

光合成研究

第17卷 第3号(通卷50号) 2007年12月

Vol. 17 No. 3 December 2007

THE JAPANESE ASSOCIATION FOR PHOTOSYNTHESIS RESEARCH



日本光合成研究会

光合成研究
第17巻 第3号 (通巻50号) 2007年12月
NEWS LETTER Vol. 17 No. 3 December 2007
THE JAPANESE ASSOCIATION FOR PHOTOSYNTHESIS RESEARCH

CONTENTS

トピックス 南極淡水湖沼における藻類群集の強光・紫外線に対する適応戦略
田邊優貴子……58

解説 分光電気化学法を用いた光合成電子伝達成分の酸化還元電位計測
加藤祐樹、仲村亮正、渡辺 正……63

研究紹介 植物分子イメージングによる光合成機能の可視化
河地有木……74

報告記事

14th International Congress of Photosynthesisに参加して
桶川友季……79

ステート遷移に関するサテライト会議・ロンドン大学クイーンメリー
Satellite Meeting on State Transitions; University of London,
Queen Mary
高橋裕一郎……82

Rubisco satellite meeting
Research Frontiers with Rubisco, the “Elixir of Life” in the
Biosphereに参加して
蘆田弘樹……84

第8回日本光合成研究会シンポジウムのお知らせ
……87

集会案内88

新刊図書89

公募90

事務局からのお知らせ91

日本光合成研究会会員入会申込書92

日本光合成研究会会則93

幹事会名簿95

賛助法人会員広告

TOPICS

南極淡水湖沼における藻類群集の強光・紫外線に対する適応戦略

総合研究大学院大学複合科学研究科
極域科学専攻

田邊優貴子

はじめに

一般的な南極大陸のイメージ。それは雪と風が吹き荒れ薄暗く寒い、一年中厚い氷に閉ざされた生命を拒む大陸であろう。しかし、南緯 69 度、東経 39 度に位置する東南極昭和基地周辺には、この一般的イメージとは違った南極が存在する。氷床から解放され大陸岩盤が剥き出しとなった露岩域と呼ばれる地帯である (図 1)。これら露岩域は氷期-間氷期サイクルという地球規模の環境変動の影響を受け、数万年前に南極氷床が後退して形成された環境であり¹⁾、そこには多様な大きさ・形状・水質を持った湖沼が数多く点在している²⁾ (図 1)。この昭和基地周辺の露岩域における貧栄養な湖沼中で、ユニーク且つ豊かな植物群落 (藻類・コケ類を中心とした) が形成されていることが、近年の日本南極地域観測隊の活動により発見された (図 2)。これまでも南極の浅い貧栄養湖沼中には、時に数メートルにも及ぶ分厚い湖底藻類マットによる独特の生態系が築かれていることがよく知られてはいるが³⁻⁶⁾、他の南極地域においても昭和基地周辺のようにユニークな形態をした植物群落の例は未だに報告されていない。

南極の淡水湖沼生態系は一般的に貧栄養、低温であることに加え、光合成有効放射 (PAR) が年間を通して少ない^{7,8)}という、極めて生産性の低い環境である。夏には一日中光が降り注ぐ白夜が続く、冬には全く光の入射しない極夜が続く。その上、南極湖沼の多くは年間の内ほとんど、もしくは全ての期間にわたって氷に覆われているため、氷の厚さや状態の季節変動や積雪といった要因により湖水中の光環境が大きく影響を受ける^{9,10)}。こういった背景からも、湖沼中の光合成生物にとっては、光の得られる極めて短い期間こそが唯一の生育期と考えられている。ところで、高緯度に

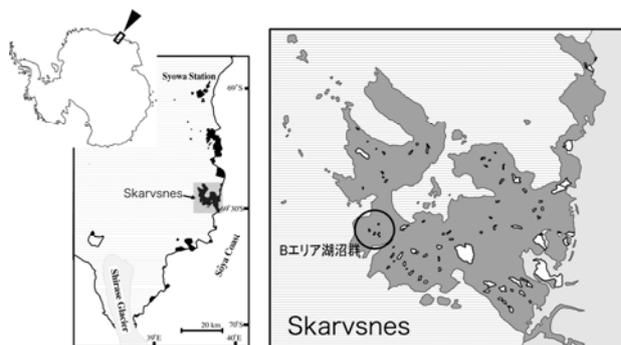


図 1 宗谷海岸とスカルプスネス露岩域および研究湖沼の地図



図 2 東南極 昭和基地周辺における湖沼中の湖底植物群落

なるほど夏季の日照時間が長く日射量の日積算量は大きくなる¹¹⁾。例えば、中緯度都市である東京 (35°40'N, 39°45'E) における日射量の日積算量が最大になる 5 月の平均値 16.1 MJ/m²/day (1972 年から 2000 年までの統計値, Japan Meteorology Agency, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>) と、昭和基地周辺露岩域 (69°20'S, 39°36'E) における 8 月の平均値 28.3 MJ/m²/day¹²⁾とを比較してみると、南極域での夏の一日の日射量が多いことがよく分かる。このように南極における夏は、光エネルギーを利用して生活できる季節であるのだが、藻類が光合成を行うに当たって強光・低温といった一般的なストレスが大きい時期でもある。

南極の湖沼から露岩域一帯に渡って優占しており、重要な一次生産者である藍藻群は、強光や近年の南極

域におけるオゾン層減少による強紫外線環境に対して強い耐性と適応能力を持っていると考えられる。カロテノイドやキサントフィル、紫外線防御物質である scytonemin^{13,14}、MAA(マイコスポリン様アミノ酸)¹⁶⁻¹⁹ は紫外線や強光を調節もしくは防御することにより、活性酸素による細胞の損傷や光合成活性の低下と成長阻害から保護する役割を持つことが知られている^{13,20-26}。本研究では、昭和基地周辺のユニークな湖底藻類群集形成と成功の謎に迫るべく、藻類群集の強光・強紫外線環境に対する防御と適応という観点から解明を目指した。



図3 各湖底藻類群集の形状

南極湖沼中の光環境と藻類群集の光に対する応答

昭和基地より南に約 40 km ほど離れたスカルプスネス露岩域 (69°20S, 39°36E) に位置する、近接したような環境の 4 つの浅い淡水湖沼 (地蔵池、菩薩池、仏池、扇池) で 2007 年 1 月に研究調査を行った (図 1)。各湖沼の最大水深は、地蔵池 : 3.1 m、菩薩池 : 3.0 m、仏池 : 3.0 m、扇池 : 2.7 m で、そこにはテクスチャーと形状が異なる藻類群集が繁茂していたが、それぞれ一様に表面はオレンジ色、その下層は黄緑色、さらに黒緑色へと続く、という色の共通性が見られた (図 3)。この色こそが、南極の強い光と紫外線が降り注ぐ環境下で生命活動を行うための鍵になるのではないかと推察し、①湖水中の光スペクトル (TriOS Optical Sensor)、②藻類群集の各層ごとに光-光合成曲線 (WALZ Water-PAM) の測定を行った。

測定の結果、湖面での太陽光強度と比較して、全ての湖底におよそ 50~70 % もの可視光が到達していた (図 4)。さらに扇池では非常に有害な UV-B (280-315 nm) 領域の光でさえ 40 % 近くも到達する環境であった (図 4)。以上のことから、南極の貧栄養湖沼はその清澄さと浅さ故に、水の中とはいえ強光・強紫外線環境であることが判明した。これら藻類の光-光合成を測定したところ、最大電子伝達速度 (ETRmax) は、全て低い値であったが、その中でも柔らかい構造をとる地蔵池と菩薩池の群集は比較的 ETR が高く、堅い構造の仏池と扇池の群集は低い値であった (図 5)。PAR を最大 470 mmol/m²/s まで上げると、全湖沼とも中層 (黄緑色) と下層群集 (黒緑色) で ETR に阻害が起きたが、オレンジ色をした表層群集はほとんどの湖沼で強光阻害を示さなかった。しかし、扇池の表層群集だけは PAR

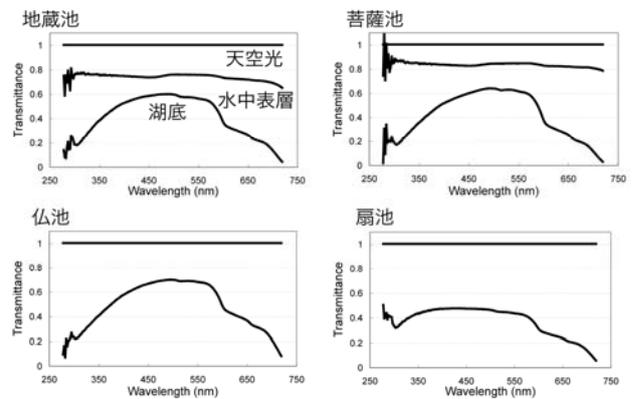


図4 各湖沼中における湖底への光スペクトル透過率

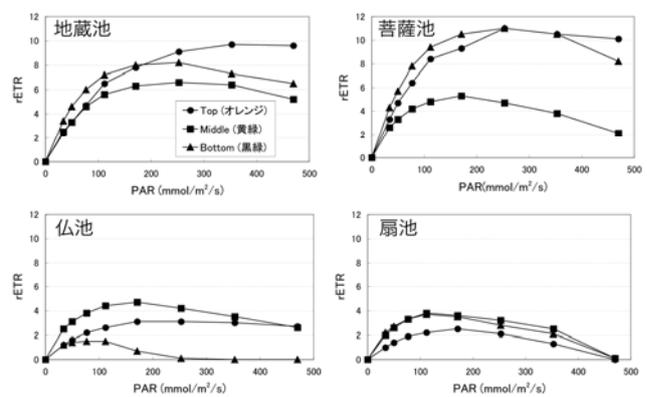


図5 各湖底藻類群集の各層毎の光-ETR 曲線

が 250 mmol/m²/s で ETR が低下した (図 5)。

光防御/制御物質から見た強光・紫外線に対する適応戦略

湖底藻類群集を表層から鉛直的に約 2~3 mm 毎に切断し、薄層状切片を作成した。各層に含まれる光合成色素 (クロロフィル)、光防御/制御色素 (カロテノ

イド、キサントフィル)、紫外線防御物質 (scytonemin、MAA) を抽出し、HPLC (高速液体クロマトグラフィー) もしくは分光光度計により分析を行った。その結果、全湖沼ともに MAA 含有量、クロロフィル a 量に対する scytonemin 量の比、同じくカロテノイド量の比は強光環境である表層群集で最も高い値であった (図 6 - 図 7)。可視光域が特に強い環境である仏池では、scytonemin、カロテノイド、キサントフィルの含有率が高かった (図 7)。このことから、湖底藻類群集はその表層で強光・紫外線に対して防御もしくは調節する機能を働かせることによって巧みに環境へ適応していることが推察された。扇池は紫外線がとりわけ強い環境であり、それに応答して MAA の含有量が多く (図 6)、さらにカロテノイドとキサントフィルがある程度の含有率である (図 7) にも関わらず強光阻害が起きている。これは、紫外線がビオラキサンチン脱エポキシ化酵素を阻害するために、可視光と紫外線が同時に強い場合には、キサントフィルサイクルによる光阻害の防御が行われなくなることが原因であるかも知れない²⁷⁾。

菩薩池では全層に渡って糸状藍藻 *Leptolyngbya perelegans* (図 8A) が優占種であったが、他の 3 湖沼では表層でのみ優占しており、下層では *Leptolyngbya tenuis* (図 8B) が優占種であった。いずれにおいてもこれら糸状藍藻が群集構造の骨格を形成しており、さらには光環境に依存して優占種に違いがあるのではないかと示唆された。他には菩薩池と仏池の中層で藍藻 *Nostoc sp.* (図 8C)、上層では緑藻 *Thorakochloris sp.* (図 8D)、扇池の下層では緑藻 *Kentrosphaera grandis* (図 8E) が優占していた。

おわりに

近接し、似たような環境の 4 湖沼において水中の光スペクトルと光-光合成曲線の測定、光合成色素と光防御/制御色素、紫外線防御物質の分析を行った。南極淡水湖沼はその清澄さと浅さ故に、可視光域が約 50%~70%も、紫外光域が約 40%も湖底に到達することが明らかとなった。一般的な陸水学や生物海洋学の教科書では、紫外線は水面に達した放射のうち約 50%が表面付近で散乱・吸収され、残りもその後水中で直ちに散乱・吸収されてしまうと解説されている^{11,28)}。今回研究対象とした湖沼でこれ程まで紫外線が

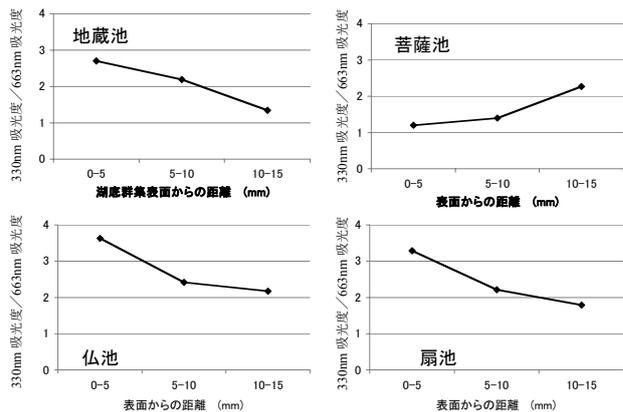


図 6 各湖底藻類群集中の MAA 含有量

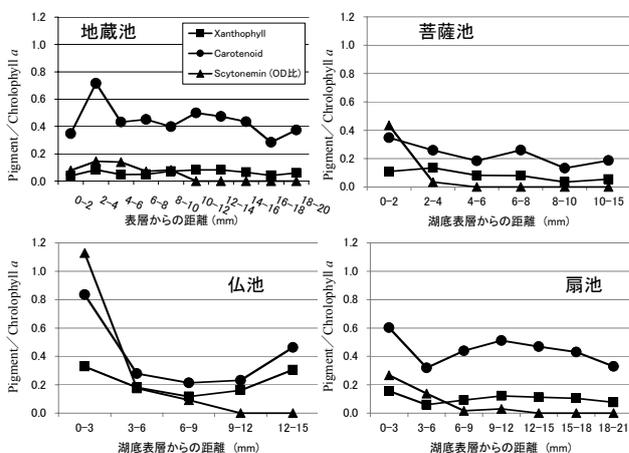


図 7 クロロフィル a に対するカロテノイド、キサントフィル、scytonemin の含有率透過率

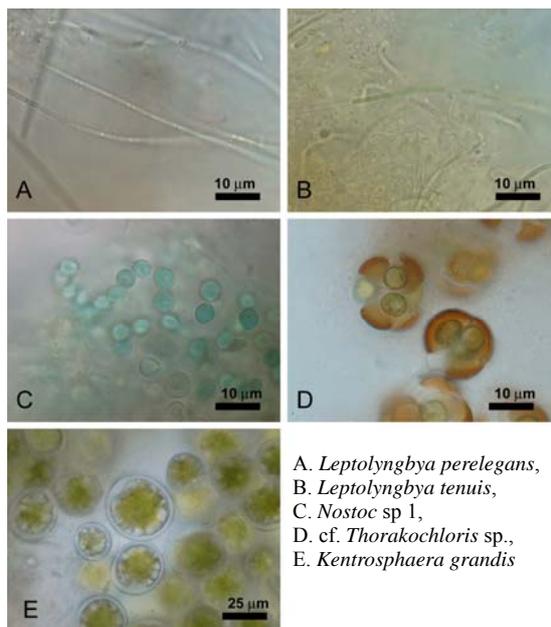


図 8 4 湖沼における湖底藻類群集中の優占種

透過する理由として、水中で紫外線を吸収すると言われる溶存有機物の含有量が極めて少ないため²⁹⁾ではないかと考えられる。

本研究のまとめとして、図9に概略図を示した。強光・強紫外線環境下で生息する群集は、光防御/制御色素や紫外線防御物質を多量に作り出すことによって、有害な光から身を守り生命活動を行っている。しかし、これら堅い群集は防御物質等を合成するのにコストが掛かる分 ETR が低い値であった。逆に、柔らかい群集では防御物質をあまり合成していないためか、比較的高い ETR となっていた。また、群集構造の骨格を形成している糸状藍藻の種が、強光環境である表層と弱光環境である下層で異なることから、光環境に応じて棲み分けがなされているのではないかと推測される。

南極の特殊な光環境の下、様々な種の藻類が集まって出来た湖底藻類群集。一見バラバラでありながらも混沌とした不思議な形の構造物ではあるが、色に規則性を見出し、光をテーマに研究を進めて来た。そこから見え始めた個々の光合成の多様さと、垣間見える群集全体としての生き方。流転する環境の中で生物の生き方は多様であるが、混沌とした個々がこの群集を形成し、まるで全体として何らかの秩序を持って生きている一つの生命体のように見えてならないのである。

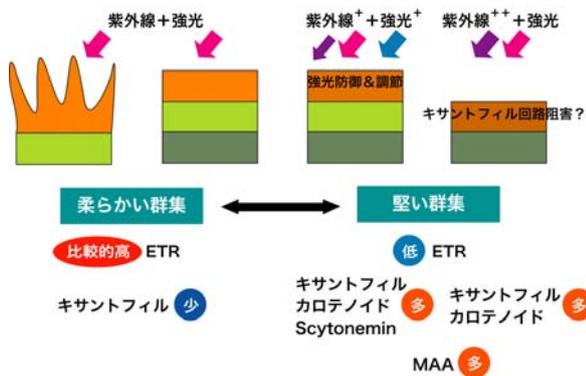


図9 光環境の違いによる藻類群集の適応戦略

参考文献

1. Miura, H., Maemoku, H., Igarashi, A., and Moriwaki, K. (1998) *Special map series of NIPR* 6.
 2. Imura, S., Bando, T., Seto, K., Ohtani, S., Kudoh, S., and Kanda, H. (2003) *Polar Bioscience* 16, 1.

