

## 20. 貨物機内のアクティブ IC タグの電波伝搬特性

航空交通管理領域 ※山本 憲夫  
機上等技術領域 米本 成人、河村 暁子、山田 公男、磯崎 栄寿

### 1. まえがき

IC タグとは自らの識別情報(ID)や付加情報を離れた場所から読み書きできる機器のことで、RFID (Radio Frequency IDentification) と呼ばれる。IC タグにはパッシブ型とアクティブ型とがあり、アクティブ型は電池を内蔵して定期的又はインタロゲータの質問にもとづき ID や内部センサの情報等を送信する。現在、433 MHz 帯の電波を用いるアクティブ IC タグは国際物流業務電子管理化のための世界標準規格となっている。我が国でも平成 18 年 12 月にこのタグの技術基準が定められ製品化された。しかし、航空の分野でこのタグを使用するためには、タグから放射される電波による機上搭載装置への電磁干渉の可能性を事前に調査する必要がある。電子航法研究所では航空局の依頼を受け平成 18 年度からこの調査をすすめている。

本稿では、我が国で市販されている 433MHz 帯アクティブ IC タグの電磁放射特性について述べる。次いで、このタグを取り付けた貨物コンテナをボーイング 747-400 型貨物機に搭載し、機内各所で電波分布を測定した結果について述べる。また、機内で放射された電波が機上搭載無線機器に到達するまでの伝搬損失(経路損失)を測定する。これらをもとに、RTCA (米国航空無線技術協会) の文書 160E (DO-160E) [1], 307 (DO-307) [2]等に基づいて電磁干渉の可能性を評価した結果について報告する。

### 2. アクティブ IC タグの概要

今回試験する 433MHz 帯アクティブ IC タグは、国際物流用コンテナ管理のため世界的に利用が推進されているもので、長距離・高速通信が可能、外部ノイズによる妨害への耐性が高い等の特徴がある。利用形態として、タグとインタロゲータ間のデータ通信、タグ相互間の通信が考えられ、主な設置場所としてタグ本体は国際貨物コンテナ等、インタロゲータは港湾、空港、倉庫及び工場等が考えられる。

このアクティブ IC タグの電波特性について実機を用い空港内で調査した。試験に用いたタ

グは国内の技術基準に適合し、市販されているセイコープレジジョン社のアクティブ RFID システム WT-200 型である。表 1 はそのカタログ仕様である。図 1 はこのシステムの外観で、タグ本体、モニタ用アンテナ、制御用 PC 及びタグの送信データ設定器からなる。なお、実運用時は多数のコンテナへのタグ設置が想定されるため、同一仕様のタグを 20 個用意し、複数のタグ使用時の電波特性についても試験した。

### 3. アクティブ IC タグからの電磁放射特性

電磁放射特性は RTCA DO-160E 21 節「無線周波数放射」記載の順に従い、電子航法研究所の電波無響室において昨年度と同じ測定機器、配置で実施した[3]。

表 1 調査したアクティブ IC タグの仕様

基本仕様	
適用規格	ARIB STD-T92
使用周波数	433.92MHz
送信出力	1mW以下
変調方式	周波数偏移変調(FSK)
送信間隔	3秒～24時間の範囲で任意
通信可能距離	約50m以上
寸法	65mm×36mm×9.5mm, 約20g
送信機能	定時送信、振動、押しボタン検知送信、電池寿命送信、その他
空中線仕様	
アンテナ	$\lambda/12$ 微小ループアンテナ
周波数範囲	432から436MHz
公称インピーダンス	50 $\Omega$
最大利得	-24.2dBi



