

論文

[1126] 誘導加熱鍍鉄筋のマイクロ波 radiation energy に関する研究

太田 福男*

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の寿命はコンクリート表面からコンクリート中に埋め込まれている鉄筋表面までのコンクリートが中性化し、コンクリート中の鉄筋が錆び始めた時点とされている¹⁾。これは、コンクリートがアルカリ性を維持している限り鉄筋は錆びないという考えに基づいている。ところが近年、海砂使用等の塩害による鉄筋の発錆あるいはアルカリ骨材反応によるコンクリート中のひび割れ多発によって雨水等の浸透による鉄筋の発錆など、使用材料ならびに環境の悪化にともなって、コンクリートそのものはアルカリ性を維持していてもコンクリート中の鉄筋はおびただしく錆が進行し、コンクリートを破壊するまでに至る構造物も増えつつある。一方建築構造物の室内側では生活環境の向上によりコンクリートの中性化速度はかなり速くなって来ており従来の中性化速度式が適用できない場合が多い。したがって、コンクリートの中性化深さを測定するだけでは鉄筋コンクリート構造物の劣化状況の判定が難しくなってきた。この問題点を解決するためには、現行の間接的に鉄筋の発錆を予測するコンクリートの中性化深さ測定方法に代わる直接鉄筋の発錆程度を測定する方法が必要である。しかし現時点では、コンクリート中の鉄筋の錆の程度を測定する方法はコンクリートを削って鉄筋表面を露出させる直接錆を観察する方法や非破壊試験方法である自然電位を測る方法にたよる以外にない。前者の方法は錆程度を確実に判定できる利点はあるものの、建造物を損傷する点と測定箇所のコンクリートを破壊するので、同一箇所での構造物の劣化進行速度（錆進行速度）の継続的な測定が不可能であるなどの欠点を持っており、後者の方法は、かぶり部分のコンクリートの性質や含水率によって測定値が変動する等の問題点がある。

このような観点から本研究は、マイクロ波によるコンクリート中の鉄筋の錆の程度を非破壊的にかぶりコンクリートの影響に左右されないで、より簡便に推定する方法を確立するために、マイクロ波による鉄筋の発錆程度推定するための基本特性である、加熱鉄筋より放射されるマイクロ波と発錆程度との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 実験

コンクリート中の鉄筋の発錆程度を非破壊試験によって測定する方法を確定するための基礎的な実験を次の要領で行った。すなわち実験は大別すると、コンクリート中の鉄筋の最適電磁誘導加熱方法を見つけるための実験(実験-A)と加熱された鉄筋の熱放射率と錆程度との相関性を調べるための実験(実験-B)の2種類である。

2.1 実験の種類

(1) コンクリート中の鉄筋加熱方法に関する実験(実験-A)

コンクリート中の鉄筋の最適誘導加熱方法を求める目的で、D-22の異形鉄筋を4cmの深さに埋め込んだ試験体(30×30×10cm)を用いて、加熱出力と鉄筋昇温速度との関係を調べ、次に鉄筋上にあるコンクリートがひび割れない昇温速度領域を求めた。

*大同工業大学教授 建設工学科、工博（正会員）

(2) 鉄筋の錆成分の熱放射率の測定実験(実験-B)

鉄筋の錆そのものがマイクロ波放射率とどのような相関性を持っているかを調べるための基礎実験として、鉄筋の主たる錆成分の FeO 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 の4種類を取り上げ、それぞれの粉末をステンレス板に一様に塗布したあと加熱し、その放射率を調べた。

(3) 発錆程度と熱放射率との相関性測定実験(実験-B)

鉄筋および鉄板の発錆程度と熱放射率との相関性を調べるために、鉄筋を丸鋼と異形の2種類、15cm角の錆程度の異なる鉄板4種について熱放射率と誘導加熱して冷却時に放出されるマイクロ波出力を測定した。

