

熱画像測定装置を用いた非接触非破壊での 鋳物表面き裂検出の検討

坂之上 悦 典*¹
服 部 悟*²

[要 旨]

鉄鋼製品におけるき裂を非破壊かつ迅速に検出する手法として、熱画像測定を適用した。その結果、シミュレーション上ではき裂の深さによりき裂が直接観測できない試料背面からでも熱分布に差異が予測された。また、圧延鋼板および鋳物に対して入熱を行い、熱画像を測定したところき裂の深さおよびアスペクト比により測定される熱画像に相違があり、き裂検出の可能性が示唆された。

1 はじめに

戦後の社会基盤の整備が進みだしてから70年以上が経過し、鉄鋼製品は当初の想定を超える長期の使用がなされている。早急な代替がなされない中、既存構成部品の損傷状況を的確に把握することは極めて重要である。素材に発生する損傷において表面き裂の発生、伝ぱが重要となるが、き裂の発生箇所が目で観測できる場所とは限らず、見えない部分のき裂の発生、伝ぱを観測することは非常に困難である。非破壊でき裂を計測する手法として、X線探傷法、超音波探傷法があるが、いずれも対象物を計測機に持ち込んだり、複雑形状での測定には熟練技術が必要であるなど、制約が多い。

その中で、対象物の熱画像を測定することにより、き裂を検出する手法^{1), 2)}が注目されている。本手法は、非接触、高速測定が可能であり、何より測定対象物近傍での現場計測が可能であるため、鋳鉄製マンホールなどの基盤的社会インフラのき裂検出を迅速に行える可能性がある。そこで鉄鋼製品におけるき裂を非破壊かつ迅速に検出する手

法として、熱画像測定を適用したので報告する。

2 試験方法

2.1 熱伝導シミュレーションにおける背面き裂検出

人工き裂を有する鋼板において、定常熱伝導状態における伝熱シミュレーションを行った。用いた試料サイズを図1に示す。中央部に所定の深さの非貫通スリットを有する2次元ステンレス鋼板を用いた。解析シミュレーションソフトとして、ANSYS ED Release 10.0を用いた。表1に、熱伝導解析に用いた境界条件等を示す。入熱面は、側面の一面だけでその他はすべて均一温度の雰囲気条件とした。

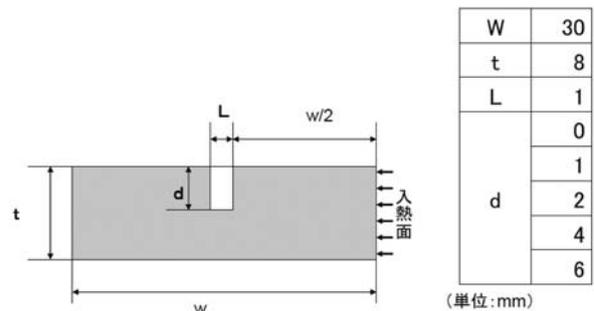


図1 熱伝導シミュレーションに用いた試料サイズ

表1 熱伝導に用いた解析条件

熱伝導	16.7 W/m·°C	雰囲気熱伝導	10 W/m·°C
比熱	590 J/kg·°C	入熱端面温度	100 °C
比重	7.93	雰囲気温度	20 °C

* 1 基盤技術課 主任研究員

* 2 基盤技術課 副主査

2.2 背面に人工き裂を有するステンレス鋼板に対する熱画像測定

ステンレス鋼板(SUS430圧延鋼 W30×L210×t8mm)に所定の深さ及び幅を有する人工き裂を導入し、平板端部を温浴した状態で、熱画像測定装置(TVS-500、日本アビオニクス株)を用いき裂を有する面と反対側より表面温度の測定を行った。なお測定表面には、熱的性状を一定とするために黒色塗料を塗った。測定状況の概略図を図2に、測定に用いた試験片の形状を図3に示す。き裂の幅及び長さを一定とし深さ方向を変化させ試験群をDと表記し、き裂の深さ及び長さを一定とし幅方向を変化させ試験群をWと表記する。