3. Hodgson, D. A., Vyverman, W., Verleyen, E., Sabbe, K., Leavitt, P. R., Taton, A., Squier, A. H., and Keely, B. J. (2004) *Aquatic Microbial Ecology* 37, 247.
 4. Sabbe, K., Hodgson, D. A., Verleyen, E., Taton, A., Wilmotte, A., Vanhoutte, K., and Vyverman, W. (2004) *Freshwater Biology* 49, 296.
 5. Verleyen, E., Hodgson, D. A., Leavitt, P. R., Sabbe, K., and Vyverman, W. (2004) *Limnology and Oceanography* 49(5), 1528.
 6. Matsumoto, G. I., Komori, K., Enomoto, A., Imura, S., Takemura, T., Ohya, Y., and Kanda, H. (2006) *Polar Bioscience* 19, 51.
 7. Campbell, J. W., and Aarup, T. (1989) *LM* 34(8), 1490.
 8. Larcher, W. (2001) *Ökophysiologie der Pflanzen* 6. Auflage (Ulmer, E., Ed.) GmbH & Co., Springer, Stuttgart, Germany.
 9. Fritsen, C. H., and Priscu, J. C. (1999) *Limnology and Oceanography* 44(2), 447.
 10. Vincent, W. F., Rae, R., Laurion, I., Howard-Williams, C., and Priscu, J. C. (1998) *Limnology and Oceanography* 43(4), 618.
 11. Lalli, C. M., and Parsons, T. R. (1993) *Biological oceanography*, Elsevier Science, Oxford.
 12. Tanabe, Y., Kudoh, S., Imura, S., and Fukuchi, M. (2007) *Polar Biology online first*.
 13. Garcia-Pichel, F., and Castenholz, R. W. (1991) *Journal of Phycology* 27, 395.
 14. Proteau, P. J., Gerwick, W. H., Garcia-Pichel, F., and Castenholz, R. (1993) *Experientia* 49, 825.
 15. Karentz, D., McEuen, E. S., Land, M. C., and Dunlap, W. C. (1991) *Marine Biology* 108, 157.
 16. Bandaranayake, W. M. (1998) *Natural Product Reports* 159.
 17. Karsten, U., Franklin, L. A., Lüning, K., and Wiencke, C. (1998) *Planta* 205, 257.
 18. Karsten, U., Sawall, T., and Wiencke, C. (1998) *Phycological Research* 46, 271.
 19. Suh, H.-J., Lee, H.-W., and Jung, J. (2003) *Photochemistry and Photobiology* 78(2), 109.
 20. Gilmore, A. M. (1997) *Physiologia Plantarum* 99, 197.
 21. Demmig-Adams, B., and Adams, W.W. (2000) *Nature* 403, 371.

22. Vincent, W. F. (2000) *Cyanobacterial dominance in the polar regions*. In: *The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space* (Whitton, B. A., and Potts, M., Eds.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
23. Misonou, T., Saitoh, J., Oshiba, S., Tokitomo, Y., Maegawa, M., Inoue, Y., Hori, H., and Sakurai, T. (2003) *Marine Biotechnology* 5, 194.
24. Squier, A. H., Hodgson, D. A., and Keely, B. J. (2004) *Org Geochemistry* 35, 1221.
25. Horton, P., Wentworth, M., and Ruban, A. (2005) *Federation of European Biochemical Societies Letters* 579, 4201.
26. Nishiyama, Y., Allakhverdiev, S. I., and Murata, N. (2006) *Biochimica et Biophysica Acta* 1757, 742.
27. Pfundel, E. E., Pan, R.-S., and Dilley, R.A. (1991) *Plant Physiology* 98, 1372.
28. Horne, A. J., and Goldman, C. R. (1994) *Limnology 2nd edition*, McGraw-Hill, Inc., New York.
29. Morris, D. P., Zagarese, H., Williamson, C. E., Balseiro, E. G., Hargreaves, B. R., Modenutti, B., Moeller, R., and Queimalinos, C. (1995) *Limnology and Oceanography* 40(8), 1381.

解説

分光電気化学法を用いた光合成電子伝達成分の酸化還元電位計測

東京大学生産技術研究所

加藤祐樹、仲村亮正、渡辺 正

1. はじめに

酸素発生型光合成生物は、アンテナ色素が捕捉した光エネルギーを光化学系 I、II の反応中心に集め、光誘起電荷分離と一連の電子移動を引き起こす。チラコイド膜上に配列された電子伝達成分は高速電子移動を行い、量子収率が 90% を超える高効率な光→化学エネルギー変換を進める。

光合成系の高速度電子移動は、機能分子間の距離、配向（分子軌道の重なり）、電子エネルギー準位相関（エネルギー差）が生み出す。近年の X 線結晶構造解析の進歩で、距離・配向が明らかになりつつあり、また遺伝子工学的な研究が、電子伝達成分の空間的配置を支えるタンパク質の役割を明らかにしてきた。しかし、電子エネルギー準位相関という物理化学的な側面は、まだ不確定な部分が多い。

本稿では、電子エネルギー準位相関を決める重要なパラメータの酸化還元電位につき、測定原理と手法を解説し、我々が取り組んでいる光化学系 I 一次電子供与体 P700 の酸化還元電位を中心に、得られた知見と計測法の有用性を紹介したい。

2. 電子伝達成分の酸化還元電位相関

電子伝達成分は、酸化還元電位を縦軸にとって並べると、図 1 のような Z スキームと呼ばれる相関図で表される。電子は、エネルギー準位が負なほど不安定であり、エネルギーが高いから、電位軸の上方を負にとれば、物体の落下と同じイメージで電子が伝達する様子を描ける。上向きの電子移動にはエネルギー供給が必要だが、光化学系 I、II それぞれの一次電子供与体 P700 と P680 のみが光励起されることで、電子のエネルギーがたたき上げられ、還元力が高められている。同時に生じる正孔が酸化力となり、PS II では水を酸化するほどの酸化力が発生していると考えられる。

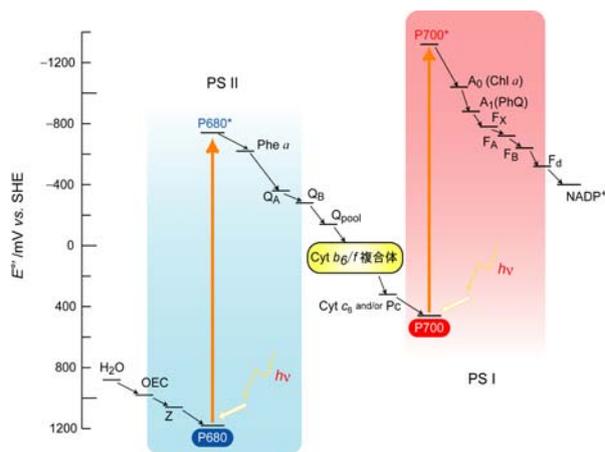


図 1 光合成電子伝達系の電子エネルギー準位相関 (Z スキーム)。電子伝達成分をそれぞれの酸化還元電位 E^* をもとにして並べてある。

電子のエネルギー準位と反応とは以下に示す関連性がある。一連の電子伝達の反応は、それぞれの成分間での酸化還元反応が連続したものとみなせる。そこで、A（電子供与体）から B^+ （電子受容体）への一電子移動を考える。



この酸化還元反応は次の 2 つの半反応に分けて捉えることができる。



酸化還元反応は平衡反応であり、この 2 つの半反応は常に完全に進行するわけではないから、反応の進み具合は熱力学的平衡状態を考える必要がある。もう少し一般化して、次式で表される酸化体 Ox と還元体 Red の平衡状態を考える。



この反応に関わる電子のエネルギー準位（電位）を E とすると、Ox、Red それぞれの活量は次に示すネルンストの式で関係付けられる。

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a(\text{Ox})}{a(\text{Red})} \quad (5)$$

平衡反応(4)の標準状態、すなわちOxとRedがいずれも活量1の状態を考えると、右向きと左向きの反応速度がつり合うが、そのとき $E = E^\circ$ であり、この電位を標準酸化還元電位 (standard oxidation-reduction potential) と定義とする。電気化学の世界では、電極を介して議論するので標準電極電位と呼んでおり、他に標準レドックス電位 (standard redox potential) や標準電位 (standard potential) などとも呼ぶ。また、ネルンスト式から分かるように、反応に関わる電位 E は、 E° を中心とする領域を取りうるものだから、 E° は反応のおおよそのエネルギー準位を表す指標となる。

反応(1)に話を戻す。ギブズエネルギー変化 ΔG は2つの半反応式(2)、(3)の電子エネルギー準位差 (電位差) $\Delta E (=E_B - E_A)$ と次の関係にある。

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (6)$$

したがって反応が進む、すなわち $\Delta G < 0$ となるためには、 $E_B > E_A$ とならなければならないことが分かる(図2)。しかし、 ΔG が負で絶対値が大きければ、すなわち ΔE が大きければ、反応しやすい(反応速度が速くなる)というわけではない。反応速度を考える際には、反応の活性化エネルギーを考慮に入れる必要がある。 ΔE が大きすぎるとマーカスの逆転領域とよばれる状態におちいり、かえって反応速度は低下する。また、 ΔE が小さいと逆反応が起こりやすくなるから、反応効率は低下する。したがって、光合成の電子伝達系は巧妙な電位の調節がなされていると考えられる。

さて、Z スキームは各電子伝達成分の酸化還元電位をもとにしているものだが、すべての電位が実測されているわけではない。これまでに、PS II の電子アクセ

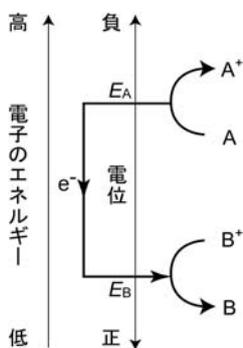


図2 酸化還元反応に伴う電子授受。電子のエネルギー準位は反応によって異なり、電子はエネルギーの高い方から低い方へ移る。

プターである Pheo a と Q_A 、Cyt b_6/f 複合体、電子伝達タンパク質である Cyt c_6 と Pc、鉄-硫黄センター (F_A 、 F_B)、そして P700 ぐらいが実測されているに留まり、あとのものはこれらの実測電位を基に電子移動反応速度などから計算されるエネルギー差により見積もられているにすぎない。エネルギー差の計算も、電子移動反応速度は、冒頭に述べたように、電位差だけではなく距離や配向という要素を含んだパラメータであるし、多くの成分は2つ以上の近接する成分との間で生じる電子移動も考えなければならないから、反応モデルをもとにした近似値であることに注意しなければならない。

さらにいえば、実測されている酸化還元電位も、研究者によって報告値が異なっているのが現状で、またその多くには誤差が含まれていることは否めない。ゆえに、我々が知っている電位というのはおおよそのものに過ぎないであろう。このことを次の項で、P700 を例に挙げて、取り上げてみたい。

3. P700 の酸化還元電位

P700 の酸化還元電位は、過去 40 年以上に渡って調べられており、数多くの報告がある¹⁾。表1にこれまでに報告されている P700 の酸化還元電位をまとめた

表1 これまでに報告されている P700 の酸化還元電位

Author(s) [Year (reference)]	Sample (treatment)	E° mV vs. SHE
Kok [1961 (2)]	Spinach (acetone extracted)	+430
Beinert <i>et al.</i> [1962 (3)]	Red algae (acetone extracted)	+430
Yamamoto and Vernon [1969 (4)]	Spinach (Triton X-100)	+480
Thorber and Olson [1971 (5)]	Green algae (SDS)	+380-420
Knaff and Malkin [1973 (6)]	Spinach (digitonin)	+520
Ke <i>et al.</i> [1975 (7)]	Spinach (Triton X-100)	+468
Ikegami <i>et al.</i> [1976 (8)]	Spinach (ether, digitonin)	+400
Evans <i>et al.</i> [1977 (9)]	Spinach (Triton X-100)	+375
Malkin [1978 (10)]	Pea (EDTA)	+385
Sétif and Mathis [1980 (11)]	Spinach (EDTA)	+492
	Spinach (Triton)	+469
	Spinach (digitonin)	+494
	Spinach (Triton, LDAO, SDS)	+459
	Spinach (SDS)	+431
	Nicotiana (SDS)	+421
Ikegami and Katoh [1989 (12)]	Cyanobacteria (ether, Triton X-100)	+355
Hamachar <i>et al.</i> [1996 (13)]	Cyanobacteria (DM)	+460
Kievit and Brudvig [2001 (14)]	Cyanobacteria (DM)	+468

が、+360 mV ~ +520 mV (vs. SHE、以降の電位はこれを基準とする)と 160 mV 以上におよぶ“ばらつき”がある。この原因として、試料分画法の違いや測定精度の限界にあるのではないかと考えられる。多くの報告は、ホウレンソウに関するものだが、1980 年に Sétif がまとめているように、界面活性剤処理によって P700 のレドックス電位が異なるとしている。しかし、それだけで物理化学的な面からすると決して小さいとはいえない“ばらつき”の説明がつくようにも思えない。そこで、我々は測定法を見直し、酸化還元電位を精密に測定できる条件の確立を目指した。

4. 酸化還元電位とは

測定法を説明する前に、酸化還元電位についてももう少し説明を加えておきたい。

2で説明したように、 E° は平衡反応(式(4))において、OxとRedがいずれも活量1の状態における電位である。このことを熱力学的に記述するには、OxとRedについては標準生成ギブズエネルギー $\Delta_f G^\circ$ を用いる。電位 E° にある電子 ne^- のエネルギーは、「電気エネルギー=電荷量×電位」の関係により、ファラデー定数 F (=96,458 C mol⁻¹)を使って $-nFE^\circ$ と書ける。すると次式が成り立つ。

$$\Delta_f G^\circ(\text{Ox}) - nFE^\circ = \Delta_f G^\circ(\text{Red}) \quad (7)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta_f G^\circ(\text{Red}) - \Delta_f G^\circ(\text{Ox})}{nF} \quad (8)$$

