急速に利用が進んでおり、カーナビを初めとして国民生活に不可欠な社会インフラとなりつつある。GPS の重要性が増すにつれ、測位精度やインテグリティ (完全性) を改善するために多くの広域および狭域の補強システムが提案されている。衛星を利用した補強システム (SBAS: Satellite Based Augmentation System) は広域補強システム³⁾ (WAAS: Wide Area Augmentation System) の一形態であり、我が国でも運輸多目的衛星 (MTSAT) を使用した SBAS である MSAS (MTSAT Satellite based Augmentation System) の開発が進められている。広域補強システムの一つの目的は、測位精度の向上であるが、これは補強用の衛星から GPS 信号の測距補正情報を中継することと、GPS と同様の測距信号を発信することで可視となる衛星数が増加し、幾何学的な衛星配置が向上することで、測位精度の向上が実現される。幾何学的な衛星配置と測位精度の関係は、GDOP (Geometrical Dilution of Precision: 幾何学的精度劣化度などと訳される) により評価される⁴⁾。

GPS 補強システムとしては静止衛星を使用した場合の有効性の改善効果を研究した例⁵⁾ があるが、GDOP の改善効果を指標として、静止衛星や楕円軌道について広く軌道要素を変えて最適配置した例は見られない。本論文では、GDOP を最小にする最適配置を示し、この最適配置に近づけるという最適化手法を提案する。本手法により GDOP の改善効果を指標にして補強衛星を 1 機及び 2 機使用した

場合の最適配置を行った結果を示す。補強衛星 2 機を最適配置した場合には、最大誤差で 60%、平均誤差で 17%もの誤差低減が可能であり、測位精度の向上に大きく寄与していることを示す。

2. 補強衛星による測位精度の改善

GPS の民間利用が活発になるにつれ、GPS を使用する上での問題点が明らかになってきた。特に、実時間要求の強い航空機の航法手段として GPS を用いようとした場合、着陸時の精度に加え、GPS システムに異常が発生した場合にユーザーに対して直ちに警報を発するインテグリティに対して厳しい要求がある。これらの要求に応えるために WAAS が提唱され、静止衛星を用いた SBAS として、我が国においては MSAS、欧州においては EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) の開発が行われている。WAAS が改善しようとしているのは、(1) 精度、(2) インテグリティ、(3) 有効性、(4) 継続性と定義される指標である。MSAS 等の SBAS では、GPS システムの健全性を示すインテグリティ情報を衛星経由でユーザーに送信することでインテグリティを強化する。測位精度の向上は、GPS 信号の測距補正情報を衛星経由で送信することと、GPS と同様の測距信号の発信により可視となる衛星数が増加し、幾何学的な衛星配置が向上することで実現される。有効性と継続性は、精度とインテグリティを満足する確率と密接な関係があり、上記の精度向上とインテグリティ性能強化に加え、GPS と同様の測距信号の発信により可視となる衛星数が増加し、有効性と継続性が向上する。

衛星測位システムにおける測位精度は、個々の測位衛星からの信号を受信/解読して求められる測距精度と、受信する衛星群の幾何学的配置から決まり、測位誤差と測距誤差

^{*1} © 2002 日本航空宇宙学会

平成 14 年 1 月 8 日原稿受理

^{*2} 宇宙開発事業団筑波宇宙センター

の間には GDOP を指標として

$$[\text{測位誤差}] = [\text{GDOP}] \times [\text{測距誤差}] \quad (1)$$

の関係がある。補強衛星による測位精度の向上は、GPS 信号の測距補正情報の送信と、GPS と同様の測距信号の発信で幾何学的な衛星配置が向上することで実現されるが、GPS 信号の測距補正情報の送信は (1) 式の測距誤差の改善を行うものであり、幾何学的な衛星配置の向上は (1) 式の GDOP の改善を行うものである。

単に測距補正情報を送る通常の DGPS (差分 GPS) に対し、幾何学的な衛星配置 (GDOP) の向上までを行い、より高精度の DGPS を行おうとする方式をシュードライト⁶⁾ (Pseudolite: 疑似衛星) 方式の DGPS という。SBAS はシュードライト方式の DGPS であることに大きな特徴がある。

