

深海底に眠る塊状メタンハイドレートの力学特性 —メタンハイドレート回収技術開発に関わる物性の取得に成功—

米田 純¹⁾・木田 真人^{1),2)}・今野 義浩^{1),3)}・神 裕介¹⁾・森田 澄人⁴⁾・天満 則夫¹⁾

*本稿は2019年11月28日に、産業技術総合研究所が行ったプレス発表(世界初、深海底に眠る塊状のメタンハイドレートの強さや硬さを測定 —海底表層のメタンハイドレート回収技術開発に関わる重要な物性の取得に成功— https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2019/pr20191128/pr20191128.html)を修正、加筆したものです。

1. はじめに

このたび、日本海上越沖にて採取された塊状メタンハイドレートの力学特性の把握に初めて成功し、研究成果を論文発表する機会がありましたので(Yoneda *et al.*, 2019), その紹介を致します。メタンハイドレートは、水分子が作る“籠”の中にメタン分子が入った構造をしており、温度・圧力の関係から、永久凍土域や深海底の地盤内に存在することがわかっています。天然のメタンハイドレートには、海底下数百mの砂の隙間に存在している砂層型メタンハイドレートと、海底の表層部分に塊(塊状)として、または泥の中にノジュール状(粒状)、レンズ状、板状、脈状に存在している表層型メタンハイドレートがあります。いずれも、分解後に発生するメタンガスは天然ガスの主成分であり、1990年代から次世代エネルギー源としての利活用が期待されました。また、メタンハイドレートは地球規模での炭素循環に大きく関わっているとされており、地球温暖化等の気候変動への影響を把握するために今も盛んに研究が行われています。本紙の前身である地質ニュースにおいても、1997年2月号に特集されました。2000年代に入り、各国でプロジェクトが発足し、原始資源量把握のための物理探査やフィールド産出試験による実証、室内試験等によるメタンハイドレート及びその胚胎堆積物の物性評価とシミュレーションによる生産予測が行われてきました。メタンハイドレートを資源化するためには、まず原始資源量とその分布を把握することが重要です。例えば、砂層型メタンハイドレートは、日本の排他的経済水域に相当量の原始資源量が試算されており、国産資源としての期待が膨らんでいます。フィールド産出試験については、これまでアメリカ、カナダ、日本、中国で実施されています(Hancock *et al.*, 2005a, b; Anderson *et al.*, 2011; Boswell *et al.*, 2017; Yamamoto *et al.*, 2017, 2019; Li

et al., 2018)。当初、日産数十～数百立方メートルであったガス生産量も、最近の試験では数千～1万立方メートルを超える生産量が報告されています。商業化へ向けては更に10倍程度の長期安定的な産出が必要とされており、研究開発は今も続けられています(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, 2019)。具体的なメタンハイドレートの生産技術を検討するためには、メタンハイドレートと海底地盤の力学的性質(強度や剛性)を調べ、開発する海底地盤の安定性を評価する必要があります。しかし、メタンハイドレートは常温大気圧下ではメタンガスと水に分解してしまうため、天然サンプルの力学的性質を測定することは極めて困難でした。そこで、深海底の温度圧力を保持して、実験室までサンプルを持ち帰ることができる圧力コアリング技術と圧力コア解析技術が確立されました(Yoneda *et al.*, 2015; Jin *et al.*, 2016)。本研究結果は、この“圧力コア解析技術”を用いて、力学試験を実施したものです。

2. プロジェクトの概要

日本では、2001年度に経済産業省が発表した「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を機に研究開発が本格化しました。上記の開発計画では、砂層型メタンハイドレートを主に対象としていましたが、2013年4月に閣議決定された「海洋基本計画」では、表層型メタンハイドレートに対して、資源量調査目標が初めて設定されています。産総研では、それまでも海底表層のメタンハイドレートの調査研究に携わっていましたが(地圏資源環境研究部門, 2006; 産総研研究成果, 2007), 2013～2015年度に経済産業省から受託した「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発)」の一環として、表層型メタン

