

退官記念講演



“音とのつきあい”

My Work on Acoustics

石井 聖 光*

Kiyoteru ISHII

私の卒業論文、大学院時代から定年退職するまでの間、専門とした音とのつきあいをのべたものである。オーディトリアムの音響、縮尺模型実験、計測器の試作、空調騒音、道路交通騒音、鉄道騒音など私が手がけてきた音にまつわる話を思いつくまま、私なりにまとめた。

1. は し が き

昭和 60 年 3 月 27 日の退官記念講演を書き残しておくために書きはじめたが、“はなし”と“文章”とは同じではない。“はなし”ではなんとか聞いていただけた内容も“文章”にするとどうにもまとまらない。私の能力不足が原因であるが、文章向けに作り直したのが本稿である。お許しいただければ幸いである。

2. 音 の 道 へ

終戦から約 1 年半、まだ混乱の続いていた昭和 21 年の秋、私は建築学科の卒業論文に音をやらせてほしいと申し出た。当時建築学科で音の問題は渡辺要教授が担当される建築計画原論（現在の建築環境工学）に属していた。渡辺教授は当時としては突飛とも思える私の希望を快く容れて下さったが、実験設備はなく、戦後音響の研究をしておられた物理工学科の糸川英夫先生の指導を受けるよう斡旋して下さいました。この時から大学院のはじめの 2 年が終わるまで糸川研究室のお世話になることとなった。この頃、物理工学科の講義の中には音に関連したものに谷安正先生の「応用音響学」、糸川先生の「振動及び波動」があり聴講させていただいた。

卒業論文を進めるために私が使うことを許された音響測定器は、ビート発振器、パワーアンプ、スピーカ、ブラウン管オシログラフ、電磁オシログラフと日本電気製の騒音計であった。これらの機器を使って教室内の音圧分布と純音による室内伝送特性を計測し、簡単に理論的検討を加えて卒論をまとめた。物資も食料も乏しく、毎日のように停電する時代で、研究はなかなか進まず、その成果も実用化の見通しなど全く立たない時代であった。しかしこの卒論によって私は実験の面白さを心から体験し、その後今日まで実験を主軸とした音の研究を続けるきっかけとなった。

大学院にはいって最初に手がけたのは建築音響のための計測器の試作であった。この頃は神田の通りには露店

商が並んでラジオ部品を売っていた。この中にアメリカ軍払い下げの部品を並べる店があり、そこにはまだ見たこともない新しいモノを発見して驚喜したこともあった。

こうしてまずはじめに試作したのが騒音計とホワイトノイズ発生器である。卒論で使った騒音計は本体と電源部に分かれ、大型で全体の目方は 10 kg 以上あったと思う。リヤカーにのせて運んだことを覚えている。この騒音計は旧海軍が東芝、日電、沖の 3 社に試作させたもの一つでその概要が日本音響学会誌に報告されていた。

そこで小型軽量の携帯用騒音計を作ろうと考え、神田でアメリカ製のミニチュア真空管を集め、なんとかまとめあげたのは昭和 24 年のことで、その回路は卒論に使った日電の騒音計を基本としたものであった。

この少し前、ふとしたことから東大理工学研究所（旧航空研究所）の音響関係の方と知り合い、この騒音計の試作の指導を受け、これに使う特性のよいマイクロホンを手に入れることもできた。

ホワイトノイズ発生器は当時の建築音響測定分野では全く新しいものであった。その基本回路は理工研で教えてもらったサイラトロン放電管によるもので、電気関係の雑誌にも紹介され始めていたが、実際に試作してみると、安定性が悪く、同じサイラトロン放電管でもタマをかえる回路定数を変えないとうまく働かないなど苦労が多かった。しかしなんとか実験に使える程度に改善し専用のアンプと一つのケースに入れた音源装置としてまとめあげ、その後の音響実験がここからスタートすることとなった。すべて手作りによらねばならない時代であった。

これらの測定器を使って卒論で行った室内音場分布の研究を続け、本郷キャンパスの法文経 25 番教室等を借用して実験を行った。

3. 大学院後半の研究、特に残響計の試作

昭和 24 年大学院の 3 年目を迎えるとき、卒論以来お世

* 東京大学名誉教授 芝浦工業大学教授

話になった物理工学科の糸川研究室から建築の渡辺研究室へもどって建築に関係した音の研究を続けることになった。しかしまだ世の中は復興の途上で音などという問題はまだまだぜいたく視されたい目で見られることもあったので、戦後アメリカから入ってきた文献の収集などに時間を費やした。

