Kyurizukai

新版 窮理図解

2011 October
no. 08

慶應義塾大学理工学部広報誌
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
English versions are also available:
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai/top_eng.html

twitter
はじめました
@keiokyuri

慶應理工の クラスレート ハイドレート研究

エネルギー・環境技術のための
Crystal Engineering

機械工学科
大村 亮（おおむら りょう）
（准教授）

研究紹介

今回登場するのは、クラスレートハイドレートを活用して
エネルギー分野での新技術開発に取り組む大村亮准教授です。

天然ガスの貯蔵や CO_2 抽出に役立つクラスレートハイドレート

氷とよく似ているが氷ではない物質の有効活用

水分子が作るかご状構造の中に水以外の物質を封じ込めて結晶化した物質をクラスレートハイドレートと呼ぶ。そのかごに収まる物質の多くは、メタンや窒素、二酸化炭素（CO_2）などの疎水性のガスだ。ガスの固形化技術としても注目されているが、その原理や仕組みにはまだ謎も多い。慶應義塾大学理工学部は、この実用化研究において世界でもトップクラスの成果をみせている。研究を推進する大村亮准教授に話を聞いた。

水分子がかごを作り その中にゲスト物質が収まる

「クラスレートハイドレートとは、水分子が規則的に並んだ結晶体で、外観は氷に似ていますが、水分子の並び方が氷とは異なります。水分子が隙間なく整然と並ぶ氷と比べて、クラスレートハイドレートは、水分子が多面体のかご状の構造をしています。その構造体内部にゲスト物質と呼ばれる水以外の物質を取り入れた状態で結晶化しているのです」と大村准教授はその構造の特徴を説明する。

水分子とゲスト物質の関係は、子どもの遊びの“かごめかごめ”を思い描くと分かりやすい。中央で目をつぶる鬼がゲスト物質で、手を取り合って鬼を囲む子どもたちが水分子だ。鬼は仲間外れではないが遠巻きに見守られ、誰とも手をつながず、輪の外にも出られない。クラスレートハイドレートにおけるゲスト物質とは、まさにこの鬼のような存在である。

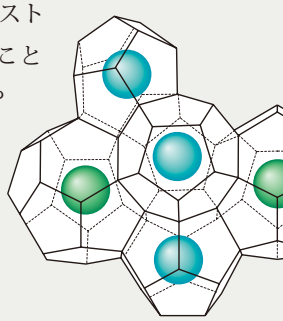
疎水性ガスを固体化し 効率的な貯蔵や運搬を可能にする

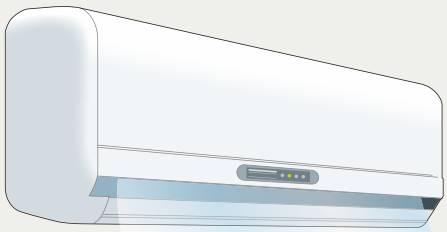
こうした特徴を持つクラスレートハイドレートだが、自然界にも存在する。近年、将来有望な天然資源として期待されているメタンハイドレートも、メタン分子をゲスト物質にもつクラスレートハイドレートである。

氷とよく似たメタンハイドレートは、メタンガスを高密度に貯蔵できる媒体として注目されている。大村さんは、このようなクラスレートハイドレートの貯蔵性を、天然ガスのエネルギー利用に活かす研究に取り組んでいる。

「メタンハイドレートは、水分子46個に対してメタン分子を8個の割合で含む結晶体で、体積比で170倍という貯蔵性を実現しています。そこで、ゲスト物質として天然ガスを封じ込めてみようと考えたのが天然ガスハイドレート研究の始まりです。今や実用化の一歩手前まできています。天然ガスハイドレートのメリットは、温度管理の手軽さです。通常、天然ガスは−162℃以下に冷却して液化天然ガス（liquefied natural gas, LNG）として貯蔵・輸送していますが、天然ガスハイドレートであれば−20℃程度で1/170に圧縮できます。1/600に圧縮できるLNGと比べると体積は3.5倍程度増えますが、−162℃以下という極低温の維持管理が不要になるなど、代替技術として有望視されています」。

