

繰り返し衝撃音のやかましさ

—ピークレベル, 継続時間, background-to-peak レベルの影響—*

矢野 隆**

(熊本大学)

小林朝人***

(八代工業高等専門学校)

泉 清人****

(室蘭工業大学)

(平成 3 年 10 月 28 日受付)

内容梗概 定常音と繰り返し衝撃音のやかましさ反応の違いを明らかにするために, 繰り返し衝撃音のやかましさとピークレベルの関係及びやかましさと継続時間の関係が, background-to-peak レベルによってどのように影響されるかを実験的に検討した。やかましさとピークレベルとの関係を示す直線の勾配は, background-to-peak レベルが大きくなるほど系統的に緩やかになることが判明した。このことは衝撃音のやかましさに関するペナルティにレベル依存性があることを示しており, これは loudness recruitment で説明することが可能である。一方, やかましさと継続時間との関係を示す直線の勾配は background-to-peak レベルによって, 有意には変化しなかった。

キーワード 衝撃音, やかましさ, ラウドネス補充, ME 法, D.D. ペナルティ
Impulsive sound, Noisiness, Loudness recruitment, Magnitude estimation method, Penalty for doubling of duration

1. 研究の背景と目的

一般に定常音, 変動音, 間欠音, 衝撃音と音の物理的非常性が増すにつれて, その物理的及び心理的評価は複雑になることが知られているが, 定常音, 変動音, 間欠音に関しては多くの実験研究から, L_{eq} が大きさややかましさを評価するための有力な指標であることが示されてきた¹⁾。しかし, 騒音の中でも衝撃音の評価に関しては未解明の点が多く, 国内外で盛んに研究されてきている^{2)~4)}。我々を取りまく環境に存在するほとんどの音には衝撃的な要素が含まれており, 音響環境を評価する上で衝撃音の評価は極めて重要である。

我が国における衝撃音の評価研究は, 衝撃音の大きさと L_{eq} などのエネルギーに基づく指標とがよく対応す

るといふもの^{5), 6)}と, ピークレベルやエネルギー以外の効果の重要性を指摘している研究^{7)~14)}とに分かれている。そのため, 衝撃音評価に関して研究者間で基本的な合意を得ること, 及び衝撃音の大きさ, やかましさ, うるささの評価方法を確立することを目的として, 1982 年以来, 曾根敏夫東北大学教授を中心に衝撃音の評価に関するラウンドロビンテスト^{15), 16)}が行われてきた。まず, 単発衝撃音の大きさの評価実験¹⁵⁾が行われ, 続いて継続時間が 2~3 秒の繰り返し衝撃音の大きさとやかましさの評価実験¹⁶⁾が行われた。その結果, 同じ carrier を有する継続時間の短い衝撃音の大きさとやかましさの評価には無加重の単発騒音暴露レベル (L_{PE}) が適用できることが示された。

他方, ヨーロッパでは現実の衝撃音を用いた評価実験及び社会調査から, 実用的なうるささの評価方法の開発を目指して, 共同研究が行われてきた^{3), 4)}。その中で, 衝撃音は一般に他の衝撃的でない音 (例えば道路交通騒音) と比べてうるさいが, その差は低 L_{eq} で大きく, 高 L_{eq} で小さいというようにレベルに依存して^{注)}変化していることが認められており, その定量化に関心が集まっている^{17)~19)}。

* Noisiness of repeated impulsive sounds: Effects of peak level, duration and background-to-peak level.

** Takashi Yano (Kumamoto University, Kumamoto, 860)

*** Asato Kobayashi (Yatsushiro National College of Technology, Yatsushiro, 866)

**** Kiyoto Izumi (Muroran Institute of Technology, Muroran, 050)

筆者ら²⁰⁾は、先に前述のラウンドロビテスト¹⁶⁾を発展させ、現実環境への適用を考慮して、より長時間の暴露の影響を検討した。すなわち、種々の継続時間を有する現実音としてのプリンタ音(準定常衝撃音)と、1 kHz 純音の繰り返し衝撃音(ラウンドロビテストでの共通刺激、分離衝撃音)を用いて、やかましさの評価実験を行った。この結果、これらの音の D.D. ペナルティ(Penalty for doubling of duration, 等しいノイズネスに感じる継続時間2倍の音のピークレベルと元の音のピークレベルとの差(dB))に有意な差のあることを示し、その差は両刺激のレベルとやかましさとの対応関係、及び継続時間とやかましさとの関係の違いによって説明されることを見出した。更に、音源によるやかましさとピークレベルや継続時間との関係の違いは、音の衝撃的な特性を端的に表すと思われる background-to-peak レベル(Fig. 1 参照)に影響されることを明らかにした。

本研究の目的は、前研究²⁰⁾を更に発展させ、繰り返し衝撃音の継続時間の効果及びレベル依存する衝撃音の効果を background-to-peak レベルに着目して系統的に調べ、定常音と衝撃音を統一的に評価するための基礎資料を提供することにある。すなわち、本研究は、ピークレベル、継続時間、background-to-peak レベルを種々変化させたピンクノイズの模擬衝撃音を用いて、background-to-peak レベルによってやかましさとピークレベルとの関係及びやかましさと継続時間との関係がどのように変化するかを実験的に検討すると共に、その原因について考察しようとするものである。なお、本研究は我が国のラウンドロビテストとヨーロッパの共同研究とを関連づけるものとして位置づけられる。

