

ラウドネス (音の大きさ) の 周波数特性と国際標準

— 基礎研究とその思いがけない影響を交えて —

鈴木陽一

東北文化学園大学工学部
東北大学名誉教授

自己紹介

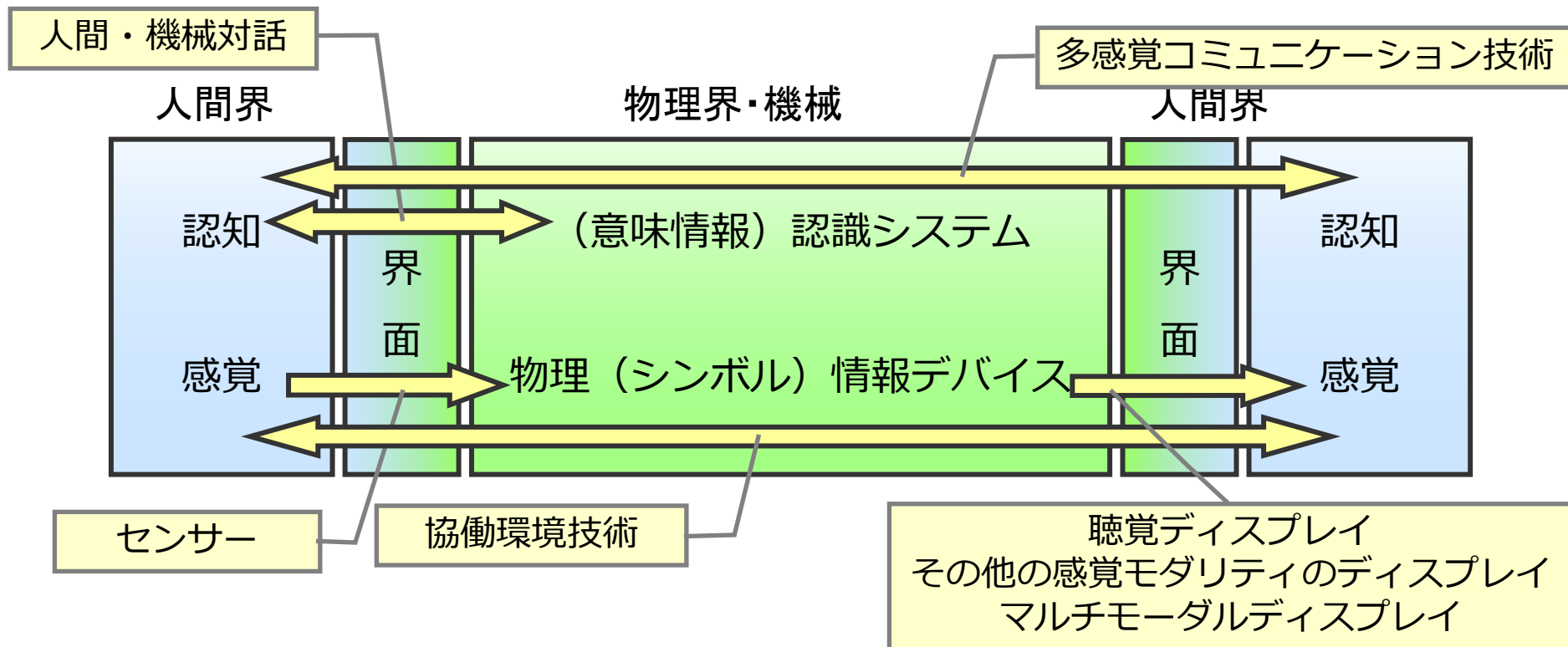
- 1954 会津若松生まれ，仙台育ち
 - 高校では，アマチュア無線，コントラクトブリッジ，SF三昧
- 1976 卒業論文@東北大・工・電気工学科
 - 母音の性質に及ぼす声道特性と音源特性の寄与
- 1978 修士論文@東北大・工・電気及通信工学専攻
 - 音の強度変化の知覚に関する基礎的研究
- 1981 博士論文@東北大・工・電気及通信工学専攻
 - 複合音のマスキングに関する研究
- 1981～ 東北大・電気通信研究所助手，同・大型計算機センター助教授，同・電気通信研究所助教授
- 1991～1992 在外研究@ミュンヘン工科大学客員研究員
- 1999 東北大・電気通信研究所教授（兼 情報科学研究科教授）
- 2017 NICT・耐災害研究センター長
- 2019 東北大・名誉教授
- 2021 東北文化学園大学・工・教授

研究史

- 1978年～2000年代半ば, 2020～現在
 - ラウドネス（主観的な音の大きさ）
- 1980年ころ～現在
 - 3次元音空間知覚と音空間システム技術
- 1980年代半ば～2000年ころ
 - 音色知覚過程
- 1980年代末期～現在
 - 次世代デジタル補聴器の開発
 - 聴力特性, 音声聴取能の評価
- 1990年代半ば～現在
 - 聴覚を含むマルチモーダル知覚過程の解明
- 2000年ころ～2010年代半ば
 - 音情報のセキュア化（電子透かし等）
- 2011年～現在
 - 屋外拡声システムの高度化

私の研究の視座

- 情報通信技術 (ICT) は新しい時間と空間の関係, すなわち新しい時空間を人間に与え続けてきた
- 人間の情報処理を考慮することにより, その時空間をより“快適な”ものにしていきたい



人間と電気情報通信

- ICTにおける人間情報処理過程解明の重要性
 - 古くは、電話や (アナログ) カラーテレビの信号処理
 - 新しくは、たとえばMPEG, AACの信号処理
 - 人間はICTシステムにおける究極的な情報の発信・受容主体
- 聴覚と視覚の重要性と特徴
 - 遠感覚モダリティ
 - 受容情報量が大きく、電子的にシステム構築が可能
 - 言語との密接な関係
 - 相補・競合など強い相互作用を及ぼしあう
- 聴覚への注目
 - 聴覚知覚は自分の意思で遮れない
 - 聴覚は全方位の情報を取得できる
 - 言語にとっては聴覚の方が進化上古いモダリティ

今回の講演でなぜラウドネスを選んだか

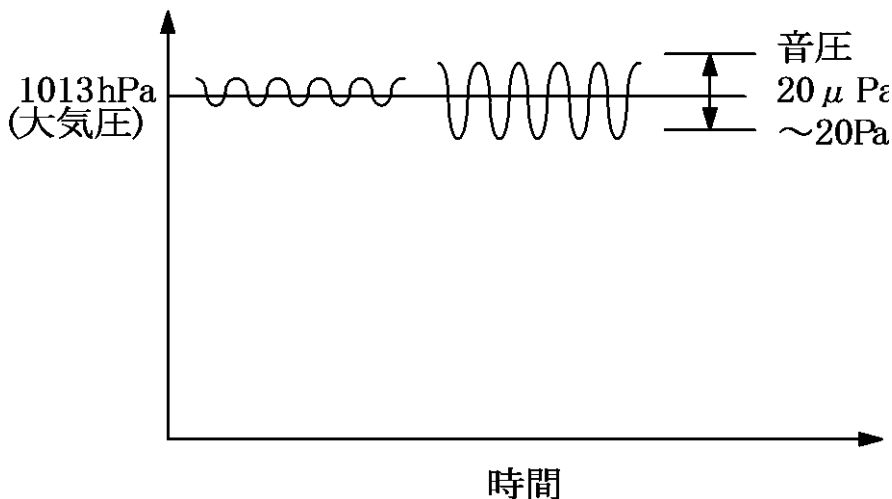
- 2021年3月 第72回 NHK放送文化賞を受賞
 - 「聴覚の基礎研究」が受賞理由（↓）になったことを
 - うれしく誇らしく思う
 - 「人が感じる音の大きさの特性『ラウドネス』は国際規格としてまとめられ、放送の音の大きさを揃えるためのメーターの基礎となりました。」
- 本講演に向けた思い
 - 思いがけず、そこまでの評価をいただけた
 - このような基礎研究が持つ意味を具体的に認識した
 - 関連の研究を振り返り、放送技術との思いがけない関係も考察した結果を紹介したい

音と聴覚情報処理の基礎

音波と音圧レベル

■ 音波

- 媒質の弾性ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの交番による波動
- 津波や水面のさざ波は親戚の重力波 (gravity wave)
 - 重力の位置エネルギーと運動エネルギーが交番



