

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04361

研究課題名(和文) 寒冷地河川における実用的アイスジャム計算モデルの開発と陸面モデルによる広域展開

研究課題名(英文) Development of a Practical Ice Jam Calculation Model and Deployment to a wider area using land surface model

研究代表者

吉川 泰弘 (Yoshikawa, Yasuhiro)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50414149

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により、「融解による解氷」は河氷厚の計算値から解氷を推定できることを確認し、「破壊による解氷」は降雨および融雪による水深変動の計算値から解氷を推定できることを確認した。アイスジャム洪水を考慮した氾濫解析手法の開発は、河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアiRICの「Nays2DH」を基本として、平面二次元の河氷変動モデルの構築を試みた。気候変動がアイスジャム洪水に与える影響は、レナ川を対象にした解析から、5月にオホーツク海高気圧が発生すると、暖気移流によって東シベリア域の気温が上がり、積雪・河氷融解を促進することで、流量の増加が平年よりも早まり、アイスジャム洪水に影響を与える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、融解による解氷と破壊による解氷を考慮した河氷融解破壊式の開発の道筋が明らかになった。アイスジャムを再現可能な平面二次元の河氷変動モデルを開発し、今後、アイスジャムの発生の規模・時期・場所に関する知見が得られる。本研究で扱う寒冷地河川の諸現象の解明は、気候変動が陸域水文過程へ与える影響を評価する上で意義があり、特に春の解氷とアイスジャム洪水に関する地域住民の理解が深まる。

研究成果の概要(英文)：For the estimation of Break-up, this study confirmed that thermal Melt-out can be estimated from the calculated value of river ice thickness. It was confirmed that mechanical Break-up can be estimated from the calculated values of water depth variation due to rainfall and snowmelt.

To develop an inundation analysis method considering ice jam floods, we attempted to construct a two-dimensional planar river ice fluctuation model based on "Nays2DH", a river flow and riverbed fluctuation analysis software from iRIC.

The impact of climate change on ice jam flooding was estimated from the data analysis for the Lena River. As a result of the analysis, when the Okhotsk High occurs in May, the warm air advection increases the temperature in the East Siberia region, which accelerates the melting of snow and river ice, resulting in an earlier-than-normal increase in streamflow, which affects ice jam flooding.

研究分野：河川工学，河氷工学

キーワード：寒冷地河川 アイスジャム 河氷 結氷河川 数値計算 氷板 晶氷 iRIC

1. 研究開始当初の背景

寒冷地河川では、気温の低下と流量の減少によって河道内に河氷が形成され、春先には気温上昇と融雪に伴う流量の増加によって河氷が融解、破壊されて解氷し下流へと流れる。解氷した河氷が蛇行部や橋脚、狭窄部で堆積して河道を閉塞させると、図1に示すアイスジャムが発生して水位の急激な上昇を引き起こす。アイスジャムは、アメリカ、カナダ、中国、ロシアなどの冬に零下になる諸外国で発生し洪水を引き起こし、日本では北海道で人的被害や水位の急激な上昇が起こる。近年及び今後のアイスジャム現象の動向に関する知見が求められている。本研究の問いは「近年の気候変動はアイスジャム現象にどのような影響を与えているのか」である。

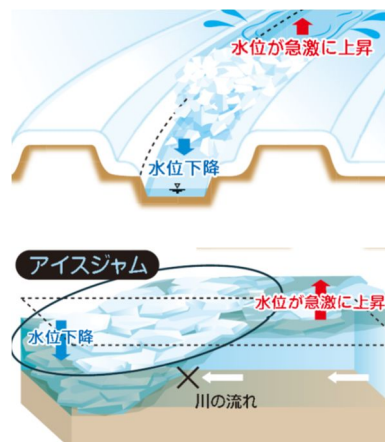


図1 アイスジャム現象

アイスジャムの発端となる解氷現象には、流量変化が緩やかな時に気温と水温の上昇により熱的に河氷が融解する現象「融解による解氷」と、流量変化が急激な時に水面勾配や氷の衝突により力学的に河氷が破壊する現象「破壊による解氷」の2つのプロセスがある。「融解による解氷」については、熱力学的アプローチにより現象を検討した既往研究¹⁾があるが、どの程度の適用性があるかについては明らかとなっていない。「破壊による解氷」については、力学的メカニズムの解明には至っていない状況であり、特に解氷現象を理解する上では、水理学的検討に加え、気温上昇をもたらす気象条件の検討も必要である。

