

|             |   |
|-------------|---|
| 氏 名         | 小 倉 泰 憲   |
| 授 与 学 位     | 工 学 博 士   |
| 学位授与年月日     | 平成 2 年 3 月 28 日   |
| 学位授与の根拠法規   | 学位規則第 5 条第 1 項  |
| 研究科, 専攻の名称  | 東北大学大学院工学研究科<br>(博士課程) 電気及通信工学専攻  |
| 学 位 論 文 題 目 | 衝撃音を含む騒音のラウドネス評価に関する研究  |
| 指 導 教 官     | 東北大学教授 曾根 敏夫  |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 曾根 敏夫 東北大学教授 城戸 健一<br>東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 丸山 欣哉<br>東北大学助教授 鈴木 陽一 |

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

我々は、日常生活において種々の騒音に曝されているが、その騒音に衝撃騒音が含まれている場合も多くみられる。この衝撃騒音の音の大きさ（ラウドネス）については、数多くの研究がなされてきたものの、評価方法の確立は特に遅れており、検討すべき問題が少なからず残されている。その中で優先的に解決すべきものとして、繰り返し衝撃音のラウドネス評価と、定常音に衝撃音が重畳した音のラウドネス評価の問題がある。本研究は、このような種々の時間変化を有する騒音の統一的評価方法への糸口を見いだすため、衝撃音、及びこれを含む騒音のラウドネスの適切な評価方法を導き出すことを目的として行われたものである。

### 第 2 章 繰り返し衝撃音の時間構造とラウドネス及びノイジネスの関係

第 2 章では、繰り返し衝撃音の時間構造が、ラウドネスに及ぼす影響についての検討を行った。本研究では、一対比較による恒常法を用いた心理物理学の実験によって、刺激音のラウドネスを求めた。初めに、継続時間が 2～3s と比較的短い場合について、時間構造のパラメタとして、衝撃音の繰り返し率、減衰時間、継続時間を選び、これらのパラメタとラウドネスの関係を調べた。次に、刺激音の継続時間を最大で 50s まで長くした場合について、繰り返し率と継続時間をパラメタとして、ラウドネスを求めた。

心理物理学の実験の結果、繰り返し率が2倍になった時、ラウドネスは1～2 dBしか増加せず、エネルギー則には従わないことが明らかとなった。一方、減衰時間とラウドネスの関係は、エネルギー則に従うことが明らかとなった。この傾向は、刺激の継続時間に依らずに見られた。また、ラウドネス評価実験で用いられた継続時間2～3 sの刺激のノイズネスを調べたところ、いずれのパラメタについても、ほぼエネルギー則が成立することが明らかとなった。

次に、騒音評価で実際に用いられている従来の評価量（音響暴露レベルと騒音計の指示値）によるラウドネス及びノイズネスの評価を行った。まず、音響暴露レベルとラウドネスの対応を調べた。この音響暴露レベルとは、音圧波形の2乗積分値のレベルであり、近似的にエネルギーレベルに相当するものと考えられる。音響暴露レベルと、ラウドネスとの間には高い相関が見られるものの、その関係は、エネルギー則からは逸脱しており、ラウドネスはかなり過小評価される。このことから、音響暴露レベルは評価量としては不相当であることが明らかとなった。一方、ノイズネスの場合は、少なくとも本研究で用いた刺激については、音響暴露レベルによってそのノイズネスを表現できることが示された。

現在規格化されている騒音計の指示特性のうち、動特性Iによるピーク値を用いてラウドネスのPSEとの対応を調べたところ、繰り返し率の増加に伴うラウドネスの増加を説明できず、過大評価となる刺激が数多く見られた。同様の傾向が動特性Fを用いた場合でも見られたが、特に繰り返し率が3～10 Hzの衝撃音のラウドネスのPSEは、騒音計出力レベルよりも最大で4 dB程大きくなることが明らかとなった。動特性Sを用いた場合は、音響暴露レベルを用いた場合とほぼ同様の傾向を示し、全体的に過小評価となることがわかった。

なお、ラウドネス評価実験、ノイズネス評価実験いずれの場合においても、テスト音及び比較音の搬送波として、1 kHz正弦波と非対称方形波の2種類の搬送波を用いたが、搬送波の違いによる差は特に見られなかった。

以上のことから、繰り返し衝撃音のラウドネスを評価するためには、音響暴露レベルや騒音計の指示値を用いた評価量は不相当であり、繰り返し率の増加に伴ってラウドネスが増加するような評価量が必要ことが明らかとなった。そこで、適切な評価量を得るために、第3章において繰り返し衝撃音のラウドネス時間積分モデルの検討を行った。

