

7. 大気腐食環境における鋼材の腐食孔工学モデルに関する基礎的研究

香月 大翔

1. 目的

腐食劣化に対して鋼構造物を適切に維持管理するためには、鋼構造物の部材・部位における腐食挙動を定量的に明らかにする必要がある。しかし、鋼構造物が様々な腐食環境に曝され、構造部位・部材における腐食環境が著しく異なる場合も少なくないことから、経時腐食挙動を精度良く評価・予測することは困難と考えられている。そこで、本研究では様々な腐食環境における鋼板の経時腐食挙動を精度良く評価・予測するために必要とされる腐食孔の工学モデルを提案することを目的とした。そのために、様々な大気ミクロ環境下における鋼材の大気暴露試験とその大気ミクロ環境のモニタリングを行った。これらの結果に基づき、鋼材の経時腐食挙動を定量的に明らかにした上で、腐食挙動との相関関係について評価した。また、試験体の腐食表面性状に対して、空間統計学的手法の1つであるパリオグラム分析を行うことで、経時腐食表面性状について評価した。さらに、この分析結果から得られる空間統計量(レンジおよびシル)に基づき、腐食環境と経時性を考慮可能な腐食孔工学モデルの提案を行った。

2. 内容

2.1 大気暴露試験 試験体の形状・寸法を図-1(a)に示す。試験体にはグリットブラスト(ISO Sa2.5)した無塗装の JIS G 3106 SM490 材である普通鋼板、および JIS G 3114 SMA490AW 材である耐候性鋼板を用いた。大気暴露試験では異なる腐食環境をシミュレートするために、試験体を水平面に対して 0° 、 45° 、および 90° の 3 種類の角度となるように、暴露台を南向きに設置した(以下、空側を対空面、地面側を対地面という)。なお、暴露場は海岸線から約 3km に位置する琉球大学構内(Lat. $26^\circ 15' N$, Long. $127^\circ 46' E$)とした。期間は 0.5 年、1 年および 2 年とし、各期間 9 体(0° 、 45° および 90° : 各 3 体)の試験を行った。

2.2 経時腐食挙動 鋼材表面に形成されたさびの性状は、鋼種や暴露角度により異なっていた。どの暴露角度においても、対地面のさび粒子は対空面と比較してさび粒子の大きさのばらつきが大きい。また、対空面および対地面についても、各暴露角度においてさび粒子の大きさおよび分布状況等が異なる。これは、雨水や結露水の滞水時間、付着塩分量やそれらの経時性が異なるためと考えられる。また、普通鋼・暴露角度 0° ・対地面では、暴露期間 2 年の試験体 3 体に、さびこぶが形成されていた。他の試験体は、全面腐食のみしか発生していなかったため、この条件下の腐食環境が最も厳しいと考えられる。

次に、試験終了後の試験体の表裏面を対象として、図-1(b)に示す 6 点にて電磁式膜厚計(分解能 $1\mu m$)を用いて、さび厚を測定した。その後、さびを除去し、重量換算した板厚減少量から平均腐食深さの算出を行った。平均さび厚の経時性を図-2 に、平均腐食深さの経時性を図-3 に示す。(a)と(b)は、それぞれ普通鋼と耐候性鋼について示している。普通鋼および耐候性鋼のそれぞれの鋼種に対して、経時変化に伴って、平均さび厚および平均腐食深さが増加している。また、対空面および対地面ともに、暴露角度の増加に伴って、平均さび厚および平均腐食深さが減少する傾向にある。これは、暴露角度が増加することで、雨水や結露水の滞留時間が短くなることや、付着塩分の洗浄量が多くなることが原因と考えられる。また、対空面よりも対地面の方が、平均さび厚および平均腐食深さが増加する傾向にある。これは、対地面では対空面よりも日光の遮断のため湿気や結露水が滞留しやすく、鋼材表面が水膜で覆われる時間が対空面に比して長いためと考えられる。平均腐食深さについて、同一の暴露期間では、耐候性鋼のそれは普通鋼のそれよりも小さい。これは、耐候性鋼に緻密な保護性さびが形成され、腐食の進行を抑制したためであると考えられる。

