

音場型アンサンブル平面バッフルスピーカー 設計の試み

Okabe, Masashi / 岡部, 雅史

(出版者 / Publisher)

法政大学多摩研究報告編集委員会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学多摩研究報告 / 法政大学多摩研究報告

(巻 / Volume)

31

(開始ページ / Start Page)

11

(終了ページ / End Page)

19

(発行年 / Year)

2016-05-30

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013342>

音場型アンサンブル平面バッフルスピーカー設計の試み

岡部雅史¹⁾

Design of sound field ensemble plane baffle speaker.

Masashi OKABE

はじめに

ヒトの音の可聴域はおよそ 20Hz ~ 20kHz (Hz : ヘルツ ; 1 秒間あたりの周波数) とされており、20Hz より小さい周波数は音としてよりも振動として認識され、20kHz より大きい周波数 (超音波) は音として知覚することはできない。また、可聴域内の音であっても、周波数によって聴覚感度が大きく変動し、低周波数域 (およそ 20Hz ~ 100Hz)、高周波数域 (およそ 15kHz ~ 20kHz) では相対感度が大きく低下しており、逆に 500Hz ~ 1kHz にかけての周波数では、およそ 20 倍程度の相対感度を示す (図 1)。この聴覚感度の良い周波数域に人の声や多くの楽音が含まれている (ドラム、ピアノ、バイオリンなどの周波数)。積極的に楽音の音色や調べを楽しむ趣味の一つと

してオーディオがある。オーディオでは、発音体としてスピーカーを用いる場合が多く、スピーカーの再生音圧周波数特性 (f 特と略す) はヒトの可聴域に適合されている。スピーカーは、各種媒体 (アナログレコード、CD、DVD、シリコンメモリー等) に記録された音声信号が電氣的にデコード (復調) されたものを最終的に物理的振動に変換させ、音として空間に放射させる役割を担っている。

本稿では、幾つかのアイデアをもとにスピーカーシステムを設計したので、概念と意図した音響的特性について紹介する。なお、ここに紹介したスピーカーシステムは、実際に神奈川県相模原市緑区にある高級木材椅子・テーブル作成 BC 工場の協力のもと設計・制作が進んでいる。本稿の前段ではスピーカーの簡単な特性の紹介、後段にて BC 工房にて行われている設計・試作の様子を紹介する。

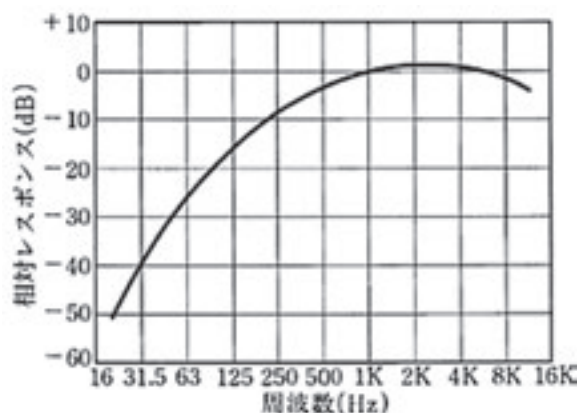


図 1 ヒトの耳の可聴周波数特性

スピーカーの構造と動作

スピーカーは電気信号として記録された音声を振動に変換させ音波として空間へ放射させる。様々な形式のスピーカーが考案されているが、ここではボイスコイルとコーン紙からなるダイナミックスピーカーを取り上げる。発音の仕組みは、強力な永久磁石の磁界の中に設置されたコイル (ボイスコイル) に音声信号を電流として通電することにより、ボイスコイルは磁界の中でフレミングの法則によって電気

1) 法政大学経済学部

波形に従いリニアモーターとして前後に振動する。このボイスコイルに振動板（多くはコーン形状のペーパー）を接合させることによって電気信号を面積の大きな振動板全体の動きへと変換する。このコーン紙が前後に振動し、コーン紙に接している空気は急激に動かされるために圧縮されたり減圧されたりして空気の粗密波（音波）へと変換がなされることになる。