また、ハイドレート化はゲスト物質を分子単位で閉じ込めることができ、保管が難しい物質や危険物の貯蔵への活用も検





大きな生成分解熱
ハイドレートヒートポンプ
ハイドレート蓄熱

高いガス包蔵性
60～200倍のガスを包蔵
エネルギー貯蔵
分子貯蔵

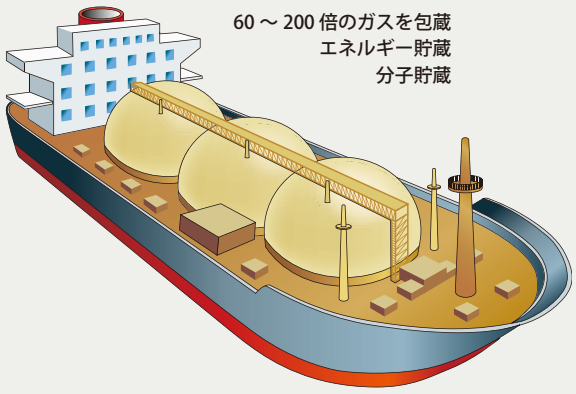


図1　クラスレートハイドレートの物性を活かす応用技術

クラスレートハイドレートに特有のガスの貯蔵や大きな分解熱といった物性を既存の技術やシステムに組み込むことで高効率な運用が可能になる。例えば、天然ガスの貯蔵・輸送技術、炭酸ガスの分離・抽出技術、高効率ヒートポンプへの活用などがある。また今後の可能性として、ハイドレートエンジンといったものも想定されている。

討されている。

「すぐれた殺菌作用を持つオゾン（O_3）は非常に不安定な物質で、オゾン分子どうしで反応して安定な酸素（O_2）に変化してしまうため（$2O_3 \rightarrow 3O_2$）、基本的に貯蔵できません。しかし、ハイドレート化すると分子の形で隔離・保存できるので、長期の貯蔵が可能です」。

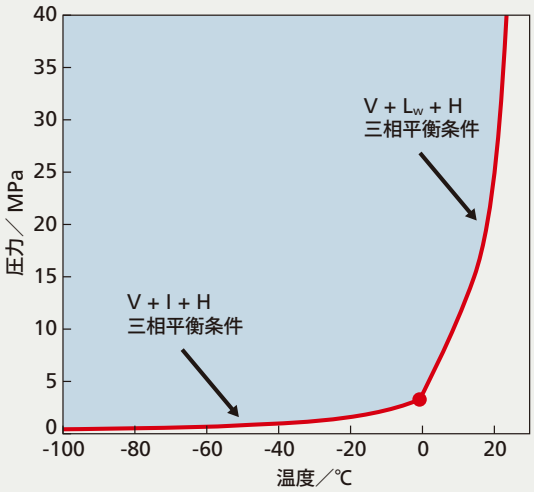
特定の物質を抽出でき CO_2 除去技術としても期待できる

クラスレートハイドレートは水とゲスト物質を一緒にするだけでは生成しない。生成には低温高圧という条件が必要で、しかもその条件はゲスト物質ごとに異なる。例えば0℃の場合、メタンがハイドレート化する条件は26気圧（約2.6 MPa）。二酸化炭素（CO_2）は12気圧、窒素では150気圧以上の高圧を要する。

「こうした生成条件の差を利用すると、特定のゲスト物質を選択的にハイドレート化できます。その応用として注目されるのが、火力発電所の排ガスからの二酸化炭素の分離・除去です。二酸化炭素と窒素から構成される排ガスを水と反応させ、二酸化炭素のハイドレート化に最適な条件を与えて二酸化炭素だけを選択的に固形化させる試みです。現在、二酸化炭素除去技術としてはアミン法*がありますが、この方法ではアミンという危険物を扱わねばなりません。それに対して二酸化炭素をハイドレート化させる除去方法で使うのは水だけですので、アミン法に代わる方法として有望と考えています」。

