

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 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22380137

研究課題名（和文）コンバインにおける選別システムのモデリングと最適化に関する研究

研究課題名（英文）Modeling and Optimization of Cleaning System in Combine Harvester

研究代表者

井上 英二（INOUE EIJI）

九州大学大学院・農学研究院・教授

研究者番号：00184739

研究成果の概要（和文）：コンバインの選別性能向上のため、選別部の穀粒収支モデルを立案し、実験によって2番還元率と穀粒損失率を求めた。その結果、2番還元率は揺動選別装置上の流量が大きくなると一定値に収束し、穀粒損失率は揺動選別装置の流量増加に伴って減少した。一方、揺動選別装置上の穀粒の挙動を明らかにするため、複数粒子結合によるDEMモデルを立案し、安息角の検証を行ったところ、7粒子結合モデルが有用であるという結果を得た。

研究成果の概要（英文）：For improving cleaning efficiency of combines, the grain flow model was devised, and the return rates from 2nd auger and grain losses were measured by experiments. As a result, the return rates were converged to the steady value with increasing flow on the cleaning shoe, and the rates of grain losses were decreased. On the other hand, in order to clarify the behavior of grains on the cleaning shoe, the DEM model by coupling spheres were devised, and it was verified by repose angles. Taking these results, it was obtained that 7 particles coupling element was appropriate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業環境・情報工学

キーワード：生物生産システム

1. 研究開始当初の背景

脱粒、選別および回収を行う脱穀部内の穀粒の流れについては、過渡状態の制御（姚他、農機誌、2007、2008）や推定（Maertens, et., al. J. agric. Engng Res. 2001）を行った報告が見られるが、定常状態に収束する時系列シミュレーションが確立されたとは言い難い。その理由として、選別部内の穀粒の状態、および時間遅れを伴った2番還元がシステムに

複雑さを与えていることが考えられる。また、作物、機械条件によって、2番分配率が変動しているため、条件の特定やサンプリングが困難になっていることなどが挙げられる。

したがって、穀粒損失の低減と選別品質の向上を実現するためには、脱穀部内の穀粒の流れをシステムと捉え、1番揚穀装置や2番還元装置における流量と、揺動選別装置の移送分離状態を測定してパラメータを明らか

にし、シミュレーションを可能にすることが必要である。

これまで、籾と藁の抗力係数・揚力係数を実験的に明らかにし、立案した運動方程式に適用し、籾と藁の飛行特性を把握してきた(松井他, 農機誌, 2003, 2004)。また、唐箕ファンから送り出される風速分布を粒子画像流速測定法(PIV)と有限体積法(FVM)を用いて明らかにし(松井他, 農機誌, 2005), その選別風の場合に連続して供給落下する籾や藁の運動に個別要素法(DEM)などの手法を用いて、実験的および力学的に飛行軌跡を解明する(古野他, 農機誌, 2006)など、選別に関する研究成果を得た。

しかしながら、一部の水稻品種における実作業では被選別物が揺動選別装置上に堆積し、正常な状態での選別が不可能になる場合がある。このような現象が発生した場合、穀粒選別損失が増加し、選別品質も著しく低下する。このことは、揺動選別装置において2番分配率が高くなるために、時間と共に循環過多状態に移移していくことによるものと考えられる。そこで、連続作業を行った場合の揺動選別装置、1番揚穀装置、および2番還元装置の穀粒流量と、穀粒選別損失がどのように変化していくのかについて、数学モデルを構築するとともに、時系列シミュレーションを行うことが重要であると考えられる。

2. 研究の目的

既往の研究で、選別装置の性能評価を行ったり(Boyce1974, Hamilton 1979a,b), 精密農業での利用を目的とした穀粒流れのモデル化やシステムとしての応答特性についての検討が行われているが(Maertens2001a,b, Whelan2002, Yong2007, Iida2008), 穀粒損失に対する2番還元の影響に注目した研究は少ない。本研究では、穀粒収支モデルの改良を行うとともに、市販の自脱コンバインを用いた選別システムを構築し、籾のみを投入して穀粒流量を様々に変化させたときの2番分配率および穀粒損失率を測定して、2番還元が選別損失に与える影響について考察した。

