

経年水力鋼構造物の腐食面形状の統計的性質について

Statistical properties of the corroded surface configuration of existing hydropower steel structures

中村 秀治*・藤井 堅**・石川智巳***・海田 辰将****

Hideharu Nakamura, Katashi Fujii, Tomomi Ishikawa and Tatsumasa Kaita

* 工博 広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

** 工博 広島大学大学院工学研究科助教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

*** 工修 (財) 電力中央研究所我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

**** 工修 広島大学大学院工学研究科博士課程後期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

There exist many important steel structures which have been used for more than several decades, and the importance of proper maintenance of these structures is increasing more and more in the future. To estimate the load-carrying capacity of aged steel structures numerically, corroded surface generation of the structural members becomes an interesting subject, however, current studies lack in the understanding of the statistical properties of the corroded steel surface. In this paper, we show corroded surface data acquired from aged dam gates and penstocks, and clarify the statistical properties of them as irregular wave forms. Based on the statistical investigation of the corroded surfaces, suitable distances between discrete measurement points or in spacial auto-correlation model are discussed and a corroded surface generation method is presented.

Key Words : corroded steel surface, measurement, statistical property, spacial auto-correlation

キーワード: 鋼板腐食面, 計測, 統計的性質, 空間的自己相関

1. まえがき

既設鋼構造物の経年劣化は大部分が腐食であり, 疲労損傷, 磨耗などが問題になることもある. 既に数10年を経過した多くの重要構造物が現存する中で, 新規建設と同時に既設鋼構造物の適切な維持・管理・更新の重要性は更に高まる趨勢にある. 鋼構造物の場合, 力学的に無駄のない設計がなされており, 余裕厚以上に腐食した場合の残存耐力評価, 特に座屈などの破壊に関わる種々の評価検討が必要である.

鋼構造物の腐食による経年劣化に関する既往の研究は多方面に及ぶが, 大きく次のように分類できよう.

- ①経年鋼構造物の材料特性と腐食鋼材の部材試験レベルでの強度特性¹⁾⁴⁾
- ②腐食した柱・梁レベルでの残存耐力試験・解析⁵⁾
- ③腐食した構造物としての耐力特性試験・解析
- ④塗膜劣化と腐食進行の相関⁶⁾
- ⑤腐食した鋼構造物の板厚および表面形状計測⁷⁾
- ⑥腐食面の検討と数値解析のための腐食面生成⁸⁾⁹⁾

⑦経年鋼構造物の診断に関する判断ルールの整理と評価システムの構築^{10),11)}

これらの研究成果を通して既設鋼構造物の経年劣化の実体が把握でき, 経験を積んだ技術者が感覚的に維持管理に関わる適切な判断を下すことは十分可能と思われるが, 判断の根拠を広く説明し納得を得るのは必ずしも容易ではない. したがって, 前記①~③のいずれにおいても数値解析が多用されているように, 維持管理においても数値シミュレーションは不可欠である.

数値シミュレーションの実施に当たっては, まず, 前記⑥の腐食面の生成が課題となる. 藤井らは空間的自己相関モデルによる鋼板腐食面の再現を提案し⁸⁾, 腐食深生成点のメッシュ幅5mmの条件下で用いられる減衰パラメータなどの諸量を与えているが, メッシュ幅設定の根拠については明確にされていない. 腐食面の生成については, 当然, 耐震・耐風設計における模擬波形と同様の手法が考えられるが¹²⁾, 既設鋼構造物の腐食面の性質上, 離散的なデータが大部分で, 実構造物の腐食面を連続的に計測した例が極めて少なく,

データを基にした不規則波形としての取り扱い、ほとんどなされていないのが実情である。

本論文では、腐食面の不規則波形としての統計量に注目し、50年以上経過した供用中の水力鋼構造物の腐食面形状を計測してその結果を示し、次に、計測データをもとにその統計的性質（平均腐食量、標準偏差、各測線間の相関係数、およびパワースペクトル密度）を明らかにする。これらに基づいて、空間的自己相関法および腐食面の統計量を活用した腐食面形状生成法について考察、提案し、維持管理における適切な板厚計測点間距離、および計測点数について言及した後、今後検討すべき課題について指摘する。

2. 腐食面の計測方法と計測結果

本論文で示す腐食面計測データの取得方法、および計測結果について以下に示す。

(1) 鋼板腐食面計測方法

a) 渦電流式変位計の原理と特性

渦電流式変位計は検出ヘッドとして小型の電磁石を用い、これに高周波電流を流すと高周波磁界が発生し、この磁界内に導電体が存在すると電磁誘導によって渦電流が発生して相互誘導がおこる。検出ヘッドの導電体との距離によってこの相互誘導のリアクタンスが変化するため、検出ヘッドと導電体の間隔が電気的な出力として得られる。このような方式をとることにより、非接触で導電体（金属）の変位測定が可能となる。

このような計測原理は鋼構造物の腐食面測定用という観点からは都合が良く、特に表面塗装を除去することなく測定が行なえるという点で他の手法にはない利点となっている。その反面、磁気を利用した非接触法の欠点として、測定レンジがセンサー径の1/2以下程度で狭い上に（Fig. 1）、センサー径を大きくすると計測位置の分解能が低下して、細かな凹凸を検出できなくなることがあげられる⁷⁾。

b) 渦電流式変位計のセンサーをサーボコントロールした腐食面測定

実際の腐食面の状態を考慮すると、鋼板腐食面計測器の性能の目安として次の3点は必要条件である。

- 腐食の径が10mm程度で、深さ4mmまでの腐食量が測定できる。
- 塗装を除去することなく非接触で測定が行なえる。
- 0.1mm程度の腐食厚測定精度を有する。

これらを満足させるためには、径4～5mmという小型の渦電流式変位計のヘッドを、深さ4mmの凹凸の測定に用い、かつ、ヘッドは測定面から離れているように

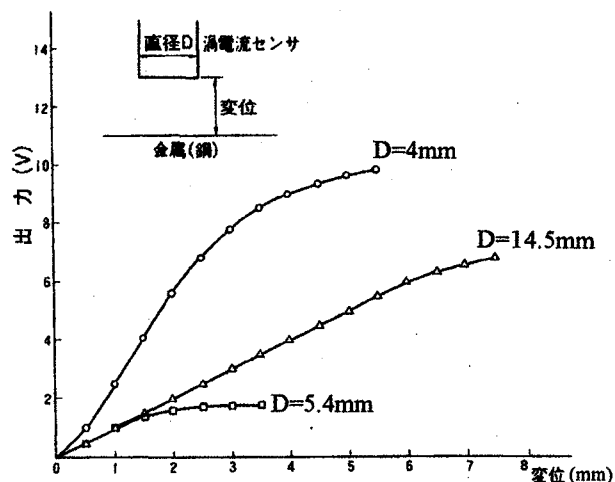
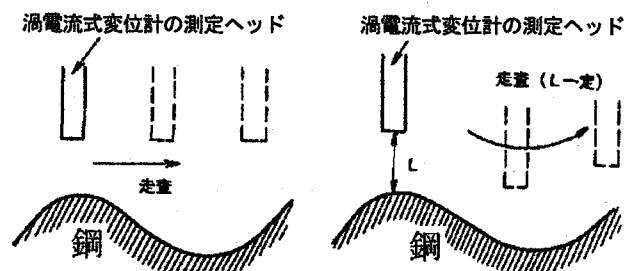


