

# 衛星測位システムに関する複雑ネットワークの基礎検討

## Basic Study of Complex Network Analysis for Global Navigation Satellite System of Systems

浅里幸起, 齋藤雅行, 三神泉

一般財団法人 衛星測位利用推進センター

Koki Asari, Masayuki Saito, Izumi Mikami

Satellite Positioning Research and Application Center

**Abstract** In this paper, we try to apply a new methodology “complex network science” onto Global Navigation Satellite System (GNSS). Complex network theory has cleared new type of network characteristics; “scale-free” and “small world” in real networks, which are expected to provide new technique for analysis and design. As the first step, we consider on a network centrality for each constellation of GNSS, and study potential items for future works using the complex network theory.

### 1 はじめに

衛星測位システムは、世界各国で数十年に渡り開発・整備の競争が続いている現代の社会基盤である。主要国の政府が進めてきた衛星系の整備は、2020年にはほぼ完成をみたが、その後も、低軌道衛星を活用するシステムの提案や、民間企業や新興国のシステム提案が行われている。本稿は、これらの動向をネットワークの成長という視点で捉え、複雑ネットワーク論を活用した新しい解析や設計に道を拓こうとするものである。

衛星測位システムは、米国の GPS, 欧州の Galileo, 日本のみちびき (QZSS), ロシアの GLONASS, 中国の BDS (BeiDou satellite navigation System), インドの NavIC (Navigation with Indian Constellation) 等の衛星系をコアシステムとしている。利用される衛星系としては、これらに加えて衛星型航法補強システム (SBAS) がある。Fig. 1 は、このような状況について、地球を取り囲む軌道図にまとめたものである。

GPS は 12 時間で地球を 1 周する地球中軌道 (MEO: Middle Earth Orbit) に配置されており、GLONASS, Galileo, BDS の軌道もこの近傍である。静止軌道 (GEO: Geostationary Earth Orbit) には、SBAS 衛星やコアシステムの一部の測位衛星が配置されている。準天頂衛星の場合は、更に高度が高く 4 万 km の高度を約 24 時間かけて周回している。測位衛星としては最も外周に位置しているといえる。

Fig. 1 では、軌道力学によって定まる軌道半径 (Radius of Orbit), 海拔高度 (Height from Sea Level), 軌道周期 (Orbital period), 軌道速度 (Orbital speed) の値を付記している。また、地球低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) を利用する ISS (宇宙ステーション), Iridium (携帯機器用通信衛星), Hubble (軌道上天体望遠鏡) 等の軌道を記載している。これらは測位システムではないが、現在では LEO の衛星測位システムも検討されている。

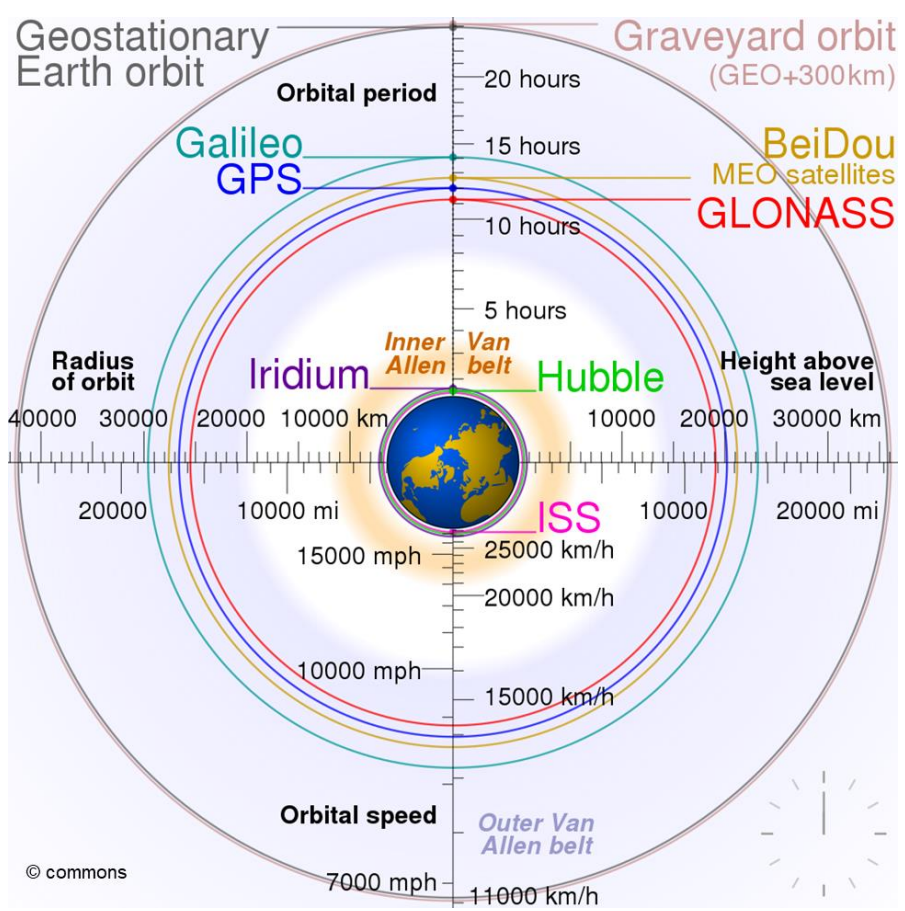


Fig. 1 Global Navigation Satellite System and their Orbits

信号の波長より一桁高い精度を実現する高精度測位補強システムが、各国で普及しており、その位置の基準となっている連続観測基準局（CORS）は、世界で数万基に達すると言われている。Fig. 2 に公開されている CORS 基準局の分布を示す。