2.2 測定装置

(1) 電磁誘導加熱装置

コンクリート中の鉄筋を加熱する最大出力は10kw電磁誘導加熱装置の概要を図-1に示す。

(2) 熱放射マイクロ波測定装置

加熱鉄筋より放射されるマイクロ波出力測定するラジオメータのブロック図を図-2に、装置の概要を写真-1に示す。このラジオメータの測定精度は温度に換算して $1/273^\circ\text{C}$ である。

2.3 試験体とその種類

錆成分測定用試験体は粉末をボンドで混練し、ステンレス板に乾燥時層厚が5mmになるまで重ね塗りを行った。使用鉄筋は丸鋼では $\phi 22$ を、異形ではD22をそれぞれ使用した。また、錆程度と放射マイクロ波との相関性を調べるための試験体は15cm角(厚さ2mm)の鉄板を使用した。コンクリート中の鉄筋の加熱昇温特性試験体としては $30 \times 30 \times 10\text{cm}^3$ の角型とし中央に上記鉄筋を埋め込んだ。ただし、かぶり厚さは4cmの一定とした。

2.4 錆程度の異なる試料

鉄の錆程度を表示する一般的な指標がないため、本報では錆程度が顕著に異なる試料を選んだ。すなわち、異形鉄筋の黒皮で表面に錆の無いものと鉄筋の表面は顕著に錆びており表面の凸凹が大きいもの(A)、丸鋼鉄筋の黒皮と表面が一様に錆びているもの(B)鉄質の異なる鉄板の黒皮と錆びたもの(C&D)および黒皮を研磨した鉄板の合計9種類の試料である。レーザー表面粗度計によって測定した錆試料表面の凸凹状況を図-3に示す。なお、こ

