

接 手 の 熱 応 力*

砂 川 恵

Thermal Stresses in Joints

By

Megumi SUNAKAWA

Abstract: The thermal stresses in the closely spaced rivetted joints and in the adhesive bonded joints were analyzed under the simplified assumptions. Some numerical examples were shown and the concept of “the effective length of joint” was presented.

概 要

鋳接手および接着接手の熱強度を検討するため、まず接手部の熱応力を解析し、鋳および接着層の剪断応力を求める基礎式を導いた。二三の場合について簡単な数値計算例を示し、その剪断応力を β , γ , λ , θ 等のパラメータを用いて図示した。また板の圧縮挫屈後の場合の有効幅のような“有効接手長”の考えを導入した。

1. ま え が き

飛行体構造においては鋳接が広く使われているが、鋳頭による抵抗を減少させ、また鋳孔による外皮の強度低下を防ぐなどの目的で、鋳の代りに接着剤を使用する部分も急速に増加しつつある。昨今、飛行速度が増大するために生ずる空力加熱、および内蔵する推進剤燃焼による高温の影響などのため、接手部に生ずる熱応力を無視できないようになった。

鋳接手におよぼす熱応力の影響については、Gatewood [1] の簡単な報告があるが、ここでは、比較的密に鋳を打った鋳接手および接着接手の熱応力について検討した。接着接手の場合、接着剤の弾性係数が温度によって変化するが、その変態点以下の温度で使用する場合は、一定と考えてこの結果を使用して差支えないであろう。

鋳接手における鋳の力の分担については、古来、Volkersen [2] の研究が有名であって、その後の研究も彼の方法を踏襲しているのが多い。ここに述べる方法も同じ方針で解析してある。

なお、接手がある程度以上長くなると、接手部の熱応力は両端に集中し、板の圧縮挫屈後の場合の有効幅のような有効長でその剪断荷重を支えることが明らかとなった。

記 号

a : 接着層の厚さ。

* 昭和 35 年 2 月 25 日宇宙科学技術シンポジウムにおいて講演。

- b, l : それぞれ接手部の幅および重ね長さ.
 k : 鋸の結合係数.
 n, p : それぞれ鋸の数およびピッチ.
 t : 板厚.
 A : 板の断面積, $A=bt$.
 C : 接手パラメータ, $C^2=K\{(1/E_1t_1)+(1/E_2t_2)\}$.
 E : 板材料のヤング率.
 G : 接着剤の剪断剛性係数.
 K : 結合層(接着層)の剪断抵抗係数(接手係数).
 P : 端部拘束によって接手が受ける一様軸力.
 R : 結合部(接着部)の軸方向の板の内力, $R=R(x)$.
 S_i : i 番目の鋸の受ける剪断力.
 T : 板の温度上昇, $T=T(x)$.
 α : 板材料の線膨脹係数.
 δ : 上下板の変位の差.
 ε : 板の歪.
 τ : 結合層(接着層)の剪断応力.
 $\beta=Cl$.
 $\gamma=E_1t_1/E_2t_2$.
 $\lambda_1=l_1/l, \lambda_2=l_2/l, l_1=l_2$ の場合 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda$.
 $\theta=\alpha_2T_{20}/\alpha_1T_{10}, \theta_{1L}=T_{1L}/T_{10}, \theta_{1l}=T_{1l}/T_{10}$.
 $\theta_{2L}=T_{2L}/T_{20}, \theta_{2l}=T_{2l}/T_{20}$.

添 字

- 1, 2. それぞれ下側, 上側の板を示す.
 o, x, l . それぞれ $x=0, x, l$ における値を示す.
 T, P . それぞれ温度変化のみの場合, 軸力のみの場合を示す.

2. 基礎方程式

いま第1図のような変換で, 鋸接手と接着接手とを等価に考えて解析する. 結合層(接着層)の剪断応力 τ_x と, 上下板の変位の差 δ_x とはつぎのような関係がある.

$$\delta_x = \frac{\tau_x}{K'}, \quad (1)$$

ここで K' は結合層(接着層)の剪断抵抗係数(接手係数)であって, δ_x の函数であるが, 弾性変位の場合 $K'=一定=K$ であり, 鋸接手および接着接手に対してそれぞれ次式で表わされる.

$$\text{鋸接手の場合} \quad K = \frac{nk}{bl} = \frac{k}{bp}, \quad (2a)$$

$$\text{接着接手の場合} \quad K = \frac{G}{a}. \quad (2b)$$

第1図(b)において、外力がない場合、 x 点における上下面の変位の差は次式で表わすことができる。

$$\delta_x = \delta_0 + \int_0^x \varepsilon_{1x} dx - \int_0^x \varepsilon_{2x} dx, \quad (3)$$