GDOP は以下のように計算される³⁾。測位を行おうとする地点と GPS 衛星 ($i = 1 \sim 4$) を結ぶ方向余弦ベクトルを定義し、このベクトルの成分

$$\begin{aligned} \alpha_i &= -\frac{x_i - x_0}{r_i} \\ \beta_i &= -\frac{y_i - y_0}{r_i} \\ \gamma_i &= -\frac{z_i - z_0}{r_i} \\ r_i &= \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

を用いて、次の行列

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

を定義すれば、GDOP は

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{Trace}(A^T \cdot A)^{-1}} \quad (4)$$

により定義される。

GDOP 最小となる衛星配置は、第 1 図に示すような天頂に 1 機、水平近く (最小仰角) に 3 機が 120° 間隔となるような配置である。GDOP が最小となるのは衛星が水平線上 (仰角 0°) の時であるが、仰角が低いと電離層遅延等の電波伝搬誤差が大きくなり、また地形や建造物の遮蔽の影響を受けやすいので、一般には仰角 $El = 10^\circ$ 以上の衛星から選択される場合が多い。第 1 図に示す GDOP を最小とする配置の場合の GDOP は最小仰角の関数として、

$$\text{GDOP}_{\min} = \sqrt{\frac{4}{3} \sec^2 El + \frac{\frac{13}{6} - \frac{1}{2} \cos(2El)}{(\cos(El/2) - \sin(El/2))^4}} \quad (5)$$

で与えられ⁴⁾、 $El = 10^\circ$ の場合は、

第 1 図 GDOP 最小となる理想的な衛星配置 (天頂に 1 機、水平近くに 3 機が 120° 間隔)

第 2 図 静止衛星 1 機による GDOP の改善効果 (静止衛星を真南に配置した場合、@東京)

$$\text{GDOP}_{\min} = 1.965 \quad (6)$$

である。補強衛星の目的は GDOP をこの理想値に近づけることであるので、本論文では補強衛星による GDOP 改善率として、

$$\Delta \text{GDOP} = 1 - \frac{\text{GDOP}_{\text{補完あり}} - \text{GDOP}_{\min}}{\text{GDOP}_{\text{GPSのみ}} - \text{GDOP}_{\min}} \quad (7)$$

を定義して補強衛星の有効性の評価を行う。

3. 補強衛星の最適軌道配置

3.1 静止衛星 1 機による GDOP の改善効果

3.1.1 真南の静止衛星を使った場合 補強衛星が 1 機の場合静止衛星が選ばれることが多く、その軌道位置として補強サービスの対象となる地域の中央付近の静止軌道上が考えられる。日本周辺領域をサービス対象とする場合、東経 140° の静止軌道が考えられる。静止衛星は常時可視である上、衛星方向が変化しないため追尾が容易である、という大きな利点がある。

補強システムの対象地域を日本周辺と考え、補強衛星を東経 140° の静止衛星とした場合の東京付近 (東経 140° 、北緯 36°) での GDOP の改善効果を第 2 図に示す。GPS 衛星として 25 衛星を考え、軌道要素は実際に受信したアルマナック (衛星捕捉用の粗軌道要素) データを使用している。静止衛星の追加により GDOP が改善された部分を図中に示しているが、GDOP が改善されるのは限定的であ

り, その改善幅も大きくない. 実際, その改善幅は, 最大 GDOP が $4.402 \rightarrow 4.372$ (改善率 $\nabla 1\%$), 平均 GDOP が $3.076 \rightarrow 3.051$ (改善率 $\nabla 2\%$) と, GDOP 改善率は小さい. この場合の衛星選択の様子を第 3 図に示す. 図中の線の太さは 3 段階に分かれており, 細線は 0° 以上の可視を, 中太線は 10° 以上の可視を, 太線は GDOP 最小となるように選んだ 4 衛星を表している. 図の一番上の線が静止補強衛星であるが, 静止補強衛星は常時 10° 以上の可視であるにもかかわらず, GDOP 最小の 4 衛星の一つとなることは少ないことがわかる.

