

多モード共振法による弾性定数測定法の開発 とアルミニウム合金の弾性定数測定

嶋津, 雄士 / SHIMADZU, Yuji

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014799>

多モード共振法による弾性定数測定法の開発 とアルミニウム合金の弾性定数測定

ELASTIC STIFFNESS MEASUREMENT SYSTEM DEVELOPED BY RESONANCE METHOD USING MULTIPLE VIBRATIONAL MODES AND MEASUREMENT OF ELASTIC CONSTANTS FOR ALUMINUM ALLOYS

嶋津 雄士

Yuji Shimadzu

指導教員 平野 元久

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

A method for determining the elastic stiffness of polycrystalline materials, which is based on the resonance method using multiple vibrational modes, is presented. We have succeeded in making the small cylindrical specimen, whose size is a few mm both in diameter and in height, resonant mode vibrated in the natural frequency and to detect the resonant frequencies. The resonant frequencies have also been calculated using Rayleigh - Ritz method in order to compare with the measured frequencies obtained by the method above. The elastic stiffness can eventually be determined in such a way that the calculated frequency series match well with the measured series by the least square method.

Key Words: Elastic Constants, Resonance Method, Titanium, Deep-drawing

1. 緒言

弾性定数は構造物の変形や固有振動数を支配する材料定数として機械設計上重要な物性値である。さらに、近年のい高強度材料の開発により構造物の断面積は減少し、座屈による破壊や大きな構造物の剛性の設計が重要課題となっている。弾性定数の正確な決定、あるいは環境、熱処理、履歴などによる変化を予測することは設計上機械的強さと同等の重要性をもつ。また、弾性定数は種々の物性(破壊、熱膨張、相変態、融解など)と密接な関係性をもち、材料科学的にも重要な物性値である。

ヤング率や横弾性定数などを実験結果から直接導出できる引張試験やねじり試験などの荷重試験があるが、一般化フックの法則に伴う弾性定数を決定させるには、幾つもの試験を組み合わせて行わなければならない。実験結果の物性値から直接弾性定数を決定できるため、単純な計算で正確な値が出る。

弾性定数の測定法は、原理的に静的測定法と動的測定法の2種類に大別される。動的測定法は、微小試験片にも使用でき、極めて小さいひずみで短時間に高精度の測定が可能であるため、共振法をはじめとして、振子法、超音波パルス法など数多くの方法が提案されている。従来の共振法では、単純な縦、曲げ、ねじりなど、一次元自由度の共振振動数を測定し、特定のモードの弾性定数を決定する方法が一般的である。

一方、立方体またはこれに近い直方体、あるいは軸長-直径比が1に近い円柱など、立体的な形状を持つ試験片での三次元の共振法では、固有振動数の解析に困難が伴う。また、実験的にも拘束をできるだけ取り除いて安定な共振振動を持続させることは、容易ではない。DemarestやOhnoは、立方体や直方体の試験片によって、酸化物単結晶などのように内部摩擦が小さく高いQ値を持つ材料を用いて共振

法の実験を行い、これらの弾性定数を決定している。しかしながら、金属多結晶材料のように内部摩擦が大きく、比較的共振を起こしにくい材料での測定例は数少ない。さらに、この方法によれば、圧延板、引抜き材、などの集合組織を持つ材料や、CFRPなどの異方性材料の弾性異方性を、1個の試験片を用いることで測定・解析できる可能性がある。

本研究では、自由振動に限りなく近い条件で試験片に共振を起こし共振振動数を測定するための共振振動測定装置の開発を行い、アルミニウム及びアルミニウム合金の共振振動数を測定し、数値解析によって弾性定数の決定を行った。

2. 実験装置

(1) 共振振動数測定装置

本研究では共振測定解析装置 FC-200 を用いて実験を行っている。この装置は共振測定解析装置本体、コントローラ、制御ソフトウェアの3つの部分から構成されている。共振測定解析装置の仕様を Table1 に装置の概略図を Fig.1 に示す。

Table 1 Measuring Machine Specification

本体	仕様
加振回路部	加振出力:-10dBm~-40dBm 加振周波数範囲:1kHz~1000kHz スイープ範囲:1kHz~100kHz,10段階 周波数ステップ:1Hz~1kHz,10段階 ディレイ:1~10秒,10段階
検出回路部 本体外形 アンブ形状	最大入力:20Vpp 高さ 250mm, 幅 300mm, 奥行き 210mm 高さ 120mm, 幅 260mm, 奥行き 180mm
重量	15kg
電源	100V 50/60Hz, 1A

この実験装置では加振周波数を変化させながら受信部に

現れる電圧の振幅を計測することで共振振動数や共振の強さを知ることができる。加振部はXYテーブル上に設置された平行板バネで支持されており、試料を加振する位置を調整することを可能にするとともに試料を適切な力で支持することで自由振動に近い条件を再現している。

