

UDC 629.73.05/.83-523:  
629.73.087

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-258

着陸用電波誘導システムの基本性能および  
多重化方式に関する一考察

真柳光美・堀川勇壮

1974年8月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. ま え が き	1
2. 基本システム	2
3. 解析上の誤差の定義	7
4. 基本システムの性能と最適配置の解析および検討	9
4.1 Rectangular System	9
4.2 Biangular System	12
4.3 Angle of Incidence System	15
4.4 I. L. A. S (Instrument Low Approach System)	16
4.5 P.A.R (Precision Approach Radar)	19
4.6 A.I.L.S (Advanced Integrated Landing System)	22
4.7 2 Ranges, 1 Angler System	24
4.8 3 Ranges System	27
5. 多重化システムの検討	30
5.1 多重化システムの基本的考察	30
5.2 7 Angles System (Rectangular System)	31
5.3 7 Angles System (Biangular System)	32
6. 実用化の検討	33
7. ま と め	34
参 考 文 献	34

# 着陸用電波誘導システムの基本性能および 多重化方式に関する一考察\*

真柳光美\*\*・堀川勇壮\*\*

## 1. まえがき

近年の急速な航空輸送の発展と共に、航空輸送の安全性および全天候性の確保がより重要になってきている。そのため、近年、航空機には自動着陸装置を搭載するものも出現し、近い将来、世界的に自動着陸時代が出現しそうである。

自動着陸をより安全、確実に実現するためには、機上の自動着陸装置の性能向上の努力も重要であるが、一方、地上の着陸誘導装置の性能および安全性（信頼性）もより重要である。現在、内外の主要空港には、ILS (Instrument Landing System, 計器着陸システム) が設置され、運用されている。しかし、本格的に自動着陸時代を迎えると、性能および信頼性の面で、これらのものは必ずしも十分なのではなく、性能および信頼性の面で、より優れた着陸援助装置の出現が望まれている。

本研究は、自動着陸の研究の一環として行なったもので、着陸誘導システムの基本システムを根本的に洗いなおし、さらに、より信頼性の高い多重化方式について検討を行なったものである。

検討としては、着陸用電波誘導方式として非常に多くの方式があるが、(1)これらの各方式を分類整理し、(2)現在可能な技術から得られる性能、特に固有誤差をもとにして、考えられる各種方式の性能および最適配置について解析を行なうものである。次に、(3)上記の解析をもとにして、実現可能な多重化方式を検討し、信頼性および経済性の高い多重化方式の概念を誘導することである。検討の結果、同一の方式をそのまま多重化すると、2重系では2倍、3重系では3倍の装置が必要となるが、この新しい概念では3重系で、8分の7倍の装置があればよく、非常に経済的なシステムとなる。欠点としては、同一のものの多重化方式と比べて、やゝ複雑な航法計算機（機上）を必要とするが、将来の航空機は機上用計算機を標準装備することが予想されるので、この点の問題は少ないと考えられる。

また、近年、航空交通管制の面から、機上と地上との間のデータリンクが考えられている。この場合、地上の計算機を用いて、このような計算を行ない、機上側にデータリンクを介して送ってやれば、航空交通システム全体としてみた場合、経済性および性能の面で優れたものが容易に得られる可能性がある。

したがって、このようなシステムを実用化するためには、電子工学的な研究も必要とするが、関連部門として、航空交通管制、データリンク、およびエリア・ナビゲーション等の技術との関連も十分検討する必要がある。

以下、着陸用電波誘導システムの基本システムの分類と計算式、解析上の誤差の定義、基本システムの性能と最適配置の解析および多重化システムの検討等について述べる。

## 記号

- X : 地上座標系における滑走路に沿った成分
- Y : 地上座標系における滑走路に直角な成分
- b : 地上座標系におけるXとYとなす面に直角な成分（高度）
- $X_0$  : 測定基点の地上座標系X成分の値
- $Y_0$  : 測定基点の地上座標系Y成分の値
- R : 測定基点から測定物体までの距離測定値
- $\alpha$  : 測定基点から測定物体に対する仰角測定値
- $\beta$  : 測定基点から測定物体に対する方位角測定値
- l : 測定基点から測定物体までの距離値
- $\eta$  : 測定物体から2測定基点に対する狭角値

## 添字

- $\Delta$  : 誤差量（増分） 例  $\Delta X$
- : テイラー展開する点での真値（定数值） 例,  $\bar{X}$
- T : 真値 例,  $X_T$
- O : 測定基点Oの配置座標 例,  $X_0$
- 01~03 : 測定基点01~03の配置座標 例,  $X_{01} \sim X_{03}$
- 0 $\alpha$ ~0 $\beta$  : 測定基点の $\alpha \sim \beta$ に関する配置座標 例,  $X_{0\alpha} \sim X_{0\beta}$
- C : Constant（一定値） 例,  $\Delta R_c$

\* 昭和47年5月21日受付

\*\* 計測部

P : Proportion (比例率) 例,  $\Delta R_p$   
 1~6: 情報の種類, ただし, 1 については情報の固定値を表わす場合もある。

方式名が必ずしも一般的に述べられている方式と一致しない場合もある。

2. 基本的システムの分類と計算式

航空機の 3 次元位置情報は最小限 3 つの基本的情報源が必要である。これらの基本的情報源としては測定距離および測定角度の 2 つが考えられる。距離測定方式は地上レーダなどによる地上測定方式と, トランスポンダなどを用いた機上測定方式があるが, この検討ではどちらの方式とも決めないで, 一般化して取扱うことにする。角度測定方式についてもトラッキングレーダのように測定物体をトラッキングしながら変位角度を得るものと, ある定められた回転方向のみにビームをスキャンさせしかもそのビームが角度変化に従ってパルス間の時間を変えて測定角度の情報源を与えるものなどがあるが, 同様にこの検討ではどちらの方式とも決めないで行う。

角度情報と距離情報とを用いた基本誘導システムは諸方式として, 各種の組合せを考慮ことができ, これを Table 1 に示す。さらにこれらの組合せられたシステムは地上測定基点の配置とその機器の可動自由度によってつぎのように分類できる。ただし, 分類に当って, 現在実用化および研究されている方式, 3)~6) 18)~23) それらを発展的に考慮した類似な方式, さらに新たに試みた別な方式等を一括して行なったので,

		角度情報源の数			
		0	1	2	3
距離情報源の数	0				3 Angles System ① Rectangular System ② Biangular System (Flare Scan) ③ Angle of Incidence
	1			2 Angles and 1 Range System ① I.L.A.S ② P.A.R ③ A.I.L.S	
	2		2 Ranges and 1 Angle System		
	3	3 Ranges System			

Table 1 基本誘導システムの諸方式

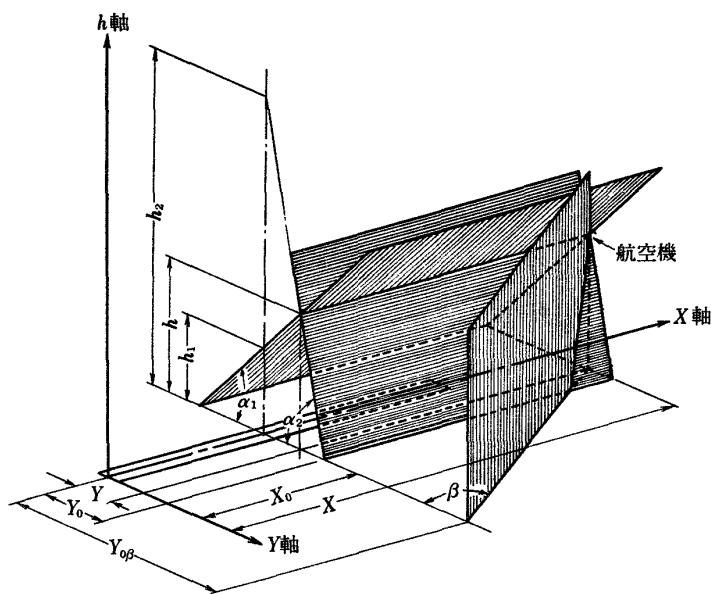


Fig. 1 Rectangular System

2.1 3 Angles System

本システムは次のような3種の方式が考えられる。

(1) Rectangular System<sup>1)</sup>,<sup>18)</sup>

本システムは Fig.1 のように滑走路の両側に地上測定基点を設け、滑走路に沿った方向を回転軸として垂直方向にビームをスキャンさせて測定角度  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  の情報源を用いて、滑走路中心からの偏差  $Y$  と高度  $h$  の情報を得る。さらに滑走路に沿った距離  $X$  情報は別に設けた地上測定基点でビームを水平にスキャンさせて得た測定角度  $\beta$  とすでに得られている  $Y$  情報を用いて得られる。原理が類似なものにリーダーケーブル方式がある。これらの計算式は Fig.1 を用いてつぎのように得られる。

$$h_1 : (h - h_1) = Y_0 : Y = h_2 : (h_2 - h) \quad (2-1)$$

$$h_1 h_2 - h_1 h - h_2 h + h_1 h_2 = 0 \quad (2-2)$$

$$\therefore h = 2 h_1 h_2 / (h_1 + h_2) \quad (2-3)$$

$$\therefore h = 2 Y_0 \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) \quad (2-4)$$

$$Y = (h - Y_0 \tan \alpha_1) / \tan \alpha_1 \quad (2-5)$$

$$\therefore Y = 2 Y_0 \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) - Y_0 \quad (2-6)$$

$$\therefore X = X_0 + (Y_{0\beta} - Y) \tan \beta \quad (2-7)$$

(2) Biangular System (Flarescan System)<sup>1), 4)</sup>

本システムは Fig.2 のように滑走路に沿って地上測定基点を2つ距離  $X_{0a}$  離して設け、滑走路に直角な方向を軸として垂直方向にビームをスキャンさせて測定

角度  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  の情報源を得る。その情報源を用いて高度  $h$  と滑走路に沿った距離  $X$  を求める。滑走路中心からの偏差  $Y$  は滑走路先端に別に設けた地上測定基点でビームを水平にスキャンさせて得た測定角度  $\beta$  とすでに得ている  $X$  情報を用いて求められる。

これらの計算式は Fig.2 からつぎのように得られる。

$$l / \sin \alpha_2 = X_{0a} / \sin \eta \quad (2-8)$$

$$\eta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (2-9)$$

$$\therefore h = l \sin \alpha_1 \quad (2-10)$$

$$= X_{0a} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 / \sin (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2-11)$$

$$= X_{0a} \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (2-12)$$

$$X = X_{01} + l \cos \alpha_1 \quad (2-13)$$

$$= X_{01} + X_{0a} \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 / \sin (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2-14)$$

$$= X_{01} + X_{0a} \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (2-15)$$

$$Y = X \tan \beta \quad (2-16)$$

(3) Angle of Incidence System

本システムは Fig.3 のように地上測定基点を3つ設ける。各測定基点の装置は測定対象がビームの中心にくるようにトラッキングしながら垂直スキャンして迎角を測定する。すなわち垂直にスキャンするビームが測定対象の方向と直交する軸まわりで回転するように、垂直軸まわりに水平にも回転させる。したがって、本システムの測角には2自由度の可動装置を必要とする。各測定基点より得られた情報源である迎角を用い

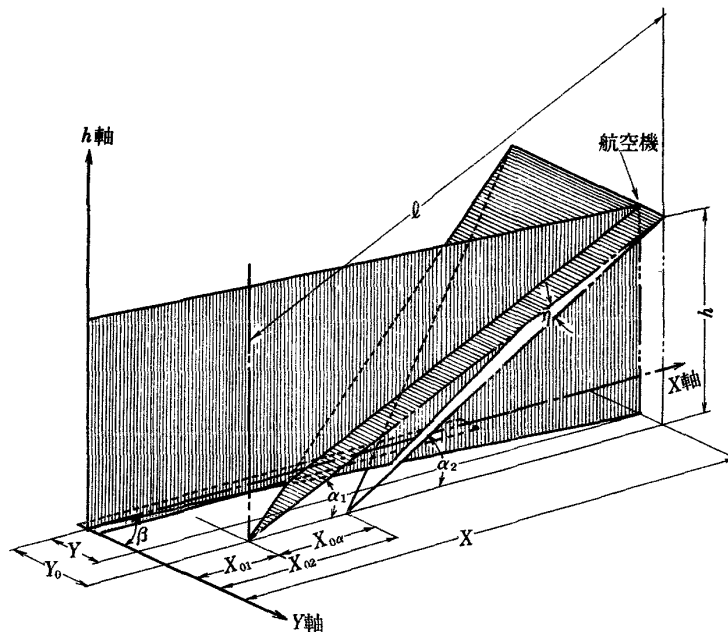


Fig. 2 Biangular System

て3次元位置情報を得る式は Fig. 3からつぎのように得られる。

$$h = l_1 \tan \alpha_1 = l_2 \sin \alpha_2 = l_3 \sin \alpha_3 \quad (2-17)$$

$$l_1^2 = (X - X_0)^2 + (Y + Y_0)^2 + h^2 \quad (2-18)$$

$$l_2^2 = (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + h^2 \quad (2-19)$$

$$l_3^2 = X^2 + (Y - Y_0)^2 + h^2 \quad (2-20)$$

これらの式から測定距離仮定値  $l$  を消却すると次式を得る。

$$h^2 \cot^2 \alpha_1 = (X - X_0)^2 + (Y + Y_0)^2 \quad (2-21)$$

$$h^2 \cot^2 \alpha_2 = (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 \quad (2-22)$$

$$h^2 \cot^2 \alpha_3 = X^2 + (Y - Y_0)^2 \quad (2-23)$$

$$\therefore Y = h^2 (\cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2) / 4 Y_0 \quad (2-24)$$

$$\therefore X = [h^2 (\cot^2 \alpha_3 - \cot^2 \alpha_2) + X_0^2] / 2 X_0 \quad (2-25)$$

$$h^2 \cot^2 \alpha_2 = [h^2 (\cot^2 \alpha_3 - \cot^2 \alpha_2) - X_0^2]^2 / 4 X_0^2 + [h^2 \cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2 - 4 Y_0^2]^2 / 16 Y_0^2 \quad (2-26)$$

$$h^4 [4 Y_0^2 (\cot^2 \alpha_3 - \cot^2 \alpha_2)^2 + X_0^2 (\cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2)^2] - h^2 [8 X_0^2 Y_0^2 (\cot^2 \alpha_3 + \cot^2 \alpha_1)] + 4 X_0^2 Y_0^2 (X_0^2 + 4 Y_0^2) = 0 \quad (2-27)$$

$$\therefore h^2 = [4 X_0^2 Y_0^2 (\cot^2 \alpha_3 + \cot^2 \alpha_1) \pm \sqrt{D}] / [4 Y_0^2 (\cot^2 \alpha_3 - \cot^2 \alpha_2)^2 + X_0^2 (\cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2)^2] \quad (2-28)$$

$$\therefore h = \sqrt{h^2} \quad (2-29)$$

$$\text{ただし, } D = 16 [X_0^4 Y_0^4 (\cot^2 \alpha_3 + \cot^2 \alpha_1)^2 - 4 X_0^2 Y_0^2 (X_0^2 + 4 Y_0^2) [4 Y_0^2 (\cot^2 \alpha_3 - \cot^2 \alpha_2)^2 + X_0^2 (\cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2)^2] + X_0^2 (\cot^2 \alpha_1 - \cot^2 \alpha_2)^2] \quad (2-30)$$

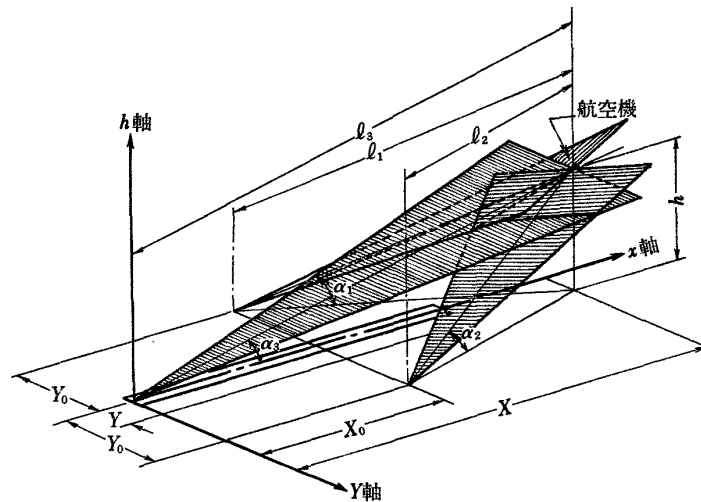


Fig. 3 Angle of Incidence System

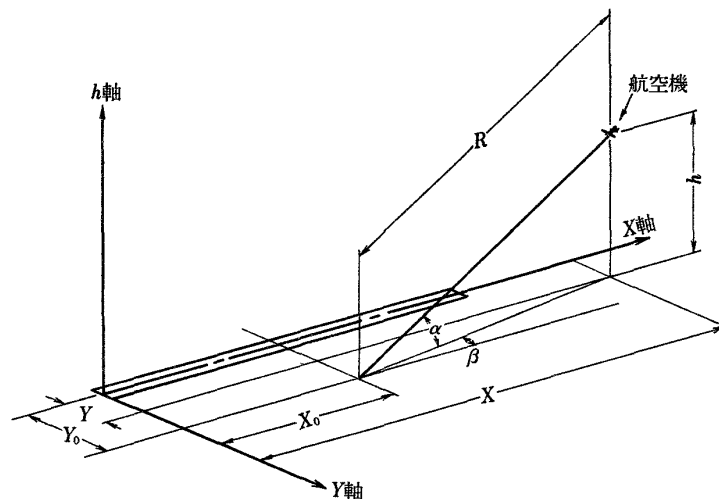


Fig. 4 Instrument Low Approach System

このように本システムは測定対象の3次元位置情報を得るのにかなり複雑な計算を必要とする。しかし(2-28)式の平方根を求めれば(2-29)式の高度  $h$  を得られる。さらに(2-28)式を(2-24)式および(2-25)式に代入すれば縦および横の情報  $X, Y$  を得ることができる。

## 2.2 2 Angles and 1 Range System

本システムは次のような3種の方式が考えられる。

### (1) I. L. A. S (Instrument Low Approach System) 8)

本システムは一般にトラッキングレーダともいわれ、Fig. 4のように滑走路の片側に地上測定基点を一つ設け、測定対象をトラッキングしながら基点から測定対象までの測定距離  $R$  と基点から測定対象に対する迎角  $\alpha$  と方位角  $\beta$  の情報源を得る。これらの情報源を用いて測定対象の3次元位置情報は Fig. 4 から次のように得られる。

$$h = R \sin \alpha \quad (2-31)$$

$$Y = Y_0 - R \cos \alpha \sin \beta \quad (2-32)$$

$$X = X_0 + R \cos \alpha \cos \beta \quad (2-33)$$

このように本システムは簡単な計算式によって測定対象の3次元位置情報を得ることが出来る。しかし、トラッキングさせることは測定装置の可動部を2自由度以上にさせることであり、装置を複雑にする欠点がある。

### (2) P.A.R (Precision Approach Radar) 9)

本システムは前記の I L A S と同様に滑走路の片側

に地上測定基点を一つ設けて、類似の情報源を得る点で I L A S とまったく同じである。ただ異なる点は本システムが測定対象をトラッキングしないでビームをスキャンさせることである。このようにスキャンさせる方法としては、Fig. 5 のように滑走路に対して直交する軸まわりで垂直にスキャンさせるのと垂直軸まわりで水平にスキャンさせるのを交互に行なわせるのが一般的である。このように本システムは装置の可動部として I L A S の2自由度に対して1自由度で1情報源を得ることができる。測定対象の3次元位置情報は Fig. 5 から次のように得られる。

$$R^2 = X_1^2 + Y_1^2 + h_1^2 = l_1^2 + Y_1^2 = l_2^2 + h_1^2 \quad (2-34)$$

$$X_1 = l_1 \cos \alpha = l_2 \cos \beta \quad (2-35)$$

$$Y_1 = l_2 \sin \beta = l_1 \cos \alpha \tan \beta \quad (2-36)$$

$$h_1 = l_1 \sin \alpha = l_2 \cos \beta \tan \alpha \quad (2-37)$$

ここで、 $l$  を消却するため  $l$  について求めると

$$l_1^2 = R^2 / (1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \beta) \quad (2-38)$$

$$l_2^2 = R^2 / (1 + \cos^2 \beta \tan^2 \alpha) \quad (2-39)$$

であり、これらを  $X_1, Y_1, h_1$  の式に代入し、 $X, Y, h$  を求めると

$$X = X_0 + R \cos \alpha / \sqrt{1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \beta} \quad (2-40)$$

$$Y = Y_0 - R \sin \beta / \sqrt{1 + \cos^2 \beta \tan^2 \alpha} \quad (2-41)$$

$$h = R \sin \alpha / \sqrt{1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \beta} \quad (2-42)$$

となる。このように本システムは I L A S に比較して計算式は複雑になる。しかし測定装置の可動部は比較的簡単になる利点がある。

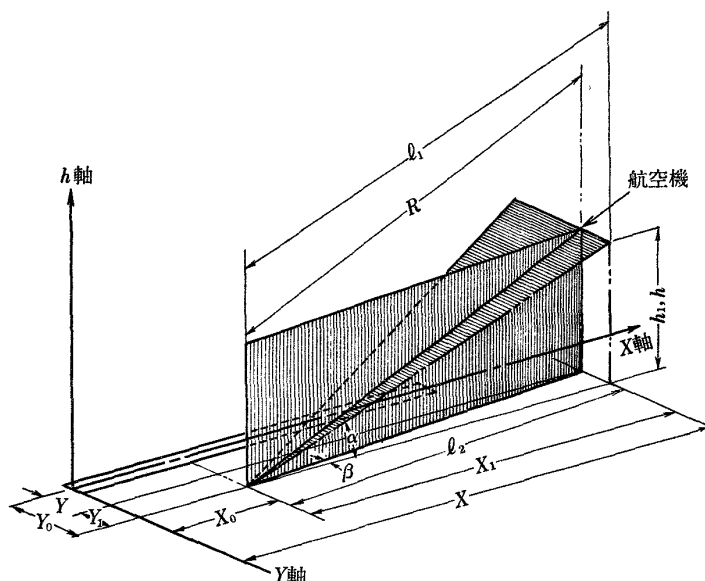


Fig. 5 Precision Approach Radar System

(3) A.I.L.S (Advanced Integrated Landing System)<sup>2), 10), 11)</sup>

本システムは Fig. 6 のように滑走路先端と滑走路片側に地上測定基点を設ける。滑走路先端の基点では測定対象までの距離  $R$  と方位角  $\beta$  の情報源を得る。滑走路わきの基点では滑走路に直交する軸まわりで、ビームを垂直にスキャンさせ迎角  $\alpha$  の情報源を得る。このように本システムの測定装置の可動自由度は 1 情報源につき 1 自由度である。なお、本システムと原理的に同じであるシステムに REGAL (Range and Elevation Guidance System)<sup>9)</sup> がある。本システムの 3 次元位置情報は Fig. 6 から次のように得られる。

$$R \sin \eta = X_0 \sin \alpha \quad (2-43)$$

$$\therefore \eta = \sin^{-1}(X_0 \sin \alpha / R) \quad (2-44)$$

$$h = R \sin(\alpha - \eta) \quad (2-45)$$

$$X = R \cos(\alpha - \eta) \quad (2-46)$$

$$Y = R \cos(\alpha - \eta) \tan \beta \quad (2-47)$$

2.3 2 Ranges and 1 Angle System<sup>12)</sup>

本システムは距離測定基点を滑走路に直交して配置するのと滑走路に沿って配置する 2 種の方式が考えられるが、ここでは直交するシステムのみを扱った。

本システムは Fig. 7 のように滑走路先端にその中心線より距離  $Y_0$  離して地上測定基点を 2 つ設け、測定対象までの距離  $R$  の情報源を得る。別の地上測定基点を滑走路片側に設け、滑走路に直交する軸まわりでビームを垂直にスキャンさせ、基点から測定対象に対する

