

機関番号：32702

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360104

研究課題名（和文）沸騰伝熱に及ぼす加熱面性状の一般普遍的表記法の構築

研究課題名（英文）Universal evaluation of the effects of heated surface properties on boiling heat transfer

研究代表者

庄司 正弘 (SHOJI MASAHIRO)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：00011130

研究成果の概要（和文）：

沸騰伝熱、特に核沸騰熱伝達及びの限界熱流束に及ぼす加熱面性状の影響について、関連因子を表面粗さの幾何学的形状と物理化学的性状（濡れ性）の2つに大別し、前者をフラクタル次元で、後者を接触角で表わし、両者を統一した表現法の可能性について実験的に調べた。粗さに関する研究の結果はBerensonの結果とほぼ同じで満足できる結果であったが、濡れ性の影響に関しては、残念ながら十分に信頼性のある結果が得られず、今後課題を残すこととなった。

研究成果の概要（英文）：

The effects of surface properties on boiling heat transfer and CHF(Critical Heat Flux) were experimentally investigated by changing surface geometric factors such as surface roughness, Cavity size and cavity shape. The results are correlated by using fractal dimension and contact angle to obtain an universal evaluation method of the heated surface. The results concerning the surface roughness is the same to the report of well-known Berenson. On the other hand, no clear results was obtained concerning the effect of surface wettability, remaining problems in future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学・熱物質移動

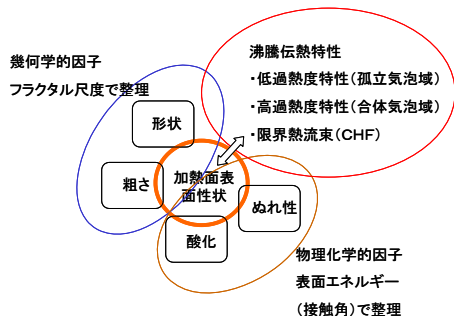
キーワード：核沸騰、限界熱流束、表面性状、表面粗さ、フラクタル次元、濡れ性、接触角

1. 研究開始当初の背景

沸騰のメカニズム解明にとって最も重要にして必要な問題は、加熱面性状の的確な把握と、沸騰伝熱の関係を明確にすることである。との認識は多くの沸騰研究者によく認識されている。しかるに、発展した現代の物理

的、化学的知識を以ってしても、こうした表面性状の普遍的な把握法、表現法は知られない。沸騰伝熱にとって重要な加熱面からの発泡特性（気泡核の問題）は、表面の粗さやぬれに関係するとされるが、発泡核となる表面のキズや粗さは形状が大小まちまちであり、それによって核の活性・不活性や気泡の成

長・離脱も異なってくる。また発生気泡の示す複雑な挙動は、この表面性状の複雑性と直接的に結びついたものであり、沸騰現象の解明には、表面性状の適切な把握と、誰もが等しく用いることの出来る表記法（表現法）の構築が強く求められている。申請者はこれまで、この難解な問題を故意に避け、人工キャビティ付与面という単純化、理想化された加熱面を用いて沸騰の複雑さについて研究してきた。そして一定の成果は得られたと自負しているが、工業的に用いられる実際面は理想化されたものとはほど遠く、酸化Kの程度、粗さの程度などが千差万別である。沸騰を成熟した mature な技術として応用して行くには、この難解な表面性状に関する問題に対し何らかの有効な手立てを考える必要がある。申請者は、下の参考図に示すように加熱面性状を幾何学的な因子と物理化学的な因子に分けて考え、前者については近年発展の著しいフラクタル幾何学を援用し、後者についてはこれまで通り表面エネルギー（具体的には動的な接触角）を用いて両者を総合する形で評価し、それと沸騰伝熱特性との関連付けを行って、一般的、普遍的な表面性状の表記が可能になるのではないかと着想した。本研究は、この考えに基づいた一連の実験研究である。



