差動補助翼操縦装置の差動性*

藤 田 輝 昭**

Differential Link Mechanism Used for Aileron Control

Teruaki HUZITA

1. 緒 言

航空機の補助翼操作において、その上げ側と下げ側の舵角が等しいと、下げ側の翼の抵抗が上げ側より大きくなり、旋回側とは逆の偏揺れモーメントを発生する。これを防ぐには、差動補助翼操作により上げ側の舵角を下げ側の数倍にもって行く方法が採られてきた。グライダーや軽飛行機では、この差動補助翼操作は第1図のような回転する横杆とロッドを組み合わせた簡単な機構で行なっている。このモデルで中央の横杆の操作角を操縦桿の操作角と見なし、左右の横杆の回転角を補助翼の舵角と見なせば、操縦桿の操作角 θ を任意にとるとき、上げ側舵角 δ_u は下げ側舵角 δ_d より大きくなる。何故なら、横杆を最初にセットする角度や中央と左右の横杆半径の違いなどによって、ロッドの一定のストロークに対する横杆の回転角が左右で異なるからである。ここで、第1図に示す横杆の回転半径 r , r_1 , セット角 α , α_1 , 横杆の回転中心間の距離 l , および横杆の回転中心線の傾き ϕ をパラメータと

して変化させると、 δ_u と δ_d について種々の差動を得るであろう。

われわれが今までグライダーを作るとき、作図による手さぐりで操作角最大時の差動 δ_u/δ_d を3に近い値に設計したが、何時も問題になることは次の2点であった。1つは、 δ_u/δ_d の大きな値を得るには前記のパラメータをどう変化させたら良いか。第2に、実際に設計されたものでは、操作の始めすなわち θ の小さい所では δ_u/δ_d はほとんど1に近く、最大舵角に近づくとき急激に $\delta_u/\delta_d=3$ に近づく。したがって、操縦装置の組立寸法が少し狂うと操作角最大時の δ_u/δ_d の値が設計値より可なり低下する。これはこの機構では操作の初めから終わりまで δ_u/δ_d を一定に保ち得ないからである。ここで θ の全ての値に対し δ_u/δ_d が一定となる理想的な場合を差動が一樣であると呼び、それに対し差動の大小とは後で定義する $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ の値の大小を指すものとする。

この簡単な機構を用い、できるだけ一樣でかつ大きな差動を得ようとするとき、上記の各パラメータがど

第1図

* 昭和46年2月10日原稿受理

** 防衛大学校応用物理教室

のような効果を持っているかを知れば、差動補助翼操縦装置の設計に役立つであろうと考え、以下のような

第2図

第3図

第4図

計算とその解析を行なった。

2. 計算とその解析

2.1. $r=r_1$, $\alpha=\alpha_1$ および $\phi=90^\circ$ の場合 全てのパラメータの影響を同時に解析しようとすれば、かえって混乱を招くであろう。そこでまず最も簡単な $r=r_1$, $\alpha=\alpha_1$ で $\phi=90^\circ$ すなわち前進角のない場合について調べることにする。

第5図

第6図

幾何学的関係から次の2式を得る。

$$k \cos(2\alpha + \theta - \delta_d) + \sin(\alpha + \theta) + \sin(\alpha - \delta_d) = k \cos 2\alpha + 2 \sin \alpha \quad (1)$$

$$k \cos(2\alpha - \theta + \delta_u) + \sin(\alpha - \theta) + \sin(\alpha + \delta_u) = k \cos 2\alpha + 2 \sin \alpha \quad (2)$$

ここで

$$k = \frac{r}{l} \quad (3)$$

この三角方程式を解き、 θ を横軸に、 δ_u および δ_d を縦軸にとると、 δ_u に δ_d は勾配1の直線に関して対称となり、原点での勾配は共に1である。 $k=1/2, 1/5, 1/10, 1/20$ および0とし、そのおのおのにつき α を 0° から 5° 間隔で 30° まで、 30° 以上は 10° 間隔で変化させて計算した。第2, 3, 4, 5図および第6図。 δ_u の最大値は上げ側の横杆とロッドが一直線となる死点である。実用上この死点まで操作できないが、操作角最大時の目安として以後、この上げ側の死点を採用し、その点における δ_u と δ_d との比 $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ を図中に示した。たとえば第5図の $k=1/20$ の場合、 $\alpha=30^\circ$ とすれば、死点において $\theta=28^\circ$, $\delta_u=57^\circ$, $\delta_d=21^\circ$ で $(\delta_u/\delta_d)_{\max}=2.7$ となる。その値は $\theta=28^\circ$

