

## セラミックボイスコイルの開発

Development of Ceramic Voice Coil

石垣 敏宏

Toshihiro Ishigaki

**要 旨** 合成宝石として使われているキュービック・ジルコニアの構成分子であるジルコニアをボイスコイル用電線の絶縁材料に応用する研究から特殊な電線絶縁用エンジニアリングセラミックス「ジルコニアシリコン」を開発し、耐熱温度の高いボイスコイルを実現した。スピーカでは電気入力のおほとんどが熱となってボイスコイルの温度が上昇する。大入力時にはボイスコイルの熱的破壊が機械的破壊より先に現われるため、ボイスコイル耐熱温度向上の研究が長年進められていた。ジルコニアシリコンを絶縁層に用いた電線からなる「セラミックボイスコイル」は、そのすべての生産工程を従来とほとんど変えずに生産でき、さらに、高い耐熱温度を有し、スピーカとして多くのメリットを生み出す画期的なボイスコイルとなった。

**Summary** We realized ultra-heat-resistant voice coil through development of zirconium silicon, the unique engineering ceramic used as an insulator for electric wire. The development of zirconium silicon results from the study of zirconia for its application to insulation material in lead wires in voice coils. Zirconia is a component of cubic zirconia, which is known as artificial jewelry. In a loudspeaker unit, almost all of the electric power is changed to heat in the voice coil. Such heat increases temperature of the voice coil. Since thermal damage occurs before mechanical damage during high-power input, improvement of the heat-resistance of the voice coil has been studied for many years. The ceramic voice coil, made of an electric wire with a zirconium silicon layer, can be manufactured in almost the same process as the existing ones and has greater heat resistance. The ceramic voice coil is an epoch-making invention, which has brought many advantages to loudspeakers.

**キーワード** : ボイスコイル, スピーカ, セラミック, 電線, 耐熱性

### 1. まえがき

近年、スピーカへの大入力化が進み、入力限界をいかにして上げるかと言う技術開発に各メーカーが鋭意取り組んでいる。スピーカはアンプより出力された電気信号がボイスコイルに入り、磁界の中で上下に動くことで振動板を通

して音が出る(図1)。いわば、ボイスコイルとはスピーカの心臓である。ボイスコイルはフィルムを円筒状にしたボビンの上に電線を巻いてコイルとしたものである(図2)。声を出すコイルと言う意味でスピーカ用のコイルはボイスコイルと呼ばれる。

スピーカへの大入力化によりボイスコイルに入る電力が大きくなる。それに伴いボイスコイルの発熱量も増加する。しかし、ボイスコイルに用いる電線の絶縁皮膜塗料の耐熱温度は350程度であり、それ以上になると絶縁皮膜の熱分解が生じてコイルの短絡が起こる。従来、ボイスコイルの温度上昇を少なくするためにはボイスコイル径を大きくすることで対応していたが、ボイスコイルの径を大きくすることにより振動系重量も増加、音質的には悪い方向へと向かっていた。そこで我々はこの状況を打破するため、電線の絶縁皮膜に抜群の耐熱性を持つセラミックの適用を検討した。高温下においてもコイルの短絡を起こさない超耐熱性セラミック絶縁被覆電線を開発し、ボイスコイルの耐熱温度の飛躍的な向上を目指した。

## 2. 絶縁層セラミックの開発

セラミックは耐熱性が高く、スペースシャトルなど、耐熱性が要求されるさまざまな所で使用されている。しかし、通常、セラミック化合物を作るには1000以上の高温で長時間焼かなければならない。ボイスコイル用の電線は図3に示すように金属の導線の上に絶縁層と融着層を焼き付けたもので各層の厚さは数ミクロンである。電気釜に入るようなものであれば1000以上の高温でじっくり焼くことも可能であるが、電線の場合は数ミクロンの厚さの絶縁層を長さ数百メートル以上均一の厚さに焼き付けなければならない。通常のセラミック製造方法を電線に適用することは不可能であった。