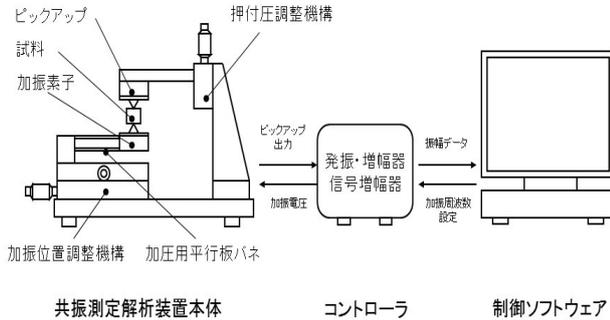


Fig. 1 Resonant frequency measurement system

(2) 測定支持部

共振法による弾性定数の測定では、自由振動を起こさせて、これをできるだけ拘束なく検出することが肝要である。実験装置における試験片支持部の詳細を Fig.2 に示す。トランスデューサには加振部および検出部ともに富士セラミックス社の圧電素子 C-91 を採用した。加振部、検出部ともにポリウレタンに圧電素子を取り付け、これの表面に探針として取り付けられたサファイア針で試験片を支え試験片への加振および共振の強さの検出を実現する機構とした。探針で試料に振動を加えることで、試料は複数の周波数で共振を起こし共振点では表面の振幅が大きくなる結果、試料の逆側から当てられたもう1本のサファイア針に振動が伝わり、その根元にある圧電素子に電圧が現れる。試験片にサファイア針を押し付ける力は受信部を支えるアームの根元にある押付圧調整機構で調整が可能である。

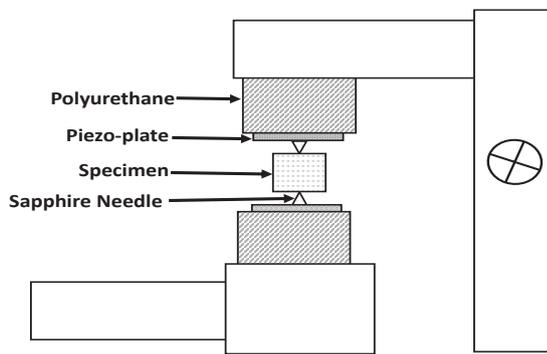


Fig. 2 Specimen and support parts including piezo-electric transducer

(3) コントローラ

コントローラは加振のための交流電圧を生成するドライバ部分、試料を加振した際に受信部から得られる微弱信号を増幅しその振幅を取り出す信号増幅部分、これらを制御する組込 CPU から構成される。ドライバ部分は更に特定の周波数の正弦波を生成する DDS (Direct Digital Synthesizer) 部、DDS からの電圧を増幅する電圧増幅部、電圧増幅部からの信号のインピーダンスを下げ圧電素子をドライブするだけの電流を流すことができるようにする電力増幅部からなる。DDS 部は組込 CPU からの SPI 通信による指令により、10kHz~1MHz の正弦波をつくり出すことが可能であ

る。DDS の周波数精度は± 100ppm 以内である。電圧増幅部の増幅率は5倍に設定し、電力増幅部を経た出力は10Vpp, 150mA になる。この交流電圧が圧電素子に加えられ、圧電素子により機械的な振動に変換され圧電素子表面に取り付けられたサファイア針により試料に伝えられる。信号増幅部はピックアップからの微弱信号を増幅する220倍の電圧増幅部、増幅された交流信号を実効値 (RMS 値 = Root Mean Square 値) に対応する直流電圧に変換する RMS-DC コンバータ部、AD 変換器の最大値を超えたことを検出する電圧オーバーフロー検出部から構成されている。

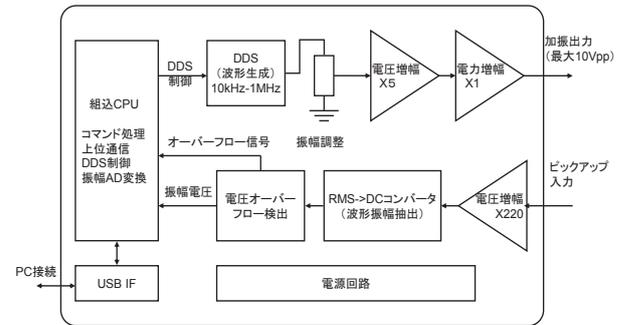


Fig. 3 Control System

(4) 制御ソフト

制御ソフトウェアはコンピュータ上のソフトウェアによってコントローラに対して周波数を増加させながら試料を加振し、受信部に現れる振動の振幅を取得する命令を送ることで試料の周波数に対する応答を得る。スキャン開始周波数、スキャンする周波数スパン、増加させる周波数ステップを指定することができる仕様にしており、スキャン周波数に対する受信出力を CSV 形式で保存することが可能である。

(5) 圧電素子

圧電素子は機械エネルギーと電気エネルギーを変換することができる。無負荷状態の圧電素子に対して歪みを与えると電気出力を生じ、電気入力を与えることで伸縮を生じさせることが可能である。これらを相互変換する性質を利用し、加振部に対して交流の電圧負荷をかけることで圧電セラミックを特定の周波数に対する変位を与える。与えられる電流の正負によりひずみの方向が変わるため違う周波数を連続して加振が可能になっている。本実験では共振振動数1MHzの試験片の軸方向に加振する縦波用 (Dilation 振動) 圧電素子、試験片の直径方向に振動する横波用 (Shear 振動) 圧電素子を2種類を用いて実験を行いどちらが共振振動数の測定に向いているのか検証した。また試験装置に採用するにあたり、使用する圧電素子の性能検証を行った。圧電素子 (Dilation 振動) に外部から電圧をかけそれをレーザー変位計 IL-S025 (キーエンス社) で変位の測定をした。実験の結果を Fig.4 に示す。その結果 $1.5 \times 10^{-9} \text{m/V}$ の変位を観察した。共振振動の実験結果をもとに試験片の共振の変位を計算したところ、最大でも $6.5 \times 10^{-9} \text{m}$ 程度であり、非常に微小な試験片変位を感知しかつ電氣的な変換を実現していることが確認できた。

