フライトレベルの幾何学的高度の変化特性

長岡 栄*

Variation Characteristics of Geometric Heights of Flight Levels

Sakae NAGAOKA

Abstract

This paper describes the annual variations of the geometric heights of flight levels used for aircraft. The height difference between the isobaric surface corresponding to the flight level and the nominal flight level value is estimated from the measured geometric height of an aircraft by a height finding radar and the Mode C reported pressure altitude by the Secondary Surveillance Radar (SSR). The observed differences indicate a periodical variation of approximately twelve months. The seasonal trend of the difference between the geometric height H and the flight level FL , i.e., $H-FL$, is modelled by

$$H-FL = C_1 \sin \{C_2 (t - C_3)\} + C_4 + \varepsilon$$

where t is the data acquisition time, ε is the residual and C_i ($i=1, 2, 3, 4$) are the model parameters. Several characteristics of $H-FL$ are discussed herein.

1. まえがき

航空交通管制では航空機相互間に安全な間隔を設定することにより、空中衝突の危険を避けている。このため航空機は所定の経路や高度を飛行することになる。航行には、高度センサとして、気圧高度計を用いている。これは、標準大気気圧と高度の関係を利用し、測定気圧を高度に換算する。従って、実際の高度が標準大気と異なる場合は、換算した高度と実高度は必ずしも一致しない。

しかし、地表との距離を十分にとれる14,000ft以上の高高度においては、必ずしも地上からの幾何学的高度の情報を要せず、安全上は、他機との相対距離を確保すればよい。このため、高高度においては国際民間航空機関(ICA0)の標準大気⁽¹⁾に基づいた気圧高度であるフライトレベルが使用されている。

航法システム関連の研究では、電波の放射特性の調査や測位実験の際、航空機の幾何学的高度の情報が欲しいが、気圧高度(またはフライトレベル)の情報しか利用できないという場合が少なくない。こうした場合、両者の関係が明かになっていれば、飛行フライトレベルから幾何学的高度の推定がある程度可能となり得る。

これまで、この分野では幾何学的高度の実測が容易でないことから、文献(2)で航空機の高高度の測定値に基づいた数か月分の月平均の統計値が報告されているのみで、詳しい報告例が見られない。文献(2)では、データに欠測値が多く、フライトレベルも運航票との照合を行っただけで、二次監視レーダ(SSR)で確認されてはいなかった。このため、資料としては満足できるものではなかった。

そこで、文献(2)を補完するため、NAMS (Navigation Accuracy Measurement System)⁽³⁾と呼ばれる測高レーダで取得した航空機の幾何学的高度とSSRの気圧高度情報に基づき、フライトレベルの幾何学的高度の通年変化を調べてみた。今回はまず、季節変動を解析し三角関数モデルによる近似を試みた。さらに、解析結果をレーウィンゾンデ(Rawinsonde)による観測⁽⁴⁾の統計値⁽⁵⁾と比較した。その結果、いくつかの特徴を明かにできたので報告する。

*正会員 運輸省電子航法研究所(〒181 三鷹市新川6-38-1)

本稿では、まずフライトレベルおよび使用データについて説明し、ついで解析の方法と結果を示す。最後に、レーウィンゾンデによる観測データとの比較・検討を行い、問題点などについて述べる。

2. フライトレベル

2.1 ICAO 標準大気

フライトレベルは ICAO の標準大気に基づいて、航空機が飛行する大気の気圧を高度に換算した値である。この標準大気は海拔 0 [m] で気温が 15 [°C]、気圧が 1013.25 [mb] (または [hPa]) で、気温減率 θ_0 ($=0.0065$ [°C/m]) で標高 11 [km] まで減少し、それ以上の高度では 20 [km] まで -56.5 [°C] である。このとき、気圧 P [mb] と高度 Z [m] との関係は次式で与えられる。

$$Z = (T_0/\theta_0) \{1 - (P/P_0)^k\} \quad Z \leq 11 \text{ [km]} \quad (1)$$

$$Z = H^* + (RT^*/g) \ln (P^*/P) \quad 11 \text{ [km]} \leq Z \leq 20 \text{ [km]} \quad (2)$$