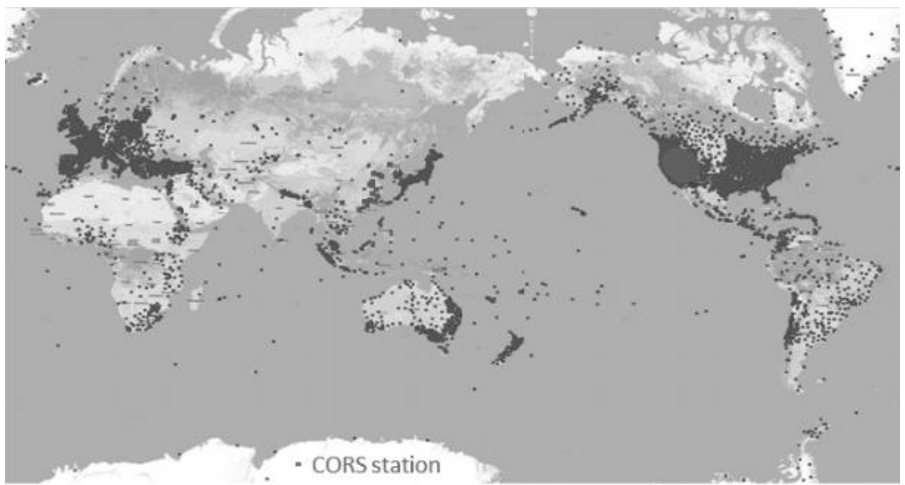


Fig. 2 GNSS Reference Stations

黒点が CORS 基準局の配置を表わしている。日・米・欧や豪州東岸、ニュージーランドなどは国土を覆うよう整備が進んでいることが分かる。日本では国土地理院の「電子基準点」が約 1300 基整備されている。このシステムは、2004 年のサービス開始以降、業界関係者や研究開発者に盛んに利用されている。

これらの CORS 基準局は、DGNSS (Differential GNSS), RTK (Real-Time Kinematic), VRS (Virtual Reference Station) 等のサービスで利用されてきたが、今日では PPP (Precise Point Positioning) や PPP-RTK, PPP-AR (Ambiguity Resolution) 等のサービスに利用が拡大している。PPP の利用例としては、カナダの CSRS (Canadian Spatial Reference System) -PPP や、オーストラリアの事例がある。

今日、先進国では成長戦略の一環で自動運転に取り組んでいるが、デシメータ級又はセンチメータ級の精度要求があるため、CORS 基準局に基づく高精度測位は不可欠の技術になりつつある。今後このトレンドは途上国を巻き込み、国際的に拡大していくと予想される。

また、欧州連合の統計によれば、Fig.3 に掲げるように、測位受信機は導入ベースでは世界で 70 億台になろうとしている<sup>[1]</sup>。この数字は過去に導入された機器数の累積なので、現在稼動しているのは 30 億台程度と言われている<sup>[2]</sup>。いずれにしても膨大な数の端末がネットワークを形成していることに変わりはない。

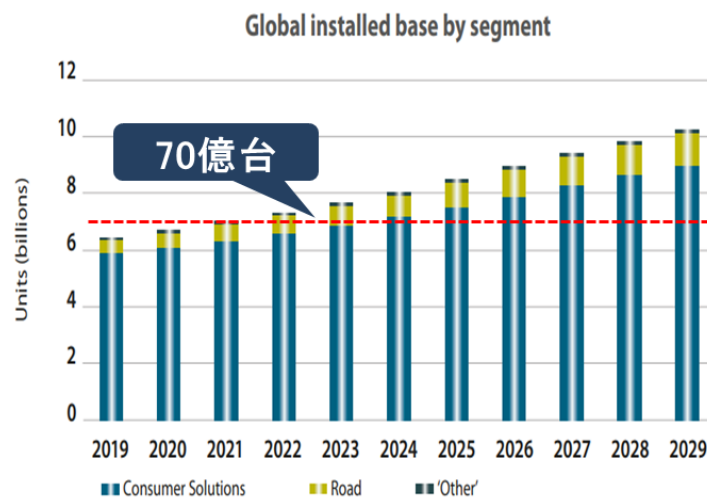


Fig. 3 GNSS Market Report 2019 by EU GSA

これに加えて、みちびき7機体制等で計画のある衛星間測距、米国・英国・中国等が言及している低軌道衛星の測位利用など、衛星測位ネットワークの複雑度を高めるプランは多数存在しており、今後の衛星測位システムの高度化に貢献していくものと期待されている。

一方、複雑ネットワーク論は、米国で生まれた新しい科学である。複雑ネットワークとは、現実のネットワークを意味している。ここでいうネットワークは、通信・放送網、交通網、電力供給網、パイプライン網のような具体的なネットワークだけではなく、人間関係や、論文共