図2　メタンハイドレートの生成条件

メタンハイドレートは、メタンと水分子、それに温度と圧力条件が揃ってはじめて生成できる。温度と圧力の関係を示したのがこのグラフである。温度が低い時に生成に必要な圧力は低く、温度が高くなると圧力も高くなる。ただし、制御に必要な低温や圧力は制御可能な範囲に収まっており、扱いやすさも特長である。こうした物性は、全てのクラスレートハイドレート物質に共通して見ることができる。



氷蓄熱に代わる 高効率蓄熱媒体としても期待

クラスレートハイドレートが生成されると水分子は氷状になるが、その温度を5℃から15℃の範囲でコントロールすることも可能である。この物性を利用する冷房用蓄熱媒体としても期待される。

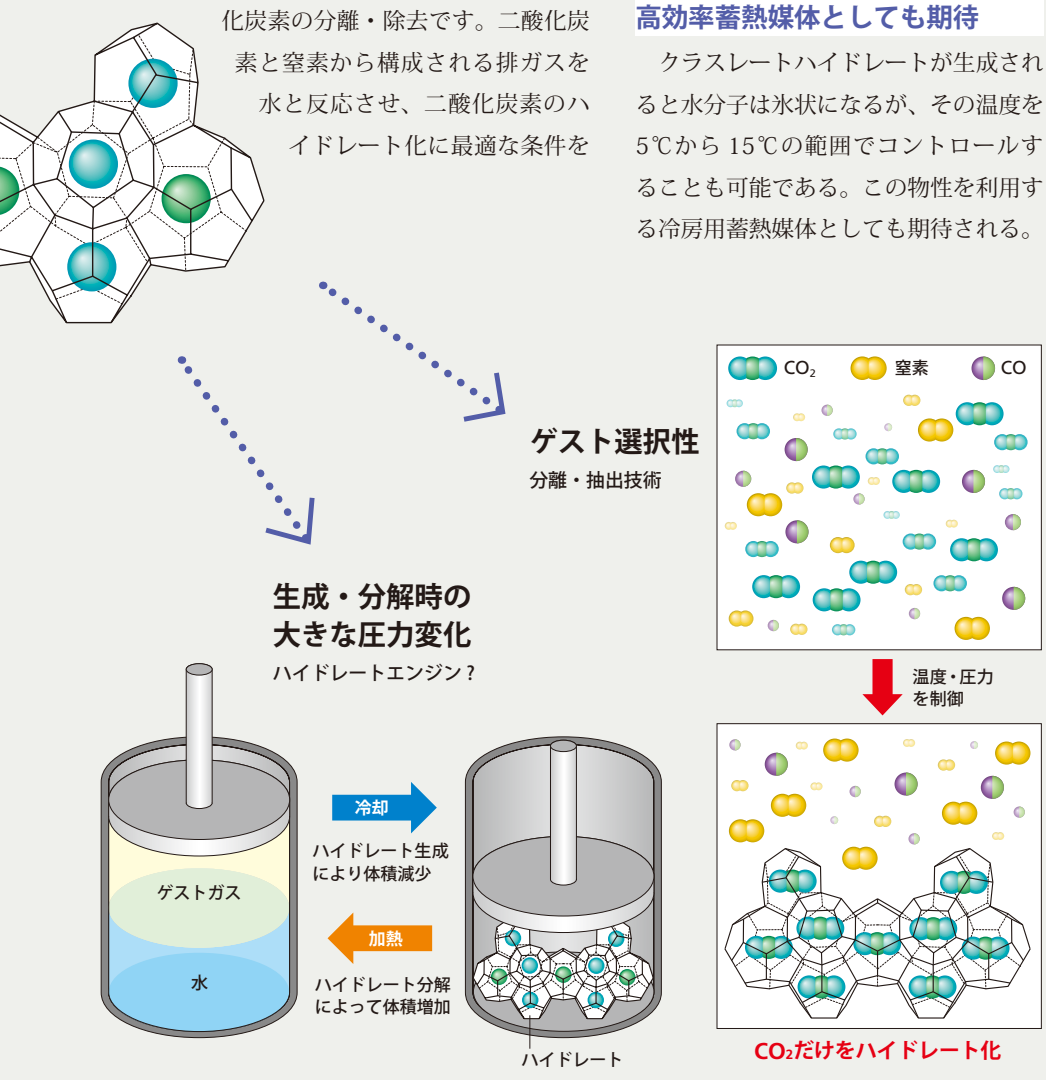
「現在、大きなビルなどの空調機器が採用する氷蓄熱システムは、夜間電力で氷を作り、その冷気を冷房の熱源としています。ただ、効率の点からいえば28℃の室温を維持するために必要な15℃の冷風を作るための最適な熱源は10℃前後であり、0℃の氷では温度が低すぎるという指摘があります。実際、熱源を10℃にすると4割程度の省エネ効果が期待できます。ハイドレート蓄熱ではゲスト物質や圧力を管理することで10℃前後の熱源を提供でき、既存の氷蓄熱をはるかにしのぐ効率を有する蓄熱システムを提供できます」。

