

外来電波による干渉を受けたGPS受信機の挙動解析

監視通信領域 ※米本 成人、河村 暁子、ニッ森 俊一、岡田国雄

1. はじめに

乗客が航空機に搭乗する際、携帯電話等の電波を発する機器の使用は、航空機内における安全阻害行為等として改正航空法により禁止されている[1]。これは、航空機内で乗員の職務執行を妨げる様々な悪質行為を規制するためである。その行為の一つとして、電子機器を正当な理由なく作動させる行為が施行規則や告示等で規定されている。

現代の航空機には多くの搭載電子機器を使用しており、外来の電磁波による電磁干渉が懸念されている。しかし、外国では航空機内で携帯電話や無線LAN等、電波を利用しながら商用飛行が行われている。このような背景の中、当研究所では航空機内で安全に電子機器の使用を許容する要件、そして真に危険な状態を明らかにする研究を行っている。

航空機における電磁干渉問題の調査は、国土交通省航空局、航空会社の協力のもと15年以上に渡り実施してきた[2]。これらの調査結果に加えて、米国の航空無線技術委員会(RTCA: Radio Technical Commission of Aeronautics)の「航空機内で乗客が持ち込む電波を発する電子機器を許容する指針」文書

294 (DO-294) [3]、また「携帯電子機器許容のための航空機設計、および認証」文書307 (DO-307)[4]の記載に基づき、図1に示す代表的な航空機に対して電磁干渉の可能性の有無について評価を行った。その結果、地上の航空機内で携帯電話を使用した場合の電磁干渉が起こる確率は非常に低く、リスクはほとんど0と見てよいと結論付けた[5]。これにより平成23年4月より、告示の改正が行われたところである。しかしながら、非常に低確率であるが、VHF通信とGPSに対して受信機が有害干渉を受ける電力を受信するリスクが残ることが明らかとなっていた[6]。GPS受信機への干渉波の影響については、干渉波/信号比(I/S)が25dB以上であれば影響がないことが示されている[7]。しかしながら、起こりうる不具合の許容確率を求めるために、具体的な不良動作についての考察が必要とされている。

そこで、本稿では、電磁干渉が起こる可能性が残されているGPSについて、RTCAの防護指針を超過する干渉波が混入した場合にGPS受信機が起こす挙動を詳細に解析した結果について述べる。



図1 評価を行った航空機

2. GPS に対する電磁干渉可能性評価手法

すべての民生機器が航空機搭載機器と同じ不要放射レベルを常に満足するよう製作されていれば、航空機への影響は無いと結論付けることができ、常時使用することが可能となる。しかしながら、乗客が持ち込む可能性のある電子機器は、異なる電磁放射基準で製作されており、別途評価が必要となっている。本章では GPS 受信機に対する電磁干渉可能性の評価手法について述べる。

2.1 電磁干渉の分析手法

乗客が持ち込む電子機器の電磁干渉問題について、RTCA では無線 LAN や携帯電話等の意図的に電波を発する機器の使用を許容するため、2002 年に特別委員会 202 携帯電子機器(SC-202)を設立し検討を行った。SC-202 ではこれら電子機器使用時の安全性を証明するための試験方法や航空機の設計段階で認証を与える手法をまとめた[3,4]。この指針は安全性を保ちつつ電子機器を使用するための検証手順を定めており、具体的な数値を勧告していない。なぜならば、航空機の大きさや搭載される機器は千差万別であるため、航空機毎に試験評価する必要があるからである。電波の発射形態や電波の結合経路に分けて表 1 に検討すべき事項をまとめる。

通信等のため、意図的に放射された電波は、一般的に意図せず放射された電波に比べて強い。航空無線機器には使用する周波数以外の信号に対して干渉を起こさないように措置が取られているため、アンテナを介した干渉の可能性は無い。よって、意図的な電波に対しては、強い電波の電力が航空機搭載機器の耐えうる電波の強さを超える可能性を検討する必要がある。

他方で、不要放射は意図的な電波放射に比較して弱いため、航空機搭載機器が耐える電波の強さを超過する可能性はほとんど無い。しかし、それらはどの周波数に発生するのかが不明である。航空機搭載機器は航空用無線周波数帯域では非常に高い受信器感度があるため、他の周波数に比べて弱

