空中超音波を利用した高速非接触検査技術の紹介

日本大学理工学部電気工学科
音環境・超音波エレクトロニクス研究室
大隅　歩

目次

■非破壊検査について

■主な非破壊検査対象物と超音波による検査方法

■利用する固体内の音波の種類

■空中超音波による非接触非破壊検査の概要

■空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■金属薄板への適用事例

非破壊検査について

■非破壊検査　Nondestructive inspection　JIS Z 2300 (0125)

【非破壊検査】とは，非破壊試験(Nondestructive testing：NDT）の結果から規格などによる基準に沿って合否を判定する方法を指す.

【非破壊試験】は，素材や製品を破壊せずに、きずの有無・その存在位置・大きさ・形状・分布状態などを調べる試験。材質試験などに適用されることもある。

放射線透過試験，超音波探傷試験，磁粉探傷試験，浸透探傷試験，渦流探傷試験，

などがある。

一般社団法人非破壊検査協会，http://www.jsndi.jp/aboutus/aboutus02.html, 2022.10.18

主な非破壊適用物と検査方法

■主な非破壊検査適用物

原子力発電所・プラント・鉄道・航空機・橋梁・ビル・地中埋設物等

■材料・素材

金属・コンクリート・樹脂・ＣＦＲＰ（複合材料）

■主な非破壊検査方法

目視検査，放射線透過検査，**超音波探傷検査**，磁気探傷検査，浸透探傷検査，渦流探傷検査，ひずみ測定，漏れ試験，アコースティックエミッション(AE)，赤外線検査法等

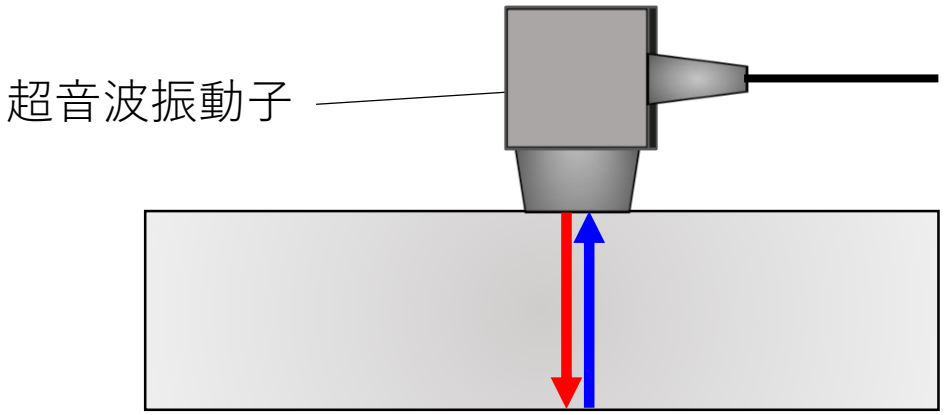
超音波探傷検査のパルスエコー法について

一般社団法人非破壊検査協会，http://www.jsndi.jp/aboutus/aboutus02.html, 2021.8.21

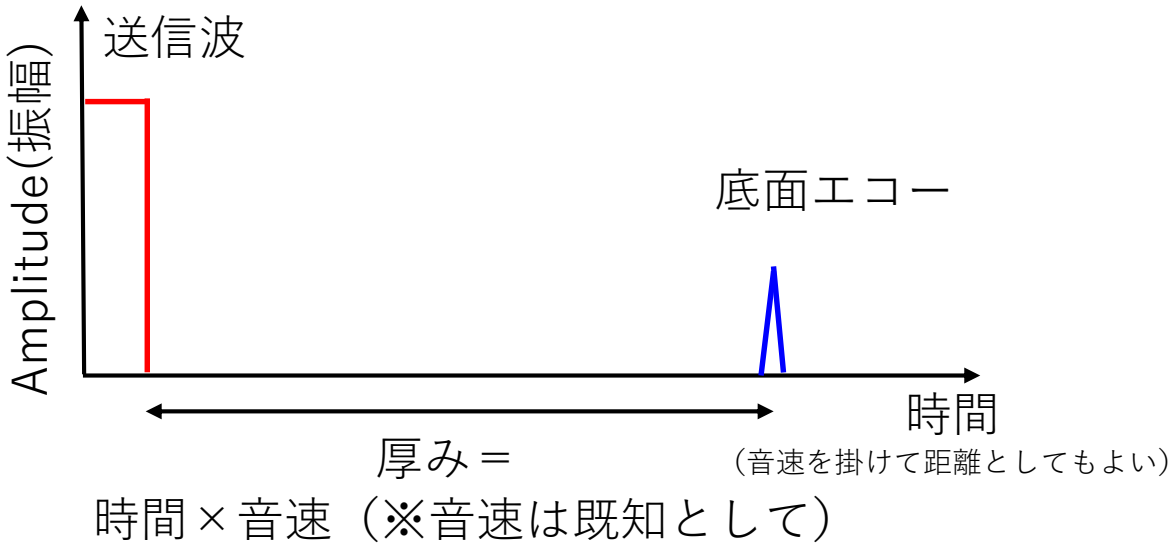
新版非波形検査工学，石井勇五郎, 1993

主な非破壊適用物と検査方法

■超音波探傷検査のパルスエコー法



➢Aモード(Amplitude mode)

