【解説】

メタボロミクスの農業・食品分野への応用

及川 彰

メタボロミクス（メタボローム解析）は近年の分析装置の性能向上に伴い、急速に確立が進んでいる研究手法である。メタボロミクスのターゲットである低分子化合物は様々な生物活性に直接かかわる要素であり、これらを網羅的に調べることによって、未知の生物機能の解明につながる可能性がある。近年のメタボロミクスを用いた研究には、生理現象の解明などの基礎研究に加え、バイオマーカーの発見など医療分野における応用例が多く認められる。一方で低分子化合物は食味や色など農産物や食品の品質にかかわる分子でもあることから、メタボロミクスは農業・食品分野でも十分に応用が可能な技術であることが示唆される。本稿では、メタボロミクスについての概説から実際の農業・食品分野への応用例や可能性を述べる。

メタボロミクス

遺伝子 (gene) やタンパク質 (protein) などの語尾に“ome” がつくと「網羅的な情報」となり，“omics” がつくと「網羅解析」の意味になる (図1)。狭義については議論のあるところかもしれないが、現在ではこれらの

定義が最も広く認められている。このうち、ゲノム (gene + ome: 遺伝子の網羅的な情報) については戦前にすでに現れている言葉であり、1930年に木原によって「生物をその生物たらしめるのに必須な最小限の染色体セット」と定義されている。その後の目覚ましい科学技術の発展により生物の理解が進み、かつ各種分析装置の性能の向上により得られたmRNAやタンパク質、代謝物の網羅情報が注目され、20世紀末に相次いでトランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームという言葉が作られていった。同時に、これらの網羅的な解析を意味するオミクス (ゲノミクス、トランスクリプトミクス、プロテオミクス、メタボロミクス) についても科学者の間で認知され始めた。これらのなかで最も遅く確立されたメタボロームおよびメタボロミクスという言葉が最初に現れた文献は、PubMedによる検索の結果それぞれ1998年⁽¹⁾と2000年⁽²⁾発行のものであった。

「代謝物の網羅解析」であるメタボロミクスは、現在すでに分析手法が確立しているメタボロミクス以外のオミクス技術に比べ、ある程度の分析方法は絞られつつあるものの、いまだ完全に技術として固定されていない。その原因としては、対象となる低分子化合物の物理化学

Application of Metabolomics to Agriculture and Food Science
Akira OIKAWA, 山形大学農学部

図1 ■ オームおよびオミクスの定義

オーム（語尾に“ome”がつく）は網羅的な情報、オミクス（語尾に“omics”がつく）は網羅的な情報を意味する。遺伝子 (genome)、転写物 (transcript)、タンパク質 (protein) および代謝物 (metabolite) にもそれぞれに相当する言葉が存在し、メタボロミクス (metabolite + omics) は「代謝物の網羅解析」と定義できる。

的性質が非常に多様であり、一つの分析条件ではこれを網羅することが不可能であることが挙げられる。ゲノムやトランスクリプトーム、プロテオームを構成するヌクレオチドやアミノ酸は、それぞれの間での物理化学的性質が比較的似ており、ほとんどの場合一つの装置・一つの分析条件で網羅解析が可能である。一方、低分子化合物は高極性（糖リン酸など）から低極性（トリグリセリドなど）までの分子を含み、かつ分子量（数十から千を超えるものまで）や生体内濃度（mmol レベルから fmol, amol レベルまで）などが異なる。そのため、現在でも1種類の分析条件ですべての低分子化合物を分析する技術は確立されておらず、複数の装置や分析条件を組み合わせ「できるだけ網羅的な」メタボロミクスが行われている。一方で、トランスクリプトミクスやプロテオミクスがゲノム情報に依存しており、主にモデル生物でしか用いることが難しいことに比べ、メタボロミクスはゲノム情報の存在しない生物でも対応が可能である利点が存在する。たとえば、アルコールデヒドロゲナーゼと名づけられた酵素（タンパク質）は多くの生物で認められるが、それぞれのアミノ酸配列は類似しているが完全には一致せず、また基質特異性や比活性などの性状も異なることが多い。一方、グルタミンという代謝物も同様にほとんどの生物に含まれているが、モデル生物と非モデル生物に含まれるグルタミンは同一分子であるため、含量の生物間での比較が可能である。さらに、複数の生物種が混在しているサンプルに対してメタボロミクスに

