

機関番号：10101

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360196

研究課題名 (和文)「環境変化順応型」冷却ガスパイプライン技術の開発～複合材料利用による新しい可能性

研究課題名 (英文) Development of Chilled Gas Pipeline Complying with Environmental Change, Innovation due to Composite Materials

研究代表者

蟹江 俊仁 (KANIE SHUNJI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10332470

研究成果の概要 (和文)：天然ガス資源に恵まれる北方寒冷地域を対象に、冷却ガスパイプラインの新しい構造形式として、中詰材に砂などの可塑性材料を用いるパイプインパイプの開発を行なった。特に中詰材に水を飽和させ凍結することで、より高い靱性が発揮され、材料の非線形領域まで有効に利用できるため、周辺環境の変化に対しても柔軟に対応できる。さらに、周辺土の凍結・融解を人為的に制御することで、曲げ剛性の回復や漏洩防止も可能となった。

研究成果の概要 (英文)：A pipe-in-pipe filled with sand was developed as an innovative structure for chilled gas pipeline in northern cold regions where a plenty of natural gas is reserved. As a result of the study, it is confirmed that the pipe-in-pipe can comply with environmental change due to increased ductility by sand because it allows large deformation. In addition, self recovery in flexural rigidity and anti-leaking becomes possible by artificial freezing and thawing of surrounding soil.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：構造工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：凍土、活動層、凍着強度、弾性係数、温度依存性、パイプインパイプ、複合材料

1. 研究開始当初の背景

人類が地球上での営みを継続するために、水素経済社会への移行は必須の課題である。その中で、まず、極寒冷地域を含む北方圏域に豊富に貯蔵する天然ガスを供給地に安全・確実に届け、公正で健全な市場形成を促すパイプラインネットワークの構築は急務である。

現在シベリアでは、永久凍土地帯からの埋設型天然ガスパイプラインを一部で供用しているものの、流送ガスを冷却しなかったために周辺の凍土が溶け出し、構造安定性を失

ってパイプラインが変形した結果、全生産量の 2%、わが国の消費量の 17%が大気に放出されているとされる。これは、貴重な天然資源を「利用せずして温室効果を高める」、人類の未来にとって大きな「二重の損失」になっている。このような状況下で、シベリアやアラスカといった北方圏域では、さらに厳しい環境下からの新たな天然ガスパイプラインの構築に乗り出しており、これまでに提案者らは、「新」世界規格となりうる天然ガスパイプラインの技術開発に取り組んできた。その中で、永久凍土を「溶かさず」「安全に」

輸送できる「冷却」ガスパイプラインは、一方で、未凍結領域にフロストバルブと呼ばれる凍結層をパイプ周辺に形成させるため（写真 1）、大きな変形をパイプにもたらし、独自の研究ならびにアラスカ大学との共同研究等を通じて検証している。こうしたことから、大きな変形に対し「高い強度で対抗する構造」や、「高い変形追随性能をもった構造」、さらには「変形緩和対策としての施工方法」などについての研究を行い、冷却することでパイプラインの周囲に発生する「凍結」あるいは「冷温」ゾーンを積極活用した複合的構造の開発を着想するに至った。

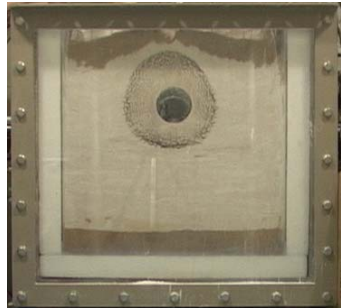


写真 1 フロストバルブによるパイプラインの凍上

2. 研究の目的

本研究全体の目的は、地球温暖化による影響が出やすいと言われる北方寒冷地域において、将来的な環境変化に対しても順応できるような冷却ガスパイプライン構造を開発することである。特に、冷却ガスにより凍結する周辺地盤が、パイプラインと一体化して曲げ変形に抵抗できるようにした上で、万一のパイプラインの破損に対しても、周辺凍結地盤との密着性と気密性を確保することにより漏洩を防止する他、必要に応じて再凍結などの人為的コントロールにより自己修復性も確保しようとするものである。こうしたことから、本研究全体を4つのサブテーマにわけて実施することとした。研究の全体フローは図 1 に示す通りである。

