

## 超高压合成法により「透明ヒスイ」の合成に成功

### [概要]

ヒスイ（翡翠）は通常緑色の宝石の一種であり、ヒスイ輝石（jadeite）と呼ばれる鉱物の数ミクロン～数十ミクロン程度の結晶の集合体です。ヒスイは国内で産する代表的な美しい鉱物であることなどの理由により、日本鉱物科学会により 2016 年 11 月に日本の「国石」として選定されました。

ヒスイは多結晶鉱物であるため結晶界面での光の散乱などにより、透光性はあまりよくなく、通常は不透明～半透明です。しかし、ヒスイを構成する鉱物の粒径を可視光の波長（約 400-800 ナノメートル）より十分小さくすることにより、高い透光性を有する「透明ヒスイ」が得られると予想されていました。

地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）では、超高压下での物質合成法を駆使することにより、これまでにナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）や、透明で硬いナノ多結晶ガーネットの合成を世界に先駆けて発表してきましたが、このたび同様の手法を用いて粒径 200-300 ナノメートルの多結晶からなる透明ヒスイの合成に成功しました。ヒスイは高い耐摩耗性を持つことが知られており、今後更に粒径を 100 ナノメートル以下のナノ領域に減少させるとともに、微細組織の制御を行うことにより、新たな高硬度・耐摩耗性材料として発展する可能性もあります。

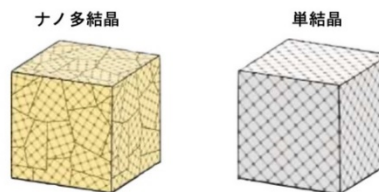
なお本研究の成果は、日本鉱物科学会が発行する英文誌「Journal of Mineralogical and Petrological Science」において、9 月 30 日にオンライン出版されます。

### [成果のポイント]

- ・超高压合成法により、日本の国石であるヒスイの透明化に成功した
- ・光学的に非立方体である単斜晶系の単一鉱物多結晶体に対して、粒径をナノ領域に近づけることにより高い透光性が得られることを示した
- ・得られた透明ヒスイは、粒径の減少とともに硬くなることを示した
- ・ナノ領域（粒径 100 ナノメートル以下）の試料合成により、更に透明で硬い「透明ナノ多結晶ヒスイ」の実現が見込まれる
- ・ヒメダイヤ、透明ナノ多結晶ガーネットに続く超高压合成法を用いた重要な成果であり、今後様々な「透明ナノセラミックス」の開発が期待される

### [背景]

鉱物には1粒の結晶が成長した「単結晶」と、多数の微細な結晶の集合体である「多結晶」があります。通常宝石は単結晶でできていますが、ヒスイは孔雀石などとともに例外的な多結晶体の宝石です。多結晶体の鉱物・宝石は、微細な結晶の界面や、結晶の隙間にある空気や不純物の影響で透明度は高くありません。



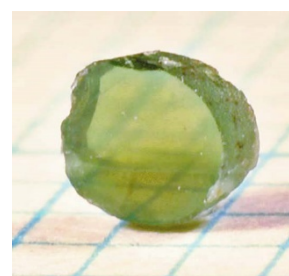
一方、鉱物などの多結晶体は工業的には「セラミックス」とも呼ばれ、陶磁器など様々な用途に使われています。セラミックスも上記と同じ理由で通常は光を通しません、結晶の隙間にある空気や不純物を取り除くことにより、光を通すセラミックス（「透明セラミックス」）が開発され、レンズやレーザーなどに応用されています。これらの透明セラミックスは立方晶系と称される光学的等方体の結晶からできていますが、必ずしも立方晶系の結晶でなくても、結晶の粒径が光の波長（400-800 ナノメートル：1 ナノメートルは 100 万分の 1 ミリ）の 1/10 程度のナノ領域（100 ナノメートル以下の領域）になると、透明になることが予想されていました。

