

腐食した鋼線材の曲げ疲労耐久性に関する実験的研究

An experimental study on bending fatigue durability of corroded steel wire.

大西弘志*, 松井繁之**

Hiroshi Onishi, Shigeyuki Matsui

*工修, 大阪大学大学院助手, 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 工博 大阪大学大学院教授, 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

The major severe deterioration in steel road bridge is fatigue failure of decks and damages due to corrosion. Especially, the corrosion problems are most serious ones in cable members used in prestressed concrete structures, cable stayed bridges, suspension bridges and so on. Because the cable members in these structures are the most important members to keep performance of structures. Then many research works about this problem were carried out. However, in most of these previous research works, the relation between corrosion damage and reduction of mechanical performance in cable members is not clear.

The authors carried out some research works related this problem. In former works, the authors find out the relation between the surface profiles and remaining performance in corroded steel wire. But, these works are carried out under static condition. Then the authors carried out fatigue test with corroded steel wire to investigate the fatigue durability.

Key Words: corrosion, steel wire, fatigue durability, surface profiles

キーワード: 腐食, 鋼線材, 疲労耐久性, 表面形状

1. はじめに

わが国における橋梁架設状況の変遷を調査した結果¹⁾によると, わが国における橋梁の架設数は1960年代以降に急速に増加し, 1961年~1990年の期間に現在供用されている橋梁の大部分の架設がなされたことが良く知られている(図-1参照). これらの橋梁は2011年以降, 次々に供用年数が50年を超過し, 老朽化に伴う機能の低下とそれに伴う社会的影響が懸念される. 現在の社会情勢においては, 橋梁の老朽化に対する対策としての橋梁の更新は現実的ではないと思われ, 橋梁の維持管理を適切に行うことによる既存橋梁の延命化と維持管理予算の平準化が必要であると認識されている.

さらに前述の橋梁架設数に関する調査の結果を詳細に見てみると, 1976年を境として架設されている橋梁種の割合に変化が生じている. 図-1に示された橋梁架設数の合計を1975年以前と1976年以降とに時期を分けて橋梁種毎に算出した結果を図-2に示す. 1975年以前では鋼橋の架設数が全体の44%にあたる31125橋であり, 鉄筋コンクリート(RC)橋は19014橋(27%), プレストレストコンクリート(PC)橋は17352橋(24%)となっている. これに対し, 1976年から2000年の間に架設された橋梁ではPC橋が29798橋(48%)と最も多く, 次いで鋼橋(22384橋: 37%), RC橋(7047橋: 12%)の順になっており, 近年ではPC橋がより多く建設される傾向が認められる.

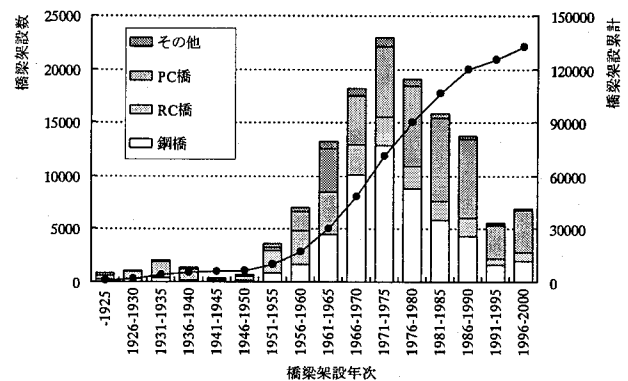
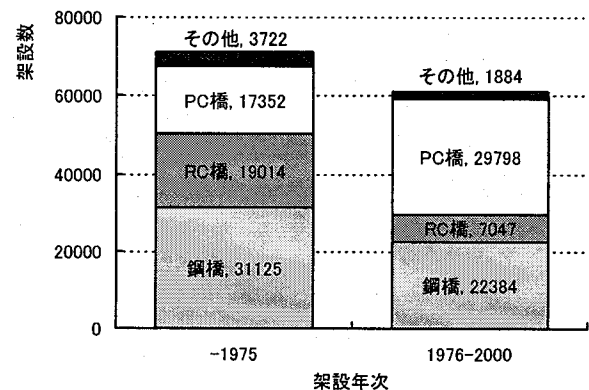
図-1 橋梁架設数の変遷¹⁾

図-2 橋梁種毎の架設合計の比較

また、わが国における橋梁の架替えの理由を調査した報告²⁾によると、橋梁の架替え理由の大きなものは鋼材の腐食と床版の破損であると報告されている。これらの中でも鋼材の腐食に関してはこれまでも研究が進められているものの、鋼材に発生した腐食損傷の状態と部材の性能低下との関係に着目した研究では、鋼板を調査の対象とした研究³⁾が多く、PC橋で使用されているような鋼線材に関する研究では腐食損傷の調査が極めて簡単なものしかなされていないものが多い。しかしながら、近年においては一部のPC橋においてグラウトの充填不足などの要因によりPC鋼線にも腐食損傷が認められる事例が報告されるようになってきており、これらの腐食損傷によりどの程度の性能低下が引き起こされているのかを精度よく評価する手法の確立が求められている。

以上のことから、著者らはこれまでも腐食損傷を有する鋼線材やPC鋼棒を対象とした調査・研究を実施してきた^{4), 5)}。しかしながら、これまでの研究では腐食損傷の発生状態と損傷を受けた鋼線、PC鋼棒の静的な挙動との関係を明らかにするのに留まっていた。そこで、本研究では人工的に腐食損傷を発生させた鋼線材の腐食状態を詳細に調査し、その鋼線を用いて疲労試験を行うことにより鋼線材における腐食損傷の発生状態と疲労耐久性の関係を明らかにすることを試みた。

2. 実験の概要

本研究では、鋼線材における腐食損傷の発生状態と疲労耐久性との関係について調査を行うために次の2つの段階に分けて実験を実施している。

- 1) 供試体に対して環境促進試験を行うことにより人工的に腐食損傷を発生させ、その状況を詳細に調査する。
- 2) 曲げ疲労試験機を用いた疲労試験により曲げ疲労に対する耐久性を調査する。

ここでは、これらの実験の段階に沿って説明を加えていくことにする。

2. 1. 供試体

本研究で使用した供試体の形状の一例を図-3に示す。供試体の全長は100mmであり、そのうち中央の40mmの区間に腐食損傷を与えることにした。供試体の直径は5mmと7mmの2通りである。供試体の両端の30mmの区間は曲げ疲労試験に際して供試体を試験機に固定するための部分である。環境促進試験により供試体に腐食損傷を与える際にはこの部分に対して粘着テープを巻きつけて保護工とした。

供試体を使用した材料の物性を表-1に示す。本研究では次の5種類の供試体を用いている。

- 1) 実橋梁から採取した直径7mmのPC鋼線 (Act7)
- 2) 直径5mmで未使用の鋼線 (Nom5)
- 3) 直径7mmで未使用の鋼線 (Nom7)
- 4) 直径5mmの亜鉛メッキされた鋼線 (Zinc5)
- 5) 直径7mmの亜鉛メッキされた鋼線 (Zinc7)

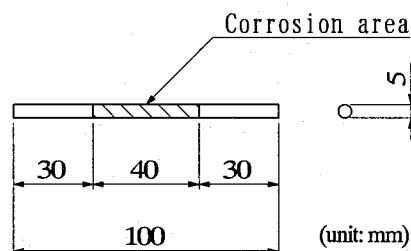


図-3 供試体形状 (直径5mm)

表-1 供試体の物性

供試体名	直径 (d: mm)	弾性係数 (MPa)	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)
Act7 (Actual bridge)	7	2.15×10^5	1470	1645
Nom5 (Normal wire)	5	2.23×10^5	1530	1778
Nom7 (Normal wire)	7	2.16×10^5	1554	1762
Zinc5 (Galvanized wire)	5	2.23×10^5	1631	1845
Zinc7 (Galvanized wire)	7	2.1×10^5	1425	1664

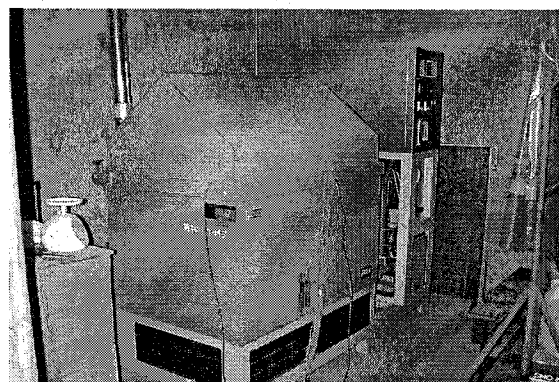


写真-1 塩乾湿複合サイクル試験機

表-2 環境促進試験環境

STEP	状態	温度	湿度	時間
1	塩水噴霧	35℃	98%	4時間
2	乾燥	60℃	***	2時間
3	湿潤	50℃	***	2時間
塩水濃度		5%		

注)「***」は測定不能 STEP2では0%, STEP3では100%に試験機を設定した。

本研究ではこれらの供試体のうち、Nom5供試体を基本の供試体とし、Nom7を寸法の違いによる影響を見るための供試体、Zinc5、Zinc7を亜鉛メッキによる防食効果を確認するための供試体としている。また、Act7は実橋梁が撤去されるのに際して採取された供試体であり、実橋梁供用期間中に受けた影響により、どのように挙動が変化するかを確認するための供試体とした。

