

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420533

研究課題名(和文) Pile-upを考慮した津波による海水の市街地への来襲とインパクトに関する研究

研究課題名(英文) Study on impact and run-up ice floes driven by Tsunami considering ice pile-up

研究代表者

木岡 信治 (KIOKA, SHINJI)

国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所・主任研究員

研究者番号：20414154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：連続体モデルと離散体モデルからなる海水の陸上遡上シミュレーション手法を開発した。離散体の計算法として、離散体特有のpile-upやjam等の計算が可能となる、鉛直運動を考慮した準3次元DEMを開発し、氷群の陸上遡上実験結果からその妥当性を間接的に検証した。中規模衝突実験とDEMやFEMを応用した数値モデルにより、より複雑な構造物への海水の衝突破壊現象を解明した。これらより、津波来襲時におけるpile-upやice-jamを考慮した海水挙動、脆性破壊挙動を考慮した氷塊群が及ぼす構造物への動的作用、など海水による被害拡大の予測または最悪のシナリオ想定等に資する津波防災対策上の支援ツールを開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed numerical models of drifting and run-up ice floes driven by Tsunami, which consists of a continuum and a discrete model. The discrete model is a quasi-3D DEM based on a 2D DEM in which phenomena unique to granular solids such as arch action, jam and pile-up can be simulated with a small computation load. Experiments using synthetic ice were performed to evaluate the simulation method. We clarified the more complicated fracture processes of sea ice on structure through both medium-scale experiments and numerical calculations based on FEM and DEM. We also suggested a simple calculation method of ice collision force during tsunami run-up based on the theoretical approaches, the numerical models and the physical experiments to estimate approximately economic loss caused by tsunami with ice floes in extensive areas. Thus, we developed the support tools to offer information or materials lead to suppose various scenarios including the worst-case for disaster mitigation plans.

研究分野：海水工学，寒地工学

キーワード：DEM FEM 脆性破壊 離散体 pile up ice jam 海水 衝突

1. 研究開始当初の背景

冬期の北海道北東部沿岸域などの流水や沿岸結氷を含む氷海域において、大量の海水をとめた津波は、通常の津波よりも被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える可能性がある。実際過去に、津波により海水が遡上し、建築物等が損壊した事例がいくつか報告されている。2011年の東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえ、津波想定や対策等の見直しが進められる中、北海道においても寒冷地特有の課題を考慮した津波対策が強く求められている。

2. 研究の目的

津波来襲時における沿岸部および陸上での pile-up (氷群の積層) や ice-jam (氷群による閉塞現象) を考慮した海水挙動、脆性破壊挙動を考慮した複数氷塊が及ぼす構造物への動的作用、など海水による被害拡大の予測または最悪のシナリオ想定等に資する津波防災対策上の支援ツールを開発する。

3. 研究の方法

(1) 海水の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発

本計算方法では、そのコストと目的に応じて、広域的、局所的なエリア予測に分けている。広域の計算では、海水群を巨視的に高粘性流体と見なし、非線形長波方程式の2層流モデルの適用を試みている。特に、上層流体(氷)が無限に拡散するという矛盾に対処するため、氷-水-空気での界面張力項を設ける等、氷の固体としての振る舞いに矛盾しないよう工夫し、現実の海水の漂流運動に近づけるための試みを展開している。また2層の界面抵抗係数は「摩擦抗力係数」として扱い、水平拡散係数(粘性係数)は、オホーツク海における海水の海岸近傍の速度分布(境界層内)から推定される渦動粘性係数(滝沢ら、1977)を採用した。

一方、特に陸上遡上時や構造物との干渉時においては、pile-up / ice-jam や arch action など離散体特有の現象を考慮した手法が必要となる。本研究では離散体モデルの一つである個別要素法(DEM)を採用した。3次元DEMの適用は、それが局所的なエリア(数100m~数km)であっても、計算コストが莫大となり、困難である。そこで、2次元のDEMに鉛直方向の運動を考慮した準3次元モデルを構築した。氷に作用する外力は、流れによる圧力抗力と摩擦抗力からなると仮定し、遡上の際に地面に接触して運動する場合には、鉛直方向の運動とともに地面の束縛力や抵抗を考慮した。なお、氷群が流体に及ぼす影響は無視した。また、面外方向の挙動である、pile-up/rafting を再現するため、質量保存および仕事とポテンシャルエネルギーの関係より導出される shore ice pile up の条件式(Kovacs & Sodhi, 1979)を準用し、これに氷間の動摩擦を考慮した条件式を構築した。DEM