2. 研究の目的

研究期間内に最低限、表面性状評価に必要な実験データ、データベースを確立したと考えている。そして、沸騰伝熱実験結果と対比して前記のフラクタル測度の有効性の検証、濡れ性評価における表面エネルギーの有効性についての検証（確認）を行うこと、そしてその両者を融合した形で実用的で有効な表面性状の一般的・普遍的な表記法を提案したい。なお、加熱面の表面性状と対比する沸騰伝熱特性としては、核生成が本質である核沸騰の、①低過熱度孤立域の代表的な熱伝達率、②高過熱度合体気泡域の代表的な熱伝達率、および核沸騰の特性である限界熱流束（CHF）に注目する。その理由は、それぞれにおいて、気泡核の果たす役割が異なるためである。

3. 研究の方法

研究期間内に所期の目的を達成するため、まず、加熱面の各種表面仕上げによって粗さと形状（幾何学的性状）を各種に変え、その評価をフラクタル測度（フラクタル次元）を用いて整理することを試みた。同時に、それらキャビティの沸騰における活性、不活性の問題、伝熱特性への影響（核沸騰特性に注目し、孤立気泡域、合体気泡地、限界熱流束CHF特性）について実験的に調べ、幾何学的な表面性状パラメタと沸騰伝熱特性の関わりを明らかにするよう試みた。次に、加熱面の酸化や濡れ性などの物理化学的性状の違いが沸騰伝熱の特性とどのように結びついているかを、動的な接触角を評価測度として整理しうるか否かを検討した。加熱面の物理化学的な違いは、銅製ブロックを高温槽で温度、暴露時間を変えて実現する他、塗膜（CNT塗布）のある加熱面を用いた。実験は下記の3種類を並行的に行った。

実験1：加熱面の幾何学性状の評価実験

従来の沸騰実験で多く使用されているサンドペーパーによる表面仕上げ等により、各種の粗さ、形状を持った加熱面を用意する。そして、その幾何学的性状を客観的な物差し（測度）を用いて整理した。まず、表面の粗さを粗さ計で測定した。この際、最大・最小粗さのみならず、10点平均粗さやザウター平均粗さなど各種測度でデータを整理した。次に、形状については表面深さに関係するため、ホイールソーを用いて表面をわずかづつ研削・研磨し、その面を顕微鏡写真にとって重ね、3次元工面粗さ形状を得ることを計画したが、データ取得が完全には行えなかったため、粗さ測定から得られた情報を採用し、それが表面形状を現すとしてボックスコンテンツ法によってフラクタル次元を計算した。この実験研究では、粗さと形状をフラクタル測度という一つの尺度で把握（表現）可能かどうかを調べることが研究目的となる。

実験2：加熱面の物理化学的性状の評価実験

加熱面の濡れ性などの性状を広範囲に変え、その評価を動的な接触角で整理することを試みた。性状の変化は、銅面の酸化調整（特定の温度雰囲気保持時間を変えることにより、濡れ性が連続的に変化することが知られる。この方法はUCLAのDhir教授が最初に採用し、その後申請者もそれを援用しCHFを整理した経験をもつ。

実験3：加熱面性状による沸騰伝熱特性実験

上記実験1で製作した加熱面の一つひとつにつき、プール飽和核沸騰実験を行い、沸騰熱伝達特性を測定した。遷移沸騰や膜沸騰は、本研究で対象としている加熱面性状（核生成特性）とは直接的に結びつくものではないので、本研究では研究対象としていない。核沸騰には、周知のように1次気泡の生成が

主である低過熱度の孤立気泡地域と、合体気泡（蒸気塊）の生成が主となる高過熱度の合体気泡域の2つがある。実は伝熱特性は両者で明確な差は見られないのであるが、核生成及び沸騰気泡の挙動は両者で見かけ上非常に異なるため、この伝熱実験では特定の過熱度に注目して、孤立気泡域の代表的熱伝達と合体気泡域の代表的熱伝達の大きさを評価関数として加熱面による差について調査する。また、限界熱流束（CHF）は核沸騰熱伝達のもう一つの特性点であるので、CHFの値に特に注目した。

