

OCARINA通信

The OCU Advanced Research Institute for Natural Science and Technology

—特別企画—

機構長&プロジェクトリーダー対談

—人として科学者として真理を追究し、
都市 大阪から世界へ発信する—

機構長 木下勇教授

プロジェクトリーダー 橋本秀樹教授

—研究紹介—

B グループ研究課題

「都市圏の環境保全と地盤防災のための

地下水資源の健全な活用方法の構築」

—大阪市をはじめとする都市圏における

地下水利用のあり方を提言—

チームリーダー 大島昭彦教授 (工学研究科)

—活動報告—

—Topics—

光合成の酸素発生の謎を解明

—人工光合成への足がかり—

神谷信夫教授



木下 勇氏
デザイン・イラスト

VOL.1

■特別企画

人として科学者として真理を追究し、 都市 大阪から世界へ発信する。

「複合先端研究機構」が正式にスタートして1年半が経ち、日ごろの活動内容や研究成果をご紹介する広報誌「OCARINA 通信」を発刊することとなりました。第1号となる今号は、特別企画として機構長の木下先生とプロジェクトリーダーの橋本先生の対談をお届けします。

共同研究プロジェクトから始まり、 拠点となる複合先端機構が設立された。

木下先生／現代の問題を解決するためには、研究科や研究領域といった既存の枠組みを越えた横断的な研究が欠かせないという想いから、共同研究プロジェクトを始めたのがきっかけでしたね。以来、研究はもちろん、組織づくりに資金集めに、ずっと全速力で走り続けてきたような気がします。

橋本先生／理系の研究は日進月歩で進んでいくので、どんどんアピールしていかないと乗り遅れてしまうんですよ。

木下先生／そうですね。新しい拠点ができるまで数年間も待ってられないので、ここ2号館に1つ目の拠点をつくってしまいました。この建物はかつて予科練（海軍飛行予科練習生）が使用していたもので、梁が太くて構造自体がしっかりしているという安心感もあります。この構造は、文化庁登録有形文化財に指定されている本学1号館とほぼ同等の構造でできているんですよ。そうした歴史ある建物を拠点として研究できることも、誇りに思っています。

橋本先生／内装を変えるだけで、これだけモダンな空間になるんですよ。それに、130年という歴史のある古い大学の最も古い建物の中で、最も先進的な研究が行われているというのは、面白いじゃないですか。ここを拠点として都市環境の再生・防災についての研究した成果を世界に発信していけるようになりたいですね。

大阪市立大学の未来を考えた先人たち。 その想いを実現できる研究機構に……。

木下先生／この複合先端研究機構は、故 角野昇八先生（前・大阪市立大教授・特命副学長）の切なる思いから生じたものです。当時、角野先生や初代機構長を務められた畑先生は、今よりもう少し大きな機構の姿を思い描いていました。

平成24年の完成をめざして整備工事を進めている理系新学舎の中にも、複合先端研究機構のもう1つの拠点ができます。そこでまた、新しい研究プロジェクトを進めてほしいですね。

橋本先生／新しい拠点も1000㎡以上を確保していますからね。まっさらな空間だけがあるので、そこに入りたい人は、研究内容とお金を用意して来てくださいね。歓迎しますよ。

木下先生／確かに、自助努力は必要ですよ。私たち自身もそうしてきましたから。

橋本先生／そうでしたね。CREST（戦略的創造研究推進事業）や企業などから研究費をもらったり、文部科学省の補正予算をとってきいたり。さまざまな自助努力をしてきました。権利を主張するためには、義務も果たさねばなりません。

研究費の1/3は自分でなんとかして、残りの1/3は大学、もう1/3は国の予算をとるといった進め方でなければ、難しいでしょうね。自分の研究はやって当たり前で、+αで動かなければならないので、相当大変なことではありますよ。

木下先生／もう1つ付け加えるなら、大学からも研究費の1/3を引き出せるだけの研究内容と説得力があるかどうかということも、問われているのだと思います。

橋本先生／ここにくるまで、結構苦労はしましたね。金兄前学長の頃から、バーチャルな組織として始まり、先見の明がある西澤学長によってリアルな組織づくりが進められました。すべてがうまく運び出すと、研究者たちのエネルギーがドカーンと爆発するような気がしますね。

年間203GtものCO₂を吸収。 光合成の不思議……。

木下先生／光合成やCO₂削減という言葉だけでは、光合成研究の魅力や面白さは伝わらないかもしれませんが、「自然は年間に203Gt（1Gt=10億t）のCO₂を吸収している」と聞いたら、驚きませんか？それが、光合成の力なのです。どんなに頑張っても、人間が203GtのCO₂をマネジメントすることはできません。

一方、人間は、その活動を通して年間に7GtのCO₂を排出しています。そのうちの20%、2GtくらいのCO₂をなんとかするために、一生懸命になっているわけです。

では、203GtのCO₂吸収の仕組みはどうなっているのか？複合先端研究機構のような大きくはない規模の組織では、そこに特化して研究しても良いのではないかと思います。