解氷後に発生することが多いアイスジャムにおいて、発生規模、発生時期、発生場所に関する知見は河川治水上重要となる。このような知見を得る手段として数値計算が有用であるが、アイスジャム現象を考慮した計算モデルは十分には開発されておらず、計算モデルの開発が望まれている。

寒冷地域では気候変動の影響を受ける現象が多く観測されている。既往研究²⁾では、北半球における河氷厚、河川の結氷期間の変動に着目し、水文過程が組み込まれた陸面モデルを用いて検討を実施している。その結果、31年間で、河氷厚は8cm薄くなり、結氷期間は9日間短縮する結果が得られた。一方で、気象学的な知見から解氷現象について検討した事例は少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、解氷現象における河氷融解破壊式の開発、アイスジャム洪水を考慮した氾濫解析手法の開発、北半球における気候変動が解氷現象に伴うアイスジャム洪水に与える影響の検討である。

3. 研究の方法

(1) 水理条件と気象条件を考慮した解氷現象の解明

「融解による解氷」は、気温を主な入力値として一地点の現象を表現できるが、その適用性については明らかとなっていないため、他の河川において検証を行った。「破壊による解氷」は、現象自体が「融解による解氷」に比べて急激で観測事例が少ないため、実河川における解氷現象を現地でも観測し現象の解明を試みた。

(2) アイスジャム洪水を対象とした氾濫解析手法の開発

平面的な陸域への氾濫現象を考慮できる解析手法が求められている。アイスジャム洪水の規模、発生時期と発生地点を診断するために、アイスジャム実験を実施して実験データを得て、アイスジャム洪水を対象とした氾濫解析手法の開発および実験データを用いた計算結果の妥当性の確認を行った。

(3) 気候変動がアイスジャム洪水に与える影響

気候変動の影響を受けやすいシベリアを対象に、面的な視点で気象が解氷現象に与える影響を明らかにした。解氷現象に最も影響を与える因子は気温と河川流量である。春の気温の上昇は融雪を促し河川流量の増加につながる。この気温上昇をもたらす気象条件をデータ解析により特定した。

