

後退翼およびデルタ翼の光弾性応力解析

河 田 幸 三

1. は し が き

航空機の速度が音速に近づくのに伴い、翼による衝撃波の発生をおくらせるのに、後退翼、さらにはデルタ翼（三角翼）が採用されるようになったことは周知の通りである。後退翼、デルタ翼は材料力学（構造力学）の面にも新しい問題を提示した。翼構造の形式⁽¹⁾としては、

(1) 薄板と補強材とを結合したもの (Stiffened sheet construction)

が従来主として使われてきたが、

(2) 厚肉構造 (Thick walled construction)

(3) 中実断面 (Solid section) のもの

も剛性を大きくするため最近用いられるようになった。いま、中実断面の翼を考えてみると、これは一端を固定され、他の境界が自由である平行四辺形板や三角板の曲げとか振りの問題に帰着する。

この問題は最近理論的にも取扱われているが、光弾性応力解析により見通しよくその概観を把握することができる。この方法はもちろん、上述の(1)および(2)の構造形式にも拡張できるが、ここでは先ず(3)について行った解析結果につき述べることにしよう。

2. 板の曲げの光弾性応力解析法について

板の曲げ応力を光弾性的に解析するには、次の方法を用いることができる。

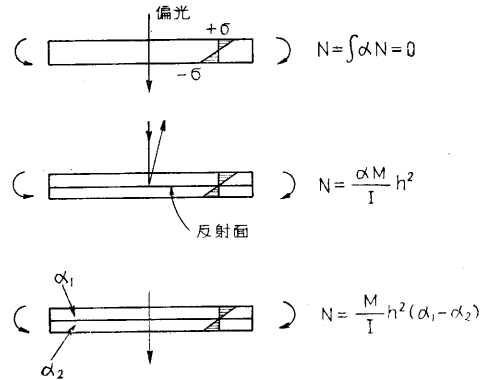
- (1) 凍結法⁽²⁾⁽³⁾
- (2) 二層法 $\left\{ \begin{array}{l} \text{反射法}^{(4)} \\ \text{透過法}^{(5)} \end{array} \right.$
- (3) 散乱光法

(4) 予め単軸応力を凍結した板を曲げ、回転効果を用いて解析する方法⁽⁶⁾

いま、曲げを受ける板に垂直に偏光を通したものとすると、曲げ応力の分布は中立面の両側でそれぞれ絶対値が等しく符号が逆であるから、光弾性効果の積分値、従って現われる縞次数は 0 である。このように普通に光を通したのでは駄目なので、上述の方法を用いるわけである。

凍結法は網状構造をもつポリマー（普通、二次転移点の室温より高いもの）のモデルを二次転移点以上に加熱してこの状態で負荷し、そのまま室温まで徐冷することによりエントロピー弾性状態での応力分布を“凍結”し

そのモデルから各部のスライスをとって三次元応力分布を知る方法である⁽⁷⁾。板の曲げにももちろん適用できる。特に板の固定端近傍の応力集中を調べるのに適している。



第 1 図 二層法による板の曲げの解析

二層法は文字通り二層から成る板を光弾性材料として用いる方法である。二枚の等しい厚さの同一光弾性材料の間に金属の箔などの反射面を接着して作った板に偏光を入射させ、その反射光を用いれば、曲げモーメントに比例した縞次数⁽⁸⁾

$$N = \frac{\alpha M}{I} h^2$$

ただし、 N : 縞次数, α : 光弾性感度, M : 曲げモーメント, I : 板の断面二次モーメント,

$2h$: 板厚,

を得る。また、弾性係数が同じで光弾性感度の著しく異なる二種の光弾性材料を接着して得た板に偏光を透過させると、やはり曲げモーメントに比例した縞次数⁽⁸⁾

$$N = \frac{M}{I} h^2 (\alpha_1 - \alpha_2)$$

(ただし、 α_1, α_2 : 二種の材料の光弾性感度) を得る。これら二層法は常温法であって実験は凍結法に比し楽だが、試片の作製に若干の注意を要する。接着により光弾性縞の擾乱のおこらないこと、接着強度の十分であることが必要条件である。このような条件を満たすためには、ポリ附加、重合系のポリマーの中の適当なものを選択するとよい⁽⁸⁾。