Fig. 1 渦電流式変位計の出力特性の例

する必要がある。4mmの凹凸を測定するには、余裕を含めて6～10mmの測定レンジが要求され、ヘッドを一定の高さに固定しておいて測定面の上を走査するという単純な構造では実現不可能である。そこで、渦電流式測定器の出力を間接的に変位測定に用いることを考える。すなわち、渦電流式変位計のヘッドを上下移動可能な装置に取り付けておき、変位計のヘッドの出力が常に一定となるようにヘッドの位置をサーボコントロールさせる。この時、ヘッド自体は常に対象物表面から等距離にあるため、ヘッドを上下に移動させた量を出力値とすれば表面の凹凸が得られる（Fig. 2）。この方式には、

- ①渦電流式変位計のレンジはそれほど必要とされないため、小口径のヘッドを利用できる。
- ②渦電流変位計の出力の非直線性の影響を直接受けることはない。
- ③ヘッドは表面から一定距離を保って移動するため非接触である。

という特徴があり、前記の必要事項を満足させることができる。



- 渦電流式変位計のみの場合
- 渦電流式変位計とサーボ機構とを組合せた場合

Fig. 2 渦電流式変位計とサーボ機構を組合せて腐食表面形を計測する概念

c) 計測精度の検討

理論的に計測精度を明らかにするのは難しいので、実際の鉄管から切り出した試験片で比較検討することとし、実験室において、次の4種類の計測法で表面形状の計測を行った。

- 1) 針接触式 (最も正確な表面計測法という位置づけ)
- 2) 本論文で計測に主として用いた渦電流式変位計+サーボコントロール方式 (ヘッドの径 4mm)
- 3) 渦電流式変位計のみ (ヘッドの径 14.5mm)
- 4) 渦電流式変位計のみ (ヘッドの径 4mm)

Fig. 3 は腐食のほとんど無い鋼板表面に塗装した場合であり、「針接触」の結果が塗膜表面を示している。「渦電流+サーボ」および「渦電流」は塗膜の有無に関係なく鋼板表面を計測していることが確認できる。Fig. 4, Fig. 5 は塗膜を除去した腐食面についての結果であるが、腐食形状に対する追従性の視点から見て、「渦電流+サーボ」が「針接触」に最も近く、上記2)の方法での現場計測が十分可能と判断した。

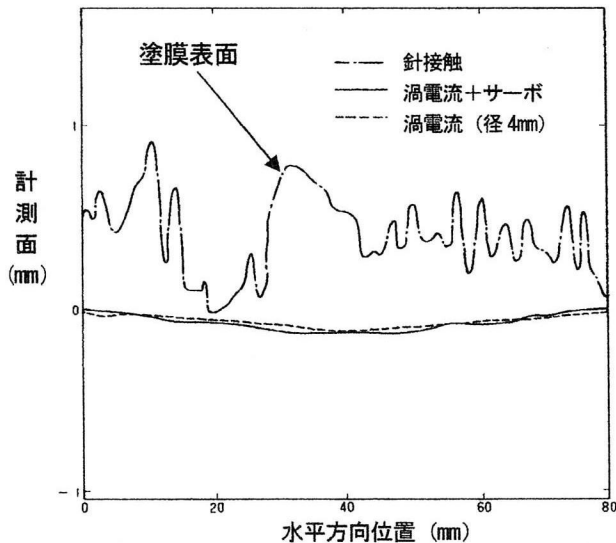


Fig. 3 表面に塗膜のある状態での表面計測結果

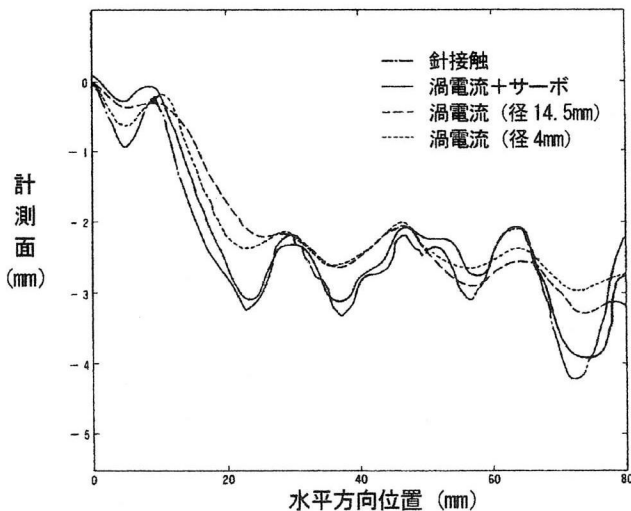


Fig. 4 一様に腐食の大きい試験片での表面計測結果

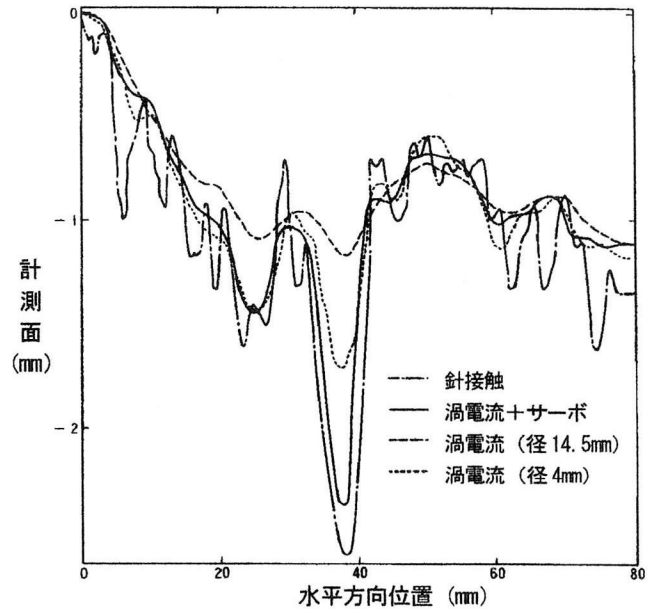


Fig. 5 孔食のある試験片での表面計測結果

(2) 計測対象構造物と計測手順

上記 2) の方式の計測器を用いて大井川水系 7 地点、および阿賀野川水系 5 地点のダムゲート、水圧鉄管を対象に腐食面の計測を行った。これらはすべて計測時点で既に 50 年以上使用されたものであり、現存する構造物の経年劣化の実体を表しているものと考えられる。

