

本田財団レポート No. 170

第 38 回本田賞授与式 記念講演 (2017 年 11 月 16 日)

「シリコンカーバイド (SiC) の研究開発と実用化」

京都大学 名誉教授

松波 弘之 博士

公益財団法人 **本田財団**

松波 弘之 博士

京都大学 名誉教授



■ 生まれ

1939年6月5日

■ 略 歴

1962年 京都大学工学部電子工学科を卒業
1964年 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻
修士課程修了
1964年 京都大学助手
1970年 京都大学工学博士
1971年 京都大学助教授
1976～1977年 米国ノースカロライナ州立大学客員准教授
1983年 京都大学教授に就任
2003年 京都大学を定年退官し、同大名誉教授
2004～2012年 科学技術振興機構イノベーションプラザ
京都 館長

■ 学・協会活動

一般社団法人 SiC アライアンス 会長 (2015年～)
応用物理学会、電子情報通信学会、電気学会、
結晶成長学会、IEEE

■ 主な出版物

半導体工学 (1984年、昭晃堂)
半導体工学 第2版 (1999年、昭晃堂 (2014年から朝倉書店))
Silicon Carbide Vol. I, II (1997年、Akademie Verlag) 共編著
Silicon Carbide –Recent Major Advances–
(2003年、Springer) 共編著
半導体材料とデバイス (2001年、岩波書店 現代工学の基礎) 共著
半導体 SiC 技術と応用 (2003年、日刊工業新聞社) 編著
半導体 SiC 技術と応用 第2版 (2011年、日刊工業新聞社) 編著
ワイドギャップ半導体—あけぼのから最前線へ—
(2013年、培風館) 共編著

■ 受賞歴

1998年 第15回 日本結晶成長学会論文賞 (半導体シリコン
カーバイドのステップ制御エピタキシー)
2001年 第1回山崎貞一賞 (半導体及び半導体装置分野)
材料科学技術振興財団
2002年 平成14年度 文部科学大臣賞 (研究功績賞)
2004年 第4回 (2003年度) 応用物理学会 研究業績賞
(SiC 半導体・デバイスの先駆的研究)
2004年 第41回 (平成15年度) 電子情報通信学会 研究業績賞
(半導体 SiC の高品質エピタキシャル成長と次世代電子
デバイスの基礎研究)
2005年 SSDM Award-2005
2013年 2012年度朝日賞 (パワー半導体シリコンカーバイドの
先駆的研究)
2016年 IEEE David Sarnoff Award
2017年 アカデミア賞

その他：応用物理学会、電子情報通信学会フェロー、
IEEE Life Fellow

シリコンカーバイド(SiC)の研究開発と実用化

(電気エネルギーの有効利用)

松波 弘之 京都大学

Crazy boy の歩んだ道 “夢を形に!!”

1. 半導体によるICTイノベーション(20世紀)
2. 電気エネルギー有効利用(パワー半導体の役割)
3. 省エネルギーとパワー半導体SiCへの期待
4. 基礎研究 (京都大学の寄与)
— ターニングポイント、エポックメイキング —
5. 実用化に向けての国家プロジェクトの展開
6. まとめと将来展望

SiC World

この度は、本田賞を授与くださいますたいへんありがとうございます。推薦をしてくださった先生、採択していただきました選考委員会の先生方、たいへんありがとうございます。

昨年の IEEE David Sarnoff 賞受賞、シリコンカーバイドが世界的な規模で動き始めているという状況、そしてこの本田賞受賞と相続く僥倖に、本人の足元が震えている、そんな状況です。

今日は記念講演として、「Crazy boy の歩いた道」としてお話をさせていただきたいと思います。駆け出しの若造がとんでもないテーマにとりついて、はじめは出口も見えないようなところでありましたが、私の恩師がよく言われた「工学は社会で使われて初めて意味があるのだ」、これだけはずっと自分のモットーにしてきました。そして、「人のまねはしない」、「他人と違うことをやる勇気を持って挑戦をする」というその姿勢は今も変わっておりません。

内容はここにありますように、まず、半導体による ICT イノベーション。現在の状況はどんなところにあるかということを紹介させていただきます。今日ご出席の皆様の中でサイエンス&テクノロジーの専門家は少ないというように聞いています。その分野のことをお知りになっている方々にとってはまどろっこしい話になるかと思いますがご容赦ください。

次に電気エネルギーの有効利用。ここでパワー半導体の果たす重要な役割ということを紹介します。そして、省エネルギーという観点から、シリコンカーバイドの出番であると強調します。そこに辿り着いた京都大学での基礎研究。これがターニングポイントをもたらし、エポックメイキングな発表をさせていただきました。大学の中で、基礎研究として「ステップ制御エピタキシー」法による結晶成長、それを用いた SBD、MOSFET などデバイスを提案したことを紹介します。

実際に社会で使っていただこうとすると、企業がそれをつくってくださらないと駄目ですが、国家プロジェクトで「この方向だよ」というガイドラインがあって初めて企業が頑張ってくれる。それらにどのように携わったかということを紹介させていただき、最後に今後の展望をお話させていただきます。

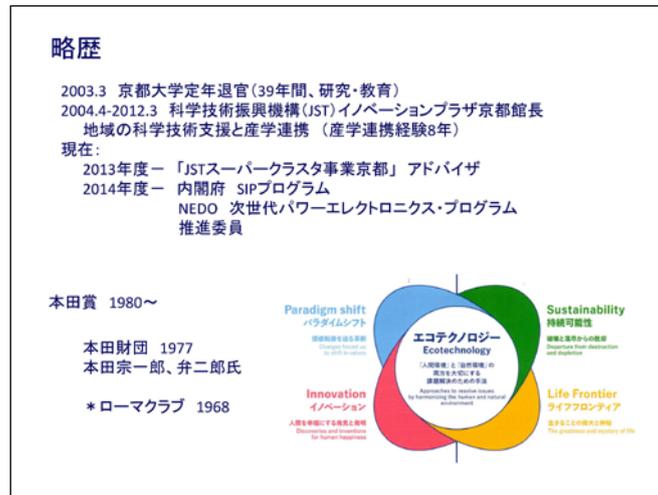


図-1

〈図-1〉 略歴については既にご紹介いただいているので、省略させていただきます。

1968年にローマクラブが、「このままいけば人類は破滅の方向に行く。地球温暖化、食糧不足、人口増加、ここを何とかしないと」と提唱したことを、私は若いころに恩師から聞いておりました。本田宗一郎、弁二郎さんのご兄弟が、この点にポイントを当てられて、1977年に本田財団を作られました。そして、エコテクノロジーという分野で、Sustainability、Paradigm shift、Innovation、さらにはLife frontierと、この4項目を旗印にされて日本初の国際賞を作られた。その慧眼には、改めて心から敬服を申し上げたいと思います。

■ 半導体による ICT イノベーション (20世紀)

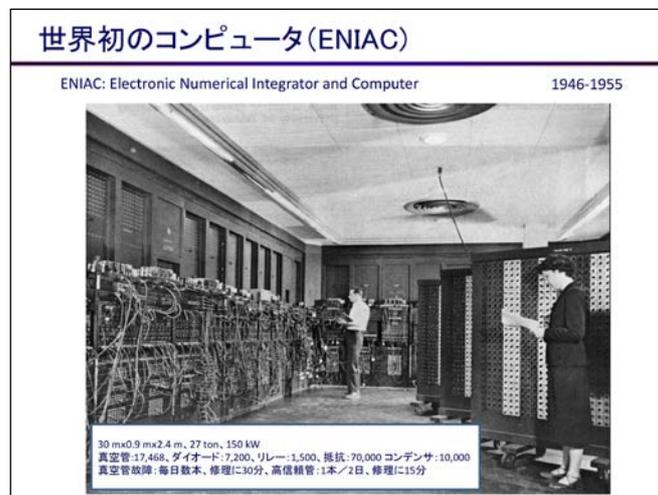


図-2

〈図-2〉 さて、それでは、現在、私たちは半導体の恩恵をどれだけ受けているかということを紹介したいと思います。

これは多くの方が見慣れておられると思いますが、第1号の電子計算機です。真空管を使っていました。1946年から1955年の間に少し動いたようです。真空管を使って、奥行き30m、高さ2.4m、幅90cmという超膨大なもので、夜間に動かさないと地域が停電になってしまうようなものでした。

1万7000本も使っている真空管の一つが壊れると修理に30分かかる。高信頼管をつくっても2日に1本はアウトになる。こういう時代のようにでした。それが半導体を使うトランジスタの発明により、現在のコンピュータに変わってきています。

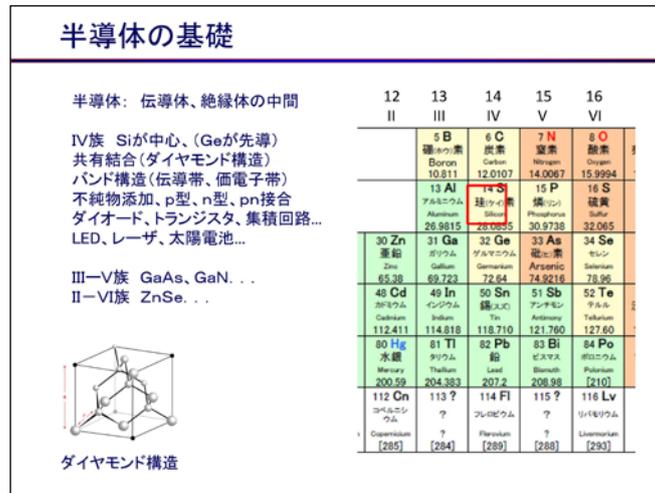


図-3

〈図-3〉 先日「半導体って何だ」というようなことを私の弟が言いだすものですから、これはちょっと説明しなければいけないのではないかと思います。電気を流すには導体というものがあります。でも裸線では危なくてさわれないですから必ずゴムなどの絶縁体を使います。半導体は、この導体と絶縁体の中間にあるもので、文字どおり半導体です。