式(8)右辺の $\Delta_f G^\circ(\text{Red}) - \Delta_f G^\circ(\text{Ox})$ は標準反応ギブズエネルギー $\Delta_r G^\circ$ とみなせるから、 $\Delta_r G^\circ < 0$ のときには右(還元)方向に、 $\Delta_r G^\circ > 0$ のときには逆向きに、反応式(4)の平衡がずれる(反応が進行する)と解釈できる。いいかえれば、 E° が負で絶対値の大きい酸化還元対ほど反応が左(酸化)方向にずれる、すなわち電子を放出しやすい系といえる。 $\Delta_r G^\circ$ は重要な熱力学的パラメータで、膨大な量が蓄積されているから、 $\Delta_r G^\circ$ をもとに E° の多くが計算されている($\Delta_r G^\circ$ 、 E° とも化学便覧などに記載されている)。したがって、 E° が既知ならば、電子授受の方向(図2参照)をある程度予測が可能となる。

公表されているデータをみてみると、 E° がもっとも負であるのは、Li⁺/Li系の-3.045 Vがあるが、Liが強力な還元剤なのはこのことからいえる。後述する酸化還元滴定でよく使われる還元剤であるジチオナイト

(亜二チオン酸ナトリウム: Na₂S₂O₄)は、 $2\text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_4^{2-} + 4\text{OH}^-$ の平衡反応となり、その E° は-1.13 Vである(ただし、アルカリ性のときに還元力が高いことに注意されたい)。酸化剤として使われるフェリシアン化カリウム(K₃[Fe^{III}(CN)₆])だと、平衡反応 $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-} + e^- \rightleftharpoons [\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ が成立し、 E° は+0.361 Vである。

さて、標準状態から平衡がずれたときの物質の活量と電位の関係を表したものがネルンスト式であることを2でみてきた。活量は濃度に近似できるから、P700の一電子授受が伴う酸化還元平衡は次式をもとに考えればよい。

$$E = E^\circ + \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{P700}^+]}{[\text{P700}]} \quad (9)$$

この場合、厳密に言えば、 E° は $[\text{P700}] = [\text{P700}^+]$ の場合の系の電位であり、また現実の系は標準状態とは違って周囲からの影響(例えば溶液なら溶媒との相互作用)があるため、理論値とは異なる。したがって、測定される E° は E° と表し、式量電位あるいは形式電位(formal potential)と呼ぶ。他に中点電位(midpoint potential)や単に酸化還元電位と呼ばれるが、我々はこれを求めているのである。

また、ネルンスト式をみると、Ox (Red) を多く加えれば、系の電位は正(負)に変化するし、逆に系の電位を正(負)にすれば、Ox (Red) の割合が増えるのが分かるだろう。したがって、系の電位をなんらかの方法で変化させ、その際の P700 の濃度変化を調べられれば、得られる電位と濃度の相関関係から $[\text{P700}] = [\text{P700}^+]$ となる電位を求めればよい。系の電位の制御を、酸化剤・還元剤を加えて行うのが酸化還元滴定法と呼ばれ、電気化学的手法では、電極と電気化学装置を用いて行う。

5. 酸化還元滴定法

光化学系の中では、電子伝達成分はアンテナ色素に対してごく微量で単に吸収スペクトルを測定したのでは検出できないが、幸い P700 など光合成の電子伝達系は酸化・還元状態にもなって大きく分光特性が変化するので、酸化還元反応前後の吸収スペクトル変化や蛍光強度の変化から酸化体、還元体の濃度を調べることができる。他に、過度吸収測定や EPR 測定を組み合わせて、目的成分の酸化・還元状態を調べるという方

法もある。酸化剤・還元剤を用いて目的とする成分を酸化・還元させて、同時に分光学的情報を得ることで酸化還元電位を求める方法を酸化還元滴定法 (oxidation-reduction titration または redox titration) という。本稿では、可視光吸収分光法と組み合わせた滴定法についてみていくことにする。

滴定法でもっともシンプルなのは、フェロシアン化物イオン/フェリシアン化物イオン ($[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$) 酸化還元対を用いる方法である。フェロシアン化/フェリシアン化カリウムを溶液に加えるとそれぞれ安定した陰イオンが得られるから、添加量比を調節することにより、ネルンスト式に応じて系の電位を変化させられるので、酸化還元対より少量の (目的とする) 成分を酸化・還元できる。 $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ の E° 、すなわち両者の濃度が同じ場合の電位は、サンプル溶液の pH にもよるが、pH = 7 で +430 mV であるから、ネルンスト式と添加量比から電位を間接的に知ることができる。したがって、フェロシアン化/フェリシアン化カリウムの添加量比とサンプル溶液の吸光度から、目的とする成分の酸化還元電位を見積もることができる。この方法は、特に $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ の E° に近い酸化還元電位をもつ P700 や Cyt c_6 、Pc などに有効で、報告例のいくつかはこの方法により求められている。

同じ滴定法でも、電極と電位差計 (ボルトメーター) を用いれば系の電位を直接調べられる。電極一つでは電位を計れないので、基準となる電極 (参照電極、基準電極などという) に対してもう一本電極を系に導入し (作用電極という)、作用電極上における系の平衡電位と参照電極の電位との差を計測する。作用電極には、系との電子授受が素早いものが望ましく、白金がその代表例である。参照電極は、銀-塩化銀電極やカロメル電極 (saturated calomel electrode: SCE) などが一般的である。参照電極と作用電極を複合化した ORP (oxidation-reduction potential) 電極と称するものが市販されており、pH メーターと接続して電位を測定することもできる。pH メーターあるいはボルトメーターは入力インピーダンスが大きくないと ($10^{12}\Omega$ 程度が望ましい)、電流が流れて IR 降下が生じるため、正確な電位測定はできない (したがって、“テスター” は不可)。極端な場合は、参照電極と作用電極の電位差が無くなるように電流が流れ続ける (系は平衡とならない)。入

力インピーダンスが大きい測定装置を用いれば、測定装置にはわずかな電流が流れるだけで、瞬時に参照電極、作用電極上で電気化学的平衡が成り立つから、系の平衡電位を調べられる。このようにして測定される電位を開回路電位 (open circuit potential) という。酸化還元電位を調べるには、酸化剤・還元剤を加えてさまざまな電位における電子授受平衡状態を作り出した上で、この開回路電位を測定する必要がある。

また、作用電極と目的とする成分との平衡をすみやかに達成するために、適当な電子メディエーターを加える。種々の E° をもつメディエーターがいくつかあるが、系中の電子授受平衡を考慮に入れると機能する電位領域はおおよそ $E^\circ \pm 120 \text{ mV}$ 程度であるから、目的成分の E° に応じて選択する必要がある。広い電位範囲にわたって滴定を行う場合には、 E° の異なる複数のメディエーターを共存させる。このあたりのことは成書¹⁵⁾を参考にされたい。

こうした電極を用いた滴定法は、酸化還元平衡法 (redox poisoning method) や電位差滴定法 (redox potentiometry) などと呼ばれている。測定には図 3¹⁵⁾のようなセルが用いられる。目的物を酸化・還元するには、酸化剤・還元剤をマイクロシリンジなどを用いて測定セルに少しずつ加える。系全体を平衡にするために、攪拌などして系全体を均一にする。酸化剤には 0.1 M 程度のフェロシアン化カリウム溶液、還元剤には 0.01 M の水酸化ナトリウム溶液に 0.05 M 程度のジチオナイトを溶解したものがよく用いられる。他に、アスコ

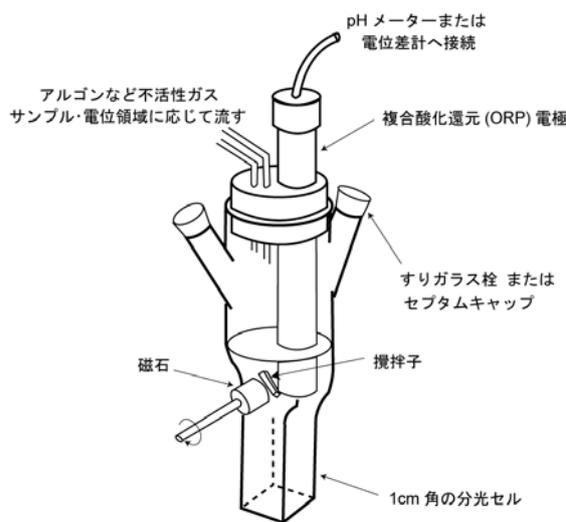


図 3 電極を用いた酸化還元滴定測定に用いるセルの一例。教科書¹⁵⁾などを参考にして作図。

ルビン酸やジチオスレイトールなども対象とする成分の電位領域によっては用いられるが、いずれにしてもサンプル溶液の pH 緩衝能を十分高くしておくことが必要である。こうして、酸化剤・還元剤を加え、電極上の平衡電位と吸光度変化を同時に測定することにより、各電位における目的とする成分の酸化還元状態が調べられる。

6. 正確に酸化還元電位を測定するためには

酸化還元滴定法により酸化還元電位を正確に求めるには、系全体の酸化・還元雰囲気をつくりだせるだけ速やかに均一にして平衡化させ、かつその電位を正確に知ることになるであろう。しかしながら、実際はどうだろうか。酸化還元滴定法で、一番の問題となるのは、酸化・還元剤を滴下してから目的成分の酸化還元状態が平衡に達するのを見極めることにあるのではなかろうか。平衡の見極めは、分光測定で吸光度変化を観測して行うが、系全体が平衡に達するのに時間が掛かるようであれば、吸光度は時間とともに自然に変化するから、いつ測定値をよみとればいいのか分かりづらくなってしまふ(後述する分光電気化学測定でも同じ)。また、論文によっては、数 mV 刻みで吸光度を測定し、非常に多くの点数からなるネルンストプロットが報告されているが、酸化剤あるいは還元剤を滴下し、吸光度が変わっていく様子と電位変化を連続的に調べているのではないか、と思われるものもある。そうした場合だと本来の“開回路電位”を計測しているのか、疑問が付きまとう。

吸光度変化を正確に調べるには、ベースラインが完全に安定していなければならないが、測定に時間が掛かるようであれば、その変化も考慮に入れなければならない。酸化・還元剤を加えていけば変化することも考えられるから、目的成分と酸化・還元剤の濃度にも注意しなければならないであろう。目的成分の吸光度変化が大きい場合には、こうした誤差は小さいかもしれないが、キノン類やシトクロム類など吸光度変化が小さい場合は、誤差は無視できないものとなり、注意を要する。また、系全体を攪拌するなどして均一にしても、特に PS I や II など可溶化するために界面活性剤を用いた懸濁液では、泡立てないように気をつけなければならないから、攪拌の速さも制限される。したがって、測定容器の大きさによっても平衡化に掛かる

時間は変わってくるであろうし、滴下する酸化・還元剤の濃度や種類によっても変わってくることも考えられる。一測定にだいたい数時間掛かるのが平均的なようだが、測定時間が長いと、目的成分によっては一部が失活してしまう可能性もある。したがって、測定時間が長いほど、誤差が生じる傾向にあるものと考えられる。

さらに、P700 の酸化還元電位測定に限っていえば、酸化剤としてよく用いられるフェリシアン化カリウムだと、Sétif らが報告しているように、系中の P700 を完全に酸化できず、過剰に加えても 90%程度しか酸化できないようである¹¹⁾。これは、 $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ の E° が P700 のレドックス電位に比べてやや低いことと、系にフェリシアン化物イオンだけを滴下したとしても、熱力学平衡状態ではわずかに還元されてフェロシアン化物イオンも生成しているためだと考えられる。よって、P700 の定量を正確にできないから、電位と濃度の相関には、分光学的に測定された結果と実際とはずれが生じることになる。

以上挙げられるだけでも、実験を行う際に考慮すべき要素が多いと思われるが、研究者や実験条件によって値が異なってくるのもこうしたところに理由があるのではなかろうか。

7. 電気化学装置を用いて電位を制御する^{16,17)}

酸化還元滴定法では、酸化・還元剤によって系の電位を変化させることはできるが、あくまで「変化させる」であり、任意で制御することは(特にメディエーターを混在させている場合)ほぼ不可能である。それに対して、電気化学装置を使えば任意の電位に瞬時に変化させ、制御できる。電気化学的手法の最大の利点はここにある(もう一つの利点は、反応(速度)を電流として精密に取り扱えることにある)。電気化学装置のもっとも汎用的なものにポテンショスタットというものがあつ、これを使えば参照電極に対して作用電極の電位を 0.1 mV の精度で制御できる。電位を変化させて電極上で反応を進行させる(平衡をずらす)とその際に電流が流れるが、参照電極ではなく対極(対電極、補助電極などともいう)というもう一つの電極を用いてそちらに電流を流すことで、常に作用電極の電位は参照電極に対する電位として制御できる。電気化学測定は、こうした 3 電極式の系で行う。

それでは、図 3 のセルにもう 1 本の電極を加えて、

ポテンシオスタットを用いれば、系全体の電位を制御できるのだろうか。注意しなければならないのは、あくまで制御できるのは、「電極の電位」である。そして反応系は、電極表面近傍でのみ電極電位に応じて反応が進行させられているのであり、電子授受が速ければネルンスト式に従った濃度変化が生じているのである。具体例として図4に、 $[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ のような電子授受の速い酸化還元対の電極電位に対する濃度変化の様子¹⁶⁾を模式的に示す。電極電位を図4(A)のように制御し、その際に電極上で生じる反応の「応答」を電流で観測する方法をサイクリックボルタンメトリー

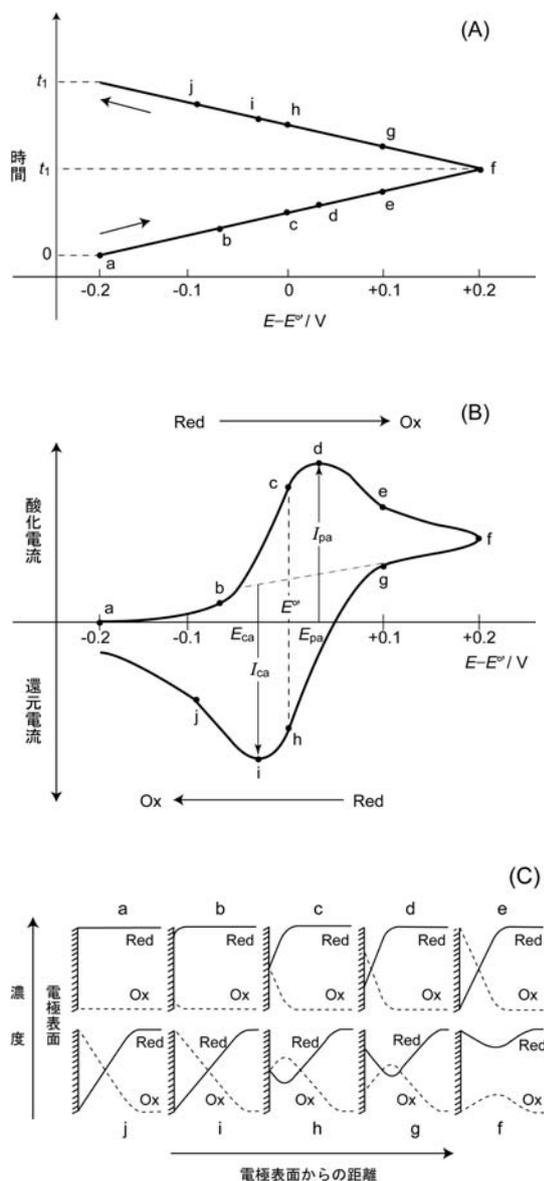


図4 電位走査(A)による電流応答 (ボルタモグラム) (B)および各点 a~e における Red・Ox の濃度プロファイル(C)。教科書¹⁶⁾を参考に作図。

というが、電子授受が速い系だと図4(B)の下部に示したような電位-電流曲線 (ボルタモグラムという) が観測できる。酸化還元電位 E° は酸化電流ピークと還元電流ピークの中点の電位として求められるが、それではいったい反応系はどのようなになっているのだろうか。