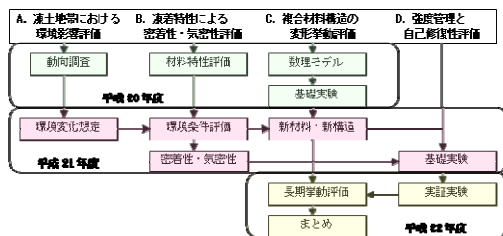


図 1 全体フロー図

(1) 凍土地帯における環境影響評価

近年、加速度的に進む永久凍土境界面位置の変化と、凍土面の低下等について、アラスカやシベリアなどでの現地調査を行い、冷却ガスパイプラインの計画・設計において想定

すべき、「環境変化」条件を設定することを目的とする。より具体的には、予測に必要な不可欠な永久凍土上層部（トランジエントレイヤー）の雪氷層位学的情報を得ること、また、将来の凍土帯変化を把握するために日本の山岳永久凍土帯において地中の熱・水循環のモニタリングを目的とした。

(2) 凍着特性による密着性・気密性評価

パイプとフロストバルブとの凍着特性は、万一のガス漏洩に対するバリア効果を評価する上で最も重要な因子である。本研究では、凍着試料・被凍着材料を始めとする様々な因子に着目し、凍着による密着性と気密性等について実験的に評価を行い、これらを確保するための条件と方法について明らかにすることを目的とする。

(3) 複合材料構造の変形挙動評価

パイプと周辺材料との組合せによる複合材料構造に対して、解析・実験の両面からその変形挙動評価を行うものである。特に、周辺材料が乾燥した砂のような粒状体の場合に始まり、完全飽和状態で全体が強固に凍結している状態などでは、複合材料としての数値モデルにも大きな違いがある。このため、パイプ周辺を構成する材料や断面構造の検討に加え、凍結土のさまざまな条件を反映した実験を行い、変形挙動評価モデルの確立を目的とする。

(4) 強度管理と自己修復性評価

複合材料としてのパイプの剛性管理と自己修復性を適切に行うため、水分量と温度の管理方法を様々に制御し、実験的な検証を行う。これにより、実用的な強度管理と自己修復性確保の方法について考え、評価手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 凍土地帯における環境影響評価

東シベリアのヤクーツク市、チョクルダ市近郊および北海道大雪山系山頂部において、深度 3m までのボーリングを計 10ヶ所行った。得られた土試料を用いて体積含水率と水（氷）の安定同位体比のプロファイルを測定した。一方、国内の永久凍土分布地である大雪山系山頂部と富士山頂部では、季節的に凍結融解を繰り返す土層（活動層）と永久凍土上層部の地温と土壌水分の変化を 2~5 年間にわたって観測した。

(2) 凍着特性による密着性・気密性評価

密着性や気密性は、構造物とその周辺に形成される凍結土との凍着せん断性能に依存する。このため、凍着せん断応力を計測するための独自の直接せん断試験装置を開発し、実験を行った。この装置のイメージ図を図 2 に示す。これは構造物表面を代表する円柱形の供試体に、同じく円柱形状をした凍結土を凍着させ、ひずみ速度一定でせん断力を加え

るものである。この実験では、大きく分けて①構造物側の表面粗さ、ならびに材質が与える影響、②凍結土側の材料物性が与える影響に着目して研究を行った。

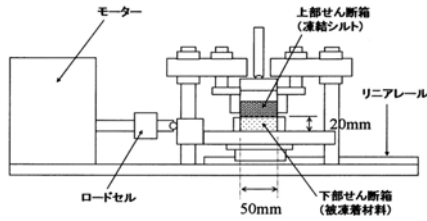


図 2 凍着せん断試験装置

(3) 複合材料構造の変形挙動評価

複合材料構造としての変形挙動評価には、①パイプラインと凍結凍土との応力伝達メカニズム、②パイプインパイプ構造による中詰材の作用と曲げ剛性向上への効果、ならびに③上記を踏まえた挙動評価モデルの確立が必要となる。

