

# 弾性波を利用した超砥粒ホイールの 品質検査方法

芝浦工業大学  
デザイン工学部 デザイン工学科  
教授 澤武一

2022年9月6日

# 本研究の立ち位置

## 研削作業の自動化技術

研削動力, AEセンサ, 磁気軸受, モニタリングなどなど, 多くの方法が報告されている

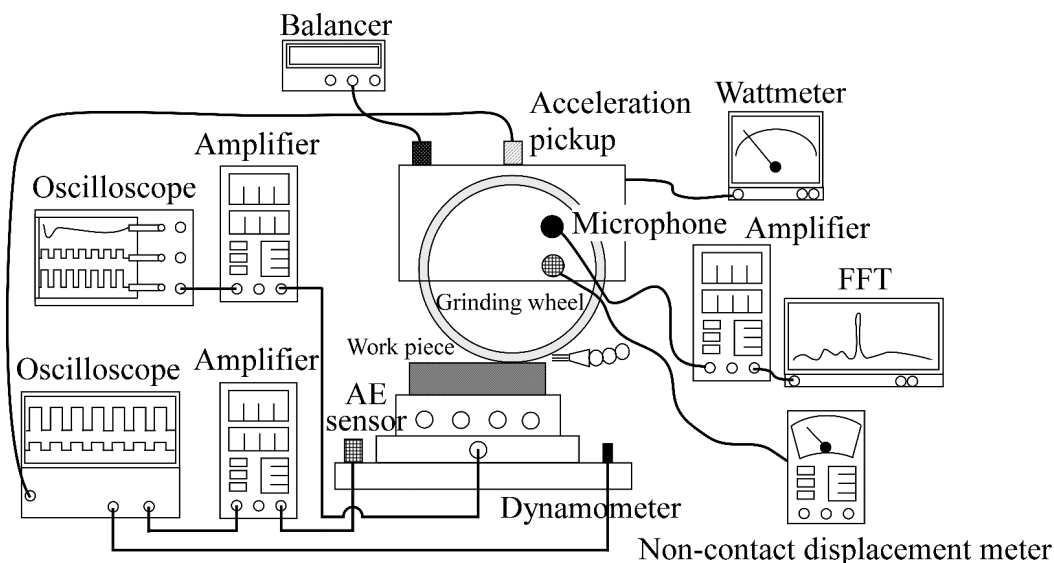
これまでに...

○平面研削盤の主軸頭に加速度ピックアップを取付け, 研削作業中に得られる主軸頭の特定周波数の変化を監視する手法の提案

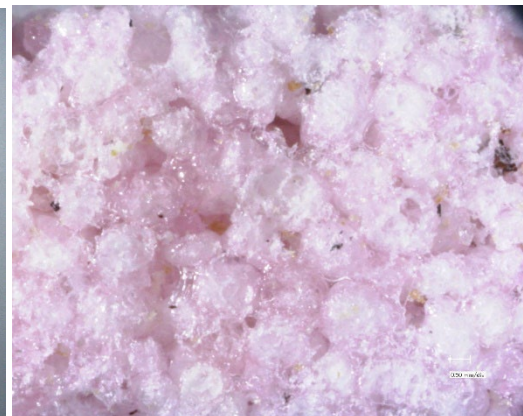
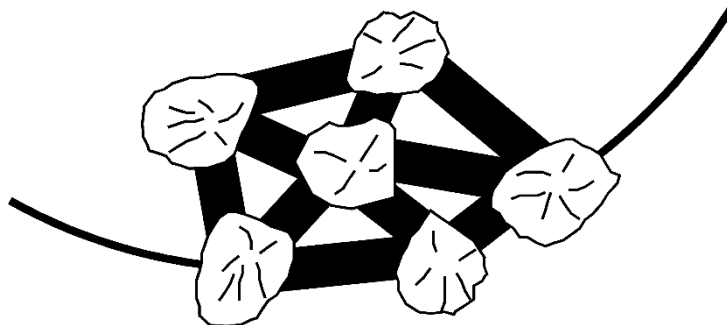
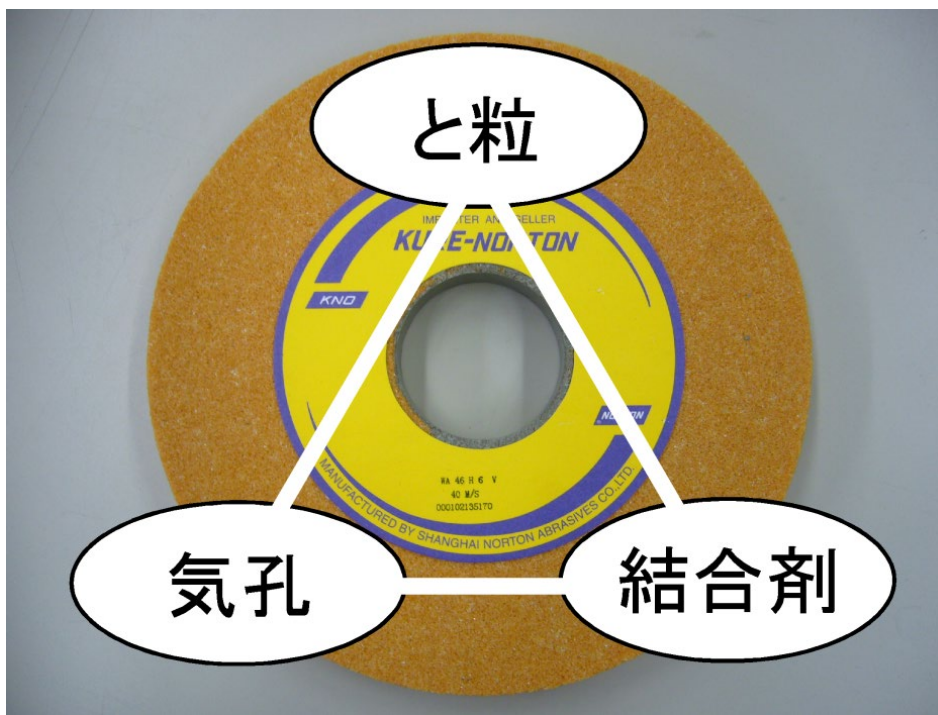
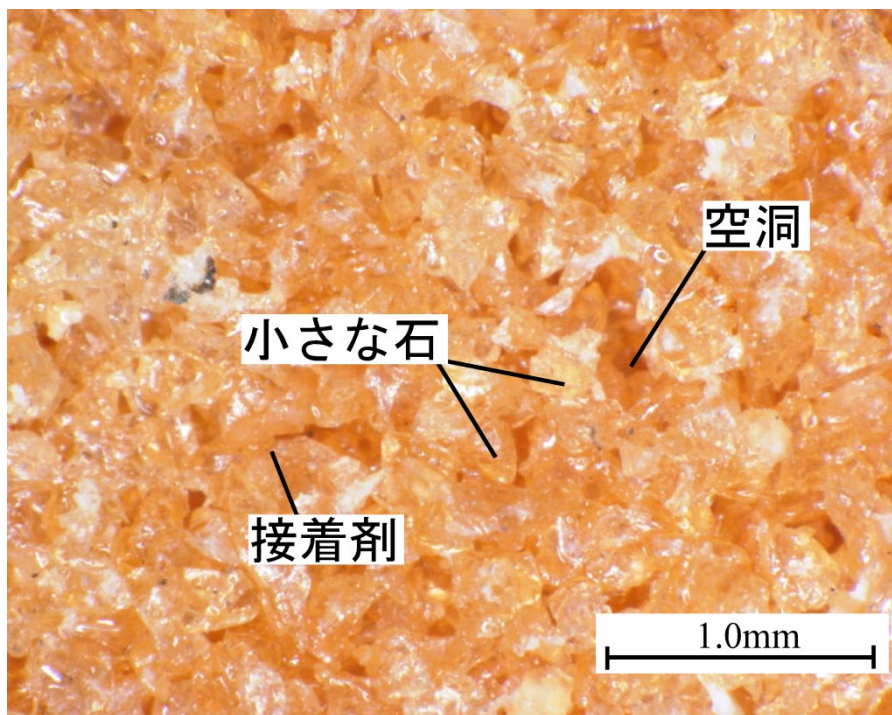
○研削砥石・超砥粒ホールのたわみ振動音観測による認知の提案



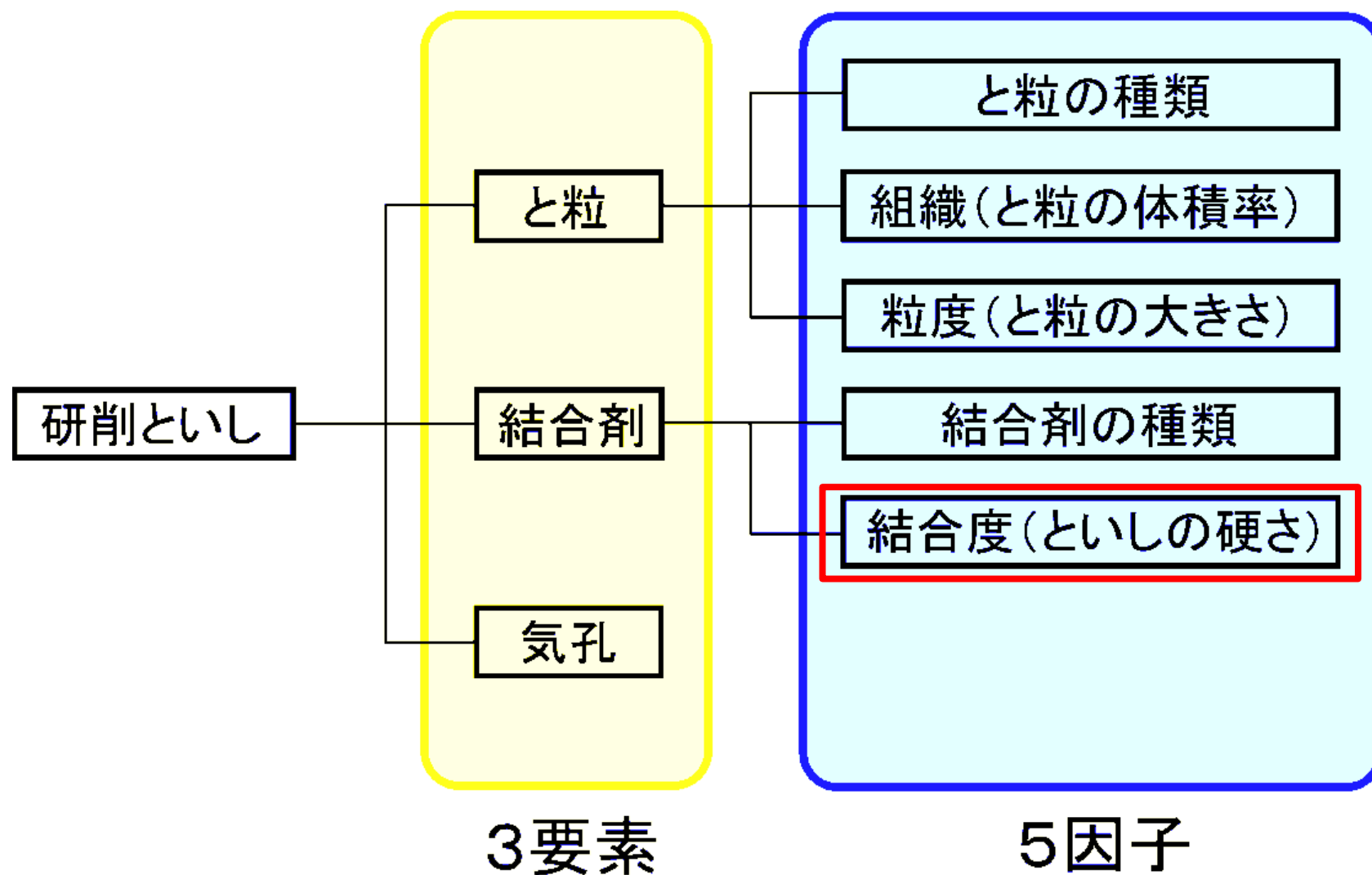
黒田精工 GS-45FLII



# 本研究の立ち位置



# 本研究の立ち位置





# 本研究の立ち位置

## 研削様式と結合度選択

| 研削様式   | 研 削 力 | 結合度が低い場合 | 結合度が高い場合 |
|--------|-------|----------|----------|
| 精密・軽研削 | 小     | 良好       | 目つぶれ形研削  |
| 高能率研削  | 大     | 目こぼれ形研削  | 良好       |
| 重 研 削  | 大     | 目こぼれ形研削  | 良好       |