■ 空気を伝搬する音波

- 大気圧 (1.013×10^5 Pa) に重畳される, 交流的で微少な圧力変動
 - 会話音声でおよそ10mPa程度

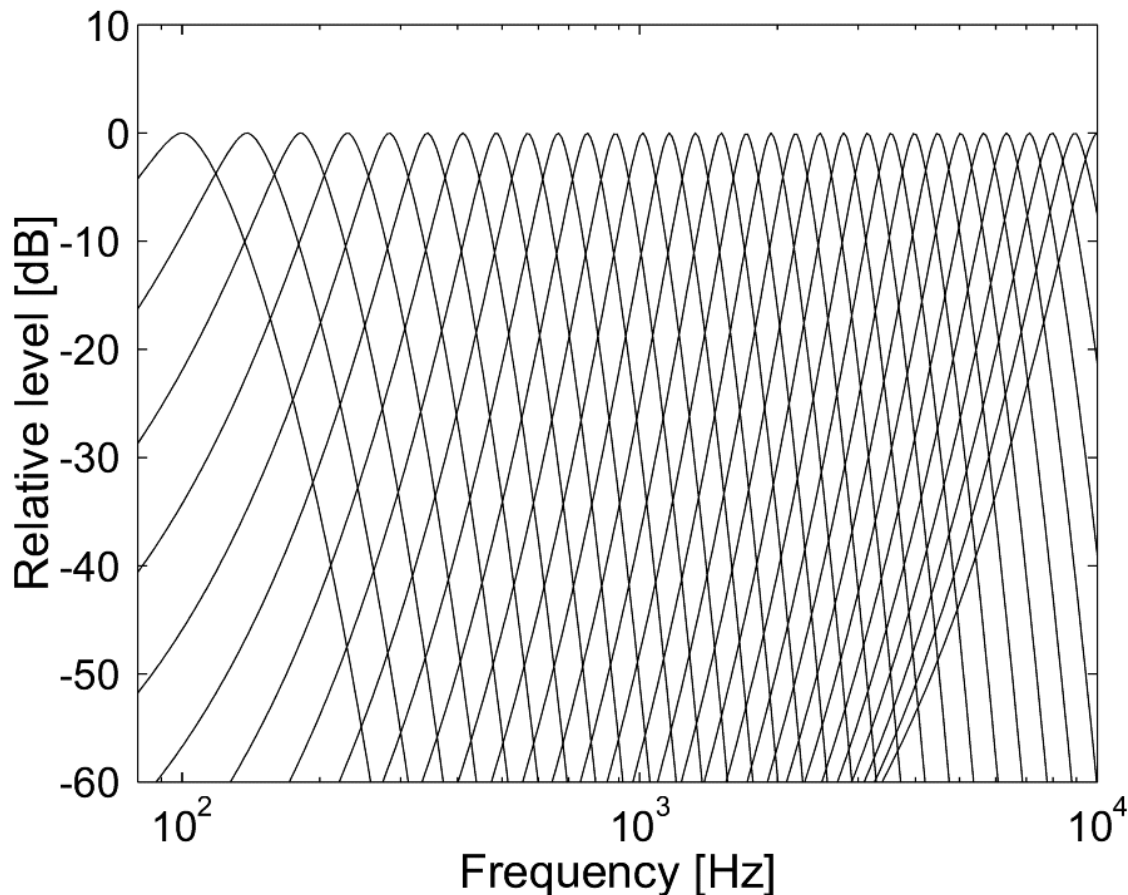
■ 音圧レベル

$$L_P = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2}$$

- p : 表したい音の音圧
- p_0 : 基準音圧 (20 μ Pa)
 - 1kHz前後の周波数でほぼ人間の最小可聴値

幅広い可聴周波数範囲≒10オクターブ

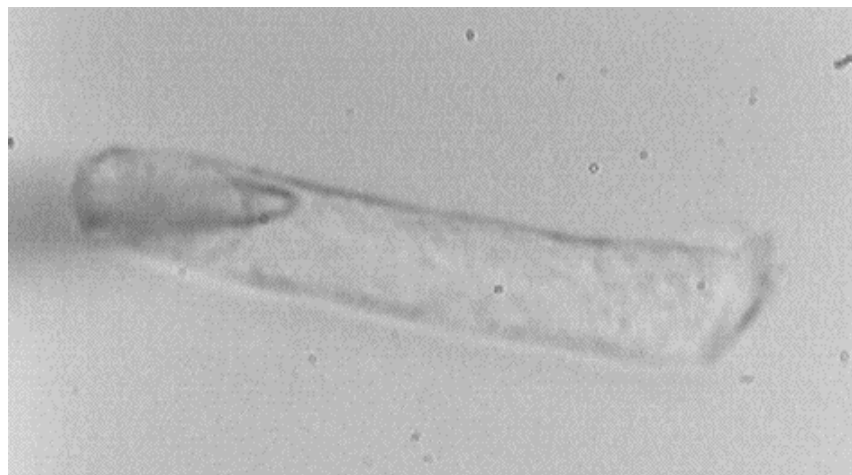
- 聴覚フィルタ処理（内耳の基底膜の共振特性）を反映
 - 帯域幅は中程度の周波数で約1/4オクターブ
 - デジタル信号処理のサブバンド処理と高い親和性



聴覚フィルタモデル
(ROEX フィルタ)の
周波数特性

ダイナミックレンジ > 120 dB

- 外有毛細胞による基底膜振動のアクティブ増幅過程由来
 - 外来音の波形に合わせた外有毛細胞の振動による
 - これにより, $20\mu\text{Pa}$ (2×10^{-10} 気圧) の弱い音を聴取可能
- 聴神経による音の強さの指数関数的圧縮 (指数 < 1)
- 対応する信号処理がしばしば悪条件 (ill condition) に



外有毛細胞の交流電気刺激に対する挙動

和田仁名誉教授提供

音の強さと大きさ

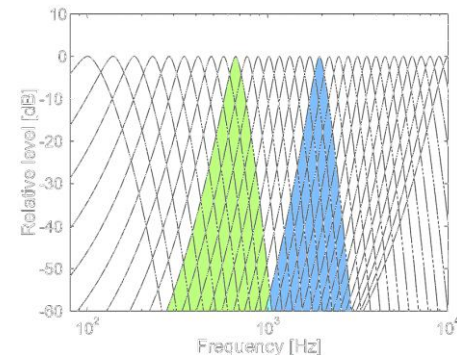
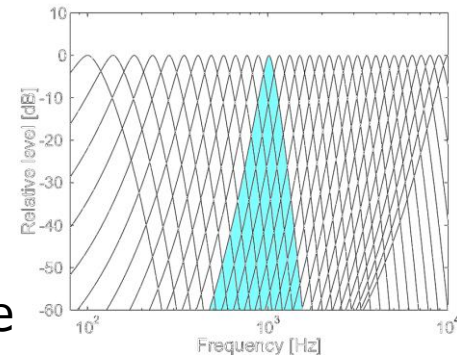
- 音の強さ (sound intensity)
 - 単位面積あたりを通過する音のパワー [W/m²]
 - 音圧×粒子速度 (c.f. 電気系: 電圧×電流, 機械系: 力×速度)
 - 音圧レベル0dB (音圧20μPa) の音の強さ $\doteq$ 1pW/m²
- 音の大きさ (ラウドネス, loudness)
 - 人間が音を聞いたときの感覚的な量
 - 音の強さ(I)とラウドネス(S)の関係

$$S = kI^{0.3} \quad [\text{sone}]$$

- 1kHz 40dBの純音の音の大きさを 1.0 sone とする
- べき指数が0.3なので
 - 音の強さが約10倍 (約10dB) 大きくなるごとに2倍になる

広帯域音のラウドネスと、その推定法

- 音圧レベルが同じく40dBでも.....
 - ある聴覚フィルタ帯域に限定された音
 - ラウドネスはその音の強さの0.3乗となる
 - 音圧レベルが40dBなら音の強さは $10 \text{ nW/m}^2 \Rightarrow 1 \text{ sone}$
 - 2つの聴覚フィルタ帯域に分かれた音
 - 各帯域のラウドネスは、各帯域の音の強さの0.3乗
 - 音の強さはそれぞれ $5 \text{ nW/m}^2 \Rightarrow$ それぞれ約 0.8 sone
 - 全体のラウドネスは、ほぼ、それらの和になる
 - 全体のラウドネスは 1.6 sone にも!
- 音の強さが同じなら、広帯域音のラウドネスは純音や狭帯域音のラウドネスより大きくなる
 - 狭帯域ごとのラウドネスを求めて総合する手続きが必要
 - その推定法はISO 532シリーズで標準化

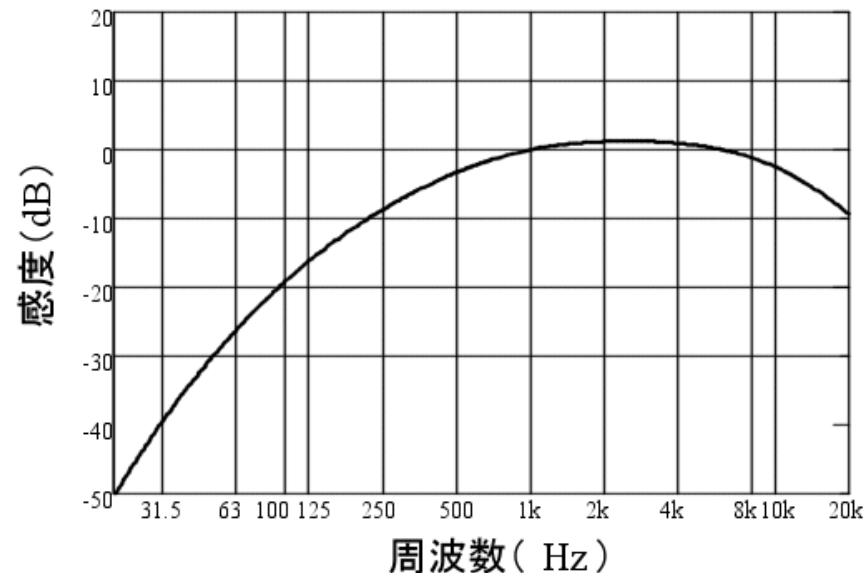


騒音と騒音レベル

- 騒音 = 望ましくない音, 不快な音, じゃまな音
 - 音の性質などには依らない, あくまで聴取者の判断
 - 騒音の評価には人間の感覚を基準とした測定が必要
 - ISO532シリーズの使用が本質的だが....
- 騒音レベル L_A
 - 人間の聴覚の感度が低域と超高域で下がること (後述) を反映した重み付けを行う簡易法
 - その周波数特性を A 特性と呼ぶ (右下図)

$$L_A = 10 \log_{10} \frac{P_A^2}{P_0^2}$$

- p_A : A 特性周波数補正した音圧
- p_0 : 基準音圧 (20 μ Pa)
- 簡便さと互換性維持等の理由故にいまも多用されている



等価騒音レベル (L_{Aeq})

- ある時間内の音の総エネルギーの平均値の騒音レベル

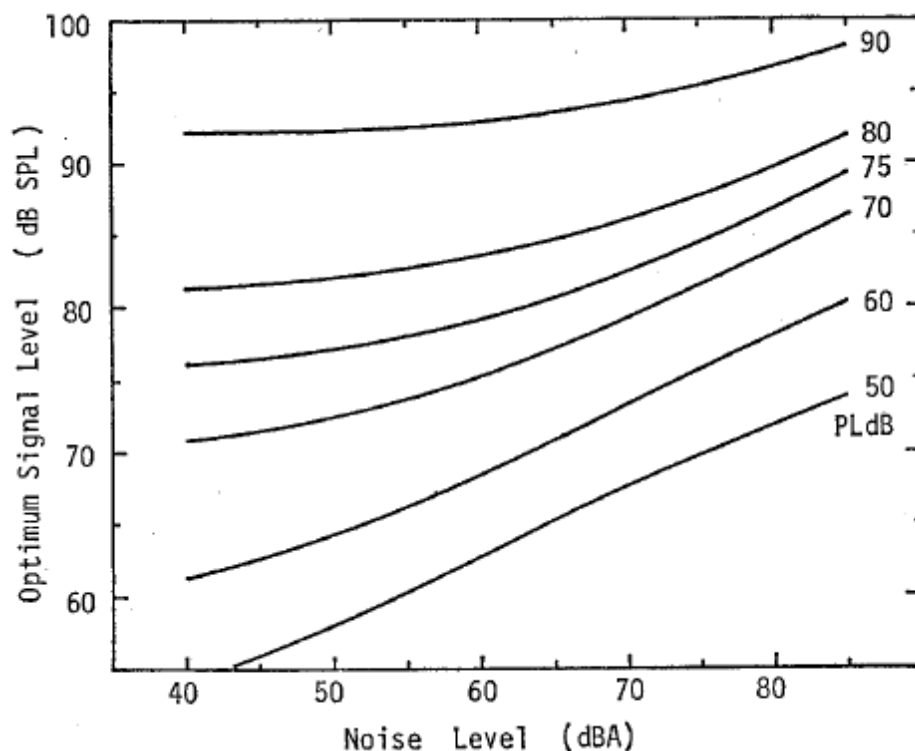
$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right\}$$