橋本先生／203Gtというのも、濃縮された状態ではないですからね。地球のCO₂の濃度は平均400ppm（1ppm=0.0001%）くらいです。



そのCO₂だけをよりとってきて、203Gtを処理する能力がある。なぜそんなことができるのか、それは、1つの大きな謎なんですよ。

海に囲まれた島国、日本で 1億3千万人が生きるためには？

木下先生／日本の土地にどれだけ作付けしても、3千万人しか生きられません。この数字は、江戸時代の人口からきています。当時は、自給自足の最も美しい循環社会でした。しかし、日本の気候や作付面積を考えると、1億3千万人も人口がいては、自給自足なんてできません。

橋本先生／要するに人間が多すぎるんです。でも、それでは人を減らしましょうというわけにはいきませんよね。

木下先生／それを何とかしようとしたら、日本の場合は海洋に目を転じるしかない。すると、海洋の中で非常に不思議な生命体がいることがわかりました。通常、タネは芽が出て花が咲いて増えるでしょう。そうではなく、タネのまま増えていくものが見つかったのです。

橋本先生／オキナワモズクですね。このモズクのタネは、潮に乗って海の中を泳いでいて、育ちやすい場所に着床すると芽が出てきます。しかし、泳いでいる間に死んでしまっはいけないので、その

間はタネのまま分裂して増えていきます。つまり、2種類の増え方があるのです。

このタネは、シンプルな構造であり、人工的に培養しやすいので、実験に向いているのです。実験の鉄則は、ファクターは1つしか変更しないこと。同時に2つのことを変更すると、どちらが原因だったのか人間には判断できませんからね。

木下先生／沖縄では、年間2万tものモズクを養殖していますね。
橋本先生／それでも、2万tでは、203GtのCO₂を吸収することはできませんね。地球全体のスケールで考えていかなければなりません。試験管の中でやっていることを地球規模で考えたらどうなるのでしょうか？試験管の代わりにするのは、海しかないですよ。

■特別企画



profile

大阪市立大学 複合先端研究機構 / 理学研究科教授

橋本 秀樹 はしもと ひでき

関西学院大学大学院理学研究科修了。理学博士。大阪市立大学工学部助手、静岡大学工学部助教授を経て、2002年から大阪市立大学理学研究科教授。2008年、複合先端研究機構設立時からプロジェクトリーダーを務める。2010年から複合先端研究機構専任教授（理学研究科兼任）。

今の取り組みの結果は孫の世代に影響する。 だからこそ、基礎研究が欠かせない。

木下先生 / CO₂の削減やバイオフェューエル（生物由来燃料）について、さまざまな研究・対策がなされていますね。「それらの対策は何かを見落としていないか？本当に正しいのか？」という判断をするためには、私たちが取り組んでいるような基礎研究をしっかりとっておく必要があるのではないかと考えています。

橋本先生 / 結局、ターゲットになるのは孫の世代なんですよ。人間って、基本的には自分の生きている間のことしか考えないじゃないですか。でも一番迷惑を被るのは、孫の世代なんです。いまの私たちがまさにそう。高度成長経済期の人たちがいろいろやってきたことが孫の世代になって問題となり、非常に苦労しています。研究というのは、本来はそれくらい先のことで考えてやらなければならないのだと思います。

自分の専門分野だけでなく、 その先につながるものをイメージする。

木下先生 / 例えば、植物工場では、より効率が良いという理由で、赤色LEDが使われています。さらに最近では、フラッシュを使って光合成のタイミングにだけ光るようにしています。

橋本先生 / 光合成で重要なのは、明暗の切り替えなんですよ。植物にあてる光を点滅させると、光ったままの状態の約10倍もの酸素が出てくることが実証されています。

木下先生 / 現在の植物工場の効率的なシステムは、そうした光合成研究から生まれたんですよ。

橋本先生 / あと最近、GSユアサなどが電気自動車に利用していたリチウムイオン電池を2次利用して、ローソンの屋根に設置した太陽電池の電力を貯蔵する実証実験を始めたというニュースを見ました。このニュースを見て、将来的にできたら面白いなど考えたのは、ローソンならぬノーソン。太陽電池の電力を利用してLED照明を一定周期で光らせ、CO₂を固定したり、通常の10倍くらい早く育つ作物を作ったり。さらに、光合成を使って燃料電池

に使える水素を発生させるようなことができれば、非常に効率が良いですよ。そういう融合的な取り組みをきちんと理解して、マネジメント出来る人・研究者を育てていくためには、複合先端研究機構のような組織が必要なのです。光合成の研究をやるだけでは、ノーソンの発想は出てきませんよね。

大阪市だからできる研究をする。 それが、私たちの使命。

木下先生 / 太陽や風といった自然のエネルギーで発電した電力をいかに効率よく転送するか、という問題もあります。

橋本先生 / 太陽光発電などで生まれる電力は直流なのに、わざわざ交流に変えて送電しているんですよ。

木下先生 / 直流は途中で抵抗が生じ、電圧がなくなっていくという問題がありました。しかし最近、高温超伝導が使えるようになり、直流のままの送電も可能になったのです。実用化されている超伝導線なら、半径500mのところは、すべて結ぶことができます。そこで着目したいのが、地下鉄などの都市交通ですね。新幹線以外の電車は直流の電力を使って動いているので、そのまま直流を流すためのインフラにすることができます。それを前提に、光合成研究をすればいいという発想が出てくるのです。

