

等ラウドネス曲線(音の大きさの等感曲線) の精密決定に関する研究

竹島久志 (仙台電波工業高等専門学校)

takesima@cc.sendai-ct.ac.jp

1 はじめに

感覚的な音の大きさをラウドネスという。ラウドネスは音の強さだけではなく、音のスペクトルにも強く依存する。したがって、純音(正弦波音)や狭帯域音の場合には、音の強さが同じでも、周波数によってラウドネスは大きく変化する。

そこで、純音の周波数を変化させ、ラウドネスが一定であると知覚される音圧レベルを結ぶことにより一本の曲線が得られる。これが等ラウドネス曲線である。等ラウドネスレベル曲線や音の大きさの等感曲線と呼ばれることもある。一本の曲線が示す音の大きさの程度は、1 kHzでの音圧レベルで表される。これをラウドネスレベルと呼び、その単位は phon である。例えば 40 phon は、音圧レベル 40 dB の 1 kHz 純音の音の大きさと等しい音の大きさを表現している。

騒音計には、人の聴覚の感度特性を反映させるための聴感補正回路が組み込まれている。この回路の特性(聴感補正特性)は A 特性と呼ばれ、A 特性によって重み付けされた音圧レベルは騒音レベル(単位 dBA)と呼ばれる。この聴感補正特性 A 特性は、1930 年代にベル研の Fletcher and Munson[1] により測定された等ラウドネス曲線(フレッチャー・マンソン曲線)の 40 phon の曲線に基づいて導出された。

このように、等ラウドネス曲線は聴覚および音響計測の基本特性として重要であることから、1965 年に推奨国際規格 ISO R 226 として規格化された。(1987 年に国際規格 ISO 226[2] となる。)ただし、その規格で規定された特性は、A 特性の基となったフレッチャー・マンソン曲線ではなく、1950 年代に英国の Robinson and Dadson[3] により測定された曲線(ロビンソン・ダッドソン曲線)であった。

1985 年になって、国際規格特性であるロビンソン・ダッドソン曲線の大きな特徴である 400 Hz 付近のたるみが、実際には観測されないというドイツからの報告が、国際標準化機構(ISO)の音響関係の専門委員会 TC 43 に提出された。この報告を受けた TC 43

は、等ラウドネス曲線の規格である ISO 226 を全面改訂することを、新しい作業項目(work item)とすることを決定した。

これを受けて、日本、デンマーク、ドイツの研究者グループが、等ラウドネスレベルの測定を開始した。私は日本の研究グループの一員として等ラウドネス曲線の見直し作業に参加し、「等ラウドネスレベルの測定に関する研究」、さらに「測定データから等ラウドネス曲線を推定するための研究」に従事した。本発表では、これらの研究について報告する。

2 等ラウドネスレベルの測定に関する研究

等ラウドネス曲線を求めるには、まず、様々なレベルと周波数で、ラウドネスレベルが等しくなる条件、すなわち、等ラウドネスレベルを求める必要がある。

あるラウドネスレベルと周波数における等ラウドネスレベルを得るには、そのラウドネスレベルの基準となる音(基準音、通常 1kHz 純音)と測定対象の音(テスト音)の大きさを比較し、同じ大きさに感じられるテスト音の音圧レベルを求めればよい。基準音とテスト音を一対として被験者に提示する方法は、一対比較法と呼ばれる(図 1)。本研究の測定では、音圧レベルを固定した基準音と音圧レベルを様々に変えたテスト音を一対として多数回被験者に提示し、音の大きい方を選択させた。得られた反応の度数分布に累積正規分布を当てはめ、大きいという判断の生起確率が 50% となる音圧レベルを求める。これが、等ラウドネスレベルとなる。

テスト音の音圧レベルの決定方法として、当初、恒常法を用いていた。恒常法とは、実験前にあらかじめ提示する音圧レベル決めておき、全ての組合せの音を複数回(例えば 20 回)ランダムな順で提示する方法である。しかしこの方法では、提示する音圧レベルの範囲(レンジ)の中央寄りに結果が偏るという誤差(レ

