

[随想]

衛星航法研究のメッカに

東京海洋大学 名誉教授
大学院海洋科学技術研究科 特任教授 安田 明生

To a Mecca of Satellite Navigation Research

Akio YASUDA

はじめに

私の研究のスタートは1965年、卒業研究として気体中の放電現象においてブレイクダウンに至る前の現象の解明でした。放電研究の発展として大学院では、マイクロ波とレーザを用いたプラズマ計測が研究テーマになりました¹⁾。1975年、本学の前進である東京商船大学に奉職後も当時の名古屋大学プラズマ研究所の共同研究員として、微力ながら我が国の核融合研究を支えてきました。1981年にはプラズマ計測の手法を応用して、マイクロ波による波高計の開発に成功し²⁾、一時は気象庁の観測船に採用され、波浪予測の基礎データ収集に活躍していました。1987年には、まだ1日のうち数時間しか使えなかったGPSの測位実験を始めました⁴⁾。洋上での静止衛星放送受信のための追尾システムの開発も平行して進められ、1989年には南太平洋を航行中の船舶で静止気象衛星の追尾受信に成功しました⁵⁾。その後も船舶上での衛星受信装置改良の研究を続けました⁶⁾。1990年からはプラズマ計測のために開発した時間差計測システムを利用して、静止衛星を用いた測位実験を開始し、当時まだ意図的に測位精度劣化操作が施されていたGPSに優る精度での洋上実験にも成功しました⁷⁾。GPSの正式運用開始は1995年でしたが、1990年代に入り徐々に衛星数も増え、実用的な利用が可能になり、GPS関連の多くの研究成果を生み出し続けています⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

1996年に日本航海学会のGPSシンポジウムを企画し、翌1997年にはシンポジウムを開催するために日本航海学会にGPS研究会を立ち上げ、毎年11月に継続的に開催し、我が国における衛星航法研究に関する情報交換の場として、いまやGPS/GNSSシンポジウムは定例行事として、国際的にも認知されつつあります。

我が国におけるGPSの研究は1990年頃より、地殻変動のモニタや測地・測量関係で始まり、高価な受信機が公的研究機関や理学系の大学研究室や大手建設会社により導入され、それなりの成果を挙げてきました。航法への応用は1990年代になってから、カーナビゲーションの位置決めシステムとして導入すべく研究されてきましたが、直接外国から受信機モジュールを導入するケースが多く、応用研究が中心でした。現在では2007年4月に携帯電話からの緊急通報に位置情報の付加が義務化されることになり、携帯電話にも広く装備されるようになってきました¹²⁾。そのため、屋内測位のための高感度化や市街地での妨害やマルチパス軽減のための研究が盛んに行われています。2007年4月には本学大学院に衛星航法工学講座が船井電機㈱の寄附講座としてスタートし、高感度GPS受信機の開発、ソフト・ウェアGPS受信機の開発・測位アルゴリズムの開発、IMU/方位センサー/GPS統合技術、ルート検索アルゴリズムの研究、地図データ・ベース管理技術、RTK-GPS精密測位技術の開発、情報通信システムの開発・試作・情報の更新ネットワークの構築、次世代衛星測位システム動向および技術課題調査など衛星測位に関わる多岐の技術開発研究が始まりました。10有余年にわたるGPS/GNSSシンポジウム開催実績により、我が国の衛星測位関連技術研究者との連携を保ちながら、関連研究の拠点を築くべく、日夜努力を重ねています。衛星測位システムは世界的にめまぐるしい程の発展の様相を見せ、関連する技術開発やアプリケーションの開発が進められています。本年2008年11月にはアジア・大洋州地域の国際シンポジウム¹³⁾の開催を任せられ、研究室を挙げて準備に奔走しています。現テーマは一見、私の学生時代に培われた学識とは無関係に見えますが、学問ベースは共通しており、そこで培われた手法や研究姿勢など40年たった今でも変わらず、生き続けています。この間、先輩、同僚、後輩のご理解、ご協力は申すに及ばず、関連する団体・企業等の暖かいご支援が有ってこそ、ここまでやって来られたものと感謝の念にたえません。

さて、現在のテーマに関連して、世界の衛星測位システムとしては米国のGPSのみならず、ロシアのGLONASS衛星が活動し、欧州連合がGalileoシステムを準備し、中国もCompassシステムを立ち上げようとしています。我が国は地域衛星測位システムを準備しており、2010年には初号機の打ち上げが予定されています。以下に各衛星測位システムのトレンドについて紹介いたします。

