

～ 効率的な低音再生を目指して ～  
**並列配置小部屋構造(MCAP)型スピーカー**  
**13cm フルレンジシステム - TR130b 型 -**

2008年12月14日 鈴木 茂

**1. はじめに**

並列配置小部屋構造 (MCAP: **M**ultiple-**C**hamber **A**ligned in **P**arallel)型スピーカシステムは、直列型のマルチパスレフを研究していた 2005 年に設計・製作したものです。試作品は、3 部屋 4 ダクト構造の簡単なものでしたが、結果が良かったので、2007 年には特許を出願をしました。

MCAP 型は、多自由度パスレフの一種で、スピーカーユニットを取付ける主空気室に副空気室を並列に複数接続する構造です。共振周波数が複数あるので、低域の不足を広い範囲に亘って補うことができます。今回の作品は、合計 4 部屋、6 ダクト構造で、共振周波数が 6 つあります。MCAP 型の計算は複雑ですが、簡易計算法もありますので、興味のある方はウェブサイトをご参照ください。

皆様にお聞かせする機会を下さったミュージズの方舟の皆様にご挨拶申し上げます。

**2. MCAP 型スピーカシステム計算式の概要**

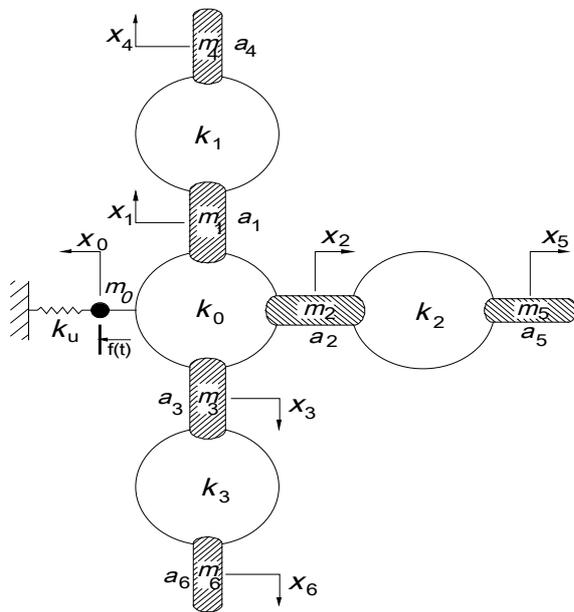


Fig.1 振動モデル

MCAP を設計するには、シングルパスレフの計算式を基にして、運動方程式を立て、固有振動の周波数を求めます。現段階では、周波数特性を計算することは出来ていないので、固有振動数を計算して、寸法・形状を決めてゆきます。

Fig.1 は MCAP 型の構造図を示します。ここで、網がかかっている部分は、ダクトを示します。x<sub>1</sub>～x<sub>6</sub> は、塊として動くダクト内の空気の変位を表します。また、k<sub>0</sub>～k<sub>4</sub> は、ダクトの面積に対する空気室のばね定数を表します。

箱のばね定数 k は、ダクト面積の関数であるので、便宜上、ダクトの面積を、基準面積との比を使用して表します。基準面積は、振動板面積とし、a<sub>0</sub> で表すこととします。ここで、各副空気室の容積を、夫々、V<sub>0</sub>, V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> とすると、振動板面積に対するキャビネットのばね定数は、次式で表されます。  $k_j = \frac{a_0^2 P}{V_j}$  但し、断熱条件ではなく等温条件として

いるのでご注意ください。ダクトの断面積を、夫々 a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, ..., a<sub>6</sub> とすると、夫々のダクトに対するキャビネットのばね定数は次式で表されます。

$$k_j^* = \frac{r_j^2 a_0^2 P}{V_j} \quad \text{但し} \quad r_j = \frac{a_j}{a_0}$$

自由振動の運動方程式は、次式のように表されます。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{0}$$

