

光合成：量子電磁力学の観点から

坂野 齋

山梨大学工学部 *

(Dated: March 2, 2026)

この小文では、試みに光合成の光化学反応をフォトンブリーディング法（PB法、または、ドレスト光子フォノン援用アニーリング法）[1]で作成された発光ダイオード、光センサーと対応づけて、量子電磁力学の観点から考えてみたいと思います。

川添、大津らによって開発されたPB法は直接遷移型半導体のみならず、間接遷移型半導体からも高効率の発光ダイオードの作製を可能にするプロセスです。作製されたデバイスにおいて、巨大磁気光学効果の発現 [2]、光学フォノンの関与 [3] が実験的に示されています。現象の激しさとフォノンの関与からコヒーレント長の大きな振電系の存在が、また、磁氣的現象の発現から内在VPの関与が示唆されます。また、PBデバイスを時間反転して動作させる、つまり、入力光が光、出力が電流とすると高感度の光センサーになります [4]。

PB法で作成した発光ダイオードにしても光センサーにしても、その動作状態は基底状態から遠い動的状態と考えられます。私たちの理論では、この動的状態を内在VPの「種」である光学型の格子振動（光学フォノン）とそれに同調する電子系が大きなコヒーレント長の振電系を形成することから導こうとしています。基底状態から遠い動的状態を同定するためには、摂動法は無力で変分法が必須と考え、作用（すでに電子系について最適化されたもの）を内在VPの汎関数として最適化する（マクスウェル方程式の解を求める）方法を採用しています。その概念図がFig. 1です。縦軸が作用、横軸がVPの横成分です。光学型の格子振動を電子系からみた外電流密度とみなし内在VP（の横成分）との結合の作用が青線です。それに同調する電子系の非線形効果を考慮した作用が緑線です。これらを合算したものが振電系の作用の赤線です。赤線にはマクスウェルの方程式の解に相当する停留点： A_0, A_1, A_2 が現れますが、最小値原理を採用した場合、 A_0 が基底状態に近い動的状態、 A_2 が求めたい基底状態から遠い動的状態です。概算では A_2 の出現は、キャリア電子の数密度が $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ （代表的な実験条件）のとき、振電系のコヒーレント長が100nm程度あれば可能と見積もっています。今述べた、基底状態から遠い動的状態の出現の仕組みは、散逸構造の理論（プリゴジンが構築したエントロピーに基づく非平衡化学熱力学）から流れと非線形性の役割を抽