## 研削方式と結合度選択の目安

| 研削方式 | 接触弧長さ | 結合度が低い場合 | 結合度が中間の場合 | 結合度が高い場合 |
|------|-------|----------|-----------|----------|
| 円筒研削 | 小     | 目こぼれ形研削  | 良好        | 目つぶれ形研削  |
| 平面研削 | 中     | 良好       | 目つぶれ形研削   | 目つぶれ形研削  |
| 内面研削 | 大     | (良好)     | 目つぶれ形研削   | 目つぶれ形研削  |

# 研削砥石の結合度選択の指針

|      |          | 結 合 度 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|------|----------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|
|      |          | 極軟    |   |   |   | 軟 |   |   |   | 中 |   |   |   | 硬   | 極硬  |
|      |          | B     | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P~S | T~Z |
| 平面研削 | 汎用       |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 軟質，粘質材   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 高硬度材     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 薄物研削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 断続研削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 砥石接触面大   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 細溝，角出し   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | クリープフィード |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      |          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
| 円筒研削 | 汎用       |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 軟質，粘質材   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 高硬度材     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 端面切削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 断続研削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 加工物外径大   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 加工物外径小   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      |          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
| その他  | ねじ研削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 自由研削     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |
|      | 切断砥石     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |

# 本研究の立ち位置

表 1 結合度測定法

| 方 法              | 備 考                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 静<br>的<br>方<br>法 | a. ドライバ法<br>b. 機械的ニスビット法<br>c. ボール押し込み法<br>d. 機械的強度測定法<br>e. 引っかき試験法<br>C. Krug など<br>大越・渡辺<br>E.L. Hemingway<br>関口・渡辺など<br>J. Peklenik                                                                                                                                                     |
| 動<br>的<br>方<br>法 | a. 砂吹付法<br>b. 超音波衝撃法<br>c. バイブロテスタ法<br>d. グレドオメータ法<br>e. スクレオフィックス法<br>f. 表面接触摩耗法<br>g. 臨界圧力法<br>h. ドレッシング抵抗法<br>i. 周波数測定法<br>Mackensen. B. Kleinschmidt W. Späth<br>今中<br>W. Späth<br>U.S.P 1830842<br>U.S.P 2024066<br>岡村<br>浅枝<br>L.V. Colwell, 海老原, 塩崎<br>ベイステート社, カーボラン<br>ダム社, サイモンズ社 |

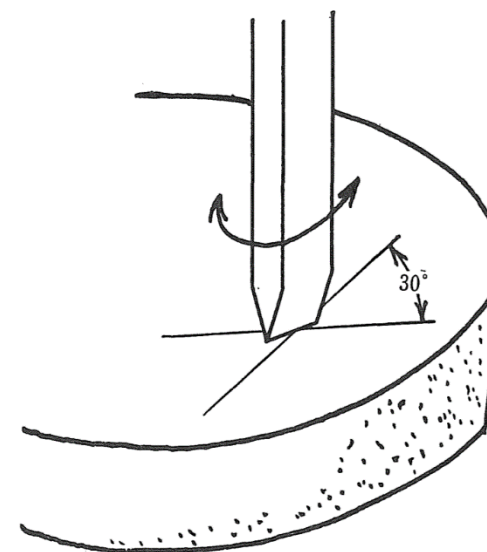


図1 ドライバ法

# 超音波パルス法

538  
研 究

## 研削砥石中の超音波の伝播速度\*

——研削砥石の結合度測定に関する研究（第1報）——

海 野 邦 昭\*\* 篠 崎 襄\*\*

Ultrasonic Velocity in Grinding Wheel

——Study on Grading of Grinding Wheels by Ultrasonic Pulse Method (Part 1)——

Kuniaki UMINO, Noboru SHINOZAKI

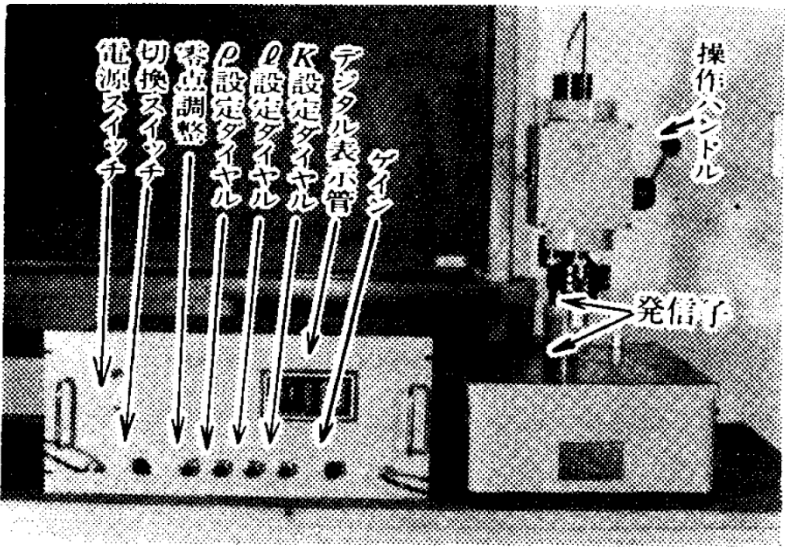


図 2 測定装置の写真

精密機械 36 巻 8 号

### 2.2 超音波パルス透過法<sup>9),10)</sup>

超音波の伝ば速度  $V_l$  は弾性係数と密接な関係を持ち、無限媒体の場合には

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (9)$$

で与えられる。したがって縦弾性係数は

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot V_l^2 \quad (10)$$

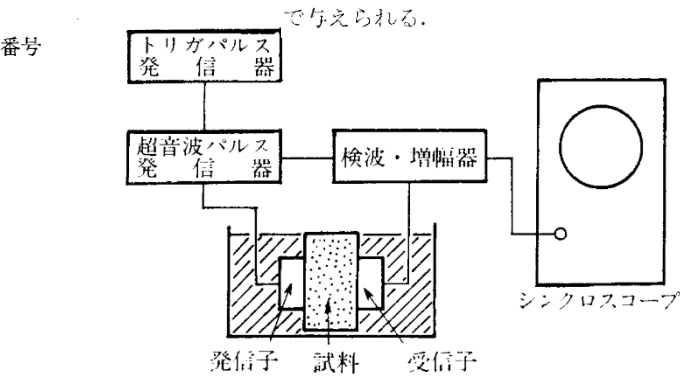
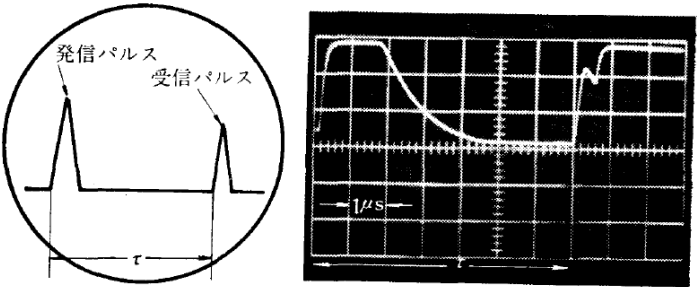


図 3 装置のブロックダイアグラム



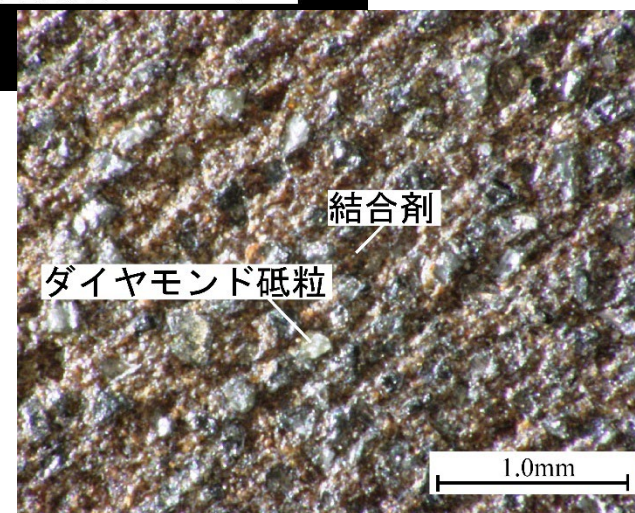
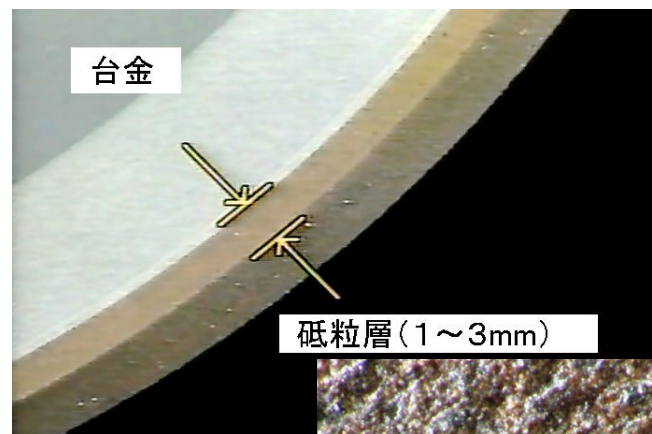
WA, # 46, V,  $V_g=48\%$ ,  $V_b=12\%$

図 4 ブラウン管上の映像



# 普通砥石と超砥粒ホイール

| 研削砥石                                                                              | 超砥粒ホイール                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
| 砥石中心部まで均一組織                                                                       | 台金と砥粒層で構成                                                                          |



工作物材質や加工目的から超砥粒ホイールの選定, ツルueイング・ドレッシング条件および研削条件の設定を適正に行い, その条件で研削加工した際の研削状態をセンシングする。  
加工前から仕上がり具合を予測し, かつ安定的に量産できる研削加工システムを構築できる。  
加工前から終了までトータルでマネジメントできる研削加工技術の実現を目標とする。

# 表面波の伝播速度を利用した砥粒層評価法



精密工学会誌 2021 年 87 巻 4 号 p. 388-392

表面波の伝播速度を用いた超砥粒ホイール砥粒層の  
品質検査と縦弾性係数導出に関する基礎研究\*

澤 武 一\*\*

Fundamental Study on Derivation of Elastic Modulus and Quality Estimate of Abrasive Layer of Super Abrasive Wheel  
Using Surface Wave Propagation Velocity