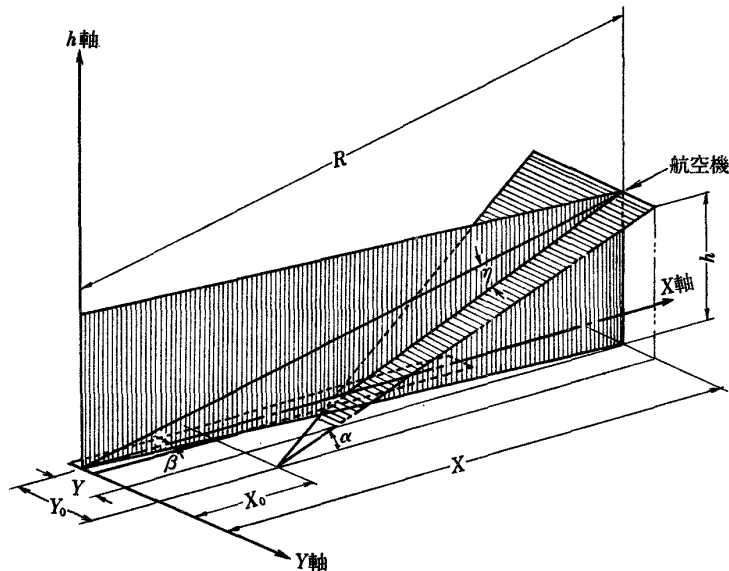


Fig. 6 Advanced Integrated Landing System

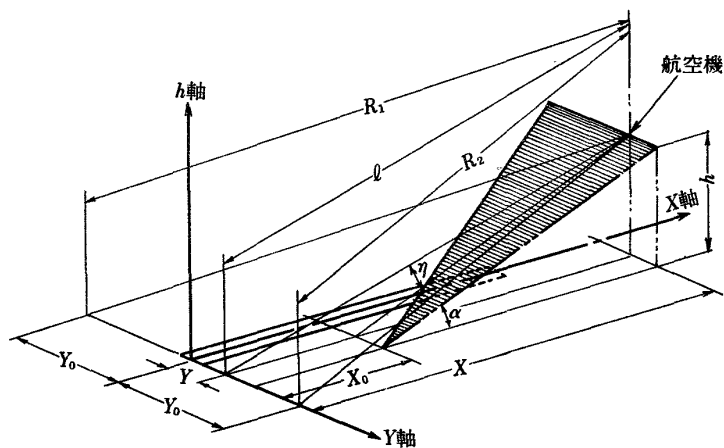


Fig. 7 2 Ranges, 1 Angular System



迎角  $\alpha$  の情報源を得る。このように本システムの測定装置の可動自由度は1情報源につき1自由度で可能である。本システムの3次元位置情報を得る式は Fig. 7 から次のようになる。

$$R_1^2 = l^2 + (Y_0 \pm Y)^2 \quad (2-48)$$

$$R_2^2 = l^2 + (Y_0 \mp Y)^2 \quad (2-49)$$

$$X = l \cos(\alpha - \eta) \quad (2-50)$$

$$h = l \sin(\alpha - \eta) \quad (2-51)$$

$$l \sin \eta = X_0 \sin \alpha \quad (2-52)$$

ここで、推定値  $l$ ,  $\eta$  を消却するため  $l$ ,  $\eta$  について求めると

$$l = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2)/2 - Y_0^2 - Y^2} \quad (2-53)$$

$$\eta = \sin^{-1}(X_0 \sin \alpha / l) \quad (2-54)$$

となり、これらの推定値を前の式に代入すると次式が得られる。

$$Y = (R_1^2 - R_2^2) / 4 Y_0 \quad (2-55)$$

$$X = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} \cdot \cos[\alpha - \sin^{-1}(X_0 \sin \alpha / \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2})] \quad (2-56)$$

$$h = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} \cdot \sin[\alpha - \sin^{-1}(X_0 \sin \alpha / \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2})] \quad (2-57)$$

### 2.4 3 Ranges System<sup>13)</sup>

本システムは地上測定基点の配置について各種の方法が考えられるが最も良いと思われる次のようなシステムについてのみ試みた。

本システムは Fig. 8 のように地上測定基点を滑走路中心線上の先端に1つと滑走路の両側に2つ設ける。これらの3つの地上測定基点から測定対象までの距離  $R$  の情報源を用いて測定対象の3次元位置情報を求める。測定対象の3次元位置情報を求める式は Fig. 8 か

ら次のように得られる。

$$R_1^2 = X^2 + Y^2 + h^2 \quad (2-58)$$

$$R_2^2 = (X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + h^2 \quad (2-59)$$

$$R_3^2 = (X - X_0)^2 + (Y + Y_0)^2 + h^2 \quad (2-60)$$

これらの式から各情報  $X$ ,  $Y$ ,  $h$  を求めると次式を得る。

$$Y = (R_3^2 - R_2^2) / 4 Y_0 \quad (2-61)$$

$$X = [(R_1^2 - (R_2^2 + R_3^2) / 2 + X_0^2 + Y_0^2) / 2 X_0] \quad (2-62)$$

$$h = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2} \quad (2-63)$$

これら3次元の各情報のうち(2-63)式に見られるように高度  $h$  は正の値であるから右辺の平方根は正でないとは虚数になってしまい解が得られない。このことは高度  $h$  が小さな値になるに従って、各情報  $X$ ,  $Y$  および情報源  $R_1$  の値に含まれる誤差の影響が大きくなり、解を得るための条件がさらに悪くなり、ますます解を得ることが困難になることが推測できる。

### 3. 解析上の誤差の定義

前節で述べた基本システムについて、システムの固有の誤差による測定誤差とシステムの最適配置についての検討を、以下に述べる仮定のもとに行なうことにする。

#### 3.1 誤差の定義

各地上測定基点より得られる情報源は次に上げるような因子<sup>1)</sup>,<sup>15)~17)</sup>によって誤差が含まれるものと考えられる。

- (1) 情報源の分解能
- (2) 大気によるビームの曲がりから生ずるもの。
- (3) 振動、温度変化、空気摩擦等によってスキャンしているビームアンテナから生ずるもの。
- (4) サイドロブの地形反射から生ずるもの(サイド

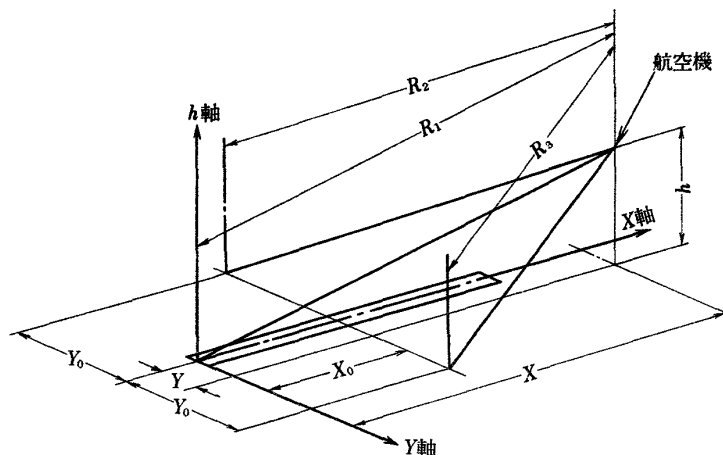


Fig. 8 3 Ranges System

ロブの大きさと地形反射係数に比例する)。これらの因子から生じる誤差は静的誤差 (static error) と動的誤差 (dynamic error) に分けて考えることもできる。しかし、本報告においては一般に述べられている精度 1), 3), 8), 9) を参考にして、次のように情報源誤差を仮定した。

i) 測定距離誤差 = 固定誤差 + 比例誤差

ii) 測定角度誤差 = 固定誤差

### 3.2 Flat Beam Scanning 誤差について<sup>1)</sup>

前章で各種方式について述べたが、その内多くの方は Flat Beam Scanning によって情報源を得ている。それゆえ、ここでは Flat Beam Scanning 誤差について検討する。この Flat Beam Scanning はある軸まわりにスキャンするので、その軸に対して直角な方向で情報源が得られているなら問題はない。しかし、一般にそ

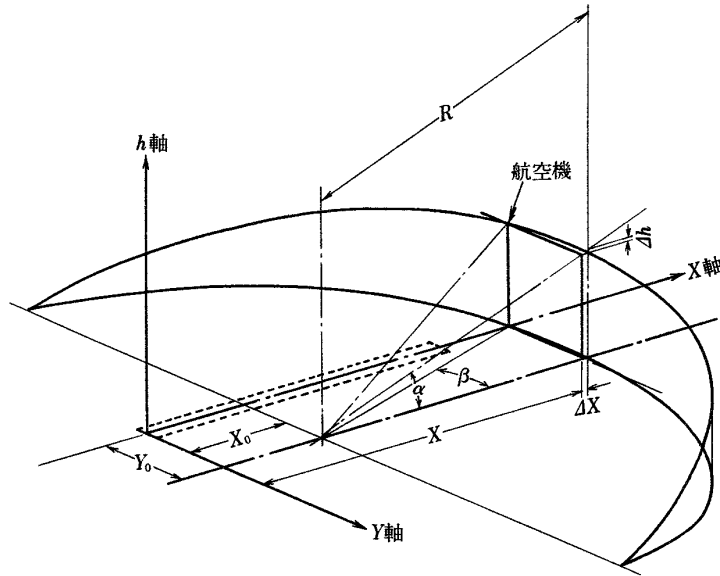


Fig. 9 Flat Beam scanning による誤差

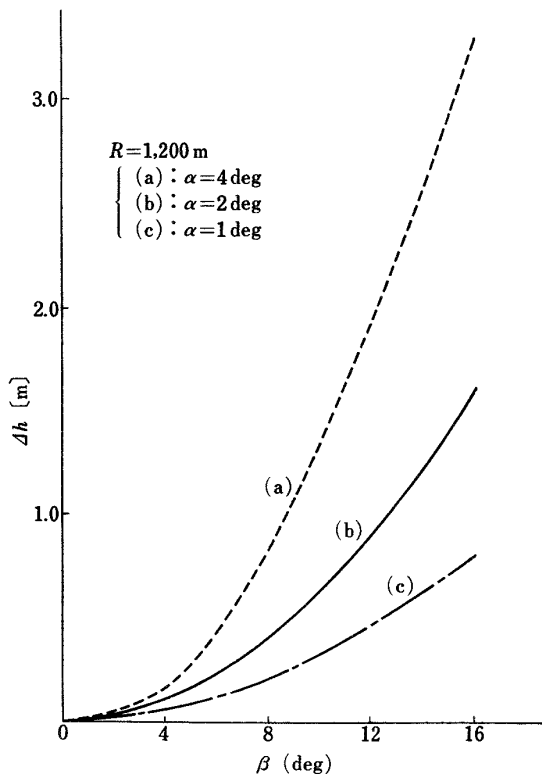


Fig. 10 方位角 (beta) による誤差 (delta h)

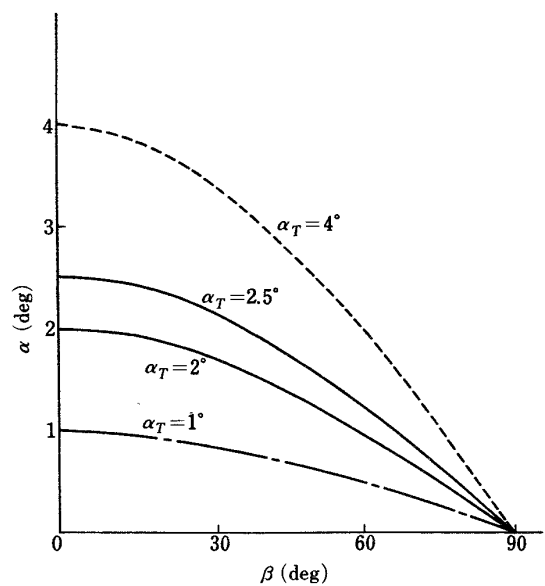


Fig. 11 方位角 (beta) と迎角 (alpha) の関係

の軸上のある点から放射状に電波を発して情報源を得るため、その軸に対する直角度からずれた角度 $\beta$ による誤差を生ずる。これを Flat Beam Scanning による誤差と云う。この誤差の関係式は Fig. 9 から次のように得られる。ただし、ここでは高度  $h$  についてのみ述べる。

$$\text{実測高度: } h = R \sin \alpha \quad (3-1)$$

$$\text{真の高度: } h = R \sin \alpha \cos \beta \quad (3-2)$$

$$\text{高度誤差: } \Delta h = h - h_T \quad (3-3)$$

$$= R \sin \alpha (1 - \cos \beta) \quad (3-4)$$

この  $\Delta h$  と  $\beta$  の関係を Fig. 10 に示す。このように、Flat Beam Scanning による場合は上述した誤差因子による誤差のほかに新たな幾何学上の誤差が含まれることになる。この方位角  $\beta$  があると迎角  $\alpha$  は真の値より小さくなる。この関係を Fig. 11 に示す。この場合の関係式は  $\alpha_T = \sin^{-1}(\sin \alpha \cos \beta)$  であり、例えば、 $\beta$  が 90 度になると 0 度になってしまう。

これらのことから、Flat Beam Scanning の場合はできるだけ方位角  $\beta$  を小さくするか、または何らかの補正が必要である。しかしながら、解析検討は幾何学上の誤差も測角誤差に含まれたものとして扱う。

### 3.3 数値計算に用いる誤差の値

上記の仮定に従って次章で数値計算を行う。この場合、仮定した情報源誤差量の前後を  $1/2$ 、2 倍の誤差量で数値計算を行う。しかし、情報誤差量の変化が少ない場合は  $1/10$ 、10 倍の誤差量で行う。

地上測定基点配置座標の 3 次元情報誤差量におよぼす影響については最適配置座標とその前後の 3 通りで行なう。以上については原則としてのものであり、場合によっては省略する事もある。

次に数値計算に用いる情報源誤差量は下記のように仮定する。ただし、ここに仮定した数値が数値計算結果、情報誤差量を余りにも大きくし、不適当な場合はそのつど情報源誤差量を変える。

a) 測距誤差 ( $\Delta R$ ) = 固定誤差 ( $\Delta R_c, \Delta R_c = 3 m$ )  
+ 比例誤差 ( $\Delta R_p, \Delta R_p = 1 \%$ )

b) 測角誤差 ( $\Delta \alpha, \Delta \beta$ ) = 固定誤差 ( $\Delta \alpha_c, \Delta \beta_c,$   
 $\Delta \alpha_c = \Delta \beta_c = 0.0 1^\circ$ )

### 3.4 航空機の着陸経路の仮定<sup>14)</sup>

航空機の着陸経路は一般に滑走路に入るまで直線状に降下し (アプローチ)、滑走路に入ってから指数関数状に経路をとる (フレア) ので、数値計算に用いる航空機の着陸経路は次のような数値を用いて行う。

(ただし、中規模の滑走路と中型機を想定している)

滑走路終端を座標原点にすると滑走路に沿った距離

$X$  と高度  $h$  および  $Y$  の関係は次式で表わされる。

$$X > 3300 m \rightarrow h = (15 + (X - 3300) \tan 2.5^\circ) m$$

$$X = 3300 m \rightarrow h = 15 m$$

$$X < 3300 m \rightarrow h = (18.83 e^{-0.23(3300-X)} - 3.83) m$$

$$Y = X \tan 0.1^\circ$$

## 4. 基本システムの性能と最適配置の解析および検討

前章で求めた計算式をそのまま用いたのでは各システムの特長が判りにくいので、適当な条件を仮定して近似式を作り、それを用いて検討を行うことにする。得られた近似式は非線形であるから、さらに、テーラ級数展開により線形化する。これを用いて、各情報源の誤差量  $\Delta$  と地上測定基点の配置 (座標) の影響を調べ、各方式の性能を比較検討する。さらに、各情報源に誤差を含ませ、厳密式を用いた数値計算により誤差を求め、この数値計算例から近似式での検討の妥当性を確認する。

### 4.1 Rectangular System

本システムの近似式は (2-4), (2-6), (2-7) 式と次の条件から得ることができる。

条件: 情報源  $a_1, a_2$  は一般に滑走路近辺においてその値が十分に小さくなるので、次の条件式を満足するものと仮定できる。

$$\text{条件式: } \tan \alpha_1 \approx \alpha_1 \quad (4-1)$$

$$\tan \alpha_2 \approx \alpha_2 \quad (4-2)$$

$$\text{ただし } \alpha_1, \alpha_2 \ll 1$$

$$\text{近似式: } h \approx 2 Y_0 \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (4-3)$$

$$Y \approx 2 Y_0 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2) - Y_0 \quad (4-4)$$

$$X \approx X_0 + (Y_0 \beta - Y) \tan \beta \quad (4-5)$$

これら近似式をテーラ級数展開し、2 次以上の高次項を無視すると次式が得られる。

$$|\Delta h| = 2 Y_0 \{ (\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2) (|\Delta \alpha_1| \bar{\alpha}_2 + |\Delta \alpha_2| \bar{\alpha}_1) - \bar{\alpha}_1 \bar{\alpha}_2 (|\Delta \alpha_1| + |\Delta \alpha_2|) \} / (\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2)^2 \quad (4-6)$$

$$= 2 Y_0 (|\bar{\alpha}_1|^2 |\Delta \alpha_2| + |\bar{\alpha}_2|^2 |\Delta \alpha_1|) / (\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2)^2 \quad (4-7)$$

$$|\Delta Y| = 2 Y_0 (|\bar{\alpha}_1| |\Delta \alpha_2| - \bar{\alpha}_2 |\Delta \alpha_1|) / (\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2)^2 \quad (4-8)$$

$$|\Delta X| = -\tan \beta |\Delta Y| + (Y_0 \beta - \bar{Y}) |\Delta \beta| / \cos^2 \beta \quad (4-9)$$

ただし、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  はテーラ展開する点での  $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  の真値である。

このように、各情報の誤差量と各情報源の誤差量との関係式を得ることができた。これら各式の誤差量を最小にするためには、各情報源の誤差量を最小にし、地上測定基点を最適な所に配置すればよい。

地上測定基点の最適配置は次のようにして求めることができる。すなわち、測定対象の3次元位置を空間のある点に固定して考え、地上測定基点の配置座標を変数とみなし、次式を定義する。計算簡略のため  $\alpha_1 = \alpha_2$  の場合を扱う。

$$h = h_1 \tag{4-10}$$

$$X = X_1 \tag{4-11}$$

$$Y = 0 \tag{4-12}$$

近似式(4-3)に(4-10)式を代入すると(4-13)式になり、 $|\Delta h|$ については $\alpha_1 = \alpha_2$ を(4-7)式に代入すると(4-14)式を得る。

$$h_1 = Y_0 \alpha \tag{4-13}$$

$$|\Delta h| = Y_0 (|\Delta \alpha_1| + |\Delta \alpha_2|) / 2 \tag{4-14}$$

それゆえ、 $|\Delta h|$ は近似式(4-13)が成立つ範囲内で $Y_0$ を小さくすれば小さくなる。しかし $Y_0$ を余り小さくすると近似式が成立しなくなるので注意を要する。

$|\Delta Y|$ については(4-8)式と(4-13)式から次式を得る。

$$|\Delta Y| = Y_0 (|\Delta \alpha_2| - |\Delta \alpha_1|) / 2 \alpha \tag{4-15}$$

$$= Y_0^2 (|\Delta \alpha_2| - |\Delta \alpha_1|) / 2 h_1 \tag{4-16}$$

このように $\Delta Y$ は $Y_0^2$ に比例して増加するから、 $\Delta h$ と同じく $\Delta Y$ を小さくするには $Y_0$ は可能な限り小さくしなければならない。しかし、近似式が成り立つ領域では $Y_0$ を余り小さく出来ない事に注意を要する。

$\Delta X$ については(4-5)式に(4-12)式を代入すると、次式を得る。

$$X_1 = X_0 + Y_{0\beta} \tan \beta \tag{4-17}$$

$$\therefore Y_{0\beta} = (X_1 - X_0) / \tan \beta \tag{4-18}$$

この式を(4-9)式に代入すると次のようになる。

$$|\Delta X| = -\tan \beta |\Delta Y| + (X_1 - X_0) |\Delta \beta| / \tan \beta \cos^2 \beta \tag{4-19}$$

$$= -\tan \beta |\Delta Y| + 2(X_1 - X_0) |\Delta \beta| / \sin 2\beta \tag{4-20}$$

この式の第1項は $\beta = 90^\circ$ で無限大になり、第2項は $\beta = 45^\circ$ で最小値になる。角度 $\beta$ が $45^\circ$ 以下の小さな領域では第2項の方が第1項より大きく $|\Delta X|$ に影響する。これらのことから $|\Delta X|$ を最小にするには測定対象の測定精度が一番要求される点付近が $\beta = 45^\circ$ になるように $Y_{0\beta}$ を決め、 $X_0$ はできるだけ大きくすればよい。このように、測定基点の最適配置は $Y_0$ をできるだけ小さく、 $Y_{0\beta}$ は着地点付近の方位角 $\beta$ が45度になるように決め、 $X_0$ はできるだけ大きく設定すればよい。ただし、 $Y_0$ は实际的に着陸誘導を考慮すると滑走路内に設けられず、实际的運用上の見地から最小値が決められる。このような $Y_0$ は一般的に近似式が成立つ範囲にある。

それゆえ、これらの近似式より得られた結果の妥当性、すなわち、各パラメータ(情報源誤差の大きさ、地上測定基点の配置座標)が測定対象の3次元位置誤差に及ぼす影響は厳密な計算式(2-4)、(2-6)、(2-7)を用いて、各情報源に誤差を含ませて得た情報と真値の差を求めた数値計算例で示す。

Fig. 12 は情報誤差 $\Delta h$ について示した。本システムの $\Delta h$ は非常に小さいので、地上基点配置については情報源誤差量を仮定値の10倍で行い、 $Y_0$ をパラメータに実線で示した。計算式での検討と同じく、 $Y_0$ を2倍にすれば $\Delta h$ も2倍になる。しかしながら $Y_0$ を100m