*Electronic address: banno@yamanashi.ac.jp

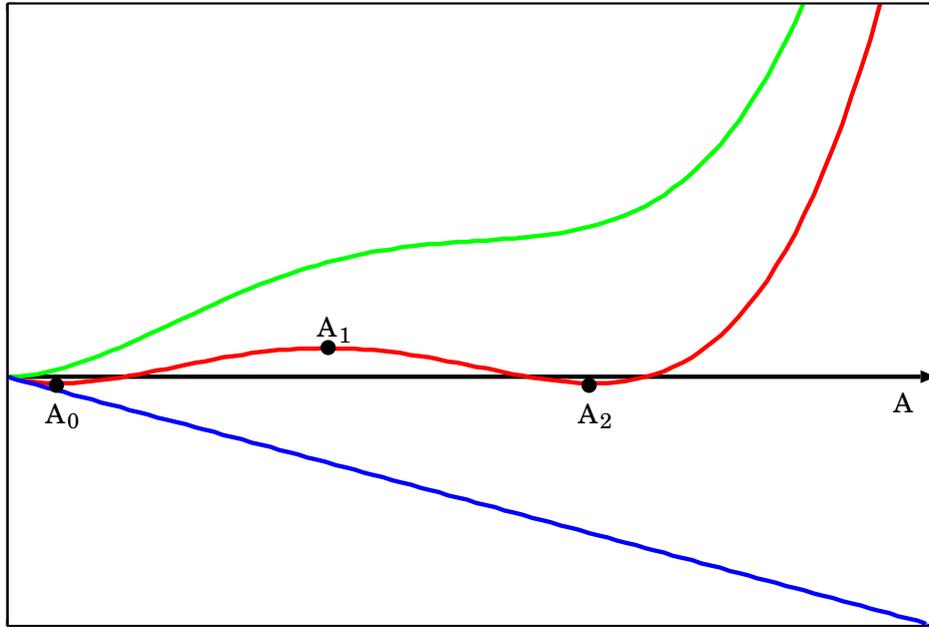


FIG. 1: Ref.[12] の図を再掲. 縦軸は電子系を最適化済みの作用, 横軸は VP の横成分, 緑線: 電子系の複雑な作用, 青線: 横光学型格子振動と VP の結合の作用, 赤線: 緑線と青線を加えた全作用では, 新たな停留点 A_0, A_1, A_2 がマクスウェル方程式の解として現れる. 特に A_2 は基底状態から遠い状態.

出して一般化したものです [8–11].

ここで, 変分関数がゲージ変換不変性を持たない電磁ポテンシャルとすることに違和感があるかもしれません. スカラーポテンシャル, ベクトルポテンシャル (SP,VP) という電磁ポテンシャルは電磁場の本質です [7, 12]. 実際, ラグランジアン, ハミルトニアンは, 電磁ポテンシャルで記述されます. このうち, 本来的に内在している SP と VP の縦成分は, 束縛状態の電子系をつくるために優先的に最適化 (マクスウェル方程式の解を用いて消去) され, ゲージ変換不変な 2 電子間クーロン相互作用に書き換えられます. VP について, ゲージ変換不変でないのはその縦成分のみなので, 残りの, VP の横成分は, ゲージ変換不変で物理現象に直接関係することができます; 超伝導体のマイスナー効果, アハラノフ-ボーム効果はその例です. その意味で, 作用の変分関数として内在 VP の横成分を採用することは合理的です.

さて, 超伝導のマイスナー効果について, ロンドンが「反磁性電流は物質に遍在し, 生体では酵素反応に関わっているだろう」という見解をもっていました [5, 6]. これは マイスナー効果に限定しなければ, 内在 VP が遍在して化学反応, 生物活動に影響をあたえているだろうと読むこともできます. そこで, 上記の基底状態から遠い動的状態の出現の仕組み