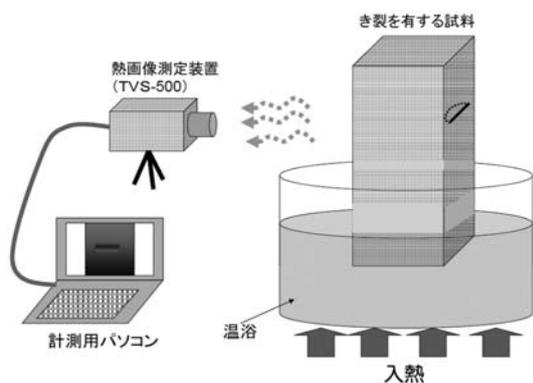


図2 熱画像測定装置を用いたき裂計測の概略図

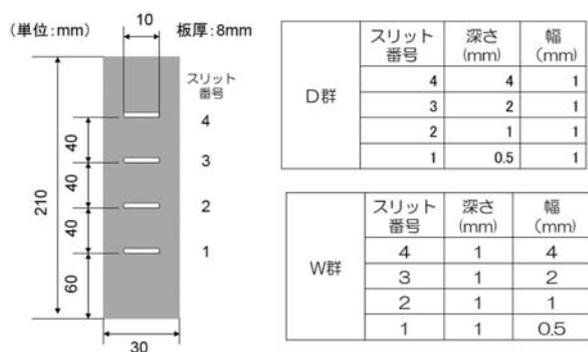


図3 熱画像測定に用いたステンレス鋼板の形状データ (D群、W群)

2.3 鋳物表面き裂に対する熱画像測定

図4に示す鋳物FC250材試験片を用い、小野式回転疲労曲げ試験機(H5型、株島津製作所)により疲労試験を行い、試験片中央部円孔部より疲労

き裂を発生させた。図2の場合と同様に、疲労き裂を有する試験片端部を温浴させた状態で、中央部円孔部付近に対し熱画像測定装置により熱画像測定を行った。その後、実際の疲労破面を確認するため、試験片を塩水中に浸し表面を腐食酸化させた後、引張試験機を用いて強制破断させた。

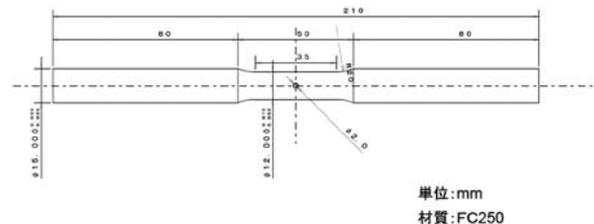


図4 回転疲労曲げ試験形状

3 結果及び考察

3.1 熱伝導シミュレーションにおける背面き裂検出

シミュレーションモデルにおけるメッシュの一例を図5に示す。き裂周辺部では、熱伝導の乱れが生じることが予想されるので、メッシュの分割を細かくした。き裂の幅を一定とし深さ方向を変化させたシミュレーション結果を図6に示す。き裂背面直下の表面温度の低下量(差分温度)とき裂深さ(無次元き裂深さ)の関係を図7に示す。

入熱面の温度が100℃と高く雰囲気温度20℃における安定時の熱分布ではあるが、無次元き裂深さが30%程度を超えると、き裂背面の温度低下が0.05℃より大きくなり、変化を検出できる可能性