平均さび厚と平均腐食深さの関係を図-4 に示す。図中の実線は平均さび厚と平均腐食深さの回帰直線 m であり、破線はその $m \pm 2\sigma$ (σ : 標準偏差)を示している。腐食による鋼材の減少量とさびの生成量には電気化学的な線形関係があると考えられること、また、大気ミクロ環境に関係なく平均さび厚と平均腐食深さは相関性が高いため、普通鋼および耐候性鋼のそれぞれの鋼種に対して、回帰直線を用いて整理した。回帰直線の傾きは普通鋼に比べ耐候性鋼のほうが小さい。この関係を用いることで、現場において、さびを除去することなく平均腐食深さを予測することが可能となる。

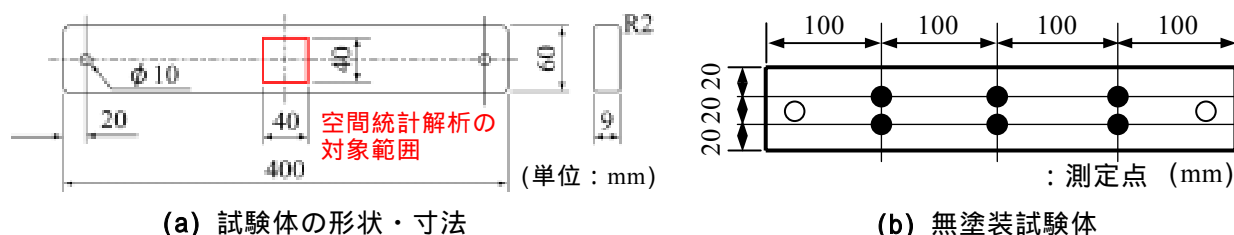


図-1 試験体の形状・寸法 および さび厚の測定位置

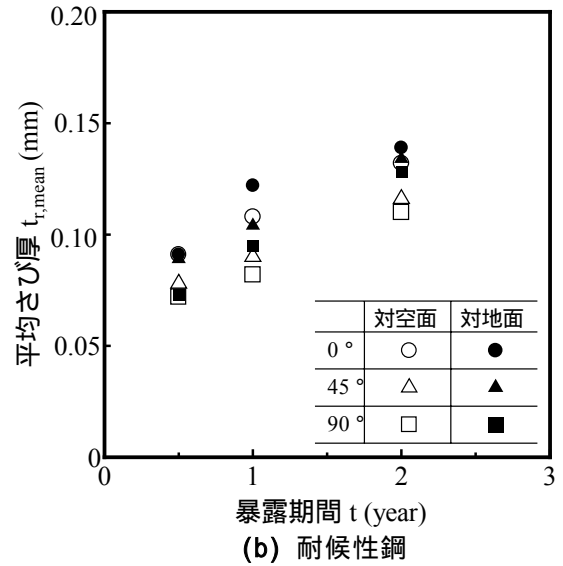
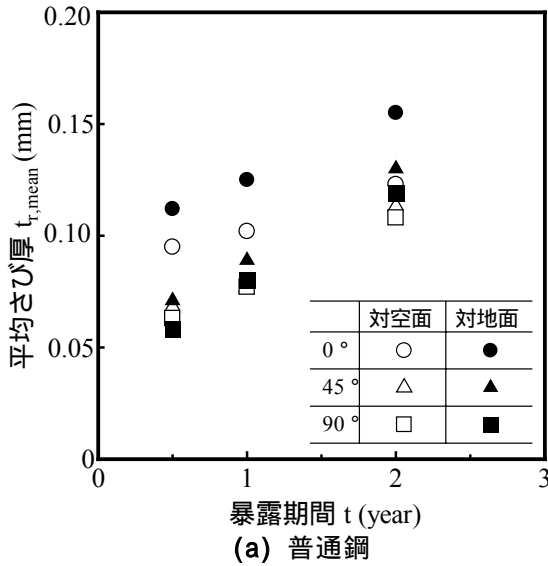


