

背景反射の除去手法を用いた
赤外線サーモグラフィ試験

防衛大学校理工学研究科後期課程

装備・基盤工学系専攻 装備生産工学教育研究分野

鈴木 総司

令和2年12月

目次

第 1 章 序論	1-15
1. 1 社会的背景と非破壊検査	1
1. 2 赤外線サーモグラフィ試験	2
1. 3 背景反射の問題に対する過去の研究	5
1. 4 研究目的および本論文の構成と独創性	7
参考文献	9
第 2 章 偏光理論を用いた背景反射の除去	16-68
2. 1 緒言	16
2. 2 絶縁物に対する背景反射の低減および除去	16
2. 2. 1 絶縁物の偏光理論	17
2. 2. 2 絶縁物に対する背景反射の低減およびきずの識別	20
(1) 絶縁物の屈折率の取得	20
(2) 絶縁物の偏光反射率の測定	22
(3) 絶縁物の偏光放射率の測定	27
(4) 絶縁物の識別方法および検証実験	28
2. 2. 3 絶縁物に対する Brewster 角を用いた反射の除去	39
(1) Brewster 角における背景反射除去の検証	39
(2) 非破壊検査への適用	41
2. 2. 4 絶縁物に対する背景反射の定量的な分離除去	43
(1) 定量的な分離アルゴリズムの構築と実施手順	43
(2) 定量的分離手法の検証実験	48
a) 平板に対する実験	48
b) 円管に対する実験	51
2. 3 金属に対する背景反射の低減および除去	55
2. 3. 1 金属の偏光理論	55
2. 3. 2 金属に対する背景反射の低減およびきずの識別	56
(1) 金属の偏光反射率の測定と消衰係数および屈折率の決定	56
(2) 金属の偏光放射率の測定	57
(3) 金属の識別方法および検証実験	59
2. 3. 3 金属に対する背景反射の定量的な分離除去	62
2. 4 偏光理論を用いた背景反射除去方法の限界と注意点	64
2. 5 結言	66

参考文献	66
------------	----

第3章 コンクリートに対する位相解析法を用いた検査および背景反射の除去69-97

3. 1 緒言	69
3. 1. 1 パルスフェーズサーモグラフィ法	69
3. 1. 2 パルスフェーズサーモグラフィ法の問題点	72
3. 2 逐次データを利用した位相解析手法の提案	73
3. 2. 1 数値実験による温度変化と位相変化の観察	73
3. 2. 2 逐次データを利用した位相解析手法	82
3. 3 背景反射除去に対する数値解析による検証	85
3. 4 背景反射除去に対する実験による検証	88
3. 5 結言	95
参考文献	96

第4章 ポリビニルアルコール（PVA）フィルムおよび塗料を用いた背景反射の低減98-124

4. 1 緒言	98
4. 2 PVA フィルムを用いた背景反射の低減	99
4. 2. 1 PVA フィルムの放射率の測定	99
(1) PVA フィルム	99
(2) FT-IR による PVA フィルムの分光放射率の測定	100
(3) 測定誤差の影響と下敷き材の選定	102
(4) 分光放射率の測定結果	103
a) 厚さが異なる場合	103
b) ケン化度が異なる場合	105
(5) 赤外線サーモグラフィ装置による放射率の測定	107
4. 2. 2 非破壊検査の検証実験	108
4. 3 PVA 塗料を用いた背景反射の低減	112
4. 3. 1 PVA 塗料	112
4. 3. 2 PVA 塗料の気化による温度変化	112
(1) 気化熱の測定方法	112
(2) 測定結果および考察	113
4. 3. 3 FT-IR による PVA 塗料の分光放射率測定	115
(1) 分光放射率測定用の試験片作製と測定	115
(2) 分光放射率の測定結果	115

a)	厚さが異なる場合	116
b)	ケン化度が異なる場合	117
4. 3. 4	非破壊検査の検証実験	118
(1)	気化熱を利用したきず検知	118
(2)	塗布後の放射加熱によるきず検知	120
4. 4	PVA フィルム・塗料の黒体化処理効果	121
4. 5	結言	122
	参考文献	123

第 5 章	結論	125-128
--------------	-----------------	----------------

謝 辞	129-130
------------------	----------------

研究業績	131-133
-------------------	----------------

第1章 序 論

本研究は、赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の除去を目的としたものである。

本章では、まず、研究分野に関する社会的背景と非破壊検査の重要性を説明する。その後、本研究対象の赤外線サーモグラフィ試験について述べ、試験時に外乱として問題となっている背景反射を解説する。次に、背景反射を扱う過去の研究について調査、整理し、続いて解決すべき研究課題を示す。最後に本研究の目的および構成を示す。

1. 1 社会的背景と非破壊検査

経済活動の経費削減や地球規模での環境維持の為に、物を長く、安全に使うことを目的に非破壊検査が行われてきた。非破壊検査とは、材料、機器、設備および構造物などを破壊することなく、きず（欠陥）や劣化部分を検出する手法であり、これらの製造時や維持管理の段階における健全性検査に欠かせない技術である。非破壊検査は、目的に応じて主に2種類の手法、きずの検出とひずみの測定に分けることができ、さらに検査対象やきずの種類・形態・条件に応じて選択する。図 1-1 に非破壊検査の種類の一部を示す。きずの検出の種類は、放射線透過試験、超音波探傷試験、目視試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、渦電流探傷試験、および赤外線サーモグラフィ試験などがある。ひずみ測定は、ひずみゲージ法、光弾性法、熱弾性応力測定法などがある¹⁾⁻⁴⁾。

これらの検査は、それぞれに利点および欠点があり、そのため検査対象物、検査環境、用途などによって最適な検査を行っている。検査対象物は、多種多様であり、また、使用条件も高温、高速、高負荷と厳しく、内容も腐食性、放射性、引火性、爆発性などの危険性が高いものもあり、品質の管理、確保や維持、安全な操業や稼働寿命の延伸などに役立っている。そのため、各検査方法に対し、高精度化、高効率化、新たな検査対象物への適応などの研究が行われている。

なお、本論文において、試験で検知される異常部を、一般的な呼称の「欠陥」ではなく、非破壊試験用語に則り「きず」と表現する。JIS Z 2300⁵⁾の定義である、「きず」とは非破壊試験の結果から判断される不完全部又は不連続部のことであり、「欠陥」は規格、仕様書などで規定された判定基準を超え、不合格となるきずである、に従うものとする。

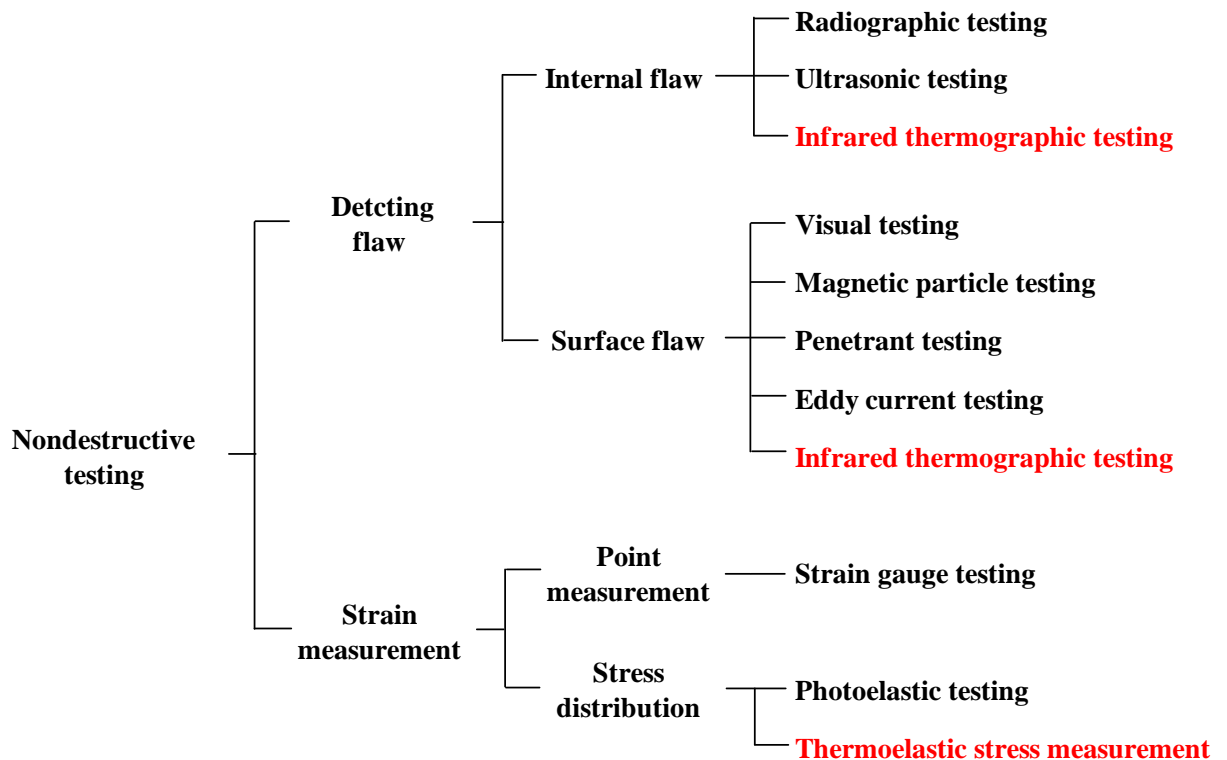


図 1-1 非破壊検査の種類

1. 2 赤外線サーモグラフィ試験

様々な非破壊検査手法の中で、赤外線サーモグラフィ試験は、安全性・簡便性・高速性等の特長から注目され、普及が進められてきている⁶⁾⁻¹²⁾。赤外線サーモグラフィ試験とは、検査対象物から放射する赤外線を赤外線サーモグラフィ装置で取得し、表面温度分布の違いからきずを検出するものである。赤外線は電磁波の一種であり、日本非破壊検査協会規格 NDIS 3005 赤外線サーモグラフィによる非破壊試験の標準用語¹³⁾では、波長が可視光より長く 1mm より短い電磁波と定義されている。赤外線の区分けは 3 つあり、近赤外線 (0.75 μm ~2.5 μm)、中赤外線 (2.5 μm ~8 μm)、遠赤外線 (8 μm ~1000 μm) に分かっている。近年では 30 μm ~1000 μm の領域をテラヘルツ波と呼び、非破壊検査の分野でも研究が盛んに行われている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

一般的な赤外線サーモグラフィ装置の使用波長帯域は、主に短波長形(注：本論文中では JIS 規格 5)の表記に従い型ではなく形を用いる)と長波長形の二種類がある。短波長形の波長帯域が約 3~5 μm 、長波長形の波長帯域は約 8~14 μm である。これは空気中の透過率の高い大気の窓という領域を使用しているためである。短波長形装置の主な検出器は、量子形である。使用する波長帯域の特徴として、太陽光反射の影響が大きく、室温反射の影響が比較的小さい。また、大気の吸収がやや大

きいことが上げられる。装置の特徴としては、検知器の冷却が必要であること、感度が高く応答速度が速いが波長依存性を有することなどがある。また、一般的に高価格である。一方、長波長形装置の主な検出器は、熱形であり、使用する波長帯域の特徴として太陽光反射の影響が小さく、室温反射の影響が大きい。装置の特徴としては、検知器の常温動作が可能であり、大気の吸収が小さく、感度の波長依存性がないが、量子形と比較して感度が低く、応答速度が遅いことなどが上げられる。また、一般的に低価格である。近年、赤外線サーモグラフィ装置は、研究と企業努力により短波長形では高速化、高画素化、長波長形では軽量化および低価格化が進んでいる。無人航空機の性能向上や赤外線サーモグラフィ装置の軽量化により、無人航空機への搭載が容易になり、より広い範囲を検査できるようになっている^{17),18)}。

きずの検出原理については、測定対象物に熱移動が生じている時のきずによる断熱温度場を検出する方法、きず部位における自己発熱（吸熱）による温度場を検出する方法、空洞放射効果による見かけの温度変化部位を検出する方法、の3種類に大別できる⁶⁾。以下にそれぞれの検出原理を説明する。

・断熱温度場法

最も一般的に用いられる方法である。測定面が加熱された時、空気層などのきず部が熱流の伝達を遮る断熱効果を利用し、測定面に現れた健全部ときずの温度差を見分けて、きずを検出する。図 1-2 に測定物の内部はく離状況での測定の一例を示す。

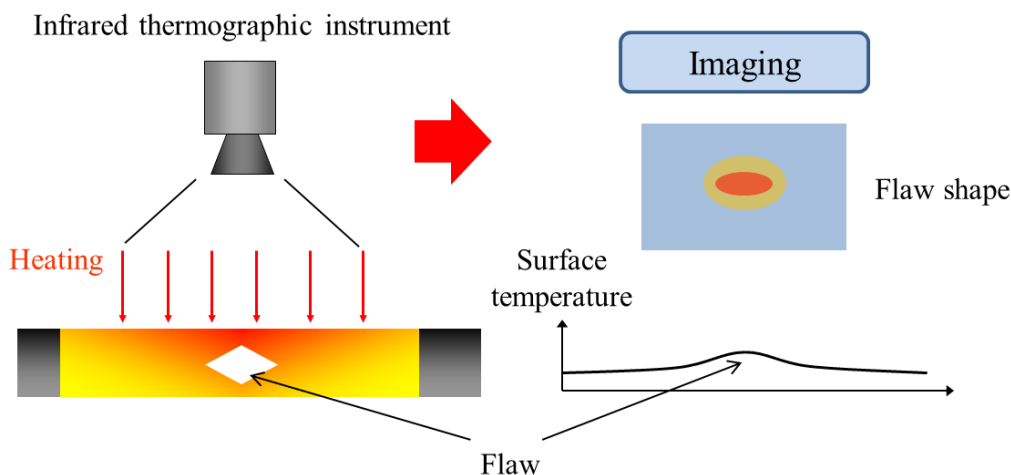


図 1-2 測定物の内部はく離状況での測定の一例

- ・自己発熱温度場法

積層材料内の氷による吸熱や電気設備の接触不良による電気抵抗変化などによる自己発熱（吸熱）を測定し、きずを検出する。

- ・空洞放射効果法

測定面に空洞状のきずがあった場合、空洞きずの部位については空洞放射効果により放射率が高くなる。よって赤外線サーモグラフィ装置で撮像すると、健全部よりも空洞きずのほうが、見かけの温度が高くなる。その温度差を利用し、きずを検出する。

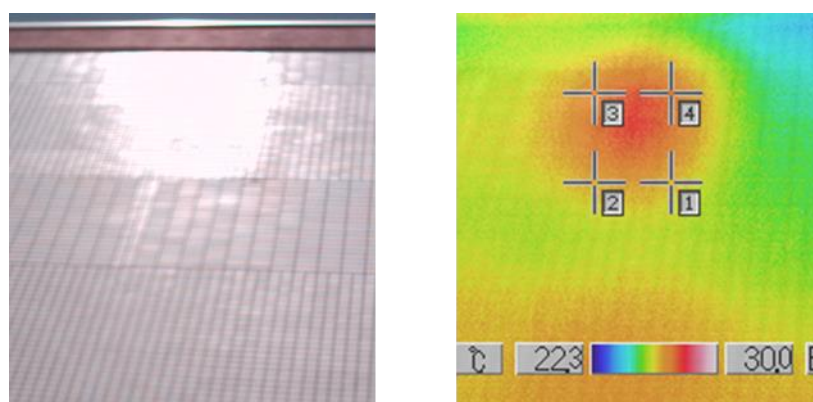
赤外線サーモグラフィ試験の分類として、アクティブ法およびパッシブ法がある。アクティブ法とは、何らかの方法で測定対象物に熱負荷を人工的に与え温度変化を利用する方法である¹⁹⁾⁻²²⁾。キセノンランプ、フラッシュランプ^{23),24)}、レーザー²⁵⁾⁻²⁸⁾や超音波²⁹⁾など検査対象によってさまざまな種類が用いられる。一方、パッシブ法とは、太陽光や外気温の自然変動などにより生じた測定対象物の温度変化を利用する方法である³⁰⁾。

赤外線サーモグラフィ試験は、非接触かつ遠距離から検査ができるため、建築物の検査では足場やゴンドラ等の設備を必要としないこと、広範囲を少人数で短時間に検査できること、検査結果を視覚的に判断し記録できること等の特長を有する。また、赤外線領域の波長帯域を用いるため人体に安全であるという特徴がある。そのため、宇宙および航空機関連³¹⁾⁻³⁵⁾、発電施設^{36),37)}、鉄道関連^{38),39)}、橋梁^{40),41)}、道路⁴²⁾、建築物⁴³⁾、美術品¹⁴⁾など、様々な場所で使用する。対象材料も様々で、CFRPなどの複合材料に対する亀裂・はく離の検知⁴⁴⁾、コンクリートの空孔・はく離の検知⁴⁵⁾、金属のジョイントの接合不良の検知^{46),47)}などがある。また、赤外線サーモグラフィ試験に関連して、金属などの熱弾性効果を利用した応力や疲労強度の評価ができる^{48),49)}。さらに、赤外線サーモグラフィ試験の技術は、画面表示の温度差から異状を見分けるといった観点から、防犯などに用いる人の認識⁵⁰⁾や人の体表温の測定⁵¹⁾⁻⁵⁴⁾などの分野に応用することができる。そして、赤外線サーモグラフィ装置の能力向上や補正方法⁵⁵⁾、深層学習の導入による検査負担の軽減⁵⁶⁾⁻⁶³⁾、有限要素法を用いた定量的な評価⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾等の研究が進んでおり、きず検知に対する信頼性が向上している。

このように多くの利点があり幅広い分野で使用されている赤外線サーモグラフィ試験だが、欠点もある。それは、気象、時間、周囲環境による制約があること、温度ムラ、検査者の知識・経験不足による誤検知の可能性があること等が挙げられる。検査者に対しては、一般社団法人日本非破壊検査協会が JIS

化および ISO 化された資格試験を実施し、技術者のレベルを向上し、誤検知を防げるよう努めている^{6),7)}が、環境の制約や温度ムラの改善は検査者にとって非常に困難な問題として残り続けている。温度ムラの原因は主に3つあり、加熱ムラ、対象物の表面の違い（汚れなど）による吸収ムラおよび背景反射である。加熱ムラに関しては、加熱装置の工夫や加熱範囲を限定することや画像処理で問題を解決しようとしている^{23),24)}。背景反射は簡易的な方法として測定者が移動し、温度異常部のずれにより見分けることができる。しかし、測定位置が固定されている場合や制限される場合、天空など背景が大きい場合は、背景反射の影響を必ずしも除去できない。これらの状況を回避するためには、背景反射を低減、除去し、きずのみを検出する新しい手法が必要である。

本論文では、誤検知の要因に挙げられている背景反射に注目した。これは、検査時に太陽光や周辺構造物の放射赤外線エネルギーが、測定対象物表面に反射して赤外線サーモグラフィ装置レンズ部に入射し、映り込むことを指す。図 1-3 に背景反射が測定対象物に反射し、赤外線サーモグラフィ装置に映り込む場合の可視画像と熱画像を示す。背景反射源が対象物に映り込むと、多くの場合、高温部として検知されるため、同じく高温のきずと見分けがつかなくなり誤検知の原因となる。



(a) 可視画像

(b) 熱画像

図 1-3 対象物の撮像時に映り込む背景反射の例

1. 3 背景反射の問題に対する過去の研究

赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の問題については、様々な対応が行われている。試験中に経験的に行われていることとしては、測定者が移動した際に赤外線サーモグラフィ装置に映り込む異常温度部の位置の変化から確認できる⁶⁷⁾。これは、きずに起因する異常温度部は測定者の移動に応じて変

化しないが、背景反射の場合は測定者に応じて移動することから判断する。その他に、測定対象物周辺を暗幕等で覆うことや、反射熱源からの放射を暗幕で遮ることが行われている。しかし、移動して確認する方法では、元の位置（概して撮影するのに最適な位置）では熱画像上に背景反射が残ってしまうことや、対象物全面に映りこむような巨大な反射は消し去ることができない。暗幕で処置する方法は手間がかかる欠点がある。他にも経験的な解決方法として、材料に黒体スプレーを塗布することや、黒体化した箱で測定材料を囲うことで背景反射の外乱を低減する方法がとられている。この方法は測定対象物が小さい場合は、非常に有効である⁶⁸⁾。しかし、黒体化处理は測定対象によっては、目視による視認性が著しく低下することや、検査後に塗料が除去しにくいという問題があり、実製品には適用が難しい。

背景反射を低減するための研究としては、まず、得られた熱画像データの画像処理によるものが上げられる。Zeiseら⁶⁹⁾は移動ロボットで使用する熱画像から3Dレーザ距離計を併用して画像処理により除去している。これは移動する際に熱画像に映りこむ背景反射の位置の変化から判断し、除去する方法であり、かなり良好な実験結果が得られている。一方で動きや変化がないと判断ができないという問題がある。遠藤ら⁷⁰⁾は、プラントの配管に対して試験をする際に問題となる背景反射に対する相関関数を用いて、反射を除去している。きずと健全部の温度変化から処理する方法であり、画像処理は背景反射の除去に理論的に有効であることが示されている。また、アクティブ法で行っているため、きず深さの情報が得られ、きず評価ができる可能性がある。一方、本手法はアクティブ法にのみ有効である。同様に画像処理として、鄭ら⁷¹⁾は、建築構造物に対して自己相関ロックイン処理を用いて背景反射の低減を試みている。この方法は、一定の変化のない背景反射に対して有効である。この他にも、背景反射を定量的に除去するための研究では、小笠原ら⁷²⁾は、反射熱源の赤外線画像を撮像することで放射強度を取得し、測定対象物の反射率を事前に求め、赤外線サーモグラフィ装置に入射する背景反射の強度を計算し、画像から除去する方法を提案している。定量的に画像処理を行っているため、検査した画像から背景反射を理論上は完全に除去することができ、検査を問題なく実施できる。しかし、この手法では、背景反射源撮像時に焦点距離や角度に工夫が必要であり多少手間がかかる。

画像処理以外の背景反射低減に関する手法として、他に、対象物や大気の放射特性・吸収特性に注目した方法が上げられる。阪上ら^{73),74)}は、建築物のタイルなどを対象に5~8 μm の大気の窓を外れた波長帯域を持つ赤外線サーモグラフィ装置を使うことで、太陽や周辺の構造物を含めた背景反射の低減を図っ

ている。特に、波長帯域が $3\sim 15\mu\text{m}$ の熱形赤外線サーモグラフィ装置を使用し、 $5\sim 8\mu\text{m}$ のフィルタを使うことで汎用性を向上させており建築構造物に対して有効である。しかし、この方法は、測定温度範囲の狭小化、温度分解能の低下、フィルタと大気による減衰による測定対象物からの放射強度の減衰およびノイズの問題がある。同様に日本アビオニクス⁷⁵⁾は、波長帯域を制限することによって、背景反射を低減する高温の金属用の温度測定に用いる赤外線サーモグラフィ装置を開発している。しかし、使用温度範囲が高温の為、非破壊試験に用いる際は、高温炉などに使用用途が限定される。小山⁷⁶⁾は2波長帯が受光可能な特殊なセンサを用いて背景反射を低減している。これは、海に反射した太陽光の反射成分がそれぞれの波長帯域で異なることを利用して低減処理を行っている。しかしこの方法は、特殊なセンサを用いるため一般的ではない。

また、Vollmerら⁷⁷⁾は熱画像取得時に問題となる背景反射に対して偏光理論を使用している。この研究は偏光子を用いることで簡易的に背景反射を低減しており有効である。しかし、非破壊検査に対しての定量的な研究ではないため、測定対象物への効果やきず検知への有効性は示されていない。

放射測温を行う場合にも、同様に背景反射は外乱になり問題となる。限られた部分を高精度に測温するニーズから背景反射となる熱源を置き、放射を制御することで測定する方法が考案されている^{78),79)}。しかしこの方法は、背景反射となる熱源を用いるため、大きな構造物などの検査には向かない場合がある。

以上のように、様々な背景反射除去方法が提案されているが、赤外線サーモグラフィ試験の多種多様な条件に対して万能に対応することは難しく、広範囲の条件に適応できる新しい手法が望まれる。

1. 4 研究目的および本論文の構成と独創性

過去にも背景反射の低減や除去のために研究が行われているが、それぞれに使用場所や加熱条件等に制限があり、使用範囲が限られているのが現状である。

そこで本研究では、広範囲の条件に適応できる背景反射除去を目的とする。背景反射は、材料の放射率が低いことに起因する場合と周りの悪環境条件に起因する場合がある。また、赤外線サーモグラフィ試験では、状況によっては、事前に検査対象に接触できない場合や、検査対象物の正面から赤外線サーモグラフィ装置で撮像できない場合など様々な状況がある。これら様々な状況に対応するために検査の段階を考慮し、①検査前、②計測時、③データ処理時の3段階に分け、研究を行った。研究の概要を図1-4に示す。このように段階を分けて対応することで、様々な背景反射に対する処置ができるようにした。

第2章では、②計測時に適用する手法として、偏光理論を利用した背景反射の低減および③データ処理時の除去手法の提案を行う⁸⁰⁾⁻⁸²⁾。まず、赤外線サ

一モグラフィ装置に偏光子を取り付け、S 偏光測定と P 偏光測定の結果を比較する作業のみで、背景反射ときずとを判別できる定性的な背景反射低減手法を考案している。続けて、偏光理論に基づく定量的な背景反射除去手法を提案している。赤外線放射エネルギーと赤外線反射エネルギーを 2 変数の線形方程式とし、偏光子付赤外線サーモグラフィ装置で S 偏光測定と P 偏光測定を実施、方程式を解くことにより、赤外線エネルギーの反射成分である背景反射と、放射成分であるきず指示を定量的に分離できる手法である。

第 3 章では、③データ処理時に適用する手法として、修正位相解析手法を提案し、低熱拡散率材料のコンクリート構造物のはく離検知試験における背景反射除去の有効性を示す。まず、有限要素法を用いた数値実験と MATLAB を利用した位相解析により、コンクリート構造物のはく離検知試験における温度履歴の位相挙動を明らかにする。その知見をもとに、温度データを逐次取得し、その都度に位相解析処理を行うアルゴリズムを提案する。本手法は、全測定データを利用するためコンクリート構造物など低熱拡散率材料では検査に時間がかかってしまう問題、視野内に複数のきずが存在していた場合に見逃してしまう問題等の従来の位相解析手法における問題点を解決できる。併せて、本手法が背景反射除去に有効であることを検証する。

第 4 章では、①検査前処理に適用する手法として、ポリビニルアルコール製の高放射率フィルムおよび塗料を作製し、背景反射の低減を行う⁸³⁾。本フィルムおよび塗料は、可視光域で透明なため貼付後も目視検査が可能であり、赤外線域で高放射率を有するため背景反射の影響を低減でき、水溶性があるため試験後に除去し易い特長を持つ。これらは従来の黒体フィルムおよび黒体塗料の欠点を補うもので、特にアルミニウム製品やステンレス配管などの高反射金属製品の非破壊検査に実用的に機能する。また、きず検知が可能なことを実験的に示す。第 5 章では各章の結言をまとめ結論としている。

なお提案する 3 手法は、組み合わせて使用するものではなく、それぞれの効能や用途に応じて、単独で用いても十分に反射を除去できるものを目指す。検査を 3 段階に分けそれぞれ別の方法の研究を行うことで、様々な状況で行う赤外線サーモグラフィ試験に対し、背景反射の問題に対する処置ができると考え、研究を行った。

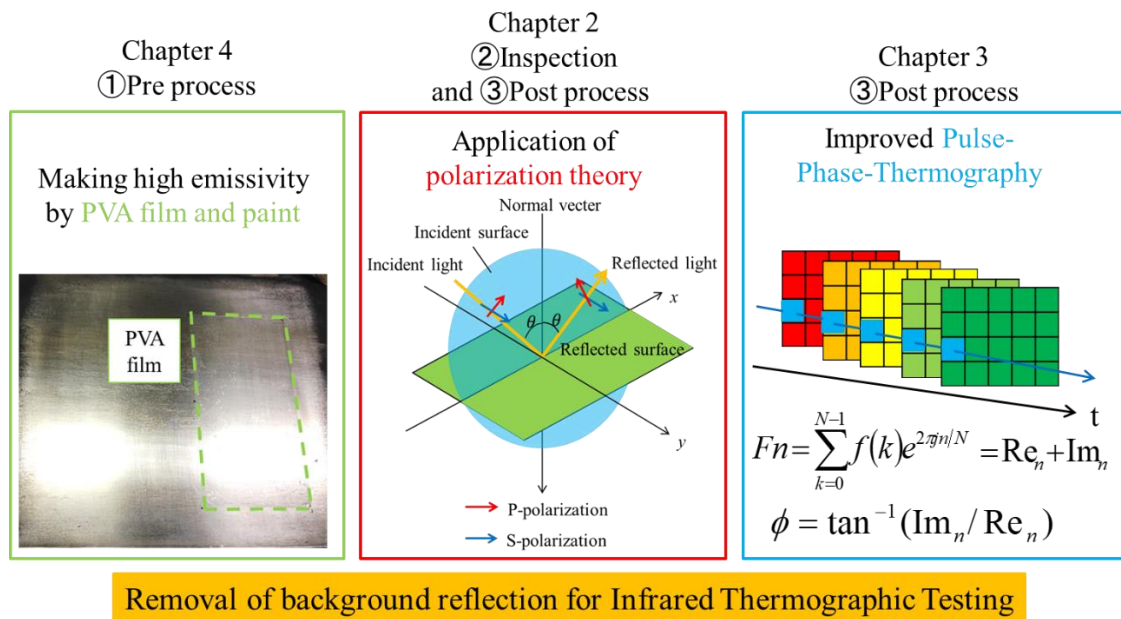


図 1-4 本研究の概要

第 1 章 参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：非破壊試験技術総論，日本非破壊検査協会，(2010)
- 2) 日本非破壊検査協会：非破壊検査工学最前線，共立出版，pp.79-147，(2009)
- 3) 日本非破壊検査協会：非破壊評価工学，日本非破壊検査協会，(2009)
- 4) 濱崎仁：建築物の維持・保全に関する基準等の現状と動向，非破壊検査，63(6)，pp.271-273，(2014)
- 5) 日本規格協会：非破壊試験用語，JIS Z 2300，(2009)
- 6) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験Ⅱ，日本非破壊検査協会，(2012)
- 7) 日本非破壊検査協会：ISO 18436-7 機械設備の状態監視と診断 赤外線サーモグラフィカテゴリーⅡ，日本非破壊検査協会，(2018)
- 8) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック，日本非破壊検査協会，pp.45-48，(2005)
- 9) 阪上隆英：赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査，溶接学会誌，72(4)，pp.27-31，(2003)
- 10) R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda and F. G. Bulnes : Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing, sensors, pp.12305-12348, (2014)

- 11) P. D. Pastuszak, A. Muc, M. Barski : Methods of Infrared Non-destructive Techniques : Review and Experimental Studies, Key Engineering Materials, 542, pp.131-141, (2013)
- 12) I. J. Aldave, P. V. Bosom, L. V. González, I. L. de Santiago, B. Vollheim, L. Krausz and M. Georges : Review of thermal imaging systems in composite defect detection, Infrared Physics & Technology, pp.167-175, (2013)
- 13) 日本非破壊検査協会 : 赤外線サーモグラフィによる非破壊試験の標準用語, NDIS 3005, (2009)
- 14) H. Zhang, S. Sfarra, K. Saluja, J. Fleuret, Y. Duan, H. Fernandes, N. Avdelidis, C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague : Non-destructive Investigation of Paintings on Canvas by Continuous Wave Terahertz Imaging and Flash Thermography, Journal of Nondestructive Evaluation, 36(34), pp.1-12, (2017)
- 15) D. Wu, C. Haude, R. Burger and O. Peters : Application of terahertz time domain spectroscopy for NDT of oxide-oxide ceramic matrix composites, Infrared Physics & Technology, 102, pp.1-9, (2019)
- 16) J. Xu, H. Wang, Y. Duan, Y. He, S. Chen and Z. Zhang : Terahertz Imaging and Vibro-Thermography for Impact Response in Carbon Fiber Reinforced Plastics, Infrared Physics & Technology, pp.1-18, (2020)
- 17) 大場喜 : UAV を活用した建築保全技術開発に関する研究 赤外線カメラを搭載したドローンによる建物検査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1-2, (2018)
- 18) 岩本剛, 小林賢昌, 真栄城玄一, 三浦景祐 : UAV を用いた超高 RC 煙突の赤外線画像撮影調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1-2, (2018)
- 19) X. Maldague : Introduction to NDT by active infrared thermography, Materials Evaluation, pp.1-22, (2002)
- 20) C. Ibarra-Castanedo, J.-M. Piau, S. Guilbert, N. P. Avdelidis, M. Genest, A. Bendada and X. P. V. Maldague : Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb Structures, Research in Nondestructive Evaluation, 20, pp.1-31, (2009)
- 21) L. Sripragash and M. J. Sundaresan : A normalization procedure for pulse thermographic nondestructive evaluation, NDT&E International, 183, pp.14-23, (2016)
- 22) D. P. Almond, S. L. Angioni and S. G. Pickering : Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation, NDT&E International, 87, pp.7-14, (2017)

- 23) X. Maldague and S. Marinetti : Pulse Phase Infrared Thermography, *Journal of Applied Physics*, 79(5), pp.2694-2698 , (1996)
- 24) X. Maldague , F. Galmiche and A. Ziadia : Applications of Pulse Phase Thermography, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 16, pp.339-344, (1997)
- 25) J. Roemer, T. Uhl and Ł. Pieczonka : Laser spot thermography for crack detection in aluminum structures, 7th international symposium on NDT in aerospace, pp.1-7, (2015)
- 26) Z. Liu, D. JIAO W. SHI and H. XIE : Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings, *Optics express*, 25(25), pp.1-12, (2017)
- 27) W. Swiderski : Non-destructive testing of CFRP by laser excited thermography, *Composite Structures*, 209, pp.710-714, (2019)
- 28) Y. Xu, S. Hwang, Q. Wang, D. Kim, C. Luo, J. Yang and H. Sohn : Laser active thermography for debonding detection in FRP retrofitted concrete structures, *NDT&E International*, 114, pp.1-15, (2020)
- 29) 今西大輔, 西名慶晃, 栗原康行 : Sonic-IR 法を用いたクレーン走行桁亀裂診断技術の開発, *日本機械学会論文集*, pp.1-12, (2017)
- 30) 佐藤大輔, 阪上隆英, 込山貴仁, 久保司郎 : パッシブブロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とこれによる内部欠陥検出精度の向上, *コンクリート工学年次論文集*, 29(2), pp.667-672, (2007)
- 31) S. Deane, N. Avdelidis, C. I. Castanedo, H. Zhang, H. Y. Nezhad, A. A. Williamson, X. Maldague and A. Tsourdos : Autonomous Systems Imaging of Aerospace Structures, 10th International Symposium on NDT in Aerospace, pp.1-9, (2018)
- 32) S. Deane, N. P. Avdelidis, C. IBARRA-Castanedo, H. Zhang, H. Y. -Nezhad, A. A. Williamson, M. J. Davis, X. Maldague and A. Tsourdos : Application of NDT Thermographic Imaging of Aerospace Structures , *Infrared Physics & Technology*, pp.1-20, (2019)
- 33) A. Moropoulou, N. P. Avdelidis, M. koui and K. Karas : An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements, *NDT and E International*, 34, pp.329-335, (2001)
- 34) K. E. Cramer : NASA Thermographic Inspection of Advanced Composite Materials, *QIRT Journal*, 1(1), pp.1-7, (2004)
- 35) K. E. Cramer, W. P. Winfree, K. Hodges, A. Koshti, D. Ryan and W. W. Reinhardt :

- Status of thermal NDT of space shuttle materials at NASA, Proceedings of The International Society for Optical Engineering, pp.1-9, (2006)
- 36) 原子力規格委員会：原子力発電所の設備診断に関する技術指針－赤外線サーモグラフィ診断技術 JEAG 4223-2015, 日本電気協会, (2016)
- 37) Y. -C. Chou and L. Yao : Automatic Diagnosis System of Electrical Equipment using Infrared Thermography, International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, pp.155-160, (2009)
- 38) M. Clark, D. M. McCann and M. C. Forde : Infrared thermographic investigation of railway ballast, NDT&E International, 35, pp.83-94, (2002)
- 39) 川上幸一, 小西真治, 篠原秀明, 久保昌史, 黒須秀明, 赤木寛一 : 赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリート浮き検出方法の検討とその応用, 土木学会文集 F1 (トンネル工学), 74(1), pp.25-39, (2018)
- 40) M. Clark, D. M. McCann and M. C. Forde : Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges , NDT&E International, 36, pp.265-275, (2003)
- 41) C. Biscarini, I. Catapano, N. Cavalagli, G. Ludeno, F.A. Pepe and F. Ubertini : UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy, NDT and E International, pp.1-15, (2020)
- 42) 内田勇治, 松井俊吾, 塩澤大輝, 阪上隆英 : 赤外線サーモグラフィ装置を用いたアスファルト舗装上からの RC 床版内部欠陥検出システムの開発, 非破壊検査, 68 (3), pp.132-136, (2019)
- 43) M. Ivan, A. L. Barazzetti, M. Scaioni, E. Rosina and M. Previtali : Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings, Remote Sensing, 3(9), pp.1847-1869, (2011)
- 44) 古賀洋一郎, 鈴木良朗, 轟章, 水谷義弘 : CFRP の電気抵抗異方性を利用した選択的加熱による層間はく離検査, 日本複合材料学会誌, 42(5), pp.185-192, (2016)
- 45) 谷口修, 重松文治, 堀江宏明, 大下英吉 : 電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の温度性状に基づく RC 構造物の空洞検出システムの開発に関する研究, 土木学会論文集 E, 64(1), pp.173-185, (2008)
- 46) M.S. Benmoussat, M. Guillaume, Y. Caulier and K. Spinnler : Automatic metal parts inspection: Use of thermographic images and anomaly detection algorithms, Infrared Physics & Technology, 61, pp.68-80, (2013)
- 47) C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace and G. Giorleo : The use of infrared

- thermography for nondestructive evaluation of joints , *Infrared Physics & Technology*, 46, pp.93-99, (2004)
- 48) 阪上隆英 : 赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定, *溶接学会誌*, 72(6), pp.511-515, (2003)
- 49) 赤井淳嗣, 塩澤大輝, 船造俊介, 珍坂恵大, 阪上隆英 : 散逸エネルギー計測に基づくアルミニウム合金 A6061-T6 の疲労強度評価, *材料*, 67(12), pp1036-1041, (2018)
- 50) M.Wan, G. Gu, W. Qian, K. Ren, Q. Chen, H. Zhang and X. Maldague : Total Variation Regularization Term-Based Low-Rank and Sparse Matrix Representation Model for Infrared Moving Target Tracking, *Remote Sensing*, 10(510), pp.1-22, (2018)
- 51) 近藤徳彦 : 人の体温調節反応, *神戸大学発達科学研究紀要*, 5(2), pp.55-66, (1998)
- 52) 石井順太郎 : 耳式赤外線体温計の表示温度の信頼性向上, *Synthesiology*, 1(1), pp.47-58, (2008)
- 53) 濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫 : ウェアラブルセンサを用いた深部体温推定に関する一検討, *情報処理学会研究報告*, pp.1-5, (2014)
- 54) 日本経済新聞 : サーモグラフィを学校に配備コロナ対策, *日本産経新聞*, (2020)
- 55) S. Marinetti and P. G. Cesaratto : Emissivity estimation for accurate quantitative thermography, *NDT and E International*, 51, pp.127-134, (2012)
- 56) V. Ramesh : A Review on Application of Deep Learning in Thermography, *International Journal of Engineering and Management Research*, 7(3), pp.489-493, (2017)
- 57) H.-T. Bang, S. Park and H. Jeon : Defect identification in composite materials via thermography and deep learning techniques, *Composite Structures*, 246, pp.1-7, (2020)
- 58) B. Yousefi, D. Kalhor, R. Usamentiaga, L. Lei, C. I. Castanedo and X. P. V. Maldague : Application of Deep Learning in Infrared Non-Destructive Testing, *14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, pp.97-105, (2018)
- 59) Q. Luo, B. Gao, W.L. Woo and Y. Yang : Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection, *NDT and E International*, pp.1-13, (2019)
- 60) Y. Duan, S. Liu, C. Hu, J. Hu, H. Zhang, Y. Yan, N. Tao, C. Zhang, X. Maldague, Q. Fang, C. Ibarra-Castanedo, D. Chene, X. Li and J. Meng :

- Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network, *NDT and E International*, 107, pp.1-8, (2019)
- 61) T. D'Orazio, C. Guaragnella, M. Leo and P. Spagnolo : Defect detection in aircraft composites by using a neural approach in the analysis of thermographic images, *NDT&E International*, 38, pp.665-673, (2005)
- 62) N. Saeed, Y. Abdulrahman, S. Amer and M. A. Omar : Experimentally validated defect depth estimation using artificial neural network in pulsed thermography, *Infrared Physics & Technology*, 98, pp.192-200, (2019)
- 63) N. Saeed, N. King, Z. Said and M. A. Omar : Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning, *Infrared Physics & Technology*, 102, pp.1-8, (2019)
- 64) A. Manohar and F. L. di Scalea : Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography, *NDT and E International*, 66, pp.1-7, (2014)
- 65) Z. Tong, S. Xie, X. Li, C. Pei, Z. Chen and Y. He : Efficient numerical simulation of eddy current pulsed thermography NDT signals based on FEM-BEM method and energy equivalent principle, *Infrared Physics & Technology*, 101, pp.138-145, (2019)
- 66) A. S. Rizi, S. Hedayatrasa, X. Maldague and T. Vukhanh : FEM modeling of ultrasonic vibrothermography of a damaged plate and qualitative study of heating mechanisms, *Infrared Physics & Technology*, 61, pp.101-110, (2013)
- 67) 島田宏樹 : サーモグラフィ活用による状態監視保全技術の改善, *INSS journal*, 11, pp.107-116, (2004)
- 68) 中村元 : 赤外線カメラによる金属表面の温度測定, http://www.nda.ac.jp/~nhajime/pdf/lecture_IRT-measurement_121003.pdf, (2012), (2020.10)
- 69) B. Zeise and B. Wagner : Temperature Correction and Reflection Removal in Thermal Images using 3D Temperature Mapping, *SCITEPRESS*, pp.158-165, (2016)
- 70) 遠藤英樹, 日下卓也, 阪上隆英 : 赤外線サーモグラフィ試験による配管のスクリーニング技術, *非破壊検査*, 59(2), pp.90-95, (2010)
- 71) 鄭子揚, 阪上隆英, 久保司郎, 佐藤大輔 : 赤外線サーモグラフィ法による建築物外壁タイルはく離検出における反射ノイズ低減, *非破壊検査*, 61(5), pp.235-238, (2012)
- 72) N. Ogasawara, C. Kobayashi and H. Yamada : Image Processing for Reduction of Background Reflection from Thermal Image, *Advanced Experimental*

- Mechanics, 3, pp.173-179, (2018)
- 73) T. Y. Cheng, D. Sato and T. Sakagami : Development of infrared camera with 5~8 μm bandwidth sensitivity for inspection of tile-finished walls in buildings, 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing, pp.1-6, (2017)
- 74) 阿瀬弘紀, 佐藤大輔, 鄭子揚, 阪上隆英 : 5-8 μm 波長帯に感度を有する赤外線カメラの実用化に関する研究 実構造物における反射低減効果および剥離検出性の確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1-2, (2018)
- 75) 日本アビオニクス株式会社, 金属温度計測用インラインモデル TS300SW, (2018)
- 76) 小山正敏 : 2 波長赤外線センサの研究および衛星搭載型赤外線センサの研究の紹介, 航空と宇宙, 751, pp.1-10, (2016)
- 77) M. Vollmer, S. Henke, D. Karstädt, K.-P. Möllmann and F. Pinno : Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging, Proceedings of InfraMation, pp.287-298, (2004)
- 78) 田村洋一 : 鉄鋼プロセスにおける放射測温法, 計測と制御, 21(11), pp.33-38, (1982)
- 79) 木下智弘 : スポット放射温度計による放射率未知の壁面温度計測, 防衛大学校システム工学群卒業研究発表会予稿集, pp.1-2, (2016)
- 80) S. Suzuki and N. Ogasawara : Quantitative Evaluation of Polarized Emissivity and Polarized Reflectivity using Infrared Thermographic Instrument, Advanced Experimental Mechanics, 3, pp.167-172, (2018)
- 81) S. Suzuki and N. Ogasawara : Infrared Thermographic Test for Removing Background Reflection based on Polarization Theory, NDT & E International, 103, pp.19-25, (2019)
- 82) 鈴木総司, 小笠原永久 : 金属に対する偏光理論を利用した赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の除去, 非破壊検査, 69(6), pp.300-305, (2020)
- 83) 鈴木総司, 小笠原永久, 松田裕行 : 赤外線サーモグラフィ試験に用いる可視光透明な高放射率フィルム, 非破壊検査, 70(2), pp.83-88, (2021)

第2章 偏光理論を用いた背景反射の除去

本章では、計測時に実施する背景反射の低減およびデータ処理時に実施する分離除去について述べる。本章における研究の独創性は、偏光理論に基づいた反射除去プログラムの構築と、検証実験による有効性の確認である。

2.1 緒言

光は電磁波であり、その振動方向は伝播の方向に垂直である。偏光とは、その振動に偏りのある光のことである^{1)~4)}。偏光は、主に直線偏光、楕円偏光、円偏光があり⁵⁾、その特徴を利用して、立体テレビジョン、顕微鏡⁵⁾、光弾性解析⁶⁾、コンピュータビジョン^{7),8)}、切りくずの状態の調査⁹⁾、金属表面状態の調査^{10),11)}、地雷や車両の識別¹²⁾など様々な物に利用されている。

