

楽器音の音響分析と音響合成のためのノウハウ^{*}

やさしい
解説

青木直史 (北海道大学大学院情報科学研究院)**

1. はじめに

最近、トライアングルをはじめとするいくつかの楽器音を具体例として、自分なりに取り組んでみた音響合成の試行錯誤を音響学会の研發にて紹介してみたところ [1, 2]、日本工業大学の大田先生からつぎのような打診を頂戴することになり、今回の記事を執筆することになりました。

「楽器音の分析や合成に関する知見についてご紹介いただいて、信号処理の授業などで学生の興味を引き出すことに困っている方の参考になればと考えております。」

じつは、この10年ほど、コンピュータによる楽器音の音響合成をテーマとして大学の演習授業を実施し続けてているのですが、「これはすごい!」という音をつくってくれる学生に出会えたことはほとんどなく、内情を明かしますと、どのように教えたらよいのか筆者も困っていたというのが本当のところでした。音をつくるのは、絵を描くようににはいかず、あらためて考えてみると、なかなかに手ごわい課題なのかもしれません。

提出されたレポートから察するに、何をどうしたらよいか思案に暮れている学生も多いようで、ケアが必要なことはわかつていたのですが、この手の課題は試行錯誤こそが真の目的。白状すると、正しいやり方や答えがあるのかどうかもよくわからないのですが、とはいえそれもあんまりだろうと、率先垂範、背中を見せていただこうと、自分でも課題に取り組んでみたところ、気がつけば沼にはまっており、いつの間にかミイラ取りがミイラになっていたという顛末になっています。

今回の記事は、こうした自分自身の経験を踏まえ、学生のみなさんの参考になればと、筆者なりの模範的な取り組み方(?)について紹介してみようと思います。他大学にも、似たような課題を前にして困り顔の学生がいらっしゃるかもしれません、「こんなことをやってみれば、かならずや先生は感心するはずですよ。」というポイントをお伝えできればと思います。

2. こんな課題が出されたら

件の課題というのは、つぎのようなものです。対象は大学の3年生。

「ウェブサイトなどから楽器音の音データを入手し、波形、周波数特性、スペクトログラムを表示しなさい。これらをお手本とすることで、楽器音を合成するプログラムをつくりなさい。どのような手順で音をついたのか、自分のプログラムについて説明してください。」[3, 4]

こんな課題が出されたら、とにもかくにもやらないといけないのはツールの準備。このご時世ですので、自宅のパソコンで課題に挑戦してもらうことになってしまいわけなのですが、初心者にもわかりやすいプログラミング環境としてはPythonがオススメです。Pythonを使えば、WAVEファイルの読み書きはもちろん、波形、周波数特性、そしてスペクトログラムの描画も簡単にできます[5]。周波数分析のキモはフーリエ変換ですが、numpyのfftモジュールを利用すれば、そのあたりも問題はありません。パソコンに詳しくない人も、とりあえずAnacondaをインストールしておけば大丈夫でしょう。

この課題は、音をつくる前に、まず音を観察することが手順になっているわけなのですが、このように、対象をじっくりと観察することは、自然

* A case study of the analysis and synthesis of instrumental sounds.

** Naofumi Aoki (Hokkaido University)

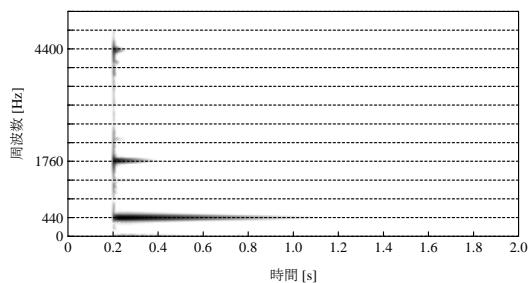


図-1 マリンバのスペクトログラム (A4 音)

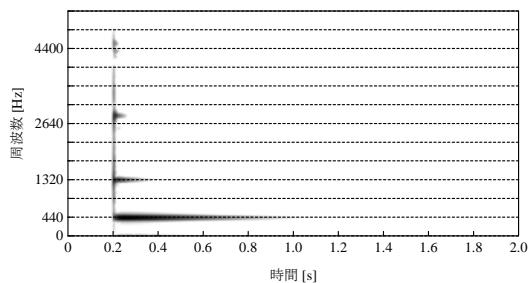


図-2 シロフォンのスペクトログラム (A4 音)

