樹脂材料を用いた水中の鉄さび捕捉技術の開発

Development of an Iron Oxide Particle Catcher in Water Using Resin Material

飯島 茂*, 野田 清治, 宮 一普, 古川 誠司

Shigeru Iijima, Seiji Noda, Kazuhiro Miya, Seiji Furukawa

Received 27 February 2014; Accepted 8 December 2014

Iron oxide deposition on resin material was investigated in order to develop an iron oxide particle catcher for the plate heat exchanger of water cooling system, preventing thin water channels from being clogged. It was revealed that acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) resin captured a large amount of iron oxide by experimental results using artificial hematite suspension. Moreover, dependency of surface roughness of ABS on iron oxide deposition was quantitatively evaluated. As a result, it was found that mass of the hematite deposit in an arithmetic average roughness of $7.7\ \mu\text{m}$ or more was 15 times as much as that in a roughness of $0.44\ \mu\text{m}$. Further analysis of ABS surface clarified that good deposition of rough ABS surface is probably brought by big holes with a width from 50 to $80\ \mu\text{m}$ and a depth from 30 to $50\ \mu\text{m}$, since hematite particles easily flow in and deposited on inner walls with these holes.

Keywords: Hematite, ABS, Surface roughness, Particle catcher, Hole width, Hole depth

1. 緒 言

空調・冷熱機器では熱交換器は必要不可欠な技術である。熱交換器の熱媒体として水が用いられることがあり、循環水と呼ばれる。循環水はタンクからポンプを通して熱交換器に送られ、冷媒と熱交換を行い冷却される。冷却された循環水は空調機などを介して対象物を冷却し、タンクに戻る。熱交換器の一種であるプレート式熱交換器はガスケットを付けて、伝熱プレートを重ね合わせ締め付けて形成される。各伝熱プレート間には数 mm の間隙をとって流路が形成され、そこに高温流体と低温流体をそれぞれ交互に流し、二流体間の熱移動によって熱交換を行う。プレート式熱交換器は熱伝達率が大きく小型化できることから、熱交換器として広く使用されている¹⁾。

熱交換器中の循環水の流路に鉄さびが発生する現象が知られている。循環水の流路に鉄製配管やラジエータといった鉄製部品が使用されている場合、溶存酸素の存在によって鉄製部品が腐食するために鉄さびが発生する²⁾。一般に水中での鉄腐食においては、赤い鉄さびが発生する。これはオキシ水酸化鉄 (FeOOH) と呼ばれる³⁾。このオキシ水酸化鉄は組成の上で、酸化鉄の一種であるヘマタイト (Fe_2O_3) の水和物と同じ組成と考えることができる。循環水中で鉄さびが発生すると、循環流路への鉄さびの付着が生じる可能性があり、熱交換効率の低下や、また流路が狭いプレート式熱交換器においては循環水の流路阻害の要因となりうる。このような鉄さびの発生による障害を防止するため、循環水の水質基準が設けられている。一般社団法人日本冷凍空調工業会が定める冷凍空調機器用水質基準ガイドライン (JRA-GL) では、循環水中の鉄濃度が $1.0\ \text{mgFe/L}$ を超えると鉄を原因とした障害が発生しやすいと規定している⁴⁾。鉄さびの付着を防止するには、鉄さびの生成を抑制する必要がある。鉄さび生成を抑制するには循環水中の溶存酸素を減少させる方法⁵⁾や、鉄製配管をコーティングする方法⁶⁾がある。また防錆剤を加えることで鉄さびの生成を抑制する方法³⁾もあり、循環水用の防錆剤も市販さ

粉体工学会2013年度秋期研究発表会 (2013年10月, 大阪) にて発表

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 環境システム技術部

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

Environmental Technology & System Department, Advanced

Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation

(8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan)

