

ホワイトペーパー
腐食および防食モデリング

By **ED FONTES** and **BERTIL NISTAD**

目次

はじめに	3
熱力学, 速度論, および輸送現象	3
熱力学および速度論	3
輸送現象およびモデル方程式	5
ガルバニック腐食	6
隙間腐食	7
孔食	7
応力腐食亀裂	8
一般的な均一腐食	8
陽極保護	9
陰極保護	9

他の情報

ユーザーストーリーギャラリー

<https://www.comsol.com/stories>

アプリケーションギャラリー

<https://www.comsol.com/models>

技術ペーパーおよびプレゼンテーション

<https://www.comsol.com/papers-presentations>

COMSOL ブログ

www.comsol.com/blogs

お問い合わせ

お客様のユニークなアプリケーションのための COMSOL® ソフトウェアを使った数値シミュレーションとアプリケーションデザイン機能の使い方に関するお問い合わせは comsol.com/contact にお送りください。技術に関するお問い合わせは comsol.com/support にお送りください。

著者について

Ed Fontes, COMSOL, www.comsol.com

Ed Fontes は COMSOL の最高技術責任者 (CTO) です。彼は王立工科大学 (KTH) (ストックホルム) で応用電気化学の博士号を取得しました。彼は COMSOL で化学工学, CFD, 伝熱製品群の開発を指揮してきました。COMSOL の技術開発の総責任者を務めています。

Bertil Nistad, COMSOL, www.comsol.com

Bertil Nistad は COMSOL の技術マネージャーです。彼はノルウェー科学技術大学 (NTNU) (トロンダ임) で電気工学の博士号を取得しました。腐食モジュールの開発に従事しています。

はじめに

ほとんどすべての人工構造物には金属の使用が含まれます。それは多くの場合、腐食しやすい非貴金属です。腐食に起因する損害の世界的な推定コストは約2.5兆ドルです。適切な防食は、これらの損害のコストの15~55%を節約できます (R1)。したがって、腐食と防食を理解することは経済的にインセンティブがあると主張しても過言ではありません。

数学モデリングとシミュレーションは、腐食と防食を理解するための非常に効率的なツールです。系の熱力学と反応速度特性に基づく検証済みの高精度モデルは、理解だけでなく、予測の作成、直感の強化、イノベーションの促進にも使用できます。

このホワイトペーパーでは、腐食と防食を説明するモデルの背後にある基本理論を示します。また、腐食を軽減するために、これらのモデルを使用してデバイスとプロセスを理解、革新、および最適化する方法を例示しています。

熱力学, 速度論, および輸送現象

腐食プロセスのモデリングの基礎は、異種化学反応の理論に基づいています。腐食が発生する表面反応には、還元と酸化反応が伴います。そこでは、金属構造が電解質と接触しています。酸化と還元は、サイトと呼ばれる表面の2つの異なる位置で発生し、酸化サイトから還元サイトへの電子の輸送は、金属構造の電子伝導を通じて行われます。電気化学反応と電解質中のイオン伝導による電流輸送により、回路が閉じられます。

酸化反応は、電解質中のアニオンが移動していく陽極サイトで起こります。還元反応は、電解液中のカチオンが移動していく場所である陰極サイトで起こります。

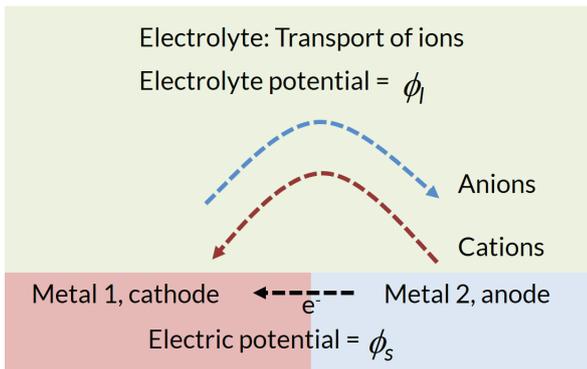
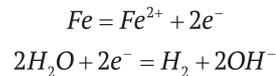


図1. 金属1が陰極として作用し、金属2が陽極として作用するガルバニ電池。回路は、両方の金属表面を覆う電解質の存在によって閉じられます。

熱力学と速度論

サイトが陽極として機能するか陰極として機能するかを決定するのは、金属表面の電子に対する親和性です。電子に対して高い親和性を持つ金属は、陰極であり、電子を引き付けますが、反対に親和性が低い金属は電子を放出し、腐食します。電子に対する親和性は、反応のギブス自由エネルギー (ΔG) によって決まります。電子が関与しているため、電位は自由エネルギーに影響します。これはファラデーの法則によって表され、ギブスの式と組み合わせて、電気化学反応のネルンストの式が得られます (R2)。

腐食プロセスにおける一般的な酸化反応 (陽極) は金属溶解であり、一般的な還元反応 (陰極) は水素発生です。



陽極反応と陰極反応の速度はアレニウスの法則により決定され、反応速度は、活性化エネルギーに指数関数的に依存します。繰り返しますが、電子が関与しているため、活性化エネルギー (ΔG^\ddagger) は電位の影響を受けます。ファラデーの法則とアレニウスの方程式を組み合わせると電気化学反応のバトラー・ボルマー方程式が得られます。

