

破壊強度学

非破壊検査法

JAXA社会連携講座

酒井信介

非破壊試験の定義

材料・部品・構造物などの種類の
いかににかかわらず、試験対象物を
傷つけたり、分解したり、あるいは破
壊したりすること無しに欠陥の有無
それらの状態、内部構造等を知るた
めに行う試験全体を指す。

非破壊検査採用の目的

- ①信頼性・安全性の確保:
- ②製造技術の改良:
- ③製造コストの低減:
- ④メンテナンスの検査:
- ⑤定期検査:

非破壊検査の適用例

① 材質検査及び材料評価試験

機械部品や構造部材の素材となる材料は健全であることが要求される。その健全性証明、担保のために非破壊検査記録が必要である。

② 品質評価

鑄造、溶接、加工などの製造工程内における製品の健全性を担保するための非破壊検査の実施。

③ 経年劣化度計測と寿命評価

運用中の設備で定期検査の実施による健全性評価と耐久年数を推定する余寿命評価のための非破壊検査の実施。

④ 予防保全のための維持管理検査

重要部品の健全性を担保するための非破壊検査の実施。

⑤ ひずみ計測

実機における荷重の負荷状況、変形量を計測し、設計予想値と比較する。

⑥ その他計測

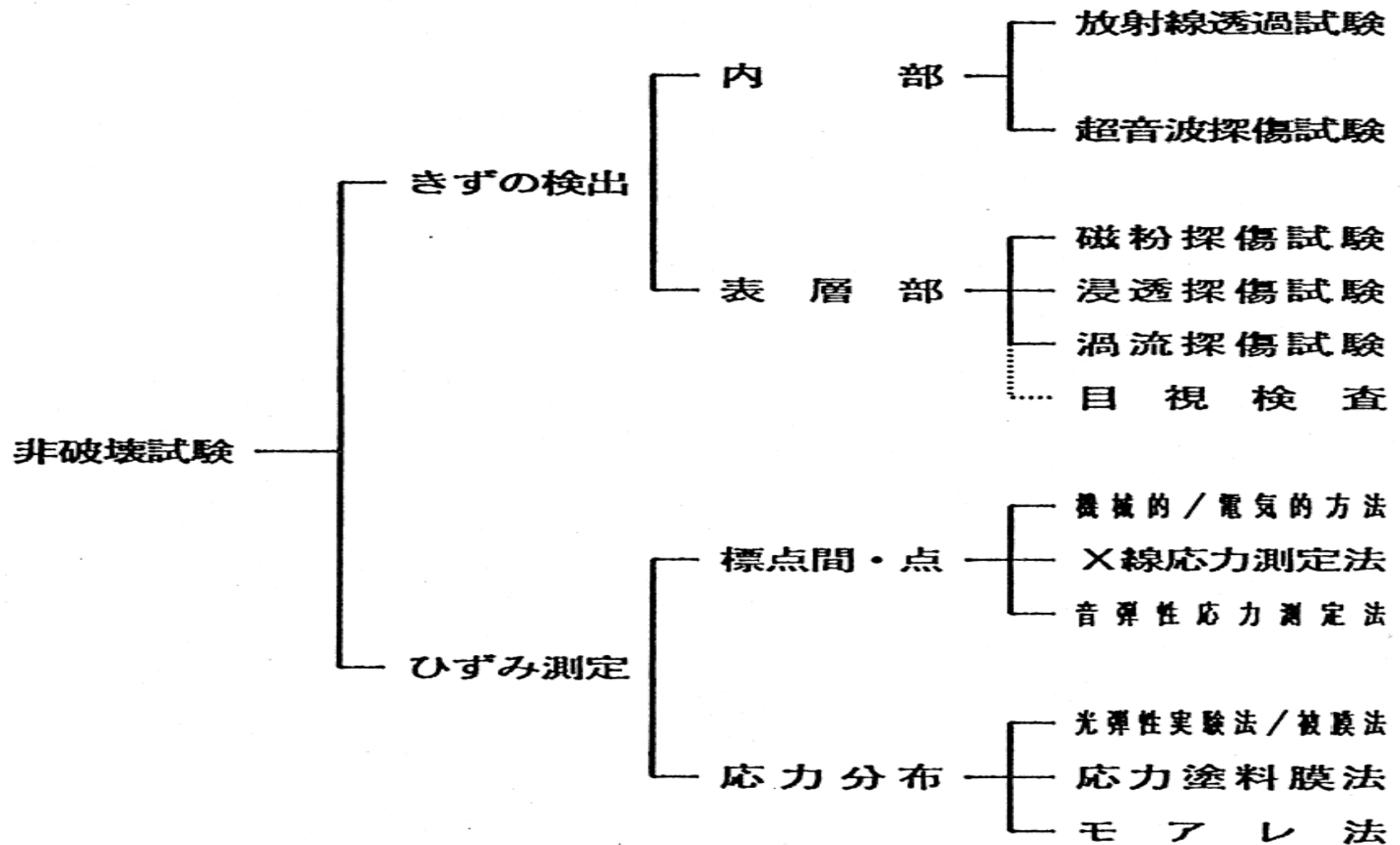
非破壊検査の種類

- A. 放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)
- B. 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)
- C. 磁粉探傷試験 (MT: Magnetic Particle T.)
- D. 浸透探傷試験 (PT: Liquid Penetrant T.)
- E. 渦流探傷試験 (ET: Eddy Current Testing)
- F. ひずみ測定 (SM: Strain Measurement)
- G. 厚さ測定 (TM: Thickness Measurement)

特殊な非破壊検査

- (A) 目視検査 (肉眼検査、ファイバースコープ、ボアスコープ等)
- (B) 鋭敏化度測定
- (C) 軸力計測
- (D) 硬度測定
- (E) SUMP (法) (S u z u k i' s Universal Micro Printing)
- (F) 形状測定その他

非破壊検査の分類



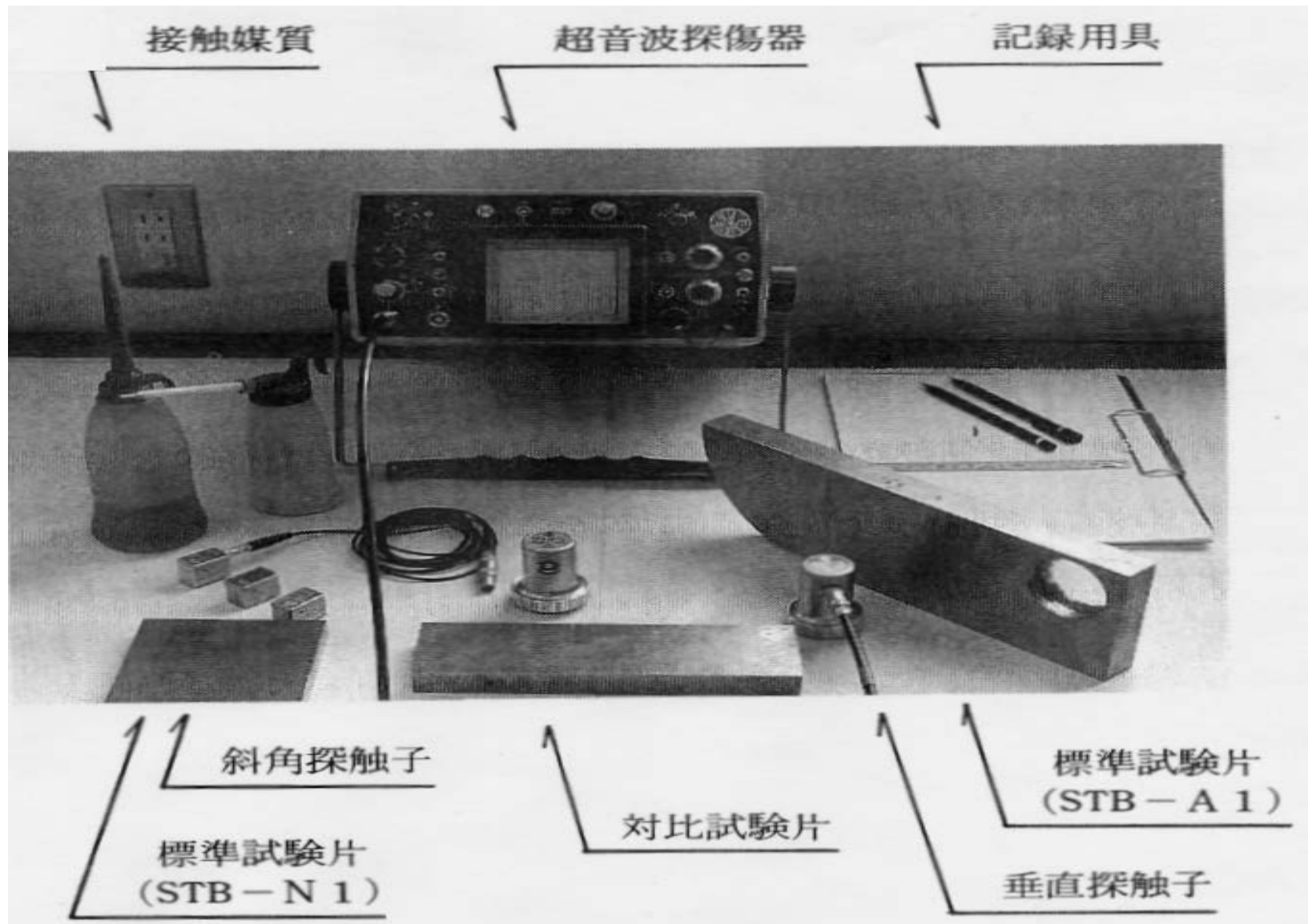
* 広義な意味で、目視検査も非破壊試験の一種に分類されます。

超音波探傷技術(UT)

超音波探傷法内容

1. 超音波探傷技術の特徴
2. 探触子
3. 超音波法の測定原理
4. 超音波の物理的特性
5. 超音波探傷法
6. 接触媒質
7. 欠陥の寸法計測と形状確認
8. 新しい測定法1(フェーズドアレイ法)
9. 新しい測定法2(TOFD法)
10. 新しい測定法3(ノイズ分析法)

超音波探傷機器一式



1.1 超音波の特徴

- 非破壊試験
 - 超音波には、連続波とパルス波がある。
 - 超音波は人間の耳に聞こえない20kHz以上の周波数
 - 音波には縦波、横波、表面波の3種類
 - 縦波：粒子の振動方向が伝播方向と一致している。
 - 横波：粒子の振動方向と伝播方向の角度が90度である。固体のみに伝播する。
 - 表面波：材料の表面層だけを伝わる波である。
- 縦振動と横振動を混合したような挙動を示す。

1.2 経年劣化・損傷検査(各種検査の紹介)

損傷モードに適した**非破壊検査**(NDI)

- ・腐食: 目視検査で確認、超音波厚さ計で肉厚計測
- ・き裂、割れ(疲労損傷): 繰返回数で決まる。

PT, MT, UT, RT, ET, マイクロスコープによるき裂発見

- ・微小亀裂(疲労、クリープ損傷): 1mm以下のき裂
マイクロスコープ、レプリカ、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡
(SEM)

破壊検査

- ・材質劣化(クリープ損傷、高温機器):
- ・クリープ損傷(高温機器対象): 0.1mm以下のき裂
ボイドの発生、材質劣化、変形、強度低下
- ・疲労損傷(微視き裂: き裂成長速度の把握-定検期間)
- ・脆化(水素浸食、結晶粒界偏析、照射脆化):

2. 超音波発生用探触子の構造

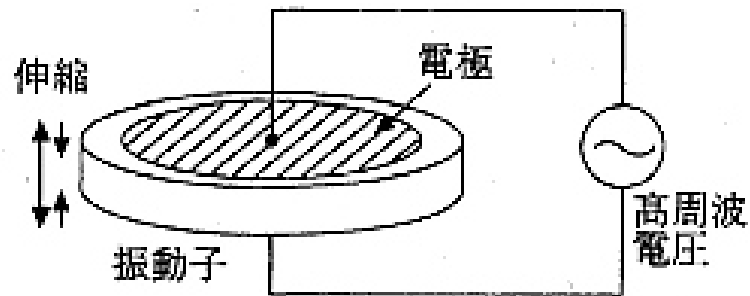
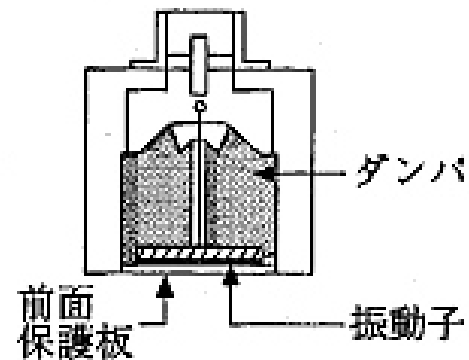
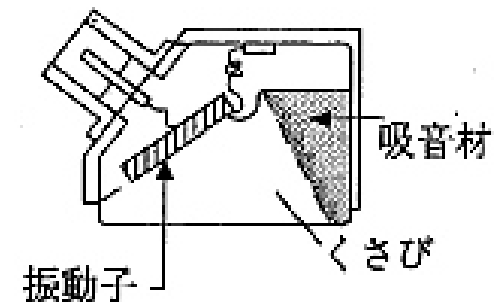


図 超音波の発生と受信



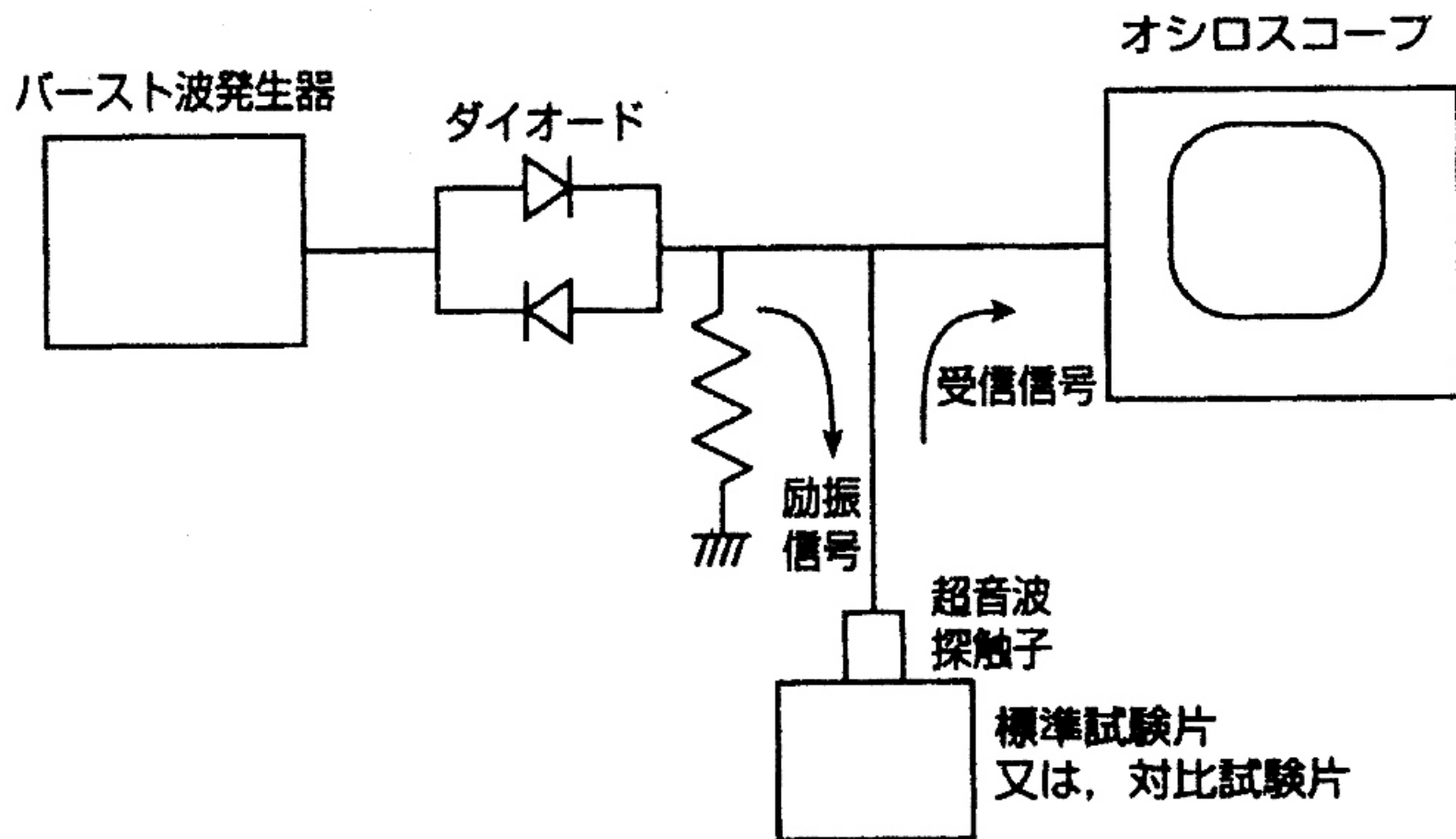
(a) 垂直探触子



(b) 斜角探触子

図 探触子の構造

2.1 探触子の出力と入力波形の比較法



相対感度測定のための接続法

3. 超音波法の測定原理

- ・ 超音波を用いる測定原理の代表的なものは3つある。

①パルス反射法 ②透過法 ③共振法

1)パルス反射法(一般的な探傷、超音波厚さ計)

- ・ 反射エコーの信号を評価する方法
- ・ 最近はデータ処理装置の進歩に伴い、TOFD法、フェーズドアレイ法などマルチ探触子による図示化
- ・ 探触子には、発信周波数、周波数分布特性、エコー波形、出力、入力、検出感度などの特性がある。

3.1 探傷法

- 垂直探傷法
- 斜角探傷法
- Aスコープ
(波形基本表示)
- Bスコープ
(断面表示)
- Cスコープ
(図式化、平面表示)

垂直探傷法

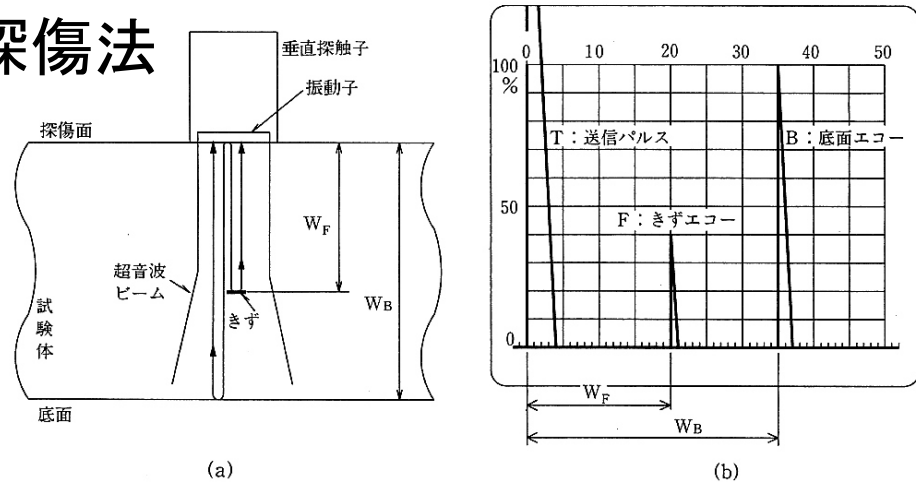


図 4.13 垂直探傷とその探傷図形

斜角探傷法

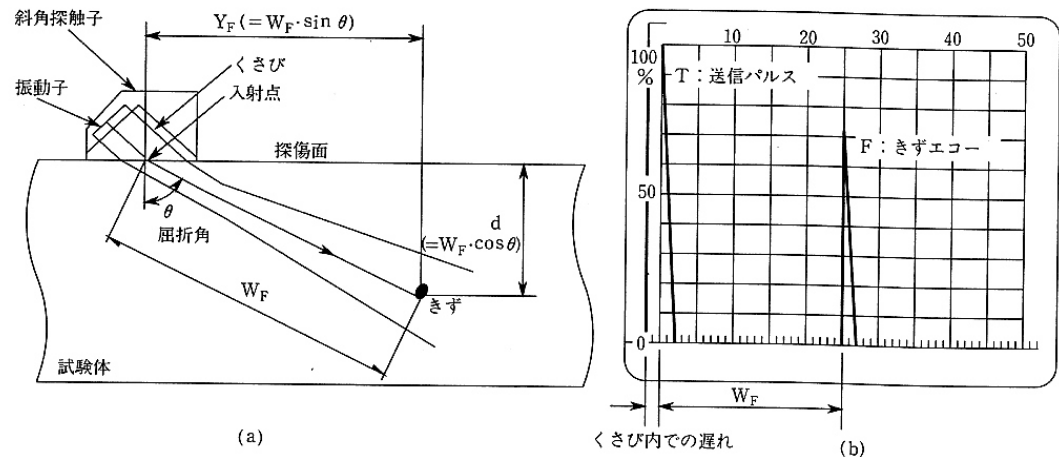
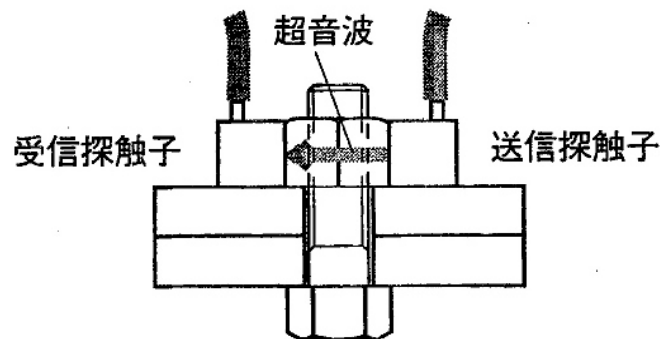


