

# ETL NEWS

ISSN 0011-846X



## 電総研ニュース

脳細胞はおおまかな情報を見出しにして詳細情報を処理  
青色コヒーレント光の高効率発生  
太陽電池を作ってみよう  
その他

**1999.9** vol.596

# 脳細胞はおおまかな情報を見出しにして詳細情報を処理 - 脳型ビジョンに応用 -

超分子部表情認知ラボ 山根 茂\*

生命工学工業技術研究所 生体情報部 菅生康子

首席研究官 河野憲二

e-mail: yamane@etl.go.jp\*

## 1. はじめに

我々は物事を分類して覚えている。顔かどうか、顔であれば人間か、猿か、人間であれば表情はどんなか、髪型は? というように、おおまかな分類があり、さらにその中を細かく分類している。

おおまかな分類や詳細な分類が脳で行われているのだろうか、行われているとすると、脳細胞はそれらの分類をどう行っているのだろうか。これらの疑問に答える研究成果が電総研と生命研の研究で明らかにされ、Nature に 8 月 26 日付で掲載された。

側頭葉の脳細胞は顔を見た直後に、「ヒトか、サルか、図形か」というおおまかな情報を保持し、約 20 分の 1 秒 (50 ミリ秒) 遅れて「表情は、個体は」という顔の詳細な情報を保持しだすことが明らかとなった。

## 2. 側頭葉の脳細胞の活動を記録

顔や物体を認識する中枢と云われている側頭葉の脳細胞は、目からの画像情報を視覚一次野などを経て、受け取り、認知のための処理を行っている。今回の成果は二ホンザルにサルやヒトの顔、図形などを見せて、側頭葉の脳細胞の活動を記録して分ったものである。実験で見せたサルの顔は4頭から得られた16枚で、各頭4種類の表情をしている。ヒトの顔は3

人から得られた12枚の顔で、各人4種類の表情をしている。顔以外に色と形の異なる10枚の図形刺激も使用した(図1)。

サルにランダムな順で一枚づつ刺激の顔を見せて、そのときの脳細胞の活動を記録する。そうすると、顔によって脳細胞の応答に変化があることがわかった。ある脳細胞の例を説明しよう。この細胞は図形にはほとんど応答しないが、顔には応答する。普通の顔には顔呈示直後に応答してすぐにその応答は止まる。一方、サルが大きく口を開けた顔には呈示直後に応答し、その応答が顔がでている間中続いている。

このような応答の変化が意味するところを定量的に表す方法として、情報量の解析を行った。この方法は未だ一般的に広く使われている訳ではない。NIH の B. J. Richmond 博士や電総研の北澤 茂主任研究官が先駆的に解析方法を開発してきた。情報量というのは「外界情報の識別、判断、抽出や行動の選択、運動の方向など、個体にとって意味のある情報が脳細胞の活動にどの程度含まれているかを定量的に表す指標」である。例えばAとBを完全に識別するには、0と1の2状態があればいいので、1ビットの情報量が必要となる。もし、脳細胞がAには応答があり、Bには応答がなければ、AとBを識別できるから1ビット



図 1

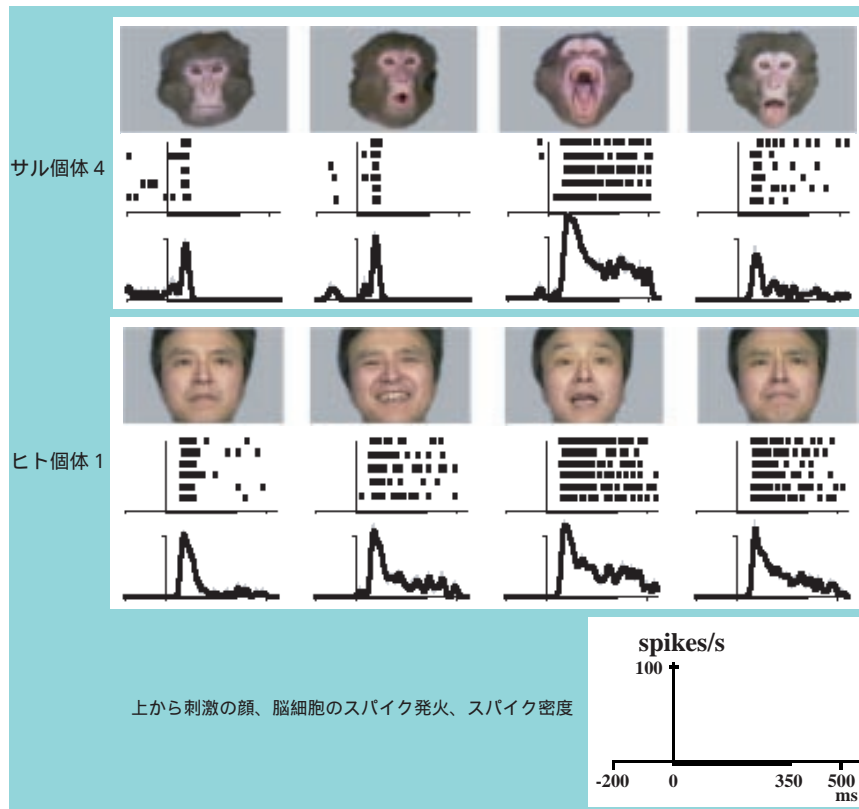


図 2

の情報を持っているということになる。実際の応答はAとBで完全に応答が分かれることはないので、1ビットより小さい値になる。

そこで、図2の脳細胞がおおまかな分類情報や詳細情報をどれだけ持っているか、ここでは北澤博士の方法で解析した。

\* おおまかな分類：ヒトとサルと図形の3個に分類する情報

\* 詳細な分類：1．サルの個体、2．サルの表情、3．ヒトの個体、4．ヒトの表情

### 3．情報量の解析

脳細胞の応答は図2にあるように、時間変化が激しい。時間的に情報量がどう変化しているかを知るために、解析には50ミリ秒の観測窓を設け、その50ミリ秒内での顔に対する応答(スパイク/秒)を使って、おおまか・詳細、の分類に関する情報量を計算した。そうするとその窓の中心時間での情報量が求まることになる。そしてその窓を8ミリ秒ごとに時間軸上を移動させると、情報量の時間変化が求まることになる。図3はこうして求めた情報量の時間変化である。

赤線はおおまかな情報、黒線はサル表情に関する

詳細情報の時間変化である。おおまかな情報の方が詳細より早く出現していることが分かる。ページに塗りつぶしたヒストグラムは脳細胞の応答である。おおまかな情報は応答の始まりに一致して出現していることがわかる。図3の脳細胞のように、おおまかと詳細の情報の両方を持っている脳細胞すべてから得られた情報の変化を重ね書きしてみると図4のようになり、おおまかな情報が詳細情報より約50ミリ秒先行していた。

