

8. 飛行フェーズによるGPS信号の信頼性

衛星航法部 ※坂井 丈泰 惟村 和宣

1 はじめに

航空機の航法システムとして GPS に代表される衛星航法システムを利用するための検討が、ICAO (international civil aviation organization; 国際民間航空機関) により進められている。航空機の航法に使用する航法システムは、第一に所要の測位精度を保証することが求められるが、この他に十分な信頼性を確保することも重要である。このことを反映して、ICAO による衛星航法システム GNSS (global navigation satellite system) の SARPs (standards and recommended practices) 案 [1] にも、アベイラビリティ (availability; 有効性) やコンティニューイティ (continuity; 連続性) といった信頼性に関する基準値が記載されている。

我々は、このアベイラビリティおよびコンティニューイティについて、計算方法や計算に必要なパラメータを検討してきた [4]。ここで、アベイラビリティは航法システムが所要の性能で動作している性質または確率を、コンティニューイティは航法システムが一定時間にわたって中断せずに動作し続ける性質または確率を意味する。

GPS 受信機は GPS 衛星から送信される信号を受信することによって測位を行うから、アベイラビリティやコンティニューイティを計算するためには GPS 信号の信頼性に関する情報が必要となる。このため、GPS 衛星から送信される段階における信頼性 [2] や、航空機上における受信状況 [3] について報告を行ってきた。今回はさらに、航空機のバンク（旋回）や飛行フェーズによって GPS 信号の受信状況がどのように変化するかを調査した結果を、以下のとおり報告する。

- GPS 信号の信頼性について
- 飛行実験の概要
- バンクによる影響
- 飛行フェーズによる違い

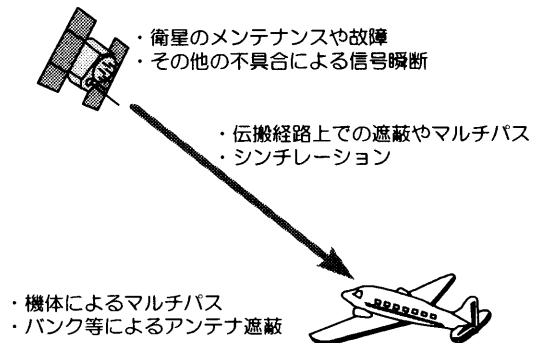


図 1. GPS 信号の中断要因。

2 GPS 信号の信頼性

GPS 衛星は測距信号を 1575.42MHz の搬送波に乗せて放送しており、ユーザ受信機は多数の衛星から送られてくる信号を同時に受信して測距を行う。GPS 信号の送信が停止するか S/N の低下により受信機が測距を行えなくなると擬似距離などの測定データが欠落することになるが、ここではこのような状況を GPS 信号の中断という。測定データが欠落すると航法装置の測位計算に影響を与えることは明らかであって、航法システムの信頼性を左右することになる。

GPS 信号が中断する要因の第一は GPS 衛星のメンテナンスや故障に伴う信号停止であるが、こうした衛星側の問題についてはすでに調査結果を報告した [2]。GPS 衛星から送信された信号がユーザに受信されるまでの伝搬経路中では、遮蔽やマルチパスといった原因により S/N が低下する (図 1)。これには、障害物のほかシンチレーションやアンテナパターンによる影響が含まれ、航空機の場合は機体による遮蔽やマルチパスも発生する。信号が遮蔽されたり、あるいは S/N が必要なレベルに達しなくなると受信機は測距動作ができなくなり、信号の中断を起こす。

こうした伝搬経路中の問題による GPS 信号の中断については、今のところ発生頻度などの情報が少ない。このため、今回は飛行中の航空機上でどの程度の信号中断が発生しているかを調

表 1. 飛行実験の概要.