著関係、俳優共演関係など広い範囲の関係性をすべて包含する概念である。この意味で人間社会の多くのものはネットワークで出来ているといえる。

これらの一見関係のないネットワークの中に、共通の興味深い法則が見いだされている。このネットワークの性質を用いて、新しい解析や設計をしようという試みが複雑ネットワーク科学であり、多くの分野においてその適用が試みられている。

本稿では、各国の競争によって複雑度を増している衛星測位システムに複雑ネットワーク科学を適用するための基礎検討を行うことにする。

## 2 複雑ネットワークの諸性質

本章では、複雑ネットワーク論が明らかにしているその諸性質についてまとめる<sup>[3-8]</sup>。

### 2.1 ネットワークの基本要素

ネットワークとは、点を線で結んだものである。数学的にはグラフとも呼ばれる。これは、頂点 (vertex) を辺または枝 (edge) で結んだものである。一方、工学や物理学では、ノード (node) をリンク (link) で結んだものといわれることが多い。本稿ではノードとリンクという用語を用いる。

ネットワークには、無向グラフと有向グラフがある。有向グラフは、リンクが向きをもっており、無向グラフにはリンクに向きがない。Fig. 4 にこれらの概念図を示す。例えば、インターネットは、双方向の通信路であるから無向グラフである。ところが、WWW (World Wide Web) はハイパーリンクでつながっているため、必ず向きを持った関係があり、有向グラフとなる。

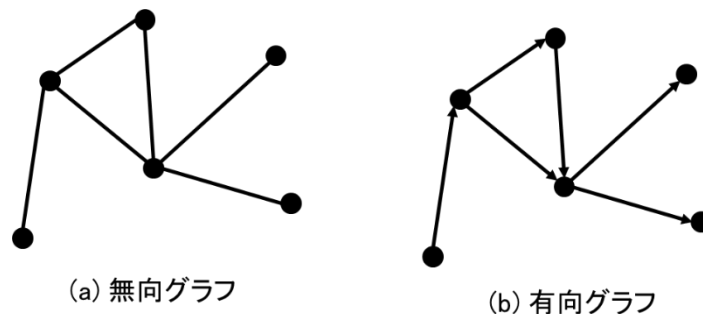


Fig. 4 無向グラフと有向グラフ

後の節において、衛星測位システムについて、この観点を考えて、ネットワーク性を調べることにする。

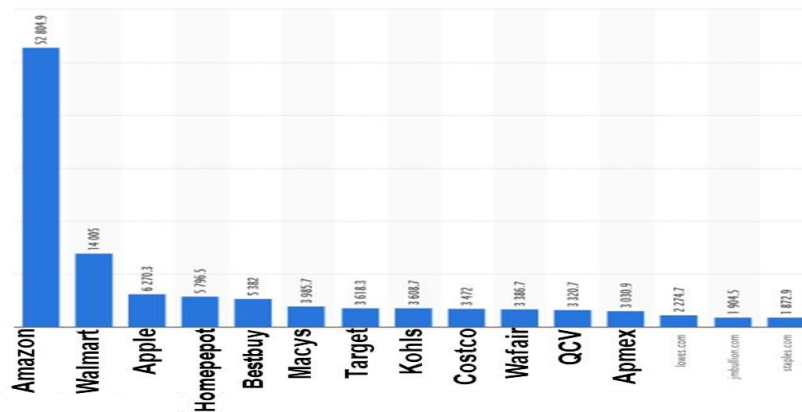
更に、ネットワークを研究する上でよく使われる量である次数 (degree) と次数分布について説明する。あるノードに結ばれているリンクの本数を、そのノードの次数という。次数  $k$  のノードがいくつ存在するかを示すヒストグラムを次数分布  $f(k)$  という。現実存在する多くのネットワークでは、次数分布がべき分布になるものが見られる。この場合、特徴的な大きさ (スケール) を持たなくなる性質があり、これをスケールフリー性という。

## 2.2 二極化する世界

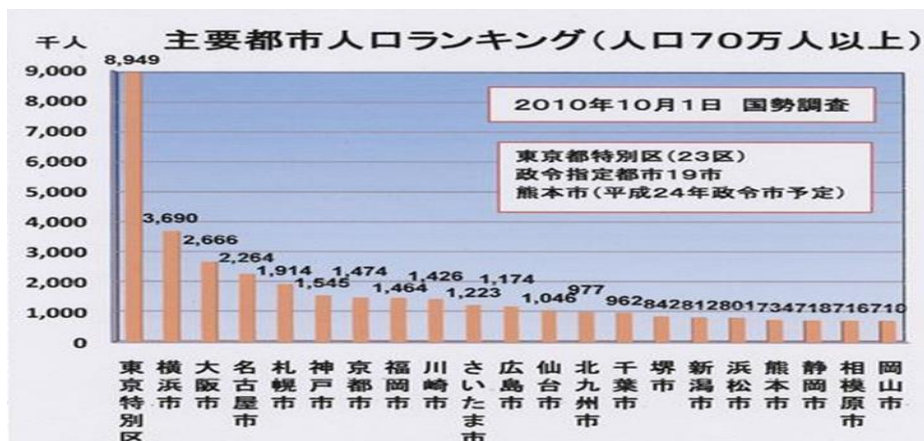
世界はネットワークで出来ているという見方に関連して、Fig.5 は社会のさまざまな側面をグラフにしたものである。いずれも首位グループの属する圧倒的なプレーヤーと、ロングテールに属するその他のグループに分かれることに特長がある。



