

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560056

研究課題名(和文) 金属容器中の非接触液体検出手法に関する研究

研究課題名(英文) Observation of liquid levels inside opaque metal and resin container by dynamic heat conduction

研究代表者

青柳 稔 (Aoyagi, Minoru)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：00342436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：不透明容器内部の液体の水位を、非接触で観察する手法を提案し、その観察システムと理論の確立、そして、応用に関する研究をおこなった。提案した手法は、容器の表面をフラッシュにより瞬間加熱し、その後の冷却過程の温度変化を赤外線サーモビューアで観察する。フラッシュにより加熱された容器表面の熱が、容器内部の液体と空気へ伝達されるが、その熱伝達係数の違いから、液体と空気部分で表面温度に差が生じ、水位の観察が可能になる。本研究では、当該手法により、金属や樹脂容器内部の液体の水位観察が可能である事を、実験と理論の両面から明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A method of observing the liquid level inside an opaque metal and resin container is proposed, where the change in surface temperature of the container is monitored using an infrared camera following momentary heating of the container by a flash. This technique makes use of dynamic heat transport processes occurring over a very short time scale, and is both non-destructive and non-contact. The proposed method has succeeded in inferring the liquid level in containers composed of metal, resin and paper, and the theory of the proposed method is composed of the three modes of heat transport: radiation, conduction and convection. The proposed method can be expected to have a wide range of applications in research and industry, due to the simple and broadly applicable principle of operation, which exploits the different rates of heat transfer between adjacent materials to discern the presence of interfaces.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：計測工学 熱工学 赤外線 透過観察

### 1. 研究開始当初の背景

(1)エンジンやミッション等の金属容器の中に入っているオイルの量や、薄手の金属容器や樹脂容器の中に入っている液体の量など、不透明な容器中の液体の量を非接触、かつ、短時間で観察して、その量を計測する技術の要求が、輸入部材・原料・材料を使用する会社の製造現場で高まっている。特に、これらの受け入れをおこなう部署での要求が高い。これは、海外で作られたこれらの一部に、液量が規定に満たないものが混入し、これらを使って製造した製品が不具合を起こす可能性が有るからである。これらを受け入れ検査で除外するには、質量を計測する方法が簡便であるが、容器の質量が液体に比べて重い場合には、液体の質量を検査することは、測定精度の観点から難しい。また、容器の内部に複雑な機構が組み込まれている場合や、容器の中に不純物を入れる事で液体の質量を誤魔化している場合もあり、これらの場合には質量だけでなく、液体の充填の状態を観察したいという要求もある。この様な状況において、容器内部の液体の水位を可視化して計測する手法が求められている。容器の透過観察手法として広く使われるのが、X線やγ線による透過であるが、製造ラインではX線やγ線のような放射線を使う手法は避けるべきであり、また、現実問題として現場では受け入れられない。

(2)これらの課題に対して申請者は、空中超音波を用いた計測法や、接触型の超音波を用いた計測法により水位の検出を試みてきた。しかし、空中超音波を用いた計測法では、容器内部の水位を観察することは難しく、接触型の超音波を用いた計測法では、水位の観察はできるが、計測に時間がかかり製造現場での適用は難しいと判断した。また、これらは基本的に1次元の測定手法であり、容器内部の水位を2次元に測定するには、測定手法に工夫が必要である。

(3)近年、赤外線検出装置の性能は著しく向上している。高感度の赤外線検出装置の温度分解能は、検出素子を冷却することなく0.05℃以下になり、フレームレート(温度分布画像の記憶インターバル)は100Hz以上である。つまり、物体の温度変化を、短い時間間隔で、かつ、高い温度分解能で観察する事が可能になった。本研究は、液体の入った容器の表面をフラッシュランプにより瞬間的に加熱して、その後の容器表面の過渡的な温度変化を高感度の赤外線検出装置により観察し、容器内部の液体が入っている部分と、空気の部分の温度変化の観察をおこなうことで、水位の観察を非接触でおこなうアイデアに基づくものである。製造現場でも、フラッシュランプや赤外線検出装置を使用することは可能である。申請者は、当該研究費補助金の申請前にこのアイデアの予備的な実験をおこな