図-2 平均さび厚の経時性

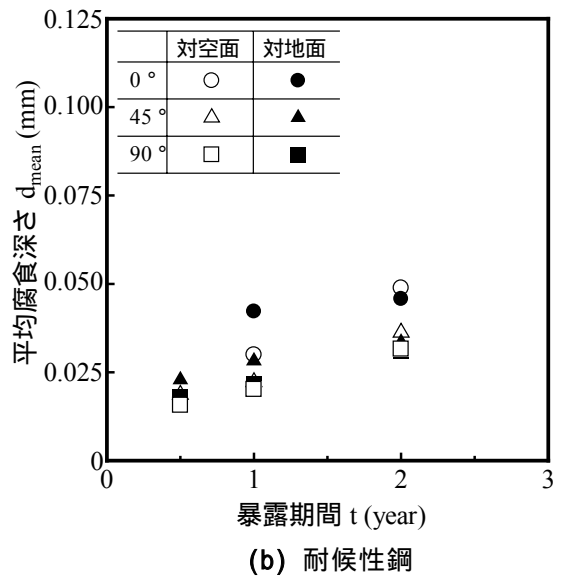
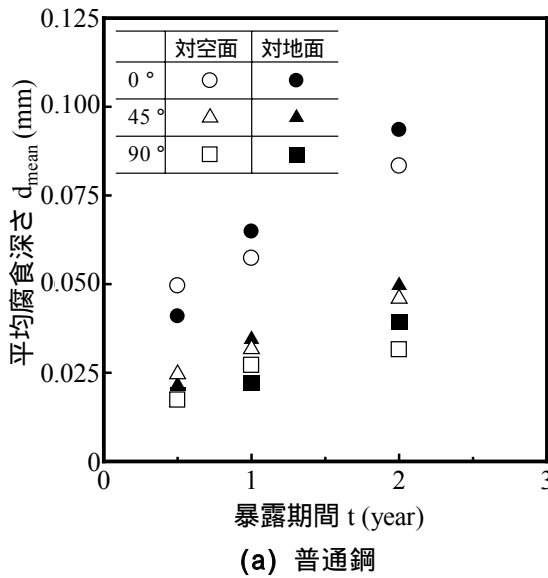


図-3 平均腐食深さの経時性

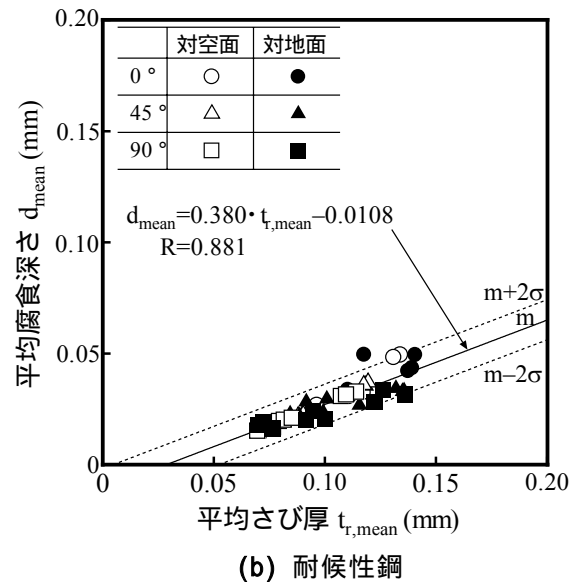
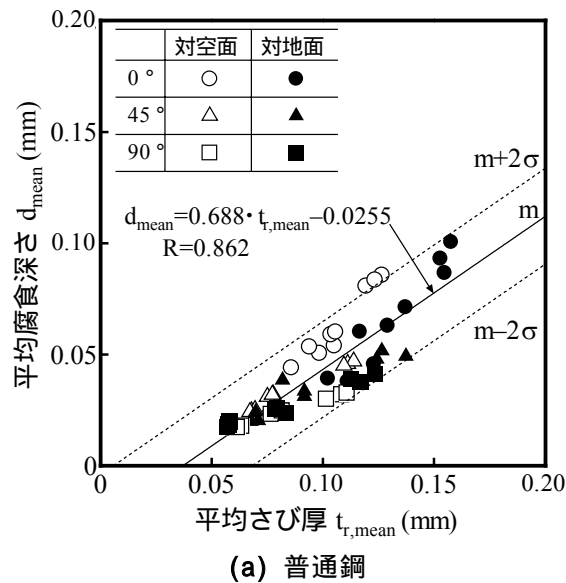