磁界の中でリニア駆動するボイスコイルの動きを振動板によって音へと転換させる構造は極めてシンプルであり、音に発生原理は理解しやすい。

しかしながら、録音された信号を忠実に音へと変換されるかどうかはスピーカーのコーン紙が信号通りに空気を動かして音波を形成できているかに依存する。いわゆるハイファイ（Hi-Fi）という語はこのHigh Fidelity（録音された原音に対して忠実に再生発音できているか）から派生した語である。

スピーカーから出る音は Hi-Fi か？

スピーカーのボイスコイルに入力された電気信号によってコイルはリニアに動きコーン紙を振動させる。このコーン紙の振動が完全に音波に変換された場合は発音はハイファイとなるだろうが実際はそうはならず、音声信号の限られた部分しか音波に変換されていない。主な理由は振動伝達の不確実性によるものである。

不確実性 1

空振り現象

例えば 20Hz の電気信号をボイスコイルに加えればボイスコイルとコーン紙は正確に 20Hz で振動するが音にはなりにくい。特に小口径のスピーカユニットではこの傾向が顕著に現れる。なぜコーン紙の動きが音にならないのか？ 空気は密度の小さな流体としての性質を持っている。この性質によって、コーン紙が前後に動いても空気が横方向に逃げってしまうために音圧が生じないのである。この現象をコーン紙の空振りという。特にコーン紙がゆっくりと動く低周波数域ではコーン紙の動きに沿って空気がたやす

くスリとコーン紙の正面から横方向に逃げるためにこの現象が顕著に見られる。この現象は実験的に再現できる。洗面器に水を入れてティースプーンで水を極めてゆっくりとかき回してみると、全く抵抗なくティースプーンが動くにもかかわらず、水は動かない。ティースプーンがゆっくりと動く時、正面の水は上下左右にスリと逃げて力が伝わらないためである。このような空振り現象はスピーカーの f 特にも示されており、小口径（2～10センチ）のダイナミックスピーカーでは低周波数域の発生音圧が低くなっているのである。

一方ティースプーンの代わりに大きな面積のシャモジなどを使って動かすと抵抗があり、水は動く。

面積が大きいためには水は逃げられずに力が加えられ動くのである。つまり、流体に力を加えるためには作動物体の面積を大きくすれば力の伝達効率が増加することが理解できる。このことから低周波数域のコーン紙の動きを音波に変換する効率を上げ、低音再生するためにはコーン紙の面積を大きくする必要がある。このような大面積のコーン紙を持つスピーカーはウーハーユニット、スーパーウーハーユニット等と呼ばれ、直径が 30～100センチにまで及ぶものが市販されている。このような大面積のコーン紙を持つスピーカーユニットではコーン紙の空振り現象が抑えられるため、その f 特は小口径スピーカーユニットに対して低周波数域の再生音圧が大きくなっている。

不確実性 2

分割振動

スピーカーの Hi-Fi 再生を妨げる他の要因として、スピーカーのコーン紙の振動の不確実性がある。スピーカーのボイスコイルの動きはコーン紙全体に伝わり、コーン紙は電気信号に従って正確に前後にピストン運動を行う。しかし、振動周波数が上昇するにつれて、ボイスコイルのピストン運動がコーン紙全体に伝達されず、特に周辺部はボイスコイルの振動とは異なる振動となる傾向が強い。このような異常な振動を分割振動という。コーン紙の分割振動は、高周波数域の再生音波の乱れを招き、ピ

アノやバイオリンなどの音色が濁り再生音の劣化を招く。ウーハーやスーパーウーハーなどコーン紙の面積が大きいスピーカーにこの傾向が顕著に現れる。一方、小中口径（2～16センチくらいまで）のスピーカーユニットでは、前項の空振り現象で低音域の再生は苦しいものの、コーン紙の面積が小さいために分割振動は起こりにくく、人のボーカルからピアノ、バイオリン、ギター、トランペットあたりまでの高音域（～20kHz）までを綺麗な音色で再生できる。

