

第23回

千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

講演資料

日時 平成21年2月13日(金)  
13:00～16:30

場所 ホテルポートプラザちば



## 新型高性能デジタル超音波探傷器のご紹介

The introduction of a new high performance ultrasonic digital flow detector

○高田 泰                      鈴木 弘章  
YASUSHI TAKADA              HIRONORI SUZUKI  
オリンパス株式会社  
Olympus Corp.

### 概 要

・平成 21 年 2 月末に発売予定の米国 OlympusNDT 社製新型ポータブル超音波探傷器 EPOCH1000 シリーズについて、その概要及び機能、性能についての詳細を紹介する。

### 1. 緒 言

この度オリンパス㈱より、新型ポータブル超音波探傷器 EPOCH1000 シリーズが発売される。ポータブルデジタル超音波(以下デジタル UT とする)探傷器 EPOCH シリーズは、旧米国 Panametrics 社時代である 1988 年に初代 EPOCH として EPOCH2002 が発売されて以来、今回の EPOCH1000 タイプで、第 8 代目のデジタル UT 探傷器となる。モデルチェンジの度に、小型軽量化、高機能化、高性能化(デジタル技術の高度化による高分解能化、波形追従の高スピード化など)が図られて来たが、今回の EPOCH1000 シリーズは、高性能デジタル UT 探傷器とマニュアルフェイスドライ超音波(以下 PA-UT とする)探傷器の 2 つの特徴を兼ね備えた探傷器となっている。以下にその詳細について説明する。

### 2. 探傷器概要

本探傷器 EPOCH1000 シリーズは、EPOCH1000, EPOCH1000iR, EPOCH1000i の 3 タイプで構成される。その外観を図 1 に示す。

EPOCH1000 は、デジタル UT 探傷器のみの機能、EPOCH1000i は、デジタル UT 探傷器及び PA-UT 探傷器の 2 つの機能、EPOCH1000iR は、デジタル UT 探傷器のみの機能を備えかつソフトウェアのアップグレードのみで PA-UT 機能を追加出来る探傷器である。

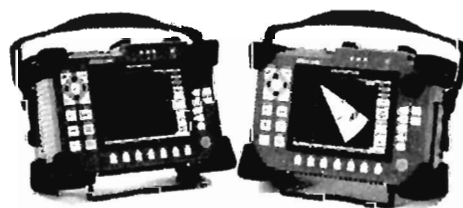


図 1 探傷器外観

### 3. 高性能デジタルUT探傷器

デジタルUT探傷器としての基本性能は、全機種同等である。主要なスペックを以下に示す。

#### (本体)

- |          |  |
|----------|--|
| ディスプレイ   | ・反透過型フルVGA液晶                                       |
| 耐環境性能    | ・IP66規格に準拠   |
| インターフェイス | ・USBクライアントポート×1、USBホストポート×2                        |
|          | ・RS232Cポート×1                                       |
|          | ・VGAポート  |
|          | ・9pinアナログアウトポート                                    |
|          | ・26pin ハートウェアIOポート (アラームアウト、2軸エンコーダーイン、トリガーアウト/イン) |

#### (探傷器部)

- |       |   |
|-------|---|
| パルサー  | ・PRF(パルス繰り返し周波数)最大6KHz                    |
|       | ・ハイパワー最大475Vのチューナブルスクエアパルサーを装備。           |
| レシーバー | ・デジタルフィルター装備 (スタンダード時7段階、アドバンスフィルター時30段階) |
|       | ・”ClearWave”波形表示機能装備。                     |

PRF(パルス繰り返し周波数)は、最大6KHzまで可変可能であり、同時に4つのアナログ信号、6つのアラーム信号の出力が可能である。また、トリガーイン/アウトやRS232Cポートによるコマンドの送受信が可能であり、他の機器との組み合わせにより簡単な自動探傷用途での使用も可能である。レシーバー部は、ワンショット400MS/S相当のデジタルタイザを搭載、測定範囲に関わらず鋼中0.01mmの分解能(パルスエコーモード時)で路程の測定が可能である。

また、新しく“ClearWave”と呼ばれる機能を搭載している。これは、特殊な信号処理により、Aスキャン波形の視覚的な分解能を向上させる機能である。これにより、アナログ探傷器の波形表示に近いAスキャン波形の表現力を実現し、デジタルUT探傷器では捉えにくかった、底面エコーやコーナーエコー近くの回折波などの検出が可能となる。今までデジタルUT探傷器の波形表示に不満を持っていたユーザーにとって最適な機能と言える。その他に、30段階の高性能ローパスフィルターを装備。S/Nの良い探傷を実現することができ、超音波の減衰が激しい物や林状エコーなどにより探傷の難しい試験体の探傷にも適用が可能である。

### 4. PA-UT機能

PA-UT機能は、同時励振数16、最大エレメント数16のタイプがリリースされる。当社で以前より販売しているポータブルフェイストアラレイUT探傷器OMNISCANシリーズと比較すると、より簡単に操作できるよう設定の項目も最小限に留められている。そのため、フェイストアラレイUT探傷器を初めて使用されるユーザーにも簡単に設定・操作することができる。また、フェイストアラレイ探傷器の校正機能として欠かせない、全フォーカルワ(\*1)に対する自動感度校正機能、自動ウェッジディレイ校正機能も装備されており、その校正も非常に容易に行うことができる。

#### 4.1 セクタースキャン(\*2)による探傷

設定された角度範囲を電子スキャンする際に得られた A-スキャンデータを合成することにより、S-スキャン（断面映像）をディスプレイに表示することが可能である。また、S-スキャン上の各角度成分の A-スキャンを参照することが出来る。図 2 は、屈折角  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$  のセクタースキャンによる S-スキャン画像及び屈折角  $60^{\circ}$  における A-スキャンが表示されている。

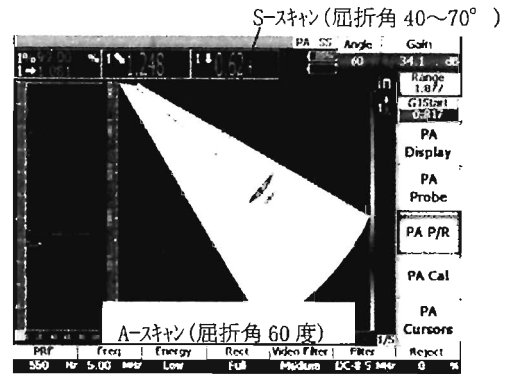


図 2 セクタースキャンによる探傷

#### 4.2 垂直ビームを含んだセクタースキャンによる探傷

垂直ビームを含んだセクタースキャン（縦波）による探傷も可能である。図 3 は、屈折角  $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$  のセクタースキャンによる S-スキャン画像及び屈折角  $0^{\circ}$  における A-スキャンが表示されている。

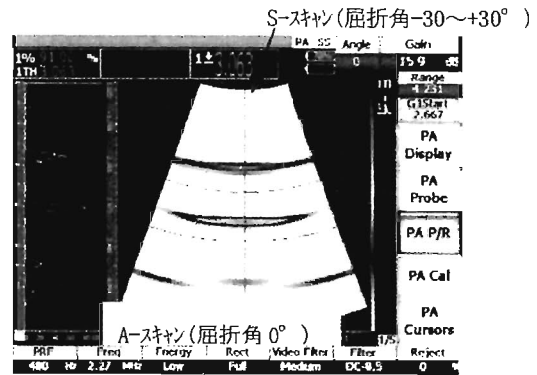


図 3 垂直ビームを含んだセクタースキャンによる探傷

#### 4.3 フェイストアレイ校正機能

全てのフォーカスを一度に校正することが可能である。本校正は、横穴などの基準きずに対して全フォーカスのビームが照射されるように 1 回スキャンをすることで、感度、ウェッジゲイブ及び音速の校正を自動的に行うことが出来る。図 4 は、感度校正時のディスプレイ表示を示す。

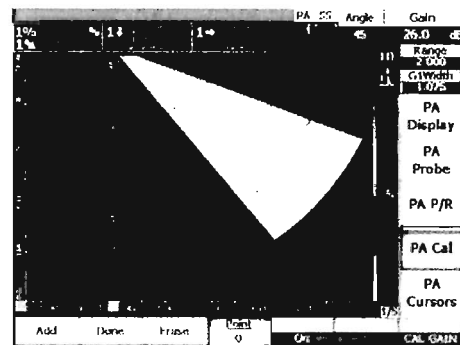


図 4 フェイストアレイ校正機能

#### 4.4 フリーズモードにおける解析機能

フリーズモード時に、各角度成分の A-scan を参照することができる。また図 5 のように、S-scan 画面上に 2 つのカーソルを表示することができ、容易にきずのサイズングを行うことができる。

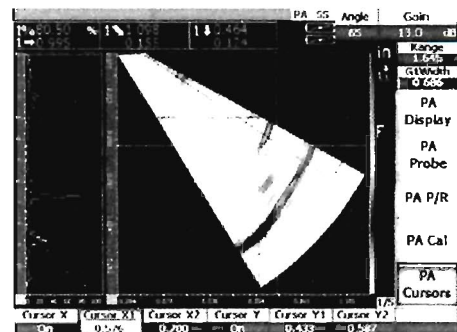


図 5 フリーズモードにおける解析機能

#### 4.5 フェイズトアレイプローブ

新たに EPOCH1000 シリーズ用の 6 種類のフェイズトアレイプローブ (図 6) を発売予定である。標準的な 2、5、10MHz 16 エLEMENT のプローブ、AWS プローブ、DGS/AVG プローブ などのバリエーションなどがある。

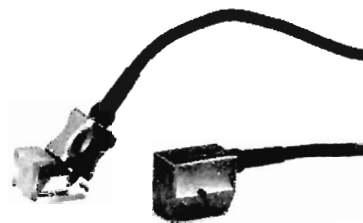


図 6 フェイズトアレイプローブ

#### 5. 終わりに

本探傷器は、今まで PA-UT 探傷器を使用されたことがない、デジタル UT 探傷器のユーザーには是非使用して頂きたい。そして、本探傷器を PA-UT の入門機として現場で使用して頂き、その有用性を実感して頂ければ幸いである。本探傷器によって、超音波フェイズトアレイ法の検査現場への適用が加速することを期待する。

(参考) EPOCH1000i (PA-UT 機能付) は、本体定価 200 万円前後の価格で発売予定

- \*1 設定された屈折角度・焦点等の特性をもったビームの総称  
(類義語：バーチャルプローブ)
- \*2 屈折角度を可変させた扇形状のスキャン方法

Phasor XS™

フェイズドアレイ搭載超音波探傷器

フェイズドアレイ搭載超音波探傷器  
Phasor XS Ver.2の紹介



日本PHAS株式会社

坂代一郎

本資料記載内容は製作者に許可なく  
開示・複写・転載・改作を禁じます。

## Phasor XS Ver.2

Phasor XS

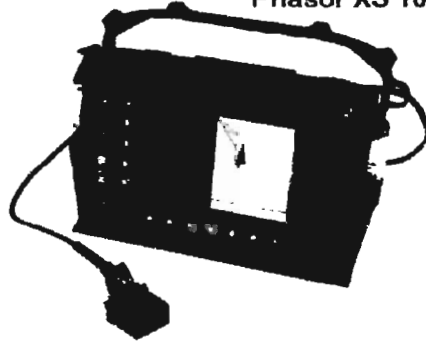
セット価格  
298万円!!



## Phasor XS Ver.2

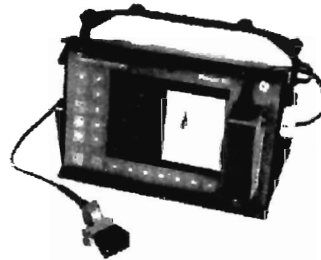
Phasor XS™  
フェーズロックディスプレイ搭載録音波探検器

PhasorXS CV  
Phasor XS 16/16  
Phasor XS 16/64



## Phasor XS の特徴

- バッテリ駆動
- ポータブル
- 1台2役





## Phasor XS Ver.2の主な仕様

| 仕様         | 標準モード | 一般仕様                | フェイスドレイ             |
|------------|-------|---------------------|---------------------|
| パルサー       |       | スバイクパルス             | 双極スクエアパルス           |
| パルス電圧      |       | 最大300V              | ±25~75V             |
| パルス立ち上がり時間 |       | 15nsec以下            |                     |
| ダンピング      |       | 50or1000Ω           |                     |
| 一掃2掃切替     |       | 有り                  | 一掃転子法のみ             |
| アンプ帯域      |       | 0.3~15MHz<br>(-3dB) | 0.3~10MHz<br>(-3dB) |
| 検波モード      |       | 全波・正半波・負半波          | 全波・正半波・負半波          |
| アナログゲイン    |       | 0~110dB             | 0~40dB              |
| デジタルゲイン    |       |                     | 0~39.9dB            |
| フィジカルプローブ  |       |                     | MAX 16または264ch      |
| ヴァーチャルプローブ |       |                     | MAX 16ch            |
| パルス幅       |       |                     | 40~500nsec          |
| パルスディレイ    |       |                     | 0~1024uSEC          |
| 受信ディレイ     |       |                     | 0~1024uSEC          |

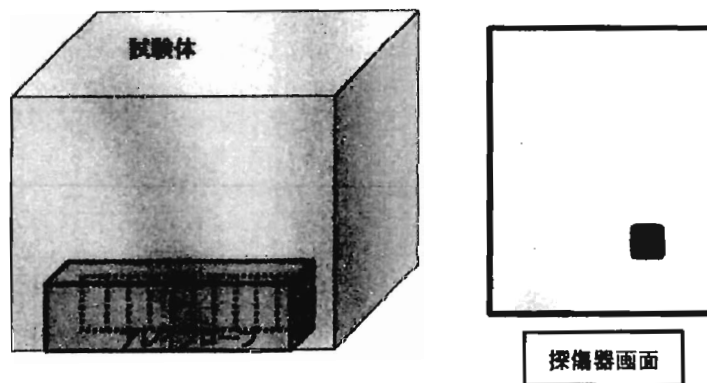
## Phasor XS Ver.2の主な仕様

| 仕様        | 標準モード | 一般仕様                       | フェイスドレイ                 |
|-----------|-------|----------------------------|-------------------------|
| 音速設定      |       | 1000から16000m/s             | 1000から16000m/s          |
| 測定距離      |       | 12.5m(MAX)                 | 1m(MAX)                 |
| 表示ディレイ    |       | 10.3m(MAX)                 | 1m(MAX)                 |
| リジェクション   |       | 0~80%                      | 0~80%                   |
| TCG       |       | 16ポイント(6dB/us)             | 15ポイント(6dB/us)          |
| DAC       |       | 直線または曲線                    |                         |
| ゲート       |       | 2ゲート                       | 3ゲート                    |
| 表示モード     |       |                            | リニア・セクタ                 |
| 表示スコープ    |       | Aスコープ                      | Aスコープ・Bスコープ<br>及びトップビュー |
| 設定条件保存    |       | 内部メモリ・SDカード                |                         |
| レポート保存    |       | SDカード                      |                         |
| 表示画素      |       | VGA 1480×640               |                         |
| 表示言語      |       | 日本語・英語・フランス語・ドイツ語・スペイン語・中国 |                         |
| バッテリー動作時間 |       | 約6時間                       |                         |
| 防塵・防滴     |       | IP54                       |                         |