図 1 アクティブ IC タグシステムの外観

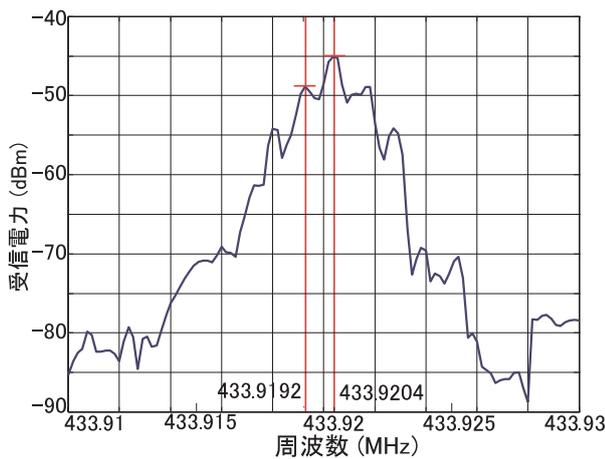


図2 ICタグ電波の周波数スペクトル

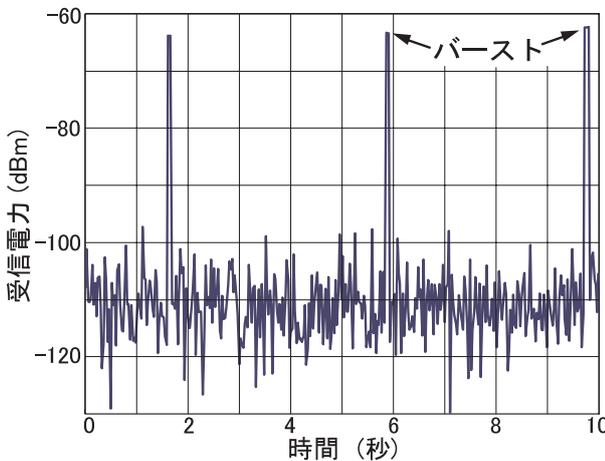


図3 ICタグ電波の10秒間経時変化

図2はタグの使用周波数付近でのスペクトルである。このタグは周波数偏移変調（FSK）方式であるため、中心周波数（433.9204MHz）から約±1.2kHz離れた高低2つの側波帯で情報を伝送している。図3はこの電波を10秒間連続測定したもので、約0.1秒幅のパルス（バースト）が約4秒間隔で観測された。これは電波の放射頻度が低い（デューティが低い）ことを意味し、従来の方でこの電波を確実に観測することは容易でない。そこで、バーストの頻度に応じて測定回数及び帯域を設定する方法を考案し、その方法で測定した。

図4は、2MHz・6GHz間で1個のタグからの電磁放射を測定した結果で、タグの向きは縦向き、受信偏波面は水平である。この図で「DO-160E電磁放射基準」とはこの基準を超える電波を放射する機器は機上装置としては使用できないという限界値で、航行援助、通信等で使われる航空バンド（108・152MHz、1020・1100MHz及び1525・1680MHz：図4の基準

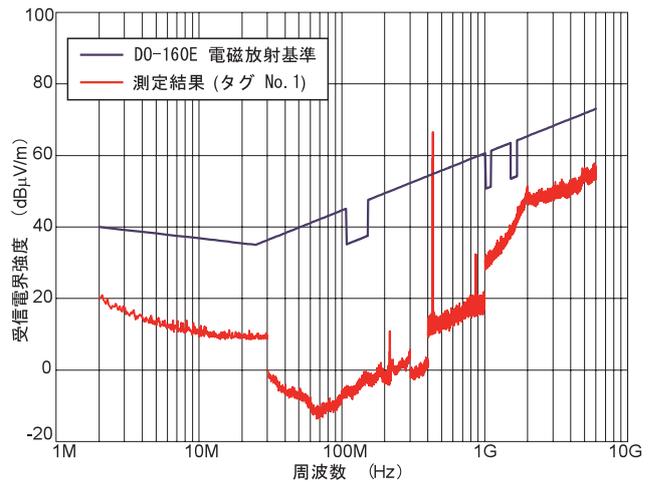


図4 ICタグからの電磁放射測定結果



図5 コンテナの一例（AKE型）

線で10dBの切れ込みがある部分）では厳しい設定となっている。タグからの電磁放射は、その使用周波数433.92MHzでは66.1dBμV/mと電磁放射基準を超えた。一方、使用周波数の2倍(867.9MHz)及び2分の1(217MHz)では調波成分が観測されたが、その電界強度は基準に比べ充分低いものであった。

多数のタグを同時に使用したときの電波重畳効果を調べるため10個のタグを金属板上に取り付け電磁放射を測定した。その結果、重畳効果と見られる強い電波は観測されなかった。