表 1 起こりうる電磁干渉の分類

電波の形態	結合経路	過去の結論
意図的に放射された電波(有用な信号)	無線用アンテナを介した結合(IRA)	干渉の可能性なし
	機器筐体への直接結合(IRU)	検討する必要あり
	機器入力と配線に対する結合(IRC)	検討する必要あり
意図せず放射された電波(不要放射)	無線用アンテナを介した結合(NIRA)	<u>検討する必要あり</u>
	機器筐体への直接結合(NIRU)	干渉の可能性なし
	機器入力と配線に対する結合(NIRC)	干渉の可能性なし
伝導不要放射(接続線上の不要放射)	機器入力との結合(CEI)	機器認証で検討済
	混信(CC)	機器認証で検討済

い電波でも干渉を起こす恐れがある。これらの評価には航空機内から発せられた電波が搭載アンテナを経由して搭載無線機器の入力端に発生する度合いを統計的に評価する必要がある。

今回は、表 1 に示された検討事項のうち、不要放射が GPS の受信周波数帯域内に発生した場合に起こる受信機の挙動を解析するものである。

2.2 各航空機における GPS 干渉の可能性

GPS 受信機を受信周波数帯域内に不要放射が発生した場合の干渉の可能性について検討する。機内で放射された電波は、航空機の内部から外部に漏れだし、通常飛行機の胴体上部に取り付けられた GPS アンテナから侵入する。この時の電力は遮蔽、散乱、吸収の影響を受けて弱められる。こ

表2 各航空機のGPS受信機のIPL
および想定される電波の侵入量

航空機	IPL (dB)	侵入量 (dBm)	RTCA 規定値
A	63	-102	×
B	73	-112	×
C	83	-122	×
D	91	-130	×
E	81	-120	×
F	104	-143	○

の損失の値を干渉経路損失（IPL: Interference Path Loss）と呼ぶ。IPLは機体や開口部の大きさ、アンテナの取り付け位置、電波の周波数や偏波の向きにより大きく変化する。よって、航空機内で様々な位置と偏波でIPLを測定し、統計的に処理する必要がある。ここで、図1に示す航空機における最小のIPL値、および電波を発しない電子機器の不要放射規定の内で最大の値（電気用品基準、約-39dBm）を用いて、GPS受信機への干渉波侵入量を計算した表2に示す。

不要放射がIPLの分だけ弱まってGPS受信機に侵入した時、RTCA DO-307に記載されたGPS受信機の電磁干渉許容値（-134dBm）より小さくなれば理論的に電磁干渉が起らないと言い切れる。

ここで、掲載したIPLは各航空機の最悪ケースであり、統計的にはこれより大きな損失が見込める。通常の電子機器で今回使用した上限の不要放射がGPS受信機の帯域内に存在する確率は低い。これらを考慮しても、多くの航空機では許容値を超過する可能性が残されているのが現状である。

今回は許容値を超える電波が侵入してきた場合のGPS受信機の挙動を詳細に調査し、侵入してきた電波に対して起こりうる事象を明確にすることを目的としている。

3. GPSに混入する意図的な電磁干渉に対する挙動解析

本章では、GPS受信機に対してRTCA

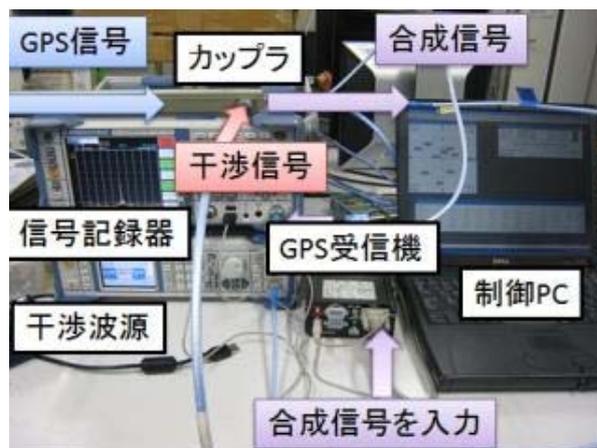


図2 GPS干渉評価システム



図3 連続波を混入した合成信号の例

の許容値を超える信号が侵入した場合の、受信機の振る舞いを分析する。図2に評価システムの概要を示す。

電子航法研究所1号棟鉄塔上に設置したGPSアンテナ（Trimble 14632）で取得した信号を受信機（Novatel Powerpack-II 3151R）で受信する。屋上設置のアンテナ直下の増幅器で増強されたGPS信号に対し、カップラを介して干渉波の信号を混ぜ合わせ合成信号を生成する。この合成信号を入力した場合のGPS受信機の挙動を制御PCにて取得される各種指標をもとに解析する。図3に合成した信号の測定例を示す。