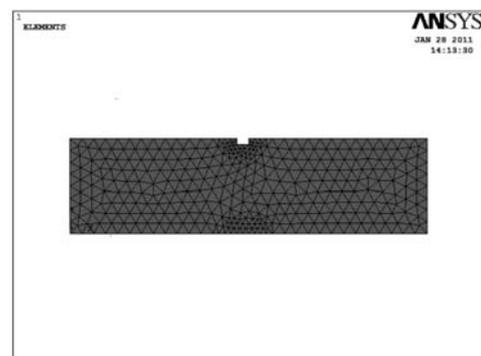


図5 熱伝導シミュレーションに用いた分割メッシュの一例

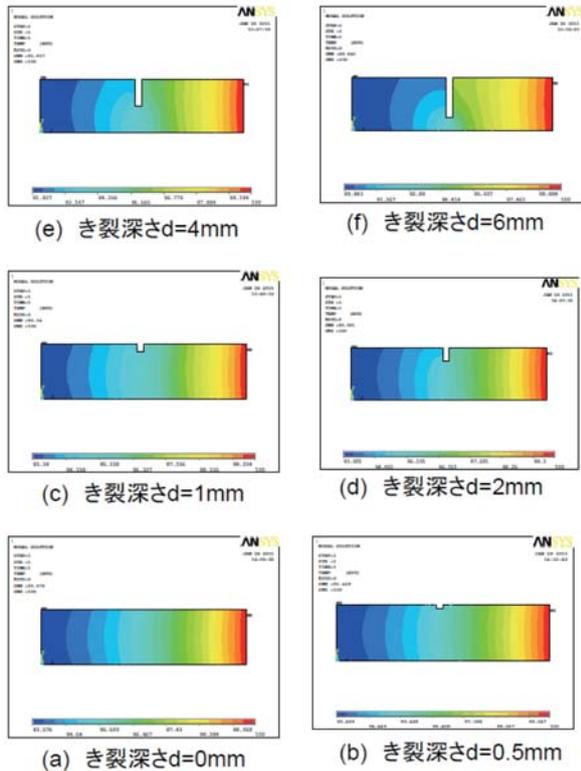


図6 き裂を有する伝熱シミュレーション
(D群：試験片：W30mm×t8mm)

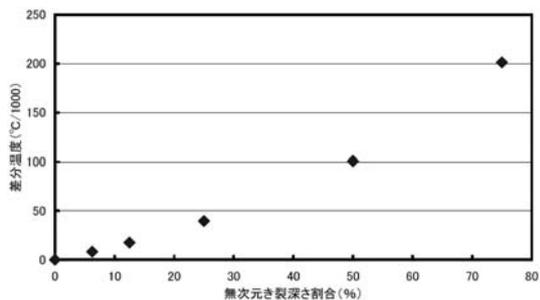


図7 無次元き裂深さ割合と差分温度の関係

があることが示唆された。

3.2 背面に人工き裂を有するステンレス鋼板に対する熱画像測定

き裂を有しない鋼板の熱画像測定の一例を図8に示す。熱は試料下部より上部へ向けて均一に移動していることがわかる。き裂の幅及び長さを一定とし深さ方向を変化させたD群の測定結果を図9、き裂の深さ及び長さを一定とし幅方向を変化させたW群の結果を図10に示す。

ここで、き裂の有無により熱量の移動量に変化

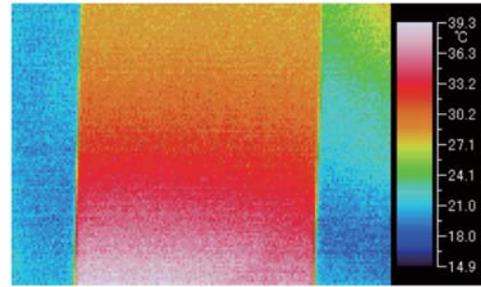


図8 き裂を有しない鋼板表面の熱画像測定例

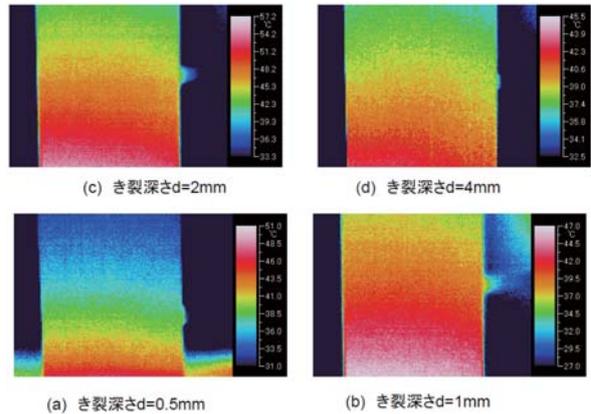


図9 き裂を有する熱画像測定
(D群：試験片：L210×W30mm×t8mm)

