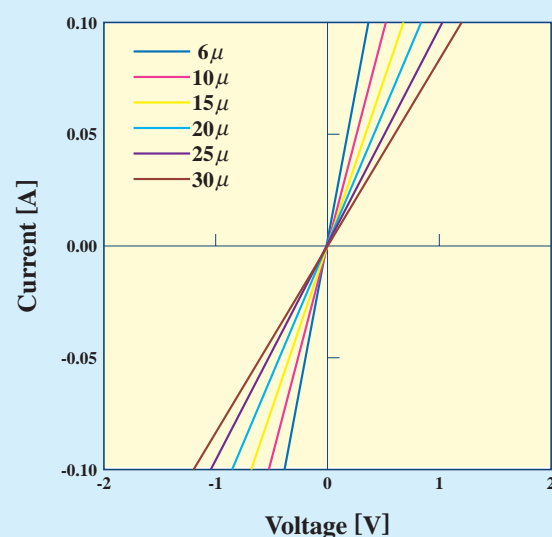


High Performance Vacuum Deposition System

I-V characteristics of Ni/Ti/SiC contact



## 電総研ニュース

超音波診断装置をベースにした新しい肝疾患

診断システムの開発

低温プロセスによる低抵抗オーミック電極形成に成功

受賞・その他

**2000.5** vol.604

# 超音波診断装置をベースにした 新しい肝疾患診断システムの開発

## Development of a New Diagnostic System for Human Liver Diseases Based on the Conventional Ultrasonic Diagnostic Equipment

基礎計測部 超音波精密計測技術ラボ

Metrology Fundamentals Division, Ultrasonic Precise Measurement Technology Lab.

In this paper, the authors show the experimental results of quantitative ultrasonic diagnosis technique for human liver diseases by using fractal dimensions ( $D_F$ ) of the power spectrum shapes of RF signals. We developed an experimental system based on a conventional ultrasonic diagnostic system, and applied the signal processing technique to RF signal of the conventional system. As a result, we showed that normal livers, fatty livers and liver cirrhosis could be discriminated by the  $D_F$  values. And we also showed that the degree of fatty livers could be estimated by the  $D_F$  values.

### 1. はじめに

今日、超音波画像診断装置は広く普及し、各種臓器や胎児の診断において、日常的に使用されるツールとなっている。腹部診断の分野では、慢性肝炎、肝硬変あるいは脂肪肝の診断でも広く利用されている。一方、超音波による肝疾患の定量診断技術開発に関する研究も盛んに行われており、近年、国内では、画像の特徴抽出に関する研究等について、成果が発表されている<sup>1,2)</sup>。しかしながら、臨床の現場において利用されるためには、実験室レベルの研究だけでは不十分であり、測定上の様々な制約条件をクリアすることが求められる。また、医療現場の医師、及び医療診断機器業界双方が満足できる機器開発を目指すなければならない。

我々は、肝臓からの超音波エコー波形から疾患程度の定量診断を行うための、新しい信号処理法を提案し<sup>3)</sup>、既に広く普及している超音波診断装置の付加機能の一つとして利用することを目的とした研究を進めている。現在は、超音波診断装置で使われている超音波波形に、この信号処理技術を適用することの可否について、臨床での検討を通じて検証を行っている。このような新しい信号処理技術を既存の診断装置の付加機能として利用することのメリットとして、  
(1) 既に使われている装置の延長線に位置づけることにより、臨床の現場でも受け入れ易く、新しい技術として広く普及されることが期待できること  
(2) 医用超音波診断機器業界にとっても、新規に装置を開発する負担を伴わずに、比較的短期間で

新しい超音波定量診断技術を開発・実用化できる可能性が期待できること  
等があげられる。

本稿では、実験用に試作した装置の概要、及び正常肝、肝硬変及び脂肪肝を対象にして行った、臨床におけるデータ解析結果について報告する。

### 2. 信号解析の原理

ここで提案する波形解析法は、散乱媒質からのエコー波形のパワースペクトル(以下、PSと略す)形状が、媒質を構成する散乱体の空間分布に強く依存することに着目し、PS形状の複雑さをフラクタル次元(以下、 $D_F$ と略す)<sup>3)</sup>を用いて数値化するものである。この方法により、散乱体の数が少ない正常肝組織では超音波エコー波形のPS形状は、凹凸が多い複雑な図形となるため $D_F$ は大きくなり、逆に線維や脂肪滴が増加する肝硬変や脂肪肝等では散乱体の個数が多くなるため、パワースペクトル形状の凹凸が少なくなり、 $D_F$ は小さくなる。このことを定性的に図1で説明する。図1は、散乱体数が少ない(散乱体密度小)場合及び散乱体数が多い(散乱体密度大)場合のそれぞれについて、散乱体が等間隔の場合とランダムの場合のPSの計算例である。等間隔の場合、PS上のピーク列も等間隔となり、その間隔は散乱体間隔に反比例する。即ち、散乱体数が少ない媒質では、PS上のピーク数は多くなり(a)、逆に散乱体数が多くなるとピーク数は少なくなる(b)。一方、一般の生体組織などでは、散乱体は等間隔ではなく、ある平均値

