

# 測位精度劣化がもたらす社会影響について

---

2022-03-18

岩本 貴司

三菱電機株式会社

- テーマの素朴な解釈
  - 測位装置の出力精度が劣化した場合に与える社会影響
  - 測位装置の使用環境, 装置内部の処理, 装置出力が利用先に与える影響

宇宙天気現象による測位精度劣化は, 地上の測位装置の物理的不具合よりも, 測位装置内部の処理が前提を逸脱することにより多くもたらされる.

- 測位装置出力の精度劣化がもたらす影響
  - 位置推定量として直接利用する際の影響
  - 後段のシステムが利用する際の影響

機械的な参照による影響拡大の可能性

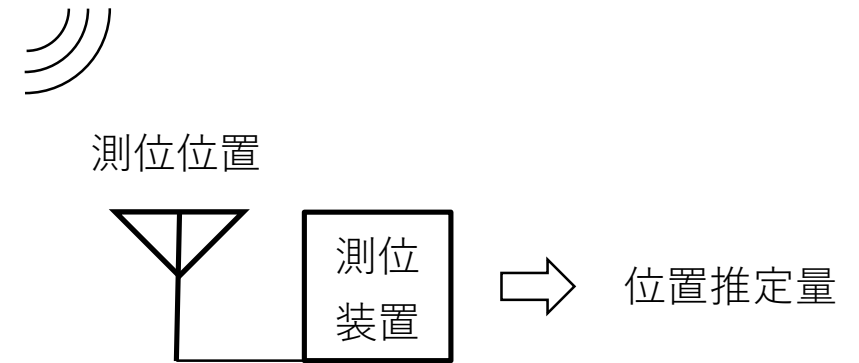


図: 測位装置の模式図

## GNSSを利用する測位装置の位置推定量出力を移動体が利用する事例紹介

1. 海上位置推定事例: Automatic Identification System
2. 空中位置推定事例: 航空機向け補強システム
3. 陸上位置推定事例: Mobile Mapping System

GNSSを利用する測位装置が実現した機能, その実装, 宇宙天気から受ける影響...

## Automatic Identification System (AIS)

AISは、船舶の識別符号、種類、位置、針路、速力、航行状態及びその他の安全に関する情報を自動的にVHF帯電波で送受信し、船舶局相互間及び船舶局と陸上局の航行援助施設等との間で情報の交換を行うシステムです。 [1]

- 航海用レーダーでは把握困難な、島影から飛び出す船舶などとの衝突回避に導入
- 2002年IMOのSOLAS条約発効により、約10万隻の船舶に搭載義務化 [2]
- 船舶に限らず、爆発物らしきものの位置などをバーチャルAIS航路標識として表示 [3]

## AIS装置に実装される測位装置

- 各無線局が位置情報を、GPS1周波コード受信機や多編隊1周波SBAS (準拠) 受信機などを用いて取得して交換. 精度は各装置に依存

## 測位精度劣化への対策

- 発生した太陽フレアから予見された影響を、Webページなどで事前警告された例

## 測位精度劣化時の代替手段

- 航海用レーダーによる監視, 目視による参照点観測と海図参照など

## 測位精度劣化による影響

- 他船や海上標識への予想外の接近

IMO: Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, 国際海事機関

SOLAS条約: International Convention for the Safety of Life at Sea, 海上における人命の安全のための国際条約

[1] "AISを活用した航行支援システム," 海上保安庁, [online] <https://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/ais-info.html>

[2] Wikipedia, [online] [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_identification\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_identification_system). Creative Commons Attribution 2.5 Generic licenseに基づく引用

[3] "海の安全情報," 海上保安庁, [online] [https://www6.kaiho.mlit.go.jp/07kanku/kinkyu/0700\\_20210715103337243\\_JA\\_199\\_EME.html](https://www6.kaiho.mlit.go.jp/07kanku/kinkyu/0700_20210715103337243_JA_199_EME.html)