2. 実験

2.1 テスト音

実験に用いたテスト音の条件を Table 1 に、刺激対のレベル変動パターンを Fig. 1 に、無響室内でスピーカ再生したときの被験者の頭の位置でのテスト音の波形の一例を Fig. 2 に示す。また、刺激対を作成するための装置の構成を Fig. 3 に示す。刺激対は、マイクロコンピュータで制御したプログラマブルアッテネータを用いて、ピンクノイズをレベル変動させることによって作成され、DAT に録音された。

テスト音はピークレベル4条件、継続時間5条件、background-to-peak レベル5条件の合計100種類で、定常音から様々な衝撃性を有する繰り返し衝撃音までを作成するために、background-to-peak レベルを0, 10, 20, 30, 40 dB(A) に設定した。繰り返し率は3 pps, 立ち上がり時間は約100 ms/20 dB の1条件だけとしたが、これはこれらの条件がラウンドロビテスト¹⁶⁾の条

Table 1 Conditions of the test sounds.

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Carrier | Pink noise |
| Repetition rate | (pps) 3 |
| Peak level | (dB(A)) 50, 60, 70, 80 |
| Duration | (s) 2, 4, 8, 16, 32 |
| Background-to-peak level (dB(A)) | 0, 10, 20, 30, 40 |

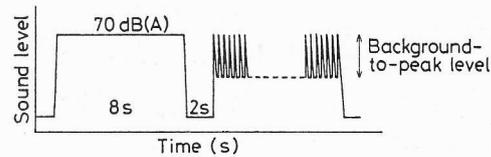


Fig. 1 Level fluctuation pattern of a pair of stimuli.

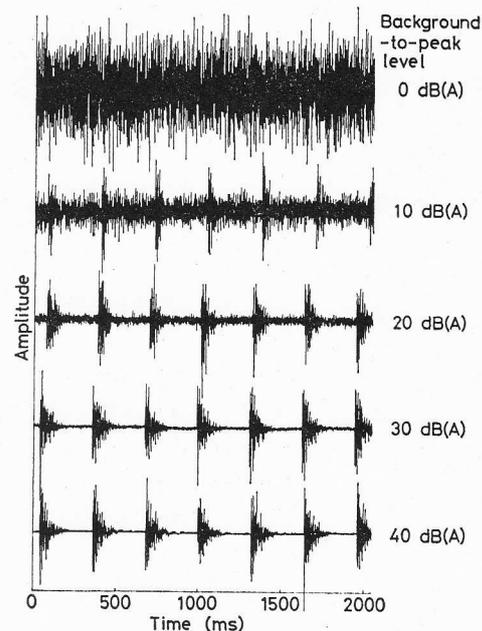


Fig. 2 An example of wave form of test sound.

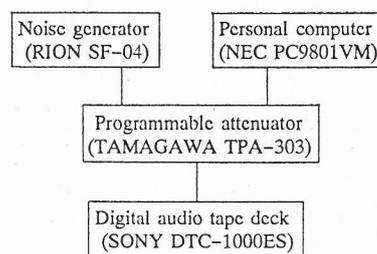


Fig. 3 Block diagram of equipments for production of experimental sounds.

件の中間に当たること、及び background-to-peak レベルが40 dB(A)まで設定できることを考慮したものである。基準音はピークレベル70 dB(A)、継続時間8秒の定常音(background-to-peak レベル0 dB(A))である。なお、定常音の立ち上がり・立ち下がり時間も約100 ms/20 dBとなるようにした。

衝撃音の立ち下がり部分はプログラマブルアッテネータへ減衰値を1.7 dB ずつ約8.5 ms 間隔に送り、ほぼ所定の特性が得られるようにした。立ち上がり時間は、

作成装置の性能から精確に制御することはできないが、プログラマブルアッテネータの信号切り替え速度とスピーカの立ち上がり特性で決定される。テスト音の carrier にはランダムな波形のピンクノイズを用いているため、その立ち上がり時間を測定することは困難である。そのため、1 kHz 純音の断続音を用いて、ピークレベルを 50, 60, 70, 80 dB に設定して、立ち上がり部分の波形を観測した結果、どの場合も background から一定のピークに達するまでの時間は約 4 ms であった。

実験音のレベル設定は、被験者がいない状態で被験者の頭の位置にマイクロホン置いて、スピーカから定常音を流し、精密騒音計の dB (A) Fast の値を読みとりながら行った。従って、衝撃音のピークレベルは carrier がピンクノイズであるため一定しているわけではないが、平均的にはほぼ所定の値が得られているものと考えられる。なお、暗騒音レベルは約 15 dB (A) 以下であった。

2.2 実験方法

実験方法は基準音のやかましさを 100 として、テスト音のやかましさに数値を割り当てさせる ME 法²¹⁾⁻²³⁾を用いた。基準音とテスト音の提示順序を検討するために、予備実験として、最初に基準音が提示され、テスト音が後に提示される刺激系列と、基準音がテスト音の後に提示される刺激系列のどちらが判断し易いかを尋ねた結果、前に基準音がくる方が判断し易いと答えたものが圧倒的に多かった。しかし、基準音が先に提示される場合、テスト音の継続時間が長くなると、基準音の印象が薄れ、評価の精度が悪くなることが予想される。本研究では以上の判断のし易さと判断の精度の二つを考慮し、更に基準音とテスト音の提示順序の効果による誤差を相殺するために、両方の系列を採用することとした。