の縦軸上に×印で示した。以上の結果から次の結論を得る。

(1) k —一定の場合、 α が大きいほど操作角 θ の範囲は狭くなるが差動は大きい。したがって操作の初めから差動を大きくしたければ、 α を大きくすればよい。しかしいずれにしても差動の一様性は悪い。

(2) α —一定の場合、 k によって差動の大きさはほとんど変わらない。また $k=1/2$ の極端な場合を除くと、 $k=1/5$ から $1/10, 1/20, 0$ への変化に対し、死点における θ, δ_u および δ_d の値は平均して $2^\circ, 3^\circ$ および 1° づつ位しかふえて行かない。したがって $k \leq 1/20$ の場合は $k=0$ で近似して十分である。

実際に使用する場合の1例として、第5図の $k=1/20$ で使用する上げ側舵角の最大値を $\delta_u=30^\circ$ とし、死点を避ける意味で $\alpha=30^\circ$ の場合を採用すると、 $\theta=22^\circ, \delta_d=17^\circ$ および $\delta_u/\delta_d=1.8$ となる。このことは実際に使用できる δ_u/δ_d の最大値は図中の $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ の値よりかなり低くなることを意味している。

そこで、さらに大きな差動を得るための手段として、この機構を何段にも左右へ継ぎ足した多段方式が考えられる。段数を増しても、死点の側の δ_u は変わらないが δ_d は減って行くから、 $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ を大きくすることは可能である。しかし差動の一様性についての改良は望めない。

2.2 $r=r_1, \alpha \neq \alpha_1$ および $\phi=90^\circ$ の場合 次に α と α_1 との種々の組合せによる差動への影響を調べるために $\gamma=r_1, \alpha \neq \alpha_1$ で前進角のない場合を取り扱う。

幾何学的関係より次の2式を得る。

$$k \cos(\alpha + \alpha_1 + \theta - \delta_d) + \sin(\alpha + \theta) + \sin(\alpha_1 - \delta_d) \\ = k \cos(\alpha + \alpha_1) + \sin \alpha + \sin \alpha_1 \quad (4)$$

$$k \cos(\alpha + \alpha_1 - \theta + \delta_u) + \sin(\alpha - \theta) + \sin(\alpha_1 + \delta_u) \\ = k \cos(\alpha + \alpha_1) + \sin \alpha + \sin \alpha_1 \quad (5)$$

上式を θ について微分し

$$\frac{d\delta_d}{d\theta} = \frac{\cos(\alpha + \theta) - k \sin(\alpha + \alpha_1 + \theta - \delta_d)}{\cos(\alpha_1 - \delta_d) - k \sin(\alpha + \alpha_1 + \theta - \delta_d)} \quad (6)$$

$$\frac{d\delta_u}{d\theta} = \frac{\cos(\alpha - \theta) - k \sin(\alpha + \alpha_1 - \theta + \delta_u)}{\cos(\alpha_1 + \delta_u) - k \sin(\alpha + \alpha_1 - \theta + \delta_u)} \quad (7)$$

原点では、 $\theta = \delta_d = \delta_u = 0$ ゆえ

$$\left(\frac{d\delta_d}{d\theta}\right)_{\theta=0} = \left(\frac{d\delta_u}{d\theta}\right)_{\theta=0} = \frac{\cos \alpha - k \sin(\alpha + \alpha_1)}{\cos \alpha_1 - k \sin(\alpha + \alpha_1)} \quad (8)$$

すなわち、 α と α_1 の組み合わせを色々変えれば、原点での勾配を1以外の値に変えることができる。

以上の場合を全ての組み合わせについて計算することは不可能である。そこで手さぐりの意味で、原点での勾配が1より大きい場合、1に等しい場合および1より小さい場合の次の3つの例について、(4)(5)式を計算してみよう。(i) $k=0, \alpha=20^\circ, \alpha_1=40^\circ$,

