

港湾鋼構造物の腐食実態に基づく劣化判定 エキスパートシステムの構築

An Expert System for Deterioration Assessment of Civil Engineering
Steel Structures in Marine Environments

山本広祐*, 工藤康二*, 中村秀治*, 戸村寿一**, 池谷 充**

Kousuke Yamamoto, Kouji Kudou, Hideharu Nakamura, Juichi Tomura and Mitsuru Ikeya

Corrosion deterioration of civil engineering steel structures, such as steel pile piers and sheet pile walls in marine environments, has lately become of interest, and many unsolved problems on corrosion deterioration of the structures are now under investigation in various organizations.

At first, we investigated the actual state of steel pile piers and sheet pile walls in port facilities, and developed a corrosion data-base of the structures. Next, we related the data-base to an expert system for corrosion deterioration assessment of the structures, which had some functions, such as stress check up, judgement of maintenance step, and life time prediction.

In this paper, we described the data-base, and the outline of the whole advising system for corrosion deterioration assessment.

Keywords : corrosion, expert system, data-base, marine environment

1. 緒言

近年、鋼材の腐食による土木構造物の機能低下が顕在化し、鉄鋼構造物を中心に多くの検討がなされている。なかでも、港湾鋼構造物は特に厳しい腐食環境にさらされるため、従来から腐食実態の把握を目的とした板厚測定等が実施され、多くの腐食調査データが蓄積されているが、これを受けて腐食による劣化度を的確に判定する技術の開発が重要になってきている。腐食による劣化度の判定としては、腐食によって生じた減肉量を現地で測定し、力学的な照査を行なうのが一般的であり、既にこの考え方が現行の基準類^{1), 2)}に盛り込まれている。また、より詳細な解析的評価方法も検討されている³⁾が、いずれにしても以下に示す問題点が考えられ、また、蓄積した調査データが実務に有効活用されていないのが実情である。

- ・港湾鋼構造物のメンテナンスでは目視調査（点検）の重要性が認識されている⁴⁾が、目視調査結果と構造耐力の低下が密接に関連付けられていない。
- ・腐食実態を直接測定しなければ力学的な照査が行なわれない。

そこで、港湾鋼構造物を代表する鋼管杭栈橋、鋼矢板護岸を対象に、腐食調査データを収集（文献調査⁵⁾を含む）、整理し、その有効活用を図る目的で腐食データベースを構築した。更に、現地での直接的な腐食調査を行なう前段階として、既設構造物の腐食による劣化状態を簡易に推定するため、腐食データベースと連携し、構造物の応力照査、施設の措置（保守点検）程度の判定、余寿命概算を行なうエキスパートシステムを構築した。

本論文では、港湾鋼構造物の腐食実態、並びに、構築した腐食データベース、劣化判定エキスパートシステムについて、その概要を述べるものである。

2. 港湾鋼構造物の腐食実態

腐食実態は、構造物や構成材の種類及び構造物の設置環境により異なるため、鋼管杭栈橋、鋼矢板岸壁に分けて腐食調査データの収集（文献調査⁶⁾を含む）、整理を行なった。評価項目は、電気防食の有無、鋼材種別、設置地域、及び、深度方向の環境区分とした。平均腐食速度に関する集計結果を表-1～表-4に示す。なお、表中で、近畿と中国は瀬戸内海沿岸、四国は太平洋沿岸のデータが大半である。

2-1 非防食の鋼管杭と鋼矢板に関する部位別の平均腐食速度（表-1）

飛沫部（満潮水位以上）は一般に最も腐食速度の大きい部位であり、集計結果でも平均0.184mm/yrと最も大きい値を示した。この値は、文献¹⁾、²⁾に示される値0.3mm/yrより40%程度小さい値であった。

干満部（干潮水位-1.0mから満潮水位）は最も調査データ数が多く、平均腐食速度で0.110mm/yrを示した。この部位は、過去の調査例でも最も集中腐食が生じ易く、また、海洋生物の付着などで腐食の発見し難い部位で

* 正会員 財団法人電力中央研究所（〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646番地）

** 中川防蝕工業株式会社

ある。文献 1) , 2) でも過去の調査結果に基づきバラツキが多いことを考慮して、平均腐食速度を0.1~0.3 mm/yrと幅のある値としている。

海中部（干潮水位-1.0m以深）の平均腐食速度は、飛沫部や干満部に比較すると小さく、平均腐食速度で0.093mm/yrである。この部位も干満部と同様に集中腐食を生じ易いため、文献 1) , 2) では0.1~0.2mm/yrと幅のある値を採用している。