次に、揺動選別装置上の穀粒の流下特性を検討するため、穀粒の物理特性を調べてDEM解析を実施するとともに安息角の測定実験を実施し、妥当性の検証を行った。岡安らは、個別要素法を用いて穀粒群の3次元運動解析を行っており、籾を球体としてパラメータを変化させて適用することで、一定の成果を得てきた。しかしながら、これらの解析では穀粒のモデル形状が球であるために、堆積した状況を精度良く再現することは難しいという問題があった。一方、Renらは、トウモロコシの粒子を複数の球を結合して異方性を持つモデルとし、衝突や接触について

論じている。そこで、本研究では、穀粒の堆積状況を精度良く再現するために、個別要素法を用いて、複数粒子を結合した籾のモデルを提案し、その安息角について、汎用の個別要素法コード(ITASCA社製, PFC3D)を用いたシミュレーションを実施した。同時に、実際の籾を用いて、漏斗法と円筒法2種類による安息角の測定を実施し、その整合性について検討した。

3. 研究の方法

(1) 穀粒収支モデル

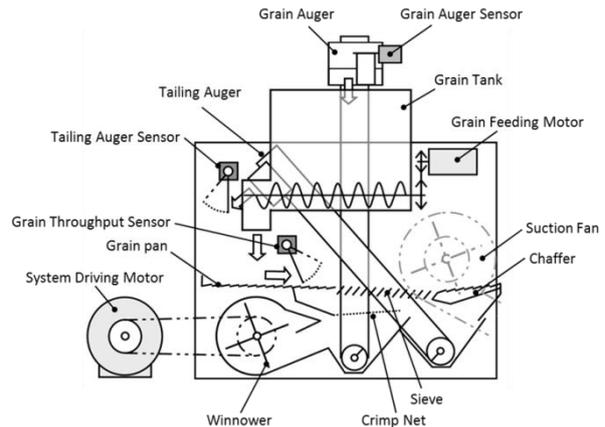


図1 選別実験装置

コンバイン選別部実験装置を図1に示す。揺動選別装置、および1番オーガ、2番オーガの各流量を測定するため、揺動選別装置前方の移送棚終端中央、1番揚穀オーガ吐出口、2番揚穀オーガ吐出口にポテンショメータを設置した。揺動選別装置および1番オーガについては、吐出する穀粒の流下層厚を測定するアクチュエータを取り付けた。2番オーガについては、吐出口から排出される穀粒がアクチュエータに衝突して変位する構造とした。各センサからの出力電圧はデータロガーを用いて4ms毎に記録した。

各部の流量については、脱粒された穀粒の供給量(ホップからの供給量)を $q(t)$ 、揺動選別装置上の流量を $q_g(t)$ とし、1番オーガ出口での流量を $q_1(t)$ 、2番オーガ出口での流量を $q_2(t)$ 、穀粒損失の流量を $q_3(t)$ とした。

このときの2番分配率は、時刻 t における揺動選別装置上の流量の関数として $\alpha(q_g(t))$

で表し、同様に穀粒損失率は $\beta(q_g(t))$ とした。

式(1)~(5)に改良した穀粒収支モデルを示す。搬送による時間遅れについては、揺動選別装置上の流量測定時刻を基準として、1番ラセン放出口までの時間遅れを Δt_1 、2番オーガ出口までの時間遅れを Δt_2 、選別損失となる機外排出までの時間遅れを Δt_3 とした。

$$q(t) + q_{2(t-\Delta t_2)} = q_g(t) \quad (1)$$

$$q_g(t) = q_{1(t+\Delta t_1)} + q_{2(t+\Delta t_2)} + q_{3(t+\Delta t_3)} \quad (2)$$

$$q_{1(t+\Delta t_1)} = (1 - \alpha_{(q_g(t))} - \beta_{(q_g(t))}) \cdot q_g(t) \quad (3)$$

$$q_{2(t+\Delta t_2)} = \alpha_{(q_g(t))} \cdot q_g(t) \quad (4)$$

$$q_{3(t+\Delta t_3)} = \beta_{(q_g(t))} \cdot q_g(t) \quad (5)$$

(2) 複数粒子結合粉の DEM モデル

粉や藁層は生物体であり物性値はある程度の範囲で変化している。粉体や流体を個別要素法で再現する場合、この物性値が重要になる。本研究では、粉の特性を把握するために、粒子形状や他のパラメータに左右され、また、一般的に粉体特性の表示に用いられることの多い安息角を用いた。一般に安息角は、構成粒子の粒度が大きいほど、より角張っているほど大きくなる。本研究では、2つの異なる注入法を用いて安息角を比較し、粒子挙動を高速度カメラで撮影した。