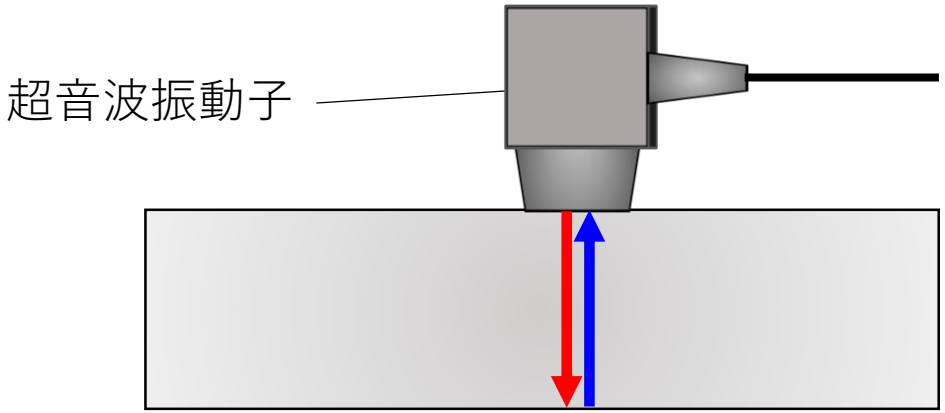


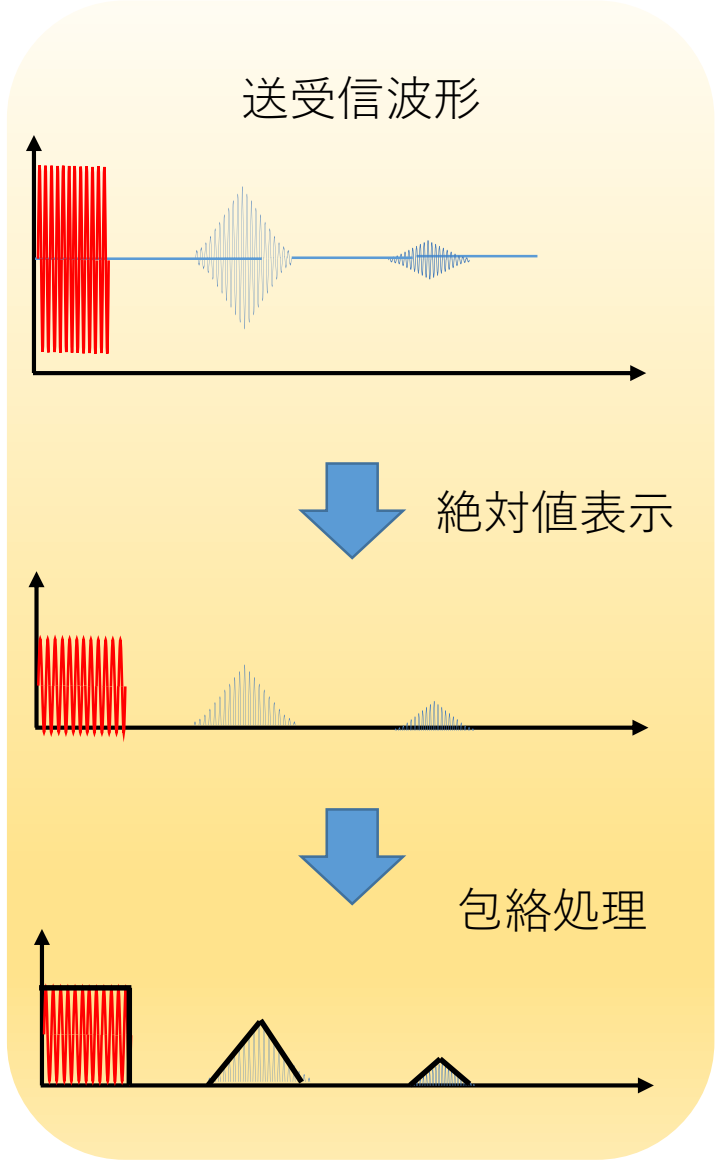
■パルスエコー法

エコーのタイミングから厚みを計測

主な非破壊適用物と検査方法

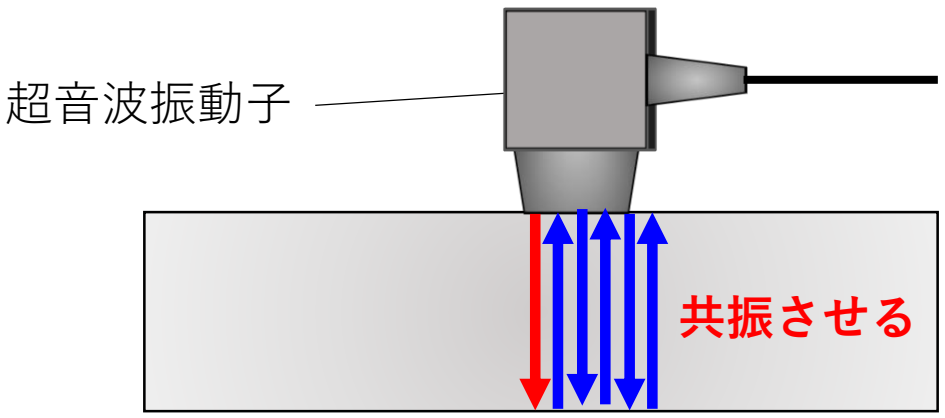
■Aモード(Amplitude mode)とは

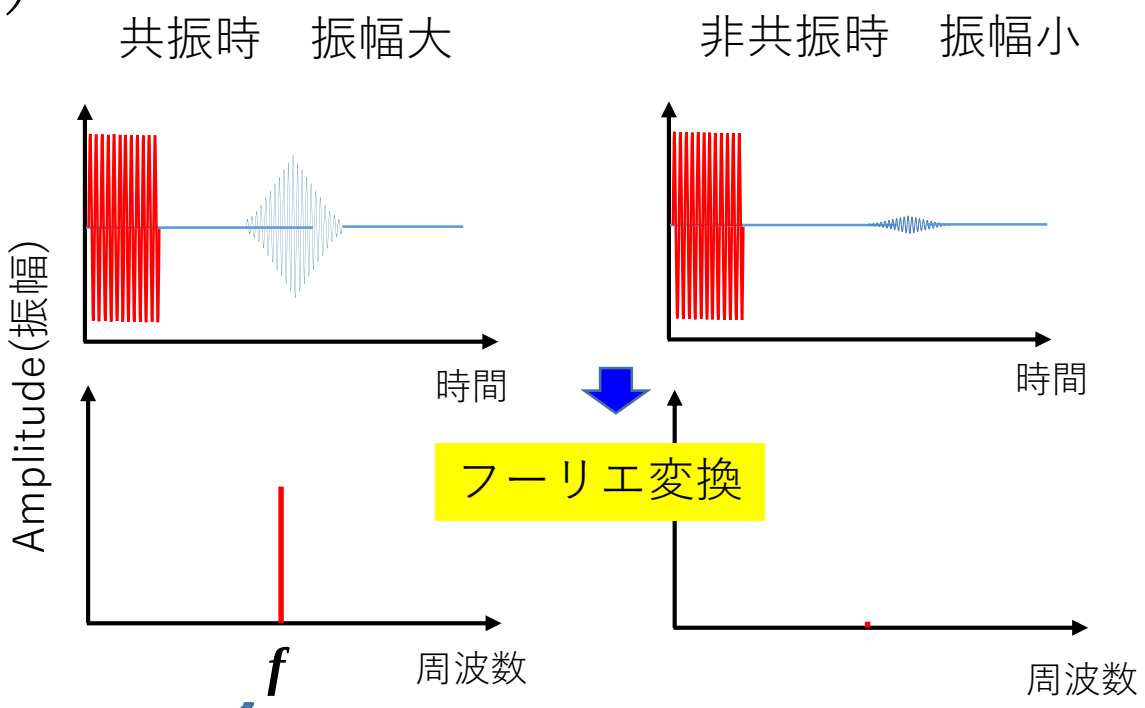




主な非破壊適用物と検査方法

■共振法（パルスエコー以外の方法として）





$$t = \frac{v}{2f}$$

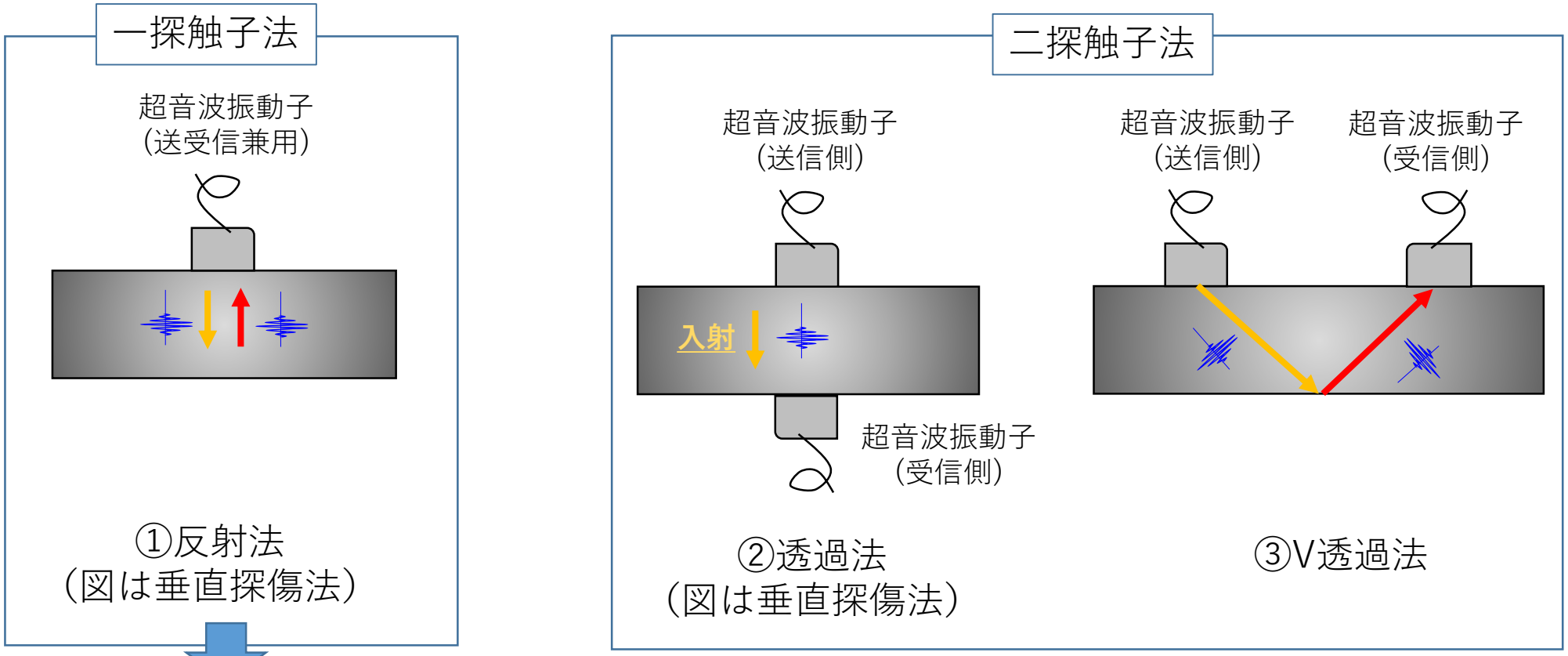
t : 厚み，v :音速，f : 共振周波数

送信波の周波数をスイープ(チャープ波)して，共振によって振幅が増幅された周波数（共振周波数）を見つけ，音速との関係から厚みを計算

主な非破壊適用物と検査方法

■主な超音波探傷のパルスエコー法

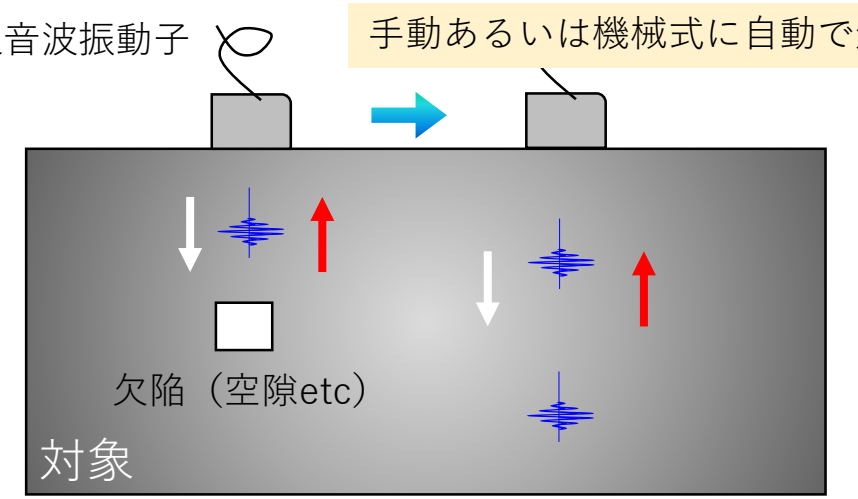
非破壊検査の場合，パルスエコー法を利用した３つの主な方法がある．



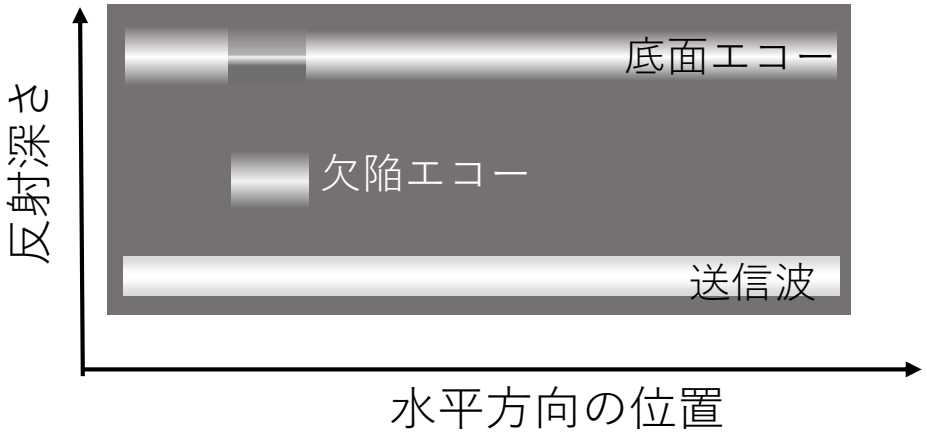
斜角探傷法・表面波探傷法・板波探傷法などもある（表面波や板波をガイド波という）

※反射法・透過法のほかに、共振法がある．主に厚みの推定に利用される．

主な非破壊適用物と検査方法

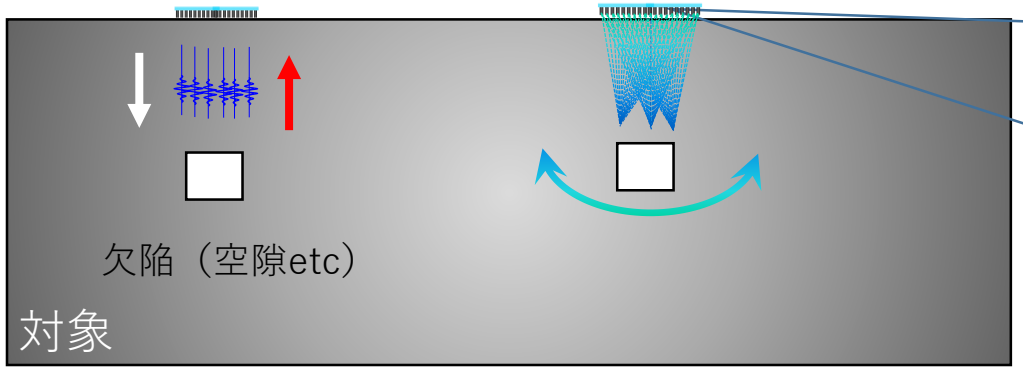


➢Bモード断層像

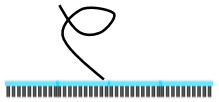


走査しながら行うのは、効率が悪いので【Phased array】を利用するのが一般的

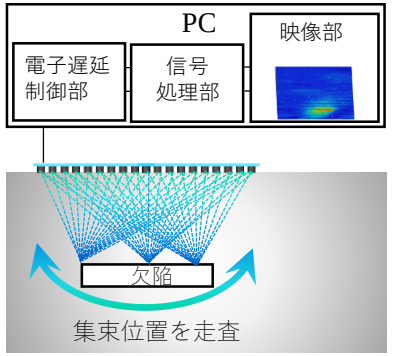
①平面的に音波を照射　②音波を任意の位置に集束させて照射



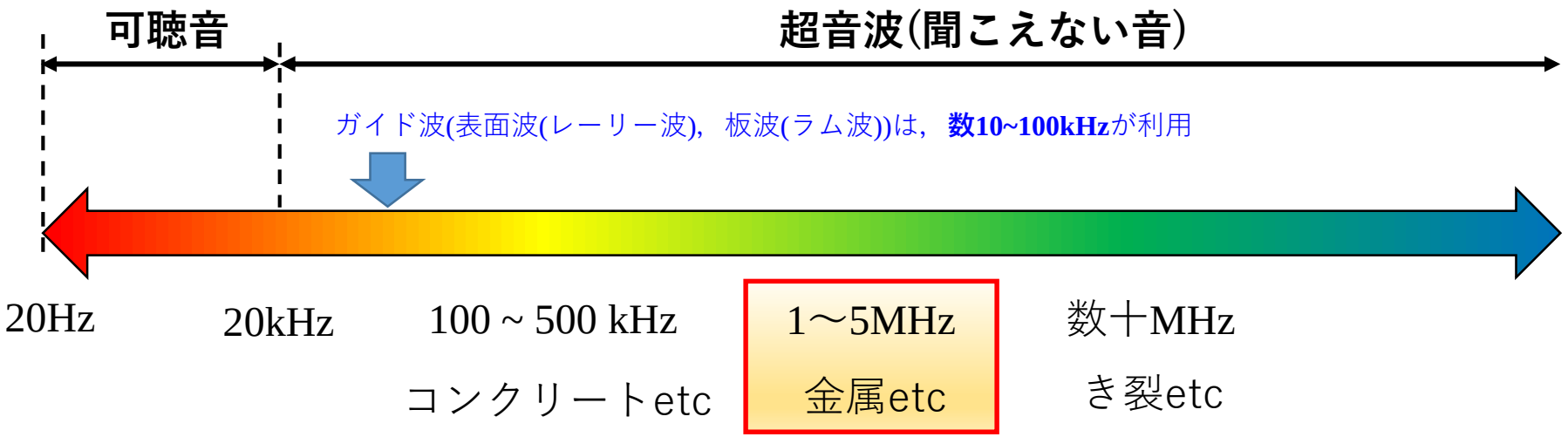
フェイズドアレイ



小さな超音波振動子を16~128素子配列して，各々電気的に別々に駆動する．遅延信号などを用いれば，任意の位置に音を集束させることもできる．



主な非破壊適用物と検査方法



標準的な非破壊検査用超音波振動子の周波数

一般的に，波長の1/5程度の大きさの欠陥まで検出できるとされる．

例として，縦波音速が6000m/sのアルミの中の0.2mmの欠陥を検出するには・・・?

