

# ヤング率の測定技術について

三谷 幸寛\*

*Mitani Yukinori*

一般にヤング率測定を実施する場合、3種類の測定方法（機械的試験法、共振法、超音波パルス法）が用いられる。各種方法にて同一材料を測定した場合、得られるヤング率は等しくなると思われがちである。しかし、実測値には差が生じる事が知られている。本報では各測定方法の概要を解説するとともに、測定データを比較し、それぞれの特徴と傾向を紹介する。

キーワード：ヤング率、引張試験、共振法、超音波パルス法、差動トランス伸び計

## 1. はじめに

各種産業では製品の性能向上を目指し、各種合金の改良が盛んに行われている。例えばガスタービン設備ではエネルギーの高効率化を図るために、これまで以上に材料の耐熱性が要求されており、それに伴い耐熱合金の高温域における機械的特性を正確に把握することが重要となってきた。弾性率の一種であるヤング率（Young's modulus; 縦弾性係数）は、材料の弾性域において応力とひずみの関係を示す係数である。つまりヤング率は剛性率やポアソン比と同様に材料の変形強度を示す重要な要素の1つであり、構造物の設計、解析には必要不可欠な物性値である。

ヤング率の測定は様々な方法により実施され、**図1**に示すように静的試験（Static Test）と動的試験（Dynamic Test）に分類されている。各測定方法では、原理、測定温度範囲、試験片の寸法などが異なるため、適切な方法を選定する必要がある。

る。**表1**に一般的な各測定温度範囲を示す。

静的試験（機械的試験法）には、引張試験、圧縮試験、ねじり試験があり、ヤング率は応力-ひずみ線図の傾きから容易に算出される。しかし、試験片の品質や加工精度の影響が大きく、測定結果の誤差要因となる。高温環境では熱膨張などの変形が発生し、ひずみ計による計測には注意が必要である。

一方、動的試験では、静的試験に比べて小さな試験片での測定や脆性材料の測定にも適用可能である。さらに、測定時における材料のひずみが小さく、高精度の測定が可能であるなどの利点がある。しかし、結晶構造に異方性を有する材料では試験片の採取方向によって結果が大きく異なるため、試験前にラウエ法などにより材料の結晶構造を把握しておくことが必要である。

