ＩＳＳＮ　０３８６-５８７８
土木研究所資料第 4131 号

土 木 研 究 所 資 料

塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋の マクロセル腐食形成機構

平成 21 年 1 月

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター

Copyright © (2009) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第 4131 号 2009 年 1 月

塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構

つくば中央研究所　材料地盤研究グループ　基礎材料チーム
（併）構造物メンテナンス研究センター　橋梁構造研究グループ　上席研究員　渡辺博志
構造物メンテナンス研究センター　橋梁構造研究グループ　上席研究員　木村嘉富
つくば中央研究所　材料地盤研究グループ　基礎材料チーム
（併）構造物メンテナンス研究センター　橋梁構造研究グループ　主任研究員　古賀裕久
構造物メンテナンス研究センター　橋梁構造研究グループ　研　究　員　中村英佑

要 旨

本報告書は，塩害環境下にあるコンクリート構造物中の鉄筋に生じるマクロセル腐食の形成機構について検討したものである．模擬供試体を製作し，屋外暴露試験や腐食促進試験などを実施した後に供試体の解体調査を行い，マクロセル腐食が塩害環境下の鉄筋腐食に及ぼす影響を実験的に検討した．この結果，マクロセル腐食による鉄筋の腐食速度は，鉄筋の腐食部分と非腐食部分の表面積比や気温，水分供給の有無，コンクリート中の塩化物イオン濃度などによって律速されたが，全体の腐食量に占める割合は，最大でも 30%以下に留まることを確認した．

キーワード： マクロセル腐食，コンクリート構造物，塩害，塩化物イオン，鉄筋腐食，腐食速度

目次

1, はじめに 1

2. マクロセル腐食の形成機構と研究の目的 2
2.1 マクロセル腐食の形成機構 2
2.2 既往研究のレビュー 4
2.3 本研究の目的 6
2.4 実験の特徴 7

3. 屋外暴露試験（シリーズⅠ） 8
3.1 実験の目的 8
3.2 供試体の概要 8
3.3 実験方法 10
3.4 実験結果および考察 11

4. 腐食促進試験（シリーズⅡ） 25
4.1 実験の目的 25
4.2 供試体の概要 25
4.3 実験方法 27
4.4 実験結果および考察 27

5. 外気温とマクロセル腐食形成機構の関係 31
5.1 実験の目的 31
5.2 供試体の概要 31
5.3 実験方法 31
5.4 実験結果および考察 33

6. 結論 36

参考文献 37

1. はじめに

コンクリート構造物は，適切な設計・施工がなされれば，十分な耐久性を有する．しかし，我が国のコンクリート構造物の中には建設から長期間経過したものや過酷な環境下で供用されてきたものも少なくない．これらのコンクリート構造物では，塩害や中性化などの作用によってコンクリート内部の鉄筋に腐食が生じ，腐食の進行とともに構造物の性能が急速に低下していくことが懸念される．

塩害環境下のコンクリート構造物で生じる鉄筋腐食は，外部から浸透する塩化物イオンの量が部材位置によって不均一となるため，一部で局所的に腐食が進行するマクロセル腐食となる可能性が高い．マクロセル腐食は，鉄筋表面全体で均一に腐食が進行するミクロセル腐食と異なり，局所的に腐食が進行し，その速度も速くなると考えられている．このため，マクロセル腐食が部材の塑性ヒンジ領域や応力集中部など構造的に重要な部位で生じた場合には，構造物の耐荷性能に甚大な影響を及ぼすこととなる．今後，既設コンクリート構造物を適切に維持管理していくためには，実環境で生じる可能性の高いマクロセル腐食の形成機構を解明し，これがコンクリート中鉄筋の腐食速度や部材の構造性能に及ぼす影響を適切に把握することが極めて重要となる．

マクロセル腐食に着目した研究はこれまでにも数多く実施されてきたが，その形成機構や腐食速度に及ぼす影響は必ずしも明確にされていない．ひび割れや打継目などの欠陥部や断面修復部でマクロセル回路が形成されて腐食速度が増加することが実験的に明らかにされているが，実際の塩害環境下にあるコンクリート構造物では，欠陥部が無く未補修のものであっても，地理条件や構造形式等により部材の一部に局所的に塩化物イオンが供給されてマクロセル回路が形成される可能性がある．このような場合に生じるマクロセル腐食に対しては，これまでほとんど検討が行われてこなかったのが現状である．

これらのことを踏まえ，本報告書では，塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食の形成機構を実験的に明らかにすることを目的とした．具体的には，塩化物イオン濃度の違いによって生じるマクロセル腐食を人工的に再現可能な模擬供試体を製作し，屋外暴露試験と腐食促進試験を行い，各種の電気化学的測定と供試体の解体調査の結果をもとに，マクロセル腐食の形成機構とその進行過程を解明することを試みた．また，マクロセル腐食により劣化した鉄筋の機械的性質についても引張試験を実施した結果をもとに考察を加えた．

2. マクロセル腐食の形成機構と研究の目的

2.1 マクロセル腐食の形成機構

コンクリート中の鉄筋の腐食は，鉄がイオン化するアノード反応と溶存酸素が還元するカソード反応が互いに等しい速度で進行することによって生じる．

アノード反応： $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (1)

カソード反応： $1/2\ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ (2)

鉄筋腐食の全反応はアノード反応とカソード反応が組み合わさった反応となり，式(3)のように水酸化第一鉄($Fe(OH)_2$)が生じる．

全反応： $Fe + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2$ (3)

水酸化第一鉄は，溶存酸素の供給により，式(4)の反応を生じて二酸化第二鉄($Fe(OH)_3$)の赤錆となる．

$Fe(OH)_2 + 1/4O_2 + 1/2\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3$ (4)

一般に，アノード反応とカソード反応が同じ位置もしくは極めて近い位置で生じる場合の腐食が，ミクロセル腐食と称される(図-2.1)．ミクロセル腐食は，鉄筋表面全体で均一に腐食が進行するため，モデル化も容易であり，自然電位法や分極抵抗法など各種の電気化学的測定を用いて腐食リスクや腐食速度を推定する方法が提案されている．

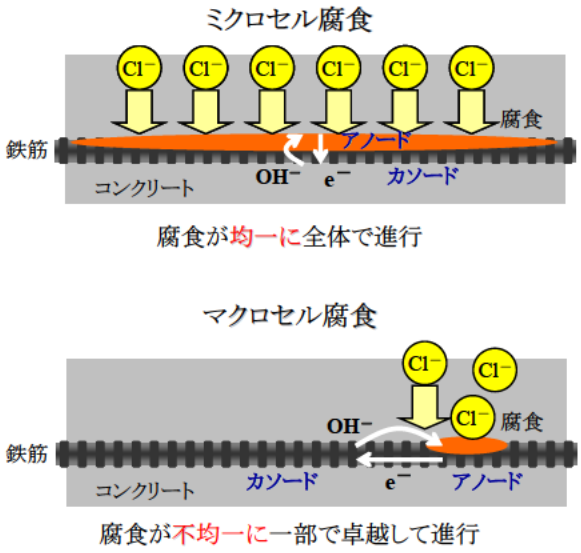


図-2.1　ミクロセル腐食とマクロセル腐食

一方，マクロセル腐食は，アノード反応とカソード反応が互いに離れた位置で生じ，一部で局所的に腐食が進行する(図-2.1)．例えば，ひび割れや打継目などの欠陥部で塩化物イオンや水，酸素など腐食因子の浸透が不均一となる場合や，断面修復後の母材コンクリートの残留塩化物イオン濃度が高い場合などでは，マクロセル回路が形成され腐食速度が増加することが指摘されている．また，先に述べたように塩害環境下にあるコンクリート構造物では，外部から供給される塩化物イオンの量が部材位置によって異なるため，コンクリート中の塩化物イオン濃度が高い部分でアノード反応が卓越し，これ以外の部分でカソード反応が生じてマクロセル回路が形成される可能性が高い．

ミクロセル腐食とマクロセル腐食の形成機構は，Evans のダイアグラムを使用して電気化学的側面からも考察することができる．

図-2.2 に，ミクロセル腐食の概念図を示す．ここでは，異なる環境中におかれた鉄筋のアノード分極曲線とカソード分極曲線を示している．また，コンクリート中の溶存酸素の濃度が同一であると仮定し，カソード分極曲線を 1 本のみとした．鉄筋腐食は，式(1)のアノード反応と式(2)のカソード反応が互いに同じ速度で進行することによって生じる．このため，アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で腐食反応が進む．点 A は，塩化物イオンの多い環境中の鉄筋の腐食反応を示す点であり，自然電位は E^a_{corr}，腐食電流は i_a となる．一方，点 B は塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋の腐食反応を示す点であり，自然電位は E^c_{corr}，腐食電流は i_c となる．塩化物イオンの多い環境中では自然電位は卑

になり腐食速度も大きくなるが，塩化物イオンの少ない環境中では自然電位は貴になり腐食速度も小さくなる．

一方，マクロセル腐食は，腐食環境にある鉄筋と腐食環境にない鉄筋が電気的に接続された状態で生じる．図-2.3 に，マクロセル腐食の概念図を示す．ここでは，先に示した塩化物イオンの多い環境中の鉄筋と塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋が電気的に接続されていることを想定した．塩化物イオンの多い環境中の鉄筋ではアノード反応が卓越し，逆に塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋はカソード反応が卓越する．マクロセル腐食においても両者の反応速度は一致するため，外部分極曲線の交点で自然電位と腐食速度が決まる．しかしながら，コンクリート中の鉄筋では，アノード部とカソード部との間にコンクリートが存在するため，コンクリート抵抗 R_{con} によって電位に差が生じる．これを iR ドロップと呼ぶ．ここで，アノード部とカソード部の自然電位は分極し，アノード部は C 点で，カソード部は D 点で腐食反応が進む．このため，自然電位はアノード部で貴に，カソード部で卑に変化する(図-2.3 では，E^a_{corr} が E^a_{macro} へ，E^c_{corr} が E^c_{macro} へシフト)．また，アノード反応の速度はアノード部の鉄筋で増加するため，ミクロセル腐食と比較して，マクロセル腐食の進行速度は速くなると考えられる(図-2.3 では，i_a が i_{macro} へシフト)．このため，マクロセル腐食が生じた場合には，自然電位法や分極抵抗法などの電気化学的測定では必ずしも適切な判定を下すことができない．

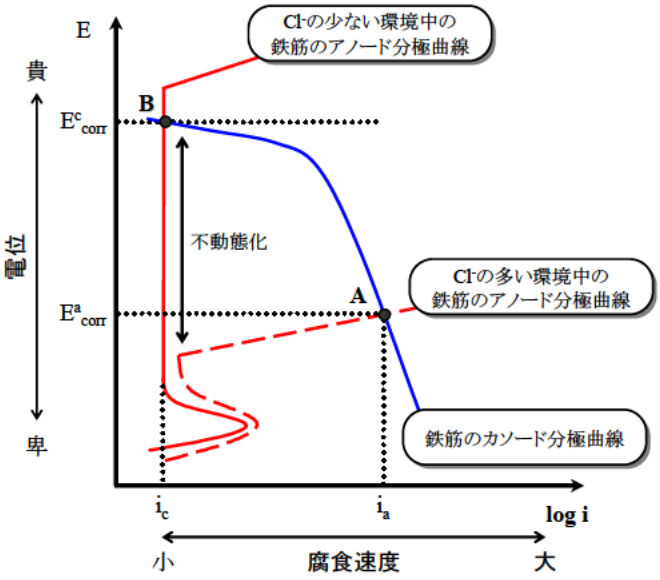


図-2.2　のミクロセル腐食の概念図

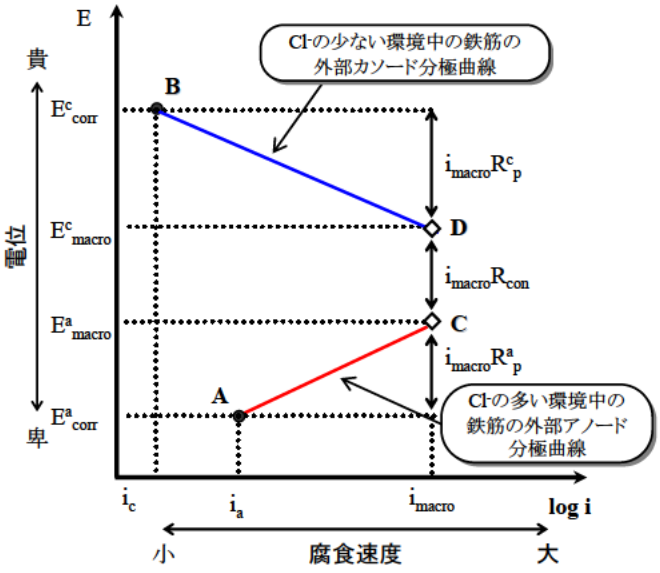


図-2.3　マクロセル腐食の概念図

また，上記に基づくと，マクロセル腐食による鉄筋の腐食速度は，アノード部とカソード部の分極抵抗を R^a_p，R^c_p とすると，式(5)で与えられるとされている [25), 26)]．

$$i_{macro} = \frac{E^c_{corr} - E^a_{corr}}{R_{con} + R^c_p + R^a_p} \qquad (5)$$

すなわち，マクロセル腐食の進行速度は，①分極前のアノード部とカソード部の自然電位の差，②アノード部とカソード部の間のコンクリート抵抗，③アノード部とカソード部それぞれの分極抵抗，3 つのパラメータによって決定されると考えることができる．

2.2 既往研究のレビュー

これまでにも，マクロセル腐食の形成機構に着目した研究は数多く実施されている．以下に，これらの概要を整理する．

(1) ひび割れや打継目などの欠陥部，断面修復部に生じるマクロセル腐食

ひび割れや打継目などの欠陥部や断面修復部では，マクロセル腐食が生じる可能性が高く，その形成機構の研究は複数の研究者によって実施されている．

岡田・宮川らは，ひび割れを導入した供試体の自然電位とマクロセル電流を測定し，ひび割れが生じた場合のマクロセル腐食の形成機構について検討している．この結果，マクロセル腐食の進行速度はアノード部とカソード部の面積比(Ac/Aa)に律速され，Ac/Aa を 300 としても腐食速度が増加したこと，ひび割れが存在する場合には水セメント比が小さいほどマクロセル腐食による腐食速度が大きくなることなどを指摘している [1), 2)]．また，小林・宮川は，自然電位や分極抵抗など電気化学的測定の結果から数値解析によってコンクリート中の電位勾配を求め，ミクロセル腐食とマクロセル腐食による腐食量を分離して算定する方法を提案している [3)]．ひび割れを有する供試体では，マクロセル腐食が全腐食量に占める割合は 20～30%であり，水セメント比が小さくなるほどマクロセル腐食の占める割合が大きくなることを指摘している．同様の方法を川東・小林・宮川は鋼板を埋設した供試体に適用し，マクロセル腐食よりもミクロセル腐食による腐食量の割合の方が大きくなったことを解析と実測の両面から報告している [4)]．

一方，大即・宮里らは，分割鉄筋を埋設した供試体の電気化学的測定を行うことにより，ひび割れや打継目など欠陥部で生じるマクロセル腐食の形成機構について検討している．ここでは，曲げひび割れの生じた場合や断面修復時の塩分除去が不十分な場合に，マクロセル腐食が生じて腐食速度が増加することなどを定量的に示している [5)~9)]．また，自然電位やコンクリート抵抗，分極抵抗の測定からマクロセル電流を解析するモデルを提案し，ひび割れ部でマクロセル腐食が卓越し，提案モデルによる解析値が実測値と概ね等しくなることを報告している [10), 11)]．

大野・鈴木・田村は，水セメント比，かぶり，ひび割れ幅をパラメータとした供試体の促進試験を実施して，ひび割れと鉄筋腐食の関係について検討している [12)~17)]．この結果，水セメント比が小さいほど，かぶりが大きいほど，ひび割れ幅が小さいほど，マクロセル電流は小さくなり，腐食の程度も抑制されることを示している．また，分極抵抗の逆数の時間積分から求めた腐食量とマクロセル電流の測定値から求めた腐食量が概ね線形の関係にあることを指摘している．

北野らは，複数の補修材料を用いて断面補修部を模擬した供試体を製作して暴露試験と促進試験を実施し，母材部の残留塩化物イオンや補修材料の物性値がマクロセル腐食の形成機構に及ぼす影響について検討している [18), 19)]．この結果によると，全腐食量に占めるマクロセル腐食の割合は 10%以下であり，必ずしもマクロセル腐食の影響は大きくないことを指摘している．

Raupach は，分割鉄筋を埋設した供試体に曲げひび割れを導入し，ひび割れ部で生じるマクロセル腐食による腐食量について検討している [20)]．これによると，ひび割れ部がアノードとなるマクロセル回路が形成され，かぶりが小さいほど，水セメント比が大きいほど，ひび割れ幅が大きいほど腐食量が大きくなることを 2 年間の暴露試験により確認している．

Elsener は，複数の分割鉄筋を接続して電解質中やモルタル中に設置し，分割鉄筋間の抵抗が自然電位やマクロセル電流に与える影響について検討している [21)]．この結果によると，マクロセル電流はカソード部からアノード部に向かって流れるが，分割鉄筋間の抵抗が大きい場合にはマクロセル電流は小さくなることを示している．

(2) 塩化物イオンの濃度差によって生じるマクロセル腐食

大野・田村らは，塩化物イオン濃度の異なるコンクリートを用いて製作した供試体の乾湿促進試験により，塩化物イオンの濃度差によって生じるマクロセル腐食の形成機構を検討している[22]．マクロセル腐食によりアノード部の腐食量は増加するが，アノード反応とカソード反応のどちらにマクロセル腐食の進行速度が律速されるかは Ac/Aa によって異なることを指摘している．Ac/Aa が比較的小さい場合にはカソード律速となりカソード部の表面積の増加とともにマクロセル腐食の進行速度も増加するが，Ac/Aa がある範囲以上ではアノード律速となり腐食速度には限界があることを示している．ここでは，腐食減量の測定結果から Ac/Aa が 10 程度でアノード律速となっていると考えられる．

丸屋らは，ミクロセル腐食におけるアノード分極曲線とカソード分極曲線をモデル化し，アノード部とカソード部の自然電位の差によってマクロセル回路が形成されると仮定し，マクロセル腐食による腐食量を算定する解析モデルを構築している[23]．解析結果と暴露供試体の鉄筋の腐食状態を比較することにより，構築したモデルによって定性的に腐食量を推定できるとしている．