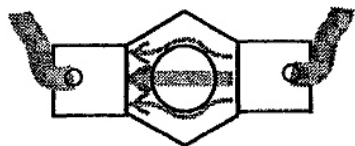
図 4.14 斜角探傷と探傷図形

3.2 超音波法の測定原理(透過法)

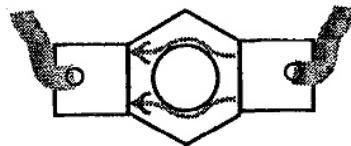
2) 透過法(伝播特性評価に使用)



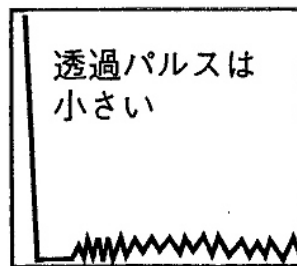
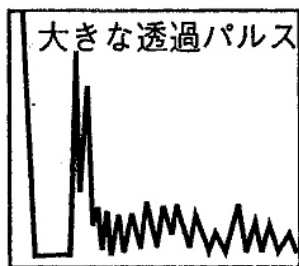
(a) 適正な軸力の場合



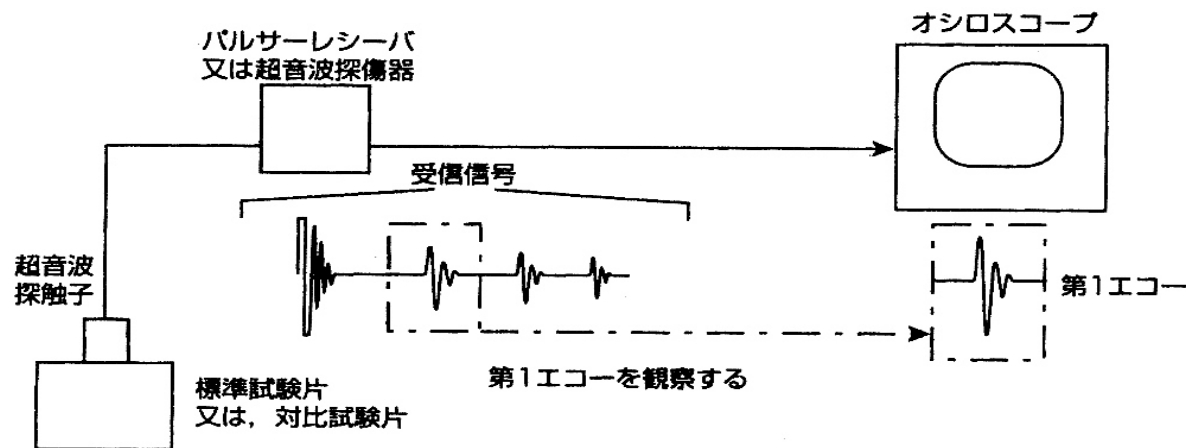
(b) 軸力が低い場合



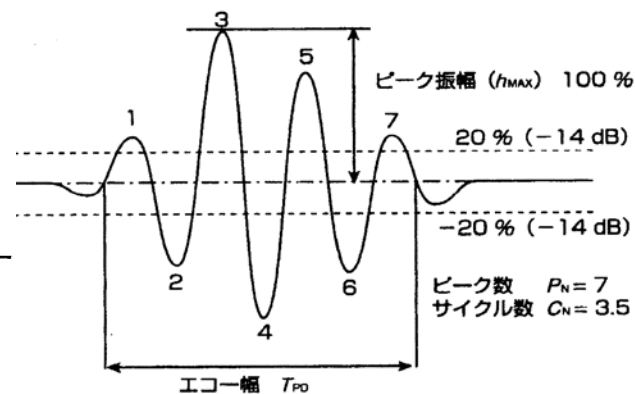
超音波 A スコープ波形



3.3 超音波波形解析用接続例(周波数分析)



時間領域応答性測定のための接続法



時間軸応答性の例

ピーク周波数 (MHz) f_p : 周波数スペクトルの最大振幅点の周波数

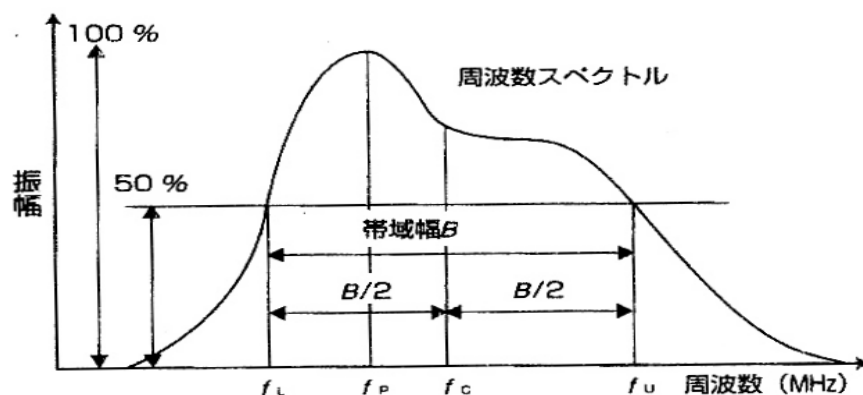
下限周波数 (MHz) f_L : 最大振幅点から 6 dB 下がった振幅点の低いほうの周波数

上限周波数 (MHz) f_U : 最大振幅点から 6 dB 下がった振幅点の高いほうの周波数

中心周波数 (MHz) f_c : $f_c = (f_L + f_U) / 2$

帯域幅 (MHz) B : $B = f_U - f_L$

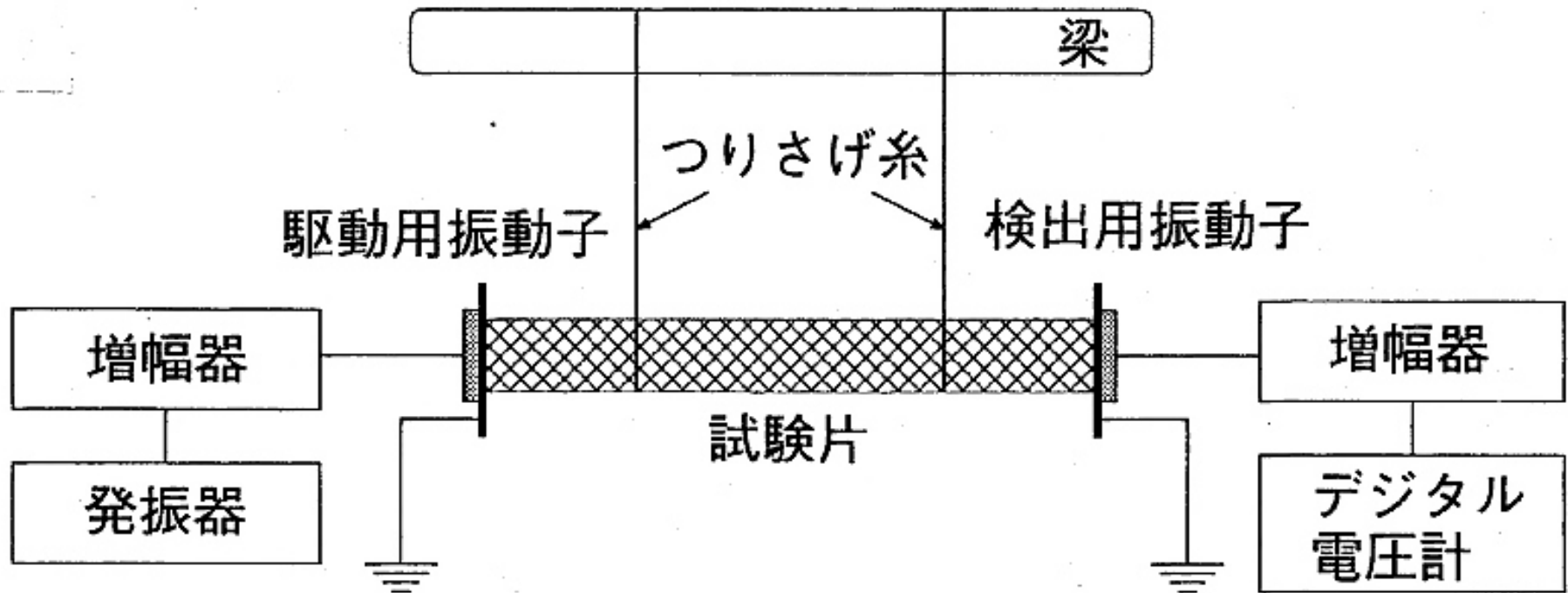
比帯域幅 (%) B_w : $B_w = [(f_U - f_L) / f_c] \times 100$



周波数スペクトルの例

3.4 超音波法の測定原理(共振法 物性計測)

渡辺式ヤング率測定装置((有)栄電システム)測定概略図



4. 超音波の物理的特性（物性値）

1. 音の特性（波の種類で異なる）
2. 音速 V
3. 周波数 f
4. 波長 λ $\lambda = V/f$
5. 減衰：散乱減衰、拡散減衰
6. 屈折
7. 反射
8. 共振
9. 伝達特性

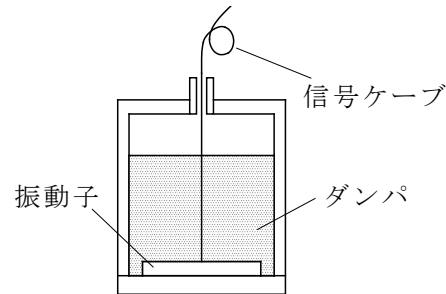
4.1 超音波波形の種類

波の種類	特 徴	備 考
縦波(L波)	通常の音波、音速が最も早い	・物質の振動方向と同じ伝播方向を持った波
横波(S波)	固体中の横振動の波	・物質の振動方向に対して直角に伝播方向を持った波 ・物質により音速が定まる
表面波	表面に沿って伝わる波	
板波	薄板の中を伝わる波	モードにより音速が著しく異なる。

4.2 超音波の音速と5Mzの時の波長

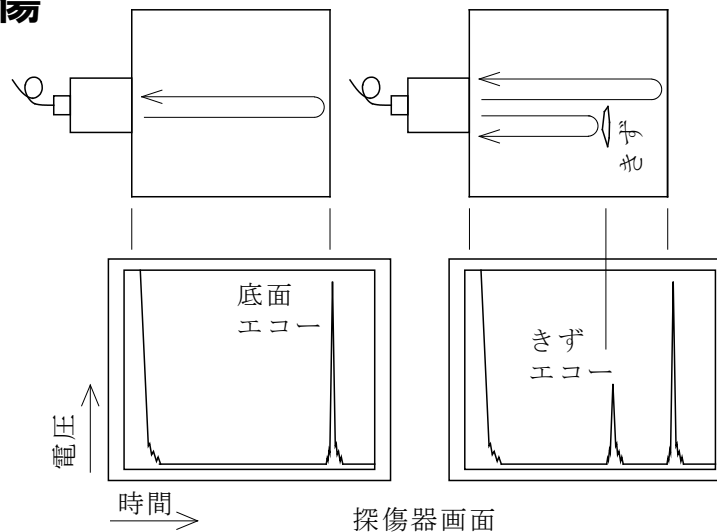
物 体	縦 波		横 波	
	音速 (m/s)	波長(mm)	音速(m/s)	波長(mm)
アルミニウム	6260	1.3	3080	0.62
鋼	5900	1.2	3230	0.65
アクリル樹脂	2730	0.55	1430	0.29
グリセリン	1900	0.38	液体や気体の中では 横波は存在しない	
水(20℃)	1480	0.30		
油	1400	0.28		
空気(15℃)	340	0.07		