第7図

第8図

第9図

(ii) $k=0, \alpha=30^\circ, \alpha_1=30^\circ$, (iii) $k=0, \alpha=40^\circ, \alpha_1=20^\circ$. 第7, 8および9図。結果は明らかに第9図の(iii)の場合が他の2つより差動が大きい。次に差動の一様性について検討する。原点での δ_u/δ_d は全て1で差動がなく、 θ の増加するにつれ δ_u/δ_d が1より増加して行き差動がつく。結局この機構にたよる限り完全な差動の一様性は望めないが、 δ_u/δ_d の変化を見ると、(i) の場合は θ のわづかの範囲で最大値に達

し、(iii)の場合は始め、横軸にそい比較的直線的に変化し、 θ の終わりに急激に立ち上り $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ に近づく。緒言で触れたように、 δ_u/δ_a の大きな値は望ましいがその急激な変化は望ましくない。

したがって δ_u/δ_a が比較的直線的な形でふえ、かつその終わりにおける δ_u/δ_a の値が大きいことが望ましい。この考え方を採用するならば、 δ_u/δ_a が直線的にふえる範囲が広く $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ が大きい(iii)の場合がそれになうだろう。

(iii)の場合、 $d\delta_a/d\theta=0$ の点が $d\delta_u/d\theta=\infty$ の点より左側にあると、操作の途中で舵の逆転を起こす。またその反対の場合は $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ の低下を招く。したがって、 α と α_1 の値組を適当に選び $d\delta_a/d\theta=0$ の点と $d\delta_u/d\theta=\infty$ の点を同じ縦軸上に置くのが合理的である。以後この状態を臨界状態とし、その状態の死点における値には c の下記号を付すことにする。

$d\delta_a/d\theta=0$ とおけば(6)式より

$$\cos(\alpha+\theta_c)-k\sin(\alpha+\alpha_1+\theta_c-\delta_{uc})=0 \quad (9)$$

$d\delta_u/d\theta=\infty$ とおけば(7)式より

$$\cos(\alpha_1+\delta_{uc})-k\sin(\alpha+\alpha_1-\theta_c+\delta_{uc})=0 \quad (10)$$

(4)(5)式中の θ 、 δ_u 、 δ_a に下記号 c を付し、それに(9)(10)式を加えた4式から、 k をパラメータとし、 θ_c を 0° から 90° まで変化させて解く。第10、11、12、13図および第14図。図中の $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ は δ_{uc}/δ_{ac} を意味している。結論として、

(1) 2.1節にくらべ差動はかなり大きい。たとえば、 $k=1/20$ 、 $\theta=\theta_c=30^\circ$ の時、第5図では $\alpha=28^\circ$ 、 $(\delta_u/\delta_a)_{\max}=2.7$ だが、第13図では $\alpha=57^\circ$ 、 $\alpha_1=39^\circ$ 、 $(\delta_u/\delta_a)_{\max}=5.4$ で、差動はほぼ2倍になっている。

(2) 正確な意味での一様性は期待できないが、第7、8図および第9図を比較して論じたところの一様性は2.1節の場合より大きい。

(3) $k=1/2$ の極端な場合を除いた $k=1/5$ 、 $1/10$ 、 $1/20$ および0の図は皆同じ傾向を示し、その値にも大

第10図

第11図

第12図

第13図

差がない。すなわち初期設計の段階では $k=0$ の図を用いて大よその見当をつけることができる。

2.3 $\alpha \neq \alpha_1$ 、 $r \neq r_1$ および $\phi=90^\circ$ の場合 槓杆の半径比 r/r_1 が差動に与える影響を調べるため $\alpha \neq \alpha_1$ 、 $r \neq r_1$ で前進角が 0° の場合を取り扱う。

$$\begin{aligned} & k k_1 \cos(\alpha+\alpha_1+\theta-\delta_a) + k \sin(\alpha+\theta) \\ & + k_1 \sin(\alpha_1-\delta_a) = k k_1 \cos(\alpha+\alpha_1) + k \sin \alpha \\ & + k_1 \sin \alpha_1 \end{aligned} \quad (11)$$

第14図

$$k k_1 \cos(\alpha + \alpha_1 - \theta + \delta_u) + k \sin(\alpha - \theta) + k_1 \sin(\alpha_1 + \delta_u) \\ = k k_1 \cos(\alpha + \alpha_1) + k \sin \alpha + k_1 \sin \alpha_1 \quad (12)$$