干満部や海中部の腐食速度がバラツキ、局部腐食を生じ易いのは、海洋生物の付着の差や、深度方向に対する溶存酸素や溶存塩類の差により、通気差電池や酸素濃淡電池等のマクロセルが生じ易いためである。

2-2 非防食の鋼管杭と鋼矢板に関する地域別の平均腐食速度（表-1）

飛沫部は、調査データが少ないため地域別の評価が行えなかった。

干満部の平均腐食速度の最も大きい地区は、北陸の0.166mm/yrで、順に関東（0.145）、北海道（0.135）となり、また腐食速度の小さい地区は、九州（0.062）、東海（0.066）、中国（0.075）の順であった。

海中部の平均腐食速度の最も大きい地区は、北海道の0.122mm/yrで、順に四国（0.113）、関東（0.110）となり、また腐食速度の小さい地区は、沖縄（0.045）、九州（0.055）、近畿（0.060）の順であった。

この結果から、地域性について必ずしも決定的な傾向は見出せないが、概して西日本（暖流海域）の方が腐食速度が小さいことが指摘できる。日本の周辺海域の水温差は最大17℃といわれているが、水温差による溶存酸素量の差（水温が低い方が大きい）や波浪等による酸素の拡散の方が腐食に対する影響が大きいものと推察される。なお、この他に海洋生物の影響も考えられるが、その程度は明確ではない。

2-3 非防食の鋼管杭と鋼矢板

に関する鋼材種別の平均腐食速度（表-2、表-3）

今回の集計の約1/3が鋼管杭、約2/3が鋼矢板であった。鋼管杭及び鋼矢板の平均腐食速度は、干満部で鋼管杭が0.119mm/yr、鋼矢板が0.106mm/yr、海中部で鋼管杭が0.100mm/yr、鋼矢板が0.090mm/yrと若干ではあるが鋼矢板の方が小さい傾向にあった。鋼矢板の場合、陸側の土壌中の腐食も受けていることを考えると、さらに腐食速度は小さい傾向にあるといえるが、鋼矢板には若干Cuが添加されているため鋼管杭より耐食性が良いものと思われる。

2-4 電気防食中の鋼管杭と鋼矢板に関する平均腐食速度（表-4）

電気防食の効果が若干低減する干満部では0.032mm/yr、電気防食の効果がほぼ発揮できる海中部では0.023mm/yrの値を示した。この結果から、電気防食の効果が顕著であることが実態として理解できる。

3. 腐食データベースの構築^{*)}

収集（文献調査^{*)}を含む）、整理した腐食調査データをもとに、個別地点、地域別の2つのデータベースを構築した。主なデータ格納項目は表-5に示す通りであり、16ビットパソコン上でデータベース用のパッケージソ

表-1 鋼管杭と鋼矢板の平均腐食速度【電気防食無し】

	平均腐食速度(mm/yr)		
	飛沫部	干満部	海中部
北海道	0.141	0.135	0.122
東北	—	0.114	0.084
関東	0.233	0.145	0.110
東海	—	0.066	0.061
北陸	0.163	0.166	0.103
近畿	0.045	0.082	0.060
中国	—	0.075	0.075
四国	—	0.118	0.113
九州	—	0.062	0.055
沖縄	0.220	0.097	0.045
全国	0.184	0.110	0.093

注) 下線部は3地点以下のデータによる

表-2 鋼管杭の平均腐食速度【電気防食無し】

	平均腐食速度(mm/yr)		
	飛沫部	干満部	海中部
北海道	0.222	0.204	0.173
東北	—	—	—
関東	0.233	0.180	0.137
東海	—	—	—
北陸	0.141	0.165	0.108
近畿	0.045	0.087	0.071
中国	—	0.074	0.064
四国	—	0.093	—
九州	—	0.065	0.066
沖縄	—	—	—
全国	0.191	0.119	0.100

注) 下線部は3地点以下のデータによる

表-3 鋼矢板の平均腐食速度【電気防食無し】

	平均腐食速度(mm/yr)		
	飛沫部	干満部	海中部
北海道	0.059	0.130	0.118
東北	—	0.114	0.084
関東	—	0.127	0.095
東海	—	0.066	0.061
北陸	0.193	0.167	0.096
近畿	—	0.079	0.055
中国	—	0.077	0.102
四国	—	0.124	0.113
九州	—	0.060	0.047
沖縄	0.220	0.097	0.045
全国	0.162	0.106	0.090