5. 超音波探傷方法



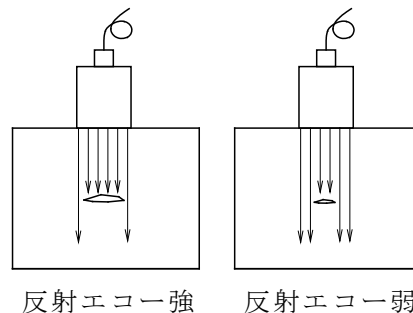
探触子 音波の周波数は数MHz
が一般的で振動子の厚さに依存

垂直探傷

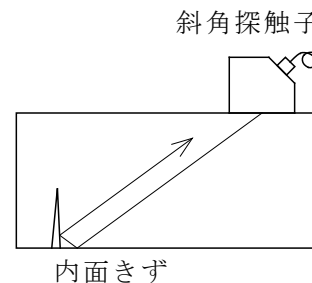


経路上の傷
の存在

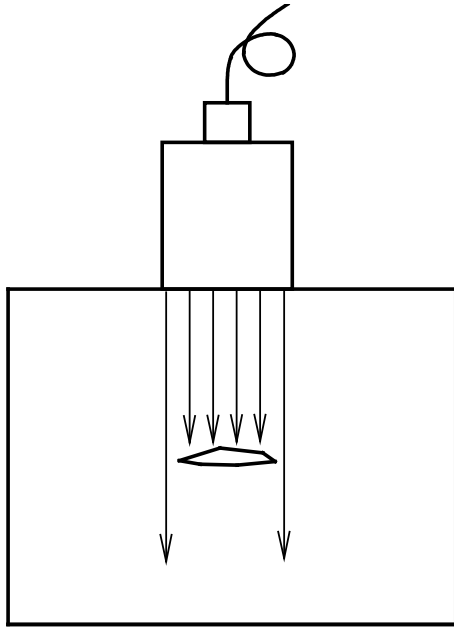
傷の大小



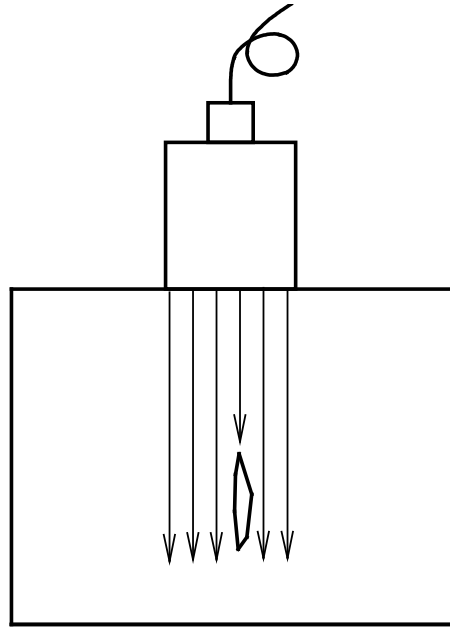
斜角法



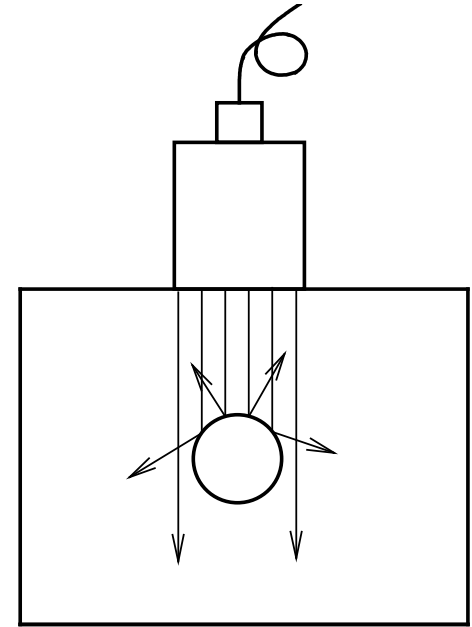
5.1 超音波探傷における注意点



反射エコー強



反射エコー弱



反射エコー弱

5.2 代表的な欠陥と探傷波形の例

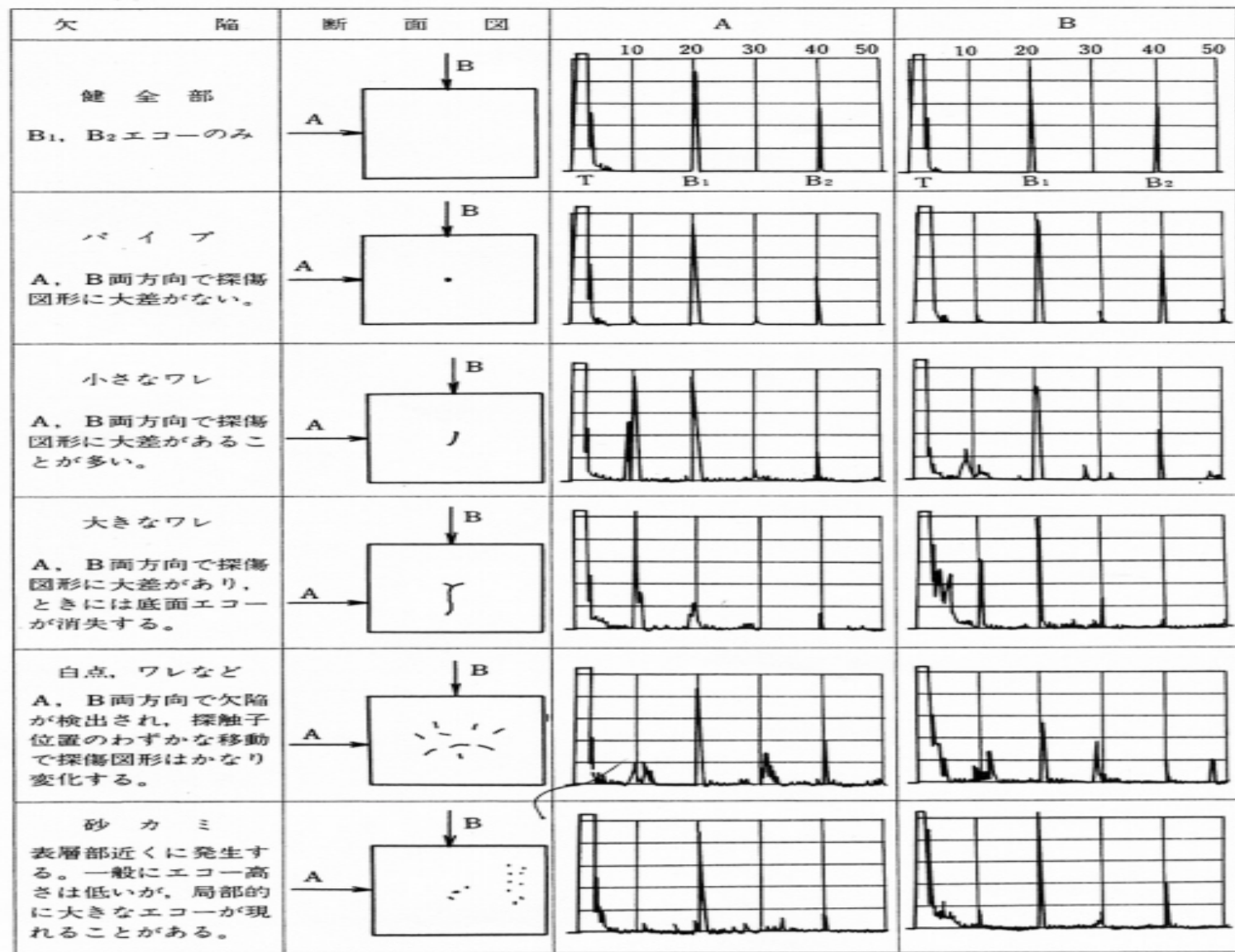


図4.20 角材の探傷図形の例

5.3 溶接部の探傷方法

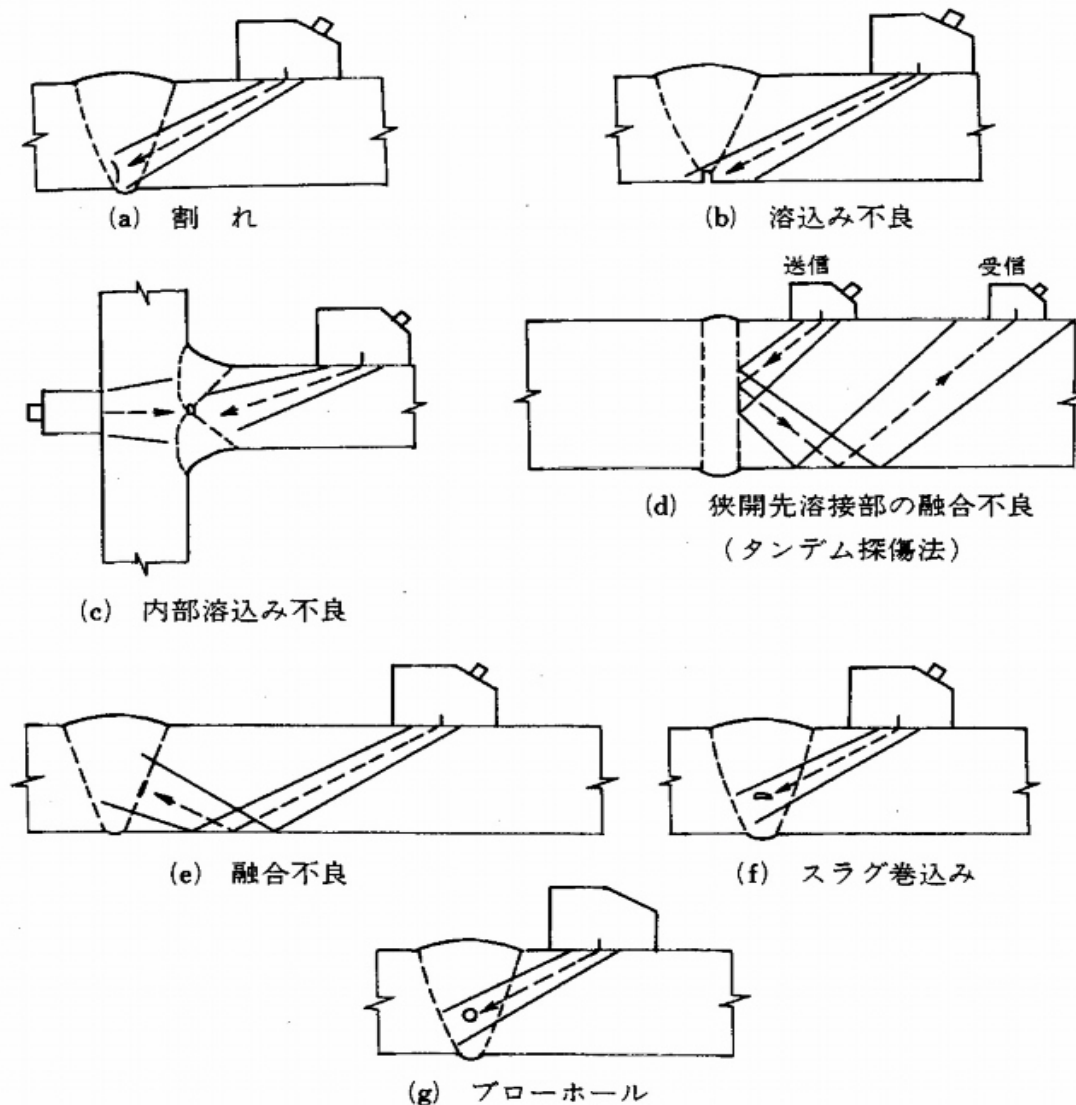
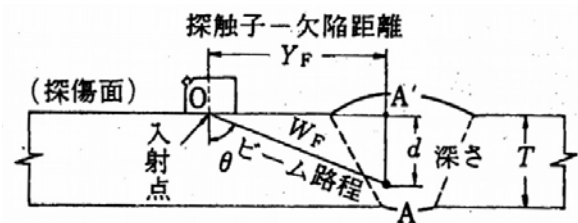
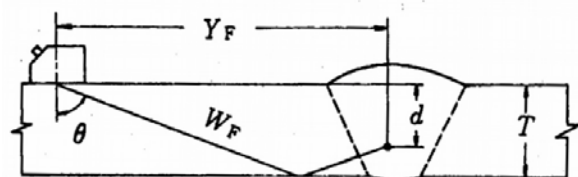


図4.21 溶接欠陥の種類と検出方法

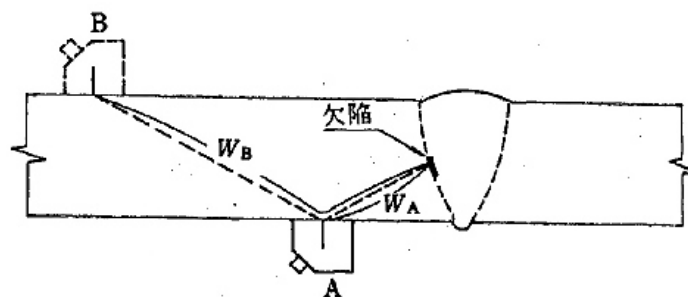


(a) 直 射 法

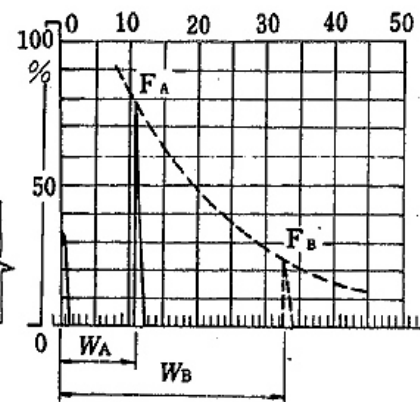


(b) 一回反射法

斜角探傷による欠陥位置の推定



(a) 欠陥をねらう探触子位置



(b) ブラウン管上でのエコー高さ

ビーム路程の変化によるエコー高さの変化

6. 接触媒質

- 探触子と非検査体の間に充填する

表 接触媒質の種類と特徴

種 類	特 徴 な ど
水	経済的，入手容易，油気のある探傷面，傾斜では使いづらい。
マシン油	入手容易，標準試験片に適する。粗面には不向き。
グリセリン	75%以上の濃度では，伝達効率が良い。粗面に対して有利探傷面とのなじみが悪い。傾斜面では，使いづらい。発錆作用があり，標準試験片には，不向き。浸透性が強く，装置故障の原因になりやすい。JIS Z 3060で使用を推奨。
水ガラス	グリセリンより伝達効率が良い。強アルカリ性で皮膚を痛める。乾燥すると固化して探触子を痛めやすい。
でん粉のり	粘性を調整できる。伝達効率は，水と大差がない。
グリセリンペースト	グリセリンに少量の界面活性剤及び増粘剤を添加した，のり状の接触媒質。チクソトロピー性を有するため，走査性及びエコーの安定性にすぐれている。

7. 欠陥の寸法測定と形状確認

7.1 寿命評価のための欠陥寸法測定方法

最近はパソコンの発達で超音波波形の電算によるデータ処理技術が進歩しており、従来の時間-波形曲線による単独処理よりも、データを蓄積、2次元、3次元の解析処理による図式化が進んでいる。

① 端部エコー法

従来から行われているが、結果の信頼性は探傷者の技量に依存している。

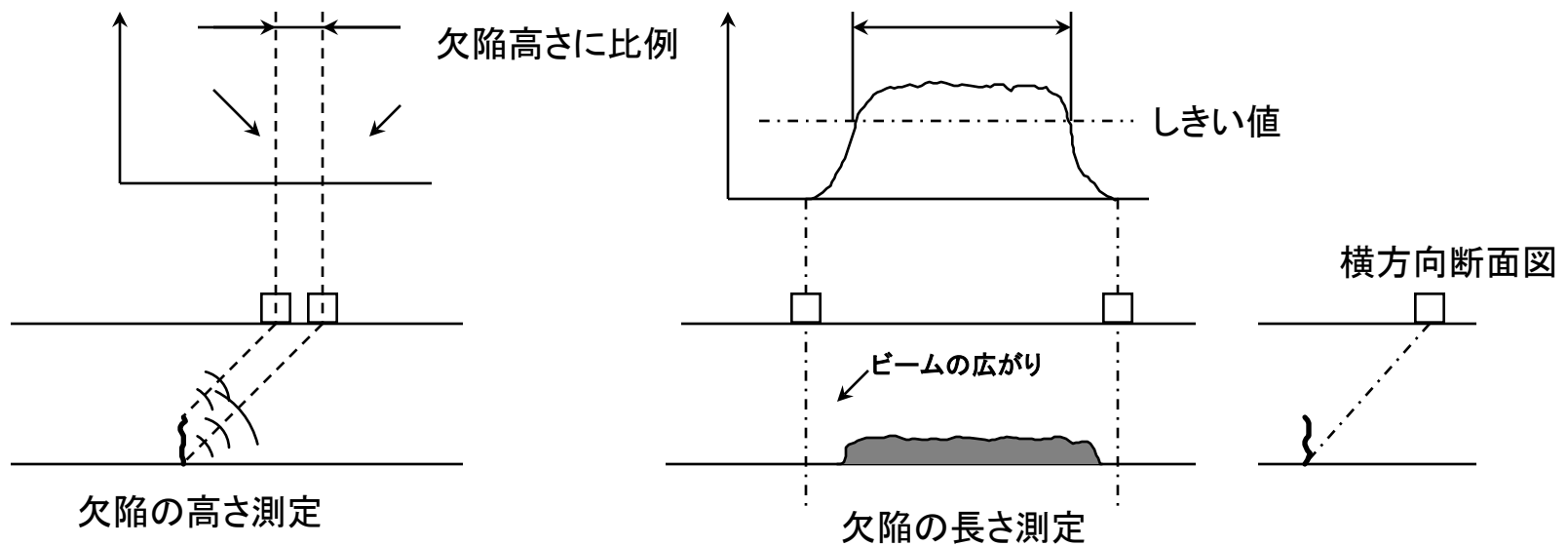
② TOFD法

欠陥寸法の測定性に優れているが、探傷部形状により制限を受ける。

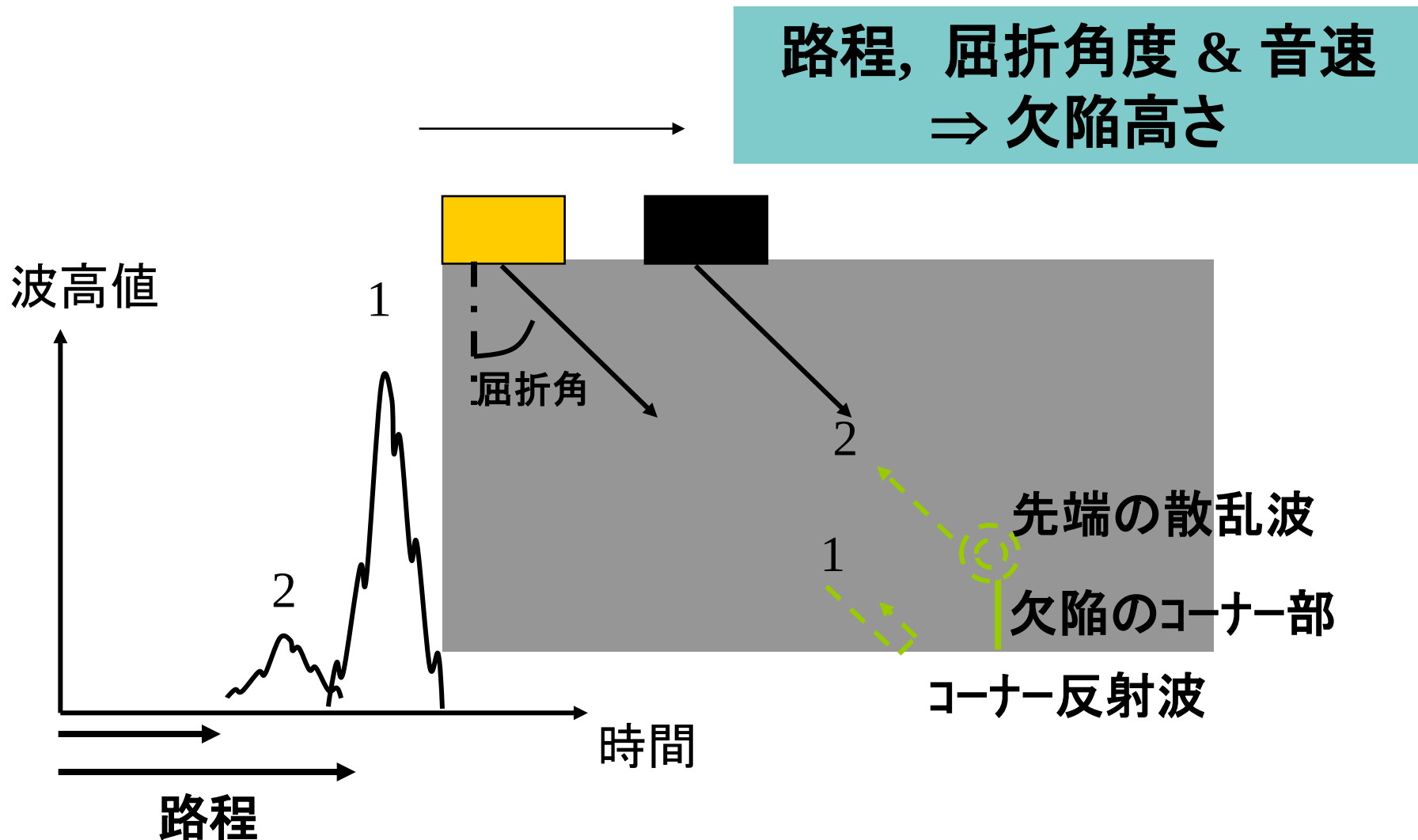
③ フェーストアレイ法

欠陥形状の描写力に優れる新技術。探触子が大きい。

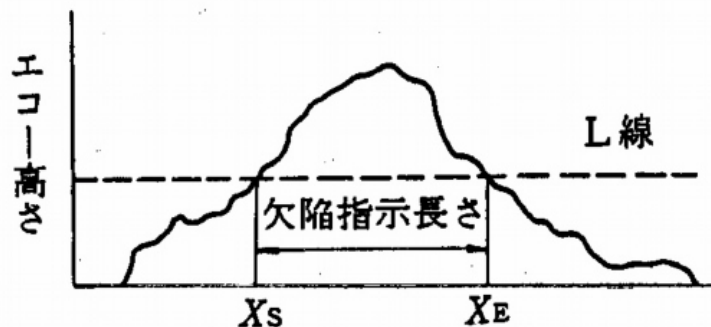
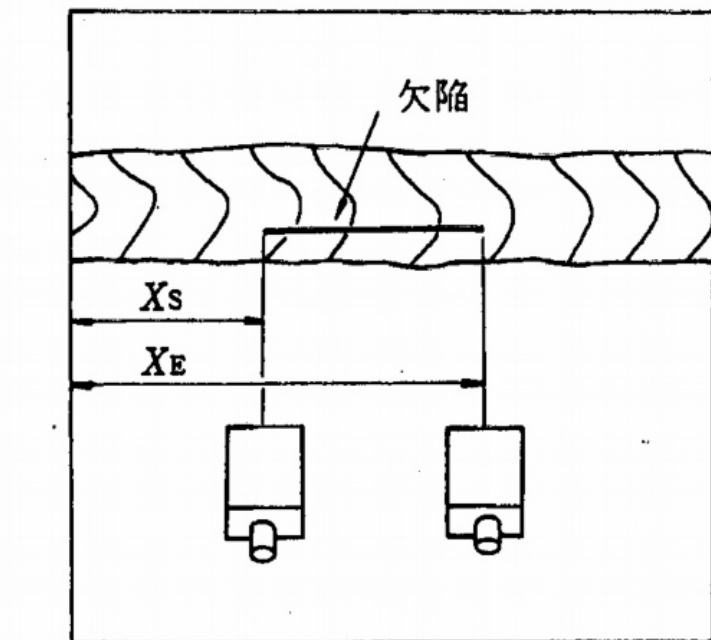
7.1 超音波による欠陥寸法測定原理



7.2 従来の欠陥寸法測定法(端部エコー法)



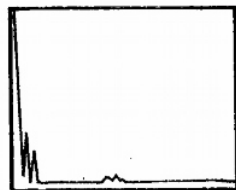
7.3 溶接継手部の欠陥長さの測定法



欠陥指示長さの測定
(JIS Z 3060)