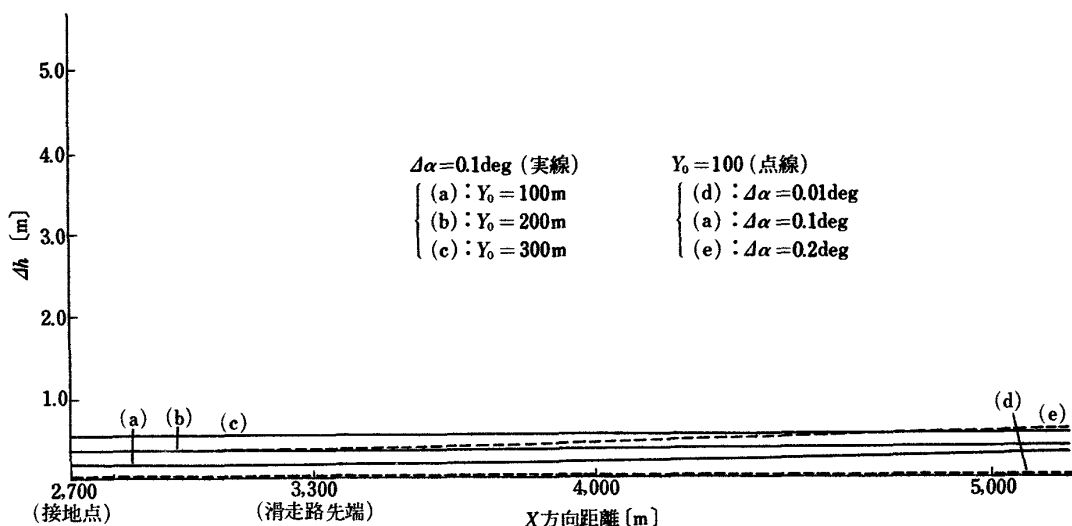


Fig. 12 Rectangular System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

と小さな値にすると高度が上るに従って $\Delta h$ が大きくなる。このことは実線(a), (c)を比較すれば容易に判る。なお、情報源誤差量はその値を2倍にすれば $\Delta h$ も2倍になる。実線(a)と点線(e)を比較することによって明白である。

これらの数値から明らかなように、本システムは高度測定誤差 $\Delta h$ を非常に小さく出来ることが特徴である。Fig. 18 は情報誤差 $\Delta Y$ について示す。 $\Delta Y$ は $\Delta h$ に比較して $Y_0$ を小さくすれば小さくなるから全く同じである、しかし接地点附近に近づくに従って $\Delta Y$ は大き

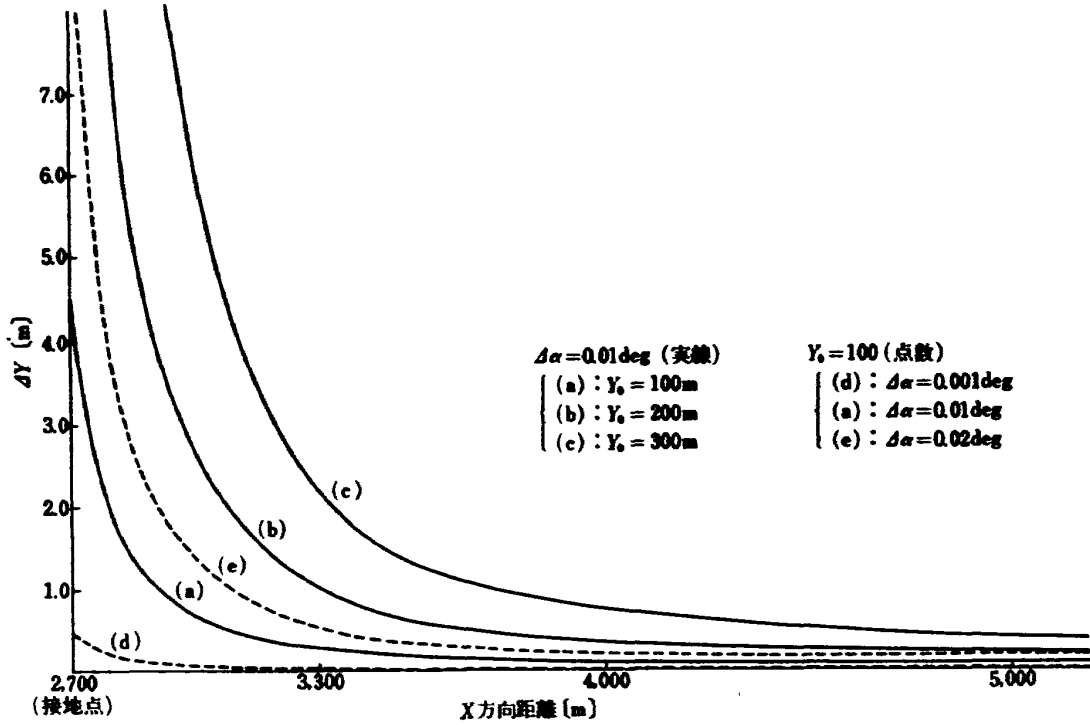


Fig.13 Rectangular System の各パラメータが $\Delta Y$ におよぼす影響

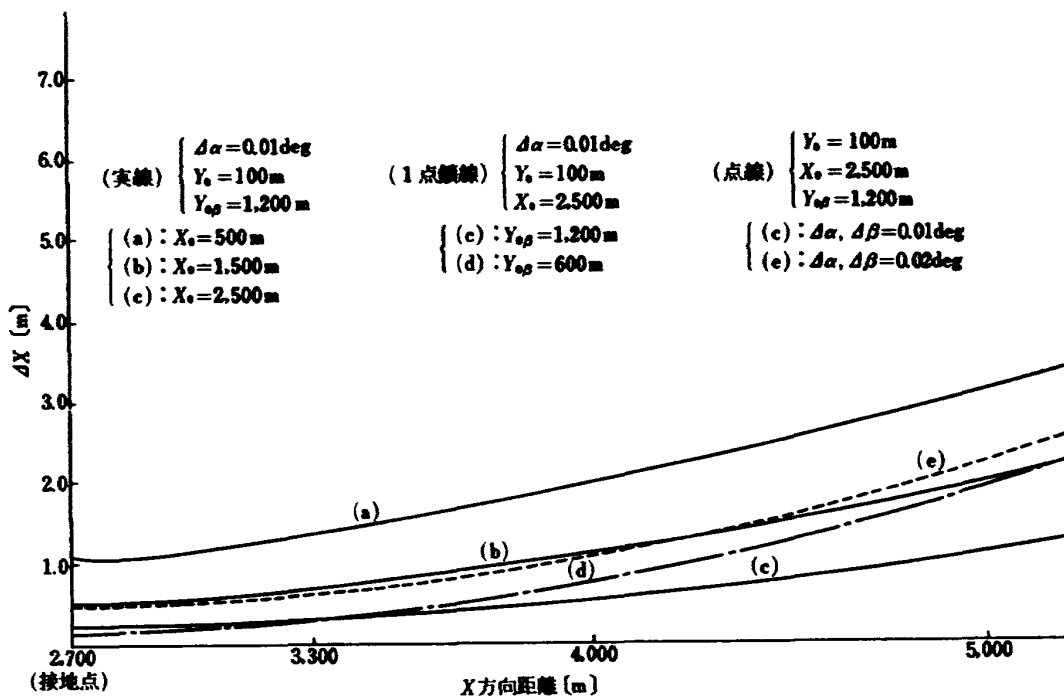


Fig.14 Rectangular System の各パラメータが $\Delta X$ におよぼす影響

な値になる。これは  $\Delta Y$  の式に見られるように高度  $h_1$  に反比例しているからである。地上基点配置座標  $Y_0$  の影響を実線(a), (b), (c)で示す。情報源誤差  $\Delta\alpha$  についてはその値を2倍にすれば情報誤差  $\Delta Y$  も2倍になる。これは実線(a)と点線(c)を比較すれば明白である。本システムの欠点は横偏差誤差  $\Delta Y$  が低高度で大きくなることである。しかし高度  $h$  が上るに従って  $\Delta Y$  は非常に小さくなる。

Fig.14は情報誤差  $\Delta X$  について示す。 $\Delta X$  は  $\Delta Y$  の値も関係してくるので  $Y_0 = 100m$ , の小さな値にし、パラメータ(地上測定基点配置座標  $X_0, Y_0$  と情報源角度誤差  $\Delta\alpha, \Delta\beta$ ) について調べる。Fig.14の実線(a), (b), (c)は  $X_0$  をパラメータにしたものであり、誤差計算式による検討結果と同じく  $X_0$  を大きくすることによって  $\Delta X$  を小さくすることが出来る。 $Y_0$  については接地付近の  $X$  を測定するのに測角  $\beta$  が45度に近づくよう、 $X_0$  との関係で設定した方が  $\Delta X$  を小さくすることが出来る。このことは式による検討結果と計算結果 Fig.14の1点鎖線(c) (d)とを比較することによっても明らかである。すなわち、(c)と(d)を比較すると接地点(2700m)では(d)の方が(c)より  $\Delta X$  が小さくなっている。これは測角  $\beta$  が45度になる点が(d)の場合  $X = 3.100m$ , (c)の場合  $X = 3.700m$  であり、(d)の方が接地点で測角  $\beta$  を45度に近づけられるからである。測角  $\beta$  が45度をこえる範囲では  $\beta$  が小さくなるように  $Y_0$  を大きくした方がよい。情報源誤差量  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  についてはその値を倍にすれば情報誤差量  $\Delta X$  も倍になる。この模様を Fig.14の点線(e), (c)で示してある。

## 4.2 Biangular System

本システムの近似式は(2-12), (2-15), (2-16)式と次の条件式を代入することによって得られる。

条件: 測角  $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  はその値が十分に小さくなる領域にあり、次の条件式を満足するものと仮定する。

条件式:

$$\tan \alpha_1 \doteq \alpha_1 \quad (4-21)$$

$$\tan \alpha_2 \doteq \alpha_2 \quad (4-22)$$

$$\tan \beta \doteq \beta \quad (4-23)$$

ただし  $\alpha_1, \alpha_2, \beta \ll 1$

近似式:

$$h = X_0 \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-24)$$

$$X = X_{01} + X_0 \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-25)$$

$$Y = [X_{01} + X_0 \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)] \beta \quad (4-26)$$

情報源の影響を調べるため、この近似式を線形化する。

近似式をテラ級数展開し、2次以上の高次項を無視すると次式を得る。

$$|\Delta h| = X_0 \alpha (-\bar{\alpha}_1^2 |\Delta\alpha_2| + \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1|) / (\bar{\alpha}_2 - \bar{\alpha}_1)^2 \quad (4-27)$$

$$|\Delta X| = X_0 \alpha (-\bar{\alpha}_1 |\Delta\alpha_2| + \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_1|) / (\bar{\alpha}_2 - \bar{\alpha}_1)^2 \quad (4-28)$$

$$|\Delta Y| = \bar{\beta} |\Delta X| + [X_{01} + X_0 \alpha \bar{\alpha}_2 / (\bar{\alpha}_2 - \bar{\alpha}_1)] |\Delta\beta| \quad (4-29)$$

このように、情報誤差と情報源誤差の関係は(4-27), (4-28), (4-29)式から得られる。これら各式の情報誤差量を最小にするためには、各情報源の誤差量を最小にし、しかも地上測定基点を最適配置すればよい。地上測定基点の最適配置は次のようにして求められる。すなわち、測定対象の3次元位置を空間のある点に固定して考え、地上測定基点の配置座標を変数とみなし、次式を定義する。

$$h = h_1 \quad (4-30)$$

$$X = X_1 \quad (4-31)$$

$$Y = Y_1 \quad (4-32)$$

これらの値を近似式に代入して地上測定基点配置座標変数を得る。

$$h_1 = X_0 \alpha \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-33)$$

$$\therefore X_0 \alpha = h_1 (\alpha_2 - \alpha_1) / \alpha_1 \alpha_2 \quad (4-34)$$

$$X_1 = X_{01} + X_0 \alpha \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-35)$$

$$\therefore X_{01} = X_1 - h_1 / \alpha_1 \quad (4-36)$$

さらに、これらの式を誤差式(4-27), (4-28), (4-29)に代入し、情報誤差量を最小にするような情報源  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  の関係を得るため、 $\alpha_1$  で偏微分を行う。 $\Delta h$  については次のようになる。

$$|\Delta h| = h_1 (-\alpha_1^2 |\Delta\alpha_2| + \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1|) / \alpha_1 \bar{\alpha}_2 (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1) \quad (4-37)$$

$$\begin{aligned} \partial |\Delta h| / \partial \alpha_1 = & [-2h_1 \alpha_1^2 |\Delta\alpha_2| (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1) \bar{\alpha}_2 \\ & - (\bar{\alpha}_2^2 - 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2) h_1 (-\alpha_1^2 |\Delta\alpha_2| + \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1|)] \\ & / (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1)^2 \alpha_1^2 \bar{\alpha}_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (4-38)$$

$$\begin{aligned} \therefore -2\alpha_1^2 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_2| + 2\alpha_1^3 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_2| + \alpha_1^2 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1| \\ - 2\alpha_1^3 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_2| - \bar{\alpha}_2^4 |\Delta\alpha_1| + 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2^3 |\Delta\alpha_1| = 0 \end{aligned} \quad (4-39)$$

$$\therefore -\alpha_1^2 |\Delta\alpha_2| + 2\bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_1| \alpha_1 - \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1| = 0 \quad (4-40)$$

この  $\alpha_1$  に関する2次方程式の根を求めると次のようになる。

$$\alpha_1 = \bar{\alpha}_2 [|\Delta\alpha_1| / |\Delta\alpha_2| \pm \sqrt{1 - |\Delta\alpha_2| / |\Delta\alpha_1|}] \quad (4-41)$$

$$= \alpha_2 |\Delta\alpha_1| (1 \pm \sqrt{1 - |\Delta\alpha_2| / |\Delta\alpha_1|}) / |\Delta\alpha_2| \quad (4-42)$$

ここで、(4-27)式の最大値は $|\Delta\alpha_1|$ と $|\Delta\alpha_2|$ が異符号で最大の時に生ずるから、上式についても $|\Delta\alpha_1|$ と $|\Delta\alpha_2|$ が異符号で最大の場について行う。

$$\therefore \alpha_1 = \bar{\alpha}_2 (\sqrt{2} - 1) \quad (4-43)$$

地上測定基点 $X_{01}$ と $X_{0\alpha}$ は次式の関係があるから、上式の $\alpha_1$ を代入して得ることが出来る。

$$X_1 = X_{01} + X_{0\alpha} \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-44)$$

$$\therefore X_{0\alpha} \doteq 0.6 (X_1 - X_{01}) \quad (4-45)$$

$\Delta X$ については(4-28)式から、高度情報 $h$ と類似の方法を用いて次のように求められる。

$$|\Delta X| = h_1 (-\alpha_1 |\Delta\alpha_2| + \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_1|) / (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1) \alpha_1 \bar{\alpha}_2 \quad (4-46)$$

$$\partial |\Delta X| / \partial \alpha_1 = h_1 \{ -\alpha_1 \bar{\alpha}_2 (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1) |\Delta\alpha_2| - (\bar{\alpha}_2^2 - 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2) (-\alpha_1 |\Delta\alpha_2| + \alpha_2 |\Delta\alpha_1|) \} / (\bar{\alpha}_2 - \alpha_1)^2 \alpha_1^2 \bar{\alpha}_2^2 = 0 \quad (4-47)$$

$$\therefore -\alpha_1 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_2| + \alpha_1^2 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_2| + \alpha_1 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_2| - \bar{\alpha}_2^3 |\Delta\alpha_1| - 2\alpha_1^2 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_2| + 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1| = 0 \quad (4-48)$$

$$\therefore -\alpha_1^2 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_2| + 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1| - \bar{\alpha}_2^3 |\Delta\alpha_1| = 0 \quad (4-49)$$

$$\therefore -\alpha_1^2 |\Delta\alpha_2| + 2\alpha_1 \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_1| - \bar{\alpha}_2^2 |\Delta\alpha_1| = 0 \quad (4-50)$$

上式は(4-40)式の2次方程式と全く同じであり、誤差式(4-5)の最大値は情報源誤差 $\Delta\alpha_1$ と $\Delta\alpha_2$ が異符号で最大の時に生ずるから、上式についても同様に行う。それゆえ、 $\alpha_1$ は高度情報の場合と全く同じになる。

$$\alpha_1 = \bar{\alpha}_2 |\Delta\alpha_1| (1 \pm \sqrt{1 - |\Delta\alpha_2| / |\Delta\alpha_1|}) / |\Delta\alpha_2| \quad (4-51)$$

$$= \bar{\alpha}_2 (\sqrt{2} - 1) \quad (4-52)$$

これを $X$ の近似式に代入すると地上測定基点配置座標 $X_{01}$ ,  $X_{0\alpha}$ の関係式が求まる。

$$X_1 = X_{01} + X_{0\alpha} \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-53)$$

$$\therefore X_{0\alpha} \doteq 0.6 (X_1 - X_{01}) \quad (4-54)$$

$\Delta Y$ については(4-29)式と(4-35), (4-33)の関係式から次式が得られる。

$$|\Delta Y| = \beta |\Delta X| + \{ X_1 - h_1 / \alpha_1 + h_1 / \alpha_1 \} |\Delta\beta| \quad (4-55)$$

$$= \beta |\Delta X| + X_1 |\Delta\beta| \quad (4-56)$$

上式を $\alpha_1$ で偏微分すると次のようになる。

$$\partial |\Delta Y| / \partial \alpha_1 = \beta \partial |\Delta X| / \partial \alpha_1 \quad (4-57)$$

これは $X$ についての式を $\beta$ 倍したものであり、全く同じ結果となる。

このように、 $|\Delta h|$ ,  $|\Delta X|$ ,  $|\Delta Y|$ を最小にするような地上測定基点の最適配置を求める式が得られた。これらの式は測定対象の位置によって変化するから、高精度が要求される領域を考えて、決めればよい。

なお、これらの近似式より得られた結果の妥当性と各パラメータの影響は情報源に誤差を含ませて厳密式(2-12), (2-15), (2-16)を用い、誤差を求めた数値例でFig.15~17に示す。

Fig.15 は高度情報誤差 $\Delta h$ について示したものであ

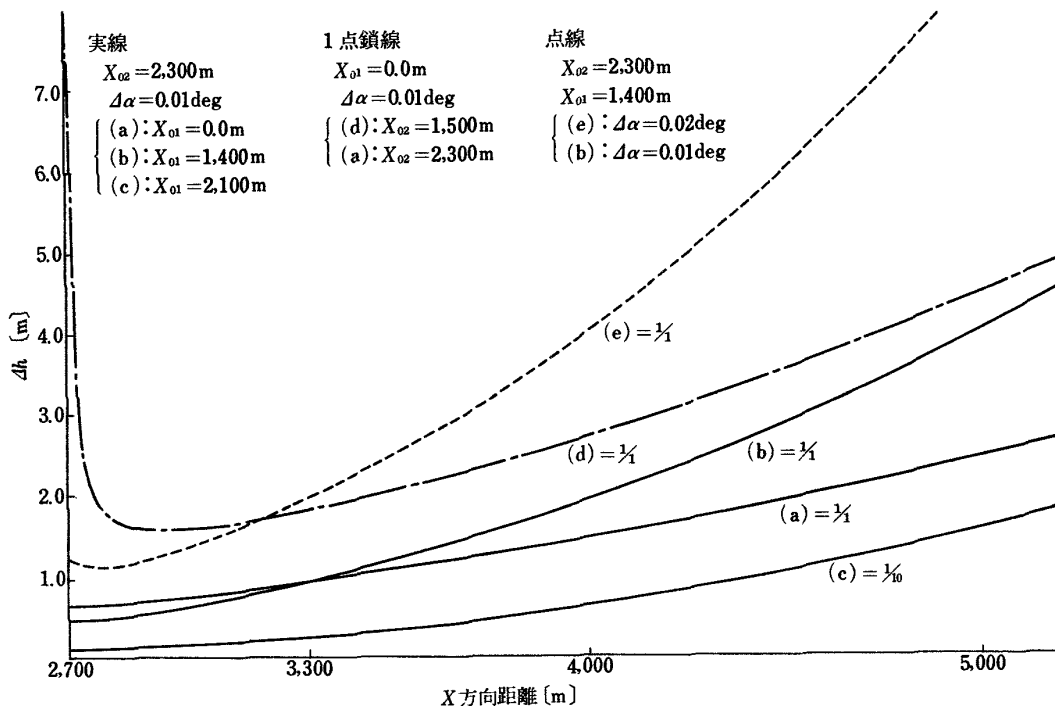


Fig.15 Biangular System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

る。誤差式(4-27)は $\alpha_2$ を大きくすれば $\Delta h$ を小さくできる事を示している。すなわち、(a)と(d)を比較すれば明らかである。それゆえ、 $X_{02}$ を2300mに固定して、 $X_{01}$ の値をパラメータに実線(a), (b), (c)で比較する。式による検討では(4-45)式から、(a)の場合の地上基

点配置に対する最適測定対象位置は $X_1 = 3.833m$ に相当し、(b)の場合は $X_1 = 2.900m$ , (c)の場合は $X_1 = 2.433m$ に相当している。これらを考慮して、数値計算例を見れば、 $\Delta h$ の大きさをXの変化で(a), (b), (c)の順から(c), (b), (a)に変えている。これらのことから、

