

論文 AE 法による鉄筋コンクリートの塩害劣化の早期判定法の開発

小林 廉^{*1}・田中 正俊^{*2}・友田 祐一^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：コンクリートの塩分浸透による鉄筋腐食を評価するため、電食実験においてアコースティック・エミッション(AE)計測を行った。この結果に基づいて、塩分浸透の予測解析を行った結果、AE 発生挙動と塩分の浸透状況を比較することにより鉄筋腐食の進行過程を早期段階で定量的に判定できる可能性が明らかとなった。

キーワード：塩分浸透、鉄筋腐食、電食、アコースティック・エミッション

1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物の寿命予測を行う上では、コンクリート内部への塩分浸透による鉄筋腐食の進行を定量的に予測することが不可欠である。最近制定された土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」¹⁾によれば、塩害による鉄筋腐食の劣化進行過程は図-1のようにまとめられている。

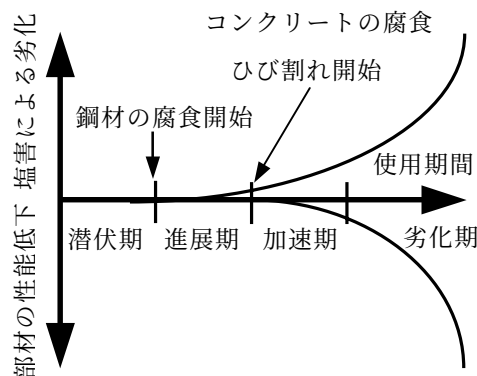


図-1 塩害による劣化進行過程

図に従って塩害を評価するには、潜伏期、進展期、加速期の正確な予測が不可欠である。しかし、実際にこれら三つの時期を見極めることは容易なことではない。ところで、電食実験にアコースティック・エミッション (AE) 法を適

用した研究²⁾によれば、コンクリート中の鉄筋腐食に伴い、活発に AE 現象を確認できることが知られている。ただし、従来の研究では、自然電位法により鉄筋腐食時期を評価することが一般的であった³⁾。したがって、AE 法によれば、自然電位法よりも早く鉄筋腐食を評価できると考えられる⁴⁾。

そこで、本研究では、電食実験中に AE 計測を行い、AE の発生挙動と塩分の浸透状況を比較することにより、図-1 の劣化進行過程でのそれぞれの時期について明確な判定を試みた。

2. 塩分濃度解析

図-1 に基づいて各時期における腐食度を決定するには、鉄筋位置での塩分濃度の評価は不可欠である。ただし、本研究で実施した電食実験は、塩分移動に関しては電気泳動現象に属する。これには複雑な過程が考えられるが、第一義的には拡散現象として解析できると考えた。

拡散現象の解析には、簡便法として、表面濃度を一定とする式(1)を用いることにした。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1)$$

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*3 熊本大学技術専門職員 工学部技術部 (正会員)

*4 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (cc)
					W	C	S	G	
20	45	3.5	5.2	40.9	175	389	686	1138	175
20	55	7.7	6.8	42.9	176	321	741	1179	144

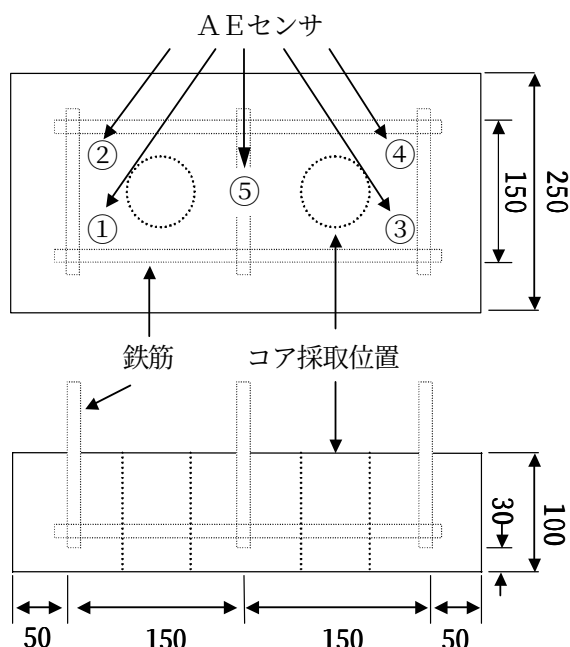


図-2 実験供試体

ここで、 $C(x,t)$ ：各実験における塩分濃度

C_0 ：各実験における塩分濃度

D ：拡散係数(cm²/sec)

x ：浸透深さ(cm)

t ：実験期間(日)