科学における暗黙の了解といえるでしょう。もちろん、波形をながめるくらいだったら誰でも朝飯前ではないかとは思いますが、音を観察する場合はそれだけでは不十分で、周波数特性をながめること、さらに突っ込んで、周波数特性の時間変化であるスペクトログラムをながめてみることが不可欠になります。

このあたりの話でつまずいてしまう学生は、そもそも周波数というものの概念を理解していないのではないかと思われるしだいなのですが、安心してください。大学の3年生とは、意外とそんなものかもしれません。まあ、だからこそ、そのあたりの理解を深めるために、こうした課題に取り組んでもらうわけですから。

3. 木琴の音をながめる

今回の記事は、木琴を具体例として、音響合成の試行錯誤を紹介してみようと思います。観察の対象として用意したのは、アイオワ大学がネットに公開しているサンプル [6]。もちろん、楽器を演奏できる方であれば、自分で録音してみるのもひとつ手かもしれません、木琴のような高価な楽器を持っている方はほとんどおられないでしょうし、こういったとき、ネットは本当に便利です。

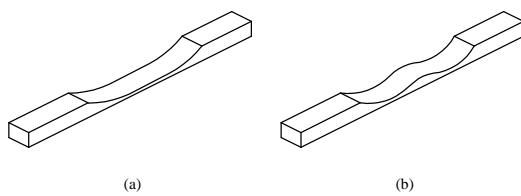


図-3 音響板の形状：(a) マリンバ、(b) シロフォン

貴重なサンプルを公開していただいている方々に感謝したいと思います。

さて、これは知る人ぞ知る蘊蓄なのかもしれません、じつは、木琴にはマリンバとシロフォンというふたつの種類があるということを、みなさんはご存知でしたでしょうか。それぞれ音色が異なる別々の楽器なのですが、「知ってたよ。」という方は有段者。日ごろ、木琴のことなど深く考えたことがない普通の人にしてみれば、はじめて聞く意外な事実なのではないでしょうか。

そんなわけで、本当にそのとおりなのか調べてみることにしました。図-1と図-2は、それぞれマリンバとシロフォンのサンプルをひっぱってきて、コンピュータを使って描画してみたスペクトログラムになっています。ざっと観察してみると、いくつかの横じまが見て取れるかと思いますが、いずれも音の高さはA4音のサンプルを使っているため、どちらも周波数440Hzの基本音が出現していることがわかります。そのほかの部分音も見て取れます、高域になるにつれて持続時間が短くなっていくのはどちらも同じです。

このように、一見するとどちらも同じように見えるスペクトログラムではありますが、よくよく見比べてみると、マリンバとシロフォンでは、倍音構成に違いがあることがおわかりいただけるのではないでしょうか。マリンバには4倍音、シロフォンには3倍音が出現しており、さらに調べてみると、その上の部分音も微妙に違っている。「ひょとして、これがマリンバとシロフォンの音色の違いなのでは。」と思われた方は鋭い。確かにそのとおりでして、こうした周波数特性の違いが、マリンバとシロフォンの音色の違いをすばり表しているわけなのです。

答えを言ってしまうと、じつは、こうした周波数特性の違いが生まれるように、わざと音響板の形状を加工しているのが、似て非なるマリンバと

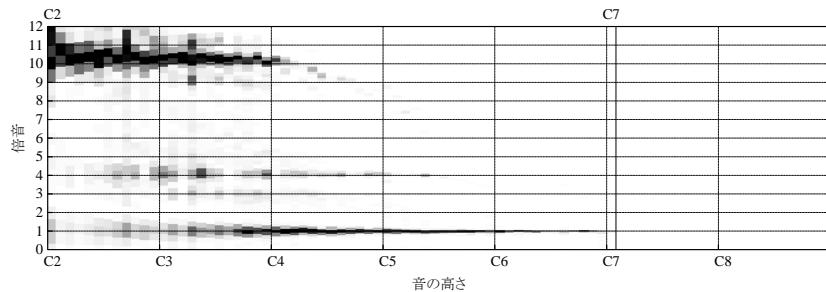


図-4 マリンバの倍音構成 (C2 音～C7 音)

