

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870153

研究課題名(和文)河床材料特性の縦断変化とその規定要因に関する基礎研究

研究課題名(英文)CHARACTERISTICS OF GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF RIVERBED AND THEIR DETERMINING FACTORS

研究代表者

知花 武佳(Chibana, Takeyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：10372400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：全国の一級河川を踏査し、日本列島を18の領域に区分した上で、様々な領域から対象地を選び、セグメントM、1、2-2の複数箇所得られた代表粒径を平均年最大流量時の無次元掃流力と比較した。その結果、類型による地質の差が、粒度分布や土砂の移動頻度の差をもたらしていることを見いだした。セグメントMと2-2とでは代表粒径が全く異なるにも関わらず、大きい粒径成分を含む地点に限れば、その粒度分布形状はかなり類似していた。これは、大粒径の空隙を細粒分で極力埋めた結果の分布であった。一方セグメント1では類型や代表粒径に関わらず粒度分布形状がほぼ同じであったが、標準偏差も小さく、全体的に動きにくい粒径であった。

研究成果の概要(英文)：By observing all class A rivers in Japan, Japan island is divided into 18 regions. We selected target sites from Segment M, 1 and 2-2 of several regions and examine the relationship between representative diameter and Shields number under the mean annual maximum discharge. Consequently, it was clarified that the size distribution and the movement frequency of riverbed material depend on the geomorphological condition of each region. Representative diameter in Segment M and 2-2 is quite different, but the shape of size distribution is quite similar when relatively coarse material is contained. We found that the distribution pattern makes porosity as small as possible. On the other side, the size distribution in Segment 1 is relatively uniform and the frequency of movement is relatively low.

研究分野：河川工学

キーワード：日本列島の地域区分 粒度分布 代表粒径 平均年最大流量 河床材料の移動頻度 空隙率

1. 研究開始当初の背景

河床材料の粒度組成及びその堆積量は河床の安定性に直結し、治水安全度を支配する要素であると同時に、河川生物の生息環境にとっても重要である。そのため、河床材料の粒度及びその堆積量が、どこでどのような状態になるかを把握及び予測し、状況に応じて適切な対策を講じることができれば、河川管理上大変有用である。

本来、河川にはそれぞれの流域特性に応じた、河道線形、河床勾配、川幅、水深等が存在し、こうした河道形状と上流から供給される土砂の量と粒度によって、その場の河床材料の粒度と堆積厚さが規定されていたはずである。しかし今は、いずれも人為的に大きく改変されており様々な河道の問題を引き起こしている。これらの問題に対処すべく、河道線形特性、平衡河床勾配、安定河幅等に関する研究は非常に多く、古くからなされてきているが、特定の河川ではうまくいっても、他の河川には適用できないといったことが多い。この原因は地域によって異なる土砂の特性を把握及び表現できていないことに起因するところも大きい。

こうした、土砂の粒度を表す指標として、計測した粒度分布から平均粒径や D_{60} などの代表粒径が算出され、これらの値は河道計画において様々な活用されている。しかし一方で、粒度分布そのものは、十分に分析され、河道計画に活用されているとは言い難い。河床の土砂粒度分布は粒径加積曲線によって表され、代表的なものとして対数正規分布、タルポット型分布、二峰性の分布などが知られている¹⁾。粒径加積曲線の形状は当然、上流からどのような大きさ、量の河床材料が供給されるかに加え、ダムや堰などの横断構造物によっても規定され、時空間的に変動している。その一方で、長い時間をかけて土砂が輸送される中で、河川流量、勾配、川幅などの基本的な河川の諸元によって規定される、基準となる特徴も有しているはずである。

またシミュレーションを行う際には、土砂の粒度組成は、現況にあうように上流からの流下土砂量と粒度を調整することが多く、その妥当性には疑問が残ることも多い。これら安定形状及び河床材料の現地適用性の問題は、上流からの供給土砂の粒度組成と輸送量、及び、河床及び河岸でどれだけの土砂が交換（浸食・堆積）されているかが見積もられていないことに起因する。