電極近傍の酸化体・還元体の濃度プロファイルは図4(C)のようになり、電極表面では濃度比がネルンスト式に従って変化する。しかし、電極から離れたところ (バルク) では、濃度はほとんど変化しないのである。バルクと電極表面の間に注目すれば、濃度は連続的に変化して勾配ができており、この勾配を拡散層という。観測されるボルタモグラムにはこの拡散層によって生じる電流も含まれるため、必ずしも電位-電流の一義的な相関ではないことに注意しなければならない (だから、大雑把に言えば、電流ピークを示す電位 E_{pa} 、 E_{ca} と E° は異なる)。ちなみに、クロロフィルなどの単分子やシトクロム類などわりと小さいサイズのタンパク質なら拡散が速いので、こうしたサイクリックボルタンメトリーから酸化還元電位を調べられるが^{18,19)}、PS I などの超分子複合体だと測定は困難になる。サイクリックボルタンメトリーにより P700 の酸化還元電位の測定を試みた報告が一件あるが¹⁴⁾、電流応答は小さいものであり、またボルタモグラムから酸化還元電位が求められたとしても、P700 以外に反応種を含む PS I のような複合体だと電流-電位曲線だけでは反応種の特定はできない。

それでは、電極電位を一定にすればどうだろうか。例えば、+0.1 V (図4の e) では、電極表面では Red は完全に酸化されているが、はたしてバルク中に存在する全ての Red を完全に酸化できたりするのだろうか。電位を一定にすると、図5に示したように拡散層が広がっていくから、時間をかければ系全体まで広げられ

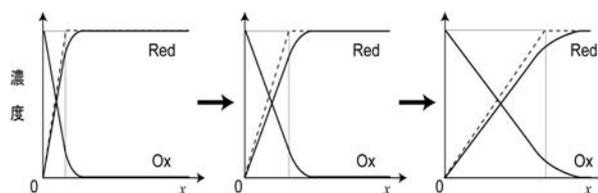


図5 電極反応が進むにつれて拡散層の厚み δ が広がる様子。点線は拡散層に対するネルンストの仮定モデル。

るように思えるかもしれない。拡散層の時間変化を考えてみると、物質の拡散係数を D_0 とし、物質濃度が直線的に (図 5 の点線のように) 変化していくと仮定すれば、拡散層の厚み δ は $\delta = (\pi D_0 t)^{1/2}$ という時間 t の関数で表せる^{17a)}。水溶液では、分子やイオンはだいたい $D_0 = 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ なので、例えば 10 秒で 180 μm 程度の厚みが形成される。逆に厚み 1 cm になるには 3000 秒 (50 分) ほどかかる計算になるから、だいぶ時間が掛ければ系全体を・・・と考えるかもしれないが、実際には対流の影響で厚みは 0.05 cm 程度で頭打ちとなる。したがって、攪拌したとしても、図 3 のようなセルで系全体の酸化還元を電気化学的に制御するのは現実的ではない。

8. 薄層電解セルを用いた分光電気化学測定

それでは、測定系を電極近傍だけに制限してしまえば、系全体を電気化学的に酸化・還元できる (電気化学の用語では「電解する」という) のではなからうか。これが薄層電解セルの発想である^{17b)}。測定系を電極から拡散層の厚み以下に抑えて電極電位を制御すれば、理論上ではある時間後には系全体の物質濃度がその電位に応じたものになる。数十 μm から数百 μm の厚みであれば、数秒から数十秒という短時間で系全体を平衡化できるという計算になる^{17c)}。

電極に、 SnO_2 や In_2O_3 (Indium-Tin Oxide: ITO 電極と呼ばれる) などの半導体を薄膜にした電極や、金や白金などの網電極を用いて、電解しながら分光測定できるものを透明薄層電解セル (optically transparent thin-layer electrode cell: OTTLE cell) という。最近では市販もされている。我々は、PS I 一次電子供与体 P700 の酸化還元電位を精密に測定するのを目的に、図 6 に示すようなセルを設計・作成した²⁰⁾。電極は金の 100 mesh/inch の網電極を用い、光路長が 200 μm 程度となるように設計した。同一サンプルでデータの再現性を調べたり異なる条件下で測定できるように、サンプル溶液の量は 200 μL 程度の少量で済むようにした。

9. 測定条件の確立 ～電子メディエーターの見直し

薄層電解セルを用いた場合でも、PS I 反応中心内部に位置する P700 と電極の直接電子授受は難しいので、測定には電子メディエーターを必要とする。我々は、P700 の酸化還元電位を精度よく測定するために、電子

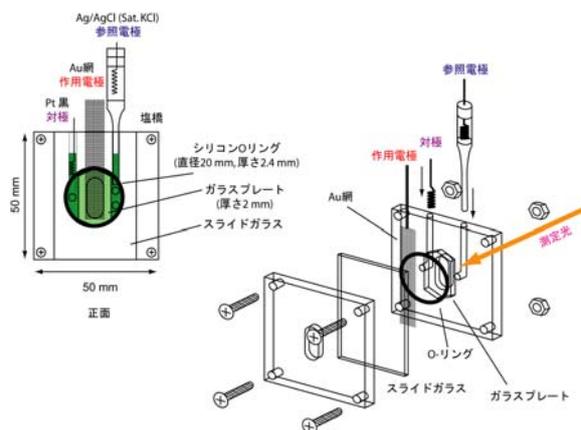


図 6 分光電気化学測定用の透明薄層電解セル

メディエーターの見直しも行った。滴定法で酸化剤としてよく用いられるフェリシアン化カリウムだと、電気化学的平衡に達するのに時間が掛かることが分かったからである (後述)。そこで、我々は同じ電位領域に E° をもつフェロセン類²¹⁾に着目した。フェロセンは $E^\circ = +422 \text{ mV}$ (pH = 7) であり、その誘導体であるフェロセンジメタノールは $E^\circ = +465 \text{ mV}$ 、ジメチルフェロセンは $E^\circ = +341 \text{ mV}$ と異なる電位領域で電子授受を行うので、これらを混合して使用することとした。フェロセン類は、水に不溶であるから、あらかじめ 10 wt% で調製した界面活性剤ドデシルマルトシドの水溶液に溶解させておき、測定の際に希釈して用いることとした。酸化した後の再還元の場合にも系を速やかに平衡状態にするのを目的に、テトラクロロベンゾキノン ($E^\circ = +260 \text{ mV}$) とフェナゾニウムメソスルフェイト (PMS, $E^\circ = +80 \text{ mV}$) も用いることとした。PS I は、Chl *a* 濃度にして 1.5 mM から 2.0 mM 程度となるように、界面活性剤ドデシルマルトシド 0.3 wt% の水溶液に懸濁してサンプル溶液を調製した。その他の詳細な条件については文献²⁰⁾を参照されたい。

透明薄層電解セルを用いて測定したスペクトルの一例を図 7 に示す。図 7(A) は、ホウレンソウ由来の PS I サンプルの Q_y 帯付近における吸収スペクトルである。電極電位を +50 mV および +650 mV に制御した際のスペクトルを載せており、両者にほとんど差はないが、差し引いて拡大すると、図 7(B) に示すような差スペクトルが得られる。700 nm に大きな吸光度の減少が、808 nm 付近にブロードな吸光度の増大が見られ、光酸化法などで得られる明暗差スペクトル²²⁾とほぼ同様で

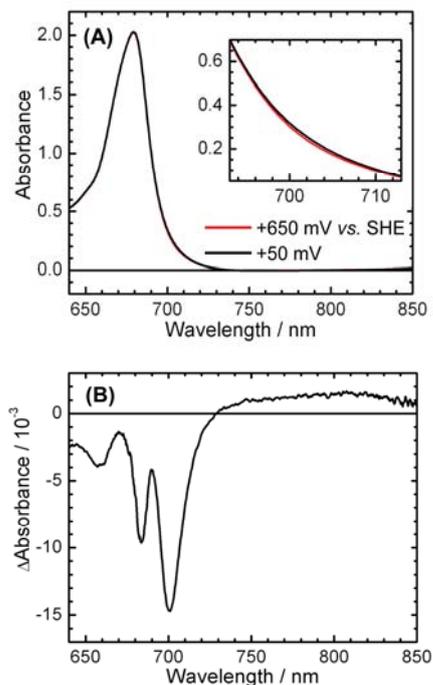


図7 ホウレンソウ由来のPS I サンプル溶液の透明薄層電解セル中における吸収スペクトル(A)と酸化還元差スペクトル(B)。

あることから、観測されたのは $P700^+ - P700$ 差スペクトルだといえる。

そこで次に、700 nm および 808 nm に測定波長を固定し、+50 mV で還元状態に保持してから+650 mV に酸化し、その後+50 mV に戻すという操作を行い、その際の吸光度の時間変化を追跡した (図8)。まず、電子メディエーターにフェリシアン化カリウムを 1 mM の濃度で用いた場合をみても、測定波長にかかわらず、吸光度は時間に対して徐々に変化し、平衡に到達するまでに 8 分程度要することが分かった。一方、フェロセンを用いた場合では、濃度を 100 μM とフェリシアン化カリウムを用いた場合の 1/10 にしても、4 分程度で平衡に到達した。さらに、フェロセンとフェロセンジメタノールを 50 μM ずつ用いた場合には、2 分以内で平衡に到達できた。この結果は、等電点が 4 付近の PS I は (測定を行った pH = 8 では) 負に帯電しているから、アニオンであるフェロシアン化物イオンと P700 は電子授受が起こりにくいためだと考えられる。それに対して、酸化してカチオンとなるフェロセン類の方が電子授受が速く、分光電気化学測定法には有効だといえる。

また、測定波長が 700 nm の場合 (図8(B)) では、

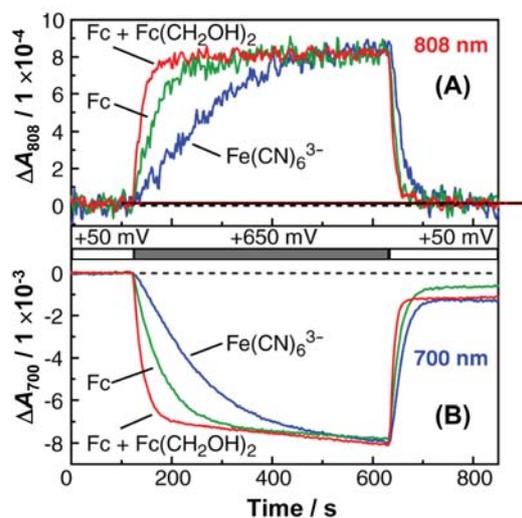


図8 電位を変化 (+50 mV \rightarrow +650 mV \rightarrow +50 mV) した際の 808 nm および 700 nm における吸光度時間変化。電子メディエーターとして $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ を 1 mM、フェロセン (Fc) を 100 μM 、フェロセンジメタノール ($\text{Fc}(\text{CH}_2\text{OH})_2$) を 100 μM 加えてある。文献²⁰⁾からデータを引用、一部改定。

+650 mV で電位を保持すると、吸光度が一定にならず、徐々に減少した。さらに、+50 mV への再還元後は元のベースラインに戻らず、完全な可逆応答は得られなかった。これは、PS I に存在するアンテナクロロフィルが不可逆酸化されて 700 nm の吸光度もそれに伴って減少するため、LHC を含む高等植物や緑藻の PS I ではこの不可逆酸化がより顕著にみられる。電気化学測定では電極電位を変えるだけで、酸化・還元サイクルを何度も繰り返せるので、反応の可逆性や不可逆酸化成分がどの程度結果に影響しているかを、正確かつ簡便に評価できる。このことは、滴定法では実現できない強力な利点だといえる (図7(B)のスペクトルも $P700^+$ を再還元してスペクトルを測定し、不可逆酸化されたアンテナクロロフィルの寄与を除去してある)。以上の結果から、吸光度変化が小さく S/N 比からすると不利ではあるが、完全な可逆性を示す 808 nm における吸光度変化の追跡が P700 酸化還元電位の測定には適しているといえる。

10. P700 酸化還元電位測定 ~ホウレンソウと *T. elongatus* の比較

最後に、ホウレンソウと好熱性シアノバクテリア

Thermosynechococcus elongatus から分画した PS I における P700 の酸化還元電位を測定した結果²³⁾を紹介する。

確立した分光電気化学測定条件にて、さまざまな電極電位に制御して得られた吸光度の時間変化を図 9 に示す。いずれの電位においても平衡状態が観測され、吸光度変化が可逆なことが確かめられた。電位をランダムに、また繰り返し変化させても同じ結果となり、再現性が高いことも確かめられている。各電極電位における吸光度変化 ΔA からネルンストプロットを行った結果が図 10 である。図 10 の(A)、(B)ともネルンストプロットと呼ばれるが、酸化還元電位の解析は図 10(A)の方が平易であろう。プロットはよい直線性を示し、最小二乗法により傾きが *T. elongatus* で 62.1 ± 2.9 mV/decade、ホウレンソウで 60.7 ± 1.7 mV/decade と、室温における一電子酸化還元反応の理論値(ネルンスト式より $\ln \rightarrow \log$ 変換して $2.303RT/F$) 59 mV/decade に近い値となり、P700 の一電子授受を観測できていることが裏付けられる。図 10(B)はしばしば滴定曲線 (titration curve) とも呼ばれるが、プロットが実線で示した一電子酸化還元理論曲線とよく一致していることが示された。

P700 の酸化還元電位は図 10(A) の $\text{Log}([P700^+]/[P700]) = 0$ となる切片から求められ、*T. elongatus* で $E^{\circ} = +423 \pm 1$ mV、ホウレンソウで $E^{\circ} = +470 \pm 2$ mV という結果となった。図からも明らかのように、両者では、P700 の酸化還元電位が明確に異なることが示された。酸化還元電位の違いが単離操作による PS I の変性によって生じたものでないことは、強い界面活性剤処理によって分画した PS I コア標品でも両者の P700 酸化還元電位に同程度の差が見られることから確かめられている。両者の酸化還元電位が異なる原因について考察を現在進めているが、一つの理由に、生体内で電荷分離反応により電子を放出した P700 (P700⁺) を再還元する水溶性電子伝達タンパク質の種類にあるのではないかと考えている。酸素発生型光合成生物は、水溶性電子伝達タンパク質にシトクロム *c*₆ もしくはプラストシアニン (あるいは両者) をもつが、*T. elongatus* は前者を、ホウレンソウは後者を電子伝達系に用いる。両者は電位が異なることが知られており、これらから効率よく電子を受け取るために、P700 の酸化還元電位が調節されていると考えられる。

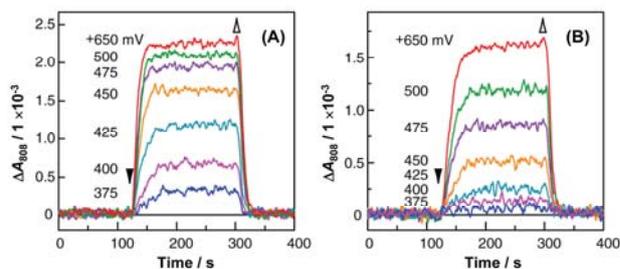


図 9 電位変化に伴う *T. elongatus*(A)およびホウレンソウ(B)由来の PS I サンプルの 808 nm における吸光度変化。文献²³⁾からデータを引用、一部改定。