しかし、問題がないわけではない。クラスレートハイドレートの実用化にはゲスト物質の安全性の証明はもちろん、この技術の原理や仕組みを解明し、その知識を多くの研究者や識者と共有していく必要があるという。

「実用化が見えだした今だからこそ基礎研究にも取り組んでいます。アカデミックの側に立つ者として、また先行する研究者として、特定のエンジニアリング分野に偏らない幅広い視点でこの現象を捉える時期が来ていると考えています」。

クラスレートハイドレートの研究は着々と進められている。

（取材・構成　渡辺　馨）



＊：化学反応を利用した二酸化炭素の分離・除去法の1つ。二酸化炭素と結合反応を起こすアミノ基を分子構造に持つアルカノールアミン水溶液を吸収液として利用する。吸収液の再生コストの低減が課題。なお、アミンは強いアルカリ性を示し、取り扱いにも注意を要する。

説得力のある研究には論理的な思考力が不可欠

面白いと感じることに真正面から向き合っていきたい

学部生の頃からクラスレートハイドレート研究に取り組んできた大村亮さん。研究者の道を歩み続ける一方で、後進の育成にも尽力している。自身が受け持つ熱力学について、「学生にとっては難解で最悪な科目に違いない」と笑うが、学生からは分かりやすいと好評で、物理が面白くなったという声も聞こえてくる。

――理工系に進学したきっかけは？

今でこそ理工学部の、それも機械工学科の教員をしていますが、高校時代の私はといえば、数学と物理が大の苦手で、好きな科目は政治・経済や倫理、そして歴史、という社会系が得意な学生でした。

そんな文系向きの私が理工系に進んだのは父の影響でした。進学先の大学を考えていた時、父に「せっかく専門の先生に出会える機会だから、どうせなら苦手なことを教えてもらったらどうだ」と言われたのです。幸いにも数学や物理もテストはそこそこできたので大学は理工系と決め、慶應義塾大学理工学部の機械工学科に進学しました。

――苦手な理系はどうでしたか。

数学の苦手意識は変わりませんでしたが、物理への印象は入学後すぐに変わりました。力学や熱力学関連の講義を担当される先生方はさすがに専門家で、ちゃんと分かっている人が教えてくださるとこんなに面白いのかと実感しました。

大学では物理現象や機械の動作について、それがなぜそうなるのか、どうして動くのか、その原理からメカニズムまでの一部始終を実験を交えながら学ぶことができます。「これが何の役に立つのか」と自問自答しながら勉強した高校の物理とはまったく別物でした。

