

## SPL サブウファー “ TS-W5000SPL ” の開発

Development of the “TS-W5000SPL” SPL subwoofer

小林 博之，鈴木 隆志，佐藤 清弥

Hiroyuki Kobayashi, Takashi Suzuki, Seiya Sato

**要 旨** Car Audioとして最大音圧を競うSPL競技用にTS-W5000SPLを開発した。本製品の開発では，各方面からの意見を集め，さまざまな実験を行い，高音圧再生時の問題点を克服すべく複数の新技術を開発した。今回開発したメッシュインサートエッジなどの新技術は一般モデルにも応用することになった。

**Summary** TS-W5000SPL has been developed for use in the SPL competition that is held to compete for the maximum SPL (Sound Pressure Level) in a car.

We collected information from various sources and reflected the comments in a large number of trials. Some new technologies have been developed through those trials as the solutions of the many problems found when reproducing High SPL.

Those new technologies, such as Mesh insert surround, are also used for mass production models.

**キーワード** : S P L 競 技 ， 高 高 圧 再 生 ， メ ッ シ ュ イ ン サ ー ト エ ヅ ジ

### 1. ま え が き

Car用サブウーファーマイン市場である北米では，決められたルールのもとで80Hz以下の音を再生し，最大音圧を競うSPL競技が盛んである。およそ高音質とはかけ離れた競技ではあるが，競技への参加を通して「高音圧再生技術，耐久性の向上などのノウハウの蓄積」，および「当社のサブウーファーマの高耐久性を多くのユーザに提示する」，という二つの目的で当社も2002年度よりSPL競技に参加している。

競技で勝利することを主眼に開発した「TS-W5000SPL」を投入し，2003年度はExtreme9+クラスにて173.3dBの記録で優勝した。

世界最高レベルの高音圧再生下では，スピー

カーユニットにさまざまな負荷がかかる。TS-W5000SPLの開発段階で，従来に経験したことのない難問が出現し，これを解決するために技術開発を進めることで，セラミックコート電線に代表される新技術の開発に結びついた。本稿では，ユニットの開発を通じて新規に開発した技術について報告する。

### 2. SPL 競 技 ル ー ル 概 要

図1に競技車輛の外観を示す。またSPL競技ルール概要を測定方法，使用可能機器，機器の取り付けなどに関する規定を「dB Drag racing ルールbook」より主な事項を抜粋し，次に示す。



図1 パイオニアがサポートする Mr.Scott の競技車輛外観

## 2.1 測定

測定に関する主な規定は、

- a. 競技で認定された圧力型標準センサを所定の場所に設置し、それをを用いて測定する。
- b. 使用帯域を 80Hz 以下の周波数に限定し、80Hz を超えた場合、その記録は認定されない。
- c. 最高音圧に達するために与えられた測定時間は 30 秒である。30 秒間のトライの中で最高音圧を記録する。
- d. 測定中はドアを開けてはいけない。もし開けた場合は、失格になりえる。

などである。

## 2.2 使用可能機器

競技で使用可能な機器の規定は、

- a. 使用機器は、12volt の車載用に設計されたものであること
- b. 再生信号ソースは、音楽ソース、テストトーンなどの録音信号を使用
- c. 再生信号ソースは、市販の CD や、自作録音でも可能
- d. 発振器、Frequency multipliers、Harmonizers は使用禁止
- e. すべてのオーディオ機器は、市販されている(されていた)こと
- f. アンプは、普通の直線的な増幅をすること
- g. すべての機材は車両外装に収まっていること