各記号の内容は下記の通りです。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (k_0 + k_1)r_1^2 & k_0 r_1 r_2 & k_0 r_1 r_3 & k_0 r_1 r_4 \\ k_0 r_2 r_1 & (k_0 + k_2)r_2^2 & k_0 r_2 r_3 & k_0 r_2 r_4 \\ k_0 r_3 r_1 & k_0 r_3 r_2 & (k_0 + k_3)r_3^2 & k_0 r_3 r_4 \\ k_0 r_4 r_1 & k_0 r_4 r_2 & k_0 r_4 r_3 & (k_0 + k_4)r_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -k_1 r_1 r_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 r_2 r_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 r_3 r_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 r_4 r_8 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} k_1 r_5^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 r_6^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 r_7^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 r_8^2 \end{bmatrix}$$

m はダクトの中で振動する空気の質量で次式の通りです。

$$m_j = \rho \cdot a_j \cdot l_j$$

但し、ρ は、空気の密度、l はダクトの相当長さ

ここで、次式を解くと振動系の固有値を求めることができ、共振周波数を求めることができます。

$$|\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}| = 0 \quad f_k = \frac{\sqrt{\lambda_k}}{2\pi} = \frac{\omega_k}{2\pi}$$

### 3. 設計仕様

設計仕様は下記の通りです。超低音を十分なレベルで再生、20Hzも再生可能なことを目標としました。また、16cmクラスのユニットでも使用可能なサイズとしました。

スピーカーユニット	W5-1611SA(Tangband)
副空気室の数	3
主空気室容量[L]	9.0
第1副空気室容量[L]	9.7
第2副空気室容量[L]	9.6
第3副空気室容量[L]	10.5
第1ダクト W×H×L[mm]	40×40×40
第2ダクト W×H×L[mm]	40×40×80
第3ダクト W×H×L[mm]	40×40×100
第4ダクト W×H×L[mm]	33×33×100
第5ダクト W×H×L[mm]	33×33×180
第6ダクト W×H×L[mm]	33×33×260
外形寸法 W×H×D[mm]	300×600×334
共振周波数[Hz]	30, 37, 49, 67, 85, 94

ユニットには、限定品ではなく、将来国内でも入手が可能であろうと思われるものを使用しました。13cmは、国内では、選択の余地が少いものの、海外ではいくつか販売されていたので、Cantareの5FR MK II、Omnes AudioのL5、TangbandのW5-1611SAを購入しました。

意外に困ったのは、cm表示が少いことでした。L5は、メーカーの表示で13cmとなっていたため問題ありませんでしたが、5FR MK IIは、cmで表示してあるものが見つからず断念、W5-1611SAは、SpectrumAudioのサイトでドイツ語表示してあるものを根拠に使用の了解を頂きました。結局、TangbandのW5-1611SAとの相性が良かったため、このユニットに決定しました。W5-1611SAは、強化ナイロンフレームの普及品ですが、強力なネオジウムマグネットを使用していながら中高域のレベルが高すぎずMCAP型には好適なモデルです。結局SpectrumAudio社からの輸入金額は、送料、送金手数料、関税を含めて、3種類で合計8万円程になりました(1ユーロが168円でした)。FE138ES-Rを買うのに近いお金はかかりましたが、メールのやりとりは10回以上に及びドイツ語の勉強にもなりました。

### 4. 使用材料と製作

ここで使用した材料は、下記の通りです。使用しなかったドライバー等も含めると、全部で12万円位と思います。スピーカーユニット W5-1611SA×2本 88.2ユーロ

接続端子(RIT-CC1/GB)×2個	1,000円
ケーブル VCTF2-2SQ×1m	160円
パソコン用12cmファンガード×2個	500円
板材	スーパーシナアピトン 1820×910×15 1枚 アカマツ集成材 1820×300×18 1枚 アカマツ集成材 910×450×18 1枚 以上カット費用、送料込み 約33,000円
吸音材	パッキング用のクッション材(スポンジ)を使用
その他	ネジ、ラッカースプレー、爪付ナット、紙やすり 等 5,000~6,000円位