Photo 1 に示したようなダムゲートにおいては、主桁ウェブおよびスキンプレーットの腐食した箇所を選択し、また水圧鉄管においては管胴部の腐食した箇所を選択し、2cm 間隔で平行な 5 測線を長さ 25cm でけがき、計測線上を渦電流式変位計のセンサーが移動するようにして、長さ 23cm を 0.5mm ピッチで計測した。

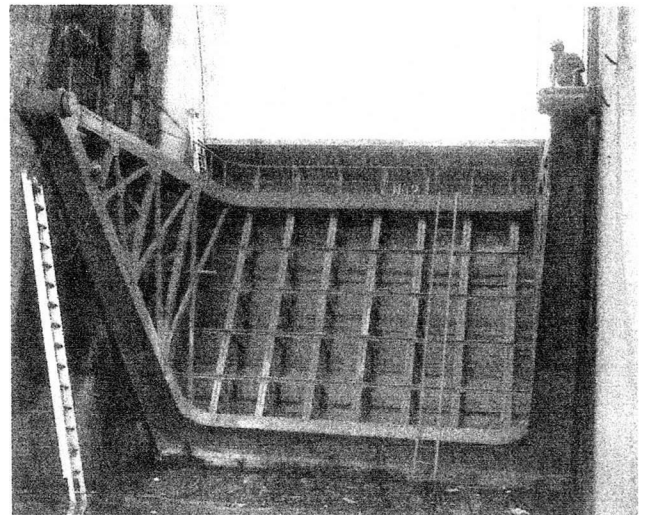


Photo 1 ダム天端のピア間設置された古い洪水吐きゲートの例

(3) 計測結果

腐食の程度を大まかに Table 1 のようにランク分けしたが、ランク A, B に属する腐食面は塗膜上から見る限りきれいであり、所々に点食が見られる程度である。このレベルは経年劣化と言うにあらず、残存耐力評価の対象にもならないので、ランク C, D に属する 8 ケースを選定して検討するものとした。

Photo 2 に Case1~Case8 の腐食面の写真を示し、Fig. 6 に計測結果を示したが、図中、実際の腐食前の面は不明である。したがって、一定の方式で腐食前の面を設定するしかないのであるが、過去の計測結果に照らして言えることは、同じ経過年数であっても構造物毎に置かれた環境および維持管理状態によって、また同じ構造物であっても部材ごとに、また、同じ部材であっても数 mm 位置がずれただけで、大幅に腐食量は異なり得ることである¹³⁾。

ここでは、便宜的に、一つの計測範囲内で腐食の少ない 2~4 程度の点に対して、その周囲の腐食量の 1/30 を目安に板厚を加算することで、腐食前の位置を割り出し、これら複数の点を直線で結ぶことで腐食前の面を定めた。

Table 1 腐食面の腐食程度によるランク分け

ランク	定義	腐食深
A	外見上も板厚測定値も建設時と変わらない状態。	最大 0.3mm 以下
B	部分的に腐食が認められるが、最大でも余裕厚の範囲であり、建設時と力学上何ら変化がない状態。	最大 0.5mm 以下 平均 0.2mm 以下
C	平均腐食量では余裕厚の範囲であるが、部分的に孔食が進行し、力学上、影響が出始めている状態。	最大 0.5mm 以上 2.5mm 以下 平均 0.2mm 以上 0.5mm 以下
D	腐食に伴い、建設時より耐力が低下している状態。	最大 2.5mm 以上 平均 0.5mm 以上

3. 腐食面の統計的性質について

本章では、腐食面の特性を評価し一般化するために、先に示した計測結果の平均腐食量、その標準偏差、各測線間の相関係数および FFT によるパワースペクトル密度を算定し、統計的性質を明らかにする¹⁴⁾。

(1) 平均値、標準偏差および相関係数

Fig. 7 に Case1, 3, 5, 7 の平均腐食量と標準偏差を示す。すべてのケースで平均腐食量が大きくなると、標準偏差も大きくなり、Case 1 以外は変動係数で概ね

0.6~0.7 程度であった。Case1 の場合には、平均値と標準偏差が同等程度で変動係数は約 1 となり、今回のデータ範囲においては特異なケースと考えられる。

次に、すべてのケースおよび各測線のデータを対象に測線間の相関係数を算出した。今回の計測は 2cm 間隔でのデータであり、この程度粗い測線間隔ではその相関係数は概ねゼロとなることが明らかとなった。これは、相関係数について文献 8) にも示されている結果と一致する。

(2) 腐食面の波数特性について

次に腐食波面の波数特性を検討するため、FFT によりパワースペクトル密度を全測線 (8 ケース×5 測線=40 測線) について計算した。その結果を平均腐食量と標準偏差で無次元化して Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここに、 S_z : パワースペクトル密度[mm³]、 $\bar{z}$: 平均腐食量[mm]、 σ_z : 標準偏差[mm]、 λ : 波数[1/mm]を表す。

Fig. 8 より、若干特異な性質を有していた Case1 の測線 1, 2, 3 を除き、縦軸の無次元化スペクトル密度はいずれのケースもほぼ同じであること、また最もパワーの大きいスペクトルピークは無次元波数で約 0.015 であることが明らかとなった。(なお、Fig. 8, Fig. 9 は腐食波面に対する一般的特性を示すものであるため、特異ケース以外は測線の記入を省略した。)

この結果は、今回計測した 40 測線での結果であるため、この特性の普遍性についてデータ蓄積による十分な検証が必要であるが、本論文ではこの特性を一般的な腐食波面に適用できるものと仮定する。この時、腐食波形のパワースペクトルは次の関係式で表される。

<パワースペクトル密度: $S_z(\lambda)$ >

$$\frac{\lambda S_z(\lambda)}{\sigma_z^2} = f(\lambda \cdot \bar{z}) \quad (1)$$

<スペクトルピークを与える波数: λ_{max} >

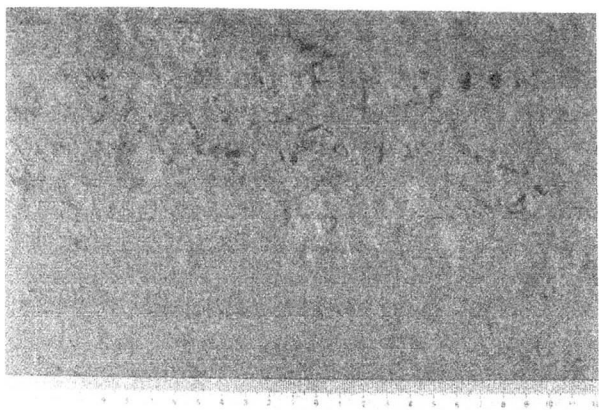
$$\lambda_{max} \cdot \bar{z} \approx 0.015 \quad (2)$$