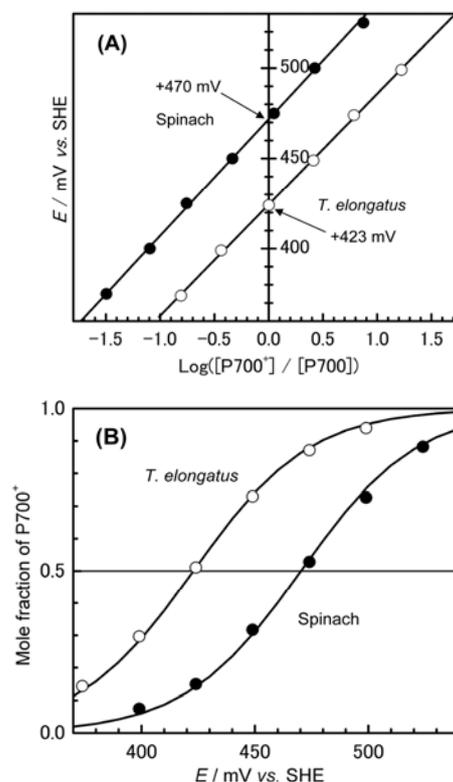


図 10 各電位における ΔA_{808} (図 9) をもとにして作成したネルンストプロット。(A)の直線は、データを最小二乗の結果を表すもので、この 0 切片から酸化還元電位 E° を求める。(B)はしばしば滴定曲線ともよばれ、実線は各 E° をもとにした一電子酸化還元理論曲線を表す。文献²³⁾のデータを一部引用。

したがって、我々の結果は、電子伝達系成分の酸化還元電位調節機構の一端を示したものだといえる。

11. 終わりに

ホウレンソウと *T. elongatus* の P700 酸化還元電位測定は、当研究室にて 5 人以上の測定者が、これまでに述べ 10 回以上は行ってきている。それでも誤差は ± 2 mV 程

度に収まり、測定者による誤差もほとんどない。このような正確性を可能とする測定条件の要因として、正確な電位の制御と速やかな平衡の達成が挙げられる。そしてこのことが、電位変化に対する明確な吸光度変化の決定につながっているといえる。

このようにして確立した測定条件により、ハウレンソウと *T. elongatus* では明確に700の酸化還元電位が異なることを初めて見出すに至った。このような明確な差異は、長年測定されてきたにもかかわらず、測定精度と実験条件によって埋もれていたといえるのではなからうか。さらに、紅藻や緑藻など含めたさまざまな酸素発生型光合成生物のP700について酸化還元電位測定を進めており、酸化還元電位の生物種依存性を見出しつつある。今後、更なる展開としては、PS IIにも測定を広げ、光合成電子伝達系の電子エネルギー準位に関する詳細を明らかにしたい。

参考文献

1. (a) Ke, B. (2001) Redox potential of P700, in *Photosynthesis: Photochemistry and Photobiophysics*, pp 471-473, Kluwer Academic Publishers; (b) Golbeck, J. H. (1987) Structure, function and organization of the Photosystem I reaction center complex, *Biochim. Biophys. Acta* 895, 167-204.
2. Kok, B. (1961) Partial purification and determination of oxidation reduction potential of the photosynthetic chlorophyll complex absorbing at 700 m μ , *Biochim. Biophys. Acta* 48, 527-533.
3. Beinert, H., Kok, B., and Hoch, G. (1962) The light-induced electron paramagnetic resonance signal of photocatalyst P700, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 7, 209-211.
4. Yamamoto, H. Y., and Vernon, L. P. (1969) Characterization of a partially purified photosynthetic reaction center from spinach chloroplasts, *Biochemistry* 8, 4131-4137.
5. Thornber, J. P., and Olson, J. M. (1971) Chlorophyll-proteins and reaction center preparations from photosynthetic bacteria, algae and higher plants, *Photochem. Photobiol.* 14, 329-341.
6. Knaff, D. B., and Malkin, R. (1973) The oxidation-reduction potentials of electron carriers in chloroplast photosystem I fragments, *Arch. Biochem. Biophys.* 159, 555-562.
7. Ke, B., Sugahara, K., and Shaw, E. R. (1975) Further purification of "Triton subchloroplast fraction I" (TSF-I particles): Isolation of a cytochrome-free high-P700 particle and a complex containing cytochromes f and b6, plastocyanin and iron-sulfur protein(s), *Biochim. Biophys. Acta* 408, 12-25.
8. Ikegami, I. (1976) Fluorescence changes related in the primary photochemical reaction in the P700-enriched particles isolated from spinach chloroplasts, *Biochim. Biophys. Acta* 449, 245-258.
9. Evans, M. C. W., Sihra, C. K., and Slabas, A. R. (1977) The oxidation-reduction potential of the reaction-centre chlorophyll (P700) in photosystem I, *Biochem. J.* 162, 75-85.
10. Malkin, R. (1978) Oxidation-reduction potential dependence of the flash-induced 518 nm absorbance change in chloroplasts, *FEBS Lett.* 87, 329-333.
11. Sétif, P., and Mathis, P. (1980) The oxidation-reduction potential of P-700 in chloroplast lamellae and subchloroplast particles, *Arch. Biochem. Biophys.* 204, 477-485.
12. Ikegami, I., and Katoh, S. (1989) Preparation and characterization of P700-enriched photosystem-I complexes from the thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus sp.*, *Plant Cell Physiol.* 30, 175-182.
13. Hamacher, E., Kruip, J., Rögner, M., and Mantele, W. (1996) Characterization of the primary electron donor of photosystem I, P700, by electrochemistry and Fourier transform infrared (FTIR) difference spectroscopy, *Spectrochim. Acta A* 52, 107-121.
14. Kievit, O., and Brudvig, W. G. (2001) Direct electrochemistry of photosystem I, *J. Electroanal. Chem.* 497, 139-149.
15. (a) 高宮建一郎 (1981) Redox poisoning 法による電子伝達解析, "光合成研究法" (加藤榮, 宮地重遠, 村田吉男編), pp 396-402, 共立出版; (b) Dutton, P. L. (1978) Redox potentiometry: Determination of midpoint potentials of oxidation-reduction components of biological electron-transfer systems, in *Methods in Enzymology: vol. LIV, Biomembranes*

- (Fleishcer, S., and Packer, L., Eds.) pp 411-435, Academic Press, New York.
16. 渡辺正, 金村聖志, 益田秀樹, 渡辺正義 (2001) "電気化学", pp 85-101, 丸善.
 17. Bard, J., and Faulkner, L. R. (2001) *Electrochemical methods: Fundamentals and applications*, (a) pp 156-166; (b) pp 417-455; (c) pp 680-693, Wiley, New York.
 18. (a) Kobayashi, M., Ohashi, S., Iwamoto, K., Shiraiwa, Y., Kato, Y., and Watanabe, T. (2007) Redox potential of chlorophyll *d* *in vitro*, *Biochim. Biophys. Acta* 1767, 596-602; (b) Watanabe, T., and Kobayashi, M. (1991) Electrochemistry of chlorophylls, in *Chlorophylls* (Scheer, H., Ed.), pp 287-315, CRC press, London.
 19. Proux-Delrouyre, V., Demaille, C., Leibl, W., Sétif, P., Bottin, H., and Bourdillon, C. (2003) Electrocatalytic investigation of light-induced electron transfer between cytochrome *c₆* and photosystem I, *J. Am. Chem. Soc.* 125, 13686-13692.
 20. Nakamura, A., Suzawa, T., and Watanabe, T. (2004) Spectroelectrochemical determination of the redox potential of P700 in Spinach with an optically transparent thin-layer electrode, *Chem. Lett.* 33, 688-689.
 21. Szentrimay, R., Yeh, P., and Kuwana, T. (1977) Evaluation of mediator-titrants for the coulometric titration of biocomponents, in *Electrochemical studies of biological systems* (Gould, R. F., Ed.), pp 143-169, American Chemical Society.
 22. Nakamura, A., Akai, M., Yoshida, E., Taki, T., and Watanabe, T. (2003) Reversed-phase HPLC determination of chlorophyll *a'* and phylloquinone in Photosystem I of oxygenic photosynthetic organisms: Universal existence of one chlorophyll *a'* molecule in Photosystem I, *Eur. J. Biochem.* 270, 2446-2458.
 23. Nakamura, A., Suzawa, T., Kato, Y., and Watanabe, T. (2005) Significant species-dependence of P700 redox potential as verified by spectroelectrochemistry: Comparison of spinach and *Thermosynechococcus elongatus*, *FEBS. Lett.* 579, 2273-2276.

研究紹介

植物分子イメージングによる光合成機能の可視化

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門
 バイオ応用技術研究ユニット
 ポジトロンイメージング動態解析研究グループ
 河地有木

昨今の研究により光合成と光合成産物の輸送のメカニズムは分子レベルでの理解が日々進んでいます。しかしながら、地球環境の変化が植物個体の生産性に及ぼす影響といった農学的見地から発せられる問いに対して、分子レベルの知見が直接的に還元する例は多くは見られません。これを打破するため、分子メカニズムと個体の生理応答の中間レベルとして、ミリメートルオーダーの組織・器官レベルの生理機能の解明が有効だと考え、日本原子力研究開発機構（原子力機構）では放射性化合物をトレーサとして用い、植物体内の分子動態を可視化する、いわゆる植物分子イメージング研究を模索しています。中でもポジトロンイメージング技術（Positron Emitting Tracer Imaging System: PETIS）は、定量的かつ非侵襲的に生きた植物中での養分や環境汚染物質の動態を動画像として捉えることができ、養分などの輸送・分配・蓄積の仕組みや、環境変化やストレスに対する応答を明らかにする研究が進められています¹⁾。

ポジトロンイメージング技術とは加速器を用いた植物研究用ポジトロン放出核種トレーサの合成と、イメージング装置、それに付随する様々なトレーサ実験技術で構成されています。原子力機構の高崎量子応用研究所イオン照射研究施設（TIARA）では AVF サイクロトロン加速器を用いて（表 1）に示されるような、様々なポジトロン放射性核種をもとにした放射性核種化合物の合成を行っています。中でも ^{11}C や ^{13}N を用いた窒素栄養と炭素栄養²⁻⁴⁾、 $^{52}\text{Fe}^{3+}$ や $^{62}\text{Zn}^{2+}$ といった金属核種を用いた植物中ミネラル⁵⁻⁸⁾、 $^{107}\text{Cd}^{2+}$ を用いた環境汚染物質などの動態計測を目的とした農学・植物生理学の研究を実施するため、安全かつ迅速なイオン照射・分離・精製と植物への供与を可能としています。イメージング装置は医学分野で近年めざましい進歩を遂げ

表 1 原子力機構高崎量子応用研究所で製造される植物研究用ポジトロン RI トレーサ

nuclide	nuclear reaction	products
^{11}C	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	CO_2 , methionine
^{13}N	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$, $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$	NO_3^- , NH_4^+ , N_2
^{15}O	$^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$	H_2O
^{18}F	$^{16}\text{O}(\alpha,pn)^{18}\text{F}$, $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$	F, FDG, proline
^{48}V	$^{45}\text{Sc}(\alpha,n)^{48}\text{V}$	H_2VO_4^-
^{52}Mn	$^{nat}\text{Cr}(p,xn)^{52}\text{Mn}$	Mn^{2+}
^{52}Fe	$^{nat}\text{Cr}(\alpha,xn)^{52}\text{Fe}$	Fe^{3+}
^{62}Zn	$^{nat}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$	Zn^{2+}
^{105}Cd	$^{nat}\text{Ag}(p,3n)^{105}\text{Cd}$	Cd^{2+}
^{107}Cd	$^{nat}\text{Ag}(p,n)^{107}\text{Cd}$	Cd^{2+}

ているポジトロン断層法（Positron Emission Tomography: PET）と同じ検出技術を用いたプランータイプ（二次元）のイメージング装置を用いています⁹⁾（図 1）。植物を測定対象とした場合、対象物が薄く平面であることが多いため、三次元画像取得が可能な PET よりも、植物の測定条件（温度・湿度・光量など）が適切に設定された環境で、トレーサ動態を感度良く撮像できることが重要になります。イメージング装置の有感領域はおおよそ縦 19 cm 横 12 cm で組織・器官レベルから 1 植物個体全体がその視野に入り、2 mm 程度の空間分解能を持ちます。比較的素早い動態を計測する場合は 10 秒おきの画像を撮像し、遅い動態を計測する場合は数日間連続して撮像を行う実験が可能です。この実験技術の最も重要なファクターは「植物実験」を念頭にデザインされている点です。測定環境条件の変動は大きく植物生理の変化を引き起こし、実験結果をミスリーディングしてしまいます。そのため、イメージング装置だけでなく RI 供与装置、RI カウンターなど、多角的な視点を持つための計測機器を大型

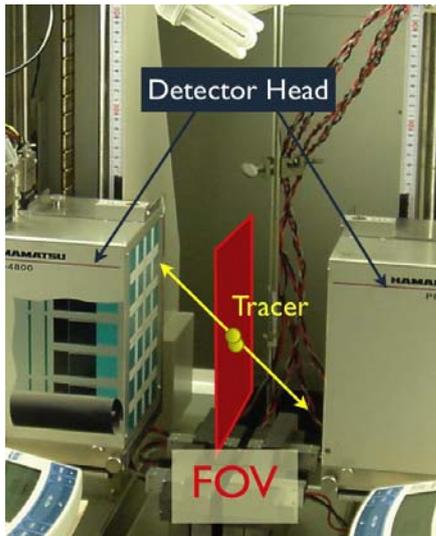


図1 PETIS プラナーイメージング装置。2 対の検出器で視野 (FOV) 内のトレーサ分布を可視化する。

の植物育成庫内に配し、計測による植物生理の変化を極力排除した実験系を構築しています。

このようにポジトロンイメージング技術を駆使することで、植物研究においても様々なトレーサが植物体内を移行分布していく、分子の様子を可視化する植物分子イメージングが可能となり、多様な研究において成果を上げ始めています。ただ、確かに静止および動画データは、植物が持つさまざまな生理機能を定性的に映し出してくれますが、植物研究者が真に必要とするデータは、可視化されたトレーサの体内分布ではなく、生体の生理機能の分布であるはずで、「トレーサ由来の放射線を計測する」という意味では高い定量性を持つ体内分布画像データには、生体内の分子メカニズムに起因する生理的あるいは生化学的な機能を定量

できる情報が内包されています。従って、トレーサ動態解析により植物生理機能の定量評価が可能になります。これは、生体内分子メカニズムを表現可能な数理モデルで記述し、撮像されたトレーサの動態を解析して植物生理機能を数値化する手法です。今回研究紹介させていただく内容も、光合成機能を定量評価するため、そのメカニズムをコンパートメントモデル法¹⁰⁾で記述して炭素動態を数理解析する手法を用いています。

私の研究では、植物個体の光合成を構成する機能のそれぞれをイメージングすることを目的としました。¹¹C で標識した二酸化炭素 (¹¹CO₂) で、光合成時の炭素動態を Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS)で撮像し、葉内での炭素動態をモデル解析し、光合成時の主要な生理機能である「二酸化炭素固定」および「光合成産物送り出し」の定量と機能画像の構築を試みました。光合成産物の動態は、食料生産など農学的見地からも重要なファクターであり、環境に応答する生理機能の数値化は植物生理学分野への展開が可能であると期待しています。

光合成は放射性炭素 (¹¹C など) をトレーサとして用いることで、その反応の過程をはじめ、合成産物の輸送、移行や分布が可視化できることが知られています。また、¹¹C は半減期が約 20 分と非常に短いため、同一個体を用いた繰り返し測定や異なる環境下での測定が可能です。この炭素動態を解析するために、各器官を箱で、トレーサ分子の移動を矢印でそれぞれ表す、コンパートメントモデル法で光合成を数理モデル化しました (図 2)。コンパートメント内の ¹¹C トレーサ濃

