

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360323
 研究課題名（和文） セメントおよびコンクリートの衝撃破壊挙動の解明と耐
 衝撃特性の向上
 研究課題名（英文） Analyses of Impact Fracture Behavior on Cement and Concrete,
 and Improvements of Their Anti-impact-fracture Properties
 研究代表者
 田邊 靖博 (TANABE YASUHIRO)
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70163607

研究成果の概要：

実用衝撃負荷速度域において、建物が衝突による衝撃負荷を受けることを想定した研究を行い、繊維の荷重保持力(強度×断面積の大きな繊維)が大きいほど耐衝撃抵抗性が高いこと、マトリックスが延性であるほど破片が大きくなること、破壊靱性値が大きいほど欠損体積が小さくなること、を明らかにした。さらに、繊維の機械的特性によっても破壊現象が大きく変わることを明らかにした。高強度コンクリート、繊維とモルタルの密着性制御、ならびに高強度繊維を組み合わせることで、飛翔体の衝突で材料中に大きな欠損が生じさせない、あるいは、飛翔体の運動エネルギー吸収能が高い、新たな繊維強化モルタルあるいはセメントの作製に有効な設計指針を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・複合材料・物性

キーワード：セメント・モルタル、衝撃試験、PE 繊維、PVA 繊維、CNF、炭素繊維

1. 研究開始当初の背景

ニューヨークWTCへの航空機衝突や尼崎でのマンションへの列車衝突など、建物への衝突は、想定外の衝撃負荷を与える。最悪の場合は建物が崩壊し、崩壊しない場合でも建物が大きな損傷を被ることが予想される。衝撃負荷速度100km/h(= 27.8m/s)から2,500km/h (= 694 m/s)の実用衝撃負荷速度域において、建物が衝突による衝撃負荷を受けることを想定した設計が必要である。しかし、建物の重要な構成要素であるセメントおよびコンクリート(セメント等)

の実用衝撃負荷速度域での破壊挙動の報告は皆無に等しい。新材料創出の立場からは、強度を不連続的・画期的に向上させ、いかなる衝撃に対しても破壊しないセメント等を創出することが理想であるが、そのコストは莫大なものとなることが予想される。壊れることを受け入れ、壊れても損失を最小とできる材料、つまり、航空機衝突等の不測事態が発生した場合には、制御された破壊を起こして2次災害を防止できるフェールセーフ型材料の開発にむけたパラダイムシフト[破壊との共生]を念頭において研究を進め

る必要があった。

2. 研究の目的

上述背景の下、実用衝撃負荷速度域での破壊現象の詳細な理解とその事象にあわせた材料プロセスの提案が不可欠と考え、本研究では、実用衝撃負荷速度域で異物が衝突した際のセメント等の破壊挙動をその構成要素〔セメント、骨材、水/セメント比、気孔率、強化材〕をパラメータ(材料パラメータ)として解析し、設計に不可欠な実用衝撃負荷速度域において、耐衝撃抵抗性が高く、不測の場合には制御された(壊れ方を設計できる)破壊を起こす新たな繊維強化セメントおよびコンクリートの創製に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 試験体

① 飛翔体の材質の影響を検討する目的で、表1に示すモルタルを用いた。また、強化繊維の影響を検討する目的で、PVA 繊維(直径0.2mm、長さ6mm、引張り強度 1GPa)およびVGCF(直径 150nm、長さ 10-20 μ m の炭素繊維)を混合したモルタルを用いた。特性などを表1に示す。

表1 試験体1

モルタル材料	水/セメント比	繊維量 (vol%)	圧縮強度 (MPa)
高強度	30	0	87
普通強度	60	0	38
PVA1	60	1	35
PVA3	60	3	33
VGCF1	60	1	30
VGCF3	60	3	35

② 試験体の特性の影響を検討するために、PE 繊維(直径 0.012mm、引張り強度 2.7GPa)で強化した表2に示す5種類のモルタルを作製した。コスト、作業性など今後の繊維強化モルタルの市場性を考慮して、PE 繊維で強化したモルタルを供試体とした。表2に示す破壊靱性は、各試験体の引張り試験の荷重-変位曲線が囲む面積で代表している。