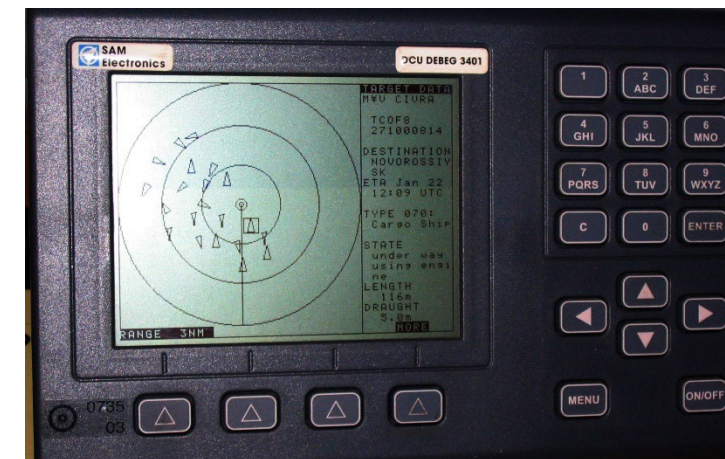
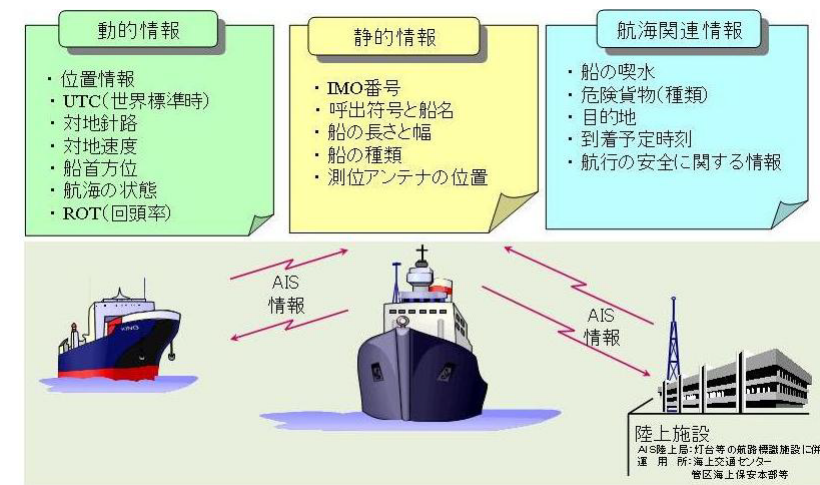


図: (上) AISで交換される情報 [1]

(下) AIS装置の表示例 [2]

- GNSSを利用する航空機測位を補強するシステムとして, Satellite Based Augmentation System (SBAS, 北米ではWAASと呼称) と Ground Based Augmentation System (GBAS, 北米ではLAASと呼称) が広く利用されている。
  - 地上でGNSS波を受信して解析し, 航空機に向けた航法衛星システムの警報や相対測位のための情報を作成し, 規定遅延時間内に航空機へ放送 [4]
  - 航空機搭載受信機は, GNSS受信信号と補強信号とを用いて1周波コード相対測位
  - 地球座標系で記述された航路への誘導を提供. 従来のVOR/DME, ILS等地上送信局に対する相対方位/距離を計測する誘導方法で実現されなかった, 曲線航路や地上局見通し方向以外への誘導が可能に
  - 一般航空機に向けた補強信号は, 2003年7月10日 (WAAS信号) 送信開始
  - SBASでは, 静止衛星経由で放送. 地上観測に基づき演算された格子点上の垂直誤差情報で電離圏誤差に対処. GBASでは, 地上VHF局経由で空港周辺に放送. 電離圏+対流圏誤差に, 地上観測に基づく (高度補正された) 擬似距離誤差と誤差変化レートとの放送で対処

VOR: VHF omni-directional radio range,超短波全方向式無線標識

DME: Distance Measuring Equipment,距離測定装置

ILS: Instrument Landing System,計器着陸装置

[4] "International standards and recommended practices, Annex 10 to the Convention on the International Civil Aviation," INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2018.

[5] Wikipedia, [online] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/FAA\\_WAAS\\_System\\_Overview.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/FAA_WAAS_System_Overview.jpg)

[6] Wikipedia, [online] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/LAAS\\_Architecture.svg/767px-LAAS\\_Architecture.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/LAAS_Architecture.svg/767px-LAAS_Architecture.svg.png)