2. 研究の目的

我々はこれまで関東地方を中心とした河川を中心に、山地河川から下流の蛇行原河川に至るまで様々な場所で多くの土砂の粒度分布を計測してきた。その結果、土砂の粒度分布は計測する場所によって様々であるものの、いくつかの共通点を見出すことができ

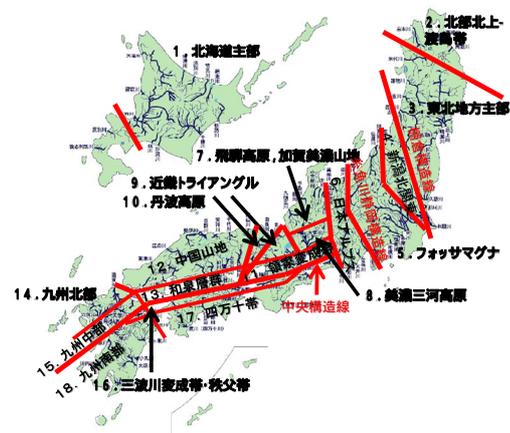


図-1 日本列島の18地域区分

た。そこで本研究では、ある特定の河川での精度を追求する前に、地質条件及び人為的な改変度合いが異なる複数河川を対象とし、比較的簡便な現地調査により上流から下流（河口付近を除く）にかけて縦断的に調査を行い、河床材料の粒度と堆積量の分布という土砂輸送の最終形態から、それらを規定する河道特性量（河道形状や水理量など）について考察することから始めるべきであると考えた。ここで、河床材料の粒度と堆積量を規定する河道特性を表す簡単な指標を開発することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 日本列島の類型化

全国の一級河川を踏査し、その川の状況を参考に日本列島を図-1に示す、以下の領域に区分した。北海道主部、北部北上-渡島帯、東北地方主部、新潟北関東、フォッサマグナ、日本アルプス、飛騨高原、加賀美濃山地、美濃三河高原、近畿トライアングル、丹波高原、領家変成帯、中国山地、和泉層群、九州北部、九州中部、三波川変成帯・秩父帯、四万十帯、九州南部。

この中でなるべく状況が異なるように、の朱太川、の渡良瀬川、思川、久慈川、那珂川、の相模川（本川及び中津川、道志川、秋山川）狩野川、酒匂川、の富士川支流（大武川・御勅使川）、の手取川、の菅生川、の千代川、の荒川（本川及び入間川、越辺川、高麗川）、の多摩川（本川及び浅川）を対象とし、現地調査を実施した。

(2) 現地観測

2009年以降計測されてきた様々な場所のデータに、ここ三年間の調査結果を加え、上述した河川において土砂の粒度分布を調査する現地観測を行い、併せて各種のデータを収集した。観測サイトは、山本のセグメント区分²⁾に従い、山地（セグメントM）、扇状地

(セグメント1), 蛇行原(自然堤防帯, セグメント2-2)に分けて扱っている。なお、堰やダム等横断構造物の1.5km以内は調査対象から除外した解析とあえて構造物上下流に注目した解析の双方を実施した。

河床材料の調査方法について、セグメントM及びセグメント1では線格子法により調査した。文献^{3),4)}を参考に、河原上と流路の水際に、50mのメジャーを河道縦断方向に二本設置し、1m間隔で礫径(中間径)を調査し、合計で一地点につき102個の河床材料を計測した。なお、河床材料が1mm以下の場合はそれ以上細かく計測せず、1mmとした。一方でセグメント2-2では流路内の河床から深さ10cm以内の土砂を200g以上採取し、実験室に持ち帰って乾燥させ、ふるいにかけて粒度分布を調査した。ただし文献⁵⁾に従い、試料がシルト分を多く含む場合は、沈降分析を行って粒度分布を求めた。