表2 試験体2

モルタル材料	繊維長、量 (mm, vol%)	圧縮強度 (MPa)	引張り強度 (MPa)	破壊靱性 (-)
A	6, 1.5	87	9.8	17.1
B	6, 0.5	97	5.3	5.8
C	6, 0.5	91	6.1	5.5
D	9, 1.5	84	11.1	23.9
E	6, 1.5	96	12.6	10.8

(2) 飛翔体

① 飛翔体の材種の違いによる破壊の影響を検討するために、スチール球、ガラス球、アルミニウム球、プラスチック球(ポリアセタール)の計4種類の直径4mm を用いて、普通強度モルタルならびに高強度モルタルの衝突実験を行った。

② その他の試料については、直径4mm スチール球を用いて実験を行った。

(3) 飛翔体加速装置

飛翔体加速装置とその加速原理を表3に示す。

表3 加速装置

速度域 (m/s)	装置・手段	原理
0 - 15	自由落下	重力
80 - 100	スプリング式	バネの反発力
200 - 400	一段式	圧縮空気
600 -	二段式	火薬と圧縮 He

4. 研究成果

(1) 飛翔体速度の影響

直径4mm のスチール球を用いて普通強度モルタルについて、実験をおこなった。100m/s 以下では損傷が認められなかった。音速を超える速度域では、20mm 厚試料でも飛翔体が貫通した。また、試料厚が厚いほど、試験片の損傷が大きくなる傾向が認められ、衝突面での穴の直径は20mm、裏面では30mmとなった。飛翔体の速度が増すにつれて、衝突面破壊、裏面破壊、貫通、局所貫通の順に破壊形態が進行した。しかし、モルタルの圧縮強度の違いは、損傷の大きさに殆ど影響しなかった。

(2) 飛翔体の影響

ガラス球、アルミニウム球、プラスチック球の場合は、衝突板への損傷は小さく、飛翔体自身が破壊する傾向がみられた。一方、スチール球は、飛翔体自身は破壊することなく、衝突板を大きく損傷させた。

(3) 強化繊維の影響

① 衝突速度 200-400m/s

厚さ10mm の普通強度モルタルに飛翔体が衝突する場合、本実験条件では、300m/s 弱で裏面剥離を生じた。しかし、PVA 繊維を3vol%添加したPVA1モルタルでは350m/s 付近でも裏面剥離を生じなかった。また、短繊維強化モルタルが裏面剥離を生じる速度域においては、繊維を添加しない普通強度モルタルに比べて裏面剥離範囲が小さくなることが分かった。VGCF 添加では、普通強度モルタルと比較して大きな違いが認められなかった。VGCF は高強度と推察されるが、径が小さいために、荷重保持力(強度 \times 断面積に比例)が小さく、繊維強化の効果が出なかった

と考えられる。結果を図1と2に示す。さらに、VGCF表面は疎水性が強いため、VGCF表面に含酸素官能基を付与したところ、モルタルの静的特性が向上した。強化繊維の表面処理も重要な因子であることが分かった。