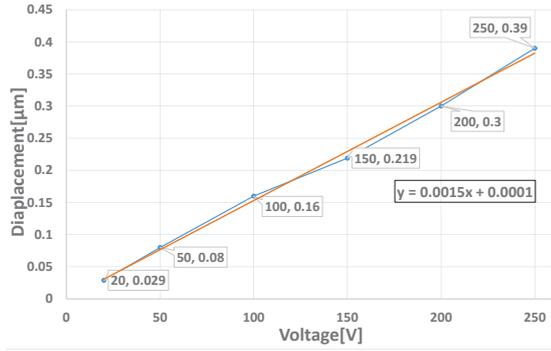


Fig. 4 Displacement- Voltage Diagram of Piezo

3. 数値解析理論

(1) 有限要素解析

試験片形状として直径 $2R$, 軸長 $2L$ の円柱体に, 均質等方体であると仮定して, 密度 ρ , 弾性定数 G , ポアソン比 ν を与える. 解析には有限要素法と Rayleigh-Ritz 法を用いて, 試験関数は円周方向に三角関数, 柱軸方向にルジャンドル多項式, 同心円筒に有限要素法を適用して算出する.

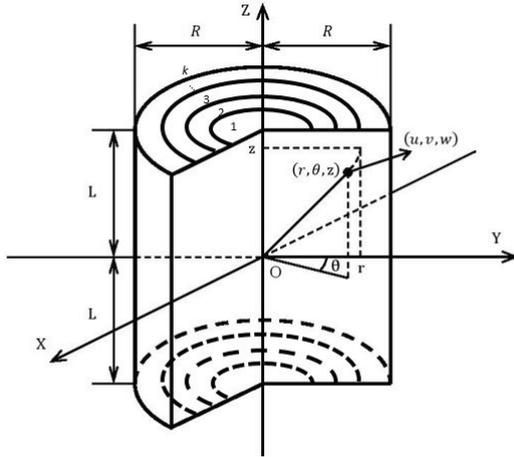


Fig. 5 Cylindrical Specimen

座標系は図4に示すように, 円柱体の中心に原点を置く円柱座標系 (r, θ, z) に, 直交座標系の三軸方向変位を $(u, v, w)e^{i\omega t}$ とした. ここで, ω は角振動数であり, 周波数 f の関数として, $\omega = 2\pi f$ で表される. 振動の基本モードは円周方向の波数 m , と柱軸方向の対称性 O(対称モード) あるいは E(逆対称モード) で分類され, 変位成分 (u, v, w) , 円周方向にたいして, 固有値は縮退しているが位相差を持つ2種のモードで,

$$\left. \begin{array}{l} u \propto \cos m\theta \\ v \propto \sin m\theta \\ w \propto \cos m\theta \end{array} \right\} \text{もしくは} \left. \begin{array}{l} u \propto \sin m\theta \\ v \propto -\cos m\theta \\ w \propto \sin m\theta \end{array} \right\} \quad (1)$$

であり, 軸方向に対して, ルジャンドル多項式 $P_j(x)$ に $\sqrt{(2j+1)/2}$ を乗じたものを用いて,

$$\text{対称モード : O} \left\{ \begin{array}{l} u \propto P_j(z/l) \\ v \propto P_j(z/l) \\ w \propto P_j(z/l) \end{array} \right\} \begin{array}{l} j = \text{偶数} \\ j = \text{奇数} \end{array} \quad (2)$$

$$\text{逆対称モード : E} \left\{ \begin{array}{l} u \propto P_j(z/l) \\ v \propto P_j(z/l) \\ w \propto P_j(z/l) \end{array} \right\} \begin{array}{l} j = \text{奇数} \\ j = \text{偶数} \end{array} \quad (3)$$

であり, 半径方向に対して, Fig.??に示すように半径 R を k 等分した $r_i = Ri/k$ ($i = 0 \sim k$) に節点を置いた. 要素 (i) 内変位 $\mathbf{u}^{(i)}$ は, 節点変位 (u_i, v_i, w_i) の節点 $(i-1)$ と i の間の直線内挿によることとして,

$$\mathbf{u}^{(i)} = \mathbf{u}_{i-1}(1-\xi) + \mathbf{u}_i\xi \quad \left(\xi = \frac{r-r_{i-1}}{r_i-r_{i-1}} \right) \quad (4)$$

$$= \Theta P \{ \phi_{i-1}(1-\xi) + \phi_i\xi \} \quad (5)$$

である. ここで, Θ は円周方向を, P は軸方向を行列表示した右辺であり, ϕ_i は節点 i の一般化変位ベクトルである. これらを用いて各節点変位求め, 振動モードを図示する. ここでモードを波数 m , 対称性 O または E とし, その分類を n として, $mO(E)-n$ の形で表す.

運動エネルギー T は質量行列 M の式として,

$$T = \frac{\pi}{2} \rho \omega^2 r^2 l \Phi^T M \Phi \quad (6)$$

$$\Phi = \{ \phi_0 \quad \phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_k \} \quad (7)$$

であり, ひずみエネルギー V は, 応力ひずみ関係を与える弾性行列 H の式として,

$$V = \sum_i V_i = \frac{1}{2} \int \epsilon_i^T H \epsilon_i d\tau_i \quad (8)$$

ここで, ϵ_i はひずみの6成分 $(\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \gamma_{\theta z}, \gamma_{zr}, \gamma_{r\theta})$ であり, 弾性行列 H は

$$H = G \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_2 & & & \\ c_2 & c_1 & c_2 & & & \\ c_2 & c_2 & c_1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{ここで, } c_1 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}, \quad c_2 = c_1 - 2 \quad (10)$$

$$V = \frac{1}{2} G \pi R \Phi^T K \Phi \quad (11)$$

となり, $T_{max} = V_{max}$ は, $M\Phi\lambda = K\Phi$ の一般固有値問題にすることで固有値 ω を求めることができる.