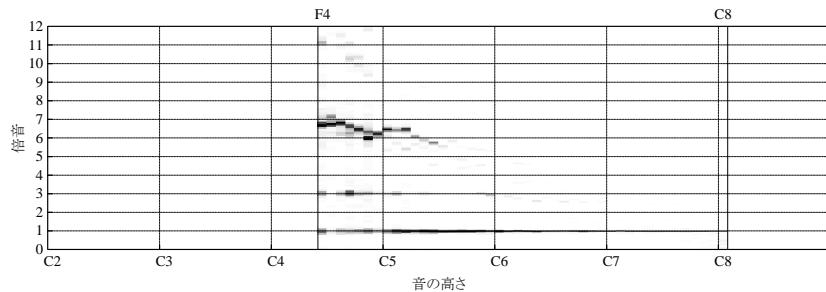


図-5 シロフォンの倍音構成 (F4 音～C8 音)

シロフォンの秘密にほかなりません。図-3 に示すように、マリンバとシロフォンの音響板を裏返してみると、どちらも中央部分が削られているものの、マリンバとは異なり、波打つように削られているのがシロフォンの特徴になっています。

こうした加工によって、マリンバは4倍音が強調され、シロフォンは3倍音が強調されることになるわけですが、このように発音物体の形状が周波数特性を左右するファクタになっていることは、音響学の知識として覚えておくとよいかもしれません。一見するとどちらも同じように見えるマリンバとシロフォンに、じつは、こんな秘密が隠されていることを知ると、ちょっとした感動を覚えるような気がしますが、いがかでしょう。

さて、A4 音のサンプルは確かにそうであることがわかったわけですが、こうした特徴が、はたしてほかの高さのサンプルにも現れるのかどうか、さらに突っ込んで調べてみました。音が鳴りはじめた瞬間はすべての部分音が勢ぞろいしているため、そのあたりの波形を切り出し、周波数分析を行ってみました。

図-4 と図-5 に、それぞれマリンバとシロフォンの倍音構成を示します。これらは、横軸を音の高

さ、縦軸を周波数として、周波数特性を濃淡表示したものになっています。ちなみに縦軸は基本周波数で正规化しています。結果をながめてみると、A4 音だけでなくほかの高さのサンプルも、マリンバは基本音と4倍音、シロフォンは基本音と3倍音が出現しやすいことがわかります。また、マリンバは10倍音あたり、シロフォンは6.5倍音あたりにも部分音が出現しやすいことがわかります。ただし、音域によって倍音構成は少しづつ変化し、音が高くなるにつれて基本音だけが目立つようになります、それぞれの楽器の音色の違いは区別しにくくなっています。

このように、ひとつの事実を発見したとしても、ほかの条件でも本当にそのとおりなのか、さらに突っ込んで調べてみることは、自然科学における大事な姿勢といえるでしょう。単純にサンプルをとつかえひつかえして周波数分析を繰り返していくだけのように見えるかもしれません、数を増やすことで定量的に調べようとする努力は、じつは、レポートを読む先生の心を打つポイントだと思っていただいてさしつかえありません。こうした取り組みをさりげなくアピールしていただければ間違いなく高得点をもらえますよ。

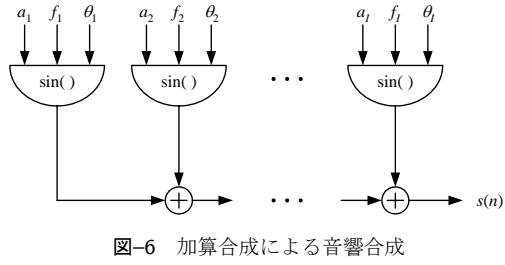


図-6 加算合成による音響合成

ちなみに、マリンバとシロフォンの音色の違いは、音響板の形状だけでなく材質にもよるそうで、マリンバはやわらかく、シロフォンはかたい木材でつくられていることも重要なファクタなのだと [7]。まあ、そもそも、マリンバと比べてシロフォンのほうがカバーする音域が高いわけで、そのため、シロフォンのほうが、印象として鋭い音色に聞こえているだけなのかもしれない、という気がしないでもありませんが。