0.2mmを検出限界である1/5波長とすると，波長はその5倍の1mm程度の周波数である必要がある．したがって、音速が6300m/sなら，周波数は以下となる．

$$\frac{\text{音速}}{\text{波長}} = \text{周波数} = \frac{6300m/s}{1.0mm} = 6.3MHz$$

利用する固体内の音波の種類

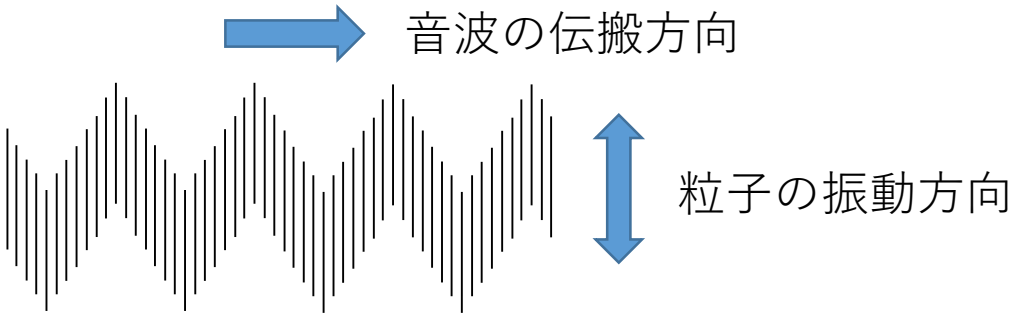
■バルク波(縦波[L波・P波]・横波[T波・S波])

主に，内部の欠陥・き裂検出に利用

■媒質粒子の振動方向と振動の伝搬方向が一致しており，このような音波を縦波という。
(地震学ではPrimary wave：P波，縦波そのものはlongitudinal wave:L波ともいう)

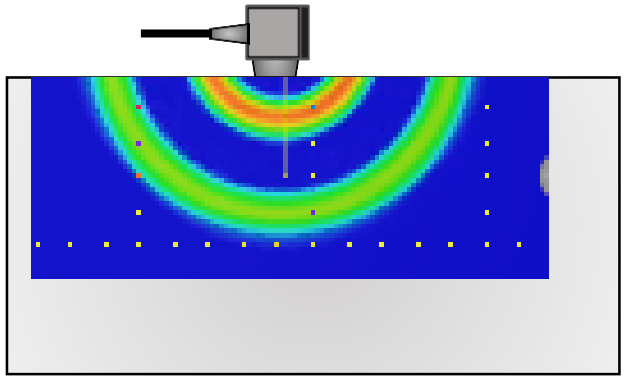
空気は縦波のみ

■粒子の振動方向と振動の伝搬方向が直角の関係となる音波を横波という。横波は固体媒質の場合のみ発生する。
(横波はShear wave:S波 ,Transverse wave:T波，地震学ではSecondary wave：S波ともいう，振動方向によってSH波，SV波にわかれる)※H:Horizontal，V:Vertical



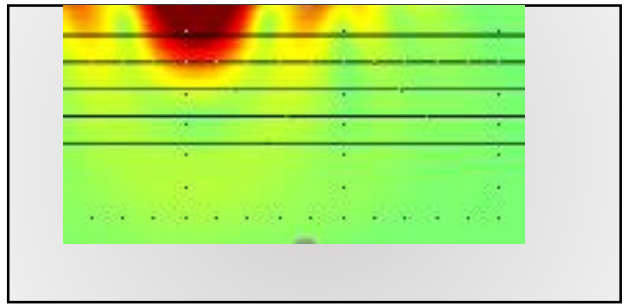
利用する固体内の音波の種類

■バルク波(縦波・横波)



・内部の欠陥・き裂検出に利用

■ガイド波(レーリー波・ラム波，etc)・・・縦波と横波が境界条件によって合成



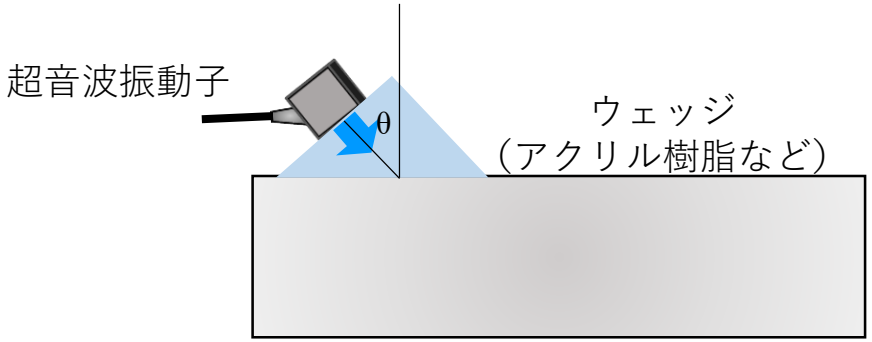
・レーリー波は，波長程度の深さの表層を伝搬するので表層の欠陥検出に優れる.

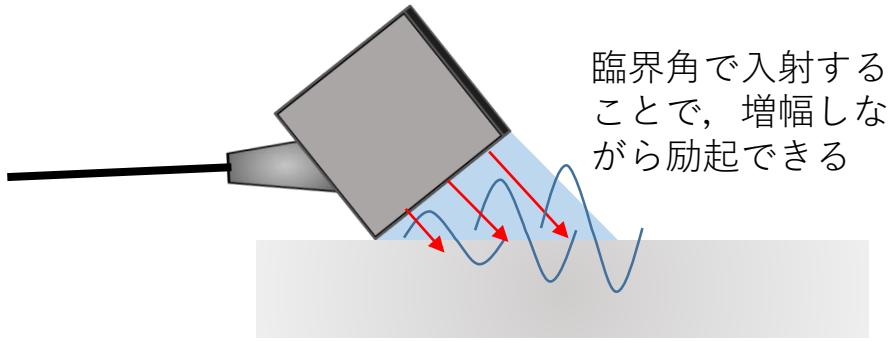
・特に高周波になるほど，表層を伝搬するので、欠陥に対する感度は高い

尾上守夫，高木幹雄，板を伝わる超音波，生産研究，18巻，12号，1966
中畑和之, ガイド波理論のイロハ－分散関係と－伝搬モード, 日本音響学会誌，76巻12号，2020

利用する固体内の音波の種類

■レーリー波(Rayleigh wave)・・・縦波と横波(SV波)の表層付近での合成波





➢一般的にガイド波を励起する場合は，ウェッジを使って臨界角で入射する

臨界角
（スネルの法則から）

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{C_w}{C_p}\right)$$

C_W:入射波（ウェッジ内の縦波音速）

Cp：入射後の対象の音速

レーリー波音速（等方性媒質の場合）

$$c_R = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu}\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

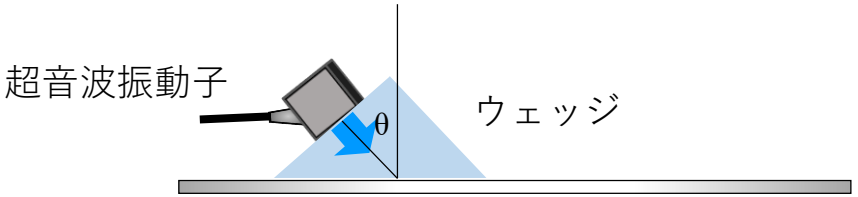
E:ヤング率（縦弾性係数）

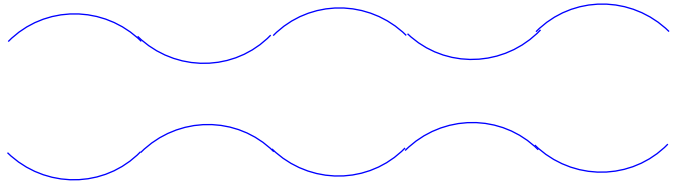
ν ：ポアソン比

ρ ：密度

利用する固体内の音波の種類

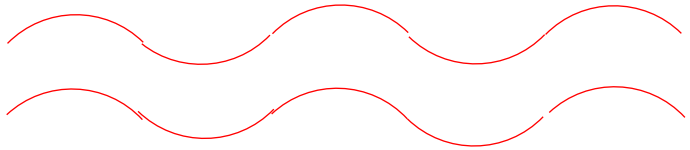
■ラム波(Lamb波)・・・縦波と横波(SV波)の合成波（波長に対して十分に薄い薄板など）





全体が共振しながら伝搬する

Sモード



Aモード

■対象モード（シンメトリックモード）

Smode(S0,S1,S2,　・・・)

●伸縮振動

$$\frac{\tan(\alpha d/2)}{\tan(\beta d/2)} = -\frac{(k^2-\beta^2)^2}{4k^2\alpha\beta}$$

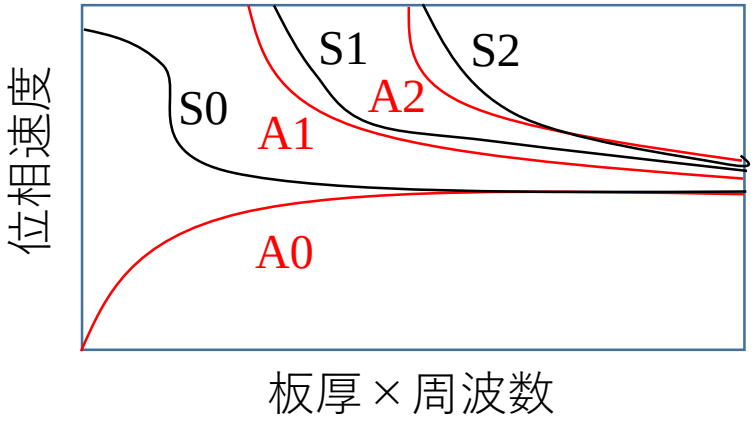
■非対称モード（アンチシンメトリックモード）A mode (A0,A1,A2,・・・)