昭和26年、日本音響学会は会長に東大理工学研究所の佐藤孝二教授を選出し、学会本部が東工大から理工研に移り、活発な活動を始めた。はからずも私が建築音響の部門から幹事としてその運営に参加することとなり、音響に関する多数の部門の先輩を知る機会にめぐり合ったことは、大学院の学生の私にとって誠に幸運であった。学会には多くの研究委員会がつくられ、その中に平山嵩教授（東工工学部建築）を委員長とする建築音響委員会があり、その仕事として東大理工学研、NHK 技研を中心に各大学、研究所の手持ちの計測器を持ちよって、日比谷公会堂、第一生命ホール、ヤマハホール等の建築音響測定が実施され、これに参加する機会を得た。当時まだ各研究機関の整備が不十分であったときに、互いに協力した共同研究が行われたことは大変有意義であった。

この共同研究の少し前頃から、私は残響計の試作に熱中していた。この頃、わが国の残響時間の測定は、かつての電磁オシロに残響波形を記録させる方法から、ブラウン管による方式に変わり、指数減衰する残響波形を直線化するために、時間軸も指数減衰させる手法が開発された頃であった。

当時欧米ではすでに高速度レベルレコーダと称する縦軸を50 dB程度のデシベル目盛とし、残響のような速いレベル変化を記録する装置が普及しつつあった。そこでなんとかこれに相当する性能のものを試作しようと考えた。この頃、アメリカの音響学会誌に、半導体の非直線性を利用した対数増幅器が報告されていたので、これを利用してCRTに高速度レベルレコーダの記録波形と同じものを画かせて残響時間を求める装置の製作を試みた。この残響計が動き始めて、残響測定の精度が飛躍的に向上し、残響測定の結果から計算で求める建築材料の吸音率測定も容易に行えることとなり、研究は急速に進んだ。昭和30年秋、世界的に有名なBrüel and Kjaer社の高速度レベルレコーダが輸入されるまで、この残響計が計測器の主力となった。

4. オーディトリアムの音響設計へ

昭和20年代後半には戦後の復興が着実に進められたがオーディトリアムの建設はほとんどなく、戦災をまぬがれたもの、戦後改修されたものなどの調査をする程度であった。

ところが昭和27年に建築家前川国男先生から神奈川県立音楽堂の設計に際して音響の立場から協力を依頼さ

れるという幸運が舞い込んだ。当時一介の大学院生を協力させた前川先生の決断は大変なことであったと思う。私は“盲人蛇に怖じず”の諺のごとく喜んでお引き受けした。この音楽堂は神奈川県の内山知事の肝入りで計画されたクラシックコンサート専用のもので、競技設計の結果前川事務所の案が一等当選し、神奈川県在住の音楽家の大きな協力によって実現したものであった。

ホールの形状の検討、使われる材料の選定等についてその時までに私の習い覚えたすべてを投入し、分からないところは納得のいくまで調査研究することとした。特に建築材料の音響的な性質については未知の点が多く、その吸音率は文献にその値が表としてのついていたが、外国文献の翻訳が多く、日本製のどの材料がそれに当たるのか不明のものもあった。日本音響学会の建築音響委員会では日本で実際の設計に使える建築材料の吸音率表を早急に作る作業をすべきだという意見があり、NHK技術研究所でその実測が始められていた。

そこで私はこの音楽堂で使う材料はすべて吸音率を実測することとした。しかし当時の生研にはその施設がなく、幸いなことに東京目黒の国立公衆衛生院建築衛生学部の残響室を借用することができたが、教科書に載っているような測定法は知っていたが、いざやってみるといろいろ問題があった。いわゆるノウハウを全く知らないものでまごつくことが多かった。しかしこの測定に前述の残響計が偉力を発揮した。当時のわが国の吸音率の測定技術としては最高のレベルであったと今でも自負している。こうしていろいろな建築材料の吸音特性を調べてみると、それまでの文献には書かれていない多くの知見が得られた。

この神奈川県立音楽堂の設計に協力していた昭和28年、ロンドンにできたRoyal Festival Hallの音響に関する資料を入手した。これは戦後わが国にもたらされたコンサートホールの音響に関する最初の資料であり、これをもとに音楽堂の設計に再検討を加え、かなりの設計変更を行い、昭和29年11月、落成した。幸いクラシック音楽専用のコンサートホールとして30年余をへた今日でも高く評価され、その音響効果を損なわないために、古くなった客席椅子の交換などホールに手を加える際には十分な検討を加え、その前後に残響時間等の音響測定を実施してチェックを行っている。