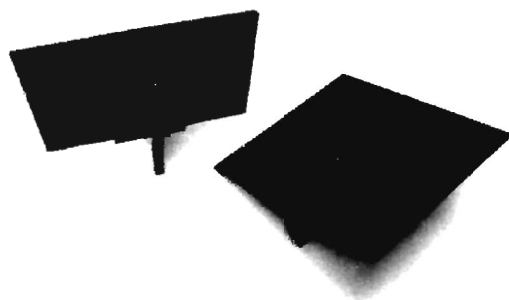
## 新規機能

- フェイズトアレイ
- トップトップビュー
- プラスマイナス角セクタースキャン
- 通常探傷
- JIS3060に基づくエコー高さ区分線
- Jフランク

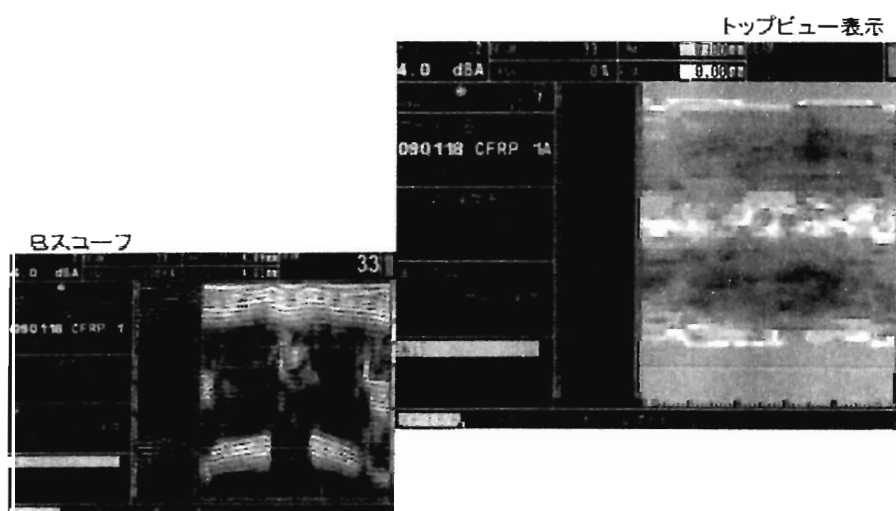
## トップビュー



## 航空機部材へ



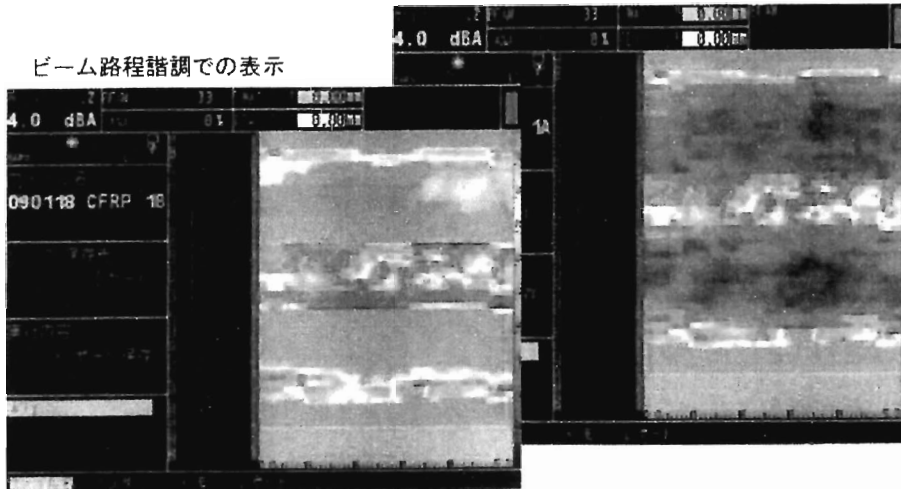
## トップビュー表示



## トップビュー表示

エコー高さ譜調で表示

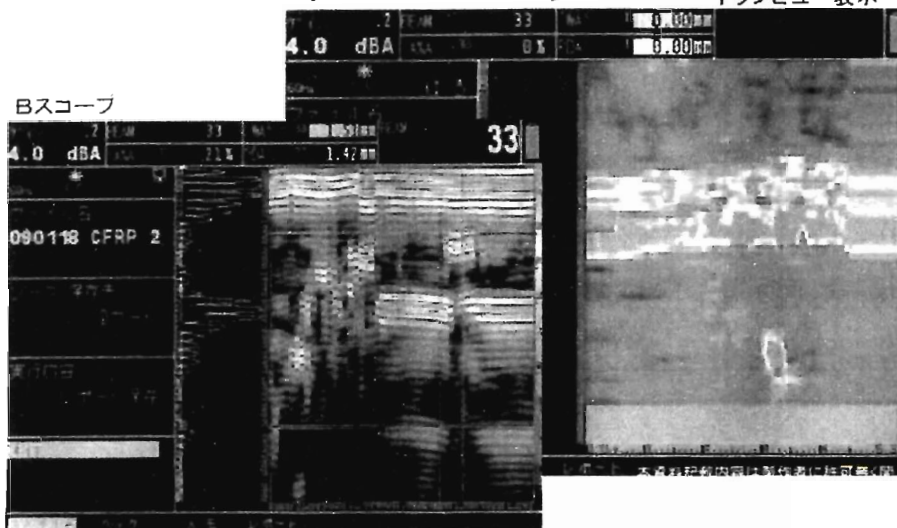
ビーム路程譜調での表示



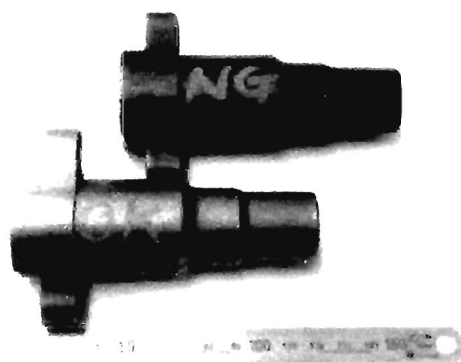
## トップビュー表示

トップビュー表示

Bスコープ



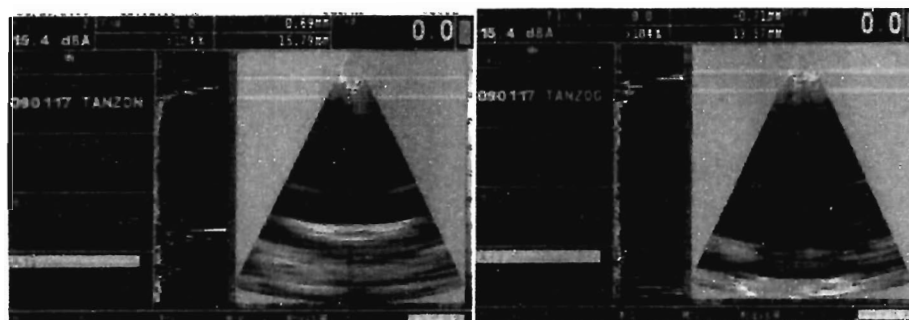
## プラスマイナスセクタスキャン



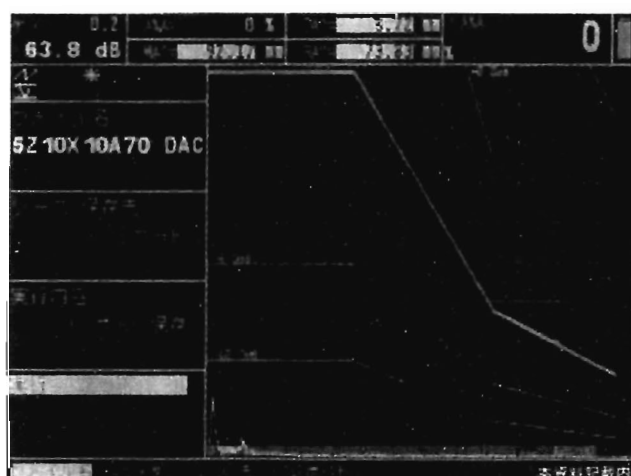
## プラスマイナス角セクタスキャン



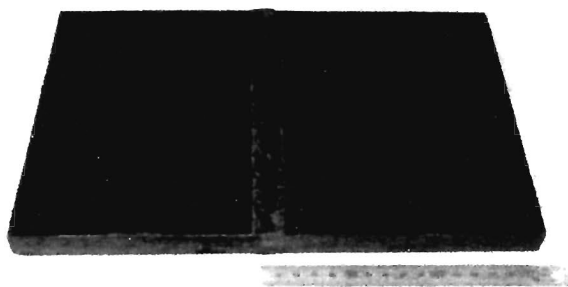
## プラスマイナスセクタスキャン



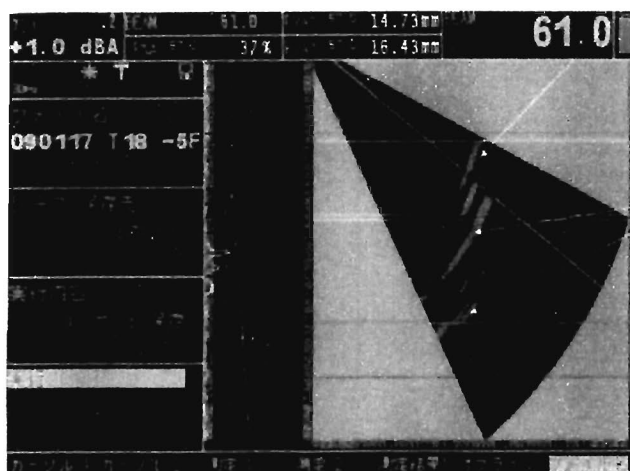
## JIS Z 3060に基づくエコー高さ区分線



## 溶接部の探傷



## 溶接部の探傷 フェイズドアレイ

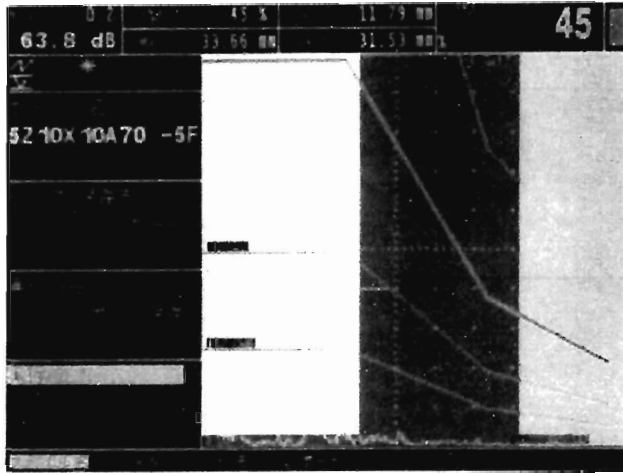


きず

形状

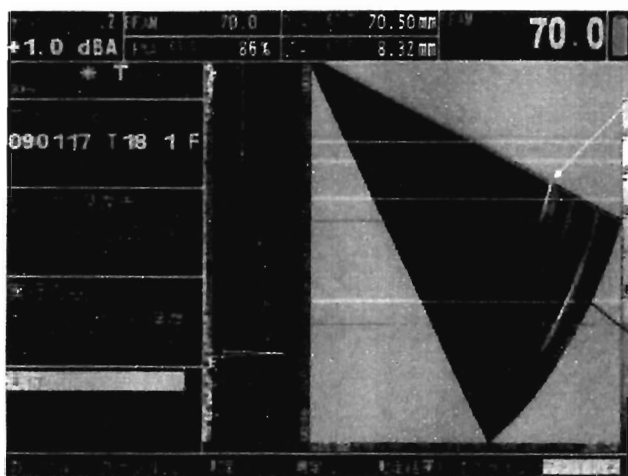
# 溶接部の探傷

## 通常探傷



# 溶接部の探傷

## フェイズドアレイ

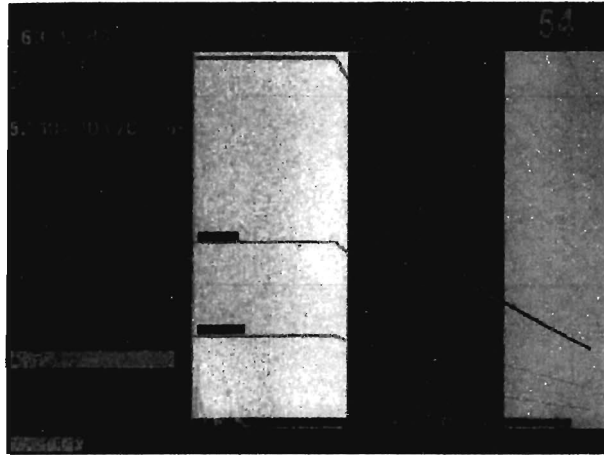


きず

形状



## 溶接部の探傷 通常探傷

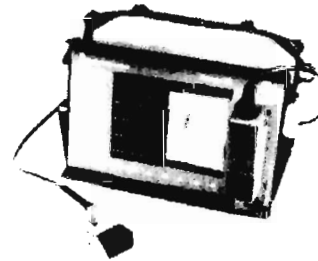


## 溶接部の斜角探傷

- 一時探傷をセクタスキャンで効率化できる
- 装置を変えることなく、ソフト切り替えにより規格に基づいた探傷できずの評価を行うことも出来る。

## Phasor XS の特徴

バッテリー駆動  
ポータブル  
1台2役



## 謝辞

CFRPテストピースを貸与いただきました宇宙航空研究開発機構 複合材センター松嶋正道先生並びにデモ機を貸与いただいたGEインスペクション・テクノロジーズ・ジャパン株式会社に感謝申し上げます。

# CFRPの材料特性に及ぼす吸水・環境温度の影響

素材開発室 長瀬 尚樹, 西川 康博, 福島 清

Effect of water absorption and environmental temperature  
on material property of CFRP

Naoki NAGASE, Yasuhiro NISHIKAWA and Kiyoshi FUKUSHIMA

CFRPは比強度・比剛性や耐食性等の優れた特徴を有しているため、航空宇宙分野をはじめ、産業機器への適用が進んでいる。将来、複合材料の適用が広がれば、様々な環境で使用されることが考えられるため、本研究では低コストで成形できる常温硬化エポキシ樹脂を用いてCFRP試験片の作製を行い、50℃及び70℃の恒温水槽に試験片を入れて吸水試験の実施により温度と時間による吸水率を測定した。また、任意の時間ごとに試験片を取出し、曲げ試験を行った。未浸漬の試験片と比較して50℃では889時間程度浸漬しても曲げ強度の低下は認められなかったが、70℃においては浸漬時間増加に従い大きく低下し、試験片の損傷面積も拡大することがわかった。

## 1. はじめに

CFRPは比強度・比剛性や耐食性等の優れた特徴を有しているため、航空宇宙分野をはじめ、産業機器への適用が進んでいる。近年では、自動車分野への適用も進められ、軽量化による省エネへの貢献が期待されている<sup>1),2)</sup>。しかし、CFRPは金属と比較すると、複雑な破壊状況を示し、耐熱性に劣り、吸水により劣化する等の欠点も有するとの報告<sup>3)</sup>もなされている。将来、複合材料の適用が広がれば、様々な環境で使用されることが考えられる。使用環境の適否を判断する際に材料の評価手法の確立とデータの蓄積が重要となる。

本研究では、これまで公開データが少ない、常温硬化エポキシ樹脂を用いて成形したCFRPの吸水・温度環境における曲げ強度・破壊状況について報告する。まず、試験片の作成を行い、吸水試験の実施により温度と時間による吸水率を測定する。また、任意の時間ごとに試験片を取出し、曲げ試験を行い、曲げ強度及び剛性を調べる。さらに、曲げ試験後の試験片破壊状況をマクロ試験、超音波探傷試験、SEMにより観察し、各条件が及ぼす破壊状況への影響を考察する。

## 2. 実験方法

### 2. 1 CFRP試験片の成形

試験片はCFクロス(3K平織, 200g/m<sup>2</sup>目付)に常

温硬化型のエポキシ樹脂(Z2/H07, 耐熱80℃)を含浸させながら、型内に手積みし8plyの積層板を作成した。樹脂含浸及び脱泡にはローラーを使用した。積層した約350mm×500mm(板厚1.9mm)の母板2枚から、ダイヤモンドカッターで100mm×90mmの試験片を切出した。

### 2. 2 吸水試験

吸水試験には、恒温水槽を使用した。積層板から切出した試験片各6体(吸水測定用1体, 曲げ試験用5体)をそれぞれ、70±3℃と50±3℃に保った蒸留水中に浸漬させ、最長で約3,500時間まで吸水させた。任意時間ごとに吸水測定用試験片を装置から取出し、ペーパータオルで表面の水滴を十分に拭き取った後、電子天秤を用いて板の質量を測定した。吸水率 $C_t$ (%)は次式により計算した。

$$C_t = (m_t - m_0) / m_0 \times 100$$

ここで、 $m_0$ は吸水前の試験片質量、 $m_t$ は吸水後の試験片質量である。

### 2. 3 曲げ試験

恒温水槽から任意時間(6.5, 216, 889, 2063, 3527hr)で取出した試験片をダイヤモンドカッターにより長さ100mm, 幅15mmの曲げ試験片を5本採取した。採取した試験片はJISK7073により、支点間距離を80mm, 曲げ速度を5.0mm/minとして3点

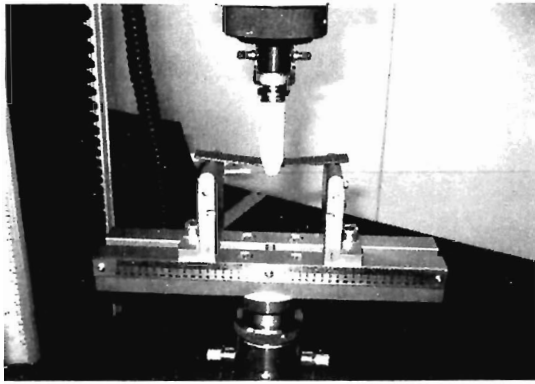


図1 曲げ試験状況の写真

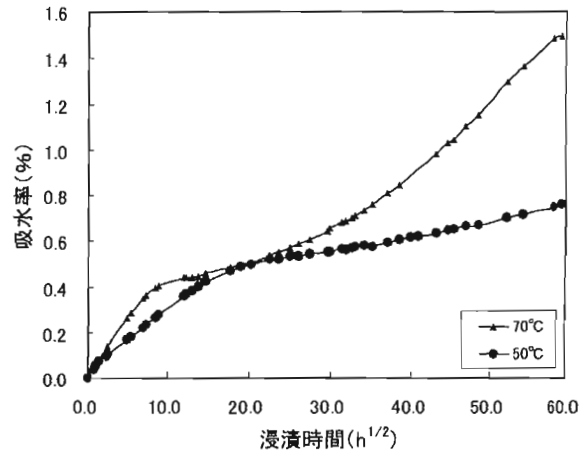


図2 浸漬時間と吸水率の関係

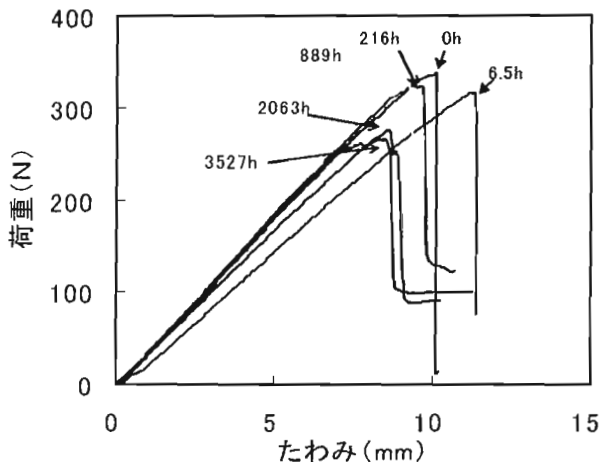


図3 代表的な荷重-たわみ線図 (50°C)

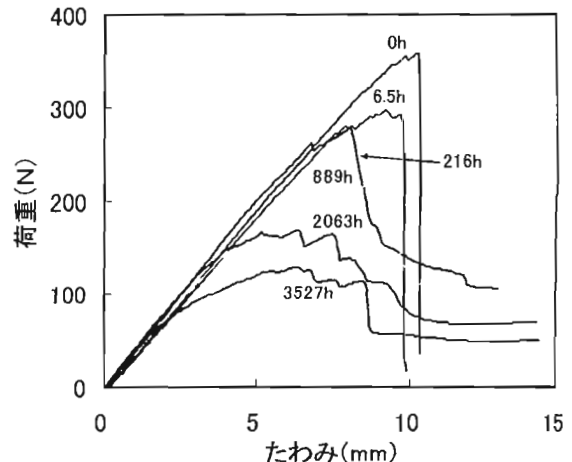


図4 代表的な荷重-たわみ線図 (70°C)

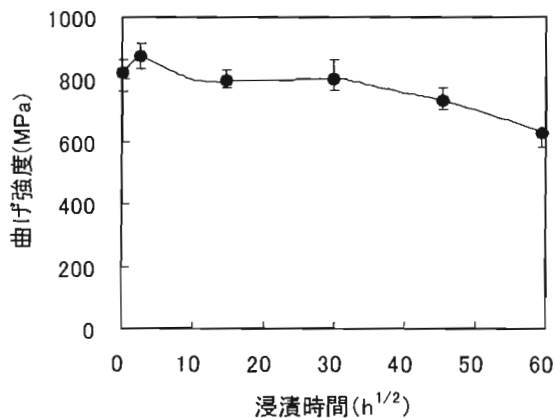


図5 浸漬時間と曲げ強度の関係 (50°C)

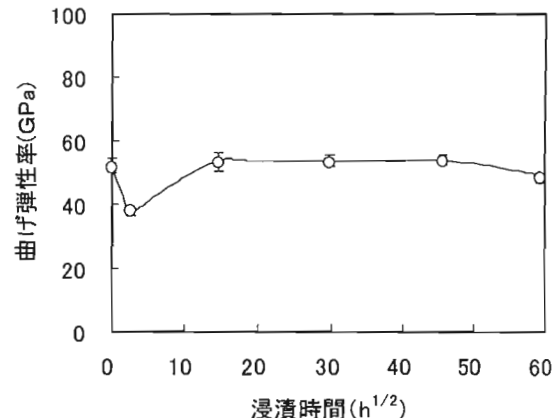


図6 浸漬時間と曲げ弾性率の関係 (50°C)

曲げ試験を行い、未浸漬試験片との比較を行った。曲げ試験には万能材料試験機 (5567, Instron 製) を使用した。一連の切断から試験までの作業は恒温水槽から取出し後、24 時間以内に全て室温環境下で行った。

#### 2. 4 曲げ試験片の破壊状況観察

試験後の曲げ試験片は、外面から破壊状況を調べるために試験片外観のマクロ試験、試験片内部の超音波探傷試験、曲げ試験片の破面を SEM に

より観察した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 吸水試験結果

図2に吸水率の時間変化のグラフを表す。縦軸は吸水率、横軸は時間の平方根である。各条件とも浸漬して初期の吸水速度が大きい。また、50°C に比べて 70°C では吸水速度が大きい。50°C では、400 時間程度吸水すると吸水速度が緩やかになるのに対して、70°C の試験片では、100 時間～400

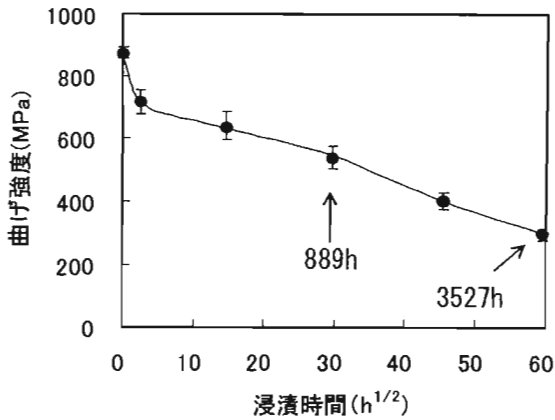


図7 浸漬時間と曲げ強度の関係(70°C)

