
固体材質同士の接合面における 機械損失について

坪野研
小野里光司

▷ 概要

熱はめを行ったときの固体物質の機械損失についての測定結果

- 単体と熱はめしたときの試料のQ値を測定

熱はめすることによる
Q値の低下を確認

- Q値と弾性エネルギーとの関係を見る

相関があることを確認

- 接合面による機械損失の計算

$$\phi_{border} h_{border} = 1.8 \times 10^{-7} \text{ m}$$

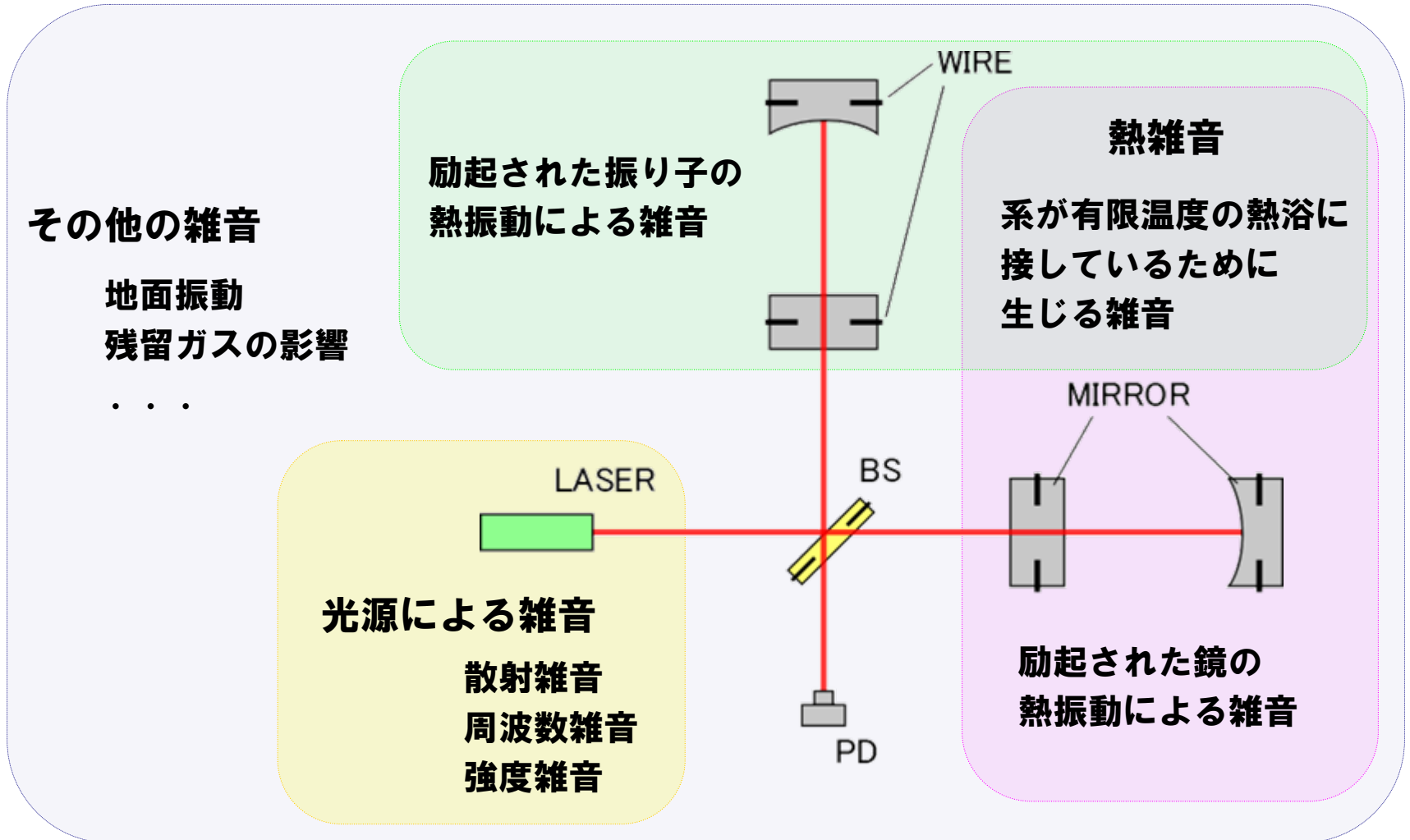
1. 序論
 - 干渉計の雑音
 - 熱雑音
 - DECIGOの概要
 - 大型鏡の問題点
 - 本研究の概要

2. 実験方法・装置
 - 試料
 - Q値の測定方法
 - 差動型マイケルソン干渉計
 - 実験装置(沼田氏)

3. 結果と考察
 - Q値の測定結果
 - 弾性エネルギーとQ値の関係
 - 測定Q値の記述
 - 接合面の機械損失の計算
 - 熱はめによる機械損失
 - Q値の推定
 - まとめと今後の課題

1. 序論

▷ 干渉計の雑音



1. 序論

▷ 熱雑音

揺動散逸定理 (FDT)

$$G_x(f) = -\frac{4k_B T \operatorname{Im}[H(\omega)]}{\omega^2}$$

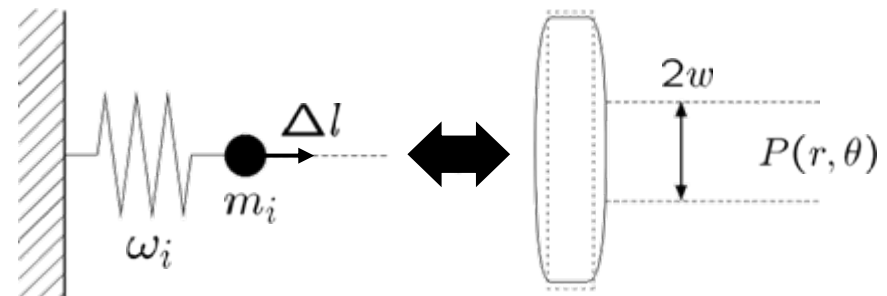
1次元調和振動子の熱雑音

$$m\ddot{x} + m\omega_0^2 x = f$$

$$G_x(f) = \frac{4k_B T}{m\omega} \frac{\omega_0^2 \phi(\omega)}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega_0^4 \phi(\omega)^2}$$