* 責任著者連絡先 iijima.shigeru@dy.MitsubishiElectric.co.jp

れている。一方、生成した鉄さびの付着抑制方法の確立を目的として、鉄さびの付着現象に対する水質や流速の影響について研究されている。Williamson ら⁷⁾ は、ヘマタイト粒子のステンレス配管への付着現象の pH 依存性について研究した。また Cerovic ら⁸⁾ は水中のヘマタイト粒子のポリプロピレンへの付着速度の pH および流速依存性について研究した。どちらの場合も中性領域での鉄さびの付着量が最大となった。さらには Newson ら⁹⁾ は、鉄さびの 1 種であるマグネタイトの水中での付着現象に関する流速の影響について研究し、粒子の付着速度に対するせん断応力や分子間力、電気二重層の影響について考察した。一方で、物理的に鉄さびを分離除去する方法もある。砂ろ過¹⁰⁾、液体サイクロン¹¹⁾ といった流体からの異物除去方法が適用可能と考えられるが、装置が巨大になる、もしくは圧力損失が大きくなる等の欠点がある。空調・冷熱機器の使用環境によっては、大型の装置を追加で設置することや循環水を入れ替えることが困難な事例も想定される。そのような使用環境に対しては、空調・冷熱機器に付帯できる小型の鉄さび付着防止装置が有効と考えられる。

そこで、小型の鉄さび付着防止装置の開発を目的として、鉄さびを捕捉材に高密度に集積して水中から分離除去する方法に注目した。今回、酸化鉄を懸濁させた模擬水を使用して、単位面積当たりの付着量が多い材料を選定するための試験を行い、金属材料 4 種類と樹脂材料 4 種類の計 8 種類の材料の酸化鉄付着量について調べた。また表面粗さ R_a が $0.44 \sim 11 \mu\text{m}$ の試験片を用意し、単位面積当たりの付着量を評価した。これらの試験結果より酸化鉄の付着量の表面粗さ依存性について考察した。

2. 実験材料

2.1 試料

2.1.1 模擬水

赤い鉄さびを含む循環水を模擬するため、市販のフェライト製造用酸化鉄粉末 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、純度 99% 以上、JFE ケミカル(株)、JC-DC) を水道水に懸濁させ、JRA-GL で規定される循環水中の鉄濃度 1.0 mgFe/L より十分に高い酸化鉄濃度 100 mg/L と 200 mg/L の模擬水を調製した。この理由として、実環境の濃度に合わせると模擬水中の鉄さび量が小さくなり、試験片への付着量の差を検出できないことや付着限界量を明確化するためである。

2.1.2 金属試験片

鉄さびの付着量の材料依存性を評価するため、金属試験片として銅、真鍮、アルミニウム、ステンレス (ステ

Fig. 1 Direction of polishing and surface profile measurement on a test piece

ンレス304) の 4 種類の金属材料を使用した。全ての試験片は厚さ 0.1 mm とし、 $2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の板状に切断した。試験前に試験片をアセトンに浸漬し 24 kHz の超音波を 15 分間印加してその表面を洗浄した。

2.1.3 樹脂試験片

樹脂試験片として ABS (アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合合成樹脂)、シリコン、PE (ポリエチレン)、PET (ポリエチレンテレフタレート) の 4 種類の樹脂材料を使用した。全ての試験片は厚さ 1.5 mm とし、 $2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の板状に切断した。試験前に試験片をエタノールに浸漬し 24 kHz の超音波を 15 分間印加してその表面を洗浄した。

ABS 試験片について、表面形状を変化させるために研磨を行った。研磨には棒やすりとサンドペーパーを使用した。棒やすり、もしくはサンドペーパーの種類を変えて研磨することにより表面粗さを調節した。研磨は Fig. 1 に示すように、試験片の両面について長辺に平行な方向に 1 分程度行い、端から $6.0 \sim 6.5 \text{ cm}$ の領域に表面粗さ R_a が $0.44 \mu\text{m} \sim 11 \mu\text{m}$ の凹凸を持つ試験片を用意した。