で計算される氷-氷の接触力がこの条件式による力よりも大きければ pile-up/rafting が発生し、逆に、2つ以上の単体の氷が積層している状態の氷に作用する慣性力が摩擦力を超えた場合に、崩壊すると仮定した。

さらに、本シミュレーションの妥当性を検証するため、簡単な水槽実験を行った(図-1)。海水模型(synthetic ice)は、摩擦係数と密度が実物の氷とほぼ等しいポリプロピレン製とした。沿岸部では氷板が波浪等により破壊され比較的小さな氷片群が集積している状態を想定し、多数の円盤型の氷模型(直径3cm, 厚さ0.5cm)を岸沖方向に2mの範囲(水路幅0.78m)に密に配列した。その沖合には板状の模型を配置した。斜面には複数の角柱構造物をいくつかのパターンで配置した。水面に浮かべた海水模型を沖合から台車で曳航して陸上遡上させ、pile-up 高を含む遡上状態等を調べた。

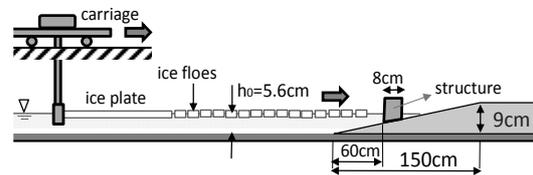


図-1 海水の陸上遡上の模型実験の方法

(2) 海水群を伴った津波の陸上遡上に関する水理模型実験

本実験では特に比較的建築物が密集した市街地への津波氾濫流を想定し、そこに形成される海水群の pile-up や ice-jam 現象に着目し、海水群の挙動や水位の変化等を調べた。前者は、氷が高く積み上がる現象、後者は、狭い箇所での氷の滞留・閉塞現象で、これらの形成により、大きな荷重が作用する場合がある。津波時ではないが、橋梁や沿岸・海洋構造物等の崩壊事例がある。

図-2のように、海水群が沿岸に漂着した状態を想定し、ゲート急開方式により段波を発生させ、一様斜面部を伝搬した後、水平な陸上部に遡上させた(縮尺1/100)。水平部開始地点(勾配変化点)より0.8mの位置に、アクリル製の角柱からなる複数の建築模型を横断方向に一直列配置した。ゲート下流水深を一定とし、貯水深、建築物の幅、その隣棟間

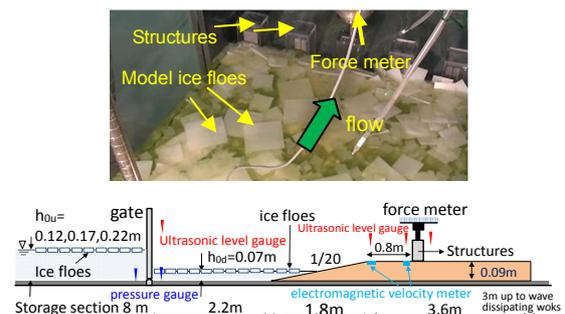


図-2 海水群を伴った津波遡上の水理模型実験

隔を変えて実施した。模型氷は、一辺 1.5cm ~10cm からなるポリプロピレン製の方形板（氷厚は 5mm）を用い、一辺の平均が 3cm となるように配合した。なお、密度と摩擦係数は実際の氷と同程度であるが、破壊強度や弾性率等は相似でないため、氷群衝突力の評価は対象外である。主な計測項目は、分力計による水路中央部に設置した建築模型に作用する荷重、超音波水位計とデジタルビデオカメラによる遡上水深、そして底面設置型の電磁流速計による遡上流速である。

