

## 4. 溶接の非破壊検査

武田 有祐

エム・エムブリッジ(株)

(一社)日本橋梁建設協会 製作小委員会 製作部会

第39回鋼構造物基礎講座  
「溶接構造物の設計～製作」  
— 溶接構造物設計時の施工を鑑みた留意点 —

## 4. 溶接の非破壊検査

2020年10月28日

(一社)日本橋梁建設協会 製作小委員会 製作部会 武田有祐

# 非破壊検査とは

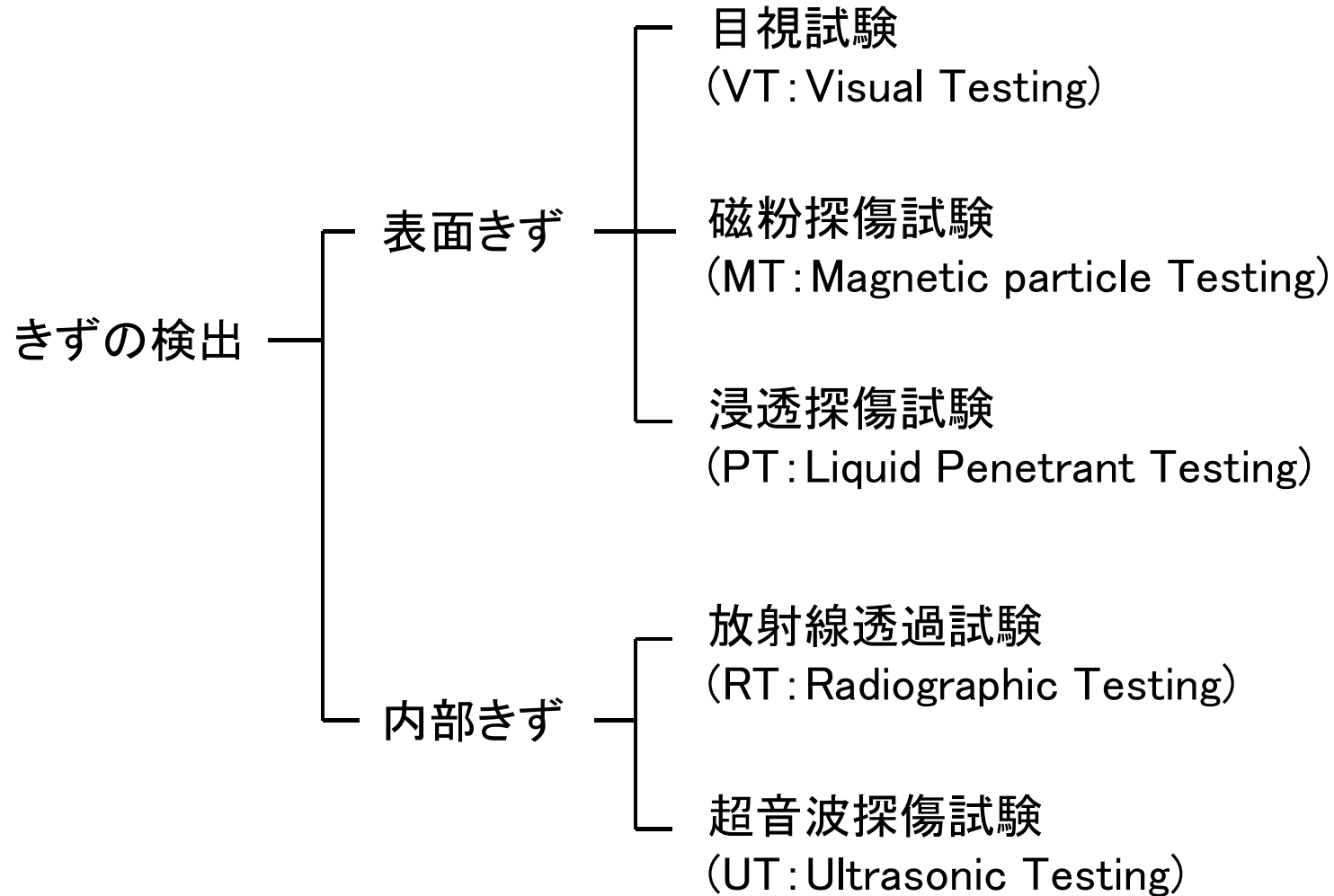
- 素材、構造物等の品質管理や品質保証の手段として適用
- 検査対象物をきずつけたり破壊したりせずに、きずの有無とその状態を知るための方法
- 検査対象物の性質、状態、内部構造などを知るための方法

# 非破壊検査の種類

原理の面からの分類

- 1) 光学、色彩学の原理を利用：外観試験、浸透探傷試験、磁粉探傷試験
- 2) 放射線の原理を利用：放射線透過試験、コンピュータトモグラフィ試験
- 3) 電磁気の原理を利用：磁粉探傷試験、過流探傷試験
- 4) 音響の原理を利用：超音波探傷試験、アコースティック・エミッション試験
- 5) 熱学的原理を利用：サーモグラフィ試験
- 6) 漏洩の原理を利用：漏れ試験

# 溶接継手のきずの検出に適用される非破壊検査



# 外部きず検査

- 外部きず検査は、溶接継手の表面のきずを検出し、合否判定する(外部きず＝表面きず)
- 外部きず検査は、まず **目視試験** (外観試験ともいう) を適用
- **溶接継手全線** が検査対象
- 判断が難しい場合や重要な継手の場合は、**磁粉探傷試験** や **浸透探傷試験** を適用

# 外部きずの種類

アンダカット:

溶接止端に沿って母材が掘られて、溶接金属が満たされず溝となっている部分

オーバーラップ:

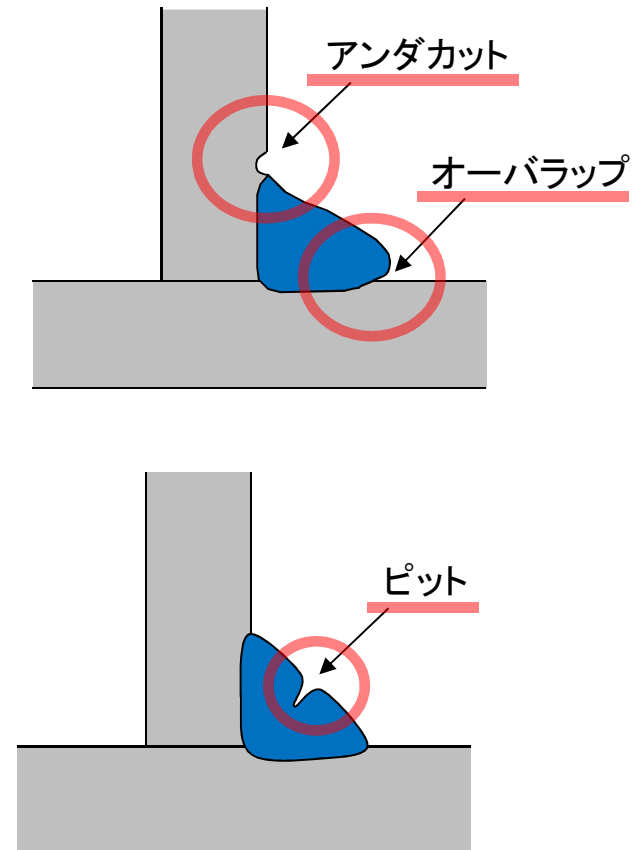
溶接金属が止端で融合しないで重なった部分

ピット:

溶接金属中に生じる球状の空洞(ブローホール)が表面に開口したもの

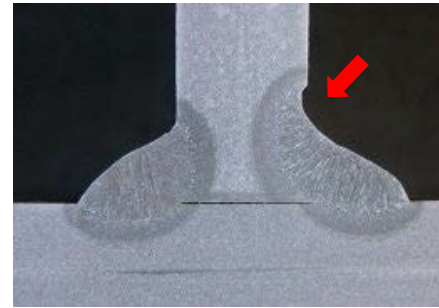
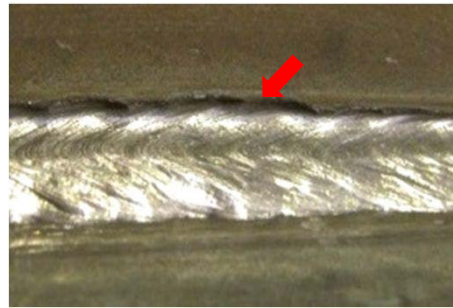
アークストライク:

溶接継手以外にアークを発生させた跡



# 外部きずの種類

アンダーカット

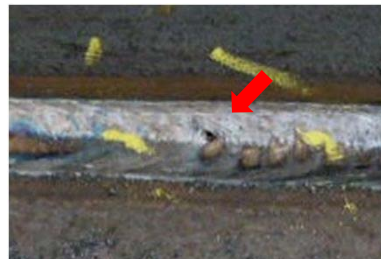


オーバーラップ



外観で溶接金属が止端で融合しないで重なっているか判断できないため、厳しめの判定となりやすい

ピット

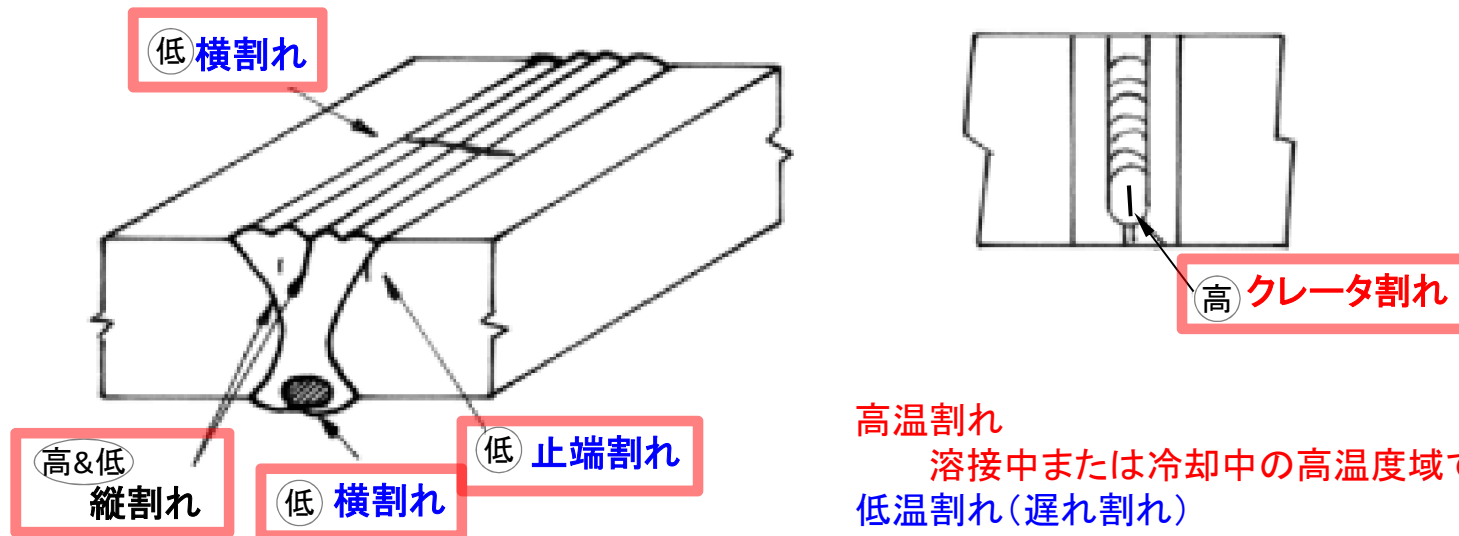
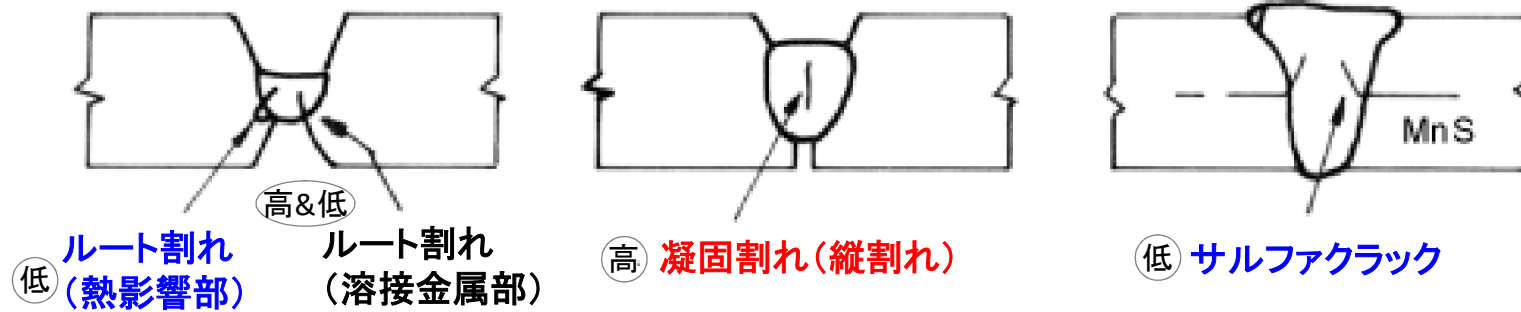


アークストライク





# 溶接割れの種類(突合せ溶接継手)

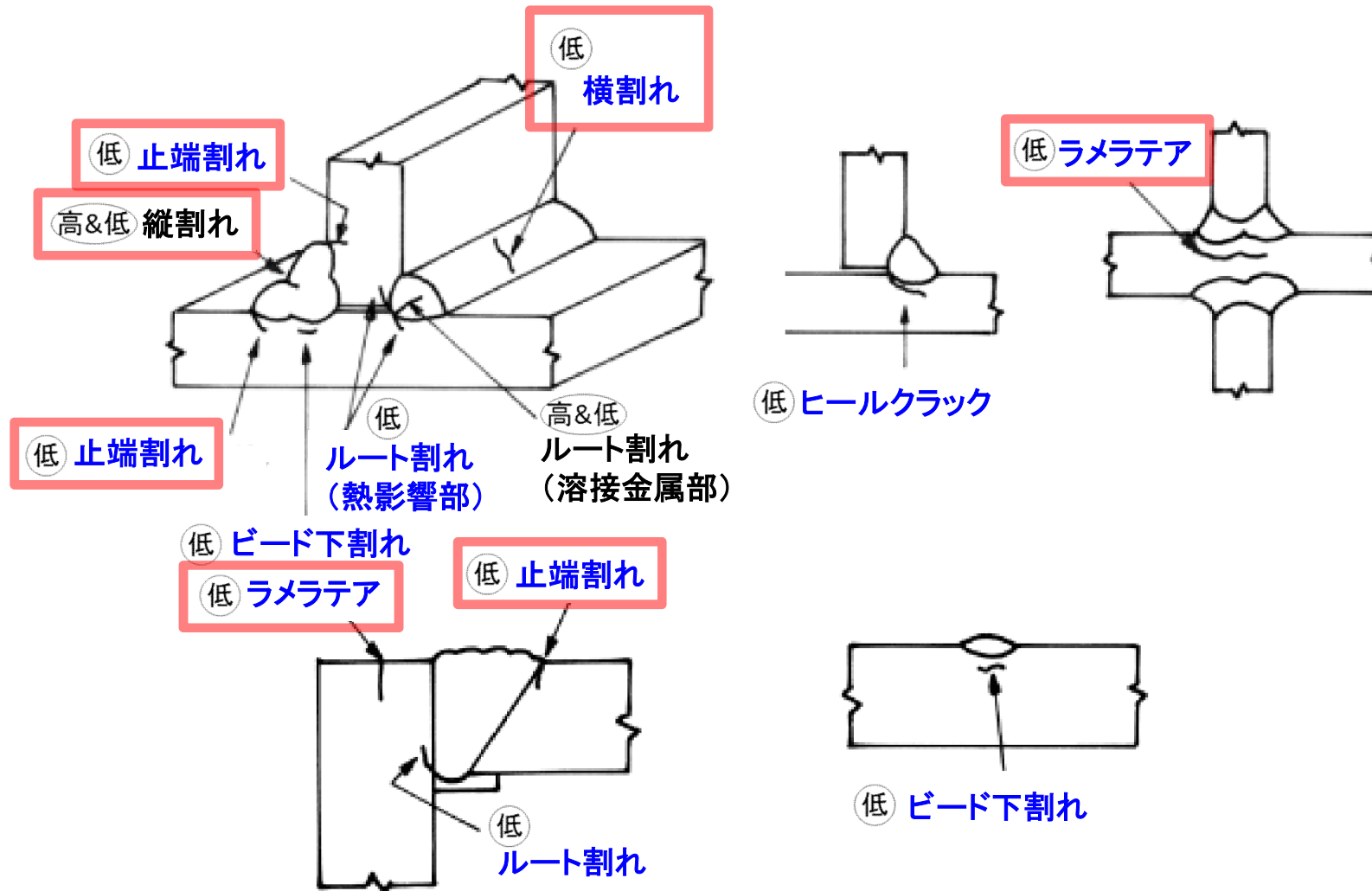


高温割れ  
溶接中または冷却中の高温領域で発生する割れ

低温割れ(遅れ割れ)  
200~300℃以下の温度域で発生する割れ

高温割れと低温割れの両方

# 溶接割れの種類 (T継手, 十字継手, かど継手)



# 溶接割れの種類

溶接割れの多くは溶接継手の内部に発生し、非破壊検査で全てを検出することは困難



溶接割れが生じない溶接施工方法（鋼材・溶接材料・予熱・溶接方法・溶接手順等）とすることが重要

# 外部きず検査の判定基準

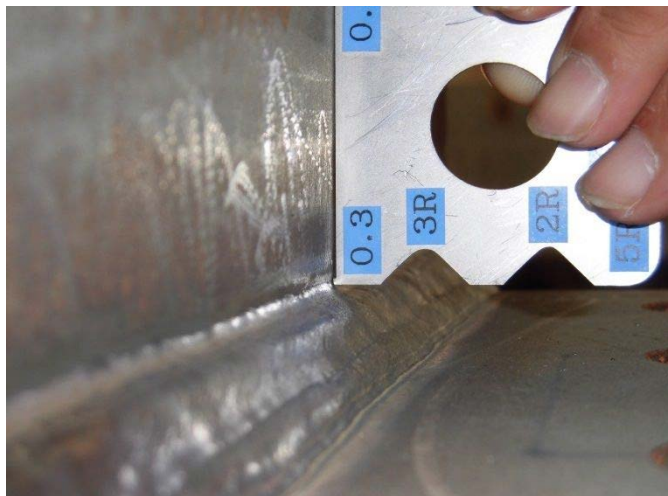
道路橋示方書・同解説Ⅱの場合

- ・溶接割れ：あってはならない
- ・アンダーカット：設計上許容される以下
  - ※ 溶接継手の形式や種類で判定基準が異なるため、必ず設計に確認すること ⇒ 設計で明確しておくこと
- ・オーバーラップ：あってはならない
- ・ピット：断面に考慮する継手はあってはならない  
その他の継手は1継手につき3個または継手長さ1mにつき3個までを許容
  - ※ 防せい防食の面でピットが弱点になる可能性あり
- ・アークストライク：あってはならない
- ・溶接ビード形状：溶接ビード表面の凹凸、すみ肉溶接の大きさ
- ・開先溶接の余盛り：ビード幅に対する余盛り高さの制限

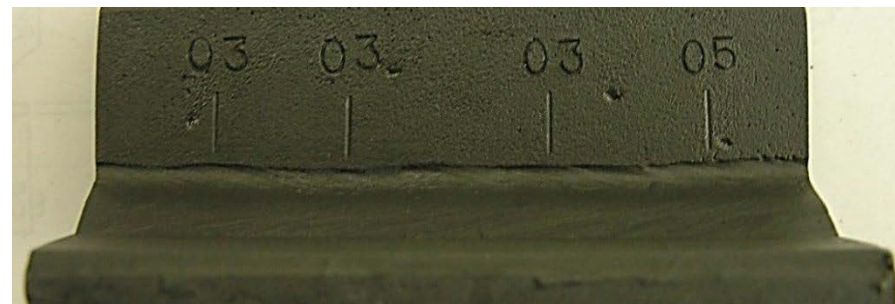
# アンダーカットの検査

深さが許容値より十分に小さいまたは大きい場合は目視検査で判定

判定が困難な箇所は溶接ゲージ、限界ゲージ、限界見本等を用いる



限界ゲージ



限界見本

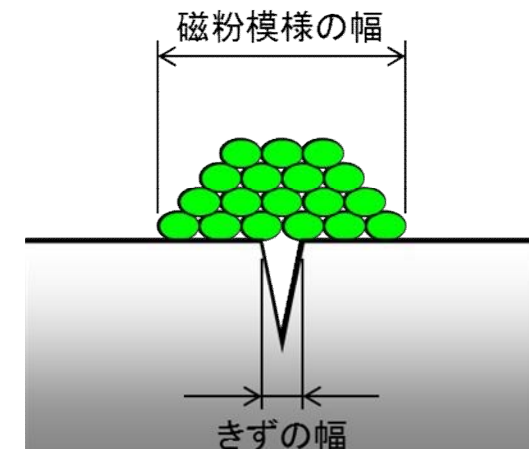
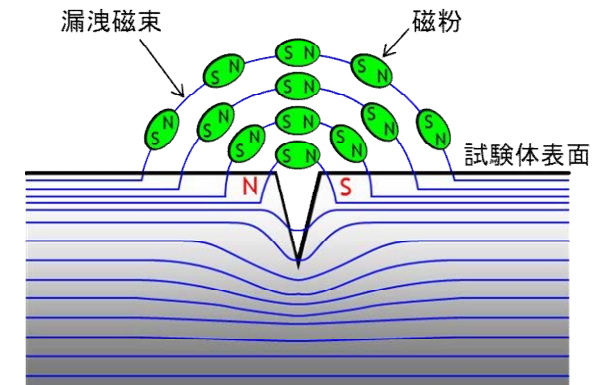
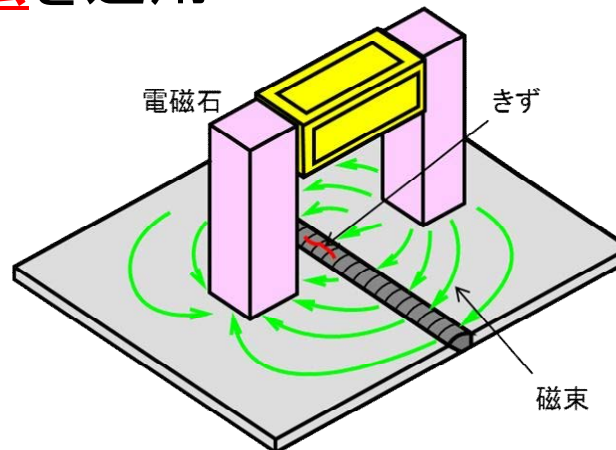
# 磁粉探傷試験