熱雑音と系の機械損失を関係付ける

ある力が加えられたときの系の伝達関数が分かれば熱雑音を知ることができる



鏡の熱雑音

$$G_x \simeq \frac{4k_B T}{\omega} \sum_i \frac{1}{m_i \omega_i^2 Q_i}$$

➡ 熱雑音を低減する方法

- 温度を低くする
- Q値が大きい材質を用いる
- 質量を重くする

1. 序論

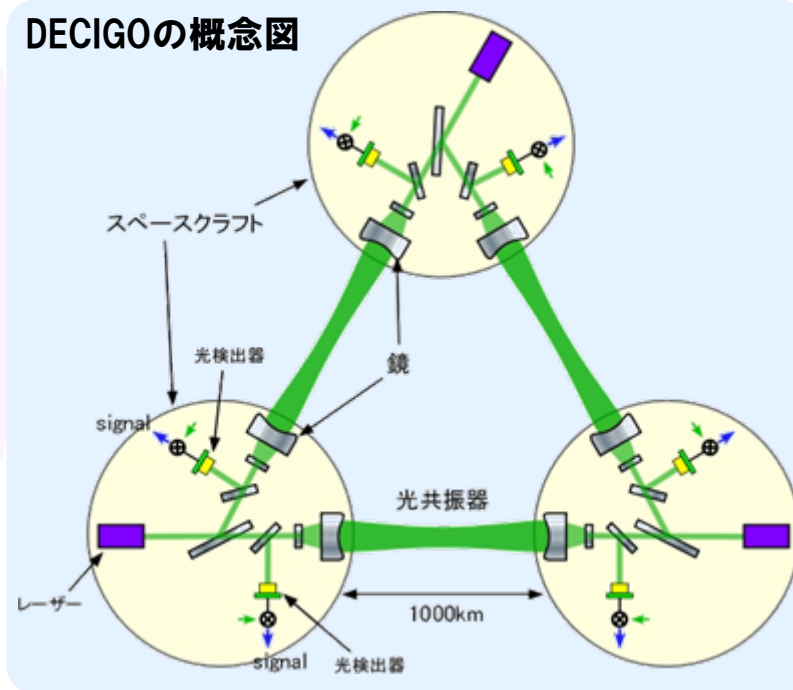
▷ DECIGOの概要

宇宙空間に重力波検出器を打ち上げる計画

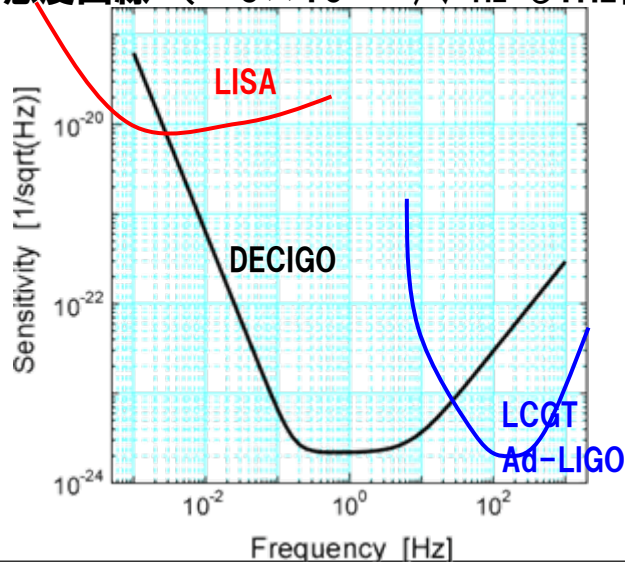
互いに1000km離れた3台のS/C間の距離を精密に測定することで重力波を観測

ファブリ・ペロー干渉計 (1000km)
倍波Nd:YAGレーザー (出力10W,波長532nm)
鏡 (直径1m,質量100kg)

DECIGOの概念図



目標感度曲線 ($\sim 3 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz付近)



0.1~1Hzの低周波数帯に感度をもつ

主要な重力波源

連星の軌道放射
大質量BH
背景重力波...

