

再注目される交流電磁場測定法（ACFM）の 広範な溶接部への適用事例

ACFM (Alternative Current Field Measurement) for the Weld Joint Inspection

Eddyfi Technologies

C. Tremblay
○ N. Nonaka

2024年8月27日 危険物保安技術協会主催
新技術を活用した危険物施設の保安設備等に関する研究会（第9回）



AGENDA

1. ACFM ACFM 概要
2. 動作原理
3. ACFM 装置
4. 適用事例

ACFM 概要

ACFMの概要

交流電磁場測定法：ACFM (ALTERNATIVE CURRENT FIELD MEASUREMENT)

“金属表面の開口キズの検出とサイジング、ペイント上から適用可能”

鉄やオーステナイト系の材料にも適用：

- 鉄材には5KHzプローブ：主に炭素鋼材（CS）
- オーステナイト系素材には50KHzプローブ：主にステンレス（SS）

深い割れの深さ評価：

- 25mm深さのキズを計測（1.0インチ深さ）
- 大きくラフな構造の溶接部へ適用できる
- 表面の荒い状況における疲労割れの評価技術としての選択肢

厚みのあるコーティング上からの検査：

- 最大4mm厚さのコーティング上から良好なサイジング
- 最大10mmのリフトオフを許容（感度は低下する）



ACFM の起源

1980年台：構造物の疲労亀裂の問題

アレクサンダーキーランド号の転覆事故（ノルウェー沖）

- 支持構造物に取り付けられていたハイドロフォン溶接部のき裂を起点としてコラムDが破断、プラットフォーム転覆に至った事故
- 調査によって、起点となった溶接部の熱影響部（HAZ）にき裂が認められた

海中環境下における検査：

MT:

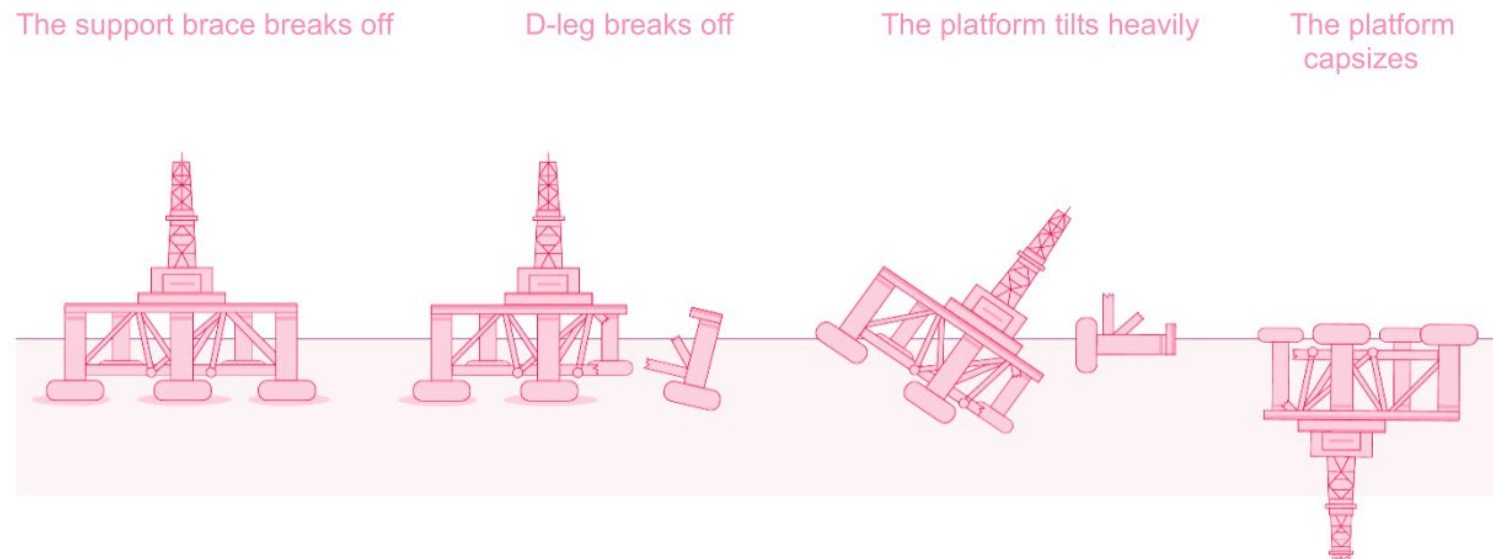
- 大規模な前処理 / コーティング剥離の要求
- 深さサイジング不可

ECT:

- 海中環境への展開に向かない
- 水面下ではセンシティブ（誤判定）
- 深さ評価は信頼性に乏しい

ACPD (交流 – 電位低下):

- サイジングOK、金属表面の露出が必要
- 水中環境では展開できない



ソース : The Office of the Auditor General's investigation of the authorities' work on the Alexander L. Kielland accident

ACFM の起源

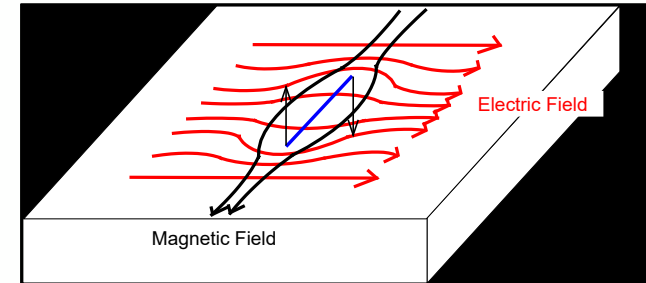
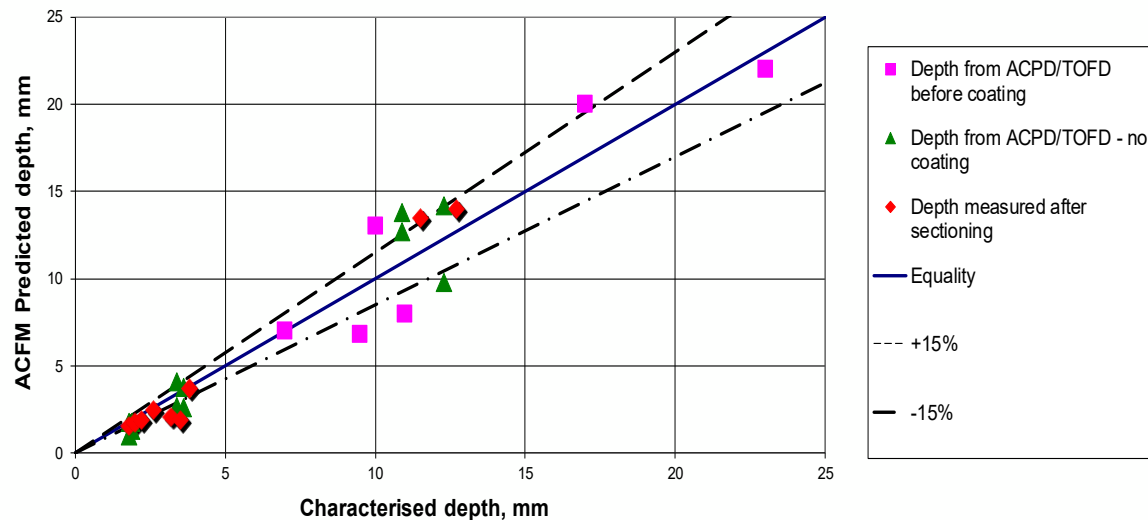
1990年台初頭：技術開発