- $P_A(t)$: 騒音の音圧
- P_0 : 基準音圧 (= 20μPa)
- t_1 : 測定開始時刻, t_2 : 測定終了時刻
- T : 測定時間 ($t_2 - t_1$)
- 騒音の評価値として世界各国で用いられる
 - ある人がさらされた騒音の総エネルギーと騒音性難聴の発生率は密接に関係
 - アメリカ環境保護庁 (EPA) 等の大がかりな研究が根拠
 - 日本でも環境基準や労働環境の基準値等は全て等価騒音レベル

音の大きさに関わる自身の研究から

騒音下 (例: 車室内) における音楽聴取最適化

- 騒音下の信号音 (音楽) のラウドネスを一定に保つモデル特性を実験結果に基づいて決定 (下図)
- さらに, 聴覚フィルタごとのラウドネスを保つことで音色・音質の変化を抑える技術を提案
 - デジタル補聴器の原理の考案につながった

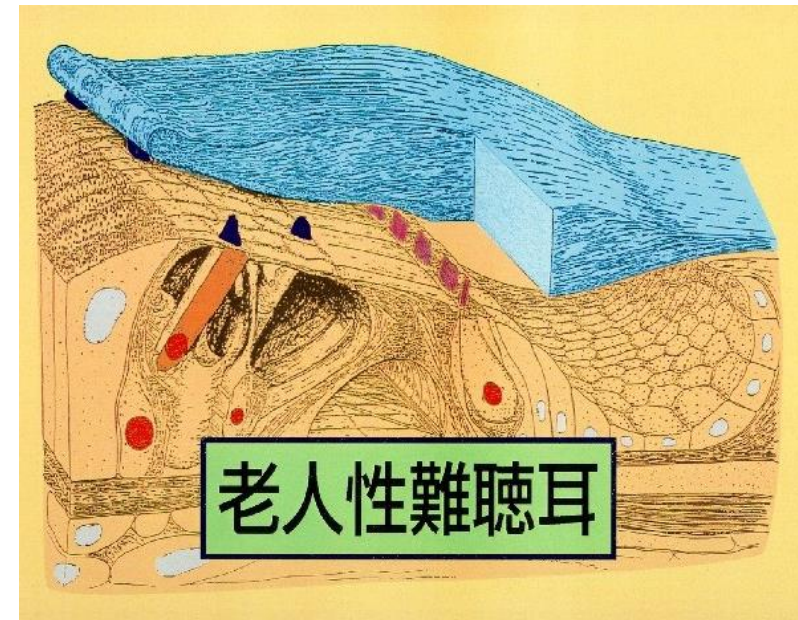
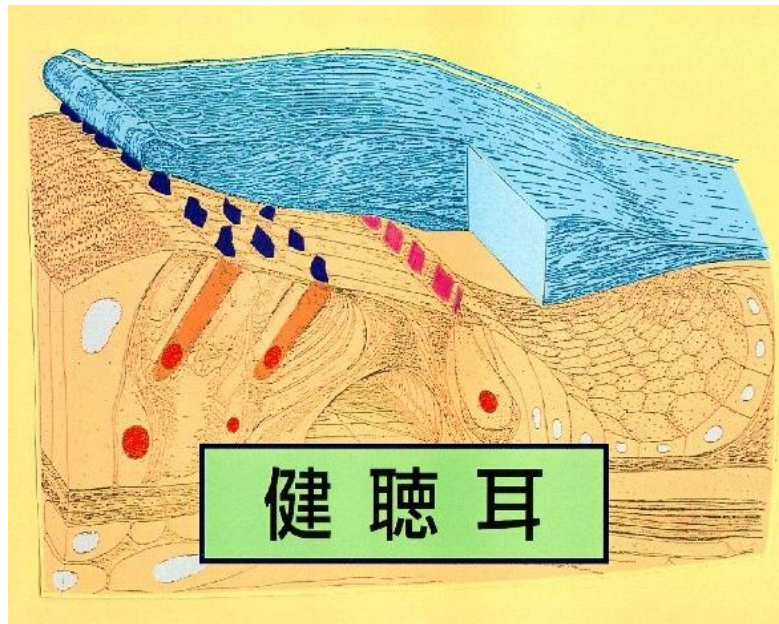


ラウドネス補償型ディジタル補聴器

- 伝音性難聴：音の物理的伝達経路の障害
 - 音を大きくするだけで効果があり，手術も著効
- 感音性難聴：音の感覚・知覚経路の障害
 - 典型的な難聴（老人性難聴や騒音性難聴）
 - その典型的な機序は内耳の外有毛細胞の損傷
 - ラウドネス知覚のレベル依存性が非線性に変化
 - 周波数分解能・音空間知覚能，時間分解能などにも影響
 - 単に音を大きくするだけではだめ
 - 障害を補償するという姿勢が重要
 - 特に重要なのは，ラウドネス知覚の歪の補償

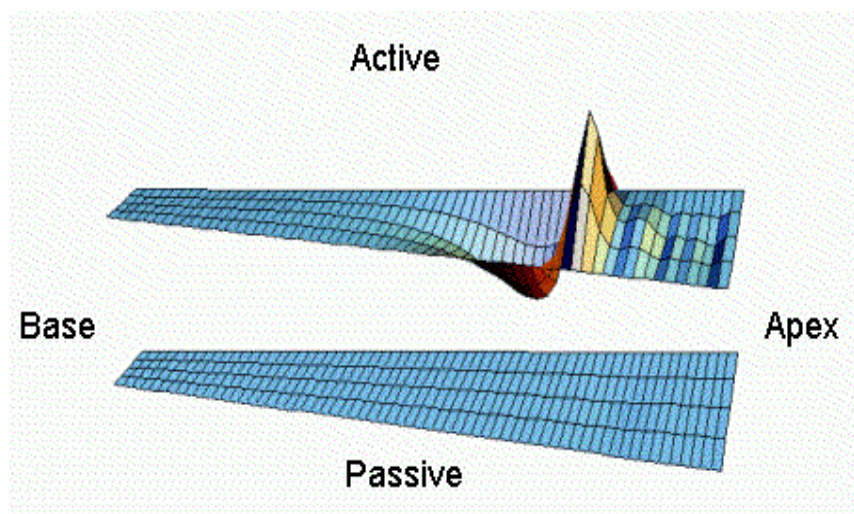
感音性難聴における典型的な内耳の変化

- 外有毛細胞の毛 (不動毛) が脱落したり, 細胞全体が脱落する
- それが難聴を引き起こす機序が分かったのは50年ほど前

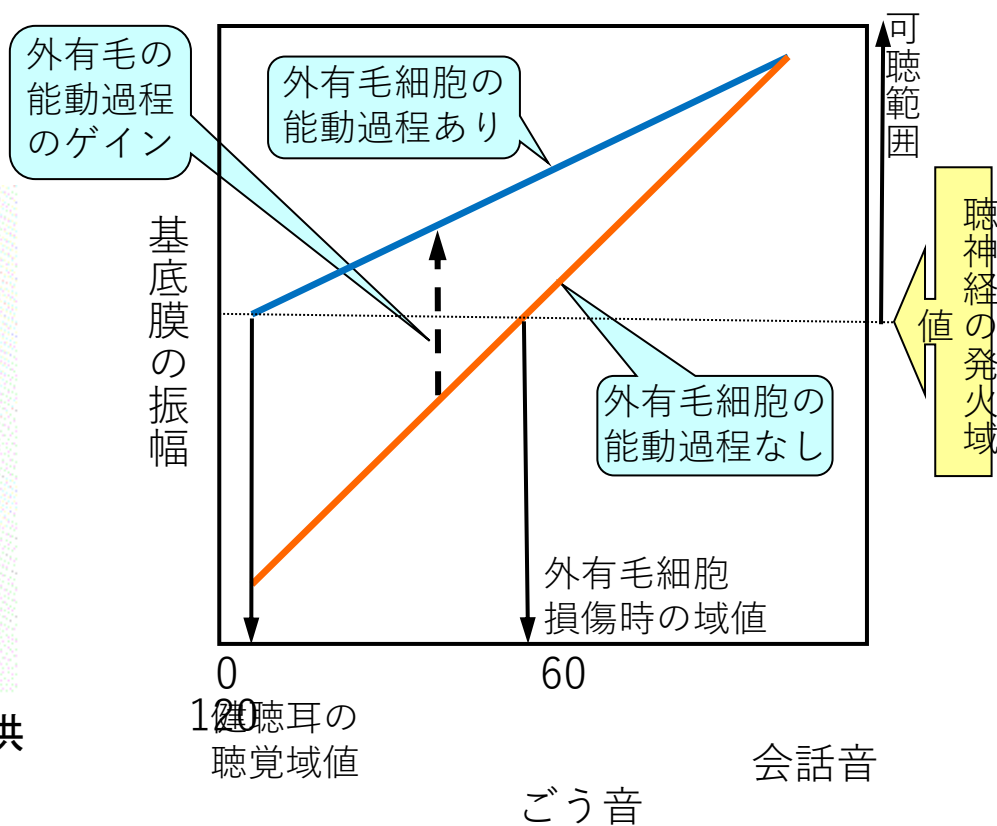


外有毛細胞の能動過程と聴覚のダイナミックレンジ

- 外有毛細胞の損傷によりレベル圧縮動作が消失 (左図)
 - 聴覚系が線形に近づき, ダイナミックレンジが減少 (右図)
- それによるラウドネス知覚の歪を補償することが有効
 - ラウドネス補償処理: デジタル補聴器の基本原理に