当社では、低温域から高温域まで様々な測定ニーズに対応すべく静的試験および動的試験を実施している。本報では静的および動的試験の代表

\* 計測事業部 材料試験部

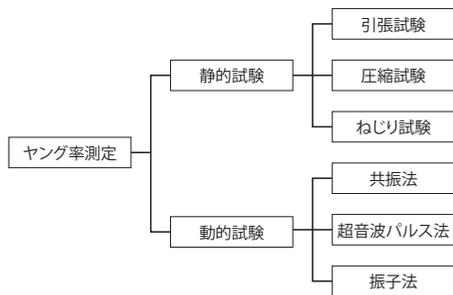


図1 代表的なヤング率測定方法

的な方法について解説するとともに、標準試験片における各測定データの比較・検討した結果について紹介する。

## 2. ヤング率測定方法の解説

### 2.1 静的試験（機械試験）

機械試験の代表的な測定方法には、引張試験、圧縮試験、ねじり試験、曲げ試験等があるが、本報では計測が最も簡単な引張試験によるヤング率測定法についてを解説する。

引張試験では一般的に棒状あるいは板状の試験片に引張荷重を加え、その変位を求めることによ

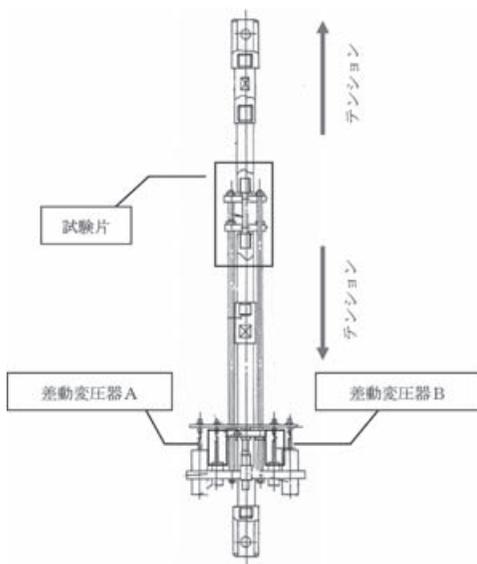


図2 差動トランス式伸び計

りヤング率Eを算出する。変位計測方法として、ひずみゲージタイプ、レーザ変位計、クリップゲージタイプ、差動トランス式伸び計（DTF）などが利用されている。高温域での計測は図2に示すような、DTFが利用されている。差動トランスによって試験片評点間の変位を計測し、ひずみを算出する。また、常温では、試験片にひずみゲージを貼付け、荷重-変位の関係を求める方式が広く採用されている。

引張試験では、ヤング率は(1)～(3)式より求まる。

$$E = (\sigma_{n+1} - \sigma_n) / (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \quad \dots \dots (1)$$

$$\sigma = \frac{P}{S_0} \quad \dots \dots (2)$$

$$\varepsilon = \frac{y_{n+1} - y_n}{l} \times 100 \quad \dots \dots (3)$$

- $E$  : ヤング率 (N/m<sup>2</sup>)
- $\sigma$  : 引張応力 (N/m<sup>2</sup>)
- $\varepsilon$  : 引張ひずみ
- $\sigma_{n+1} - \sigma_n$  : 引張荷重を変動させた時の引張応力の変化量 (N/m<sup>2</sup>)
- $\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n$  : 引張荷重を変動させた時の引張ひずみの変化量
- $P$  : 引張荷重 (N)
- $S_0$  : 試験片の初期の断面積 (m<sup>2</sup>)
- $y_{n+1} - y_n$  : 引張荷重を変動させた時の標点距離の変化量 (mm)
- $l$  : 標点距離 (mm)

### 2.2 動的試験

動的試験の代表的な測定方法として、振子法、共振法、超音波パルス法がある。本報では一般的に広く採用されている共振法と超音波パルス法を解説する。

### 2.2.1 共振法<sup>(1)</sup>

共振法は、試験片に機械的または電氣的に強制振動を与えて共振周波数(固有振動数)を計測し、この共振周波数からヤング率(縦弾性係数)を計算する測定法である。強制振動には縦振動、横振動、捻り振動があり、縦および横振動の共振周波数からヤング率が求まり、捻り振動の共振周波数から剛性率(横弾性係数)が求まる。

図3に共振法のうち最も一般的な自由共振を利用した測定装置の概念を示す。本装置では、試験片を2本の吊り線で保持し、駆動極と試験片の間にコンデンサをつくることで固有振動を発生させ、それを振動センサで検出しヤング率を得る。したがって加振、検出ともに非接触であることが最大の特徴である。また、本装置では試験片は導電性材料である必要があるため、絶縁材料では試験片表面にカーボンを塗布することにより測定が可能となる。

共振法ではヤング率は(4)式で求まる。

$$E = 0.9467 \times \left(\frac{l}{h}\right)^3 \times \frac{m}{w} \times f^2 \quad \dots \dots (4)$$

- $E$ : 動的ヤング率 (N/m<sup>2</sup>)
- $l$ : 試験片の長さ (m)
- $h$ : 試験片の厚さ (m)
- $m$ : 質量 (kg)
- $w$ : 試験片の幅 (m)
- $f$ : 横共振法の一次共振振動数 (s<sup>-1</sup>)

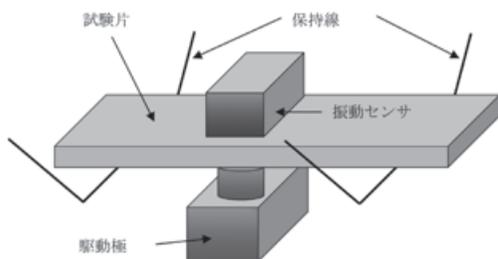


図3 共振法測定イメージ

### 2.2.2 超音波パルス法<sup>(2)</sup>

超音波パルス法は、縦波用振動子および横波用振動子を用いて約1～20 MHzの超音波パルスを試験片に伝播させ、試験片内を伝播する縦波および横波の伝播速度からヤング率および剛性率を計算する方法である。