1) 産総研 エネルギー・環境領域 創エネルギー部門

2) 北見工業大学 工学部地球環境工学科

3) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

4) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード: メタンハイドレート, 強度, 剛性, 圧力コア, 表層

ハイドレートの広域的な分布調査等を実施しました。産総研から委託された明治大学は、2015年に資源量調査の一環として圧力コアを取得し、つづいて、産総研が圧力コアの分析を実施しました。第1図は圧力コアの回収から室内試験までの代表的な様子を示しています。第1図aは掘削船上のドリルフロアでサンプルが入ったコアラーが回収される様子です。下端にはボールバルブがあり、海底下で閉じることで水圧を保持しています。次に第1図bでは、回収されたコアラー内部の温度圧力をチェックしています。ここで、良好なサンプルはX線画像及びP波速度、 γ 線密度が取得され、さらに重要なサンプルは圧力容器に入れて陸へ運搬されます。第1図c及びdは圧力容器運搬の様子です。今回、砂層型メタンハイドレートの資源化に向けた研究開発として産総研が培ってきた圧力コア解析技術の内、サンプルの強度や剛性を取得する技術を新たに表層型メタンハイドレートに適用し、力学的性質を含む基

礎物理特性を評価しました。第1図eは圧力容器を圧力コア解析装置に接続した様子を示しており、第1図fは装置の観察窓から天然の塊状メタンハイドレートが視認された様子です。

3. 論文の概要

研究で用いた天然メタンハイドレートは、2015年8～11月に日本海上越沖の水深約900mの地点(第2図：採取地点の広域図及び周辺海底地形図中の赤点)において採取された圧力コアのサンプルです。圧力コアは、約10MPaの水圧を保持した状態で船上へ引き揚げられ、一度も減圧することなく専用の圧力容器に移された後、産総研北海道センターへと輸送されました。このすべての行程において、温度・圧力がメタンハイドレートの安定条件を満たすよう、管理されています。