4. 木琴の音をつくる

こうした観察をふまえて、いよいよ木琴の音をつくってみることにします。

音響合成の基本は加算合成 [8]。音響合成的具体的な方法にはさまざまなアプローチがありますが、あらゆる波形はサイン波の重ね合わせによって表現できるという重ね合わせの原理をそのまま適用する加算合成が基本になります。

加算合成の定義は、式で書けば、つぎのようになります。とても簡単です。

$$s(n) = \sum_{i=1}^I a_i \sin \left(\frac{2\pi f_i n}{f_s} \right) \quad (1)$$

図-6 に示すように、サイン波をつくり足し合わせるのが加算合成の手順にほかなりません。音を観察してみた結果、マリンバとシロフォンは、それぞれ倍音構成が異なっていることがわかつたわけですが、たとえば、マリンバであれば基本音、4倍音、10倍音、シロフォンであれば基本音、3倍音、6.5倍音を重ね合わせることで、それぞれの音をつくることができます。

ただし、スペクトログラムを観察することで明らかになったように、それぞれの部分音は時間の経過とともに減衰し、最後には消えていきます。こうした音をつくるには、 a_i を時変のパラメータ

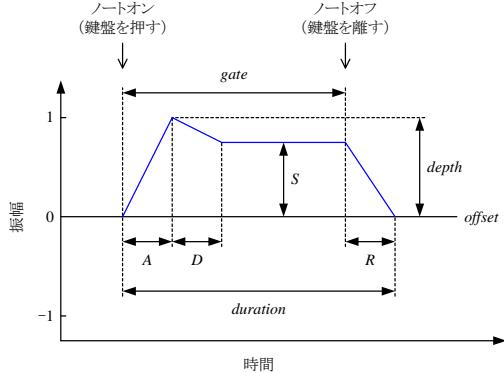


図-7 ADSR のパラメータ

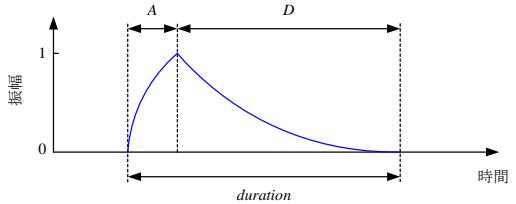


図-8 打楽器の時間エンベロープ

とし、つぎのように加算合成の定義を書き直す必要があります。

$$s(n) = \sum_{i=1}^I a_i(n) \sin \left(\frac{2\pi f_i n}{f_s} \right) \quad (2)$$

楽器音の音響合成は、こうした音の時間変化を、ADSR と呼ばれるパラメータによって定義することが一般的です。図-7 に示すように、アタックタイム (A)、ディケイタイム (D)、サステインレベル (S)、リリースタイム (R) という 4 つのパラメータを使って時間エンベロープをコントロールするのが ADSR のしくみにほかなりません。図-8 に示すように、S を 0 にすると、木琴をはじめとする一般的な打楽器の時間エンベロープを定義することができます。

加算合成によって、実際に木琴の音をつくる Python のプログラムは、筆者のウェブサイトにアップしておきますので、参考にしてみてください [9]。このプログラムを実行すると、マリンバの A4 音をつくることができます。まったくのゼロからつくった音がいかにもそれらしく聞こえると、感動すること間違いないなしですよ。

加算合成は、言ってみれば重ね合わせの原理を仮説として音をつくっているわけです。「つくれないモノは理解できない」というファインマンの言葉に照らし合わせて考えてみると、こうした仮説にもとづいて実際にそれらしい音をつくることができれば、音はサイン波の集合であるということを、仮説を検証しつつ具体的に理解できたといえるのではないかでしょうか。つくることで理解するというアプローチは、自然科学の姿勢として大変意義深いものがあるように思います。