実験に用いる刺激対の配列はランダムとし、基準音-テスト音の順序 (A 系列と呼ぶ) で録音した実験用のテープを 6 巻、テスト音-基準音の順序 (B 系列と呼ぶ) のテープを 6 巻の合計 12 巻のテープを作成した。基準音とテスト音の間隔は 2 秒で、一つの刺激対を聞いた後、次の刺激対が提示されるまでの間隔は 10 秒であり、被験者にはこの 10 秒間にやかましさを判断をさせた。

被験者には教示を与えて、実験の目的と要領を十分に修得させた後、聴力検査を行った。本実験を始める前に、各系列の 25 組の刺激対を用いて練習させた。本実験では、被験者には 1 日に一つの系列 (A 系列又は B 系列) を評価させ、後日、別の系列 (B 系列又は A 系列) を評価させた。本実験では 25 刺激対を評価させるごとに休憩を入れ、1 本のテープを評価し終わるのに約 1 時間、実験終了には練習も含めて約 2 時間半を要した。被験者は 1 人ずつ無響室へ入って前方スピーカから再生される音の評価を行った。

2.3 被験者

被験者は 18~27 歳の男子学生 15 名と女子学生 21 名の合計 36 名で、全員聴力検査で両耳とも正常聴力 (オーディオメータ RION AA-68N で測定して、すべての周波数で 30 dB 以下) を有することを確認した。なお、被験者には拘束時間に応じた謝金を支払った。

3. 実験結果と一次解析

3.1 やかましさ評定値の平均値

A 系列 (基準音-テスト音) の評定値と B 系列 (テスト音-基準音) の評定値の相関係数は、36 名の被験者のうち大部分の被験者については 0.8 以上であったが、0.5 以下の被験者が 2 名、負の相関を示す被験者が 1 名いた。これら 3 名の被験者の評定値は信頼性が低いと考えられたので、これらを除いた 33 名の被験者の評定値を検討に用いた。なお、36 名全員の被験者の平均値と 33 名の被験者の平均値には大きな差はなかった。

やかましさ評価値の算術平均値又は幾何平均値とピークレベルや継続時間などの各変数との対応関係には顕著な差は見られず、同様の傾向を示していたが、幾何平均値よりも算術平均値の方が種々の統計的な検討を行う上で簡便であるため、A 系列と B 系列の評価値の算術平均値を代表値とした。その結果を Fig. 4 に立体的に示す。

A 系列の評定値は B 系列の評定値よりも大きかったが、定性的な傾向は似ている。基準音とテスト音が同じである場合 (ピークレベル 70 dB (A), 継続時間 8 秒, background-to-peak レベル 0 dB (A)) の評定値は B 系列の場合には約 99 で、ほぼ 100 となったが、A 系列では約 109 であり、100 より大きかった。この理由は、B 系列 (テスト音-基準音系列) では基準音を聞いた直後に判断を行うので、基準音の判断基準は安定するが、A 系列 (基準音-テスト音系列) ではテスト音の継続時間

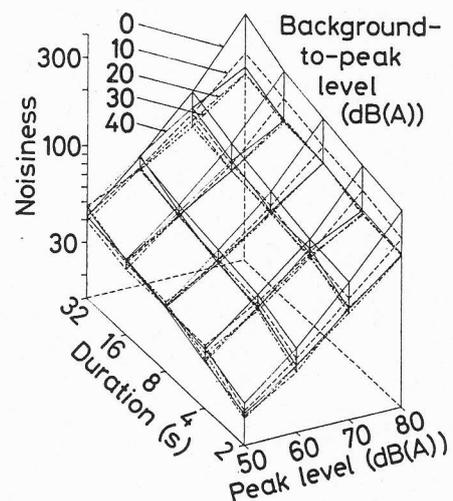


Fig. 4 Relation between noisiness and peak level or duration for repeated impulsive sounds.

の長短によって基準音の印象が変化することがテスト音の判断に影響することによると考えられる。

被験者 (S) \times ピークレベル (L) \times background-to-peak レベル (I) \times 継続時間 (D) の 4 元配置による分散分析を行った結果, S , L , I , D の主効果はすべて 1% で有意であり, $L\times I$ 及び $L\times D$ の交互作用も 1% で有意であったが, $I\times D$ の交互作用は 5% で有意であり, $L\times I\times D$ の交互作用は 5% で有意ではなかった。

3.2 やかましさとピークレベル及び, やかましさと継続時間との一次分析

Fig. 4 の結果を基に, やかましさとピークレベル, やかましさと継続時間の関係を示す回帰式と相関係数を求め, Table 2 と Table 3 に示す。相関係数はどの場合も高いが, 特に Table 2 のやかましさとピークレベルとの相関係数はすべて 0.99 以上あり, 非常に高い。

Table 2 のやかましさとピークレベルの関係を示す回帰式の勾配は, background-to-peak レベルが大きくなるにつれて, 全般に小さくなる傾向にある。しかし, 詳細に見れば, background-to-peak レベルが 0 dB (A) すなわち定常音では L (ピークレベル) の係数は継続時間に関係なく, ほぼ一定である。一方, background-to-peak レベルが 10~40 dB (A) では継続時間が 2 秒の場

合に L の係数は最大になり, background-to-peak レベルが 30, 40 dB (A) では継続時間が大きくなるにつれて, L の係数は小さくなる傾向にある。このことは継続時間が短い場合にレベルがやかましさに及ぼす効果が大きいことを示しているようである。