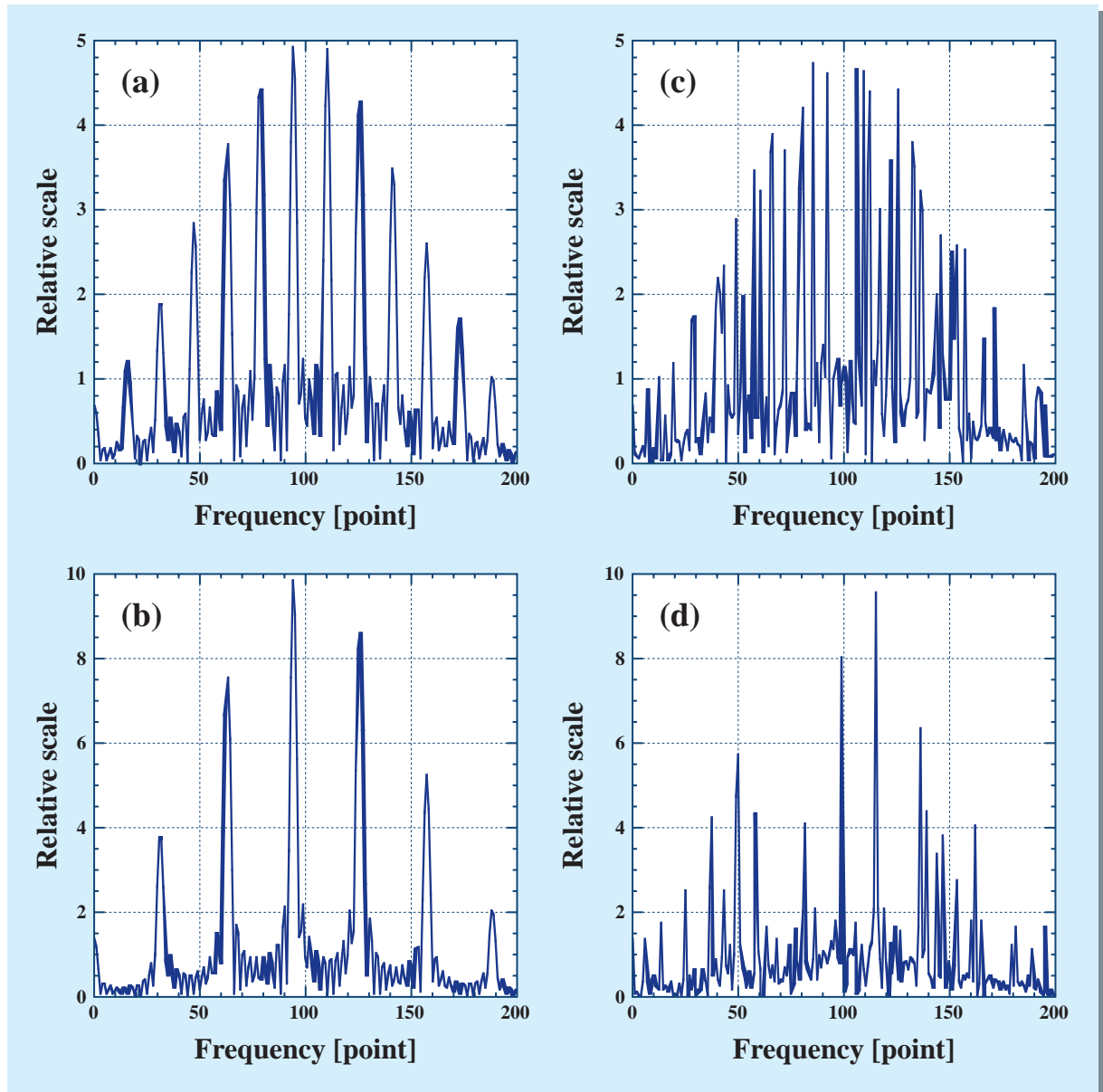


図1 散乱体密度及び間隔分布とPS形状の関係（数値計算結果）

の周辺にばらついて分布する。従って、PS形状に現れるピークも等間隔ではなくなり、複雑な形状を示すようになる。しかし、ピーク数の大小の傾向自体、即ち図形としての複雑さ自体は保存され、散乱体配置にばらつきがある場合でも、PS形状の凹凸の複雑さは、散乱体数に依存することがわかる。 $D_F$ でPS形状の凹凸の程度を数値化した場合、(c)は(d)よりも凹凸が多いため、 $D_F$ は大きな値を示す。

以上の原理に基づいて、実際の肝臓について考察すると、肝硬変あるいは脂肪肝など肝臓中に線維化や脂肪滴などで散乱体密度が高くなると、肝臓からの超音波エコーのPS形状は凹凸が少なくなるために

$D_F$ が小さい値を示し、逆に散乱体密度が小さい正常肝では、PS形状は凹凸が多くなるために $D_F$ が大きな値を示す傾向が見られる。ラット肝を用いた実験で得られたPSの例を図2に示す。これらは、正常、及び薬物で線維化を生じさせたラット肝を摘出して5MHzの超音波で測定した、超音波エコー波形のPSであり、正常肝のPSでは線維化を生じたPSよりも若干凹凸が多いことがわかる。これらのPSについて $D_F$ を計算すると、正常ラット肝のPS形状の $D_F$ は一般に1.9以上と大きく、線維化を生じたラット肝では1.8前後と小さくなる<sup>4)</sup>。

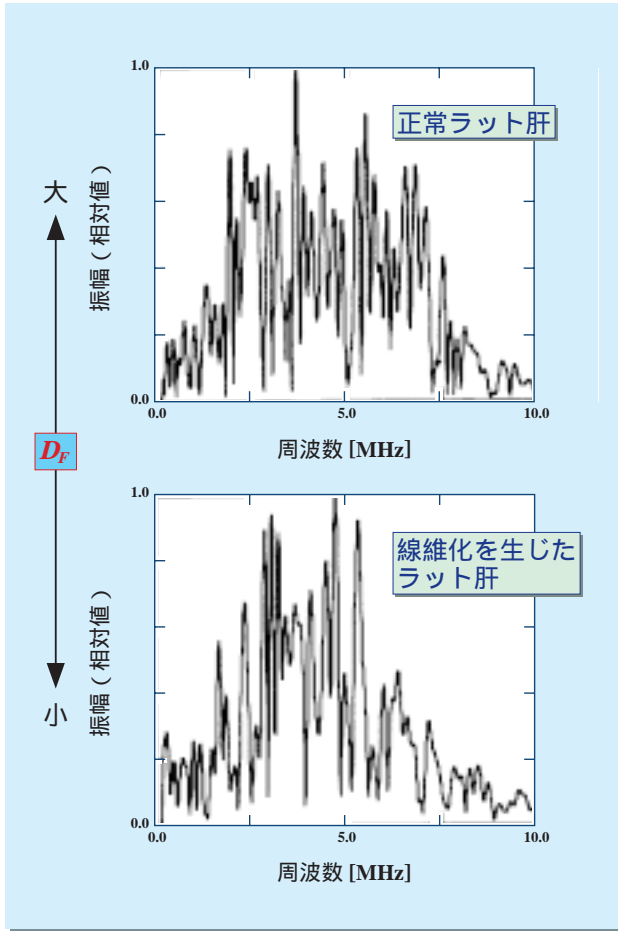


図2 生体からのエコー波形のPSの例  
(上：正常ラット肝、下：線維化を生じたラット肝)

### 3. 既存の超音波診断装置をベースにした波形データ収集・ $D_f$ 計算システム

以上のような原理に基づいて、本方法を人の肝疾患の定量的診断に応用することを試みた。

本研究は、医療機関である福島県立医科大学第一内科、及び医用超音波機器メーカーであるアロカ(株)と、図3のような役割分担のもとで、97年度から共同研究体制を築いて行ってきた。

解析システムの概略を図4に示す。波形データ収集は、福島医大第一内科で使用していた超音波診断装置(アロカ製SSD-2000)を改造して使用した。具体的には、同装置のRF波形、及びトリガ信号を外部に出力する端子を設け、波形デジタル化(ソニーテクトロニクス社製、RTD710A、10bit、20MHzサンプリング)経由でコンピュータ(DELL社製 Optiplex)に取り込む。波形を収集する肝臓の部位は、診断装置の断層画像上に表示されるカーソルで任意に設定でき、カーソル線上の波形が収集される。データ収集では、

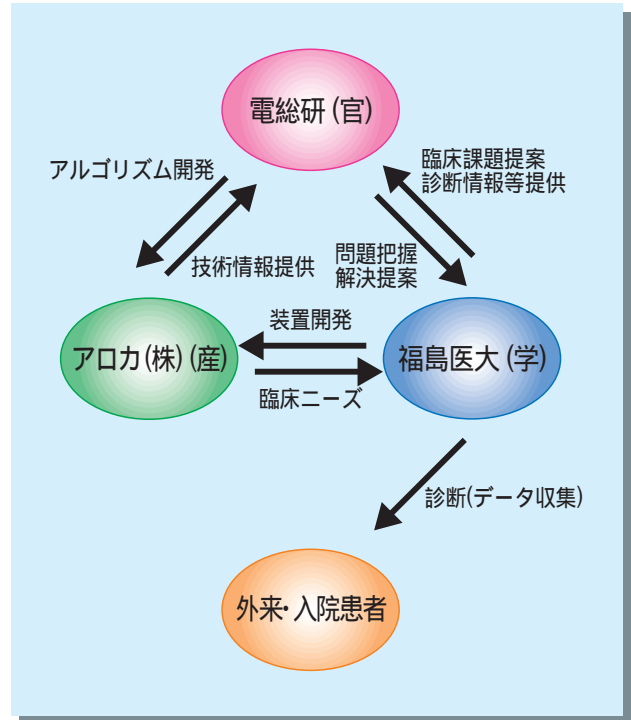


図3 本研究の実施体制

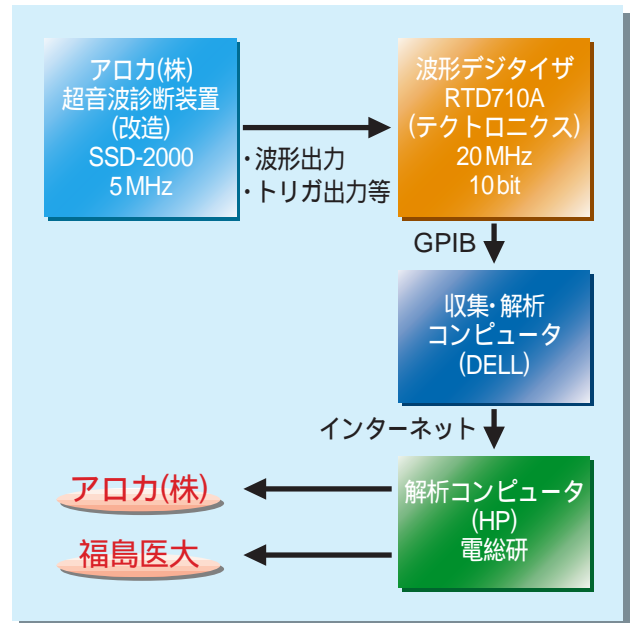


図4 データ収集・解析システムブロック図

解析上問題となる、大きな脈管等を、可能な限り避けた。福島医大で収集された波形データは、現場でも $D_f$ を計算できる他、インターネット経由で電総研にも転送されるシステムとなっている。電総研では、PS及び $D_f$ を、ワークステーション(HP社製C110)上で計算した。原則として、一人の患者に対して、10本もしくは20本の異なる部位からの波形データを収集