●屈曲振動

$$\frac{\tan(\alpha d/2)}{\tan(\beta d/2)} = -\frac{4k^2\alpha\beta}{(k^2-\beta^2)^2}$$

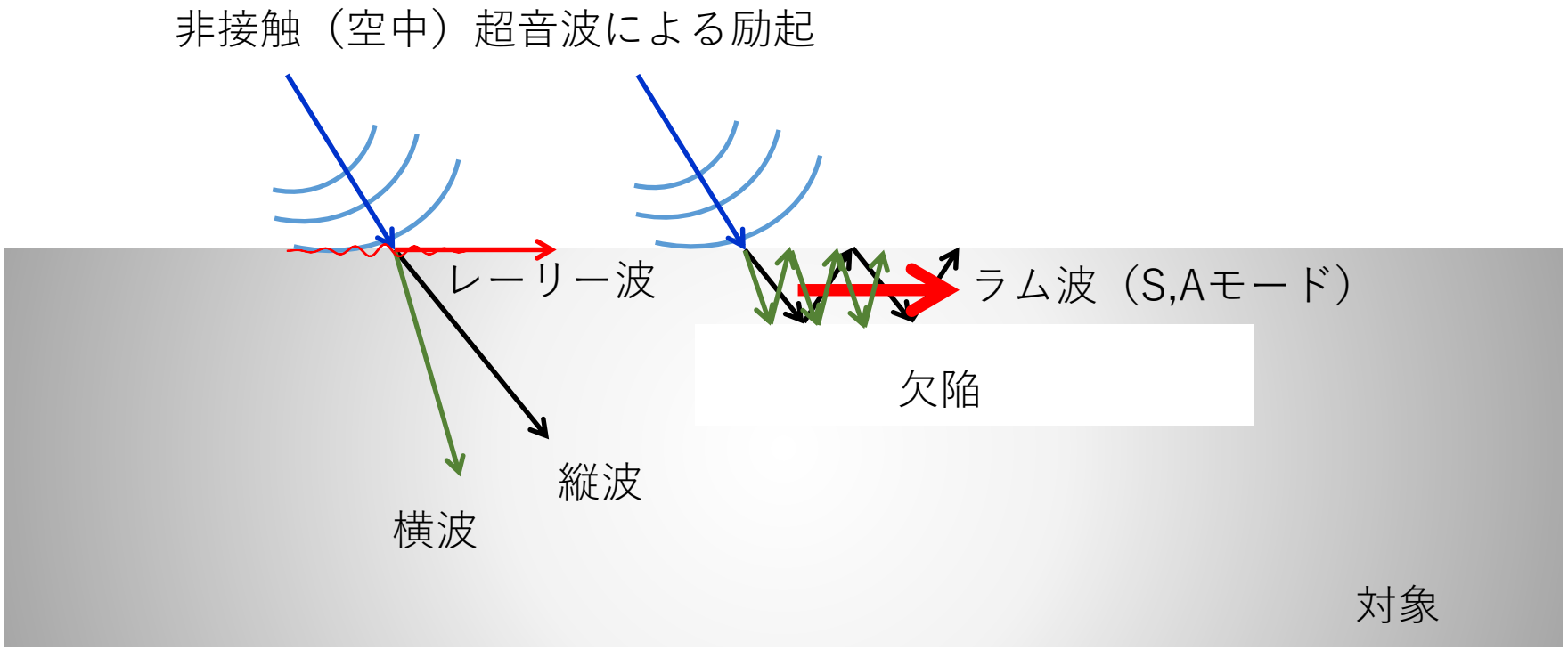
$$k=\omega/c, \alpha=\sqrt{(\omega/c_L)^2-k^2}, \beta=\sqrt{(\omega/c_T)^2-k^2}$$

C_L: 縦波音速，C_T：横波音速



利用する固体内の音波の種類

■レーリー波とラム波の関係



レーリー波は，境界面において基本的に発生する．（例：地面と大気の境界面である地表）一方で，欠陥などがあると，欠陥の直情の領域は薄板のように振る舞い，レイリー波はモード変換されてラム波として伝搬する．

空中超音波による非接触計測の概要

■非接触超音波探傷の種類

種類	励起方法	利用可能な周波数	特徴
レーザ超音波	レーザ照射のＯＮＯＦＦによって，対象を加熱・冷却することで，物体を膨張と圧縮させることにより交番的な応力を発生させ，超音波を励起	~数百MHzまで（フェムト秒レーザならＴＨｚ）	・遠距離照射可能（数メータ以上） ・高周波まで使用可能のため最も分解能が高い ・設備が高価 ・安全に配慮する必要がある
電磁超音波(EMAT)	内蔵されたコイルに交流電力を励起させることによるローレンツ力により，超音波を励起	~数十MHzまで	・比較的高い周波数まで利用可能で分解能が高い ・近接非接触（数cm以内）
空気結合超音波 （空中超音波）	強力な空中超音波によって対象に超音波を励起	~数MHz	・照射距離は数十ｃｍ ・分解能が最も低い ・安全性は高い ・手軽に使える

空中超音波による非接触計測の概要

■超音波探傷利用時の注意

超音波探傷では，振動子面と対称の間に空気が入ると，音波が伝わりにくくなる．

空気が入らないようにカップリング材（水・ジェル）を用いる．

■使用メリット

➢カップリング材が使用できない対象への活用

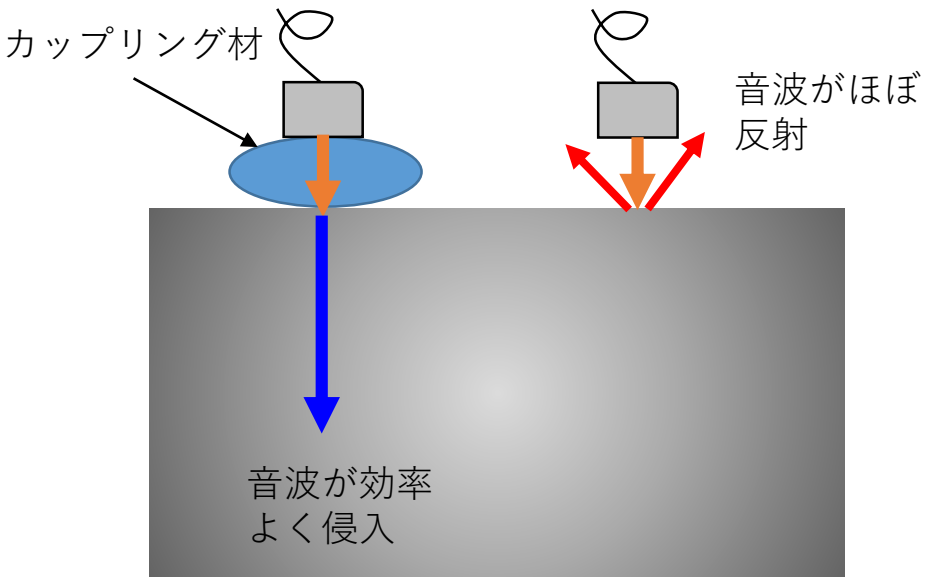
（対象に浸み込んでしまう・汚したくない）

例えば，水を嫌う電池・素材の検査が可能

➢カップリング材を使っても空気が入るくらい対象表面が粗い

（凹凸が著しいなど）

➢手軽に行える



非接触にすれば，上記は基本的に解決する．

空中超音波による非接触計測の概要

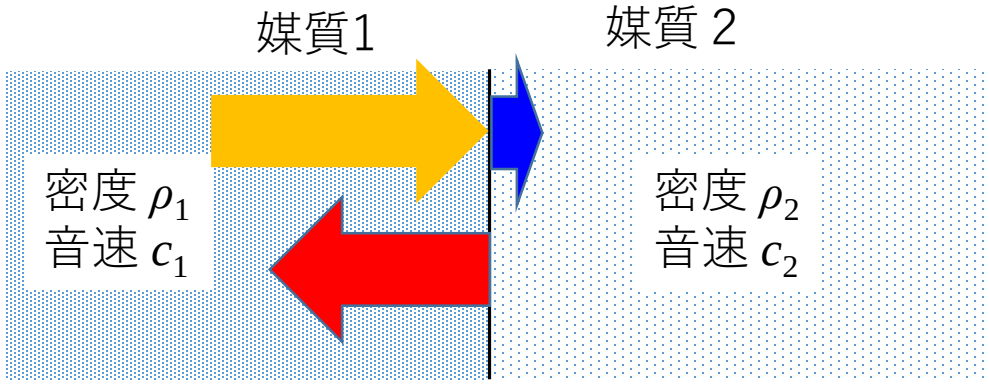
■空中超音波探傷の問題点

対象の中にほとんど音波が侵入しない

■音の反射率

音の反射率は，以下の式で示される．

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$



■反射率の計算例

例えば、空気中からアルミ板に音波を垂直入射すると，

空気の密度1.297kg/m^3，音速340m/s

アルミの密度2700kg/m^3，音速(縦波)6100m/s

とすると，音の反射率は0.999946 となり，99.9946%反射する．

$$R = \frac{2700 \times 6100 - 1.297 \times 340}{2700 \times 6100 + 1.297 \times 340} \cong 0.9999464$$