⑬ 溶接部の割れ検出

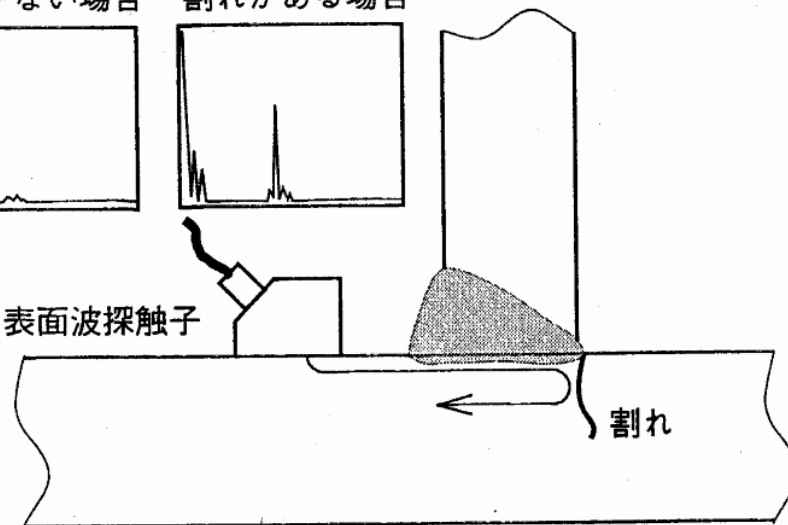
割れない場合



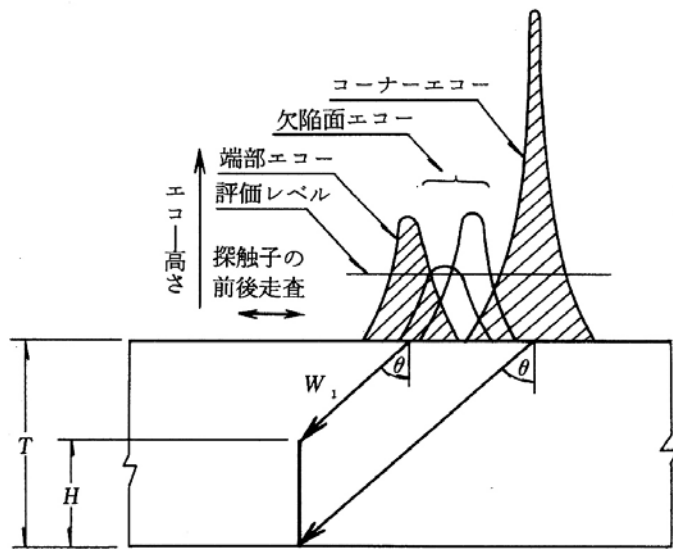
割れがある場合



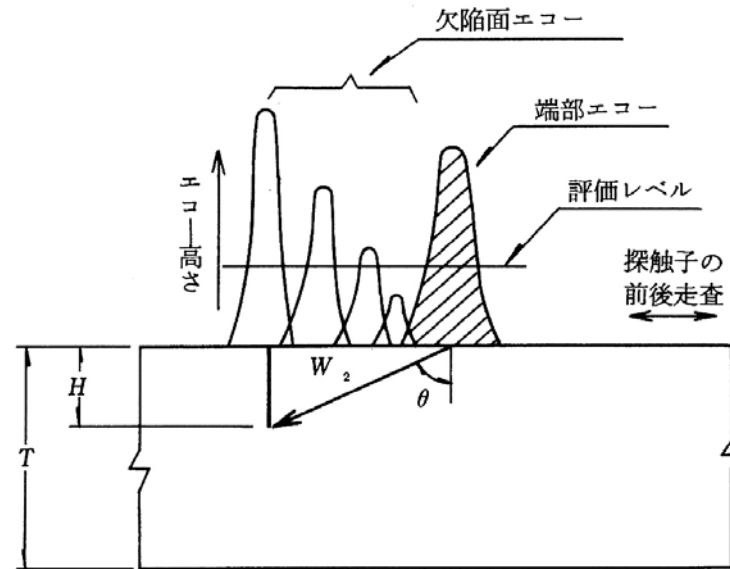
表面波探触子



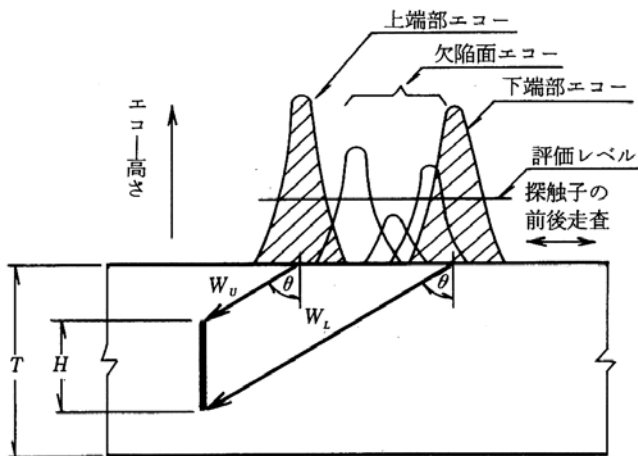
7.4 斜角法による端部エコーのとりえ方



(a) 探傷面と反対側にある表面開口欠陥



(b) 探傷面と同じ側にある表面開口欠陥

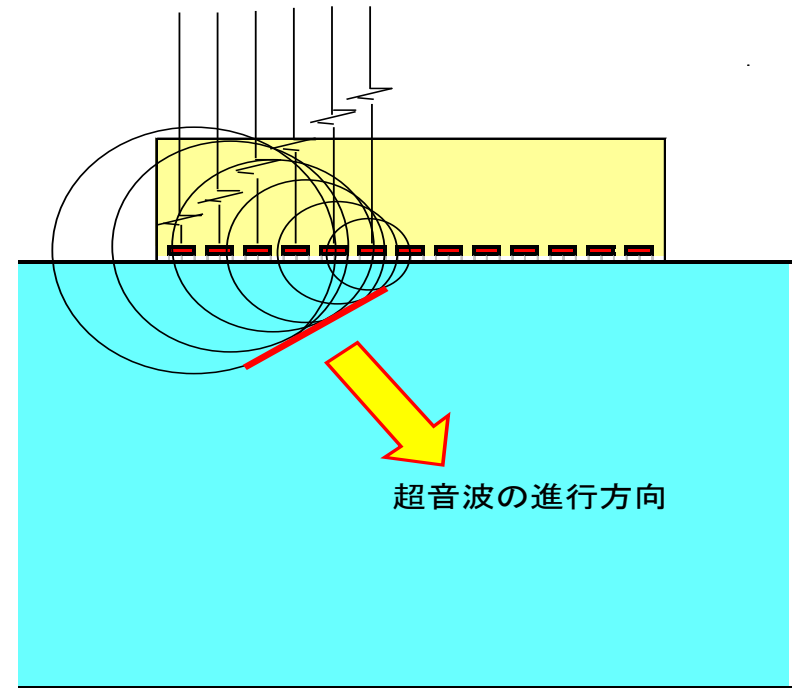
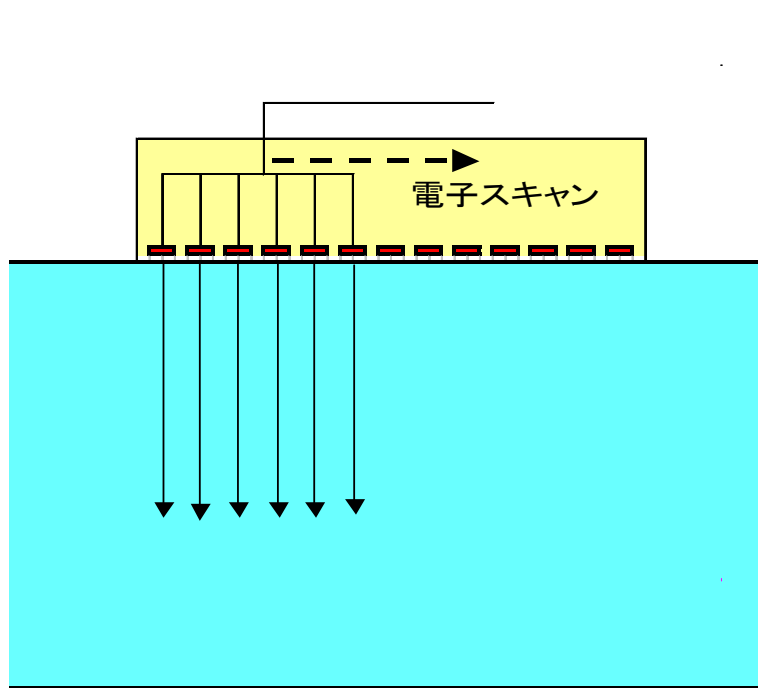


(c) 内部欠陥

8. 新しい超音波計測法(フェーズドアレー探傷)

電子スキャンによる大量のデータの高速採取

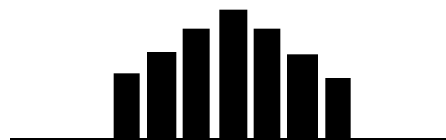
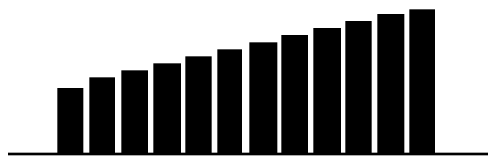
リニアスキャン、セクタスキャン、電子フォーカシング等



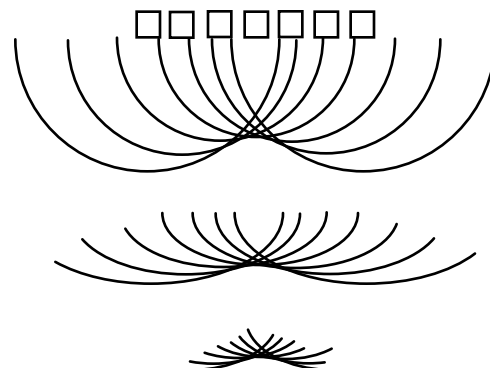
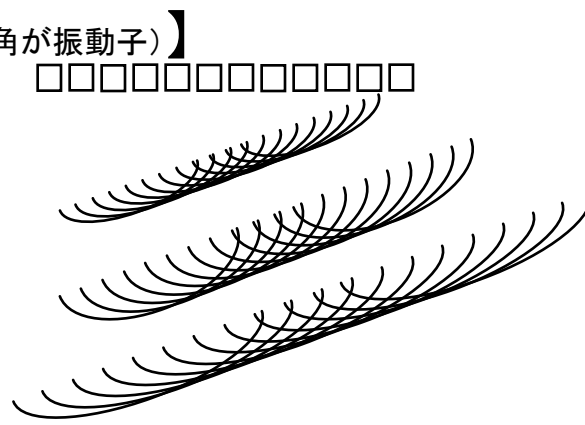
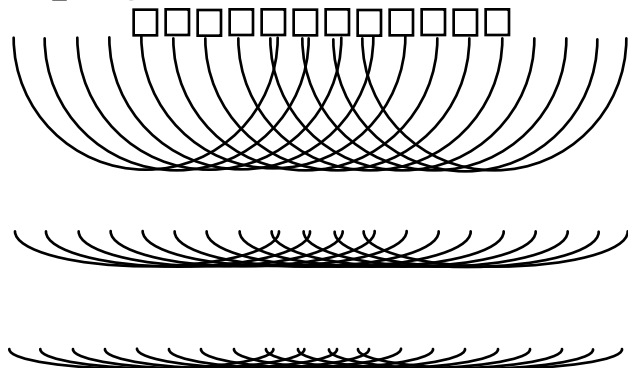
原 理

8. 1 フェーズドアレイ法の波形の出方

【振動子毎の遅延時間】



【超音波波面の進行状況 (白四角が振動子)】



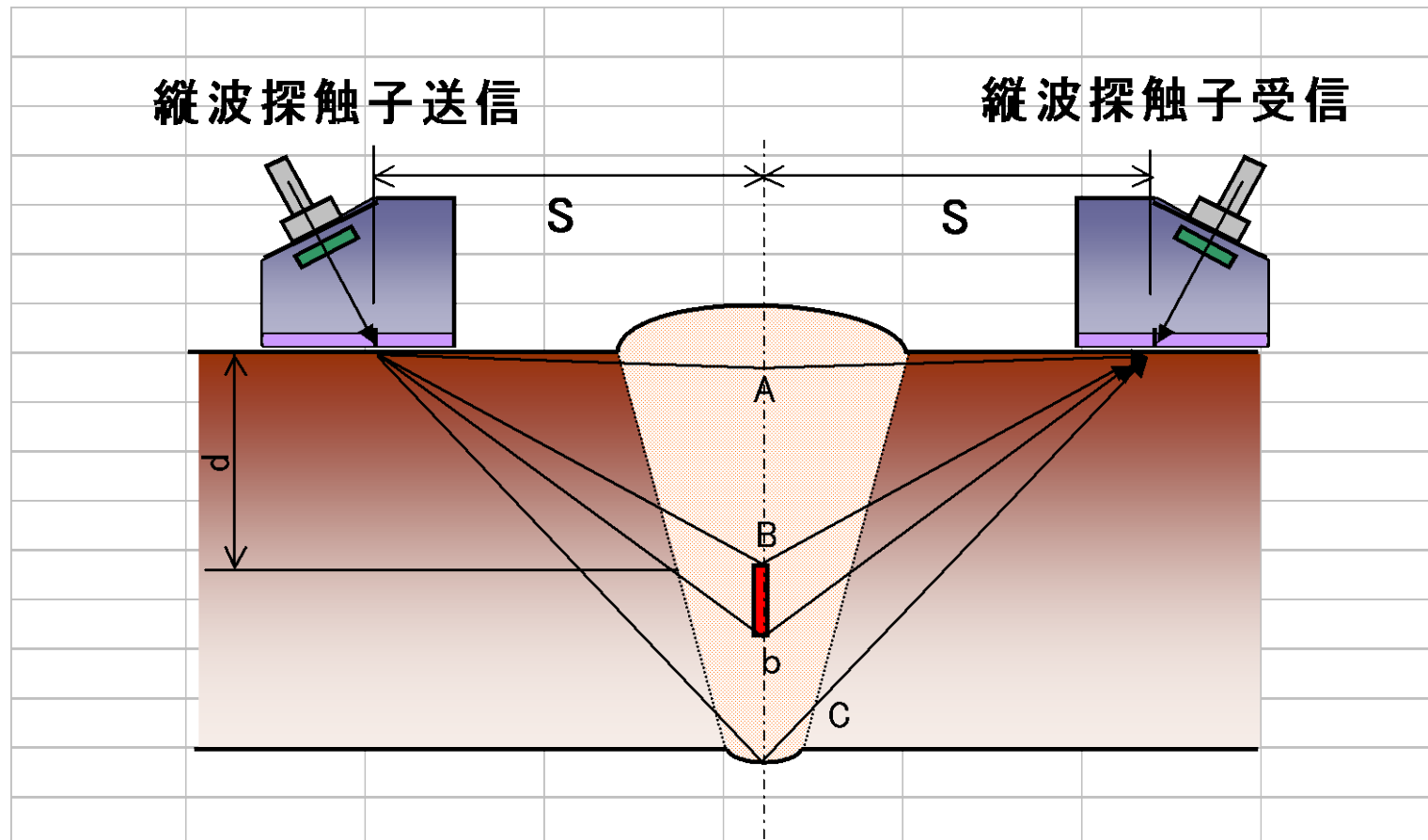
各振動子が同時に励振した場合の超音波波面

各振動子の励振時間を調整し、
屈折角を制御した場合の超音波
波面

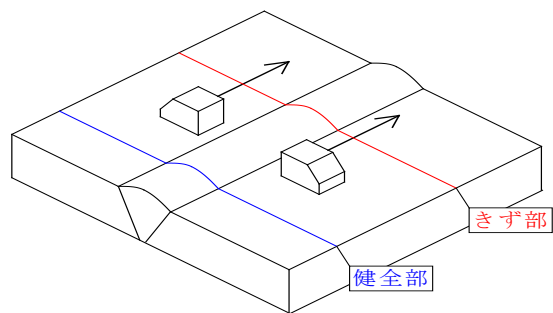
各振動子の励振時間を調整し、
焦点を制御した場合の超音波
波面

9. 新しい超音波計測法 (TOFD法)

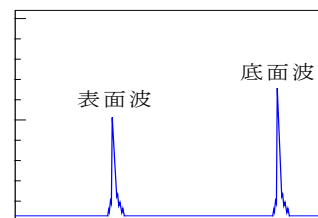
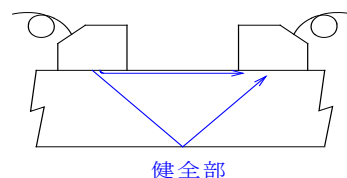
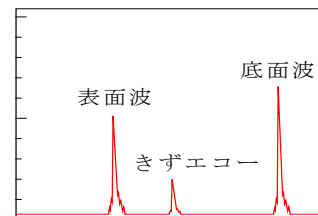
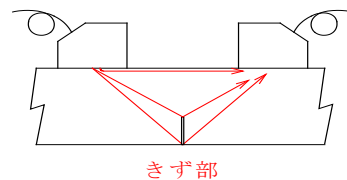
- TOFD法 (Time of flight diffraction technique) の原理
波形をパソコンに取組、データ処理による図式化を図る。