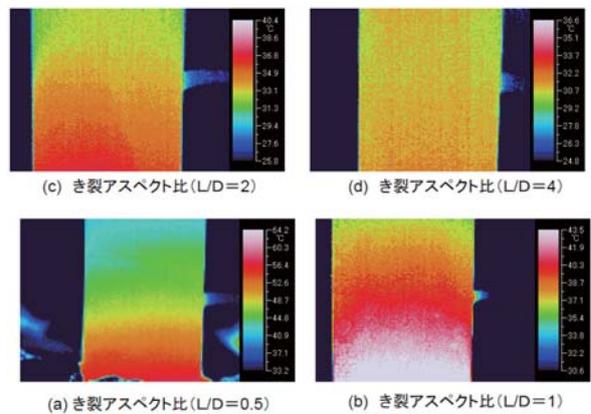


図10 き裂を有する熱画像測定
(W群：試験片：L210×W30mm×t8mm)

がないか観測するため、図11に示す貫流熱量比なるパラメータを考える。入熱源は試料端部より平行であり、熱源から見てき裂を含む方向の単位面積あたりの熱量とき裂を含まない方向の単位面積あたりの熱量との比であるのでき裂の有無による影響を評価できると考える。D群、W群に関するき裂形状と貫流熱量比の関係を図12、図13に示す。図12より無次元き裂深さ割合（き裂深さ/試料厚