安息角の値は同じ試料でも測定方法によって結果が異なるため、DEMシミュレーションを考慮して注入法で行うこととし、漏斗を用いた方法（以下漏斗法、図2）と、円筒を用いた方法（以下円筒法、図3）の2種類について行った。

安息角測定における外乱を小さくするため、粉には枝硬の付着が少ないものを実験に供試した。水分は、乾燥したものと（1.6%）、水に漬けて含水率を上げたもの（18.9%）、天日干して外面のみ乾燥させたもの（12.9%）の3種類で行った。



図2 漏斗法による安息角生成



図3 円筒法による安息角生成

複数の粒子はグループ化し、剛体として働く結合要素を生成することができる。結合要素の内部接触は計算を省略する一方、外部との接触は通常通りの計算を行う。したがって、結合要素は、作用力で破壊されずに、境界面が変形した剛体としてふるまう。

粉のモデルは、PFC3DのCLUMP機能を用いて、3粒子、5粒子、7粒子を結合させることで作成した（図4）。モデルパラメータは既往の研究成果から設定した。

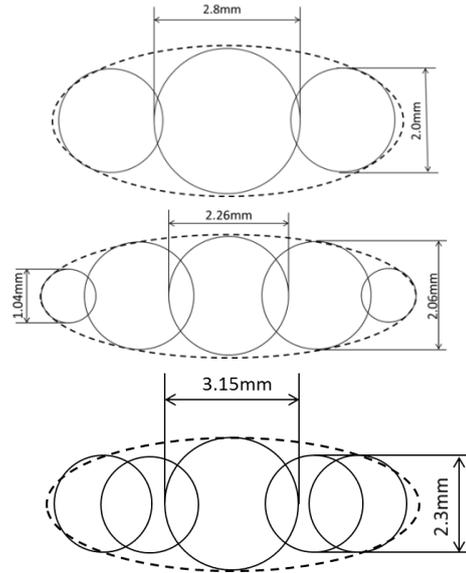


図4 結合要素による粉モデル

4. 研究成果

(1) 穀粒収支モデル

① 時系列データの取得

穀粒収支モデルに基づいて時系列シミュレーションを行うには、2番還元率及び選別損失率の供給流量に対する変化の傾向を明らかにする必要がある。このことから、穀粒供給流量を変更して各部の流量を測定し、時系列データの取得を行った。

実験では、粉を所定の流量で20~30秒の間供給し、1番吐出口、2番吐出口、揺動選別装置上の各センサ電圧をデータロガーに記録した。穀粒損失は3番口から排出された穀粒を実験毎にネットで回収して計量した。各条件について3回の計測を行った。

供試機の作業条件は、収量825kg/10aとした場合、穀粒流量は347g/sとなるが、実際の作業では藁層も含まれ、畔際での条数増も考慮して、最大流入量を600g/sとした。また、回向を想定して、穀粒供給開始後60秒で一旦穀粒供給ラセンを停止し、10秒後に同条件で更に60秒間穀粒を供給した。供給停止後は、120秒間データの取得を行った。

図5に揺動選別装置上、1番吐出口、2番吐出口の各流量の時間変化を示す。

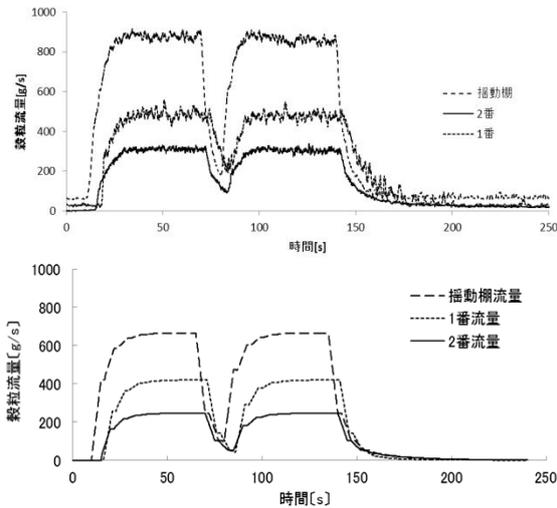


図5 各部の流量 (上:実験, 下:シミュレーション)