図-4 平均さび厚と平均腐食深さの関係

2.3 ACM 型腐食センサを用いた大気マイクロ環境のモニタリング 大気暴露試験と同時に、6 つの異なる大気マイクロ環境のモニタリングを行った。ACM 型腐食センサ(以下、センサという)を用いて、Fe-Ag 対のガルバニック腐食電流を 10 分間隔で、1 年間継続モニタリングした。この測定値をもとに、文献 1 で提案されている降雨期間におけるセンサ出力の換算評価手法に基づき、日平均電気量を算出した。算出した 6 つの大気マイクロ腐食環境における日平均電気量を図-5 に示す。腐食挙動とセンサの出力から算出した日平均電気量には相関があると考えられる。0°・対空面における日平均電気量を除いて検討を行う。対空面に比して対地面のほうが日平均電気量大きい。これは対空面に比べて対地面では、日光の遮断により雨水や湿気が滞留しやすいことが原因と考えられる。また、対空面および対地面によらず暴露角度が増加するにしたがって、日平均電気量が減少している。これは、暴露角度が大きいほど雨水の滞留の時間が短くなり、腐食電流の出力が小さくなったためであると考えられる。このように、腐食挙動の激しさと提案されている算出方法で整理した日平均電気量の大きさは、傾向が一致している。

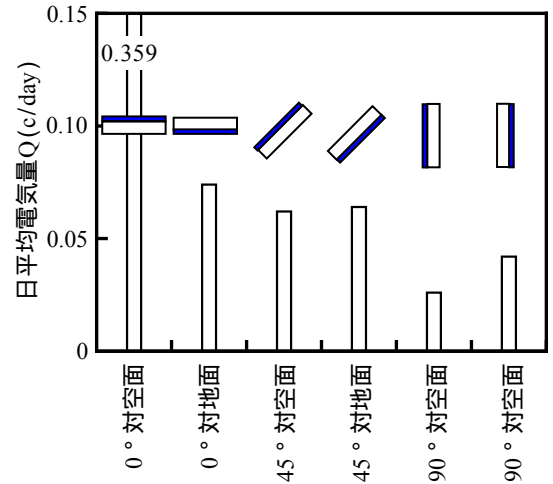
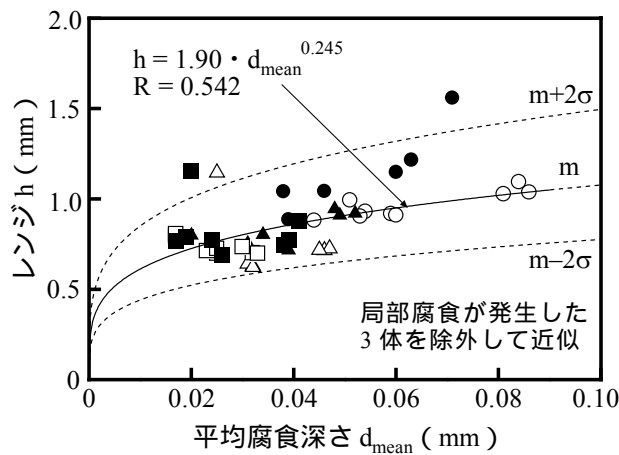
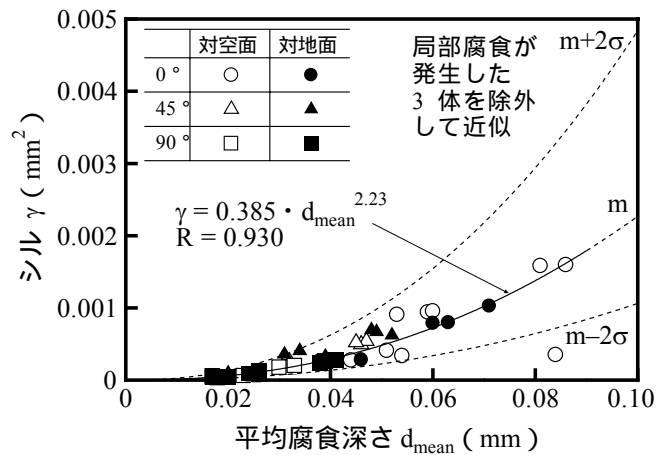


