

## 今回のお題 (中原雅考)

「音圧吸収型吸音材」としての「ビン(瓶)」。  
 前は、色々なビンの吸音特性を測定しました。  
 形が変わればそれなりに特性がかわるものもあれば、見た目は違うのにほとんど特性が変わらないものもありました。  
 また、ビンにちょっとした「しかけ」をするだけで、吸音特性が大きく変化することも観察できました。  
 隊員のみなさんも、徐々にビンの性格が読めるようになってきたのではないのでしょうか。

今回、隊員の皆さんには、今までの知識と経験を集結して頂き、「理想の吸音ビン」をつくりあげて頂きます。  
 隊員の皆さんが迷い込んだビンの国は、もともとは部屋のモード改善のためにたどり着いた世界です。  
 ビンの国でモード除去装置としての理想のビンをつくりあげ、音響改善プロジェクトへカムバックしましょう。

何度も申し上げますが…  
 そもそもモードは本当に悪いやつなのか？  
 モードを撃退すれば本当に幸せな世の中がやってくるのか？  
 これらと隊員が向き合う日もそう遠くないかもしれません。

## ～事前準備の時間～ 復習～ビンの吸音特性 (中原雅考)

ビンの設計を始める前にビンの吸音特性に関して復習しておきましょう。  
 吸音材には、「粒子速度吸収型吸音材」と「音圧吸収型吸音材」の二種類が存在します。  
 よく見かけるグラスウールや綿状の吸音材は、運動エネルギー (Kinetic Energy) を吸収する「粒子速度吸収型吸音材」です。  
 一方、ビンは位置エネルギー (Potential Energy) を吸収する「音圧吸収型吸音材」です。  
 そのため、ビンは、音量の大きいところ (音圧の高いところ) に設置することで、その効果を発揮します。  
 「音圧吸収型吸音材」の多くは ... といいますか、実用的に使われている一般的なもので知る限りの全ては、共鳴型です。  
 例えば、「板」を「音圧吸収型吸音材」として利用しようとする場合、  
 音を板に単純にあてて振動させるくらい小さなエネルギーでは、吸音と呼べるほどのエネルギー量は消費されません。  
 大量のエネルギーを消費させるためには、ある周波数で激しく板を共振させ大きく板を振動させる必要があります。  
 そのような激しいエネルギー消費を引き起こすことで、ようやく吸音効果が得られます。  
 ということで、ビンをはじめとする「音圧吸収型吸音材」は、(知っている限り) 全て共鳴型となっています。  
 ビンは、ある周波数のみを吸音するといった性格を持つ吸音材ということになりますね。

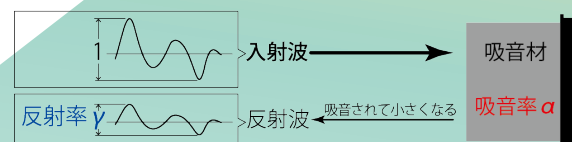
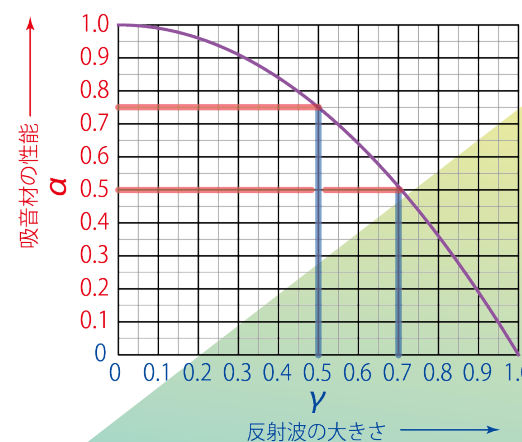
## $\alpha$ と $\gamma$ (復習)

吸音材の性能を表す「吸音率  $\alpha$ 」と、反射波の振幅がどの程度小さくなるかを表す「反射率  $\gamma$ 」の間には、以下の関係があります。

$$\gamma = \sqrt{1 - \alpha}$$

ということです、吸音率  $\alpha = 0.5$  では、反射してくる音を 70% ( $\gamma = 0.7$ ) 程度の大きさにしか減少させることができず、反射波の振幅を 50% ( $\gamma = 0.5$ ) まで減少させようとする、吸音率  $\alpha = 0.75$  の吸音材が必要になるということになります (【図1】)。

