

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22108008

研究課題名（和文）メタボロミクスによる植物成分生合成のゲノムマイニング

研究課題名（英文）Metabolomics-assisted genome mining for biosynthesis of plant metabolites

## 研究代表者

齊藤 和季（SAITO, Kazuki）

千葉大学・薬学研究科（研究院）・教授

研究者番号：00146705

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 47,700,000円

研究成果の概要（和文）：植物が生産する天然化学成分は、食料や医薬、工業原料として私たちの生活に役立っている。そこで、この天然化学成分が植物内で作られる仕組みを、メタボロミクスなどのゲノム機能科学や分子生物学、生化学によって明らかにした。臨床的に用いられている抗がん成分カンプトテシンやキノリチジンアルカロイド、硫黄原子を含んだニンニクの健康機能成分などについて、その生産に關与する遺伝子をいくつか決定した。

研究成果の概要（英文）：Plant metabolites are useful for our daily life as food, medicines and raw materials for industry. In this study, we have investigated the mechanism and regulation for the biosynthesis of plant metabolites by means of functional genomics, molecular biology and biochemistry. We have identified some genes involved in the biosynthesis of anti-cancer camptothecin, quinolizidine alkaloids and sulfur-containing metabolites from plants.

研究分野：天然資源系薬学、植物ゲノム機能科学、植物バイオテクノロジー

キーワード：生合成 植物二次代謝 メタボロミクス 統合オミクス

## 1. 研究開始当初の背景

移動できない植物は化学的な戦略に基づく独自の生存戦略を発達させた。その結果、植物代謝産物の総数は20万~100万種に達すると見積もられ、動物などの化学的多様性を凌駕している。その多くはアルカロイド、ポリフェノール、テルペノイドなどの特異的(二次)代謝産物(いわゆる天然有機化合物)である。メタボロミクスは植物成分生合成の遺伝子機能同定において極めて有力な手法であり、多くの生合成遺伝子がメタボロミクスを用いた研究によって同定されている。この植物の有する二次代謝成分生合成のメカニズムと制御のゲノム基盤解明とその応用は、人口の爆発的増加とそれに伴う食料不足、地球温暖化、感染症の拡大など地球規模での喫緊の諸問題解決のために極めて重要なテーマである。

## 2. 研究の目的

本研究では、モデル植物シロイヌナズナでの二次代謝ゲノムマイニングを進めるとともに、臨床的に用いられている抗がん成分、健康機能成分などの生物活性成分を生産する薬用植物について、オミクス統合データから生合成に必須な遺伝子を生物情報学を駆使したゲノムマイニングと植物細胞での *in vivo* 機能解析により機能同定を進めことを目的とした。

## 3. 研究の方法

(次項の研究成果と並列して記載した。)

## 4. 研究成果

(1) モデル植物シロイヌナズナにおける二次代謝遺伝子のマイニングと機能同定

シロイヌナズナの各種部位および変異体のフラボノイドターゲット分析から、シロイヌナズナには、35個のフラボノール、11個のアントシアニン、8個のプロアントシアニンからなる合計54分子種のフラボノイド分子種が存在することが明らかになり、これらのフラボノイド分子は *in vivo* において植物の非生物学的ストレスを緩和することが証明された。

(2) リジン由来のアルカロイドの生合成遺伝子マイニング

天然にはリジンに由来する多様なアルカロイドが見出されており、重要な医薬品資源となっている。Lupinus 属をはじめとするマメ科植物が生産するキノリチジンアルカロイドは、特異な生理活性を有しており漢方で用いられる生薬にも含まれている。このアルカロイド生合成に関与する酵素およびそれをコードする遺伝子についての知見はきわめて限られていた。そこで、ホソバルピナス *Lupinus angustifolius* のアルカロイド生産品種と非生産品種とのディファレンシャル遺伝子発現解析と次世代シーケンサーによる De novo ディープ・トランスクリプター

