

## 土木分野における鋼材腐食診断と防食に関する調査・研究の変遷および今後の展開

濱田, 秀則  
Kyushu University

<https://hdl.handle.net/2324/4479605>

---

出版情報 : Concrete Journal. 59 (5), pp.372-377, 2021-05. Japan Concrete Institute  
バージョン :  
権利関係 :

# 土木分野における鋼材腐食診断と防食に関する 調査・研究の変遷および今後の展開

濱田 秀 則\*

## 1. はじめに

本稿はこの特集号のテーマである“鋼材腐食診断と防食の考え方”の土木構造物に関する総説とするものである。既往の数多ある知見を整理して、コンパクトにまとめなくてはならない・が、うまくまとまっているかはかなり疑わしい。この特集号の主査である上田先生（徳島大学）から本稿への執筆を依頼された時は、少し簡単に考えすぎている。“何とかなる”と高を括っていたが、次第にその難しさが重圧となってきた。

何を書けばよいのか、何を求められているのか、明確に目標を設定するまでもかなりの時間を要した。そこで、まずこれまでの委員会などの複数員のチームでの活動の成果を概観することとし、さらに、研究者が個人（あるいは個々の機関）として発表している研究成果を再確認してみることにした。これらに、自らのこれまでの経験も踏まえて、“鋼材腐食診断”についての現状を総括するとともに、筆者が日頃考えていることを書かせていただき総説とさせていただくこととした次第である。

## 2. 学会における委員会活動など

### 2.1 土木学会における委員会活動の系譜

ここでは文献1)~3)に連なる土木学会コンクリート委員会におけるⅢ種委員会の成果について述べる。中でも1)は技術の総括的な記述としては大変画期的なものであり、この委員会の成果が数年後のコンクリート標準示方書の維持管理編の創設の推進力の一つとなったと言える。この委員会活動で収集整理された文献は539件にのぼっており、この委員会活動までも鉄筋腐食に関する多くの研究が実施されていたことがわかる。この報告書において、電気化学的な鉄筋腐食診断に関する今に至る重要技術がすでに網羅されて解説されており、さらには、防食・補修技術として、表面被覆工法、断面修復工法、電気防食工法、電氣的脱塩工法（デサリネーション）、再アルカリ化工法についての解説が詳述されている。

文献2)の委員会は、先の委員会の継続委員会である。

ここで収集されている文献数は437件にのぼっており、この当時、鉄筋腐食に関する研究が我が国で精力的に実施されていたことがわかる。この継続委員会（Ⅱ期）においてはⅠ期の委員会において残された課題をフォローするとともに、新しい知見も紹介されている。鉄筋腐食診断については、電気化学的試験の項目は増えていないが、コンクリート中に埋設するタイプの電気化学的センサの紹介が新たに追加されている。

文献3)の委員会は2)の委員会から約10年の時を置いて設置されており、委員長も宮川先生（京都大学）から武若先生（鹿児島大学）に引き継がれている。鋼材腐食診断技術については横田博士（㈱四国総合研究所）を主査として活動がなされており、また、防食、補修、補強に関しては本特集号の主査である上田先生（徳島大学）が主査を務められている。委員会全体で収集された文献数は206件である。鉄筋腐食診断技術では従来の技術から最新の技術までほぼすべての技術が網羅されており、今でも技術情報として色褪せることなく、また現場技術者が手にするテキストとしても十分機能する内容である。この三連の委員会以外にも土木学会において関連する委員会活動は存在するが、この三委員会が鋼材腐食診断に関してはエポックと言っても過言ではない。

ここで、コンクリート技術シリーズについて少し述べておきたい。コンクリート技術シリーズは、土木学会コンクリート委員会のⅢ種委員会の報告書であり、学会の正式な刊行物とは位置付けられていない。したがって、今後要請があっても増刷されることはない。学会にも余部はないことから、これらを所持されている場合は、廃棄、紛失されることのないようお願いしたい。

