

論文 舗装熱を利用したサーモグラフィー法による床版内部の欠陥評価と温度分布

金光 寿一^{*1}・柳内 睦人^{*2}・山本 欣徳^{*3}

要旨：近年，道路橋床版は初期欠陥・損傷・劣化の事例が数多く報告されている。しかし，その診断手法の一つであるサーモグラフィー法では，対象となる床版下面は日陰となり検出に必要な熱源の確保が問題となっている。そこで，本研究ではアスファルト改修工事時の舗装熱を熱源として床版内部の各種変状部と表面温度の関係を検討した。その結果，舗装熱の熱伝達から熱画像には欠陥の傾きに対応した表面温度分布が確認され，内部に潜在する欠陥，表面に接している欠陥を判別できることが確認された。舗装熱を利用する有効性は，パッシブ法との比較，非定常熱伝導解析から明らかにしている。

キーワード：サーモグラフィー法，舗装熱，道路橋床版，欠陥検出，非定常熱伝導解析

1. はじめに

近年，道路橋RC床版は施工不良，交通条件及び環境条件の変化などを要因とする初期欠陥・損傷・劣化の事例が数多く報告され，維持管理の面からモニタリング体制の構築が望まれている。その診断手法の一つであるサーモグラフィー法では，日射量及び外気温の変動を利用したパッシブ法と各種人為的な加熱や冷却を利用するアクティブ法から層状剥離などの内部空洞・空隙部の検出が行われている。しかし，対象となるRC床版下面は日陰となるためにパッシブ法では変状部との温度差が期待できず，また，アクティブ法では加熱や冷却範囲が制限されるために温度むらから起こる検出精度や足場の設置経費に問題を残している。さらに，鉄道交差部などアクティブ法が適用できない橋梁も数多く存在している。既に筆者らは，これらの問題点を解決できる熱源の確保として，アスファルト舗装時における舗装熱の利用を提案し，パッシブ法との比較から検出できる欠陥の大きさや深さに，また検出可能となる許容時間にも有効であることを明らかにしている¹⁾。しかし，実橋梁

の診断を想定した場合，得られた熱画像の表面温度変化から変状部のみを確実に抽出するためには，欠陥・損傷・劣化から発生した多種多様な内部変状と表面温度分布の関係を明確にしておく必要がある。

そこで，本研究では欠陥・損傷・劣化から発生した層状剥離などの傾きを有する変状部を想定し，舗装熱の熱伝達から各種変状部(以下，欠陥と記す)と表面温度分布の関係を明らかにしたものである。舗装熱を利用した本手法の有効性については，外気温の変動を利用したパッシブ法との比較及び三次元非定常熱伝導解析から検証した。

2. 実験概要

本実験は，欠陥の大きさ及び厚さは一定として欠陥の傾きのみを変化させて欠陥検出が可能となる開始時間，最適な検出時間及び検出許容時間について健全部との温度差から検討した。

2.1 試験体及び欠陥の形態

実験に供したコンクリート試験体は，500×500mmの正方形で，厚さは200mmである。RC床版

*1 中央工学校 土木測量学科講師 工修 (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 三島市役所

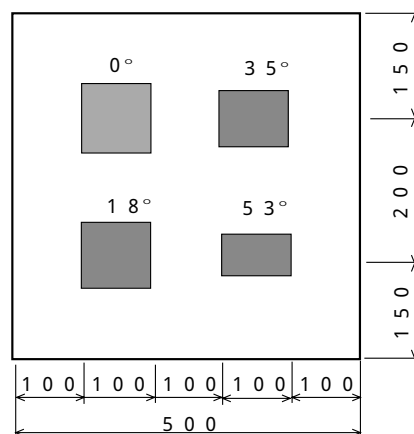
表-1 欠陥の形態

欠陥記号	欠陥傾き (°)	欠陥寸法(mm)		中心深さ (mm)
		大きさ(水平)	厚さ	
SF-0	0	100	3	40
SF-18	18	95		
SF-35	35	82		
SF-53	53	60		