し、それらの各波形データから得られる  $D_F$  の平均値をもって、その患者の  $D_F$  と定義した。正常(N)15例、肝硬変(LC)9例及び脂肪肝(F)18例についてデータ解析を行った。

#### 4. 解析結果

##### 4-1. $D_F$ による疾患の識別結果

図5に、正常、肝硬変及び脂肪肝それぞれのグループの  $\log$ - $\log$  プロット<sup>3)</sup> の平均値を、また図6に図5

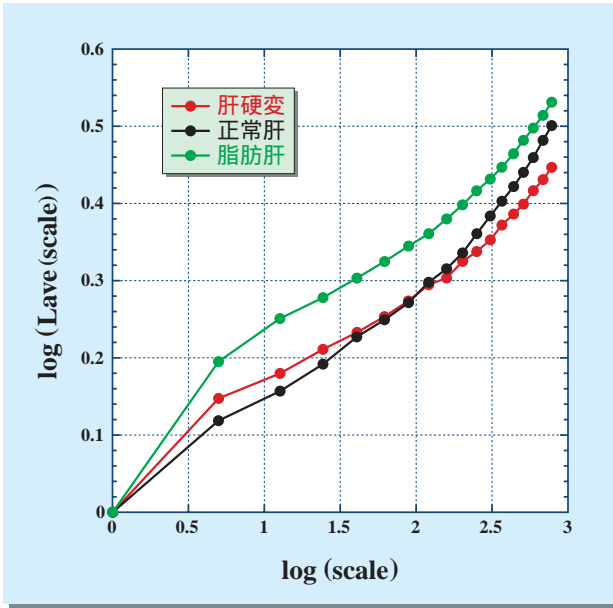


図5 正常、肝硬変および脂肪肝各グループの  $\log$ - $\log$  プロットの平均値

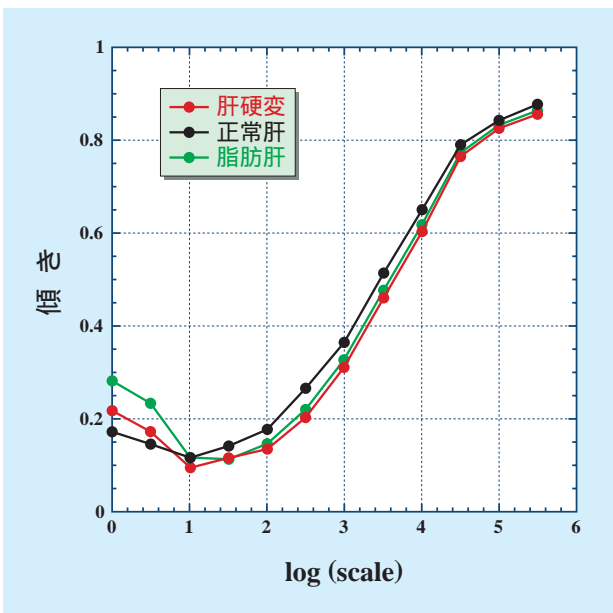


図6 Fig.5の各グラフの傾き  $H$

のグラフの傾きをそれぞれプロットした。このように、各グループ毎に  $\log$ - $\log$  プロット上に特徴が観察された。図6からわかるように、スケールが小さい領域で、グラフの傾きの大きさ  $H$  が脂肪肝 > 肝硬変 > 正常の順になっており、このスケールで解析したときに、 $D_F$  ( $=2-H$ で定義される) に、各疾患の特徴が現れている。この  $D_F$  を全患者についてプロットした結果を図7に示す。同図から、以下の点が明らかになった。

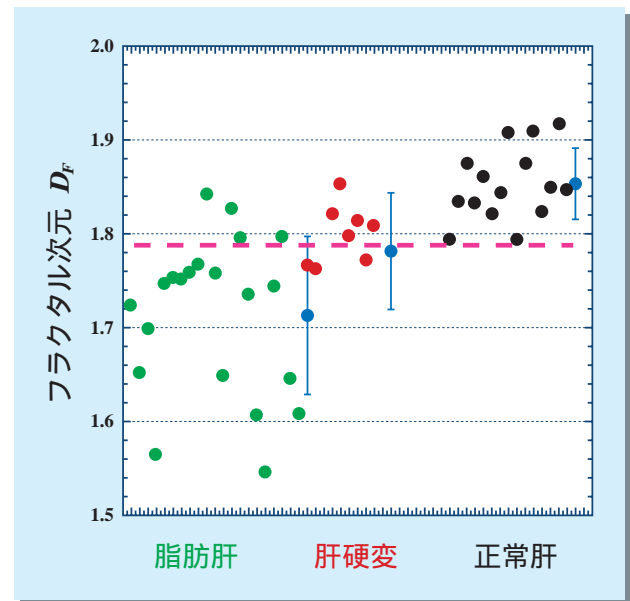


図7  $\text{scale}=1$  における  $D_F$  計算結果。  
青色プロットは各疾患グループの平均値と標準偏差。

- (1) 肝硬変と脂肪肝は、図7中に破線で示したように、概ね、 $D_F$  を用いて識別可能である。
- (2) 肝硬変と正常は重なりが大きく、 $D_F$  のみでの識別は困難である。
- (3) 脂肪肝と診断された患者の  $D_F$  はばらつきが大きい。

これらのうち、(3)については、後述する。(2)の問題を解決するためには、 $D_F$  以外の指標が必要になる。ここでは、図6における  $\log(\text{scale})=1$  近傍で  $D_F'$  値を計算し、これと図7の  $D_F$  との比  $R_{DF}(D_F'/D_F)$  を定義し、計算を試みた。 $R_{DF}$  の計算結果を図8に示す。同図に示すように、破線で示したある  $R_{DF}$  を境にして、正常と脂肪肝及び肝硬変とが、ほぼ識別できることがわかる。以上を整理すると、以下の2点が明らかになった。

- (1)  $R_{DF}$  を用いることにより、正常とそれ以外とに識

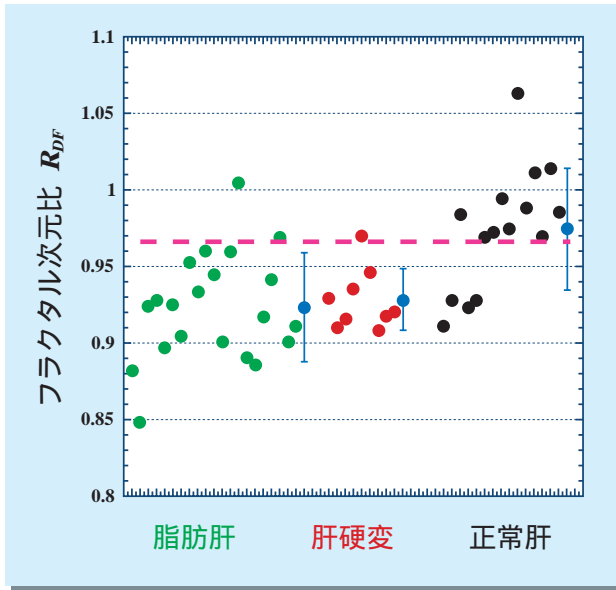


図8  $R_{DF}$  計算結果。青色プロットは各疾患グループの平均値と標準偏差。

別でき、

- (2)  $D_F$  を用いることにより、肝硬変と脂肪肝を識別することができる。

実際に得られた波形データに対して、上記(1)(2)を適用し、これらの疾患の識別の可能性について検討した。その結果、正常肝では15例中11例、肝硬変は9例中6例、脂肪肝では21例中16例が、正しく識別でき、全体として正しく識別された割合は73%であった。即ち、 $D_F$  及び  $R_{DF}$  を用いることにより、画像診断を用いずに、70%以上の識別率で、これらの疾患を識別できることがわかった。