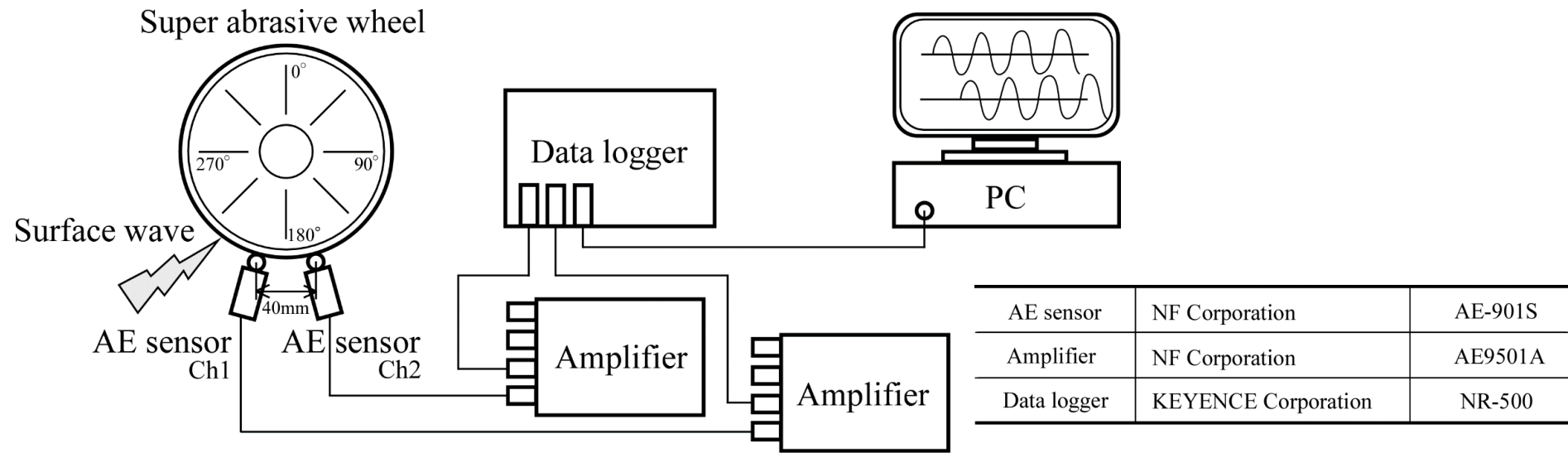


Fig.1 Schematic diagram of measuring equipment

# シャープペンシル芯圧折法

## (3) シャープペンシル芯圧折法

AEセンサを通常の測定状態に取り付け、その近傍でシャープペンシルの芯を圧折する。硬度2H、径0.5mmの芯を長さ3mm出し、約30度の角度で圧折する(このための治具を図2-5に示す)と、そこで開放される応力は1  $\mu$ sの間に5ニュートンになる。これを基準として計測器の感度を調整したり、得られたデータの物理量を推定する。

他の方法に比べて簡便であり、かつ実際の測定状態で検証ができるのが特長であるが、圧折の度に検出波形がばらつく欠点もある。

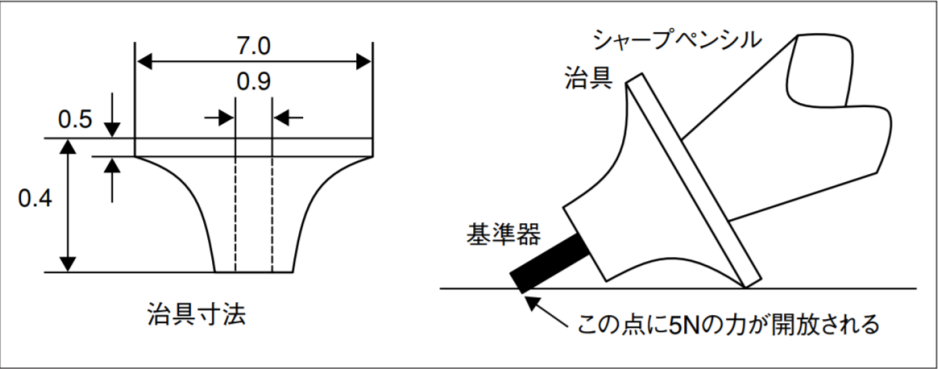


図2-5 シャープペンシル圧折法

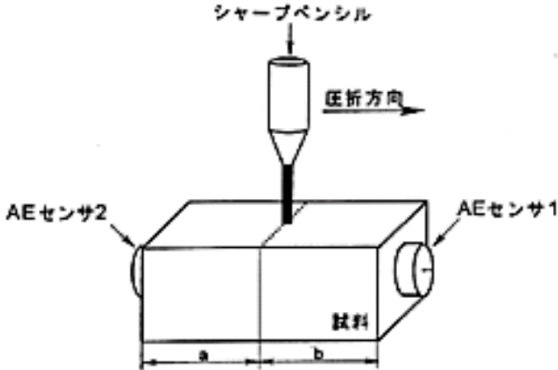


図6 シャープペンシルの芯の圧折試験概略

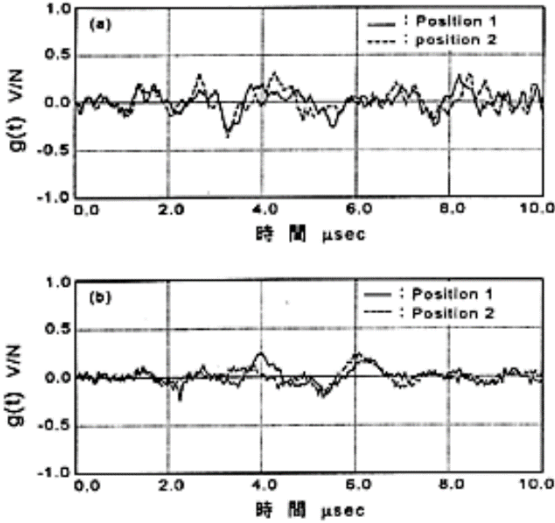
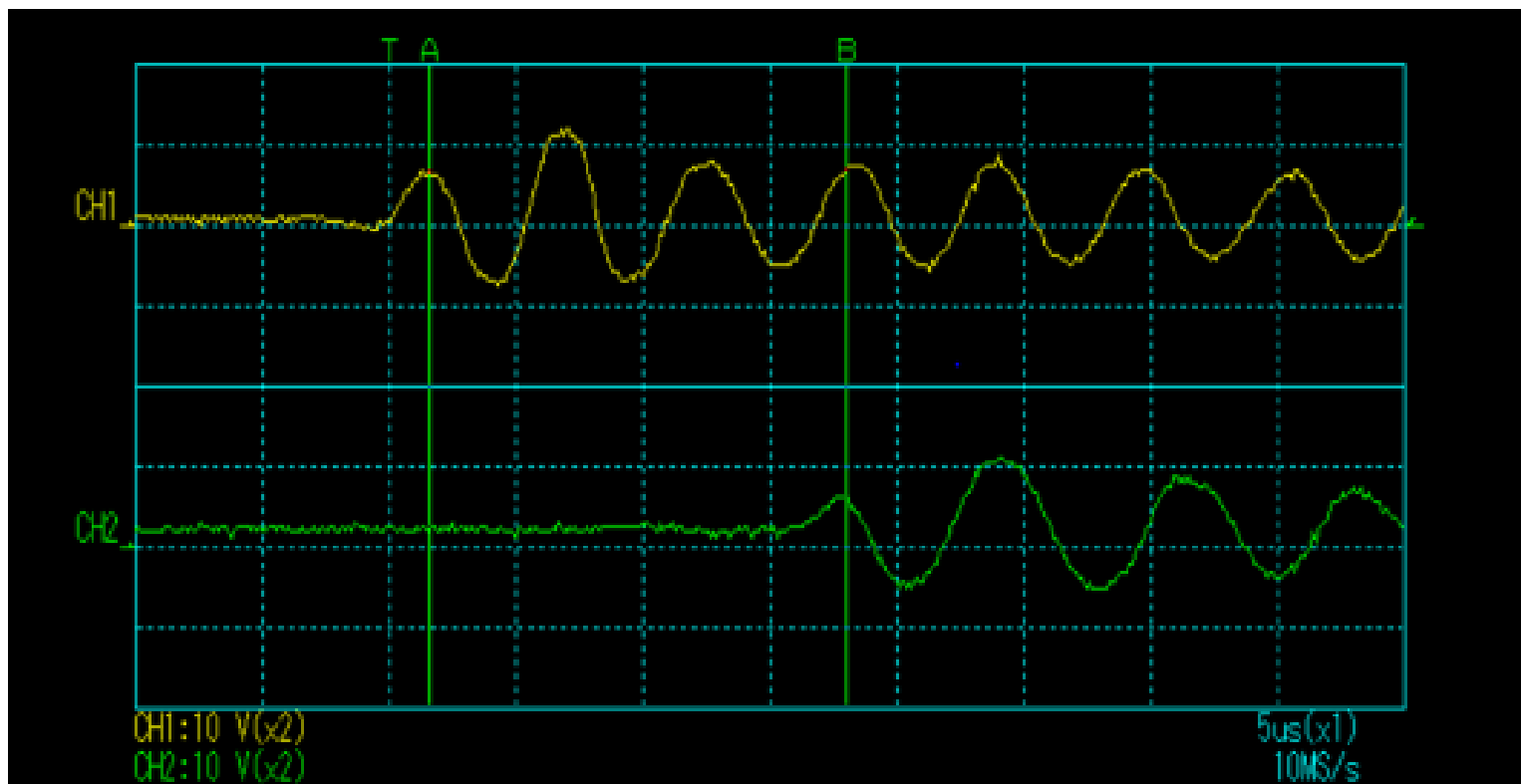


図7 圧折試験から求めた AE センサ 1 の応答関数 (a) と AE センサ 2 の応答関数 (b)

アモルファスカーボン膜の剥離挙動解析と密着性評価, 石川県工業試験場

# 表面波の測定状況



AEセンサ2では, AEセンサ1よりも表面波を観測する時間が遅れる



# 表面波の伝播速度から弾性係数を導出する式

縦波  $V_p = \sqrt{\frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

横波  $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1+v)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

表面波  $4 \sqrt{1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{V_r}{V_p}\right)^2} - \left\{ 2 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2 \right\}^2 = 0$

表面波

(1)  $V_p = \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}} \cdot V_s$  (4)

(2)

(3)

(5)  $\left\{ 2 - \left(\frac{V_r^2}{V_s^2}\right)^2 \right\} - 4 \sqrt{1 - \left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{V_r^2(1-2v)}{2V_s^2(1-v)}} = 0$

$V_p$ : 縦波の伝播速度 (m/s)

$V_s$ : 横波の伝播速度 (m/s)

$V_r$ : 表面波の伝播速度 (m/s)