しかし、そこには、隠れた面白さがあります。材料で言いますと、この周期表の珪素（シリコン）が主役です。そして、その両脇の III-V 族とか II-VI 族が、やはり半導体として使われています。結晶構造はダイヤモンド構造と呼ばれ、天然のダイヤモンドが持っている構造です。

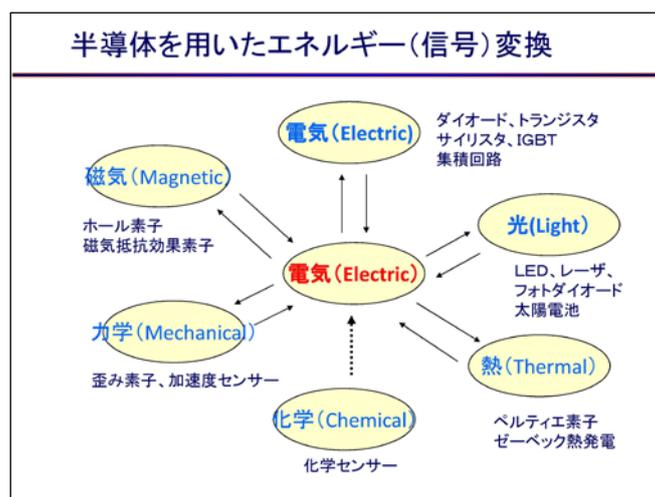


図-4

〈図-4〉 半導体を使うと、いろいろな信号とかエネルギーの変換が可能になります。今のところ電気と電気、それから電気と光の二つが半導体デバイスとして世の中で広く使われています。

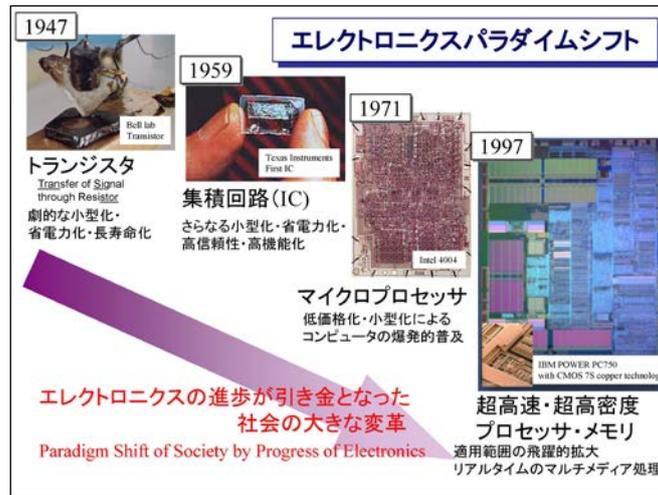


図-5

〈図-5〉 トランジスタの発明から集積回路が生まれ、1970年ごろにはこれにプログラムを載せたマイクロコンピュータが実現しました。さらに、最先端のCMOSを使い、今のコンピュータに進展しています。これが半導体の非常にうれしいことであると同時に、トランジスタの発明がエレクトロニクスの進展を促して、社会の大きな変革につながりました。



図-6

〈図-6〉 デスクトップからタブレットPCになり、半導体を使つての電子カメラ、さらには今の iPod、iPad、スマートフォン等に使われていますが、この領域になると、コンピュータの中で使っていたハードディスクを回すモーターは要らなくなっています。すべて半導体がこの中に入っている。大きなメモリはクラウドに積んで自分が必要なものだけを取り出す。世の中はこういう格好になっています。

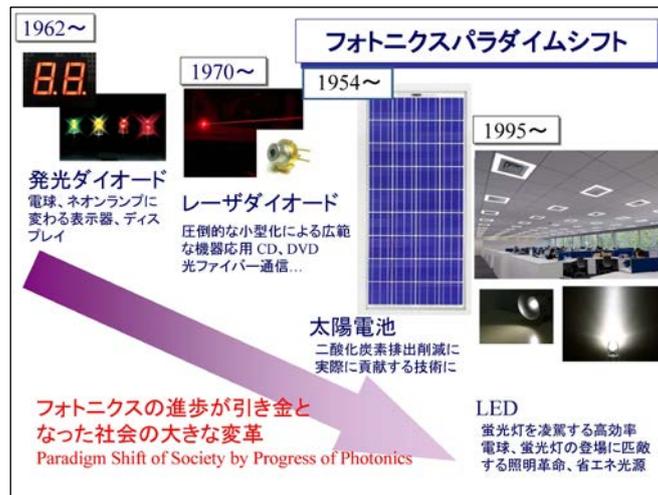


図-7

〈図-7〉 もう一つは半導体の中で光と電気との相互変換、これがどれだけ役に立っているかという、発光ダイオード（LED）が出た後、レーザーに発展しました。レーザーポインターはこれを使っています。太陽電池は、Renewable energy の主役になっています。青色が発表されてから、黄色の蛍光材を被せて白色ランプが出てきました。蛍光灯はおそらくもう数年たつと、すべてと言っていいほど LED 照明になってしまうでしょう。このような格好で、トランジスタの発明から半導体が主役になって 70 年経つと、すっかり世界観が変わってしまったと言えます。

■ 電気エネルギー有効利用（パワー半導体の役割）

さて、これまでの話は情報処理とか通信とか、電力の小さな部分で使われる電気の役割でした。もっと大きな部分で、例えば電気自動車を動かすモーターを駆動しようとする、そこにパワー半導体というものが果たす役割が出てきます。

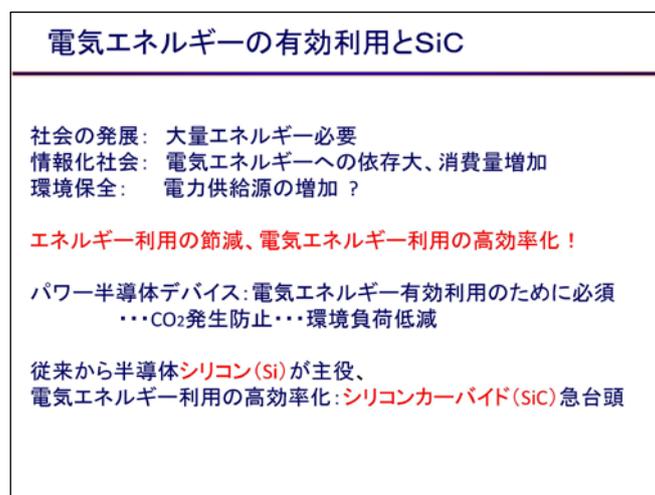


図-8

〈図-8〉 電気エネルギーが非常に使いやすいので、たくさん使おうという考えが増えてきています。電力不足を補うため発電所をたくさんつくらなければいけません、今のところは原発が大地震後ほとんど使えませんが、火力発電で、石炭あるいは石油、LNG などの化石燃料を燃やしています。それは CO₂をたくさん出して地球温暖化につながっていますので、環境には

好ましくありません。電力の利用部分での損失を減らすことができれば、新しい産業もそれで動かせることができるし、皆さんの要求を満足させることになります。

電力利用の際に活用されるのがパワー半導体です。そこでの損失を小さくするのがパワー半導体に課せられているというか、期待されている重要なポイントです。パワー半導体は従来からシリコンが主役でしたが、シリコンカーバイドが急激に台頭してきました。

SiC半導体とは？

SiC: 炭化珪素 あるいは シリコンカーバイド(Silicon Carbide)

Si (シリコン): 現在のあらゆる半導体デバイスの主役
(論理演算回路、メモリ、太陽電池など)

C (カーボン、ダイヤモンド)

SiC: Si 50%、C 50%で構成される材料
堅牢な(強い)半導体 (隕石に存在)

図-9

〈図-9〉 シリコンカーバイド、SiC 半導体とは何かというと、シリコンとカーボンを 1 : 1 に組み合わせた化合物です。地球上で、原材料としてはその辺の砂を持ってきてもシリコンは取れる。何か物を燃やせば炭ができる。そのようなものでシリコンカーバイドは成り立っているので原料は十分にあります。

電気エネルギーの違い

直 流 (DC)	交 流 (AC)
<p>電圧、電流が時間によらず一定</p> <p>(電源) 太陽電池、乾電池など</p> <p>(利点) コイルやコンデンサによる損失がない</p> <p>(用途) パソコン、多くの家電製品など</p>	<p>電圧、電流が周期的に変化</p> <p>(電源) 通常の発電機、コンセント</p> <p>(利点) 変圧器により電圧の昇降が容易</p> <p>(用途) モーター、電気自動車など</p>

図-10

〈図-10〉 皆さんご存じのように、直流は電池から送られてくるものです。これは一方向に電流が流れ、帰りはアースを通過して地上に戻っています。これに対して、交流は図のように時間とともに波形が変わっています。電流も電圧も同様な格好です。パソコンやスマートフォンは、直流の電池で動いています。しかし、電力会社からの電気は交流です。これで直流と交流の変換が非常に大切だということが分かっていただけだと思います。