GPS の概要と近代化の方向¹⁴⁾

GPS は米軍により開発された最新の電波航法システムで、勿論、兵器として誕生した。開発は 1970 年代に始まり、実験運用が始まった 1980 年代半ばより、民間に使用が許された。正式の運用開始宣言は 1995 年で、このときから世界中のどこでもいつでも上空が開けていれば 100m の精度の連続的な測位が保証されることとなった。これに先立つこと 4 年の 1991 年 9 月米合衆国政府が ICAO 総会で、1993 年から少なくとも 10 年間の無償での民生利用を約束した。さらに 1996 年 3 月にはクリントン大統領の PDD (Presidential Decision Directive) で、全世界に無償での民生利用を再確認した。

その後 2000 年 5 月には精度劣化操作 (SA : Selective Availability と呼ばれた) が取り止められ、それ以来、10 数メートルの精度の測位が保証されている。入り組んだ道筋と住所表示を持つ我が国で最も早くからカーナビの必須アイテムとして採用された。現在では安価な受信機が大量に製造されるようになり、世界一の普及率を誇っている。最近では携帯電話にも組み込まれ、老人や子供の保護システムの開発・普及が始まっており、パーソナル・ナビ用のコンテンツ・サービスの開発も進んでいる。

また余り気付かれてないが、携帯電話の基地局の時刻同期に用いられ、効率良い通信に不可欠のものとなっているし、遠隔地間の時刻同期ツールとしても貴重なものとなっている。GPS の電波の位相 (搬送波位相) を用いる測位方式は数 mm の分解能が得られるので、地殻変動のモニタに活用されている。

表 1 GNSS の概要

	GPS (米国)	GLONASS (ロシア)	Galileo (欧州連合)	Compass (中国)
衛星機数	24機 (4機×6軌道面)	24機 (8機×3軌道面)	30機 (10機×3軌道面)	MEO 30機 GEO 5機
現行衛星数	31	13	試験衛星 1	GEO 4, MEO 1
設計寿命	7.5年	7年		
軌道半径	26,561km	25,510km	29,980km	27,927km
周回周期	12 恒星時間 (約 11 時間 58 分 2 秒)	11 時間 15 分 40 秒	14 時間 21 分 36 秒	12 時間 53 分 20 秒
軌道傾斜角	55°	64.8°	56°	
搬送波周波数	L1=1,575.42MHz (10.23MHz × 154) L2=1,227.6MHz (10.23MHz × 120) L5=1,176.45MHz (10.23MHz × 115)	G1=1602+K × 0.5625MHz G2=1246+K × 0.4375MHz K=-7 ~ 24	E1=1575.42MHz E5=1191.795MHz E6=1278.75MHz C1=5019.861MHz	B1=1561.098MHz B1-2=1589.742MHz B2=1207.14MHz B3=1268.52MHz
測距信号 (民生用のみ)	L1C/A : code 1023 chip rate : 1.023Mcps L2C : 511.5kcpsTDM CL: Pilot 76250, CM:10230+50bps データ L5: code 長 10230, rate : 10.23Mcps	G1:code 511.5, Chip rate: 1.023Mcps	E1A:BOCcos(15,2.5) E1B/C:BOC(1,1) Data + Pilot E5: code 10230 chip rate: 10.23Mcps E6: BOC(10,5) BPSK(5)	QPSK BOC B1:chip rate 2.046Mcps B2:chip rate I:2.046Mcps Q:10.23Mcps B3:10.23Mcps
精度	水平 10m, 垂直方向 15m, 時刻 10ns		5-10m	目標 : 10m

表 1 は GNSS の概要を示す。GPS は一日に約 2 回地球を周回し、同地点の上空に同じ衛星配置が日ごとに 4 分ずつ早まって現れる。軌道傾斜角 55° は衛星が南半球から北半球で飛行するとき赤道と交差する角度で、衛星が飛来する南北緯度の上限となる。24 機の衛星で所定の性能を発揮するとされているが、2008 年 1 月現在、31 機の衛星が軌道上に有る。東京では、上空が開けていれば少なくとも 7 ~ 8 機、多いときには 12 機程度が見え、サービスに供されている。最少で 4 機の衛星からの信号が得られれば位置と時刻を同時に決定できる。すべての衛星はセシウムあるいはルビジウムの正確な原子発振器