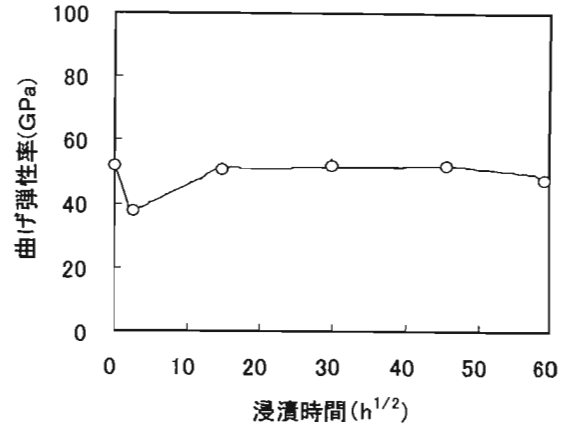


図8 浸漬時間と曲げ弾性率の関係(70°C)

時間程度の間、一旦吸水速度が緩やかになり、その後増加した。

### 3. 2 曲げ試験結果

図3, 図4に50°C, 70°C浸漬の曲げ試験における代表的な試験片の荷重-たわみ線図を示す。両グラフとも未浸漬(0h)の試験片では線形に応力が増加し、最大応力に至った後、脆性的に一気に破断する。図3(50°C浸漬)では、889hまで未浸漬の試験片と比べ、最大荷重の変化は認められなかったが、2063h以降になると最大荷重が低下した。図4(70°C浸漬)に示すように、浸漬時間の長い試験片は、最大荷重に至るまで微小な荷重変動とともに高周波の可聴音を発しながら最大荷重に達した。最大荷重に達した後も破断せずに段階的に破壊が進んだ。また、浸漬時間の増加に従って、最大荷重が大幅に低下した。

図5・図6に50°C, 図7・図8に70°Cの浸漬時間と曲げ強度及び曲げ剛性の関係を示す。プロットは5本の各データの平均値で、各条件の最大・最小値はエラーバーで示した。

図5に示すように、6.5hにおいて曲げ強度は微増するが、その後、未浸漬と比べて889hまでほとんど低下せず、浸漬による曲げ強度への影響は小さいといえる。889h以後は、時間の平方根に対して直線的に緩やかに曲げ強度が低下したが、最長(3527h)浸漬させても24%程度の強度低下であった。図6に示す50°Cの曲げ弾性率は、未浸漬に比べ初期(6.5h)で27%低下したものの、それ以降は未浸漬と比べ大きな変化はなかった。図7の70°Cにおける曲げ強度は浸漬して初期(6.5h)に強度が大きく低下した。その後、浸漬時間の平方根に対してほぼ直線的に急激に低下し、889hにおいては、

未浸漬と比べ38%の強度低下を示し、3527hになると66%の強度低下を示した。図8に示すように70°Cに浸漬した試験片の曲げ弾性率は、初期(6.5h)において28%低下し、その後は未浸漬と比較して大きな変化は認められなかった。初期における曲げ強度及び曲げ弾性率の変化は、未硬化部の硬化反応の促進や初期の急激な吸水によって、樹脂が不安定な挙動を示すためであると考えられる。

### 3. 3 曲げ試験片の破壊状況観察

#### 3. 3. 1 断面マクロ試験結果

曲げ試験後にマクロ写真装置(日本光学工業(株)製)を用いて試験片の断面観察を行った。図9, 図10に50°C及び70°Cの蒸留水に浸漬後、曲げ試験を行った後の試験片側面中央部を撮影した代表的な断面観察写真を示す。図9に示すように50°C試験片の889hまでの破壊状況は、破断及び局所的な破壊である。2063h以降になると表面の剥離が大きくなり、また、クラック箇所も増加していることがわかる。2063h以降でクラック箇所が増加するのは、樹脂の劣化が進むことにより、クロス間の界面接着性が弱くなり、わずかな荷重で剥離しやすくなるためであると考えられる。図10の70°C浸漬した曲げ試験片においては、6.5hでは局所的な破壊にとどまり、216hでは表面の剥離が生じ、889h以降では表面剥離のほか内部のクラックが広域化し、最終的な3527hでは細かい繊維の破断が生じる複雑な破壊状況であった。

#### 3. 3. 2 超音波探傷試験結果

50°C及び70°Cの曲げ試験後の試験片の超音波探傷試験結果(Cスコープ)を図11, 図12に示す。使用した装置は超音波映像装置AT7500(日立



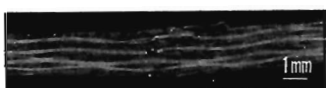
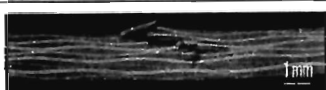

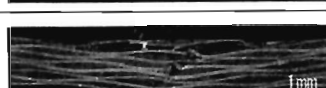
| 時間   | 50°C  |
|------|---|
| 0    |  |
| 6.5  |  |
| 216  |  |
| 889  |  |
| 2063 |  |
| 3527 |  |

図 9 断面観察写真 (50°C)

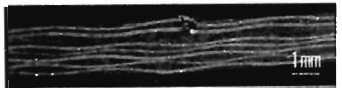
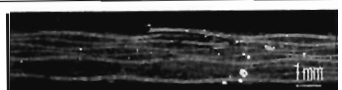
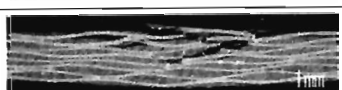

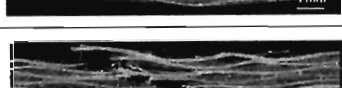
| 時間   | 70°C   |
|------|--|
| 0    | 破断   |
| 6.5  |  |
| 216  |  |
| 889  |  |
| 2063 |  |
| 3527 |  |

図 10 断面観察写真 (70°C)

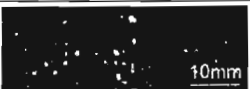


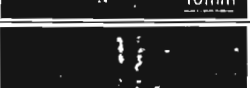


| 時間   | 50°C-曲げ試験片  | 損傷面積比 |
|------|---|-------|
| 0    |   | 1     |
| 6.5  |  | 1.1   |
| 216  |  | 1.5   |
| 889  |  | 1.6   |
| 2063 |  | 2.0   |
| 3527 |  | 2.0   |

図 11 超音波探傷試験結果 (50°C)

建機製)で使用了探触子は周波数が 5MHz、水距離で 40mm-focus の集束探触子である。試験方法<sup>4)</sup>はゲート位置を表面から 0.50mm~1.64mm の深さに設定して 100μm ピッチで走査し、結果を画像化した。試験片中央付近で白く見える箇所はゲートに設定した深さにある損傷箇所では反射波が生じている箇所である。また、黒く見える箇所はゲートに設定した位置よりも表面に近い箇所に剥離また

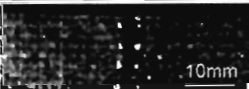



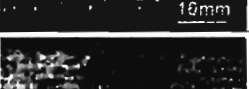

| 時間   | 70°C-曲げ試験片   | 損傷面積比 |
|------|--|-------|
| 0    |   | 1     |
| 6.5  |  | 1.5   |
| 216  |  | 1.6   |
| 889  |  | 3.6   |
| 2063 |  | 5.0   |
| 3527 |  | 5.5   |

図 12 超音波探傷試験結果 (70°C)

は損傷があるために表面近傍で超音波が反射し、試験片内部まで超音波が伝搬しなかった箇所である。

未浸漬の試験片の損傷に対してどの程度損傷の度合いが大きいかの目安を示すため損傷面積比を表した。試験片の大きさが各々若干異なるため、損傷面積比は損傷面積率を以下の式  
 損傷面積率 (%) = (損傷面積 / 試験片面積) × 100

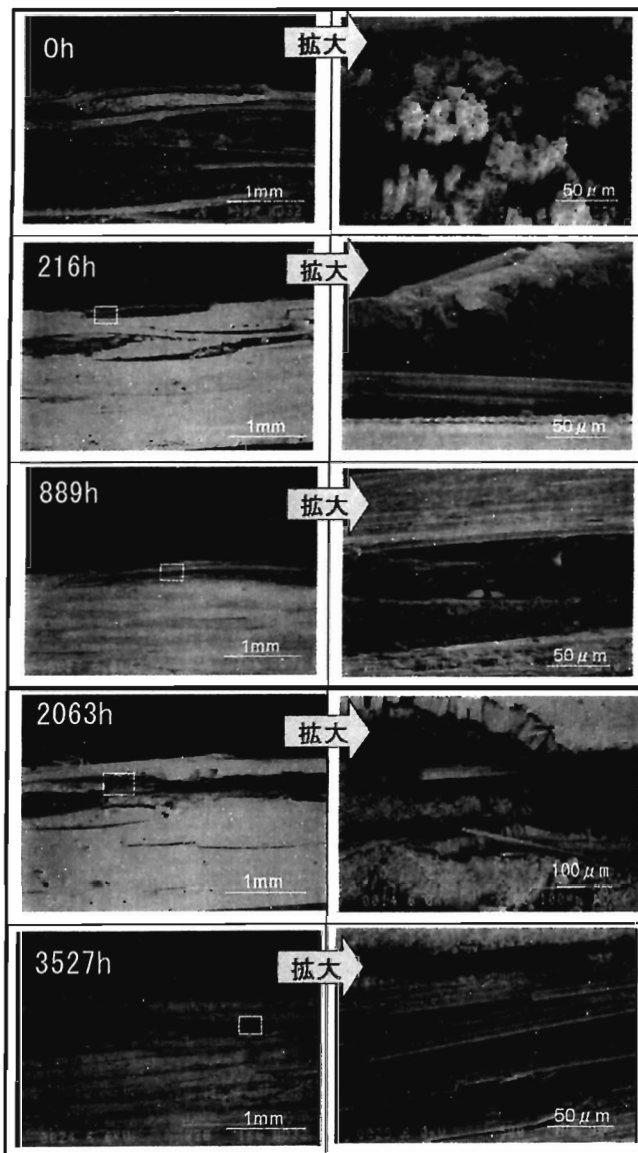


図 13 SEM観察写真(50°C)

により算出した後、未浸漬の試験片の損傷面積率を1として各浸漬時間による損傷面積率を比で示した。図11に示すように50°Cにおける試験片では損傷面積が徐々に大きくなり、未浸漬に比べ889hで1.6倍、3527hでは2.0倍に増加することがわかる。また、図中の剥離箇所に着目すると圧縮荷重により試験片の長手方向に剥離が広がっていることがわかる。

図12に示すように70°C試験片では、損傷面積が浸漬時間によって拡大し、未浸漬の試験片と比較した損傷面積比は216hで1.6倍程度と小さかったが、889hになると急激に増加して3.6倍となった。これは図2の吸水曲線で示したとおり、889h以降、一旦緩やかになった吸水速度が増加している時間帯で樹脂自体の特性が変化している可能性がある。

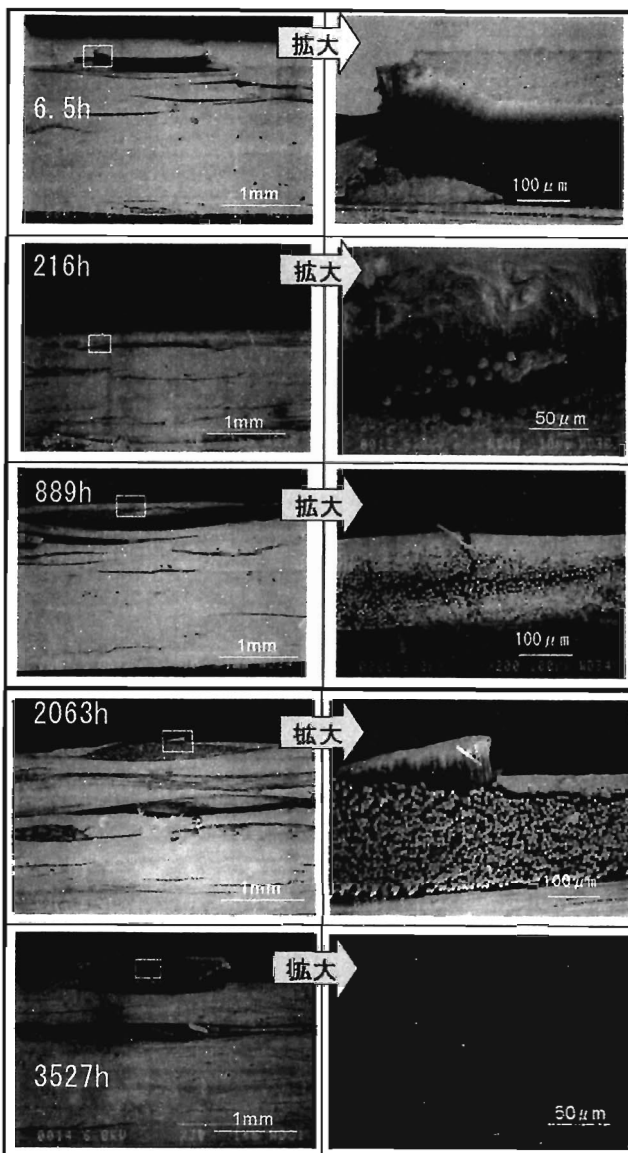


図 14 SEM観察写真(70°C)

吸水によるガラス転移温度の変化や融点の変化について追加調査を行う必要がある。2063h及び3527hでは探傷画像から試験片の膨潤状態が観察でき、吸水及び樹脂の劣化の影響により、損傷面積比が5倍以上に拡大し、表面近傍の樹脂が劣化していることがわかる。

### 3.3.3 SEM観察結果

曲げ試験後の試験片破面をSEM(走査型電子顕微鏡 JSM-6100S(日本電子(株)製))により観察した。試験片中央部付近をダイヤモンドカッターで切断した後に破面に金を蒸着して観察した。図13、図14に50°C及び70°Cの試験片のSEM観察写真を示す。浸漬時間ごとに外観を低倍率で撮影した後(左写真)、表面近傍の繊維や樹脂の詳細な状態を観察するため、任意の倍率に拡大して

表 1 各実験結果のまとめ

| 温度         | 50℃  | 70℃  |
|------------|--|--|
| 吸水率        | 6.5h : 急激に吸水<br>その後は、緩やかに増加  | 6.5h : 急激に吸水<br>100~400h: 緩やかに増加<br>400h~ : 吸水速度増大   |
| 曲げ強度       | 6.5h : 微増<br>~889h: 安定、大きな低下なし<br>その後、直線的に緩やかに低下<br>最長浸漬しても24%低下程度 | 6.5h : 急激に低下<br>その後、直線的に大きく低下する。<br>3527hでは、66%低下    |
| 曲げ弾性率      | 6.5h : 低下<br>その後、大きな変化ない   | 6.5h : 大きく低下 (27%)<br>その後、大きな変化ない                    |
| マクロ試験      | 局部的破壊→表面の剥離→表面近傍の剥離面積増大  | 局部的破壊→表面の剥離→クラック箇所の広域化→複雑な破壊状況                       |
| 超音波探傷試験    | 剥離が徐々に進行<br>表面近傍の剥離面積増大<br>浸漬前からの最大損傷面積率2.0倍                       | 剥離、クラックが時間とともに増加<br>膨潤状態の観察ができる<br>浸漬前からの最大損傷面積率5.5倍 |
| SEM (破面観察) | ~889h: 繊維と樹脂の密着良好<br>その後、密着性が徐々に低下                                 | 初期: 積層間での剥離<br>その後、繊維の束が分離<br>最終的には繊維1本1本が分離         |

撮影した(右写真)。図 1 3 の 50℃試験片では 889h まで繊維と樹脂が密着している状態が観察できる。2063h では繊維の束が分離している箇所が確認でき、3527h では部分的に繊維自体が分離し、樹脂の密着性低下が顕著になっていることがわかった。図 1 4 の 70℃試験片では 6.5h で積層間の剥離が生じ、216h では積層間の剥離が生じさらに部分的に繊維の抜けが確認できる。889h では束間が分離し、2063h では繊維の束間が少しずつ分離し、3527h になると繊維 1 本 1 本が分離することがわかる。上記のことから浸漬時間が増加するに従って、曲げ試験片の破壊が段階的に進むことがわかった。さらに、浸漬時間による曲げ強度の低下と破壊状況の複雑化は、樹脂の密着性低下が起因となることがわかった。

#### 4. まとめ

常温硬化エポキシ樹脂を用いて成形した CFRP 積層板の作成を行い 50℃及び 70℃の蒸留水中に浸漬して、吸水率の変化、曲げ強度及び剛性、曲げ試験後の試験片の破壊状況の観察を行った。個別の実験結果を表 1 にまとめる。全体的な結論は以下のとおりである。

1) 50℃, 70℃とも浸漬初期(6.5h)に急激に吸水し、曲げ剛性が低下する。

- 2) 50℃の蒸留水中に浸漬しても 889h 程度までは強度が低下せず、樹脂と繊維の密着性が良好である。また、3527 時間浸漬しても、未浸漬と比較して曲げ強度は 24%の低下である。
- 3) 70℃では浸漬時間の増加とともに曲げ強度は大きく低下し、小さい荷重で剥離が多く生じる。強度の低下は、樹脂と繊維との界面密着性の低下や樹脂の膨潤が大きな起因である。
- 4) 70℃における曲げ試験片の破壊状況は、浸漬時間の増加に従い積層間の剥離(表面近傍)、束間の分離、束内の繊維 1 本 1 本の分離という形に段階的に進む。

#### 参考文献

- 1) 北野, 山口 : 日本複合材料学会誌, 32, 5 (2006), 193-197
- 2) 邊, 他 7 名 : 日本複合材料学会誌, 33, 2 (2007), 41- 47
- 3) 石坂, 川越, 宮野 : 日本機械学会論文集, 68, 668 (2002), 611-616
- 4) 長瀬, 西川, 福島 : (社) 日本非破壊検査協会, 第 10 回新素材及びその製品の非破壊評価論文集, 1~4



# 電磁誘導式4探針電位差プローブによる表面キズ深さ評価について

## Four-Needle Potential Difference Probe for Surface Flaw Depth Evaluation in Electromagnetic Potential Method

○星川 洋, 小山 潔, 田山 陽司

Hiroshi HOSHIKAWA, Kiyoshi KOYAMA, Youji TAYAMA

日本大学 生産工学部

College of Industrial Technology, Nihon University

### 概 要

表面キズの深さを評価することを目的とした電磁誘導式電位差法において、キズ長さ方向の電位差をキズの両側で検出する4探針プローブを提案する。本プローブは励磁コイルからの直接的な誘導の影響を受けることが無く、またキズに対するプローブの位置ずれの影響が小さいので、表面キズ深さを精度高く評価できる。