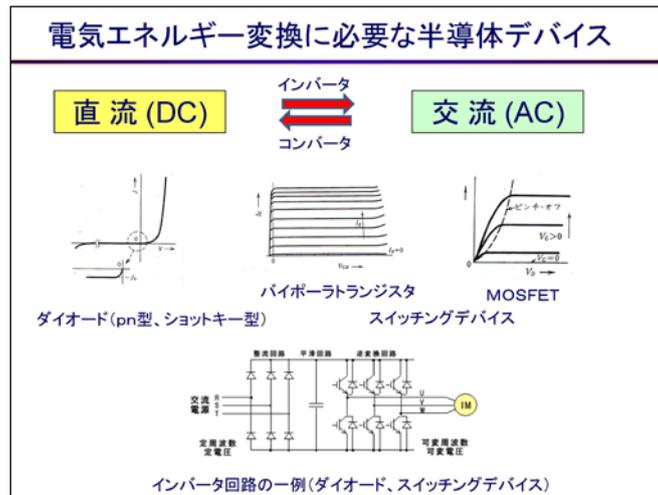


図-11

〈図-11〉 交流から直流にするには、一方向でよく電流を流し逆方向では流さないダイオードが要ります。電力会社からは、東日本では 50Hz、西日本では 60Hz の交流が届きます。家電製品で皆さん方がお使いになっているインバータエアコン、インバータ冷蔵庫、インバータ洗濯機、あるいはインバータ蛍光灯は、いったん直流に変えた後、それを速いスイッチングで切って高周波の交流にする。そのためにはスイッチングをしてくれるトランジスタが要ります。2 種類ありますが、今日の主役は MOSFET です。ダイオードとトランジスタがないと直流と交流の変換はできないのです。

ちなみに交流から入って交流のインダクションモーターを回そうとすると、まず直流にして、それを速いスイッチングで切るインバータを入れてモーターを回す、高速回転の動作原理です。

■ 省エネルギーとパワー半導体 SiC への期待

それでは、シリコンカーバイド (SiC) を使ったら、その点がどうなるかということです。

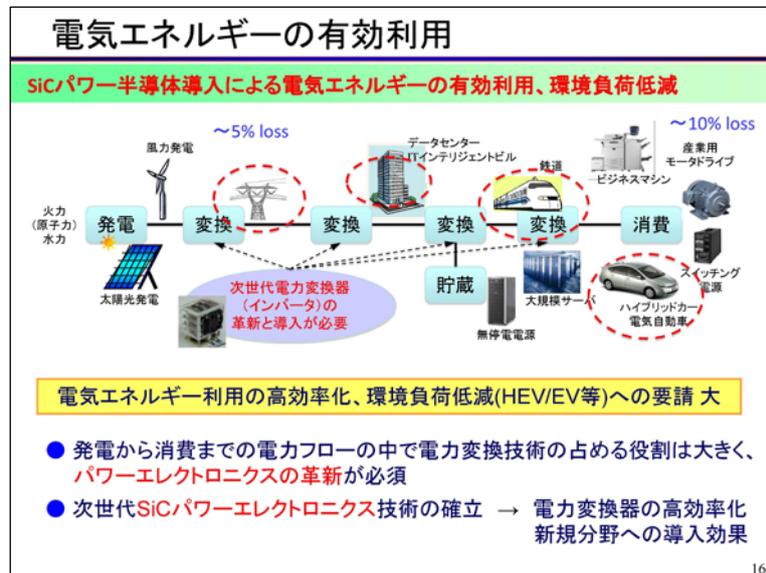


図-12

〈図-12〉 図は、発電所から私たちの手元で使うところまでの送電線です。送電の途中で、周波数を変換したり、直流を交流に変えたり、交流を直流に変えたりするという搬送のところでの損失を考えると、発電した電力の約 5% を失っているとされています。

使う側で、例えば 2kW のエアコンがあります。これの約 10% は熱として捨てています。いま使っているインバータが Si-IGBT と呼ばれるバイポーラ型なものですから、スイッチング時間が遅いと同時に逆方向に流れる電流のため、大きな損失になっています。発電所でつくった電力が、消費側では 85% になってしまっている。これは大変な問題です。

各所で使っている変換の部分で、シリコンの IGBT からシリコンカーバイド MOSFET に替えると、損失がうんと減ります。

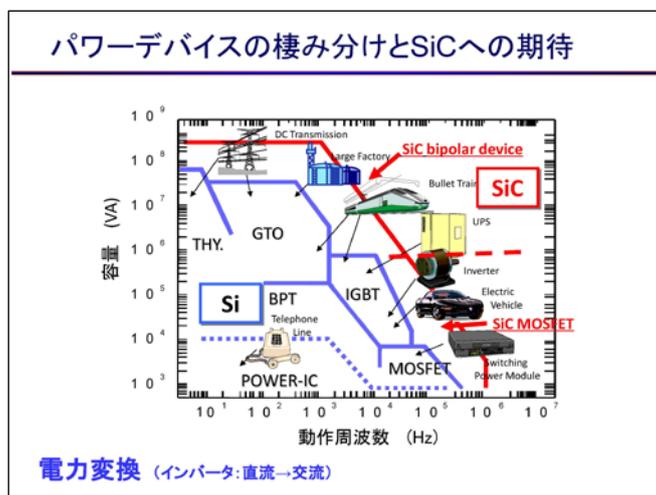


図-13

〈図-13〉 この図はシリコンパワーデバイスにどのようなものがあり、どのように使われているかということを示しています。シリコンカーバイドの MOSFET ができたら、性能面で今の変換器の主流であるシリコンの IGBT をほとんど完全に置き換えることができることを示しています。

シリコン MOSFET は小さな電力レベルで使われますが、これは物の性質が決められている限界です。それがシリコンカーバイドですと 2 桁半ぐらい上までいける。こういうところがポイントです。

SiC パワーデバイスのメリット

	Si	SiC(4H)	vs. Si
禁制帯幅 (eV)	1.12	3.26	x 3
電子移動度 (cm ² /Vs)	1,350	1,000	x 0.8
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	2.8	x ~9
電子飽和速度 (cm/s)	1.0E+07	2.0E+07	x 2
熱伝導率 (W/cmK)	1.5	4.9	x 3

- 高電圧 x10
- 低損失 x100
- 高周波動作 x10
- 高温動作 x3

汎用インバータ

- 高効率 (損失: 1/2 ~ 1/10 !)
- 高耐圧
- 高出力
- 小型 (システム: 1/4 ~ 1/10 !)
- 簡易冷却 (小型ヒートシンク、空冷)

図-14

〈図-14〉 この図はシリコンとシリコンカーバイドの物性を比較したものです。汎用のインバータで使うと、この物性が持っている限界が大きく効いてきます。禁制帯幅と呼ばれるものが約

3 倍ありますから、3 倍以上の高温で使える。それと高効率で耐圧を上げることができますし、大きな電力を取り出すことができる。小型になることは冷却装置が小さくて済む、場合によっては水がいらない、風だけでいい。シリコンカーバイドには、こういうことが期待されています。

■ 基礎研究（京都大学の寄与）－ターニングポイント、エポックメイキングー

パワーデバイスとして有用であることをはじめから分かっていたのではありません。シリコンカーバイドにとりついたきっかけは、他人と違うことをやるのだということからスタートしました。それがいよいよパワー半導体として使えることになり、シリコン IGBT とシリコンカーバイド MOSFET がどれだけ違うかという話が分かってきたのです。

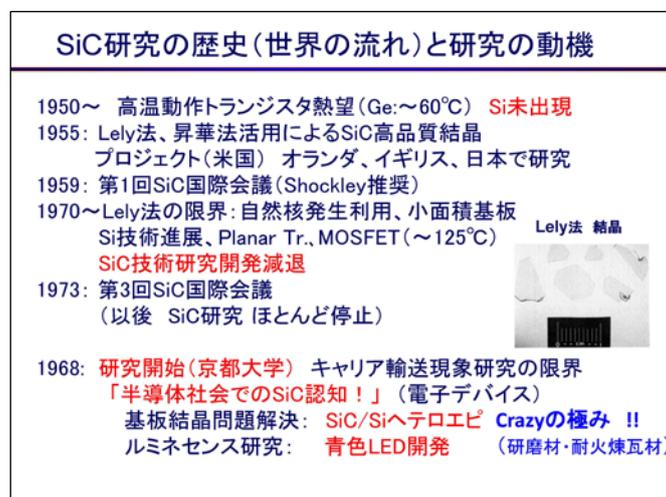


図-15

〈図-15〉 この図はシリコンカーバイド研究の歴史です。ゲルマニウムのトランジスタがはじめに Shockley たちによってつくられたときに、温度が 60°C 以上になると p 型、n 型の区別がつかなくなり、トランジスタが動作しない。もっと高い温度まで使えるエレクトロニクスが欲しくなります。

高い温度で使えるデバイスが欲しいとアメリカを中心に国レベルでのプロジェクトが動き、オランダ、イギリス、日本でも研究が行われました。まだシリコンが現れていない時期で、Lely というドイツの研究者から、シリコンカーバイドの高品質な結晶がつかれるというアナウンスがあり、みんながそれに飛びつきました。第 1 ラウンドのシリコンカーバイドに対する期待が 1950 年代の半ばからスタートしたのです。しかし、シリコンが進んできて、これが 125°C まで使えると分かりました。そうしたら、結晶成長が難しいシリコンカーバイドに対する興味は失われました。