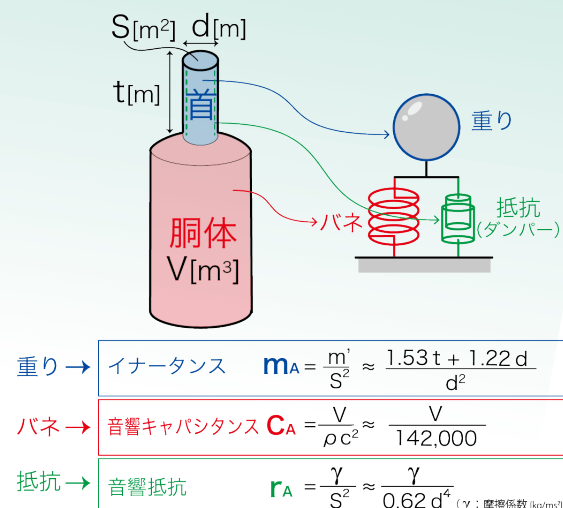
吸音率  $\alpha$  を見る目が、少々厳しくなったでしょうか。



【図1】吸音率  $\alpha$  と反射率  $\gamma$

## 音からみたビン (復習)

人間から見ると、ビンの中の空気はどれも同じ空気ですが、音からみると、「重り」にみえる空気と「バネ」に見える空気が存在します。  
 「重り」はビンの首の部分の空気、「バネ」は胴体部分の空気です。  
 音にとって「重り」となる空気を「イナータンス ( $m_A$ )」と呼び、「バネ」になる空気を「音響キャパシタンス ( $C_A$ )」と呼びます。  
 それぞれ、【図2】のように、ビンの首の直径 ( $d[m]$ )、首の長さ ( $t[m]$ )、胴体の容積 ( $V[m^3]$ ) を使って表すことができます。  
 これによると、細くて長い空気が、音にとっては「重い」空気ということになりますね ( $m_A$  は  $t$  に比例して  $d$  に反比例)。



【図2】空気的作用

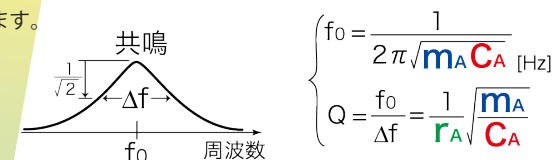
## ビンの共鳴 (復習)

「重り」と「バネ」が手を結び、そこには共振現象、すなわち「共鳴」が生じます。「共鳴」が生じると、ある特定の周波数で激しくビンの中の空気が揺り動かされ、大量のエネルギーが消費されます。

この特定の周波数を「共振周波数 ( $f_0$ )」と呼び、「イナータンス ( $m_A$ )」と「音響キャパシタンス ( $C_A$ )」が、それを決定しています (【図3】)。

さらにその鋭さ  $Q$  は、抵抗が多いと緩いピーク、抵抗が少ないと急峻なピークといったように、ビン内部の「音響抵抗値  $r_A$ 」によって決定されます。

では、抵抗が無い ( $r_A=0$ ) と?  $Q=\infty$  ということ、無限に突き抜ける一本の鋭いピークとなります。現実世界ではこういうことは発生しないので、どんなビンにもいくらかの「音響抵抗  $r_A$ 」が存在するということになります。



【図3】共鳴計算

## 吸音ビンの設計

復習はこの辺にして、隊員の皆さんに、理想の「吸音ビン」を設計して頂くこととしましょう。

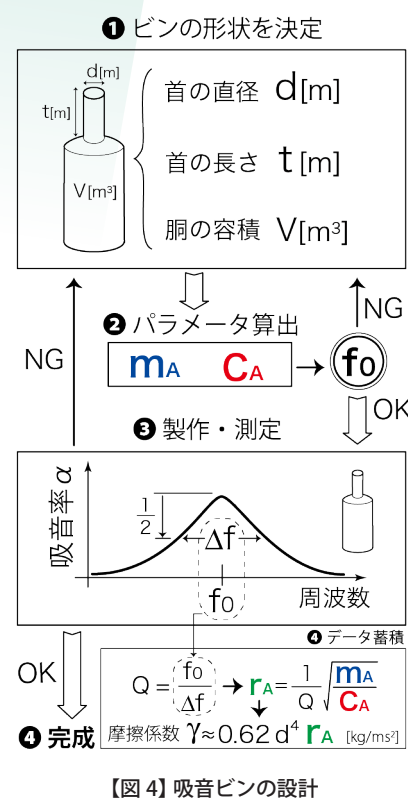
最初に優先されるべき設計項目は、「共振周波数  $f_0$ 」です。これを意図通りに実現できるよう、ビンの首の直径 ( $d[m]$ )、首の長さ ( $t[m]$ )、胴体の容積 ( $V[m^3]$ ) を設定します。

といっても、同じ  $f_0$  に対して、答え ( $d[m]$ ,  $t[m]$ ,  $V[m^3]$ ) は一通りではありません。一つの目標値  $f_0$  に対して、色々な組み合わせの答えが考えられます。それらは何が違うのでしょうか？