ム解析を行って生合成に関わる複数の遺伝子候補を絞り込んだ。これらの中で生合成の初発段階に関与する植物から初めてのリジン脱炭酸酵素(L/ODC)遺伝子の同定に成功した。他にキノリチジンアルカロイドを生産するクララ *Sophora flavescens*、クソエンドウ *Thermopsis chinensis* およびイヌクララ *Echinosophora koreensis*、さらに、同様にリジン由来のリコポディウムアルカロイドを生産するヒカゲノカズラ *Lycopodium clavatum* やトウゲシバ *Huperizia serrata* などの植物種からの L/ODC 遺伝子のクローニングに成功し、*in vivo* での実験も含めて機能の詳細を同定できた。その結果、これらの酵素は進化の過程でオルニチンに特異的なオルニチン脱炭酸酵素から活性中心付近のアミノ酸残基の変異によって多様性を拡張していった事が示された。

また、*L. angustifolius* のリジン脱炭酸酵素遺伝子を導入、発現したタバコ毛状根を作成し、[ -15N]- または [ -15N]-L-リジンを投与したトレーサー実験を行った。タバコアルカロイドのニコチン、アナタピン、アナタリン、アナバシンへの 15N の取り込みを LC-Q-MS, LC-FT-ICR-MS などによって詳細に検討した。その結果 5N の取り込みはアナバシンのみに見られ、タバコ細胞での中間体 <sup>1</sup>-piperideine は非対称の中間体を經由して生成するが、*L. angustifolius* のリジン脱炭酸酵素遺伝子を導入、発現した細胞では対称中間体カダベリンを經由して生成することが示された。

(3) 抗癌性アルカロイド、カンプトテシンの生合成経路解明と遺伝子マイニング

カンプトテシンは現在臨床的に用いられている植物由来の抗癌薬のなかで DNA トポイソメラーゼ I を阻害するという特異な作用メカニズムを有している。カンプトテシンは生合成的にはモノテルペノイドインドールアルカロイドに分類され、トリプタミンとセコロガニンが縮合して生成するストリクトジンを中間体とすることは知られているが、その後の生合成経路、中間体、酵素およびそれをコードする遺伝子は不明のままである。そこで、チャボイナモリ *Ophiorrhiza pumila* からカンプトテシンを生産する毛状根とカンプトテシン非生産性の培養細胞を確立し、PCR-セレクトサブトラクションと次世代シーケンサーによる de novo ディープ・トランスクリプトーム解析を行った。同時に代謝物のターゲット分析と非ターゲット分析を組み合わせたメタボローム解析も同じ二つの細胞系に対して行った。これらの統合解析から特定遺伝子発現と特定代謝物蓄積の関連を明らかにした。同時に、ストリクトジン生合成いたる過程に関与するトリプトファン脱炭酸酵素およびセコロガニン合成酵素遺伝子を RNAi 法によって抑制した毛状根の代謝プロファイルも行った。これらの知見を総合してストリクトジンからカンプト

テシンに至る未知の複数ステップに關与する生合成中間体と酵素およびその遺伝子を同定しつつある。さらに同様の手法で転写因子群についても解明を進めている。

また、以前にカンプトテシン生産植物の自己耐性は、その毒性ターゲットであるトポイソメラーゼI遺伝子の点変異によるという分子機構を解明し、二次代謝の生合成と自己耐性機構についての共進化の仮説を提唱した。さらに、新たな分子力学的モデリングと新規植物種からのトポイソメラーゼI遺伝子の解析を進め、タンパク質上のどのドメインの変異が耐性獲得に關わっているかを検討した。