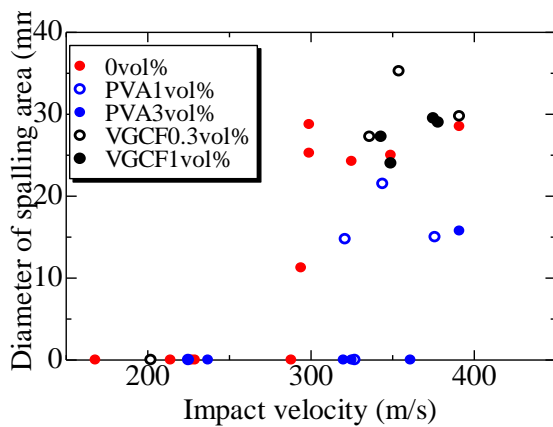


図1 損傷痕の大きさ

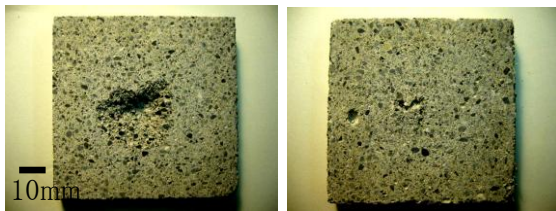


図2 約350m/sで飛翔体を衝突させた後の損傷痕（左：普通強度、右：PVA3）

② 衝突速度 600m/s 以上

飛翔体速度が600m/s弱で試料に衝突した場合はPVA繊維添加、無添加に関係なく飛翔体は貫通する。ただし、短繊維強化モルタルでは貫通口の周りに生じる同心円上のき裂進展を抑え、結果として損傷範囲を抑える効果があることが分かった。また短繊維強化モルタルはラジアルクラックの発生も抑える効果があることが分かった。さらに速度を上げると、貫通口が生じるだけで、試料による顕著な差は見られなくなる。これらのことから、PVA繊維を添加することによって靱性が向上した短繊維強化モルタルは、貫通限界近傍での衝突速度においては裏面の損傷範囲を抑える効果がある。しかし、それ以上の衝突速度ではPVA繊維による効果が見られなくなる。結果を図3と4に示す。

(4) 試験体特性の影響

① 損傷痕

モルタル B、C は飛翔体貫通後、ラジアルクラックが発生した。それに対して、モルタル A、D、E はほとんど発生していなかった。これは、モルタル B、C は繊維の混合率が少ないため、クラックが伝播しやすくなり上記の現象が生じたと考えら

れる。破壊の一例として図5にモルタル B の写真を示す。図6に飛翔体衝突前後での各モルタルの質量減少量(損傷痕の寸法を代表して)を示す。同じ試料でも多少のばらつきがある。これは、飛翔体衝突後の試料において、繊維のみでつながっている現象が確認されたので、この有無によって質量減少量が異なったためである。しかし、大まかな傾向としてはモルタル B、C は他のモルタルより、質量減少量が多いことがわかる。飛翔体貫通時における質量減少は主にコーンクラックの発生によって生じる。引張強度もしくは靱性が低いモルタル B、C の質量減少量が大きくなると考えられる。各種セラミックスを用いた飛翔体速度約 320m/s での衝突実験から、飛翔体衝突による欠落部体積が曲げ強度よりも破壊靱性との相関性が高いことを考慮すると、本実験で用いたモルタルについても、損傷痕寸法に破壊靱性が大きく影響を及ぼしていると推察される。

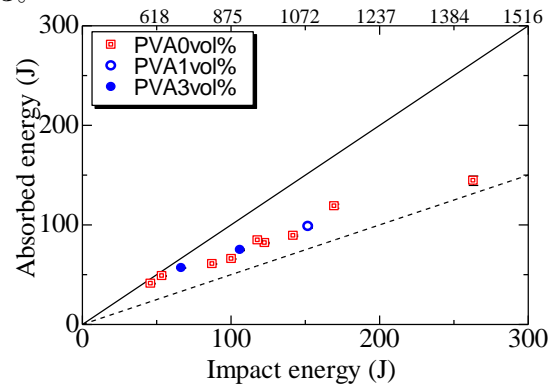


図3 各種モルタルの飛翔体エネルギー吸収能

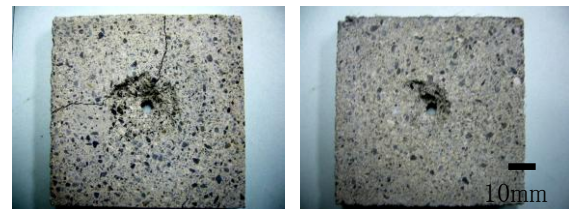


図4 約600m/sで飛翔体を衝突させた後の損傷痕（左：普通強度、右：PVA3）

また、図1と比較して、不貫通速度が大きくなっている。高強度モルタルの圧縮強度はモルタルA-Eと大差ないことを考慮すると、飛翔体の易運動エネルギー吸収には圧縮強度は大きな影響を与えていないと示唆される。図5と図6から、モルタルの繊維混合率を下げることで、引張強度とじん性値が低下し、質量減少量の増大及びラジアルクラックが発生すると考えられる。