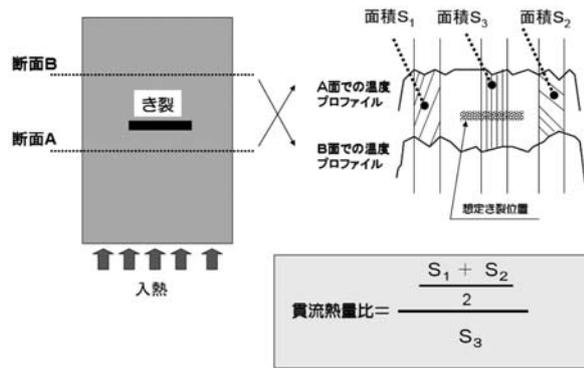


図11 貫流熱量比

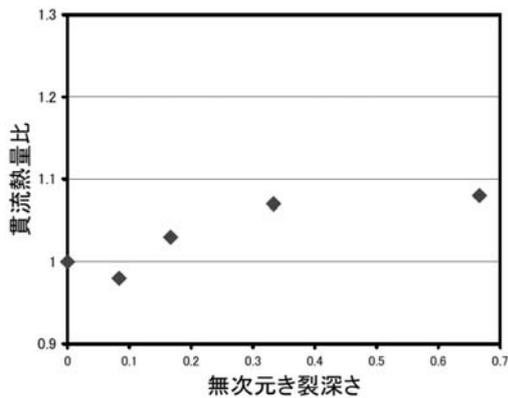


図12 無次元き裂深さと貫流熱量比

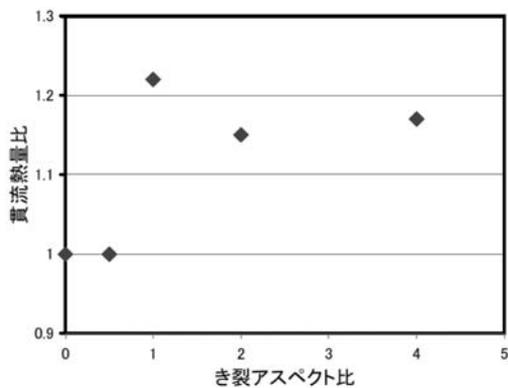


図13 き裂アスペクト比と貫流熱量比の関係

さ)が30%を超えると、貫流熱量比が1.05を超え、有意にき裂を検出することができる。

図13よりき裂アスペクト比(き裂幅/き裂深さ)が、0.5程度では貫流熱量比に差が見られないが、2.0を超えると貫流熱量比が1.15以上となり有意にき裂を検出することができる。

3.3 鋳物表面き裂に対する熱画像測定

図4に示す試料中央部に円孔を有する試験片に、

公称応力91MPaを作用させ、回転曲げ疲労試験を行ったところ、 1.43×10^5 回で破断した。この破断回数をもとに、 7.46×10^4 回まで疲労試験を実施した試料をFA、 1.28×10^5 回まで疲労試験を実施した試料をFB、 1.36×10^5 回まで疲労試験を実施した試料をFC、 1.41×10^5 回まで疲労試験を実施した試料をFDとした。疲労試験実施後の未破断試料を、図2に示すような温浴条件下で熱画像を測定した。測定結果を図14に示す。その後、各試料を引張破断させ得られた破面の写真を図15(a)~(d)に示す。図15(a)及び(d)の破面観察より、明確な疲労き裂が認められるFD-穴2-右における破面を有する熱画像と、引張強度の低下がほとんど無く、き裂の発生がほとんど認められないFA-穴1-右及び左の破面を有する熱画像について検討を行う。

き裂の発生が認められないと考えるFA-穴1では、円孔周りの熱分布がほぼドーナツ形状であるのに対し、き裂の発生が破面に認められたFD-穴2-右では、熱分布に左右の差異が見られる。詳細に見るとき裂(円孔底より約1mmのき裂が認められている)発生側の表面では、き裂の発生を明確に同定するには熱画像測定装置の分解能が十分でないにせよ、約0.1℃以下の温度変化が認められる。

4 まとめ

き裂を有する鋼板の熱伝導シミュレーションを行うとともに、熱画像測定装置を用いて、鋼板および鋳鉄鋳物に対するき裂検出の検討を行った。以下に得られた結論をまとめる。

(1)熱の流れが定常状態にあるき裂を有する鋼板に対して、熱分布の検討を行った。き裂深さによりき裂が直接観測できない試料背面からでも熱分布に相違ができることが認められた。すなわち、無次元き裂深さが30%程度を超えると、き裂背面

の温度低下が0.05°Cより大きくなり、変化を検出できる可能性があることが示唆された。

(2) き裂を有するステンレス鋼板に対してき裂をはさむ領域と含まない領域とを比較するため貫流熱量比を定義した。その結果、無次元き裂深さ割合(き裂深さ/試料厚さ)が30%を超えると、貫流熱量比が1.05を越え、有意にき裂を検出することができること、き裂アスペクト比(き裂幅/き裂深さ)が、0.5程度では貫流熱量比に差が見られないが、2.0を超えると貫流熱量比が1.15以上となり有意にき裂を検出することができることがわかった。

(3) 鋳物に疲労き裂を発生させ、熱画像を用いて表面状態を測定したところ、き裂開口を直接観測できない場合でも熱分布に差異が見られ、約0.1°C以下の温度変化が認められ、熱画像によるき裂測定の可能性を見出した。

(参考文献)

