実験用航空機に搭載したロランCの精度評価について

加 来 信 之*

Evaluation Test on a Loran-C Receiver
Carried by Aircraft for Flight Experiment

Nobuyuki KAKU

Abstract

Evaluation tests of radars and navigation aids often require continuous positioning of aircraft employed for flight experiment. Therefore, a Loran-C receiver, JNA-760R, a specially ordered model of JNA-760, is equipped for the purpose. Since its accuracy of positioning is most important, calibration test is made by the method of aerial triangulation with a Karl Zeis RMK-21/18 camera, which has a positioning accuracy of the order of 1 m.

The JNA-760R has a function of distance-distance positioning (ρ - ρ navigation) in addition to the ordinary function of hyperbolic navigation. Test results show superiority of the ρ - ρ method which has an accuracy of about 300m and is enough for evaluation tests of VOR, ASR, etc. However, a rapid turn has caused an error of 800m and hence, it should be avoided.

1. は じ め に

航空機用航行援助施設の評価実験では、実験用航空機の位置測定を精度よく、かつ能率的におこなう必要がある。この位置測定は、従来、写真撮影やTVトラッカーなどを用いる光学的方法が用いられてきた。すなわち、ILS (Instrument Landing System), VOR (VHF Omni Directional Range) などのような地上局に対する航空機の角度情報を提供する施設の評価では、主としてシネセオドライトを用い、カメラ設定角およびフィルム中心からの偏差とでコース誤差を求めている。また、将来の着陸誘導装置として開発中のMLS (Microwave Landing System) の評価では、TVカメラを利用した航空機トラッキング・システム⁽¹⁾が用いられている。しかし、これらの光学的方法では測定範囲が可視距離内に限定され、遠距離における位置測定が困難である。また、航空機上で測定する援助施設のデータと地上で測定する位置データとを照らし合わせるためのデータリンクが必要で、測位装置が大規模となる。このようなことから、地上局からの角度と距離を求めるレーダーの場合、固定目標からの反射を用いて精度評価をおこなっている。

そこで、地上の大規模な支援装置を用いることなく、航空機の位置測定をおこなうため、ロランCを実験用航空機に搭載することを計画した。搭載用ロランCは、通常の機能のほか、 ρ - ρ 航法用の到達時間の測定と、出力命令による測定データの出力ができるように改造したものである。この搭載用ロランCの測位精度を確認するため、航空写真を用いて精度評価実験をおこなったのでここに報告する。

2. 搭載用ロランCの概要

搭載用ロランC装置 (JNA-760R) は、通常の機能のほかに ρ - ρ 航法に用いる到達時間の測定と、出力命令による測定データの外部への出力ができるように市販の装置 (JNA-760) を改造したもので、表1にその主要性能を示す。

* 正会員 電子航法研究所 (三鷹市新川6-38-1)

表1 搭載用ロランC航法装置の主要性能

項 目	性 能
航 法 方 式	双曲線航法/ ρ - ρ 航法
位 置 表 示	緯度6桁 経度7桁 最小単位0.01分
時間差/到達時間表示	6桁2組 最小単位0.1 μ s
ノッチフィルター	自動同調方式
出 力 デ ー タ	出力命令受け付け後0.1秒以内にGP-IBでデータ出力 (時間差, 到達時間, SNR, 波形情報)
外 部 基 準 発 振 器	ρ - ρ 航法用ルビジウム発振器 (EFRATOM FRK-L)
ア ン テ ナ	航空機搭載HFアンテナ 長さ4.27m

ロランCは利用空域によりその測位精度が異なるため、双曲線航法の他に ρ - ρ 航法を選択可能とし、精度の劣化を軽減させることにした。 ρ - ρ 航法では、離陸前に空港内で定点測定をおこなって双曲線航法で測位計算した緯度・経度、または地図から読み取った緯度・経度を入力し、これを基準として飛行中の到達時間を測定する。到達時間の測定に用いる基準発振器は、安定度が 1×10^{-11} (1 sec) 以下のルビジウム発振器 (EFRATOM FRK-L) を使用した。この搭載用ロランCの使用法は、空港を中心とする半径60NMの空域で、その飛行時間を約2時間と想定している。したがって、その間のルビジウム発振器の周波数ドリフトは 0.1 μ s 以下に収まり、航法装置の最小測定単位以下となる。

制御器からの出力命令受け付け後0.1秒以内に、双曲線航法に用いる時間差、 ρ - ρ 航法に用いる到達時間、受信信号のSNR、波形情報をGP-IBインターフェースを介して出力できるよう改造した。これは測位計算後の緯度・経度を出力すると、計算中に航空機が高速で移動することによる誤差が大きいため、処理前の測定デー