図-5 各大気マイクロ環境における日平均電気量

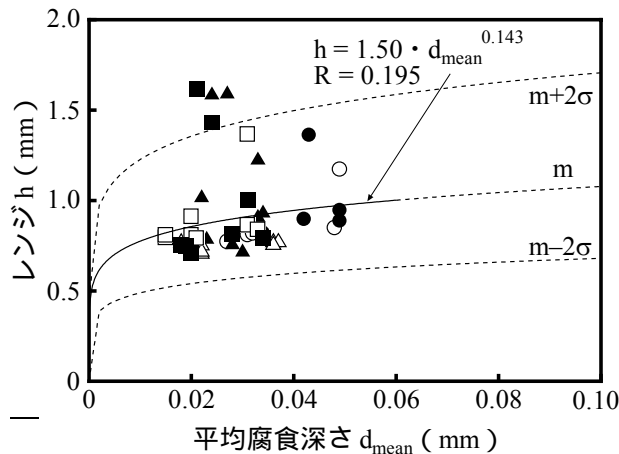


(a) レンジ

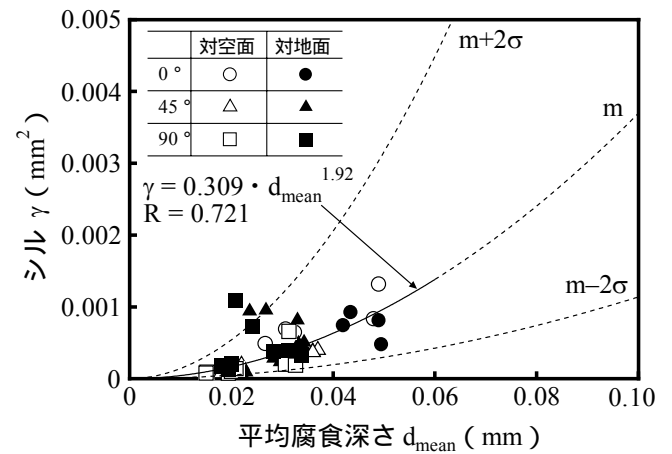


(b) シル

図-6 平均腐食深さと空間統計量の関係(普通鋼)



(a) レンジ



(b) シル

図-7 平均腐食深さと空間統計量の関係(耐候性鋼)

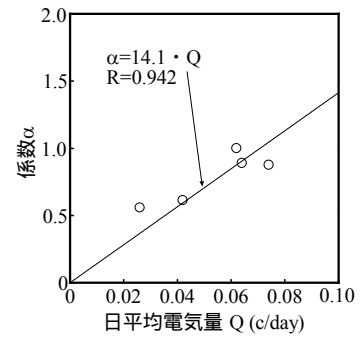
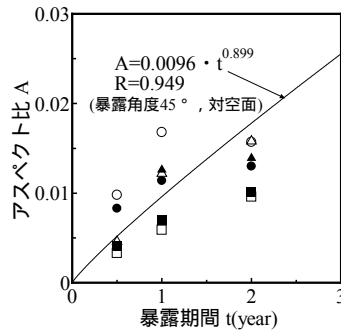
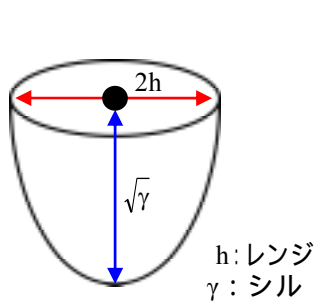


図-8 空間統計量を用いた (a) 暴露期間とアスペクト比の関係 (b) 日平均電気量と係数 α の関係
腐食孔モデル

図-9 アスペクト比の経時性(普通鋼)

2.4 平均腐食深さと空間統計量の関係 腐食深さには空間的な自己相関構造が存在する. そのような領域に対して空間統計学的手法であるバリオグラム解析を実施することで, 腐食表面性状の特性値(レンジおよびシル)を抽出した. レンジは腐食表面性状における腐食孔の影響範囲を, シルは腐食表面性状の凹凸の程度を示す. さび除去後の試験体についてレーザー深度計(スポット径: $30\mu\text{m}$, 分解能: $0.05\mu\text{m}$)を用いて腐食表面性状を測定した. なお, 測定ピッチは 0.2mm とした. また, 空間統計解析の対象範囲は図-1の赤枠の領域とした. 試験体の代表領域を抽出すること, 材端部からの腐食の影響を除去することを考慮して決定した. 平均腐食深さと空間統計量(レンジおよびシル)の関係を図-6および図-7に示す. 図-6と図-7は, それぞれは普通鋼と耐候性鋼について示している. 図中の実線は平均腐食深さと空間統計量の累乗回帰曲線 m であり, 破線はその $m \pm 2\sigma$ (σ : 標準偏差)を示している. 平均腐食深さが深くなるほど, レンジおよびシルの値は増加している. これは腐食の進行に伴い腐食孔の影響範囲が大きくなること, および腐食表面性状の凹凸の程度が大きくなることを意味する. また, レンジおよびシルのほとんどのプロットが $m \pm 2\sigma$ の領域内にある. したがって, 平均腐食深さが同じであれば空間統計量(レンジおよびシル)は, 大気マイクロ環境によらず, 変化しないと考えられる. 鋼種による空間統計量の相違については, 普通鋼における平均腐食深さと耐候性鋼における平均腐食深さが同じ場合, 耐候性鋼における腐食孔の影響範囲や凹凸の程度は普通鋼のもの比べて大きくなっている. 同じ暴露期間における普通鋼の空間統計量と耐候性鋼の空間統計量の値はほとんど変化しないのに対し, 平均腐食深さは耐候性鋼よりも普通鋼のほうが大きいためである.