#### 4. ICタグによる貨物機内の電界強度

航空機内ではアクティブICタグからの電波がコンテナや機内構造物等で反射し、局所的に電界強度が高くなる可能性がある。そこで、タグを取り付けた貨物コンテナを日本航空のボーイング747-400型貨物機に搭載し、機内の電界強度を測定した。使用したコンテナは大型の

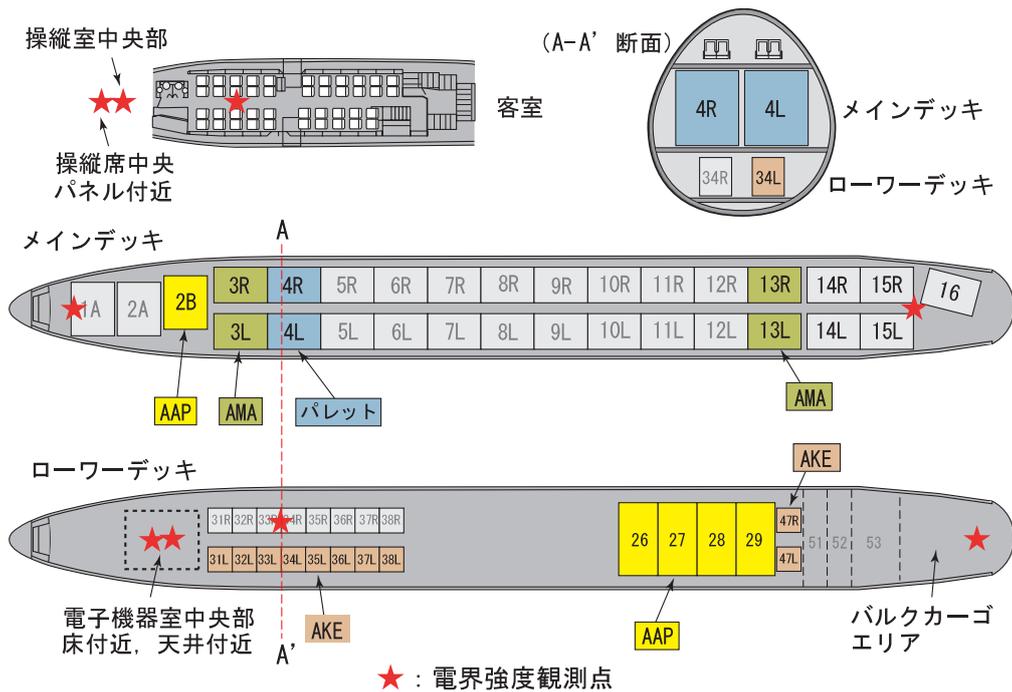


図6 ボーイング747-400型貨物機内のコンテナ配置と観測点

AMA, 中型の AAP, 主にローワーデッキや旅客機で使用する小型の AKE, 及び荷物平積み用パレットである。図5はコンテナの一例 AKE型である。今回の測定ではAMA4個, AAP5個, AKE10個の計19個にタグを取り付けた。

図6は機内のコンテナ積載位置及び電界強度観測点で, メインデッキにAMA, AAPとパレット, ローワーデッキにAAPとAKEを積載した。観測点は9カ所で, 標準ダイポールアンテナと携帯スペクトルアナライザとを用い, 433.92MHzを中心に100kHzの帯域で10秒間連続して観測した。

図7は貨物室メインデッキ後方(図6の13R, 13Lコンテナ後方の観測点)における測定例である。電界強度が35dB $\mu$ V/mを超えるパルス状の波形をタグからの電波とみなすと, 10秒間に49個のパルスが観測された。図3で示したように1つのタグの電波放射間隔は10秒間に2・3回のため, この観測点では19個すべてのタグからの電波が受信されたと考えられる。図7の最高電界強度は75dB $\mu$ V/m程度と電波無響室におけるタグ単体での電界強度66.1dB $\mu$ V/mに比べ相当大きくなった。この原因として, 観測点とタグ間の距離が1m(図4での測定距離)より短い場合があること, 機体構造物等での電波多重反射の影響, 及び複数のタグからの電波の重畳効果等が考えられるが, 詳細な原因の探