不確実性 3

音波の回折

音波は波動であるためホイヘンスの原理に従って回折現象を示す。つまり音波は障害物に対して回りこみや反射などの挙動を示す。特に波長が長い音波（低周波数域；低音）ほど指向性が小さく回りこみが顕著である。高周波数域では指向性が大きくなり回りこみ現象は小さくなる。また周波数にかかわらず波の重ね合わせ現象も生じる。この音波の回りこみ現象と波の重ね合わせ現象がスピーカー単体での使用を困難なものにしている。

スピーカー単体ではコーン紙は前面に音波を発生しているのはもちろんだが、背面にも逆位相の音波を発生している。つまりコーン紙は前後にピストン運動をして音波を作り出しているが故に、前方に動いて圧縮波を放つ際には、コーン紙裏側には逆位相の粗波を放っている。低音域ではコーン紙の両面で発生した逆位相の音波がお互いに回り込んで打ち消し合ってしまうのである。一方高音域では音波の指向性が強いために低音よりは回りこみが生じにくい、そのため、スピーカー単体で音楽を鳴らしてみると低音域が減衰し甲高いf特となって聞こえる。

マルチウェイスピーカーシステム

近年のスピーカーシステム設計ではコーン紙前面の音波のみを利用するためにスピーカーをむき出しで使用することはせずに、箱（キャビネット）などに取り付けてコーン紙前面から発せられる音声と背面から発せられる逆位相の音声を物理的に遮断し、全体としてスピーカーシステムとして使用している。こ

のキャビネットの設計を工夫することによってスピーカーの持つ不確実性を補正しf特を改善して使用する。キャビネットの工夫は様々な面で行われ、ユニットの受け持ち周波数を、超低音域、低音域、中音域、高音域、超高音域と分け、それぞれスーパーウーファーユニット、ウーファーユニット、スコーカーユニット、ツイーターユニット、スーパーツイーターユニットをスピーカーユニットとしてキャビネットに取り付けるなど、現在のメジャーな形式となっている。この場合、音楽信号を直接各ユニットに流すと、それぞれの受け持ちユニットの苦手な周波数を含んだ信号をも再生することになるので（例えばスーパーウーファーユニットに高音域周波数など）コーン紙の分割振動が生じるなど再生音が劣化することになる。それぞれのユニットに適合した周波数域の信号のみを各ユニットに分配するために、コンデンサー、コイル、抵抗器を用いるのが通常となっている。これらの素子を各ユニットに接続する配線に直列に、あるいは並列に付加することで低音信号のみをウーファーユニットに、高音信号のみをツイーターユニットに流すことができ、各ユニットのf特を整え、スピーカーシステム全体としては低音から高音までワイドレンジのf特となる。

しかし、音楽信号をこれら素子に通すことは、音声信号の位相の変化、微量音楽信号の消失などが生じやすく、繊細な音楽的ニュアンスの劣化を招くことが指摘されている。つまり、マルチウェイスピーカーシステムは全体的な再生周波数域はワイドになっても、肝心の音質の面では劣化が生じやすいのである。さらに加えて、マルチウェイスピーカーシステムの音質面の弊害として音源の拡散による空間定位の劣化が見られる。これは本来ならば点音源から発せられるべき楽音が周波数域ごとに分割され別々のスピーカーユニットから発音されることになる。例えばオルガンを例にとると、低音（100Hz）はウーファー、高音（5kHz）はツイーターから発音され、あたかも2つの音源から発せられたように聞こえる場合があり、著しく再生音楽の品質を低下させる原因となる。