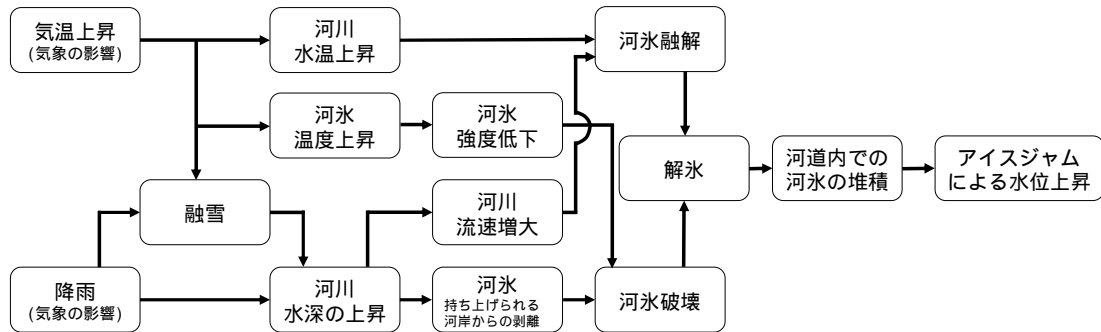


図2 解氷現象及びアイスジャム現象に関する流れ図

4. 研究成果

(1) 水理条件と気象条件を考慮した解氷現象の解明

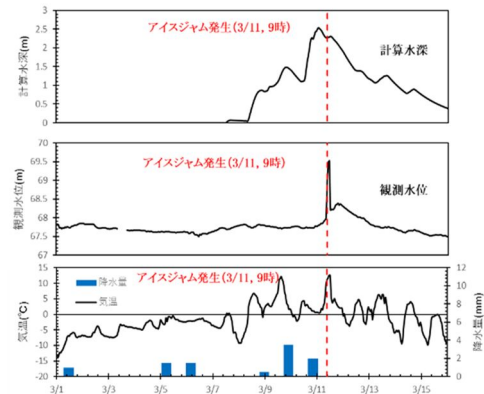
1年目は、アイスジャム発生過程について、2018年3月にアイスジャム洪水が確認された北海道内11河川の現地調査結果を整理し、被災河川における河水の急激な解氷、破壊、流下およびアイスジャム発生過程を把握した。気温上昇、降雨、河川水位上昇等の気象・水文条件がアイスジャム発生時期・場所におよぼす影響を検討した。アイスジャム発生リスクの高い河道・地形を評価できる物理指標であるアイスジャムスケールを被災河川に適用し、被災箇所でアイスジャムスケールが高いことを示した。また2018年3月にアイスジャム災害を受けた辺別川において、アイスジャム発生過程の解明のため河水の解氷、破壊、流下過程の解明に向け、タイムラプスカメラ、水位計、氷温計による現地連続観測を行った。

2年目は、辺別川での冬期観測結果を整理し、氷温・河川水温・気温同時計測が、計測地点の解氷時検出に有効であったこと、また複数の観測手法を組み合わせることで、解氷過程の時系列の考察が可能となることを示した。2018年のアイスジャム発生河川を対象に、実務利用を想定した河氷厚予測モデルを適用し、公開データである気象・水位データをもとに、アイスジャム発生リスクの増減を簡便に予測できる可能性を示した。

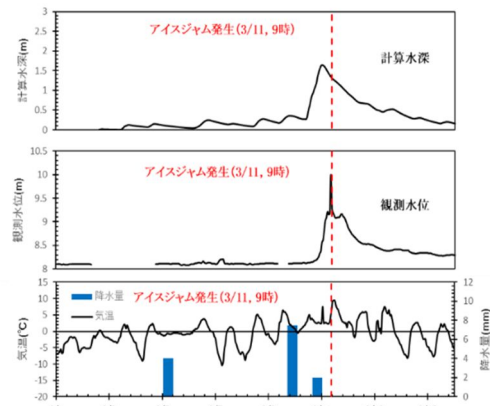
3年目は、2020年3月に北海道内の複数河川で発生したアイスジャム洪水の現地調査を行い、アイスジャムの発生機構を整理し、河川監視カメラによる河道内画像と水位変動により発生時期把握が可能なることを確認した。アイスジャム発生に影響する因子について2018年発生事例との比較を行うとともに、河氷厚予測モデルによる発生予測の問題点と改善点について整理した。

水面に氷が存在しない秋から水面に氷が存在しなくなる春までの河氷の挙動について、Shen³⁾は流れ図で解説している。一方で、この流れ図において解氷に至るまでの過程は十分に明らかにされていない。本研究では、上記の現地観測結果に基づき、新たに解氷現象を流れ図で整理した。作成した流れ図を図2に示す。この成果により解氷現象を整理することが出来た。

解氷現象における河氷融解破壊式については、現地観測及び計算モデルを構築し検討した。融解による解氷は、河氷厚の計算値から解氷時期を推定できることを確認した。破壊による解氷は、降雨および融雪による水深変動の計算値から解氷時期を推定できることを確認した。検討結果の一例を図3に示す。計算水深はアイスジャム発生前にピーク値が現れるため事前に体制を組みやすい。天気予報データも利用可能であり汎用性が高い。



(a) 網走川津別観測所 (津別アメダス)



(b) 浦幌川KP0.2 (浦幌アメダス)

図3 アイスジャム発生時の観測水位と計算水深 (2020年3月)

(2)アイスジャム洪水を対象とした氾濫解析手法の開発

氾濫解析手法の計算値の妥当性を確認するための実験データを取得した。実験条件は、北海道渚滑川のアイスジャム現地観測データを用いた。アイスジャム洪水を考慮した氾濫解析手法の開発について、河川の流れ・河床変動解析ソフトウェア iRIC のうち「Nays2DH」を基本として、河水の流下堆積・形成融解・河川水温移流拡散現象を再現できる計算モデルを導入して、平面二次元の河水変動モデルを構築した。本計算モデルの動作確認を行い、アイスジャム実験の再現を試みた。河水は橋脚位置で一時的に閉塞傾向となり、水位が上昇し、その後、徐々に閉塞が解消する傾向は概ね表現できた。一方で、実験結果と異なる結果が出ている箇所や解氷現象を考慮していないため、モデル改良が必要である。