a: コアラー回収



b: 温度圧力チェック



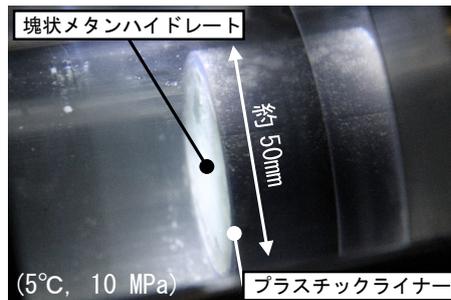
c: 冷蔵トラックからの搬出



d: 圧力容器の運搬

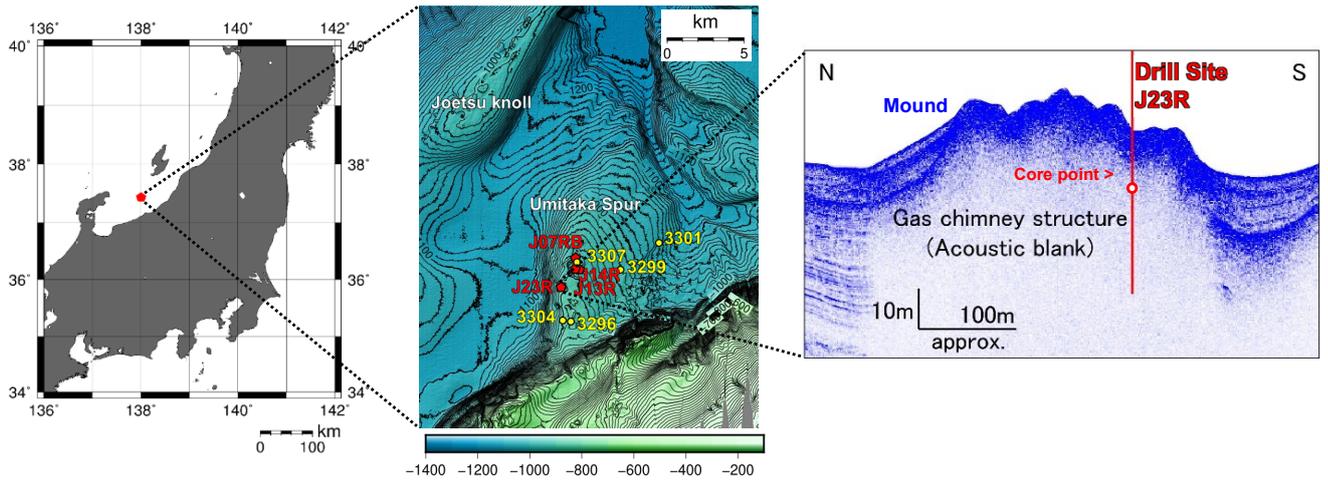


e: 圧力コア解析装置への接続

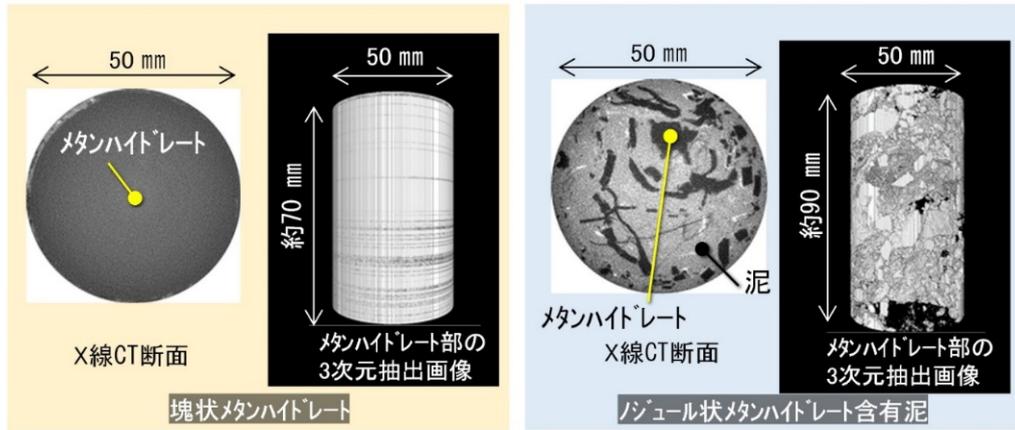


f: 圧力コアの断面(観察窓より)

第1図 圧力コアの回収・輸送から解析装置への接続の様子



第2図 本研究で使用した圧力コアの採取地点(赤点:掘削地点, 黄点: MD179 による掘削地点 [Kataoka and Matsumoto, 2012]) (Yoneda et al., 2019 による)