現実の塩分浸透では、表面濃度を一定と見なすこと、及び実験的に決定することは困難とされている⁵⁾。そこで、見掛けの表面濃度を C_1 として用いた。この場合、表面濃度 C_1 は、

$$C_1 = \frac{C(x)}{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \quad (2)$$

ここで、 $C(x)$ ：各実験における 0.5cm～2.5cm までの塩分濃度

と置き、式(2)より求めた 0.5cm～2.5cm までの表面濃度を平均して各期間における電食実験の見かけの表面濃度 C_1 を推定した。これによって、

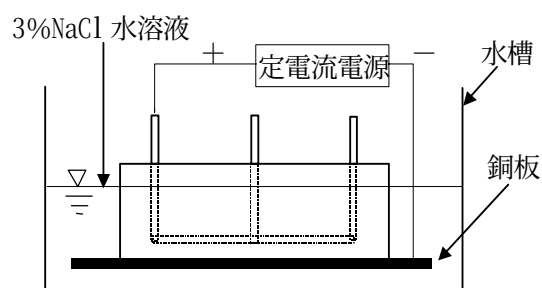


図-3 実験装置

各時点での内部の塩化物イオン量分布を再現するのに最適な表面濃度を決定したことになる。なお、実験解析での拡散係数は、土木学会・コンクリート標準示方書¹⁾に示されている、式(3)の回帰式によりコンクリート配合に対応する値を求めた。

$$\operatorname{Log} D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \quad (3)$$

ここで、 W/C ：水セメント比

次に、既往の研究成果⁶⁾を参考して、式(1)で求められた拡散係数を 20 倍して電食実験における塩分浸透予測解析に適用した。

3. 実験概要

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。本研究では、コンクリート内部への塩分浸透に対する水セメント比(W/C)の影響を確認するため、 W/C の異なる二種類の供試体を用意した。実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-2に示す 250×400×100mm の板状のものである。打設する際の練り混ぜ水には NaCl 水溶液を用い、供試体中の塩化物イオン量 Cl^- を 0.3kg/m³ となるように調整した。0.3kg/m³ の塩分濃度は、鉄筋腐食の許容塩化物イオン量(0.3～0.6kg/m³)⁷⁾を考慮し決定した。供試体は 28 日間