そこで我々はセラミックのコーティングに関し、ゾルーゲル法という手法に着目した。ゾ

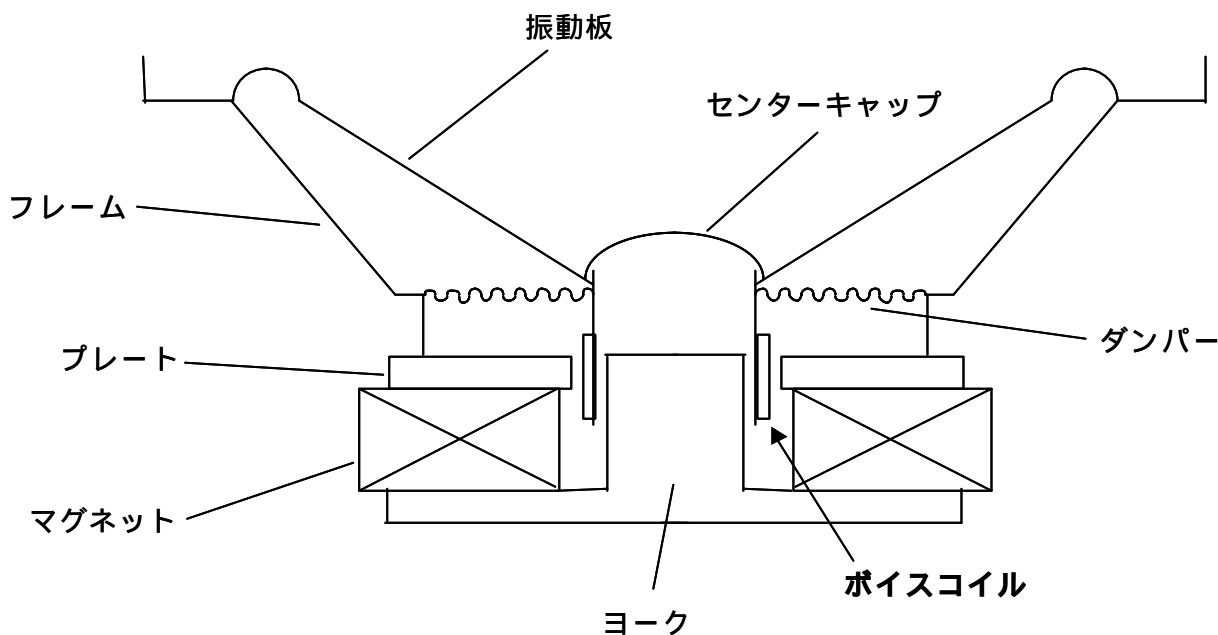


図1 スピーカ機構

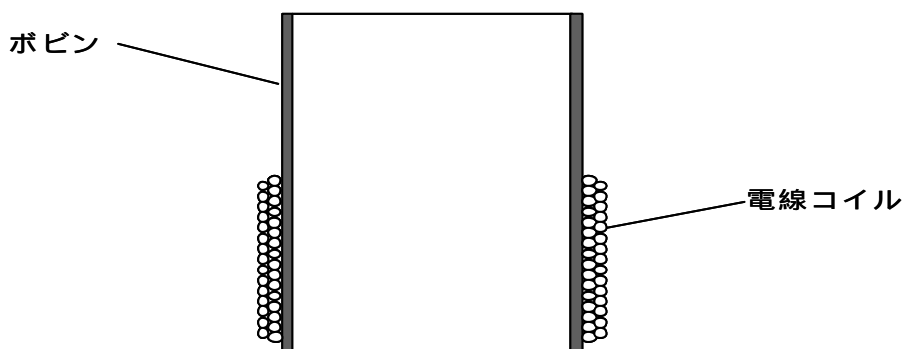


図2 ボイスコイル

ルーゲル法とは液状のセラミック前駆体(金属アルコキシド)に水やアルコールを加え、100程度と言う比較的低い温度で加熱することによってセラミックを作る手法である。ゾル-ゲル法により電線へのセラミック焼き付けのめどはたった。しかし、当初我々は耐熱性に優れた酸化ケイ素系のセラミックをゾル-ゲル法で検討、電線の絶縁皮膜としての焼付塗装を試みたが、酸化ケイ素系セラミックには柔軟性が無く、電線を少し折り曲げただけで皮膜に簡単にひびが入ってしまった(図4)。通常、セラミックには柔軟性がない。電線に用いるには柔軟性のある素材を新規に開発する必要があった。