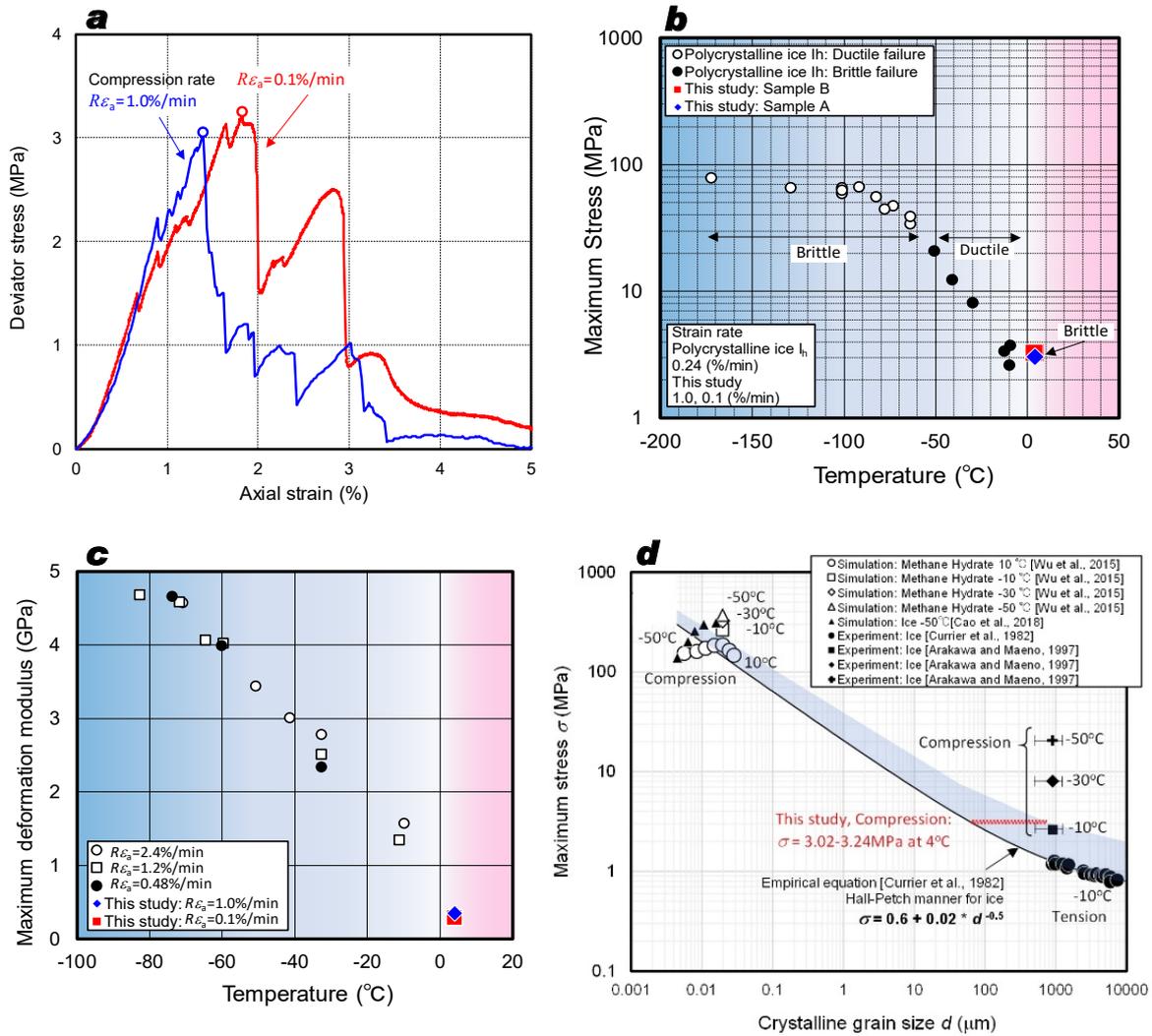


第3図 表層型メタンハイドレートサンプルのX線CT断面画像とメタンハイドレート部の3次元抽出画像 (Yoneda et al., 2019 に加筆)

実験室では、直径約 50 mm の円筒形サンプルを X 線 CT 装置で撮影し、メタンハイドレートの性状観察を行いました。第3図は、代表的なサンプルの X 線 CT 断面画像、及び、CT 画像からメタンハイドレートのみを抽出した 3 次元観察画像です。塊状メタンハイドレート(第3図左)の内部は、一様にメタンハイドレートが存在しており、泥などの混在はほぼ確認できません。CT 画像や後述する実験の後に分解して排出されたガス量から算出したメタンハイドレートの体積含有率は 92 ~ 100 % でした。ノジュール状メタンハイドレート含有泥(第3図右)は、内部に数 mm から数 cm の板状あるいは塊状のメタンハイドレート片を含有しており、個々のメタンハイドレート片の内部には泥などの混在は確認できません。メタンハイドレート部の 3 次元抽出画像では、メタンハイドレート片の配置に規則性や偏りは見られず、本サンプル中にランダムにメタンハイドレートが析出しているものと考えられます。本サ