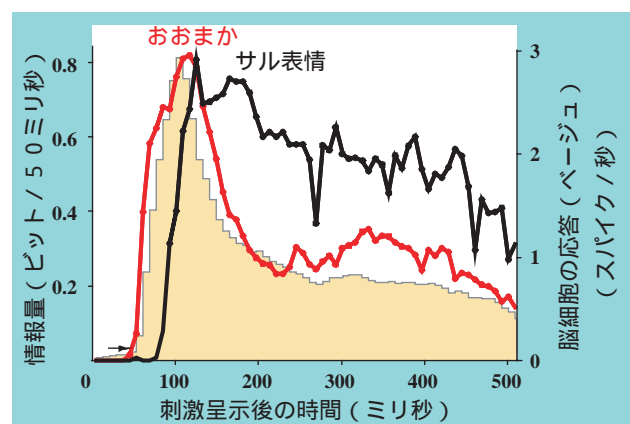


図 3

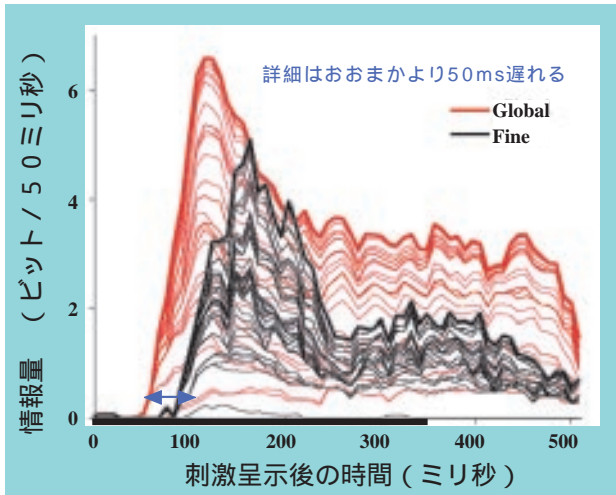


図 4

4. 脳細胞の情報処理

これらの脳細胞は前頭葉、頭頂葉、嗅内皮質、海馬、扁桃体に応答を送っている。その応答を受け取る脳の領野では最初のおおまかな情報を使って、情報処理のモードを事前に変えることができ、詳細情報の迅速、適切な処理ができることとなる。いわば、おおまかな先行情報は見出しのようなものであろう。この見出しの利用は迅速適切処理という長所ももつが、反面、連想や行動の範囲が制限を受けやすいという短所もある。例えば人の顔を見て、“雨が降りそう”とは連想しにくい。

【脳型ビジョン】

人間の視覚系はコンピュータではまねのできない情報処理装置である。その原理を利用して脳型ビジョンを実現しようとする研究が、当所の脳情報処理工学応用ラボなどで行われている。コンピュータ

でも人間でも視覚情報処理実現の困難な点は、カメラに写る平面像から三次元外界を迅速にそして精密に推定しなければならないということである。

それを解決するモデルとして提案されているのが、脳の知見に基づく双方向視覚情報処理モデルである。そのモデルでは、網膜の画像情報を受け取る視覚野（後頭葉）から側頭葉の経路を順方向とし、順方向の処理と逆方向の処理との相互作用で、外界の精密な推定を行おうとするものである。神経回路の解剖学的知見でも双方向結合が存在している。

そのモデルでは、最初の順方向処理でラフな一撃推定を行い、その結果を逆方向結合で低次視覚系にもどし、入力情報と比較し、順方向信号が修飾されて再び側頭葉でより精密な推定が行われる。

本研究結果とモデルの動作とを比較してみると、モデルの最初の一撃推定は、側頭葉の脳細胞が応答しだし、おおまかな情報を表すことに相当するのだろう。その後の逆と順方向処理の相互作用による推定の結果が、詳細情報に相当することになるのだろう。

5. まとめ

双方向視覚情報処理モデルの振る舞いに相当する信号が、実際に計測された意義は大きく、今後、脳型ビジョンの実証研究が加速され、その実現に一歩近づくことになることを期待している。その機構は一般の連想記憶にも応用可能である。

P.S. 本研究成果は目標達成型脳研究「ヒトを含む霊長類のコミュニケーションの研究」による研究成果である。

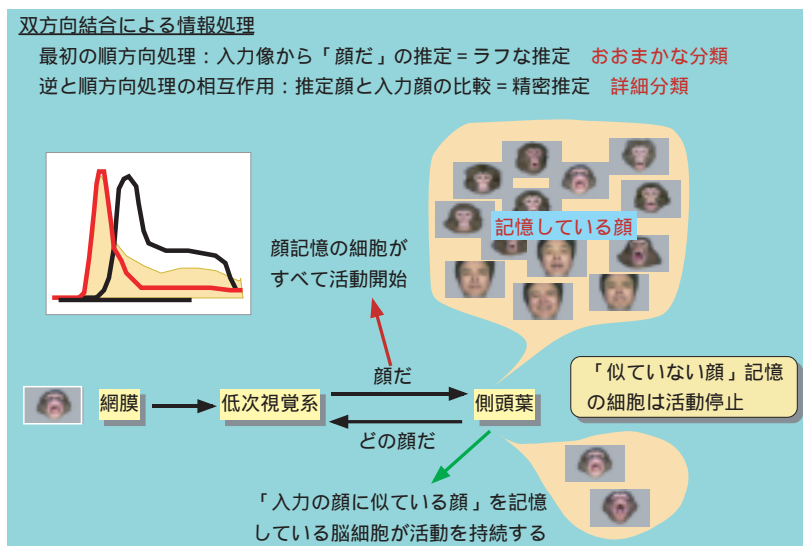


図 5

# 青色コヒーレント光の高効率発生

## - セミモノリシック共振器による第2高調波発生 -

### Highly Efficient Blue Light Generation with a Semi-monolithic Resonator

光技術部 土田英実

Optoelectronics Division Hidemi Tsuchida

e-mail: tsuchida@etl.go.jp

A semi-monolithic standing-wave resonator has been constructed and employed for frequency doubling of a Ti:sapphire laser. The resonator consists of a 5 mm long KNbO<sub>3</sub> crystal with dielectric coatings on both end faces and a spherical mirror with 20 mm radius of curvature. With 31.2 mW input power the second harmonic power of 11.4 mW at 430.7 nm has been generated corresponding to the conversion efficiency of 36.5 %.

#### 1. はじめに

光記録、リソグラフィ、ディスプレイ、分光、医療などへの応用を目的として、短波長領域におけるコヒーレント光発生の研究が高い関心を集めている。近年 GaN 系半導体レーザーが著しい進展を遂げているが、非線形光学結晶を用いた第2高調波発生は、緑色から紫外に渡る波長域のコヒーレント光を発生する有効な手段である。種々の非線形光学結晶の中で、ニオブ酸カリウム (KNbO<sub>3</sub>、以下 KN と略す) はその非線形光学定数の大きさから、近赤外域の Ti:sapphire レーザーや AlGaAs 半導体レーザーの第2高調波発生に利用されている。連続動作のレーザーを用いた波長変換では、結晶をレーザー共振器内、あるいは外部の共振器内に配置して、変換効率を増大する手法が用いられる。外部共振器は鏡、レンズなどの光学素子により構成され、共振により結晶内での光強度が増大するように設計される。

当所では非線形光学、量子光学研究の一環として、非線形光学結晶を用いた第2高調波発生とパラメトリック波長変換、およびこれを利用した光の量子状態制御の研究を進めている。これまでに外部リング共振器中に配置した KN 結晶を用いた第2高調波発生実験