ただし、

$P_0 = 1013.25$ [mb]	平均海面上の気圧
$T_0 = 228.16$ [K]	平均海面上の気温 (=15°C)
$g = 9.80655$ [m/s ²]	重力加速度
$R = 287.04$ [m ² /s ² K]	大気の気体定数
$k = R\theta_0/g = 1/5.2561$	
$H^* = 11$ [km]	対流圏と成層圏の境界の高度
$T^* = -56.5$ [°C]	境界における気温
$P^* = P_0 (1 - \theta_0 H^*/T_0)^{1/k}$	境界における気圧

である。(1)式または(2)式により気圧 P を高度 Z に換算した値がフライトレベル (FL) である。図 1 に ICAO 標準大気の気温および気圧とフライトレベルとの関係を示す。

2.2 航空機が使用する気圧高度

航空機が管制機関から飛行を許可される高度は、通常、フライトレベル値 FL で指定される。航空機の気圧高度計は気圧 P を測定して高度 Z を求めるものである。航空機は(1)式または(2)式で $Z = FL$ となる気圧 P の等気圧面上を飛行しようとする。このため、飛行中の実大気が標準大気と異なる場合には、実高度は(1)、(2)式の関係に従わないため、気圧 P の等気圧面の幾何学的高度 H_{FL} はフライトレベル値 FL と一致しない。

実際の飛行では、地表の物標との相対距離が問題となる場合もあるが、高度計の高度計規正値を設定することにより対処している。これにより、滑走路上の標高を指示させたり (QNH セットアップ)、標準大気に基づく高度を指示 (QNE セットアップ) させることができる。

フライトレベルは QNE セットアップをした場合の高度に相当し、わが国では 14,000ft 以上の高度を飛行するとき使用されることになっている。フライトレベルは 29,000ft のように ft 単位で表すが、通常は 100ft を単位とした 3 桁の数字で FL290 と表す。

3. 使用データと測定原理

3.1 NAMS による測高データ

電子航法研究所では 1983 年から 1985 年にかけて、航空機の高度維持誤差の分布の調査⁽⁶⁾を行った。

図 1 ICAO 標準大気の特徴

これには NAMS と呼ぶ測高レーダを幹線航空路の直下 (和歌山県潮岬) に設置し、上空通過機の幾何学的高度を測定した。

この NAMS は図 2 に示すように、アンテナからの幾何学的高度に加えて、二次監視レーダ (SSR) により航空機の識別コード (モード A) と機上の気圧高度計による高度の観測値 (モード C) を取得できる。また、気象データ処理機能⁽⁷⁾も備えており、設置場所における気温と気圧を測定できる。

NAMS により 1983 年 11 月から 1985 年 2 月までに取得した約 1 万 8 千機分のデータを解析した。このデータは、原則として月～土曜日の午前 8 時から午後 5 時までの間に取られた。

3.2 測定原理

図 3 に測高の幾何学的関係を示す。いま、フライトレベル FL (に対応する等気圧面) の幾何学的高度 H_{FL} は次式で表せる。

$$H_{FL} = h_m + h_a + e_h + e_m \quad (3)$$

ただし、

- h_m : アンテナから航空機までの高さの測定値
- h_a : アンテナの海拔高 (83.1m=272.6ft)
- e_h : 航空機の高高度維持誤差
- e_m : レーダによる測高誤差
- H : 航空機の幾何学的高度の測定値
($= h_m + h_a$)

ここで、高度維持誤差は航空機が飛行を承認されたフライトレベル (以後、承認 FL と呼ぶ) の幾何学的高度と実際に飛行した高度の差 ($e_h = H_{FL} - (H + e_m)$) である。これは、気圧高度計の誤差と航空機の飛行技術誤差からなる。ここで、飛行技術誤差とは気圧高度計の指示値に基づき航空機を飛行させようとした高度と実際に飛行した高度の差のことである。