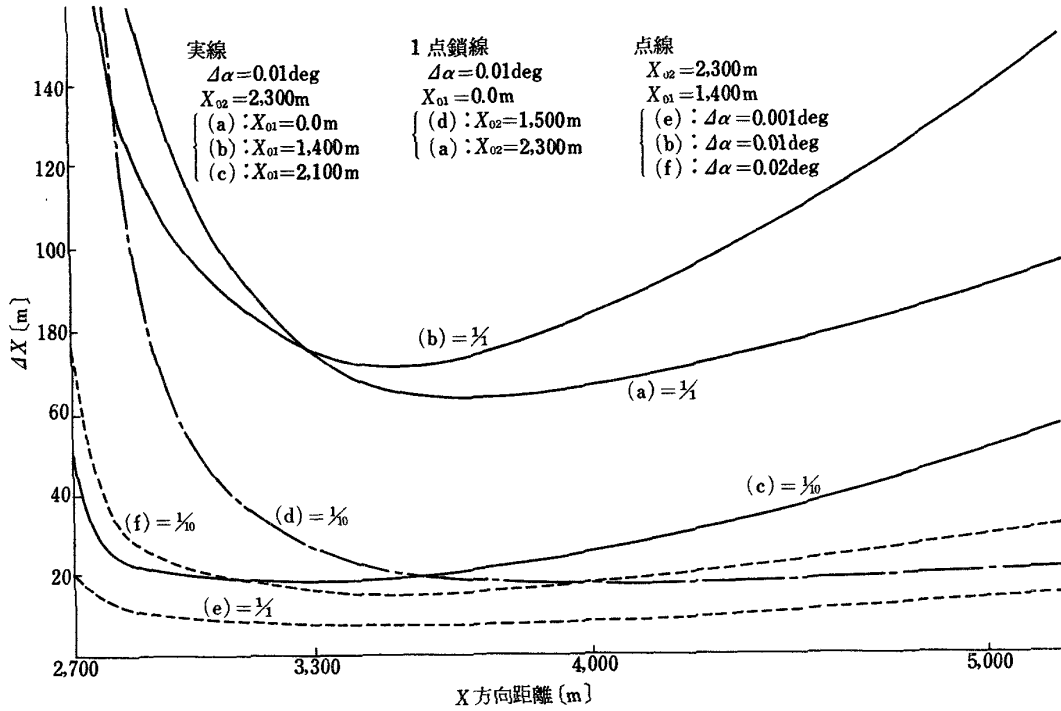


Fig.16 Biangular System の各パラメータが  $\Delta X$  におよぼす影響

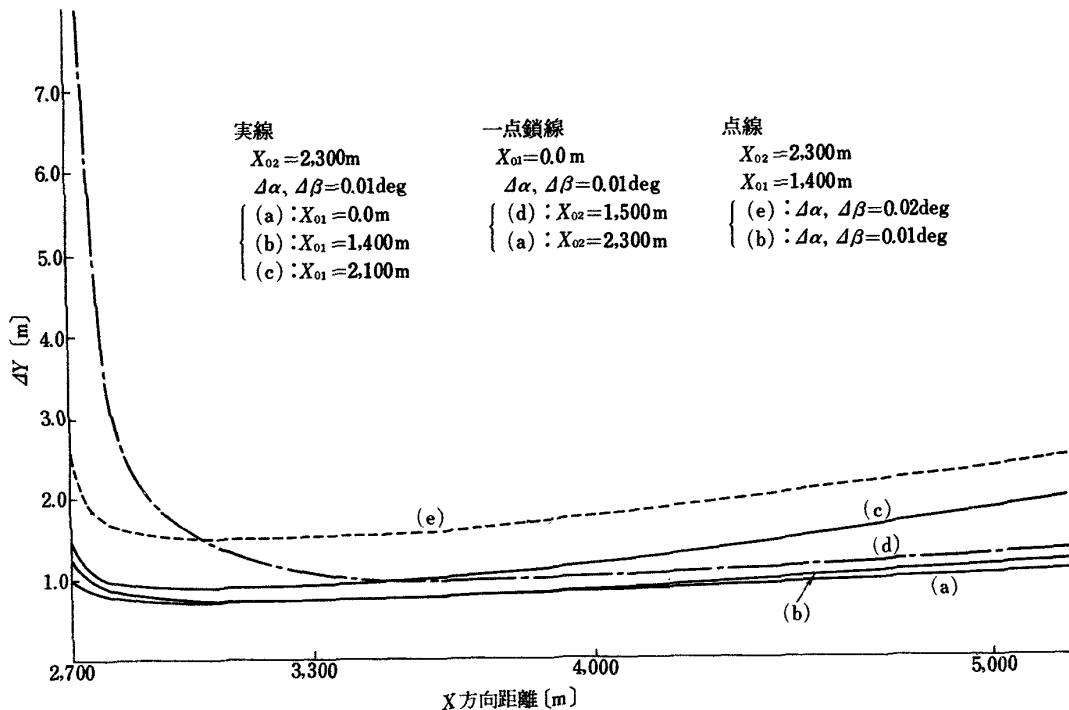


Fig.17 Biangular System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響



式による検討が妥当なものであることが容易に判る。なお、(d)の場合、 $X=2,700\text{ m}$  附近で  $\Delta h$  が大きくなるのは、数値計算に用いた(2-12)式の分母が誤差量の大きさと地上基点配置座標による迎角  $\alpha$  の関係で零に近づくためである。情報源の誤差量についてはその大きさに比例して  $\Delta X$  も大きくなる。点線(e)と(b)を比較すれば明白である。

Fig. 16 は  $\Delta X$  についての数値例である。実線(a), (b), (c)は  $X_{02} = 2,300\text{ m}$  に固定し、 $X_{01}$  を変化させた場合である。これらは  $\Delta h$  の場合と全く同じ最適測定対象位置が対応する。すなわち、(a)の場合は  $X_1 = 3,833\text{ m}$ , (b)の場合は  $X_1 = 2,900\text{ m}$ , (c)の場合は  $X_1 = 2,433\text{ m}$  に相当する。これら式による検討結果と数値計算結果とはほぼ一致している。

1点鎖線は  $X_{01}$  を固定し、 $X_{02}$  を変化させた場合である。(a)と(d)を比較すると、 $X_{02}$  すなわち  $\alpha_2$  の大きい(a)の方が  $\Delta X$  を小さくできる。(d)は  $1/10$  の縮尺で書かれているから、実際の値は10倍になる。点線は情報源誤差量をパラメータにして行なったものであり、その誤差量の大きさに比例して  $\Delta X$  も大きくなっていることが(e), (f)を比較することによって容易に判る。本システムでは誤差  $\Delta X$  が非常に大きな値になるので、地上基点を最適配置しても、情報源誤差  $\Delta\alpha$  を1桁下げるように努力する必要がある。

Fig. 17 は  $\Delta Y$  についての数値計算例である。 $\Delta Y$  は(d)の場合を除いて非常に小さくなる。(d)は  $X_{02} = 1,500\text{ m}$  の場合で、低高度において  $\Delta Y$  が大きくなるのは  $\Delta h$ ,  $\Delta X$  と同様に地上測定基点配置座標と誤差量の大きさとの関係で、(2-16)式の分母が零に近づくからである。実線(a), (b), (c)は  $\Delta X$ ,  $\Delta h$  の場合と同様に  $X_{01}$  を変化させた場合である。接地点附近では(b)の場合が  $\Delta Y$  を一番小さくできる。これは、接地点附近の誤差の少ない情報 Y を得る地上基点最適配置に(b)の場合が一番近いからである。誤差量の大きさの影響については(b)と(e)を比較すれば明らかである。すなわち、情報源誤差量に比例して情報誤差  $\Delta Y$  も大きくなる。

これら Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 によって、情報源誤差と地上基点配置座標が情報誤差におよぼす影響を数値計算例で示した。その結果、誤差式による解析結果が妥当なものであることを確認した。

### 4.3 Angle of Incidence System

本システムの近似式は(2-24), (2-25), (2-28) (2-29) 式と次の条件から得ることができる。

条件：各地上測定基点から得られる情報源、すな

わち迎角  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  は通常十分小さくなるような領域にあるので、次の条件式を仮定することができる。

条件式：

$$1/\alpha_1 \approx \cot \alpha_1 \quad (4-58)$$

$$1/\alpha_2 \approx \cot \alpha_2 \quad (4-59)$$

$$1/\alpha_3 \approx \cot \alpha_3 \quad (4-60)$$

それゆえ、近似式は次のようになる。

$$Y = h^2 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2) / 4 Y_0 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \quad (4-61)$$

$$X = \{ h^2 (\alpha_2^2 - \alpha_3^2) + X_0^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \}^2 / 2 X_0 \alpha_2^4 \alpha_3^4 \quad (4-62)$$

$$h^2 = \{ 4 X_0^2 Y_0^2 (\alpha_1^2 + \alpha_3^2) / \alpha_1^2 \alpha_3^2 \pm \sqrt{D} \} / \{ 4 Y_0^2 (\alpha_2^2 - \alpha_3^2)^2 / \alpha_2^4 \alpha_3^4 + X_0^2 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)^2 / \alpha_1^4 \alpha_2^4 \} \quad (4-63)$$

$$\text{ただし、} D = 16 \{ X_0^4 Y_0^4 (\alpha_1^2 + \alpha_3^2)^2 / \alpha_1^4 \alpha_3^4 - 4 X_0^2 Y_0^2 (X_0^2 + 4 Y_0^2) \{ 4 Y_0^2 (\alpha_2^2 - \alpha_3^2)^2 / \alpha_2^4 \alpha_3^4 + X_0^2 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)^2 / \alpha_1^4 \alpha_2^4 \} \} \quad (4-64)$$

$$h = \sqrt{h^2} \quad (4-65)$$

このように、各情報 X, Y, h は  $h^2$  が求まらなると得られない。 $h^2$  を得るためには判別式 D が正でなければならない。

こゝで式を簡単にするため次のことを仮定する。

$$Y = 0 \quad (4-66)$$

$$\therefore \alpha_1 = \alpha_2 \quad (4-67)$$

これを判別式に代入すると次のようになる。

$$D = 16 X_0^2 Y_0^4 \{ X_0^2 (\alpha_1^2 + \alpha_3^2)^2 - (X_0^2 + 4 Y_0^2) (\alpha_1^2 - \alpha_3^2)^2 \} / \alpha_1^4 \alpha_3^4 \quad (4-68)$$

$$= 64 X_0^2 Y_0^4 \{ \alpha_1^2 \alpha_3^2 (X_0^2 + 2 Y_0^2) - Y_0^2 (\alpha_1^4 + \alpha_3^4) \} / \alpha_1^4 \alpha_3^4 \quad (4-69)$$

この判別式が正になるためには右辺の大かつこが正でなければならない。

さらに、判別式を簡単にするため、地上測定基点配置座標について次のように仮定する。

$$X_0 \geq 2 Y_0 \quad (4-70)$$

$$\therefore D = 6 \alpha_1^2 \alpha_3^2 - \alpha_1^4 - \alpha_3^4 > 0 \quad (4-71)$$

$$\therefore \alpha_1 < 2.44 \alpha_3 \quad (4-72)$$

情報源に含まれる誤差量  $|\Delta\alpha|$  は最悪条件で  $\alpha_1$  に  $+\Delta\alpha$ ,  $\alpha_3$  に  $-\Delta\alpha$  含まれることになる。もし、 $|\Delta\alpha|$  の大きさを次のように仮定すると、上記判別式の条件がさらにきびしくなる。

$$|\Delta\alpha| \text{ が } \alpha \text{ の } 10\% \text{ の大きさなら } \alpha_1 < 2.0 \alpha_3$$

$$|\Delta\alpha| \text{ が } \alpha \text{ の } 20\% \text{ の大きさなら } \alpha_1 < 1.77 \alpha_3$$

これらの条件は本システムに対する絶対必要条件である。本システムは接地附近の低高度で、情報源に含ま

れる誤差の量が大きくなり、必要条件が満たされにくくなるので、情報 X, Y, h 共に得にくい。すなわち、不適当なシステムである。

本システムの地上測定基点最適配置はこれまで仮定した条件を満たさなければならず、おのずから制限される。近似式による検討は式が複雑になるので、数値計算例の結果のみで、各種パラメータが測定対象の3次元位置情報誤差におよぼす影響を示す。

Fig. 18 は3次元情報誤差  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta h$  についての数値計算例である。実線は  $\Delta X$  についてであり、地上測定基点配置座標をパラメータとして(a), (b), (c) の3例について示してある。この数値計算例から、 $\Delta X$  は低高度で非常に大きな値になる。しかも、情報源誤差  $\Delta\alpha$  を 0.001 deg で計算しており、この  $\Delta\alpha$  を現在適当な値と思われる 0.01 deg にしたら、 $\Delta X$  はさらに大きくなり、実用に適さない。なお、地上測定基点配置座標については  $X_0$  を大きく、 $Y_0$  を小さくすれば  $\Delta X$  を小さくできることが判る。

点線は  $\Delta Y$  についてであり、 $\Delta X$  と同様に地上測定基点配置座標をパラメータとして(d), (e), (f) の3例について示してある。この数値計算例から  $\Delta Y$  も  $\Delta X$  と同様に低高度でかなり大きな値になる。しかも  $\Delta\alpha$  は 0.001 deg で計算しているから 0.01 deg にすると誤差は非常に大きな値となり、実用に適さない。なお、地

上測定基点配置座標については  $\Delta X$  と同様に  $X_0$  を大きく  $Y_0$  を小さくすれば  $\Delta Y$  を小さくすることができる。1点鎖線は  $\Delta h$  についてであり、地上測定基点配置座標をパラメータとして(g), (h), (i) の3例について示してある。 $\Delta h$  はこの数値計算例から  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  に比較してかなりよい。しかし、 $\Delta\alpha = 0.001 \text{ deg}$  で計算しており、 $\Delta\alpha = 0.01 \text{ deg}$  にすると  $\Delta h$  もかなり大きな値になり、実用に適さない。地上測定基点配置座標については  $Y_0$  を小さくし、 $X_0$  を 1200 m と 2400 m 間の最適な値にすれば、 $\Delta h$  を小さくすることができる。これらのことから、本システムは3次元位置情報計算が複雑な上、誤差量も非常に大きくなるので、航空機の着陸援助システムとして不適当である。

#### 4.4 I.L.A.S

本システムの近似式は(2-31), (2-32), (2-33) 式と次の条件から得ることができる。

条件：情報源  $\alpha$  は一般にその値が十分に小さくなる領域にあり、次の条件式を満足するものと仮定できる。

条件式：

$$h \doteq R \alpha \tag{4-73}$$

$$Y \doteq Y_0 - R \sin \beta \tag{4-74}$$

$$X \doteq X_0 + R \cos \beta \tag{4-75}$$

これら近似式をテーラ級数展開し、2次以上の高次項を無視すると次の誤差式が得られる。

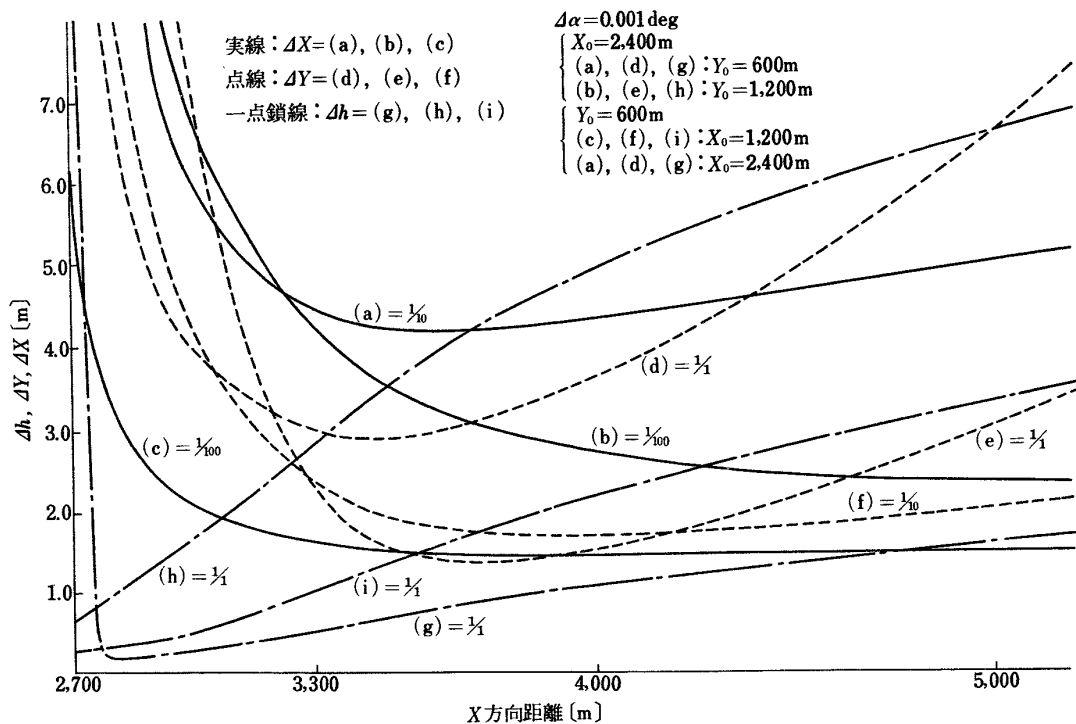


Fig.18 Angle of Incidence System の各パラメータが  $\Delta h$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  におよぼす影響

$$|\Delta h| = \bar{R}|\Delta\alpha| + \bar{\alpha}|\Delta R| \quad (4-76)$$

$$|\Delta Y| = -\bar{R} \cos \beta |\Delta\beta| - \sin \beta |\Delta R| \quad (4-77)$$

$$|\Delta X| = -\bar{R} \sin \beta |\Delta\beta| + \cos \beta |\Delta R| \quad (4-78)$$

このように、各情報の誤差量と各情報源の誤差量との関係式は線形で得ることができる。これら各式の誤差量を最小にするためには、各情報源の誤差量を最小にし、地上測定基点を最適な所に配置すればよい。

地上測定基点の最適配置を得るために、測定対象の3次元位置を空間のある点に固定し、地上測定基点配置座標を変数とみなし、次式を定義する。

$$h = h_1 \quad (4-79)$$

$$X = X_1 \quad (4-80)$$

$$Y = Y_1 \quad (4-81)$$

これらの値を近似式(4-73), (4-74), (4-75)と誤差式(4-76), (4-77), (4-78)に代入すると次のようになる。

$|\Delta h|$  については

$$h_1 = R \alpha \quad (4-82)$$

$$\therefore \alpha = h_1 / R \quad (4-83)$$

$$|\Delta h| = R|\Delta\alpha| + h_1 |\Delta R| / R \quad (4-84)$$

$$\partial |\Delta h| / \partial R = |\Delta\alpha| - h_1 |\Delta R| / R^2 = 0 \quad (4-85)$$

$$\therefore R = \sqrt{h_1 |\Delta R| / |\Delta\alpha|} \quad (4-86)$$

このように、高度  $h_1$  と測距  $R$  との関係式が得られる。ここで、高度  $h_1$  が接地点に近づくほど零に近づくから

$R$  もそれによって零になるように配置すればよい。

すなわち、可能な限り  $X_0, Y_0$  を接地点近くに配置することである。

$|\Delta Y|$  については、(4-77)式は次のように変形できる。

$$|\Delta Y| = \sqrt{R^2 |\Delta\beta|^2 + |\Delta R|^2} \cdot \sin(A + \beta) \quad (4-87)$$

$$\text{ただし, } A = \tan^{-1} (R|\Delta\beta| / |\Delta R|) \quad (4-88)$$

それゆえ、 $\beta$  が零に近づくように配置すれば  $\Delta Y$  を小さくできる。

$\Delta X$  についても、(4-78)式は次のように変形できる。

$$|\Delta X| = \sqrt{R^2 |\Delta\beta|^2 + |\Delta R|^2} \cdot \sin(B - \beta) \quad (4-89)$$

$$\text{ただし } B = \tan^{-1} (|\Delta R| / R|\Delta\beta|) \quad (4-90)$$

それゆえ、 $\beta$  が  $B$  に近づくように配置すれば  $\Delta X$  を小さくできる。このように本システムは測距  $R$  を小さくし、 $\beta$  については、 $\Delta Y$  の場合は小さく、 $\Delta X$  の場合は  $B$  に近づくような配置にすればよい。

次に、これら近似式より得られた結果の妥当性は情報源に誤差を含ませて厳密式(2-31), (2-32), (2-33)を用い、誤差を求めた数値計算例 Fig. 19~21で示す。Fig. 19は誤差量  $|\Delta h|$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c) は地上測定基点配置座標  $X_0$  をパラメータにした例であり、 $X_0$  が接地点に近づくほど  $\Delta h$  は小さな値になる。これは誤差式による検討結果

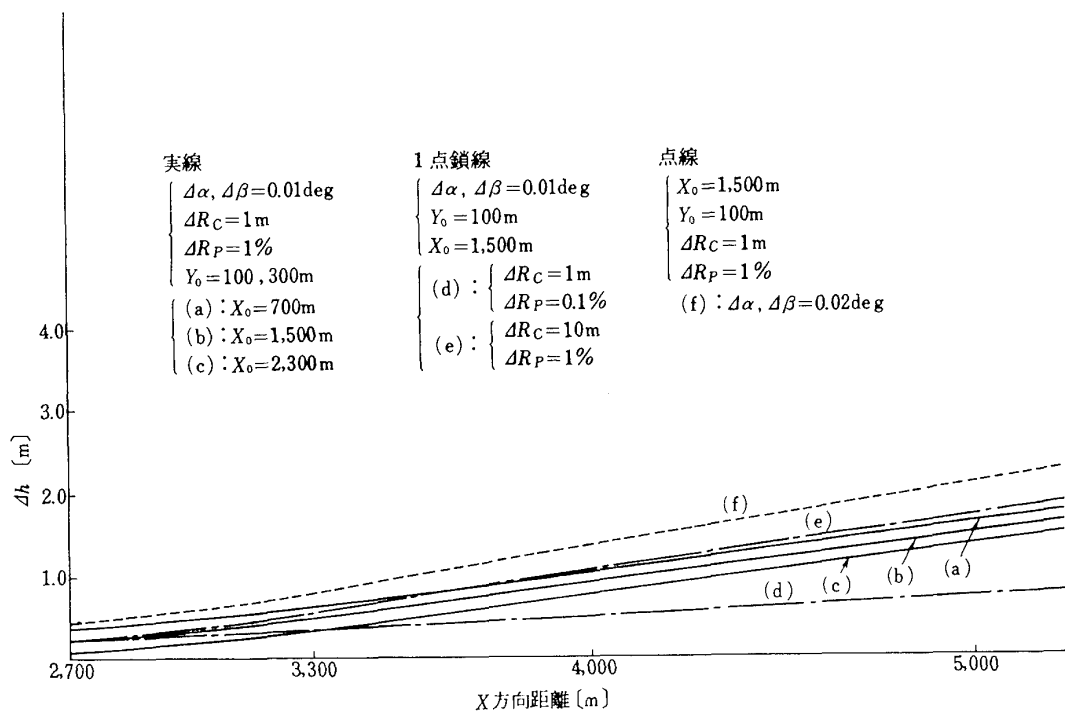


Fig. 19 Instrument Low Approach System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

と一致する。なお、(a), (b), (c) は $\Delta h$  の等差の関係で高度  $h$  に従い増加するから、低高度における  $X_0$  は  $\Delta h$  に大きな影響を与える。測距誤差  $\Delta R$  については、(d), (e), の1点鎖線によって比較する。 $\Delta h$  は低高度において  $\Delta R$  の値に余り影響さ

れないが、高高度になるに従って  $\Delta R$  の%誤差が大きく影響する。点線(f)は情報源角度誤差  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  を2倍にしたもので、 $\Delta h$  は低高度で(b)に比較して2倍の値を示す。