Arya らは，アノード部とカソード部を分離した供試体の自然電位とマクロセル電流を測定し，両鉄筋の間隔と面積比がマクロセル腐食の形成機構に与える影響を検討している[24]．この結果，アノード部とカソード部の間隔を大きくするとマクロセル電流が減少すること，Ac/Aa の増加とともにマクロセル電流は増加するが，Ac/Aa が 40～150 の範囲でアノード部の腐食反応が限界に達するためにマクロセル電流が一定値に収束することなどを報告している．

Andrade らは，塩化物イオン濃度を含むコンクリートと含まないコンクリートを打ち重ねてアノード部とカソード部を分離した供試体を製作し，マクロセル電流の実測値と式(5)の計算値を比較している[25]．ここでは，Ac/Aa を変化させた複数の供試体でのマクロセル電流の実測値と式(5)の計算値が精度良く一致することを確認している．また，カソード部の面積がアノード部の面積より小さい場合にはマクロセル電流は小さくなるが, カソード部の面積がアノード部の 41 倍とした場合にはマクロセル腐食による腐食速度はミクロセル腐食の 3～6 倍になったことを報告している．

Raupach らは，塩化物イオン濃度を含むコンクリートと含まないコンクリートを打ち重ねてアノード部とカソード部を分離した供試体を製作し，マクロセル電流の実測値と数値解析による計算値の精度について考察している[26]．実測値と数値解析によるマクロセル電流の計算値は概ね一致し，数値解析によりアノード部とカソード部の間隔が広がるほど，分極による自然電位の変化量とマクロセル電流が減少することを示している．

(3) 中性化によって生じるマクロセル腐食

本報告書の対象外であるが，中性化によって生じるマクロセル腐食について検討した事例もある．

Song らは, 中性化させたモルタルにアノード部となる鉄筋とカソード部となるステンレスを埋設し, 自然電位とマクロセル電流の測定結果から Ac/Aa がマクロセル電流に与える影響を検討している[27]．ここでは，Ac/Aa を 0.25～25 の範囲で変化させ，これと自然電位とマクロセル電流の関係を考察している．この結果，マクロセル電流は，Ac/Aa とともに増加することが確認されている．

2.3 本研究の目的

本研究では，アノード部とカソード部を分離し，人工的にマクロセル腐食を再現可能な模擬供試体を用いて，塩害環境下のコンクリート中の鉄筋で生じるマクロセル腐食の形成機構を解明することを目的とした．具体的には，下記の 4 点について重点的に考察を行う．

(1) マクロセル腐食の腐食速度

マクロセル腐食が生じた場合の鉄筋の腐食速度はミクロセル腐食のみが生じた場合よりも速くなるとの指摘がある．しかしながら，両者の腐食速度の違いは必ずしも明らかにされていない．また，マクロセル腐食の腐食速度は，アノード部とカソード部の表面積比(Ac/Aa)によって律速されると言われているが，実際の腐食量との関係は必ずしも明らかにされていない．屋外暴露試験と腐食促進試験を行い，ミクロセル腐食とマクロセル腐食の腐食速度の違いや Ac/Aa がマクロセル腐食の進行速度に及ぼす影響を明確にする．

(2) マクロセル腐食の形成機構

マクロセル腐食による腐食速度は，式(5)に示したように，①アノード･カソード部の自然電位の差，②アノード・カソード部の間のコンクリート抵抗，③アノード・カソード部の分極抵抗により決定される．また，Ac/Aa によっても腐食速度は律速されることが指摘されている．これらに加えて，気温や湿度，降水の影響など気象条件によってもマクロセル腐食による腐食速度は変化すると考えられる．そこで，各パラメータがマクロセル腐食の形成機構とその進行速度に及ぼす影響を実験的に明らかにする．

(3) 屋外暴露試験と腐食促進試験の比較

屋外での暴露試験と恒温恒湿槽内での腐食促進試験を実施し，両者の結果を相互比較することにより，試験条件の違いがミクロセル･マクロセル腐食による鉄筋腐食量に与える影響について検討する．

(4) マクロセル腐食が鉄筋の機械的性質に与える影響

ミクロセル腐食とマクロセル腐食の腐食速度の違いが言及されることは多いが，これらが鉄筋の機械的性質に及ぼす影響についてはほとんど検討されていない．そこで，腐食促進試験後の鉄筋の引張試験を実施し，引張強度や伸び性能など，ミクロセル・マクロセル腐食により劣化した鉄筋の機械的性質について考察を行う．

2.4 実験の特徴

本研究では，塩害環境下のコンクリート中で生じるマクロセル腐食の形成機構を解明するため，下記の 4 つの項目について実験を行った．次章以降では，これらの内容を詳細に述べる．

(1) 屋外暴露試験(シリーズⅠ)

アノード側コンクリートの塩化物イオン濃度，Ac/Aa，カソード側コンクリートの水セメント比を変化させた供試体を製作し，屋外暴露試験により，これらのパラメータがマクロセル腐食の形成機構に与える影響を検証することを目的とした．このため，暴露前後に自然電位とマクロセル電流の測定を実施し，暴露試験終了後に供試体を解体して鉄筋の腐食性状を調査した．

(2) 腐食促進試験(シリーズⅡ)

アノード側コンクリートの塩化物イオン濃度，Ac/Aa を変化させた供試体を製作し，恒温恒湿槽内で乾湿繰返しによる腐食促進試験を行うことにより，これらのパラメータがマクロセル腐食の形成機構に与える影響を検証することを目的とした．屋外暴露試験と同様に，ここでも促進試験中に自然電位とマクロセル電流の測定を実施し,促進試験終了後に供試体を解体して鉄筋の腐食性状を調査した．また，鉄筋の引張試験を実施し，ミクロセル・マクロセル腐食により劣化した鉄筋の機械的性質について調査することとした．

(3) 外気温とマクロセル腐食形成機構の関係

アノード・カソード部の鉄筋を分離した供試体を恒温恒湿槽内に安置し，温度を様々に変化させて各種の電気化学的測定を実施し，外気温の変化による各鉄筋の自然電位と分極抵抗，両鉄筋間のコンクリートの抵抗の変化がマクロセル電流に及ぼす影響について検討することを目的とした．

3. 屋外暴露試験(シリーズⅠ)

3.1 実験の目的

アノード側コンクリートの塩化物イオン濃度（以下，Cl^-濃度）や Ac/Aa，カソード側コンクリートの水セメント比(以下，W/C)がマクロセル腐食の形成機構に与える影響を明らかにするため，これらの実験パラメータを網羅した供試体を製作した．この供試体を用いて室内での各種の電気化学的測定および屋外暴露試験を行うことにより，①ミクロセル腐食とマクロセル腐食の進行速度の違い，②Ac/Aa がマクロセル腐食の形成機構・進行速度に与える影響，③カソード側コンクリートの W/C がマクロセル腐食の形成機構・進行速度に与える影響，について検討することを目的とした．

アノード側コンクリートの Cl^-濃度は鉄筋腐食の主要因となる実験パラメータとして，Ac/Aa はマクロセル腐食の進行速度を律速する実験パラメータとして，これらがマクロセル腐食の形成機構に及ぼす影響については既往研究においても検討されてきた．これに対して，カソード側コンクリートの W/C を実験パラメータとした検討はこれまでに実施されていない．今回の実験でこれを実験パラメータとして採用した理由は，コンクリートの W/C の違いによってカソード反応に必要とされる酸素や水の供給量が異なるため，マクロセル腐食の進行速度にも差が生じることが予測されたためである．すなわち，これまでマクロセル腐食の腐食速度を律速するとされてきた Ac/Aa に加えて，カソード部における酸素供給量の違いによる影響もここでは検討することが可能である．

3.2 供試体の概要

表-3.1 にコンクリート配合．**表-3.2** に供試体の諸元，**図-3.1** に供試体の形状を示す．

局所的に Cl^-が鉄筋位置まで浸透して生じるマクロセル腐食の形成機構と進行速度を検討するため，アノード部とカソード部の鉄筋を分離し，人工的にマクロセル腐食を再現可能な供試体を製作した．ここでは，両鉄筋のリード線を短絡するとマクロセル回路が形成され，開放するとミクロセル回路のみが形成されるとみなした．鉄筋には，異形鉄筋 SD295A D13 を用いた．塩化物イオンは，所定の濃度となるようにコンクリート練り混ぜ時に塩化ナトリウムを混入して与えた．なお，供試体は異なる塩化物イオン濃度のコンクリートを打ち継いで製作したため，これらを同時に打設して打継目が不連続とならないように十分に配慮した．

No.1 供試体は，アノード・カソード部のコンクリートの W/C を 55%とし，アノード部の Cl^-濃度を 5，10kg/m^3 の 2 種類とした．また，アノード部の鉄筋に短絡するカソード鉄筋の本数を変化させることで，Ac/Aa を 1～30 の範囲で変化させてマクロセル回路を形成させることができる．これに対して，No.2，3 供試体は Cl^-濃度 5，10kg/m^3 のコンクリート中に 1 本の鉄筋を埋設したものであり，ミクロセル腐食の進行速度を把握するために製作した．

一方，No.4 供試体は，No.1 供試体と同様にアノード部の W/C を 55%としたが，カソード部の W/C を 35，75%の 2 種類とした．Ac/Aa を 1～15 の範囲で変化させ，W/C の異なるコンクリート中のカソード鉄筋とマクロセル回路を形成できるようにした．

いずれもの供試体も，側面をエポキシ樹脂で塗装したため，水と酸素の供給は供試体上下面から行われたと考えられる．また，鉄筋端部の腐食を防止するため，鉄筋端部から 10mm の範囲についてはエポキシ樹脂で保護した．

なお，厳密には 1 本の鉄筋中でもミクロセル腐食とマクロセルは同時に進行すると考えられるが，ここでは簡略化のため，アノード部とカソード部の鉄筋を短絡していない状態でミクロセル腐食のみが進行し，これらを短絡した状態でミクロセル腐食とマクロセル腐食の両方が進行すると仮定した．また，No.1，2，3 供試体の材齢約 1 ヶ月の暴露前の測定結果は，文献 28)，29)で報告済みである．

表-3.1　コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	混和剤
35	46	172	493	751	900	4.9
55	46	172	314	819	982	3.1
75	46	172	230	851	1,020	2.3

普通ポルトランドセメント，最大骨材寸法20mm

表-3.2　供試体の諸元

供試体	アノード				カソード			表面積比 (Ac/Aa)	腐食形態
	No.	鉄筋長さ (mm)	Cl-濃度 (kg/m^3)	W/C (%)	鉄筋長さ (mm)	Cl-濃度 (kg/m^3)	W/C (%)		
1	A101	300	10	55	300	0	55	1～30	マクロセル
	A102	100						1～90	
	A051	300	5					1～30	
	A052	100						1～90	
2	A103	300	10		—	—	—	0	ミクロセル
3	A053		5		—	—	—	0	
4	B101		10		300	0	35	1～15	マクロセル
	B102						75		
5	B103				—	—	—	0	ミクロセル

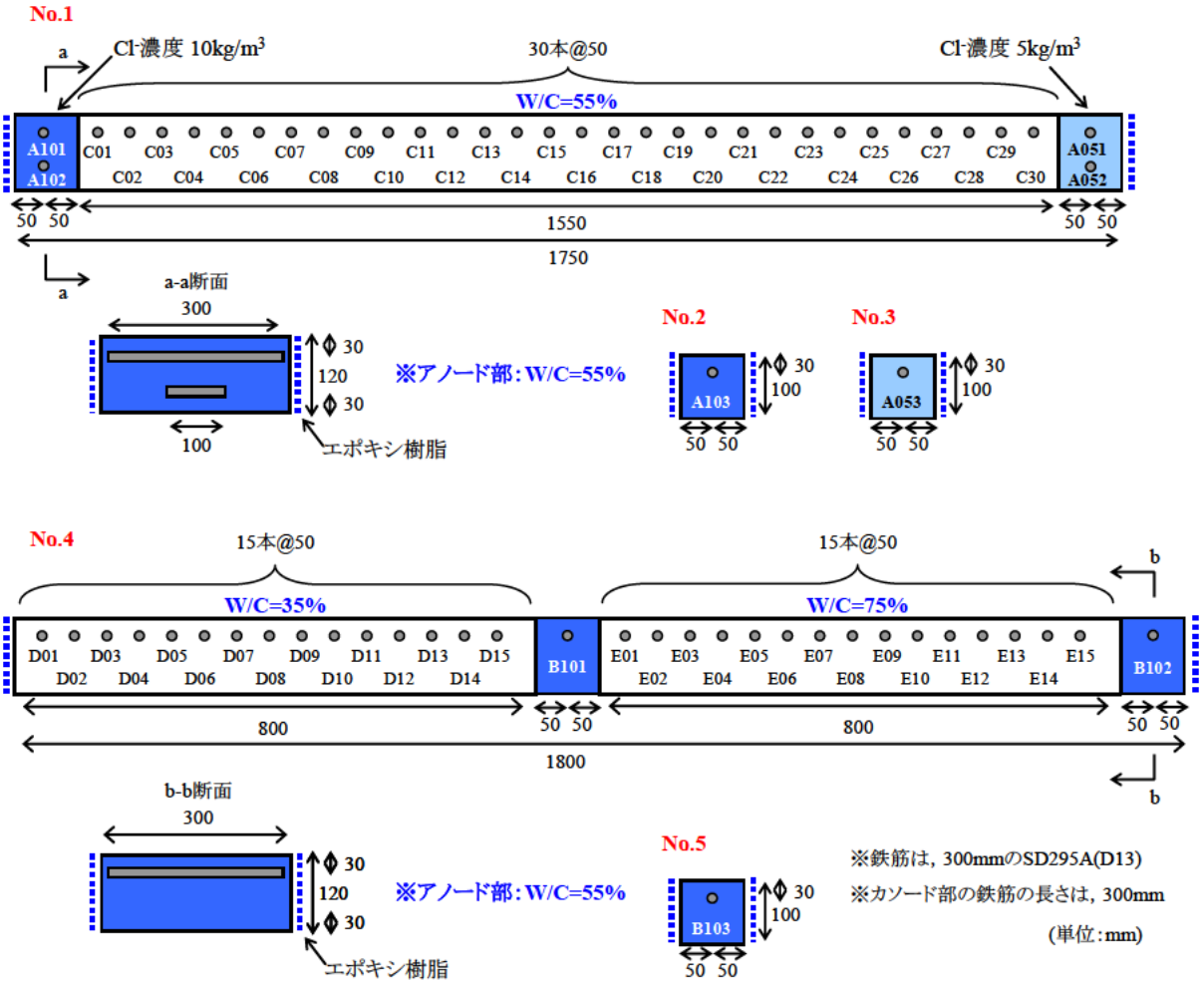


図-3.1　シリーズⅠ供試体の形状

3.3 実験方法

供試体は，まず，実験室内（室温約 20℃，湿度約 60%RH）に安置し，供試体の製作から約 1 ヶ月後に自然電位とマクロセル電流を測定した．自然電位の測定は，供試体表面を 150 分以上湿潤した後に銀／塩化銀電極を用いて行い，測定値から 120mV を差し引いて銅／硫酸銅電極基準に換算した．マクロセル電流は無抵抗電流計を用いて測定した．No.1 供試体では，Ac/Aa を徐々に変化させた場合の自然電位とマクロセル電流の挙動を把握するため，アノード鉄筋と短絡するカソード鉄筋の本数を 1，3，6，9，12，18，24，30 本と増やして測定を行った．また，アノード・カソード鉄筋の短絡を行っていない場合と各カソード鉄筋を 1 本ずつアノード鉄筋と短絡した場合の測定も行った．一方，No.4 供試体では，アノード鉄筋（B101）の両側に水セメント比の異なるコンクリート中に埋設したカソード鉄筋を設置しており，B101 鉄筋と W/C が 35%もしくは 75%のコンクリート中のカソード鉄筋，B102 鉄筋と W/C が 75%のコンクリート中のカソード鉄筋を短絡することで，カソード側コンクリートの W/C の違いがマクロセル腐食の形成機構に与える影響を検討することとした．

室内測定の後，供試体を屋外に暴露した．**表-3.3** に各供試体のコンクリート打設，暴露開始，暴露終了の時期，**図-3.2** に供試体の暴露状況を示す．No.1～3 と No.4～5 ではコンクリート打設時期が異なったため，暴露開始時と暴露終了時の材齢が異なり，最終的な暴露期間も異なった．暴露期間中は，毎月 7 日間を基本としてデータロガーを用いてマクロセル電流の自動計測を行った[30]．なお，屋外暴露中は，アノード・カソード鉄筋の短絡を維持したままとした．

暴露終了後，実験室内に供試体を再び移設し，自然電位とマクロセル電流を測定した．暴露前の測定方法と同様に，アノード鉄筋と接続するカソード鉄筋の組合せを変えることで，Ac/Aa や両鉄筋間の距離がマクロセル腐食の形成機構に与える影響を検討することとした．また，ここでは，No.4 供試体の短絡するカソード鉄筋の本数を 1，3，6，…，15 本と徐々に変化させた場合の自然電位とマクロセル電流の測定も行った．さらに，水分供給がマクロセル腐食の形成機構に与える影響を把握するため，供試体全体もくしはアノード･カソード部に部分的に給水した場合のマクロセル電流も測定した．

その後，供試体を解体し，JCI-SC1 に準拠して鉄筋の腐食面積率と質量減少率を測定した．

なお，暴露試験中には定期的に供試体表面のひび割れ幅をクラックスケールで測定した．

表-3.3 供試体の製作，暴露の時期

	コンクリート打設	暴露開始	暴露終了	暴露期間
No.1，No.2，No.3	2006年11月	2007年4月 (材齢5ヶ月)	2008年2月 (材齢15ヶ月)	10ヶ月
No.4，No.5	2007年3月	2007年6月 (材齢3ヶ月)	2008年2月 (材齢11ヶ月)	8ヶ月



