

川内記念講堂の改修後の音を高精度で予測

～計算機シミュレーションと 1/10 模型実験の組合せにより改修結果を高精度で予測～

2008 年 6 月 20 日

東北大学電気通信研究所

■ ポイント ■

- 計算機シミュレーション（注1）と、模型実験（注2）の、それぞれの特徴を生かした形の、ハイブリッド音場予測を世界で初めて実現。更に、その結果を実際に音として聞くことができる、ハイブリッド可聴化技術を開発した。
- 開発したハイブリッド可聴化技術を用い、東北大学 100 周年記念事業の一環として進行中の川内記念講堂（注3）改修結果を、10 月の竣工を待たずに高精度で予測した結果、改修後の音が期待どおり高品位になるものと推定することができた。

■ 概要 ■

東北大学【総長 井上明久】電気通信研究所【所長 矢野雅文】の鈴木陽一教授らの研究グループ(以下「東北大」という)は、株式会社竹中工務店【社長 竹中統一】の協力を得て、高い周波数領域において高精度が期待できる計算機シミュレーションと、低い周波数において高精度が期待できる模型実験（今回の縮尺は 1/10）を組み合わせ、それぞれの特徴を生かした高精度のハイブリッド型音場予測と、その結果を実際に音として聞くことができるハイブリッド可聴化技術の世界で初めて実現した。また、この技術を用いて、東北大学 100 周年記念事業の一環として進行中の川内記念講堂の改修結果を、10 月の竣工を待たずに高精度で予測した結果、改修後の音が期待どおり高品位になるものと推定することができた。改修竣工後、実際の音響特性と比較し、更に高精度な技術の開発を目指す。

■ 新技術開発の背景 ■

現在、ホールの音響設計には、音場の計算機シミュレーション技術が広く用いられている。しかしそのほとんどは、音が光と同様に鏡面反射することを前提としており、音の波動性が十分考慮されていない。そのため、低い周波数における精度がどうしても不足する。一方、同じく広く用いられている模型実験では、低い周波数では高精度が期待できるものの、適用周波数には上限があり、可聴帯域全域をカバーすることは困難である。また、ホールの音響設計には、これらの結果を単に図示して解析するだけでなく、実際に音として聞いてみるのが重要であり、可聴化（auralization）を行うことが極めて重要である。

可聴周波数全帯域において高い精度を有する音場予測技術は、音楽専用ホールなどの高品位音響空間の設計に極めて有効であると期待される。

■ 新技術の特徴 ■

開発したハイブリッドシミュレータは、以下に示す3種のインパルス応答（注4）を重ね合わせて、より高精度なインパルス応答（右上図）を作り出すところに特徴がある。

(1) 音響模型を使ってインパルス応答を求める

ステージ中央から時間引き延ばしパルス（TSP: Time-Stretched Pulse, 注5）を放射し、これを客席で受音することにより、模型のインパルス応答を求める（右下図）。模型から求めたインパルス応答は低周波数域で精度が高いため、計測結果に遮断周波数 5kHz の低域フィルタをかけ、5kHz 以下の低周波数域のインパルス応答（残響音）を実測する。

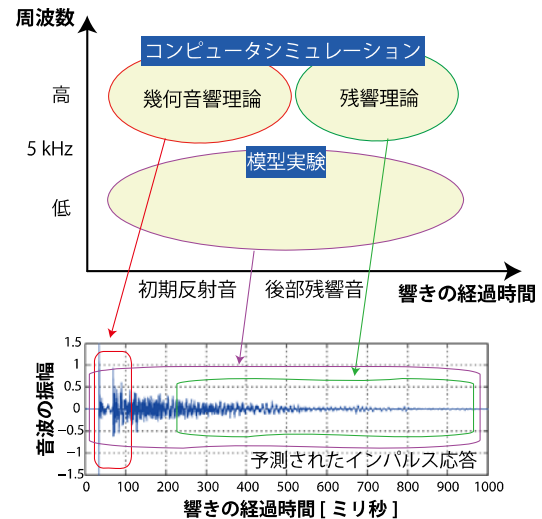
(2) コンピュータシミュレーションによりインパルス応答を求める

幾何音響理論（音が壁によって鏡と同じように反射すると見なす理論）を用いたコンピュータシミュレーションにより、ステージ上の音源からある客席までの音の反射経路をたどり、いくつかに分割した方向ごとに反射音の到来時刻とその強さを計算する。幾何音響理論は高い周波数帯域で精度が高いため、計算結果に遮断周波数 5kHz の高域フィルタをかけ、5kHz 以上の高周波数域の初期反射音を算出した。