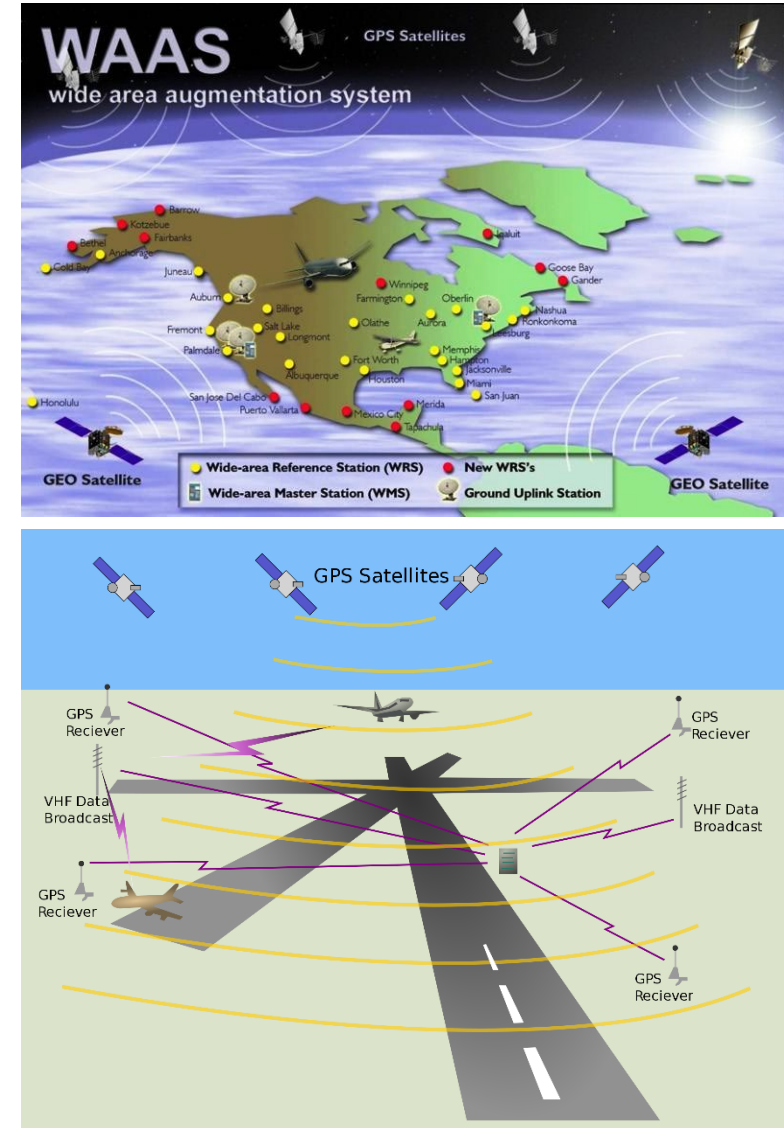


図: (上) WAASの模式図 [5]

(下) LAASの模式図 [6]

- SBAS, GBASにおける2種類の空間尺度
  - 測位誤差 $X$ の累積分布 $P(X)$ に対する関係式  $P(X \leq X_{95/100}) = 95/100$  を満足する, 95/100分位数 $X_{95/100}$  で表される測位精度
  - Alert Limit
    - GNSS衛星送信波異常などで測位精度が維持されない場合, 定められたTime to Alert以内にAlertを, 衛星もしくは地上局経由で放送
    - Alertが送信されず, かつ測位誤差がAlert Limitを上回る確率は, (典型的に  $10^{-7}$  オーダーの) 非常に微小なintegrity risk未満
    - SBASのCategory Iと呼ばれる精密進入誘導における水平方向の, 精度とAlert Limitとはそれぞれ, 16 mと40 m. [4]
- 精度劣化への対策
  - 測位誤差を統計的に上限するProtection Levelを演算して, Alert Limit以下であることを航空機搭載受信機で監視
- 測位精度劣化時の代替手段
  - 慣性航法装置や, VOR/DME, ILSなどの地上装置などを用いて距離や方位を推定
- 精度劣化がもたらす社会影響
  - VOR/DMEなどの地上局を結ぶ区分直線航路による飛行航路の増大, CO<sub>2</sub>排出量増大
  - 予想外の航路逸脱や高度低下
- 補足
  - Integrity risk評価の前提となる事前確率は, 必ずしも十分な標本数の基盤を持っていない [7]
  - 実際, 2003年に発生したHalloween Stormでは, 想定を超える電子密度空間勾配が観測され, 脅威モデルが改訂された
  - Halloween Stormにおける観測よりも急峻な電子密度勾配を持つプラズマバブルが石垣島などで観測され, 脅威モデルの策定が進められた [8].

[7] S. Pullen et alia, "Prior probability model development to support system safety verification in the presence of anomalies," IEEE/ION PLANS, 2006.

[8] S. Saito et alia., "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," GPS Solut, vol. 21, Oct. 2017, doi: 10.1007/s10291-017-0662-1.