本結果のポイントは2つある。

- (1) 画像診断の経験が無くても、患者から超音波エコー波形を収集する技術ができさえすれば、自動的に疾患識別が可能であることを示した点にあり、将来的には、いわゆる集団検診など、スクリーニング検査などにおいて、より迅速な疾患識別に応用できる可能性があると考えられこと。
- (2) この成果が、既存の超音波診断装置の波形信号をそのまま利用して得られたこと。

今後、更に、識別率を向上させることが求められる。

#### 4-2. 脂肪肝の定量診断結果

図7からわかるように、医師が脂肪肝と診断した患者グループの  $D_F$  は、ばらつきが大きい。従来、この  $D_F$  のばらつきは、各患者の脂肪肝の程度を反映しているものと推測されるので、この点を確認するた

めに、超音波診断画像から、脂肪肝の程度を医師の経験に基づいて点数(Fatty score)化し、その点数と  $D_F$  との間の相関について検討を行った。具体的には、超音波診断装置で脂肪肝を診断する際に、医師が経験的に着目している、

- (1) 肝腎コントラスト(肝臓と腎臓の画像上のコントラストの違いが大きいほど脂肪肝が強い)
- (2) 深部エコーの減衰(脂肪肝が強いほど、深部で超音波の減衰が大きい)
- (3) 脈管の不明瞭化(脂肪肝が強いほど、脈管等が画像上で不明瞭になる)

をもとに、総合的に0(弱)から7(強)の8段階で点数化を行い、 $D_F$  と比較した。3名の医師の経験に基づいて点数化された Fatty score (縦軸) と  $D_F$  (横軸) を比較した結果を図9に示す。この結果から、点数が

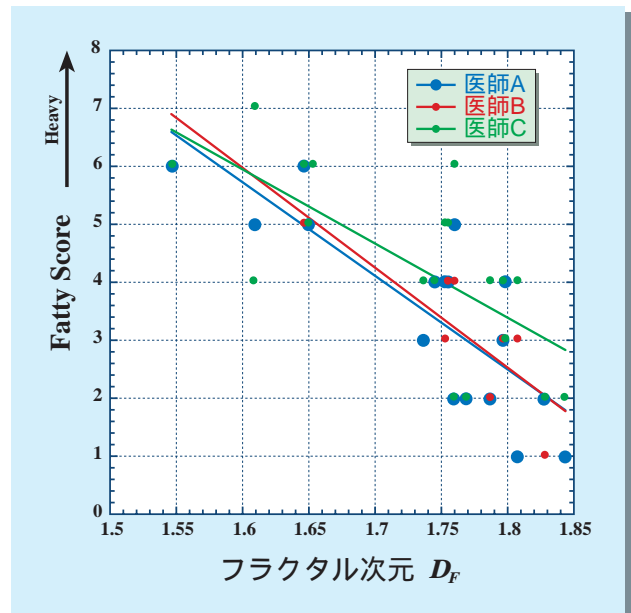


図9 3人の医師によって点数化された脂肪肝程度(縦軸)と  $D_F$  (横軸) の比較。直線は、各医師毎に最小自乗近似した結果

大きい患者、即ち経験的に脂肪肝が高度と考えられた患者については  $D_F$  が小さく、逆に脂肪肝が軽度と診断された患者では  $D_F$  が大きく、全体として明瞭な相関が見られた。このことから、以下のことが結論づけられる。

- (1) 脂肪肝患者について得られた  $D_F$  は、医師が超音波診断画像に基づいて経験的に診断した脂肪肝の程度と良い相関がある。
- (2) このことから図7で示した脂肪肝患者の  $D_F$  のばらつき要因は、各患者の脂肪肝の程度を反映し

ている可能性がある。

以上の結果から、脂肪肝患者については、 $D_F$ を用いることにより、画像診断の経験が浅い医師でも、脂肪肝の程度を定量的・数値的に評価できる可能性があることが示された。

脂肪肝診断も、人間ドックなどの集団検診におけるチェック項目の一つであるが、その程度を数量的に表現することは、現在はできない。本手法により、例えば一人の患者の脂肪肝の状態の変化を、時間を追って数値的に診断することなどが可能になる。

## 5. まとめ

本研究では、肝臓からの超音波エコー波形のパワースペクトルを計算し、その形状をフラクタル次元( $D_F$ )で数値化することにより、

(1) 正常肝、肝硬変及び脂肪肝の識別

(2) 脂肪肝の数値化

が可能であることを示した。

今回の結果のポイントは、既存の超音波診断装置のエコー波形をそのまま解析して得られた点にある。即ち、本手法を実用化するために、新規の診断装置の開発を必要としない。ここで行っている演算も高速フーリエ変換と $D_F$ を求める簡単な計算のみであり、パソコンレベルでもほぼ実時間で $D_F$ が得られる。従って、これらの演算機能を組み込んだボードを作成し、既存の超音波診断装置に組み込むとともに、結果を表示する機能を付加するのみで、容易に実用化が可能である。

今後の課題としては、肝硬変についても、今回の脂肪肝同様、その程度を何らかの方法で別途数値化することで、 $D_F$ との比較を試みたい。また、慢性肝炎についても、既にデータ収集を進めており、解析を予定している。

## 研究課題名

「医療及び福祉機器技術の研究開発」  
組織性状超音波定量診断技術の研究

## 参考文献

- 1) 山口他、日本音響学会講演論文集、2000年3月、p1075、等。
- 2) I. Akiyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol.34(1995) pp.2826-2830.
- 3) 菊池他、日本音響学会誌 47 巻 11 号 (1991) pp.818-824.
- 4) T. Kikuchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol.34(1995) pp.2831-2834.

---

## ラボメンバー (Lab. Members)

菊池 恒男 (Tsuneo Kikuchi)  
e-mail:kikuchi@etl.go.jp

佐藤 宗純 (Sojun Sato)

基礎計測部 (Metrology Fundamentals Division)

基礎計測部 (Metrology Fundamentals Division)

# 低温プロセスによる低抵抗オーミック電極形成に成功

- パワーデバイス用炭化珪素(SiC)のプロセス技術の新展開 -

## Low Resistivity Ohmic Contacts Formed to n-type SiC at Room Temperature

- Evolution in Process Technology for SiC Power Devices -

先進パワーデバイス研究室  
材料科学部 ハードエレクトロニクス・ラボ  
Advanced Power Devices Lab.  
Materials Science Division, Hard Electronics Lab.

Low resistivity ohmic contacts to heavy dope n-type 4H-SiC were accomplished by two different methods with and without post metal-deposition annealing. An adequate process for fabricating TLM test structures was carefully designed and carried out, which included phosphorous implantation and activation, mesa etching, field oxide growth, opening of contact windows, and formation of Ni/Ti/SiC or Al/SiC contacts by electron beam evaporation and patterning. Superior linearity in I-V characteristics between contacts and specific contact resistance in the range of  $10^{-6}$  ohm-cm<sup>2</sup> to  $10^{-7}$  ohm-cm<sup>2</sup> were observed.