4. 研究成果

(1) 地質による生産土砂粒度分布の違い

山地河川は土砂生産源に近いので、河床の粒度分布は流域の地質に大きく影響される。これは、流域の地質によって河床に供給される土砂の岩質が異なり、岩質によって土砂の風化作用の速度が異なるためである。例えば、花崗岩はマサ化を起こすために、巨礫が礫や砂利を經由せずに砂へと風化してしまうため、流域が花崗岩地質から成る河川では礫や砂利が少ない。この現象は「風化作用の不連続性」⁶⁾と呼ばれ、多様な地質で構成される渡良瀬川の山地区間の河床材料調査の結果でも確認することができた。渡良瀬川では、河床材料調査を行う際に、7地点で各礫の岩質も同時に記録した。その結果、堆積岩の河床材料は50cmを超える巨礫が少なく、30cm以下の礫が主であった。すなわち堆積岩地質は30cm以下の礫を産出しやすい。同様に考えると、火山岩地質は30cm程度の礫を産出しやすく、また深成岩地質(主に花崗岩)は1mを超える巨礫を含む土砂を産出しやすい事が分かった。

(2) 日本列島の類型ごとの土砂粒度特性

の朱太川は、縦断的に勾配変化が緩やかで、粒径の変化も少なく、粒度組成も後述するセグメント1に典型的な狭い範囲で安定している。上流に存在する大粒径の材料に関しては、移動頻度は低いが、2~6cm程度の砂利に関しては平均年最大流量程度でも連続的に移動していると考えられる。はジュラ紀付加体と花崗岩(時に第四紀火山岩)からなるエリアであり、花崗岩の巨礫の影響で山間部は代表粒径が20cm以上となり、その間をジュラ紀付加体由来の砂利が流下しているという状態になる。ただし、花崗岩の割合の狭い久慈川はジュラ紀付加体の影響が強く、特に下流域はと類似した粒度となってい

る。の河川は第四紀火山岩が主体となりやすいのが特徴であり、に比べれば小さな巨礫から大礫が中心となる。砂の割合はそこそこあるが全体的によりも砂利が少ない。その結果、セグメント1においても10cm前後の代表粒径が平均年最大流量で動くか動かないか程度で安定しているのが特徴である。ただし、破碎帯を流れる酒匂川のみ特徴は次のに近い。の河川は砂防堰堤が多く設置されていることが多く、これにより巨礫が止められ細粒分の割合が増えることを、歴史的資料の収集と水路実験から確認した。よってここでは平均年最大流量よりもずっと小さな流量に対応したものしか流れておらず、時折花崗岩の巨礫が残置されていても、それにより安定的な粒度組成となることはなかった。に関しては、地質的特徴はと同じである。ただし、調査を行った手取川が火山岩主体で有り、と類似した土砂動態となっている。に関しては、ジュラ紀付加体に中生代以前の火山岩が混在した地質となっている。そのため、火山岩特有の小さな巨礫から大礫も存在するが、これらは平均年最大流量程度では移動せず、この地質では多い火山岩由来の砂利が移動しているのが特徴である。地質年代は異なるが、山が低いこともありのグループに近い動きをする。のグループは、花崗岩が主体となるため、上流域には巨礫が存在する。また、変成岩や古い火山岩由来の砂利も多いため、全体的にやに近い土砂動態となる。ただし、これらに比べて山地の標高が低いので、砂利の動きはやほど活発ではない。に関しては、上流域では、10cm以上の大礫が存在するが、下流域では砂利が中心となる。ジュラ紀付加体であるので、下流域はやと類似したものになるはずであるが、データに不足があり十分確認できていない。の河川はよりも大礫を産出しにくいので、流下方向の粒径変化が乏しく、せいぜい5~10cmの間でしか変化が無い。また砂利の量もそこまで多くないので粒度分布は不安定であり、平均年最大流量程度でもかなり活発に移動すると考えられる。

上記の内、, , の類型、及び堰堤の効果が小さければおそらくの類型でも、巨礫が産出される上、やに比べて急勾配であるため、流下方向の粒径変化が大きい。これらの類型では、平均年最大流量と代表粒径とが対応しており、平均年最大流量程度で代表粒径が動くか動かないか程度である。

(3) セグメントMの土砂粒度分布の特徴

ここでは、複雑な地質をもち巨礫が存在する類型の渡良瀬川山地区間の粒度分布と、中生代堆積岩を流域地質に持ち巨礫がほぼ見られない類型の多摩川山地区間とで、粒度分布の特徴について比較した。両河川で調査した土砂粒度分布について、横軸を各サイトの代表粒径で無次元化して比較したところ、渡良瀬川では、調査地点によって代表粒