(a) 世界各国の国内総生産(GDP)



(b) 米国電子商取引



(c) 日本の都市人口

Fig.5 二極化する世界

なぜこのような現象が起きるか。生存戦略を考察すれば、首位グループに留まって、ロングテールに陥らない条件は何なのか。複雑ネットワーク論によって、その数理的条件が解明されることを期待することは研究が推進される動機の一つである。

二極化が現れるのは、ユーザが新しくネットワークに参入するにあたって、メジャーなノードに結合する性質があることに起因することが分かっている。これは「優先選択 (preferential attachment)」と呼ばれる性質である。つまり、新しいノードをリンクする時、既にリンクを多く持っているノードに繋ごうとすることから生まれるのである。周囲のノードよりも特にリンク数の多いノードは **ハブ (hub)** と呼ばれる。

このような複雑ネットワークの性質は、国や企業をはじめとして、現代社会で活動する多くの主体が生存戦略を検討する上での関心事となっているが、本稿では国際競争によって近年ますます複雑化しつつある衛星測位システムに関する課題について検討する。

## 2.2 スケールフリー性

スケールフリー性のあるネットワークでは、次数分布がべき分布になることが知られている。べき分布の特徴は「特徴的な大きさ (スケール)」が存在しないことである。これを指して、スケールフリーという。

スケールフリーネットワークの次数分布は平たくなる。大きなネットワークで計算すると、次数分布は、式(3)のとおり大きな  $k$  に対してべき分布

$$f(k) \sim k^{-\gamma} \quad (3)$$

に近づく。

### (1) 自己相似性の発現機構

式(3)には、自己相似的であるという特徴がある。べき関数(3)は、式(4)に示す特徴を持っている。

$$f(ck) = (ck)^{-\gamma} = c^{-\gamma} f(k) \propto f(k) \quad (4)$$

つまり、横軸を  $c$  倍すると同時に縦軸を  $c^{-\gamma}$  倍すると元の関数に重なることになる。ガウス分布やポアソン分布では、そのような性質はない。それは偏差  $\sigma$  という典型的長さ (スケール) があるからである。冪関数にはそのような典型的な長さがないので、式(3)をスケールフリーな分布と呼ぶことができる。実在するネットワークの多くで冪分布する次数分布が観測されている。スケールフリーネットワークが生成されるモデルとしては、**Barabási-Albert** モデルがある。

### (2) 二極化の発現機構

**Barabási-Albert** モデルでは、新しいノードを接続する時に、確率

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (5)$$

に従って選択する。この確率にしたがうと、先に述べた優先選択の規則が発動し、スケールフ

リーネットワークが成長していく。この場合、次数の多いノードにリンクが増えるため、ポジティブフィードバックが起こり、メジャーなノードはますます次数が多くなり、いわゆる二極化現象が発現することになる。

### 2.3 スモールワールド性

複雑ネットワークのもう一つの性質として知られるものに、スモールワールド性がある。Wattsによって定量的な証明がなされている。Wattsは、それまで「6次の隔たり」と言われていた事象を、実験的に証明した。これは、任意の誰かが世界のどこかにいる任意の誰かにメールを出すと、何人の人間と介すると届けられるかという問題である。「6次の隔たり」とは、その実験結果が、高々6人であったという結果になったことをいう。Fig.6にその説明図を示す。

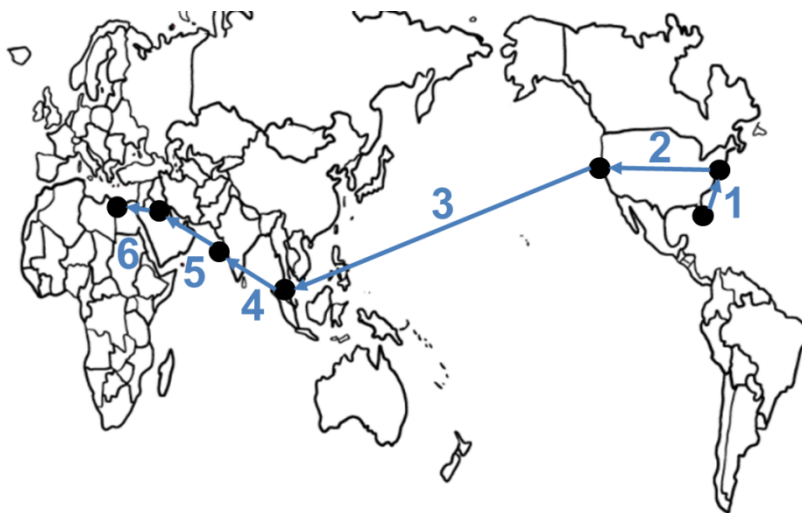


Fig. 6 6次の隔たりの一例

「6次の隔たり」については、次の例が理解を助けると考える。一人の人間に仮に100人の知り合いがいるとする。次の誰かに情報を伝えると、その人にも100人の知り合いがいるとすれば、 $100^n$ 人に情報を伝えることができる。ここで、 $100^5=10$ 億人では人類の全人口78億人に達しないが、 $100^6$ は1000億人となり、全人口を越えることになる。こう考えると、「6次の隔たり」には、一定の普遍性があることが分かる。