橋本先生 / 光合成を使った太陽光発電や水素発電で出てくるのは、直流の電力ですからね。

木下先生 / なぜ大阪市大で光合成研究をするのか。その理由の1つは、地下鉄などがそのまま直流電力のインフラにつなげられるからですよ。

橋本先生 / 電車をインフラとして活用すれば、市内全体をカバーすることができますね。

木下先生 / 20~25%のCO₂をカットしようとしたら、あらゆる技術を総合しなければなりません。その一例が、都市エネルギーのインフラ整備と、それに合った発電、イノベーションを考えること。大阪市大には、それをやる使命があるのではないのでしょうか。

橋本先生 / そう、使命ですよ。こうした研究は、大学の1研究室



profile

大阪市立大学 複合先端研究機構長／大学院理学研究科教授

木下 勇きのした いさむ

東北大学理学部化学科卒業。名古屋大学大学院理学研究科修了。理学博士。大阪市立大学理学部助手、講師、助教授を経て、2003年から現職。

で考えたことがダイレクトに行政に跳ね返る規模でやらなければ難しいものです。大阪市ならちょうどいい規模であり、大阪市自体が環境という問題に非常に興味を持っているので、研究しやすい環境でもあります。

“知りたい”と思うのは本能だから、 人類の知的好奇心を満たすための研究。

木下先生／大阪市大として、ほかにはないユニークな視点から、イノベーションにつながるような研究に取り組んでいきたいですね。しかし、個人的な意見なのですが、現在は哲学が欠落しているのではないかと思います。哲学なしではイノベーションに挑めないのではないのでしょうか？

橋本先生／なぜその研究をやりたいのか、正当に自己主張する術もないし、考えたことすらないというのは、問題でしょうね。

木下先生／人間の本能は「知りたい」に尽きると思うのです。恋をするのも、相手の人が自分を好きかどうか知りたいから。死んだ後どうなるかを知りたいから、宗教ができる。

橋本先生／結局は、その命題に突き当たるんですよね。理学の研究者にとって「その研究にはどんな意味がありますか？」という質問は愚問であると、ファラデーも言っています。人間は知的好奇心のある動物であり、知らないことを明らかにするのが理学なのだから、それ以上何をやることあるのでしょうか。

でも、世の中がそれでは許してくれない時代になってきている。役に立つ、イノベーションでこんなものができるというところに結びつけようとする、哲学や倫理が出てくるのでしょう。

木下先生／正直に言うと、これ以上生活が便利になってもどうってことないのです。むしろ、私たちの生活に直結しなくても、超新星が現れたら新聞の一面に載り、小惑星探査機の「はやぶさ」が帰ってきたらみんなが感動するのです。

橋本先生／みんな感動しているけど、税金をどれだけ燃やしていることか。

木下先生／それでも、やっぱり知りたい。その思いがすごく大事だとしたら、科学研究者は、そういうことをしっかり考えるべきなん

ですよ。

どなたかの受け売りですが、「サイエンスは未来を語らない。語っているのは、人間である」という言葉があります。確かにその通り。ところが、多くの人はサイエンスがあって未来があると勘違いしてしまうんですね。

人間が間違いを犯さないように……

USRは、私たちのよって立つべき基盤。

木下先生／私は公害世代なので、「化学研究をやることは、本当にいいことなのか？」という自問自答をくり返してきました。例えば、水俣病の原因となった水銀を垂れ流したというのは、大変な問題です。しかし、だからといって水銀の使用をすべて禁止するのは、どうなのか。適切な処理をして水銀を使えば、コストも安くなって、加工しやすくなるのに、そういう可能性もすべてつみ取ってしまっています。

橋本先生／安全面でのオーバースペックになっているんですね。

木下先生／本当の意味で安全に管理すれば、問題ない話です。

橋本先生／要するに、人間の問題。人間が間違いを犯すから、人災ですよ。人災を防ごうと思ったら、哲学や倫理が出てくるしかありません。

木下先生／いま、公的な存在は、必ず倫理綱領を作ることが要求されていますね。大阪市立大学にも倫理綱領があり、そこでは、人類の福祉や社会のために尽くすということが書かれています。

橋本先生／複合先端研究機構にも規程があり、社会や地域への還元を目的とするといったことが書いてありますね。

木下先生／それらをUSR(University Social Responsibility)と言います。会社の場合はCSRで、よく聞く言葉になっていますね。その大学版であるUSRは、私たちのよって立つべき基盤になるのではないかと思います。研究の成果を大阪市、市民、世界に発信していくのはもちろんのこと、倫理、哲学的イメージも発信していく場でありたいですね。

■ 研究紹介

大阪市をはじめとする都市圏における 地下水利用のあり方を提言。

「都市圏の環境保全と地盤防災のための地下水資源の健全な活用法の構築」を研究課題とする B グループは、理学研究科・工学研究科・生活科学研究科の教員 5 名*が共同で研究を行っています。ここでは、チームリーダーを勤める工学研究科の大島先生に語っていただきました。