――クラスレートハイドレート研究に取り組んだきっかけは……。

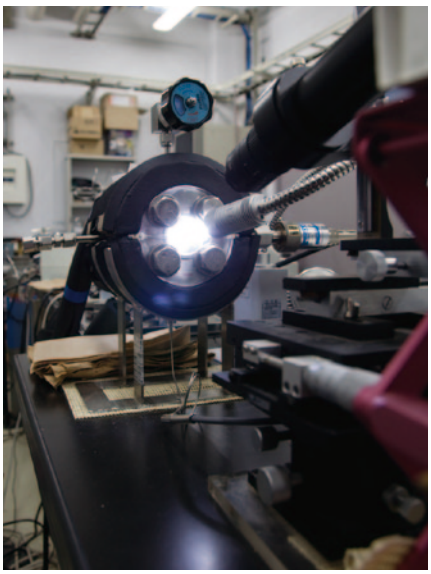
大学４年の時、森康彦先生の研究室に入ってからです。当時、森先生は伝熱（熱伝達）の研究をされており、そのテーマの１つがクラスレートハイドレートでした。当時から面白い事象とは思っていましたが、それ以上のことは考えていなかったように思います。その意識が変わったのが、米国のコロラド鉱業大学のE. D. Sloan Jr. 教授と出会ってからです。Sloan 先生はエンジニアリングの世界においてずば抜けた業績を持つハイドレート研究の第一人者で、私が修士課程の学生だった時に先生を招いた特別講座がここの理工学研究科で開講されました。２カ月という短い期間でしたが、クラスレートハイドレートを専門に研究されてこられた Sloan 先生から体系的な知識を学べたのは素晴らしい経験でした。

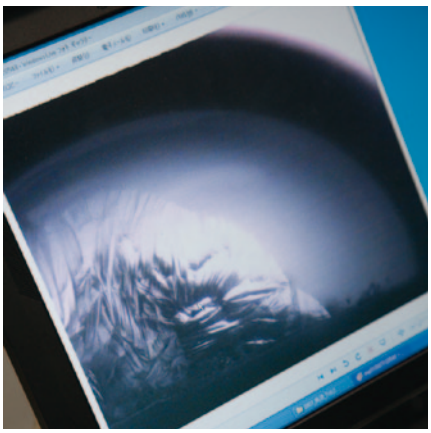
学位取得後もクラスレートハイドレート研究を続けようと考えていたとき、産業技術総合研究所（産総研）のハイドレート分野で若手研究者を求めていることを知り、早速応募しました。産総研には４年間在籍しましたが、その間、エンジニアリングの視点で対象を見つめながらも、応用物理的なファンダメンタルな研究もするというエンジニアリング・サイエンスを実践できたことは今につながる貴重な経験でした。

――その後大学に戻られたとのことですが、何か思うところがあったのですか？

実は学生の頃から、自分の性格を考えると、人を励まして力を引き出すような仕事の方が向いていると思っていたのですが、産総研に勤めてそのことを強く意識するようになりました。

産総研の研究者は部下や臨時職員と一緒に研究することもありますが、基本的





この円筒を横置きにしたような装置を用いて高圧・低温条件におけるクラスレートハイドレートの結晶成長過程を観察します。上の画像はメタン＋ CO_2 混合ガスと水との反応で成長しつつあるハイドレートの結晶を示しています。

ジョギング以外で続けている運動はサッカーとベンチプレス。ベンチプレスで持ち上げることのできる最大の質量は目下のところ 95kg。100kg を目指し師匠の森教授と一緒に週 2 回のトレーニングを続けています。

しがちですが、そこをぐっと抑える。私が努めて意識するのは、研究や発表会などを通してこれらのことを経験し、体感できる環境を用意することです。

機械工学的な視点でいえば、物理法則を基準に物事を判断できる応用力を身につけて欲しいと思います。学生にとって力学や熱力学ほどわかりにくい科目はないと思いますが、身につけてみるとこれほど役に立つ学術は他にはないというのも事実です。社会の仕組みやシステムの構築に欠かせない学術であるということに在学中に気付けるような講義や講座を提供していきたいと思っています。

には自分自身の研究に邁進するというタイプがほとんどです。ところが私は、学生と一緒にあれこれ考え、社会のために、大学のために、何より将来を担う学生を育てたいと思うようになり、大学から舞い込んできた専任講師の話をチャンスと捉え、教員という道を選びました。自分では厳しい面も持ち合わせつつ誉めて伸ばすタイプの教員だと思っています。学生には、怖い教員として通っているようです……この点は自分でもある程度は納得しています。

るときには走ることですっきりできるなど気分転換になっていると思います。

――教員として、学生の力を引き出すために意識していることを教えてください。

「論理的であれ」ということでしょうか。組織や社会の中で自分を活かすために欠かせないのが筋道を立てる力だと思っています。そして、もう 1 つが、相手の立場で考えること。伝えたいことがあるときほど、自分の意見を前面に出