その中でも、釣りやドライブ等で水面や地面からの反射可視光を抑えるために偏光機能付サングラスが使われている。これは、反射可視光が反射角度に基づいて偏光しており、偏光子を通すことで一部の反射可視光を低減できるからである。赤外線は、可視光線の赤色より波長が長い電磁波であり、光の性質を持っている。そのため偏光理論を使用した背景反射の低減などが提案されている。この理論を応用し、非破壊検査に用いることで背景反射の問題に有効ではないかと考えた。

従来の偏光赤外線に関する研究としては、Vollmerら¹³⁾が熱画像取得時に問題となる背景反射に対して偏光理論を使用した低減を行っており、良好な結果を得ている。しかし、非破壊検査に対しての研究ではないため、対象物の放射赤外線測定への効果やきず検知への有効性は示されていない。また、背景反射は低減された形で画像上に残っているため、対象物の定量的な温度評価が必要な場合などは問題となる。

そこで本章では赤外線サーモグラフィ試験において偏光理論を利用した背景反射の低減およびきず指示との定性的な識別、定量的な分離を試みた。絶縁物および金属を対象とし、まず、偏光子を赤外線サーモグラフィ装置に取り付け、偏光理論を利用することで、背景反射を低減し、きず指示の取得が容易になるか検証した。次に、きず指示と背景反射が重なっていた場合でも、きず指示を判断できるよう、偏光理論を応用した背景反射ときず指示の定量的な分離手法を構築し、実験的検証を行った。

2.2 絶縁物に対する背景反射の低減および除去

コンクリート構造物や磁器質タイル張り建築物など、赤外線サーモグラフィ試験が行われてきた材料は、一般的に絶縁物が多い。また、金属製品であっても錆止めなどの目的で表面塗装されていることが多く、検査表面は絶縁物とな

っている．これら絶縁物は，金属と比較し，放射率が高く^{14),15)}，物性値が1つで反射率が決まるため¹⁵⁾，赤外線サーモグラフィ試験が優位に行える．しかし，太陽光や電灯，発電機，観測者など，測定対象物より高温の周囲物が発する赤外線の背景反射は，依然，外乱として誤検知となる危険性があり，本研究では，まず，検査方法を確立するために測定対象物を絶縁物とした．

2. 2. 1 絶縁物の偏光理論

まず，絶縁物の偏光理論に基づいた偏光反射率について説明する．ある屈折率 n の物質の境界面で反射される赤外線の偏光について考える．図 2-1 に反射面における赤外線の偏光を示す． xy 平面に存在する滑らかな絶縁物平板を反射面とした場合，入射光と反射光がなす面は入射面と定義される．

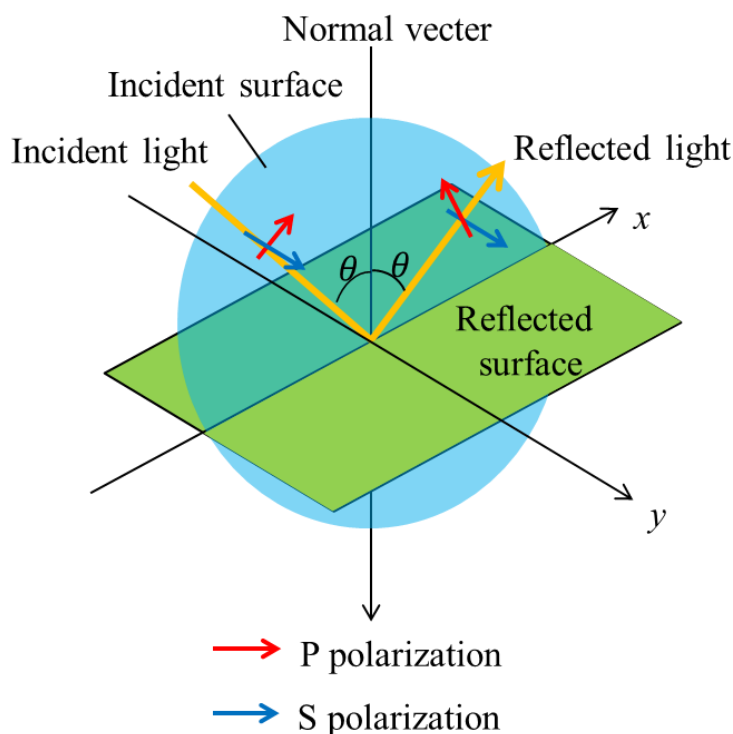


図 2-1 反射面における赤外線の偏光

直線偏光は，光の電場の振動方向が入射面に対して垂直になっている S 偏光と，平行になっている P 偏光に区別できる．ある絶縁物質の境界面で反射される赤外線の S 偏光反射率 ρ_{sd} と P 偏光反射率 ρ_{pd} は Maxwell の電磁波理論に基づき式(2-1)，(2-2)となる¹⁵⁾⁻¹⁷⁾．

$$\rho_{Sd}(\lambda, \theta) = \left(\frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (2-1)$$

$$\rho_{Pd}(\lambda, \theta) = \left(\frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (2-2)$$

ここで、 λ は波長を、 θ は対面角を示す。屈折率 n が波長依存性を持つため、反射率は波長の関数となっている。図 2-2 に屈折率が 2.0 の時の対面角と S 偏光反射率および P 偏光反射率との関係を示す。

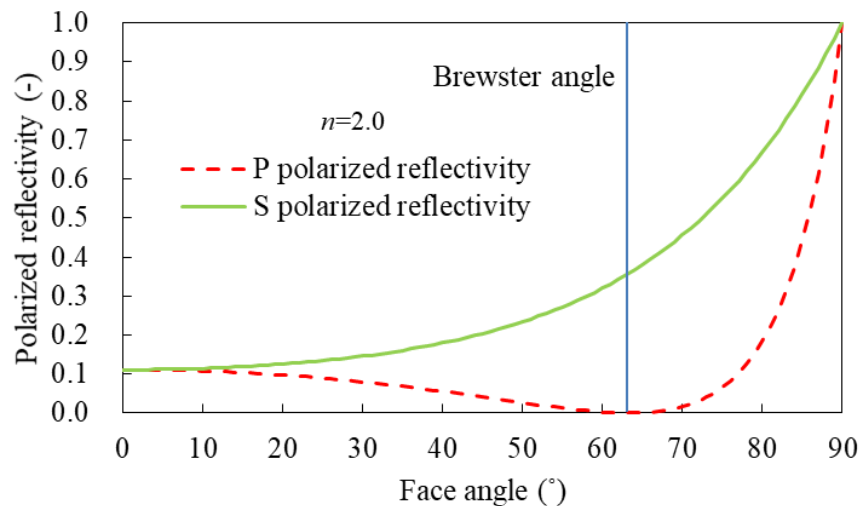


図 2-2 屈折率が 2.0 の時の対面角と S 偏光反射率および P 偏光反射率との関係

いずれの反射率も光の対面角 θ と反射面となる物質の屈折率 n に依存する。入射角 0° では偏光は起こらないため、S 偏光反射率と P 偏光反射率は同じ値となる。対面角が増加すると、S 偏光反射率は上昇し続ける。これに対し P 偏光反射率はある特定の角度で 0.0 となり、その後、急激に上昇する。この P 偏光反射率が 0.0 となる角度を Brewster 角という¹⁷⁾。反射前に赤外線が進む媒体の屈折率を n_1 、反射面となる媒体の屈折率を n_2 とすると、Brewster 角 β は次式で表される。

$$\tan \beta = \frac{n_1}{n_2} \quad (2-3)$$

空気の屈折率は約 1.0 であり，一般的な絶縁物の多くは屈折率が 1.5~2.0 の間にある．式(2-3)より， $n_1=1.0$ （空気）， $n_2=1.5\sim 2.0$ とすると，一般的な絶縁物の Brewster 角は $56.3^\circ\sim 63.4^\circ$ となる．理論上，Brewster 角において P 偏光反射率は 0.0 となり，反射された赤外線は S 偏光成分のみとなる．

次に，偏光放射率について説明する．反射率 ρ ，吸収率 α ，透過率 τ とするとエネルギー保存則から次式が成り立つ．

$$1=\rho+\alpha+\tau \quad (2-4)$$

また，放射率 ε とするとキルヒホッフの法則より吸収率と放射率は等しく

$$\alpha=\varepsilon \quad (2-5)$$

が成立する．物体が不透明体で透過率 $\tau=0$ とすると，次式が成り立つ．

$$\varepsilon=1-\rho \quad (2-6)$$

よって，放射赤外線の S 偏光放射率は式(2-7)，P 偏光放射率は式(2-8)となる．

$$\varepsilon_{Sd}(\lambda,\theta)=1-\rho_{Sd}(\lambda,\theta) \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_{Pd}(\lambda,\theta)=1-\rho_{Pd}(\lambda,\theta) \quad (2-8)$$

対面角の増加に対し，P 偏光放射率はある対面角（Brewster 角）までは上昇した後，急激に減少する．これに対し，S 偏光放射率は単調減少する．S 偏光放射率，P 偏光放射率は，反射率と相反関係にある．偏光反射率および偏光放射率は，いずれも対面角 θ と，物質の屈折率 n に依存する．また，式(2-7)，(2-8)から放射率は以下のように表せる．

$$\varepsilon_{Td}(\lambda,\theta)=1-\frac{1}{2}\{\rho_{Sd}(\lambda,\theta)+\rho_{Pd}(\lambda,\theta)\} \quad (2-9)$$

対面角 $\theta=0.0$ のとき，屈折率 n は以下のようになる^{18),19)}．

$$n(\lambda,\theta=0)=\frac{2-\varepsilon+2\sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon} \quad (2-10)$$

2. 2. 2 絶縁物に対する背景反射の低減およびきずの識別

絶縁物に対する偏光理論を用いて、背景反射ときずの定性的な識別が可能な実施手順の考案を行った。

(1) 絶縁物の屈折率の取得

まず、偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置を用いて、偏光反射率および偏光放射率を定量的に測定できるかの検証を行うため、測定対象物の選定を行った。測定対象物の条件は、実験の再現性を確保するため、表面が均一で扱いやすい絶縁物である。本研究では、条件を満たす物としてクラフトテープ（ニチバン，No.313）を選定した。

次に測定対象物の屈折率を得るために放射率を測定した。放射率の測定は、分光放射率測定装置を用いた。分光放射率測定装置は、フーリエ変換赤外分光光度計（Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR 装置, Thermo Fisher Scientific, Nicolet 6700）、黒体炉（計量研形低温域黒体炉, チノー, IR-R24）、試料加熱装置から成る。構成の概要を図 2-3 に、FT-IR 装置の代表的な仕様を表 2-1 に示す。試料の放射率は、物体の放射強度 v_s と、物体と同一温度の黒体放射強度 v_b との比 v_s/v_b で表される。試料の放射強度 v_s は、試料上表面を一定温度（373.0K）に保ち、試料表面から放射される赤外線放射強度を波長ごとに測定して得られる。また、黒体放射強度 v_b は、試料と同一温度の黒体炉を用いて測定した。さらに、計測には FT-IR 装置の内部放射等の外乱が含まれるが、それらを高反射率の金蒸着ミラー（反射率 0.99, 30mm×30mm×5.0mm, シグマ光機）を用い除去した。垂直分光放射率 ε_s の算出式は、式(2-11)となる^{18),19)}。

$$\varepsilon_s = \frac{v_s - v_m}{v_b - v_m} \quad (2-11)$$

ここで、金蒸着ミラーで取得した強度 v_m である。クラフトテープの放射率の測定結果を図 2-4 に示す。今回使用する赤外線サーモグラフィ装置の測定波長域である 8~14 μm における平均放射率は 0.92 であることが分かった。式(2-10)から屈折率は 1.8 であった。

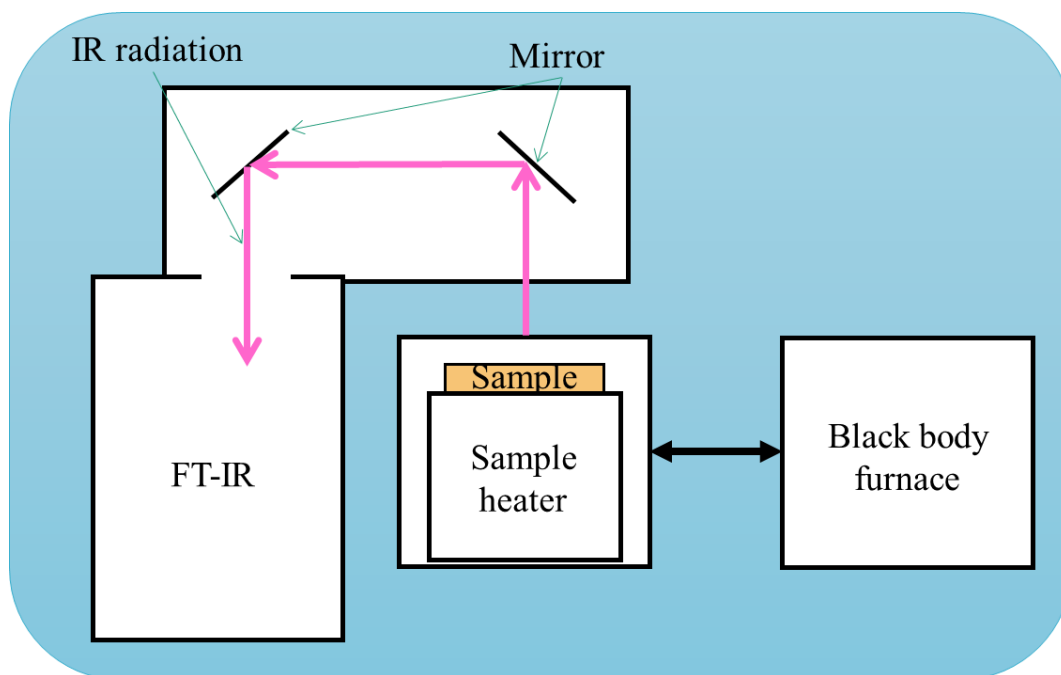


図 2-3 分光放射率測定装置の構成

表 2-1 FT-IR 装置の代表的な仕様

Name	FT-IR Nicolet6700
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Optical system	Gold optical system
Maximum resolution	25000 μm
Sensor	MCT-A(0.855~16.7 μm)
Measurement wavelength range	1.28~26.7 μm
S/N	50000 : 1

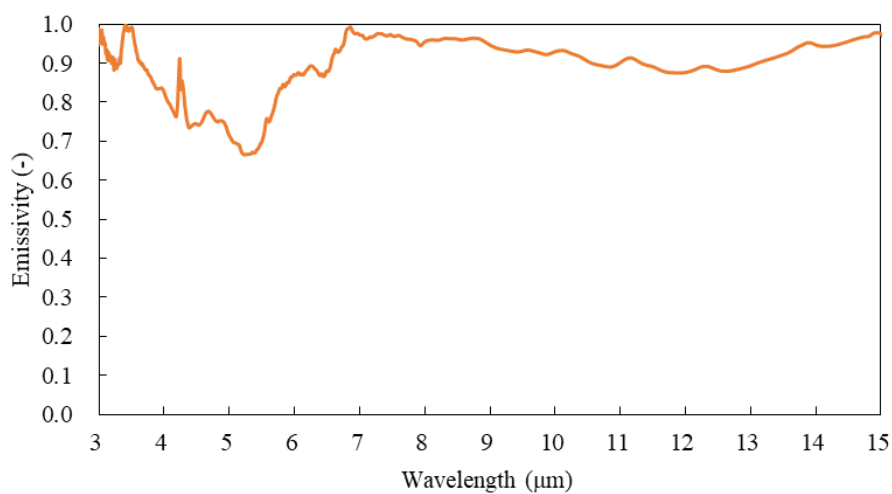


図 2-4 クラフトテープの分光放射率

(2) 絶縁物の偏光反射率の測定

測定対象物の反射赤外線において、偏光反射率と対面角の関係を求めるために、高温熱源から放射される赤外線を測定対象物表面で反射させ、偏光子付赤外線サーモグラフィ装置で測定した。偏光反射率の測定の概要を図2-5に示す。

本研究で用いた偏光子は、ワイヤーグリッド偏光子（アイ・アール・システム、WGP-8421）である。偏光子の直径は34mm、材質はゲルマニウム製で、本研究に使用する赤外線サーモグラフィ装置の検出波長域8~14 μm において、偏光方向を約80%、偏光直交方向を約0.2%の赤外線を透過し、ガラス製の直線偏光子よりも高い透過率を示す²⁰⁾。赤外線強度の測定には、検出波長域8~14 μm の赤外線サーモグラフィ装置（NECAvio 赤外線テクノロジー、TVS-500）を使用した。レンズ前方に偏光子を装着した。偏光子付赤外線サーモグラフィ装置の外観を図2-6に示す。

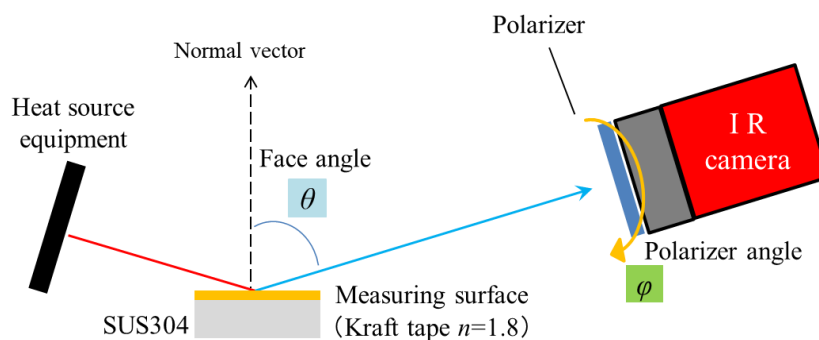


図 2-5 偏光反射率の測定の概要

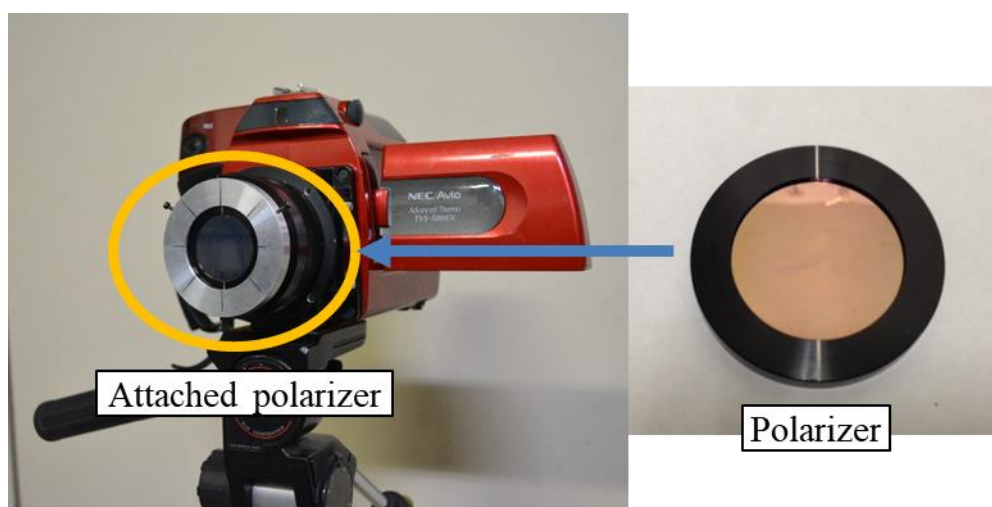


図 2-6 偏光子付赤外線サーモグラフィ装置の外観

図 2-5 において、熱源から測定面までの距離を 300mm、測定面から赤外線サーモグラフィ装置までの距離を 700mm としている。偏光子角度 φ は、偏光子のワイヤ線が入射面に平行のときを 0° とし、 $\varphi=0^\circ$ と 90° で撮像した。赤外線サーモグラフィ装置に入射するのは、偏光子角度 0° のとき S 偏光となり、偏光子角度 90° のとき P 偏光となる。測定対象物であるクラフトテープは、縦 400mm×横 400mm×厚さ 10mm のステンレス鋼 (SUS304) 平板の表面に貼付した。反射熱源の概要を図 2-7 に示す。放射面は縦 40mm×横 40mm の黒体化処理したステンレス薄膜ヒーターを用い、表面温度を熱電対で測定し、343.0K に設定した。赤外線サーモグラフィ装置の光軸と測定対象物の法線がなす角度は $10^\circ\sim 80^\circ$ 間で 10° 毎実験を行った。なお、この角度を対面角という。測定面の偏光反射率は、熱源から放射され測定面で反射した赤外線強度と、熱源から放射された赤外線強度との比により決定した。各赤外線強度は、赤外線サーモグラフィ装置において、温度値へ変換前のデジタルデータを出力し用いている²¹⁾。

偏光反射率の計算値と実験値の比較を図 2-8 に示す。S 偏光反射率、P 偏光反射率ともに測定値は理論値よりも低い値であった。特に P 偏光反射率は 60° (Brewster 角) 以下において 0.0 であった。

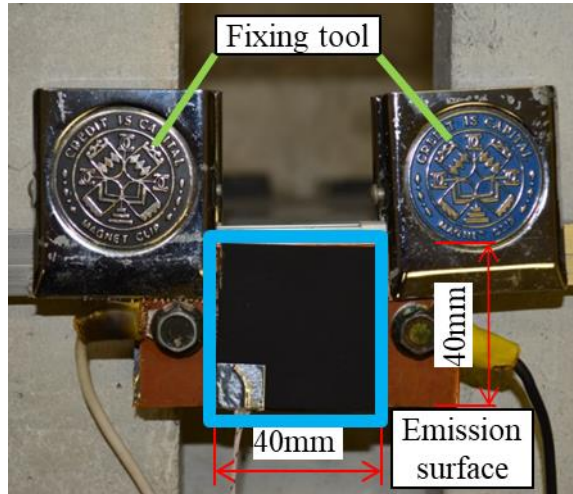


図 2-7 反射熱源の概要

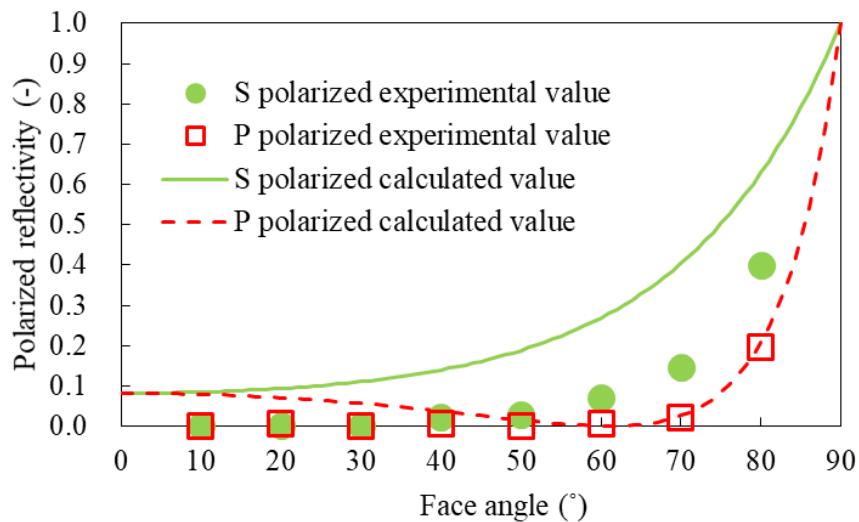


図 2-8 偏光反射率の計算値と実験値の比較

図 2-8 に示した偏光反射率の測定結果において、計算値より実験値が低下する傾向が得られた。これは測定面の表面粗さが原因である可能性がある²²⁾⁻²⁵⁾。反射率は、入射した角度と等しい角度で反射する鏡面反射率と、表面粗さに起因して拡散する拡散反射率の合計値である。光学的には、表面粗さが波長に比べて十分に小さい場合は、滑らかな表面と扱うことができる²⁶⁾。しかし、本試験で用いたクラフトテープの表面粗さは、赤外線サーモグラフィ装置の検出波長域 8~14 μm では光学的に十分に滑らかではなかったため拡散反射が起き、赤外線サーモグラフィ装置に入射する鏡面反射赤外線が相対的に少なくなり、結果として偏光反射率の実験値が低下した可能性がある。

以下に、Beckmann の式²⁶⁾を用いて、表面粗さを考慮した計算値の鏡面反射率の補正を試みた。Beckmann の式を式(2.11)に示す。

$$\rho_r = \rho_0 \exp\left\{-\left(4\pi\frac{\sigma}{\lambda}\cos\theta\right)^2\right\} \quad (2-11)$$

ここで、測定面の鏡面反射率 ρ_r 、測定物の光学的に滑らかな表面での反射率 ρ_0 、二乗平均粗さ σ 、波長 λ である。波長 λ が長くなるにつれて、また二乗平均粗さ σ が小さくなるにつれて、併せて角度 θ が大きくなるにつれて、鏡面反射成分が大きくなることを示している。二乗平均粗さ σ の測定をレーザー顕微鏡（キーエンス、VK-X250）を用いて行った。ランダムに 10 回測定を実施し、クラフトテープの二乗平均粗さ σ の平均は 2.3 μm であった。図 2-9 に Beckmann の解析式により補正した計算値と実験値の比較を示す。波長 λ は、赤外線サーモグラフィ装置の検出波長域の平均値 11 μm を用いている。

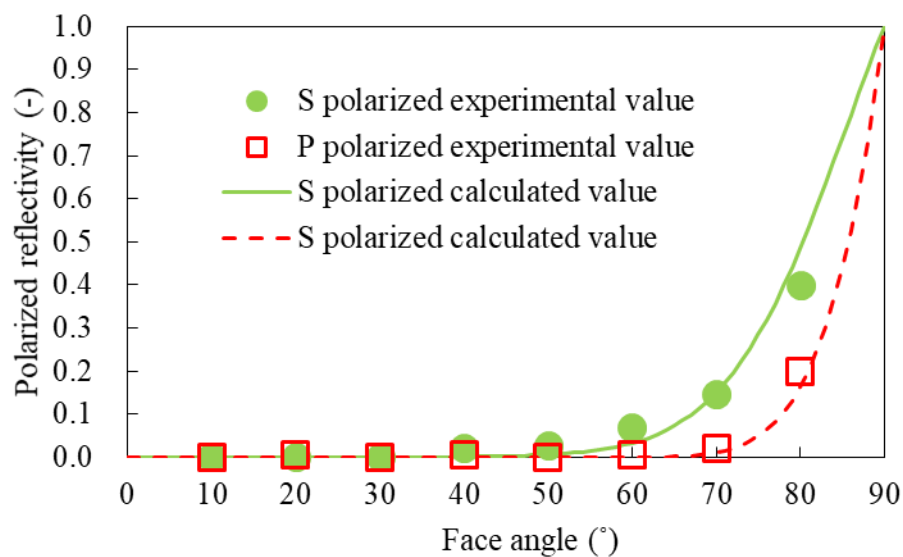


図 2-9 偏光反射率の Beckmann の式により補正した
計算値と実験値の比較

Beckmann の式による補正の結果，計算値が低下した．P 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.01，最大で対面角 80° において 0.03 であった．S 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.02，最大で対面角 80° において 0.09 であった．実験値は補正した計算値と概ね一致した．

続いて，計算値と実験値が概ね一致した原因が表面粗さに起因するものか，さらに検証するために，測定対象物を表面粗さの小さい物とし偏光反射率の測定を行った．測定対象物は絶縁テープ（ニチバン，VT-191C）を選択した．レーザー顕微鏡を用いてランダムに 10 回の粗さ測定をした結果，二乗平均粗さは，赤外線サーモグラフィ装置の平均検出波長域の平均値 $11\mu\text{m}$ より十分に小さい， $0.2\mu\text{m}$ であった．また，絶縁テープの放射率を分光放射率測定装置で測定したところ，波長 $8\sim 14\mu\text{m}$ の範囲における平均放射率は 0.97 であった．この値を式 (2-10) に代入し屈折率を求めたところ 1.4 であった．偏光反射率の測定実験は，測定面に絶縁テープを貼付し，対面角 θ は， $40\sim 80^\circ$ の間で 20° 毎に行った．その他の実験条件は 2.3 節のクラフトテープの偏光反射率の評価と同様に行った．

図 2-10 に絶縁テープの偏光反射率の計算値と実験値の比較を示す。P 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.00, 最大で対面角 40° において 0.01 であった。S 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.03, 最大で対面角 40° において 0.04 であった。表面が光学的に滑らかと言える絶縁テープでは、S 偏光反射率と P 偏光反射率は計算値と実験値は概ね一致した。

以上の結果から、クラフトテープの偏光反射率の実験値の低下は、表面粗さによる拡散反射の影響であることを検証できた。また、表面粗さを測定し Beckmann の式を用いることで、ある程度の反射率補正が可能だが完全ではないため、偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置を用いて、実際の検査対象物の偏光反射率測定が必要であると言える。

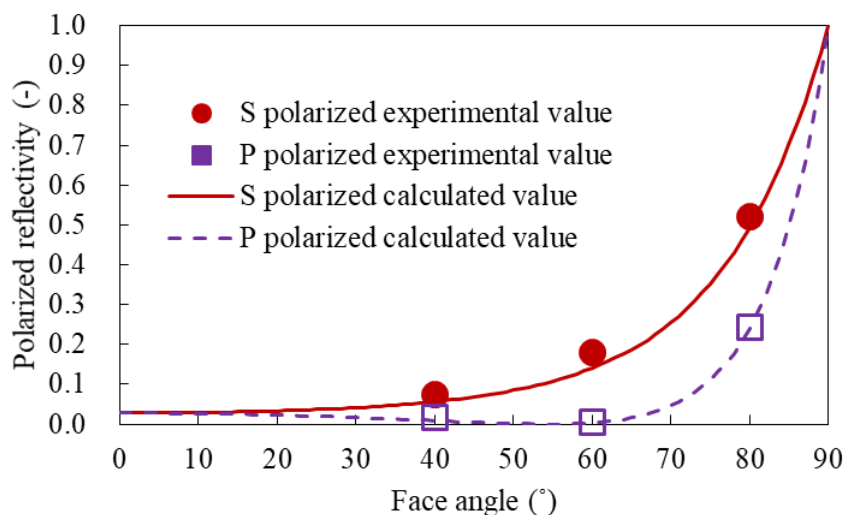


図 2-10 絶縁テープの偏光反射率の計算値と実験値の比較

(3) 絶縁物の偏光放射率の測定

次に、放射赤外線における偏光放射率と対面角の関係を求めるために、熱源から放射される赤外線を偏光子付赤外線サーモグラフィ装置で測定した。偏光放射率の測定の概要を図 2-11 に示す。熱源は偏光反射率の測定の反射熱源と同様の形のものを使用し、表面にクラフトテープを貼付した。本表面温度は、熱電対で測定し、343K とした。測定面から赤外線サーモグラフィ装置までの距離を 700mm とし、対面角 θ は、 $10^\circ \sim 80^\circ$ の間で 10° 毎に測定を行った。測定面の偏光放射率は、赤外線サーモグラフィ装置が得る測定面からの赤外線強度と、熱源と同じ温度に設定した黒体の赤外線強度との比から求めた。なお、黒体の赤外線強度は、チノー製の計量研形比較黒体炉 IR-R24 を利用して測定した。

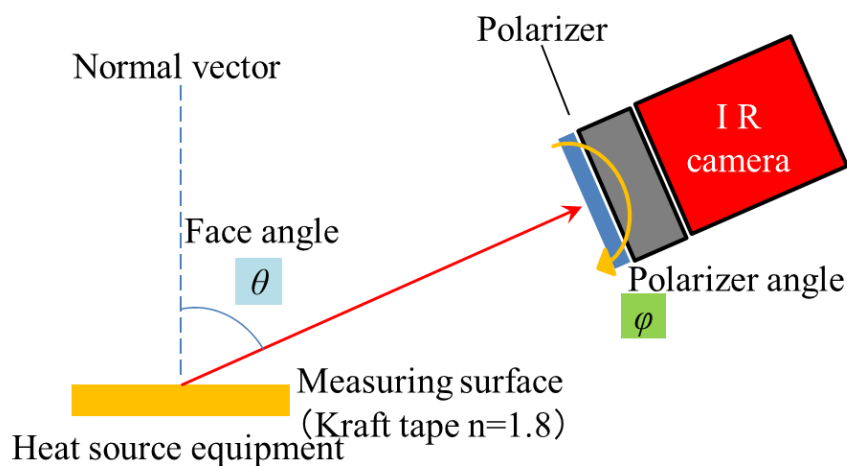


図 2-11 偏光放射率の測定の概要

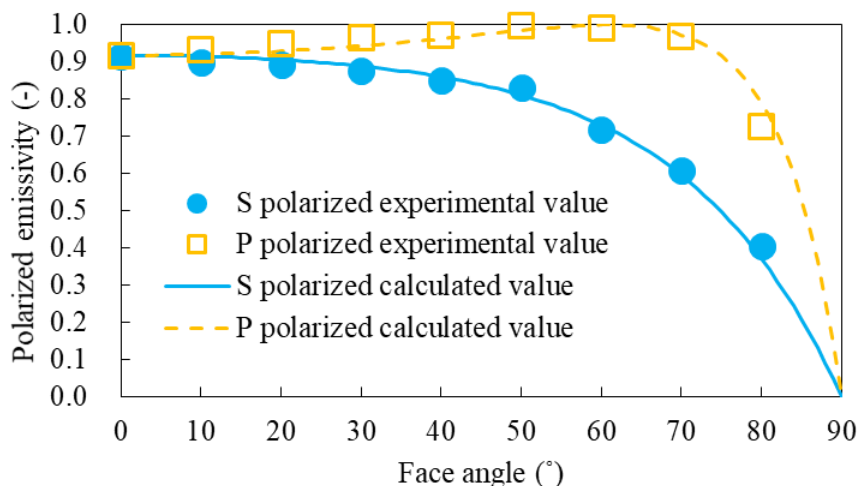


図 2-12 偏光放射率の計算値と実験値の比較

図 2-12 に偏光放射率の計算値と実験値の比較を示す．偏光放射率の計算値については，前節の偏光反射率の計算値を利用し，式(2-7)，式(2-8)から求めた．図 2-12 の結果において，P 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.02，最大で対面角 80° において 0.06 であった．S 偏光反射率の計算値と実験値の差の平均は 0.02，最大で対面角 80° において 0.03 であった．拡散を考慮しなくてはならない反射率の場合と異なり，放射率は計算値と実験値はほぼ等しいことが示された．

(4) 絶縁物の識別方法および検証実験

2.2 節の偏光反射率測定実験において，対面角 80° における偏光子角度 0° と 90° で測定された温度 T_{r0} と T_{r90} から，偏光子角度 0° の温度 T_{r0} を引いた温度差，さらに 2.3 節の偏光放射率測定実験において，対面角 80° における偏光子角度 0° と 90° で測定された温度 T_{e0} と T_{e90} から偏光子角度 0° の温度 T_{e0} を引いた温度差を図 2-13 に示す．

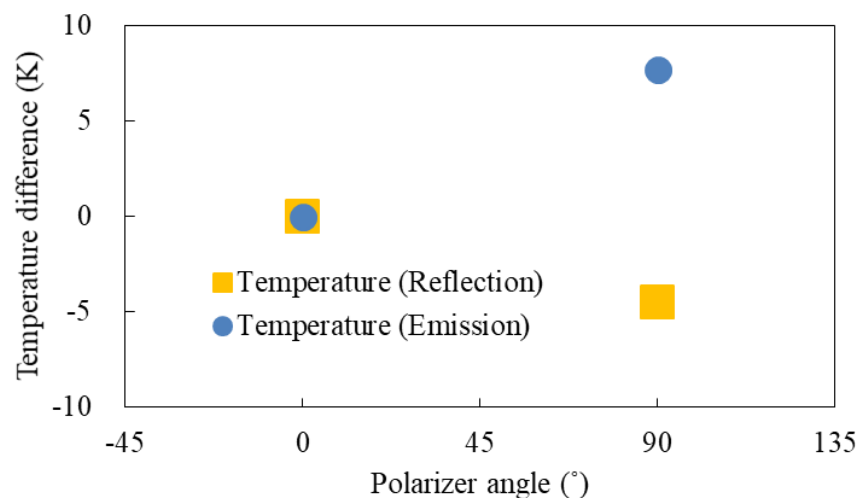


図 2-13 偏光子角度を変化させたときの温度差

偏光子角度を 0° から 90° に変えることにより，偏光反射率測定時に計測された温度は下降している．一方，偏光放射率測定時に計測された温度は上昇している．この特性を利用した定性的な識別方法を提案する．識別方法のフローチャートを図 2-14 に示す．

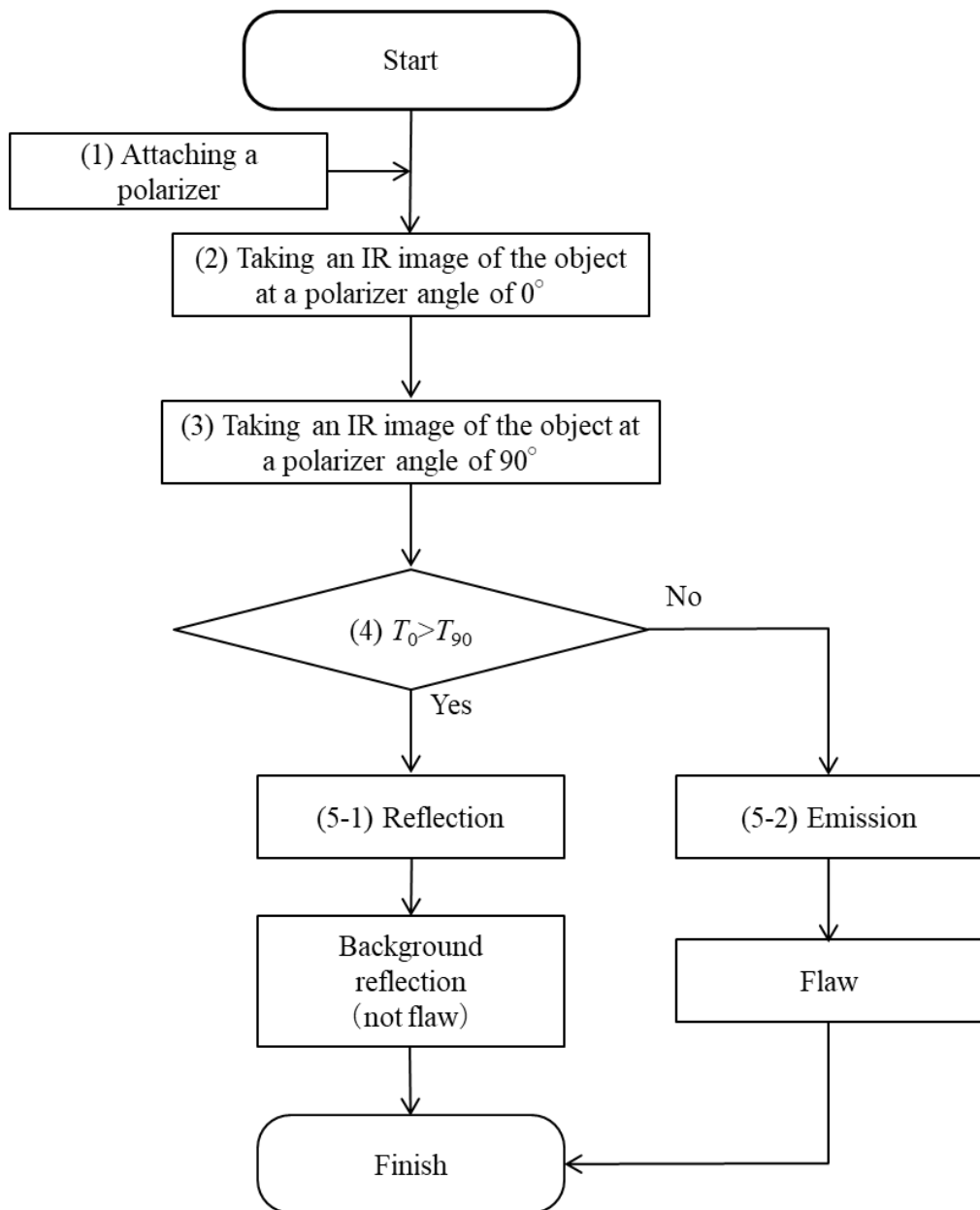


図 2-14 定性的な識別方法のフローチャート

以下にフローチャートに沿って識別手順を説明する。

- (1) 赤外線サーモグラフィ装置に偏光子を取り付ける。
- (2) 偏光子角度 0° で撮像する。測定部の見かけの温度を T_0 、健全部の見かけの温度を T_{s0} とする。
- (3) 偏光子角度 90° で撮像する。測定部の見かけの温度を T_{90} 、健全部の見かけの温度を T_{s90} とする。
- (4) 偏光子角度を 0° から 90° に変えたときの測定部における温度差 $(T_{90} - T_0)$ と健全部における温度差 $(T_{s90} - T_{s0})$ の差 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ を求める。
- (5-1) (4) で求めた値が 0K 以下の場合 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})] < 0$ は、測定部の温度上昇は背景反射によるものと判断する。
- (5-2) (4) で求めた値が 0K 以上の場合 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})] > 0$ は、測定部の温度上昇をきず指示と判断する。

上記の方法を用いてきず指示と背景反射が識別できるか実験を行った。図 2-15 に実験の概要を示す。測定対象物、反射熱源、赤外線サーモグラフィ装置および偏光子は、偏光反射率測定時と同じものを使用している。対面角は 80° である。熱源から測定面までの距離を 300mm 、測定面から赤外線サーモグラフィ装置までの距離を 700mm としている。きずを模擬するために、測定面の一部を下面より直径 30mm 、高さ 40mm のアルミニウム円柱を用いて接触加熱した。なおアルミニウム円柱はシリコンラバーヒータで加熱されており、測定対象物の上表面の温度が一定になるよう制御している。上表面温度は、熱電対により測定した。また、模擬きずの見かけ温度と、測定面で反射される反射熱源の見かけ温度が赤外線サーモグラフィ装置で表示された時に、きず指示と背景反射が識別困難な条件として同一になるように、反射熱源を電圧調整している。赤外線サーモグラフィ装置に表示される位置において模擬きずを左側に、反射熱源の反射像を右側に配置し、下記の 2 つの条件で実験を行った。

- ・ きずを模擬するために測定面の一部を 303K に加熱し、反射熱源の表面温度は 308K とした。背景反射ときず指示の配置は、両者が重ならないようにした。
- ・ きずを模擬するために測定面の一部を 323K に加熱し、反射熱源の表面温度は 338K とした。背景反射ときず指示の配置は、両者が重なるようにした。

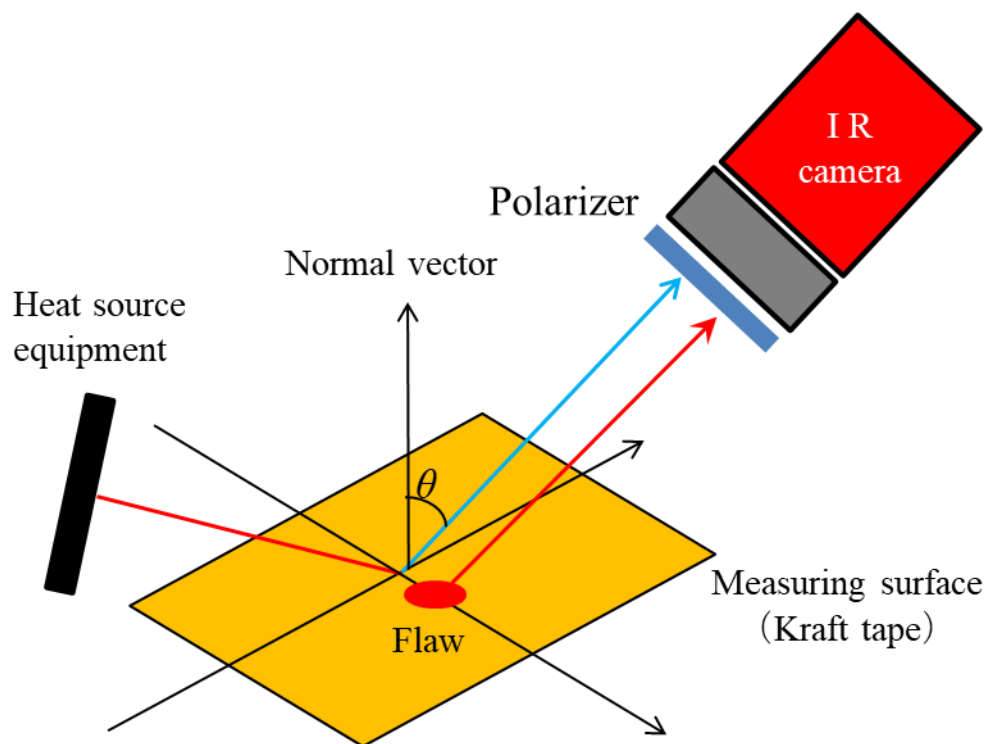


図 2-15 きず指示と背景反射の識別実験の概要

まず、背景反射ときず指示の配置が重なっていない場合について示す。図 2-16 に偏光子なしで撮像した熱画像を、図 2-17(a)に偏光子角度 0° で撮像した熱画像を、図 2-17(b)に偏光子角度 90° で測定した熱画像をそれぞれ示す。図 2-16 の熱画像では、3 個の十字で示した健全部、きず指示および背景反射のそれぞれの見かけの温度を記載している。また、図 2-16 の線上の位置の温度プロファイルを図 2-18 に、図 2-17(a), (b)における同位置の温度プロファイルを図 2-19(a), (b)に示す。

図 2-16 の偏光子なしの熱画像および図 2-18 の温度プロファイルでは、背景反射もきず指示と同様に温度が高く映し出されてしまい誤検知の危険が残る。一方、偏光子を赤外線サーモグラフィ装置に取り付け撮像した図 2-17 の熱画像(a)と(b)とを、図 2-19 の温度プロファイルの(a)と(b)とをそれぞれ見比べると、きず指示と背景反射の温度の大小関係が変化していることが分かる。偏光子角度による温度変化を考察するため、見かけの温度および各温度差を表 2-2 にまとめた。