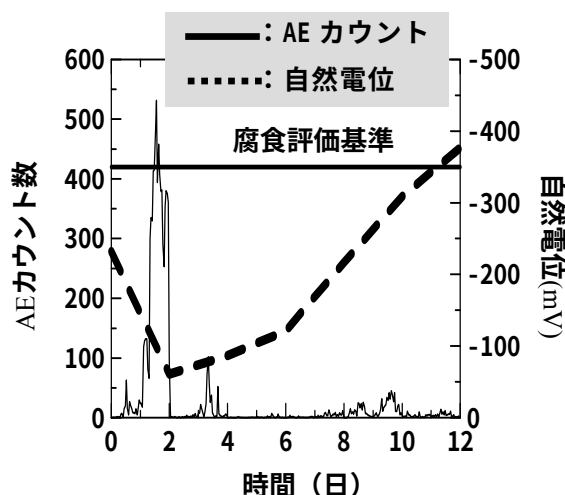


図-4 W/C=45%における
AE カウントと自然電位の比較

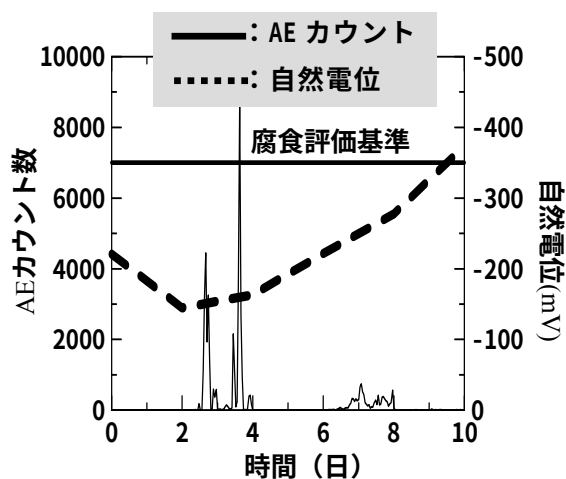


図-5 W/C=55%における
AE カウントと自然電位の比較

標準水中養生後、底面以外にエポキシ樹脂を塗布し、その後、電食実験を行った。図-3 に示す水槽に 3%NaCl 水溶液を入れ、底に銅版を敷き、その上に供試体を置いて鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続し、既往の研究成果⁶⁾を参考として 100mA の定電流を通電させた。この場合の鉄筋はすべて溶接されている。実験終了後、図-2 に示す位置でコアを採取して浸透面から 5cm の深さまで 1cm 毎に切断・粉碎し、コンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量⁸⁾を測定した。なお、電食実験中に鉄筋腐食の目安として、供試体表面を 20 点(5cm 間隔)に分割して、48 時間毎に水槽より供試体を取り出し、通電停止 30 分の後に測定面は乾燥しないよう処置し、自然電位を測定した。測定装置は SRI-CM-II、照合電極には銀／塩化銀電極を使用しており、測定された値は硫酸銅電極の電位に変換した。ここで、分割した点の半数以上が鉄筋腐食の評価基準である -350mV ⁹⁾ より卑となった時を実験終了とした。その結果、W/C=45%の供試体は 288 時間後、W/C=55%の供試体は 240 時間後に実験を終了した。自然電位計測と平行して、塩害による劣化進行を初期の段階で把握するために AE 測定を行った。AE センサは、図-2 に示す 5ヶ所に共振周波数 50kHz(プリアンプ内蔵防水型)のセンサを設置し、システムの利得 20dB、周波数帯域

10kHz～200kHz と設定して、自然電位の測定時を除き、連続的に AE 計測を実施した。

4. 実験結果

図-4 と図-5 に、異なる二種類の供試体における AE 発生数と自然電位を比較した結果を示す。AE 発生特性に関して双方を比較すると、AE 発生が顕著に表れる時期は W/C=45%に関しては 1 日目、W/C=55%に関しては 2 日目以降からと異なるものの、4 日目あたりで一旦、AE 発生が落ち着くことが共通する特徴として確認できる。このことから、4 日目までの間に示方書の潜伏期を過ぎて進展期に移行したと推測した。一方で、自然電位の傾向については、AE 発生が鎮静化した 6 日目(W/C=45%)および 4 日目(W/C=55%)あたりより急激に卑の方向に向かい始めている。これより、AE 計測が自然電位法と比較して、鉄筋腐食状況をより早期の段階で把握できる可能性が示された。AE の発生が鎮静化した 4 日目以後、W/C=45%では 8～10 日目、W/C=55%では 6～8 日目付近で二次的な AE 発生が確認された。そこで、この時期に示方書の進展期から加速期へ移行し、鉄筋腐食により、ひび割れが発生したと推測した。なお、W/C の影響については、W/C=55%より W/C=45%の供試体が長期にわたり電食実験を行ったことから、W/C の相違がコ