- i. 外部電源の使用は禁止

などが決められている。

## 2.3 車両・取り付けについて

取り付けに関しては、

- a. 車室と測定室は同一である。
- b. パーテーションなどを使って、車室を仕切るのは不可である。
- c. フロントガラスとドアは、車室として機能する(壁にすることは禁止されている)。
- d. 車室には2人の平均サイズの大人が、普通のスタイルで座れる。
- e. 再生装置は、測定装置に干渉してはならない。ホーン・ウェーブガイド・ポートなどをマイクの近くに配置することも、これに含まれる。
- f. ドアスピーカーやキックパネルに取り付けられたスピーカーを除き、すべてのスピーカーキャビネットとバッフル板は、運転席のドア後ろ側と助手席ドア後ろ側を結んだ線からはみ出してはならない。などが規定されている。図2に競技に使用した車両の様子を示す。

## 3. 高音圧を達成する際起こりうる問題点 音圧を非常に高くすると、

- a. キャビネット背圧によりエッジの吸い込みが起こり、音圧低下、およびボイスコイルこすりが生じる。

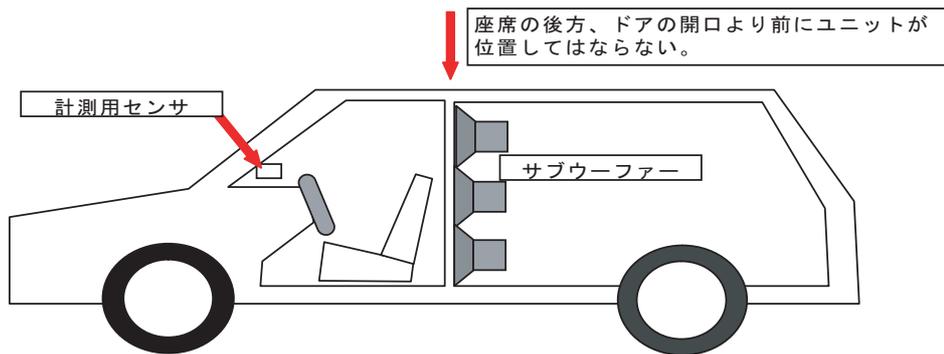


図2 競技に使用した車両の構成

- b. コーン紙がたわみ、音圧が上がらなくなる。場合によってはコーン紙が割れてしまう。
- c. 過大入力により、ボイスコイルが焼き切れてしまう。
- d. ダンパー、コーン紙がボイスコイルより剥がれてしまう。

などを起こす。

#### 4. TS-W5000SPL の特徴

##### 4.1 オーバーハングエッジによる、振動面積拡大

フレームサイズは最も一般的でかつ、多数個並べやすい大きさである30cmとした。その上で振動板面積を最大化するためオーバーハング形状のエッジを考案した。その結果通常のエッジ構造のウーファーと比較し、22%の振動面積拡大効果を得ることができた。

図3に示すように、エッジの貼り付け面がエッジロール下部にあり、フレームを固定する

ネジはエッジ内に収納される機構をもつ。ネジの取り付けは、エッジをめくって行う。

##### 4.2 ハニカムメッシュインサートエッジ

競技は30秒以内の測定ということもあり、実際ユニットに負荷される入力は、ユニット一本あたり10,000Wを超え、エッジ部は大音圧再生時、常に空気からの反力を受けることになる。その結果、図4に示すように通常はエッジの吸い込まれ現象(Puckaring)が起きてしまい、限界点からそれ以上は入力を加えても再生音圧を上げ