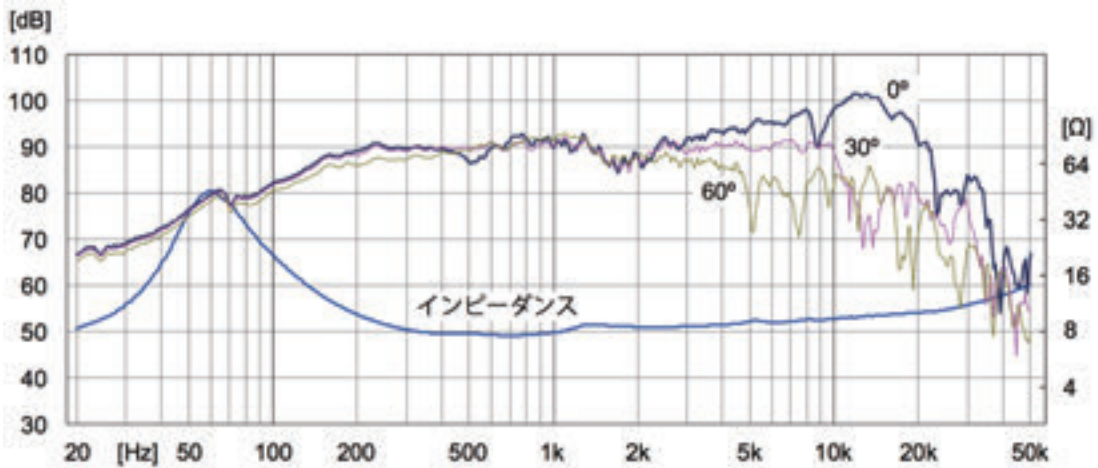


図2 フルレンジスピーカーユニット (口径 10cm) の f 特 (Fostex 社 FE108-Sol)

フルレンジスピーカー

これは人の可聴周波数域 20Hz～20kHz をなんとか全て発音できるスピーカーのことであり、フルレンジスピーカーと称される。多くは口径 5cm～16cm 程度 (実効振動板面積換算でおよそ $15\text{cm}^2 \sim 150\text{cm}^2$) のスピーカーである。代表的な f 特を図 2 に示す。低音域は空振り現象のために約 200Hz 以下の f 特はガラ下がりとなるが、キャビネットの工夫でなんとか低音域を持ち上げて使用できる。バスレフ方式、バックロードホーン方式、共鳴管方式などで設計されたキャビネットではコーン紙背面から発せられる低音も位相変換させ放射させるために低音が増強された f 特となる (ヘルムホルツ共鳴の利用)。最適に設計されたキャビネットでは、10cm フルレンジスピーカーユニット 1 つで 20Hz～20kHz を再生可能なシステムとすることも可能である。フルレンジスピーカーの良さはシンプルな配線による音楽信号の純度の高い再生が可能な点にある。マルチウェイスピーカーシステムのように配線にコンデンサー、コイル、抵抗などの素子を付加せずに、直接音楽信号をスピーカーに入力するために、信号の位相が変化せず、また微少な信号の消失なども生じない。この利点から再生音は楽器の空間定位が明確で臨場感に富んだ極めて品位の高いものとなる。このことよりフルレンジスピーカーを愛好するオーディオマニアが多い。

ステレオ再生

今日では、ほぼすべての音楽ソース (CD、レコードなど) が 2 チャンネルステレオ (正確にはステレオフォニック: stereophonic) 再生を前提として録音されているため、通常、左右 2 つのスピーカーシステムによって CD やレコードを再生している。2 チャンネルステレオ再生とは、楽曲などを複数のマイクロフォン (2 本とは限らない) を用いて録音し、左右 2 チャンネルに分けてコードし、再生時には各チャンネル独立して再生し、視聴者前方左右に設置したスピーカーシステムから発音する方式である。この方式によって、視聴者に再生音の立体的音場感 (左右、前後、上下感覚)、空間音像定位感 (各楽器の空間配置) が認識され、再生音の臨場感が生じる。以前は 4 チャンネルや 6 チャンネル、それ以上のマルチチャンネルもステレオ再生法として提案されたが現行では上記の 2 チャンネルステレオ再生方法が主流となっている。なお、映画館などではマルチチャンネル再生によるサラウンド再生も行われている。