当時のシリコンカーバイドの結晶は非常に薄くてしかもいびつな形ですから、デバイス屋はこんなものを使ってデバイスをつくらうという元気は出てきません。1968 年頃に私がそれまでの修士論文や博士論文でやっていた仕事は、半導体の中を電子がどのように動くかという、俗に輸送現象から半導体の物性を極めようとするものでした。隔靴搔痒の状況で、世の中で使ってもらえる工学というようなものに、いったいいつつながるのだろうと考えていました。

当時、シリコンが主流になっていましたから、企業はそのシリコンで流れに残されないようにしていました。さらに、ガリウムヒ素という半導体でガンダイオードというもの世の中に提案されました。これは直流をかけておくだけでマイクロ波が出てくる。大学の研究者たちはガリウムヒ素の研究に動きまわりました。しかし、そのフェーズで同じ方向をやっていたら後塵を拝するだけで、何も道具がない中では駄目だろうと思いました。私が取り上げた修士論文や博士論文の仕事は、結晶が難しい組成を持ち、それができたとしても世の中で使ってもらえるものにはなりそうにない。

一方、シリコンカーバイドは、第一ラウンドで素晴らしい物性があることが知られていました。特に、高い温度で使え、放射線に対して強い特性を活かした、シリコンでは実現できないようなものが、この材料を使ったら可能だと思いました。また、当時、皆さんが欲しがった青色発光ダイオードは、シリコンカーバイドでp型、n型を制御すれば作れることは分かっていました。基板がないから電子デバイスがつかれない。シリコンの上にシリコンカーバイドをつくり、これでトランジスタをつくらう。そういう夢を持ちました。

シリコンとシリコンカーバイドの原子間隔は20%も違います。科研費に応募しても、採択してもらえない。こういうものにチャレンジをしようというのは、今から思うとCrazyの極みです。できっこないようなことに、他人がやっていないからやりたいとの思いでした。しかも、ターゲットは、高温で使えるエレクトロニクス、あるいは耐放射線のほうで使えるトランジスタを作らうと思いました。青色発光ダイオードとシリコン上のシリコンカーバイドトランジスタの二本立てで研究を開始しました。振り返ってみると、この二つをやっていたからこそ「ステップ制御エピタキシー」法という非常にすばらしい結晶成長方法に至り着きました。だから、一つのことだけでこれを追いかけていたら、もっと長い時間かからない限り、シリコンカーバイドはパワーデバイスとしては世の中には出てこなかったのではないかと思います。



図-16

〈図-16〉 ブルーのLED作製に取り組みました。グラファイトのるつぼの中でシリコンを溶かして、その中に種結晶をつけるとその上にp型、n型層が作られる。三洋電機が実用化してくれて商品になりました。これは、「ああ商品になったな」という達成感を味わわせていただきました。



図-17

〈図-17〉 シリコンの上のシリコンカーバイドエピタキシャル成長の話に移ります。写真は手づくりの装置です。こういうものを大学の中でつくるのは非常に容易なグループだったものですからすぐに取り組みました。シリコンの板の上にシリコンカーバイドを付けるのに、高い温度にシリコンを保ったまま原料ガスを流すと、シリコン表面の活性度が高くなり、くっついたものからどんどん成長してしまうので単結晶ができない。再現性良くシリコンカーバイドの結晶を作るのに約10年かかりました。

活性なシリコン基板の上に流すから駄目なので、何か座布団のようなものでふたをして、その上にガスを流したらいいのではないかという発想で、シリコン基板の上に低温でC系のガスを流す方法で解決しました。学生が替わってもほとんど同じ結果。再現性が実現できました。

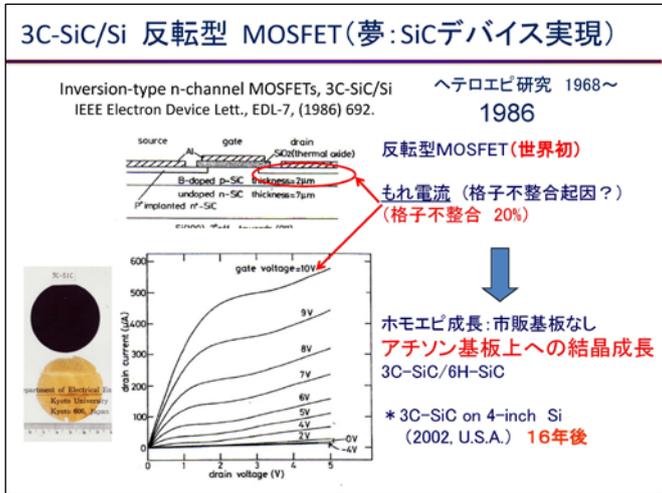


図-18

〈図-18〉 「忍耐の10年」と呼んでいます、それで喜び勇んでシリコン上のシリコンカーバイドMOSFETを発表しました。世界初の発表だったと思います。しかし、ダイオード特性は飽和を示さなければいけないのですが、どこかでリークが見える。これは原子の間隔がシリコンとシリコンカーバイドで20%違うので、そのひずみがシリコンカーバイドのpn接合の界面をフラットにせず、ギザギザ構造となり、大きな電界が集中して電圧数ボルトで流れてしまっ

ていたのです。これはやはりシリコンカーバイドの基板につくらなければ駄目だと思いました。ところが基板は市販されていません。



図-19

〈図-19〉 やむを得ませんので、図にあるような結晶を持ってきました。これは研磨材として、あるいは耐火煉瓦の材料として使われます。ものすごく大掛かりな装置で、珪砂という砂とコークスを入れ、塩やおがくずを入れて、ガスが抜けるようにしておき高温にします。こういう装置でつくったものから塊を取り出したものです。

当時、これを生産している会社に行くと、「周りの粉になりやすいところはいいけれども、塊の結晶は粉がつくりにくいので、段ボール箱に入れておけば後で送ってあげる」と言われました。親切な恩恵を受けて、学生と一緒に単結晶が見えている小結晶をタガネと金槌で取り出しました。塊は図のような格好をしていますから、裏を単結晶面に平行に削らなければいけない。ダイヤモンド、ボロンカーバイドに次いで硬い。研磨の際に平行度が保てなくなるものも出ます。ウエーハが取れますから、温度を上げてシリコンカーバイドの成長に必要なガスを流すと結晶ができます。

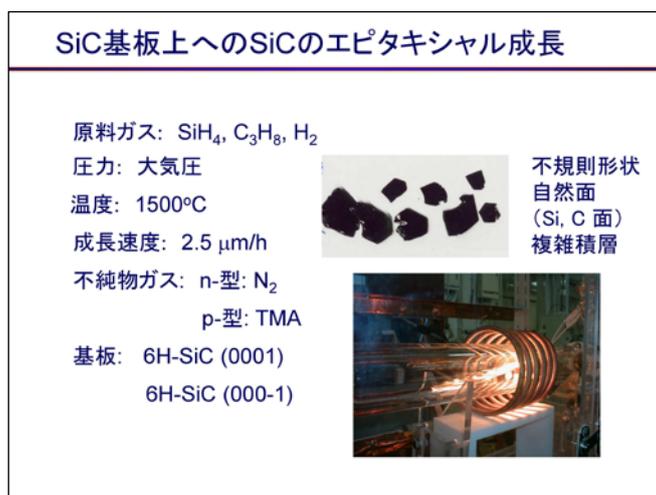


図-20

〈図-20〉 ある日、「いつも奇妙なモザイクパターンが見えていたのに何も見えない」と報告

がありました。ある学生が意識的に研磨面への成長という冒険心でやったようです。見たら、均一なきれいな面ができていました。

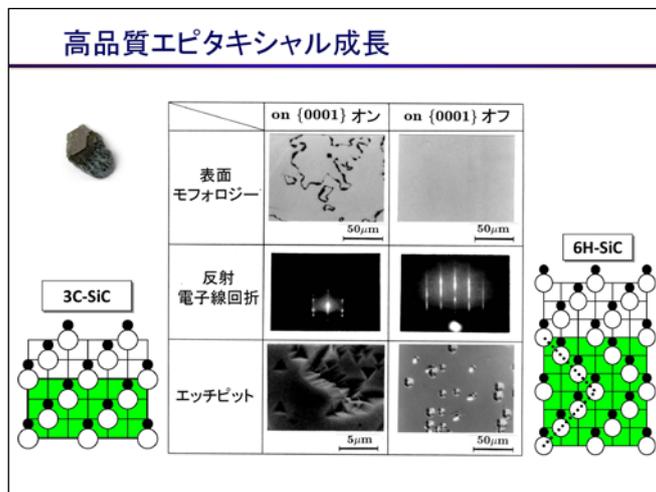


図-21

〈図-21〉 これをいろいろな評価法でチェックしました。少し高い温度に上げたアルカリでエッチングすると全く違います。一方は六角形に近い、他方は三角形で、境界を境にして180度ひっくり返っている。後で、反射電子線回折法で見たら、前者は基板と同じ六方晶のジグザグの積み上げ。それに対し、後者は立方晶のシリコンカーバイドが生えていることが分かりました。これは「本当にやったね」という感じです。これが1986年に起こりました。