*）益田 晴恵（理学研究科・生物地球系専攻・教授） 三田村宗樹（理学研究科・生物地球系専攻・教授）

貫上 佳則（工学研究科・都市系専攻・教授） 西川 禎一（生活科学研究科・長寿社会総合科学講座・教授）

浅層・中層・深層、

3 層の地下水の特徴とは。

私たちは、地下水を深度別に大きく 3 つの層に分けてとらえています。地下 40m までの浅層地下水、100～500m 程度の中層地下水、そして 500m より深い深層地下水、それぞれ抱えている問題も活用法も異なります。

最も浅い浅層地下水は、かつて汲み上げ過ぎたことが原因で地盤沈下を引き起こしたため、昭和 38 年には地下水の汲み上げを規制する工業用水法、ビル用水法が施行されました。その結果、図 1 に示したように地盤沈下は収束しましたが、この浅層地下水は山側から雨などによる水が常に供給されるため、地下水位が急上昇してしまいました。これにともない、さまざまな問題が起きているのです。この層の研究は私の専門分野でもあるので、後ほど詳しく説明しましょう。

中層地下水で問題となっているのは、法規制対象外の井戸を掘り、地下水を利用する専用水道の敷設が増していることです。その利用実態はほとんど把握されていませんが、専用水道が増え続けると、水道事業の衰退を招く可能性があります。また、このまま放置すると地下水が枯渇し、再び地盤沈下を起こす可能性もあります。この層の地下水は浅層ほどの供給源がないため、一旦水量が減ってしまうと、なかなか元に戻すことはできないのです。深層地下水も、温泉開発で需要が高まっているため、近い将来に枯渇する可能性があります。そうした問題を防ぐために、地下水利用の実態調査も行っています。

浅層地下水の水位上昇は、

4 つの問題をもたらす。

私自身の研究は、浅層地下水と地盤の防災・環境をテーマにしています。この層の地下水位が高くなったことで、4 つの問題が生じています。まず 1 つは、地下構造物が設計・施工されたときよりも地下水位が高くなっているため、浮力が働き、既設構造物が不安定になること。2 つ目は、地下鉄建設などに伴う掘削工事が難航すること。3 つ目の問題は、阪神・淡路大震災でも問題となった液状化です。間もなく東南海、南海地震が起きると言われていますが、今のように地下水位が高い状態では、かなり大きな被害が出ると予想されています。そして 4 つ目の問題は、土壌・地下水の汚染です。重金属や揮発性有機化合物（VOC）などで汚染された土壌に地下水が浸透すると、地下水とともに汚染物質が拡散してしまいます。

さらに、私たちは“豊富にある浅層地下水を有効に利用していないこと”も、問題の 1 つであると考え、地下水を有効活用して 4 つの問題を解決する方策を探究しています。

どれくらいの地下水を

汲み上げられるのか。

図 2 は、大阪の東西方向の断面図です。浅層地下水は、ほとんど水を通さない「沖積粘土層」を挟み、「緩い沖積砂層」と、その下の「第 1 洪積砂礫層」に分かれています。この 2 つの層の地下水を対象として、どれくらいの量の地下水を汲み上げられるのかを算出しました。

まず、大阪の地盤データベースとボーリング調査をもとに、250m メッシュ毎の土質・地盤の特性を求めました。その特性値から、地下水位を下げたときの沖積粘土層の沈下量を求めています。さらに、最小限の許容沈下量以下にとどまる地下水位低下可能量が分かれば、有効活用できる地下水量を割り出すことができるのです。本研究では、建築基礎構造設計指針などから許容沈下量を 5cm と仮定しています。

図 3 は沖積砂層、図 4 は第 1 洪積砂礫層の水を汲み上げた場合です。地盤の緩い一部の地域を除くと、沖積砂層で 2～3m、第 1 洪積砂礫層で 2～4m は地下水の汲み上げが可能だということがわかりました。

浅層地下水の水位低下は

液状化対策として有効か。

さらに、液状化対策として地下水位の低下が有効なのかどうか検証してみました。まずは、沖積砂層の層厚や粒の大きさなどの特性を調べ、そのデータをもとに海溝型の東南海、南海地震が起きたときの液状化の危険度を求めました。それが、図 5 です。PL 値が高いほど、危険度が高いことを表しています。現状の地下水位では、東大阪地域は沖積砂層が薄いので比較的安全ですが、西大阪地域における液状化の危険度が非常に高くなっていますね。

では、沖積砂層の水位が下がると、どうなるのでしょうか？現状から水位を 3m 下げた場合の液状化の危険度を表したのが、図 6 です。非常に危険な状態を表す赤い色がほとんどなくなりました。つまり、地下水位を 3m ほど下げることによって、地盤沈下を起こさずに液状化を予防できるということです。



profile

大阪市立大学 工学研究科都市系専攻 教授

大島 昭彦 おおしま あきひこ

大阪市立大学工学部卒業、同大学院工学研究科土木工学専攻修了。工学博士。1988年に大阪市立大学工学部土木工学科助手となり、同講師、同助教授を経て2011年から現職。専門分野：地盤工学

地盤工学の視点から

地下水の有効利用を考える

これまでの研究結果を踏まえ、現在は汲み上げた地下水の有効利用についての研究を進めています。例えば、下水・上水の中間的な「中水」として利用する方法があります。具体的には、ビルや工場の水冷式エアコンの冷却用水や、ビルや公園のトイレの洗浄用水、公園の緑化・ビオトープの環境用水などに利用できるでしょう。ほかにも、緊急時の非常用水にしたり、ヒートアイランド対策の打ち水に利用したり、さまざまな使い方が考えられます。