(4) ニンニクのアリイン生合成に關与する鍵酵素遺伝子のマイニングと同定

ニンニク *Allium sativum* などのネギ属植物はアリインに代表される特異的な含硫黄二次代謝産物を生産し、これらは発癌抑制作用やコレステロール低下作用、免疫賦活作用等の多様な薬効・健康機能の本体と考えられている。これら含硫黄二次代謝産物はグルタチオンから合成されることが示唆されているが、詳細な生合成経路や生合成反応を担う酵素をコードする遺伝子は明らかにされていない。そこで、ニンニクのアリイン生合成の鍵ステップである生合成中間体の S-酸化および  $\gamma$ -グルタミル基転移に關与する酵素遺伝子を、トランスクリプトームデータのマイニングと組換え蛋白質の機能解析によって同定した。これら酵素の基質特異性から、アリイン生合成の後半の経路が示された。さらに、アリイン生合成の他のステップに關わる酵素遺伝子の同定および機能解明についても、同様の手法で進めている。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)(総件数)

Supaart Sirikantaramas, Arthitaya Meeprasert, Thanyada Rungrotmongkol, Hideyoshi Fuji, Tyuji Hoshino, Hiroshi Sudo, Mami Yamazaki, and Kazuki Saito: Structural insight of DNA topoisomerases I from camptothecin-producing plants revealed by molecular dynamics simulations. *Phytochemistry*, **113**, 50-56(2015) DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.02.012 査読有  
Naoko Yoshimoto, Ayami Yabe, Yuka Sugino, Soichiro Murakami, Niti Sai-ngam, Shin-ichiro Sumi, Tadimitsu Tsuneyoshi and Kazuki Saito: Garlic  $\gamma$ -glutamyl transpeptidases that catalyze deglutamylation of biosynthetic intermediate of alliin. *Front. Plant Sci.*, 5:758(2015), DOI:10.3389/fpls.2014.00758, 査読有  
Lloyd W. Sumner, Zhentian Lei, Basil J. Nikolau and Kazuki Saito: Modern plant metabolomics: Advanced natural product

gene discoveries, improved technologies, and future prospects. *Natural Products Reports*, **32**, 212 - 229 (2015) DOI: 10.1039/c4np00072b, 査読有

Keiko Yonekura-Sakakibara, Ryo Nakabayashi, Satoko Sugawara, Takayuki Tohge, Takuya Ito, Misuzu Koyanagi, Mariko Kitajima, Hiromitsu Takayama, and Kazuki Saito: A flavonoid 3-O-glucoside: 2''-O-glucosyltransferase responsible for terminal modification of pollen-specific flavonols in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.*, **79**, 769-782 (2014), DOI:10.1111/tpj.12580, 査読有

Ryo Nakabayashi, Keiko Yonekura-Sakakibara, Kaoru Urano, Makoto Suzuki, Yutaka Yamada, Tomoko Nishizawa, Fumio Matsuda, Mikiko Kojima, Hitoshi Sakakibara, Kazuo Shinozaki, Anthony J. Michael, Takayuki Tohge, Mami Yamazaki, and Kazuki Saito: Enhancement of oxidative and drought tolerance in *Arabidopsis* by overaccumulation of antioxidant flavonoids. *Plant J.*, **77**, 367-379, DOI: 10.1111/tpj.12388 (2014) 査読有

Somnuk Bunsupa, Kana Komastu, Ryo Nakabayashi, Kazuki Saito, and Mami Yamazaki: Revisiting anabasin biosynthesis in tobacco hairy roots expressing plant lysine decarboxylase gene by using  $^{15}\text{N}$ -labeled lysine. *Plant Biotech.*, **31**, 511-518 (2014) DOI: 10.5511/plantbiotechnology.14.1008a, 査読有

Mami Yamazaki, Keiichi Mochida, Takashi Asano, Ryo Nakabayashi, Motoaki Chiba, Udomson Nirin, Yasuyo Yamazaki, Dayan B. Goodenowe, Ushio Sankawa, Takuhiro Yoshida, Atsushi Toyoda, Yasushi Totoki, Yoshiyuki Sakaki, Elsa Góngora-Castill, C. Robin Buell, Tetsuya Sakurai and Kazuki Saito: Coupling deep transcriptome analysis with untargeted metabolic profiling in *Ophiorrhiza pumila* to further the understanding of the biosynthesis of the anti-cancer alkaloid camptothecin and anthraquinones. *Plant Cell Physiol.*, **54**, 686-696(2013), DOI:10.1093/pcp/pct040, 査読有