UCL（ロンドン大）：

- 原型となる技術の開発
- 最初の装置/プローブを設計・製造
- サイジングを実現するための**数理モデル**の開発

検証に対する大規模投資：

- JIPによる投資 – Shell, BP, CP, BG
- ACFM、MT、ECTを比較するためのブラインドテスト
- 数種の実際の欠陥および被検体形状を用いた完全なPOD評価
- サイジングのブラインドテスト（下図）ACFMサイジングの正規化に未だ用いられている
- 後の広範なオフショア試験を先導した象徴的な検証プログラム



ACFM 動作原理

ACFM 動作原理

均一な電界の形成

電界誘導（インデューサ）：

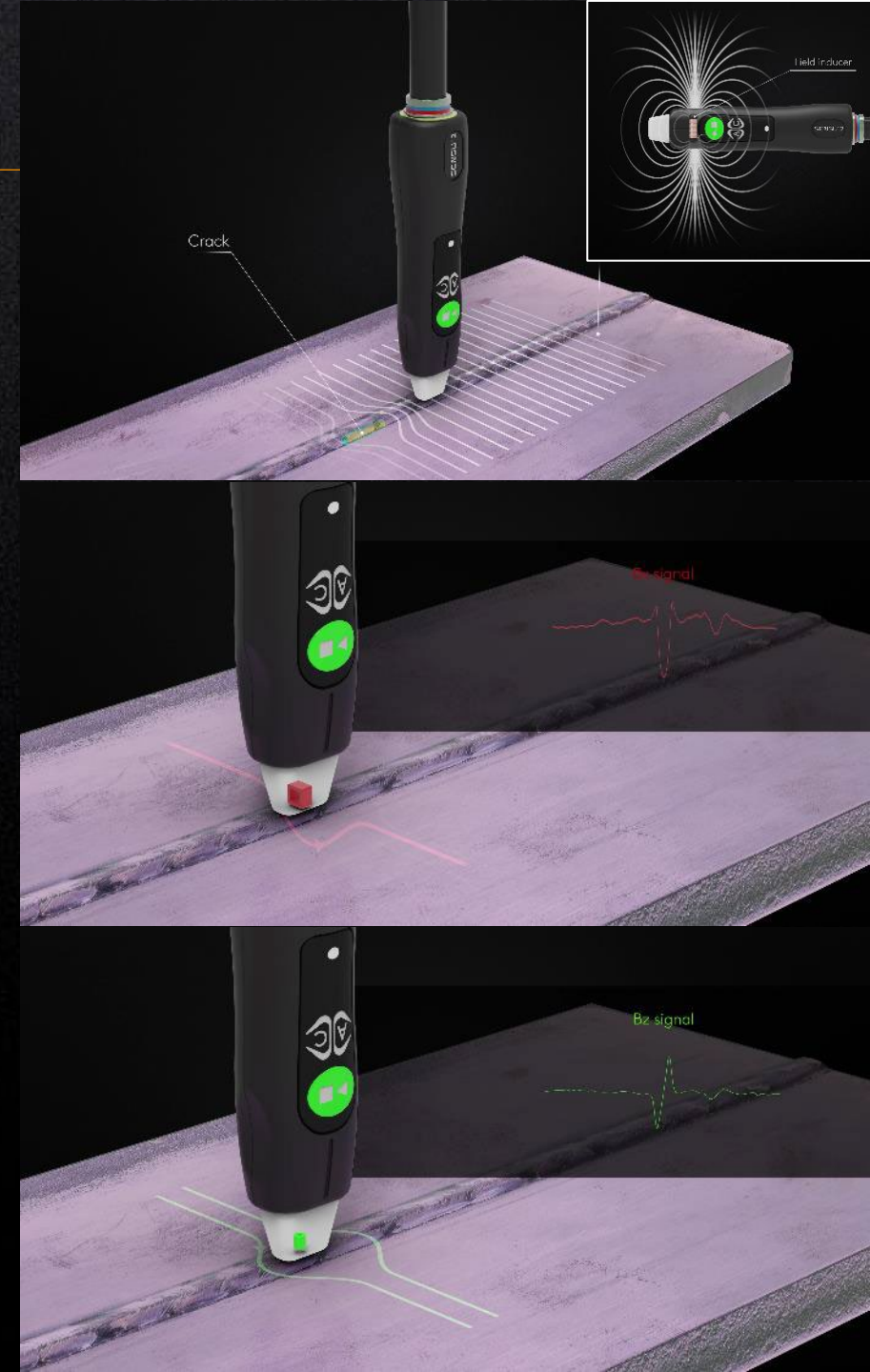
- プローブ先端部よりも高い位置に設置
- 安定した交流電源にて駆動
- 被検体中に均一な電界を形成

欠陥は被検体中の電流は流れの妨げに：

- 一部は強制的に深さ方向へ迂回（赤色）
- 一部は割れの端部を迂回（緑色）

検出対象に近接した小さな検出コイルで妨害を検知：

- Bxコイル（赤）は割れの深さに関する情報を収集
- Bzコイル（緑）は割れの長さに関する情報を収集



ACFM 動作原理

バタフライ

Bx 信号:

- 一般的に割れの上を通過するとき下方へ振幅
- 振幅値は割れの深さに相関
- 割れの向きを区別するために使用

Bz 信号:

- 割れの一端の近傍でマイナスの谷を形成し、もう一端でプラスの山を形成
- 割れの長さに相関

バタフライ:

- Bx および Bz 信号を合成
- 単純化された明確なインディケーション情報
- 簡単に習得し易いルール、効率的で信頼性の高い分析を可能に
- 割れと他の指示とを区別する目的で利用できる

Bx signal



Bz signal



Bx + Bz signal



ACFM 動作原理

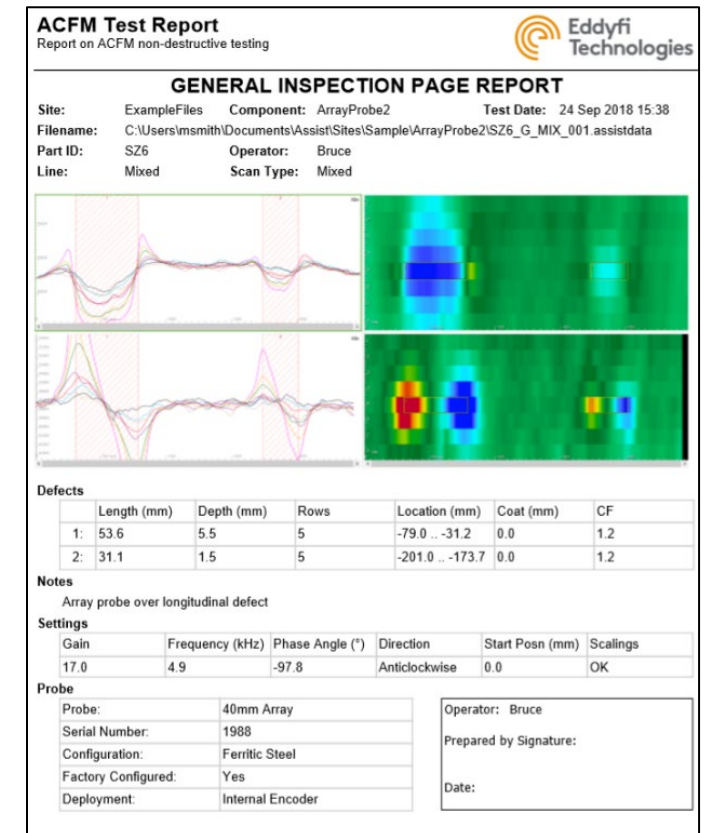
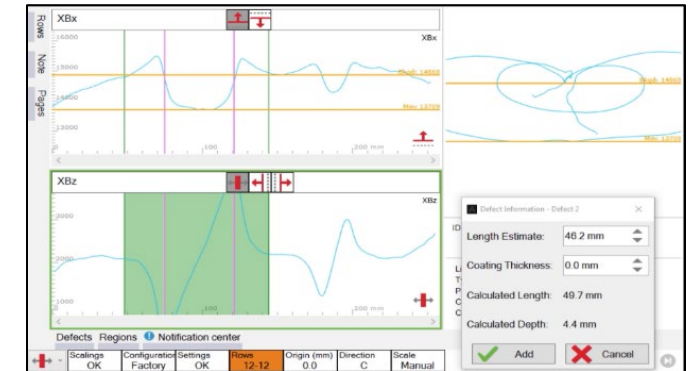
検出/サイジング/レポート