穀粒の投入を開始すると揺動選別装置上のセンサの流量が上昇し、1番ラセンと2番ラセンに穀粒が分離され、1番吐出口まで5.5秒、2番吐出口まで5.0秒で到達している。

図5から実験結果とシミュレーション結果が良く一致していることが判る。

② 2番分配率と穀粒損失率

2番還元をしない場合の穀粒損失率について測定を行った。2番吐出口からの穀粒は機外に取り出し、揺動選別装置上への還元を行わない状態で2番分配率と穀粒損失率を測定した。2番吐出口からの穀粒質量と測定時間から2番分配率を求めた。2番吐出口からの還元は行っていないため、供給ラセンの粗供給量を揺動選別装置の流量とした。供給流量と選別損失の関係を図6に示す。

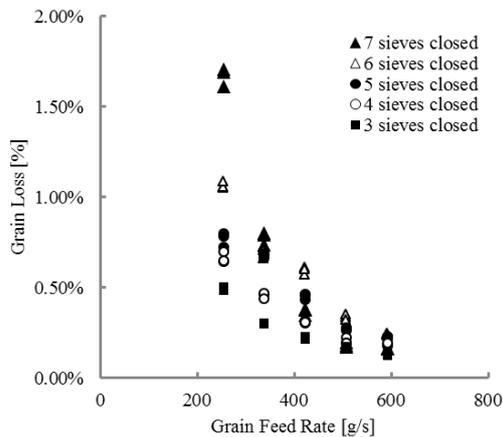


図6 供給流量と選別損失の関係

図6より、チャフシーブの塞ぎ枚数が多くなるほど穀粒損失が大きくなることがわかる。また、チャフシーブを塞ぐ枚数に関わらず、粗供給量を増やすと穀粒損失率は減少する傾向がみられた。揺動棚流量 250g/s～600g/s の範囲では、揺動棚流量が増えることで穀粒損失率が增加するという現象はみられなかった。

③ 2番還元率と穀粒損失率

次に通常通り2番還元を行った場合の穀粒損失率について測定を行った。2番吐出口センサの電圧から求めた2番還元量と供給モータ回転数より求めた供給量を加えた値を揺動選別装置の流量とした。供給流量と選別損失の関係を図7に示す。

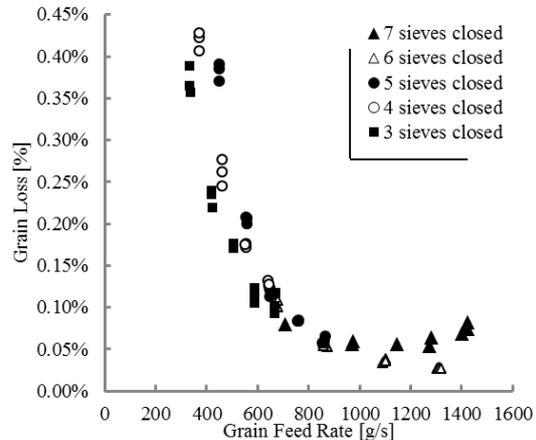


図7 揺動選別装置流量と選別損失の関係

実際の収穫作業では、揺動選別装置流量が増えると損失も増大する。本実験では、図10からわかるように揺動棚流量が1000g/sまで選別損失率は減少傾向にあった。本実験では実験条件の単純化のため穀粒のみを供給したが、実際の収穫作業時には穀粒と藁屑の混合物が揺動棚上に供給される。穀粒のみを供給した場合、藁屑と混ざりあった場合に比べて、揺動棚上での粗の挙動に違いが生じたものと考えられる。