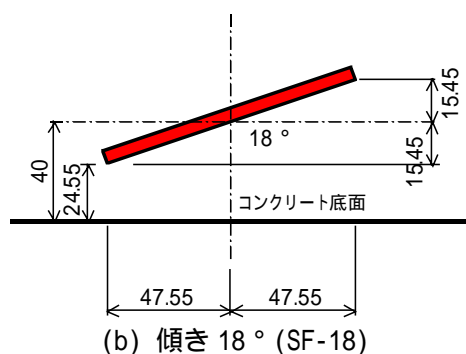
内部の空洞・空隙を想定した擬似欠陥は、発泡スチロールを加工して、コンクリート下面から40mm(表面間寸法)の位置を中心として傾きを与えた。その大きさは100×100×3mmの直方体とし、傾きを0°(水平)、18°、35°、53°(表面に接触)の4種類とした。なお、試験体は測定面以外からの熱の流入を遮断するため、側面には厚さ50mmの発泡スチロールを貼付けている。また、舗装箇所は500×500mmの試験体に対して内寸480×480mmの木枠を作製し、その木枠内に舗装した。傾きを変えて作製した欠陥一覧を表-1に、その欠陥位置と傾きを図-1(a)～(c)に示す。なお、欠陥記号SFの後の数字は欠陥の傾きを示す。また、図-1(a)に示す欠陥の傾きは図の下側が開いた方向である。

2.2 アスファルト舗装

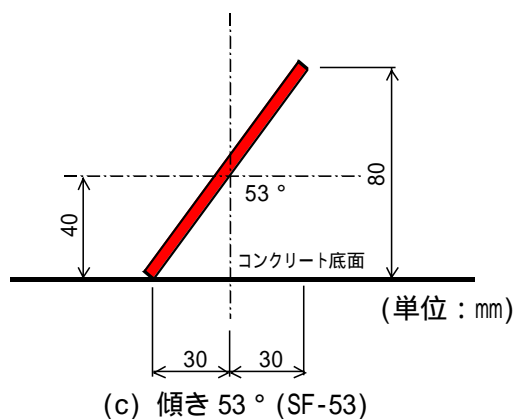
試験体への舗装は、近年RC床版に採用されている防水工、砕石マッシュク舗装(SMA)及び排水性舗装の2層仕上げを想定し、繰返して実験を行うためにISO標準砂を代用して温度管理を行った。その温度管理では、気象条件及び施工条件によってかなり温度降下が異なることが予測されるが、本実験では、SMA舗装及び排水性舗装の舗装時の温度である160～165が2次転圧終了温度60に降下するまでの時間を、概ね3時間前後になるように設定し、砂上を断熱材で覆うことで調整した。また、表層を想定した2層目は、60に降下した時点で舗装し温度管理方法は1層目と同様に行った。そのISO標準砂の厚みは、1層が80mm、2層が60mmである。なお、コンクリート表面には、実橋梁施工で行われているエポキシ樹脂プライマー処理後にシート系の防水加工を施している。



(a) 欠陥位置



(b) 傾き 18° (SF-18)



(c) 傾き 53° (SF-53)

図-1 試験体及び欠陥の形態

2.3 熱赤外線センサによる測定方法及び条件

熱赤外線センサ〔2次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域8.0～14.0μm、感度0.15(at30)〕による温度測定は、高さ2.0mのL形鋼で試験体を支え、測定距離1.35mの真下の位置からパッシブ法では8月29日の9:00-21:00までの12時間を、また舗装熱では8月7日の10:00～20:00までの10時間を10分間隔で熱画像を得ることにした(写真-1参照)。その試験体下面の測定面は、500×500mmの試験体に対して400×400mmの範囲である(図-1(a)参照)。なお、試験



写真-1 測定状況

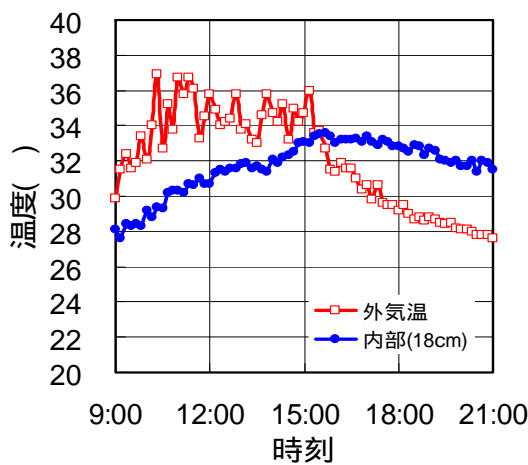


図-2 外気温及び内部温度変化

体が小さく時々刻々変化する日射角の影響から測定面に温度むらが起こることが予測されるため、試験体周囲をシートで覆うことで対応している。

3. 実験結果

3.1 パッシブ法で得られた熱画像

図-2 は、測定時の外気温と熱電対を埋め込んで測定した試験体下面より 2cm(上面より 18cm)の位置の内部温度である。また、写真-2 には欠陥部 SF-0 と健全部間で最も大きな温度差を示した 11:50 の熱画像を示す。

