

# 論文 光ファイバセンシングによる鋼材の腐食膨張挙動に関する研究

早野 博幸<sup>\*1</sup>・井坂 幸俊<sup>\*2</sup>・吉田 愛<sup>\*3</sup>・江里口 玲<sup>\*2</sup>

**要旨:** RC 構造物の腐食ひび割れに影響を及ぼす鉄筋の腐食膨張挙動に関して、光ファイバセンシングによる実験的検討を行った。FBG センサを用いて大気中の塩分環境下における棒鋼の腐食膨張を計測し、初期段階ではひずみ変化が小さいがその後指数関数的に増大すること、腐食面積率や腐食量と膨張ひずみの関係等を明らかにした。また、コンクリート中における棒鋼の電食下における腐食膨張挙動を計測した結果、腐食生成物の体積膨張率は腐食量や拘束の影響を受け 1.5 または 1.7 となった。さらに、光ファイバセンサを用いることで、腐食の発生・進展および腐食ひび割れ発生までモニタリング可能であることを示した。

**キーワード:** 光ファイバセンサ, 腐食, 体積膨張, ひずみ, 電食試験, 腐食ひび割れ

## 1. はじめに

RC 構造物の鉄筋腐食は、その開始から進展によるひび割れの発生、最終的にはかぶりコンクリートの剥落へと繋がるもので、これらすべてを予測することは極めて難しい。腐食の開始および進展は、従来より電気的手法によって推測されてきた。また、腐食ひび割れについては、鉄筋の腐食膨張によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するときの腐食限界量に関して多くの実験的検討が行われてきた。

腐食ひび割れの発生は、鉄が腐食生成物に変化する過程で体積膨張が生じ、周囲のコンクリートに応力が発生することに起因する。そのため化学的アプローチとして腐食生成物の分析を行い、その原子量と密度から腐食過程における体積膨張率の検討が詳細に行われており<sup>1)2)</sup>など、現在までに約 20 種類の腐食生成物の存在が確認され、環境条件によって生成する種類が異なることが明らかになっている<sup>2)</sup>。

腐食自体は電気化学的反応によるものであるが、その過程で体積変化を伴うことから、本研究では鋼材のひずみ変化によってその挙動を捉える物理的アプローチからの検討を行った。腐食膨張挙動を計測するためには鋼材ひずみを計測すればよいが、ひずみゲージを貼付した場合には鋼材を覆うことで腐食因子の侵入を遮断し、さらに表面が腐食するとゲージが剥がれて計測不能となるなど現実的には難しい。そこで、腐食因子を阻害しない極めて細い径を有し、センサ部に腐食電流を流すことなく周囲の電磁気の影響を受けずに計測できる光ファイバセンシングに着目した。既往の研究<sup>3)</sup>においては、モルタル内部の鋼材の腐食が検知できる可能性を見出したが、本論では、光ファイバセンシングによってコンクリート

中の棒鋼のひずみから腐食膨張挙動を捉えることができるかについて、さらには腐食過程における棒鋼の体積膨張率について実験的検討を行った結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 光ファイバセンサの概要

本研究では光ファイバセンサとして FBG センサ<sup>4)</sup>を用いた。測定原理としては、光ファイバケーブルの一部に紫外線によって回折格子が形成されたセンサ部において、ひずみや温度変化によって回折格子間距離が変わり、それに応じた反射光の波長変化を物理量に変換する仕組みを利用している。