補強の効果は, 補強サービスを行おうとする対象領域全体で評価しなければならない. そこで, 日本周辺の北端として, 宗谷岬 (東経 142° , 北緯 45.5°) を選び, 補強衛星による GDOP 改善効果を求めた結果を第 4 図に示す. このケースでは, GDOP の一時的な劣化が見られる (最大 GDOP = 7.878) ので, 補強衛星の効果が顕著に現れやすいが, 最大 GDOP が $7.878 \rightarrow 7.062$ (改善率 $\nabla 14\%$), 平均 GDOP が $3.062 \rightarrow 2.974$ (改善率 $\nabla 8\%$) と, GDOP 改善率は期待されるほど大きくない.

以上により, 補強衛星として真南の静止衛星を使用した場合の GDOP 改善効果は小さく, シュードライト方式の DGPS として有効に機能しているとは言い難い. GDOP を最小とする理想的な衛星配置は第 1 図に示した通りであり, 天頂付近か最低仰角 (10°) 付近に位置しないと GDOP 改善効果が小さい. 補強衛星として真南の静止衛星を使用する場合は, 特に北緯 36° の東京では仰角が約 45° となり, 天頂からも水平線からも離れているので GDOP の改善には寄与せず, 北緯 45.5° の宗谷岬からは仰角が低くなるので水平線に近づき, GDOP の改善にやや寄与するのである.

3.1.2 東端の静止衛星を使った場合 GDOP を最小とする理想的な衛星配置は第 1 図に示した通りであるので, 補強衛星は天頂付近か水平線付近に置かなければ GDOP 改善に寄与しないことが前節の結果から確かめられた. そこで, 補強衛星としての静止衛星を真南ではなく, 東南か南西の最小仰角に近い方向に配置すれば, GDOP がより改善されることが期待される.

補強衛星としての静止衛星は, サービス対象領域全体から, ある仰角以上で可視でなければならない. 地球を球体とすると (地球の扁平率は $1/300$ であるので, この近似による誤差は 0.2° 程度である), 静止衛星の仰角は以下の関係より求められる. 観測点の緯度を ϕ , 観測点と静止衛星の経度差を $\Delta\lambda$ とすると,

$$\cos \beta = \cos \phi \cos \Delta\lambda \quad (8)$$

β は観測点と静止衛星の間の中心角であり, 仰角 El とは次式の間がある (正弦定理)

$$\frac{r_{\text{GEO}}}{\sin(90^\circ + El)} = \frac{r_e}{\sin(90^\circ - \beta - El)} \quad (9)$$

r_{GEO} は静止軌道長半径, r_e は地球半径であり, $El > 10^\circ$ を「可視」とすると, (9) 式は,

第 3 図 静止衛星 1 機追加した場合の衛星選択 (静止衛星を真南に配置した場合, @東京)

第 4 図 静止衛星 1 機による GDOP の改善効果 (静止衛星を真南に配置した場合, @宗谷岬)

$$\begin{aligned} \frac{r_{\text{GEO}}}{\sin 100^\circ} &= \frac{r_e}{\sin(80^\circ - \beta)} \\ \sin(80^\circ - \beta) &= \frac{r_e}{r_{\text{GEO}}} \sin 100^\circ = 0.1490 \quad (10) \\ \beta &= 71.43^\circ \\ \cos \beta &= \cos 71.43^\circ = 0.3184 \end{aligned}$$

これを (8) 式に入れると, $El = 10^\circ$ を満たす緯度 ϕ と経度差 $\Delta\lambda$ が求められる. 補強サービス対象領域全体から $El > 10^\circ$ となる東端の静止衛星の経度は, 領域の西北端の位置で決まり, 日本周辺領域の西北端を対馬 (東経 129.2° , 北緯 34.7°) とすると, 経度差が 67.2° 以内である必要があり, 196° (西経 164°) 辺りが東端の静止経度となる⁷⁾.

