

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 26 日現在

機関番号：82112

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23380023

研究課題名(和文) 果樹等の越冬組織の凍結挙動の新規可視化法の開発とその支配因子の同定

研究課題名(英文) Development of methods that allows visualization of freezing behaviors in cold hardy plant tissues and determination of factors contributing to tissue freezing behaviors.

研究代表者

石川 雅也 (Ishikawa, Masaya)

国立研究開発法人農業生物資源研究所・その他部局等・研究専門員

研究者番号：90355727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：冬、氷点下では植物体の温度もマイナスになる。寒さに強い果樹等は組織の凍結をどう制御しているのかよく判っていない。凍結生存戦略の動態・仕組の解明のため、赤外線サーモビュアとMRIを用いて凍結過程を非破壊的に観察できる凍結可視化法を開発し観察を行った。植物は種や組織により、凍る順番や凍結・未凍結部位が詳細に決まっており(ブルーベリー枝は皮層部から凍結開始)、その決定因子として組織の水核活性(凍らせる能力)が重要で、その組織分布と凍結順位には高い相関があること、水核活性は季節変動し、センサーのように凍結温度を検知して凍結を必要部位に誘発する機能を持つ事などが判った。水核活性の物質的特徴等を解析した。

研究成果の概要(英文)：Diversity and mechanisms involved in freezing behaviors of cold hardy plant tissues remain unknown. To address this question, we attempted to develop non-invasive methods that allow visualization of freezing behaviors in plant tissues using MRI and infra-red thermography. These methods enabled to clarify tissue- and species-specific freezing behaviors (freeze autonomously or remain stably unfrozen) and the order of freezing among tissues. These traits were closely related to the distribution of ice nucleation activity (INA), the ability of cause heterogeneous ice nucleation, in the tissues. Tissue INA reached the maximal just before the first autumnal frost and likely functions as the freezing sensor that allows to induce freezing in appropriate places and timing.

研究分野：植物生理学

キーワード：耐寒性 赤外線サーモビュア 凍結 水 可視化 MRI 水核活性 氷

1. 研究開始当初の背景

植物の最大成分は水で、凍結ストレスは細胞内の凍結を引起こしうる過酷なストレスである。寒さに強い植物は組織の凍結にどう対応しているのだろうか。申請者らの研究により、耐寒性の高い越冬植物組織では、この凍結ストレスに対して組織及び種に固有の凍結挙動（凍結に対する反応）を示し、耐寒性の重要な機構であることが判っている。例えば、木本皮層組織では細胞外凍結（細胞間隙に氷晶が生成し、細胞内液は細胞外に急速に移動し凍結、細胞は脱水される）、花芽、葉芽などでは器官外凍結、木部放射柔細胞では深過冷却（-20~-40℃まで凍らない）という凍結挙動（凍結様式）が見られる。

しかし、果樹等の越年生植物の冬芽や枝など、複雑な植物器官の凍結過程や凍結挙動の詳細やダイナミックな動態（実際にどのようにして植物組織が凍り始め、凍結伝搬、或いはブロックされるかなど）は、凍結自体が非常に早い現象のため、良い解析手法がなく、詳細に解析した例は殆どない。また、種や器官による凍結様式の多様性やそれを支配する要因は、重要な耐寒性機構であるにも拘らず、殆ど不明である。近年、温暖化により低温馴化不足や春の早すぎる芽の動き出しで、温帯性果樹等の凍霜害が頻発するが(文献①)、有効な対策がない。この解決にも凍結の実態とその制御機構解明が重要で、植物の凍結現象の実態把握のため、凍結挙動の詳細を解析できる手法開発・最先端化が必須である。

そこで、本研究ではMRI可視化法と近年、感度向上の著しい赤外線(IR)サーモビューアを利用して、複雑な植物器官の凍結過程や凍結挙動の詳細や動態の可視化解析を目指す。様々な植物種の器官を解析し、凍結挙動の多様性や特徴、その機構の解明を目指す。

凍結挙動の支配因子としては、どこから凍り始めるか決定する氷核活性が重要であるが、植物組織の内生氷核活性の実態は殆ど不明である。着生する氷核活性細菌が重要というのが従前の定説であった(文献②)。まず植物の氷核活性の特性や組織分布とその機能解明が重要と考えられた。