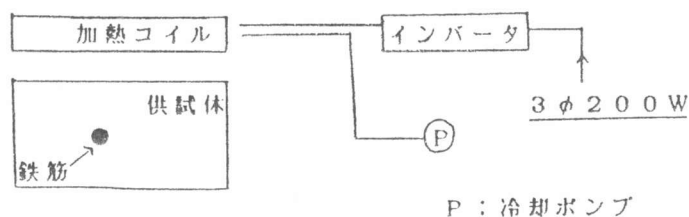


図-1 電磁誘導加熱回路

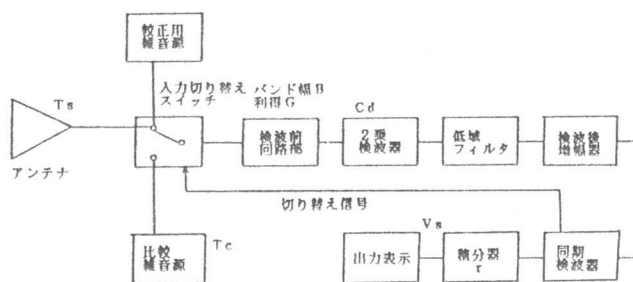


図-2 デイック式ラジオメータブロック図

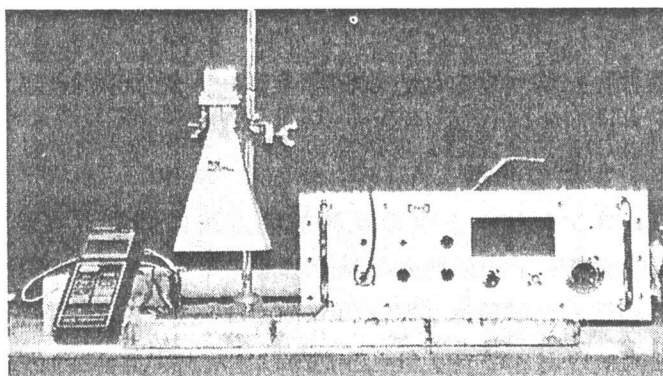


写真-1 熱放射マイクロ波測定装置

こで言う表面粗度は単位幅(1000 μm)あたりの最大凸凹差である。

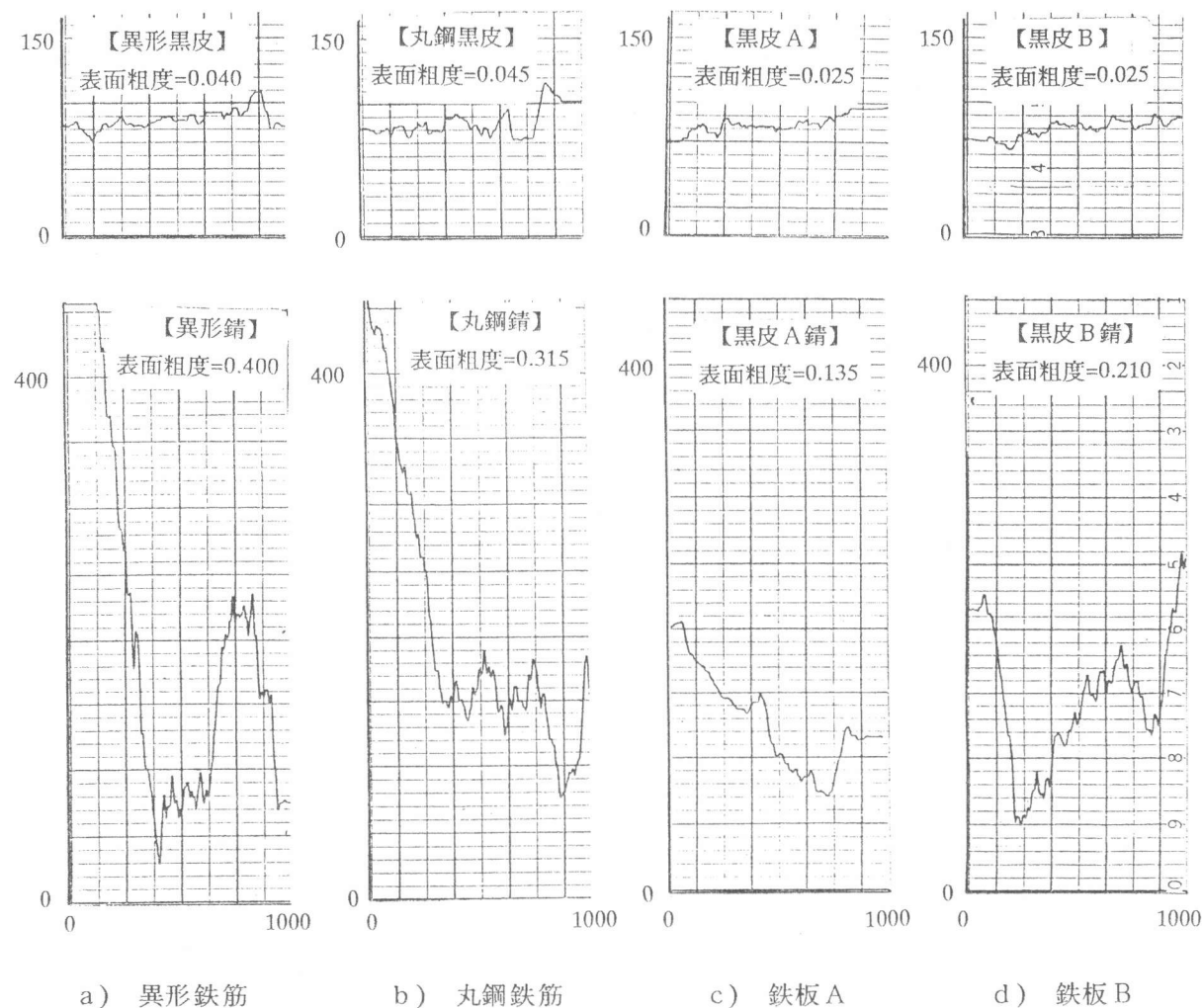


図-3 鍍試料表面の凸凹状況

3. 実験結果とその考察

3.1 コンクリート中の鉄筋の電磁誘導加熱特性

かぶり厚4cmのコンクリート中の鉄筋をコンクリート表面に誘導加熱用コイルを置いて加熱した場合の、鉄筋の温度上昇曲線の一例を図-4に示す。

図-4は鉄筋温度(センサーNo.2)が150℃に到達するまで出力7kwで誘導加熱し、その後は自然放置した場合の鉄筋とコンクリート表面温度と経過時間との関係を表している。この図によれば、鉄筋を150℃まで加熱するに要する時間はおよそ3分程でありその間コンクリートの温度は2~3℃上昇する程度である。上昇温度の均等

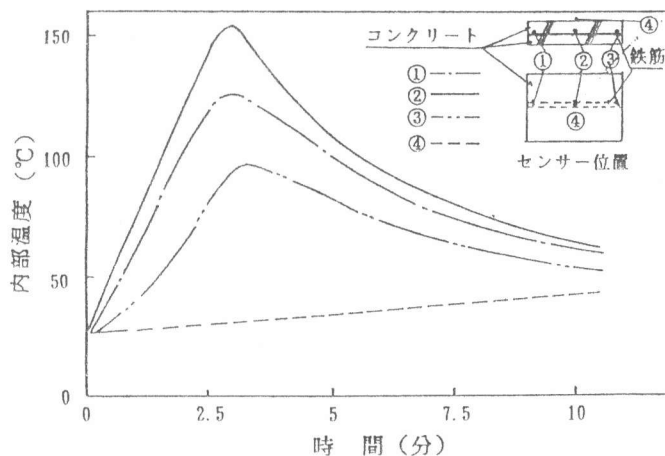


図-4 鉄筋内部温度と加熱時間との関係

性は、鉄筋中央部と端部(中心より左右に15 cmの位置)は加熱範囲(センサーNo. 2 とNo. 1 の間)内では約20℃ほどの温度差があるが、加熱コイルの加熱部分からはずれた位置にある端部(センサーNo. 3)では約70℃ほどの温度差となっている。また、図には表示していないが、加熱出力10 kwでも150℃までの加熱時間は30秒ほど短くなるだけである。