### 2.2 JCIにおける委員会活動の系譜

日本コンクリート工学会JCIにおいても精力的に委員会活動が行われている。これらの活動を通じて知見の収集・整理、技術の体系化が進められている。なお、土木学会での活動は土木分野の活動であるが、JCIでの活動は土木と建築の協働である。JCIでの委員会における成果物として文献4)~9)が、今現在筆者の手許にある。

文献6)の通称“リハビリ委員会”は筆者も参画しており、補修材料および補修工法についての情報をまとめ、

\* はまだ・ひでのり／九州大学大学院 工学研究院 教授（フェロー会員）

補修の体系化を進める起点となったものである。この報告書において「過酷環境下のコンクリート構造物の補修・補強ガイドライン」の考え方が提示されており、実務者がスムーズに補修・補強を実施できるようにその手順が示されている。

リハビリ委員会を受けて設立されたのが、文献8)の通称“複合劣化委員会”である。それまでは単独の劣化事象について研究・調査が進められていたが、複数の劣化が同時に起こる複合劣化に議論の範囲が広がった。複合劣化はその名のとおりに複雑な劣化機構となり、かつ単独劣化よりも劣化速度が早くなることもあることから維持管理が難しくなる。この委員会の成果として、「複合劣化構造物の補修・補強ガイドライン(案)」が提示されているが、リハビリ委員会でのガイドラインと同様にこのガイドラインも現在まで十分に活用されていない。今後、必要とされ見直される可能性もあると思われる。

文献7)の委員会においては、当時の最新・最先端の非破壊検査技術が総括して紹介されている。弾性波法、電磁波法、電気化学的手法の3つの異なる原理の技術を分類・整理し、電気化学的測定法に関しては、永山博士(財)日本建築総合試験所)と横田博士(株)四国総合研究所)が中心となり取りまとめている。なお、お二人はそれぞれ建築、土木で鉄筋腐食診断技術の向上に大きく貢献された研究者である<sup>10)</sup>。計測方法、結果の判定規準さらには計測の事例が詳しく記述されている。

JCIにおいては、2001年に第1回のコンクリート診断士試験が行われており、そのためのテキストとして同年「コンクリート診断技術—基礎編・応用編—」が発刊された。このテキストはコンクリート診断に関連する技術を総括するものであり、それまでの調査研究活動の成果がほぼ網羅されている。土木学会のコンクリート標準示方書とともに、その時々における一つの完成された姿とも言えるものであり、数年間隔で記述内容が更新されてきている。

### 2.3 土木学会・コンクリート標準示方書 [維持管理編]の系譜

コンクリート標準示方書に維持管理編が初めて登場したのが、平成13年(2001年)1月である。その後すでに3回の改訂を経て、第4号に相当する2018年制定版が平成30年(2018年)10月に発刊されている。

第1号に相当する2001年制定版<sup>11)</sup>における鋼材腐食診断に関する記述としては、“8章 詳細点検”の中の“解説表8.2.1 劣化機構に基づく点検方法の選択基準”および“10章 試験および調査の方法”が該当箇所である。

第2号に相当する2007年制定版<sup>12)</sup>では、“4章 点検”の“解説表4.7.2 調査の方法と得られる情報の例”において初版の記述が踏襲されている。なお初版の10章に記述されている内容は、4章の中に残されている。

第3号に相当する2013年制定版<sup>13)</sup>では、“3章 点検”“解説表3.7.2 調査方法と得られる情報の例”に同様の記

述が踏襲されている。さらにこの2013年制定版の「維持管理編：劣化現象・機構別」に“4章 鋼材腐食”が新設されている。この中には診断技術としての新しい記述はないが、鋼材腐食の原因推定の考え方が記されている。

第4号に相当する2018年制定版<sup>14)</sup>では、“3章 点検”“解説表3.7.2 調査方法と得られる情報の例”において既往の記述が踏襲され、さらに“解説表3.7.3 調査に関連する基準等”が新たに追加されている。これにより、個別の試験方法を規定する基準・規準がすぐにわかり大変便利になっている。2013年制定版で新設されていた“4章 鋼材腐食”自体は2018年制定版では削除されているが、その内容は“3章 点検”“3.4 定期点検”の解説中に残されている。