その結果、外気温は測定を開始した 9:00 から最大温度差となった 11:50 までに約 6 程上昇し、15:00 頃には内部温度(下面より 2cm)と逆転している。この頃から内部に蓄積された熱が下

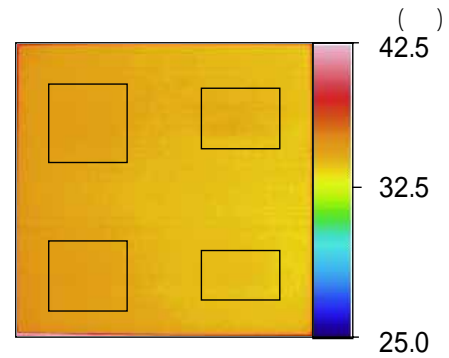


写真-2 パッシブ法の熱画像(11:50)

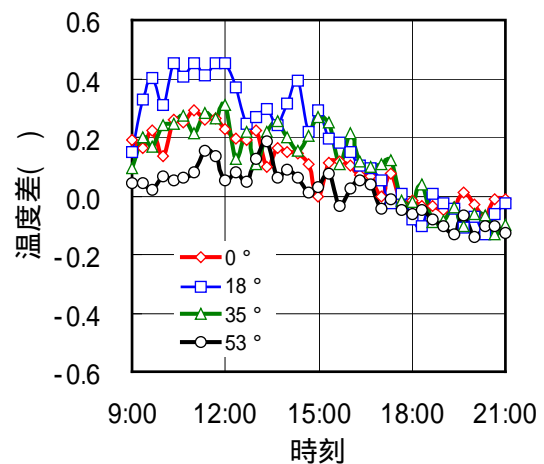


図-3 温度差の時系列変化

面から放射され始めるものと思われる(図-2 参照)。その写真-2 に示す最大温度差の熱画像では、温度分布が一様であり各欠陥部を視覚的に確認することは困難である。既往の研究¹⁾においても β 程度の上昇温度では深さ 20mmに水平に設置した欠陥部 100×100×5mmは視覚的に検出可能なものの、40mmに位置する欠陥部を検出することは困難となっている。このことから欠陥部SF-53 は表面に接しており検出可能と思われたが、図-1(c)に示すように傾きを有すること、水平寸法が 60mmと小さくなったことなどから欠陥部下面に蓄積される熱量は期待できないものとする。図-3 に各欠陥部と健全部との温度差を示す。なお、この温度差は各欠陥部の大きさ(水平寸法)内で得られた画素温度の平均から健全部(試験体中央部 50×50 mm)の温度を減算したものである。

そのパッシブ法の欠陥評価では、気温の上昇時は空洞・空隙を有する欠陥部の表面温度が健

全部より高温域を示すことになるが、温度差は欠陥の3要素である大きさ、厚さ、深さによって異なり、最も大きな温度差を示したSF-18の11:50で0.42であった。

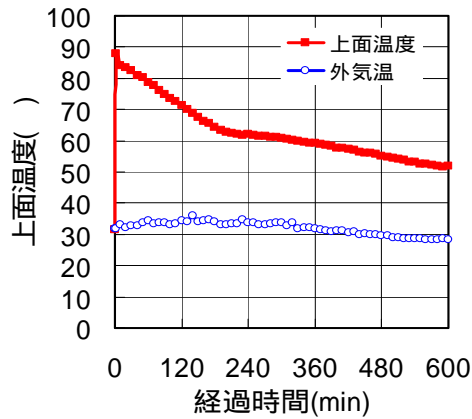


図-4 コンクリート上面温度及び外気温

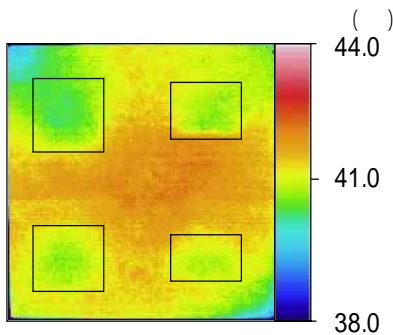


写真-3 舗装熱の熱画像(420分経過後)

