

神戸工業試験場 共振法事業部 大阪工場 ～弾性率および内部摩擦測定の実験サービス～

固体材料のヤング率、剛性率およびポアソン比は、構造物の設計や解析において最も基本的な物性パラメータです。これらの値を正確に測定することで、材料の弾性変形挙動を高い精度で予測し、強度設計の最適化や振動特性の評価が可能になります。さらに、内部摩擦特性を評価することで、材料内部におけるエネルギー損失や減衰特性を分析し、溶質元素や材料欠陥を考慮した制振性能の研究が可能になります。

共振法試験は、固体材料の弾性率を高精度に測定するための代表的な手法です。この方法では、試験片を特定の振動モードで励振し、その固有振動数(共振周波数)を測定します。弾性率は、試験片の形状・密度・共振周波数の関係式を用いて算出されます。非破壊での測定が可能であり、高精度かつ再現性の高い試験結果を得ることができるため、研究開発や品質管理において広く活用されています。

(株)神戸工業試験場の大阪工場では、**広範な温度範囲におけるヤング率・剛性率・ポアソン比・内部摩擦の実験サービスを提供**するとともに、これらの試験に対応する専用測定の実器販売を行っています。本稿では、これらの技術の原理と活用方法についてご紹介します。

共振の基本原理解

共振とは、物体に外部から周期的な力を加えたとき、その力の周波数が物体の固有振動数と一致すると振幅が大きくなる現象です。この共振を利用し、駆動周波数を変えながら、振幅を測定し、振幅が最大となる共振周波数を特定します。



自由共振法による弾性率測定

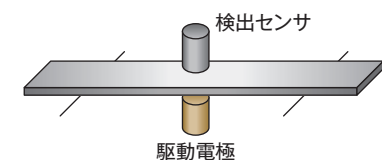
試験片に振動を与えて共振を起こし、その共振周波数を測定します。この時に試験片の両端が自由に振動することから、自由共振法と呼んでいます。ヤング率を求める場合は、曲げモードの1次共振周波数を用います。一方、剛性率を求める場合は、ねじりモードの1次共振周波数を使用します。

得られた共振周波数に加えて、試験片の質量や寸法、密度の値をもとに、動的ヤング率と動的剛性率を計算します。これらの計算は、材料が均質で等方性であることを前提として行われます。

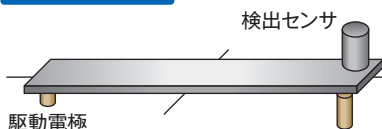
また、**ヤング率と剛性率が求めれば、この前提のもとでポアソン比を算出することも可能**です。

ヤング率 E 測定	測定装置 型式		JE
			JG
剛性率 G 測定	標準試料形状 (mm)		2×10×60
	測定方式		自由共振法(両端自由)
	駆動方式		静電駆動
	検出方式		振動音
	測定周波数範囲 (Hz)		600～20,000
	測定温度 (℃)		JE: -80～800 JG: 室温～200
	内部摩擦		可
	対象材料		金属・セラミックス・高分子材料
	参考規格		ASTM E1875