(3), (4)も使用できるが、現在のところ(1), (2)の方法に比べ、簡単さおよび精度の点で利点が少いので省略する。

一般に光弾性応力解析は連続的な応力計算機としての機能を持っているが、構造力学の光弾性的研究には次のように対象を二種に分けて考えるのが能率的であろう。

(1) マクロ法

各局部の応力集中は度外視して、構造物全般の応力（むしろ荷重）分布を概観することを主眼とする。

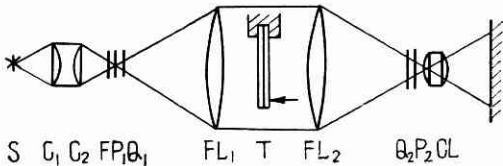
(2) ミクロ法

各局部の応力集中を調べるのを主眼とする。

凍結法はどちらかと言えば、ミクロ法の方に適しているのに対し、二層法はマクロ法に適している。従って両者を併用するのが、精密かつ迅速に結果を得る目的に対し最も有効と考えられる。

3. 平行四辺形板および三角形板の曲げの（透過）二層法による解析⁽⁹⁾

まず（透過）二層法で行った解析結果について述べよう。この方法は簡便に応力分布の概観を与えてくれるところが利点である。



第2図 板の曲げの光弾性解析装置

- S : 光源（水銀灯）
- C₁, C₂ : コンデンサー・レンズ
- F : 単色フィルター
- P₁, P₂ : ポラロイド
- Q₁, Q₂ : 1/4 λ板
- FL₁, FL₂ : フィールドレンズ
- T : 試験片
- CL : カメラ

実験装置：通常の二次元光弾性用の実験装置であるが、ただフィールド・レンズを2枚にしてその間が平行光束になるようにした。使用波長は5461Å。曲げを受ける板はこの平行光束に垂直に保持した。板の固定の条件



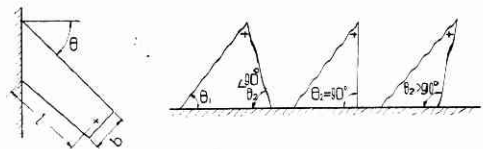
4-1 $\theta=0^\circ$ 4-2 $\theta=60^\circ$, l 大 4-3 $\theta=45^\circ$, l 小
第4図 平行四辺形板の等色線図

を満足させるのはなかなか困難であり、諸種の方法を考えたが、結局は二枚の精密に仕上げた鋼板の間にはさまみ、ボルト数本で締めつけ固定した。締めつけ圧力が小さいと光弾性縞は理想的な場合とかなり異ってくる。

荷重は板に垂直に（平行光束の方向に）加える。アリ溝に沿って板に垂直に滑動できる荷重点を介して荷重を伝えた。

光弾性材料：透過二層法では光弾性感度のなるべく差の大きい二種の材料を選ぶのが得策である。接着による光弾性縞の擾乱の少ないこと、十分な接着強度の必要なこと等も併せ考慮の上、感度の大きい材料としてエポキシ樹脂、感度の小さい材料としてポリメチルメタクリレートを選定した。20°Cでの感度はそれぞれ+0.94mm/kg -0.07mm/kg ($\lambda=5461\text{\AA}$ に対し) の程度である。接着はエポキシ樹脂のプレポリマーにより行った。曲げモーメントを与えてみて光弾性縞が鮮明に出ない場合には、大抵接着強度不十分と考えてよいようである。このような時にはさらに負荷を増すと接着面で破断する。

試片の平面形：曲げを受ける試片の平面形は、まず大勢を掴むために次のように選んだ。



第3図 平行四辺形板と三角形板の平面形

(1) 平行四辺形板

幅 b は一定として、後退角 θ と荷重点から後縁附根までの距離 l とを変化する。

(2) 三角形板

- $\theta_1 < 90^\circ$, $\theta_2 < 90^\circ$ の場合
- $\theta_1 < 90^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$ の場合
- $\theta_1 < 90^\circ$, $\theta_2 > 90^\circ$ の場合