注) 下線部は3地点以下のデータによる

表-4 鋼管杭と鋼矢板の平均腐食速度【電気防食有り】

	平均腐食速度(mm/yr)		
	飛沫部	干満部	海中部
北海道	—	0.077	0.054
東北	—	—	—
関東	0.060	0.023	0.017
東海	—	0.053	0.035
北陸	0.116	0.033	0.024
近畿	0.040	0.024	0.023
中国	—	0.003	—
四国	—	—	—
九州	—	0.024	0.023
沖縄	—	0.038	0.026
全国	0.064	0.032	0.023

注) 下線部は3地点以下のデータによる

フトウェアを使用して構築した。地域別データベースは、個別地点データベースを地域別（全国10地域、及び全国平均）に編集、整理したものであり、劣化度の判定を行なう地点のデータがない場合、または、個別地点データベースの一部に欠損がある場合に利用する。なお、最大、最小腐食速度は、地点特有のデータと判断し、地域別データベースには含めていない。

表－5 データベースの主要な格納項目

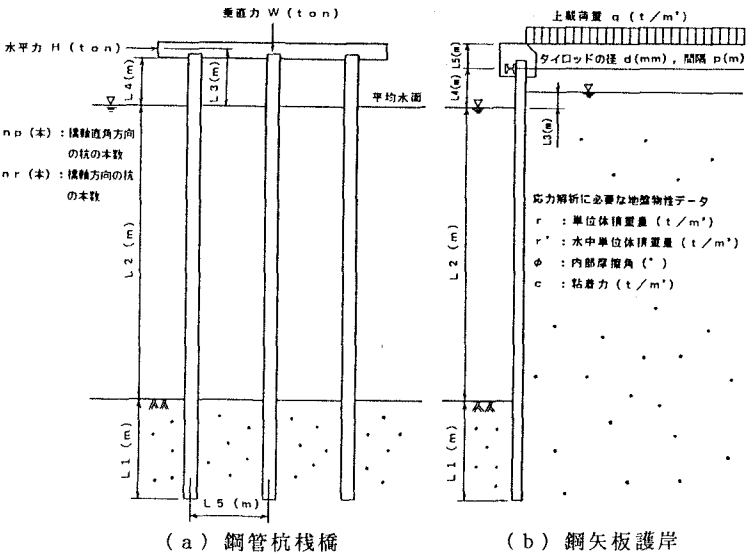
個別地点データベース	地域別データベース
地点名	地域名
使用鋼材	使用鋼材
電気防食の有無	電気防食の有無
飛沫部の最大，最小，平均腐食速度	飛沫部の平均腐食速度
干満部の最大，最小，平均腐食速度	干満部の平均腐食速度
海中部の最大，最小，平均腐食速度	海中部の平均腐食速度
各部の測定箇所数	各部の測定地点数
防食期間	
非防食期間	

4. 劣化判定エキスパートシステムの構築⁷⁾

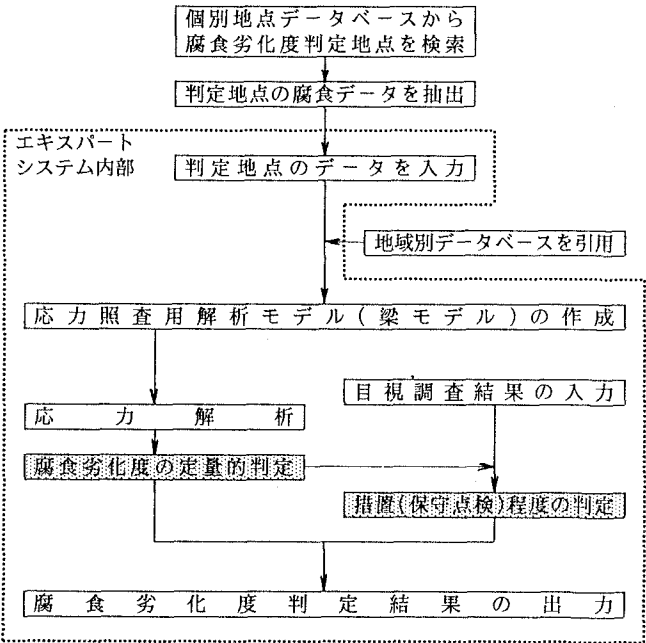
港湾鋼構造物を代表する鋼管杭栈橋、鋼矢板護岸（図－1）を対象に、16ビットパソコン上で劣化判定エキスパートシステムを構築した。本システムの全体構成と流れは図－2に示す通りである。開発言語としては、A I言語であるOPS83⁸⁾とC言語（応力解析のみ）を使用した。