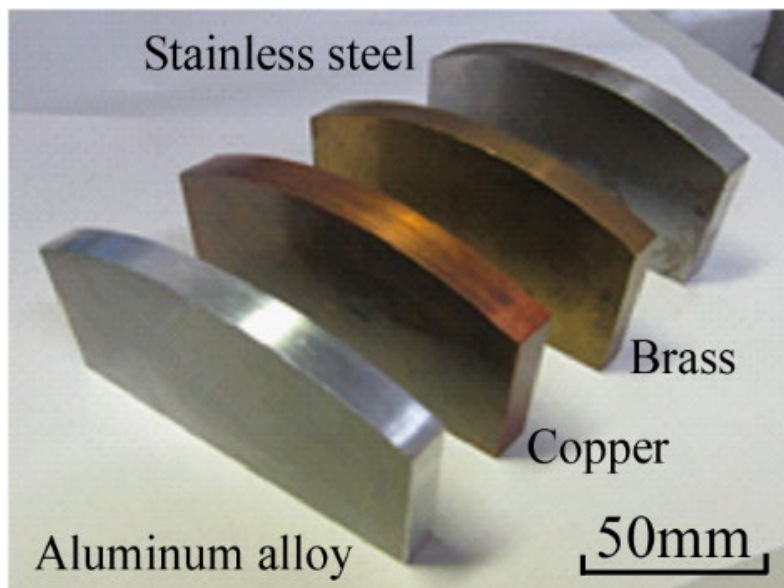
$v$ : ポアソン比

$E$ : 縦弾性係数 (GPa)

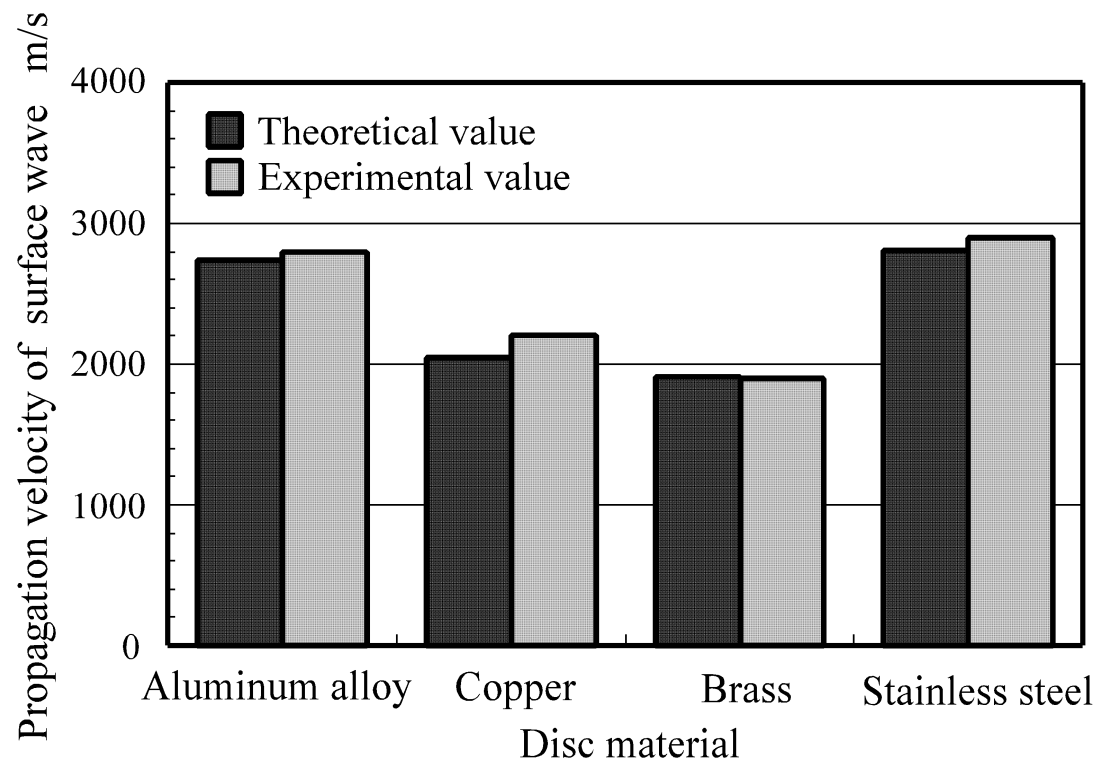
$\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$G$ : せん断弾性係数

# 単一材料による基礎実験



**Fig.3** Disk used in the experiment



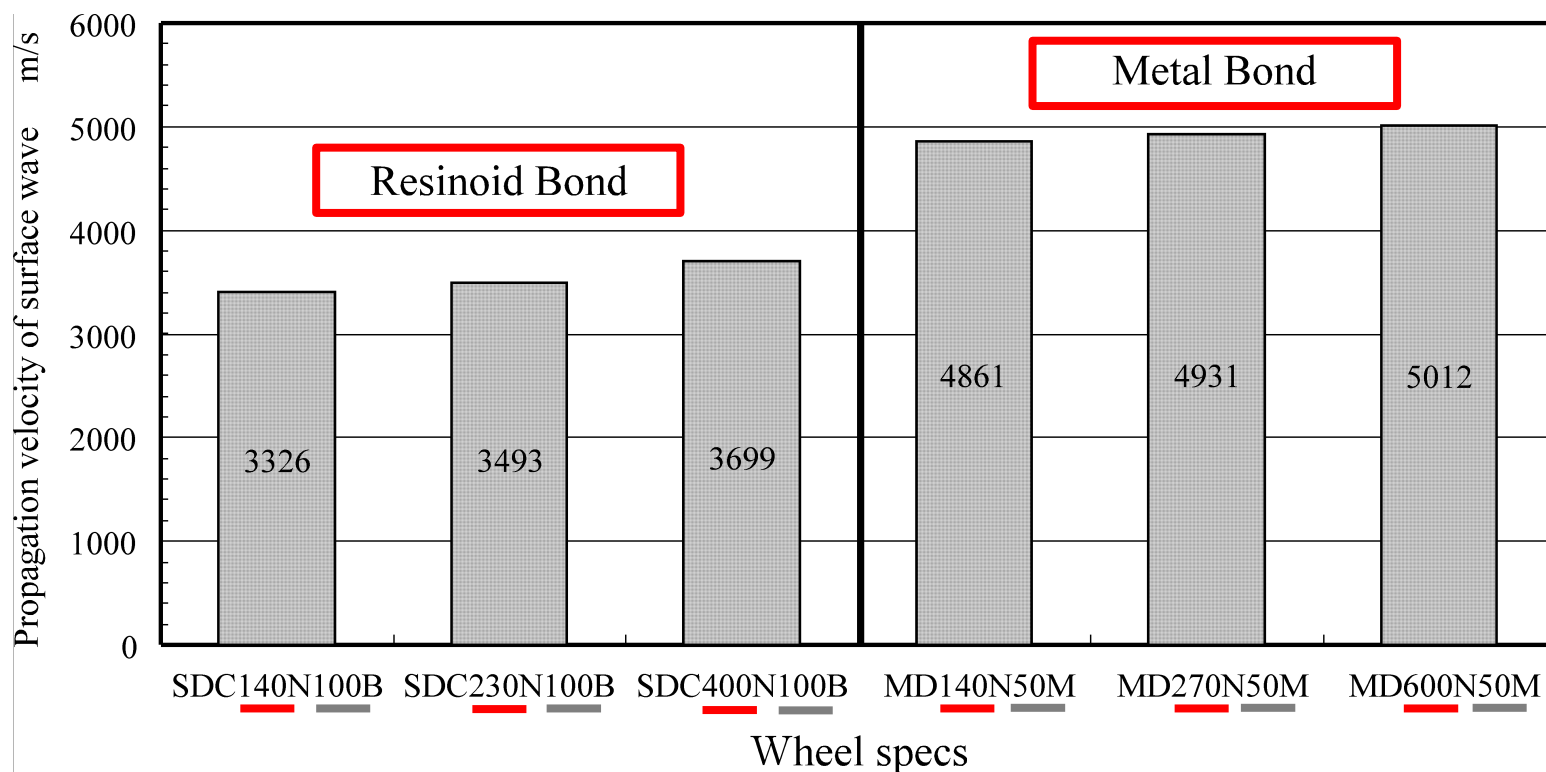
**Fig.4** Surface wave propagation velocity of various disc materials

物性値が既知である単一材料では、表面波の実験値と理論値がほぼ一致することから、本実験装置は表面波を測定できていると判断した

# 各種砥粒層における伝播速度の違い

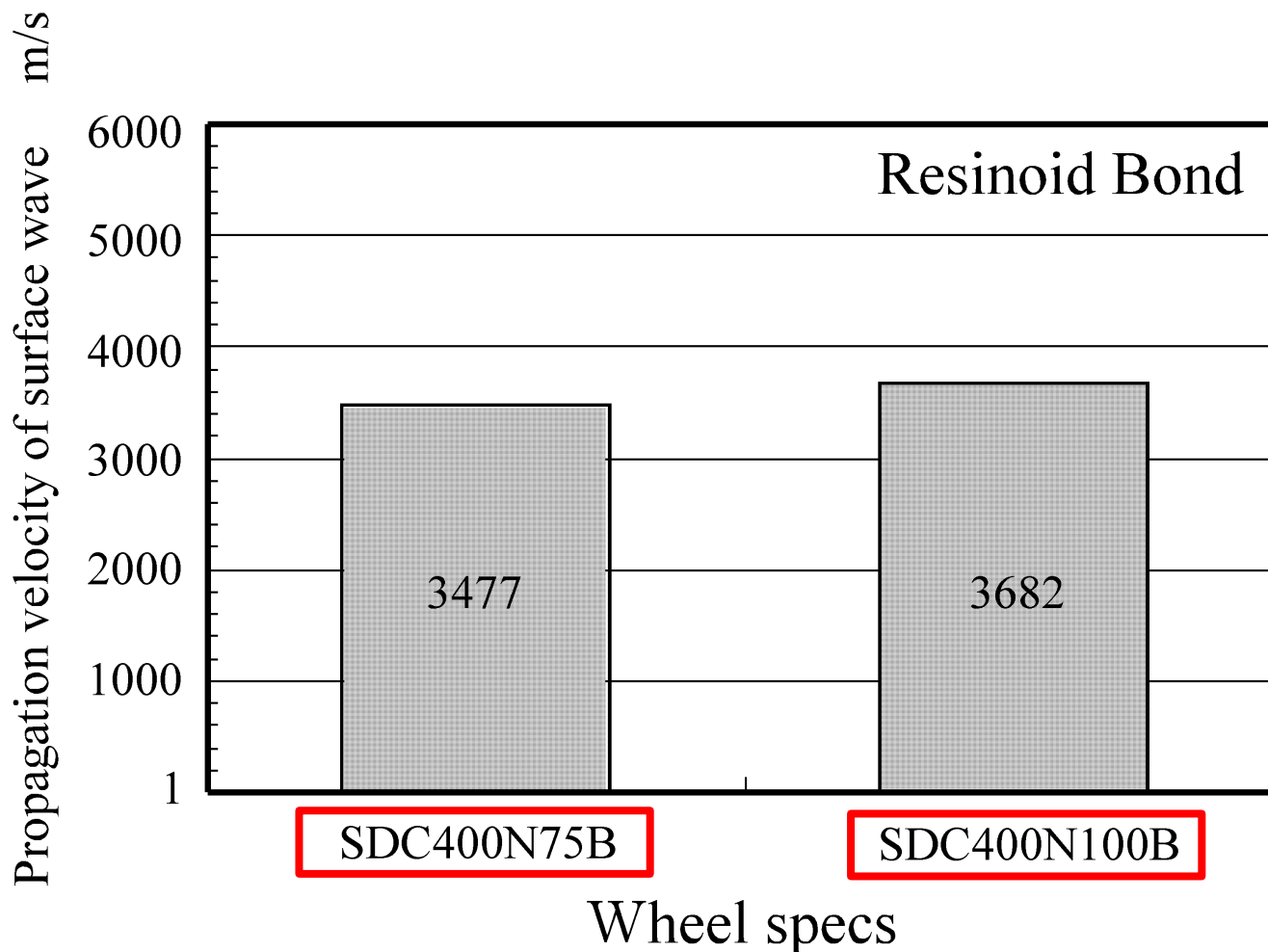
SDC: 低衝撃度ダイヤモンド砥粒を金属被覆したもの

MD: 高衝撃度ダイヤモンド砥粒で金属被覆がないもの



- ・粒度が高くなる(砥粒数が多くなる)と表面波の伝播速度が僅かに速くなる。
  - ・式(1), (2)に示す通り, 弾性波の速度は縦弾性係数が大きくなるほど速くなる。
- レジノイドボンドホイール, メタルボンドホイールともにダイヤモンドと結合剤の密着性を考慮する必要があるが, 砥粒数が多いほど砥粒層の縦弾性係数が高くなるためであると考えられる。