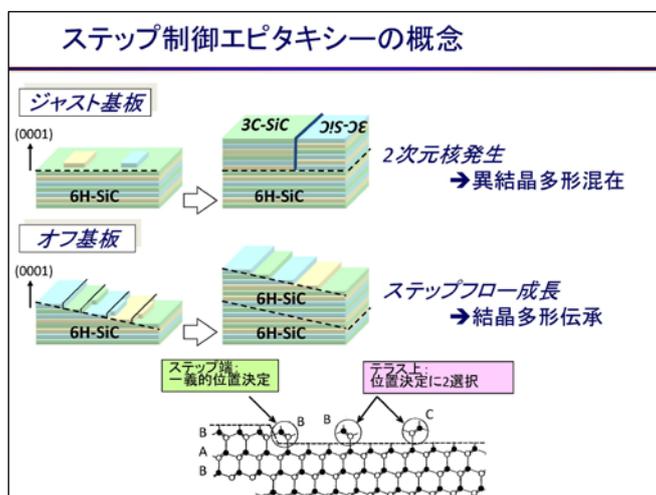


図-22

〈図-22〉 結晶成長の専門家ですとステップ構造があるときステップ端から成長させたら非常にきれいなものができるということをご存知だと思いますが、私どもはデバイス研究が中心ですから、それをはじめは考えていなかった。はじめからステップを使ったらいいのだというロジックで進んでいたら、「あいつすごいな」ということになるのでしょうが、私たちはアクシデントがきっかけで、それをうまく使うことができました。そういう幸運を私はもらったと思います。

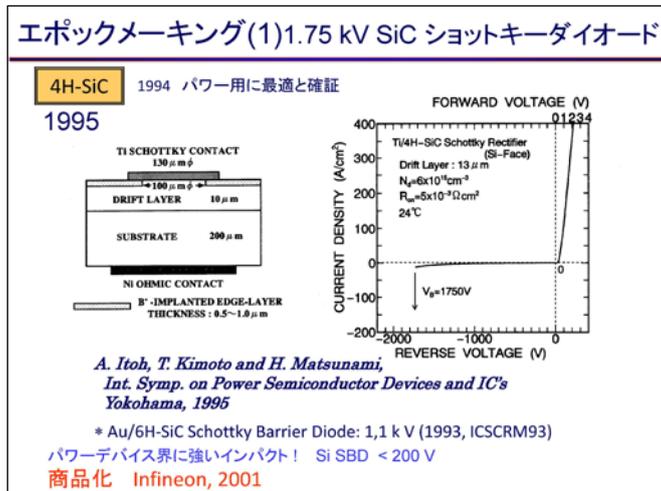


図-23

〈図-23〉 早速 pn 接合を作ってみました。シリコン上のシリコンカーバイドでは逆方向の 2V ぐらいからリークしていましたが、2 μm の成長で pn 接合を作ったら耐圧が一気に 100V までいきました。そうすると、あとはお手の物です。どちらの方向に何度傾けたら最適かという条件をすべて出しました。そしてそれを使ってショットキーバリアダイオードを 1993 年に発表し、1995 年には本格的なショットキーバリアダイオード構造で耐圧を一気に 1.75kV まで上げることに成功しました。

13 μm の厚さで、固有オン抵抗 5mΩ/cm² を実現しました。これはパワーデバイス業界にものすごく強いインパクトを与えました。なぜかという、シリコンではこれをやろうとすると 200V で精いっぱいです。ここに多くのパワーデバイスの人たちが集まり始めました。私どもの発表の後、いろいろな機関が追いかけてきました。

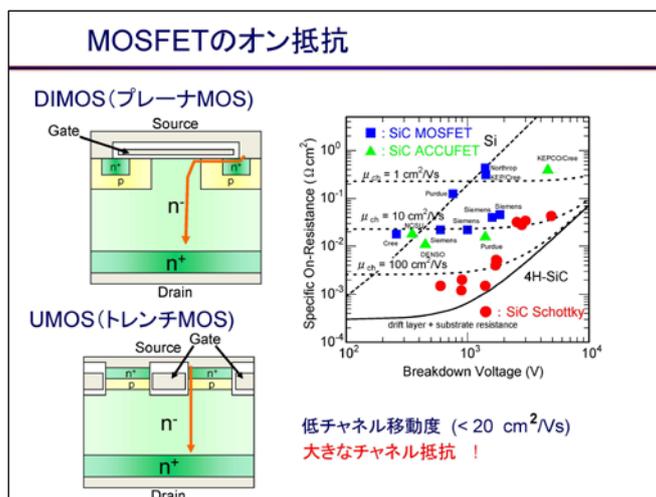


図-24

〈図-24〉 1990 年代後半、MOSFET ができ、縦型で使ったら図のようにシリコンの限界はようやく抜けました。しかし、皆さんが使っていた面は、一番まずい面なのです。将来はトレンチ MOS になるだろうということを考えました。

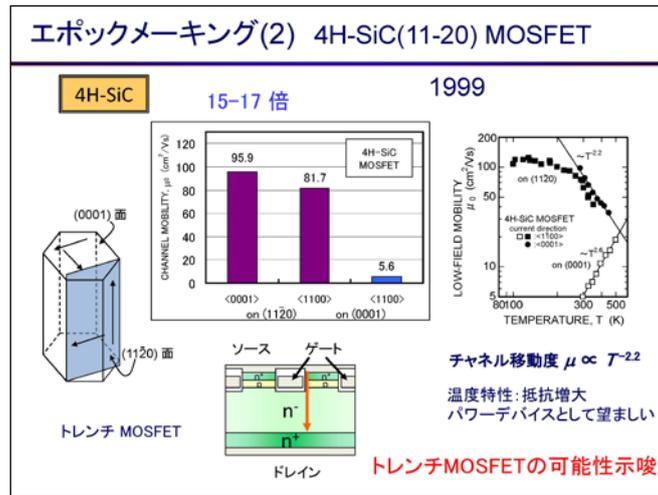


図-25

〈図-25〉 従来の面(0001)と垂直の(11-20)面上でプレーナ構造MOSFET特性を見たら、一気に今までの20倍ぐらい改善できそうだと分かりました。

「これからはトレンチMOSFETですよ」ということを言ったら、京都のロームという非常に先進的な企業が、京都大学でやったことを産学連携で非常にうまく取り上げてくれ、のちほどお話しする世界初のトレンチMOSFETを開発してくれました。

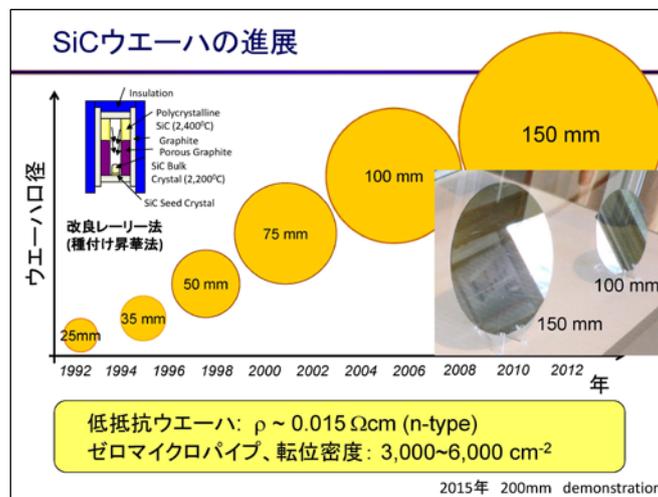


図-26

〈図-26〉 斯界が苦勞したウエーハは、今100mmが中心ですが、150mm(6インチ)に替わろうとしています。既に次の200mmもデモンストレーションができています。私が使っていたあの石ころを考えてもらおうと、いかに違うかが分かると思います。デバイスが動くと材料屋さん頑張っ

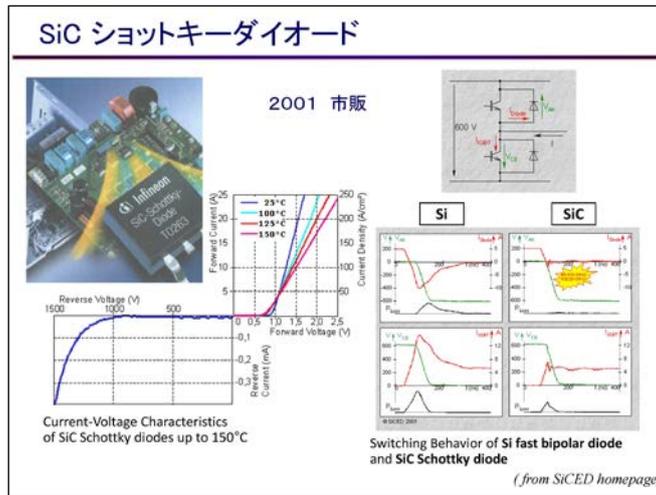


図-27

〈図-27〉 Infineon というドイツの会社が 2001 年に、シリコンカーバイドショットキーダイオードを使うとどれだけ損失が減るかということを示しました。すぐに、ビジネスも考えた上での生産を始めました。シリコンは耐圧 1000V 程度では使えないのです。

図において、シリコンカーバイドショットキーダイオードと、シリコン pn ダイオードを持つてくる比較で、後者の損失がずいぶん大きいことが分かります。これでシリコンカーバイドショットキーダイオードの優位性が示されました。