図-3.2 供試体の暴露状況

3.4　実験結果および考察

(a) コンクリート表面の腐食ひび割れ幅

図-3.3 に，暴露試験中の供試体表面の腐食ひび割れ幅の推移を示す．ここでは，各アノード鉄筋直上に発生した腐食ひび割れの幅をクラックスケールで定期的に測定した際の最大値を示している．マクロセル腐食を模擬した供試体（No.1 供試体の A101，No.4 供試体の B101 と B102）とミクロセル腐食を模擬した供試体（No.2 供試体の A103，No.5 供試体の B103）を比較すると，ひび割れ幅はマクロセル腐食を模擬した供試体で大きくなる傾向にあった．いずれの供試体においても，かぶりは 30mm で同一としていた．このため，マクロセル腐食の生じている鉄筋の腐食量がミクロセル腐食のみが生じている場合よりも大きくなり，腐食によるひび割れ幅も大きくなったと考えられる．また，カソード側コンクリートの W/C を 75%とした B102 は，これを 35%とした B101 よりもひび割れ幅が大きくなった．これはカソード側コンクリートの W/C が大きい場合にはカソード鉄筋への酸素の供給量が多くなり，マクロセル腐食が促進される傾向にあったことを反映したためと考えられる．ただし，カソード側コンクリートの W/C を 55%とした A101 はこれを 75%とした B102 よりもひび割れ幅が大きくなったが，これは両供試体の製作時期と暴露期間が異なり，A101 の方が材齢やマクロセル腐食を形成させていた期間が長期となったためと考えられる．なお，コンクリート中の Cl⁻濃度を 5kg/m^3 とした供試体ではひび割れは確認されなかった．

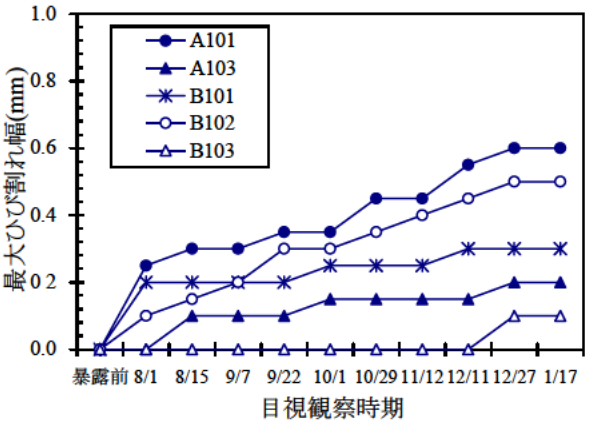


図-3.3　暴露試験中のひび割れ幅の推移

(b) 自然電位

図-3.4 に No.1 供試体でアノード鉄筋を A101 とした場合，図-3.5 に No.1 供試体でアノード鉄筋を A051 とした場合の自然電位を示す．ここでは，アノード・カソード鉄筋を短絡させていない場合，カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡させた場合，Ac/Aa を徐々に増加させた場合に，各鉄筋の直上で測定した自然電位を示す．また，これらは暴露前（材齢約 1 ヶ月，2006 年 12 月）と暴露後（材齢約 15 ヶ月，2008 年 2 月）の 2 時点において実験室内（室温約 20℃，湿度約 60%RH）で得られた結果である．

アノード鉄筋を A101 とした場合，暴露前の測定では，短絡前の自然電位はアノード鉄筋で約-430mV:CSE，カソード鉄筋で-50～-150mV:CSE であった．アノード・カソード鉄筋を短絡すると，分極して自然電位はアノード鉄筋で貴に，カソード鉄筋で卑に変化し，複数のカソード鉄筋と短絡した際の自然電位の分布はなだらかな勾配を示した．この傾向は暴露後の測定でも同様であったが，暴露後の測定では，短絡前の自然電位はアノード鉄筋で約-690mV:CSE，カソード鉄筋で-50～-150mV:CSE であり，アノード鉄筋の自然電位が卑になるとともに短絡後の自然電位の勾配は暴露前よりも急になった．この原因としては，暴露試験中にアノード鉄筋の直上に腐食ひび割れが生じたために鉄筋の置かれた腐食環境が厳しくなり，自然電位も卑に変化し，アノード鉄筋に近いカソード鉄筋の自然電位の卑化量が大きくなったことが考えられる．同様の傾向は，アノード鉄筋を A051 とした場合の測定結果においても確認することができる．

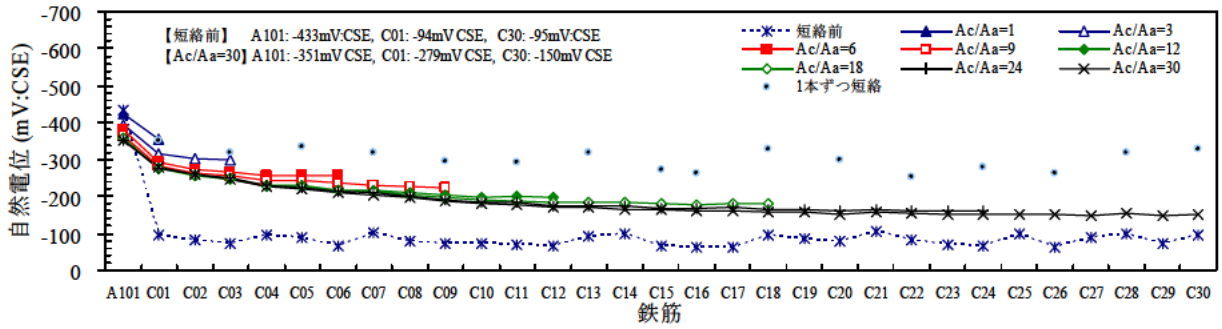
また，Ac/Aa を最大にした場合，いずれの測定結果においても，カソード鉄筋の自然電位の卑化量はアノード鉄筋に近いほど大きく，遠いほど小さくなり，自然電位の分布は勾配を形成した．一方，

各カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡した場合の自然電位の卑化量は，アノード・カソード鉄筋間の距離にかかわらず，概ね同程度であった．これの傾向は，供試体の材齢や屋外暴露の有無，アノード側コンクリートの Cl^- 濃度の違いにかかわらず，共通する傾向であった．特に材齢の増加はアノード・カソード鉄筋間のコンクリート抵抗の増加に寄与したはずであり，各カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡した場合にはアノード・カソード鉄筋間の距離が自然電位の卑化量にも影響を及ぼす可能性が高いと考えられたが，この影響を明確に確認するには至らなかった．すなわち，マクロセル腐食形成後のカソード鉄筋の自然電位の分極に及ぼす影響としては，アノード・カソード鉄筋間のコンクリート抵抗よりもカソード鉄筋の分極抵抗の方が支配的であったのではないかと推察される．

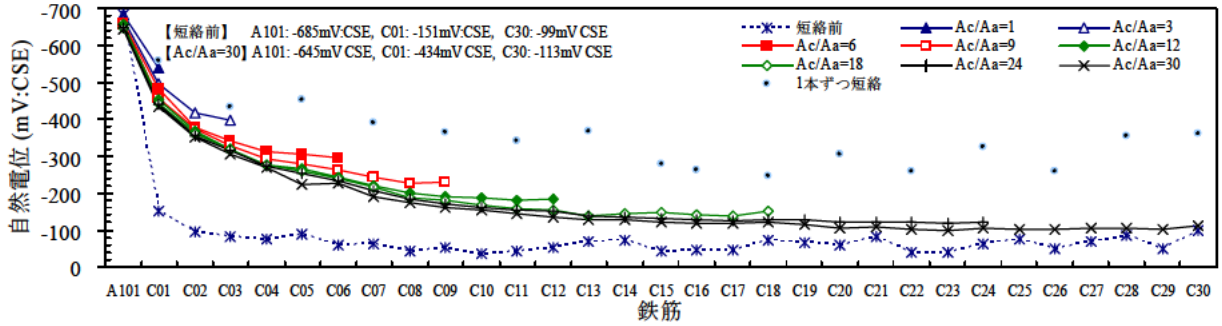
両アノード鉄筋から比較的離れた位置にあるカソード鉄筋（例えば，A101 では C20～C30，A051 では C01～C10）の自然電位に着目すると，暴露前後で分極による卑化量に大きな差は生じていないことがわかる．これは，Ac/Aa を大きくするために短絡するカソード鉄筋の本数を増加させても，ある時点でアノード鉄筋の腐食反応速度が限界に達するために，短絡したカソード鉄筋のマクロセル腐食への貢献度が相対的に小さくなったためと考えられる．一方で，両アノード鉄筋に比較的近いカソード鉄筋（例えば，A101 では C01～C10，A051 では C20～C30）では，暴露試験後により卑化したアノード鉄筋の影響を受けて分極量が大きくなり，勾配も急になったと考えられる．

図-3.6 に，アノード鉄筋を A101 とした場合の暴露前後の No.1 供試体の測定結果を比較して示す．ここでは，アノード・カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡した場合のマクロセル電流，カソード鉄筋の分極抵抗，短絡前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差，短絡後のカソード鉄筋の自然電位の卑化量を示す．マクロセル電流は，マクロセル電流の測定値をアノード鉄筋の表面積（異形鉄筋 D13 の公称周長 4cm×長さ 30cm）で除すことによりマクロセル腐食電流密度に換算した．以下，本報告書では，マクロセル電流に関する考察はマクロセル腐食電流密度を指標として行う．また，分極抵抗の測定には，二重対極を用いた交流インピーダンス法（印加電圧：5mV，周波数：10kHz と 0.02Hz の 2 種類）を用いた．なお，分極抵抗の測定時に同時に得られたカソード部のコンクリート抵抗の平均値は，暴露前で 1.29kΩ，暴露後で 3.08kΩ であり，材齢とともに増加する結果となった．

アノード・カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡した場合のマクロセル電流は，暴露後に大きくなる結果となった．これは，暴露前後のカソード鉄筋の分極抵抗の変化がほとんどなく，材齢とともにコンクリート抵抗が増加したにもかかわらず，暴露後にアノード鉄筋の自然電位が大幅に卑になり，アノード・カソード鉄筋の自然電位の差が大きくなったためと考えられる．また，僅かではあるが，マクロセル電流はアノード鉄筋に近いほど大きくなり，短絡後のカソード鉄筋の自然電位の卑化量もアノード側で大きくなる傾向にあった．分極抵抗にこれと同様の傾向がないことから，材齢とともにコンクリート抵抗が増加したことにより，ばらつきは認められるものの，アノード鉄筋との距離がマクロセル電流やカソード鉄筋の分極量に影響を及ぼすようになったためではないかと推察される．ただし，アノード鉄筋からの距離にかかわらず，分極抵抗が小さいカソード鉄筋と短絡した場合にはマクロセル電流が大きくなり，この傾向はアノード鉄筋からの距離の影響よりも明確に現れている．このため，材齢の増加とともにコンクリート抵抗の影響がマクロセル電流の大小に影響を及ぼすようになってきたと推察されるが，影響の大きさとしてはカソード鉄筋の分極抵抗の影響の方が依然として大きいと考えられる．

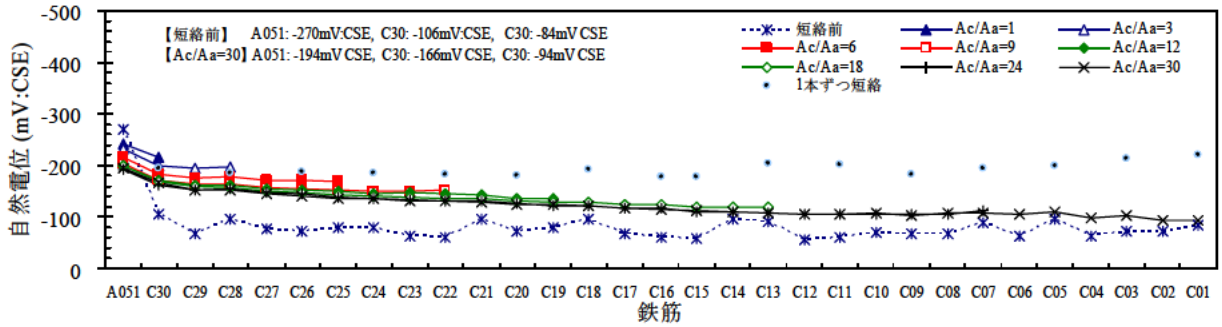


(a) 暴露前（材齢約 1 ヶ月，2006 年 12 月）

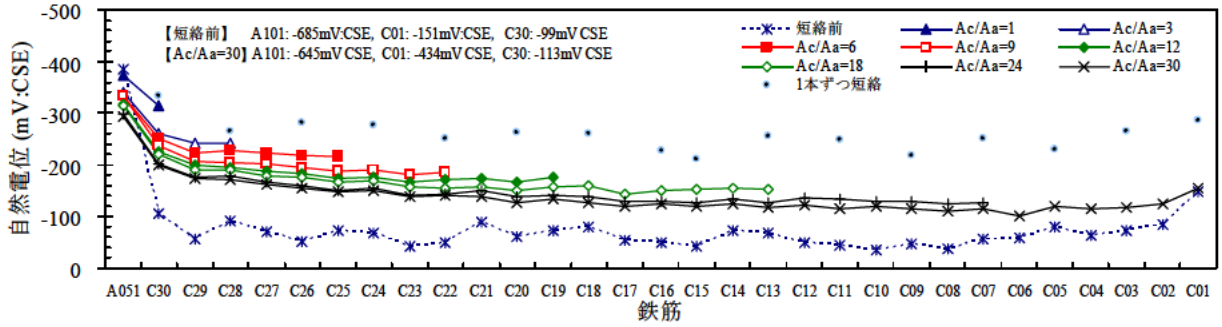


(b) 暴露後（材齢約 15 ヶ月，2008 年 2 月）

図-3.4　No.1 供試体の自然電位の分布（アノード鉄筋：A101）

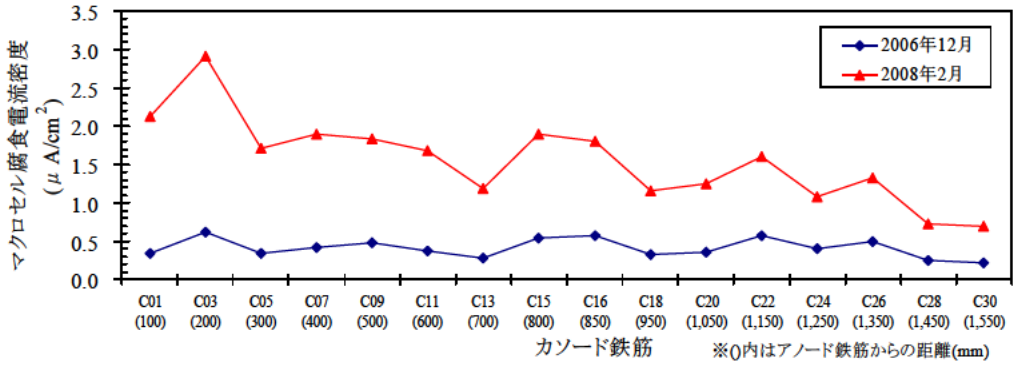


(a) 暴露前（材齢約 1 ヶ月，2006 年 12 月）

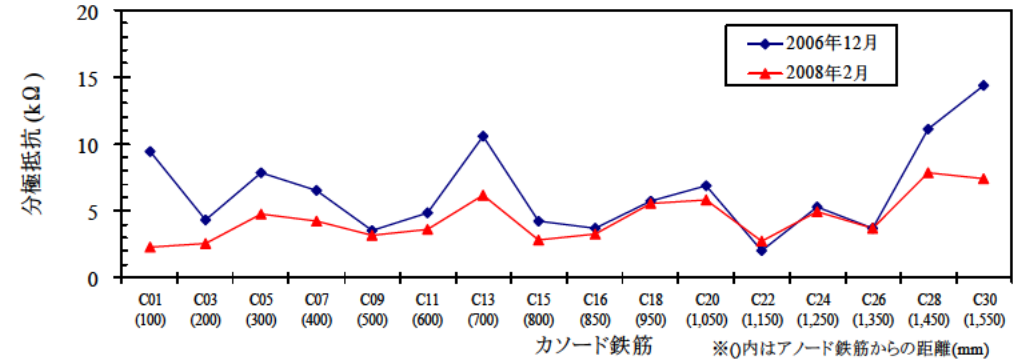


(b) 暴露後（材齢約 15 ヶ月，2008 年 2 月）

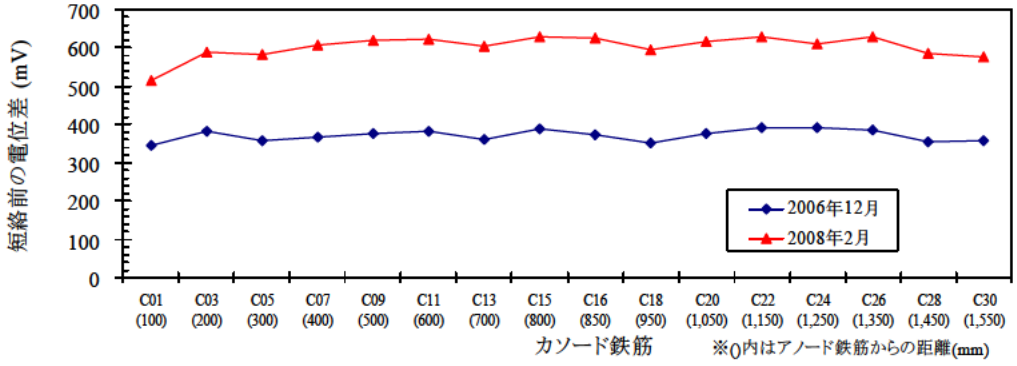
図-3.5　No.1 供試体の自然電位の分布（アノード鉄筋：A051）



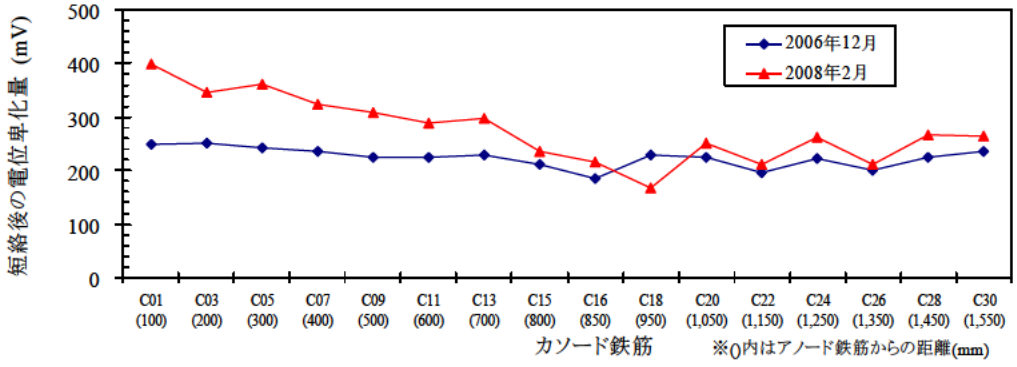
(a) アノード・カソード鉄筋を 1 本ずつ短絡した場合のマクロセル電流



(b) カソード鉄筋の分極抵抗



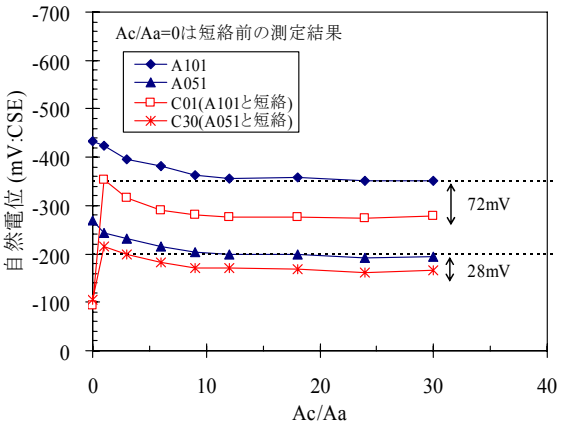
(c) 短絡前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差