# 各種砥粒層における伝播速度の違い

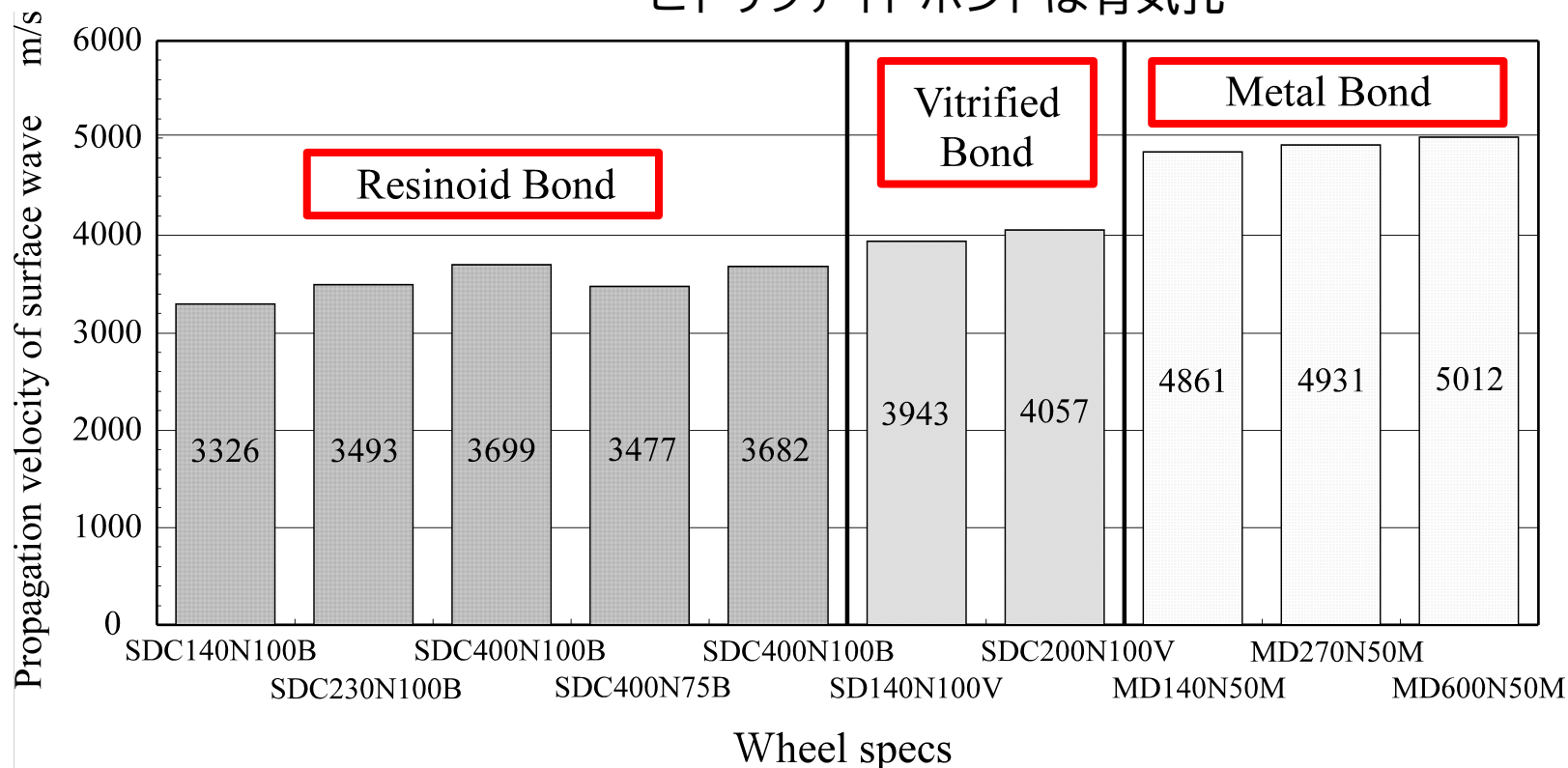


- ・コンセンタレーションが高いほど表面波の伝播速度が速くなる。



# 各種砥粒層における伝播速度の違い

レジノイドボンドホイールとメタルボンドホイールは無気孔  
ビトリファイドボンドは有気孔

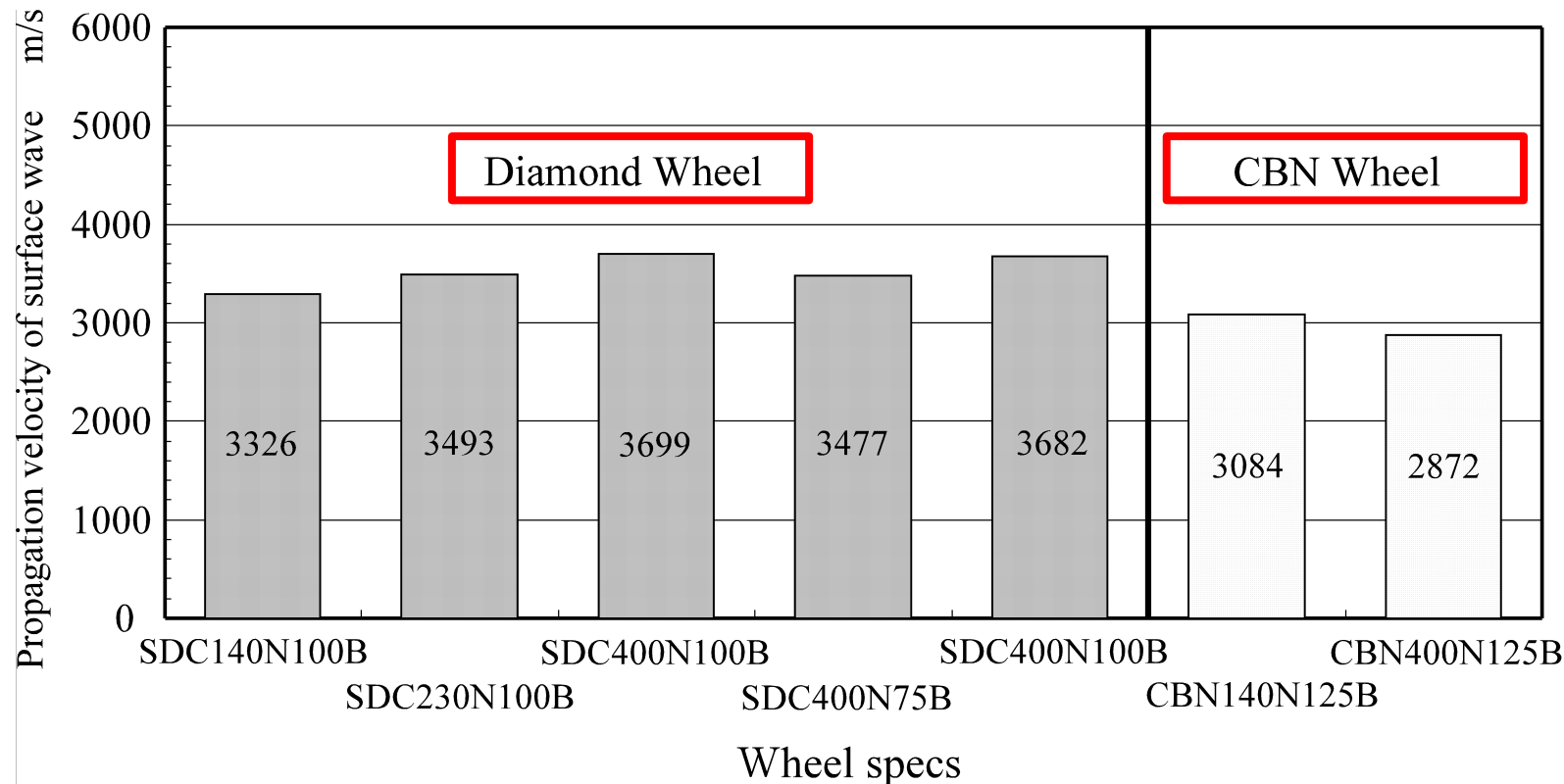


- 細かい仕様の違いによって表面波の伝播速度に違いがあるが、表面波の伝播速度はレジノイドボンドが最も遅く、次いで、ビトリファイドボンドが速くなり、メタルボンドが最も速くなる。この順列は縦弾性係数と相関関係が成立する。
- ビトリファイドボンドホイールは有気孔のため表面波の伝播速度が遅くなると予測したが、レジノイドボンドホイールよりも速くなっているのは伝播速度に対する影響が気孔よりも弾性係数大きいことが起因している？

複製、無断転用を禁ずる。

Copyright © SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, All Rights Reserved.