(2) 最適化手法

結晶構造が等方体の材料では独立した弾性定数を2個もつ. 実験結果から弾性定数を最適化して求めるために最急降下法を用いている. 実験で得られた各モードごとの振動数と計算値との差 $\sum(\Delta f^n)^2$ を求め, 仮の弾性定数の値を修正して再度固有値計算の計算を行い, 実験値と比較する. $\sum(\Delta f^n)^2$ が最小値に収束するまで繰り返し計算を行う.

(3) 弾性定数の決定法

一般的な形状での弾性体の三次元自由振動を扱う場合, 試験片の形状・寸法・密度および一組の弾性定数を与えて共振周波数を計算することは可能である. 一方, 共振周波数

から弾性定数を計算することは不可能である。したがって、逆問題の視点から、弾性定数をパラメタとし、振動数スペクトルの実験値と計算値が十分に一致するまで、固有値計算を繰り返し、最小値を求める最適化問題としてパラメタの弾性定数を求める。

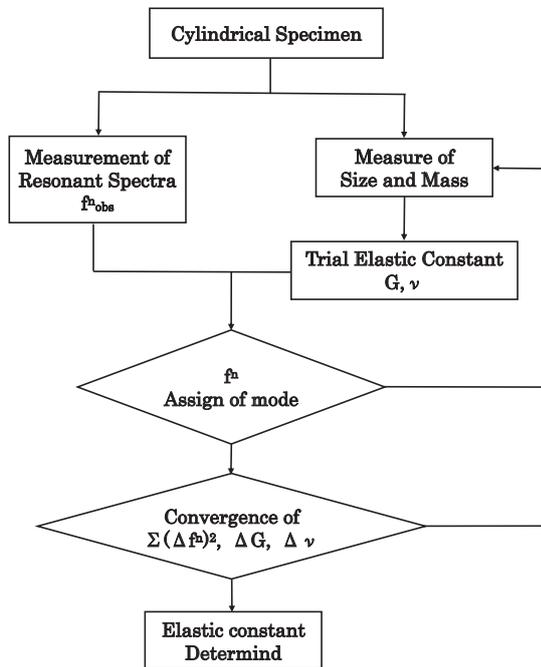


Fig. 6 Calculation Flowchart of Elastic Constant Determination

4. 実験方法

(1) 試験片

本研究では測定に純アルミニウム (A1070), ジュラルミン (A2017), 超ジュラルミン (A2024), 超超ジュラルミン (A7075) の 4 つの純アルミニウム及びアルミニウム合金を用いて試験機の評価を行った。金属材料の場合, 試験片を円柱体とすることで試験機の製作が容易になり加工精度が上昇する。純アルミニウムは直径 10mm の棒状のものから旋盤加工で $\phi 6 \times 6$ の円柱体試験片を作成した。アルミニウム合金 3 種類は直径 6mm の棒状のものを切断して高さ 6mm のものに加工した。試験片のサイズはデジタルノギスで測った後, 電子天秤 TW223N で試験片の質量を測りそこから各試験片の密度を算出した。算出した各試験片の形状は Table 4 に示す。共振振動数の解析においてこれらの数値は固有のパラメータとして使用される。

Table 2 Mechanical properties

Material	Diameter (mm)	Height (mm)	Mass (g)	Density (g/cm ³)
A1070	6.00	5.94	0.453	2.70
A2017	5.98	5.98	0.470	2.80
A2024	5.96	5.97	0.468	2.81
A7075	5.97	5.94	0.468	2.82

純アルミニウムは比重が軽く展性や耐食性に優れているなど長所をもっているが, 引張強さが焼きなまし状態では 8.0kg/mm², 耐力 3kg/mm² 程度しかない。アルミニウムを構造用材料に利用するためには強度面での機能向上が必要でありアルミニウム合金の研究は機械的強さの向上と

共にある。本研究ではそんなアルミニウム合金の中でも熱処理合金系の A2017, A2024, A7075 を使用した。この 3 種類は, 析出硬化により結晶内の転移を増殖させ転移を動きにくくすることで引っ張り強さを強化している。A2017, A2024 は Al-Cu 合金に対して Mg を添加することで自然硬化性を高め Mn を添加することで強さと伸びを改善している。A7075 は Al-Zn 合金に Mg を添加することで MgZn₂ を硬化要素とする強い時効硬化を発生させる。しかし Zn, Mg の割合を多くすると応力腐食割れの傾向が多くなるため割合を気をつけると共にクロムの微量添加でこれを防いでいる。また G.P. ゾーンの形成が室温近傍ではきわめて徐々に起こり数年も継続するため, 人工時効硬化処理を行うことで安定させてアルミニウム合金中最高ともいえる強さを実現している。このようにアルミニウムに対して適切な添加物と処理を行いアルミニウムを強い合金することで構造用材料として仕上げている。一方で弾性定数という視点から各材料を見たとき引っ張り強さや耐力の差に比べて弾性定数にはそれほど大きな差はない。つまり機械的な性質は大きく異なるが弾性定数に大きな差はないため 4 つの材料の弾性定数の精密測定が可能かどうかの検証を行った。