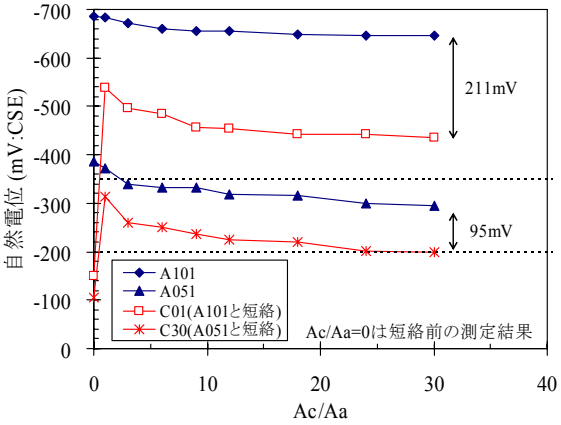
(d) 短絡後のカソード鉄筋の自然電位の卑化量

図-3.6　No.1 供試体の測定結果（アノード鉄筋：A101）

図-3.7 に，暴露前後の Ac/Aa を変化させた場合のアノード鉄筋（A101，A051）とこれに最も近いカソード鉄筋（A101 では C01，A051 では C30）の自然電位の推移を示す．暴露の有無に関わらず，Ac/Aa の増加とともにアノード鉄筋の自然電位は貴に，カソード鉄筋の自然電位は卑に変化した後，概ね一定値に収束する傾向にあった．Ac/Aa=30 とした場合のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差は，暴露前よりも暴露後で大きくなった．また，暴露前と比較して暴露後のカソード鉄筋の自然電位の卑化量も大きくなる傾向にあった．これらの原因は，アノード鉄筋の自然電位が暴露前よりも暴露後で大幅に卑になったためと考えられる．



(a) 暴露前（材齢約 1 ヶ月，2006 年 12 月）

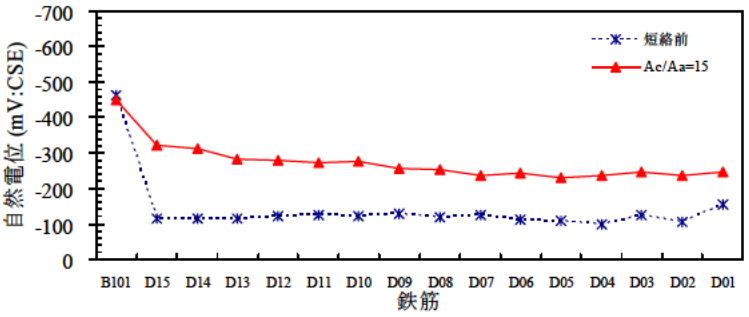


(b) 暴露後（材齢約 15 ヶ月，2008 年 2 月）

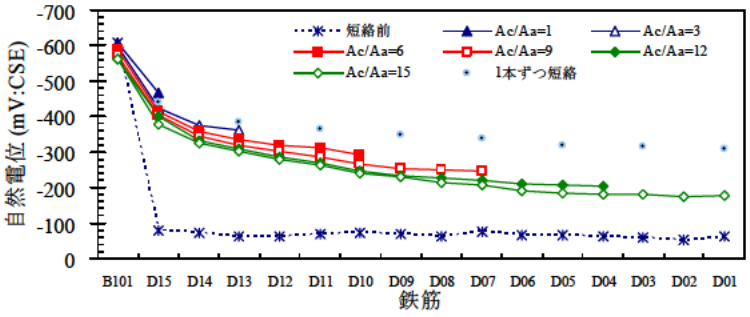
図-3.7　No.1 供試体の Ac/Aa と自然電位

図-3.8，3.9 に，No.4 供試体の自然電位の測定結果を示す．ここでは，アノード鉄筋を B101 としてカソード側コンクリートの W/C を 35%とした場合，アノード鉄筋を B102 としてカソード側コンクリートの W/C を 75%とした場合のそれぞれについて暴露前と暴露後の測定結果を示す．いずれも各鉄筋直上での測定結果であり，暴露後は Ac/Aa を徐々に増加させた場合の測定も行った．

これまでの結果と同様に，アノード・カソード鉄筋を短絡してマクロセル回路を形成した後の自然電位の分布は，アノード鉄筋を最も卑としたなだらかな勾配を示した．また，暴露後は両アノード鉄筋の直上に腐食ひび割れが生じており，腐食環境が厳しくなったために自然電位が卑に変化し，全体的な勾配は急になった．カソード側コンクリートの W/C の違いに着目すると，若干ではあるが W/C75%のカソード側コンクリート中の鉄筋の自然電位の方が短絡前から卑であったために，分極後のこれらの自然電位も卑になる傾向にあった．

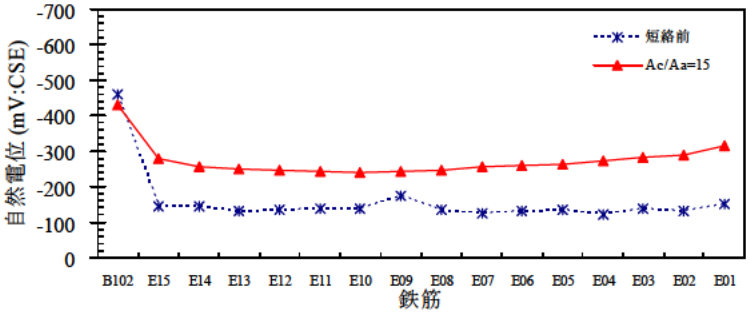


(a) 暴露前（材齢約 3 ヶ月，2007 年 6 月）

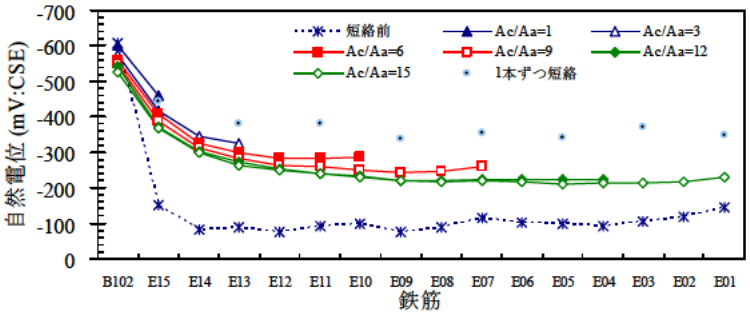


(b) 暴露後（材齢約 11 ヶ月，2008 年 2 月）

図-3.8　No.4 供試体の自然電位の分布
（アノード鉄筋：B101，カソード側コンクリート W/C=35%）



(a) 暴露前（材齢約 3 ヶ月，2007 年 6 月）



(b) 暴露後（材齢約 11 ヶ月，2008 年 2 月）

図-3.9　No.4 供試体の自然電位の分布
（アノード鉄筋：B102，カソード側コンクリート W/C=75%）

(c) マクロセル電流

図-3.10 に，No.1 供試体の Ac/Aa とマクロセル電流の関係を示す．いずれの測定も，実験室内（室温約 20℃，湿度約 60%RH）で実施したものである．

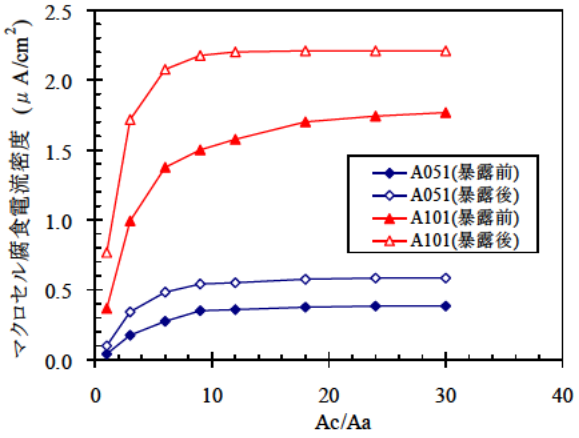


図-3.10　No.1 供試体の Ac/Aa とマクロセル電流

マクロセル腐食電流密度は，Ac/Aa とともに増加したが，Ac/Aa=10 程度を閾値として概ね一定値に留まる傾向にあった．先に述べたように，この原因は，短絡するカソード鉄筋の本数を増やして Ac/Aa をある程度増加させた際にアノード鉄筋の腐食速度が上限値に達したために，マクロセル腐食電流密度の増加が抑制されためと考えられる．この傾向は，暴露前後で等しいものであった．すなわち，マクロセル腐食の進行速度は，Ac/Aa が小さい段階ではカソード律速となるが，Ac/Aa がある程度大きい段階ではアノード律速となると考えられる．

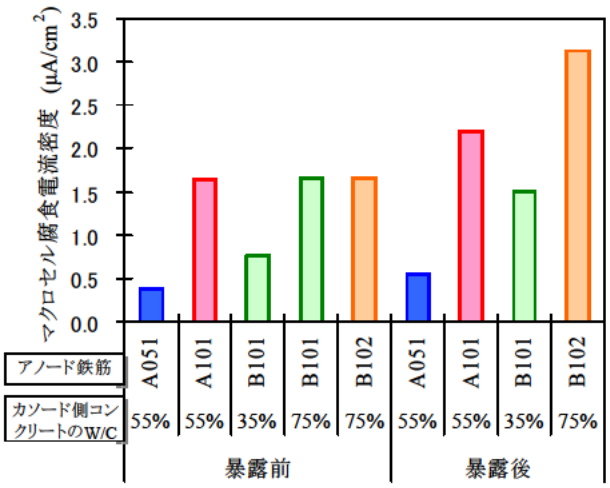


図-3.11　各条件におけるマクロセル電流の比較

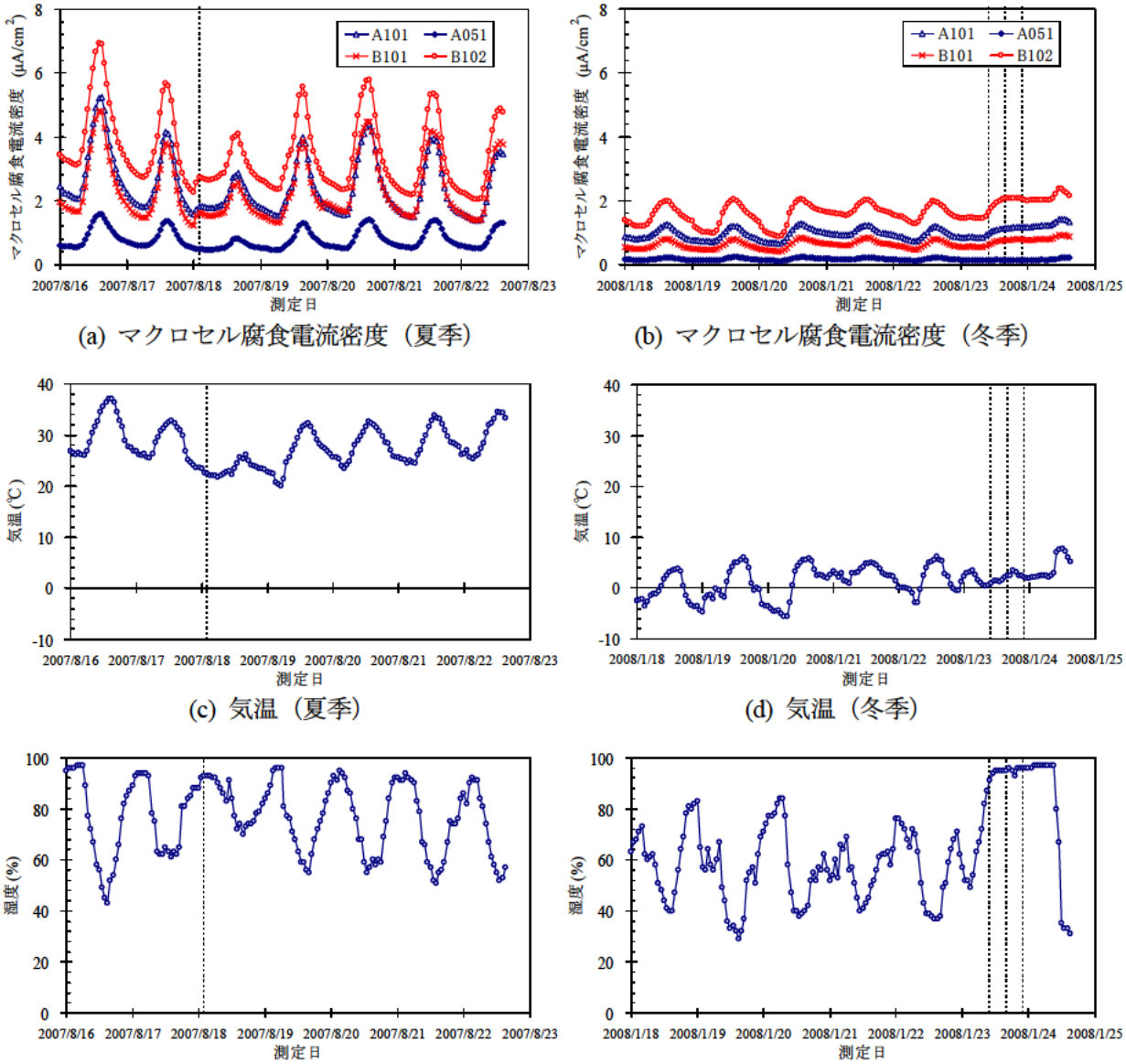
※ただし，Ac/Aa=15 とした．

また，暴露前後で比較すると，いずれの場合も暴露後のマクロセル腐食電流密度が大きくなる傾向にあった．式(5)に従えば，マクロセル腐食の進行速度は，短絡前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差に比例し，両鉄筋間のコンクリート抵抗と両鉄筋の分極抵抗に反比例すると考えられる．すなわち，ここでは，アノード鉄筋の直上に腐食ひび割れが発生したことにより，自然電位が卑となってカソード鉄筋の自然電位との差が大きくなり，また，アノード鉄筋の分極抵抗も小さくなったために，マクロセル腐食電流密度も大きくなったと考えられる．

図-3.11 に，No.1 供試体と No.4 供試体の短絡条件を変え，アノード鉄筋の Cl^-濃度やカソード側コンクリートの W/C を様々に変化させた場合のマクロセル電流の測定結果を示す．全体的に，暴露前よりも暴露後のマクロセル腐食電流密度が大きくなる傾向にあった．アノード側コンクリートの Cl^-濃度を 5kg/m^3 とした A051 の値は最も小さくなっており，マクロセル腐食の進行速度にはアノード部の Cl^-濃度が大きな影響を及ぼすと考えられる．また，カソード側コンクリートの W/C の違いに着目すると，W/C が大きいほどマクロセル腐食電流密度が大きくなる傾向にあった．例えば，暴露前の B101 を W/C が 35%と 75%のカソード鉄筋と短絡した結果を比較した場合や，暴露後の A101，B101，B102 の結果を比較した場合に，この傾向を明確に確認することができる．すなわち，カソード側コンクリートの W/C の大小によるコンクリート抵抗や緻密性が異なったため，マクロセル腐食の進行速度も異なったと考えられる．

図-3.12 に，暴露試験中のマクロセル電流の測定結果と測定時の気温と湿度を示す．気温と湿度は，気象庁ホームページの気象統計情報からつくば（館野）での測定値を引用した[31]．なお，マクロセル電流の測定は毎月 7 日間を基本として暴露期間を通じて実施したが，ここではその代表例として夏季と冬季の測定結果を示す．また，これらの測定値は毎時間ごとの測定結果であり，1 時間あたりに 0.5mm 以上の降水が記録された時点を破線でグラフ中に示す．

これらの結果によると，アノード側コンクリートの Cl^- 濃度の大きい供試体，カソード側コンクリートの W/C の大きい供試体で，マクロセル電流は大きくなる傾向にあった．また，マクロセル電流は，夏季の方が大きくなるとともに，昼間で大きく，夜間で小さくなる規則的な日変動を示す傾向にあった．この原因は，マクロセル電流が外気温の変化の影響を強く受けるためと考えられる．逆に，湿度は，昼間で小さく夜間で大きく，マクロセル電流の規則的な日変動による大小関係とは反対の傾向を示した．また，降水があった時点では，湿度が大きくなるとともに，マクロセル電流も若干大きくなる傾向を示した．これらのことを踏まえると，マクロセル電流の大小に及ぼす影響としては，外気温の影響が卓越し，外気温ほどでは無いにしろ，降雨等による水分供給の影響もあるものと考えられる．



(a) マクロセル腐食電流密度（夏季）　(b) マクロセル腐食電流密度（冬季）

(c) 気温（夏季）　(d) 気温（冬季）

(e) 湿度（夏季）　(f) 湿度（冬季）

図-3.12　暴露試験中のマクロセル電流と気温，湿度の関係

暴露試験中のマクロセル腐食の測定結果から，外気温だけでなく，降雨等による水分供給もマクロセル電流の大小に影響を及ぼすことを確認した．そこで，暴露試験終了後の供試体を実験室内（室温約 20℃，湿度約 60%RH）に安置し，給水条件がマクロセル電流の大小に与える影響を検討することとした．給水条件は，次の 4 種類を①～④の順に実施した．

①給水しない場合：　供試体を実験室内に安置

②供試体全面に給水する場合：　全面に散水を行い，濡れたウエスで全面を被覆して安置（2008 年 2 月 4 日 13 時と 2008 年 2 月 5 日 9 時に給水）