図-28

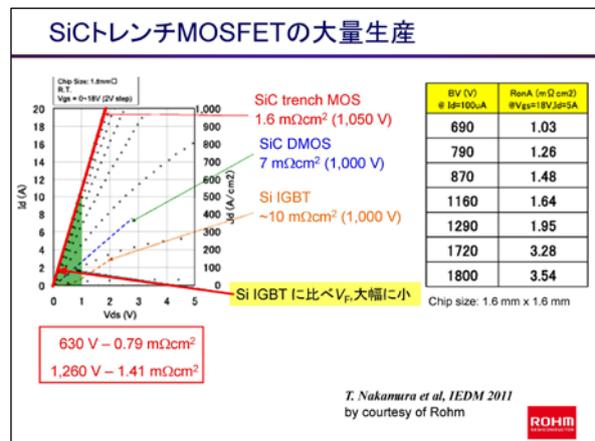


図-29

〈図-28、29〉 そのような発表が出て一気に注目されましたが、日本はバブルがはじけた後でしたからすぐには商品化されませんでした。9年後の2010年4月に、ロームが大量生産をするというアナウンスをし、その年の12月にはMOSFETが200°Cまで動作するという発表をしてくれました。さらに、トレンチMOSFETのアナウンスも学会でしてくれました。

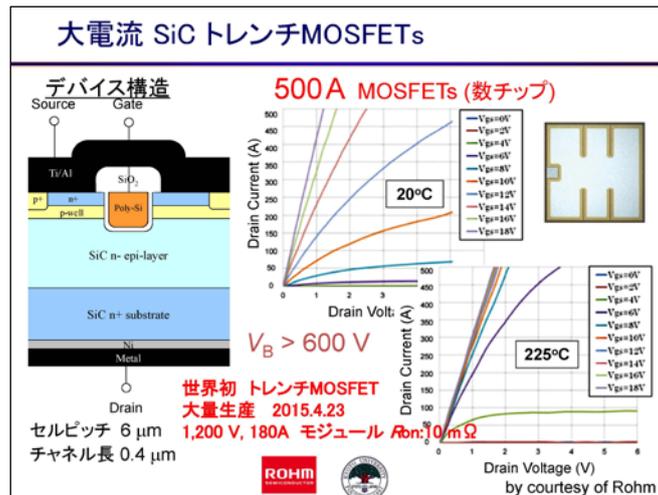


図-30

〈図-30〉 おまけに 2015 年にはトレンチ MOSFET のモジュールまでつくって 180A という、このようなすごい結果を出してくださった。これはワールドファーストであると同時に、日本の中でも本当に Excellent な結果です。

■ 実用化に向けての国家プロジェクトの展開

これまで、技術がここまで来ていますよということをお話しました。ここからは、企業が頑張ってくれないとなかなか仕事ははかどらないということをお伝えします。

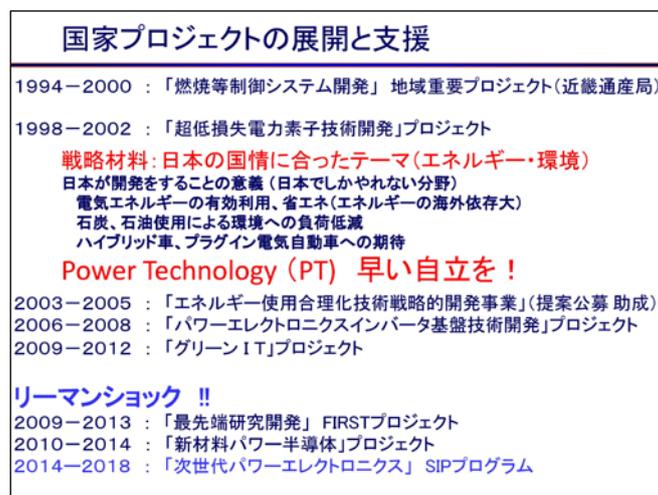


図-31

〈図-31〉 図には長々と書いてありますが、ポイントは、リーマンショックが 2008 年に来ました。産業界はとてもやっつけられない状況でした。そのタイミングで国も考えてくれて、これは企業が元気を出すための仕掛けが要ということで、「最先端研究開発」FIRST と、「新材料パワー半導体」プロジェクトが開始されました。そういう中でいろいろ提案や仕事をする事になりました。



図-32

〈図-32〉 そのときに SiC アライアンスというのをつくっていただきました。先ほどお話したように、違ったプログラムが三つ平行に動くと、みんなスポンサーしか見ない。同じようなことをやっているのに具合が悪いのではないかと、横串が必要だということでアライアンスをつくっていただいたのです。現在、一般社団法人に変わっています。

そこではニュートラルな立場で将来の方向を見据え、いろいろな提案をしようということ動いています。次のプログラムとしてどのようなことが必要か、あるいはサイエンスコミュニケーションで結果を皆さんに知らせる、産学官連携の支援もやろうということ動いています。



図-33

〈図-33〉 いち早く商品化してもらったのは三菱電機です。はじめはシリコンカーバイドショットキーダイオードとシリコン IGBT を使って図のようなエアコンをつくり、スイッチング損が 60%減るということでした。今年の発表によりますと、AI の技術も使って、人がいない時には勝手に消える。あるいは人が動いたら、そちらの方向に冷・暖房の風向が替わります。Active Switch Compressor というようなものを使って切り替えも容易になっています。

夏場使うよりも冬場のほうが省エネの効果が大きいという情報も聞いています。夏場はせいぜい 35~36℃から 28℃。この温度に比べると、1桁の温度から 18℃まで持っていこうとすると、かなり電力を使うからです。

社会における応用例(2) 鉄道

1. 地下鉄電車(東京)への搭載
Si IGBT・SiC SBD ハイブリッド・インバータ

(1) 電気ブレーキの活用: 22.7%→51.0%
(2) 電車全体の電力損失: **38.6%低減**
(2012.7.30 - 2012.8.17 平均)

2. 郊外電車(小田急) 1.5kV: 3.3kV, 1,5 kA
フル SiC インバータ
電車全体の電力損失: **40%低減**

地下鉄 600V



2012.9

郊外電車



2014.4

(三菱電機 URL)

パワエレの革新はシステムの変革を促す

図-34

〈図-34〉 はじめにハイブリッド型の地下鉄に載せていただいた。シリコン IGBT とシリコンカーバイドショットキーダイオードを使って、実験結果で約 40%の損失低減が実現できました。スピードの速いところで回生ブレーキが使える、回生して出た電気は近所の電車に送る、こういう仕掛けです。オールシリコンカーバイドにして小田急で使ったら、やはり 40%ぐらいの損失低減が実現できました。

鉄道への搭載例



北神急行電車7000系 2015年10月
直流1500V架線対応フルSiC適用VVVFインバータ装置 (体積・重量約80%減) 三菱電機



新京成電車8800形 2016年2月



JR東日本 2014年7月
山手線の新型車両E235系がSiCパワー半導体採用
2015年秋頃に営業運転開始



JR西日本 2016年8月
大阪環状線の新型車両E323系がフルSiC素子インバータ採用

スーパークスタ京都 鈴木SDのまとめから

図-35

〈図-35〉 現在、シリコンカーバイドはいろいろな地方の電車に使われています。これは東京の山手線。大阪の環状線は古いタイプの褐色の色がなくなり、いま走っている電車にシリコンカーバイドが導入されています。

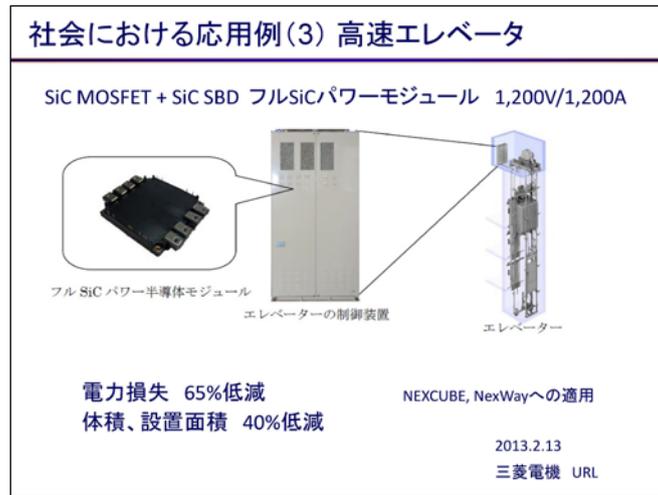


図-36

〈図-36〉 エレベータ。これはすぐ近くに並んでいますから、回生したエネルギーを近くに送ると65%の損失低減です。



図-37

〈図-37〉 自動車にも使われています。ハイブリッド車です。まずテストコースで燃費5%改善。デバイスを替えるだけで一気に5%というのは将来すごいらしいです。2020年頃に市販開始というアナウンスが出ています。



図-38

〈図-38〉 ホンダでは2016年から燃料電池車にシリコンカーバイドパワーデバイスが使われています。現在、既にタクシー会社などに市販されています。

昨日、お台場水素ステーションまで行き、どのようにしてボンベに詰めるかなどを学ぶことができました。そこは省エネ型です。太陽電池を使い、水の電気分解で水素をつくる。まさにトータルでエコ・省エネ型です。

おまけに、いま世の中の燃料電池車は4人乗りですが、昨日乗せていただいた燃料電池車はボンネットの下に駆動部分を積み込めるようすべて小型で済む仕掛けが作られていて、5人乗りのセダンとなっています。非常に乗り心地が良かったです。