スモールワールド性は、意外に少ない隔たりによって誰とでもコミュニケーションできることを示している。これは、日本に古くからある「世間は狭い」という諺に対応する性質を、ネットワーク科学で説明したものと考えることができる。

その性質のシステム論的な意味合いとしては、異なる要素が統合されたシステムでも、比較的容易に適切な協働を行える設計の可能性を示唆していると見える。

### 3 複雑ネットワークとしての衛星測位システム

今日、衛星測位システムはますます複雑になろうとしている。GPSやQZSS等のコアシステ

ム、多くの測位補強システム、各国が整備する電子基準点システム、数十億台の測位受信機（スマートフォンや自動車搭載機器を含む）のつながりが構成され、Fig. 1 に描いたように地球を囲む直径 8 万 km のサイズの大規模な衛星通信のシステムである。

衛星測位システムのネットワークは、次のようにいくつかの観点から見ることができる。

- (1) 測距ネットワーク
- (2) システム依存ネットワーク
- (3) 位置基準ネットワーク

これらは、それぞれ関連はあるが、内容が異なるネットワークである。以下の節で考察する。

### 3.1 測距ネットワーク

測距のネットワークは、測距信号を送信して受信する間をノードとし、それぞれの送信機から受信機への無線信号をリンクとするネットワークである。

衛星測位の測距は、物理的な性質を持ち、観測方程式で表わすことができる。観測エポックと呼ばれる時刻  $t$  において、衛星  $p$  の電波信号を受信機  $u$  で観測して得られる距離測定値の基本的なモデルは、式(6)(7)のように記述される<sup>[9-12]</sup>。なお、Phase-range（搬送波位相距離）は国際規格 RTCM 10403.1 (2013) から導入された用語である。

- ・コード疑似距離 (Pseudorange) [m]

$$\rho_{i,u}^p(t) = r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c\{\delta t_u(t) - \delta t^p(t)\} + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + e_{i,u}^p(t) \quad (6)$$

- ・搬送波位相距離 (Phase-range) [m]

$$\Phi_{i,u}^p(t) = r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c\{\delta t_u(t) - \delta t^p(t)\} + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \lambda_i N_{i,u}^p(t) + \varepsilon_{i,u}^p(t) \quad (7)$$

ただし、 $i, f_i, \lambda_i$  はそれぞれ搬送波の周波数帯 (L バンド) を表わす番号、周波数、波長であり、例えば GPS の場合は Table 1 に示すように  $i = 1, 2, 5$  の 3 周波で送信されている。

Table 1 GPS の搬送波周波数と波長

番号 $i$	周波数 $f_i$ [MHz]	波長 $\lambda_i$ [m]
1	1575.42	0.19
2	1227.60	0.24
5	1176.45	0.25

$r_u^p$  は衛星  $p$  と受信機  $u$  の幾何学的距離であり、 $p$ - $u$  間の信号伝搬時間を  $\tau_u^p$ 、座標系は国際地球基準座標系 (ITRF) で

$$s^p \equiv [x^p, y^p, z^p]^T, u \equiv [x_u, y_u, z_u]^T \quad (8)$$



とすると,

$$r_u^p(t, t - \tau_u^p) = \|u(t) - s^p(t - \tau_u^p)\| = \sqrt{(x_u - x^p)^2 + (y_u - y^p)^2 + (z_u - z^p)^2} \quad (9)$$

である.  $c$  は光速,  $\delta t^p$  は受信機時計誤差,  $\delta t^p$  は衛星時計誤差,  $\delta I_u^p$  は L1 帯のコード疑似距離に対する電離圏遅延誤差,  $\delta T_u^p$  は対流圏遅延誤差を表わしている. また, 搬送波の観測を開始した時点での位相は  $0 \sim 2\pi$  の範囲で測定されるため, 衛星・受信機間の距離測定値としては整数波長分の不確実性が生じる. この不確実性は, 整数値バイアスまたはアンビギュイティとよばれ, (7)式において  $N_{i,u}^p$  として加えている.  $e_{i,u}^p$ ,  $\varepsilon_{i,u}^p$  は観測雑音を表わしており, 一般に  $e_{i,u}^p$  の観測雑音は数 m なのに対し,  $\varepsilon_{i,u}^p$  では数 mm であり, 搬送波位相距離の方が精度のよい観測である[11].

そのため, 高精度衛星測位ではコード疑似距離と搬送波位相観測の両方を用いた測位演算が行われるが, 未知量  $N_{i,u}^p$  が整数であるという制約の下で受信機座標を推定する必要が生じる.

測距のネットワークには, Fig. 7 (a) に描くように衛星と単独の受信機との距離を測る単独測位が基本であるが, もうひとつ Fig. 7 (b) のように位置が既知の受信機の測距観測を補正值として用いて高精度に位置を特定する方法がある. いわゆるディファレンシャル測位と呼ばれる方法である. この場合, ネットワークとしての複雑度が高くなることになる. また, 既知点と計測点の間は無線信号による測距ではなく, リンクの性質としては異なる要素が加わることになる. ここは後述する位置基準ネットワークが関連すると考えられる..