割れの検出能力:

- 検出可能な割れのサイズ（長さ/深さ、LOなし） :
4mm / 0.5mm
- 検査有効幅 (シングルプローブ): 15mm

独自のサイジングプロセス、評価能力:

- 使用時の本体校正は不要
- 割れの深さサイジング範囲: 0.5mm <> 25mm
- 信号を選択 ➡ ソフトウェアで高さ評価
- ワンクリックでレポート作成



ACFM 装置

ACFM 探傷システム (ポータブル)

Amigo2

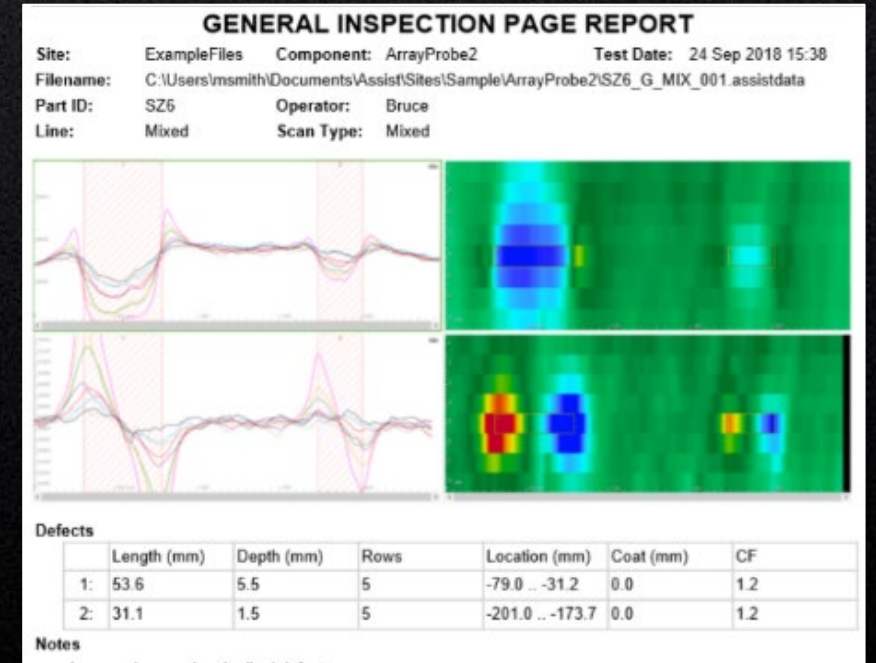


- パワフル、高速
- 高品質マルチチャンネルデータ
- 複数の検査アプリケーションをサポート
- 最長50mケーブル長
- プローブの互換性：旧SENSU、SENSU2、アレイ、カスタム
- 近代化されたシステム、最新の電子ハードウェア/ソフトウェア

Amigo2 SE



- 廉価版
- シングルプローブのみ
- アレイプローブは利用不可だが、他の機能についてはAMIGO2と同様



プローブ

一般用 SENSU2 プローブ（気中用）



Sensu2 プローブの共通の特徴:

- 現場での利用に適した：保護等級IP65 / 接続可能なケーブル長 5、20、50m
- 性能：高速なデータ採取 / 良好な信号対ノイズ比率
- 利便性：プローブ本体へコンフィグファイルを格納 / 操作ボタン、LEDインディケータ / 人間工学に基づいた形状

	ペンシルプローブ	溶接部用プローブ	アレイプローブ
形状	 A black, handheld pencil-style probe with a green button and a small display.	 A black, rectangular probe with a red line and a small display.	 Two black, rectangular array probes with small displays and buttons.
有効幅	直角、ストレート、横向き	3点支持で安定スキャン / 突合せ溶接部	形状追従型アレイプローブ、8 or 16素子オプション、素子の伸縮幅：12mm
機能	15mm	15mm	16 素子Ver : 90mm 8 素子Ver : 45mm
	適用範囲が広い、軽量、シンプル	より広く深い磁場 / 計測能力：25mm深さ	エンコーダを装備、デュアルフィールド（2重磁場、2方向のキズの検出 / 1回走査でサイジング）

NEW

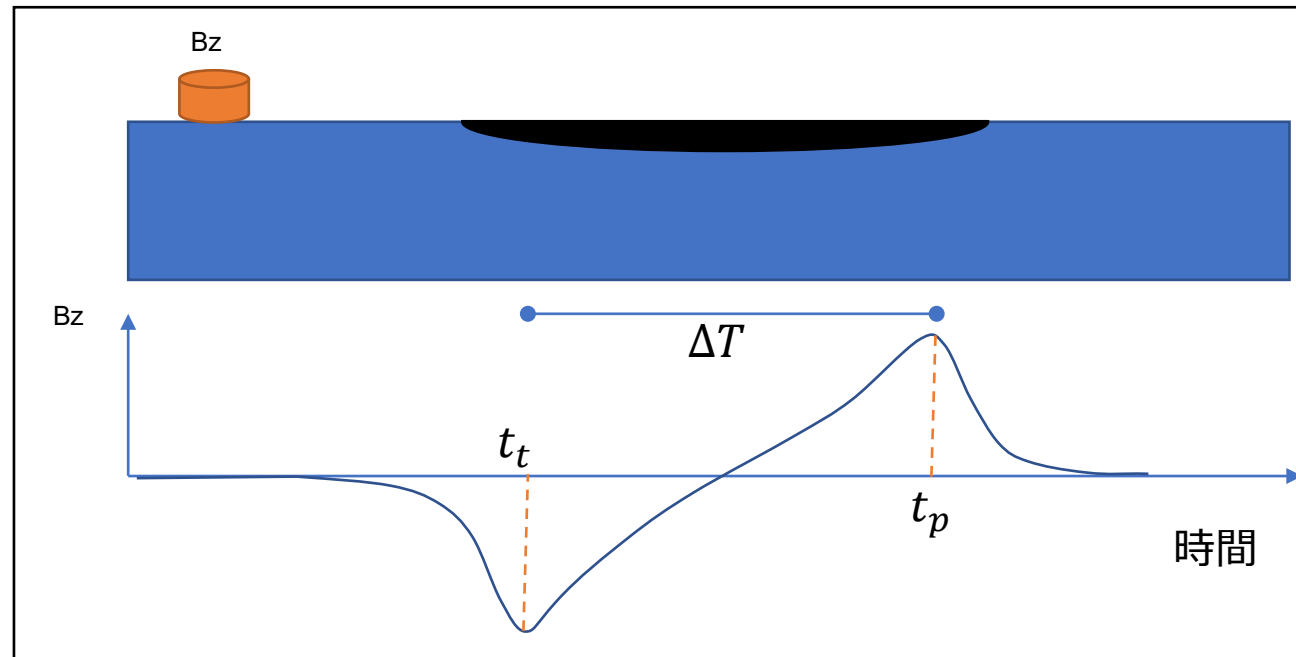
エンコード不要 キズ長さ測定

新型 “3BZ” プローブ

従来のBz信号を用いた欠陥検出ではできない…

エンコードを用いずに割れ長さを推定するのに必要な情報：

- 割れの始点における通過時間 (Bz の谷): t_t
- 割れの終点における通過時間 (Bz の頂点): t_p
- 割れ両端部の経過時間: $\Delta T = t_p - t_t$
- 平均スキャン速度: エンコード無しでは把握することは困難！