よって含まれる代謝物量を網羅的に調べることが可能である。メタボロミクスの定義からは外れるが、代謝物以外の低分子化合物も含む土壌や河川水などの環境サンプルもメタボロミクスの対象として用いることができる。これらの事実はメタボロミクスがさまざまな研究分野に容易に応用できることを示唆している。

メタボロミクスは通常の代謝物分析と同様、抽出、前処理、機器分析、データ解析から成り立つ。詳細は数多く報告されている総説^(3,4)に載せられているので本稿では省くが、抽出や前処理については従来の低分子化合物の分析のそれとほとんど変わらない。メタノールなどの有機溶媒を破碎したサンプルに加えることによりターゲットとなる代謝物を抽出し、分析装置に適した前処理（分液、限外ろ過、誘導体化など）を行う。機器分析には主に質量分析装置が用いられている（図2）が、質量分析装置の前段には代謝物を分離する装置が接続されることが多く、それにより対象代謝物種が限定される。たとえば、キャピラリー電気泳動質量分析装置（図3）を用いたメタボロミクスでは、主にアミノ酸や糖リン酸、ヌクレオチドなどのイオン性化合物、液体クロマトグラフィー質量分析装置では脂質やポリフェノール類など中性化合物の網羅解析が行われることが多い。ほかにもガスクロマトグラフィー質量分析装置やNMRなどもメタボロミクスに用いられているが、上記したように1種類の装置では代謝物すべてを網羅することができないため、複数の装置による分析を組み合わせる研究例も認められる^(5,6)。また、得られたメタボロームデータが非常に大きくかつ複雑であることから、データ解析には特別なソフトウェアが用いられていることが多く、自作のソフトウェアを用いることもしばしばである。多変量解析などの統計学的処理、ソフトウェアの開発やデータベースの構築も含めバイオインフォマティクスの知識が必要となることが多い。機器分析やデータ解析手法について、現在でも活発な開発が行われていることもメタボロミクスの特徴と言える。

メタボロミクスは生物の代謝の状況を明らかにするので、生理現象などの理解に向けた未知遺伝子の機能解明など基礎研究に用いることができる。メタボロミクスの応用研究で最も進んでいる分野は医療関連であり、さまざまな疾患のバイオマーカーがメタボロミクスにより明らかにされている^(7,8)。医療分野での研究が進展している理由として、動物の代謝物の種類が比較的少ないことや、比較対象が単純（健康対罹病など）であるために、得られたメタボロームデータの解析が迅速にかつ明瞭に行えたことが挙げられる。一方、農業や食品分野では分

	対象化合物	主な利点	主な欠点
ガスクロマトグラフ/質量分析装置 GC-MS	全般（誘導体化が必要） 揮発性化合物（テルペノイドなど）	幅広い化合物の検出 フラグメントピークからの化合物同定が可能	誘導体化が必要な場合が多い
液体クロマトグラフ/質量分析装置 LC-MS	主に疎水性化合物 （フラボノイド、カロテノイドなど）	溶媒、カラムを変更することで様々な化合物への対応ができる	一つの分析条件で同定できる化合物が少ない
キャピラリー電気泳動/質量分析装置 CE-MS	イオン性化合物 （アミノ酸、有機酸、糖リン酸など）	イオン性化合物を高分解能で誘導体化を行わずに検出	中性および非極性化合物が分離・検出できない
フーリエ変換イオンサイクロトロン型質量分析装置 FT-ICR MS	全般（イオン化されるもの）	ハイスループット解析 超高分解能で精密質量を検出できる	同一組成式を持つ化合物が分離不可
核磁気共鳴分析装置 NMR	全般	化合物の物理化学的性質によらず検出できる MSとは異なる情報を得られる	感度、分離能が低い