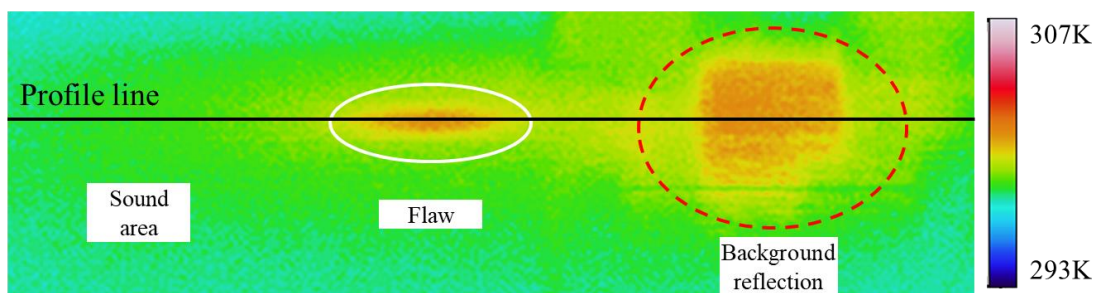
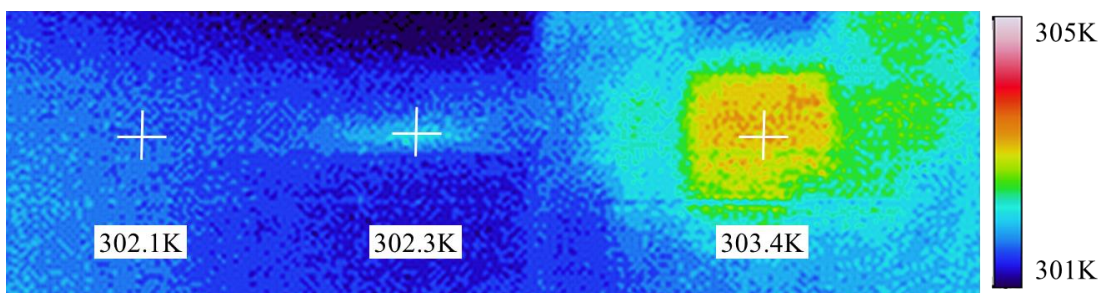
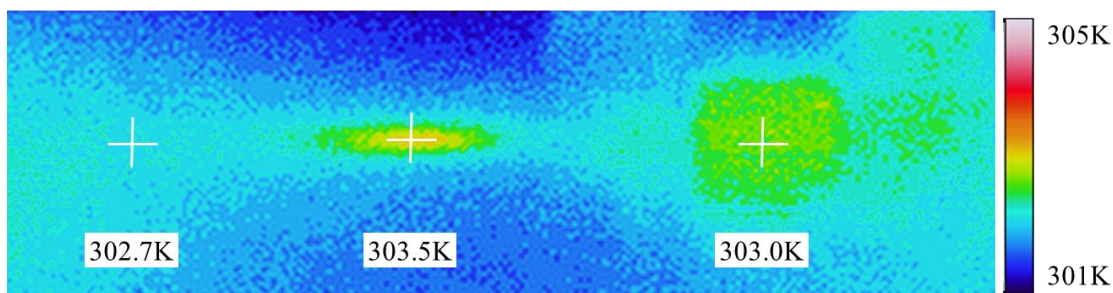


図 2-16 偏光子なしで撮像した熱画像
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)



(a) 偏光子角度 0° で撮像した熱画像



(b) 偏光子角度 90° で撮像した熱画像

図 2-17 偏光子ありで撮像した熱画像
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)

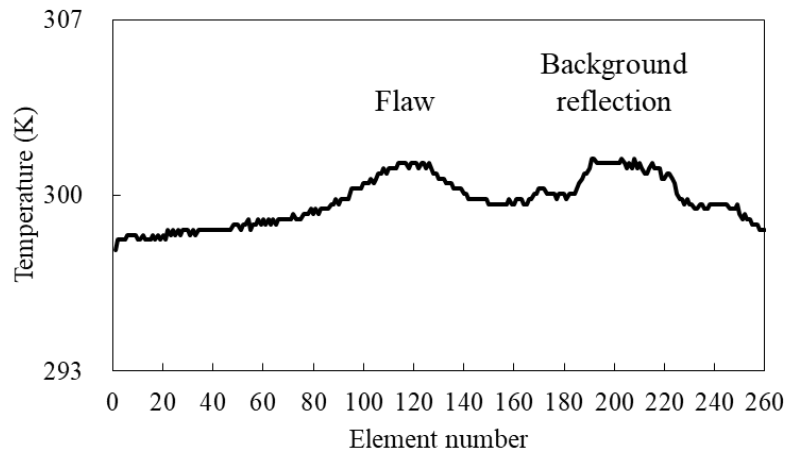
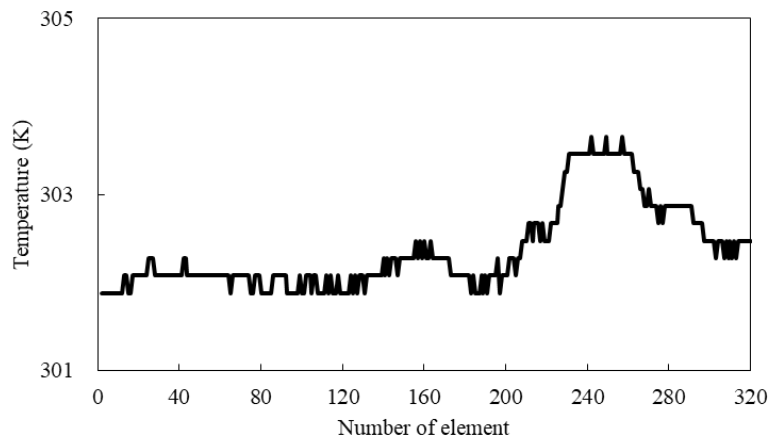
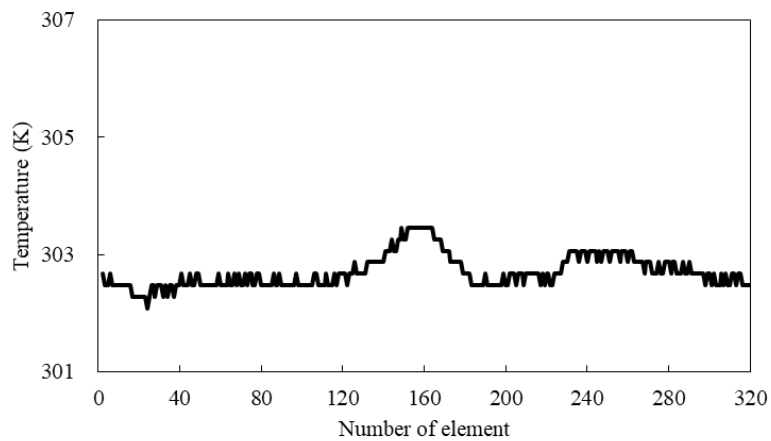


図 2-18 偏光子なしで撮像した温度プロファイル
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)



(a) 偏光子角度 0°



(b) 偏光子角度 90°

図 2-19 偏光子ありで撮像した温度プロファイル
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)

表 2-2 健全部，きず指示および背景反射の温度および温度差

	Sound area (K)	Simulated flaw(K)	Background reflection(K)
Polarizer angle 0°: T_0	302.1	302.3	303.4
Polarizer angle 90°: T_{90}	302.7	303.5	303.0
Temp. diff. b/w polarizer angles : $T_{90} - T_0$	0.6	1.2	-0.4
Temp. diffs. with sound area : $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$	0.0	1.8	-1.0

偏光子角度を 0° から 90° に変えたときの測定部における温度差($T_{90} - T_0$)と健全部における温度差($T_{s90} - T_{s0}$)との差 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ を評価すると，きず指示では $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ が 1.8K と正であるが，背景反射では $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ が-1.0K で負となる．これは，偏光子角度の変化に伴い生じた偏光放射率の増加と偏光反射率の減少が，赤外線強度の放射成分と反射成分を増減させた結果である．

$[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の温度差画像を図 2-20 に，温度差プロファイルを図 2-21 に示す．温度差画像および温度差プロファイルにおいて，きず指示は高温部として，背景反射は低温部として示されており，きず指示と背景反射を定性的に見分けることができる．

一方，図 2-20 や図 2-21 において，健全部でも高温表示される部分が見られる．これらは温度差プロファイルにおいてスパイク状に表れており，赤外線サーモグラフィ装置のマイクロボロメータ素子の時空間的な感度のばらつきに起因すると思われる．防護策としては，素子感度の不均一補正処理（NUC）を利用する，素子間の空間的・時間的な平均化処理を施す，対象物に合わせた閾値を設けることなどが有効と考えられる．

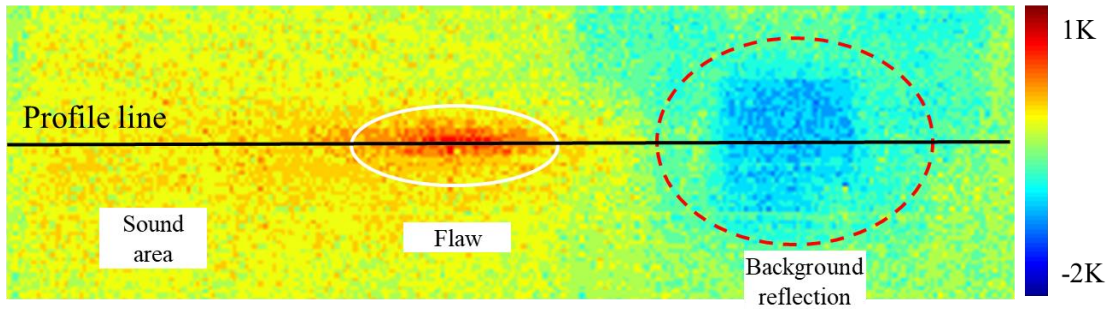


図 2-20 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の温度差画像
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)

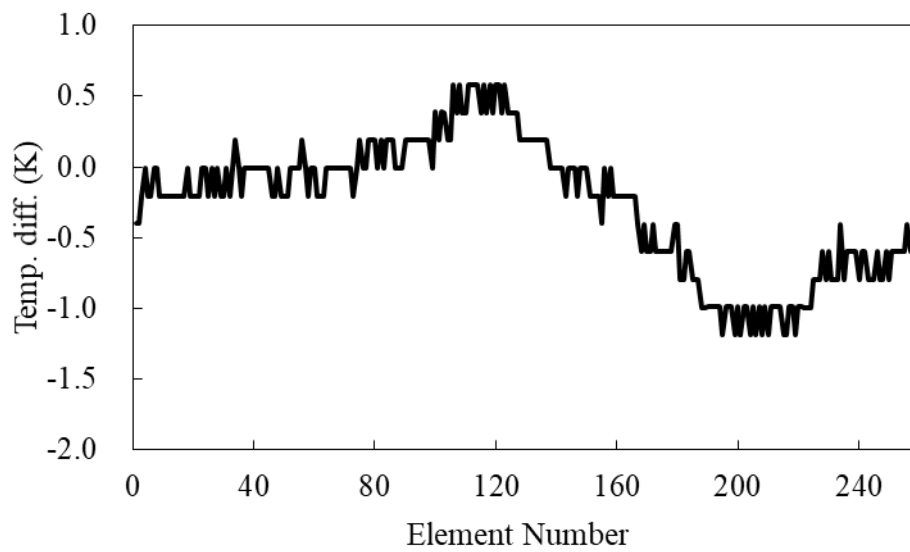


図 2-21 図 2-20 の線上の温度差プロファイル
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)

次に背景反射ときず指示の配置が重なっている場合について示す。

図 2-22 に偏光子なしで測定した熱画像を，図 2-23(a)に偏光子角度 0° で測定した熱画像を，図 2-23(b)に偏光子角度 90° で測定した熱画像をそれぞれ示す。

偏光子なしの場合（図 2-22）では，前項と同様に背景反射ときず指示は見分けることはできない。一方，偏光子ありの場合では，偏光子角度が 0° から 90° に変化すると温度変化が確認できるため，概ねのきず指示は確認できる。

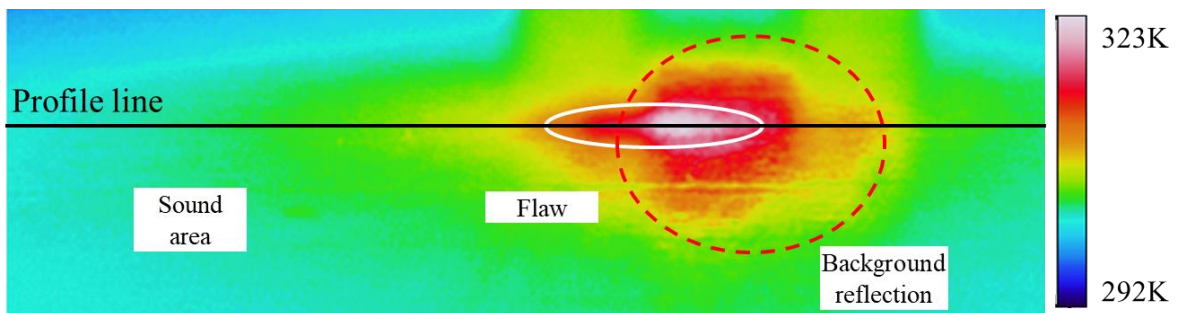
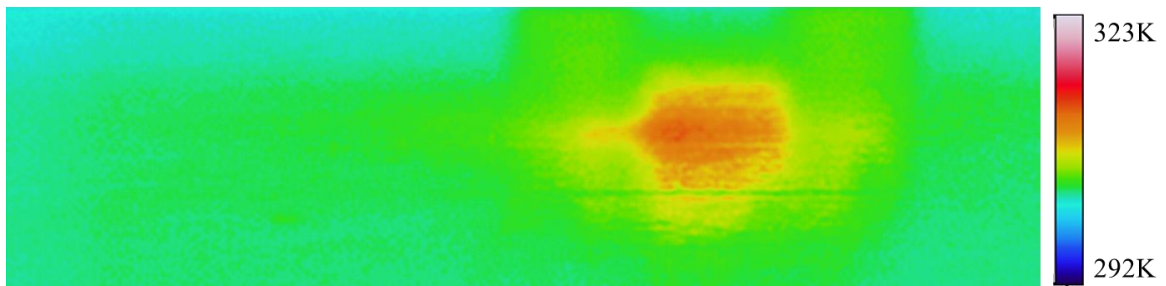
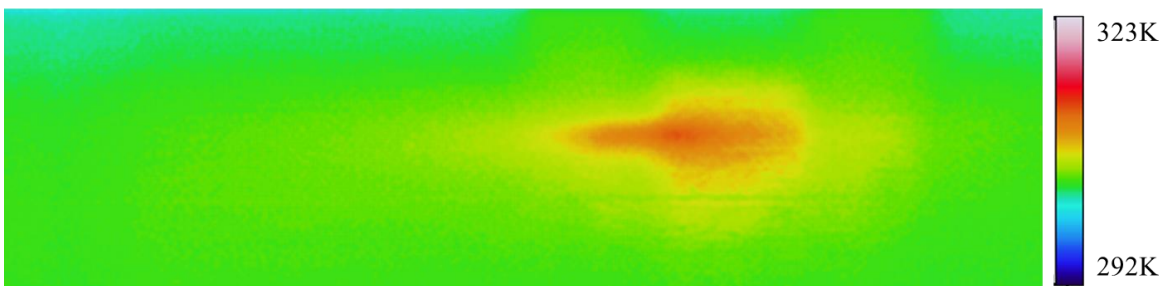


図 2-22 偏光子なしで撮像した熱画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)



(a) 偏光子角度 0° で撮像した熱画像



(b) 偏光子角度 90° で撮像した熱画像

図 2-23 偏光子ありで撮像した熱画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)

また、図 2-22 の線上の位置の温度プロファイルを、図 2-23 の同様の位置の場合も含めて図 2-24 および図 2-25 に示す。偏光子角度 0° から 90° に変化させたときに、背景反射の温度低下ときずの温度上昇が観察され、概ねのきずの位置が確認できるが、明確な区別は難しい。

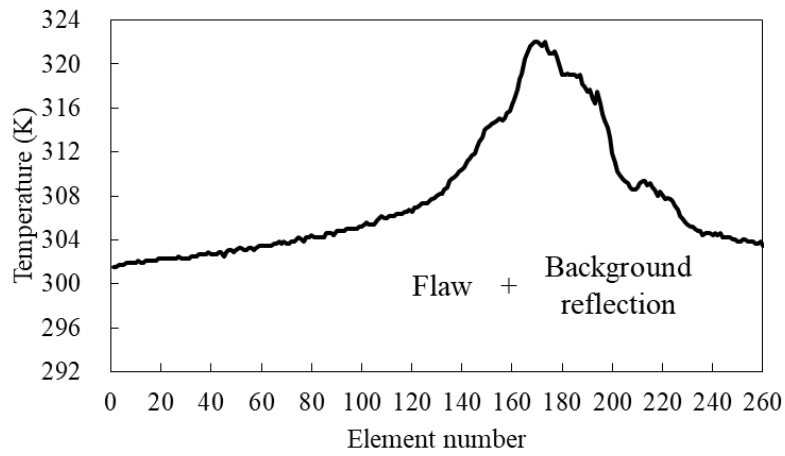
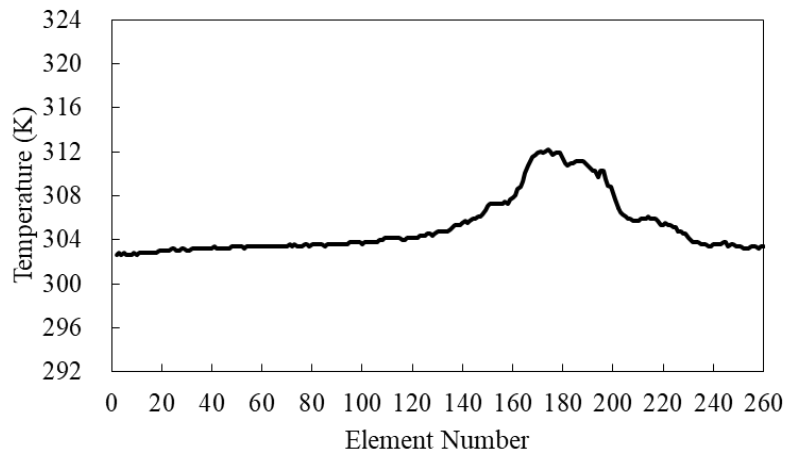
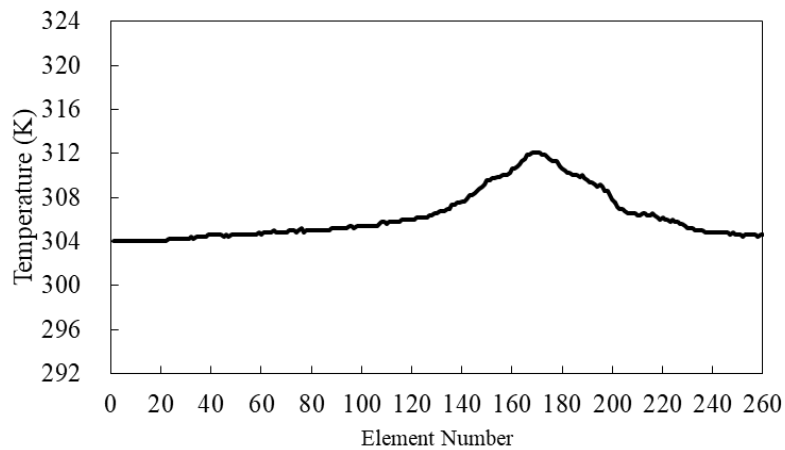


図 2-24 偏光子なしで撮像した温度プロファイル
(きず指示と背景反射が重なっている場合)



(a) 偏光子角度 0°



(b) 偏光子角度 90°

図 2-25 偏光子ありで撮像した熱画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)

図 2-26 に $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の温度差画像， および図 2-27 に温度差プロファイルを示す． $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の温度差画像および温度差プロファイル上において，きず指示と背景反射が重なっている部分については明確な区別がつかず，きず指示の大きさを見誤ってしまう危険性がある．また，背景反射ときず指示のどちらの見かけの温度が高く支配的であるかにより $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の値の正負が決定するため，得られた温度差画像には背景反射のみ，あるいはきずだけが存在すると誤判断してしまう危険性がある．

以上の結果から，本識別手法は，偏光子を用いた計測と簡単な差分処理を利用するだけで，背景反射ときず指示を定性的に識別できる．しかし，背景反射ときず指示が重なっている危険性が排除できない場合には適用できない．背景反射を除去し，きず指示のみを抽出する定量的な分離方法の確立が望まれる．

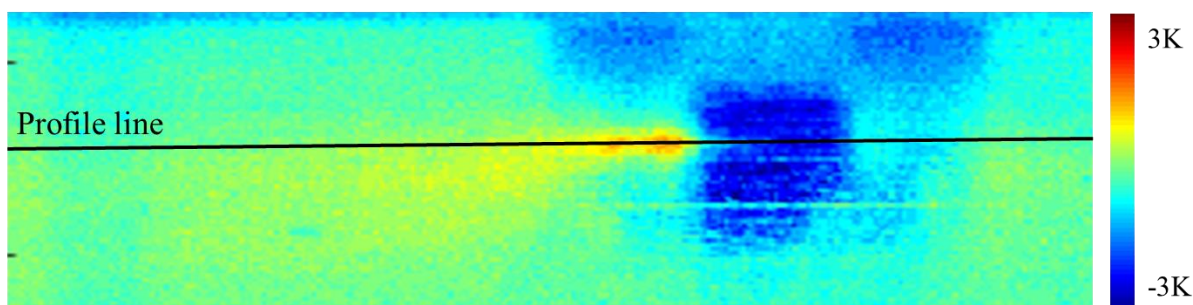


図 2-26 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の温度差画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)

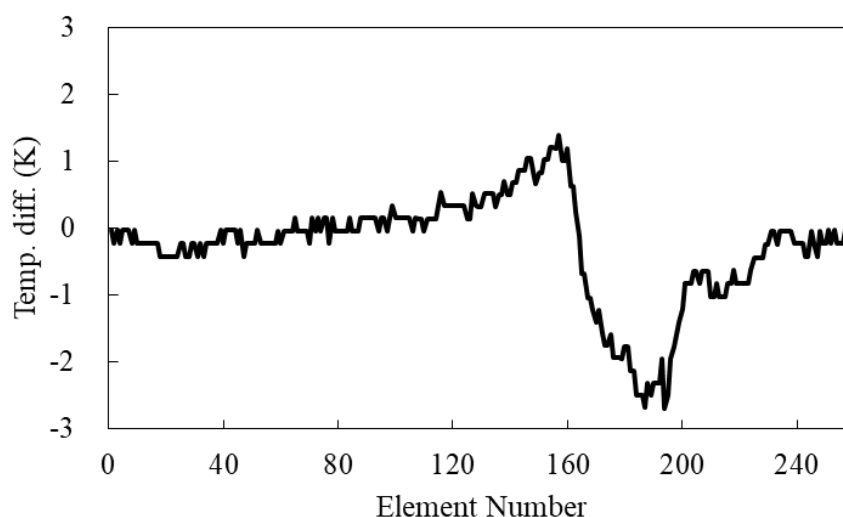


図 2-27 図 2-26 の線上の温度差プロファイル
(きず指示と背景反射が重なっている場合)

2. 2. 3 絶縁物に対する Brewster 角を用いた反射の除去

Brewster 角の優位な特性を活用する検査手法の提案を行う。理論上, Brewster 角において絶縁物の P 偏光反射率は 0.0 となり, 反射された赤外線は S 偏光のみとなる。つまり, 赤外線サーモグラフィ装置に入射する偏光を P 偏光のみに制限すれば反射成分をなくすことができる。この理論を用いた背景反射の除去方法を検証する。

(1) Brewster 角における背景反射除去の検証

Brewster 角において, 赤外線サーモグラフィ装置に入射する偏光を P 偏光のみに制限すれば反射成分がなくなることを, 実験的に検証した。

実験条件は, 2.2.2 項(2)偏光反射率の測定と同様で, 反射熱源の温度は 413K に設定している。測定対象物をクラフトテープとすることで, 2.2.2 項(1)で得られた屈折率と式(2-3)から Brewster 角は 63° となる。偏光子なしで撮像した熱画像を図 2-28 に, 中心位置の温度プロファイルを図 2-29 に示す。

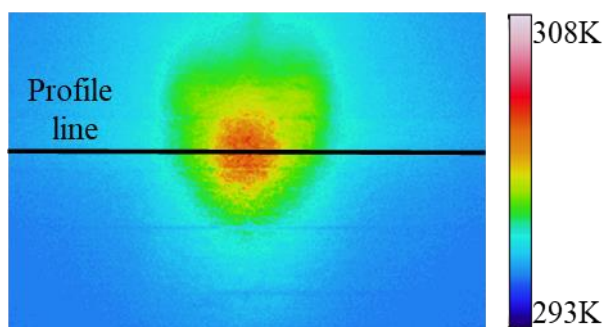


図 2-28 偏光子なしで撮像した熱画像

(Brewster 角においてクラフトテープに熱源を反射させた実験)

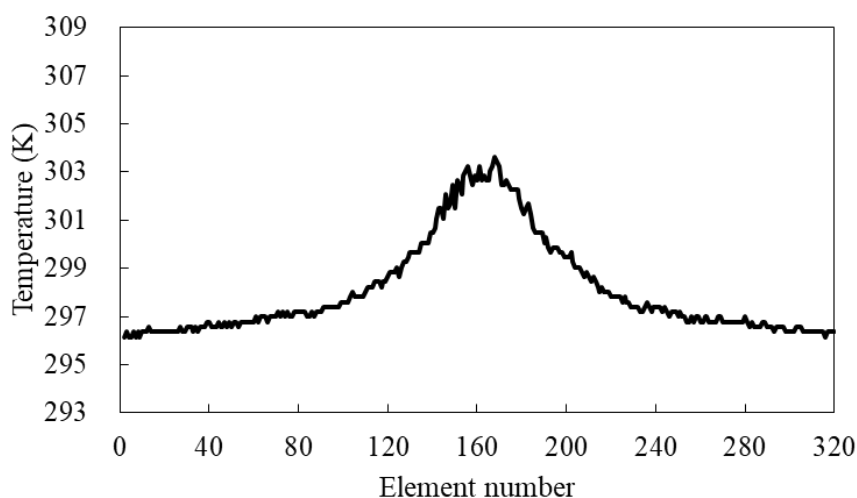


図 2-29 図 2-28 の温度プロファイル

(Brewster 角においてクラフトテープに熱源を反射させた実験)

また，偏光子角度 90° で撮像した熱画像を図 2-30 に，温度プロファイルを図 2-31 に示す．図 2-28 の偏光子なしで撮像した熱画像では，背景反射が高温部として映りこんでおり，きずと誤検知してしまう．一方，図 2-30 の偏光子角度 90° で撮像した熱画像および図 2-31 の温度プロファイルでは，温度異常部がなくなり，Brewster 角では背景反射が除去できていることが実験的に検証できた．

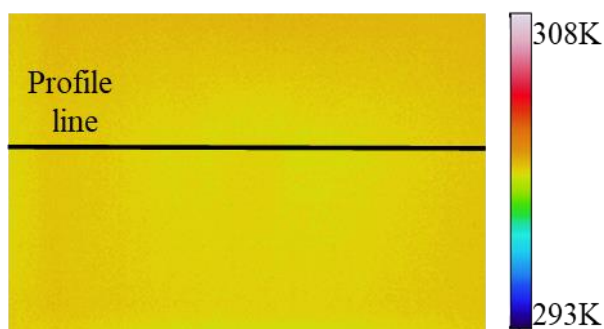


図 2-30 偏光子角度 90° で撮像した熱画像
(Brewster 角においてクラフトテープに熱源を反射させた実験)

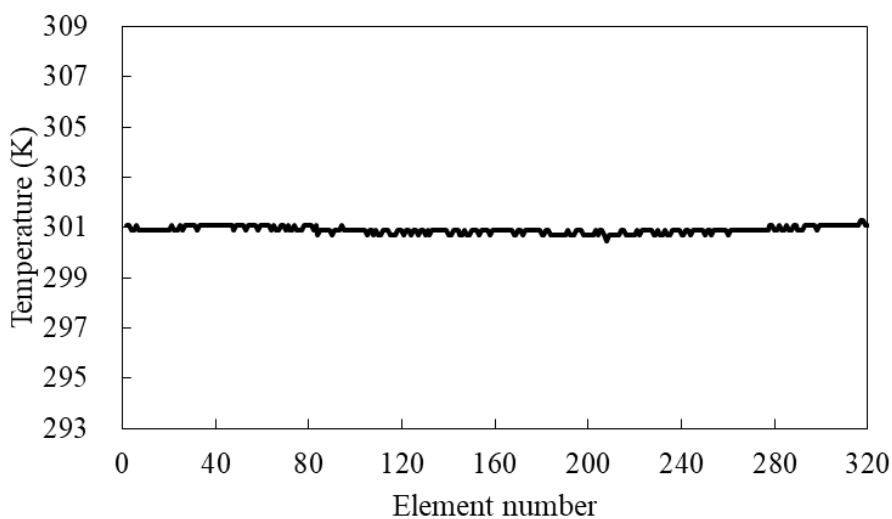


図 2-31 図 2-28 の線上の温度プロファイル
(Brewster 角においてクラフトテープに熱源を反射させた実験)

(2) 非破壊検査への適用

次に、非破壊検査への適用について検討するため、背景反射ときず指示が重なっている場合について実験を行った。対面角は、 63° で行い、きずを模擬するために測定面の一部を 303K に加熱し、反射熱源の温度は 413K に設定している。それ以外の実験条件は、2.2.2 項(4)における背景反射ときず指示部が重なっている場合と同じ条件で行った。また、比較のためにきず指示のみの場合も実験を行った。

図 2-32 に偏光子なしできず指示のみの場合に撮像した熱画像を、図 2-33 に偏光子なしできず指示と背景反射が重なった場合に撮像した熱画像（Brewster 角）を示す。図 2-32 の偏光子なしのきず指示のみに背景反射が重なって表示すると、図 2-33 のようになり、背景反射ときず指示の違いが判別できない。

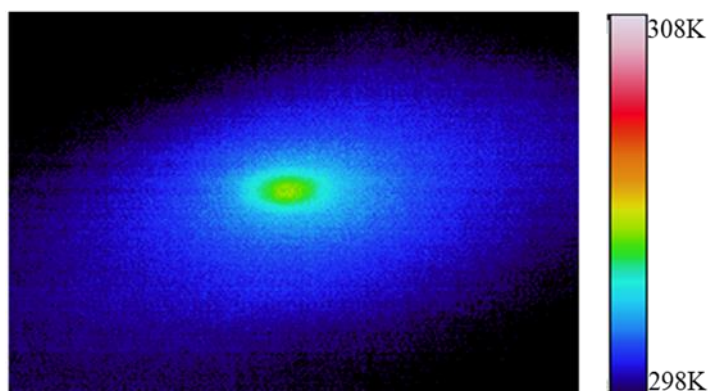


図 2-32 偏光子なしできずのみの場合に撮像した熱画像
(Brewster 角)

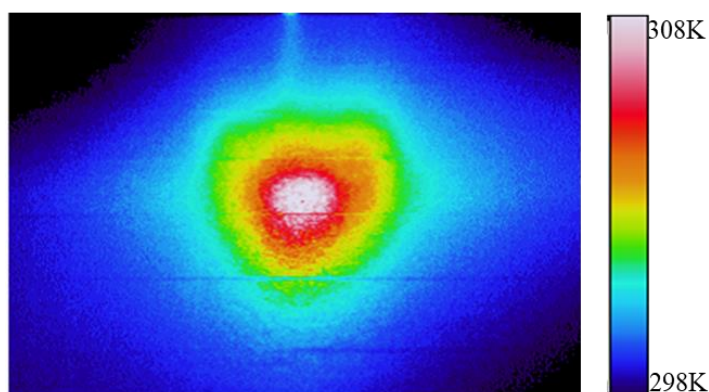


図 2-33 偏光子なしできず指示と背景反射が重なった場合に撮像した熱画像
(Brewster 角)

図 2-34 に、偏光子角度 90° で撮像したきず指示と背景反射が重なった場合の熱画像（Brewster 角）を示す。高温部の形状はほぼ等しく、背景反射が除去されて、きず指示だけが抽出されていることが分かる。

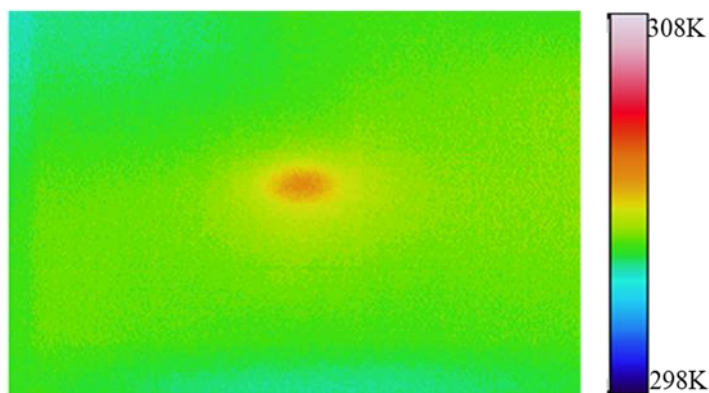


図 2-34 偏光子角度 90° できず指示と背景反射が重なった場合に撮像した熱画像（Brewster 角）

また、赤外線サーモグラフィ装置に入射する光は、視野の上端から下端まで各画素における対面角は異なる。一般的に非破壊検査で用いられる標準レンズ 22mm を使用した場合、視野角は 20° ($\pm 10^\circ$) 程度であることを踏まえ、屈折率 1.5~2.0 の P 偏光反射率について、対面角が 50° ~ 70° 間の値を図 2-35 に示す。対面角 55° ~ 65° の P 偏光反射率は、0.01 以下の非常に低い値となっており、Brewster 角だけでなく、その近傍である赤外線サーモグラフィ装置の視野範囲であれば、背景反射が低減されることが分かる。よって、偏光子を用いた Brewster 角における非破壊検査は、背景反射の除去に有効と考えられる。

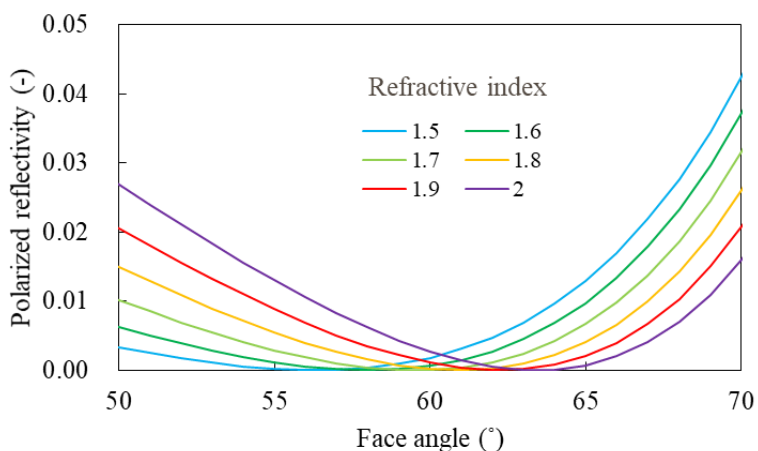


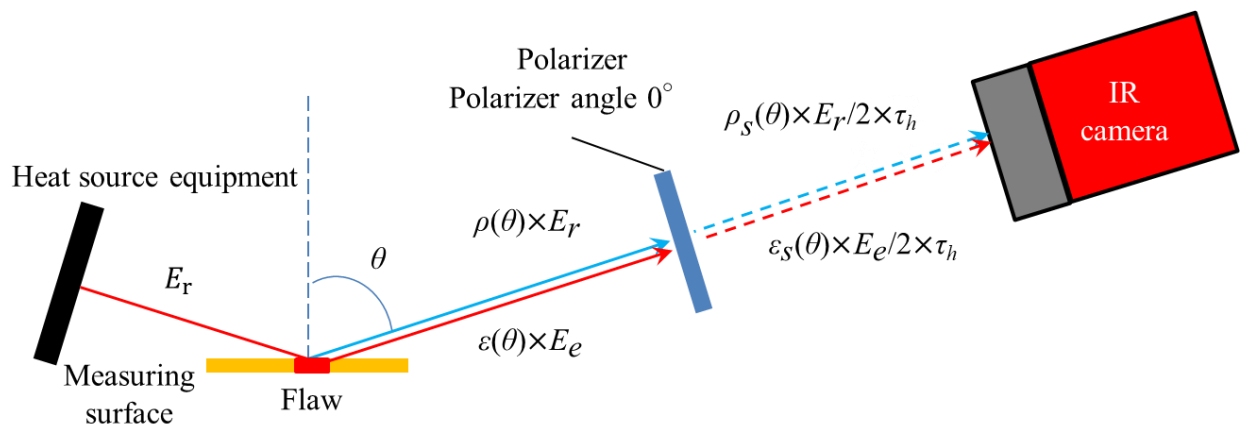
図 2-35 対面角が 50° ~ 70° 間の屈折率 1.5-2.0 の P 偏光反射率

2. 2. 4 絶縁物に対する背景反射の定量的な分離除去

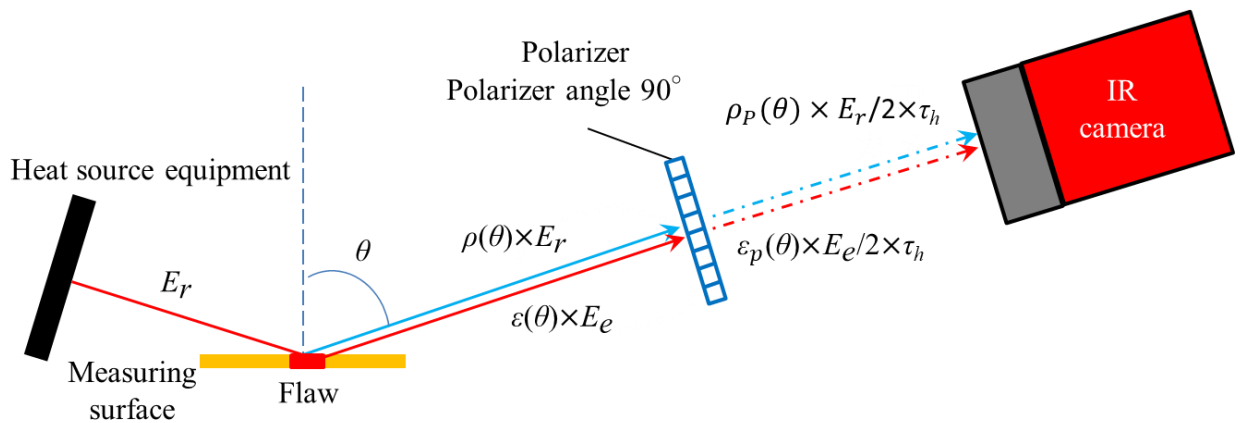
(1) 定量的な分離アルゴリズムの構築と実施手順

前項において、きず指示と背景反射が重なっている場合などに、きず指示のみを抽出する定量的な分離手法が必要なことが示された。そこで本項において、偏光理論を用いたきず指示と背景反射の定量的な分離手法を提案する。これは背景反射である赤外線反射強度ときず指示である赤外線放射強度を、偏光子を用いた測定値からそれぞれ計算で求めることで、背景反射ときずが重なっている場合でも、きずの存在を判断できるようにすることを目的としている。

図 2-36 に偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置に入射する赤外線強度を示す。



(a) 偏光子角度 0° (S 偏光)



(b) 偏光子角度 90° (P 偏光)

図 2-36 偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置に入射する赤外線強度

このとき $E_S(\theta)$: 対面角 θ における S 偏光強度, $E_P(\theta)$: 対面角 θ における P 偏光強度, $\varepsilon_S(\theta)$: 対面角 θ における S 偏光放射率, $\varepsilon_P(\theta)$: 対面角 θ における P 偏光放射率, $\rho_S(\theta)$: 対面角 θ における S 偏光反射率, $\rho_P(\theta)$: 対面角 θ における P 偏光反射率, E_e : きず指示から放射される放射強度, E_r : 反射熱源から放射される放射強度, τ_h : 偏光子の透過率とする. 撮影した熱画像の中に測定面から放射された赤外線強度と測定面で反射された赤外線強度が含まれている場合, 偏光子角度 0° と 90° のときの赤外線サーモグラフィ装置が取得する赤外線強度は, 以下の式(2-12), (2-13)で表される.

$$E_S(\lambda, \theta) = \varepsilon_S(\lambda, \theta) \times \frac{E_e}{2} \times \tau_h + \rho_S(\lambda, \theta) \times \frac{E_r}{2} \times \tau_h \quad (2-12)$$

$$E_P(\lambda, \theta) = \varepsilon_P(\lambda, \theta) \times \frac{E_e}{2} \times \tau_h + \rho_P(\lambda, \theta) \times \frac{E_r}{2} \times \tau_h \quad (2-13)$$

なお, Malus の法則により E_e および E_r は, 偏光子を通過した後に $1/2$ に減衰している²⁷⁾. あらかじめ対象材料の偏光反射率および偏光放射率を前項の手順で測定し, 現場にて E_S と E_P を測定すれば, 式(2-12), (2-13)で連立方程式を解くことで, きずから出る放射強度 E_e と背景反射である放射強度 E_r を分離取得できる.

このアルゴリズムに基づき, 背景反射ときず指示の分離手法のプログラムを **MATLAB** を用いて作製した. なお, 赤外線サーモグラフィ装置で測定される波長帯域が限定的であることから, 偏光反射率および偏光放射率は測定波長帯域の平均値を用いている.

また, 赤外線サーモグラフィ装置は視野の中央と端とでは, 対面角に違いがある. 放射率と反射率は対面角依存性があるため, 赤外線サーモグラフィ装置の各素子の対面角を, 幾何学的に計算し求めた. 非破壊検査の一般対象物における主要な形状として, 平板と円管形状を選択している.

