

氏 名	有 岡 孝 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 2 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	有限要素法による耐食合金製構造物の防食設計に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平野 賢一      東北大学教授 谷野 満 東北大学教授 杉本 克久

## 論 文 内 容 要 旨

火力、原子力、および水力等の動力を用いた発電設備においては、一般に各々の方法により生産されたエネルギーの伝達媒体として水が用いられる。またこの媒体は、種々の金属材料から構成される設備を通過して、エネルギーを伝達し、最終エネルギーの形である電気を創り上げる。このような形で水と金属材料が接し、電解質である水と、金属材料の界面で種々の電気化学反応が生じる。さらに、この電気化学反応の結果として、構成材料にき裂を生じたり、又時として異常に早い速度で、構成材料の一部に腐食を生じてしまうことがある。

この種の現象を予知し、防止することは発電設備等の構造物の健全性を確保する上において極めて重要なことである。しかし、現象を支配する因子が材料、化学及び応力等の多岐の技術領域にわたることから、この種現象を定量的に評価する技術が確立されているとは言い難いのが現状である。しかし、原子力発電設備のように極めて高い安全性が要求され、かつ運用期間中の設備の取り替えが困難な設備においては、上記の電気化学反応に起因する構成材料の損傷を防止するために、より精度の高い、かつ定量的な防食設計技術の確立が望まれる。上記要求に対し、仮に各々の現象に対し定量的な計算解析方法が見い出せたとしても、工学的に用いられるボルト締結部のような溶液の滞留部（以下スタグナント部と記す）のような幾何学的に複雑な構造物に対し、上記電気化学的現象を定量的に計算し、その健全性および問題点を評価することは数学的に極めて困難である。

このような複雑な構造物でのある物理量の数値的な解析は、有限要素法（Finite Element Method, FEM）を用いて行なう試みが、構造物の応力・歪解析の分野で行われており、工学的には、かな

りの成果をおさめている。さらに、この数値解析手法は、その用途の広さから、熱伝導および電磁気学等の技術分野での数値解析へと応用の範囲が広められている。一方、防食設計へのこの種技術の適用は、電気防食の分野への適用例が一部報告されており、防食電流通電時の電流密度分布および電位分布を有限要素法を用いて計算し、対象構造物全体に適切な防食電流を与えるための電極の配置を決定するために一部で用いられている。しかし、一般には化学および電気化学分野への有限要素解析手法の適用は、現時点ほとんど行われていないのが現状である。

以上の背景から、オーステナイト系ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れ、ガルバニック腐食、および隙間腐食という機械構造物の健全性を確保する上で重要な損傷に結びつく可能性のある3つの現象を取り挙げ、定量的な防食設計手法の確立を目的として各々の現象の解析に有限要素法の適用を試みた。そのためにまず、各々の現象について、その発生機構を調べるため詳細な実験的検討を行なった後、定量評価を行なうための数学モデルを構築し、複雑な構造物に対しても計算できるように、近似数値解法の1つである有限要素法を、上記腐食現象へ適用することを試みた。

このように、従来化学および電気化学の領域にほとんど適用されていなかった有限要素法を用い、幾何学的に複雑な構造物の中での溶存酸素等の拡散を計算するのに Fick の第2則を、また電位および電流密度分布を計算するのにラプラス方程式を数値解析することにより実験的に求めた基礎データをもとに、種々複雑な構造物の腐食感受性を定量的に評価する方法を提案した。

以下本論文で取り扱った、内容の概要と、論文の構成を述べる。

## 第1章 緒 言

本研究の背景および研究内容の概要を要約した。

## 第2章 実験方法および FEM 計算方法

本研究で行なった実験の方法および定量的解析手法として用いた FEM 計算の方法について記した。

## 第3章 オーステナイト系ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れに関する定量的評価手法に関する研究

火力、および原子力発電設備等の配管材料として広く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼の代表的な損傷事象の1つであり、防食設計を行なう場合の重要なポイントの1つである。粒界型応力腐食割れを第1番目の検討対象として取り挙げた。

まず、この現象の発生に関与する材料側の原因を詳細に検討し、高温  $H_3BO_3$  水中での粒界型応力腐食割れ発生のための材料側の臨界条件を求めた。

さらに、主として文献調査により粒界型応力腐食割れが発生するための臨界電位についての情報を集録し、ボルト締結部のような溶液のような溶液の滞留部における電位を計算により予測し、上記粒界型応力腐食割れの臨界電位を越えるかどうかを検討し、その結果に基づいて、種々スタグナント構造での粒界型応力腐食割れ感受性の有無を評価する手法を提案した。

なお、このような複雑な構造物の電位を計算するに当たっては、電位が水中の酸素および水素濃度により大きく影響されることから、スタグナント領域での酸素および水素の濃度変化を、適切な境界条件下で Fick の第 2 則を有限要素法により数値解析した結果を用いて、電位を計算した。

#### 第 4 章 ガルバニック腐食に関する定量的評価手法の研究

防食設計上検討を要する挙動は、損傷が発生した場合に大きなトラブルに結びつく可能性のある構造材料の溶解速度が大きな現象である。その意味での代表的現象の一つとして、電位の異なる異種金属が、海水等の電解溶液中で電気的に接合した場合に生じるガルバニック腐食が挙げられる。

