

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26660019

研究課題名(和文)イオノミクスを活用した果実の栄養強化に関する研究

研究課題名(英文)Ionomic study for biofortification in fruit crops

研究代表者

金山 喜則 (Kanayama, Yoshinori)

東北大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10233868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：網羅的に元素分析が可能なイオノーム分析を、果実作物においておこなった。分析は、可食部における各元素の濃度を明らかにすること、および種間や器官間での元素濃度の比較をおこなうことを目的として実施した。分析対象は必須元素、毒性や放射性物質に関わる元素を含む19種類の元素であり、材料にはリンゴ、ニホンナシ、ナス、エダマメを用いた。その結果、元素の体内分布を、作物の栄養強化に必要な基礎的知見として示すとともに、難移動性であると考えられてきた元素のいくつかにおいて、種によっては高い移動性をもつことを明らかにすることができた。また、種を超えたイオノームパターンの普遍性も明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Ionomic analysis, high-throughput elemental analysis, was performed in three diverse fruit crops to represent element concentrations in edible parts and to compare element concentrations between edible parts and vegetative organs and between species. Nineteen elements containing essential elements for human health, toxic elements, and elements with radioisotopes from nuclear reactors were analyzed in apple, Japanese pear, eggplant, and edamame. The distributions of elements were shown as basic information needed for biofortification, and high mobilities depending on species were found in some elements whose mobilities are believed to be low. Classification of element profiles into the leaf and the others containing the edible part except with the calyx in principal component analysis revealed the similarity in element distribution across the species. The present study may contribute to the research progress in the ionomics studies of fruit crops.

研究分野：園芸学

キーワード：果樹 果菜 イオノミクス

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の国内外におけるイオノミクス研究では、栄養器官を対象とした解析が主に行われており、モデル実験植物を用いた遺伝学的研究や、施肥等の土壌環境を対象とした報告が多かった。モデル実験植物以外では牧草や野草、あるいは果樹以外の樹木において、やはり遺伝学的研究や、施肥の影響が調べられている。一方、作物のイオノミクス研究は少なく、可食部の解析例は、わずかにイネとダイズにおいてみられる程度であった。果実作物におけるイオノミクス研究としては、トマトのストレス応答に関する研究はあるものの、果実の栄養に関わる研究は見当たらなかった。

研究分担者の渡部は、日本で初めてイオノミクスを取り入れた当該分野の第1人者であり、モデル実験植物を用いた植物栄養学の成果をあげていた。また、研究代表者の金山は、東日本大震災の復興支援に関わる研究の一環として渡部と共同研究を行い、園芸作物におけるセシウムの動態の一部を明らかにした。以上のような背景において、以前より金山は果実作物を用いた糖と機能性成分の蓄積に関する研究を行ってきたことから、新たな果実の付加価値に関わる萌芽の分野であるミネラルの栄養強化 (Biofortification) について、渡部との共同研究の中でイオノミクスによる研究を推進することとした。

2. 研究の目的

イオノーム分析は、植物の全イオンを網羅的に測定、解析する、新しいオミクス研究である。これまでのところ、シュートなどの栄養器官が主要な解析対象であり、モデル実験植物であるシロイヌナズナやモデルマメ科植物であるロータスを用いた遺伝学的研究や、施肥等の土壌環境を対象とした報告が多い。モデル実験植物以外では、牧草、野草、樹木で遺伝学的研究や、施肥や環境ストレスのイオノームに及ぼす影響が調べられている。

一方、作物を扱った研究例は少なく、これまでにイネ、ダイズ、ナタネにおける報告があるが、可食物のイオノーム解析としてはイネとダイズにおける報告がみられる程度である。ダイズは乾燥種子であり、本研究のような、野菜として食する未熟種子すなわちエダマメとしての解析例は見当たらない。主要な果樹や野菜などの園芸作物はミネラルの供給源として重要であるにもかかわらず、イオノーム解析に関する報告はほとんどみられない。数少ない例としてはトマトとビルベリーの研究例がある。トマトについてはストレス応答のイオノームの影響を葉でみているだけであり、果実を含めた詳細な解析はなされていない。また、ビルベリーではイオノームが果実の品質評価に有効であることが示されているが、他の器官との比較や可食部内での組織間の比較は行われていない。多様