ヤング率 E 測定



剛性率 G 測定

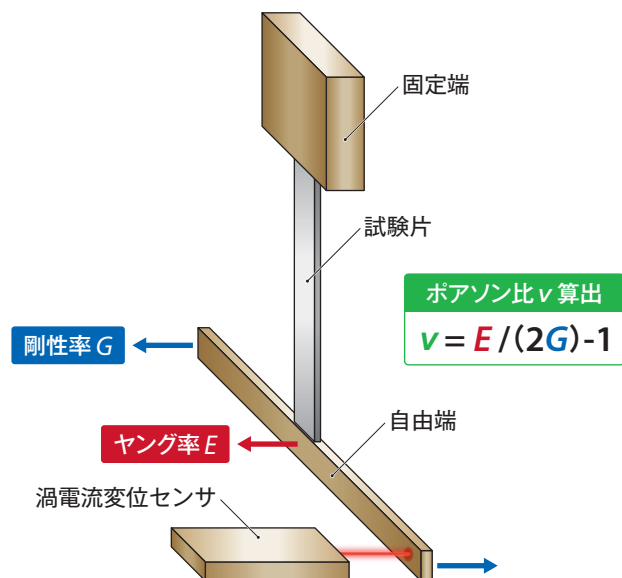


ポアソン比 ν 算出

$$\nu = E / (2G) - 1$$

片持ち式共振法による弾性率測定

一般的に、高温になるほど、固体材料を共振させることは難しくなります。そのような共振しにくい材料に対しては、片持ち式の共振法が有効です。この方法では、板状の試験片の一端を固定し、自由端を揺らして曲げやねじりの振動を与え、共振周波数を求めます。当社のEGシリーズでは、1度の試験片固定で広範囲の温度条件下において、曲げおよびねじりの一次共振周波数を取得でき、ヤング率・剛性率・ポアソン比を求めることが可能です。

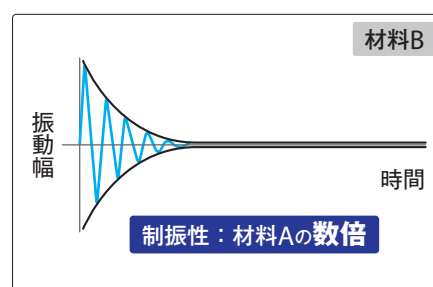
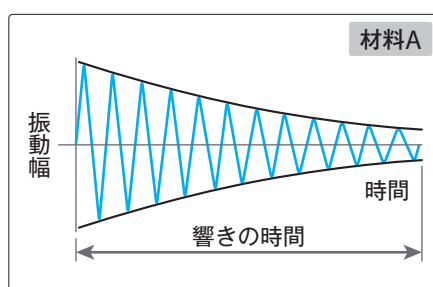


測定装置 型式	EG	
標準試料形状 (mm)	2×10×60	
測定方式	自由共振法(固定-自由)	
駆動方式	電磁駆動	
検出方式	変位センサ	
測定周波数範囲 (Hz)	10～100	
測定温度範囲 (℃)	EG-HT	室温～1200 (常用1000℃)
	EG-LT	－180～室温
内部摩擦	可	
対象材料	金属・セラミックス・高分子材料	

内部摩擦(Q⁻¹)の工学的価値

共振法による内部摩擦の測定は、材料内部の欠陥や構造変化を非破壊で評価できる重要な手法です。

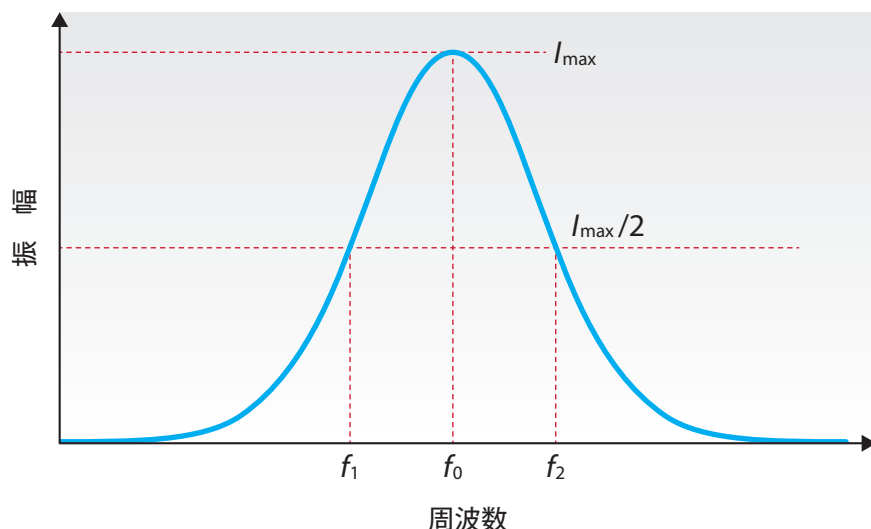
内部摩擦は、振動エネルギーが熱に変換される際の損失を示し、転位の運動、原子の拡散、粒界すべりなど、材料内部の微視的な挙動が反映されます。そのため、結晶欠陥や溶質元素、熱処理履歴、内部応力の状態などを知る手がかりとなり、材料の健全性評価や信頼性向上に大きく貢献します。なお、外部摩擦の影響が一番小さい自由共振法による測定を推奨しております。