また、昇温速度50℃/分、150℃まで加熱すると、試験体は鉄筋の熱膨張のため鉄筋上面のコンクリート両端部から5 cm程の長さのひび割れが生じたが、140℃ではひび割れは見られなかった。本研究の目的である錆程度を推定するに必要な測定時温度が80℃～40℃であることから、加熱終了時から測定開始時までの間に鉄筋が放熱する温度低下を考慮すれば最適加熱温度は140℃～100℃と思われる。なお、加熱昇温速度は50℃/分以上になると急激に加熱装置の消費電力が大きくなることから、最適昇温速度は経済性の観点から50℃/分程度と思われる。

3.2 錆成分の熱放射

マイクロ波出力

鉄筋の錆成分としては黒皮(FeO)を含めて、酸化第二鉄(Fe_2O_3)、水酸化第二鉄($\text{FeO}(\text{OH})$)および四三酸化鉄(Fe_3O_4)などがある。これらの成分は錆程度の進行に伴って変質しながら最終的には四三酸化鉄や水酸化鉄になる。図-5は各成分を100℃まで加熱した後自然放置したときの冷却時温度とその時の成分の熱放射マイクロ波出力との関係を示したものである。図-6にこの成分のマイクロ波出力と温度との関係を示す。

図-5および図-6から、錆成分の内 Fe_2O_3 および $\text{FeO}(\text{OH})$ は熱放射によるマイクロ波をほとんど出さないが、 FeO と Fe_3O_4 の熱放射マイクロ波出力はかなり大きく錆成分温度に比例していることがわかる。また、図-5から、熱放射マイクロ波出力とその時の温度との関係を求め、その直線の傾きを調べることによって図-6に示すようにマイクロ波出力の特徴を鮮明にすることができる。