③アノード部のみに給水する場合：　アノード部のみに水道水を散水し，濡れたウエスでアノード部のみを被覆して安置（2008 年 2 月 6 日 9 時に給水）

④カソード部のみに給水する場合：　カソード部のみに水道水を散水し，濡れたウエスでカソード部のみを被覆して安置（2008 年 2 月 7 日 9 時に給水）

⑤給水を終えて乾燥させた場合：　給水を終え，供試体を実験室内に再び安置

図-3.13 に，給水条件を変えた場合のマクロセル電流の測定結果を示す．供試体を実験室内に安置した段階では，約 3 日間，マクロセル電流は概ね一定値で推移した．実験室内の気温と湿度が概ね一定に保たれていたためと考えられる．その後，供試体全面に 2 度にわたり給水を行うと，マクロセル電流は 2 度とも徐々に増加した．また，アノード部のみに給水した場合にも，同様にマクロセル電流は増加した．このようにマクロセル電流が大きく変動したのは，アノード側コンクリートの Cl⁻濃度を 10kg/m^3 としアノード鉄筋直上に腐食ひび割れの生じていた A101，B101，B102 であった．アノード側コンクリートの Cl⁻濃度を 5kg/m^3 とし腐食ひび割れの生じていなかった A051 ではこの傾向を確認することはできなかった．一方で，カソード部のみに給水した場合には，マクロセル電流の明確な増加は確認されず，カソード部への水分供給がマクロセル電流の増加に寄与しなかったことを示している．すなわち，降雨等による水分供給は，アノードとなる鉄筋周辺に腐食ひび割れが発生して容易に水分が鉄筋近傍まで浸透可能な場合において，アノード鉄筋の腐食環境をより厳しいものとしたために，マクロセル電流に大きな増加をもたらしたと考えられる．腐食ひび割れが発生していない場合やカソード部のみに給水があった場合には，水分供給によるマクロセル電流の変動は比較的少ないものと考えられる．

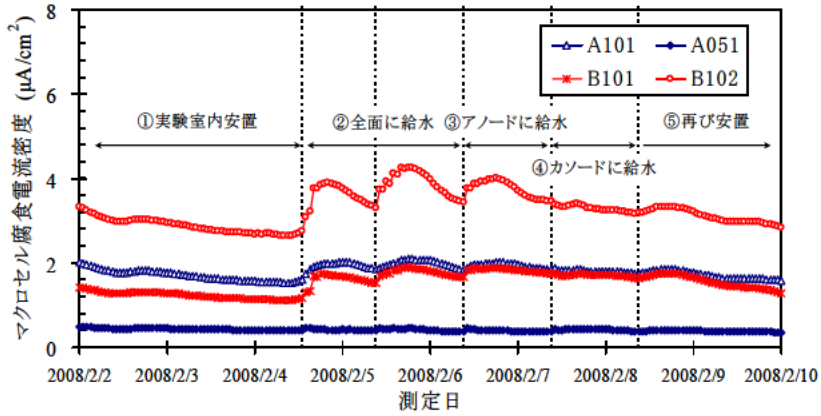
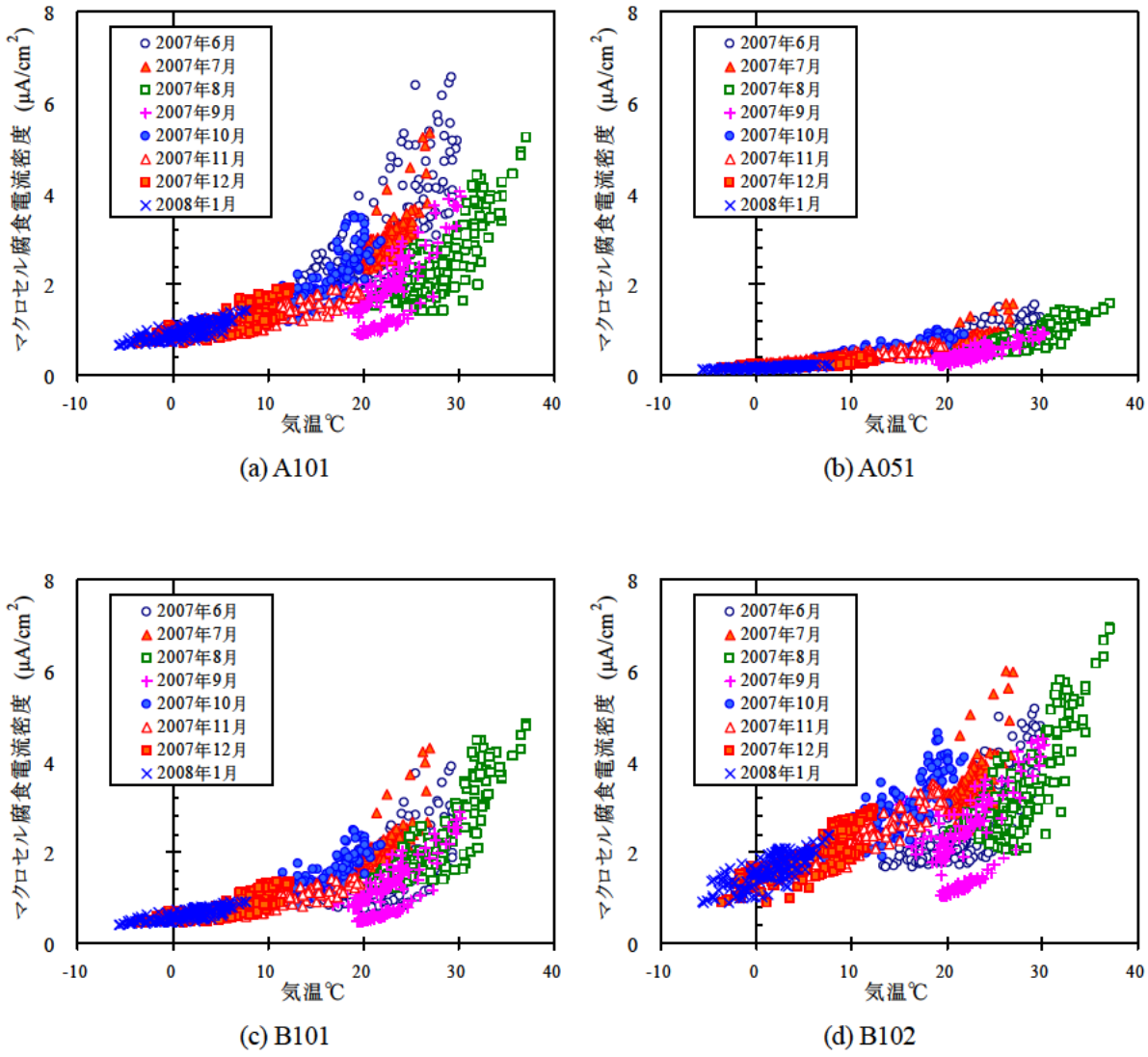


図-3.13　給水条件を変えた場合のマクロセル電流

また，マクロセル電流と気温の関係を詳細に検討するため，図-3.14 に各アノード鉄筋のマクロセル腐食電流密度と気温の関係を示す．ここでは，毎月 7 日間の 1 時間ごとの測定結果をグラフに示した．この結果によると，いずれのアノード鉄筋においても，気温が高いほどマクロセル腐食電流密度が大きくなる傾向にあることが再確認できる．



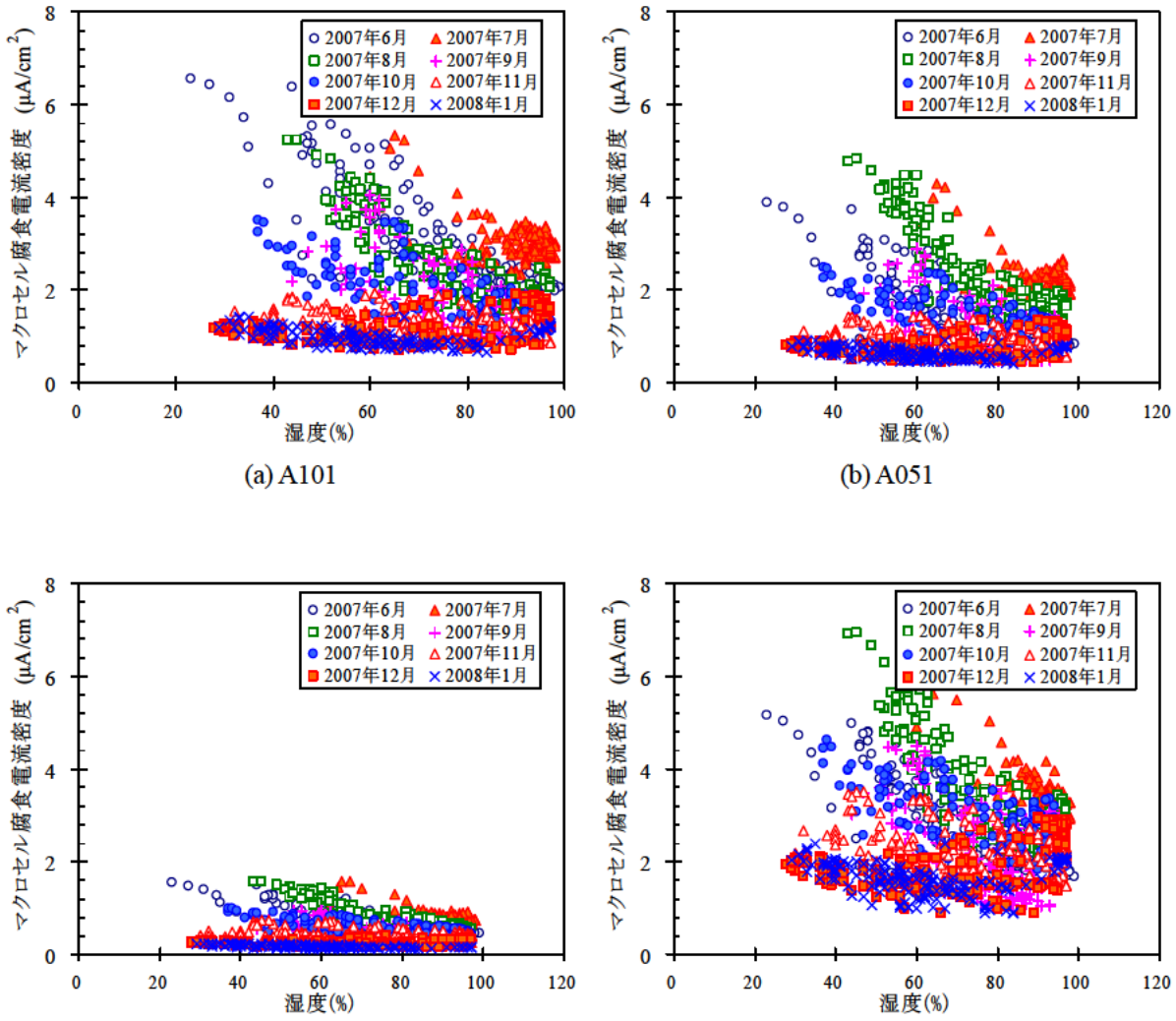
(a) A101　　(b) A051

(c) B101　　(d) B102

図-3.14　アノード鉄筋のマクロセル電流と気温の関係

また，マクロセル電流に与える湿度の影響も考察するため，図-3.15 に各アノード鉄筋のマクロセル腐食電流密度と湿度の関係を示す．ここでも，図-3.14 と同様に，毎月 7 日間の 1 時間ごとの測定結果をグラフに示した．湿度は，気温のような各測定時期に応じた変動がみられず，年間を通じて一定の幅を持ちながら変動していたようである．しかしながら，マクロセル電流は，先に示したように夏季で比較的大きくなったことに加えて，特に湿度が低いほど大きくなる傾向にある．この原因は，図-3.12 の気温と湿度の関係からもわかるように，気温の高い昼間に湿度は低く，気温の低い夜間に湿度は高くなっていることから，気温の高く湿度の低い昼間の測定値が大きくなったためと考えられる．特にこの傾向は夏季ほど顕著であり，これは夏季の方が昼間の気温が高くなることを反映したためと考えられる．

図-3.13 で示したように水分供給時にマクロセル電流は増加する傾向にあったが，ここでは湿度が高い場合においても必ずしもマクロセル電流は増加していない．この原因は，マクロセル電流の大小に及ぼす影響は湿度よりも気温の方が大きく，降雨により湿度が増加した時よりも，夏季のように湿度が低くても気温が高い時の方が大きなマクロセル電流が発生したためと考えることができる．



(a) A101　(b) A051

(c) B101　(d) B102

図-3.15　アノード鉄筋のマクロセル電流と気温の関係

(d) 鉄筋の腐食状況

図-3.16 に，暴露試験終了後に供試体を解体して記録したアノード鉄筋の腐食状況を示す．ここでは，各鉄筋表面を 5mm×5mm のセルに分割し，各セルに占める腐食部分の割合を色分けして示している．アノード側コンクリートの Cl^-濃度が高い鉄筋で腐食部分の占める割合が大きくなる傾向にあった．また，マクロセル腐食を模擬した供試体中の鉄筋も腐食部分の占める割合が大きくなる傾向にあった．なお，練り混ぜ時に Cl^-を混入していないカソード部の鉄筋では腐食は生じていなかった．

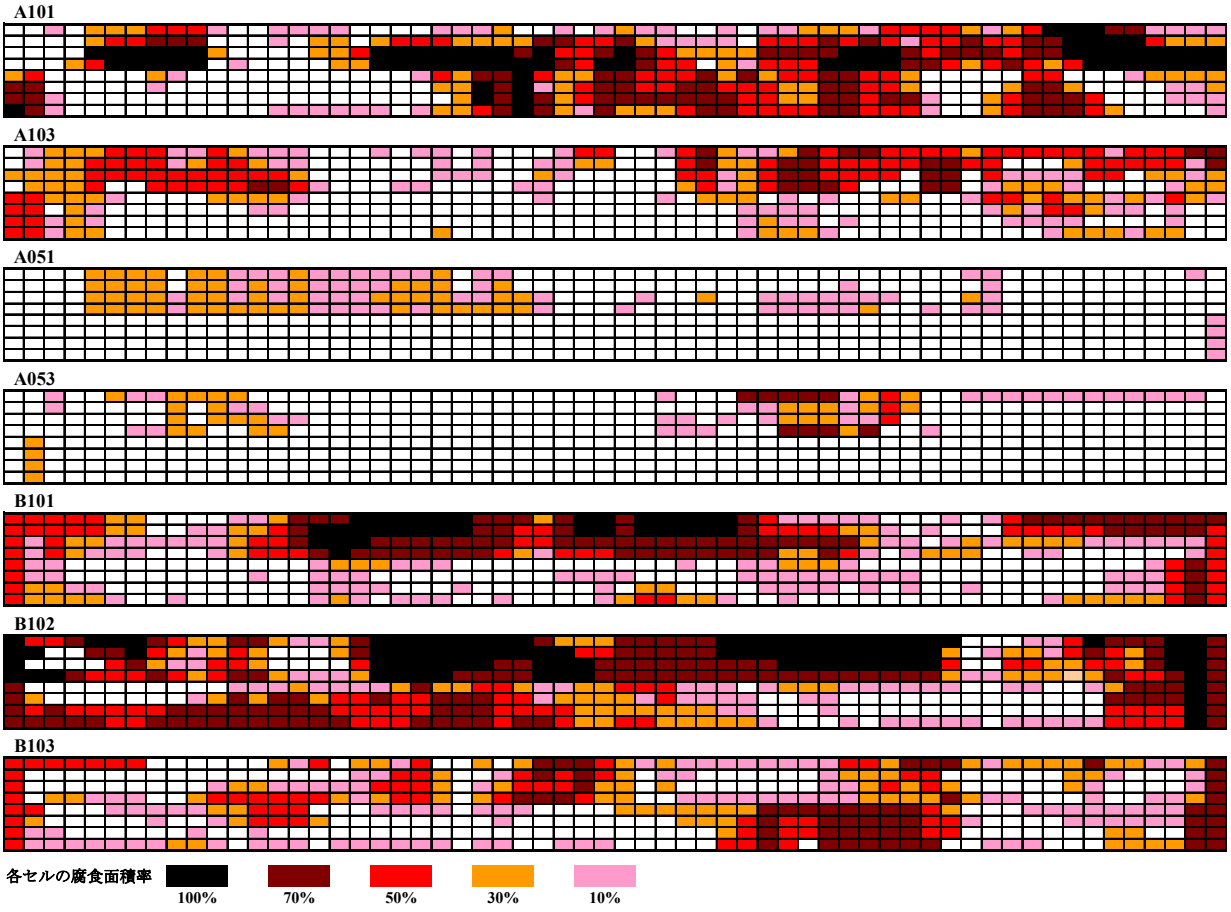


図-3.16　アノード鉄筋の腐食状況

(e) 鉄筋の腐食面積率

鉄筋の腐食程度を定量的に比較するため，各鉄筋の腐食面積率を算出した．ここでは，図-3.16 の腐食部分の面積を足し合わせ，JCI-SC1 に準拠して鉄筋の全表面積に占める腐食部分の割合として腐食面積率を求めた．図-3.17 に，各アノード鉄筋の腐食面積率を示す．これにより，上述したアノード鉄筋の腐食の状況の傾向を再確認することができる．

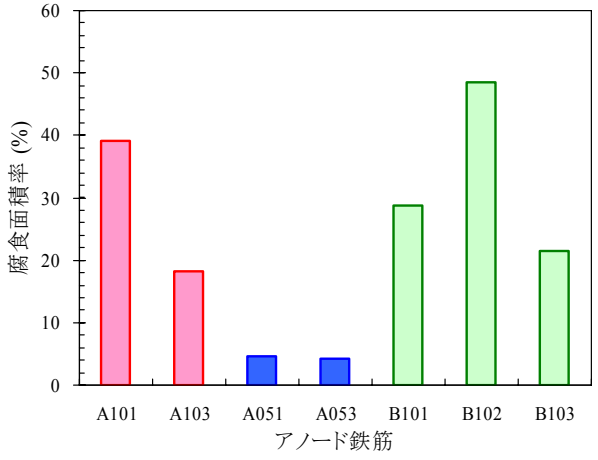


図-3.17　アノード鉄筋の腐食面積率

(f) 鉄筋の質量減少率

図-3.18 に，鉄筋の質量減少率を示す．ここでは， JCI-SC1 に準拠し，まずクエン酸アンモニウム水溶液に鉄筋を浸漬して除錆し，供試体製作前に測定した各アノード鉄筋の質量をもとに質量減少率を算出した．また，マクロセル腐食，ミクロセル腐食，黒皮分の質量減少率をそれぞれ算出した．マクロセル腐食による質量減少率は，暴露試験中に毎月 7 日間実施したマクロセル電流の測定値の平均値を求め，これに全体の暴露時間を乗じることでマクロセル腐食による鉄筋の腐食量を算定し，質量減少率に換算した．また，黒皮分は，徐錆時に除去された異形鉄筋の黒皮の質量である．これは，腐食の生じていなかったカソード鉄筋 3 本を抽出し，アノード鉄筋と同時にクエン酸アンモニウム水溶液に浸漬した際の質量減少率の平均値を算出し，これが全てのアノード鉄筋でも同一であると仮定して求めた．ミクロセル腐食による質量減少率は，質量減少率から上記の方法で求めたマクロセル腐食と黒皮分の質量減少率を差し引いた値と一致すると仮定した．