Kazuki Saito, Keiko Yonekura-Sakakibara, Ryo Nakabayashi, Yasuhiro Higashi, Mami Yamazaki, Takayuki Tohge, Alisdair R. Fernie: The flavonoid biosynthetic pathway in *Arabidopsis*: Structural and genetic diversity. *Plant Physiol. Biochem.*, **72**, 21-34(2013), DOI.org/10.1016/j.plaphy.2013.02.001, 査読有

Kazuki Saito: Phytochemical genomics - a new trend. *Curr. Opin. Plant Biol.*, **16**, 373-380(2013),

DOI:10.1016/j.pbi.2013.04.001, 査読有  
Takashi Asano, Kanae Kobayashi, Emi Kashihara, Hiroshi Sudo, Ryosuke Sasaki, Yoko Iijima, Koh Aoki, Daisuke Shibata, Kazuki Saito and Mami Yamazaki: Suppression of camptothecin biosynthetic genes results in metabolic modification of secondary products in hairy roots of *Ophiorrhiza pumila*. *Phytochemistry*. **91**, 128-139 (2013),  
DOI: 10.1016/j.phytochem.2012.04.019, 査読有  
Somnuk Bunsupa, Mami Yamazaki and Kazuki Saito: Quinolizidine alkaloid biosynthesis: recent advances and future prospects. *Front. Plant Sci.*, **3**, 239 (2012)  
DOI: 10.3389/fpls.2012.00239, 査読有  
Keiko Yonekura-Sakakibara, Atsushi Fukushima, Ryo Nakabayashi, Kousuke Hanada, Fumio Matsuda, Satoko Sugawara, Eri Inoue, Takashi Kuromori, Takuya Ito, Kazuo Shinozaki, Bunyapa Wangwattana, Mami Yamazaki and Kazuki Saito: Two glycosyltransferases involved in anthocyanin modification delineated by transcriptome independent component analysis in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* **69**, 154-167(2012), DOI: 10.1111/j.1365-3113x.2011.04779x, 査読有  
Somnuk Bunsupa, Kae Katayama, Emi Ikeura, Akira Oikawa, Kiminori Toyooka, Kazuki Saito, and Mami Yamazaki: Lysine decarboxylase catalyzes the first step of quinolizidine alkaloid biosynthesis and coevolved with alkaloid production in Leguminosae. *Plant Cell*. **24**, 1202-1216 (2012), DOI: 10.1105/tpc.112.095885, 査読有

[学会発表](計 30 件)

Nirin UDOMSOM, 野老美喜, 今井亮輔, 齋藤和季, 山崎真巳: Molecular cloning and characterization of AP2/ERF transcription factors possibly involved in camptothecin biosynthesis in *Ophiorrhiza pumila*. 日本薬学会第 135 年会. 2015 年 3 月 25-28 日. 神戸.  
Somnuk Bunsupa, Kousuke Hanada, Hideki Ueno, Akira Maruyama, Kaori Aoyagi, Kana Komatsu, Madoka Yamashita, Akira Oikawa, Ryosuke Sasaki, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Convergent Evolution of Plant Lys Decarboxylase: Molecular Cloning and Characterization of Lys Decarboxylase from Clubmosses. 第 56 回日本植物生理学会年会. 2015 年 3 月 16-18 日. 東京農業大学, 東京.  
小沼美沙都, 吉本尚子, 水野新也, 中林亮, 今井真介, 角慎一郎, 恒吉唯充, 齋

藤和季: ニンニクの含硫二次代謝物アリインの生合成に関わる S 酸化酵素遺伝子 *AsFM01* の機能解析. 日本生薬学会第 61 回年会福岡 2014. 2014 年 9 月 13-14 日. 福岡大学, 福岡.