図4 エッジの吸い込みの様子

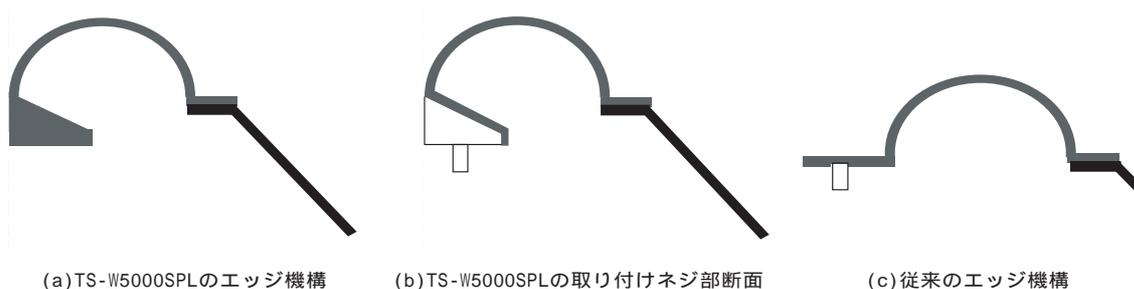


図3 オーバーハングエッジ

ることができなくなると言う問題があった。

また、エッジの吸い込み現象が始まると、エッジの支持力があいまいになり、振動系のピストンモーションが損なわれ、ボイスコイルが狭い磁気ギャップに接触し、やがてはボイスコイルのショート、断線などの破損に到る。この現象は小容積の密閉エンクロージャーやバスレフタイプのエンクロージャーにおけるポート共振周波数にて顕著になる。

測定マイクをセットする運転席側の容積が小さく、「振動板面積×振幅」が大きい程高い音圧が期待できる。このことはすなわちエッジにとって上述の最も厳しい条件での大振幅を吸い込まれ現象を避けながら達成させなければならないことを意味する。

この対策として、単にエッジを硬い材料にしても対吸い込み性は向上するが、バネ性が強くなり過ぎて、共振周波数の上昇を招いてしまう。またエッジを厚くしても対吸い込み性には強くなるが、機械抵抗が増えて感度のロスが多くなってしまう。そこで考案したのが、図5に示すように、ゴムにアラミド繊維のハニカム状メッシュをインサートしたラジアルタイヤに似た構造のエッジである。

あらかじめエッジの形に加熱成型されたアラミド繊維メッシュをゴムの加硫成型時に金型に

挟み込んで、同時に成型する方法で作ることにより、単なる張り合わせと異なり、薄い自動車タイヤのように強靱なゴムエッジが出来上がる。

このハニカム状のアラミド繊維メッシュは、振動板振幅方向(Z方向)の動きを妨げず、吸い込みによるエッジの部分的な凹みを抑制する。しかもX,Yあらゆる方向において通常の織物より伸縮性が均一、かつゴムに比べ伸びが少ない特性を有しているため、エッジの支持力すなわち耐ローリング(振動軸ブレ)性を強化する働きがある。

#### 4.3 射出成型長繊維カーボンファイバー強化PPコーン

一般的にスピーカでは、空気の反力、部材そのものの慣性により変形し、感度の頭打ちおよび音質を濁らせるという現象は、コーン紙においても同様に生じるので、効率を低下させずに剛性を上げる方法を考案する必要に迫られた。

幸い、材料開発グループが樹脂フレームの軽量高剛性化に取り組んでおり、射出成型の樹脂を長繊維フィラーと混合することにより、曲げ弾性を飛躍的に高める技術を確認したところであった。今回は競技用ということもあり、目的に最も合致した軽量かつ最も剛性が上げられる長繊維カーボンファイバーを超高結晶PPの強



図5 ハニカムメッシュインサートエッジ

化ファイラーとして使用した。

この技術は、比較的長い繊維をPPと共に射出することが特徴であり、繊維が長いことが飛躍的に剛性を高めるといふ新しい射出成型技術である。図6に本材料を用いたコーンの断面を示す。

#### 4.4 カーボン抄紙センターキャップ

センターキャップにはカーボンを紙のように抄いて低濃度のエポキシ樹脂を含浸させた軽量高剛性の材料を使用した。またエッジとコーン紙、エッジとフレーム、コーン紙とセンターキャップそれぞれの接着には熱に強く、たわみに追従するシリコン系特殊接着剤を使用し、大音圧下においても剥がれないように配慮した。