NAMS では SSR モード C により、100ft を最小量子化単位とした気圧高度計の指示値を求めており、この指示値と承認 FL が一致したデータのみを解析対象とした。このため、高度維持誤差のうち飛行技術誤差は 100ft 以内に抑えられている。

また、NAMS の測高誤差 e_m は約 100ft (3σ) 以下⁽⁸⁾である。わが国およびユーロコントロール⁽⁹⁾における観測結果⁽⁶⁾では、 $e_h + e_m$ の値は標準偏差で 80ft 以下である。したがって、この誤差成分は 80ft (1σ) よりも小さいはずである。本論文では、これらの誤差成分を無視し、 $H_{FL} \approx H$ として解析する。

4. 解析方法と結果

4.1 各フライトレベル毎の統計

SSR で取得した気圧高度計の指示値が承認フライトレベルの値 FL [ft] に一致した航空機の幾何学的高度の測定値 H [ft] を用いて、その差 $H-FL$ の分布を調べた。表 1 には各フライトレベル毎に $H-FL$ の分布の統計値を示した。また、図 4 に $H-FL$ の統計値をプロットした。各フライトレベルとも、 $H-FL$ の最大値と最小値では約 3,000ft から 4,000ft の違いがあ。また、 $FL270$ から $FL410$ までの範囲では $H-FL$ がほぼ高度に比例して増大している。なお、図中の S. D. は標準偏差を表す。

図2 測高システム (NAMS) の構成

図3 フライトレベルの測高の概念

表1 海拔実高度 ($H=h_a+h_m$) とフライトレベルの差の統計値
 $h_a=272.6\text{ft}$ (83.1m), (1983年11月~1985年2月)

FL	標本数	最大 (ft)	最小 (ft)	平均 (ft)	標準偏差 (ft)	歪度	尖度
270	590	1798	-1192	607.6	776.7	-0.310	1.85
280	892	1872	-1234	445.6	808.3	0.046	1.76
290	827	1929	-1218	504.5	827.5	-0.040	1.78
310	1326	2048	-1306	583.8	844.8	-0.060	1.86
330	1434	2268	-1149	591.9	904.5	0.133	1.73
350	1473	2420	-1340	857.9	913.0	-0.184	1.83
370	1572	2612	-1092	845.3	889.3	0.019	1.88
390	670	2690	-953	1141.2	865.5	-0.315	2.04
410	181	2662	-820	1185.1	810.1	-0.367	2.31

4.2 季節変動の考察

図5はFL330 (33,000ft) についての H-FL の分布の例である。横軸には時間 t を、縦軸には H-FL の値を示した。図中の□印は月毎の平均値である。時刻 t の原点は1983年11月1日の0時を0とした。図からわかるように夏には H-FL は最大で正の値をとり冬には負の値をとる。大まかな傾向としては1年周期で変動しているように見える。

図6と図7に、各々、NAMSの測定場所に於ける気温および気圧の時系列分布を示す。図5と比較するとわかるように、H-FLと気温の相関はかなり強いが、気圧との相関は殆どみられない。

以上の結果はFL270からFL410の他のフライトレベルについても同様である。図8にFLと月で分類した H-FL の季節変動の様子を示す。プロットした点は平均値で、曲線は平滑化したものである。

4.3 季節変動分の抽出

図5の分布は季節変動の傾向を三角関数でモデル化できることを示唆している。そこで、 t をデータ取得時刻として次式をあてはめることを考える。

$$f(t) = C_1 \sin \{C_2(t - C_3)\} + C_4 \quad (4)$$

ただし、 C_j ($j=1, 2, 3, 4$) はモデルパラメータで定数である。このとき、航空機の幾何学的高度の測定値を H_i 、データ取得時刻を t_i 、 ε_i を残差、 N をデータ数として

$$H_i - FL = f(t_i) - \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

図4 各フライトレベルにおける H-FL の変化

図5 FL330 における H-FL の季節変化

図6 測定地点の気温の季節変化

図7 測定地点の気圧の季節変化

を考え、この残差二乗和を最小化するようにモデルパラメータ C_j を定めた。計算手順としては、まず $f(t)$ を C_j の近似値 C_j^0 のまわりで Taylor 展開して線形化した。ついで、これに線形最小二乗法を適用した[付録1]。この計算プログラムは BASIC で作成し、パソコン上で走らせた。