それを見つけるために、吸音率の測定を実施しましょう。

測定結果からは、他にも、得られた  $Q$  からビンの「摩擦係数  $\gamma$ 」を推定したり... などと色々な活用が考えられます。

さて、隊員の皆さんの経験と自主性に期待し、設計・測定スタートです。

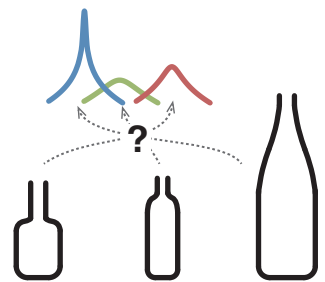


【図4】吸音ビンの設計



## 「自在音圧吸収ビン」でビンの吸音に迫る (ミカミ隊長とえりっこ隊員、りっこ隊員)

### ■ ないものは作るう！



【図5】りっこの脳内 CT 画像

りっこ隊員（以下「り」）：結局さ、「現実世界でビンに挑戦」とかいふ触れ込みでやった前回の企画だけど、何が分かった？隊長は「隊長日記」とかいふ言い訳コーナーで「まだまだ勉強です」とか「何故でしょう。分かりません（笑）」とか、ヘラヘラといい加減にシメてたけど、これで読者諸君が納得しとてども思ってるのかね。

えりっこ隊員（以下「え」）：確かにねー。前回私たちは測定装置作りになんりコキ使われたけど、隊長は適当に空いた酒ビン持って来て、その辺にあったティッシュとかかぶせて、「測ってハイ終わり」的な感じあったよね。解説しないで「結果は各自お楽しみ下さい」的な。

り：そもそも、なんで一旦現実世界に戻って来てビンの実験してるのかわかっていうと、私たちのアクリル模型箱の音響特性を整えるためでしょ。「音圧吸収型吸音体」として役立つように、自在にビンの吸音特性を設計できないと、意味なくなかない？

え：隊長は一升瓶見て「どこまでが首で、どこからが胴なのかさっぱり分かりません」なんて言ってたけど、そんなんじゃ全然使える道具にならないよね。でも、確かにその辺にあるビンって吸音用に作られてるわけじゃないし、自在に使いこなすのは結構難しいよね。

り：あらあら、隊長の肩持っ？あのね、私が使ってる製図用アプリの HP に良いことが書いてあったの。「いいものは使おう。ないものは作るう。」だって。その辺のビンを使うのが難しかったら、作っちゃえばいいんじゃない？

何やらのっけから責められております隊長ですが、メゲずに参りましょう！というわけで、今回はアクリル製の「特製吸音ビン」を作っちゃいました【図6】。設計はさすがの執念の、りっこ隊員です。ビンといえば円筒のものが多くですが、特製ビンは角柱型です。直方体のアクリル部屋に設置される時のスペース効率を考えたそうです。前回「名もない角びん」が円筒状でなくともちゃんと吸音してましたしね。これまでの実験の成果をきちんと活かしてます（エライ）。胴体となるその角柱には、首になる円筒が直につながります。これなら「どこまでが首で、どこからが胴なのか」と悩む必要はありません（というより、もはやそういう言い訳はできない!）。胴に向かってだんだんと首が広がるビールビンなどと違って、特製ビンは首の内径も一定になっていますから実に明快です。「自由自在」に吸



【図6】アクリルの特製「自在音圧吸収型吸音ビン」

音特性が調整できるように、首の太さ、長さ、胴の体積が変えられるようになっています。首は脱着式で、好きな太さ、好きな長さの首に付け替えられます。胴体にはアクリル製のスペーサーを入れられるようになっていて、胴体の容積を調節することができます。つまり、これで首と胴を色々に変化させることができます。ということは即ち、Dr. 中原の「事前準備の時間」に書かれている通り、これはイナータンスと音響キャパシタンスを好みに合わせて変化させられるということを意味します。まさに「夢の吸音」ビン! ですね？

え：すごーい、やるじゃん! いいのできたじゃん！

り：まあね♪でも、我が隊はまだスタートラインに立ったに過ぎない。これを使ってこれから何を成し遂げるのかが重要よ。

え：ハイ・・・。

り：まずは何と言っても共鳴周波数よね。今回は見きわめづらいなりにも隊長が何となく「首」と「胴」を読み取って計算してくれて、測定結果にも何となく合ったという感じだったけど、今回はハッキリと区別できるから、ビシャツと設計して、共鳴させて、白黒つけちゃおう。

え：吸音特性にも迫ってみようよ。今回は、ビンの形状は吸音特性にそれほど影響しないっていうまとめだったけど、みんなお酒用のビンだったからね。酒ビンの範疇ではそんなに差は無いのかもしれないけど、今回は色んな形が作れるから違いが見られるかも。吸音の多い少ないとか、吸音特性のゆるい、鋭いとか。

り：いいね! じゃあさ、共鳴周波数はアクリル部屋の1次モードに合わせて250[Hz]にしようよ。「事前準備の時間」によればさ、共鳴周波数は首と胴とのバランスだから、同じ共鳴周波数でも色んな形のビンができるよね。胴が小さければ首を大きくすればいいし、胴が大きければ首を小さくすればいいし！