い、この検出方法の可能性について確証を得ていた。しかしながら、観察システムと観察理論が十分に確立しておらず、実用上も学問的にも不完全な状況であった。本研究で、この観察手法と観察理論を確立させて、当該手法を実用的な段階まで引き上げる。

### 2. 研究の目的

本研究は予備実験において、容器中の液体の水位の観察の可能性について確証のあるものである。しかしながら、金属容器中の液体の観察に成功した段階であり、容器の材質や厚み、フラッシュランプによる容器の瞬間加熱温度、容器表面の過渡的な温度変化などの基礎特性について十分なデータが得られた状況ではない。また、計測理論についても確立されていない。さらに、提案した観察手法の他の分野への応用についても明確でない。当該研究の目的は下記の4項目である。

(1)1mm以下から1cm程度の厚みを有する、アルミニウムや銅や真鍮などの金属や、塩ビなどの樹脂などの一般的な材料を使った容器に水を入れ、フラッシュにより容器表面を瞬間加熱し、その後の容器表面の、自然冷却における温度変化の観察を赤外線検出装置(赤外線サーモビューア)によりおこない、容器の材質や厚みと、容器の中の水位の観察状態の関係を明らかにする。

(2)水以外の液体、具体的にはシリコンオイルを用いて、(1)と同様の検討をおこない、水以外の液体の水位観察の可能性について明らかにする。

(3)当該観察手法の、水位観察以外の応用について検討し、当該手法の応用について考察をおこなう。

(4)上記に対して、それぞれ観察理論を検討し、当該観察手法の理論を確立する。

### 3. 研究の方法

不透明容器内の水位を観察する観察システムと、観察理論を構築するために、以下の方法にて研究に取り組んだ。

#### (1)装置の導入と観察システムの構築:

本研究における水位観察実験は、赤外線検出装置(赤外線サーモビューア)の温度分解とフレームレート、そして、容器を瞬間加熱するフラッシュランプが最も重要である。高感度で高フレームレートの赤外線検出装置ほど、水位の観察を精度よく行う事ができる。赤外線カメラ各社の赤外線サーモビューアをデモにより検討した結果、NEC Avio社のInfReC Thermography R300 infrared cameraを当該研究助成金により導入した。この赤外線サーモビューアの、温度分解能は0.5℃、フレームレートは60Hzであり、当該研究に十

分の性能であると判断した。

容器を瞬間加熱するフラッシュランプは、発光強度と光の分光特性が重要である。市販されているフラッシュランプの中で発光強度が高い、Ningbo Suncy Electric Appliance社のDigital studio flash CD-1200を導入した。このフラッシュランプはキセノンランプを用いており、発光時間は約50ms、発光エネルギーは、893 J/Flashである。

これらを主な実験装置として、観察システムを構築した。構築した観察システムの概要図を図1(a)に示す。赤外線サーモビューア、フラッシュランプ、そして、容器の位置関係は、目的に応じて最適な位置に配置する。

容器に液体を入れて水位の観察を行うが、容器の材質や厚みを変える必要がある。そこで、図1(b)に示す実験容器(枡)を作製した。枡は透明樹脂で、水位を側面から観察することができる。枡の蓋(Plate)の材質を金属や樹脂に変える事で、実際の容器に対する実験と同様の実験を行うことができる。容器と蓋(Plate)の接触個所には、ガスケットがはめ込まれており、液体漏れを防止している。また、ガスケットの周囲は金属枠が取り付けられており、ネオジウム磁石と金属枠で蓋(Plate)を挟み込むようにして固定することができる。