式(2)より、腐食波形における最も支配的な波長 l_d は、

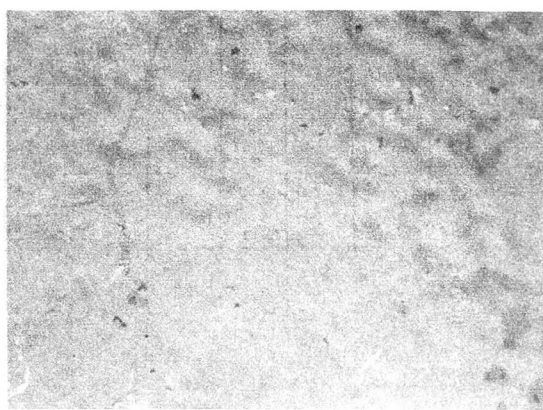
$$l_d \approx 67 \cdot \bar{z} \quad (3)$$

で与えられる。

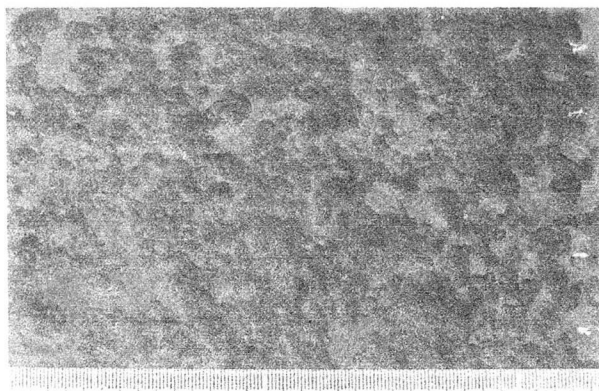
式(1)中、 f は関数であることを意味しており、式の具体的形をどのように近似するかは今後の課題である。式(3)は、平均腐食量と支配的な波長の間に比例関係のあること、すなわち平均腐食量が小さければ波長は短く、反対に平均腐食量が大きければ波長は長くなることを意味しており、維持管理の実務的感覚とも一致し、物理的に妥当と考えられる。



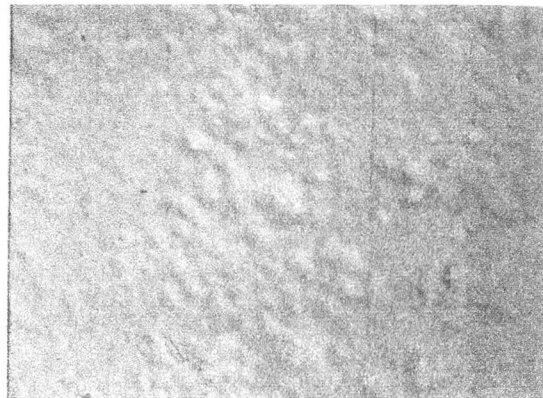
a) Case 1



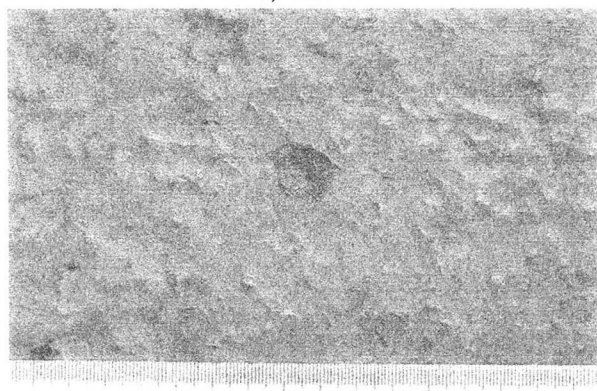
e) Case 5



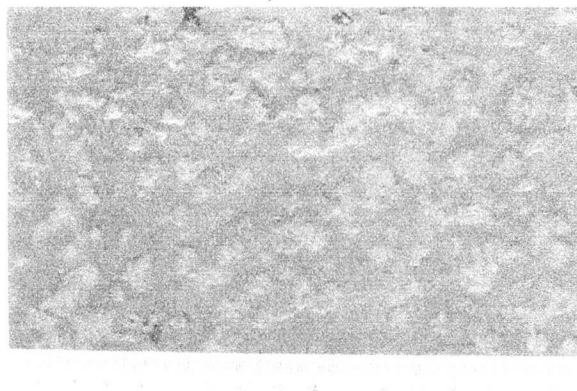
b) Case 2



f) Case 6



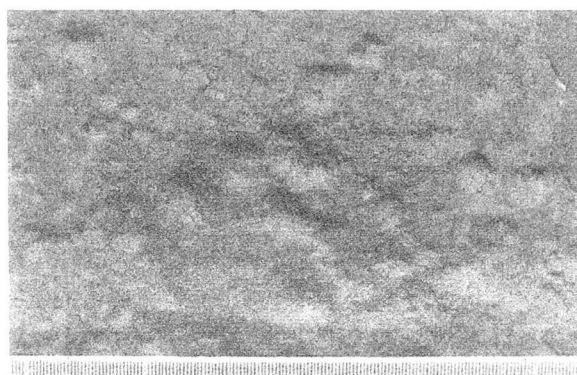
c) Case 3



g) Case 7



d) Case 4



h) Case 8

Photo 2 計測した腐食面 (Case1~Case8)

