

遮音欠損が透過音のラウドネスに及ぼす影響

中川 清

§ 1. はじめに

集合住宅、ホテル等における界壁の遮音性能はプライバシーと直接関係するため、建物内の騒音問題の中でもきわめて重要性が高い。

近年は建物の高層化・軽量化が進められ、界壁に石膏ボードに代表されるコインシデンス欠損の顕著な軽量部材、多重構造等が採用されるようになり、遮音特性も従来のコンクリート等の重量単体壁に比して複雑な曲線となる傾向がみられる。こうした界壁を実際の建物に採用した場合、居住者の反応も従来の遮音評価法では十分説明できない現象がみられ、特に遮音特性の一部周波数帯に著しい遮音の低下（以下、遮音欠損と呼ぶ）の生じている壁体に対する苦情発生は特徴的である。

本稿では、遮音性能の評価・検討の第1段階として聴感上重要な働きをしていると考えられる遮音上の欠損に着目して、質量則（5 dB/oct.）の遮音特性の一部周波数帯に遮音欠損が生じている場合の透過音がラウドネスに及ぼす影響を検討した。また、騒音レベル（ L_A ）、S. S. Stevens および E. Zwicker のラウドネス計算法を基に遮音欠損に伴うラウドネス効果の予測法を検討した。

§ 2. 実験方法

2.1 遮音欠損によるラウドネス効果の定量化方法

質量則（5 dB/oct.）に沿った遮音特性をもつ基準壁の入出力特性は図-1のC₀で表わされ、その一部の周波数帯に遮音欠損を生じている比較対象壁の入出力特性は図-1のSで表わされる。すなわち、フラットな特性の音が壁体に入射した場合の透過音の周波数特性は高音域で減衰する形となり、遮音欠損の影響は山型のピークとして表わされる。

ここでは、遮音欠損をもつ比較対象壁の透過音（S）と等ラウドネスで判断される標準壁透過音（V）のレベ

ル L_{c1} を実験から求め、基準レベル L_{c0} とのレベル差 ΔL をもって遮音欠損による“主観評価移動量”とした。すなわち、主観評価移動量はある壁体が本来もっているべき質量則による透過損失が、遮音欠損の存在によって何 dB 平行に引き下げられたかということを意味する。

2.2 実験装置

実験は無響室内の一角に設けた約6帖のスペースで行ない、なるべく被験者が自然に判断できるように配慮して壁面四周には一般住宅用カーテンを引き、床面にはカーペットを敷いてある。

実験に用いた装置のブロック・ダイアグラムを図-2に示した。試験音のレベル監視は、無指向性マイクロホン（B&K TYPE 4145）とスペクトロメータ（B&K 2113）を用いて被験者の聴取位置で行なった。

2.3 試験音

図-3の63~4kHz帯域までフラットな周波数特性（音源1）および高音域主成の周波数特性（音源2）の2種類を想定し、それぞれについて実験対象壁の遮音特性を差し引いた広帯域定常ノイズを試験音とした。