Nirin Udomsom, Miki Tokoro, Ryosuke Imai, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Molecular cloning and characterization of AP2/ERF transcription factors possibly involved in camptothecin biosynthesis in *Ophiorrhiza pumila*. 日本生薬学会第 61 回年会福岡 2014. 2014 年 9 月 13-14 日. 福岡大学, 福岡.

Bunsupa Somnuk, Aoyagi Kaori, Saito Kazuki, Yamazaki Mami: Cloning and Characterization of copper amine oxidase from quinolizidine-alkaloid producing *Lupinus angustifolius*. 第 32 回日本植物細胞分子生物学会(盛岡)大会・シンポジウム. 2014 年 8 月 21-22 日. いわて県民情報交流センター, 盛岡.

K. Saito: Metabolomics-based functional genomics: From Arabidopsis to crops and medicinal plants. *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Plant Metabolism*. July 2 – 5, 2014. Xiamen, China.

Somnuk Bunsupa, Kousuke Hanada, Akira Maruyama, Hideki Ueno, Madoka Yamashita, Ryosuke Sasaki, Akira Oikawa, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Moving into Generalist: Repeated Evolution of Plant Lys Decarboxylase for Alkaloids Production via Promiscuous Activity. The 3th International Conference on Plant Metabolism. July 2-5, 2014. Xiamen, China.

K. Saito: Metabolomics-based functional genomics from Arabidopsis to crops and medicinal plants. *ICREA Workshop: From model systems to crops, challenge for a new era in plant biology*. May 7 – 8, 2014. Barcelona, Spain.

Yoshimoto Naoko, Yabe Ayami, Onuma Misato, Sugino Yuka, Nakabayashi Ryo, Ueyama Masae, Kamata Yasuhiro, Imai Shinsuke, Sumi Shin-ichiro, Tsuneyoshi Tadimitsu, Saito Kazuki: Functional characterization of de-glutamylating and s-oxygenating enzymes for the alliin biosynthesis in garlic. 9<sup>th</sup> International Workshop, Sulfur Metabolism in Plants. Molecular Physiology and Ecophysiology of Sulfur. April 14-17, 2014. Freiburg, Germany.

Somnuk Bunsupa, Kaori Aoyagi, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Cloning and Characterization of Copper Amine Oxidase from Quinolizidine-alkaloid Accumulating *Lupinus angustifolius*. 第 55 回日本植物生理学会年会. 2014 年 3 月 18-20 日. 富山大学, 富山.

K. Saito: Metabolomics-based functional genomics in plants. *Molecular Life Sciences 2013 International Symposium of the Germany Society for Biochemistry and Molecular Biology*. October 3 – 6, 2013. Frankfurt, Germany.

K. Saito: Phytochemical genomics: An omics perspective for the origin of metabolomics diversity in plants. *TERPNET 2013 - 11<sup>th</sup> International Meeting on Biosynthesis, Function and Biotechnology of Isoprenoids in Terrestrial and Marine Organisms*. June 1 – 5, 2013. Kolyvari, Crete, Greece.

Somnuk Bunsupa, 山崎真巳, 斉藤和季: Transcriptome mining of genes associated with quinolizidine alkaloids biosynthesis in *Lupinus angustifolius*. 日本薬学会第133会. 2013年3月27-30日. 横浜.

Somnuk Bunsupa, Hideki Ueno, Akira Maruyama, Kadoka Yamashita, Akira Oikawa, Ryusuke Sasaki, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Cloning and Characterization of Plant Lys

Decarboxylase: Diversity and Molecular Evolution. 第54回日本植物生理学会年会. 2013年3月21-23日. 岡山大学, 岡山.

Kazuki Saito: Origin of metabolomic diversity. Evolution of Plant Metabolic Diversity, March 3-6, 2013. New York, USA.