4－1 港湾鋼構造物の腐食劣化度の判定手順

現行基準類^{1)・2)}に示される腐食劣化度の判定手順は図－3に示す通りである。通常、構造物の機能維持を確認するため定期点検が行なわれるが、腐食または防食材の劣化や損傷が著しい時、構造物が所定の健全度を維持しているか検討し、必要に応じて対策を講じるものとされている。開発したシステムは、現地における直接的な腐食調査の前段階に位置付けており、腐食による劣化状態を簡易かつ定量的に推定することを目的としている。

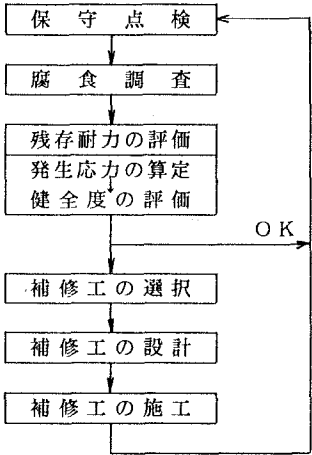


図－1 対象構造物の概要



：推論処理を行なう部分

図－2 本システムの全体構成と流れ



図－3 現行基準類による腐食判定、及び補修手順

4-2 応力解析、劣化判定に使用するデータ

劣化判定に必要なデータは、対象構造物の構造諸元（図-1中に示す記号の値）、目視調査結果、及び腐食データである。腐食データは、個別地点データベースから地点を検索（選定）、抽出することにより作成する。判定を行なう地点のデータがない場合、または、データの一部分に欠損がある場合、近接する他地点のデータ、あるいは、地域別データベースから該当地域の平均的なデータを引用する。従って、腐食データベースを有効活用し、現地で腐食調査を行なう前段階として施設の劣化状態を類推することができる。応力解析では、腐食データをもとに各部の残存板厚を求め、構造諸元に基づいて変断面杭、変断面矢板を応力照査用の解析モデル（梁モデル）として作成する。変断面杭、変断面矢板は、飛沫部、干満部、海中部、及び海底土中部の4区分を断面変化の境界とする。海底土中部の腐食速度はデータベースに格納されていないが、文献1）、2）に示される値を根拠に設定している。鋼矢板護岸を背面から支持するタイロッドの腐食については、調査データによる裏付けがないため現時点では考慮していない。

4-3 応力解析

構造物の劣化判定を行なう場合、個々の力学的な実態を正確に評価することが重要である。設計計算式は、多数提案されているが、栈橋基礎の支持条件、護岸背面の土圧分布等は不明確な場合が多く、また、統一的に評価し得ない要素が多いため、最も一般的な理論を共通の基盤として用いるものとした。鋼管杭栈橋に関してはChangの弾性支持杭理論（仮想固定点法）を、鋼矢板護岸に関してはRankineの土圧理論を発生応力の算定根拠とした。

(1) 鋼管杭栈橋の応力解析¹⁾

Changの仮想固定点法では、杭の固定点を海底面下 $1/\beta$ にあるものと仮定し、以下の計算式により曲げモーメント分布を算定する。

仮想固定点

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{K_h D}{4 E I}} \quad \dots\dots\dots \text{(式-1)}$$

ここに、 K_h ：横方向地盤反力係数（実測できない場合には $K_h=0.15N$ としてよい。）

D ：鋼管杭の直径

$E I$ ：鋼管杭の曲げ剛性

N ：地盤の $1/\beta$ 近辺までのN値

杭頭モーメント

$$M_0 = \frac{1}{2} (h + \beta^{-1}) H_1 \quad \dots\dots\dots \text{(式-2)}$$

ここに、 H_1 ：杭1本あたりの水平力

h ：水平力の作用高さ（海底面から）

地中部最大曲げモーメント

$$M_{\max} = H_1 h \sqrt{\frac{1 + (\beta h)^2}{2 \beta h}} \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{\beta h}\right) \quad \dots\dots\dots \text{(式-3)}$$