実験対象壁とした壁体の遮音特性を次に示す。

(1)基準壁の遮音特性：質量則に沿った5 dB/oct.の遮音特性

(2)比較対象壁の遮音特性：標準壁遮音特性の一部周波数帯に遮音欠損が生じている遮音特性

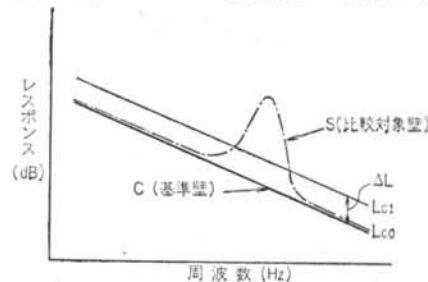


図-1 試験壁体の入出力特性

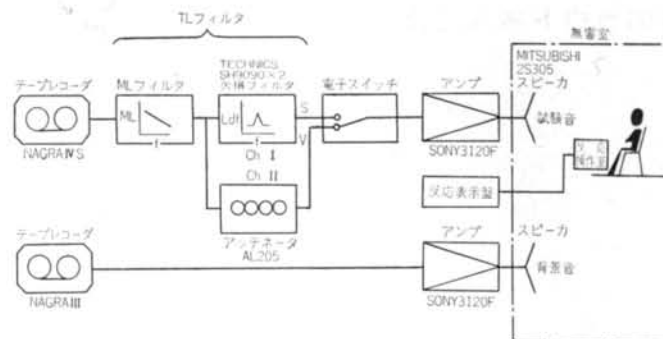


図-2 測定系ブロック・ダイアグラム

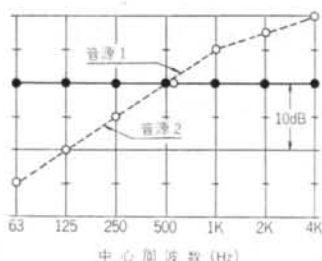


図-3 音源の周波数特性 (1 octave)

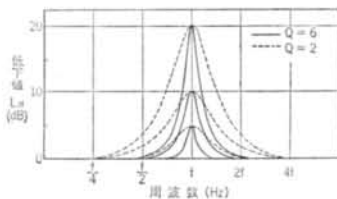


図-4 遮音欠損量

- 遮音欠損は図-4に示したように、
- ・欠損の広がり $Q=6$, $Q=2$ の2種類、
 - ・欠損の最大低下値 (L_{at}) が 5, 10, 20 dB の3種類とした。また、欠損の生じている周波数帯は、
 - ・125, 250, 500, 1k, 2k, 4kHzのいずれかに生じている1周波数帯欠損6種、
 - ・欠損が 250 Hz と同時に 1k, 2k, 4kHzのいずれかに生じている2周波数帯欠損3種

の計9種である。したがって、比較対象壁の遮音特性はこれらを組み合わせた総計54種となり、図-5(a), 5(b)に例を示した。

試験音に用いた音源1と音源2による基準壁透過音の周波数特性を図-6に示した。各試験音は、基準壁透過音のレベルを 60 dBC として、それぞれ欠損によるピークを付加した比較対象壁透過音を設定した。したがって、比較対象壁透過音のレベルは1周波数帯欠損で最大 15 dB程度変わることになる。

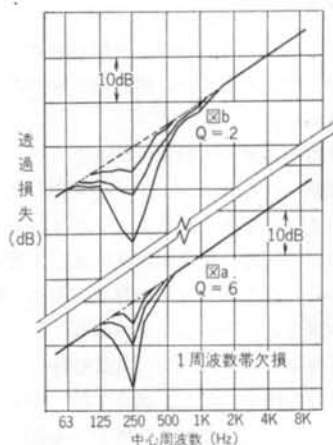


図-5(a) 遮音欠損形状の例 (I)

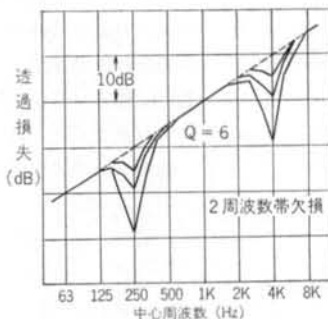


図-5(b) 遮音欠損形状の例 (II)

