

JAERI-M

8923

電極板の有効弾性係数の概算法

1980年7月

柴沼 清・栗山 正明・奥村 義和

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

電極板の有効弾性係数の概算法

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

柴沼 清・栗山 正明・奥村 義和

(1980年5月31日受理)

本報告は、電極板、すなわち冷却用のパイプを有する有孔板の有効弾性係数に関する概算法を述べたものである。電極板は直交異方性体であり、各対称軸について弾性定数を公式化した。電極板の材料に無酸素銅 ($E_0 = 12500 \text{ kg/mm}^2$, $\nu_0 = 0.34$) を採用した場合の結果を以下に示す。

$$E_L = 3180 \text{ kg/mm}^2, \quad E_T = 3860 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_{LT} = 0.12, \quad \nu_{TL} = 0.15$$

Estimation of Effective Elastic Constants for Grid Plate

Kiyoshi SHIBANUMA, Masaaki KURIYAMA and Yoshikazu OKUMURA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 31, 1980)

This article contains a method of estimation for the effective elastic constants of a grid plate, which is a flat perforated plate with pipes for cooling. The elastic constants of the grid plate are formulated for two symmetric axes. In the case of using OFCu ($E_0 = 12500 \text{ kg/mm}^2$, $\nu_0 = 0.34$) as the material of the grid, the results are given as follows.

$$E_L = 3180 \text{ kg/mm}^2, \quad E_T = 3860 \text{ kg/mm}^2$$
$$\nu_{LT} = 0.12, \quad \nu_{TL} = 0.15$$

Keywords: Grid plate, Young's modulus, Poisson's ratio,
Orthotropic

目 次

1. はじめに.....	1
2. 電極板の有効弾性係数の概算	1
2.1 縦弾性係数	1
2.1.1 円孔板の縦弾性係数	1
2.1.2 パイプ板の縦弾性係数	4
2.1.3 電極板の有効縦弾性係数	5
2.2 ポアソン比	6
2.2.1 円孔板のポアソン比	6
2.2.2 パイプ板のポアソン比	6
2.2.3 電極板のポアソン比	7
2.3 任意方向の電極板の弾性定数	7
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Estimation of effective elastic constants for grid plate.....	1
2.1 Young's modulus	1
2.1.1 Young's modulus of perforated plate	1
2.1.2 Young's modulus of plate with pipes	4
2.1.3 Effective young's modulus of grid plate.....	5
2.2 Poisson's ratio	6
2.2.1 Poisson's ratio of perforated plate	6
2.2.2 Poisson's ratio of plate with pipes	6
2.2.3 Effective Poisson's ratio of grid plate	7
2.3 Any directional effective elastic constants of grid plate	7
Acknowledgement	8
Reference	8

1. はじめに

核融合プラズマの中性粒子入射加熱用イオン源の加速電極はイオンビームによる熱負荷によって、熱応力、たわみ等が発生し、材料の破損やビームの発散の原因となりうる可能性がある。このように、熱負荷による力学的問題は設計上重要であるにもかかわらず、電極板がイオンビームを引き出す円孔と冷却用のパイプ孔から構成された複雑な形状をした薄板であるために、力学的問題を厳密に解析することは非常に困難であった。

そこで、この熱負荷問題を解決するためには、まず、電極板の幾何学的形状による異方性を考慮した巨視的な力学的特性—縦弾性係数、ポアソン比—を算出する必要性があり、本報告はこの力学的特性を解析的に求める概算法を述べたものである。

2. 電極板の有効弾性係数の概算

Figure 1に示すように、電極板はイオンビーム束を引き出すための多数の円孔とこれを冷却するための水冷用のパイプ孔から成っており、この二つの構造を同時に考慮することは力学的に非常に困難である。

そこで、Figure 2のように、まず、円孔を有する部材(a)—円孔板と、パイプ孔を有する部材(b)—パイプ板に分離し、各々の部材について弾性定数を算出する。次に、体積分率に応じて重ね合わせ法を適用することによって電極全体の弾性定数を求めることにする。

2.1 縦弾性係数 E

2.1.1 円孔板の縦弾性係数 E_{1L} , E_{1T}

円孔板はFigure 2 (a)のように円孔が規則的に正方配列した薄板であるために斜線で示すくり返しユニットで代表される。このことから、円孔板の縦弾性係数はFigure 3のモデルを解くことによって求めることができる。