4. 研究成果

(1) 初年次の研究成果

① 緒言： 沸騰現象あるいは沸騰熱伝達の理解にとって、最も重要にして難解な問題は加熱面（沸騰面）を適切に指定し表現することである。従来の研究では、面の粗さや接触角を用いて加熱面性状を指定するのが通常であったが、周知のように気泡の発生には粗さのみならず、キャビティの形状や分布密度も深くかかわっている。つまり、沸騰加熱面を規定するには最低限、(1)面の粗さや形状などの幾何学的性質と、(2)面の汚れや酸化の程度に関連した物理化学的性質を、同時に、しかも適切に表示することが必要である。筆者らはその表記法の一つとして、幾何学的測度としてフラクタル次元を、また物理化学的測度として接触角を採用し、熱伝達性能とそれら測度との関連を明らかにして、普遍的な表面標記法を提案し、その構築を目指している。本研究は、その可能性を探る第一歩として、性状の異なる幾つかの加熱面を用意し、沸騰伝熱特性と表面性状パラメタとの関連を調べたものである

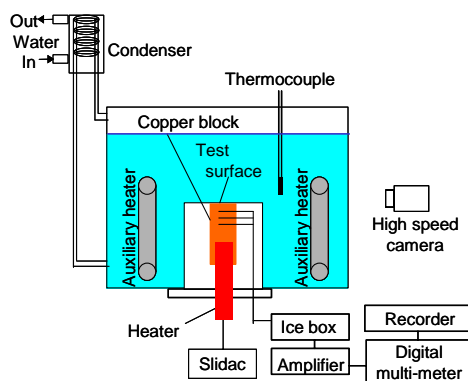


Fig.1 Experimental apparatus
g.1 Experimental apparatus

② 実験： 実験装置の概略を図1に示す構成は水平上向き、プール、大気圧下で通常採用される方式と大差ない。加熱面試験部は図1右に詳細を示しているように、カートリ

ッジヒータで加熱した直径1.0 mmの円柱の端面である。実験は飽和条件で行っている。加熱面としてはサンドペーパー#80、#150を約1.0 MPaで加圧転写した2種類の粗面、#3000で研磨した面（鏡面）と、それらの面をLiaw-Dhirの方法⁽¹⁾で処理し、濡れ性を変化させたもの、都合6種類の面（図2参照）を用意した。これ以外に比較検討のため、銅面にCNT（カーボンナノチューブ）を垂直配向塗布した特殊な超撥水面についても実験を行った。実験では限界熱流束CHFを含む核沸騰伝熱特性に注目して行い、また現象の観察には高速度ビデオ（撮影速度1000fps）を用いた。

③ 実験結果

粗さの異なる面、濡れ性と粗さの異なる面に対し得られた沸騰曲線を図3に、熱伝達率の大きさを図4に示す。これらの結果によれば、面が粗いほど熱伝達は向上するが、CHFはほぼ一定の値に保たれている。これらの結果はBerensonの報告と一致している。

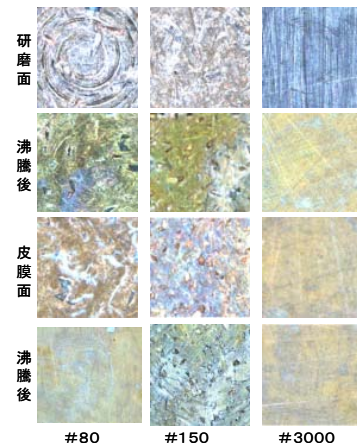


Fig.2 Pictures of the employed surfaces

また図3、4から、濡れ性が良い面ほど熱伝達率が高くなる傾向があるものの、その程度は僅かであることがわかる。ただし今回の実験では表面処理（Liaw-Dhir法）の条件は限られた1条件しか行っていない。今後は表面処理温度や保持時間を広範囲に変えた実験が必要である。一方、図5はCNT塗布面の沸騰実験の結果である。CNT面は粗さがサブミクロンの超撥水性面（接触角は130°以上）といわれる。濡れ難い面であるため予想通り核沸騰熱伝達は素面（Cu面）に比べ低下するが、不思議なことにCHFは少しながら向上する。銅面にCNTを垂直に配向することは可能となっているが、しかし面全体を完全に塗布するのはかなり難しい。図5には昨年度のデータも示しているが、図に見るように本実験データと熱伝達の大きさやCHFの値に差があるのは、こうした事情による。