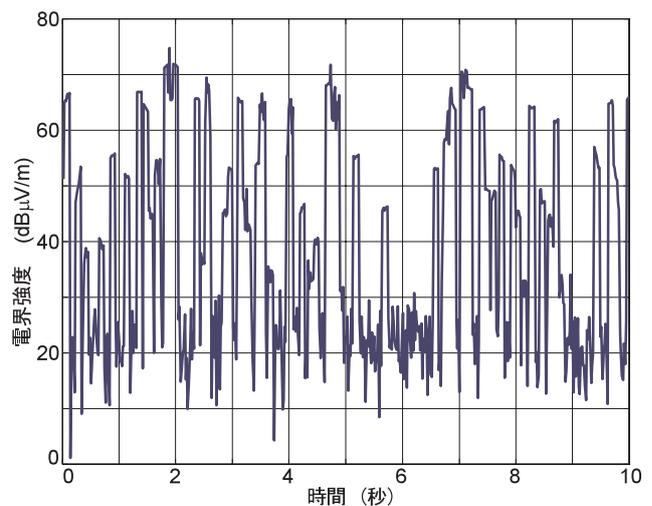


図7 測定結果例(観測点: 13R, 13Lコンテナ後方)

求は今後の課題である。

受信に用いたスペクトルアナライザの横軸(時間)は551サンプルの分解能があり, 図7のパルス状波形の幅は約0.1秒であることから, 一つのパルスから約5個の受信データが取り出せ(≈551/10/10), 全体では約250個のデータが取得できることになる。

以上の手順で図6の9カ所の観測点で得られたデータを集積し, 電界強度の累積分布を求めたのが図8である。この曲線から, 機内の電界強度は95%以上の確率で約70dB $\mu$ V/m以下

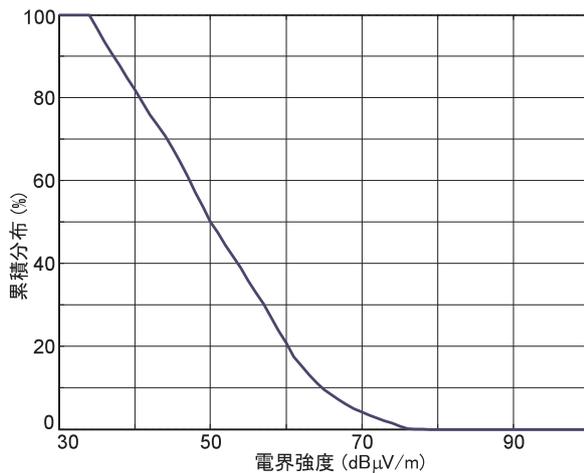


図8 機内電界強度の累積分布

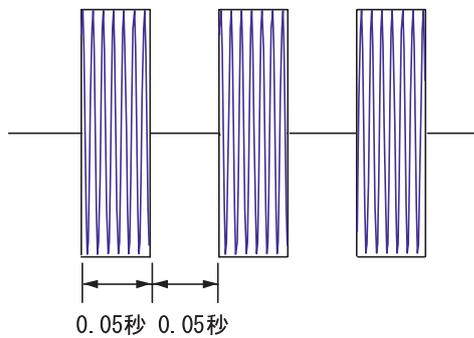


図9 試験電波送信器の信号波形

となり、最高値は 78.7dBμV/m であった。

### 5. 機内経路損失の測定

433MHz 帯アクティブ IC タグからの電波が機上アンテナを經由し機上搭載無線機器に入射して電磁干渉を引き起こす可能性について検討するため、IC タグを模擬する試験電波送信器を機内に設置し、それと代表的無線機器 8 種類との間の経路損失を測定した。

この試験には日本航空のボーイング 747-400 型貨物機を用い、コンテナ類を搭載しない状態で試験電波送信器を操縦室、客室、メインデッキ前方、後方ドア付近及びローワーデッキ電子機器室内の計 13 カ所に設置して試験電波を送信した。図9は試験電波送信器の波形で、無線機器が使用している周波数または 433.92MHz を 0.05 秒間隔でパルス状に送信する。送信電力は+20dBm である。試験電波観測のため、電子機器室（図6参照）内機器ラックに搭載されている被試験無線器を引き抜き、そのアンテナ端子に受信用スペクトルアナライザを接続した。スペクトルアナライザの周波数設定は試験電波