ポジティブに考えれば

0.0054%程度，透過する

空中超音波による非接触計測の概要

■空中超音波探傷の実現する手段

空中超音波探傷を実現するには，わずかに透過した音波を利用するために

①数100kHz～数MHz帯域用の**強力な**空中超音波振動子の開発

②振動子を大電力で駆動する増幅器

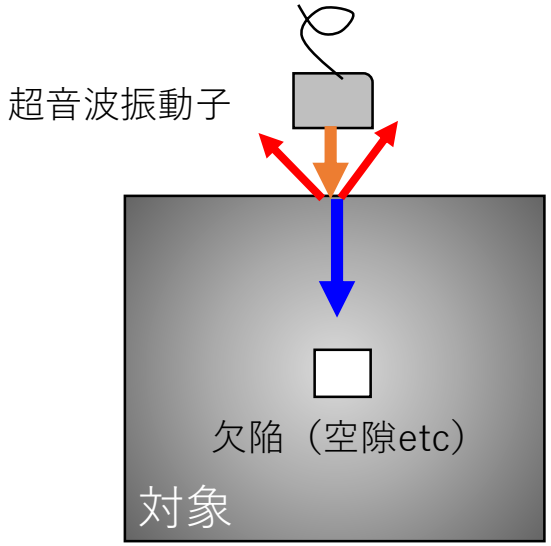
③受信信号を大増幅する計測用増幅器

ハードからのアプローチ

④信号処理（適切なフィルタ処理・チャープ駆動・パルス圧縮etc）

ソフトからのアプローチ

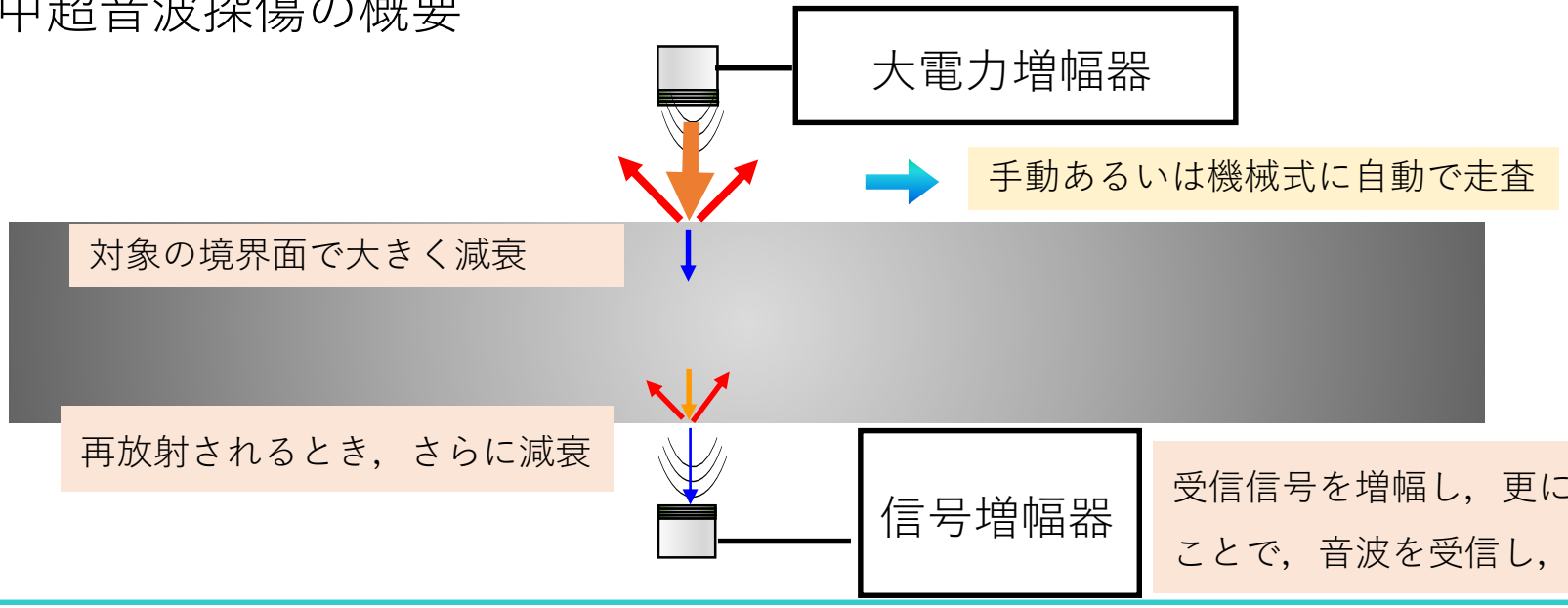
が必要となる．



なんとか利用したい・・・

空中超音波による非接触計測の概要

■実現された空中超音波探傷の概要



従来の超音波探傷法非接触での欠陥検出は可能になったが，・・・次の問題として，

計測の長時間化

がある．フェイズドアレイのように高速で計測を行いたい．

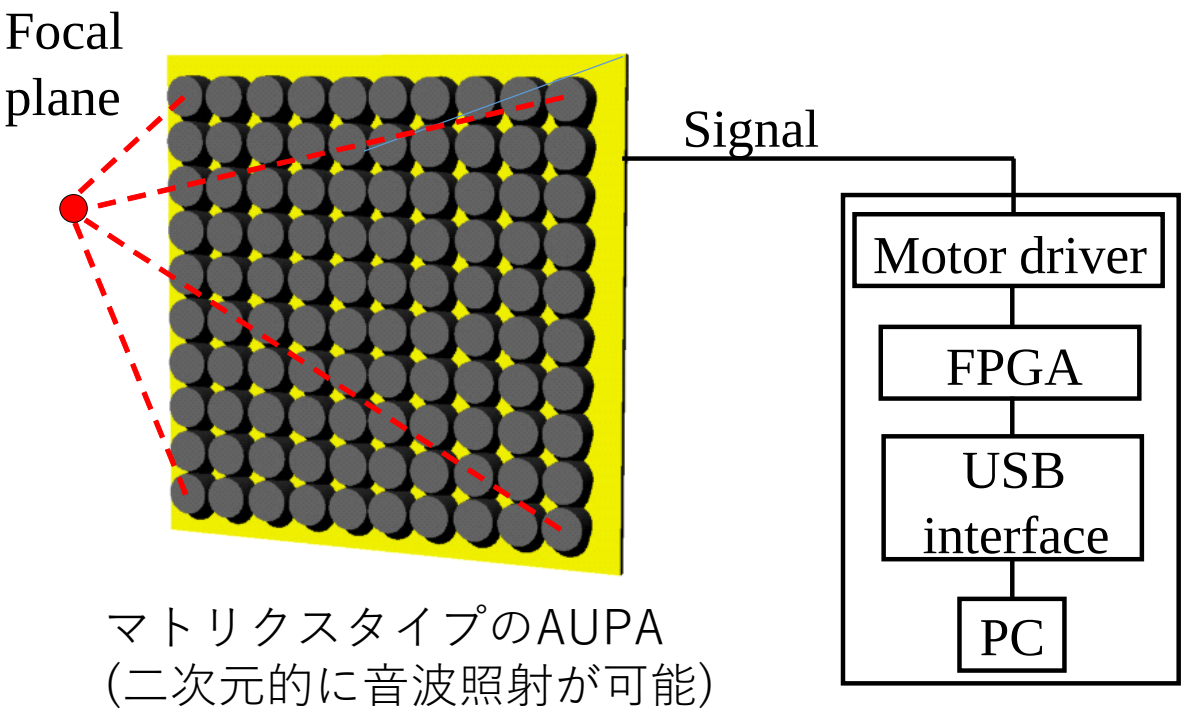
空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■空中超音波フェイズドアレイ(**Aerial Ultrasound Phased Array : AUPA**)

・直径10mm程度の空中超音波トランスデューサを配列した構成

・一般的なフェイズドアレイと同様に各トランスデューサに適切な遅延信号を入力することで任意の位置に音波を集束可能.

・比較的強力な空中超音波放射可能



マトリクスタイプのAUPA
(二次元的に音波照射が可能)

■適用事例

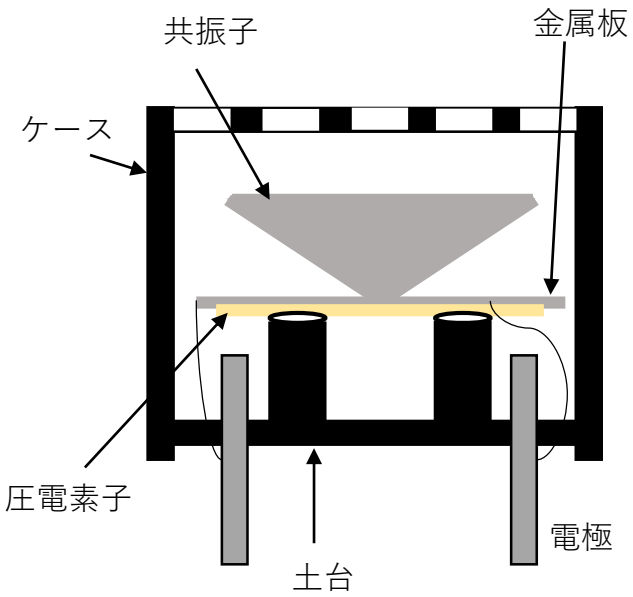
・レビテーションテクノロジー

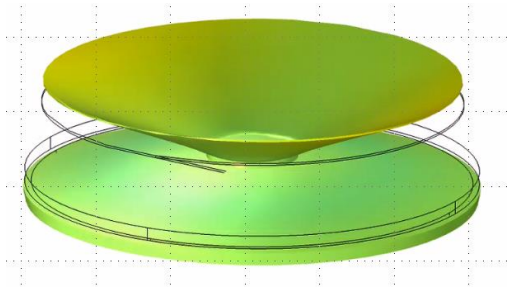
・ハプティクスデバイス

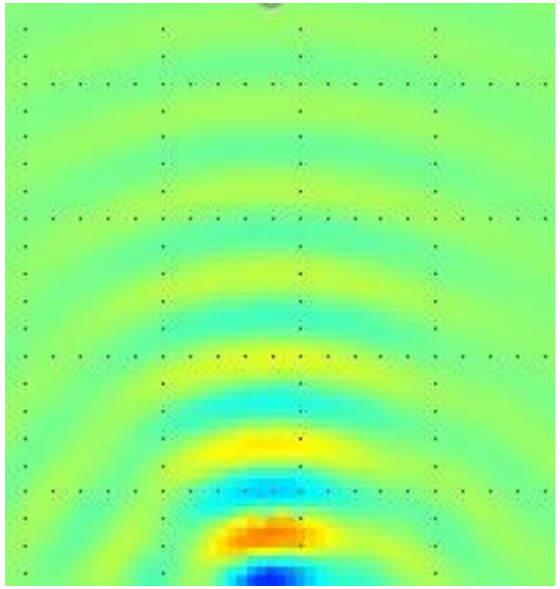
空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■空中超音波トランスデューサ