補強衛星として西経 164° の静止衛星を選び, 東京付近における GDOP の改善効果を第 5 図に示す. 第 5 図を第 2 図と比較すると, 静止衛星を真南ではなく東端に配置すると GDOP が大きく改善されることがわかる. 改善幅は, 最大 GDOP が $4.402 \rightarrow 3.996$ (改善率 $\nabla 17\%$), 平均 GDOP が $3.076 \rightarrow 2.873$ (改善率 $\nabla 18\%$) とかなりの改善が見られる. この場合の衛星選択の様子を第 6 図に示す. 図の一番

第5図 静止衛星 1 機による GDOP の改善効果 (静止衛星を東端に配置した場合, @東京)

第6図 静止衛星 1 機追加した場合の衛星選択 (静止衛星を東端に配置した場合, @東京)

第7図 静止衛星 1 機による GDOP の改善効果 (静止衛星を東端に配置した場合, @宗谷岬)

上の線が静止補強衛星であるが、東端に置いた場合は可視の内で半分の期間は GDOP 最小の 4 衛星の一つとして選択されており、GDOP 改善に寄与していることがわかる。

宗谷岬での GDOP 改善効果を求めた結果を第 7 図に示す。第 7 図を第 4 図と比較すると、宗谷岬では東端の静止衛星を補強衛星とした効果がさらに顕著に現れる。GDOP の一時

第8図 南方楕円軌道衛星の可視方向 (@宗谷岬)

的な劣化のピークは消え、最大 GDOP が $7.878 \rightarrow 3.964$ (改善率 $\nabla 66\%$)、平均 GDOP が $3.062 \rightarrow 2.783$ (改善率 $\nabla 25\%$) と大幅な改善が見られる。測位精度が最悪 GDOP にて規定される場合には、測位精度が 2 倍に向上することを意味する。

以上により、補強衛星として静止衛星を使用する場合には、真南ではなく東端 (補強対象領域の西北端から見て最小仰角となる静止精度) に配置すれば、GDOP の改善効果が大きく、測位精度を最大で 2 倍向上させることができる。

3.2 楕円軌道衛星 1 機による GDOP の改善効果 GDOP を最小とする理想的な衛星配置に近づけるため、補強衛星を南方の最小仰角付近に配置することも考えられる。

ケプラーの第二法則により、楕円軌道では遠地点付近を長く飛行するので、南半球に遠地点を持つ楕円軌道にすれば、南方の最小仰角付近に長く位置させることができる (以下「南方楕円衛星」と呼ぶ)。南方楕円衛星の軌道設計は、補強対象領域の最北端から見て、最小仰角付近に長く留まるようにして行う。

楕円軌道の遠地点高度は $a(1+e)$ であるので、(9) 式と同様に次式が成立する。

$$\frac{a(1+e)}{\sin(90^\circ + El)} = \frac{r_e}{\sin(90^\circ - \beta - El)} \quad (11)$$

$El = 10^\circ$ であり、最北端を宗谷岬とし、遠地点を最北端の真南にとると、

$$\beta = i + \phi = i + 45.5^\circ \quad (12)$$

であるから、(11) 式は、

$$\frac{a(1+e)}{\sin 100^\circ} = \frac{r_e}{\sin(34.5^\circ - i)} \quad (13)$$

となり、傾斜角と離心率の関係が求められる。(13) 式の関係式を参考に傾斜角と離心率を振り、遠地点以外でも最小仰角以下にならないように留意して、GDOP 改善効果の大きい軌道を求める。

このような軌道設計の結果、傾斜角 28° 、離心率 0.367

第9図 楕円軌道衛星1機によるGDOPの改善効果(楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @東京)

第11図 楕円軌道衛星1機によるGDOPの改善効果(楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @宗谷岬)

第10図 楕円軌道衛星1機追加した場合の衛星選択(楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @東京)

第12図 楕円軌道衛星1機追加した場合の衛星選択(楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @宗谷岬)

の軌道が最適軌道であることがわかった。この軌道の宗谷岬からの可視状況を第8図に示す(図中で○は1時間おきに付している)。南方の最小仰角近くを12時間以上かけてゆっくりと周回する軌道であることがわかる。