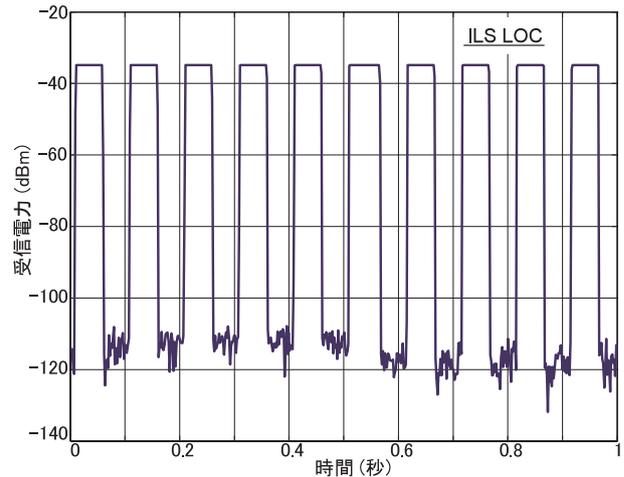


図10 測定結果例 (ILS ローカライザ)

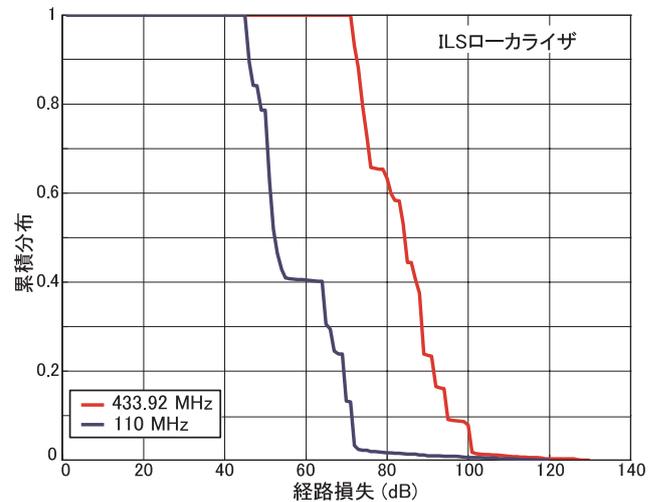


図11 経路損失の累積分布 (ILS ローカライザ)

周波数のゼロスパン、周波数帯域は試験電波周波数±500Hzとした。

図10は測定結果例で、ILSローカライザアンテナ端子で得られた電界強度である。送信位置はメインデッキ後方左ドア付近、ILSローカライザアンテナの位置は機首のレドーム内である。受信電力最高値は約-35dBmのため、経路損失はこの受信電力と送信電力との差となり、この例では55dB (=20-(-35))となる。

同様の手順ですべての送信位置で得た経路損失データを統計的に処理し累積分布を求めた結果が図11である。青線はILSローカライザで使う110MHzでの経路損失、赤線はタグの周波数433.92MHzでの経路損失である。110MHzの経路損失が433.92MHzのそれより20dB程度小さくなっている。経路損失の最悪値は110MHzで45.58dB、433.92MHzでは71.72dBとなった。

表2 経路損失最悪値

測定対象無線機器	使用周波数(MHz)	経路損失(使用周波数)	経路損失(433.9MHz)
VHF COM	110	51.06	70.35
VOR	110	78.67	82.51
ILS LOC	110	45.58	71.72
ILS GS	320	88.08	103.54
DME	1100	87.1	85.39
ATC	1100	79.4	89.64
TCAS	1100	78.25	78.77
GPS	1530	81.12	85.15

表2は、試験した搭載無線機器とその使用周波数及び経路損失の最悪値である。無線機器の使用周波数での経路損失は433.92MHzでのそれと比べ小さくなる傾向が見られた。これは、搭載機器用アンテナはその使用周波数で最高感度となるよう設計されているためである。また、経路損失はVORを除き使用周波数が低い機器が小さくなる傾向が見られた。これは、周波数が高くなるにともない空間での減衰が大きくなること、電波の直進性が高くなり機体等による遮蔽効果が大きくなることなどが原因である。ただしVORでは、そのアンテナが垂直尾翼上部近くにあり、機内の試験電波送信位置から最も離れているため経路損失が大きい。