2.4 背景音

実験条件を一定とするため、図-6のほぼ NC 20 の広帯域定常雑音 (25 dBA) を呈示した。

2.5 ラウドネス比較判断の方法

実験は、比較対象壁透過音 (S) を先行呈示し、これと等ラウドネスで判断される標準壁透過音 (V) の音圧レベルを求めた。

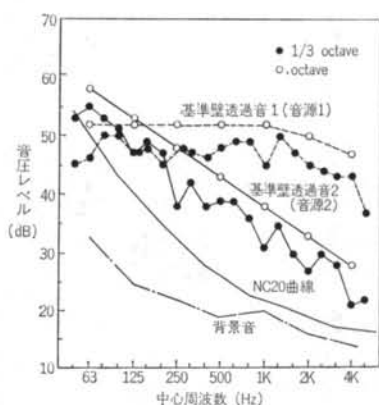


図-6 試験音と背景音の周波数特性

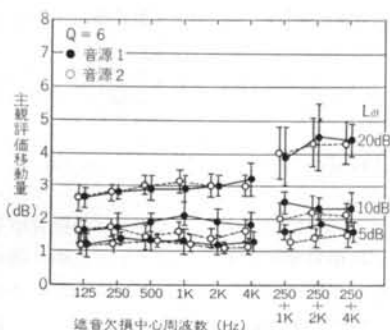


図-7(a) 遮音欠損と主観評価の関係 (I)

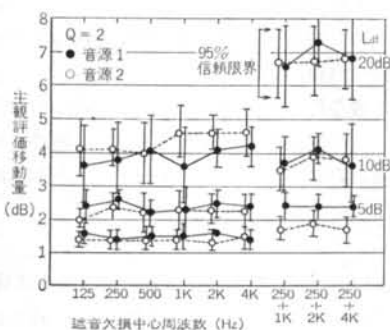


図-7(b) 遮音欠損と主観評価の関係 (II)

試験音の継続時間は1.0秒、2試験音間の休止時間は0.8秒とした。

2.6 被験者と判断回数

正常な聴力をもつ20代の男子2名、30代の男子3名の計5名を選定し被験者とした。各被験者は、あらかじめ予備実験でラウドネス感覚を把握した後に、下降系列と上昇系列、各5回の判断を求めた。

§ 3. 実験結果と考察

3.1 データの信頼性

被験者各人の判断のばらつきを標準偏差で示すと0~0.9 dB程度と比較的小さく、また欠損の周波数帯による差異も余り認められなかった。5被験者間の判断のばらつきは、標準偏差で最大で1.5 dB程度である。

3.2 遮音欠損と主観評価値の関係

各実験条件下において、各被験者の主観評価移動量の平均値を求め、これを全被験者について平均した結果とその95%信頼限界を図-7(a)、7(b)に示した。図中の●印は音源1による値であり、○印は音源2による値を示してある。

移動量平均値の特徴をまとめると次のようになる。

(1) 1周波数帯欠損での音源による差異は小さく、最大低下値 L_{af} = 5, 10, 20 dB 各々について、欠損の広がり $Q=6$ の場合には1.1~1.4, 1.4~2.1, 2.6~3.2 dB, $Q=2$ の場合には1.3~1.6, 2.0~2.6, 3.6~4.6 dBとなる。これらの中で $L_{af}=20$ dB では欠損周波数に比して主観評価移動量やや増大する傾向がみられるが、一般には欠損周波数への依存性が低くほぼ一定の主観効果を与えており、 Q が小なるほど、また L_{af} の大なるほど移動量大きい。

(2) 2周波数帯欠損での主観評価移動量も1周波数帯欠損の場合と同様の傾向がみられ、その値は最大低下値 $L_{af}=5, 10, 20$ dB の各々について、 $Q=6$ の場合には1.3~1.9, 2.0~2.5, 3.9~4.5 dB, $Q=2$ の場合には1.7~2.4, 3.5~4.1, 6.6~7.8 dBとなる。

(3) 当然のことであるが、2周波数帯欠損での主観評価移動量は1周波数帯欠損に比して大きく、最大低下値 L_{af} の大なるほど両者の差は大きい。

ここで、主観効果が欠損周波数への依存性が低い理由について検討してみる。ラウドネスに関しては主に音響エネルギーと周波数が寄与していることが知られており、周波数に対しては、高音域で感度が高いという性質がある。壁体透過音の周波数特性のエンベロープは質量則 (ML) フィルターによって定まり、基準壁透過の周波数特性は音源1については等ラウドネス曲線にほぼ沿っており、また音源2についても低音域でやや異なるものの全般に等ラウドネス曲線に近い。この結果、遮音欠損に伴う特定帯域における音響エネルギーの増加効果 (ラウドネスの上昇) が周波数によらずほぼ一定になっていると考えられる。したがって、透過音の周波数特性が等ラウドネス曲線から大きく外れる場合には必ずしもこのよ