ここで、形状による応力集中は考慮せず、荷重に対して垂直な面では常に応力は均一に分布していると仮定する。

Figure 3のように座標をとれば、引張方向に垂直なユニットの断面積 $s(x)$ は厚さを単位長さとするとき、

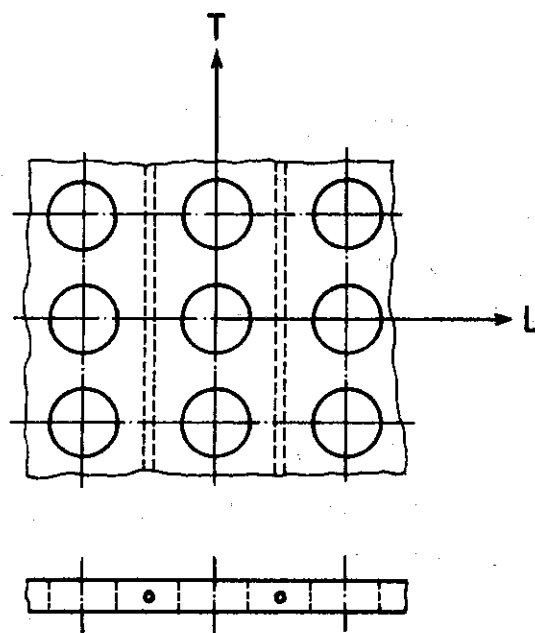


Fig. 1 電極板

1. はじめに

核融合プラズマの中性粒子入射加熱用イオン源の加速電極はイオンビームによる熱負荷によって、熱応力、たわみ等が発生し、材料の破損やビームの発散の原因となりうる可能性がある。このように、熱負荷による力学的問題は設計上重要であるにもかかわらず、電極板がイオンビームを引き出す円孔と冷却用のパイプ孔から構成された複雑な形状をした薄板であるために、力学的問題を厳密に解析することは非常に困難であった。

そこで、この熱負荷問題を解決するためには、まず、電極板の幾何学的形状による異方性を考慮した巨視的な力学的特性—縦弾性係数、ポアソン比—を算出する必要性があり、本報告はこの力学的特性を解析的に求める概算法を述べたものである。

2. 電極板の有効弾性係数の概算

Figure 1に示すように、電極板はイオンビーム束を引き出すための多数の円孔とこれを冷却するための水冷用のパイプ孔から成っており、この二つの構造を同時に考慮することは力学的に非常に困難である。

そこで、Figure 2のように、まず、円孔を有する部材(a)—円孔板と、パイプ孔を有する部材(b)—パイプ板に分離し、各々の部材について弾性定数を算出する。次に、体積分率に応じて重ね合わせ法を適用することによって電極全体の弾性定数を求めることにする。

2.1 縦弾性係数 E

2.1.1 円孔板の縦弾性係数 E_{1L} , E_{1T}

円孔板はFigure 2 (a)のように円孔が規則的に正方配列した薄板であるために斜線で示すくり返しユニットで代表される。このことから、円孔板の縦弾性係数はFigure 3のモデルを解くことによって求めることができる。

