

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04865

研究課題名(和文) インディカ、ジャポニカ水稻品種間のセシウム吸収・体内分配の変異要因と分子機構

研究課題名(英文) Physiological factors and molecular mechanisms on absorption and distribution of cesium in indica and japonica rice varieties

研究代表者

近藤 始彦 (Kondo, Motohiko)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：00355538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：Cs吸収と体内分配のイネ品種間差異の生理・遺伝要因の解明を行った。Csの吸収はインディカ品種ではジャポニカ品種に比べて特に幼穂形成期～穂揃期の吸収能力が高かったが、これはKとの拮抗作用だけでなくCs吸収自体にも品種間差異があるためと考えられ、関連輸送体発現レベルにも品種間差異がみられた。またCs吸収への蒸散流の寄与は大きくないと考えられた。インディカ品種は玄米へのCs分配が高くまた低K条件で高まることが高い玄米Cs濃度の要因であった。また葉身から再転流があり穂首に集積しやすいことが明らかになった。コシヒカリ/IR64の染色体置換系統の遺伝解析より、Cs吸収に関与するQTL領域を複数見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性セシウム¹³⁷Csの農地汚染に対しては、長期間にわたる吸収抑制対策が不可欠である。これまで農地除染およびカリウムの多量施用によるセシウム吸収抑制が行われており、基準値を上回る玄米の生産は最小限に抑えられている。しかし、今後の被災地での営農再開の促進に向けては、より少量のカリウム施肥で放射性セシウムの可食部への蓄積を効果的に抑制する技術の開発が求められており、本研究で実施した品種間差異の生理・遺伝要因の解明は、セシウム低蓄積性の品種開発と効率的なカリウム施肥技術の確立に貢献する。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on physiological and genetic factors conferring to the varietal difference in absorption and distribution of Cs in rice. Indica varieties showed larger Cs uptake during panicle initiation to heading stages as compared with japonica ones, which was attributed not only to the differences in K uptake but also Cs absorption ability of root. The expression level of several transporter genes was different in Koshihikari and Habataki, which suggests that difference in Cs dynamics between both cultivars may be related with the gene expressions. Distribution of Cs to grain was also larger in indica than japonica varieties and it was enhanced under low K conditions. Distribution of Cs was regulated dynamically during ripening period. During ripening, Cs was translocated from leaf blades to other parts. Cs accumulated most in the panicle neck at maturing stage. Genetic analysis using Koshihikari/IR64 CSSL reveals several QTLs related to Cs uptake.

研究分野：土壤肥料

キーワード：イネ セシウム カリウム 品種間差異 輸送体 体内分配 QTL

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故により拡散した核種の中でも半減期の長い放射性セシウム¹³⁷Csによる農地汚染に対しては、長期間にわたる効果的な吸収抑制対策が不可欠である。これまでに、農地除染およびカリウムの多量施用によるイネのセシウム吸収抑制が行われており、基準値を上回る玄米の生産は最小限に抑えられている。しかし、長期的なカリウムの多量施用には多くのコストが必要であり、今後被災地での営農再開の促進に向け、より少量のカリウム施肥で放射性セシウムの吸収および可食部への移行を効果的に抑制する技術の開発が求められている。これまでに日本のイネ品種間の比較において、ジャポニカ品種でインディカ品種より放射性セシウム蓄積が低い傾向が得られている。根圏からのセシウム吸収、体内でのセシウム分配のそれぞれについて、品種間差異の要因が解明されれば、低蓄積性品種の開発や効率的なカリウム施肥法の提案に向け大きく貢献すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでに明らかにされてきたインディカ品種、ジャポニカ品種間でのセシウム吸収と体内分配の違いについて、その原因となる生理、遺伝的要因を解明する。このためにインディカとジャポニカを含む複数の水稻品種について、土壤中のセシウム/カリウム動態、吸収特性等の品種間差異の要因解析を行う。品種間での生育ステージごとの根、茎葉部、玄米へのセシウム、カリウム分布の異同を明らかにするとともに、特に蒸散やカリウム輸送体の発現との関連性を解析する。インディカ・ジャポニカ品種の染色体断片置換系統(CSSL)を用いたQTL解析を行い、キーとなるQTL領域を推定する。