座屈耐力の評価は、全体座屈として仮想固定点をヒンジ点、杭頭を回転拘束点とし、Euler座屈に対する照査を行なう。局部座屈は、API (American Petroleum Institute) の以下の実験式²⁾を根拠に照査を行なう。

$$P_{\max}/P_y = 1.64 - 0.23 (D/t)^{0.25} \quad \dots\dots\dots \text{(式-4)}$$

ここに、 $P_{\max}$ ：局部座屈荷重

P_y ：試験体の降伏応力×断面積

t ：鋼管杭の板厚

(2) 鋼矢板護岸の応力解析

Rankineの土圧理論より主働土圧荷重、受働土圧荷重を求め、タイロッドの取付け点、及び根切り点での曲げモーメントの釣合条件から、タイロッドの張力、必要根入れ長さ、曲げモーメント分布、せん断力分布を算定する。なお、座屈耐力の評価は行なわない。

(3) 腐食領域と応力評価箇所

鋼管杭栈橋の場合、仮想固定点をヒンジ点、杭頭を回転拘束点として設計する。この場合、杭頭または海底面直下に大きな曲げモーメントが発生することが知られている。海底土中部の腐食は他の箇所より1桁小さいため、腐食による残存耐力の照査は、最も腐食を生じやすい飛沫部で行なえばよい。但し、本システムでは対象としなが、終局耐力を評価する場合、杭頭固定部の破壊¹⁾と飛沫部での降伏応力の超過のいずれが先行するかを十

分検討しなければならない。

一方、鋼矢板護岸の場合、タイロッドの取付け点と根切り点をヒンジ点として設計する。この場合、タイロッドの取付け点と根切り点との中央付近に最大曲げモーメントが生じるため、海中部の腐食の把握が重要となる。但し、タイロッドとコンクリート（及び鉄筋）との接触部や、タイロッドの土壌中腐食には注意が必要である。

4-4 腐食劣化度の定量的判定

腐食劣化度の定量的判定は、応力解析結果と腐食評価との関連に、従来の知見を交えて定量的な判定を行なうものである。応力解析では、鋼管杭、鋼矢板に発生する曲げ応力、せん断応力、軸圧縮応力、座屈耐力を算定、照査し、発生応力レベルを類別する。腐食評価では、各地点の平均腐食量と最大腐食量（局所的な腐食や孔食）を関連させて、腐食状態を総合的に評価する。腐食データに基づいた応力照査とは別に、腐食評価を行なう理由は、以下の事項を確認することにある。

- ・応力的には問題がなくても、設計時に期待した構造耐力が大幅に減少していないか。
- ・平均腐食量に基づく耐力評価が行えないほど、局所的な腐食や孔食が進展していないか。

応力解析結果と腐食評価に基づく劣化度の定量的判定は、5種類のデシジョンテーブルを用いて図-4に示す手順で行なわれ、最終的に以下の判定を提示する。

- ・特に措置を講じる必要はなく、通常の点検で十分である。（ランクA）
- ・腐食劣化が進行し始めており、重点的に点検する必要がある。（ランクB）
- ・腐食劣化が進行しており、その防止に関する対策を検討する必要がある。（ランクC）
- ・腐食劣化により構造耐力が大幅に減少しており、緊急に措置を講じる必要がある。（ランクD）
- ・腐食は少ないが、設計に余裕が少ないため、今後の点検には注意が必要である。（ランク特1）
- ・設計には余裕が大きい、腐食がかなり進展しており、今後の点検には注意が必要である。（ランク特2）

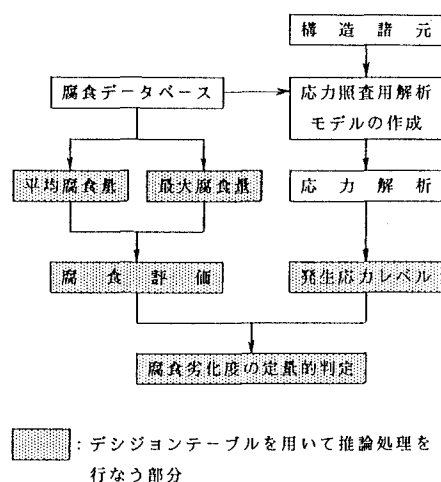


図-4 定量的判定の流れ

4-5 措置（保守点検）程度の総合判定

目視調査は、通常、6カ月に1度の頻度で実施されている¹¹⁾。目視調査結果の判定（目視判定）は、

- ・赤味を帯びた錆が見られないか、散見される程度で、集中腐食は生じていない。（ランクⅠ）
- ・赤味を帯びた錆がある程度見られるが、集中腐食は生じていない。（ランクⅡ）
- ・赤味を帯びた錆がかなり見られ、集中腐食の可能性がある。（ランクⅢ）
- ・赤味を帯びた錆が顕著に見られ、集中腐食の可能性が大きい。（ランクⅣ）