図9-(a)にFL330の場合の(4)式によるあてはめ結果を示す。図9-(b)には残差 $H_i - FL - f(t)$ の分布を示す。この(4)式のモデルの残差 ε_i の標準偏差は298.4 [ft] である。よって、大体の傾向は $C_1=1,163$ [ft], $C_2=0.0165$ [rad/日], $C_3=187.0$ [日], $C_4=802.2$ [ft] の三角関数で記述できる。ここで、周期 τ は

$$\tau = 2\pi / C_2 = 381 \text{ [日]} \approx 1.04 \text{ [年]}$$

となる。当然ながら周期が約1年で、振幅は1,163 [ft] の変動となっている。 C_3 の値は、時期的には5月の初旬に相当する。残差にもまだ複雑な周期の変動が含まれているが、取得間隔が一定でなく欠測値もあり、この解析は容易でないのここととめる。

短期的変動をみるため図10に50日分の H-FL の変化の一例をプロットした。これは測定データを直線で結んだものである。これからは規則的な変化の傾向は読み取れない。

4.4 各 FL の三角関数モデルのパラメータ

表2には各フライトレベル毎に求めた H-FL の分布を近似するモデルパラメータの値を示した。いずれも残差の標準偏差は300ft 程度、周期 $\tau = 2\pi / C_2$ は約1年となっている。振幅 C_1 は FL350 までは高度とともに増加しているが、それ以上では減少の傾向がみられる。

5. 解析結果の比較

5.1 気象観測データとの比較

気象庁ではレーウィンゾンデ⁽⁹⁾により、定点で一定時刻に高層気象の観測を行っている。NAMS による観測地に近い潮岬では当時、午前9時と21時の2回、気球を上げていた。観測量は気温、気圧、湿度で、方向探知器により風などの情報を得ている。高度については、幾何学的高度ではなく、気圧、気温等と測高公式を用いて間接的に求めたジオポテンシャルの形で与えている。

本稿では測高データによる H-FL の解析結果と比較するため、この統計データを用いる。利用したのは30年報⁽⁶⁾にある過去30年間の、21時に於ける月別の平均値である。昼間のデータは日射による誤差の影響が大きく、夜間のデータのほうが精度がよいといわれており、あえて21時のデータを採用した。

ここでは次式によりジオポテンシャル高度⁽¹⁰⁾ ϕ [m'] を海拔高度 H_g [m] に変換した。なお、m' はジオポテンシャル・メートルを表す。

図8 フライトレベル毎の H-FL の季節変化

図9 (a)モデルによる当てはめ結果 (上)
(b)その残差の変動特性 (下)

表2 H-FLの傾向を表す三角関数のパラメータの推定値と残差

FL	モデルパラメータ				残差 (ft)	
	C ₁ (ft)	C ₂ (rad/日)	C ₃ (日)	C ₄ (ft)	平均	標準偏差
270	1005	0.0160	182.0	570.1	-0.15	249.7
280	1045	0.0165	184.0	618.5	-0.00	276.1
290	1088	0.0163	183.5	616.6	-0.31	278.1
310	1135	0.0167	189.1	717.7	0.00	298.4
330	1163	0.0165	187.0	802.2	-1.62	298.4
350	1181	0.0164	185.0	863.3	-0.03	310.6
370	1174	0.0165	187.9	964.4	-0.00	322.6
390	1177	0.0162	185.1	1011.5	0.52	317.5
410	1146	0.0161	188.4	1045.1	-0.39	311.4

図10 短期的な変動特性の例

$$H_g = (g/g^*) \phi / \{1 - (g/g^*) (\phi/a)\} \quad (6)$$

ただし、

g^* : 潮岬における海面上の重力加速度 (=9.7973 [m/s²])

g : 重力加速度 (=9.80655 [m/s²])

a : 同地点に於ける地球の半径 (=6371.7 [km])