縦軸は信号強度、横軸は周波数であり、1575.42MHzの連続波を干渉波として重畳している例である。盛り上がっている黄線のスペクトルがGPS衛星から放射されている拡散信号であり、スパイク状に抜け出した信号が混入した疑似干渉信号である。干

渉信号はカップラを經由して混入しているため、アンテナの放射パターンや、内部増幅器の利得の値を補正して、アンテナ近傍の空間における電波の強さに換算する。図 4 に使用した GPS アンテナの放射パターンを示す。

アンテナと増幅器の合成の利得は天頂付近で最大の利得となり、約 39.76dB である。また、半値幅は 45 度であり、衛星の仰角が下がると受信電力が小さくなる。衛星は時間によって配置が変化するため、受信信号は一定でない。よって、以降は同じ条件で測定を繰り返し、統計的に挙動を解析する。

3.1 比較的強い干渉波に対する挙動

まず、連続測位中の GPS 受信機に対して、干渉量が増えた場合の受信機の挙動、GPS が使用不能になる条件について調査した。測位中の受信機に干渉波を混入した場合の、捕捉衛星数の変化を図 5 に示す。

縦軸は捕捉されている衛星の数、横軸は干渉波投入からの経過時間を示している。尚、衛星配置によるばらつきを平準化するため衛星数は 3 回測定の平均値とした。各折線はアンテナ付近の電波の強さに換算した干渉波強度の違いを示している。干渉波強度は -110dBm から -102dBm である。干渉波が -110dBm 以下では平均的に 10 個の衛星を捕捉している状態が続き、測位状況に変化は見られない。-110dBm 以上に増えるにしたがって、捕捉する衛星数が徐々に少なくなってくる。これは図 4 のアンテナパターンからもわかるように、各衛星からの電波強度が一定でなく、干渉波強度と比べて低仰角衛星からの電力が低くなり、解読できなくなるためである。-105dBm あたりで測位限界の衛星数 4 個を下回り、-103dBm を超過すると 10 秒以内に GPS が不能となる。このことから、GPS が測位をしている状態では、干渉波の侵入量が -110dBm 付近で影響が表れ、-105dBm で完全に GPS が使用不能となることが示された。この時の GPS 信号強度は仰角にもよるが約 -133dB となり、干渉波/信号比は

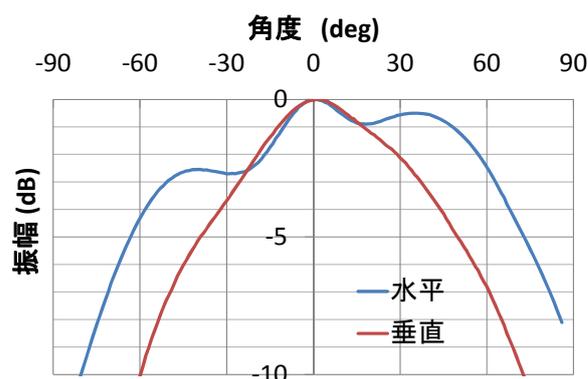


図 4 GPS アンテナの利得パターン

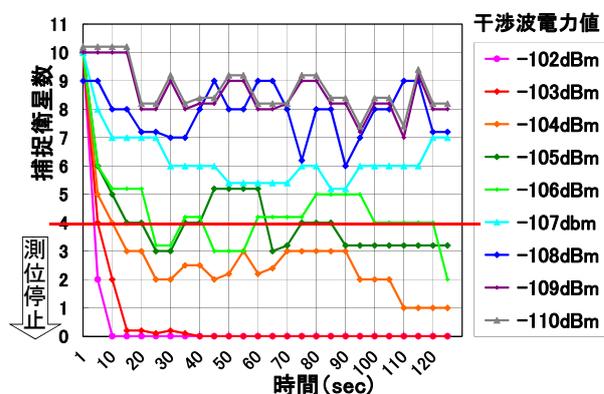


図 5 捕捉中の GPS 衛星の数の変化

約 28dB 程度となる。これらは過去の報告の例と比較しても妥当な結果と言える。

3.2 比較的弱い干渉波に対する挙動

比較的弱い干渉波の場合、連続測位をしている受信機では影響が見られない。しかし、GPS 受信機の電源投入時の衛星捕捉段階では、弱い干渉波の影響が現れることが想定される。そこで、GPS の測位開始時間 (TTFF: Time To First Fix) を測定し、弱い干渉波の影響を評価する。図 6 に実環境で測定した TTFF の変化を示す。縦軸は電源投入後に最初に測位を開始するまでの経過時間であり、干渉波電力を -138dBm から徐々に増加させて変化する TTFF を記録した。各種マークは実測された TTFF の実測値で、赤線は 12 回の測定の平均値を示している。図 6 に示されるように、-127dBm あたりまでは繰り返し誤差は比較的小さく、ほぼ 70 秒前後で測位が開始される。-125dBm 付近で繰り返し誤差、および平均値ともに大きくなり、100 秒前