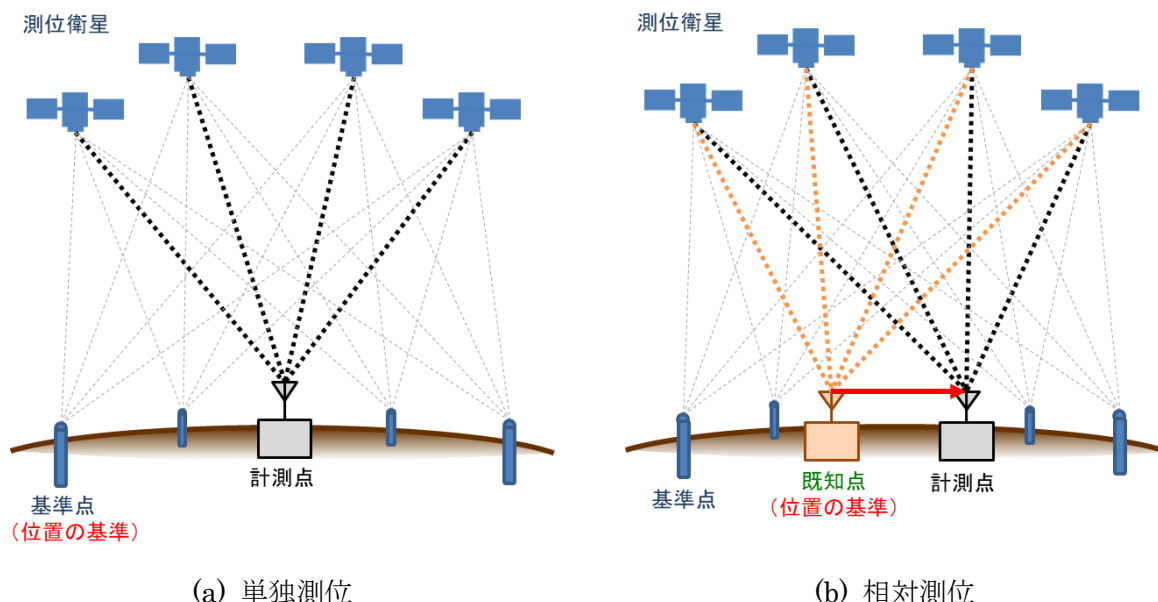


Fig. 7 測距ネットワークの例

更に, 測距ネットワークは, 以下のような技術開発によって複雑度を高めつつある.

### (1) 衛星間測距の利用

準天頂衛星「みちびき」7機体制では、衛星間測距が組み入れられる見通しである。これは衛星測位の性能向上にとって有効であると考えられる。測距ネットワークの観点からすれば、トポロジーの複雑度が高まることによって、新たなシステムの可能性が創出されることになる。検討要素に加えていく必要があると考えられる。この場合、GPSやGalileoのような中軌道以上の衛星であれば、電離層遅延誤差  $\delta I_u^p$  や対流圏遅延誤差  $\delta T_u^p$  は考慮する必要がなくなり、軌道誤差  $\delta s^p$  やクロック誤差  $\delta t^p$  だけが問題となる。

### (2) 低軌道衛星の測位利用

米国、英国、中国から、低軌道衛星の測位利用が発表されている。地表の測位受信機までの距離が短く、短時間で衛星配置を変えて多くの測距方程式を得ることができる低軌道衛星は、測位目的にあっても多くのメリットを持っている。中国のプランにあっては、地球監視と複合する構想が出されている。このような低軌道衛星群は、今後、測距ネットワークの複雑性を高める要素となっていくと考えられる。

## 3.2 システム依存ネットワーク

システム依存ネットワークは、例えばGPSを測位受信機が使う、という具体的に一方が別のシステムに依存する関係を表わしたネットワークである。これも有向グラフとなる。今日のスマートフォンでは、複数の衛星系を利用できることは普通のことである。機器によって受信する衛星系は異なっている。また、電子基準点を利用する場合には、国土地理院のシステムに依存することになる。

## 3.3 位置基準ネットワーク

位置基準ネットワークは、位置基準のハイアラーキーである。これも有向グラフとなる。ただし、複数の位置基準を網平均してより真に近い位置を算出することもある。

2020年1月に発行されたISO 19161-1:2020の「国際地球基準系 (ITRS : International Terrestrial Reference System)」では、地殻 (Crust) を基準とした基準座標系と、衛星軌道 (Satellite-ephemerides) を基準とした基準座標系が並列で定義され、国際合意となっている。すなわち、地上の電子基準点、および衛星の軌道が、位置の基準であることが明示されたということである。

ここで、一点、産業利用上の注意を述べる。各産業分野は、それぞれの目的と要求事項をもって測位技術を利用している。従って、前記ISOの位置基準の定義がそのまま適用されるわけではない。各産業の基準によって、何に基づく位置であるかは定義されており、地上の基準点のみが基準である場合は少なくない。それぞれの産業現場の規定に従って位置を測る必要がある。ここにも、各産業分野独自の位置基準ネットワークが存在する。また、同一の産業分野であっても地域・国・州によって違いがあることには注意を要する。