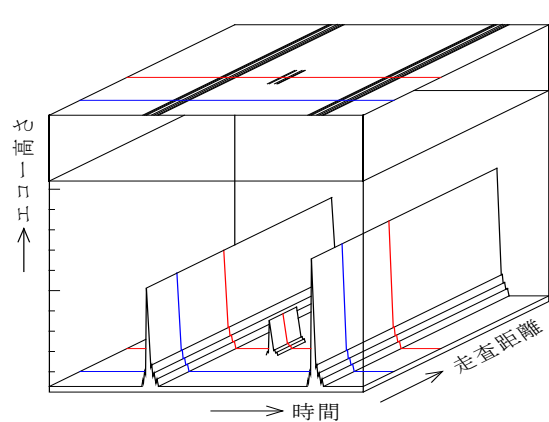
9.1 TOFD法の解説



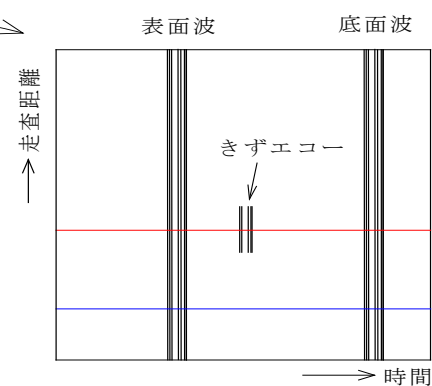
探触子の走査



各部の探傷波形



Bスコープ変換のイメージ図

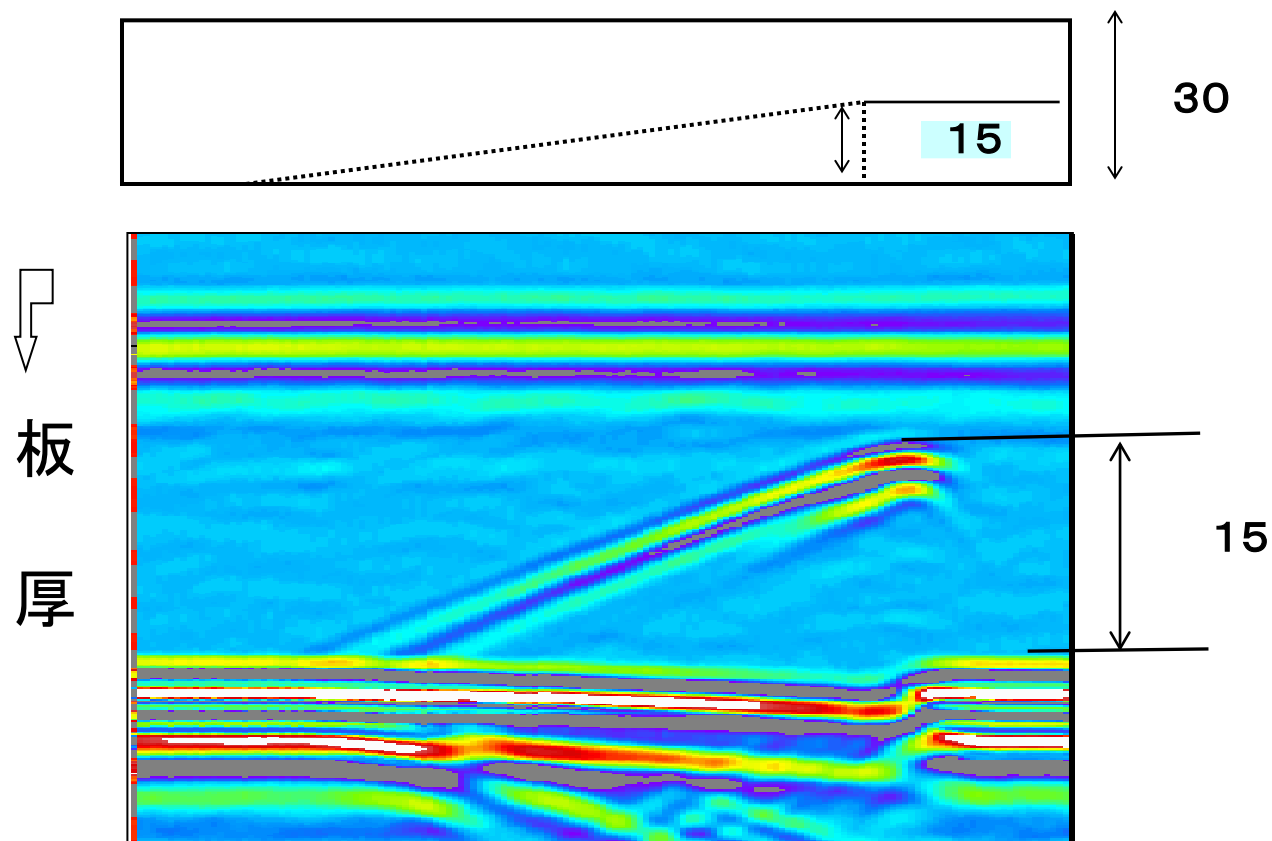


エコー高さは画像の濃淡で表します。

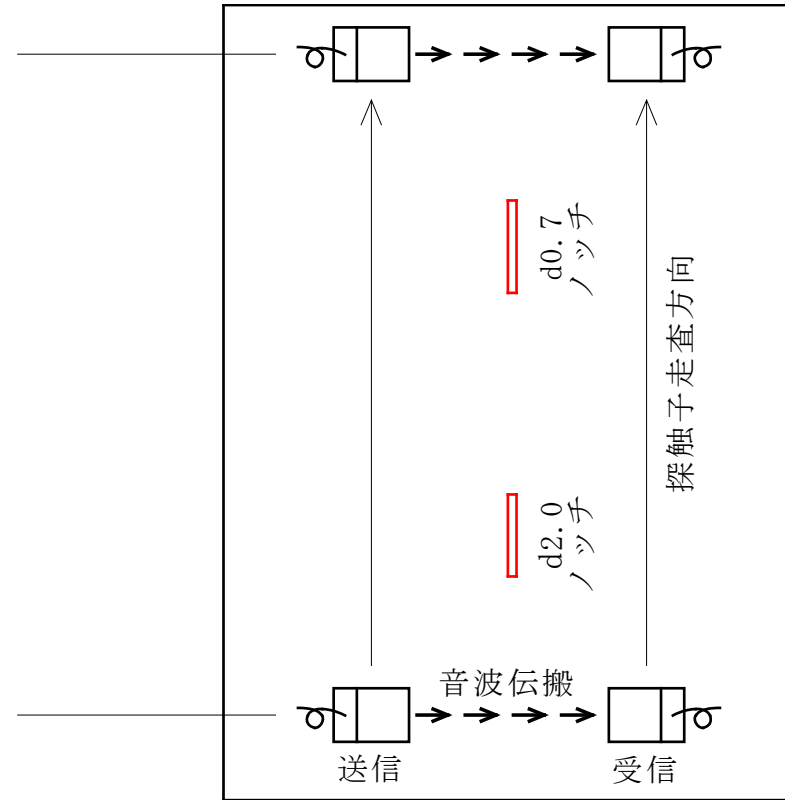
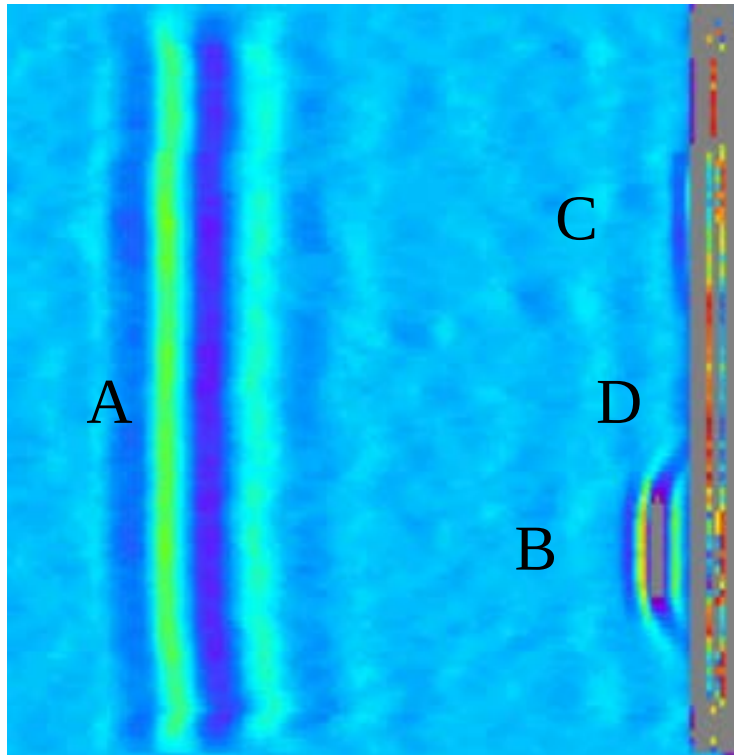
Bスコープ画像

9.2 TOFD法による表示例

- 裏面開口ノッチの探傷例



9.3 TOFD法による人工ノッチの検出画像



A: 表面波

B: d2.0ノッチからのきずエコー

注意点: サイジングには表面波、底面波を受信する必要があるのですが、構造的にこれらの反射波を受信できない部位については、探傷のみとなる。

9.4 TOFD法によるクリープ損傷評価例

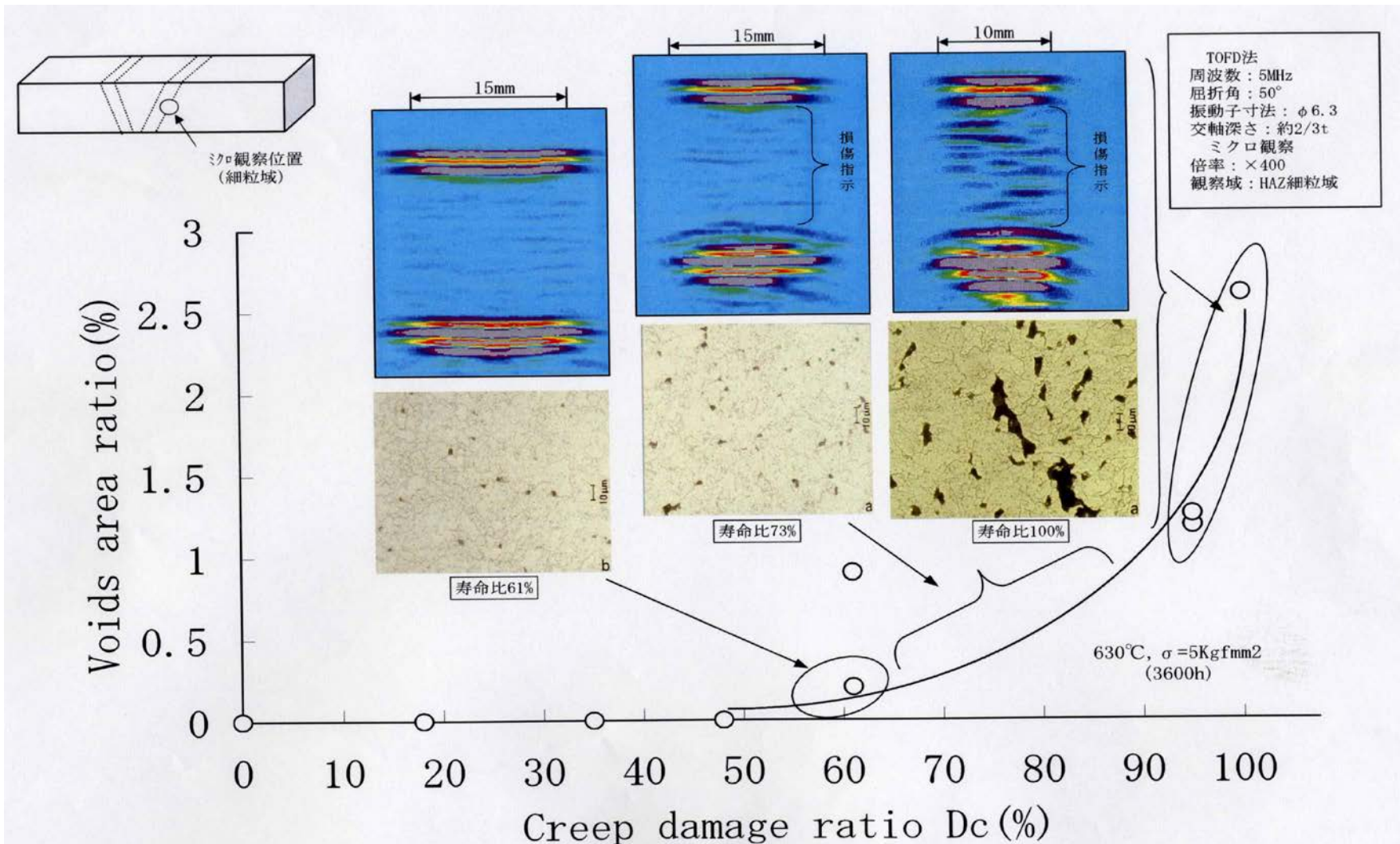
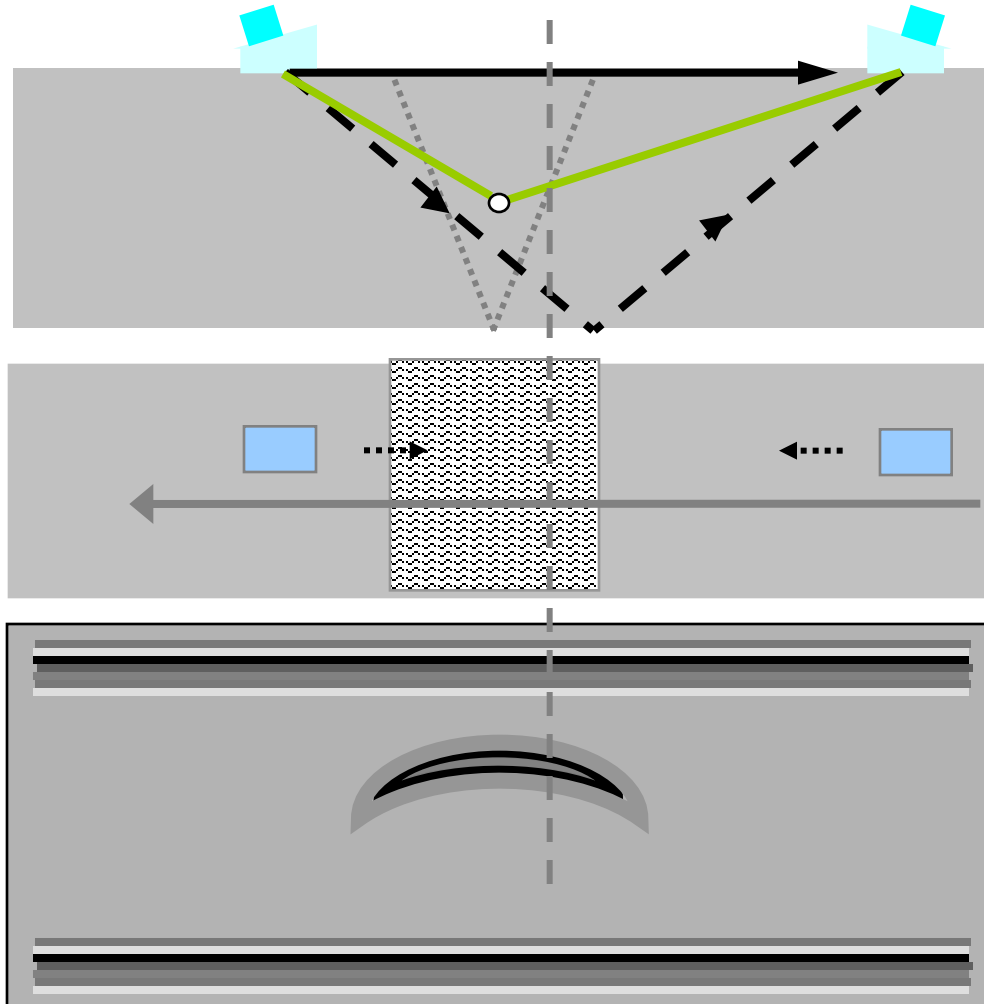


図10 クリープ損傷におけるボイド面積率とTOFD画像の検出推移

9.5 TOFD画像の表示

指示の路程は
欠陥直上に来
たときに最小と
なる



ラテラル波

試験体上面

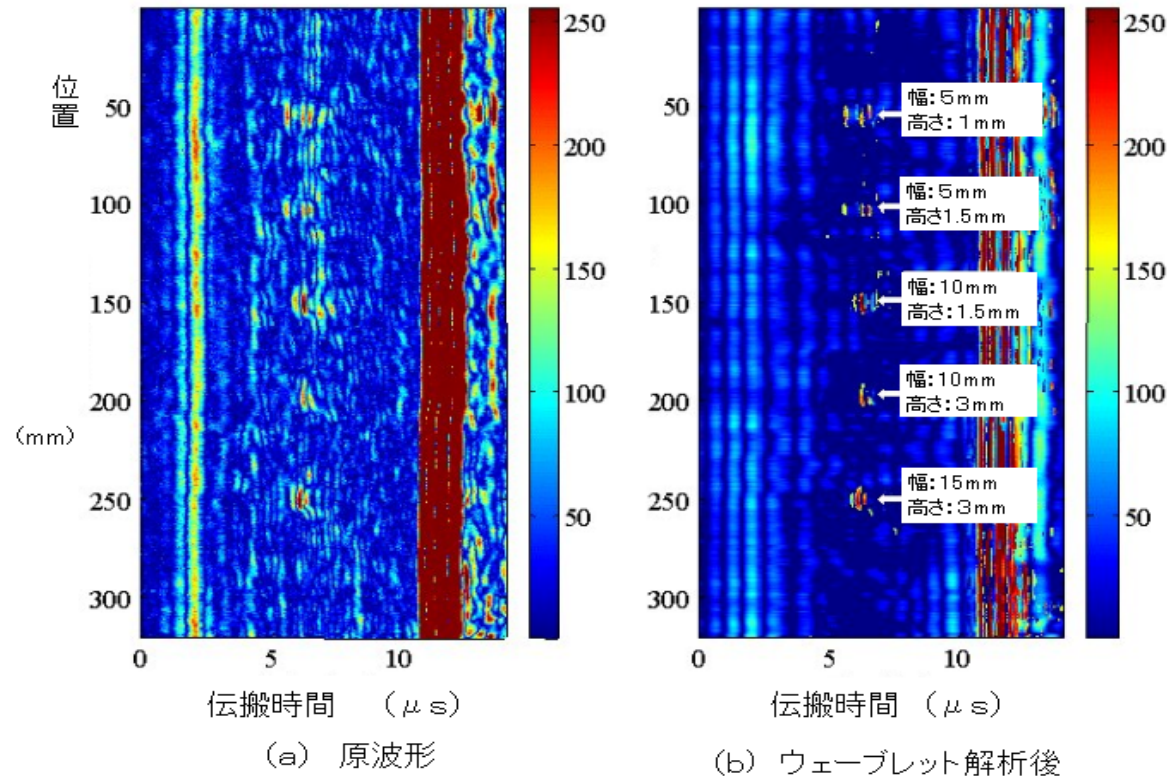
底面

断面表示

この場合の指示の表示は放物線となる

9.6 TOFD画像の表示例

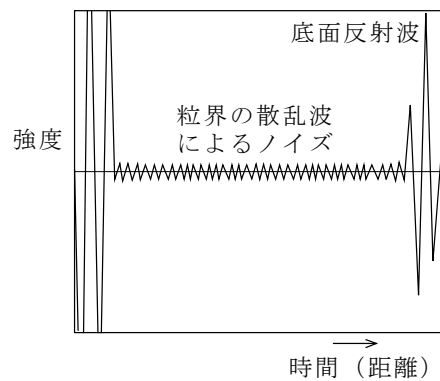
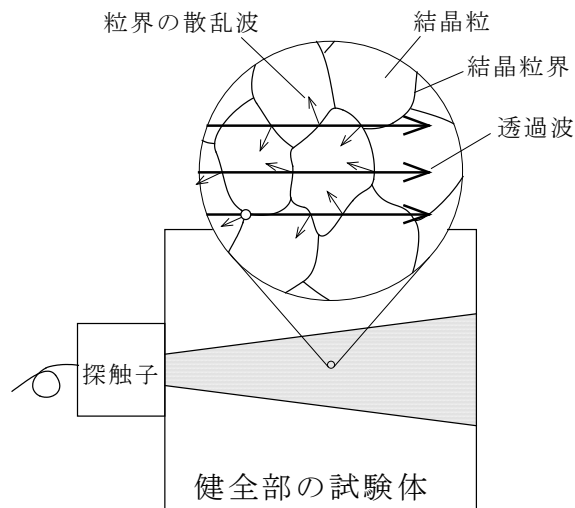
超音波TOFD画像への適用例



インコネル溶接部の融合不良の超音波TOFD像

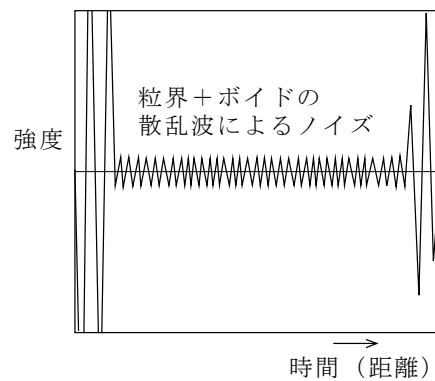
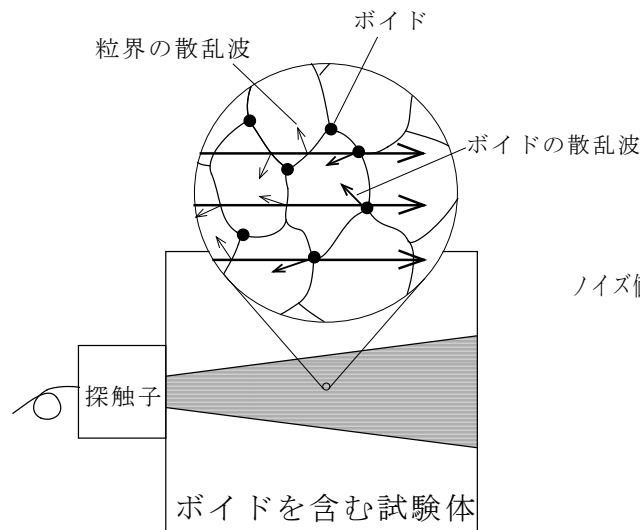
10. 新しい超音波計測法(超音波ノイズ分析法)

健全部

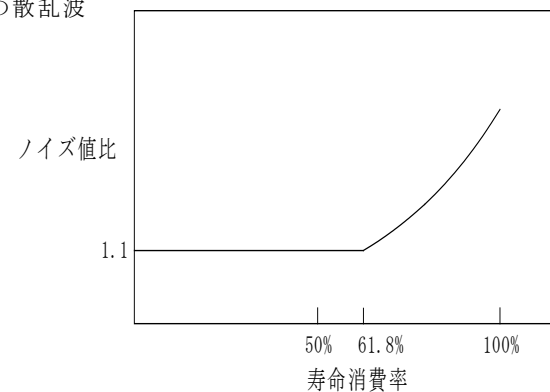


波形画像

ボイド発生部



波形画像



11. 新しい波形解析方法

ウェーブレット解析の概念

マザーウェーブレットを伸縮、平行移動
類似の成分を抽出



時間軸情報を持った周波数解析

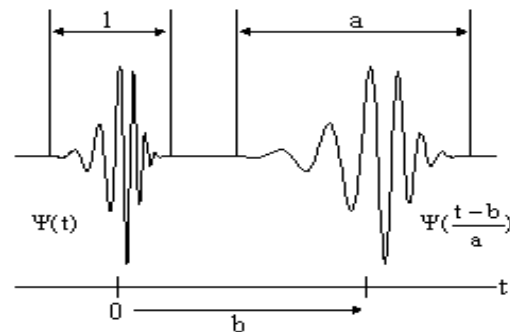
超音波探傷波形を分解

きず信号の周波数特性と
ノイズ信号の周波数成分を分離

アルゴリズムの構築

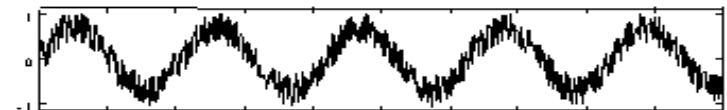


SN比の向上

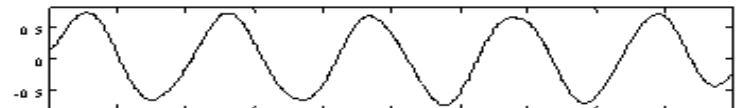


db10 マザーウェーブレット

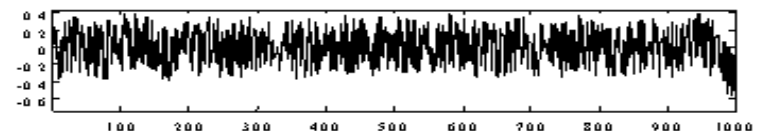
(a) 原波形



(b) 信号(S)