1. 序論

▷ 大型鏡の問題点

DECIGOの場合

目標感度の低周波数帯の制限要因

- ・ 加速度雑音
- ・ レーザー光の輻射圧雑音
- ・ 鏡の熱雑音

倍波Nd:YAGレーザー（波長532nm）
を使用したときのレーザー径： 約41cm

鏡は大きいほうが得になる

DECIGO用の鏡：

直径1m、質量100kg

1枚鏡は可能か？



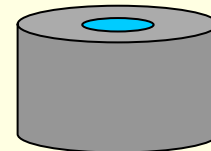
複合鏡にする可能性

鏡と鏡の間の接合面での機械損失
が問題となる

熱雑音の増大

地上型干渉計の場合

鏡の周りを比重の大きな材質で囲うことで質量を大きくできる



固体同士の接合面での機械損失がどの程度なのかを調べることが必要

1. 序論

▷ 本研究の概要

接合面の機械損失を考える一例として

熱はめというはめ込み方法を使用



単体の試料と

熱はめした試料

両方のQ値を測定して比較する

▷ 熱はめ（工業的には「焼ばめ」ともいう）

熱膨張を利用したはめ込み方法

原子力発電のタービンの設計にも

使用されるわりと一般的な手法

▷ 熱はめを利用した鏡の作成例

円筒の方を加熱して熱膨張させ

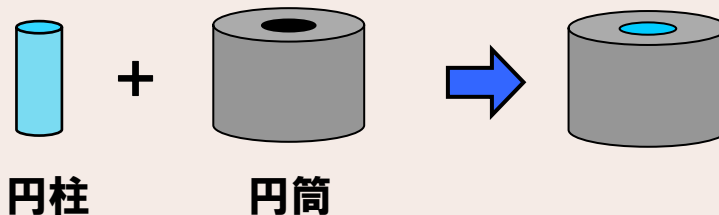
円柱をはめ込む

冷えて、常温になるとがっちりとはまる

熱はめによりどれだけ

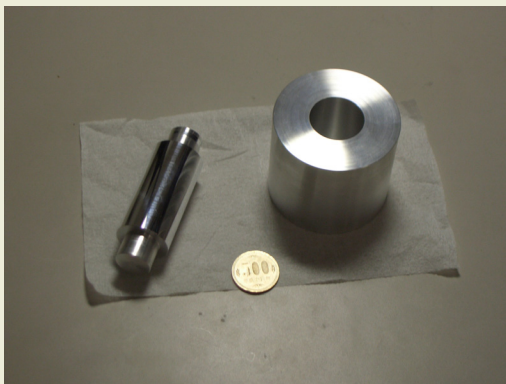
Q値の低下があるかをみる

接合面の弾性エネルギー等との関係を見る

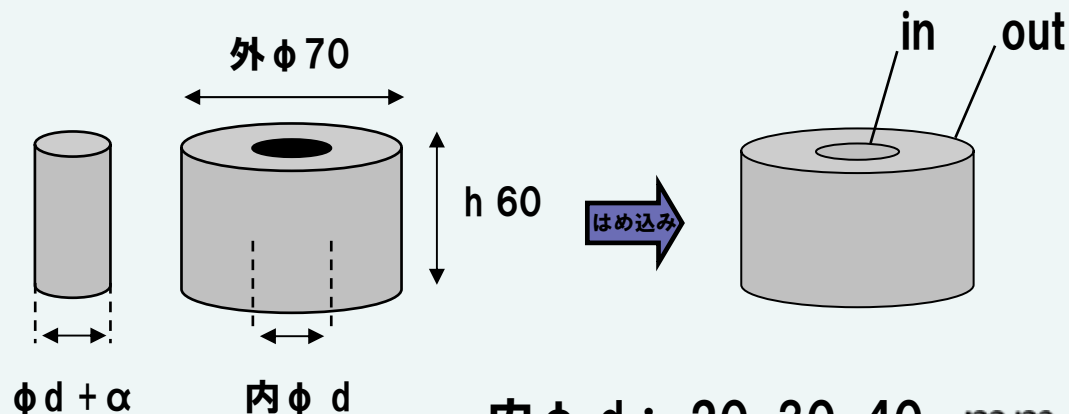


2. 実験方法・装置

▷ 試料（アルミニウム (A5056), 真鍮 (C3604)）



アルミニウムの例



内 ϕd : 20, 30, 40 mm
軸の公差 α : 50, 70 μm

機械損失のモデル

$$\phi = \frac{U_{\text{in}}}{U_{\text{total}}} \phi_{\text{in}} + \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{total}}} \phi_{\text{out}} + \frac{U_{\text{border}}}{U_{\text{total}}} \phi_{\text{border}}$$

U_{in} U_{out} U_{total} U_{border} : 歪みエネルギー
 ϕ_{in} ϕ_{out} ϕ_{border} : 損失

2. 実験方法・装置

▷ Q値の測定方法

PZTを用いて鏡の共振を励起する

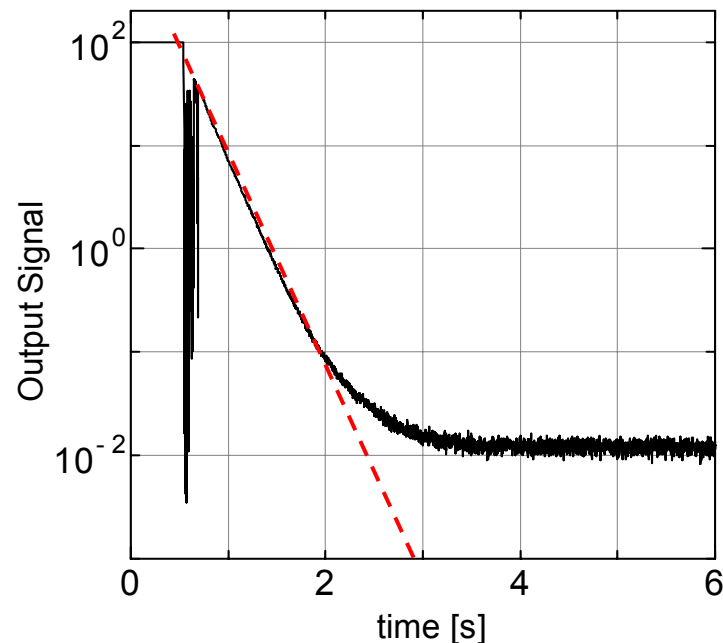
PZTを離して励起するのをやめる

振動の減衰を見ることによりQ値を測定する

減衰振動の信号の大きさは

$$\exp\left(-\frac{\omega_0 t}{2Q}\right)$$

に比例するのでフィッティングして
Q値を求める



2. 実験方法・装置

▷ 差動型マイケルソン干渉計

励起された試料の振動を読み取る

腕の長さの変化を光検出器の電流の変化として検出する

PD1,2に流れる電流の差

$$I_1 - I_2 = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cos(2k\Delta l)$$