3. 研究の方法

インディカとジャポニカを含む複数の水稻品種や遺伝解析材料を土耕および水耕栽培し、Cs吸収特性および体内分配を比較することで、インディカ品種の高いCs蓄積性の要因を解明する。以下の実験で一部を除きCsは安定同位体¹³³Csを用い、ICP-MSにより分析を行った。

1. 吸収特性の比較

土耕栽培にてインディカ多収品種タカナリとジャポニカ普通品種コシヒカリを栽培し生育およびステージ別のCs、K吸収を比較した。また耐塩性品種インディカ品種ソルトスター、インディカ多収品種北陸193号ならびにジャポニカ普通品種日本晴を異なるCs、K施肥レベル下で土耕ポット栽培し、Cs、K吸収量および地上部・地下部分配などを比較した。

2. 吸収機構の解明

(1) 根圏濃度の影響

Cs吸収能力の違いはKの吸収能力の高さによるKとの拮抗作用の低下も要因として考えられる。そこで根圏のK濃度が同一である条件におけるCs吸収の品種間差を明らかにするために、コシヒカリとタカナリを用いて、水耕栽培試験を実施した。根圏のKおよびCs等の元素濃度が同一となるように、タンクと水耕ベッド間で水耕養液を循環させる方式を採用し、水耕ベッドに両品種を並べて栽培した。水耕養液にはCsを添加した。幼穂形成期および穂揃期に根および地上部をサンプリングし、Cs及びK濃度を分析した。また土耕栽培において根圏土壌溶液中のCs、K濃度とこれらの吸収の関係の比較を行った。

(2) 蒸散との関係の解析

蒸散に依存した水吸収量の多寡がCs吸収量に与える影響を明らかにするため、蒸散要求量(相対湿度)の異なる人工気象室内でイネを栽培した。人工気象室は、気温を明期25(12時間)、暗期20(12時間)光合成有効光子束密度740 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度、気象室内の相対湿度を90%(高湿度区)または40-50%(低湿度区)に制御し、芽生えの時期(出芽1週間後)から異なる湿度条件で2品種(コシヒカリとタカナリ)をそれぞれポット栽培し、幼穂形成期まで約6週間栽培した。6週間後に蒸散量(単位葉面積当たり、地上部乾物重当たり)を測定した。蒸散測定終了後にイネ個体を葉身、葉鞘、基部、根の部位別に解体し、各部位のCs含有量を測定した。

3. 体内分配と輸送体の解析

生育期間中のセシウムの体内分配動態を明らかにするため、Cs収・蓄積能の低いコシヒカリとCs吸収蓄積能の高いインディカ品種ハバタキを用いて、異なるK施肥レベルで圃場試験やポット栽培試験を複数年実施した。この中では福島県で採取した¹³⁷Cs汚染土壌を用いたポット試験を含む。生育時期別に地上部各部位をサンプリングし、Cs及びK濃度を分析した。また、体内におけるセシウムの輸送にはカリウム輸送体など陽イオン輸送体が関わっている可能性が考えられるため、登熟期にCs濃度が大きく変動する葉身や節間をサンプリングし、輸送体遺伝子発現量の変動を解析した。

4. 遺伝的要因解析

ジャポニカ品種とインディカ品種の間にある玄米へのCs吸収の違いの原因に関わる遺伝領域の特定を進めるため、コシヒカリとインディカ品種IR64から作成した染色体置換系統について玄米中のCs濃度を比較解析した。