こうした地下水の有効利用を実現する上で欠かせないのが、地下水の「公水」化です。地下水は大きな視点で見ると、地球環境の中で循環しているものです。雨が降り、河川に流れたり地下を通ったりして海に戻り、蒸発してまた雨となる……。雨も河川も海も、個人のものではないのに、地下水だけ個人のものというのは、おかしい話ですよ。そこで、地下水は「公水」化して、国や自治体が適正な管理・利用をすべきであると考え、自治体にも働きかけています。

複合先端研究機構として

研究する意義とは。

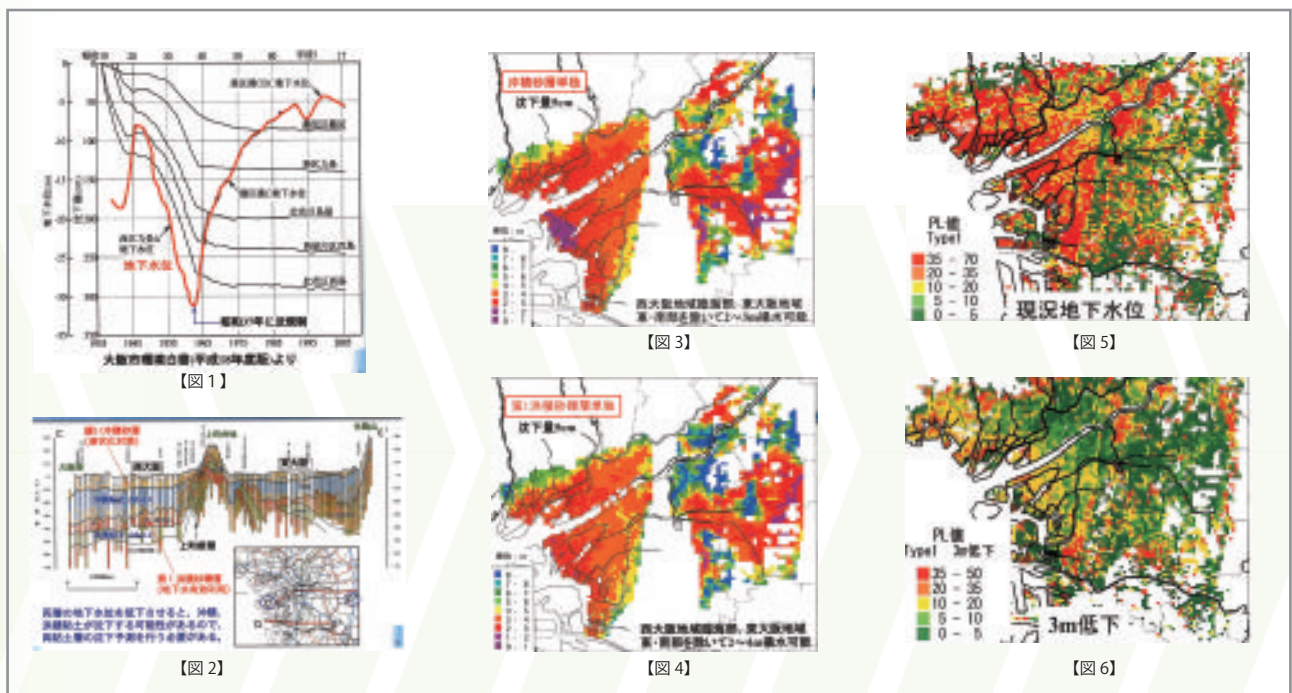
このチームには、私のような土木・地盤工学の専門家だけでなく、環境工学および地球学や地質学の専門家、さらには細菌の専門家など、自分の得意分野を持ったスペシャリストたちが集まっています。互いの情報を交換することで研究に広がりや深み生まれ、非常に有意義な研究ができています。

本年7月、同じBグループの益田教授をヘッドに研究成果を1



『都市の水資源と地下水の未来』
益田晴江編 京都大学学術出版会

つにまとめた『都市の水資源と地下水の未来』という本が出版されます。地下水の利用についてさまざまな角度からアプローチし、調査・研究してきたことの集大成となりますので、お手にとっていただければ幸いです。地下水の有効利用・地盤の問題は、非常に身近な問題です。行政はもちろん、一般市民の皆さんとともに、考え、取り組んでいきたいと考えています。



■活動報告

Kick Off Symposium

大阪市立大学 複合先端研究機構 設立記念シンポジウムプログラム

▶開催日時 2008年3月10日

▶招待講演者

- Richard J. Cogdell, Fellow of Royal Society (University of Glasgow, UK)
- Alfred Holzwarth (Max-Planck Institute, Germany)
- Cong-Qiang Liu (State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, China)
- Shawn K. Y. Lum (Nanyang Technological University, Singapore)
- 矢野 重信 (奈良女子大学)
- 西垣 誠 (岡山大学)
- 田中 伸和 (電力中央研究所)