2. 2. 環境促進試験

本研究では供試体に腐食損傷を与えるために、供試体に対し

て写真-1 に示す塩乾湿複合サイクル試験機（スガ試験製、ISO-3-CY・R）を用いた環境促進試験を実施した。環境促進試験の際に採用した試験条件を表-2 に示す。この環境は塩水噴霧の後に乾燥・湿潤のサイクルを加えることにより、より厳しい腐食環境を実現しており、これまでも鋼材に対して速やかに腐食損傷を与えることのできる試験環境であると評価されている⁹⁾。

環境試験においては表-2 に示されている STEP1~3 の試験環境を順番に供試体に与えた。本研究ではSTEP1~3 によりもたらされる一連の環境変化を1サイクルと定義し、20 サイクルを単位として最大120 サイクルまで環境促進試験を実施した。

2. 3. 腐食状況調査方法

(1) 質量減少量の測定

一般に鋼材の腐食状況を調査する場合、調査対象の項目として、残存重量と残存板厚が挙げられることが多い。本研究では供試体として直径5mmと7mmのPC鋼線を使用しているため、表面凹凸の不均一性やマイクロメーター等を用いた直接測定の不確実性から、腐食鋼板の残存板厚にあたる残存直径を精度よく測定することは困難であると判断した。そこで、本研究では一般的な測定に該当する項目として、腐食区間の残存質量を計測することにした。供試体の残存質量の計測は所定の腐食環境サイクル数を経過した供試体を環境促進試験機から取り出した後、供試体の表面に付着している腐食生成物を除去したのちに行った。腐食生成物の除去にあたっては供試体を温度60℃、重量濃度10%のクエン酸水素2アンモニウム水溶液に2時間浸漬し、その後に真鍮ワイヤブラシを用いて水洗することにより、可能な限り供試体の健全な部分を露出させた。腐食生成物を除去した後の供試体の表面を詳細に観察して腐食損傷を受けた区間を確定し、その長さをノギスで測定した。この作業が完了した供試体について、電子はかりを用いて質量を0.001gの精度で測定した。

(2) 表面凹凸形状の計測と周波数特性の算出

供試体質量の減少以外に腐食損傷によって供試体に発生する変化としては供試体表面の形状変化がある。腐食損傷が発生した結果として供試体表面に発生する凹凸形状と供試体の疲労耐久性の間にどのような関係が存在するのかを調査するために、腐食後の供試体の質量減少量の測定とは別に、供試体表面の凹凸形状を詳細に調査した。今回の表面凹凸形状の計測に用いたシステムの概要を図-4 に示す。このシステムは凹凸形状を計測するためのセンサとしてCCDレーザー変位センサ（キーエンス製、LK030・LK2000）を用いている。このシステムを用いることにより、円周方向には12°、供試体長手方向には0.12mmの間隔でデータを得ることができた。今回の表面凹凸計測での計測点の分布状況の概要を図-5 に示す。本研究においては、腐食試験の後の疲労耐久性を調べるための試験として、後述の曲げ疲労試験を実施することを当初から予定していたので、表面凹凸の計測範囲は供試体の中でも曲げ応力が特に大きくなる

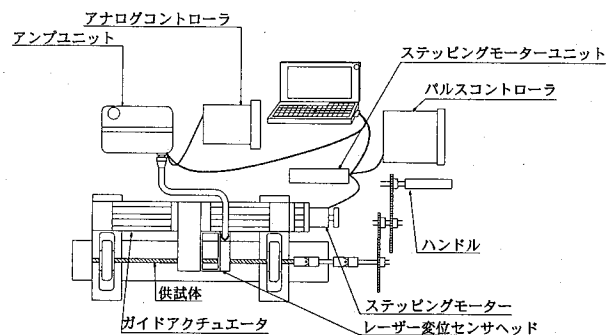


図-4 表面凹凸計測システム

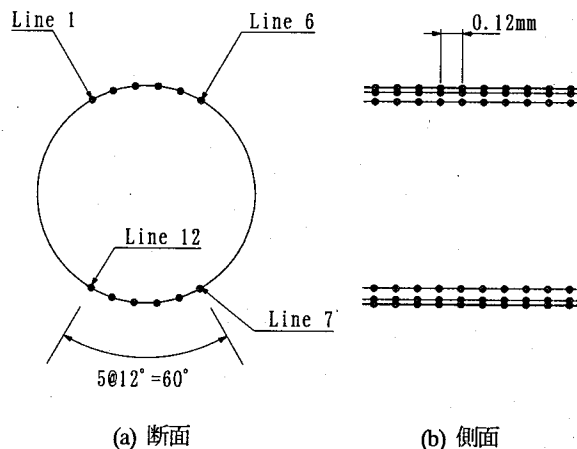


図-5 表面凹凸測定点

上縁と下縁を含む各々60°の範囲に12本の計測線（図-5中line 1~12）を設定した。

このようにして収集した供試体表面の形状データを確認すると不規則な波形を呈していることはこれまでの著者らの研究⁴⁾から容易に予測できた。そこで、供試体表面の形状に含まれる特性を表現するための手法として、表面形状データに対して高速フーリエ変換を行い、フーリエスペクトルの分布とそれに適合する回帰曲線を求めることにより、表面凹凸形状の周波数特性を表現することにした。これまでの研究において検討を進めた結果、次の関数が表面凹凸形状の周波数特性を最も精度よく近似できることがわかっていたので、本研究でもこの関数を使用して検討を進めることにした。

$$y = A + \frac{B}{x} + \frac{C}{x^2} \quad (1)$$

ただし、 x ：周波数（1/mm）、 y ：周波数 x に対応する振幅（mm）

A, B, C ：定数

本研究では疲労試験の結果等と表面形状の特性を比較する場合には、式(1)から求められる特定の波長を有する成分の振幅をパラメータとして用いることにした。

2. 4. 曲げ疲労試験方法

本研究では、PC鋼線に発生した腐食損傷の状況とその損傷の存在により疲労耐久性に与えられる影響との関係について調査するため、2. 3. で述べた腐食状況調査が完了した供試体に対

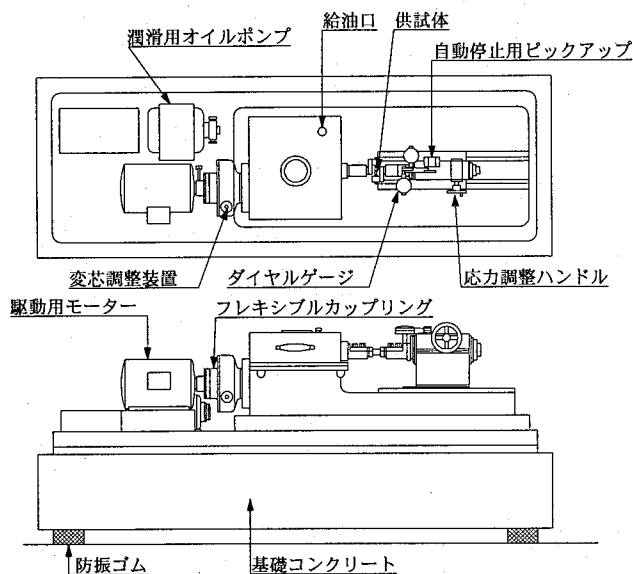


図-6 シェンク式ねじり曲げ疲労試験機

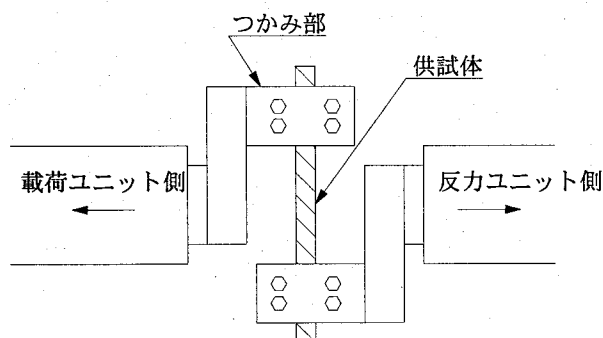


図-7 供試体つかみ部の概要
(シェンク式ねじり曲げ疲労試験機)

して疲労試験を実施した。既往の研究⁷⁾において、腐食したPC鋼線に対する疲労試験としては引張疲労試験を実施した例が圧倒的に多い。しかしながら、ケーブル部材に作用する外力は引張力のみではなく、特に近年の外ケーブル方式のPC橋などで多く見られる、ケーブル偏向部などの部位では曲げの作用が卓越すると考えられる。このことから、ケーブル偏向部などに着目したフレットング疲労⁸⁾に関する研究もなされているが、腐食損傷を受けたケーブルの曲げ疲労に関するデータは未だ不足しているのが現状であると考えられる。そこで、本研究では疲労試験の形式を曲げ疲労試験とすることにした。

今回の試験では図-6、7に示すシェンク式ねじり曲げ疲労試験機を利用して試験を実施した。この試験機の負荷機構は、駆動用モーターの回転をフレキシブルカップリングから油槽（試験機中央の四角の部分）内の2重偏心機構を有するクランクに伝え、荷重側の供試体固定治具を振動させることにより供試体への荷重を行うものである。反力側には供試体固定治具の固定軸に応力棒が連結されており、荷重側から供試体を通して伝達される曲げモーメントの量に応じて応力棒が振れる。供試体に作用しているモーメント量はこの応力棒の振り角を試験機に備え付けられたダイヤルゲージを用いて測定することにより管理