完全に同じ表面形状を持った試験片を複数作することは困難なため、研磨を施した ABS 試験片は洗浄して再利用した。洗浄操作として、エタノールで湿らせた紙製のウェスで試験片の表面上の酸化鉄粒子を拭きとった後、試験片をエタノールに浸漬し 24 kHz の超音波を 15 分間印加して残存した酸化鉄粒子を除去した。

2.2 酸化鉄の付着試験

酸化鉄付着量の材料と表面粗さ依存性について評価した。材料依存性については、2.1.2、2.1.3 に示した 8 つの材料への酸化鉄付着量を測定した。また表面粗さ依存性については、表面を研磨した ABS について酸化鉄付着量を測定した。本試験結果より表面粗さと酸化鉄の付着量との関係について考察した。

Fig. 2 Schematic drawing of hematite adhesion test equipment

Table 1 Conditions of adhesion test with hematite

Item		Value
Rotation speed of stirrer	[rpm]	500
Testing time	[h]	5, 20
pH	[—]	7.8
Electrical conductivity	[mS/m]	16
Concentration of hematite	[mg/L]	100, 200
Arithmetic mean diameter of hematite	[μm]	7.3
Volume of water in a beaker	[mL]	200
Depth of water in a beaker	[cm]	8.3
Inner diameter of a beaker	[cm]	5.5
Depth of test pieces in water	[cm]	3.5~5.0
Temperature	[$^{\circ}\text{C}$]	18~25

酸化鉄付着試験の概略図を Fig. 2 (a), (b) に示す。酸化鉄のビーカーに懸濁液を入れ、スターラーを用いて攪拌し、試験片を垂直に 3.5~5.0 cm 浸漬させた。ビーカーを上面から見た時、ビーカーの中心に近い面を表面、ビーカーの内壁に近い面を裏面と定義した。試験条件を Table 1 に示す。

試験片への酸化鉄の付着量は単位面積当たりの付着量 [mg/cm^2] と被覆率 [%] を用いて評価した。単位面積当たりの付着量は、試験前後の試験片の質量差を模擬水に浸漬した領域の 2 次元上の面積（表・裏両面の合計）で除して計算した。また被覆率は、試験後の試験片をデジタルカメラで撮影した画像に対して二値化処理を行って表面、裏面それぞれの付着領域の面積を求め、模擬水に浸漬した試験片上の領域の面積で割ることで計算した。

2. 3 評価方法

2. 3. 1 酸化鉄粒子の粒子径分布測定

酸化鉄粒子の粒子径分布の測定には、レーザー散乱方式の粒子径分布測定装置 SALD-7100（島津製作所）を用いた。酸化鉄粒子の屈折率は Fe_2O_3 の値 2.95 を用い、体積基準の粒子径分布について評価した。

2. 3. 2 酸化鉄懸濁液のゼータ電位測定

酸化鉄懸濁液のゼータ電位測定には、ゼータ電位計 ELSZ（大塚電子）を用いた。電気泳動法を使用し、pH を 2.5 から 11 の範囲で変化させて、ゼータ電位を測定した。pH の調整には 0.1 mol/L の塩酸（HCl）と 0.1 mol/L の水酸化ナトリウム（NaOH）を用い、電解質として 10 mmol/L の塩化ナトリウム（NaCl）を用いた。

2. 3. 3 3 次元形状測定方法

全ての試験片に対して、酸化鉄付着試験前に非接触 3 次元測定機 NH-3（菱光社）を用いて 3 次元形状を測定した。Fig. 1 に示すように、測定方向は試験片の長辺に垂直な方向とした。研磨は長辺と平行な方向に行ったため、測定方向は研磨方向と垂直に交差している。

2. 3. 4 表面粗さ測定方法

試験片表面の凹凸の高さ方向の形状と酸化鉄の付着量の関係を評価するため、各試験片の表面粗さを求めた。

Fig. 1 に示すように、試験片の研磨した領域の中央部・端部を選び、ピッチ $10\mu\text{m}$ 、測定長 1mm として 3 次元形状を測定した。得られた粗さ曲線に対してその 1 次近似直線すなわち平均線を求め、これと粗さ曲線との距離の絶対値を算術平均粗さとした。各試験片において、表中央部・表端部・裏中央部・裏端部について $100\mu\text{m}$ 間隔で各 10 箇所、合計 40 箇所の算術平均粗さの平均値を求め、表面粗さの代表値とした。