Table 3 のやかましさと継続時間の関係を示す回帰式の $\log D$ の係数は, 全般に background-to-peak レベルが大きくなるほど, 増大する傾向にあり, 音の衝撃的な特性が大きくなるほど継続時間の効果が大きいことを示唆している。 $\log D$ の係数をピークレベルごとに見ると, background-to-peak レベルが 0 dB (A) のときはピークレベルが増すにつれて増加しており, 平松ほか²⁴⁾のホワイトノイズの定常音を用いた実験の結果と同様の傾向を示している。一方, 30, 40 dB (A) では逆にピークレベルが増すにつれて $\log D$ の係数は減少する傾向にあり, background-to-peak レベルが 10, 20 dB (A) では系統的な傾向は見られない。

Table 2, 3 の L 及び $\log D$ の回帰係数の同質性の検定を行った。Table 2 の回帰式では, background-to-peak レベルが 0, 10, 20, 40 dB (A) の場合には L の係数に有意差は認められなかったが, 30 dB (A) の場合には L の係数に 5% で有意差が見られた。Table 3 の

Table 2 Regression equations and correlation coefficients between noisiness and peak level.

| Background-to-peak level (dB(A)) | Duration (s) | Regression equation | Correlation coefficient |
|----------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 2 | $\log N=0.0281 L-0.027$ | 0.997 |
| | 4 | $\log N=0.0261 L+0.172$ | 0.996 |
| | 8 | $\log N=0.0266 L+0.188$ | 0.997 |
| | 16 | $\log N=0.0269 L+0.219$ | 0.997 |
| | 32 | $\log N=0.0294 L+0.127$ | 0.997 |
| 10 | 2 | $\log N=0.0245 L+0.127$ | 0.999 |
| | 4 | $\log N=0.0211 L+0.440$ | 0.994 |
| | 8 | $\log N=0.0221 L+0.409$ | 0.998 |
| | 16 | $\log N=0.0225 L+0.416$ | 0.995 |
| | 32 | $\log N=0.0223 L+0.492$ | 0.998 |
| 20 | 2 | $\log N=0.0227 L+0.177$ | 0.996 |
| | 4 | $\log N=0.0190 L+0.517$ | 0.999 |
| | 8 | $\log N=0.0191 L+0.569$ | 1.000 |
| | 16 | $\log N=0.0198 L+0.548$ | 0.998 |
| | 32 | $\log N=0.0196 L+0.623$ | 1.000 |
| 30 | 2 | $\log N=0.0225 L+0.188$ | 1.000 |
| | 4 | $\log N=0.0196 L+0.475$ | 0.997 |
| | 8 | $\log N=0.0186 L+0.604$ | 0.996 |
| | 16 | $\log N=0.0179 L+0.684$ | 1.000 |
| | 32 | $\log N=0.0168 L+0.816$ | 0.992 |
| 40 | 2 | $\log N=0.0222 L+0.228$ | 0.999 |
| | 4 | $\log N=0.0212 L+0.379$ | 0.994 |
| | 8 | $\log N=0.0195 L+0.540$ | 0.999 |
| | 16 | $\log N=0.0185 L+0.666$ | 0.997 |
| | 32 | $\log N=0.0186 L+0.746$ | 0.997 |

N : Noisiness value L : Peak level (dB(A))

Table 3 Regression equations and correlation coefficients between noisiness and duration.

| Background-to-peak level (dB(A)) | Peak level (dB(A)) | Regression equation | Correlation coefficient |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0 | 50 | $\log N = 0.172 \log D + 1.372$ | 0.982 |
| | 60 | $\log N = 0.187 \log D + 1.593$ | 0.988 |
| | 70 | $\log N = 0.189 \log D + 1.854$ | 0.990 |
| | 80 | $\log N = 0.208 \log D + 2.166$ | 0.980 |
| 10 | 50 | $\log N = 0.189 \log D + 1.349$ | 0.931 |
| | 60 | $\log N = 0.180 \log D + 1.546$ | 0.970 |
| | 70 | $\log N = 0.157 \log D + 1.788$ | 0.992 |
| | 80 | $\log N = 0.165 \log D + 2.046$ | 0.997 |
| 20 | 50 | $\log N = 0.191 \log D + 1.320$ | 0.928 |
| | 60 | $\log N = 0.243 \log D + 1.465$ | 0.971 |
| | 70 | $\log N = 0.161 \log D + 1.749$ | 0.989 |
| | 80 | $\log N = 0.158 \log D + 1.948$ | 0.995 |
| 30 | 50 | $\log N = 0.281 \log D + 1.259$ | 0.981 |
| | 60 | $\log N = 0.210 \log D + 1.501$ | 0.975 |
| | 70 | $\log N = 0.156 \log D + 1.741$ | 0.950 |
| | 80 | $\log N = 0.152 \log D + 1.948$ | 0.976 |
| 40 | 50 | $\log N = 0.259 \log D + 1.273$ | 0.997 |
| | 60 | $\log N = 0.267 \log D + 1.467$ | 0.992 |
| | 70 | $\log N = 0.215 \log D + 1.735$ | 0.969 |
| | 80 | $\log N = 0.167 \log D + 1.949$ | 0.980 |

N : Noisiness value D : Duration (s)

回帰式では、background-to-peak レベルが 0, 10, 20 dB (A) の場合には $\log D$ の係数に有意差はなかったが、30, 40 dB (A) では 5% で有意な差が認められた。以上のことから background-to-peak レベルが大きい場合にはピークレベルと、継続時間がやかましさに独立に影響するのではなく、相互に影響しあっていることが推察される。