組立は、板材のカットが特に正確だったので、2日間で完成しました。仕上は数回手直ししたので、全部で1週間位を要しています。最初はL5を使用していましたが、いまひとつ好みの鳴りっぷりではありませんでしたので、前記の通りユニットは変更になっています。詳細はウェブサイト公開しています。

### 5. 音の特徴

MCAP型の音はバスレフの音ですが、共振周波数が分散されて低域限界が伸びている点が異なります。

周波数特性は、36Hz-18kHzは、ほぼフラット、30Hzは十分なレベルで再生します。20Hzはなんとか再生しますがレベルは高くありません。特性は、ウェブサイトをご参照ください。

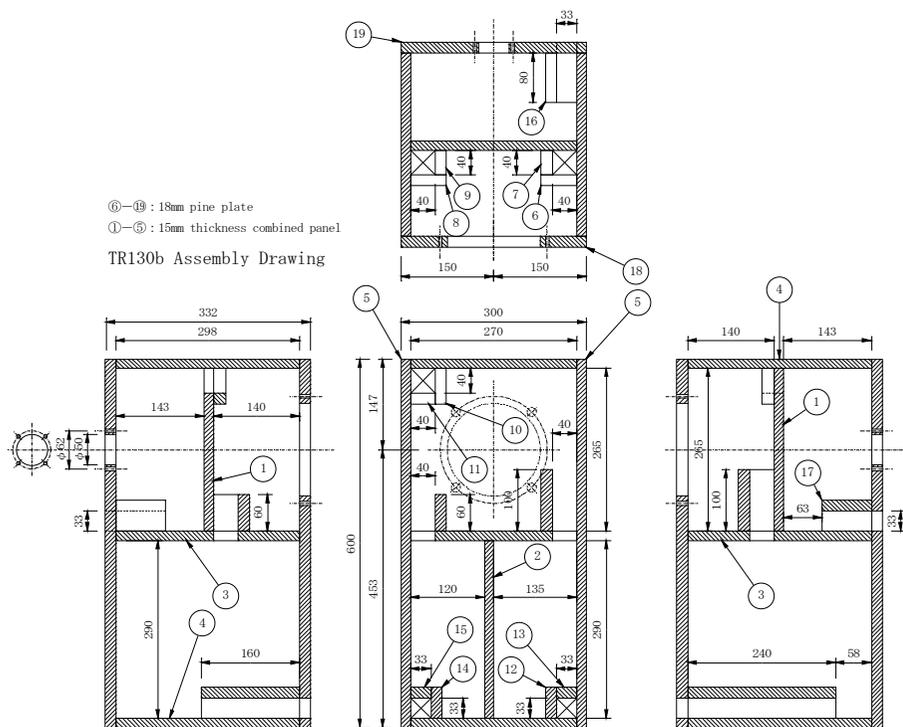
音楽ソースでは、室内楽が良いのは当然ですが、オペラ、交響楽、オルガンも良く再生します。ジャズのピアノトリオもキレと音場感が抜群でした。癖のない自然な音にできたと思います。作品の完成度は高いと思いますが、贅沢を言えば、スピーカーユニットのフレームには振動対策が必要です。エンクロージャーは、FE138ES-Rでも十分に使えるレベルにあると思います。

今回聞いて頂く音楽は、MCAP型の特徴が分りやすいものが中心で、30Hz~40Hzの低音を含んだオルガン、大太鼓の強烈なオペラ等の近現代曲、ジャズ等の聞きやすい曲を予定しています。