ンプルのメタンハイドレート片の体積含有率は約 20 % でした。

X 線 CT 撮影後、サンプルを海底圧力下において試験片長さ 8 ~ 10 cm にカットし、圧縮試験装置にセットしました。塊状メタンハイドレートは 2 サンプル、ノジュール状メタンハイドレート含有泥は 3 サンプルの圧縮試験を実施しています(第4図及び第5図)。塊状メタンハイドレートサンプルは、水圧 10 MPa、温度 4℃の下で一軸圧縮試験を実施し、強度 3 MPa(第4図のピーク値)、剛性 300 MPa(第4図の軸ひずみ 1 % 程度までの直線の傾き)という結果が得られました。これは、天然メタンハイドレートの強度や剛性として、世界で初めて計測された値となります。2 サンプルは異なるひずみ速度で圧縮されましたが、強度と剛性に大きな差は見られませんでした。ここで、比較的容易に手に入る氷と比較してみます。第4図 b 及び c に強度及び剛性と温度の関係を示しました。

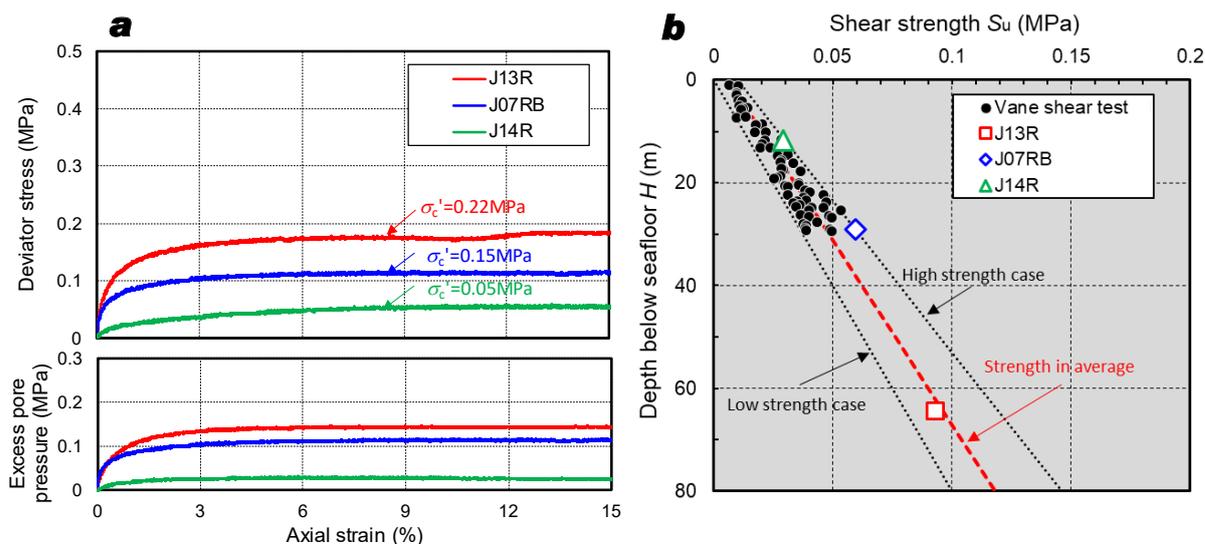


第4図 塊状メタンハイドレートの一軸圧縮試験の結果 (a: 主応力差と主ひずみの関係、(強度=ピーク値, 変形係数(剛性)=軸ひずみ1%程度までの直線の傾き) b: 強度と温度の関係 [Arakawa and Maeno, 1997], c: 変形係数(剛性)と温度の関係 [Arakawa and Maeno, 1997], d: 強度と結晶粒径の関係 (Yoneda et al., 2019 による))

例えばマイナス10℃環境下の多結晶氷と比べると、強度は近いが、剛性は小さいことが分かります。これにより、同程度の強度を持つ氷は破壊に至るまでの変形が大きい“粘り強い”挙動になるのに対し、メタンハイドレートは比較的小さな変形で破壊をする“脆い”挙動になることが明らかになりました。材料の強度は、結晶粒の大きさに依存することが知られています。これまでに報告されている数値解析の結果や氷の強度を参考に、今回の天然サンプルの結晶粒の大きさを推定すると、数十～数百μmとなります(第4図d)。