4. 研究成果

1. インディカとジャポニカ品種の吸収特性の比較

(1) タカナリの生育はコシヒカリに比較して地上部および根いづれの乾物重も、幼穂形成

期には大きい傾向にあった ($p = 0.06$) が、穂揃期には同程度であった (地上部; $p = 0.74$ 、根; $p = 0.39$)。乾物重の差異に起因して、幼穂形成期の株当りの K 吸収量および Cs 吸収量はタカナリの方が有意に多かった。しかしながら、カリウム濃度 (表 1) およびセシウム濃度 (表 2) には有意な品種間差は認められず、幼穂形成期までのセシウム吸収能は両品種で同程度であったと考えられた。穂揃期のカリウム濃度にも有意な品種間差は認められず、穂揃期までのカリウム吸収能も両品種で同程度であったと考えられた。一方で、穂揃期のセシウム濃度は地上部および全体について、タカナリの方が有意に高かった。したがって、幼穂形成期から穂揃期にかけてのセシウム吸収能はタカナリの方が高いこと、また、タカナリではコシヒカリに比べて地上部へのセシウム分配率が高いことが示された。

表 1. 幼穂形成期及び穂揃期におけるカリウム濃度 (平均値 \pm SE、 $n=3$) .

採取時期	品種	カリウム濃度 (mmol g^{-1})		
		地上部	根	全体
幼穂形成期	コシヒカリ	0.382 ± 0.013	0.136 ± 0.005	0.336 ± 0.011
	タカナリ	0.376 ± 0.030	0.135 ± 0.003	0.330 ± 0.025
	P 値	0.86	0.91	0.85
穂揃期	コシヒカリ	0.215 ± 0.009	0.0485 ± 0.0051	0.189 ± 0.009
	タカナリ	0.232 ± 0.005	0.0394 ± 0.0070	0.192 ± 0.001
	P 値	0.23	0.36	0.78

P 値は対応のない t 検定による。

表 2. 幼穂形成期及び穂揃期におけるセシウム濃度 (平均値 \pm SE、 $n=3$) .

採取時期	品種	セシウム濃度 (nmol g^{-1})		
		地上部	根	全体
幼穂形成期	コシヒカリ	0.649 ± 0.007	1.43 ± 0.03	0.797 ± 0.009
	タカナリ	0.652 ± 0.038	1.32 ± 0.10	0.780 ± 0.048
	P 値	0.96	0.40	0.76
穂揃期	コシヒカリ	0.269 ± 0.003	0.741 ± 0.054	0.342 ± 0.003
	タカナリ	0.374 ± 0.004	0.670 ± 0.075	0.431 ± 0.006
	P 値	<0.01	0.48	<0.01

P 値は対応のない t 検定による。

(2) 同様に異なる K および Cs レベルにおける北陸 193 号・ソルトスター・日本晴の 3 品種で比較すると、インディカの 2 品種 (北陸 193 号、ソルトスター) で玄米 Cs 濃度は高かったがその要因として根から地上部への移行、茎部から玄米への移行が高いことが主要な要因であった。根部から地上部への移行は K でもインディカ品種で大きい傾向にあり、茎部不伸長部における K 輸送体が関与していると推察された。一方玄米への移行に K には明確な差はないことから Cs 特異的な輸送体の関与が示唆された。以上よりインディカ品種は根の吸収、地上部への移行、玄米への移行の 3 つにおいてジャポニカ品種と違いがあることが示唆された。またソルトスターは K 施肥による Cs 吸収の低下程度が小さく拮抗作用が働きにくい品種特性をもつと考えられた。

2. 吸収機構と蒸散との関係

(1) 吸収能力の違いは K の吸収能力の高さによる K との拮抗作用の低下も要因として考えられる。そこで根圏の Cs・K 濃度が同一になる水耕にて、インディカ品種はジャポニカ品種に比べて幼穂形成期～穂揃期のセシウム吸収能力が高かった。この結果より Cs 吸収の違いは、K 吸収による土壌中 K 濃度の低下による Cs との拮抗作用の低下だけではなく、Cs 吸収能そのものにも違いがあることが示唆された。また土壌溶液中の K、Cs 濃度との関係からも K との拮抗作用の違いだけでは説明できず、根の吸収特性にも品種間差異があると考えられた。

(2) 蒸散に依存した水吸収量の多寡が水稻のセシウム吸収量に与える影響を明らかにするため、蒸散要求量 (相対湿度) の異なる人工気象室内で水稻品種を栽培し、生長、気孔開度、蒸散量、各種元素の吸収量などを調査した。蒸散要求量の指標として測定したシャーレからの水面蒸発量は、低湿度区が高湿度区の約 2 倍であり、両区の間で大きな蒸散要求量の違いがあることが確認された。生育初期からこのような環境で 6 週間生育したイネの蒸散量 (地上部乾物