固体材料の内部摩擦をイメージするには、鐘や楽器の音の響き方を思い浮かべるのが分かりやすいです。材質が異なれば音の響きが変わるのはもちろん、同じ材質でも製造方法によって音の響き方や余韻の長さが異なります。これは、材料ごとに内部摩擦の大きさが異なり、振動エネルギーの損失の仕方が変わること意味しています。

半価幅法による内部摩擦の算出

共振法による内部摩擦の測定には、**半価幅法**を採用しています。半価幅法とは、**共振法による弾性率測定で得られるスキャン波形を用いて、内部摩擦を算出する手法**です。共振ピークおよびその最大振幅の半分となる位置の周波数を用い、下式より内部摩擦を算出します。弊社の弾性率測定装置では、低温から高温までの測定に対応しておりますので、内部摩擦ピークの検出も可能です。



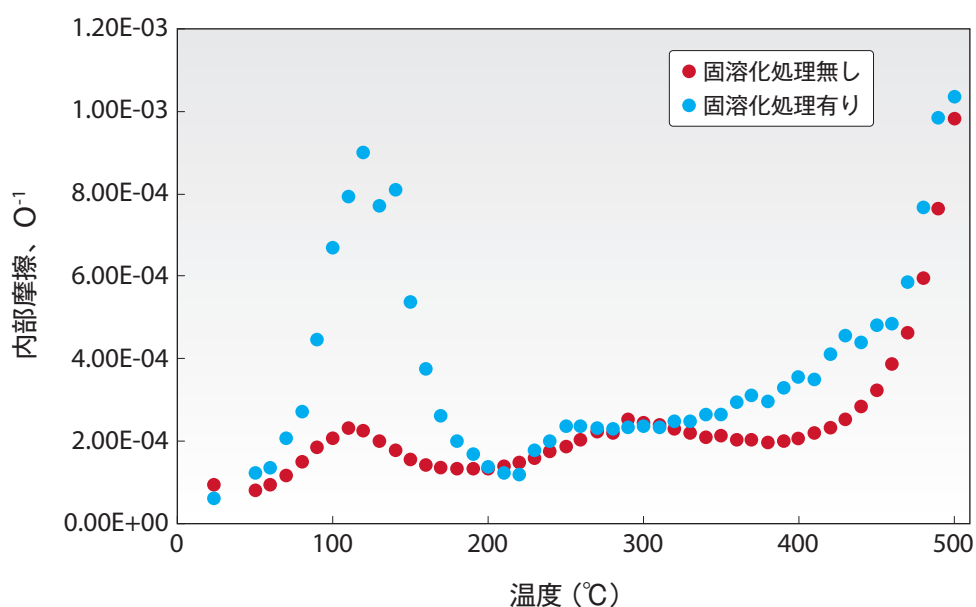
$$Q^{-1} = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{3}f_0}$$

参考 内部摩擦を用いた換算式

対数減衰率 (δ)	πQ^{-1}
減衰比 (ζ)	$\frac{1}{2} Q^{-1}$
損失係数 (η)	Q^{-1}

ケーススタディ 純鉄の内部摩擦温度依存性

純鉄における炭素の固溶化処理の有無による、内部摩擦の温度依存性の挙動の違いを以下に示します。炭素の固溶により、110℃付近で内部摩擦ピークの増大が確認されました。このピークは炭素に起因するSnoekピークであると考えられます。**Snoekピークを確認することで、固溶原子の有無を評価できるほか、ピークの高さを比較することにより、固溶量の相対的な比較も可能**です。



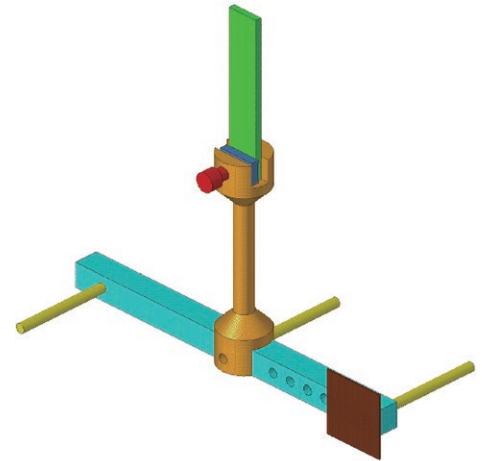
試験装置	JE-HT
寸法	60×10×1.5mm
測定雰囲気	Ar
共振周波数	約2200 Hz