④ 摘要

本研究では、穀粒収支モデルの改良を行うとともに、市販の自脱コンバインを用いた選別システムを構築し、粗のみを投入して穀粒流量を様々に変化させたときの穀粒損失率を測定して、2番還元が選別損失に与える影響について調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- ・各部の流量は改良モデルを用いたシミュレーション結果と良い一致が見られた。
- ・揺動選別装置の流量が低いときに選別損失率は高く、流量が増加すると減少し、一定値に収束する。
- ・穀粒のみを用いた実験においては、揺動棚流量の増加によって選別損失が増加する現象は確認できなかった。

(2) 複数粒子結合粗の DEM モデル

① 実験・解析条件

既往の研究では、球を粗として解析を行ってきた。そこで本研究では、実際の粗の形状を考慮した解析を行うため、個別要素法を使った結合要素による粗モデルを作成した。本モデルを用いて安息角測定実験を再現し、安

安息角測定の実験結果と比較することで、その妥当性について検討を行った。

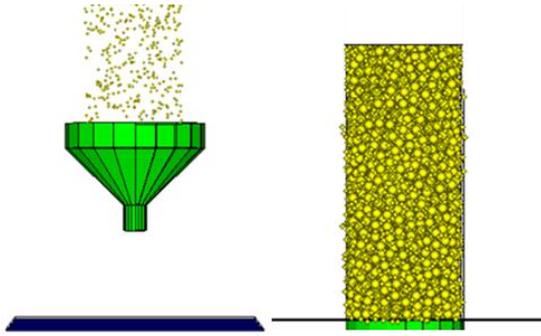


図8 DEMモデル(左:漏斗法,右:円筒法)

図8に示すように、漏斗法モデルでは漏斗高さ12~24cmとしたモデルを作成した。作成した漏斗部には結合要素モデルの粃2000粒を供給し、自由落下させた。また、円筒法モデルでは直径6cmと19cmのガラス管のモデルを作成し、作成したガラス管内に、同様の粃モデル16000粒を供給し、自由落下させて充填した後、ガラス管に鉛直上向き速度を与えた。

②実験・解析結果

表1に安息角測定結果を示す。また、図9にシミュレーション終了時の状態を示す。

表1 安息角測定結果

含水率	漏斗法			円筒法
	11.5cm高	16.7cm高	24cm高	
1.6%	34	34.9	34.4	20.4
12.9%	36	35.6	33.8	24.4
18.9%		38.6		23.8

表2 円筒径による安息角の違い

単位:度	
円筒径	
6cm	19cm
19.2	23.7
※含水率9.6%	

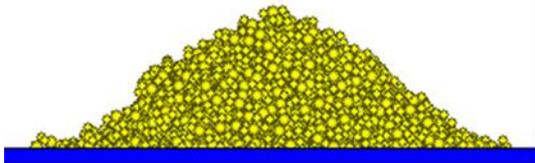


図9 シミュレーション終了状態

表1の結果から、円筒法を用いた場合より、漏斗法を用いた場合のほうが安息角が大きくなることがわかった。また、含水率が低いものと比べ、含水率が高いものの方が、安息

角が大きいくことがわかった。このことは、乾燥した粃の方が摩擦係数が小さくなり、傾斜を形成する際、滑りやすくなることによるものと考えられる。

また、表2の結果から、充填時の粃の位置が低い場合の方が安息角が大きくなることがわかった。これは、落下開始時の粃の位置が高い場合に、粃の落下速度が大きくなり、落下面の粃との衝突で外方に向けて飛散するためであると考えられる。表1の高さの違う漏斗法においても同様の傾向が表れている。

図9にDEMモデルによる解析結果の一例(漏斗法)を示す。これらの解析結果から、粃モデルの外形座標を取得して安息角を求めた。

表3 安息角シミュレーション結果(3粒子)

単位:度				
漏斗法			円筒法	
11.5cm高	16.7cm高	24cm高	φ6cm	φ19cm
36.9	37	33.2	24.7	26.8

表4 結合要素数による安息角の違い

単位:度			
2粒子	3粒子	5粒子	7粒子
29.2	37	38.3	34.4
漏斗法16.7cm高			

表3より、先の実験同様、高さが低い方が安息角が大きくなるという傾向を得ることができた。漏斗法と円筒法では、測定方法の違いによる安息角の差異が大きく、また、それぞれの測定方法において、条件の違いによる値の変化の傾向も表現することができた。