南方楕円衛星による東京付近でのGDOPの改善効果を第9図に示す。第9図を第2図と比較すると真南の静止衛星よりも改善されているが、第5図と比較すると東端の静止衛星にはやや及ばない。その改善幅は最大GDOPが $4.402 \rightarrow 4.402$ (改善率0%)、平均GDOPが $3.076 \rightarrow 2.921$ (改善率▼14%)である。衛星選択の様子を第10図に示す。南方楕円衛星を選択する割合は、東端の静止衛星の場合に比べてやや低い。

南方楕円衛星のGDOP改善が東京付近では東端の静止衛星に及ばないのは、南方楕円衛星の軌道要素が最北端からの最小仰角で決まるからである。仮に最北端において最小仰角を 7° まで許容すれば、東京での仰角もその分低くなり、平均GDOPは2.865(改善率▼19%)となって、東端の静止衛星の場合よりも改善効果が大きくなる。

南方楕円衛星は最北端で最低仰角近くに長く留まるために最北端でのGDOP改善度が大きい。宗谷岬でのGDOP

改善効果を求めた結果を第11図に示す。第11図を第7図と比較すると、東端の静止衛星を補強衛星とした場合と同様に改善効果が顕著である。GDOPの劣化のピークは消え、最大GDOPが $7.878 \rightarrow 3.935$ (改善率▼66%)、平均GDOPが $3.062 \rightarrow 2.750$ (改善率▼28%)となっており、改善率は東端の静止衛星の場合を上回っている。衛星選択の様子を第12図に示す。宗谷岬からは非常に長い期間連続して南方楕円衛星を選択しており、GDOP改善に寄与していることがわかる。最悪GDOPは補強衛星が無い場合の半分以下となっており、測位精度の向上に大きな効果があることがわかる。

また、楕円軌道の遠地点を天頂近くや、北方の最低仰角近くに置くことも考えられる。さまざまな軌道を検討してみたが、上記の東端静止衛星や南方楕円衛星を上回る結果は得られなかった。一例として、傾斜角 110.7° 、離心率0.6の逆行長楕円軌道のGDOP改善効果を第13図に示す。最大GDOPが $4.402 \rightarrow 4.174$ (改善率▼9%)、平均GDOPが $3.076 \rightarrow 2.946$ (改善率▼12%)であり、改善率は上述の場合に及ばない。遠地点が北半球にある長楕円軌道は近地点付近で不可視となる。このため、補強衛星のもう一つの

第 13 図 楕円軌道衛星 1 機による GDOP の改善効果 (傾斜角 110.7° , 離心率 0.6 の長楕円軌道)

第 16 図 静止衛星 2 機による GDOP の改善効果 (静止経度: 東経 82° , 西経 164° , @宗谷岬)

第 14 図 静止衛星 2 機による GDOP の改善効果 (静止経度: 東経 82° , 西経 164° , @東京)

第 17 図 静止衛星 2 機による GDOP の改善効果 (静止経度: 東経 73° , 西経 159° , @東京)

第 15 図 静止衛星 2 機追加した場合の衛星選択 (静止経度: 東経 82° , 西経 164° , @東京)

精度改善の手法である測距補正情報の通知が行えない時間帯が発生する。GDOP 改善の効果が他と比較して小さい上に、測距補正情報が送れないデメリットは大きいので、北半球に遠地点がある北方楕円軌道は補強衛星としては実用的ではない。

3.3 静止衛星 2 機による GDOP の改善効果

3.3.1 東端と西端の静止衛星を使った場合 補強衛星を 2 機に増やせる場合には、静止衛星 2 機の使用が考えられる。第 1 図の理想的配置を念頭に置けば、南西と南東の最小仰角付近に静止衛星を配置するのが GDOP の改善に効果的であると予想される。前述の通り、東端の静止経度は西北端の対馬からの可視により決まり、同様に西端の静止経度は補強対象領域の東北端からの可視により決まる。対象領域の東北端を知床 (東経 145.4° , 北緯 44.4°) とすると、経度差が 63.5° 以内であるから、東経 82° 辺りが西端の静止経度となる。補強衛星として東経 82° と西経 164° の静止衛星を選び、東京付近における GDOP の改善効果を第 14 図に示す。第 14 図を第 5 図と比較すると、GDOP はさらに改善されており、その改善幅は、最大 GDOP が $4.402 \rightarrow 3.597$ (改善率 $\nabla 33\%$)、平均 GDOP が $3.076 \rightarrow 2.873$ (改善率 $\nabla 32\%$) である。衛星選択の様子を第 15 図に示す。上 2 本の線が静止補強衛星であるが、2 機が効率的に選択されており、GDOP の改善に寄与していることがわかる。宗谷岬における GDOP の改善効果を第 16 図に示す。第 16 図を第 7 図と比較すると、GDOP はさらに改善されており、最大 GDOP が $7.878 \rightarrow 3.233$ (改善率 $\nabla 79\%$)、平均 GDOP が