》 FEM解析と組み合わせた逆解析

材料が異方性の場合でも、共振周波数そのものの測定は可能です。しかし、規格に記載されている算出式は等方性材料を前提としているため、弾性率を高い精度で算出することは困難です。この課題は、FEM解析と組み合わせることで解決可能です。

直交異方性材料には、9つの独立した弾性定数パラメータが存在します。同一材料から採取角度を変えて試験片を切り出すことで、これらすべてのパラメータに感度を有する試験片を作製することができます。**これらの試験片について共振周波数を測定し、その値を目標値としたパラメトリック解析による逆解析を実施することで、最適な弾性定数を求めることが可能**となります。また、片持ち共振法による共振周波数測定についても、試験片と駆動軸を組み合わせたモデルを作成することで逆解析が可能であり、1000℃までの高温環境下での測定にも対応しています。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}$$



EG-HT駆動軸の解析モデル図

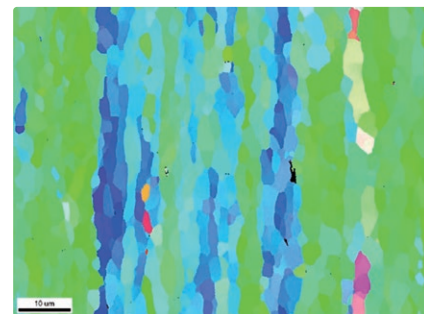
等方体とみなせる理想的な条件

- ① ランダムな方位分布
- ② テクスタ無し
- ③ 結晶粒の等軸性
- ④ 統計的に十分な結晶粒の数

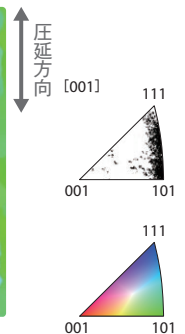
EBSDで異方性の有無を評価することが可能です。

箔材のように、板厚方向の結晶粒の数が十分で無い場合も、等方性を前提とした算出式が適さないことがあります。

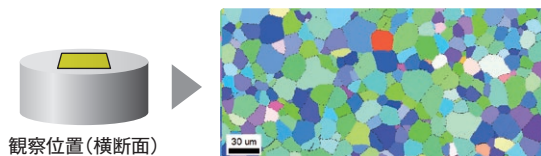
テクスタのある組織



圧延されたアルミ合金



偏った方位分布

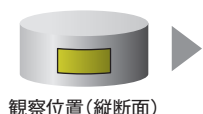
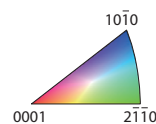


観察位置(横断面)



純Ti(TB340)の横断面のIPFマップ

Ti(Titanium, alpha)



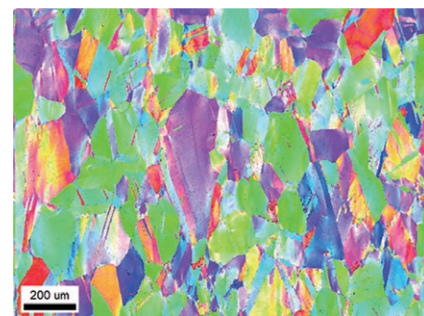
観察位置(縦断面)



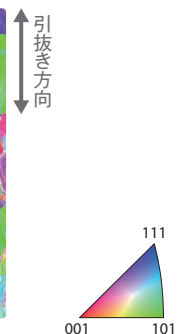
純Ti (TB340)の縦断面のIPFマップ

市中で購入した純チタンの丸棒

等軸ではない結晶粒



引抜き加工された純銅



超音波法共鳴式弾性定数測定装置CCII

～異方性材料の物性値取得が可能に～

CAE解析の精度は、使用する材料の物性値に大きく左右されます。安全な設計や適正な評価を行うには、高精度な物性値の取得が不可欠です。一般的な材料であれば、既存の規格(ASTMやJIS)に従うことで正確に測定できます。一方、これらの規格は等方性を前提として策定されているため、異方性材料における弾性定数の精密な算出には限界があります。