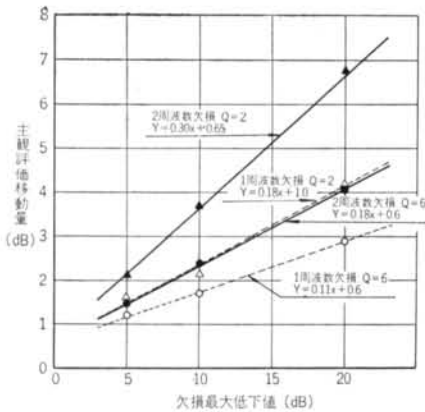


図-8 欠損低下値と主観評価の関係

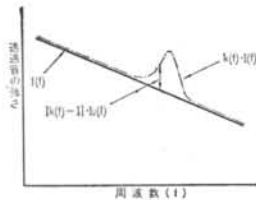


図-9 遮音欠損による透過音のエネルギー増分
うな特徴が現われるとは限らないといえよう。

主観評価移動量が欠損周波数帯への依存性が低いことから、周波数を無視してその平均値と欠損最大低下値 (L_{af}) の関係として整理すると図-8 ようになる。図には最小二乗法から求めた回帰直線を示してあるが、回帰係数は1周波数帯欠損では $Q=6$, 2の各々について 0.18, 0.11, 2周波数帯欠損の場合では0.18, 0.30となり、 $Q=2$ の方が大きい値をとる。また、各々の条件下では欠損最大低下値と主観評価移動量にほぼ直線的な対応関係がみられる。

3.3 遮音欠損による主観効果の予測

主観評価移動量と欠損最大低下値間に直線的な対応関係がみられるが、 Q および欠損周波数帯の数によって回帰係数は異なる。そこで、欠損の広がり (Q) と共に欠損最大低下値 (L_{af}) を含めた量として、遮音欠損に伴う透過音のエネルギー増加分を考えてみた。

図-9 に示すように遮音欠損がない基準壁の透過音 1 Hz 当りの強さを $I(f)$ として、遮音欠損に伴う透過音の増分を $k(f)$ という係数で表わすと、遮音欠損に伴う 1 Hz 当りのエネルギー増分は $\{k(f)-1\} \cdot I(f)$ となる。これを $I(f)$ で基準化して周波数軸上で積分し、式(1) のように対数で表わした量を相対増加エネルギーレベル

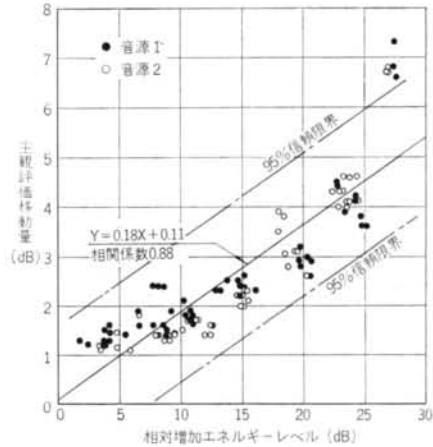


図-10 相対増加エネルギーレベルと主観評価の関係
(L_{re}) とする。

$$L_{re} = 10 \log \int_f \frac{\{k(f)-1\} \cdot I(f)}{I(f)} \cdot df \quad (\text{dB}) \quad \dots(1)$$

$$\approx 10 \log \sum_{i=1}^N \frac{\{k(i)-1\} \cdot I(i)}{I(i)} \quad (\text{dB}) \quad \dots(2)$$