DC成分

↑ DC成分をオフセット回路で除去

干渉計の出力電圧

$$V_{\text{out}} = V_P \cos(2k\Delta l)$$

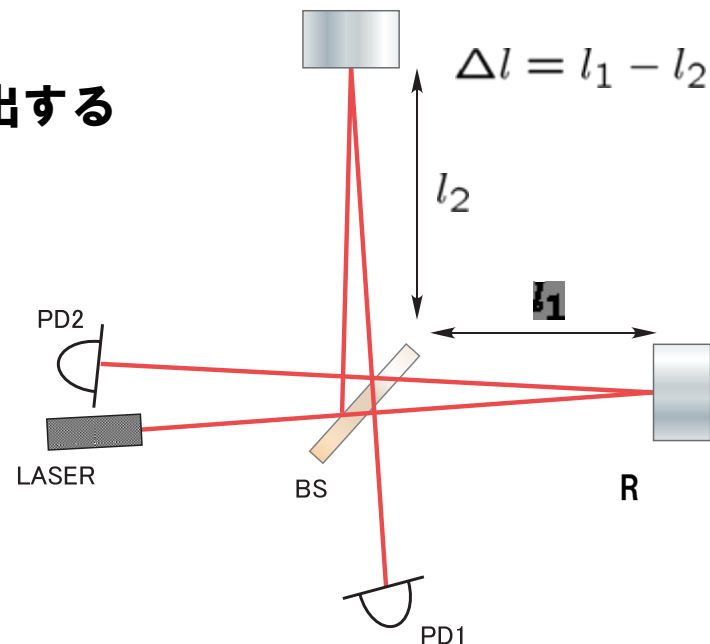
Δl の変化に対して V_{out} の変化が最も大きい → $V_{\text{out}}=0$ のとき

$$\left. \frac{\partial V_{\text{out}}}{\partial \Delta l} \right|_{V_{\text{out}}=0} = 4\pi V_P / \lambda$$



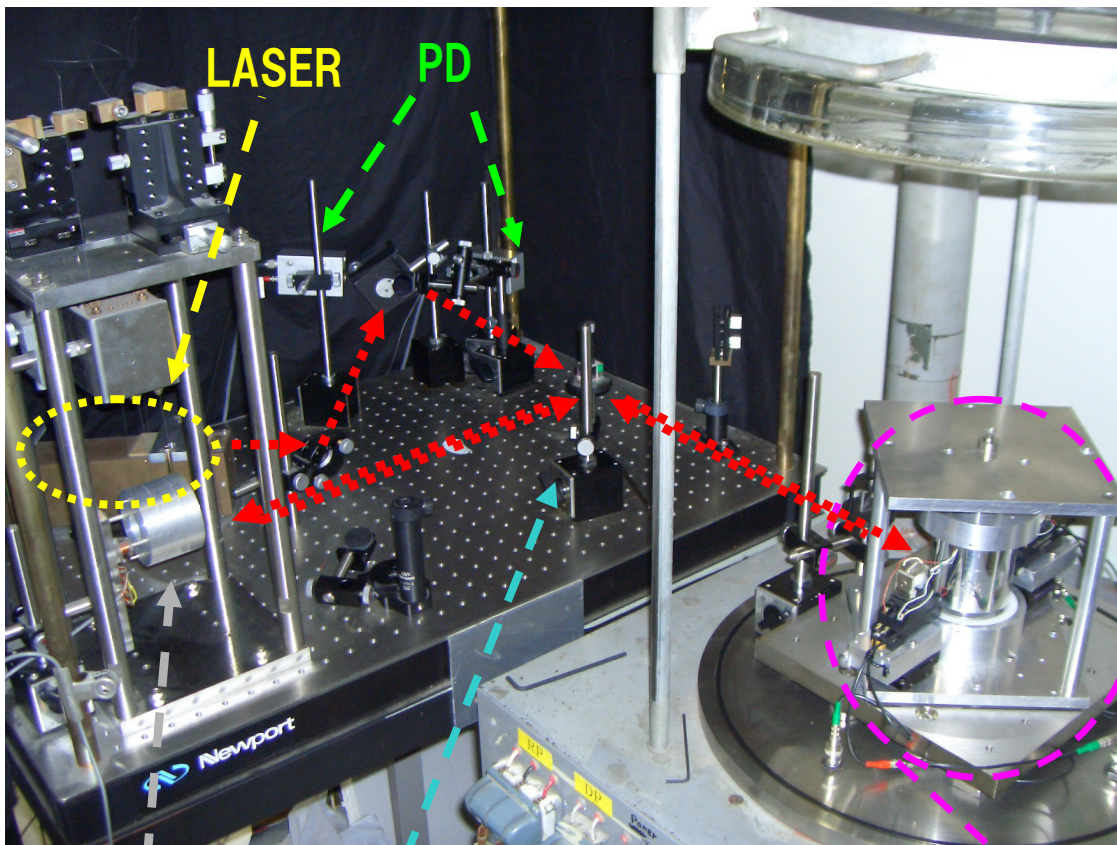
干渉計をこの動作点に保つ

実験では片方の鏡を参照鏡として位置を制御



2. 実験方法・装置

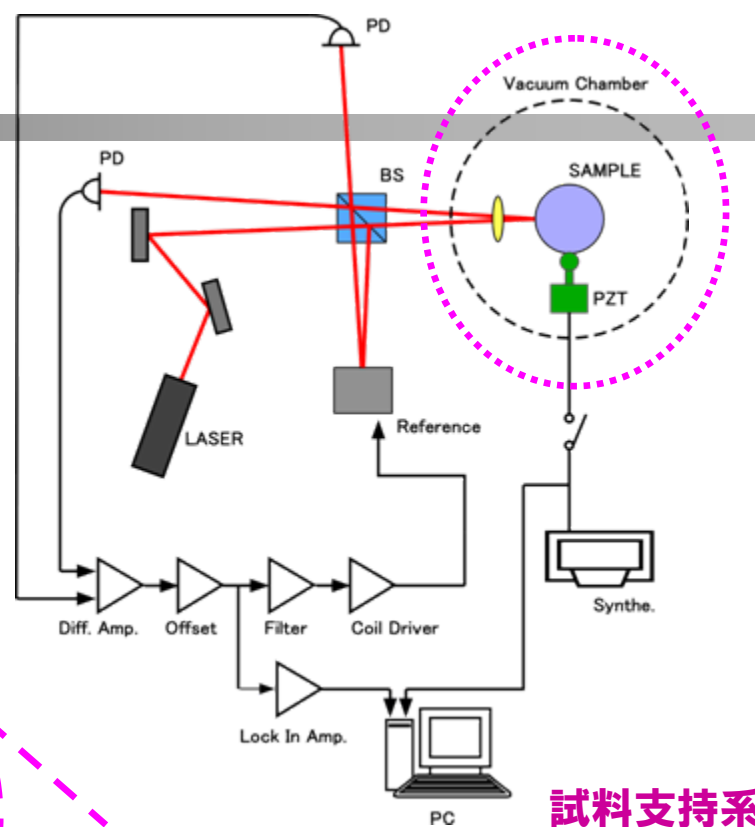
▷ 実験装置 (沼田氏)