ここで、形状による応力集中は考慮せず、荷重に対して垂直な面では常に応力は均一に分布していると仮定する。

Figure 3のように座標をとれば、引張方向に垂直なユニットの断面積 $s(x)$ は厚さを単位長さとする、

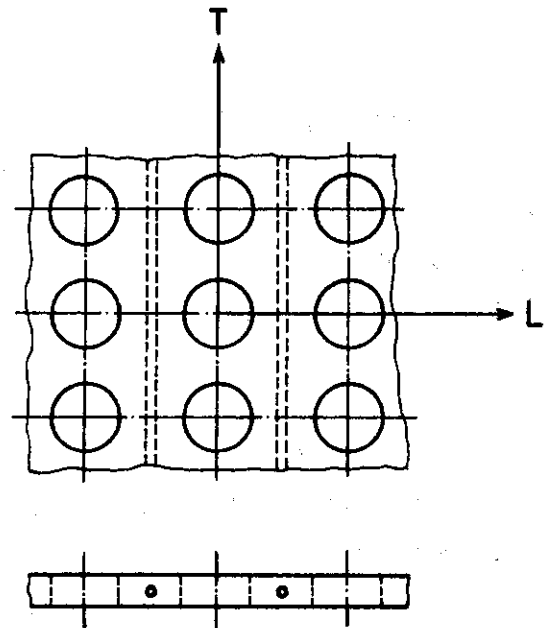


Fig. 1 電極板

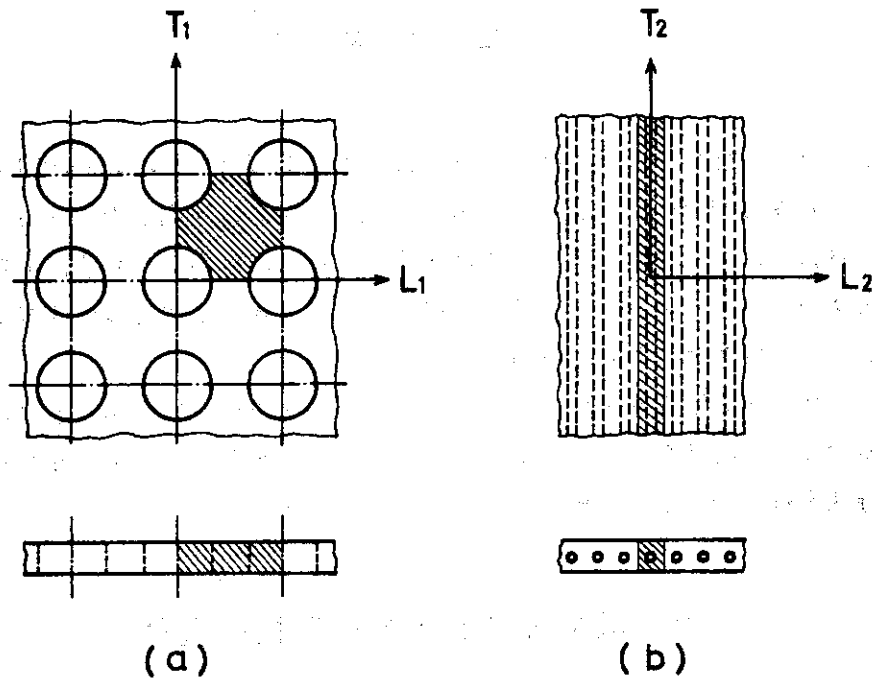


Fig. 2 電極板の分離

$$s(x) = \begin{cases} 2(a - \sqrt{r^2 - x^2}) & (0 \leq x \leq r, 2a - r \leq x \leq 2a) \\ 2a & (r \leq x \leq 2a - r) \end{cases} \quad (1)$$

と表わされる。

材料の縦弾性係数を E_0 とし、ユニットにかかる荷重を P とすれば、各断面におけるひずみ $\epsilon(x)$ は

$$\epsilon(x) = \frac{P}{E_0 s(x)} \quad (2)$$

であり、これを対称性を考慮することにより、 $0 \leq x \leq a$ で平均すれば、ユニット全体の平均ひずみが求まる。

$$\epsilon = \frac{1}{a} \int_0^a \epsilon(x) dx = \frac{P}{a E_0} \int_0^a \frac{dx}{s(x)} \quad (3)$$

一方、ユニットの平均応力は

$$\sigma = \frac{P}{2a} \quad (4)$$

であるから、ユニットの平均縦弾性係数 E_{1T} は次式となる。

$$E_{1T} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{E_0}{\int_0^a \frac{2}{s(x)} dx} \quad (5)$$

ここで、

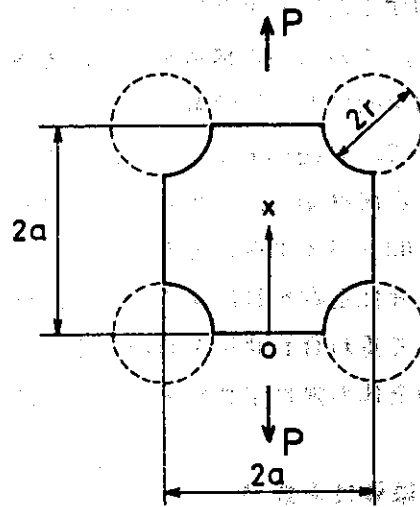


Fig. 3 円孔板の解析モデル

$$I = \int_0^a \frac{2}{s(x)} dx = \int_0^r \frac{dx}{a - \sqrt{r^2 - x^2}} + \int_r^a \frac{dx}{a} \quad (6)$$

$$I_1 = \int_0^r \frac{dx}{a - \sqrt{r^2 - x^2}} = \int_0^r \frac{a + \sqrt{r^2 - x^2}}{a^2 - r^2 + x^2} dx \quad (7)$$