「CC IIシリーズ」は、こうした異方性材料の弾性定数の評価に対応しています。共鳴超音波スペクトルスコピー(RUS)法では、すべての共振ピークが発生するためピークの判別が困難ですが、本装置は電磁超音波共鳴法(EMAR法)を採用しており、**非接触で、かつ特定の振動モードを選択的に励起することが可能**なため、モード判定の誤りやピークの重なりが生じにくく、極めて高精度な測定・解析を実現しています。これまでに、等方性材料や立方晶、六方晶での測定実績があります。また、「CC II-HT」では、最大1000℃の高温環境下での測定にも対応しています。

弾性定数とは

弾性定数とは、**フックの法則に基づき、応力とひずみの相互関係を表す材料定数**です。弾性定数は一般に6×6のマトリクス形式で表されます。弾性マトリクスには対称性があるため、独立成分数は最大で21個となります。さらに、材料の結晶構造や異方性を考慮することで独立成分数は減少し、等方性材料では2個となります。

弾性定数マトリクス

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{Sym.} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

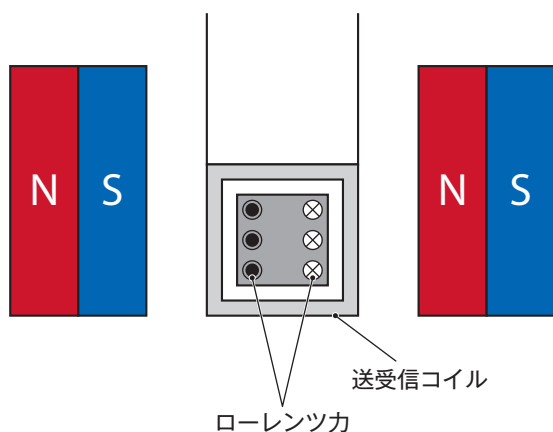
➡

等方性材料

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ & \text{Sym.} & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix}$$

CCIIシリーズの測定原理

送受信コイルに挿入した試料に外部磁場を印加し、コイルに高周波電流を流すことで、試料表面に渦電流が発生します。この渦電流と外部磁場の相互作用(直交性)からローレンツ力が発生することで、試料を振動させます。同一のコイルで受信も行っており、送信と逆の過程でひずみを検出しています。コイルの向きを90度回転することによって、異なる振動モードを励起させることが可能です。

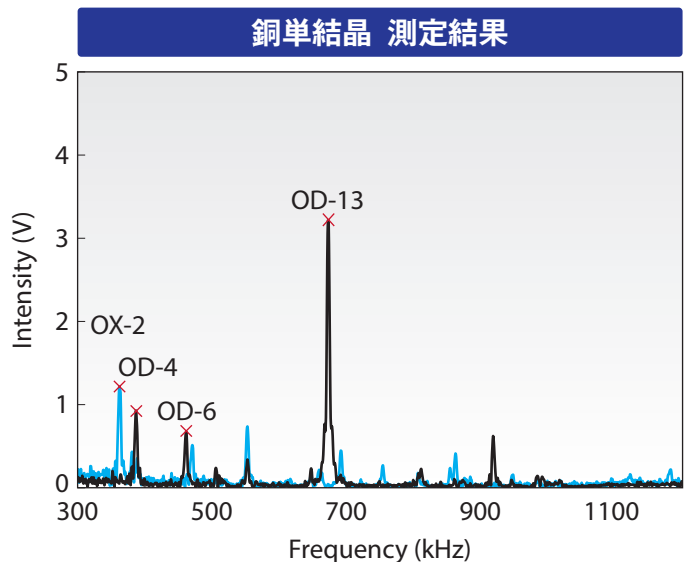
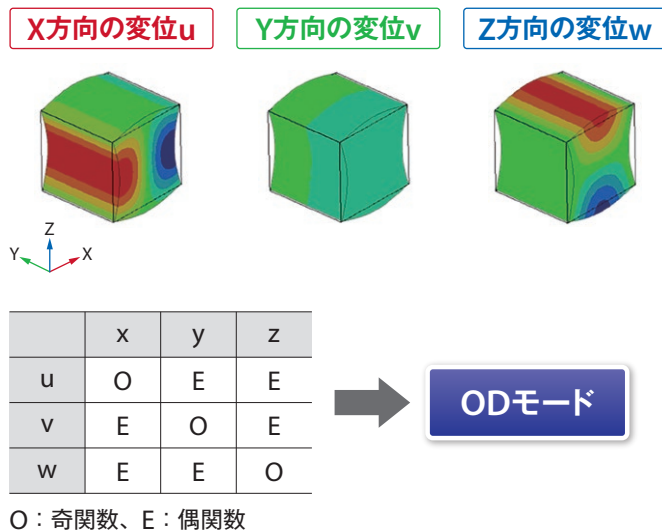