ここで

$$k = \frac{r}{l}, \quad k_1 = \frac{r_1}{l} \quad (13)$$

前節までの結論から、ここでは $k k_1 = 0$ と近似することにする。

$$k \sin(\alpha + \theta) + k_1 \sin(\alpha_1 - \delta_d) = k \sin \alpha + k_1 \sin \alpha_1 \quad (14)$$

$$k \sin(\alpha - \theta) + k_1 \sin(\alpha_1 + \delta_u) = k \sin \alpha + k_1 \sin \alpha_1 \quad (15)$$

θ で微分して、

$$\frac{d\delta_d}{d\theta} = \frac{k \cos(\alpha + \theta)}{k_1 \cos(\alpha_1 - \delta_d)} \quad (16)$$

$$\frac{d\delta_u}{d\theta} = \frac{k \cos(\alpha - \theta)}{k_1 \cos(\alpha_1 + \delta_u)} \quad (17)$$

また、臨界状態を取り扱うことにすれば、

$$d\delta_d/d\theta = 0 \text{ より} \\ \alpha + \theta_c = 90^\circ \quad (18)$$

$$d\delta_u/d\theta = \infty \text{ より} \\ \alpha_1 + \delta_{uc} = 90^\circ \quad (19)$$

(14) (15) (18) および (19) 式より $k/k_1 = r/r_1$ をバ

第15図

第16図

第17図

第18図

ラメータとして解いた結果を第15, 16, 17図および第18図に示す。これらに第14図すなわち $r/r_1 = 1$

の場合を加えて比較すると、次の結論を得る。

(1) 2.2 節と比較して $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ の値に大きな変化はない。ただ前節との違いは、 r/r_1 の変化に対し δ_{uc} , δ_{dc} の値が大きく変わっていることである。したがって要求する $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ の一定値に対し、さらに δ_{uc} , δ_{dc} の値組も要求値にそうよう選ぶことができる。

(2) 横杆の半径比 r/r_1 が差動の一様性におよぼす影響について判然した結論は得られないが、 $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ の値が 2.2 節とあまり変わらないことから、前節以上の一様性を期待することは無理のようである。

2.4 $\alpha \neq \alpha_1$, $r=r_1$ および $\phi \neq 90^\circ$ の場合 横杆の回転中心線が前進または後退する場合である。第 1 図に示すように、前進距離を $d(>0)$ とし、簡単のために $r=r_1$ の場合を取り扱う。前節と同様 $k^2=0$ の近似を行なうと、

$$\begin{aligned} & \sin(\alpha_1 - \delta_d) + \sin(\alpha + \theta) \\ & - m[\cos(\alpha_1 - \delta_d) - \cos(\alpha + \theta)] \\ & = \sin \alpha_1 + \sin \alpha - m(\cos \alpha_1 - \cos \alpha) \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin(\alpha_1 + \delta_u) + \sin(\alpha + \theta) \\ & - m[\cos(\alpha_1 + \delta_u) - \cos(\alpha - \theta)] \\ & = \sin \alpha_1 + \sin \alpha - m(\cos \alpha_1 - \cos \alpha) \quad (21) \end{aligned}$$

ただし

$$m = \frac{d}{l} \quad (22)$$

さらに臨界状態を取り扱うことにし、(20) 式を θ で微分し $d\delta_d/d\theta=0$ とおくと、

$$\theta_c = \phi - \alpha \quad (23)$$

ただし

$$\tan \phi = \frac{1}{m} \quad (24)$$

(21) 式を θ で微分し $d\delta_u/d\theta=\infty$ とおくと、

$$\delta_{uc} = \pi - \phi - \alpha_1 \quad (25)$$

(23) 式を (20) 式に代入し、式の両辺を $\sqrt{1+m^2}$ でわって整理すれば、

$$\begin{aligned} & \cos(\phi - \alpha) - \cos(\phi + \alpha_1) \\ & = 1 + \cos(\pi - \phi - \alpha_1 + \delta_{dc}) \quad (26) \end{aligned}$$

同様に (25) 式と (21) 式より

$$\begin{aligned} & \cos(\phi - \alpha) - \cos(\phi + \alpha_1) \\ & = 1 + \cos(\phi - \alpha + \theta_c) \quad (27) \end{aligned}$$

ゆえに

$$\phi - \alpha + \theta_c = \pi - \phi - \alpha_1 + \delta_{dc}$$

これに (23) および (25) 式を代入すれば、

$$\delta_{dc} = 2\theta_c - \delta_{uc} \quad (28)$$

(23) (25) (26) および (28) 式を用いると、 ϕ をパラメータとし、 θ_c を 0° から 90° まで変化させたときの α_1 , δ_{uc} および δ_{dc} が求められる。