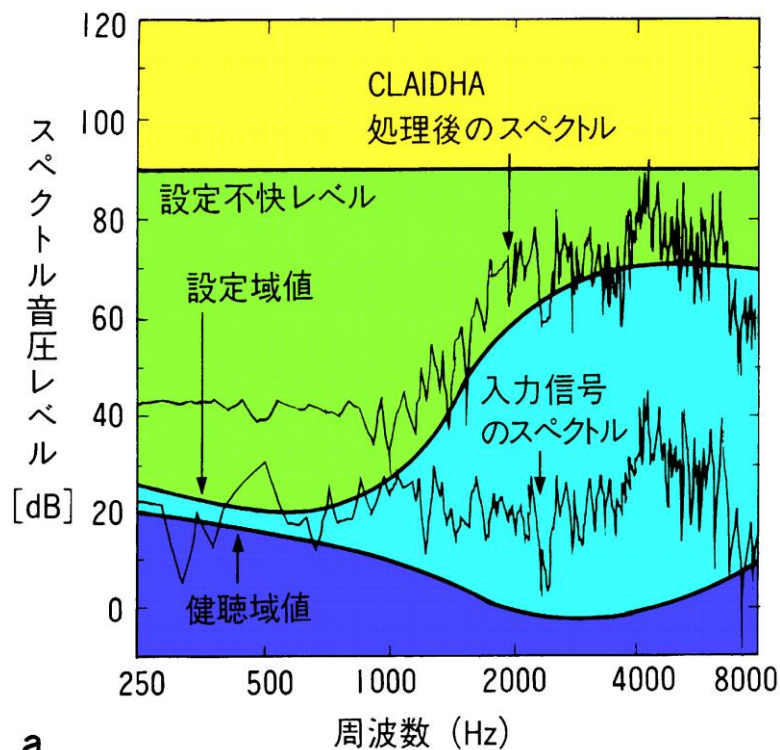


和田仁名誉教授提供

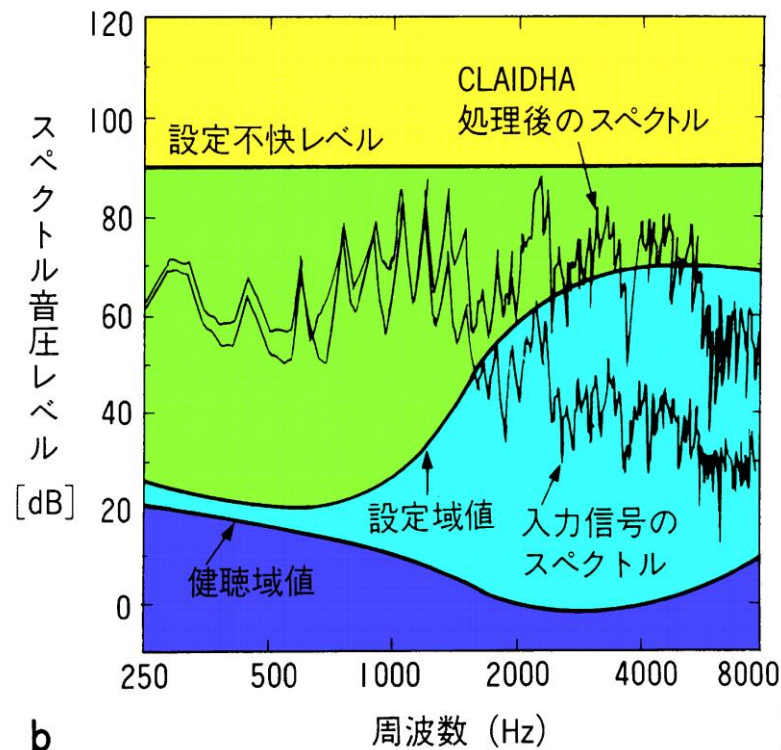


CLAIDHA処理の開発

- 周波数帯域ごとのラウドネスが同じになるように補償
 - 入力スペクトルに応じてゲイン周波数特性を動的に調整
- 音声/sa/の信号処理結果(下図)のように動作



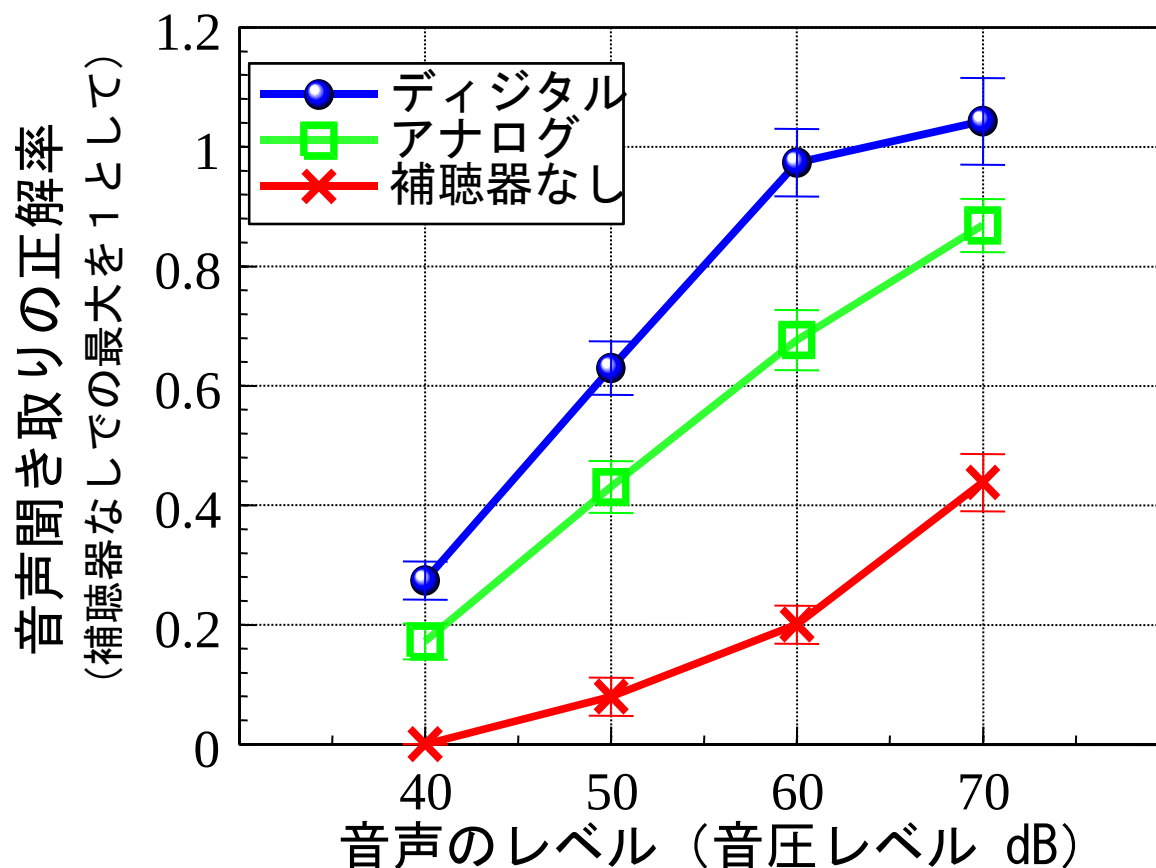
a. /sa/の子音部の処理結果



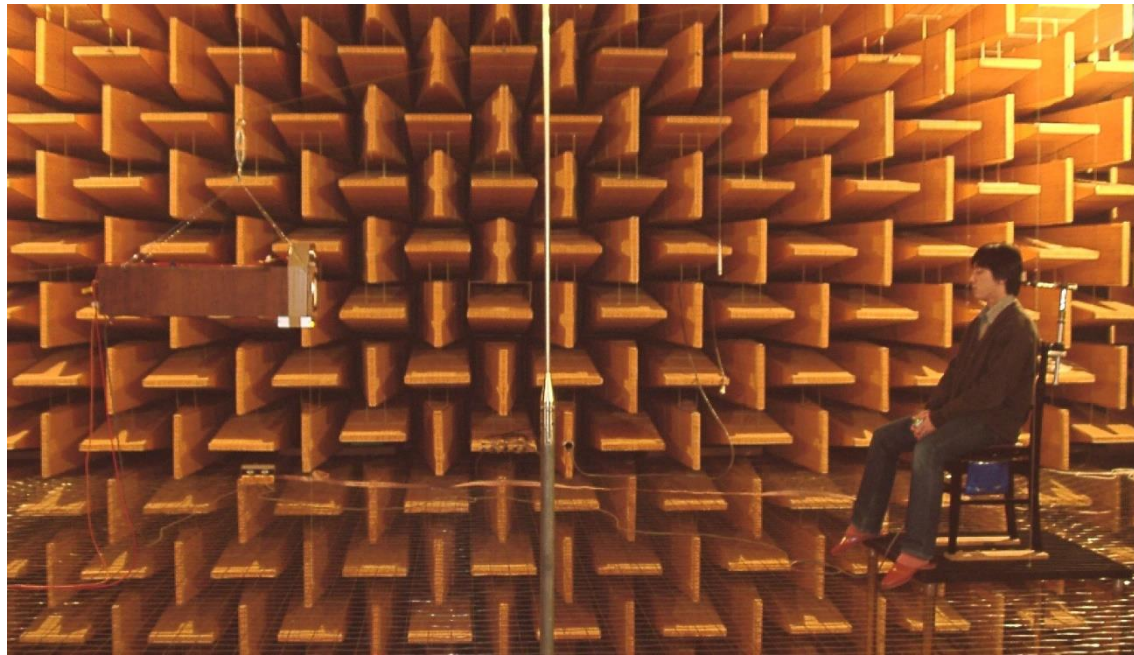
b. /sa/の母音部の処理結果

補聴器種別ごとの音声聞き取り能力

- 100耳を超える適用結果によりCLAIDHA処理の有効性を確認
 - 横軸：音声の提示レベル (40dB≡ささやき声, 60dB≡普通の会話)
 - 縦軸：音声聞き取りの正解率
(補聴器なしのときの最大値を1.0として表示)



等ラウドネスレベル曲線と そのISO規格 (ISO 226) の全面改定



左側につるされたスピーカーから出た音の大きさを右側に座る被験者が判断する
(産総研の大無響室における実験風景)

ラウドネスレベル

- ラウドネスをdBと関係付けた量
 - 音圧レベルが x dBの1kHz純音と同じラウドネスである音のラウドネスレベルは
 - x phon
 - 逆に, 例えばラウドネスレベル40phonの音の大きさは, 音の種類によらず1sone
 - ∴ 音圧レベル40dBの1kHz純音のラウドネスは1sone
- ラウドネスは音の強さだけではなく, 音の周波数スペクトルによっても変化するのだった
 - 純音の周波数もラウドネスに影響を与える

そうであるならば,

等ラウドネスレベル曲線

- 周波数 f の純音について、音圧レベル x dBの1kHz純音と同じラウドネスになる音圧レベルを求める
- 様々な周波数で、この音圧レベルを求め、周波数の関数として表すと
 - ラウドネスレベルが x phonである純音の音圧レベルを表す曲線 (等高線) が得られる



