

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21310106

研究課題名（和文） 複雑条件下における不整地盤上作業機械・人間系の転倒安全快適確保システムの構築

研究課題名（英文） Construction of Comfortable System to Secure the Tipping Safety of Off-Road Working Machinery-Man System under Complex Conditions

研究代表者

阿部 雅二郎（ABE MASAJIRO）

長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授

研究者番号：60212552

研究成果の概要（和文）：不整地盤上作業機械とその運転者である人間よりなる系において、複雑条件下の機械転倒安全性を快適に確保するシステムの構築を目的に、運転室シミュレータと小型クローラクレーンおよびその支持地盤モデルよりなるリアルシミュレータに加え、クレーン-支持地盤系のバーチャルシミュレータを開発した。これらシミュレータより機械の転倒限界状態近傍における運転者の運転・生体特性と機械およびその支持地盤挙動との相関関係を総合考察し、転倒安全快適確保のための基本原理を示した。運転支援システムの試作および有用性確認も実施した。

研究成果の概要（英文）：For systems consisting of off-road working machinery and man, that is driver of the machinery, to construct a comfortable system to ensure the tipping safety under complex conditions, we developed a real simulator composed of driving cabin, small crawler crane and its supporting ground and also a virtual simulator for crane-its supporting ground system. By using these simulators, in conditions close to the tipping limit state, interrelations between driving and vital characteristics of drivers and the dynamic behavior of machine and ground were analyzed synthetically and a fundamental principle to ensure the tipping safety with comfortable usage was described. A driver support system was made on a trial basis and the availability was investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	3,200,000	960,000	4,160,000
平成22年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
平成23年度	1,600,000	480,000	2,080,000
平成24年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 社会システム工学・安全システム

キーワード：安全工学、機械力学・制御、シミュレータ、建設機械、不整地盤

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の社会的背景

図1に示すような多様な不整地盤上にて作業する機械が一般的な土木、建築工事から、

防災工事、災害時の救援および復旧工事に至るまで幅広い分野において活用されている。これらの機械による重大事故として、転倒事故が問題となるが、転倒に関する問題の科学的究明は十分ではなく、関連安全装置の革新も進んではいない。

機械、それを支える不整地盤およびこれらを取り巻く周辺環境の挙動が“複雑”な場合、それらを機械運転者は予測、予想し難く、時にはパニック状態となり転倒事故が発生しやすい。「経験の浅い機械運転者」や「災害時等の不慣れでかつ緊迫した条件下での機械使用」の増加により、“複雑”で機械運転者に負担の大きい条件下（以降、「複雑条件」と呼ぶ）における安全性確保の問題解決は焦眉の急である。



図1 不整地盤上作業機械の代表例

(2) 研究の学術的背景

作業機械の転倒安全性に関する研究として、国内では玉手らの「支持地盤の脆性的破壊沈下による移動式クレーンの転倒危険性」がある。転倒時の複雑な地盤破壊を考慮した注目すべき研究であるが本研究対象のクローラ支持と異なりアウトリガ支持の場合を対象とした実験研究である。海外では Towarek らの「Dynamic stability of a crane standing on soil during the rotation of the boom」があり、移動式クレーン旋回時の動的転倒安定性に土質地盤の影響を考慮し考察した貴重な研究例だが限られた土質地盤を対象としている。

不整地盤上で作業する機械を対象にした各種研究をもとに設定され社会的影響の大きい転倒安全性に関する公的基準として、代表的なものでは、国内には「移動式クレーン構造規格」、国際的には ISO4305「Mobile crane -Determination of stability」がある。転倒防止等のために既存機械には安全装置として過負荷防止装置が備えられている。しかし、いずれも基本的に不整地盤挙動の複雑性を無視した水平で堅固な地盤上での作業を前提とし、地盤の変形等の影響は考慮されず、規定化、製品化されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、不整地盤上のような複雑条件下においても、転倒事故を限りなく少なくし、万一発生してもその被害を最小

限に留めることができる快適な安全確保システムを構築することである。これをこれまでの研究により構築しつつある「不整地盤上作業機械のための転倒安全確保システム」を基盤にして発展、高度化させ達成しようとするものである。