(3) 氷塊の構造物への衝突破壊に関する実験および数値モデルと簡易式の開発

本研究では、津波による単体あるいは複数の海水の構造物への衝突力ならびに破壊プロセスを明らかにし、さらに構造物の動的応答解析等も含めた実用的な総合的設計支援ツールを構築することを目的として、衝突実験ならびに数値モデルの開発を行った。

まず実験では、既存の自由落下方式による衝突装置を改良することにより、複数氷塊の中規模程度の衝突実験を実施した。計測項目は、高速度カメラ等による氷塊（基本寸法・形状として氷厚 0.15m, 1 辺 0.6m の直方体）の破壊プロセスならびに、荷重計による衝突力、非接触式の変位センサによる構造物（直径 60cm の鋼製杭）の変位である。

氷塊の数値モデルとしては、離散体モデルである DEM と連続体モデルである FEM の 2 タイプを構築した。離散体モデルは、我々による既存の 3 次元 DEM をやや改良し、氷内部での詳細な破壊時のエネルギー収支、および応力波伝搬や微視的なクラック発生・伝搬機構などを数値あるいは視覚的に出力できるものとした。また複数氷塊の衝突による構造物の動的応答計算など、より複雑な衝突プロセスに対応できるような数値計算システムを開発した。なお構造物には 3 次元の弾塑性 FEM を適用した。また、もう一つの氷塊の数値モデルである、連続体モデルについては、3 次元の弾塑性 FEM の適用を試みた。構成則としては、ひずみ硬化しない弾完全塑モデルを用い、材料の構成モデルは、降伏関数にモール・クーロンの破壊基準を採用した。塑性ポテンシャルとしては、モール・クーロン式の ϕ , c に関連づけた Drucker-Prager 式を用いた。ただし、ダイレイタンシー角は ϕ に置き換えた。動的非線形計算では、材料非線形による収束計算には修正 Newton-Raphson 法を、時間積分には Newmark の β 法を用いた。なお、材料の内部減衰を考慮しなかった。その計算結果を中規模の海水の衝突実験結果と比較して、その妥当性を調べた。

こうした、3 次元の数値モデルは個々の重要構造物の詳細な耐水設計には有用だが、ハザードマップなど広域における構造物の安全性を評価するには計算コストがかかる。

これまでの理論解析、数値解析、中規模実験結果などを踏まえ、津波遡上時の氷塊による衝突力の平面分布の簡易推定法を提案した。この推定法は主に氷塊の動弾性係数と漂流速度、氷厚を入力値とし、単位長さあたりの力として出力される。これにより海水の漂流・陸上への遡上シミュレーションと組み合わせ、より広域的な海水による構造物の損壊状況、ひいては経済損失等の概略推定が可能となる。

以上の知見は、構造物の耐水設計のほか、広域的見地からの構造物配置や避難計画等のハザードマップ作成に活用される。

4. 研究成果

(1) 海水の漂流・陸上への遡上シミュレーション

海水群を、巨視的に連続体（高粘性流体）としてモデル化し、非線形長波方程式の 2 層流モデルを適用した。界面張力項などの導入などにより、海水が無限に広がり氷厚が薄くなるという矛盾を退け、流水の固体としての振る舞いが確認された。また、1952 年 3 月の十勝沖地震によって発生した流水を伴った津波の陸上遡上の氷塊の遡上速度や流水遡上域等を大局的に再現でき、本手法の妥当性が示され、有望であることを確認した。