表-3 環境促進試験実施供試体数

	環境促進サイクル負荷数						
	0	20	40	60	80	100	120
Act7	20	20	20	20	20	20	20
Nom5	20	20	20	20	20	20	20
Nom7	16	16	0	16	0	16	0
Zinc5	20	20	20	20	20	20	20
Zinc7	16	16	0	16	0	16	0

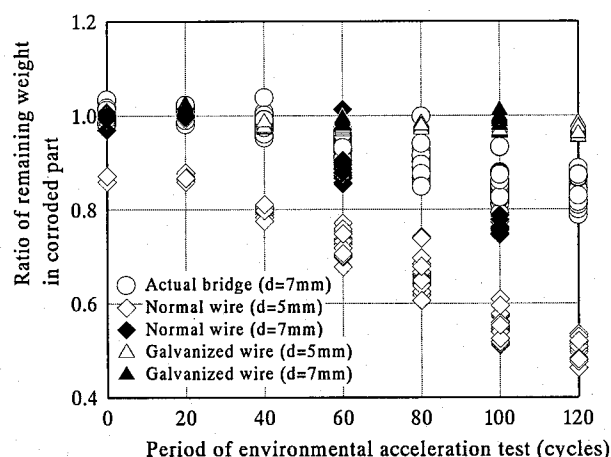


図-8 残存重量比の経時変動

した。荷重モーメントの大きさはフレキシブルカップリングの隣にある変心調整装置を用いてクランクの変心量を変化させることにより調整することができる。また、供試体の破壊に際しては試験機に備え付けの自動停止機構が作用し、自動的に停止させることができる。この試験機の荷重速度は60Hzであり、最大荷重曲げモーメントは $\pm 19.6 \text{ Nm}$ である。なお、本研究では供試体の試験の評価対象となる部分をできるだけ増やすため、完全両振りの条件で荷重を実施している。

3. 実験の結果と考察

3. 1. 環境促進試験による腐食損傷発生状況

本研究で環境促進試験により腐食損傷を与えられた供試体の数量を表-3に示す。本研究では、腐食損傷の発生状態の不規則性を考慮し、入手した材料の中から最大限の数量の供試体を採用し、各腐食段階に均等に配置するようにした。以下に環境促進試験により発生した腐食損傷に関する調査の結果について述べる。

(1) 質量減少量や表面に発生した形状変化

環境促進試験により供試体に腐食損傷を与えることで発生した供試体質量の減少について確認する。図-8に環境促進試験を所定のサイクル数だけ経た供試体の残存質量が腐食損傷なしの状態の供試体の質量の平均値に対してどの程度の比率であるのかを示す。この図を見ると、Nom5 供試体（図中の "Normal

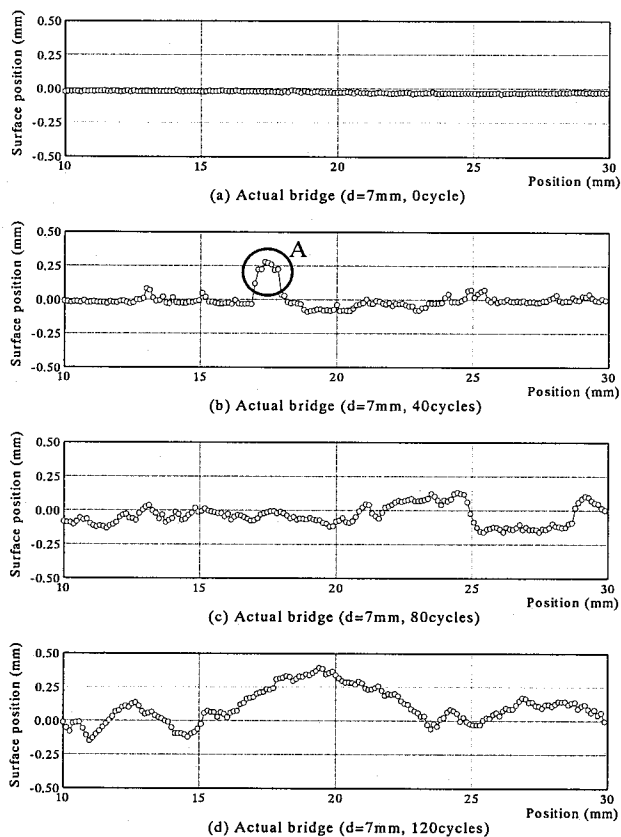


図-9 表面凹凸形状計測結果 (Act7)

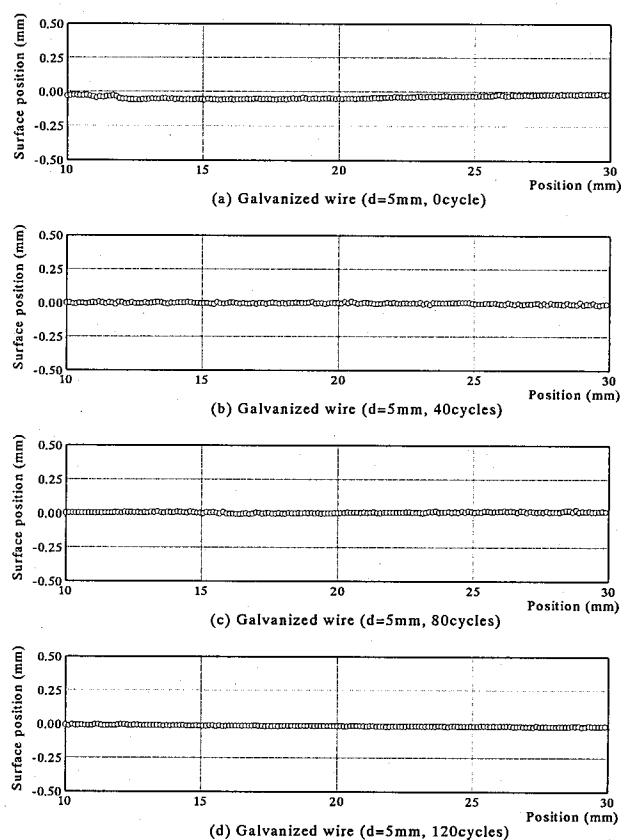


図-10 表面凹凸形状計測結果 (Zinc5)

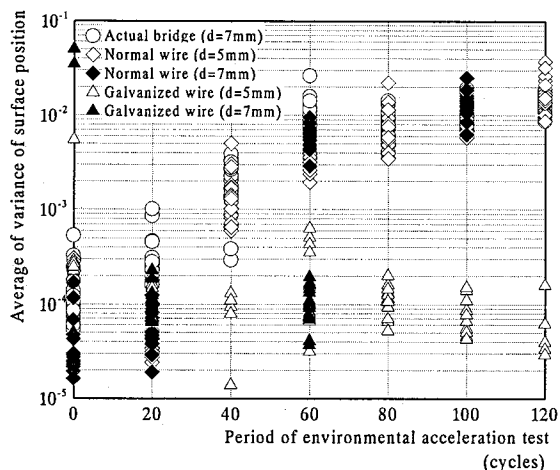


図-11 表面凹凸形状計測値の分散の経時変動

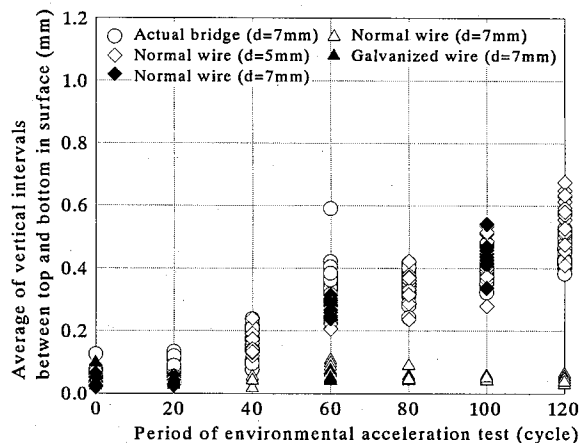
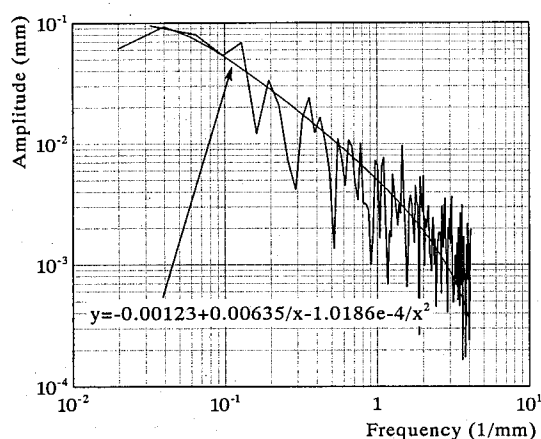