で、入力パワー470mWに対して2倍波パワー145mWの発生に成功し、30.1%の変換効率を達成した。変換効率は入力パワーを上げることにより増大できるが、

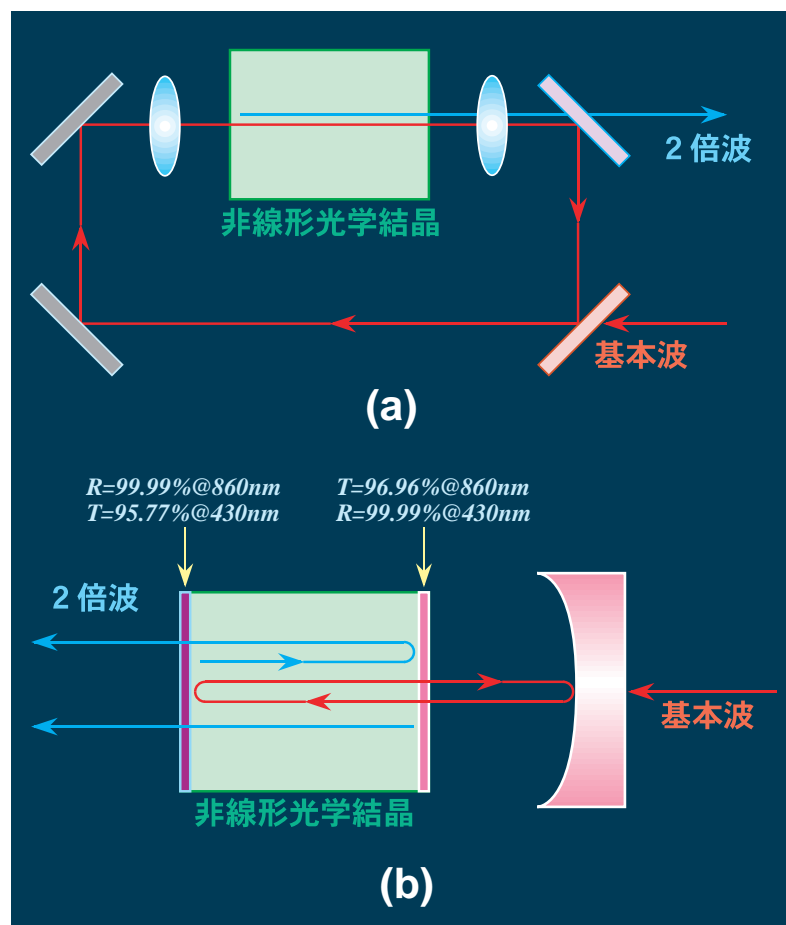


図1 (a) 進行波型リング共振器  
(b) 定在波型セミモノリシック共振器の構造

実用的な観点からは、高い変換効率をより小さい入力パワーで実現することが望ましい。測定結果と理論計算の比較により、変換効率を制限している要因は、共振器内で基本波が受ける光学的損失であることがわかっている。共振器は種々の光学素子で構成されるが、これらは必要に応じて基本波、2倍波に対して高反射(HR、High-Reflection)あるいは減反射(AR、Anti-Reflection)コーティングを施して用いられる。現状技術では2波長に対する完全なHR、ARコーティングは困難であり、その不完全性から損失が生じる。

共振器損失の問題を克服してより高い変換効率を得るため、当所では独自構造のセミモノリシック共振器を開発した。従来のリング共振器に比較すると、セミモノリシック共振器では、構成する光学素子数を減らすことが可能で、コーティングの不完全性に起因する損失を低減できる。長さ5mmのKN結晶と1枚の球面鏡を組み合わせた共振器を試作して実験を行った結果、わずか31.2mWの入力パワーに対して、36.5%の変換効率が達成された。

## 2. 共振器構成と変換効率

図1(a)は以前の実験で用いた進行波型リング共振器の構成を模式的に示したものである。共振器は4枚の鏡、2枚の凸レンズ、およびレンズ間に配置された非線形光学結晶で構成される。第2高調波発生にはこのような四角形の構成、およびレンズを用いない8の字型の構成が一般的に用いられている。共振器内では入射する基本波のみが共振し、2倍波は鏡を通して外部に取り出される。

発生する2倍波パワー $P_2$ と基本波パワー $P_1$ の関係は次式で表される。

$$P_1 = \frac{\sqrt{P_2} [2 - \sqrt{1 - T} (2 - L_1 \sqrt{P_2 E_{NL}})]^2}{4 T_1 \sqrt{E_{NL}}} \quad (1)$$

ここで、 $T_1$ と $L_1$ は基本波に対する入力側の鏡の透過率、および共振器内部の損失である。パラメータ $E_{NL}$ は共振器がない場合の変換効率で、結晶の2次非線形光学定数とビーム形状により決定される。図2は異なる損失 $L_1$ に対して、 $P_2$ と $P_1$ の関係をプロットしたものである。計算にはリング共振器に対する測定

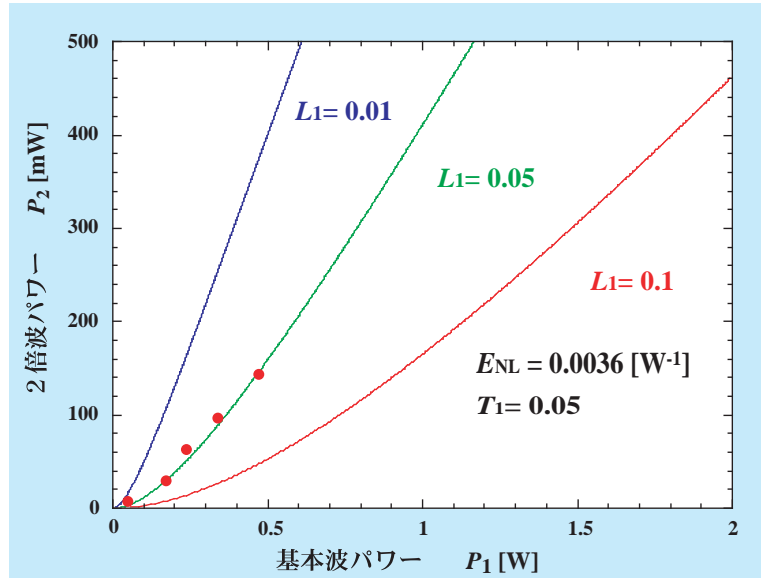


図2 2倍波パワーと基本波入力パワーの関係

値 $E_{NL} = 0.0036 [W^{-1}]$ 、 $T_1 = 0.95$ を用いた。この図より、変換効率が共振器損失に大きく依存し、変換効率増大のためには共振器損失の低減が重要であることがわかる。はリング共振器を用いた実験の結果で、損失は $L_1 = 0.05$ に相当する。

本研究では図1(b)に示す構造の定在波型セミモノリシック共振器を採用した。共振器は端面に誘電体多層膜を蒸着した非線形光学結晶と、結晶近くに配置した球面鏡から構成される。7個の光学素子を用いたリング共振器と比較すると、必要な光学素子は2個に減少する。結晶の左端面は基本波に対してHR、2倍波に対してAR、一方右端面は2倍波に対してHR、基本波に対してARになっている。基本波は右側から入射し、2倍波は左側から取りだされる。リング共振器と同等の機能をわずか2個の光学素子で実現するため、実際の構成に当たっては高度なコーティング技術が要求される。

## 3. 第2高調波発生実験

図3に実験装置とセミモノリシック共振器の写真を示す。基本波光源として、スペクトル線幅55kHzの単一周波数Ti:sapphireレーザーを用いた。このレーザーは非線形光学や量子光学の実験用光源として、当所でも独自に開発されたもので、市販の装置に比較して高いスペクトル純度を有する。セミモノリシック共振器は長さ5mmのaカットKN結晶と、曲率半径20mmの球面鏡で構成される。波長860、430nmに