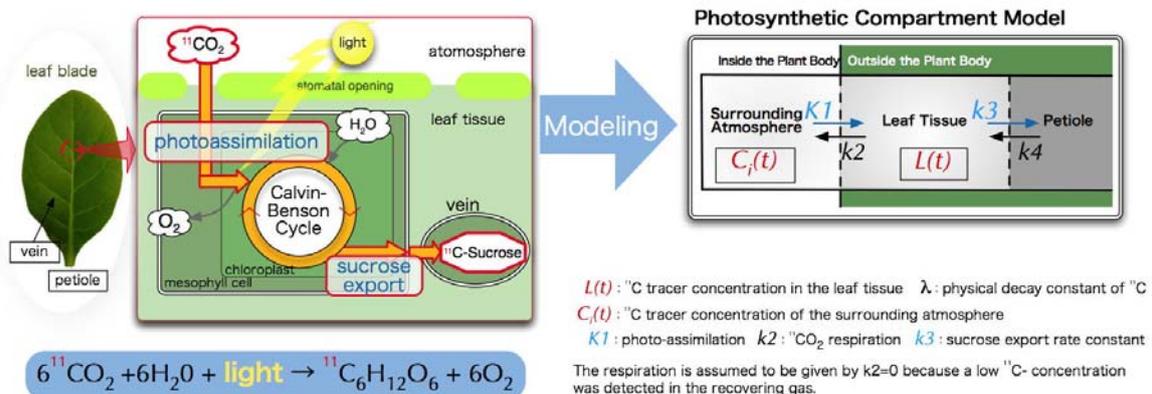


図2 光合成の過程 (左側) を炭素の動きに注目したコンパートメントモデルで簡略化し (右側)、これを微分方程式で表して解析解を得ます。

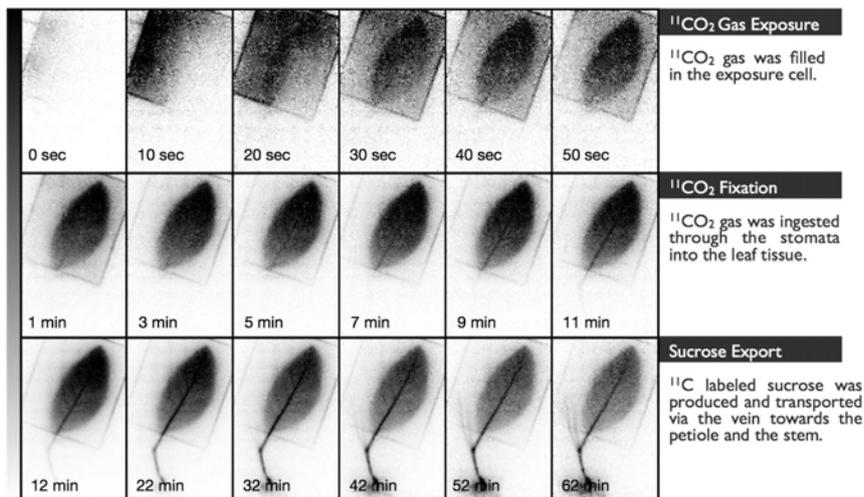


図3 葉における炭素動態の経時変化

度に対しては、次の時間微分方程式が成り立ち、

$$\frac{L(t)}{dt} = K_1 \cdot C_i(t) - (k_2 + k_3 + \lambda) \cdot L(t)$$

大気への $^{11}\text{CO}_2$ の最放出が検出されなかったため $k_2=0$ としてこの式を解き、次式に示される解析解が得られます。

$$L(t) = K_1 \cdot C_i(t) \otimes e^{-(k_3+\lambda) \cdot t}$$

この式は、葉における炭素の放射能濃度時間変化の実測値を基に、この解析解を用いた数値解析により、「二酸化炭素固定」および「光合成産物送り出し」の二つの植物生理機能の定量が可能となることを示しています。

ここで構築した光合成コンパートメントモデルの妥当性についての検証実験を PETIS で行いました。タバコの葉に約 10 MBq の $^{11}\text{CO}_2$ を吸収させ、1 時間撮像しています。この撮像で、葉を封入したセル内に進入した $^{11}\text{CO}_2$ が葉内に取り込まれ、光合成によって ^{11}C がラベルされたショ糖を合成、 ^{11}C -ショ糖が葉から植物体全体へと送り出される炭素動態を可視化しています(図3)。ここで得られた動画データの動態解析は、① 動画像に関心領域を取り、葉が吸収した炭素動態を示す放射能濃度時間変化を葉の応答関数データとして

抽出、② 葉に供給した $^{11}\text{CO}_2$ の入力関数データを抽出、③ 光合成コンパートメントモデルより導いた解析解に対して、二つの関数を非線形最小自乗法でフィッティング、④ 二酸化炭素固定速度および光合成産物送り出し率という二つの生理パラメータを算出、という手順で行いました。図4に見られるように、モデルが示す推定曲線と実測値は良く一致しており、モデルが妥当であることを示しています。つまり、 $^{11}\text{CO}_2$ と PETIS による非侵襲的かつ定量的な葉の光合成機能の評価法を構築し、従来困難であった光合成産物の送り出し率の数値化にも成功した、と言えます。また、さ

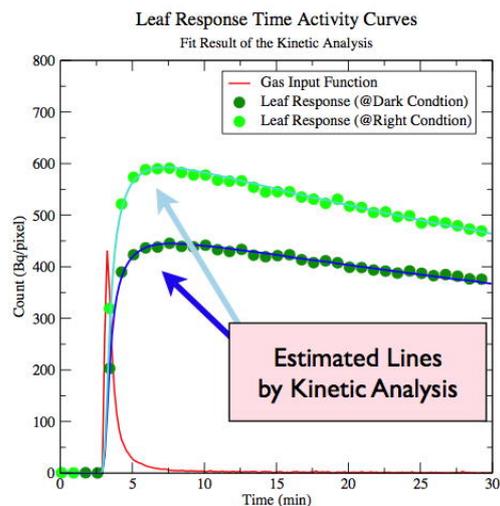


図4 コンパートメントモデル解析による推定。同一植物個体を用いた2回の計測値(強光●と弱行●)と推定曲線は良く一致しました。

らに解析法の改良を進めて炭素動態を画素毎に解析し (pixel-by-pixel analysis¹¹⁾)、光合成機能画像の作成、いわゆる光合成機能イメージング¹²⁾も可能としました (図5)。これは画像上に非常に小さな関心領域を取り、その位置の植物生理機能を示す解析値で画像を再構成する方法です。これにより、二つの光合成機能の分布が可視化され、「葉上に一様に広がる炭素固定能」や「基部に比べ先端部に強い光合成産物送り出し能が分布している」ことなどが解ってきました。

定量性については、コンパートメントモデルの矢印に当たるファクターを率ではなく、測定中の環境因子をモデルに持ち込むことによって絶対定量、つまりモル数もしくは分子数レベルでの差異を明確に表現できることが示されます。これは、いわゆる分子イメージング¹³⁾であり、当研究グループの撮像法・解析法をもってすることで「生体内の分子メカニズムに起因する生理をイメージングする」、いわゆる植物分子イメージング研究が実現していること、が示されていると考えています。

今後はさらに測定の短時間化に取り組み、現在の3時間に一回しか供試植物の光合成機能を測定できない現状を改善する予定です。比較的短時間で応答する環境因子 (重金属ストレス、温度環境の変化、等) をパラメータとした植物分子イメージングを行い、光合成産物の輸送機能を解析する実験を計画しています。

私たちのグループでは、この計測技術の特長を活かした植物研究手法を開発し、個体レベルの植物中における様々な生理機能を定量的に解析・評価することに

より、食糧生産や環境保全に有用な植物機能を理解し、活用するための研究を進めています。この植物分子イメージングというアイデアを有効に活用し新たな光合成研究を展開していただける方、とにかく使ってみたい方、また今回紹介させていただいた内容へのご意見など、是非ご連絡いただければ幸いです。よろしくお願いたします。

参考文献

1. 大山卓爾、松橋信平 (2005) ポジトロンイメージングによる植物機能の可視化.放射線と産業, 108: 26-32.
2. Kawachi, N., Sakamoto, K., Ishii, S., Fujimaki, S., Suzui, N., Ishioka, N. S., and Matsushashi, S. (2006) Kinetic analysis of carbon-11-labeled carbon dioxide for studying photosynthesis in a leaf using positron emitting tracer imaging system, *IEEE Transact. Nucl. Sci.* 53, 2991-2997.
3. Matsushashi, S., Fujimaki, S., Kawachi, N., Sakamoto, K., Ishioka, N. S., and Kume, T. (2005) Quantitative Modeling of Photoassimilate Flow in an Intact Plant Using the Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS), *Soil Sci. Plant Nutr.* 51, 417-423.
4. Kiyomiya, S., Nakanishi, H., Uchida, H., Tsuji, A., Nishiyama, S., Futatsubashi, M., Tsukada, H., Ishioka, N. S., Watanabe, S., Ito, T., Mizuniwa, C., Osa, A., Matsushashi, S., Hashimoto, S., Sekine, and T., Mori, S. (2001) Real Time Visualization of ¹³N-Translocation in Rice under Different Environmental Condition

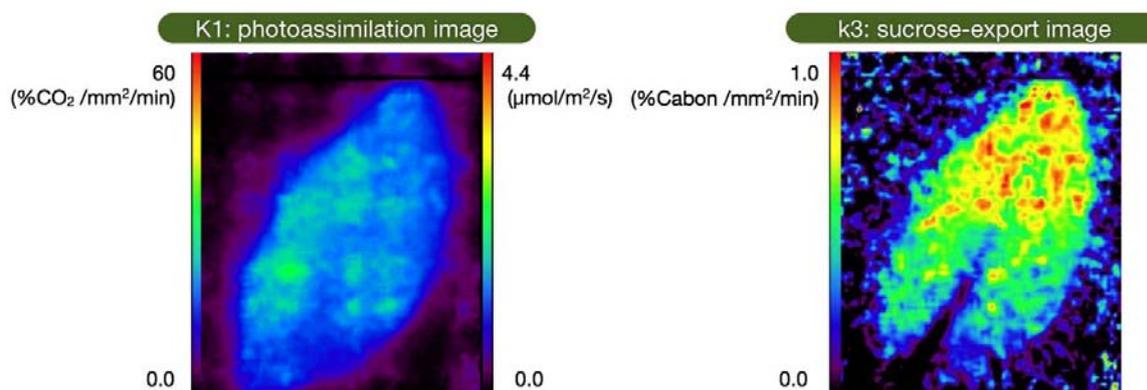


図5 光合成機能画像。(左)炭素固定速度分布と(右)ショ糖の送り出し強度の分布を示している。

- Using Positron Emitting Tracer Imaging System, *Plant Physiol.* 125, 1743-1754.
5. Ishimaru, Y., Kim, S., Tsukamoto, T., Oki, H., Kobayashi, T., Watanabe, S., Matsuhashi, S., Takahashi, M., Nakanishi, H., Mori, S., and Nishizawa, N. K. (2007) Mutational reconstructed ferric chelate reductase confers enhanced tolerance in rice to iron deficiency in calcareous soil, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 104(18), 7373-7378.
 6. Tsukamoto, T., Nakanishi, H., Kiyomiya, S., Watanabe, S., Matsuhashi, S., Nishizawa, N. K., and Mori, S. (2006) ⁵²Mn translocation in barley monitored using a positron-emitting tracer imaging system, *Soil Science and Plant Nutrition* 52, 717-725.
 7. Suzuki, M., Takahashi, M., Tsukamoto, T., Watanabe, S., Matsuhashi, S., Yazaki, U., Kishimoto, N., Kikuchi, S., Nakanishi, H., Mori, S., and Nishizawa, N. K. (2006) Biosynthesis and secretion of mugineic acid family phytosiderophores in zinc-deficient barley, *The Plant Journal* 48, 85-97.
 8. Ishimaru, Y., Suzuki, M., Tsukamoto, T., Suzuki, K., Nakazono, M., Kobayashi, T., Wada, Y., Watanabe, S., Matsuhashi, S., Takahashi, M., Nakanishi, H., Mori, S., and Nishizawa, N. K. (2006) Rice plants take up iron as an Fe³⁺-phytosiderophore and as Fe²⁺, *The Plant Journal* 45, 335-346.
 9. Uchida, H., Okamoto, T., Ohmura, T., Shimizu, K., Satoh, N., Koike, T., and Yamashita, T. (2004) A compact planar positron imaging system, *Nucl. Instrum. Meth. A* 516, 564-574.
 10. Jacquez, J. A. (1965) *Compartmental Analysis in Biology and Medicine*, Elsevier/North Holland, Amsterdam.
 11. Watabe, H., Jino, H., Kawachi, N., Teramoto, N., Hayashi, T., Ohta, Y., and Iida, H. (2005) Parametric imaging of myocardial blood flow with ¹⁵O-water and PET using the basis function method, *J. Nucl. Med.* 46, 1219-24.
 12. Kawachi, N., Fujimaki, S., Ishii, S., Suzui, N., Ishioka, N. S., and Matsuhashi, S. (2006) A New Method for Parametric Imaging of Photosynthesis with C-11 Carbon Dioxide and Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS), *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record* 3, 1519-1522.
 13. Herschman, H. R. (2003) Molecular Imaging, *Science* 302, 605-608.

14th International Congress of Photosynthesis に参加して

九州大学大学院生物資源環境科学府
植物資源科学専攻博士課程
桶川 友季

2007年7月23日から27日までScotlandのGlasgowで“14th International Congress of Photosynthesis”が開催された。Glasgowはスコットランド最大の都市だが、ちょっとした都会くらいの街でとても過ごしやすかった。伝統的な建造物と現代的な建物が融和したとてもきれいな街並みだった。

学会はホテルから二駅のところにあるScottish Exhibition and Conference Centre (SECC)で行われた。とても大きくてきれいな建物だったが周りにはほとんど何もなかった。そのため昼食は会場で済ませるしかなかった。

私にとって初めての国際学会。当初の予定ではポスター発表だけだったが、急遽、鹿内先生の代役でセッションでも話すことになった。旅行気分だった学会がいきなりとてつもなく大変なもののような感じがした。(実際はかなり観光も満喫したが。) 20分という発表時間。日本語でもそんなに長い時間話したこと無いのに英語でなんて大丈夫だろうかと不安になった。しかし当日は共同研究者でもある東工大の久堀先生がサポートしてくださるとのことだったのでかなり気分は楽になった。

この学会報告記事では個人的なことばかりで申し訳ないが私のポスター発表、口頭発表を中心に話を進めていく。

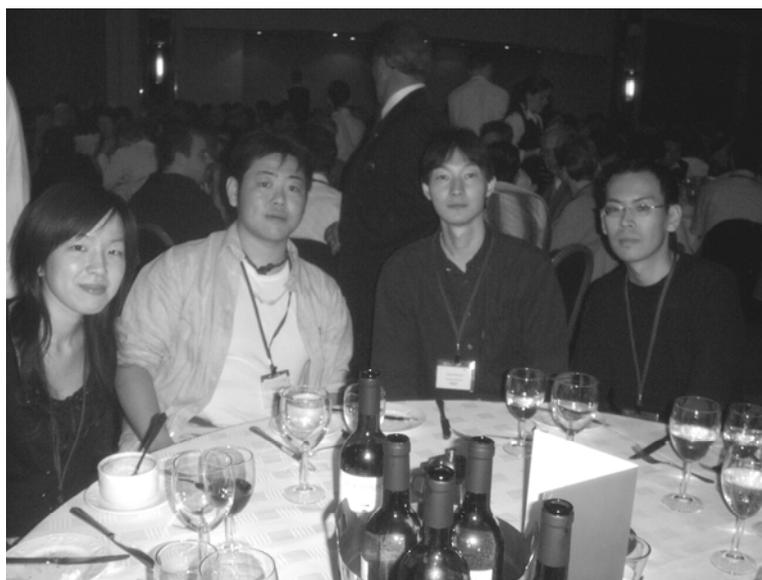
24日(火)、この日はポスター発表。午後からはElectron Transport; operation, organization and regulationのセッションを聞きに行った。William Cramer博士がCytochrome *b₆f*複合体で新規に発見したヘムについての話をされていた。ディスカッションではこのヘムとPSIサイクリック電子伝達の関わりにまで及んだ。このヘムがPSIサイクリック電子伝達に関与しているのではないかと多くの人が注目しているがこれまでにそれを証明するデータは得られていない。ミトコンドリアには保存されていないこのヘムが葉緑体においてどのような機能を持つのか私も非常に興味深い。そして午後五時、ポスター発表が始まった。初めの方は日本の方が何人か聞きに来てくれた。説明も日本語だったので落ち着いて話すことが出来た。それから緊張しながらポスターの前に立っているとKrishna Niyogi博士が聞きに来