以上、本稿の前段では現行のダイナミックスピーカーを用いたオーディオのごく表層を記した。筆者自身もオーディオを趣味とする者の一人であり、かねてより、趣味を生かした知識と経験をスピーカー自作に生かしてきた。前述のバスレフ方式、バックロードホーン方式、共鳴管方式などは自作スピーカー、メーカー製スピーカーともに一般的なスピーカー形式であり、おおよその再生音の傾向も想定しや

すい。以下本稿の後段では、あまり一般的ではないスピーカーシステムを設計してみた。

音場型アンサンブルスピーカー

概念：新しくスピーカーシステムを考案する際にポイントとして以下を考慮した。

1ー平板バッフルの採用

キャビネットを用いスピーカーユニット背面を包んだ場合、ユニットのコーン背面に背圧がかかる。この背圧が振動板の自由な動きを妨げる原因となり、再生音の音楽性を損なうことが多い。そこで今回の設計試行ではキャビネットを用いずにスピーカーを口径に合わせた穴を開けた平板に取り付けることとした。この形式は最もシンプルなスピーカーシステムであり、スピーカーの前と後ろから放射される音を板で遮断したものである。特徴として振動板には背圧がかからないため最もスムーズに動作することができ、再生音の純度が高く、極めて微小・繊細な音色も再生できるとされている。スピーカー前後の低音の回りこみ現象を抑えるために、十分な大きさの板（少なくとも 1m^2 程度）を用いる必要がある。

2ーフルレンジスピーカーユニットの使用

極力シンプルな配線にてスピーカーユニットに音楽信号を入力させるためにフルレンジスピーカーユニットを使用し、コンデンサー、コイル、抵抗などの信号の劣化を招く要素を排除した。低音再生を增强するためにフルレンジユニットとしては大口徑の16センチユニットをバッフルの中央部に1つ配置し、音像の空間定位、音場の拡大、ステレオ感の醸成のため8センチユニットをバッフルの左右に1つずつ配置した。

3ー音場型アンサンブルシステムの採用

長岡鉄男氏の発案によるマトリックス配線3スピーカーシステムを採用することとした。この機構では中央のスピーカーユニットからは右チャンネル(Rch)と左チャンネル(Lch)の和信号($R+L$;モノラルと同意)、左右のスピーカーユニットからはそ

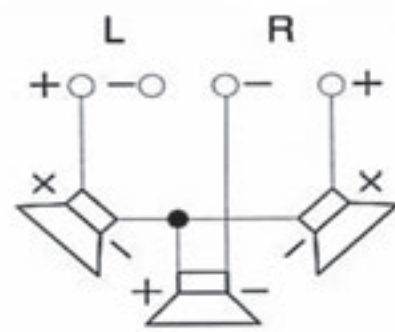


図3 長岡氏によって発表された3スピーカーマトリックス配線図

れぞれ反対側のチャンネルとの差信号（左側： $L-R$ 、右側： $R-L$ ）が再生される。つまり左右のスピーカーからはそれぞれ左右の位相差成分のみの音声を再生することになる（図3）。この方式は最もシンプルなマトリックススピーカーシステムであり、3つのスピーカーユニットを1つのキャビネットに設置する（アンサンブル型スピーカーシステム）だけで音場、空間定位、ステレオ感の醸成が可能となる。前述のマルチウェイ方式とは違い、音質劣化の元凶となるネットワーク素子（コンデンサー、コイル、抵抗など）が介在せず純度の高い音楽再生が期待出来る。長岡氏の発表したオリジナルの3スピーカーマトリックスシステムではバスレフ方式のキャビネットを採用していたが、今回の設計試行では、再生音の繊細な音響品位を追求するため平板バッフルに3スピーカーマトリックス方式を採用することとした。

4ーアンプとCDプレーヤー搭載のオールインワン構成

スピーカーシステムをオーディオ機器としてだけではなく、室内に溶け込む「音の出る家具」の一つとして設計した。また、このデザインコンセプトを支持する客層として「美しい木の家具」に訴求される層を想定した。オーディオマニア向きには構想していない。よって、面倒なオーディオ的な組み立てや機器類のライン接続操作を極力省くために平面バッフルにアンプとCDプレーヤーもあらかじめ組み込んでおき、オールインワン構成とした。この製品を室内に設置してすぐに音楽を楽しめるようになっている。搭載するプリメインアンプとCDプレーヤーは音質、機能、デザインなどの要素を吟味した結果、デノンのPMA-390RESP（プリメインアンプ）とDCD-