(10.23MHz) を搭載し、これの整数倍 (154 倍) の同一の周波数で信号を送信している。衛星ごとに異なるコード (ゴールド符号) で位相変調することにより識別される。P コードは、2つの周波数の電波で測距信号が送信されるので、電離層伝搬遅延量が測定でき、高精度測位が可能であるが、軍事用で、一般には開放されていない。L1, L2 の属する周波数帯は携帯電話にも使用されている。

GPS の近代化

1998年3月30日、当時のゴア副大統領が2008年遅くから打ち上げ予定のブロックII FからL2帯による民生コードの送信と第3の周波数を民間用に追加することを宣言した。これがGPS近代化の推進を最初に世界に約束したものとされる。2000年5月には1990年以来加えられていたSAと呼ばれる精度劣化操作が解除された。これが近代化の第一歩とされる。近代化のメリットはパワーアップのほかにも多周波数による耐妨害性、電離層遅延量の測定可、搬送波測距方式のアンビギュイティ高速決定などが挙げられている。

2008年1月現在8機のブロックII R-M衛星のうち5機が2007年12月までに打ち上げられている。L2電波には民生用のコード(L2C)が載せられている。図1(a)(b)はそれぞれ現行とII R-Mに載せられる信号の周波数スペクトルを示す。コード長が10倍になる等で、各衛星信号間の分離がよくなるなど測位性能向上が見込まれている。P(Y)コードは信号のチップ長がC/Aコードの10分の1なので、周波数帯域幅は10倍となる。2008年から打ち上げ予定のブロックII F衛星には図1(c)に示すように、さらに1176.45MHzにL5と呼ばれる電波を追加することになっている。L5の周波数帯域幅(チップ長に依存する)はP(Y)コードと同じで、電波干渉やマルチパスの影響を軽減できる。電力も増強される見込みである。ブロックII R-M以降にはL1, L2にMコードと呼ばれる軍事用の信号が載ることになっているが、これは民生用ではないので、説明は省く。

米国ではさらにこの先のGPS IIIと呼ばれる計画を推進しており、2013年頃からの打ち上げが計画されている。ここではブロックII Fのスペクトルに加えて、L1Cと呼ばれる新しい信号がL1帯に追加されることになっている。これは欧州が計画しているGalileo衛星測位システムが採用を予定しているL1帯の信号と同じもので、C/Aコードをさらに1MHzで変調したBOC(Binary Offset Carrier)と呼ばれる信号である。

人工衛星の寿命は、姿勢制御用の燃料に依存するといわれているが、GPSの場合は搭載原子時計の寿命によるところが大きいようで、設計寿命の7.5年を大幅に超えて就役する衛星が多く、更新が遅れがちで、近代化の進み方も年々先延ばしになる傾向がみられる。

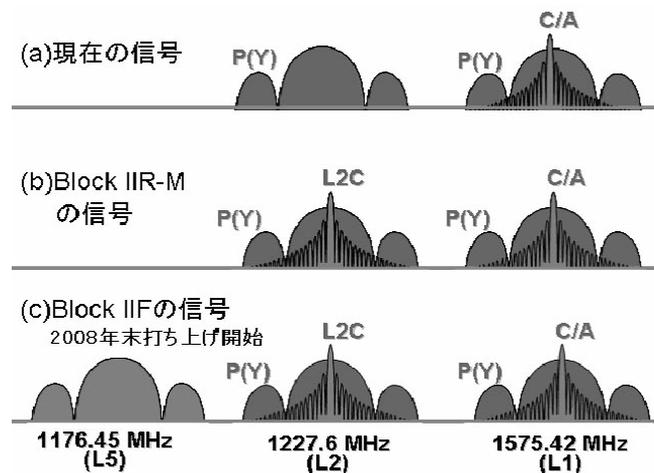


図1 各GPS電波のスペクトル
(縦軸：電力，横軸：周波数)

その他の世界的な衛星測位システム¹⁵⁾

(1).GLONASS

GLONASS (Global Navigation Satellite System) はソ連軍が開発して、ロシア軍が運用している衛星測位システムである。これはGPSよりやや低い3軌道面、それらの傾斜角が高緯度に位置する国土を考慮して約 65° であることを除くとGPSとほぼ同じ性能と機能を持つ衛星測位システムで、ロシア版GPSとも言えるものである。1996年には24衛星でGPSと同様に