3. 研究の方法

背景や研究目的に述べた複雑条件の基本となる代表的な複雑性として、I：機械操作の複雑性、II：不整地盤の複雑性および III：周辺自然環境の複雑性がある。本研究では、I 及び II、特に I の複雑性に注目して条件設定できるシステムを新たに設計開発し、本システムを活用して不整地盤上作業機械の複雑条件下における転倒安全性に関する特性を総合的に解析考察する。

本研究では、不整地盤上作業機械の複雑条件下での転倒安全性を解析するため、図2に示すリアルシミュレータシステムを中核とし、バーチャルシミュレータと統合するハイブリッド安全シミュレータシステムを独自に設計開発する。リアルシミュレータでは、図3に示す「6自由度モーションシステムで運動制御される運転室モデル」および図4に示す「作業機械モデル」の解析システムにより各種の計測解析を行う。

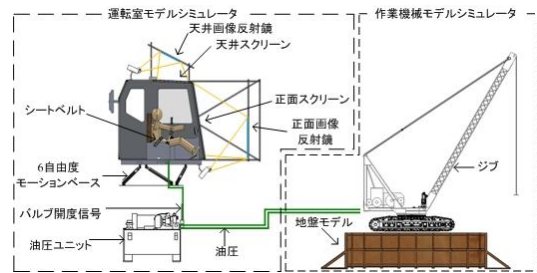


図2 リアルシミュレータシステム

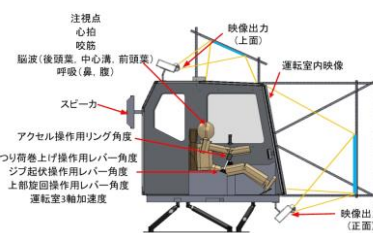


図3 運転室モデル解析システム

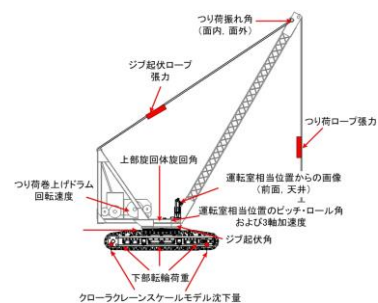


図4 作業機械モデル解析システム

(1) 「機械操作の複雑性」に関する解析方法

図4に示した作業機械モデルは、転倒時の周辺環境への被害規模が大きいこと、つり荷三次元的振れを伴う挙動が複雑であるため安全システムの構築が容易ではないことからクローラクレーンモデルとする。国際規格にも定められた複合操作条件での解析が可能な解析システムを設計開発する。クローラクレーン下部走行体モデルは実機クローラクレーンに近い仕様へと改良し、より実機に近い条件での実験解析を可能とする。また、複合操作下の本格実験時安全確保のため、実験解析システムのリスクアセスメントを実施しインタロックシステム等を備える。クローラクレーンでの成果は挙動の複雑性が少ない他の不整地盤上作業機械へ応用可能である。

図3に示した運転室モデルに搭乗する運転者が図4に示した作業機械モデルを連動システムを介して操作する。複合操作等する機械の転倒限界状態を超過する前後において機械の各部の挙動や各部に作用する荷重を測定し解析する。

(2) 人間すなわち機械運転者の運転特性および生体特性の解析方法

図3に示した運転室モデルに搭乗する運転者において、作業機械が転倒限界状態を超過する前後に注目し、運転特性として「操縦特性、行動特性および注視点特性」を、生体特性として「脳波、心拍数、呼吸および筋肉活動の変化特性」をそれぞれ計測し解析する。

(3) 「不整地盤の複雑性」に関する解析方法

実用上重要であるがほとんど研究されていない鋼板補強した軟弱地盤のモデルを設計製作する。地盤材料には実際の作業地盤環境に多い火山灰質粘性土および砂質土を用いる。土槽の設計においては、有限要素法による詳細解析によって、強度の照査以外にクレーン荷重により生じる地盤内応力に土槽の側壁面および底面の影響が出ないことを照査し寸法等を決定する。

不整地盤モデルでは作業機械モデルからの負荷による沈下量や地盤内圧力を測定し解析する。

4. 研究成果

(1) 「機械操作の複雑性」に関する解析

①クレーン動特性

予備解析として転倒安全性が問題となるクレーンの単一操作であるジブ起伏操作作業を対象にリアルシミュレータを用いて前方ぶりおよび側方ぶりの状態で実験解析した。図5に一例を示すように、クレーン転倒過程において、ピッチング等の機体挙動に比