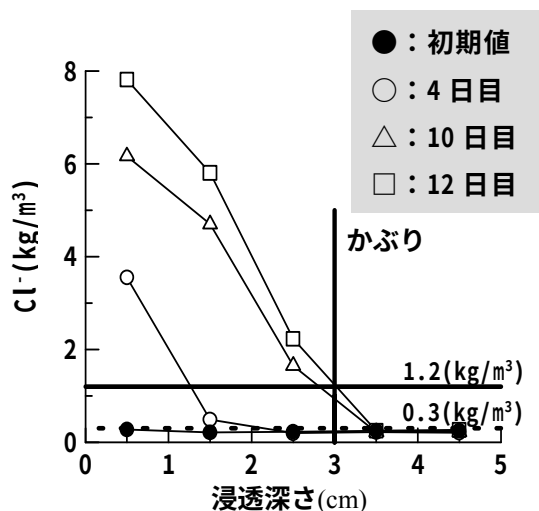


図-6 W/C=45%における
電食期間別全塩分量結果

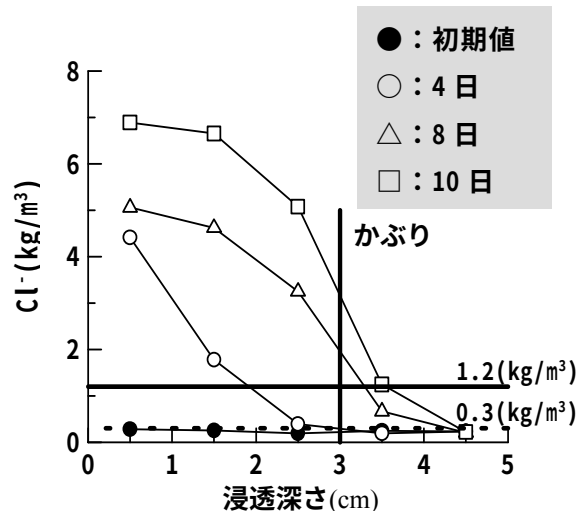


図-7 W/C=55%における
電食期間別全塩分量結果

ンクリート中への塩分浸透特性に深く関連していることも確認された。

以上の結果より、図-4と図-5に示されるように、潜伏期から進展期に相当する最初のAE頻発期と、進展期から加速期へ移行すると思われる二次的なAE頻発時期について、塩分浸透状況および鉄筋腐食状況を把握するため、W/C=45%については4日間と10日間、W/C=55%については4日間と8日間の電食実験を追加した。各実験終了後、それぞれに全塩分量と可溶性塩分量を測定した。

図-6と図-7に、W/Cの異なる二種類の供試体における電食期間別の全塩分量の測定結果を示す。ここで、図中における実線は $\text{Cl}^- = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、点線は $\text{Cl}^- = 0.3 \text{ kg/m}^3$ を示す。この二つの規制値は、土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」で記述されているコンクリート単位容積あたりの鋼材位置における塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度である。図-6のW/C=45%においては、電食実験を4日間行った供試体のかぶり位置での全塩分量は 0.3 kg/m^3 付近にあり、実際に鉄筋をはつり出したところ、僅かではあるが鉄筋の腐食が認められた。また、電食実験を10日間以上行った供試体については、かぶり位置での全塩分量が 1.2 kg/m^3 付近にあり、供試体の

底面にひび割れが確認された。さらに、鉄筋をはつり出したところ、完全に鉄筋が腐食していることが認められた。なお、10日間以上電食実験を行った供試体と4日間電食実験を行った供試体の全塩分量分布を比較すると、前者では、表面付近からかぶり位置までの含有塩化物イオン量が非常に高い値を示していることが認められる。これは、4日目以降には供試体の底面にひび割れが発生し、それが進展したことで塩分の進入がさらに促進されたためと考えられる。図-7では、W/C=55%の結果では、4日間電食実験を行った供試体の全塩分量は、W/C=45%と同様、 0.3 kg/m^3 付近にあり、実際に鉄筋をはつり出したところ、一部に鉄筋腐食が認められた。電食実験を8日間以上行った供試体については、かぶり位置での全塩分量が 1.2 kg/m^3 を大きく超えており、W/C=45%に比べて、より顕著にひび割れが発生していた。鉄筋をはつり出したところ、かなりの範囲にわたって鉄筋腐食が確認できた。さらに、図-6、7の二つの図を比較すると、W/C=45%の供試体では電食期間が長期化しても、浸透深さがかぶりを越える箇所(4cm～5cm)での全塩分量が、W/C=55%の供試体に比べて、大きく増大することはない、あまり変化しないことが確認できる。これは、W/Cが小さいため、コ