2. 研究の目的

果樹等の高耐寒性植物がどのようにうまく制御しながら凍るか解明するため、本研究では、①植物の素早い凍結過程を非破壊可視化できる高感度の新手法を開発する（MRIや赤外線(IR)サーモビューア等による示差熱可視化法等）。②新手法を用いて越冬植物組織の凍結・伝搬の動態・秩序や構成組織、季節、馴化や耐寒性の強弱による凍結挙動の相違を可視化解析する。③凍結挙動を支配する植物の内生氷核活性に着目し、詳細な特徴や組織分布、凍結挙動における役割を解明する。ダイナミックな凍結動態と制御因子（内生氷核活性）を解明し、果樹等の耐寒性増強や凍霜害機序解明や凍霜害回避法開発に資する。

3. 研究の方法

(1) IRサーモグラフィによる植物の凍結挙動の非破壊可視化解析

ブルーベリー枝を-6℃のフリーザー内に入れ、凍結過程をデジタルIRサーモグラフィ（FLIR Systems ThermoCAM SC/B660）を用いて1画像/秒で撮影した。ThermoCAM Researcherを用いて、撮影熱画像をBase image (n)として二種類の画像解析を行った(nは秒数)。Referential image (n) = Base image (n) - Base image (152s)。Differential image (n) = Base image (n) - Base image (n-1)。

(2) MRIによる凍結挙動の非破壊可視化解析

高分解能MRIは、温度可変装置を装備したBruker DRX300を用いた。主にプロトン密度画像を撮った。冬芽や枝等を10mm管に挿入し、約5℃/時で冷却し、各温度に10分間放置後、撮像した（128x128の解像度で8回積算：解像度78μm）。

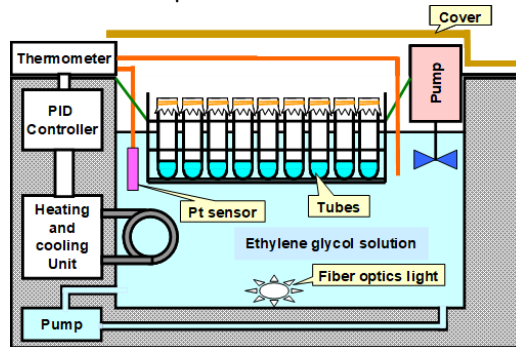


図1. 氷核活性測定装置の概略

(3) 植物組織の氷核活性測定

冬芽、枝等の各組織の氷核活性は、試験管法により測定した(図1)。冬芽を各パーツ（芽鱗片、小花、葉原基等）に分解し、クリーンベンチ内で各試料をオートクレーブ滅菌した試験管（水2mL）に入れ、透明の蓋をした。試験管を水槽（エチレングリコール40%v/v）に浸漬し、1℃ずつ段階的に冷却し、各温度で20分放置後に凍結した試験管数をカウントした。一試料につき40反復（試験管本数）とし、氷核活性は半数の試験管が凍結した温度（凍結温度の中央値）で表した。ミリQ水の凍結温度中央値は-18℃（2mL系）であった。この手法は植物小試料の氷核活性を再現性よく測定可能である。

4. 研究成果

(1) IRサーモグラフィによる植物の凍結挙動の非破壊可視化法の開発と凍結挙動の解析

サーモグラフィは、凍結に伴う潜熱の試料表面からの放射を画像として捉えて植物の凍結過程を非破壊可視化動画観察する。主に含水量の高い夏の葉などの凍結過程観察に利用されてきた(文献③④)。含水量の少ない冬の植物を材料とした研究例は少ない。

ブルーベリー越冬枝の凍結挙動をサーモグラフィで可視化観察した(図2)。各画像間

の差をとる Differential image は、飛躍的な感度増加がみられ、枝の凍結が2段階で生じることを可視化した。最初の凍結開始(156s)と凍結伝播は、鮮明で緩速な凍結伝播による発熱で、それに続く同じ部位からの二回目の発熱(171-176s)は、ぼやっとした急速な凍結伝播(発熱)であった(図2)。