### 2.2 大気中における鋼材の腐食膨張の計測

基礎的検討として、大気中において光ファイバセンサを用いて棒鋼の腐食膨張を周方向のひずみとして計測可能かどうかの検討を行った。みがき棒鋼 (JIS G 3108,  $\phi 20 \times h50\text{mm}$ ) の軸高さ方向の中央区間 25mm に、FBG センサ部が中央に位置するように光ファイバケーブル ( $\phi 150 \mu\text{m}$ ) をらせん状に巻き付け、ケーブルの両端を棒鋼に接着固定した。ファイバの周回数を 1, 2, 3 回の 3 水準として各 3 体の試験体を作製し、棒鋼の上および下端部面以外の側面に対して 10%NaCl 水溶液をしみ込ませた脱脂綿で塩水を付着させ、30°C90%R.H.の恒温恒湿槽に入れひずみの計測を行った。また、測定からの経過日数が 0.7, 3, 7, 10, 14 日にて試験体の腐食状態を写真撮影し、棒鋼の端部を曲率補正した後に腐食面積率を算出した。計測はセンサの波長が許容値を超えた時点および 14 日で終了とし、棒鋼に設置した光ファイバを除去した後、10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液(60°C)に浸漬して除錆し、腐食量を測定した。

\*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

\*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 (正会員)

\*3 太平洋セメント (株) 中央研究所

## 2.3 コンクリート中における鋼材の腐食膨張の計測

### (1) 試験体の概要

一般環境下では、コンクリート中における鋼材の腐食開始からかぶりコンクリートにひび割れが発生するまではかなりの期間を要する。そこで腐食機構は異なるが、早期に腐食が進行する電食試験を実施し、コンクリート中における鋼材の腐食膨張が計測できるかどうかの検討を行った。試験体は図-1に示すように、みがき棒鋼(φ30×350mm)をコンクリート中(300×300×310mm)にかぶりが50mmとなるように配置した。このみがき棒鋼には、各々25mm区間にFBGセンサが中央部に位置するよう1本の光ファイバケーブルをらせん状に巻き付けた。また、光ファイバが断線したり、計測不能となった場合にすべてのFBGセンサが計測不能とならないように直列配置せず、それぞれのFBGセンサを個別に計測機と接続した(計8ch)。

コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いてW/C0.6とした。コンクリートはブリーディングによって鉄筋の下部に欠陥部が生じ、そこから腐食が生じることが考えられるが、今回はこの影響を排除するため、配置した棒鋼の軸方向にコンクリートを打設し、できるだけ均一に腐食させるようにした。

コンクリートを打設後、湿布で打設面を覆い20℃で24時間養生後、脱型を行った。コンクリートから露出した棒鋼は腐食しないよう被覆処理し、かぶり面の中央部には防水型ひずみゲージを貼付して材齢22日まで湿潤養生を行った。

### (2) 電食試験の概要

試験体はかぶり面に貼付したゲージ側が上部となるようアクリル容器に入れ、コンクリートが湿潤状態になるよう水中に浸漬させたまま20℃一定の養生槽に入れた。かぶり面から10mmの位置に陰極材となる銅板を配置し、棒鋼を陽極材として200mAの一定電流を流して電食試験を行った。計測に関しては、光ファイバセンサによる棒鋼の周方向ひずみを8ヶ所、ひずみゲージによるコンクリートかぶり面中央部のひずみを1ヶ所それぞれ連続的に計測した。

### (3) 腐食量および除錆後の棒鋼の寸法計測

腐食ひび割れ発生後に電食試験を終了し、試験体のコンクリート部分を除去して棒鋼を取り出して10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液(60℃)に浸漬させ、腐食生成物を除去して腐食量の測定を行った。また、ノギスを用い除錆後の棒鋼の直径を光ファイバを巻いている区間(25mm)、その間の区間(10mm)に分けてそれぞれ10点計測し、平均直径を算出した。