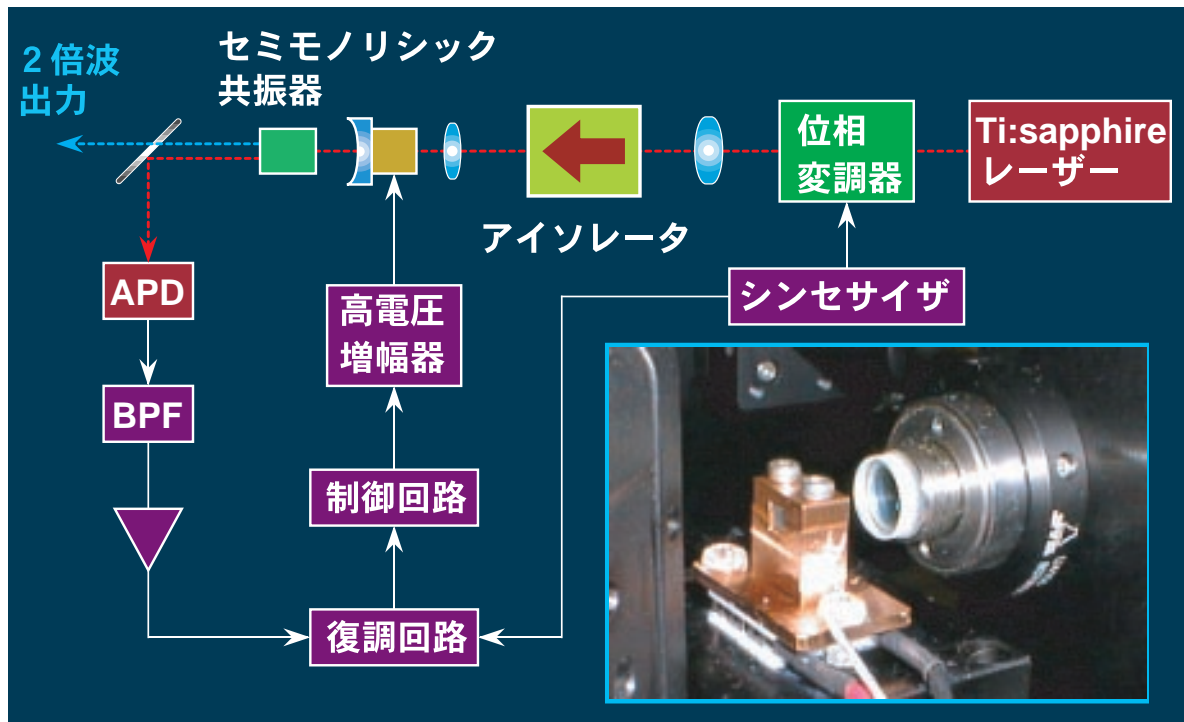


図3 実験装置とセモノリシック共振器

おける結晶端面の反射率  $R$ 、および透過率  $T$  は図 1 (b) に示されている。結晶は銅ブロック上に配置し、ペルチェ素子により温度制御して位相整合を達成した。球面鏡の反射率は 860nm において 98.0% で、周波数同調のため piezoアクチュエータに取り付けて使用した。レーザー光は 2 枚のレンズを用いて共振器モードに整合するように入射した。結晶と鏡の距離は、結晶の左端面で基本波のスポットサイズが 27mm になるように設定した。リング共振器に比較すると、入射側の鏡からレーザーに戻る反射光の量が大きいので、光アイソレータを用いた。

安定な第 2 高調波発生を実現するため、FM サイドバンド法を利用して、共振器を入射する基本波の周波数に安定化した。結晶の左端面からわずかに透過する基本波を 2 倍波から分離した後、アパランシェフォトダイオード (APD) で受光した。APD 出力はフィルタ (BPF) で変調成分を取り出した後ミキサにより復調し、制御回路、高電圧増幅器を介して piezo アクチュエータに帰還した。

理論と実験を定量的に比較するため、(1) 式中のパラメータの測定を行った。共振器がない場合の変換効率より、 $E_{NL} = 0.0048 [W^{-1}]$  が得られた。これはリング共振器の実験で得られた値の 1.3 倍である。この違いはセモノリシック共振器において、結晶内で

のビーム径がより小さくなるように設計されているためである。結晶が位相整合からはずれた状態で共振器のフィネスを測定し、損失を測定した結果、 $L_1 = 0.018$  が得られた。これはリング共振器の  $1/2.8$  になっており、セモノリシック構造の効果が現れている。

図 4 に理論計算と測定結果を示す。A は波長 430.7nm の 2 倍波パワーと基本波入力パワーの関係である。は測定値で、基本波入力パワーが 0 - 31.2 mW の範囲で測定を行った。変換効率は入力パワーとともに増加し、入力パワーが 31.2mW の場合に、最大の 2 倍波パワー 11.4mW が得られた。これは 36.5% の変換効率に相当する。実線は (1) 式による理論計算結果で、測定値とほぼ一致している。入力パワーが 25mW 以上で両者にわずかな差が見られるが、これは結晶内での基本波吸収によるものである。KN 結晶では 2 倍波が存在する場合に、基本波の吸収が増加することが知られており、共振器損失の増加により変換効率が低下する。この効果は図 4 B で示される結晶温度の入力パワー依存性からも明らかである。波長 430.7nm の第 2 高調波発生に対する位相整合温度は、Sellmeier 方程式から 31.95 C と算出されるが、測定値はこれより 1 C 以上低く、入力パワーとともに低下する傾向にある。これは結晶中の基本波吸収による発熱が原因である。この実験では Ti:sapphire レー

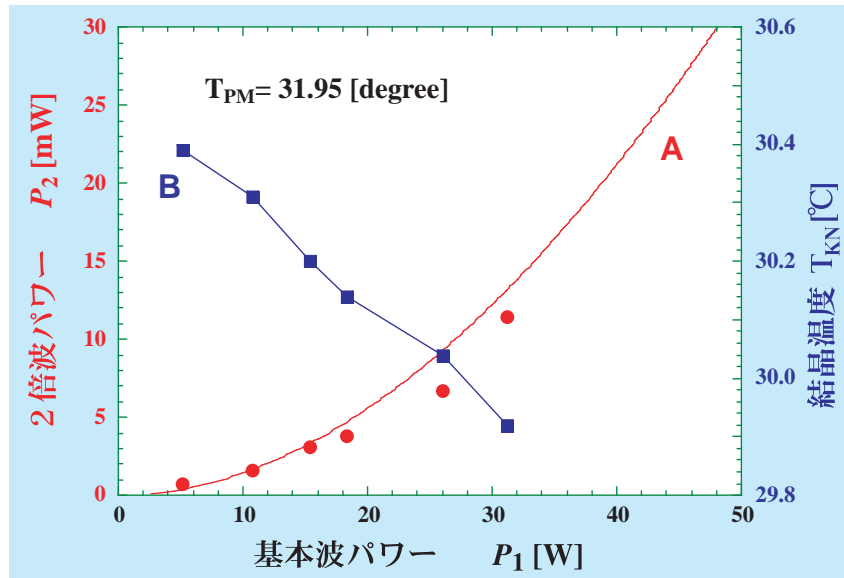


図4 2倍波パワー (A) と結晶温度 (B) の基本波入力パワー依存性

ザーの励起光源の制約から、入力パワーは31.2mW以下に制限されたが、図4からわかるように、入力パワーの増大により50%以上の変換効率が期待できる。

4.まとめ

独自構造のセモノリシック共振器を開発し、第2高調波発生において36.5%の変換効率を達成した。リング共振器を用いた場合と比較すると、わずか1/15の入力パワーでより大きな変換効率が得られたことに

なる。これは共振器損失の低減によるものであり、セモノリシック共振器の有効性が示された。50mW程度の入力パワーは半導体レーザーで容易に実現可能なレベルであり、セモノリシック共振器を用いた小型の短波長コヒーレント光源が実現できることを示唆している。今後は変換効率の一層の向上と量子相関光子対発生への応用を展開する予定である。