全世界を24時間カバーしていたが、設計寿命は3年（最新のGLONASS-Mでは7年）と言われており、次々と退役し、一時は7機まで減少していたが、2004年夏には、ロシア政府により復活の強い意思表示がなされた。2007年暮れには13機で運用、さらに12月25日には3機が打ち上げられたが、2008年1月10日現在、未就役である。これらがサービス・インすれば16機体制となる。最近の計画では2009年末には24機体制に復帰する予定である。GLONASS-MのG2には民生信号も載せられている。他の衛星測位システムとの互換性を考え、多重方式をCDMAへ移行することが検討されている。GPS-GLONASS共用受信機も市販されている。

(2)Galileo

Galileoは欧州連合で独自に開発・運用を目指す衛星測位システムを持つべく1999年頃から準備を開始した。2005年12月28日にはロシアのバイコヌール基地から実験衛星GIOVE-A (Galileo In-Orbital Validation Element-A)を打ち上げ、テストが続けられている。当初PPP (Public Private Partnership)と称して、民間の参加を計画していたがビジネス化は困難との見方から民が手を引き資金的に行き詰まっていたが、2007年11月末にすべての経費をEU予算で賄うことが決まり、2013年(当初2008年運用開始予定)を目指して推進することになった。二号機GIOVE-Bは2008年4月14日に打ち上げられる予定である。GPSよりやや高い3軌道上に30衛星を配置し、Lバンドの3周波とCバンドの搬送波で測距信号を送信しようとするものである。L1帯はGPSと完全に重なる。基本的な測位サービスは無料であるが、高精度を求めるユーザーのために有料サービスが予定されている。

(3)Compass

中国では2000年頃から北斗(Beidou)と呼ばれる静止衛星を用いた測位システムの開発を軍事目的で開始した。2006年には、GPS等と同じように地球を周回するMEOを用いた衛星測位システム構築のアイデアが打ち出され、2007年2月に第一号機を打ち上げ、軌道上の実証試験を行っている。中国はGalileo計画に出資しており、衛星測位に関するプロジェクトにはGalileoの名前が冠されている。しかし、他の国のシステムへの相乗りに飽き足らず、独自の衛星測位システムの開発に踏み切ったことにより、国力の誇示をしているように見える。

(4)準天頂衛星測位システム(QZSS)

準天頂衛星は我が国独自のアイデアで、既存の衛星測位システム(GPS)を補完・補強しようというもので、平成15年度から本格的に開発が始まった。静止衛星に赤道に対して角度を持たせることにより、衛星はその角度の緯度の真上まで一日に一回飛来する。さらに軌道を楕円にすることにより、日本の上空に長時間滞留させることもできる。この衛星からもう一機のGPSとなる測距信号と同時に、GPS測位を補強する信号を出そうというものである。高層ビルの林立する都市部や、険しい地形の山間部において、有効に働くものと期待されている。一号機の打ち上げは2010年頭と予定されている。その後実証試験の後に、有効性が確かめられれば、2機が追加され、日本の上空にいつでも一機は留まることになる。

図3に現在予想される軌道(長半径約43,000 km, 軌道傾斜角45°, 離心率0.099)の3衛星の東京における仰角を示す。仰角79°以上にいつでも一機、30°以上なら常に二機の衛星が見える。

(5)GNSS相互運用性

すべての衛星測位システムが計画通りに展開されれば、2010年代の中ごろには100機以上の測位衛星が地球を周回することになる。自国の利益のみを考えるのではなく、便益を広く共有すべく、システム間の相互利用性を考慮しながら、開発が進められている。表1に示すように互いに同じ周波数で信号を送信するので、一台の受信機で一度に多くの信号を受信することができ、測位の精度や信頼性が格段に向上するとともに、上空が塞がれる高層ビル街や山間部での測位には大きな力となる。