重当たり)は、両品種共に高湿度区の方が低湿度区より1.7~1.8倍程度多かった。タカナリは日本型水稻品種に比べて蒸散量が高い傾向を示すことが指摘されているが、今回の実験では、個体レベルでの蒸散量において、コシヒカリとタカナリとの間で大きな差異は認められなかった。また、湿度処理が地上部(葉身と葉鞘)のCs濃度に及ぼす影響については、湿度処理の効果は有意でなかった。これらの結果から、栄養成長期のこれら水稻品種においては蒸散量の多寡がCsの経根吸収に及ぼす影響は大きくないこと、根から地上部へCsが移動する段階ではトランスポーター等による輸送調節が寄与している可能性が示唆された。1の結果より水稻の個体当たりのCs吸収量は幼穂形成期から穂揃期頃に著しく高まる可能性が考えられる。栄養成長期以降のセシウム吸収と蒸散量の関係については今後検討する必要があると考えられる。

3. 体内分配と輸送体の解析

(1) 分配について調査した結果、ハバタキはコシヒカリと比較してCs吸収量が多く地上部全体のCs濃度が高かったが、玄米/わら濃度比も高く、玄米へ分配される割合が高かった。この結果は過去に得られた「インディカ品種は玄米へセシウムを蓄積しやすい」という知見とも一致した。体内で最もCsが蓄積する部位は最上位の節間(穂首)であり(図1)、登熟期に数倍に高まった。一方で、葉身では両品種とも登熟期にCs濃度が低下したことから、葉身から節間など他の部位へCsが転流したと考えられる。コシヒカリを用いたポット試験では、カリ施肥量が少ない場合に穂首への¹³⁷Cs蓄積が促進されるとともに、玄米への分配割合が増加した(図2)。K分配動態については、節間で最も濃度が高いなど¹³³Csの分配動態と共通点が多く認められた。

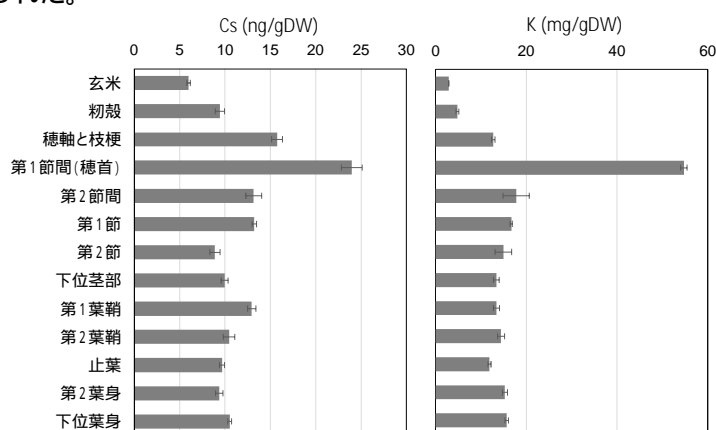


図1 コシヒカリ成熟期の各部位における¹³⁷Cs及びK濃度
茨城県内試験圃場にて栽培。施肥は元肥で10a当たりN 8 kg、P₂O₅ 8 kg、K₂Oは無施用。栽植密度11.1株/m²。値は3株の平均値±標準誤差を示す。