示方書維持管理編における鋼材腐食診断に関連する記述の変遷をごく簡潔にまとめた。初版の2001年制定版の記述が少しずつ修正・追記されながらも基本的には踏襲されている。示方書における記述は、試験項目の紹介とともに、維持管理のプロセスの中の点検において、調査の目的を達成するために有効となる試験項目を示すものである。示方書「維持管理編」は、関連技術の一つの完成された姿とも言えるものであり、今後も改訂がなされるたびに最新の情報に更新されていくこととなる。

### 2.4 鋼材腐食診断に関連する書籍など

鋼材腐食診断方法あるいは考え方をレビューするにあたって、文献15)~17)まで遡ってみた。なお、それより古い資料として、筆者の手元にある中では文献18)が最も古い。この中で腐食状況の指標として、“さびた長さ”が使われている。この文献でかぶり厚さと許容ひび割れ幅の関係、さらにはかぶり厚さとさびの長さの関係が示され、防食のために確保すべき最小のかぶり厚を50mmと提示している。この数値は後の知見を合わせて考えても的確なものであることがわかる。

戻って、これらの書籍<sup>15)~17)</sup>の鉄筋の腐食診断に関する記述内容は現在でも十分に通用するものである。なお、文献17)について特筆すべきは、コンクリートの酸素拡散性の試験方法の記述があることである。拡散セルの両端に酸素ガスと窒素ガスを流す仕組みの拡散試験方法を紹介し、実際の計測データも示されている。コンクリート中の酸素の拡散係数を計測する方法を示しているのは、筆者の知る限りこの書物が唯一である。最近の研究ではこの拡散試験はほとんど行われていないようであるが、今後必要となることもあり得るであろう。

## 3. 鋼材腐食診断とは

### 3.1 ミクロとマクロについて

鋼材腐食診断についての記述を始めるにあたり、まずミクロとマクロの対比について述べる。ミクロ(微視的)とマクロ(巨視的)は対比する用語として様々に使われている。腐食の分野においてもミクロセル、マクロセル



という用語がある。これは、アノードとカソードの距離の大小についてマイクロとマクロを使用しているものであるが、さらには、腐食反応の継続時間もマイクロセルとマクロセルとでは違いがあると考えられる。このように、マイクロとマクロは絶対的に定義されるよりも相対的な対比として用いられることが多い。

コンクリート中における塩化物イオンの移動を例にマイクロとマクロを考えてみる。コンクリート中における塩化物イオンの移動は、濃度勾配を駆動力とする拡散現象として扱われる。しかし、塩化物イオン自身が濃度を感知して移動しているわけではなく、イオン自身は不規則なブラウン運動をしている。高濃度域から低濃度域に移動するイオンに加えて、低濃度域から高濃度域に移動するイオンも存在する。しかし、高濃度域から低濃度域に移動するイオンの数が相対的に多くなることで、マクロに見れば高濃度域から低濃度域に移動しているように見えることになる。フィックの法則で記述されるイオンの拡散は、ある意味マクロな視点での理解と行うことができ、さらにマイクロな視点でのイオンの挙動を記述するためには確率論の助けが必要となる。ただし、耐久性設計などの実用上は、マクロな視点での議論で十分である。なお、文献19)においてすでに、マクロ的に見たコンクリートの耐久性、マイクロ的に見たコンクリートの耐久性という視点でマクロとマイクロという用語が用いられている。

以後の記述においては、マイクロとマクロを対比させつつ述べてみたい。

### 3.2 腐食速度の診断

鋼材腐食診断という場合、大きくは腐食速度の診断と腐食量（腐食状況）の診断に分かれる。

腐食速度の診断という場合、マイクロの視点からと、マクロの視点からとは考え方が異なる。マイクロの視点では、腐食が電気化学的反応であることから、電気化学の理論を用いて考察する。一方、マクロの視点とは、構造物のライフスパンおよび劣化事象を念頭において考察することと言える。