図-39

〈図-39〉 これはもう既にお話した太陽電池のコントローラーです。



図-40

〈図-40〉 さらに、究極は JR 東海で使ってくれる予定です。2020 年にはこれを実用するとのアナウンスがあります。自動車もこれも二つともオリンピックの年ですね。しかも戦略が非常にすごいと思います。JR 東海は N700 系（新幹線）が走っていますが、つくってから時間が経っているのでリプレースしなければならない。このタイミングでシリコンカーバイドを使い、特にトランス、コンバータ・インバータとモーターをみんな見直し、軽さとして1編成当たり11 トン軽くしています。来年度のプランとして、4 両単位にして、それぞれにシリコンカーバイドを載せる。いま 16 両編成で東京-大阪を動いています。西日本では 12 両とか 8 両とかがあります。4 両単位で標準品をつくっておけば、将来、注文に応じてゼロからデザインをする必要はなくなります。世界で JR 東海を中心とした新幹線の仕組みは大変ウェルカムになっていますが、そういう所へいく場合でも、それぞれの地域に応じた設計をする必要がない。非常に短納期で、しかも標準品ですからお値段も安くなるだろう。こういうことです。

SiCパワー素子の市場規模と省エネ効果の予測

活用分野	SiCパワー素子の市場規模(100万個)		2020年における省エネ効果*5)			
	2010年	2020年	導入量	省エネルギー量(TWh/年)	CO ₂ 排出削減量(万t/年)	原油換算の省エネルギー量(万kl/年)
電気自動車/ハイブリッド車/燃料電池車	2.4*1)	6~20*2)	500万台	6.25	229	145
汎用インバータ(モーター)	0.1*1)	43*3)	4100万台	9.96	366	231
CPU電源	1*1)	100*4)	6500万台	2.73	100	63
無停電電源装置(UPS)	0.5*1)	50*1)	2300万台	4.71	173	109
分散電源システム	0.01*1)	2*1)	2002万kW	3.83	141	89

* 1) ジェイスターの予測。* 2) 日本電動車両協会、「燃料電池自動車に関する調査報告書」の予測を参照。* 3) 経済産業省経済産業政策局調査統計部、「機械統計年報」の予測を参照。* 4) 電子情報技術産業協会、「世界の電子機器と半導体市場の中長期展望」の予測を参照。
* 5) エンジニアリング振興協会、「次世代パワー半導体デバイス実用化調査」の予測を参照。 出典: EE Times Japan 2007.5

図-41

〈図-41〉 何と云ってもモーターをどのように制御するかが省エネルギーの決め手です。産業界あるいは世の中で使っているのが一番大きい。CO₂換算でも一番大きいですが、各種のモーターがあるものですから、統一的にこのようなインバータでこのような制御をしたらいいよというのはなかなか言えません。

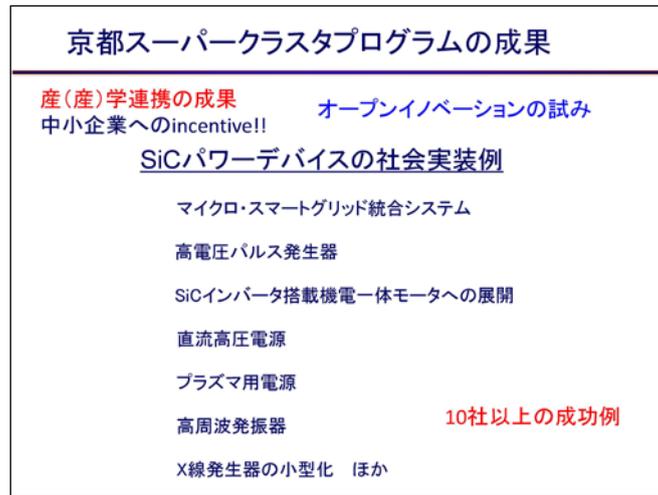


図-42

〈図-42〉 私がいま強く期待しているのが京都地域のスーパークラスタです。

文部科学省は、クラスタ事業で11年間各地域を支援したのにほとんど何も世の中に出ていないので、プロジェクトを止めました。それを受けてJSTが責任を持ってやろうということになりました。

私の提案は、企業にもincentiveを与えることでした。シリコンカーバイドパワーデバイスは、非常に速く動作するので、リングングという振動が起こるのです。それを防ぐためには電気回路の人を持ってこなければ駄目だと言って、京都大学の電気工学の回路の先生方に加わってもらいました。非常におもしろい成果が生まれつつあります。10社以上が成功しています。

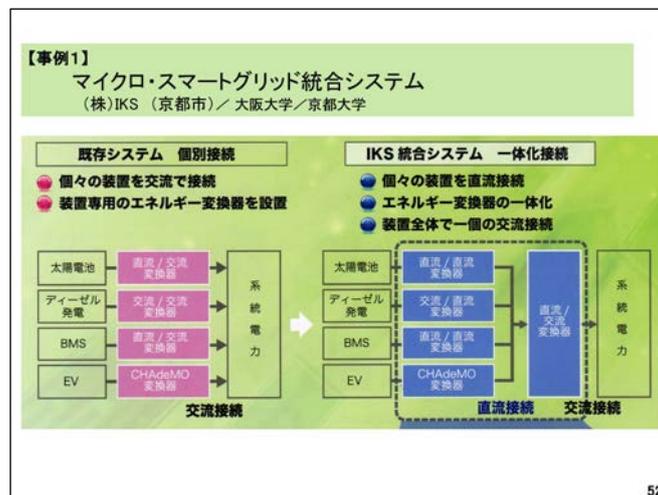


図-43

〈図-43〉 一例は中小企業です。非常にアイデアが良く、HEMS (Home Energy Management System) というものです。家の中に10kWのPV、太陽電池を置き、そして日産リーフを持ってきて、電気エネルギーの移動ができます。



図-44

〈図-44〉ここでデータを出してくれていて、シリコンカーバイド MOSFET に替えると、これまでのシリコン IGBT に比べて 42% も低減できるとのことです。

現在、京都市が所有する「みやこめっせ」の地下駐車場に急速充電の装置を置いてくれています。駐車料だけ払えば、ここへ行って無料で充電できます。その後、ゼネコンと組んで BEMS (Building Energy Management System)、さらにはそこに興味を示した大手が加わり、ハワイのマウイ島での CEMS (Community Energy Management System) と展開しています。現時点では、そこの社長はカナダに単身で行き、カナダ政府の支援を受けられそうです。

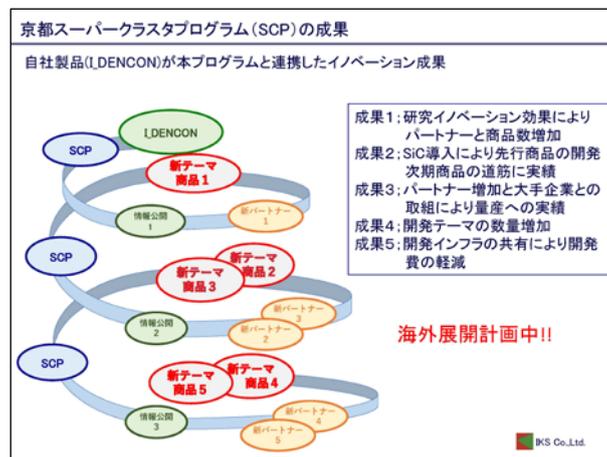


図-45

〈図-45〉中小企業がこういう仕掛けを使って、どんどん成長していっています。これが京都のすごさだと思います。スパイラル状にいろいろな新しい問題が出てきて、それを解決すると、いろいろなユーザーが出てくる。こういう話です。

【事例2】
SiC-Pulser: 高電圧パルス発生器
32kV/240A-peak定格 SiC-Pulser
(株)京都ニューロニクス (京都市) / 福島SiC応用技研(株)(福島県いわき市)
/ 京都大学

SiC-MOSFETを直列×並列に接続したスイッチユニット

- 低オン抵抗 (従来の1/1000以下と抵抗が非常に少ない)
- 高繰り返し周波数 (従来の100倍以上)
- 高速度スイッチング (従来のSi系と比べ約8倍高速)
- モジュール直接接続 (任意の接続数で用途に応じた高電圧電圧パルス)

スイッチユニットのスペック

入力	SiCスイッチユニット駆動電圧入力	駆動電力伝送
出力	定格スイッチング電圧	最大 8kV
	定格電流 (ピーク)	240A-peak
	立ち上がり時間 (10% → 90%)	40ns 以下
	立ち下り時間 (90% → 10%)	40ns 以下
回路方式	スイッチング素子種類	SiC-MOSFET
	スイッチング素子定格電圧	VDS=1200V (di/pulse) = 80A

図-46

SiC加速器中性子源

■ ベンチャー企業の参画
■ 産学連携による共同開発

JST京都地域スーパークラスター
福島SiC応用技研(株)
ローム(株)
(有)品川通信計装サービス

Stanford大学との連携

成果例

SiC-BNCTがん治療装置イメージ図

図-47

〈図-46、47〉 もう一つ、シリコンカーバイドならではのアプリケーションをやっている福島SiC 応用技研があります。これは、シリコンカーバイドでないとできない。シリコンではできない。将来はクライストロンというようなものも替えてしまおうということで、加速器中性子源の構成例を挙げています。