図-10に、式(2)を基に1/3オクターブ帯域音圧レベルから計算した相対増加エネルギーレベルと主観評価移動量の関係を示した。図中には、最小二乗法から求めた回帰直線と95%信頼限界を示してある。全データによる相関係数は0.88と比較的高い相関を示しており、相対増加エネルギーレベルが 20 dB を越える領域 (2周波欠損 $Q=2$, $L_{af}=20\text{dB}$ の条件に相当) でやや外れるものの、全般に適合性は良い。

今回の実験条件に限定すれば、上記の式(2)の相対増加エネルギーレベルを計算することによって、遮音欠損による主観評価移動量を近似的には予測することが可能であるといえよう。

3.4 L_A , LL_s , LL_z による透過音のラウドネス評価

遮音欠損壁透過音(以下、ピーク音と呼ぶ)およびこれと等ラウドネスとなるようにレベルシフトした基準壁透過音(以下、標準音と呼ぶ)のラウドネスレベルを、騒音レベル (L_A) と S.S. Stevens および E. Zwicker のラウドネス計算方法によって求め、その差を検討した。計算された2音のレベルの差が微小である場合、そこで用いた計算方法は遮音欠損が主観評価に及ぼす影響の予測法として利用できることを意味する。ここで、 L_A は実測値であり、 LL_s は Stevens の MK VI 1/3 oct. 計算法、 LL_z は Zwicker の 1/3 oct. 図解法により算出したラウドネスレベルである。

各評価法による2音のラウドネスレベルの差 (ΔLL)

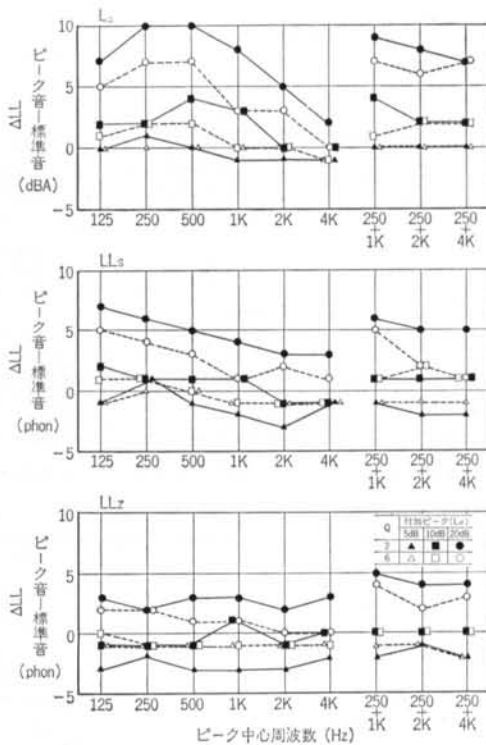


図-11(a) 等ラウドネスと判断された2音のラウドネス計算値の差(音源1)

は、図-11(a), 図-12(b)のようになり、その平均値と標準偏差を次に示した。

| | 平均値 | 標準偏差 |
|---------------|-----|------|
| L_A (dBA) | 1.8 | 3.1 |
| LL_s (phon) | 1.3 | 2.4 |
| LL_z (phon) | 0.1 | 1.8 |

各種計算法によるラウドネスレベルの計算結果をまとめると次のようになる。

(1)等ラウドネスで判断された2音は欠損によるピーク部のエネルギーが大なるほど各評価法とも差が増大し、ピーク音のラウドネスが高く算定される傾向がみられる。

(2)欠損によるピーク値(遮音欠損の L_A と等価)が5dBの条件下ではいずれの評価法によっても評価差は±3dB内に収まっており、主観評価との適合性は高い。

(3)欠損によるピーク値が10dBの条件下では LL_s と LL_z の適合性が高く、これに比して L_A では遮音欠損の周波数帯に依存する傾向がみられる。

(4)欠損によるピーク値が20dBの条件下ではいずれの評価法も主観評価との適合性は低下する。しかしながら、その中では LL_z の評価差は±5dB以内に収まり最も安定している。一方、 L_A ではピーク音のラウドネ