以上から、今回試験した機器の経路損失は110MHz帯の周波数を用いるVHF COM、ILSローカライザを除きすべて70dB以上と、きわめて大きな値となることが明らかとなった。

## 6. 電磁干渉の可能性評価

### 6.1 DO-307による評価法

RTCAは、一般の携帯電子機器（PED：Portable Electronic Device）に加え、携帯電話やアクティブICタグのような電波を使う機器（T-PED：Transmitting PED）の機内使用を想定した航空機安全性認証の際、航空当局が考慮すべき事項や試験手順をまとめたDO-307を最近刊行した。本報告ではこのDO-307をもとに電磁干渉の可能性を評価する。

図12はDO-307で電磁干渉の可能性評価に用いる「電磁結合」の概念を示す模式図である。図の「信号(1)」と「信号(2)」はT-PEDで使う周波数と電界強度を示している。T-PEDの周波数は世界の電波当局が指定しており、これが航空バンドと重なることはない。一方、「スプリア

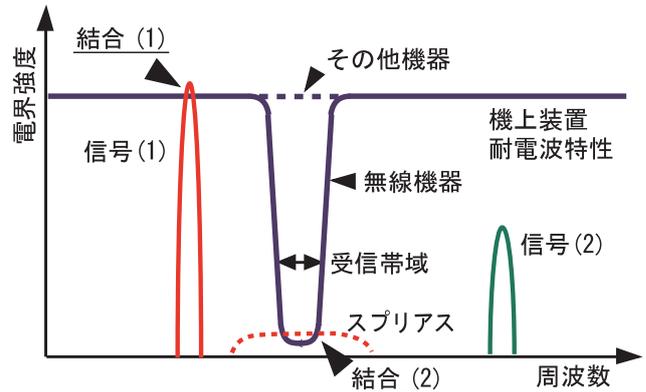


図12 PEDと机上装置間の電磁結合

ス」は、あらゆるPEDの電子回路から放射される微弱な不要放射成分であり、その周波数、強さはPED毎に異なっている。同図の「机上装置耐電波特性」についてはILSのように電波を使う装置（無線機器）とFMSのようなその他の装置に分けて考える必要がある。まず、無線機器ではその受信帯域できわめて微弱な電波を受信する設計となっていることから、機器の耐電波強度はその受信限界値にする必要がある。一方、無線機器の受信帯域外とその他の機器については、DO-160E 20節「無線周波数感受性」で規定された外来電波に対する机上装置の耐性試験で用いる電界強度とする。この試験電界強度には装置の重要性、設置位置等で多くのカテゴリがあるが、ここでは電子機器室に搭載された一般机上装置向けのカテゴリT（5V/m = 134 dB $\mu$ V/m）を用いた。

以上から、電磁結合については以下の2つの可能性を考慮する必要がある。

- 結合(1)：T-PEDの電波が机上装置筐体、接続ケーブル等に入射して生じる結合
- 結合(2)：T-PEDを含むPEDからの不要放射が機内—機外—机上アンテナ—机上無線機器へと入射して生じる結合

### 6.2 電磁干渉の可能性評価結果

まず、上記結合(1)について考える。3章及び4章から、試験したアクティブICタグからの電磁放射最高値は貨物機内の78.7dB $\mu$ V/mであった。この値はカテゴリTの試験電界強度（134dB $\mu$ V/m）に比べ大幅に低い。したがって、タグからの電波と机上装置筐体、接続ケーブル等との電磁結合はきわめて小さく、タグの使用電波（433.92MHz）が机上装置に電磁干渉する可