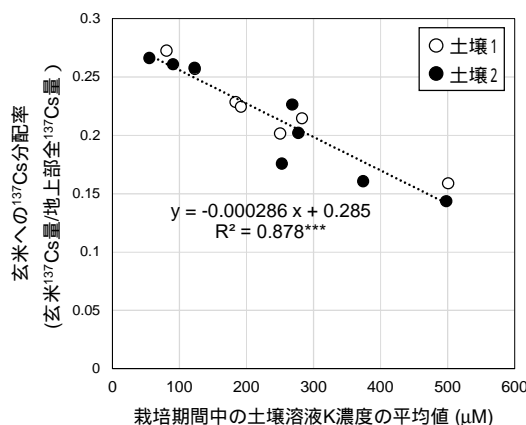


図2 カリ施肥条件と玄米への¹³⁷Cs分配割合の関係

福島県内圃場2カ所から採取した土壌を用いて2016年にポット栽培(1/5000aワグネル)を行った。土壌の¹³⁷Cs濃度は土壌1が1770 Bq/kg、土壌2が3780 Bq/kg。施肥は元肥で1ポット当たりN 0.5 g、P₂O₅ 0.46 g、K₂Oは0~0.71gまで8段階施用。各カリ施肥処理区1反復ずつ。Nは幼穂形成期に1ポット当たり0.2g追肥。1ポットに3個体移植。両土壌で回帰式に有意差が認められなかったため、両土壌のデータを合わせて回帰式を求めた。r²は決定係数(*** P < 0.001)。

(2) 各輸送体は体内の部位ごとに異なる遺伝子発現パターンを示し、葉身で多く発現する輸送体や、節間特異的に発現する輸送体が存在した。これら輸送体遺伝子のいくつかは登熟期に

発現量が変化したが、K 施肥による差異はほとんど認められなかった。根においては K 施肥量の多寡によって複数の輸送体遺伝子発現量が明瞭に変化した。地上部の結果はこれとは対照的であった。したがって、K 施肥量の多寡による体内の Cs 分配動態の差異は、K 輸送体の量的変動ではなく、異なるメカニズムが要因として関わっている可能性が示唆された。一方で、いくつかの輸送体については、複数の部位においてコシヒカリと八バタキで遺伝子発現量が異なったことから、両品種における Cs 分配動態の差異はこれら輸送体発現量の差異と関わっている可能性が考えられる。

4. 遺伝的要因の解明

コシヒカリと IR64 から作成した染色体置換系統について玄米中の Cs 濃度を比較解析した結果 (表 3) 第 2 染色体の置換系統についてみると、コシヒカリ背景型の SL2007 で玄米中 Cs 濃度が上昇し、IR64 背景型の SL2109 で玄米中 Cs 濃度が下がることが 2016 年度と 2017 年度の 2 カ年にわたって示された。また、第 9 染色体の置換系統についてみると、コシヒカリ背景型の SL2032 で玄米中 Cs 濃度が上昇し、IR64 背景型の SL2130 において玄米中 Cs 濃度が下がることが 2016 年度と 2017 年度の 2 カ年にわたって示され、これらの系統が相互に含む置換領域が玄米への Cs 吸収の違いに関与することが予想された。そこで、第 2 染色体置換系統 SL2007、SL2109 の双方については親品種との戻し交配を進め、B1F2 集団を用いて詳細な遺伝解析を実施した。結果として、コシヒカリ//コシヒカリ/SL2007 の集団からは第 2 染色体 28.9Mb の RM5833 マーカー付近に IR64 型で Cs 吸収が高まる QTL を、IR64/SL2109//IR64 の B1F2 集団からは第 2 染色体 33.8Mb の RM5460 マーカー付近にコシヒカリ型で Cs 吸収が低下する QTL をそれぞれ見いだした (図 3)。両方の素材から共通に Cs 吸収に関与する QTL は見いだせなかったものの、Cs 吸収に関与する遺伝領域が一部明らかになったと考えられた。

表 3 玄米セシウム濃度に背景品種との違いを生じる第 2 染色体と第 9 染色体の染色体置換系統

表.玄米セシウム濃度に背景品種との違いを生じる第2染色体と第9染色体の染色体置換系統

	背景(戻し親)	ドナー	染色体置換部位の領域	玄米Cs濃度(ppb)	戻し親に対する比
SL2007	コシヒカリ	IR64	Chr2 4.67-8.04及び27.22-36.08Mb	20.0	155
SL2032	コシヒカリ	IR64	Chr9 16.3-23.76Mb	19.0	147
コシヒカリ				12.9	100
SL2109	IR64	コシヒカリ	Chr2 31.42-36.08Mb	25.2	77
SL2130	IR64	コシヒカリ	Chr9 6.79-19.94Mb	23.3	71
IR64				32.9	100