キーワード：表面キズ、深さ評価、電位差法、電磁誘導、渦電流

### 1. まえがき

構造材料に表面キズが存在すると応力集中のために破壊につながる恐れがあるから、安全性を確保するために、表面キズが検出されたときには、その深さを評価する非破壊検査法が必要となる。目視では評価できない表面キズの深さ評価法として、直接通電による電位差法<sup>1)2)</sup>の他に、近年は電磁誘導による電位差を利用した評価法の研究が行われている<sup>3)6)</sup>。これらの電磁誘導を用いた方法では、電位差を検出する探針が増幅回路の入力端子とループを構成するために、励磁コイルからの直接的な磁界により発生する誘導起電力の影響を受けて評価精度が低下する問題点がある。筆者らは電磁誘導を利用した電位差法理論を明確にすると共に、表面キズの深さを精度高く評価できるプローブの開発を目指している。本報告では、電磁誘導による電位差発生現象を理論的に示す<sup>6)7)</sup>と共に、従来のもよりも評価精度の高い電磁誘導式4探針電位差プローブを提案する。このプローブは、矩形の平面励磁コイルと2本1組とした2対の探針とを組み合わせている。キズに沿った電位差を4本の探針で検出することにより、励磁コイルからの直接的な誘導起電力の影響を受けず、またキズに対するプローブの位置ずれの影響をほとんど受けずに、表面キズ深さを評価できることを報告する。

### 2. 電流の変化による電荷と電位の発現

電磁誘導は時間と共に変化する磁界が誘導電界を発生し、導体内に渦電流を誘導する現象である。誘導電界は交流発電機や変圧器などにおける発電として利用されるものであり、導体内の電荷を動かして電流を流し、電荷を集積させて電位差/電圧を発生させる作用を行う。

電荷保存の法則に基づいて、電荷は正と負との対として発生/消滅する以外には、正/負の電荷が単独で発生/消滅することはない。電荷保存の法則は電位の源である電荷密度 $q[C/m^3]$ と磁界の源である電流密度 $J[A/m^2]$ とを関係付ける式

$$\nabla \cdot J(r, t) = -\partial q(r, t) / \partial t \quad (1)$$

によって表わされる<sup>8)</sup>。ここで、 $r[m]$ は位置、 $t[s]$ は時間を表す。式(1)は導体内で電荷を運ぶ電流密度

Jが位置と共に変化する領域では、電荷密度qが時間と共に変化するを意味している。位置に対して変化なく一様な電流が流れる領域では、電荷の出入りは等しいから電荷密度は不変である。すなわち、電流が一様に流れる領域では、電流が流れても電荷は姿を現わすことはない。一方、キズなどの不連続のために電流が位置と共に変化する領域では、電流が流れ出れば電荷が減少して電荷密度は時間と共に低下し、電流が流れ込めば電荷が増加して電荷密度は時間と共に上昇するから、正または負の電荷が発現する。ただし、電荷保存の法則に則って、ある領域に正電荷が発生すれば、必ず対となって、他の領域に負電荷が発生する。

電位はクーロンの法則に基づく斥力に抗して電荷を運ぶ仕事と定義される。言い換えれば、電位は集積分布した電荷密度が蓄えた電気エネルギーを表す。キズなどの不連続によって電流の流れが滞ることで電荷が発現すれば、分布電荷として蓄えられた電気エネルギーである電位が発生する。誘電率を $\epsilon$ [F/m]としたとき、電荷 $q$ [C]により発生する電位 $\phi$ [V]はポアソンの方程式

$$\nabla^2 \phi(r, t) = -q(r, t) / \epsilon \quad (2)$$

で与えられる<sup>9)</sup>。式(2)は、電位が電荷密度に比例することを表す。クーロン斥力に基づく電界( $-\nabla\phi$ )は、導体内で電荷密度/電位の高い所から低い所に向かって電流を流し、電流の連続性を保つ役割を担う。

### 3. 電磁誘導式4探針電位差プローブ

従来の電磁誘導式電位差プローブは縦置励磁コイルを用い、表面キズに対して垂直となるように渦電流を誘導し、キズを跨いだ両側に配置した2つの探針で電位差を検出して表面キズ深さを評価するものである。この方式のプローブでは渦電流を誘導する励磁コイルからの磁束による誘導を避けることが出来ず、リフトオフ変化によってプローブの指示値が変わるためにキズ深さを信頼性高く評価することは困難である。

筆者らは励磁コイルからの直接的電磁誘導の影響を受けないプローブの構造として、キズ長さに沿った方向の電位差を検出するプローブを考えた。さらに、キズに対してプローブを設置するに際して、設置位置の僅かな差異がプローブの指示値に大きな影響を与えることから、プローブ位置ずれによる影響を小さくする必要がある。そこで、図1に示すように矩形平置励磁コイルにより渦電流を誘導し、キズ長さ方向に沿って発生した電位差を、励磁コイルの中心に2本1組の探針をキズの両側で対として配置する4探針電位差プローブを考案した。

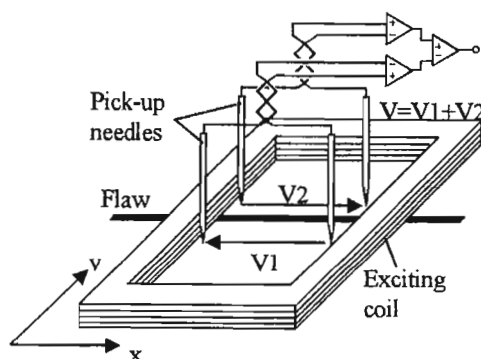
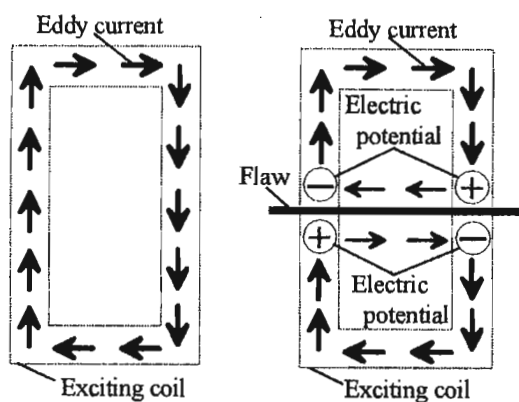


図1 4探針電位差プローブ



(a) キズ無し (b) キズ在り

図2 渦電流と電位差

矩形平置励磁コイルは試験体表面近傍に巻線に沿って閉路を成すように渦電流を誘導するから、試験体にキズが無いときには渦電流の滞りは無く、電位差はほとんど発生しない。試験体に表面キズがあると、キズによって渦電流が妨げられてキズの周囲には電荷が集積して電位差が発生する。表面キズが深いほど渦電流は大きく妨げられて大きな電位差が発生するから、電位差を検出することによって表面キズの深さを評価することが可能である。

探針を含む電位差検出回路が励磁コイルからの磁界による直接的な誘導起電力の影響を抑える方法として、電位差を検出する2つの探針はキズに沿った方向の電位差を検出するように配置することとした。また、キズに対する探針の設置位置の差異がプローブの信号に影響を与えないようにする必要がある。そこで、図1に示したように矩形の平面励磁コイルと4本の探針から構成される電磁誘導式電位差プローブとした。キズに沿った電位差  $V_1$ 、 $V_2$  を2組の2探針で検出し、それらの信号を差動増幅( $V=V_1+V_2$ )する。プローブの信号を  $V$  とすることにより、キズに対するプローブの垂直方向(図中の  $y$  軸方向)の位置変化による、検出される電位差の変化を小さくできると考えた。キズに沿った方向の電位差はキズ深さに応じて変化するため、プローブの検出信号はキズの深さに応じて変化することになる。

#### 4. 解析および実験の方法

A- $\phi$ 法による3次元有限要素解析<sup>10)</sup>を以下の条件で行った。試験体は厚さ5mmの真鍮板とし、その導電率 $\sigma$ を $1.3 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、比透磁率 $\mu_r$ を1.0とした。キズはスリット状とし、長さ25mm、幅0.5mm、深さ1mm、2mm、3mm、4mmとした。励磁コイルは矩形として、長さ23mm、幅13mm、巻き線断面積 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ とした。励磁電流の密度 $J_0$ は $0.3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ とし、試験周波数は40kHz(標準浸透深さが0.7mm)とした。キズと平行方向の2探針の間隔は6mm、キズに対して垂直方向の両側に配置された2組の探針の間隔は2mmとした。

実験では、5mmの厚さ真鍮板を試験体として、解析を行った寸法の表面キズを放電加工した。励磁コイルの寸法と4本の探針間隔、及び試験周波数は解析と同じ値として、渦電流探傷器を用いて実験を行った。

## 5. 解析および実験の結果

図3は試験体にキズがない場合について、試験体表面の渦電流と電位を有限要素解析によって求めた結果を示す。なお、同図における渦電流と電位は正弦波交流であり、励磁コイルの電流に対して90度進相成分を示す。渦電流は励磁コイルの巻線に沿って閉路を成して一様に誘導されるから、電荷が滞留して集積することはほとんど無く、試験体に電位差はほとんど現れないことがわかる。

図4は試験体の表面にスリットキズがある場合について、試験体表面における渦電流と電位を示す。渦電流は表面キズによって流れが妨げられ、キズの近傍に正と負の電荷が滞留して集積する結果として、キズを挟んだ両側に正と負の電位が対として発生することが分かる。図3と図4のマックスウェルの方程式に基づく解析結果は、電磁誘導によって導体内に電位差が生起すること明確に示している。

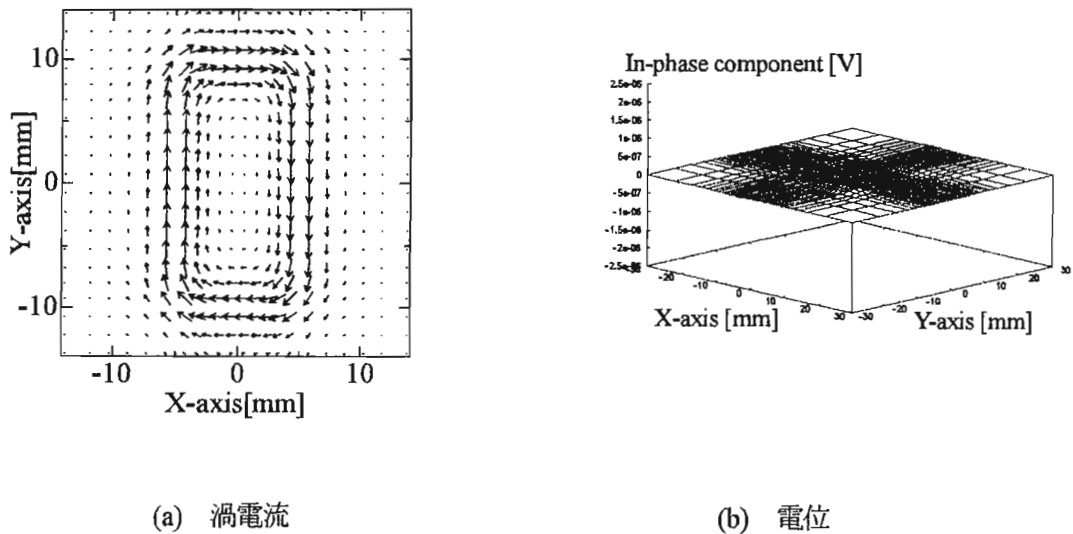


図3 渦電流と電位 (キズが無い場合)

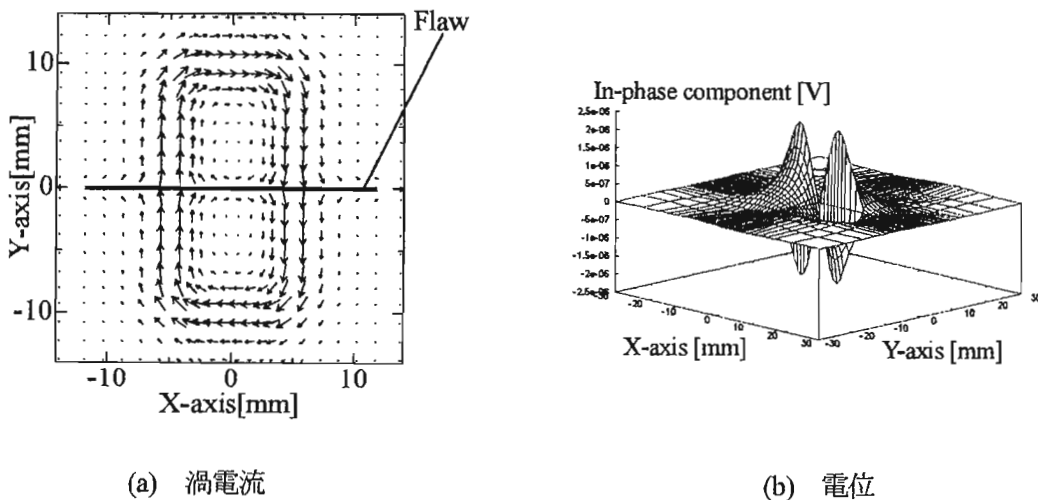


図4 渦電流と電位 (表面キズがある場合)

図5は深さ4mmのキズの両側に配置された2本1組の探針によって検出される電位差信号（V1・V2）と4探針プローブの電位差信号（ $V=V1+V2$ ）とを示す。なお、キズを跨いだ探針間の距離は2mm一定としている。同図からキズに対して垂直方向で探針の位置が変わるとV1とV2は大きく変化することが分かる。すなわち、図4(b)において、キズの近傍に発生する電位はキズから離れるに従って急激に減衰することから、V1とV2は大きく変わるのである。一方、図5におけるキズからのプローブの位置が変化しても、Vはほとんど一定に保たれることがわかる。

図6は、キズ深さに対する4探針プローブの信号の解析結果を示す。同図(a)はプローブの位置ずれによる信号の変化が小さいことを示している。同図(b)はキズ深さに対するプローブの検出信号と、電位差、及び、渦電流による誘導起電力を示しており、プローブの信号は渦電流からの誘導起電力が小さく、ほとんど電位差を検出していることを示している。以上の有限要素解析は、プローブの検出信号が表面キズの深さに対応して変化することを示している。

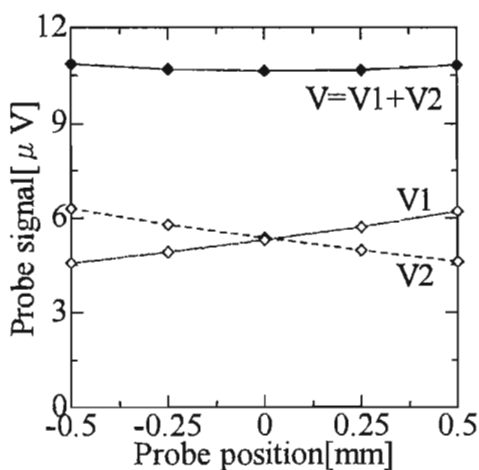
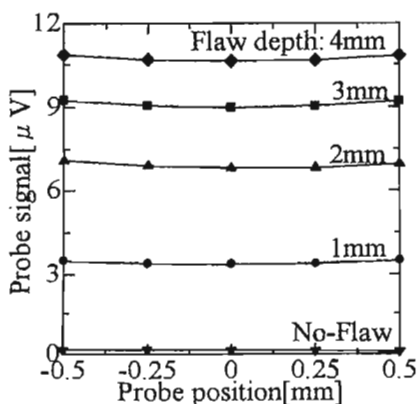
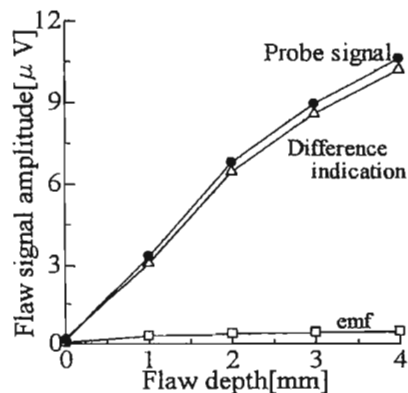


図5 探針の位置に対する検出信号



(a) 位置による信号変化



(b) キズ深さと信号

図6 キズ深さに対する4探針プローブの信号（解析結果）

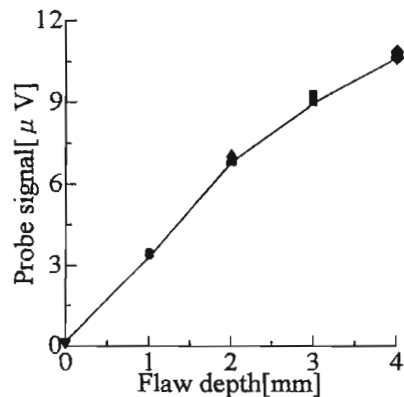


図7 キズ深さに対する4探針プローブの信号（実験結果）

図7はキズ深さに対する4探針プローブの検出信号の実験結果を示す。同図の検出信号は、増幅器を含む渦電流探傷器で得られた信号であるため、解析で得られたプローブの検出信号に対する絶対値の比較できないが、キズ深さに対応してほとんど同様に変化することを示している。

## 6. あとがき

電磁誘導式4探針電位差プローブはキズ長さ方向の電位差を検出し、励磁コイルからの直接的誘導起電力の影響を受けず、さらにキズに対するプローブの位置ずれの影響が小さいので、キズの深さを精度高く検出できるものとする。実用に当たっては試験体の電磁気特性と形状寸法に対応して4探針プローブの探針間隔と試験周波数を適切に設定することが必要である。

## 参考文献

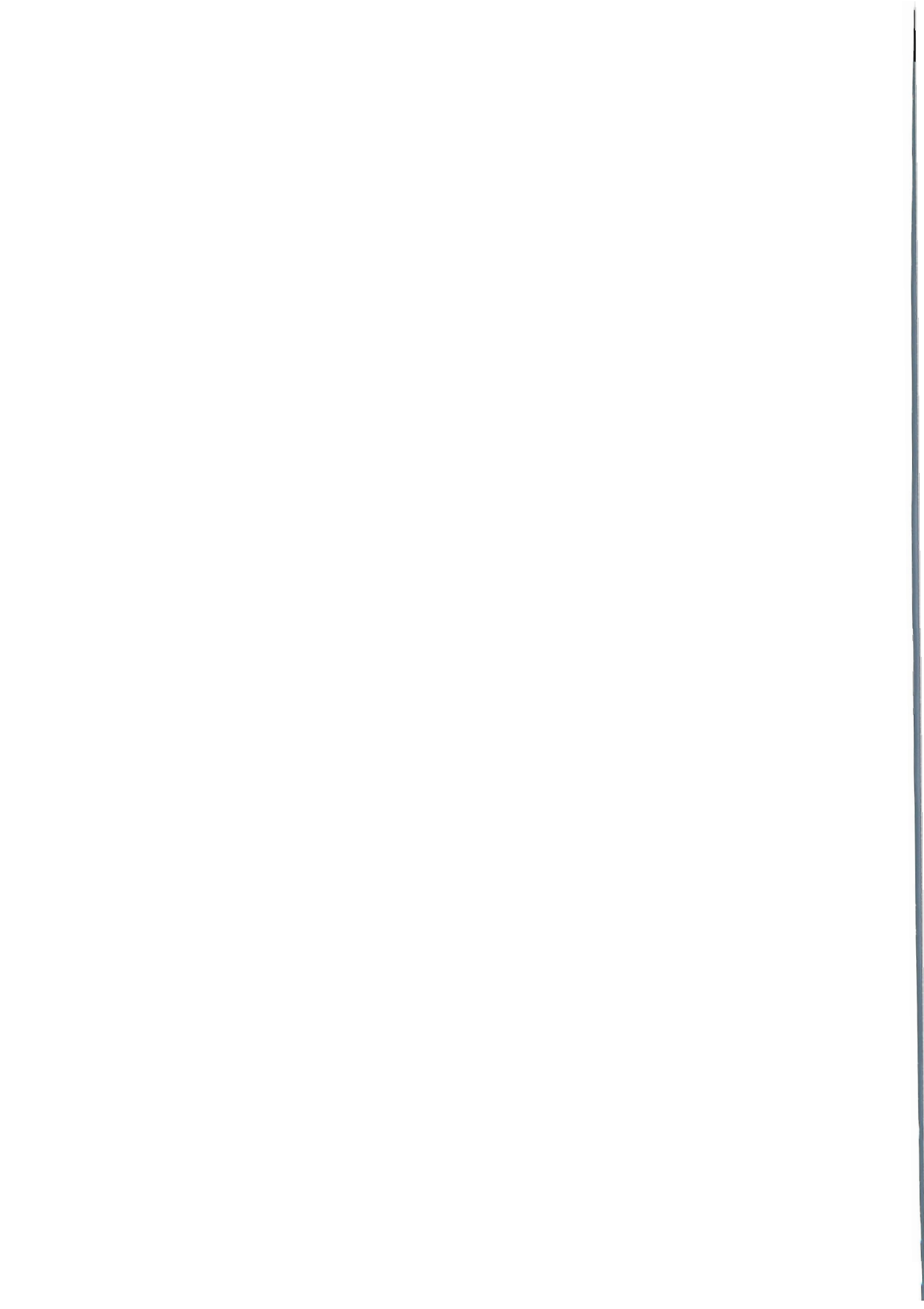
- 1) 浜田晴一, 早川学: 「火力発電設備に対する電位差法の応用における最近の進展」, 非破壊検査, 55巻9号, pp. 473-477 (2006)
- 2) 燈明泰成: 「近接端子直流電位差法による表面き裂の定量的非破壊評価」, 非破壊検査, 55巻11号, pp567-570 (2006)
- 3) 村山稔, 庄子哲雄, 渡辺豊, 佐藤康元: 「集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊評価」, 日本機械学会論文集(A編), 63(609), pp. 1119-1125, (1997)
- 4) 庄子哲雄, 川原鉄士, 粟野真和, 佐藤康元: 「集中誘導型交流電位差法による SUS316FR 鋼におけるクリープ疲労損傷の非破壊計測・評価」, 非破壊検査, 48(12), pp. 853-861, (1999)
- 5) 佐藤康元, 渥美健夫, 庄子哲雄: 「電位差法による裏面応力腐食割れのモニタリング」, 非破壊検査, 55巻11号, pp563-566 (2006)
- 6) H. Hoshikawa, K. Koyama, M. Maeda: "Electric Potential in Eddy Current Testing", Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 22A, pp375-382 (2003)
- 7) H. Hoshikawa, K. Koyama: "Electric Potential Diverts Eddy Current away from Discontinuities", Materials Evaluation, Vol. 64, No. 8, pp809-814 (2006)
- 8) 熊谷信昭: 「電磁理論」, コロナ社, p. 50, (1990)
- 9) 文献7), p. 116
- 10) 坪井始, 内藤督: 実践数値電磁界解析法, 養賢堂, p57, (1995)