2.5 空間統計量を使用した腐食孔工学モデル 前節で算出した各々の試験体における空間統計量を利用して, 腐食孔工学モデルの検討をした. 空間統計量を用いた腐食孔モデルを図-8に示す. この値から, 腐食孔のアスペクト比 A の算出を行った. なお, アスペクト比 A は式(1)で定義した.

$$A = \frac{\sqrt{\gamma}}{2 \times h} \quad (1)$$

普通鋼における暴露期間とアスペクト比の関係を図-9(a)に示す. アスペクト比 A は暴露期間 t と累乗回帰線による相関が高いと考えられる. そこで, 普通鋼および耐候性鋼のそれぞれの鋼種において, 暴露角度 45° の対空面を基準とし, 他の大気マイクロ腐食環境における累乗回帰線を次のように定義した.

$$A = \alpha \cdot a \cdot t^b \quad (2)$$

(a および b : 暴露角度 45° 対空面における累乗回帰線の定数)

日平均電気量と係数 α の関係を図-9(b)に示す. 耐候性鋼についても同様の整理を行った. その結果, アスペクト比 A と日平均電気量 Q の関係は次式で表現することができる.

$$A_{CS} = 0.135Q \cdot t^{0.899} \quad (3)$$

$$A_{WS} = 0.165Q \cdot t^{0.390} \quad (4)$$

A_{CS} : 普通鋼におけるアスペクト比

A_{WS} : 耐候性鋼におけるアスペクト比

この評価式を用いることで, 任意の腐食環境および暴露期間におけるアスペクト比が算出可能であるため, 腐食孔モデルの生成が可能と考えられる. 将来, 空間点過程により腐食孔の位置を特定し, その位置に本研究で提案した腐食孔工学モデルを適用することで残存耐力などの評価・予測に有用な経時腐食表面性状空間統計数値シミュレートに寄与できると考えられる.

3. 結論

1) 全面腐食が発生している場合, 平均さび厚を測定することで, 簡易的に平均腐食深さおよび腐食表面性状を求められる. 2) 普通鋼, 耐候性鋼のそれぞれの鋼種に対して, 大気マイクロ環境によらず, 平均腐食深さから腐食表面性状の特性値(レンジおよびシル)を推定できる. 3) 普通鋼と耐候性鋼の平均腐食深さが同じ場合, 耐候性鋼の腐食表面性状における腐食孔の影響範囲や凹凸の程度は普通鋼に比して大きい. それは, 同じ暴露期間における普通鋼の空間統計量と耐候性鋼の空間統計量の値はほとんど変化がないのに対し, 平均腐食深さは耐候性鋼よりも普通鋼のほうが大きいためである. 4) 空間統計量から求めたアスペクト比には経時性があり, 任意の腐食環境および暴露期間を用いて表現できる. また, 経時性を考慮した全面腐食の腐食孔工学モデルを提案した.

参考文献 1) 杉谷国博, 貝沼重信, 香月大翔, 友田富雄, 向川優貴: ACM型腐食センサを用いた鋼構造部材の経時腐食挙動の評価・予測手法の提案, 土木学会西部支部研究発表会, 1-40, 2009. 2) 中山武典, 岩田多加志, 長尾護, 下津佐正貴, 茨木信彦, 稲田淳: 高強度懸架ばね用鋼の腐食疲労特性とその改善, 神戸製鋼技報, Vol.47/No.2, pp.50-53, 1997.