な植物種を一度に解析することは、種を超えたイオノームの多様性と普遍性を検討する意義があり、牧草ではそのような報告があるが、園芸作物ではみられない。

果実はビタミンとともに、ヒトにとっての必須元素の主な供給源として重要である。現在、カリウムの不足はないものの、カルシウムやマグネシウムの不足は先進国、発展途上国を問わずみられており、作物のヒト必須元素の供給源としての機能を強化する Biofortification が注目されている。したがって、イオノーム解析は、これまで行われてきた作物栄養、土壌肥料学的側面ばかりでなく、Biofortification の推進に資すると考えられる。ミネラルをサプリメント錠剤から摂取することも可能であるが、サプリメント錠剤よりも果実として摂取する方が効果があることも報告されており、果実においてで栄養強化する意義は大きい。

園芸作物におけるイオノーム解析、さらにはイオノームの可食物と栄養器官における比較、可食部内での果肉と皮のような比較といった、栄養強化のための基礎的知見は不足している。実際、グローバルな健康増進のため、植物の可食部における元素分布や移動の研究の重要性やイオノームのコンセプトの有用性が提唱されている。そこで本研究ではイオノーム解析例の希少な園芸作物を対象とし、果樹、果菜、マメ類という3つの異なるタイプの果実作物を同一環境下で栽培し、イオンの部位別の相対的な比較を行い、果実作物のイオノームの基礎的知見を得ることを目的とした。食品として重要な元素の植物体内における分布の特徴を明らかにするために、可食部である果肉または種子とその皮 (さや)、およびそれらと葉など栄養器官との比較を行ったところ、イオノームの普遍性や種特異性について知見が得られた。

3. 研究の方法

植物は東北大学農学研究科圃場で栽培した。15年生のリンゴとニホンナシから葉と果実を収穫期に採取し、果実は果肉と皮に分け、60℃で乾燥した。ナスとエダマメも同じ圃場で栽培し、葉、茎、果実を収穫期に採取した。ナスでは果肉、皮、がく、葉、茎を、エダマメでは子実、さや、葉身、葉柄、茎をそれぞれ60℃で乾燥した。乾燥試料は硝酸で処理したのち、ICP-MSによる分析に供した。

4. 研究成果

同族の元素であるカルシウムとストロンチウム、鉄とニッケルに0.8以上の高い正の相関がみられ、同じく同族のカリウムとナトリウム、マンガンと亜鉛についてもおよそ0.7の正の相関がみられた。このように異なる科に属する種の組織別の分析においても、同族元素の移動や分布の類似性が示唆された。カルシウムとストロンチウムのような同族の元素間の競合は根、茎、葉のいずれにお

いてもみられないとしており、本研究および既報におけるカルシウムとストロンチウム、鉄とニッケルの「正の」相関はそのような見解と一致した。

カリウムとナトリウムも同族であり本研究では正の相関が得られたが、既報では、カリウムとナトリウムの間には必ずしも有意な相関は得られていない。既報では栽培条件の違いによる変動に由来する相関をみているため、ナトリウムとカリウムの栽培条件への応答の違いが無相関の要因である可能性がある。過剰なナトリウムはカルシウムの吸収を阻害するという記述があり、実際本研究でもナトリウムは多くの元素と相関係数が負となり、果肉/葉でも他の元素と明らかに異なる高い値を示した。全種で得られた負の相関は有意ではないが、種ごとに解析するとナトリウムと他の元素との負相関の多くは有意となった。したがって、ナトリウムは吸収や移動において他の多くの元素と競合的關係にある可能性がある。

ヒトにおける必須元素で欠乏しやすく栄養強化に関わる元素としては、鉄、亜鉛、銅、カルシウム、マグネシウム、セレンが上げられる。これらの元素の不足は、高血圧や貧血、味覚障害や不眠症、さらには糖尿病の要因となるなど健全な生活に深刻な影響を与える。このような有用元素や、放射性物質および毒性に関わる元素については、園芸作物におけるイオノミクスとしての解析例や、可食部と栄養器官、あるいは果肉と皮を比較した例はほとんどみられない。また、ダイズとしての知見はあるが、エダマメすなわち未熟種子の段階での知見もほとんどみられない。エダマメは未熟ダイズ種子を利用する野菜で、ビタミンが豊富であるなど野菜として有用である。主な有用元素について得られた知見を以下に述べる。