## 特別講演会

石油タンク底部のAEグローバル診断技術

講師 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター

特任教授 関根 和喜 氏





# 石油タンク底部のAEグローバル診断技術

平成21年2月13日(金)

横浜国立大学  
安心・安全の科学研究教育センター  
関根 和喜



Yokohama National University

1



横浜国立大学

Yokohama National University

安心・安全の科学研究教育センター

Center for Risk Management and Safety Sciences

安心・安全な**市民社会**の  
構築を目指して



Yokohama National University

2



## 日本における石油タンクの維持管理の現状

主要課題 ・強度信頼性・構造健全性(含む耐震性)の確保  
・経年損傷(特に底部の腐食)対策

容量  $\geq 1,000$  kl  
特定屋外タンク貯蔵所

約 8,800 基

**開放検査** (8年~13年毎)  
(底部板厚測定、溶接線MT検査)



容量  $< 1,000$  kl

準特定屋外タンク  
非特定屋外タンク

約 70,000 基

**開放検査の義務無し**

点検義務  
実質: 10~15年ごとに  
自主開放点検



## 現行の石油タンク底部(アニュラー板+底板)腐食管理(消防法準拠)

**開放検査** 8~13年(平均10年)



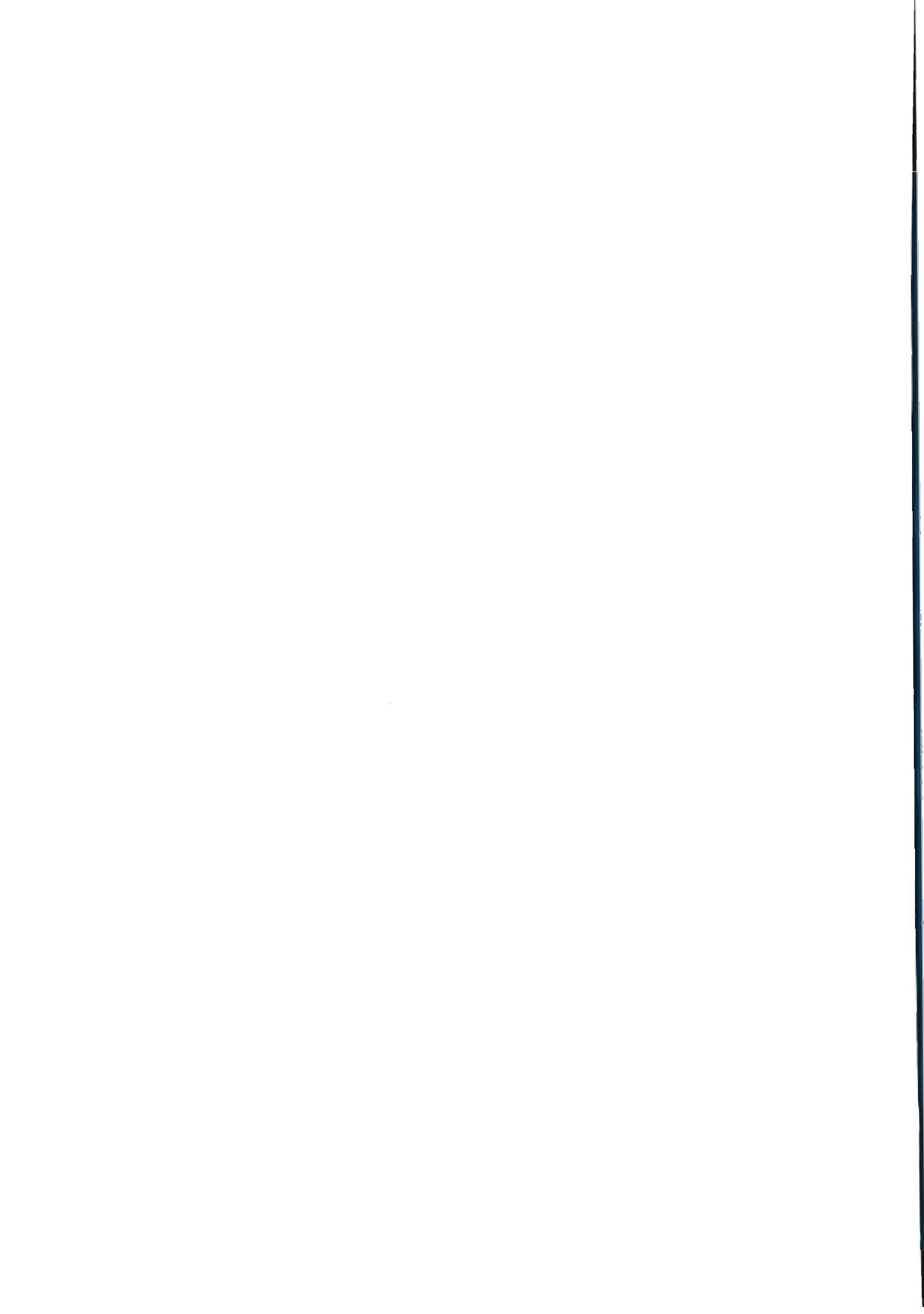
- ・内容物の払出し
- ・スラッジ等の処理
- ・クリーニング

UT板厚測定  
(離散的測定)

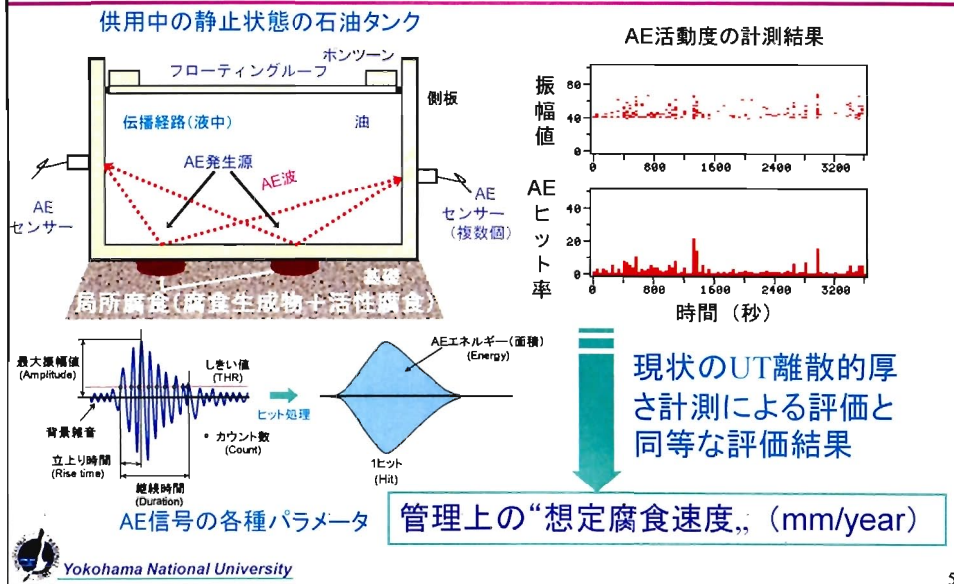
計測データ群の最小板厚

真の最小板厚を  
計測しているの  
か?

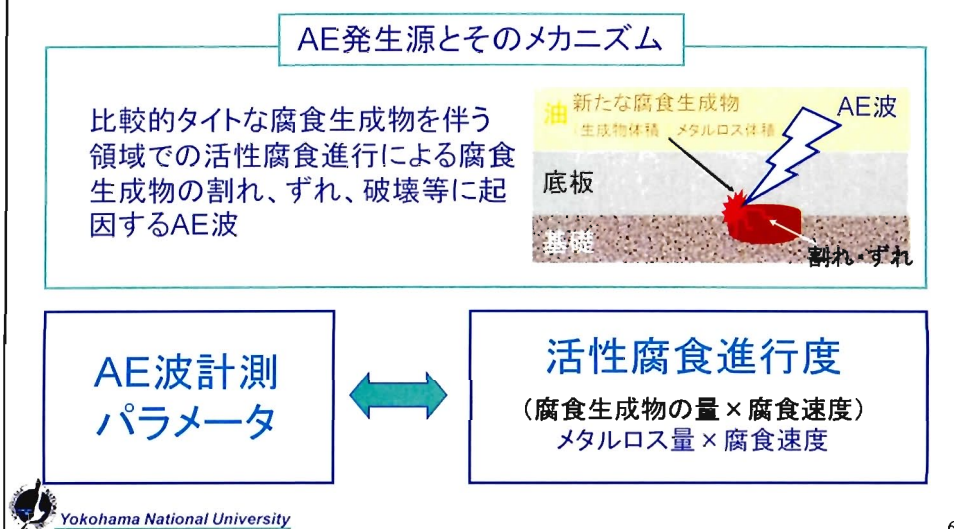
次回開放検査までの  
必要板厚の確保

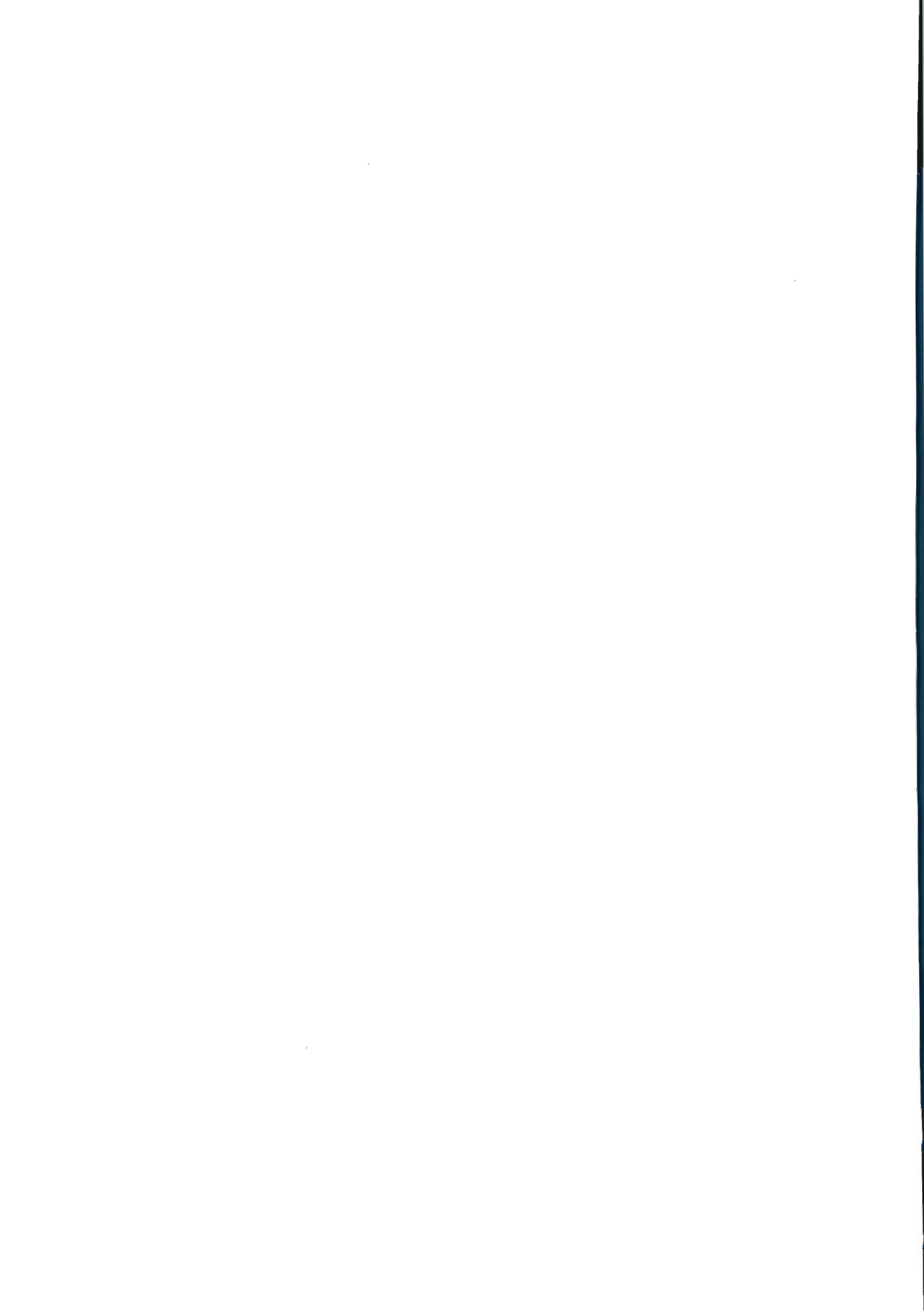


## 供用中AE試験の模式図と腐食損傷評価結果



## 石油タンクのAE計測は何を捉えているのか？





## 想定されるAE発生源とそのメカニズム

**油** 水素バブルの破裂

AE波

底板

基礎

水素

Cl<sup>-</sup> Cl<sup>-</sup> 空隙

局所的に酸性化した表面

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$   
 $Fe^{2+} + 2OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_2$   
 $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2$

$Fe(OH)_2 \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2OH^-$   
 $Fe^{2+} + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$   
 $2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$

**油** 腐食生成物層の割れ・ずれ

AE波

底板

基礎

既存の腐食生成物

$4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4H_2O$   
 $6Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 + 6H_2O$

局部的強酸性環境下でのカソード反応で生じた水素バブルの破裂<sup>1)</sup>

腐食生成物の体積膨張に伴う既存の腐食生成物の自壊、割れ、き裂<sup>2)</sup>

- 1) S.S.Park, S.Kitsukawa, K.Katoh, A.Maruyama, S.Yuyama and K.Sekine, Materials Transactions, 46(11), pp.2490-2496 (2005)
- 2) S.S.Park, S.Kitsukawa, K.Katoh, A.Maruyama, S.Yuyama and K.Sekine, Materials Transactions, 47(4), pp.1240-1246 (2006)