径が異なるにも関わらず、無次元化した粒度分布の形状はかなり似ている(図-2)。なお、渡良瀬川と同様に巨礫を有する常願寺川(類型)であるが、砂防堰堤があっても巨礫が十分存在する)を調査した黒田ら⁸⁾も、代表粒径が異なっても粒度分布が一致する現象を報告している。一方で、30cmを超える巨礫がほとんど見られない多摩川では、粒度分布はサイト毎に大きく異なっており不安定である。

(4) 砂防堰堤の入り方と土砂粒度分布への影響

すでに砂防堰堤が代表粒径に及ぼす影響について述べたが、地質によって砂防堰堤の入り方も異なった。例えば、火山岩では低落差の連続砂防堰堤が、花崗岩では高落差の砂防堰堤が距離をおいて設置される傾向にあった。さらに、これらの高さや堰堤下流の粒径との間に明確な関係が見られ、堰堤下流では、落差が低いほど大きな礫径がなくなり、高いほど小さな礫径のものがなくなっていた。

(5) セグメント1の土砂粒度分布の特徴

扇状地河川で行われた線格子法の結果について検討した。その結果、渡良瀬川の山地区間と同様に、各々の地点では異なる粒度分布であっても、横軸を代表粒径で無次元化すると、河川によらず粒度分布形状がかなり類似しており、安定的な粒度分布になっていることがわかった。ただし、セグメントMに比して粒度分布の幅は狭く均質的である(図-2)。

(6) セグメント2-2の土砂粒度分布の特徴

セグメント2-2については、調査した粒度分布はほぼ一様なものから対数正規分布型、タルボット型のものまで存在し、多様であった。しかし、(4)の結果と同様に、大きい河床材料を含む場合に粒度分布形状が類似するという考え方に基づいて、調査地点の中で2cm以上という大きい河床材料を含む地点の粒径加積曲線について抽出して無次元化したところ、代表粒径が異なっても粒径加積曲線の形状はかなり似ていた(図-2)。なお、セグメント2-2においても2cm以上の砂利が見られるのは、久慈川とというジュラ紀付加体の河川であった。

(7) 粒度分布と空隙率の関係について

最も平均的な粒度分布を各セグメントの代表として抽出して比較した。セグメントMで30cm以上、セグメント2-2で2cm以上といった、各セグメントの中で大きい河床材料を含むサイトに限れば、粒度分布の形状はかなり類似している。ここで、藤田ら⁹⁾が対数正規分布の粒度分布について空隙率を検討した。藤田ら⁹⁾は標準偏差が大きくなると空隙率が減少すると結論づけているが、この論

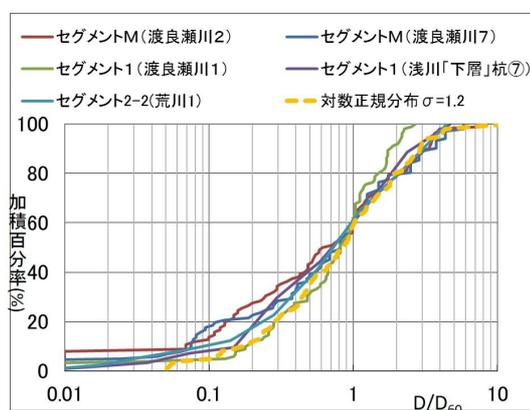


図-2 セグメント間の土砂粒度分布の比較

文で示された結果をよく見ると、標準偏差が1.2程度となった段階でかなり空隙が充填されており、それ以上標準偏差が大きくなっても空隙率があまり減少しないと読み取れる。このことから、大きい河床材料の空隙に徐々に小さい河床材料が充填されていった場合に、標準偏差が1.2程度の対数正規分布に近づくまで空隙率が減少するという可能性が考えられる。実河川では上流から様々な粒径の土砂が供給されるものの、実際には、標準偏差が1.2の対数正規分布は、各セグメントの代表として抽出した粒度分布とかなり類似していた。ただし、滅多に移動しないような核となる大きい河床材料が存在しなければ、空隙が充填される現象が生じにくい。ため、多摩川の山地区間のように様々な粒度分布形状となると考えられる。