我々はキュービック・ジルコニアの構成分子であるジルコニアに着目した。他のセラミックに比べ、ジルコニアには柔軟性があることが知られていた。ジルコニアは耐熱性、耐食性、耐磨耗性、絶縁性に優れているためカッターやドリルの刃先など工業用にも広く使われている。この点も電線絶縁層の材料として申し分なかつ

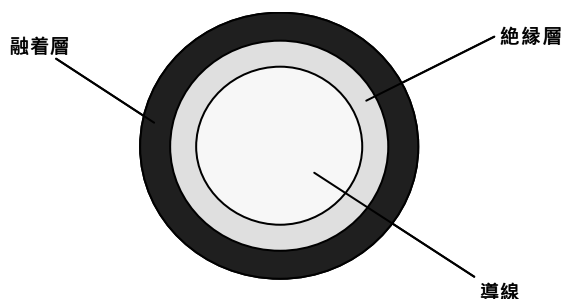


図3 電線断面

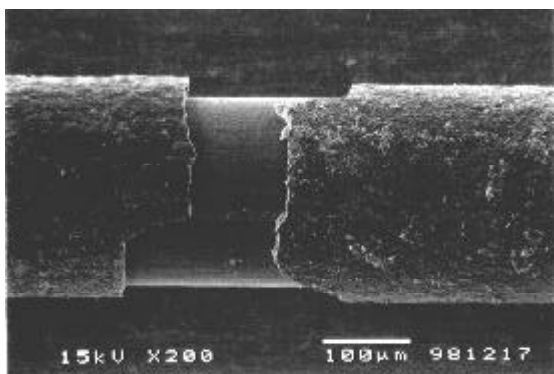
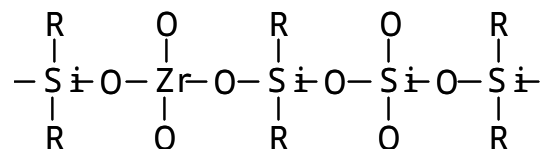


図4 開発初期のセラミック被膜

た。我々は実験を繰り返し、ジルコニアに適量のシリコンを加えると非常に柔軟性のあるセラミックとなることがわかった。

そして、我々は電線用の絶縁材料として「ジルコニアシリコン」(図5)を開発した。開発したジルコニアシリコンは電線にミクロンオーダーで焼き付けを行うことが出来る。またセラミック単体で500以上の耐熱性があり、かつ、非常に柔軟性がある。ジルコニアシリコンを絶縁層として焼き付けた電線を直径10mmのコイルに巻いてもジルコニアシリコンの皮膜にひびが入るようなことはなかった。



Si: ケイ素, Zr: ジルコニア, R: アルキル基

図5 ジルコニアシリコンの化学構造

### 3. プライマーの検討

柔軟性と耐熱性の両方の性能を満足するセラミックとして「ジルコニアシリコン」を開発したが電線同士を強固に接着させるためには絶縁層の上に融着層を設ける必要がある。ジルコニアシリコンに用いる融着層としては、ボイスコイル製造時の量産性を考慮し、エポキシ・ポリアミド系樹脂の皮膜はメタノールで仮接着でき、高温で加熱することにより耐熱性のある強固な皮膜となる。このような樹脂皮膜は自己融着性皮膜と呼ばれる。

但し、エポキシ・ポリアミド系樹脂はジルコニアシリコンに対する密着性が悪いため、中間層にプライマーを検討した。我々はジルコニアシリコンの耐熱性を十分に活かすことが出来るプライマー素材の検討を行い、酸化ケイ素ベースのセラミックにポリエステル側鎖を付けた