べ下部転輪荷重の変化は早くに出現した。転倒予兆をできるだけ早期に検知するには下部転輪荷重の計測が有効であることを示した。

次に、「機械操作の複雑性」に関する解析として、クローラクレーンの代表的な複合操作作業である「つり荷巻上げとジブ起伏」、「上部旋回とジブ起伏」および「つり荷巻上げと上部旋回」の3種類を対象に実験解析した。同解析実施のためクレーンモデルへの複合操作指令を送るLabVIEWプログラムも開発した。実験解析より以下のことを示した。「つり荷巻上げとジブ起伏」複合操作時においてジブ伏せ操作中に同操作を急停止すると面内方向のつり荷の振れを助長し、静的な転倒限界状態に至る前であってもクレーンが転倒することがある。また、前方つりでの「つり荷巻上げとジブ起伏」および「上部旋回・ジブ起伏」複合操作時においてジブ伏せ速度が一定速度より速いと機体ピッチング角が大きく変化し、面内方向のつり荷振れを助長することがある。「上部旋回とジブ起伏」および「つり荷巻上げと上部旋回」複合操作時においては旋回速度が遅い場合、面外方向のつり荷振れは小さく、転倒安定性への影響は少ない。

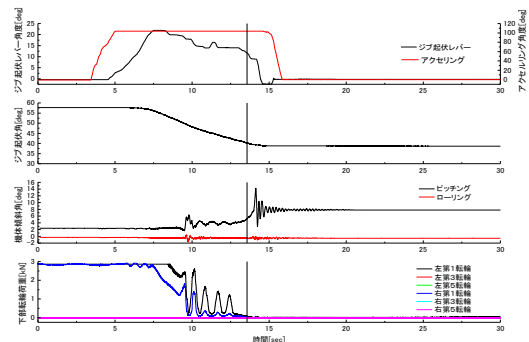


図5 ジブ起伏運転特性とクレーン動特性の関係

②下部転輪荷重を用いた転倒安定度の評価

転倒安定度を定量的に評価する指標として、転輪荷重の測定値より算出する地盤反力中心を用いる方法を提案した。

前方ぶり、側方ぶりでつり荷巻上げまたはジブ起伏操作を単独実施する場合、旋回操作を単独実施する場合、さらに2操作同時に実施する場合を対象に下部転輪荷重を左右クローラの前・中心・後方にある6つの転輪で測定した。

このような下部転輪に作用する荷重による地盤反力中心位置の算出が、転倒安定度の定量評価に有用であることを示した。

(2) 人間すなわち機械運転者の運転特性 および生体特性の解析

運転初心者にとって転倒安全性を確保しつつ作業するのに負担の大きい複雑条件のひとつとして、運転者への要求課題を与え実験解析した。

- ・荷を初期位置よりつり上げ、できるだけ早く正確に目標位置へ移動させる。
 - ・荷振れを抑え、転倒、障害物への接触のない安全な作業をする。
 - ・最低1回は同時2操作の複合操作を行う。
- 上記要求課題達成度を移動式クレーン運転士実技試験の減点対象および失格基準項目をもとに点数評価した。

要求課題達成度の点数が最も低く、大きな荷振れや障害物への接触を起こし、クレーンが転倒限界状態に近づく危険な状態になった運転者Aと、レバー操作ミス等が少なく要求課題達成度の点数が最も高かった運転者Bの運転特性等に注目し解析考察した。この特徴ある結果を比較し、複雑条件下における「運転者の運転特性、生体特性」および「つり荷及びクレーン挙動等」をそれぞれの相関関係を含めて求め考察した。主な結果は以下の通りである。

① 運転者操作特性および機体挙動の関係

図6に各レバー操作量について、図7に機体傾斜角についてそれぞれの時間変化を示す。(a)、(b)はそれぞれ運転者AおよびBの結果である。図6において、つり荷巻上げ、ジブ起伏、旋回の各レバー操作量 L_h 、 L_j 、 L_s の+/-はそれぞれ、つり荷巻上げ/下げ、ジブ起こし/伏せ、右旋回/左旋回に対応している。図7では、ジブが向いている方向に対してピッチ角 θ_p は前方、ロール角 θ_r は右方向への傾斜を正とする。また、図中の Δt_s 、 Δt_o 、 Δt_i はそれぞれ、最大荷振れが発生した近傍時間、障害物近傍時間および転倒限界状態近傍時間を表わしている。