# 3-1 陸上位置推定事例: Mobile Mapping System (1)

- Mobile Mapping System (MMS) は, 走行しながら建物, 道路の形状・周辺の3次元位置情報を高精度で効率的に取得するシステム. [9]
  - 1または3基のGNSSアンテナ, 慣性航法装置, 車速センサーを搭載. それらセンサー信号を統合して自己の位置, 姿勢, 速度を推定
  - 利用地域や装置構成に応じた補強情報を受信搬送波位相標本に適用
  - 2~6台のカメラと1~4台のレーザースキャナーを搭載し, 周囲の3次元位置データを取得
- 他の陸上位置推定システムとの比較
  - カーナビゲーションシステムは, GNSSアンテナ1基を搭載する例が多く, 慣性航法装置を搭載しない例もある. いずれも自己位置推定に地図との経験的な照合を使用する例が多い.
  - カメラ, レーザースキャナー, レーダーなどの装置を搭載し, それら観測値と地図との経験的な照合を自己位置推定に利用する例もある.
  - GNSS受信機と慣性航法装置との統合に, それぞれの測位結果を疎結合カルマンフィルターを用いる例も多い.



図: (上) MMSの構成例 (下) MMSで得られた3次元データの例 [8]

[9] “三菱モービルマッピングシステムMMS-G,” 三菱電機, 2022年2月.

- MMSは,センサー信号を密結合カルマンフィルタで統合して自己位置を推定
- MMSの自己位置精度※ 水平6cm (rms) 以内
- MMS計測による座標取得の正確度 (Accuracy) ※ 7m地点で10cm (rms) 以内
- 堤防の取得座標と測量値との比較により, メーカー公表精度との一致確認 [10]
- 測位精度劣化への対策
  - 予測誤差の表示
  - 波数不定性解消がより期待される計測ルートへの変更
  - 衛星未測位区間ではランドマーク(既知点)を利用する補正手法
- 測位精度劣化時の代替手段
  - トータルステーションなどの衛星測位以外の手法を利用する測量
- 測位精度劣化による影響
  - 計測期間の延長や計測費用の増大

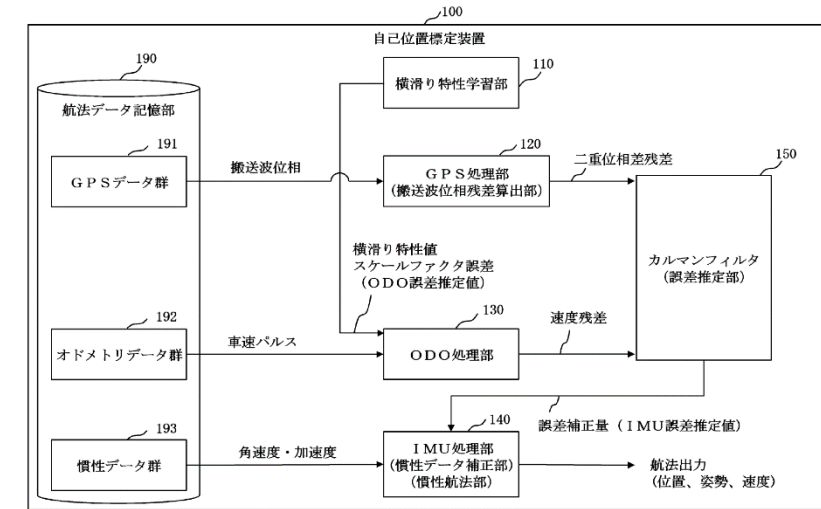


図: MMSの基盤となった, 自己位置標定装置の機能構成図 [11]

※良好なGNSS受信環境を前提、高精度測位解を得た状態

[10] 吉川, “車載写真レーザ測量システムによる3次元地図情報の活用,” 博士論文, 岡山大学, 2019.