ここで

$$\varepsilon_{1x} = \frac{R_{1x}}{E_1 A_1} + \alpha_1 T_1, \quad (4)$$

$$R_{1x} = \int_0^x \tau_x b dx = Kb \int_0^x \delta_x dx, \quad (5)$$

$$\therefore \varepsilon_{1x} = \frac{K}{E_1 t_1} \int_0^x \delta_x dx + \alpha_1 T_1. \quad (6)$$

同様に

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2x} &= -\frac{R_{1x}}{E_2 A_2} + \alpha_2 T_2 \\ &= -\frac{K}{E_2 t_2} \int_0^x \delta_x dx + \alpha_2 T_2. \end{aligned} \quad (7)$$

(6) 式, (7) 式を (3) 式に代入して

$$\begin{aligned} \delta_x &= \delta_0 + \int_0^x \left(\frac{K}{E_1 t_1} \int_0^x \delta_x dx + \alpha_1 T_1 \right) dx - \int_0^x \left(-\frac{K}{E_2 t_2} \int_0^x \delta_x dx + \alpha_2 T_2 \right) dx \\ &= \delta_0 + K \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \int_0^x \int_0^x \delta_x dx dx + \int_0^x (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2) dx \\ &= \delta_0 + C^2 \int_0^x \int_0^x \delta_x dx dx + \int_0^x (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

ただし

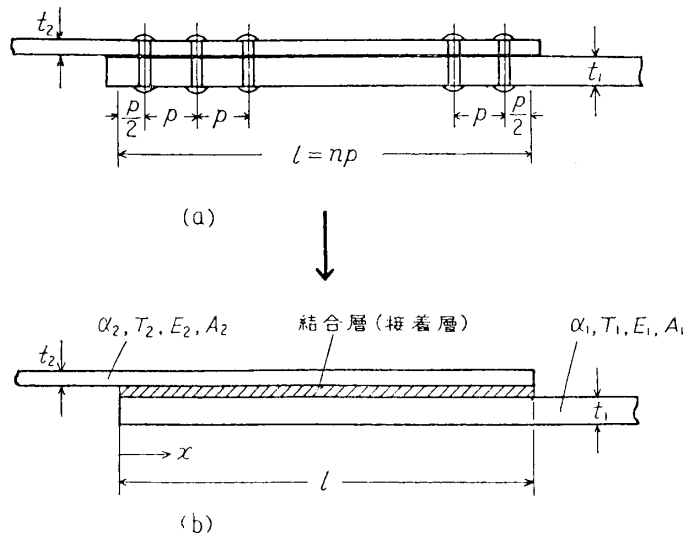
$$C^2 = K \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right). \quad (9)$$

(8) 式を x で2回微分して

$$\frac{d^2 \delta_x}{dx^2} = C^2 \delta_x + \frac{d}{dx} (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2). \quad (10)$$

したがって、 T_1 , T_2 の形を与え、適当な境界条件を使って (10) 式を解けば、(1) 式より結合層 (接着層) の剪断応力を求めることができる。そして i 番目の釘の受ける剪断力 S_i は次式から求められる。

$$S_i = b \int_{i-p/2}^{i+p/2} \tau_x dx. \quad (11)$$



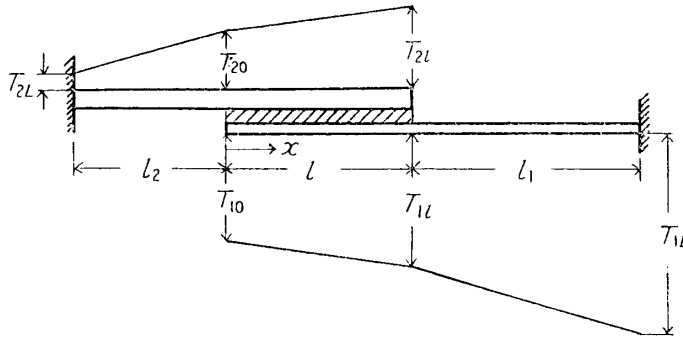
第1図 釘接手と接着接手

3. 応 用 例

実際問題としては、接手には外力が加わる場合が多く、また外力がなくても端部が拘束されていると温度変化のために軸力が生ずる。単純に外力が加わる場合は、そのための剪断応力を別に求めて重ね合わせればよいので除外して、温度変化のみがあって端部が拘束されている場合について考えよう。