バトラー・ボルマーの方程式は、電気表面サイトでの電気化学ポテンシャルの関数としての電気化学反応

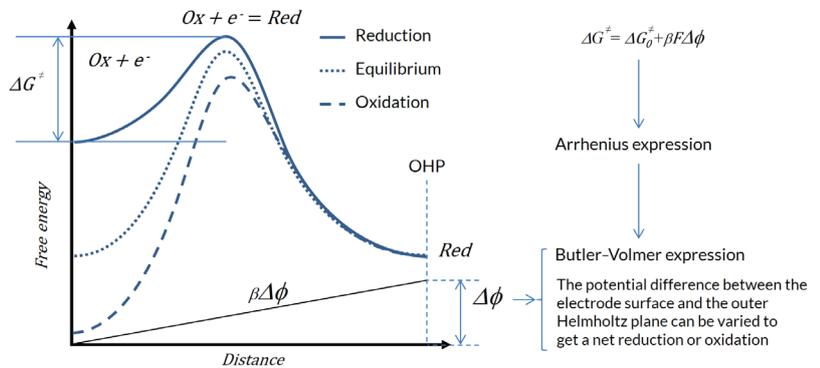


図2. 金属表面の電位に応じて、表面は陰極または陽極として機能します。より貴な金属に接触して、より卑な金属表面が陽極として機能します。OHP は荷電二重層のヘルムホルツ平面の外側を示します。ここで、 β は対称係数を示し、 F はファラデー定数を示します。

の速度を与えます。ファラデーの法則を使用すると、電流密度が得られますが、これは電子が関与しているためです。(R2)たとえば、バトラー・ボルマー方程式は水素発生反応について説明しています。

$$i_{H_2} = i_{0,H_2} \left\{ (C_{OH^-})^2 P_{H_2} \exp\left(\frac{3F}{2RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{F}{2RT} \eta\right) \right\}$$

この方程式では、 i_{H_2} は金属表面に垂直な電流密度を示します。これは、可逆反応を想定した水素発生反応によるものです。交換電流密度 i_{0,H_2} は、平衡時の陽極電流密度と陰極電流密度を表し、反応の速度定数を反映します。高い交換電流密度は速い反応速度の反応に対応します。水酸化イオンの無次元濃度は次のように表されます。

$$C_{OH^-} = \frac{c_{OH^-}}{c_{OH^-,eq}}$$

そして、金属表面の水酸化イオン濃度を平衡状態のその濃度で割ったものを表します。対応する無次元水素分圧は次のように示されます。

$$P_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2,eq}}$$

ファラデー定数は F , R は気体定数を表します。 T は温度、 η は反応過電位を表します。反応過電位は次のように定義されます。

$$\eta = \phi_s - \phi_l - (\phi_{s,eq} - \phi_{l,eq})$$

ここで、 ϕ_s は金属表面の電位を示します。そして ϕ_l は荷電二重層のすぐ外側の電解質電位を示します。(OHP上、非常に希釈された電解質を除く。)したがって、過電位は、平衡時の同じ電位差と比較して、金属表面の電位とその表面に近い電解質電位との差です。電位差 $\phi_s - \phi_l$ を測定することは事実上不可能です(平衡であるかどうかは無視して)。これは電解質に別の金属表面を突っ込むことを意味するため(たとえば、微小電極)そこでは、その金属と電解質の間に別の電位差を生むことになるからです。代わりに、非常に高いインピーダンスに接続された参照電極を使用できます。そして、この電位差は少なくとも常に同じ電位差を示します。モデルでは、同じ参照電極が使用される場合、過電圧を次のように表現できます。

$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq}$$

ここで、 E_{eq} は平衡電極電位を示し、同じ参照電極で、平衡および非平衡の同じ位置で測定されます。モデルでは、これは、電位 ϕ は1点で設定する必要があることも意味します。例えば、それは一つの金属上の一つの位置で、理論的には平衡と非平衡で同じ値と位置に保たなければなりません。電位は通常、参照電極が(理論上)より負の電極に接続されている位置でゼロに設定され、 $\phi = 0V$ となります。一点で電位を設定しないと、問題は不定となります。

電子的に同じ電解質と接触している2つの異なる金属で構成される金属表面を見ると、電子親和力が高

い表面サイトは、低い表面サイトよりも平衡状態でより高い電気化学ポテンシャル E^{eq} をもたらします。下図の互いに非常に近い陽極サイトと陰極サイトのプロットによると、表面サイトは電子的に接触しており、同じ電解質と接触しているため、正味電流がゼロの混合電位(腐食電位、 E_{corr} とも呼ばれます)を持つガルバニ電池が得られます。ここで、より低いエネルギー親和性を持つ表面が陽極として機能することがわかります。これは、定義上、表面での正の電荷移動電流密度です。より高い電子親和力を持つ表面は、陰極として機能し、これは定義により負の電流密度です。正味ゼロ電流密度での陽極反応および陰極反応の電流密度の絶対値は、腐食電流 i_{corr} と呼ばれます。

電極反応は、電気化学ポテンシャルが電流の絶対値の対数の関数としてプロットされる、いわゆるエバンス図で視覚化することもできます。ここで、質量輸送抵抗がなく、オーム損失を無視した場合の腐食電位と腐食電流を見ることができます。