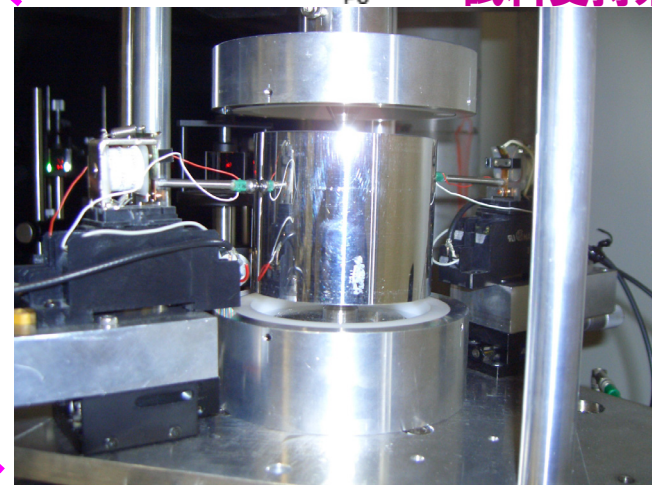
参照鏡

BS

支持による損失を少なくする
ための節点支持



試料支持系

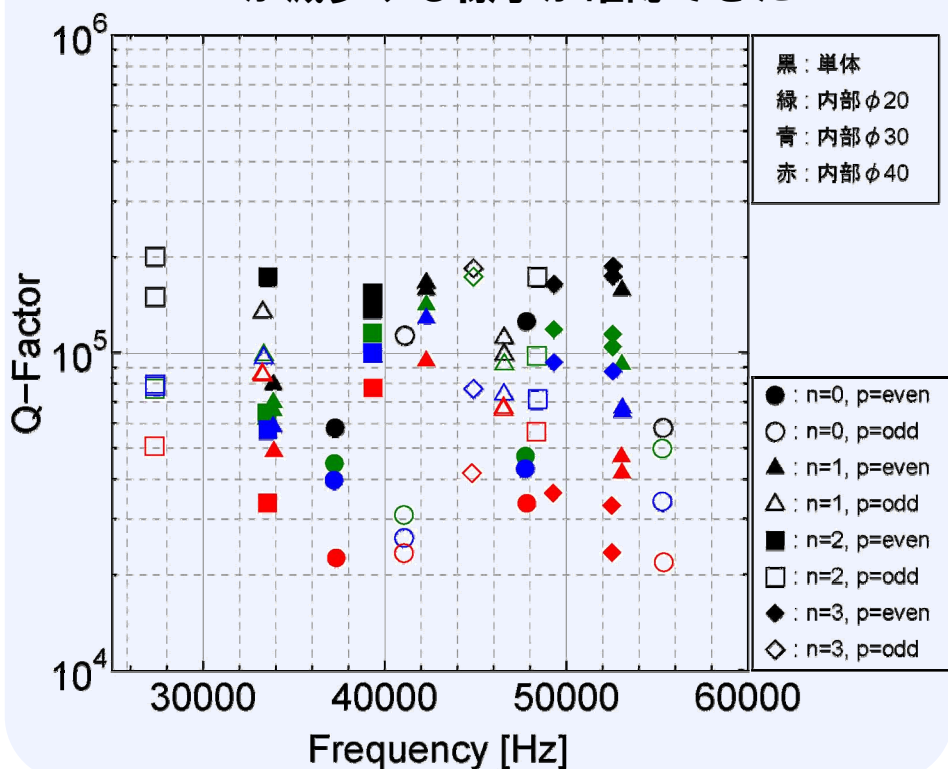


3. 結果と考察

アルミニウムと真鍮それぞれについて
単体のものと熱はめしたもののQ値の測定結果

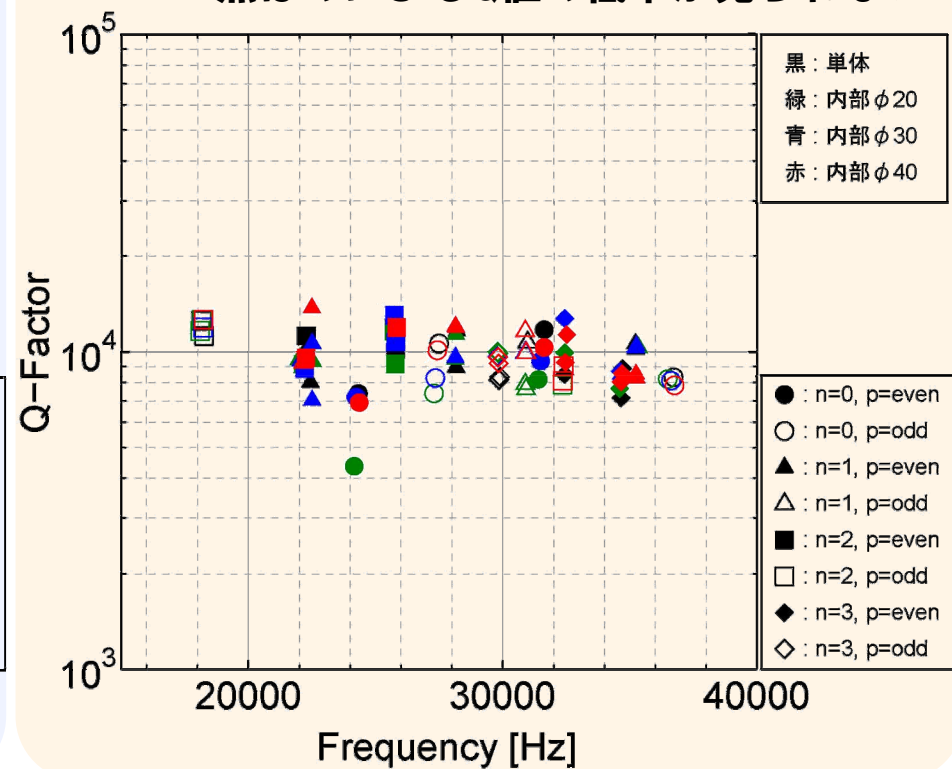
▷ アルミニウム (A5056)