## 3. 実験結果および考察

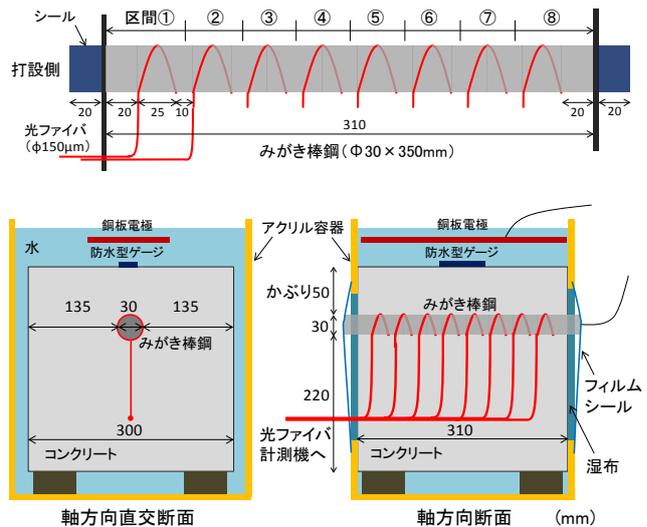


図-1 電食試験体の概要

### 3.1 大気中における鋼材の腐食膨張

計測した波長からひずみへの換算は式(1)<sup>4)</sup>に基づき、本研究で使用したFBGセンサの中心波長1550nmを乗じて $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ となる。さらに式(2)によって計測時および初期値の波長からひずみを算出した。

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon = (\lambda - \lambda_0) / 1.2 \times 10^3 \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon$ : ひずみ( $\mu$ )、 $\lambda$ : 波長(nm)、 $\lambda_0$ : 初期波長(nm)。

計測開始後の経過時間と棒鋼のひずみの関係を図-2に示す(凡例: 1(ファイバ周回数)-1(No.))。恒温恒湿槽に入れた直後は若干の槽内における温度分布の相違でひずみが減少しているものもあるが、0.05日(1.2時間)程度で急激な膨張挙動を示している試験体(2-3)があり、その後の挙動も連続的で離散的になっていないことから腐食に伴う体積ひずみが計測されていることが分かる。腐食程度の目安として0.7日におけるセンサ付近の腐食状況の一例を写真-1に示す。

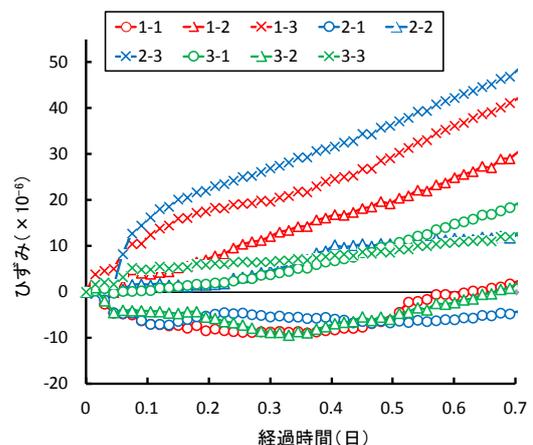


図-2 計測開始直後の経過時間とひずみの関係

さらに、その後の試験終了までの経過時間と光ファイバセンサによるひずみの関係を図-3に示す。時間の経過とともにひずみは増加傾向を示しているが、計測開始から3~5日まではひずみの増加傾向は緩やかであり、それ以降は腐食の進展に応じて試験体ごとに増加割合が様々ではあるが、急激な増加傾向を示している。腐食状態の目安となる腐食面積率とひずみの関係について検討するため、終了となる14日までひずみが計測できた各1体について腐食面積率を算出し、ひずみとの関係を図-4に示す。計測開始から0.7日の腐食面積率はいずれも約20%程度と腐食が進展しているが、ひずみは大きくても数十 $\mu$ 程度であり大きな値ではない。光ファイバの周回数が3の試験体3-2に着目すると、他より腐食面積率が小さくてもひずみが増大する傾向があり、30%程度を超えると指数関数的に増大した。光ファイバの周回数が多いほど鋼材表面との接触長が長くなり、腐食部分に接する確率が高くなって早く腐食検知できるが、周回数が多すぎると鋼材への外来腐食因子の到達を妨げることが予想される。ただし、図-3を見る限り周回数が腐食検知確度に影響を及ぼすかどうかは不明瞭であり、厳密には各試験体が同じ腐食の発生・進展となっているかは定かではないので、ファイバ周回数が腐食の検知確度に及ぼす影響を検証することは難しいといえる。