――研究以外で関心があることや、続けてきたことはなんでしょうか？

体を動かすことですね。長く続いているのがジョギングです。最近では毎日 16km ほど、時間にして 1 時間 40 分くらい走っています。家が綱島なので、鶴見川沿いを新横浜に向かい、日産スタジアムまで行って戻ってくるという感じです。趣味というよりは習慣になっている感じもしますが、走っている間に考えをまとめることができるし、逆に迷ってい

◎ちょっと一言◎

● 学生さんから：知識の幅が広いという一言に尽きます。講義だけでなく、歴史や文化の話も面白いですし、料理やその食材、ワインにまつわる話題も豊富で、つい聞き入ってしまうほど。スポーツも得意で、体力も僕ら以上にあると思います。

（取材・構成　渡辺 馨）

さらに詳しい内容は
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai

学生には、物理法則を基準に物事を判断できる応用力を身につけて欲しいと思います。

大村 亮 Ryo Ohmura

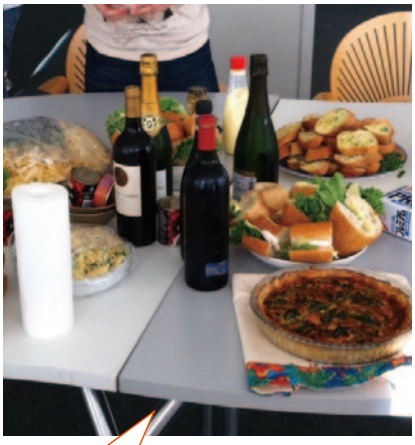
専門は熱工学、物理化学。現在の研究テーマはクラスレートハイドレートの物理化学、ならびにエネルギー・環境関連技術の開発。基礎研究から実用を想定した応用研究まで幅広く展開している。2000 年、博士（工学）を取得後、フランスでハイドレート研究に参画。2002 年から独立行政法人産業技術総合研究所研究員。2006 年に慶應義塾大学理工学部専任講師に着任し、2009 年同大学准教授に就任。現在に至る。

Gastronomique 大村研究室！

研究室の料理

“食は人なり”―私たち大村研究室は“食”にこだわりを持っています。
研究室で行われる食事会の様子を学生が紹介します！

大村研究室では、月に 2、3 回ほど食事会を開きます。料理は出来合いの物ではなく、ハムやチーズ、ソーセージなどの食材を揃えて調理します。これは論文掲載を祝うために準備した料理です。この日のメニューはペンネのサラダ、フランスパンにハムやトマトを挟んだサンドイッチでした。



これは完成した料理。先生に用意していただいたワインと、クラッカーやチーズなどのおつまみを並べたものです。研究室のみんなで協力して調理した料理はよりいっそう美味しく感じられます。ワインやビールを飲みながらいただきました。

イタリアンレストランで食べたカルツォーネです。ピザと同じ食材を三日月型に折りたたんで両面を焼いた料理で、とても美味しいのでぜひ一度食べてみてください。大村研究室では美味しいと評判のお店や、ドイツのソーセージやビールを味わえるオクトーバーフェストなどのビアフェスに出かけることがあります。

私の好きなワインとビール

フランスを筆頭に欧州各国の文化、
特に食文化に大きな影響を受けた私（大村）。
フランス各地のおいしいワインの探求に、
奥深いベルギービールの世界の理解に日々励んでいます。

2000 年 3 月の学位取得後、9 カ月ほどフランスに留学しました。期待される研究成果を重んじて米国あるいは英国に行くべきという多くの先生方の助言に従わず（ごめんなさい）、その大いなる文化へのあこがれからフランスを選び、トゥールーズに 5 カ月、サンテティエンヌに 4 カ月滞在しました。