2. 3. 5 開口部幅・深さ測定方法

試験片表面の凹凸を形成する開口部の幅と深さを測定した。Fig. 1 に示すように、試験片の研磨した領域の中央部を選び、ピッチ $0.1\mu\text{m}$ 、測定範囲 $100\mu\text{m}$ として 3 次元形状を測定した。各試験片は表中央部・裏中央部を $100\mu\text{m}$ 間隔で各 4 箇所、合計 8 箇所測定した。試験片表面の詳細な形状から開口部の数を測定するために、ピッチを $0.1\mu\text{m}$ とした。

開口部幅と開口部深さは、3 次元形状測定によって得られた粗さ曲線から、以下の規則に基づいてそれぞれ求めた。Fig. 3 に示す粗さ曲線の例に沿って説明する。

Fig. 3 Example of a roughness curve

- 1) 粗さ曲線中の全ての頂点を $A_1, A_2, A_3 \dots$ のように規定する。頂点は粗さ曲線上のある点において、傾きが正から負に変化する変曲点とし、傾きの符号が等しく、絶対値が変化しただけの点については頂点とは扱わない。また隣り合う変曲点間の高低差が酸化鉄の平均粒子径の1/2の値である $3.7 \mu\text{m}$ 未満の場合は、頂点とは扱わない。Fig. 3 の A_2 - B_2 間にある2箇所は傾きに変化する点、符号が変化していないため、頂点として扱わない例である。全ての頂点について下記に示す2)以降の規則に従い開口部を規定する。
- 2) 測定データ中の全ての頂点について同様の作業を行うが、ここではFig. 3の中で最も説明が容易な頂点 A_3 について説明する。頂点 A_3 より高い頂点の中で、頂点 A_3 に最も近い頂点を見つける。Fig. 3では A_3 の左側の部分のみに注目した例を示しており、この場合 A_3 より高い頂点は A_1 のみとなるが、実際の測定では左右両方向に対して同じ作業を行う。頂点 A_3 から測定方向に平行な線を引き、 A_3 - A_1 間の曲線と最初に接触した点 B_1 について、線分 A_3B_1 の長さを開口部 A_3B_1 の開口部幅とする。ただし、 A_3 - B_1 間の曲線において、 A_3 より低い頂点が存在する場合は、その頂点に対して上記と同じ操作を繰り返してそれぞれの開口部幅を求める。Fig. 3では A_3B_1 とは別に A_2B_2, A_2B_3 の2つの開口部が存在する例を示した。またFig. 3の A_1 のように測定データ中に自身より高い点が存在しない頂点については開口部として扱わない。
- 3) A_3 - B_1 間の曲線上にある最も低い点 C について、線分 A_3B_1 と点 C の間の高さ方向の距離を開口部 A_3B_1 の開口部深さとする。また A_3 - B_1 間に複数の開口部が存在する場合は、最も低い点を点 C とする。
- 4) 有効な開口部は開口部深さが平均粒子径の1/2である $3.7 \mu\text{m}$ 以上とする。

Fig. 4 Mass of hematite deposition per unit area on 8 materials without polishing (hematite concentration: 100mg/L testing time: 5h)

- 5) Fig. 3には図示しないが、 A_3 - B_1 間に、頂点 A_3 と高さの差が $1 \mu\text{m}$ 未満の頂点 D が存在する場合、開口部は A_3D と DB_1 の2つ存在するとし、 A_3B_1 を1つの開口部とはしない。