図-4からは、腐食面積率が30~50%程度を上回るときから体積膨張が急激に増大することが分かる。この理由としては、腐食生成物の生成経路として、鉄イオン水溶液から出発したものが最終形態としていずれも固相である、オキシ水酸化鉄( $\text{FeOOH}$ )や酸化鉄( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ など)になることから<sup>5)</sup>、固相に変わることによってひずみとして表れることが考えられる。また腐食初期に発生する腐食生成物は液体中のイオンから形成するコロイド状であり<sup>6)</sup>、これらは構造的には液体に近い性質とみなせる。したがって高湿度下で水膜ができていくのみがき棒鋼表面では平面的に広がることで堆積しにくく、ひずみとして表れにくいことが影響しているものと考えられる。その後は、電池効果と併せて、高温高湿となる大気中では腐食速度を加速させる水と酸素が十分に供給されるため急速に腐食が進展し、ひずみが増大したと考えられる。また、腐食生成物については非晶質と結晶質のものが存在し、結晶化するか否かも体積膨張に大きく影響すると考えられるが、いずれにしても本環境条件での大気中の塩分環境下における腐食では、急激に体積膨張が生じる加速期があることが明らかとなった。また、図-3より3000 $\mu$ 程度になるとひずみの増加割合が小さくなるものもみられ、大量の腐食生成物が表面に付着することによって酸素や水が内部に供給されにくくなり、腐食速度が遅くなったことが考えられる。



写真-1 腐食状況の一例 (左: 1-2, 右: 2-3)

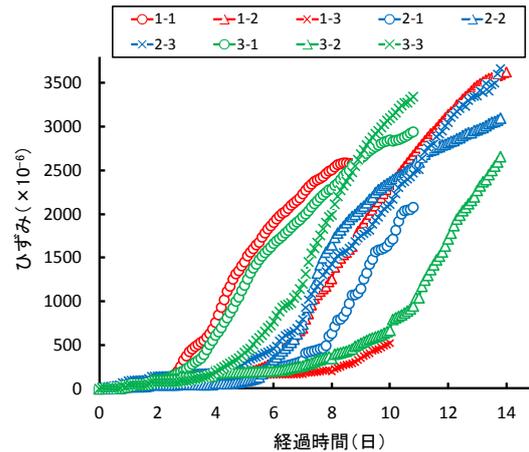


図-3 試験終了までの経過時間とひずみの関係

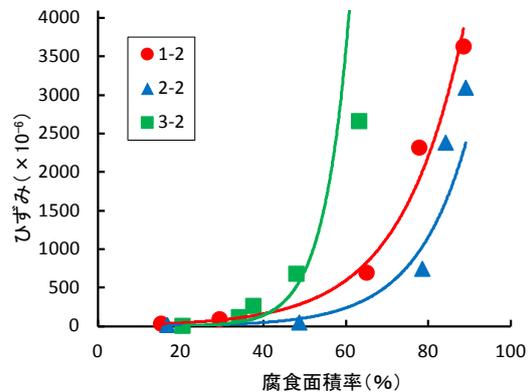


図-4 腐食面積率とひずみの関係

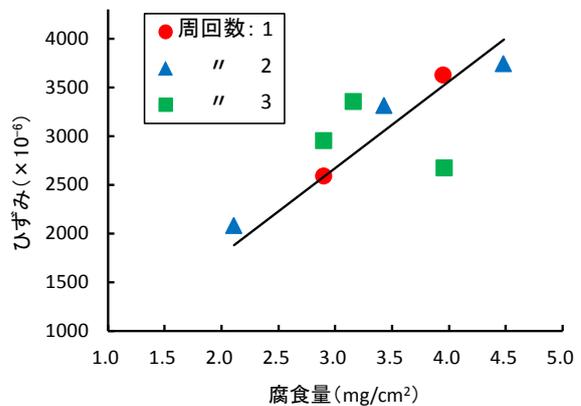


図-5 腐食量とひずみの関係

各試験体の計測終了後の腐食量とひずみの関係を図-5に示す。なお、試験体 1-3 は途中で光ファイバの破損がみられたため図から除いた。図より、光ファイバの周回数に関わらず腐食量とひずみは概ね正の相関が認められ、腐食がかなり進行している状態では、腐食量の増加に伴って体積膨張ひずみも大きなものとなっていることが分かり、膨張ひずみより腐食量が推定できる可能性があることを示している。