## AE発生メカニズムの明確化と腐食速度に対する定量的関係の導出

**石油タンク底板腐食のモデル実験(ラボ実験)**

AE活動度と腐食速度の同時測定

各種条件下でのデータ蓄積  
相関関係を特定する

**タンク底板腐食によりAEが発生する際のメカニズムの明確化と  
AE活動度と局部腐食速度との定量的関係の導出**

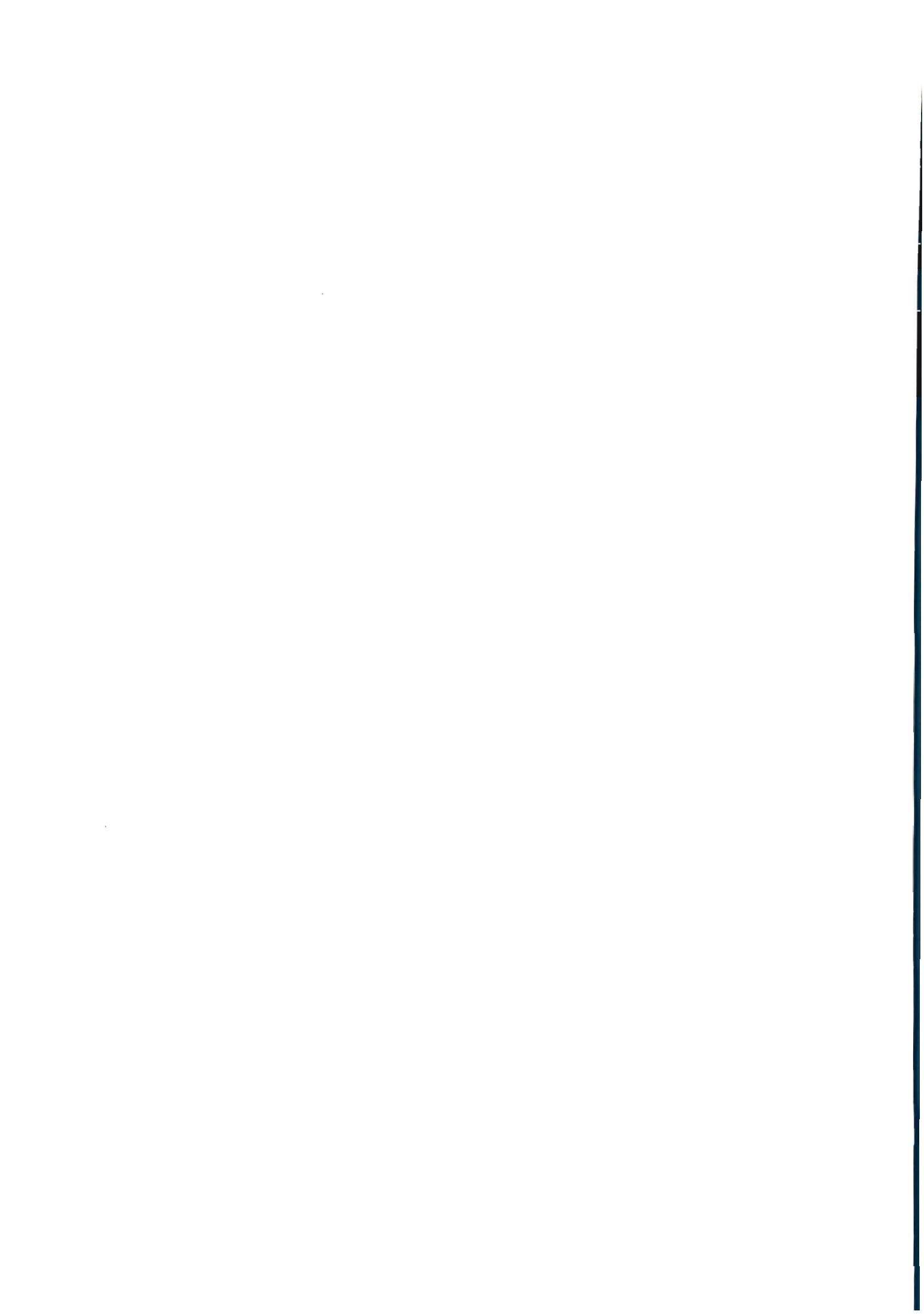
$R^2 = 0.82$

MHR/hit/100cm<sup>2</sup>

$Y_p / 10^3 S \cdot cm^2$

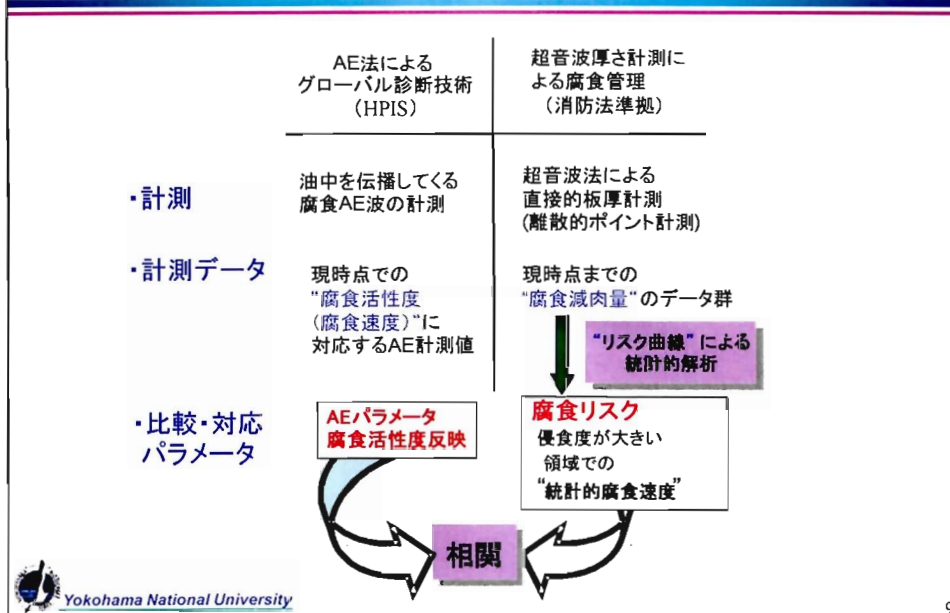
AE活動度と腐食速度の相関の一例  
(pH=1, 含水率35wt%)

$Y_p$ : 分極コンダクタンス



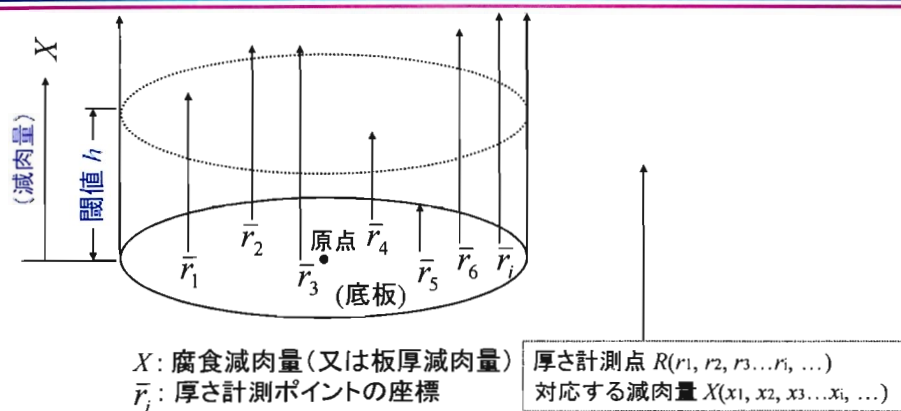


## AE法による底板腐食の診断・評価の考え方 (I)



## 法定厚さ計測データ群の整理 (腐食損傷リスク曲線)

粗視化による整理 —フラクタル分析—



底板裏面腐食の“リスク曲線”

上側累積頻度 (確率)  $F(h) = CF(X \geq h)$

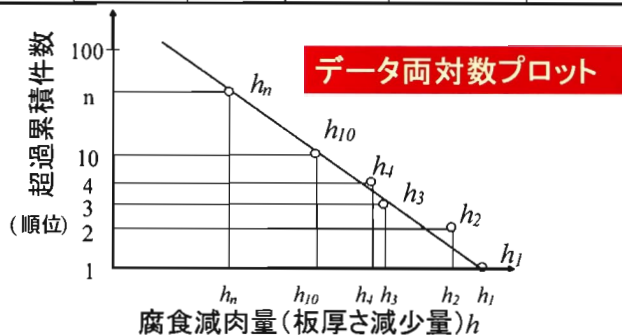
$\log F(h) \Leftrightarrow \log h$



## 損傷リスク曲線の簡易的構成法

損傷量(減肉量)(確率変数:X)の大きい方から順に  
 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ とソートする。

|           |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 腐食減肉量 $h$ | $h_1$ | $h_2$ | $h_3$ | ..... | $h_n$ |
| 順位        | 第1位   | 第2位   | 第3位   | ..... | 第n位   |



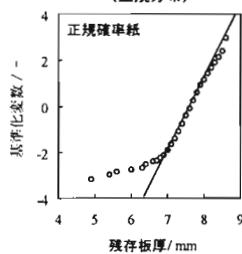
$$\frac{\text{超過累積件数}}{\text{標本数(全データ数)}} = \text{超過累積確率(又は上側累積確率)} F(h)$$



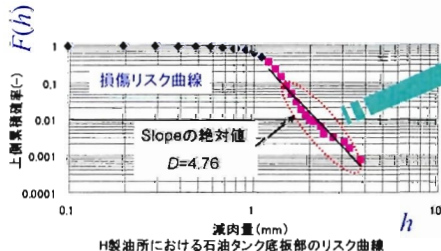
Yokohama National University

## 板厚計測データの統計的分析 (1)

H 製油所におけるタンク底板の板厚分布 (正規分布)



腐食の進行したタンク



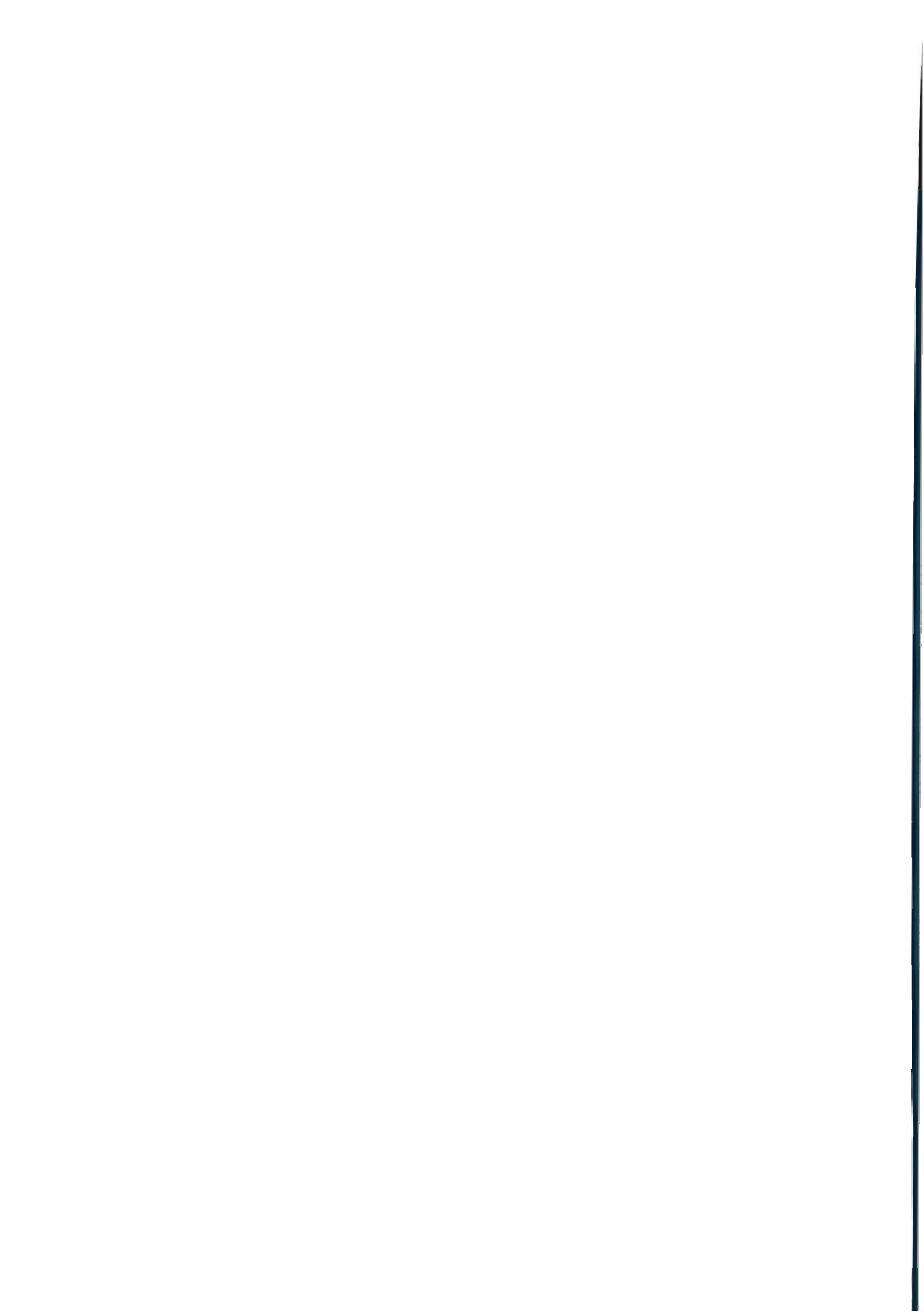
侵食度が大きい領域での  
減肉データ群

特性パラメータ

Slopeの絶対値の逆数:  $1/D$   
(腐食リスク)

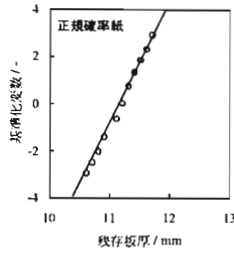


Yokohama National University

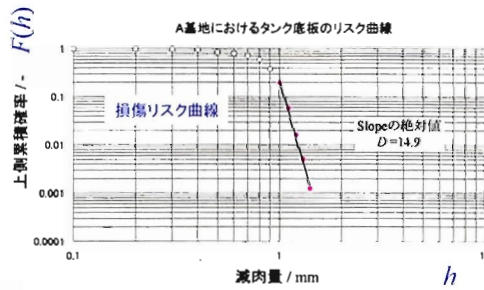


## 板厚計測データの統計的分析 (2)

A 基地におけるタンク底板の板厚分布  
(正規分布)

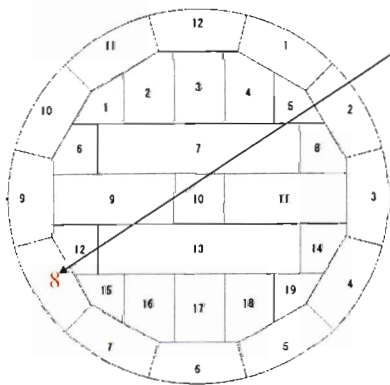


腐食の軽微なタンク

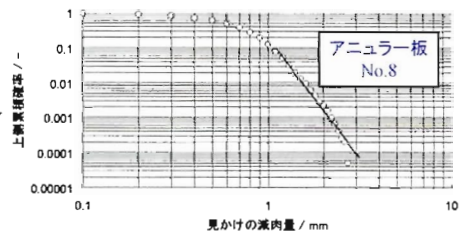


1/D : 腐食リスク

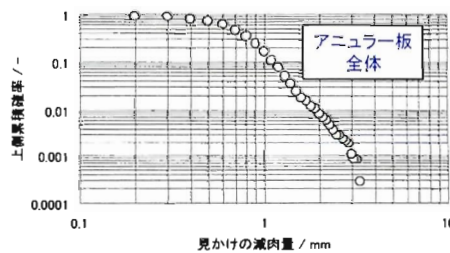
## 連続面計測による板厚データを用いたアニューラ板の損傷リスク曲線



タンク底板展開図



K製油所におけるタンクアニューラ部(No.8)のリスク曲線

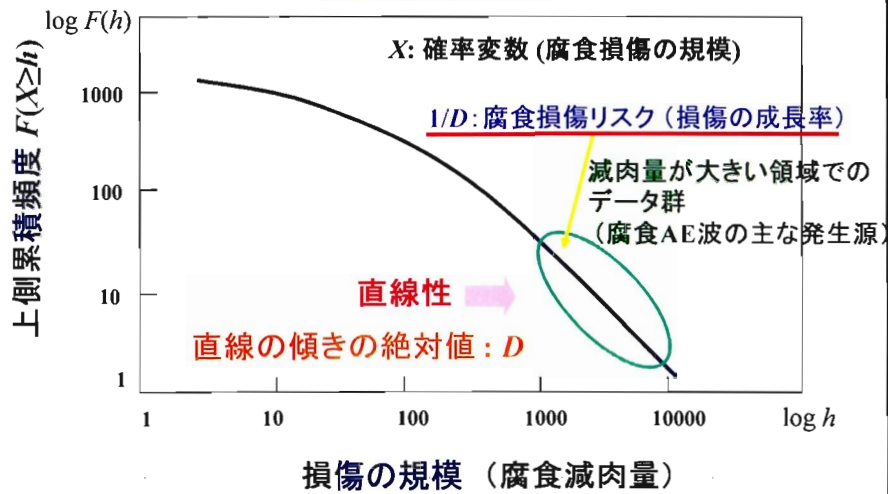


K製油所におけるタンクアニューラ部全体からのリスク曲線



## 損傷リスク曲線 (Damage Risk Curve)

### 両対数グラフ



## 石油タンク底板の統計的腐食速度 (1)

$D$ : 現時点 (板厚計測時,  $t=0$ ) での腐食リスク曲線における  
テイル部の傾きの絶対値

$$D = -\frac{\partial \ln F}{\partial \ln h} = -\frac{\delta F / F}{\delta h / h} \quad (1)$$

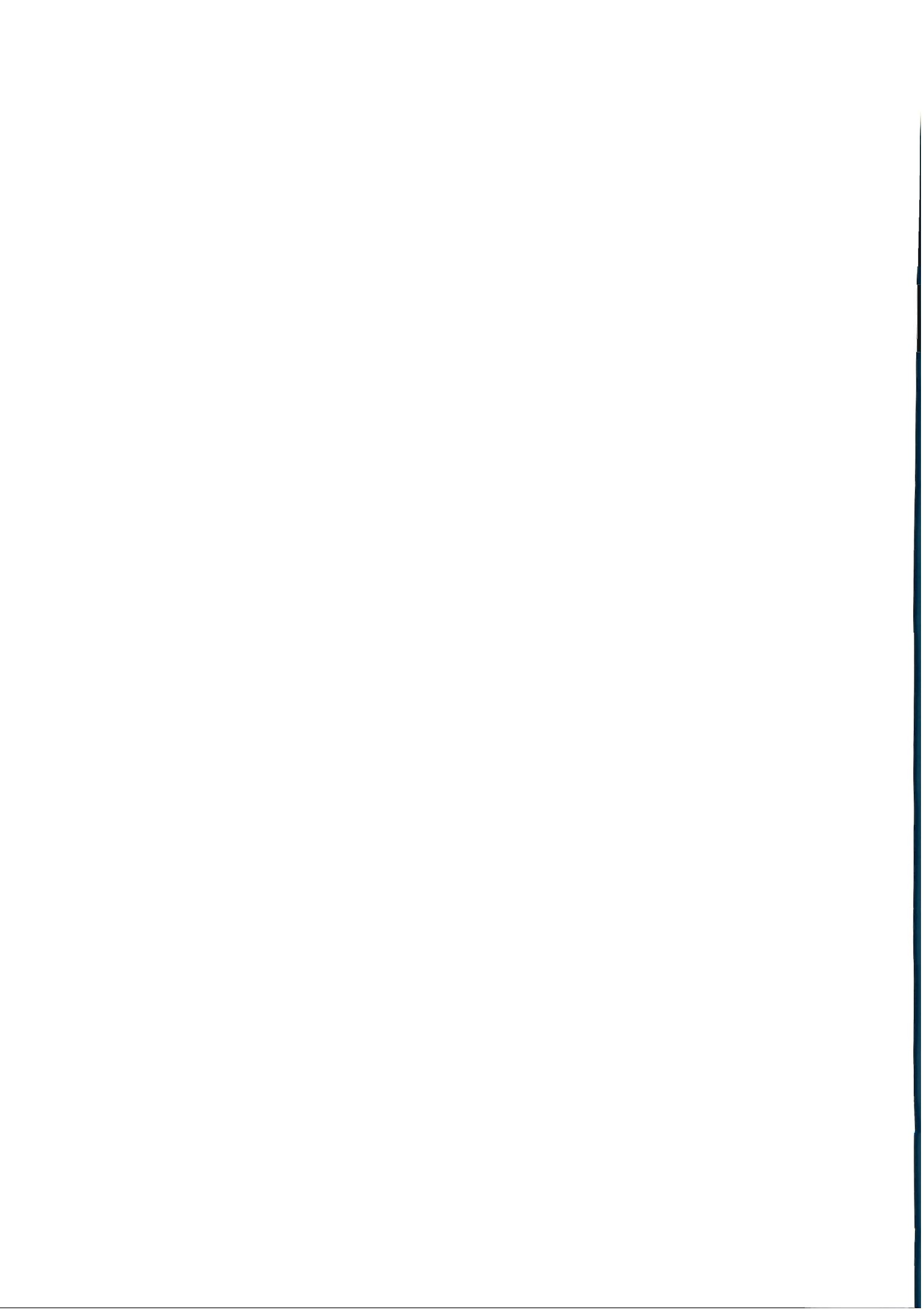
$$\delta h = -\frac{1}{D} \frac{\delta F}{F} h \quad (2)$$

・  $\Delta t$  時間後の腐食減肉量分布  $F(\Delta t)$

$$F(\Delta t) = F + \delta F \quad (\delta F \geq 0) \quad (3)$$

・  $\delta F = kF\Delta t$  ( $k$ : 定数, 1/year) と仮定する (4) (エルゴード仮説)







## 石油タンク底板の統計的腐食速度 (2)

現時点( $t=0$ , その腐食量(定数) $\langle h \rangle$ )以降では減肉量は  
 $h - \langle h \rangle$  を問題にするから、  
 $h$  を  $h - \langle h \rangle$  として

$$\frac{\delta h}{\delta t} = -\frac{k}{D}h + \frac{k}{D}\langle h \rangle \quad (5)$$

(5)式の反応速度論的意味

Corrosion rate = (Retardation term) + (Driving force term)

腐食進行の発展方程式

$$\frac{h(t)}{\langle h \rangle} = 1 - \exp\left(\frac{-k}{D} \cdot t\right) \quad (6)$$