測定装置 型式	CC II -RT, CC II -HT
標準試料形状 (mm)	3×4×5
測定方式	EMAR法
駆動方式	ローレンツ力
検出方式	電磁誘導
測定周波数範囲 (kHz)	300～5,000
測定温度 (℃)	RT～1000
内部摩擦	可
対象材料	結晶系(等方体、立方晶、六方晶)

振動モードの割り当て

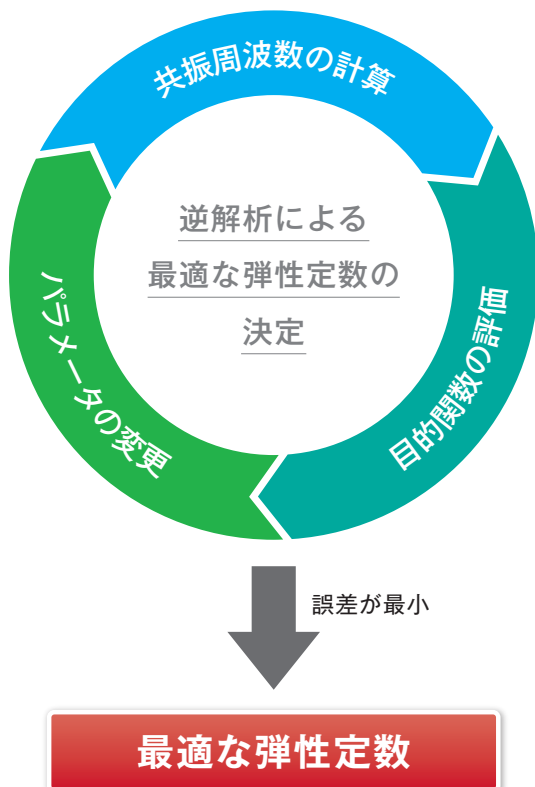
振動モードには、膨張・収縮、曲げ、せん断、ねじりの変形が存在し、変位の対称性を考慮することで8つのグループに分類できます。最適化では、測定した共鳴ピークを目標値とするため、振動モードの割り当て精度が極めて重要となります。

モードの割り当てには算出した共振周波数を用います。共振周波数は、リッツ法によるエネルギー最小化原理、またはFEM解析により求めます。初期値として弾性定数を与えて共振周波数を算出し、その値を基に共鳴ピークの割り当てを行います。**EMAR法では特定の振動モードを選択的に発生させることが可能なため、モードの割り当てが比較的容易**です。



逆解析による最適な弾性定数の決定

算出した共振周波数と測定値の相対誤差二乗和を目的関数とし、弾性定数を変数(パラメータ)とする逆解析を行います。最適化には専用のPythonスクリプトを使用しています。繰り返し計算により、目的関数が最小となる最適なパラメータを求めることで、材料の弾性定数を決定します。立方晶の場合、異方性パラメータを用いた異方性の評価も可能です。



銅単結晶 解析結果		
最適値	C11[GPa]	168.4
	C12[GPa]	121.2
	C44[GPa]	73.2
異方性パラメータ	A	3.10

■ 異方性パラメータの算出

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$$

※完全な等方体の場合A=1となる。

共振式薄板曲げ疲労試験機RF

～厚さ0.05～0.8mmの薄板疲労試験が短時間で可能に!～

薄板は、ばね・ベルト・バルブ・ダイヤフラム・コネクタ・スイッチなどに用いられる構成部品に欠かせない素材です。また、近年では、電池スタックや電子デバイス内の構成部品にも、金属製の薄板が組み込まれており、その需要は今後増大すると見込まれます。これらの薄板材の疲労寿命は、製品の信頼性を左右する重要な特性値です。しかし、サンプルが薄くなればなるほど疲労試験の難易度は高くなるため、薄板材の疲労強度特性には不明な点が多く残されています。