3 次元計算より遥かに計算負荷が少なく、氷などの離散体特有の arch action や jam, pile-up などが考慮できる準 3 次元的な DEM を構築した。前述の氷の陸上遡上に関する実験から、本計算での構造物前後の pile-up 状況や遡上状態等の再現性が概ね良好であることを確認し、その妥当性が示された（図-3）。また、一様斜面から続く平坦地形上に大小複数の構造物（障害物）を配置した地形に、正弦波が遡上する単純な条件を例として、本計算法の適用を試みた。津波とともに海水が遡上し、構造物周辺で pile-up が生じていること、引き波とともに、沖に戻る海水と、陸に残存する海水が存在すること、等が見て取れる。海水の遡上範囲のほか、pile-up や jam の発生リスクがある箇所が表示可能であるため、ハザードマップなどへの活用が期待される（図-4）。また、北海道東部に位置する漁港を例に、本計算法を使って、津波による海水の遡上計算を実施し、ハザードマップ作成等実務への適用可能性について検討した。前述の方法により、衝突力の分布を推定し、被害予測の一つの方法として、構造物の被害状態に対応する、飯塚・松富(2000)の被害危険度ランクを推定した（図-5）。海水遡上範囲、pile-up 等の発生リスク箇所が表示可能であることを概念的に示すことができ、構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上でも、本手法が有用である事を確認した。

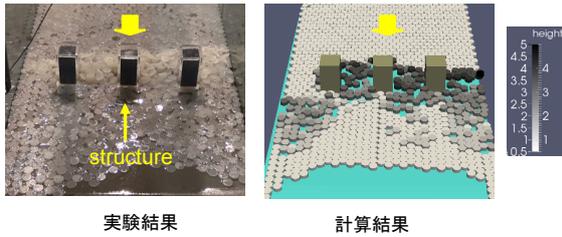


図-3 遡上氷の実験結果と計算結果との比較

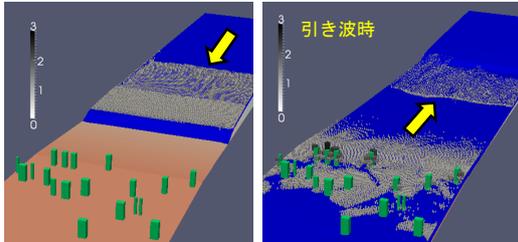


図-4 単純地形への正弦波と氷の遡上計算の例（高さ方向に5倍に拡大して表示，グレースケールは pile-up 高を示す）

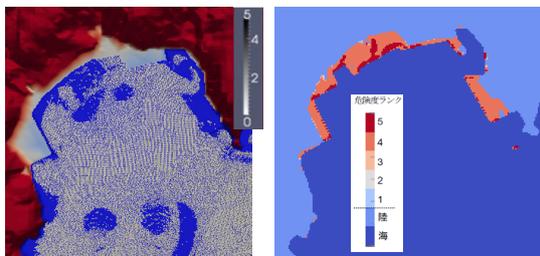
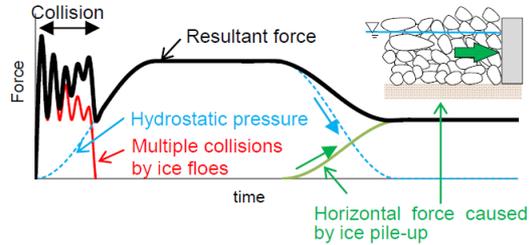


図-5 北海道東部に位置する漁港背後地への津波による海水遡上シミュレーションとハザードマップ作成の例. 危険度ランクの概念は，飯塚・松富(2000)による

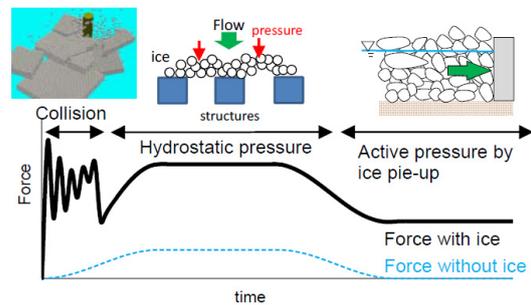
(2) 海氷群を伴った津波の陸上遡上に関する水理模型実験結果および混相流としての構造物群への作用荷重モデルの提案