図2 ■ メタボロミクスに用いられる分析装置の例

このほかにも赤外分光光度計なども用いられることがある。

図3 ■ キャピラリー電気泳動-飛行時間型質量分析装置（CE-TOFMS）

メタボロミクスで用いられる分析装置の一つで、アミノ酸や有機酸、糖リン酸などのイオン性化合物の分離・検出に適している（理化学研究所環境資源科学研究センター（鶴岡））。

析対象代謝物種が比較的多く（特に植物サンプル）、また重要な品質である食味や外観には代謝物が複雑に関与していることなど、メタボロミクスを応用するにあたり困難が予想された。しかし、明確な研究目的をもって綿密な研究計画を立てることにより、農業・食品分野でもメタボロミクスが応用できる可能性は高い。以下に、農業・食品分野でのメタボロミクスの応用について、すでに行われている事例や今後の可能性を述べていく。

農業・食品分野でのメタボロミクス

1. 品種開発・改良

あらゆる農作物において新品種の開発は、収量の確保や病虫害の蔓延防止などのための重要な課題である。伝

統的な育種手法に加え、近年の遺伝子組換え技術によって多くの優良な品種が開発されてきた。従来、品種の選抜には面積あたりの収量や病虫害への抵抗性などを物理的に調べる方法が主に行われている。これらは経験則に従うことが多く、科学的な根拠は後回しにされることが多い。しかし病虫害や高温などのストレス抵抗性に関与するバイオマーカーを見つけることができれば、より素早い品種選抜が可能になると考えられる。また複数の成分に的を絞った品種改良も考えられる。たとえば、機能性成分を多く含む農作物品種の選抜にメタボロミクスを用いた場合、機能性成分だけでなく呈味成分を含むほかの代謝物含量も同時にかつ包括的に把握できるため、「食味などを損なわない高機能性な品種」を選抜することができると考えられる。これら得られた品種を基に再び育種を行うことにより、これまでの収量や病害抵抗性などだけではなく、機能性など別の視点からの品種開発につながるだろう。

一方で、遺伝子組換え農作物（食品）について非組換え体との実質的同等性を確認するためにもメタボロミクスを用いることができる。遺伝子組換えにおける実質的同等性とは、組換えられた遺伝子にかかわる成分以外は非組換え体と同じであることを意味し、メタボロミクスによる代謝成分の網羅解析はまさにこれを確認するのに適した手法であると言える。実際、いくつかの遺伝子組換え植物での実質的同等性がメタボロミクスによって調べられており、遺伝子組換えによる成分の変化より、圃場や年次の違いによる成分変動のほうが大きいことを明らかにしている^(9, 10)。

イネやトマトなどすでに遺伝情報が明らかになっている農産物では、品質と遺伝子の関連を QTL（quantita-

図4 ■ 農業・食品分野へのメタボロミクスの応用例

品種改良から生産技術，調理加工法まであらゆる分野への応用が考えられる。

tive trait loci) 解析によって調べられることがある。この品質にメタボロームデータを用いる mQTL (metabolite (metabolome) QTL) 解析と呼ばれる手法も近年取り組まれている^(11, 12)。松田らは85種のイネ戻し交雑自殖系統から759種の代謝物を見だし、いくつかの代謝物についてイネゲノム上にQTLスポットを見出した⁽¹¹⁾。ゲノムシーケンサーの性能向上に伴い、今後ゲノム情報は多くの生物種で解明されていくことが予想され、mQTLが品種選抜の重要な手法になっていくかもしれない。

また、最近国内では、産地などの名前を冠した特産農産物や在来作物に注目が集まっている。これらの一部は「京野菜」のようにブランド化されているが、このブランドの定義は曖昧であることが多く、作付面積が増えるに従い品質にばらつきが出てくることが問題となっている。また、単に美味しいとか外見がきれいではほかの品種（ブランド）との差別が弱く、次々と新しい農産物が売り出されるにつれて、販売におけるブランド力が弱まってきている。筆者らは山形県鶴岡市の特産品であるブランド枝豆「ダダチャマメ」をメタボロミクスに供し