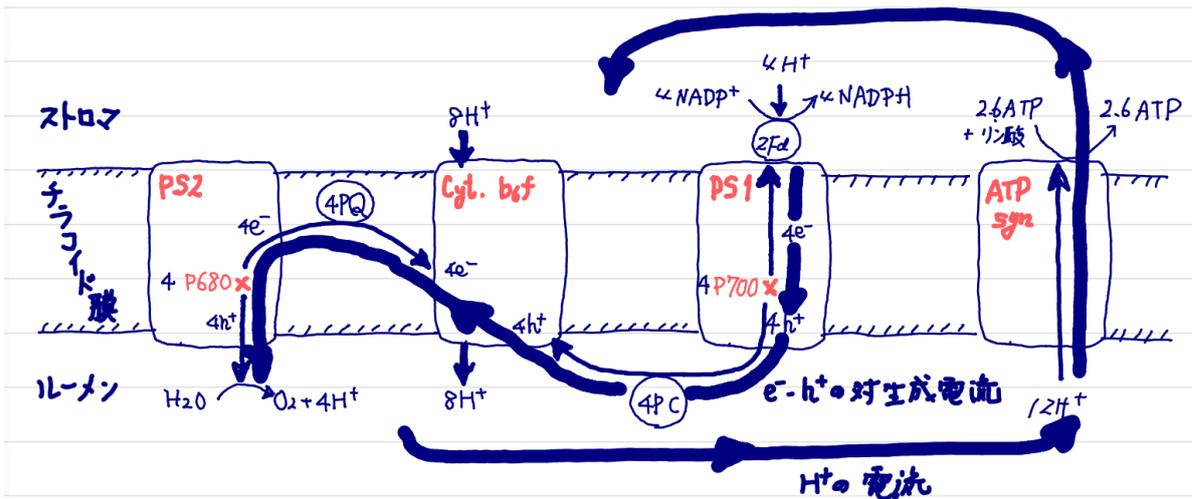


FIG. 2: Ref.[13] の図 6.3.4 を改変. 光励起 4 つが必要な O_2 1 分子発生に規格化. 4 電子の電流がストロマ (チラコイド膜外側) からルーメン (チラコイド膜内腔) に向かって生じ, 12 水素イオンの電流がルーメンからストロマに向かって生じる.

を念頭に, 光合成の光科学反応を量子電磁力学の観点から考えてみたいと思います.

光合成の光化学反応は植物の細胞内小器官である葉緑体内のチラコイド膜で起こります; この膜はストロマ (膜外) の水溶液とルーメン (膜内腔) の水溶液を隔てています. 光科学反応の主な場は, Fig. 2 のとおり, チラコイド膜とそれを貫通する光化学系 2 (PS2), シトクローム b_6f 複合体 (Cyt. b_6f), 光化学系 1 (PS1) であり, 大枠として, 光のエネルギーを入力して, 還元剤であるニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸 (NADPH) とエネルギーを化学的に蓄えるアデノシン三リン酸 (ATP) を出力します. この出力物質たちは次の段階の化学反応で CO_2 から有機物を作るために消費されます [13, 14].

光化学反応について, もう少し細かくみると, はじめに PS2 の反応中心 P680 のクロロフィルが吸光し, 電子-正孔対 (LUMO に励起された電子と HOMO に残った正孔の対) を生成します. 通常, 化学では正孔の概念は使わず, すべて電子の動きとして追跡しますが, 半導体での量子電磁気学との対応を意識して「電子-正孔対」と表現します. 電子は酸化還元電位から見積もられるポテンシャルエネルギーが大きい物質から小さい物質へ差額エネルギーを散逸しながらストロマ方向へ移動し, 正孔もポテンシャルエネルギーが大きい物質から小さい物質へ差額エネルギーを散逸しながらルーメン (チラコイド膜内腔) 方向へ移動します. ここにおいて, チラコイド膜内で電荷分離がなされ, ストロマからルーメンへ向かう電子-正孔の対生成電流が生じることになります.

ルーメンに達した PS2 起源の正孔は水分子を酸化して酸素ガスと水素イオンを発生させ

ます。一方、ストロマ近傍に達した PS2 起源の電子はプレストキノ (PQ) を介してチラコイド膜を貫通する Cyt.*b₆f* に達します。

PS1 でも、反応中心 P700 のクロロフィルが吸光し、電子-正孔対を生成しますが、このうち正孔はプレストシアニン (PC) を介して Cyt. *b₆f* に達し、そこで PS2 起源の電子と対消滅します。そのエネルギーとキノン反応回路を利用して、ストロマ側の希薄な水素イオンを、すでに濃厚な水素イオンがあるルーメン側にポンプアップして、化学ポテンシャル高い水素イオンをつくります。この水素イオンはチラコイド膜を貫通する ATP 合成酵素 (ATP synthase) の駆動力となりルーメン側に ATP を生成します。一方、PS 1 起源の電子はルーメンに達しフェレドキシン (Fd, 鉄硫黄クラスターを内包するタンパク質) を介して NADP 還元酵素がニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸 (NADPH) を生成します。

ここで、チラコイド膜の PS2, Cyt.*b₆f*, PS1 を流れる電子-正孔の対生成電流密度は光化学反応という電磁現象を伴う動的状態の物理量とみることができます。PB での考えを援用すると、もし、コヒーレント長が 100nm 程度の振電系があつて、十分な数のキャリア; π 電子が参加できるならこの電流密度は増強され、高効率な光化学反応が起きる状態が、基底状態から遠い動的状態として実現されることとなります。