ここでは簡単のため一軸問題として取り扱い、曲げや挫屈は起らないと仮定する。

3.1. 両端が拘束されている場合



第2図

第2図のように両端が拘束されている場合、温度変化のために生ずる軸力 \$P\$ は(12)式から求まるもので、それによる剪断応力を温度変化のみの場合の剪断応力に重ね合わせれば、結合層(接着層)の剪断応力が与えられる。\$l_1\$部、\$l_2\$部、\$l\$部の長さの変化をそれぞれ \$\Delta l_1\$、\$\Delta l_2\$、\$\Delta l\$ とすれば次式が成立する。

$$\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l = 0, \quad (12)$$

ただし

$$\Delta l_1 = \int_0^{l_1} \alpha_1 T_1(x) dx + \frac{Pl_1}{E_1 A_1}, \quad (12a)$$

$$\Delta l_2 = \int_0^{l_2} \alpha_2 T_2(x) dx + \frac{Pl_2}{E_2 A_2}, \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} \Delta l &= (\Delta l)_T + (\Delta l)_P \\ &= \int_0^l (\varepsilon_{2,x})_T dx + (\delta_l)_T + \int_0^l (\varepsilon_{2,x})_P dx + (\delta_l)_P. \end{aligned} \quad (12c)$$

いま第2図のような温度変化が上下板に生じたとすると、\$\Delta l_1\$、\$\Delta l_2\$、\$\Delta l\$ はそれぞれつぎのようになる。

$$\Delta l_1 = \frac{\alpha_1 l_1}{2} (T_{1U} + T_{1L}) + \frac{Pl_1}{E_1 A_1}, \quad (13a)$$

$$\Delta l_2 = \frac{\alpha_2 l_2}{2} (T_{20} + T_{2L}) + \frac{Pl_2}{E_2 A_2}, \quad (13b)$$

$$\Delta l = (\Delta l)_T + (\Delta l)_P, \quad (13c)$$

ここで

$$\begin{aligned} (\Delta l)_T &= \int_0^l (\varepsilon_{2,x})_T dx + (\delta_l)_T \\ &= -\frac{K}{E_2 t_2} \int_0^l \int_0^x (\delta_x)_T dx dx + \int_0^l \alpha_2 T_2 dx + (\delta_l)_T. \end{aligned} \quad (14)$$

よって $(\delta_x)_T$ を求めると, (10) 式より

$$\frac{d^2(\delta_x)_T}{dx^2} = C^2(\delta_x)_T + \frac{d}{dx}(\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2). \quad (15)$$

いま

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{10} + (T_{1l} - T_{10}) \frac{x}{l}, \\ T_2 &= T_{20} + (T_{2l} - T_{20}) \frac{x}{l}. \end{aligned} \quad (16)$$

境界条件:

$$\begin{aligned} x=0 \text{ において} \quad \frac{d(\delta_x)_T}{dx} &= \alpha_1 T_{10} - \alpha_2 T_{20}, \\ x=l \text{ において} \quad \frac{d(\delta_x)_T}{dx} &= \alpha_1 T_{1l} - \alpha_2 T_{2l}. \end{aligned} \quad (17)$$

を用いて (15) 式を解くと,

$$\begin{aligned} (\delta_x)_T &= \frac{1}{C \sinh \beta} \left\{ (\alpha_1 T_{1l} - \alpha_2 T_{2l}) \cosh \beta \frac{x}{l} - (\alpha_1 T_{10} - \alpha_2 T_{20}) \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{C\beta} \{ \alpha_1 (T_{10} - T_{1l}) - \alpha_2 (T_{20} - T_{2l}) \}, \end{aligned} \quad (18)$$

ただし

$$\beta = Cl. \quad (19)$$

また

$$\begin{aligned} (\Delta l)_P &= \int_0^l (\varepsilon_{2x})_P dx + (\delta_l)_P \\ &= \frac{Pl}{E_2 A_2} - \frac{K}{E_2 t_2} \int_0^l \int_0^x (\delta_x)_P dx dx + (\delta_l)_P, \end{aligned} \quad (20)$$

ここで $(\delta_x)_P$ は, Volkersen [3] の結果を一般化して,

$$(\delta_x)_P = \frac{P}{E_1 A_1} \frac{1}{C \sinh \beta} \left\{ \cosh \beta \frac{x}{l} + \gamma \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) \right\}, \quad (21)$$

ただし

$$\gamma = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} \quad (22)$$

で与えられる.