電気化学とは“化学反応のエネルギーと電気エネルギーとの相関関係を検討する”ことを主目的とする学問であり、その理論は熱力学的な平衡論、反応速度論、電解質溶液論から構成されている<sup>20)</sup>。電気化学に関するテキスト類は無数に存在するが、筆者がこれまでに手にしたテキストとしては文献20)~23)などがある。腐食科学・腐食工学はその基礎理論を電気化学に置いており、電気化学の一分野もしくは派生分野である。さらに、電気化学の基礎として物理化学<sup>24)</sup>が位置づけられる。

電気化学の理論で腐食速度を考える場合、最終的には分極抵抗に行きつく。理論の出発点は、化学反応の進行方向は反応前後の自由エネルギー（化学ポテンシャルの総和として表現される）の大小関係で決まり、反応速度は反応の過程で経ることになる高エネルギー状態に移行

する際に超えなくてはならない自由エネルギーバリアによって決まるという考え方である。この自由エネルギーバリアの指数表示で定義される反応速度定数に電位勾配の補正を入れ、外部電流（密度）を正負の反応電流（密度）の和とし、さらに交換電流密度の概念を入れることにより、Buttler-Volmerの式を得る。鋼材の腐食の場合、カソード反応が逆反応（負反応）ではないが、交換電流密度が腐食電流密度に相当すると考えることで腐食反応に対してもButtler-Volmerの式を適用する<sup>25), 26)</sup>。この式に対して、過電圧の小さい領域で近似式への変換を施すことで分極抵抗に行きつく。このように電気化学的には数学的考察を経て分極抵抗の概念が得られ、数式上で交換電流（腐食電流）と“分極抵抗の逆数”が比例関係にあることが示される<sup>25)~27)</sup>。

分極抵抗はその名のとおり電気抵抗に相当するものであるが、その意味は、Randleの等価回路として示される回路モデルにおける $R_p$ に相当するものである<sup>28)</sup>。コンクリートの電気抵抗成分である $R_c$ と分離して計測する方法として交流を用いるACインピーダンス法が確立されている。この方法で求められる腐食速度は、ある領域の鋼材表面において流れている腐食電流であり、今現在における腐食速度となる。

一方、マクロな視点での腐食速度とは、年単位あるいは10年単位で鋼材の腐食が進展する速度とも言え、例えば、mm/yearの単位で示される。参考までに示すと、港湾施設に用いられている鋼管杭あるいは鋼矢板などの鋼材の場合、最も過酷な環境である飛沫帯および集中腐食が発生しやすい平均干潮位（M. L. W. L.）直下において0.3 mm/yearという腐食速度が標準値として示されている<sup>29)</sup>。この数値は、数多くの実構造物の腐食調査を経て得られたものであり、実用的には十分な精度である。

分極抵抗の測定で得られた腐食電流（密度）の単位を変換することで実用的な腐食速度を算出するが、この計算において、得られた腐食速度が今後も継続するとの仮定が入る。このことが、得られた腐食速度の信頼性を得る際の妨げになっていると筆者は考えている。腐食が開始するとアノードとカソードの電位は分極により近づき、ある時間が経過した後に電位差が解消され腐食は停止すると考えられるが、この継続時間については電気化学には解答がない。

ここで、筆者らが以前行った研究を紹介したい<sup>30), 31)</sup>。腐食生成物である錆を観察すると、多くが写真-1に示す



写真-1 多くの錆に見られる層状の構造

ような層状を呈している。この層の中を顕微鏡で観察したところ、大きな層の中にさらに小さな層が存在することがわかった。我が国で採取した試料ではこの大小二つの層が観察されたが、インドネシアで採取した試料では小さな層しか観察されなかった。このことから、我が国においては腐食の進行には季節変動と日変動があるが、インドネシアにおいては日変動しかないと考えられた。いずれにしても、腐食反応にはサイクルがあり、反応の停滞期間があると考えられる。進行期間と停滞期間を明示することは出来ないが、少なくともすべての時間で腐食反応が継続しているわけではないと考えられる。この研究では顕微鏡を用いてはいるものの、腐食に関する研究という観点からはマクロな研究に分類される。