である。

5.2 気温分布

図11に潮岬上空の気温の高度分布の例を示す。使用データは過去30年間のデータの平均値である。8月と2月の21時に於ける観測データをプロットした。FLの値は(1)式または(2)式を用いて観測気圧 P から Z ($FL(P)$ と書く)を算出して求めた。気温データの標準偏差は2月で1.0~2.2度, 8月で0.5~0.8度程度である。実大気は必ずしも ICAO 標準大気と一致していないことがわかる。

5.3 H-FLの季節変動の分布

30年報のデータに基づき ϕ の観測値から(6)式で求めた H_g と P の観測値から(1)式で求めた $FL(P)$ を用いて、H-FLの推定値 ($=H_g - FL(P)$) を求めた。約34,000ft (FL340) に相当する $P=250$ [mb] の点と30,100ft (FL301) に相当する $P=300$ [mb] の点における、H-FLの推定値の月毎の変化を図12に示した。

併せて1984年(1~12月)のNAMSによるFL330におけるH-FLの分布を示した。大きい■印はその月毎の平均値で、各データの標本数は60~114, 標準偏差は124~390ft程度である。なお、30年報の推定高度にも60~210ft (1σ) 程度の変動があることを考慮すると、双方の結果はよく一致していると考えられる。

6. 考 察

6.1 NAMSデータと気象データの差異

レーウィンゾンデによる観測の統計データとNAMSデータによるH-FLの推定結果は傾向としてよく一致しているが、両者のデータは次の点で異なるものである。

(i) データの精度

レーダによる幾何学的高度 H で H_{FL} を推定する場合、航空機的高度維持誤差 e_h とレーダの測高誤差 e_m が推定誤差の要因となる。これに対し、気象データによる幾何学的高度を推定では、気温、気圧、湿度などの測定誤差、および高度の推定式の精度などが問題になる。

(ii) 観測可能時間

レーダでは航空機が上空を飛行すればデータが取得でき、フライトレベルの状態が推測できる。よって、数分から数時間間隔で観測が可能である。他方、レーウィンゾンデのデータは1日2回分しか利用できない。

6.2 問題点と今後の課題

本稿ではH-FLの季節変動の傾向を(4)式の三角関数でモデル化したが、これを用いれば300ft (1σ) 程度

図11 実際の大気気温分布との比較

図12 気象データから推定した H-FL との比較
 ($P=250\text{mb}$ は FL340 に, $P=300\text{mb}$ は FL301 に相当する。■は測定値)

の誤差で H-FL を推定できると思われる。従って、おおまかな近似で足りる場合は、幾何学的高度を FL と (4) 式のモデルによる計算値の和で見積ればよい。なお、(5) 式の残差については詳しい解析ができなかったが、今後、欠測値がありデータ取得間隔が一定でない場合のスペクトル解析の方法等について検討する必要があると考える。

7. むすび

和歌山県潮岬上空を通過した航空機について、約1年半におよぶ測高レーダによる幾何学的高度 (H) と二次監視レーダによる気圧高度情報の観測データに基づいて、フライトレベル (FL) の幾何学的高度の変化特性を調べた。その結果、明らかになったことは以下のとおりである。

- ① H-FL の値は夏に最大で冬に最小となる。高高度ほど変動の振幅が大きい。地表の気温と H-FL には正の相関がみられる。
- ② 季節変動の傾向は周期がほぼ1年の三角関数モデルで近似できる。この場合の残差の標準偏差は約 300 [ft] である。
- ③ H-FL の季節変化の傾向はレーウィンゾンデのデータを用いた解析結果とよく一致している。

今回用いたデータは日曜・祭日と一部の週に欠測値があり、データ解析上むずかしい点があった。このため、三角関数による回帰モデルの考察にとどめざるをえなかった。今後、Bayes 推定法など、これを克服するような解析方法について考察してみたい。