ポリエステル化セラミックをプライマー素材として開発した。このポリエステル化セラミックのプライマーを用いることによりジルコニアシリコンの絶縁層とエポキシ・ポリアミド系樹脂の融着層をより密着させることが可能になり、ボイスコイル作製が容易な自己融着性セラミック絶縁被覆電線(図6)を完成させることが出来た。当電線を用いて作るボイスコイル(以下、セラミックボイスコイル)は、そのすべての生産工程を従来とほとんど変えずに生産することが出来た。

#### 4. 耐熱性能

自己融着性セラミック被覆電線を用いてセラミックボイスコイルを試作した。これをスピー

カに組み込み、瞬間最大入力値を測定した。この試験は図7のようにピンクノイズ発信器でピンクノイズ信号を発生し、ピンクノイズから試験用周波数特性を作るためのウエイティングネットワーク(IEC268 - 1C 準拠)、クリッピング回路およびアンプを介してスピーカを駆動。各入力でのスピーカ用ボイスコイルの温度はその抵抗値変化から求めた。

図8は 20mm のボイスコイルにおける瞬間最大入力限界を測定したものである。従来の電線を用いて作ったボイスコイルの入力限界は140W。一方、開発したセラミックボイスコイルでは入力限界190Wに達し、入力限界が36%向上した。両者の破壊時の温度差は100℃で、スピーカとして著しい耐熱性向上が見られた。