1) 阪上、西村、久保、崎野、石野、p.50-57, 第

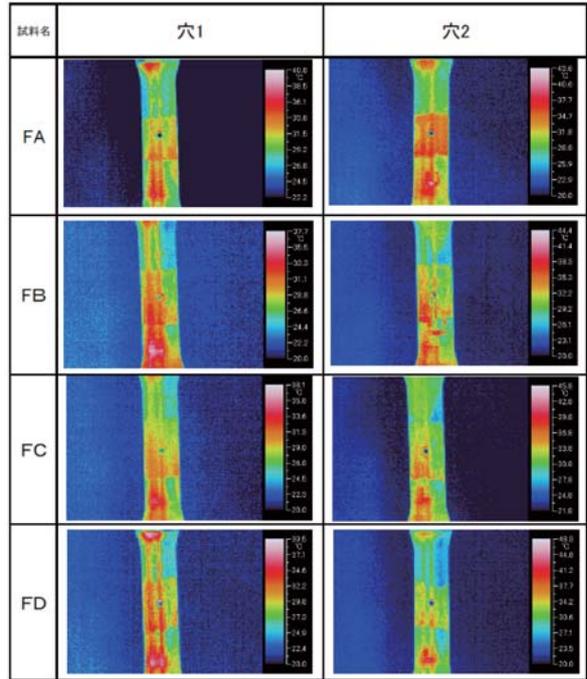


図14 疲労試験後の鋳物表面の熱画像測定

72巻724号 (2006-12), 日本機械学会論文集 (A編)

2) 渋谷, “高精度赤外線カメラ応用例”, p.1, No.16, July 2008, JFE-TEC NEWS

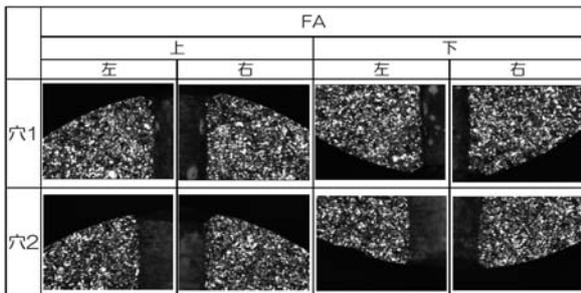


図15(a) 疲労破面 (試料FAの穴1および2)

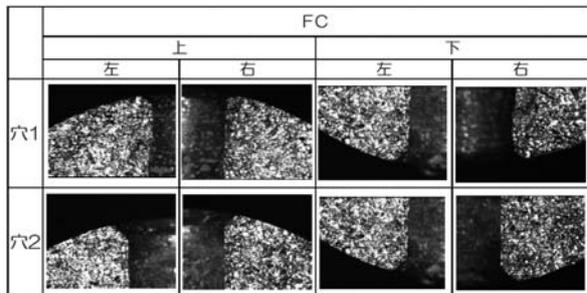


図15(c) 疲労破面 (試料FCの穴1および2)

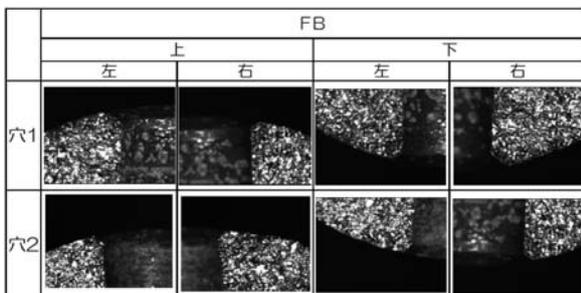


図15(b) 疲労破面 (試料FBの穴1および2)

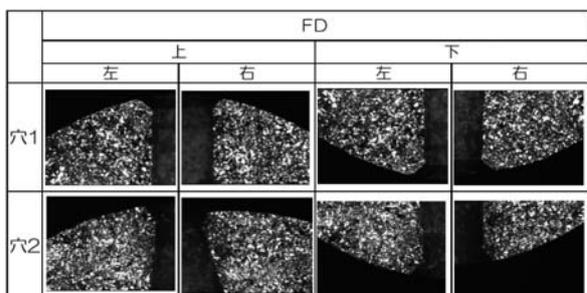


図15(d) 疲労破面 (試料FDの穴1および2)