写真右の Gaillac はトゥールーズ近郊で最も人気のあるワインです。フランス南西部ワインの中では随一の味で色もきれいです。写真中央のワインは Saint-Joseph というローヌ川流域のワインの 1 つです。これはサンテティエンヌ高等鉱業学校の Herri 教授と Bonnefoy 専任講師の 2 人が教えてくれました。ワインソムリエのように高級ワインを勉強するのも 1 つの道だと思いますが、私はフランス人の友人から教えてもらった庶民感覚のワインの楽しみ方を大切にしています。

Herri 教授にはビールについてもベルギービールを飲みなさいと教えてもらいました。ベルギービールには、ビール大国であるドイツやチェコのものとはまた違った奥深い世界があります。青いラベルの瓶は Blanche de Bruges というブルージュの白ビールで、その隣が専用グラスです。ブルージュはきれいな街ですので観光で訪れる方も多いかと思います。その際はぜひこの Blanche de Bruges をお試しください。

私の本棚
My favorite books

Clathrate Hydrates of Natural Gases　クラスレートハイドレートに関する化学工学的研究の権威 Sloan 教授（コロラド鉱業大学）による専門書です。ハイドレートの結晶学的性質・物理化学的性質から研究・開発の歴史や関連する工学技術、さらには天然のハイドレートの分布に関する地質学的研究まで、天然ガスハイドレートが関わる理工学的内容を網羅した成書です。ハイドレート研究に関わる大学生・大学院生、研究者、技術者にとって必携の一冊と言えるでしょう。

Chemical and Engineering Thermodynamics　化学系・化学工学系の熱力学分野における第一人者である Sandler 教授（米国デラウェア大学）著の化学熱力学・工業熱力学の教科書です。ハイドレート研究を通じて知り合った私の数少ない親友の 1 人である Sum 博士（コロラド鉱業大学准教授）の先生（博士論文の指導教員）の著作ということもあり、数ある熱力学の教科書の中から選んで使っています。熱力学の講義の準備に、ハイドレートの熱力学的研究に活躍している一冊です。

熱力学（JSME テキストシリーズ）　この本は日本機械学会の出版物ですので、主に工業熱力学を取り扱っています。慶應義塾大学理工学部機械工学科でも 2 年生の必修科目「熱力学の基礎」をはじめいくつかの熱力学関連科目で教科書として用いています。熱力学は実は「力」学ではなく「エネルギー」の科学です。熱力学をしっかり学ぶと力学だけからはわからないことがたくさんわかるようになります。熱力学を学び始める人にも、実践的に関わる人にも役立つわかりやすい本だと思います。

志賀直哉　近代日本の文豪の中で私が最も敬愛するのが志賀直哉です。実家で父が全集を所蔵しているので、小説や随筆の全作品に加えて日記・書簡の類いまで全て読みました。志賀直哉の作品は「目に見えるような」描写と読点や接続詞の使用を最小限に抑えた「リズム」のよい簡潔な記述が特徴です。研ぎ澄まされたとさえ言えるその文体は日本語表現の一到達点を示したと評されます。理工学分野の学術論文でも明瞭さ（clarity）は必須の条件ですので，私たち理工系の人間も志賀直哉から大いに学べるのではないかと思っています。

Transport Phenomena　この書名を邦訳すると移動速度論となりますが、交通手段に関するものではありません。エネルギーと物質の移動速度および流体力学を統一的に扱う学術を移動速度論といいます。エネルギーの収支を扱う熱力学とともに、エネルギー・環境問題への対応で重要な基礎をなす物理的学術といえるでしょう。この本の著者らによって移動速度論という考え方が初めて提唱されたのは 1950 年代でした。提唱以来半世紀以上を経た 21 世紀、その重要性はさらに高まっていると思います。

地球からの贈り物

大気中の二酸化炭素（CO_2）濃度の上昇が地球温暖化や気候変動の大きな要因であることは多くの人々に知られてきましたが、その CO_2 濃度が過去 70 万年の間、数万年単位で増減を繰り返してきたことを知る人は少ないかもしれません。こうした過去の気象状況を調査する鍵となるのが、大村准教授が研究しているクラスレートハイドレート物質です。