## (2)水位観察実験：

### ①基礎実験

上記した観察システムを用いて水位観察実験をおこなった。蓋(Plate)は、銅板、アルミ板、真鍮板、塩ビ板を用い、その厚みは容器の材質により異なるが、0.2mm程度から1mm程度まで変化させた。容器内部に入れる液体は水とした。赤外線サーモビューアにより、1/60秒毎の温度分布画像を取得して、容器の冷却時の過渡現象を解析した。

### ②応用実験

液体としてシリコンオイルを用い、空気、水、シリコンオイル境界面の観察実験をおこなった。また、粘度の異なるシリコンオイルを数種類混ぜて実験をおこなった。粘度の異なるシリコンオイル同士は目視では区別が出来ないが、当該観察手法で境界面が検出できれば広い応用が期待できる。

### ③実用実験

上記は実験用の特別な容器(枡)を用いた実験であるが、市販されている一般的な飲料用の容器を用いて水位の検出をおこなった。

## (3)水位検出以外の応用実験：

当該観察手法は、容器内部の液体と空気の熱伝導率や熱伝達率の違いに起因する、容器表面温度の冷却過程の温度変化の違いを利用して水位を検出する。従って、この原理を応用して、水位検出以外の活用方法が考えられる。以下の応用実験をおこなった。

- ①パウチフィルムの接着欠陥の検出
- ②木材の内部クラックの検出
- ③塗料斑の検出

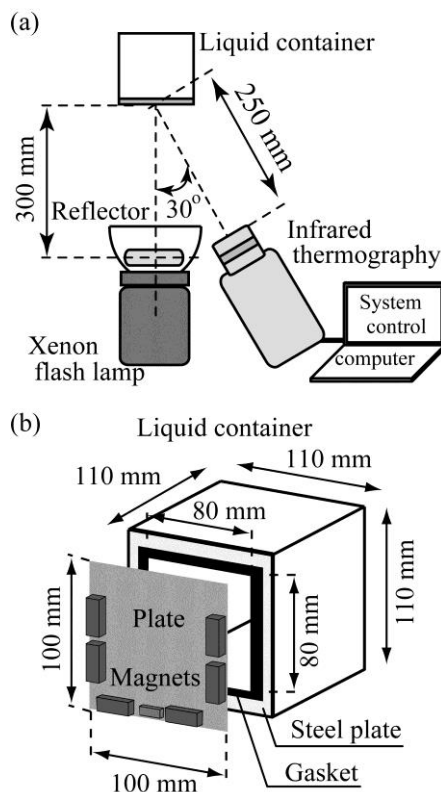


図1. 実験システムの概略図：

(a)観察装置の配置図, (b)観察容器の概要図

## (4)理論の構築：

当該観察手法は、熱放射(フラッシュランプから容器への熱伝導)、熱伝導(容器表面内における熱伝導)、熱伝達(容器から水への熱伝達)の3つの基本的な熱伝導工学理論から成り立っていると考えられる。これらを用いて基礎および応用実験結果を説明する理論を考える事で、観察手法の理論を構築する。

## 4. 研究成果

### (1)水位検出の基礎実験から得られた成果：

#### ①基礎実験

図2は厚さ0.2mmの銅容器(銅板)に黒体塗料を塗布し、当該手法により、容器表面の温度分布の時間変化を観察したものである。水と空気の境界面は白色の点線で示している。(a)はフラッシュ発光前の温度分布、(b)は表面温度が最大になった時の温度分布である。この時間を0secとしている。温度の最大値は60°C程度である。時間の経過と共に、容器の表面温度は低下し、水と空気の部分の温度低下の変化に差が生じる。0.1secの温度分布では明確に水と空気の境界面(水位)が観察できる。図2(i)は、図2(a)の白色の一点鎖線部分の温度プロファイルを示している。この温度プロファイルからも、水位が読み取れる。このプロファイルを利用すれば、水位検出の自動化も可能になる。