4. 考 察

4.1 やかましさとピークレベルの関係への background-to-peak レベルの影響

Table 2 の回帰式における L の係数の同質性を検定した結果、background-to-peak レベルが 30 dB (A) の場合に 5% で有意差が見られた。従って、すべての background-to-peak レベルで回帰直線が平行であると見なすことはできないが、各 background-to-peak レベルごとの平均的な傾向を検討するために、ピークレベルごとに五つの継続時間に対するやかましきの幾何平均値を求めた。これらを基に回帰式を算出したものが Table 4 である。Table 4 の L の係数の同質性を検定した結果、1% で有意であることが確認された。 L の回帰係数は background-to-peak レベルが大きくなるにつれて減少し、background-to-peak レベルが 20 dB (A) 付近から一定になる傾向がうかがえる。

Fig. 5 は Table 4 の回帰式を示したものである。

Table 4 Regression equations and correlation coefficients between noisiness, averaged over durations, and peak level.

| Background-to-peak level (dB(A)) | Regression equation | Correlation coefficient |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0 | $\log N = 0.0274 L + 0.136$ | 0.997 |
| 10 | $\log N = 0.0225 L + 0.377$ | 0.997 |
| 20 | $\log N = 0.0201 L + 0.487$ | 1.000 |
| 30 | $\log N = 0.0191 L + 0.553$ | 1.000 |
| 40 | $\log N = 0.0200 L + 0.512$ | 0.999 |

N : Noisiness value L : Peak level (dB(A))

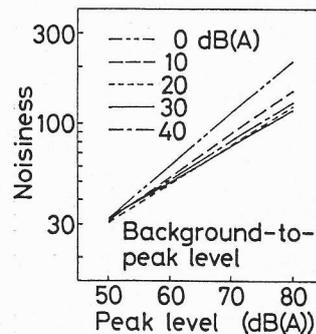


Fig. 5 Comparison of linear regression lines between noisiness and peak level for background-to-peak level.

Fig. 5 の回帰直線の勾配は background-to-peak レベルが 0 dB (A) すなわち定常音のときに比べて、20~40 dB (A) の衝撃性が大きい場合にゆるやかであり、やか

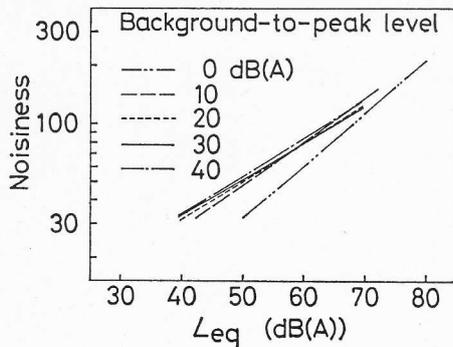


Fig. 6 Comparison of linear regression lines between noisiness and L_{eq} for background-to-peak level.

ましさとピークレベルの関係が background-to-peak レベルによって系統的に変化する傾向があることが読み取られる。

Fig. 6 は Fig. 5 の横軸のピークレベルを L_{eq} で表したものである。今回の実験範囲では衝撃音は定常音よりもやかましく、同じやかましさを示す衝撃音と定常音の L_{eq} の差（衝撃音に対するペナルティ）は L_{eq} が低い場合に大きく、 L_{eq} が高い場合には小さくなっており、ヨーロッパでの共同研究の結果と同様の傾向が得られている。なお、10~40 dB (A) の background-to-peak レベルでは、やかましさと L_{eq} の関係を示す各線は重なり合う位置にあり、これらの衝撃音に対するペナルティは、 L_{eq} 40 dB (A) で約 10 dB、 L_{eq} 60 dB (A) で約 5 dB 程度である。

このことは筆者らの以前の ME 法による繰り返し衝撃音の評価実験の結果²⁰⁾やカテゴリ判断法による衝撃音と変動音の妨害感の比較実験の結果^{25), 26)} (Fig. 7) の傾向とも一致している。また、Fig. 6 の傾向は Brambilla ほか¹⁷⁾、Buchta²⁷⁾、Vos^{18), 19)} による衝撃音によるうるささのペナルティがレベルによって変化し、低レベルで大きく、高レベルで小さいという報告とも一致している。特に、Vos¹⁹⁾ は様々な実験方法を用いて検討し、実験方法のいかんによらず、前述のようなレベル依存性が確認されることを報告している。

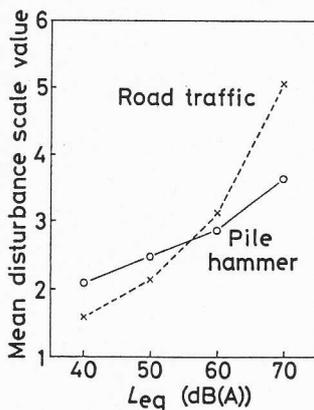


Fig. 7 Comparison of disturbance caused by impulsive (pile hammer) and fluctuating (road traffic) sounds.