Table 3 Chemical composition (in mass %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A1070	0.07	0.1	0.01	0	0.01	0.04	0.03	99.69
A2017	0.45	0.28	3.98	0.55	0.54	0.03	0.03	94.1
A2024	0.16	0.19	4.4	0.59	1.4	0.11	0.02	93.09
A7075	0.14	0.17	1.7	0.03	2.6	5.7	0.01	89.43

(2) 実験方法

前述した共振振動装置を使って試験片に振動を加えて試験片の共振点を計測する。共振測定解析装置本体の加振位置調整機構と押付調整機構を使って, 加振部と受信部についている探針の位置を針先があうように調整する。試験片になるべく力が加わらないように探針で挟みこむ。このときなるべく試験片の中心部を挟むことで, 試験片に余計な力が加わらないようにして自由振動に近い条件を実現する。試験片を挟んだ後, 制御ソフトで 100kHz から 1000kHz までを 10Hz スパンで加振および受信するように制御ソフト上で設定して計測を行う。測定中は温度のじょう乱などを防ぐため測定部本体をアクリル製カバーで覆っている。共振数とピックアップした振幅出力係数は CSV 形式で出力されるため, それを散布図にすることで共振点を確認する。加振する振動数に対してピックアップされる振幅が大きいところが試験片が共振を起こし大きく変位を起こしている振動数なので共振数として認定する。

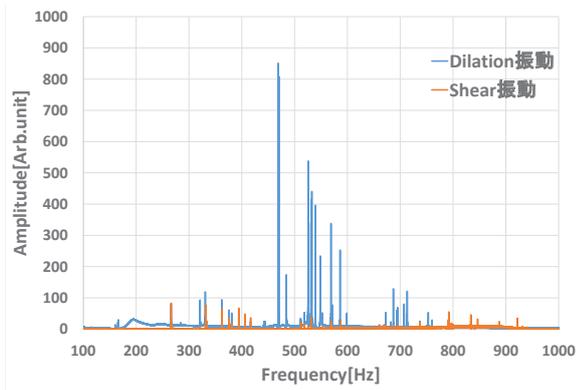


Fig. 7 Vibration Experiment Results of $\phi 6 \times 6$ A1070 Specimen

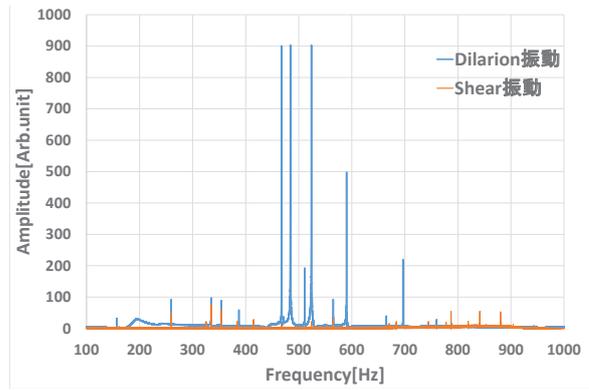


Fig. 10 Vibration Experiment Results of $\phi 6 \times 6$ A7075 Specimen

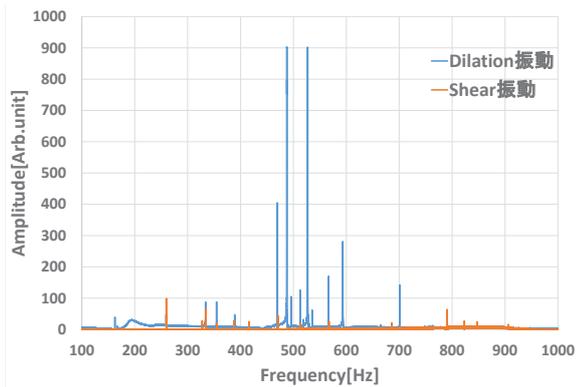


Fig. 8 Vibration Experiment Results of $\phi 6 \times 6$ A2017 Specimen

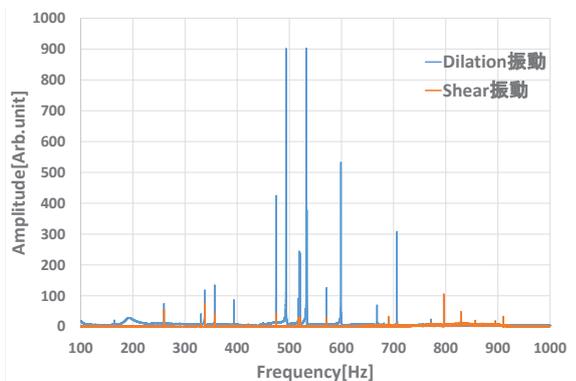


Fig. 9 Vibration Experiment Results of $\phi 6 \times 6$ A2024 Specimen

5. 実験結果

(1) 共振振動数のピックアップ

共振振動実験を行うと CSV ファイルには加振した振動数とその際の試験片の振幅を記録される。共振振動数のピックアップの際はこれの Amplitude-Frequency グラフに起こし、振幅の大きい点を共振振動数とする。目視にて振幅の大きいところを全てピックアップした後、データの文字列で前後の振幅を確認し一番大きい振幅であることを確認できたら共振ピークとして認定する。Dilation 振動では共振がおこらない点においても加振の振動が受信素子に干渉するため 7~8 前後の振幅を検出する。共振点として認識するのは前後に検出している振幅よりも 5 以上大きいものを共