海氷群を伴った津波の陸上遡上に関する水理模型実験結果より，海氷群と海水による混相流体としての作用荷重モデルを提案した．図-6(a)に示すように，①初期の氷群衝突による動的荷重（赤線）（仮に，先行する氷群の緩衝を考慮し，徐々に低下する正弦半波衝撃パルスの集合と仮定），②ice-jam 生成のせき止め効果によって生じる水位上昇と構造物間における静水圧増分による大きな荷重の発生，およびその定常状態の持続（青線），③静水圧と交代する形での水位低下による氷群(pile-up)の主働圧の発現とその定常的な（水位ゼロ状態での）荷重（緑線），から構成していると仮定できる．単にそれを重ね合わせしたものが作用荷重（黒線）と考えると，その実測値の経時変化を大局的に説明できた．よって，混相流の場合には，初期の個体群の衝突のほか，大きな静的荷重の持続，水位が低下してもなお残留する pile-up による主働圧の持続等が大きな特徴であり，被害拡大シナリオの一つであるといえる．また，海水など大量の漂流物が存在する場所でのピ

ロティ構造や窓等の開口を有する施設の設計には，その部分の津波力低減を考慮しない方が安全側である事，避難に際しては，水位上昇や氷塊の pile-up により，通常の津波時より高所へ避難する必要があるなど，防災の実務上の観点より，いくつかの留意事項を示した．



(a) 混相流による作用荷重の発生メカニズム



(b) 混相流と通常の津波との作用荷重の比較

図-6 混相流（海氷+海水）の作用荷重モデル

(3) 氷塊の構造物への衝突破壊に関する実験および数値モデルの開発

DEM による 3 次元衝突破壊シミュレーション手法の改良により，を改良し，氷内部での詳細な破壊時のエネルギー収支，応力波の伝搬，微視的なクラック発生・伝搬機構などを数値あるいは視覚的に出力できるものとした（図-7）．これにより，氷サイズが構造物よりも大きな場合，破壊機構は構造物（杭）近傍の破壊（圧壊，貫入）とその周辺の亀裂伝搬という 2 つのプロセスから成り，しかも，最大衝突力は，主に衝突時の構造物近傍の圧壊・貫入（個々の粒子の弾性衝突）でほぼ決まり，その後の亀裂の伝搬機構はあまり影響を及ぼさない事，高速域では破壊に費やすエネルギーは僅か数%程度と推察されるなど，脆性材料の衝突破壊メカニズムや構造物へ与えるインパクトなど，より微視的な考察を与えるツールを獲得した．これにより上述の衝突力分布の簡易モデルを構築するための数値実験ツールとしても活用した．また複数氷塊に対応できるよう改良するとともに，海水の衝突破壊および構造物への動的荷重について検討し（図-8），単体の氷塊と，複数氷塊による挙動とは異なることや，構造物の固有振動によってはその氷塊の複数衝突プロセスが重要であることを明らかにした．

さらに，材料の構成モデルとしてモール・クーロンの破壊基準を考慮した 3D の動的弾

塑性 FEM の適用性も試みた (図-9). DEM とともに衝突速度にともなう衝突荷重の推移の実験的傾向を概ね良好に再現できた. 実務上の観点から, 破壊性状や衝突力波形までを問題とする場合には, DEM を用いるのが良いが, 最大衝突力や継続時間の概算値程度であれば, 計算コストの安い FEM を用いる事が合理的と考えた. しかし, 降伏 (破壊) 時以降の若干の衝突荷重の速度依存性の再現には難があり, 課題が残った.