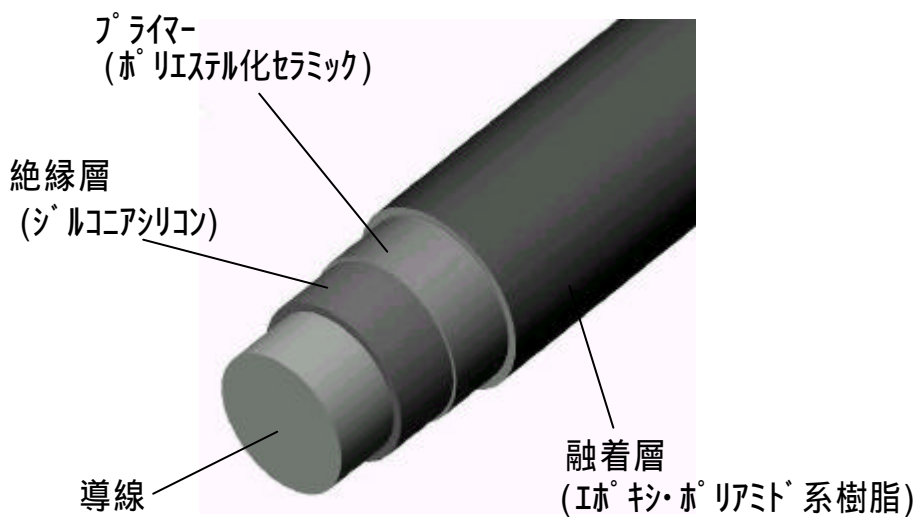


図6 セラミック被覆電線

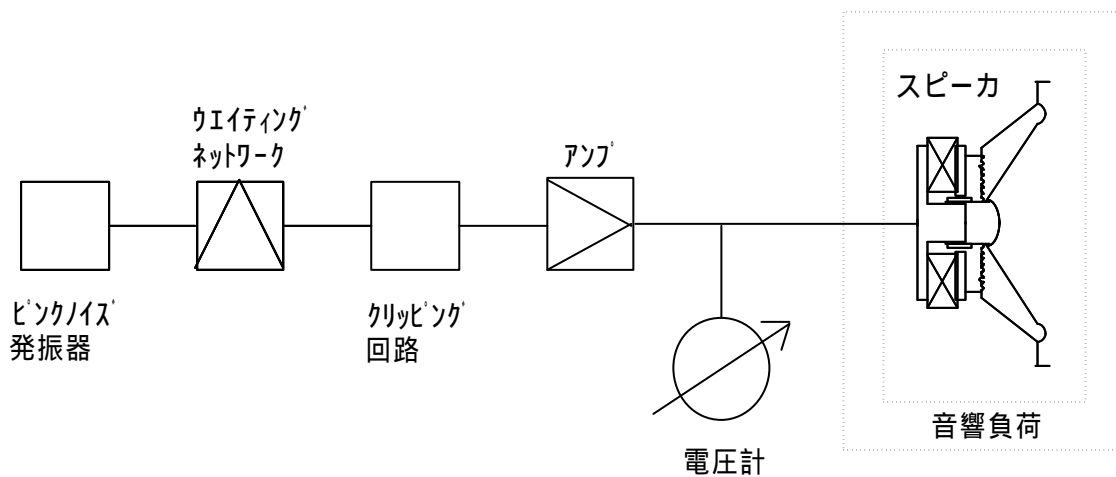


図7 耐熱試験回路

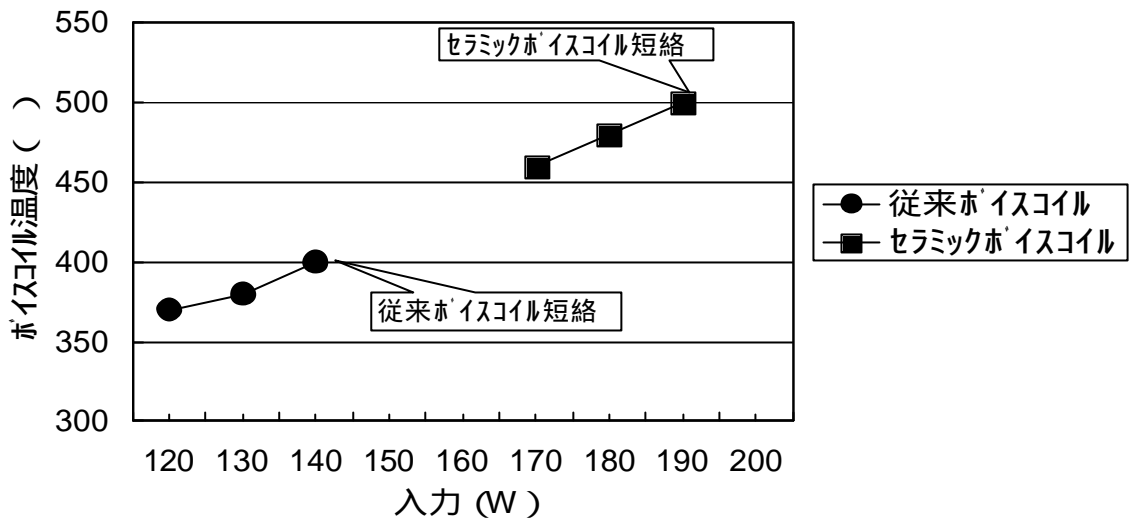


図8 瞬間入力時の耐熱比較

### 5. 軽量化への方向

まえがきに述べたが、従来の電線を用いた場合、耐入力を上げるためにはボイスコイルの径を大きくしている。しかし、電線の耐熱性が上がれば逆にボイスコイルの径を小さくすることが可能になる。ボイスコイルの径が小さければ同じ音圧を出すにしてもより小さな体積の磁気回路で済む。セラミックボイスコイル使用により従来電線使用時の磁気回路を約30%軽量化することが可能になる。また、ボイスコイルの軽量化により振動系重量(振動板+ボイスコイル+ダンパーの一部の重量)が軽くなる。それにより高域特性を向上させることが出来る。

### 6. 量産品への採用

セラミックボイスコイルは車載用のハイエンドサブウーハー:TS-W5000SPL(図9)に採用された。このサブウーハーは開発当初、通常の電線を用いて定格1000W,最大2000Wで製品化が進められていた。従来のボイスコイルの場合、2000W入力では電線の絶縁層が短時間で絶縁破壊してしまう。しかし、このスピーカにセラミックボイスコイルを適用してみると2000Wでも絶縁破壊は起こらず、長時間の連続動作にも十分に対応出来ることがわかった。