レンジ効果)を生ずる可能性があることが分かった。そこで、本研究ではランダム化最尤適応法を使うことにした。これは、測定実験途中に、そこまでの反応からその時点の等ラウドネスレベルの最尤推定値を求め、それにある範囲でランダムに決めたレベルを加減算した音圧レベルを次の刺激音の提示レベルとする方法である。図2に、500Hzの50 phon等ラウドネスレベルを、提示レベル範囲の中心を変えて恒常法(CS)とランダム化最尤適応法(RMLSP)で測定した結果[4]を示す。これより、恒常法(CS)の結果にはレンジ効果の影響を強く受けるが、ランダム化最尤適応法(RMLSP)ではレンジ効果の影響をほとんど受けないことを確認できた。そこで、ランダム化最尤適応法を用いて等ラウドネスレベルの測定を実施した。

等ラウドネスレベルの測定は、産業技術総合研究所の大無響室において実施した。図3に測定の様子を示す。この無響室の壁面には、長さ2mの吸音クサビが約4000本設置されており、世界最高水準の自由音場特性を有している。

純音は、高レベル音においても歪みなく提示する必要があった。TC 43 推奨実験条件に従うと、第2高調波が-30 dB以下、第3高調波が-40dB以下、それ以上の高調波は-50 dB以下を満たさないといけない。我々はこれを満足するために、複数のスピーカシステムを用いた。例えば、160 Hz以下で高レベル音を提示する測定には、口径80 cmのコーンスピーカを用いた。また一部の測定において、高調波歪みを打ち消す信号を電気的に加えることにより歪みを抑える方法を採用した。

被験者は聴力正常な18~25歳である。この年齢範囲は、聴覚が十分に発達し、かつ、加齢による衰えない、すなわち最も良い状態の聴覚を持つと考えられる。測定は周波数帯域、等ラウドネスレベル帯域に分けて複数回実施され、参加した被験者総数は115名である。

測定データの一部として、図4に40 phonのデータを示す。図中には本研究のデータの他に、ドイツ(2箇所)とデンマーク(2箇所)で測定されたデータ、さらに、フレッチャー・マンソン曲線およびロビンソン・ダッドソン曲線を示す。これを見ると、新たに測定された等ラウドネスレベルは、特に1 kHzより低周波数領域でロビンソン・ダッドソン曲線より15 dBにもおよぶ大きな差があることが分かる。この傾向は他のラウドネスレベルでも同じであった。また、40 phonの測定データはどちらかというとフレッチャー・マンソン曲線に近かった。各国から報告された測定データを比較すると、全体的な傾向は一致しているものの、