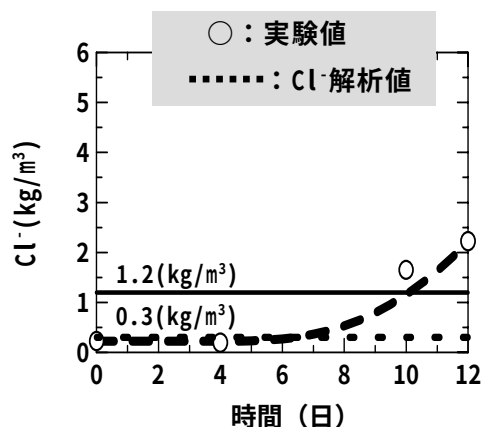


図-8 W/C=45%における
3cm の Cl^- と実験値との関係

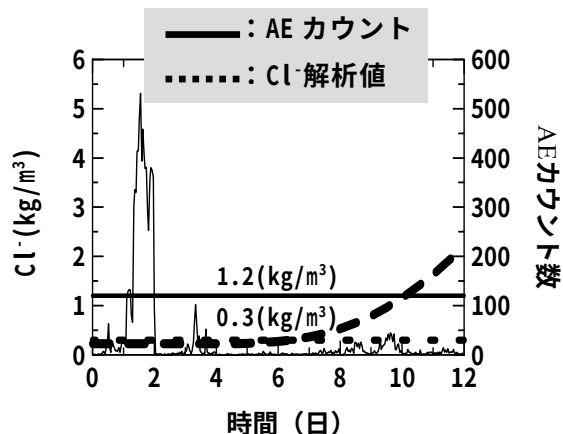


図-10 W/C=45%における
3cm の Cl^- と AE カウント数との関係

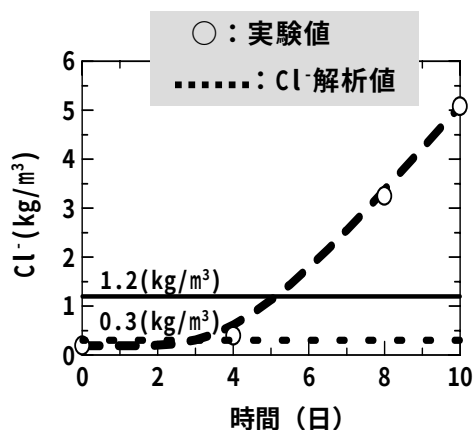


図-9 W/C=55%における
3cm の Cl^- と実験値との関係

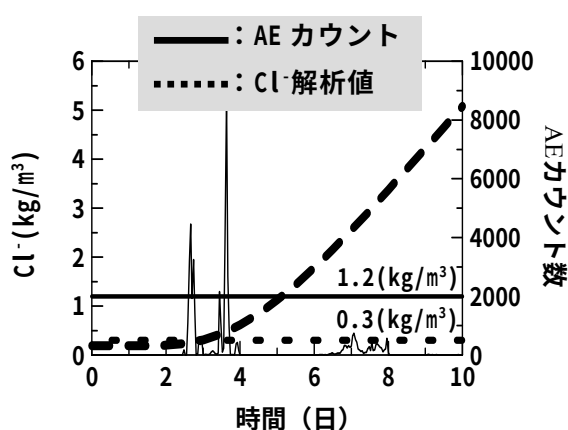


図-11 W/C=55%における
3cm の Cl^- と AE カウント数との関係

ンクリート中の塩分浸透が抑制されていることを示している。

以上の結果により、AE 法が自然電位法より鉄筋腐食状況を早期の段階で把握できることが確認された。そして、AE の第一次頻発期は鋼材の腐食発生限界濃度である 0.3kg/m^3 付近に相当し、第二次の頻発期はコンクリートひび割れ発生限界濃度としての 1.2kg/m^3 付近に相当すると考えた。これより、AE 発生特性により、鉄筋腐食の進展期および鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ開始の加速期が判断できる可能性が示された。