図7にモルタル C のコーンクラック部の光学顕微鏡の写真を示す。この写真より、試料表面から出ているポリエチレン繊維は長くても 1mm程

度であり、コーンクラックが発生する際にはポリエチレン繊維が破断していることがわかる。図8にモルタルCの引張試験後の破断面を示す。図7と比較すると、試料表面から出ているポリエチレン繊維が多く、さらに、3mm程度のポリエチレン繊維も見受けられるため、衝撃試験時より多く、繊維の引き抜きが発生していると考えられる。このことより、飛翔体が高速で衝突する場合には繊維の特性がより重要になると考えられる。

また、貫通孔付近は白化しているのが確認できる。白化した部分を光学顕微鏡で観察すると、シリカフュームと推察される、白い粒状の物体が観察された。一般的にコンクリートが圧縮破壊するときには、骨材とセメントペーストとの接着部破壊によって生じるとされている。よって、白化した部分は圧縮応力がかかり、シリカフュームとセメントとの界面部分で破壊し、白く見えると考えられる。反対にコーンクラック部は引張力で、セメントペースト部で破壊したため、シリカフュームが観察されず、貫通孔付近と色が異なると考えられる。

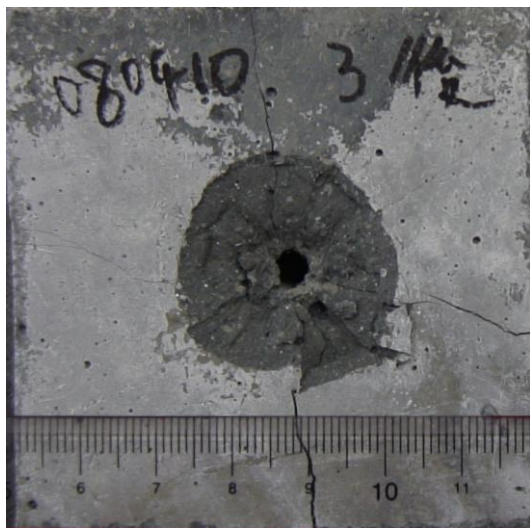


図5 飛翔体が650m/sで衝突した後のモルタルBの損傷痕の様子

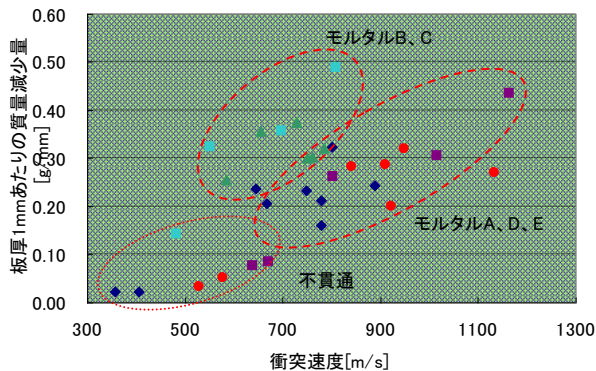


図6 試験体1mm当たりの欠落重量



図7 モルタルCのコーンクラック周辺部

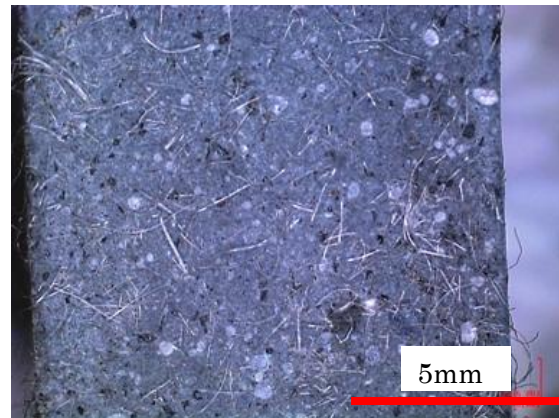


図8 モルタルCの引張り破断面

② 飛翔体運動エネルギーの吸収と破片

飛翔体の貫通前後の速度を計測し、貫通前後の運動エネルギーの差を試料の吸収運動エネルギーとし試料の板厚で割った値の比較を行った。図9に結果を示す。モルタルB、Cはエネルギー吸収が高く、モルタルDは低い。引張強さもしくは靱性が低いとエネルギー吸収が高くなる傾向がある。また、図6より、エネルギー吸収が高いモルタルB、Cは他のモルタルと比較して、質量減少量が多い。このことより、モルタルB、Cにおいて、飛翔体の運動エネルギーは、飛翔体貫通時に試料から発生する破片(デブリ)の運動エネルギーとしてより多く吸収されると考えられる。