いま普通の加速器は、サイクロトロンというものすごく大きなものを使っていますが、シリコンカーバイドを使ったらそういうものが要らなくなるということです。この発展型としてBNCT (Boron Neutron Capture Therapy) で、これを使うと肝胆脾というボリュームのある臓器も、Boronを含んだDDS (Drug Delivery System) で薬をばらまいておくと、散らばっているがんは治療できるだろうと夢のような話です。

■ まとめと将来展望

まとめと展望

あゆみ
省エネとパワー半導体SiCへの期待
基礎研究の成果 情熱・継続・忍耐
実用化へのアプローチ 国家プロジェクトへの関与

SiCパワーデバイス

1. ユニポーラデバイス:市販レベル
ショットキーダイオード、JFET、MOSFET、モジュール
応用例で、電力損失低減の実績
今後の展開:産業用機器
プロトタイプを試作を経て広い展開を期待 「使いこなし」の重要性
2. 米国:Power America、GE; 欧州:Infineon

展望
実装・実証の必要性 パワエレ応用回路の重要性
Technology pushからMarket pullへ
世代交代、若手育成 (how to use, what to makeを考える)
制御分野人材の取り込み

図-48

〈図-48〉 将来方向です。これは改めて言う必要もないと思いますが、いまやシリコンカーバイドパワーデバイスは世の中で使われるようになってはいますが、もっと使いこなしの重要性を強く訴えています。



図-49

〈図-49〉 日本はテクノロジープッシュのサポートは非常に多い。しかし、アメリカやヨーロッパのように「良いものを作ってきたらうまく使ってあげるよ」とならないと、おいしいところはみんな取られてしまいます。ここを考えないと、これからの産業界の問題としてとても大きくなります。Technology push から Market pull。それから、若手を育て、こういうものを使うときの特別な使い方をよく知ってもらう。これが大切だということを強調したいと思います。

図-50

〈図-50〉 国家プロジェクトのおかげで日本は今のところアメリカと比較するとほぼ 2～3 年前を進んでいます。

米国は Power America ということをオバマ大統領が 2014 年の一般教書で発表し、2015 年 2 月からスタートしたプロジェクトが動いています。目標は、安いパワーデバイスを作るための Foundry を設置し、政府は 70 億円出すので地域でコンソシアムをつかってあとの 70 億円を出し、それをもとに中小企業が頑張ってパワーエレクトロニクスをつくれというものです。

それがあと 2 年ほどすると成果が出てきますから、一気に使う側で得意の腕を振るう人たちが CPES (Center for Power Electronics Systems) にいます。これは Virginia Polytechnic Institute and State University、Virginia Tech と呼んでいますが、そこに大きな研究集団

があり、15年以上のキャリアがあります。シリコンカーバイドを使ってこれだけの結果が出るという電気回路の報告がたくさん出てきています。日本は遅ればせながら、ようやくその動きが始まりました。



図-51

〈図-51〉 今年9月のSiC関連国際会議では、世界全体がNicheからMain streamに躍り出るよということを強調しました。世界全体としてこのような動きが見えている状況になってきたので、会議の委員会としても、こういうキャッチフレーズを挙げています。

提言
<p>スーパークラスタ京都の経験から</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中小企業支援 産(産)学連携 10社以上の実績あり……産学連携の成功例 ・超大手企業の参画……オープンイノベーションの芽出し <p>・各種国家プロジェクト: 産学連携+オープンイノベーションが条件 短期間でのコンソシアム形成では、目標達成困難では?</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長期に亘る組織構築と実績ある提案が必要、発展型の継続支援 !! <p>・プロジェクト志向 か 基礎研究か? 企業: 今日・明日の課題 プロジェクト: 明後日 アカデミア: 明々後日 (transformative researchへの挑戦)</p> <p>若い研究者へ勇気を与え、研究意欲をencourageするため 文科省科学研究費 萌芽研究 peer reviewは好ましくない!</p>

図-52

〈図-52〉 最後に、省庁関係のサポートの方々がお越しだと聞いているので、提言をさせていただきます。スーパークラスタ京都の経験から言うと、産学連携がかなりうまい具合に進んでいると大手企業が参画し、期せずしてオープンイノベーションが出来上がります。このような仕掛けを続けて支援して下さるようなことをお考えいただきたく思います。近ごろこの省庁も、産学連携とオープンイノベーションを強調しておられます。そのようなアナウンスがあって急きょ集まったグループでは、積み上げがない限り、3年、5年で結果が出るものではありません。100に一つとか1000に三つ、このようなことが世の中では言われていますが、限ら

れた予算であればなるだけ有効に使っていただきたく思います。

今の若手の一番の問題はプロジェクトでしか研究費が取れないものですから、プロジェクトを乗り換え、乗り換えでやっています。私が Crazy なことをやらせてもらったような雰囲気ではありません。好奇心とか真理探究とかをやりたい人たちは予算が取れません。

独立行政法人になって13年たちました。それによって1%ずつ運営費交付金が減っていきます。既に大きな大学三つがつぶれるほどの予算削減がありました。おまけに若手がやるという勇気を与えるような仕掛けがほとんどありません。ここをぜひお考えいただきたく思います。将来大化けしそうな transformative な研究がとても重要であると思っています。



図-53

〈図-53〉 将来の夢です。シリコンカーバイドパワーデバイスのリニアにも使っていただきたいです。



図-54

〈図-54〉 同時に、大型の船、それから飛行機での応用もありましょう。

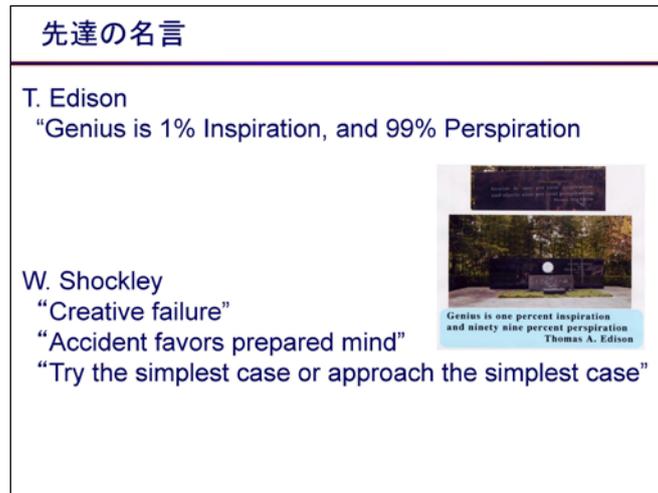


図-55

〈図-55〉 私の好きな先達の言葉です。エジソンの、「Genius is 1% inspiration, 99% perspiration」、「天才といえども本当にインスピレーションでいい結果が出るのは99%汗をかいているからだ」という言葉です。

トランジスタの生みの親 Shockley は「Creative failure」、これは日本語でも分かりやすいです。

「Accident favors prepared mind」、これは、あるアクシデントが起こったときに、いつも考えているからこれはこう使えるのではないかということです。このような気分が大切。

それから、いろいろ苦労してあることを達成したときに、もっと簡単な方法でできないか、これは私が大好きな言葉です。

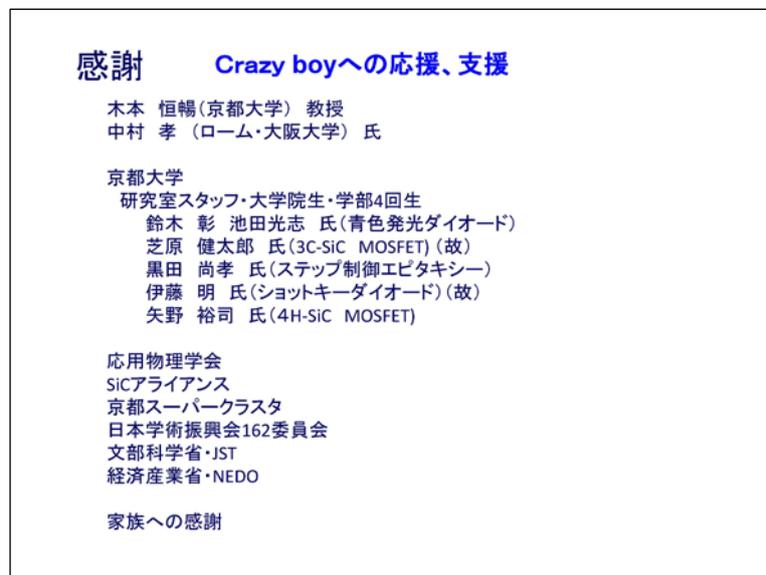


図-56

〈図-56〉 最後に、こういう方々にお世話になったことを申し上げたいと思います。特に京都大学の木本教授、現在は世界の木本として世界を走り回っています。ロームの中村さん、今は大阪大学ですが、いち早く京都大学の成果を産業界に取り込んで、SBDの大量生産、さらにはDMOSの大量生産、先行してトレンチ MOSFETの実用化を実現して下さいました。いろいろなど

ころで学生が頑張ってくれました。青色発光ダイオードの企業。それから、MOSFET の一番初め
ステップ制御エピの黒田君。ショットキーダイオードの、亡くなりました伊藤君。それから、
MOSFET の矢野君。さらには学会の、そしていろいろな支援機関の方々にお礼申し上げます。
家族、特に史子には、やりたいことをやってきて大変世話になったなと思い、最後に感謝をし
たいと思います。少し長くなりましたが、ありがとうございました。

発行所 **公益財団法人 本田財団**
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
<http://www.hondafoundation.jp>
発行者 山本雅貴