た。商業品種や他産地の在来枝豆およびダダチャマメなど計27品種の網羅的な成分比較を行った結果、ダダチャマメにはほかの枝豆品種とは区別できる特徴（アミノ酸や糖類が多い，有機酸が少ない，独特の香気成分をもつなど）があることがわかった (<http://www.iab.keio.ac.jp/jp/content/view/432/145/>)。これらの結果はダダチャマメ販売時にほかの枝豆との区別のための広告文句として用いることができるだけでなく、一定の成分レベルに達しないものは販売経路に回さないなどの措置を行うことによるブランド力の維持につなげられることが期待される。またダダチャマメにもさまざまな品種があり、これらをメタボロミクスによって比較することで、イネにおける「魚沼産コシヒカリ」のような同一品種内でのさらなるブランド化も可能である。ダダチャマメでは主に食味に重点が置かれているが、切り花などでの色や香りに注目したブランド化にもメタボロミクスは貢献できるだろう。

2. 農業技術の改善

優良な品種は良食味や高収量，高ストレス抵抗性など

をもたすが、土壌改良や肥料・農薬の種類や量、被覆材や農機具の導入などの農業技術による影響が品種間差を凌駕することもしばしば認められる。これら農業技術の農産物への影響もこれまでは経験則や数種類の成分分析によってのみ調べられていたが、メタボロミクスにより科学的な解明が期待できる。たとえば、メタボロミクスによって明らかにできる農産物中の食味や機能性にかかわる成分含量について、土壌の性質や農業技術が異なる農家間で生産される農産物を比較し、どのような条件が農産物の品質にかかわっているのかを解明することができるだろう。また、栄養欠乏時のバイオマーカーを明らかにすることにより、適した施肥の種類や量、時期を特定することが期待できる。また、年次による成分変動を記録し続けることにより、どのような気象条件が農産物の成分量に影響を与え、ひいては品質を決めるのかを明らかにできるかもしれない。これらは非常に手間と時間がかかる研究であるが、従来は注目されていなかった成分も含めた網羅的なデータは将来の農業技術改良に必ず役立つものとなるであろう。

また、農産物の品質には外観だけではわからないことがしばしば認められる。たとえば、イチゴは完熟する前の段階で収穫し出荷するが、果実の外観だけでは糖や有機酸などイチゴの食味にかかわる成分含量の判断は難しく、出荷時期の指標が求められている。またメロンやセイヨウナシのように収穫後数日おいて熟す果実では、「食べ頃」の判断が困難であり消費者を悩ませている。さらにこれらの特性は品種によっても異なるため、感覚的に把握するには長年の経験が必要となる。メタボロミクスを用いてこれら「適期」にかかわるバイオマーカーを明らかにし、外観など一般にもわかりやすい指標との相関を調べることによって、出荷時期や「食べ頃」の判断に一定の科学的基準を導入できるだろう。

このようにメタボロミクスは生産者である農家や卸売や販売、消費者にまで直接フィードバックできるデータを示すことができる技術であると言える。

3. 食品保蔵・加工法の向上

多くの農水産物や食品において、鮮度は食味などの重要な要因となる。そのため鮮度を維持することは、生産農家だけでなく流通・販売における課題の一つとなっている。上記したダダチャマメを含む枝豆は野菜のなかでも経時による鮮度低下が大きいものの一つであり、収穫後の保存・輸送の条件によって食味や外観がたちまち悪化する。杉本らはダダチャマメを用いて、収穫後のいくつかの保存・輸送条件を想定し、それらをメタボロミク

スに供することによって、保蔵条件によるダダチャマメの成分変動を明らかにした⁽¹³⁾。また筆者らも鮮度保持袋と保存温度条件によるカットキャベツの成分変動についてメタボロミクス技術を用いて調べた。これらの結果から、生鮮食品は保蔵中に乾燥や高低温などのストレスを複合的に受けており、複雑な成分変動が起きていることが明らかになった。生鮮食品の種類や季節（外気温）によっても異なるため、それぞれのサンプルで別個の試験が必要であるが、これは成分を網羅的に調べるメタボロミクスの利点を有効に用いた応用例と言え、最適な保蔵温度や鮮度保持フィルムの開発につながるものが期待される。