接合面積の増加と共にQ値
が減少する様子が確認できた



▷ 真鍮 (C3604)

単体の真鍮のQ値が小さく
熱はめによるQ値の低下が見られない



3. 結果と考察

▷ 弾性エネルギーとQ値の関係

$n > 2$ の振動モードにおいて
接合面付近の弾性エネルギーとQ値の関係をみる

$n=0,1$ は中心に変位がある
振動モードなので除外

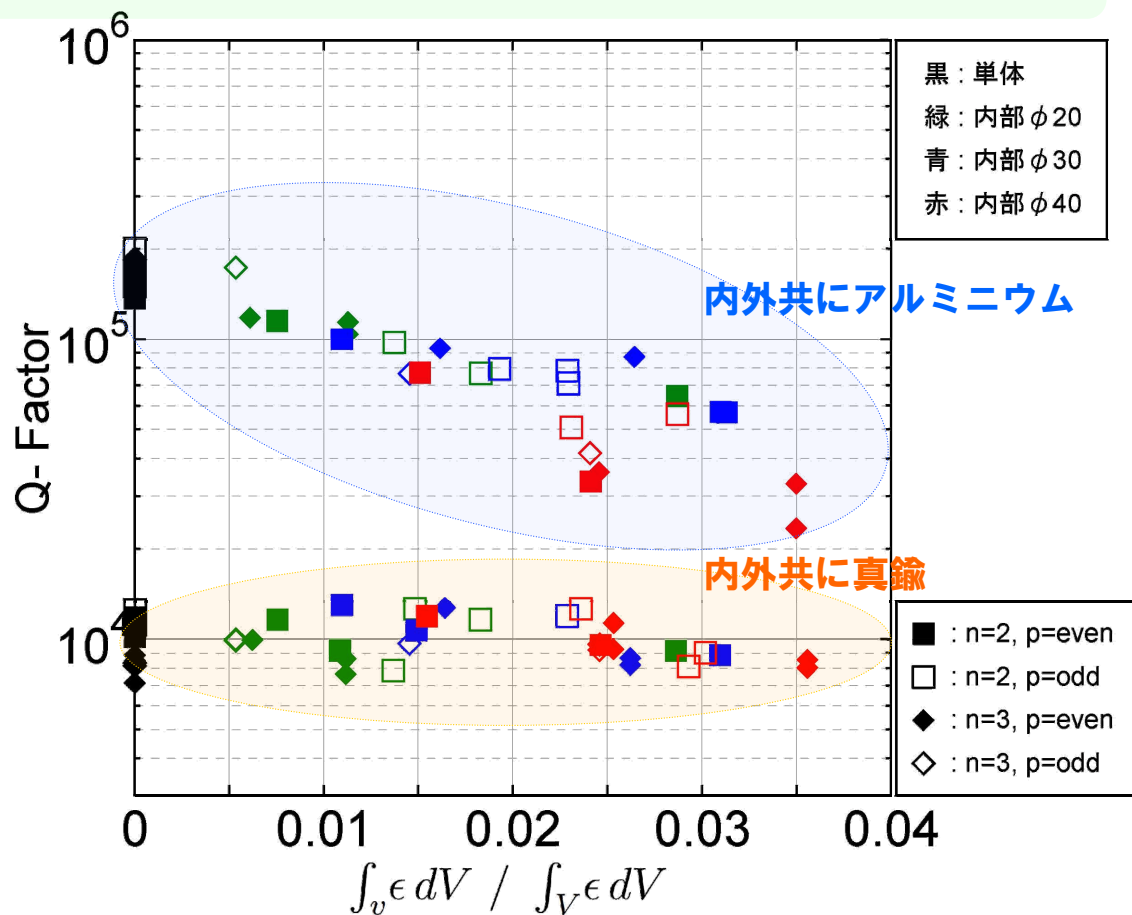
相関係数 $r_{Al} = -0.93$
 $r_{Brass} = -0.15$

アルミニウム：

Q値と弾性エネルギーとの間に
相関があるように見える

真鍮：

単体のときでも 10^4 とQ値が低い
弾性エネルギーとの関係が
見えない



3. 結果と考察

▷ 測定Q値の記述

A.M.Gretarsson and G.M.Harry,
Rev.Sci.Instr.70 (1999) 4081.