# 各種砥粒層における伝播速度の違い

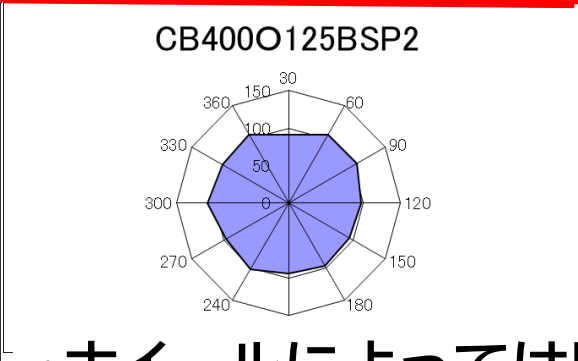
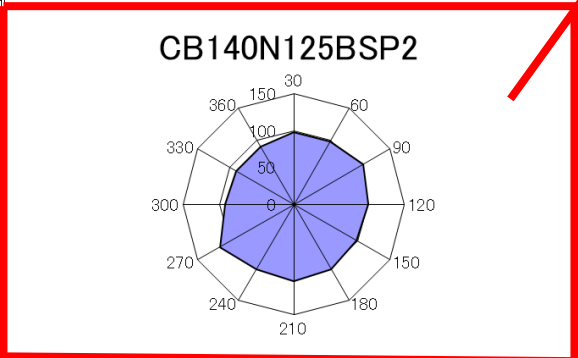
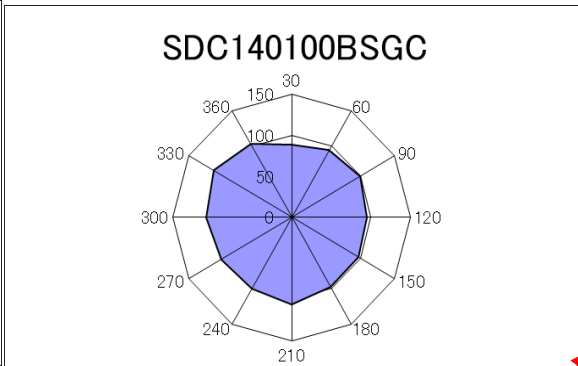
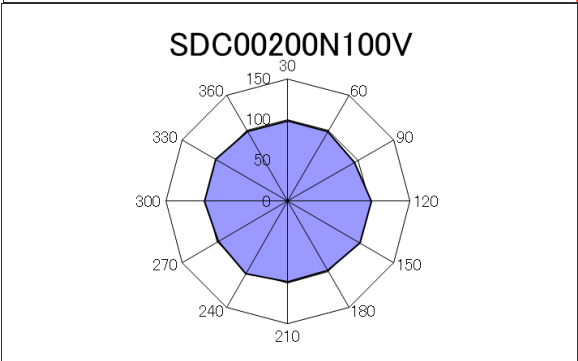
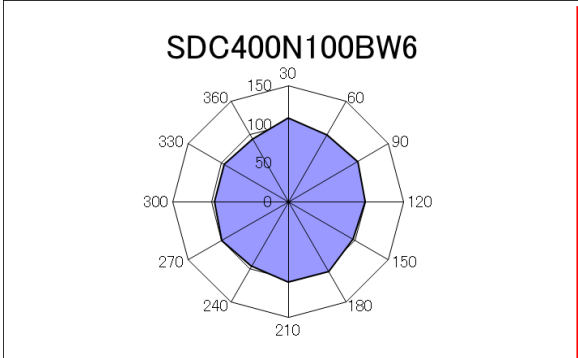
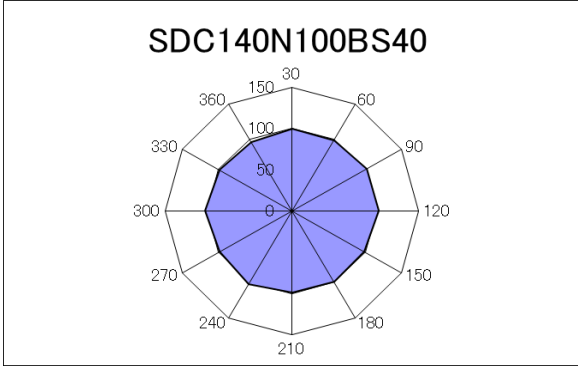


- ・いずれの仕様の砥粒層でもダイヤモンドはCBNよりも表面波の伝播速度が高い。  
ダイヤモンドとCBNの縦弾性係数の違いが影響しているもの？と推察できる。

# 表面波のばらつき(ムラ)の調査

ばらつきが少ない

ばらつきが多い



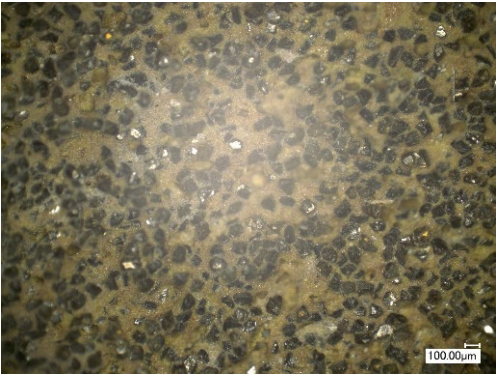
| 距離(mm) | 計測点(°) | 時間(μs) | 速さ(m/s) |
|--------|--------|--------|---------|
| 40     | 30     | 13.2   | 3030.3  |
|        | 60     | 13.2   | 3030.3  |
|        | 90     | 12     | 3333.3  |
|        | 120    | 12.8   | 3125.0  |
|        | 150    | 13.2   | 3030.3  |
|        | 180    | 12.8   | 3125.0  |
|        | 210    | 12.4   | 3225.8  |
|        | 240    | 12.8   | 3125.0  |
|        | 270    | 11.2   | 3571.4  |
|        | 300    | 14     | 2857.1  |
|        | 330    | 14.4   | 2777.8  |
|        | 360    | 14.4   | 2777.8  |

伝播速度が最も速かった点、遅かった点の  
砥粒のばらつきをマイクロスコップで観察する

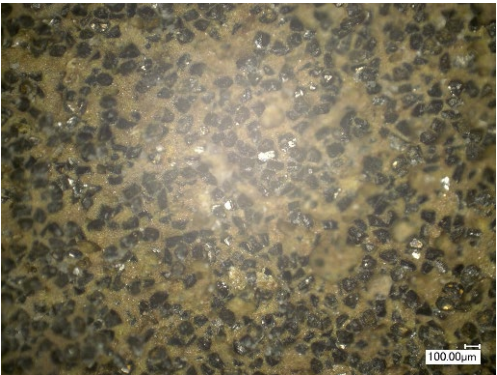
・ホイールによっては円周上の均一性に微小なムラがある？  
品質検査法として使用できないか？

# 砥粒のばらつきの調査

CB140N125BSP2

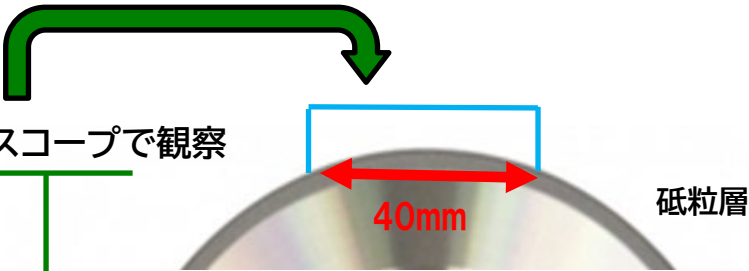


270°の位置



360°の位置

40mmの測定範囲を10等分してマイクログラフで観察



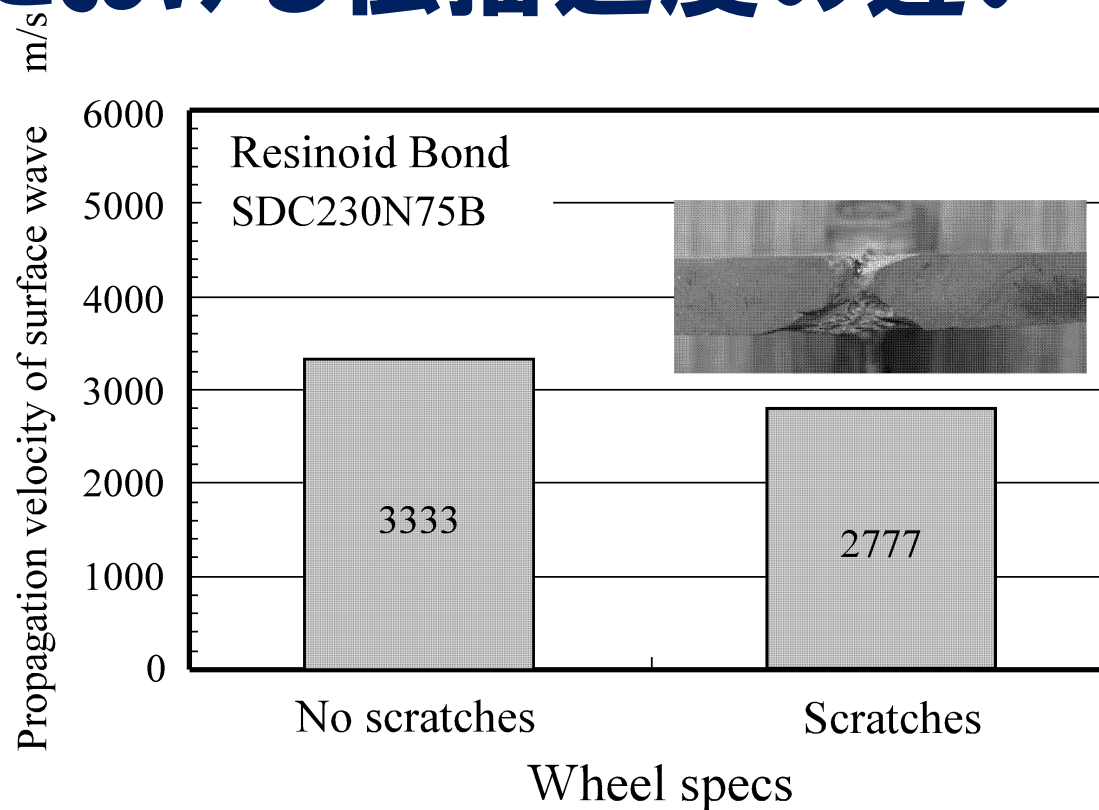
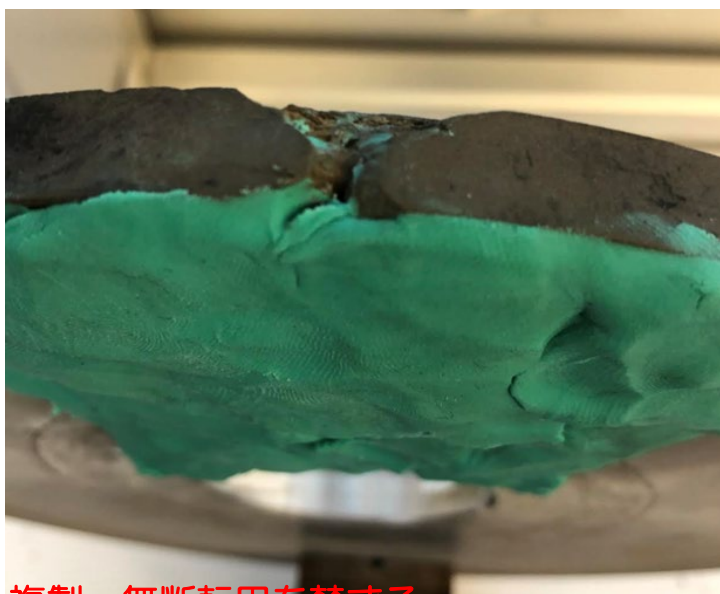
砥粒の数を実際に数えた

|               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CB140N125BSP2 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 270度          | 505 | 513 | 588 | 559 | 549 | 542 | 582 | 550 | 576 | 580 |
| 360度          | 509 | 564 | 539 | 561 | 560 | 551 | 547 | 520 | 539 | 483 |

※目視で違いを見分けることはできなかった...