さあ、面白くなって来ましたね。りっこ隊員が気づいた通り、ある共鳴周波数（ $f_0$ ）で吸音するビンの形状（首と胴の組合せ）というのは無限にあります。無限ですよ。今回は共鳴周波数が全て同じ250[Hz]のビンを何と9種類（!）作ってみました【図8】。色んなプロポーシヨンの9本ですが、共鳴周波数はみんな同じ250[Hz]に設計されています。【図8】に首の寸法と胴体の容積を記入しておきましたので、是非「事前準備の時間」【図3】の式を使って計算してみてください。あれびっくり、全て250[Hz]になるはずですよ。さて、この個性豊かな9本のビン、共鳴周波数はみんな同じですが、みんな同じように吸音するのでしょうか。吸音率の大きさは？吸音帯域の広さは？共鳴周波数については大抵の教科書に書いてありますが、この辺りの事になると詳しく書いてある文献はあまり多くないと思います。しかしまずは基本が大事。本当に狙った250[Hz]で設計通り共鳴させられているのかどうか、共鳴周波数のチェックから参りましょう。

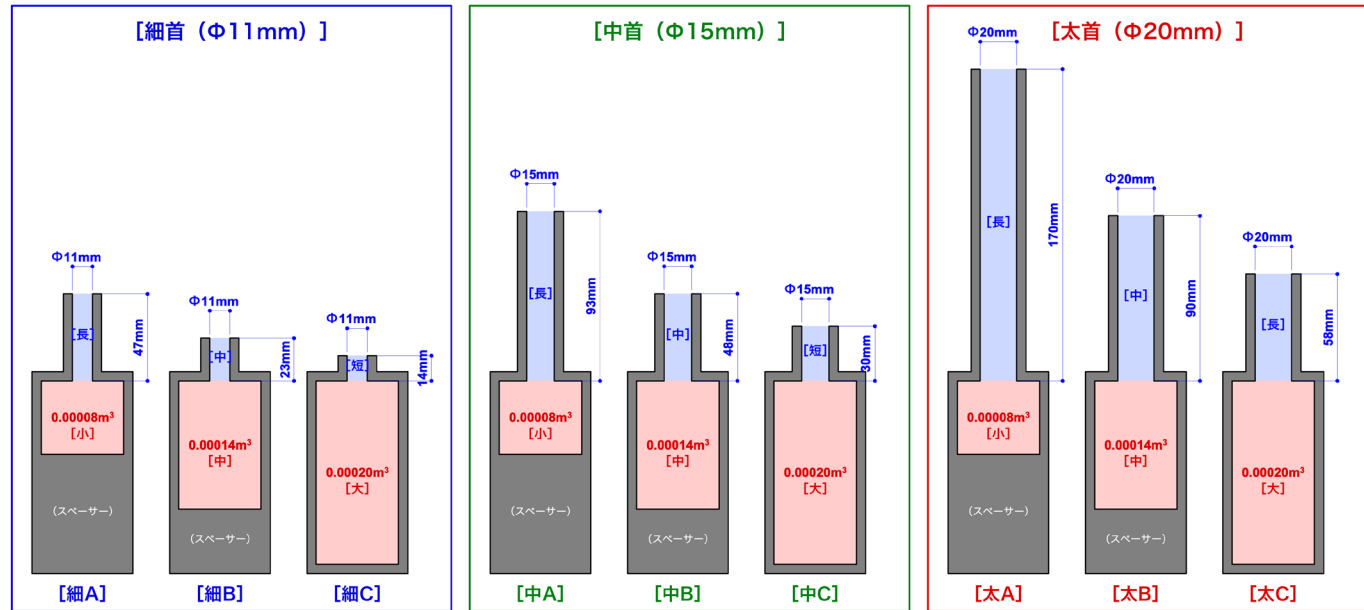


【図7】前号頑張って作った測定装置が大活躍

### ■ まずは共鳴周波数をチェック！

り：いへーい!ズバリ私の設計通り。みんな250[Hz]ピークの狙い撃ち吸音が出来てる【図9】!ちょっと変なヤツが一本だけいるけど。

え：すごいねー、チリバツ（注：「パツチリッす」の意）じゃん。さすが「自在吸音ビン」、首と胴がきちんと区別できるから、共鳴周波数はかなりの精



【図8】期待の音圧吸収トリオが3チーム。共鳴周波数は全員が $f_0=250\text{Hz}$ です。

度で設計できそう。

ミカミ隊長(以下「ミ」):お、やってるやってる。今回はまた随分と変わったビールびんだね。きれいな泡でも立つの？

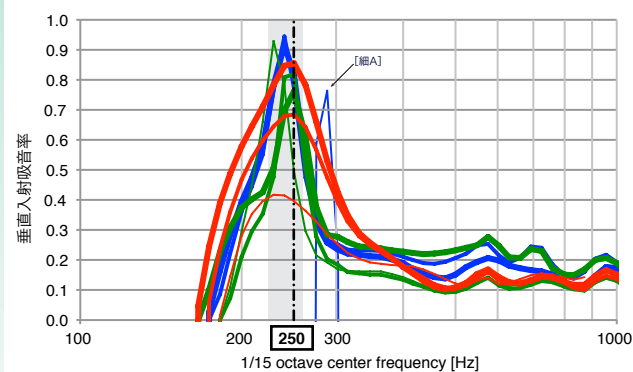