研究課題：量子相関フォトンクスに関する研究

# 太陽電池を作ってみよう

高校生のための太陽電池講座 - サイエンスキャンプ'99

電子デバイス部 坂本邦博<sup>\*1</sup>、板谷太郎<sup>\*2</sup>  
e-mail: ksakamot@etl.go.jp<sup>\*1</sup>, itatani@etl.go.jp<sup>\*2</sup>

## 1. 出会い

- 太陽電池ってどうやって電気を作るの? -

**陽子さん**：太陽電池って、電卓についてたり、最近屋根の上に乗っかってるのをよく見るし、地球にやさしいエネルギーなんて聞くんだけど、こんな板切れからどうして電気が作れるの？

**博士**：その質問に答える前に、半導体について勉強してみよう。半導体って聞いたことあるかね？

**太郎くん**：パソコンやテレビ、ゲームや携帯電話にも使われているんだよね。もちろん太陽電池にも。最新のハイテクを支える「産業の米」だよね。

**博士**：そうじゃ。半導体研究の歴史は60年以上もある。第二次大戦中にレーダーの電気信号の変換に黄鉄鉱と呼ばれる自然鉱物の半導体を使ったのが半導体利用の始まりじゃ。戦後、人工の材料を使うようになり、ゲルマニウムからはじまってシリコンを使うようになってから爆発的に発展してきたんじゃ。半導体製品の生産額は、98年度には2,500億円もあるんだよ。ところで半導体はどういう性質を持っているか知っているかな？

**太郎くん**：電気をよく通すのが金属で、通さないのが絶縁体。その中間が半導体だよね。無線の免許取るときに勉強したんだ。

**陽子さん**：半導体ってどっちつかずのやつ。

**博士**：ご名答。半導体は中途半端に電気を流すから、いろいろと細工すると電気の流れやすさを変えられて、役に立つ機能を持たせる事ができるんじゃ。竹を割ったような性質の金属や絶縁体にはできん芸当じゃな。

**陽子さん**：私、中途半端なやつはきらい。

### ●シリコンってすごいかも！

**博士**：いやいや、ちっとも中途半端じゃないぞ。半導体はたいそうデリケートなやつで、ちょっとでも変な物質が混ざってしまうと性質が変わってしまう。半導体を上手に使いこなし狙った電気的な性質を持たせるには、非常に純粋な材料を用意する必要がある。現在のシリコン結晶の純度を知っとるかい？

99.99999999%と9が10個続くんじゃ。つまり、シリコン原子100億個に1個不純物原子が混じっている割合じゃ。徹底しとるじゃろ。だいたい世界中の人間の中で1人しか変なやつがおらんってことじゃ。君たちのクラスでも変なやつが何人かおるだろう。この研究所ときたらわし以外は皆変人じゃ。また、シリコンは地球上にいくらでもある。シリコンの原料は何か知っとるかい？砂じゃよ。砂の中にはシリコンの酸化物、つまり石英がいくらでもある。地球の元素の20%はシリコンだとも言われておる。どんどん太陽電池を作っても無くなる心配はないぞ。

**陽子さん**：シリコンってちょっとはやるじゃん。でも純粋なやつってつき合いづらいよ。

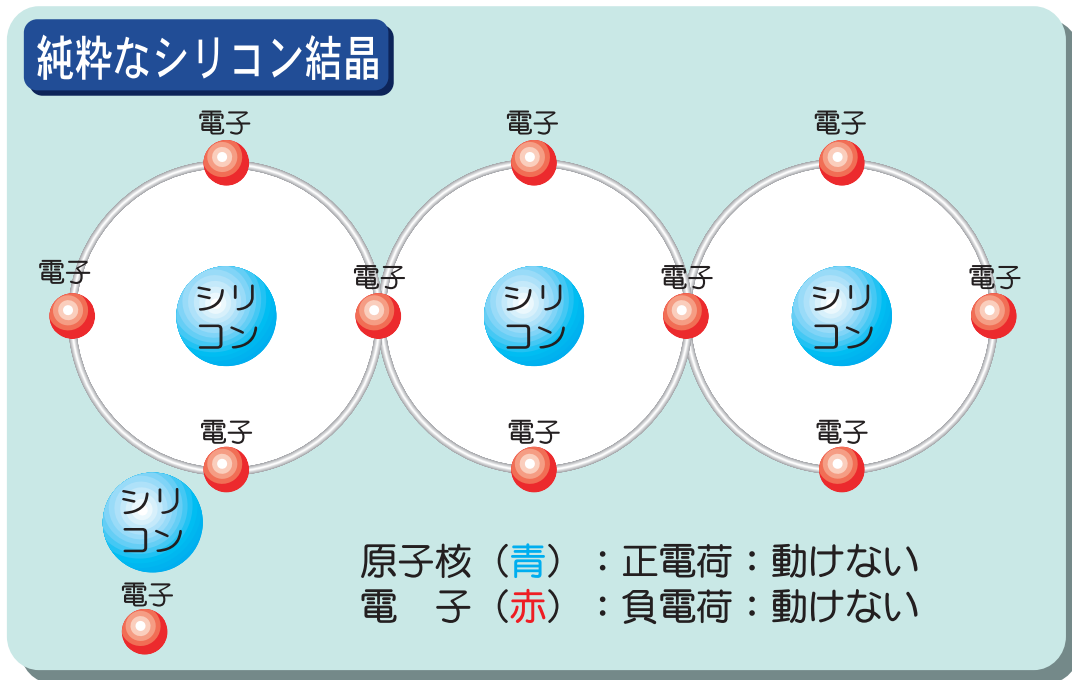
### ●ドーピング？ n型半導体？ p型半導体？

**太郎くん**：純粋なシリコンにわざと不純物を入れるんだよね。

**博士**：それをドーピングという。もともとは麻薬とか興奮剤を与えるという意味で、スポーツの世界では悪い意味に使われるが、半導体では一番重要な技術じゃ。

陽子さん：純なやつをヤクで手なずけるってわけ。

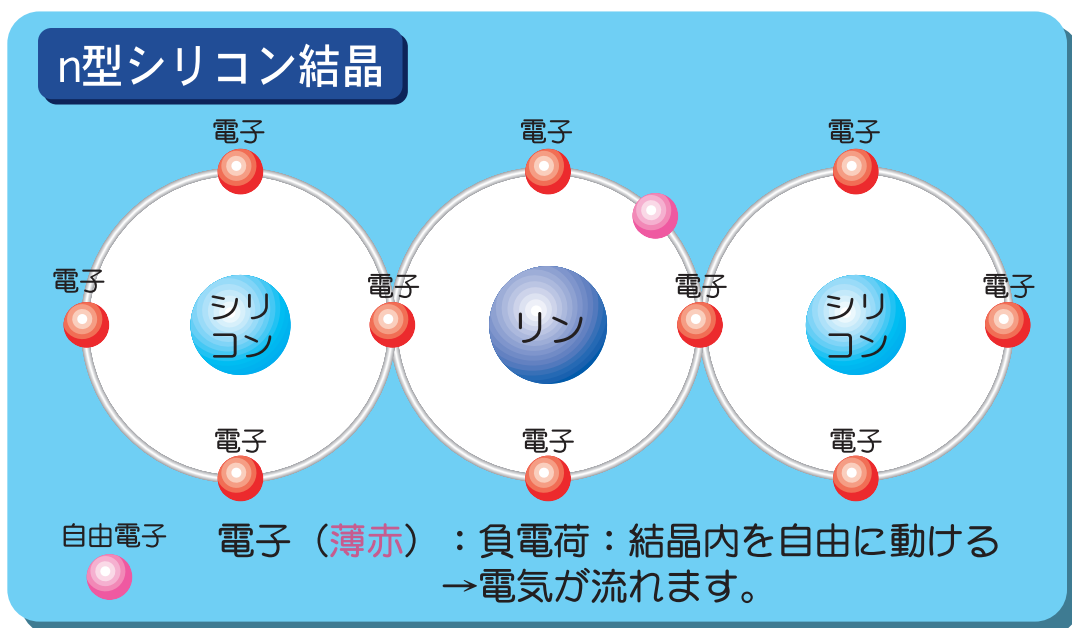
博士：うまいのう。まず純粋なシリコン結晶の中を見てみよう。



結晶の中ではシリコンの原子が規則正しく並んでおる。原子の中心にはプラスの電荷を持つ原子核があり、そのまわりをマイナスの電荷を持つ電子が回っていることは知っとるじゃろ。シリコンの結晶の中では、原子の一番外側を回っている電子は隣り合ったシリコン原子の間で共有されて、原子と原子を結びつけておるんじゃ。どの電子もしっかりシリコン原子核とシリコン原子核の間に収まっていて、勝手にふらふら動くことはできん。