そこで、この現象による金属材料の溶解速度を、適切な境界条件のもとでラプラス方程式を有限要素法を用いて数値解析を行なうことにより求める手法を提案した。

さらに電位の異なる銅と鉄を、NaCl 溶液中で電気的に接続し、NaCl 濃度、銅と鉄の表面積比、NaCl 溶液の流れ状況（レイノルズ数）、および溶液の深さ等、種々のパラメータを変化させたモデル実験を行ない、計算によるガルバニック腐食速度と実験結果との整合を比較することにより、本計算方法がガルバニック腐食速度を定量的に評価する方法として妥当であることを示した。

なお、この現象の解析に有限要素法を適用することは、複雑な構造物に対しても数値計算が可能ということに加えて、以下の工学的意義を有している。ラプラス方程式について数学的厳密解を得ようとした場合、その数学的困難さから、“各々の異種金属の分極抵抗が等しい”という仮定条件を設定せざるを得ないのが現状である。しかし、現実のガルバニック腐食速度を求めようとした場合、この仮定条件が極めて非現実的であるために工学的にはこの数学的厳密解を利用できないのが現状である。これに対し、有限要素法を用いることにより、各々の金属材料で異なる分極抵抗を与えて計算することも可能であるし、また分極抵抗が電位に対して独立ではなく、電位の関数として計算することも可能となり、より現実的な条件で計算することができるようになり、ガルバニック腐食速度を評価する上で、極めて有効な特長を有することを示した。

#### 第 5 章 隙間腐食の発生時間予測に関する定量的評価手法の研究

ガルバニック腐食と同じく、発生した場合、金属の溶解速度が大きいもう一つの代表的現象として隙間腐食を防食設計上の重要度から選択し取り挙げた。

隙間腐食は、構造的に狭隘な隙間構造が存在した場合、ある環境条件下で隙間部にある金属材料の溶解速度が大きく加速される現象である。

そこで、この現象が隙間内の pH が経時的に徐々に低下し、ある臨界の pH に達した時、金属の溶解速度が、急激に大きくなる特徴に着目し、鉄系および Ni 系の種々の合金（304 鋼、430 鋼、316 鋼、347 鋼、317 鋼、Inconel 625、Inconel 82、Inconel 65 および SW 4500）について、隙間防食が発生するための臨界 pH を実験的に求め、この値が母材への Cr および Mo 添加量に大きく影響を受けることを示した。さらに、隙間内の金属の溶解量と、隙間内の pH 変化に相関関係が存在することを利用し、隙間腐食発生のための臨界 pH に達するまでの時間を、種々隙間構造条件について計算する手法を提案した。

なお、計算は各々の材料の臨界 pH に達する迄の時間を計算するため隙間内の金属溶解速度を、与えられた構造，材料，および環境条件下で前記のガルバニック腐食速度を解析するために導入した有限要素法を用いて数値解析して求めた。

さらに，AIを用いて隙間寸法をパラメータにしたモデル実験を実施し，計算により求めた隙間腐食発生までの時間と実験値との整合を検証することにより，隙間腐食発生までの時間を種々条件下で計算する手法として妥当な評価であることを示した。

## 第 6 章 結 言

第 3 章から第 5 章迄の研究結果の概要を取り纏めて記した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

金属材料の粒界型応力腐食割れ、ガルバニック腐食、および隙間腐食は構造物の損傷に結びつくものであり、形状的に複雑な構造物におけるこれらの腐食を防止するため定量的な防食設計法の確立が望まれている。しかし、腐食におよぼす構造の影響を考慮した定量的防食設計法はまで十分に確立されていない。

本論文は、これを達成するために行なった研究の成果をまとめたものであり、全編6章よりなる。第1章は緒言であり本研究の目的と概要を述べている。

第2章では実験の方法と定量的解析法として用いた有限要素法の具体的適用について検討している。

第3章では、オーステナイト系ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れについて材料学および化学的要因を実験的に検討している。また、ボルト締結部のように構造が複雑で狭隘な部分の腐食電位を有限要素法によって計算し、それを粒界型応力腐食割れの臨界条件と比較することにより応力腐食割れにおよぼす構造的要因を定量化する手法を提案した。さらに実地の複雑な構造物でこの手法が防食設計法として有用であることを検証している。第4章では、ガルバニック腐食について有限要素法による計算結果が実験結果によく一致することを示すとともに、本解析法が数学的厳密解による方法にくらべて著しく有用であることを示している。

第5章では、隙間腐食についても有限要素法を用いた計算手法が防食設計法として有用であることを示した。まず、インコネル系合金などについての実験的検討により隙間腐食特性の向上には、成分元素Crおよび添加元素Moが有効であることを示した。さらに、隙間腐食速度を解析した結果が実験結果とよく一致することを確認し、本手法によって材料学および化学的要因のみならず構造的要因を加味した腐食速度の定量的評価が可能であることを示した。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、新しい定量的防食設計法を確立したものであり、材料物性学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。