等ラウドネスレベル曲線 (略称: ELC)

- 聴覚の感度曲線とも言え、聴覚の最も基本的な特性の一つ
- 1930年代にはフレッチャーとマンソン (ベル研) がELCを測定し、米国のみならず広く用いられた
- 1950年代の英国のデータが60年代にISO化 (ISO 226)

音響に関する国際標準

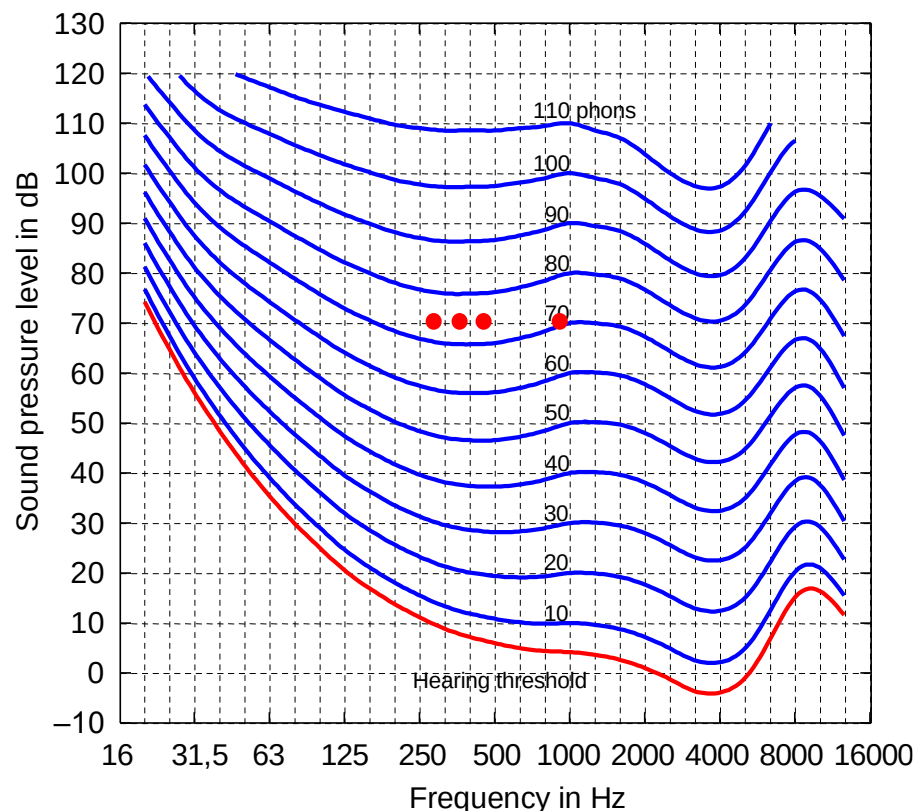
- 音響に関する国際標準，国際規格は公的機関が策定の主体の “de juri” 規格が主
 - IEC：測定器等の電気音響機器関連の規格を所掌
 - ITU：音声符号化等の通信，放送関連の規格を所掌
 - ISO：音に関する基幹，基盤的な規格の策定を所掌
 - その多くはISO/TC43 (Acoustics) (第43専門委員会)が担当
- 情報分野では学会やフォーラム等が定めた “de facto” 規格が大きな存在感を示していることと対照的
 - これは音響の規格が物理学 (含：心理物理学) に基づく基礎，基盤的なものの主体であることと関係があらう

旧ISO 226と疑義の提示 (1985 プラハ会議)

- ELC研究とISO規格の経緯
 - 当初のISO 226 (右図) は1950年代のロビンソンとダッドソン (英国国立物理学研究所, NPL) による測定値に基づく
- 1985年, ドイツの疑義報告がISO TC43 (Acoustics) へ
 - 300, 400, 500 Hzのラウドネスレベル70 phonの測定値には400 Hz付近の特性のたるみが見られない
 - ISO 532-1 (Zwickerのラウドネス推定法) と矛盾

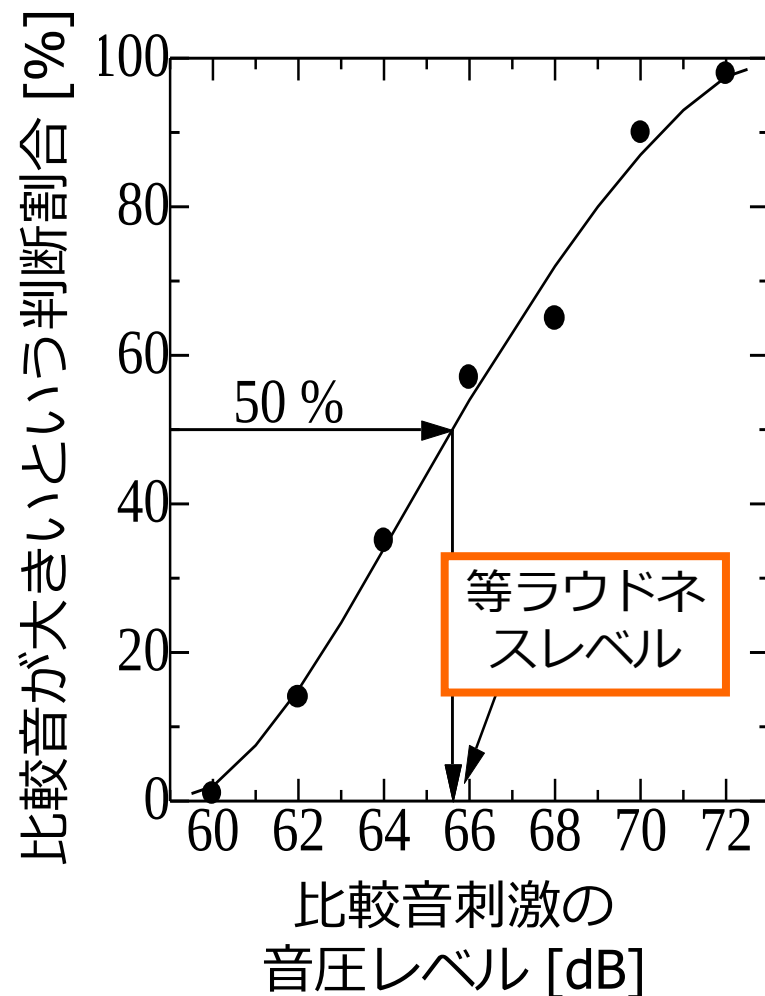
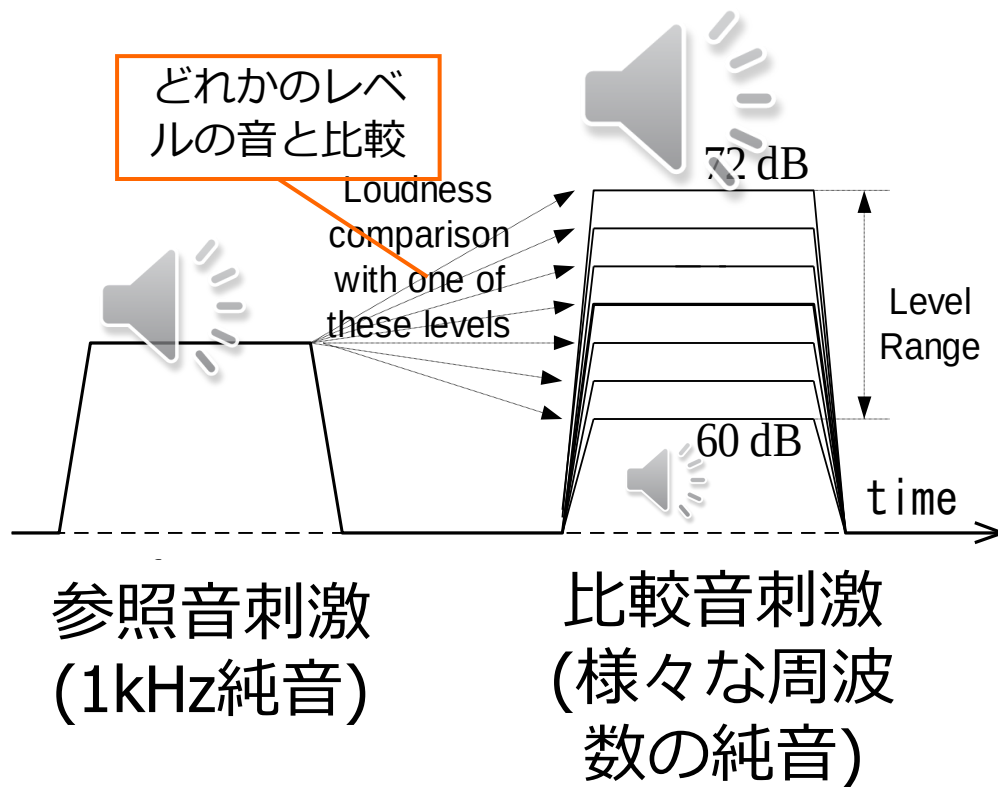
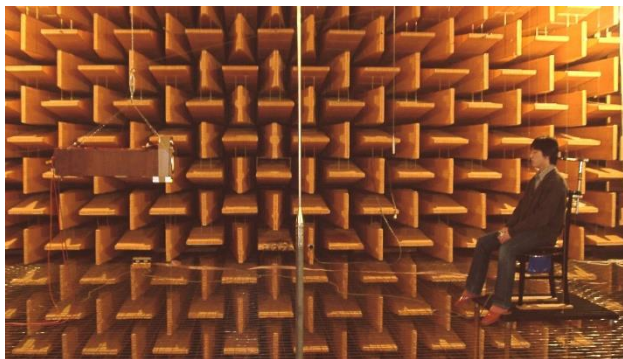