太郎くん：電子が動くと電流が流れるから、純粋なシリコンは電気を流しにくいんだね。

博士：そうじゃ。電気が流れなければ電気回路には使えん。そこでシリコン結晶中に少しだけリンを入れてみる。シリコン原子の場所にリン原子が入るとこうなる。

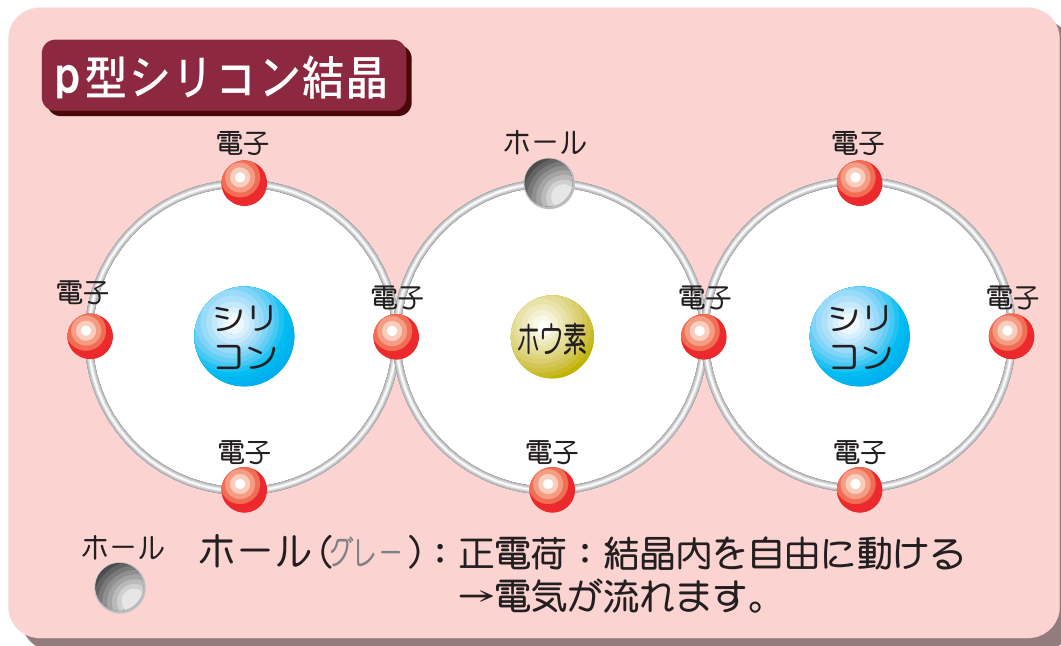


リン原子の一番外側を回っている電子の数はシリコンよりも1つ多いんじゃ。この1つ余った電子は収まる場所が無くて、結晶内を勝手にふらふら動くんじゃな。こいつを自由電子と呼ぶ。自由電子が動くと、シリコン半導体中を電気が流れる。純粋なシリコンにリンをドーピングしたらドーピングしたリン原子の数だけ自由電子ができて電気が流れやすくなるんじゃ。陽子君、電子の持つ電荷はプラスかねマイナスかね？

陽子さん：マイナス。物理で習った。

博士：そのとおり。マイナス(negative)の電荷を持つ自由電子が電気を伝えるから、リンをドーピングした半導体をn型半導体という。

今度はシリコン結晶中に少しホウ素を入れてみよう。



ホウ素原子の一番外側を回っている電子の数はシリコンよりも1つ少ない。ホウ素原子がシリコン原子と置き換わると、そこでは電子の足りない電子の無い穴がひとつできるじゃ。この穴をホールと呼ぶ。電子は原子核の周りをぐるぐる回っているから、近くの穴にすっぽり入ってしまうことがよく起こる。ある電子が近くのホールに入ったらどうなる？電子がもといいた場所が空っぽになるじゃろう。今度は、そこが新たにホールになるんじゃ。ホールに電子が次々入ってくることにより、ホールは半導体中を自由に動けるんじゃ。ホールは電子の抜けた穴だからプラスの電荷を持つ。プラス(positive)のホールが電気を伝えるから、ホウ素をドーピングした半導体をp型半導体というんじゃ。

太郎くん：ちょっと待って。穴が動くってよくわかんないなあ。本当に動いているのは電子なんでしょ？

陽子さん：映画館が混んでてさ、座席が一つだけ奥の方で空いてたとするじゃん。順番に詰めてもらって通路の席を空けてもらうのを暗闇で見たら、空いている席が動いているように見えるよね。

博士：そうじゃそうじゃ。本来は非常にたくさんある全ての電子の運動を調べないと電気の流れ方がわからないのじゃが、ホールという仮想的なプラスの粒子を考えると、ほんの少数のホールの運動で簡単に電気の流れが説明できるんじゃ。学級日誌には欠席者の名前を書いて出席者の名前は書かんじゃ。どっちを書いても誰が出席したかわかるなら、少ない欠席者の方だけを書くのが人情っていうのと同じじゃ。