① パイプラインと凍結凍土との応力伝達メカニズム
パイプラインとフロストバルブが凍着した状態で、パイプラインに軸方向荷重を与えると、両者の界面にせん断応力が発生する。このような状態における応力ひずみ関係は、曲げを受けるパイプラインとフロストバルブの曲げ剛性評価に大きな影響を与える。両者の応力伝達性能には明確な温度依存性が見られる上、せん断応力とひずみの間には非線形性が見られることが分かっている。これらの影響を考慮できる実験装置を独自に開発して実験を行なった。これを図 3 に示す。

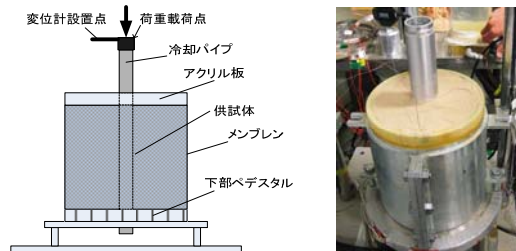


図 3 凍着強度実験モデル

この実験装置を用いて、パイプラインとフロストバルブの間で発生する応力伝達と、相対変位量から換算されるひずみを求めることとした。内部に詰める土質材料には、凍上性の高いシルト質土や、凍上しない砂などを用いて比較することとした。

② パイプインパイプの曲げ変形試験

パイプラインの周囲に砂などの可塑性材料を配置することにより、曲げ剛性と靱性の確保を図るアイデアとして、パイプインパイプ構造がある(図 4 参照)。これは、冷却ガスを流す本管の外周にもう一つの管を配置した二重管構造であり、外管と内管の間

には中詰材が充填された構造である。本研究では、中詰材に砂を用いることにより、曲げに伴う断面のつぶれ(Brazier Effect)を防止し、高いひずみレベルの変形まで追従できるようにした。さらに、この中詰材に水を充填させることにより、冷却ガスの冷熱による凍結作用を活用し曲げ剛性を制御する他、万一の破損に対しても流送ガスの漏洩を防止する機能を持たせるものである。本研究では、図 5 に示すような 4 点載荷による曲げ破壊実験装置を用いて、実験を行なった。

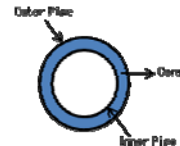


図 4 PIP 断面

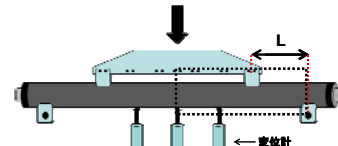


図 5 実験装置

③ 挙動評価モデルの検討

曲げを受けるパイプインパイプにおける中詰材の果たす役割は、断面内でのつぶれを内外管同士の応力伝達により防止する他、曲げ圧縮に抵抗することである。もし、中詰材が凍結している場合は、曲げ圧縮のみならず、曲げ引張応力にもある程度抵抗できるものと思われる。このような効果による曲げ強度の向上と靱性の向上効果を定量的に評価するため、数理モデルの提案を行い、実験結果と比較検証することで、解析モデルの確立を目指した。

(4) 強度管理と自己修復性評価

複合材料としてのパイプの剛性管理と自己修復性を評価するため、二つの実験的研究を行なった。一つは、構造物の表面の「ぬれ性」に関するものであり、今一つは繰返しの凍結による自己修復性の確認実験である。

4. 研究成果

(1) 凍土地帯における環境影響評価

① 永久凍土上層部の雪氷層位学的特徴

大雪山系山頂部で得られた活動層および永久凍土上層部の体積含水率および酸素安定同位体比のプロファイルを図 6 に示す。永久凍土層の酸素安定同位体比の値が、積雪の値(-10~-20‰)よりも低いことから、最終氷期の氷が保存されている可能性がある。この雪氷層位学的な特徴は、東シベリアで得られた結果と同様であった。このことは、地下水の大規模融解を遅らせる高含水率の層が 1-2m 深に存在することを示し、人的影響による永久凍土融解予測に重要な知見を与えるものである。一方、地下水の酸素安定同位体比プロファイルの特徴を用いて山岳永久凍土の融解過程を捉えられる可能性がある。