距離センサでよく使用される高音圧タイプのトランスデューサ．（駆動周波数：40kHz, 58kHz）







空中超音波トランスデューサの外観と特性

浅田 隆昭, 空中超音波トランスデューサの概要―現状と今後について―, 日本音響学会誌，76巻5号，2020

空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■AUPAの音波集束原理

各振動子に送る遅延時間t_d

$$t_d = \frac{r' - r}{c}$$

r はアレイ面から集束面までの距離

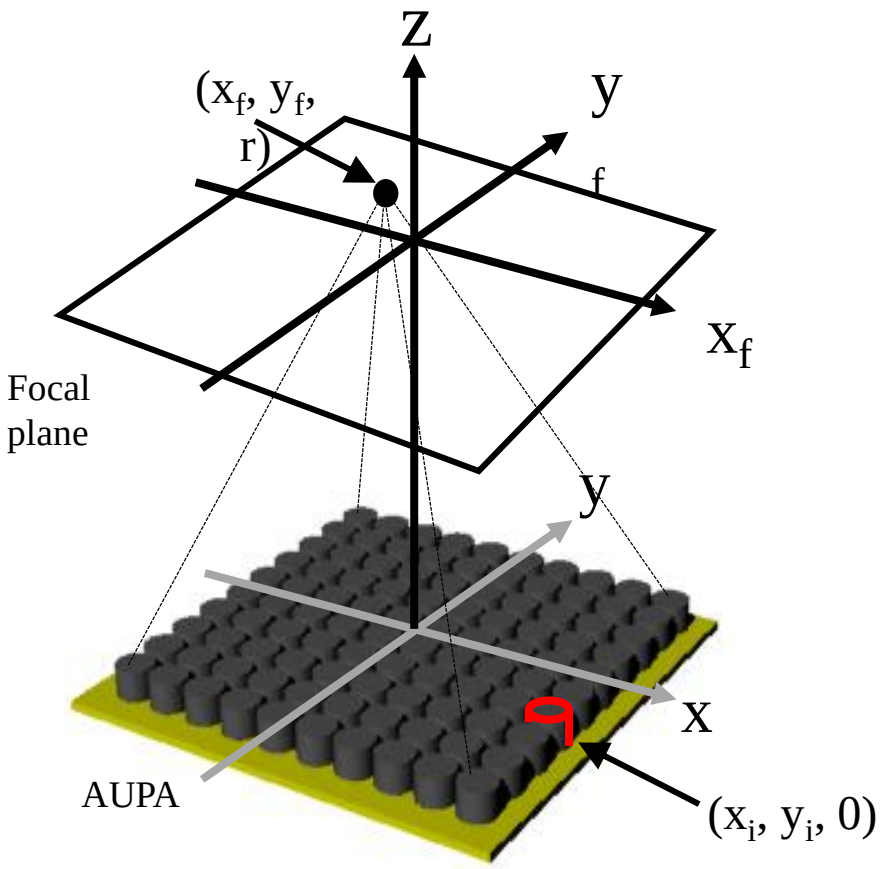
r' は振動子から集束点までの距離

m, n は振動子の座標, c は音速

$$r' = \sqrt{(x_m - x_f)^2 + (y_n - y_f)^2 + r^2}$$

アレイの辺と平行な方向のメインローブの幅 ω

$$\omega = \frac{2\lambda r}{D}$$



$r = 200mm$, アレイは正方形で

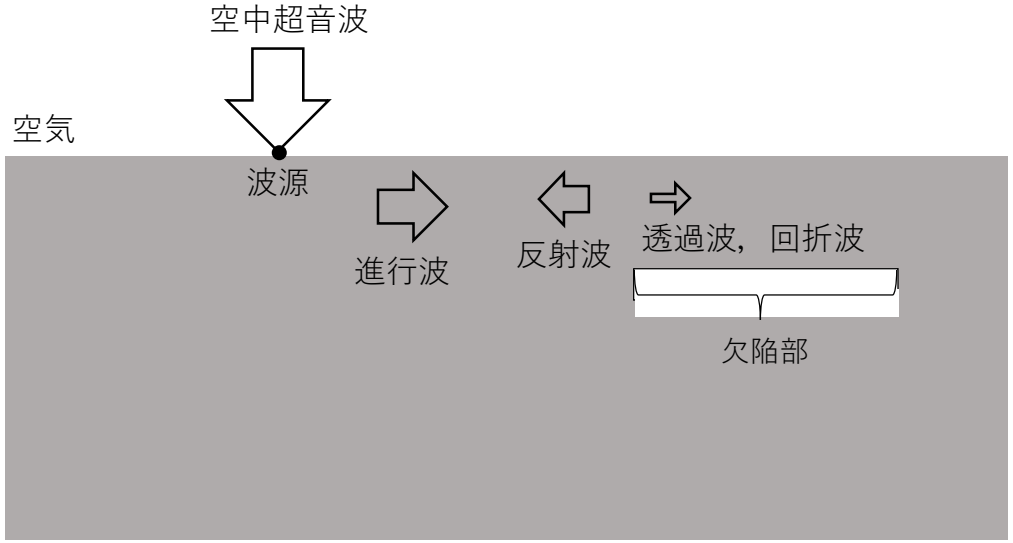
100×100mm(センサ数10個×10個)

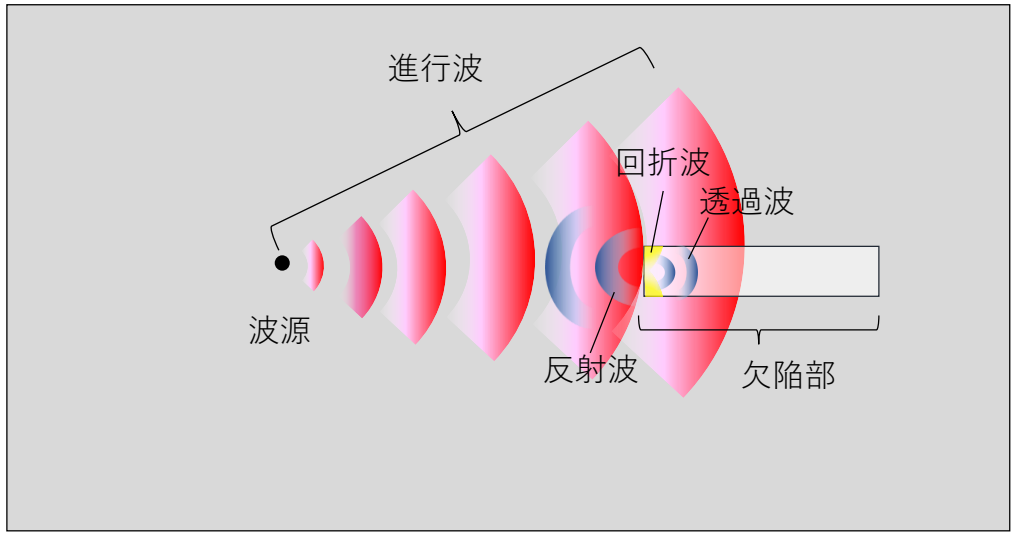
T.Hoshi, et al；IEEE Trans. On Hap., Vol.3,No3,pp.155-165,2010

空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■ガイド波を利用した対象内欠陥の可視化原理

　対象に対して，空中超音波を照射すると，わずかに透過した音波は，縦波と横波に分かれるが表層付近ではレーリー波が進行波として伝搬する．表層付近に欠陥が存在するとき，欠陥との境界で一部の音波は反射・回折，透過する．　このとき，欠陥の直上は薄い板のようになるので，レーリー波からラム波へモード変換される．この音波の波動伝搬の様子を計測によって可視化すれば，欠陥位置を特定することができる．また，欠陥部において振動エネルギーが変化するため，振動エネルギーのピーク分布を捉えることでも欠陥部を特定できる．

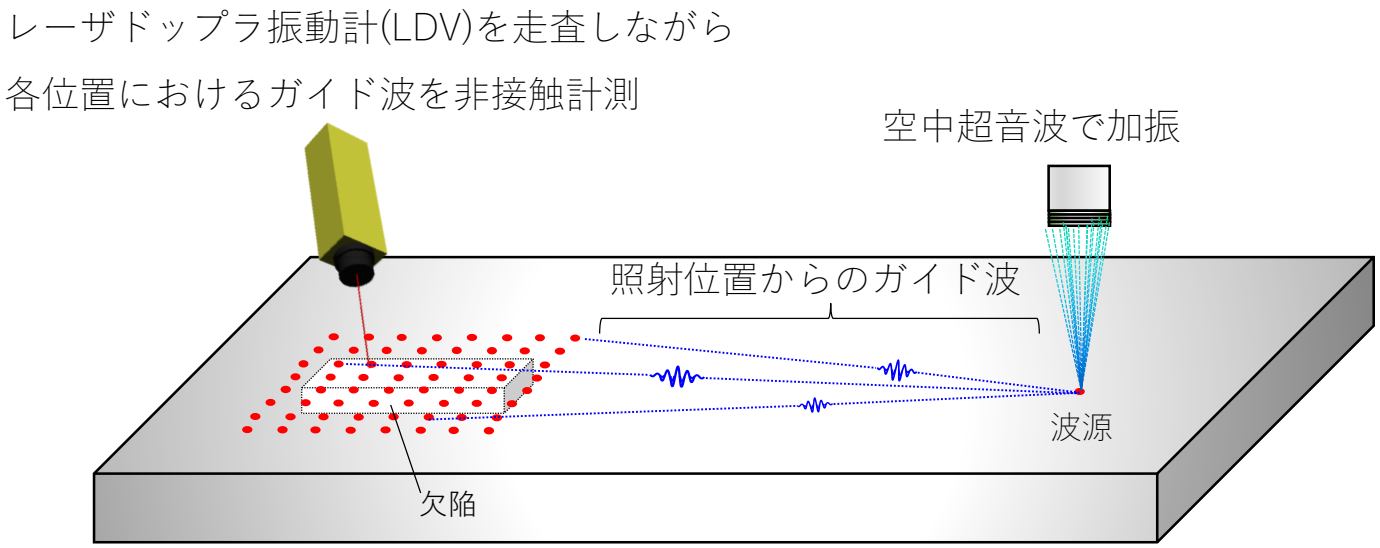




空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■ガイド波の計測

　ガイド波を観測するには，波源からのガイド波を計測領域に全体に渡って，受信器を走査しながら計測する必要がある．一方，この方法では計測時間が長時間化する．

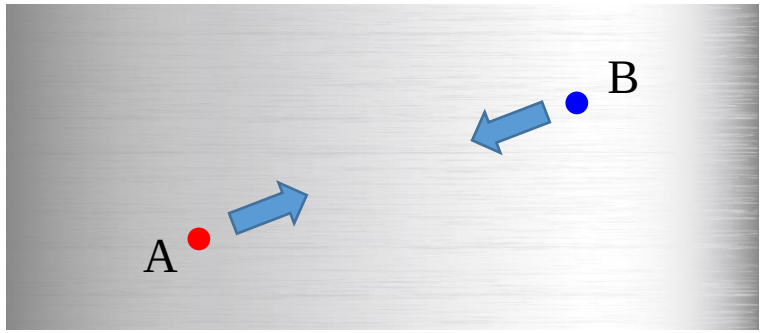


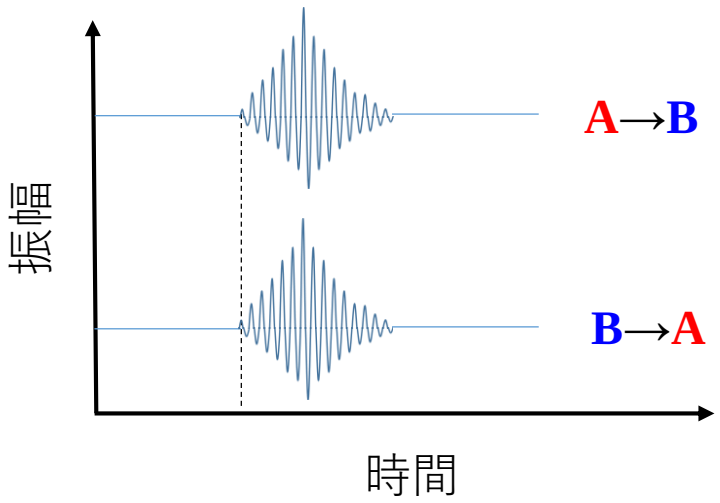
空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■相反定理の利用

相反定理の原理を用いて，受信器は固定し波源を走査することで，ガイド波を観測する．

相反定理が成立するとき，図中の点Aから送信して点Bで受信した音波の時間波形と，点Bから送信して点Aで受信した音波の時間波形は等しくなる。この原理を利用すれば，波源（音波照射）を二次元走査して固定した受信器で計測して得た波動伝搬の結果は，波源固定-受信走査による結果と同一のものとなる。ただし，集束音波等の照射により理想的な点励起は実現できないので，厳密には相反定理は成り立たない。