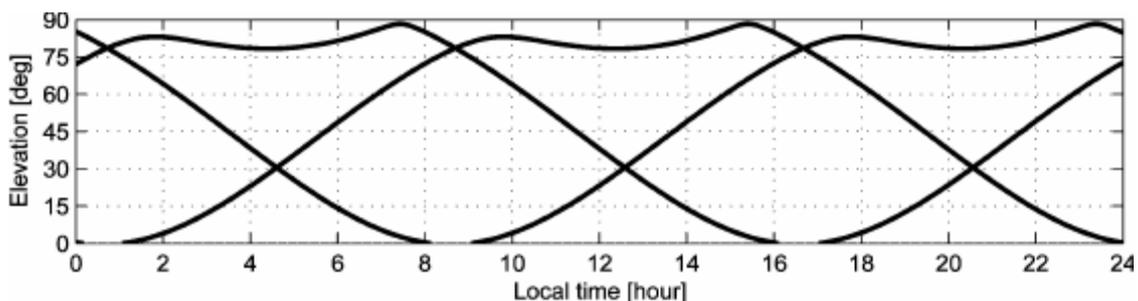


図2 東京における準天頂衛星の仰角

あとがき

以上紹介してきた様に衛星測位システムは位置情報を共有し、安心安全な社会を維持するために必須のアイテムとして世界的に開発整備が進められており、受信技術の開発のみならず、多くのアプリケーションの開発も推し進められています。

思い起こせば、制御核融合は私が研究を始めた 40 年前から、10 年後には実用化が可能と断言して、今日まで来ています。数年前から世界の主要 7 カ国の数十年にわたる成果を結集し、巨大実証炉 ITER の建設に取り掛かっています。原油の残存埋蔵量が 37 年分という試算が発表されるに至り、その重要性がさらに深く認識されるに至っています。

翻って、自分の周りの研究を見つめてみると、本学では船舶運航の安全化・効率化がメインテーマでしたが、現在では対象が広く物流全体に展開しています。その中でも、位置を正しく知ることは、効率的な物流を促し、引いては労働時間の短縮、燃料の節約、CO₂ 排出の削減など、21 世紀の社会が繁栄を維持するために欠くことのできないものとなってきています。衛星航法に関わる研究を広く本格的に取り組んでいる研究室はわが国にはほとんど無いので、本学に多くの若者が集い、衛星航法研究のメッカとなることを祈念しています。

参考文献

- 1) 安田明生：マイクロ波およびレーザによるプラズマの密度測定に関する研究
(名古屋大学博士論文) 1975 年
- 2) 安田明生他：Feedback-Stabilized Dual-beam Laser Interferometer for Plasma Measurements, Rev. Sci. Instrum. Vol.51 No.12 (pp.1652-1655), 1980 年
- 3) 安田明生他：Ship-born Type Wave-height Meter for Ocean Going Vessels, Using Microwave Doppler Radar, IEEE J. Oceanic Eng. Vol.Q5-10 (pp.138-143),1985 年
- 4) 安田明生他：GPS における GDOP と測位誤差分布について，日本航海学会論文集第 79 号 (pp.25-31), 1988 年
- 5) 千葉元, 安田明生: 簡易型自動追尾アンテナによる船舶上での静止気象衛星画像の受信日本航海学会論文集 第 82 号 (pp.129-137), 1990 年
- 6) 鈴木治, 安田明生: 船舶搭載用, 低速回転 Az-El マウントによる衛星追尾方式, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-B- II No.8 (pp.714-721), 1998 年
- 7) 樊春明, 安田明生: 静止衛星による測位システムについて－II, － VSAT による衛星位置測定システムの構成－, 日本航海学会論文集第 96 号 (pp.71-77), 1997 年
- 8) 安田明生他: 中波ビーコンに重畳された DGPS 補正データ放送の受信, 日本航海学会論文集第 95 号 (pp.45-50), 1996 年
- 9) 浪江宏宗, 安田明生: RTK-GPS におけるデータ伝送システムの評価, 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J82-B No.1 (pp.116 ~ 123), 1999 年
- 10) 館田良文, 安田明生: 異なるコード追尾方式の GPS 受信機間で生じる差動誤差の解析, 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J84-B, 2001 年
- 11) 久保信明, 安田明生: 単独測位におけるマルチパスの評価と誤差改善方法, 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J84-B No.12 (pp.2123-2131), 2001 年
- 12) GPS/GNSS シンポジウム 2007 テキスト, 第三章インドア測位と GPS 携帯, (pp.73-102), 2007 年
- 13) <http://gnss2008.jp>
- 14) 安田明生: GPS の概要, 光学 VOL32 No.11(pp.646-653), 2003 年
- 15) 安田明生: これからの衛星測位システム, 会報宇宙 No.53 (pp.171-185) (日本経済団体連合会), 2005 年