り：違いますってば。これは音圧吸収専用の特製ビンですっ。

ミ：なるほど、良く調整できてるじゃん。【図9】の横軸は1/15 オクターブバンドだから、この細かさだとピークがちょっと250[Hz]からズレちゃってるのもあるけど、主な吸音の帯域は250[Hz]あたりにあるっていう風に見て良さそうだね。青の細線（[細A]）はかなりズレちゃってるけども。

え：この9本がみんな同じ共鳴周波数を持つってなんて、ちょっと見た目じゃ想像できない。でも、計算すればそうなるんだから当然といえば当然なんだけど、やっぱり理論って大事。すごいですね。

り：そうだね。でも吸音特性まで眺めると、全部がピッタリ重なるわけじゃなくて、やっぱり個性が出てる。鋭いのもあれば緩いやつもあるし、高いのも低いのも、色々あるよ。

ミ：うんうん、そこが面白いところ、知りたいところだね。まとまっちゃってると分かりづらいから、グループごとに見ていってみようか。



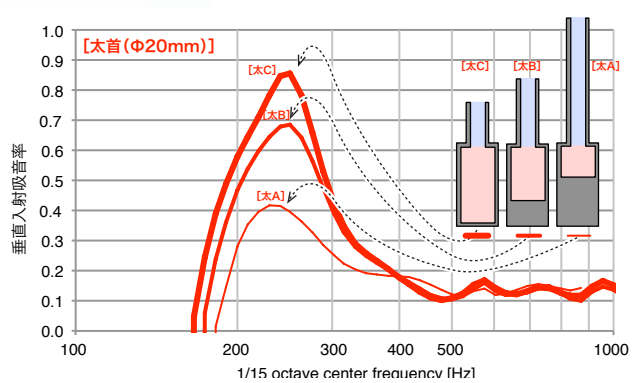
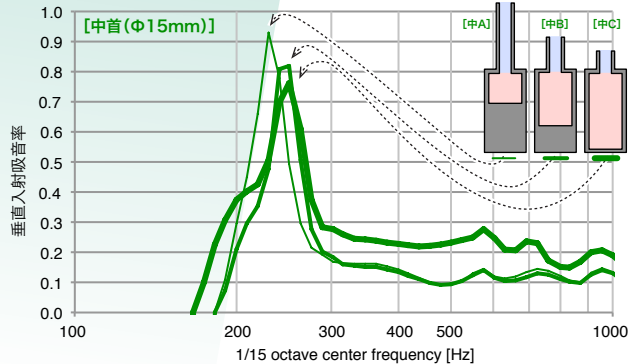
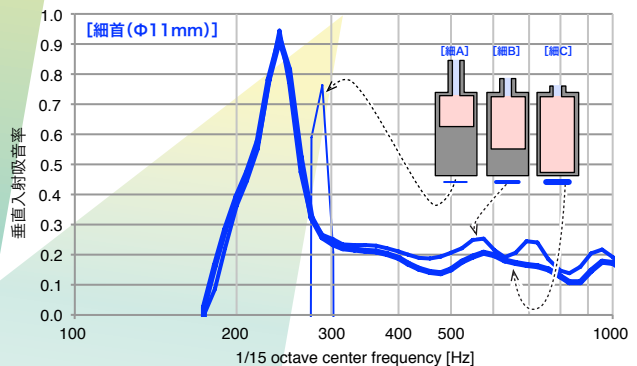
【図9】全ビンの吸音特性。（ごく一部を除いて）みんな250[Hz]だぞっ！

### ■ 吸音周波数特性もチェック！

ミ：[首の太さ]ごとに3つのチームに分類してみました【図10】。どうかな。これ見て何か分かる？

り：……。チーム【細首（青）】は……。鋭い？首の長さ、胴の大きさが変わっても特性がほとんど変わらない感じ。

え：チーム【中首（みどり）】は、首の長さと胴の大きさによってちょっと変化ありますね。首が長くて小さい胴の（[中A]）が一番吸音率が高く、鋭い感じ？首が短く、胴が大きくなるにつれて吸音率が下がっていくように見えますね。大きな違いではないですけどね。