上に述べた例からも、ミクロな視点での計測結果とマクロな視点での計測結果をうまく接続する理論もしくは知見は未発達段階であると言える。これに類する研究事例もあるが<sup>32),33)</sup>、さらなる知見の蓄積が望まれる。電気化学的に精緻でかつ高度な計測結果をマクロな視点での考察に十分に活かすことで真に役立つ技術に歩進すると期待される。

### 3.3 電気化学的計測に関する新しい試み

鋼材の自然電位を求める方法は古くからあり、分極抵抗を求める方法としてはACインピーダンス法がほぼ確立されている。一方で、現時点での計測方法ではコンクリート中の鉄筋との電気的接続が不可欠である点や、ACインピーダンス計測機器が比較的高価であることなどを考慮した、新しい計測方法の開発も進められている。筆者が知る範囲ではあるが、それらの試みを紹介したい。

一つは、文献34)、35)などに紹介されているサイプ法(CIPE: Current Interrupted Polarizing Extra-polation Method)と名付けられた方法である。ACインピーダンス法ではなく、分極曲線を用いた腐食速度計測法である。この方法は従来から用いられているTafel直線の勾配から腐食電流を求める方法の応用であるが、勾配の求め方に新しい方法が取り入れられている。このサイプ法の導入に加えて、照合電極と対極が一体となったコンクリート埋込み型のセンサを用いて腐食電流を計測する試みも報告されている<sup>36)</sup>。

文献37)に報告されている試みは、プローブ電極と称するモニター用の鉄をコンクリートに埋め込み、その分極抵抗を計測することで近傍の鉄筋の状態を推定するというものである。この試みのようにモニターをコンクリートに予め埋め込んでおくという方法に関しては、すでに実用化されている技術もある<sup>38)~40)</sup>。

文献41)に報告されている方法は内部鉄筋へのリード線の接続をせずに分極抵抗を計測する方法を試みたものである。得られたデータと既往の方法で得られた結果には一定のずれが生じているようであるが、定性的には傾向がつかめており今後の発展が期待される方法である。

以上、腐食速度の計測について述べてきた。この章の冒頭でも述べたが、鉄筋腐食診断には腐食速度と腐食量の二つの側面がある。ここで言う腐食量(腐食状況)とは、腐食程度のことであり、鋼材が露出している場合は腐食面積率、腐食減量あるいは断面欠損率などで表示する。露出していないコンクリート中の鉄筋に対して非破壊で腐食状況の診断を行うことはかなり難しく、既存の方法としては、X線透過法(NDIS 1401)、特に鋼材の破断検知方法としては漏えい磁束法が開発されている<sup>14)</sup>。

スペースの制約から本稿では腐食量に関しては以上の記述とさせていただくことをお許し願いたい。

## 4. 将来展望 ー私見も入れてー

### 4.1 腐食技術者とコンクリート技術者の協働への期待

ミクロとマクロという言葉で、腐食を対象とする場合の視点の違いを説明することを試みた。乱暴な分類かもしれないが、腐食技術者は化学の素養を基本としミクロな視点で考察する。一方、コンクリート技術者は土木工学の素養を基本としマクロな視点で考察する。このために電気化学、腐食工学を難解な学問と感じているコンクリート技術者は多いのではないと思う。(筆者の個人的意見に過ぎないが)

近年、腐食の専門家の方にコンクリート中の鉄筋の腐食に関心を持っていただけるようになった<sup>37),42)~44)</sup>。電気化学的に詳しい考察はやはり腐食の専門家の領域であるし、電気防食を適用する場合も腐食の専門家の協力がなければ難しい。