この後、東横ホール、読売ホールをはじめとしたオーディトリアムの音響設計を手がけることになった。この間、設計を通じて学術研究を必要とする多くのテーマを見いだすことができた。そしてこれらの研究を行うための実験手法の一つとして縮尺模型実験が必要であることを痛感した。

5. 縮尺模型による音響実験の開始

オーディトリウム音響設計に関連して早急に解決を必要とする問題の一つに後壁からの反射音がエコーとなって音響障害をおこすのを防止する技術の開発があった。その対策には後壁を吸音性にして反射音を弱める方法と後壁に凹凸をつけて当たった音を散乱反射させて特定の方向への反射音を弱める方法とが考えられた。これを理論的に検討するばかりでなく、実験によって確かめるために模型実験が必要であると考えた。当時わが国では音響の模型実験はあまり行われていなかったし、一部で行われていたものも比較的低い周波数を対象としており、後壁からのエコーのような中高音を対象としたものはなかった。その理由は音響模型実験では相似則を満たすために模型の縮尺だけ反対に音の周波数を高くするので、中高音を対象とすると超音波域に及ぶことになり、そのための音源とマイクロホンの開発が遅れていたためであった。ところが幸いなことにこの頃ドイツでプラスチック膜を振動膜とする空中超音波用のスピーカとマイクロホンが発表され、わが国でも愛媛大学の松沢教授によってこれが試作された。これらを参考に建築音響の模型実験用のものを試作して、オーディトリウムの後壁からのエコー防止のための模型実験を始め、実際の設計に直接役立つデータを得ることができた。

この実験はオーディトリウムの後壁のみの部分模型によるものであったが、やがてオーディトリウム全体の模型でその音響効果を予測しようという研究に進み、その最初は神奈川青少年センターで、2番目は東京日比谷の日生劇場であった。日生劇場は芸術院会員村野藤吾先生の設計で、独特の3次曲線からなる壁と天井の形を音響の要求といかにか合致させるかが問題であり、模型実験の偉力を発揮した建築設計への協力であった。

その後東京関口台町の東京カトリックカテドラル聖マリア大聖堂(丹下健三氏設計)についても模型による検討を行った。

6. 音響模型実験の相似則

よるず模型実験には相似則を満たすことが必要である。音の場合には、 $1/n$ の縮尺では音の波長も $1/n$ としなければならないので周波数は n 倍となる。模型の材料は実物の n 倍の周波数の音に対して実物と同じ吸音率等の音響特性を持っていなければならない。また時間は $1/n$ となり、したがって残響時間は実物の $1/n$ となる。

一応この条件で相似則が成り立つのであるが、一つ困ったことは空気の音響吸収であった。相似則を満たすには n 倍の周波数で $1/n$ の距離を伝わる時空気による音響吸収が実物と同じになればよいが、温度と湿度が関係して一般にはこの関数が成り立たない。低い周波数ではその絶対値が小さいので無視できるが周波数の高い、特に超音波領域では無視できなくなる。こうした情況のも

とでなんとか相似則を満たす方法が内外で研究されたすえ、縮尺 $1/10$ の場合に限り、湿度3%以下の絶乾状態に近い空気を媒質とすれば相似則が成り立つことが発見され、大型の除湿器を設備した実験が行われるようになった。

私の研究室では相似則を成り立たなくする空気の音響吸収の原因が空気中の酸素によるもので、これが温度、湿度に影響されることに着目し、空気中から酸素を除いて窒素のみにすれば $1/10$ 模型の場合、温度、湿度に関係なく相似則が成り立つことを発見し、模型内の空気を窒素に置換し、実用上残存酸素濃度を3%以下にすればよいことを確かめた。この研究には当時助手であった平野興彦氏(後に講師、現在環境工学研究所社長)と大学院学生橋秀樹氏(現在生研助教)の絶大な協力があつた。

この後に実施した模型実験の多くはこの媒質に窒素を使用する方法によっている。

相似則を満たすもう一つの大切な点は、実物に対応する模型材料を得ることである。当初は吸音材料と反射材料の2種類といった単純なものであつたが、実物の吸音率を測定する残響室の $1/10$ 模型によって、いろいろな特性の材料に対応する模型材料を捜し、合板は製図のケント紙、孔あき板はトランジスタ回路のプリント板、厚いグラスウールはフランネルの布地といったものが使えることが分かってきた。この研究は前述の橋秀樹氏を中心に行われた。