② 大雪山系山岳凍土帯の地中環境変化

永久凍土の温度モニタリングを開始して、

大雪山系の4箇所にて2~5mまでの温度プロファイルを得ることに成功している。これまでの3~5年間の地温観測からは、この1~2年で最大融解深が最大となり深部の永久凍土温度は昇温傾向を示した。さらに、メイン観測所の土壌水分は2010年シーズンに極めて高い状態に保たれていることが分かった。

③ 富士山頂における永久凍土調査の開始
 富士山頂では、2年間の温度測定を実施した結果、永久凍土の存在は確認されなかった。調査地点は、気象条件に基づく既存の分類では永久凍土が連続的に存在すると判定されるにも関わらず、地温変動が大きく融解しやすい、特徴的な凍土環境におかれていると考えられる。富士山頂における凍土を含む地中の温度変化は年変動が激しく、凍土は熱的に不安定な状態であると考えられるため、現時点で利用できる情報では近年の気候変動による富士山頂の地中環境への影響を評価することは難しい。

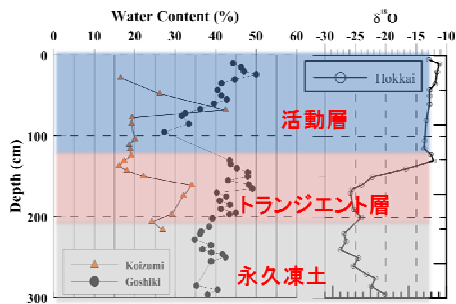


図6 大雪山系山頂部における体積含水率・安定酸素同位体比のプロファイル

(2) 凍着特性による密着性・気密性評価

① 構造物側の表面粗さ・材質が与える影響
 様々な材料の供試体を用意し、その表面性状をコピーしたエポキシ樹脂のダミー供試体とともに、凍着性能の検証を行なった。表面粗さの測定値には Ra 測定値を用いたが、両者の表面粗さに有意な差がなく、コピーの精度は比較的高い。

これらを用いた実験結果から、表面の粗さを同一にしても、また材質をエポキシ樹脂に統一しても、凍着せん断強度には違いが発生することから、これら両者の影響を受けることが確認された。

② 凍結土側の材料物性が与える影響

凍結土側の材料物性を変化させて、その凍着強度の差を見てみた。比較対象としたのは、純氷・シルト・豊浦標準砂であり、凍結土側の材料物性によっても凍着せん断強度が大きく異なることが分かり、パイプラインと凍土との一体的な曲げ剛性の向上には、周辺土の土質が因子となることが確認された。

(3) 複合材料構造の変形挙動評価

① パイプラインと凍結凍土との応力伝達メカニズム
 本実験においては、外縁での拘束条件をゴ

ムメンブレンとメタルバンドの二種類を採用し、それぞれ弱拘束、強拘束としている。また、フロストバルブを形成させるための不凍液の温度は、 -3°C から -7°C を目安に制御した。これらの実験結果を元に、パイプライン外周表面での温度と凍着強度の関係を図示したものが図7である。図から明らかなように、凍着強度は強い温度依存性を有する他、強拘束を与えた方が高い凍着強度を示している。本実験で用いた供試体材料は、凍上性の高い工業シルト(MZカオリン)を用いているため、フロストバルブの形成に伴い凍上が発生し、外縁拘束により、フロストバルブと凍結凍土の間には、パイプ半径方向の直応力が発生しているものと考えられる。これより、パイプラインと凍結凍土との間のせん断方向応力伝達には、直応力が影響していることが判明した。