図-12 表面凹凸形状計測値変動幅 (供試体平均値) の変動

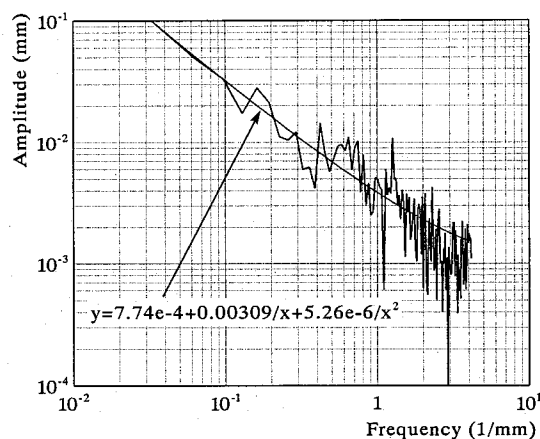
wire (d=5mm)”)では環境促進試験開始直後から大幅に質量の減少が始まっていることがわかる。環境促進試験完了時の120サイクル経過時には腐食損傷を有する供試体の質量は腐食損傷なしの供試体の50%程度にまで減少している。これに対し、Act7供試体(図中の“Actual bridge (d=7mm)”)では腐食損傷による質量減少は環境促進試験が40サイクルを経過したあたりから確認されるようになり、環境促進試験完了時の120サイクル経過時でも20%程度の質量減少に留まっており、Nom5供試体とは異なる傾向の挙動を示しているように見える。Nom7供試体(図中の“Normal wire (d=7mm)”)の挙動はNom5供試体とAct7供試体の中間の挙動を示していた。このような挙動の差異が生じた原因としては供試体の寸法の違いによる単位体積あたりの

表面積が異なることや、特にAct7供試体では試験開始時の状態がNom5と異なり長期間実橋で使用されていたことから、供試体表面に何らかの保護層が形成されていた可能性がある。また、Zinc5、Zinc7供試体(図中の“Galvanized wire”)では環境促進試験の開始から修了に至るまで有意な質量の変動が確認されることはなく、本研究において採用した腐食環境に対して亜鉛メッキによる防食が有効であることを示している。

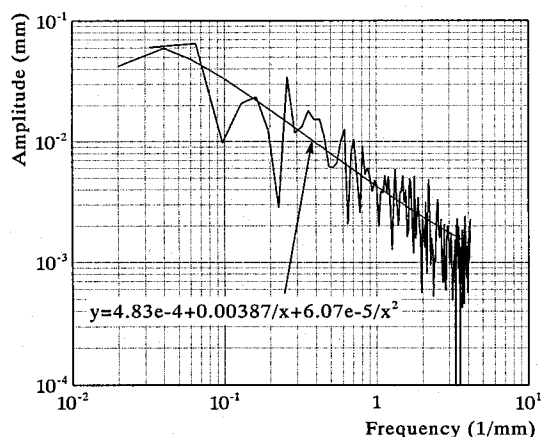
供試体表面の形状を計測した結果の例を図-9、10に示す。これらの図では縦軸の上方が供試体中心に向かう方向であり、横軸には腐食区間の端部からの距離をとっている。図-9において、環境促進サイクル40サイクルの供試体の表面(図-9(b))には孔食らしき形状(図中Aの部分)が確認できるが、これ以



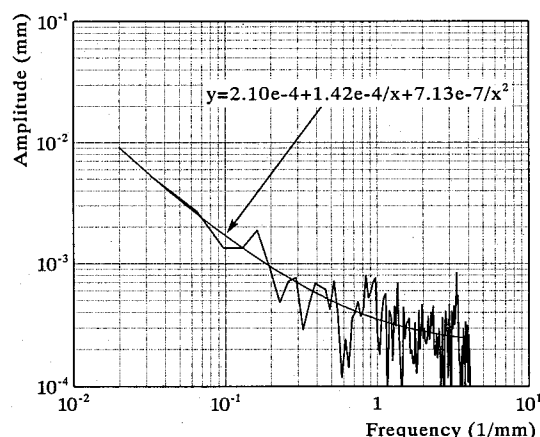
(a) Actual bridge (d=7mm, 120cycles)



(b) Normal wire (d=5mm, 120cycles)



(c) Normal wire (d=7mm, 100cycles)



(d) Galvanized wire (d=5mm, 120cycles)

図-13 表面凹凸形状周波数特性

外の部分に関して形状を確認すると、表面の凹凸は極めて小規模なものに留まっている。また、図-9 における表面凹凸形状の全体的な傾向を見てみると、環境促進サイクルの増加とともに供試体表面の凹凸振幅が大きくなっていることが確認できる。これに対し、図-10 を確認すると、試験のどの時点においても大きな凹凸形状は確認できない。この傾向は Zinc5, Zinc7 の全ての供試体に共通のものであった。このことから、今回の環境促進試験で採用した腐食環境に対して、亜鉛メッキによる防食対策は有効であったことが確認できた。

供試体の表面形状の乱れの程度を確認するために、表面凹凸形状計測値の分散と計測値の変動幅について、環境促進試験の進行とともにどのように変化しているのかを確認した。表面凹凸形状計測値の分散の経時変動を図-11 に、個々の供試体に設定されている 12 本の計測線で確認された計測値変動幅の各供試体における平均値の経時変動を図-12 に示す。これらの図を見ると、Act7, Nom5, Nom7 供試体と Zinc5, Zinc7 供試体で傾向が異なっていることが確認できる。これは、Act7, Nom5, Nom7 供試体では環境促進試験の進行に伴って腐食損傷が進行し、表面に凹凸形状が形成されていったのに対し、Zinc5, Zinc7 供試体では環境促進試験の終了に至るまで腐食損傷の進行が認められなかったためである。また、これらの図においては残存質量の経時変動(図-8)のような供試体間での傾向の違いは認

められなかった。これは表面凹凸形状計測値の分散や計測値変動幅が表面形状計測値の絶対値により定まるものではなく、計測データ間の相対的な位置関係に大きく影響される性質のものであることが原因であると考えられる。以上のことから、図-8, 11, 12 を確認することにより、Act7, Nom5, Nom7 供試体においては、腐食損傷によってもたらされた供試体表面の形状変化によりこれらの供試体では同程度の凹凸が生じていることが期待できる、しかし、供試体の断面積の減少量はこれらの供試体の間で異なっていると見るべきである。

(2) 表面凹凸形状周波数特性

本研究で環境促進試験により腐食損傷を発生させた供試体の表面形状計測データに対して高速フーリエ変換を施すことにより求められる、供試体表面凹凸形状の周波数特性の例を図-13 に示す。図中の曲線は式(1)を適用することにより求められた回帰曲線である。ここで示した例を見ても確認できるように、式(1)の形式で与えられた回帰曲線は供試体表面凹凸形状の周波数特性を精度良く表現できていることがわかる。図-13 (a)~(c) に示された Act7, Nom5, Nom7 供試体の周波数特性を比較すると、Nom5 の周波数特性で回帰曲線が若干下に凸の形状を示しているが、Act7 と Nom7 は良く似た形状を呈している。成分ごとの振幅について、回帰曲線を利用して確認してみると、周