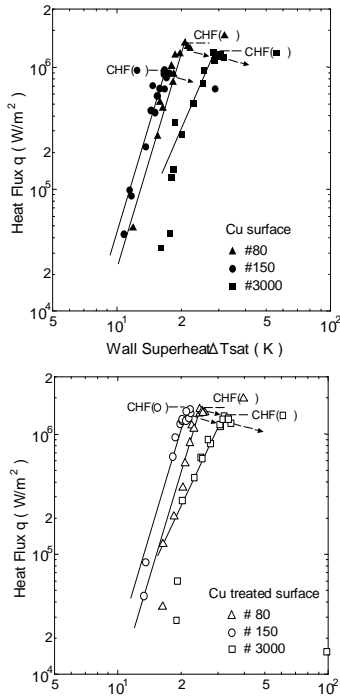


Fig.3 Boiling curves for different surface roughness and wettability

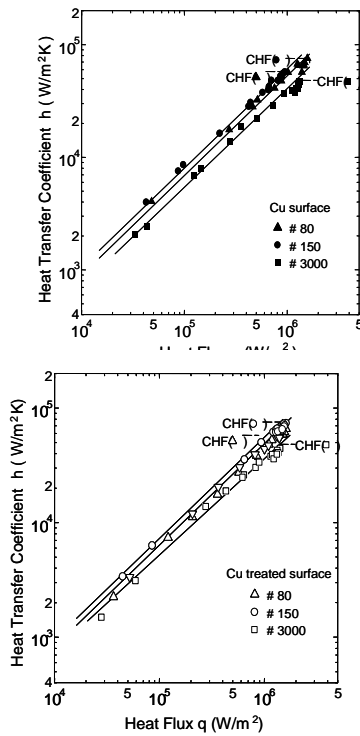


Fig.4 Heat transfer dependence on surface roughness and wettability

さて図6は、本実験で採用した各種の粗さと濡れ性をもつ加熱面で得られたCHFを、接触角の関数として整理したものである。一般に同一物質表面で濡れ性のみを変化させ

るのは非常に難しい。しかしLiawとDhirは、銅面に限れば一定の温度を一定時間保持させることでサブミクロンの薄い酸化皮膜を付与することが出来ることを見出し、主直加熱面で水を用いた系統的な実験研究を行っている。図5には、それらのデータを示してあるが、本実験データとはその値と変化傾向に大きな差がある。このことは間接的ながら、表面の性状、特に濡れ性の影響を接触角のみでは表しえないことを示唆している。つまり接触角は面の粗さにも依存して変化するが、その沸騰伝熱への影響は単純でないことを物語っている。