以上の事例は衝撃音のやかましさとレベルの関係と連続音のやかましさとレベルの関係との相違が普遍的な原理に基づいた現象であることを示唆している。

では何故、衝撃音の衝撃性が増すほど、定常音に比べて、やかましさとピークレベルとの関係を示す直線の勾配がゆるやかになるかを、繰り返し衝撃音とそのピークレベルに等しいレベルの定常音とが、それぞれ閾値付近にある場合と耐えがたいレベルにある場合の両者の音の感じ方の違いについて経験的に考えてみたい。

ピークレベルが低い場合、特にピークレベルが閾値付近に近づくると衝撃音の低レベル成分は知覚されなくなり、定常音・衝撃音ともに知覚されるのはピークレベル付近だけであり、衝撃音の全体の印象において高レベル成分の貢献が大きい。また、Namba ほか²⁸⁾ によって提案されている短い継続時間の衝撃音の立ち上がり部分に生じる聴覚の overshoot 効果によって、衝撃音の印象は定常音よりも大きくなる可能性がある。

一方、ピークレベルが高くなり、耐えられないようなレベルに近づくると、定常音の場合には常に耐えがたいレベルに暴露されることになるが、衝撃音では暗騒音レベルの穏やかなレベルの影響で、定常音よりもやかましくなく感じられるようになる。その程度は background-to-peak レベルのいかんによる。すなわち、ピークレベルが高い場合には衝撃音の低レベル成分が全体の印象に大きく貢献し、その分高レベル成分の寄与は小さくなると考えられる。

4.2 繰り返し衝撃音のやかましさとレベルとの関係と loudness recruitment

衝撃音と定常音のやかましさとレベルとの関係の違いは経験的には 4.1 節で述べたように考えられるが、Vos¹⁹⁾ は loudness recruitment に関する Hellman²⁹⁾ らの心理音響の知見によって、レベル依存性のペナルティを説明しようとしている。すなわち、部分マスキング (partial masking) の結果、評価される音の閾値が上昇することによって、ラウドネスが減少するという現象と関連づけようとしている。Hellman²⁹⁾ らは、広帯域又は狭帯域の暗騒音と共に提示される純音に対して、そのラウドネスの減少はマスキング閾値に近いレベルで大きく、その純音のレベルが大きくなるとラウドネスの減少は急激に小さくなること、及びラウドネスの減少は SN 比に大きく依存しており、SN 比が小さいほどラウドネスの上昇は急激であることを報告している。本研究において background-to-peak レベルの減少すなわち background レベルの増加がマスキングノイズのレベルが上昇することと等価であると考えれば、Fig. 5 の傾向は Hellman²⁹⁾ の結果と一致する。

また、Vos¹⁹⁾ はマスキング実験で使われている純音と彼の用いた刺激（銃砲音など）とでは周波数特性が異なる

ること、ラウドネス（大きさ）はアノイアンス（うるささ）を部分的にしか規定しないことを挙げて、loudness recruitment だけではレベル依存性のペナルティを十分には説明できないとしている。一方、筆者ら³⁰⁾は本研究と同じ繰り返し衝撃音を用いて、大きさとやかましさの評価実験を行い、大きさとやかましさはともに繰り返し衝撃音の物理量の変化に対して定性的には同様の变化傾向を示すことを報告した。やかましさとうるささの違いに関しては議論があるが、広帯域の信号の部分マスキングの効果が純音の場合と同様であること、及び、本研究で用いた継続時間の長い信号にも同様の効果が現れることが証明されれば、レベル依存性のペナルティは loudness recruitment によってかなり説明できるものと思われる。

衝撃性の効果がレベル依存性を有するという事は、衝撃音のピークレベルがどの程度であるかによって、衝撃音のピークレベル成分が全体の印象に寄与する程度が低 L_{eq} で大きく、高 L_{eq} で小さくなるように変化するためであると言い換えることができよう。定常音から衝撃音まで広範囲に測定し、大きさややかましさを評価する方法を開発するには、以上の効果を計測システムに組み込むか、評価方法の中で考慮する必要がある。Ogura ほか³¹⁾は定常音から衝撃音まで統一的に評価するために、立ち上がり時定数 100 ms と立ち下がり時定数 5 秒を有する 2 時定数モデルを提案しているが、このモデルではレベル依存性のペナルティは説明できない。

4.3 やかましさと継続時間の関係への background-to-peak レベルの影響

4.1 節と同様に、background-to-peak レベルごとにやかましさと継続時間の平均的な傾向を検討するために、継続時間ごとに四つのピークレベルに対するやかましさの評定値を幾何平均して回帰式を求めた。Table 5 にこれらの回帰式と相関係数を示し、Fig. 8 には回帰直線を示す。Table 5 から $\log D$ の回帰係数は background-to-peak レベルが増すと増加する傾向がうかがえるが、これらの回帰係数の同質性を検定した結果、5% で有意差は見られなかった。このことはやかましさと継続時間との関係が background-to-peak レベルに

Table 5 Regression equations and correlation coefficients between noisiness, averaged over peak levels, and duration.

| Background-to-peak level (dB(A)) | Regression equation | Correlation coefficient |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0 | $\log N = 0.189 \log D + 1.746$ | 0.998 |
| 10 | $\log N = 0.173 \log D + 1.682$ | 0.983 |
| 20 | $\log N = 0.188 \log D + 1.620$ | 0.980 |
| 30 | $\log N = 0.200 \log D + 1.612$ | 0.985 |
| 40 | $\log N = 0.227 \log D + 1.606$ | 0.994 |

N : Noisiness value D : Duration (s)

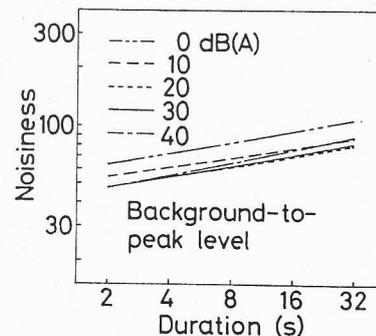


Fig. 8 Comparison of linear regression lines between noisiness and duration for background-to-peak level.