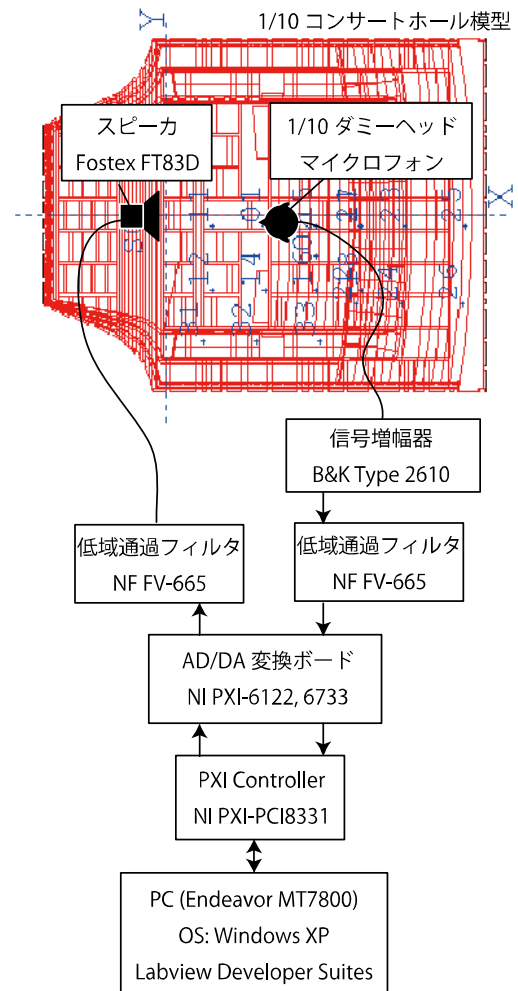
(3) コンピュータシミュレーションにより後部残響音を求める

上記の(1)と(2)で求めたインパルス応答は残響の余韻の部分の精度が高くないので、残響の理論モデルを用いたコンピュータシミュレーションにより、後部残響音を求める。その結果に遮断周波数 5kHz の高域フィルタをかけ、高周波数域の後部残響音を計算した。

また、上記の方法によって求めた音響特性から実際の音が聞こえるようにする可聴化に



ハイブリッドシミュレータの模式図



音響模型によるインパルス応答測定

においては、今回、従来のように無響室に多数のスピーカを配置する方法（立体角分割法；注6）ではなく、バイノーラル方式を用いる点も新しい特徴である。即ち、重ね合わせたインパルス応答を、聴取者の両耳位置について求め、これに、ドライソース（無響室で録音された音楽信号）を畳み込んで出力を得た。そのため、従来の方式のように、音はスピーカではなくヘッドフォンを用いて聴取できることから、音響設計が容易になるように工夫している。

【用語の説明】

注1 計算機シミュレーション (computer simulation)

コンピュータシミュレーションは、実世界や仮説的状况をコンピュータ上でモデル化し、システムがどのように作用するのかを予測する手法である。今回は、コンピュータにホールの形状、内装仕上げ材の吸音率を入力して、室内音響特性を計算後、音響特性の評価検討を行った。

注2 模型実験

実在するものや設計図にしたがって形状を忠実に再現したものが模型であり、その模型を使って行う調査を模型実験と呼んでいる。今回は設計図にしたがって、縮尺 1/10 モデルを製作し、ホールのインパルス応答を実測した。室内音響の模型実験では、残響時間、音圧レベル分布や聴感的物理量の評価を行うことが多区、可聴化まで踏み込んだ例は少ない。

注3 川内記念講堂

東北大学 50 周年（1957 年）を記念して 1960 年に竣工。故二村忠元教授（元電気通信研究所所長、元音響学会会長）のチームが音響設計を担当した 2000 人規模の大ホールを備えていた。この大ホールは、多目的ホールとしては高品位の音響を実現、式典、講演の他、オーケストラを初めとする様々な音楽活動にも活用されていた。

2007 年の東北大学 100 周年記念事業の一環として大規模改修が行われることとなり、現在、収容人数 1230 名の本格的シューボックス形ホールへの改修が進行中。改修後は、音楽ホールとして一級の品質を有すると共に、講演会場としても良好な性能を実現することを目標として、工事が行われている。また、名称は公募結果を参考に改められる予定である。

注4 インパルス応答

あるシステムの特性（今回の場合にはホールの音響特性）を厳密に表現する時間特性。ホールの「残響」もインパルス応答の一種。あるホールのインパルス応答を正確に求めることができれば、その特性を、畳み込みと呼ばれるデジタル信号処理によって音楽信号に重ね合わせることにより、ホールの中の音響特性を正確に表現することができる。

注5 時間引き延ばしパルス (TSP: Time-Stretched Pulse)

短時間に正弦波の周波数を高い値から低い値まで連続的にスイープした信号。位相を周波数の 2 乗に比例して変化させて時間軸を引き延ばしている。

注6 立体角分割法

空間をある数に分割し、対応する位置・角度にスピーカを設置し、反射音は一番方向が近いスピーカに割り当て、同時に全てのスピーカから音を提示する手法。1965年にゲッチンゲン大学第3物理学研究所において世界で最初に実現された。日本では、1990年代にゼネコン各社が競ってシステム開発を行った方法で、空間の分割数は会社によりまちまちであり、望ましい分割数は不明である。スピーカの数を増やすと音の広がり感は向上すると考えられるが、スピーカやスピーカを取り付けた治具からの反射音の影響が問題になる可能性もある。

<本件に関するお問い合わせ先>

東北大学電気通信研究所
教授 鈴木 陽一
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
東北大学電気通信研究所
TEL: 022-217-5460 FAX: 022-217-5535
E-mail: suzuki@ais.riec.tohoku.ac.jp