図6の(a)、(b)に示すように、 Δt_i が存在する運転者Aでは、 Δt_i がなく目標地点までつり荷を運べた運転者Bに比べ、1sec以内で50%以上変化量のあるレバー操作が多く見られる。図7(a)より、 Δt_s での機体傾斜角が $-5 \sim +9 \text{deg}$ の範囲で変化している。その最大値(絶対値)はクローラクレーンモデルが転倒限界状態になる機体傾斜角に近い。図7(b)より運転者Bでは、1sec以内で50%以上の変化量のあるレバー操作は少なく機体揺れが小さい。

② 運転者の咬筋活動強度および注視点特性

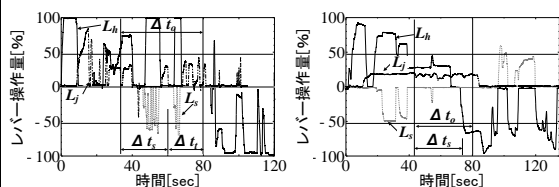
図8に生体特性のひとつである咬筋活動強度について、図9に運転者注視点の移動特性として、運転者の上下、左右方向の視線角度についてそれぞれの時間変化を示す。

図9では、左右方向をX、上下方向をYとし、上方向、右方向をそれぞれ正としている。

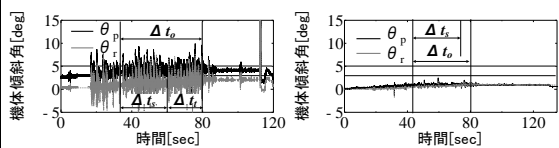
図8の(a)と(b)に示すように運転者AおよびBともに常時25%前後の咬筋活動強度が出ている。これは緊張により無意識に咬筋に力が入ったためであると考えられる。

要求課題達成度の高い運転者Bは、図8(b)より運転者Aに比べ50%を超える咬筋活動強度が多く出ている。集中して周囲や障害物への注意をはらいながら微調整の難しい旋回操作を行う作業によって強い緊張状態にあったと考えられる。図9より全体を通して注視点の移動が多く、特に Δt_o での注視点の移動が多く、障害物通過時に障害物およびつり荷の両方へ繰り返し注意をはらったことを示している。

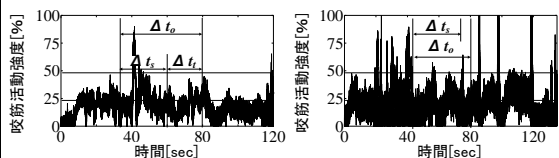
一方、要求課題達成度の低い運転者Aは、図9(a)と(b)を比較すると、運転者Aの上下左右ともに 25deg 以上の視線角度の変化(画像システムのスクリーン端までの視線移動)が運転者Bに比べ少ない。自動車の初心者運転でも見られるように、周囲への注意が不十分で視線が一点に集中しやすい傾向を示していると考えられる。注視点と視野映像より解析して求めたつり荷位置での注視点停留時間割合は、障害物近傍時間の Δt_o において運転者Aは約70%となり、運転者Bのそれより約10%高かった。運転者Aはつり荷に注意が集中しすぎ、障害物回避へ対応できず荷振れを大きくし、転倒限界状態にクレーンを近づけたと考えられる。



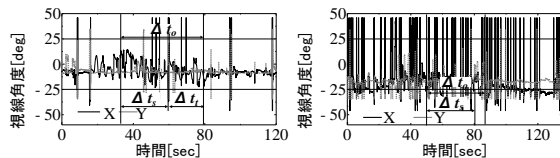
(a) 運転者A (b) 運転者B
図6 つり荷巻上げ L_h 、ジブ起伏 L_j 、
旋回 L_s のレバー操作量時間変化