▶シンポジウム概要

複合先端研究機構の設立を記念して開催された、第1回目の国際シンポジウム。エネルギー不足、水資源の不足、地球温暖化といった喫緊の都市問題に対して戦略的に研究を展開すべく、当該分野において活躍されている国内外の研究者をお招きし、分野間の垣根を取り払って、問題解決に向けての認識を共有するとともに活発な意見交換を行いました。



7

The 2nd Activity Report

2010 OCU International Symposium on the Foundation of Environmental Research

▶開催日時 2010年3月8～9日

▶招待講演者

- Richard J. Cogdell (University of Glasgow, UK)
- Thomas A. Moore (Arizona State University, USA)
- Ana L. Moore (Arizona State University, USA)
- Bruno Robert (CEA, FR)
- Leroy Cronin (University of Glasgow, UK)
- Timothy J. Storr (Simon Fraser University, CA)
- Lawrence R. Sita (University of Maryland, USA)
- L. James Wright (University of Auckland, NZ)
- 石谷 治 (東京工業大学)
- 宮坂 力 (桐蔭横浜大学)

▶シンポジウム概要

第2回目の国際シンポジウムの会場となったのは、淡路夢舞台国際会議場です。青い海と緑の森、豊かな自然を身近に感じられる環境で、招待講演者らによる11件の講演や27件のポスターセッションなどが行われました。「大阪発世界を救う」を合い言葉として2日間にわたって活発な意見交換が行われ、情報発信への第一歩を踏み出しました。



The 3rd Activity Report

大阪市立大学 複合先端研究機構 2号館開所記念講演会

▶開催日時 2010年11月18日

▶招待講演者

<特別講演>

- 矢野 重信
奈良先端科学技術大学院大学 客員教授
京都大学産官学連携本部 研究員
大阪市立大学複合先端研究機構 特別研究員
大阪市立大学複合先端研究機構 外部審査員
大阪市立大学 客員教授

<基調講演>

- 藤井 律子 (大阪市立大学複合先端研究機構)
- 川上 恵典 (日本学術振興会)



▶シンポジウム概要

2010年11月、複合先端研究機構の設立から4年目にして、本格的な活動拠点となる研究施設の設立に至りました。プロジェクトが名実ともにスタートしたことを機に、記念講演会を開催し、矢野客員教授による特別講演のほか2件の基調講演、34件のポスターセッションを実施。世界をリードする研究機構をめざし、参加者一同、思いを新たにしました。

The 4th Activity Report

第3回 大阪市立大学複合先端研究機構国際会議 ～角野メモリアル～

▶開催日時 2011年3月7～9日

▶招待講演者

- Richard J. Cogdell (University of Glasgow, UK)
- Thomas A. Moore (Arizona State University, USA)
- Ana L. Moore (Arizona State University, USA)
- Dalio Polli (Politecnico di Milano, Italy)
- Kazi Matin Ahmed (University of Dhaka, Bangladesh)
- Guoji Ding (Shanghai University, China)
- Sarah Henry (University of Glasgow, UK)
- 加藤 昌子 (北海道大学)
- 麻田 俊雄 (大阪府立大学)
- 戸田 三津夫 (静岡大学)
- 松田 智 (静岡大学)
- 中井 美早紀 (関西大学)
- 松村 有里子 (成蹊大学)



▶シンポジウム概要

第3回目の国際シンポジウムは、複合先端研究機構の設立に尽力された故 角野昇八先生の偉大な功績をたたえ、「角野メモリアル」と題して開催。これまでに機構が成し遂げた業績、最新の研究成果を発表したほか、国内外の研究者による講演も行われました。また同時に、研究活動のさらなる充実に向け、新プロジェクトのアイデアを募集、発表しました。

Topics



profile

大阪市立大学 複合先端研究機構 教授

神谷信夫 かみや のぶお

高エネルギー物理学研究所／放射光実験施設客員研究員、理化学研究所副主任研究員、理化学研究所播磨研究所（大型放射光施設SPring-8）研究技術開発室室長を経て、2005年から大阪市立大学理学研究科教授。理学博士。2010年から複合先端研究機構専任教授。

光合成の酸素発生の謎を解明 —人工光合成への足がかり—

複合先端研究機構の神谷信夫教授（物質分子系専攻）と岡山大学大学院自然科学研究科の沈建仁教授（バイオサイエンス専攻）らの研究グループは、光合成において光エネルギーを利用し、水を分解して酸素を発生させる反応の謎を解明しました。太陽の光エネルギーを生物が利用可能な化学エネルギーに変換する機構を解明し、地球の環境問題、エネルギー問題、食料問題の解決に貢献する画期的な成果といえます。本研究の成果は、英国「*Nature*」誌の Research Article として掲載されています。（*Nature* (2011), 473(7345), 55-60）