陸面モデル・分布型水面モデルによる広域展開については、アイスジャム計算モデルを結合するところまでは達成できなかった。現在までの研究の進捗を述べる。

寒冷地河川において河水の形成融解を再現できる計算モデルを陸面モデルに結合し、本モデルの有効性を異なる気候環境において検証してきた²⁾。このモデルは、河水表面に積もる積雪による断熱効果も考慮されている。しかし、河水表面の積雪深は、陸面モデルによって計算された川周辺の陸地の積雪深を代用しており、断熱効果を過大に評価するため、河氷厚を過小に評価することが課題であった。その課題を解決するために、エネルギーと水収支に基づいた積雪モデルを取り入れた。特に、積雪モデルでは吹雪による雪の消失効果も考慮した。改良したモデルを北極域の大河川に適用して、積雪深と河氷厚の観測データと比較を行い、改良したモデルの計算精度の有効性を確認した。積雪の断熱効果の改善による河氷厚の増加が、春のピーク流出のタイミングの遅れとピーク流量の減少に影響していたことを確認した。そして秋の結氷時に雪が積もり始めるタイミングが河氷厚に大きく依存していたことが分かった。そこで、改良したモデルによる感度実験を行い、河氷厚 5 cm を積雪スタートの閾値と決めた。モデルの検証実験では、観測された積雪深と河氷厚を精度良く計算していたことが確認できた。河氷厚モデルにおける積雪プロセスの改良が従来早くなっていた解氷のタイミングを 2-3 日遅らせる改善をもたらした。その結果、高温バイアスであった水温の予測精度の向上と北極海に流入する河川水熱フラックスの予測向上に繋がった。

今後、物理プロセスに基づいた簡易的な有効性が本研究で認められたアイスジャム計算モデルを陸域モデルに結合することで、北極域河川で起きているアイスジャムの予測及び流量予測の改善が期待できる。

(3)気候変動がアイスジャム洪水に与える影響

気象場がアイスジャムと関連する流量増加へ及ぼす影響に関して、東シベリアのレナ川を対象に調査を行った。過去 60 年間 (1950~2011) の統計的データ解析を行った結果、対象地域で融雪時期となる 5 月の気温には長期的な上昇傾向がみられ、この昇温トレンドに対応して、流量増加のタイミングは早まる傾向がみられた。これらのトレンドは既往研究^{2),4)}による河氷厚及び河川水温のトレンドと整合する。また、流量増加のタイミングには年毎にばらつきがみられ、これは雪氷融解との関係から予想される通り、気温の年々変動と強い負相関を示した。さらに、この負相関に基づいて気象場解析を行った結果、流量増加のタイミングの年々変動はオホーツク高気圧と関係していた。すなわち、5 月にオホーツク海高気圧が発生すると、暖気移流によって東シベリア域の気温が上がり、積雪・河氷融解を促進することで、流量の増加が平年よりも早まる傾向があることが明らかになった。気候モデルによる将来予測研究では、温暖化時にオホーツク海高気圧の発生時期と勢力が変化することが指摘されることから、今後の状況変化が注視される。以上の結果から、他地域においても、その地域の融雪時期の気温変化を引き起こす気象イベントが河氷融解及びアイスジャムに大きく影響すると考えられる。