しかし、コンクリート中の鋼材腐食を考える場合、最終的には構造物の劣化速度が重要である。腐食速度を劣化速度に変換して構造物の耐久性を評価し、将来予測を行う<sup>45)~48)</sup>。そのためにはミクロな視点で得たデータをマクロなデータに換算する必要がある。手前味噌かもしれないが、このミクロとマクロの接続はコンクリートの専門家が担当するべきであると思う。その理由は、鉄筋が腐食することにより発生するコンクリートの変状であるひび割れ、かぶりの剥落、最終的には構造性能の低下までを総合的に考察しなければならないからである。その意味では、今後はコンクリート工学の中に、電気化学や腐食工学の基礎も導入していくことが求められていると言えよう。

### 4.2 コンクリート腐食工学・コンクリート電気化学の創造への期待

文献49)、50)の山口先生(鹿児島大学)を委員長として活動がなされたJCIの委員会はコンクリートの専門家への電気化学・腐食工学の啓蒙を目的としたものである<sup>51)</sup>。コンクリート構造物の維持管理において、電気化学的な計測を行う場面が多くなってきていることや電気防食に代表される電気化学的防食工法の適用が今後増えてくることが予想されていることがその背景にある。こ



これらの委員会の委員には腐食の専門家も含まれており、腐食分野とコンクリート分野の協働での成果となっている。

前節でも述べたが、これらの成果もベースとして“コンクリート腐食工学”あるいは“コンクリート電気化学”とも称することのできる新しい学問体系を創造する時期にきているのではないかと思う。これはミクロとマクロの融合した学問体系であり、コンクリート工学の中に位置づけるべきものであろう。

## 5. おわりに

冒頭に紹介した土木学会やJCIにおける委員会活動には若き日の宮川豊章先生（京都大学名誉教授）が委員長として力強く牽引されたものが多い。筆者も委員の端くれとして参加させていただき、研究に関しても、示方書などの基準を制定する業務に関しても本当に多くのことを勉強させていただくことができた。

筆者は1986年4月に港湾技術研究所の研究官に採用され社会人のスタートを切ったが、その時すでに大即信明先生（東京工業大学名誉教授）が電気化学的計測方法を確立されており<sup>52),53)</sup>、筆者はそれを勉強することで研究を始めることができた。自分自身で零から腐食の研究を始めることはおそろくできなかつたと思っている。

2006年4月九州大学に転じて以来、武若耕司先生（鹿児島大学名誉教授）にはいつもご指導をいただいた。筆者が指導している博士課程学生の論文調査委員をお願いすると、いつも快くお引き受け下さり、論文に対して常に的確なご助言、ご指導をいただくことができた<sup>54)</sup>。

この特集号に執筆されている方々の中には、宮川先生、大即先生、武若先生のご指導を受けた方も多いのではないかと思う。先生方への感謝をもって本文の結語とする。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ26、鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向—コンクリート委員会腐食防食小委員会報告一、平成9年12月
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ40、鉄筋腐食・防食に関する研究の現状と今後の動向（その2）—コンクリート委員会腐食防食小委員会（2期目）報告一、平成12年12月
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ86、コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）委員会報告書、平成21年10月
- 4) 財団法人コンクリート工学協会：JCI-SCコンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）、昭和62年（1987年）4月
- 5) 財団法人コンクリート工学協会：委員会報告、鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術—技術の現状一、防食研究委員会、1989年1月
- 6) 財団法人コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会 報告書、1998年10月
- 7) 財団法人コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会 報告書、2001年3月
- 8) 財団法人コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理研究計画委員会 報告書、2001年5月
- 9) 財団法人コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム ■委員会報告書 ■論文集、コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会、2004年10月
- 10) 例えば、横田 優：コンクリート中の鉄筋腐食速度評価における