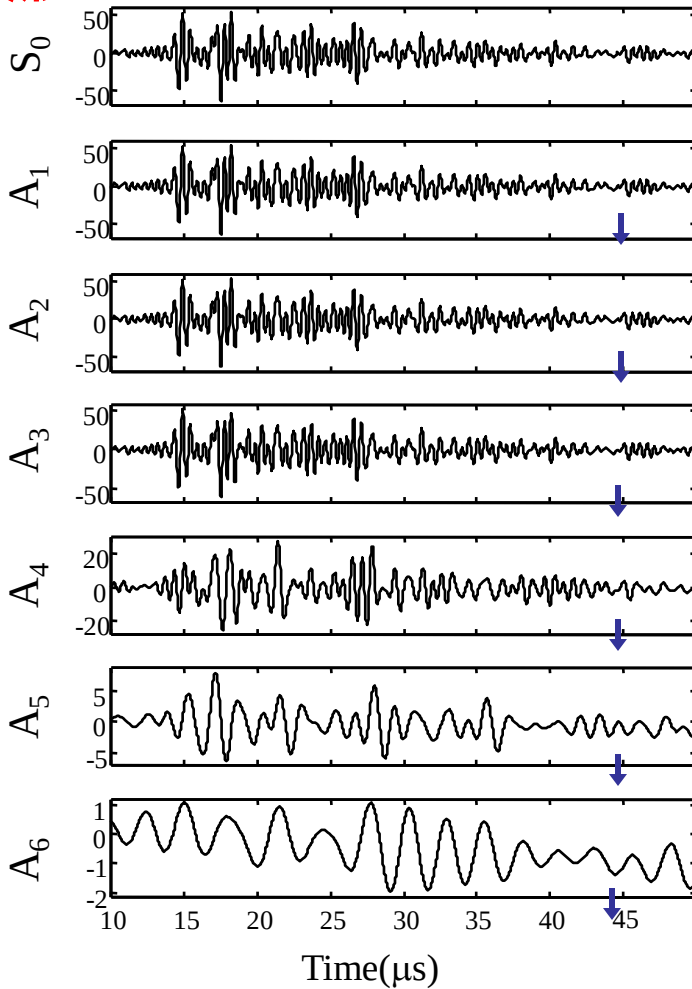
(c) ノイズ(N)



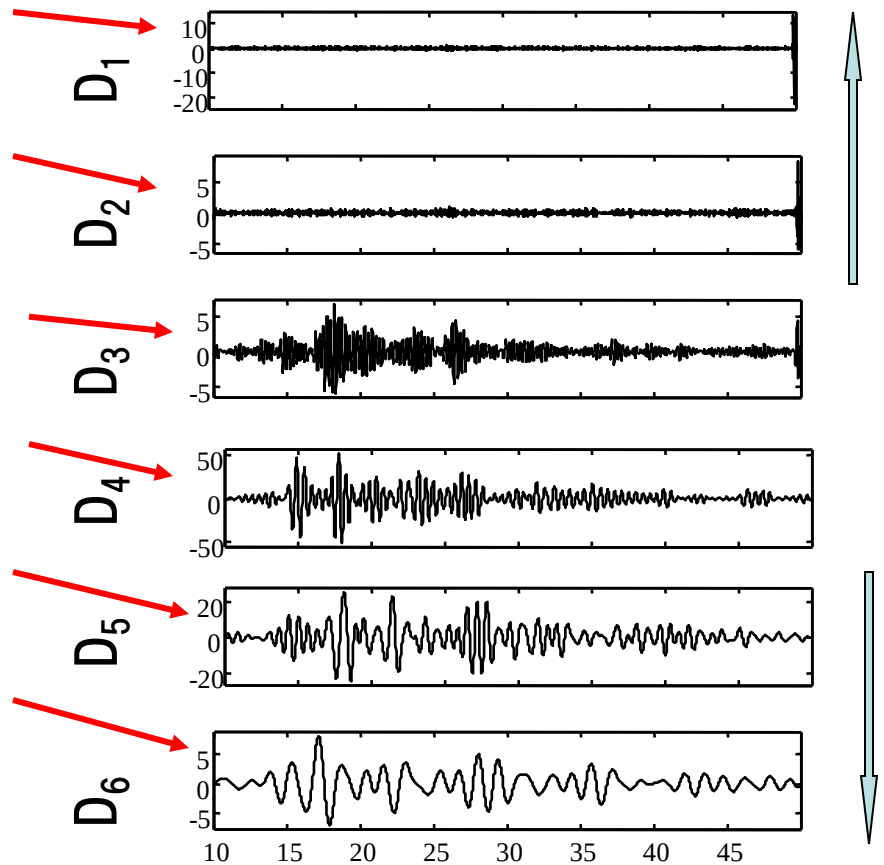
11.1 超音波波形の周波数分解例

原波形

Processed by db10



高周波数成分

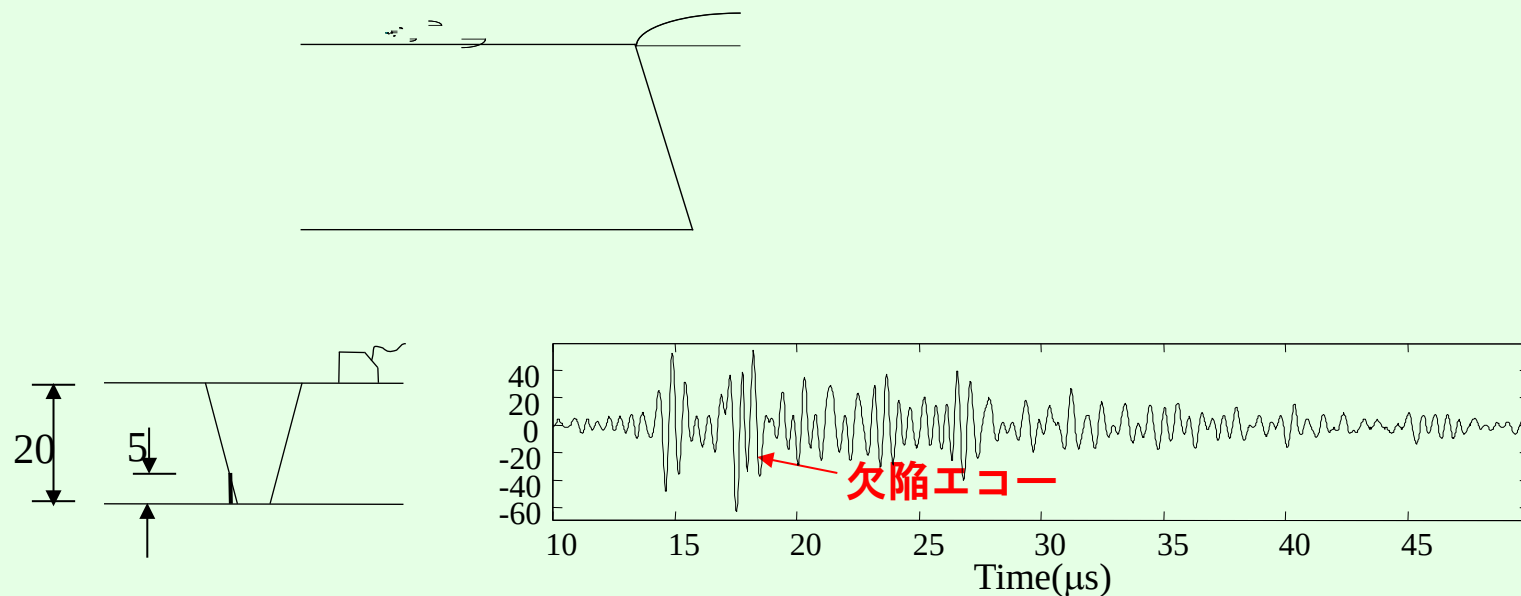


低周波数成分

11.2 ウェーブレット波形による評価例

オーステナイト系溶接部超音波探傷の現状

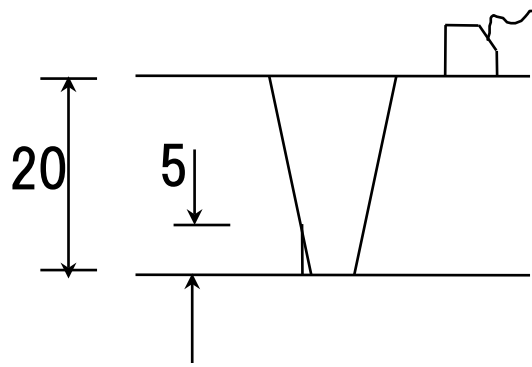
①オーステナイト系溶接部は柱状晶による疑似エコーが発生し、直感性のあるデータが得られない。



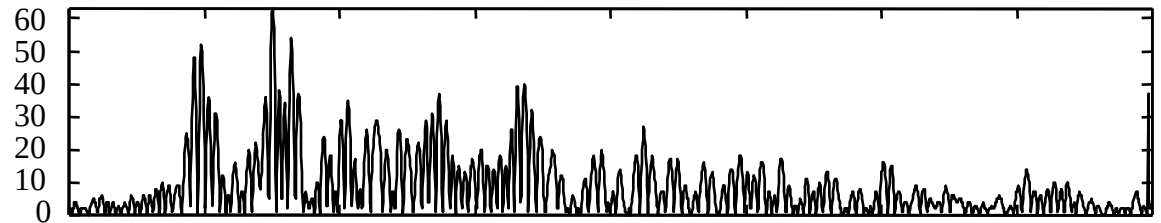
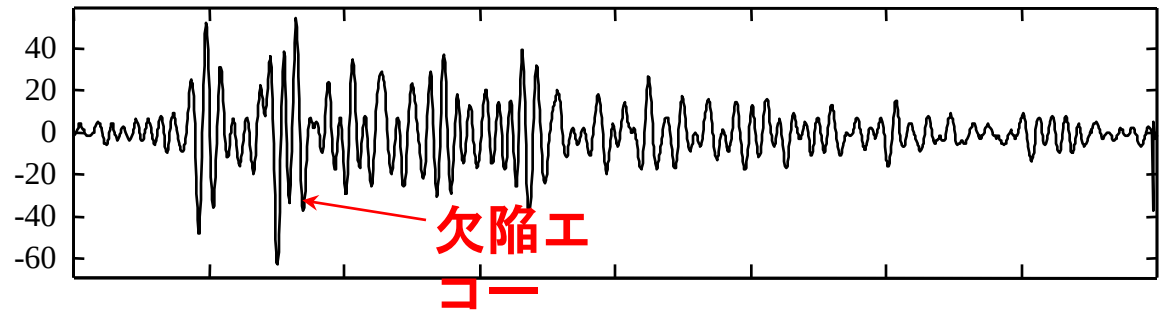
11.3 ウェーブレット法による検査方法

オーステナイト系ステンレス溶接部への適用例

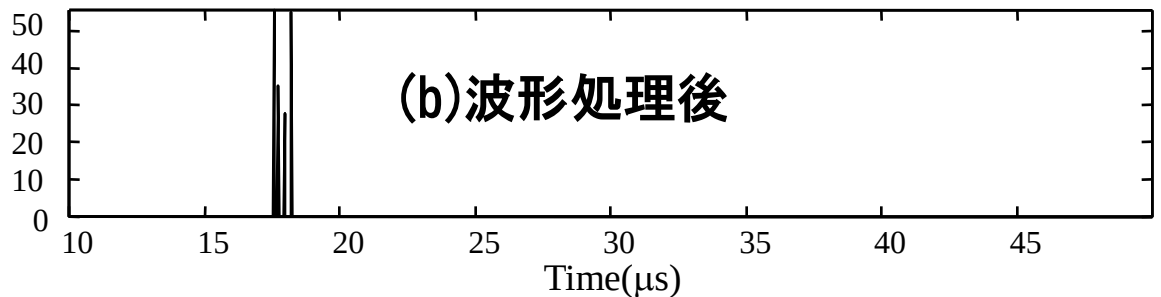
波形解析結果



(a)原波形



(b)波形処理後



参考文献

主たる参考文献

非破壊検査概論：日本非破壊検査協会

超音波探傷試験実技テキスト：日本非破壊検査協会

鉄骨溶接部の超音波探傷試験実技マニュアル：日本非破壊検査協会

JISハンドブック：43 非破壊検査

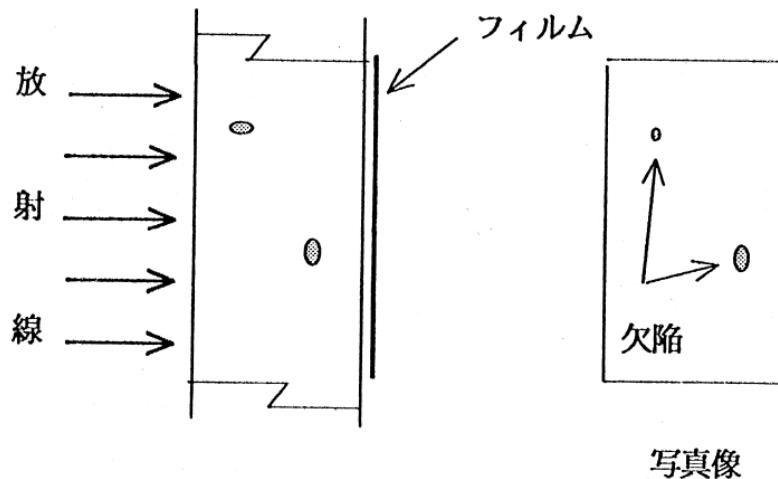
非破壊検査2

機械工学専攻 酒井信介

目 次

- | | | |
|------------|----|----------------------------|
| 1. 放射線透過試験 | RT | 5 目視試験 |
| 2. 浸透探傷検査 | PT | 6 レプリカ法 |
| 3. 磁粉探傷試験 | MT | 7 応力計測・ひずみ計測・軸 |
| 4. 渦流探傷試験 | ET | 力計測・その他 |
| | | 8 欠陥の種類(非破壊検査の
対象となるもの) |
| | | 9 欠陥の有害性 |

1. 放射線透過試験(RT)



1.1.1 図-1 放射線透過試験の原理

B. 放射線の種類

(A) 電磁波

① X 線

② γ 線

(B) 粒子線

① α 線

② β 線

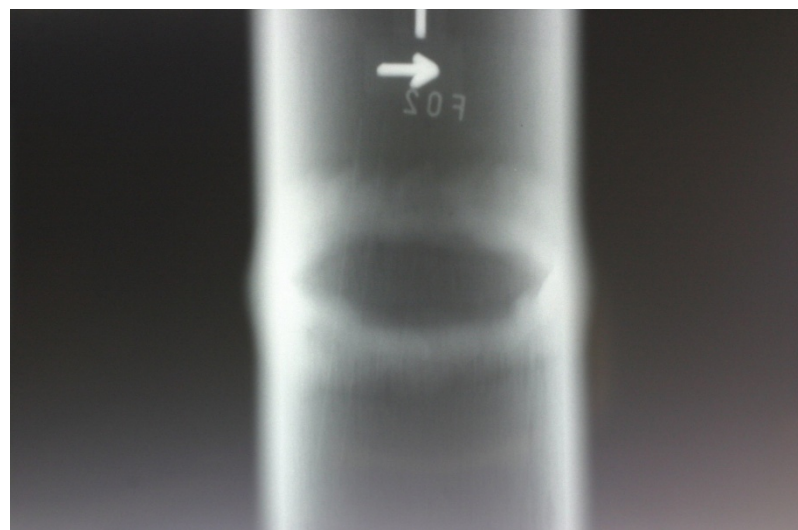
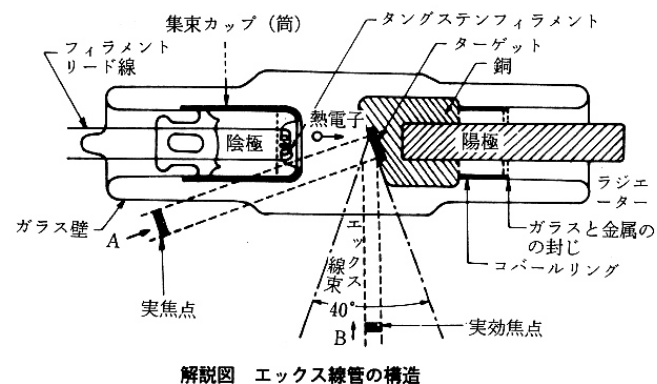
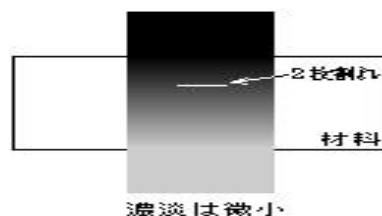
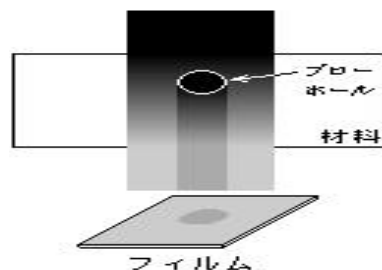
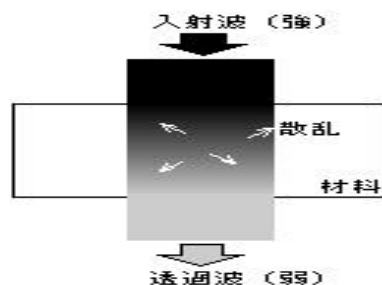
③ 中性子線

C. 放射線の特徴

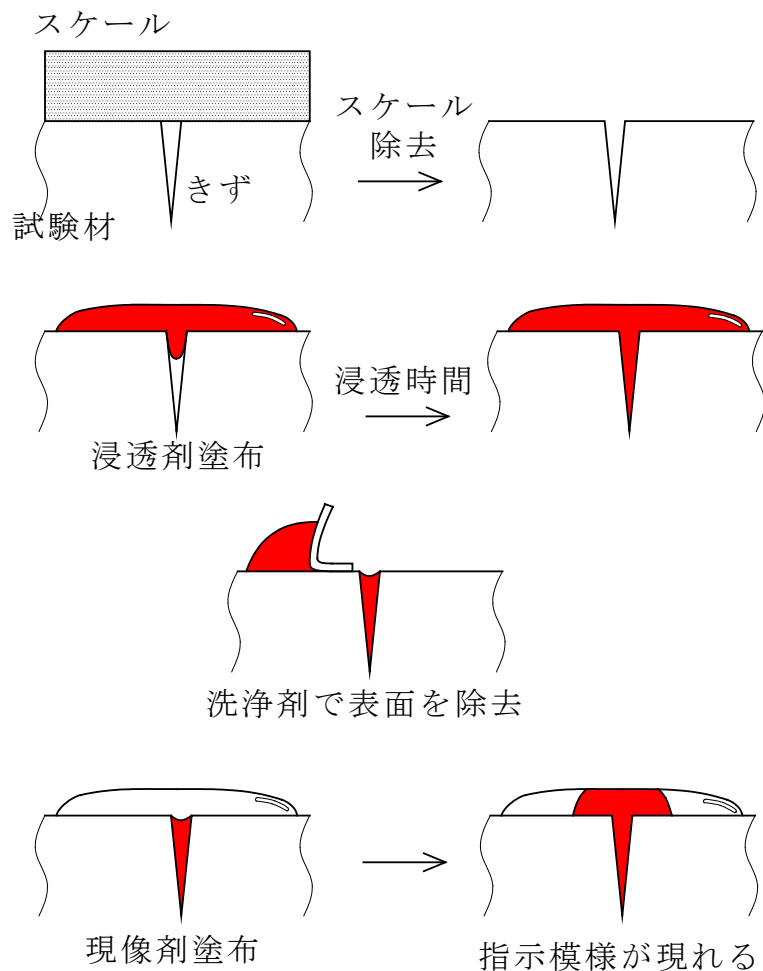
- * 物質を透過しやすい。
- * 電離作用がある。
- * 蛍光作用がある。
- * 写真作用がある。
- * 距離の二乗に反比例して減弱する。
- * 物体を透過することにより吸収・散乱され強さは弱くなる。
- * 散乱・回折する性質がある。