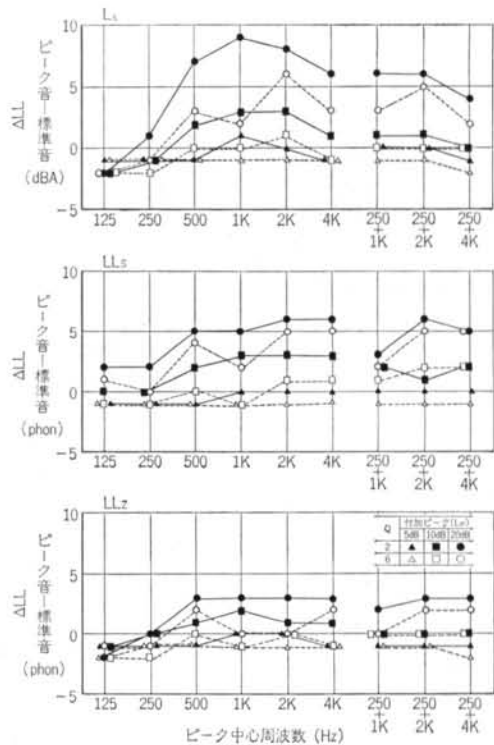


図-11(b) 等ラウドネスと判断された2音のラウドネス計算値の差(音源2)

スが高く算定され、最大10dBの評価差がみられる。

以上、主観評価値との適合性はマスキングの影響をかなり厳密に採り入れたZwickerの LL_z が最も良く、次いでStevensの LL_s 、 L_A の順であった。すなわち、単に周波数補正を行なった L_A は適合性が低く、遮音上の欠損の影響を十分表わしきれないことを示している。

§ 4. おわりに

遮音特性上の欠損が主観評価に及ぼす影響をラウドネスによって調べた。この結果、主観評価値の移動量は欠損の広がり(Q)と欠損の最大低下値の双方に関係しており、欠損の生じている周波数帯への依存性はみられなかった。また、遮音欠損による透過音のラウドネスに及ぼす影響は、本稿で定義した相対増加エネルギーレベルによって説明できることを示した。

以上の結果は音源の周波数、試験音のレベル等に関して特定の条件下で得られたものであり、そのまま壁体の遮音評価に適用することには問題があるが、遮音に対する主観評価のメカニズムを解明する上で有益な資料にな

るものと考えられる。

今後は実用的な遮音評価基準の作成に向けて、音源の

種類、試験音レベル等に関してさらに広範囲な実験を遂行していくことが必要と考える。

<参考文献>

- 1) H.J. Radmacher: "Subjektive Bewertung der Schalldämmung, Untersucht an Elektrisch Nachgebildeten Schalldämmkurven" *Acustica*, Vol. 5 (1955)
- 2) E. Zwicker: "Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke" *Acustica*, Vol. 10 (1960)
- 3) S.S. Stevens: "Procedure for Calculating Loudness: Mark VI" *J.A.S.A.*, Vol. 33 (1961)
- 4) D.M. Clark: "Subjective Study of the Sound Transmission Class for Rating Building Partitions" *J.A.S.A.*, Vol. 47 (1970)
- 5) 中川他: "遮音性能と主観評価—その1: 遮音欠損と Loudness 効果" 日本建築学会学術講演梗概集(昭和52年10月)
- 6) 中川他: "遮音性能と主観評価—その2: 遮音欠損と Loudness 効果(欠損の低下量と広がり)" 日本建築学会学術講演梗概集(昭和53年9月)
- 7) 中川他: "遮音欠損とラウドネス効果—その3: 音源の違いによる影響及び評価法の検討" 日本建築学会学術講演梗概集(昭和54年9月)