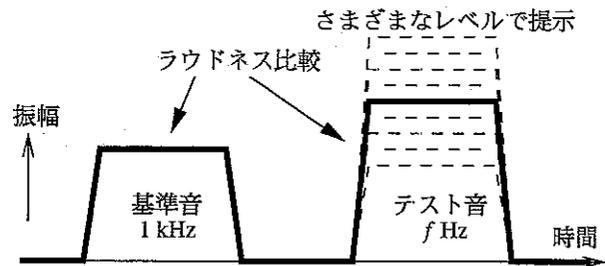


図1: 一対比較法の刺激音提示タイムパターン

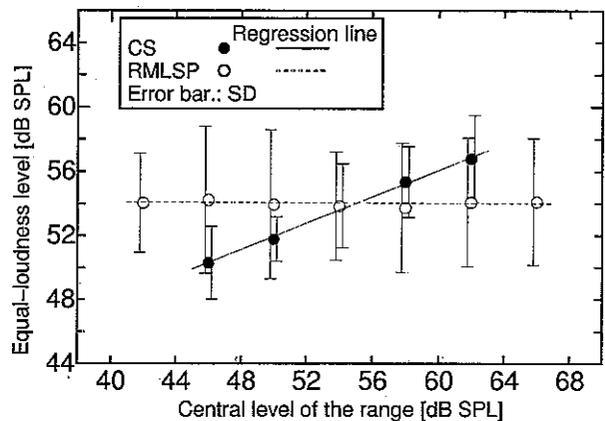


図2: 恒常法(CS)とランダム化最尤適応法(RMLSP)による500Hzの50 phon等ラウドネスレベル:テスト音の提示レベル範囲の中心を変化させて測定。

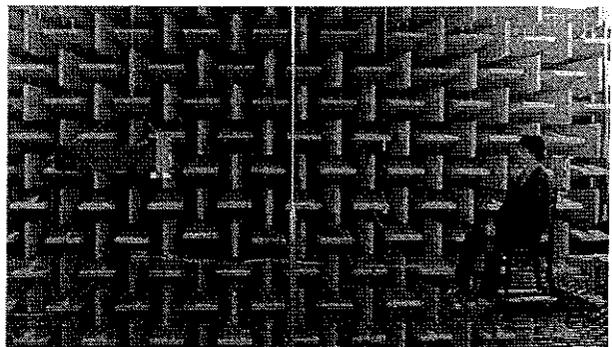


図3: 産業技術総合研究所大無響室における等ラウドネスレベル測定の様子

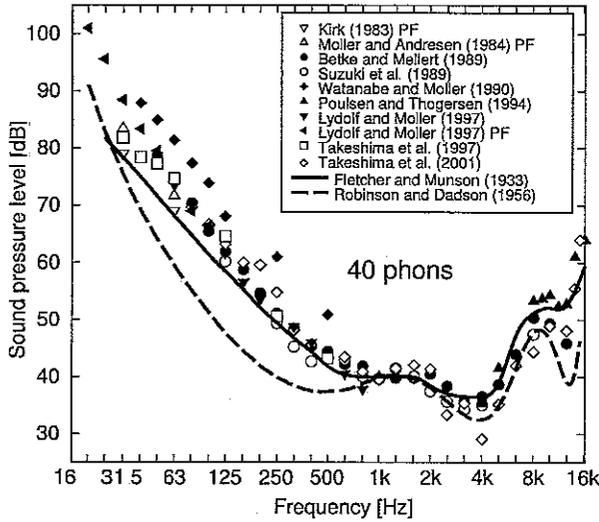


図 4: 自由音場における純音の等ラウドネス曲線 (40 phon)

一部に系統的に外れていると思われるデータが見られるなど、研究者間のばらつきが大きかった。

3 等ラウドネス曲線の推定に関する研究

図 4 のプロットで示すように、等ラウドネスレベルの測定データは周波数軸および音圧レベル軸上で離散的であり、しかも、研究者間でばらつきが見られる。そのため、等ラウドネス曲線は、測定データを平滑補間することにより求めなくてはならない。ばらつきの大きなデータから信頼性の高い曲線を得るには、ラウドネス知覚の先見知識を利用することが賢明と考えた。我々は、ラウドネスと音圧レベルの関係を表現するラウドネス関数に注目した。ラウドネス関数は古くから多く研究されており、複数のモデル式が提案されている。そのモデル式を用いて等ラウドネスの関係式を導出し、その関係式のパラメータを測定データから求めることにより、等ラウドネス曲線を推定することができる。

過去に提案された 5 種類のモデル式から、ラウドネスの音圧依存性が精度よく表現でき、かつ、安定にパラメータが推定可能であることを考慮して、次式を選択した [5]。

$$S = a(p^{2\alpha} - p_t^{2\alpha}) \quad (1)$$

ここで、 p はある純音の音圧、 p_t はその音の最小可聴値、 α と a はパラメータであり、 S がその音のラウドネスである。式 (1) を用いて、周波数 1 kHz で音