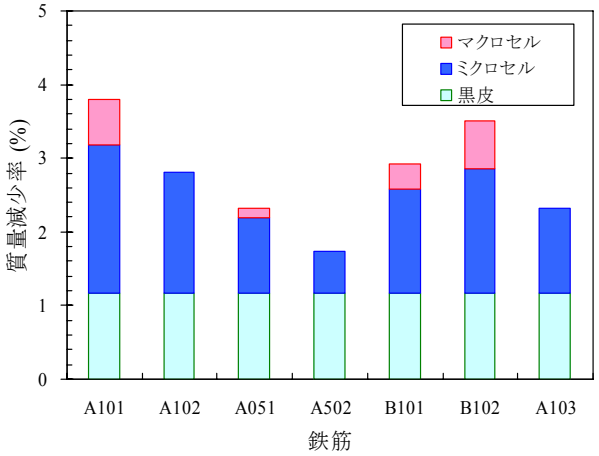


図-3.18　アノード鉄筋の質量減少率

まず，各アノード鉄筋の質量減少率の大小を比較すると，図-3.16，17 と同様に，アノード側コンクリートの Cl^-濃度が大きい場合とカソード側コンクリートの W/C の大きい場合に，大きくなる傾向にあった．ただし，図-3.17 の腐食面積率の結果と比較すると，これらの差が相対的に小さくなったことがわかる．この原因は，ここで得られた質量減少率が約 4%と比較的小さいレベルであったために，腐食面積率ほど明確な差が生じなかった可能性がある．

次に，ミクロセル腐食とマクロセル腐食それぞれによる質量減少率の大小を比較すると，マクロセル腐食による質量減少率も，アノード側コンクリートの Cl^-濃度が大きい場合とカソード側コンクリートの W/C の大きい場合に大きくなったことを確認できる．また，図-3.19 に，黒皮分を除いた質量減少率，すなわち，純粋な鉄筋腐食による質量減少率に占めるミクロセル腐食とマクロセル腐食の割合を示す．これによると，マクロセル腐食が全体の腐食量に占める割合は，10～30%の範囲にあることがわかる．また，マクロセル腐食の占める割合は，これまでに示してきた質量減少率の結果と同様に，アノード側コンクリートの Cl^-濃度が大きい場合とカソード側コンクリートの W/C の大きい場合に，大きくなる結果となった．いずれにしても，全体の腐食量に占める割合は，ミクロセル腐食に起因する腐食量が卓越することがわかる．

ただし，同一のアノード側コンクリートの Cl^-濃度とカソード側コンクリートの W/C で質量減少率を比較すると，ミクロセル腐食のみを模擬した供試体とマクロセル腐食を模擬した供試体では，いずれの場合も後者の質量減少率が大きく，ミクロセル寄与分の質量減少率も大きくなる結果となった．この原因は，供試体間の個体差の影響もあるが，マクロセル腐食を模擬した供試体では比較的早期に腐食ひび割れが発生したために，ひび割れが発生したことでミクロセル寄与分の質量減少率の増加が誘発された可能性がある．すなわち，マクロセル寄与分の質量減少率としては，上記のようにマクロセル電流の測定値から直接的に算定されるものに加えて，腐食ひび割れの早期発生により間接的にミクロセル腐食の進展を誘発したものも含める必要がある可能性もある．この場合，マクロセル腐食を模擬した供試体の質量減少率は，ミクロセル腐食のみを模擬した供試体の 1.5～2 倍の範囲にあった．

今回のアノード鉄筋の質量減少率は最大でも 4%程度であり，必ずしも大きい値ではなかった．このため，今後は，腐食量の大きい場合のミクロセル腐食とマクロセル腐食の構成比率についても検討を行うことが必要と考えられる．

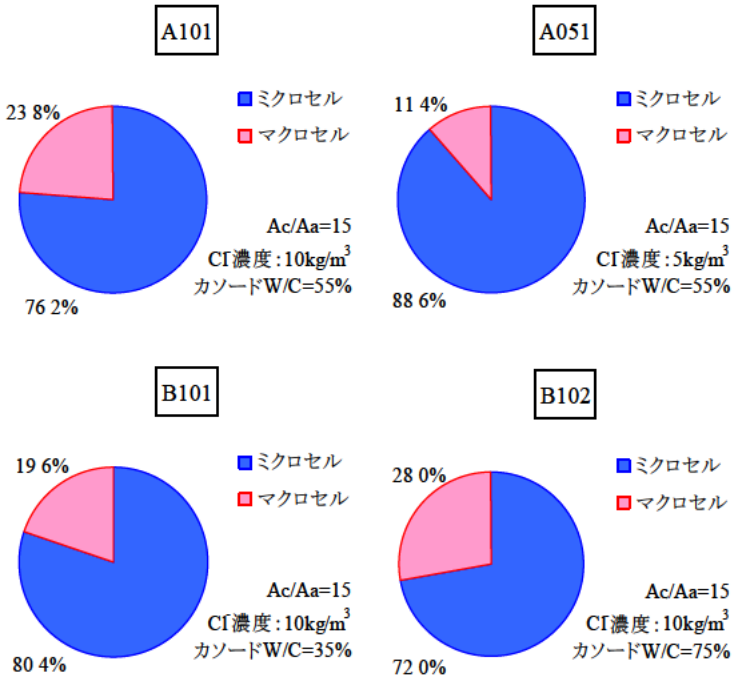


図-3.19　ミクロセル・マクロセル腐食による腐食量の割合

4. 腐食促進試験(シリーズⅡ)

4.1 実験の目的

ここでは，アノード側コンクリートの Cl^-濃度と Ac/Aa の異なる供試体を製作し，乾湿繰返しによる腐食促進試験を行い，①マクロセル腐食とミクロセル腐食の腐食速度の違い，②アノード側コンクリートの Cl^-濃度と Ac/Aa がマクロセル腐食の形成機構と腐食速度に与える影響を明らかにすることを目的として実験を行った.

また，シリーズⅠとシリーズⅡには，アノード部の Cl^-濃度と Ac/Aa が等しい供試体もあるため，両供試体の鉄筋の腐食性状を比較することで屋外暴露試験と腐食促進試験の試験条件の違いによる影響を検討することも可能である．このため，両シリーズの供試体において，W/C=55%のコンクリート配合は同一のものとし，セメントや鉄筋，骨材，混和剤も同じものを用いた.

4.2 供試体の概要

表-4.1 にコンクリート配合．**表-4.2** に供試体の諸元，**図-4.1** に供試体の形状を示す.

ミクロセル腐食とマクロセル腐食の進行速度の違いを比較するため，人工的にマクロセル腐食を再現できる供試体を製作した．ここでは，部材の一部に Cl^-が浸透し，局所的なアノードによって生じるマクロセル腐食を模擬するため，打継目が不連続とならないように Cl^-を含むコンクリート(アノード部)と Cl^-を含まないコンクリート(カソード部)を打ち重ねて製作した．アノード部のコンクリートの Cl^-濃度は，5，10kg/m^3 の 2 種類とし，コンクリート練り混ぜ時に所定量の塩化ナトリウムを加えた．カソード部のコンクリートの Cl^-濃度は，0kg/m^3 である.

アノード部には鉄筋を 1 本ずつ配置し, カソード部の鉄筋本数を変化させることで, 異なる Ac/Aa(=0～30)で形成されるマクロセル腐食を再現できるようにした(No.2～5，7)．また，ミクロセル腐食による腐食を再現する供試体には，Cl^-を含むコンクリート中に 1 本の鉄筋を配置した(No.1，6).

なお，厳密には 1 本の鉄筋中でもミクロセル腐食とマクロセル腐食は同時に進行すると考えられるが，ここでは簡略化のため，アノード部の鉄筋とカソード部の鉄筋を短絡していない状態でミクロセル腐食のみが進行し，これらを短絡した状態でミクロセル腐食とマクロセル腐食の両方が進行すると仮定した.

鉄筋は，SD295A D13 を使用した．鉄筋端部からの腐食を防ぐため，端部から 10mm をエポキシ樹脂により保護した．また，供試体の側面と底面をエポキシ樹脂で塗装したため，コンクリート中への水と酸素の供給は供試体上面からのみ行われたと考えられる.

表-4.1　コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	混和剤
55	46	172	314	819	982	3.1

普通ポルトランドセメント，最大骨材寸法20mm

表-4.2　供試体の諸元

供試体	アノード部のCl⁻濃度 (kg/m^3)	鉄筋本数		表面積比 (Ac/Aa)	腐食形態
		アノード	カソード		
1	10	1	0	0	ミクロセル
2			1	1	マクロセル
3			5	5	
4			15	15	
5			30	30	
6	5		0	0	ミクロセル
7			15	15	マクロセル

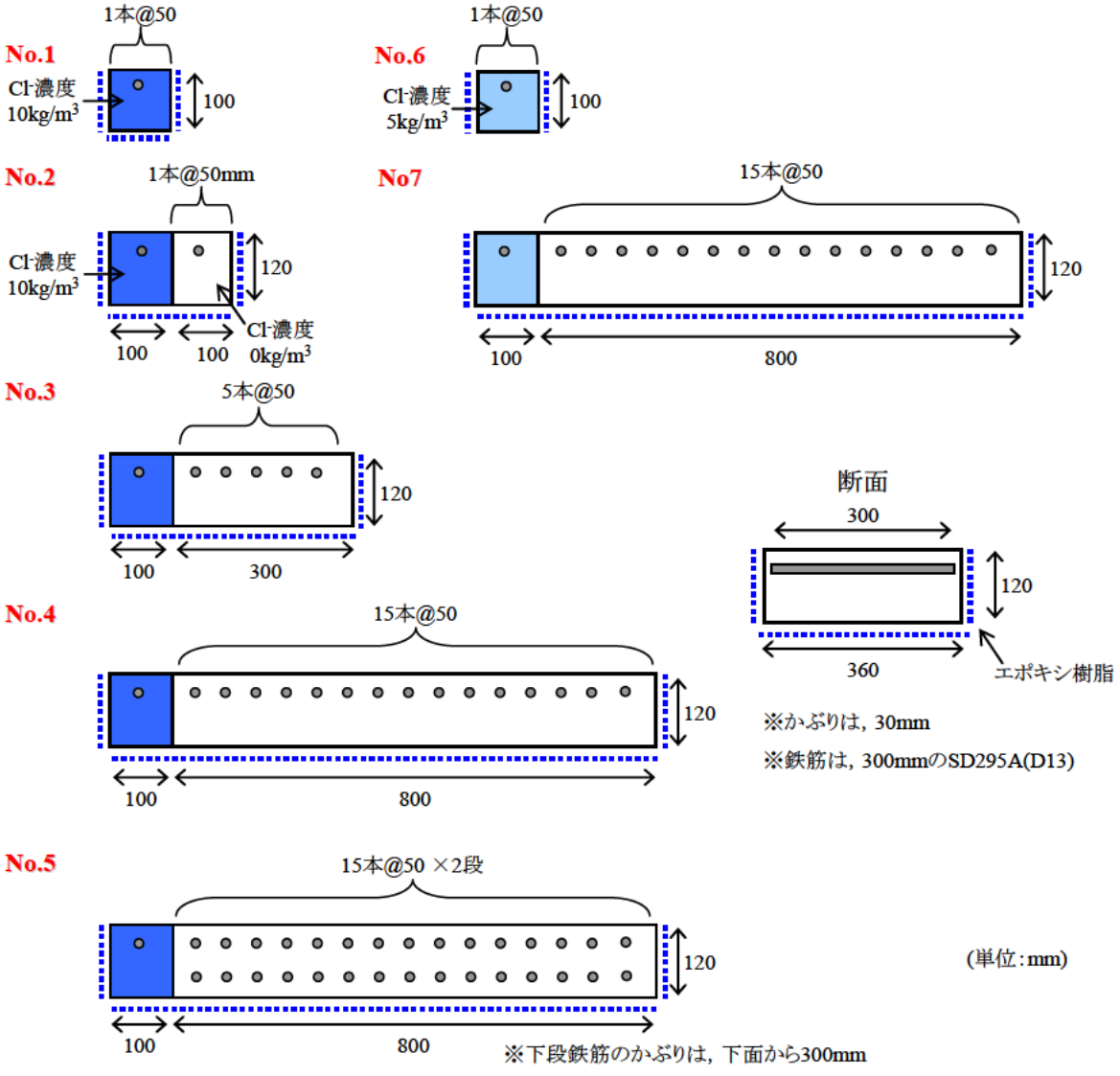


図-4.1　シリーズⅡ供試体の形状

4.3　実験方法

供試体は，恒温恒湿槽内で乾湿繰返しを行うことで，腐食を促進させた．乾湿繰返しの方法は，JCI-SC3 に従い，3 日間の湿潤期間(60℃，90%RH)，4 日間の乾燥期間(15℃，60%RH)を 1 サイクルとしてこれを 20 サイクル行った．

測定は，1，3，5，・・・，19，20 サイクル後に，アノード鉄筋とカソード鉄筋のリード線の短絡を解放して 24 時間安置し，自然電位を測定した後に供試体表面の腐食ひび割れを目視観察した．これらの測定は，コンクリート表面を約 60 分以上湿潤した後に実施した．いずれも照合電極には，銀/塩化銀電極を使用した．また，促進試験中は，データロガーを介してアノード鉄筋とカソード鉄筋のリード線を短絡し，15 分間隔でマクロセル電流を連続測定した[30]．

乾湿繰返し後は，供試体を解体して鉄筋の腐食状態を観察し，JCI-SC1 に従って鉄筋の腐食面積率と質量減少率を測定した．

4.4　実験結果および考察

(a) コンクリート表面のひび割れ幅

図-4.2 に，各促進サイクル終了後の各供試体のコンクリート表面のひび割れ幅の推移を示す．ここでは，各促進サイクル終了後にクラックゲージを用いてアノード鉄筋直上の最も大きいひび割れ幅を測定した．促進 3 サイクル後に全ての供試体でひび割れの発生を確認し，その後，ひび割れ幅は徐々に増加して，最終的には 0.6mm 程度のひび割れ幅となった．若干ではあるが，Aa/Ac の大きい供試体ほどひび割れ幅が大きくなる傾向にあった．

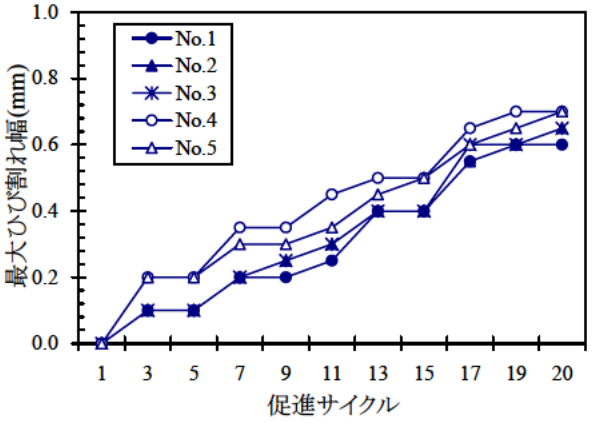


図-4.2　各促進サイクル後のひび割れ幅の推移

(b) 自然電位

図-4.3 に，各促進サイクル終了後の自然電位の測定結果を示す．自然電位は，銀/塩化銀電極を使用し，コンクリート表面を 60 分間以上湿潤した後に，気温 20℃湿度 60%RH の室内で測定した．測定値は，各鉄筋の直上の 3 点で得られたものを平均し，120mV を差し引いて銅/硫酸銅電極基準に換算した．

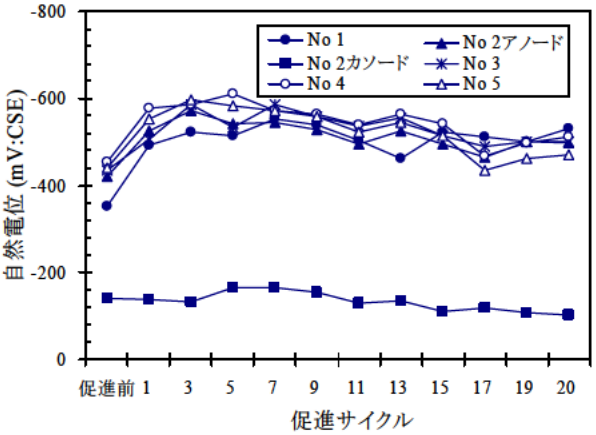


図-4.3　各促進サイクル後の自然電位

自然電位は，Cl^-を含むコンクリート中の鉄筋（No.2 カソード以外）で卑になり，Cl^-を含まないコンクリート中の鉄筋（No.2 カソード）で貴になった．また，Cl^-を含むコンクリート中の鉄筋の自然電位は，試験開始前には-400mV:CSE 程度であったものが，試験開始以降は-400～-600mV:CSE で推移した，腐食ひび割れの発生により鉄筋の置かれた腐食環境が厳しくなり，これを反映して自然電位も卑化したと考えられる．ただし，ひび割れ幅が徐々に増加したのに対して，自然電位は 1 回目の促進サイクル以降は同程度で推移した．一方，Cl^-を含まないコンクリート中の鉄筋の自然電位は-150mV:CSE 程度で常に推移した．

(c) マクロセル電流の経時変化

図-4.4 に，促進試験中のマクロセル電流の測定結果をもとに算出した積算電荷量を示す．ここでは，クーロンの法則により，湿潤と乾燥の各期間の累積電流を電荷量に換算した．積算電荷量は，湿潤時に大きく，乾燥期に小さくなる傾向にあった．また，Ac/Aa が大きい供試体で大きくなる傾向にあったが，いずれの供試体の積算電荷量も促進サイクルを経るとともに小さくなった．この原因としては，供試体の材齢が増えるとともにコンクリート抵抗が増加したこと，促進サイクルを経るにつれて腐食が進行し促進後期における腐食の進行量が促進初期と比べて相対的に減少したことなどが考えられる．