超音波パルス法の測定例を図4に示す。超音波パルス法では超音波の入出力には探触子(検出器)が用いられ、振動を電圧変化に変換する。測定装置は試験片に変形力を加える構造を持たないため、内部摩擦等による計測上の誤差の影響は少なくなる。しかし、本手法では縦波および横波の入出力が探触子(検出器)と試験片の密着性に大きく依存するため、試験片を加工する際には表面を研磨し、面精度を確保する必要がある。

超音波パルス法では、ヤング率は(5)～(7)式により求まる。

$$G = \rho V_s^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \times \frac{V_L^2 - 2V_s^2}{V_L^2 - V_s^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$E = 2 \times (1 + \nu) G = \rho V_s^2 \times \frac{3V_L^2 - 4V_s^2}{V_L^2 - V_s^2} \quad \dots \dots (7)$$

- $E$ : ヤング率 (N/m<sup>2</sup>)
- $G$ : 剛性率 (N/m<sup>2</sup>)
- $\nu$ : ポアソン比

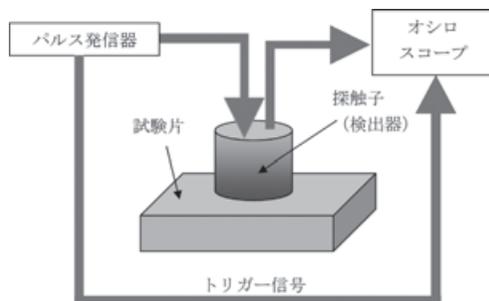


図4 超音波パルス法イメージ

$\rho$  :かさ密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$V_L$  :縦波音速 (m/s)

$V_s$  :横波音速 (m/s)

### 3. 各種測定方法における ヤング率の温度依存性への影響

これまでに JIS などでも静的試験と動的試験の結果が比較されているものの、試験条件等の詳細は明らかにされていない。特に高温でのヤング率測定は、炉の耐久性、動的試験における検出能力の限界、比較そのものに対するニーズは低かったと考えられる。しかし、近年、炉の耐久性が飛躍的に向上し、駆動部および検出器を炉から切り離すといった機構の改良が加わることにより、動的試験装置の性能が飛躍的に向上した。さらに新材料の開発と限界設計の要求により、高温ヤング率の測定への関心を高めている。本報では JIS にて規定された試験片を用いて、ヤング率の温度依存性を調べた結果を紹介する。

#### 3.1 試験方法および条件

3種類の測定法（共振法、超音波パルス法、引張試験）の各条件を表1に示す。試験片材料には Inconel 600 を用いた。試験温度については各機器の仕様範囲内とした。雰囲気は不活性雰囲気（アルゴン雰囲気）とした。

#### 3.2 結果および考察

Inconel 600 の各種測定法によるヤング率の温度

依存性を図5に示す。図中の R および L は試験片の採取方向であり、R は圧延方向、L は圧延方向に対して垂直方向を示す。3種類の測定法の各結果から、試験片採取方向の影響はほとんどないことが分かる。したがって、供試材には異方性がないことを示している。

図5より、室温から高温域において、各種測定によるヤング率に差異が生じていることが分かる。いずれの測定方法においても、室温から約 800℃程度までの範囲では、温度上昇に伴うヤング率の減少率が同程度となっている。

引張試験では、800℃以降のヤング率の減少率が急激に高くなっている。共振法によるヤング率の減少率も緩やかではあるが高くなっている。一方、超音波パルス法では室温から最大温度 1,050℃まで、一定の間隔で減少し続けている。超音波パルス法では、1,050℃で著しく音波が伝播しにくくなることが確認された。一般的に音波が伝播しにくい場合、探触子の出力を上げるなどして対応するが、高温下では、探触子の耐熱特性の限界があるため、超音波パルス法による測定は 1,050℃までとした。

なお、室温から約 550℃までの静的試験と動的試験の結果を比較した報告例があり、室温付近では両者の差異は小さいが、高温になるにつれてその差異が拡大し、静的試験の結果が著しく小さな値を示すとされている。<sup>(2)</sup> 本試験でも 800℃付近から静的試験と動的試験の差異が拡大しており、文献<sup>(2)</sup>と同様の傾向が確認された。