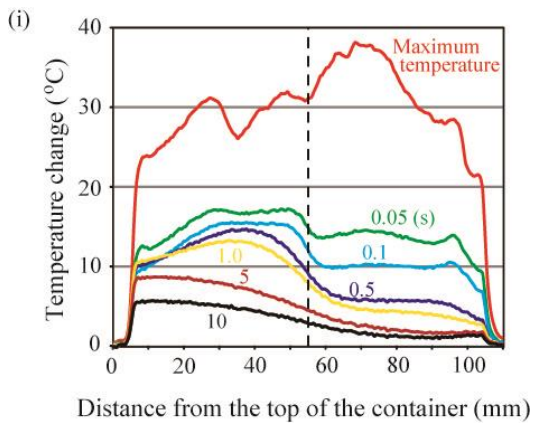
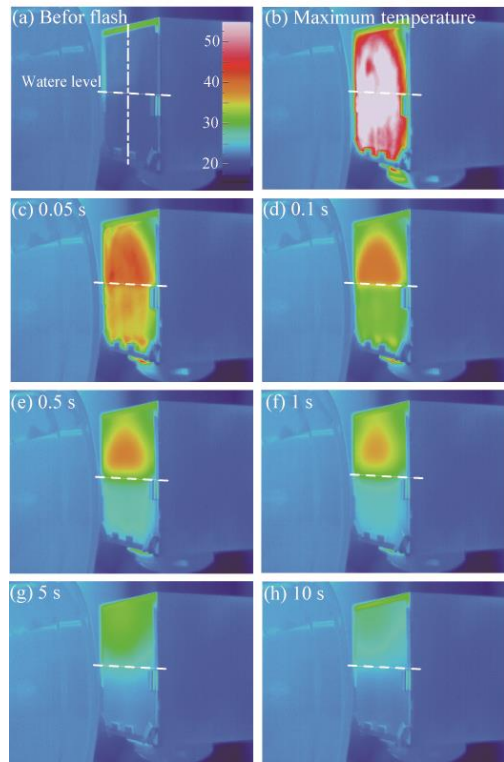


図2 厚さ 0.2mm の銅板表面上の温度分布の時間変化: (a)-(h)表面温度が最大になった時間を 0sec とし 10sec までの温度変化。点線が実際の水位を示している。(i)は(a)の一点鎖線の位置の温度プロファイル。

図3は、厚さ 1mm のアルミ板と塩ビ板の表面温度分布を示している。時間はアルミ容器が 0.5sec 後、塩ビ容器が 5sec 後である。両者ともに水位を観察することができる。塩ビ板は銅板やアルミ板に比べて、時間はかかるが明確に水と空気の境界面を観察する事ができる。この理由は、塩ビの熱伝導率は  $0.16 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ 、銅の熱伝導率は  $398 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ 、アルミニウムの熱伝導率は  $236 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  であり、塩ビの熱伝導率は金属に比べて小さく、熱の伝導に時間がかかるためである。また同様の理由から、板内部の平面方向の熱拡散も、