### 1. はじめに

21世紀では、現在より高度な情報化社会になり、これを支える情報産業、エネルギー産業を含むあらゆる分野で、エレクトロニクス化が要求され進展すると思われる。現在のエレクトロニクスはシリコン半導体を中心とする電子デバイスによっているが、21世紀ではシリコン半導体だけでは、これらあらゆる分野のエレクトロニクス化に対応することができない。特に送電システムなどエネルギー輸送に用いる電子デバイスでは、現在のシリコン半導体の電子デバイスでは達成できない超低損失な高パワー・高周波・高集積を兼ね揃えたデバイスが必要で、このためにはその物性値からみてシリコン半導体より優れている炭化珪素(SiC)、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体による開発が期待されている。

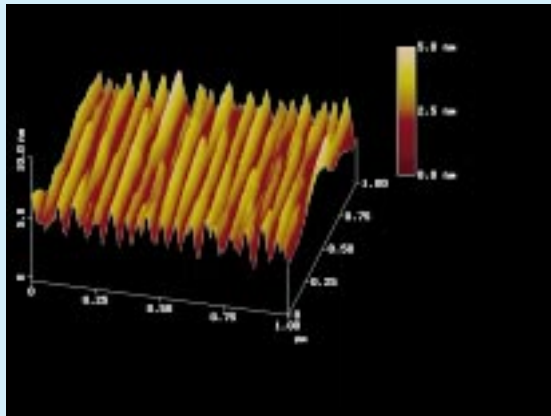
当所では、これらの状況から21世紀の社会を支えるエレクトロニクスの基盤技術の確立を目指して、産官学による研究プロジェクト「ハード・エレクトロニクス技術」を提唱した。そして、平成10年度から5年計画でニューサンシャイン計画のエネルギー輸送の省エネルギー化を目標とする「超低損失電力素子技術」(UPD)として、炭化珪素のデバイス化材料技術を中心とした研究を、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けた新機能素子協会(素子協)と電総研の共同研究として、当所の中に集中研を設けて実行している。

今回、このUPDプロジェクトの研究の中で、デバイス化プロセスの鍵技術の1つである金属/半導体界面制御において、低温プロセスによる低抵抗オーミック電極形成に成功したので、これについて紹介する。

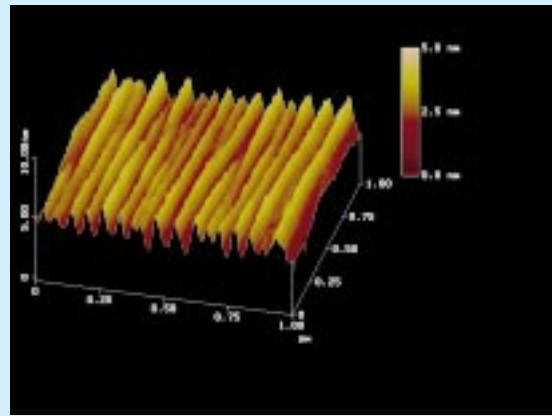
### 2. SiCのオーミック電極

電子デバイスの構成の中で、電気を流すために電極(金属)を形成する必要があるが、半導体材料の電気的特性を最大に生かすためには、この金属と半導体界面における接触抵抗が少ないオーミック電極(コンタクト)を形成する必要がある。本プロジェクトの対象材料である炭化珪素(SiC)の場合、実用レベルとしてこのオーミックの接触比抵抗値は $\rho_c=10^{-6}\Omega\text{cm}^2$ 以下のものが要求されている。

一般に、オーミックコンタクトを得る方法として、電極材料を成膜したのち高温でアニールして界面をアロイ化させる伝統的な方法(以下「D&A法」と略称)と、理想的な金属/半導体界面を形成しコンタクトアニールを施さず低抵抗を実現する低温形成法とがある。D&A法は既に本テーマの数値目標に一桁に迫るの技術が文献等で公開されている。しかし、この方法では目標値に早く到達するという意味では、手の着けやすい方法である反面、コンタクトアニールが引き起こす障害が多く報告されており、実デバイスに適用するにはこれらを丹念に潰していく地道な努力が必要である。



(a) RCA 洗浄のみ



(b) RCA 洗浄と犠牲酸化

図1 AFMによるSiCエピ層の表面モフォロジーの観察

一方、コンタクトアニールを必要としない低温法はこの障害を一挙に取り除く可能性を秘めた極めて魅力的な方法であるが、報告例が余りにも少なく、技術的見とおしが立っているとは言い難い。実際、報告されているSiCのn型の抵抗値は目標値の何桁も上の値であり、p型に至っては報告は皆無である。低温形成法はハイリターンだがハイリスクの方法なのである。

### 3. 表面処理プロセス

電極蒸着前の表面処理は低抵抗の金属/SiCコンタクト形成の重要な出発点である。D&A法ではアニールする前の界面の構造や界面の異物がコンタクトアニールの合金化反応、ひいてはコンタクト抵抗に強い影響を与えることが広く知られている。この傾向は低温形成法ではより顕著であり、影響は重大である。この意味で、蒸着前処理を確立するなら感度の高い低温形成法で形成したコンタクトで検討するのが好ましい。

以前、電総研のグループは、RCA洗浄、犠牲酸化および沸騰水処理などからなる前処理によって、異なる結晶形のあるSiCの6H基板を用いた金属/n型6H-SiCの界面の系において、界面準位密度を減少させることにより、界面で生じる電氣的障壁(ショットキー障壁)の高さが金属とSiCの仕事関数の差で決まるピンニングフリーと呼ばれる理想的な界面に近い状態を実現した。(電総研ニュース、556号)そして、この方法により仕事関数の小さい金属を選択することにより、Ti/n型6H-SiC( $N_d=5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ エピ)の系でコンタクトアニールを行うことなく、オーミック特

性(コンタクト抵抗 $\rho_c=6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ )が得られることを初めて示した。本研究では、この成果を出発点として、SiCのパワーデバイス用材料としては本命と期待される4H基板(Si面)に置き換えて、同方法の再検討を行った。その結果、6H-SiC同様、犠牲酸化が界面準位密度を減少させる効果があり、Ti/n型4H-SiC界面の障壁高さを減少させ、それに伴いオーミックコンタクト抵抗を低減させることが明らかになった。しかし沸騰水処理の明確な効果は今回の検討からは見られなかった。

犠牲酸化の効果の起源を探求するために、洗浄のみ、犠牲酸化、それぞれのサンプル( $N_d=1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )において、AFMを用いて表面モフォロジーを観察した。その結果を図1に示す。図1(a)に示す洗浄のみのサンプルにおいては、ステップに垂直方向の面が見られる。一方、図1(b)に示す犠牲酸化を行ったサンプルにおいては、洗浄のみのサンプルに見られたステップに垂直方向の面が顕著に減少している。ステップに垂直方向の面の減少により、SiCエピ層表面におけるダングリングボンドが減少していることが考えられる。

図2に4H-SiCのSi表面(理想的には表面がSi原子だけでカバーしている面)の表面処理におけるX線光電子分光(XPS)スペクトルの相違を示す。図のスペクトルはC(カーボン)1sの観察結果であるが、洗浄のみの場合に見られるカーボンによるピークが、犠牲酸化によって低減されていることがわかる。これより、犠牲酸化によって金属/SiC界面(Si面)を形成するとき、理想的な界面の形成を阻害するカーボ

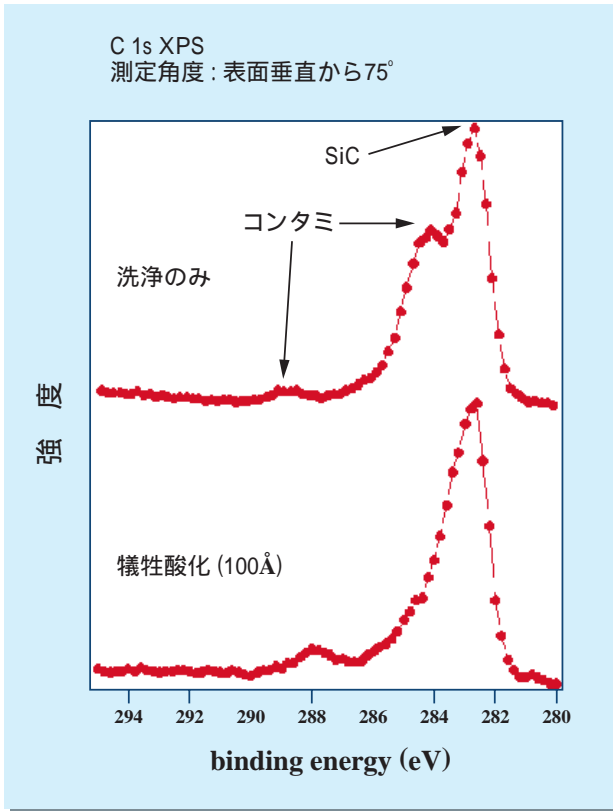


図2 XPSによるエピ層表面の評価( $N_D=9.4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ )

ンが減少したと考えられる。こうして、界面準密度の少ないピニングフリーな界面になり、ショットキー障壁の高さが金属の仕事関数によっては減少できるようになったと解釈できる。

#### 4. コンタクト抵抗の評価

$\rho_c < 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ のコンタクト抵抗を精密に評価するには、寸法精度の高いTLM (Transmission length model) 構造あるいはケルビンコンタクト構造のTEG (Test element group) 形成が必須である。図3は、電極材料の様々な性質や実デバイス構造のニーズに柔軟に対応させるために設計した3つのTLMの断面構造を示している。ここでは $p^-$ エピ基板に形成したイオン注入 $n^+$ 層にコンタクトを形成する例で示しているが、 $p$ 基板に形成した $n^+$ エピ層にコンタクトする場合、 $n^-$ エピ層に形成した $p^+$ イオン注入層にコンタクトする場合、 $n$ 基板に形成した $p^+$ エピ層にコンタクトする場合も、ほぼ同様な構造である。

図3 (a)はコンタクトメタルがNiやPtのようにエッチングによるパターニングがし難い材料のときにも構成できる極めて汎用性の高い(=材料を選ばない)構造で、我々が独自に提案した構造である。コンタク

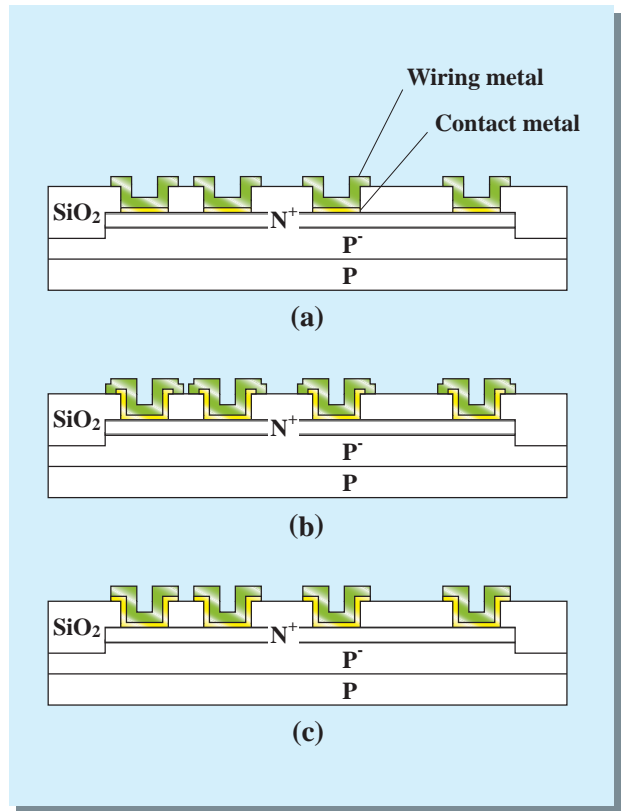


図3 製作可能なコンタクト構造

トメタルが容易にエッチングできるときには、(a)ほかに(b)の構造を選択することができる。さらに、コンタクトメタルが配線メタルと連続してエッチングできる材料系ならさらに選択肢が広がり、(c)の構造も選ぶことができる。図示していないが、この3構造はケルビンコンタクトTEGでも同様に設定され、選択することができる。

#### 5. 実験例 - 低温形成法で作製した低抵抗Ti/4H-SiC構造

コンタクト抵抗を低減するには、原理的に、抵抗の原因となるショットキー障壁 $\phi_b$ を、(a)下げるか、(b)薄くするか、である。Ti/6H-SiC系で提案された仕事関数の低いTi電極の選択とピニングフリーの界面の創製からなる方法は(a)の実践であり、高電子濃度のエピ基板を使ってトンネリング起こしやすくする方法は(b)に依拠している。しかし、両方法を連携させる試みはまだない。

良く知られているように、高濃度に不純物を添加( $>3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )した半導体基板に接触させた金属のコンタクト抵抗はトンネル放出を主体とした伝導機構となり、これは

$$\rho_c \propto \exp(\phi_b / (N_d)^{1/2})$$

で表される。この式は不純物高添加半導体においても  $\phi_b$  はコンタクト抵抗を決定する重要な因子であることを示唆している。特にSiCのように不純物添加が  $N_d=10^{20}/\text{cm}^3$  以上の高い範囲では困難となる半導体系では、コンタクト抵抗を下げるために、高不純物領域であっても  $\phi_b$  を下げる意味は大いにある。

以上の考察の結果を受けて、ショットキー障壁を (a) 低くすると同時に (b) 薄くする、両方の効果を狙った検討を行った。

p 型 4H-SiC エピ基板 (Si 面) 全面にイオン注入した P (リン) 不純物層 ( $2.7 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ) を  $1700^\circ\text{C}$  Ar 雰囲気中で活性化させた後、所定の  $n^+$  領域をメサ分離した。つづいて前項で述べた蒸着前処理 (洗浄工程) を行い、基板に 10nm 厚のドライ酸化膜と 400nm 厚の CVD-SiO<sub>2</sub> を成膜した後、前記メサ上に HF エッチでコンタクトホールを開孔、直ちに Ti (100nm)、Ni (200nm) を連続蒸着し、TLM 電極パターンを形成した。

隣接する2つのコンタクト間でIV特性を測定したところ、図4のように、すべての電極間で直線性の良いオーミック特性が得られた。図5はIV特性から求めたコンタクト間の総抵抗  $R_t$  とコンタクト距離  $L$  の関係である。この図からコンタクト抵抗  $\rho_c = 4.6 \times 10^{-6} [\Omega\text{cm}^2]$  と  $n^+$  層のシート抵抗  $R_s = 54 [\Omega/]$  抽出される。この  $\rho_c$  は低温形成法の結果として報告されている最小の値である。図6にはこの低温形成法で達成したコンタ

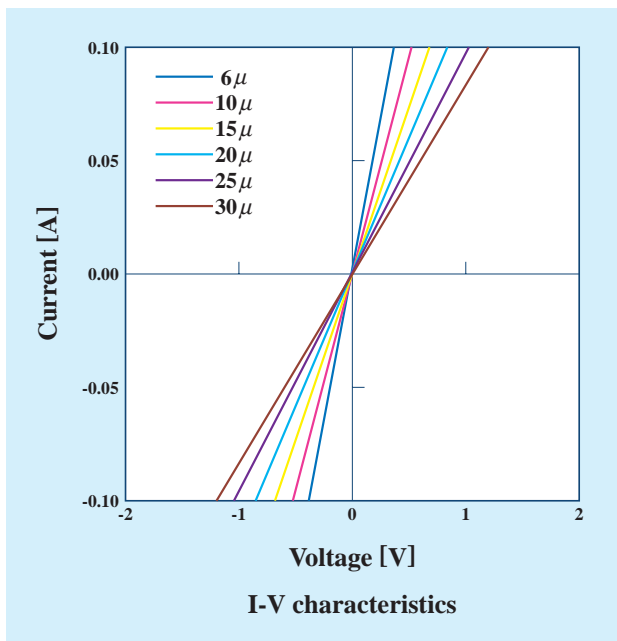


図4 Ni/Ti/SiC コンタクトの IV 特性 (低温形成法)