図 2-37 に，平板の幾何学的計算方法のための模式図を示す．この時赤外線サーモグラフィ装置の中央の素子の対面角は式(2-14)となる¹⁹⁾．

$$\theta(x) = \tan^{-1} \left(\frac{x}{H} \right) \quad (2-14)$$

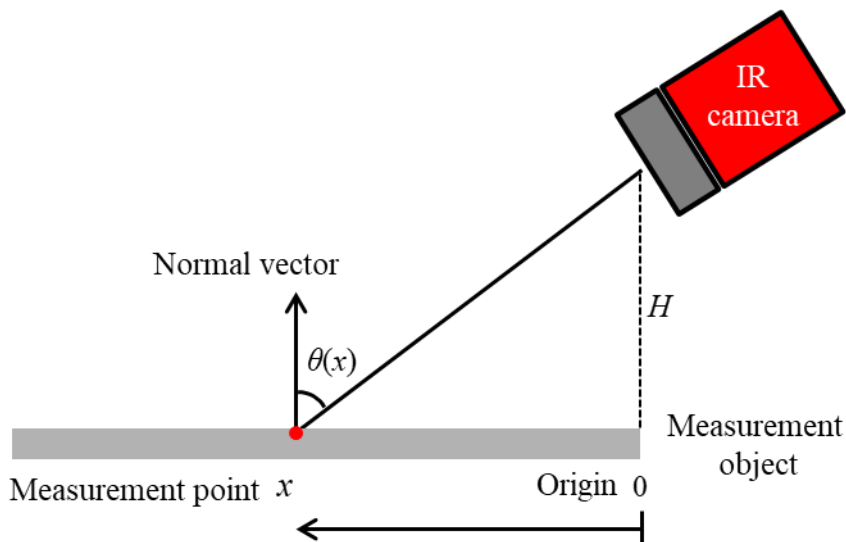


図 2-37 平板の幾何学的計算方法のための模式図

次に図 2-38 に円管の幾何学的計算方法のための模式図を示す．赤外線サーモグラフィ装置の検知器の位置を原点とし，測定点 x の位置における対面角度を $\theta(x)$ ，対象物から検知器までの距離を L ，対象物の半径を R ，測定点－対象物の中心－検知器の成す角を α ，測定点－検知器－対象物の中心の成す角を ω とする．図上の対面角は，式(2-15)-(2-17)を用いて，式(2-18)となる．

$$\theta(x) = \omega + \alpha \quad (2-15)$$

$$\tan \omega = \frac{R \sin \alpha}{L + R(1 - \cos \alpha)} \quad (2-16)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{x}{R} \right) \quad (2-17)$$

$$\theta(x) = \left[\frac{R \sin \left(\sin^{-1} \frac{x}{R} \right)}{L + R \left\{ 1 - \cos \left(\sin^{-1} \frac{x}{R} \right) \right\}} \right] + \sin^{-1} \frac{x}{R} \quad (2-18)$$

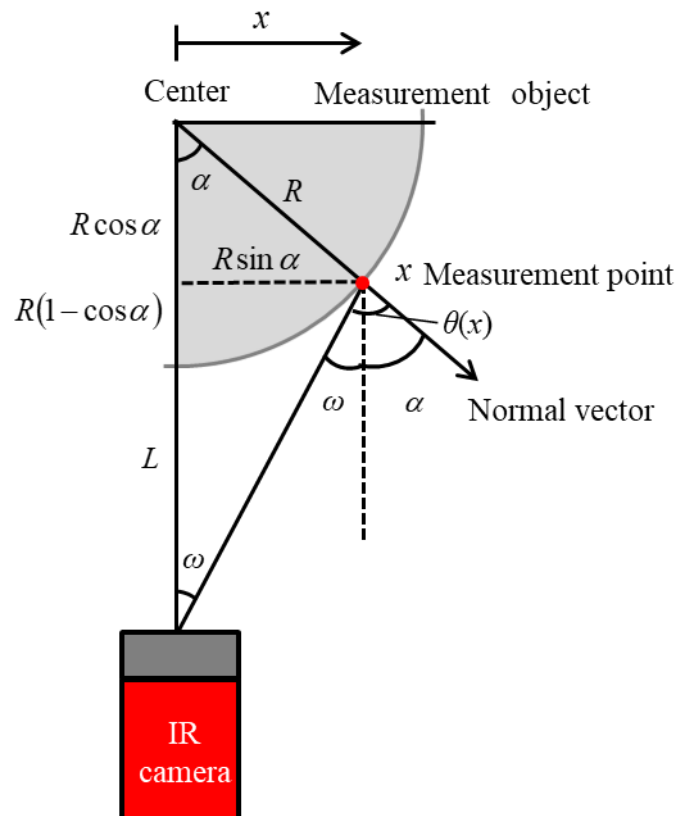


図 2-38 円管の幾何学的計算方法のための模式図

図 2-39 に背景反射の定量的な分離手法のフローチャートを示す。以下フローチャートに沿って手順を説明する。

- (1)-(3) : 測定中に温度異常部を発見した場合、偏光子を装着し偏光子角度 0° および 90° で撮像する。
- (4) : S 偏光および P 偏光反射率と S 偏光および P 偏光放射率を求めるために測定距離や図面などで画素ごとの対面角 θ を求める。
- (5) : (4) から対面角 θ における偏光反射率、偏光放射率を算出する。
- (6) : 分離プログラムにより背景反射を除去する。
- (7) : 作製した画像からきずを判断する。

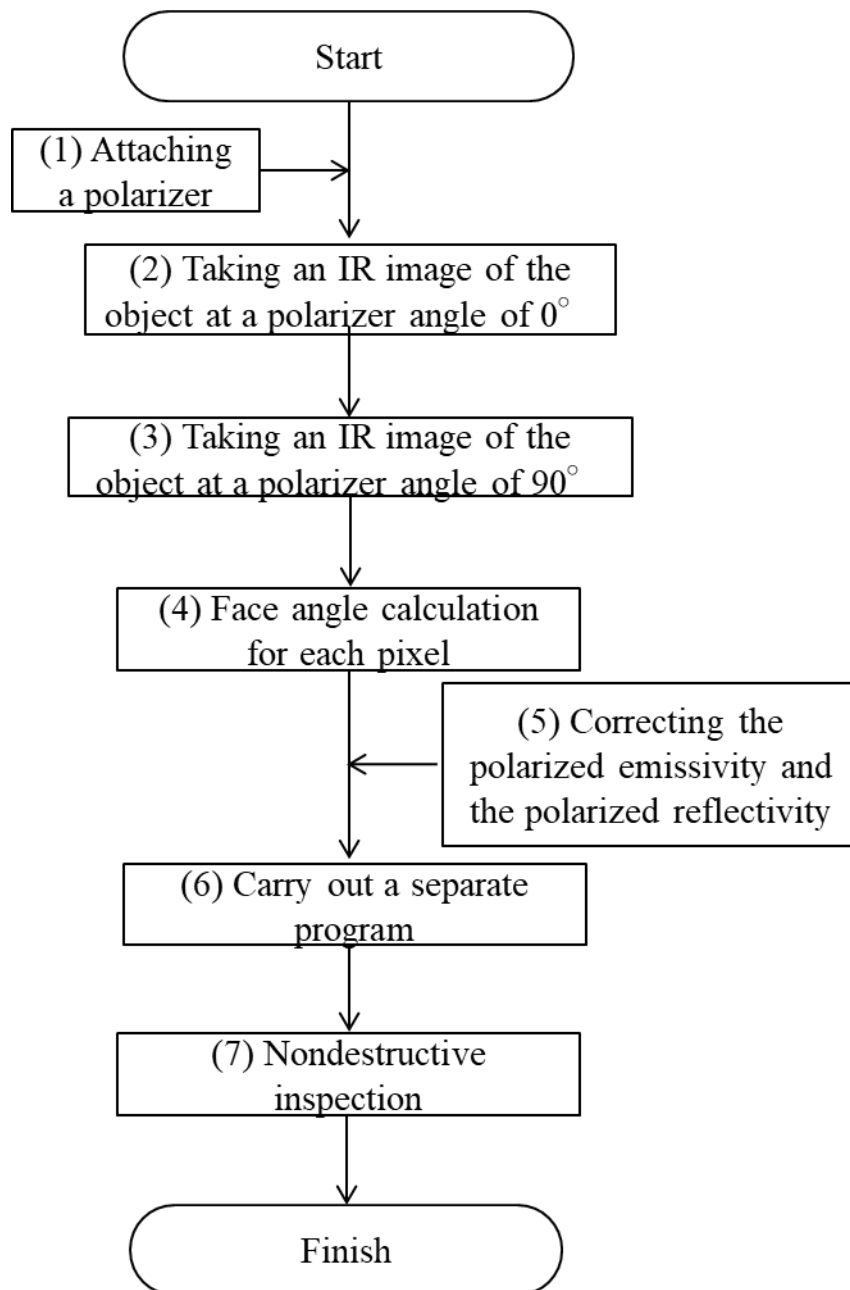
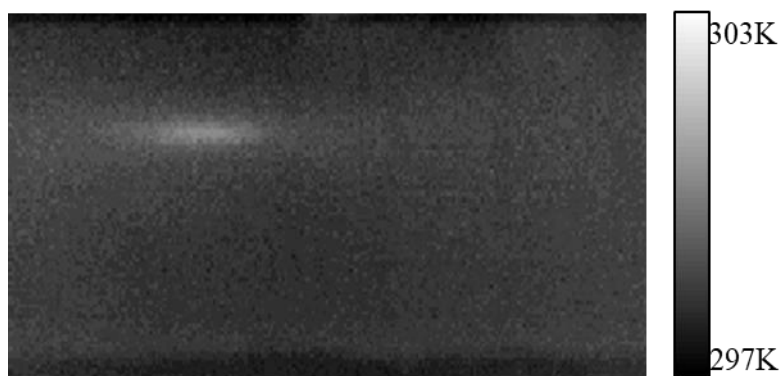


図 2-39 背景反射の定量的な分離手法のフローチャート

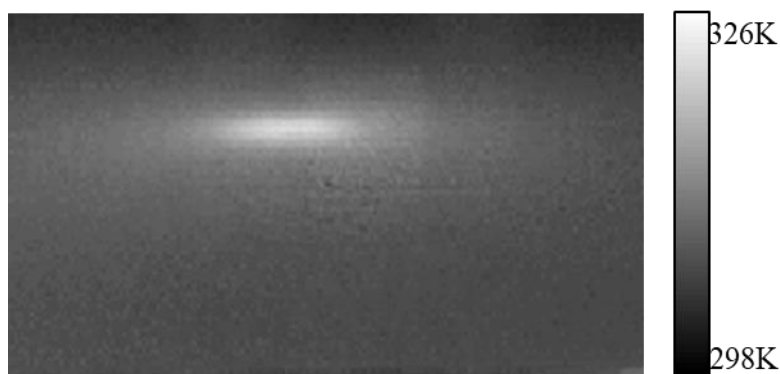
(2) 定量的分離手法の検証実験

a) 平板に対する実験

2.2.2 項(4)で行った平板に対する識別実験の結果に対して、定量的分離手法の検証実験を行った。背景反射ときず指示が重なっていない場合と重なっている場合について、それぞれ図 2-40(a), (b)に実験結果を示す。この時、(a)背景反射ときず指示が重なっていない場合では、通常 of 赤外線サーモグラフィ試験で撮像した温度プロファイルと比較するために、対面角 80° の放射率で補正をした。(a)背景反射ときず指示が重なっていない場合、および(b)背景反射ときず指示が重なっている場合でも背景反射が除去できており、きず指示のみが抽出できていることが確認できる。



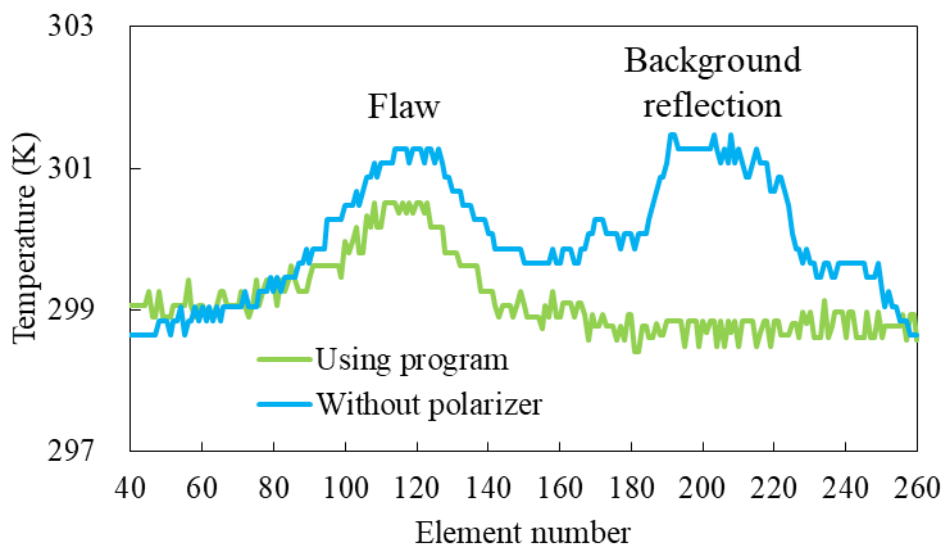
(a) 背景反射ときず指示が重なっていない場合
(除去前の熱画像は図 2-16)



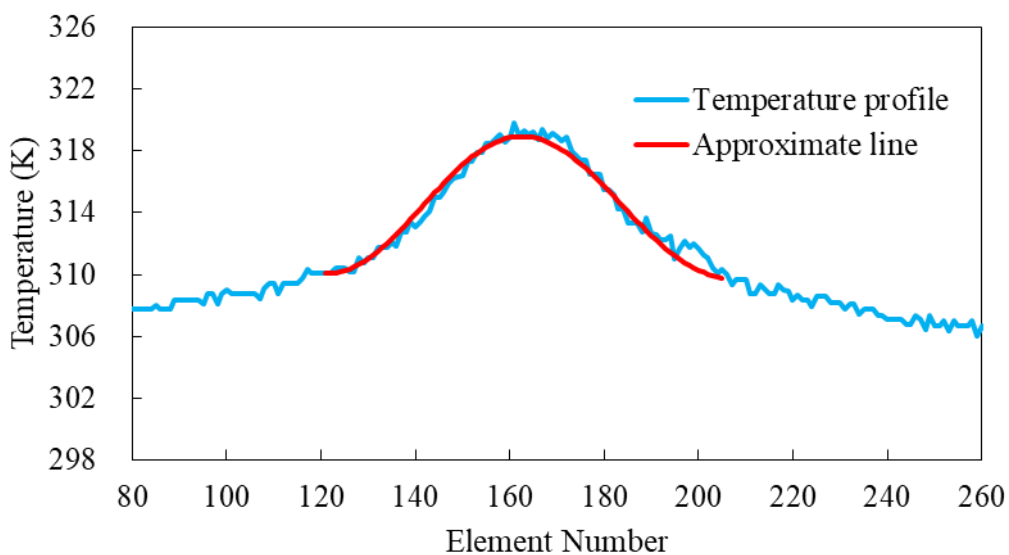
(b) 背景反射ときず指示が重なっている場合
(除去前の熱画像は図 2-22)

図 2-40 平板に対する分離プログラムの実験結果

図 2-40(a), (b)におけるきず指示位置の温度プロファイルを図 2-41(a), (b)に示す.



(a) 背景反射ときず指示が重なっていない場合
(除去前の画像は図 2-16)



(b) 背景反射ときず指示が重なっている場合
(除去前の画像は図 2-22)

図 2-41 熱画像の線上の温度プロファイル

図 2-41(a) 背景反射ときず指示が重なっていない場合では、背景反射が除去できており、もとの背景反射の位置は、健全部として一定の温度で表示されている。きず指示については、放射率および背景反射の補正が行われ、通常の赤外線サーモグラフィ試験で得られる温度を得ることができている。また、図 2-41(b) 背景反射ときず指示が重なっている場合においても、背景反射が除去できており、きず指示が抽出できている。図 2-41(b)の温度プロファイルを用いて、きずサイズの同定を試みた。温度プロファイルを 6 次式に最小二乗近似し、各画素の温度勾配が最大になる場所をきずの縁とした^{28),29)}。これは、数値解析と実験から経験的に求められた方法である。図 2-42 に、図 2-41(b)の各画素の温度勾配を示す。得られたきずの縁の大きさは 29.4mm であり、加熱装置サイズ 30.0mm と概ね一致した。図 2-41(b) 背景反射ときず指示が重なっている場合では、取得したきずの温度は 321.5K であった。設定温度 323K との差は 1.5K であり、温度についてもある程度の補正できた。

以上の結果から、平板に対して背景反射を除去でき、本分離プログラムの有効性を示すことができた。

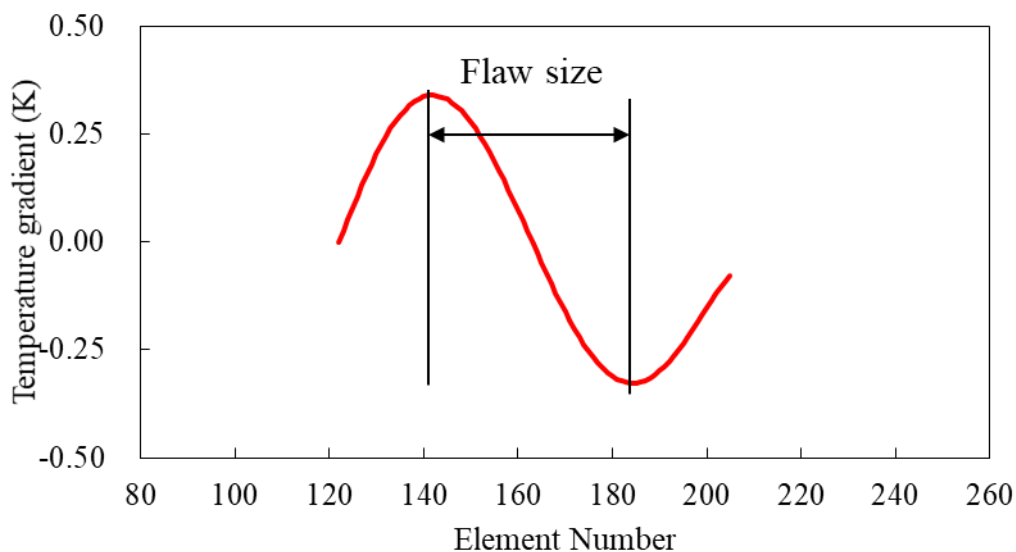


図 2-42 図 2-41(b)における各素子間の温度勾配

b) 円管に対する実験

続いて、円管に対して背景反射ときず指示の分離実験を行った。図 2-43 に実験の概要を示す。偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置および反射熱源は前節と同様のものを使用した。反射熱源の温度は、303K である。円管は高さ 95mm 直径 300mm のステンレス鋼製容器を使用し、底面から 50mm まで水を注いでいる。また、円管表面には、クラフトテープを貼付している。円管の下にラバーヒーターを設置し、水の温度が 323K になるように加熱維持した。赤外線サーモグラフィ装置から円管までの距離は 700mm、円管から反射熱源までの距離は 300mm である。なお、反射熱源は、赤外線サーモグラフィ装置から見て円管の右斜め後方に設置し、背景反射を模擬した。

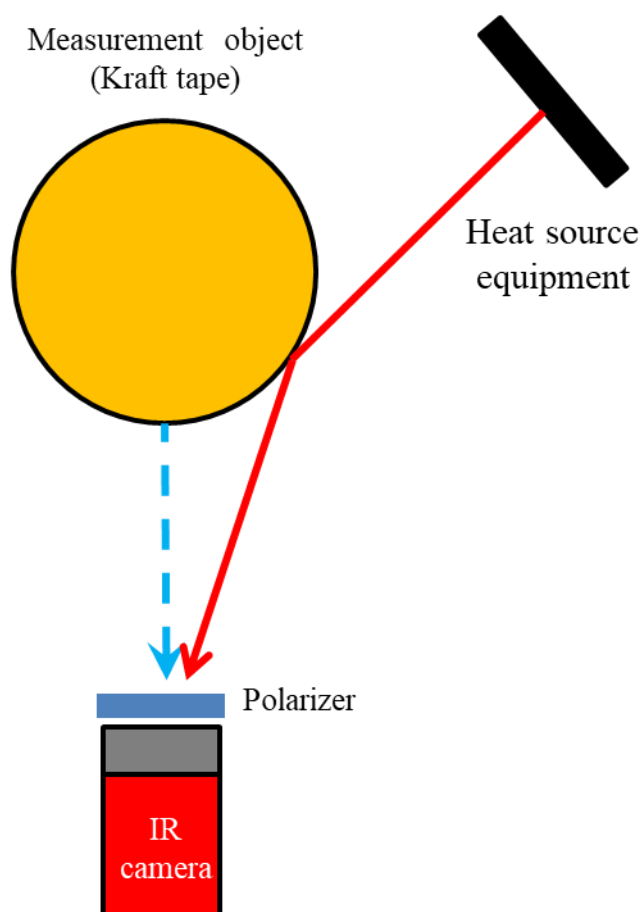
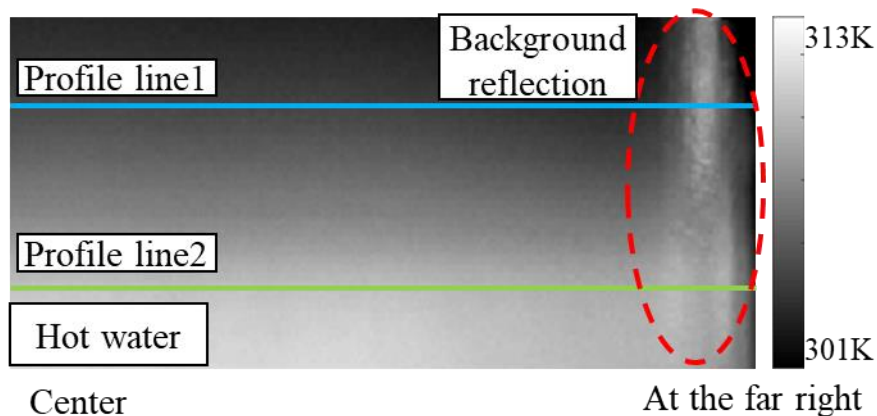


図 2-43 円管に対する実験の概要

図 2-44(a)に偏光子なしで撮像した熱画像を，図 2-44(b)に分離プログラムを適用した熱画像を示す．熱画像は円管の右半分を撮像対象としており，画面左端が円管中央，画面右端が円管右端となる．図 2-45(a)，(b)に，図 2-44 に示した上部（水なし部）線上の温度プロファイルを，図 2-46(a)，(b)に同下部（水あり部）線上の温度プロファイルを示す．

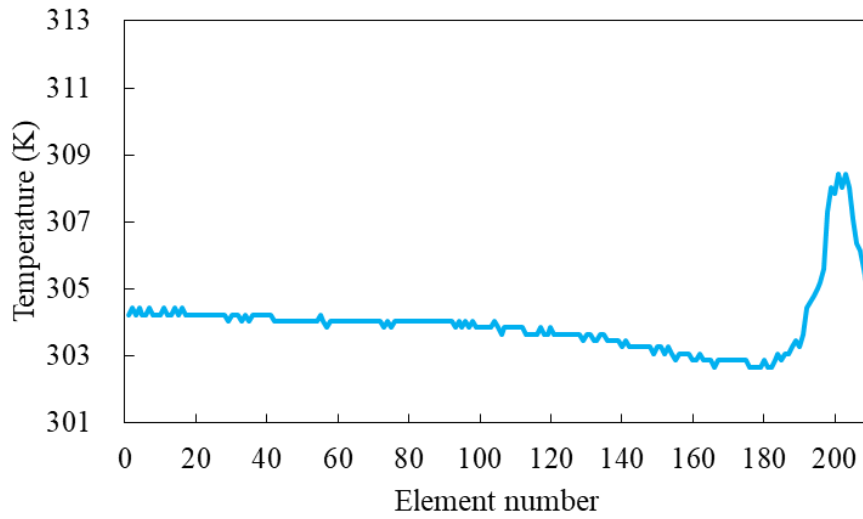


(a) 偏光子なしで撮像した熱画像

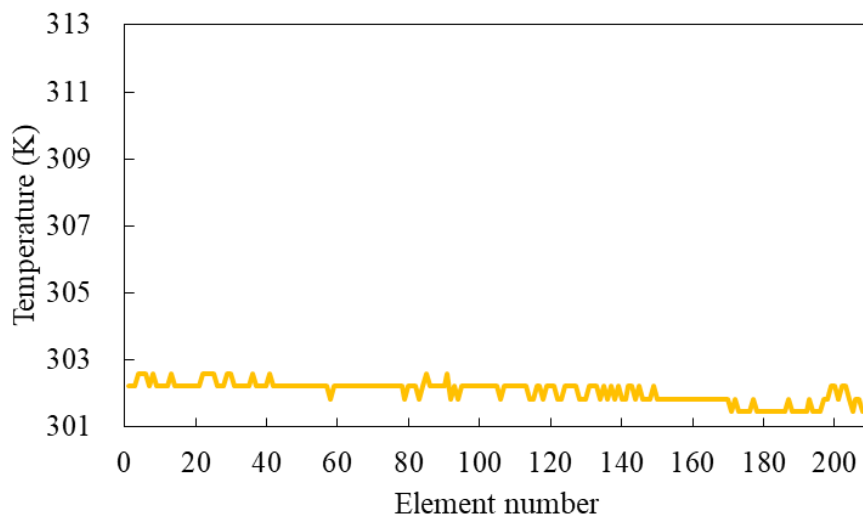


(b) 分離プログラム適用後の熱画像

図 2-44 従来の熱画像と分離プログラムの実験結果

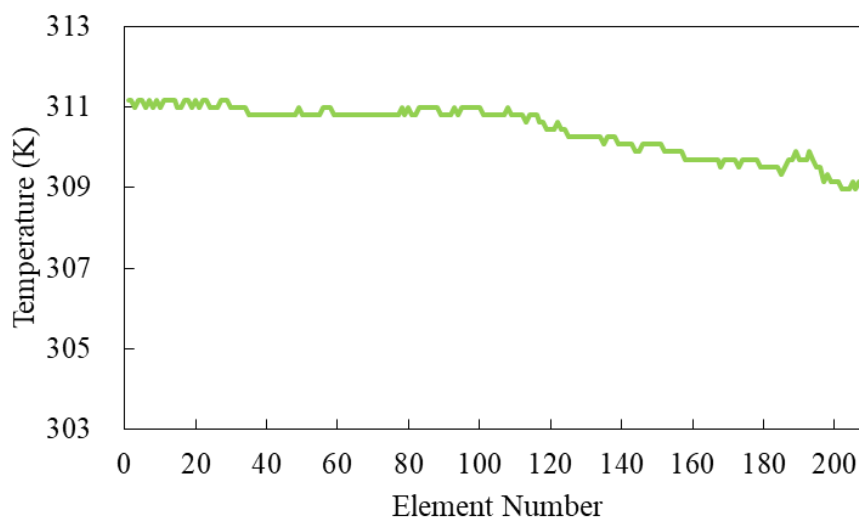


(a) 偏光子なし (Profile line 1)

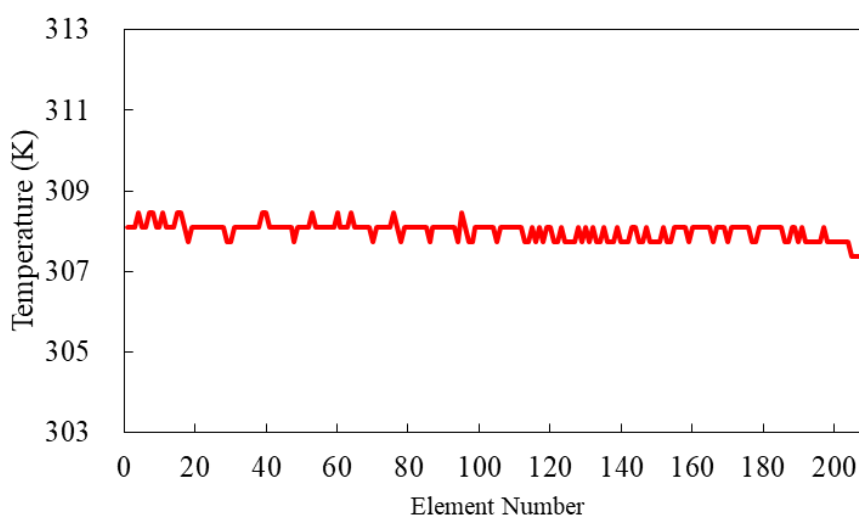


(b) 分離プログラム適用後 (Profile line 3)

図 2-45 図 2-44 の上部線上 (水なし部) の温度プロファイル (円管に対する実験)



(a) 偏光子なし (Profile line 2)



(b) 分離プログラム適用後 (Profile line 4)

図 2-46 図 2-44 の下部線上 (水あり部) の温度プロファイル
(円管に対する実験)

図 2-44~46(a)偏光子なしで撮像した熱画像では、画面右上端部に高温の背景反射が写りこんでおり、きずと誤検知してしまう危険性がある。また、対面角度増加に起因する放射率低下により、右端部に向かって温度下降している。一方、分離プログラム適用により背景反射を除去できていることが、図 2-44~46(b)の熱画像および温度プロファイルで確認できる。また、対面角度の変化による放射率の補正処理が機能し、円管中央部と端部でほぼ同じ温度になっている。

以上の結果から、円管形状の対象物に対して分離プログラムを用いることで、放射成分と反射成分を分離し、背景反射を除去できることを示した。

2. 3 金属に対する背景反射の低減および除去

非破壊試験における赤外線サーモグラフィ法の特徴の一つとして、対象材料の制限を受けにくいことがあげられ、ステンレス製原子力発電所用配管の内部減肉やアルミニウム製航空機用ハニカムサンドイッチパネルの層間はく離なども検査対象となっている。これら金属の表面は腐食しにくいいため、塗装はされず、金属面がむき出しになっていることが多い。しかし、絶縁物と比較して金属の反射率が高いため、背景反射の影響を受けやすい問題を有している。そこで本節では、測定対象物を金属とし、前節において絶縁物に対し確立した定性的な低減手法および定量的な分離手法が適応できるか検証した。

2. 3. 1 金属の偏光理論

まず、直線偏光の理論における、金属と絶縁物との違いについて述べる。ある物質の境界面で反射される赤外線のス偏光反射率 $\rho_{Sm}(\lambda, \theta)$ と P 偏光反射率 $\rho_{Pm}(\lambda, \theta)$ は Maxwell の電磁波理論に基づき式(2-19), (2-20)となる¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。

$$\rho_{Sm}(\lambda, \theta) = \frac{(n - \cos \theta)^2 + k^2}{(n + \cos \theta)^2 + k^2} \quad (2-19)$$

$$\rho_{Pm}(\lambda, \theta) = \frac{(n \cos \theta - 1)^2 + (k \cos \theta)^2}{(n \cos \theta + 1)^2 + (k \cos \theta)^2} \quad (2-20)$$

ここで、 λ は波長、 θ は対面角、 n は屈折率および k は消衰係数である。屈折率と消衰係数は波長依存性を有する。絶縁物では、消衰係数は小さく無視できるのに対し、金属では消衰係数は無視できない^{15), 16)}。そのため求めるべき材料定数が絶縁物と比較して1つ増えている。反射率は式(2-21)となる。

$$\rho_{Tm}(\lambda, \theta) = \frac{1}{2} \{ \rho_{Pm}(\lambda, \theta) + \rho_{Sm}(\lambda, \theta) \} \quad (2-21)$$

また、金属のように透過率が 0.0 とみなせるような材料では、放射率はエネルギー保存則により式(2-22)となる。

$$\varepsilon_{Tm}(\lambda, \theta) = 1 - \rho_{Tm}(\lambda, \theta) = 1 - \frac{1}{2} \{ \rho_{Pm}(\lambda, \theta) + \rho_{Sm}(\lambda, \theta) \} \quad (2-22)$$

さらに、S 偏光放射率 $\varepsilon_{Sm}(\lambda, \theta)$ と P 偏光放射率 $\varepsilon_{Pm}(\lambda, \theta)$ は式(2-23), (2-24)となる。

$$\varepsilon_{Sm}(\lambda, \theta) = 1 - \rho_{Sm}(\lambda, \theta) \quad (2-23)$$

$$\varepsilon_{Pm}(\lambda, \theta) = 1 - \rho_{Pm}(\lambda, \theta) \quad (2-24)$$

2. 3. 2 金属に対する背景反射の低減およびきずの識別

本項では、2.2.2 項で構築した背景反射ときず指示の定性的識別方法の金属材料への適用を試みる。

(1) 金属の偏光反射率の測定と消衰係数および屈折率の決定

反射赤外線において、偏光反射率と対面角の関係を求めるために、高温熱源から放射される赤外線を測定対象物表面で反射させ、偏光子付赤外線サーモグラフィ装置で測定した。測定対象物は、腐食に強く、一般的に使用される際には表面に塗装が施されないステンレス鋼板 (SUS304) である。表面を鏡面研磨した縦 400mm×横 400mm×厚さ 10mm の平板を水平に設置した。反射熱源の温度を 343.0K に設定し、対面角は 30°、40°、60°、80°で測定している。

図 2-47 に偏光反射率の実験値と対面角の関係を示す。

理論に従う計算値には、消衰係数と屈折率が必要となる。これら値は、分光エリプソメトリー¹⁷⁾で求めることができるが、波長依存性があり、本研究で使用している赤外線サーモグラフィ装置の波長帯域 8~14 μm とずれがあるため、実験値を利用して、以下の手順で決定した。まず、対面角 30°の S 偏光実験値と P 偏光実験値を平均して求めた反射率 $\rho_{Tm}(\lambda, \theta)$ を、式(2-21)の左辺に代入する。式(2-21)の右辺は、式(2-19)と式(2-20)を利用することで、本式の未知数は屈折率 n と消衰係数 k の 2 つになる。続いて、対面角 80°の P 偏光実験値を式(2-19)に代入する。この式における未知数も屈折率 n と消衰係数 k の 2 つになる。よって、これら両式を連立すると、測定対象物の屈折率 n と消衰係数 k が求められる。その結果、屈折率 2.8、消衰係数 5.3 であった。これら値は、赤外線サーモグラフィ装置の検出波長領域 8~14 μm の平均値となる。最後に、これら材料定数を利用して、式(2-19)および式(2-20)から図 2-47 の計算値を決定した。求めた計算値と他の対面角の偏光実験値は概ね一致した。

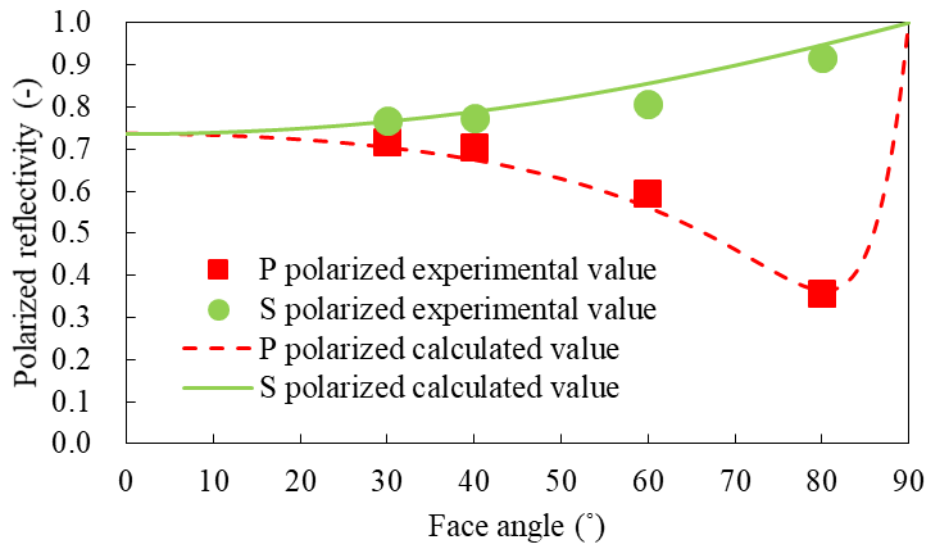


図 2-47 偏光反射率と対面角の関係における計算値と実験値の比較

(2) 金属の偏光放射率の測定

次に、偏光放射率の測定の概要を図 2-48 に示す。測定対象物は偏光反射率の測定と同様のものを使用した。また、ステンレス鋼板の測定面の一部を下面より直径 30.0mm、高さ 40.0mm のアルミニウム円柱を用いて接触加熱した。なおアルミニウム円柱は下面よりシリコンラバーヒータで加熱されており、測定対象物の上表面の温度が一定値 (343.0K) に保たれるよう制御している。表面温度は、熱電対で測定した。測定面から偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置までの距離を 700mm とし、対面角は、30°、40°、60°、80°で測定を行った。測定面の偏光放射率は、ステンレス鋼板加熱部からの赤外線強度と、加熱部と同じ温度の黒体の赤外線強度を赤外線サーモグラフィ装置で測定し、それらの比から決定した。なお、黒体にはチノー製の計量研形比較黒体炉 IR-R24 を利用した。

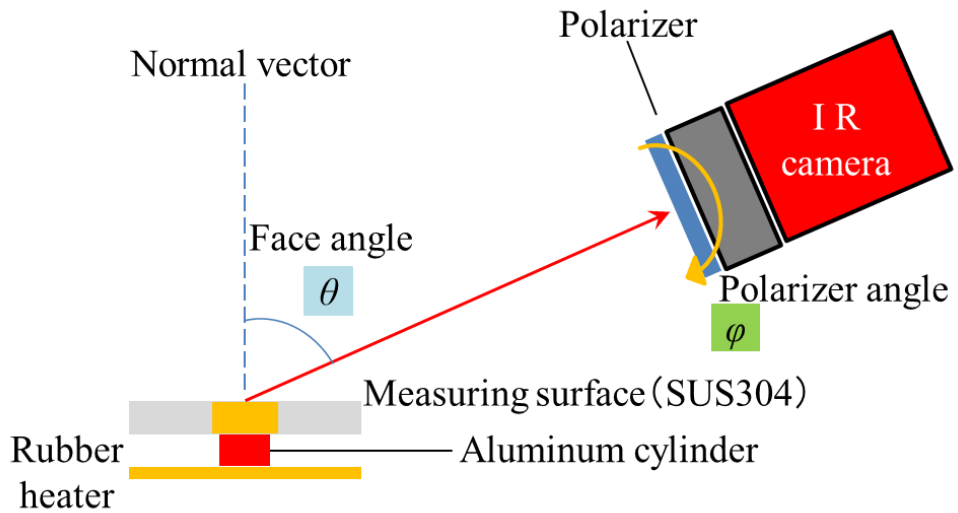


図 2-48 金属に対する偏光放射率の測定の概要

図 2-49 に偏光放射率の計算値と実験値の比較を示す。偏光放射率の計算値は、前項偏光反射率を求める際に得られた屈折率と消衰係数の値を利用し、式(2-23)、(2-24)から決定している。偏光放射率でも計算値と実験値は概ね一致している。

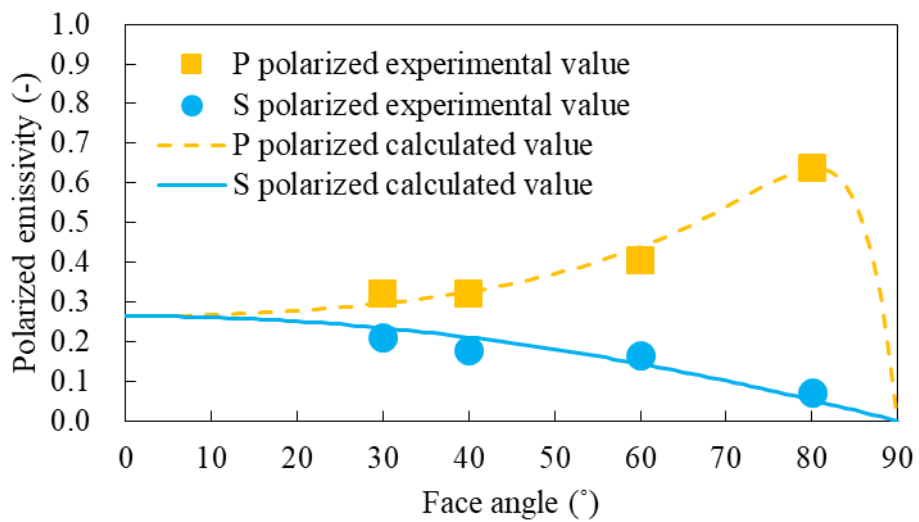


図 2-49 偏光放射率の理論値と実験値の比較と対面角の関係

(3) 金属の識別方法および検証実験

2.2.2 項(4)で行った絶縁物に対する背景反射ときずの識別方法を，金属に適応させた．2.2.2 項(4)の検証実験と同じ条件で，測定対象物のみステンレス鋼板に変更し，実験を行った．きず指示の見かけ温度と，測定面で反射される反射熱源の見かけ温度が識別困難な条件として同一になるよう，測定対象物の表面温度を 327.8K，反射熱源の表面温度を 307.0K としている．赤外線サーモグラフィ装置に表示される背景反射ときず指示の配置は，両者が重なっていない場合と重なっている場合の 2 種類の実験を行った．

まず，背景反射ときず指示の配置が重なっていない場合について示す．図 2-50 に偏光子なしで測定した熱画像を，図 2-51(a)に偏光子角度 0° で測定した熱画像を，図 2-51(b)に偏光子角度 90° で測定した熱画像をそれぞれ示す．図 2-51 の熱画像では，3 個の十字で示した健全部，きず指示および背景反射のそれぞれの見かけの温度を記載している．また，その際の温度および各温度差を表 2-3 に示す．なお健全部は温度変化が少ない位置から選定した．

偏光子なしで撮像した場合（図 2-50），背景反射ときず指示はともに高温部として表示され，どちらであるか判別できない．一方，偏光子を付けた場合，偏光子角度を 0° から 90° に変えたときの測定部における温度差 $(T_{90} - T_0)$ と健全部における温度差 $(T_{s90} - T_{s0})$ との差 $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ を評価すると，きず指示では， $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ が 4.5K と正であるが，背景反射では $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ が -2.5K と負であり，絶縁物と同様に識別が可能である．

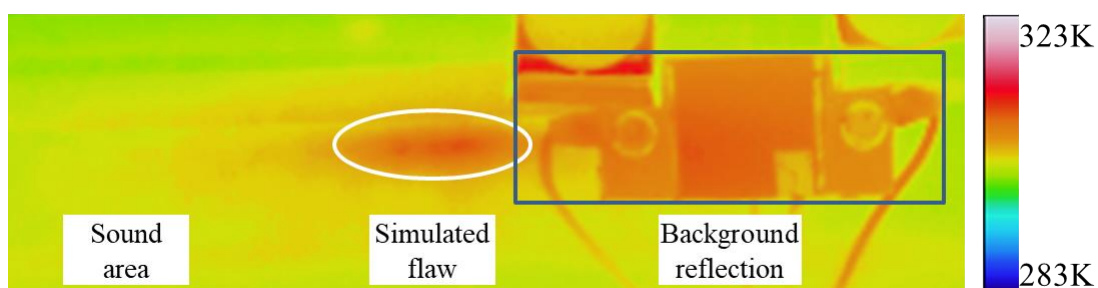
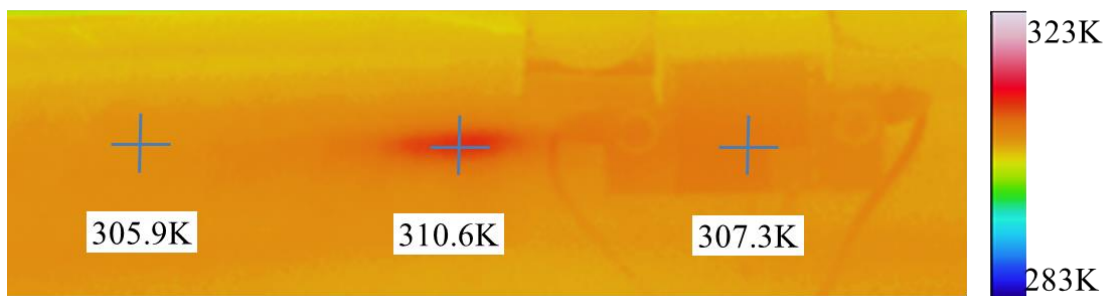


図 2-50 偏光子なしで測定した金属の熱画像
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)



(a) 偏光子角度 0°



(b) 偏光子角度 90°

図 2-51 偏光子ありで撮像した金属の熱画像
(きず指示と背景反射が重なっていない場合)

表 2-3 健全部, きず指示および背景反射の温度および温度差

	Sound area (K)	Simulated flaw(K)	Background reflection(K)
Polarizer angle 0°: T_0	301.1	301.3	305.0
Polarizer angle 90°: T_{90}	306.3	310.6	307.3
Temp. diff. b/w polarizer angles : $T_{90} - T_0$	4.8	9.3	2.3
Temp. diffs. with sound area : $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$	0.0	4.5	-2.5

次に背景反射ときず指示の配置が重なっている場合について示す。図 2-52 に偏光子なしで測定した熱画像を，図 2-53 (a)に偏光子角度 0° で測定した熱画像を，図 2-53 (b)に偏光子角度 90° で測定した熱画像をそれぞれ示す。なお，図 2-52 の白線については 2.3.3 目に後述する。

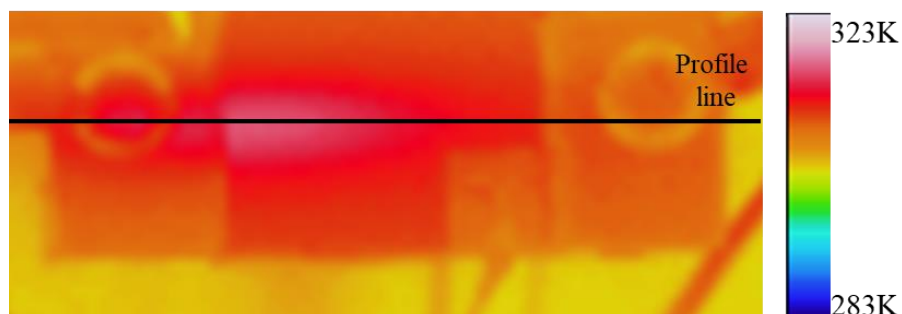
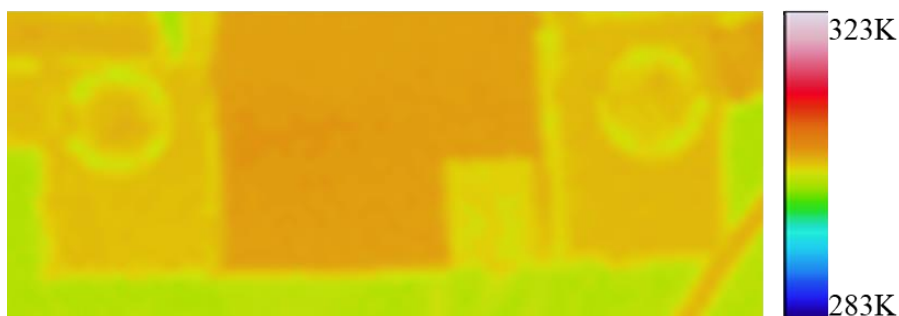
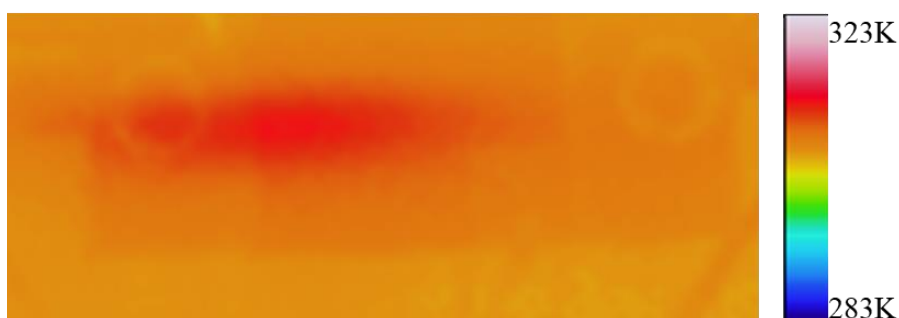


図 2-52 偏光子なしで測定した金属の熱画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)



(a) 偏光子角度 0°



(b) 偏光子角度 90°

図 2-53 偏光子ありで撮像した金属の熱画像
(きず指示と背景反射が重なっている場合)

偏光子なしの場合（図 2-52）では，前項と同様に背景反射ときず指示は見分けることはできない．一方，偏光子ありの場合では，偏光子角度が 0° から 90° に変化すると温度変化が確認できるため，概ねのきず指示は確認できる．特に図 2-53(b)では，きず指示が見分けやすくなっている．しかし，背景反射ときず指示のどちらの見かけの温度が高温で支配的に表示されるかにより $[(T_{90} - T_0) - (T_{s90} - T_{s0})]$ の値の正負が決定するため，得られた指示が，背景反射のみによるもの，あるいはきず指示だけによるものと誤判断してしまう危険性は解決されないで残る．すなわち絶縁物の場合と同様，本識別手法は，偏光子を用いた計測と簡単な差分処理を利用するだけで，背景反射ときず指示を定性的に識別できるが，背景反射を除去し，きず指示のみを抽出する定量的な分離方法の確立が望まれる．

2. 3. 3 金属に対する背景反射の定量的な分離除去

金属材料において背景反射ときず指示が重なっている場合でも，前節で構築した分離プログラムを用いて，背景反射を定量的に分離し，きず指示を正確に判断できるか実験的に検証した．このときの偏光反射率と偏光放射率は，各素子の撮像位置に応じた対面角を求め，2.3.2 項(1)，(2)の実験から得た計算値を使用した．