また、多くの加工食品は複雑な工程を経て製造される。これらの過程で、原材料に含まれる成分は、磨砕や加熱、抽出などによって含量が変化する。これらの成分には食味や機能性にかかわるものも含まれるが、これまでは一部の代表的な成分についてのみ調べられることが多かった。しかし、製造工程における成分変動は複雑で、かつそれぞれの食品ごとに異なることが予想される。メタボロミクスを用いて想定外の代謝物も含む食味や機能性にかかわる成分を網羅的に調べることによって、製造工程における成分含量への影響を明らかにできるだろう。筆者らは以前、庄内柿（山形県庄内地方の特産品）の粉末作成における加熱工程で、機能性成分が減らないばかりか増える現象を見いだした（<http://www.iab.keio.ac.jp/jp/content/view/439/145/>）。これはおそらく加熱の初期の柿果実におけるストレス応答による結果と考えられる。通常、原材料が加熱などの加工工程を経ると、含まれる有効成分は減少する（壊れる）と常識的に考えられていたが、この研究結果はその逆が起きている可能性を示した。ほかのすべての加工食品についてもメタボロミクスは応用可能であり、場合によっては加工によって食味や機能性にかかわる成分含量が増加しているケースもあるだろう。さらに、これは何も食品加工工場においてのみ言えることではなく、一般家庭の調理によっても十分に起こりうる成分変動である。現在の世論は、より美味しくより体に良い食品を求める傾向にあるため、今後の研究結果によってはメタボロームデータが食品に携わる業者だけでなく一般消費者にとっても有用な情報となるかもしれない。

4. 応用例：セイヨウナシのメタボロミクス

これまでに述べたことを具体的に考えてみよう。図5にセイヨウナシにメタボロミクスを用いて何がわかりどのように応用できるかの例を示した。

図5 ■ セイヨウナシのメタボロミクスで応用できること

メタボロミクスによって、農家や卸売業者など生産の現場から、流通・販売・加工に携わる企業・店舗、さらには消費者までに「より良いセイヨウナシ」をもたらすことができるかもしれない。

まず、セイヨウナシ果実に含まれる植物ホルモンを含む成分が果実の生長によってどのように変動するかをメタボロミクスによって明らかにする。これにより、果実成長にかかわると考えられる因子（植物ホルモンなど）やセイヨウナシの食味を構成する成分（糖、有機酸、芳香成分など）の含量の増減のタイミングを理解できる。これは施肥や収穫の時期の目安となる可能性があり、主に農家にとって有用な情報となることが期待される。しかしこれらの成分変動は、年次や圃場(畑)、品種によって異なると考えられるため、セイヨウナシ一般または一つの品種に対しての結論を出すためには、複数年度および異なる圃場での試験結果が求められる。これは施肥などの農業技術による収穫果実成分への影響を調べる場合にも同様である。メタボロミクスによって得られる情報は従来の知見よりはるかに多く、優良なセイヨウナシ果実の選抜に、より多角的かつ客観的な影響を与えるであろう。

セイヨウナシは収穫後追熟させて食す果実であるが、「食べ頃」の見極めが一般には難しい。さまざまなセイヨウナシ品種について、メタボロミクスによって追熟時の成分変動を調べることによって、それぞれの品種に適した「食べ頃」の指標を明らかにできるかもしれない。また追熟時の果実保存条件による成分変動を網羅的に調べることによって、収穫後のセイヨウナシ果実の生理学的な理解につながり、長期保存などに向けた最適条件の検討が可能になると考えられる。また、セイヨウナシ果実を缶詰やゼリー、ジャム、菓子などに加工する過程において、食味成分や機能性にかかわる代謝物量の変動をメタボロミクスによって調べることで、より美味しくか

つ機能性を保持した（もしくは増加した）加工方法を確立できるかもしれない。

また、セイヨウナシには山形県の“ラ・フランス”や新潟県の“ル・レクチュ”などの有名品種だけでなく多くの品種があり、生産県の農業試験場などを中心に鋭意、新品種の導入や開発が行われている。当然、品種ごとに含まれる代謝物種や含量には違いがあり、場合によっては食味成分や機能性成分が多いことなどを売り文句にした販売も考えられる。このような特産品の差別化は地域振興にとっても重要な武器となり得るため、メタボロミクスを用いて産地の強化や町興しにつなげることができるかもしれない。