エンコーダ不要 - キズ長さ測定

新型 "3BZ" プローブ

平均スキャン速度の計測するために:

- Bz コイルを2つ追加; Bz2 および Bz3
- d_{12} = Bz1 と Bz2 間の距離
- d_{13} = Bz1 と Bz3 間の距離

割れの上をスキャンする時に得られる:

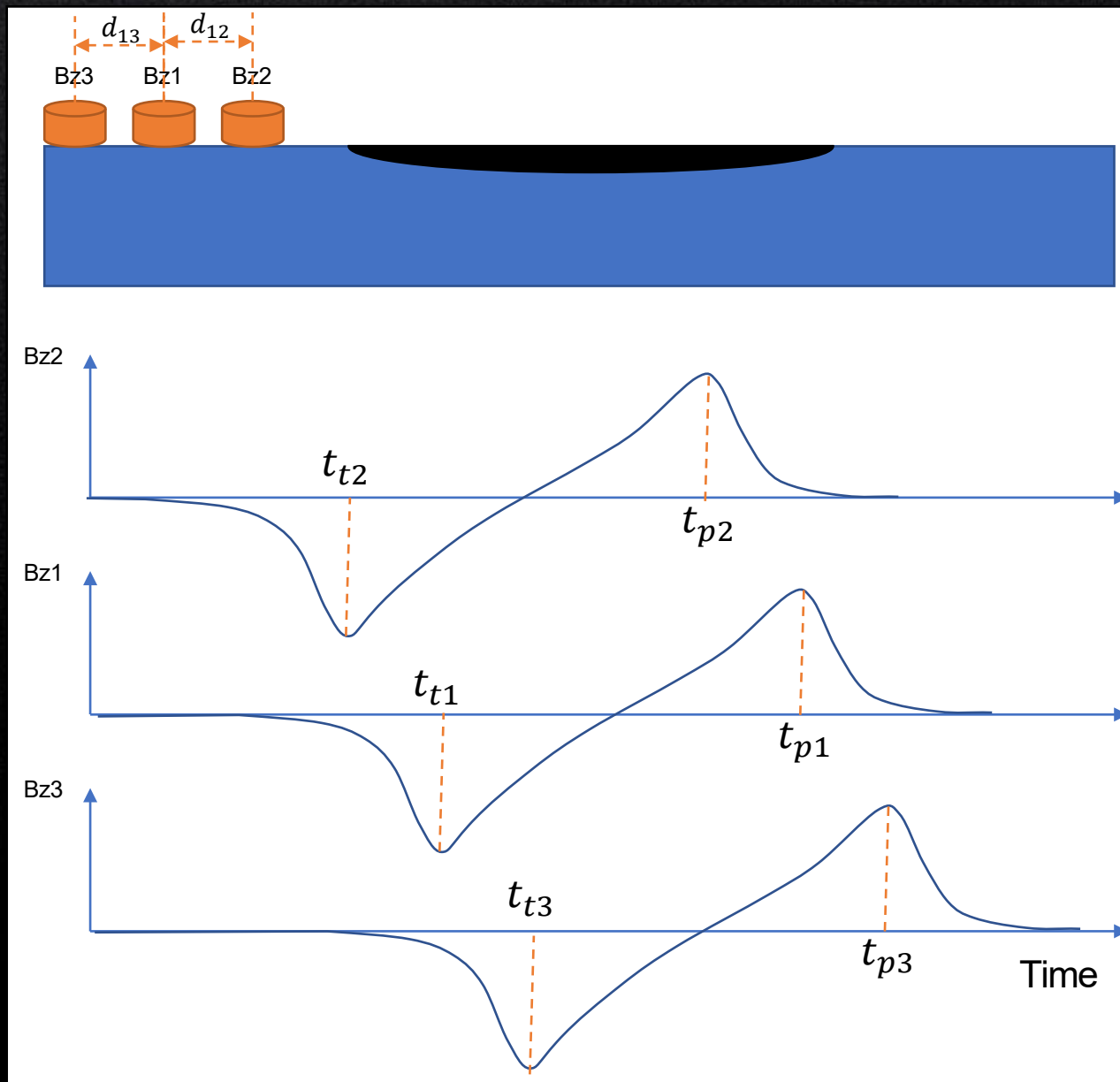
- 谷を通過する時間 (t_t)
- 頂点を通過する時間 (t_p)

以上より、平均スキャン速度を計算できる:

$$Avg.Speed = \left(\frac{d_{12}}{t_{t1} - t_{t2}} + \frac{d_{13}}{t_{t3} - t_{t1}} + \frac{d_{12}}{t_{p1} - t_{p2}} + \frac{d_{12}}{t_{p3} - t_{p1}} \right) / 4$$

結果として、割れ長さの推測が可能になる:

$$Crack\ length = Avg.speed * \Delta T$$

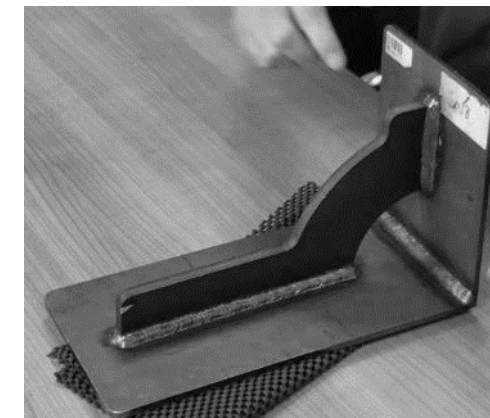


NEW

検査プラン

箇所数の多い、複雑構造の検査を簡単に

箇所数の多い、複雑構造の検査対象物：



検査プラン：複雑な検査を最適化されたシーケンスとしてプログラム

Code	Description	Location	Inspection Technique	Number of Cycles	Max Crack Length (mm)	Crack Orientation	How Required
100	Butter weld, butter joint and other welds located at bottom of the outside edge of side bearing post to draft sill and (SBS) Full length of weld.	A:End Right A:End Left B:End Right B:End Left					
101	Butter weld, joint and other welds from outside of body side bearing. Full length of weld.	A:End Right A:End Left B:End Right B:End Left					
102	Butter bottom cover plate to oil flange longitudinal weld. Full length of weld.	A:End Right A:End Left B:End Right B:End Left					

Inspection Technique	Repair Code
101 Repair or Reinforce	101
102 Repair or Reinforce	102
103 Repair or Reinforce	103
104 Repair or Reinforce	104
105 Repair or Reinforce	105
106 Repair or Reinforce	106
107 Repair or Reinforce	107
108 Repair or Reinforce	108
109 Repair or Reinforce	109
110 Repair or Reinforce	110
111 Repair or Reinforce	111
112 Repair or Reinforce	112
113 Repair or Reinforce	113
114 Repair or Reinforce	114
115 Repair or Reinforce	115
116 Repair or Reinforce	116
117 Repair or Reinforce	117
118 Repair or Reinforce	118
119 Repair or Reinforce	119
120 Repair or Reinforce	120

Typical Bolster Designs



Manage Part Lists

DGZFP

Manage Part Lists

Part Lists

☐ Part List Name
☒ Car model A
☐ Car Model B
☐ Car model C
☐ Car model N

Part IDs

☒ Weld1
☒ Weld 2
☒ Weld 3
☒ Weld N



Edit Plan

DGZFP

Edit Plan

Component

☐ Car SN1
☐ Car SN2
☐ Car SN3
☒ Last car today

Part List

Car model A

Car model N

Car model B

Car model A

適用事例

ACFM 適用事例

幅広い分野で、多くの実績



And more...