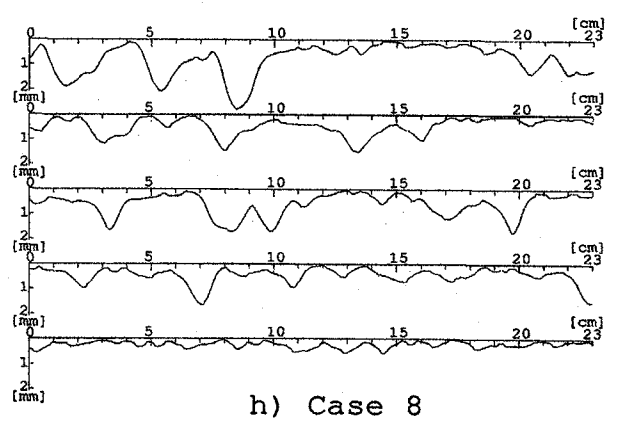
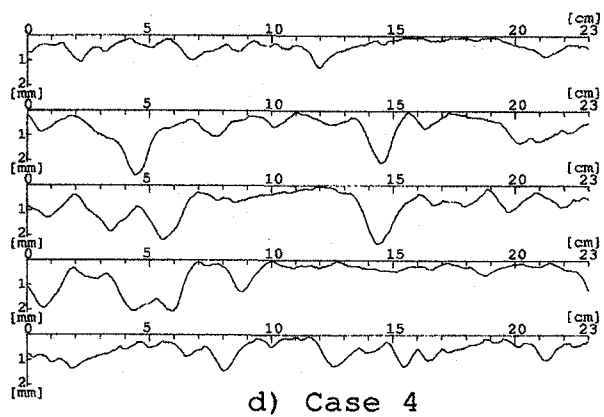
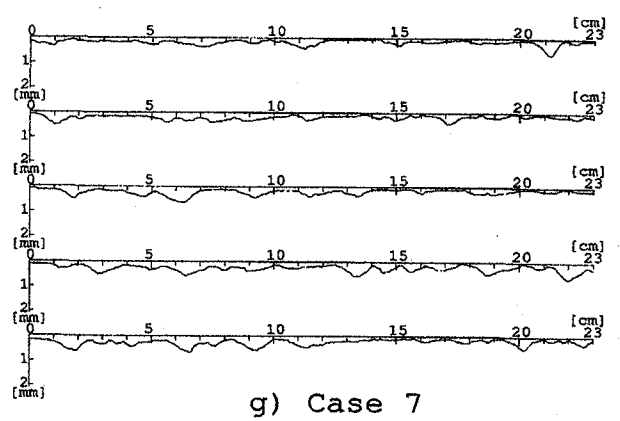
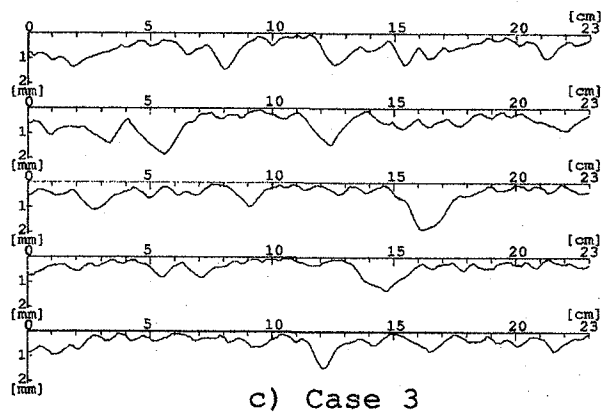
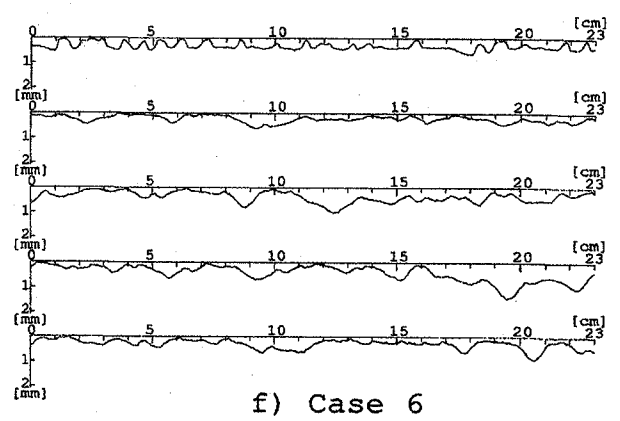
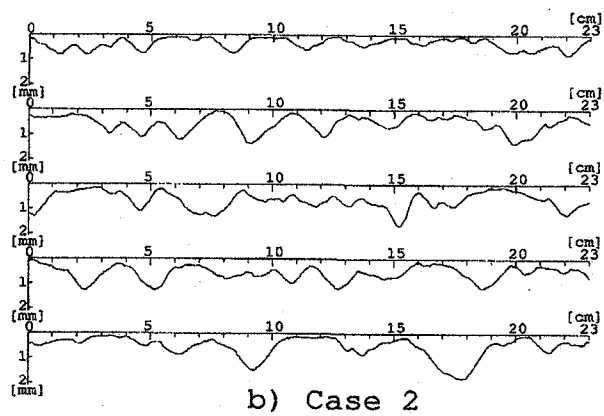
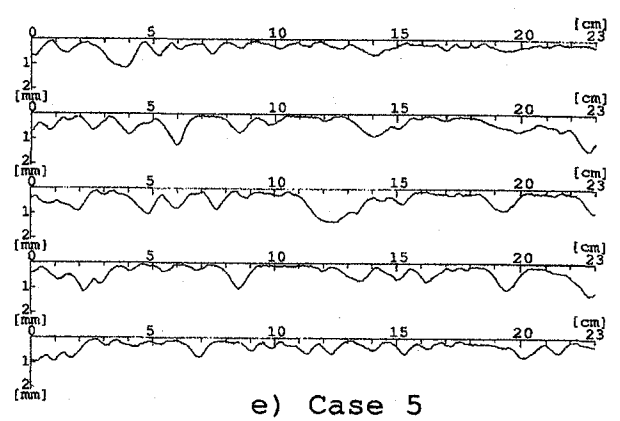
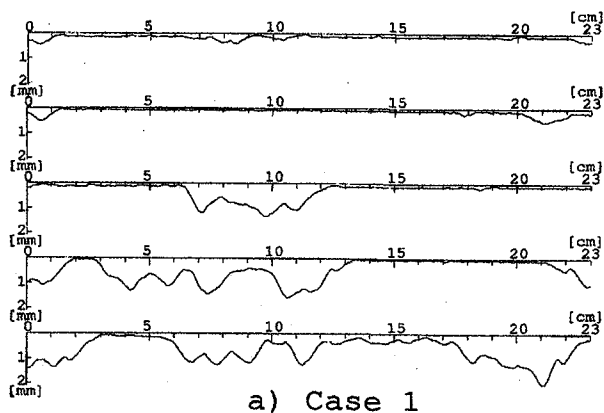


Fig.6 腐食面の計測結果 (Case1~Case8)