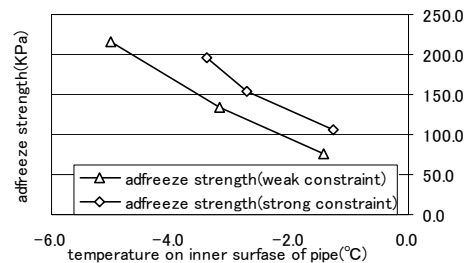


図7 温度と凍着強度の関係

こうした成果を受けて、外縁拘束の強弱、すなわちパイプラインと凍土との間の直応力の大きさが、荷重変位関係に与える影響を見たものが図8である。図から明らかなように、直応力が大きい強拘束の場合は、全体的に荷重変位関係における非線形性が高まると同時に、荷重増加に対する変位増加も抑制される傾向が見られる。また、弱拘束時に見られていた脆性的な挙動がなくなり、靱性の高い破壊挙動を示している。こうした応力伝達性状の変化は、構造物の靱性向上に重要な因子となるものと考えられる。

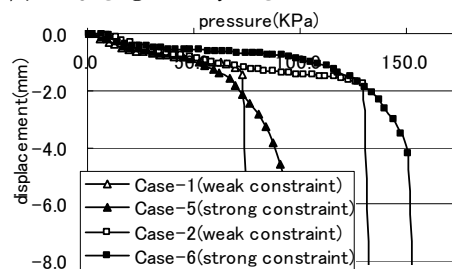


図8 拘束圧の違いによる挙動の差異

② パイプラインパイプの曲げ変形試験

図9は、4点荷重曲げ実験により得られた曲げモーメントと曲率の関係を示すものである。図中の暖色系は砂だけを充填したものの、寒色系は凍結させたものであり、図9の(a)と(b)は、凍結した中詰材の強度がひずみ

速度依存性を有していることを考慮し、荷重速度が遅い場合と早い場合に分けて示したものである。

可塑性材料を中詰材として用いると、中空の場合よりも高い靱性を発揮し、従来のパイプラインより高い曲率まで変形している。さらに、これを凍結させることで、大幅に靱性が増加することが確認された。また、荷重速度依存性も見られ、遅い荷重速度を採用した場合は、著しく曲率が大きくなる。その結果、時間的に穏やかな変形に対しては特にその効果が顕著に現われることが確認された。

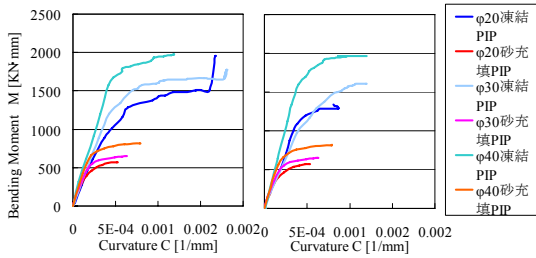


図 9 曲げモーメントと曲率の関係
(荷重速度 (a) : 0.23, (b) : 5.0 [mm/min])

② 挙動評価モデルの検討

解析対象としたのは、前述の4点荷重による曲げ変形実験のシミュレーションであり、構造と荷重の対称性より、1/4 分割モデルを採用した。可塑性の中詰材の挙動評価にあたり、引張側のパイプ軸方向のヤング係数のみを変化させる異方性を導入することで、その影響を考慮した(図 10 参照)。ここでは代表的な結果として、図 10 の断面図で円マークしてある箇所軸方向全点での外管と内管それぞれの変位を図 11 に示す。

これらの解析結果の比較から、中詰材がモルタルの場合に比べて砂や砂凍土の場合の方がより大きな変位を許すことが確認できた。特に中詰材の材質としてモルタル、砂、砂凍土の順で靱性の向上が認められ、実験結果に合致した結果が得られた。これらより、本解析モデルは可塑性中詰材を充填したパイプラインパイプの変形挙動を概ねうまく表現できているものと考えた。