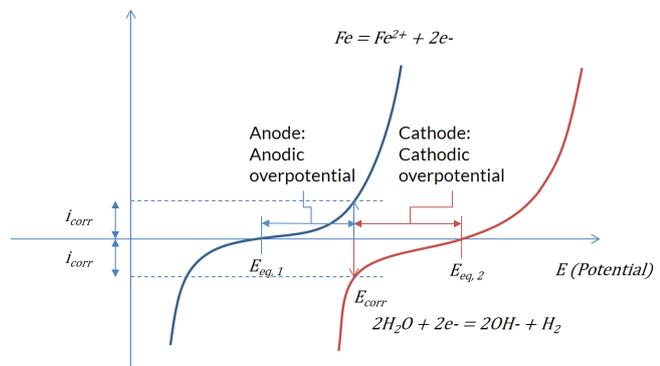


図3. 卑金属様表面(青)と貴金属様表面(赤)での反応のバトラー・フォルマー式。

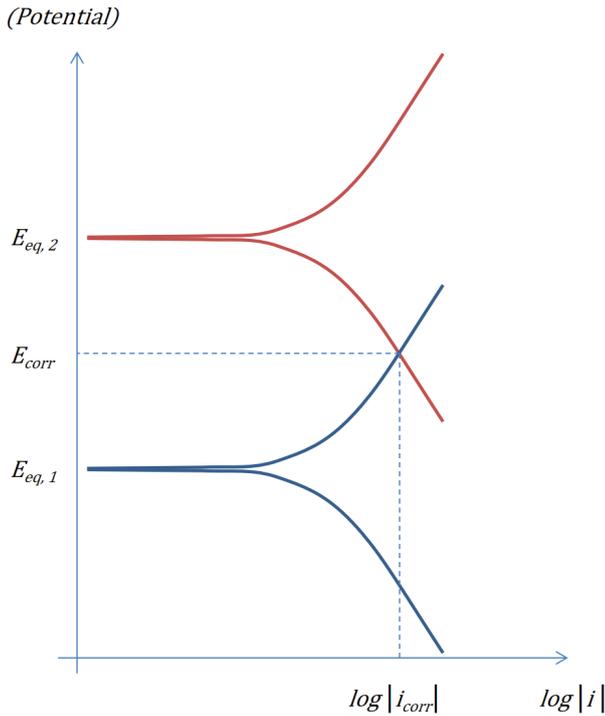


図4. オーム損失および質量輸送損失がない場合の2つの電極反応のエバンス図。

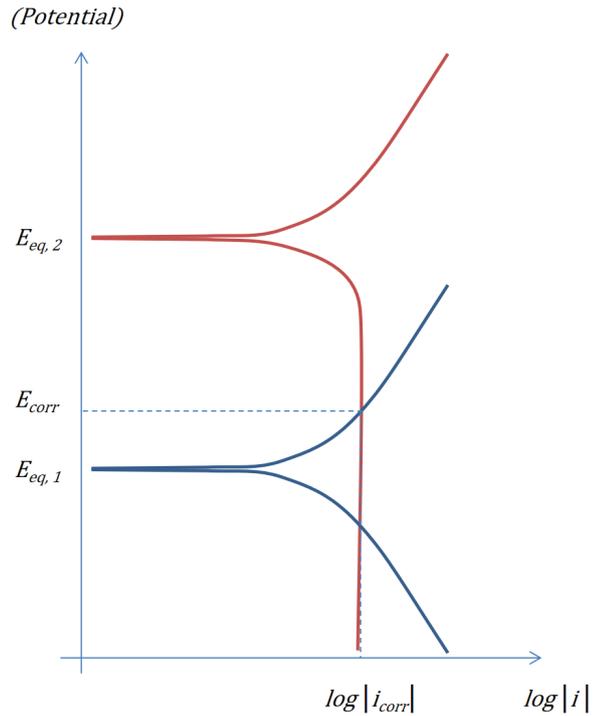


図6. 図5のプロットに対応する酸素還元反応における電流制限のエバンス図

物質輸送の制限がある場合、物質輸送損失は過電圧の指数関数的な増加を抑制します。高い電流密度は指数関数的に増加しなくなり、限界電流密度と呼ばれる一定の値に漸近的に近づく場合があります。これは、下の図のように、酸素還元(赤)の陰極分岐(負)で見られます。

輸送現象とモデル方程式

電子電位と電解質電位は、空間と時間で変化する場合があります。さらに、電解質の組成も、空間と時間で変化する場合があります。腐食および防食のモデルが高い信頼性を持つためには、それが電解質の組成と、金属と電解質の電位分布を表すことができなければなりません。そのようなモデルは、電解質中の荷電イオンの流束、電解質中のすべての化学種の物質収支、および電解質中の電気的中性条件をモデル方程式として導入します。そして、上記の電気化学反応の式が、金属表面の境界条件として導入されます。

電解質中の荷電イオンの輸送を記述する方程式は、いわゆるネルンスト・プランク方程式です。荷電イオンの流束 N_i は、拡散、泳動、移流からの寄与で構成されています。物質収支では、異なる方向の流束変動は、以下の式の時間依存項である蓄積または物質収支の式の電解質中の一様反応 R_i によって均合いが保たれます。ここで、 c_i は化学種 i の濃度を表します。

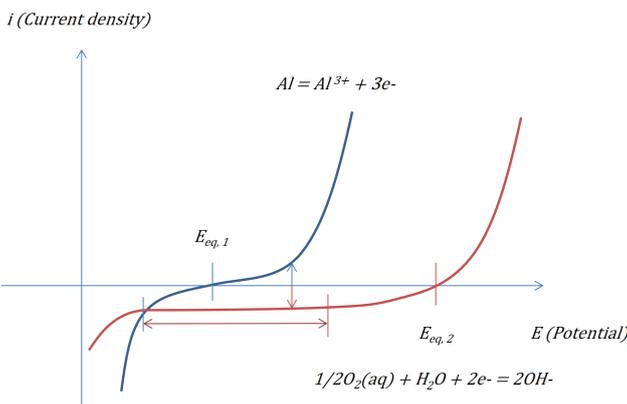


図5. 酸素還元(赤)は、広範囲の電位にわたって制限された物質輸送です。負電流の絶対値は、水素の発生が始まる負の電位でのみ増加します。

輸送制限酸素還元と陽極金属溶解に対応するエバンス図を図6に示します (R3)。

電解質ドメインのモデル方程式は次のとおりです。

1.1からn-1種の物質収支:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i + R_i = 0$$

流束は、ネルンスト・プランクの方程式によって与えられます:

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla \phi_i + c_i \mathbf{u}$$

ここで、 D_i は化学種 i の拡散係数、 z_i はイオン i の電荷、 $u_{m,i}$ は移動度、 \mathbf{u} は電解質の流れを表す速度ベクトルを表します。

2.電解質中の電流密度収支の式、 \mathbf{i}_i :

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_i = 0$$

電解質中の電流密度は、電解質中のすべての電荷の流束の合計で与えられ、イオンの流束から、ファラデーの法則と組み合わせ、次で与えられます。

$$\mathbf{i}_i = \sum_{i=1}^n z_i F \mathbf{N}_i$$

3.ポアソンの方程式:

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla \phi_i) = F \sum_{i=1}^n z_i c_i$$

ここで、 ε は誘電率を示します。ほとんどの電解質(非常に希釈された電解質を除く)では、この式は電気的中性条件で近似されます:

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0$$

電解質ドメインには、 $n+1$ 個の未知数、つまり n 個の化学種濃度と1個の電解質ポテンシャル ϕ です。物質収支の方程式の数は $n-1$ です。電流密度の収支の式は n 番目の式で、すべての荷電種の質量収支の線形結合です。電気的中性条件は、電解質の最後の方程式 ($n+1$) を与えます。これにより、未知変数 ($n+1$) と同じ数の方程式が得られます。

金属構造の電子ポテンシャルについては、オームの法則と組み合わせ、電流保存の方程式を使用できます。

4.金属の電流密度の収支:

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_s = 0$$

ここで

$$\mathbf{i}_s = -\kappa_s \nabla \phi_s$$

ここで、 κ_s は金属の電気伝導度を示します。

上で説明したバトラー・フォルマー方程式は、金属-電解質界面の両側のドメイン方程式の境界条件で

使われます。たとえば、イオン i が表面で電気化学反応に関与する場合、その境界条件は、境界での流束が単位面積あたりの反応速度に一致する必要があるという事実によりもたらされます。

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{n} = -\frac{s_i}{nF} i_{BV}$$

ここで、 \mathbf{n} は金属表面の法線ベクトルを示し、 s_i は電荷移動反応における化学種 i の化学量論係数、 n は電子数、 i_{BV} はイオン i が関与する電気化学反応のバトラー・フォルマー式です。これは反応の合計になり得ることに注意してください。電流密度の収支に対応する境界条件は次のとおりです。

$$\mathbf{i}_i \cdot \mathbf{n} = i_{BV}$$

また、ここで、バトラー・フォルマー式 i_{BV} は、いくつかの反応の式の合計になります。同様に、金属の電流密度収支の境界条件は、次の式から得られます。

$$\mathbf{i}_s \cdot \mathbf{n} = -i_{BV}$$

完全に混合された電解質では、金属構造の表面にある非常に薄い微視的な境界層を除き、あらゆる場所で濃度勾配を無視できます。電流密度収支の式は次のようになります。

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_i = 0$$

ここで

$$\mathbf{i}_i = -\left(\sum_{i=1}^n z_i^2 u_{m,i} F^2 c_i \right) \nabla \phi_i + \left(F \sum_{i=1}^n z_i c_i \right) \mathbf{u}$$

ただし、上記の式の右辺の2番目の項には、因子として電気中性条件が含まれており、これはゼロに等しくなります。上記の式の右辺の最初の項の括弧内の係数は、電解質の伝導率 κ_i に等しくなります。これにより、完全に混合された電解質の電流密度について次の式が得られます。

$$\mathbf{i}_i = -\kappa_i \nabla \phi_i$$

ガルバニック腐食

上記の議論ですでにガルバニック腐食を取り上げています。電子的接触状態にあり、同じ電解質と接触している異なる電子親和力を持つ2つの金属がガルバニ電池を形成します。これは、自動車産業と造船業で異なる金属を溶接する際の問題です。2つの金属間の接触領域の近くでは、卑金属がガルバニックプロセスで陽極溶解します。このような構造は、例えば、金属表面とイオンを含む水(電解質)との直接接触を妨げるコーティングを使用することにより保護する必要があります。

完全に混合された電解質を仮定する場合、金属-電解質界面での水素発生と金属溶解にバトラー・フォルマー方程式を使用し、金属の1点に電子ポテンシャルを設定できます。下の図は、結果の電流密度の流線と等電位曲線を示しています。さらに、陽極の溶解

が考慮される移動メッシュで問題が求解されます。以下のプロットは、電解液にさらされ、72時間にわたってより貴な金属と接触した後、最初は平らなより卑な金属の表面が、陽極溶解によってどのように消費されるかを示しています。

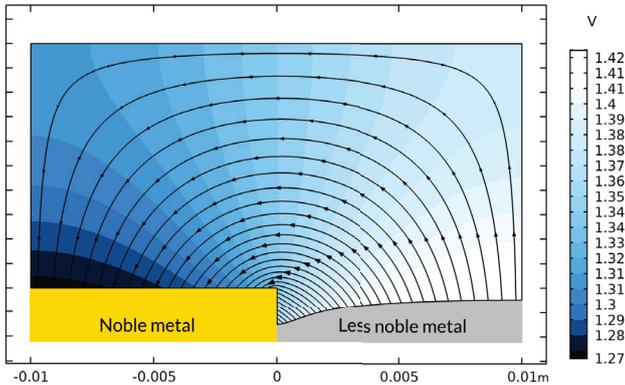


図7. ガルバニ電池の電解質の電流密度と等電位曲線の流れ。貴金属および卑金属の初期表面は、初期状態で水平です。72時間後、卑金属は陽極溶解により腐食します。

エレクトロニクス業界において、銅と他の卑金属(半田金属など)の使用は、湿度の高い環境での電解腐食の例です。保護されていない表面に水が凝結し、イオンがゆっくりと溶解して電解質を形成すると、ガルバニ電池が容易に形成されます。銅構造は陰極表面として機能し、より卑金属の半田金属を溶解し、電子デバイスの故障を引き起こします。

隙間腐食

上記の議論では、異種金属の電子親和力の違いによるガルバニック腐食について見てきました。しかし、電解質組成の変動によって腐食が発生する可能性もあります。たとえば、隙間腐食では、隙間の口で隙間の底よりも酸素の活性が高いため、隙間の口の電気化学ポテンシャルがより高くなります。