[11] 梶原, 瀧口, 島, 黒崎, “位置標定装置、位置標定装置の位置標定方法および位置標定プログラム,” 特許第5586994号

- GNSSを利用する測位装置が新たに実現した機能
  - 地球座標系で表現される位置情報を地球表面上で、従来手法に比べ高精度で演算
  - レーダーによる監視, 計器飛行誘導装置への相対方位/距離計測, トータルステーション等による測量などの従来法より広域の応用を実現
- 測位装置の特徴的な実装
  - 国籍/地域を問わず搭載可能な測位装置 (AIS)
  - 受信メッセージと確率モデルとに基づいて測位誤差を統計的に上限するProtection Levelの演算を伴う測位装置 (SBAS/GBAS)
  - GNSS受信波が不安定な高架下やトンネルなどでも測位精度を維持する測位装置 (MMS)
    - 利用環境や要求性能コストに応じて, 補強信号やセンサー統合を利用
- 宇宙天気から受ける影響
  - 端末上に表示されるシンボル毎に固有の精度劣化 (AIS)
  - 宇宙天気現象の新たな知見に基づく脅威モデルの改訂 (SBAS/GBAS)
  - 予測誤差の上昇を回避する計測スケジュールへの変更やランドマークの利用 (MMS)
    - 処理方式に依存する (例えばカルマンフィルタに対する誤差バイアスなどの) 影響の懸念
    - 新規の応用, 特に自律運転や運転支援などへの応用では, 宇宙天気擾乱時を含む幅広い入力標本に対する性能解析が求められる。



- 宇宙天気の切り分けに対する期待

GNSS測位装置の出力誤差  $X$  は, 一般的に宇宙天気要因  $Z$  とその他要因  $Y$  とに依存. その確率密度を  $p(X, Y, Z)$  と表すとき, 切り分け近似

$$p(X, Y) = \int p(X, Y, Z) dZ = \int p(X, Y | Z) p(Z) dZ \simeq \sum_{\{l \in \text{label}\}} p(X, Y | Z_l) P(Z_l)$$

(ただし  $p(X, Y | Z) = p(X, Y, Z)/p(Z)$  は宇宙天気要因が  $Z$  である時の条件付き確率)

が有効な場合, 宇宙天気要因への対処が容易になると期待される. 例えば, 素朴な切り分け近似

$$p(X, Y) \simeq p(X, Y | \text{静穏}) P(\text{静穏}) + p(X, Y | \text{擾乱}) P(\text{擾乱})$$

が有効になり, 擾乱警報が利用可能になる場合, 静穏時を前提とする測位装置の活用範囲や信頼性の向上などが期待される.

その場合, 警報伝達の信頼性や警報漏れ (偽陰性) の抑圧がシステム全体の信頼性を高める.

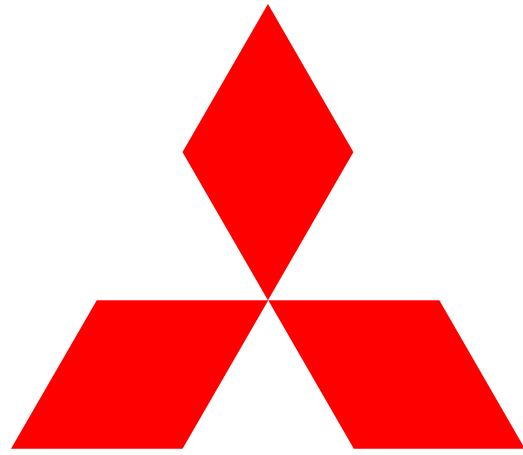
- 観測データに対する期待

- GNSSを利用する測位応用システムに大きな影響を与える電離圏擾乱時のデータは限られている
- プラズマバブルは, 急峻な電子密度勾配のみならず, シンチレーションの誘発や誤差分布へのバイアス混入などGNSS測位の脅威になる. 到来時データは限られ, 特に準天頂衛星システムのサービス開始後では, 昨年9月のデータが最初と考えられ, 新たな観測データの価値が高い
- 電子基準点設置受信機によるGEONET [12] 観測データは, GNSS測位装置の利用・開発に貴重. それらデータの時間空間的解析に加え, 電離圏の短波帯電波による観測データが, NICTから公開 [13] され, GNSS測位装置の利用・開発を促進.
- 観測網が相対的にまばらなNICTイオノゾンデ大宜味局の西側域に位置する石垣島の短波監視装置 (DEURAS-H) [14] などで観測されるデータが利用可能になると, 太陽極大期に当該地域への到来頻度が高まる傾向が過去示されているプラズマバブルへの対応が加速される期待

[12] GEONET: GNSS earth observation network system, GNSS連続観測システム, 国土地理院, [online] <https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html>

[13] “宇宙天気予報 電離圏領域,” 情報通信研究機構, [online] <https://swc.nict.go.jp/forecast/ionosphere.html>

[14] “短波監視施設,” 総務省, [online] [https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/moni/type/deurasys/deuras\\_h.htm](https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/moni/type/deurasys/deuras_h.htm)



**MITSUBISHI  
ELECTRIC**

*Changes for the Better*