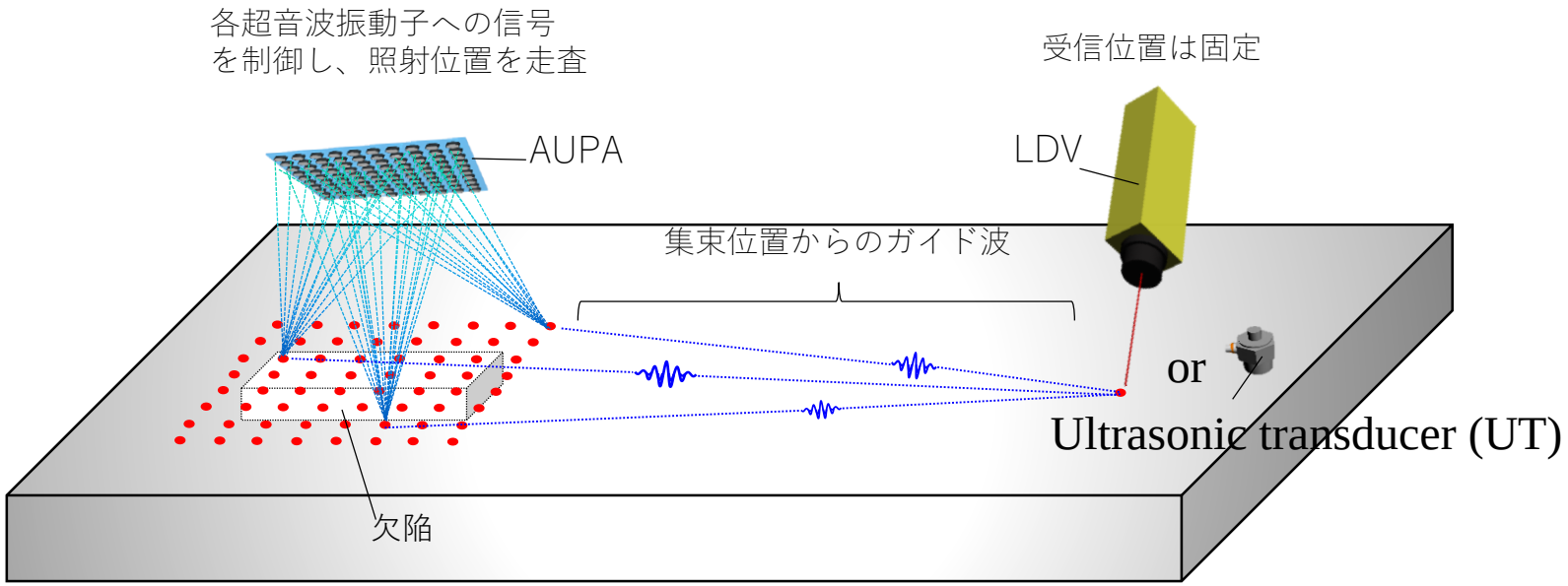
空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

■AUPAを利用した波源走査の高速化

AUPAを用いれば電子的に音波を高速走査しながら，ガイド波を励起することできる．

・約2500点の計測が120秒程度で終了

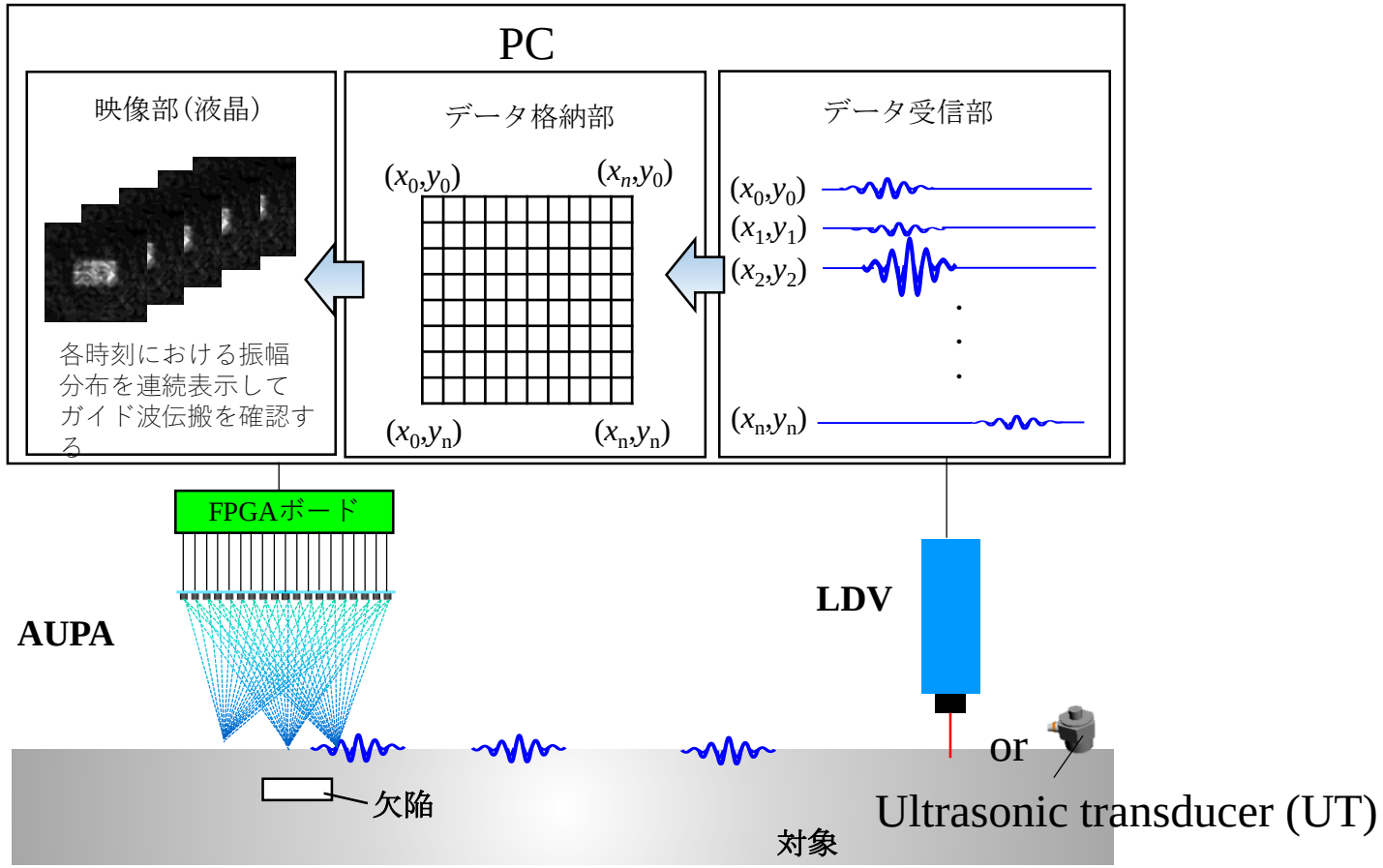
（従来方法9000秒程度であるので，約75倍の高速化）



センサを固定設置できるので
あれば，受信器は接触式でもよい

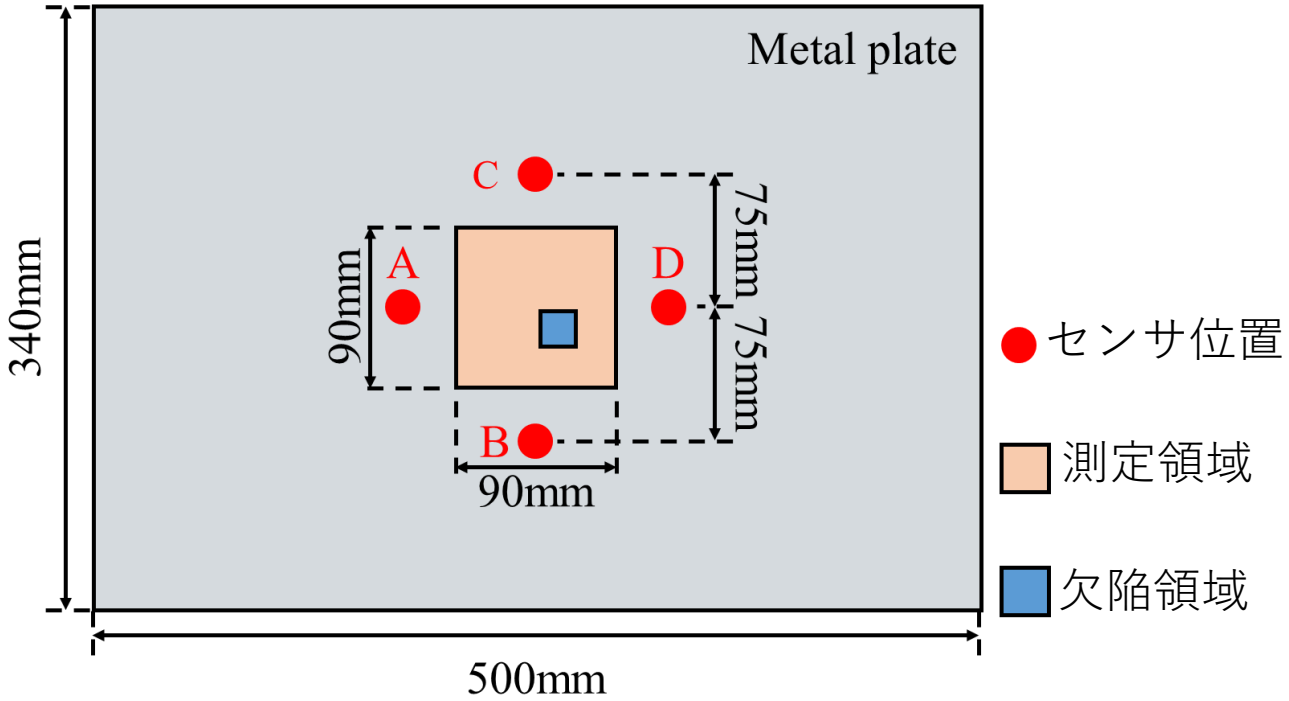
空中超音波フェイズドアレイによる高速非接触非破壊検査

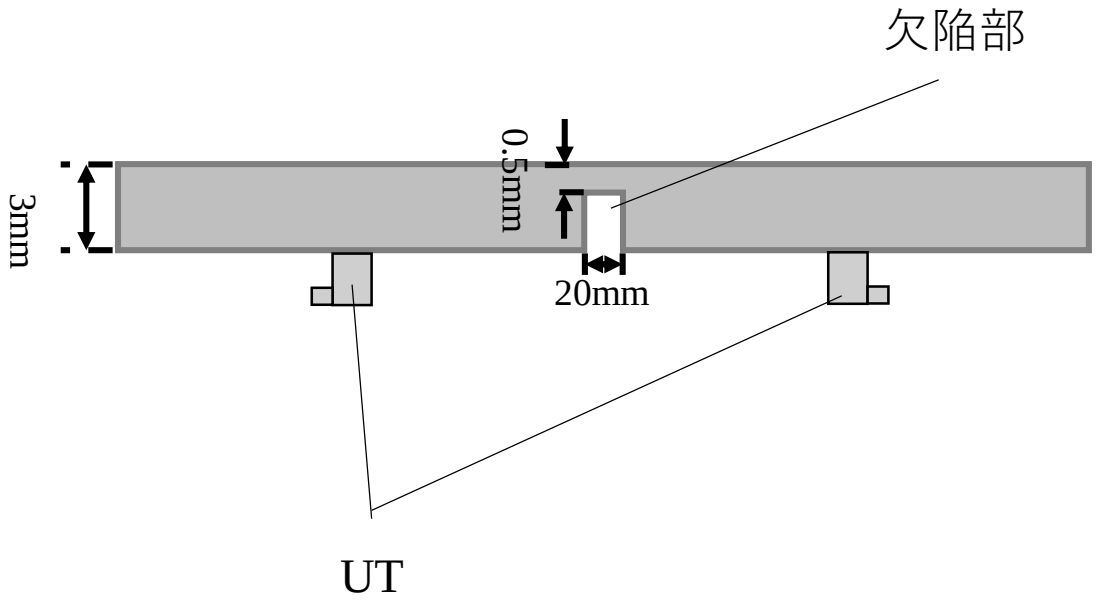
■AUPAを利用した高速非接触非破壊検査システム



金属薄板内欠陥への適用事例

■金属薄板資料の外観と測定領域





■実験条件

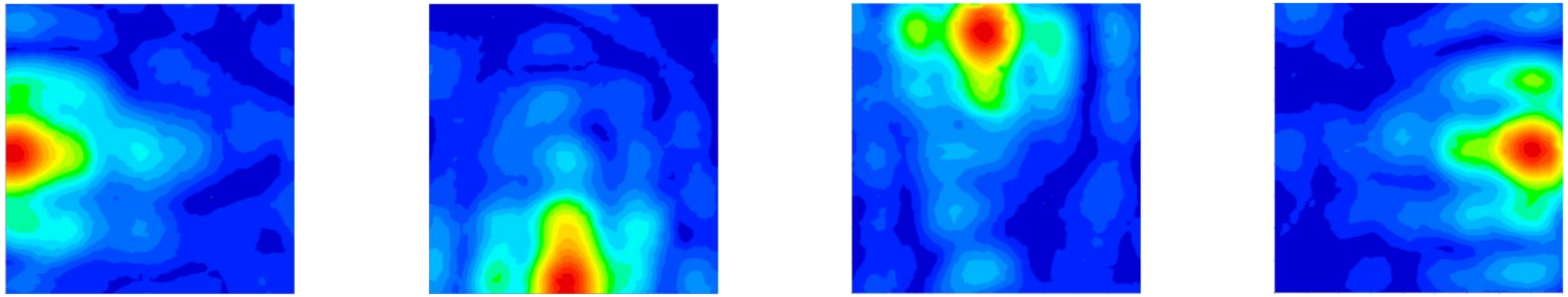
印加電圧24V，入力サイクル10サイクル

サンプリング周波数2MHz，走査速度50ms(信号処理含む)