図1 搭載用ロランCの構成図

タを記録し、地上で測位計算をおこなうためである。

本装置の構成を図1に示す。既設のHFアンテナで受信したロランC信号を、専用のアンテナカブラを介して航法装置へ入力する。航法装置で測位計算した緯度・経度を航跡表示器へ送り、地形データと共に飛行中の航跡を表示する。また、評価実験において航空機の位置が必要なときは、制御器の出力命令により、そのときの測定データを読み出して印字および磁気テープへ記録する。そして、実験終了後、地上においてこのデータで測位計算をおこなう。本装置を航空機に搭載した状況を図2の写真に示す。

図2 実験用航空機に搭載したロランCおよび計測装置

3. 実験方法および実験結果

ロランCの測位精度は、測量用航空カメラを用いて算出した航空機の位置と比較する方法で求めた。精度確認実験は、ロランCの他に測量用航空カメラを搭載して、図3に示すコースを高度1,800mで飛行しながら、大島、茅ヶ崎、海老名、相模原地区において撮影した。そして、ロランC信号は、航空カメラのシャッターに同期して、M局(硫黄島)、X局(北海道)、Y局(沖縄)の信号を受信測定した。

1回目の飛行実験後、再度大島上空に戻って同一コースを飛行したが、大島上空の旋回中に信号レベルの低いY局の追尾がはずれ、双曲線航法による測位が不可能になった。

3.1 空中三角測量

撮影は、焦点距離210mm、画面寸法180×180mmのカルツァイス RMK-21/18型を用い、進行方向に60%重ねておこなった。撮影時のカメラの三次元位置は、この航空写真から「空中三角測量」⁽²⁾を用いて解析し算出した。空中三角測量は、重複した写真相互間の座標を地上座標系に対して最小2乗法で同時に調整(平均)計算をし、写真の地上座標系を求める方法である。空中三角測量をおこなうには、

地上に標定用基準点の位置を示すための対空標識を多数設ける必要がある。しかし、この作業は多大な労力を必要とするため、今回の実験ではおこなわず、写真上で明確に判定できる場所を基準点として、1/2500~1/5000の国土基本図からその地上座標を読み取った。この方法で算出した航空機の測位誤差(各基準点の残差の標準偏差)を表2に示す。測位誤差は、測定地区により異なるが、最大値で約1mであり、ロランCの精度評価に用いるには十分と考える。

図3 精度確認実験の飛行コース

表2 空中三角測量による測位誤差

測定 地区名	撮影 回数	測位誤差 (m)		
		緯度	経度	高度
大島	8	0.226	0.349	0.301
茅ヶ崎	7	0.807	0.308	0.191
海老名	8	0.450	0.419	0.208
相模原	6	1.032	0.566	0.167

測位誤差は、各基準点の残差の標準偏差である。

3.2 ロランCの測位精度

空中三角測量による航空機の位置を基準とした、ロランCの双曲線航法と ρ - ρ 航法による測位誤差を表3に示す。符号は誤差の方向を表わし、緯度の場合真値の北側が(+)南側が(-)、経度では東側が(+)西側が(-)としている。今回の実験では、離陸前に空港内で4秒間隔51回の定点測定をおこない、双曲線航法で求めた緯度・経度を ρ - ρ 航法の基準とした。そして、 ρ - ρ 航法の測位計算では、国土基本図から求めた定点測定場所の緯度・経度で、補正をおこなった。飛行中の測定は、各地区とも、約6秒間隔のシャッターに同期しておこなった。

表3 ロランCによる測位誤差

測 定 地 区 名	測 定 回 数	双曲線航法による測位誤差(m)			ρ - ρ 航法による測位誤差(m)		
		緯 度	経 度	RMS	緯 度	経 度	RMS
調布空港*	51	-90	15	14	0	0	0
大 島	8	-686	-438	38	-662	89	49
茅ヶ崎	7	-157	-165	16	-133	220	23
海老名	8	-119	-118	21	-91	247	32
相模原	6	-112	-23	27	-70	279	35
調布空港**	50	飛行中追尾不能になる			-18	57	18

ρ - ρ 航法は、飛行実験前に調布空港内で定点測定をおこない、国土基本図から求めた位置で補正している。

*：離陸前の定点測定

**：着陸後の定点測定

た。着陸後、離陸前と同じ場所で50回の定点測定をおこなったが、測位誤差は ρ - ρ 航法で約 60m であった。しかし、定点測定において測定した到達時間の離陸前と着陸後との差は、最小測定単位の $0.1\mu\text{s}$ 以下であるので、ルビジウム発振器のドリフトによる誤差は無視できるものと考えられる。