大気中における腐食生成物の体積膨張率の検討を行うため、試験終了時点のひずみから腐食時の棒鋼の平均直径、さらに体積を算出し、元の直径から算出した体積との差を腐食に伴う体積増加量とした。この値と腐食量および鋼の密度(0.00785g/mm<sup>3</sup>)から算出した除錆後の体積減少量を用いて体積膨張率を計算した結果を表-1に示す。拘束がない場合の体積膨張率については、腐食生成物はポーラスなものであるため、想定される腐食生成物の原子量と密度から算出したものより大きくなることが予想され、水を拘束した場合 Fe(OH)<sub>3</sub>・3H<sub>2</sub>O では6倍以上になるといわれている<sup>7)</sup>。本結果は5.5~8.1でほぼ6を超えており、既往の研究結果とほぼ一致した。

以上より、大気中における塩分環境下において、棒鋼の腐食膨張をひずみとして定量的に評価が可能なが分かった。また、腐食量および腐食面積率とひずみは相関が認められ、腐食の進展に応じてひずみが増大することが明らかとなった。

### 3.2 コンクリート中における鋼材の腐食膨張

#### (1) 電食試験前のひずみ挙動

電食試験前のコンクリート打設後の養生中における棒鋼のひずみを図-6に示す。ひずみは水和に伴うコンクリートの温度上昇とともに増加し、材齢1日の脱型中には一時計測を中断したが温度降下に伴って減少した。練り上がり後からのコンクリートの温度上昇値は、線膨張係数(鋼:11.7×10<sup>-6</sup>/°C, 光ファイバセンサ:実測値 10.0×10<sup>-6</sup>/°C)から算出すると10°C程度と予測できる。

#### (2) 電食試験中のひずみ挙動

電食試験開始後の鋼棒のひずみを各区分ごとに図-7に示す。いずれも電食開始直後から17日程度まではひずみの変動は小さく、その後は急激にひずみが増大しており、環境は異なるが3.1で検討したひずみ挙動と類似している。高温高湿大気中の塩分環境下では、腐食反応はその要因となる水と酸素が随時供給され、電池効果も伴って次第に加速度的に腐食が進行する。それに対して、電食試験における鉄の腐食機構としては、鉄がイオン化するアノード反応が卓越することが考えられること、さらには電食開始後から一定の腐食電流が流れており、ファラデーの法則によれば鉄の電解量、すなわち腐食量は時間に比例して一定速度で生じることが考えられる。そ

表-1 大気中における腐食生成物の体積膨張率

No.	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
体積膨張率	7.8	8.0	7.7	7.6	6.7	7.8	5.5	8.1