#	時期	飛行コース	延べ測定時間	飛行高度
1	1998/2	仙台空港周辺	92.5 h	低 (~1500ft)
2	1998/10	仙台空港周辺	140.8 h	低 (~1500ft)
3	1999/2	仙台空港周辺	70.1 h	低 (~1500ft)
4	1999/2	仙台~福島	42.2 h	中 (~8000ft)
5	1999/2	調布~八丈島	29.3 h	中 (~10500ft)
6	1999/11	仙台空港周辺	94.3 h	低 (~1500ft)
合計			469.1 h	

べた. その結果は, 衛星の仰角が低くなるほど中断頻度が多くなるというもので, 信号の中断する平均時間間隔 [秒] と仰角 e_i [度] との関係を経験関数で近似すると,

$$MTBF^R(e_i) = 45.7 \exp(0.28e_i) \quad (1)$$

が得られていた. この結果によると, 仰角 5 度の衛星でも中断間隔は 200 秒程度と短く, 注意が必要である.

3 飛行実験の概要と結果

ところで, 前回の結果は飛行中のすべての時間にわたる平均値を求めたものであって, この中にはバンクによる影響が含まれていた. このため, 今回は水平飛行中とバンク中とを分けて集計することを考えた. また, 航空機の飛行フェーズにおいて, バンクが多いのはターミナル空域や出発あるいは進入中と思われることから, 飛行フェーズ別による集計も試みた.

3.1 飛行実験の概要

調査には, 当所の実験用航空機ビーチクラフト B99 による飛行実験の際に取得した測定データを利用した. GPS 受信機としては NovAtel 社の RT-20 を 1 台または 2 台搭載し (ただしこれは実験用受信機であり, GNSS 機上装置として承認されたものではない), 測距信号を受信可能なすべての衛星の測定データを 1 秒間隔で記録した (L1 周波数のみ). アンテナについては, 機体上面に取り付けられている GPS/GLONASS 用パッチアンテナを使用した.

実験の実施時期や飛行コースなどの概略は表 1 のとおりである. 飛行高度は, 仙台空港周辺の

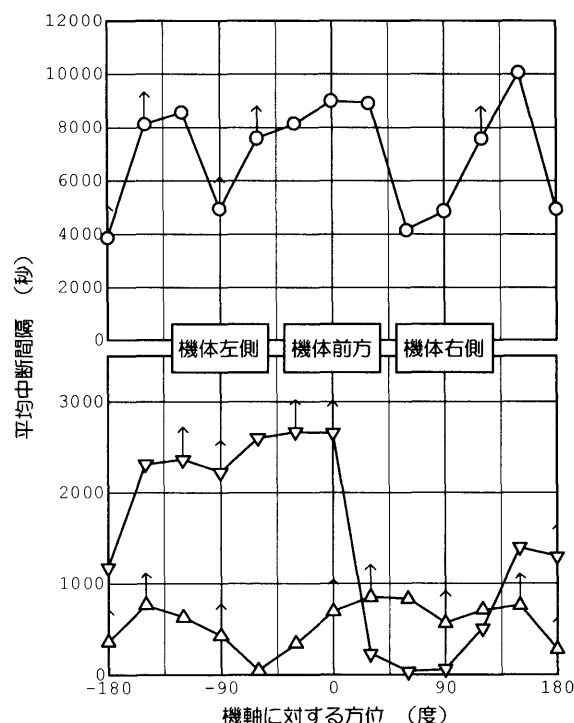


図 2. 機上 GPS 受信機による受信信号の中断間隔. (上) 水平飛行中; (下) 旋回中 ('△'=右旋回; '▽'=左旋回).

の実験ではおおむね 1500ft 程度までと低い, #4 では 8000ft, #5 では 10500ft まで上昇した. 後述するように本調査は衛星別に行うので, 表中の延べ測定時間は飛行時間と受信衛星数の積である. 以下の調査では, 合計で延べ 469.1 時間にわたる測定データを使用した.