鉄、亜鉛、銅は、カルシウムと同様に師部難移動性であるとされているが、本研究では、鉄はエダマメで、亜鉛はナスとエダマメ、銅は全種で可食部と栄養器官の差が小さいという有用な性質が認められ、一般的な移動性についての知見が必ずしも果実作物に当てはまらないことが示された。銅については、リンゴで果実と葉が似た濃度であるという本研究の結果を支持する知見がある。亜鉛については、輸送関連タンパク質が機能して輸送性を高める種があり、ナスやエダマメにはそのような輸送システムが存在するのであろう。エダマメにおいて銅は果肉/葉比が3以上となり、成熟ダイズ種子で過去に得られている比である約1よりもかなり高く、未熟時の種子に、特異的に銅を蓄積させるメカニズムがあると考えられた。銅は師部難移動性だが、複合体として移動性が高まる場合があるとしており、このような移動メカニズムと可食部の銅濃度との関連を今後調べる必要がある。

セレンは、selenate ないしは

organoselenium として師部輸送されるといふメカニズムが提唱されており、本研究でも実際、エダマメでは再分配されているようであった。一方、リンゴ・ニホンナシでは組織間差が大きかったので、種によってセレンの師部移動性が異なることが明らかになった。リンゴは野菜、果実の中では比較的セレン濃度が高い作物とされており、実際、本研究でも調べられた種、器官の中でリンゴの葉での含量が最も高かったことから、輸送性を改善することでさらに栄養強化が期待できる。その他、モリブデンもヒトの必須元素であるが、その分布はエダマメにおいて特徴的で、茎と種子に特異的に蓄積し、種子/葉比は35にもなったことから、エダマメ特異的な種子蓄積メカニズムが考えられた。実際、ダイズの植物片を用いたモリブデン輸送の調節についての研究で、モリブデンは他の元素と比べて種子への特異的分配の傾向が非常に強いことが示されている。

毒性に関わる元素としては、ヒ素は組織間差がカルシウムのように大きく、葉で高く、可食部では未検出が極めて低かった。葉を含めて含量自体が低い上に、果実への移行も少ないという利点がみられた。この結果はリンゴについての既報と一致した。カドミウムについては、エダマメやナスでは極端な組織局在の特徴はみられなかったが、リンゴ・ニホンナシでは葉の方が明らかに高かった。ナスとリンゴについては既報と本研究の結果は一致した。また、リンゴのカドミウム含量はどの組織でも他の作物よりかなり低かったが、ニホンナシではいずれの組織でもリンゴより遥かに高かったことから、ニホンナシとリンゴはカドミウムの吸収および輸送について異なるメカニズムを有することがわかった。

原発事故ではセシウムやストロンチウムの放射性同位体が環境に拡散する可能性があり、その際、露地栽培の農作物への影響が問題となる。両元素の果樹や野菜における体内分布の知見が乏しいことから、基礎的知見を得るため、露地栽培の果実作物を選んで実験を行った。上述のようにストロンチウムは同族のカルシウムととても良く似ており相関も高かった。一方、カリウムと同族のセシウムは組織間差が小さくカリウムと同様に易移動性の性質を示した。ただし、他種とくらべてカリウム含量が低かったリンゴ・ニホンナシにおいて、セシウム含量はむしろ高かった。セシウムとストロンチウムについては、エダマメ、ナス、ニホンナシでは報告がなく、リンゴでも、放射性セシウムやストロンチウムの土壌から植物への移行係数についての報告はあるが、植物体内分布のような基礎的知見はないので、本研究で得られた知見には意義がある。

食品あるいは栄養強化を考えると果肉/葉の比の向上が重要なので、基本的データとして検討したところ、大半の元素は1ないし

は1以下であった。ホウ素は、一般には細胞壁に固定されるために移動し難いが、ソルビトールが存在すると移動しやすくなる。実際、ソルビトールを転流するリンゴ・ニホンナシ、あるいはソルビトール合成系の遺伝子を導入したスクロース転流植物ではホウ素の移動性が高いことが知られている。したがって、今回のリンゴ・ニホンナシのホウ素の果肉/葉の比が1に近い結果はソルビトールと関係している可能性がある。一方、ナスとエダマメでも果肉/葉比は比較的高かったが、両種ともスクロース転流植物であることからソルビトールによるホウ素の師部移動の促進は望めない。したがって、ソルビトールにかわる新たなホウ素の輸送機構が想定された。また、リンゴ・ニホンナシのカルシウムおよびマンガン、亜鉛は他種と比べて果実の濃度が低く、果肉/葉比がカルシウムでは他種の0.1~0.2倍、マンガンを亜鉛では他種の0.1倍未満であった。したがって、リンゴ・ニホンナシのこれら元素の分配の改善は有意義である。