このプロセスは、金属表面の組成のわずかな変動から始まり、一部分が陽極として機能し、一部分が陰極として機能します。これがすなわち、以下で説明する一般的な腐食です。陰極酸素還元反応は隙間全体で酸素を消費しますが、最終的には、酸素輸送抵抗が大きい隙間の底で酸素が枯渇します。

この段階では、隙間の口と比較して酸素活性が低いいため、隙間の底で低い電気化学ポテンシャルとなり、腐食プロセスが加速します。これが発生すると、隙間の底部は強く陽極分極し、陽極金属の溶解が起こり、一方で隙間の口は陰極として働き、酸素の還元が陰極反応として起こります。

下のプロットは、酢酸/酢酸ナトリウム溶液で鉄の腐食が起こる隙間の腐食生成物と他のイオンの濃度分布を示しています。モデル方程式の解は、ウォルト

ンの発見を再現します(R4)。このプロットは、バルクと比較して隙間でナトリウム濃度が著しく低いことを示しています(プロットの右側)。一方、鉄イオンと鉄錯体は、先端に向かって(プロットの左側)濃度が高くなっています。

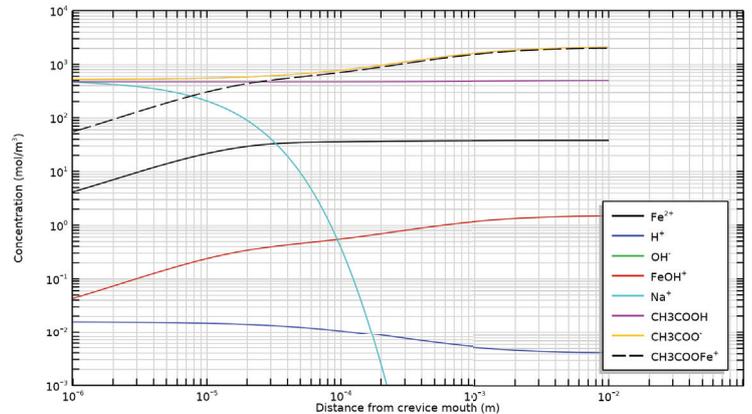


図8. 隙間の深さに沿ったイオンおよびイオン錯体の濃度

孔食

金属の表面に水滴があると、隙間腐食に似た濃縮電池が生じる場合があります。均一な腐食は、液滴で覆われた金属の表面で酸素を消費します。これにより、液滴の中央で酸素が枯渇しますが、液滴の端にある薄い層の酸素輸送抵抗は低くなります。液滴の端は陰極として機能し始め、液滴の中央の下の表面は陽極として機能します。

これが孔食の始まりかもしれません。液滴の中央に小さな孔ができる場合があります。この孔が形成されると、表面の液滴が乾燥したときに水分が残ります。腐食プロセスは、隙間腐食に非常に似たものになります。孔の口は酸素へのアクセスにより陰極として機能しますが、孔の底は陽極として機能し、金属を溶解して腐食プロセスを悪化させます。

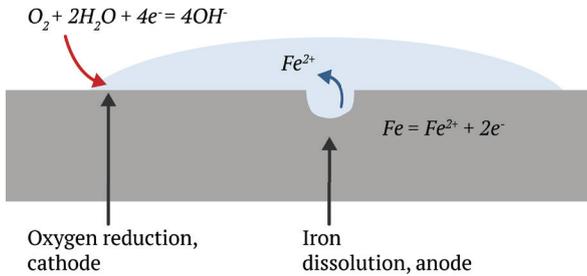


図9 均一な酸素還元と鉄の溶解により腐食が始まり、最終的に表面で酸素勾配が発生します。これにより、最終的に陰極表面と陽極表面が得られます。つまり、反応はもはや均一に分布していません。

応力腐食亀裂

このタイプの腐食は、孔食に似ています。ただし、応力腐食亀裂は、亀裂の機械的形成によって開始されます。これらの亀裂はしばしば不動態化します。すなわち、保護酸化膜が急速に形成されます。不動態化が発生しない場合、孔食と同様のプロセスが始まり、亀裂の口が陰極として機能し、亀裂の先端が陽極として機能します。

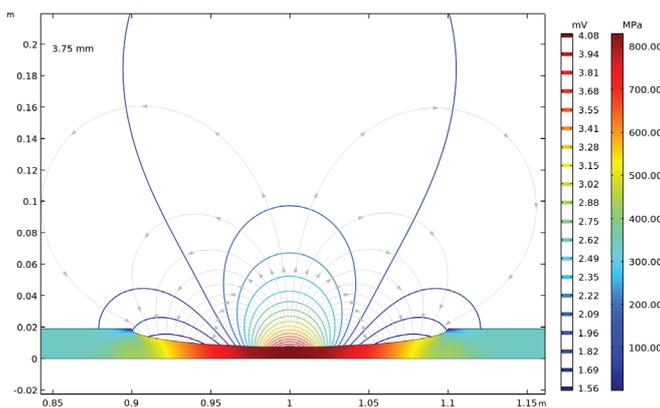


図10. 電解質と接触している金属板の応力。プレートの薄い領域が最も応力が高く、陽極として機能します。

上の図は、金属表面の応力を示しています。ここでは、化学速度論式は、応力腐食亀裂を引き起こす微小亀裂の形成を説明しています。このモデルは、完全に混合された電解質を想定した腐食と、金属の固体力学シミュレーションを組み合わせましたものです。最も高い応力を受ける金属板の中央は陽極として機能し、応力が増加すると腐食し始めます。

一般的な均一腐食

金属表面は、さまざまな組成の粒と粒界で構成されています。これは、異なる粒子と結晶粒界が電子に対して異なる親和性を持つ可能性があることを意味します。これは、金属表面が電解質で覆われている場合、微視的なガルバニ電池の形成につながります。このタイプの腐食はマイクロスケールで局所化されますが、肉眼では表面の均一な腐食のように見えます。下の図は、卑金属の結晶が貴金属の結晶によってどのように溶解するかを示しています。元の表面は完全に平坦ですが、電解質との60時間の接触後、腐食プロセスにより表面がより凹凸になります。