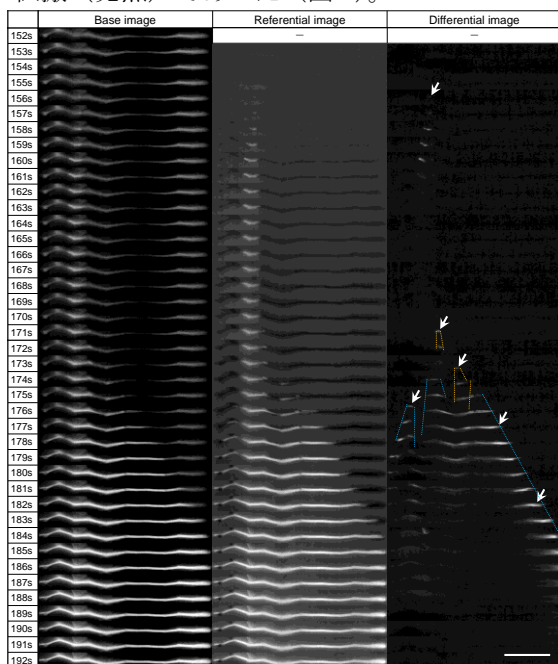


図2. IRサーモグラフィによるブルーベリー枝の凍結過程の解析(白い部分が凍結発熱を示す)

原理的に、鮮明な現象は枝表面付近の、鮮明でない現象は枝中心部付近の発熱に由来すると予想された。環状除皮による実験の結果、一度目の発熱は枝皮層部の凍結、二度目の凍結は木部の凍結に由来することが判った(図省略)。本結果は、ブルーベリー枝では皮層部から凍結開始し、皮層部での緩慢な凍結伝播が生じ、その一部がやがて木部に伝播し、木部の急速な凍結が進む(水分が多いため急速に進む)ことを示し、枝の凍結開始は、水分の多い木部から生じるというこれまでの通説(文献⑤)と全く異なる。

以上、本法は試料表面から遠い組織内部の凍結或未凍結部位の解析には適さないが、早い凍結現象を詳細に解析できる利点がある。

(2) MRI による植物の凍結挙動の非破壊可視化法の開発と凍結挙動の解析

MRI を用いて凍結温度下での未凍結水の分布と密度を画像化し、複雑な植物器官でも内部の凍結状態を非破壊的に観察できる手法を開発した。原理は医療用MRIと同様で、組織中の水の密度を代表するようなパラメータをとる。試料中の組織水は様々な環境下にあり、多様な長さの緩和時間をもつ。多様な水を画像化するため、パルス間隔($T_r=1.2\text{ s}$)を長く、エコー時間($T_e=7\text{ ms}$)を短く設定した。水が凍結すると T_2 が T_e より極端に短くなるためコントラストが消失し、凍結水と未凍結水を容易に区別可能である。

高分解能 MRI の実用解像度は $20\sim 100\ \mu\text{ m}$ で組織レベルの解析には十分である。本法によりアメリカハナミズキ花芽の凍結解析を行った(図3b)。葯、胚珠だけが $-15\sim -25^\circ\text{C}$ まで過冷却(白く残る部分)し、それ以外の花芽組織は細胞外凍結することが判った(後者は -7°C でシグナルが激減して画像から消え、黒くなった芽鱗片等)。葯・胚珠だけが過冷却する花芽の凍結様式は新規な発見で、凍結部位と過冷却部位の境界バリアなど微細な凍結制御が可視化された。一方、画像演算により(図3a,c)凍結した部分も可視化可能になった。MRI は新現象発見や凍結制御機構、多様性の解析に有効な手法である。

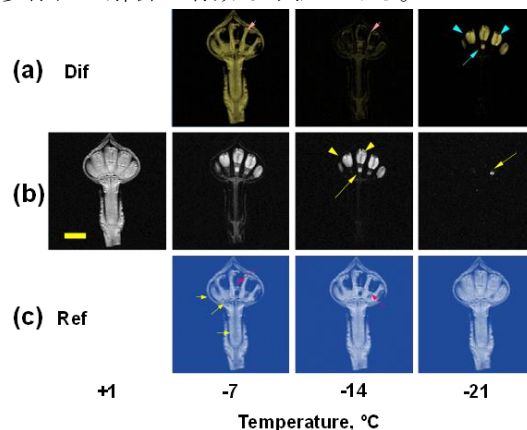


図3. MRI によるアメリカハナミズキ花芽の凍結様式の解析。(b)は各温度での画像(白い部分が未凍結水分分布を表す), (a)は各温度間の差画像, (c)は各画像を $+1^\circ\text{C}$ 画像から引算したもの(発表論文②)