GRC では超高压合成技術を用いて透明度の高いナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）や、ナノ多結晶ガーネットを世界で初めてそれぞれ、Nature 誌（2003）、Nature Communications 誌（2016）に発表しました。ダイヤモンドやガーネットは立方晶系の結晶であるため、粒径に関係なく透光性の高い多結晶体が得られますが、同様の超高压技術を用いることにより粒径をナノ領域にすると、立方晶系以外のヒスイのような鉱物でも高い透明性を持つことが予測されていました。



#### [本研究の内容]

本研究ではヒスイの成分を持つガラスをつくり、これを円柱形に加工して GRC の超高压装置 ORANGE を用いて 10-20 万気圧の超高压と、900-1300°C の高温をかけ、ヒスイの多結晶体を合成しました。得られたヒスイは、温度・圧力に応じて数百ナノメートルの粒径からなる多結晶体で、一部は高い透光性を示しました。



実験の結果、特に最も高い圧力の 20 万気圧で、1300°C 付近の試料が最も粒径が小さく透光性も高いことがわかりました。この試料に対する光の透過率は、可視光の中間的な波長（645 ナノメートル）に対して約 70% の高い値を示し、「透明ヒスイ」とも称される高い透明性を持っています。また、この透明ヒスイは、粒径が大きなヒスイに比べて高い硬度を持つことも明らかになりました。

ヒスイの結晶系は「単斜晶系」と称して、光学的等方体である立方晶系のダイヤモンドや

ガーネットと異なり、より透明な多結晶体をつくるには粒径をナノ領域にする必要があります。今回得られた透明ヒスイの粒径は 240 ナノメートル程度であり、完全なナノ領域（< 100 ナノメートル）にすれば、より透明なヒスイが得られると考えられます。また、ナノ領域では多結晶体の硬さが増加することが知られており、より硬いヒスイが実現すると思われれます。

#### [今後の展開]

本研究ではヒスイの粒径の最小値は 240 ナノメートル程度に留まっていますが、今後圧力・温度・加熱時間・昇温時間などの最適化により、100 ナノメートル以下の真の「ナノ多結晶ヒスイ」の合成が可能になると予想されます。ナノ多結晶ヒスイは、より高い透光性と硬さを持つことが予想され、光学材料としても有用な可能性があります。また、ヒスイは宝石鉱物の中でも最も高い靱性（割れにくさ）を有することが知られていますが、ナノ多結晶ヒスイを構成する微細ヒスイ結晶の形状を制御することにより、高い硬度を持ち割れにくい透明ヒスイの合成が可能になると予想されます。更に、GRC の世界最大の超高压合成装置 BOTCHAN の利用により、1cm 程度の透明ヒスイの合成も可能になると考えられます。



GRC では先端的な地球惑星深部科学の推進に加え、独自の超高压合成法を用いてヒメダイヤモンドを始め様々な新物質・材料の開発をすすめています。2018 年度には GRC に超高压材料科学部門が設置されましたが、今後はこの部門を中核とした新たな学際的研究を展開する予定です。本研究はその一つの方向性として、超高压を利用した様々な「透明ナノセラミックス」合成の成果の一つであり、今後も従来にない新材料の開発が期待されます。

#### [終わりに]

本研究は愛媛大学工学研究科博士前期課程を今春修了した満 圭祐さん（現・(株)三菱マテリアル）と、指導教員である入舩徹男 GRC 教授を中心に、大藤弘明 GRC 教授（現東北大学教授）、山田明寛滋賀県立大学准教授（愛媛大学工学研究科博士後期課程修了）との共同研究として行われました。本研究成果は、ヒスイを日本の国石と決定した日本鉱物科学会が発行する英文誌「Journal of Mineralogical and Petrological Science」に、これら 4 名の共著として論文発表されました。なお、本研究の一部は科学研究費基盤研究 (A)「超高压合成透明ナノセラミックス」（令和 3 年度～令和 7 年度：代表入舩教授）により行われるとともに、天然ヒスイの特性や産状に関しては、フォッサマグナミュージアム小河原孝彦学芸員にご教示いただきました。