(a) 運転者A (b) 運転者B
図7 機体ピッチ角 θ_p 、ロール角 θ_r の
時間変化



(a) 運転者A (b) 運転者B
図8 咬筋活動強度の時間変化



(a) 運転者 A (b) 運転者 B
図 9 視線角度の時間変化

(3) 「不整地盤の複雑性」に関する解析

図 11 に示すような不整地盤モデルを構築した。土槽内部の地盤材料には不整地盤の代表である火山灰質粘性土を用いており、粒径や含水比等を調整し通常の現場で存在する地盤条件での実験が可能となった。内部には土圧計を設置することで、リアルシミュレータを用いた実験中の地盤内応力を測定することができる。また、地盤材料上に鋼板を設置することで鋼板補強の有無によるクレーン動特性および地盤特性を測定することができる。

クローラクレーンモデルおよび新たに設計製作した鋼板補強した軟弱地盤モデル上においてつり方向を変化させる実験解析より、クレーンの転倒安定性に関する鋼板補強の影響を考察した。比較のため鋼板補強無しの場合についても同様な条件で実験解析した。クレーン作業条件は、現場の作業を想定した「つり荷巻上げとジブ起伏」複合操作による繰り返し荷役作業とした。

前方つりにおいて、クレーン支持鋼板に作用するクローラ荷重が支持地盤内のクローラ幅と等しい深さまで伝達される作業条件下では、その深さ地点における鉛直圧力はクローラ直交方向にほぼ等分布した。

図 10 は鋼板補強した軟弱地盤における繰り返し荷役作業による鋼板沈下量を示している。N 値が 3 未満の火山灰質粘性土において同一の荷役作業を繰り返す場合、鋼板すなわち地盤の沈下は 2 回の作業でほぼ収束する傾向を示した。さらに、測定した下部転輪荷重より算出予測した地盤反力中心の位置の妥当性を、地盤内圧力より算出した地盤反力中心の位置と比較し確認した。

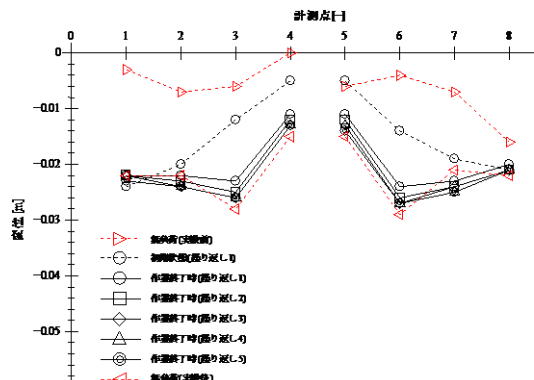


図 10 鋼板沈下量の変化

(4) 実験解析システムの再構築

本研究を通して、図 12 に示すようにクローラクレーンモデルの新たな下部走行体を設計開発し、より実機に近い条件での実験が可能となった。新下部走行体は、各メーカー規格に対応できるように下部転輪位置等の調節機構が備えられている。

また、複雑条件下での実験時における安全確保のために、図 11 に示すようにクローラクレーンモデルおよび不整地盤モデルと実機運転室シミュレータ周辺に防護柵を設置した。入口にはインタロックシステムを導入し、実験中の危険領域から実験従事者を隔離するシステムを構築した。運転室シミュレータに搭乗する運転者の固定が完了していなければシミュレータは作動せず、実験中の運転者および実験従事者の安全性を向上させた。