Fig. 20 は誤差量  $\Delta Y$  についての数値計算例である。

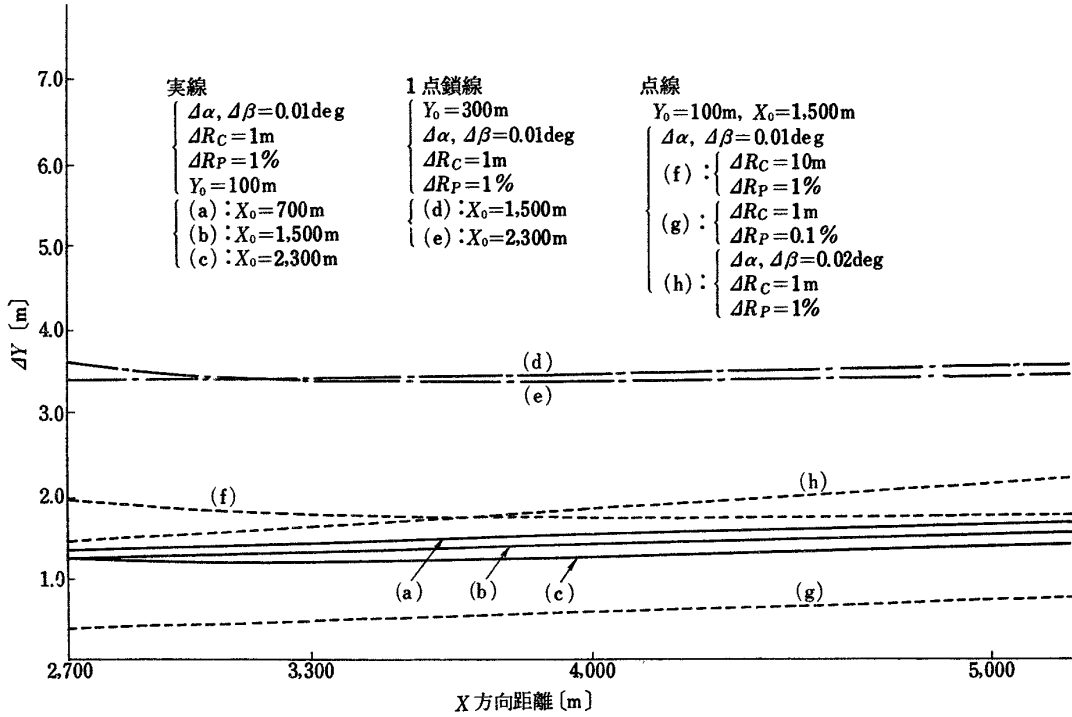


Fig.20 Instrument Low Approach System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響

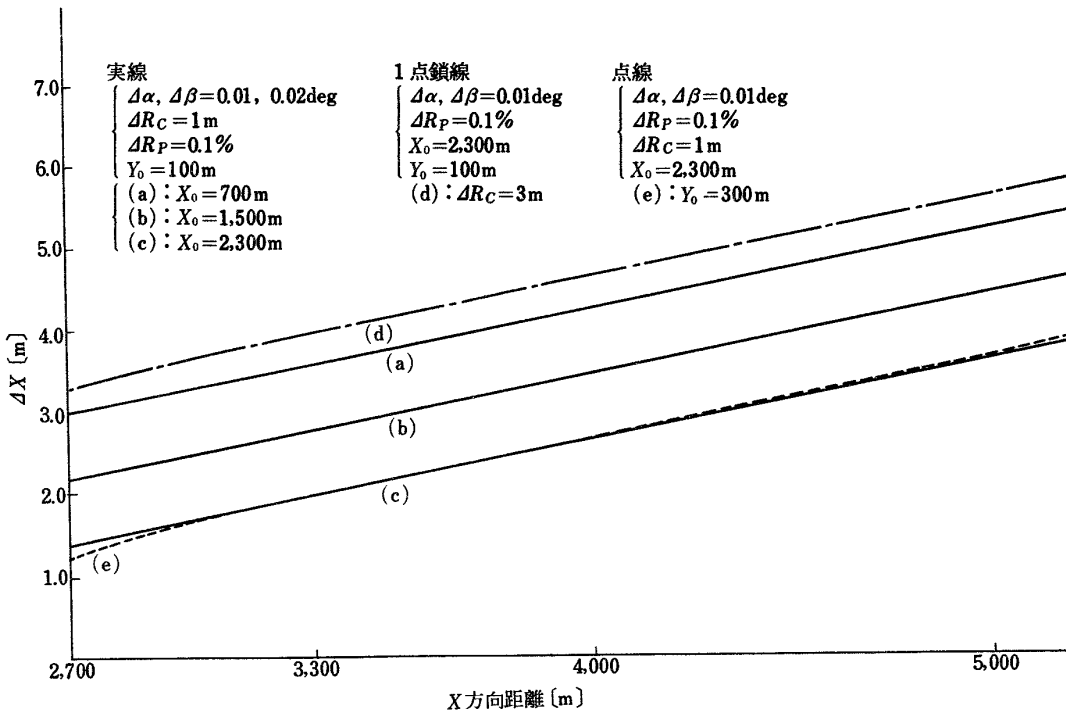


Fig.21 Instrument Low Approach System の各パラメータが  $\Delta X$  におよぼす影響

実線(a), (b), (c) は地上測定基点配置座標  $X_0$  をパラメータにした例であり,  $\Delta h$  の場合と同様に  $X_0$  を接地点に近ずけるほど  $\Delta Y$  を小さくできることが判る。地上測定基点配置座標  $Y_0$  を  $300\text{ m}$  にした場合を1点鎖線で示す。 $Y_0 = 300\text{ m}$  の(d), (e) は  $Y_0 = 100\text{ m}$  の(a), (b), (c) に比較して約3倍の  $\Delta Y$  を示す。これは誤差式(4-87)の  $\beta$  が条件式(4-74)から,  $\beta = \sin^{-1} [Y_0 - Y/R]$  の関係にあり,  $Y_0$  を大きくすると  $\beta$  も大きくなり,  $|\Delta Y|$  が大きくなったものである。

点線(f), (g), (h) は  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  および  $\Delta R$  の情報源誤差量をパラメータにしたものである。これら(f), (g), (h) を地上測定基点配置座標の同じ(b)と比較すると,  $\Delta R_p = 0.1\%$  にした(g)が1番小さな  $\Delta Y$  を得る。(f), (h) は(b)よりわずかに大きくなる。これらのことから,  $\Delta R$  の%誤差が大きく  $\Delta Y$  に影響することが判る。

Fig.21 は誤差量  $\Delta X$  についての数値計算例である。これも  $\Delta h$ ,  $\Delta Y$  と同様に, 地上測定基点配置座標が接地点に近づくほど  $\Delta X$  が小さくなる。すなわち, 実線(a) (b), (c) を比較すれば明白である。しかも(a), (b), (c) は  $\Delta X$  が等差の関係にあるから,  $X_0$  の  $\Delta X$  に与える影響の割合は低高度において大きい。

なお, 地上測定基点配置座標  $Y_0$  については(c), (e) を比較することによって判る。(e)は(c)に比較して  $Y_0$  を3倍の大きさにしてあるが,  $\Delta X$  はほぼ同じ値を示す。これは, 誤差式(4-89)で検討した  $\sin$  の項が  $R$  によって大きく影響されることを意味する。

1点鎖線(d)は  $\Delta R_c$  を  $3\text{ m}$  で計算したもので, (e)に比較して2~3倍に近い値を示す。これは情報源誤差  $\Delta R_c$  が  $\Delta X$  にそのまま現われるからである。

$\Delta R_p$  については(a), (b), (c), (d) 共すべて  $0.1\%$  で計算を行っている。これは  $\Delta R_p = 1\%$  で計算すると  $\Delta X$  が大きな値になるからである。

角度誤差  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  の影響は  $0.01\text{ deg}$  を  $0.02\text{ deg}$  にしただけでは  $\Delta X$  に変化が見られない。

これらのことから,  $\Delta X$  については  $\Delta R$  の影響がそのまま現われることが判る, すなわち, 誤差式(4-78)の第2項が第1項に比較して大きく  $\Delta X$  に影響する。

#### 4.5 P.A.R

本システムの近似式は(2-40), (2-41), (2-42)式と次の条件式から得ることができる。

条件: 情報源  $\alpha$  はその値が十分に小さくなる領域にあり, 次の条件式を満足するものと仮定する。

$$\text{条件式:} \quad \sin \alpha \doteq \alpha \quad (4-91)$$

$$\cos \alpha \doteq 1 \quad (4-92)$$

ただし,  $\alpha \ll 1$

したがって近似式として次式が求まる。

$$X = X_0 + R / \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \quad (4-93)$$

$$= X_0 + R \cos \beta \quad (4-94)$$

$$Y = Y_0 - R \sin \beta / \sqrt{1 + \alpha^2 \cos^2 \beta} \quad (4-95)$$

$$h = R \alpha / \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \quad (4-96)$$

$$= R \alpha \cos \beta \quad (4-97)$$

これら近似式をテラー級数展開し, 2次以上の高次項を無視すると次式が得られる。

$$|\Delta X| = \bar{R} \sin \bar{\beta} |\Delta \beta| + \cos \bar{\beta} |\Delta R| \quad (4-98)$$

$$|\Delta Y| = (\bar{R} \cos \bar{\beta} |\Delta \beta| - \sin \bar{\beta} |\Delta R|) / \sqrt{1 + \bar{\alpha}^2 \cos^2 \bar{\beta}} + 2 \bar{R} \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} \cos \bar{\beta} (-\bar{\alpha} \sin \bar{\beta} |\Delta \beta| + \cos \bar{\beta} |\Delta \alpha|) / (1 + \bar{\alpha}^2 \cos^2 \bar{\beta})^{3/2} \quad (4-99)$$

$$|\Delta h| = \bar{\alpha} \cos \bar{\beta} |\Delta R| + \bar{R} \cos \bar{\beta} |\Delta \alpha| - \bar{R} \bar{\alpha} \sin \bar{\beta} |\Delta \beta| \quad (4-100)$$

このように, 各情報の誤差量と各情報源の誤差量との関係式を線形で得ることができた。これら各式の誤差量を最小にするためには, 各情報源の誤差量を最小にし, 地上測定基点を最適な所に配置すればよい。

地上測定基点の最適配置は次のように求められる。すなわち, 測定対象の3次元位置を空間のある点に固定して考え, 地上測定基点の配置座標を変数とみなし, 次式を定義する。

$$X = X_1 \quad (4-101)$$

$$Y = Y_1 \quad (4-102)$$

$$h = h_1 \quad (4-103)$$

これらの値を近似式に代入すると地上測定基点配置座標変数が得られる。

$$X_1 = X_0 + R \cos \beta \quad (4-104)$$

$$\therefore X_0 = X_1 - R \cos \beta \quad (4-105)$$

$$Y_1 = Y_0 - R \sin \beta / \sqrt{1 + \alpha^2 \cos^2 \beta} \quad (4-106)$$

$$\therefore Y_0 = Y_1 + R \sin \beta / \sqrt{1 + \alpha^2 \cos^2 \beta} \quad (4-107)$$

$$h_1 = R \alpha \cos \beta \quad (4-108)$$

$$\therefore \alpha = h_1 / R \cos \beta \quad (4-109)$$

高度情報  $h$  についての最適配置を求めるには, 上式の  $\alpha$  を誤差式(4-100)に代入し, 測距  $R$  について偏微分すれば  $\Delta h$  を最小にする  $R$  が求まる。すなわち,

$$|\Delta h| = h_1 |\Delta R| / R + R \cos \beta |\Delta \alpha| + h_1 \tan \beta |\Delta \beta| \quad (4-110)$$

$$\partial |\Delta h| / \partial R = \cos \beta |\Delta \alpha| - h_1 |\Delta R| / R^2 = 0 \quad (4-111)$$

$$\therefore R = \sqrt{h_1 |\Delta R| / \cos \beta |\Delta \alpha|} \quad (4-112)$$

このように,  $\Delta h$  を最小にする  $R$  の値が求まる。ここで  $h_1$  は接地点に近づくほど零に近づくから,  $R$  も  $h_1$  に従って可能な限り接地点に近づく配置することにな

る。

情報 X については誤差式 (4-98) から測距 R を小さくすれば  $\Delta X$  を小さくできる事は明白である。

情報 Y については, 地上測定基点配置座標  $Y_0$  は近似式 (4-95), (4-97) から次式で表わされる。

$$Y_0 = Y_1 + R^2 \sin \beta / \sqrt{R^2 + h^2} \quad (4-113)$$

誤差式 (4-99) は次のように変形できるから

$$|\Delta Y| = (-2R|\Delta R| - R^2 \cos \beta |\Delta \beta|) / \sqrt{R^2 + h^2} - R^2 \sin \beta (R|\Delta R| + h|\Delta h|) / (R^2 + h^2)^{3/2} \quad (4-114)$$

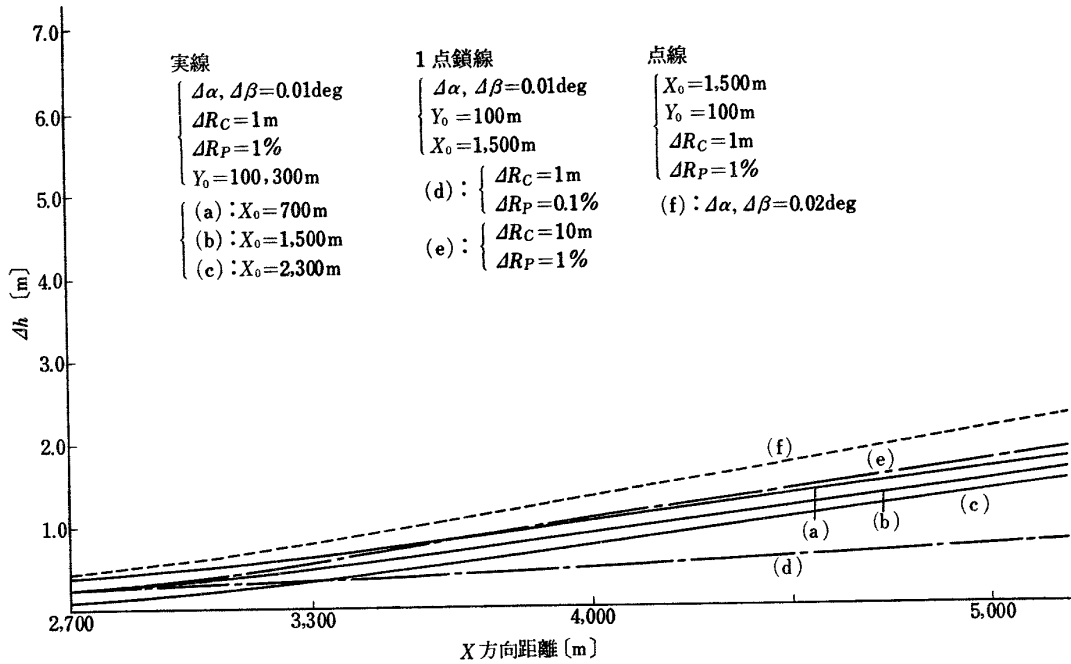


Fig.22 Precision Approach Radar System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

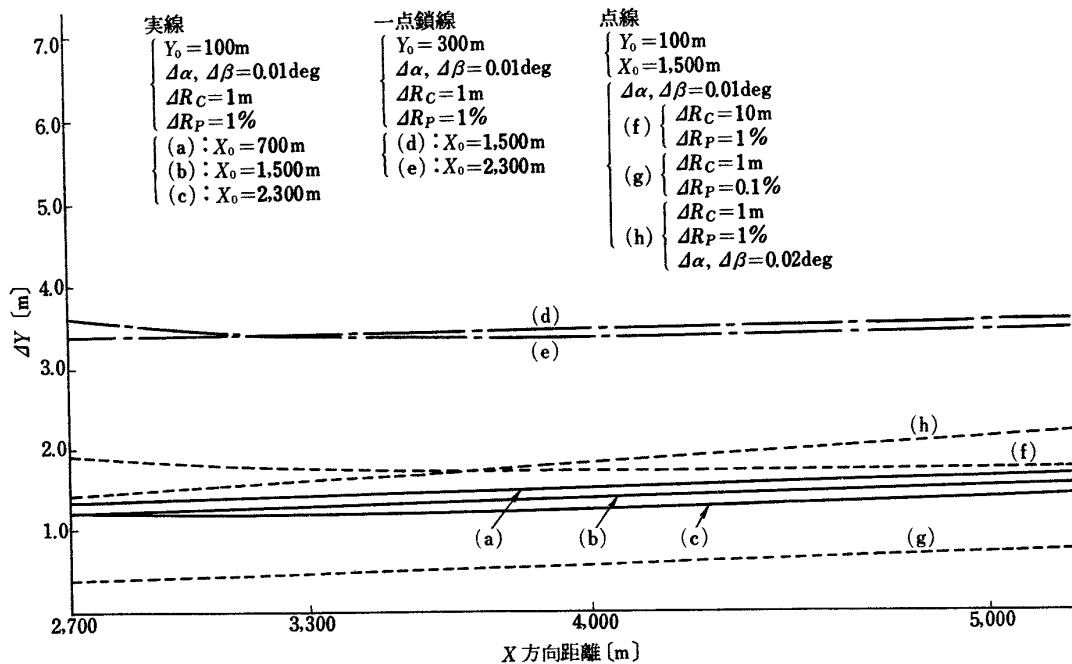


Fig.23 Precision Approach Radar System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響

$$= (R^2 + h^2)^{3/2} [-2R(R^2 + h^2)|\Delta R| - R^2(R^2 + h^2) |\Delta\beta| \cos\beta - R^2(R|\Delta R| + h|\Delta h|) \sin\beta] \quad (4-115)$$

$$= - (R^2 + h^2)^{3/2} [2R(R^2 + h^2)|\Delta R| + \sqrt{A^2 + B^2} \sin(C + \beta)] \quad (4-116)$$

ただし,  $A = R^2(R|\Delta R| + h|\Delta h|)$  (4-117)

$$B = R^2(R^2 + h^2)|\Delta\beta| \quad (4-118)$$

$$C = \tan^{-1}(B/A) \quad (4-119)$$

ここで, Rとhを固定すると $\Delta Y$ は $\sin(C + \beta)$ に従って変化する。 $Y_0$ と $\sin\beta$ の関係性は得られているから, $Y_0$ を可能な限り小さくすれば $\Delta Y$ は小さな値になる。このように,本システムは地上測定基点配置座標 $X_0, Y_0$ を $X_1, Y_1$ に可能な限り近づければ誤差の少ない情報 $X, Y, h$ を得ることができる。これらの近似式より得られた結果の妥当性は情報源に誤差を含ませて厳密式(2-40), (2-41), (2-42)を用い,誤差を求めた数値計算例で確認する。

Fig. 22は $\Delta h$ についての数値計算例である。実線(a), (b), (c)は地上測定基点を接地点に近づけるほど $\Delta h$ が小さくなることを示している。しかも,その各々は等差的関係にあるから,低高度になるほど影響の割合が大きくなる。 $\Delta R$ についての1点鎖線(d), (e)は低高度において余り差がないが,高高度になるに従って $\Delta h$ に大きく影響を与える。角度誤差 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ については点線(f)と(b)を比較すればその倍率と同じ倍率で $\Delta h$ に影

響している。これらの事は前項で述べたILASと全く同じである。これは(4-100)式と(4-76)式を比較すれば,(4-100)式の $\beta$ が小さいと右辺の第3項を他項に比べ無視でき,(4-76)式と同じになるからである。Fig. 23は $\Delta Y$ についての数値例である。これも前項で述べたILASと全く同じように見える。すなわち,(4-77)式と(4-99)式を比較すれば,(4-99)式の右辺第2項が $\beta$ の小さい範囲で無視でき,第1項のみとなり,(4-77)式と等しくなるからである。各パラメータの影響を略記すると,地上測定基点の影響は実線(a), (b), (c)によって比較でき, $X_0$ が接地点に近づくほど $\Delta Y$ が小さくなる。しかし(a), (b), (c)共々大差がない。地上測定基点配置座標 $Y_0$ の影響は1点鎖線(d), (e)と実線(b), (c)を比較すれば明らかである。これは誤差式で検討したように, $\Delta Y$ が $\sin(C + \beta)$ で変化するからで,しかも, $\sin\beta$ は $Y_0$ で変化するから,結局, $\Delta Y$ は $Y_0$ で変化することになる。

$\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta R$ については点線(f), (g), (h)で示す。これらのうち $\Delta R_p$ を0.1%にした(g)が1番少ない $\Delta Y$ を示している。

Fig. 24は $\Delta X$ についての数値計算例である。これも,前項で述べたILASでの誤差近似式(4-78)と(4-98)が全く同 であるため,同じ結果が得られている。地上測定基点配置座標は(a), (b), (c)と $X_0$ を接地点に近

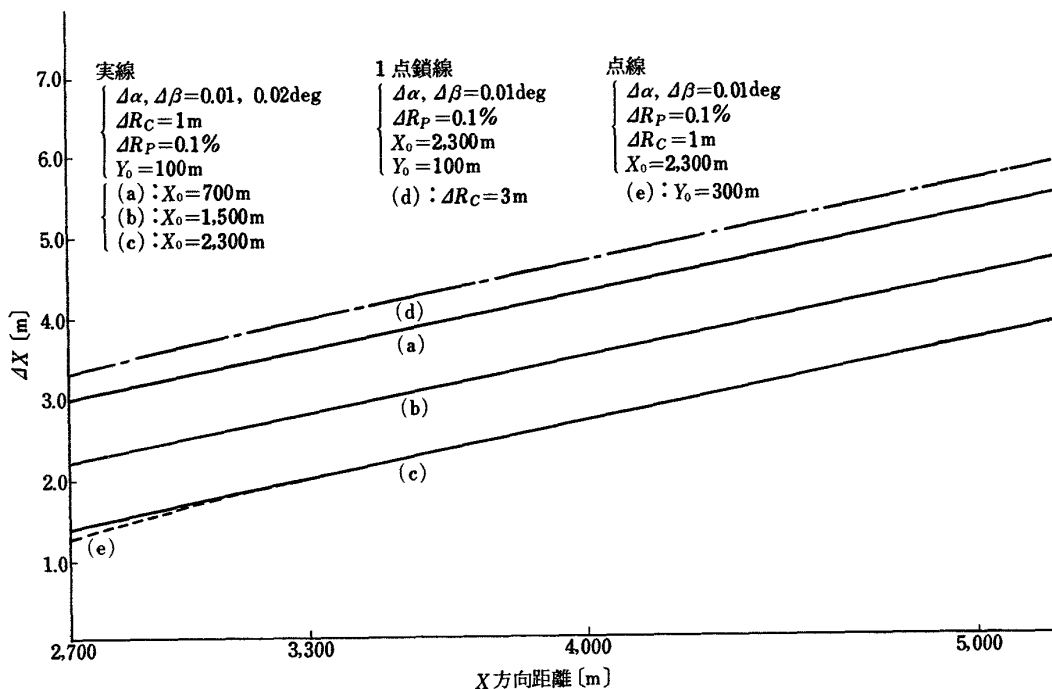


Fig.24 Precision Approach Radar System の各パラメータが $\Delta X$ におよぼす影響

ずけるに従って  $\Delta X$  を小さくすることができる。  $\Delta R_c$  については(e)と(d)を比較することにより明らかである。すなわち、その倍率に従って  $\Delta X$  も大きくなる。  $\Delta R_p$  は 1% で計算すると  $\Delta X$  がかなり大きな値になるので、  $\Delta X$  を計算するのに  $\Delta R_p = 0.1\%$  で行なった。

角度誤差  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  については実線(a), (b), (c) で示したように 0.01 deg を 0.02 deg にしても変化しない。