振点として認定した。Shear 振動では共振振動点以外での振幅の振幅が限りなく小さく 0~1 程度のため、4 以上の振幅で共振振動数と認定した。また実験において、共振振動数付近でスプリットを起こす場合がある。この場合には振幅の大きいものを採用することでピックアップする共振振動数を選択した。共振振動実験から試験片の共振振動数をピックアップし、解析値と比較したものが以下を Table4~7 にまとめる。

Table 4 Resonance Vibration Point of $\phi 6 \times 6$ A1070 Specimen

No.	Calc. (kHz)	Mode	Obs. in dilation (kHz)	Obs. in shear (kHz)
1	261.354	0E-2	266.168	266.268
2	325.376	2E-1	322.251	321.277
3	332.336	1O-2	331.887	331.808
4	356.103	1E-2	362.108	362.300
5	385.509	2O-1	381.048	381.112
6	386.177	0O-2	-	392.523
7	412.094	2O-2	410.138	415.522
8	462.299	1O-3	467.710	-
9	472.640	0E-3	470.826	470.475
10	506.912	0O-3	-	-
11	509.122	1E-3	511.244	511.663
12	522.709	0O-4	519.457	518.679
13	525.350	3E-1	525.753	525.919
14	528.070	2E-2	530.765	531.723
15	550.891	3O-1	548.210	549.935
16	563.345	1O-4	568.676	569.33
17	586.849	0E-4	586.661	584.11
18	599.113	3O-2	599.355	-
19	658.578	1E-4	-	-
20	659.120	0O-5	-	660.223
21	668.800	2E-3	-	669.327
22	673.342	2O-3	672.483	672.867
23	682.239	1O-5	682.556	-
24	684.568	3E-2	689.357	688.548
25	702.278	4E-1	700.901	699.137
26	709.707	4O-1	707.319	-
27	735.928	2O-4	739.953	737.374
28	759.240	1E-5	757.457	756.073
29	778.830	2E-4	-	-
30	779.784	1O-6	-	-

(2) 最適化による、横弾性定数とポアソン比の決定と有意差

共振振動実験を行った結果から、各材料試験片のピックアップした共振振動数を前述した数値解析理論に基づいて材料の弾性定数を決定する。各試験片を Dilation 振動と Shear 振動の 2 種類の加振方法でそれぞれの実験結果を数値解析

Table 5 Resonance Vibration Point of $\phi 6 \times 6$ A2017 Specimen

No.	Calc. (kHz)	Mode	Obs. in dilation (kHz)	Obs. in shear (kHz)
1	261.6497	0E-2	259.442	259.617
2	329.8157	2E-1	327.780	327.831
3	334.2370	1O-2	334.051	334.322
4	358.9148	1E-2	354.843	355.096
5	387.9142	0O-2	387.519	387.659
6	389.7715	2O-1	389.064	-
7	416.3676	2O-2	-	416.003
8	471.9148	1O-3	469.809	470.458
9	487.6199	0E-3	487.654	-
10	515.7887	1E-3	512.776	513.225
11	522.8301	0O-3	518.607	-
12	523.2994	0O-4	527.082	-
13	531.9508	3E-1	529.520	-
14	533.7513	2E-2	-	-
15	556.9567	3O-1	-	-
16	570.0206	1O-4	566.851	567.060
17	593.3853	0E-4	593.624	-
18	607.1114	3O-2	-	-
19	667.3046	1E-4	664.912	-
20	674.5280	2E-3	-	-
21	680.8655	2O-3	-	-
22	689.4195	1O-5	-	685.608
23	693.2136	3E-2	-	-
24	694.6571	0O-5	701.154	701.199
25	710.6980	4E-1	-	-
26	717.9054	4O-1	-	-
27	752.2816	2O-4	751.382	-
28	765.5502	1E-5	763.880	-
29	784.9500	0E-5	-	-
30	790.6277	2E-4	-	790.432

Table 6 Resonance Vibration Point of $\phi 6 \times 6$ A2024 Specimen

No.	Calc. (kHz)	Mode	Obs. in dilation (kHz)	Obs. in shear (kHz)
1	264.3757	0 E - 2	259.792	259.711
2	333.9299	2 E - 1	330.697	330.808
3	337.6959	1 O - 2	338.203	338.066
4	358.915	1 E - 2	356.639	356.464
5	392.1273	0 O - 2	391.716	391.427
6	394.4755	2 O - 1	393.939	-
7	421.1127	2 O - 2	420.970	421.108
8	477.6671	1 O - 3	474.363	474.721
9	493.9399	0 E - 3	493.422	-
10	521.8648	1 E - 3	520.979	519.585
11	528.7514	0 O - 3	-	-
12	529.3150	0 O - 4	532.695	-
13	538.4895	3 E - 1	533.621	-
14	539.9467	2 E - 2	-	-
15	563.5840	3 O - 1	-	-
16	576.5421	1 O - 4	571.487	582.163
17	600.1403	0 E - 4	596.259	-
18	614.4883	3 O - 2	-	-
19	674.7107	1 E - 4	670.130	-
20	682.1775	2 E - 3	-	-
21	688.7598	2 O - 3	-	690.147
22	697.2051	1 O - 5	-	-
23	701.3609	3 E - 2	-	-
24	703.6230	0 O - 5	706.473	706.115
25	719.3634	4 E - 1	-	-
26	726.5622	4 O - 1	-	-
27	761.5353	2 O - 4	-	-
28	774.1566	1 E - 5	-	773.450
29	793.1280	0 E - 5	-	796.066
30	799.8643	2 E - 4	-	796.377