PB でつくった発光ダイオードは電流を入力して高効率でオンシエル光を出力しますが、動作を時間反転させたものは高感度光センサーとしてオンシエル光を入力、電流を出力としたものになることは先に述べました。光合成の光化学反応も、大雑把にはオンシエル光を入力して、電流を出力 (実際は電流密度のシンクとして NADPH, ATP が生成される) と考えられると思います。

PB デバイスとの対応付けで最も重要なことはコヒーレント長が 100nm 程度の振電系の存在です。まず、対生成電流が流れるのは構造をもつチラコイド膜内とそれを貫通するタンパク質複合体であり格子振動が存在、関与できます。また、PS2, PS1 に存在する π 電子をもつ分子は、反応中心のクロロフィル、過剰な反応を抑制する β -カロテンがあります。さらに、PS2, PS1 をそれぞれ中心に取り囲む、数十個のクロロフィルを含む集光複合体が形成されています。試みに、Ref.[15] の PS1 とその集光複合体の構造解析から考えます。100nm \times 100nm \times 40nm の体積にクロロフィルだけを数えると 57 個あります。100nm 程度の構造がありますが、そこが振電系をなすとして、参加可能な π 電子密度は、(1 クロロフィルあたりの π 電子数を 10 とすると) $57 \times 10 / 100 \times 100 \times 40 \text{nm}^3 \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ であり、先にのべた PB デバイスの代表的なキャリア密度と近いオーダーであり、否定的な数値ではありません。

ロンドンの先見を視野にいれ、光合成の光化学反応の効率の指標である対生成電流密度への内在 VP の効果を量子電磁力学の観点から考えてみることは、意味があることかもしれ

ません。私自身、化学出身でもあり興味深く思っています。

- [1] T. Kawazoe and M. A. Mueed and M. Ohtsu, *Appl. Phys. B*, **104** p.747–754(2011); M. A. Tran, T. Kawazoe, and M. Ohtsu. *Appl. Phys. A*, **115** p.105-111(2014); M. Ohtsu, "Silicon Light-Emitting Diodes and Lasers" (Springer International Publishing, Switzerland, 2016).
- [2] N. Tate, T. Kawazoe, W. Nomura, and M. Ohtsu, *Scientific Reports* **5** p.12762-1-7 (2015); M. Ohtsu,
- [3] N. Wada, M. A. Tran, T. Kawazoe, M. Ohtsu, *Appl Phys A***115** p.113-118(2014).
- [4] H. Tanaka and T. Kawazoe and M. Ohtsu, *Appl. Phys. B*,**108** p.51–56(2012).
- [5] F. London. *Superfluids vol.1, Macroscopic Theory of Superconductivity*. Dover Publications, Inc., New York, 1950; F. ロンドン and 井口家成 (訳) . *超伝導のマクロ理論*. 講談社, 東京, 1974.
- [6] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「化学反応とドレスト光子～フリッツロンドンの先見とオフシエル電磁場の量子化～」(2019/12/24).
- [7] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「電磁ポテンシャルとドレスト光子～電場・磁場での記述の破綻が現れるとき～」(2021/04/28).
- [8] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「ドレスト光子が関わる量子的散逸構造～最小作用の原理 vs. 最小エネルギーの原理～」(2022/02/23).
- [9] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「流れを考慮した最小作用の原理による量子的散逸構造の探索」(2022/10/30).
- [10] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「エネルギー非共鳴過程の作用積分～間接遷移型半導体の発光と触媒反応～」(2023/06/28).
- [11] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「オフシエル電磁場系の作用と散逸構造系のエントロピー」(2024/03/04).
- [12] 坂野 齋, オフシエル科学フォーラム「フォトンブリーディングデバイスの研究における先入観」(2025/06/25).
- [13] 東京大学光合成教育研究会, "光合成の科学", 第5章, 第6章 (東京大学出版会,2007).
- [14] 日本光合成学会, "光合成" 第II部 (朝倉書店,2021).
- [15] X. Qin, M. Suga, T. Kuang, and J.-R. Shen, *Science* **348** p.989-995 (2015).