(12), (13), (14), (16), (18), (20), (21) の諸式より P は結局つぎのように求められる.

$$\begin{aligned} -\frac{P}{(E_1 A_1)(\alpha_1 T_{10})} &= \left[- (1 - \theta) \left\{ \frac{\gamma \cosh \beta + 1}{(1 + \gamma)\beta \sinh \beta} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \right. \\ &\quad \left. + (\theta_{1l} - \theta\theta_{2l}) \left\{ \frac{\cosh \beta + \gamma}{(1 + \gamma)\beta \sinh \beta} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2(1 + \gamma)} \{ \gamma(1 + \theta_{1l}) + \theta(1 + \theta_{2l}) \} + \frac{1}{2} \{ (\theta_{1l} + \theta_{1L})\lambda_1 + \theta(1 + \theta_{2L})\lambda_2 \} \right] \\ &\quad \div \left[(\lambda_1 + \gamma\lambda_2) + \frac{(1 + \gamma^2) \cosh \beta + \gamma(2 + \beta \sinh \beta)}{(1 + \gamma)\beta \sinh \beta} \right], \end{aligned} \quad (23)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{l_1}{l}, \quad \lambda_2 = \frac{l_2}{l}, \\ \theta &= \frac{\alpha_2 T_{20}}{\alpha_1 T_{10}}, \quad \theta_{1L} = \frac{T_{1L}}{T_{10}}, \quad \theta_{1l} = \frac{T_{1l}}{T_{10}}, \quad \theta_{2L} = \frac{T_{2L}}{T_{20}}, \quad \theta_{2l} = \frac{T_{2l}}{T_{20}}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