● p型半導体とn型半導体をくっつけると - pn接合

陽子さん：p型半導体とn型半導体のどっちを使って太陽電池をつくるの？

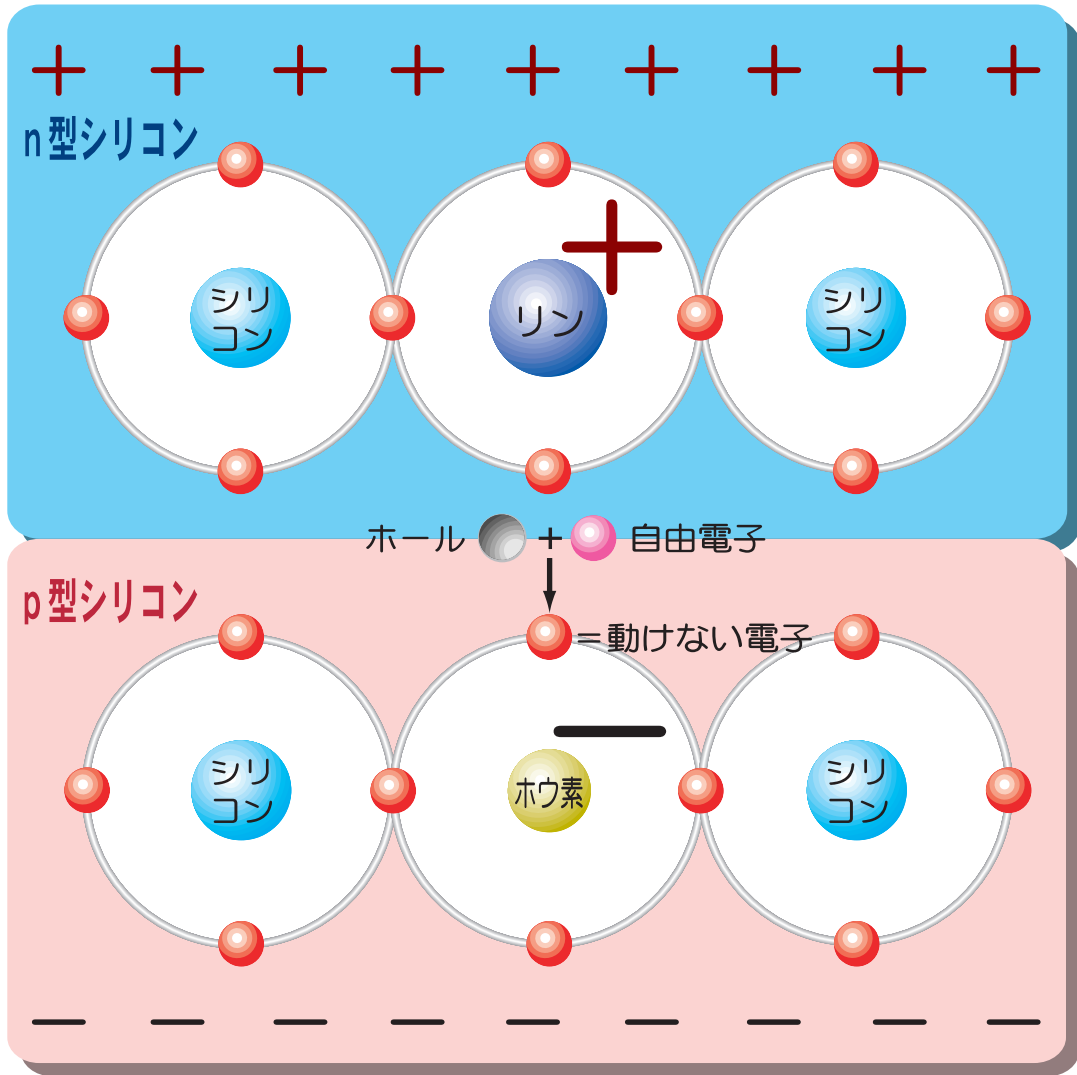
博士：p型もn型もどちらのシリコンを太陽に向けても結晶が熱くなるだけじゃ。太陽のエネルギーを電気に変えるには、もうひとひねり、pn接合という20世紀最大の発明が必要なんじゃ。p型半導体とn型半導

体をくっつけて自由電子とホールが行き来できるようにしたらどうなると思う？

太郎くん：自由電子はマイナスでホールはプラスだから、互いに引き合うよね。

陽子さん：自由電子がホールの穴にドッポーン。もう動けない

博士：ふたりともだんだん分かってきたな。p n接合の近くでは、n型半導体からは自由電子が無くなり、p型半導体からはホールが無くなってしまふんだ。その結果、n型半導体は電子が足りなくなってプラスの電気を持ち、p型半導体は電子が余ってマイナスの電気を持つようになるんじゃ。



陽子さん：このたまった電気で発電！・・・あれ、太陽の出番が無い。

博士：いやいや、この電気は取り出せないんじゃ。プラスのn型半導体とマイナスのp型半導体を電線でつないだら、電流は電線をn型半導体からp型半導体へ流れるはずじゃろう。電流は一回りしてn型半導体へ戻らなければならないから、半導体の中ではp型半導体からp n接合を越えてn型半導体へ流れるはずじゃ。ところがp型半導体のホールはp n接合の向こうのn型半導体がプラスだから反発してp n接合を越えられない。またn型半導体の自由電子もp n接合の向こうのp型半導体がマイナスだからp n接合を越えられないんじゃ。つまり電流が流れないから電池にならないんじゃ。

● p n接合に光が当たって、さあどうだ！

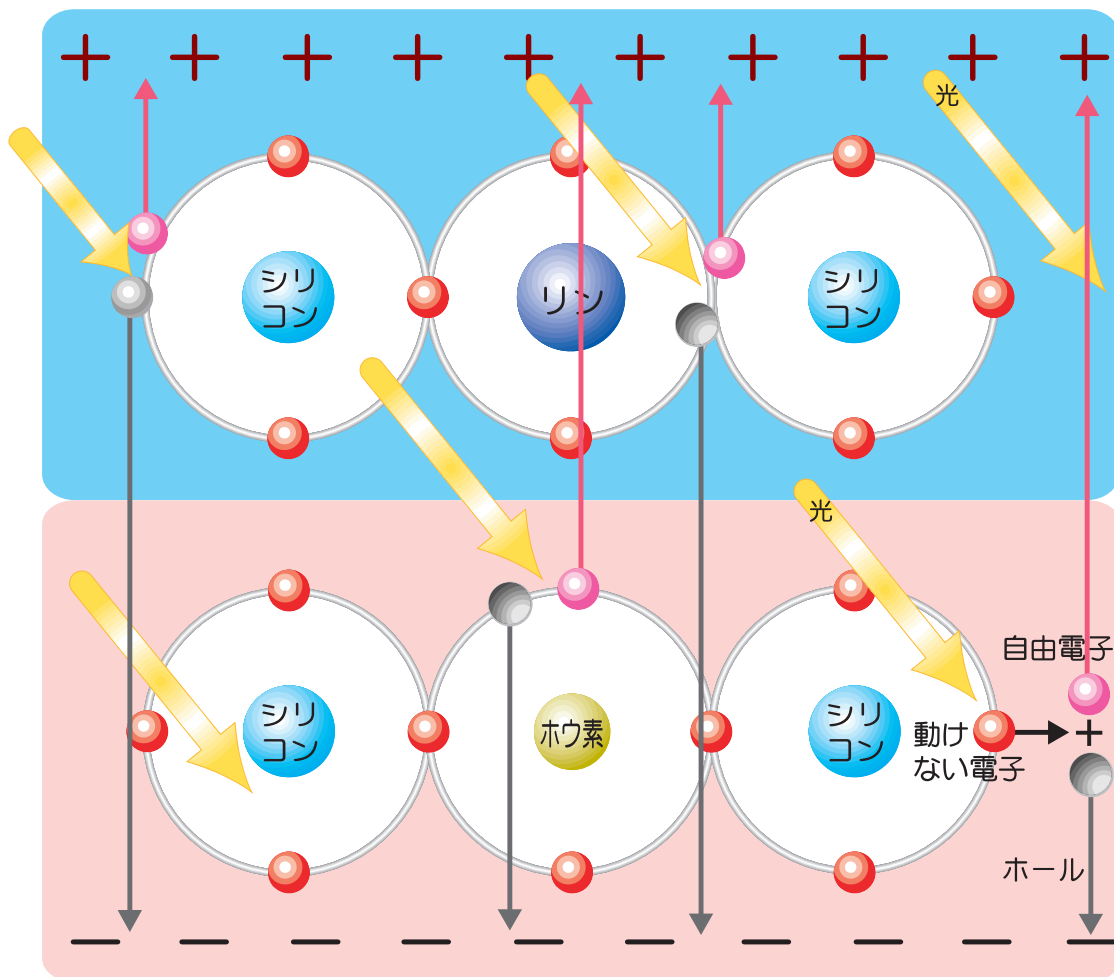
博士：やっとお日様の出番じゃ。シリコンに光が当たると何が起こるじゃろうか？シリコンの結晶の中の殆ど