3.2 バンクによる影響

まず, 航空機のバンクによる影響を調べるために, 実験機の水平飛行中とバンク (旋回) 中のそれぞれについて信号中断の平均時間間隔を計算した. いずれの状態についてもピッチングによ

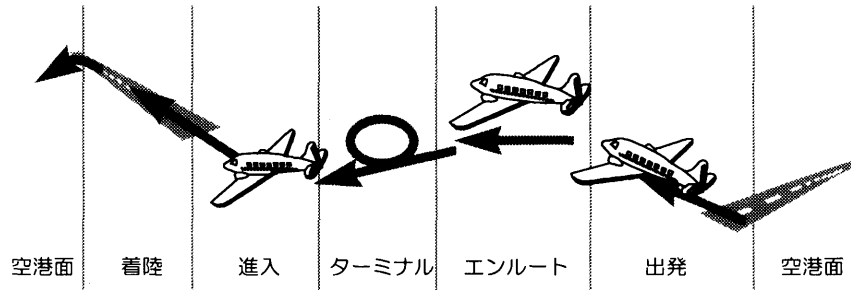


図 3. 飛行フェーズの分類.

る影響を除くために上昇角度あるいは下降角度が2度を超えないことを条件とし、方位角の変化が毎秒0.5度以上の時間帯はバンク中、それ以外は水平飛行中として分類した。なお、地上付近の建物等によるマルチパスの影響を避けるため、対地高度60m以上におけるデータ(169.9時間)のみを用いている。

水平飛行中とバンク中のそれぞれについて、受信機の各衛星に関する距離測定動作が中断するタイミングを検出し、この平均時間間隔を算出した。その結果を図2に示す。図の縦軸は中断の発生した平均時間間隔、横軸は実験機から見た各衛星の方位角(前方が0度、右回りを正とする)である。

上段は水平飛行中における計算結果であり、GPS信号の中断は4,000~10,000秒以上にわたって発生しないことがわかる。これに対して下段は旋回中の状況であり、右旋回では左側、左旋回では右側で特に中断を生じやすくなっている。実験機の旋回するコースの外側、すなわち主翼が上がる側において信号の中断が発生しやすくなっていることになるが、これは、水平面に対するアンテナの角度が変わることによる影響のほか、主翼による遮蔽あるいはマルチパスなどに起因するものと思われる。なお、各図における矢印記号は、測定時間中には中断が検出されなかったことを示しており、中断間隔はこれより長いものと予想される。

3.3 飛行フェーズ別の集計

次に、航空機の飛行フェーズ別の中断間隔を調べるために、実験機の飛行状態を飛行フェーズに相当するように分類し、これに対応した集計

を行った。飛行フェーズの分類基準は下のとおりである(図3を参照)。

空港面 — 対地高度15m以下で、着陸フェーズ以外の状態。

出発 — 対地高度15mに達してから、水平飛行に移るまでの間。

ターミナル — 出発後、進入フェーズに入る前までのエンルート以外の時間帯。

エンルート — 一定以上の高度に達してから、目的地に針路を向け、目的地付近で最初に旋回をするまでの間。

進入 — 着陸前に最後に旋回をしてから、着陸フェーズに入るまでの間。

着陸 — 対地高度15mに達してから、滑走路からの離脱を開始するまでの間。

この分類は管制上の飛行フェーズの定義とは異なるが、各フェーズごとに機体の姿勢変化の特徴が出るように配慮して分類を行うこととした。たとえば、この分類で出発フェーズにある実験機は、もっぱら大きな迎え角を持つ状態で飛行していることになる。

上の分類に従って集計を行った結果を、表2にまとめた。もっとも中断が発生しにくいのはエンルートの飛行中であって、平均的にほぼ45分以上にわたって連続して受信される。実験機が空港面にある場合も中断は少なく、平均間隔は25分に近い。一方、その他の飛行フェーズでは中断間隔は比較的短く、もっとも頻繁に中断が発生する出発フェーズでは平均間隔は204秒であった。ターミナル、進入、着陸の各フェーズでは、それぞれ315~480秒程度の間隔をもって中断が発生していた。

図4には、各フェーズの中断間隔を、衛星の仰角を横軸にして表示した。(a)は中断間隔の比

表 2. フェーズ別の平均中断間隔.