Table 7 Resonance Vibration Point of $\phi 6 \times 6$ A7075 Specimen

No.	Calc. (kHz)	Mode	Obs. in dilation (kHz)	Obs. in shear (kHz)
1	263.0939	0 E - 2	259.868	259.904
2	329.6244	2 E - 1	325.138	325.214
3	336.3501	1 O - 2	334.924	335.243
4	359.9369	1 E - 2	354.350	354.519
5	389.5749	0 O - 2	386.819	385.499
6	390.0067	2 O - 1	387.170	-
7	417.6347	2 O - 2	-	415.083
8	472.5319	1 O - 3	468.119	467.932
9	487.5035	0 E - 3	484.320	-
10	516.7759	1 E - 3	512.049	511.567
11	523.8132	0 O - 3	523.723	521.752
12	526.1878	0 O - 4	526.710	-
13	531.9311	3 E - 1	-	-
14	534.9634	2 E - 2	-	-
15	557.6479	3 O - 1	564.764	-
16	571.7548	1 O - 4	565.089	565.095
17	595.2445	0 E - 4	589.975	590.046
18	607.4687	3 O - 2	-	-
19	670.2452	1 E - 4	664.677	670.219
20	676.5442	2 E - 3	-	-
21	682.4573	2 O - 3	-	684.234
22	691.7839	1 O - 5	-	-
23	694.5729	3 E - 2	-	-
24	696.0575	0 O - 5	696.272	696.193
25	710.8836	4 E - 1	-	-
26	718.4169	4 O - 1	-	-
27	753.1090	2 O - 4	753.596	757.774
28	768.1283	1 E - 5	-	775.505
29	789.2825	0 E - 5	788.293	787.178
30	792.6311	2 E - 4	-	-

にかけ、解析結果として算出される剛性率・ポアソン比・ヤング率の平均値それぞれだして Table8-11 にまとめた。

(3) Q 値の測定

固体物質では振動は次第に減衰する。内部摩擦を生じさせる物性原因のひとつとして転移が挙げられる。前述した通りアルミニウム合金は熱処理によって転移を増殖させて引張強さや耐力を強化をしている。内部摩擦が多いとその影響で共振振動数は多くなる。共振振動数の広がり、他の機構を含んでいることになり、内部摩擦の大きさの指標となる。また Q 値の決定ができれば減衰比の決定ができるため、より正確な共振振動数の測定が実現可能になり、さらに粘性の強い材料である金属合金材料や高分子材料や複合材料などの測定も可能になりうる。今回は共振振動の実験結果から半値幅法をもちいて各材料の Q 値を定め減衰比を算出した。振動点で Q 値は変わるため、各材料の同じ振動モードで比較する必要があったため今回は振幅が一番安定して取れていた 460-470kHz 全後の振動モード 1O-3 の点で測定を行った。

Table 8 Elastic Constant of A1070

A1070					
Dilation 振動			Shear 振動		
剛性率	ポアソン比	ヤング率	剛性率	ポアソン比	ヤング率
25.99	0.309	68.03	26.08	0.301	67.84

Table 9 Elastic Constant of A2017

A2017					
Dilation 振動			Shear 振動		
剛性率	ポアソン比	ヤング率	剛性率	ポアソン比	ヤング率
27.13	0.342	72.79	27.07	0.343	72.71

Table 10 Elastic Constant of A2024

2024					
Dilation 振動			Shear 振動		
剛性率	ポアソン比	ヤング率	剛性率	ポアソン比	ヤング率
27.59	0.342	74.06	27.80	0.336	74.30

Table 11 Elastic Constant of A7075

A7075					
Dilation 振動			Shear 振動		
剛性率	ポアソン比	ヤング率	剛性率	ポアソン比	ヤング率
27.16	0.335	72.50	27.31	0.334	72.86

Table 12 Attenuation Rate of Dilation Experiment

減衰比			
A1070	A2017	A2024	A7075
2.33×10^{-5}	1.78×10^{-5}	1.63×10^{-5}	1.96×10^{-5}

Table 13 Attenuation Rate of Shear Experiment

減衰比			
A1070	A2017	A2024	A7075
1.96×10^{-5}	2.01×10^{-5}	1.46×10^{-5}	1.60×10^{-5}

(4) 極小試験片の有効性検討

本研究は微小な試験片による弾性定数の測定を目指しており、測定範囲の拡大をを目指すことでより活用範囲を見出すことが可能になる。具体的には疲労破壊部や接合部などを切り出して測定を目指しているが、その場合に重要なのが測定可能な試験片サイズを把握しておくことである。測定可能範囲を調べるために、A2017で $\phi 2 \times$ と $\phi 3 \times 3$ の試験片を作成して実験を行った。試験片サイズを小さくすることで振幅が小さくなるため検出可能かどうかを調査した。同じ比率の試験片で実験を行うことでプログラム上で初期パラメーターを変更すれば形状モデルを変更することなく対応可能である。試験片のサイズを小さくすることで共振振動数の第1次モードの振動数が上がると予想されたため、500kHzから1000kHzまでを10Hzスパンで実験を行った。その結果、 $\phi 2 \times 2$ 試験片では振動モードが最小の共振点が800kHz近くなり現在の測定器の性能では共振点2点しか検出できず、弾性定数の決定に使うのは難しいという結果になった。 $\phi 3 \times 3$ 試験片では、Dilation振動をかけると、試験片の振幅が小さいため加振と干渉してしまいうまく共振点の測定ができなかった。Shear振動では共振点の検出が7~8点程度検出できたため、弾性定数の決定を行ったところ剛性率27.06GPaポアソン比0.343ヤング率72.68GPaという結果が得られた。これは $\phi 6 \times 6$ 試験片で得られた数字と酷似しており有効であると判断できる。