ここではセイヨウナシについて例を挙げたが、これらのほとんどはすべての農産物・食品に応用できる。何を目的にするかで結果の見方や使い方が変わるが、農産物や食品のメタボロミクスによって得られるデータは同様（含まれる代謝物含量）であり、セイヨウナシで考えられた実験をそのまま他の農産物や食品に適用可能である。実際には品種間差がほとんど認められない、逆に有用成分が少ないなどのネガティブな結果が得られることもあるだろう。しかし、メタボロミクスによって得られる膨大な情報のなかには、別の角度や立場から眺めることによって有用なものも含まれることが期待できる。いくつかの明確な目的があり、かつ確かな実験計画が設計可能ならば、「まずはメタボロミクスをやってみて、それから考える」で良いのではないだろうか。

今後の展望

農業・食品分野での研究では食味と健康機能性が大きなトピックとなることが多い。後者については明確なターゲット分子がある場合が多く、また機能未知の成分についても動物実験などの評価系が既存であるため、メタボロミクスを用いた研究が比較的容易に始められる。一方、食味は単に呈味成分だけが関与しているわけではないため、単純にメタボロミクスによる結果だけでは実際の結果に則さないことが多い。そのためメタボロミクスに加えていくつかのデータを解析に加える必要がある。たとえば、食味に重要な食感（咀嚼性）は代謝物量で調べるよりもレオメーターのような装置によって調べたほうが良い。一方で、被験者の年齢や性別、体調や空腹状態などによっても食味は影響を受けることから、食味について論議する際には注意が必要である。

メタボロミクスを行うためには高価な装置が必要であり、かつ熟練した技術や知識が必要であるとの認識が強

い。福崎らは近年、GC/FIDを用いたメタボロミクスを提唱した⁽¹⁴⁾。これは質量分析装置を用いなくても比較的安価な装置で、目的次第ではあるが、十分にメタボロミクスが可能であることを示している。GC/FIDは多くの大学や研究機関に既存の装置であることが多く、これを用いれば資金の潤沢でない企業や研究グループでもメタボロミクスを試すことができるだろう。また、慶應義塾大学や大阪大学、理化学研究所など外部からの依頼分析を数多く受けているメタボロミクス拠点では、分析やデータ解析がマニュアル化されている。これはメタボロミクスを行うために極めて特殊な技術が必要というわけではなく、誰にでもメタボロミクスの実行が可能であることを示唆している。最近、国内の若手メタボロミクス研究者有志（ESI友の会）によって「メタボロミクスのプロトコル集」が公開された（<https://sites.google.com/site/esitomonokai/home>）。これにはサンプルの調製から機器分析、データ解析までの実践的な手法が数多く記されており、これからメタボロミクスを始める研究者からすでに行っている研究者まで広く利用されることが期待できる。

本稿の最初に述べたように、メタボロミクスはモデル生物以外に応用が容易な技術である。どんな農作物でも食品でもメタボロミクスを行うことによって何らかの情報が得られるはずである。その情報をどう用いるかはケースバイケースだが、多くの経験がさらに優れた技術の開発につながることは間違いない。日本ではまだこの分野へのメタボロミクスの応用例が少なく、携わっている研究者も多くはない。しかし近年、少しずつではあるが報告例も増えてきており、チーズ^(14, 15)、ワイン⁽¹⁶⁾、緑茶⁽¹⁷⁾などのメタボロミクスが別個の目的のために用いられている。農業も食品産業もわれわれの生活に密接にかかわっており、美味しく安全で高機能な農産物および食品に対するニーズはますます高まることが想定される。今後メタボロミクスが農業・食品分野にますます応用されていき、これらのニーズに応えられる成果を生み出していくことを期待する。

謝辞：果実成長中のセイヨウナシ果実のメタボロミクスについては、生研センター・イノベーション創出基礎的研究推進事業により行われた。

文献

- 1) H. Tweeddale, L. Notley-McRobb & T. Ferenci: *J. Bacteriol.*, **180**, 5109 (1998).
- 2) R. Drysdale & L. Bayraktaroglu: *Yeast*, **17**, 159 (2000).
- 3) A. Oikawa, F. Matsuda, M. Kusano, Y. Okazaki & K. Saito: *Rice*, **1**, 63 (2008).