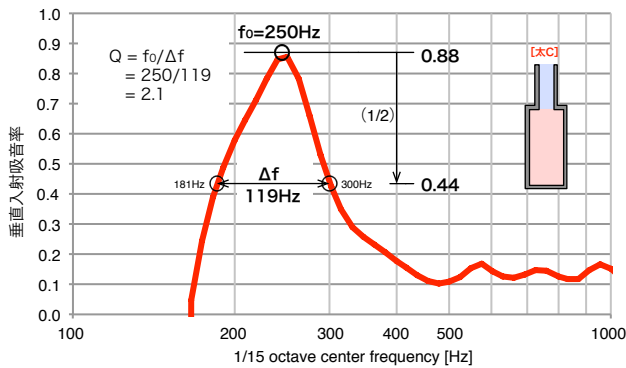
【図10】[首の太さ] チーム別にまとめました

り：チーム【太首（赤）】は、ハッキリした傾向が見えますね。首が長いほど、胴が小さいほど吸音率は下がっていくみたい。吸音特性はゆるやかになっていきますね。首の太さによってずいぶん傾向に違いがあるみたい。



ミ：そうだね、そんな感じに見えるね。まとめると、こんな感じかな？

チーム	良い点	良くない点
【細首】	首と胴のバランスに抛らず共鳴周波数が安定している。	-
	吸音特性の変化も少ない。	吸音特性を変化させづらい。
	小さく、短くて済むので、省スペース。	-
【中首】	首と胴のバランスにより、共鳴周波数、吸音率、吸音特性が微妙に変化する。	
【太首】	首と胴のバランスに抛らず共鳴周波数が安定している。	-
	吸音特性の鋭さを変化させることができる。	首と胴のバランスにより吸音特性が変わってしまう。
	-	細首よりも大きな設置スペースが必要。



【図 1 1】吸音特性の鋭さ「Q」はこのようにして読み取ります（【太 C】の例）

## ■ 太首の乱

え：隊長、できました【図 1 2】ですー。

ミ：なるほど、こうして見るとグラフで漠然と感じてた印象が具体的によく分かるね。

り：そうですね、首が太くなるに従って、吸音特性の山がゆるくなっていくみたい。

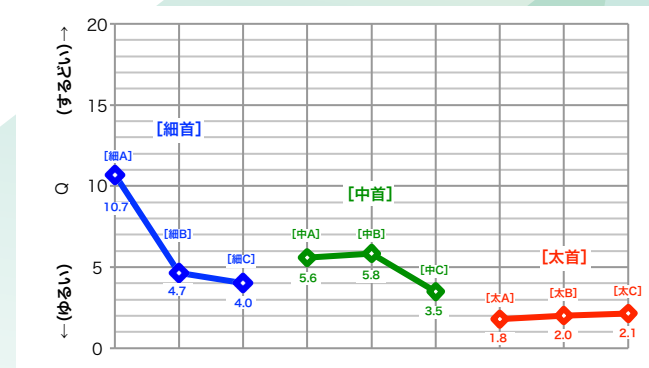
ミ：よし、じゃここで止まらずにその Q から音響抵抗 (r<sub>A</sub>) も求めてみよう。式はコレだよ、簡単でしょ？

$$\text{(音響抵抗)} \quad r_A = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{m_A}{C_A}} \quad \text{(イナータンス)} \quad \text{(音響キャパシタンス)} \quad \text{(鋭さ)}$$

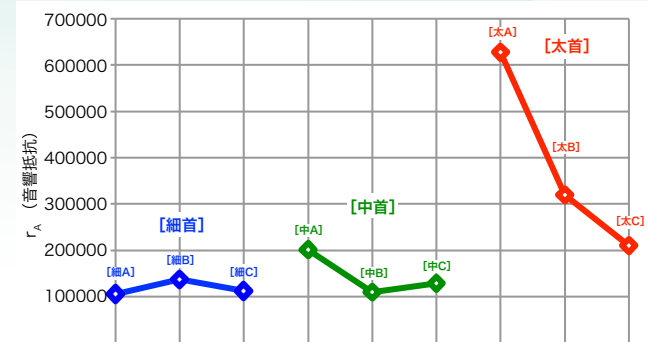
り：隊長、今度は私がやりました。【図 1 3】ですー。

え：首の太さによって結構違うんですねー。この数字が大きいのか小さいのかはよくわかりませんが、取りあえず【細首】だと 100000 ～ 130000 くらいの間に収まってるから、ピンの寸法が分かればこのくらいの数字を使って実用的な Q の設計ができそうですね！

り：ちょっとバラついてはいるけど【中首】までは、まあまとまってる。でもこの【太首】はどうするよ？同じ【太首】でも首の長さで随分と違っちゃってますね。これ使って設計しろって言われましても・・・。