この積分を行うために、 $\sqrt{r^2 - x^2}$ を Taylor 展開すると、次式となる。

$$\sqrt{r^2 - x^2} = r - \frac{1}{2r} x^2 - \frac{1}{8r^3} x^4 - \frac{1}{16r^5} x^6 - \frac{5}{128r^7} x^8 \quad (8)$$

よって、

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^r \left(\frac{a + r - \frac{1}{2r} x^2 - \frac{1}{8r^3} x^4 - \frac{1}{16r^5} x^6 - \frac{5}{128r^7} x^8}{a^2 - r^2 + x^2} \right) dx \\ &= \int_0^r \left(c_1 x^6 + c_2 x^4 + c_3 x^2 + c_4 + \frac{c_5}{a^2 - r^2 + x^2} \right) dx \\ &= \frac{c_1}{7} r^7 + \frac{c_2}{5} r^5 + \frac{c_3}{3} r^3 + c_4 r + \frac{c_5}{\sqrt{a^2 - r^2}} \tan^{-1} \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} \quad (9) \end{aligned}$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} c_1 &= -\frac{5}{128} \left(\frac{1}{r^7} \right) \\ c_2 &= \frac{5}{128} \left(\frac{a^2}{r^7} \right) - \frac{13}{128} \left(\frac{1}{r^5} \right) \\ c_3 &= -\frac{5}{128} \left(\frac{a^4}{r^7} \right) + \frac{9}{64} \left(\frac{a^2}{r^5} \right) - \frac{29}{128} \left(\frac{1}{r^3} \right) \\ c_4 &= \frac{5}{128} \left(\frac{a^6}{r^7} \right) - \frac{23}{128} \left(\frac{a^4}{r^5} \right) + \frac{47}{128} \left(\frac{a^2}{r^3} \right) - \frac{93}{128} \left(\frac{1}{r} \right) \\ c_5 &= -\frac{5}{128} \left(\frac{a^8}{r^3} \right) + \frac{7}{32} \left(\frac{a^6}{r^5} \right) - \frac{35}{64} \left(\frac{a^4}{r^3} \right) + \frac{35}{32} \left(\frac{a^2}{r} \right) + \frac{35}{128} r + a \end{aligned} \right.$$

よって、

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{1391}{1680} + \frac{27}{64} \left(\frac{a}{r} \right)^2 - \frac{37}{192} \left(\frac{a}{r} \right)^4 + \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r} \right)^6 \\ &\quad + \frac{1 - \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r} \right)^7 + \frac{7}{32} \left(\frac{a}{r} \right)^5 - \frac{35}{64} \left(\frac{a}{r} \right)^3 + \frac{35}{32} \left(\frac{a}{r} \right) + \frac{35}{128} \left(\frac{r}{a} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2}} \\ &\quad \tan^{-1} \frac{\left(\frac{r}{a} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2}} \quad (10) \end{aligned}$$

と表わされ、また、

$$I_2 = \int_r^a \frac{dx}{a} = \frac{1}{a} (a-r) = 1 - \left(\frac{r}{a}\right) \quad (1)$$

であるから、円孔板の縦弾性係数は次式で表わされる。

$$E_{1T} = \frac{E_0}{A + B} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{cases} A = \frac{289}{1680} - \left(\frac{r}{a}\right) + \frac{27}{64} \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \frac{37}{192} \left(\frac{a}{r}\right)^4 + \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r}\right)^6 \\ B = \frac{1 - \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r}\right)^7 + \frac{7}{32} \left(\frac{a}{r}\right)^5 - \frac{35}{64} \left(\frac{a}{r}\right)^3 + \frac{35}{32} \left(\frac{a}{r}\right) + \frac{35}{128} \left(\frac{r}{a}\right) \tan^{-1} \left(\frac{r}{a}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}} \end{cases}$$

円孔は正方形列をしているため、対称軸L, Tに対する弾性係数も等しく

$$E_{1T} = E_{1L} \quad (3)$$

である。

2.1.2 パイプ板の縦弾性係数 E_{2L} , E_{2T}

パイプ板はFigure 2 (b)のように、パイプ孔が規則正しく板厚中を一方方向に貫いた板であり、斜線部分の反復性を考慮してモデル化すると解析ユニットはFigure 4となる。