表1 各種測定条件

測定方法	試験片の規格	測定方式	装置型式	適用温度範囲
引張試験	JIS G0567J II-6号試験片 平行部直径6mm/ つば頂間距離30mm	差動トランス 伸び計 (2.1項参照)	オートグラフ万能機 AG-IS型 (島津製作所)	RT~1100 [°C]
共振法	JIS Z2280 L60×W10×T2	室温: 自由共振 高温: 片持ち共振 (2.2.1項参照)	高温ヤング率測定装置 EG-HT/JE (日本テクノプラス)	RT~1200 [°C]
超音波パルス法	JIS Z2280 L10×W10×D10	パルス反射法 (2.2.2項参照)	バースト波音速測定装置 RAM-5000型 (RITEC)	RT~1000 [°C]

引張試験（静的試験）では、引張ひずみの変化量をヤング率の計測に使用しており、引張ひずみ量は同じ温度変化幅であっても低温時と高温時では相違することがヤング率の変化に表れていると考えられる。

一方、動的試験の、共振法、超音波パルス法を比較すると、800℃までは差異が小さいものの、800℃からは差異が拡大している。共振法と超音波パルス法は、振動を与えて測定を行なうという点では共通しているが、各々で用いられる周波数は異なっている。一般的に、弾性率には周波数依存性があるといわれている。<sup>(3)</sup> 共振法と超音波パルス法の周波数は、約10～200Hzと約1～20MHzであり、周波数が大きく異なっている。800℃以降において、共振法と超音波パルス法のヤング率の差異が生じたことは、各々用いられる周波数による影響を受けていると考える。

以上のことから材質によって、各種測定方法による結果に差異が生じ始める温度を把握しておくことは、材料特性を評価するうえで重要であることが分かる。

なお、今回の比較試験には、INCONEL600を用いたが、単結晶材、一方凝固材のような異方性をもつ材料については、試験片の採取方向により個々のヤング率に大きな差異が生じるので、さらに注意が必要となる。

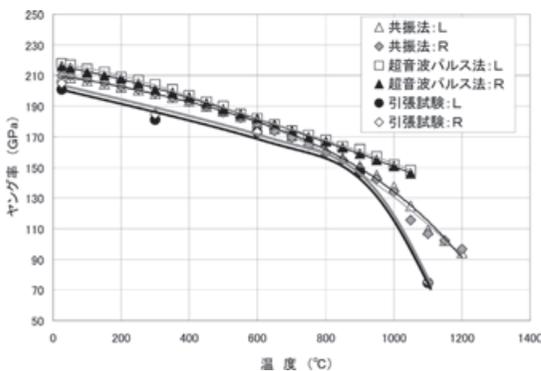


図5 3種類の測定法によるヤング率測定結果の比較

#### 4. まとめ

各種ヤング率の測定方法と結果の一例について報告した。測定技術の進歩に伴い、高温域における測定が可能となったが、各測定方法の特性を把握し、材料毎に適正に結果を評価することが必要である。特に、評価が難しいとされている高温域については、測定方法に起因するヤング率の差異を補完する手段として様々な技術開発が行なわれている。当社では、室温において、引張試験によるヤング率測定をおこなう場合には、ひずみゲージを用いる方法と、差動トランス式伸び計を用いる方法の2種類の測定が可能である。一般的にひずみゲージは伸び計と比較して誤差が小さいといわれているが、高温域においては一般のひずみゲージが使用できない。当社では高温域での引張試験には、高温に耐え得る溶射ひずみゲージを適用する技術を有しており、900℃以上の領域における測定の信頼性向上を目指している。これら技術を含め、ヤング率の測定に求められている適切な試験方法を提供していきたいと考えている。

#### 参考文献

- (1) 日本規格協会：JIS Z2280 金属材料の高温ヤング率試験方法
- (2) 日本機械学会：技術資料 金属材料の弾性係数
- (3) 畑中達也、長谷川英雄 豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.31 No.4. 54



計測事業部  
材料試験部  
三谷 幸寛  
TEL. 045-791-3519  
FAX. 045-791-3542