【図 1 2】図 1 1 の要領で吸音率の測定結果から読み取った吸音特性の鋭さ Q

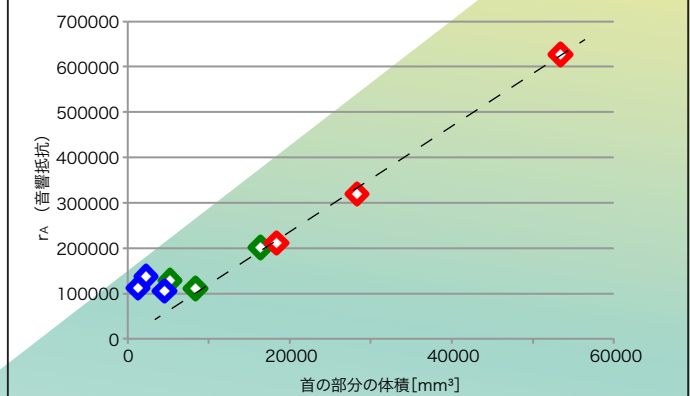


【図 1 3】図 1 2 の Q から計算（逆算？）した音響抵抗

え：でもさ、【太首】の吸音特性って“素性”は良いよね。特に【太 C】なんて吸音率は大いし、吸音帯域も広いから現場で使うにはとっても良いと思う。設計するのは難しそうだけど、諦めるにはもったいないなあ・・・。なんかいい方法ないんですか、隊長？

えりっこ隊員の言う通り、確かに【太首】の吸音特性は、高く裾野の広い山になっていて、魅力的です。私も現場で使うならコレを選びたいですね。ただ、この音響抵抗の特性ですから、設計して使うとなると悩んでしまいます。徹底的に理論的な解明に挑むという方法もあるでしょうし、読者の中にも「こんなの簡単じゃん」という知識をお持ちの方もいらっしゃるかもしれませんが、ここは実用本意のミカミ隊、理論的な正しさはひとまず横に置いて、簡易的にでも良いので使える方法を探し出してみたいと思います。

【図 1 4】をご覧ください。横軸を首の部分の体積（立方ミリメートル）、縦軸を音響抵抗として両者の関係をプロットしてみました。抵抗は首の部分の空気と関連が深いはずなので、何か手がかりになる関係性はないかと思いプロットしてみたのですが、非常にシンプルな右肩上がりの関係が見られます。【細首】の音響抵抗の 100000 ～ 130000 あたりが下限になっていて、首の部分の体積が増えれば増えるほど、音響抵抗も増加するという関係に見えます。



【図 1 4】「首」部分の体積と音響抵抗との関係

「理論的な正しさはひとまず横に置いて」といいながらも何か裏付けが欲しくなり、付け焼き刃ですが、慌てて学生時代のノートや文献をひっくり返して、共鳴器の音響抵抗について復習してみたのですが、残念ながら「音響抵抗は首の体積に比例する」なんて単純な関係にはどうやっても行きあたりません。ですから、かなりおまじない的な要素が強いのですが、仮に今回の【太首】の音響抵抗はこれで簡易的に予測・設計できるということにしてみましょう（くどいようですが、一般的に通用する式ではありませんのであしからず）。

$$r_A = 10 \times S \text{ (首の断面積) [mm}^2\text{]} \times t \text{ (首の長さ) [mm]} + 100000$$

【図 1 5】をご覧ください（小さくてスミマセン）。この「簡易式」を使って計算した音響抵抗と Q を、実際の測定結果と合わせてプロットしました。理論的な裏付けがありませんので、あくまでも“結果オーライ”程度のもんですが、これくらいの

SONA：(株)ソナ

1975 年より、メジャーレコード会社（ソニー、ビクター、エイベックス、ユニバーサルミュージック等）や放送局（NHK、NTV、TBS、YTV、ABC 等）そしてポストプロダクション（オムニバスジャパン、イマジカ、Sony PCL 等）など幅広い分野のスタジオの音響設計を手がけ、多くの制作環境を高品質に導いています。

その一方で、トップ・アーティストやクリエイターなどのパーソナル・スタジオの実績に関しても抜きん出ています。

また、サラウンド対応スタジオは DVD の普及前から取り組み、この分野での先駆的な役割を果たしています。

新たな技術を柔軟な思考で取り入れ、様々な手法でスタジオデザインにアプローチし、建築はもちろんのこと、モニターシステムの構築や最終的な再生音の調整（THX からライセンスを受けた技術者が在籍）に関しても積極的に携わっています。

<http://www.sona.co.jp>

中原雅孝

株式会社ソナ 取締役 / オンフューチャー株式会社 代表取締役 / Audio Engineering Society Governor, 日本支部 理事 / 博士(芸術工学)