飛行中の各測定点における測位誤差をグラフで表わしたものが図4である。誤差は、双曲線航法では真値の西側へ、 ρ - ρ 航法では東側へ分布した。そして双曲線航法の誤差は、 ρ - ρ 航法に比べると東西方向に広がっている。大島地区では双曲線航法の場合南西へ 813m ずれ RMS が 38m、 ρ - ρ 航法の場合南南東へ 668m ずれ RMS が 49m であった。茅ヶ崎、海老名、相模原地区では双曲線航法の場合南西へ 168m ずれ RMS が 65m、 ρ - ρ 航法の場合南東へ 266m ずれ RMS が 45m であった。ただし、双曲線航法は測位計算のままであるが、 ρ - ρ 航法は国土基本図による補正をおこなっている。

図4 空中三角測量による航空機位置を基準としたロランC測位誤差

4. 測位誤差の検討

ここでは、測位誤差を各局の成分に分離できる、 ρ - ρ 航法の誤差について検討する。

4.1 速度応答特性による測位誤差

大島地区の測位誤差は、他の3地区に比べて、南西方向に約 600m ずれている。この原因は、速度の変化にロランCの速度応答特性が追従できなかったためと考え、その調査をおこなった。

大島地区での実験では、測定コースに入るため図3に示すように 180 度の急旋回をおこない直線飛行になった後、写真撮影とロランCの測定をおこなった。この旋回によるロラン局に対する速度変化は、M局およびX局方向とも 600km/h 以上であった。

ロランCの速度応答特性が、この速度変化によりどのような影響を受けるかを、ロランC信号のシミュレータを用いて調査した。シミュレータを大島地区において測定した信号レベルと同じ状態に設定し、到達時間を局から遠ざかる方向へ速度 329km/h で変化させ、途中で局に近づく方向にステップ状に変化させ、このときのロランCの速度応答特性を測定した。この結果を図5に示す。横軸が測定時間（1分/単位）を、縦軸が到達時間を表わしている。そして直線が設定値を、点線がそのときの測定値である。図に見られるように、速度が急変化す

ると測定値が設定値からずれて、その回復に4～5分かかることがわかった。図6に、このときの設定値からずれた測定値の偏差量すなわち追従誤差を示す。横軸は図5と同じく測定時間を、縦軸が追従誤差を表わしている。このように、速度をステップ状に変化させると、その変換点で最大約4.5 μ sの追従誤差が生じる。

シミュレータ実験でわかった回復時間(4～5分)を用いて、実際の飛行実験における追従誤差を調査した。大島では、旋回後測定コースに入り、直線飛行しているため、旋回してから4～5分経過した後のデータは、追従誤差がないものと考えられる。この追従誤差を無視できる到達時間データで追従誤差が生じなかった場合の旋回直後の到達時間を推定し、それに対する測定到達時間の偏差量を調べた。図7にこの飛行実験における追従誤差を示す。ただし、測定終了後大島北端で西へ14度旋回しているため、測定データを直進した場合の到達時間に補正をして用いた。この飛行実験では、旋回の頂点から約20秒後に直線飛行へ移っているが、そのときの速度変化による偏差量は約1 μ sであった。シミュレーション実験での追従誤差4.5 μ sはステップ状に速度を変化させたためで、実際の旋回における速度変化はこれに比べるとかなり遅いので、このような追従誤差になったものと考えられる。

図5 シミュレータによる速度応答特性

図6 シミュレータによる追従誤差

図7 大島上空での追従誤差

大島地区における誤差は、急旋回による速度の変化にロランCが追従できなくなり、大きくなったものと考えられる。したがって、精度よい測位は、旋回後4～5分間経過してからおこなう必要がある。

4.2 飛行高度による誤差

茅ヶ崎、海老名、相模原地区の測定誤差は、大島地区のような速度応答特性による誤差がないため全体的に小さいが、南東方向に約270mずれている。

ρ - ρ 航法の誤差は、各局からの到達時間誤差に分離することが可能であるため、3地区の誤差を、局方向成分に分離した。表4に分離した局方向成分の誤差を示す。符号は局から遠ざかる側を(+), 近づく側を(-)で表わしている。X局による誤差は、遠ざかる側と近づく側との両側に分布し3地区平均で-7mであるが、M局による誤差は全体的に近づく側にあり-135mと大きい。これら3地区の誤差の差は、t分布を用いた平均値の差の検定によると5%水準で有意と認められるので、地区間の地理的要因により生じていると考えられる。