また，No.4 供試体は Aa/Ac=15，No.5 供試体は Aa/Ac=30 としたが，促進初期の積算電荷量に大きな差は見られず，促進後期では No.4 の方が大きくなることもあった．この原因としては，シリーズⅠの結果でも示したように，今回の形状の供試体では Aa/Ac=10 程度でアノード反応が限界に達するため，短絡するカソード鉄筋の本数をこれ以上増やしてもマクロセル電流の増加に寄与する可能性が低くなること，供試体間の個体差などが考えられる．

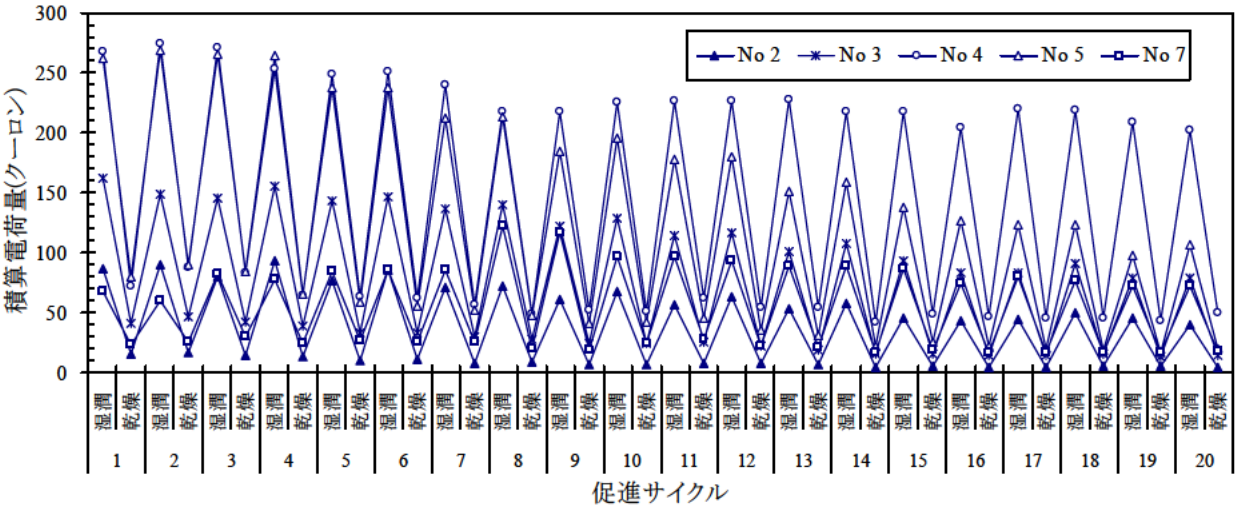


図-4.4　各促進サイクルにおける積算電荷量

(d) 鉄筋の腐食面積率

図-4.5 に，促進試験後に供試体を解体して鉄筋を取り出し，シリーズⅠと同様の方法で算出した鉄筋の腐食面積率を示す．

全てのアノード鉄筋の表面の大部分で腐食が生じており，腐食面積率は 90%以上となるものが多くなった．若干ではあるが，Ac/Aa の小さい供試体では腐食の生じていない部分も残されており，腐食面積率が小さくなった．また，シリーズⅠと同様に，Clを混入していないコンクリート中のカソード鉄筋には腐食は生じていなかった．

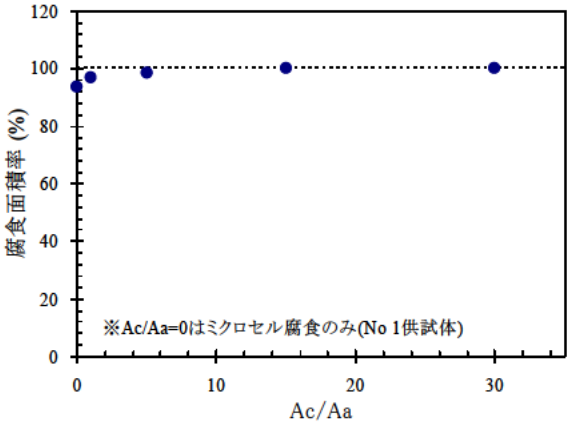


図-4.5　腐食面積率

(e) 鉄筋の質量減少率

図-4.6 に，各供試体のアノード鉄筋の質量減少率を示す．ここでは，シリーズⅠと同様の方法で，マクロセル腐食，ミクロセル腐食，黒皮分による質量減少率を算出した．ただし，マクロセル腐食による質量減少率については，促進試験期間全体を通じてマクロセル電流の測定を行っていたため，これらを積算してマクロセル腐食による腐食量を算出し，質量減少率に換算した．

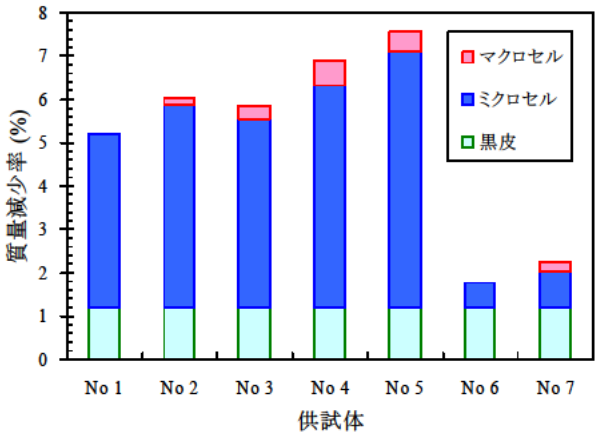


図-4.6　アノード鉄筋の質量減少量

ここでも，シリーズⅠと同様に，アノード側コンクリートの Cl⁻濃度を 10kg/m^3 とした No.1～5 の質量減少率は，5kg/m^3 とした No.6, 7 よりも大きくなる傾向にあった．若干のばらつきはあるものの，Ac/Aa の増加とともに質量減少率も大きくなる傾向にあった．ただし，全質量減少率に占めるマクロセル腐食の貢献分は必ずしも大きくなく，腐食の多くがミクロセル腐食によって生じたものであることが確認できる．また，No.4 と No.5 の結果に着目すると，全体の質量減少率は No.5 の方が大きくなっているが，これはミクロセル腐食の貢献分が異なるためであり，マクロセル腐食の貢献分は同程度であった．Ac/Ac の違いにかかわらず，マクロセル腐食の貢献分が同程度となった原因は，マクロセル腐食の進行速度は，Ac/Aa とともに大きくなるものの，ある段階でカソード律速からアノード律速に転じるためと考えられる．

また，図-4.7 に，黒皮分を除いた質量減少率に占めるミクロセル腐食とマクロセル腐食の割合を示す．マクロセル腐食による腐食量が全腐食量に占める割合は，No.2～5 では最大でも約 10%であり，シリーズⅠよりも小さくなった．ただし，No.7 はアノード側コンクリートの Cl⁻濃度を 5kg/m^3 とした供試体であり，腐食量自体は小さくなったものの，マクロセル腐食の占める割合が約 20%と No.2～5 よりも大きくなった．

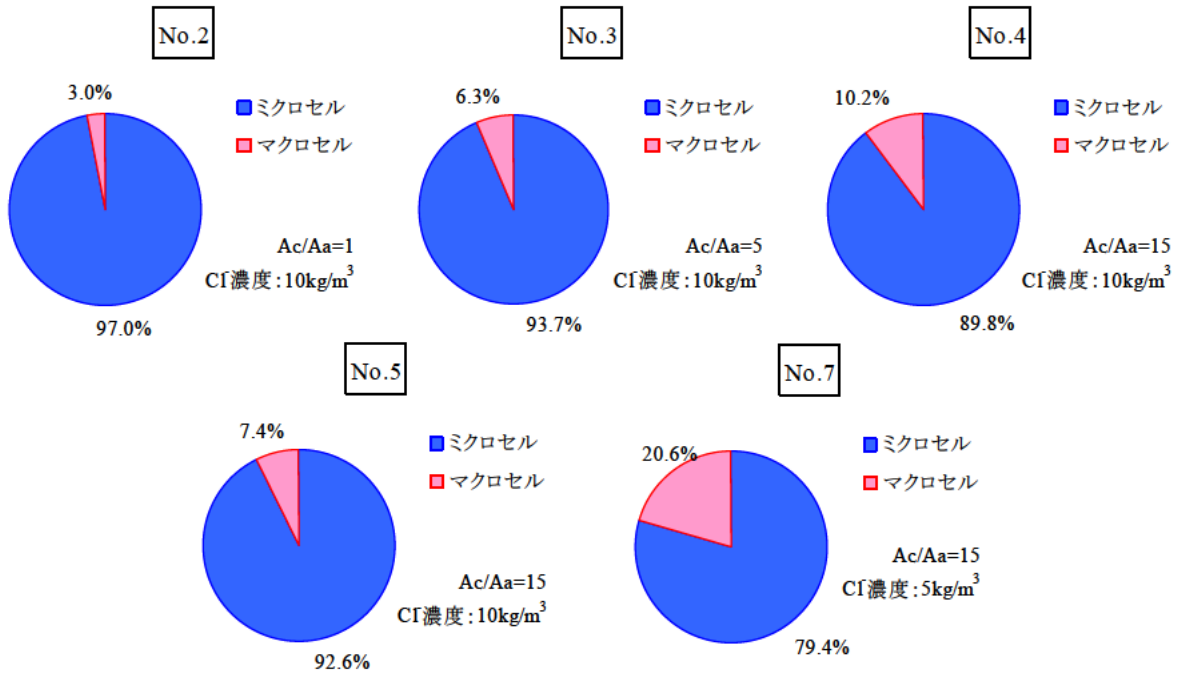


図-4.7　ミクロセル・マクロセル腐食による腐食量の割合

(f) 腐食鉄筋の機械的性質

図-4.8 に，錆除後の鉄筋の引張試験による荷重－伸び関係を示す．

健全な鉄筋と比較して，腐食による質量減少率が大きい鉄筋ほど，最大荷重と最大荷重時の伸びが低下した．アノード側コンクリートの Cl⁻濃度を 5kg/m^3 とした No.6 と No.7 よりも，10kg/m^3 とした No.1～5 の質量減少率が大きくなったために，上記の傾向が特に明確に現れた．また，マクロセル腐食を進展させた供試体とミクロセル腐食のみを進展させた供試体を比較すると，アノード側コンクリートの Cl⁻濃度の違いによる差ほど，最大荷重と最大荷重時の伸びへの影響は明確には現れなかった．この原因は，今回の試験ではミクロセル腐食のみを進展させた場合とマクロセル腐食を進展させた場合の質量減少率の差がそれほど大きくなかったこと，いずれの鉄筋においても腐食が比較的広範囲で生じ局所的なものではなかったことなどが考えられる．

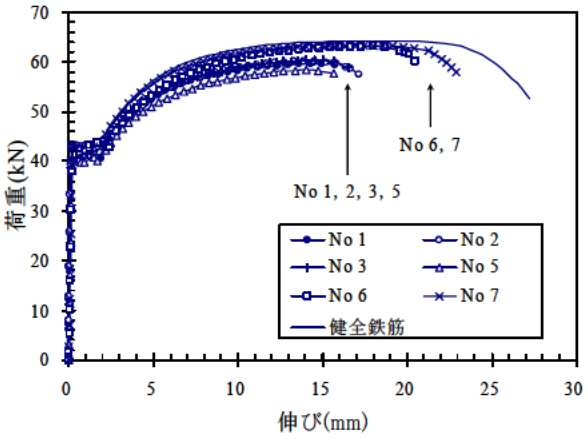


図-4.8　鉄筋の荷重－伸び関係

なお，No.4 は測定ミスのため，この結果は図-4.8 には掲載していない．

5. 外気温とマクロセル腐食形成機構の関係

5.1 実験の目的

これまでのシリーズⅠとシリーズⅡの検討結果を踏まえると，マクロセル腐食の進展速度，すなわちマクロセル電流の大小は外気温の影響を強く受けると考えられる．また，マクロセル電流は，式(5)に示したように，①分極前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差，②アノード・カソード鉄筋の間のコンクリート抵抗，③アノード・カソード鉄筋の分極抵抗，3 つのパラメータによって決定されると考えることができる．そこで，温度変化に伴うこれら 3 つのパラメータとマクロセル電流の関係を実験的に明らかにすることにより，外気温の変化がマクロセル腐食の形成機構に及ぼす影響を検討することとした．

5.2 供試体の概要

表-5.1 にコンクリート配合．**表-5.2** に供試体の諸元，**図-5.1** に供試体の形状を示す．

供試体は S1 と S75 の 2 体を用いることとした．両供試体の形状は異なるものの，いずれも Cl^-を含むコンクリートと Cl^-を含まないコンクリート中に 1 本の鉄筋（前者の鉄筋をアノード鉄筋，後者の鉄筋をカソード鉄筋とする）を埋設し，両鉄筋を短絡した場合にマクロセル回路が形成されるとみなした．S1 ではアノード部とカソード部に使用したコンクリートの W/C を同一の 54.5%としたが，S75 ではアノード側のコンクリートの W/C を 55%，カソード側のコンクリートの W/C を 75%とした．アノード側コンクリートの Cl^-濃度は，いずれも 5kg/m^3 で等しい．供試体の側面と底面をエポキシ樹脂で塗装し，コンクリート中への酸素と水の供給は上面からのみ行われるようにした．供試体は，打継目が不連続とならないよう十分に配慮し，Cl^-を含むコンクリートと Cl^-を含まないコンクリートを同時に打ち重ねて製作した．鉄筋には，S1 ではみがき丸鋼（SR235 φ13），S75 では異形鉄筋（SD295A D13）を使用した．なお，S75 には，異形鉄筋と同じ長さのステンレス棒を分極抵抗測定時の対極とするため，アノード・カソード部それぞれに埋設した．

5.3 実験方法

実験は，恒温恒湿槽内に供試体を安置し，槽内の湿度を 60%RH 一定とし，温度を 5～55℃の範囲で 10℃ずつ変化させて行った．測定は，マクロセル電流を無抵抗電流計で測定し，自然電位と分極抵抗は，FRA（周波数応答アナライザ）を備えた電気化学測定システムを使用し，照合電極には銀／塩化銀電極を用いた．自然電位と分極抵抗の測定前には，供試体表面に水道水を噴霧し，十分に濡れたウエスで約 30 分間被覆して湿潤させた．分極抵抗の測定は，交流インピーダンス法により行い，印加電圧を 50mV，周波数範囲を 10kHz～40Hz として行った．また，分極抵抗測定時の対極には，S1 では測定対象ではないもう一方の鉄筋を使用し，S75 では測定対象の鉄筋の直下のステンレス棒を使用した．いずれも測定対象と対極は平行に配置されており，表面積もほぼ等しいものとした．なお，測定は，恒温恒湿槽内の温度が設定温度となった後に約 24 時間経過した後に実施した．

表-5.1　コンクリート配合

(a) S1 供試体

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	混和剤
54.5	45.2	160	294	827	1,036	3.1

普通ポルトランドセメント，最大骨材寸法20mm

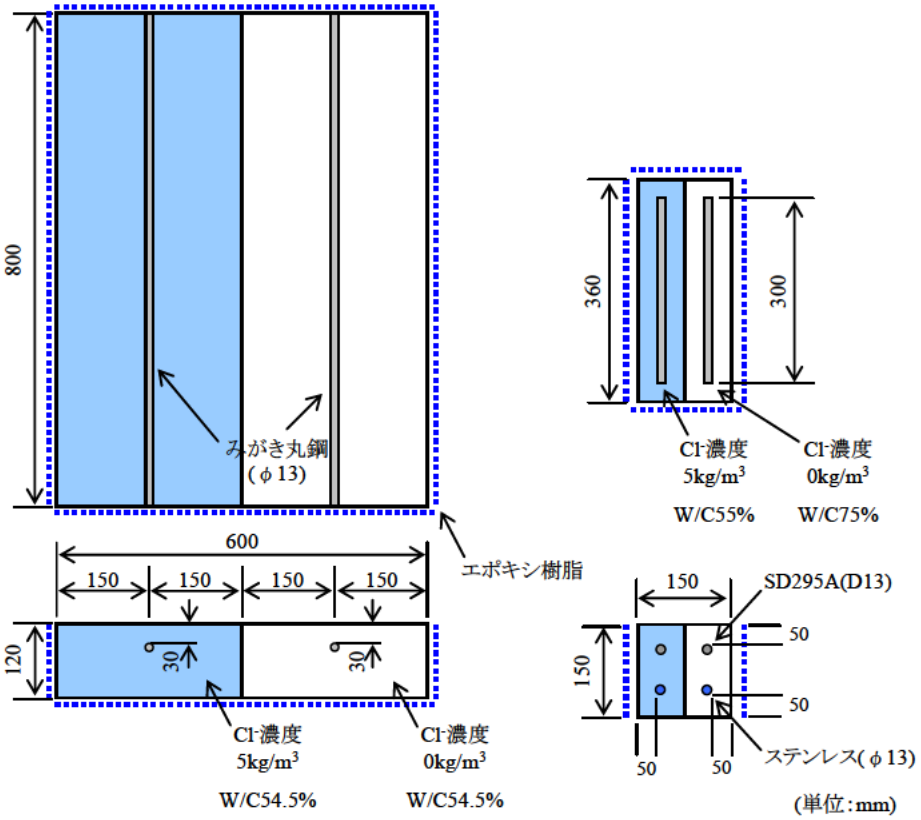
(b) S75 供試体

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	混和剤
55	46	172	314	819	982	3.1
75	46	172	230	851	1,020	2.3

普通ポルトランドセメント，最大骨材寸法20mm

表-5.2　供試体の諸元

供試体	アノード			カソード			表面積比 (Ac/Aa)	腐食形態
	鉄筋長さ (mm)	Cl-濃度 (kg/m^3)	W/C (%)	鉄筋長さ (mm)	Cl-濃度 (kg/m^3)	W/C (%)		
S1	800	5	54.5	800	0	54.5	1	マクロセル
S75	300	5	55	300	0	75	1	



(a) S1 供試体　　(b) S75 供試体

図-5.1　供試体の形状

5.4　実験結果および考察

(a) マクロセル電流

図-5.2 に，マクロセル腐食電流密度と温度の関係を示す．ここでは，温度を恒温恒湿槽内の設定温度とし，測定時には実際の温度と設定温度の差が±3℃程度であることを確認した．いずれの供試体においても，マクロセル腐食電流密度は，温度上昇とともに増加した．これはこれまでのシリーズⅠとシリーズⅡの結果とも一致するものである．