前項において実施した背景反射ときず指示が重なっている場合の熱画像（図 2-52）に対し，分離プログラムを適用した結果を図 2-54 に示す．また，分離プログラム適用前後の図線上の温度プロファイルを，それぞれ図 2-55 および図 2-56 に示す．適用前の熱画像および温度プロファイルに対し，適用後は反射熱源の放射面や固定具からの背景反射を除去できており，模擬きずの温度勾配が確認できる．また，温度プロファイルのきず指示の温度は， 326.8K であり模擬きずの設定温度の 327.8K と 1K 差であることから，温度についてもある程度の補正ができた．

併せて，図 2-56 の温度プロファイルを用いて，きずサイズの同定を試みた．温度プロファイルを 6 次式に最小二乗近似し，各素子の温度勾配が最大になる場所をきず縁とした^{28),29)}．近似曲線を図 2-56 に赤線にて追記し，各素子の温度勾配を図 2-57 に示す．図 2-57 からきずサイズは 30.5mm と求められ，加熱装置サイズ 30.0mm と概ね一致した．

以上の結果から，本分離プログラムは金属材料に対しても，背景反射を除去し，定量的にきず指示を抽出できることが示された．

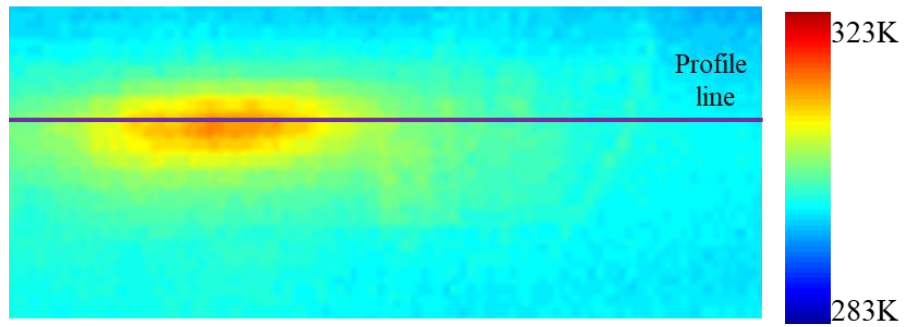


図 2-54 分離プログラム適用後の熱画像（適用前の熱画像は図 2-52）

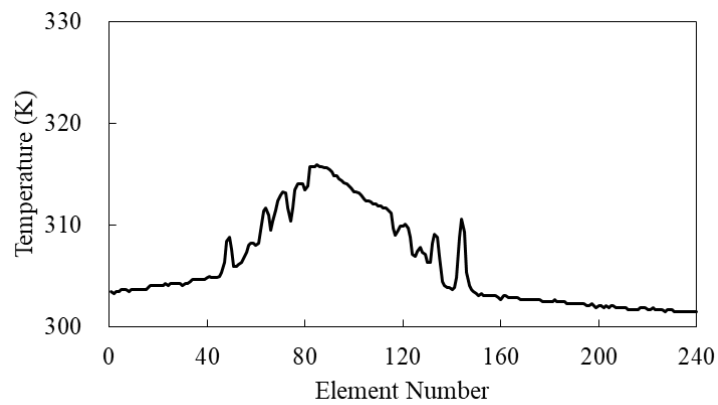


図 2-55 分離プログラム適用前の温度プロファイル（熱画像図 2-52）

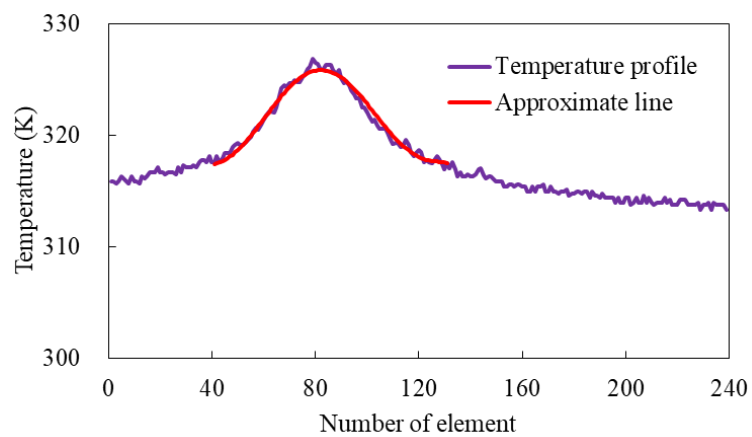


図 2-56 分離プログラム適用後の温度プロファイル（熱画像図 2-54）

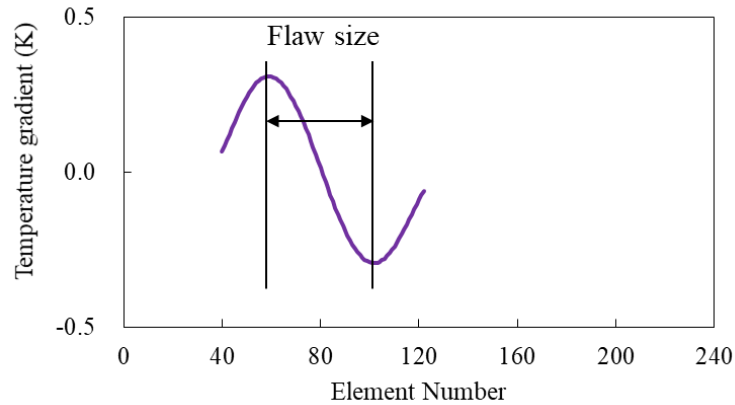


図 2-57 図 2-56 の温度プロファイルにおける各素子間の温度勾配

2. 4 偏光理論を用いた背景反射除去方法の限界と注意点

本章では、偏光理論を用いた背景反射の低減および定量的な分離除去手法を提案し、非破壊試験に対する有効性を示してきた。しかし、本提案手法は、全ての条件に適用が可能な万能な方法ではなく、2つの注意すべき問題点が存在する。それは1. 対面角に関する分離手法の限界と、2. 測定回数に関する時間的制約である。以下に両者について説明する。

- ・ 背景反射の除去手法には対面角に関する分離手法の限界がある。本提案手法は、赤外線放射強度と赤外線反射強度の関係を2変数の線形方程式で表し、式を解くことにより背景反射を除去している。各偏光反射率と各偏光放射率の差を利用しているため、対面角が小さければ、S偏光とP偏光の差が小さくなり、結果として背景反射ときず指示の分離誤差が大きくなる問題が生じる。本研究で使用している赤外線サーモグラフィ装置では、出力するカウント値の最小数値が1上昇すると温度（常温付近）が約0.1K上昇する。また装置に入力する放射率は小数点2桁である。入力放射率の変化は、カウント値の変化より計測に与える影響が大きく、よって、本除去手法を適用させる際には、S偏光とP偏光の放射率の差が0.01以上あることが望ましいと考えられる。S偏光とP偏光の放射率の差と対面角および屈折率の関係を図2-58に示す。絶縁物は一般的に屈折率1.5~2.0である。この中で放射率差が0.01になる最大対面角の屈折率は1.5である。屈折率 $n=1.5$ の材料では、放射率差が0.01に到達する対面角が約 18° 以上であれば本手法は行うことができると考える。対面角が約 18° 以下では、背景反射と放射を分離することは難しい。

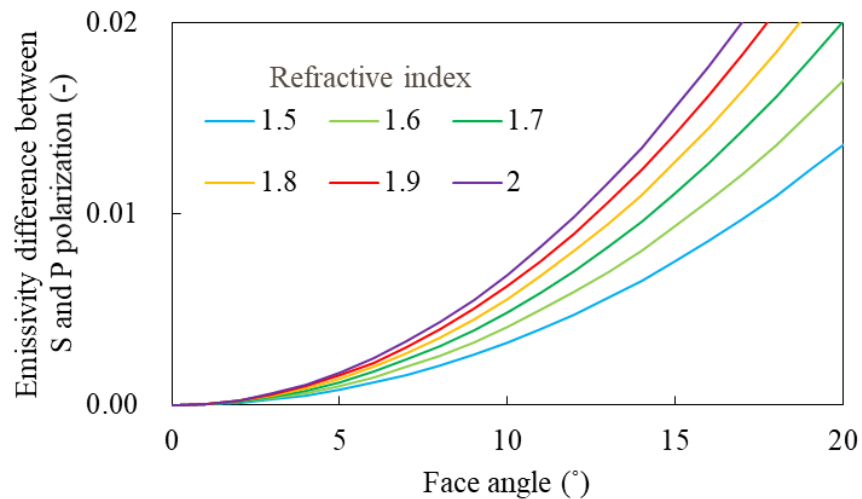


図 2-58 S 偏光と P 偏光の放射率の差と対面角および屈折率の関係

- 本研究で使用した偏光子付き赤外線サーモグラフィ装置では、偏光子の向きを変えることによって、S 偏光と P 偏光を計測している。そのため、S 偏光と P 偏光の同時計測はできず、2 測定間に時間差が発生してしまう。よって本研究では、偏光子の向きを変える約 1~2 秒間で定常状態を保てる現象に限り、背景反射とキズ指示の分離に有効である。また、非定常状態の背景反射やキズ指示の場合は、2 台の赤外線サーモグラフィ装置で S 偏光と P 偏光を同時計測すれば良いが、視野を合わせる画像処理技術が別に必要となる。あるいは、市販の偏光センサー付き高性能赤外線サーモグラフィ装置を使用すれば適応できると思われる^{30),31)}。これは偏光子角度 0°, 45°, 90°, 135°の 4 つのセンサーが一組の素子として配置されており、4 つの偏光子角度の直線偏光の同時取得が可能である。本装置は、有効検出素子が 1/4 になることに注意が必要である。

2. 5 結 言

本章では、偏光理論について着目し、偏光子を利用した計測による背景反射の低減およびきず指示（放射）との定量的分離を行った。以下に、得られた結果を示す。

- ・ 偏光子角度 0° から 90° に変化させたときの温度差分を利用し、きず指示と背景反射の定性的な識別が可能である。ただし、適用は、背景反射ときず指示の位置が離れていた場合に限られる。
- ・ 絶縁物において、視野を Brewster 角に制限し P 偏光測定することで、反射率が 0.0 となり、背景反射のない撮像が可能である。
- ・ きず指示と背景反射が重なっている場合でも、提案した分離手法により、背景反射を除去でき、きず指示の定量的な抽出が可能である。
- ・ 対面角が小さい場合、S 偏光と P 偏光の差が小さくなるため、本分離手法の適用は難しい。また、S 偏光と P 偏光の測定時差にも注意が必要である。

以上の結果により、絶縁物および金属に対して偏光理論を用いた背景反射の低減および除去は有効である³²⁾⁻³⁴⁾。

第 2 章 参考文献

- 1) 好村滋洋：光と電波，培風館，pp.44-49，(1990)
- 2) 石黒造三：光学，共立全書，pp.10-22，(1953)
- 3) 黒田和雄：物理光学，朝倉，pp.1-58，(2011)
- 4) 江馬一弘：光物理の基礎，朝倉，pp.1-28，(2010)
- 5) W.A.Shurcliff 著，福富斌夫，有賀那加夫，三輪啓二訳：偏光とその応用，共立出版，pp.3-9，123-160，(1965)
- 6) 梅崎栄作：光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望，精密工学誌，79(7)，pp.607-611，(2013)
- 7) 宮崎大輔，池内克史：CV におこる偏光を用いた研究，情報処理学会論文誌，158(31)，pp.64-72，(2008)
- 8) 齊藤めぐみ，佐藤洋一，池内克史：赤外光の偏光解析とその透明物体形状モデリングへの応用，情報処理学会論文誌，41(10)，pp.12-18，(2000)
- 9) E. P. Whinton：Preliminary Investigation of Polarization Effects During Metal Cutting，Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers，8013，pp.1-12，(2011)

- 10) 井内徹：金属の酸化時の偏光特性と放射率補正放射側温への応用，計測自動制御学会論文集，35(7)，pp.832-839，(1999)
- 11) 井内徹：偏光光度を利用した常温付近における光沢金属の放射側温法，計測自動制御学会論文集，36(5)，pp.395-401，(2000)
- 12) J. D. Howe and R. G. Buser：U. S. Army NVESD MWIR Polarization Research for Ground Targets，NATO-OTAN，pp.1-18，(2005)
- 13) M. Vollmer, S. Henke, D. Karstädt, K.-P. Möllmann and F. Pinno：Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging，Proceedings of InfraMation，pp.287-298，(2004)
- 14) M. A. Bramson：INFRARED RADIATION A Handbook for Applications，PLENUM PRESS NEW YORK 1968，(1968).
- 15) 増喜彰久，入月守，森下侑一：物体の放射率，計装，17(6)，pp.1-7，(1974)
- 16) R. Siegel and J. R. Howell：Thermal Radiation Heat Transfer，Taylor & Francis，pp.47-133，(1992)
- 17) 藤原祐之：分光エリプソメトリー，丸善，pp.13-56，(2003)
- 18) 小林千恵：背景反射低減赤外線サーモグラフィ法の構築，防衛大学校修士論文，(2015)
- 19) N. Ogasawara, C. Kobayashi and H. Yamada：Image Processing for Reduction of Background Reflection from Thermal Image，Advanced Experimental Mechanics，3，pp.167-172，(2018)
- 20) 株式会社アイ・アール・システム：Wire Grid Polarizer Test Report
- 21) NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社：TVS-500EX 取扱説明書
- 22) 浅野有一郎，塩住基二，虎尻彰，柳本隆之，栗本邦夫，八角忠明：レーザを用いた鉄板の表面粗度および光沢度の測定，川崎製鉄技報，18(2)，pp.114-121，(1986)
- 23) 深尾宙彦，北垣亮馬，佐藤幸恵，野口貴文：コンクリート表面の明度および光沢度に及ぼす表面性状の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，35(1)，pp.649-654，(2013)
- 24) 星文和，大場義浩，後藤一磨，三坂好央，佐藤慎司：拡散反射光の偏光特性による用紙銘柄判別，Ricoh Technical Report，41，pp.1-7，(2016).
- 25) 西川忠，平野彰彦，鎌田英治：赤外法によるタイル仕上げ外壁の剥離診断に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，529，pp.29-35，(2000)
- 26) P. Beckmann and A. Spizzochino：The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces，PERGAMON PRESS，pp.70-98，(1963)
- 27) 青木貞雄：光学入門，共立出版，pp.141-145，(2002)

- 28) 石井敏満, 中谷隆彦, 稲垣照美, 新見素二, 大岡紀一: 赤外線サーモグラフィによる材料内部欠陥の定量検出に向けた数値シミュレーション, 赤外線サーモグラフィによる非破壊評価特別研究委員会, pp.9-14, (2002)
- 29) 鎌田敏郎, 川瀬貴行, 国枝稔, 六郷恵哲: サーモグラフィによる鋼-コンクリート間の欠陥評価手法に関する研究, 「サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査」合同特別研究委員会, pp.18-21, (2000)
- 30) 株式会社 Noxant, NOXCAM-POLA 資料, pp.1-2, (2019)
- 31) 株式会社ソニーセミコンダクタソリューションズ, 偏光イメージセンサ資料, pp.1-2, (2019)
- 32) S. Suzuki and N. Ogasawara: Quantitative Evaluation of Polarized Emissivity and Polarized Reflectivity using Infrared Thermographic Instrument, *Advanced Experimental Mechanics*, 3, pp.167-172, (2018)
- 33) S. Suzuki and N. Ogasawara: Infrared Thermographic Test for Removing Background Reflection based on Polarization Theory, *NDT & E International*, 103, pp.19-25, (2019)
- 34) 鈴木総司, 小笠原永久: 金属に対する偏光理論を利用した赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の除去, *非破壊検査*, 69(6), pp.300-305, (2020)

第3章 コンクリートに対する位相解析法を用いた検査および背景反射の除去

本章では、データ整理時に利用して背景反射を除去する手法について述べる。本章における研究の独創性は、位相解析手法を低熱拡散率のコンクリート材料に適用するために修正したことと、提案手法の背景反射除去への有効性を示したことである。

3.1 緒言

前章では、偏光子を介した測定、つまり計測時の工夫により反射を除去した。しかし、測定対象物の正面付近からの計測（対面角 $\simeq 0^\circ$ ）ではS偏光とP偏光が区別できず、その結果、反射を除去できないなどの問題もあるため、計測時ではなく、データ取得後に何らかの処理をして、反射の影響を除去する方法の開発が必要である。

そこで本章では、温度変動データを位相解析することによって、きず部と加熱ムラおよび吸収ムラを見分けることができる、パルスフェーズサーモグラフィ法（Pulse Phase Thermography, 以下はPPTと示す。）¹⁾⁻⁷⁾に着目した。この手法は、きず部と健全部の温度差ではなく、きず部と健全部の温度変化の違いに着目しているため、背景反射にも有効であると考えた。

3.1.1 パルスフェーズサーモグラフィ法

従来の赤外線サーモグラフィ法は、対象表面の赤外線放射を捉えて、検査対象の表面温度を計測することで、きず検出を行う。しかし、放射率が周囲と異なる箇所や加熱ムラがある場合、健全部であっても温度ムラとなり、きずとの判別が難しい。図3-1は、本学校内のコンクリート構造物壁面の外観と、晴天時の日射により加熱されている時に撮影した赤外線画像である。この壁面は、黒枠で囲んだ部分に、きず（空隙）による温度変化部分が見られるが、赤枠で囲んだ窓枠角から下に伸びる黒い汚れの部分は、きずがないにも関わらず放射率の違いから周囲より高い温度を示しており、汚れがきず検出の誤差要因になることを確認できる。特に、放射加熱の場合、放射率の異なる部分は、熱の吸収量が他の部分と異なるため、温度ムラとなる。また、照射強度自体が不均一な場合（加熱ムラ）も温度ムラが生じる。

PPTとは、パルス加熱後の検査対象表面の温度値そのものではなく、温度変化データを利用することで、温度ムラときず指示とを混同することなく判別できる手法である。以下に、そのきず検出原理を説明する。

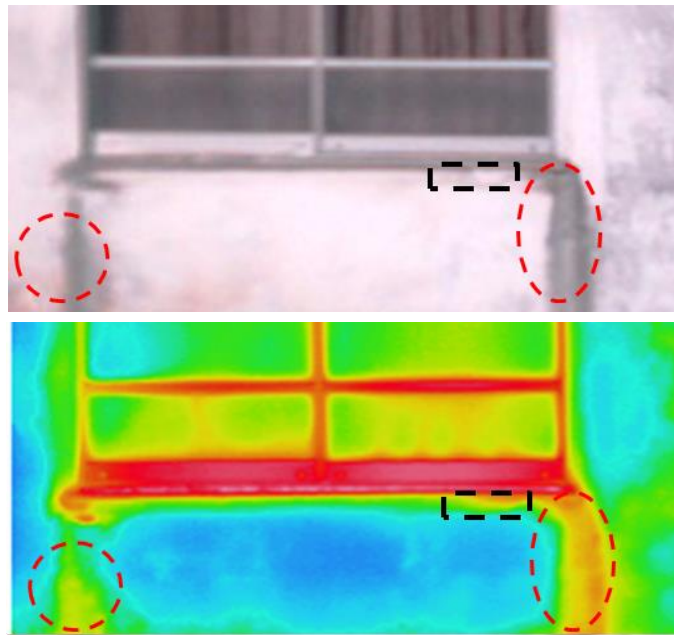


図 3-1 コンクリート構造物壁面の外観およびその赤外線画像
 (黒枠：きず部，赤枠：汚れによる温度ムラ発生個所)

物体を加熱するとき，深さ z の位置に熱エネルギーが到達するまでの時間 t は，熱拡散率 a を用いて次式で表される^{1),2)}。

$$t \sim \frac{z^2}{a} \quad (3-1)$$

熱拡散は，熱エネルギーが到達する位置と時間に依存する．PPT は，この原理を利用したもので，表面温度の時間変化を周波数スペクトルに変換し，位相を比較することで，異なる部分を判別する方法である¹⁾⁻⁷⁾．表層での熱拡散は，多少の温度ムラがある場合でも，ほぼ次元熱伝導的に行われるため，位相の違いから，温度ムラときず部を区別できる．よって，位相は，加熱後の温度変化の違いを示している．すなわち，位相を比較することで，きず部と健全部を判別することができる．

測定対象物の加熱には，パルス状の熱負荷を与える．パルス波形は，フーリエ変換すると幅広い周波数成分を示すため，パルス加熱による温度変化は，様々な周期的加熱を一度に受けたことと同様の意味を持つ．温度変化の違いは，フーリエ変換をすることで，振幅と，位相に分けられた形で得られる．振幅はフーリエ変換前の波形の大きさを示し，位相はフーリエ変換前の波形の時間変化を示す成分である．

PPT における，加熱後の表面温度の取得からきず検出までを，図 3-2 に示す

流れに従い、以下に説明する。

①パルス状の熱負荷を検査対象表面に与え、温度変化の熱画像を連続撮影する。

②各画素（温度変化データ測定点）の温度データ $f(t)$ を取得する。

③温度データ $f(t)$ をフーリエ変換により、周波数スペクトル $F(u)$ に変換する。

$F(u)$ は、離散フーリエ変換の公式から式(3-2)を用いて計算できる。 $R(u)$ と $I(u)$ はそれぞれ実数部と虚数部である。 u は周波数を表す。

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} f(t) e^{-j2\pi ut/N} = R(u) + jI(u) \quad (3-2)$$

④ $F(u)$ から、温度変化の周波数スペクトルの持つ振幅 $A(u)$ および位相 $\phi(u)$ を得る。 $A(u)$ 、 $\phi(u)$ は、それぞれ式(3-3)、式(3-4)で示される。

$$A(u) = \sqrt{I(u)^2 + R(u)^2} \quad (3-3)$$

$$\phi(u) = \tan^{-1} \left(\frac{I(u)}{R(u)} \right) \quad (3-4)$$

⑤位相の違いを示す指標として、各温度データ測定点の位相の最大値を選ぶ。

各画素における位相の最大値から、健全部における位相を差し引いた位相差画像を表示する。

⑥位相差画像から、位相差の生じている部分をきず部として検出する。

以上が検出原理である。

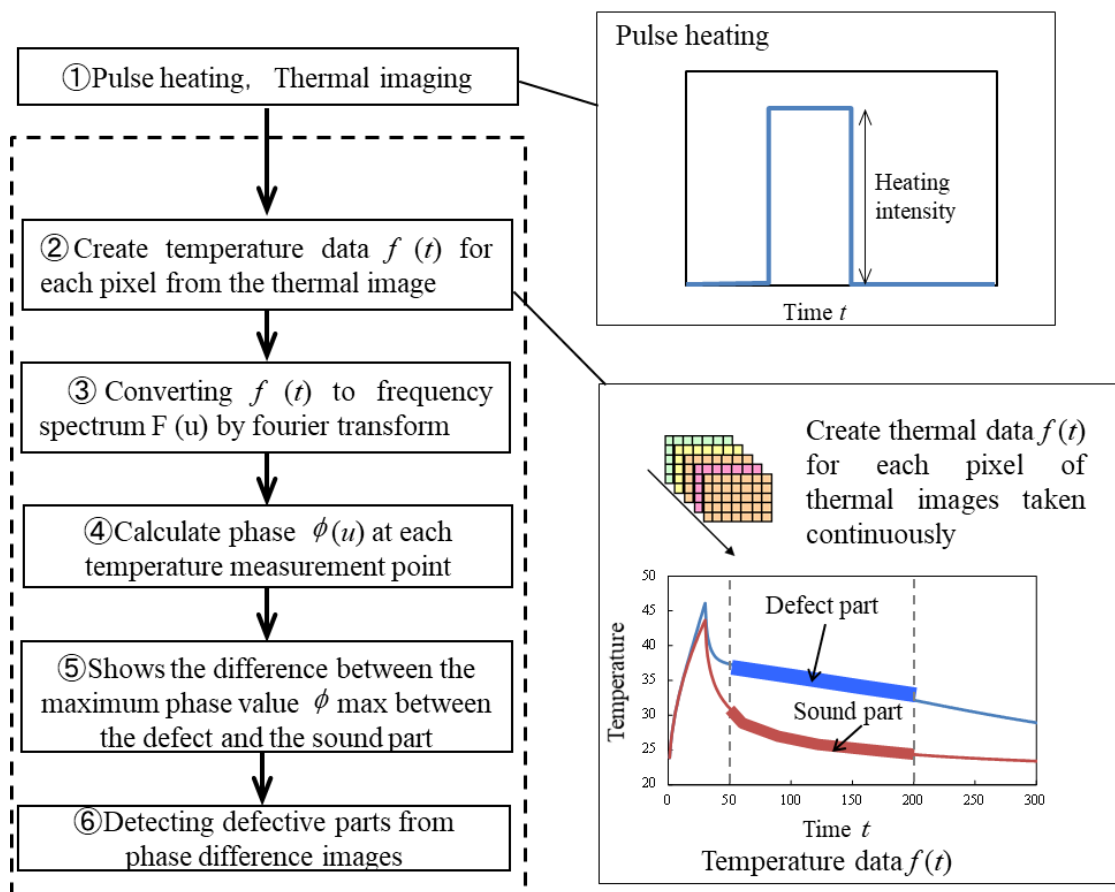


図 3-2 PPT のデータ処理の流れ

測定対象物としては、アルミニウム⁸⁾や鉄⁹⁾などの金属、CFRP¹⁰⁾⁻¹⁴⁾などの複合材の研究がされている。これらは比較的厚さが薄く、熱拡散率が高い材料に適應されてきた。そのため、加熱は基本的にフラッシュランプなどの短い時間でパルス加熱を与える装置を使用する。また、短い時間で加熱をするため、位相解析の際にブラインド周波数⁸⁾やウェーブレット変換¹⁵⁾を用いればきず深さを同定することが可能であり、定量的な評価が可能である。

3. 1. 2 パルスフェーズサーモグラフィ法の問題点

従来の温度差によるきず検知手法に対し、温度むらの影響を受けないため、効果的な PPT であるが、いくつかの問題点がある。まず 1 点目の問題として、PPT が背景反射の除去に有効であるかを確認した過去の研究がないことである。従来の研究は、加熱ムラや吸収ムらの影響が少ないことを示しているだけである。熱伝導現象と関係ない温度上昇として背景反射が含まれている場合、PPT に影響を与えるのか確認する必要がある。

また、2 点目の問題として、コンクリートなど比較的熱拡散率が低く、ある程度深い位置にきずが存在する材料に対する事例が少ないことである。位相

解析を適用する場合，短い時間の加熱では，赤外線サーモグラフィ法の検知に必要なきず指示と健全部との温度差が得られない．そのため，長い加熱時間を要し，加熱時間中に熱が材料に伝わってしまうことで，位相解析の結果に影響を及ぼす．また，全計測データを取得したのちに位相解析を実施するため，非常に長い検査時間を要することの問題もある．佐藤，中村，阪上ら^{16),17)}や石川ら¹⁸⁾や Leeuwen ら¹⁹⁾は，コンクリートに対して，位相解析を用いて良好な成果を挙げているが，上記の問題は解決できていない．

また3点目の問題として，対象構造物にきず深さが異なるきずが複数個存在していた場合，1枚の位相差画像から複数のきず検出および深さ評価ができないことである．これは，測定時間や周波数の影響を受けることが原因であり，周波数が異なる複数の位相差画像を用いなければ，全てのきずを検出することはできない．また，測定時間や周波数によっては，健全部と各きず深さの位相差の値が変化し，深さを誤検知してしまう恐れがある．

上記問題を克服するために，次節以降に改善を施した新しい位相解析手法を提案し，数値解析と実験において背景反射除去に対する有効性を示す．

3. 2 逐次データを利用した位相解析手法の提案

前節に示した PPT 手法の欠点に対応するため，計測中に逐次データ処理することで時間を短縮し，かつ異なる深さのきず部が存在しても対応できるように工夫した位相解析手法を提案する．

3. 2. 1 数値実験による温度変化と位相変化の観察

まず最初に，有限要素解析を用いて，内部にきず（空気層）を有するコンクリートの赤外線サーモグラフィ試験の数値実験を行い，温度と位相の挙動を整理した．

使用したプログラムは，市販の陰解法有限要素プログラム ANSYS である．構造解析だけでなく，熱伝導解析，振動解析，流体解析，電磁波解析などの物理現象の解析に対応している²⁰⁾．図 3-3 に解析モデルを示す．作製したモデルは，横幅 260mm，高さ 150mm の断面形状とし，表面と平行にきず（空気層，図中ピンク色）を配置している．きずの深さ D は，5，7，10，15，20，30mm の 6 種類とし，きず厚さは 2mm である．これは，コンクリート構造物においてはく離きずを生じやすい，モルタル層の境界や鉄筋の位置を想定している．本解析は一次元熱伝導現象のため，二次元のモデルを作製する必要はないが，次節以降で，複数のきず部と健全部が存在する数値実験を行うため，要素分割に起因する誤差をなくすため，同じ外形状のモデルで数値実験を実施している．

温度変化の激しいきず周辺を，最小要素サイズ 1mm×1mm で分割し，節点数は 17287，要素数は 17400（4 節点平面要素）である．併せて，きずがないモ

デルについても検討し、健全部とした。解析モデルに適用したコンクリートおよび空気の物性値を表 3-1 に示す。

境界条件は、上面への熱流束付与と、上下面からの熱伝達である。上表面では、熱流束付与条件と熱伝達条件の両方を設定するため、一次元の表面要素を定義している。上面への加熱は、加熱時の吸収エネルギーに相当する熱流束として、 7.5kW/m^2 、30 秒間を与えることで再現した。熱伝達率は、無風の条件を想定し $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とした²¹⁾。外気温およびモデルの初期温度は 273K である。また、側面は断熱境界面とした。実験の計測時間に相当する解析終了時間は、きず深さ 5mm から 20mm を 1000 秒間、きず深さ 30mm を 1500 秒間行った。結果は、上表面の温度値を出力間隔は 1 秒で取得した。

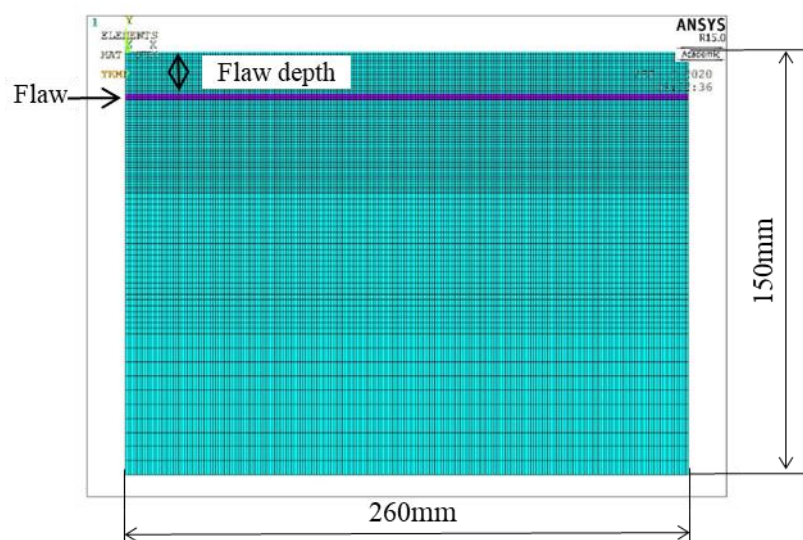


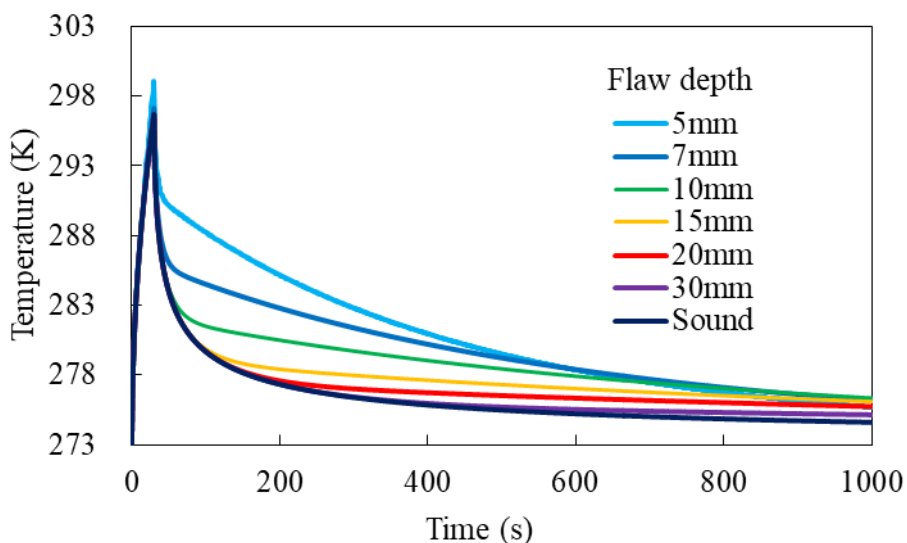
図 3-3 解析モデルの一例

表 3-1 数値解析に用いた材料定数

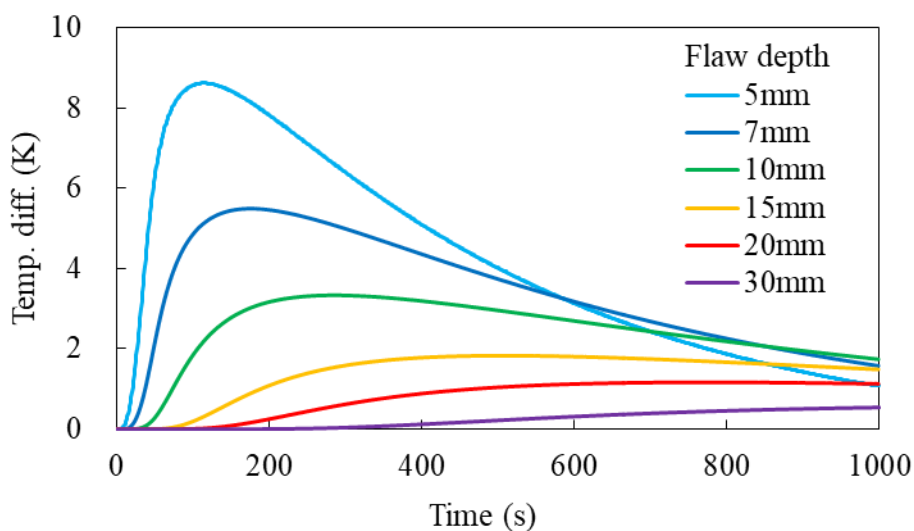
	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	密度 kg/m^3	比熱 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
コンクリート	1.5	2300	1050
空気 (はく離部)	0.04	1.16	1250

図 3-4(a)に、解析によって得られた各きず深さの温度履歴を示す。全てのきず深さにおいて、加熱中は温度上昇し、加熱終了時に最大値をとり、その後低下する。また、図 3-4(b)に健全部ときず部の温度差履歴を示す。浅いきず部ほど、健全部との温度差が、より早い時間に、より高く出る傾向にある。

従来の赤外線サーモグラフィ試験では、この温度差最大の熱画像を用いてきず検知を行っていた。そのため、加熱ムラなどで与える熱量が異なると、想定した温度差が得られずに誤検知を生じていたのである。



(a) 各きず深さにおける温度履歴



(b) 各きず深さにおける健全部ときず指示の温度差履歴

図 3-4 熱伝導解析による各きず深さにおける温度データ

次に数値解析で得られた温度履歴データ（図 3-4(a)）に対して、MATLAB を用いた位相解析を行った。位相解析は、データ時間を加熱終了直後の 30 秒から 1 秒ずつ逐次更新して、実施している。(a)30-65 秒、(b)30-112 秒、(c)30-430 秒の結果のうち、きず深さ 5mm、15mm、健全部について、各周波数に対する位相の関係を図 3-5(a)-(c)に示す。以下、最小位相の値に着目して(a)-(c)の位相挙動について観察する。

(a)は加熱直後の区間である。図 3-4(a)の温度履歴において、きず深さ 5mm では、加熱終了直後に急激に温度履歴勾配が変化している。これは、上表面に与えられた熱エネルギーが、下面に向かって伝導していく過程で、きず部まで達した後、きずの断熱効果によりきず上部に滞留し、熱エネルギーの流れが変化したことを示す。この熱エネルギーがきず上部に滞留することによって、きず上部は一様に温度上昇する。図 3-6 に(a)加熱直後と(b)加熱終了後から 35 秒後の温度分布図を示した。左に健全部の、右にきず深さ 5mm の結果を示している。きず深さ 5mm における、加熱終了後から 35 秒後の熱画像のみ、きず部上面の領域の温度が一様になっていることが示されている。

この区間の温度履歴を位相解析すると、図 3-5(a)において、きず深さ 5mm の場合にのみ、位相と周波数の関係に差（位相差）を生じている。これは、上述したように、きず深さ 5mm の温度履歴の勾配が急変しており、温度履歴において高い周波数、すなわち短い周期が支配的となったためである。きず深さ 15mm や健全部では、まだ熱エネルギーの流れの変化を生じていないため、温度勾配の変化は小さく、結果として、きず深さ 5mm のみに位相差が確認できたのである。また、ここでは示していないが、より短い時間の温度データを対象に位相解析すれば、きず深さ 5mm の位相もきず深さ 15mm および健全部と同じ挙動を示すことになる。

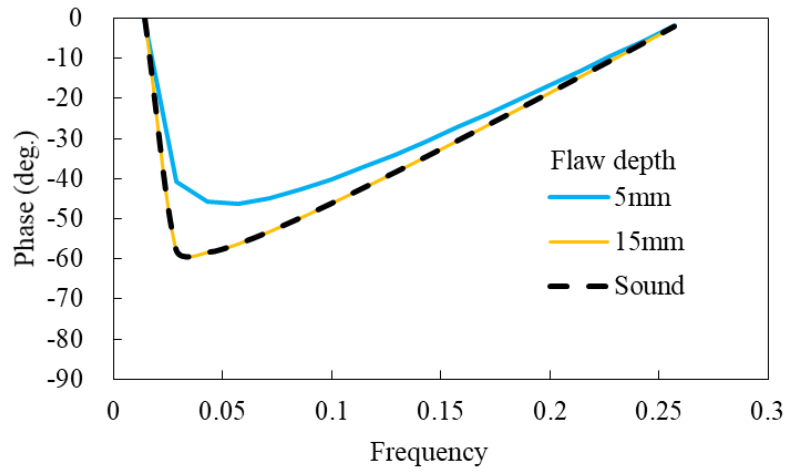
続いて、(b)加熱終了後から 112 秒まで 82 秒間の温度履歴データに対し位相解析を行うと、きず深さ 5mm の最小位相は減少して、健全部ときず深さ 15mm と同値となった。これは、以下の理由によると考えられる。きず上部が一様温度になった後は、上表面からの熱伝達現象ときず下部への熱伝導現象が緩やかに進み、温度履歴勾配の変化も小さくなる。よって温度履歴の位相解析では、低い周波数、すなわち長い周期が支配的に変化していく。その時間的变化は、深いきずや健全部より、浅いきずの方が早く、その過程で他の深いきずや健全部と位相差が同値になったり、(c)に示すように逆転することになる。

(c)加熱終了後から 430 秒まで 400 秒間の温度データに対し位相解析を行った結果では、深さ 5mm の最小位相は健全部を通り越し、より低い値となっている。また、きず深さ 15mm の位相挙動が(a)のきず深さ 5mm の挙動と同じく、

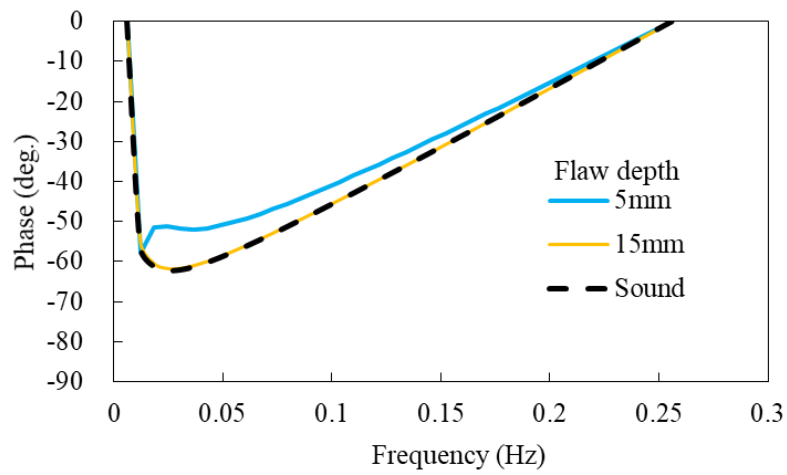
健全部よりも低い値を示している。さらに、より長い時間の解析を実施すれば、きず深さ 15mm の最小位相も漸減し、一度健全部と同値となった後に健全部以下の値となる。

すなわち、全測定データに対し位相解析を実施し位相差画像を抽出する従来の PPT 手法では、きず深さと位相解析する温度履歴データの組み合わせによっては、健全部と同じ位相値となり、きず深さが検知できない危険性を伴うことになる。

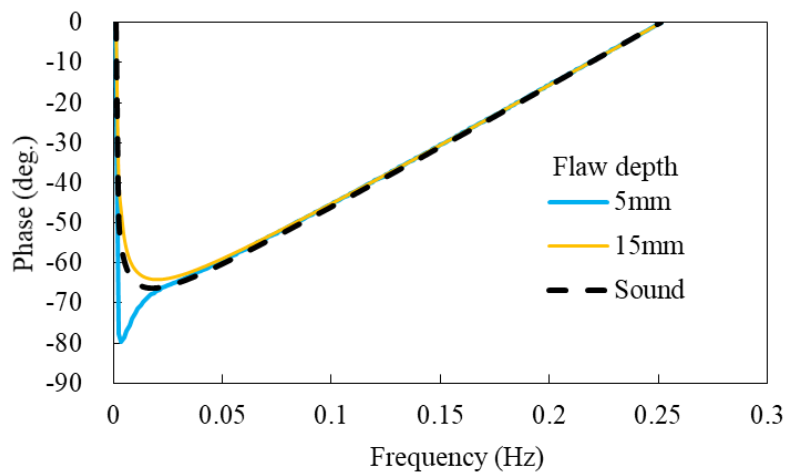
以上の結果から、温度履歴データを逐次更新した位相解析を実施し、最小位相に着目することで、きず深さに応じた位相差を抽出できることから、きず検知の可能性が示唆された。



(a) 加熱終了後（30 秒）から 35 秒間のデータを対象（30 秒~65 秒）

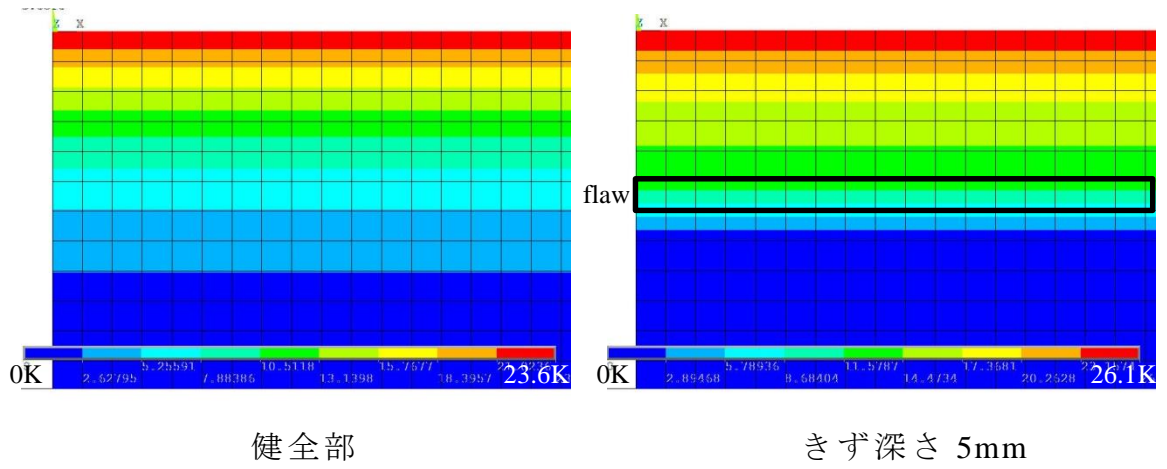


(b) 加熱終了後（30 秒）から 82 秒間のデータを対象（30 秒~112 秒）

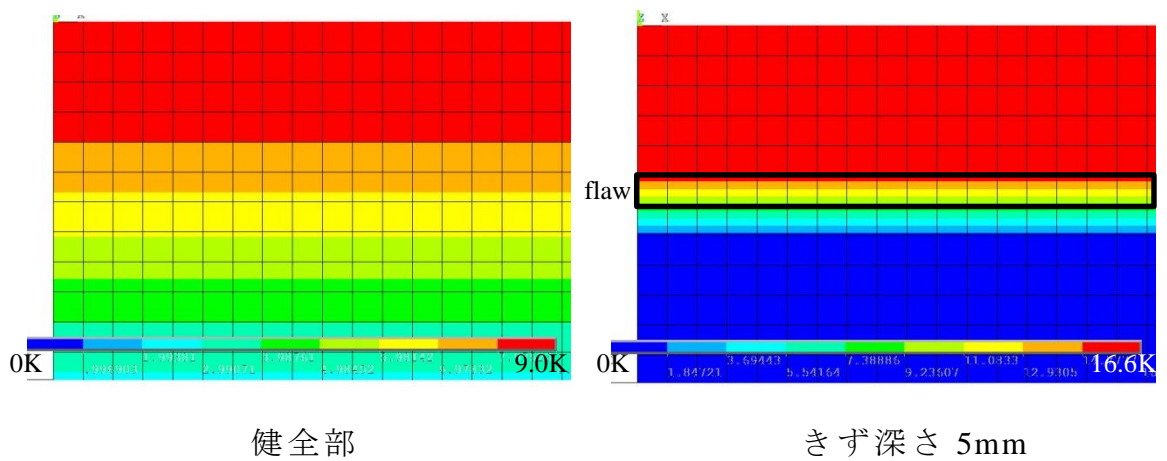


(c) 加熱終了後（30 秒）から 400 秒間のデータを対象（30 秒~430 秒）

図 3-5 逐次測定データを更新した位相解析結果



(a) 加熱終了直後の温度分布図



(b) 最大位相差時間（加熱終了後から 35 秒後）における温度分布図

図 3-6 各時間における温度分布

上記の考察をより分かりやすく示すために、逐次に測定データを更新した際における最小位相の値を抽出し、図 3-7 に示した。また、健全部との位相差の履歴を図 3-8 に示す。きず部の位相が、実験開始当初は健全部よりも大きく、きず深さに応じた一定の時間が経つと健全部の位相より低い値になっていることが確認できる。全データに対して位相解析する従来の方法では、きず深さによっては、位相差が 0 になってしまう、すなわちきず指示が喪失してしまう重大な危険性を示している。