まず、T方向の縦弾性係数 E_{2T} はパイプ孔の存在が剛性の低下を引き起こすと考えられ、すなわち

$$E_{2T} = \frac{(4ht - \pi d^2)E_0}{4ht} \quad (4)$$

と表わされる。

次に、Figure 4のL方向の縦弾性係数 E_{2L} は2.1.1節の円孔板と同様な方法で求めることができるが、ここでは、さらに簡単化し、Figure 5に示すモデルについて解析を行う。すなわち、パイプ孔の面積は同じとして、円形を正方形に近似する。

Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ各部材にかかる荷重は同じとし、それぞれの見かけの縦弾性係数に応じて伸びると仮定すると、 E_{2L} は、

$$\frac{1}{E_{2L}} = \frac{(h - \frac{\sqrt{\pi}}{2}d)t}{ht} \cdot \frac{1}{E_0} + \frac{\frac{\sqrt{\pi}}{2}dt}{ht} \cdot \frac{1}{E'} \quad (5)$$

ただし、

$$E' = \frac{2t - \sqrt{\pi}d}{2t} E_0$$

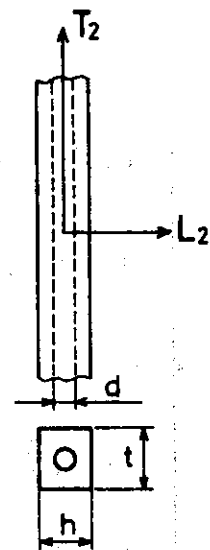


Fig. 4 パイプ板の解析モデル

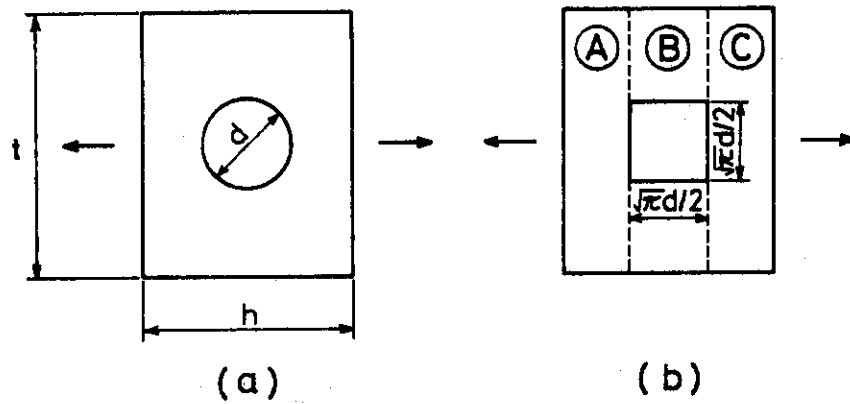


Fig. 5 モデル化

であり、ゆえに、

$$E_{2L} = \frac{2h(2t - \sqrt{\pi d})E_0}{(2h - \sqrt{\pi d})(2t - \sqrt{\pi d}) + 2\sqrt{\pi d}t} \quad (6)$$

となる。

2.1.3 電極板の有効縦弾性係数 E_L, E_T

電極板は以上 2.1.1, 2.1.2 で述べた円孔板とパイプ板とから規則的に構成された薄板であり、各々の部材の体積分率によって、荷重又は伸びが分担されるとして、重ね合わせ法により電極板の縦弾性係数を求める。

i) T 方向の縦弾性係数 E_T

電極板の T 方向縦弾性係数は Figure 6 のように円孔板とパイプ板が並列に組み合わさっていることから、円孔板とパイプ板の T 方向への変位が等しいとして、それぞれの体積について重ね合わせ法を適用する。