一般に，鉄筋の腐食反応は化学反応であり，式(6)のアレニウスの定理に従うことが知られている．

$$ln(v) = a \cdot \frac{1}{T} + b \qquad (6)$$

ここで，v: 腐食速度(mm/year)，T: 絶対温度，a，b: 定数とする．

図-5.3 に，絶対温度の逆数とマクロセル腐食による腐食速度の関係を示す．マクロセル腐食による腐食速度は，図-5.2 で示したマクロセル腐食電流密度に 1.16×10^{-3} を乗じて mm/year に単位換算した[32]．この結果によると，絶対温度の逆数とマクロセル腐食による腐食速度は概ね線形関係にあることがわかる．すなわち，マクロセル腐食による腐食速度もアレニウスの定理に従うと考えられる．

(b) 自然電位

図-5.4 に，自然電位と温度の関係を示す．ここでは，各鉄筋直上の 2 点での測定値を平均し，-120mV を差し引いて銅／硫酸銅電極基準に換算した結果を示す．自然電位の温度換算は行っていない．この結果によると，若干のばらつきはあるものの，いずれの供試体においても自然電位は温度が大きくなるほど卑に変化する傾向にあることを確認できる．また，自然電位の卑化量はアノード鉄筋の方がカソード鉄筋よりも大きいようである．

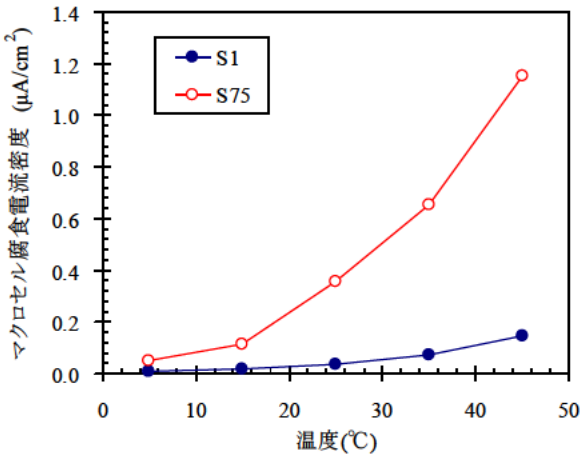


図-5.2　マクロセル腐食電流密度と温度

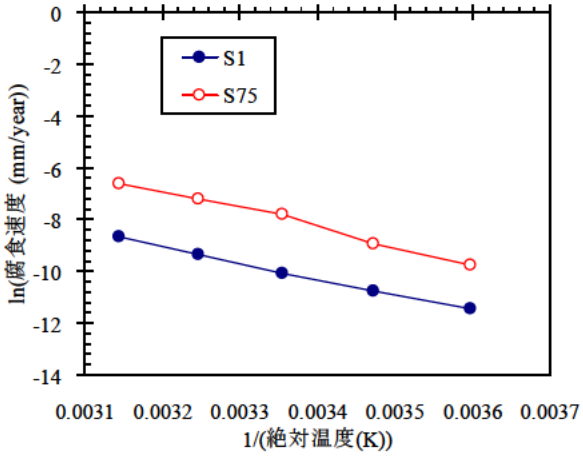


図-5.3　マクロセル腐食による腐食速度と絶対温度

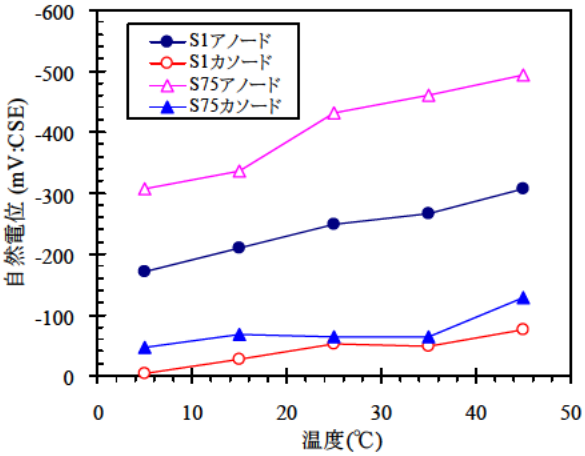


図-5.4　自然電位と温度

(c) 分極抵抗

コンクリート中の鉄筋の等価電気回路モデルを図-5.5 のように仮定すると，理想的な測定条件下で得られる交流インピーダンスの測定結果は図-5.6 のようになる．

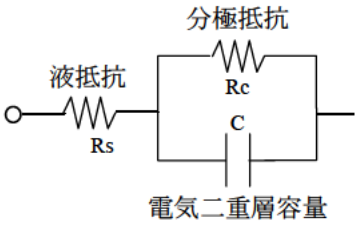


図-5.5　等価電気二重モデル

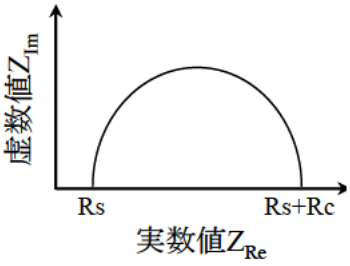
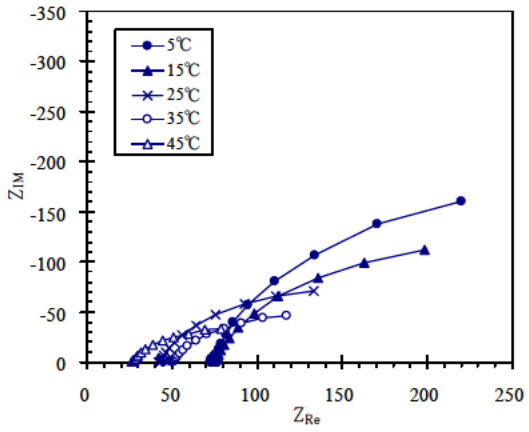


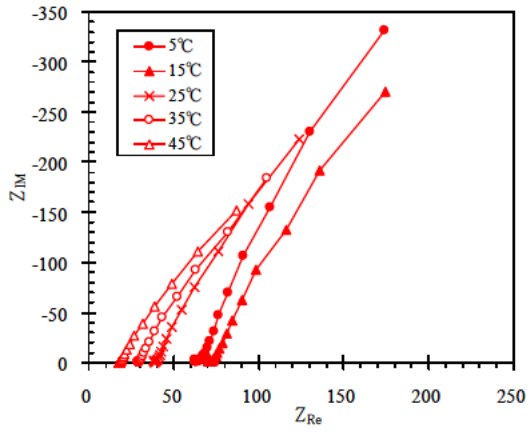
図-5.6　交流インピーダンス

図-5.7 に，各供試体の各鉄筋の交流インピーダンスの測定結果を示す．ここでは，図-5.6 のような理想的な半円の測定結果は得られていないが，温度変化に伴う各鉄筋のコンクリート抵抗と分極抵抗の変動の概略を把握することは可能である．コンクリート抵抗は，交流インピーダンスの半円と横軸の交点のうち小さい方で表され，分極抵抗は，もう一方の交点となる．ただし，ここでは測定時の周波数の最小値を 40mHz としたため，後者の交点を特定することが困難であり，測定された範囲の交流インピーダンス結果をもとに推定する必要がある．

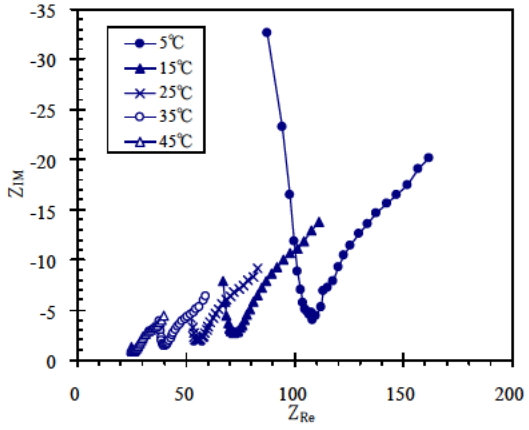
この結果によると，いずれの鉄筋においても，温度上昇とともにコンクリート抵抗と分極抵抗が小さくなる傾向にあることがわかる．式(5)で述べたように，マクロセル電流は，①分極前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差，②アノード・カソード鉄筋の間のコンクリート抵抗，③アノード・カソード鉄筋の分極抵抗の影響を受けると考えられる．このため，図-5.2 に，示したように温度上昇とともにマクロセル電流が増加した原因は，コンクリート抵抗と分極抵抗が小さくなったためと考えられる．



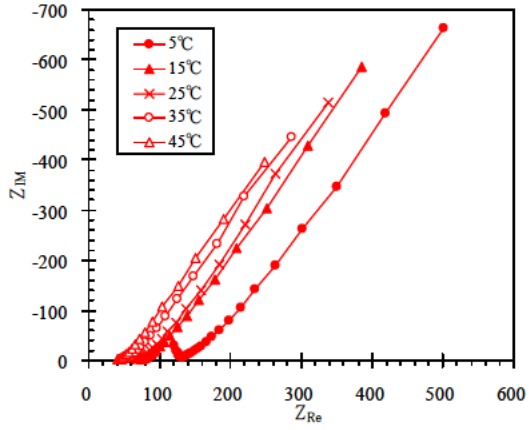
(a) S1 のアノード鉄筋



(b) S1 のカノード鉄筋



(c) S75 のアノード鉄筋



(d) S75 のカノード鉄筋

図-5.7　各供試体の各鉄筋の交流インピーダンスの測定結果

(d) ミクロセル・マクロセル腐食の速度

アノード鉄筋とカソード鉄筋を短絡していない状態で，LPR 法（直線分極抵抗法）による腐食速度の測定も行った．ここでは，腐食電位より 15mV 卑な電位から 15mV まで貴な電位まで 180 秒間で走査し，腐食電位付近で電位と電流の関係の線形回帰直線を作成して，この傾きから分極抵抗を求めた．その後，式(7)を用いて分極抵抗を腐食速度に換算した．

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \qquad (7)$$

ここで，i_{corr}: 腐食速度（μA/cm^2），R_p: 分極抵抗（Ωcm^2），B: 定数で 26mV とした．

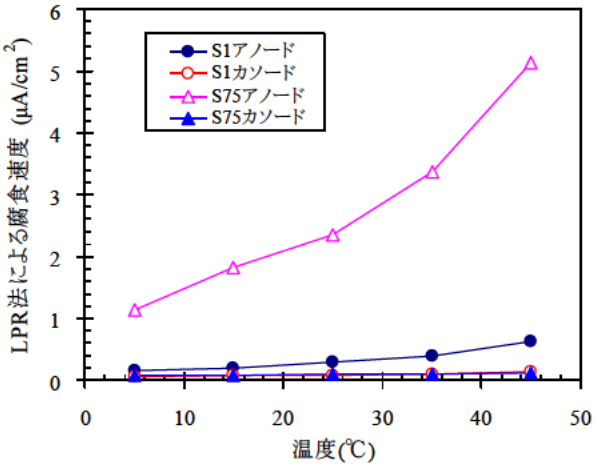


図-5.8　LPR 法による腐食速度

図-5.8 に，各鉄筋の腐食速度と温度の関係を示す．S75 のアノード鉄筋の腐食速度が突出し大きく，次に S1 のアノード鉄筋の腐食速度が大きくなった．温度が大きいほど腐食速度も大きくなった．特に，S75 のアノード鉄筋の腐食速度は，表 5-3 の RILEM 規準の腐食レベルの換算表[33]と照らし合わせても極めて大きいことが確認される．また，どちらのカソード鉄筋も Cl-を混入していないコンクリート中に埋設されており，腐食速度は極めて小さくなった．この結果を図-5.2 に示したマクロセル電流の測定結果から算出したマクロセル腐食による腐食速度と比較すると，どちらの供試体においても，Ac/Aa=1 での測定結果ではあるが，マクロセル腐食による腐食速度はここで LPR 法により求めたアノード鉄筋の腐食速度よりも小さいことがわかる．すなわち，シリーズⅠとシリーズⅡの結果と同様に，コンクリート中鉄筋の腐食量に占めるマクロセル腐食の貢献度は，ミクロセル腐食よりも小さくなるものと考えられる．

表-5.3　RILEM 規準の腐食レベル

Icorr(μA/cm^2)	Corrosion level
≦0.1	Negligible
0.1～0.5	Low
0.5～0.1	Moderate
＞1	High

6. 結論

本報告書では，塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食の形成機構を明らかにすることを目的として，模擬供試体を用いた屋外暴露試験と腐食促進試験等を行った．塩化物イオンの濃度差に起因するマクロセル腐食の形成機構について，今回の実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる．

1) マクロセル腐食による腐食量は最大でも全腐食量の 30%以下であり，ミクロセル腐食の貢献分の方が卓越すると考えられた．
2) マクロセル腐食の進行速度に影響を及ぼすパラメータとしては，①アノード部の Cl^-濃度，②Ac/Aa，③カソード部コンクリートの W/C，④外気温，⑤水分供給などが考えられた．①が大きくなるほど，④が上昇するほど，③が大きいほど，マクロセル腐食の進行速度は増加した．また，②はある閾値以上になると，マクロセル腐食の進行速度がカソード律速からアノード律速となるため，必ずしもマクロセル腐食の進行速度の増大に寄与するわけではなく，今回の実験の範囲ではその閾値は，Ac/Aa=10 程度であった．また，⑤はアノード部の鉄筋近傍に腐食ひび割れ等が生成し，容易に水が鉄筋まで到達し得るような場合に，マクロセル腐食の進行速度の増加に寄与した．
3) マクロセル腐食の進行速度には規則的な日変動があり，その大小は外気温によって概ね説明し得るものであった．また，アノード部の鉄筋直上に腐食ひび割れが生成している場合には，降雨等による水分供給もマクロセル腐食の進行速度の増加に寄与した．
4) 約 8～10 ヶ月の屋外暴露試験による腐食量と，JCI-SC3 に準拠した乾湿繰返し試験による腐食量では，後者の腐食量の方が大きくなる結果となった．しかしながら，全腐食量に占めるマクロセル腐食の貢献分など傾向としては概ね一致する結果が得られた．
5) ミクロセルおよびマクロセル腐食により損傷した鉄筋の引張強度と伸び性能は，腐食形態の違いにかかわらず，質量減少率が大きくなるほど低下した．
6) マクロセル腐食の進行速度は外気温が高いほど増加したが，この原因は，外気温の上昇により，コンクリート抵抗と鉄筋の分極抵抗が小さくなるためと考えられた．

参考文献

1) 岡田清，小柳洽，宮川豊章：コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文報告集，No.281，pp.75-87，1979.
2) 岡田清, 宮川豊章: コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報，No.33，pp.494-497，1979.
3) 小林孝一，平澤征夫，宮川豊章：RC 部材のひび割れによるマクロセル腐食の電気化学特性を用いた解析的検討，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.71-89，2003.
4) 川東龍夫，小林孝一，宮川豊章：コンクリートに埋設された鋼材のマクロセルおよびミクロセル腐食に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.1-15，2003.
5) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一：鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.109-119，1996.
6) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，鎌田敏郎，宮里心一：断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.31-42，1997.
7) 大即信明，宮里心一，柴田常徳，久田真，Tarek Uddin Md.，長滝重義：鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.63-73，1998.
8) 大即信明，宮里心一，鈴木裕隆，木村勇人：曲げひび割れ近傍の生じる主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.161-177，1999.
9) 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.83-93，2001.
10) 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，Vol.12，No.2，pp.93-103，2001.
11) 長谷川裕介，宮里心一，親本俊憲，横関康祐：ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.1，pp.31-39，2006.
12) 鈴木計夫，大野義照，田村博：高強度コンクリートにおけるひびわれと鉄筋腐食，セメント・コンクリート論文集，Vol.43，pp.460-465，1989.
13) 大野義照，鈴木計夫，田村博：コンクリート中鉄筋のマクロセル腐食に及ぼすかぶり厚さと水セメント比の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.45，pp.526-531，1991.
14) 大野義照，鈴木計夫，田村博：コンクリートのかぶり厚さとひび割れの鉄筋腐食への影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.46，pp.642-647，1992.
15) 大野義照，鈴木計夫，田村博：ひび割れの生じたコンクリート中の鉄筋腐食，セメント・コンクリート論文集，Vol.47，pp.504-509，1993.
16) 大野義照，鈴木計夫，田村博：ひび割れの生じた高強度コンクリート中の鉄筋腐食，セメント・コンクリート論文集，Vol.48，pp.536-541，1994.
17) 大野義照，鈴木計夫，田村博：コンクリート中鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.49，pp.726-731，1995.
18) 北野勇一，渡辺博志，久田真，北山良：補修 RC 梁中の残留塩分に起因するマクロセル腐食に関する暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1787-1792，2006.
19) 北野勇一，渡辺博志，久田真，北山良：補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1107-1112，2007.
20) Raupach, M.: Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete – theoretical background and

practical cosequences, *Construction and Building Materials*, Vol.10, No.5, pp.329-338, 1996.
21) Elsener, B.: Macrocell corrosion of steel in concrete – implications for corrosion monitoring, *Cement & Concrete Composites*, Vol.24, pp.65-72, 2002
22) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博:電気化学的測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究(塩化物濃度の異なる電池), セメント・コンクリート論文集, Vol.44, pp.388-393, 1990.
23) 丸屋剛, 武田均, 堀口賢一, 小山哲, 許鎧麟：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.757-776, 2006.
24) Arya, A., Vassie, P. R. W.: Effective cathode to anode ration and reinforcement corrosion in concrete, *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, pp.33-42, 1996.
25) Andrade, C., Maribona, I. R., Feliu, S., Gonzalez, J. A., Feliu, S. Jr.: The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements, *Corrosion Science*, Vol. 33, No.2, pp.237-249, 1992.
26) Warkus, J., Raupach, M.: Modeling of reinforcement corrosion – Corrosion with extensive cathodes, *Materials and Corrosion*, Vol.57, No.12, pp.920-925, 2006
27) Song, X., Liu, X.: Experimental Research on Corrosion of Reinforcement in concrete through cathode-to-anode area ratio, ACI Materials Journal, Vol.97, No.2, pp.148-155, 2000.
28) 独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会：自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書, 整理番号第 357 号, 2007.
29) 中村英佑, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村雅之, 井川一弘：塩害環境下にあるコンクリート構造物への自然電位法の適用に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.263-275, 2008.
30) 山口光俊, 徳光 卓, 藤田数正, 鈴木 丘：マクロセル電流計測の自動測定方法に関する実験的検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 5-185, pp.369-370, 2005.
31) 気象庁ホームページ：http://www.jma.go.jp/jma/index.html
32) 土木学会：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-, コンクリート技術シリーズ No.26, 1997.
33) RILEM TC 154-EMC: Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, *Materials and Structures,* Vol.37, pp.623-643, 2004.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4131 January 2009

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754