(3) 氷核活性の植物界における分布

多様な植物種の各組織の氷核活性を試験管法で検索した。熱帯性・亜熱帯性植物など凍結感受性植物は、どの組織も氷核活性が低い。温帯～亜寒帯の耐寒性植物では、組織のどこかに高い氷核活性を持つ傾向があった。つまり、凍結感受性植物は凍りにくく、寒さに強い植物は凍り易い(発表論文⑤)。

(4) 植物の氷核活性の組織分布

越冬中の耐寒性木本植物の冬芽などの氷核活性を調べた。器官外凍結の Ice sink (氷析出部位)として機能し、積極的に凍結する部位(芽鱗片等)や細胞外凍結をする枝皮層部等は氷核活性が高いが、小花や葉原基など深過冷却で耐寒する組織は氷核活性が低かった(図4:レンゲツツジ花芽の例)。このようにMRI等により可視化された各組織固有の凍結様式と組織の氷核活性には密接な相関が見られた(発表論文③⑤)。

ブルーベリー枝の各組織の氷核活性を調べた。枝の高い氷核活性は、皮層部に由来した(図5)。木部や髄は -9°C 程度の活性しかなかった。これは、サーモグラフィで可視化された、ブルーベリー枝は皮層部から凍結開始し、木部に伝播するという枝組織の凍結順位とよく一致した(発表論文⑧)。枝皮層部を乳鉢で、Homogenize して、Differential

centrifugation でどの細胞内画分に氷核活性がくるか調べた。氷核活性は細胞壁画分に回収され、細胞内の画分には、殆ど氷核活性がなかった。本結果は細胞外凍結において細胞外を積極的に高い温度で凍結開始させることに合目的である。このように氷核活性の組織分布は、組織の凍結様式や凍結順位と密接な関連があった。

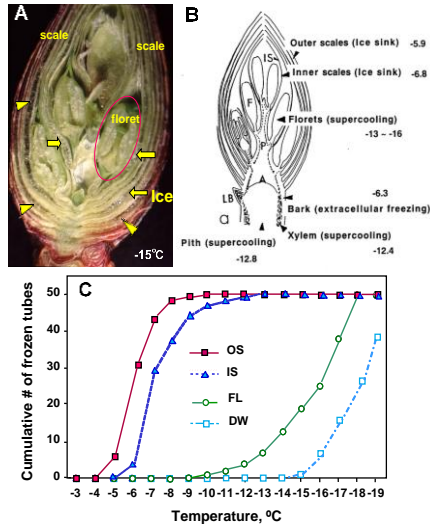


図4. レンゲツツジ花芽の氷核活性分布 (B, C) と-15°Cでの氷結晶の分布 (A)。芽鱗片内に多数の氷結晶がみられる。芽鱗片と枝皮層部の氷核活性は高く、小花は低い。発表論文③⑤

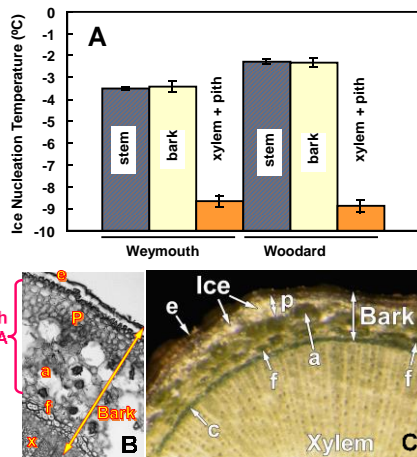


図5 ブルーベリー枝の氷核活性の組織分布 (A, B) と-10°Cでの氷結晶分布 (C) 発表論文⑧

(5) 植物組織の氷核活性の季節変化と特性

レンゲツツジ花芽とブルーベリー枝の氷核活性季節変化を10年間調べた。何れも秋の初霜直前に最も高い活性を示した(図6, 7)。レンゲツツジ花芽は8月末の花芽形成が終了時点では、外鱗片にはある程度の氷核活性があるが、内鱗片には殆ど活性がない。しかし、初霜が降りる10月下旬にかけて内外鱗片の氷核活性が急激に上昇し最大となり、冬季間維持される。一方、小花の氷核活性は冬季間低い状態で保たれた。