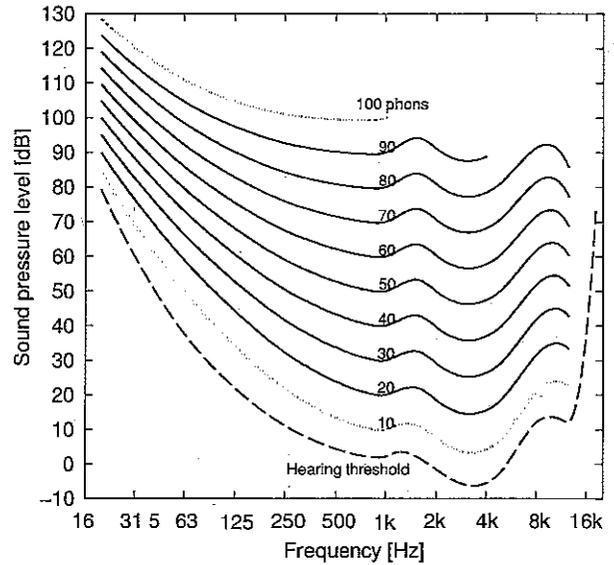


図 5: 推定した等ラウドネス曲線 (新曲線)

圧 p_r である純音 (基準音) のラウドネスと、周波数 f [Hz] で音圧 p_f の純音 (テスト音) のラウドネスが等しいとすると

$$p_f^2 = \frac{1}{U_f^2} \{ (p_r^{2\alpha_r} - p_{rt}^{2\alpha_r}) + (U_f p_{ft})^{2\alpha_f} \}^{1/\alpha_f}, \quad (2)$$

が得られる。これが等ラウドネス特性の関係式である。ここで、添字が r の変数は基準音 (1 kHz) のパラメータを、添字が f の変数は周波数 f [Hz] の純音に関するパラメータを示す。また、 $U_f = (a_f/a_r)^{1/\alpha_f}$ である。

式 (2) を周波数毎に等ラウドネスレベルの測定データに最小二乗法でフィッティングすることにより、式 (2) の α_f および U_f を求めた。これらを周波数軸上で平滑し、それを式 (2) に代入することにより滑らかな等ラウドネス曲線を推定することができた [6]。

図 5 に、この方法により推定した等ラウドネス曲線を示す。ここで、10 phon および 100 phon の曲線は点線で示されている。これは、最小可聴値から 20 phon 未満の等ラウドネス特性のデータが無い場合、および、90 phon より高いデータが 1 つの研究機関からしか報告されていないためである。

4 新曲線の特徴

図 6 は、新規格の等ラウドネス曲線と前規格のロビンソン・ダッドソン曲線を示す。両者を比べると、1 kHz 未満の低周波数域の 20 から 80 phon において約 15 dB にもおよぶ差が見られる。1 kHz より高

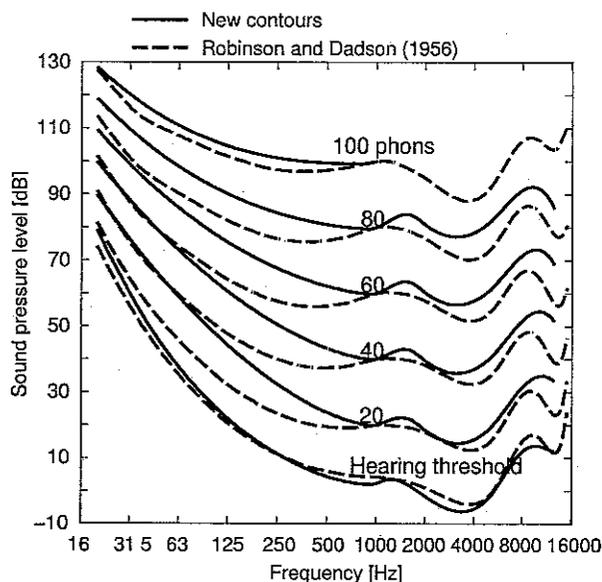


図 6: 新曲線とロビンソン・ダッドソン曲線

い周波数域においても新曲線は ISO 226 より全体的に大きく、最も大きい場合 5 dB 程度になる。一方、最小可聴値は大部分の周波数領域で特性が一致している。