第 18 図 静止衛星 2 機追加した場合の衛星選択 (静止経度: 東経 73°, 西経 159°, @東京)

第 20 図 楕円軌道衛星 2 機による GDOP の改善効果 (楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @東京)

第 19 図 静止衛星 2 機による GDOP の改善効果 (静止経度: 東経 73°, 西経 159°, @宗谷岬)

第 21 図 楕円軌道衛星 2 機による GDOP の改善効果 (楕円軌道衛星を南方に配置した場合, @宗谷岬)

3.062→2.603 (改善率 ▼42%) となる。

3.3.2 東端と西端の静止衛星の間隔を広げた場合 測距補正情報は 1 機以上が可視であれば送ることができるので、補強衛星を 2 機使用できる場合は、補強対象領域全体に渡って 2 衛星が可視であることは必ずしも必要ではない。例えば、我が国の人口密集地帯である首都圏から京阪神付近までは 2 衛星可視として精度向上を目指し、その外側では 1 衛星以上が可視であれば良いとすると、東端と西端の静止衛星の間隔を広げることができる。首都圏や京阪神付近では最低仰角近くに静止補強衛星が位置することになるため、GDOP 改善効果が大きくなる。補強衛星を東経 73°と西経 159°に配置した場合の東京付近における GDOP の改善効果を第 17 図に示す。最大 GDOP が 4.402→3.018 (改善率 ▼33%)、平均 GDOP が 3.076→2.554 (改善率 ▼32%) となっており、第 17 図を第 14 図と比較すると、GDOP はさらに改善されている。衛星選択の様子を第 18 図に示す。第 18 図を第 15 図と比較すると、東端と西端の静止衛星の間隔を広げた場合は、大部分の期間で静止補強衛星が選択されており、GDOP の改善に極めて有効に利用されていることがわかる。宗谷岬における GDOP の改善効果を第 19 図

に示す。このケースの場合、首都圏から京阪神付近に重点化して静止衛星の配置を決めているため、宗谷岬からは 1 衛星しか見えず、GDOP の改善は第 16 図には及ばない。最大 GDOP が 7.878→3.751 (改善率 ▼70%)、平均 GDOP が 3.062→2.739 (改善率 ▼29%) となっており、第 7 図の東端の静止衛星の場合よりは改善されている。これは、東端の静止衛星の位置が西経 164°から 159°へとさらに東に移動し、宗谷岬から見た仰角が低くなったためである。

対象全域に渡って静止衛星 2 機を可視として全域の精度向上を行うか、対象ユーザーの多い重点地域に最適化して一層の精度向上を行うかは、システム設計の要素であり、補強システムの提供者の選択に委ねられる。どちらのサービスに重点を置くか、また重点領域の範囲によって、静止衛星の軌道要素を決めてやれば良い。

3.4 楕円軌道衛星 2 機による GDOP の改善効果

3.4.1 南方楕円衛星を使った場合 補強衛星を 2 機使用する場合には、3.2 節で述べた南方楕円衛星を 2 機とすることも考えられる。同一軌道上の南方楕円衛星を 12 時間の位相差で配置した場合の東京付近における GDOP の改善効果を第 20 図に示す。最大 GDOP が 4.402→4.090 (改善率 ▼13%)、平均 GDOP が 3.076→2.791 (改善率 ▼26%)