(MT: Magnetic particle Testing)

- 鉄鋼材料などの強磁性体の表面及びその近傍のきずを検出するのに適した試験
- 鋼橋では、鋼製橋脚の隅角部の非破壊検査や維持管理(疲労亀裂の調査)等で適用
- JIS: JIS Z 2320 非破壊試験-磁粉探傷試験  
(2019.7から日本工業規格が日本産業規格に改称)

# 磁粉探傷試験 (MT: Magnetic particle Testing)

- 被検査物を局部的に磁化させて、きず近くの漏洩磁束に磁粉(強磁性体の粉末)を吸着させ、この磁粉模様を検出することにより、きずの有無を調べる方法
- 磁化の方法には、プロッド法、コイル法、極間法等があり、鋼橋の溶接継手の検査には一般に極間法を適用

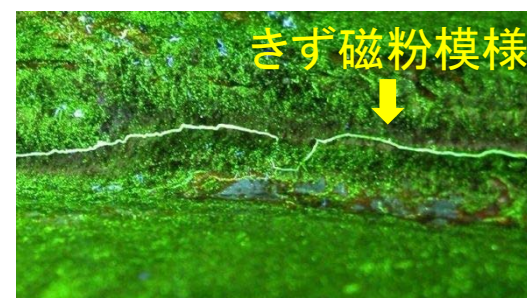


# 磁粉探傷試験 (MT: Magnetic particle Testing)

- 磁粉の種類
  - **蛍光磁粉**、非蛍光磁粉
- **湿式法**、乾式法
- 湿式法での検査液の種類
  - 石油系鉱油、精製水



蛍光磁粉液





# 磁粉探傷試験 (MT: Magnetic particle Testing)

## 留意点①

- ・きずが磁束の方向に直交する場合に最も多くの漏洩磁束が発生
- ・溶接割れには縦割れと横割れがある



溶接継手の溶接線方向と溶接線直角方向の2方向での検査が必要

## 留意点②

- ・溶接の継ぎ目や溶接継手の止端部等の断面急変部に疑似模様(きず以外の原因で現れる磁粉模様)を検出



判定が困難な場合は断面急変部をグラインダーなどで仕上げてから検査

# 浸透探傷試験

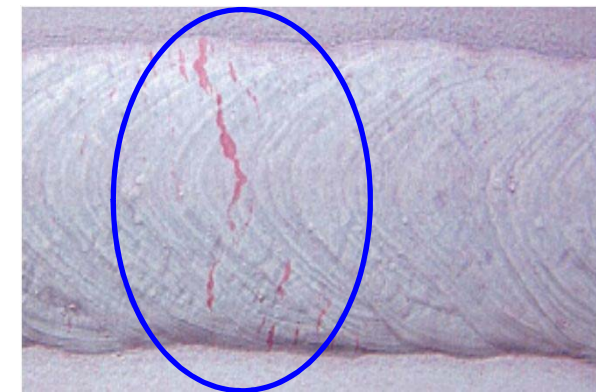
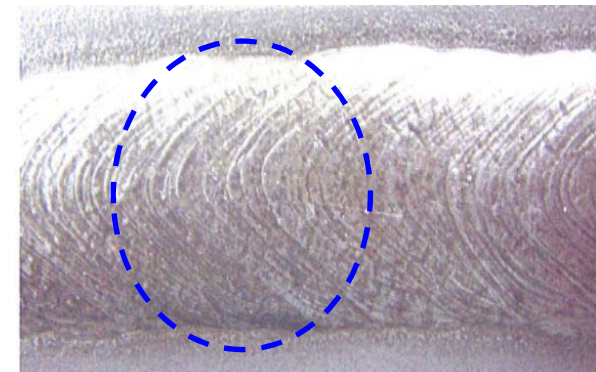
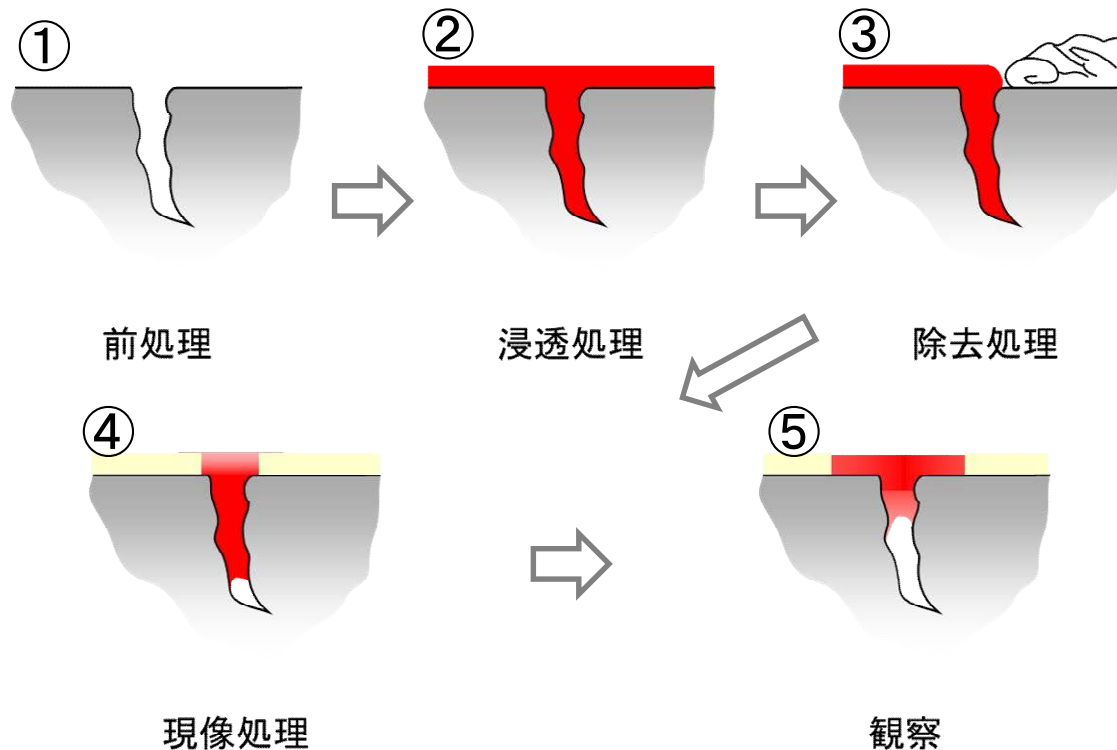
(PT: Liquid Penetrant Testing)

- 表面に開口しているきずの試験に適しており、多孔質でなければ非金属にも適用できる
- 鋼橋では、ベースプレートの全周溶接などの拘束が大きい継手の非破壊検査で適用
- JIS: JIS Z 2343 非破壊試験-浸透探傷試験

# 浸透探傷試験

(PT: Liquid Penetrant Testing)

- ・容易に目視できるようにするために、**毛管現象**及び**知覚現象**を利用し、より拡大した像にした指示模様としてきずを検出



# 浸透探傷試験

## (PT: Liquid Penetrant Testing)

### 観察方法による分類

- ・染色浸透探傷試験: 赤色染料を着色した浸透液を使用
- ・蛍光浸透探傷試験

### 余剰浸透液を除去する方法による分類

- ・溶剤除去性浸透探傷試験: 有機溶剤の洗浄液を用いて、余剰浸透液を除去
- ・水洗性浸透探傷試験 ・後乳化性浸透探傷試験

### 現像方法による分類

- ・速乾式現像法: 白色微粉末を揮発性の有機溶剤にけん濁させたものを使用する方法
- ・乾式現像法 ・湿式現像法 ・無現像(剤)法

# 浸透探傷試験

## (PT: Liquid Penetrant Testing)

### 留意点①

前処理、浸透処理、除去処理、現像処理では専門知識が必要

前処理: 表面及び表面きず内の清掃

浸透処理: 浸透処理中の観察

除去処理: 過剰除去と除去不足の防止

現像処理: 現像中の観察

### 留意点②

・溶接の継ぎ目や溶接継手の止端部等の断面急変部に疑似模様を検出

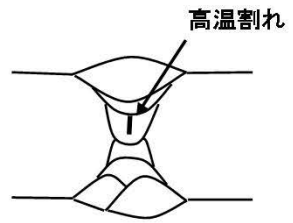
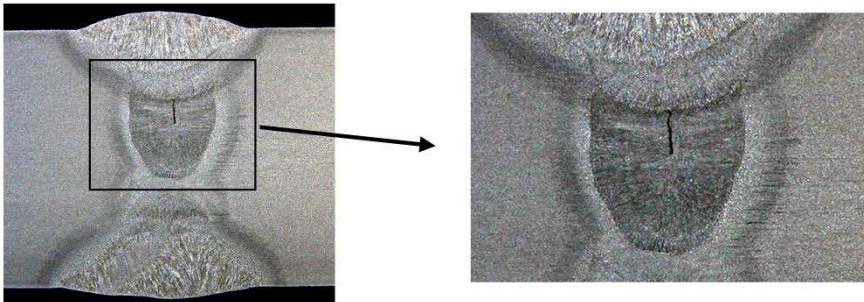
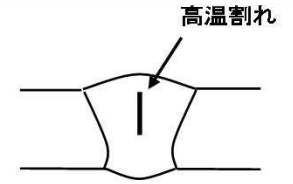