3. 試験結果および考察

3. 1 金属・樹脂試験片に対する酸化鉄付着量の比較

3. 1. 1 酸化鉄付着試験結果

Fig. 4に金属試験片と樹脂試験片への酸化鉄の付着量を比較した結果を示す。全ての試験片の表面粗さ R_a は $0.02 \sim 1.1 \mu\text{m}$ であった。樹脂試験片の方が金属試験片より付着量が多い傾向にあり、シリコン 0.05 mg/cm^2 、ABS 0.04 mg/cm^2 の順で付着量が多かった。金属試験片への酸化鉄の付着量としては、ステンレスが樹脂試験片のPETを上回ったが、銅、真鍮、アルミニウムのそれは 0.01 mg/cm^2 以下と非常に小さかった。本論文で用いた酸化鉄粒子の粒子径分布およびゼータ電位に着目して、3.1.2, 3.1.3でこれらの結果について考察する。

3. 1. 2 酸化鉄粒子の粒子径分布

酸化鉄粒子の粒子径分布と表面粗さが重なっている場

Fig. 5 Particle size distribution of the hematite suspension (particle volume based)

Fig. 6 pH vs Zeta potential of hematite suspension

合、付着量は大きくなると考えられる。模擬水中の酸化鉄粒子の粒子径分布の測定結果を Fig. 5 に示す。本図より、酸化鉄粒子の粒子径は、 $0.22\sim 38\mu\text{m}$ の範囲の広い分布を持ち、算術平均径 $7.3\mu\text{m}$ 、最頻粒子径 $13\mu\text{m}$ であった。本報においては、算術平均径 $7.3\mu\text{m}$ を模擬水中の酸化鉄粒子の粒子径の代表値とした。酸化鉄の粒子径分布が試験片の表面粗さ R_a が $0.02\sim 1.1\mu\text{m}$ より大きい範囲に集中した。さらに、Fig. 4 では試験片の表面粗さと酸化鉄の付着量の間に相関が見られなかったことから、樹脂試験片の方が金属試験片より酸化鉄付着量が多かった理由は、試験片の表面粗さと粒子径分布の関係からは説明できない。

3. 1. 3 酸化鉄粒子のゼータ電位

模擬水の pH に対するゼータ電位変化の測定結果を Fig. 6 に示す。本図より、本研究で用いた酸化鉄懸濁液の等電位点は $\text{pH}=2.8$ であり、試験条件 $\text{pH}=7.8$ では酸化鉄粒子はマイナスに帯電している。金属試験片の等電位点は中性付近と考えられ¹²⁾、試験条件 $\text{pH}=7.8$ では酸化鉄粒子はプラスに帯電するか、或いはマイナスに帯電しても絶対値は小さく、静電的には酸化鉄粒子は金属試験片に付着しやすい条件にあると考えられる。一方、樹脂試験片の等電位点は多くが酸性領域 ($\text{pH } 3.0\sim 4.6$) といわれており¹³⁾、試験条件 $\text{pH}=7.8$ では酸化鉄粒子はマイナスに帯電し、その絶対値も比較的大きく、静電的には酸化鉄粒子は樹脂試験片に付着しにくい条件である

と考えられる。以上から付着試験では静電的に不利な条件の樹脂試験片の方が金属試験片より多くの酸化鉄が付着した。

3. 1. 2, 3. 1. 3より、金属試験片より樹脂試験片の方が多くの酸化鉄が付着した理由は、粒子径やゼータ電位で示される酸化鉄粒子の性状によるものではないことが分かった。材料による付着量の差異の要因に関する考察は今後の課題だが、表面電位に依存せずに酸化鉄を付着させやすい樹脂材料を捕捉材として採用し、表面形状を変化させることで単位面積当たりの付着量を増加させることを検討する。

3. 2 ABS 試験片への酸化鉄付着量の表面形状依存性

3. 2. 1 試験片の表面粗さ

これまでの結果より、酸化鉄粒子の粒子径より試験片の表面粗さが小さい場合でも、樹脂試験片は金属試験片より酸化鉄付着量が多かった。そこで酸化鉄が付着しやすい樹脂試験片に、酸化鉄粒子の粒子径より大きな表面粗さを付けることで、単位面積当たりの付着量をさらに増加させることを検討した。樹脂試験片の両面を表面粗さ R_a が $0.44\sim 11\mu\text{m}$ になるように加工し、酸化鉄の付着量を測定した。なお酸化鉄の等電位点としては中性付近という報告があるが¹²⁾、表面電位の相互作用の影響を排除するために、3. 1と同じ酸化鉄粒子を用いた。