荷重点は三角形板の尖端および頂角の二等分線上の数の個の点とした。

等色線図：このようにして得た平行四辺形板、三角形板の等色線写真は第4・5図に示すように、通常の梁理論

で得られる光弾性縞とは全く異ったものである。

結果のプロット：この写真から自由境界での応力分布をプロットしてみると、第6・7図のようになる。このプロットから導かれる結論をまとめてみると、

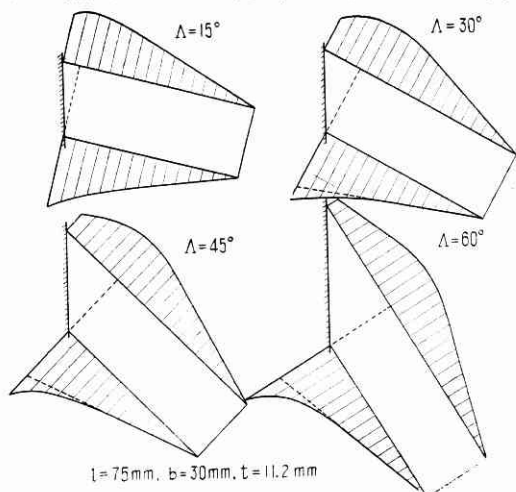
(1) 平行四辺形板では、後縁附根に著しい応力集中が起る。前縁での最大値は後縁附根から前縁に下した垂線



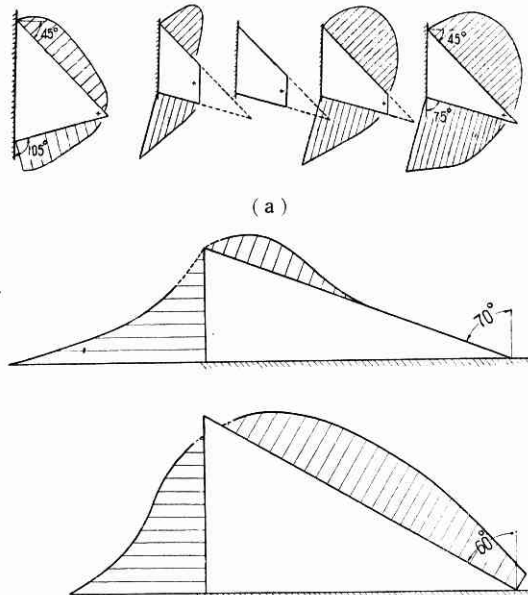
5.1 $\theta = \theta_2 = 75^\circ$ 5.2 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 50^\circ$ 5.3 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 30^\circ$ 5.4 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 105^\circ$

第 5 図 三角形板の等色線図

の近くに起り，そこから前縁附根までは逆に応力が減少する．前縁附根では 0 に近い値まで下る．AA' から尖端



第 6 図 先端に集中荷重



第 7 図

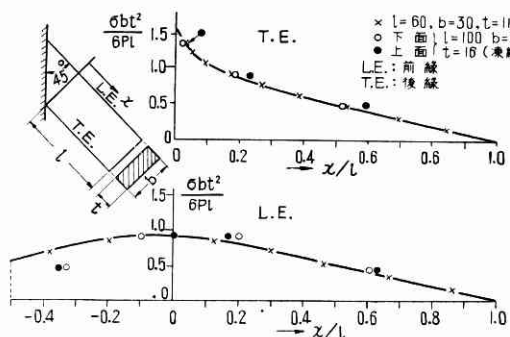
までの間はほぼ AA' で固定した梁に近いものと考え、これに A での増大，A' での減少を補正するという考えでまず間に合うものと考えられる．この傾向は後退角 θ が大きくなるにつれて増大するようである．

(2) 三角形板の場合には， θ_1, θ_2 が 90° より大きいか小さいかにより傾向が異なるようである． $\theta_1 < 90^\circ, \theta_2 < 90^\circ$ の場合には，附根はいずれも減少傾向を示し，その度合は θ の小さいほど著しい． $\theta_1 < 90^\circ, \theta_2 = 90^\circ$ の場合には， θ_1 の側の辺では中程に最大値の点があり，附根では 0 の近くまで下る． θ_2 の側の辺では附根でやはり若干の応力集中が起る．この傾向は θ_1 が小さくなるにつれ著しくなる． $\theta_1 < 90^\circ, \theta_2 > 90^\circ$ の場合には， θ_1 側の辺附根での低下， θ_2 側の辺附根での集中がことに著しい．

(3) 板の厚いか薄いか，すなわち断面形の如何による影響は若干認められるので，さらに検討を進める必要がある．

4. 凍結法での解析

透過二層法による解析と併行して凍結法による解析も行った．平行四辺形板の前後縁のスライスについてのプ



第 8 図

ロットの結果は二層法での結果とよく一致するが，凍結法では二層法の際に認められなかった種類の応力集中の生じているのに注意しなくてはならない．これは固定端での当りの応力集中であって，板に垂直に光を通す場合には現われないものである．この種の応力集中は附根の