© 2022 Eddyfi Technologies

ACFM 適用事例

産業プラント & 製油所における検査需要

コーティング上から割れを検出/サイジング:

- 配管施工
- 圧力容器
- 補機
- ノズル部
- 他多数...

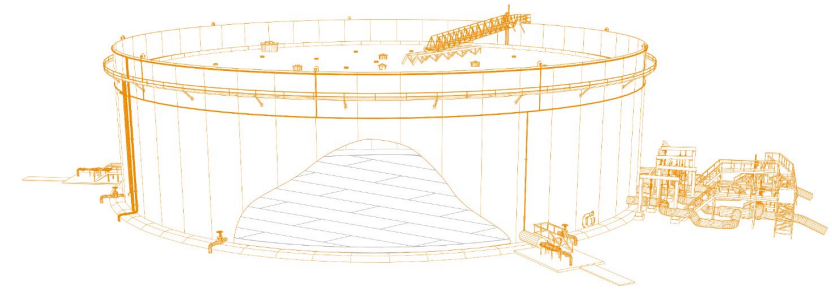


ACFM 適用事例

備蓄タンクの溶接線検査

- 割れの検出とサイジング：
最低限の表面清掃、ペイントの剥離不要
- 隅肉溶接プローブ：アニュラー板×側板 溶接部
- 底板：高速なアレイプローブスキャン
 - 一般的な溶接部：1回走査
 - 段違い継手の高さ：最大 10mm 高さまで対応
- 広い採用実績：
 - 大気開放式タンク：仏（COFREND）、英、他
 - 球形LNGタンク：ブラジル
 - LNGオフショア / LNG船：マレーシア
 - And more...
- MT（磁粉探傷試験）との対比：
 - 大幅なコスト削減
 - 検査業務生産性向上

[For more information](#)



ACFM 適用事例

高温環境
溶接パス検査



適用例:

- 配管溶接施工時
- 容器 / 圧力容器
- エマルジョン流体のパイプライン
- 運転中配管のホットタップ施行時の溶接やスプリットT管の事前/事後検査
- **複数パス溶接の中間層検査**

従来手法の課題 (MT/PT):

- 一般的な最大適用可温度: 50-60°C
- 検出感度低下を許容すると215°C

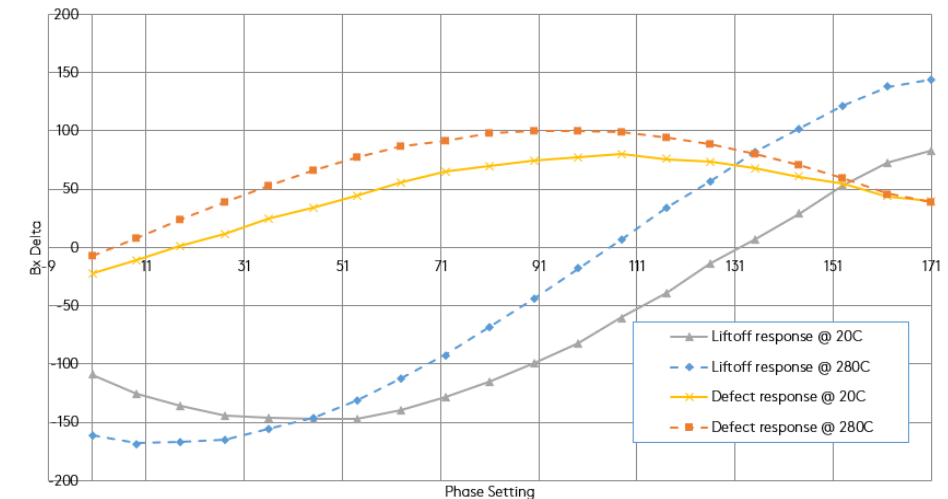
標準 ACFM プローブ:

- 80°C 連続使用
- 接触時間 @ 150°C: 50 秒
- 接触時間 @ 200°C: 10 秒

空冷式特殊 ACFM プローブ:

- フィールド: 300°C 検証済み
- 試験: 最大 500°C
- 内部温度が許容値を超えると警告

[For more information](#)



温度変化位相シフト

Slot ID	1	2	3	4	5	6
Length (mm/in)	5.0/0.197	5.0/0.197	5.0/0.197	10.0/0.394	20.0/0.787	5.0/0.197
Depth (mm/in)	0.89/0.035	1.57/0.062	1.02/0.040	1.15/0.045	1.99/0.078	1.05/0.041

試験に用いられたキズ

ACFM 適用事例

建築・土木

アミューズメント施設



各種クレーン



橋梁



鉄骨構造物



ACFM 適用事例

橋梁

構造物の特徴:

- 比較的高い導電率を持つ溶射アルミニウムや溶融亜鉛コーティング亜鉛メッキ鋼が利用される
- 導電性コーティングはNDTへ小さくない影響を与える：非開口キズとしての取り扱い
- コーティングの厚さ：～240 μm

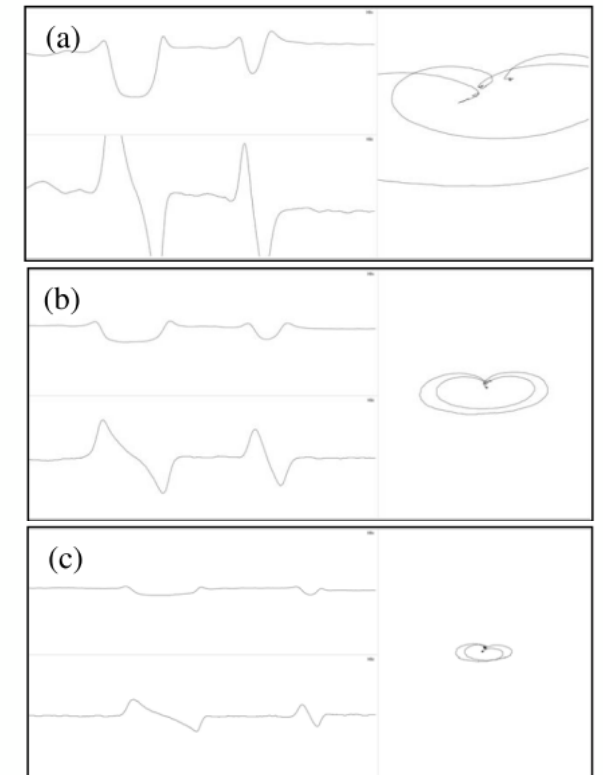
ACFM 手法:

- 良好な検出性能を確保
- めっきが不均質な場合はサイジング性能に影響：剥離しての実施が望まれる

実験的アプローチ、新たな信号処理:

- より厚さのある亜鉛メッキ
- 非開口キズを検出可

[For more information](#)