第 19 図

今 $\phi=85^\circ$ すなわち前進角 5° の場合を第 19 図に示す。これと第 14 図すなわち前進角 0° の場合と比較すると、 α の曲線は左へ 5° , α_1 の曲線が右へ 5° ずれるが、 δ_{uc} , δ_{dc} および $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ は全く変らない。逆に後退角の場合は、後退角分だけ α の曲線が右へ、 α_1 の曲線が左へずれるだけである。結論として

中央と左または右横杆の回転中心を結んだ直線が前進または後退することによる差動への影響はない。

3. 設 計 例

前進角も後退角もなく、最大舵角の時 $\delta_u=30^\circ$, $\delta_u/\delta_d=3$ の値を目標として設計する。また簡単のため $r=r_1$ とする。

$k=r/l$ の値は、縦横比の大きいグライダーでは主翼内のスペースに制限されて $1/20$ 以下の小さい値になるが、軽飛行機では比較的広い範囲の値がとれるであろう。 k の値があまり小さいとロッドの長さ l の一定割合の膨張、収縮が横杆のセット角に大きな影響を与える恐れがあるが、 l が長ければ当然強度上これを分割しなければならぬから、その一部で差動を行ない、他は遊ばせる方式を採用すればよい。そこで $k=1/10$ と仮定して計算を進める。

今までの経験から、最大舵角における δ_u/δ_d の $1.5 \sim 2$ 倍の $(\delta_u/\delta_d)_{\max}$ をもつ場合を採用すべきであろう。この例では $(\delta_u/\delta_d)_{\max}=4.5 \sim 6$ で平均して 5.3 である。そこで第 12 図において、 $\theta_c=30^\circ$, $\alpha=55^\circ$, $\alpha_1=35^\circ$, $(\delta_u/\delta_d)_{\max}=5.3$ の場合を採用した。この α および α_1 の値を (4) (5) 式に代入し数値計算した結果を第 20 図に示した。ストップにより δ_u/δ_d の最大値を 3 におさえると、 $\theta=24^\circ$, $\delta_u=27^\circ$, $\delta_d=9^\circ$ となり大よその目標値を得ることができた。途中の $\theta=12^\circ$ でも $\delta_u/\delta_d=1.6$ になっている。

ただしこの場合、死点における $\theta_c=30^\circ$ と θ の最

大値 24° との間に 6° しか差がないから、楕円にかかる力の $1/\sin 6^\circ \approx 10$ 倍の軸力がロッドに生ずることになる。

4. 結 論

最も簡単かつ低廉な差動補助翼操作の機構を用い、一様でかつ大きな差動を得るための解析を行なった。パラメータの種類が多いため、かなり直観的な判断で解析の範囲を狭めて行なった。

(1) 差動の大きさは楕円のセット角 α , α_1 に大きく依存し、楕円半径 r と楕円の回転中心間の距離 l との比 k や楕円半径の比 r/r_1 にあまり影響されない。また楕円の回転中心線が前進または後退することによる差動への影響はない。したがって $r=r_1$ で設計を進めた方が構造も簡単で、後の解析も楽である。また差動を極力大きくしたければ多段方式を用いればよいが、その計算および解析は非常に複雑である。

(2) 差動の一様性については、この機構を用いるかぎり限界がある。しかしわれわれが得た多くの図表から、まず大きな差動 $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ をもちかつ θ_c の大きなものを選ぶ。(ただし $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ を大きくしようとすれば θ_c が小さくなり、逆に θ_c を大きくしようとすれば $(\delta_u/\delta_a)_{\max}$ が小さくなるから、その両方をマッチさせるための最適設計値の決定は、必要とする δ_{uc} や δ_{ac} の値ともからめて、読者に委ねなければならぬ。)そして実用する θ の最大値を θ_c 以下の適当な値にとれば、かなり良い結果が期待できるだろう。

第 20 図

(3) この論文は差動機構の動きを主として解析した。したがって設計例に示されたような必要強度の大きい点や、さらにガタが機構におよぼす影響等は今後に残された課題となるのであろう。

なおこの問題を提起された三菱重工業株式会社顧問本庄季郎氏、ならびに本論文における数値計算について、多くの示唆と御支援をいただいた防衛大学校助教授岸尚氏に深く感謝する。