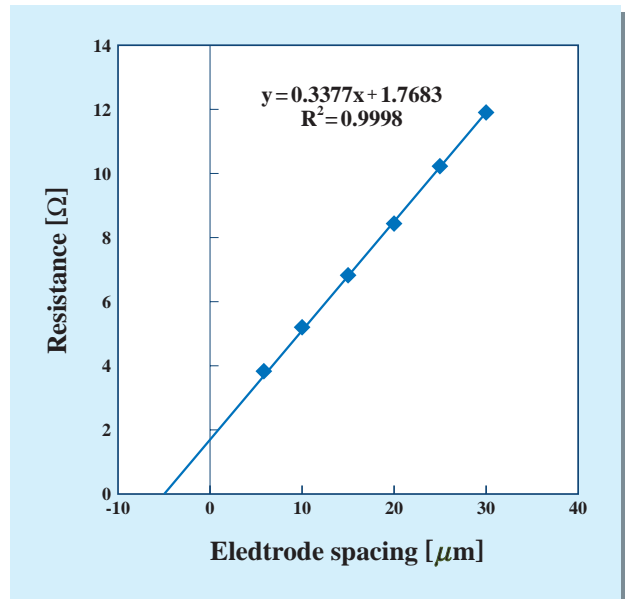


図5 Ni/Ti/SiC コンタクトの TLM 特性 (低温形成法)

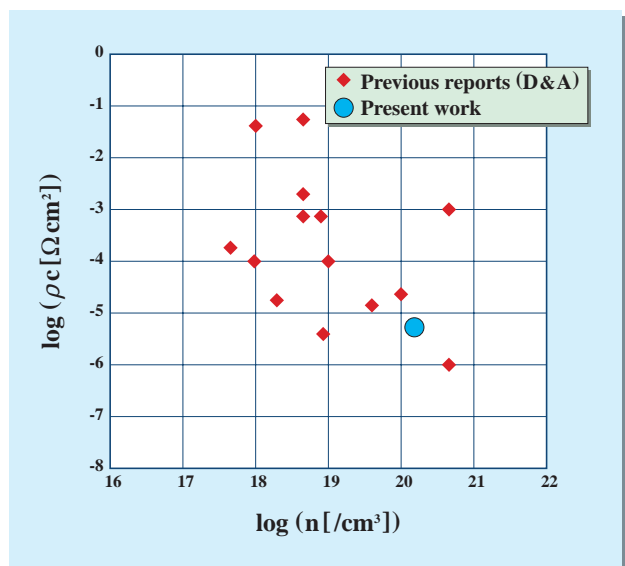


図6 コンタクト抵抗の比較

クト抵抗 (図中 印) を最近の D&A 法の結果とともに、基板の電子濃度で整理してプロットしている。同図から低温形成法でも D&A 法と比べて何ら遜色のない低抵抗コンタクトが達成できることが理解される。

低抵抗を示した TLM の断面を透過型電子顕微鏡で観察した。図7は Ti/SiC 界面を約 600 万倍で撮影したものである。挿入図は界面の透過電子線回折像である。界面で SiC と Ti の格子が連続していること、SiC と Ti の回折スポットが重なるように整列していることから、P イオン注入した SiC 基板の上に Ti がエピタキシャル成長していることが明らかになった。

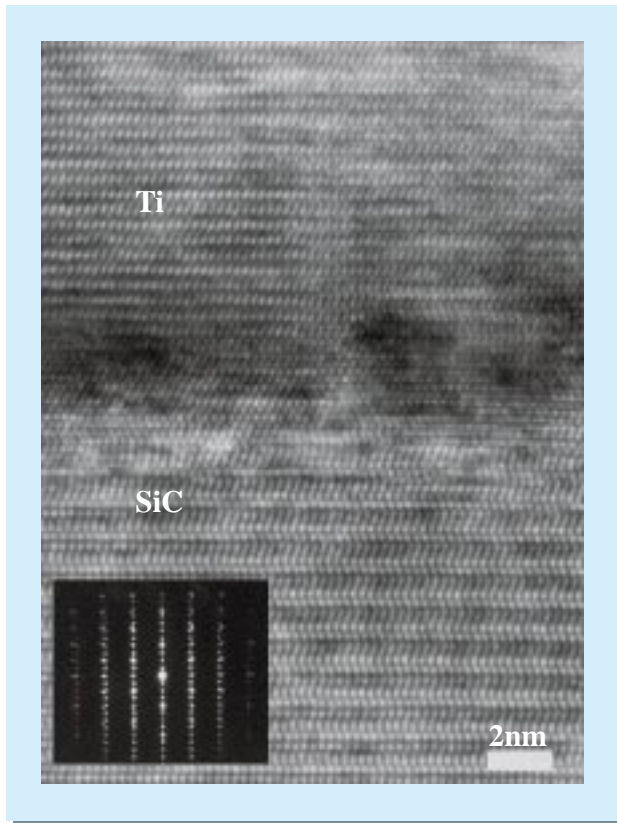


図7 低温法で形成した Ti/SiC コンタクトの TEM 観察

以上、低温形成法で作製した低抵抗 Ti/4H-SiC 構造について述べたが、イオン注入プロセスを行わない、エピタキシャル成長時の窒素ドーピングによる  $n^+$  層を用いた低温 Al/4H-SiC 系でも優れた低抵抗オーミックコンタクトが得られることが判明した。前述の Ti/SiC 界面の結果と比べて、この系の特筆すべき特徴として以下の点がある。(a) 不純物濃度が一桁以上低い  $n^+$  SiC エピ基板でほぼ同じコンタクト抵抗が得られたこと、(b) 電極材料が Si プロセスに整合性の高い Al であること、(c) Al は従来 SiC において p 型コンタクトの電極材料でもあること等である。この系を採用することにより、n 型と p 型コンタクトが同じメタルで取れ、コンタクト形成プロセスが簡略化できる可能性がある。

## 6. まとめ

本稿では UPD プロジェクトで展開している 4H-SiC の低接触オーミックコンタクト技術について研究成果について紹介した。本研究では、SiC の p/n 両伝導型のコンタクトに共通的に用いられる基盤技術である、1) 蒸着前処理、2) コンタクトの構造とプロセスの設計、3) TEG 設計、4) 要素プロセスの条件だしを行い、その技術を確立した。そして、低温形成法という、実用デバイス化プロセスとして魅力ある方法において、n 型 SiC で  $\rho_c = 4.6 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  のコンタクト抵抗を達成することに成功した。現在、この手法の発展を図るとともに、温度環境の変化など実用レベルでこの手法で得られたコンタクトがどこまで適用できるか、実際のデバイスのプロセスに導入してテストを行っている。まだ確定的な結論は出せないが、実用レベルへの適用もかなり有望である感触を得ている。

### ラボメンバー (Lab. Members)

谷本 智 (Satoshi Tanimoto)

e-mail: s-tani@etl.go.jp

先崎 純寿 (Junji Senzaki)

早見 泰明 (Yasuaki Hayami)

大串 秀世 (Hideyo Okushi)

荒井 和雄 (Kazuo Arai)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

材料科学部 (Materials Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

## 受賞

### 黒川一夫氏が勲四等瑞宝章を受章

(元電子計算機部長)

(平成12年5月11日)



(電総研での功績)

黒川氏は、昭和31年4月東京大学工学部電気工学科より当所に出向、アナログ計算機の研究に従事した。昭和36年11月には学位論文「磁気増幅器式アナログ計算機」により東京大学に於いて工学博士の学位を取得した。

その後、次の時代ではデジタル計算機が主流になるとの判断のもと、アナログとデジタルの技術を融合させたハイブリッド計算機の開発に取り組んだ。

昭和41年4月に制御部計測制御研究室長、昭和45年企画室長、昭和46年10月には電子計算機部長と、要職を歴任し、この間多くの国際会議、内外の論文誌を通して、上記の技術の普及に努め、「ハイブリッド計算機のシミュレーション研究」に関し世界に果たした氏の功績は絶大なものがある。特に、その研究過程において磁気増幅器が電流増幅動作であることに

着目し、電流相似演算器理論を発展させ、新たに電流相似型磁気増幅器を完成させた。その研究業績は国際アナログ計算会議より高く評価された。

昭和39年8月から3ヶ月間、同会議に出席するとともに欧米各国における各種計算機および自動制御に関する試験研究の動向調査のため、イギリス、ベルギー、オランダ、フランス、イタリア、チェコスロバキア、西ドイツ、カナダおよび米国に出張した。この時の研究成果は、各方面に多大な関心をもたらした。