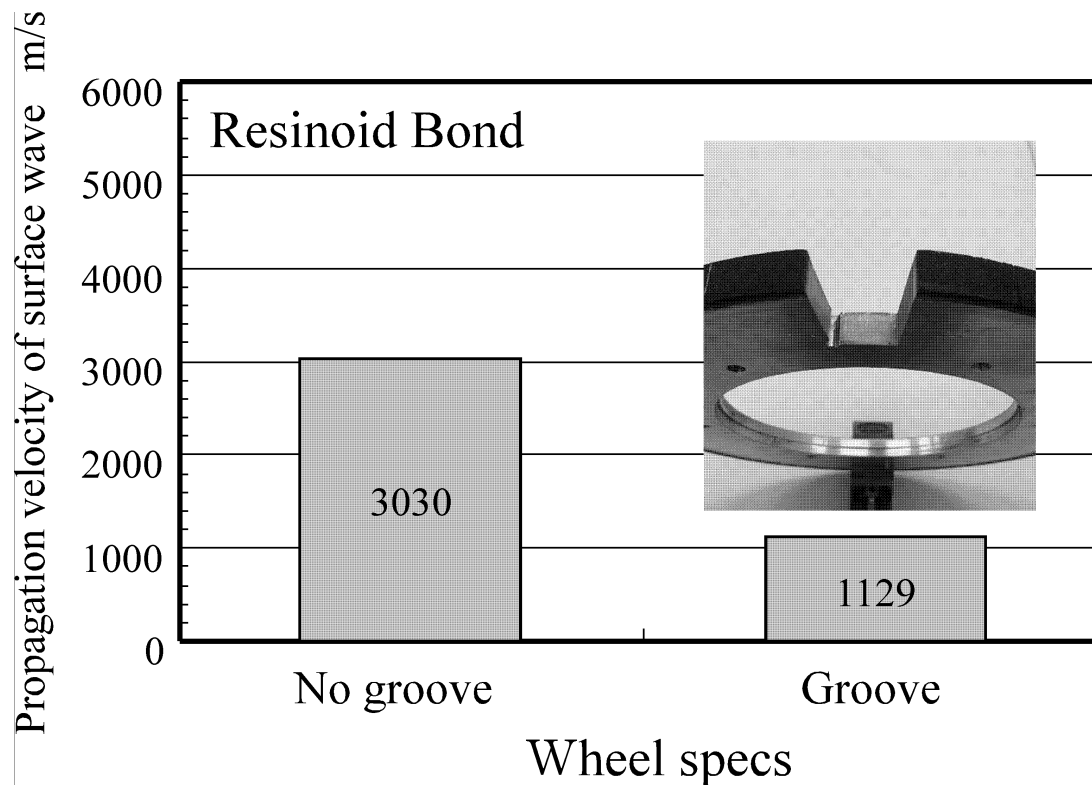
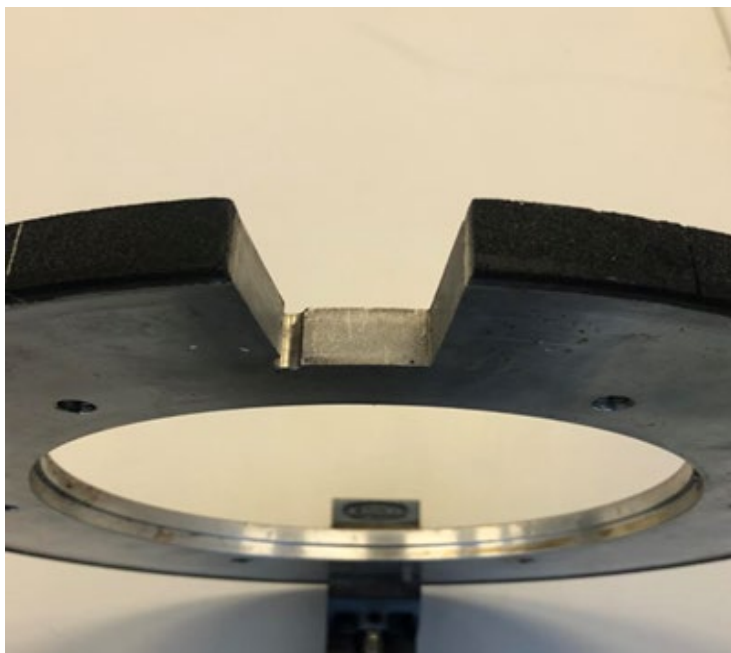


# 傷のある砥粒層における伝播速度の違い



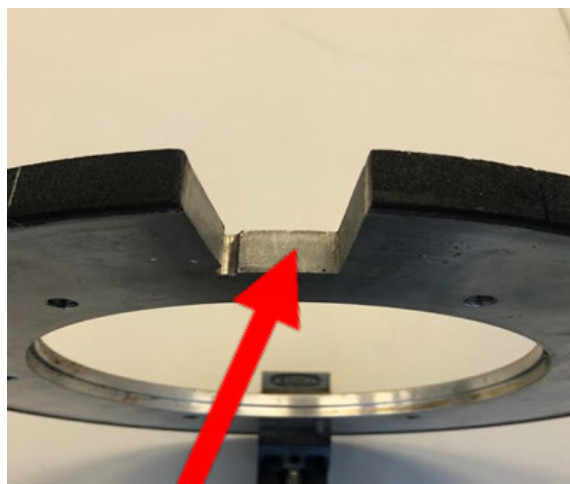
- ・欠陥がある場合はない場合よりも伝播速度が遅い。  
欠陥による表面波の散乱が主因か？

# 溝のある砥粒層における伝播速度の違い

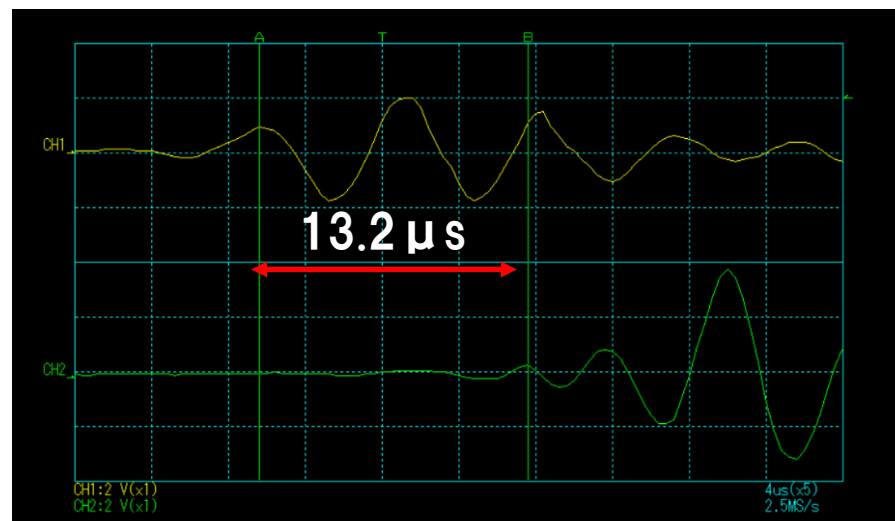


・ワイヤーカットで切断した部分では通常の部分よりも伝播速度が遅い。

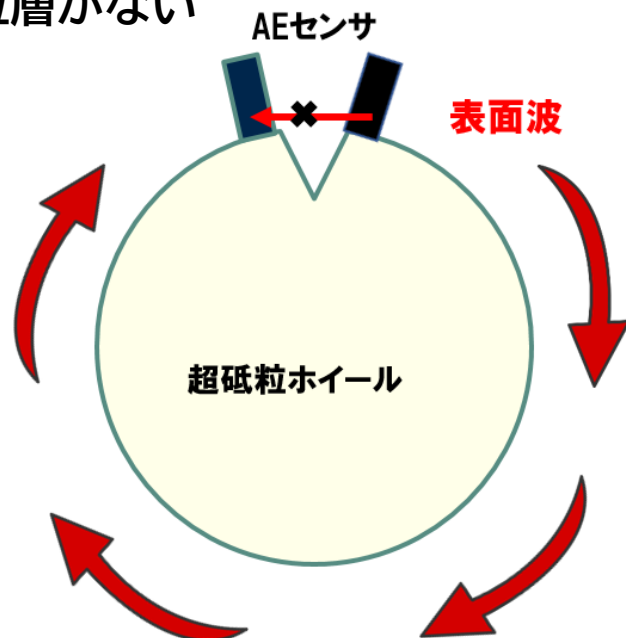
# 溝のある砥粒層における伝播速度の違い



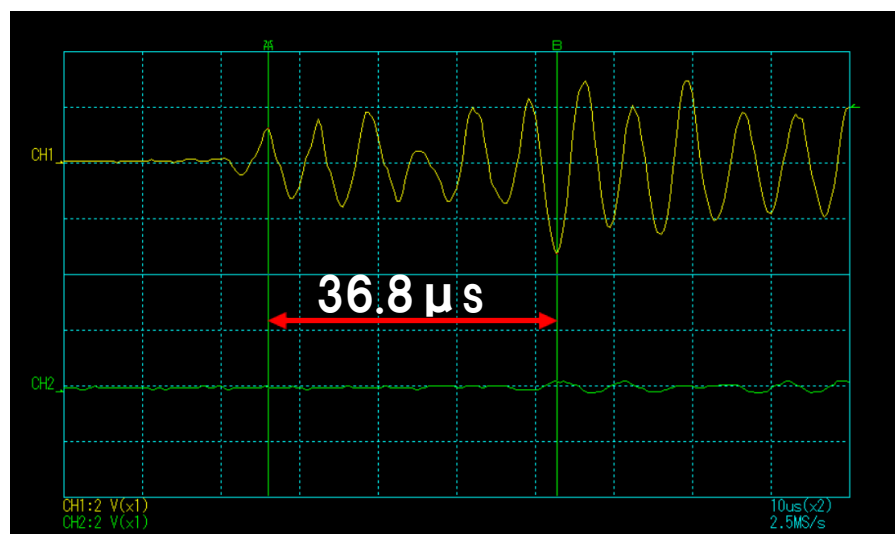
溝なし



砥粒層がない



溝あり



表面波が外側を回って伝わっている？

# 表面波の伝播速度から弾性係数を導出する式

縦波  $V_p = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

横波  $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

表面波  $4\sqrt{1-\left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2} \sqrt{1-\left(\frac{V_r}{V_p}\right)^2} - \left\{2-\left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2\right\}^2 = 0$

表面波

(1)  $V_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \cdot V_s$  (4)

(2)

(3)

(5)  $\left\{2-\left(\frac{V_r^2}{V_s^2}\right)^2\right\} - 4\sqrt{1-\left(\frac{V_r}{V_s}\right)^2} \cdot \sqrt{1-\frac{V_r^2(1-2\nu)}{2V_s^2(1-\nu)}} = 0$

$V_p$ : 縦波の伝播速度 (m/s)

$V_s$ : 横波の伝播速度 (m/s)

$V_r$ : 表面波の伝播速度 (m/s)

$\nu$ : ポアソン比

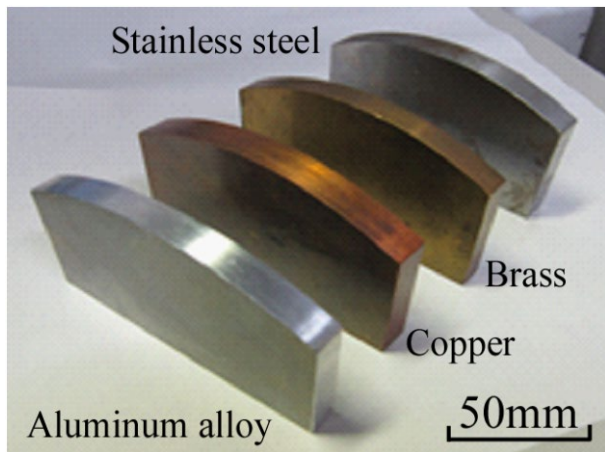
$E$ : 縦弾性係数 (GPa)