(8) 水理量と粒度分布との関係について

セグメントMとセグメント2-2では、大きい河床材料を含む場合に粒度分布の形状が一致し、空隙率の低い状態となっていた。一方セグメント1では、調査地点によらず粒度分布形状が一致したものの、他のセグメントと比較すると粒度分布の形状が少し異なり、比較的標準偏差が小さい。その理由を考察するため、対象地点の水理量と山本の図²⁾とを比較した(図-3)。

山本²⁾は、各地の河川のデータを収集し、平均年最大流量時の無次元掃流力 Q_m と代表粒径との関係性を見出した。 Q_m の算出方法は山本の方法²⁾に準じているが、概ね以下の通りである。

- ・平均年最大流量 Q_m について、対象地点から最も近い観測所の13年以上の各年最大流量を調査して平均した。ただし一部の山地河川では流量観測地点がないために、付近の雨量計のデータを用いて合理式により流量を算出した。
- ・その区間の平均的な川幅 B について、現地観測及び定期横断測量結果から求めた。
- ・文献¹⁰⁾を参考に、代表粒径に応じて粗度係数 n を決定する。
- ・河床勾配 I を求め、式(1)により平均水深

H_m を求める .

$$H_m = \left(\frac{nQ_m}{BI^{0.5}} \right)^{3/5} \quad (1)$$

・式(2)により * を求める .

$$\tau_* = \frac{H_m I}{1.65 D_{60}} \quad (2)$$

セグメント M のデータについて、セグメント 1 と比較して * が大きい地点が多いのは、河岸が側岩で固定されているために川幅が拡大しづらく、掃流力が上昇しやすいためと考えられる . そのためセグメント M とセグメント 2-2 では比較的土砂が移動しやすい状況であり、例えば多摩川の山地区間などは * が凡そ 0.2 を超えている . このような場所では、大きい河床材料を含まれず、平均年最大流量程度の出水時にほとんどの大きさの土砂が動き得るため、先に考察したような大きい礫が核となって、その間隙により小さい材料が充填されていく状況は、ピーク流量時にも生じるとは考えにくい . そのため粒度分布形状は様々であった .

ただし、セグメント M やセグメント 2-2 であっても大きい河床材料を含み、粒度分布の形状が空隙率を小さくするように目詰まりする地点では平均年最大流量時の * は比較的小さい . このような分布の時に、D₉₀ の大きさが D₆₀ の 3 倍程度であるとしても、例えば D₆₀ に対する * が 0.18 程度であっても D₉₀ に対する * は 0.06 程度である . すなわちこれらの地点では、大きい材料がその場に留まりつつも他の河床材料が移動するという状況が生じ得るため、大きい材料の間隙により小さい材料が充填されていく現象が生じる .

その一方で、セグメント 1 の代表粒径に対する * は小さく、平均年最大流量程度では、D₉₀ はおろか D₆₀ すらも動くか否かという程度である . そのため、他のセグメントのように大小様々な河床材料が同時に移動して大きい材料の間隙が埋められるという機会が少なく、これがセグメント 1 の粒度分布の標準偏差が比較的小さい理由と考えられる . ただしセグメント 1 でも、D₉₀ よりも小さい河床材料が十分に移動すれば、空隙が充填され、標準偏差が 1.2 程度の粒度分布になるはずであり、このことは我々が行ったリング法の観測結果¹¹⁾、によって説明できる . 本調査の詳細な観測方法は文献¹¹⁾、に記したが、多摩川水系浅川の高幡橋付近において、交互砂州が形成されている河原上に杭とリングを設置し、出水前後でどの程度の深さまで土砂が交換されているかを調査した . その結果、表層の粒度分布は分級しており、例えば交互砂州の水衝部に相当する河原上流端では礫径が比較的精く、水衝部でない河原下流探知各では比較的精かい . その一方で、出水により堆積した「下層」の粒度分布は、表層の礫