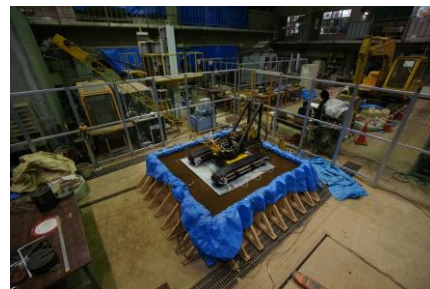


図 11 インタロック付安全防護柵内にて不整地盤モデル上設置のクレーンモデル



図 12 クローラクレーンモデル新下部走行体

(5) クローラクレーン三次元バーチャルシミュレータの基盤構築

図 13 に示すようにクローラクレーンのつり荷、ワイヤーロープ、ジブ、上部旋回体および下部走行体をモデル化し、作業地盤との

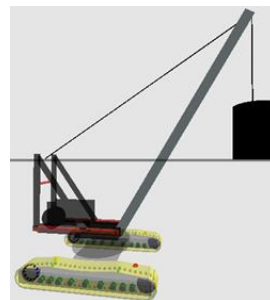


図 13 三次元バーチャルシミュレータモデル

相互作用を考慮できる三次元バーチャルシミュレータの基盤を構築した。

(6) 人にやさしい、人の求める快適な転倒安全確保システム

複雑条件下における「人にやさしい、人の求める快適な転倒安全確保システムの基本原理」を実用上重要な条件のもと提案するため、鋼板補強地盤上に設置したクローラークレーンモデルを運転初心者が障害物回避を含め、「つり荷巻上げと上部旋回」、「つり荷巻上げとジブ起伏」および「上部旋回とジブ起伏」の複合操作する場合の実験解析を実施した。機械が転倒限界状態を超過する前後における「運転者の操縦特性、行動特性および注視点特性」、「運転者の心拍数、呼吸等の生体特性」および「機械動特性」の相関関係について、(2)に示したように解析考察した。さらに、(5)に概要を述べたマルチボディダイナミクスに基づくバーチャルシミュレータによる解析考察結果とも総合し、快適に転倒安全を確保するには、機械の転倒安定状態を作業中リアルタイムに高精度に把握し機械側での転倒回避制御に用いること、運転者へ機械の転倒安定状態を直感的にわかりやすく提示することが重要であることを示した。

以上のことを踏まえ、運転者への機械の状態提示システムとして図14に示すような下部転輪荷重の測定値から算出できる転倒安定度を提示するシステムを試作し、その有用性を評価した。要求課題達成度の向上や迷い操作回数の低減が認められた。

試作した機械状態提示システムにより、転倒限界状態の超過やパニック状態の回避等が期待できるが、作業効率の低下を招かず、運転者の快適性も追求する必要がある。

今後は、機械側の転倒回避システムと機械の状態提示システムの統合システムの開発等へとさらなる発展を図る予定である。

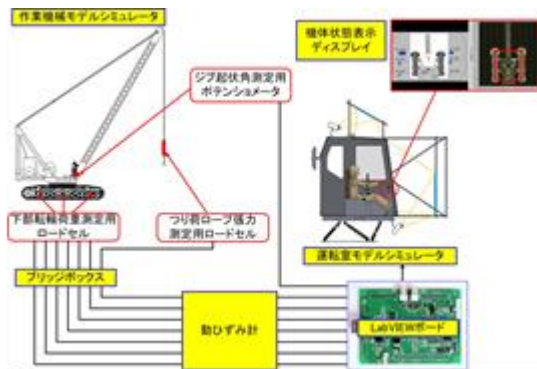


図14 下部転輪荷重を利用した運転支援システムの概要

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)

[学会発表] (計4件)

- ① 阿部雅二郎、高橋翼、藤野俊和、山口祥、複雑条件下におけるクローラークレーン-人間系の転倒安全性に関する基礎実験解析、日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会、平成25年3月9日、福井大学
- ② 仲川力、阿部雅二郎、藤野俊和、クローラークレーンの三次元バーチャルシミュレータによる荷役作業解析(ジブ起伏時におけるクレーンの動特性)、日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会、平成25年3月9日、福井大学
- ③ Tomohiro Imai, Masajiro Abe, Toshikazu Fujino, Virtual Simulator Aided Design of Crawler-type Working Vehicle-Terrain System, Proceedings of the 1st International GIGAKU Conference in Nagaoka, 2012.2.4, Nagaoka University of Technology
- ④ 阿部雅二郎、内田裕也、藤野俊和、遠藤広樹、複合操作時クローラークレーン-人間系の転倒安全性解析用リアルシミュレータの開発、日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会、平成23年3月5日、信州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 雅二郎 (ABE MASAJIRO)
長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授
研究者番号：60212552

(2) 研究分担者

丸山 暉彦 (MARUYAMA TERUHIKO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：30016646
杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：50196755
志田 敬介 (SIDA KEISUKE)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：40365028
仲川 力 (NAKAGAWA CHIKARA)
舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授
研究者番号：70249811
藤野 俊和 (FUJINO TOSHIKAZU)
長岡技術科学大学・工学部・助教
研究者番号：70508514