Stern-Geary 式中の比例定数B値について、第51回セメント技術大会講演要旨、1997年

- 11) 土木学会：[2001年制定]コンクリート標準示方書 [維持管理編]、平成13年1月
- 12) 土木学会：[2007年制定]コンクリート標準示方書 維持管理編、平成20年3月
- 13) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編、平成25年10月
- 14) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]、平成30年10月
- 15) 大即信明・榎野紀元・片脇清士・小林明夫・宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ、塩害（I）、技報堂出版、1986年5月
- 16) 大即信明・榎野紀元・片脇清士・小林明夫・友澤史紀・榊田佳寛・宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ、塩害（II）、技報堂出版、1991年4月
- 17) 小林豊治・米澤敏男・出頭圭三：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3、鉄筋腐食の診断、森北出版、1993年5月
- 18) 神山 一：コンクリート中の鉄筋のさび、セメント・コンクリート、No.308（コンクリートの耐久性特集）、1972年10月
- 19) 大島久次：技術随想“マクロ的とミクロ的からみたコンクリート建造物の耐久性”、セメント・コンクリート、No.308（コンクリートの耐久性特集）、1972年10月
- 20) 玉虫伶太：電気化学、(株)松岳社、1967年12月
- 21) 玉虫伶太・高橋勝緒：エッセンシャル電気化学、東京化学同人、2000年1月
- 22) 渡辺 正・中林誠一郎：電子移動の化学—電気化学入門、朝倉書店、1996年4月
- 23) 喜多英明・魚崎浩平：電気化学の基礎—電気化学を志す人へ、技報堂出版、1983年4月
- 24) 例えば、阿武聰信・立田清朗：基礎物理化学（改訂版）、廣川書店、昭和54年2月（筆者の教養部時代の教科書である）
- 25) 水流 徹：腐食の電気化学と測定方法の注意点I 腐食の電気化学 基礎的な事項、防錆管理、Vol.65, No.1, 2021
- 26) 水流 徹：腐食の電気化学と測定方法の注意点II 腐食現象の電気化学的解析、防錆管理、Vol.65, No.2, 2021
- 27) 例えば、濱田秀則：RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究、港湾技術研究所報告、第38巻、第2号、運輸省港湾技術研究所発行、1999年6月
- 28) 例えば、染谷 望：コンクリート分野で活用する電気化学的手法の基礎 ②鋼材腐食評価の難しさ、コンクリート工学、第55巻、第11号、2017年11月
- 29) 例えば、(財)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）、平成19年7月
- 30) 池田隆徳：コンクリート構造物の塩害およびアルカリシリカ反応に関わる診断技術の高度化に関する研究、九州大学学位論文、2012年3月
- 31) 濱田秀則・池田隆徳・佐川康貴：鋼材表面に生成される層状腐食生成物の微細観察、防錆管理、第55巻、第8号、2011年8月
- 32) 例えば、小林孝一・宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集、No.699/V-50、2001年2月
- 33) 例えば、金光俊徳：交流インピーダンス法を用いたひび割れ発生後および補修後の鉄筋コンクリートに対する腐食進行評価、材料、第69巻、第12号、pp.921~928、2020年12月
- 34) 竹子賢士郎・山本 悟・高谷 哲：分極曲線測定によるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.1, 2014
- 35) さび、154号、特許技術の紹介より、腐食速度測定法【特許第6026055号】、日本防蝕工業(株)発行、令和3年（2021年）1月
- 36) 金光俊徳・高谷 哲・山本 悟・竹子賢士郎・山本貴士：Tafel外挿法を用いた腐食モニタリングによるコンクリート中の鉄筋腐食進行評価、材料と環境、第67巻、第7号、2018年7月
- 37) 時枝寛之・岡本 樹・星 芳直・四反田功・板垣昌幸：電気化学インピーダンス法を用いたコンクリート内部鉄筋腐食のモニタリングに関する研究、材料と環境、第66巻、第9号、2017年9月
- 38) 東 洋輔・宮里心一・綾田隆史・向井浩三：犠牲陽極を用いたモルタル中鉄筋の腐食発生時期予測、材料、第57巻、第10号、2008年10月
- 39) 武若耕司：コンクリート構造物の耐久性向上のための対策技術の変遷（その1）、防錆管理、Vol.64, No.3, 2020
- 40) 武若耕司：コンクリート構造物の耐久性向上のための対策技術の変遷（その2）、防錆管理、Vol.64, No.4, 2020
- 41) 金光俊徳・小野新平：完全非破壊によるコンクリート内部鉄筋の腐食速度評価法の提案、土木学会論文集E2、第76巻、第4号、2020年10月