1. 1 RT法の測定例

X線写真



2 浸透探傷試験(PT)の原理



疑似模様

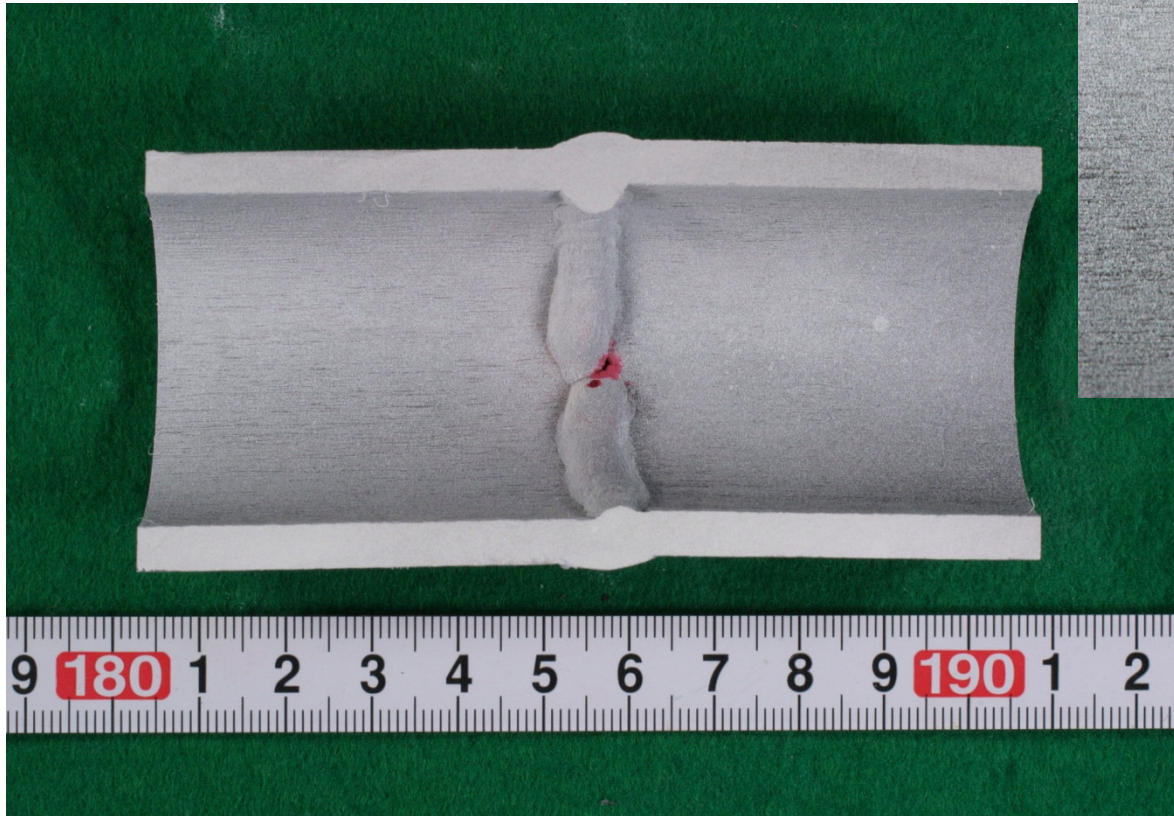
洗浄不足

スケール残存

きず見逃し

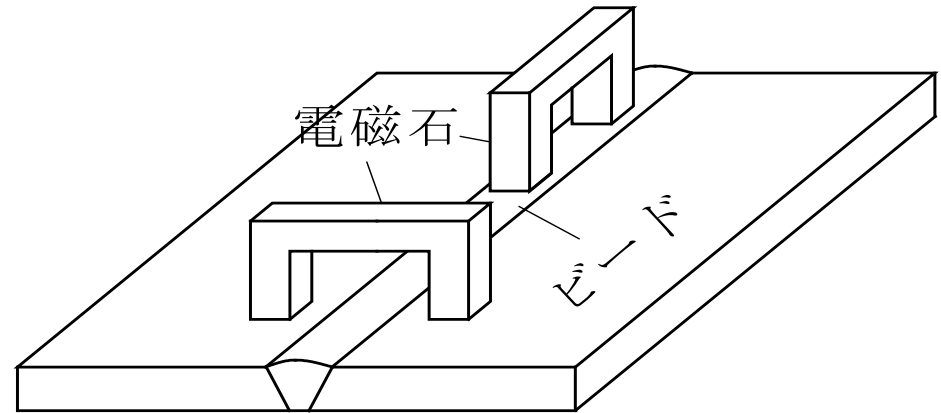
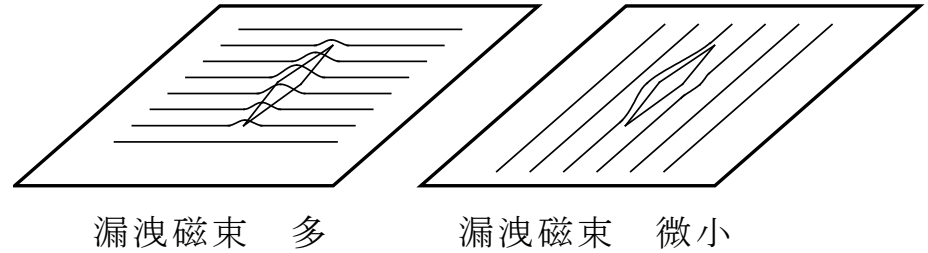
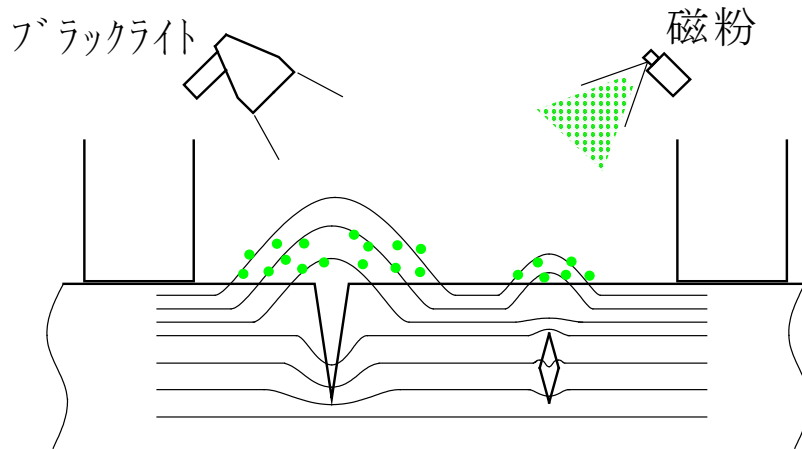
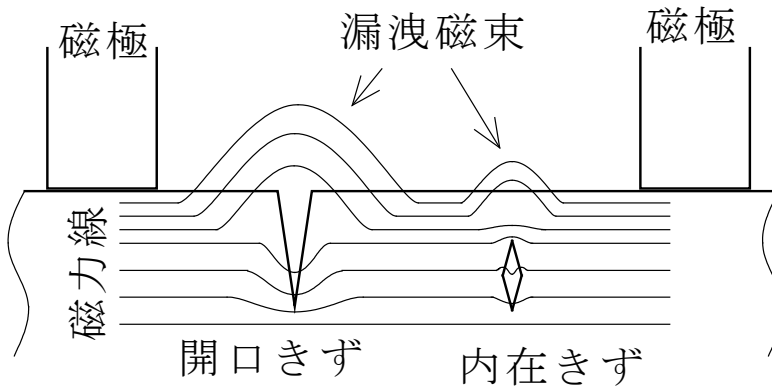
浸透不足

2. 4 PT試験結果例



3. 磁粉探傷試験(MT)

強磁性体で出来ている供試体を磁化し、傷部で不連続になり、磁粉が凝集・吸着して模様が出来る。この模様を評価する。



直交方向に磁力線を通す

8.1 磁化の方法(JIS参照)

表4 磁化方法

磁化方法	符号	備考	図
軸通電法	EA	試験体の軸方向に直接電流を流す。	図4
直角通電法	ER	試験体の軸に対して直角な方向に直接電流を流す。	図5
プロッド法	P	試験体の局部に2個の電極（これをプロッドという。）を当てて電流を流す。	図6
電流貫通法	B	試験体の穴などに通した導体に電流を流す。	図7
コイル法	C	試験体をコイルの中に入れ、コイルに電流を流す。	図8
極間法	M	試験体又は試験される部位を電磁石又は永久磁石の磁極間に置く。	図9
磁束貫通法	I	試験体の穴などに通した磁性体に交流磁束などを与えることによって、試験体に誘導電流を流す。	図10

3. 2 磁化の方法 JIS参照

図4 軸通電法

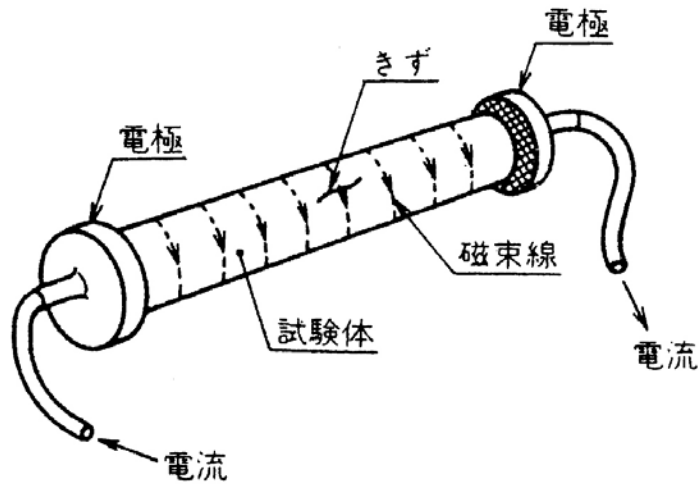


図6 プロッド法

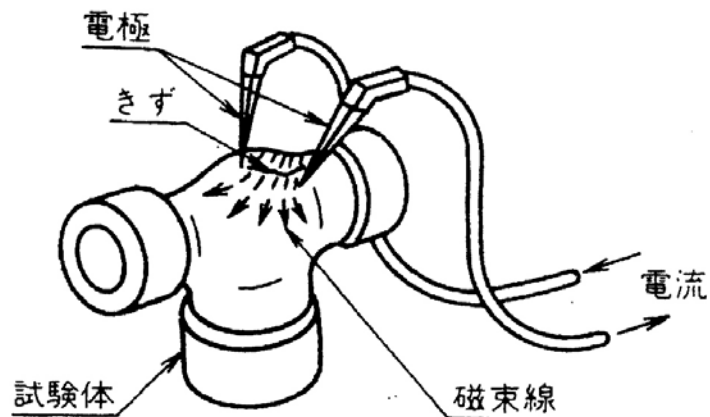


図5 直角通電法

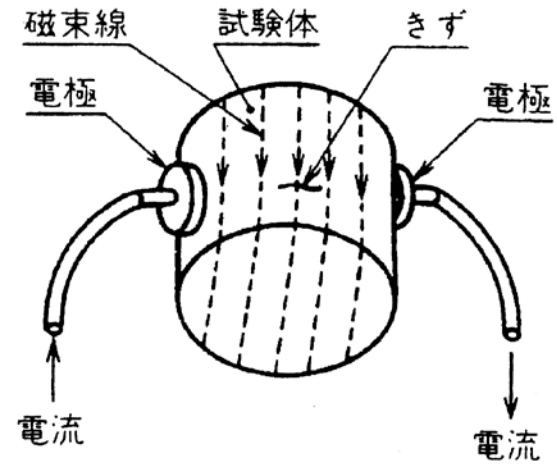
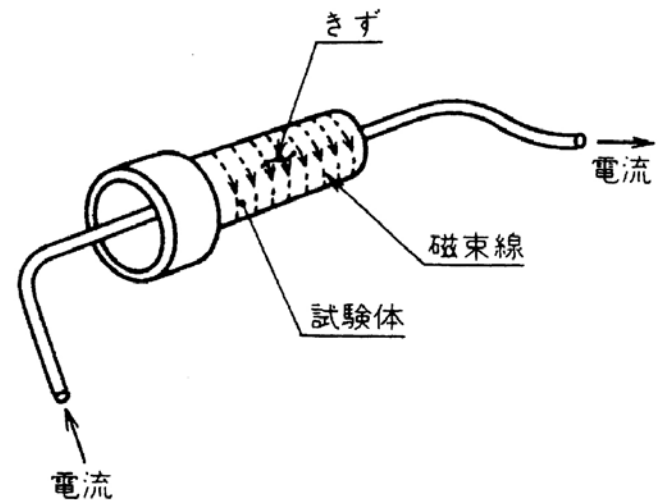


図7 電流貫通法



3. 3 磁化の方法 JIS参照

図8 コイル法

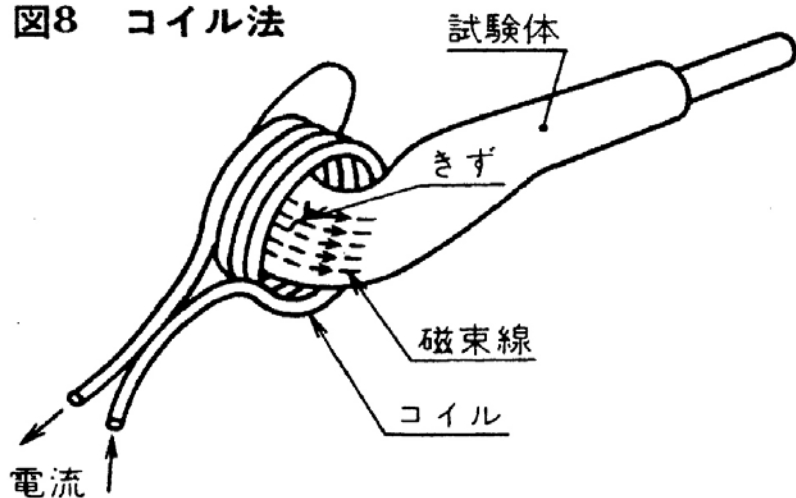


図9 極間法

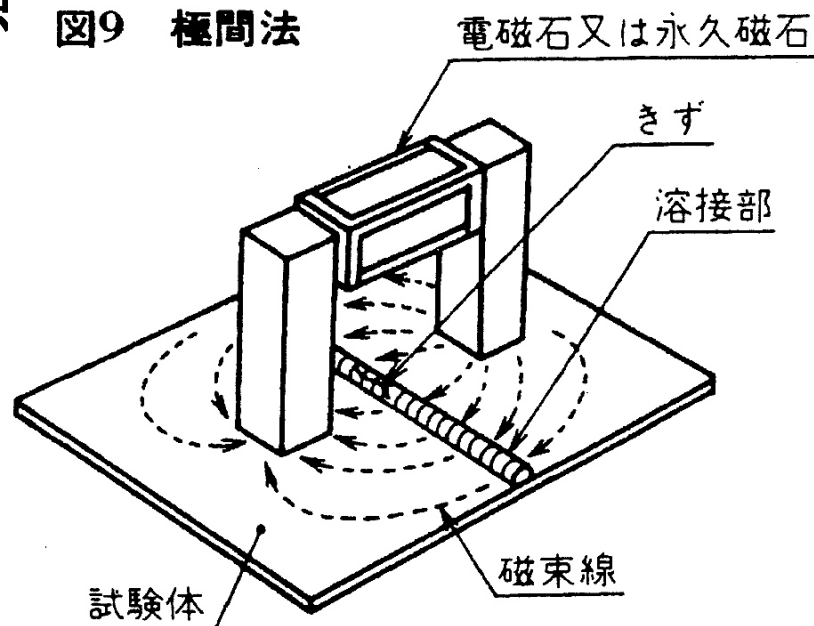


図10 磁束貫通法

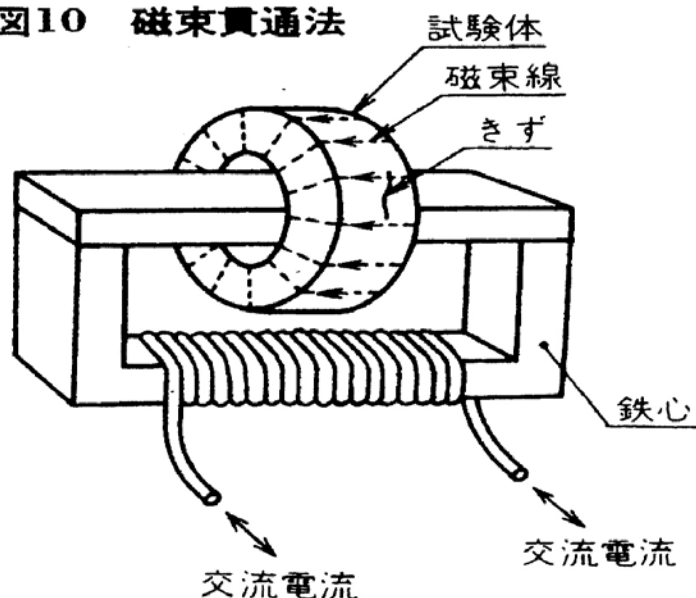
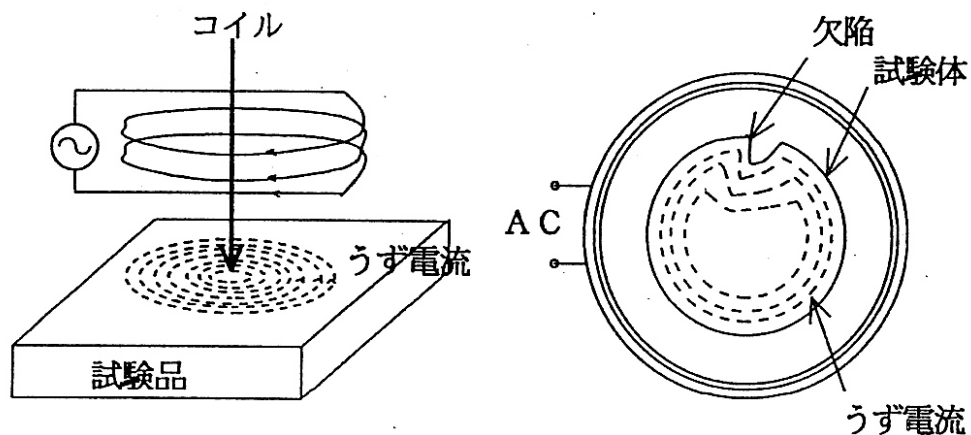


表5 探傷に必要な磁界の強さ

試験方法	試験体	磁界の強さ (A/m)
連続法	一般の構造物及び溶接部	1 200～2 000
	鋳鍛造品及び機械部品	2 400～3 600
	焼入れした機械部品	5 600以上
残留法	一般の焼入れした部品	6 400～8 000
	工具鋼などの特殊材部品	12 000以上

備考 ここでいう磁界の強さとは、予測される欠陥の方向に対して直角な方向の磁界の強さをいう。

4 渦流探傷試験(ET)



1.1.1 図-10 渦流探傷試験の原理

図1 試験コイルの形式及び方式

試験コイルの方式	試験コイルの形式	
	自己誘導形：S	相互誘導形：M
自己比較方式：B	巻線 1 2	一次巻線 二次巻線 1 2
標準比較方式：A	巻線 1 2	一次巻線 二次巻線 1 2

4. 2 電磁誘導試験の使い分け

種 類	適 用	現 象
探傷試験	鉄・非鉄の管・棒・板・線など	寸法・形状・位置など欠陥による変化
材質試験	非鉄材料	導電率の変化
	鉄鋼材料	透磁率の変化
膜厚測定	金属面状の絶縁体の膜厚	導体－コイル間距離の変化
	金属膜厚	厚さ測定
寸法計測	非鉄・鉄鋼材料	寸法・形状変化