(株)神戸工業試験場では、薄板ならではの問題を合理的に解決した共振式の曲げ疲労試験の受託試験サービスを開始しました。

共振式疲労試験の原理および特徴

共振式疲労試験は、サンプルの固有値の一つである共振周波数を利用した疲労試験法です。

サンプルが共振状態に至ると、最小限のエネルギーでサンプルに繰返し応力を与えることができます。一般的な機械式疲労試験とは異なり、サンプルの片方のみを固定した状態で応力を与えることができ、非常に薄い板材に対して精度の高い応力を高速で与えることが可能になりました。共振状態の動的な応力については、後述するFEM解析を用いて算出する必要があります。本装置の名称の“RF”は、共振 Resonance と疲労 Fatigue の頭文字をとったものです。

これは、**神戸工業試験場 共振法事業部の前身である日本テクノプラス(株)(NTP)が開発した技術**です。

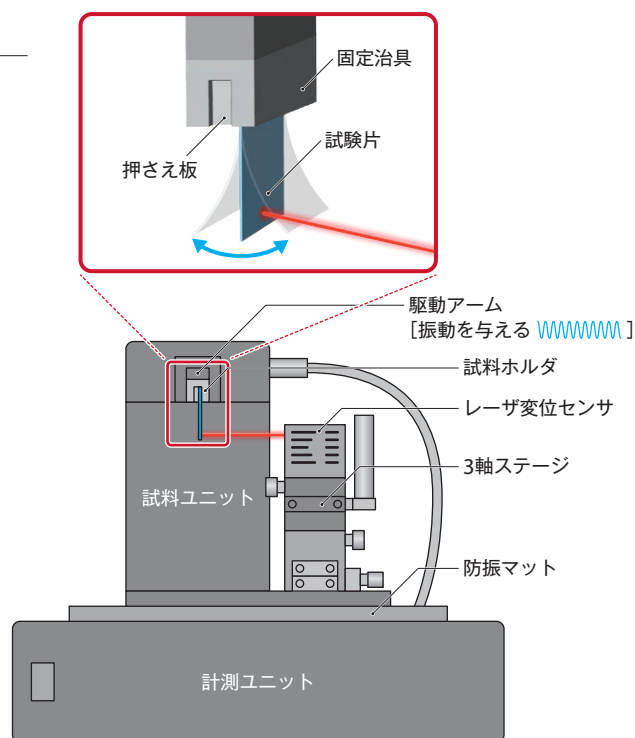
RF装置の仕様

アウトプット：S-N曲線

(応力振幅と破断・未破断繰返し数の関係)

試験サンプル	金属・セラミック系材料
変位振幅の計測	レーザー変位計
振幅範囲	±5 mm 以内
試験温度	室温～200℃
試験片の厚さ	0.05～0.8 mm
試験片の幅	3～5 mm
試験片の長さ	15～35 mm
振動周波数範囲	100～1000 Hz
破断検知	共振周波数の低下※

※サンプルに疲労き裂が発生・進展すると、サンプルの剛性が小さくなるため共振周波数が低下します。



KMTL×NTPのコア・コンピタンス

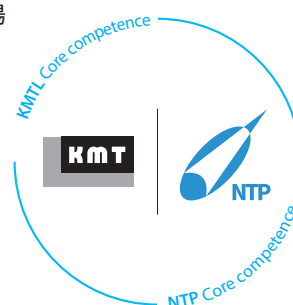
RF試験は、共振法に特化した(旧)日本テクノプラスの基盤技術と疲労試験に精通した神戸工業試験場のコラボ商品です。

本装置は、薄板材の疲労に特化している希少性の高い疲労試験機です。

一般的な疲労試験機よりも周波数が高く、短時間でデータ取得が可能です。

- ▶▶ (例えば) 共振周波数が500Hzのとき、1000万回の疲労試験は5時間半で完了します。
- ▶▶ $N=10^7$ 以上の超高サイクル疲労試験が可能です。