次に、ノジュール状メタンハイドレート含有泥に対しては、水圧10MPa、温度4℃の下で採取深度に応じた地層の圧力状態を再現し、三軸圧縮試験を行いました(第5図a)。その結果、深度の増加に伴う強度増加が確認されました。塊状メタンハイドレートの強度と単純に比較すると

1/10程度以下となります。この結果は、メタンハイドレートを含まない周辺地盤の強度とほぼ等しいものでした(第5図b)。すなわち、体積含有率20%程度のメタンハイドレート片は、残りの80%程度を占める泥の力学的性質に影響を及ぼさないことが明らかになりました。以上の結果から、表層型メタンハイドレートの濃集域内部の塊状メタンハイドレート部は、周囲の泥地盤と比べて強度が高く、力学的に安定していることが予想されます。一方で、塊状メタンハイドレートからノジュール状メタンハイドレート含有泥、さらには周辺の泥地盤へと遷移する領域においては、周辺地盤の力学的性質が支配的であることが示唆されました。これらの結果は、表層型メタンハイドレートの具体的な回収技術の検討や、開発時における海底地盤の安定性評価のために、非常に重要な知見であると考えます。



第5図 ノジュール状メタンハイドレート含有泥の三軸圧縮試験の結果 (a: 主応力差及び過剰間隙水圧と主ひずみの関係, b: 深度と非排水せん断強度の関係 [黒点は Kataoka and Matsumoto (2012) によるメタンハイドレートを含まない周辺地盤の掘削サンプル (第1図の黄点) のベーンせん断強度からの値]) (Yoneda et al., 2019 による)

4. おわりに

メタンハイドレートを開発するには、その性状を理解することが重要です。加えて、自然界におけるメタンハイドレートの集積・散逸メカニズムを解明することは、グローバルな炭素循環の理解を深め、地球温暖化のメカニズム解明の糸口となる可能性も秘めています。メタンハイドレートが存在する地層の物性は場所ごとに特有であることが多く、一義的に決められないため、技術的検討を簡単に進めることができません。資源開発の場合には、対象領域における海底地盤の強度や剛性の把握が今後も重要となるでしょう。産総研の有する圧力コア解析技術を今後も活用して、将来の開発対象となるような有望な深海底地盤の物性を明らかにし、安全で効率的な資源回収方法の提案につながる研究を進めていきたいと考えています。

謝辞: 本研究は、経済産業省の委託により実施しているメタンハイドレート研究開発事業において得られた成果に基づいています。研究開発コンソーシアムメンバー及びサンプリング業務を実施した明治大学、並びに地元関係者他、研究にご協力いただいた皆様に深甚の謝意を表します。

本研究の実施に当たり、明治大学の松本良教授、鳥取大学の海老沼孝郎教授、産総研北海道センターの長尾二郎所長代理、産総研つくばセンターの鈴木清史主任研究員には多大なる労を頂きました。ここに深く感謝致します。

文献

- Anderson, B., Hancock, S., Wilson, S., Enger, C., Collett, T., Boswell, R. and Hunter, R. (2011) Formation pressure testing at the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: Operational summary, history matching, and interpretations. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 478–492.
- Arakawa, M. and Maeno, N. (1997) Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression. *Cold Regions Science and Technology*, **26**, 215–229.
- Boswell, R., Schoderbek, D., Collett, T. S., Ohtsuki, S., White, M. and Anderson, B. J. (2017) The Ignik Sikumi Field Experiment, Alaska North Slope: Design, operations, and implications for CO₂ – CH₄ exchange in gas hydrate reservoirs. *Energy Fuels*, **31**, 140–153.
- Cao, P., Wu, J., Zang, Z., Fang, B., Peng, L. and Li, T. (2018) Mechanical properties of bi- and poly-crystalline ice. *AIP Advances*, **8**, 125108.
- Currier, J. H. and Schulson, E. M. (1982) The tensile strength of ice as a function of grain size. *Acta metal.*, **30**, 1511–1514.
- 地圏資源環境研究部門 (2006) 新潟県上越市沖の日本海海底で、海底に露出するメタンハイドレートの確認・採取に成功。産総研 TODAY, **6**, 40–41.
- Hancock, S. H., Collett, T. S., Dallimore, S. R., Satoh, T.,