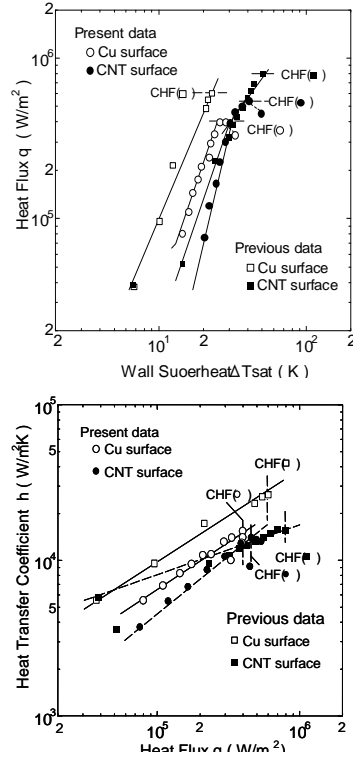


Fig.5 Boiling curve(left) and heat transfer(right) of Cu and CNT surfaces

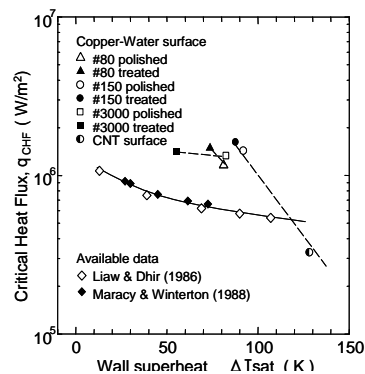


Fig.6 CHF dependence on surface roughness and wettability

④まとめ

本研究では、沸騰熱伝達に関連し、加熱面性状の表記について一つの可能な方法を提

案し、そのための第1歩の検証実験を行った結果について報告した。本提案法の検証には、加熱面性状を広範囲に変えた一連の継続的実験が必要である。

(2) 2年次～3年次(最終年度)の研究成果

① 緒言

沸騰現象あるいは沸騰熱伝達の理解にとって、最も重要にして難解な問題の一つは、加熱面性状を適切に指定し表現することである。従来の研究では、面の粗さや接触角を用いて加熱面性状を指定するのが通常であったが、周知のように気泡の発生には粗さのみならず、キャビティの形状や分布密度も深くかかわっている。つまり、沸騰加熱面を規定するには最低限、(1)面の粗さや形状などの幾何学的性質と、(2)面の汚れや酸化の程度に関連した物理化学的性質を、同時に、しかも適切に表示することが、十分でないとしても最低限必要であろう。筆者らはその表面性状の表記法の一つとして、幾何学的測度としてフラクタル次元を、また物理化学的測度として接触角を採用し、熱伝達性能とそれら測度との関連を明らかにして、普遍的な表面性状標記法を構築することができないか、と考えている。本研究は、その可能性を探るため前報⁽²⁾に引き続き行った基礎実験であり、性状の異なる幾つかの加熱面を用意し、沸騰伝熱特性と表面性状パラメタとの関連について調べたものである。

② 実験

実験装置および実験方法は前年と同様である。加熱面の粗さはサンドペーパー#20～#300を約1.0MPaで加熱面に加圧転写した。また#3000で研磨した面(ほぼ鏡面)と、その面をLiaw-Dhirの方法で熱処理し、濡れ性を各種に変化させたものを試験面として用意した。加熱面の粗さは面上の異なる位置10点で、触針式の粗さ計で測定し、先ず平均粗さを求めた。次に、粗さ計のデータが表面の深さ方向の形状を表すとして、ボックスカウント法によりフラクタル次元を算出した。その結果を図1示す。粗さ計によるデータは表面のキズの形状を正確に与えるものではなく、従ってフラクタル次元は1を僅かに越える値に留まっている。

③ 実験結果

1) 加熱面粗さの影響

粗さの異なる面に対し得られた沸騰曲線を図3に示す。面が粗いほど熱伝達は向上するが、CHFの値はほぼ一定である。これらの結果はBerenson⁽⁴⁾の報告と一致している。図4はCHFの面粗さあるいはフラクタル次元による違いを示す。CHFは粗い面ほど、またフラクタル次元が大きいほど小さくなる傾向がある。データはフラクタル次元による整理の方が分散が少なく良いように見えるが、本実験の場合、粗さとフラクタル次元の指標に大きな差が無いため、