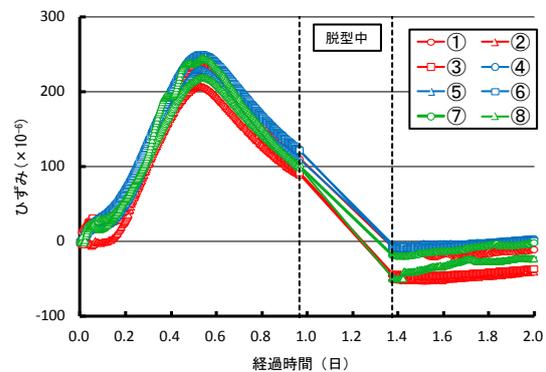


図-6 電食試験前のひずみ

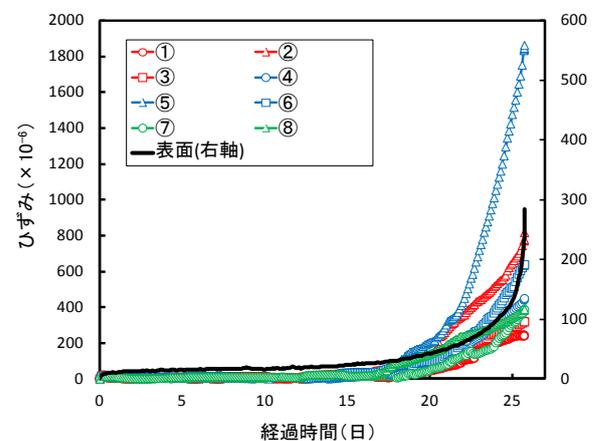


図-7 電食試験開始後のひずみ

のためにひずみ増加も一定となって表れることが予想されたが、計測結果はそれとは異なるものであった。

既往の研究<sup>8)</sup>では、最初の腐食生成物である Fe(OH)<sub>2</sub>などは水溶液としてコンクリートの細孔中に移動するため膨張圧に寄与しないことを指摘している。また、3.1の大気中における腐食膨張ひずみも同様であったように、腐食反応とそれに伴う体積膨張は必ずしも一致しない可能性が考えられる。さらには、腐食生成物には非晶質と結晶化したものが混在しており、Fe(OH)<sub>3</sub>が形成され、さらに非晶質 FeOOH を経て結晶性 FeOOH に変化する<sup>9)</sup>など、腐食生成物が非晶質か結晶質によっても体積膨張に影響を及ぼすことが考えられる。腐食生成物が固体となって堆積し、それがひずみとなって表れるかどうかについてはさらなる検討が必要である。

腐食ひび割れ発生前後のひずみ挙動を図-8に示す。電食開始後25.74日において、光ファイバ計測による棒鋼のひずみ、およびコンクリート表面ひずみの勾配がほぼ同時期に変わっており、このときにかぶり面にひび割れが生じた可能性が高い。ひび割れは、目視観察により

鉄筋周辺部からかぶりが最も小さい50mm部分にのみ貫通して発生した。図-7からも分かるように中心区間である⑤のひずみが突出して大きく、ひび割れ発生前後の挙動からも表面ひずみに最も近い勾配をしているから、この区間で初めに表面ひび割れが生じた可能性が高い。

以上の挙動より、コンクリートの腐食ひび割れ発生の駆動力である棒鋼の体積変化が計測でき、棒鋼の腐食開始から進展、さらにはかぶり部分の腐食ひび割れ発生までをモニタリングできることが明らかとなった。

### (3) 各区間におけるひずみ

棒鋼の各区間におけるひずみの変化を図-9に示す。計測開始から15日まではひずみ自体が小さく区間ごとではほとんど差はないが、20日程度から各区間で差異が生じて中央部が最も大きくなり、概ね端部の方が小さくなっている。端部においては、発生した腐食生成物が堆積する前の初期段階の微細なコロイド状や非晶質であるときにコンクリート側面へ流出したことが考えられ、試験終了後に観察した結果においても腐食生成物が若干流出していたことが確認された。

試験前の棒鋼の半径と腐食ひび割れ発生時の光ファイバによるひずみから算出した棒鋼の平均半径の差(腐食膨張による半径変化量)と、試験前の棒鋼の半径と除錆後の棒鋼の平均半径の差(除錆後の半径変化量)を図-10に示す。この図は、棒鋼の断面で考えた場合、 $x \leq 0$ 部分が元の棒鋼、赤線で囲まれた部分が腐食膨張による増加分、青線で囲まれた部分は鉄が腐食生成物に変化した部分ということになる。ひび割れ時のひずみが突出して大きかった中央区間⑤(155-190mm)は、当然腐食膨張による半径変化量も大きくなっているが、この区間は腐食反応が他より活発であったということになる。一方で除錆後の半径変化量をみてみると、同様に中央区間が最も変化量が大きくなっており、より多くの鉄が腐食生成物に変化したということである。また、端部においては除錆後の半径変化量も小さいことから、端部への腐食生成物の流出に加え、鉄から腐食生成物への変化量も少ないために膨張ひずみも小さくなったことが考えられる。その他の区間についても概ね傾向は一致しており、光ファイバによる腐食膨張挙動は除錆後に実測した半径変化量とも関連があり、計測結果の妥当性を示しているものと考えられる。