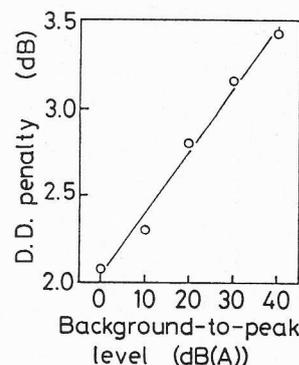


Fig. 9 D.D. penalty vs. background-to-peak level.

よって系統的に影響されないことを示している。

4.4 繰り返し衝撃音の D.D. ペナルティと background-to-peak レベル

4.1 節と 4.2 節で求めたやかましさとピークレベルとの関係及びやかましさと継続時間との関係を基に、D.D. ペナルティを background-to-peak レベルごとに求めたものが Fig. 9 である。Fig. 9 には回帰直線（相関係数 0.993）を挿入したが、background-to-peak レベルが増加しても、D.D. ペナルティが直線的に増加し続けるとは考えられず、むしろ挿入線は S 字状となり、D.D. ペナルティは一定値に漸近すると考える方が合理的であろう。background-to-peak レベルが 0 dB (A) のとき D.D. ペナルティは約 2 dB で、この値は Little と Mabry³²⁾ によって得られた実験値に等しい。

5. ま と め

定常音と衝撃音のやかましさ反応の違いを明らかにし、繰り返し衝撃音の継続時間の効果を求めるために、繰り返し衝撃音のやかましさとピークレベルとの関係、やかましさと継続時間との関係が background-to-peak レベルによってどのように影響されるかを実験的に検討した。その結果は以下のように要約される。

1) やかましさとピークレベルとの関係を示す直線の勾配は、background-to-peak レベルによって系統的に変化し、background-to-peak レベルが大きくなるほど

緩やかになる。

2) このことは衝撃音のやかましさに関するペナルティにレベル依存性があることを示しており、これは loudness recruitment で説明することが可能である。

3) やかましさと継続時間との関係を示す直線の勾配は background-to-peak レベルが増すほど大きくなるが、回帰係数の同質性を検定した結果、有意差は見られなかった。

4) background-to-peak レベルが 0~40 dB (A) まで変化すると、D. D. ペナルティは 2.1~3.4 dB まで増加し、衝撃性が大きいほど D. D. ペナルティは大きい。

謝 辞

衝撃音と定常音のうるささとレベルとの関係の違いに関して、オランダ TNO の J. Vos 博士から貴重な助言を賜り、資料を提供していただいた。また、本研究の一部は昭和 63 年度科学研究費補助金奨励研究 (A) 及び平成元年度実吉奨学金の援助によった。記して感謝の意を表す。

注) Vos¹⁹⁾によれば、比較的低い L_{eq} レベルでは衝撃音は道路交通騒音よりもうるさく、その差は L_{eq} が増すと減少するという。すなわち、衝撃音のレベルをうるささが等価な道路交通騒音のレベルで置き換えるために、衝撃音の L_{eq} に加えるべきレベル (これをペナルティと呼んでいる) は低 L_{eq} レベルで大きく、高 L_{eq} レベルで小さくなり、レベルに依存しているとしている。Vos はこのような性質を有するペナルティを衝撃音に対するレベル依存性のペナルティ (level-dependent penalty for impulse sound) と呼んでいる。