なお、地上測定基点配置座標  $Y_0$  についても  $\Delta X$  におよぼす影響は小さい。これは点線(e)と(c)を比較すれば明らかである。

これら  $\Delta h$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  共、前項で述べた IALS と全く同じような結果になった。しかし、厳密にはこれらの二つの計算式は異なり IALS よりもかなり複雑になっている。

### 4.6 A.I.L.S

本システムの近似式は(2-45), (2-46), (2-47) 式と次の条件式から得ることができる。

条件：情報源  $\alpha$  はその値が十分に小さくなる領域にあり、次の条件式を満足するものと仮定する。

条件式：

$$\sin \alpha \doteq \alpha, \quad \cos \alpha \doteq 1 \quad (4-120)$$

$$\sin \eta \doteq \eta, \quad \cos \eta \doteq 1 \quad (4-121)$$

$$\text{ただし } \alpha \ll 1, \quad \eta \ll 1$$

$$\therefore \eta = X_0 \alpha / R \quad (4-122)$$

したがって、近似式として次式を得る。

近似式：

$$h = R(\alpha - \eta) = \alpha(R - X_0) \quad (4-123)$$

$$X = R(\cos \alpha \cos \eta + \sin \alpha \sin \eta) \quad (4-124)$$

$$= R \quad (4-125)$$

$$Y = R \tan \beta \quad (4-126)$$

これら近似式をテーラ級数展開し、2次以上の高次項を無視すると次式が得られる。

$$|\Delta h| = (\bar{R} - X_0) |\Delta\alpha| + \bar{\alpha} |\Delta R| \quad (4-127)$$

$$|\Delta X| = |\Delta R| \quad (4-128)$$

$$|\Delta Y| = \tan \bar{\beta} |\Delta R| + \bar{R} \sec^2 \bar{\beta} |\Delta\beta| \quad (4-129)$$

このように、各情報の誤差量と各情報源の誤差量との関係式は線形で得ることができた。これら各式の誤差量を最小にするためには各情報源の誤差量を最小にし、地上測定基点配置座標を最適に決めればよい。

地上測定基点の最適配置は、前項と同様に測定対象の3次元位置を空間のある点に固定し、地上測定基点の配置座標を変数とみなし、次式を定義して求める。

$$h = h_1 \quad (4-130)$$

$$Y = Y_1 \quad (4-131)$$

$$X = X_1 \quad (4-132)$$

これらの数値を近似式に代入すれば、地上測定基点配置座標変数は次式のように求まる。

$$h_1 = \alpha(R - X_0) \quad (4-133)$$

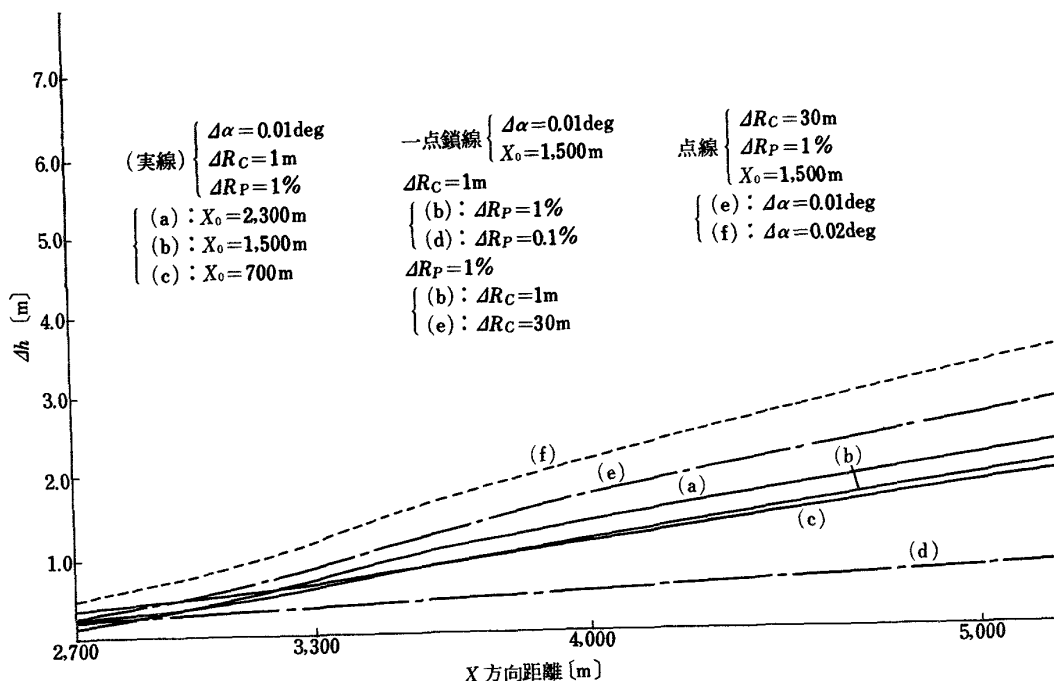


Fig. 25 Advanced Integrated Landing System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響



$$\therefore X_0 = R - h_1 / \alpha \quad (4-134)$$

この変数を誤差式(4-127)に代入し、 $\alpha$ で偏微分すれば、 $\Delta h$ を最小にする $\alpha$ の値が求まる。すなわち、

$$|\Delta h| = [R - (R - h_1 / \alpha)] |\Delta \alpha| + \alpha |\Delta R| \quad (4-135)$$

$$= h_1 \Delta \alpha / \alpha + \alpha |\Delta R| \quad (4-136)$$

$$\partial |\Delta h| / \partial \alpha = -h_1 |\Delta \alpha| / \alpha^2 + |\Delta R| = 0 \quad (4-137)$$

$$\therefore \alpha = \sqrt{h_1 |\Delta \alpha| / |\Delta R|} \quad (4-138)$$

この $\alpha$ の値を(4-134)式に代入すれば次式を得る。

$$X_0 = R - \sqrt{h_1 |\Delta R| / |\Delta \alpha|} \quad (4-139)$$

このように、 $X_0$ の最適値は測距 $R$ と高度 $h_1$ の関数であ

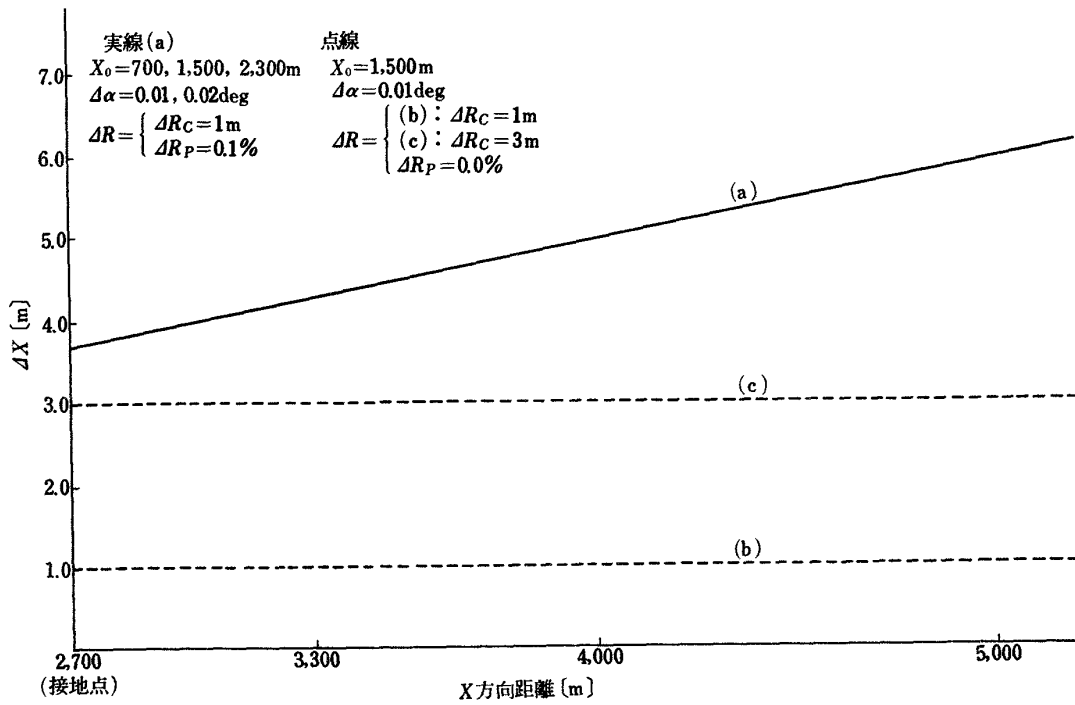


Fig. 26 Advanced Integrated Landing System の各パラメータが  $\Delta X$  におよぼす影響

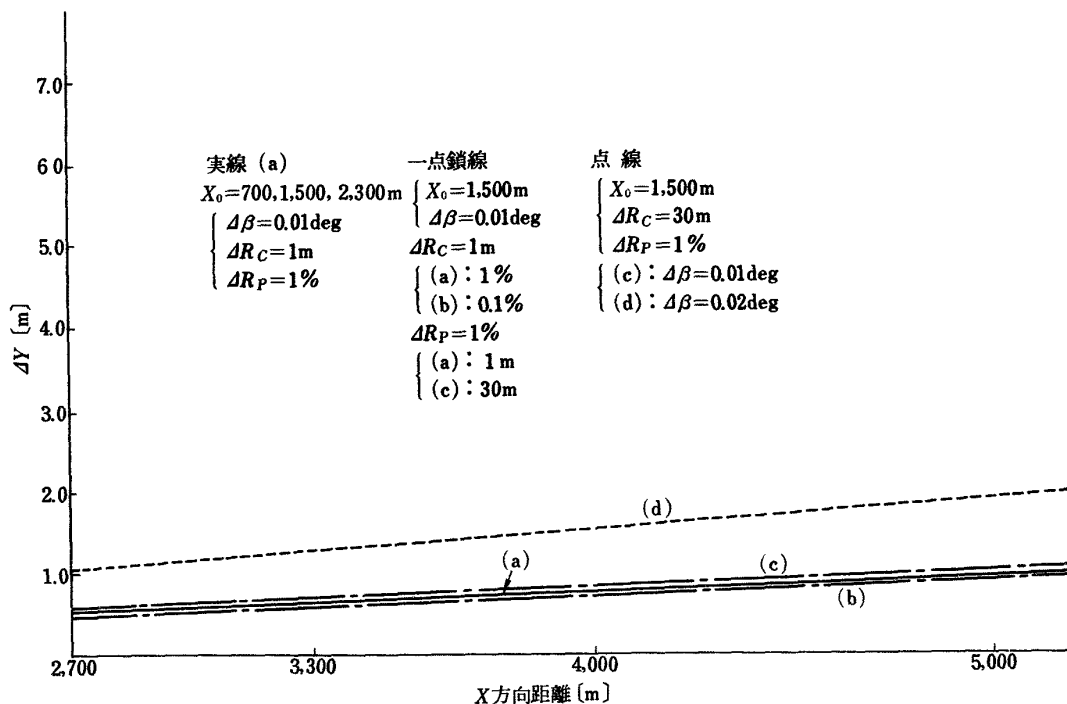


Fig. 27 Advanced Integrated Landing System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響

り、接地点に近づくほど高度  $h$  が零に近づくから、 $X_0$  も  $R$  に近づくように大きくしなければならない。すなわち、接地点に可能な限り近づけて  $X_0$  を配置することである。

これら、近似式より得られた結果の妥当性を、すなわち各パラメータの影響を厳密式を用いた数値計算例 Fig. 25~Fig. 27 で確認する。

Fig. 25 は  $\Delta h$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c) は  $X_0$  をパラメータにして計算した例である。これらを比較すると、低高度において  $X_0$  を接地点に近づけた(a)が  $\Delta h$  を一番小さくしている。しかし、高高度になるに従って  $X_0$  を小さくした(c)が  $\Delta h$  を一番小さくなる。これらの結果は、式による検討結果得られた地上測定基点配置座標  $X_0$  の最適値が高度  $h$  の平方根に比例して減少するからであり、全く、式による検討結果と一致する。

1点鎖線は  $\Delta R$  をパラメータにした例である。これは誤差式(4-127)の第2項によって変化したもので、測距  $R$  の%誤差  $\Delta R_p$  も測距  $R$  の固定誤差  $\Delta R_c$  も高高度になるに従って  $\Delta h$  に大きく影響する。

点線は角度誤差  $\Delta\alpha$  をパラメータにした例である。これは誤差式(4-127)の第1項による影響を示すものである。誤差式(4-127)は接地点近くの低高度において、第2項が無視できるから、第1項のみになる。これは(e)と(f)の値を接地点で比較すると  $\Delta\alpha$  を2倍した(f)が  $\Delta h$  も2倍になっているから明らかである。しかし、高高度になるに従って(4-127)式の第2項も無視できないから、 $\Delta\alpha$  の  $\Delta h$  におよぼす割合は少なくなる。

Fig. 26 は  $\Delta X$  についての数値計算例である。 $\Delta X$  は誤差式(4-128)に見られるように、 $\Delta R$  のみに影響される。実線(a)は  $X_0$  と  $\Delta\alpha$  を変化させても  $\Delta X$  が変化しない事を示す。点線(b), (c) は  $\Delta R_p$  が零の場合に、 $\Delta R_c$  を  $1m$  と  $3m$  に変化させた例である。 $\Delta X$  は  $\Delta R_c$  の変化をそのまま示している。 $\Delta R_p$  の影響は  $\Delta R_p$  を  $0.1\%$  考慮した(a)と  $\Delta R_p$  を無視した(b)を比較すれば判る。(a)は  $\Delta R_p$  の分だけ(b)より大きく  $\Delta X$  を示している。このように  $\Delta X$  は  $\Delta R_p$  の影響が非常に大きく現われる。

Fig. 27 は  $\Delta Y$  についての数値計算例である。 $\Delta Y$  の誤差式(4-129)は  $\beta$  が十分に小さな領域においては次のように表わせる。

$$|\Delta Y| = \bar{\beta} |\Delta R| + \bar{R} |\Delta\beta| \quad (4-140)$$

この式は右辺の第1項より第2項の方が大きく  $\Delta Y$  に

影響する。このことは1点鎖線(b), (c)による  $\Delta R$  の変化と点線(d)による  $\Delta\beta$  の変化を見れば明白である。実線(a)は地上測定基点配置座標  $X_0$  をパラメータにした例であり、 $X_0$  の変化は  $\Delta Y$  に影響しないことを示している。(b), (c)は(a)に比較して  $\Delta R_p$  を  $0.1\%$  と  $\Delta R_c$  を  $30m$  に変化させた場合であり、 $\Delta Y$  の変化はわずかに見られる。しかし、 $\Delta R$  の  $\Delta Y$  におよぼす影響は小さく、ほとんど無視できる。(d)は(c)に比較して  $\Delta\beta$  を2倍にしたもので、 $\Delta Y$  も2倍になっている。このように  $\Delta Y$  は  $\Delta\beta$  が大きく影響することが判る。

本システムは、 $\Delta h$  は非常に小さく、 $\Delta X$  も比較的小さくできる長所を有するが、 $\Delta X$  が大きくなる欠点を有する。これらのことは近似式による検討結果と数値計算例による結果から確認できる。

#### 4.7 2 Ranges, 1 Angular System

本システムの近似式は(2-55), (2-56), (2-57)式と次の条件式から得ることができる。

条件：情報源  $\alpha$  と  $\eta$  はその値が十分小さくなる領域にあり、次の条件式を満足するものと仮定できる。

条件式：

$$\sin \alpha \doteq \alpha, \quad \cos \alpha \doteq 1 \quad (4-141), (4-142)$$

$$\sin \eta \doteq \eta, \quad \cos \eta \doteq 1 \quad (4-143), (4-144)$$

$$\text{ただし, } \alpha \ll 1, \quad \eta \ll 1$$

$$\therefore \eta = X_0 \alpha / l$$

それゆえ、近似式は次のようになる。

$$Y = (R_1^2 - R_2^2) / 4 Y_0 \quad (4-146)$$

$$X = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} \cdot (\cos \alpha \cos \eta + \sin \alpha \sin \eta) \quad (4-147)$$

$$\doteq \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} \quad (4-148)$$

$$h = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} \cdot (\sin \alpha \cos \eta - \sin \eta \cos \alpha) \quad (4-149)$$

$$\doteq \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} (\alpha - \eta) \quad (4-150)$$

$$= [\sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y^2} - X_0] \alpha \quad (4-151)$$

これら、近似式をテラ級数展開し、2次以上の高次項を無視すると次式が得られる。

$$|\Delta Y| = (\bar{R}_1 |\Delta R_1| - \bar{R}_2 |\Delta R_2|) / 2 Y_0 \quad (4-152)$$

$$|\Delta X| = (\bar{R}_1 |\Delta R_1| + \bar{R}_2 |\Delta R_2| - 2 \bar{Y} |\Delta Y|) / 2 \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - \bar{Y}^2} \quad (4-153)$$

$$|\Delta h| = (\sqrt{R_1^2 + R_2^2} / 2 - Y_0^2 - \bar{Y}^2 - X_0) |\Delta\alpha| + \bar{\alpha} |\Delta X| \quad (4-154)$$

このように各情報の誤差量と情報源の誤差量との関係式は線形で求まった。それゆえ、各式の誤差量を少なくするためには各情報源の誤差量を最小にし、地上測定基点を最適な所に配置すればよい。

地上測定基点の最適配置は、前項と同様に測定対象の3次元位置を空間のある点に固定し、地上測定基点の配置座標を変数とみなし、次式を定義して求める。

$$h = h_1 \quad (4-155)$$

$$Y = Y_1 \quad (4-156)$$

$$X = X_1 \quad (4-157)$$

これらの数値を近似式(4-151)、(4-146)に代入すれば、地上測定基点配置座標変数は次式のように求まる。

$$h_1 = \alpha \left[ \sqrt{(R_1^2 + R_2^2)} / 2 - Y_0^2 - Y_1^2 - X_0 \right] \quad (4-158)$$

$$\therefore X_0 = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2)} / 2 - Y_0^2 - Y_1^2 - h_1 / \alpha \quad (4-159)$$

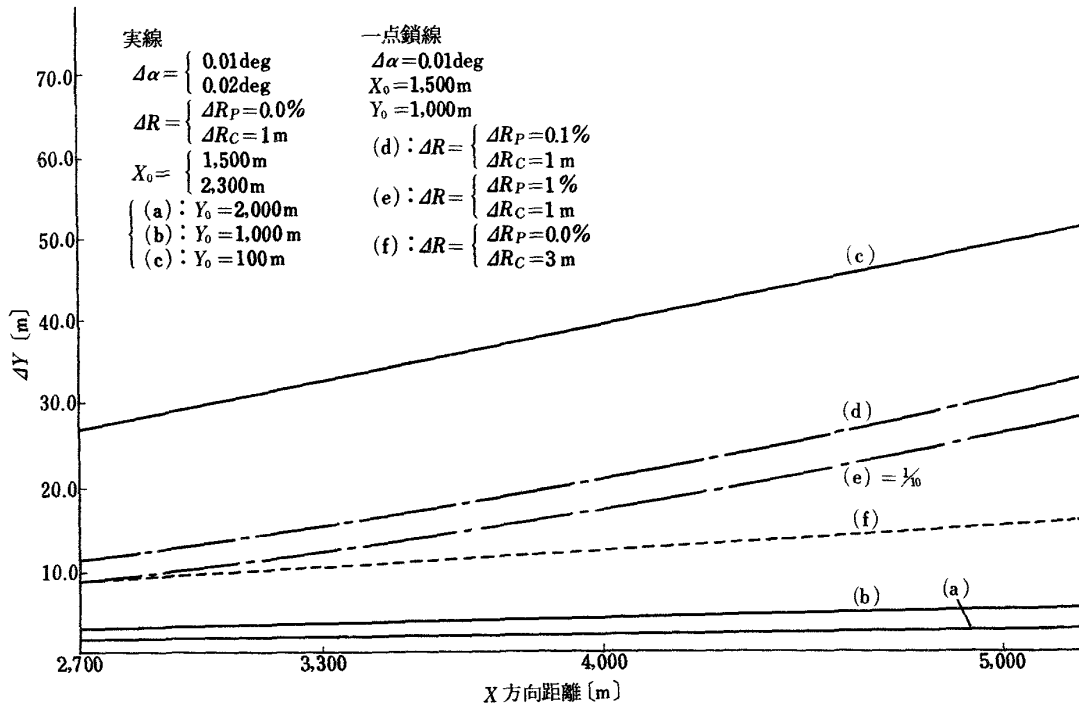
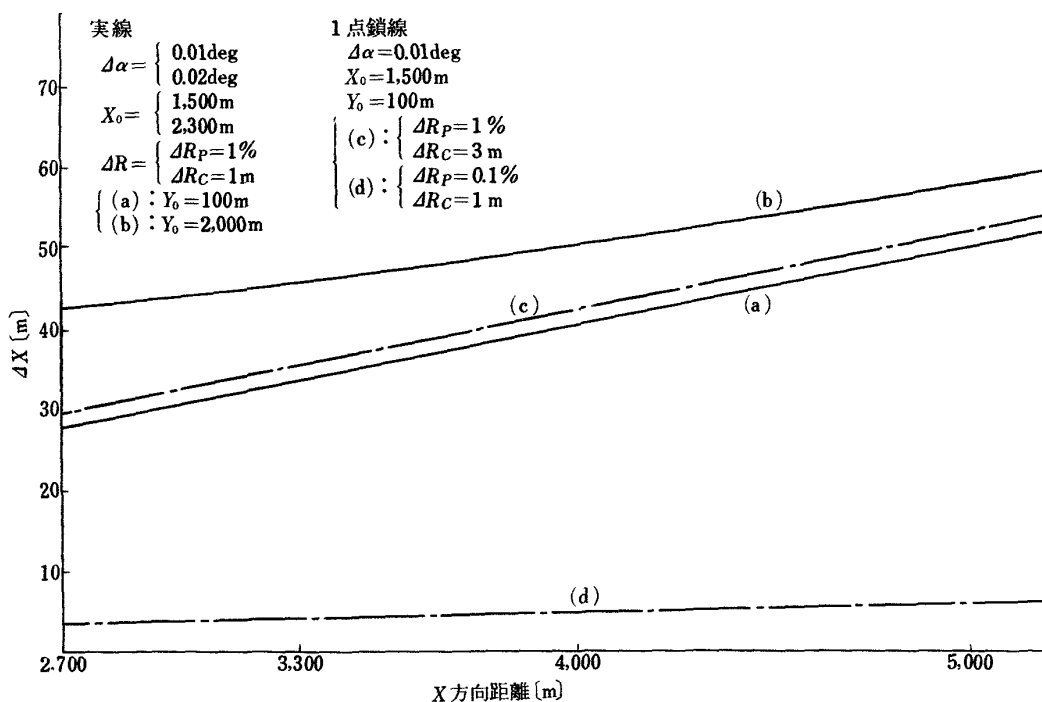