### (4) 腐食量

電食試験後にコンクリートから採取した棒鋼表面は、ほぼ一面に腐食生成物が生じていた。コンクリート標準示方書維持管理編<sup>10)</sup>では、異形棒鋼を用いた電食試験においては、鋼材径等によって若干値は異なるものの、鋼材腐食量がおおむね $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 以上で腐食ひび割れが発生するとされている。本試験では棒鋼の種類の違いはあ

るが腐食量は $10.1\text{mg}/\text{cm}^2$ とほぼ近い値になっており、光ファイバセンサ設置による影響は小さく、従来実施されてきた電食試験と同様に取り扱えたと考えられる。

### (5) 腐食生成物の体積膨張率

腐食ひび割れ発生時の棒鋼のひずみと除錆後における棒鋼の直径の計測結果より、腐食生成物の体積膨張率を算出した。その算出過程および結果を表-2に示す。まず棒鋼の各区間における腐食ひび割れ時のひずみから平均直径を算出し、ひび割れ時の棒鋼の体積 $V_1$ を各区間ごとに算出する。試験前の元の直径から求めた体積 $V$ を求め、 $V_1$ との差が腐食による体積増加量となる。さらに除錆後の直径から各区間の体積 $V_2$ を求め、元の体積 $V$

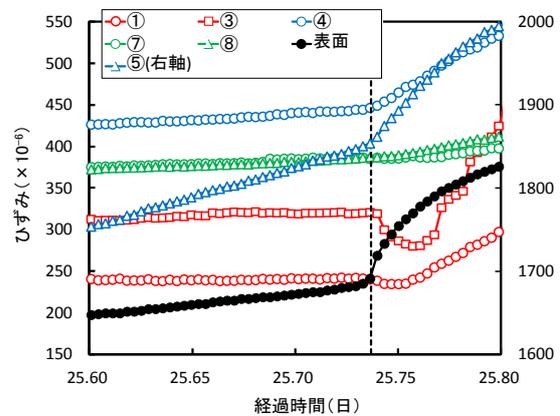


図-8 腐食ひび割れ発生前後のひずみ

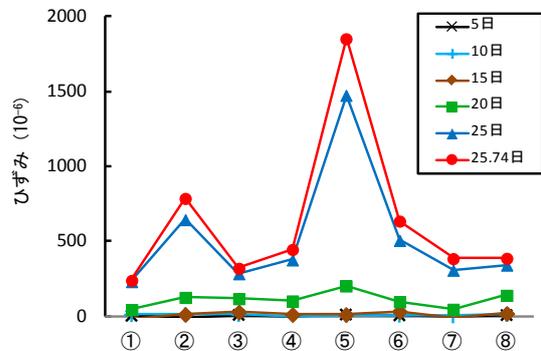


図-9 各区間におけるひずみの変化

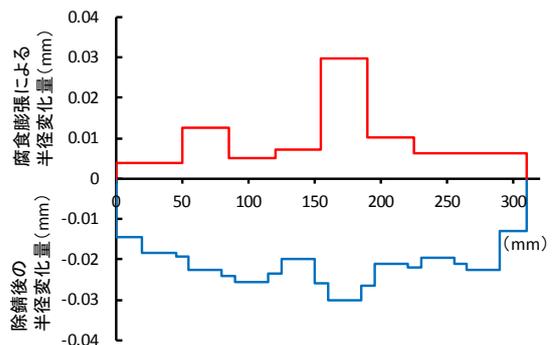


図-10 腐食時および除錆後の棒鋼の半径変化量

表-2 棒鋼の腐食生成物の体積膨張率の算出結果

区間	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	全体
端部からの距離(mm)	0-50	50-85	85-120	120-155	155-190	190-225	225-260	260-310	0-310
元の体積 V(mm <sup>3</sup> )	35232	24663	24663	24663	24663	24663	24663	35232	218440
ひび割れ時のひずみ(μ)	240	788	321	447	1854	636	385	388	—
ひび割れ時の平均直径(mm)	29.961	29.978	29.963	29.967	30.012	29.973	29.965	29.965	—
ひび割れ時の体積 V1(mm <sup>3</sup> )	35250	24704	24680	24686	24761	24696	24683	35262	218722
腐食による体積増加量(mm <sup>3</sup> )	18	42	17	24	98	34	20	29	282
除錆後の体積 V2(mm <sup>3</sup> )	35152	24589	24580	24592	24567	24590	24597	35145	217814
除錆による体積減少量(mm <sup>3</sup> )	80	73	82	70	95	72	66	87	625
腐食生成物の体積膨張率	1.2	1.6	1.2	1.3	2.0	1.5	1.3	1.3	1.5