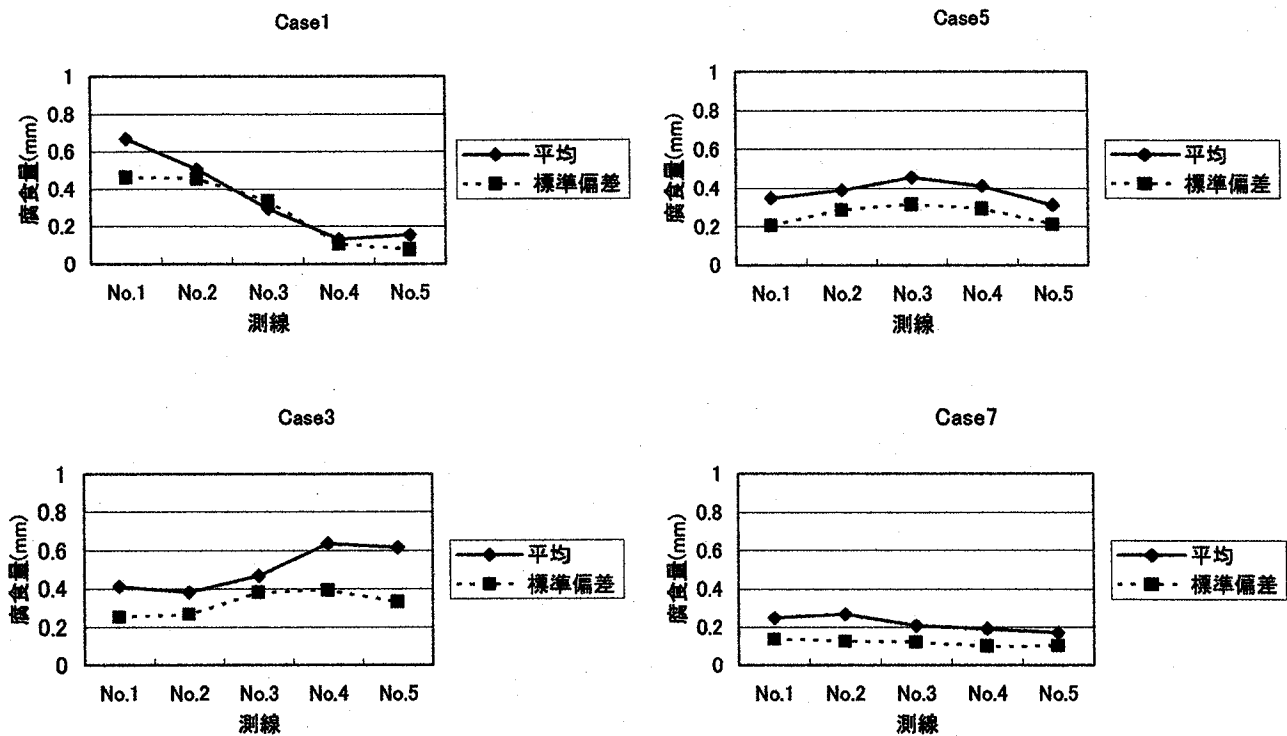


Fig. 7 平均腐食量と標準偏差

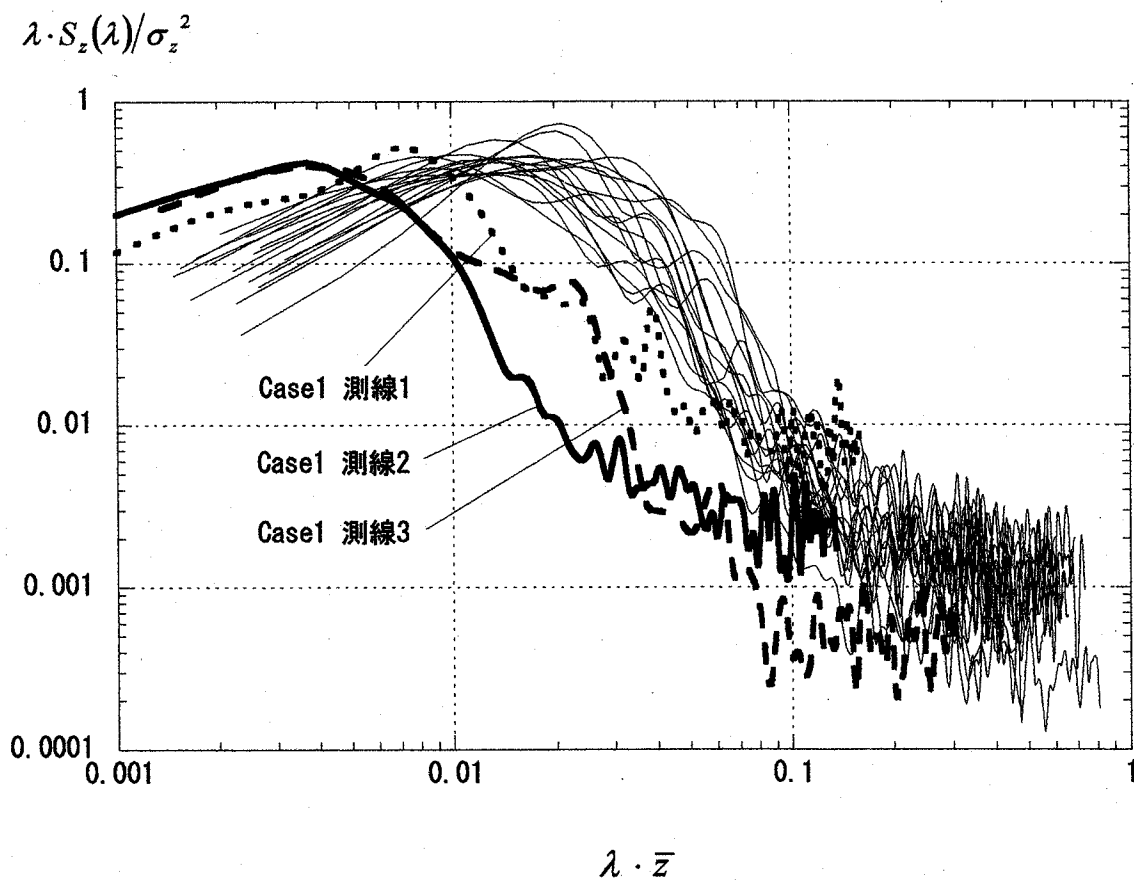


Fig. 8 パワースペクトル密度 (Case1~Case 4)