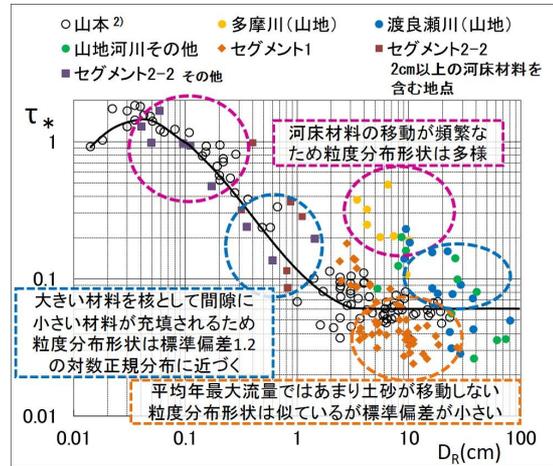


図-3 山本の図²⁾と本研究対象地点との比較
(実線は山本による線)

径に関わらずどこでもかなり似ている (図-2) . この下層の粒度分布は標準偏差が 1.2 程度であり、他の粒度分布と同様である .

すなわち、セグメント 1 であっても大規模な出水時には D₉₀ 以下の河床材料が十分に移動して大きい材料の間隙が充填されるという状況が生じ得る . しかし、平均年最大流量程度では D₆₀ 以上の土砂はあまり移動しないため、粒度分布の標準偏差が比較的小さいと考えられる .

以上から、粒度分布の特徴は次のように説明できる . セグメント M とセグメント 2-2 で大きい河床材料を含まず、平均年最大流量時の * が大きい場合は、河床材料の全体的な移動が頻繁に生じるため、粒度分布形状は様々である . ただし、セグメント M で 30cm 以上、セグメント 2-2 で 2cm 以上といった、各セグメントの中で大きい河床材料を含む場合には、その材料が核となってより小さい材料が充填されていく事で、標準偏差が 1.2 の対数正規分布形状に近づく . 一方、セグメント 1 では大流量時には D₉₀ 以下の河床材料が移動し得るが、平均年最大流量程度では D₆₀ より大きい材料はあまり移動しないために、粒度分布の標準偏差が比較的小さい .

< 参考文献 >

- 1) Sulaiman, M., Tsutsumi, D., & Fujita, M.: Porosity of Sediment Mixtures with Different Type of Grain Size Distribution. 水工学論文集, 第 51 巻, pp.133-138, 2007.
- 2) 山本晃一: 沖積河川 - 構造と動態 -, 技報堂出版, 2010.
- 3) 河村 三郎: 土砂水理学 1, 森北出版, 1982.
- 4) 三國谷隆伸, 知花武佳: 河床構造に着目した山地河川のサブセグメント区分と

河床材料粒径の規定要因，河川技術論文集，第17巻，pp.131-136，2011．

- 5) 地盤工学会：土質試験 基本と手引き，2010.
- 6) 小出博：日本の国土 - 自然と開発 - ，東京大学出版会，1973.
- 7) 産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）：20万分の1日本シームレス地質図 ，2015年版
- 8) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の滲筋形成機構と河床粒度分布特性，河川技術論文集，第11巻，pp.363-368，2005.
- 9) 藤田正治, Sulaiman, M., Ikhsan, J., 堤大三.：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集, 第14巻，2008.
- 10) 国土技術研究センター(編)：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.97-131，2002.
- 11) 原田大輔，知花武佳，日野将人：土砂動態観測に基づいた交互砂州の形状・土砂移動特性と川幅水深比によるその違い，河川技術に関する論文集，vol.22, pp.175-180，2016．
- 12) 須川遼，知花武佳，三國谷隆伸，川口淳郎：渡良瀬川山地部における生息場としての河床構造と流域・河道特性の関係性，河川技術に関する論文集，vol.19, pp.513-518，2013．

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1件)

原田大輔，知花武佳，Agus SANTOSO：河床材料の粒度分布の特徴とその規定要因について，土木学会論文集 B1(水工学)，査読有，Vol.73, No.4, I_931-I_936, 2017.

〔学会発表〕(計0件)

〔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〕
特になし

6．研究組織

(1)研究代表者

知花 武佳 (CHIBANA, Takeyoshi)
東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・
准教授

研究者番号：10372400