分析の結果をふまえて音をつくることを、技術者の世界では、いわゆる分析合成と呼んでいますが、このアプローチが成功をおさめた代表例として知られているのが、携帯電話でもおなじみの情報圧縮の技術です。20世紀末、携帯電話の開発と歩を合わせるようにして、情報圧縮の研究が盛んに行われましたが、適切なモデルを仮定し、できる限り少ない情報量で効率よく音声信号を表現することが目標とされました。お手本の音に近づけるべく、合成した音を何度も聞きながら、仮説を検証しつつ改良の余地を探すことが、こうした研究の姿勢だったわけです。

身近にお手本がある楽器音の再現は、こうした分析合成のアプローチを理解するうえで格好の題材になるのではないでしょうか。将来、音響の技術者になるのも面白そうだと考えている方は、後学のためだと思って、一度はトレースしておいたほうがよいかもしれませんね。

5. 本当にこれでいいのか？

さて、無事に音をつくることができたし、レポートにまとめる内容としては、このくらいでも十分かもしれません。しかし、そこからさらに突っ込んで調べてみるのも一興。マリンバのA4音は確かにつくることができましたが、音の高さを変えてみるとどうなるか。その楽器がカバーする音域については、きちんと音をつくることができるか確認してみたいと思う方は、かなり研究者向きかもしれません。ぜひとも大学院進学を検討してみてください。

そんなわけで、音の高さをA4音からひとつずつ変えてマリンバの音をつくり確認してみたわけなのですが、なんと、このプログラムでつくったマリンバの音は、音を高くしていくと、しだいに

金属音のように聞こえはじめ、木琴というよりも鉄琴のように聞こえてしまうことがわかつてしましました。

金属音と聞いて、とっさに思い出すのはFM (frequency modulation) 合成 [8]。かつて、一世を風靡したFM合成は、アナログシンセサイザには難しかった金属音を簡単につくり出せることをキャッチコピーにしていたわけですが、非整数倍音こそ金属音らしさの理由であり、非整数倍音イコール金属音を簡単につくり出せるところにFM合成ならではのアドバンテージがあるとする説明を、はるか昔に聞いた記憶があります。

しかし、実際にやってみると非整数倍音を含まないマリンバも金属音のように聞こえてしまうわけで、非整数倍音イコール金属音とする説明にはちょっと無理があることがわかります。まあ、FM合成をやさしく説明しようとすると、非整数倍音イコール金属音としておいたほうがイメージがつかみやすいのは確かで、筆者もそのご多分にもれず、そんなものなんだろうと納得してしまっていただけのことなのかもしれません。

おそらく、金属音らしさとは、発音物体の材質によって左右される共鳴の度合いによって説明されるべきものであって、非整数倍音の有無によって単純に片づけられるものではないのかもしれません。FM合成のキャッチコピーを鵜呑みにしてた筆者も、ここに来て、遅まきながらようやく非整数倍音というのは金属音らしさの十分条件であり必要条件ではないのかもしれないという見解にいたったわけです。やはり、自分で手を動かしてやってみると、いろいろ見えてくるものです。

では一体どうすればよいか。周波数特性では1本の縦線で表されるサイン波は、いわゆる完全共鳴の状態に対応しているわけで、その共鳴の度合いは無限大です。サイン波を重ね合わせてつくった音が金属音のように聞こえてしまうのは、共鳴の度合いがあまりにも大きすぎるからなのだろうと。だとすれば、共鳴の度合いを小さくすると金属音らしさがやわらぐのではないかという仮説が立つわけなのですが、どうすればそんな芸当ができるのかということになるわけです。