- Inoue, T. and Huenges, E. (2005a) Overview of thermal stimulation production - test results for the JAPEX/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L - 38 gas hydrate production research well. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, **585**, 1-15.
- Hancock, S. H., Dallimore, S. R., Collett, T. S., Carle, D., Weatherill, B., Satoh, T. and Inoue, T. (2005b) Overview of pressure - drawdown production - test results for the JAPEX/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L - 38 gas hydrate production research well. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, **585**, 1-16.
- Jin, Y., Konno, Y., Yoneda, J., Kida, M. and Nagao, J. (2016) In situ Methane hydrate morphology investigation: Natural gas hydrate - bearing sediment recovered from the eastern Nankai trough area. *Energy Fuels*, **30**, 5547-5554.
- Kataoka, S. and Matsumoto, R. (2012) The physical and mechanical properties of sea - bottom sediments in the Eastern Margin of Japan Sea by MD179. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **77**, 274-279.
- Li, J.-F., Ye, J.-L., Qin, X.-W., Qiu, H.-J., Wu, N.-Y., Lu, H.-L., Xie, W.-W., Lu, J.-A., Peng, F., Xu, Z.-Q., Lu, C., Kuang, Z.-G., Wei, J.-G., Liang, Q.-Y., Lu, H.-F. and Kou, B.-B. (2018) The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea, *China Geology*, **1**, 5-16. doi: 10.31035/cg2018003.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (2019) 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ2及びフェーズ3総括成果報告書, 2019年2月. <https://www.mh21japan.gr.jp/archives05/> 閲覧日: 2020年4月2日
- 産総研研究成果 (2007) 新潟県上越市沖の海底にメタンハイドレートの気泡を発見, https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070302/pr20070302.html 閲覧日: 2020年4月21日
- Wu, J., Ning, F., Trinh, T. T., Kjelstrup, S., Vlugt, T. J. H., He, J., Skallerud, B. H. and Zhang, Z. (2015) Mechanical instability of monocrystalline and polycrystalline methane hydrates, *Nature Communications*, **6**, 8743. doi: 10.1038/ncomms9743
- Yamamoto, K., Kanno, T., Wang, X.-X., Tamaki, M., Fujii, T., Chee, S.-S., Wang, X.-W., Pimenov, V. and Shakod, V. (2017) Thermal responses of a gas hydrate - bearing sediment to a depressurization operation. *RSC Advances*, **7**, 5554-5577.
- Yamamoto, K., Wang, X.-X., Tamaki, M. and Suzuki, K. (2019) The second offshore production of methane hydrate in the Nankai Trough and gas production behavior from a heterogeneous methane hydrate reservoir. *RSC Advances*, **9**, 25987 .
- Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Egawa, K., Kida, M., Ito, T., Nagao, J. and Tenma, N. (2015) Mechanical behavior of hydrate - bearing pressure core sediments visualized under tri - axial compression. *Marine and Petroleum Geology*, **66**, 451-459.
- Yoneda, J., Kida, M., Konno, Y., Jin, Y., Morita, S. and Tenma, N. (2019) In situ mechanical properties of shallow gas hydrate deposits in the deep seabed. *Geophysical Research Letters*, **46**, 14,459-14,468, doi:10.1029/2019GL084668

YONEDA Jun, KIDA Masato, KONNO Yoshihiro, JIN Yusuke, MORITA Sumito and TENMA Norio (2020) Mechanical properties of massive methane hydrates in deep-sea. - The information crucial for developing and evaluating their recovery techniques -.

(受付: 2020年4月2日)