程度に分類され¹¹⁾、変状の大きさにより現地において腐食調査が実施される。しかしながら、頻繁に行なわれる目視調査は必ずしも施設の定量的な評価に密接に関連付けられていない。従って、措置程度の総合判定では、目視調査結果を腐食データに基づいた定量的判定結果で検定し、施設（構造物）の将来的な措置（保守点検）程度を判定することを目的としている。判定（検定）基準は、表-6に示す通りである。

なお、別途、設計時断面に基づく応力解析結果と、現在の腐食減肉した断面に基づく応力解析結果から、腐食に伴う経年変化を推定し、余裕厚が消失するまでの年数、及び許容応力を超過までの年数を概算する。

5. 結言

本論文では、鋼管杭栈橋、鋼矢板護岸を対象に、腐食データベースを作成し、腐食特性の分析を行なった。地域、鋼材種別の腐食特性に明確な差異は認められず、非防食鋼材では平均腐食速度が0.1mm/yr（海中部）～0.2mm/yr（飛沫部）程度、防食鋼材では0.02mm/yr（海中部）～0.06mm/yr（飛沫部）程度であった。

更に、鋼管杭栈橋、鋼矢板護岸の劣化状態を判定する方法・知識を整理し、腐食データベースの情報をを用いて腐食による劣化度を簡易に推定できるエキスパートシステムを構築した。また、腐食劣化度を判定する上で重要となる腐食領域と応力評価箇所の関連を考察した。今後、本システムを実構造物に適用することにより機能の向上、整備を図っていく。

表－6 措置（保守点検）程度の判定（検定）基準

目視判定 定量的判定	I	II	III	IV
A	定量的判定と目視判定が対応する。	定量的判定と目視判定が対応する。	特2に同じ	特2に同じ
B	ほぼ対応するが、若干目視判定の方が甘い ため、今後の点検には注意が必要。	定量的判定と目視判定が対応する。	定量的判定と目視判定が対応する。	特2に同じ
C	特1に同じ	ほぼ対応するが、若干目視判定の方が甘い ため、今後の点検には注意が必要。	定量的判定と目視判定が対応する。	定量的判定と目視判定が対応する。
D	特1に同じ	特1に同じ	ほぼ対応するが、若干目視判定の方が甘い ため、今後の点検には注意が必要。	定量的判定と目視判定が対応する。
特1	定量的判定と目視判定が対応しない。設計には余裕が少なく、今後の点検には十分注意が必要である。			
特2	定量的判定と目視判定が対応しない。設計には余裕があるが、今後の点検には注意が必要である。			

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：“港湾の施設の技術上の基準・同解説（改訂版）”，1989.6
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：“港湾鋼構造物補修マニュアル”，1986.3
- 3) 松井 創：“杭腐食の進行した栈橋の耐力の計算手法について”，運輸省港湾技術研究所，昭和63年度講演会講演集，1988.12
- 4) 横井聰之，阿部正美：“港湾鋼構造物の腐食の実態について”，土木学会論文集，第403号／VI-10，1989.3
- 5) 阿部正美，横井聰之，大即信明，山本邦夫：“港湾鋼構造物の腐食調査資料集”，運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料 No.628，1988.9
- 6) 山本広祐，中村秀治，工藤康二：“火力発電施設における土木鋼構造物の腐食実態調査”，電力中央研究所報告，調査報告 U89029，1989.10
- 7) 山本広祐，中村秀治，工藤康二，篠原靖志：“火力発電所港湾鋼構造物の腐食劣化度判定システムの構築”，電力中央研究所報告，研究報告 U89053，1990.3
- 8) C.L.Forgy：“人工知能用言語 OPS 83”，パーソナルメディア(株)，1986.12
- 9) American Petroleum Institute (API)：“Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms”，API RP2A，1982
- 10) 杉村義広，平出 務 編：“杭頭接合部の力学的挙動に関する研究”，建設省建築研究所，建築研究報告 No.129，1990.9
- 11) 西脇芳文，吉田昭夫，長内 進：“火力発電所土木設備の保守管理について”，電力土木，No.218，1989.1