そんなわけで、ここからが音響合成の試行錯誤のはじまりなのですが、じつはよい方法がありまして、答えを言ってしまうと、「足してダメなら引

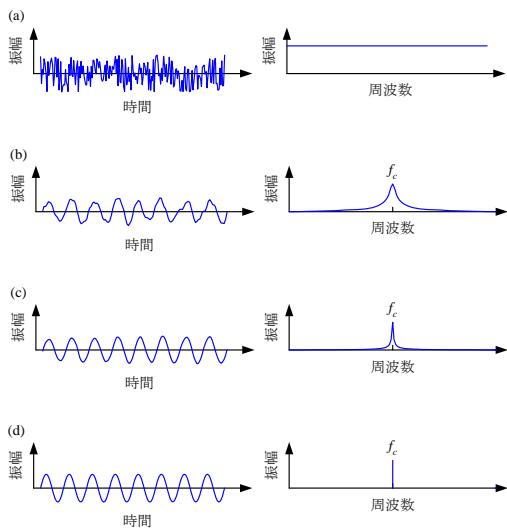


図-9 BPF による波形の生成 : (a) 白色雑音、(b) BPF を通過させた白色雑音 (Q が小さい場合)、(c) BPF を通過させた白色雑音 (Q が大きい場合)、(d) サイン波

いてみる」という言葉のとおり、減算合成を適用するのがひとつのアプローチになります。

かつてのアナログシンセサイザには、音づくりの方法として、フィルタのレゾナンス、すなわち Q を極端に大きくすることで、意図的に発振を引き起こし、サイン波をつくり出すという一種の裏技がありました。図-9 に示すように、こうしたテクニックを利用すると、白色雑音からサイン波まで、共鳴の度合いの異なるさまざまな波形をつくり出すことができます。

こうした減算合成のしくみを利用すれば、金属音らしさがやわらいだ木琴の音がつくれそうだという道筋が見えてきたところで、満を持して登場するのがフィルタ。減算合成は、原音をフィルタで加工することで音をつくり出しているわけで、フィルタの実装がどうしても必要になります。ちょっと面倒に思うかもしれません、信号処理における必須のテクニックですし、これをきっかけにフィルタの実装に足を踏み入れてみるのも悪くないかもしれませんよ。

まあ、フィルタと一口で言ってもいろいろあるわけですが、初心者にオススメなのは万能フィルタと呼ばれるバイクワッドフィルタ [8, 10]。ここでは、白色雑音を原音とし、バイクワッドフィルタの BPF (band-pass filter) に通すことで部分

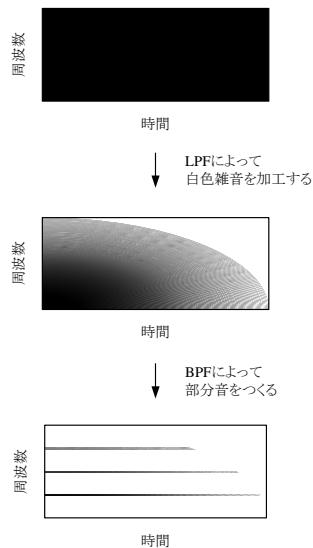


図-10 LPF による白色雑音の加工と BPF による部分音の生成

音を抜き出し、重ね合わせるというアプローチで木琴の音をつくれることにしました。

ノウハウを少々。スペクトログラムを観察することで明らかになったように、木琴の音は、時間の経過とともに高域の部分音から順番に減衰していきます。こうした特徴を表現するには、白色雑音そのものを原音とするのではなく、図-10 に示すように、高域の成分からしだいに減衰していくように、あらかじめ白色雑音を加工しておくことが効果的です。アナログシンセサイザでいうところの VCF (voltage controlled filter) のしくみそのものですが、LPF (low-pass filter) の遮断周波数に時間エンベロープを設定すると、こうした音の時間変化を表現することができます。

BPF は部分音の数だけ用意する必要があります。BPF の中心周波数は、それぞれの部分音の周波数そのものです。BPF の Q については高めに設定し、ここでは 200 にしてみました。

音づくりの最後は振幅のコントロール。アナログシンセサイザでいうところの VCA (voltage controlled amplifier) を使って、打楽器らしい減衰音に仕上げます。図-11 が全体のブロック図。じつは、VCF も VCA も、ここではどちらも ADSR によって時間エンベロープをコントロールしているわけなのですが、参考まで、表-1 に具体的なパラメータを示しておきます。

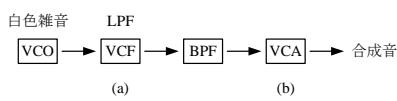


図-11 減算合成による木琴の音響合成

表-1 木琴の時間エンベロープ：(a) VCF、(b) VCA

白色雑音					
<i>A</i> [s]	<i>D</i> [s]	<i>S</i>	<i>R</i> [s]	<i>offset</i> [Hz]	<i>depth</i> [Hz]
0	0.2	0	0.2	500	2000