薄板は放熱性に優れるため、高速の繰返し変形に伴う発熱のリスクが低いです。



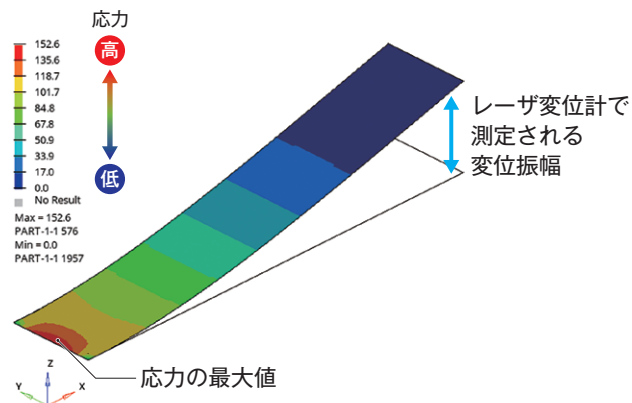
》 FEM(有限要素法)解析による応力値の算出

FEM解析では、対象となる物体や構造物を小さな要素に分割し、それぞれの要素の挙動を数学的にモデル化します。各要素は、三角形や四角形などの幾何学的な形状を持ち、要素内部の挙動は数学的な方程式や関係式で表されます。

RF試験における共振周波数、応力と変位の関係は、FEMを使った固有値解析で求めます。RF試験における応力振幅は、FEM解析に基づき定義されます。

FEM解析を行うには、材料のヤング率、ポアソン比、密度の材料特性値が必要です。

弊社は、FEM解析のソルバーにABAQUSを使っております。



FEM解析結果 | 動的な曲げ応力の分布図

》 試験フローのモデルケース

- RF試験に用いる疲労試験片の形状や寸法は、弊社で決定致します。基本的に、定形的な試験片形状はございません。
- FEM解析に必要な材料のヤング率、ポアソン比、密度の材料特性値がない場合でも、弊社内で各種実験を行い、FEM解析にフィードバックすることが可能です。
- 試験片加工には、ワイヤーカットや打ち抜き加工（いわゆる、パンチング）を適用します。加工後には、精密な寸法計測と重量測定を実施します。
- 疲労試験データ、FEM解析結果、試験片寸法検査成績書**を基本成果物としてご提出致します。
- 目標とする応力レベルを見積もるため、静的な強度や硬さなどの情報のご提供をお願いする場合がございます。
- 破断した試験片の破面解析も実施可能です。



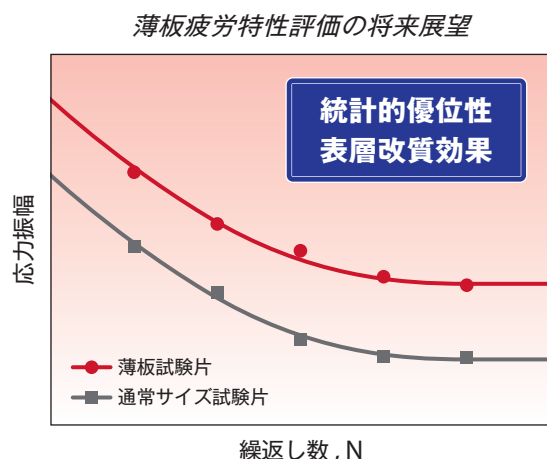
》 未踏の薄板疲労強度特性評価

統計的優位性

疲労強度は、対象材料の最弱部で決まると言われております。例えば、高強度鋼では、介在物等の材料欠陥が疲労破壊の起点になり、介在物サイズの統計値が疲労強度特性に大きな影響を与えます。板厚を小さくすると大きい欠陥に遭遇する確率が極めて小さくなることから、RF試験で得られた疲労強度は一般的な疲労強度よりも高くなる傾向を示す可能性があります。

表層改質効果

薄板の曲げ疲労強度は、表面近傍の性状を非常に強く受けます。そのため、表層数十ミクロンの改質技術が疲労強度の向上にダイレクトに貢献する場合も考えられます。



(株)神戸工業試験場 大阪工場は、新大阪駅から徒歩15分の便利な立地にあります。

工場内の設備や試験装置の見学、技術的なご相談やお打ち合わせにも対応しております。

大阪方面へお越しの際は、ぜひお気軽にお立ち寄りください。