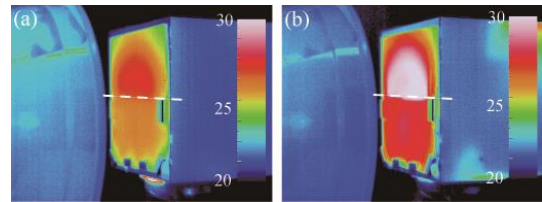


図3 厚さ 1mm の(a)アルミニウムと(b)塩ビ板表面上の温度分布。

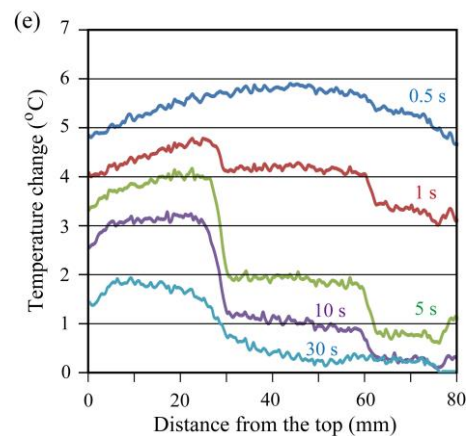
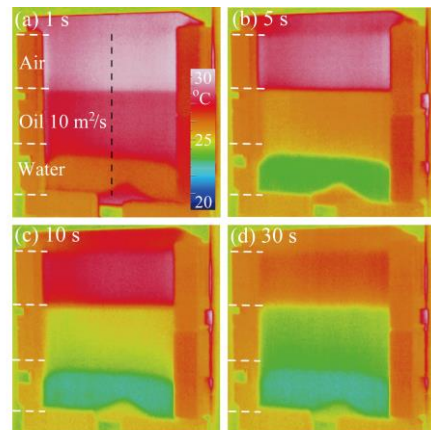


図4 (a)-(d) 0.5 mm 厚の塩ビ板内部に、水、シリコンオイル(粘度  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ )、空気を入れた時の板表面の温度分布の時間変化。(e) は(a)の黒線個所の温度プロファイル。

金属板は塩ビ板よりも大きく、その熱拡散により境界面が不鮮明になると考えられる。

ただし、この基礎実験では容器(板)に黒体塗料を塗布する必要があった。黒体塗料を塗布しないと、フラッシュが板の表面で反射されてしまい、容器の加熱が不十分になり、境界面の観察が難しくなる。以下においても、容器(板)には黒体塗料を塗布している。また、金属板においては厚み 1mm が水位検出の限界、塩ビ板においては厚み 3mm が水位検出の限界であった。発光エネルギーのより大きな光源を用いれば、より厚い容器の水位の観察が可能になると考えられる。



### ②空気とオイル界面の観察結果

図4は、厚さ0.5mmの塩ビ容器(板)に、水、シリコンオイル(粘度 $10\text{m}^2/\text{s}$ )、空気を入れた場合の温度分布の時間変化である。(e)は(a)の黒線個所の温度プロファイルである。水、シリコンオイル、空気の境界面が明確に観察できる。アルミニウム板でも同様の観察結果が得られた。

また、上記の容器に粘度の異なるシリコンオイル(粘度 $0.65\sim 5\text{m}^2/\text{s}$ )を混ぜて、空気、シリコンオイル2種類、水の状態にした場合でも、それぞれの境界面を検出することができた。

### ③実用実験

飲料容器などに使われている、紙パック、スチール缶、アルミ缶などに水を入れて、水位の観察実験をおこなった。図5に示す様に、容器の表面に黒体塗料を塗布する事で、水位の観察をおこなうことができた。また、黒体塗料を塗布しない場合でも、図6に示すように水位を観察することができたが、容器の色や材質により水位観察の状態が異なる。光の反射が大きい材質や色の場合には、水位の観察は難しくなる。

### (2)水位検出以外の応用実験:

当該観察手法の応用として、①塗料斑の検出、②パウチフィルムの接着不良の検出、③木材の内部クラックの観察を試みた。図7(a)は塗料斑の観察結果である。画像中の赤い部分は周囲から数百ミクロン厚い塗料斑である。当該手法で、観察することができた。図7(b)はパウチフィルムの接着不良の観察結果である。黄色い部分が故意に作った接着不良である。直径1mmの接着不良を観察することが可能であった。図7(c)は木材内部のクラックの観察結果である。図中のオレンジ色の部分に故意にクラックが作られている。木材の表面から1mm以下の深さにあるクラックを観察することが可能であった。