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta E_{bulk} + \Delta E_{surf} + \Delta E_{border}}{E_{total}}$$

ΔE_{bulk} : 固体が損失するエネルギー

ΔE_{surf} : 表面のダメージ層で損失するエネルギー

ΔE_{border} : 接合面のダメージ層で損失するエネルギー

E_{total} : 全体のエネルギー

表面や接合面の付近に

厚さがそれぞれ h_{surf} , h_{border}

のダメージ層があるとする

$$E = \frac{1}{2} Y \int_V \epsilon^2(\vec{r}) dV$$

$$\frac{1}{Q} = \phi_{bulk} + \phi_{surf} h_{surf} \frac{\int_{S_s} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}} + \phi_{border} h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}}$$

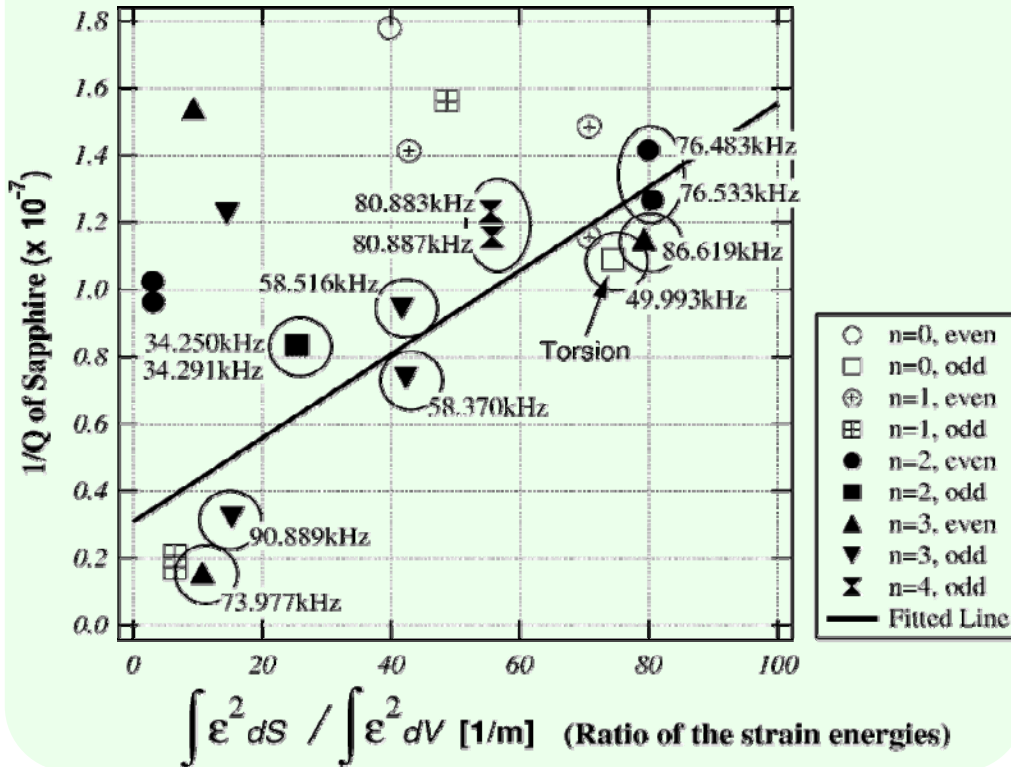
3. 結果と考察

▷ 接合面の機械損失の計算

$$\frac{1}{Q} = \phi_{bulk} + \phi_{surf} h_{surf} \frac{\int_{S_s} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}} + \phi_{border} h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}}$$

K. Numata *et al.* (2001)

表面のダメージによる
損失を測ったもの



Sapphireでの結果が参考になるかは
分からないが

$$\phi_{surf} h_{surf} \sim 1.3 \times 10^{-9} \text{ m}$$

アルミニウムの機械損失

^^

$$\phi_{bulk} \sim 5 \times 10^{-6}$$



$$\frac{1}{Q} \simeq \phi_{bulk} + \phi_{border} h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}}$$