50x5 及び 20x20 非開口キズの検出
亜鉛メッキ厚さ：(a) 200 (b) 580 (c) 670 μm

ACFM 適用事例

石油＆ガス：ドリル・ストリングのネジ部検査

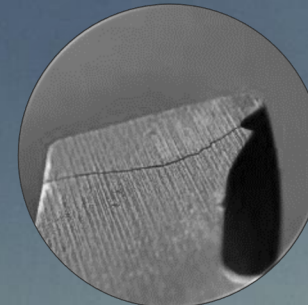
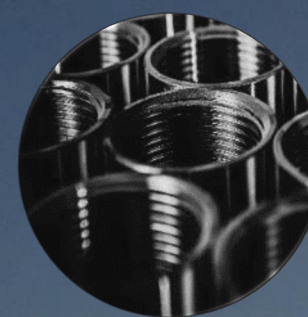
ドリル・ストリングのネジ結合部は掘削リグにおいて大きな役割を持つ部位：

- 底穴アセンブリ（BHA）の中で最も弱い結合部位
- 大きな応力に晒され、疲労割れが起こりやすい
- ねじ切れによりBHAを失うことは、多くの出費を伴う（～ ¥ 5,000万）

従来の検査手法（MT/PT）には多くの課題が残る：

- 十分な清掃・表面処理、全体を通して時間を要する検査
- 複雑な表面形状、限定的な検出能により好ましくない現像結果
- 環境負荷が高い：ケミカル、環境に優しくない。ロジスティックを複雑にし、総操業コストを押し上げる要因に
- 割れ深さを評価できない：修繕の判断材料としては費用効果が薄い

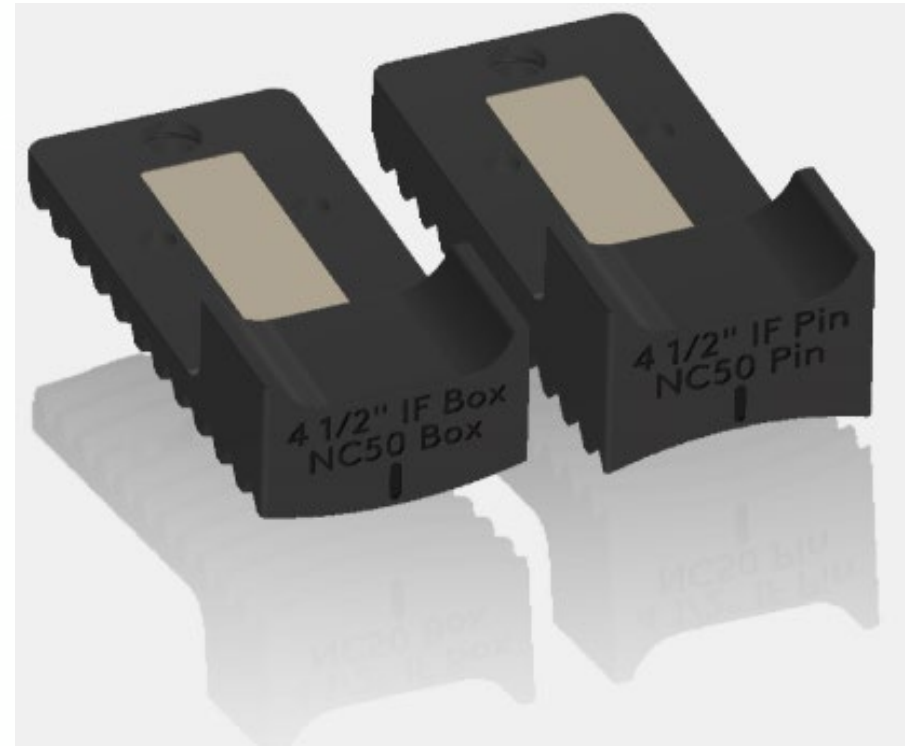
ACFMにより、信頼性と費用効果の高い代替手法を提案します！



ACFM 適用事例

ドリル・ストリングのネジ部 検査

- ネジ部共通プローブ（UTP）：1個のプローブで全てに対応
- 3次元プリンタで作成したシューを適用、様々なネジ山条件に
- ボックス ID：2.3" IF, 2.3" Reg., NC23 以上
- ネジピッチ最大 4 TPI、5 TPIへも適用
可しかし若干の感度低下
- ターンローラ上で検査を推奨、迅速
- 高速、再現性高い、実証済…



ACFM 適用事例

鉄道関連適用事例

ACFM :

20年にわたり鉄道業界で使用されてきた、しっかりとした検査方法

車軸、輪軸検査:

- 疲労割れの検出とサイジング
- 15種のキズあり車軸を用いた独立したブラインドテストの実施
- ACFMは、ECTよりも優れ、MTよりも明らかに有効であることを証明

様々な溶接部検査への適用:

- タンク車両の溶接部
- 台車枠の溶接部
- 補機溶接部

レールの検査:

- ころがり割れ（RCF）検出の高速で信頼性の高い手法
- ACFMは試験と運用実績により英国の鉄道各社から認められている技術：
Corus Rail Technologies (Network Rail 向け), Balfour Beatty Rail Technologies, York EMC Services, UK.



ACFM 適用事例

タンク車両の検査



- 構造溶接部検査の磁粉探傷の代替手法としてACFMを適用
- 過去、100台以上の車両で成功裡に運用されている
- 完全な検証により実証：低い誤判断、高いPOD

効率化、経済的なメリット享受:

- 北米では、10年間で 330,000 台のタンク車両の検査需要
- 磁粉探傷はグリッドブラストおよび再塗装処理が必要; ACFM は不要
- 1台当たり; Amigo2により、3 – 4 時間節約可能
- 年間、99,000 ~ 132,000人工数を毎年節約
- 年間の潜在的なコスト効果：最大 \$4百万 (\$30/hとして)
- 近年のケースでは、1年間で1台当たりの投資を回収

他の利点:

- 車両の利用率の高回転
- リスク低減：人工の低減 / 労働災害の低下（例：表面処理等による）
- 信頼性向上 / 効率化：ヒューマンエラーの低減 / 欠陥の記録、後に確認できる検査記録
- 化学由来の消耗品の収集や処理の管理が不要