しかし、この問題は、計測データを逐次に更新して、その都度に位相解析を行うことで得られた位相差履歴（図 3-8）に着目することで解決できる。次項において、逐次データを利用した位相解析手法を新たに提案する。現在の赤外線サーモグラフィ装置の内部では、逐次に測定データを更新し位相解析処理を行うことは不可能だが、測定データをパソコンに転送するタイプの赤外線サーモグラフィ装置であれば、ほぼリアルタイムに位相差画像を得ることが可能となる。

なお、図 3-8 の位相差履歴で観察される振動は、きず深さが浅いと利用できるデータが少なくなり、周波数分解能が落ちることが原因である。

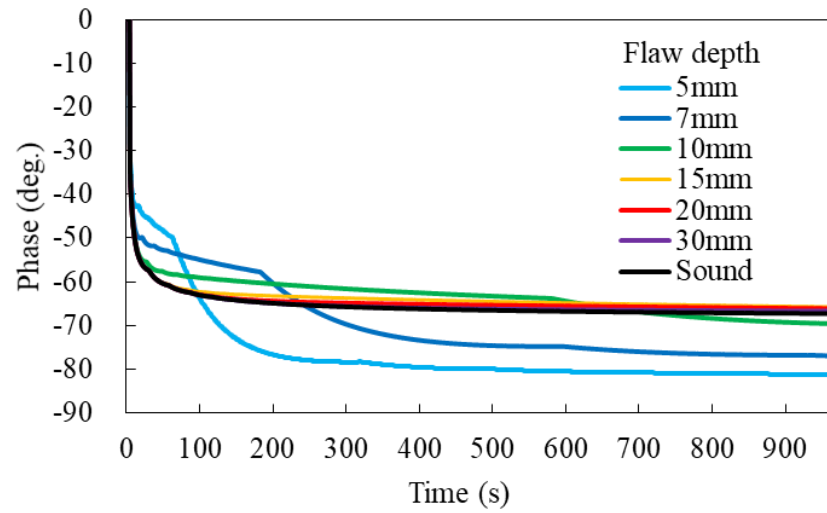


図 3-7 逐次に測定データを更新した際の最小位相と測定時間の関係

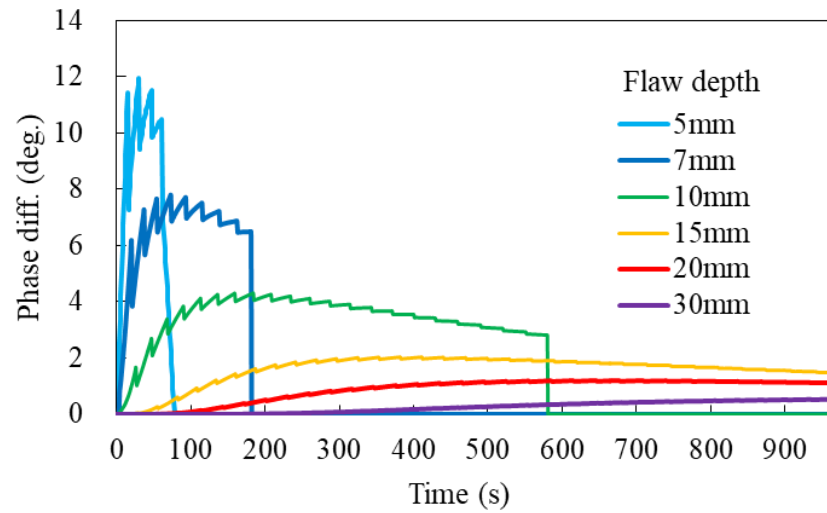


図 3-8 逐次に測定データを更新した際の同一周波数における位相差と測定時間の関係

3. 2. 2 逐次データを利用した位相解析手法

これまでに示した最小位相の挙動に着目し、逐次データを利用した位相解析手法を提案する。図 3-9 に手法のフローチャートを示し、以下に手法の説明を記述する。

- (1) 赤外線サーモグラフィ装置の全てのピクセルの測定時間 m 秒間の温度データを読み込む。
- (2) 各画素の温度データをフーリエ変換する。
- (3) 各画素、測定時間 m 秒間における最小位相を抽出し、周波数を記録する。
- (4) 健全部ときず部の位相差（最小位相における周波数）を計算する。
- (5) 位相差を比較する。この時、位相差が上昇していれば(6)へ、減少していれば(7)へ移行する。
- (6) 解析する時間幅を増やし、再度(1)へ移行する。
- (7) 各画素の周波数を記憶する。
- (8) 健全部との周波数差を計算する。事前に計測していたきず深さと周波数の関係のデータベースに照らし合わせ、各画素のきず深さを算出する。
- (9) 欠陥の深さを特定する。

なお、きずの深さの同定には、位相解析時に得られた周波数を利用している。これは、以下の理由による。一次元熱伝導方程式の解が、初期の温度変化では方程式をラプラス変換することにより、十分時間経過した後の温度変化では変数分離の解法により求めることができる²²⁾。いずれの解でも、フーリエ数(at/L^2)とビオ数(hL/k)の関数になる。ここで、 a は熱拡散率、 t は時間、 L は深さ方向距離、 h は熱伝達率、 k は熱伝導率である。材料が固定され、対流条件が安定していれば、深さ方向距離の2乗と時間は比例する。すなわち、解析モデルにおいては、きず深さの2乗と周波数には、反比例の関係があることを示している。図 3-10 に、数値実験で得られたきず深さの2乗の逆数と最小位相の周波数の関係を示す。比例関係が示されており、本結果から得られた近似曲線を、きず深さの同定に用いた。

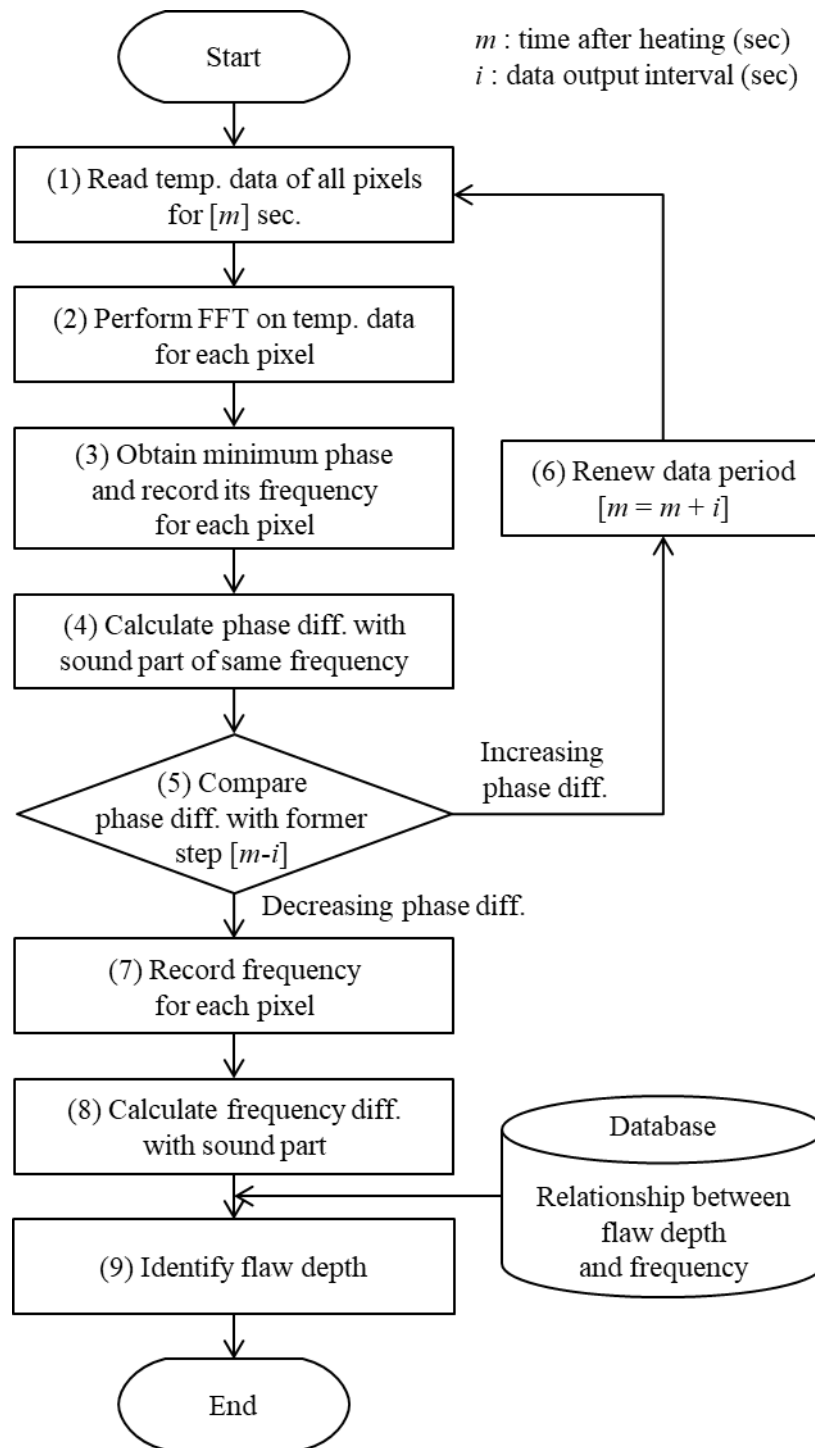


図 3-9 逐次データを用いた位相解析手法のフローチャート

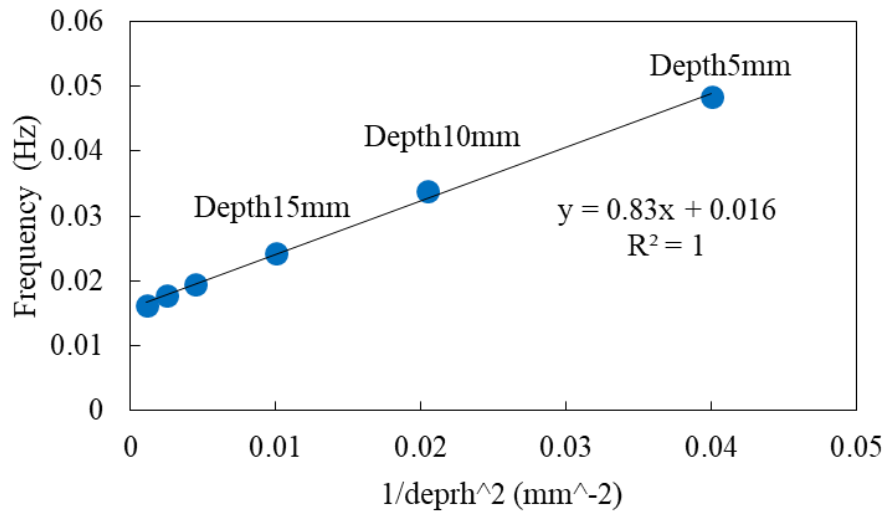


図 3-10 最小位相の周波数ときず深さの 2 乗の逆数の関係

図 3-11 に健全部ときずの最大温度差時間および最大位相差時間ときず深さの関係を示す。従来の位相解析手法では、全データを取得後にきず検知を行うが、本手法では逐次にデータ処理を行うため、浅いきずに対しては、短い時間で検知を行える。また、図 3-11 より、最大位相差時間は、最大温度差時間より 50~100 秒ほど時間が短いことが確認でき、本手法が、従来の PPT 手法のみならず、温度差に着目した一般的な手法より検知時間を短縮できることが示された。

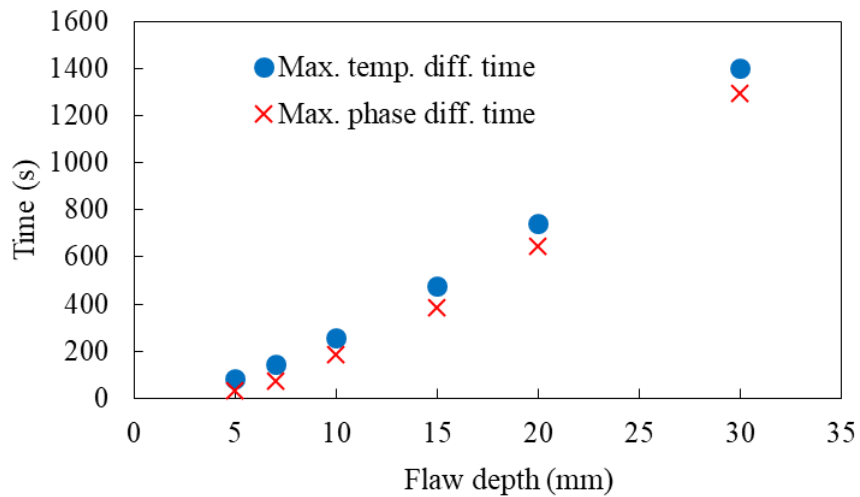


図 3-11 健全部ときずの最大温度差時間および最大位相差時間ときず深さの関係

3. 3 背景反射除去に対する数値解析による検証

前節提案の逐次データを用いた手法について、有限要素法を用いた数値実験による非破壊検査を行い、その有効性を確認する。対象は、異なる深さの二つのきずを有するモデルである。従来の PPT では、図 3-6 に示したように、二つの異なる深さのきず指示を同時に抽出することはできないため、片方のきず指示を見逃してしまう恐れがある。

使用した有限要素モデルを図 3-12 に示す。紫色に示された要素が、空気の材料定数を設定したきずである。左端の深さ 5mm、右端の深さ 15mm のそれぞれ位置に、幅 15mm、きず厚さ 2mm のきずを配置している。きずの配置以外の境界条件、材料定数、要素分割・要素数・節点数は、全て 3.2.1 項と同じである。結果は、非破壊検査において赤外線サーモグラフィ装置で計測できる表面の温度を、1 秒ごとに出力している。

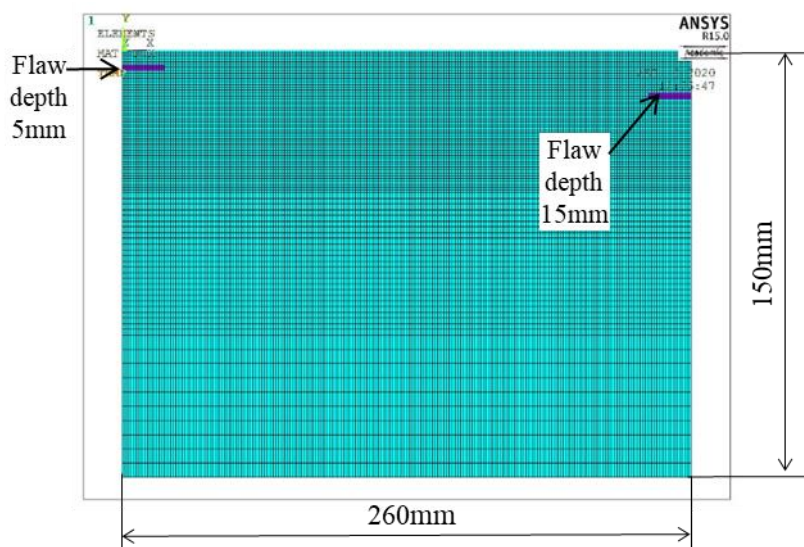


図 3-12 二つの異なる深さのきずを有する解析モデル

図 3-13 に、深さ 5mm のきず上部（モデルの左上端）、深さ 15mm のきず上部（モデルの右上端）、健全部（中央最上部）の節点における、温度変化を実線にて示す。30 秒間の加熱終了後の温度下降具合がきずの深さによって異なっていることが示されている。

図 3-14 には、逐次データを用いた位相解析手法で得た周波数分布を青色実線で示す。従来の PPT 手法と異なり、左端と右端にそれぞれ異なった深さのきずを同時に確認することができている。なお、図中にはきずの範囲を黒点線で示している。図 3-10 に示したきず深さと最小位相の周波数の関係からきず深さを求めると、左端のきず指示は 5.2mm、右端のきず指示は 14.1mm となった。誤差はそれぞれ 4.0%と 6.2%である。これらの誤差は、きず深さと周波数の関係を決定した数値実験と、今回の数値実験の熱伝導現象の違いによると考えられる。前者は、横方向への熱伝導がない一次元熱伝導現象だったことに対し、後者では、きず縁部において横方向の熱伝導が生じることで、二次元の複雑な熱伝導現象となっている。このことで、表面の温度変化にも違いを生じ、きず深さと周波数の関係に誤差を生じたのである。今後、きずの幅や形状をパラメータとして追加し、きず深さと周波数のデータベースを構築することで、より精度の良い同定結果が得られると思われる。

続いて、逐次データを用いた位相解析手法が、背景反射の除去に有効であるかを検証した。高温背景から測定対象物表面で反射した赤外線エネルギーが、赤外線サーモグラフィ装置に入射していると仮定して、上記の数値実験における温度履歴データに、反射成分として 10K を加算した。この時、本来は反射成分として温度を一律に加算するのではなく、赤外線エネルギーを一律に加算した上で温度値を求めるべきであるが、非破壊検査を行う狭い温度幅では赤外線エネルギーと温度の関係はほぼ線形関係と近似できるため、このように温度を加算して背景反射を模擬した。図 3-13 に反射を含んだ条件の温度履歴を点線で示した。全面に同じ温度の反射成分が追加されている場合（きず部・健全部ともに点線の場合）、温度差できずを検知する手法でも、反射の影響はなくきずを検知できる。しかし、一部のみに背景反射が映っているような場合、例えば、背景反射が健全部のみに映っている場合（きず部は実線、健全部は点線の場合）では、きず部より健全部の方の温度が高いことになり、きず部を検知することは出来ない。それだけではなく、健全部をきず部と誤検知してしまう危険性を生じる。この温度履歴に対し、提案した逐次データを用いた位相解析手法により、周波数分布を求め図 3-14 に示した。得られた周波数分布は、背景反射がない場合と一致している。これは、反射成分が温度の時間的变化には影響を与えていないため、位相や周波数が変化しなかったのだと考えられる。よ

って、本章で提案した逐次データを用いた位相解析手法は、背景反射の除去に有効なことが検証できた。

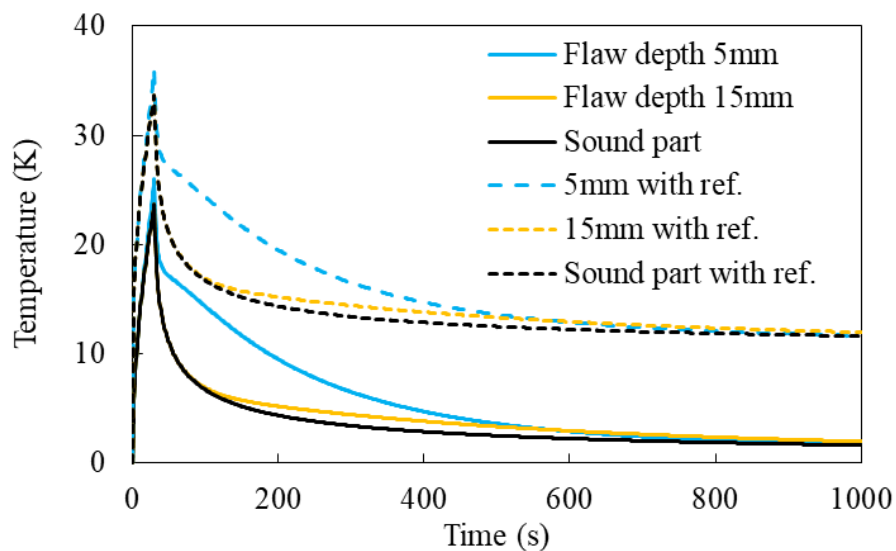


図 3-13 反射なしと反射ありの場合の温度履歴

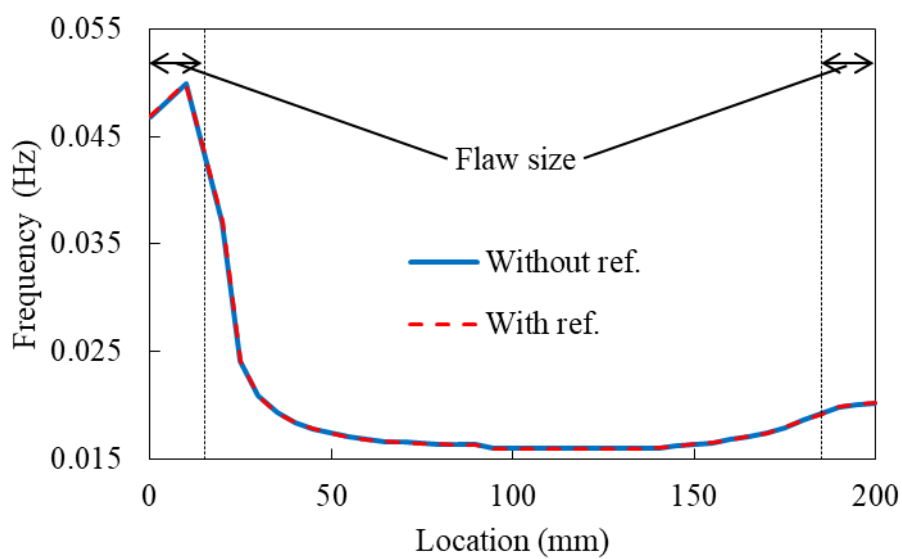


図 3-14 反射なしと反射ありの場合の周波数分布

3. 4 背景反射除去に対する実験による検証

続いて、本提案手法の非破壊検査に対する有効性を実験を行い検証した。試験対象は、トンネル内壁を想定して作製された 300mm×300mm×100mm のコンクリート製試験片である。図 3-15 に示すように、試験片中央を横断して、表面から深さ 10mm、幅 100mm、厚さ 1mm のきずが配置されている。

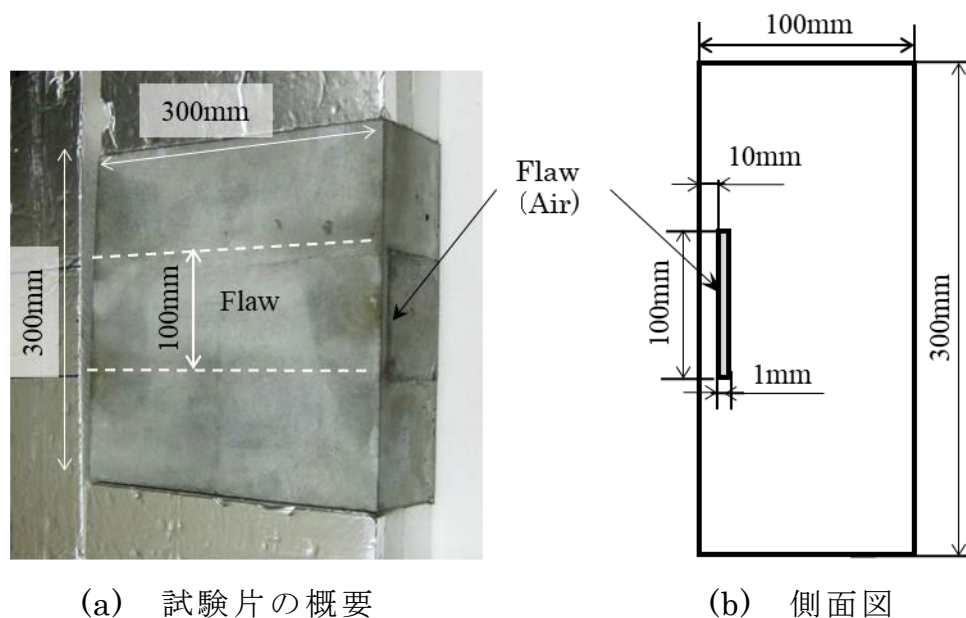


図 3-15 深さ 10mm のきずを有するコンクリート製試験片

図 3-16 に検証実験の概要を示す。加熱には 1kW のハロゲンヒータ用い、試験片の正面 3m の位置から、試験片表面を 30 秒間、照射した。加熱終了後はハロゲンランプを取り除き、長波長形赤外線サーモグラフィ装置（日本アビオニクス、TVS-500EX）を使用して、10 秒間隔で連続して 1000 秒間の熱画像を撮影した。赤外線サーモグラフィ装置は、試験片から距離 2m、ハロゲンヒータの照射と重ならないよう、正面から約 20°の位置に設置した。

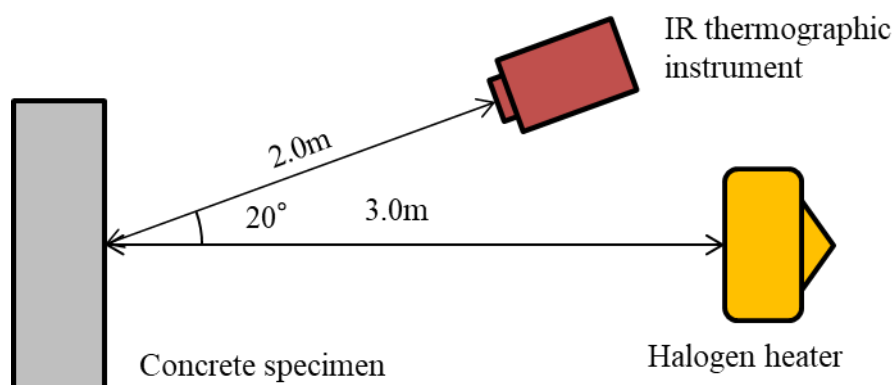
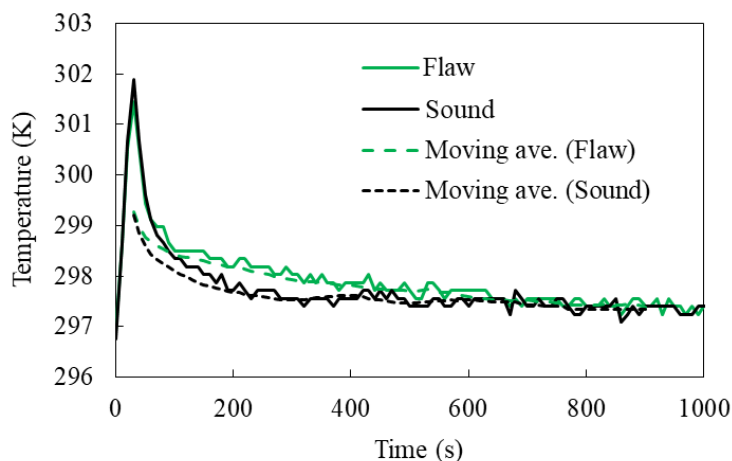


図 3-16 検証実験における装置の配置（上面からの視点）

きず部（試験片の上から 150mm，左から 200mm の位置）と健全部（同，上から 50mm，左から 200mm）の温度履歴を図 3-17 に実線で示す．30 秒間の加熱中はほぼ線形に温度上昇し，加熱終了直後から内部への熱伝導と，外気への熱伝達により急激に温度降下している．60 秒後から温度差を生じ始め，280 秒後程度で最大温度差時間となっている．図 3-18 に最大温度差時間（280 秒後）の温度分布を示す．きず部が高温部として検出できている．

図 3-17 において，両温度履歴とも，赤外線サーモグラフィ装置の検知器の信号ノイズおよび周囲温度の揺らぎにより温度ドリフトが生じている．本温度履歴データに対し位相解析を実施したところ，高周波の温度ドリフトの影響を受けて，きずを検知することが出来なかった．そのため，以降の処理では，10 点の前方移動平均処理後の温度履歴データ（図 3-17 中の点線）を利用した．



▼図 3-17 10 秒ごとに計測した温度履歴
（点線は位相解析に利用した移動平均データを示す）

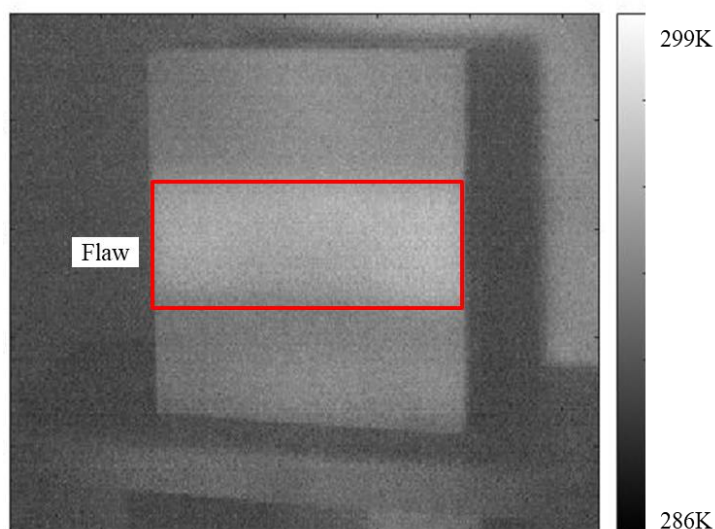
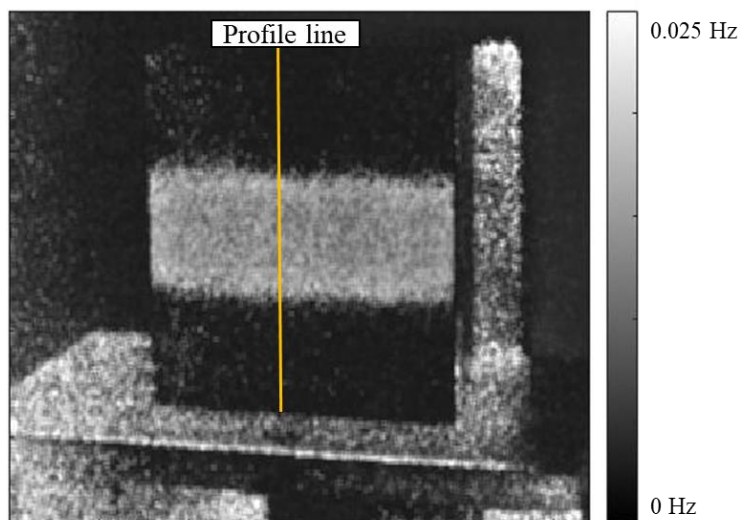
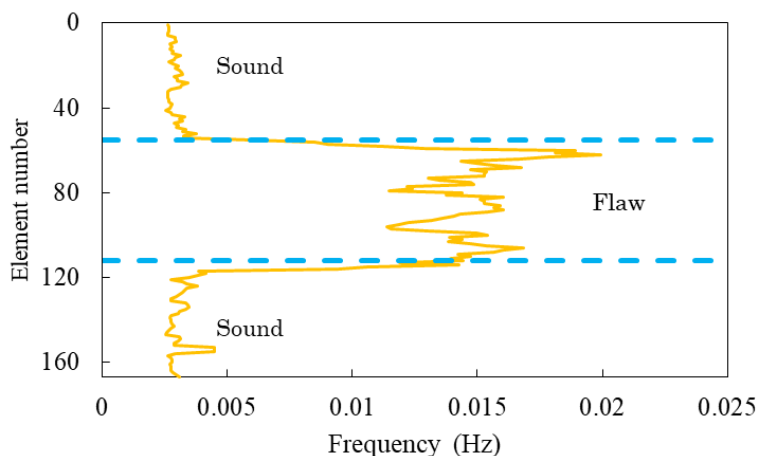


図 3-18 最大温度差時間（280 秒後）における温度分布

実験で得られた温度履歴データに対し、逐次データを利用した位相解析手法を適用することで得られた周波数分布画像を、図 3-19 に示す。きず部が高周波領域として明瞭に確認できる。周波数分布画像上の黄色線部の周波数プロファイルからも、きずの位置が概ね判別できている。また、周波数データからきず深さを求めたところ、6.0mm（誤差 40%）であった。この誤差は、位相解析に利用した温度履歴データは移動平均処理しているため、温度履歴の傾向が異なり周波数に変化したことが原因と考えられる（図 3-17 参照）。



(a) 周波数分布画像



(b) 周波数プロファイル

図 3-19 逐次データを用いた位相解析手法を適用して得られた周波数分布

そこで、高周波ノイズである温度ドリフトを取り除く処理を、移動平均ではなく、近似曲線を用いて行った。具体的には、温度履歴の 30～300 秒までを 6 次式に、310～1000 秒までを 1 次式で近似した後、それぞれの近似曲線を利用

して実験計測と同じく 10 秒ごとに温度データを発生させ、近似温度履歴とするやり方である。図 3-20 に近似曲線で得られた温度履歴（点線）を、実験で得られた温度履歴（実線）と重ねて示す。本近似温度履歴を利用してきず深さを求めたところ、8.3mm（誤差 17%）となった。まだ同定誤差は大きく改善の余地は残されているものの、同定精度は向上した。赤外線サーモグラフィ装置の全画素に対し近似曲線を用いた手法を適用することは難しく、また移動平均処理は大きな同定誤差を生じるため、赤外線サーモグラフィ装置の不均一性補正処理（NUC 処理）のタイミングを調整するなど、温度履歴の温度ドリフトをより小さくする工夫が必要である。

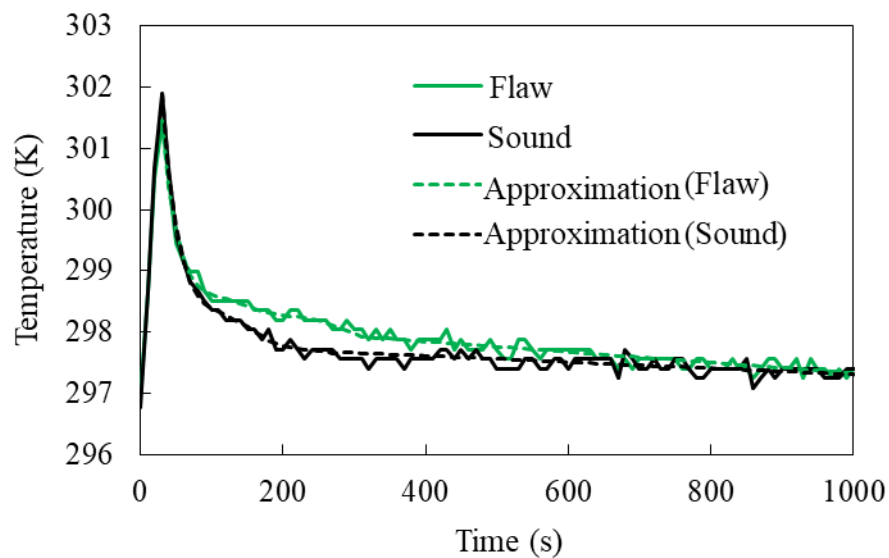


図 3-20 近似曲線を利用した温度履歴データ

次に、背景反射がある状態で実験を行った。図 3-16 の実験配置図において、コンクリート試験片の反射率を上げるために、赤外線サーモグラフィ装置を対面角 50° の位置に配置した。これは、高層建築物の検査の際、見上げ角が高くなった場合を想定している。反射熱源として、500W のハロゲンランプを、対面角 -50° 、距離 1.2m の位置に配置し、その高温フィラメントがコンクリート試験片表面で反射し、赤外線サーモグラフィ装置の視野に入るようにした。ただし、反射熱源からコンクリート試験片に与える放射エネルギー量は少なく、表面温度の向上には寄与していないことをあらかじめ確認している。ハロゲンランプと試験片の配置概略を図 3-21 に示す。なお加熱装置として用いているハロゲンヒータの条件は、反射なしの実験（図 3-16）と同じである。

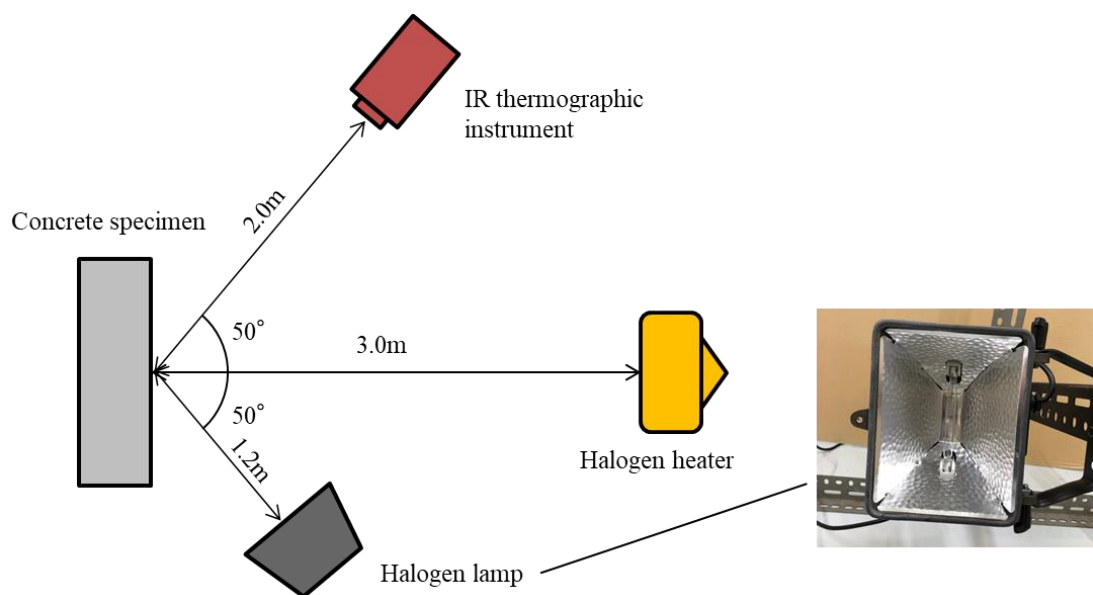
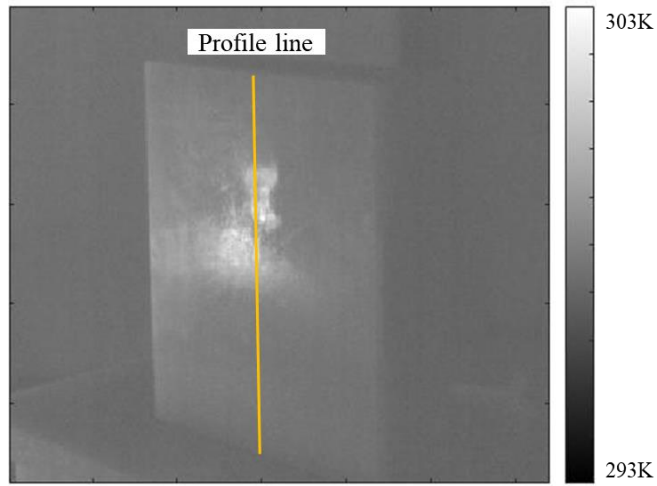
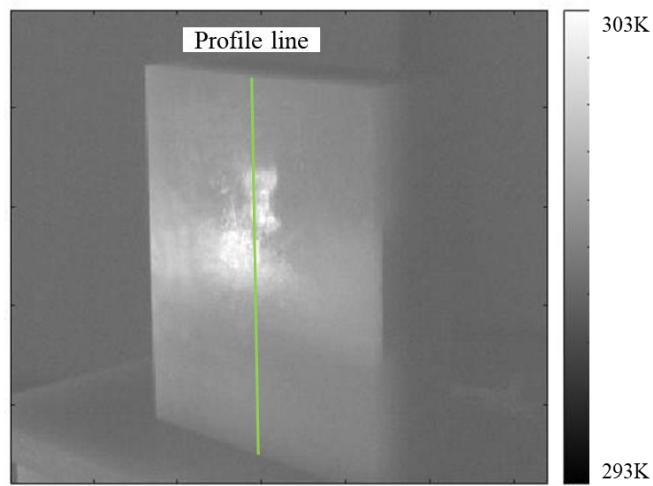


図 3-21 反射熱源（ハロゲンランプ）とコンクリート試験片の配置

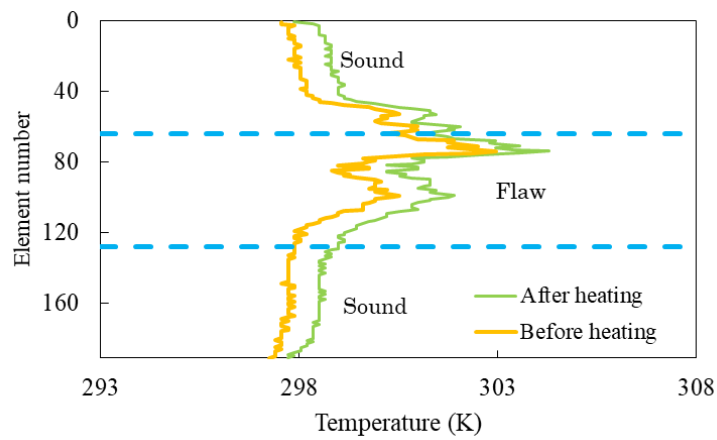
加熱前の熱画像を図 3-22(a)、最大温度差時間（280 秒後）の熱画像を図 3-22(b) およびそれぞれの温度プロファイルを示す。両熱画像ともに高温の背景反射が映り込んでおり、きずと誤検知する危険性がある。特に最大温度差時間の熱画像では、本来、きずと健全部の温度差が観察できるはずであるが、反射熱源がより高温であるため、きずが確認しにくくなっている。温度プロファイルでも同様に、きずと背景反射の判断はできない。



(a) 加熱前の熱画像



(b) 最大温度差時間（280 秒後，加熱終了 250 秒後）の熱画像

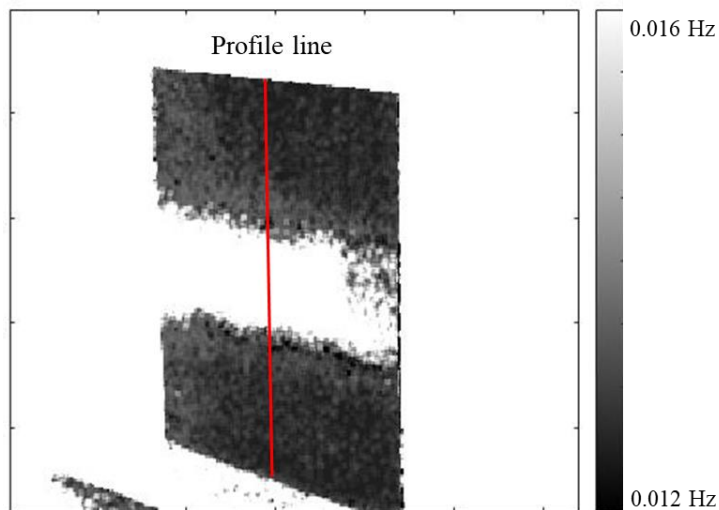


(c) 温度プロファイル

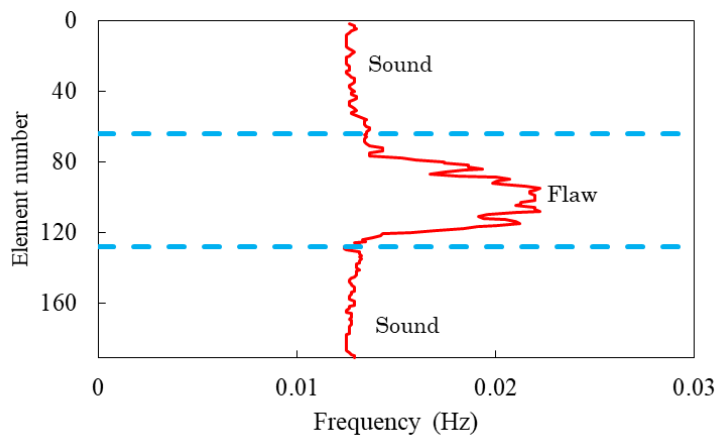
図 3-22 背景反射の影響を受けている熱画像

背景反射を含んだ実験の温度履歴データに対し、逐次データを利用した位相解析手法を適用し得られた周波数分布画像と周波数プロファイルを図 3-23 に示す。背景反射が除去され、きずが高周波領域として明瞭に確認できる。周波数プロファイルからも、背景反射の影響は確認できない。得られたきずの幅は実際のきずの幅よりも小さくなった。これは、熱の横への流れと熱画像の取得時のノイズにより生じたものと思われる。だが、概ねのきず位置の判別には支障はないと考える。

以上の結果から、逐次データを利用した位相解析手法は、背景反射の影響を受けることなく、低熱拡散率のコンクリートに対してきずの検知が可能であることを示した。



(a) 周波数分布画像



(b) 周波数プロファイル

図 3-23 背景反射を含んだ熱画像の周波数分布

3. 5 結 言

本章では，コンクリートに対して修正した位相解析手法を適用させ，測定時間の改善およびきず深さの同定方法を提案した．本章で得られた結果を以下に述べる．

- ・ 逐次データを利用した位相解析手法を提案し，コンクリートなどの低熱拡散率材料に対しても，従来の位相解析手法より短い時間できずの検知，深さ同定が行える．脱落につながりやすい浅いはく離きずに対しては，時間短縮の効果が特に顕著である．
- ・ 検査視野内に深さの異なる二つのきずが存在していても，見落とすことなく，検知することが可能である．
- ・ 背景反射が映り込んでいる状態でも，測定面の非定常熱伝導現象には影響はないため，問題なくきず検知が行える．