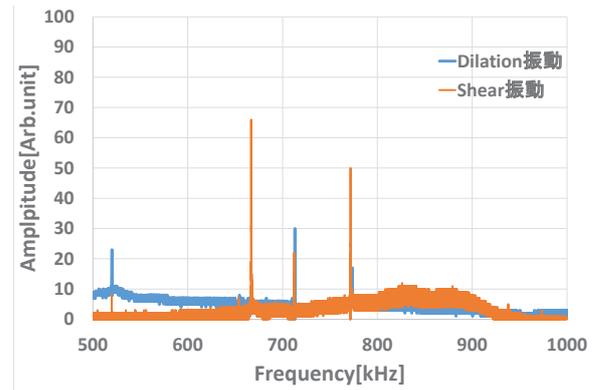


Fig. 11 Vibration Shear Experiment Results of $\phi 3 \times 3$ A2017 Specimen

Table 14 Resonance Vibration Point of $\phi 3 \times 3$ A2017 Specimen

No.	Calc. (kHz)	Mode	Obs. in dilation (kHz)	Obs. in shear (kHz)
1	521.555	0E-2	520.12	519.75
2	657.433	2E-1	-	654.20
3	666.246	1O-2	667.42	667.02
4	715.437	1E-2	713.02	712.09
5	773.242	0O-2	-	772.51
6	776.945	2O-1	-	773.2
7	829.960	2O-2	-	-
8	940.683	1O-3	-	938.02
9	971.989	0E-3	-	973.23

6. 結論および考察

共振法による弾性定数の決定を目指して共振振動数測定装置の開発を行った。その結果円柱体試験片での共振点の測定に成功した。複数回の試行実験においても、同モードの振動数のピックアップ数値は1kHz以上ずれることはなく正確に共振振動数をピックアップすることができており、また試験片の挟み方などによって共振振動数が大きく変動しないという実験結果を得た。共振振動数のピックアップはどの試験片でもモード次数が低い点、すなわち振動数が低い点では安定して共振点をピックアップすることが可能だったが、振動数が高くなるにつれバラツキや全く共振振動数として取れない点があった。また加振方向によって共振振動数のピックアップ数も若干変化することが分かった。Dilation振動では16~25、Shear振動では14~23の振動モードが安定してピックアップできておりピックアップ数ではDilation振動のほうが優れている。その反面Dilation振動ではスプリットが起きやすかった。これは加振、受信ともに試験片の軸方向で振動するため起こりやすいのではないかと考察する。共振振動数を人為的にピックアップしているため安定性や共振点の判断のしやすさとはいう意味ではShear振動の方が優れていると判断した。しかし今回は比較的振動しやすい材料を用いたため、チタンなどの振動しにくい材料の場合にどうなるかなどは今後の検討すべき課題である。測定した共振振動数から逆問題的に弾性定数の決定を試みた結果、純アルミニウム、アルミニウム合金のいずれも剛性率とポアソン比の精密決定が可能だった。この結果からヤング率の算出を文献による既存のデータとの差を $\Delta E/E$ で算出するとDilation振動では-0.15~-0.95%、Shear振動では-0.24~-0.46%という結果になり既存データよりはすべてやや小さい値を得た。この結果からいずれの振動方向でも弾性定数の決定は有効な範囲を取るが、共振振動数にピック

アップのしやすさと弾性定数の決定精度の面で Dilation 振動よりも Shear 振動による実験のほうが優れていると考える。現在の実験装置の仕様では最小で $\phi 3 \times 3$ の円柱体試験片までの測定が可能であることが分かった。より微小な試験片での実験を可能にするには、圧電素子を積層板のものに変更し加振および検出の可能な周波数スパンを広げると同時に、より微小な振幅を検出できるようにする必要があることがわかった。今回各材料の減衰比について実験結果より算出を試みたが Dilation 振動と Shear 振動による各試験片の減衰比の傾向がまったく正反対の結果となったためうまくいかなかった。一番の大きな原因は試験片の支持姿勢を安定させることが難しく複数回の実験結果から減衰比の算出をしても安定したデータを示すことができなかったことである。試験片の微細な変位を敏感に機構であるため、試験片を挟む力によって変位の検出値が大きく変わるため安定して値を求めることができなかった。今後この課題に取り組むに当たっては支持方法を定量化し安定した姿勢で試験片を支持することが一番の課題である。

謝 辞

本研究の完成にあたり、有益なご教示を賜りました平野元久教授に心から謝意を表します。また、副査を務めてくださった崎野清憲教授、本研究活動の遂行にあたりご協力いただいた塚本英明教授及び塚本研究室所属の学生、ワークショップの橋本伸男さんに深く感謝申し上げます。さらに山本 智陽、金庭 一樹、小林 容志をはじめとする修士 1 年生、4 年生諸氏のご協力を厚く御礼申し上げます。

文 献

- [1] H. H. Demarest, *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**, pp.768- (1971).
- [2] I. Ohono, *J. Physo. Earth*, **24**, pp.355- (1976).
- [3] 妹尾允史, 西村融, 平野元久, 日本機械学会論文集 (A 編), **50**, 451, pp.440-447 (1984).
- [4] 日本機械学会, 金属の弾性係数, pp1-12, pp159-166
- [5] アルミニウム加工技術便覧編集委員会, 日刊工業新聞社, アルミニウム加工技術便覧, pp68-91(1970 年)
- [6] 軽金属協会, アルミニウム読本, pp3-30