3.3 錆程度と熱放射との関係

図-3に示す試料の熱放射率を赤外線放射率計を用いて測定した後、赤外線放射温度と鉄板内部温度との関係を示したのが図-7である。

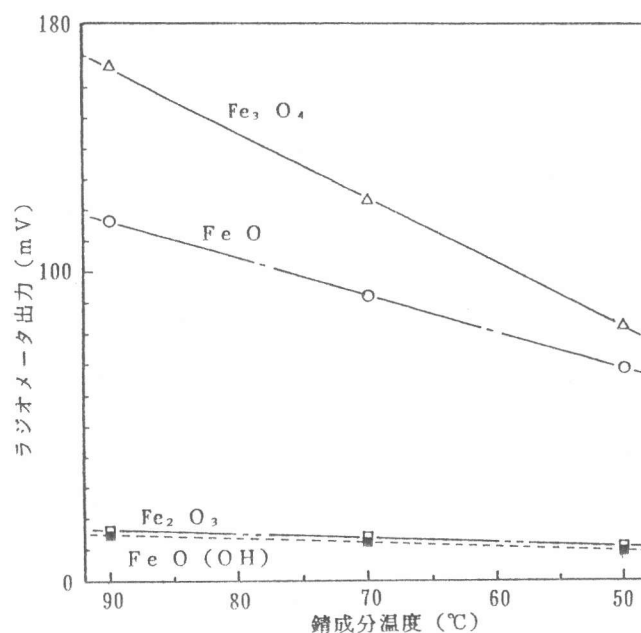


図-5 錆成分のマイクロ波出力と冷却時成分温度の関係

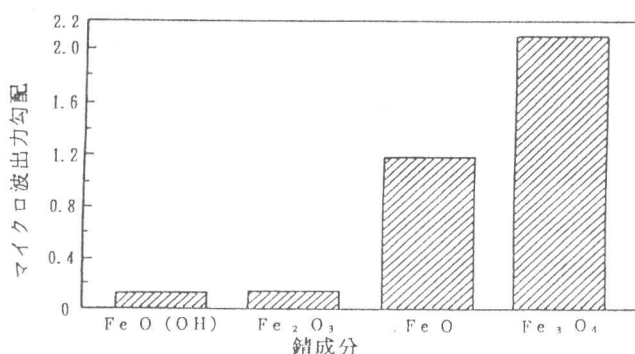


図-6 錆成分のマイクロ波出力勾配

この図によれば、鉄の表面の黒皮を研磨した試料の熱放射率は0.44ときわめて小さいが黒皮Aで0.7~0.81、黒皮A錆で0.94、黒皮B錆で0.95となる。黒皮A錆と黒皮B錆の試料では図-3に示すように錆の程度がかなり異なっているが放射率はほとんど同程度となる。しかし、鉄板を加熱しその表面の赤外線放射温度と鉄板内部温度とを対比すると、錆程度が大きいほど赤外線放射温度が高いことがわかる。

3.4 鉄板の熱放射率と

マイクロ波出力勾配との関係

加熱された鉄板より放射されるマイクロ波出力勾配とその熱放射率とを比較した結果を図-8に示す。

この図から、同一種類の鉄板に限れば、発錆程度が大きい程マイクロ波出力も大きくなっているが、鉄板の種類が異なれば、熱放射マイクロ波出力勾配と熱放射率との相関性は異なる場合もあることがわかる。

3.5 鉄筋の熱放射マイクロ波出力

加熱された鉄筋の熱放射マイクロ波出力値と鉄筋内部温度との測定結果を図-9（丸鋼）および図-10（異形）にそれぞれ示す。すなわち、この図によれば、ラジオメータの出力が測定時の温度ならびに気温によって出力値が異なるので出力値の大小で比較することはできないが、熱放射マイクロ波出力勾配は錆びている鉄筋の方が大きく、鉄板と同様の傾向を示している。