### (3)観察システムの確立

水位観察実験や応用実験をおこなうことで、最終的に当該手法の観察システムを確立した。図8にその外観を示す。図1(a)に示した基本的な観察システムに、反射フードを加え、フラッシュランプを2台にした。試料は球体の中央に配置する。球体の反射フードの内部には、可視光反射率98%の反射シートを敷き詰めてあり、これにより、観察試料に均一に光を当てることを可能にした。特に、円筒形の容器の水位観察を行う場合に、図1(a)に示した基本的な観察システムでは、フラッシュから離れた容器の部分に照射されるフラッシュのエネルギー密度が小さくなり、その結果、温度分布画像が不均一で見にくい状況であったが、この観察システムでは、そういった状況が改善された。

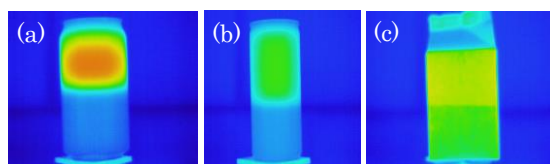


図5 実用容器に黒体塗料を塗布した場合の水位観察: (a)アルミ缶、(b)スチール缶、(c)紙パック

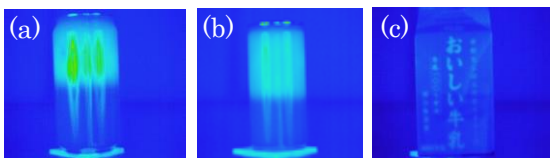


図6 実用容器に黒体塗料を塗布しない場合の水位観察: (a)アルミ缶、(b)スチール缶、(c)紙パック

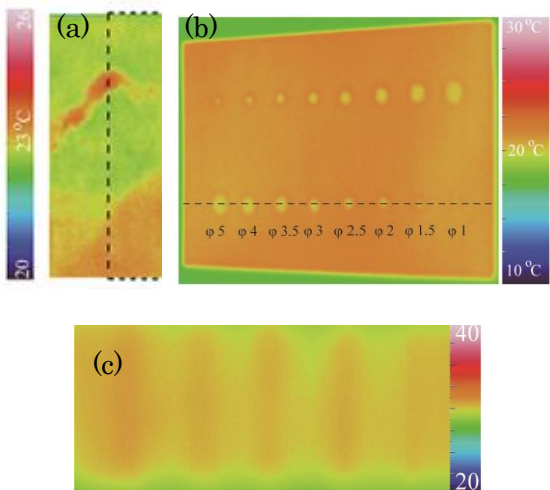


図7 応用実験結果: (a)塗料の塗り斑の観察、(b)パウチフィルムの接着不良の観察、(c)木材内部のクラックの観察



図8 最終的な観察システム

### (4)観察理論の構築

上記した基礎実験、および、応用実験の観察結果を説明する理論を考察した。それらの理論は、発表論文に詳細に記述した。簡単にまとめると、当該観察手法は、①フラッシュ

から観察対象物までの熱放射、②加熱された対象物表面から対象物内部への熱伝導、③対象物から液体や空気などへの熱伝達の3つの一般的な伝熱理論で説明できる。①はフラッシュランプからの熱放射であるが、フラッシュランプの形状やフラッシュの分光分布などに依存しており、理論を実際の実験結果に適用する事は難しい。フラッシュランプからの熱放射の結果として対象物が加熱されるが、その後の伝熱は、熱伝導および熱伝達理論を実際の実験に適用して解析する事が容易である。②の熱伝導はよく知られた熱伝導方程式で表され、③の熱伝達は定常的な熱伝達式で表される。これらの式を、各現象に当てはめれば現象を説明する事が可能である。複雑な伝熱現象でも、伝熱抵抗、伝達抵抗を使った伝熱回路を考えて、それに対して熱の過渡現象の方程式を立て、解く事で実験結果を説明できる解を得る事ができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