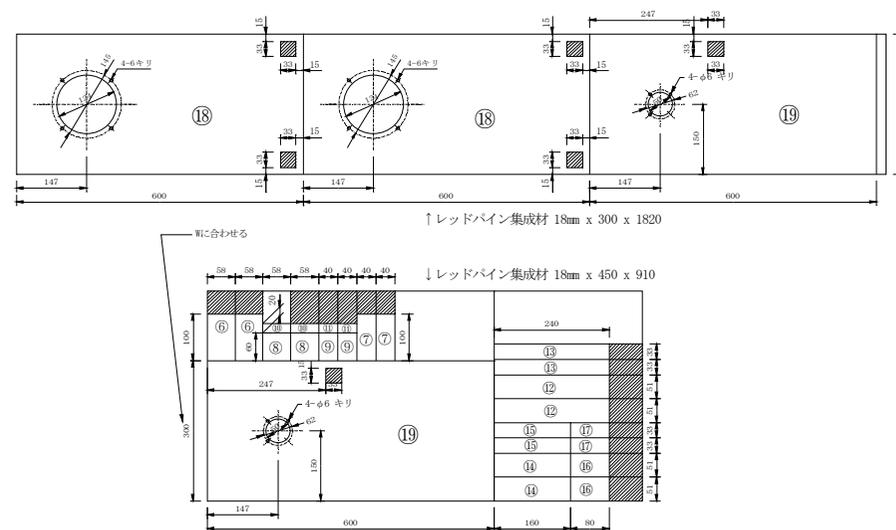
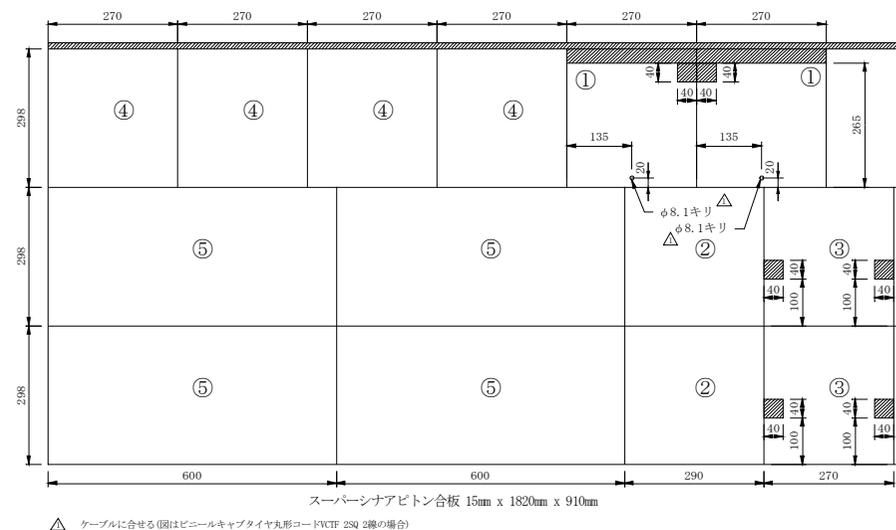
私のシステムは、1万円未満の日立DVL-P900とAccuphaseC-2000+P-350ですが、今回は、Accuphaseの上級機DP500+C2810+P-7100では、どのように鳴るのかとても楽しみです。

## 6. 設計図面

TR130b型の組立図と板取図を示します。空気室の配置は立体的で、主空気室が正面上、第1空気室がその後ろ、第2、第3副空気室は下側に横に並びます。ダクトは効率を重視して正方形断面としています。円形のほうが更に良いと思います。ケーブルの通し孔は、ケーブルに応じて変更する必要があります。できれば1.25SQ位の細い線を使用したかったのですが、自宅にあった2SQのものを使用しました。端子に負担がかかりすぎたかもしれません。



組立は、難しいところはありませんが、寸法に狂いのないことが重要です。このため、特に精度を要求する材料には、シナアピトン合板を使用、目立つところには、見た目の美しいアカマツ集成材を使用しています。少しでも見栄えを良くするために、角は鉋と紙やすりでアールを付け、何度も表面を削った後にラッカーを薄く重ね塗りし、更に表面を削った後にラッカースプレーを厚く塗りました。



詳細は、[http://www.geocities.com/sg\\_suzuki/indexj.html](http://www.geocities.com/sg_suzuki/indexj.html) をご参照ください。