全面改訂作業開始



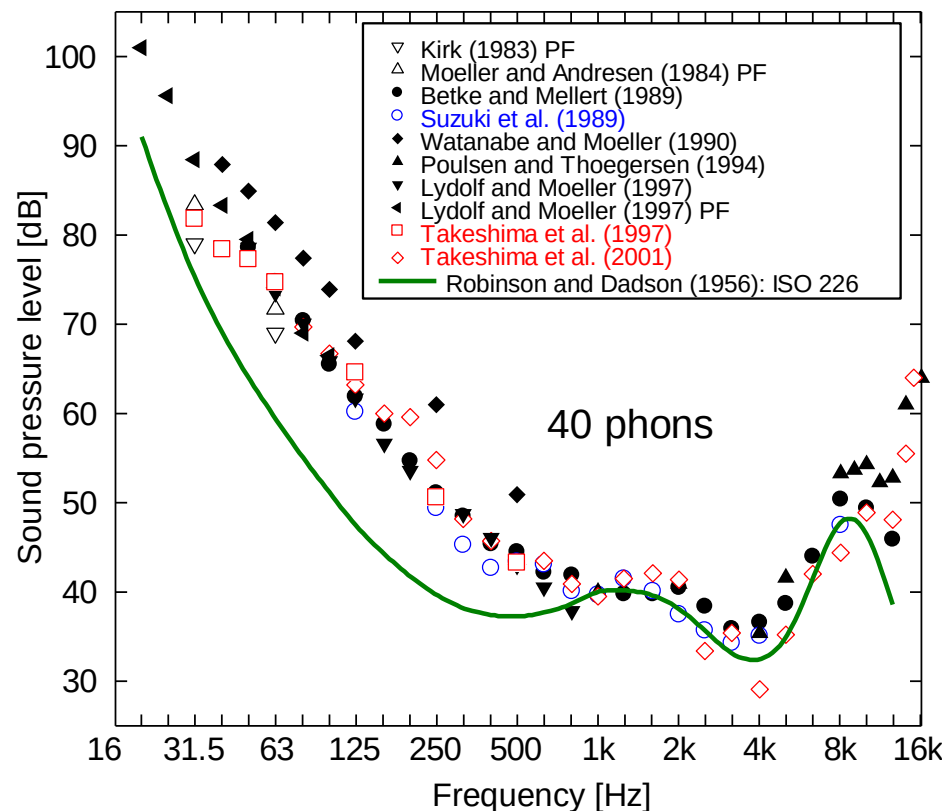
ロビンソンとダッドソンによるELC
(ISO R226:1961, ISO 226:1987) と,
1985年に示されたドイツの測定結果

等ラウドネスレベルの求め方 (一対比較法)



改定作業は興奮から沈静, そして再開へ

- 1985年: 日米独丁などによる独立の精密測定実験が開始
 - 日本は東北大と電総研 (現:産総研) が共同研究を開始
 - 1kHz以下では右図のように, 15dBに及ぶ誤差が
- 1990年代半ばには日本以外では研究が下火に
 - 日本は国研 (電総研) の経常研究費と, 科研費, 財団助成等により研究を継続できた
- 1999年: ISOに日本を中心とする国際PTが発足 (ISO/TC43)
 - 代表: 鈴木陽一, 日米独丁9名
- 2003年 ISO 226:2003 発行
 - 学術誌論文 (米国音響学会誌) は2004年*

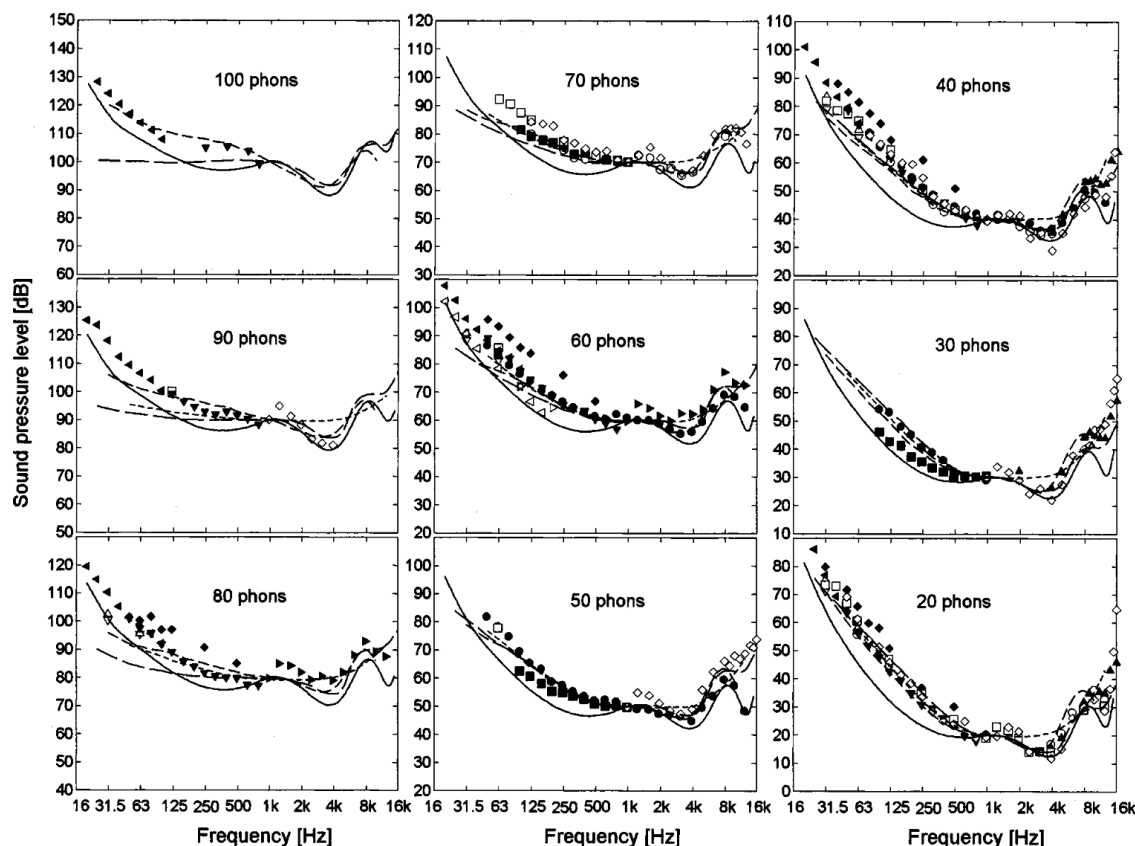


1980年代以降の等ラウドネスレベル
測定データ例 (曲線は当時の I S O 226)

* Suzuki Y. & Takeshima H. "Equal-loudness-level contours for pure tones." *J. Acoust. Soc. Amer.* 116.2 (2004): 918-933.

等ラウドネスレベル曲線の推定の学術的課題

- 測定データは全て離散的（周波数，ラウドネスレベル）
 - ラウドネスレベル (phon) ごとの平滑補完では各曲線を独立に推定
⇒ 平行的でない醜い曲線群となり，信頼感に欠ける
- 如何に合理的な曲線群を推定するか



- ▽ Kirk (1983) PF
 - △ Møller and Andresen (1984) PF
 - Betke and Mellert (1989)
 - Suzuki et al. (1989)
 - Fastl et al. (1990)
 - ◆ Watanabe and Møller (1990)
 - ▲ Poulsen and Thøgersen (1994)
 - ▼ Lydolf and Møller (1997)
 - ◄ Lydolf and Møller (1997) PF
 - Takeshima et al. (1997)
 - ▷ Bellmann et al. (1999)
 - ◁ Bellmann et al. (1999) PF
 - ◇ Takeshima et al. (2001)
 - ▶ Takeshima et al. (2002)
-
- Fletcher and Munson (1933)
 - - - Churcher and King (1937)
 - · - - Zwicker and Feltkeller (1955)
 - Robinson and Dadson (1956)

ラウドネス関数モデルに基づくELC推定

- ラウドネスの音圧レベル依存性 (ラウドネス関数) を音圧軸の制約に利用することを発案

- ではラウドネス関数モデルのうち、どの式を使う？

$$S = ap^{2\alpha} \quad \dots (1)$$

$$S = a(p^2 - p_t^2)^\alpha \quad \dots (2)$$

$$S = a(p^{2\alpha} - p_t^{2\alpha}) \quad \dots (3)$$

$$S = a\{(p^2 + Cp_t^2)^\alpha - (Cp_t^2)^\alpha\} \quad \dots (4)$$

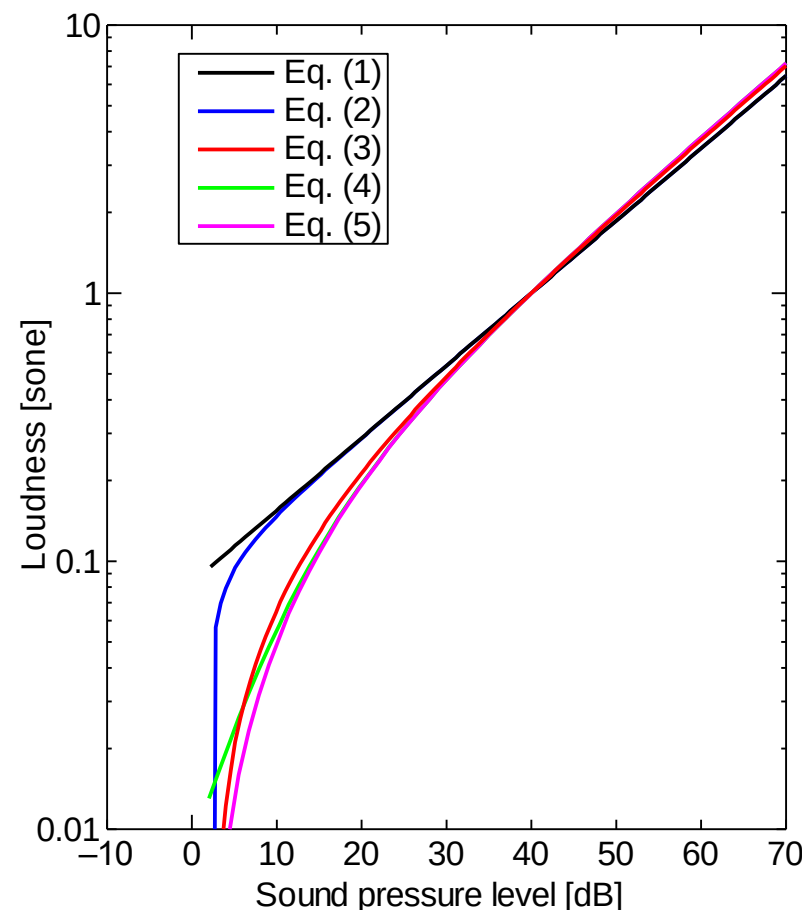
$$S = a\left[\{p^2 + (C-1)p_t^2\}^\alpha - (Cp_t^2)^\alpha\right] \quad \dots (5)$$