### 第3章 繰り返し衝撃音のラウドネス評価における時間積分モデル

第3章では、まず、第2章で得られたデータを基に衝撃音のラウドネスと繰り返し率との関係を調べ、ラウドネスを繰り返し率の関数として表した。この関数は、繰り返し率がある程度高い場合には、ラウドネスが繰り返し率に比例し、繰り返し率が低い場合には、ラウドネスが単発衝撃音のそれに漸近するものである。次に、聴取実験の結果を基に、この関数の係数を決定し、繰り返し衝撃音が一つのまとまりとして知覚される状態から、分離して知覚される状態へ移行する臨界繰り返し率と臨界時間間隔を求めた。ある程度のばらつきがあったが、この繰り返し率は、およそ0.3 Hz程度であり、臨界時間間隔は約3 sと推定された(図1)。

この結果から、聴覚には3秒程度の感覚の保持機構が存在するという仮説を立てた。この3秒と

いう値は、ラウドネスの判断が知覚によるものから記憶によるものへと移り変わる境界に対応していると考えられる。この考えに基づいて、繰り返し衝撃音のラウドネス知覚モデルを検討した。その結果、騒音計の動特性Ⅰのように、1時定数積分機構とピークホールド機構を組合せたものでは、ここで求める保持機構は実現できず、刺激の立ち上がりと減衰とで時定数が切り替えられるような2時定数積分モデルが必要であることが明らかになった。この2時定数積分モデルを、実験で用いた刺激に適用したところ、立ち上がり時定数を100ms、減衰時定数を5sとした場合に、最も実験結果と良い対応を示した。この減衰時定数5sは、感覚の保持の長さに換算すると約3sとなるものと考えられる。このことから、3s程度の感覚の保持機構を含むモデル、すなわち、2時定数積分モデルが、繰り返し衝撃音のラウドネス知覚モデルとして有効であることが示された。

#### 第4章 衝撃音成分を有する騒音のラウドネスの統一的評価手法

第3章で検討された2時定数時間積分モデルは、主として衝撃音の時間的変化に着目したモデルであり、一種の時間荷重とみなすことができる。第4章では、この時間荷重に適切な周波数荷重を組合せることにより、様々な周波数特性を持つ繰り返し衝撃音のラウドネス評価手法が得られると考え、検討を行った。このため、まず、同一の包絡線を有する繰り返し衝撃音について、周波数構造の違いがラウドネスに及ぼす影響を聴取実験によって調べ、実験結果から、各周波数荷重と2時定数積分モデルとの組合せを検討した。

最初に、A特性荷重、StevensonのMark VIとPL、Zwickerのラウドネス計算手法、KryterのPNLの5種類の周波数荷重手法と2時定数積分モデルとの組合せを検討した。これらの周波数荷重を用いる場合、A特性荷重を除いて、帯域レベルを入力とする必要がある。そこで、それを実現するために、帯域フィルタを用いる方法と、FFTによる短区間分析を用いる方法について検討したが、ほとんどいずれの刺激の場合でも、分析方法の違いによる統計的に有意な差は見られなかった。一方、周波数荷重の違いによる差の検定を行ったところ、Zwickerの手法だけが、他と有意な差をもって実験結果との対応が良かった。このことから、本研究で検討した2時定数時間積分機構を、Zwickerの方法と組合せることが適当であることが判明した。

この方法は、繰り返し衝撃音を対象としたが、繰り返し衝撃音の繰り返し率の範囲を極めて広範囲に取ったため、種々の時間変化、及び種々の周波数成分を有する騒音のラウドネス評価方法としても使用できる可能性が期待される。そこで、種々の時間パターン及び種々の周波数成分を有する騒音を刺激音として、上述の2時定数積分モデルを用いた評価手法を適用することを試みた。具体的には、現実に存在する騒音など50種の刺激についてラウドネス評価を行い、その結果と本研究で提案する方法の出力との対応を調べた。扱った刺激は、繰り返し衝撃騒音と定常騒音に衝撃騒音が重畳した騒音、変動騒音、そして定常騒音であった。

実験で用いた刺激の等価騒音レベルとラウドネスのPSEとの関係を調べたところ、平均でも6dB程度過小評価されるような誤差が見られた。これに対し、提案した手法を用いた場合は、評価の誤差は、約2dBまで減少し、格段に正確なラウドネス評価が可能であることが明らかとなった(図2)。結果として、本研究で提案したラウドネス評価方法は、単発衝撃音や繰り返し衝撃音、

そして衝撃音成分が定常音に重畳した騒音だけではなく、定常騒音や変動騒音のような衝撃音成分のない騒音とも実験結果と対応が良いため、種々の周波数成分、そして種々の時間パターンを有する広い範囲の騒音のラウドネス評価方法として有効であることが示された。

## 第5章 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

まず、繰り返し衝撃音のラウドネスは、音のエネルギーレベル（音圧の2乗積分値に基づくレベル）という従来の方法を用いたのでは正確に評価できないことを明らかにした。

そこで、これを評価するためのラウドネス知覚モデルについて検討し、立ち上がり時定数が100msで、減衰時定数が5sの2時定数積分モデルを用いれば、繰り返し衝撃音のラウドネスの時間的な特性を正確に表現できることを示した。