食品として果実を利用する際、皮は除く場合と除かない場合があることから、果肉と皮における元素の分配は重要だが、これまで調べられていない。今回、全般に皮/果肉比は果肉/葉比と比べると値が大きくおよそ1から2の元素が大半であった。果肉と皮は類似の組織なので1に近い値が多いことは予想されたが、中にはリンゴ・ニホンナシにおけるカルシウム、マンガンを、エダマメにおけるストロンチウム、アルミニウムのように3以上と突出する例がみられ、皮(あるいはエダマメのさや)に特異的に蓄積するメカニズムの存在が示唆された。

全データの主成分分析においては、本研究で用いられた異なる科、真果と偽果、あるいは草本と木本の枠を超えて、可食部と葉にイオノームパターンが分かれ、元素の局在性に関する普遍性が示唆された。また興味深いことに、茎や葉柄は同じ栄養器官である葉・葉身ではなく可食部のグループに入り、葉以外の共通性が示された。さらに全元素について、栄養強化のための基礎的知見となる体内分布を示すことができ、一般に師部難移動性とされている元素が種によっては高い移動性を有することが明らかとなった。これら本研究で得られた知見は、迅速かつ網羅的な一斉分析によって行われるイオノーム解析の有効性を示している。最近ではビルベリーにおいて、品質の比較にイオノーム解析が利用され、果実作物における有用性が示されつつある。今後、ここで用いられた種においても異なる環境下でイオノーム解析を行うことや、他の園芸作物のイオノーム解析を行う必要があるが、本研究の成果はイオノーム解析が希少な果実作物での今後の研究の端緒となると考えられた。

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3件)

Qingnan Chu, Toshihiro Watanabe, Takuro Shinano, Takuji Nakamura, Norikuni Oka, Mitsuru Osaki and Zhimin Sha (2016) The dynamic state of the ionome in roots, nodules, and shoots of soybean under different nitrogen status and at different growth stages. Journal of Plant Nutrition and Soil Science (in press).

Tomoki Shibuya, Toshihiro Watanabe, Hiroki Ikeda and Yoshinori Kanayama (2015) Ionomics analysis of horticultural plants reveals tissue-specific element accumulation. The Horticulture Journal 84: 305-313. 査読有. DOI: 10.2503/hortj.MI-058

Toshihiro Watanabe, Masaru Urayama, Takuro Shinano, Ryosuke Okada and Mitsuru Osaki (2015) Application of ionomics to plant and soil in fields under long-term fertilizer trials. SpringerPlus, 4: 781. 査読有. DOI: 10.1186/s40064-015-1562-x

[学会発表](計10件)

Yoshinori Kanayama (2015) Horticultural production and research in Japan. Tohoku University-Russian Academy Joint Seminar on Education and Research in High-Tech for Plant Production. Tohoku Univ., Sendai (Japan), 2015 November 25.

菅田瑛夏・秋山明子・魚住愛・西山学・金山喜則 (2015) トマトの染色体断片置換系統における塩ストレス耐性に関する研究. 園芸学会東北支部会. フォレスト仙台(宮城県・仙台市). 平成27年8月31日~9月1日.

Chu Q, Watanabe T, Shinano T, Nakamura T, Oka N, Osaki M, Sha Z (2014) Ionomics uptake and distribution of soybean in response to different nitrogen sources at different growth stages. 日本土壌肥料学会 東京農工大学(東京). 平成26年9月9~11日.

池田裕樹・金浜耕基・金山喜則 (2014) トマトの染色体断片置換系統 IL8-3 における尻腐れ果の発生抑制に関する研

究 . 園芸学会東北支部 . 弘前大学 (青森県・弘前市) . 平成 26 年 8 月 27 ~ 28 日 .

H. Ikeda, A. Uozumi, H. Akiyama, K. Kanahama and Y. Kanayama (2014) A tomato introgression line showed tolerance to salt stress and blossom-end rot. The 29th International Horticultural Congress. Brisbane (Australia) . 平成 26 年 8 月 17 ~ 22 日 .

[図書] (計 1 件)

Yoshinori Kanayama and Alexey Kochetov Editors (2015) Abiotic stress biology in horticultural plants. 220 pages (共同編集のため全ページを担当) . Springer .

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

金山 喜則 (KANAYAMA, Yoshinori)
東北大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号 : 10233868

(2) 研究分担者

渡部 敏裕 (WATANABE, Toshihiro)
北海道大学・農学研究院・准教授
研究者番号 : 60360939