レンゲツツジの氷核活性は2種類あり、芽鱗片のものは、121°C15分の熱処理に耐性であるが、枝皮層部の氷核活性は同処理に感受

性であった。同様に、ブルーベリー枝皮層部の氷核活性も熱感受性であった。これらの二つのタイプがどのような物質に起因するかは全く不明である。微生物由来の氷核活性はすべて熱感受性なため、熱耐性のものは、植物内生の可能性が高い。

初霜に合わせて、組織の氷核活性が高まることは、植物体内でこの物質が産生されることを想起させ、まるで初霜を予知しているようで、氷核活性の役割考察上、示唆的である。野外のリンゴの低温馴化に関する研究では、初霜を刺激として急速に耐寒性が上昇することが知られる(文献⑥)。耐寒性が不十分な状況で最初の数回の霜を生残することが重要で、組織の内生氷核活性はこの目的のために秋の初霜時に最大に達する可能性がある。

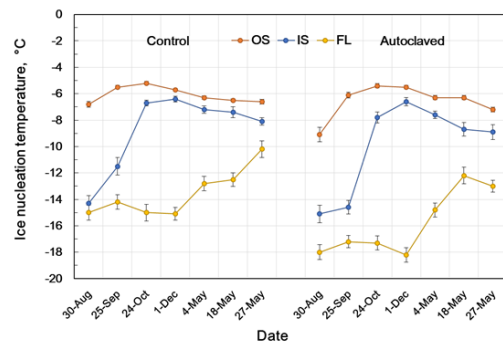


図6. レンゲツツジ花芽の各組織の氷核活性の季節変化とオートクレーブ処理耐性(121°C15分)。発表論文③

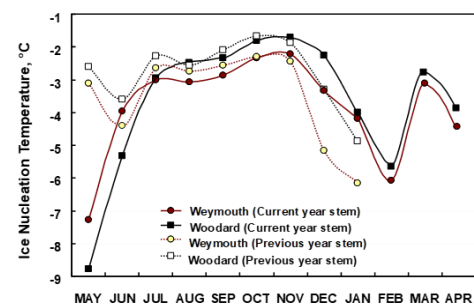


図7. ブルーベリー枝氷核活性の季節変化。発表論文⑦

(6) 植物組織の氷核活性の役割

植物が氷点下に曝されるとき、最初に起こることは凍結開始である。凍結開始温度が低いと氷成長速度は著しく高く、凍結開始温度が高いと成長速度は遅い(文献⑦)。植物の凍結開始温度が低いと(<-7~-8°C)、氷成長が迅速で細胞内まで凍結が進行し、致命的な細胞内凍結を起こす可能性が高まる。耐寒性植物組織の氷核活性が高いのは、組織が凍結温度に曝されているのをいち早く検知して、細胞外や特定部位の凍結開始を促進する一種の凍結温度センサーとして働いている可能性がある(熱帯性植物はこのセンサーがないため細胞内凍結を起こしやすい)。従前の生物学的概念のセンサーとは異なるが、外来の植氷作用がない状態でも、耐寒性植物は自発的に凍結開始するので、実質的に凍結温度センサーとして働く可能性が高い。氷核活性の組織分布は、組織の凍結様式と深い相関がある。細胞外凍結する組織の細胞間隙や器

官外凍結で Ice sink として機能する芽鱗片等は、高い氷核活性を有して、高い凍結温度で必要部位の凍結を開始させていると考えられる。一方、細胞内部や器官外凍結で過冷却状態を維持している小花などの組織は、凍結回避の目的で氷核活性が低い。このような氷核活性の組織による特異的分布が、凍結部位や凍結する順番を制御して、一連の凍結様式につながる凍結開始や発生した氷と水の蒸気圧差による水の移動を誘発し、種、組織固有の凍結様式の成立に寄与していると考えられる。確実に必要組織を高い温度で凍結させるため、高い氷核活性が局在し、凍結温度センサー機能を果たしている。