- 42) 例えば, 望月紀保・千葉丈夫: コンクリート中の鉄筋腐食モニターに分極抵抗法を適用した場合の鉄筋面積の評価について, 腐食防食 '87A-108, 1987年
- 43) 材料と環境—特集号—コンクリート劣化と鉄筋腐食1, Vol.68, No.10, (公社)腐食防食学会発行, 2019年10月
- 44) 材料と環境—特集号—コンクリート劣化と鉄筋腐食2, Vol.68, No.11, (公社)腐食防食学会発行, 2019年11月
- 45) 例えば, 小牟禮建一・濱田秀則・横田 弘・山路 徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 第41巻, 第4号, 2002年
- 46) 例えば, 小牟禮建一・濱田秀則・横田 弘・山路 徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリート工学論文集, 第15巻, 第1号, 2004年
- 47) 例えば, 長谷一矢・横田 弘・佐藤靖彦: 劣化度マップを活用した稚内港北防波堤ドームの予防保全型維持管理, 土木学会論文集E2, 第76巻, 第4号, 2020年10月
- 48) 濱田秀則: 港湾施設の保全に貢献する防錆・防食技術—栈橋構造のコンクリート上部工の塩害劣化および維持管理について—, 配管技術, 802, Vol.59, No.14, 日本工業出版(株)発行, 2017年12月
- 49) 日本コンクリート工学会: 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書, 2015年9月
- 50) 日本コンクリート工学会: 電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書, 2018年9月
- 51) 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化研究委員会: 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化, コンクリート工学, 第54巻, 第2号, 2016年2月
- 52) 例えば, 大即信明: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, 1985年9月
- 53) 例えば, 大即信明・横井聡之・下沢 治: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, 第360号/V-3, 1985年8月
- 54) 例えば, Pinta Astuti: A Study on Repair Strategy of Severely Damaged RC Structures by Using sacrificial Anode Cathodic Protection, 九州大学博士学位論文, 2020年9月  
(以下の文献は本文内では明示していないが, 本文を執筆する際に一般的に参考としたものである。以下は年代順に記載。)
- 55) 向坊 隆・米田幸夫・笹木和雄・玉井康勝: 材料科学の基礎I, 岩波講座 基礎工学12, 岩波書店, 1968年2月
- 56) 玉虫伶太: 活量とは何か, 化学One Point 1, 共立出版, 昭和58年(1983年)10月
- 57) 武若耕司: コンクリートの非破壊検査法(原理と手法)—鋼材腐食—, コンクリート工学, 第27巻, 第3号(特集 コンクリートの非破壊検査), 1989年3月
- 58) 伊藤健一: インピーダンスのはなし, SCIENCE AND TECHNOLOGY, 日刊工業新聞社, 1999年11月
- 59) 宮里心一・大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, 第12巻, 第2号, 2001年5月
- 60) 石原只雄監修: 最新 腐食事例解析と腐食診断法, (株)テクノシステム, 2008年8月
- 61) 審良善和・岩波光保・山路 徹・石中正人: 干満帯に暴露した各種セメントを用いたコンクリート中鉄筋の自然電位および分極抵抗と鉄筋腐食の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010年
- 62) 宮川豊章総編集: コンクリート補修・補強ハンドブック, 朝倉書店, 2011年6月
- 63) 山口明伸: コンクリート分野で活用する電気化学的手法の基礎 ① 電気化学の基礎とコンクリートの物性評価, コンクリート工学, 第55巻, 第10号, 2017年10月
- 64) 濱田秀則: コンクリート構造物の耐久性向上のための表面被覆の役割, 表面技術, 小特集 インフラ設備の防食と表面処理技術, 第72巻, 第1号, (一社)表面技術協会発行, 令和3年(2021年)1月