衛星測位の高精度化に伴って、位置基準ネットワークはますます重要性が増している。測位精度がデシメートルからセンチメートルになると、地殻変動よりも細かな位置測定を行うため、地上に配置された基準局による補正は不可欠になる。Fig. 8 に日本の年間の地殻変動量を示す。首都圏では 30-40 cm であるが、西日本では 50cm を超えるところもあり、鹿児島では 1m に達して、仙台周辺では 1.5m 程になる。このため、高精度測位において、電子基準点網を用いた測位補正は不可欠である。

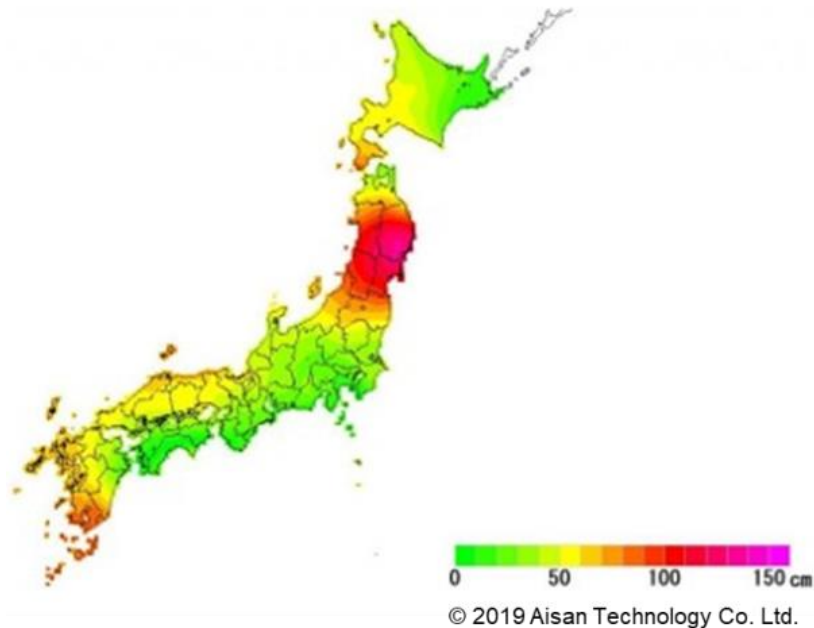


Fig. 8 日本の年間の地殻変動量

電子基準点網—測位補強システム—補正情報伝送系というネットワークが必要である。具体的には次のようなサービスが存在している。

- (1) 準天頂衛星「みちびき」による測位補強サービス
- (2) 補正情報配信会社によるサービス
- (3) 通信キャリアによる位置情報基盤サービス

必ずしも電子基準点を用いないサービスもある。その場合は、前出の ITRF 座標系による測位値が提供され、地殻変動補正のパラメータを用いて国家座標に整合させると、法規に適合する座標値が得られる。

### 3.4 複合ネットワーク

前記の、①測距ネットワーク、②システム依存ネットワーク、③位置基準ネットワークは相互に関係があり、設定する課題に対しては複数の種類のネットワークを複合して考える必要があると考えられる。例えば、公共測量で規定されているような複数 GNSS 衛星系によるネットワーク型 RTK 法を解析する場合には、①②③のすべてが関係することになる。このように、複数の種類のネットワークを考える必要がある場合もあることを特記する。

#### 4 ネットワーク中心性の分析

複雑ネットワーク論では、個々の要素のネットワーク中心性 (Network Centrality) を論じることができる。

衛星測位システムは、主要国が整備した衛星系をユーザが無償で利用でき、特定の中心があるわけではなく、また新しい衛星の打ち上げや、各地域の電子基準局の整備など、ネットワーク自体が絶えず成長を続けている。しかしながら、衛星系がコアになっているのは明白であるから、適切な定義の下で、「ネットワーク中心性」を測ることは可能である。

従来の複雑ネットワーク論における基本的なネットワーク中心性  $C_i$  の定義としては、式(10)がある。これは次数中心性と呼ばれている。次数とはリンク数の意である。

$$C_i = \frac{k_i}{\sum_i k_i} \quad (10)$$

ただし、

- $i$  衛星系の番号
- $k_i$  衛星系  $i$  のリンク数

である。しかし、実際の GNSS ネットワークは各地域にネットワーク化された電子基準点網を備えて活用していたりして、更なる複雑性をもっている。このことを反映して、式(11)のように、より複雑なネットワーク中心性  $C'_i$  を考えることができる。

$$C'_i = \frac{k_i + \sum_{i,j} w_{i,j} r_{i,j}}{\sum_i k_i} \quad (11)$$

ただし、

- $j$  位置基準系の識別番号
- $w_{i,j}$  衛星系  $i$  がつながる位置基準系  $j$  の重み係数
- $r_{i,j}$  衛星系  $i$  がつながる位置基準系  $j$  のリンク数