$\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$G$ : せん断弾性係数



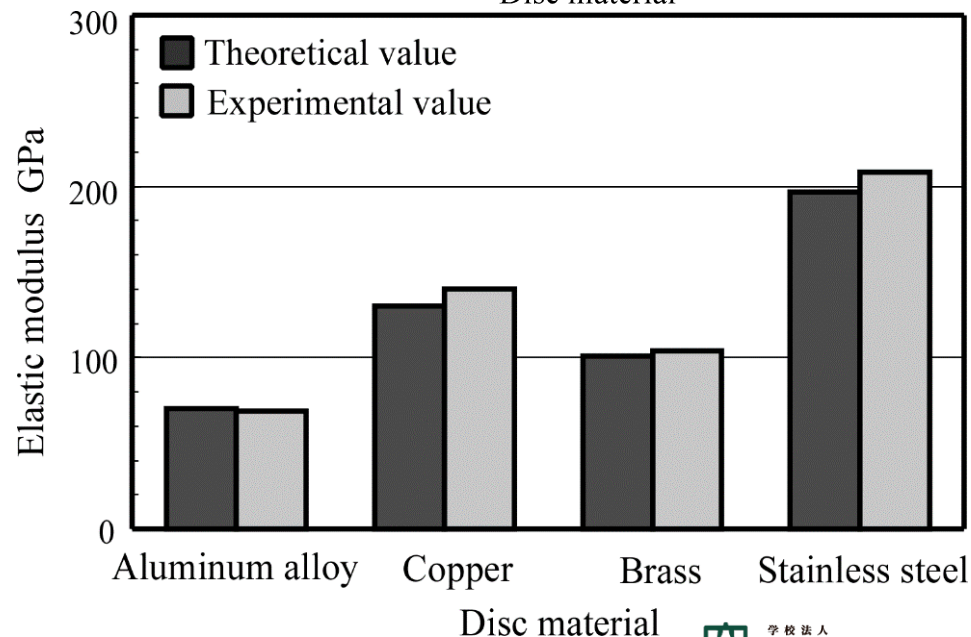
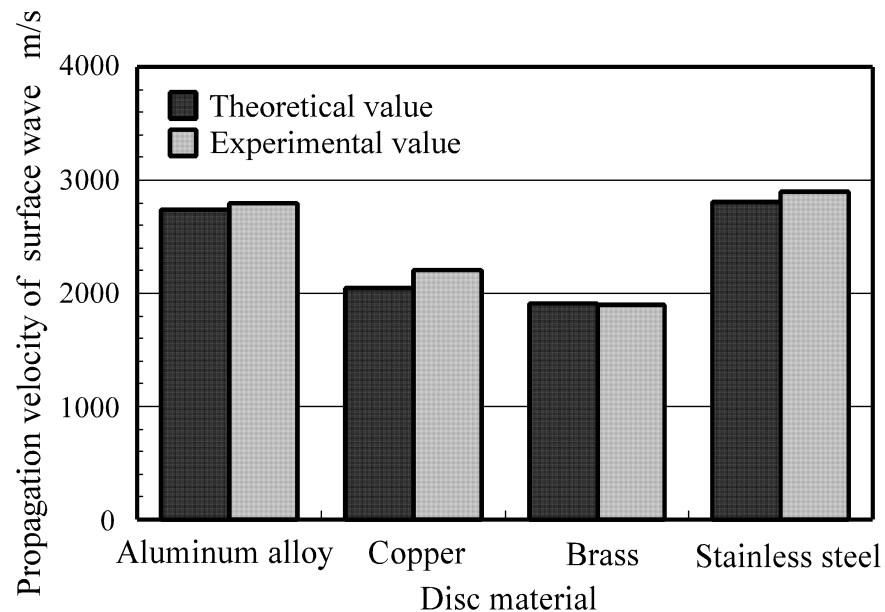
# 砥粒層による弾性係数導出の結果



Disk used in the experiment  
Mechanical properties of various materials

|                 | Poisson's ratio | Density $\text{kg/cm}^3$ |
|-----------------|-----------------|--------------------------|
| Aluminum alloy  | 0.34            | 2.69                     |
| Copper          | 0.34            | 8.96                     |
| Brass           | 0.35            | 8.71                     |
| Stainless steel | 0.3             | 7.93                     |

- 実験値と理論値はよい対応を示すことから、本研究で提案する縦弾性係数の導出方法は妥当であるといえる。



複製、無断転用を禁ずる。

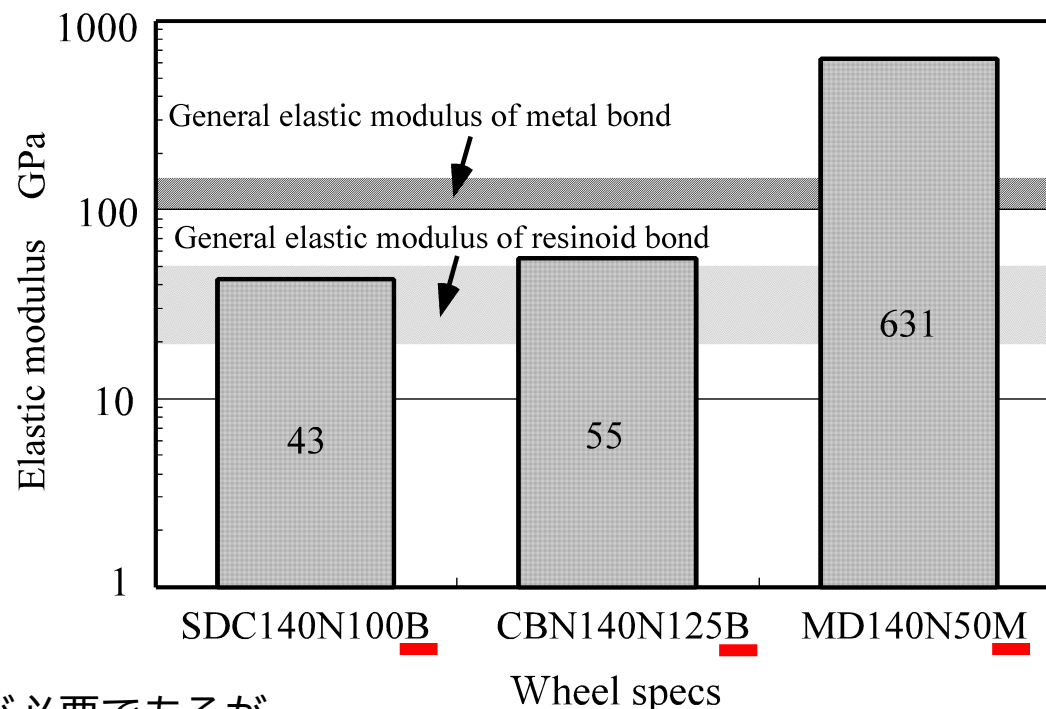
Copyright © SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, All Rights Reserved.



# 砥粒層による弾性係数導出の結果

Mechanical properties of abrasive layer

|             | Poisson's ratio | Density kg/cm <sup>3</sup> |
|-------------|-----------------|----------------------------|
| SDC140N100B | 0.2             | 1.85                       |
| CBN140N125B | 0.2             | 1.98                       |
| MD140N50M   | 0.3             | 8.28                       |



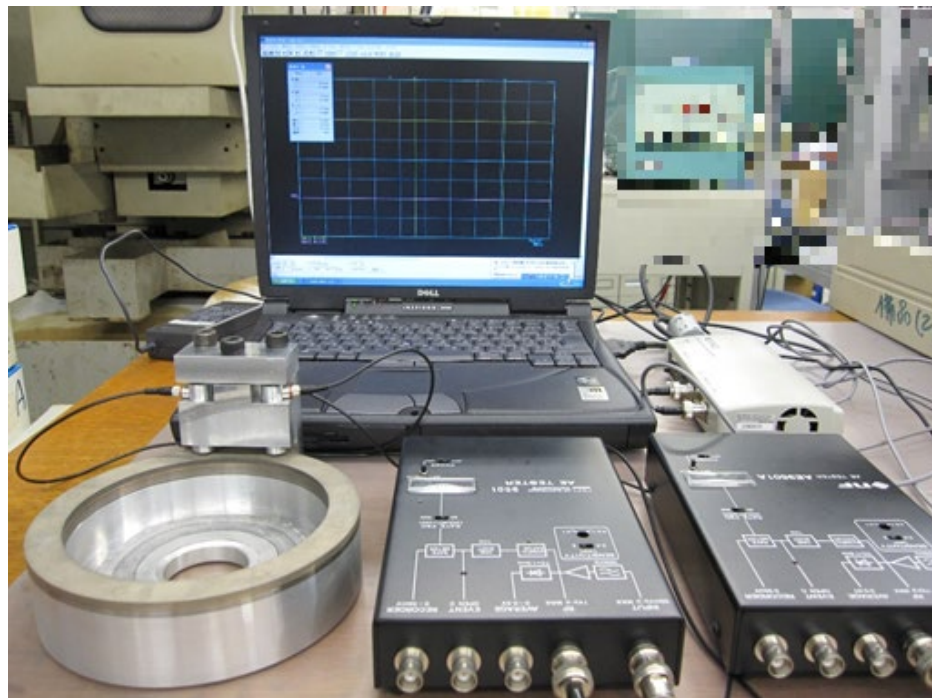
※縦弾性係数の導出には砥粒層のポアソン比と密度が必要であるが、

ポアソン比は便宜上、レジノイド砥粒層は0.2, メタルボンド砥粒層は0.3とした。

※密度は超砥粒はダイヤモンドとCBNの値, 結合剤はレジノイドボンドはベークライトの値, メタルボンドは青銅の値をそれぞれ使用し, 無気孔なので超砥粒と結合剤のコンセントレーション(有率割合)から比例計算して求めた。

- ・表面波から導出した縦弾性係数はダイヤモンド, CBNともにレジノイドボンドホイールでは妥当な値といえるが, メタルボンドホイールでは一般的な値と大きな差異が生じた。  
メタルボンドホイールの砥粒層の密度が適当な値ではなかったか？

# 進捗状況



・カップホイールもジグをつくって測定しはじめています。

※超砥粒ホイールの提供や共同研究などご支援をお願いしたく存じます。

## 想定される用途

- 超砥粒ホイールを使用した精密研削加工において、超砥粒ホイールの砥粒層の弾性係数に基づく適正なツルーイング条件、ドレッシング条件、研削条件の設定ができる
- 超砥粒ホイールを使用した精密研削加工において、研削結果（砥石寿命、加工品質）をある程度予測ができる
- 超砥粒ホイールの砥粒層の品質管理と品質向上に寄与できる

# 実用化に向けた課題

- 砥粒密度と伝播速度の体系的関係性の明確化（実験数）
- 弾性係数を導く際に必要な砥粒層のポアソン比と密度の計算方法に導出



## 企業への期待

- 本装置の試作
- 超砥粒ホイールの試供と研削実験の共同実施

**本技術を利用した製品開発と一緒に推進して  
頂ける企業を広く募集します。**

# 本技術に関する知的財産権

- ・ 発明の名称： 品質検査方法、及びそれに用いられる品質検査装置
- ・ 出願番号 : 特願2020-213730
- ・ 公開番号 : 特開2022-99753
- ・ 出 願 人 : 芝浦工業大学
- ・ 発 明 者 : 澤 武一

# お問い合わせ先

**芝浦工業大学**  
**研究推進室 研究企画課**

**T E L 03-5859-7180**

**F A X 03-5859-7181**

**e-mail sangaku@ow.shibaura-it.ac.jp**