の電子はしっかりシリコン原子核とシリコン原子核の間に収まっていて、勝手にふらふら動くことはできません。前は話したな。光が当たると電子が光のエネルギーをもらい、原子核の束縛を逃れて結晶の中を自由に動ける自由電子になるんじゃ。動けない電子が自由電子になると何が残る？

陽子さん、太郎くん：ホールっ！

博士：そうじゃ。つまり光がシリコン原子から電子を叩き出して、自由電子とホールとを作るんじゃな。しかし、せっかく光エネルギーを受けてできた自由電子とホールもそのままだったら再び自由電子がホールに落ちて光エネルギーが熱に変わってしまうだけじゃ。

ところがp n接合の近くでは違う。できた自由電子はプラスのn型半導体側に引っ張られ、一方のホールはマイナスのp型半導体側に引っ張られる。自由電子とホールは生まれたとたんに引き離されるんじゃ。こうして、n型半導体には引き寄せられた自由電子がどんどんたまりマイナスになり、p型半導体にはホールがどんどんたまりプラスになるんじゃ。



陽子さん：電線をつないだら今度はちゃんと電気が流れる？

太郎くん：えーっと、今度はn型半導体がマイナスでp型半導体がプラスだから、光が当たると電流は電線をp型半導体からn型半導体へ流れるんだね。電流は一回りして半導体の中ではn型半導体からp n接合を越えてp型半導体へ流れるはず。p n接合近くでは光を受けてできた自由電子がn型半導体に流れ込み、ホールがp型半導体に流れ込んでいるから・・・ちゃんと電流がn型半導体からp型半導体へ流れてるよ。大丈夫だ！

博士：太陽電池が発電する仕組みをわかったようじゃな。

2. さあ、太陽電池を作ってみよう

- サマーキャンプ版1日のできる太陽電池の作り方 -

**博士**：おはよう、今日は太陽電池を君たちが作る日じゃ。シリコンは純なやつだからのお、ごみやチリをきらうんじゃ。だから太陽電池はクリーンルームというほこりの全く無い部屋で作る。この部屋はいいぞ、花粉も入ってこない。わしは花粉症だからのう、春先は天国じゃ。陽子君、化粧はほこりの素。しっかり落とすんじゃよ。何、すっぴんはいやだって、人間は最大のほこりの元。防塵つなぎを着てマスクをして帽子をかぶるんじゃ。顔などわかりゃせんよ。

- クリーンルームにて -

**博士**：これがシリコンウエファーじゃ。時間の都合があるからこのう、あらかじめp型シリコンウエファーを酸化して、表面の酸化膜に窓を開けておいた。こらこら太郎君、素手でシリコンをさわっちゃだめだ。忘れちゃいけないよ、クリーンルームで一番汚いのは人間じゃ。

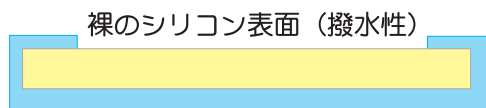
**博士**：はじめに洗浄工程じゃ、半導体は清潔さが命じゃからのう。

硫酸 + 過酸化水素水洗浄：有機物や汚染金属を取り除くんじゃ。窓の部分のシリコンが薄く酸化されて、よく濡れるようになる（親水性）。

純水洗浄：純水とは混じり物がとても少ない水じゃ。どんな味がするって、味は無いよ。何も溶け込んでいないからなあ。こいつでコーヒーをいれるとうまいぞ。

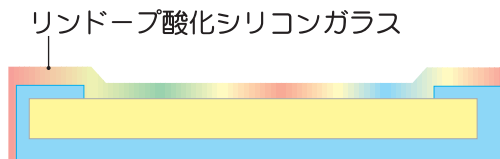


**博士**：窓の部分のシリコン表面の薄い酸化膜を取り除く。シリコン酸化膜を溶かし、シリコンを溶かさないう希フッ酸を用いる。フッ酸は危険な薬品だから、手袋と防護面を忘れずに。酸化膜が取れたらシリコン表面は水を弾くようになる（撥水性）のがいい目安じゃ。



**博士**：核心のn型不純物ドーピング、熱拡散という方法でpn接合を作るんじゃ。

リンを含んだ酸化シリコンガラスを溶かした液をスピンドーターで塗布。



博士：1000 C に加熱した電気炉でリンを溶かし込む。リンがシリコン結晶の表面から約1マイクロメートル程の深さまで溶け込み、その部分はn型シリコン層に変わるんじゃ。p型シリコン結晶がn型シリコンに変わるところがp n接合じゃ。

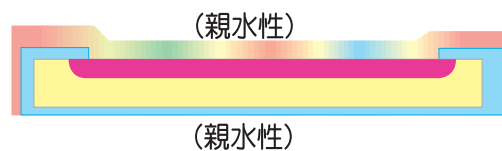


博士：酸化シリコンとリンを含んだガラスは電気を通さないので、電極を付ける前に取り除く。始めに裏面の酸化膜を取り除くぞ。

フォトリソをスピナーで表側に塗布して、表側の酸化膜がエッチングされないように保護する。裏面の酸化膜を緩衝フッ酸で撥水性になるまでエッチング。



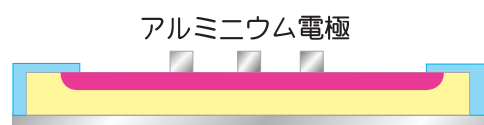
博士：フォトリソを取り除いて、また洗浄。洗浄はこまめにな。



博士：表面のリンを含んだガラスを緩衝フッ酸でエッチングする。表面の縁の熱酸化膜まで溶かさないう注意。縁の酸化膜は電極を着けたときに、p側とn側がショートするのを防ぐからな。



博士：太陽電池から電線を取り出すアルミニウム電極を蒸着して最後の仕上げじゃ。表面には光を遮らないように楕形の隙間のメタルマスクで覆って蒸着。裏面は全面蒸着。



博士：完成した太陽電池をプリント基板に銀ペーストで貼り付ける。表の電極に銅線をつなげば太陽電池の出来上がりじゃ。

陽子さん、太郎くん：あー疲れた。なんてハードな一日。

### 3. 別離

- おとなの戯言 -

博士：シリコン太陽電池は、現在世界のいろいろな所で使われておる。オーストラリアの砂漠では、公衆電話の電源用に電話ボックスの上に太陽電池を乗せとるんじゃ。サイエンスキャンプでの実験から、太陽電池を作るには、純粋なシリコン結晶、大量の純水、クリーンルームなど、たくさんのすごい技術が使われていることがわかったろう。太陽電池が誰でもどこでも使えるようになるには、太陽電池を作るのに必要な、エネルギー・材料をもっともっと少なくする必要があるんじゃ。太陽電池はpn接合が一つしかない一番簡単な半導体素子じゃが、その奥は深いぞ。将来の地球のためにも君たちのような若い人たちに頑張ってもらわなければならない。

博士：最後のテストじゃ。太陽電池で一番大切なのは何じゃ？

陽子さん、太郎くん：pn接合！

博士：ハッハッハッ、愛じゃよ、愛。モノ作りに対する愛、地球に対する愛じゃ。

陽子さん、太郎くん：・・・・・・変なやつ

この文章は、科学技術的内容を除きすべてフィクションであり、登場人物は実際のサイエンスキャンプ参加者や電総研研究者と一切関係ありません。

#### 人事異動

氏名	(新)	(旧)
平成11年8月31日付		
KEYMEULEN, Didier Charles	辞職	情報アーキテクチャ部主任研究官

編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(54)5059

表紙写真：太陽光発電システム  
(研究協力センター けやき館)

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: [info@etl.go.jp](mailto:info@etl.go.jp)  
印刷・製本 ニッセイエブロ株式会社