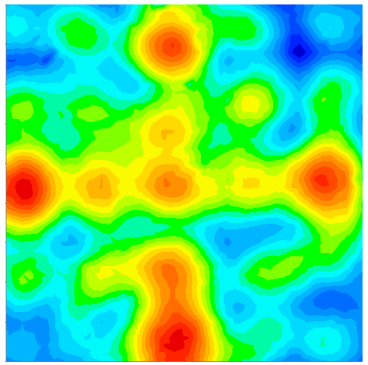
金属薄板内欠陥への適用事例

■振動エネルギー分布の計測結果　（健全試料）

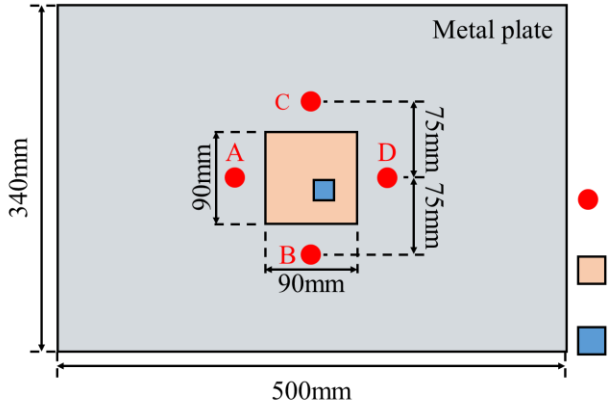
受信位置に近いほど，振動エネルギーのピーク値が大きい



Point A　Point B　Point C　Point D



加算平均処理

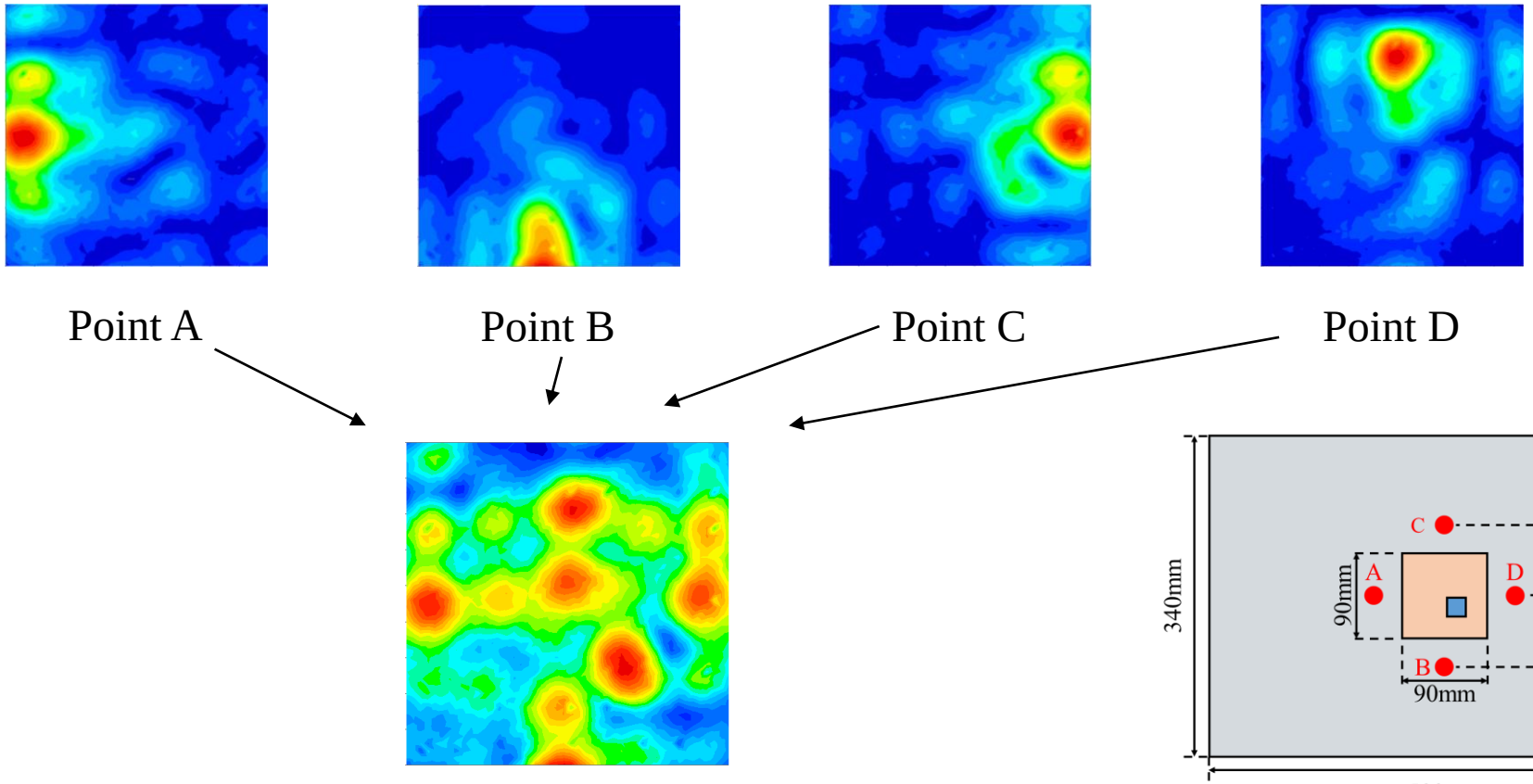


Kyosuke Shimizu et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys. 59 SKKD15

金属薄板内欠陥への適用事例

■振動エネルギー分布の計測結果 （欠陥試料）

受信位置に近いほど，振動エネルギーのピーク値が大きい．また，欠陥位置にも大きなピークが見える．

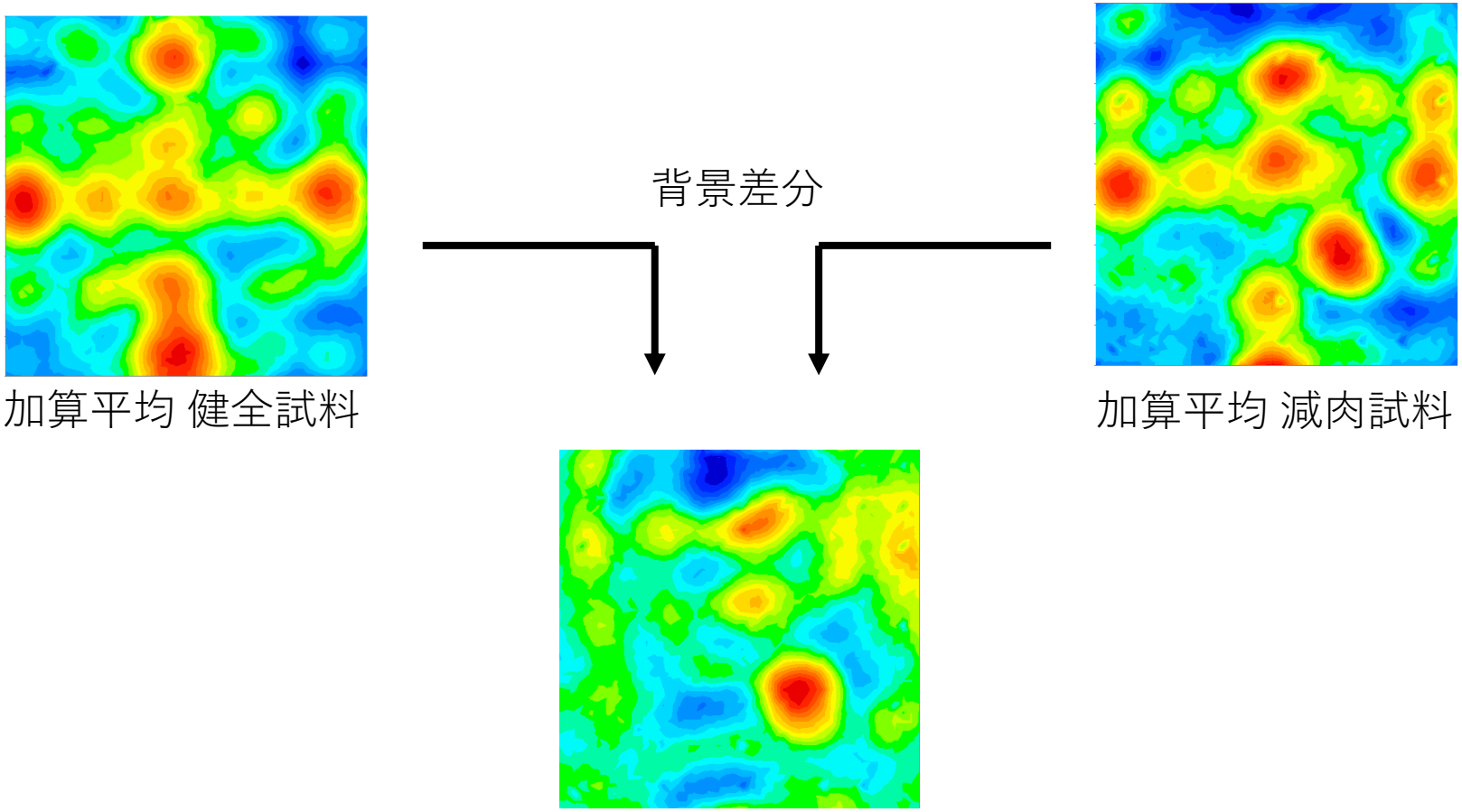


Kyosuke Shimizu et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys. 59 SKKD15

金属薄板内欠陥への適用事例

■振動エネルギー分布の計測結果　（欠陥試料）

加算平均結果を背景差分することで減肉部を明確にイメージングされる.



Kyosuke Shimizu et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys. 59 SKKD15

おわりに

■本講演の概要

➢非破壊検査の概要と従来の超音波探傷法について

➢非接触超音波非破壊検査の種類と空中超音波探傷について

➢空中超音波フェイズドアレイの活用方法と高速非接触非破壊検査システムの概要

➢金属薄板内欠陥への適用事例

■今後について

➢更なる高速化の実現(目標はリアルタイム)

➢更に微小な欠陥等の検出（検出の項精度化）

➢深い位置での欠陥検出

➢減衰材料への適用