755RESP (CD プレーヤー) とした。特にこのプリメインアンプは、マトリックススピーカーシステムにて使用した場合、音質に秀でていると評されており、今回の研究に最適と判断し採用した。

設計図と製作の様子

設計図を以下に示す (写真1、4)。スピーカーを取り付ける平板はBC工房を主宰する鈴木氏自ら選定した。スピーカーの振動に負けない強靭さが必要なこと、木目の演出という美的要素も重要なポイントになることなどを設計・企画会議から導き出し (写真2)、厚さ50ミリの北米産ウォールナット (クルミ材) のムク板を選び出した (写真3)。ウォールナットはチークやマホガニーと共に世界三大銘木と謳わ

れている。およそ300～350年前ブリティッシュデザインウォールナット材の家具製品が注目を集め、この時期のヨーロッパ家具を「ウォールナットエイジ」と呼称されるなど高級家具としての需要に特徴のある材でもある。木質は重硬・緻密で、強度と粘りを併せ持ち、狂いが少なく加工性や着色性も良いという特性を持つ。ダーク系の落ち着いた色合いと重厚な木目から、上記のように主として高級家具材や工芸材に好んで用いられている。変わったところではアメリカ合衆国大統領の演説台やアメリカ合衆国最高裁判所のベンチにも使用されるほか、耐衝撃性の強さを生かしてライフルや拳銃の銃床にも使用される。以上のような需要の高さから持続的な伐採が行われた結果、資源が枯渇ぎみであり、現代ではクルミ材は高級木材となっている。このムク板に3





写真4



写真5

つのユニット取り付け穴を開け、さらにオーディオ機材（CDプレーヤーおよびプリメインアンプ）の取り付けラック部分を兼ねた脚部を取り付ける予定である。材質が極めて緻密で粘り強いため、作業は高度な技術を要するが、BC工房の名手 斎藤氏（写真5）によって素晴らしい工作をこなしていただいている最中である。全体としてのサイズは幅160cm、高さ100cm、奥行き40cm、重量60kg程となる予定である。他にもマホガニー材、ケヤキ材やチーク材など美しく堅牢な高級木材を用いた商品展開も可能であり、木材の見事な木目や質感などを楽しめる商品となっている。

アンサンブルスピーカーシステムの設置方法と使いこなし方法

アンサンブルスピーカーは1つのキャビネットですtereo再生が可能なので、通常のスピーカーシステムのように2つのスピーカーシステムをステレオ配置する必要がなく、省スペース性にすぐれており、部屋に合わせて自由に設置できる利点がある。部屋の4辺のどこに設置しても良いが、特に推奨できる設置と使いこなしとして、部屋のコーナーに設置す

ることを勧める。この作品はオープンバッフル（平面バッフル）スピーカーシステムなのでバッフル裏面からも前面と同様な音が出ている。それを背面の壁とコーナーを利用し、うまく前面に反射させるようにすれば、部屋のコーナーがホーンとして作用し、センタースピーカー（16cmフルレンジスピーカー）から出ている良質な低音が増強され量感ある音楽再生が楽しめる。キャビネット左右のスピーカーがステレオ成分を含んだ音をリスニングルーム全体に拡散するので、音場が部屋全体に広がり、リスニングポイントが広いオーディオが楽しめる。スピーカーユニット裏面から放射される低音を、設置場所背面の壁を使って効率よく反射させるために壁との距離を調整することを勧める。ぴったり壁（コーナー）につけた方が良いか、ある程度距離を置いた方が良いか、感じられる低音の量感、ステレオ音場感の広がりを頼りに10センチぐらいずつ動かしてみて設置場所を決めてほしい。