<引用文献>

- ① 杉浦俊彦ら(2007) 園芸学研究 6: 257-263
 - ② Lee, RE et al. (1995) Biological Ice Nucleation and its Applications. APS Press, St. Paul
 - ③ Wisniewski M et al (1997) *Plant Physiol* **113**: 327-334
 - ④ Hacker J, Neuner G (2007) *Tree Physiol* **27**: 1661-70
 - ⑤ Sakai A, Larcher W (1987) Frost survival of plants. Springer-Verlag, New York, 321pp
 - ⑥ Kuroda H, et al. (1990) *J Jpn Soc Hort Sci* **59**: 409-416
 - ⑦ Pruppacher HR (1967) *J Chem Phys* **47**: 1807-1813
5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)
〔雑誌論文〕 (計 14 件)
- ① Ishikawa M, Ide H, Tsujii T, Kuchitsu K, Price, WS, Arata Y (2017). Preferential freezing avoidance localized in anthers and embryo sacs in wintering *Daphne kamschatica* var. *jezoensis* flower buds visualized by MRI. *Plant Cell Environment* (accepted)
 - ② Ishikawa M, Ide H, Yamazaki H, Murakawa H, Kuchitsu K, Price WS, Arata Y (2016). Freezing behaviors in wintering *Cornus florida* flower bud tissues revisited using MRI. *Plant Cell Environment* **39**: 2663-2675
DOI: 10.1111/pce.12813
 - ③ Ishikawa M, Ishikawa M, Toyomasu T, Aoki T, Price WS (2015). Ice nucleation activity in various tissues of *Rhododendron* flower buds: their relevance to extraorgan freezing. *Frontiers in Plant Science* **6**: 149 doi: 10.3389/fpls.2015.00149
 - ④ Ishikawa M, Oda A, Fukami R, Kuriyama A (2015). Factors contributing to deep supercooling capability and cold survival in dwarf bamboo (*Sasa senanensis*) leaf blades. *Frontiers in Plant Science* **5**: 791 doi:10.3389/fpls.2014.00791
 - ⑤ 石川雅也 (2014) 植物組織の氷核活性の検索 *低温生物工学会誌* **60**: 79-88
 - ⑥ Kurusu T, Koyano T, Hanamata S, Kubo T, Noguchi Y, Yagi C, Nagata N, Yamamoto T, Ohnishi T, Okazaki Y, Kitahata N, Ishikawa M et al. (2014) OsATG7 is required for autophagy-dependent lipid metabolism in rice post-meiotic anther development. *Autophagy* **10**(5): 878-888
<http://dx.doi.org/10.4161/auto.28279>
 - ⑦ Kishimoto T, Sekozawa Y, Yamazaki H, Murakawa H, Kuchitsu K, Ishikawa M (2014) Seasonal changes in ice nucleation activity in blueberry stems and effects of cold treatments in vitro. *Environmental & Experimental Botany* **106**: 13-23
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.02.010>
 - ⑧ Kishimoto T, Yamazaki H, Saruwatari A, Murakawa H, Sekozawa Y, Kuchitsu K, Price WS, Ishikawa M (2014) High ice nucleation activity located in blueberry stem bark is linked to primary freeze initiation and adaptive freezing behavior of the bark. *AoB PLANTS* **6**: plu044
doi:10.1093/aobpla/plu044
 - ⑨ Nakamura T, Yazaki J, Kishimoto N, Kikuchi S, Robertson AJ, Gusta LV, Ishikawa M (2013) Comparison of long-term up-regulated genes during induction of freezing tolerance by cold and ABA in bromegrass cell cultures revealed by microarray analyses *Plant Growth Regulation* **71**: 113-136 DOI 10.1007/s10725-013-9812-9
 - ⑩ Shinkawa R, Morishita A, Amikura K, Machida R, Murakawa H, Kuchitsu K, Ishikawa M (2013) Abscisic acid induced freezing tolerance in chilling-sensitive suspension cultures and seedlings of rice. *BMC Research Notes* **6**: 351-
<http://www.biomedcentral.com/1756-0500/6/351>
 - ⑪ 山崎秀幸, 石川雅也 (2012) ブルーベリーの冬の枝の凍結過程を可視化する。 *画像ラボ* 2012.2 : 64-47
 - ⑫ 山崎秀幸, 吉田慎吾, 石川雅也 (2011) 示差赤外線サーモグラフィおよび示差熱分析によるブルーベリー枝の凍結挙動の解析 *低温生物工学会誌* **57**:77-81
 - ⑬ 深見怜子, 山本浩二, 奥島里美, 栗山昭, 石川雅也 (2011) チンマザサ葉身及び葉鞘における凍結挙動の解析 *低温生物工学会誌* **57**: 71-76
 - ⑭ 山崎秀幸, 石川雅也 (2010) 示差赤外線サーモグラフィによるブルーベリー枝の凍結挙動の可視化解析. *低温生物工学会誌* **56**: 91-95
- 〔学会発表〕 (計 24 件)
- ① Ishikawa M, et al. (2016) Visualization of freezing behaviors in cold hardy woody plant tissues using MRI. *7th Biennial Western Sydney University Symposium on NMR, MRI and Diffusion* Sydney, Australia <Invited speaker>
 - ② 石川雅也 (2016) 耐寒性植物組織にみられる凍結制御に関わる構造と機能 第 61 回低温生物工学会セミナー 電機大(鳩山)<invited speaker>
 - ③ 石川雅也, 井出博之, 山崎秀幸, 村川裕基, 朽津和幸, Price William, 荒田洋治 (2016) MRI による凍結様式可視化解析法の有効性: アメリカハナミズキ越冬花芽の再解析 第 57 回日本植物生理学会 岩手大(盛岡)
 - ④ Ishikawa M, et al. (2015) Preferential freezing avoidance localized in the anthers and embryo sacs in wintering flower buds of *Daphne kamschatica* var. *jezoensis* revealed by NMR micro-imaging. *Bio-imaging* 学会 理科大(葛飾)