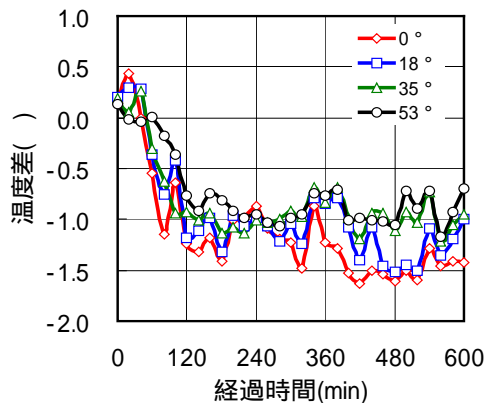


図-5 温度差の時系列変化

3.2 舗装熱で得られた熱画像

図-4 は舗装熱から得られたコンクリート上面温度(プライマーと防水工間)及び外気温を熱電対で測定した時系列変化である。測定日の天候

は晴後曇りで、測定を開始した10:00(経過時間0分)の外気温(試験体下面で測定)は31.7 測定を終了した20:00は28.5 であり、平均風速は1.2m/secであった。写真-3に最大温度差が得られた1層舗設後420分の熱画像を示す。また、図-5には各傾きを有する欠陥部と健全部との温度差を時系列で示す。

その結果、パッシブ法と舗装熱の熱画像を比較すると、側面に貼付けた断熱材の不良から若干温度むらが生じているものの、各欠陥部の位置には傾きに対応した低温域を確認することができる。視覚的に欠陥を検出できる温度差は、熱赤外線センサの温度分解能(使用機種:0.15)の感度に影響されるが、これらの時系列な熱画像と図-5に示す温度差とを比較すると確実に検出するためには±0.5程度は必要と思われる。図-3に示すパッシブ法では全て±0.5以内となっているのに対し、舗装熱では-0.5となる約100分経過後から測定を終了した600分後まで長時間検出可能であることが分かる。

4. 数値シミュレーション

三次元非定常熱伝導シミュレーションには、汎用FEMプログラムを使用して、コンクリート上面からの舗装熱に対し、欠陥の傾きがコンクリート下面の温度変化にどのように影響を及ぼすかを検討した。

4.1 解析モデルと解析設定条件

解析モデルは図-1(a)~(c)に示す断面を要素分割した。基層及び表層の舗装熱を想定した熱負荷条件及び外気温は、図-2で得られたコンクリート上面温度及び外気温を直接供給した。解析条件²⁾を表-2に示す。また、コンクリート表面と外気との冷却条件である熱伝達係数は、シミュレーションを繰返して実験値の健全部の表面温度に最も近似した $21.0W/m^2 \cdot K$ の一定値とした。ただし、試験体側面は完全断熱境界とし、コンクリートの初期内部温度は31.7、解析時間間隔は5分 結果の出力は10分間隔で行った。

表-2 解析条件

材料	密度 (kg/m ³)	比熱 [kJ/(m ³ ·K)]	熱伝導率 [W/(m·K)]
コンクリート	2,200	0.876	1.4
発泡スチロール	28	1.009	0.0556

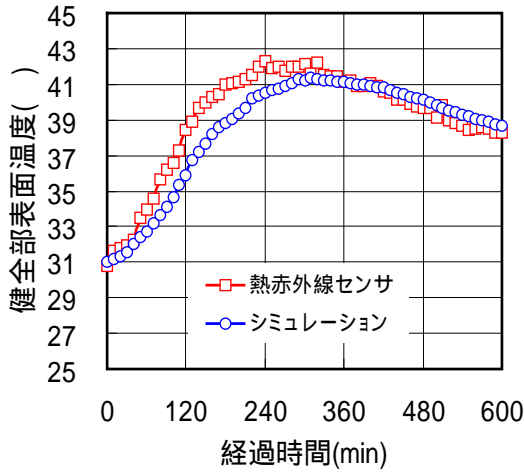


図-6 実験値と解析値の比較(健全部)