大気腐食は、均一な腐食の一例です。金属表面はしばしば液膜で覆われているため、湿気が多い環境で

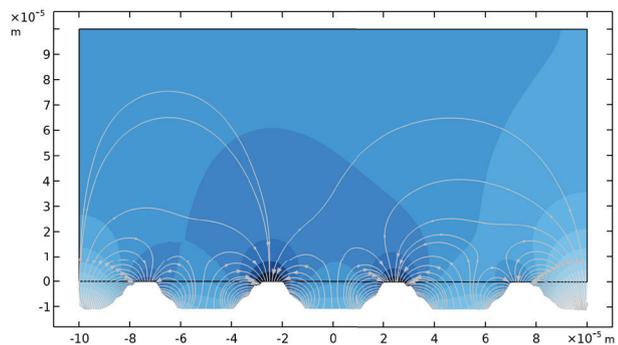


図11 移動メッシュを使用した腐食シミュレーションの結果。最初は平坦な表面は、電解液と接触して60時間後にわずかに凹凸になり始めます。

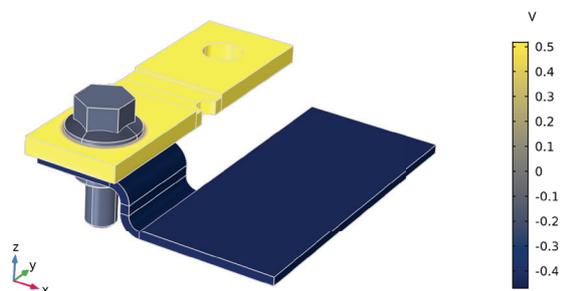


図12 湿った空気にさらされたバスバーアセンブリの表面の電極電位。構造は時々凝縮電解質の薄い層で覆われています。シミュレーションでは、銅（上部バスバー）、亜鉛（ボルト）、およびアルミニウム（下部バスバー）のさまざまな金属の腐食速度が得られます。

は大きな問題です。沿岸地域の金属構造物は、腐食を促進する塩化物イオンを含むミストにもさらされます。一般に、大気汚染は大気腐食の影響を悪化させる可能性もあります。

陽極保護

金属表面の高度に制御された酸化によって形成された酸化膜は、金属をさらなる腐食から保護することができます。陽極として働く金属表面は通常溶解するため、陽極保護とはほとんど矛盾のように聞こえます。しかし、陽極保護の場合、酸化皮膜は陽極電位によって安定化され、非常に小さな腐食電流密度しか得られません。この非常に小さな電流密度は、保護酸化膜の安定化に実際に貢献しています。陽極保護はあまり一般的な方法ではありませんが、リン酸を含むステンレス鋼タンクや硫酸を含むチタンタンクなど、極端に酸性の環境に使用されます。

陽極保護のモデリングにより、保護対象の金属表面の電位分布を調べることができます。陽極での電流密度は、不動態化電流で一定に保つことができます（境界条件）。電位はパッシベーション領域にあるために十分高くなければなりません、ばらつきはパッシベーションウィンドウより上の電位で発生する再活性化を避けるために十分小さくなければなりません。モデルの式は陰極防食の場合と非常に似ており、不動態化は陰極防食の酸素還元と同様に扱われます。

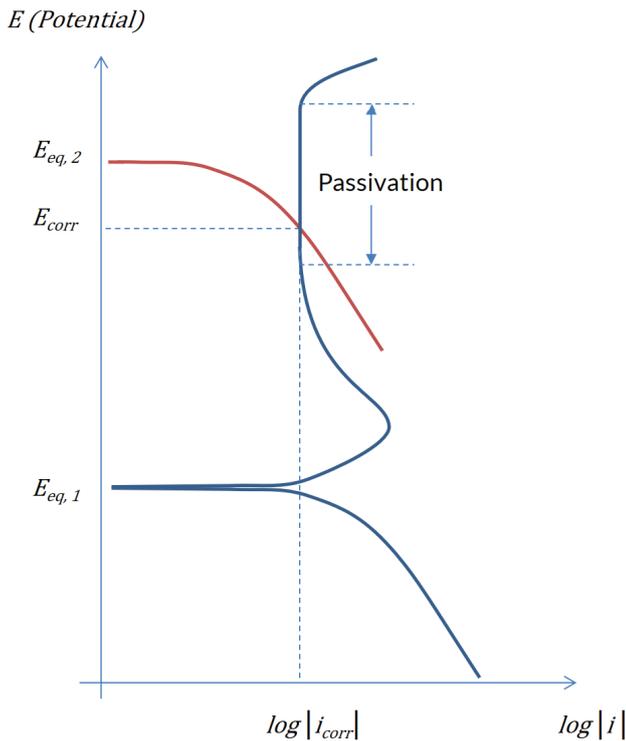


図13. 陽極保護では、電位を不動態化ウィンドウ内に維持する必要があります。

陰極保護

金属表面を積極的に保護する最も一般的な方法は、陰極を分極することです。表面の電位を陰極表面で発生する唯一の反応（または、少なくとも主反応）が酸素還元になる程度まで低下させます。酸素の減少により、保護された表面にアルカリ環境がもたらされ、石灰質層が形成される場合があります。この層はさらに表面を保護し、保護電流はさらに低くなります。

陰極保護には、原理的には、犠牲陽極を使用した陰極保護と印加陰極電流保護(ICCP)

の2つの異なるプロセスがあります。

陰極防食の原理を図5に示します。ガルバノ電池は意図的に形成され、そこでは陽極反応が制御された方法で、たとえばアルミニウム陽極を溶解します。アルミニウムの陽極が残っている限り、陰極分極は保護される金属表面で維持されます。