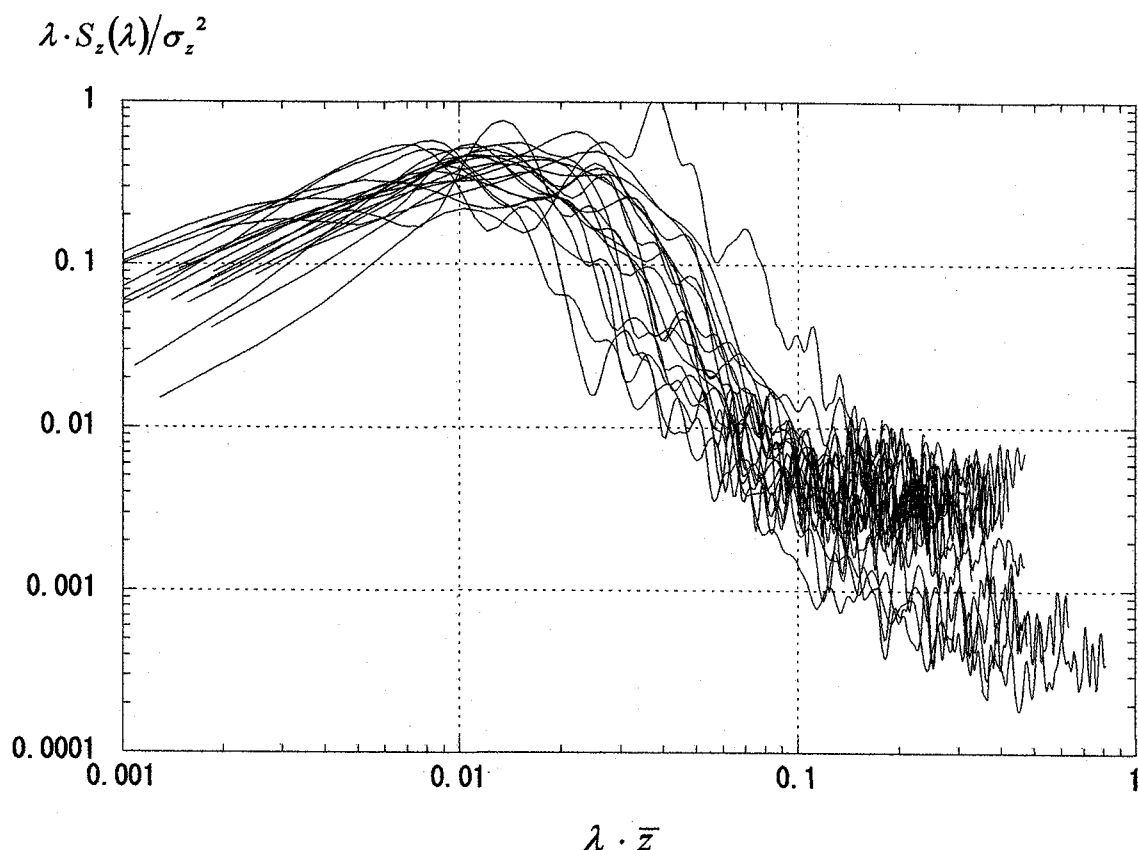


Fig.9 パワースペクトル密度 (Case 5 ~ Case 8)

4. 腐食面の統計量を基にした腐食面の生成

(1) 空間的自己相関法における最大メッシュ幅の設定

これまでに文献 8), 9) で提案している空間的自己相関法では, 計測点が離散的に配置されており, i 番目の計測点の観測された腐食深を Z_i , i, j 間の距離を d_{ij} と表す. この時, j 番目の計測点が受けた独立的外力のみ起因する腐食深 (以下, 独立腐食深と呼ぶ) を V_j とすれば, 距離減衰の強さを表すパラメータ β を用いて Z_i は以下のように表現できる.

$$Z_i = \sum_{j \in \Omega} (e^{-\beta d_{ij}}) \cdot V_j \quad (4)$$

ただし, Ω は空間的な影響を及ぼす領域

独立腐食深 V_j は, ワイブル分布あるいはポアソン分布を有するものとして $\beta = 0.4$ が示されている.

本方法は腐食鋼材の耐荷力評価のための数値解析用腐食面を生成するのに活用することができる. 腐食深を定める点の独立腐食深 V_j を, ワイブル分布あるいは

ポアソン分布を有する乱数で与えることで, 式(4)から Z_i が求まり, コンター図により腐食面を描くことができる. メッシュ幅は 5mm に設定してきた.

しかしながら計測点間のメッシュ幅設定の根拠は明確にされていなかった. そこで, 3. の結果に基づき, 腐食波形における最も支配的な波長を最低限含むことのできるメッシュ幅を最大メッシュ幅 d_{max} とすれば, 次のことが言える. すなわち式(5)に示した最も支配的な波長を再現するためには, 1 波長あたり 5 点必要として,

$$d_{max} = \frac{67 \cdot \bar{z}}{5} \approx 13 \cdot \bar{z} \quad (5)$$

本式に従えば, 生成させたい腐食面の平均腐食量を例えば 0.5mm とした場合には, 最大メッシュ幅は 6.5mm となる. なお, 当然ながら上式は上限値であり, d_{max} 以下とすることが望ましいが, 平均腐食量が大きくなれば d_{max} はさらに大きくとれる. したがって, 以上の考察に基づけば, 5mm のメッシュ幅は妥当であるが, Z_i に波長の概念の入ったスペクトル特性を

Fig. 8, Fig. 9 のような形で持たせられているかの検証は今後の課題である。

(2) AR 法に基づく腐食面の生成方法

空間的自己相関法では、3. に示した波面のスペクトル特性を、陽に考慮されていないため、生成した結果が、有すべき波面のスペクトル形状を再現しているのかどうか不明である。そこで、本章ではスペクトル特性を考慮できる方法として、腐食波面が定常正規確率過程と見なせる場合、その腐食量の統計値（平均値、標準偏差、自己相関関数、相互相関関数）に応じた不規則波面を生成する方法について示す。ここで採用した方法は、不規則波形を自己回帰式に当てはめ、その回帰係数から不規則波形を求める方法（AR 法）であり、風応答解析に必要な多点風速変動の時刻歴波形の生成に広く用いられる岩谷の方法¹²⁾を腐食波面の生成に適用するものである。以下にその概要を示す。

まず、 k 次元の定常不規則変動 $\{u_i(x)\}$ が、適切な大きさの項数 M をとったときに次式の自己回帰モデルによって表されるものとする。

$$\{u_i(x)\} = \sum_{m=1}^M [A_y(m)] \{u_i(x - m\Delta x)\} + \{\varepsilon_i(t)\} \quad (6)$$

ここで、 $[A_y(m)]$ は自己回帰係数マトリックス ($k \times k$ 行列)

$\{\varepsilon_i(t)\}$ は白色雑音ベクトル (k 次)

なお白色雑音は、このうちの 2 組の白色雑音の間でゼロでないラグ距離を有する相関についてすべてゼロとなる特性を有する。

この時、式(6)に $\{u_i(x - r\Delta x)\}$ ($r = 1 \sim M$) を乗じて平均操作を施し、白色雑音の特性を考慮すれば、次式のように変形できる。

$$[R_y(r\Delta x)] = \sum_{m=1}^M [A_y(m)] [R_y((r-m)\Delta x)] \quad (7)$$

ここに、 $[R_y(r\Delta x)]$ は不規則波形の相互相関マトリックス

また、白色雑音の共分散マトリックスは、式(6)の両辺に $\{u_i(x)\}$ ($i = 1 \sim k$) を乗じ、 $\overline{\varepsilon_i(t)u_i(t)} = \overline{\varepsilon_i(t)\varepsilon_i(t)}$ となることを考慮して平均をとれば、

$$[D_y] = [R_y(0)] - \sum_{m=1}^M [A_y(m)] [R_y(m\Delta x)] \quad (8)$$

以上より、必要な M 個のラグ距離に対する自己相関

関数および相互相関関数を定めれば、式(7)より自己回帰係数が定まり、さらに式(8)より白色雑音の共分散マトリックスを求めることができる。従って、式(8)を満たす白色雑音を実現することにより、式(6)から不規則波形を生成することが可能となる。なお、式(8)を満たす白色雑音は、次のようにして求めることができる。