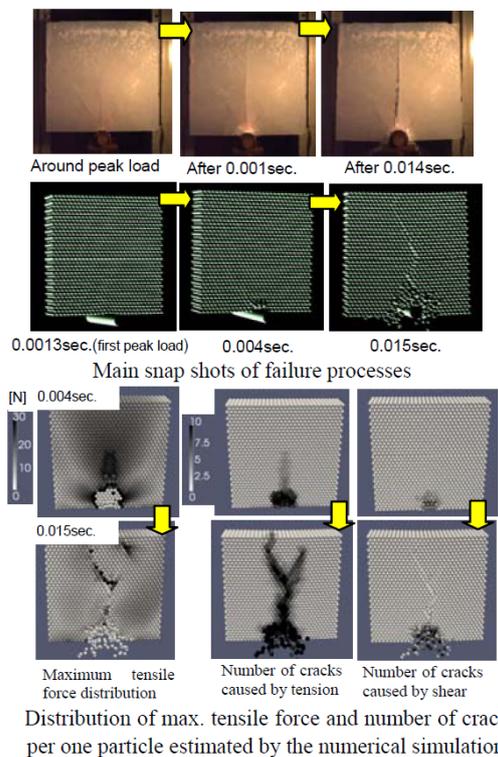


図-7 人工海氷の衝突実験による数値モデル (3次元 DEM) の検証, およびシミュレーションによる氷塊内部の応力波伝搬・クラック分布の時間変化の可視化の試み

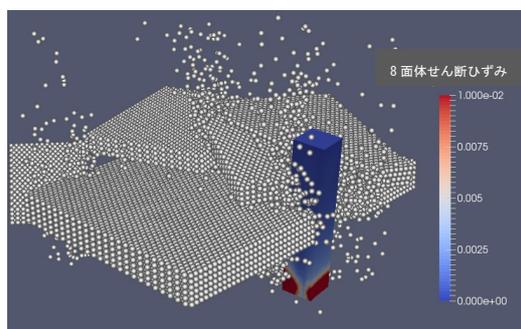


図-8 複数氷塊の弾塑性構造物への衝突シミュレーションおよび動的応答解析の例. 氷モデル: 3次元 DEM, 構造物: 動的弾塑性 FEM, グラデーションは 8 面体せん断ひずみを表す)

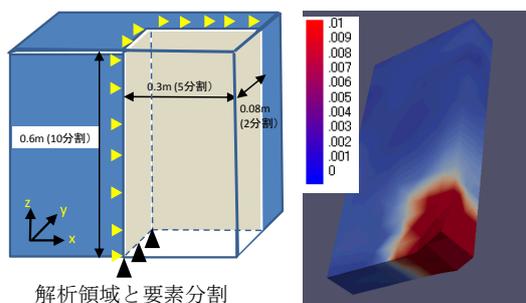


図-9 動的弾塑性 FEM による海氷の杭構造物への衝突 (貫入) シミュレーション (結果は 8 面体せん断ひずみ分布)

最後に, 海氷による上乘せリスク, これまでの実験や数値シミュレーションを通して検討してきた, 海氷挙動, 海氷の陸への遡上及び構造物等へ及ぼす外力等の予測手法および, 避難のあり方や構造物配置等の津波対策案をとりまとめた.

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 1 件)

木岡信治, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海氷群を伴う津波の陸上遡上による被害想定の研究概要, 混相流 Vol. 29 (2015) No. 2, 2015, pp.124-131.

[学会発表] (計 5 件)

木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁, 海氷の杭構造物への衝突破壊特性に関する実験的及び数値的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No2, pp.333-340, 2013.

木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海氷群を伴った市街地への津波遡上特性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 特集号, Vol.70, No2, pp.821-825, 2014.

木岡信治, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海氷群を伴った遡上津波のピロティ形式の建築物への作用に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 特集号, Vol.71, No2., pp.919-924, 2015.

S.Kioka, T.Takeuchi and Y.Watanabe, Characteristics of Sea Ice floes Run-up caused by Tsunami Considering Ice Jams and Ice Pile-ups around Structures, Proc. of the 25th The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Vol.3, pp.778-782, 2015.

S.Kioka, T.Takeuchi and Y.Watanabe, Study on estimation of damages caused by sea ice floes driven by run-up tsunami -Physical and computational experiments of fracture,

behavior and run-up of sea ice-, Proc. of the 31st International Symposium on Okhotsuk Sea & Sea ice, pp. 270-275, Mombetsu, Japan, Feb. 21-24, 2016.

S.Kioka, T.Takeuchi and N.Maruta, Fundamental Study for Physical Experiments and Numerical modelling of Ice-Jams and Ice Pile-ups Driven by Run-Up Tsunami Wave, Proc. of 23nd IAHR International Symposium on Ice, USB, Ann Arbor, USA, May 31 to June 3, 2016.

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木岡 信治 (KIOKA, Shinji)

国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所・主任研究員

研究者番号：20414154