昭和41年には、それまでデジタル化のみに注力が集中されていたICを、アナログの領域に適用し、まったく新しいタイプのハイブリッド計算機システムを完成させた。これはブラウン管ディスプレイ上に計算機のセットアップ線図を描くと、後処理はまったく自動的に行われ、直ちに答えが得られる構成のもので、昭和44年3月の米国Electronics誌に論文が掲載され世界的に大きな反響を呼んだ。実業界に於いても工業用制御機器IC化を推進するため、日本の代表的工業計器メーカーおよびIC製造メーカーを集め、IC懇談会の幹事、解析専門委員会委員長として活躍した。

昭和46年の電子計算機部長在任中は特に通産省の大型工業技術研究開発である「パターン情報処理システム」の情報処理システム部会長を勤め、その研究開発を指導しわが国の情報処理産業に大きく貢献した。

昭和56年4月に東京理科大学工学部電気工学科教授に着任した。ここでは学識と豊富な経験を生かして学生の指導にあたりるとともに、昭和56年6月から昭和62年5月まで、日本シミュレーション学会の初代会長を務めるなど学界での積極的な活動を行なった。

平成元年3月同大学を定年退任後も、同大学の教授を委嘱され、また平成3年4月には同大山口短期大学の教授(非常勤)を委嘱された。ここでは生涯教育センター顧問などを歴任し、学界のみならず広い層に対する講義や研究指導を行ない、優れた技術者・研究者の育成に貢献した。

## 科学技術庁第 59 回注目発明（平成 12 年 4 月 12 日）

粒子選択方法および飛行時間型選択式粒子分析装置 特開平 10-144253（平成 10 年 5 月 29 日公開）

発明者 齋藤 直昭、谷本 充司、小山 和義、岩田 康嗣（エネルギー基礎部）

n 型シリコンカーバイト半導体 特開平 10-194896（平成 10 年 7 月 28 日公開）

発明者 我妻 洸、川口 勝久（エネルギー部）

カラー画像の画質改善方法及び装置 特開平 10-293841（平成 10 年 11 月 4 日公開）

発明者 坂本 隆、加藤 俊一（知能システム部）

## 工業所有権取得情報

## 国内特許（2000.1.1～2000.3.31）

発明の名称	登録番号	登録日	発明者
平行移動装置	特 2969624	1999.4.30	町田 和雄、*飯倉 省一
酸化物薄膜の結晶成長方法	特 3018168	2000.1.7	酒井 滋樹、右田 真司
巨大磁気抵抗材料及びその製造方法	特 3018190	2000.1.7	坂本 勳、*本多 茂男
超伝導磁場発生装置及び超伝導検出器	特 3020172	2000.1.14	仲川 博、青柳 昌宏、赤穂 博司
円パターン描画装置	特 3023772	2000.1.21	廣島 洋
超電導エネルギー貯蔵システム	特 3023777	2000.1.21	岡野 眞、玉田 紀治
Cu系高温超伝導材料	特 3023780	2000.1.21	伊原 英雄、*関田 吉泰
非共鳴光を用いる全光フェムト秒光変調方法及びその装置	特 3026202	2000.1.28	小林 俊介、佐々木 史雄、*加藤 毅
半導体装置電極構造	特 3026215	2000.1.28	三木 一司
超伝導装置	特 3032789	2000.2.18	仲川 博、黒沢 格、高田 進、*小柏 俊典
熱電変換材料及びその製造方法	特 3032826	2000.2.18	山本 淳、太田 敏隆
J-FET型トランジスタ装置	特 3036600	2000.2.25	鈴木 克弘、矢嶋 弘義、島田 潤一、*加藤 尚範、*下山 謙司、*後藤 秀樹
光制御半導体装置	特 3037208	2000.2.25	林 豊、*友成 恵昭、*柿手 啓治
形状測定方法及び装置	特 3044285	2000.3.17	古橋 中具
ハイブリッド型超伝導限流器	特 3044297	2000.3.17	玉田 紀治、岡野 眞
画像処理方法	特 3047017	2000.3.24	富田 文明、吉見 隆、*石山 豊
触覚センサー	特 3047021	2000.3.24	永田 和之

\*は当所職員以外

外国特許（1999.4.1～2000.3.31）

出願国	発明の名称	登録番号	登録日	発明者
アメリカ	超伝導性を有するPrBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 単結晶の製法・素子	5891828	1999.4.6	岡 邦彦、*鄒 志剛、伊藤 利充、赤穂 博司
アメリカ	受光素子及び光素子の製造方法	5895227	1999.4.20	板谷 太郎、松本 和彦、石井 正己、中川 格、杉山 佳延
台湾	NbN電極を用いた真空気密素子	99890	1999.5.11	高田 進、仲川 博、*伊藤 茂生、*渡辺 照男、*円谷 和彦、*平田 義彦
アメリカ	高温超伝導体	5919735	1999.7.6	伊原 英雄、伊豫 彰
アメリカ	量子合成素子、THz電磁波発生素子、光変調素子ならびに電子波変調素子	5937118	1999.8.10	小森 和弘
アメリカ	受光素子及び光素子の製造方法	5945720	1999.8.31	板谷 太郎、松本 和彦、石井 正己、中川 格、杉山 佳延
アメリカ	フェムト秒超短可視光パルスによるテラヘルツ域誘電分散決定方法	5946085	1999.8.31	河島 整、佐々木 史雄、小林 俊介、谷 俊朗
フランス	フェムト秒超短可視光パルスによるテラヘルツ域誘電分散決定方法	2760839	1999.9.17	河島 整、佐々木 史雄、小林 俊介、谷 俊朗
アメリカ	粒子選択方法および飛行時間型選択式粒子分析装置	5962849	1999.10.5	齋藤 直昭、谷本 充司、小山 和義、岩田 康嗣
ドイツ	電子分光装置	4322852	1999.10.14	富江 敏尚
ドイツ	平板型光弁駆動用半導体装置	481734	1999.12.29	林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭
フランス	平板型光弁駆動用半導体装置	481734	1999.12.29	林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭
イタリア	平板型光弁駆動用半導体装置	481734	1999.12.29	林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭
イギリス	平板型光弁駆動用半導体装置	481734	1999.12.29	林 豊、*神谷 昌明、*小島 芳和、*鷹巣 博昭
韓国	全光型光素子	254838	2000.2.8	守谷 哲郎、*平賀 隆、*田中 教雄、*上野 一郎

\*は当所職員以外

## 人事異動

氏名	(新)	(旧)
平成 12 年 4 月 20 日付		
松井 俊浩	総務部筑波研究支援事務所先端情報計算センター長付に併任	知能システム部主任研究官
平成 12 年 5 月 1 日付		
豊島 安健	企画室開発班の併任解除 統括研究調査官付に併任 工業技術院総務部研究開発官(再生可能エネルギー・システム担当)の併任解除 工業技術院総務部研究開発官(エネルギー変換・輸送・貯蔵担当)付の併任解除 工業技術院総務部技術評価課の併任解除	材料科学部主任研究官兼企画室開発班兼工業技術院総務部研究開発官(再生可能エネルギー・システム担当)付兼工業技術院総務部研究開発官(エネルギー変換・輸送・貯蔵担当)付兼工業技術院総務部技術評価課
松井 俊浩	情報アーキテクチャ部に併任	知能システム部主任研究官兼筑波研究支援総合事務所先端情報計算センター長付
倉片 憲治	基礎計測部に併任 期間は平成 13 年 3 月 31 日まで	生命工学工業技術研究所人間環境システム部福祉医療用工学研究室
平成 12 年 5 月 22 日付		
岩崎 晃	企画室エネルギー技術研究調整官の併任解除	極限技術部主任研究官兼企画室開発班長兼企画室開発班開発係長兼企画室エネルギー技術研究調整官
三浦 永祐	企画室エネルギー技術研究調整官に併任	エネルギー部主任研究官

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(61)5059

表紙写真 : オーミック電極形成に用いた真空蒸着装置と  
Ni/Tn/SiC コンタクトの電気物性グラフ

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail:info@etl.go.jp  
印刷・製本 ニッセイエプロ株式会社