酸化鉄の付着量が最も多かったシリコンは軟らかく、やすりで表面を粗くするのが難しいため、次に付着量が多く、表面粗さの制御が容易な ABS について、酸化鉄の付着量の表面粗さ依存性を評価した。

Table 2 に研磨方法と表面粗さ R_a の対応関係を示す。試験片の表面と裏面についてそれぞれ表面粗さを測定した。試験片の表面粗さ測定ではピッチを $10\mu\text{m}$ としたが、これは粒子径 $7.3\mu\text{m}$ の粒子が開口部に入り込むのに必要な開口部幅である。棒やすり 2 のみ表面粗さ R_a について $2\mu\text{m}$ の差が生じたが、それ以外の研磨方法では表面粗さ R_a の差は $0.5\mu\text{m}$ の範囲に収まり、表面と裏面で良好な再現性を示した。よって、表面粗さ R_a の代

Table 2 Polishing method and surface roughness (arithmetic mean roughness)

Polishing method	Surface Roughness R_a [μm]		
	Average	Front side	Back side
File 1	11	11.1	11.1
File 2	9.0	8.1	10
Sandpaper#100	7.7	7.9	7.5
Sandpaper#320	4.5	4.7	4.3
Sandpaper#1000	3.3	3.4	3.2
No polishing	0.44	0.32	0.57

Fig. 7 Dependence of mass of deposit per unit area on test pieces cleaning (hematite concentration: 200 mg/L testing time: 20h)

表値として表面，裏面の表面粗さ R_a の平均値を用いる。

3. 2. 2 試験片の洗浄再利用

Fig. 7 に洗浄前後の付着量の変化を評価した試験結果を示す。付着試験の条件として，酸化鉄濃度 200 mg/L，浸漬時間 20h とした。酸化鉄の単位面積当たりの付着量は表面粗さ R_a が 0.44, 3.3, 7.7, 9.1 μm では洗浄前後で付着量は変化せず，表面粗さ R_a が 4.5, 11 μm においても誤差25%の範囲に収まった。よって試験片の洗浄による再利用が可能であることが分かった。

3. 2. 3 酸化鉄付着量の表面粗さ依存性

Fig. 8 に ABS 試験片の表面粗さ R_a と単位面積当たりの酸化鉄の付着量の関係を示す。酸化鉄濃度が 100 mg/L と 200 mg/L の場合でも，表面粗さ R_a の増加に伴って酸化鉄の付着量は増加し，試験時間が 5h と 20h のど

Fig. 8 Mass of hematite deposition per unit area on ABS test pieces with surface roughness 0.44~11 μm

Fig. 9 Dependence of surface coverage on surface roughness of ABS test pieces (hematite concentration: 200 mg/L testing time: 20 h)

ちらの場合でも，表面粗さ R_a が 7.7 μm から 11 μm の範囲では 0.6 mg/cm² で飽和した。これは表面研磨前（表面粗さ R_a 0.44 μm ）の15倍であった。

試験時間が 5h と 20h で付着量が同じ値で飽和した現象について以下のようなメカニズムが考えられる。まず開口部が酸化鉄粒子の付着によって埋まることで，平坦な面になる。その平坦な面に酸化鉄粒子の付着と，水の流れによる酸化鉄粒子の脱離の2つの現象が起こる。この平坦な面上の酸化鉄粒子の付着と脱離のバランスが取れると，付着量が飽和すると考えられる。今回の試験条件では，5h の時点で上記の状態に達したために，5h と 20h で付着量に差が生じなかった。