#### 4.5 磁気回路

磁気回路には強力な駆動力を発生することと、ボイスコイルから発生した熱を素早く伝導させ、蓄熱・放熱させることが求められた。

プレートの厚みを厚く設定し、磁気ギャップの対向幅を30mmと通常の3倍とし、BLは37.4Tmに設定した。これは通常の30cmサブウーファの約2～3倍に値する。

マグネットにはあえて体積当りの最大エネルギー積の大きいネオジウムを使用せず、大型のフェライト磁石を3段重ねて使用した。

この理由は、

a. 大きな反力を受け止めるため、磁気回路

が重い方が有利

b. 大入力为前提で、発熱が避けられないため、高温下において減磁がおきないフェライトの方がこの場合は有利

c. 機構上、ボイスコイルが大振幅可能なクリアランスを取る必要があるため、厚みのあるフェライトマグネットが有利

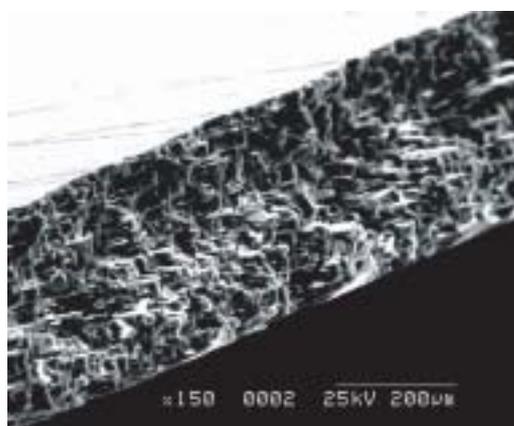
である。

#### 4.5.1 放熱

高音圧を実現するためには、十分な熱容量を持った磁気回路による吸熱、空気の流れによる直接冷却、熱を持った磁気回路からの効率の良い放熱の3点を配慮し、構造を考えた。

プレートを厚くすることはボイスコイルの放熱にも効果的であり、このプレートに、通気性を良くするため4本の溝を放射状に設けた。この溝はマグネット側にあり、プレート・マグネット・ヨークで囲まれた磁気回路内部の放熱効果を高める働きがある。

一方、ヨークには通常のウーファーに良く見られる通気孔がポール部分を貫通し、ポール部分を内部から冷却し、振動系の動きを妨げる空気抵抗の低減に役立っている。さらに本ユニットの特徴的な技術は、ポール部に4本の縦溝を設け、磁気ギャップに積極的に空気を導くことで、ボイスコイル巻線に直接空気を当て、放熱を可能にするように設計したことである。ボイ



(a)通常の射出成形PPコーン断面



(b)長繊維カーボンファイバー射出成形PPコーン断面

図6 コーン紙断面

スコイル真下のヨーク底部にも通気孔を設け、空気を外部に通気できるように配慮した。

熱を持った磁気回路からのユニット外部への放熱は熱伝導に優れるアルミニウムダイキャスト製のフレーム、および同材質のダンパーホルダーを利用し、放熱板の働きをもたせた。

フレームは、磁気回路のヨーク部分の底を抱え込むように支えている。これは接触面積を拡大する構造である。さらに通常のプレート上面に接合する方法に比べ、フレームの体積および、表面積が大きく取れ、放熱効率も高い方法である。

一方、ボイスコイルに近く、磁気回路の中では最も温度上昇が大きいプレートは、上面に設置されたアルミダイキャスト製のダンパーホルダーが面で接触しており、効果的な放熱板となっている。ダンパーホルダーにはダンパーが振幅する際の空気流が直接当たるところに位置しているため、放熱効果はさらに高まる。

プレート外周部はフレーム内部にネジ止めで直接面接触させることで、プレート外周部からもフレームに熱を伝えるようにした。以上のように非常に「風通しの良い」磁気回路となり、同時に機械抵抗を減らすことにも成功している。この磁気回路はADMG (Aero-Dynamic magnetic Gap) と名付けられた。図7にADMGの外観を示す。