これまでの結果から、同一種類の鉄では錆程度と放射率との間に良い相関性があることが明らかとなった。

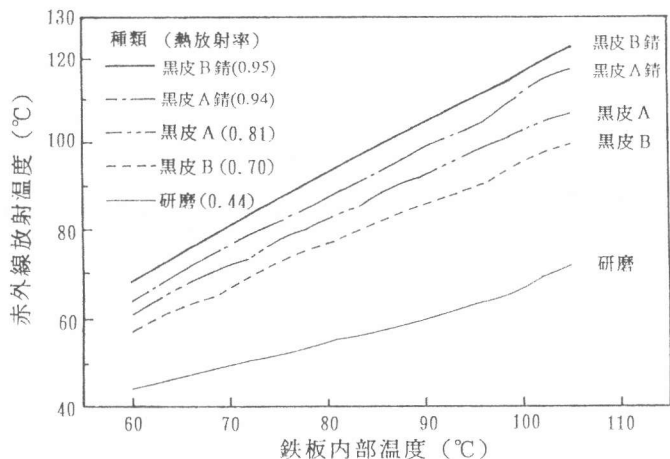


図-7 赤外線放射温度と鉄板内部温度との関係

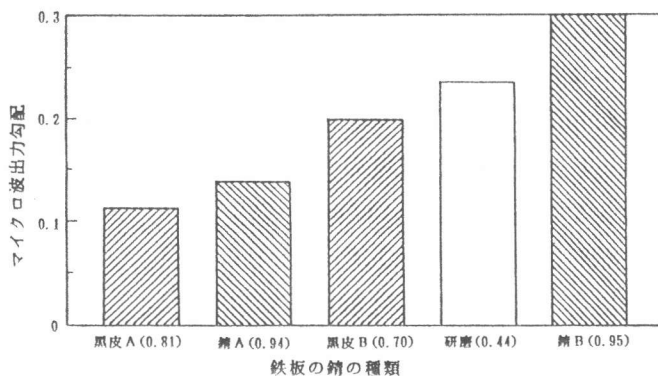


図-8 マイクロ波出力勾配と熱放射率との関係

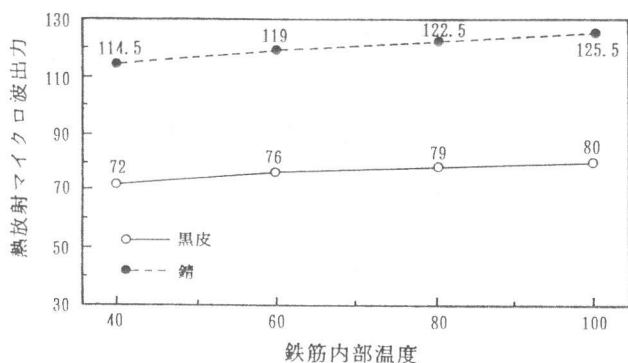


図-9 丸鋼鉄筋熱放射マイクロ波出力

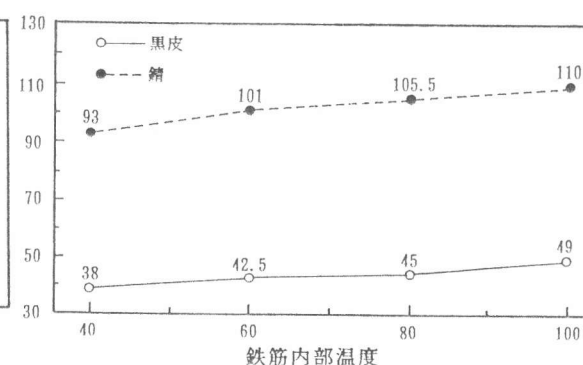


図-10 异形鉄筋熱放射マイクロ波出力

3.6 錆程度の指標

前節までに同一種類の鉄であれば、錆の程度とマイクロ波の出力勾配との間に良い相関性を見出すことができた。錆程度を表わす指標として、JCIのコンクリート構造物腐食・防食に関する基準(案)では、まず、鉄筋表面の錆を除去した後、腐食を生じた鋼材の表面形状を均一腐食と局部腐食とに分けてそれぞれ腐食評価方法を細かく定めている。本研究のねらいは、鉄筋コンクリート構造物の寿命予測をすることにあるため、鉄筋の錆によってコンクリートを剥落させるまでの錆程度を推定することにあることから、部分腐食であれ、均一腐食であれ、鉄筋の錆がかぶりコンクリートを剥落するまでの錆進行程度を知ることができれば良い。このため、本報では、上記基準案の鉄の錆侵食度を調べる手法に相当する便宜的な手法として、図-3より錆試料表面粗度比(錆試料表面粗度/同一種類の錆無し黒皮試料表面粗度)を求め、これを錆程度を表わす指標とした。