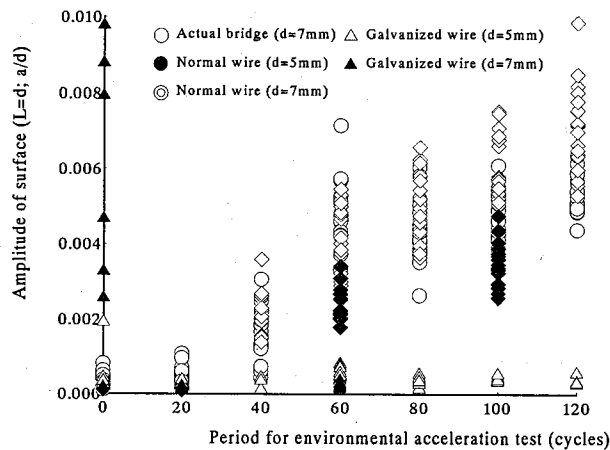


図-14 表面凹凸形状波長 d 成分の振幅の経時変動

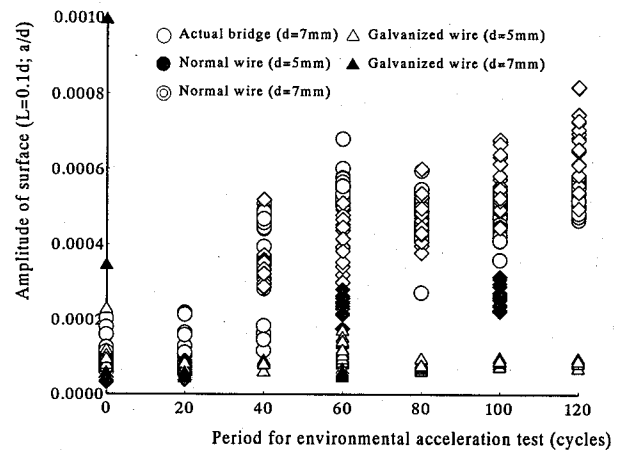


図-15 表面凹凸形状波長 $0.1d$ 成分の振幅の経時変動

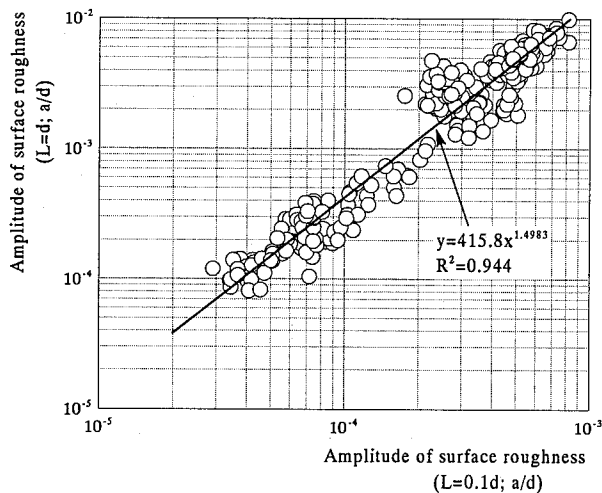


図-16 表面凹凸形状波長 d 成分の振幅と
表面凹凸形状波長 $0.1d$ 成分の振幅の比較

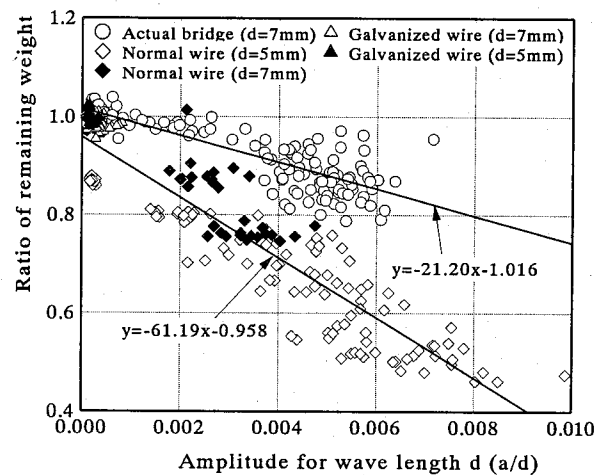


図-17 表面凹凸形状波長 d 成分の振幅と
供試体残存質量との関係

波数 $1(1/\text{mm})$ の成分の振幅は Act7, Nom5, Nom7 供試体の何れにおいても 0.004mm 付近の値になっているが、周波数 $0.1(1/\text{mm})$ の成分においては Nom5, Nom7 供試体で 0.03mm 付近の値をとるのに対し、Act7 供試体では 0.05mm 程度の値をとっており、多少、表面凹凸形状の傾向が異なっていることがわかる。また、これらの供試体の表面凹凸形状周波数特性と図-13 (d) に示されている Zinc5 供試体の周波数特性を比較すると、Zinc5 供試体の周波数特性曲線は明らかに他の供試体の曲線より小さな値を与える位置に存在している。これは Zinc 供試体では環境促進試験終了に至るまで目立った腐食損傷が確認できなかったことを反映しているものと考えられる。このことから、表面凹凸形状周波数特性曲線の相対的な位置関係によって腐食の進行の程度が比較できる可能性があると考えられる。Zinc5 供試体の周波数特性曲線の傾向を確認すると、周波数が $0.2(1/\text{mm})$ よりも大きい範囲では表面凹凸形状成分の振幅が 0.001mm 以下となっている。これに対し、周波数が $0.1(1/\text{mm})$ よりも小さい範囲においては表面凹凸形状成分の振幅が急増している。ただし、この部分は全体的な、緩やかな表面凹凸形状の変動に対応する、波長が 10mm 以上になる成分の範囲であるため、実際に計測値でその状況を確認しようとしても、図-10 に示されるように、形状変動があるとは認められない場合が多い。そこで、本研究では、

腐食損傷により生じた表面凹凸形状を表現するための指標として、周波数が $0.1(1/\text{mm})$ よりも大きくなる成分に着目して検討を進めることにした。

図-14, 15 に本研究において表面凹凸形状を表現するための指標の候補とした、表面凹凸形状周波数特性曲線から与えられる波長 d , $0.1d$ 成分 (d : 供試体の直径) の振幅の経時変動を示す。これらの図の縦軸は波長 d または $0.1d$ 成分の振幅 (a) と供試体の直径の比 (a/d) である。表面凹凸波長 d 成分の振幅の挙動を確認すると、Act7, Nom5, Nom7 供試体の表面凹凸波長 d 成分の振幅は多少のばらつきは有しているものの、環境促進試験の進行とともに単調に増加していることがわかる。これに対して、Zinc5, Zinc7 供試体の表面凹凸波長 d 成分の振幅は環境促進試験の終了に至るまで一定の値を示し続けている。このような傾向の違いは Act7, Nom5, Nom7 の各供試体では環境促進試験の進行に従って腐食損傷も進行していたが、Zinc5, Zinc7 供試体では腐食損傷が全く発生しなかったことを反映していると考えられる。表面凹凸波長 $0.1d$ 成分の振幅について確認してみると、Zinc5, Zinc7 供試体の表面凹凸波長 $0.1d$ 成分の振幅の経時変動は表面凹凸波長 d 成分の振幅と同様の傾向を示した。しかしながら、Act7, Nom5, Nom7 供試体の表面凹凸波長 $0.1d$ 成分の振幅は環境促進試験の進行に伴って増加する傾向にはある

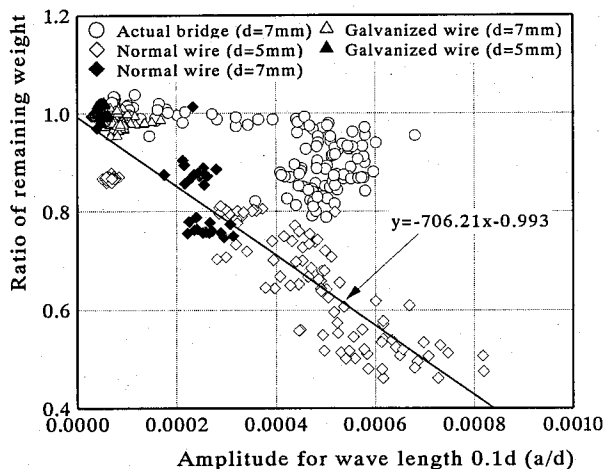


図-18 表面凹凸形状波長0.1d成分の振幅と
供試体残存質量との関係

ものの、環境促進試験 60 サイクル経過時点から 100 サイクル経過の時点にかけて停滞するという現象が確認でき、表面凹凸波長 d 成分の振幅とは異なる挙動を示している。今回、評価に用いる指標の候補として考えていた表面凹凸形状の 2 つの波長成分の間にこのような挙動の違いが確認されたため、表面凹凸形状の波長 d 成分の振幅と波長 0.1d 成分の振幅との間にどのような関係があるのかを調べてみた。その結果を図-16 に示す。この図を見ると、当初の予想に反してかなり良い線形関係を見出すことができた。このことから、表面凹凸形状波長 d 成分の振幅と波長 0.1d 成分の振幅との間には経時変動の相違はあるものの、かなり密接な関係を有しているといえる。

(3) 表面凹凸周波数特性と供試体質量減少量との関係

本研究で腐食損傷を受けた鋼材の表面状態を表す指標として考えている、供試体表面凹凸形状の周波数特性曲線から求められる成分波の振幅と供試体の質量変動との関係を確認することにした。図-17 に表面凹凸形状の周波数特性曲線から求められる、波長 d の成分の振幅と供試体の残存質量との関係を示す。この図の縦軸には腐食損傷を与えていない供試体の平均質量に対する各供試体の質量の比を、横軸には周波数特性曲線よりもとめられた波長 d 成分の振幅の供試体直径に対する比(a/d)をとっている。この図を見ると、Nom5, Nom7 供試体のデータは同一の直線の上に分布しており、供試体の質量の減少が進むと波長 d 成分の振幅が増大することがわかる。Act7 供試体に関しては Nom5, Nom7 供試体とは異なる直線の上にデータが分布しているが、供試体質量の減少に伴い波長 d 成分の振幅が増大するという点では同じ傾向にあるといえる。Nom5, Nom7 供試体のデータから求められる回帰直線と Act7 供試体のデータから求められる回帰直線の傾きを比較すると約 3:1 になっている。このことは、Act7 供試体に腐食損傷を与えると Nom5, Nom7 供試体よりも早い段階で著しい凹凸を生じる傾向にあることを示している。言い換えると、Nom5, Nom7 供試体では Act7 供試体よりも均一に腐食が進行する傾向にあると言える。

表面凹凸形状の周波数特性曲線から求められる波長 0.1d の成

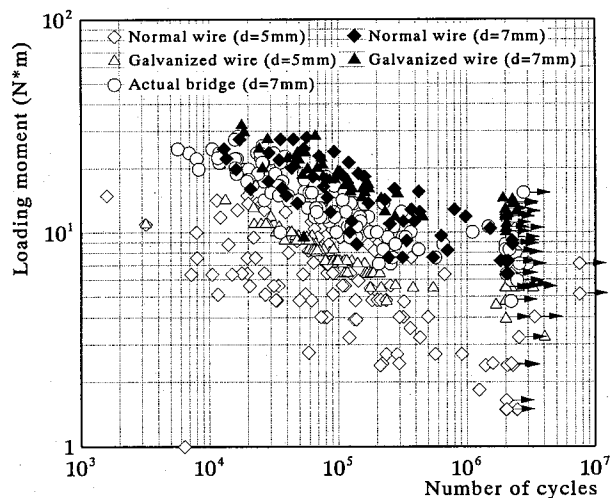


図-19 曲げ疲労試験の結果

表-4 曲げ疲労試験実施供試体数

	環境促進サイクル負荷数						
	0	20	40	60	80	100	120
Act7	20	19	20	19	20	20	9
Nom5	9	19	17	17	18	19	0
Nom7	16	16	0	14	0	16	0
Zinc5	13	12	17	15	15	15	15
Zinc7	16	16	0	14	0	14	0