地区間の地理的要因を調査するため、調布空港を基準とする各測定点のM、X局からの距離に対して誤差がどのような関係にあるかを求めた。図8にこの関係を示す。横軸はこの距離を表わしており、距離0は定点測定をおこなった調布空港を示している。また、縦軸は局方向成分の誤差で

表4 測位誤差の局方向成分

測定 地区名	M局成分の誤差(m)		X局成分の誤差(m)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
茅ヶ崎	-166	9	37	16
海老名	-128	15	-13	13
相模原	-112	16	-45	16

ある。なお、距離の符号は、M局の場合測定地区が調布空港より局側にあるため(－)，X局の場合は遠方にあるため(＋)符号で表わした。誤差の分布は、両局ともかなり強い相関があり、その相関係数はM局の場合0.84，X局の場合0.92である。また、それぞれの直線は誤差分布を回帰分析して求めた回帰直線で、これから求めた調布空港における値は、M局で－84m，X局で－104mとなる。測位計算をおこなうときに調布空港の定点測定場所で補正しているため、この回帰直線による推定誤差は、地上と飛行高度との高度差⁽³⁾により生じたものと考えられる。すなわち、調布空港での定点測定値は陸上伝搬の影響を受け到達時間に遅れを生じているが、飛行高度における到達時間はその影響が少なく遅れが小さいものと考えられる。

この回帰直線による推定誤差を用いて、各測定点における到達時間を補正し⁽⁴⁾，再度 ρ - ρ 航法の測位計算をおこなった。この高度補正後の測位誤差を図9に示す。補正をおこなった結果、誤差が非常に小さくなり、3測定地区全体では南東へ約6mずれRMSは28mとなった。

5. ま と め

航行援助施設の評価実験に用いる航空機搭載用ロランCの測位精度を、測量用航空カメラを用いて評価した。

双曲線航法では、信号レベルの低いY局が急旋回によって追従不可能になったが、 ρ - ρ 航法では、信号レベルの高いM局とX局だけで測位可能なため、ロランCによる測位が維持できた。しかし、速度変化が大きいため、十分な追従ができずに誤差が大きくなり約800mになった。

直線飛行における測位誤差は、離陸前の定点測定値を基準としたため、地上と飛行高度との高度差による誤差を生じて約300mとなった。しかし、測定点間の距離に対する誤差の回帰分析により推測した飛行高度における誤差で、高度補正をおこなった結果、誤差は約6mに減少することができた。

本装置は、使用範囲と旋回に注意して用いれば、通常200～300mの誤差で測位できることが確認できた。VOR/DME (Distance Measuring Equipment) を用いた場合の測位誤差は、ICAOの規定によると60NM離れた場所で約5NM (2 σ)⁽⁵⁾となるので、1 σ では約4600mである。このように、本装置は航行援助施設の遠距離での測位に比べて、精度が良いため、その使用範囲に注意すれば航行援助施設の評価実験に活用できる。

最後に、ロランCの製作にご協力いただいた日本無線(株)、空中三角測量で航空機の位置を算出していただいた(株)パスコの関係各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 二瓶 他2名 “航空機トラッキングシステムの性能について”，電子航法研究所第16回研究発表会講演概要，昭和59年6月

図8 調布空港を基点とする測定点距離と局方向成分の誤差との関係

図9 高度補正後の測位誤差

- (2) 小林 他3名 “測量学” 理工図書
- (3) 渡辺 泰夫 “デッカ電波の山岳地伝搬速度についての一考察Ⅱ”，日本航海学会論文集第59号，昭和53年5月，93～98
- (4) 濱田 他2名 “ロランCの陸上伝搬速度による補正とその効果について”，日本航海学会論文集第63号，昭和55年5月，71～75
- (5) 三吉，惟村 “RNAV の適用領域と誤差の分布について”，電子航法研究所報告第38号，昭和57年8月

質 疑 応 答

西谷芳雄：予稿に「伝搬径路による測位誤差の軽減をはかるため，双曲線航法のほかに ρ - ρ 航法を選択できるように改造した。」とありますが，双曲線航法に関しては，改造された点はありませんか。

加来信之：改造した点は， ρ - ρ 航法とデータの出力を可能にただけで，双曲線航法に関しては改造していません。

田口一夫：予稿の「自律的に測定することを……」の意味を説明して下さい。

加来信之：航空機の位置を，地上の支援装置を用いずに，測定することです。

田口一夫：飛行高度による伝搬速度の変化を見出していますが，アメリカでは高度によるこうした変化の曲線を発表しています。御参考下さい。

加来信之：ありがとうございます。参考にさせていただきます。