第 1 表 補強衛星による GDOP 改善効果

補強衛星の軌道		東 京		宗谷岬		備 考
		最大 GDOP	平均 GDOP	最大 GDOP	平均 GDOP	
GPS のみ		4.402	3.076	7.878	3.062	比較の基準
1 衛星	静止真南	4.372 (▼ 1%)	3.051 (▼ 2%)	7.062 (▼ 14%)	2.974 (▼ 8%)	1 衛星の場合の最適配置 静止位置の確保が難しい場合、最適配置となりうる
	静止東端	3.996 (▼ 17%)	2.873 (▼ 18%)	3.964 (▼ 66%)	2.783 (▼ 25%)	
	南方楕円	4.402 (▼ 0%)	2.921 (▼ 14%)	3.935 (▼ 66%)	2.750 (▼ 28%)	
2 衛星	静止 (日本全体で東端と西端)	3.597 (▼ 33%)	2.719 (▼ 32%)	3.233 (▼ 79%)	2.603 (▼ 42%)	2 衛星常時可視の条件下での最適配置 首都圏～京阪神において最適配置
	静止 (間隔広げ中心部に特化)	3.018 (▼ 43%)	2.554 (▼ 47%)	3.751 (▼ 70%)	2.739 (▼ 29%)	
	南方楕円	4.090 (▼ 13%)	2.791 (▼ 26%)	3.725 (▼ 70%)	2.634 (▼ 39%)	静止位置の確保が難しい場合、最適配置となりうる
	南方楕円 (東京以南に特化)	3.459 (▼ 39%)	2.664 (▼ 37%)	3.935 (▼ 66%)	2.747 (▼ 28%)	

になっている。第 20 図を第 7 図と比較すると、衛星を 2 機に増やすことで GDOP がかなり改善されている。しかし、3.3.1 項の静止衛星 2 機の場合 (第 14 図) に比べると、GDOP 改善効果はやや及ばない。南方楕円衛星は宗谷岬で最小仰角近くとなるように軌道要素が決められている。宗谷岬における GDOP の改善効果を第 21 図に示す。最大 GDOP が 7.878→3.725 (改善率 ▼70%)、平均 GDOP が 3.062→2.634 (改善率 ▼39%) となっており、第 9 図と比較すると、さらに改善されていることがわかる。しかし、第 16 図の静止衛星 2 機の場合にはやや及ばない。補強衛星を 2 機使用する場合には、南方楕円軌道よりも静止軌道を両端に配置した方が有利であることがわかる。

3.4.2 南方楕円衛星をさらに南方に配置した場合 測距補正情報は 1 機以上が可視であれば送ることができるので、南方楕円衛星の片方を、最北端ではなく、我が国の人口が集中する北緯 36° 以南に特化して軌道設計を行うことも考えられる。このようにして南方楕円衛星の片方の傾斜角を大きくしてさらに南方に配置した場合の東京付近における GDOP の改善効果を第 22 図に示す。最大 GDOP が 4.402→3.459 (改善率 ▼39%)、平均 GDOP が 3.076→2.664 (改善率 ▼37%) になっており、第 20 図と比較すると大きく改善されている。この場合、宗谷岬における GDOP の改善は、南方楕円衛星 1 機の場合 (第 13 図) と同程度である。全体として 3.3.1 項の静止衛星 2 機の場合 (第 14 図、第 16 図) を東京付近ではやや上回り、宗谷岬でやや下回る。しかし、2 機が対象領域全体で必ずしも可視ではない、という条件を考えれば、3.3.2 項の静止衛星 2 機の間隔を広げた場合 (第 16 図、第 19 図) と比較すべきであり、GDOP 改善効果は、この配置にはやや及ばない。

第 1 図の最小 GDOP の配置を念頭に置き、楕円軌道の傾斜角や離心率を振って、天頂や最小仰角近くに長く留まる軌道を設計して GDOP の改善効果を調べたが、3.3 節の静止衛星を東端と西端に配置した場合を上回る結果は得られなかった。一例として、3.2 節で述べた逆行長楕円軌道衛星 (第 13 図) を 2 機配置した場合の東京付近における GDOP 改善効果は、最大 GDOP が 4.402→3.754 (改善率 ▼27%)、平均 GDOP が 3.076→2.832 (改善率 ▼22%) で