スタジオ設計という分野において、理論と現場に向きあってきたその音響設計手法は、数多くのクライアントからの信頼を得ており、業界に対しても大きな影響を与えている。特に、サラウンド・スタジオの音響設計に関しては、業界の第一人者として数多くの実績があり、室内音響・モニターシステム・音響測定・調整を総合した設計方法を先行して築いてきた。最近では、ソナにおけるスタジオ設計業務だけでなく、音響ソフトウェアの開発などの R&D 業務もオンフューチャーに行っている。専門学校や大学などでの講義をはじめ、講演多数。主な著書に、「サラウンド入門（東京藝大出版会）」、「Multichannel Monitoring Tutorial Booklet（ソナ、ヤマハ）」、「サラウンド制作ハンドブック（兼六館）」、「サウンドレコーディング技術概論（日本音楽スタジオ協会）」等。

ミカミタカシ

株式会社ソナ 設計・技術グループ マネージャー

千葉県柏市出身。バランスを重んじる設計ポリシーと独特な

デザインセンスを優秀な音響知識の上に掲げ、現在急成長中

のアコースティック・デザイナー。

りっこ隊員

株式会社ソナ 設計・技術グループ

長野県出身。趣味は散歩と美術館巡り、甘味屋をはしごする

こと。座右の銘は晴耕雨読。「理由のあるかたち」をモットー

に機能を備えたデザインを探索しています。

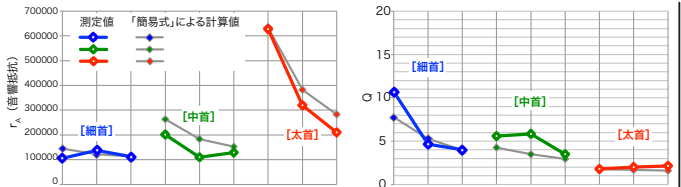
えりっこ隊員

株式会社ソナ 設計・技術グループ

千葉県出身。趣味は音楽鑑賞と BBQ。今年の BBQ 開きで何に

挑戦するか目論み中。昨年に引き続き、分りやすく現場が

スムーズに進行できるような設計を模索中。

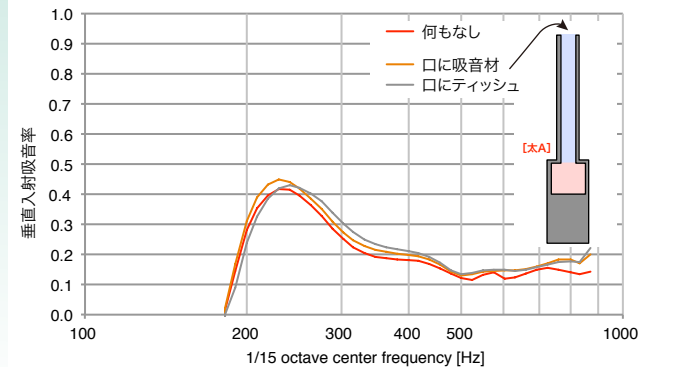


【図 1 5】「簡易式」を使った音響抵抗と Q の計算結果

予測・設計はできそうです。但し、このアクリル製「特製吸音ピン」ならば、ですが、今のところ理論的な裏付けができていませんので、簡易式の使える範囲はこのピン限定と考えた方が良さそうです。ですから、我々が模型箱の調整には使えるでしょう。しかし、現実世界で幅広く使えるようになるには・・・。今号も前号と同じ様な課題が残ってしまいました。でも、小さな一歩ですが前進はしました。よね?!

## ミカミタカシの隊長日記

「自由自在」を目指した今回でしたが、我が隊もまだまだですね。道のりは二合目といった風情でしょうか。今回は模型室に復帰という青写真を描いていたんですが、どうなることやら。ピンを極めるか、模型室に戻るか、隊員総会で協議することとしましょう。最後にもう一つだけ測定結果を紹介させて下さい。【図 1 8】は【太 A】ピンの口に抵抗を与えて、吸音特性にどんな違いが出るかを測定した結果です。前号で似た様な実験をしたんですが、覚えてますか？梅酒のピンの口にティッシュをかぶせたり、吸音材を詰めたりして吸音率を測定し、吸音率が向上したり、吸音帯域が広帯域化したりという効能を紹介しました。ところが、今回の測定結果はこのようなものでした。どうしたのでしょうか。【太 A】は今回の 9 ピンの中では最も高い音響抵抗、即ち最も緩い Q=1.8 を示したピンです。どうやら、元々 Q の緩いピンに抵抗を与えても効能は薄いようなのです。ピンの口や首にティッシュのような抵抗を与えれば、必ず前号のような効能が得られるという訳では無いようです。という事でまだまだ「自由自在」には程遠い我々ですが、極めようと思えば模型箱には戻れないかも。もう少しピンにはまってみるか、そろそろ模型室に戻るか、今度はサンマの頃にまたお会いしましょう。



【図 1 6】もともと Q の緩いピンに抵抗を付加してもあまり変化がない？

ミ：ウン、実用重視のミカミ隊だから、実用的に使える r<sub>A</sub> が分かればそんでいいよね。だから r<sub>A</sub> を知るために、まずは測定結果から Q を読み取ってみよう。

御質問等は、Pro@mirc.co.jp まで！