ついで、この2時定数積分モデルとZwickerの周波数荷重法を組合せることにより、種々の周波数成分を有する繰り返し衝撃音のラウドネスを正確に評価することができることを示した。さらに、この方法が種々の時間変化、種々の周波数成分を有する騒音に適用可能であることを実証した。これらのことから、本研究で提案したラウドネス評価手法は、繰り返し衝撃音だけではなく、定常騒音や緩やかな変動騒音を含む広い範囲の騒音の評価に有効であると考えられる。

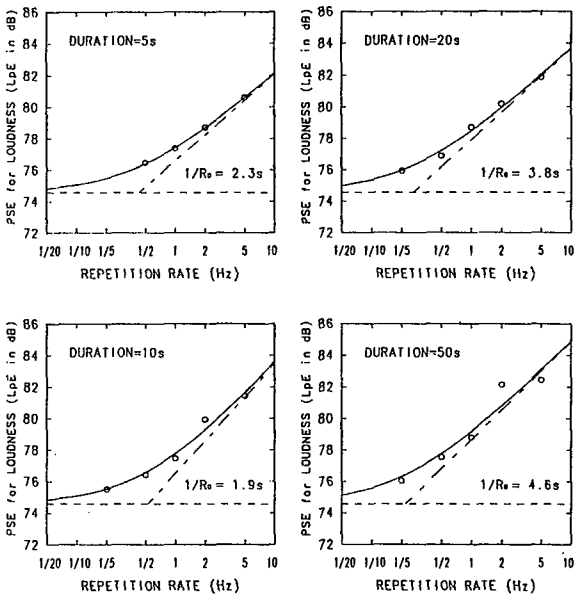


Fig. 1

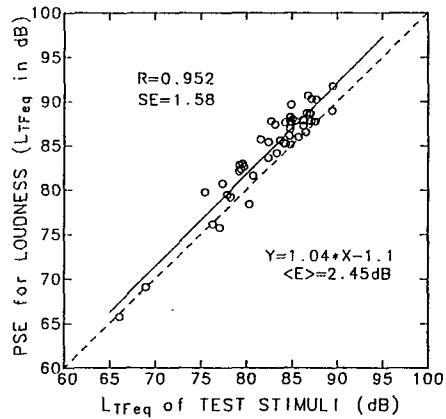


Fig. 2

## 審査結果の要旨

騒音を聞いたときに我々が感ずる音の大きさ（ラウドネス）を正確に評価する方法を確立することは、騒音の影響を定量的に知る上で基本となる課題である。これまでの研究により、定常騒音については、かなり正確にラウドネスを評価することができるようになっているが、現実の環境騒音にしばしば含まれる衝撃音の計測・評価手法は、未だ確立されていない。本論文は、この衝撃音のラウドネスを正確に評価するための計測方法について心理音響学的立場から行った研究の成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、現実の衝撃音の分析に基づいて作成したモデル衝撃音を用いて、衝撃音の減衰時間や繰返し率がラウドネスに与える影響を詳細に調べている。その結果、このような繰返し衝撃音のラウドネスは、繰返し率とともに増加するが、その大きさは、音響暴露レベル（音圧の自乗積値に基づくレベル）から見積られるよりも小さいことが示された。

第3章では、前章の研究結果を基に、繰返しの効果のモデル化を行っている。その結果、およそ0.3Hzの繰返し率を臨界値として、それ以上の繰返し率では、ラウドネスが繰返し率の対数に比例して増加し、それ以上の場合には、単発衝撃音のラウドネスに漸近することを明らかにしている。これは、聴覚系における音の大きさの知覚を考える上で、興味深い知見である。

さらに本章では、上記のモデルに基づいて、衝撃音の時間特性の評価方法について検討し、衝撃音のラウドネスが、立ち上がり時間100ms、減衰時間5sの時定数を持つ二時定数回路を用いることによって、ほぼ正確に評価できることを示している。

第4章では、この二時定数回路を、現実の衝撃音のラウドネスの評価に適用するため、それと組合せるべき周波数荷重方法の検討を行ない、Zwickerによる周波数荷重方法と組合せた場合に、最も正確な計測が可能であることを明らかにしている。さらに、現実の様々な騒音を含む50種類の音を用いた聴取実験を行ない、この方法によれば、衝撃音だけではなく、定常音や変動音を含む広い範囲の騒音のラウドネスを高精度で評価し得ることを示している。これは、実用上、極めて有用な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、これまで正確に計測することが困難であった衝撃音のラウドネスを、定常音や変動音も含めて統一的に評価できる新しい手法を提案したもので、電気音響工学及び騒音制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。