- ⑤ 灘 浩樹, 越後拓也, 豊増孝之, 山崎秀幸, 村川裕基, 朽津和幸, 石川雅也 (2015) レンギョウ枝髓に含まれる新規氷核活性物質の活性機構 第60回低温生物工学会 工科大(八王子)
- ⑥ 灘 浩樹, 石川雅也, 越後拓也 (2014) シュウ酸カルシウム-水和物結晶表面における氷核生成促進メカニズム 日本物理学会秋季大会: 9pAM-11 中部大(春日井)
- ⑦ 石川雅也, 村川裕基, 朽津和幸, 灘 浩樹, 越後拓也 (2014) レンギョウ枝髓の氷核活性物質の単離同定 日本植物学会第78回大会: 1pE08 明治大(川崎)
- ⑧ 豊増孝之, 山崎秀幸, 村川裕基, 朽津和幸, 石川雅也 (2014) シナレンギョウ枝髓に含まれる新規氷核活性物質と枝の凍結過程 第59回低温生物工学会 九大(福岡)
- ⑨ 灘 浩樹, 石川雅也, 越後拓也 (2014) シュウ酸カルシウム-水和物(100)面上での氷核生成機構: 分子動力学シミュレーション研究 日本地球惑星科学連合2014大会: MIS36-09 横浜
- ⑩ 来須孝光, 花俣繁, 小谷野智子, 久保貴彦, 八木智華子, 野口祐平, 北畑信隆, 二平耕太郎, 石川雅也, 他 (2014) イネの生殖器官発達におけるオートファジーの新たな役割 第55回日本植物生理学会: 268 富山大(富山)
- ⑪ 豊増孝之, 山崎秀幸, 石川雅也 (2014) シナレンギョウ枝の凍結挙動と髓に含まれる新規氷核活性物質 第55回日本植物生理学会: 209
- ⑫ 村川裕基, 山崎秀幸, 岸本正, 朽津和幸, 石川雅也 (2014) ブルーベリー枝の氷核活性の分布と役割 第55回日本植物生理学会年会: 209
- ⑬ Ishikawa M (2014) Ice nucleation activity in plants: from the survey to isolation, identification, characterization of responsible substances. 10th International Plant Cold Hardiness Seminar, Poznan Poland, August <invited speaker>
- ⑭ 灘 浩樹, 石川雅也, 越後拓也 (2013) シュウ酸カルシウム-水和物結晶表面上における水の秩序構造化シミュレーション 日本結晶成長学会2013年大会: 08aC03 長野
- ⑮ 山崎秀幸, 村川裕基, 朽津和幸, 石川雅也 (2013) ブルーベリー枝の氷核活性の分布と役割 日本植物学会第77回大会: 144 北大(札幌)
- ⑯ 豊増孝之, 山崎秀幸, 石川雅也 (2013) シナレンギョウ枝の凍結挙動と氷核活性 日本植物学会第77回大会: 145 北大(札幌)
- ⑰ 石川雅也 (2013) 器官外凍結と凍結制御 日本植物学会第77回大会: 194<invited speaker>
- ⑱ 山崎秀幸, 石川雅也, 中谷容子 (2013) ブルーベリー枝の氷核活性の機能・役割の解析 第58回低温生物工学会セミナー・年会: 39 関西大
- ⑲ 石川雅也 (2013) 植物組織の氷核活性の検索 第58回低温生物工学会セミナー・年会: 38 関西大(大阪)
- ⑳ 石川雅也 (2012) 耐寒性植物組織における氷晶析出と凍結制御機構 雪氷研究大会2012・福山大: 14 福山<invited speaker>
- ㉑ Murakawa H, Kuchitsu K, Ishikawa M (2012) Effect of abscisic acid on freezing behavior in rice seedlings *Plant and Microbe Adaptation to the*