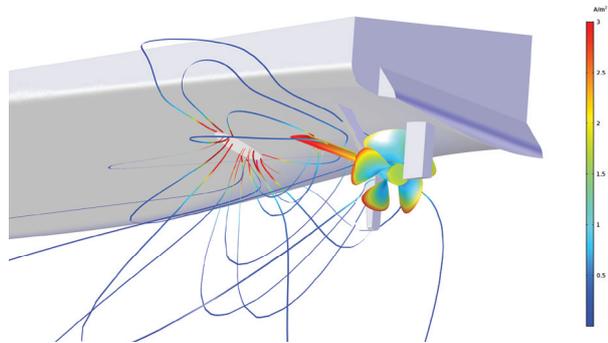


図14. 大型貨物船のプロペラを保護する印加電流による陽極周辺の海水の流れ。インペラブレードの内側部分は、構造の他の部分よりもわずかに保護されていません。

陰極保護のモデリングは、保護対象の金属表面全体が酸素還元の電位ウィンドウ内に収まるように犠牲陽極を配置する目的で行われます。境界条件は、陰極表面での一定の電流密度です。結果として生じる電位分布は、酸素還元ウィンドウ内に十分収まるはずですが、そうでない場合は、犠牲陽極を再配置する必要があります。電気化学ポテンシャルの大きな変動のリスクは2つあります。表面が過度に陰極分極し、その結果、望ましくない水素発生が起こる可能性があります。または表面は加速する腐食で保護されないかもしれません。水素の発生は、たとえば鉄骨構造の水素脆化を引き起こす可能性があります。

物体が海水に沈むと、かなり複雑な反応メカニズムにより石灰質の堆積物が生じます。これらの堆積物は保護膜として機能し、むき出しの金属表面への酸素輸送を減らし、したがって陰極反応の電流を減らします。これを考慮することにより、構造の寿命に関するより正確なモデルを取得できます。完全な反応メカニズムの厳密なモデルは、実物大の海底構造には複雑すぎますが、石灰質堆積物の沈殿のより単純

なモデルに測定値を適合させることにより、迅速で現実的な結果を得ることができます。

印加陰極電流保護は、陰極保護のための犠牲陽極の使用に似ています。ただし、陽極を溶解する代わりに、寸法安定性陽極(DSA)を使用することもできます。さらに、外部電流が印加されると、陽極は、印加電

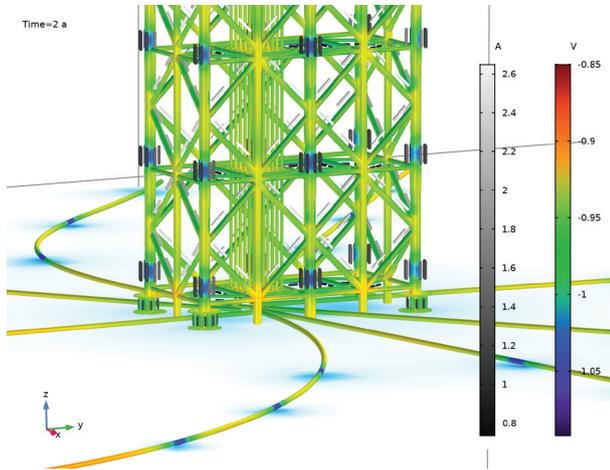


図15. 石油プラットフォームジャケット構造の電位分布と、設置から2年後の犠牲陽極からの電流出力。

流がないときよりも金属表面から遠くに配置できます。これは、陽極と陰極間の電子接続が、所望の直流電流を供給するための電源に接続された外部ケー

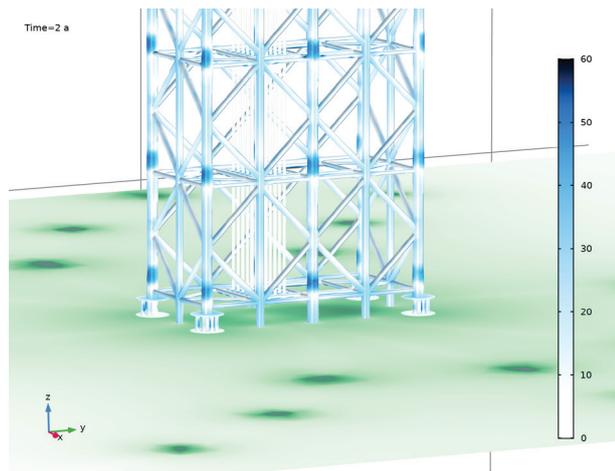


図16. ジャケット構造の設置から2年後の無次元単位での堆積化学種層を通じた酸素拡散が減少したために、体積化学種が電流分布に影響を与えます。表面を通過する電流量が減少します。

ブルを介して得られることも意味します。

ICCPのモデリングは、外部電流のない系のモデリングに非常に似ています。唯一の違いは、電位の境界条件が異なることです。外部電流のない系は短絡されています。つまり、2つの金属間の接点の電位は同じです。ICCPでは、電位差は外部電源ユニットから供給されます。また、この場合、陽極の位置決めは、陰極電位が酸