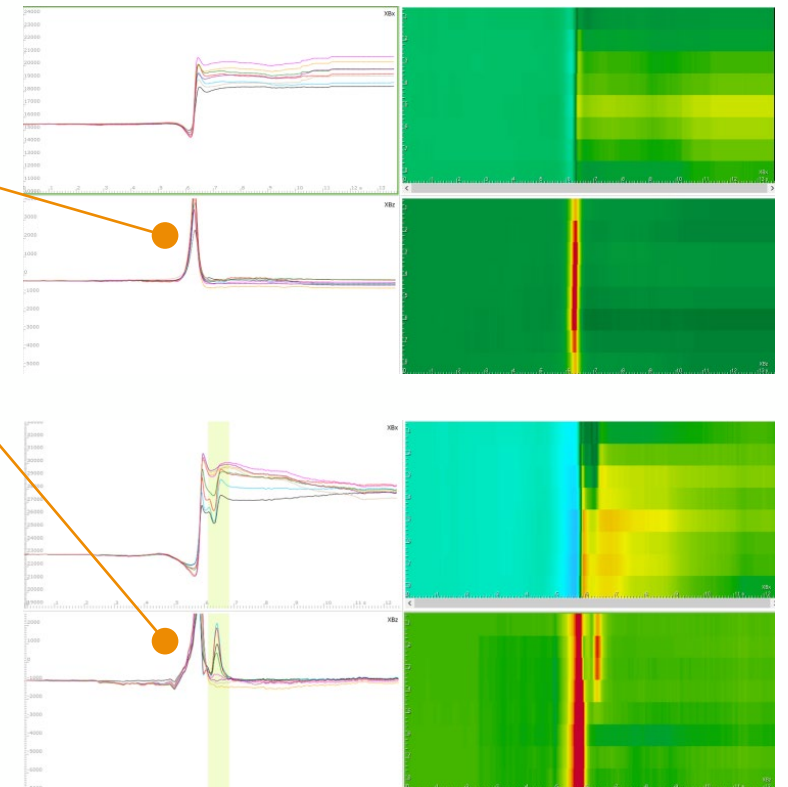
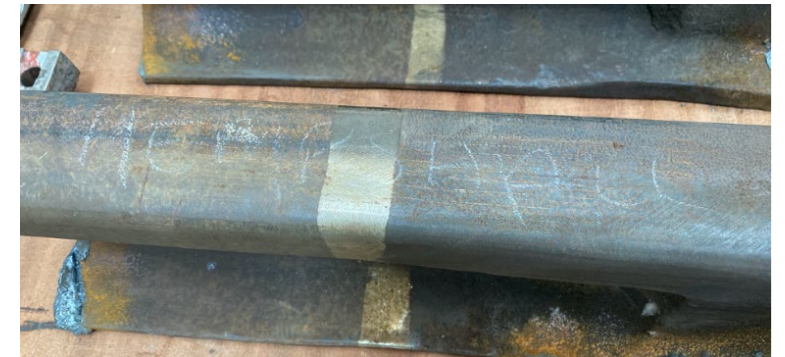
ACFM 適用事例

クロッシングレール検査

レールとマンガンクロッシングの異材継手はキズが
起こりやすい部位

ACFMのデュアル電界アレイプローブを使用した試
験により証明された性能:

- 健全な融合線は接合部全体で一貫したパ
ターンを示す
- キズのある融合線は、ここに示される通り、Y
軸側に明らかな異常信号を示す



ACFM 適用事例

鉱業

ACFM はマイニングアプリケーションに最適:

- 厳しい環境、汚い/油脂類/摩耗した部品
- 大きな構造物の大きな傷
- 繰り返し疲労割れは深さ評価が必要

一般的な適用事例:

- 大型構造物の溶接部
- ギアの歯の検査 (ACFMはASTM E2905 で指定)

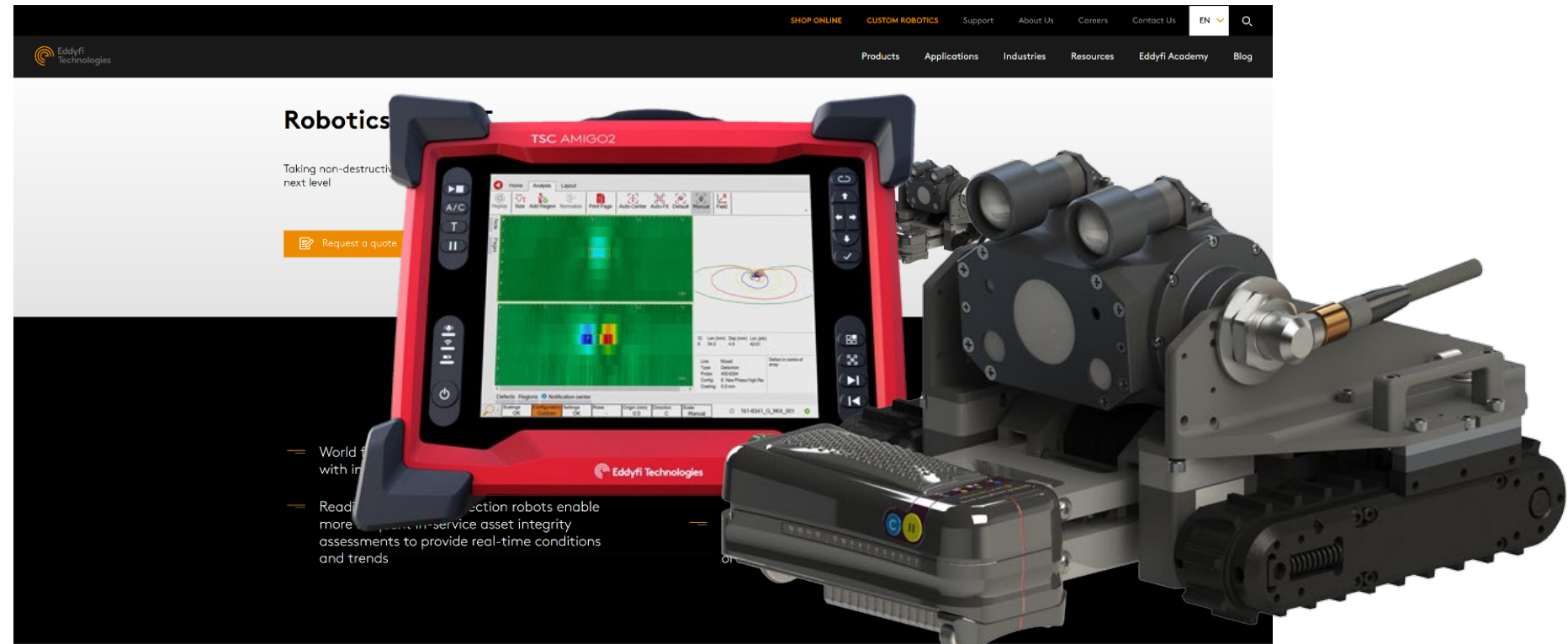


ロボットを使った ACFMの展開

AMIGO2 +
MAGGクローラ

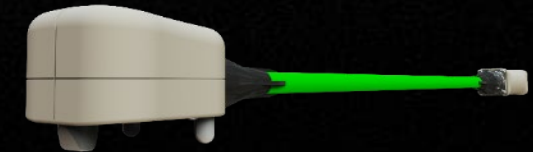
アプリケーション:

- タンクの検査
- 橋梁検査
- 風力発電、回転軸の検査
- 船体
- Etc...