第 22 図 楕円軌道衛星 2 機による GDOP の改善効果 (片方を東京以南に特化した場合、◎東京)

あり、改善率は南方楕円衛星の場合 (第 22 図) にも及ばないことがわかった。

3.5 補強衛星による GDOP 改善効果のまとめ 補強衛星をさまざまな軌道に配置した場合の GDOP 改善効果を比較した結果を第 1 表に示す。

補強衛星が 1 機の場合は、静止衛星を対象領域の西北端から可視 (最小仰角以上) となる東端に配置するのが GDOP の改善効果が大きい最適配置である。南方楕円衛星は対象領域の北方域で静止衛星を上回るが、人口の多い東京以南の領域では静止衛星の方が GDOP 改善効果が大きい。ただし、静止軌道の位置確保のためには国際調整が必要であり、自由に静止経度を選ぶことはできない。静止経度が最適位置から西になるに従って、南方楕円衛星の方が有利になる場合がありうる。静止衛星や南方楕円衛星のような、最小仰角付近に長時間留まる軌道は、GPS に見られる一時的な GDOP の劣化を防ぐのに大変有効であることがわかる。

補強衛星として 2 機使用できる場合は、静止衛星を対象領域の西北端と東北端から可視となるように東端と西端に配置するのが GDOP の改善に最も効果が大きく、最大 GDOP を 60% も低減できる場合があり、測位精度の向上に大きく寄与できる。静止衛星 2 機を特定の領域で最適化することも可能である。南方楕円衛星は対象領域の北方域で静止衛

星を上回るが、人口の多い東京以南の領域では静止衛星の方が GDOP 改善効果大きい。南方楕円衛星の内の 1 機を東京以南で最適化すれば GDOP の改善効果は大きくなり、最適の静止経度が確保できない場合には、静止衛星よりも有利になる場合がありうる。

4. 結 論

GPS を中心とした衛星測位システムは 21 世紀の社会インフラであり、測位精度とインテグリティの向上のために衛星を利用した補強システムの開発が進められている。本論文では、GDOP 改善率を指標として補強衛星の最適軌道設計を試みた。補強衛星の軌道設計を行う場合、最適 GDOP となる衛星位置を念頭に置き、これに近づけるように、静止軌道や楕円軌道を配置するのが有効な方法である。補強衛星が 1 機の場合は補強対象領域全体で可視となる東端に配置するのが GDOP 改善効率が良く、2 機の場合は静止衛星を東端と西端に配置するのが良い。この場合、補強衛星 2 機を静止軌道上で最適配置した場合には、最大誤差で 60%、平均誤差で 17%もの誤差低減が可能であり、測位精度の向上に大きく寄与しうる。また、静止経度が自由に選べない場合には、南方楕円軌道が静止軌道に次ぐ補強衛星

の最適配置となる。

補強衛星の軌道配置に当たっては、補強サービス領域を定め、GDOP を最小化すれば、測位精度の改善に有効である。

参 考 文 献

- 1) Parkinson, B. W.: Navstar Global Positioning System (GPS), Proc. of National Telecommunications Conference, 1976.
- 2) 土屋 淳, 辻 宏道: GPS 測量の基礎, (社) 日本測量協会, 1995.
- 3) Enge, B. K. and Van Dierendonck, A. J.: Global Positioning System: Theory and Applications II, Wide Area Augmentation System, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 164, 1996, pp. 81-115.
- 4) Spilker, J. J., Jr.: Global Positioning System : Theory and Applications I, Satellite Constellation and Geometric Dilution of Precision, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 163, 1996, pp. 177-208.
- 5) John Hopkins University/Applied Physics Laboratory: GPS Risk Assessment Study Final Report, VS-99-007, 1999.
- 6) Elrod, B. D.: Global Positioning System : Theory and Applications II, Pseudolites, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 164, 1996, pp. 51-79.
- 7) 河野 功: 準天頂衛星と静止衛星による衛星測位システム, 電子情報通信学会論文誌, J84-B, 14 (2001), pp. 2092-2100.