$$E_T = \frac{2b-h}{2b} E_{1T} + \frac{h}{2b} E_{2T}$$

$$= \frac{a}{b} E_{1T} + \frac{h}{2b} E_{2T} \quad (7)$$

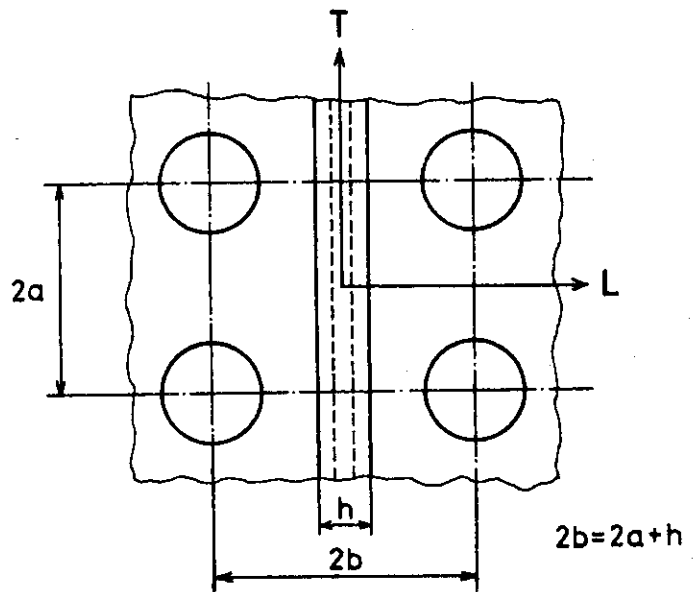


Fig. 6 電極板

ii) L 方向の縦弾性係数 E_L

次に、電極板を L 方向に引張った場合、各部材が等しい応力状態にあり、それぞれの弾性係数に比例して伸びると仮定すると、次式となる。

$$\frac{1}{E_L} = \frac{2b-h}{2b} \cdot \frac{1}{E_{1L}} + \frac{h}{2b} \cdot \frac{1}{E_{2L}}$$

すなわち、

$$E_L = \frac{2 b E_{1L} E_{2L}}{2 a E_{2L} + h E_{1L}} \quad (8)$$

と表わされる。ただし、(7)式、(8)式で、

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1T} = E_{1L} = \frac{E_0}{A + B} \\ A = \frac{289}{1680} - \left(\frac{r}{a}\right) + \frac{27}{64} \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \frac{37}{192} \left(\frac{a}{r}\right)^4 + \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r}\right)^6 \\ B = \frac{1 - \frac{5}{128} \left(\frac{a}{r}\right)^7 + \frac{7}{32} \left(\frac{a}{r}\right)^5 - \frac{35}{64} \left(\frac{a}{r}\right)^3 + \frac{35}{32} \left(\frac{a}{r}\right) + \frac{35}{128} \left(\frac{r}{a}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}} \tan^{-1} \frac{\left(\frac{r}{a}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}} \\ E_{2T} = \frac{(4ht - \pi d^2) E_0}{4ht} \\ E_{2L} = \frac{2h(2t - \sqrt{\pi d}) E_0}{(2h - \sqrt{\pi d})(2t - \sqrt{\pi d}) + 2\sqrt{\pi d}t} \end{array} \right.$$

である。

実際の電極板として、素材に無酸素銅を採用し、各形状の値を以下のように設定して、 E_L 、 E_T を求めてみる。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_0 = 12500 \text{ kg/mm}^2, \quad \nu_0 = 0.34, \quad 2a = 5.1 \text{ mm}, \\ 2b = 6.4 \text{ mm}, \quad 2r = 4.6 \text{ mm}, \quad d = 1.2 \text{ mm}, \quad h = 1.3 \text{ mm} \\ t = 2.5 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$E_L = 3180 \text{ kg/mm}^2, \quad E_T = 3860 \text{ kg/mm}^2$$

2.2 ポアソン比 ν

2.2.1 円孔板のポアソン比 ν_{1LT} , ν_{1TL}

円孔板のポアソン比は理論的に算出することは困難であるので、文献⁽¹⁾の値を採用する。すなわち、

$$\nu_{1LT} = \nu_{1TL} = 0.1 \quad (10)$$

である。

2.2.2 パイプ板のポアソン比 ν_{2LT} , ν_{2TL}

材料のポアソン比を ν_0 とすれば、Figure 4 より、 ν_{2TL} は

$$\nu_{2TL} = \nu_0 = 0.34 \quad (11)$$

と仮定できる。

ν_{2LT} は E_{2T} , E_{2L} , ν_{2TL} が求まっているので、マックスウェルの相反定理から、

$$\nu_{2LT} = \frac{E_{2L}}{E_{2T}} \nu_{2TL} = \frac{8h^2 t \nu_0 (2t - \sqrt{\pi}d)}{\{(2h - \sqrt{\pi}d)(2t - \sqrt{\pi}d) + 2\sqrt{\pi}dt\}(4ht - \pi d^2)} \quad (2)$$