(b)					
<i>A</i> [s]	<i>D</i> [s]	<i>S</i>	<i>R</i> [s]	<i>offset</i>	<i>depth</i>
0	0.8	0	0.8	0	1

さて、こうした手順でつくった音が、はたして木琴のように聞こえるかどうか、そこが一番興味あるところだろうと思うわけですが、音をつくり確認してみたところ、音を高くしていっても、いかにも木をたたいたような木琴らしい音が鳴ることがわかり、無事、仮説の正しさを証明することができました。実際、音が鳴った瞬間の感動は忘れないものがあり、加算合成で終わっていればここまで到達できなかつたと思うと、じつに感慨深いものがあったわけで、自分でやってみたからこそその達成感というものは、試行錯誤のご褒美なのだろうとあらためて思っただいです。

その一方で、こうした試行錯誤を通して気づかされたこともあります。それは、自分の耳が意外とあてにならないということ。不思議なことに、音が低いうちは木琴のように聞こえていたはずの加算合成の音も、減算合成の音をつくった後であらためて聞いてみると、もはや鉄琴のようにしか聞こえず、自分はそれまで一体何を聞いていたのだろうと考えさせられました。音がレベルアップすると、聴覚の解像度もそれに合わせて高くなってしまうのか、もはや後戻りはできず、それまでの音では満足できなくなってしまうということなのかもしれません。

今回の記事で紹介したテクニックは、アナログシンセサイザの裏技を焼き直したものに過ぎません。しかし、こうした過去の遺産を発掘し、学び直したことが重要なヒントをもたらしてくれたわけで、やはり温故知新は偉大と言わざるを得ません。自然科学は、どんな分野であれ過去の膨大な試行錯誤の上に立脚しているわけですが、アナログシンセサイザの裏技のように、一見するとアカ

デミックとは縁がなさそうな職的な知恵であっても、切り捨てるこことなく自分なりに咀嚼してみること。これを学生のみなさんに贈る言葉したいと思います。

6. 音のリアリティ

冒頭で述べたように、以上のような試行錯誤を音響学会の研發にて紹介してみたところ、筑波大学の若槻先生から、「物理的なリアリティと心理的なリアリティのどちらが大事なのか」なるコメントを頂戴しまして、とても大事なことだと思いますので、筆者が日ごろ考えていることをあらためてここに記しておきます。

まず、物理的なリアリティと心理的なリアリティとは何ぞや、ということなのですが、現実の音をお手本として正確な音をつくり出そうとするのが物理的なリアリティを追求する視点であり、一方、デフォルメもいとわずそれらしく聞こえる音をつくり出そうとするのが心理的なリアリティを追求する視点であると定義してみます。写真のような写実表現を目指す立場と、マンガのような記号表現を目指す立場を思い浮かべると、両者の違いが理解しやすいかもしれません。

黎明期の音響合成は、装置の制約があり、物理的なリアリティより心理的なリアリティを追求する視点に立たざるを得なかつたという事情がありました。ただし、こうした試行錯誤の結果として、さまざまな職的な音づくりのテクニックが編み出されていったことも事実。

ひるがえって、装置の制約が解消されつつある現在、音響合成の自由度は一昔前と比べて格段に向上してきており、物理的なリアリティを追及するアプローチは十分に機が熟しつつあります。パワフルなコンピュータを駆使して、物理的に正確な音をつくることも、決して不可能ではなくなっています。

しかし、だからといって、心理的なリアリティを追求するアプローチが完全に放棄されてしまったというわけではありません。不思議なことに、物理的に正確なものをつくってもそれらしく聞こえず、たとえウソであっても、その音らしさを強調したほうが音づくりとしてはうまくいくことも少なくありません。とくに、SF映画の効果音など、現実には存在しない音であってもそのリアリティ