飛翔体衝突の高速ビデオカメラ観察から、飛翔体の速度が速くなると、試料破片が細かくなることが分かった。この傾向はモルタルBに限らず、すべてのモルタルに観察された。表3に試料衝突後の試料裏面付近に大きな(飛翔体以上の大きさ)破片が発生しなくなる速度域(微細化速度域と定義する)を示す。モルタルBの微細化速度域は低く、モルタルDは高いことが分かる。図6の結果と合わせて考えると、モルタルBはデブリが微細化しやすく、かつデブリ量が多い、反

対にモルタル D はデブリが微細化しにくく、かつデブリ量が少ない。引張強さあるいは靱性が大きく関係しているためと考えられる。

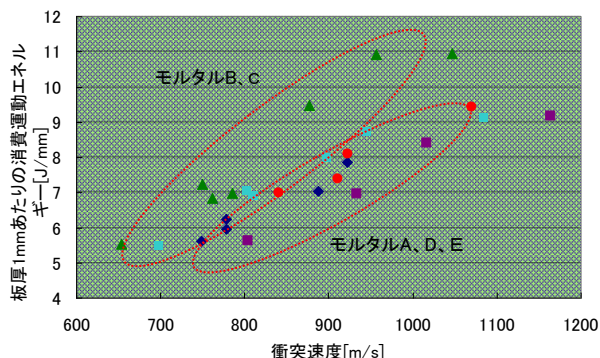


図9 飛翔体運動エネルギーの吸収能

表3 微細化速度域

試料	速度域
モルタルA	778 - 888
モルタルB	654 - 727
モルタルC	810 - 897
モルタルD	934 - 1017
モルタルE	911 - 923

マトリックス特性を変えた CFRP での飛翔体速度約 320m/s の実験結果から、繊維とマトリックスとの接着強度によって、飛散破片の生成あるいは破壊様式に違いが生じること、マトリックス延性・脆性が関係していることが示されている。詳細については検討が必要であるが、静的な力学特性と飛翔体衝突損傷性能の間には、トレードオフの関係が存在することが示唆される。

デブリの発生によって、新しい表面が発生し、表面エネルギーとして飛翔体の運動エネルギーが吸収されると仮定して、大まかな検討をおこなった。具体的には、Ca の表面張力を用いて、飛翔体衝突によって発生する表面エネルギーの計算を行った。その結果、飛翔体の運動エネルギーと比較すると非常に小さいことが分かった。また、図9より約 1000m/s 以上では吸収エネルギーはほぼ一定になることが分かる。高速ビデオ観察の比較からは、この速度域では破片量及び大きさはほとんど変わらない。よって、衝突速度が約 1000m/s 以上では破片の運動エネルギーによる飛翔体の運動エネルギーの吸収がほとんど増加しないため、吸収エネルギーが一定なと考えられる。これらのことから、飛翔体の運動エネルギー吸収には、破片の運動エネルギーが大きく関係していることが分かった。

5. まとめ

強化繊維ならびにセメントペーストの効果条件などを変えた各種モルタルを作製して、高速飛翔体の衝突によるモルタルの損傷について検討し、以下の結果を得た。

衝突時に飛翔体が破壊するか否かでモルタルの損傷が大きく変わる。飛翔体が破壊しない条件では、繊維強化による効果が大きい。繊維は強度ではなく、荷重保持力(強度×断面積)を考慮すべきであることが示唆された。

試料の質量減少量については概ね引張強さあるいは靱性に依存することが分かった。これは、飛翔体貫通時における質量減少は主にコーンクラックの発生によって生じるためである。

引張強さあるいは靱性が低いと飛翔体のエネルギー吸収が大きくなる。これは、飛翔体の運動エネルギーが主として試料から発生する破片の運動エネルギーに変換され、結果として飛翔体の運動エネルギーが吸収されるためである。しかし、引張強度が低く、靱性が低いモルタルは、飛翔体のエネルギー吸収能は高いが、大きな損傷痕を生じる。