次に、粃のモデル化において用いる結合粒子数の違いによる解析精度と計算コスト比較から妥当な粃モデルの検証を試みた。

表4から、2粒子から5粒子のモデルにおいて、粒子数が増えるにつれ、安息角の値が大きくなる傾向がみられた。これらは、横一列につなげた簡易的モデルであり、粒子数が増えるにつれ、転がりにくくなったためと考えられる。一方、7粒子を用いたモデルは、5粒子以下のモデル形状とは異なって平面に配置した形状となっている。このため、シミュレーション結果では、この7粒子モデルが最も実測に近い値を得られた。このことから、個別要素法でシミュレーションを行う場合、結合要素の粒子の配置が重要であることが示された。

③摘要

従前の研究において、球単体でモデル化された粃モデルを、複数粒子結合とすることで、より実際の粃に近い形状、特性を持つ穀粒モデルの作成を試みた。この作成したモデルは、安息角の実測データと比較することにより、

モデルの妥当性および個別要素法による粒の挙動解析の有用性を検討した。

安息角の測定では、漏斗法と円筒法の2種類で測定を行った。それと同時に、漏斗法においては漏斗の高さを、円筒法においては円筒の直径を変化させることで、安息角の変化を確認した。その結果、測定法と高さの違いによって安息角が変化することを明らかにした。

次に、外形を模した3粒子による結合要素を作成し、個別要素法に適用して安息角測定実験を再現した結果、実測値と似た傾向が得られた。

次に、結合要素を構成する粒子数、粒子の配置を変化させることによる穀粒モデルの挙動の変化を確認した。その結果、粒の扁平を再現した7粒子モデルでは、実測に近い値が得られた。このことから、粒の力学特性の再現において、個別要素法が有用な手法である一方、モデル化においては結合要素の外形形状が重要であることが判明した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計9件)

- ① コンバイン脱穀部における粒・藁の混入割合による風選別への影響, 上加裕子, 片山隆司, 松浦大海, 松井正実, 井上英二, 光岡宗司, 岡安崇史, 農機学会年次大会, 愛媛大, 2010.9
- ② 結合要素を用いた粒・藁形状モデルの個別要素法による飛行シミュレーション, 上加裕子, 松浦大海, 松井正実, 井上英二, 光岡宗司, 岡安崇史, 片山隆司, 農機学会年次大会, 愛媛大, 2010.9
- ③ 自脱コンバインにおける2番分配率の穀粒損失に与える影響, 加賀龍哉, 松井正実, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 上加裕子, 農機学会九州支部例会, 那覇市, 2011.8
- ④ 自脱コンバインにおける2番分配率の穀粒損失に与える影響, 松井正実, 井上英二, 光岡宗司, 加賀龍哉, 岡安崇史, 農業機械学会年次大会, 弘前大, 2011.9
- ⑤ 風選別部における3次元流体解析について, 片山隆司, 溝口寛子, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 上加裕子, 松井正実, 農業機械学会年次大会, 弘前大, 2011.9
- ⑥ 自脱コンバイン選別部における穀粒収支モデル, 本和世, 加賀龍哉, 松井正実, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 農機学会九州支部例会, 宮崎市, 2012.8
- ⑦ 3次元個別要素法による穀粒モデルの構築, 松本健, 松井正実, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 農機学会九州支部例会, 宮崎市, 2012.8
- ⑧ コンバイン風選別部内の穀粒・藁群の飛散シミュレーションに関する研究, 溝口寛子, 片山隆司, 松本健, 光岡宗司, 岡安崇史,

井上英二, 上加裕子, 松井正実, 農業環境工学関連学会合同年次大会, 宇都宮大, 2012.9

- ⑨ 自脱コンバインにおける2番分配率の穀粒損失に与える影響, 加賀龍哉, 本和世, 松井正実, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 農業環境工学関連学会合同年次大会, 宇都宮大, 2012.9

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 英二 (INOUE EIJI)

九州大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号: 00184739

(2) 研究分担者

松井 正実 (MATSUI MASAMI)

宇都宮大学・農学部・准教授

研究者番号: 10603425

光岡 宗司 (MITSUOKA MUNESHI)

九州大学・大学院農学研究院・助教

研究者番号: 60437770

岡安 崇史 (OKAYASU TAKASHI)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 70346831