S : ラウドネス α : 音の強さに対するべき指数

p : 音圧 a : 比例定数

p_t : その音の最小可聴値

C : 純音を丁度マスクできるノイズとその純音のエネルギー比



ラウドネス関数モデルに基づくELC推定

- ラウドネスの音圧レベル依存性 (ラウドネス関数) を音圧軸の制約に利用することを発案
 - ではラウドネス関数モデルのうち、どの式を使う？

$$S = ap^{2\alpha} \quad \dots (1)$$

$$S = a(p^2 - p_t^2)^\alpha \quad \dots (2)$$

$$S = a(p^{2\alpha} - p_t^{2\alpha}) \quad \dots (3)$$

$$S = a\{(p^2 + Cp_t^2)^\alpha - (Cp_t^2)^\alpha\} \quad \dots (4)$$

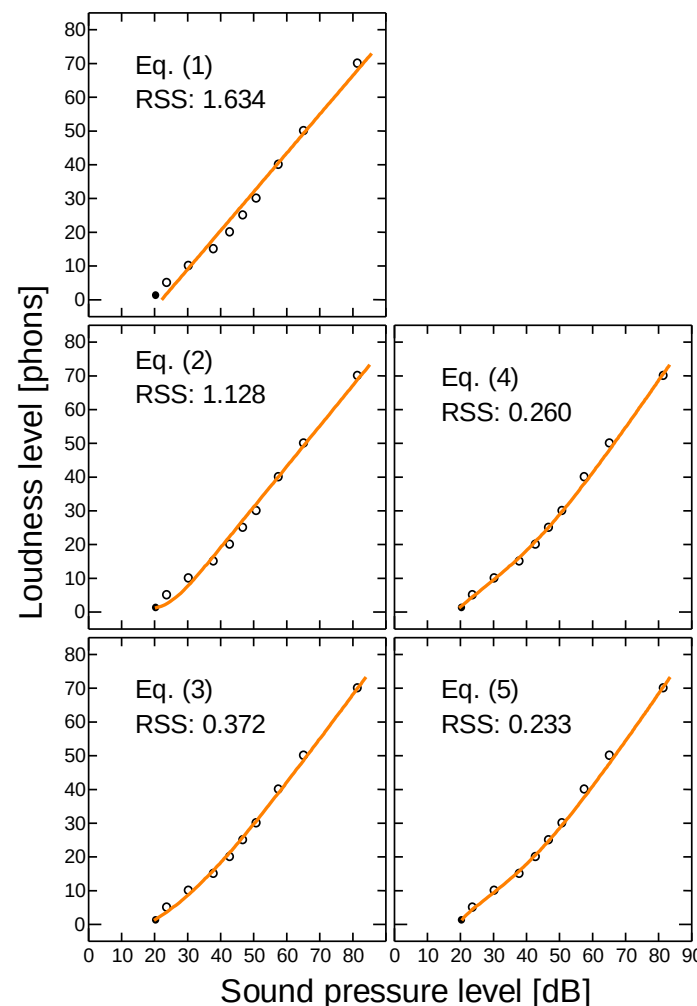
$$S = a\left[\{p^2 + (C-1)p_t^2\}^\alpha - (Cp_t^2)^\alpha\right] \quad \dots (5)$$