Kazuki Saito: Origin of metabolomic diversity in plants. Nature/VIB Conference. Frontiers in plant biology: From discovery to applications. October 3-5, 2012. Ghent, Belgium.

Somnuk Bunsupa, Mami Yamazaki, Kazuki Saito: Deep transcriptome sequencing of alkaloids-producing and non-producing cultivars of *Lupinus angustifolius* reveals biosynthesis and related pathways.

Nature/VIB Conference. Frontiers in plant biology: From discovery to applications. discovery to applications, October 3-5, 2012. Ghent, Belgium.

Somnuk Bunsupa, Hideki Ueno, Akira Maruyama, Kae Katayama, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Molecular cloning and characterization of lysine decarboxylase from *Sophora flavescens* and *Lycopodium clavatum*. 日本生薬学会第59回年会. 2012年9月17-18日. かずさアカデミアパーク, 千葉.

Somnuk Bunsupa, Hideki Ueno, Akira Maruyama, Kazuki Saito, Mami Yamazaki: Functional characterization of lysine decarboxylase from cadaverine-derived alkaloid-producing plants. 第30回日本植物細胞分子生物学会(生駒)大会. 2012年8月3-5日. 奈良先端科学技術大学院大学,

奈良.

Kazuki Saito: Integrated functional genomics of polyphenol biosynthesis in *Arabidopsis* and beyond. XXVI International Conference on Polyphenols July 22-26, 2012. Florence, Italy.

⑳ Kazuki Saito: Omics-Based Dissection of Plant Natural Product Biosynthesis - Lessons from *Arabidopsis* and Beyond. 8th U.S.-Japan Seminar on the Biosynthesis of Natural Products. June 17-22, 2012. Awaji-shima, Japan.

㉑ Somnuk Bunsupa, Mimi Yamazaki, Kazuki Saito: Deep-transcriptome analysis in *Lupinus angustifolius*: Mining and characterization of genes involved in quinolizidine alkaloid biosynthetic pathway. 8th U.S.-Japan Seminar on the Biosynthesis of Natural. June 17-22, 2012. Awaji-shima, Japan.

㉒ S. Bunsupa, K. Mochida, M. Yamazaki, K. Saito: Deep-Transcriptome Analysis of *Lupinus angustifolius* and Its Application to the Identification of Genes Associated with Quinolizidine Alkaloids Biosynthesis. 第53回日本植物生理学会年会. 2012年3月16-18日. 京都産業大学, 京都.

㉓ K. Saito, S. Bunsupa, M. Yamazaki: Biosynthetic study of quinolizidine alkaloid – History and recent advancement. *Phytochemical Society of North America 50th Anniversary Meeting*. December 10-15, 2011. Hawaii, USA.

㉔ K. Saito, S. Bunsupa, K. Katayama, A. Oikawa, M. Yamazaki: Lysine/ornithine decarboxylase – An enzyme catalyzing the first step of quinolizidine alkaloid biosynthesis in legume plants. *12th International Congress on Amino Acids, Peptides and Proteins*. August 4, 2011. Beijing, China.

㉕ K. Saito: Metabolomics-based Phytochemical Genomics - Beyond *Arabidopsis* to Crop Biotechnology. *Gordon Research Conferences, Plant Metabolic Engineering*. July 25, 2011. Waterville Valley, NH. USA.

㉖ K. Saito: Functional genomics for biosynthesis of plant specialized products. *The 2nd International Conference on Plant Metabolism*. July 2, 2011. Qingdao, China.

㉗ K. Saito: Lysine/ornithine decarboxylase – An enzyme catalyzing the first step of quinolizidine alkaloids biosynthesis in legume plants. *2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies*. December 12-20, 2010. Honolulu, USA.

㉘ K. Saito: Molecular/cellular regulation of sulfate uptake and assimilation – what we

know and what we should know. 8<sup>th</sup>  
*International Workshop on Plant Sulphur  
Metabolism. 8<sup>th</sup> International Workshop on  
Plant Sulphur Metabolism.* November  
22-27, 2010. Creswick, Australia.