## 石油タンク底板の統計的腐食速度 (3)

- ・ 現時点以降の“統計的”腐食速度の時間変化

$$\frac{\partial h(t)}{\partial t} = \langle h \rangle \cdot k/D \exp(-k/D \cdot t)$$

$\langle h \rangle$ : 現時点(開放時)での侵食度の大きい領域での  
 減肉量分布に対する統計的代表的値 (mm)

- ・ 現時点( $t=0$ )での腐食速度

$$\left| \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right|_{t=0} = k \langle h \rangle / D \text{ (mm/year)}$$

- ・ グローバル評価パラメータ =  $\langle h \rangle / D$  or  $\langle h \rangle / (D \cdot \text{year})$   
 (腐食活性度)

例えば、 $\langle h \rangle$ :  $F=0.001$ での値  $h_{0.001}$



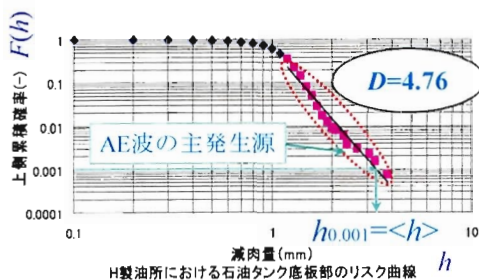


## 統計的腐食速度に対応するパラメータ(腐食リスクパラメータ C.R.P)の導出

$$\left. \frac{\partial h}{\partial t} \right|_{t=0} = k \cdot \frac{\langle h \rangle}{D}$$

↑  
現時点での腐食減肉速度

$D$ : テイル部の傾きの絶対値  
 $h$ : タンク底板の減肉量  
 $\langle h \rangle$ : 腐食減肉量の統計的な代表値  
 $t$ : 供用時間  
 $k$ : 比例定数



侵食度の大きな局部腐食領域に注目し、  
 $\langle h \rangle$ として $F=0.001$ の時の $h$ の値 $h_{0.001}$ 又は  
 $(h_{0.001}/\text{供用年})$ を採用する。

このリスク曲線の例では

$D = 4.76$

$h_{0.001} = 3.15$

腐食リスクパラメータ (C.R.P)

$$\Rightarrow \frac{h_{0.001}}{D} = 0.662(\text{mm}) \text{ 又は}$$

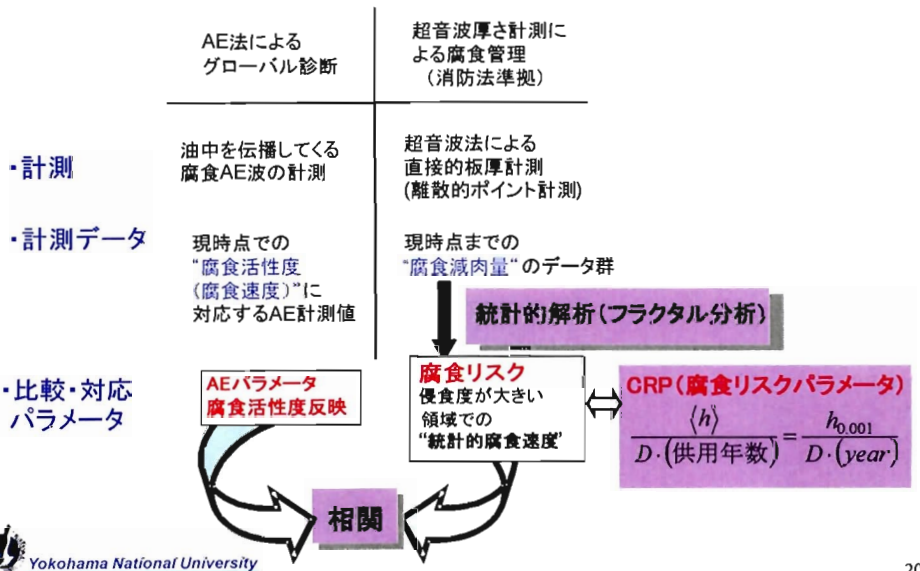
$$\Rightarrow \frac{h_{0.001}}{D \cdot (\text{year})} = 0.0154(\text{mm/year})$$



Yokohama National University

19

## AE法による底板腐食の診断・評価の考え方(II)



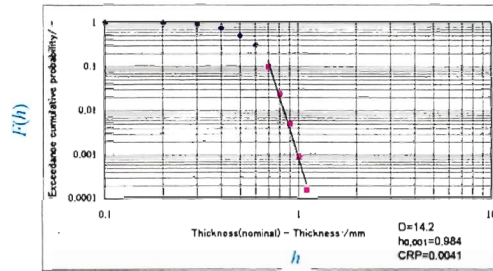
Yokohama National University

20

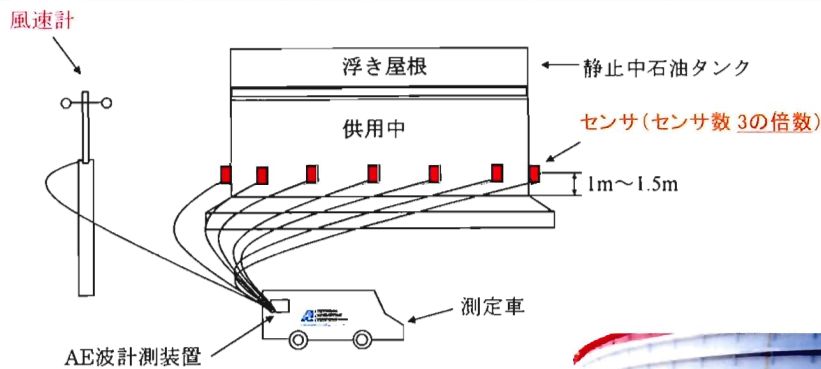


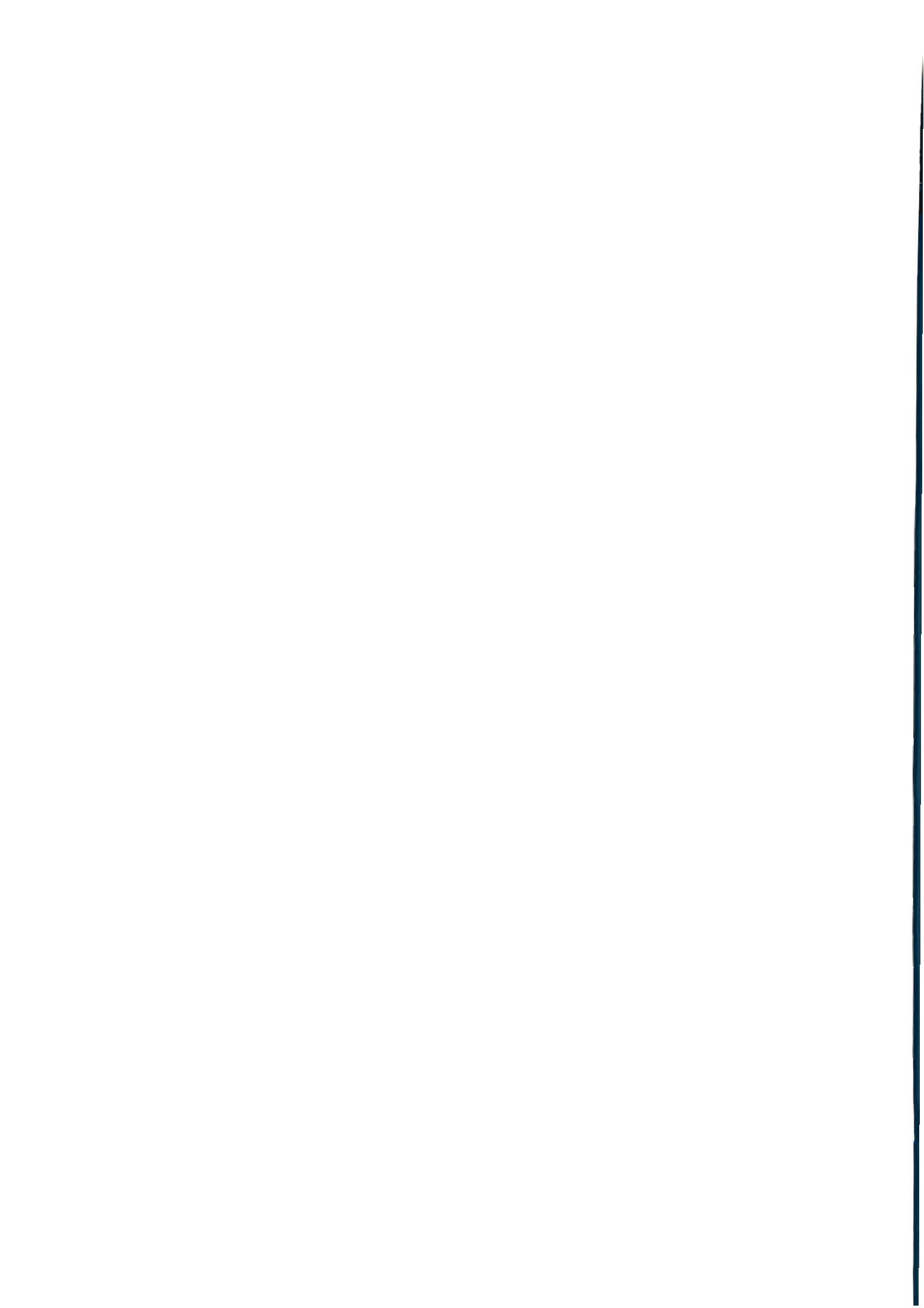
## リスク曲線作成のための板厚データベースの一例

| FILENAME           | 00000018 | Thickness<br>(板厚) | Thickness(nominal) -<br>Thickness<br>(設計板厚-測定板<br>厚) | Measured<br>number<br>(測定件数) | Exceedance<br>cumulative<br>number<br>(上側累積件数) | Exceedance<br>cumulative<br>probability<br>(上側累積確率) |
|--------------------|----------|-------------------|--|------------------------------|--|---|
| Filesize           | 43520    | /mm               | /mm  |                              |  |   |
| TEST DATE          | 1995年7月  | 10.9              | 1.1  | 1                            | 1  | 0.000156912   |
| Diameter           | 82.37m   | 11                | 1  | 5                            | 6  | 0.000941472   |
| Capacity           | 110000kl | 11.1              | 0.9  | 26                           | 32   | 0.005021183   |
| Content            | 原油       | 11.2              | 0.8  | 121                          | 153  | 0.024007532   |
| Lining             | 有        | 11.3              | 0.7  | 470                          | 623  | 0.097756159   |
| Construction Date  | 1978年8月  | 11.4              | 0.6  | 1309                         | 1932   | 0.303153931   |
| Measuring Points   | 底板部      | 11.5              | 0.5  | 1267                         | 3199   | 0.5019614   |
| Thickness(nominal) | 12.0mm   | 11.6              | 0.4  | 1614                         | 4813   | 0.755217323   |
| D                  | 14.2     | 11.7              | 0.3  | 877                          | 5690   | 0.892829123   |
| ho991              | 0.984    | 11.8              | 0.2  | 433                          | 6123   | 0.960772007   |
| CRP                | 0.0041   | 11.9              | 0.1  | 150                          | 6273   | 0.984308803   |
| Note               |          | 12                | 0  | 64                           | 6337   | 0.994351169   |
|                    |          | 12.1              |  | 25                           | 6362   | 0.998273968   |
|                    |          | 12.2              |  | 11                           | 6373   | 1   |



## 石油タンク(貯油中)のAE試験実施状況





# 各種タンクの腐食リスクパラメータ(C.R.P)とAE活動度

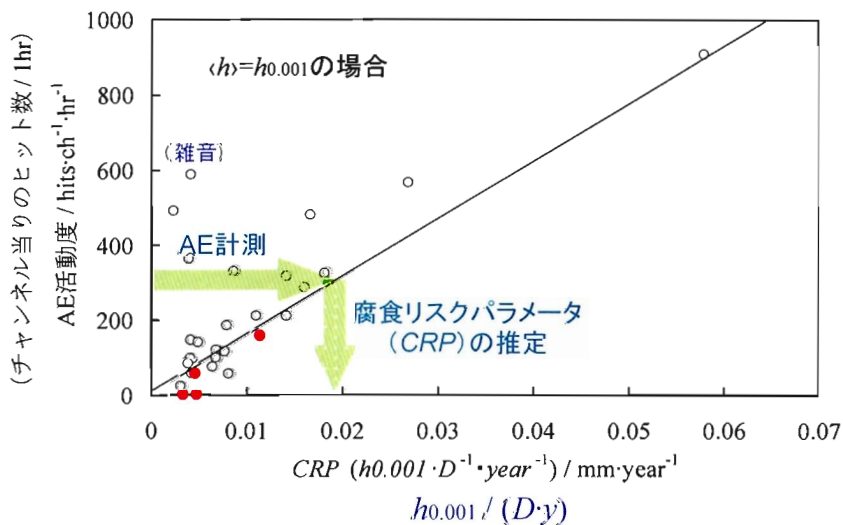
AE活動度  
(hits·ch<sup>-1</sup>·hr<sup>-1</sup>)  
(評価指標)

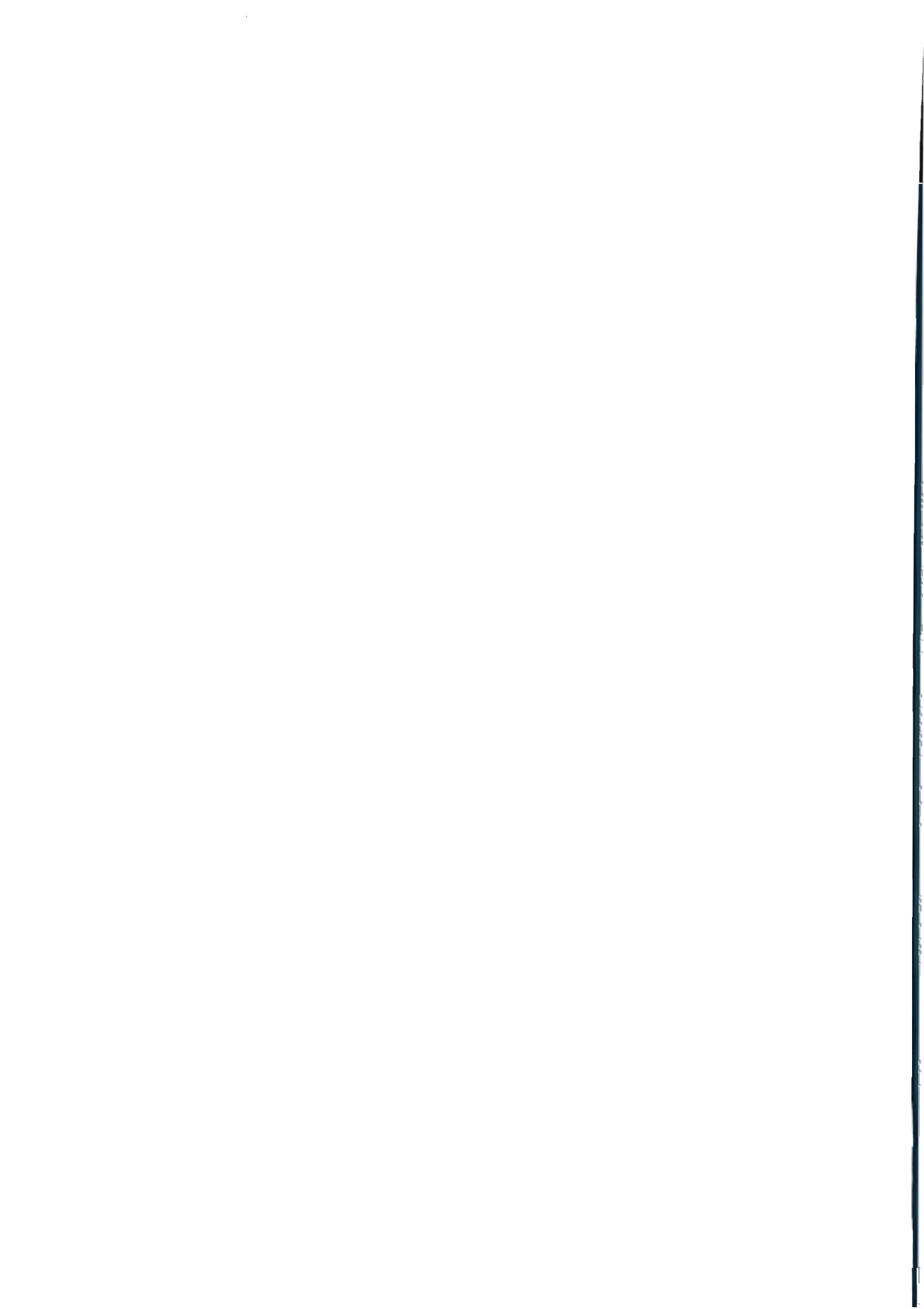
C.R.P.