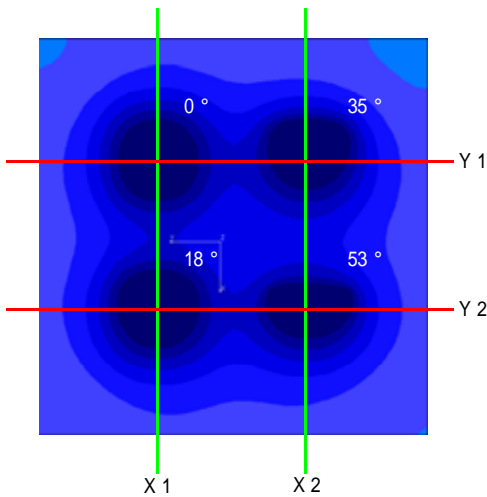
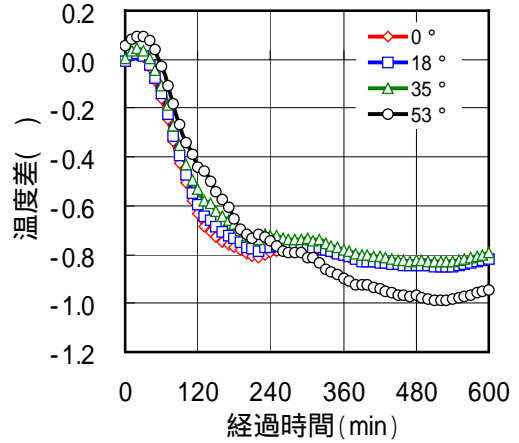


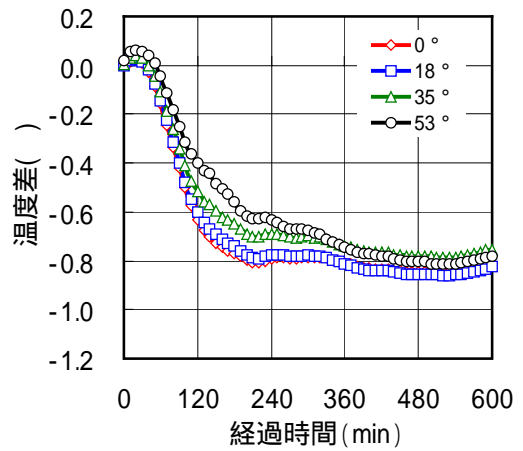
図-7 表面温度分布画像(520分後)

4.2 数値シミュレーション結果

図-6 は実験及びシミュレーションで得られた健全部の表面温度を比較したものである。実験で得られた健全部の表面温度は、写真-3に示すように不均一なISO標準砂の攪拌及び舗設の不具合や側面の断熱材の不完全さなどの影響から中央部のみが若干高温域となっており、シミュレーションとでは240分経過後で1.6の温度差が生じている。シミュレーションでは、実験値で最大温度差が得られた420分経過時前後の推移に一致させることで熱伝達係数を設定してい