分の振幅と供試体の残存質量との関係を図-18 に示す。この図においても Nom5, Nom7 供試体のデータは一つの直線の上に分布していることがわかる。これに対し、Act7 供試体のデータは a/d=0.0004-0.0006 の範囲に集中しており、一見するとデータに規則性がないように見える。Act7 供試体のデータがこのような傾向を示すのは、環境促進試験開始早期に表面凹凸形状波長 0.1d 成分の振幅が増大して a/d=0.0004-0.0006 の範囲に至るが、その後、腐食損傷が進行しても波長 0.1d 成分の振幅が停滞し続けているからである。これらのことから、Nom5, Nom7 供試体の質量が腐食損傷により減少すると、供試体の表面凹凸形状波長 0.1d 成分の振幅は増大する傾向にあるが、Act7 供試体では腐食により供試体の質量が減少しても、表面凹凸形状波長 0.1d 成分の振幅は大きく変動しない可能性が高く、表面凹凸形状の波長 0.1d 成分の振幅は鋼材の腐食状況を示す指標として適切ではないと判断した。

以上のことから、本研究においては、供試体の腐食損傷の状況を表す指標として表面凹凸形状波長 d 成分の振幅を用いることが望ましいと判断できる。

3. 2. 曲げ疲労試験の結果

本研究では、環境促進試験により供試体に与えられた腐食損傷の調査が完了した供試体について曲げ疲労試験を実施した。本研究で曲げ疲労試験に使用した供試体の数を表-4 に示す。今回の疲労試験では Act7 供試体を 127 体、Nom5 供試体を 99

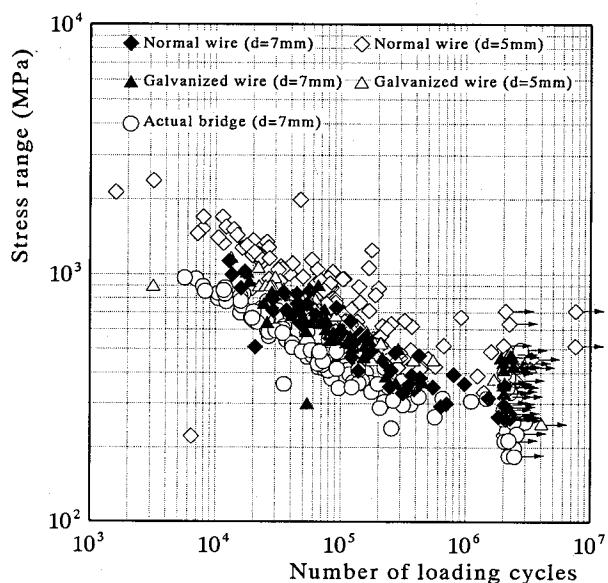


図-20 質量減少を考慮して作成したS-N関係図

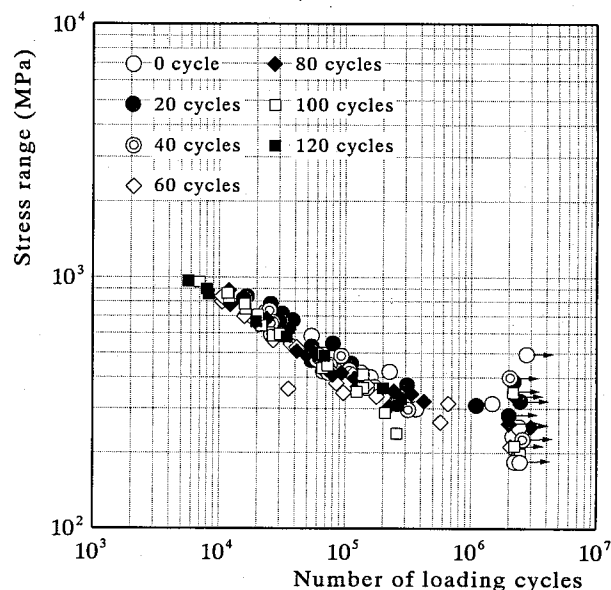


図-21 質量減少を考慮して作成した
S-N関係図 (Act7 供試体)

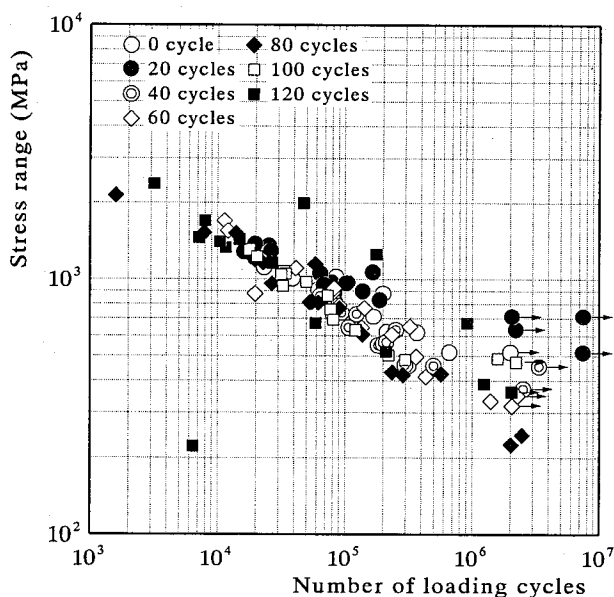


図-22 質量減少を考慮して作成した
S-N関係図 (Nom5 供試体)

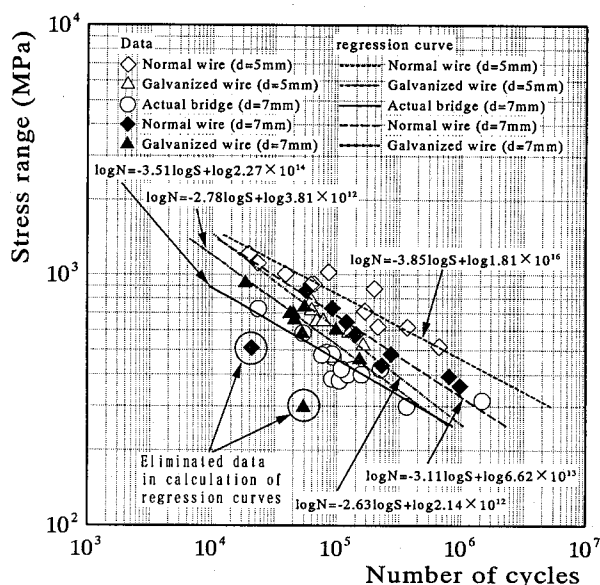


図-23 腐食損傷を受けていない供試体の
S-N関係図の比較

体, Nom7 供試体を 62 体, Zinc5 供試体を 102 体, Zinc7 供試体を 60 体使用した。今回の曲げ疲労試験で得られた結果を図-19 に示す。この図では縦軸に供試体に載荷した曲げモーメント、横軸に載荷回数を用いている。この図を見ると試験結果、特に Nom5 供試体の試験結果のばらつきが大きく、このままではおよそ 100 倍の寿命の開きがあることになってしまうことがわかる。これは各供試体における腐食の影響を全く考慮していないためである。そこで、本研究では、載荷荷重と寿命の関係をより適切に表現するために、供試体に発生した腐食損傷の影響を適切に評価するための方法について検討を加えることにした。

3. 3. 腐食損傷状況を考慮した曲げ疲労耐久性の評価

著者らは本研究で実施した曲げ疲労試験の結果について、腐

食損傷の影響を適切に反映する指標を用いて整理を行えば、より合理的な S-N 関係図を得ることができると考えた。そこで、腐食損傷の影響を表現する指標の候補として、供試体の質量減少と供試体表面の凹凸形状の 2 つを考え、それぞれについて検討を加えることにした。

(1) 供試体の質量減少量と物性に基づく評価手法の検討

本研究では、供試体に発生した腐食損傷の最も基本的な指標である質量減少量を評価に用いるにあたり、以下のように条件の設定を行った。

- 1) 腐食に伴う質量減少は腐食調査に際して確認した腐食範囲内に分布している。
- 2) 腐食の形式は均一腐食であり、局所的な形状等の偏りについては考慮しない。