玄米セシウム濃度は2016年と2017年の平均値

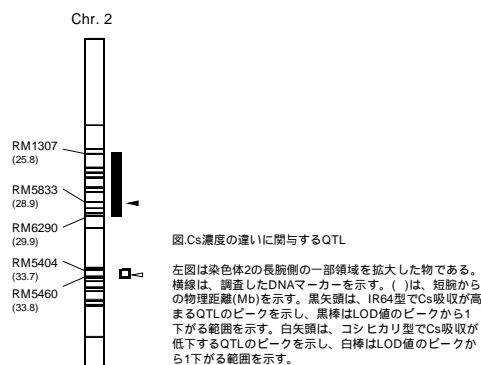


図 3 Cs 濃度の違いに関与する QTL

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Junko Ishikawa, Shigeto Fujimura, Motohiko Kondo, Mari Murai-Hatano, Akitoshi Goto, Takuro Shinano, Soil, Dynamic changes in the Cs distribution throughout rice plants during the ripening period, and effects of the soil-K level. Plant Soil, 査読有 429, 2018, 503-518, <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3700-z>

Matsunami, M., Hayashi, H., Tominaga, Nagamura, Y., Murai-Hatano, M., Ishikawa-Sakurai, J., Kuwagata T. Effective method for practical application of gene expression analysis in field-grown rice roots. Plant Soil 査読有 433, 2018, 173-187. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3834-z>

[学会発表](計 6 件)

石川淳子・藤村恵人・後藤明俊・近藤始彦 カリ施肥が水稻における ¹³⁷Cs の吸収及び体

内分配に及ぼす影響、日本作物学会第 247 回講演会、2019 年 3 月
石川淳子・藤村恵人・且原真木・中原由揮・後藤明俊・羽田野麻理・近藤始彦、カリ施肥
量がイネの根におけるカリウム輸送体遺伝子発現量とセシウム吸収に及ぼす影響、日本土
壌肥料学会 2018 年度大会、2018 年 9 月
谷本 涼・中川雄晴・竹中千里・富岡利恵・杉浦大輔・近藤始彦 イネのセシウム吸収にお
けるカリウムとの拮抗作用の品種間差 日本土壌肥料学会 2018 年度大会 2018 年 9 月
羽田野麻理・松波麻耶・石川淳子・戸上和樹・藤村恵人・後藤明俊・近藤始彦・長谷川利
拡 生長にともなうイネのカリウム吸収量の増加と安定同位体セシウム吸収の関係 第
59 回日本植物生理学会年会(札幌) 2018 年 3 月
羽田野麻理・松波麻耶・富永陽子・石川淳子・藤村恵人・戸上和樹・三浦憲蔵・近藤始彦
水稻品種による安定同位体セシウムの吸収特性とカリウム、ナトリウム吸収との関係 日
本農業気象学会 2017 年全国大会 2017 年 3 月
羽田野麻理・松波麻耶・林秀洋・富永陽子・石川淳子・藤村恵人・戸上和樹・三浦憲蔵・
近藤始彦 カリウム施肥量が水稻品種の安定セシウム吸収に及ぼす影響とフィールドトラ
ンスクリプトーム 第 45 回根研究集会 2016 年 9 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：羽田野麻理

ローマ字氏名：Hatano, Mari

所属研究機関名：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

部局名：東北農業研究センター

職名：上席研究員

研究者番号(8桁)：00343971

研究分担者氏名：石川淳子

ローマ字氏名：Ishikawa, Junko

所属研究機関名：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

部局名：次世代作物開発センター

職名：上席研究員

研究者番号(8桁)：40343959

研究分担者氏名：後藤明俊

ローマ字氏名：Goto, Akitoshi

所属研究機関名：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

部局名：次世代作物開発センター

職名：上席研究員

研究者番号(8桁)：70355569

研究分担者氏名：藤村恵人

ローマ字氏名：Fujimura, Shigeto

所属研究機関名：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

部局名：東北農業研究センター

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：70560639

(2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。