飛行フェーズ	延べ測定時間 [時間]	平均中断間隔 [秒]
空港面	143.8	1462
出発	15.53	204.0
ターミナル	110.4	481.7
エンルート	26.32	2786
進入	23.12	426.8
着陸	10.77	315.3

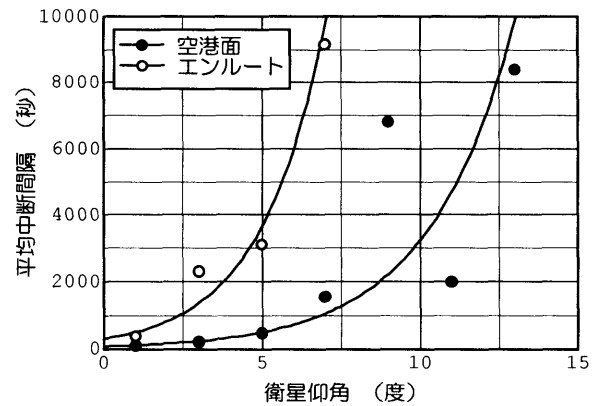
較的長いエンルートおよび空港面, (b) はそれ以外の飛行フェーズを示す. いずれもおおむね指数関数による近似が可能であり, 衛星仰角が高くなるほど中断は発生しにくくなることがわかった. 参考までに, 仰角5度における中断間隔を指数関数による近似曲線から求めると, エンルートでは1時間以上, 出発フェーズでは52.8秒であった.

4 むすび

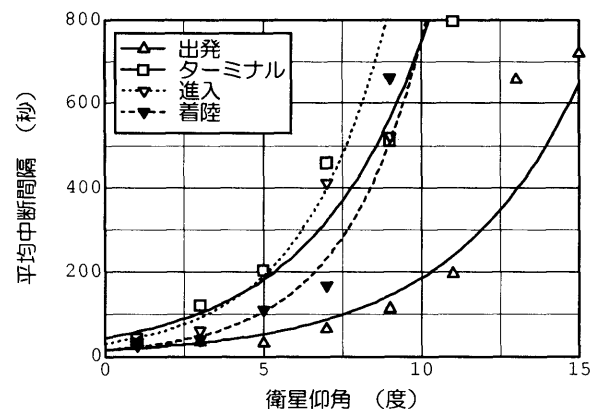
GPS を民間航空機用の航法システムとして利用する場合, 測距信号が送信される段階での信頼性に加えて, 受信環境までを含めた連続性についても検討する必要がある. このため, 飛行中の航空機に搭載したGPS受信機について信号の中断頻度を調査した結果について報告した.

調査の結果, 実験機のバンク中には, 旋回するコースの外側, すなわち主翼が上がる側において信号の中断が発生しやすくなることを確認した. これは, 水平面に対するアンテナの角度が変わることや, 主翼による遮蔽あるいはマルチパスなどに起因する影響と思われる. また, 飛行フェーズ別に中断頻度を調査した結果からは, エンルートおよび空港面以外のフェーズでは中断頻度が高くなり, 特に出発フェーズでもっとも頻繁に中断が発生することがわかった. いずれも, 実験機の迎え角が大きいことや, バンクが多いことによる影響と思われる.

航空機の高精度進入や進入着陸フェーズでは航法システムに高いコンティニュイティが求められる. 今回の結果は, こうしたフェーズにある航空機のコンティニュイティを検討あるいは計算するうえで有用である. ICAO による GNSS 標準仕様案は ILS の場合の規定をベースに構成され



(a) エンルートおよび空港面



(b) それ以外

図 4. 機上 GPS 受信機における受信信号の中断間隔.

ているが, 測距信号の連続性に関する議論が少ないことに注意が必要と考えている.

参考文献

- [1] “Draft SARPs for Global Navigation Satellite System (GNSS),” Appendix A, *Report on Agenda Item 1, GNSSP/3, Montreal, April 1999.*
- [2] 坂井, 惟村. “GPS 信号の連続性について”, 第 31 回電子航法研究所研究発表会, June 1999.
- [3] 坂井, 惟村. “機上における GPS 信号の信頼性について”, 第 32 回電子航法研究所研究発表会, June 2000.
- [4] 坂井, 惟村. “GPS による航空機進入・着陸における信頼性の計算”, 信学論, **J82-B**, 7, pp.1401-1410, July 1999.