まず、マトリックス $[D_y]$ を三角行列に分解する。

$$[D_y] = [L_y][L_y]^T \quad (9)$$

ここに、 $[L_y]$ は下三角マトリックス、 T は転置

この $[L_y]$ を用いて、次式より目的の $\{\varepsilon_i(t)\}$ が得られる。

$$\{\varepsilon_i(t)\} = [L_y] \{O_i(t)\} \quad (10)$$

ここに、 $\{O_i(t)\}$ は平均値ゼロ、分散 1 の正規乱数。

ここで、実際の腐食波形を実現するためには、 M 個の相互相関マトリックスを与えなければならない。腐食面については、3. で計測データ解析から考察されたパワースペクトルおよびクロススペクトルを与えて、これのフーリエ逆変換から相関関数を求めるのが適当である。ただし、クロススペクトルについては未だ十分な情報は得られていない。

5. 維持管理の実務における板厚計測方法に関する考察

維持管理を目的とした腐食量の調査については、橋梁、その他鋼構造物ごとに管理者が違い、計測方法も異なると思われるが、水力鋼構造物の場合、1 箇所 25 点測定を標準とし、計測位置は 20mm ピッチ、測定領域 80mm × 80mm で、測定には超音波板厚計を使用するのが一般的である。データ整理としては、平均腐食量、標準偏差、最大腐食量などが求められて判定に供せられることが多い¹⁵⁾。

この場合、統計的観点からは、1 箇所 25 点、20mm ピッチの計測値は平均腐食量および標準偏差については実務上十分意味あるものと思われるが、最大腐食量については見逃す可能性も有りえるものと思われる。また、もし、強度評価のために腐食面を生成して数値解析するのであれば、測点間隔が 10mm 以上離れたデータはほとんど独立であるため、従来の方法では波形特性に関する情報はほとんど無いことになる。

したがって、腐食面に方向性が無いものとするれば、一直線上 10cm の距離を 5mm ピッチで 20 点程度計測する、あるいは、もう 1 本平行に 5mm 離れた直線上を同

様に計測することを提案する。このようにした場合でも、同じように最大腐食量を見逃す可能性はあるが、式(1)～式(3)などを活用することで、同数程度の計測点であっても、波形特性についてまで情報が得られる可能性が格段に高くなることは明らかである。

6. 結 び

本論文は、経年劣化した洪水吐きゲート、水圧鉄管を対象として計測した腐食面形状を、不規則波形として解析し、その統計的特性をもとに、腐食面の生成や離散的な板厚計測点の最適間隔などについて検討したものである。

得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 渦電流式変位計をセンサーとして用い、サーボコントロールする方式で、鋼腐食面形状が計測できることを室内実験で確認し、供用中の経年水力鋼構造物に適用して腐食面形状のデータを収集した。
- (2) 平均腐食深が0.5mm～1.0mmに達する程度の8つの腐食面を対象に不規則波面としての統計解析を行った結果、平均腐食深と標準偏差の間には一定の傾向が見られること、1cm程度離れた2測線間の相関はほとんど無くなり、2cm程度離れると全く相関が無くなること、全てのケースのパワースペクトル密度に共通する関係のあることが見出された。さらに、スペクトルピークを与える支配的な波長と平均腐食深の間には、比例関係のあることが見出された。
- (3) 腐食面を生成する観点からは、空間的自己相関法におけるメッシュ間隔5mmは概ね妥当であることが確認できたが、生成される腐食面のスペクトル特性については今後の確認事項である。また、AR法に基づく腐食面の生成方法を示したが、これを適用するにはクロススペクトルを定める必要があるため、腐食面に平行な2方向に1mm～2mmメッシュ程度での腐食面の計測データが必要になることも明らかになった。
- (4) 維持管理の実務的な板厚計測方法について考察し、腐食の平均値、標準偏差以外に波形情報が必要な場合は、平面的にまばらに計るよりも、一直線上を密に計測するほうが有益な情報の多いことを指摘した。

なお、供用中の実構造物の腐食面を密に計測した例は少なく、不規則波形としての統計的考察に利用できるデータは極めて少ないため、本論文では、独自に淡

水湿潤状態にある構造物の腐食面を計測して用いているが、塩水その他の腐食要因によって、また塗膜のメンテナンス状態によって腐食面波形の統計的性質が異なることも考えられる。種々の腐食条件の違いに対する検討も今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 村中昭典・皆田 理・藤井 堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol. 44A，1998. 3
- 2) 松本 勝・白井義朗・中村幾雄・白石成人：腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案，橋梁と基礎，Vol. 23，No. 12，1989
- 3) 北本 真・神藤謙一・氏家禎男：鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響に関する研究，電力土木，No. 273，1998. 1
- 4) 藤井 堅：腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法，第1回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集，土木学会，1999. 7
- 5) 野上邦栄・山沢哲也・小栗友紀・加藤美幸：腐食減厚に伴う曲げ及び圧縮部材の残存耐力評価に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 47A，2001. 3
- 6) 藤原 博・菅野照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究，土木学会論文集，No. 537/I-35，1996. 4
- 7) 中村秀治，他：水力鋼構造物の寿命予測手法の開発，電力中央研究所総合報告：U04，1987. 6
- 8) 奥村誠・藤井堅・塚井誠人：空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化，土木学会論文集，No. 672/VI-50，pp. 109-116，2001. 3
- 9) 藤井堅・海田辰将・平井勝志・奥村誠：腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性，構造工学論文集，Vol. 48A，2002. 3
- 10) 中村秀治・松浦真一・松井正一・寺野隆雄：知識工学的手法に基づく水力鋼構造物の寿命予測，土木学会論文集，No. 368/I-5，1986. 4
- 11) 中村秀治・松浦真一・寺野隆雄・篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測エキスパートシステムとその適用，土木学会論文集，No. 374/I-6，1986. 10
- 12) 岩谷祥美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション，日本風工学会誌，Vol. 11，1982
- 13) 中村秀治・沼崎吉次・小林精一・加藤 治：実測結果から見たテンターゲートの静的構造特性について，土木学会論文報告集，第305号，1981. 1
- 14) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1997
- 15) 通産省資源エネルギー庁：鋼構造物の診断マニュアル（案），1993. 4

(2002年9月13日受付)