↓

判定が困難な場合は断面急変部をグラインダーなどで仕上げてから検査

# 内部きず検査

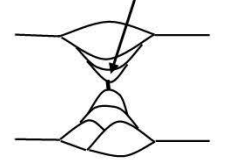
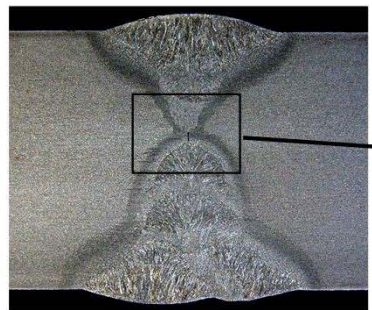
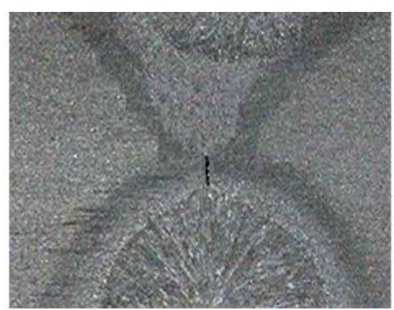
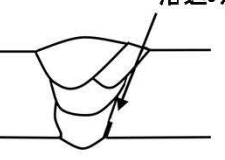
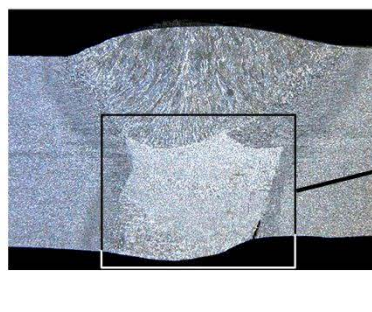
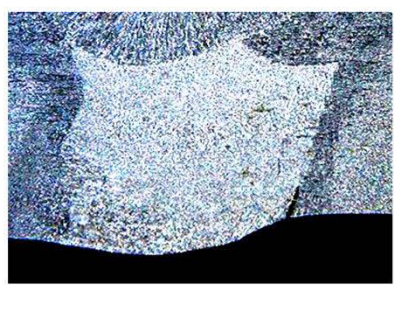
- 内部きず検査は、溶接継手内部のきずを検出し、合否判定する
- 道路橋示方書・同解説Ⅱでは完全溶込み溶接継手が検査対象
- 内部きず検査は、放射線透過試験または超音波探傷試験を適用

# 内部きずの種類

<p>高温割れ</p>	 <p>高温割れ</p> <p>(主な発生原因)  <ul style="list-style-type: none"> <li>・電流過大</li> <li>・裏はつりの形状不良</li> </ul> </p>	
	 <p>高温割れ</p> <p>(主な発生原因)  <ul style="list-style-type: none"> <li>・入熱過大</li> <li>・ルート間隔過大</li> </ul> </p>	

鋼道路施工便覧より

# 内部きずの種類

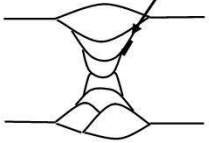
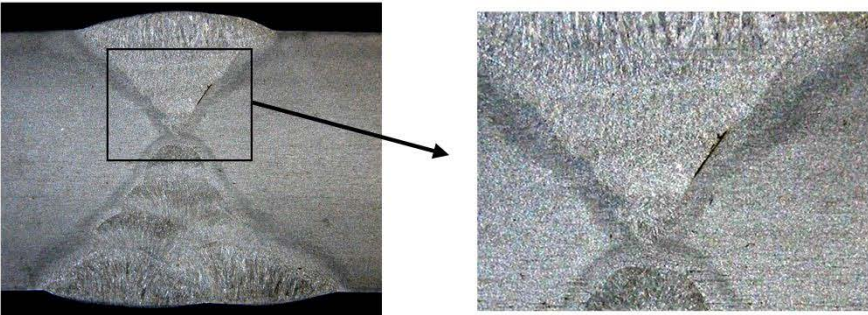

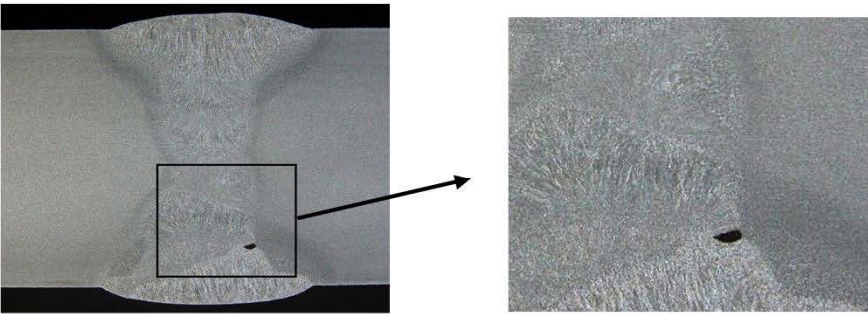
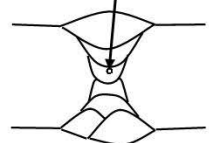
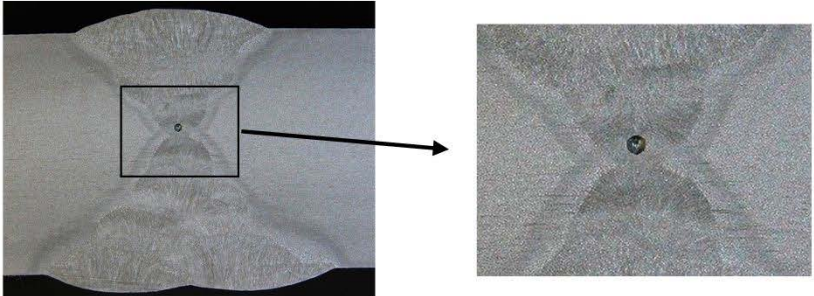
溶込み不良	<p>溶込み不良</p>  <p>(主な発生原因) ・裏はつり不足</p>		
	<p>溶込み不良</p>  <p>(主な発生原因) ・狙い位置が不適切 ・電流過小</p>		

溶込み不良:  
裏はつり不足や溶込み不足により  
ルート面が残留

鋼道路施工便覧より



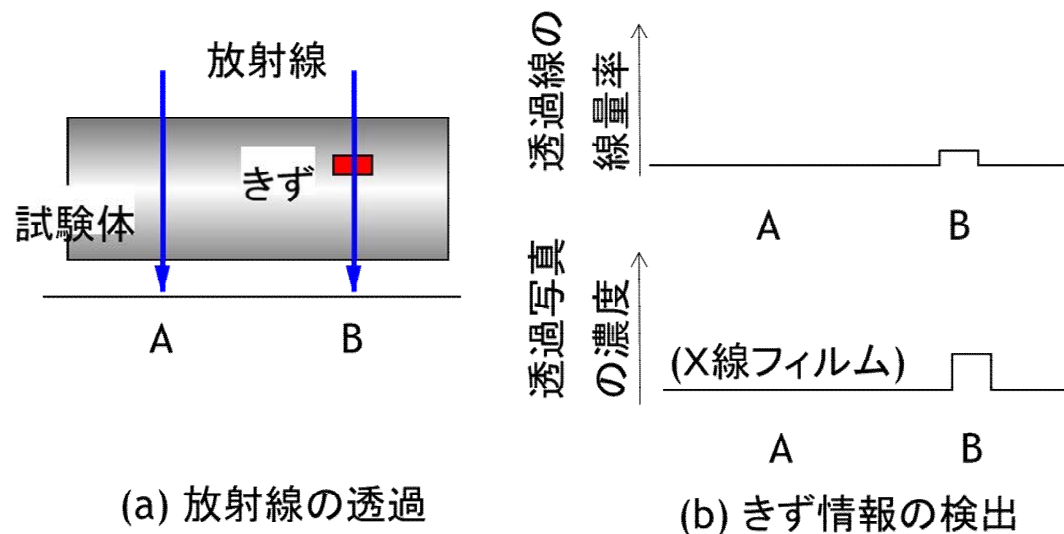
# 内部きずの種類

<p style="writing-mode: vertical-rl;">融合不良</p>	<p style="text-align: center;">融合不良</p>  <p>(主な発生原因)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 狙い位置が不適切</li> <li>- 電流過小</li> <li>- 前パスの形状不良</li> </ul>		<p>融合不良:</p> <p>溶接金属の積層間または母材開先面が融合せず残留</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl;">スラグ巻き込み</p>	<p style="text-align: center;">スラグ巻き込み</p>  <p>(主な発生原因)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 溶接速度が遅い</li> <li>- 前パスの清掃不足</li> <li>- 前パスの形状不良</li> </ul>		<p>スラグ巻き込み:</p> <p>溶接金属中または母材との融合部に生じるスラグの残留</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl;">ブローホール</p>	<p style="text-align: center;">ブローホール</p>  <p>(主な発生原因)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 異物の混入</li> <li>- シールド不良</li> </ul>		<p>ブローホール:</p> <p>溶接金属中に生じる球状またはほぼ球状の空洞</p>