< 引用文献 >

- 1) Yoshikawa, Y., Y. Watanabe, A. Itoh : A SIMPLE EQUATION FOR ICE SHEET THICKNESS AND ICE FORMATION/BREAKUP PREDICTION, Journal of JSCE, Vol.2, pp.203-213, 2014.
- 2) Park, H., Y. Yoshikawa, K. Oshima, Y. Kim, T. Ngo-Duc, J.S. Kimball, and D. Yang: Quantification of warming climate-induced changes in terrestrial arctic river ice thickness and phenology, Journal of Climate, 29, pp.1733-1754, 2016.
- 3) Shen, H.T. : Mathematical modeling of river ice processes , Cold Regions Science and Technology 62 , pp.3-13 , 2010 .
- 4) Park, H., Y. Yoshikawa, D. Yang, K. Oshima: Warming Water in Arctic Terrestrial Rivers under Climate Change, Journal of Hydrometeorology, Vol.18, No. 7, pp.1983-1995, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 吉川泰弘, 横山洋, 伊波友生	4. 巻 第25巻
2. 論文標題 橋脚部におけるアイスジャム実験と再現計算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会, 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 109-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 矢部浩規	4. 巻 Vol.75, No.2
2. 論文標題 結氷河川における解氷期の河水挙動と解氷の簡易予測手法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_931-I_936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋	4. 巻 Vol.75, No.2
2. 論文標題 橋脚部における実氷を用いたアイスジャム氾濫実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1411-I_1416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 前田俊一, 矢部浩規	4. 巻 74
2. 論文標題 2018年3月北海道アイスジャム洪水による被害の現象解明と今後の課題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1039-I_1044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu INAMI, Hiroshi YOKOYAMA, Hiroki YABE, Shunichi MAEDA and Yasuhiro YOSHIKAWA	4. 巻 24
2. 論文標題 Field Observation of Ice Flow in the Abashiri River	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 201-208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi YOKOYAMA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroki YABE, Kenji TAKAHASHI, Satoshi KONISHI	4. 巻 24
2. 論文標題 Experimental study on ice jam under completely ice-covered river	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 231-238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasuhiro YOSHIKAWA, Hotaek Park, Kazuhiro Oshima, Hiroshi Yokoyama	4. 巻 24
2. 論文標題 Proposed Simplified Ice-Jam Numerical Model for Ice-Covered Rivers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 239-247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohisa SUZUKI, Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroshi YOKOYAMA	4. 巻 24
2. 論文標題 Field Study of Anchor Ice Occurrence and Disappearance and Material Circulation in Cold Regions River	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 296-303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroshi YOKOYAMA	4. 巻 24
2. 論文標題 Verification of Ice Measurement Data by SWIP and ADCP and Observation of River Ice Time Series Behavior in Teshio River	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th IAHR International Symposium on Ice	6. 最初と最後の頁 368-375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山田隆司, 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋
2. 発表標題 堰におけるアイスジャム発生条件に関する実験的研究
3. 学会等名 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大島和裕, 朴昊澤, 堀正岳, 吉川泰弘
2. 発表標題 東シベリアの河氷融解に伴う急激な流量増加へ影響を及ぼすオホーツク海高気圧
3. 学会等名 日本気象学会2019年度東北支部気象研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋
2. 発表標題 2018年3月北海道アイスジャム洪水における危険箇所の抽出に関する検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第75号
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島和裕, 朴昊澤, 堀正岳, 吉川泰弘
2. 発表標題 東シベリアの河水融解に伴う急激な流量増加へ影響するオホーツク海高気圧
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Park Hotaek, Yoshikawa Yasuhiro, Oshima Kazuhiro, Yang Daqing
2. 発表標題 Warming water in Arctic terrestrial river under climate change
3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Hotaek Park, Takeshi Yamazaki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 279-298
3. 書名 Carbon-water cycle modeling, In Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia (eds Ohta T. et al)	

1. 著者名 Tetsuya Hiyama, Shigemi Hatta, Hotaek Park	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 207-229
3. 書名 River Discharge, In Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia (Eds. Ohta et al)	

1. 著者名 Kazuhiro Oshima, Koji Yamazaki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 25-42
3. 書名 Atmospheric water cycle, In Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia (Eds. Ohta et al)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	朴 昊澤 (Park Hotaek) (10647663)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・グループリーダー代理 (82706)	
研究分担者	大島 和裕 (Oshima Kazuhiro) (40400006)	青森大学・ソフトウェア情報学部・准教授 (31101)	
研究分担者	横山 洋 (Hiroshi Yokoyama) (70442879)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(寒地土木研究所)・主任研究員 (82114)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------