身近で大切な光合成反応

光合成、すなわち植物の葉が太陽の光を受けて、根から吸い上げた「水」と空気中の「二酸化炭素」から「炭水化物」をつくりだし、同時に空気中に「酸素」を放出するという現象はよく知られています。中学生くらいのころに、植物の葉に適当な模様をかたどった黒紙を重ねてしばらく太陽光をあてた後、その葉から緑色の色素であるクロロフィルを取り除いて白くなったものにヨウ素を作用させると、黒紙のなかったところが紫色に染まり、黒紙のあった部分は白いままで最初の模様が浮き出しているという実験をしたことを覚えている方もあると思います。これはまさに、光合成により植物の葉にデンプン（炭水化物）ができ、それがヨウ素—デンプン反応により紫色に変わって見えたということでした。このように光合成は私たちにとって身近なもので、また多くの生命現象の中でも特に大切なものであると言えます。光合成によって作られる炭水化物は、タンパク質、脂質と合わせて三大栄養素と言われます。私たちの体の中で炭水化物はブドウ糖に分解され、呼吸して取り込んだ酸素がこのブドウ糖を化学変化させて私たちの活動のエネルギーとなります。さて空気中の酸素の元をただせば、地球が誕生して以来の30億年とも言われる長い時間の間に、すべて光合成が作り出したものです。また私たちが生きていくために欠かせないタンパク質や脂質も、生物界の全体を見てその元をただせば、それらを作り出すためのエネルギーの源はすべて光合成にあります。

緑色のもとはクロロフィル

このように光合成は私たちにとって非常に大切な生物現象であるため、その研究には200年以上にもわたる長い歴史があります。そもそも光合成に関する研究は、蒸気機関の発明から始まった産業革命で、人間が石炭を無制限に燃やして汚してしまった空気を植物がきれいにしているという発見から始まりました。光学顕微鏡による観察から、植物の細胞はその全体が緑色をしているわけではなく、クロロフィルは葉緑体に集まっており、ここで光合成が行われていることがわかりました。さらに電子顕微鏡が発明されると、葉緑体の内部には袋状の脂質2重膜（チラコイド膜）が重なり合った構造があり、クロロフィルはこの部分だけにあることがわかりました。クロロフィルは太陽光を吸収してそのエネルギーを取り入れる働きをしており、20世紀の半ばになるとその化学構造が明らかになりました。クロロフィルは先端のリング状の部分（クロリン環、中心にマグネシウム）に長く伸びた鎖状の部分（フィトール鎖）が結合した構造をしています。クロリン環もフィトール鎖も水には解けにくく、逆に油に溶けやすい疎水性で、クロロフィルはチラコイド膜に埋もれた疎水性膜タンパク質複合体に取り囲まれています。

水から酸素を作り出す天然触媒の結晶化

光化学系II（PSII）はこのような膜タンパク質のひとつで、光合成で水を分解し酸素分子を作る酵素、すなわち生物界の触媒として働いています。PSIIは酸素分子とともに水素イオンと電子を作り出しており、それらは二酸化炭素を炭水化物に変える（炭酸同化）ために必要な生体物質の合成に利用されます。このようにPSIIは光合成で中心的な働きをする酵素の一つであるため、その分子構造を明らかにし、酸素発生の反応機構を解明しようとする研究には長い歴史があります。X線結晶構造解析は、分子を集めて結晶とし、そのX線回折像から分子構造を明らかにする方法であり、40年ほど前から分子量の大きいタンパク質をも対象とすることができるようになりました。しかしながら、その当初、結晶構造解析に成功したタンパク質はすべて水に溶けやすい水溶性のもので、PSIIのような疎水性膜タンパク質の構造解析ができるようになったのは、たかだか20年ほど前のことです。分子量の小さい化合物でも、分子量の大きいタンパク質でも、分子を結晶にしようとする際にまず大切なことは、不純物を含まない純品を得ることです。チラコイド膜に埋もれて水に溶けないPSIIでは、まず界面活性剤を用いて水に溶けるようにし、その上で不純物を取り除いて純品にします。しかしながら、界面活性剤は要するに衣服についた油汚れを可溶化する洗剤のようなもので、あまりに強力なものをうけるとPSIIそのものの構造を壊してしまいます（タンパク質の変成）。またPSIIはもともと疎水性のチラコイド膜の中で安定なもので、界面活性剤で可溶化した状態は不安定ですから、時間とともに純品に変成物が混ざるようになります。この変成物はPSIIに似て非なるもので、容易には取り除くことができず、膜タンパク質の結晶化ではもっともやっかいなものとなります。

PSIIのX線結晶構造解析

これは膜タンパク質の結晶化が難しい理由のほんの一部ですが、

私たちの研究チームでも、良い結晶を得るために非常に長い時間を費やしてきました。私たちがPSIIを結晶化してその構造を明らかにしようと研究を開始したのは、既に20年以上も前のことです。実は最初の数年で緑色の析出物が得られたため、茨城県の放射光実験施設（PF）に持ち込んでX線回折実験を行いました。しかしながら結果は惨憺たるもので、結晶であることを示す斑点（回折点）はまったく確認できませんでした。つまりその析出物は、クロロフィルを含んで緑色をしていても、純品のPSIIの結晶ではなかったということです。ここから長い悪戦苦闘が始まったわけですが、最近になってようやく非常に良質の結晶を得ることに成功し、兵庫県の大塚放射光施設（Spring-8）に持ち込んで結晶構造解析を完成させました。図1はPSIIの全体構造を模式的に示したもので、分子量35万の単量体が2個集まって2量体になっています。PSIIの単量体は19種類のタンパク質（サブユニットと呼ぶ）がより集まった複合体です。各サブユニットは、アミノ酸が直線状に並び（ポリペプチド鎖と呼ぶ）、それが立体的に折り畳まれたものですが、構成する原子でその分子構造を表すと複雑になりすぎて全体の様子をうまく表現することができません。そこで図1では、ポリペプチド鎖がらせん状に巻いた構造をとっている部分（ヘリックスと呼ぶ）をバトンのよう