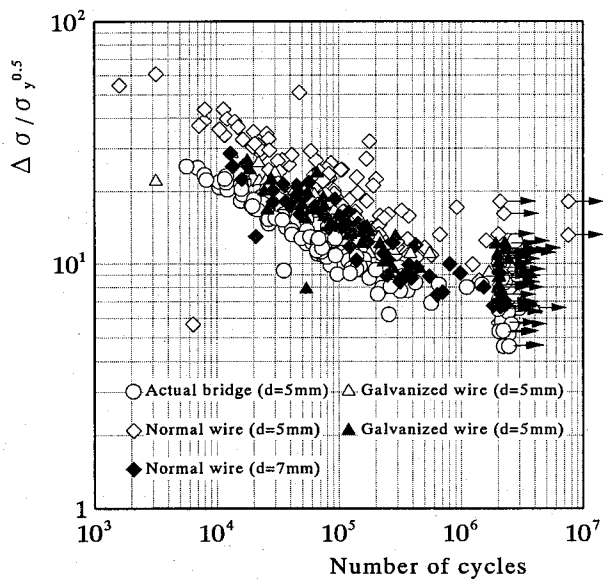


図-24 σ_y で標準化した S-N 関係図

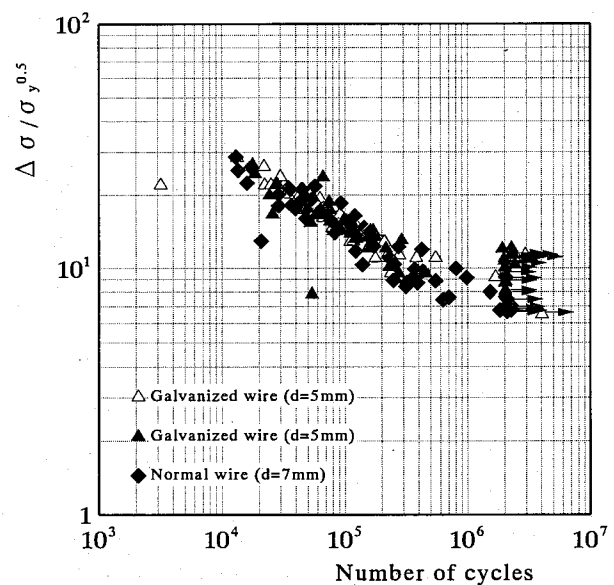


図-25 σ_y で標準化した S-N 関係図 (Nom7, Zinc5, Zinc7)

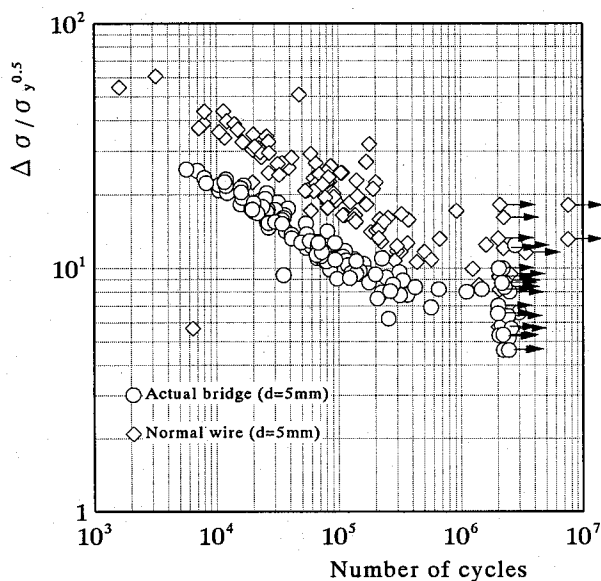


図-26 σ_y で標準化した S-N 関係図 (Nom5, Act7)

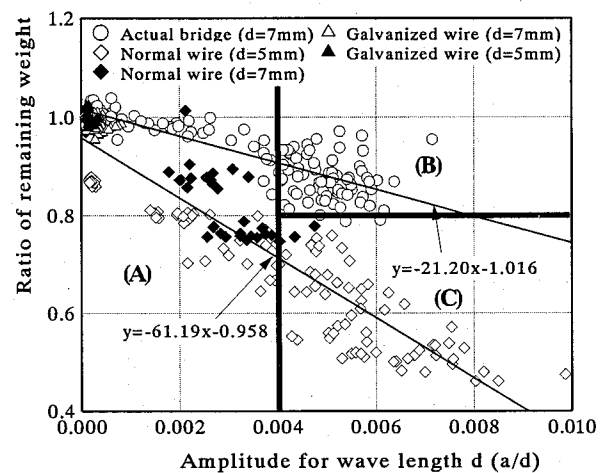


図-27 供試体種別毎のデータ分布範囲

このことを踏まえて、質量減少量から腐食損傷を考慮した供試体の断面積・断面2次モーメントを算出し、供試体断面の上・下縁の曲げ応力を計算した。この新しく算出された曲げ応力を用いて曲げ疲労試験のデータを整理した結果を図-20に示す。この図を見ると、疲労試験のデータは一定の幅を持って分布している。そのデータの種類を確認すると、データの集合の上方にはNom5 供試体のデータが多く、下方にはAct7 供試体のデータが多いことがわかる。Nom5, Act7 供試体以外の供試体のデータはデータの集合の中央に分布している。ここで、供試体ごとのデータのばらつきを確認する必要があると思われたので、Act7 供試体とNom5 供試体のデータのみを抜き出して作成したS-N 関係図を図-21, 22に示す。図-21のAct7 供試体のデータを見ると、環境促進試験の進行に伴って疲労試験データが下方へシフトしている様子がわかる。また、一部のデータを除いて、データのばらつきがそれほど大きくないこともわかる。こ

れに対し、図-22に示されたNom5のデータを見ると、環境促進試験の進行とともにデータのばらつきが大きくなり、環境促進試験の時間が長いものほど下方に来るという傾向は認められない。しかしながら、Nom5 供試体の一部のデータを除いて、データのばらつきはそれほど大きくないことがわかる。これらのことから、図-20におけるデータのばらつきには供試体のPC 鋼線の物性が関係している可能性があるのではないかと考えた。そこで、その可能性を確認するために、腐食損傷を受けていない供試体の曲げ疲労試験結果を確認することにした。図-23に腐食損傷を有していない供試体の曲げ疲労試験結果を示す。この図に示されたデータの中には一部、試験上の不具合が影響していると思われるデータ(図中の○で囲んだ点)が存在していたが、ここではこれらの点を外した形で比較・検討を行うことにした。なお、図-23中の曲線はそれぞれの供試体種別ごとに求めたS-N曲線である。図-23を確認することにより、

各供試体の疲労試験データは各々のS-N曲線上に分布しており、比較的良い相関を保っていることがわかる。また、各供試体に対応したS-N曲線を見てみると、その傾きや切片はばらばらであることがわかる。これらのことから、各供試体が有している物性に基づいた標準化を行うことが必要であると判断した。

本研究では各供試体の材質に関する標準化を行うにあたり、供試体の降伏応力を用いることを考え、腐食を考慮して算出される供試体断面の上縁・下縁における曲げ応力振幅を降伏応力の平方根で除した値 ($\Delta s/vs_y$) を用いてS-N関係図を作成してことにした。vs_yで標準化されたS-N関係図を図-24に示す。この図を見ると、図-20と比較して、各供試体シリーズの間に見られるデータの偏りが大幅に改善されたようには見えなかったため、データの分布状況を確認するために、図-24で示したデータのうち、Nom7, Zinc5, Zinc7 供試体のデータを図-25に、Nom5, Act7 供試体のデータを図-26に分けて示すことにした。図-25を見ると、今回の標準化により、Nom7, Zinc5, Zinc7 供試体のデータは良くまとまっており、これらの供試体には今回の手法が有効であることがわかる。これに対し、図-26を見るとNom5 供試体のデータとAct7 供試体のデータとの間には大きな差が生じていることがわかる。図-24を再度確認すると、Nom5 供試体のデータの集合とAct7 供試体のデータの集合の間の隙間の部分にNom7, Zinc5, Zinc7 供試体のデータが位置していることがわかる。このことから、Nom5, Act7 供試体のデータに関しては、どちらか一方のデータ集合にシフトが生じているのではなく、Nom5 供試体のデータは上方に、Act7 供試体のデータは下方にシフトを起こしているように見えるべきである。このようなデータのシフトが発生してしまう原因解明につながる手がかりとして、著者らは図-17に着目した。この図を見ると、各供試体はそれぞれ異なる3つの範囲内に分布する傾向にあることがわかる。これらの範囲を(A)~(C)と名づけ、図上に示してみた(図-27)。図-27を見ると、Nom5, Act7 供試体の一部のデータが(A)の範囲に分布しているが、これは実験初期の段階のデータであり、全体に比して数は少ない。また、これらのデータの位置を確認すると、Act7 では集合の中でも上方、Nom5 では中央付近に位置するデータであることが確認できているので、これらのデータは分類に影響を与えるものではないと判断した。また、分布範囲によってデータの分類ができたことにより、今回の曲げ疲労試験においては表面凹凸波形の波長d成分に代表される、供試体表面の凹凸形状の影響が大きかったことがわかった。このことから、本研究では、より適切に腐食損傷の影響を評価するために、供試体の表面凹凸形状に関わる指標を取り入れた評価手法について検討を行うことにした。

(2) 供試体表面凹凸形状の周波数特性に基づく評価手法の検討

供試体の表面凹凸形状に関わる指標を用いた評価手法について検討するのにあたり、本研究では外力の評価を載荷したモーメントにより行うことにした。腐食損傷による重量減少の影響を考慮した断面に対して算出される曲げ応力を評価に用いると、腐食損傷による影響を過大に反映してしまう可能性が大きいためである。ただし、前項でも触れたように、本研究で使用した

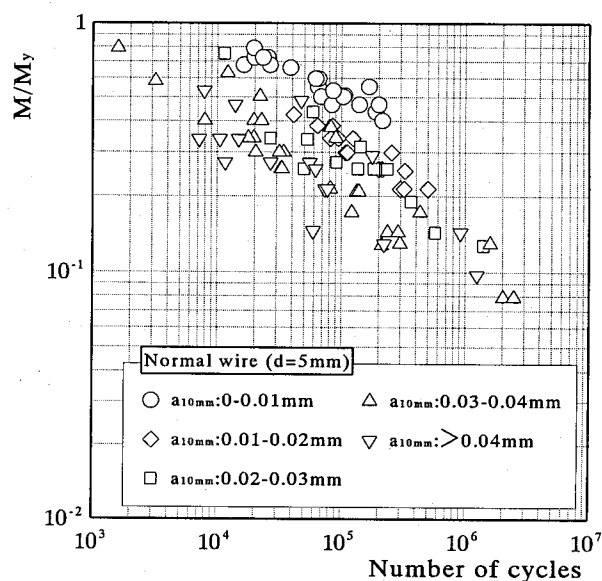


図-28 曲げ疲労試験結果における
表面凹凸波長10mm成分の振幅の影響
(Nom5 供試体)