3. 結果と考察

▷ 熱はめによる機械損失

最小二乗法でフィッティング
傾きから ϕ_{border} を求める

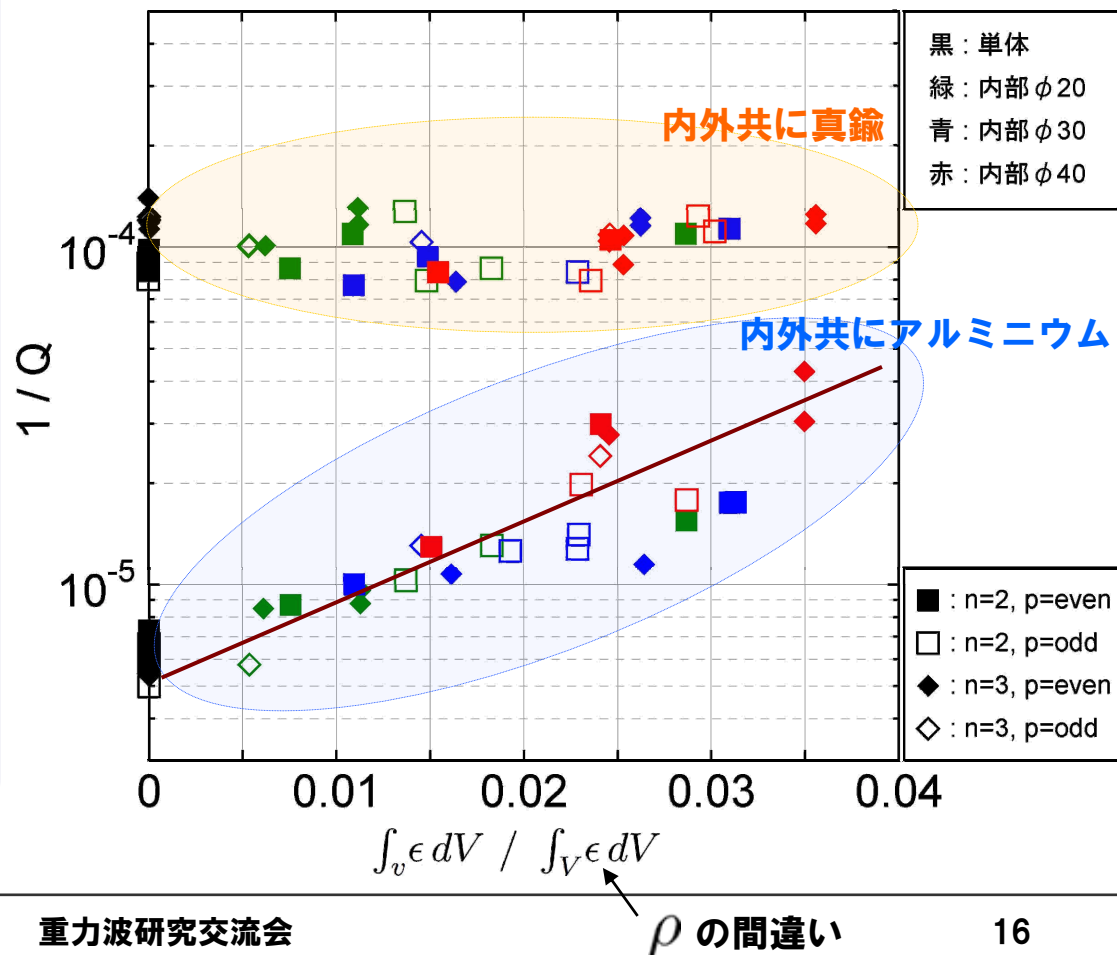
$h = 300 \mu\text{m}$
として

$$h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 dS}{\int_V \epsilon^2 dV} \simeq \frac{\int_{v_b} \rho dV}{\int_V \rho dV}$$

傾きから計算した結果

$$\phi_{border} h_{border} = 1.8 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\frac{1}{Q} \simeq \phi_{bulk} + \phi_{border} h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 d^2\mathbf{r}}{\int_V \epsilon^2 d^3\mathbf{r}}$$



3. 結果と考察

▷ Q値の推定

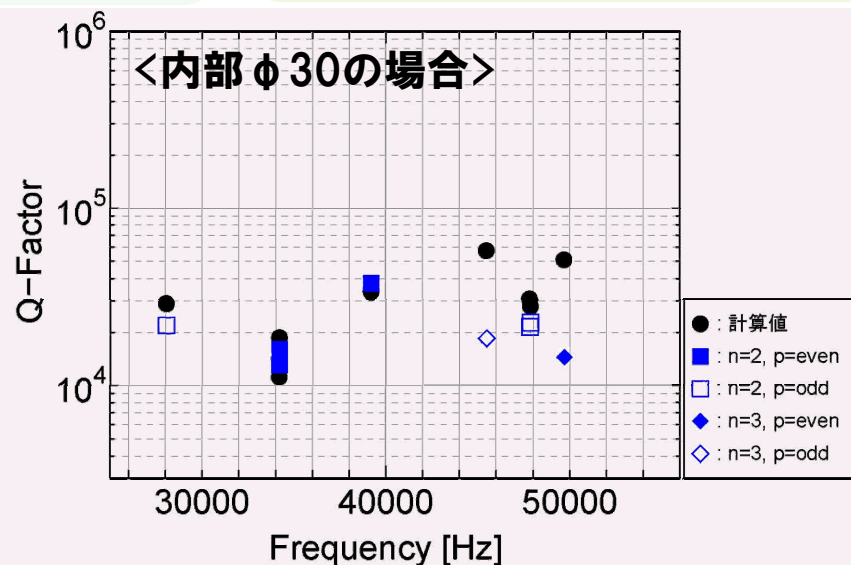
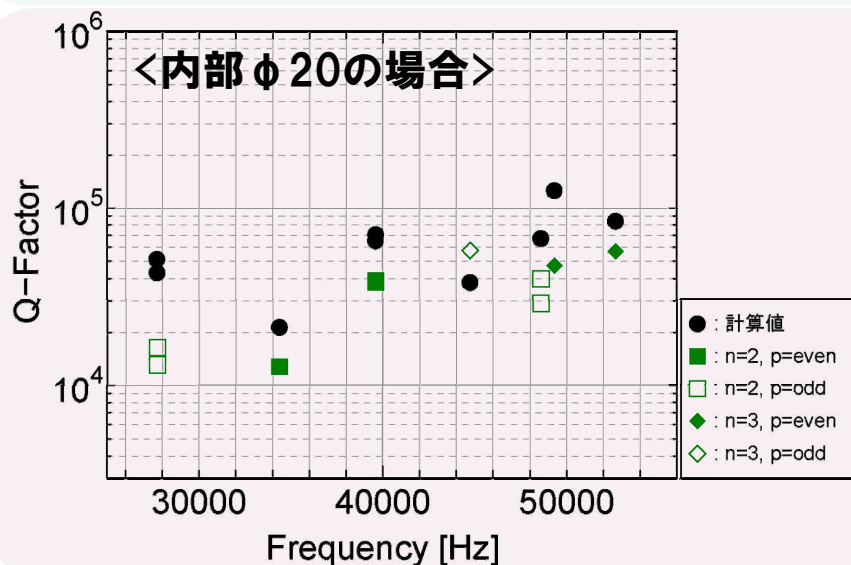
異なる材質同士で熱はめを行ったとき
Q値の推定ができないかを考えてみた

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta E_{al-bulk} + \Delta E_{brass-bulk} + \Delta E_{surf} + \Delta E_{border}}{E_{total}}$$

$$\sim \phi_{Al} \frac{\int_{V_{Al}} \epsilon^2 dV}{\int_V \epsilon^2 dV} + \phi_{Br} \frac{\int_{V_{Br}} \epsilon^2 dV}{\int_V \epsilon^2 dV} + \phi_{border} h_{border} \frac{\int_{S_b} \epsilon^2 d^2r}{\int_V \epsilon^2 dV}$$



外側のアルミニウム円筒の
内部に真鍮を熱はめしたもの



3. 結果と考察

▷ まとめ

- 単体と熱はめしたときのアルミニウムと真鍮のQ値を測定した
 - ⇒ アルミニウムはほとんどのモードでQ値が低下
- 接合面付近の弾性エネルギーとQ値に相関があることが分かった
- 接合面付近に損失があるモデルを採用したとき
 - ⇒ $\phi_{border} h_{border} = 1.8 \times 10^{-7} \text{ m}$

▷ 今後の課題

- アルミニウムに真鍮を熱はめしたときのQ値の推定が良くできないので改善
- 他の接合方法ではどうなのか
- 今後どうしていきたいのか

終わり