7. オーディトリウム建設への協力

このようにオーディトリウムの音響設計に関する協力体制が整って以降、東京郵便貯金会館ホールを始めとする全国5つの郵便貯金ホール、大阪万国博の鉄鋼パビリオン、富士パビリオン、また簡易保険会館ホール(東京五反田)エリザベト音大ホール(広島)山梨県民文化ホール、新橋演舞場、ザ・シンフォニーホール(大阪)、国立能楽堂(東京)、洗足学園前田ホールなど多くのホールの建設に音響の立場から技術協力を行った。そしてこれらの協力の過程から学術研究を必要とするテーマを見いだしそのための基礎研究は私の後を継ぐ橋助教の研究室に引き継がれていった。その中にはホール相互の音量を比較する“定パワー無指向性音源による音圧分布測定”、“パルス音源によるホールの音響評価”などがある。

8. 騒音に関する研究

前にのべたオーディトリウムの研究にくらべて建築に関係した騒音の問題は、社会的な関心がより大きく、私の生研在職中に、その研究に費やした時間の割合はこの騒音問題のほうがオーディトリウムに比べてはるかに大きかった。

9. 空調設備からの騒音, 特にダクト内で発生する騒音の研究

昭和29年,前にのべた神奈川県立音楽堂の落成も近いある日,全く予想していなかった空調騒音になやまされることとなった。出来上がった空調設備を試運転したところホール内で遠雷のような音がするというのであった。

当時空調騒音はそのファンの音がダクトを伝わって室内に出るのでこれを防ぐためにダクトの途中に消音器を入れればよいとされていた。早速調べてみるとファンの

音のスペクトルとは似ても似つかない低音成分の大きいドロン,ドロンと言う音が聞こえてくる。天井裏へはいつてみると,ダクトの周辺からホール内と同じ感じの大きな音が聞こえてくる。ダクトにさわってみるとはげしい振動が感じられた。ファンを止め天井裏のダクトを叩いてみるとホール内で同じ感じの音が聞こえる。原因はダクトの振動であった。なぜ振動するのか?ダクト内の気流の乱れが原因と思われた。こんなことは教科書にも参考書にも書かれていない。先輩に聞いても知らないと言う。これは大変なことであると考え、建築学会の雑誌



写真1 ザ・シンフォニーホール(大阪)

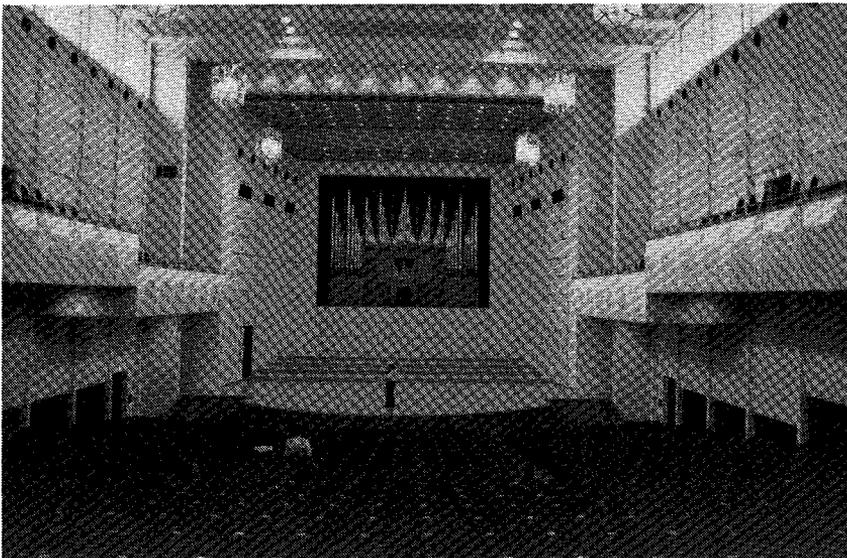


写真2 洗足学園前田ホール(東京)