鉄の種類が異なっても錆程度とマイクロ波放射率との相関関係を一意的に定めるために、図-11は種類の異なる試料のマイクロ波出力勾配と表面粗度との関係を示したグラフである。

図-11から、錆試料のマイクロ波出力勾配を同一種類の錆のない黒皮状態の試料で除して無次元化したマイクロ波出力勾配変化率を縦軸に、錆試料の表面粗度と錆の無い黒皮試料の表面粗度との比を横軸に示した結果が図-12である。

この図から、錆の程度は熱放射によるマイクロ波出力勾配との間に一定の相関性があるとみなすことができることがわかる。

4. まとめ

本研究の結果、次のような点を明らかにすることができた。すなわち、

- (1)加熱された鉄より放射されるマイクロ波を測定することによって錆の進行程度の推定は可能である。
- (2)錆の進行程度の指標は表面粗度比でも表わすことができる。

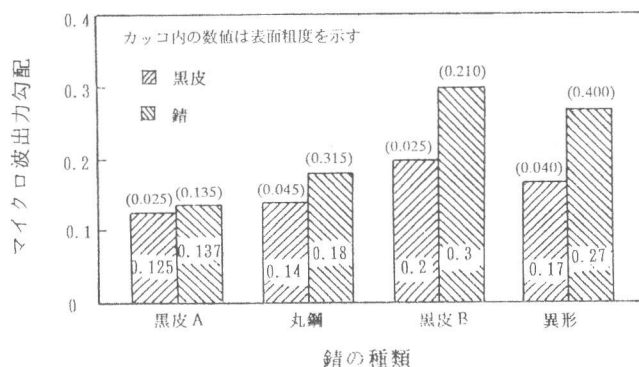


図-11 マイクロ波出力勾配と熱放射率との関係

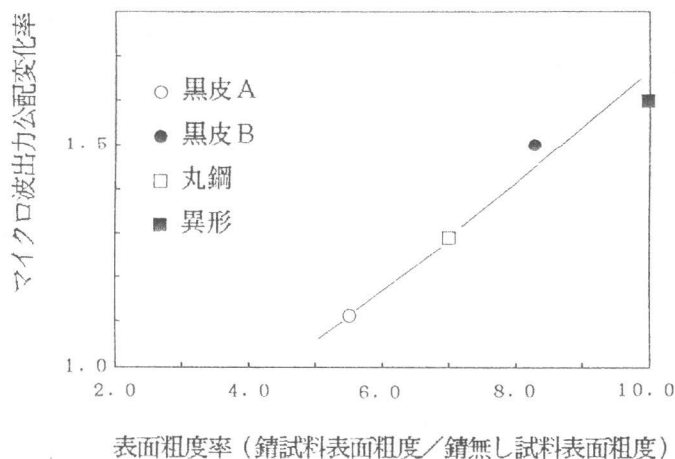


図-12 錆進行程度と熱放射マイクロ波出力勾配との関係

[参考文献] 1) 森永繁:鉄筋の腐食度に基づいた鉄筋コンクリート構造物の寿命予測に関する研究、学位論文、1986、pp.1-1~1-6

2)JCI腐食防食委員会:コンクリート構造物の腐食防食に関する試験方法ならびに基準(案)