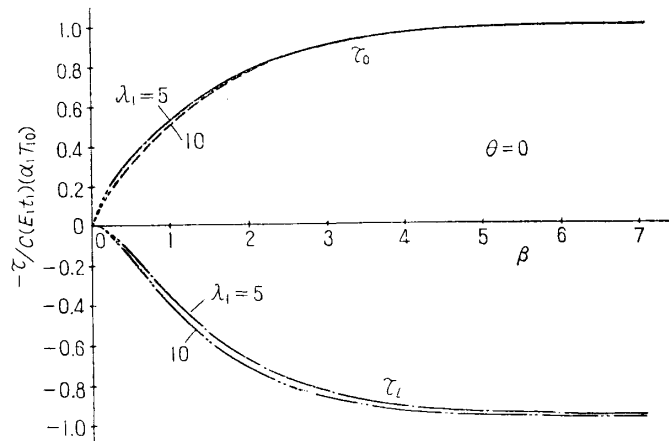
結局、結合層（接着層）の剪断応力は次式で与えられる。

$$\tau_x = K\{(\delta_x)_T + (\delta_x)_P\},$$

すなわち

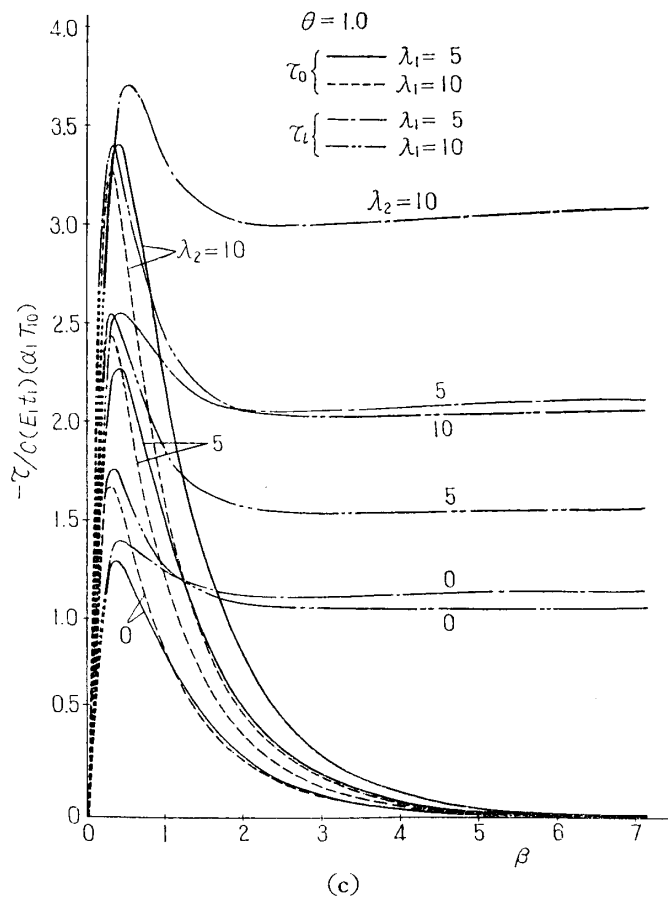
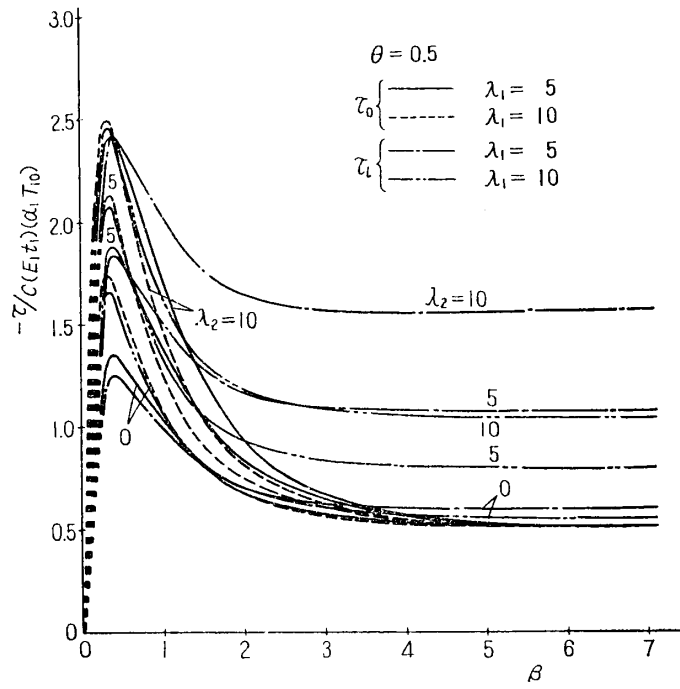
$$\begin{aligned} \frac{\tau_x \cdot (1 + \gamma)}{C(E_1 t_1)(\alpha_1 T_{10})} &= \frac{1}{\sinh \beta} \left\{ (\theta_{1l} - \theta \theta_{2l}) \cosh \beta \frac{x}{l} - (1 - \theta) \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{\beta} \{ (1 - \theta_{1l}) - \theta (1 - \theta_{2l}) \} - \left[- (1 - \theta) \left\{ \frac{\gamma \cosh \beta + 1}{(1 + \gamma) \beta \sinh \beta} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \right. \\ &+ (\theta_{1l} - \theta \theta_{2l}) \left\{ \frac{\cosh \beta + \gamma}{(1 + \gamma) \beta \sinh \beta} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \\ &+ \left. \frac{1}{2(1 + \gamma)} \{ \gamma(1 + \theta_{1l}) + \theta(1 + \theta_{2l}) \} + \frac{1}{2} \{ (\theta_{1l} + \theta_{1L}) \lambda_1 + \theta(1 + \theta_{2L}) \lambda_2 \} \right] \\ &\times \frac{\cosh \beta \frac{x}{l} + \gamma \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right)}{\sinh \beta [(\lambda_1 + \gamma \lambda_2) + \{ (1 + \gamma^2) \cosh \beta + \gamma(2 + \beta \sinh \beta) \} / (1 + \gamma) \beta \sinh \beta]}. \end{aligned} \quad (25)$$

いま、 $\gamma \ll 1$, $T_1 = T_{10}$, $T_2 = T_{20}$ (したがって $\theta_{1l} = \theta_{1L} = \theta_{2l} = \theta_{2L} = 1$) とし、 $\lambda_1, \lambda_2, \theta$ をパラメータとして τ_0, τ_l を図示すると第3図 (a)~(c) が得られる。 $\gamma, \lambda_1, \lambda_2, \theta$ をパラメータとして β の値によって τ が大きく変化するので、ことに β の小さい場合には注意を要する。



(a)