にこのことを報告した。ところがしばらくして空気調和衛生工学会の理事(後に会長)であった東大工学部の内田秀雄先生から連絡があり、学会としてもこのダクト内の発生騒音の研究が必要であると考えており、学会創立40周年記念事業としてその研究施設を生研に寄付したいというお申し出があった。当時私の上司であった渡辺要教授を中心に、勝田高司教授とも相談してこれを受け入れてその研究を行うことになったが、ちょうど生研が千葉から東京麻布へ移転する話が持ち上がっていたときであり、少し遅れても麻布に実験室を作るべきだということになった。研究施設はまずファンの発生音を取り除いた無音送風装置を作ること、これにダクトをつないで気流による騒音を発生させこれを残響室へ導いて残響室内の平均音圧からダクト内の発生騒音を求めるものであった。

この研究施設の設計に当たって、特に送風ファンに取り付ける消音装置について、1/8 模型による実験をくりかえした。送風ファンは60 cm 角のダクトに20 m/s までの気流を流すものであった。

この設計には当時技官であった朝生周二氏(後に助手、現在建材試験センター課長)が協力し、施設の完成後は種々のダクト形状による発生騒音の実測とその防止対策の研究が行われ、多くの知見が得られた。この研究は当時勝田教授のもとで大学院学生であった板本守正氏(現在日大生産工学部教授)が朝生氏と共に重要な役割を演じ、この研究成果に対して、昭和40年空気調和衛生工学会賞が授与された。

この研究施設は当時現在の裏門付近に建てられていたが、地下鉄千代田線工事のために他の音響実験室と共に現在の正門近くに移転し、ダクト騒音の研究終了後、この施設は、境界層風洞として村上教授の研究に利用されるようになった。

10. 道路交通騒音の研究

環境騒音の中で最も大きな比重をしめているのが道路交通騒音であり、昭和40年代のはじめからその研究を行っていたが、昭和46年度から第1次臨時事業「都市における災害・公害の防除に関する研究」に参加してこの中で大いに発展させることができた。現場の実態調査からはじめ、交差点等の特殊地点、道路周辺の集合住宅への影響へと研究を進めた。この研究についても縮尺模型による実験を行い、その後高架道路から周辺のビルへ騒音が伝搬する際の検討など、理論的な取り扱いがむずかしいものについては、まず縮尺模型によって道路から受音

点までの伝達関数を求め、これをもとに種々の交通流について受音点の騒音をコンピュータによってシミュレートする方法を採用し、これをハイブリッドシミュレーションと呼んでいる。この研究は当時助手であった山口道征氏(現在ブリヂストン)、大学院学生 岩瀬昭雄氏(現在新潟大学助教授)に負うところが大きい。

また昭和49年には建設省の要請により日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団の3公団から日本音響学会に対して道路交通騒音の予測計算方法を提案する委託研究があり、私は学会に設けられた委員会の委員長としてその取りまとめに当たり、昭和50年3月報告書を提出した。この計算方法が音響学会式と称され、今日まで環境行政に利用されている。

11. 鉄道騒音の研究

生研がまだ千葉にあった頃、1部の岡本舜三教授(後に本所所長)から地下鉄の振動の研究をしているので、騒音の研究をやるようにとのお話をいただいた。子供の頃から鉄道好きであったので喜んで参加させていただき、それ以来帝都高速度交通営団とのつき合いが続いている。当初は地下鉄の車内騒音が主であったが、やがて地下鉄の振動がトンネルから地盤を経て、近くのビルに伝わり、ビル内の会議室等でゴーツという電車の通過音を防ぐ対策の研究にまで及んでいる。ビル内で聞こえる鉄道騒音の主成分は100 Hz以下の低音で、地下鉄トンネルの振動が1000 Hz以上までの成分をもっているのに比べるとかなり異なり、地盤から建物への伝搬の途中で中高音は減衰が大きく低音のみが残る。したがってその防音対策は低音に対して有効なものでなければならず、むずかしい問題をかかえている。

一方地上を走行する鉄道からの騒音も一般環境に与える影響が大きい。これを住民反応との対応のよい評価量で計測するにはどうしたらよいか。環境庁に設けられた検討会の座長として、多くの研究者、関係者の協力により、昭和60年3月に一応の結論を得ることができた。

12. おわりに

私の“音とのつきあい”，思いつくままに書きつづった。まだまだ書きたいことも多いがこのへんで筆をおく。

生産技術研究所在職中、教官の先生方をはじめ職員の皆様方にも大変お世話になり、無事定年をむかえることができた。深く感謝し、皆様のご健康と生研のご発展を心からお祈りする。
(1985年7月8日受理)