ここで、Fig. 9 に掲げた欧州連合統計[13]を用いて、ネットワーク中心性を計算する。但し、現在入手できる統計データに限界があり、全世界の位置基準系のリストが未整備であり、 $w_{i,j}$ ,  $r_{i,j}$  の統計データは不明である。そこで、まずは  $w_{i,j} = r_{i,j} = 0$  とおいて  $C_i$  を計算することにする。これは、単独測位についてネットワーク中心性を調べたことを意味している。

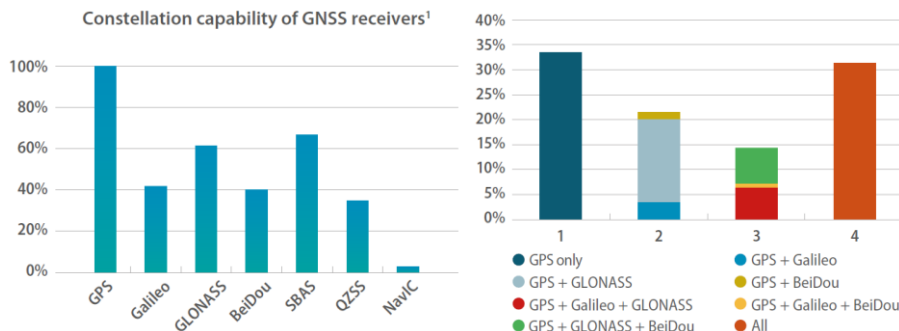


Fig. 9 GNSS 受信機の衛星系対応割合

その結果は、Table 2 のとおりである。これによれば、GPS を 1 としたネットワーク中心性に対して、GLONASS は 6 割、Galileo が 4 割強、BDS は 4 割弱、地域衛星系である QZSS は 3 割強を占めている。SBAS は 6 割を超えている数字が記されており存在感がある。

Table 2 ネットワーク中心性

No	System	$C_i$	Provider
1	GPS	1.00	U.S.A.
2	GLONASS	0.62	Russian Federation
3	Galileo	0.41	EU
4	BDS	0.39	China
5	QZSS	0.33	Japan
6	NavIC	0.06	India
7	SBAS	0.65	Many Countries

この表を見ると、歴史があって長く使われている衛星系は、ネットワーク中心性が高い傾向があることが分かる。Galileo, QZSS, BDS という新しい衛星系の割合も大きくなりつつある。今後の各衛星系が積み上げていく実績に応じて、ネットワーク中心性は変化していくことと考えられる。

ネットワーク中心性は、衛星系の競争評価をする上で役に立つ概念であるといえる。現時点では緒についたばかりで単純なものであるが、より現実の複雑性を反映して、実地に使えるようにしていく価値があると考ええる。今後の課題にしたいと思う。

## 5. 今後の展望

複雑ネットワーク論を用いた衛星測位システムの解析・設計は、始まったばかりであり、多くの課題は、未だ手付かずのままである。一方で、システムの複雑度は前述のとおり加速度的に高まりつつある。

衛星測位システムに関する複雑ネットワークの潜在的課題には、

- (1) 衛星測位ネットワークにおける信頼性 (Trusty) の解析・設計・評価
- (2) 宇宙環境における電子機器障害などに対する脆弱性の分析
- (3) 利用者における意図的な妨害に対する耐性及び対策
- (4) グローバル、リージョナル、国内、企業等の自己相似的な品質管理
- (5) その他

などがある。複雑ネットワーク論は、自己増殖的に複雑化していく衛星測位システムに対して、全体性を回復する視点を提供するものと期待されている。

## 6. おわりに

本稿では、衛星測位システムに対して複雑ネットワーク論を適用する試みを行い、基礎的な事項を明らかにした。今後、ますます複雑化していく衛星測位システムを合理的に解析・設計する方法として研究を進めていきたいと考える。

## 参考文献

- [1] 欧州航法衛星庁(GSA), GNSS Market Report, Issue 6, p.10, (2019)
- [2] Panel: Redoing Global Satellite Navigation Systems from Scratch – The Perfect System, ION GNSS+ 2020 Virtual (2020)
- [3] 増田直紀, 今野紀雄, 「複雑ネットワーク」とは何か, 講談社 (2006)
- [4] 矢久保孝介, 複雑ネットワークとその構造, 共立出版 (2013)
- [5] A.-L. Barabási, R. Albert, Science 286, p.509 (1999)
- [6] R.Albert, H.Jeong, A.-L. Barabási, Nature 401, p.130 (1999)
- [7] D.J.Watts, S.H.Strogatz, Nature 393, p.440, (1998)
- [8] Barabási Lab, <https://www.barabasilab.com/>, Network Science Institute, Northeastern University, Boston, U.S.A., Retrieved on 2020-10-10
- [9] 杉本末雄, 柴崎亮介 (編著), GPS ハンドブック, 朝倉書店 (2010)
- [10] P. Misra and P. Enge, Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance Ganga-Jamuna Press (2001)
- [11] B. W. Parkinson, J. J. Spiller Jr. (Eds.), Global Positioning System: Theory and Application, Vol. I, II, AIAA (1997).
- [12] 久保幸弘, 衛星測位関連技術へのカルマンフィルタの適用, Systems, Control and Information 2020, Vol. 64, No. 1, pp.33-38 (2020)
- [13] 欧州航法衛星庁(GSA), GNSS User Technology Report, Issue 2, p.20 (2018)