モルタルの応用展開用途によって、つまり、飛翔体の運動エネルギーを吸収する必要がある場合、建築物の破損を少なくしたい場合とで、目的にあわせた設計が必要であり、その指針は前述の通りである。

モルタル等の構造材料は構造物中で主として、圧縮応力に抵抗するように設計されているため、圧縮強度を重要視してきた。しかしながら、本研究結果より、飛翔体の衝突問題については、引張強さ及び靱性が大きく影響していることが明らかになった。また、コーンクラック部の破断面観察から、繊維部分で破断が発生していることがわかり、繊維の機械的特性のさらなる向上によって損傷痕をさらに減少させることが可能になると考えている。

謝辞

表試験体 2 に関するモルタルの作製では、国枝稔 (Minoru KUNIEDA) 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授から多大なる御協力を頂きました。記して感謝いたします。

6. 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 7 件)

① 井上健二、宮内博之、田邊靖博、立花正彦、田中享二、高速飛翔体に対する各種建築材料の衝撃破壊特性、日本建築学会 2007 年

度大会学術講演梗概集 A-1 (2007) 1011-1012

② 横田健志、田邊靖博、山田昌義、伊藤肇、板谷義紀、小林信介、機械的特性の異なる CFRP の高速飛翔体による衝撃破、平成 20 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2009) 13-16

③ 山田昌義、田邊靖博、伊藤肇、横田健志、関根圭人、北口ダニエル勇吉、熊澤猛、セラミックの高速飛翔体による衝突破壊現象と機械的性質の関係、平成20年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2009) 39-42

④ 伊藤肇、田邊靖博、山田昌義、横田健志、国枝稔、小澤国大、ポリエチレン繊維強化モルタルの高速飛翔体による衝突破壊現象、平成20年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2009) 47-50

⑤ 井上健二、宮内博之、田邊靖博、田中享二、飛翔体の高速衝突によるコンクリート材料の破壊性状、日本建築学会 2006 年度大会学術講演梗概集 A-1 (2006) 403-404

⑥ 角大詩、安田榮一、田邊靖博、母材樹脂および界面接着性の異なる CFRP の高速飛翔体による衝撃破壊、平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2006) 273-276

⑦ 上田朗啓、角大詩、井上健二、宮内博之、赤津隆、安田榮一、田邊靖博、モルタル及び短繊維強化モルタルの高速衝撃破壊挙動、平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2006) 333-336

[学会発表] (計 5 件)

① 田邊靖博、拡大する複合材料の産業応用、平成 20 年度衝撃波シンポジウム、名大 IB 情報館、2009 年 3 月 17-19 日 [招待講演]

② 関根圭人・北口ダニエル勇吉・熊澤猛、山田昌義・田邊靖博、セラミックスの衝撃破壊に及ぼす機械的性質の影響 (3E09)、2009 年 3 月 16-18 日

③ 宮内博之、井上健二、田邊靖博、立花正彦、田中享二、高速飛翔体に対する各種建築材料の衝撃破壊特性、2006 年度関東支部研究発表会、日本建築学会会館、2008 年 3 月 6-8 日

④ 井上健二、宮内博之、田邊靖博、田中享二、ファサード部位に使用される建築材料の衝撃破壊、2006 年度関東支部研究発表会、日本建築学会会館、2007 年 3 月 8-10 日

⑤ 角大詩、安田榮一、田邊靖博、飛翔体衝突における CFRP のエネルギー吸収能と母材特性・界面接着性との関連、第 50 回日本学会材料工学連合講演会、京大会館、2006 年 12 月 13-14 日

[その他] <http://www.nuce.nagoya-u.ac.jp/e5/e5.html>

7. 研究組織

(1) 研究代表者

田邊 靖博 (TANABE YASUHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70163607

(2) 研究分担者

赤津 隆 (AKATSU TAKASHI)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授
研究者番号：40231807

宮内 博之 (MIYAUCHI HIROYUKI)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教
研究者番号：40313374