図7 ADMGの外観

#### 4.5.2 フレーム構造と磁気回路保持機構

TS-W5000SPLでは、さまざまな理由により図8に示すような断面の機構にしている。本機構

の特徴は、

- a. フレームが磁気回路を抱え込む形であり、ヨークはフレームにボルトで固定されている。
- b. プレートはフレーム中間地点にボルトで頑強に固定されている。
- c. 3枚のマグネットはフレームにボルトで固定されたプレートとヨークで挟まれた構造になっている。

などである。

過大入力が続いて入力される場合、多くのウーファーは磁気回路に熱を持ち、やがてマグネットとプレートを固定している接着剤が軟化し、僅かではあるがプレートがずれるという問題があった。コンマ数ミリのような僅かなズレでも間隔が狭い磁気ギャップにとっては致命傷であり、ボイスコイルをこすり、最後には挟み込みが生じ、ロックするという問題が発生する。今回の方式はヨークもプレートもフレームに固定されているため、上述した問題を回避している。

抱え込み方式および、ボルトによる頑強な固定という機構を取ることで、図9に示すように、フレーム共振の低下（音質向上）、および伝達ロスの低減が図れた。



図8 ユニット断面

#### 4.6 セラミックコート電線（ボイスコイル）

通常ボイスコイルは導線、絶縁層、融着層の三層からなり、絶縁層は一般的にポリエステルであるが、今回はSPL競技用にセラミック皮膜線を

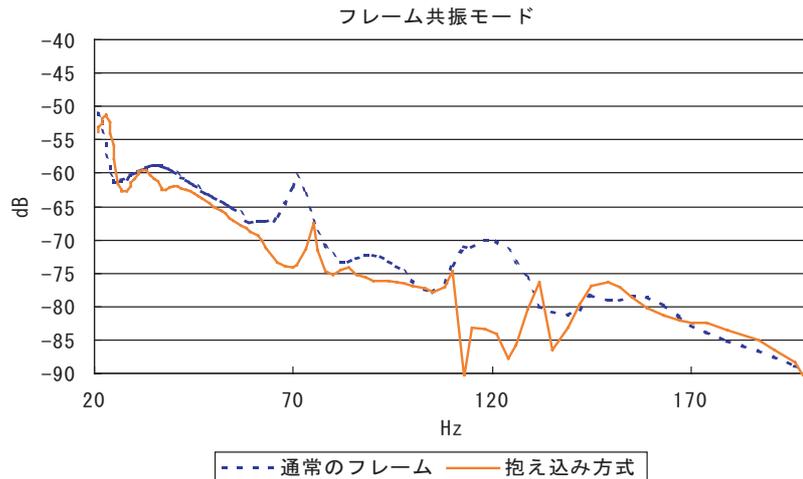


図 9 フレームの共振

開発し、導入した。セラミックは焼き固めるのが一般的であるが、それでは銅が溶けてしまう。

本ボイスコイルでユニークな点はゾル-ゲル法による、ジルコニアシリコンセラミック皮膜生成<sup>(1)</sup>である。図 10 にセラミック被膜電線の構造を示す。この皮膜はボイスコイルとして巻いてもひびが入らず、500 と非常に高い耐熱を有する電線を完成させることができた。図 11 にセラミック電線の対熱性を示す。

上述の技術を導入することで「TS-W5000SPL」は、M.M.P. が5000Wを実現した。

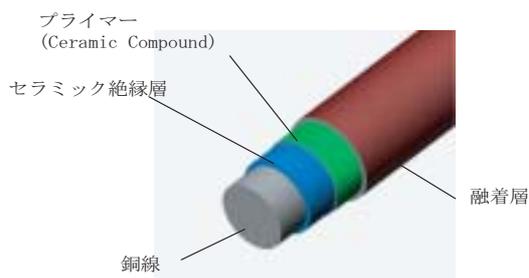


図 10 ジルコニアシリコンセラミック皮膜電線

## 5. まとめ

本開発において競技者、販社からの試作機に対する意見を集め、それを反映させて仕様を決定した。また、実際に SPL 用車両を製作し、SPL

用車両の中で、メッシュインサートエッジなどの新技術を導入し、高音圧を実現するためにさまざまな方法を試し、テストチャンバーを使用している。さまざまな実験を通じて、色々な開発目標を掲げ、新しい技術を確認することができた。また現在も競技者から色々な要望やアイデアが寄せられており、さらに新しい技術を確認すべく、努力している。