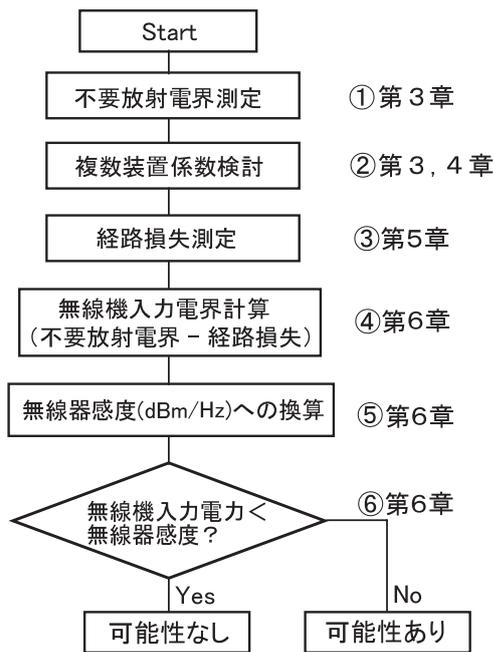


図 13 不要放射による電磁干渉の可能性評価の流れ

能性はない。

図 13 は不要放射による電磁干渉（結合(2)）の可能性評価の流れと本報告での記載部分である。まず、試験したタグの不要放射は第 3 章 図 4 における航空バンド部分の電界強度から求まる。複数タグの電波重畳効果を表す「複数装置係数」は、第 3, 4 章で記したとおり確定的な数値が得られなかったため、今回は無視した。経路損失の測定結果は第 5 章 表 2 のとおりである。以上から評価に必要なデータを表 3 に示す。この表で、「平均スペクトル密度電力」とは、無線機器入力端に到達した電界強度を無線機器の使用帯域を考慮して換算したものである。

表 3 から、すべての無線機器入力端に達する不要放射電力はそれぞれの無線器の受信感度を大幅に下回っていることが分かる。例えば、ILS ローカライザ入力端に達するタグからの電波は -202.58dBm/Hz と、ローカライザの感度 -154dBm/Hz に比べ 50dB 近いマージンがある。なお、今回無視した複数装置係数を考慮すると、上記マージンは最悪の場合 14dB 程度低下する可能性がある<sup>[3]</sup>。しかし、それを考慮しても今回試験したタグからの不要放射が無線機器に電磁干渉する可能性はないと判断できる。

表 3 不要放射による電磁干渉の評価に必要なデータ

試験対象機器	不要波電界強度 (dBuV/m)	無線器入力電界 (dBuV/m)	平均スペクトル密度電力 (dBm/Hz)	無線器感度 (dBm/Hz)
VHF	-2	-53.06	-208.06	-155
VOR	-2	-80.67	-235.67	-165
ILS	-2	-47.58	-202.58	-154
ILS GS	1	-87.08	-242.08	-145
DME	35	-52.1	-227.1	-167
ATC	35	-44.4	-219.4	-162
TCAS	35	-43.25	-218.25	-167
GPS	40	-41.12	-216.12	-181

### 7. むすび

市販されている 433MHz 帯アクティブ IC タグの電磁放射を RTCA の規定に基づき測定した。このタグを取り付けた貨物コンテナをボーイング 747-400 型貨物機に搭載し、機内の電界強度を測定・分析した。タグからの電波が航空機アンテナを経由して搭載無線機器に到達するまでの経路損失を求めた。これらの結果をもとに RTCA DO-307 の手順を用いて電磁干渉の可能性評価を行った。その結果、タグの使用周波数 (433.92MHz) での機上装置筐体やケーブル等を介した電磁結合及びタグからの不要放射による機上無線機器での電磁結合はいずれも充分小さいことが明らかとなった。したがって、今回試験したアクティブ IC タグを上記貨物機で使用したとき、同機の機上装置が電磁干渉を受ける可能性はない。

今後、複数装置係数に関する詳細な検討、他の型式の貨物機や旅客機での電磁干渉の可能性等について研究を進める予定である。

### 謝 辞

本研究の実施にあたりご支援、ご協力をいただいた航空局企画室、航空物流室、(株)日本航空の関係各位に感謝します。

### 文 献

- [1]RTCA: “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment”, DO-160E, Dec. 2004.
- [2]RTCA: “Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance”, DO-307, Oct. 2007
- [3]山本, 米本, 山田, 平田, “アクティブICタグの電磁放射に関する測定・分析”, 第7回電子航法研究所講演概要, pp.65-68, 平成19年6月