Fig.28 2 Ranges, 1 Angular System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響



$$Y_1 = (R_1^2 - R_2^2) / 4 Y_0 \quad (4-160)$$

$$\therefore Y_0 = (R_1^2 - R_2^2) / 4 Y_1 \quad (4-161)$$

これらの変数を誤差式に代入して、ある情報源で偏微分すれば、誤差量を最小にする情報源の値が求まる。

この値を地上測定基点配置座標変数の式に代入すれば変数の最適値が求まる。

高度 h については次のようになる。

$$|\Delta h| = h_1 |\Delta \alpha| / \alpha + \alpha |\Delta X| \quad (4-162)$$

$$\partial |\Delta h| / \partial \alpha = -h_1 |\Delta \alpha| / \alpha^2 + |\Delta X| = 0 \quad (4-163)$$

$$\therefore \alpha = \sqrt{h_1 |\Delta \alpha| / |\Delta X|} \quad (4-164)$$

それゆえ、地上測定基点の最適配置座標は次のようになる。

$$X_0 = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) / 2 - Y_0^2 - Y_1^2} - \sqrt{h_1 |\Delta \alpha| / |\Delta X|} \quad (4-165)$$

この式は前項で扱った AILS と同様に高度 h が零に近づくに従って右辺の第 1 項のみになる。すなわち、前項と同様に、X<sub>0</sub> は可能な限り大きく、すなわち接地点の X 座標に近づけて配置することである。

Y<sub>0</sub> については、誤差式 (4-152) から Y<sub>0</sub> を大きくすると測距 R も大きくなるが、その割合は Y<sub>0</sub> を大きくした方が小さくなるので Y<sub>0</sub> を可能な限り大きくすればよいことが判る。

これら、近似式で得られた結果の妥当性は厳密式を用いた数値計算例で各パラメータの影響を調べることに

よって確認する。Fig. 28 は  $\Delta Y$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c)は Y<sub>0</sub> をパラメータにした例である。 $\Delta Y$  は(a), (b), (c)と Y<sub>0</sub> が小さくなるに従って大きくなり、その値は Y<sub>0</sub> の値に反比例している。これら(a), (b), (c)は  $\Delta R_p$  を零で行っている。これは  $\Delta R_p$  を加えると  $\Delta Y$  が非常に大きな値となるからである。この  $\Delta R_p$  の影響は(b), (d), (e) を比較すれば明らかである。(d)は(b)に対し  $\Delta R_p$  を 0.1% 加えたもので、その加算した分だけ  $\Delta Y$  も大きくなっている。(e)は(b)に対し  $\Delta R_p$  を 1% 加えたから、さらに大きくなり、 $\Delta Y$  の値は(d)による増加の 10 倍になっている。(f)は(b)に対し、 $\Delta R_c$  を 3 倍したもので、 $\Delta Y$  も 3 倍の値を示す。

Fig. 29 は  $\Delta X$  についての数値計算例である。 $\Delta X$  は誤差式 (4-153) から明らかなように、Y<sub>0</sub> を小さな値にすれば小さくなる。すなわち、Y<sub>0</sub> を小さくすることは (4-153) 式の分母を大きくすることであり、 $\Delta X$  を小さくする。実線(a), (b)は Y<sub>0</sub> をパラメータとした例である。Y<sub>0</sub> の大きな(b)が(a)に比較して  $\Delta X$  を大きくしている。これは  $\Delta Y$  と反対の影響を示す。しかし、Y<sub>0</sub> は  $\Delta Y$  ほど  $\Delta X$  に影響を与えない。 $\Delta X$  は  $\Delta R$  によって大きく影響される。これは(c), (d)を(a)と比較すれば判る。すなわち、(c)は  $\Delta R_c$  を(a)の 3 倍にしたもので、その値だけ  $\Delta X$  も大きくなっている。(d)は  $\Delta R_p$  を(a)の 1/10 倍にしたもので、 $\Delta X$  も約 1/10 に小さくなっている。このよ

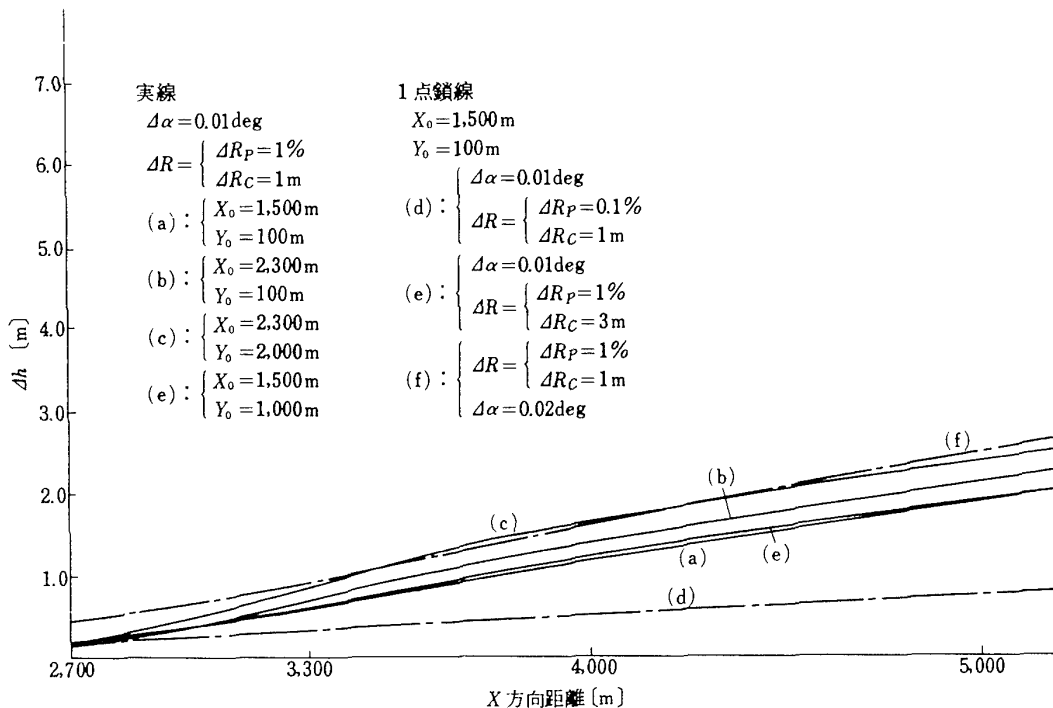


Fig. 30 2 Ranges, 1 Angular System の各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

うに  $\Delta X$  は  $\Delta R$  の値そのものをほぼ表わしている。

Fig. 30 は  $\Delta h$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c), (e)は地上測定点  $X_0, Y_0$  をパラメータにした例であり,  $X_0$  は(a), (b)を比較することによって判るし,  $Y_0$  は(c), (e)を比較すれば判る。 $X_0$  は近似式から得られた結果と前項で扱った AILSの結果から可能な限り接地点の X 座標に近ずければ  $\Delta h$  を小さくできることが推定できる。すなわち, 接地点に近い方の(b)は(a)よりも接地点での  $\Delta h$  を小さくしている。 $Y_0$  は(e)の方が(c)より  $\frac{1}{2}$  小さく,  $\Delta h$  も小さくなっている。これは誤差式(4-154)に  $X_0$  の値を代入すると平方根の項が消え,  $|\Delta X|$  の項によって影響されるからであり,  $\Delta X$  は前記したように  $Y_0$  が小さくなれば小さくなるから, 結局  $Y_0$  の小さい(e)の方が(c)より  $\Delta h$  を小さくする。

1点鎖線(d), (e), (f)は  $\Delta R$  と  $\Delta \alpha$  をパラメータにした例であり, (a)と比較すれば, 各パラメータの影響が判る。(e)は  $\Delta R_c$  を(a)の3倍にした例であるが, その値はほとんど変わらない。(d)は  $\Delta R_p$  を(a)の  $\frac{1}{10}$  倍にした例であり,  $\Delta h$  をかなり小さくしている。(f)は  $\Delta \alpha$  を(a)の2倍にした例であり, 接地点付近で  $\Delta h$  を2倍にしている。これは誤差式(4-166)が低高度において右辺の第1項により大きく影響されることを意味する。このように  $\Delta h$  は低高度で  $\Delta \alpha$  の値が大きく影響し, 高高度になるに従って  $\Delta R_p$  が大きく影響することが判

る。

### 4.8 3 Ranges System

本システムの誤差式は(2-61), (2-62), (2-63)式をテーラ級数展開し, 2次以上の高次項を無視すれば次のように得られる。

$$|\Delta Y| = (\bar{R}_3 |\Delta R_3| - \bar{R}_2 |\Delta R_2|) / 2 Y_0 \quad (4-166)$$

$$|\Delta X| = \{ \bar{R}_1 |\Delta R_1| - (\bar{R}_2 |\Delta R_2| + \bar{R}_3 |\Delta R_3|) / 2 \} / X_0 \quad (4-167)$$

$$|\Delta h| = (\bar{R}_1 |\Delta R_1| - \bar{X} |\Delta X| - \bar{Y} |\Delta Y|) / \sqrt{\bar{R}_1^2 - \bar{X}^2 - \bar{Y}^2} \quad (4-168)$$

このように, 各情報の誤差量と各情報源の誤差量との関係式は線形で得られる。これら各情報の誤差量は各情報源の誤差量を最小にし, 地上測定基点配置座標を最適に決めれば最小にすることができる。

地上測定基点の最適配置座標は前項の 2 Ranges, 1 Angler System と同様に決められる。

$Y_0$  については誤差式(4-166)が前項における(4-152)式と全く同じであるから同様にいえる。すなわち,  $Y_0$  を大きくすると測距  $R_2, R_3$  も大きくなるが, その割合は  $Y_0$  を大きくした方が小さくなるので  $Y_0$  を可能な限り大きくすることである。

$X_0$  については, 誤差式(4-167)から  $Y_0$  と同様に  $X_0$  が大きくなれば  $\Delta X$  を小さくできるから, 可能な限り接地点に近づく値にすればよい。

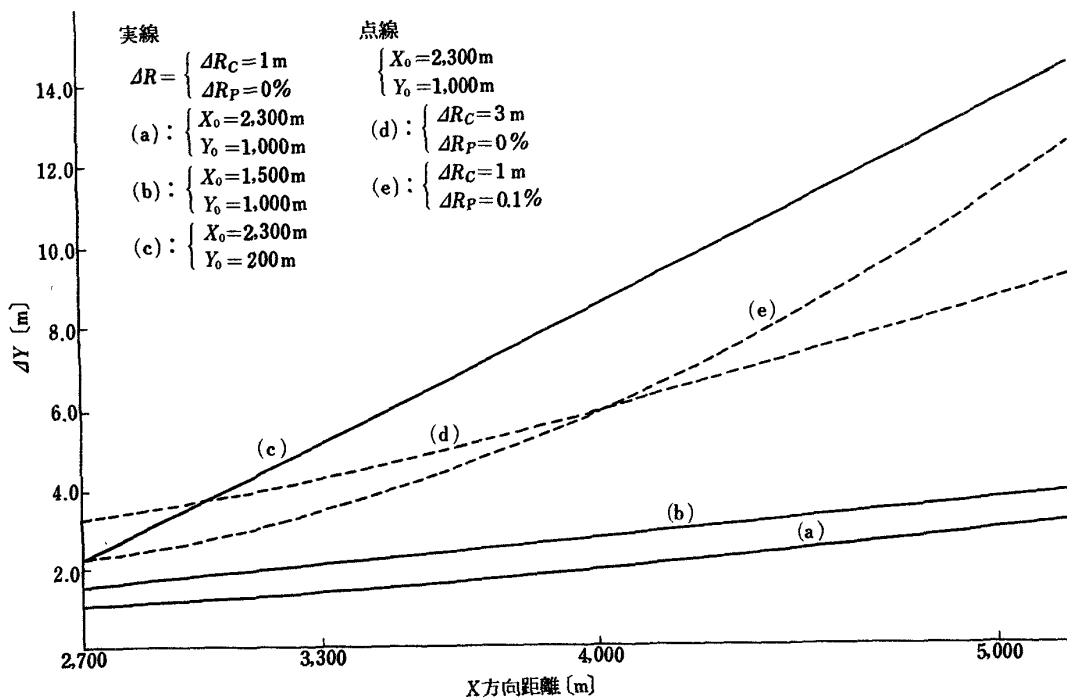


Fig. 31 3 Ranges System の各パラメータが  $\Delta Y$  におよぼす影響

このように誤差式より得られた結果は数値計算結果によってその妥当性を確認する。

それに先だち、本システムの欠点である絶対必要条件について述べる。それは高度  $h$  を(2-63)式から求める時に生ずる。すなわち、高度  $h$  を得るためには(2-63)式の平方根内の値が正であることが絶対に必要である。それゆえ、この絶対必要条件に誤差量を含ませた式で検討する。

絶対必要条件：

$$h^2 = R_1^2 - X^2 - Y^2 \geq 0 \quad (4-169)$$

この条件式に誤差量を加えると次式を得る。

$$(R_{1T} - |\Delta R_1|)^2 - (X_T + |\Delta X|)^2 - (Y_T + |\Delta Y|)^2 \geq 0 \quad (4-170)$$

$$h_T^2 + (\Delta R_1^2 - \Delta X^2 - \Delta Y^2) - 2(R_{1T}|\Delta R_1| + X_T|\Delta X| + Y_T|\Delta Y|) \geq 0 \quad (4-171)$$

ただし、添字  $T$  のついた各情報は真値を表わす。

この条件式は誤差量  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  が最大値の時、絶対に必要な最小高度  $h_T$  を求めることができる。

誤差量  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  は誤差式(4-167), (4-166)から各情報源の符号が下に示す場合に正の最大値になる。

各情報源の符号：

$$\Delta R_1 > 0 \quad (4-172)$$

$$\Delta R_2 < 0 \quad (4-173)$$

$$\Delta R_3 > 0 \quad (4-174)$$

ここで計算を簡単にするため、次式を仮定する。

$$Y = 0 \quad (4-175)$$

$$R_2 = R_3 \quad (4-176)$$

$$X = R_1 \quad (4-177)$$

$$|\Delta R_2| = |\Delta R_3| \quad (4-178)$$

$$R_2 = Y_0 \quad (4-179)$$

$$R_1 = X_0 \quad (4-180)$$

誤差量  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  の最大値はこれらの仮定と各情報源の符号および(4-167), (4-166)式から次式を得る。

$$\Delta Y = R_2 (\Delta R_3 + \Delta R_2) / 2 Y_0 \quad (4-181)$$

$$= \Delta R_2 \quad (4-182)$$

$$\Delta X = R_1 \Delta R_1 / X_0 \quad (4-183)$$

$$= \Delta R_1 \quad (4-184)$$

これらの値を絶対必要条件の式(4-171)に代入すると次式を得る。

$$h_T^2 + (\Delta R_1^2 - \Delta R_1^2 - \Delta R_2^2) - 2(-R_{1T}\Delta R_1 + X_T\Delta R_1 + Y_T\Delta R_2) \geq 0 \quad (4-185)$$

$$h_T^2 - \Delta R_2^2 \geq 0 \quad (4-186)$$

$$\therefore h_T \geq \Delta R_2 \quad (4-187)$$

このように、本システムの実測し得る真の高度  $h_T$  は  $\Delta R_2$  より大きいことが絶対必要条件である。もし、測距誤差  $\Delta R_2$  が  $1\text{ m}$  であるとする  $1\text{ m}$  以下の高度情報  $h$  は得られないことになる。これらのことから、本システムは高度  $h$  を得る方法において不適当なシステム

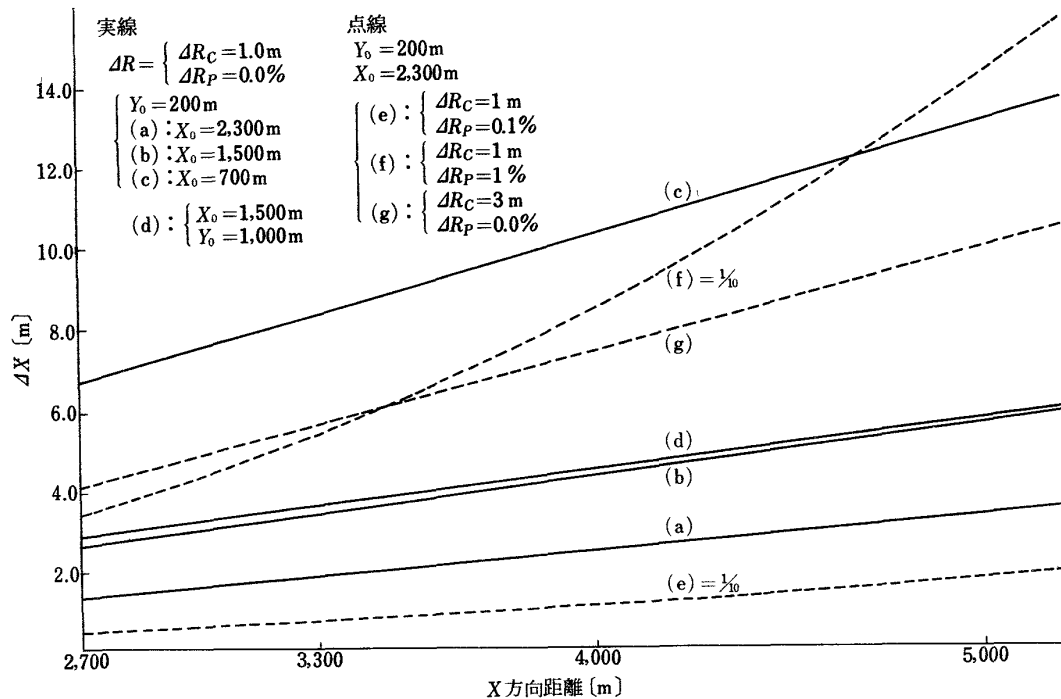


Fig.32 3 Ranges System の各パラメータが  $\Delta X$  におよぼす影響

である。

次に、これら式による結果の妥当性を数値計算例で確認する。

Fig. 31 は  $\Delta Y$  についての数値計算例である。実線(a),

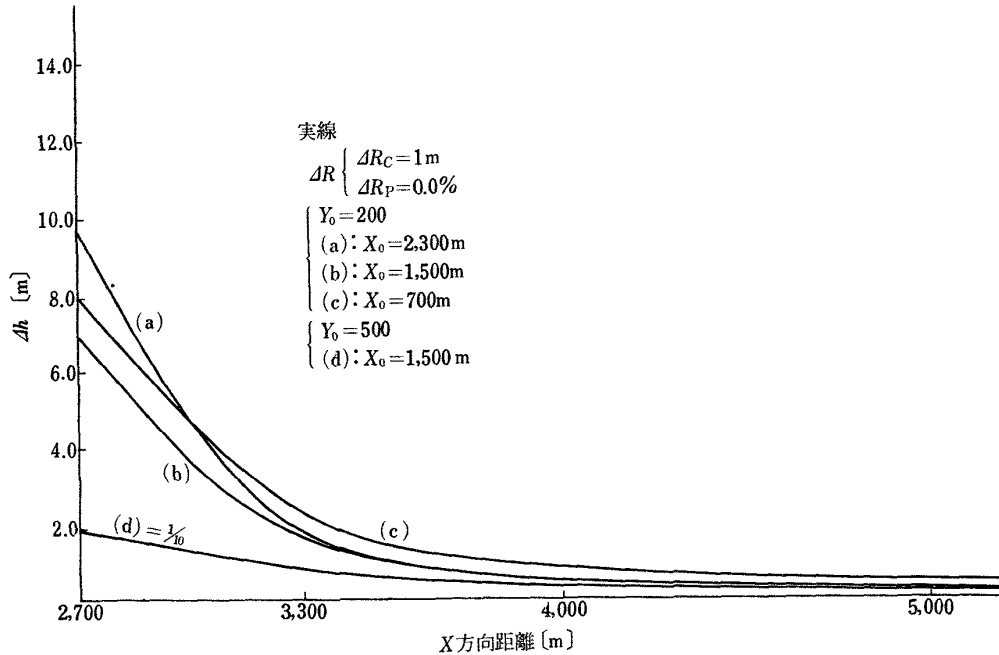


Fig. 33 3 Ranges Systemの各パラメータが  $\Delta h$  におよぼす影響

(b), (c)は地上測定基点  $X_0, Y_0$  をパラメータにした例であり、(a)と(b)を比較すれば  $X_0$  の影響がわかり、(a)と(c)を比較すれば  $Y_0$  の影響がわかる。 $Y_0$  は式による検討結果と同じく、その値が大きい(a)の方が  $\Delta Y$  を小さくできる。 $X_0$  は  $Y_0$  と同じく、その値が大きい(a)の方が  $\Delta Y$  を小さくできる。これは誤差式(4-166)の測距  $R_2, R_3$  が  $X_0$  を大きくすると小さくなるからである。

点線(d), (e)は  $\Delta R$  をパラメータにした例であり、(a)に比較して(d)は  $\Delta R_c$  を3倍したもので  $\Delta Y$  も3倍の値を示す。(e)は(a)に比較して  $\Delta R_p$  を0.01%加算したもので高高度になるに従い  $\Delta R_p$  の影響が  $\Delta Y$  に大きく現われる。

Fig. 32 は  $\Delta X$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c), (d)は地上測定基点をパラメータにしたものである。 $X_0$  については(a), (b), (c)を比較すれば明らかになる。すなわち、 $X_0$  の大きい(a)が  $\Delta X$  を最小にする。 $Y_0$  については(b), (d)を比較すれば明らかであり、わずかに  $Y_0$  の大きい(d)の方が  $\Delta X$  を大きくする。これは  $Y_0$  が大きいと測距  $R_2, R_3$  が大きくなるからで、 $\Delta X$  も(4-167)式から大きくなることから判る。しかしながら  $\Delta Y$  ほど  $\Delta X$  は  $Y_0$  に影響されない。

点線(e), (f), (g)は  $\Delta R$  をパラメータにした例である。 $\Delta R_p$  については(a)に対する(e)と、(e)に対する(g)によって  $\Delta X$  におよぼす影響が判る。すなわち、 $\Delta R_p$  は  $\Delta X$  に対する影響が大きい。 $\Delta R_c$  については(a)と(g)を比較すれば明らかであり、 $\Delta R_c$  を3倍した(g)が  $\Delta X$  も3倍になる。

Fig. 33 は  $\Delta h$  についての数値計算例である。実線(a), (b), (c), (d)は地上測定基点配置座標をパラメータにした例であり、(b)の場合が一応  $\Delta h$  を最小にしている。しかしながら(a), (b), (c)は  $\Delta h$  に対し大差が見られない。(d)は(b)に比較して  $Y_0$  を2.5倍にしたもので、 $\Delta h$  をかなり大きな値にしている。

これら(a), (b), (c), (d)に、共通していることは低高度になるに従って  $\Delta h$  が大きくなることである。しかも  $\Delta R$  は  $\Delta R_c$  のみを考え、その値も1mと最小値を用いた場合であり、 $\Delta R_p$  の加算や、 $\Delta R_c$  の増加は式で検討したように絶対必要条件が満たされず、高度  $h$  を求めることが出来ない事を数値計算によって確認できた。これらのことを考慮すると、本システムは低高度の情報  $h$  を得るのに不適当なシステムであり、実用に対し、不可能に近いシステムである。