この競技モデルで得られた新技術は量産性に対応するために開発を進め、一般モデルにも順次搭載を進めている。代表的な技術は、

- a. 抱え込み式アルミダイキャストフレーム
- b. メッシュインサートエッジ
- c. 長繊維カーボン強化 PP コーン

などで、すでに「TS-W2000SPL」,「TS-W1500SPL」に搭載されており、「競技を通して技術が鍛えられている」ともいえると思う。

## 6. 謝辞

本製品、新技術を開発するにあたり、多くの方々の協力を頂きました。製品の仕様決定に多くのアドバイスを頂きました SPL 競技者で Edge Audio の Mr.Scott Owens に深く御礼申し上げます。また、参考意見を頂いた PUSA 大泉氏に感謝します。また、セラミック皮膜ボイスコイルの開発にご協力を頂きました東京特殊電線

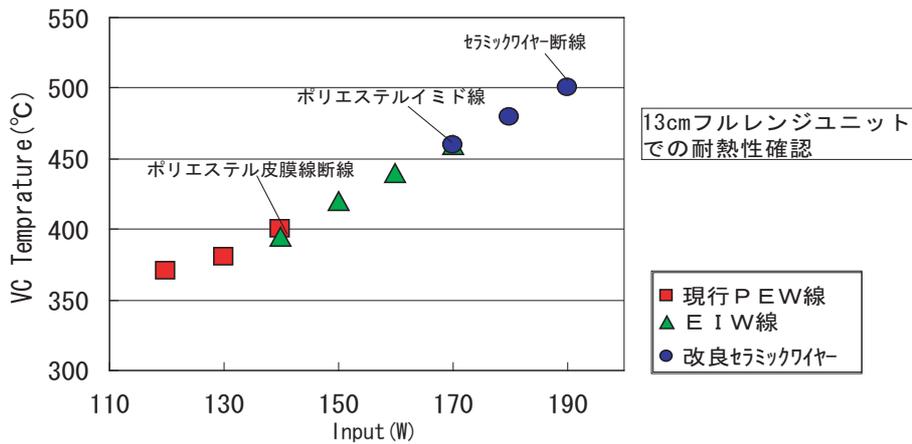


図 11 セラミック電線の耐熱性

(株) ,(株)日板研究所 , 後藤電子(株)の関係各位へ深く感謝致します。およびメッシュインサートエッジの開発に協力を頂いた最上電機(株)技術グループの各位へ感謝します。

参 考 文 献

( 1 ) 石垣：“セラミックボイスコイルの開発”，PIONEER R&D Vol.13, No.2 , pp.69-74 , 2003.

筆 者

小林 博之(こばやし ひろゆき)

所属：東北パイオニア(株) SP 第一設計部  
 入社年月：1988年4月  
 主な経歴：市販CAR SP設計(1987-2001PEEに勤務)  
 得意分野：新機構ユニット開発

鈴木 隆志(すずき たかし)

所属：MEC AM企画  
 入社年月：1984年4月  
 主な経歴：市販CAR SP設計(1986-2000PUSAに勤務)  
 得意分野：ユニット開発および製品コンセプト作り

佐藤 清弥(さとう せいや)

所属：東北パイオニア(株) SP 第一設計部  
 入社年月：1996 最上電機株式会社に入社 , 2004 東北パイオニアに転籍  
 主な経歴：2000より東北パイオニアに出向し , サブウファー設計担当  
 得意分野：新技術開発 ,