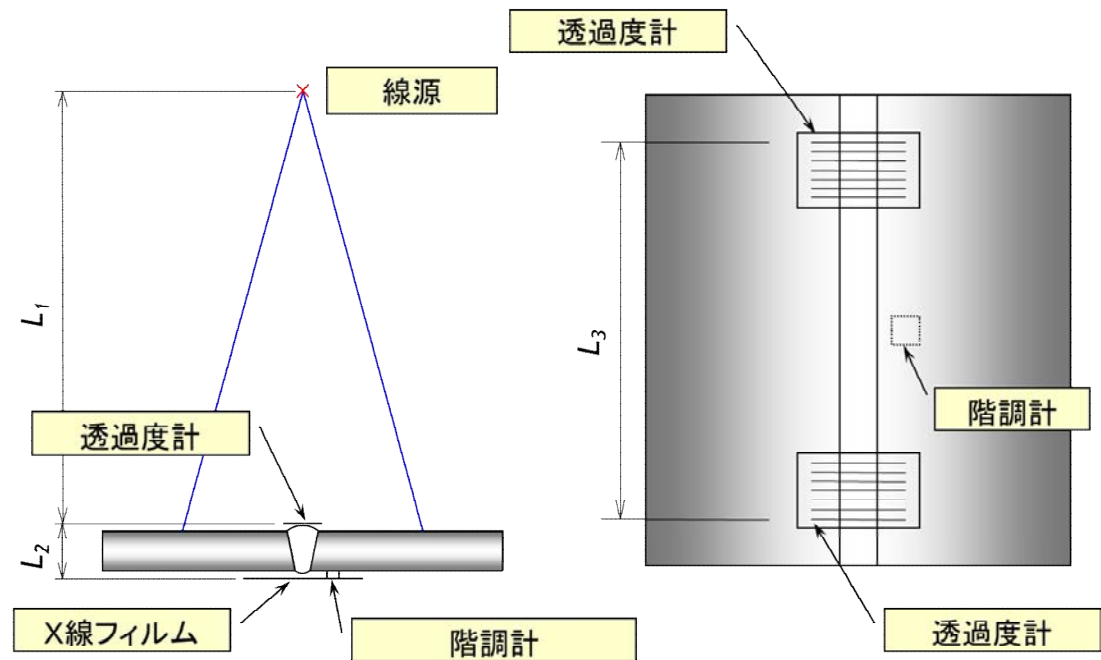
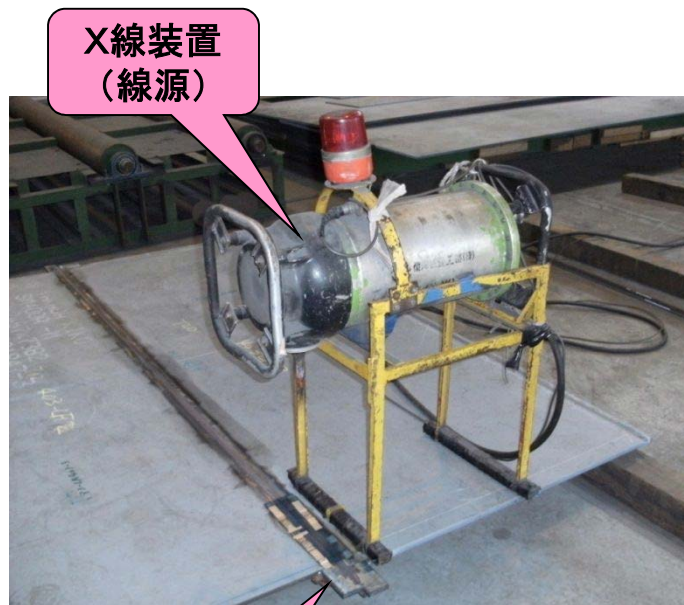
鋼道路施工便覧より

# 放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)

- ・X線などの放射線は物質を透過する性質があり、その透過の程度は物質の種類と厚さより決まる。この性質を利用して溶接きずの情報を検出
- ・きずの存在により、きずの透過線量率が増加し、透過写真(フィルム)の濃度の増加としてきず情報を検出
- ・JIS: JIS Z 3104 鋼溶接継手の放射線透過試験方法

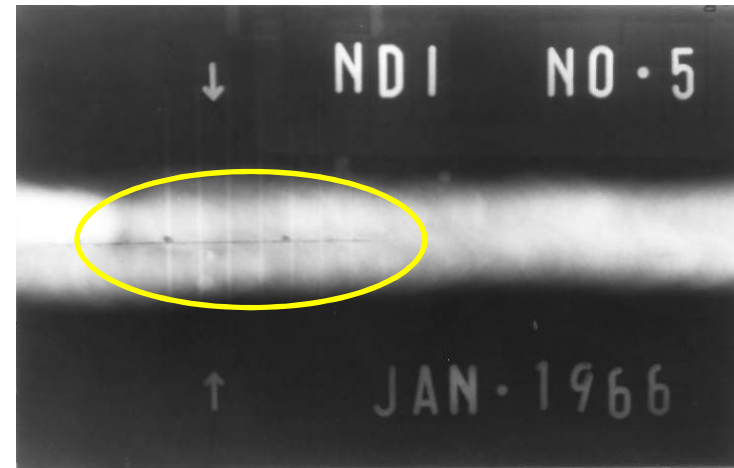
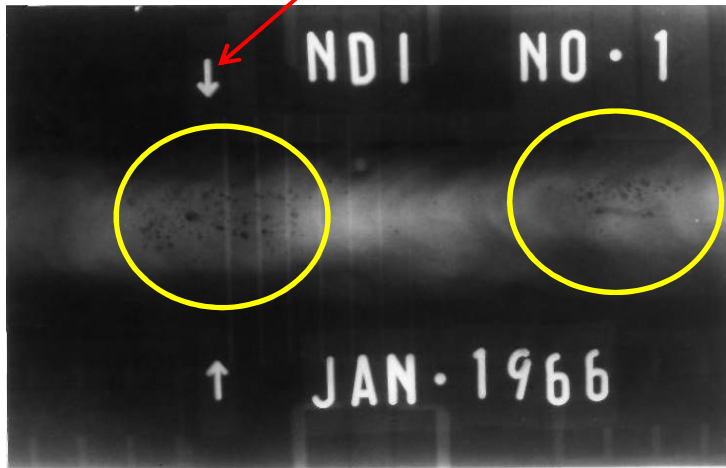


# 放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)

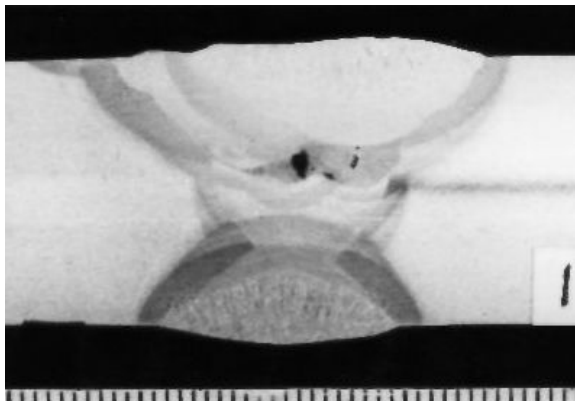


# X線フィルムの例

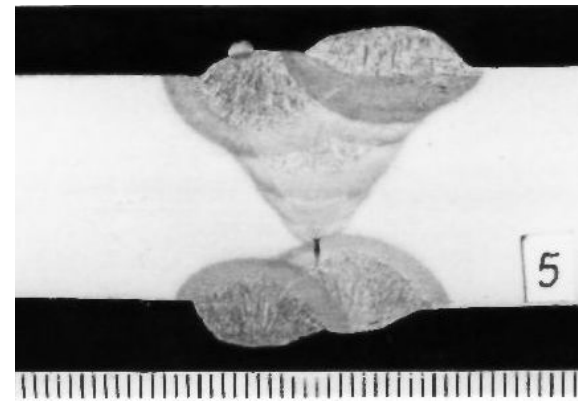
マクロ試験位置



スラグ巻込み



溶込み不良



# 放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)

## 留意点

- ・放射線透過試験では試験体の裏面にフィルムを配置するため、継手の種類によっては適用が困難

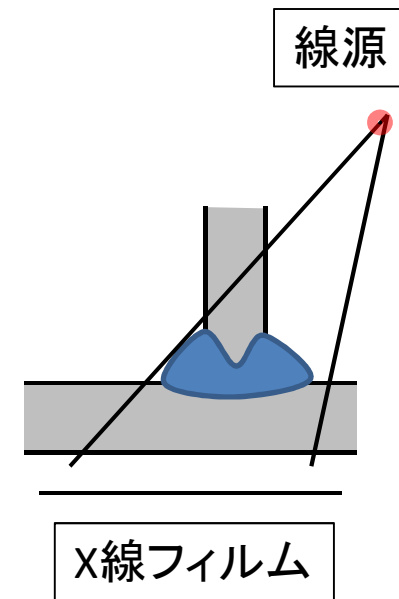


**突合せ溶接継手**は適用できるが、T溶接継手などは適用していない

- ・人体が多量被ばくすると放射線障害を起こすため、その遮蔽などに十分注意しなければならない



特に現場は**第三者の被ばく**に注意(超音波探傷試験の適用の検討)



# 放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)

## 留意点

- ・板厚が大きくなると面状のきずや小さなきずが検出しにくくなる



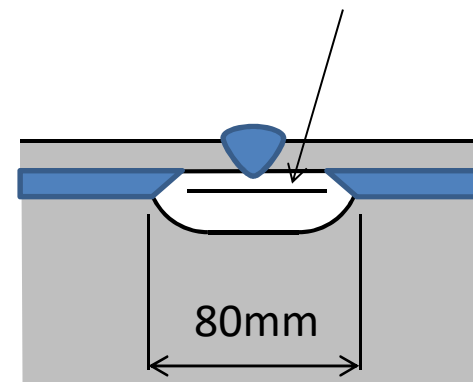
道路橋示方書・同解説Ⅱでは放射線透過試験の適用板厚は40mm以下

- ・一般に使用するフィルムの大きさは85mm×305mmであり、スカラップの大きさによってはフィルムを設置できない



鋼床版デッキプレートの場合は、幅を小さくしたフィルムを使用することがある

X線フィルムをスカラップまわし溶接に干渉しない大きさにする



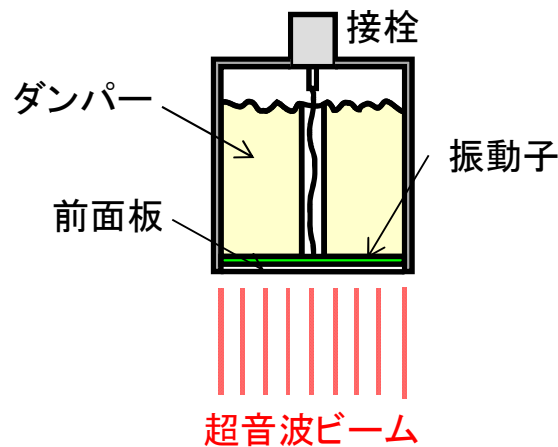
# 超音波探傷試験

## (UT: Ultrasonic Testing)

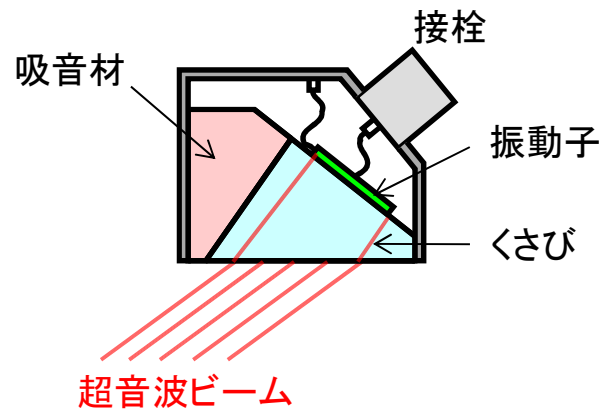
- ・被検査物に超音波を伝搬させて、きずから反射されるエコーにより、エコーの強さときずまでの距離を表示器上で測定
- ・鋼材の探傷では、一般に2または5MHzの周波数の探触子が使用されている。
- ・JIS: JIS Z 3060 鋼溶接部の超音波探傷試験方法

# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

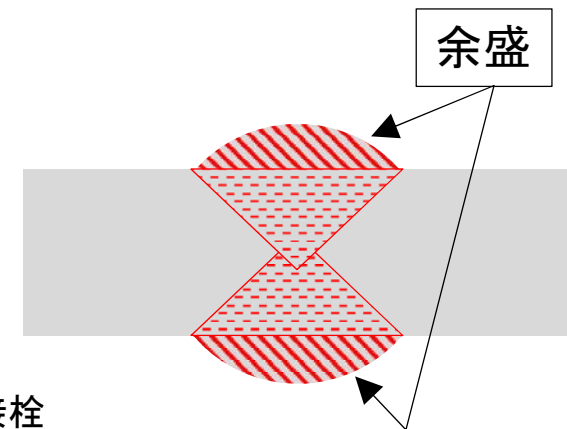
- ・垂直探傷法(超音波を試験体表面に垂直に入射する方法)と斜角探傷法(超音波を試験体表面に対して斜めに入射する方法)がある
- ・溶接継手には一般に余盛があり、垂直探傷法での探傷が困難なため、斜角探傷法が多く用いられている



垂直探触子

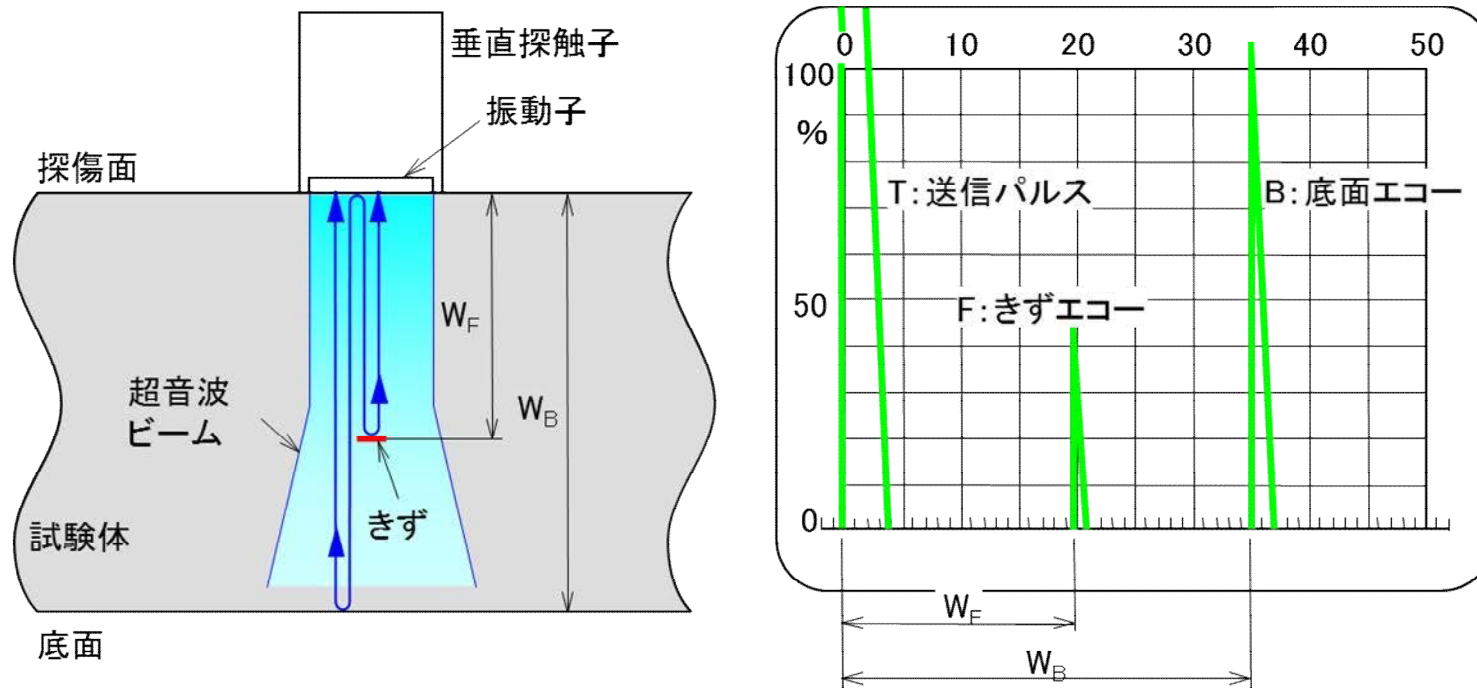


斜角探触子



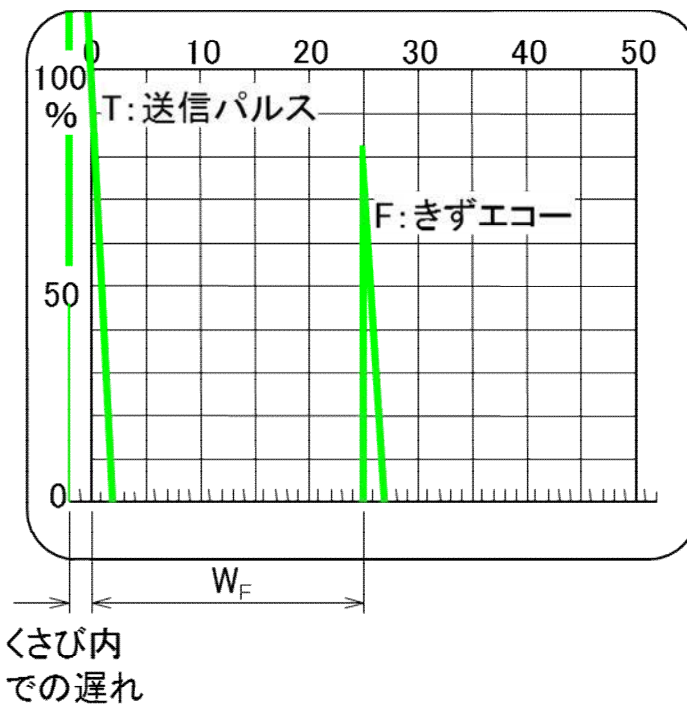
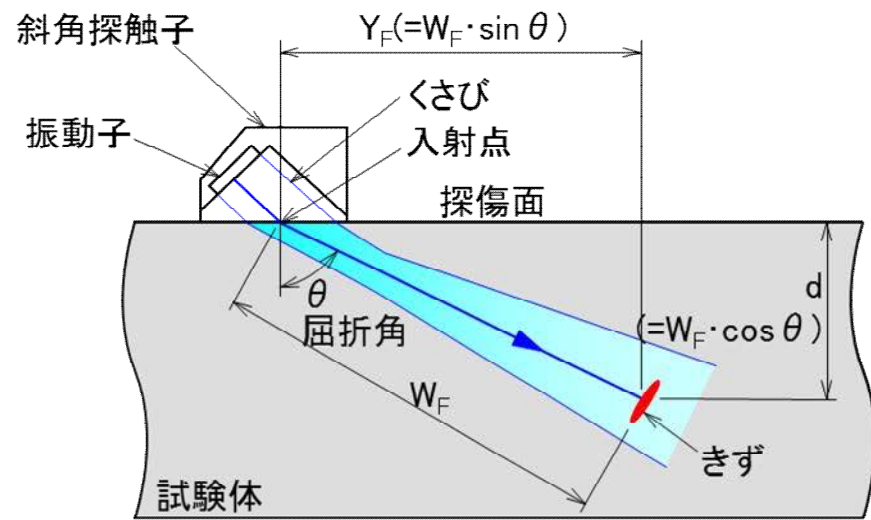


# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)



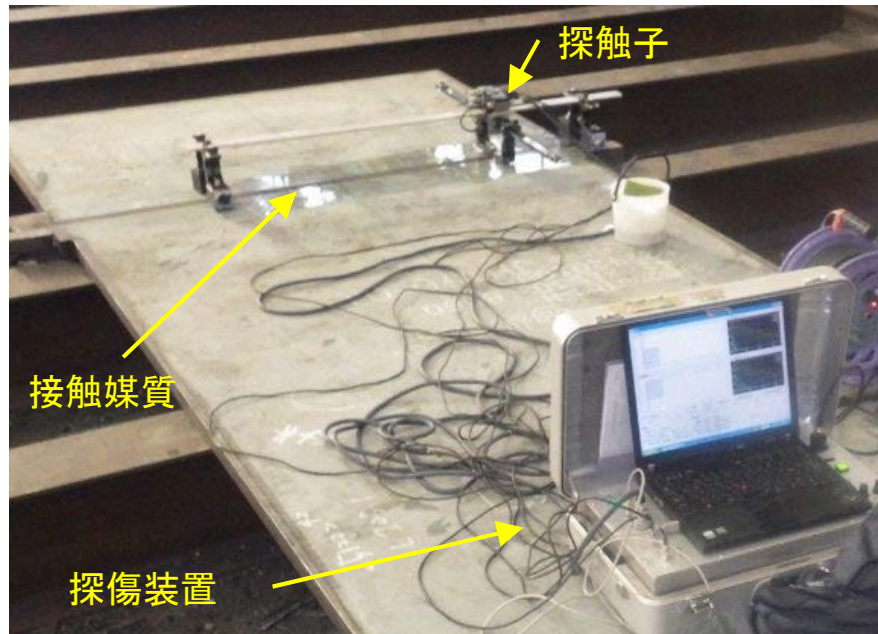
垂直探傷法

# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)



斜角探傷法

# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)



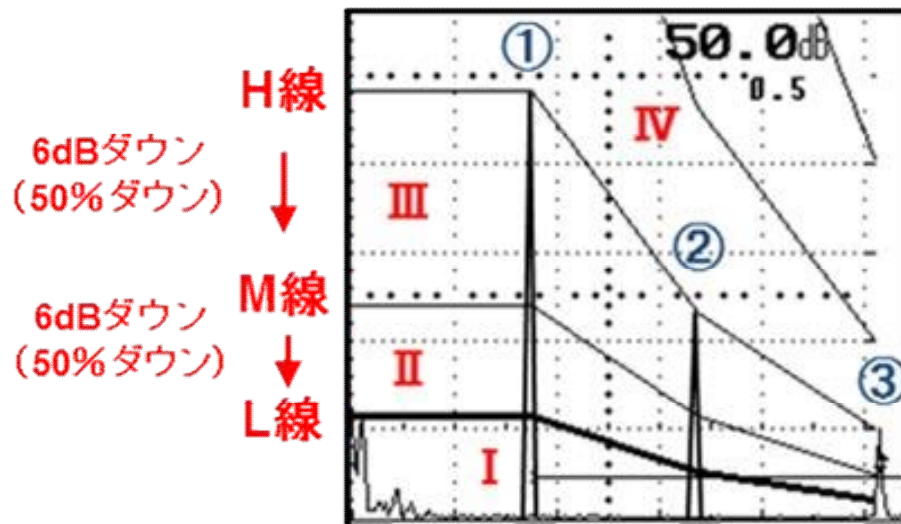
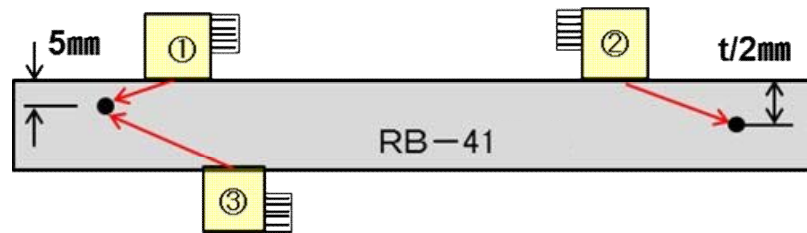
超音波自動探傷による  
突合せ溶接継手の検査状況