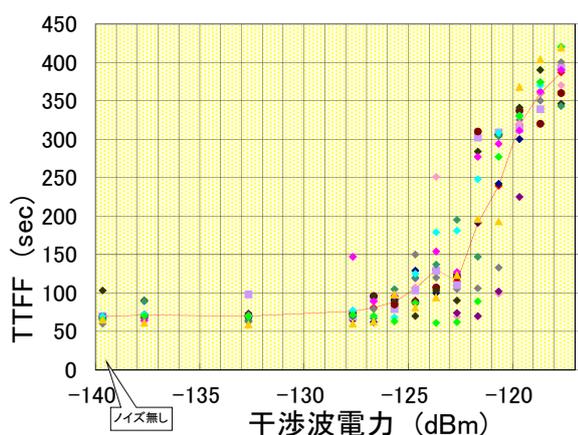


図6 外部印加ノイズによる TTF の変化

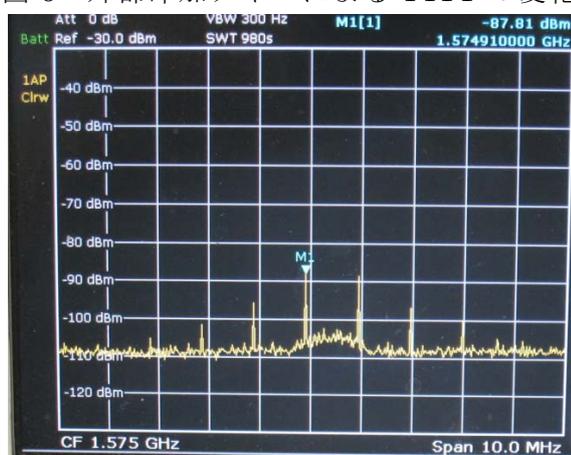


図7 観測された GPS 信号の例

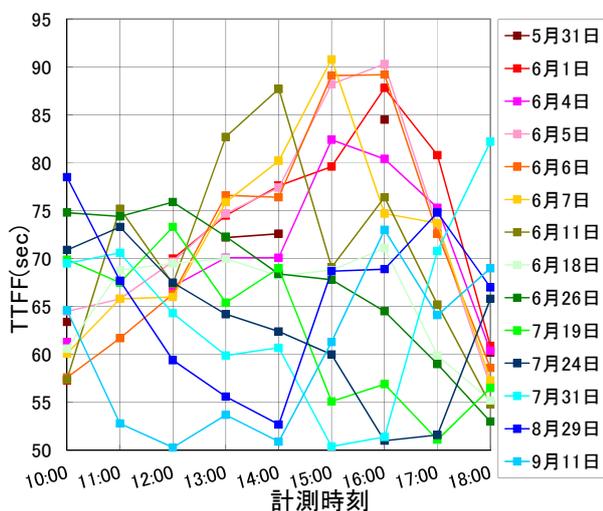


図8 Navstar63 による TTF の経時変化

後で TTF の劣化が顕著となる。その後 -120dBm あたりで平均の TTF が 300 秒を超過し、-117dBm を超過すると測位開始が不可能となる。このことから、干渉信号の強度が -125dBm を超過すると GPS 受信

機に干渉の影響が現れるといえる。

この解析の実施過程で、干渉波がない状態での TTF 測定値は、ほぼ一定の値であった。しかし、ある特定の時刻になると、干渉波がない状態でも TTF が劣化する現象が見られたため、詳しく調査を行った。図7に観測された信号の例を示す。

図3に示した干渉波とは異なり、GPS 信号の中心で約 1 MHz の間隔で楕円の信号が観測された。これは 0 と 1 の繰り返し疑似 GPS 信号を送信している衛星 (Navstar63)からの放射電波である[8]。これらの強度は衛星の動きに合わせて変化する。よって、先の評価手法を用いてこれらの疑似信号の影響を評価した。図8に各日の TTF の経時変化を示す。