Fig. 9 に試験片の表面と裏面の酸化鉄の被覆率の変化を示す。表面粗さ R_a の増加に伴って被覆率は表面，裏面ともに増加した。また表面の被覆率は裏面と比較して20%低かった。これはスターラーの回転部に近い表面近傍に渦が形成されたために，付着した酸化鉄粒子にかかるせん断応力が大きく，粒子が剥がれやすかったためと考えられる。

3. 3 酸化鉄付着量の開口部幅依存性

表面粗さ R_a が 0.44~11 μm の6つの試験片について，それぞれの開口部の個数を **Table 3** にまとめた。Table 3 はピッチ 0.1 μm で測定した測定距離 800 μm 中に存在する開口部幅について，酸化鉄の算術平均径 7.3 μm より小さい個数，7.3~15 μm の個数，15 μm 以上の個数と

Table 3 Number of holes in ABS test pieces ($R_a=0.4, 3.3, 4.5, 7.7, 9.1, 11 \mu\text{m}$)

Width of hole [μm]	Surface roughness R_a [μm]					
	0.44	3.3	4.5	7.7	9.1	11
~7.3	2	35	26	25	38	32
7.3~15	1	26	33	22	24	27
15~	1	22	14	22	23	25

Fig. 10 Distribution of width vs depth of holes on ABS test pieces

いう形で整理した。全ての試験片において $7.3\mu\text{m}$ より小さい開口部幅が多く存在した。

Fig. 8 に示したように表面粗さ R_a が $11\mu\text{m}$ の方が $3.3\mu\text{m}$ より付着量が1.7倍となったが、開口部幅の分布はほぼ等しく、付着量の差異を説明できない。そこで次節で、表面の凹凸を形成する開口部の幅・深さの分布を詳細に調べた。

3. 4 酸化鉄付着量の開口部幅と開口部深さの関連性

Fig. 10 (a), (b) に全ての試験片について、ピッチ $0.1\mu\text{m}$ で測定した測定距離 $800\mu\text{m}$ における開口部幅と開口部深さの分布を示した。3. 2. 3 で示したように Fig. 8 において酸化鉄の付着量が多かった表面粗さ R_a が 7.7 , 9.1 , $11\mu\text{m}$ の試験片には、幅 $50\sim 80\mu\text{m}$ 、深さ $30\sim 50\mu\text{m}$ の範囲の開口部が存在しており (Fig. 10 (a) 破線囲み部)、この大きな開口部の存在が付着量に支配的に作用したと考えられる。また表面粗さ R_a が 7.7 , 9.1 , $11\mu\text{m}$ の試験片で付着量が試験時間や酸化鉄濃度に関係なく飽和した理由としては、付着量に大きく影響する幅 $50\sim 80\mu\text{m}$ 、深さ $30\sim 50\mu\text{m}$ の範囲の開口部の数に大きな差が生じなかったためと考えられる。

幅 $50\sim 80\mu\text{m}$ 、深さ $30\sim 50\mu\text{m}$ の範囲の開口部が存在すると、酸化鉄の付着量が多くなるという関係について、以下のようなメカニズムが考えられる。酸化鉄の粒子径と比較して幅、深さが5倍前後の適度な大きさを持つ開口部が存在すると、流れてきた酸化鉄粒子が立体的な障害なしに入り込むことができ、かつ粒子と開口部内壁は分子間力による引力が働く適度な距離を持っているため、開口部に入り込んだ酸化鉄粒子は開口部の内壁に容易に付着する。付着した酸化鉄粒子は新たに入り込んだ酸化鉄粒子と凝集し、水中の酸化鉄粒子の付着を促進

する効果がある。このようなメカニズムを検証するためには、SEM (Scanning Electron Microscope) による粒子を付着させた試験片の表面観察を行うべきである。また今後、最適な開口部の形状を明らかにし、鉄さびの発生速度と捕捉材への付着速度を考慮して、実機に必要な捕捉材の体積を計算し、鉄さび付着防止装置の設計に反映させる。