現在、大気中の CO_2 濃度の推移については、72 万年分がデータ化されています。しかし、そのうちの実測値はわずか数十年分と少なく、それ以前のデータは南極やグリーンランドに降り積もった雪でできた氷床をボーリングで掘り出し、その中に閉じ込められた空気を分析して調べています。そのため、古い時代の空気の組成を知るには深い場所の氷床が必要となります。

氷床の中の空気は深さ 800m 程度までは氷とともに気泡として浮かんでいますが、それより深い場所では氷の水分と反応して、水分子に囲まれた状態で結晶化します。つまり、空気のクラスレートハイドレート化が起きるのです。これは 800m を超えるような低温高圧の環境にある氷中の空気は、気泡として存在するよりも空気ハイドレート（エアハイドレート）になるほうがより安定するためといわれています。しかも、このエアハイドレートは、メタンハイドレートなどと同じ構造をしており、当時の空気をそのままの状態で結晶内部に閉じ込めているのです。偶然とはいえ、それが 70 万年前の空気を保存する最適な場所になったのです。

南極の氷床は、数千万年もの歳月をかけて降り続けた雪と寒さが育てたとされています。そして当時の空気もまた、その歳月のしばらくを氷床中の気泡として過ごし、やがてエアハイドレートをゆりかごにして長い眠りに就きます。そう考えると、地上に取り出された氷床はかつての地球が当時の様子を現代に伝えるために仕込んだタイムカプセルにも見えてくるから不思議です。

理 工 学 Information

第 12 回慶應義塾先端科学技術研究センター（KLL）産学連携セミナー「しなやかさをそなえた街づくり～その実現を目指して～」

2011 年 10 月 28 日（金）15：00 ～ 17：30
日吉キャンパス　来往舎 1 階シンポジウムスペース
参加費無料・事前登録制
http://www.kll.keio.ac.jp/seminar/index.html
セミナー後には懇親・意見交換会を開催予定です。お申し込みは上記 URL からどうぞ。

KEIO TECHNO-MALL 2011 第 12 回慶應科学技術展「今、ここから。」

2011 年 12 月 9 日（金）10：00 ～ 18：00
東京国際フォーラム　E ブロック地下 2 階　展示ホール 2
入場無料・事前登録不要
http://www.kll.keio.ac.jp/ktm/index.html
KLL が年に一度開催する科学技術展。今年度は時間を 18：00 までに延長、会場も変更して開催します。

イノベーション創出戦略マネジメント講座（ソニー寄附講座）公開シンポジウム 2011　人類・未来の新たなる発展をめざして

第 2 回「インターネットと人類の未来」　2011 年 11 月 24 日（木）
第 3 回「未来はどこまで予測可能か？」　2012 年 1 月 27 日（金）
http://www.koukai-sympo.net/portal/
詳細は上記 URL にて順次公開いたします。

©慶應義塾大学

編集後記

8 月のある日、取材前の打ち合わせに現れたアロハシャツ姿の大村准教授（とてもよく似合います）。風貌どおり、オープンに取材を受けてもらえそうだと思っていると、「私は、研究者は論文で成果を発表していればよいという古風な考えの持ち主なんですよ」と言うので、あわててしまいました。でも実際は取材にとても協力的で、研究のロマンチックな面を大いに語ったあと、95kg のベンチプレスまで披露してくれました。ちなみに、表紙の背景色は大村准教授の希望に応えた「地中海の空の色」になっています（かなりのロマンチストの模様）。

それから、カエル柄のネクタイは、無事に家まで“カエル”ように、出張のときいつも奥様がチョイスされるものだとか！次々現れる新しい側面に驚いてばかりの楽しい取材となりました。　（平良沙織）

新版 窮理図解

No.08　2011　October

編集　新版窮理図解編集委員会
写真　邑口京一郎
デザイン　八十島博明（GRID）
編集協力　サイテック・コミュニケーションズ
発行者　青山藤詞郎
発行　慶應義塾大学理工学部
〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
問い合わせ先（新版窮理図解全般）
kyurizukai@info.keio.ac.jp
問い合わせ先（産学連携）
liaison@educ.cc.keio.ac.jp
web 版　http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
twitter　http://twitter.com/#!/keiokyuri