以上によりコンクリートに対して位相解析を適用させ，測定時間の改善およびきず深さの同定方法を提案することができ，背景反射の除去を検証することができた．

第3章 参考文献

- 1) X. Maldague and S. Marinetti : Pulse Phase Infrared Thermography, *Journal of Applied Physics*, 79(5), pp.2694-2698, (1996)
- 2) X. Maldague , F. Galmiche and A. Ziadia : Applications of Pulse Phase Thermography, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 16, pp.339-344, (1997)
- 3) C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague : Pulse phase thermography for defect detection and visualization , *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 3586, pp.1-9, (1999)
- 4) X. Maldague, F. Galmiche and A. Ziadia: Advances in pulsed phase thermography, *Infrared Physics & Technology*, 43(3-5), pp.175-181, (2002)
- 5) F. Galmiche, M. Leclerc and X. Maldague : Time Aliasing Problem in Pulsed Phased Thermography, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 4380, pp.1-6, (2001)
- 6) C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague : Pulsed phase thermography inversion procedure using normalized parameters to account for defect size variations, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 5782, pp.1-9, (2005)
- 7) C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague : Automatic Algorithm for Quantitative Pulsed Phase Thermography Calculations , *Proc. 16th World Conference on Nondestructive Testing*, pp.1-10, (2004)
- 8) C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague : Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on Plexiglas and aluminum samples, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 5405, pp.1-9, (2004)
- 9) C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis and X. Maldague : Quantitative pulsed phase thermography applied to steel plates, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 5782, pp.1-9, (2005)
- 10) R. C. Waugh, J. M. Dulieu-Barton and S. Quinn : Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies, *NDT & E International*, 66, pp.52-66, (2014)
- 11) M. Ishikawa, H. Hatta, Y. Habuka, R. Fukui and S. Utsunomiya : Detecting deeper defects using pulse phase thermography, *Infrared Physics & Technology*, 57, pp.42-49, (2013)
- 12) M. Ishikawa, M. Ando, M. Koyama and H. Nishino : Active thermographic inspection of carbon fiber reinforced plastic laminates using laser scanning

- heating, *Composite Structures*, 209, pp.515-522, (2019)
- 13) R. C. Waugh, J. M. Dulieu-Barton and S. Quinn : Pulse phase thermography for kissing defect detection, 16th European conference on composite materials, pp.1-6, (2014)
 - 14) 石川真志, 椎谷有紀, 向後保雄, 八田博志, 羽深嘉郎, 福井涼, 宇都宮真 : 位相解析を利用した誘導加熱励起サーモグラフィ法による CFRP 積層板の非破壊検査, *日本機械学会論文集*, 81(829), pp.1-11, (2015)
 - 15) G. Zauner, G. Mayr and G. Hendorfer : Wavelet-based subsurface defect characterization in pulsed phase thermography for non-destructive evaluation, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 7248, pp.1-8, (2009)
 - 16) 佐藤大輔, 阪上隆英, 込山貴仁, 久保司郎 : パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とこれによる内部欠陥検出精度の向上, *コンクリート工学年次論文集*, 29(2), pp.667-672, (2007)
 - 17) 中村士郎, 阪上隆英, 原田修輔, 久保司郎 : 赤外線サーモグラフィを用いた熱応答解析に基づく内部欠陥推定に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, 29(2), pp.679-684, (2007)
 - 18) M. Ishikawa, M. Koyama, H. Kasano, H. Hatta and S. Utsunomiya : Reduced inspection time in active thermographic non-destructive testing of low-thermal-conductivity materials, 14th Quantitative Infrared Thermography Conference, 1-6, (2018)
 - 19) J. V. Leeuwen, M. Nahant and S. Paez : Study of Pulsed Phase Thermography for the Detection of Honeycombing Defects in Concrete Structures, *NDT.net*, pp.1-8, (2011)
 - 20) CAD/CAE 研究会 : 有限要素解析ソフト ANSYS 工学解析入門, 理工学社, pp.163-188, (2006)
 - 21) 鳥居薫 : 内燃機関技術者のための伝熱学入門(1), *内燃機関*, 13(146), pp.57-67, (1974)
 - 22) 例えば, 日本機械学会 : JSME テキストシリーズ伝熱工学, 丸善, pp.40-43, (2008)

第4章 ポリビニルアルコール（PVA）フィルムおよび塗料

を用いた背景反射の低減

本章では，検査前に実施する背景反射の低減について述べる．研究の独創性は，可視光域で透明で目視検査ができ，赤外線域で高放射率を有し，試験後に除去し易い材料の開発と，その材料を利用した非破壊検査手法の提案である．

4.1 緒言

赤外線サーモグラフィ試験は，広範囲を非接触で効率よく検査できる反面，太陽光，街灯，観測者等の反射や放射率ムラなどの環境条件の影響を受けやすい欠点を有する．そこで，測定面に黒体塗料を塗布，または黒体テープを貼付することにより，測定面を一様に高い放射率にし，検査時の温度ムラや背景反射の低減が行われる場合がある．しかし，一方で，本黒体化处理により，測定対象表面の可視域における視認性が著しく低下し目視試験ができなくなることや，検査後に黒体塗料が除去しにくいという問題があり，産業界においては実製品への適用が難しい．また，この対策として，赤外線透過材料と高放射率材料の二層構造により低放射率材料の温度分布を転写する技術¹⁾や，セロハンテープ，テフロンテープ，カプトンテープを利用する方法²⁾などが使われているが，大面積への適用が難しいなど解決すべき点も残している．そこで，可視光域で透明で，試験後に除去しやすく，比較的安価で手に入りやすく，かつ大面積や凹凸面などにも適用しやすい高放射率材料が，引き続き，黒体テープおよび黒体塗料の代わりとして求められている．

ポリビニルアルコール（以下 PVA と示す.），ポリエチレンオキシド（以下 PEO と示す.）およびポリビニルピロリドン（以下 PVP と示す.）は，可視光域で無色透明であり，水溶性を有するため水流による除去が簡単で，黒体テープの代替候補材料としてあげられる．小笠原ら³⁾は，これらの素材に対してフィルムを作製し，黒体テープの代わりに非破壊検査などで使用ができるか基礎実験を行った．その結果として，PVP は 373K 付近で変質してしまうこと，PEO は 14 μ m 付近で低放射率となることから，代替材料として不適であり，一方，PVA は黒体テープの代用として使用できる知見を得た．

そこで本章では，PVA フィルムおよび PVA 塗料の分光放射特性などを評価し，より非破壊試験に適した高放射率材料の開発を目指すとともに，それらを用いた非破壊検査手法の提案を行う．

4. 2 PVA フィルムを用いた背景反射の低減

本研究では、厚さが一定で均質な PVA フィルムが赤外線サーモグラフィ試験に使用できるか検証した。まず、放射型の FT-IR を用いて、透過を有するフィルム材料の放射率の測定方法を提案し、各種 PVA フィルムの分光放射特性を評価した。その後、背景反射が顕著に存在する状況下で PVA フィルムを用いた赤外線サーモグラフィ法を行い、その有効性を示した。

4. 2. 1 PVA フィルムの放射率の測定

(1) PVA フィルム

PVA は、ビニルアルコールの重合体に相当する高分子化合物であり、酢酸ビニルを重合して得たポリ酢酸ビニルをケン化することにより製造されている。ケン化とはエステルにアルカリを加えて、酸の塩とアルコールに加水分解する化学反応のことである⁴⁾。PVA 中の酢酸基と水酸基の合計数に対する水酸基の割合をケン化度として表している。

PVA の特徴としては、可視光帯域 (360~820nm) で透明であること、ケン化度によって可溶媒質が変化することがあげられる。また、赤外線帯域 (3~14 μ m) で比較的高い放射率であることが知られている⁵⁾⁻⁸⁾。ケン化度と可溶媒質の関係および本研究で用いた試験片の PVA フィルムの厚さを表 4-1 に示す。72.0mol%は、283K から 303K まで水によく溶け、303K 以上になると相分離する。88.0mol%および 99.6mol%はそれぞれ 293K 以上、353K 以上で水によく溶ける性質を有する⁴⁾。

表 4-1 ケン化度と可溶媒質の関係および試験片の PVA フィルムの厚さ

Saponification degree (mol %)	72.0	88.0	99.6
Solvable substance	Water (283K to 303K)	Water • Hot water (over 293K)	Hot water (over 353K)
PVA film thickness (μ m)	35	15 30 40 60	45

赤外線サーモグラフィ法において、測定面に PVA フィルムを貼付する際、PVA フィルムと対象物の間に気泡が入ると、対象物内の層間剥離と同じ伝熱挙動を示すことから、誤検知を招く危険性がある。そこで、貼付時に気泡が入りにくくなるよう PVA フィルムを 3 層構造とした。図 4-1 に PVA フィルムの構

造の概略を示す。PVA フィルムは、片面に厚さ 15 μm の水溶性の接着剤がついており、上面を硬質のプラスチックフィルム、下面を紙製台紙に挟まれている。使用時には、最初に紙製台紙をはがし、測定面に貼付した後、プラスチックフィルムをはがして使用する。たとえ、貼付時に気泡が入っても、検査に影響のない程度の微小な空気抜き穴を開けて加圧すれば、気泡は完全に除去できる。

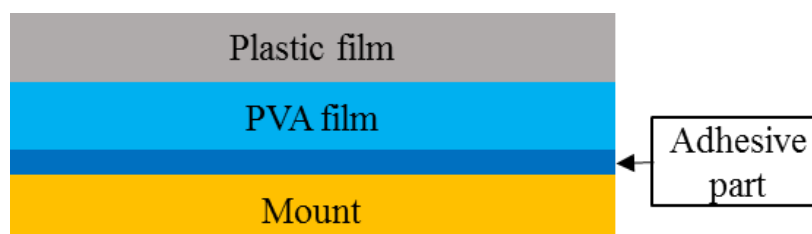


図 4-1 PVA フィルムの構造の概略

(2) FT-IR による PVA フィルムの分光放射率の測定

FT-IR を利用して、PVA フィルムの分光放射率を測定した。本節ではまず測定理論の説明を行う。

FT-IR を用いて一般試料の分光放射特性を得る際には、反射法か分離黒体法の二つの異なる測定手法が主に使い分けられている⁹⁾⁻¹³⁾。これは、試料の特徴に合わせて、測定方法を変える必要があるからである¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。しかし、検出波長の一部を透過する試料の場合、通常の反射法や分離黒体法では、正確に放射率を取得することは難しい。そのため、分光反射率と分光透過率をそれぞれ求め、その後、エネルギー保存則から [放射率=1-反射率-透過率] として、分光放射率を決定する方法がある^{17), 18)}。しかし、PVA フィルムのように、放射率が高く、反射率と透過率が極めて小さいフィルムを対象とすると、測定値の S/N 比が小さくなり、精度の良い計測が出来ないことが懸念される。また、セラミックスを対象にして、加熱した試料と、同じ温度に設定された黒体炉から放射される放射エネルギーを測定し、その比から分光放射率を直接決定する手法⁹⁾⁻¹¹⁾が提案されている¹⁹⁾。しかし、PVA フィルムのように薄い材料では、その薄さに起因し赤外線の一部を透過するため、試料の下の材料（下敷き材）の放射分が加算されてしまい正確な測定が出来ない。

そこで、試料、下敷き材および黒体炉、それぞれの放射エネルギーを測定し、試料の測定値から下敷き材の測定値と内部外乱分を減算し、分光放射率を求める修正分離黒体法を提案した。以下に手法を説明する。

測定には、FT-IR、試料加熱ヒータおよび黒体炉を用いており、構成の概要は

2.2.2 項で利用した図 2-3 と同じである。

試料加熱ヒータ上で試験片上面が 373.0K になるように加熱した試験片と、同一温度に設定した黒体炉の放射エネルギーをそれぞれ FT-IR で測定し、その比から分光放射率を決定する。なお黒体炉は、チノー社製の計量研形低温域黒体炉 IR-R24 を用い、放射率は 0.993 である。試料上面の温度は、あらかじめ校正済みの赤外線サーモグラフィ装置（日本アビオニクス社製、TVS-5000）により測定した。

本手法で使用する試験片と、試験片から放射される放射エネルギーの模式図を図 4-2 に示す。試験片は、下敷き材の上に試料を接着した (a) PVA 試験片、下敷き材のみの (b) 下敷き試験片の 2 種類を利用する。

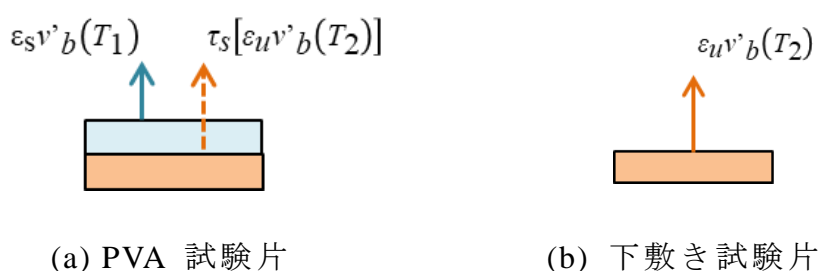


図 4-2 試験片から放射される放射エネルギーの模式図

ここで、模式図の記号は、試料の放射率 ϵ_s 、黒体の放射エネルギーの理論値 ν'_b 、試料上面の温度 T_1 、試料の透過率 τ_s 、下敷き材の放射率 ϵ_u 、下敷き材上面の温度 T_2 を表す。

PVA 試験片からは、試料の放射エネルギー ν_m 、すなわち試料上面と同一温度の黒体の放射エネルギーに試料の放射率を乗じたものと試料を透過する下敷き材の放射エネルギーの和が放射されており、式(4-1)が成立する。下敷き試験片からは、下敷き材の放射エネルギー ν_u 、すなわち下敷き材上面と同一温度の黒体の放射エネルギーに下敷き材の放射率を乗じたものが放射され、式(4-2)が成立する。なお、FT-IR で放射エネルギーを計測する際には、FT-IR の内部放射 ν_a が外乱となるため、両式に加算されている。

$$\nu_m(T_1) = \epsilon_s \nu'_b(T_1) + \tau_s [\epsilon_u \nu'_b(T_2)] + \nu_a \quad (4-3)$$

$$\nu_u(T_2) = \epsilon_u \nu'_b(T_2) + \nu_a \quad (4-2)$$

また，FT-IR で計測した黒体炉からの放射エネルギー v_b は以下の式で表すことができる．

$$v_b(T_1) = v'_b(T_1) + v_a \quad (4-3)$$

$$v_b(T_2) = v'_b(T_2) + v_a \quad (4-4)$$

赤外線サーモグラフィ装置による観測から，PVA フィルムは放射率が非常に高く，反射率が低いことが経験上明らかになっており，エネルギー保存則より $1 = \varepsilon + \tau$ が成立する．また，PVA フィルムの厚さを $15\mu\text{m}$ ，熱伝導率を $0.042\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，上面の熱伝達率を $7.8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ として，PVA フィルム内の熱抵抗による温度低下を計算すると 0.03K となり， $T_1 = T_2$ と近似できる．以上のことから，式(4-1)から(4-4)より，式(4-5)が導き出せる．

$$\varepsilon_s = \frac{v_m(T_1) - v_u(T_1)}{v_b(T_1) - v_u(T_1)} \quad (4-5)$$

式(4-5)より，同一温度（373K）に設定された PVA 試験片，下敷き試験片，黒体炉の放射エネルギーを FT-IR で計測すれば，試料の放射率が求められる．

（3）測定誤差の影響と下敷き材の選定

測定には誤差が含まれており，必ずしも理論通りの結果が得られるとは限らない．本節では，PVA 試験片(a)の測定値，すなわち放射エネルギーに 1%の誤差が含まれていた場合に生じる放射率の測定誤差を求めた．本測定手法において試料と下敷き材の放射率の高低が結果に与える影響を検討している．

表 4-2 に設定値および結果を示す．表中の左 2 列が試料と下敷き材の放射率設定値である．それぞれ FT-IR で放射率の低い場合として 0.1 を，高い場合として 0.9 を想定している．左 3-5 列目は，黒体の放射エネルギー量を 100 とした際の放射率設定値に対する放射エネルギー値である．なお，PVA フィルムからの放射エネルギー v_s である．左 6 列目は試験片(a)の測定値に誤差 1%を加えている．右 2 列がその結果から式(4-3)により求めた試料の放射率である．下敷き材の放射率が高い場合，PVA フィルムの放射率の誤差が大きい．逆に下敷き材の放射率が低い場合，PVA フィルムの放射率の誤差が小さい．

表 4-2 試料と下敷き材の放射率の影響

Set value		Measured value			ν_m with error 1%	Result ϵ_s'	Error [%]
ϵ_s	ϵ_u	ν_b	ν_m	ν_u			
0.1000	0.1000	100.0	10.00	10.00	19.19	0.1000	2.110
0.1000	0.9000	100.0	10.00	90.00	91.91	0.1900	91.00
0.9000	0.1000	100.0	90.00	10.00	91.91	0.9100	1.120
0.9000	0.9000	100.0	90.00	90.00	99.99	1.000	11.00

このことから、本実験では下敷き材として放射率が低い鏡面仕上げを施した銅板（タフピッチ銅 C1100, 30mm×30mm×3mm）を選択した。FT-IR で測定した銅板の分光放射率を図 4-3 に示す。波長帯域 3~14 μm の平均放射率は 0.02 であり、非常に低いことから、下敷き材として適している。

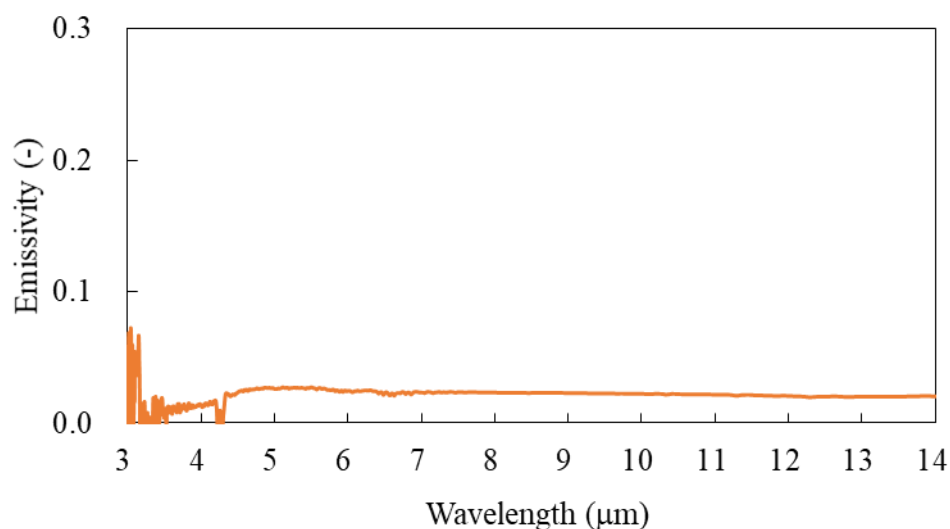


図 4-3 銅板の分光放射率

(4) 分光放射率の測定結果

表 4-1 に示した各 PVA フィルムについて、分光放射率測定を実施し、厚さとケン化度について PVA フィルムの分光放射特性を纏めた。

a) 厚さが異なる場合

ケン化度 88.0mol% の PVA フィルムについて、厚さ 12 μm ~60 μm に対して測定した分光放射率を図 4-4 に示す。また、一般的に使用される赤外線サーモグ

ラファイ装置の波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の PVA フィルムの平均放射率を表 4-3 に示す。

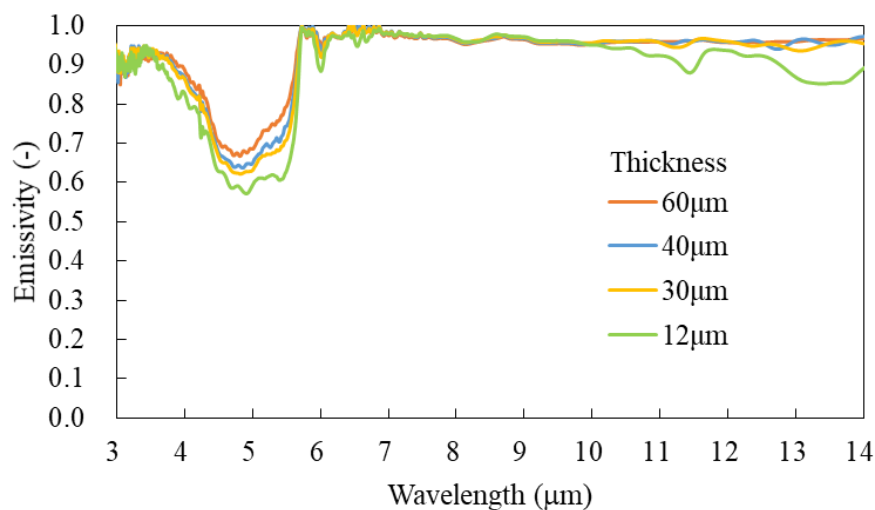


図 4-4 ケン化度 88.0mol% の PVA フィルムにおける
厚さ 12 μm ~60 μm の分光放射率

表 4-3 波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の PVA フィルムにおける
厚さ 12 μm ~60 μm の平均放射率

PVA film thickness	Average emissivity of spectral range	
	3~5 μm	8~14 μm
12 μm	0.78	0.93
30 μm	0.81	0.96
40 μm	0.82	0.96
60 μm	0.83	0.96

厚さ 12 μm から 60 μm へと厚くなっていくにつれ全波長範囲で放射率が上昇している。これは、厚さに比例して一定の値まで放射率が上昇する Lambert-Beer の法則と同様の傾向である。特に波長帯域 3~5 μm に顕著に表れており、厚さ 60 μm で放射率 0.83 に達した。波長帯域 8~14 μm では厚さ 30 μm に達すると放射率 0.96 に達し、厚さ 60 μm の放射率 0.96 と同等の値となり、ほぼ同じ分光特性を示した。また、波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm 比較すると 8~14 μm の放射率が高かった。また、他のケン化度のフィルムでも厚さに関する結果は同

傾向であった。

非破壊試験において、検査後の水洗除去の利便性および可視光域における透過性を考慮すると、PVA フィルムは出来る限り薄い方が良く、本試験結果から 30~40 μm 程度のものが最適であるといえる。

b) ケン化度が異なる場合

次に PVA フィルムを厚さ約 40 μm に固定し、ケン化度の異なる場合の分光放射率を図 4-5 に、波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の平均放射率を表 4-4 に示す。また、比較のために黒体テープ（チノー，SPN-01）の測定結果も示している。

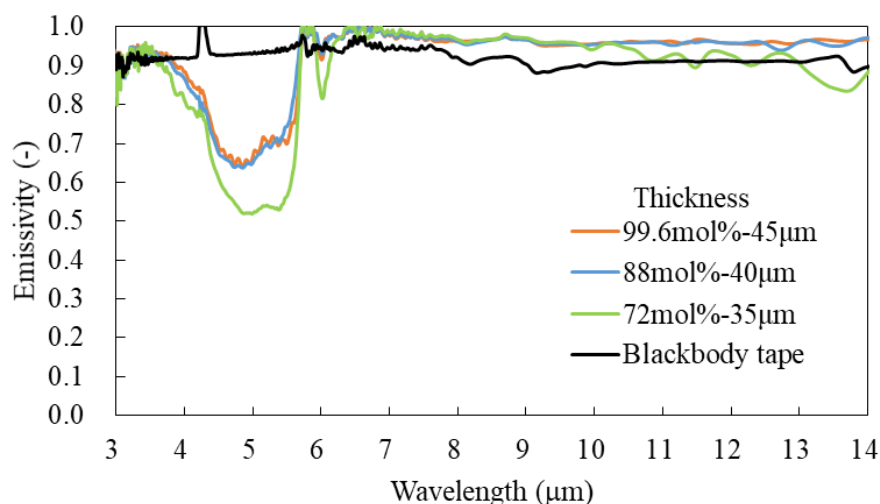


図 4-5 PVA フィルムのケン化度が異なる場合と黒体テープの分光放射率

表 4-4 波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の PVA フィルムのケン化度が異なる場合と黒体テープの平均放射率

Saponification degree (PVA film Thickness)	Average emissivity of spectral range	
	3~5 μm	8~14 μm
99.6mol% (45 μm)	0.83	0.97
88mol% (40 μm)	0.82	0.96
72mol% (35 μm)	0.77	0.94
Blackbody tape	0.93	0.91

ケン化度が 72.0mol% から 99.6mol% に増えると放射率が上昇する傾向が得られた。また、黒体テープと PVA フィルムを比較すると、波長帯域 3~5 μm では黒体テープの方が放射率が高いことに対し、波長帯域 8~14 μm では PVA フィルムの方が放射率が高い。

以上の結果から PVA フィルムは波長帯域 8~14 μm では、高い放射率を有し黒体フィルムとして利用できることが示された。また、波長帯域 3~5 μm では、PVA フィルムは黒体テープよりも放射率が低かったが、放射率の低い金属などの検査に対して効果が期待できる。

(5) 赤外線サーモグラフィ装置による放射率の測定

赤外線サーモグラフィ装置による簡易的な放射率測定²⁰⁾を行い、前節の平均放射率と比較した。対象試験片には、ケン化度 99.6mol%、厚さ 45 μm の PVA フィルムを選択した。下敷き材の上に PVA フィルムを全面に貼付した試験片を、試料加熱ヒータを用いて上面が 373.0 K になるよう加熱し、赤外線サーモグラフィ装置により放射率測定を行った。測定には検出波長帯域が 8~14 μm の日本アビオニクス社製 TVS-500EX を用いた。赤外線サーモグラフィ装置は、試験片から 500mm 上面のほぼ正面に設置した。また試験片右上には、黒体テープ (5mm \times 5mm) を貼付している。

図 4-6 に撮像した熱画像を示す。見かけの温度において、PVA フィルムが 365.0K であるのに対し、黒体テープは 361.4K と 3.6K だけ低い値となっている。厚さ約 100 μm の黒体テープ (熱伝導率 0.2W/(m \cdot K)) の熱抵抗による温度の低下は約 0.4k であり、本実験における 3.6K もの見かけの温度の低下は、黒体テープの放射率が PVA フィルムの値より低いことを示している。赤外線サーモグラフィ装置の放射率補正機能を用いて求めた PVA フィルムの放射率は 0.98 となり、FT-IR による測定値 0.97 とほぼ一致した。以上の結果より、前項で得られた PVA フィルムの放射率およびその測定方法の検証ができた。

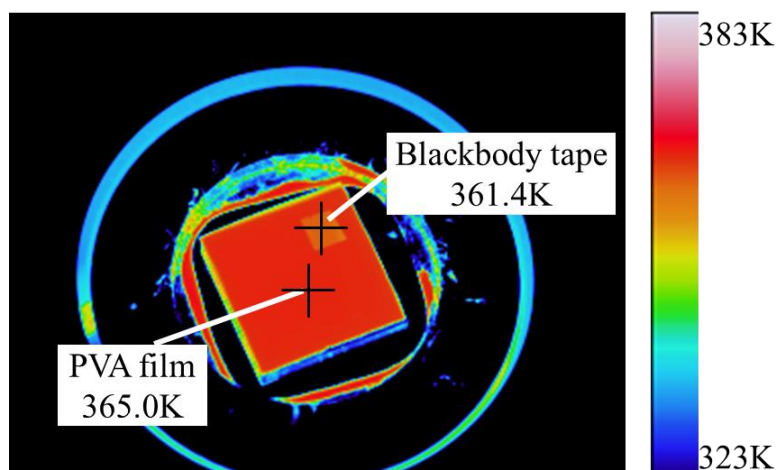


図 4-6 ケン化度 99.6mol%、厚さ 45 μm の PVA フィルムと黒体テープの比較の熱画像

4. 2. 2 非破壊検査の検証実験

PVA フィルムの非破壊検査に対する有効性を探るため、検証実験を行った。実験の概要を図 4-7 に示す。試験対象物は、裏面に直径 40mm、深さ 7.5mm の平底穴を有するステンレス鋼板 (SUS304, 400mm×400mm×10mm) である。PVA フィルムは、ケン化度 72.0mol%、厚さ 35 μ m を用い、100mm×50mm のシートを平底穴上部にきず円の右半分に重なるよう貼付した。きず円の左半分は、ステンレス鋼板の表面のままである。また、背景反射を模擬するために、実験室天井に設置された蛍光灯の反射が平底穴上部と重なる位置で赤外線サーモグラフィ装置を用いて撮像を行った。赤外線サーモグラフィ装置は、検出波長帯域が 8~14 μ m の日本アビオニクス社製 TVS-500EX を用いた。このときの赤外線サーモグラフィ装置の設置位置は試験対象物の表面から約 700mm で、赤外線サーモグラフィ装置の光軸と試験対象物の法線がなす角度が約 10°である。

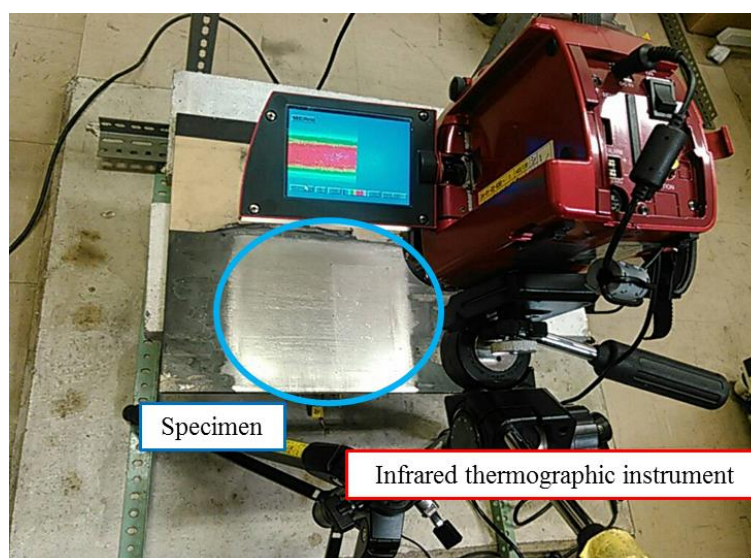


図 4-7 非破壊検査の実証実験の概要
(SUS 試験片の青丸内右半分に PVA フィルム貼付)

試験加熱前の試験対象物の様子について、可視画像を図 4-8 に、熱画像を図 4-9 に示す。可視画像では、PVA フィルムの未貼付部および貼付部の両側で蛍光灯の反射が同じように観察できており、PVA フィルムが可視光領域で透明であることを示している。一方、熱画像では、未貼付部では蛍光灯の放射エネルギーの反射が観察できるが、PVA 貼付部では反射が起きていない。これは、8~14 μm の赤外線波長帯域において、PVA フィルムの放射率が高く、反射率がほぼ 0%であることを示している。

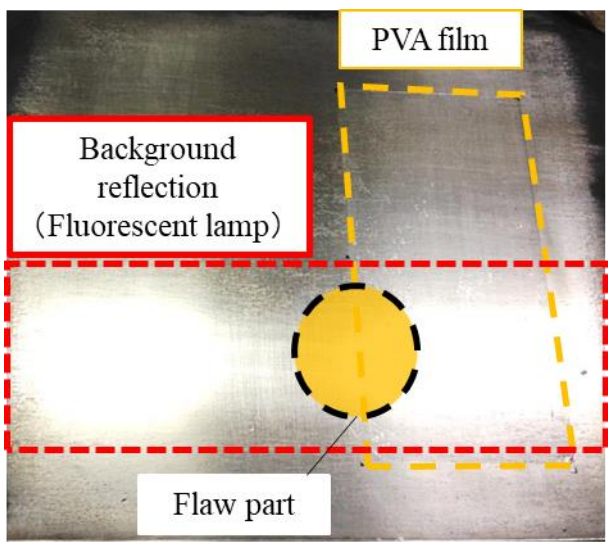


図 4-8 試験加熱前の試験対象物の可視画像
(赤破線内に背景反射を設置．橙破線内に PVA フィルム貼付)

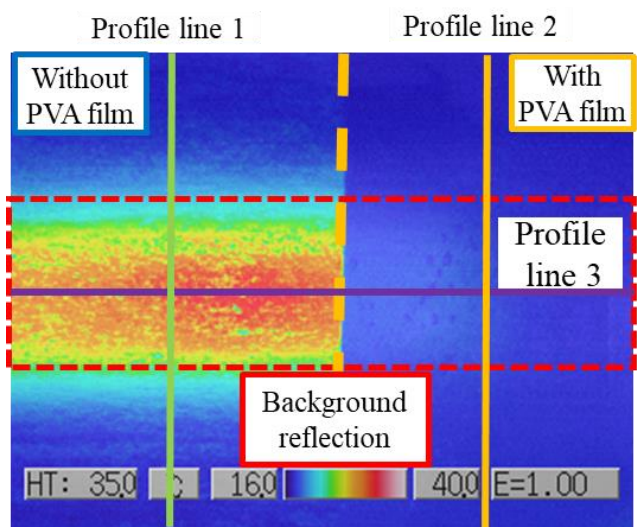
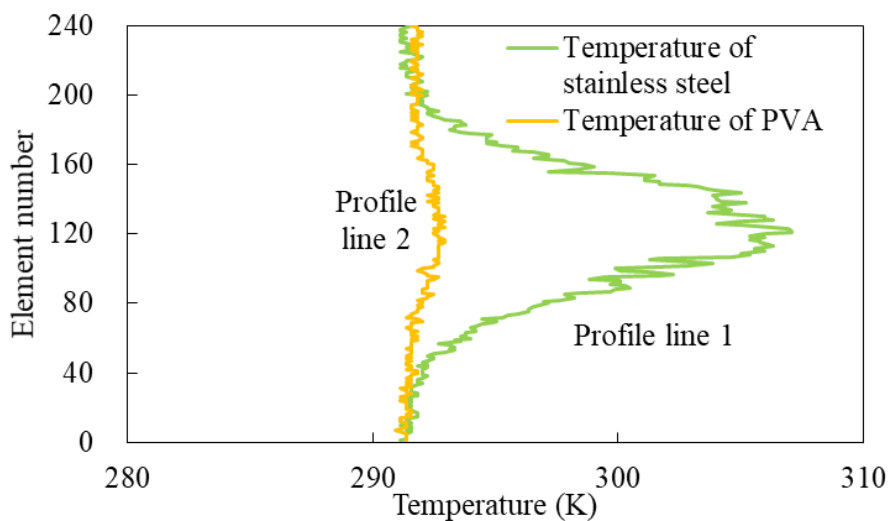
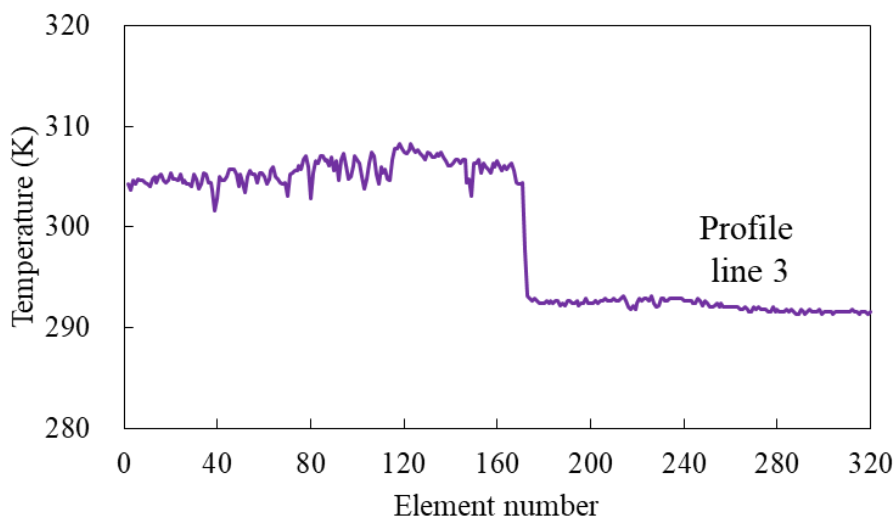


図 4-9 加熱前の試験対象物の熱画像
(緑，橙，紫の各線は図 4-10 の温度プロファイル位置を示す)

図 4-10 に、図 4-9 の線上の温度プロファイルを示す．(a)では縦軸に、(b)では横軸に位置を表す画素数があてられている．PVA フィルム未貼付部では、背景反射の影響を受け、見かけの温度が高くなっていることに対し、PVA フィルム貼付部では、背景反射の影響は低減できている．



(a) 縦方向の温度プロファイル

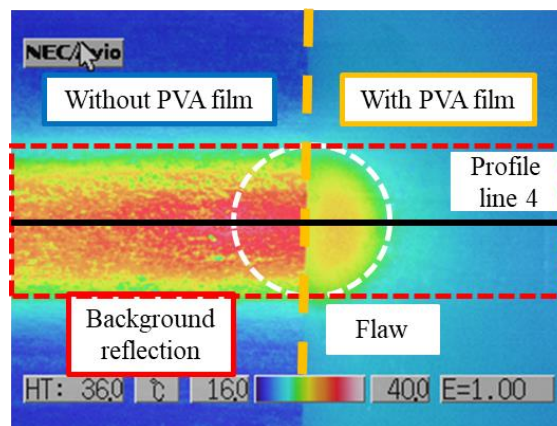


(b) 横方向の温度プロファイル（背景反射下）

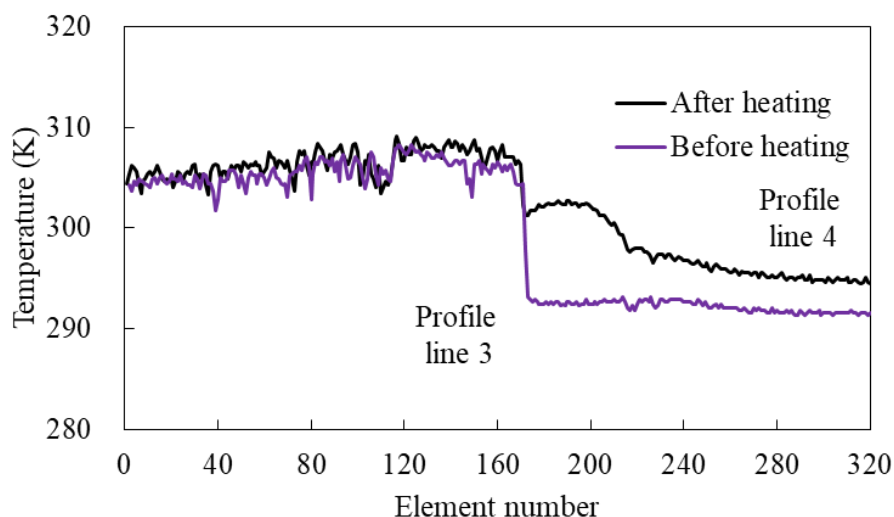
図 4-10 図 4-9 の加熱前の試験対象物の温度プロファイル

続いて、500W のハロゲンランプで試験片上面の約 300mm の位置から 10 秒間の放射加熱を実施し、加熱終了直後の結果を図 4-11 に示す。PVA フィルム未貼付部は背景反射の影響を受け、きず指示が判別できないことに対し、PVA フィルム貼付部は問題なくきずが検知できている。また、PVA 貼付部については、放射率（吸収率）が高いためハロゲンランプの加熱によりきずを確認できるが、PVA フィルムの未貼付部は、放射率（吸収率）が低いため、温度上昇が起きていないことが確認できる。

以上の結果により PVA フィルムの非破壊検査に対する有効性を示すことができた。また、実証実験終了後に、約 314K の水 500ml 程度を表面にかけ流すことで、貼付した PVA フィルムを試験片から除去することができた。もし検査対象物が水洗可能な製品であれば、試験の痕跡を残すことなく非破壊検査を実施可能であることが示された。



(a) 加熱終了直後の熱画像



(b) 加熱前および加熱終了直後の温度プロファイル

図 4-11 PVA フィルムの非破壊検査への適用結果

4. 3 PVA 塗料を用いた背景反射の低減

前項までにおいて、PVA フィルムが従来の黒体テープの代替品として非破壊検査への適用が可能であることが示された。しかし、フィルム形状では、試験対象物が屈曲部や凹凸を有している場合には、貼付しにくいという問題がある。そこで、PVA を液体化した塗料を用いることで、フィルムより簡易的に検査ができると考え、本項において、PVA 塗料の開発とその分光放射特性の調査、さらに PVA 塗料の気化熱を利用した非破壊検査手法の提案を行った。

4. 3. 1 PVA 塗料

PVA はケン化度によって可溶媒質が異なり、表 4-5 に示した関係がある。アセトン溶液とエタノール溶液は、塗布した際に、溶媒が短時間で揮発し PVA を測定面に素早く定着できる。一方で水溶液の場合は、乾燥までに時間を要するため、非破壊検査の用途には向いていない。よって本研究では、アセトン溶液とエタノール溶液のみを対象とした。

表 4-5 PVA のケン化度と可溶媒質の関係

Saponification degree (mol %)	9	35	75
Solvable substance	Acetone	Ethanol	Water
Volatility	○	○	×

4. 3. 2 PVA 塗料の気化による温度変化

赤外線サーモグラフィ法の測定原理は、きず部と健全部の熱容量の違いを利用している。熱容量が異なるということは、加熱時もしくは冷却時の温度変化に差があるということであり、この結果として生じた温度分布からきずの検出を行なっている。そのため、検査する際は対象物を加熱するなどの温度変化を与える必要がある。本研究で用いる PVA 塗料は液体であるため、塗料を塗布すると液体の気化による吸熱反応が生じる。この反応を利用することができれば、対象物表面の放射率を上昇させる PVA を塗布すると同時に、温度変化を与えることができるのではないかと考えた。そこで、アセトン溶液とエタノール溶液の両塗料の気化による温度変化を調査した。

(1) 気化熱の測定方法

気化熱の測定実験には、加熱ヒータ付き液体気化ステージと精密はかりを用いた。図 4-12 に試験装置の外観を示す。精密はかりの上に設置された加熱ヒータ付き液体気化ステージは、厚さ 0.3mm のアルミニウム製板で、ステージ

裏側に熱電対（Kタイプ，直径 0.1mm）をアルミテープで貼付²¹⁾し，温度変化を測定できるようになっている．また，ステンレス薄膜ヒータにより，ステージの温度を制御できる．実験で使用した試薬は，PVA 塗料の溶媒である，アセトン，エタノールの 2 種類を用意した．

温度変化，沸点および蒸発潜熱の関係性を調べる為に本測定実験は 2 段階で実施した．まず，常温（291K）で試薬 0.35ml をステージに滴下し，気化による質量変化と温度変化を計測した．次にアセトンの気化量（質量変化）と同一になるようにエタノールを 321K に加熱して同様の計測を行った．ステージの温度は溶液と同一温度に設定している．

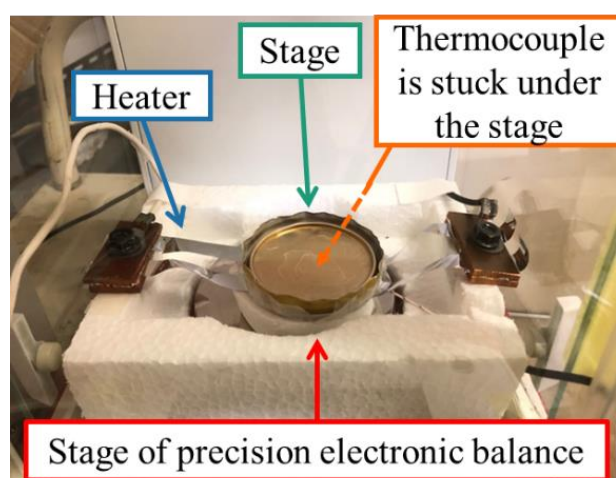


図 4-12 気化熱の測定に用いた試験装置の外観

（2）測定結果および考察

アセトンとエタノールの質量変化を図 4-13 に，その際の温度変化と質量変化の関係を図 4-14 に示す．常温の場合，アセトンの質量変化の勾配がエタノールのものより大きくなっている．これはエタノールの沸点 351.3K に対し，アセトンの沸点が 329.5K と低く，アセトンが気化しやすいことが原因である．常温のエタノールは時間当たりの気化量が少なく質量変化の勾配が小さいため，温度変化も小さくなっている．一方，エタノールを加熱し質量変化をアセトンに合わせた場合，エタノール（加熱）の温度変化がより大きくなった．これは，アセトンの蒸発潜熱 500kJ/kg に対し，エタノールの蒸発潜熱がその約 1.6 倍の 838kJ/kg であることから，温度変化においてもエタノールが約 1.6 倍大きくなったと言える．このことから，蒸発潜熱の効果を確認することができた．

以上の結果から，気化熱を利用した非破壊検査を常温で実施する場合は，本実験で利用した 2 種類の中では沸点の低いアセトンが適している．また理想的な溶媒は，蒸発潜熱が大きく，沸点が低いものである．