超音波手動探傷による  
T溶接継手の検査状況



# 距離振幅特性曲線(エコー高さ区分線)の作成

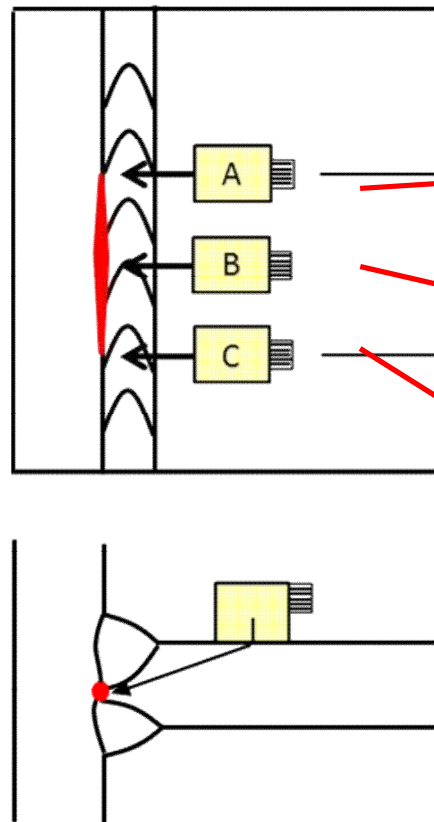


- ・同一きずでも、そのエコー高さはビーム路程が長くなればなるほど、表示器のエコー高さは小さくなる。
- ・同じ大きさのきずが、ビーム路程が異なっても同じように評価できるようにするために、対比試験片(RB-41など)にて距離振幅特性曲線を作成する。
- ・基準感度は、H線に合わせたdB値とする。
- ・H線より6dB低い線をM線、さらに6dB低い線をL線とする。L線より6dB低い線をL/2線とする。

# きず長さの測定

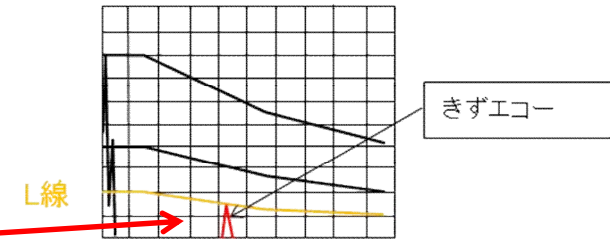
## きず長さの測定

きずエコーを検出した場合、そのきずの最大エコーがしきい値を超えたものを記録の対象とし、きず長さの測定を行う。

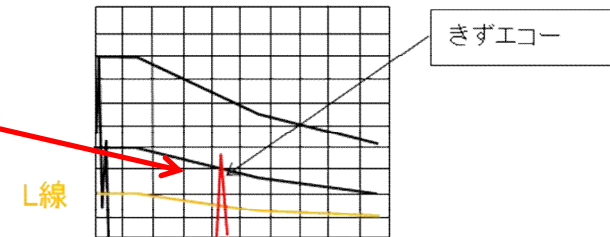


### L線検出レベル・L線カット法の場合

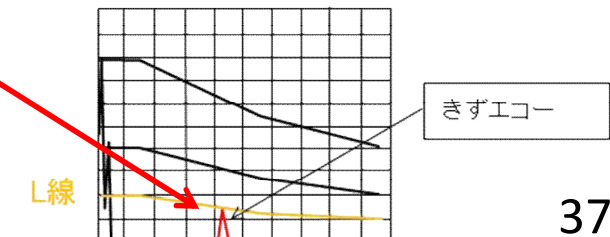
Aの位置のきずエコー



Bの位置のきずエコー



Cの位置のきずエコー



# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

## 留意点

- ・余盛りからの反射の形状エコーときずエコーとの識別が難しい場合がある

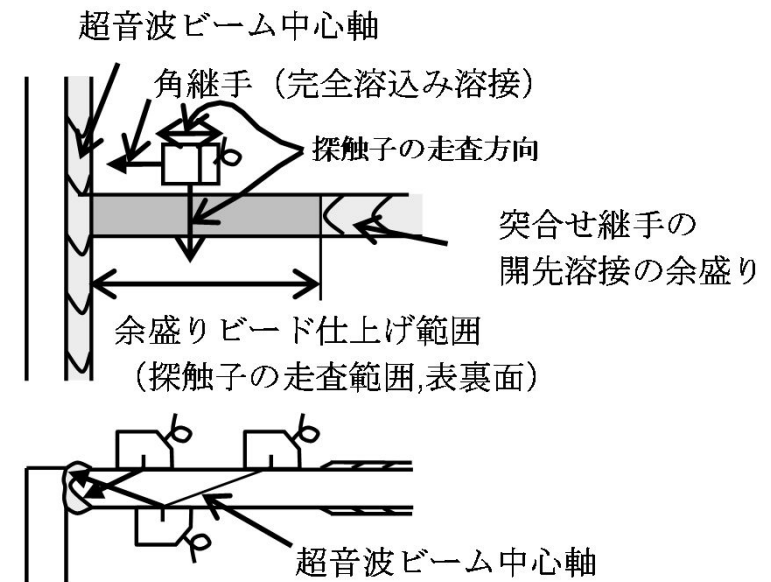


余盛りを滑らかに仕上げしてから探傷

- ・探傷面に他の溶接線の余盛りビードなどがあると、溶接線に対し平行に走査ができず正確な判定が難しくなる場合がある



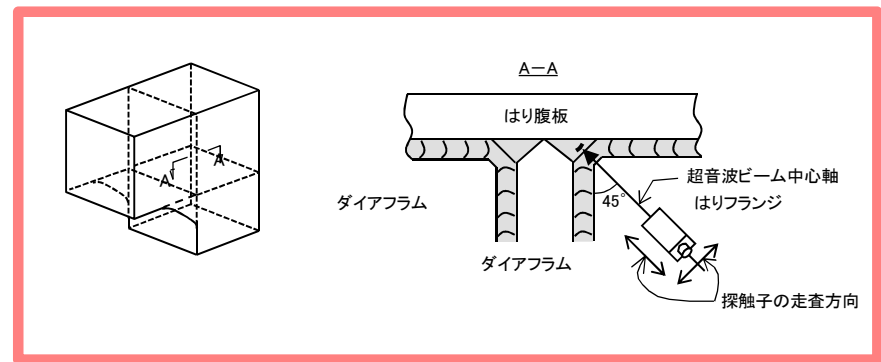
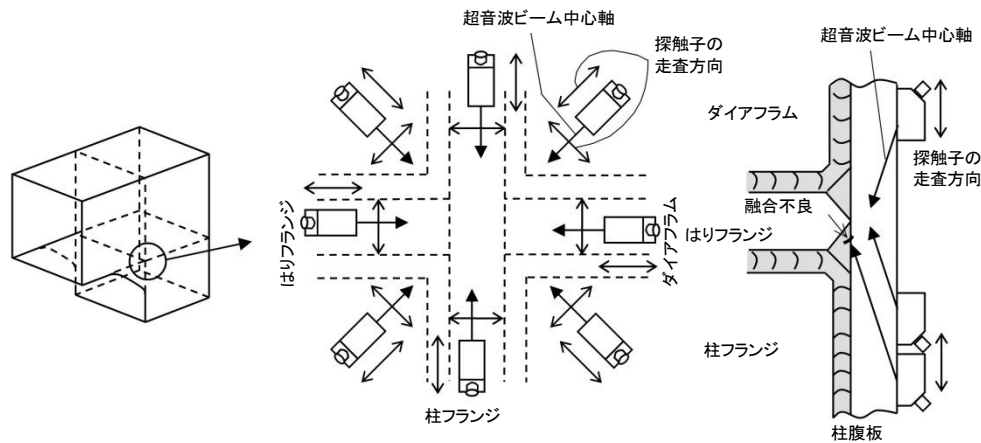
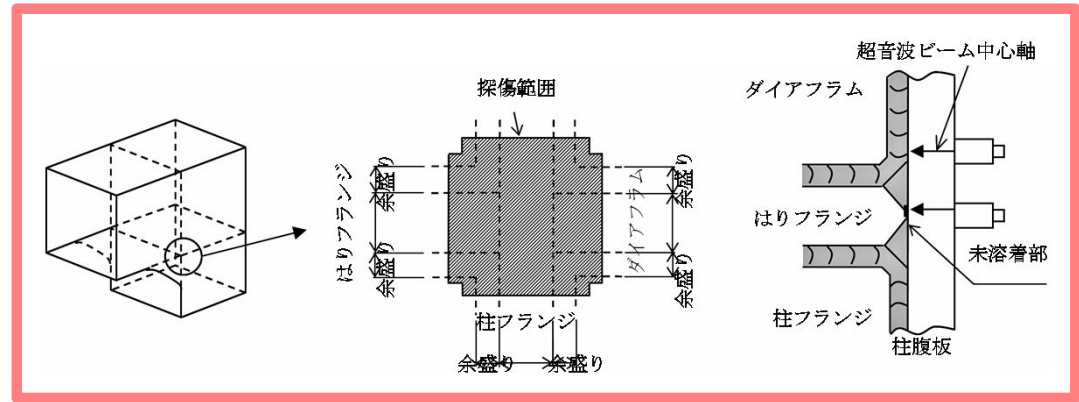
探傷面の余盛りを平滑に仕上げしてから探傷



# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

## 留意点

3線交差部のように探傷が難しい箇所(きずの検出が難しい箇所)は、3線交差部に発生しやすいきずを把握し、そのきずを可能な限り検出できるように多方向からの探傷を行う





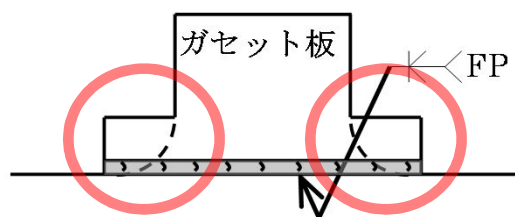
# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