- 4) K. Saito & F. Matsuda: *Annu. Rev. Plant Biol.*, **61**, 463 (2010).
- 5) C. Scherling, C. Roscher, P. Giavalisco, E. D. Schulze & W. Weckwerth: *PLoS One*, **5**, e12569 (2010).
- 6) J. Kim, J. N. Choi, K. M. John, M. Kusano, A. Oikawa, K. Saito & C. H. Lee: *J. Agric Food Chem.*, **60**, 9746 (2012).
- 7) T. Soga, R. Baran, M. Suematsu, Y. Ueno, S. Ikeda, T. Sakurakawa, Y. Kakazu, T. Ishikawa, M. Robert, T. Nishioka *et al.*: *J. Biol. Chem.*, **281**, 16768 (2006).
- 8) Z. Wang, E. Klipfell, B. J. Bennett, B. S. Levison, B. Dugar, A. E. Feldstein, E. B. Britt, X. Fu, Y. M. Chung, Y. Wu, P. Schauer, J. D. Smith *et al.*: *Nature*, **472**, 57 (2011).
- 9) J. M. Baker, N. D. Hawkins, J. L. Ward, A. Lovegrove, J. A. Napier, P. R. Shewry & M. H. Beale: *Plant Biotechnol.*, **4**, 381 (2006).
- 10) M. Kusano, H. Redestig, T. Hirai, A. Oikawa, F. Matsuda, A. Fukushima, M. Arita, S. Watanabe, M. Yano, K. Hiwasa-Tanase *et al.*: *PLoS One*, **6**, e16989 (2011).
- 11) F. Matsuda, Y. Okazaki, A. Oikawa, M. Kusano, R. Nakabayashi, J. Kikuchi, J. Yonemaru, K. Ebana, M. Yano & K. Saito: *Plant J.*, **70**, 624 (2012).
- 12) S. A. Khan, P. Y. Chibon, R. C. de Vos, B. A. Schipper, E. Walraven, J. Beekwilder, T. van Dijk, R. Finkers, R. G. Visser, E. W. van de Weg *et al.*: *J. Exp. Bot.*, **63**, 2895 (2012).
- 13) M. Sugimoto, H. Goto, K. Otomo, M. Ito, H. Onuma, A. Suzuki, M. Sugawara, S. Abe, M. Tomita & T. Soga: *J. Agric. Food Chem.*, **58**, 8418 (2010).
- 14) H. Ochi, T. Bamba, H. Naito, K. Iwatsuki & E. Fukusaki: *J. Biosci. Bioeng.*, **114**, 506 (2012).
- 15) H. Ochi, H. Naito, K. Iwatsuki, T. Bamba & E. Fukusaki: *J. Biosci. Bioeng.*, **113**, 751 (2012).
- 16) K. Inoue, M. Nishimura, H. Tsutsui, J. Z. Min, K. Todoroki, J. M. Kauffmann & T. Toyo'oka: *J. Agric. Food Chem.*, **61**, 1228 (2013).
- 17) Y. Fujimura, K. Kurihara, M. Ida, R. Kosaka, D. Miura, H. Wariishi, M. Maeda-Yamamoto, A. Nesumi, T. Saito, T. Kanda *et al.*: *PLoS One*, **6**, e23426 (2011).

プロフィール

及川 彰 (Akira OIKAWA)

＜略歴＞1998年京都大学農学部農芸化学科卒業／2003年同大学大学院農学研究科博士課程応用生命科学専攻修了（博士（農学）取得）／同年バイオテクノロジー開発技術研究組合研究員／2006月理化学研究所植物科学研究センター研究員／2012年山形大学農学部准教授（理化学研究所環境資源科学研究センター客員研究員（兼任）、慶應義塾大学特任准教授（兼任））＜研究テーマと抱負＞メタボロミクスによる生理現象の解明。代謝物動態から生理活性物質の生合成などを明らかにすること＜趣味＞日本中世史、家紋探索