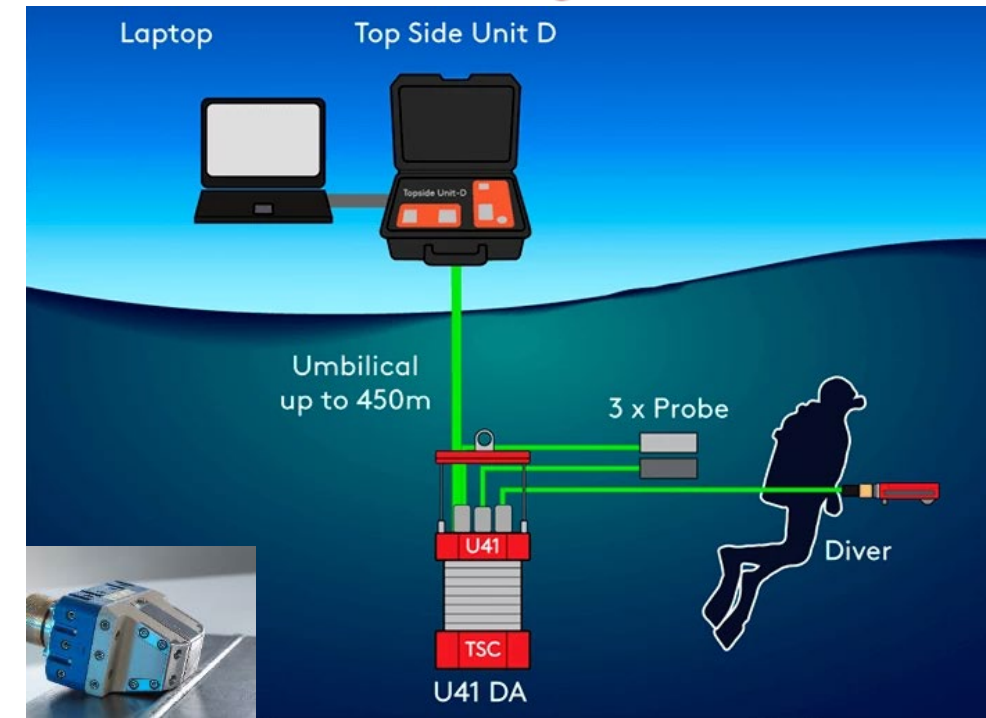
ACFM 適用事例

オフショア領域



U41: 深海向け

- 最深300mまでの深海向け
- 最大3種の Sensu2 UW プロブを同時接続、表面へ頻繁に戻ることなく検査
- 最大3本、150m長さのアンビリカルケーブルを海上のシステムへ接続
- 最新の電子デバイス：高速スキャン、データ高品質
- アレイプロブサポート：
 - 36mm幅をカバーするミニアレイプロブ駆動
 - スキャン回数の抑制
 - 高速でキズを認識・判別



Amigo™ 2 浅水域

- 水上から展開、50m水中ケーブル
- 多用途：同様のロングレンジタイプの検査アプリケーションに転用できる
- 最新の電子デバイス：高速スキャン、データ高品質
- U41同様に複数のプローブヘッドを制御可能、しかし50mケーブル長さ以内

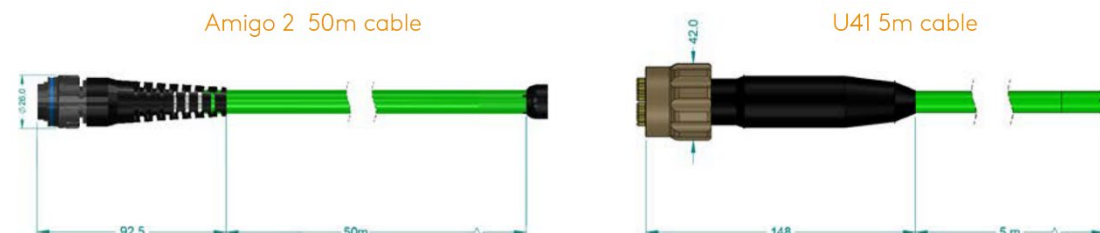


プローブ

SENSU2 水中用プローブ

Sensu2 水中用プローブの共通特徴:

- IP68 保護等級 (最深 300m まで)
- プローブ本体へコンフィグファイルを格納
- Amigo2 向けには 50m ケーブル、U41D/DA 向けには 5m ケーブルを適用



プローブ タイプ	アレイ	溶接部用	狭隘部用	溶接補修部用	ペンシル
形状	平坦部用、リジッド、4素子アレイプローブ	3点支持で安定スキャン	先端部テーパ形状プローブ	溶接修理切削形状にフィットする細長い先端形状	直角、ストレート、横向き
有効幅	36mm	15mm	15mm	15mm	15mm
適用事例	突合せ溶接部の高速スキャン	突合せ溶接部の安定した検査、深い割れ深さ計測：25mm	アクセスが狭い隅肉溶接部や類似エリア	補修中の残りの割れ深さのリアルタイム把握	様々な条件下で利用できる、隅肉溶接、突合せ溶接

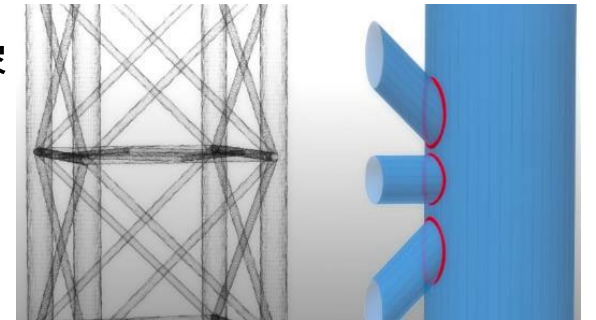
一般的な溶接構造物の検査

コーティング上から:

- ジャケット (ノード構造 / 付属品溶接 / 浸水部材の有無の調査)
- ジャッキアップ・リグ (脚部ノード溶接部/ スパッドカン溶接 / 船体)
- セミサブ、潮上帯 (脚部溶接線、船体溶接線 UWILD 検査)

その他の検査:

- 浮体式生産貯蔵施設の船体
- パイプラインの損傷調査(アンカー、ドラグ、他)
- チェーンなどの係留施設

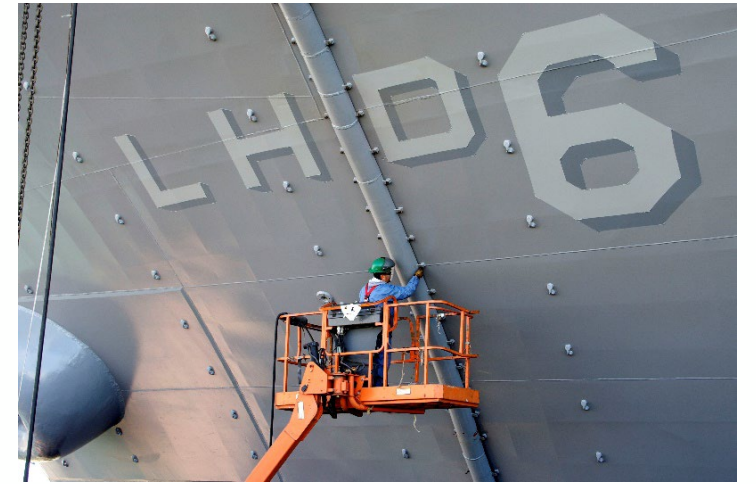


ACFM海中検査

船体 / 軍艦

溶接構造物の検査:

- コーティングの上から船体溶接部を検査
- 船内の構造物溶接部



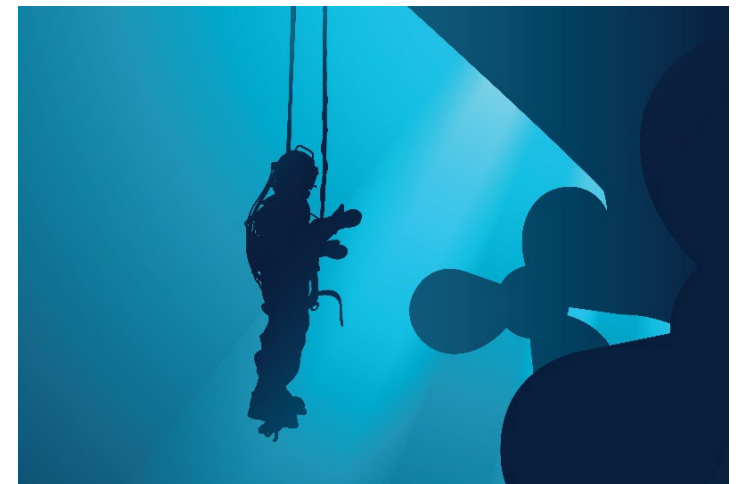
推進機関:

- プロペラの検査
- プロペラの損傷調査
- ドライブシャフトの溶接部



水中 or 船渠 いずれでも可

クローラを活用することも



[For more information](#)

Thank You

ご質問：



smatsuzono@eddyfi.com