電磁誘導試験は広義な意味で用いられ、傷の検出を主目的にする場合は、**渦流探傷試験**として使い分けられている。

4.3 交流電磁場測定法(ACFM)の原理と特徴

交流電磁場測定法(ACFM)の原理と特徴

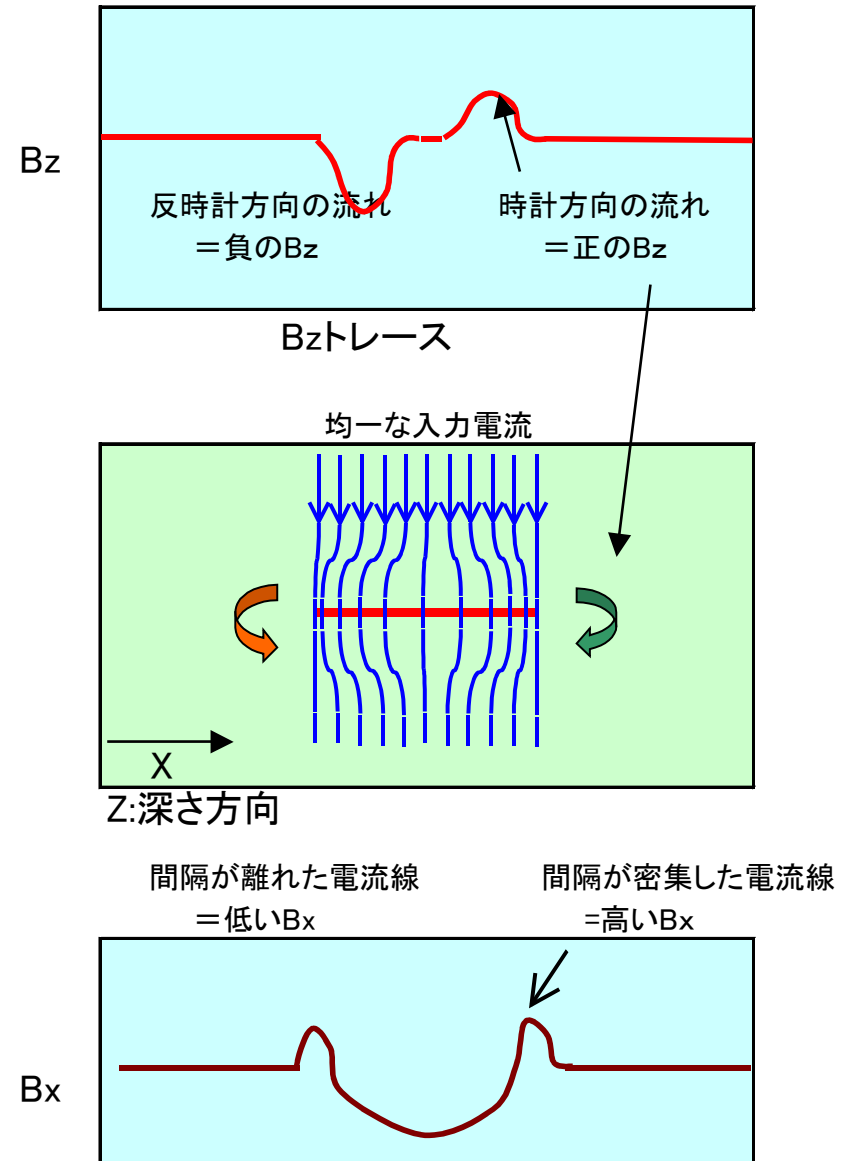
特徴

非接触での探傷ができる

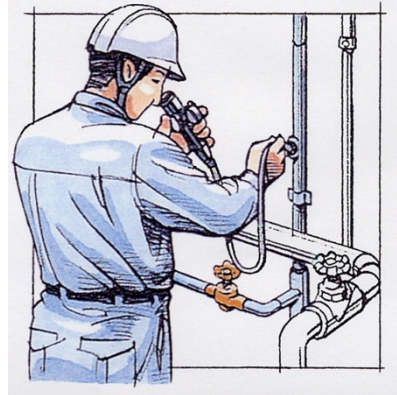
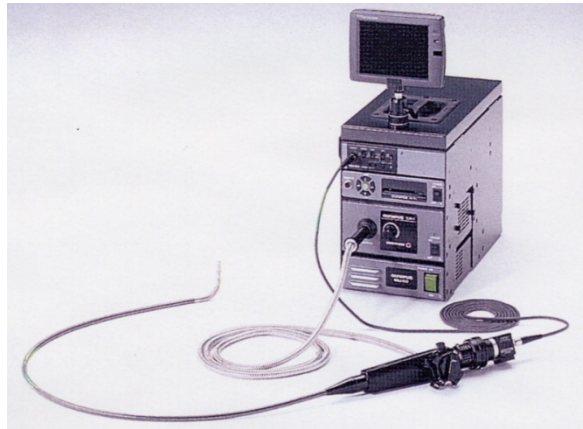
- ・塗装やスケール上からの探傷可能
- ・探傷の高速化が期待できる
- ・水・油を必要としない
(水・油を嫌う特殊機器への適用)

センサが小さい

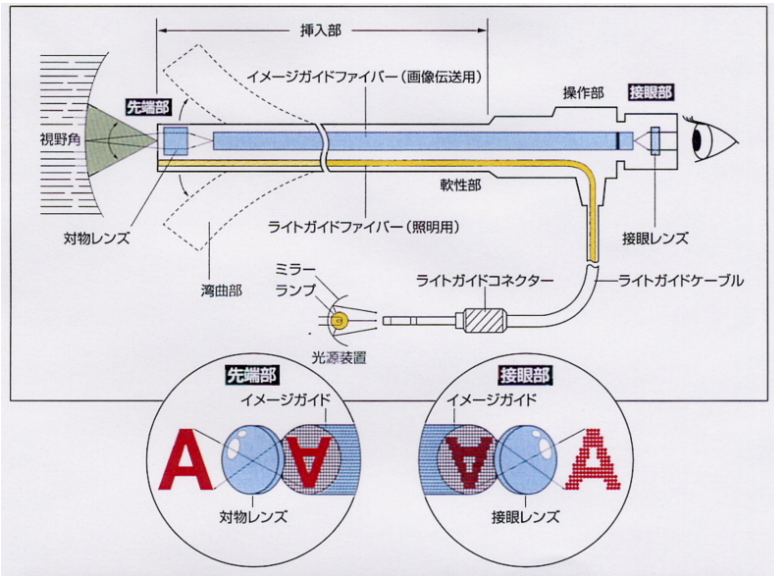
- ・接近困難な部位への適用



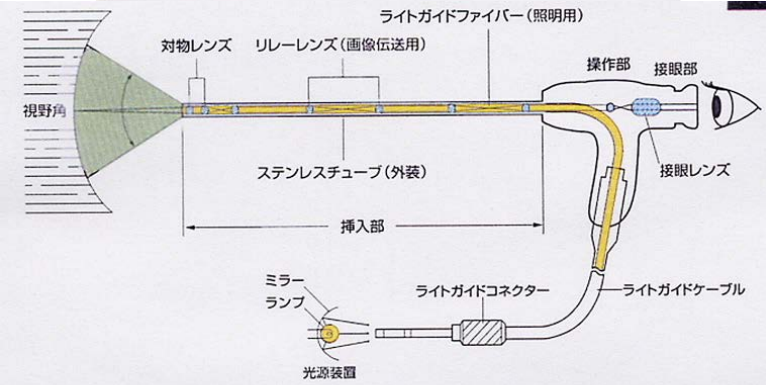
5. 1 目視検査



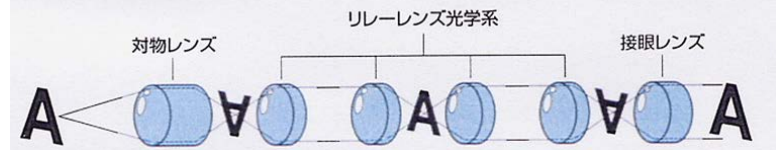
工業用硬性鏡



ファイバースコープ



工業用硬性鏡の仕組みと原理

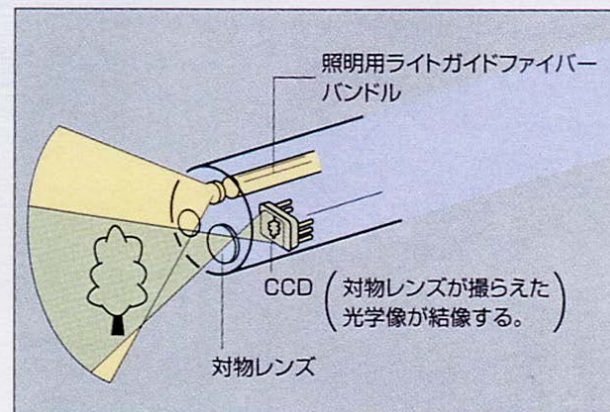


ボアスコープ

5. 2 目視検査装置 (CCDカメラ)



**CCDが撮らえた画像を
TVモニターで高解像観察**



対物レンズが撮らえた像をCCD (固体撮像素子) の表面に結像し、光の強弱を電気信号に変換して信号線を通じてカメラコントロールユニット (CCU) に伝送します。CCUでは電気信号を処理し、ビデオ出力としてTVモニターに画像を映し出します。



4方向湾曲で全周観察が可能

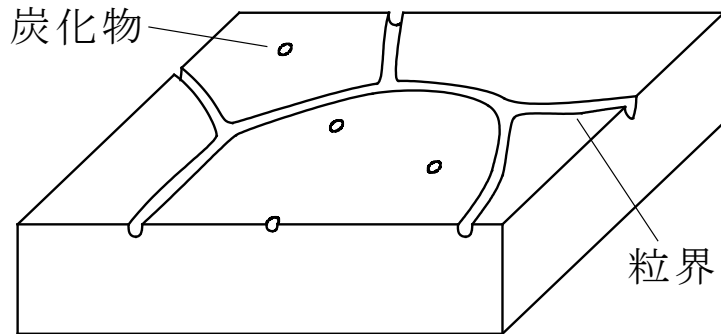


検査時の疲労が少ない軽量設計

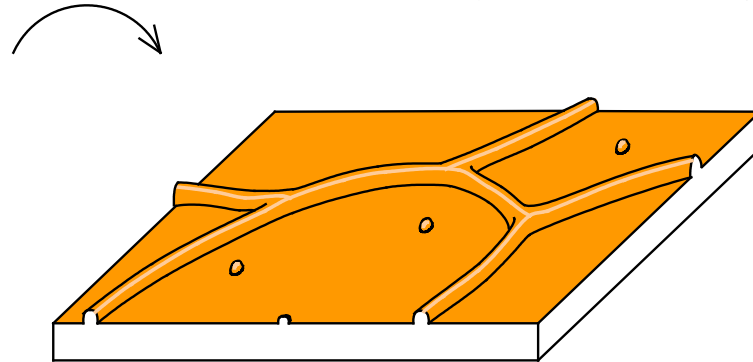
ビデオスコープ

6. 1 レプリカ法の原理

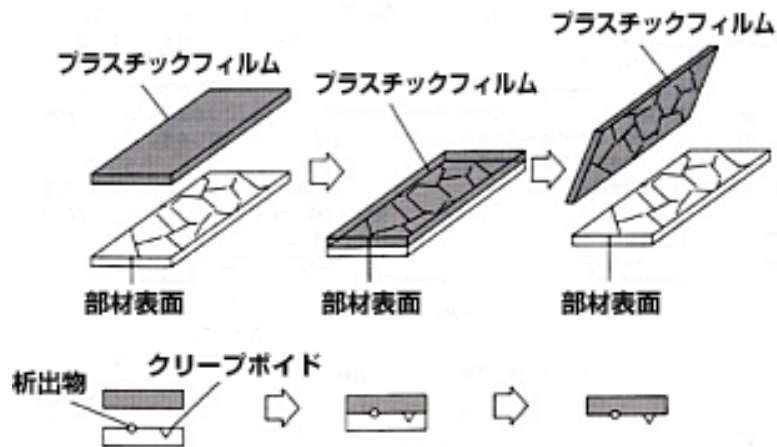
鏡面仕上げ&エッチング処理



レプリカフィルム（金蒸着）



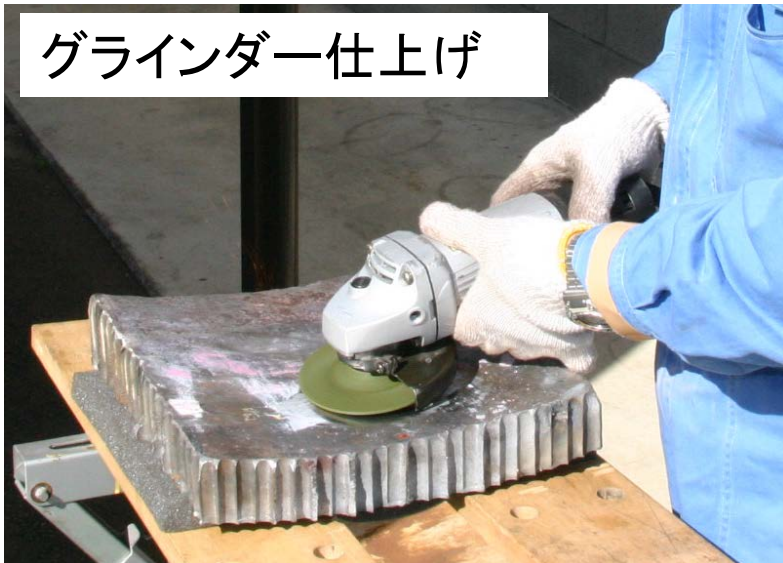
44



現場での作業例

11.2 レプリカの作業実施例

グラインダー仕上げ



バフ研磨



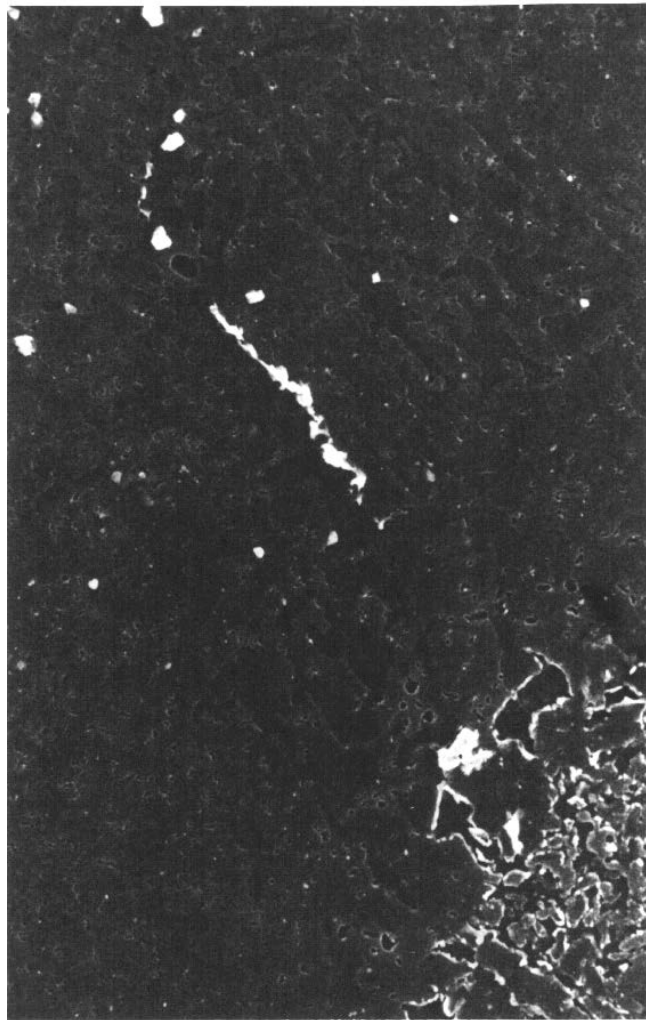
エッチング



レプリカフィルム貼り

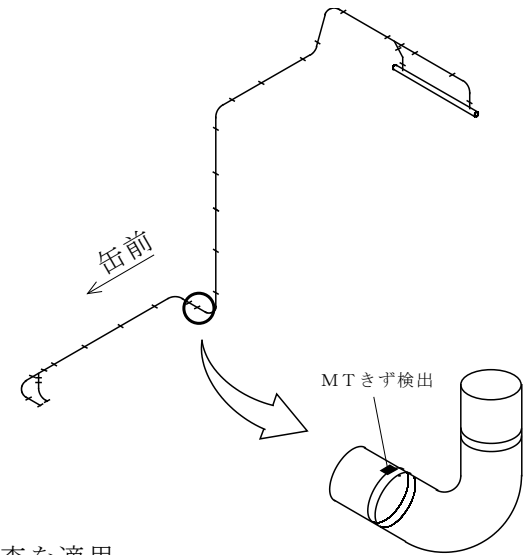


6.3 レプリカ観察例(クリープ損傷事例)

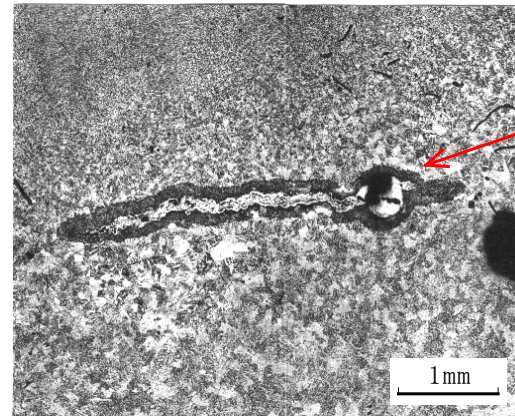


ボイラG

主蒸気管



MT きずにスンプ検査を適用



ブローホール状
の空孔

ボイラ大径管の溶接継手部

7. 応力計測・ひずみ計測・軸力計測・その他

1. 応力計測:

応力は、ひずみを計測して、弾性率とポアソン比から計算で求められる。応力計測には、X線回折法による計測、ひずみゲージによる計測、応力塗料膜法、磁気ひずみ法などが利用されている。X線回折法とひずみゲージ法が良く使用されている。

2. ひずみ計測:

ひずみ計測には、ひずみゲージ法、X線回折法、モアレ法などがある。ひずみゲージ法は、最も良く使用され、目的に応じて種々のゲージが市販されている。

3. 軸力計測:

トルクレンチによる管理、ロードセルによる計測、ボルトテンショナー、特殊なものとして超音波軸力計が利用されている。

7.1 特殊な非破壊計測装置

特殊な非破壊計測装置として以下のようなものがある。

1. 硬さ計：現場で材料の硬さを計る装置
2. 鋭敏化度測定装置：ステンレス材料の鋭敏化度を電気化学的再活性化法で測定する。専用装置としてDOSテスターがある。
3. フェライト量計測：フェライトメータでフェライト量を計測する。
4. 化学分析装置：スペクトルポート、メタスコープなど現場での合金成分簡易分析装置が利用されている。
5. その他：特殊なものが開発、利用されている。

8. 欠陥の種類(非破壊検査の対象となるもの)

1. 鋼板の欠陥:二枚割れ、非金属介在物、表面欠陥
2. 鋳鋼品の欠陥:割れ、引け巣、砂かみ及び介在物、
鋳ぐるみの未溶着、ブローホール
3. 鍛鋼品の欠陥:焼き割れ、ざくきず、非金属介在物、
砂きず
4. 鋼溶接部の欠陥:割れ、溶込み不良、融合不良、ス
ラグ巻き込み、ブローホール、タングステン巻き込み
5. 経年による損傷:腐食、孔食、SCC割れ、疲労き裂、
クリープ損傷、変形、脆性破壊、摩耗、組織変化、
遅れ破壊、脆化、水素侵食、高温酸化など

9. 欠陥の有害性

1. 切欠と応力集中

部材の断面積や形状が急変する箇所を総じて切欠という。この切欠には応力集中が作用し、公称応力値よりも応力が高くなる。

2. 欠陥の有害度

欠陥には方向性があり、応力が作用する方向と欠陥形状により、有害性は変化する。有害性の高い欠陥を見つけることが重要。

3. 表面欠陥と内部欠陥

一般的に、同じ種類、同じ寸法で有れば、表面欠陥が内部欠陥よりも有害である。

4. 溶接工構造物の溶接欠陥

溶接部は母材と比較して、欠陥が発生しやすくかつ応力集中部になる場合が多く、検査の重要対象箇所である。

主たる参考文献

非破壊検査概論：日本非破壊検査協会

JISハンドブック：43 非破壊検査