第3図 $\gamma \ll 1$, $T_1 = T_{10}$, $T_2 = T_{20}$ の場合の τ_0, τ_l

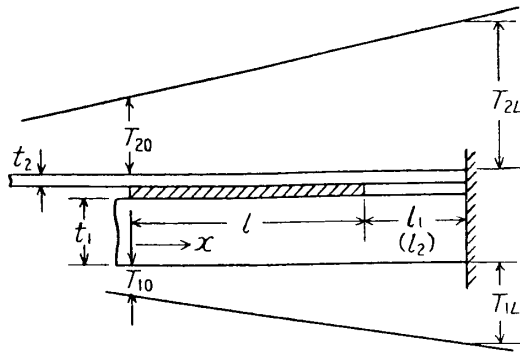


第3図(つづき) $\gamma \ll 1, T_1 = T_{10}, T_2 = T_{20}$ の場合の τ_0, τ_1



3.2. 片端が拘束されている場合

つぎに第4図のような接手構造に、図示のような温度上昇があった場合を考えよう。この



第4図

場合の軸力は次式から求めることができる。

$$\Delta l_1 - \Delta l_2 + \delta_l = 0. \quad (26)$$

ただし

$$\Delta l_1 = \int_0^{l_1} \alpha_1 T_1(x) dx + \frac{Pl_1}{E_1 A_1}, \quad (26a)$$

$$\Delta l_2 = \int_0^{l_2} \alpha_2 T_2(x) dx - \frac{Pl_2}{E_2 A_2}, \quad (26b)$$

$$\delta_l = (\delta_l)_T + (\delta_l)_P. \quad (26c)$$

$(\delta_x)_T$, $(\delta_x)_P$ は前と同様にして次のごとく求める。

$$\begin{aligned} (\delta_x)_T = & \frac{1}{C(1+\lambda) \sinh \beta} \left[(\alpha_1 T_{1L} - \alpha_2 T_{2L}) \left(\cosh \beta \frac{x}{l} - \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \right. \\ & \left. + (\alpha_1 T_{10} - \alpha_2 T_{20}) \left\{ \lambda \cosh \beta \frac{x}{l} - (1+\lambda) \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + \frac{\sinh \beta}{\beta} \right\} \right], \end{aligned} \quad (27)$$

ただし

$$\lambda = \frac{l_1}{l} = \frac{l_2}{l}. \quad (28)$$

また,

$$(\delta_x)_P = \frac{P}{E_1 A_1} \cdot \frac{(1+\gamma)}{C \sinh \beta} \cosh \beta \frac{x}{l}. \quad (29)$$

前項と同様にして、 P が次式で表わせる。

$$\begin{aligned} -\frac{P}{(E_1 A_1)(\alpha_1 T_{10})} = & \left[(\theta_{1L} - \theta \theta_{2L}) \left\{ \lambda \left(1 + \frac{\lambda}{2} \right) \sinh \beta + \frac{1}{\beta} \left(\cosh \beta - \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \right\} \right. \\ & \left. - (1-\theta) \left\{ \lambda \left(\left[1 + \frac{\lambda}{2} \right] \sinh \beta - \frac{\cosh \beta - 1}{\beta} \right) - \frac{1}{\beta} \left(\frac{\sinh \beta}{\beta} - 1 \right) \right\} \right] \\ & \div \left[(1+\gamma)(1+\lambda) \left(\lambda \sinh \beta + \frac{\cosh \beta}{\beta} \right) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

したがって、結合層（接着層）の剪断応力は次式で与えられる。

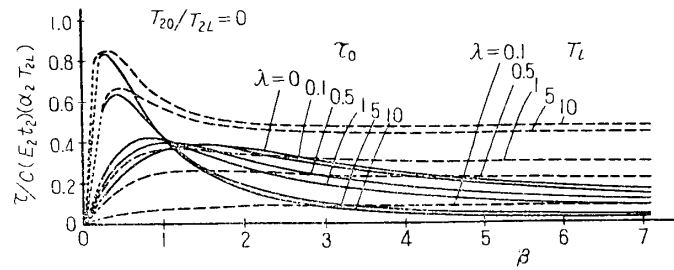
$$\tau_x = K \{ (\delta_x)_T + (\delta_x)_P \}.$$