### 5. 多重化システムの検討

着陸用の電波誘導装置としては、従来のシステムに比べて、より高い信頼性、安全性のものを必要とする。信頼性、安全性を向上させるためには、装置自体の個々の信頼性をあげる努力など、設計製作上において留意しなければならない課題もあるが、より積極的に信頼性、安全性を向上させるために、装置を多重化して、冗長性 (Redundancy) をもたせることが考えられる。

本章では、着陸用電波誘導システムの多重化について検討し、新しい概念の多重化方式を提案するものである。

#### 5.1 多重化システムの基本的考察

一般に多重化といえば、同一システムを二重系、三重系にすることである。しかし、同一方式で二重系、三重系にする方式は必ずしも経済的ではないことが予想される。したがって、経済性を考え、より少ない情報源で信頼性をあげ、しかも精度の高いシステムを得ることが可能であれば望まれる。本節は、このようなシステムが得られるかどうかについて考察を行う。着陸用電波誘導装置から得られる航空機の3次元位置情報は前章で述べたように、3つの情報源より得られる。これらの情報源に、さらに1つ以上の新たな情報

源を加えることによって多重系を構成することができ、信頼性を著しく改善できる可能性がある。このような考えから、多重系に関しての情報源の組み合わせを考えてみる。組み合わせをTable 2に示す。Table 2より、二重系は4つの情報源があれば1つの情報源があれば1つの情報源が故障しても、残った3つの情報源で3次元位置情報は得られるはずである。しかし、この4つの情報源は同じ性質のものでなければ故障を補うことはできない。このことから、4つの情報で二重系を得るには、4.3節、4.8節で述べたシステム、すなわち、Angle of Incidence System と 3 Range System のみが、二重系に拡張することができる。しかし、現在の電波技術では、これらのシステムは十分な精度を有していないので実用に供することはできない。したがって、さらに1つの情報を追加し、5つの情報源を用いて二重系を実現できる。このような方式としては、4.1節のRectangular System と 4.2節のBiangular System を拡張することができる。これらの方式は性能的に十分実用に供できると考えられる。この場合、同一方式を二重系にした場合と比べて、情報源を1つ少なくすることができたことになる。

三重系システムについても同様のことがいえる。すなわち、三重系システムでは3つの同種の基本情報のほかに2つの同種情報源を追加すれば理屈の上では構成でき、2つの情報源が故障しても3次元位置情報を得ることができるはずである。しかし、この場合でも、情報源のすべてにわたって、同種のものが要求され、前述のように、現状の電波技術より性能的にみて一重、二重系と同様に十分な性能を持ったシステムを構成することはできない。したがって、異種の情報源を用いるとすれば、7つの情報源が必要となる。3次元情報をそのまま3重にすれば、3×3、すなわち9つの情報源が必要であることと比較すると、2つの情報源が少なくすむ。

このように、多重系は、基本的に一重の基本システムを、いかに有効に拡張するかということであって、基本システムとして好ましくないシステムを多重化しても、良い位置情報は得られない。

次に、多重系について具体的な検討を進めるが、2重系は3重系の情報源を減らすことによって容易に得られるので、以下、3重系についてのみ、検討を行なうことにする。

第4章の基本システムの検討結果よりみると、位置

		角度情報源の数									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
距離情報源の数	0				30	40	50	60	70	80	90
	1			31	41	51	61	71	81	91	
	2		32	42	52	62	72	82	92		
	3	33	43	53	63	73	83	93			
	4	44	54	64	74	84	94				
	5	55	65	75	85	95					
	6	66	76	86	96						
	7	77	87	97							
	8	88	98								
	9	99									

- 30~33 : 1重系 (各測定装置の可動は1自由度以上必要)
- 40~44 : 2重系 ( " 2自由度以上必要)
- 50~55 : 2重系 ( " 1自由度以上必要)
- : 3重系 ( " 2自由度以上必要)
- 60~66 : 2重系 (同一方式の重複)
- 70~77 : 3重系 (各測定装置の可動は1自由度以上が必)
- 90~99 : 3重系 (同一方式の重複)

Table 2 多重化システムの構成



情報精度を上げるには、角度情報をできるだけ利用することが望ましいことが判明している。角度情報を得る装置の設置方法としては、滑走路に沿って基点を設け、滑走路方向にビームを走査させる方法をとるか、または滑走路に交差した方向に基点を設け、その方向に走査させるものの2種類が考えられる。前者と後者の違いは、前者では位置情報の縦情報を得ることになり、後者では横方向の情報を得ることになる。得られなかった方向の情報は、別の情報源を用いて得る必要がある。このような情報源としては、前者の場合、横方向の情報を得るために、角度情報を使用しなければならない。一方、後者の場合、縦方向の情報であるから、角度または距離情報のいづれによっても得ることが可能である。勿論、高度情報については、両者共に得ることが可能である。

このような性能の優れた2種の三重系システムとしては、4章の検討および5.1節の考察により明白である。すなわち、このようなシステムとしては、現状の技術水準よりみて、7 - Angles System の内、(1) Rectangular System と (2) Biangular System の2種のみが実現可能性である。

以下に、この2つのシステムについて考察を行なうことにする。

### 5.2 7 Angles System (Rectangular System)

本システムは一重系における Rectangular System ( Fig.1 参照 ) を拡張したものであり、これを Fig.34 に示す。この図から明らかなように、3次元位置情報の内、高度情報  $h$  は4種の情報源の内2種の組み合わせによって得られ、合計6種の計算式によって得られる。すなわち、高度情報が6つ得られる。横方向の情報  $Y$  は、 $h$  と同様に6種の計算式によって得ることができる。縦方向の情報の  $X$  については3種の情報源と上で得られた6種の  $Y$  情報の組み合わせで18種の情報得られる。これらの情報に対して、1種の情報源が故障すると、 $h$  と  $Y$  情報は半分の3種になってしまう、 $X$  情報も最悪の場合、半分の9種になる。2種の情報源が故障すると、 $h$  と  $Y$  情報は1種類になり、 $X$  情報は3種類になってしまう。

本システムの3次元情報の式は4.1節と同じ方法により、Fig.34 から得られる。すなわち、高度情報については、次の6種の情報が得られる。

$$h_1 = 2 Y_{01} \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) \quad (5-1)$$

$$h_2 = 2 Y_{02} \tan \alpha_3 \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_3 + \tan \alpha_4) \quad (5-2)$$

$$h_3 = (Y_{01} + Y_{02}) \tan \alpha_1 \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_4) \quad (5-3)$$

$$h_4 = (Y_{01} + Y_{02}) \tan \alpha_2 \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_3) \quad (5-4)$$

$$h_5 = (Y_{02} - Y_{01}) \tan \alpha_1 \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_3) \quad (5-5)$$

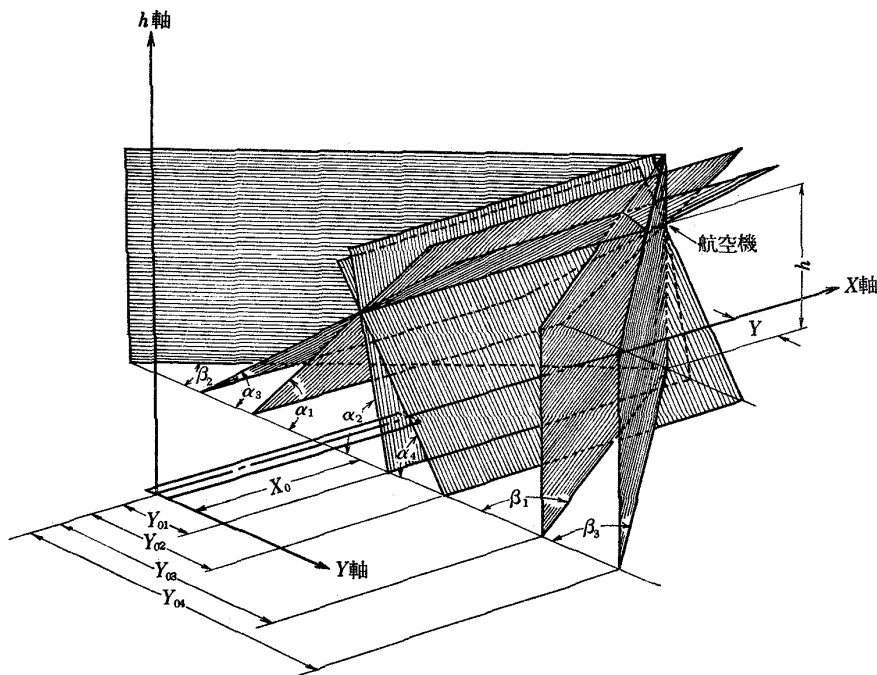


Fig.34 7 Angles System (Rectangular System)

$$h_6 = (Y_{02} - Y_{01}) \tan \alpha_2 \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_4) \quad (5-6)$$

同様に Y 情報についても次の 6 種の情報が得られる。

$$Y_1 = 2 Y_{01} \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) - Y_{01} \quad (5-7)$$

$$Y_2 = 2 Y_{02} \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_3 + \tan \alpha_4) - Y_{02} \quad (5-8)$$

$$Y_3 = (Y_{01} + Y_{02}) \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_4) - Y_{01} \quad (5-9)$$

$$Y_4 = (Y_{01} + Y_{02}) \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_3) - Y_{02} \quad (5-10)$$

$$Y_5 = (Y_{02} - Y_{01}) \tan \alpha_1 / (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_3) - Y_{02} \quad (5-11)$$

$$Y_6 = (Y_{01} - Y_{02}) \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_4) + Y_{02} \quad (5-12)$$

X 情報に対しても、同様な方法で 18 種の情報が得られる。

$$X_{1\sim6} = X_{01} + (Y_{03} - Y_{1\sim6}) \tan \beta_1 \quad (5-13)$$

$$X_{7\sim12} = X_{01} + (Y_{03} + Y_{1\sim6}) \tan \beta_2 \quad (5-14)$$

$$X_{13\sim18} = X_{01} + (Y_{04} - Y_{1\sim6}) \tan \beta_3 \quad (5-15)$$

これらの各式はすべて、基本システムで検討した式と同形となるので、各式に対する解析は省略する。4 章の基本システムの検討結果を参照して検討を行なうことにする。

高度情報の内、 $h_1$  と  $h_2$  は  $Y_{01}$  の大きさに比例して高度差  $\Delta h$  が大きくなるから、 $h_2$  の方が  $h_1$  よりも、最大誤差量が  $\Delta h_1 \times Y_{02} / Y_{01}$  倍になる。 $h_3$  と  $h_4$  の最大誤差量は  $h_1$  と  $h_2$  の中間であり、

$\Delta h_1 \times (Y_{01} + Y_{02}) / 2 Y_{01}$  倍になる。 $h_5$  と  $h_6$  は、基本システムで考察したものと同じであり、 $Y_{01}$  と  $Y_{02}$  の関係が  $Y_{01} = 0.6 Y_{02}$  の時が最適配置となる。なお、誤差量の大きさは近似式が成立つ範囲内で  $Y_{01}$  をできるだけ小さくすれば減少させることができる。

横方向の Y 情報について検討する。 $Y_1 \sim Y_4$  は低高度になるに従いがい、 $\alpha$  に反比例して誤差  $\Delta Y$  が大きくなる。さらに、 $Y_0$  の大きさに比例して誤差  $\Delta Y$  が大きくなる。したがって、 $Y_{01}$  と  $Y_{02}$  は各々が干渉しなかり小さな値になるように配置しなければならない。本システムを採用した場合の唯一の欠点はその他の情報に比べて、横方向の Y 情報についての誤差が大きいことである。

一方、縦方向の X 情報については、 $X_1 \sim X_{18}$  までのすべての情報は高精度で得ることができる。

### 5.3 7 Angles System (Biangular System)

本システムは 4.2 節の Biangular System を拡張したものであり、Fig. 35 に示す。

この図からわかるように、高度情報  $h$  は情報源 4 種の内の 2 種の組み合わせにより、6 種の計算式によって得られる。縦方向の X は、 $h$  と同じく 6 種の計算式に

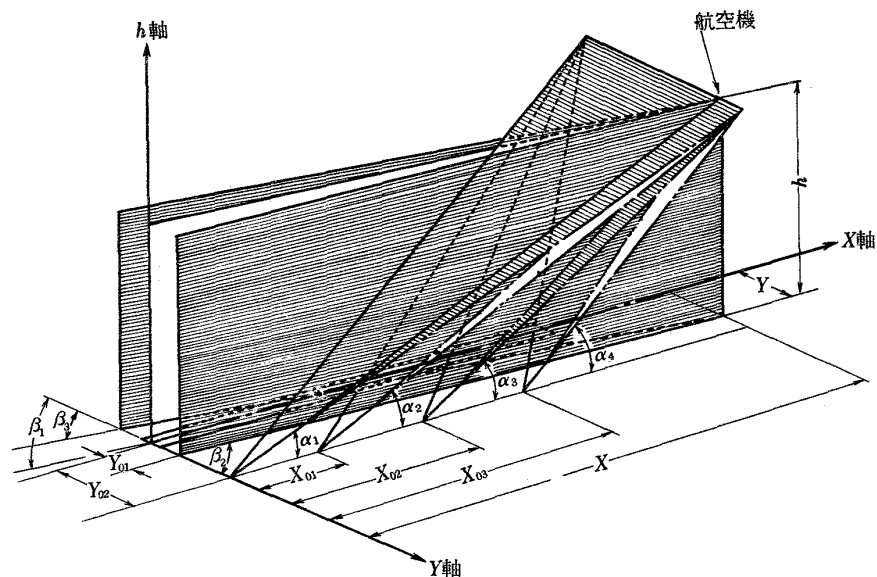


Fig. 35 7 Angles System (Biangular System)

よって得られる。横方向のYについては、3種の情報源と、上で得られた6種のX情報の組み合わせにより、18種の情報が得られる。

これらの情報の信頼性について、前節で述べたシステムのX情報と本システムのY情報を入れかえると、等価になる。すなわち、情報源1個の故障に対して、hとX情報は6種から3種に減じ、2個の故障に対しては1種類になる。Y情報については、1個の情報源の故障に対し、18種から9種に減じ、2個の故障に対しては3種になる。

本システムの3次元位置情報は、4.2節と同じ方法で、Fig. 35 から次のように得られる。すなわち、高度h情報に対しては次の6種の情報が得られる。

$$h_1 = X_{01} \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (5-16)$$

$$h_2 = (X_{02} - X_{01}) \tan \alpha_2 \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_3 - \tan \alpha_2) \quad (5-17)$$

$$h_3 = (X_{03} - X_{02}) \tan \alpha_4 \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_3) \quad (5-18)$$

$$h_4 = X_{02} \tan \alpha_1 \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_3 - \tan \alpha_1) \quad (5-19)$$

$$h_5 = X_{03} \tan \alpha_1 \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_1) \quad (5-20)$$

$$h_6 = (X_{03} - X_{01}) \tan \alpha_2 \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_2) \quad (5-21)$$

X情報に対しても同様に6種類の情報が得られる。

$$X_1 = X_{01} \tan \alpha_2 / (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (5-22)$$

$$X_2 = X_{01} + (X_{02} - X_{01}) \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_3 - \tan \alpha_2) \quad (5-23)$$

$$X_3 = X_{02} + (X_{03} - X_{02}) \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_3) \quad (5-24)$$

$$X_4 = X_{02} \tan \alpha_3 / (\tan \alpha_3 - \tan \alpha_1) \quad (5-25)$$

$$X_5 = X_{03} \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_1) \quad (5-26)$$

$$X_6 = X_{01} + (X_{03} - X_{01}) \tan \alpha_4 / (\tan \alpha_4 - \tan \alpha_2) \quad (5-27)$$

Y情報に対しては18種類得られる。

$$Y_{1\sim6} = X_{1\sim6} \tan \beta_1 \quad (5-28)$$

$$Y_{7\sim12} = X_{1\sim6} \tan \beta_2 + Y_{01} \quad (5-29)$$

$$Y_{13\sim18} = X_{1\sim6} \tan \beta_3 - Y_{01} \quad (5-30)$$

これらの各式は4.2節で検討したものと同じであるので、4.2節の検討結果を参考にして、本三重系システムについて考察を行なうことにする。

高度情報 $h_1 \sim h_6$ は、各々誤差量 $\Delta h$ を最小にする各種高度が存在する。すなわち、ある高度に対して、地上測定基点の最適配置があるから、各種地上測定基点によって各種の最適測定高度が得られる。したがって、これらの6種の高度情報を各高度範囲で適当なものに切換えて用いれば誤差の少ない高度情報を得ることも可能である。同様のことが、X情報、Y情報についてもいえる。

## 6. 実用化の検討

本報告で述べたシステムを実用化する上での問題点について、以下に検討を行なうことにする。

### (1) 測距、測角上の固有誤差の仮定の妥当性

固有誤差の値は、技術の進歩によって、将来、大巾に改善されることが期待される。したがって、本文の検討結果は将来の技術の進歩によって変わり得る。また、本研究を利用して、ある特定のシステムに着目して、測距、測角装置の精度をどの程度にあげれば、そのシステムが実用に供することができるかといった検討を行なうこともできる。

### (2) 地上基点の配置と滑走路運用上の関係

地上の基点の配置は実際の飛行場を考えると、民家、用地の関係で、どこにでも配置できるというものでもない。実用にあたっては、各飛行場について具体的な検討を必要とする。

### (3) 多重系における3次元位置情報の扱い方

多重系とした場合、3次元位置情報がいくつか得られるわけであって、その中から、エリア・ナビゲーションの計算にみられるように、高精度の情報が得られるような計算機のアルゴリズムを考えることが望ましい。これは誤差の推定が容易なので、実現性がある。また、固有誤差のみならず、動的誤差についても、最適推定理論の計算を含めることも望ましい。(ただし、本文では、これは別種の問題であるので取り扱わない。)

### (4) 地上装置か機上装置で行なうかの問題

航空機の3次元情報は地上側管制側および機上側の両方において必要であるが、この情報を得る計算を地上および機上の両者で行なうか、または、地上で行なって機上に送信(データリンク)するかの問題がある。将来の方向としては、後者の方法が、経済性、性能面で優れ、管制面からも望ましいと考えられる。また、機上側に重点を置いた場合は、エリア・ナビゲーションとの兼ね合いなども考慮して検討する必要がある。

### (5) 測距、測角方法について

実用にあたっては、測距装置、測角装置の方式および、情報源データの連続性または不連続性等を決定する必要がある。不連続性の場合にはどの位の周期にするかを検討の上、決定する必要がある。

### (6) 電波以外の情報源について

情報源の精度を上げるために、電波機器の改良のほか、電波以外の情報源、たとえば、レーザ等の使用の検討も望まれる。

## 7. ま と め

以上の解析および検討の結果、次の点が明らかになった。

### (1) 基本システムについて

各種の着陸援助システムを幾何学的な測距方式に分類し、その方式毎に3次元位置情報計算式を解析して近似誤差計算式を誘導し、情報源固有誤差と各測定点の配置の影響を検討した。その結果、各システムの3次元位置情報精度を上げるための問題点について論じた。これら解析検討の妥当性は厳密式を用いた数値計算例で確認した。

さらに、各システムの性能の比較を、計算式と数値例により行くと、3次元位置情報は測距より、測角の情報源を用いたシステムの方が誤差が少なく優れていることが明らかになった。また、各システムの性能の差は非常に大きいものであることが明らかとなった。

### (2) 多重化システムについて

多重化システムについては、より少ない情報源より多重化システムを構成し、かつ、実用に供する精度を保つことから、二重系と三重系について考察し、2つのシステムについて目的に合ったシステムであることを示した。本論文では、特に三重系システムについて示したが、電波機器は自己故障診断が容易なので、2重系も十分実用性があることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) The Bendix Radio Division "Automatic Landing System Study Part II" ASD Technical Report 61-114 Part II, 1962.2
- 2) J. E. Woodward "Scanning Beam Guidance for Approach and Landing" Radar Techniques for Detection Tracking and Navigation, 1964.7
- 3) Frank Leary "All Weather Landing When?" Space Aeronautics, 1966.2
- 4) G. B. Litchford, A. Tatz, F. H. Battle "A Look at the Future of Automatic Landing System" I.R.E. Trans. ANE, 1959.6
- 5) "Automatic Landing" Interavia, 1962.4
- 6) R. J. Shank "Scanning-Beam All-Weather Landing Guidance System" Interavia, 1968.5
- 7) W. E. Jackson "Improvements on the Instrument Landing System" IRE. Trans. A.N.E., 1959.6
- 8) A. Brodzinsky "Electronic Landing Aid for Carrier Aircraft" IRE. Trans, 1959.6
- 9) G. J. Moorcroft, M. Sc., Associate Member "Precision Approach Radar" The Institution of Electrical Engineers Paper No. 2581R, 1958.3
- 10) J. E. Woodward and G. B. Litchford "A Progress Report on the Advanced Integrated Landing System AILS" AIAA/ION Guidance & Control Conference Minneapolis, 1965.8
- 11) B. Cutler and L. Sanders "REGAL An Advanced Approach and Landing System" IRE Trans. ANE, 1959.6
- 12) Merrill I. Skolnik "An Analysis of Bistatic Radar" IRE. Trans. ANE, 1961.3
- 13) Herbert L. Groginsky "Position Estimation using only Multiple Simultaneous Range Measurements" IRE. Trans. ANE, 1959.9
- 14) J. L. Ryerson "Trajectory Precision Requirements for Automatic Landing" IRE. Trans. Ane, 1959.3
- 15) H. E. Hawkins, O. Laplant "Radar Performance Degradation in Fog and Rain" IRE. Trans.ANE, 1959.3
- 16) D. E. N. Davies, M. Sc., Graduate "Application of Electronic Sector Scanning Techniques to Height—Finding Radar Systems" Proc. IEE. Vol. 110, 1963.11
- 17) John S. Burgess, Senior Member, IRE "The Future of Radar" IRE. Trans. ME, 1961.4
- 18) J. S. Shayler "An Automatic Landing System Developed by B.L.E.U., with Particular Reference to The Radio Aids" Navigation Systems for Aircraft and Space Vehicles, 1962
- 19) Caradoc Williams, B. Sc., Associate Member "A Survey of Continuous-Wave Short-Distance Navigation and Landing Aids for Aircraft" Journal IEE. 1947, Vol. 94, Part IIIA
- 20) W. J. Charnley "A Survey of Approach and Landing Aids" The Institution of Electrical Engineers, 1958.3
- 21) J. L. Anast "All-Weather Landing Developments" Navigation Systems for Aircraft and Space Vehicles, 1962
- 22) 松田節雄 航空電子技術 昭和31年3月
- 23) 岡田 実 航空電子装置 昭和41年6月

TM-258 正 誤 表

頁	行	誤	正
25	下図	説明文のぬけ	Fig. 29 2 Ranges, 1 Angular System の各パラメータが $\Delta X$ におよぼす影響
30	左段下より3行目	自由度以上が必	自由度以上必要
30	右段上より3行目	考え方から	考え方から
30	右段上より5行目	1つの情報源があれば	トル(重複のため)
33	右段下より17行目	上側管制側	上管制側

---

## 航空宇宙技術研究所資料258号

昭和49年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)☎182

印刷所 株式会社東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