参 考 文 献

- (1) ICAO LEXICON, Vol.II-Definitions, ICAO Doc 9294, p. 99-100, 1985
- (2) 長岡 栄: "測高データを用いた航空機の気圧高度推定の一方法", 日本航海学会論文集, 68号, p. 113-121, 1982
- (3) 長岡 栄: "航法精度測定用レーダの高度推定精度の評価", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-B, No. 2, p. 259-266, 1985
- (4) 気象庁観測部高層課: "高層気象の自動化", 測候時報, 54, 5, p. 225-262, 1987
- (5) 「日本高層気象資料30年報1990年統計」, p. 119-130, 気象庁, 1991
- (6) ICAO Doc 9536, RGCSP/6, Vol. 1 and 2, Review of the General Concept of Separation Panel,

Montreal, Nov. , 1988

- (7) 長岡 栄, 吉岡栄治郎: “航法精度測定装置における気象データ処理”, 電子航法研究所報告, No. 42, p. 1-13, 1983
- (8) M. Cox, J. ten Have, D. Forrester: “European Studies to Investigate the Feasibility of Using 1000 ft Vertical Separation Minima above FL290—Part 1—”, Journal of Navigation, Vol. 44, No.2, p. 171-183, 1991
- (9) 小林寿太郎: 「気象をはかる」, p. 77-99, 日本規格協会, 1988
- (10) 正野重方: 「気象力学」, p. 3-22, 岩波全書246, 岩波書店, 1960

[付録1] モデルパラメータの決定方法

H-FL の測定値を Y_i , 時刻を t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) とする。このとき, 残差 ε_i は

$$\varepsilon_i = Y_i - f(t_i, \mathbf{C}) \quad (\text{a} - 1)$$

ここで

$$\mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3, C_4) \quad (\text{a} - 2)$$

$$f(t_i, \mathbf{C}) = C_1 \sin \{C_2 (t_i - C_3)\} + C_4 \quad (\text{a} - 3)$$

とおき, 残差平方和

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - f(t_i, \mathbf{C}))^2 \quad (\text{a} - 4)$$

を最小化するように係数 $\mathbf{C}$ を定める。(a-3) 式は非線形なので

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}^0 + \delta \mathbf{C} \quad (\text{a} - 5)$$

とおき, $\mathbf{C}$ の近似値 $\mathbf{C}^0$ の周りで Taylor 展開して次式のように線形化する。このとき,

$$f(t_i, \mathbf{C}) \doteq f(t_i, \mathbf{C}^0) + \sum_{j=1}^4 (\partial f / \partial C_j) * \delta C_j \quad (\text{a} - 6)$$

ここで, *印は $\mathbf{C} = \mathbf{C}^0$ を代入する操作を意味する。(a-4) 式を最小化する必要条件は, $j = 1, 2, 3, 4$ について

$$(\partial S / \partial C_j) = -2 \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial C_j) \{Y_i - f(t_i, \mathbf{C})\} = 0 \quad (\text{a} - 7)$$

である。ここで,

$$A_{ji} = (\partial f(t_i) / \partial C_j) \quad (\text{a} - 8)$$

とおくと, (a-7) 式の条件は (a-6) 式を用いて次のように書ける。

$$\sum_{i=1}^n A_{ji} \{Y_i - f(t_i, \mathbf{C}^0)\} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^4 (A_{ji} A_{ki}) \delta C_k = 0 \quad (\text{a} - 9)$$

この4元1次の連立方程式を解き, $\delta \mathbf{C}$ を求め $\mathbf{C}$ の推定値を求める。次に $\mathbf{C} \rightarrow \mathbf{C}^0$ とおいて同じ計算を $\mathbf{C}$ が十分収束するまで行う。

質 疑 応 答

萩原秀樹(東京商船大学): あるフライトレベルを飛行する航空機の幾何学的高度の変化は, 高層の等気圧面高度の変化とはほぼ一致していると思われるので, 幾何学的高度の変化を解析する際に, 高層天気図をご参考にされてはいかがでしょうか。

長岡 栄: コメントありがとうございます。おっしゃるとおりで等気圧面の高度がわかれば良いわけです。ラジオゾンデなどのデータが得られれば良いのですが, 我々のところでは手持ちのデータが有りません。そこで, 利用可能なデータで解析を行った訳です。