その優位性はあまり明確でない。

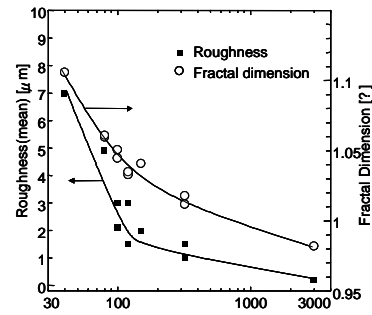


Fig.1 Surface roughness and fractal dimension

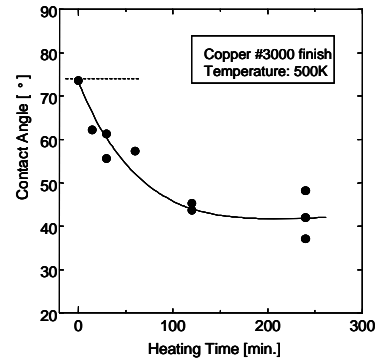


Fig.2 Contact angle variation with surface oxidation

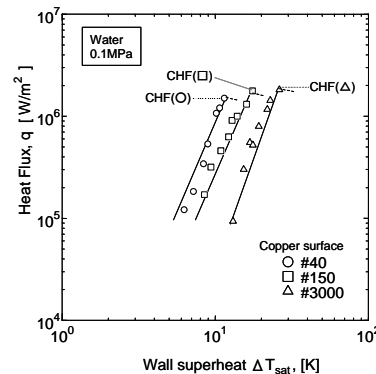


Fig.3 Boiling curves for surfaces with different roughness

2) 加熱面の濡れ性(接触角)の影響

図5は異なった濡れ性(異なった接触角)を持つ面に対して得られた沸騰曲線である。この結果から見るように、沸騰伝熱にも限界熱流束にも、濡れ性はあまり影響していない。ただし実験前後で接触角を調べると、大きく変化しており、実験後の接触角は概ね 50° ～ 60° の範囲に落ち着いている。これが、実験前の接触角がかなり違っても、CHFにその影響が現れない理由の一つと考えられる。図6は、濡れ性(接触角)による限界熱流束の変化である。接触角が大きくなり、ぬれ難い面でもCHFは減少せず、むしろ高くなる傾向にある。この結果はLiaw-Dhir⁽³⁾の結果と逆の傾向である。Liaw-Dhirの実験は大口径の垂直加熱面で行われたものであり、小口径

の水平円盤面を用いた本実験との違いである可能性があるが、今後さらに実験的検証が必要である。

④まとめ

本研究では、沸騰熱伝達に関連し、加熱面性状の表記について一つの可能な方法を提案し、その検証を目的に行った実験の結果について報告した。本提案の検証には今後、大口径で加熱面性状を広範囲に変えた実験が必要である。

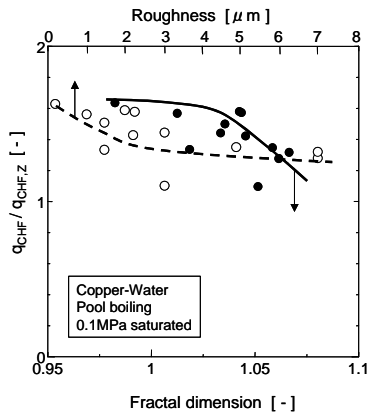


Fig.4 Variation of CHF with surface roughness and fractal dimension

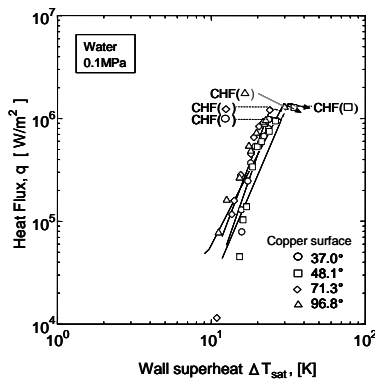


Fig.5 Boiling curves for surfaces with different contact angle

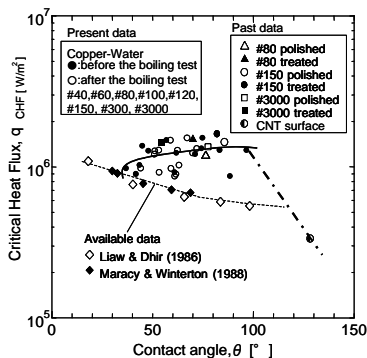


Fig.6 CHF for different surface wettability

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計0件)

〔学会発表〕 (計5件)

- ①田中信宏、柏村洋一、庄司正弘、沸騰熱伝達に及ぼす加熱面性状の影響、第48回日本伝熱シンポジウム、2011年6月2日、岡山
- ②庄司正弘、沸騰研究に残された最大の問題、日本機械年次大会、2010年9月、名古屋
- ③田中信宏、藤田和久、井坂智知、庄司正弘、渡辺誠、沸騰に及ぼす加熱面性状に関する研究、第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月28日、札幌。
- ④渡辺誠、武井智由、福富隆弘、丸山茂夫、庄司正弘、垂直配向単層カーボンナノチューブ膜を接合した加熱面からの沸騰特性、日本機械学会2009年度年次大会、2009年9月14日、岩手。
- ⑤渡辺誠、関根哲彦、福富隆弘、石川桂、丸山茂夫、庄司正弘、垂直配向単層カーボンナノチューブ膜を接着した高温加熱面と液滴間の伝熱特性、第45回日本伝熱シンポジウム、2008年5月21日、筑波。

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕 ホームページ等
 (なし)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄司正弘 (SHOJI MASAHIRO)
 神奈川大学・工学部・教授
 研究者番号：00011130

(2) 研究分担者

原村嘉彦 (HARAMURA YOSHIHIKO)
 神奈川大学・工学部・教授
 研究者番号：80175546

(3) 連携研究者

なし