①Minoru Aoyagi, Takefumi Hiraguri, Takahiro Ueno, Nondestructive detection of cracks near the surface of wooden boards by dynamic heat dissipation, 査読有, Wood Science and Technology, Published online: 22 May 2014, Publisher Springer US, DOI:10.1007/s00226-014-0639-y

②Minoru Aoyagi, Takefumi Hiraguri, Takahiro Ueno, Nondestructive analysis of uneven paint coatings by dynamic heat conduction following flash heating, 査読有, Journal of Coatings Technology and Research, Vol. 11, No. 3, 2014, pp. 311-318, 2014, DOI: 10.1007/s11998-013-9537-8

③Minoru Aoyagi, Takefumi Hiraguri, Takahiro Ueno, Detection of the boundary between oil and water in a container by dynamic heat conduction, 査読有, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 56, No. 1, 2014, pp.1-7, DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2014.56.1.15>

④Minoru Aoyagi, Takefumi Hiraguri, Takahiro Ueno, Nondestructive observation of laminate pouch bonding quality by dynamic heat conduction following flash heating, 査読有, Global Perspectives on Engineering Management, Vol. 2, No. 4, 2013, pp. 201-208

⑤Minoru Aoyagi, Takefumi Hiraguri, Takahiro Ueno, Makoto Okuda, Observation of container liquid levels by dynamic heat conduction, 査読有, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 55, No. 1, 2013, pp.10-15,

DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2012.55.1.10>.

[学会発表] (計8件)

①丸山翔平、青柳稔、過渡熱現象を利用した飲料容器の境界層の観察 基礎検討Ⅷ、2014年(平成26年)第61回応用物理学会春季学術講演会, 19a-F5-7、平成26年3月19日、神奈川県相模原市青山学院大学

②丸山翔平、三ツ間雄一、青柳稔、過渡熱現象を利用したオイルと水の境界層の観察 基礎検討Ⅶ、2013年(平成25年)第74回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-c8-5、平成25年9月16日、京都府京田辺市同志社大学

③三ツ間雄一、丸山翔平、青柳稔、過渡熱追尾による木材内部のクラック検出 基礎検討Ⅵ、2013年(平成25年)第74回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-c8-4、平成25年9月16日、京都府京田辺市同志社大学

④青柳稔、三ツ間雄一、丸山翔平、過渡熱現象を利用した塗装の塗り斑の観察 基礎検討Ⅴ、2013年(平成25年)第74回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-c8-3、平成25年9月16日、京都府京田辺市同志社大学

⑤三ツ間雄一、青柳稔、奥田眞、過渡熱現象を利用したプラスチック容器内の液体観察 基礎検討Ⅳ、2013年(平成25年)第60回応用物理学会春季学術講演会, 28p-B7-8、平成25年3月28日、神奈川県厚木市神奈川工科大学

⑥青柳稔、三ツ間雄一、奥田眞、過渡熱現象を利用したフィルム接着欠陥の観察 基礎検討Ⅲ、2013年(平成25年)第60回応用物理学会春季学術講演会, 28p-B7-7、平成25年3月28日、神奈川県厚木市神奈川工科大学

⑦三ツ間雄一、奥田眞、青柳稔、過渡熱現象を利用した金属容器内の液体観察 基礎検討Ⅱ、2012年(平成24年)秋季第73回応用物理学会学術講演会, 11a-C10-2、平成24年9月11日、愛媛県松山市愛媛大学

⑧青柳稔、三ツ間雄一、奥田眞、過渡熱現象を利用した金属容器内の液体観察 基礎検討Ⅰ、2012年(平成24年)秋季第73回応用物理学会学術講演会, 11a-C10-1、平成24年9月11日、愛媛県松山市愛媛大学

[その他]

ホームページ等

[http://www.nit-denki.jp/aoyagi\\_lab/index.html](http://www.nit-denki.jp/aoyagi_lab/index.html)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 稔 (AOYAGI Minoru)

日本工業大学 工学部、教授

研究者番号：00342436