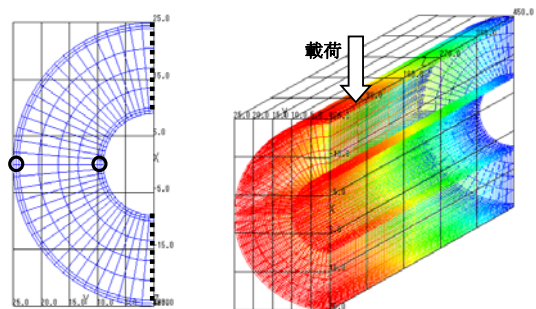


図 10 解析モデル 左：断面図 右：立面図

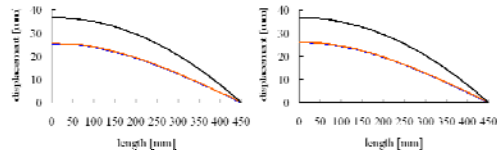


図 11 砂凍土 (左：等方性 右：異方性)

(4) 強度管理と自己修復性評価

① 構造物表面のぬれ性に関する実験

「ぬれ性」と凍着強度との関係をまとめたものを、図 12 に示す。ぬれ性は、材料表面に落とした水滴の接触角の大きさで表現され、接触角が小さければ親水性が高く、接触角が大きければ撥水性が高いことを表している。この図より、表面のぬれ性と凍着せん断強度は、材料ごとに線形的な関係を持つことが分かる。しかし、表面のぬれ性が同程度のスチール・アルミ間の凍着せん断強度を比較すると、アルミの方がスチールに比べ表面粗さが小さいにもかかわらず、大きな凍着せん断強度を示しており、構造側の材質も、凍着せん断強度に大きく影響を与えていることが分かる。したがって、高い自己修復性能を期待するためには、パイプ側の材質選定も重要であるということが判明した。

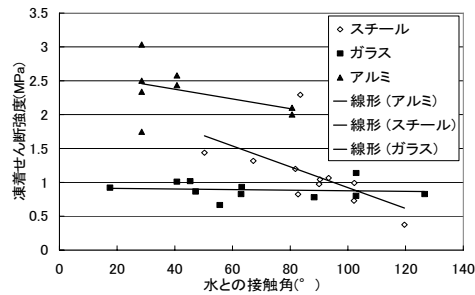


図 12 水の接触角と凍着せん断強度の関係

② 再凍結による自己修復性実験

パイプライン周辺を融解させた後、再凍結させてその自己修復性を確認した。今回の実験では、融解させる範囲をパイプ近傍のみに限って実験を行なったが、再凍結による凍着力の回復が認められ、必要に応じて融解と再凍結を促進することにより、自己修復性が得られることを確認した。

(5) 全体のまとめ

本研究の結果、中詰材に可塑性材料を用いたパイプライン構造は、高い靱性によって材料の非線形領域まで活用できる上、中詰材を凍結させることにより、凍上や融解といった比較的穏やかな環境変化に対して、さらに大きな効果をもたらすことが確認された。このようなパイプライン構造は、今後の北方寒冷域における新技術として、大いにアピールできるものと考えられる。

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9件)