の度合いを議論できるのは、音を判断する基準として、つまるところ人間は心理的なリアリティを重視しているということの証拠になるのではないでしょうか。

プラトンのイデア論にもあるように、人間の頭のなかには音の実体というものの定義されており、それを基準として音のリアリティを判断するしくみが、もしかすると人間には本来的に備わっているのかもしれません。だとすれば、物理よりも心理に重点を置いた音響合成のテクニックは、人間にリアリティを感じさせる音をつくるうえで、無視できない大きな可能性を秘めているといえるのではないでしょうか。

リアリティについて考えることは、人間が音をどのように聞いているのか理解しようすることと同義です。リアリティを追求する音響合成の試行錯誤は、一見すると、ただ音をつくっているだけのように見えて、じつは、その奥底になかなかに深い科学的な問い合わせ潜んでいるような気がするのですが、いかがでしょう。物理と心理、両者の視点を尊重しつつ、これまでに蓄積されてきたノウハウを礎として、広い視野でリアリティについて考えてみることが、さらに完成度の高い音響合成の技術を生み出していくうえで重要なヒントをもたらしてくれるよう思います。

7. 余 談

筆者が木琴の音に興味を持ったのは、じつは、2016年7月に、浜松はヤマハ社で開催された応用音響研究会に参加したことがそもそものきっかけでした。2階の会場の隣にあった展示ブースに、マリンバとシロフォンについて紹介しているパネルがあり、そこに書いてあった説明を読んで、はじめてマリンバとシロフォンは異なる別々の楽器なのだということを勉強させていただいた経緯になっています。

このご時世、学会はオンライン形式があたり前になってしましましたが、実際、オンライン形式の学会は情報をやり取りするだけであれば必要十分ですし、移動にかかる経費もからなくなっこことで参加者が増えていることも確かです。効率という視点から考えると、メリットは決して少なくないといえるでしょう。

しかし、ひょんなところで思わぬきっかけをも

たらしてくれるところに、昔ながらの対面形式の学会の醍醐味があったのも事実。学会そのものばかりではなく、むしろその周辺に、つぎのチャレンジにつながるヒントが転がっているのかもしれないと思うと、先立つものがなければ移動できないというデメリットはあれど、やはり世のなか万事コインの表裏といえるのではないかでしょうか。現在、非常事態宣言発出中のなか、9月30日の締め切りを前にこの原稿を書いているわけですから、そんなことを考えながら対面形式の学会を懐かしく思い出す今日この頃です。

8. おわりに

以上、「自分なりに音をつくりなさい」という放任主義の課題に対してどうやって取り組んだらよいのか、筆者なりの試行錯誤を紹介してきましたが、今回の記事を通して、音響合成の面白さについて伝わるものが少しでもあれば望外の喜びです。興味をもたれた方は、ぜひとも音響合成の試行錯誤の沼に飛び込んでいただいて、楽しみながら（？）この分野の勉強にチャレンジしていただけたらと思います。

レポートを書く学生には最後にもうひとつだけアドバイスを。せっかくつくった楽器音です。楽譜に合わせて音を並べてみて音楽を演奏してみてはいかがでしょう。音楽にしてみると楽器音らしさが引き立つでしょうし、なんといっても感動が違います。レポートを提出するときに、そんな音楽データをメールに添付してみると「秀」をもらえること間違いないし。ぜひとも、先生を驚かせてみてください。

文 献

- [1] 青木直史, “トライアングルの音響分析に関する一考察,” 音講論（春）, pp.1365–1366, 2019.
- [2] 青木直史, “マリンバとシロフォンの音響分析と音響合成,” 音講論（春）, pp.1275–1276, 2021.
- [3] <https://bit.ly/3uqdF6j>
- [4] <https://bit.ly/39yuPGK>
- [5] <https://bit.ly/3cAWDMI>
- [6] <http://theremin.music.uiowa.edu/>
- [7] <https://www.alsoj.net/wind-i/magazine/view/603/1741.html>
- [8] 青木直史, サウンドプログラミング入門, 技術評論社, 2013.
- [9] <https://bit.ly/3nYfnLT>
- [10] 青木直史, “はじめての音声信号処理とサウンドプログラミング,” 日本音響学会誌, vol.73, no.4, pp.230–238, 2017.