Cold 2012: 79 Sapporo

- ㉒ Ishikawa M, Yamazaki H (2012) Freezing process visualized using infra-red thermography and factors involved in freeze-regulation in wintering woody stems. *Plant and Microbe Adaptation to the Cold* 2012: 78 Sapporo
- ㉓ Ishikawa M, Yamazaki H, Fukami R (2011) Visualization of freezing process and elucidation of factors involved in freeze-regulation in wintering tissues 9th International Plant Cold Hardiness Seminar, Luxemburg <invited speaker>
- ㉔ 山崎秀幸, 石川雅也 (2011) ブルーベリー枝凍結挙動の可視化解析 日本バイオイメージング学会学術集会 20(2):115-116 千歳科技大(千歳)

〔図書〕 (計1件)

- ① Ishikawa M, Yamazaki H, Kishimoto T, Murakawa H, Stait-Gardner T, Kuchitsu K, Price WS (2018). Ice nucleation activity in plants: the distribution, characterization and their roles in cold hardiness mechanisms. In: Iwaya-Inoue et al. (eds) *Survival Strategies in Extreme Cold and Desiccation: Adaptation Mechanisms and Their Application*. Springer (accepted)

〔産業財産権〕

○取得状況 (計1件)

名称: シュウ酸カルシウムを含む氷核活性剤
 発明者: 石川雅也、野村孝之、樋谷明日香
 権利者:
 種類: 特許
 番号: 特許第6029058号
 出願年月日: 2012年9月14日
 登録日: 2016年10月28日
 国内外の別: 日本

〔その他〕

ホームページ等 準備中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川雅也 (ISHIKAWA, Masaya)
 国立研究開発法人農業生物資源研究所・その他の部局・研究専門員
 研究者番号: 90355727

(2) 研究協力者

村川裕基(MURAKAWA, Hiroki)
 朽津和幸(KUCHITSU, Kazuyuki)
 豊増孝之(TOYOMASU, Takayuki)
 井出博之(IDE, Hiroyuki)
 荒田洋二(ARATA, Yoji)
 山崎秀幸(YAMAZAKI, Hideyuki)
 深見玲子(FUKAMI, Reiko)
 栗山 昭(KURIYAMA, Akira)
 灘 浩樹(NADA, Hiroki)
 越後拓也(ECHIGO, Takuya)
 William S. Price