すなわち,

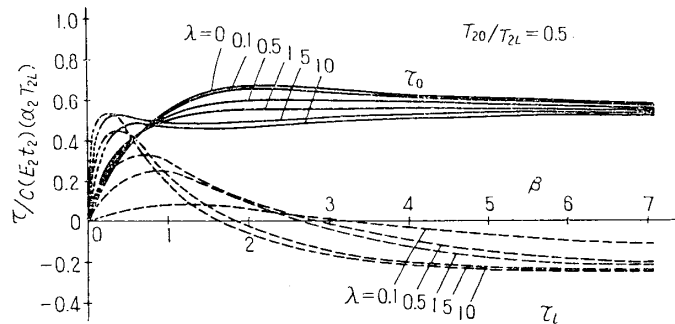
$$\begin{aligned} \frac{\tau_x \cdot (1+\gamma)}{C(E_1 t_1)(\alpha_1 T_{10})} = & \frac{1}{(1+\lambda) \sinh \beta} \left[(\theta_{1L} - \theta \theta_{2L}) \left(\cosh \beta \frac{x}{l} - \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \right. \\ & \left. + (1-\theta) \left\{ \lambda \cosh \beta \frac{x}{l} - [1+\lambda] \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + \frac{\sinh \beta}{\beta} \right\} \right] \\ & - \left[(\theta_{1L} - \theta \theta_{2L}) \left\{ \lambda \left(1 + \frac{\lambda}{2} \right) \sinh \beta + \frac{1}{\beta} \left(\cosh \beta - \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - (1 - \theta) \left\{ \lambda \left(\left[1 + \frac{\lambda}{2} \right] \sinh \beta - \frac{\cosh \beta - 1}{\beta} \right) - \frac{1}{\beta} \left(\frac{\sinh \beta}{\beta} - 1 \right) \right\} \\
 & \times \frac{(1 + \gamma) \cosh \beta \frac{x}{l}}{\sinh \beta \left\{ (1 + \gamma)(1 + \lambda) \left(\lambda \sinh \beta + \frac{\cosh \beta}{\beta} \right) \right\}} \quad (31)
 \end{aligned}$$

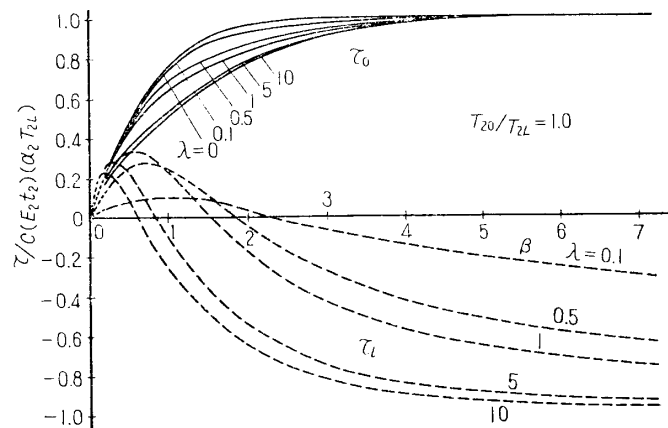
いま、 $1/\gamma \ll 1$, $T_1 = 0$ とし、 $\lambda, T_{20}/T_{2L}$ をパラメータとして τ_0, τ_l を図示したのが第5図 (a)~(c) である。この場合も当然予想されることではあるが、 $\gamma, \lambda, T_{20}/T_{2L}$ をパラメータとして β の値によって τ が大きく変わるので、 β の小さい場合には注意を要する。



(a)



(b)



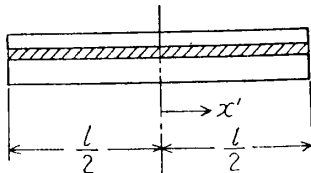
(c)

第5図 $1/\gamma \ll 1, T_1 = 0$ の場合の τ_0, τ_l

4. 有効接手長

いま有効接手長の概念を説明するために問題を極めて単純化し、3. に示した例題において、端部の拘束がなく（したがって $P=0$ ），かつ T_1, T_2 がそれぞれ一定 ($T_1=T_{10}, T_2=T_{20}$) とすると、

$$\delta_x = \frac{1}{C \sinh \beta} (\alpha_1 T_{10} - \alpha_2 T_{20}) \left\{ \cosh \beta \frac{x}{l} - \cosh \beta \left(\frac{x}{l} - 1 \right) \right\} \quad (32)$$



第6図

となる。あるいは、原点を結合層（接着層）の中央に移すと（第6図），直ちに、

$$\delta_x = \frac{1}{C \cosh(\beta/2)} (\alpha_1 T_{10} - \alpha_2 T_{20}) \sinh \beta \frac{x'}{l} \quad (32a)$$

となる。したがって

$$\tau_x = K \delta_x,$$

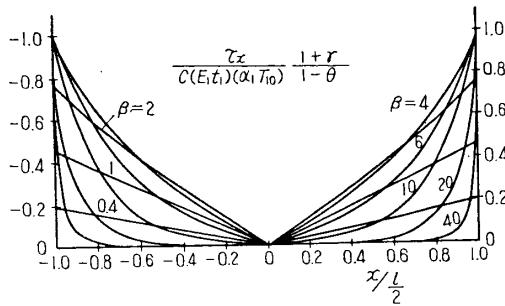
すなわち、

$$\frac{\tau_x}{C(E_1 t_1)(\alpha_1 T_{10})} \frac{1+\gamma}{1-\theta} = \frac{1}{\cosh(\beta/2)} \sinh \beta \frac{x'}{l}. \quad (33)$$