SECCにて

てくれた。Niyogi 博士は、クラミドモナスとアラビドプシスを使った遺伝学で、光化学 II で過剰に受容された光エネルギーを熱として安全に散逸する迅速適応(熱散逸)の分子メカニズムを明らかにされた。今回の学会ではセッションで講演されており、熱散逸の話とクラミドモナスの一重項酸素に対する適応についても話をされていた。初めてきちんと読んだ文献が Niyogi 博士の熱散逸について書かれた論文だったこともあって話をすることが出来たのがうれしかった。発表時間が終わり安心していると、宗景ゆり博士が Giovanni Finazzi 博士と Giles N. Johnson 博士を連れてディスカッションしに来てくれた。今回、私は光化学系 I サイクリック電子伝達活性を、突然変異株を使って測定した結果をポスター発表していた。Finazzi 博士も Johnson 博士も光化学 I サイクリック電子伝達をまた別の方法で評価している方々である。そのため、測定の細かいところまで話が及んだ。宗景博士に手助けしてもらいながら何とか伝えたいことは説明できたと思う。そんなに暑い会場ではなかったのにディスカッション後には汗をかいていた。これで一仕事終わり。明日はいよいよ大仕事が待っている。

25 日(木)、この日はいよいよ口頭発表の日だ。発表は午後一番。場所は三つある会場の中でも一番小さなところ。少し気分が楽になった。朝から会場入りし、シンポジウムを聞いたりポスターを見たり。しかし緊張のせいでぜんぜん頭に入っていない。発表時間が迫ってくる中、会場でお昼を食べているといろいろな先生方が励ましてくれた。午後 2 時、発表会場に入った。一番前のイスで既に久堀先生が待っていてくれた。司会の Paul Quick 博士も「大丈夫だよ。」と私の緊張をほぐしてくれようとしてくれた。会場に続々と人が入ってくる。2 時 25 分、ついに発表が始まった。発表中、会場を見渡す余裕も無く話し続けた。きちんと英語を話せているのか? と不安になりながら。そして 20 分という長い発表時間が終わり次は質疑応答。今回の発表内容は全て自分が関わった仕事ではあったがきちんと答えられるかがかなり不安だった。久堀先生の助けをかりつつも私のつたない英語で何とか答えることが出来た。発表には多くの方が聞きに来てくれており質問もいろいろ出た。今回の学会ではポスターでも光化学系 I サイクリック電子伝達についての発表が多いと感じたが、ここでも研究者の関心が高いことがうかがえた。質疑応答も終わり任務完了。自分の発表が終わってから 3 人の方の発表があ



懇親会場にて

ったがほぼ放心状態だったように思う。全体の発表が終わると Quick 博士が私のところまで来てくれ「よかったよ。」と声をかけてくれた。三宅先生や小川先生も聞きに来てくださっており発表が終わってから内容についてディスカッションしいろいろアドバイスもいただいた。その他、様々な方に声をかけていただいた。

28日(土)、学会も終わりこの日は一日観光に出かけることにした。電車で約一時間のスコットランドの首都であるエディンバラまで足をのぼした。世界遺産に登録されている街であるだけに古くて趣のある建物ばかりであった。どの建物を撮っても「絵になる」とたくさんの写真を撮った。今回の学会ではデジカメを持って行っており、観光の写真はたくさん撮っていた。しかし後から気付いたことだが、口頭発表の前日、当日と写真がぽっかり抜けていた。それだけ余裕が無かったんだろうなと改めて思った。と同時に話した方々みんなと写真を撮っておくべきだったと後悔した。それからかなり急な坂を上り、さらに30分以上並んでエディンバラ城の中まで入った。城からは街全体が見渡すことが出来た。城も街も全てが異世界で映画のセットの中に入っているような気分だった。記念に小さなビンに入ったスコッチウイスキーと定番のタータンチェックのマフラーを買って帰った。

最終日、この日は昼出発だったので、朝一人でグラスゴーの街を散歩することにした。その日は日曜日で店はほとんど閉まっており人もまばらだった。9泊11日のイギリスの旅、長かったような短かったような。いろいろな出来事が詰まった日を送れたと思う。食事さえもっとよければ長く滞在したいと思う街だったのだが。

今回の学会ではいろいろな方と話せる貴重な経験が出来、かなり充実したものであった。多くの方が注目し、行っている研究に自分が携わっていることを実感でき、研究に対する意識も変わったと思う。英語力を磨いて次回の国際学会では、もっと多くの研究者と話が出来よう努力したいと思う。

また今回、様々な方にお世話になり本当に感謝の気持ちでいっぱいです。この場を借りて御礼申し上げます。ありがとうございました。



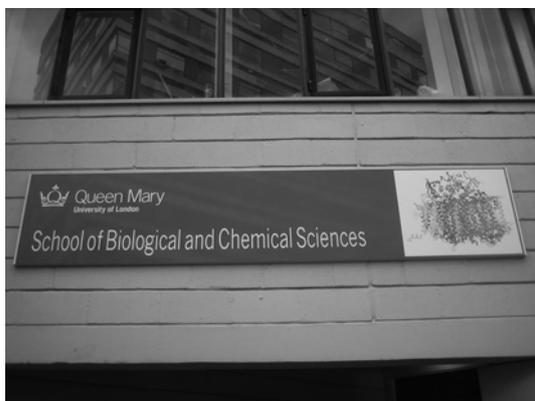
エディンバラの街並みとエディンバラ城

ステート遷移に関するサテライト会議・ロンドン大学クイーンメリー Satellite Meeting on State Transitions; University of London, Queen Mary

岡山大学大学院自然科学研究科
高橋裕一郎

グラスゴーでの国際光合成会議の後、7月28日から31日にステート遷移に関するサテライト会議が開かれました。会場はロンドンの中心から地下鉄で東に何駅か進んだ Mile End 駅の近くのロンドン大学クイーンメリーのキャンパスで、新しくゲストハウスやカフェテリアが整備されており、快適な雰囲気の良い場所でした。大学の周辺にはインドやパキスタン系の移民が多く住み、ロンドンの中心部からわずかしか離れていないにも関わらず庶民的で興味深い雰囲気の街で、ロンドンという大都市の国際性と奥深さを感じました。

会議はクイーンメリーの John F. Allen と Conrad Mullineaux がオルガナイズし、School of Biological and Chemical Sciences の G. E. Fogg Building で口頭発表とポスター発表が行われました。参加者は50人程度で、日本からは8人ほどでした。この程度の参加者の会議は、かなり踏み込んだ議論をしたり、新しく知り合いを見つけたりするには、ちょうど良いサイズで、かなり快適で有意義でした。グラスゴーの会議にだけ参加し、この様なサテライト会議に参加しないのは、わざわざ遠い外国に来たのにもったいないと感じました。会議の運営は Allen 一家が総出で手伝い、研究発表をした奥さんだけでなく、受付は息子さんが担当していました。



会場とキャンパス

ステート遷移は日本の村田紀夫先生とアメリカの Jack Myer の発見から 40 年近く研究が続けられてきた課題で、この数年ではステート遷移に関与するキナーゼの発見などによりますます注目されるようになってきました。今回のサテライト会議ではステート遷移の幅広い分野の研究者の発表があり、Allen の基調講演を兼ねた講演から始まり、光化学系 1 と 2 の構造と機能 (Nathan Nelson、Masakazu Iwai、Joanna Kargul、Powikrowska Marta)、シトクロム b_6f 複合体の構造と機能 (Gabor Bernat)、LHCII の構造とリン酸化 (Gyozo Garab、Jakob Thomas Damkjaer、Maitrayee DasGupta)、キナーゼ (Jean-David Rochaix、Giovanni Finazzi)、シアノバクテリアのステート遷移 (Conrad Mullineaux、Kumiko Kondo、Kostas Stamatakis)、やや難解でしたが物理化学的な測定の成果などの講演がありました。

2 日目の夜は大学の近くの L'Oasis というパブレストランで夕食会がありました。イギリス (ロンドン はさらに) では恐ろしく物価が高く、限られた予算ではなかなかおいしい食事にありつけなかったのですが、この日は久しぶりにまともな食事を楽しみ満足感も味わえました。



オアシスでの会食
写真の真ん中は Nathan 教授

なお、会議のプログラム、参加者のリスト、集合写真などは、
<http://www.statetransitions.org.uk/>
でご覧になれます。

Rubisco satellite meeting Research Frontiers with Rubisco, the “Elixir of Life” in the Biosphere に参加して

奈良先端科学技術大学院大学
蘆田 弘樹

7月21～27日にイギリスのグラスゴーで開催された第14回国際光合成会議のサテライトミーティングである Rubisco satellite meeting に参加した報告記事を書かせていただきます。Rubisco satellite meeting は“Research Frontiers with Rubisco, the “Elixir of Life” in the Biosphere と題して、7月20、21日にイギリスの Harpenden にある Rothamsted Research で開催されました。招待講演が26題、ポスター発表が13題で、参加者は約50名でした。日本からは、私のラボの学生の他、前忠彦先生のラボ、徳富（宮尾）光恵先生が参加されていました。Harpenden はロンドンの北に位置し、キングスクロス駅から電車で30分ほど揺られると Rothamsted Research の最寄り駅である Harpenden 駅に到着します。Rothamsted Research は Harpenden 駅から歩いて10分ほどで、駅前の繁華街の少し外れにあります。Rothamsted Research はイギリスで最も規模が大きく、1843年に創立した世界でも歴史ある農学研究所です。創立から160年を経た現在においても、農学研究の環境や生態系を中心とした遺伝学、生化学、細胞生物学、土壌学分野で世界をリードしています。



Rothamsted Research の風景：2003年に建てられた新ラボ棟

私は Rubisco satellite meeting に、我々の研究を発表する以外に、大きな楽しみを持って参加しました。その楽しみとは、私にとって RuBisCO に特化したミーティングに参加するのがはじめての経験だったので、ラボでの議論で頻りに登場し、学生の頃から論文でしか知ることができなかった世界の RuBisCO 研究者と直接会い、話ができることでした。実際、自分が関わる研究分野の著名な研究者と直接議論できたことは、これからの研究における財産になると確信しました。

さて、今回の Rubisco satellite meeting は、オーガナイザーである Rothamsted Research の Martin Parry 教授とイリノイ大学の Archie Portis 教授をはじめ、世界の RuBisCO 研究者が一同に集合しました。しかしながら、クラミドモナスを用いて RuBisCO の構造活性相関研究を精力的にされているネブラスカ大の Spreitzer 教授が出席されていなかったのは残念でした。国際光合成会議や光合成ゴードン会議で個人的に集合するのを除けば、私が知る限り、2000 年 11 月に兵庫県のグリーンピア三木で開催された NIAR/COE/BRAIN-RITE International Symposium “Photosynthetic CO₂-Assimilation Enzymes: RuBisCO and PEPC” 以来の RuBisCO ミーティングだったかと思います。

ミーティングでは、全ての発表が RuBisCO に関わる研究で、日本でも経験したことのない RuBisCO 一色の雰囲気、私も学生も至福のときを感じました。ミーティングでは大きく分けて、RuBisCO の分子進化、RuBisCO の X 線結晶構造、RuBisCO の生合成と分解メカニズム、RuBisCO activase や阻害剤による RuBisCO の活性制御、RuBisCO を中心とした植物光合成 CO₂ 固定の生理学、RuBisCO の分子改良を中心に熱い議論が行われました。参加した研究者の多くが、現存の劣悪な植物 Rubisco を改良(具



ミーティングでの集合写真：前列右から二人目と三人目がオーガナイザーの Martin Parry 教授と Archie Portis 教授

体的には高い CO₂ 親和性、高い CO₂ 固定速度、低い O₂ 反応性を可能にした RuBisCO への改良)、または最適に制御することによって、植物の光合成効率を向上させることを共通目的としており、ミーティング両日の最後に RuBisCO 改良の展望と植物生産性を目指した RuBisCO 量・活性制御の最適化についての自由討論が行われました。私の印象ですが、残念ながら、あつと言うようなアイデアはなかったのではないかと思います。つまり、世界の RuBisCO 研究者の間で、RuBisCO 改良のためのブレークスルー研究が待ち望まれており、アイデア次第で、誰もが次のブレークスルーを達成する可能性を秘めており、是非、自分もその一人になりたいと、非常に良い刺激を受けて帰国しました。

第8回日本光合成研究会シンポジウムのお知らせ

2008年度の第8回日本光合成研究会シンポジウムを下記の要領で開催いたします。今回は、「光センサー」、「色素合成」、「光合成を支える生理学」のテーマに関し、各分野でご活躍の方々による招待講演を企画しております。また、ポスター発表を募集しますので奮ってご参加ください。昨年同様、優秀ポスター発表に対して数件のポスター賞を出す予定です。

日時：2008年5月30日（金）午後～5月31日（土）午前

場所：名古屋大学野依記念学術交流館

内容：「光センサー」、「色素合成」、「光合成を支える生理学」のテーマでの招待講演
ポスター発表

参加、ポスター発表申込：参加・発表申込の要領、締切に関しては、決定次第、会報またはeメールにてお知らせいたします。

集会案内

第 49 回日本植物生理学会シンポジウム 植物の生産性とカルビン回路

「カルビンサイクル研究の新展開」

日時 : 2008 年 3 月 22 日 (土) 13:00~16:00

会場 : 札幌コンベンションセンター

〒 003-0006 札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1 - 1

(札幌市街の中心, 地下鉄大通駅から地下鉄東西線で 3 駅目の東札幌駅より徒歩 8 分)

<http://www.sora-scc.jp/>

オーガナイザー : 小川健一 (RIBS OKAYAMA)、田茂井政宏 (近畿大・農・バイオ)、牧野周 (東北大・院農)

趣旨 : 光化学系に関する集会やルビスコに関する集会は数多く企画され、多くの文献が存在しますが、カルビン回路の全貌についての議論の場は少なく、文献自体も限られています。最近、ルビスコ以外のカルビン回路酵素が植物の生産性に関係していることを示す事例が増してきました。植物の生産性の向上に繋がる知見の重要度が増してきた昨今では、ルビスコを含めたカルビン回路研究を見詰め直して、新たな視点を含めて議論する場を設けることは、この分野への取っ掛かりを提供し、研究人口を増やすという意味でたいへん有意義と考え、このようなシンポジウムを企画しました。カルビン回路における制御系の最近の知見について紹介、議論したいと思います。

プログラム :

13:00~13:05 「なぜ今カルビン回路か！」

小川健一 (RIBS OKAYAMA)、田茂井政宏 (近畿大・農・バイオ)、牧野周 (東北大・院農)

13:05~13:35 光合成による PSI 循環的電子伝達反応の、美しい制御

三宅親弘 (RITE・植物グループ)

13:35~14:05 電子伝達系からの Rubisco 活性の制御

牧野周¹、佐藤友則¹、三宅親弘²、Rowan Sage³ (¹東北大・院農, ²RITE, ³トロント大・植物学科)

14:05~14:35 カルビン回路におけるフルクトース-1,6-ビスリン酸アルドラーゼのレドックス制御

小川健一^{1,2}、松本雅好¹ (¹RIBS OKAYAMA, ²科学技術振興機構・CREST)

14:35~15:05 CP12 によるカルビンサイクル制御機構

田茂井政宏、重岡成 (近畿大・農・バイオ)

15:05~15:35 RuBisCO-like protein の解析から見えてきた RuBisCO 誕生の分子機構

蘆田弘樹、横田明穂 (奈良先端大・バイオ)

15:35~16:00 総合討論

問い合わせ : 小川健一 RIBS OKAYAMA、岡山県加賀郡吉備中央町吉川 7 5 4 9 - 1、

Tel. 0866-56-6011、Fax. 0866-56-9454、ogawa_k@bc4.so-net.ne.jp

新刊図書

Primary Processes of Photosynthesis Principles and Apparatus Edition

Editor: Gernot Renger

Series: Comprehensive Series in Photochemical & Photobiological Sciences

Publisher: Royal Society of Chemistry

ISBN: 978-0-85404-364-4

Price: £339.00

Publication date: 23/11/2007

The Structure and Function of Plastids

Series: Advances in Photosynthesis and Respiration, Vol. 23

Springer

Wise, Robert R.; Hooper, J. Kenneth (Eds.)