文 献

- 1) 難波精一郎, 桑野園子, “種々の変動音の評価法としての L_{eq} の妥当性並びにその適用範囲の検討,” 音響学会誌 38, 774-785 (1982).
- 2) 矢野 隆, 小林朝人, 泉 清人, “繰り返し衝撃音のやかましさに及ぼす継続時間の影響—その 1 研究の背景—,” 建築学会九州支部研究報告 30, 37-40 (1988).
- 3) 泉 清人, “ヨーロッパ共同体の衝撃音共同研究,” 音響技術 55, 35-39 (1986).
- 4) 佐々木實, “第 13 回国際音響会議における騒音関係の研究発表概要,” 音響学会聴覚研資 H-89-30 (1989).
- 5) 桑野園子, 難波精一郎, “衝撃音の大きさについて,” 音響学会誌 34, 316-317 (1978).
- 6) H. Tachibana, S. Ishizaki and K. Yoshihisa, “A method of evaluating the loudness of isolated impulsive sounds with narrow frequency components,” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 8, 29-38 (1987).
- 7) M. Kumagai, M. Ebata and T. Sone, “Effect of some physical parameters of impact sound on its loudness (A study on the loudness of impact sound. I),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 2, 15-26 (1981).
- 8) M. Kumagai, M. Ebata and T. Sone, “Comparison of loudness of impact sounds with and without steady duration (A study on the loudness of impact sound II),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 3, 33-40 (1982).
- 9) M. Kumagai, M. Ebata and T. Sone, “Loudness of impact sound with wide-band spectrum (A study on the loudness of impact sound. III),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 3, 111-118 (1982).
- 10) M. Kumagai, Y. Suzuki, and T. Sone, “The loudness of repeated impact sound (A study on the loudness of impact sound. IV),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 3, 231-237 (1982).
- 11) M. Kumagai, Y. Suzuki and T. Sone, “A study on the time constant for an impulsive sound level meter (A study on the loudness of impact sound. V),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 5, 31-36 (1984).
- 12) 泉 清人, “規則的断続音のやかましさと驚がく効果 騒音の不快感の評価に関する研究・I,” 建築学会論文報告集 274, 85-92 (1978).
- 13) 佐藤哲身, 泉 清人, “繰り返し衝撃音のノイズネス評価に関する実験,” 音響学会誌 38, 609-618 (1982).
- 14) 佐藤哲身, 泉 清人, “繰り返し衝撃音のやかましさと衝撃効果,” 建築学会計画系論文報告集 352, 1-9 (1985).
- 15) T. Sone, Y. Suzuki, M. Kumagai and T. Takahashi, “Loudness of a single burst of impact sound: Results of round robin tests in Japan (I),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 7, 173-182 (1986).
- 16) T. Sone, K. Izumi, S. Kono, Y. Suzuki, Y. Ogura, M. Kumagai, H. Miura, H. Kado, H. Tachibana, K. Hiramatsu, S. Namba, S. Kuwano, O. Kitamura, M. Sasaki, M. Ebata and T. Yano, “Loudness and noisiness of a repeated impact sound: Results of round robin tests in Japan (II),” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 8, 249-261 (1987).
- 17) G. Brambilla, M.R. Carretti and S. Santoboni, “Laboratory subjective evaluation of environmental impulsive sounds,” Proc. 5th Int. Congr. on Noise as a Public Health Problem 3, 159-164 (1988).
- 18) J. Vos and G.F. Smoorenburg, “Penalty for impulsive noise, deriving from annoyance rating for impulse and road-traffic sounds,” J. Acoust. Soc. Am. 77, 193-201 (1985).
- 19) J. Vos, “On the level-dependent penalty for impulsive sound,” J. Acoust. Soc. Am. 88, 883-893 (1990).
- 20) T. Yano, A. Kobayashi and K. Izumi, “Effects of duration of repeated impulsive sounds on noisiness,” Environ. Int. 16, 547-554 (1990).
- 21) B. Berglund, U. Berglund and T. Lindvall, “Scaling loudness, noisiness, and annoyance of aircraft noise,” J. Acoust. Soc. Am. 57, 930-934 (1975).
- 22) B. Berglund, U. Berglund and T. Lindvall, “Scaling loudness, noisiness, and annoyance of community noises,” J. Acoust. Soc. Am. 60, 1119-1125 (1976).
- 23) B. Berglund, U. Berglund, M. Goldstein and T. Lindvall, “Loudness (or annoyance) summation of combined community noises,” J. Acoust. Soc. Am. 70, 1628-1634 (1981).
- 24) 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫, 池野 淳, “騒音のうるささに及ぼす継続時間の効果,” 音響学会誌 32, 739-750 (1976).
- 25) 矢野 隆, 小林朝人, “衝撃音と変動音による妨害感の比較実験,” 建築学会大会学術講演梗概集 環境工学D, 365-366 (1989).
- 26) T. Yano and A. Kobayashi, “Disturbance caused by impulsive, fluctuating, and combined noises,” Proc. Inter-Noise 90(2), 1189-1192 (1990).
- 27) E. Buchta, “Annoyance of residents through low frequency (artillery) and high frequency (small arms) impulsive sounds,” Proc. 5th Int. Congr. on Noise as

- a Public Health Problem 3, 171-174 (1988).
- 28) S. Namba, T. Hashimoto and C.G. Rice, "The loudness of decaying impulsive sounds," J. Sound Vib. 116, 491-507 (1987).
- 29) R.P. Hellman, "Effect of noise bandwidth on the loudness of a 1000-Hz tone," J. Acoust. Soc. Am. 48, 500-504 (1970).
- 30) 矢野 隆, 小林朝人, 泉 清人, "繰り返し衝撃音の大きさ, やかましさとその評価方法," 建築学会中国・九州支部研究報告 8, 137-140 (1990).
- 31) Y. Ogura, Y. Suzuki and T. Sone, "A temporal integration for loudness perception of repeated impulsive sounds," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 12, 1-11 (1991).
- 32) J.W. Little and J.E. Mabry, "Sound duration and its effect on judged annoyance," J. Sound Vib. 9, 247-262 (1969).



矢野 隆

昭 49 大阪大・建築工卒。昭 51 同大・工学研究科前期課程建築工学専攻修了。熊本大・工・助手を経て、現在熊本大・工・助教授。工博。騒音の評価、照明環境の評価に関する研究に従事。日本建築学会、日本音響学会、日本騒音制御工学会、各会員。



小林 朝人

昭 30 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。滋賀県立短大・工・講師、熊本大・工・講師、助教授、教授を経て、現在八代工業高等専門学校校長。熊本大名誉教授、工博。主な研究分野は知覚に基づく環境の計画（照明・音響）。昭和 51 年度日本建築学会賞受賞。日本建築学会、照明学会、日本照明委員会、日本音響学会、各会員。



泉 清人

昭 35 北海道大・建築工卒。昭 41 米国ハワイ大学大学院修士課程建築学専攻修了。昭 58~59 イギリス・サウザンプトン大学音響振動研究所客員研究員。室蘭工業大学助教授を経て、現在同大学建設システム工学科教授。工博。建築環境工学専攻。居住環境の快適性に関する国際比較研究に従事。日本建築学会、日本音響学会、日本音響制御工学会、環境科学会、各会員。