(a) X1 及び X2 断面

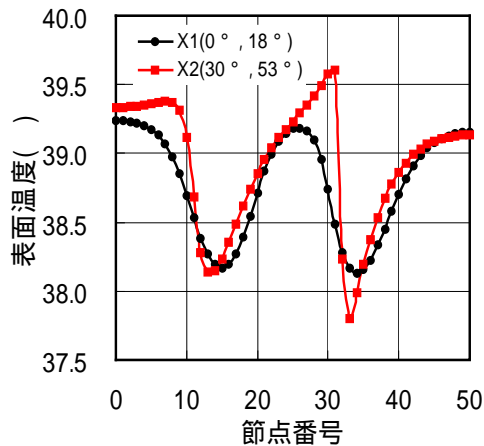


(b) Y1 及び Y2 断面

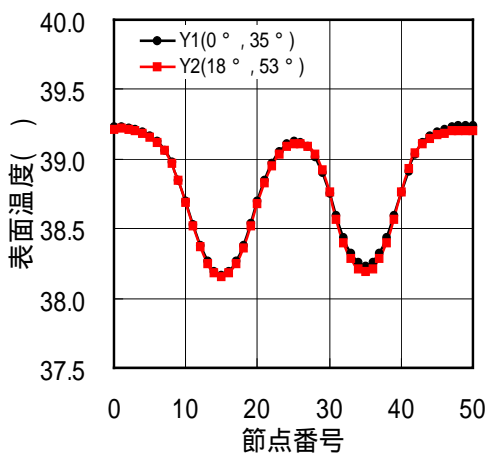
図-8 温度差の時系列変化

る。図-7に最大温度差となった520分経過後の表面温度分布画像を示す。図の欠陥形態は、X1及びX2の表示方向(図の下側)が各欠陥の傾きが開いた方向で、図ではその傾きに対応した低温域を確認することができる。図-8(a),(b)にはX1及びX2断面、Y1及びY2断面の各欠陥部と健全部との温度差を示す。なお、この温度差は図-5で示した実験値の各欠陥部の平均温度と健全部との差分ではなく、図-7で示すX1及びX2、Y1及びY2で切断した各欠陥部の節点の平均温度と健全部との差分として示している。

その結果、図-8(a)に示すX1及びX2断面ではコンクリート下面に接しているSF-53は2層目(表層)の熱伝達が始まる300分後から急激に温度差が大きくなり、520分後に最大温度差を迎えている。一方、図-8(b)に示すY1及びY2断面では、SF-0は図-8(a)に示すX1断面と同様



(a) X1 及び X2 方向



(b) Y1 及び Y2 方向

図-9 表面温度分布変化(520分後)

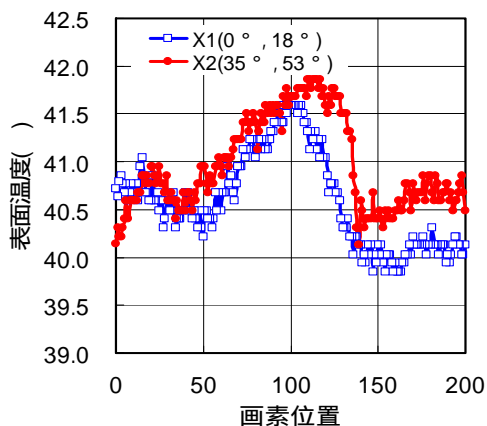


図-10 実験で得られた表面温度(420分後)

の温度分布を示し、SF-53 は水平寸法が他の欠陥より短く、熱拡散によって伝達熱が欠陥部下面により廻り込むために温度差は小さくなっている。図-9(a),(b)に X1, X2 及び Y1, Y2 断面を切断して得られた表面温度変化を示す。また、

図-10 には、同様に写真-3 を切断した実験の表面温度変化を示す。この図-9(b) に示す節点 10 ~ 20 及び 30 ~ 40 が欠陥寸法 100mm を示している。

その結果、温度変化は図-9(a) 及び図-10 からコンクリート内部に潜在する欠陥部は滑らかな放物線を示し、下面に接している SF-53 は健全部との境界で急激に変化していることが分かる。また、欠陥の傾きに対応した温度変化の勾配となっており、X 及び Y 断面の温度分布変化を比較することで内部に潜在する欠陥か、表面から発生している欠陥か、さらにその傾きも評価することが可能である。

5. まとめ

舗装熱を利用した床版内部の欠陥検出では、多種多様な欠陥部を想定して深さ 40mm の位置を中心に傾きを与え、パッシブ法との比較から本手法の有効性を確認した。本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) パッシブ法では、床版下面は日陰となるために欠陥部と健全部との温度差が ± 0.5 以内となり、視覚的な検出は困難である。
- (2) 舗装熱では、各欠陥部の温度差が -0.5 以下となりパッシブ法と比較して有効な熱源となりうる。
- (3) シミュレーションでは、舗設後ほぼ 100 分後から 8 時間以上も検出可能な時間が確保できる。
- (4) 表面温度分布の変化量及びパターンは、欠陥の傾き方向及びその角度に対応して異なり、表面から発生している欠陥部と内部に潜在している欠陥部を判別できる。

参考文献

- 1) 金光寿一, 柳内睦人, 三星智典: 舗装熱を利用したサーモグラフィー法による RC 床版内部の欠陥検出に関する研究, 土木学会論文集, No.732, V-59, pp.95-108, 2003.5
- 2) 日本機械学会編: 電熱工学資料, pp.317-322, (社)日本機械学会, 1986.10