## 留意点

- ・面外ガセットのフィレットのように探傷面が小さい

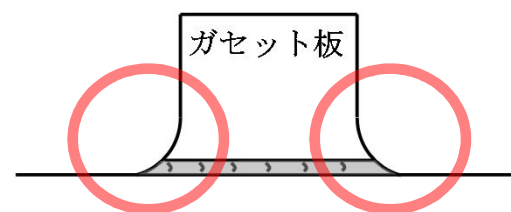
↓

## 検査合格後に切断



フィレット先端の内部きず検査として行う超音波探傷試験の探傷面を確保するために、ガセット板を上図のような形状で取付け、溶接を行う。

溶接後  
⇒



フィレット先端部をガス切断し、グラインダーにて所定の形状に仕上げる。

鋼道路施工便覧より

## ※ 探傷面も考慮して設計する

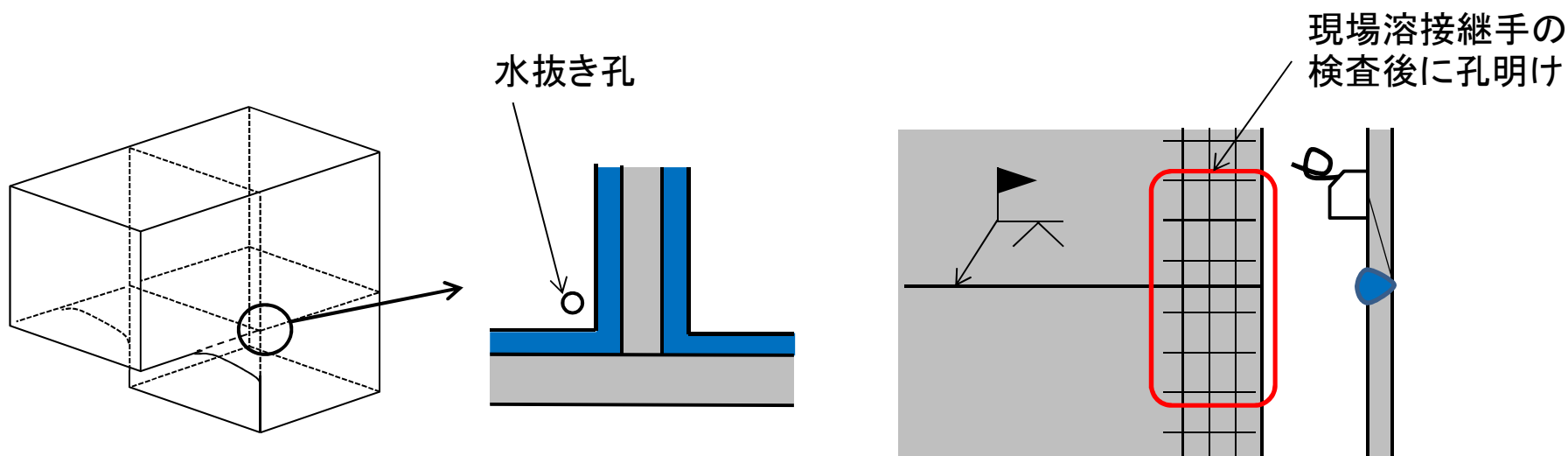
# 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

## 留意点

- ・探傷面にボルト孔などあり、平行走査ができない

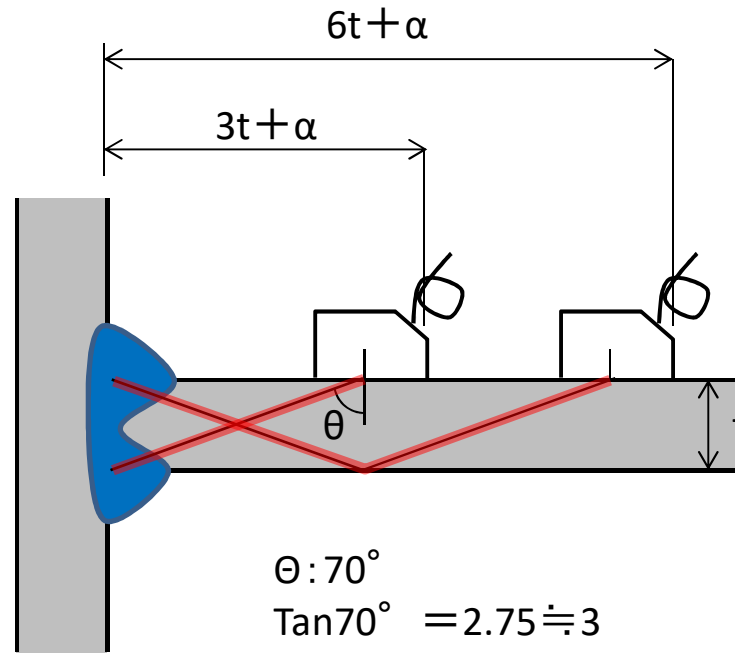


検査合格後に孔明け



※ 孔径や孔位置によっては後孔できないので注意

# 探傷面の範囲



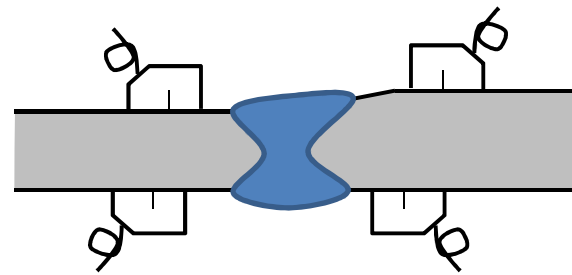
## 探傷面の計算の例

$$t \leq 25 \cdots 6t + 50\text{mm}$$

$$t > 25 \cdots 3t + 50\text{mm}$$

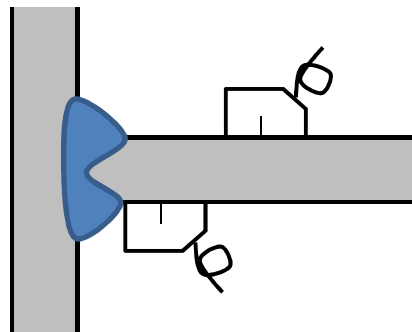
# 探傷面の方向

突合せ溶接継手は少なくとも3面から探傷



テーパ側はテーパ面以外から探傷できる範囲で探傷

T溶接継手は両面から探傷



# 内部きず検査の判定基準

## 対象とする溶接継手

【道路橋示方書・同解説Ⅱ 表-20.8.9 検査対象とする継手】

方向	継手形式	溶接の種類	備考
横方向	突合せ溶接継手	完全溶込み開先溶接	両面溶接(裏はつりあり)
		片面溶接	裏当て金がなく良好な裏波形状を有する
縦方向		完全溶込み開先溶接	両面溶接(裏はつりあり)
		片面溶接	裏当て金がなく良好な裏波形状を有する

片面溶接はやむを得ず裏はつりができない場合なので、現場溶接継手に適用

# 内部きず検査の判定基準

## 抜取り率

【道路橋示方書・同解説Ⅱ 表-20.8.10  
各部材における検査対象の溶接継手の非破壊試験検査率】

部 材		1検査ロットをグループ分けする場合の1グループの最大継手数	放射線透過試験	超音波探傷試験	
			撮影枚数	検査長さ	
引張部材		1	1枚(始端又は終端を含む)	継手全長を原則とする	
圧縮部材		5	1枚(始端又は終端を含む)		
曲 げ 部 材	引張フランジ	1	1枚(始端又は終端を含む)		
	圧縮フランジ	5	1枚(始端又は終端を含む)		
	腹 板	応力方向に直角方向の継手	1		1枚(引張側)
		応力方向に平行方向の継手	1		1枚(始端又は終端を含む)
鋼床版		1	1枚(始端又は終端を含む)		

確実に溶接品質を確保できる溶接方法(標準化された自動溶接)にて施工することを想定 ⇒ 技量に左右さる半自動溶接は全長検査

# 内部きず検査の判定基準

## 抜取り率

【道路橋示方書・同解説Ⅱ 表-20.8.11

現場溶接を行う検査対象の溶接継手の非破壊試験検査率】

部材	放射線透過試験	超音波探傷試験
	撮影箇所	検査長さ
鋼製橋脚のはり及び柱	継手全長を原則とする	
主桁のフランジ及び腹板		
鋼床版のデッキプレート	継手の始末端で連続して各50cm(2枚)、中間部で1mにつき1箇所(1枚)、及びワイヤ継ぎ部で1箇所(1枚)を原則とする	継手全長を原則とする

鋼床版デッキプレートの抜取り検査は、サブマージアーク溶接による1パス溶接を対象しており、サブマージアーク溶接以外や多層盛溶接となる場合は全線検査とするのがよい

# 内部きず検査の判定基準

表-20.8.9以外の完全溶込み開先溶接

検査方法

超音波探傷試験

抜取り検査率

継手全長



# 内部きず検査の判定基準

## 判定基準

【道路橋示方書・同解説Ⅱ 20.8.7 内部きず検査より】

検査方法		板厚 (mm)				
		8	18	25	40	100
放射線透過試験		JIS Z 3104 引張部材: 2類以上 圧縮部材: 3類以上		超音波探傷試験の 判定基準を適用	40mmを超える継手に 適用する場合は十分 な資料を有すること	
超音波探傷試験	疲労の影響がない継手	t/3mm以下				
	疲労の影響が考えられる継手	設計上許容される寸法以下 ※溶接継手の形式や種類で判定基準が異なるため、必ず設計に確認すること ⇒ 設計で明確しておくこと				

# 超音波探傷試験のしきい値は？

## 道路橋示方書・同解説Ⅱ

超音波探傷試験でのきずの指示長さと実際のきずの長さの相関に関して確認 → ○検出レベルで検査と規定していない



**きずの検出率**、空振り率も考慮する必要がある

下記の文献では、超音波自動探傷については、**L/2検出レベル**がよいとしている

国土交通省国土技術政策総合研究所, 東京工業大学, 日本道路公団, (社)日本橋梁建設協会, (社)日本鉄鋼連盟, (社)日本非破壊検査工業会: 共同研究報告書「鋼道路橋溶接部の超音波自動探傷検査手法に関する共同研究(Ⅰ)」, 国土技術政策総合研究所資料第31号, 2002.3

# 検査技術者の資格

## 目視試験

少なくとも品質保証部門での教育訓練

## 磁粉探傷試験

「JIS Z 2305 非破壊試験技術者の資格及び認証」

磁粉探傷試験のレベル2以上

極間法限定の場合：極間法磁気探傷検査のレベル2

## 浸透探傷試験

「JIS Z 2305」の浸透探傷試験のレベル2以上

## 放射線透過試験

「JIS Z 2305」の放射線透過試験のレベル2以上

## 超音波探傷試験

自動探傷：「JIS Z 2305」の超音波探傷試験のレベル3

レベル3の監督下で装置の操作のみを行う者はレベル2以上

手動探傷：「JIS Z 2305」の超音波探傷試験のレベル2以上

ご清聴ありがとうございました。