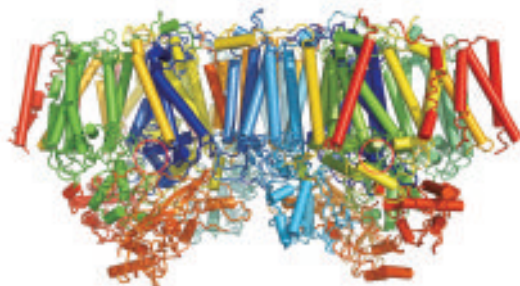


図1 光化学系II (PSII) の分子構造の模式図

な棒で表し、それ以外を折れ曲がったひもでつないでいます。図から、PSIIには長いヘリックスが林立している領域があり、その下には比較的短いヘリックスが集まっている領域があることがわかります。バトンが林立した領域は疎水性ヘリックスの集団であり、PSIIはこの部分でチラコイド膜に埋もれています。後者はチラコイド膜の外にある水溶性の部分で、図の赤丸で囲んだところには、PSIIの酸素発生でもっとも重要な役割をはたす Mn_4CaO_5 クラスターがあります（図2参照）。

PSIIの電子伝達反応

図1では、チラコイド膜を貫いて林立する多数のヘリックスの間に、ところどころ隙間が空いています。実はこの隙間には疎水性のクロロフィルが多数埋もれており、太陽光を吸収して、そのエネルギーを反応中心（P680と呼ばれる）へ伝えるアンテナとして働いています。P680は2個の特別なクロ



図2 水を分解して酸素を発生させる Mn_4CaO_5 クラスターの化学構造

ロフィルが集まったもので、回りのクロロフィルから届いたエネルギーにより、瞬間的に、負電荷を帯びた「電子」と「正孔」の対ができます（電荷分離状態と呼ぶ）。この電子は、P680からPSIIの外に出て、最終的には炭酸同化に必要な生体物質の合成に使われます。一方、P680に残された正孔は電子を引きつける性質が非常に強く、それによって近くの Mn_4CaO_5 クラスターから、さらにはこのクラスターに結合している水分子から電子を引き抜きます。こうして全体として、水から1個の電子が引き抜かれることとなりますが、2個の水分子から1個の酸素分子を作り出すまでには合計4個の電子を引き抜かなければなりません。すなわちPSIIでは、上記のプロセスが連続して4回起こることになります。

Mn_4CaO_5 クラスターの化学構造

図2はこのように複雑な反応をしている Mn_4CaO_5 クラスターの詳細な化学構造を示したものです。歪んだ椅子の形をしており、今回の結晶構造解析により世界で初めて明らかとなりました。その分解能は1.9 Å（単位はオングストローム）です。ここで分解能とは、2点を明瞭に分離できるもっとも短い距離を示し、1オングストロームは1ミクロンの1万分の1なので、今回の構造解析では、分子の中で結合している2個の原子を疑う余地なく分離することができました。図では4個のマンガン（Mn）を紫色、カルシウム（Ca）を黄色、これらをつなぐ5個の酸素を赤色、クラスターに結合した4個の水（の酸素）を橙色で描きました。私たちが特に注目していますのは、Caの右奥にあって回りの金属との結合距離が長く、椅子の形を歪める原因となっている特別な酸素とそれに近い2個の水であり、これら3個の酸素原子の内の2個（どの組み合わせになるかはなお不明）の間に酸素分子の結合が生じると予想しています。この予想を作業仮説として認めればPSIIの酸素発生反応機構を想定することができます。今回の構造解析により疑う余地なく明らかとなった化学構造と、この反応機構の想定があれば、水を分解して酸素を発生する人工触媒を設計することができ、今後はその合成研究が世界的規模で展開されるものと予想されます。

人工光合成に向けて

複合先端研究機構のAグループでは、太陽光を効率よく集める人工アンテナ系の開発が進められており、また太陽光を吸収して安定な電荷分離状態を作り出す有機金属錯体の合成研究と、水から酸素を発生させる人工触媒の研究も行われていますので、今回明らかになった Mn_4CaO_5 クラスターの構造をまねた人工の酸素発生触媒が合成されるまでにそれほど長い時間はかからないと思われます。人工光合成の実現に向けて残る課題は、酸素発生に同期して水素を発生させる人工触媒系、二酸化炭素からメタノールを合成する人工触媒系を開発し、これらと上記のアンテナ系、電荷分離系、酸素発生系を組み合わせるシステムを作り上げることとなります。最後のシステム化とその高効率化には、水素やメタノールを合成する人工触媒系の開発と同様に高いハードルが予想されますが、各モジュールをシステム化するためのノウハウは産業界に既に蓄積されており、産業界とうまく連携することができれば、目的とする人工光合成を実現できる可能性は十分にあると言えるでしょう。