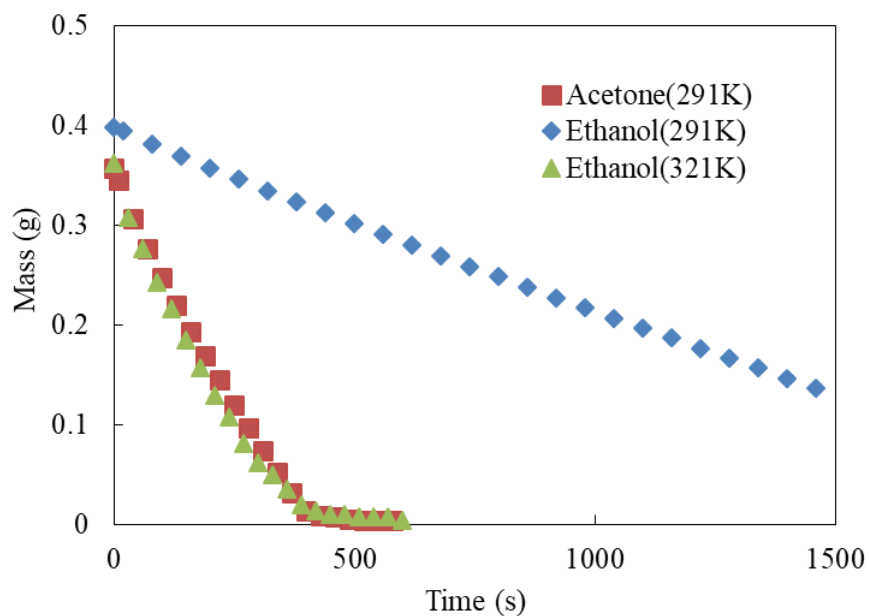


図 4-13 アセトンとエタノールの質量変化

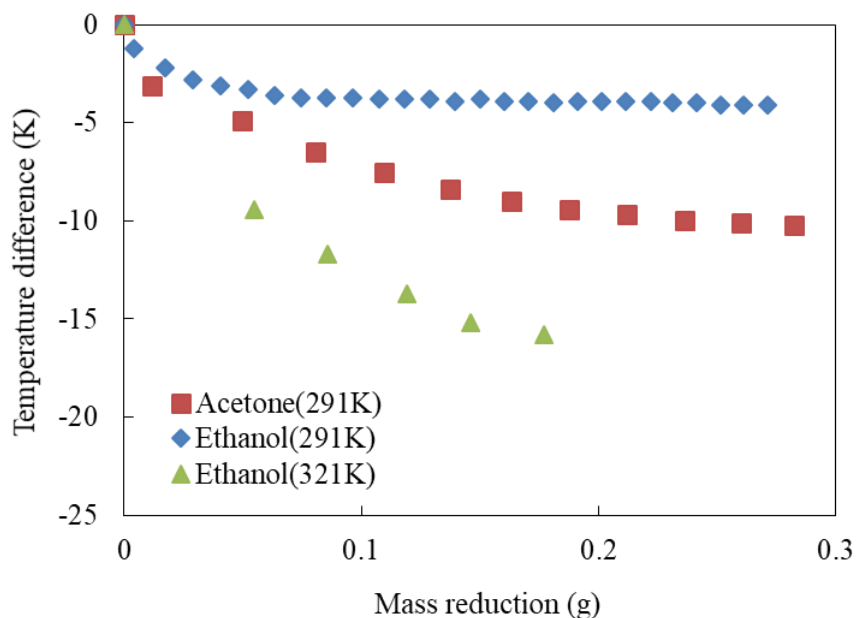


図 4-14 アセトンとエタノールの質量変化に対するステージの温度変化

4. 3. 3 FT-IRによるPVA塗料の分光放射率測定

(1) 分光放射率測定用の試験片作製と測定

PVA塗料の分光放射特性を評価するために、FT-IRによる測定を行った。測定方法は、4.2.1項 PVA フィルムの放射率測定と同じである。

放射率の測定誤差の影響を小さくするために、放射率が低い鏡面仕上げした銅板（タフピッチ銅 C1100, 30mm×30mm×3mm）を下敷き材として用意した。下敷き材表面の一部をメンディングテープで覆い、PVA塗料を均一にスプレーで塗布した。十分に乾燥させた後、メンディングテープをはがし、形状解析レーザー顕微鏡（キーエンス、VK-X200）により未塗装部と塗装部の段差を測定することで、塗装厚さを求めた。表 4-6 に作製した試験片の PVA 塗料厚さを示す。

表 4-6 PVA 塗料の種類と作製した試験片の PVA 塗料厚さ

Saponification degree (mol %)	9	35
PVA thickness (μm)	11.0 26.3 47.0	29.6

(2) 分光放射率の測定結果

表 4-6 に示した各 PVA 塗料に対し、FT-IR を用いた分光放射率測定を実施し、厚さとケン化度について PVA 塗料の分光放射特性を纏めた。なお、非破壊検査への適用を考慮し、一般的に使用される赤外線サーモグラフィ装置の波長帯域 3~5μm と 8~14μm における平均放射率を求めている。

a) 厚さが異なる場合

ケン化度 9mol% の PVA 塗料の厚さ 11.0~47.0 μm に対して測定した分光放射率を図 4-15 に示す。また、一般的に使用される赤外線サーモグラフィ装置の波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の PVA 塗料の平均放射率を表 4-7 に示す。厚さ 11.0~47.0 μm と厚くなっていくにつれ、全測定波長範囲において放射率が上昇している。これは、厚さが増すにつれて一定の値まで放射率が上昇する Lambert-Beer の法則と同様の傾向が表れている。また、波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm 比較すると 8~14 μm の放射率が高く、厚さ 47.0 μm で放射率は 0.79 に達した。併せて、ケン化度 35mol% の PVA 塗料でも、厚さに関する結果は同傾向であった。

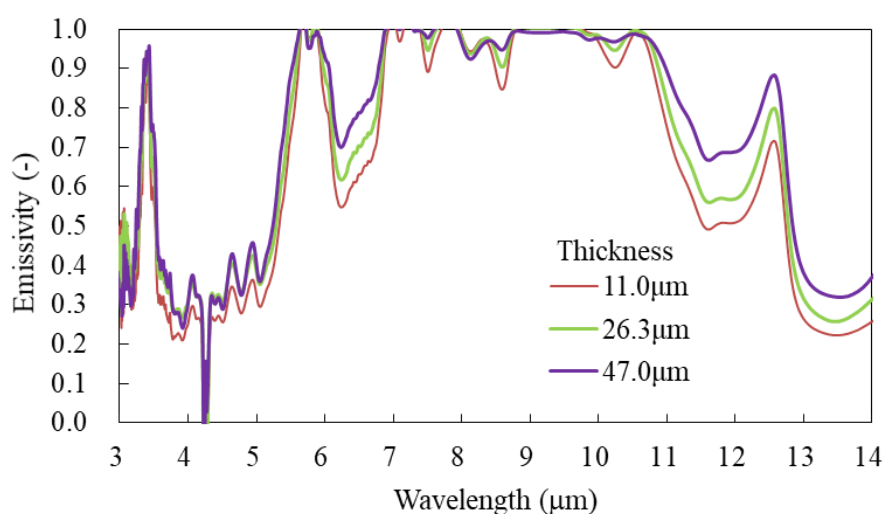


図 4-15 厚さ 11.0~47.0 μm におけるケン化度 9mol% の PVA 塗料の分光放射率

表 4-7 波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の PVA 塗料 (9mol%) の平均放射率

Thickness(μm)	Average emissivity of spectral range	
	3~5 μm	8~14 μm
11.0	0.33	0.71
26.3	0.38	0.75
47.0	0.39	0.79

b) ケン化度が異なる場合

PVA 塗料の厚さを同程度にしたケン化度 9mol% および 35mol% の分光放射率を図 4-16 に示す。また、波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の平均放射率を表 4-8 に示す。波長帯域 3~4 μm 付近および 11 μm 以上の付近について、ケン化度が 9mol% から 35mol% に増えると放射率が上昇する傾向が得られた。それ以外の波長帯域では、同等程度の放射率であった。そのため、波長帯域 3~5 μm および 8~14 μm においてケン化度 35mol% の平均放射率の方が高い傾向が得られた。

以上の結果から、本研究で作製した PVA 塗料は波長帯域 8~14 μm では、黒体テープや PVA フィルムほどではないが、十分に高い放射率を有しており、赤外線サーモグラフィ試験に利用できることが示された。

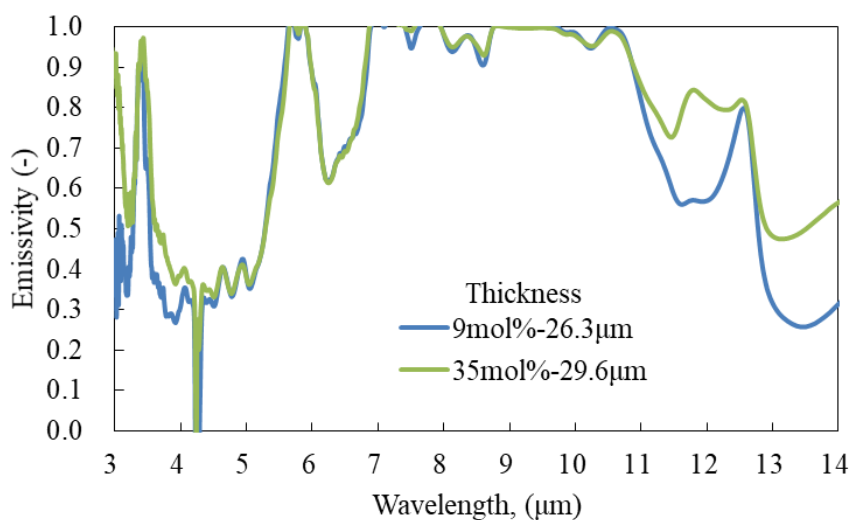


図 4-16 PVA 塗料の厚さを同程度にしたケン化度 9mol% および 35mol% の分光放射率

表 4-8 波長帯域 3~5 μm と 8~14 μm の平均放射率

Saponification degree	Average emissivity of spectral range	
	3~5 μm	8~14 μm
9mol%(26.3 μm)	0.38	0.75
35mol%(29.6 μm)	0.48	0.79

4. 3. 4 非破壊検査の検証実験

(1) 気化熱を利用したきず検知

PVA 塗料の非破壊検査に対する有効性を探るため、検証実験を行った。赤外線サーモグラフィ装置は検出波長帯域が $8\sim 14\mu\text{m}$ の日本アビオニクス社製 TVS-500EX を用い、試験対象物から約 700mm 上面に赤外線サーモグラフィ装置の光軸と試験対象物の法線がなす角度が約 10° で設置した。試験対象物は、裏面に直径 40 mm、深さ 7.5 mm の平底穴を有するステンレス鋼板 (SUS304, 400 mm \times 400 mm \times 10 mm) である。使用した PVA 塗料は、ケン化度 9mol% で溶媒はアセトンである。PVA 塗料をスプレーに入れ、ステンレス鋼板に吹きかけて塗布した。塗布の際、紙をステンレス鋼板の平底穴上面に下半分に重なるよう配置し、比較のための未塗装部とした。

PVA 塗料塗布後のステンレス鋼板の可視画像を図 4-17 に示す。可視画像上でも塗布部が可視光領域で透明であることが示されており、未塗布部と同様な状態でステンレス鋼板表面の様子が確認できる。

PVA 塗料塗布 3 秒後の熱画像を図 4-18 に、図 4-18 における線上の温度プロファイルを図 4-19 に示す。温度プロファイルは、(a)きず指示部、(b)塗布ムラ部である。熱画像ときず上の温度プロファイル(a)から、PVA 塗料を塗布したことで、表面の放射率が向上したこと、PVA 塗料の気化熱により試験対象物の表面温度が低下したこと、これら 2 点により、きずの検知が可能となったことが示された。

しかし、塗布の際に塗布量のばらつきや時間のずれが生じると、温度分布がムラになる。図 4-19(b)において、塗布ムラ部はきず指示と誤認してしまう危険性がある。今後の課題として、時空間の両面における均一塗布方法を検討する必要がある。

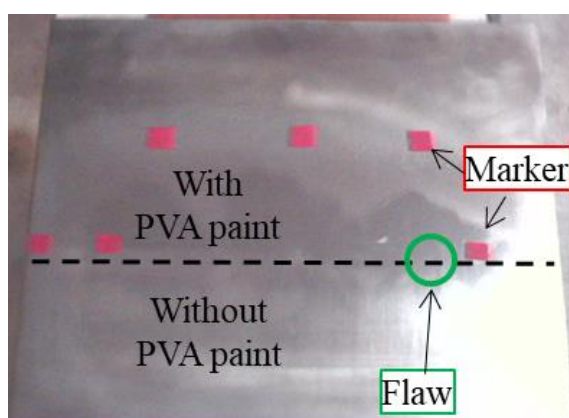


図 4-17 PVA 塗料塗布後のステンレス鋼板の可視画像

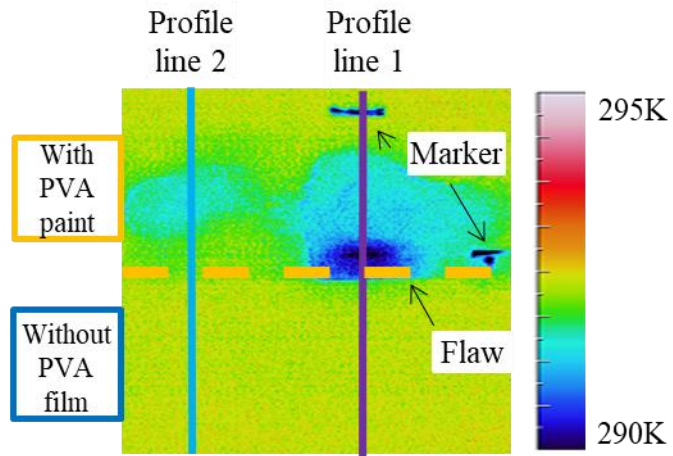
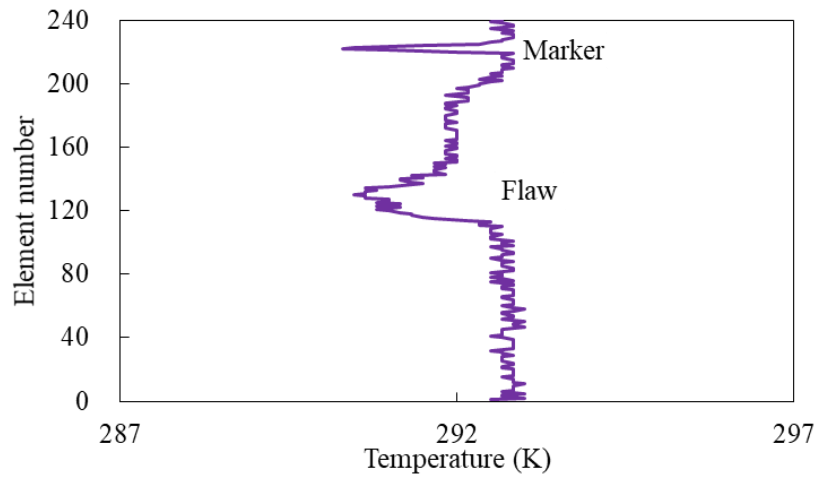
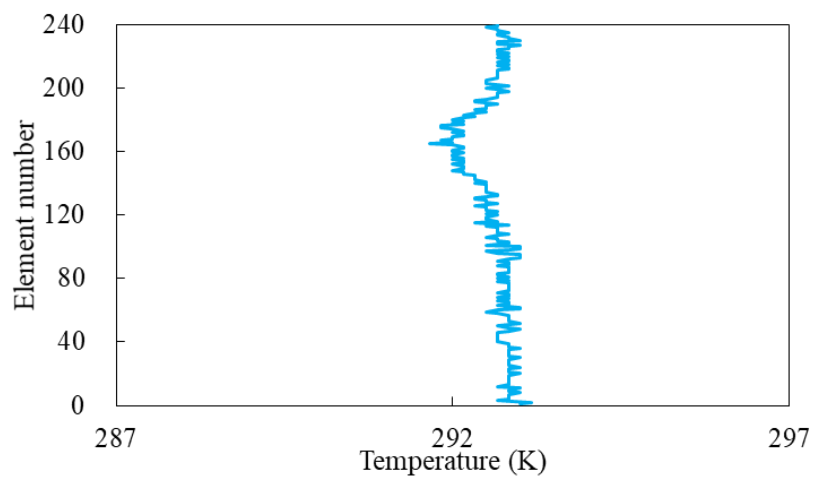


図 4-18 PVA 塗料塗布 3 秒後の熱画像



(a) きず指示部 (Profile line 1)



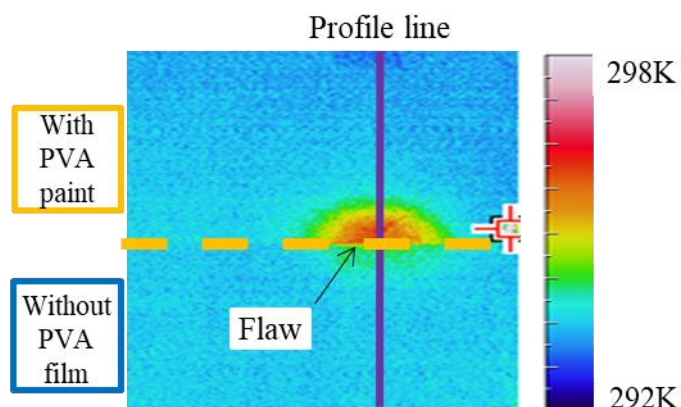
(b) 塗布ムラ部 (Profile line 2)

図 4-19 図 4-18 の温度プロファイル

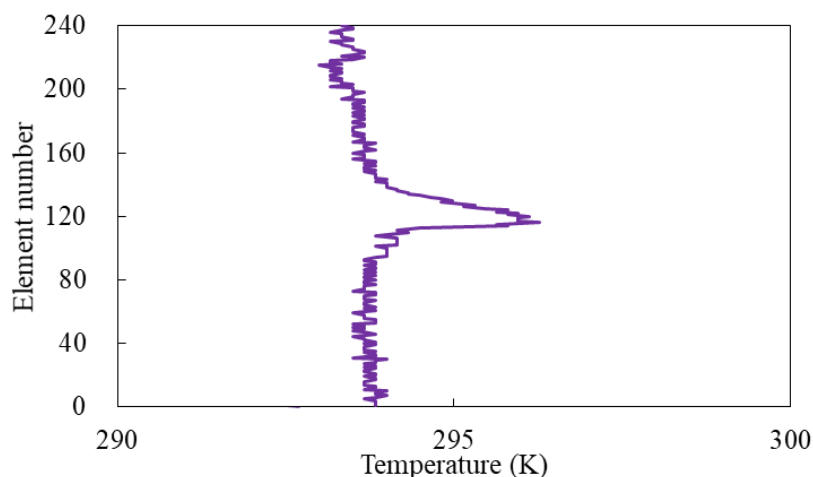
(2) 塗布後の放射加熱によるきず検知

気化熱を利用したきず検知試験の後、PVA 塗料の黒体化処理能力を確認するために、放射加熱を利用したきず検知試験を行った。500W のハロゲンランプで試験片上面の約 300mm の位置から 15 秒間の放射加熱を実施し、気化熱実験と同じ位置から赤外線サーモグラフィ装置で撮像を行った。

加熱終了直後の熱画像を図 4-20 に示す。PVA 塗料未塗布部（橙破線部下半分）は、きず検知ができないが、PVA 塗料塗布部（橙破線部上半分）は高温指示部がきず形状を表しており、きず検知ができています。温度プロファイルでも同様のことが確認できる。PVA 塗料の非破壊検査に対する黒体塗料としての有効性を示すことができた。



(a) 放射加熱直後の熱画像



(b) きず指示部の温度プロファイル

図 4-20 PVA 塗布，放射加熱後の測定結果

4. 4 PVA フィルム・塗料の黒体化処理効果

本章で提案した PVA フィルムと PVA 塗料の利点の一つは、赤外域における高い放射率である。しかし、PVA フィルムの 8~14 μm 波長帯域では約 0.95 と高い値を有しているが、3~5 μm では約 0.8 に、PVA 塗料では 8~14 μm では約 0.75、3~5 μm では約 0.35 と下がってしまい、これらは黒体塗料の約 0.95 と比較すると低い値である。そこで非破壊検査時における黒体化処理の効果について簡易的な調査を行った。

通常非破壊検査における赤外線サーモグラフィ試験では、対象物に対し数度の温度変化を与え、きず指示温度 T_f と健全部温度 T_s の温度差を観察する。一般的な条件として、周辺温度 $T_a=293\text{K}$ 、加熱温度 $\Delta T_h=+5\text{K}$ 、生じた温度差 $\Delta T_{f-s}=+5\text{K}$ と仮定した際の、物体表面の放射率 ε と反射率 $\rho(=1-\varepsilon)$ の条件による、測定温度差 ΔT_{f-s} の違いを計算した。温度差は、ステファンボルツマンの法則から、以下の式で求められる。

$$\Delta T_{f-s} = [(\varepsilon \times T_f^4 + \rho \times T_a^4)]^{1/4} - [(\varepsilon \times T_s^4 + \rho \times T_a^4)]^{1/4} \quad (4-6)$$

結果を図 4-21 に示す。通常非破壊検査における温度範囲では、ほぼ線形に近い関係となっている。また、赤外線サーモグラフィ装置の波長帯域に限ることで温度と放射エネルギーの関係がほぼ線形に近似できると仮定すれば、式(4-6)は式(4-7)となる。

$$\Delta T_{f-s} = \varepsilon(T_f - T_s) \quad (4-7)$$

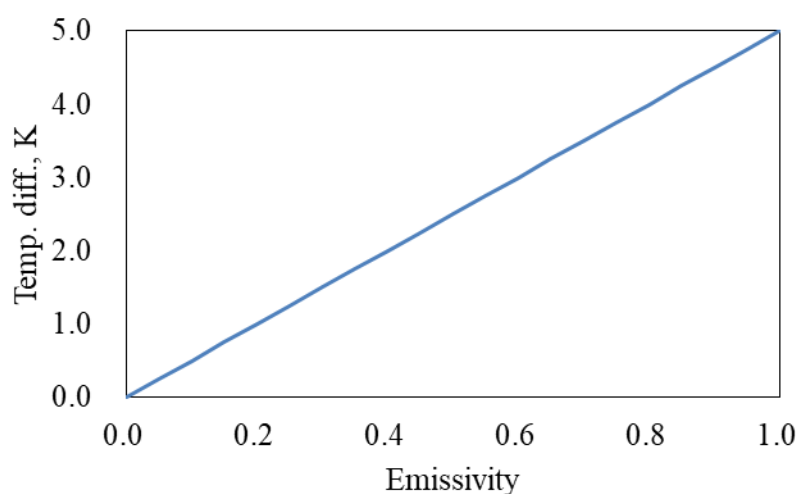


図 4-21 対象物放射率の違いによるきず指示温度と健全部温度の差 (周辺温度 $T_a=20\text{K}$ 、加熱温度 $\Delta T_h=+5\text{K}$ 、生じた温度差 $\Delta T_{f-s}=5\text{K}$ の場合)

例えば放射率が 0.2 程度のステンレスを対象物とした場合、PVA 塗料を塗布しても、検出波長域が 3~5 μm の短波長形赤外線サーモグラフィ装置では、検出感度は 1.25 倍程度しか向上せず、効果は少ない。しかし、検出波長域が 8~14 μm の長波長形装置を用いたり、0.1 以下とより放射率が低いアルミニウムなどを対象物にする場合は、PVA フィルムはもちろんのこと、PVA 塗料でも十分に黒体化処理の効果を発揮する。また、加熱時に放射加熱装置を用いる場合には、より顕著に放射率向上の効果は得られることにも留意が必要である。

4. 5 結 言

本章では非破壊検査における赤外線サーモグラフィ試験に適用できる、高放射率フィルムおよび塗料を提案した。提案材料は以下 3 つの利点を有する。

- ・ 赤外線域で放射率が高く黒体化処理が可能なこと
- ・ 可視光域で透明で、目視検査が可能なこと
- ・ 水溶性を有しているため、検査後の除去が容易であること

本章内で得られた結果を以下に述べる。

- ・ FT-IR と下敷き材を利用したフィルムおよび塗料の分光放射率測定方法を提案した。透過を有する高放射率材料に有効である。
- ・ PVA フィルムおよび塗料の分光放射特性を測定し、得られた平均放射率を赤外線サーモグラフィ装置による簡易測定法で検証した。
- ・ PVA フィルムおよび塗料は、厚さとケン化度が増すと、放射率が向上する。
- ・ PVA フィルムは、黒体テープの放射率と比較して、3~5 μm では低いが、8~14 μm では高く、黒体化材料として利用が可能である。
- ・ アセトン溶液の PVA 塗料を塗布することにより、気化熱を利用した赤外線サーモグラフィ法が可能である。ステンレス鋼板の減肉きず検知などに有効である。ただし、塗装ムラが誤検知を引き起こす危険性があり、均一塗布方法の検討を要する。

以上の結果により、PVA で作製した可視光透明なフィルムおよび塗料は、赤外線サーモグラフィ法の背景反射の低減に有効である²²⁾。特にステンレスやアルミニウム合金など表面を露出したまま使用する金属等の低放射率材料に対して効果を発揮する。以下に非破壊検査に適用する際の注意点を記す。

- ・ PVA フィルムの融点（約 393K）以上ではフィルムが変質するため、非破壊検査に影響を及ぼす可能性がある。
- ・ PVA フィルムは、ステンレスやアルミニウムなどの凹凸がない金属表面に、

PVA 塗料は凹凸がある面や複雑な形状をした金属材料の非破壊検査に有効である。ただし、PVA 塗料は、溶媒がアセトンまたはエタノールのため、プラスチックや塗装を施した部材に使用する際は、素材の種類によりそれらを侵す可能性があるため注意が必要である。

第4章 参考文献

- 1) 小倉敬二, 阪上隆英, 山中秀介, 木島重基: 表面温度分布の転写計測による FPC 基板中の微小欠陥計測, 第4回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.59-64, (1993)
- 2) 日本非破壊検査協会: 非破壊検査技術シリーズ赤外線サーモグラフィ試験 II, 日本非破壊検査協会, (2012)
- 3) 小笠原永久, 田村拓海, 鈴木総司, 山田浩之: 透明黒体フィルムを用いた赤外線サーモグラフィ試験, 日本機械学会平成 29 年度山梨講演会講演論文集, pp.1-2, (2016)
- 4) 長野浩一, 山根三郎, 豊島賢太郎: ポーバール, 高分子刊行会, pp.96-99, (1970)
- 5) 藤倉嘉昭, 石淵欣造: 各種ポリマーフィルムのふく射係数の比較, 繊維学会誌, 24(10), pp.453-457, (1968)
- 6) 藤倉嘉昭: ポリビニルアルコールとその関連物質のふく射率測定, 繊維学会誌, 27(5), pp.211-216, (1971)
- 7) 藤倉嘉昭, 鈴木孝制, 松本昌一: 複合ポリマーの熱ふく射, 繊維学会誌, 34(7), pp.43-48, (1978)
- 8) 藤倉嘉昭: ポリマーの放射率, 山形大学紀要(工学), 25(2), pp.55-68, (1999)
- 9) 日本規格協会: ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定方法 第1部: FTIR を用いた分離黒体法による垂直分光放射率, JIS R 1693-1, pp.1-8, (2012)
- 10) 日本規格協会: ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定方法 第2部: FTIR を用いた反射法による垂直放射率, JIS R 1693-2, pp.1-8, (2012)
- 11) 日本規格協会: ファインセラミックス及びセラミックス複合材料の放射率測定方法 第3部: 直接加熱熱量法による半球全放射率, JIS R 1693-3, pp.1-8, (2012)
- 12) 井邊真俊: 赤外放射率の精密測定技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 9(4), pp.481-498, (2018)
- 13) 日本規格協会: 板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試

- 験方法, JIS R 3106, pp.1-13, (1998)
- 14) K. Zhang and Y. Liu : Modified Two-temperature Calibration Method for Emissivity Measurements at High Temperatures, Applied Thermal Engineering, 168, pp.1-8, (2020)
 - 15) L. Hanssen, S. Mekhontsev and V. Khromchenko : Infrared Spectral Emissivity Characterization Facility at NIST, Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 5405, pp.1-12, (2004)
 - 16) M. Čekon : Spectral Emissivity Properties of Reflective coatings, Slovak journal of civil engineering, 10(2), pp.1-7, (2012)
 - 17) 笹森宣文 : 反射率・透過率測定による放射率の算出, 日本赤外線学会誌, 9(1), pp.13-18, (1999)
 - 18) 笹森宣文 : 赤外線透過率・反射率測定による放射率の算出, 東京都立産業技術研究報告, 第2号, pp.46-48, (1999)
 - 19) N. Ogasawara, C. Kobayashi and H. Yamada : Image Processing for Reduction of Background Reflection from Thermal Image, Advanced Experimental Mechanics, 3, pp.167-172, (2018)
 - 20) 日本非破壊検査協会 : ISO 18436-7 機械設備の状態監視と診断 赤外線サーモグラフィカテゴリーII, 日本非破壊検査協会, (2018)
 - 21) 中村元 : 熱電対による表面温度測定の誤差解析, 日本機械学会論文集, 84(867), pp.1-10, (2018)
 - 22) 鈴木総司, 小笠原永久, 松田裕行 : 赤外線サーモグラフィ試験に用いる可視光透明な高放射率フィルム, 非破壊検査, 70(2), pp.83-88, (2021)

第5章 結 論

本研究では、非破壊検査や状態監視等で幅広く使用されている赤外線サーモグラフィ試験の課題である背景反射の問題に着目した。様々な状況で対応できるように①検査前、②計測時および③データ処理時の3段階に分け対策を提案した。以下に各章で得られた結果および知見を示す。

第1章では、赤外線サーモグラフィ試験で問題となっている背景反射に着目し、赤外線サーモグラフィ試験の現状および重要性を述べるとともに、赤外線サーモグラフィ試験における外乱の影響の除去に関する国内外研究を紹介した。そこから従来の背景反射対策の問題点を導き出し、研究目的を明確にした。

第2章では、②計測時に適用する手法として、偏光理論を利用した背景反射の低減および③データ処理時の除去手法の提案を行った。偏光理論の違いから、絶縁物と金属を分けて実施している。まず、赤外線サーモグラフィ装置に偏光子を取り付け、S偏光測定とP偏光測定の結果を比較する作業のみで、背景反射ときずを判別できる定性的な識別手法を考案した。ただし、本手法は、きずと背景反射が赤外線サーモグラフィ装置の視野において位置的に重なっていると適用できない場合がある。さらに、絶縁物において対面角を Brewster 角に制限することで、反射率を0にすることができ、背景反射の除去が可能であることも示した。続けて、偏光理論に基づく定量的な背景反射除去手法を提案している。赤外線放射エネルギーと赤外線反射エネルギーを2変数の線形方程式とし、偏光子付赤外線サーモグラフィ装置でS偏光測定とP偏光測定を実施、方程式を解くことにより、赤外線エネルギーの反射成分である背景反射と、放射成分であるきずを定量的に分離できる。本手法により、たとえ赤外線サーモグラフィ装置の視野内においてきずと背景反射が重なっていても、それぞれを定量分離でき、きずのみの熱画像を抽出作製することが出来る。対面角をつけて測定できる対象物であれば、金属、絶縁物を問わず、有効な手法である。

第3章では、③データ処理時に適用する手法として、修正位相解析手法を提案し、低熱拡散率材料のコンクリート構造物の剥離検知試験における背景反射除去の有効性を示した。まず、有限要素法を用いた数値実験と MATLAB を利用した位相解析により、コンクリート構造物のはく離検知試験における温度履歴の位相挙動を明らかにした。その知見をもとに、温度データを逐次取得し、その都度に位相解析処理を行うアルゴリズムを提案している。本手法は、全測

定データを利用するためコンクリート構造物など低拡散率材料では検査に時間がかかってしまう問題，視野内に複数のきずが存在していた場合に見逃してしまう問題，これら従来の位相解析手法における問題点を解決した．併せて，本手法が背景反射除去に有効であることの結果を得ている．特に，コンクリートなど低熱拡散率の材料に対して効力を発揮する手法である．

第4章では，①検査前に適用する手法として，ポリビニルアルコール製の高放射率フィルムおよび塗料を作製し，背景反射の低減を行った．本フィルムおよび塗料は，可視光域で透明なため貼付後も目視検査が可能であり，赤外線域で高放射率を有するため背景反射の影響を低減でき，水溶性があるため試験後に除去し易い特長を持つ．これらは従来の黒体フィルムおよび黒体塗料の欠点を補うもので，特にアルミニウム製品やステンレス配管などの高反射金属製品の非破壊検査に実用的に機能する．章内では，FT-IR装置を用いて，高放射率を有し，かつ無視できない程度の透過率も合わせ持つ材料の分光放射率を定量的に求める測定方法を考案している．測定の結果，作製したフィルムおよび塗料は，一般的な赤外線サーモグラフィ装置に用いられる二つの波長帯域において， $3\sim 5\mu\text{m}$ よりも $8\sim 14\mu\text{m}$ の方が高放射率であることを示している．また，減肉きずを持つステンレス鋼板に対して，背景反射を低減させることができ，きず検知が可能なことを実験的に示した．

図5-1に本研究の概要およびそれぞれの利点，提案する適用例および欠点を示す．2章で提案した偏光理論を利用した背景反射除去は，ほぼ全ての材料に適用できる手法であり非常に有効である．そのため高層ビルの高い壁，石油貯蔵タンク，道路と滑走路など様々に対して使用できると考える．しかし，対面角度が約 18° より小さい時には，偏光の区別がつかないため機能しがたい．また，背景反射の除去のためには，プログラムによる処理が必要である．

3章の位相解析処理による背景反射除去については，ビルやトンネルの壁などに使用できると考える．また，本位相解析手法は，理論的には他の材料にも適応可能である．しかし，背景反射の除去のためには，プログラムによる処理が必要である．

4章のPVAフィルムおよび塗料による高放射率化は，簡易的に背景反射を低減することができる．このため，金属面のパイプやタンクなどに使用できると考える．しかし，フィルムの貼付および塗料の塗布については，試験片に対して接触が必要である．

赤外線サーモグラフィ試験を行う際には状況が限られるため，非破壊検査に

おける試験手法の選択と同じで、これら背景除去手法においても用途に応じた使い分けが必要である。本研究のように3つの検査段階を分けることで、赤外線サーモグラフィ試験において単独で利用しても、背景反射に対する十分な処置がさらに幅広く実施できるようになった。

以上の結果により、赤外線サーモグラフィ試験において、①検査前、②計測時、③データ処理時の3つの検査段階に分け、背景反射を定性的に低減または定量的に除去する手法を提案し、幅広い範囲で適応させた。

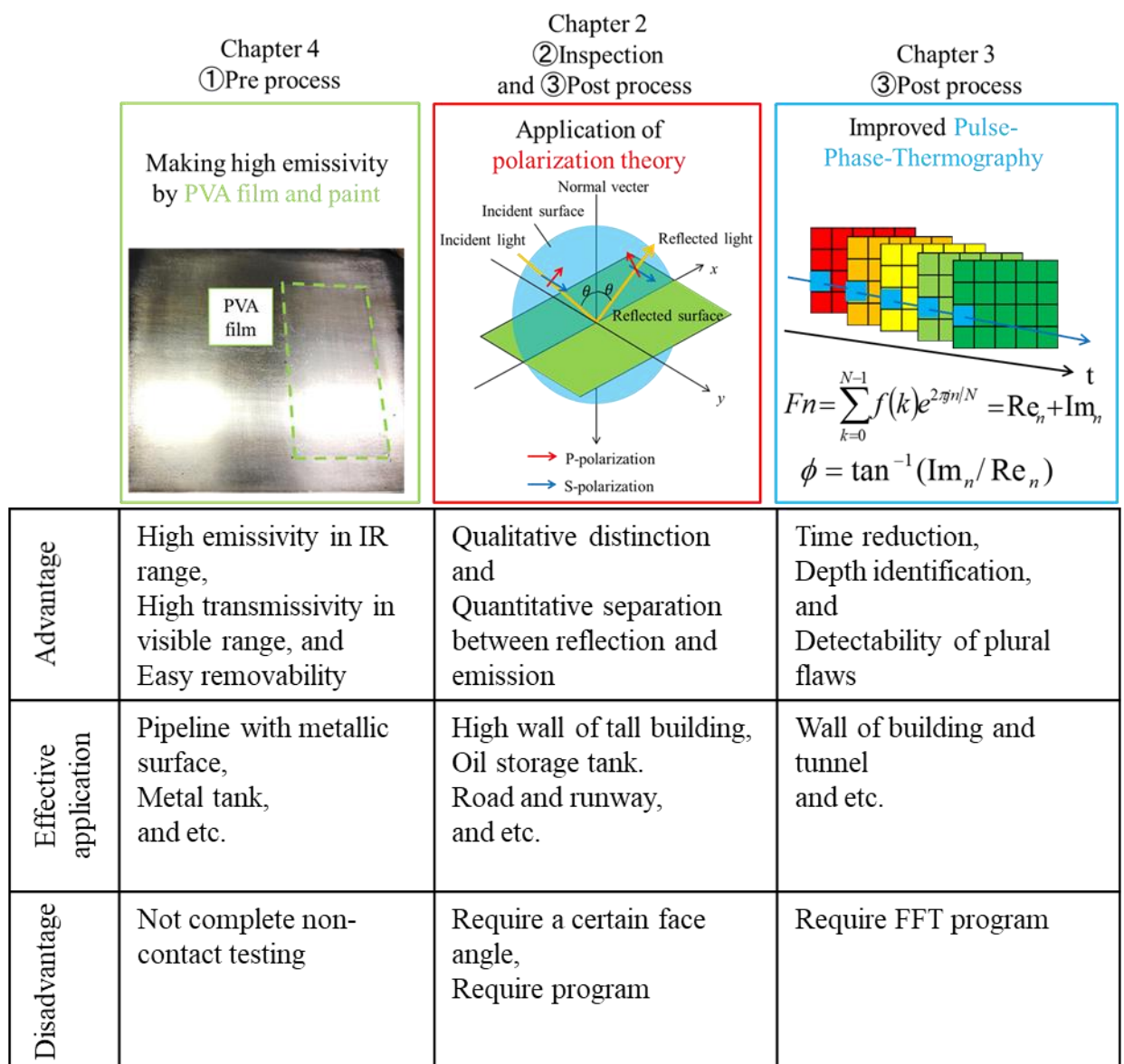


図 5-1 本研究の概要およびそれぞれの利点、提案する適用例および欠点

また、以下に今後の課題についてまとめる。

第 2 章の偏光理論を用いた Brewster 角の手法を用いて、滑走路や高速道路および高層構造物などの巨大な物に対して実用化すれば背景反射の影響を受けることなく検知が可能だと考える。そのために検査手法の提案やプログラムを作製し、検証実験をすることが必要である。また、分離手法について、より複雑な構造物(例えば自動車の部品)に対して自動角度測定機能などを追加し、自動放射率補正等が適応できるようにすれば、さらに、実用的になるので研究が必要である。

第 3 章について、実際にある構造物に対して検証実験をする。また、背景反射の除去について他の材料(例えば CFRP)について検証実験をすることでさらに実用化を図れると考える。

第 4 章について、ニーズを調査し、必要性に応じて、水溶性がない可視光透明な高放射率のフィルムを作製する。また、必要性に応じて、高温の状況に耐えられるフィルムを作製し、非破壊検査に適応を図る。また、PVA 塗料の均一塗布および複雑な構造物に対する検証実験が必要である。

以上のような研究開発をすることで、さらに社会的に有用な手法になると考える。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧なるご指導，ご鞭撻を賜りました防衛大学校 教授 小笠原永久 先生に心から感謝の意を表します。

小笠原永久 先生には，本科から博士までの 6 年間，研究者，人生の先輩として非常に多くのことを学ばせて頂きました。多くのアイデアが詰まった何気ない日常の会話がとても楽しかったです。研究以外においても，人生について考える機会を頂きました。重ねて御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり，ご指導，ご助言下さいました横浜国立大学 准教授 笠井尚哉 先生，防衛大学校 教授 中村元 先生，教授 吉富健一郎 先生に厚く御礼申し上げます。

本論文に関して有用なご助言を頂きました，防衛大学校 准教授 北嶋孝之先生，准教授 山田俊輔 先生に厚く御礼申し上げます。

PVA フィルムおよび塗料の試料を提供して頂いたとともに，数々の有用なご助言を頂きました松田裕行氏をはじめとする株式会社アイセロの皆様には厚く御礼申し上げます。

位相解析を用いた非破壊検査に関するご指導および情報交換でお世話になりました株式会社 KJTD の羽深嘉郎氏および福井涼氏に厚く御礼申し上げます。

貴重な試験片のご提供およびご助言をいただきました株式会社日立製作所の高澤秀一氏に厚く御礼申し上げます。

試験片加工のご助力をいただきました実習工場の小林浩明氏，山之内智晴氏に厚く御礼申し上げます。

研究会において数々のご指導を賜りました神奈川県非破壊試験技術交流会の皆様には厚く御礼申し上げます。

共に試行錯誤しながら研究した本科 61 期 斉藤順哉君，62 期 鷺頭健一君，63 期 山田敦也君，田村拓海君，64 期 増田敬助君に感謝します。

同じ研究室で共に研究を行った立山耕平さん，上剛司さん，覚野千尋さん，中尾友紀さん，酒井大誠さんに感謝します。いつも気遣って頂きありがとうございます。

ございました。

研究や日常生活にご助言下さいました防衛大学校 准教授 中村一成 先生，
小松喜治さんに厚く御礼申し上げます。

最後に私のことを支えてくれた家族に心から感謝します。

鈴木 総司

研究業績

学術論文（関連論文）

- 1 S. Suzuki and N. Ogasawara : Quantitative Evaluation of Polarized Emissivity and Polarized Reflectivity using Infrared Thermographic Instrument , Advanced Experimental Mechanics, 3, pp.167-172, (2018)
- 2 S. Suzuki and N. Ogasawara : Infrared Thermographic Test for Removing Background Reflection based on Polarization Theory, NDT & E International, 103, pp.19-25, (2019)
- 3 鈴木総司, 小笠原永久 : 金属に対する偏光理論を利用した赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の除去, 非破壊検査, 69(6), pp.300-305, (2020)
- 4 鈴木総司, 小笠原永久, 松田裕行 : 赤外線サーモグラフィ試験に用いる可視光透明な高放射率フィルム, 非破壊検査, 70(2), pp.83-88, (2021)

国際会議発表

- 1 S. Suzuki and N. Ogasawara : Quantitative Evaluation of Polarized Emissivity and Polarized Reflectivity using Infrared Thermographic Instrument, 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Kanazawa, Japan, Nov.2017
- 2 S. Suzuki and N. Ogasawara : Reflection Removal Infrared Thermographic Test using Polarization Theory for Dielectrics, 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Kaohsiung, Taiwan, Oct.2018
- 3 S. Suzuki and N. Ogasawara : Separation of Defects and Background Reflections using Polarization Theory for Metal , The 3rd Quantitative Infrared Thermography Conference Asia, Tokyo, Japan, Jul.2019

国内学会発表

- 1 鈴木総司，小林千恵，山田浩之，小笠原永久：赤外線偏光子を利用したきざと背景反射の識別，日本非破壊検査協会 平成 28 年度秋季講演大会，2016 年 10 月
- 2 鈴木総司，斉藤順哉，戸高陸，山田浩之，小笠原永久：放射率に及ぼす対面角度変化に伴う表面粗さの影響，日本機械学会 平成 28 年度山梨講演会，2016 年 10 月
- 3 鈴木総司，小笠原永久：表面粗さを考慮した偏光放射率と偏光反射率の定量的評価，日本実験力学学会 2017 年度年次講演会，2017 年 8 月
- 4 鈴木総司，小笠原永久：偏光子を用いたきざと背景反射の定量的分離，日本非破壊検査協会 平成 29 年度秋季講演大会，2017 年 10 月
- 5 小笠原永久，鈴木総司，斉藤順哉，松田裕行：水溶性黒体フィルムによる赤外線サーモグラフィ法，日本非破壊検査協会 平成 29 年度秋季講演大会，2017 年 10 月
- 6 鈴木総司，鷺頭健一，小笠原永久，山田浩之：パルスフェーズサーモグラフィ法における測定時間の最適化，日本機械学会 平成 29 年度山梨講演会，2017 年 10 月
- 7 小笠原永久，鈴木総司，鷺頭健一，山田浩之：逐次処理による位相解析赤外線サーモグラフィ法，日本非破壊検査協会 平成 30 年度非破壊検査総合シンポジウム，2018 年 6 月
- 8 鈴木総司，小笠原永久，松田裕行：背景反射除去と簡易黒体化处理，日本非破壊検査協会 平成 30 年度非破壊検査総合シンポジウム，2018 年 6 月
- 9 鈴木総司，小笠原永久，松田裕行：偏光理論を用いた背景反射除去と透明薄膜による簡易黒体化处理，神奈川県非破壊試験技術交流会 第 23 回技術研究会，2018 年 6 月
- 10 鈴木総司，山田敦也，小笠原永久，山田浩之：偏光理論を用いた赤外線サーモグラフィ法による背景反射と欠陥の識別，日本機械学会 平成 29 年度山梨講演会，2018 年 10 月
- 11 小笠原永久，田村拓海，鈴木総司，斉藤順哉，松田裕行，山田浩之：透明黒体フィルムを用いた赤外線サーモグラフィ試験，日本機械学会 平成 29 年度山梨

講演会，2018年10月

- 12 鈴木総司，小笠原永久：金属に対する偏光理論を用いた反射除去赤外線サーモグラフィ法，日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会，2018年11月
- 13 小笠原永久，鈴木総司，松田裕行：透明黒体塗料を用いた赤外線サーモグラフィ法，日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会，2018年11月
- 14 鈴木総司，小笠原永久：金属材料に対する偏光理論を用いた欠陥と背景反射の識別，日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィ部門合同ミニシンポジウム，2019年3月
- 15 小笠原永久，鈴木総司，松田裕行：PVA 黒体化処理を施した赤外線サーモグラフィ試験，日本機械学会 2019年度年次大会，2019年9月
- 16 鈴木総司，小笠原永久，松田裕行：透明黒体塗料およびフィルムを用いた赤外線サーモグラフィ法，神奈川県非破壊試験技術交流会 第24回秋の技術発表会，2019年10月
- 17 鈴木総司，増田敬助，鷲頭健一，山田浩之，小笠原永久：位相解析赤外線サーモグラフィ法による内部欠陥深さの評価，日本機械学会 平成28年度山梨講演会，2019年10月
- 18 鈴木総司，小笠原永久：偏光理論を利用した赤外線サーモグラフィ法における反射率低減および放射率向上，日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィ部門講演会，2019年10月
- 19 鈴木総司，小笠原永久：絶縁物に対する Brewster 角を用いた背景反射の除去，日本非破壊検査協会 2019年度秋季講演大会，2019年11月
- 20 鈴木総司，小笠原永久，松田裕行：PVA を用いた可視光透明な高放射率フィルムおよび塗料の開発，日本非破壊検査協会 令和2年度非破壊検査総合シンポジウム，2020年6月

受賞歴

1. 新進賞，日本非破壊検査協会 2016年10月
2. 奨励賞，神奈川県非破壊試験技術交流会 2020年10月