データベース

| No. | 内容物   | 建造年月     | 検査年月     | 機号        | 検出期間<br>y/year | タンク直径<br>d/mm | 円周長<br>π·D/mm | 検出距離<br>r/mm | 最大減肉量<br>mm | A      | D    | h0.001<br>/mm | h0.001·D<br>/mm | C.R.P.<br>h0.001·D·y<br>/mm·year <sup>-1</sup> | CH数 | h数    | AE活動度<br>(hits·ch <sup>-1</sup> ·hr <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------|----------|----------|-----------|----------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------|------|---------------|-----------------|--|-----|-------|---|
| 001 | ガソリン  | 1956年    | 1999年9月  |           | 42             | 12            |               | 8            | 3.1         | 0.021  | 3.48 | 2.99          | 0.078           | 0.0181   | 3   | 978   | 203   |
| 002 | 軽油    | 1956年    | 1999年9月  |           | 14             | 81.5          | 21            | 12           | 1.6         | 0.2214 | 14.8 | 1.44          | 0.006           | 0.0049   | 21  | 936   | 126   |
| 003 | 軽油    | 1956年9月  | 1999年9月  |           | 31             | 11.82         | 8             | 8            | 2.9         | 0.0181 | 3.92 | 2.12          | 0.041           | 0.0175   | 3   | 1261  | 437   |
| 004 | アセツ   | 1978年2月  | 1999年11月 |           | 22             | 47            | 12            | 12           | 1.7         | 1.084  | 18.8 | 1.02          | 0.002           | 0.0011   | 12  | 1211  | 101   |
| 005 | 軽油    | 1974年    | 2003年4月  |           | 28             | 21.2          | 8             | 8            | 0.7         | 0.0073 | 1.82 | 2.88          | 0.018           | 0.0128   | 8   | 942   | 903   |
| 006 | ガソリン  | 1974年    | 2003年4月  |           | 28             | 45.28         | 12            | 8            | 1.4         | 0.038  | 17.4 | 1.34          | 0.008           | 0.0038   | 12  | 4383  | 384   |
| 007 | 軽油    | 1989年    | 2003年4月  | 1993年一層検査 | 24             | 32.84         | 8             | 8            | 0.8         | 0.0028 | 2.90 | 1.59          | 0.018           | 0.0143   | 8   | 1500  | 211   |
| 008 | 軽油    | 1979年2月  | 2003年4月  | 1982年一層検査 | 22             | 8.1           | 18            | 12           | 1.5         | 0.002  | 7.19 | 1.11          | 0.005           | 0.0001   | 15  | 1811  | 122   |
| 009 | 軽油    | 1964年    | 2003年4月  | 1982年一層検査 | 28             | 38.82         | 12            | 8            | 1.2         | 0.0094 | 6.29 | 0.87          | 0.018           | 0.0036   | 9   | 295   | 88  |
| 010 | アセツ   | 1984年    | 2003年4月  | 1978年二層検査 | 28             | 22.22         | 18            | 8.9          | 1.5         | 0.0011 | 4.44 | 1.78          | 0.021           | 0.0018   | 8   | 1298  | 118   |
| 011 | シソント油 | 1982年    | 1993年11月 |           | 30             | 22.22         | 8             | 6            | 0.7         | 0.0018 | 4.70 | 1.13          | 0.041           | 0.0006   | 6   | 367   | 60  |
| 012 | 軽油    | 1978年12月 | 1993年11月 |           | 17             | 82.27         | 21            | 12           | 1.1         | 0.0008 | 14.2 | 0.884         | 0.009           | 0.001  | 21  | 12395 | 990   |
| 013 | 軽油    | 1978年12月 | 2003年    |           | 25             | 82.42         | 21            | 12           | 1.0         | 0.0079 | 16.8 | 1.10          | 0.009           | 0.0041   | 21  | 2113  | 148   |
| 014 | 軽油    | 1984年4月  | 2003年4月  |           | 19             | 82            | 24            | 12           | 0.9         | 0.0011 | 17.4 | 1.01          | 0.008           | 0.0030   | 21  | 358   | 76  |
| 015 | 軽油    | 1984年7月  | 2003年4月  |           | 18             | 82            | 24            | 12           | 0.8         | 0.0001 | 1.88 | 0.16          | 0.011           | 0.0018   | 21  | 1209  | 12  |
| 016 | 軽油    | 1980年4月  | 2003年4月  |           | 23             | 11.82         | 8             | 8            | 0.5         | 0.000  | 5.49 | 0.802         | 0.048           | 0.0004   | 3   | 222   | 76  |
| 017 | DCPD  | 1973年4月  | 2003年4月  |           | 30             | 17.47         | 9             | 9            | 1.6         | 0.000  | 5.42 | 2.25          | 0.014           | 0.0128   | 6   | 1818  | 315   |
| 018 | 軽油    | 1984年4月  | 2003年4月  |           | 25             | 11.82         | 8             | 8            | 0.9         | 0.0063 | 7.32 | 1.24          | 0.018           | 0.0043   | 3   | 421   | 142   |
| 019 | 軽油    | 1973年1月  | 2003年4月  |           | 30             | 26.14         | 10            | 8            | 0.5         | 0.0004 | 3.83 | 0.78          | 0.002           | 0.0001   | 8   | 818   | 102   |
| 020 | ガソリン  | 1978年9月  | 2001年    |           | 22             | 80            | 21            | 12           | 2.5         | 0.0079 | 16.5 | 1.89          | 0.006           | 0.0018   | 12  | 187   | 462   |
| 021 | 軽油    | 1978年9月  | 2003年4月  |           | 22             | 80            | 21            | 12           | 2.0         | 0.004  | 2.38 | 1.44          | 0.004           | 0.0146   | 21  | 10121 | 462   |
| 022 | 軽油    | 1978年9月  | 1984年9月  |           | 15             | 80            | 23            | 12           | 1.8         | 0.0012 | 4.43 | 1.04          | 0.025           | 0.0135   | 21  | 6006  | 286   |
| 023 | DCPD  | 1980年4月  | 2003年4月  |           | 22             | 14.5          | 12            | 8            | 0.8         | 0.0004 | 4.78 | 0.802         | 0.012           | 0.0008   | 8   | 1325  | 231   |
| 024 | 玉米    | 空欄       | 空欄       |           | 24             | 8.7           | 8             | 6            | 5.8         | 0.0207 | 9.88 | 6.34          | 0.042           | 0.0128   | 3   | 1702  | 567   |

# 腐食リスクパラメータ(CRP)とAE活動度との関係

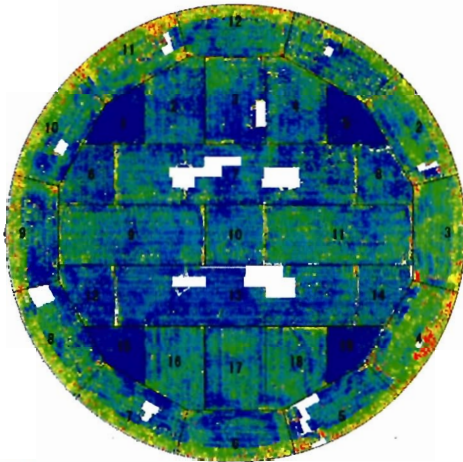






腐食リスクパラメータ(CRP)から  
管理上の想定腐食速度はどのようにして導かれるか？

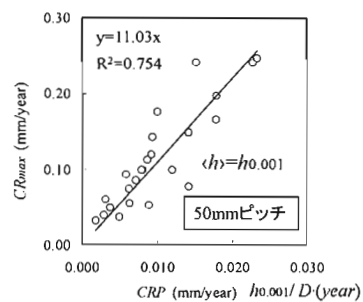
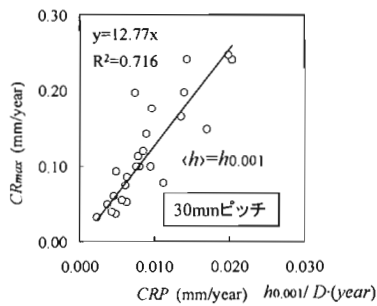
### タンクの全面の板厚計測結果(連続UT法)



相関?  
 $CRP \longleftrightarrow CR_{max}$

$CR_{max}$  = タンクの真の最大腐食速度  
(mm $\cdot$ year $^{-1}$ )  
 $CR_{max} = \frac{\text{全面板厚計測による“最大減肉量”}}{\text{タンクの供用年数}}$

### 腐食リスクパラメータ(CRP)と真の最大腐食速度(CR<sub>max</sub>)との関係



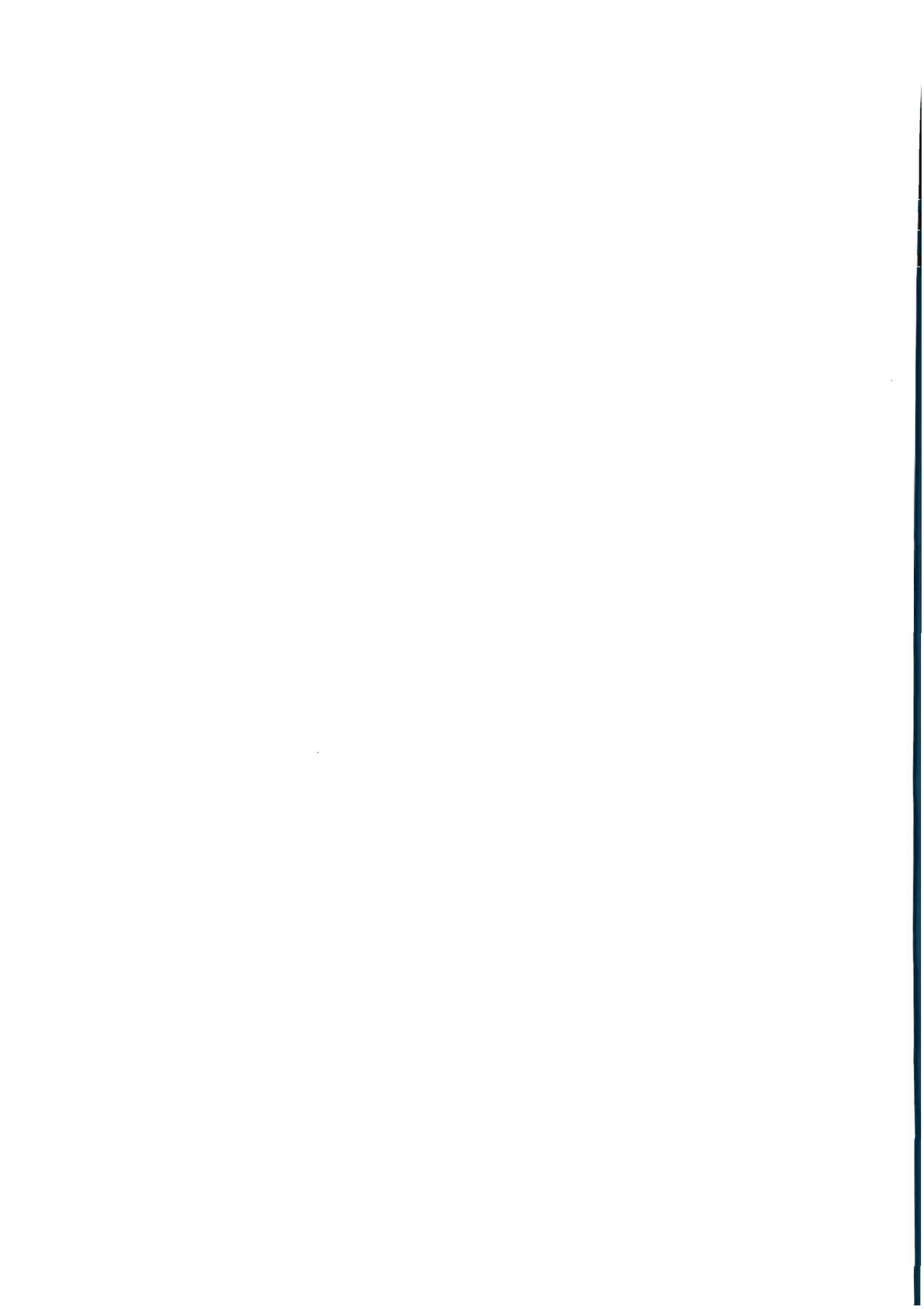
30mmピッチの板厚データに基づくCRPとCR<sub>max</sub>との関係

50mmピッチの板厚データに基づくCRPとCR<sub>max</sub>との関係

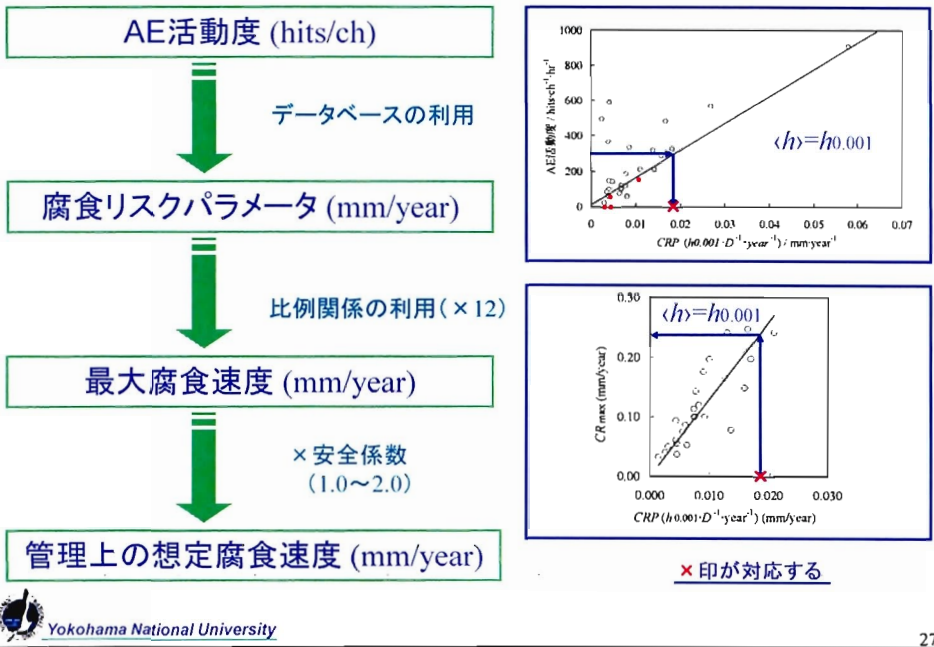
全面板厚測定  
の最小板厚値から求めた  
最大腐食速度(CR<sub>max</sub>)

相関  
 $CR_{max} \approx 12 \times CRP$

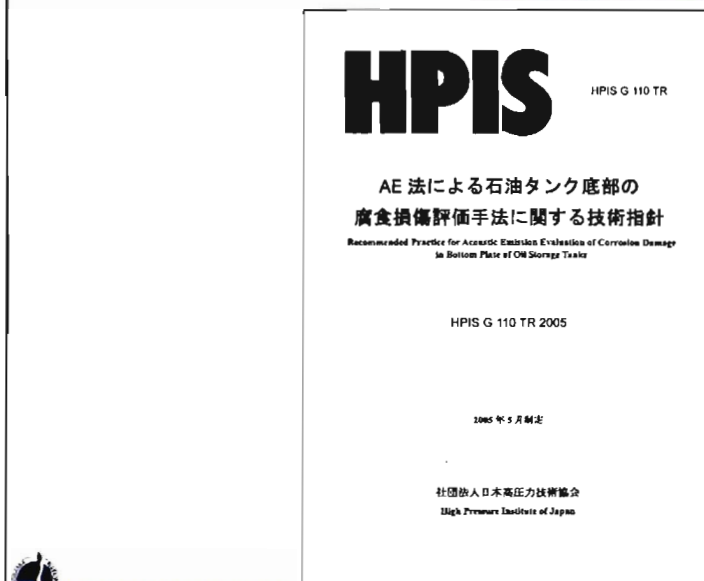
全面板厚測定結果から  
離散的に値を抽出して求めた  
腐食リスクパラメータ(CRP)

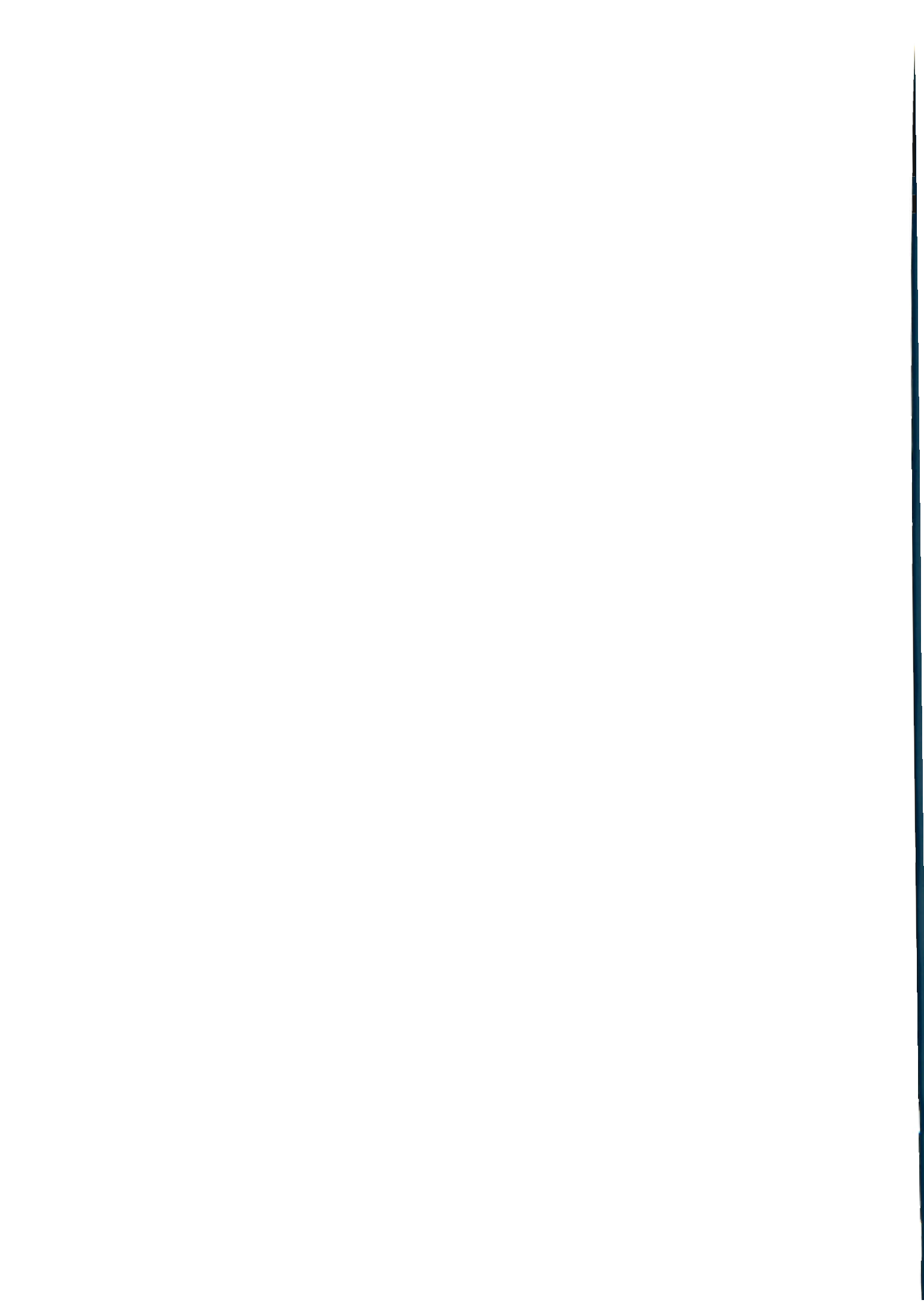


## AE活動度による管理上の想定腐食速度の導出

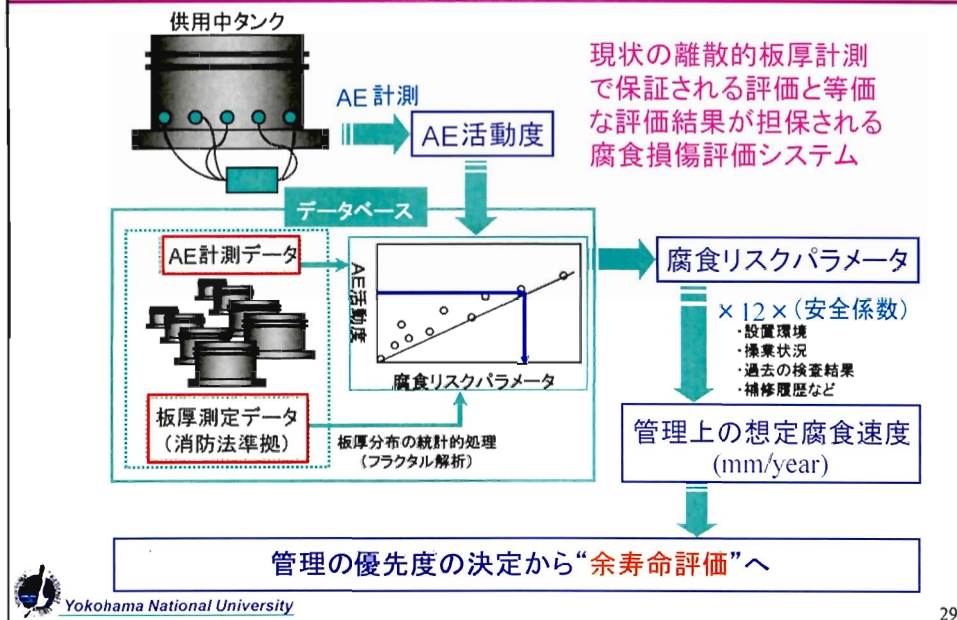


## HPIS G110TR





## HPISに準拠したAE法による底板腐食損傷評価システム



29

## おわりに

災害リスクマネジメントの立場からみた  
 石油タンクの損傷リスク評価とグローバル診断

1. 損傷が進んだ(重大損傷)領域での**損傷度データ群の特徴抽出**
2. **定量的損傷リスクと寿命評価パラメータの導出**
3. **余寿命予測を中心にした施設のグローバル診断技術**

30