4. ま と め

循環水中に含まれる鉄さびを効率よく捕捉するための捕捉材の形状依存性を評価した。鉄さびを含む循環水を模擬するために、粒子径 $7.3\mu\text{m}$ の酸化鉄を用いた模擬水を調製し、板状に切断した試験片を垂直に浸漬させ、酸化鉄付着量を測定した。これらの実験を通して以下の知見を得た。

- 1) 鉄さび向けの捕捉材として最適な材料を選定するため金属材料4種類と樹脂材料4種類を比較したところ、シリコン、ABSの順で付着量が多いことが分かった。
- 2) 表面粗さ R_a が $0.44\sim 11\mu\text{m}$ のABS試験片について、酸化鉄付着量を評価したところ、表面粗さを $7.7\mu\text{m}$ 以上とすると表面粗さ $0.44\mu\text{m}$ と比較して、酸化鉄の付着量は15倍に増加した。
- 3) ABS表面の開口部幅と開口部深さに注目して解析したところ、酸化鉄付着量の多かった表面粗さ R_a が $7.7\mu\text{m}$ 以上の試験片には幅 $50\sim 80\mu\text{m}$ 、深さ $30\sim 50\mu\text{m}$ の開口部が存在することが分かった。この開口部は水の流れに乗った酸化鉄粒子が入り込み、内壁に付着するのに適した大きさであり、付着量を増加させたものと考えられる。

References

- 1) Masubuchi, M. and A. Itoh : “Dynamic Analysis for a Plate Heat Exchanger System”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **42**, 2421-2430 (1976)
- 2) Shirato, H., H. Hoshina, K. Tomita and S. Morimoto : “Study on Corrosion in Hot Water Heating System -Behavior of Dissolved Oxygen in Hot Water Heating System Including Steel Radiator-”, *Hokkaido Research Organization Industrial Research Institute Report*, **299**, 73-80 (2000)
- 3) Fujii, T. : “Water Quality and Corrosion of Metals”, *J. Surface Finishing Society of Japan*, **51**, 134-140 (2000)
- 4) The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association : “Guideline of Water Quality for Refrigeration and Air Conditioning Equipment”, p. 18 (1993)
- 5) Tai, S. : “The Corrosion Prevention of Water Piping and More Effective Ultrasonic Cleaning by Deaerated Water”, *J. Surface Finishing Society of Japan*, **51**, 16-20 (2000)
- 6) Kimura, K. and K. Noji : “Polyethylene Powder-Coated Steel Pipe for Water Service”, *Tetsu-to-Hagane*, **66**, 260-266 (1980)
- 7) Williamson, R., I. Newson and T. R. Bott : “The Deposition of Hematite Particles from Flowing Water”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **66**, 51-54 (1988)
- 8) Cerovic, L., G. Lefevre, A. Jaubertie, M. Fedoroff and S. Milonjic : “Deposition of Hematite Particles on Polypropylene Walls in Dynamic Conditions”, *J. Colloid and Interface Science*, **330**, 284-291 (2009)
- 9) Newson, I., T. Bott and C. Hussain : “Studies of Magnetite Deposition from a Flowing Suspension”, *Chemical Engineering Communications*, **20**, 335-353 (1983)
- 10) Hashimoto, K. : “Present and Future Trends in Moving Bed Operation”, *Tetsu-to-Hagane*, **75**, 1815-1823 (1989)
- 11) Shigemori, K., T. Yamamoto, K. Fukui and H. Yoshida : “Improvement of Hydro-cyclone Performance by Use of Local Electrostatic Potential Field and Fluid Flow Control Method”, *J. Soc. of Powder Technol., Japan*, **48**, 526-533 (2011)
- 12) Kosmulski, M. : “pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach”, *J. Colloid and interface Science*, **337**, 439-448 (2009)
- 13) Kosmulski, M. : “IEP as a parameter characterizing and the pH-dependent surface charging of materials other than metal oxides”, *Advances in Colloid and Interface Science*, **171-172**, 77-86 (2012)