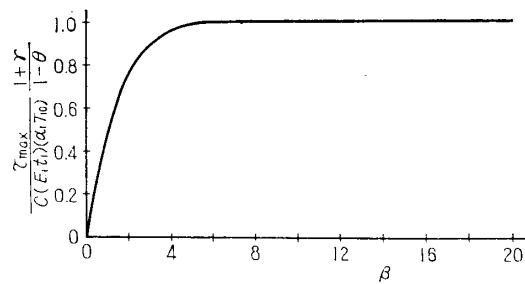
また

$$\frac{\tau_{\max}}{C(E_1 t_1)(\alpha_1 T_{10})} \frac{1+\gamma}{1-\theta} = \frac{\sinh(\beta/2)}{\cosh(\beta/2)}. \quad (33a)$$

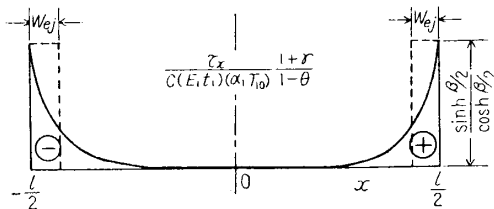
τ_x, τ_{\max} をそれぞれ (33) 式, (33a) 式にしたがって第7図, 第8図に示す。



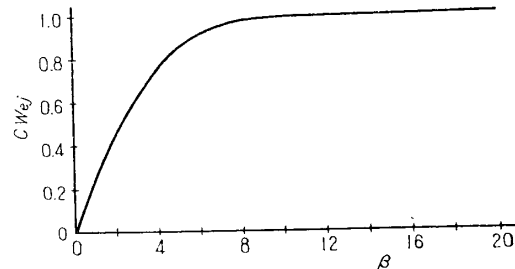
第7図



第8図



第9図



第10図

第7図において、 β が大きくなった場合、荷重の大部分は両端に集中すると考えてよい(第9図)。そこで板の圧縮挫屈後の場合の有効幅のような、全荷重を受持つ領域を考えることは合理的であろう。これを有効接手長とでも称すれば、つぎのごとく与えられる。

$$\begin{aligned} W_{ej} &= \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{l/2} \tau_x dx = \frac{1}{C} \frac{\cosh(\beta/2) - 1}{\sinh(\beta/2)} \\ &= \sqrt{\frac{E_1}{K}} \frac{1}{\sqrt{1+r}} \frac{\cosh(\beta/2) - 1}{\sinh(\beta/2)} \cdot \sqrt{t_1} \\ &\doteq \sqrt{\frac{E_1}{K}} \frac{1}{\sqrt{1+r}} \cdot \sqrt{t_1} \end{aligned} \quad (34)$$

(34) 式を第10図に示す。たとえば接着接手において、ジュラルミン板を Redux E で接着したとして、 $E=7.4 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $K=G/a=(3.22 \times 10 \text{ kg/mm}^2)/(0.2 \text{ mm})$, $r=1$ とすると、 $W_{ej}=4.8\sqrt{t_1}$ (t_1 は mm 単位) となる。

T_1, T_2 が一定でない場合でも、同様な観点から有効接手長を近似的に求めることができる。

実際に接手を設計する場合、有効接手長を用いると便利であろう。

5. あとがき

本文では接手の熱強度を検討するため、まず接手部の熱応力を解析した。弾性諸係数の温度による変化、接着層の温度による伸縮の影響等はすべて無視し、板厚、板幅も一定とした極めて単純化した場合の解を示したが、有効接手長の考えは、実際問題として利用価値があるものと考えられる。なお、接着接手を接着剤の変態点以上の温度で使用する場合には、(2b) 式の G すなわち K に補正を行なう必要がある。

また本文の考え方は、サンドウィッチ構造の熱応力を求める場合にも使えるであろう。

この解析において、植村益次助教授には懇切な御指導と御検討をいただいた。また、池田健教授には有益な御助言をいただいた。紙上を借りて厚く御礼申上げる。

1960年5月6日 航空力学部

文 献

- [1] Gatewood, B.E.: Thermal Loads on Joints, Jour. Aero. Sci., 21 (1954) 645.
- [2] Volkersen, Olaf: Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, 15 (1938) 41.
- [3] 同上, (10) 式.
なお、大沼が同じ解を報告している。日本航空学会誌, 7 (1959) 1, (9) 式.