との差が除錆による体積減少量であり、これが鉄から腐食生成物に変化した体積となる。よって、体積膨張率は  $((V1-V)+(V-V2))/(V-V2)$  で算出でき、各区間ごとに 1.2~2.0 となった。この差は拘束状態や腐食量の差異によるもので、全区間で算出すると 1.5 となった。

また、除錆後の棒鋼の直径の実測値ではなく、腐食量と鉄の密度を用いて算出した除錆による体積減少量(鉄から腐食生成物に変化した部分)と、表-2 で算出した腐食による体積増加量を用いた腐食生成物の体積膨張率は 1.7 となった。既往の研究<sup>1)2)</sup>では、腐食生成物の種類ごとに密度と原子量から体積膨張率を推定しており、その値は 2.0~6.9 となっている。この結果は拘束の無い自由空間での理論値であり、本結果はコンクリートに拘束された状態での体積膨張率であるため、これよりも小さくなっている。本検討で得られた値は、電食下の腐食開始から腐食ひびわれが発生するまでの期間の腐食生成物を対象としたものであり、前述したように腐食生成物が初期には非晶質のものが生成され、それらが結晶化するなど経時に伴う酸化や結晶化などにより値は異なってくることが予想される。これに加え、自然環境下のコンクリートは一定環境下にはなく、炭酸下に伴う pH 低下や拘束の影響を受けることにも留意が必要である。なお、FEM 解析など鉄筋コンクリートモデルを用いて腐食進展やひび割れ発生を予測する場合には、無拘束の状態、例えば飽和水酸化カルシウム溶液中にて腐食試験を行い、インプットデータとなる自由膨張ひずみの挙動を取得して、解析する方法も有効な手段の一つと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 光ファイバセンサを用いることによって、大気中およびコンクリート中における棒鋼の腐食膨張のモニタリングが可能である。また、コンクリート中においては腐食ひび割れの発生時期も明確に検出できる。
- (2) 大気中の塩分環境下およびコンクリート中の電食下における棒鋼の腐食膨張ひずみは、初期段階ではひずみ変化が小さいが、その後指数関数的に増大し、

腐食状態の指標となる腐食面積率や腐食量と腐食膨張ひずみの関係を明らかにした。

- (3) W/C0.6 のコンクリートの拘束下における電食で発生した腐食生成物の体積膨張率は、拘束の度合いや腐食量の影響を受けて 1.2~2.0 の範囲となり、平均としては 1.5 または 1.7 となった。

#### 参考文献

- 1) 須田久美子, Misra Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992
- 2) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013
- 3) 早野博幸, 井坂幸俊, 江里口玲: 光ファイバセンサを用いた鋼材の腐食検知に関する研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, vol.70, 部門 V, pp.412-413, 2015
- 4) Alan D. Kersey, et al : Fiber Grating Sensors, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.15, No.8, pp.1442-1463, Aug. 1997
- 5) 三沢俊平: 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物, 日本金属学会会報, 第 24 巻, 第 3 号, pp.201-210, 1985
- 6) 木村正雄: 鉄が濡れるとどうなるかー液体/金属界面の反応観察, 放射光, 第 16 巻, 第 1 号, pp.12-22, 2003
- 7) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の耐久性力学, pp.20-21, 2007.12
- 8) 本間大輔ほか: 鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 701 号, pp.867-876, 2014.7
- 9) J. Dünnwald, A. Otto : An investigation of phase transitions in rust layers using Raman spectroscopy, Corrosion Science, Vol.29, No.9, pp.1167-1176, 1989
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], p.155, 2003