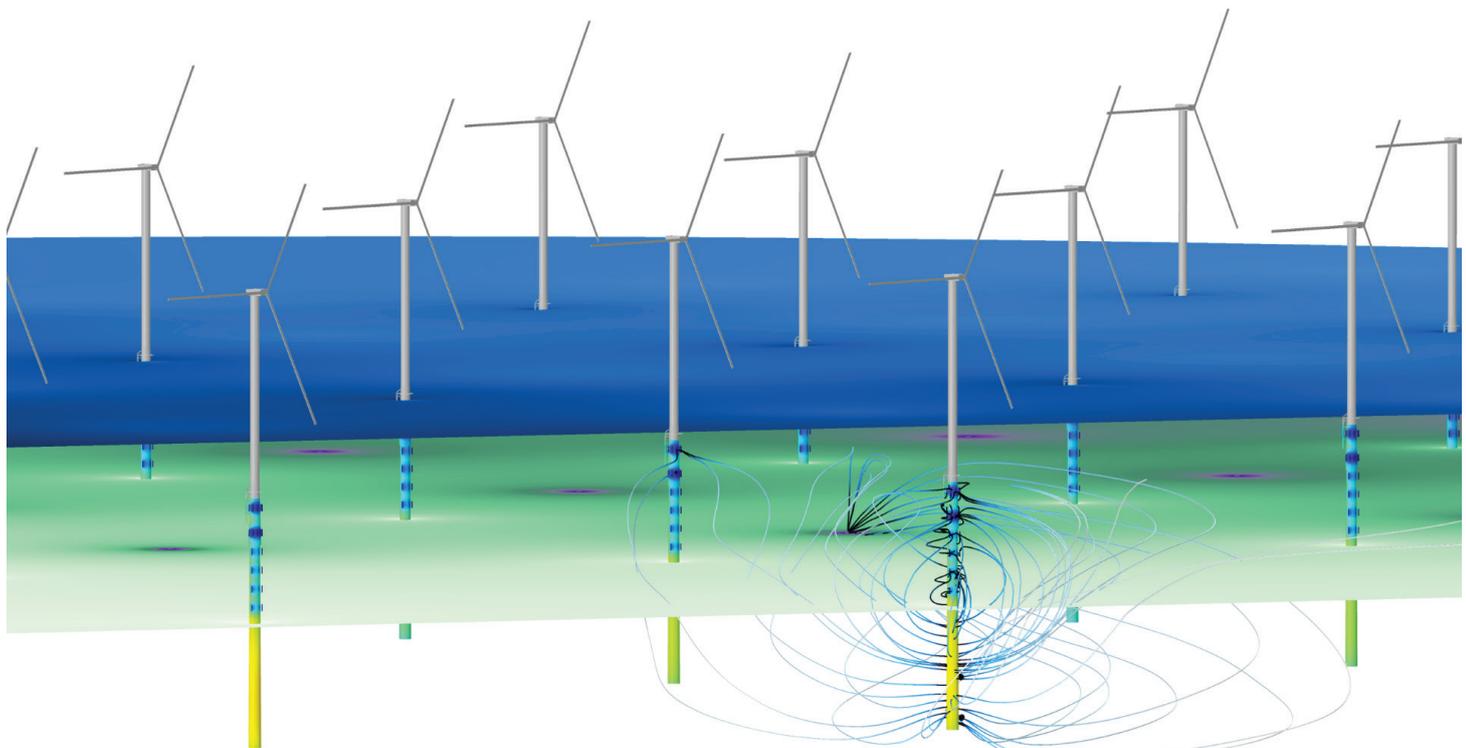


図17. 海面下に構造物の一部がある洋上風力発電所は、ICCPを使用して腐食から保護されています。シミュレーションは、構造を保護するために陽極を配置する目的で行われます。

素還元ウィンドウ内に収まるように行う必要があります。ただし、陽極の配置の自由度は大きくなります。さらに、電力消費や過保護などの他の影響がより重要になる場合があります。

ICCPは、バイポーラー効果に関する問題を引き起こします。たとえば、長時間にわたって保護された構造物の近くに固定されているボートは、双極電極として機能し、それにより腐食してICCP系に干渉する可能性があります。

動作の自由度とICCPの柔軟性は、保護された系の近くにある他の金属構造物が電流の一部を取り込み、いわゆる迷走電流効果を引き起こすことがあります。

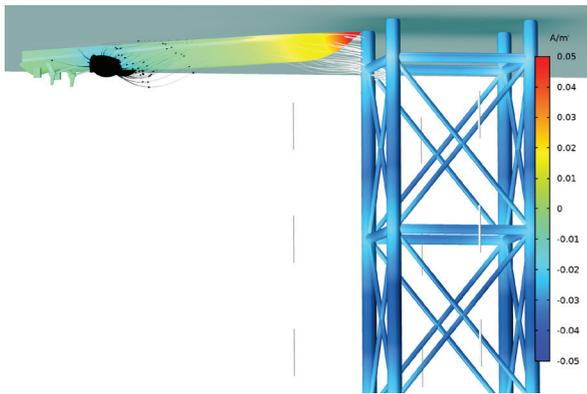


図18. 石油リグの近くに固定されたボートは、リグ構造を腐食から保護する円筒形陽極からの電流にさらされます。ボートは双極電極として機能し、船体の石油掘削装置に近い部分が陽極で腐食する場合があります。黒い流線はICCP陽極からの出力を示し、灰色の流線はジャケット構造に向かう電流の方向を示します。

おわりに

忠実度の高い1D, 2D, および3Dモデルを使用したモデリングとシミュレーションが、腐食および防食プロセスを理解することに役に立つということは明確です。さらに、これにより、腐食を軽減するデバイスと保護プロセスの設計に役立ちます。モデリングとシミュレーションの利点は、理解、設計、最適化を低コストで実行できることです。これは、純粋に経験的な設計または単純化された集中モデルに基づく設計と比較して、高価な再設計および修復のリスクも低減します。

参考文献

- R1. “Impact, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study”, Editor: G. Jacobson, *NACE International*, 2016.
- R2. J.O. Bockris and A.K.N. Reddy, “Modern Electrochemistry”, vol. 2, pp. 862–908, Plenum Press, 1970.
- R3. G. Gibson and D. Scantlebury, “Criteria for Cathodic Protection”, *The Journal of Corrosion Science and Engineering*, vol. 3, no. 17, 2001.
- R4. J.C. Walton, “Mathematical Modeling of Mass Transport and Chemical Reaction in Crevice and Pitting Corrosion,” *Corrosion Science*, vol. 30, no. 8/9, pp. 915–928, 1990.

www.comsol.com