図9 TS-W5000SPLの外観

そして、設計において検討を重ね、セラミックボイスコイルの採用により定格2000W,最大5000Wと大幅にパワーアップしたサブウーハーが完成した(図10)。スピーカ開発の目的として音質の追求という目的の他に、いかに大きな音を出せるようにするという目的もある。市場においては「SPLコンテスト」と呼ばれるいかに大きな音を出せるかを競う大会が開催されている。TS-W5000SPLは米国で行われているSPLコンテストにおいて、本スピーカ使用競技者は軒並み上位入賞を飾っており、セラミックボイスコイルの性能の良さが市場において認められてきている。今後、セラミックボイスコイルは東北パイオニアが生産するスピーカに順次採用されて行く予定である。

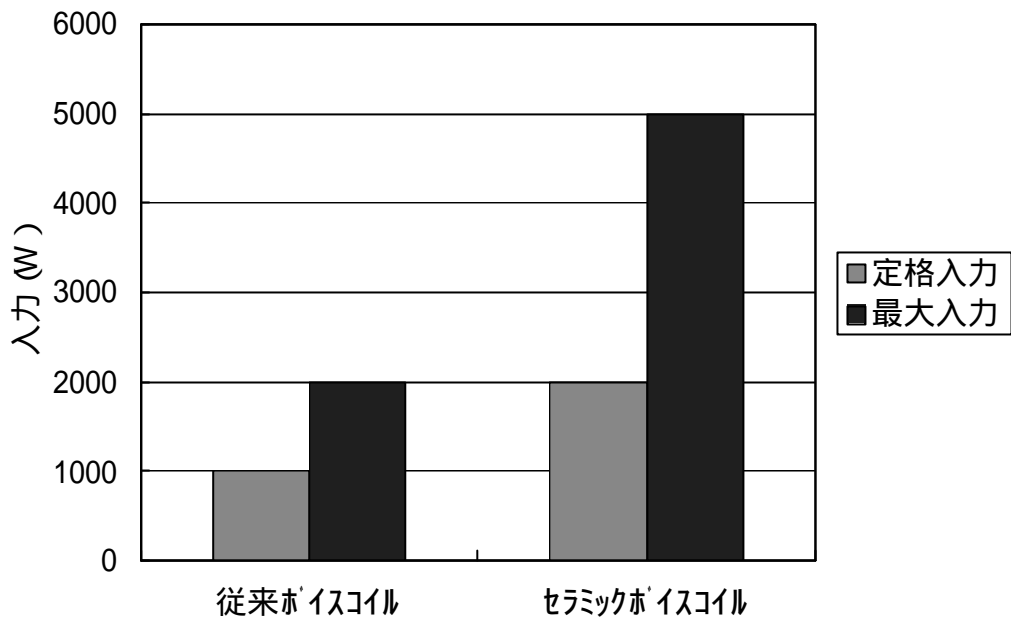


図 10 セラミックボイスコイル使用によるパワーアップ

## 7. まとめ

合成宝石として使われているキュービック・ジルコニアの構成分子であるジルコニアをボイスコイル用電線の絶縁材料に応用する研究から特殊な電線絶縁用エンジニアセラミックス「ジルコニアシリコン」を開発し、耐熱温度の高いボイスコイルを実現した。スピーカでは電気入力のほとんどが熱となってボイスコイルの温度が上昇する。大入力時ではボイスコイルの熱的破壊が機械的破壊より先に現われるため、ボイスコイルの耐熱温度(絶縁破壊温度)の向上の研究が長年進められていた。ジルコニアシリコンを絶縁層に用いた電線からなる「セラミックボイスコイル」は、そのすべての生産工程を従来とほとんど変えずに生産でき、さらに、従来ボイスコイルに比べて100 以上高い耐熱温度を示し、スピーカとして多くのメリットを生み出す画期的なボイスコイルとなった。

## 8. 謝辞

本開発は、東京特殊電線株式会社ならびに株式会社日板研究所との「セラミックボイスコイルの共同開発」によるものである。御協力頂きました東京特殊電線株式会社 R & D センターならびに、電子材料事業部の皆様、株式会社日板研究所の皆様に深く感謝致します。

筆 者

石 垣 敏 宏 (いしがき としひろ)

- a. 東北パイオニア(株) ,スピーカ事業部  
開発技術部
- b. 1993 年 4 月
- c. 材料開発