5. 解析結果および考察

ここまでの実験結果と鉄筋付近の塩分濃度を対応させるために、拡散解析を実施した。図-8と図-9にW/Cの異なるコンクリートについて、式(2)より算出したかぶり(3cm)位置での塩化物イオン解析値と実測値の関係を経過時間によって示す。なお、図中に示す実線は $\text{Cl}^-=1.2\text{kg/m}^3$ 、点線は $\text{Cl}^-=0.3\text{kg/m}^3$ を表している。双方の図より、解析値と実験値がほぼ一致していることがわかる。特に、W/C=55%については、よく一致している。これより、式(1)によって、電食実験中のコンクリート内部の塩分浸透現象を拡散現象として解析する妥当性が明らかになった。このことは、電気泳動による塩化物イオンの移動

も第一義的には拡散現象として見なせることを示していると考えられる。

図-10 と図-11 には、AE 計測結果とかぶり位置における塩化物イオン解析値を経過時間によって示す。W/C に関わることなく、第一次に AE が急激に発生する時期は、鉄筋位置の塩分濃度が 0.3kg/m^3 を越える時期に一致している。したがって、この時期より潜伏期から進展期へ移行したと判定できる。次に、含有塩化物イオン量が 1.2kg/m^3 を越える時期と第二次の AE 頻発期もほぼ一致している。したがって、この時期に進展期から加速期へ移行したと判定してもよいと思われる。これらの結果より、AE 法を用いることにより、示方書の塩害による劣化進行過程の時期を定量的に判定できる可能性が明らかとなった。

6. 結論

コンクリートへの塩分浸透による鉄筋腐食を評価するために、鉄筋腐食と AE 発生挙動の関係から鉄筋腐食の進行過程を早期段階にて判定する方法についての検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) AE 法が自然電位法より早く、かつ定量的に鉄筋腐食状況を初期の段階で把握できることが確認された。
- (2) 電食実験中の塩分浸透は拡散現象として予測解析できることが確認された。このことは、内部の塩分濃度分布の解析値と実験での分析値により確認された。
- (3) 鋼材腐食発生限界濃度に関して、コンクリート中の含有塩化物イオン量が 0.3kg/m^3 付近で潜伏期から進展期へ、 1.2kg/m^3 付近にて進展期から加速期へ移行することが明らかになった。
- (4) 上記の潜伏期から進展期、進展期から加速期へ遷移する時期が、それぞれ AE 発生の第一次頻発期と第二次頻発期として判定できる可能性が明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」，2001 年制定
- 2) 村上祐治，山下英俊，喜多達夫，大津政康：鉄筋腐食した部材の力学挙動と AE 特性，第 8 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，pp.183-188，1991.11
- 3) Sanchun,Y. Kejin,W. W.Jason Weiss. And Surendra,P.S. : Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of reinforced concrete, ACI MATERIALS JOURNAL, Vol.97, No.6, pp.637-644, Nov./Dec.2000
- 4) A.Moczko, A.Pszonka and P.Stroeven : Acoustic Emission as a useful tool for reflecting cracking behavior of concrete composites, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.805-812, Sep.1995
- 5) 佐伯竜彦，植木聡，嶋毅：コンクリート表面における塩化物イオンの濃度に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.985-990, 1999
- 6) 友田祐一，鎌田憲治，大津政康：コンクリートの塩分浸透機構と予測に関する考察，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.192-193, 1999.9
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」耐久性照査型，平成 11 年版
- 8) 船戸巳和男：硬化コンクリート中に含まれる塩分分析法，日本セメント(株)，中央研究所共同実験資料，1984
- 9) 小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993