- ③⑩ K. Saito: Funtional genomics for  
biosynthesis of plant specialized products.  
*25<sup>th</sup> Symposium on Natural Products,*  
November 6-7 2010. Pingtung, Taiwan.

[図書](計5件)

Supaart Sirikantaramas, Mami Yamazaki,  
Kazuki Saito: How Plants Avoid the  
Toxicity of Self-Produced Defense  
Bioactive Compounds. *In: "Natural  
Products: Discourse, Diversity, and Design"*  
Anne Osbourn, Rebecca J. Goss, Guy T.  
Carter, eds.: pp. 69 – 82, Wiley-Blackwell,  
Oxford, 2014.

Supaart Sirikantaramas, Mami Yamazaki,  
and Kazuki Saito: Camptothecin:  
Biosynthesis, Biotechnological Production  
and Resistance Mechanism(s). *In:*  
"Advances in Botanical Research New  
Light on Alkaloid Biosynthesis and Future  
Prospects. Volume 68" Nathalie  
Gigliolo-Guivare'h, *Volume ed.*, Jean-Pierre  
Jacquot, Pierre Gadad, *Series eds.*: pp. 139 –  
162, Elsevier-Academic Press, Amsterdam,  
2013.

Takashi Asano, Kazuki Saito, Mami  
Yamazaki: Camptothecin Production and  
Biosynthesis in Plant Cell Cultures. *In: "50  
Years of Phytochemistry Research. Recent  
Advances in Phytochemistry Volume 43"*  
David R. Gang, ed.: pp. 43 – 54, Springer,  
Heidelberg, 2013.

Somnuk Bunsupa, Kazuki Saito and Mami  
Yamazaki: Molecular biology and  
biotechnology of quinolizidine alkaloid  
biosynthesis in Leguminosae plants. *In:*  
"Biotechnology for Medicinal Plants"  
Suman Chandra, Hemant Lata, Ajit Varma,  
eds.: pp. 263-273, Springer-Verlag, Berlin  
Heidelberg, 2013.

Naoko Yoshimoto and Kazuki Saito:  
Molecular and cellular regulation of sulfate  
transport and assimilation. *In: "Sulfur  
Metabolism in Plants Mechanisms and  
Applications to Food Security and  
Responses to Climate Change"* L.J. De  
Kok, M. Tausz, M.J. Hawkesford, R.  
Hoefgen, M.T. McManus, R.M. Norton, H.  
Rennenberg, K. Saito, E. Schnug, L. Tabe, L.  
eds.: pp. 25-33, Springer, 2012

[産業財産権]

出願状況(計 0件)  
取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.p.chiba-u.jp/lab/idenshi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 和季 (SAITO Kazuki)  
千葉大学・大学院薬学研究院・教授  
研究者番号: 00146705

(2) 研究分担者

山崎 真巳 (YAMAZAKI Mami)  
千葉大学・大学院薬学研究院・准教授  
研究者番号: 70222370  
(平成25年度より連携研究者 研究分担者)

(3) 連携研究者

吉本 尚子 (YOSHIMOTO Naoko)  
千葉大学・大学院薬学研究院・助教  
研究者番号: 10415333

榊原 圭子 (SAKAKIBARA Keiko)  
独立行政法人理化学研究所・環境資源科学  
研究センター・上級研究員  
研究者番号: 20360555

福島 敦史 (FUKUSHIMA Atsushi)  
独立行政法人理化学研究所・環境資源科学  
研究センター・研究員  
研究者番号: 80415281

中林 亮 (NAKABAYASHI Ryo)  
独立行政法人理化学研究所・環境資源科学  
研究センター・特別研究員  
研究者番号: 30586160  
(平成25年度より)

草野 都 (KUSANO Miyako)  
独立行政法人理化学研究所・植物科学研究  
センター・上級研究員  
研究者番号: 60415148  
(平成22年度から平成24年度まで)