2007, XL, 575 p., Softcover

Price: \$129.00

ISBN: 978-1-4020-6570-5

☆ 近 刊 ☆

The Cyanobacteria: Molecular Biology, Genomics and Evolution

Editors: Antonia Herrero and Enrique Flores

Publisher: Caister Academic Press

<http://www.horizonpress.com/cyano>

Publication date: 01 January 2008

ISBN: 978-1-904455-15-8

Price: GB £150 or US \$300 (hardback)

Pages: xii + 484 (plus 18 colour plates)

☆ 訂 正 ☆

前号でのお知らせに出版社名がありませんでした。再度ご案内いたします。

光合成の科学

東京大学光合成教育研究会編

東京大学出版会

A 5 判 / 304 頁 / 税込 3990 円 (本体 3800 円)

ISBN978-4-13-062214-1

<http://www.utp.or.jp/bd/978-4-13-062214-1.html>

公募

岡山県生物科学総合研究所流動研究員募集

1. 採用予定人員 生物科学総合研究所流動研究員（非常勤研究員） 1名

2. 応募資格

- (1) 地方公務員法第16条の欠格条項に該当しない者
- (2) 博士号取得又はこれと同等の研究能力を有する者
- (3) 植物生理学分野の研究ができる者
「植物の収量性を大幅に向上させるための分子メカニズム解析研究」を実施する能力を有する者
(グルタチオンによるカルビン回路の制御のメカニズム研究をできる者であればより好ましい。)

3. 募集期間等

- (1) 募集期間 平成19年11月1日(木)～平成20年1月18日(金)
※ 持参する場合は、8時30分～17時15分(土曜日、日曜日及び祝日は除く。)
※ 郵送等の場合は、平成20年1月18日17時までに生物科学総合研究所に必着
- (2) 提出書類 各1通
 - ア 履歴書(市販のもので可)
 - イ 過去の研究実績の概要(2,000字以内)
 - ウ 研究論文のリスト及び主要な論文(5編以内)の別刷(コピーも可)
 - エ 自分で取り組んでみたい研究テーマとその内容(1,000字以内)
 - オ 応募者について、問い合わせのできる方2名の所属、氏名及び連絡先
※ 郵送等の場合は、封筒の表に「研究員応募」と朱書きしてください。なお、応募書類は、原則として返却いたしません。
- (3) 受付場所
岡山県生物科学総合研究所
〒716-1241 岡山県加賀郡吉備中央町吉川 7549-1
TEL (0866) 56-9450 FAX (0866) 56-9453
e-mail: seibutsu@pref.okayama.lg.jp

4. 面接の期日及び場所

書類審査に合格した応募者を対象に、岡山県生物科学総合研究所研究員選考審査会による面接試験を行い、選考いたします。なお、面接試験は2月上旬を予定しており、詳細については、後日、お知らせします。

5. 採用時期

別途、合格者本人あて通知いたしますが、採用は平成20年4月の予定です。

6. 賃金・諸手当等

報酬：「非常勤職員の報酬及び費用弁償に関する条例」の定めるところによる。
ア 月18日勤務で、274,000円程度(通勤費込み)の予定。
イ なお、上記の額から所得税、健康保険料等が差し引かれます。

7. 問い合わせ先

小川 健一 RIBS OKAYAMA、岡山県加賀郡吉備中央町吉川 7549-1、
Tel. 0866-56-6011、Fax. 0866-56-9454、ogawa_k@bc4.so-net.ne.jp

*** Information ***

事務局からのお知らせ

★入会案内

本会へ入会を希望される方は、会費（個人会員年会費：¥1,500、賛助法人会員年会費：¥50,000）を郵便振替（加入者名：日本光合成研究会、口座番号：00140-3-730290）にて送金の上、次ページの申し込み用紙、または電子メールにて、氏名、所属、住所、電話番号、ファックス番号、電子メールアドレス、入会希望年を事務局までお知らせください。

記事募集

日本光合成研究会では、会報に掲載する記事を会員の皆様より募集しています。募集する記事の項目は以下の通りです。

- トピックス：光合成及び関連分野での纏まりのよいトピックス的な記事。
- 解説：光合成に関連するテーマでの解説記事。
- 研究紹介：最近の研究結果の紹介。特に、若手、博士研究員の方々からの投稿を期待しています。
- 会議報告：国際会議、シンポジウムなどの簡単な報告記事。
- 集会案内：研究会、セミナー等の案内。
- 求人：博士研究員、専門技術員等の募集記事。
- 新刊図書：光合成関係、または会員が執筆・編集した新刊図書の紹介。書評も歓迎いたします。

記事の掲載を希望される方は、会報編集担当、野口（tnoguchi@ims.tsukuba.ac.jp）まで御連絡下さい。

日本光合成研究会会員入会申込書

平成 年 月 日

日本光合成研究会御中

私は日本光合成研究会の趣旨に賛同し、平成 年より会員として入会を申し込みます。

[]内に会員名簿上での公開承諾項目に○印をつけてください

[] 氏名 (漢字) (必須)

氏名 (ひらがな)

氏名 (ローマ字)

[] 所属

[] 住所 1

〒

[] 住所 2 (自宅の方または会報送付先が所属と異なる場合にのみ記入)

〒

[] TEL1

[] TEL2 (必要な方のみ記入)

[] FAX

[] E-mail

個人会員年会費 1,500 円 (会報、研究会、ワークショップなどの案内を含む)

賛助法人会員年会費 50,000 円 (上記と会報への広告料を含む)

(振込予定日:平成 年 月 日) (会員資格は1月1日~12月31日を単位とします)

* 複数年分の会費を先払いで振り込むことも可能です。その場合、通信欄に (何年度~何年度分) とお書き下さい。

連絡先

〒464-8602 名古屋市千種区不老町

名古屋大学理学部物理教室 光生体エネルギー研内

日本光合成研究会

TEL/FAX: 052-789-2883

E-mail: photosyn@bio.phys.nagoya-u.ac.jp

郵便振替口座 00140-3-730290

日本光合成研究会会則

第1条 名称

本会は日本光合成研究会（The Japanese Association for Photosynthesis Research）と称する。

第2条 目的

本会は光合成の基礎および応用分野の研究発展を促進し、研究者相互の交流を深めることを目的とする。

第3条 事業

本会は前条の目的を達成するために、シンポジウム開催などの事業を行う。

第4条 会員

1. 定義

本会の目的に賛同する個人は、登録手続を経て会員になることができる。また、団体、機関は、賛助会員になることができる。

2. 権利

会員および賛助会員は、本会の通信および刊行物の配布を受けること、本会の主催する行事に参加することができる。会員は、会長を選挙すること、役員に選出されることができる。

3. 会費

会員および賛助会員は本会の定めた年会費を納めなければならない。

第5条 組織および運営

1. 役員

本会の運営のため、役員として会長1名、事務局長1名、会計監査1名、常任幹事若干名をおく。役員任期は2年とする。会長、常任幹事は連続して二期を越えて再任されない。事務局長は五期を越えて再任されない。会計監査は再任されない。

2. 幹事

幹事数名をおく。幹事任期は4年とする。幹事の再任は妨げない。

3. 常任幹事会

常任幹事会は会長と常任幹事から構成され、会長がこれを招集し議長となる。常任幹事会は本会の運営に係わる事項を審議し、これを幹事会に提案する。事務局長と会計監査は、オブザーバーとして常任幹事会に出席することができる。

4. 幹事会

幹事会は役員と幹事から構成され、会長がこれを招集し議長となる。幹事会は、常任幹事会が提案した本会の運営に係わる事項等を審議し、これを決定する。

5. 事務局

事務局をおき、事務局長がこれを運営する。事務局は、本会の会計事務および名簿管理を行う。

6. 役員および幹事の選出

会長は会員の直接選挙により会員から選出される。事務局長、会計監査、常任幹事は会長

が幹事の中から指名し、委嘱する。幹事は常任幹事会によって推薦され、幹事会で決定される。会員は幹事を常任幹事会に推薦することができる。

第6条 総会

1. 総会は会長が招集し、出席会員をもって構成する。議長は出席会員から選出される。
2. 幹事会は総会において次の事項を報告する。
 - 1) 前回の総会以後に幹事会で議決した事項
 - 2) 前年度の事業経過
 - 3) 当年度および来年度の事業計画
3. 幹事会は総会において次の事項を報告あるいは提案し、承認を受ける。
 - 1) 会計に係わる事項
 - 2) 会則の変更
 - 3) その他の重要事項

第7条 会計

本会の会計年度は1月1日から12月31日までとする。当該年度の経理状況は、総会に報告され、その承認を受ける。経理は、会計監査によって監査される。本会の経費は、会費および寄付金による。

付則

第1 年会費は個人会員 1,500 円、賛助会員一口 50,000 円とする。

第2 本会則は、平成14年6月1日から施行する。

第3 本会則施行後第一期の会長、事務局長、常任幹事にはそれぞれ、第5条に定める規定にかかわらず、平成14年5月31日現在の会長、事務局担当幹事、幹事が再任する。本会則施行後第一期の役員および幹事の任期は、平成14年12月31日までとする。

日本光合成研究会の運営に関する申し合わせ

1. 幹事会：

幹事は光合成及びその関連分野の研究を行うグループの主催者である等、日本の光合成研究の発展に顕著な貢献をしている研究者とする。任期は4年とするが、原則として再任されるものとする。

2. 事務局：

事務局長の任期は2年とするが、本会の運営を円滑に行うため、約5期(10年)を目途に再任されることが望ましい。

3. 次期会長：

会長の引き継ぎを円滑に行うため、次期会長の選挙は任期の1年前に行う。

4. 常任幹事会：

常任幹事会の運営を円滑におこなうため、次期会長は常任幹事となる。

幹事会名簿

- 浅田浩二 福山大学生命工学部
池内昌彦 東京大学大学院総合文化研究科
池上 勇 帝京大学薬学部
泉井 桂 近畿大学生物理工学部生物工学科
伊藤 繁 名古屋大学大学院理学系研究科
井上和仁 神奈川大学理学部
臼田秀明 帝京大学医学部
榎並 勲 東京理科大学理学部
大岡宏造 大阪大学大学院理学研究科
大杉 立 東京大学大学院農学生命科学研究科
大政謙次 東京大学大学院農学生命科学研究科
小川健一 岡山県生物科学総合研究所
小野高明 茨城大学工学部生体分子機能工学科
小俣達男 名古屋大学大学院生命農学研究科
垣谷俊昭 名城大学理工学部教養教育/
総合学術研究科
金井龍二 埼玉大学 (名誉教授)
坂本 亘 岡山大学資源生物科学研究所
櫻井英博 早稲田大学教育学部
佐藤和彦 兵庫県立大学大学院生命理学研究科
佐藤公行 岡山大学 (名誉教授)
佐藤直樹 東京大学大学院総合文化研究科
佐藤文彦 京都大学大学院生命科学研究科
鹿内利治 九州大学農学研究院
重岡 成 近畿大学農学部
島崎研一郎 九州大学大学院理学研究院
嶋田敬三 首都大学東京都市教養学部
沈 建仁 岡山大学大学院自然科学研究科
杉浦昌弘 名古屋市立大学
大学院システム自然科学研究科
杉田 護 名古屋大学遺伝子実験施設
杉山達夫 中部大学生命健康科学研究所
鈴木祥弘 神奈川大学理学部
園池公毅 東京大学大学院新領域創成科学研究科
高市真一 日本医科大学生物学教室
高橋裕一郎 岡山大学大学院自然科学研究科
- 田中 歩 北海道大学低温科学研究所
都筑幹夫 東京薬科大学生命科学部
寺島一郎 東京大学大学院理学系研究科
徳富(宮尾)光恵 農業生物資源研究所
光合成研究チーム
豊島喜則 関西学院大学理工学部
南後 守 名古屋工業大学応用化学科
野口 巧 筑波大学大学院数理物質科学研究科
長谷俊治 大阪大学蛋白質研究所
林 秀則 愛媛大学
無細胞生命科学工学研究センター
原登志彦 北海道大学低温科学研究所
彦坂幸毅 東北大学大学院生命科学研究科
久堀 徹 東京工業大学資源化学研究所
檜山哲夫 埼玉大学理学部 (名誉教授)
福澤秀哉 京都大学大学院生命科学研究科
藤田祐一 名古屋大学大学院生命農学研究科
前 忠彦 東北大学大学院農学研究科
牧野 周 東北大学大学院農学研究科
松浦克美 首都大学東京都市教養学部
三室 守 京都大学大学院地球環境学堂
宮地重遠 海洋バイオテクノロジー研究所
村田紀夫 基礎生物科学研究所
山本 泰 岡山大学大学院自然科学研究科
山谷知行 東北大学大学院農学研究科
横田明徳 奈良先端科学技術大学院大学
バイオサイエンス研究科

編集後記

もう今年も最後の会報です。今年も忙しかったし早かった。忙しさの中で原稿を書いて下さった方々に感謝いたします。今回は東大の加藤さんをお願いし、光合成電子伝達成分の酸化還元測定に関し、電気化学の基礎から、実際の測定法まで、専門家の立場から解説記事をご執筆いただきました。トピックス、研究紹介では、日本光合成研究会シンポジウムでのポスター賞受賞者の中から田邊さんと河地さんに、それぞれ記事を書いていただきました。また、夏の国際光合成会議とサテライトの報告記事を書いて下さった桶川さん、高橋さん、蘆田さん、夏の楽しかった(?) 思い出を綴ってくださり有難うございました。

＜筑波大学 野口 巧＞

日本光合成研究会 2007-2008 年役員

会長	伊藤 繁 (名古屋大学)	
事務局	田中 歩 (北海道大学)	
常任幹事	大岡宏造 (大阪大学)	(日本光生物学協会)
常任幹事	藤田祐一 (名古屋大学)	(会報担当)
常任幹事	野口 巧 (筑波大学)	(会報担当)
常任幹事	鹿内利治 (九州大学)	(会報担当)
常任幹事	鈴木祥弘 (神奈川大学)	(ホームページ担当)
常任幹事	高橋裕一郎 (岡山大学)	(企画担当)
常任幹事	高市真一 (日本医科大学)	(企画担当)
常任幹事	小川健一 (岡山県生物科学総合研究所)	(企画担当)
会計監査	小保方潤一 (名古屋大学)	
庶務	中村洋子 (名古屋大学)	

光合成研究 第17巻 第3号 (通巻50号) 2007年12月25日発行

日本光合成研究会

名古屋大学理学部物理教室

光生体エネルギー研内

〒464-8602 名古屋市千種区不老町

FAX: 052-789-2883

E-mail: photosyn@bio.phys.nagoya-u.ac.jp

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/photosyn/index.html>

郵便振替口座 加入者名: 日本光合成研究会 口座番号: 00140-3-730290