縦軸が TTF で横軸が測定を行った時刻、各線は測定した日を示している。衛星の上昇や下降に合わせて、TTF が劣化していることが観測された。また、これら衛星は一日に約 4 分ずつずれながら移動するため、TTF 劣化の特性も徐々に移動する。なお、連続的に測位を行っている他の GPS 受信機では、干渉の影響は見られなかった。

これらの評価の結果から、GPS 受信機については、RTCA の規定値 -134dBm に比べて -125dBm (I/S 約 8dB) のあたりで TTF が劣化することが示された。なお、GPS のように周波数を拡散した信号の場合、受信機が受信している周波数帯域全体の干渉波量が問題となる。よって、この信号を出す衛星が上空にある時間帯では、衛星が見えない時間帯に比べて電磁干渉が起こる可能性が高くなるといえる。

4. 各航空機における最悪条件下での GPS に起こる障害の分析

以上の分析を基に、GPS 受信機で発生する障害を分析する。表3に GPS 受信機への侵入量に対して先に述べた事象の変化をまとめる。GPS 起動時には比較的弱い干渉波侵入量でも影響があるが、一度測位が始まると比較的大きな干渉波に耐えることが示されている。これらより、表2に示す

表3 干渉波電力と起こる事象の分類

干渉波電力 P_i (dBm)	GPSに起こりうる事象	
	起動時	連続測位時
$-105 < P_i$	使用不能	使用不能
$-110 < P_i \leq -105$	使用不能	衛星数低下
$-117 < P_i \leq -110$	使用不能	実害なし
$-125 < P_i \leq -117$	TFFF 増加	実害なし
$P_i \leq -125$	実害なし	実害なし

表4 各航空機のGPSのIPLと
想定される電波の侵入量
および起こる事象の分類

航空機	IPL (dB)	侵入量 (dBm)	起こりうる事象
A	63	-102	測位不能
B	73	-112	起動不能 捕捉後実害無
C	83	-122	TFFF 増加
D	91	-130	実害なし
E	81	-120	TFFF 増加
F	104	-143	干渉なし

各航空機でのGPS受信機で起こりうる障害について、表4にまとめる。

ここでGPSのIPLと侵入量については再掲している。これまでの実験結果等を基に起こりうる障害を分析すると、6機種の内2機種については、実害は検出できないことが示され、2機種ではTFFFが増加し、1機種でGPS受信機起動不能の可能性があり、1機種で測位不能となる可能性があることが推定される。

5. まとめ

本稿では、非常に低確率の事象であるが、乗客が持ち込む電子機器からの不要放射がGPS受信機の帯域内に発生した場合の挙動について詳細に調査した。RTCAでの電磁干渉防護指針である-134dBmを超える干渉波を加えた結果、干渉波電力が-125dBm以上からTFFFの劣化が始まること、起動時は-117dBm以上で測位が始まらないことを示した。また一度測位が始ま

った状態では-110dBm以上で捕捉衛星数が低下し、-105dBm以上で測位不能となることが示された。最後に、6種の航空機への影響を推定した結果、1機種でGPSが使用不能になる可能性があることが示された。

国際的にも多様な電子機器の利用が進むなかで航空の安全を担保するため、今後も継続に調査していきたい。

参考文献

- [1] 航空法 第七十三条、「安全阻害行為等の禁止等」。
- [2] K. Yamamoto et. al. “PED Interference reporting system in Japan”, The proceedings of 7th international symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, pp.220-223, June 26-29, 2007
- [3] RTCA Inc., “Guidance Allowing Transmitting Portable Electronic Devices in Aircrafts”, RTCA DO-294B, Dec. 2006.
- [4] RTCA Inc., “Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device Tolerance”, RTCA DO-307, Oct. 2007.
- [5] 米本成人他、「代表的な航空機における携帯電話の影響評価」成21、22年度航空機内の電磁干渉障害報告の統計分析及び該当事象の事後追跡調査報告書」、平成23年5月
- [6] 電子航法研究所、「地上停止中の航空機内における携帯電子機器の使用に関する調査報告書」、平成23年2月25日、2011年
- [7] 伊藤実他、「干渉波のGPS受信機の影響」、平成15年度電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.45-48、2003年
- [8] S. Naerlich, “GNSS signal and interference issues,” ICAO NSP Information Paper, NSP WG12/IP13, 2012