図 7 に、新規格の等ラウドネス曲線とフレッチャー・マンソン曲線を重ねて示す。これを見ると 40 phon の曲線が 100 Hz 以上の周波数範囲でよく一致していることは興味深い。第 1 節で述べたようにフレッチャー・マンソン曲線の 40 phon は、騒音計の聴感補正特性である A 特性の基であり、新曲線はその根拠を改めて与えたといえるかもしれない。なお、最小可聴値は両者で大きく異っているが、これは、フレッチャー・マンソン曲線の測定がレシーバを用いていたことによる生体雑音の影響ではないかと考えられている。

5 あとがき

等ラウドネス曲線の国際規格改訂のために、等ラウドネスレベルの測定を行い、さらに、各国から報告されたデータから等ラウドネス曲線を推定した。得られた等ラウドネス曲線を基に、ISO 226 は 2003 年 8 月に改訂されるに至った。

等ラウドネス曲線は、騒音計の聴感補正特性のみならず、デジタル補聴器、MP3 に代表されるオーディオ信号高能率符号化など、音 (オーディオ) に関する様々な分野において重要な基礎データとして利用されている。正確な等ラウドネス曲線が確定されたこ

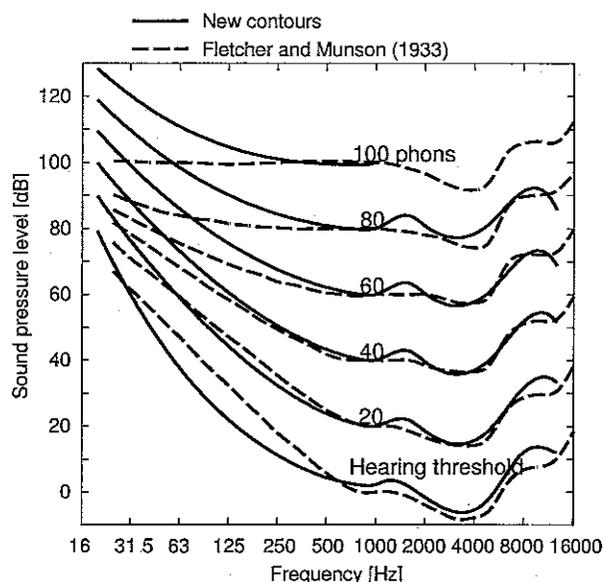


図 7: 新曲線とフレッチャー・マンソン曲線

とにより、これらの分野における将来の研究・開発に貢献できるものと期待している。

参考文献

- [1] H. Fletcher and W. A. Munson, "Loudness, its definition, measurement and calculation," *J. Acoust. Soc. Am.*, **5**, pp. 82-108 (1933).
- [2] ISO 226, "Acoustics - Normal equal-loudness-level contours," International Organization for Standardization, Geneva, (2003).
- [3] D.W. Robinson and R.S. Dadson, "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones," *Br. J. Appl. Phys.*, **7**, pp. 166-181 (1956).
- [4] H. Takeshima, Y. Suzuki, H. Fujii, M. Kumagai, K. Ashihara, T. Fujimori, T. and T. Sone, "Equal-loudness contours measured by the randomized maximum likelihood sequential procedure," *Acustica-acta acustica*, **87**, pp. 389-399 (2001).
- [5] H. Takeshima, Y. Suzuki, K. Ozawa, M. Kumagai, T. Sone, "Comparison of loudness functions suitable for drawing equal-loudness-level contours," *Acoust. Sci. & Tech.*, **24**, pp. 61-68 (2003).
- [6] Y. Suzuki, H. Takeshima, "Equal-loudness-level contours for pure tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, pp. 918-933 (2004).