供試体シリーズの間で、降伏応力などの値にばらつきが認められるため、作用モーメントを降伏モーメント(M_y)で除した値 (M/M_y)を基本の指標として用いることにした。ここで言う降伏モーメントとは供試体断面の上縁・下縁に降伏応力を発生させるのに必要な曲げモーメントである。この指標を用いて図-19において特に大きなデータのばらつきが認められたNom5 供試体について調べることにした。また、Nom5 供試体において表面凹凸形状の影響が明確に認められるのかどうかを確認するために、表面凹凸形状の周波数特性曲線から与えられる、波長10mmの成分の振幅(a_{10mm})によりデータを5つのグループに分類し、その分布を調査することにした。この時に用いた波長10mmの成分の振幅の分類は次の通りである。

グループ名(略称)	a_{10mm} の範囲
Group 1 (g1)	$0.00mm \leq a_{10mm} < 0.01mm$
Group 2 (g2)	$0.01mm \leq a_{10mm} < 0.02mm$
Group 3 (g3)	$0.02mm \leq a_{10mm} < 0.03mm$
Group 4 (g4)	$0.03mm \leq a_{10mm} < 0.04mm$
Group 5 (g5)	$0.04mm \leq a_{10mm}$

なお、この調査において、これまで本研究では波長d成分の振幅を指標として使用していたにもかかわらず、波長10mmの成分の振幅を新たに採用したのは、今回の疲労試験で用いた供試体には直径が5mmのものと7mmのものがああり、上述のグループ設定を一律に行うことはできないと判断したためである。この調査の結果を図-28に示す。図-28を見ると、 a_{10mm} の増加に伴ってデータが明らかに下方へシフトしている様子がわかる。このような傾向が確認されたことを踏まえ、本研究ではS-N関係図の縦軸に a_{10mm} の変動の影響を取り入れることを考えることにした。

供試体表面の凹凸形状に関する指標の一つである、 a_{10mm} の影響を適切に反映させるためには、各供試体の表面形状より求められる a_{10mm} のある基準値に対する比を利用することが合理的

であると思われる。本研究では、供試体種毎の状態を反映させることを考え、基準値として各供試体種の Group 1 に該当する供試体から求められる a_{10mm} の平均値 ($a_{10mm,gl,ave}$) を用いることにした。この基準値と供試体ごとに求まる a_{10mm} の値 ($a_{10mm,i}$) の比を用いてどのような形式で用いればデータのばらつきを減少させることができるのかを Nom5 供試体のデータを用いて検討した。その結果、 $a_{10mm,i}/a_{10mm,gl,ave}$ の 4 乗根を M/M_y に乗じた値を指標として採用すれば、データのばらつきが最も小さくなることがわかった。図-29 に $(a_{10mm,i}/a_{10mm,gl,ave})^{0.25} M/M_y$ を縦軸に用いて作成した Nom5 供試体の S-N 関係図を示す。図-28 では同じ荷重レベルでの供試体の破壊寿命の分布幅が最小の寿命の 20~30 倍程度になっていたのに対し、図-29 ではデータの分布幅は 10 倍程度に収まっており、この図で用いた指標が表面凹凸形状の影響を反映できた結果であると判断した。図-29 で用いた指標を本研究で使用したすべての供試体に適用した結果を図-30 に示す。この図を見ると、本研究で得られた試験データは、未だに分布に多少の片寄りはあるものの、破壊寿命比で約 10 倍以内の範囲に収まっている。また、本研究で実施した曲げ疲労試験で破壊した、全ての供試体のデータを用いて回帰曲線を求めたところ次の式で表現される曲線を得ることができた。

$$\left(\sqrt[4]{\frac{a_{10mm,i}}{a_{10mm,gl,ave}}} \cdot \frac{M}{M_y} \right)^{2.386} \cdot N = 11758 \quad (2)$$

(ただし、N：载荷回数)

以上のことから、腐食した PC 鋼線の曲げ疲労試験においては式(2)によりある程度、供試体の種類、寸法に関わりなく評価できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では環境促進試験により人工的に腐食させた PC 鋼線の状態を詳細に調査した後、曲げ疲労試験を実施し、これらの結果について比較、検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 環境促進試験により腐食させた供試体の表面凹凸形状の周波数特性を調査した結果、特定の関数形で精度良く表現できることが確認できた。
- 2) 腐食損傷が進行した PC 鋼線において、質量減少量と表面凹凸形状の波長 d 成分の振幅との間には良い相関関係が存在するが、質量減少量と表面凹凸形状の波長 $0.1d$ 成分の振幅との間には腐食の進行形態により明確な関係を見出せない場合がある。
- 3) 曲げ疲労試験を行った結果を供試体の質量減少量と降伏応力を用いて整理すると、データのシフトが見られる場合がある。この時には供試体表面の凹凸形状が一定の値よりも大きくなった影響であると考えてよい。
- 4) 曲げ疲労試験を行った結果を供試体の表面凹凸形状の周波数特性を用いて整理したところ、波長 10mm の成分の振幅を用いて統一的に評価できる可能性があることがわかった。

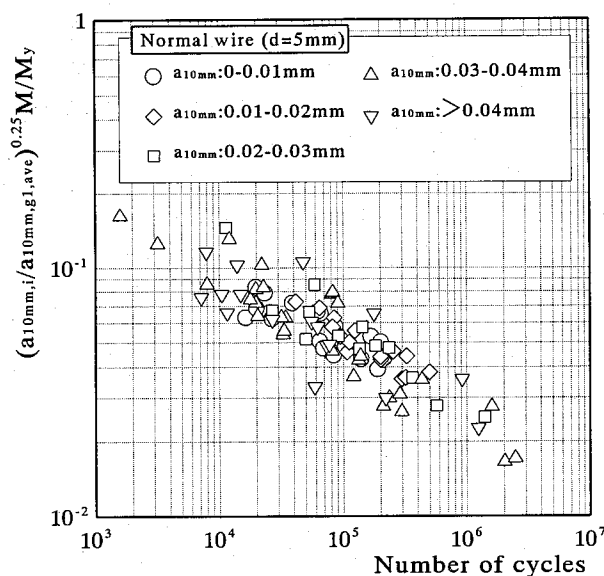


図-29 表面凹凸波長 10mm 成分の振幅により標準化された曲げ疲労試験結果 (Nom5 供試体)

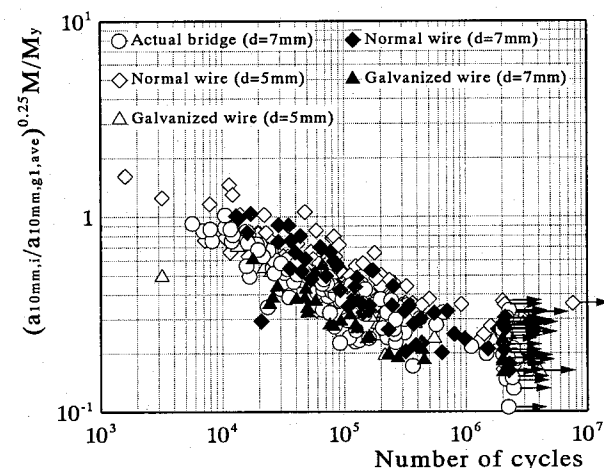


図-30 表面凹凸波長 10mm 成分の振幅により標準化された曲げ疲労試験結果

参考文献

- 1) 例えば、西川和廣、村越潤、山本悟司、上仙靖、福地友博、中嶋浩之：ミニマムメンテナンス橋に関する検討、土木研究所資料 3506 号、1997.6
- 2) 西川和廣、村越潤、上仙靖、福地友博、中嶋浩之：橋梁の架替に関する調査結果 (Ⅲ)、土木研究所資料 3512 号、1997.10
- 3) 村中昭典、皆田理、藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐力、構造工学論文集、Vol.44A, pp.1063-1071, 1998.3
- 4) 大西弘志、松井繁之：腐食 PC 鋼材の表面凹凸がその強度に与える影響、鋼構造年次論文報告集、Vol.7, pp.203-208, 1999.11
- 5) 大西弘志、松井繁之、梅原由紀夫、溝口茂：腐食 PC 鋼棒の表面形状と残存性能、構造工学論文集、Vol.47A, pp.1055-1062, 2001.3
- 6) 例えば、神谷、藤原、三宅：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究、日本道路公団試験研究所報告、Vol.31, pp.65-97, 1994.10
- 7) 例えば、杉井謙一：橋梁ケーブルの長期的健全性に関する研究、1997.5
- 8) 新井英雄、藤田学、梅津健司、鮎子多浩一、上田多門：大容量 PC 鋼より線の曲げ配置部におけるフレット疲労特性、土木学会論文集、672, V.44, pp.205-222, 1999.8

(2005 年 9 月 10 日受付)