となり, $h=1.3, d=1.2, t=2.5, \nu_0=0.34$ を代入すると,

$$\nu_{2LT} = 0.33 \quad (23)$$

となる。

2.2.3 電極板のポアソン比 ν_{LT}, ν_{TL}

電極板のポアソン比についても, 縦弾性係数と同様の方法によって求める。

$$\nu_{TL} = \frac{2a}{2b} \nu_{1TL} + \frac{h}{2b} \nu_{2TL} = \frac{a}{b} \nu_{1TL} + \frac{h}{2b} \nu_0 \quad (24)$$

マックスウェルの関係から,

$$\nu_{LT} = \frac{E_L}{E_T} \nu_{TL} \quad (25)$$

となり, 式(17), 式(18), 式(24)と電極板の設定条件から,

$$\nu_{TL} = 0.15, \quad \nu_{LT} = 0.12 \quad (26)$$

となる。

2.3 任意方向の電極板の弾性定数 E_x, ν_{xy}

この電極板は対称軸が直交する直交異方性板であり, 任意方向の弾性定数は4つの独立定数 $E_L, E_T, \nu_{LT}, G_{LT}$ が既知でなければならない。しかし, 理論的には G_{LT} の値を求めることができず, 一般には, E_{45° の値(実験値)を用いて以下のように表わされる。

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45^\circ}} - \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (27)$$

次に, G_{LT} が求められたとして, 任意方向の電極板の弾性係数 E_x とポアソン比 ν_{xy} を求める。

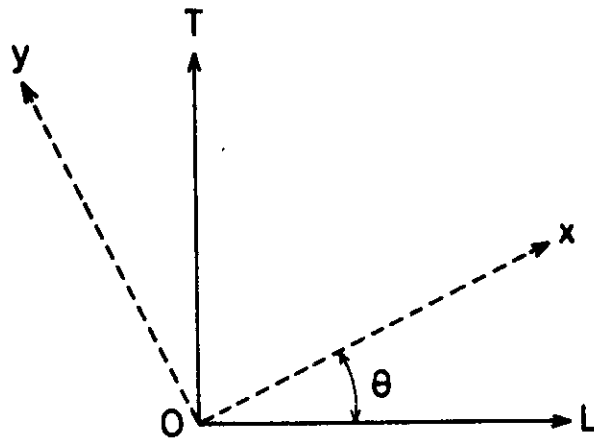


Fig. 7 座標の回転

座標軸をFigure 7に示すように、対称軸Lに対して θ 度回転させたとき、応力とひずみの関係より、 E_x, ν_{xy} は次式によって与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{E_x} = \frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \\ \nu_{xy} = \frac{\frac{\nu_T}{E_L} - \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right)}{\frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right)} \end{array} \right. \quad (28)$$

ただし、 $\ell = \cos \theta$, $m = \sin \theta$ である。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学研究室長、松田慎三郎 NBI グループリーダーに、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました森核融合研究開発センター長および小幡核融合研究部長に感謝致します。

参考文献

- 1) T. Slot, W. J. O'donnell J. Engineering for Industry, Thans. ASME Series B 1971

座標軸を Figure 7 に示すように、対称軸 L に対して θ 度回転させたとき、応力とひずみの関係より、 E_x, ν_{xy} は次式によって与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{E_x} = \frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \\ \nu_{xy} = \frac{\frac{\nu_T}{E_L} - \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right)}{\frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right)} \end{array} \right. \quad (28)$$

ただし、 $\ell = \cos \theta$, $m = \sin \theta$ である。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学研究室長、松田慎三郎 NBI グループリーダーに、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました森核融合研究開発センター長および小幡核融合研究部長に感謝致します。

参考文献

- 1) T. Slot, W. J. O'donnell J. Engineering for Industry, Thans. ASME Series B 1971

座標軸を Figure 7 に示すように、対称軸 L に対して θ 度回転させたとき、応力とひずみの関係より、 E_x, ν_{xy} は次式によって与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{E_x} = \frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \\ \nu_{xy} = \frac{\frac{\nu_T}{E_L} - \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right)}{\frac{\ell^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \ell^2 m^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right)} \end{array} \right. \quad (28)$$

ただし、 $\ell = \cos \theta$, $m = \sin \theta$ である。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学研究室長、松田慎三郎 NBI グループリーダーに、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました森核融合研究開発センター長および小幡核融合研究部長に感謝致します。

参考文献

- 1) T. Slot, W. J. O'donnell J. Engineering for Industry, Thans. ASME Series B 1971