- ① P. Y. Konstantinov・A. N. Fedorov・T. Machimura・G. Iwahana・H. Yabuki・Y. Iijima・F. Costard : Use of automated recorders (data loggers) in permafrost temperature monitoring (in Russian), Earth Cryosphere, 査読有, 15, 1, 23-32, 2011
- ② Kanie S., Sato M. and Akagawa S. : Adfreeze Behavior between Chilled Gas Pipeline and Surrounding Frost Bulb, Pipelines 2010, ASCE, 査読有, CD-ROM, 1350-1359, 2010
- ③ 佐藤太裕, 嶋崎健太 : パイプインパイプの軸圧縮座屈に対するコアの力学的役割, 海洋開発論文集, 土木学会, 査読有, Vol.26, pp.531-535, 2010
- ④ 所哲也, 石川達也, 赤川敏 : アイスレンズの成長を抑止した凍土透水試験法の提案, 地盤工学ジャーナル, 査読有, Vol.15 No.4, pp. 603-613, 2010
- ⑤ 池田敦・岩花剛 : 富士山頂の凍土融解過程の検討. 地学雑誌, 査読有, 119, 5, pp. 917-923, 2010
- ⑥ Lopez CML, Shirota T., Iwahana G., Koide T, Maximov,TC, Fukuda M, Saito H. : Effect of increased rainfall on water dynamics of Larch (Larix cajanderi) forest in permafrost regions, Russia -an irrigation experiment, Journal of Forest Research, 査読有, 2010
- ⑦ 佐藤太裕, 渡辺香奈, 白石圭祐, 蟹江俊仁, 赤川敏 : フレキシブルパイプインパイプの提案とその曲げ特性に関する基礎的検討, 海洋開発論文集, 土木学会, 査読有, Vol. 25, pp. 737-740, 2009
- ⑧ Kanie S., Akagawa S., Sato M. and Mikami T. : Interactive stress between Frost Bulb and Chilled Pipe by an Axis-symmetric Freezing Experiment, Proceedings of 9th international conference on Permafrost, 査読有, Vol.9, pp.895-900, 2008
- ⑨ Iwahana, G., Y. Sawada, M. Ishikawa, F. Katamura, T. Sone, T. Sueyoshi, K. Harada : Micrometeorological Measurements on Mountain Permafrost in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan, Proceedings of 9th international conference on permafrost, 査読有, Vol.9, pp.809-814, 2008

[学会発表] (計9件)

- ① 池田敦・岩花剛・末吉哲雄 : 富士山の凍土環境-永久凍土は融けたのか?あるいはなかったのか?-, 富士学会シンポジウム, 静岡県静岡市, 2010.10.16
- ② 末吉哲雄・池田敦・岩花剛 : 50cm 地温による永久凍土検出手法の数値モデルによる検証-富士山での永久凍土観測への適用のために-, 富士学会シンポジウム, 静岡県静岡市, 2010.10.16

- ③ 横井崇志, 蟹江俊仁, 西槇彦 : 凍土の圧縮強度と弾性係数・最大圧縮応力の温度依存性, 土木学会年次学術講演会, 土木学会, 札幌, 2010.09.02
- ④ 小渡知己, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川敏 : 可塑性材料を充填したパイプインパイプの曲げ挙動に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会, 土木学会, 札幌, 2010.09.01
- ⑤ Kanie S. : Sustainable Development in Vulnerable Environments: For Construction and Engineering in Permafrost Regions, (招待講演), International conference on Sustainable infrastructure and built environment (SIBE-2009), Bandung, West Java, Indonesia, 2009.11.01
- ⑥ Kanie S. : Interactive Behavior between Frost Bulb and Chilled Pipe by an Axially-symmetric Freezing Experiment, Cold Regions Engineering, ASCE, Duluth, Minnesota, USA, 2009.09.01
- ⑦ Go Iwahana 他8名 (招待講演) : Influence of increased rainfall on the hydrological and thermal conditions of the active layer in a larch forest, 日本地球惑星科学連合2009年大会, Yakutsk, Russia, 2009.05.21
- ⑧ 白石圭祐, 佐藤太裕, 嶋崎賢太, 蟹江俊仁, 赤川敏 : 可塑性材料を充填した鋼管の曲げ特性に関する基礎的検討, 第63回土木学会年次学術講演会, 宮城県仙台市, 2008.09.12
- ⑨ 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏, 横山正臣, 軸対称凍結モデルによるフロストバルブとパイプとの凍着強度特性, 第63回土木学会年次学術講演会, 宮城県仙台市, 2008.09.10

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蟹江 俊仁 (KANIE SHUNJI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号 : 10332470

(2) 研究分担者

赤川 敏 (AKAGAWA SATOSHI)
北海道大学・大学院工学研究科・特任教授
研究者番号 : 90360932

三上 隆 (MIKAMI TAKASHI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号 : 00002303

岩花 剛 (IWAHANA GO)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・特任助教
研究者番号 : 70431327

佐藤 太裕 (SATO MOTOHIRO)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号 : 00344482