スピーカーシステムの音響的諸元（設計段階のもの）

平板キャビネット材；北米産ブラックウォールナツ

ト

樹齢約 100 年（約 3 年ほど自然乾燥させたもの）

全体サイズ； 幅 160cm、高さ 100cm、奥行 40cm

重量； 60Kg

構成スピーカー； センタースピーカー Fostex FF165WK、サイドスピーカー Fostex FE83En

CD プレーヤー； DENON DCD-755RESP

アンプ； DENON PMA-390RESP（現行国産オーディオアンプではこの製品のみが長岡式 3 スピーカーマトリックスに対応している）

電力消費量； 222W

音楽再生帯域； 150Hz ~ 20kHz

最後に

筆者が影響を強く受けたオーディオ研究者・評論家として江川三郎、長岡鉄男の両氏がいる。すでにともに故人となってしまったが、残したものは大きく、両氏の著した膨大な評論・研究の中には音響メーカーの製作指針となったものも多い。また、あまりにも手が込んでいてメーカーでは大量生産できず、最高の音質にもかかわらず生産されなかったキャビネットも多く、それらの設計図集が出版されており、オーディオ愛好者の自作スピーカーの良い指南書ともなっている。本稿では、江川氏の取り上げた平面バッフル（オープンバッフル）形式のシステム（シンプルなバッフルで素直な音質も期待出来るが、音響用的高级木材が大量に必要なこと、加えて「1枚板」というデザイン上の制約が大きい（ごまかしがきかずメーカーが生産しない）と、長岡氏が提唱し



写真 7

た 3 スピーカーマトリックスによるステレオシステム（単純なスピーカー配線のみで効果が大きい、メーカーにとっては儲けにつながるものではなかったために企画制作されず、自作オーディオ愛好者のみが長岡氏の遺した配線図をもとに自作していた）を融合させ、アンサンブルスピーカーとして具体化を企画したものである。この企画の意図には、上記のいわゆる「大人の事情」という要件にて製品化されないスピーカーシステムをなんとか形にしてやりたいという筆者の天邪鬼精神も多少あるだろう。今回、幸運なことに（または「類は友を呼ぶ」というか）、三大銘木やその他高級木材を分厚い無垢板として潤沢に用い、独自の重厚・軽妙で意のままのデザインセンスに満ちたテーブルや椅子、高級家具を生産・販売をしている神奈川県相模原市緑区藤野の BC 工房主宰の鈴木氏の理解のもと、最も困難を極めたバッフル板の選定と加工ができたことは極めて大きく得難い協力であった。この作品が形をなし始めたのはひとえに鈴木主宰の好奇心あふれる協力の賜物であ



写真 6



写真 8



る。ここに心からの感謝の意を表したい。

次回の報告では、いよいよ完成した作品のf特の測定、各種音源を用いた試聴と作品のオーディオ的特徴づけを行いたいと思う。この作品は果たして、大規模な交響曲ものが得意なのか？ はたまた小編成の室内楽の再生に強みがあるのか？ あるいはジャズか？ オペラか？ 筆者の好んで試聴する高橋真梨子の「五番街のマリー」や「ジョニーへの伝言」などは艶々しく歌ってくれるのだろうか？ 青江三

奈の吐息は色っぽく聞こえるのだろうか？？ 作品の完成が楽しみである。2016年5月初旬の段階でやっと板の切り取りが始まったところであり、完成は同年の11月を予定している。乞うご期待。

参考文献

本稿では特に文中に参考文献を提示していない。ダイナミックスピーカー一般については古典的名著「ラジオ技術選書108 長岡鉄男・図解スピーカー」を挙げる。また、各社から製造されているスピーカーや各種形式の自作キャビネットの特徴の解説については「長岡鉄男のオリジナル・スピーカー設計術1～4」を参考にさせていただきたい。また本文中の図1については中野有朋 騒音・振動制御 (ISBN-13: 978-4924706392) より引用した。図2についてはFostex社の関連製品解説ホームページより引用した。本文中のウォールナット材の特徴については日本語版Wikipediaより引用した。