S : ラウドネス α : 音の強さに対するべき指数

p : 音圧 a : 比例定数

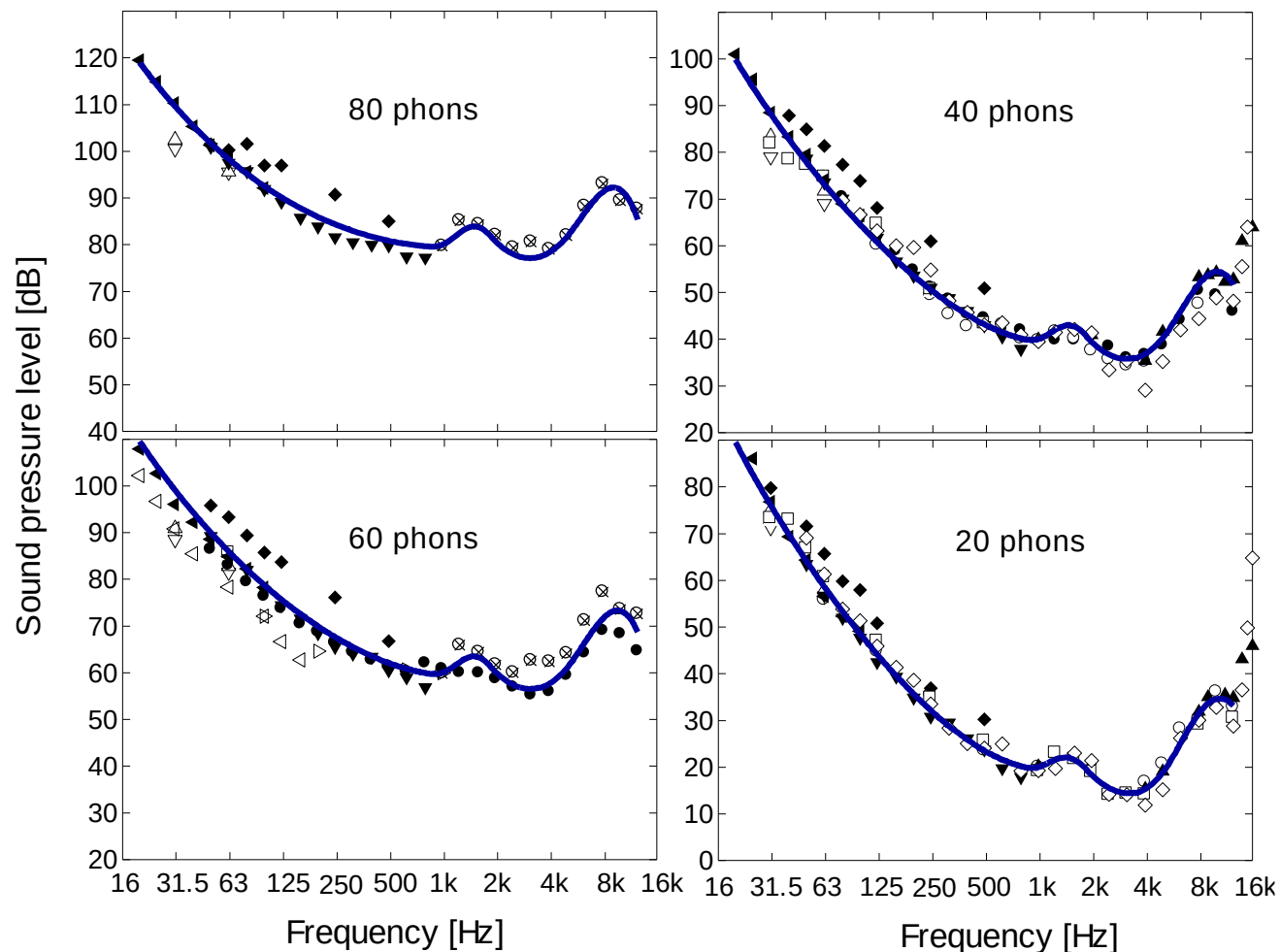
p_t : その音の最小可聴値

C : 純音を丁度マスクできるノイズとその純音のエネルギー比

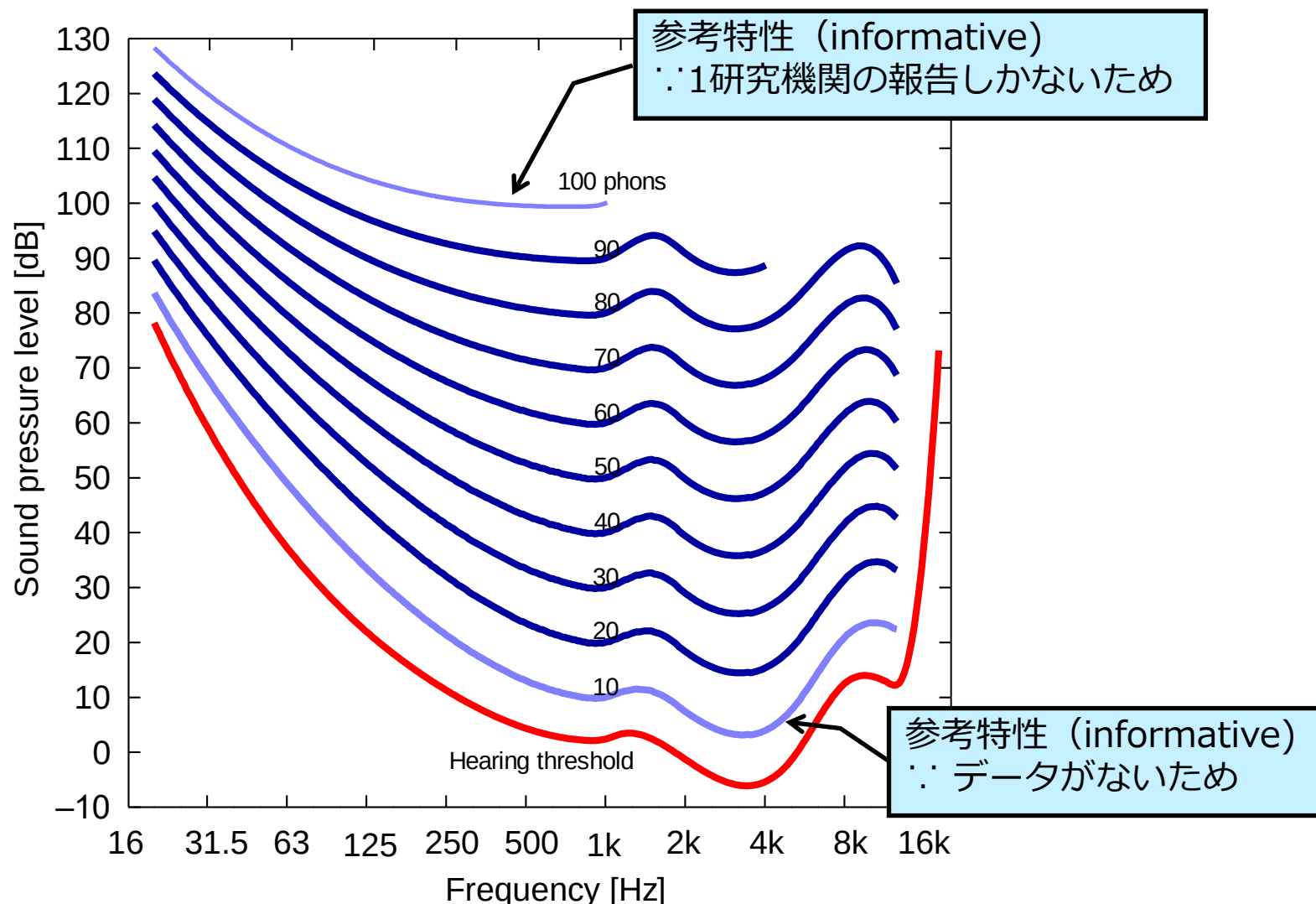


実験データと推定されたELC

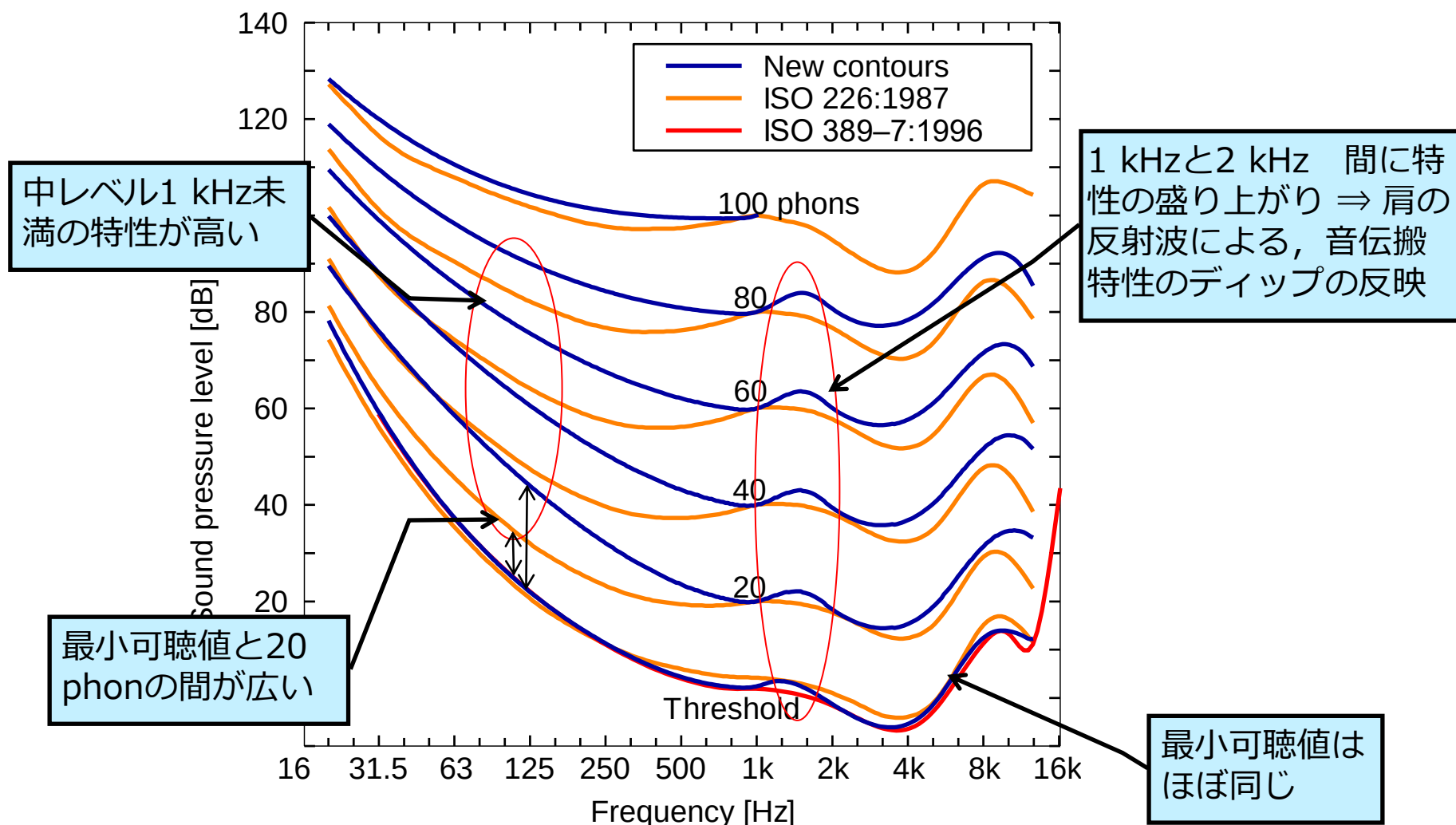
- データから，ラウドネス関数のパラメータを推定して曲線へ



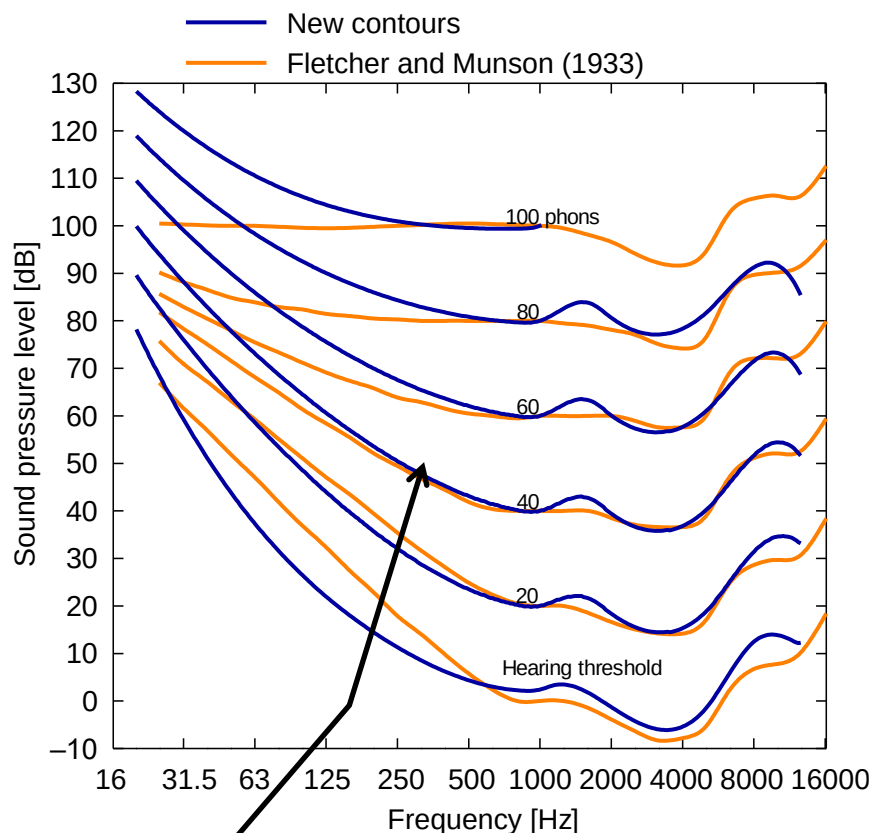
ISO226:2003の等ラウドネスレベル曲線



ISO 226:2003と旧ISO 226の比較



Fletcher-MunsonによるELCとの比較



- ISO226: 2003 は, 中レベルにおいて, むしろ1930年代のフレッチャー・マンソンによるELCに近い
- 20, 40 phon の100 Hz以上において, 両者は比較的よく一致
- 40 phonは騒音計のA特性の基盤



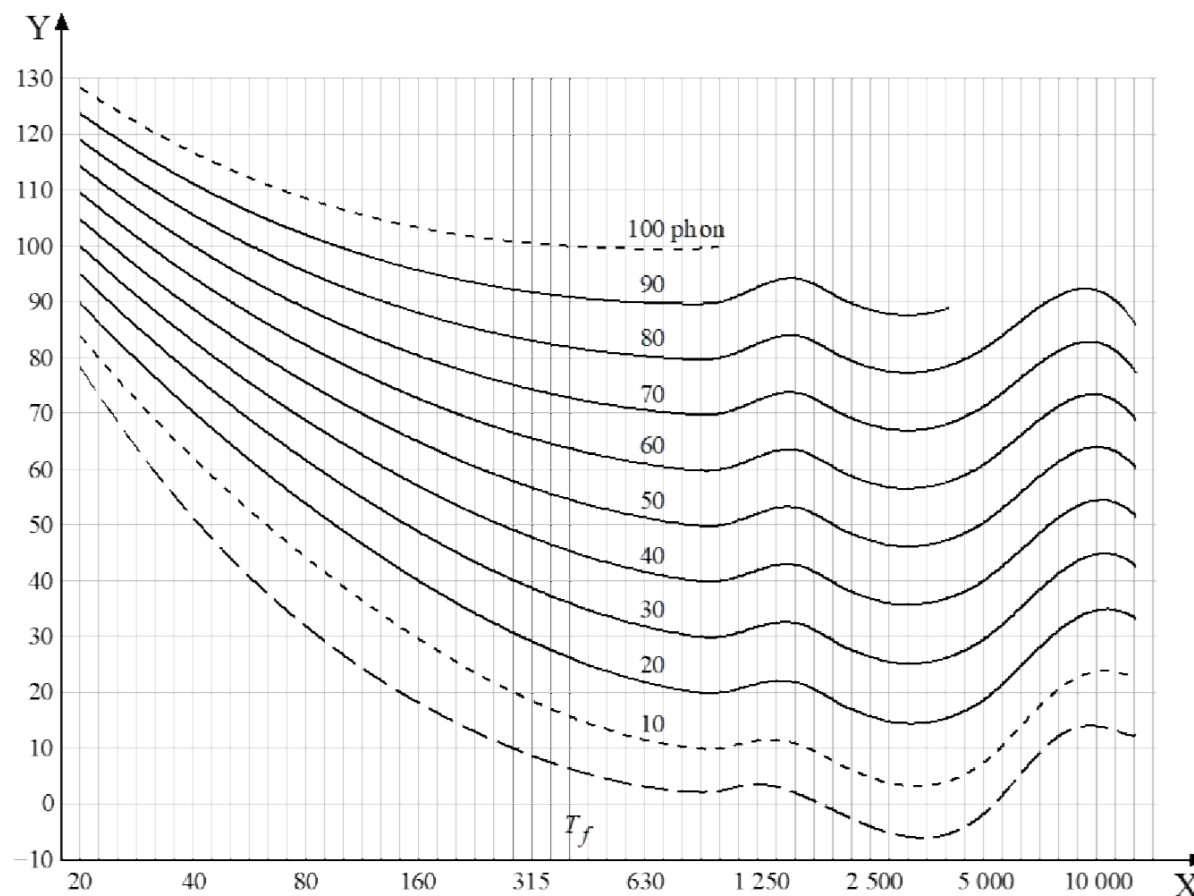
新特性がA特性の根拠を
改めて与えた

ISO 226:2003 から ISO 226:2023 へ

- ISO 226: 2003の画期性: 真の国際規格
 - 新規格は, 日本, 独, デンマーク, 米の密接な共同研究に基づいて, これらの国々と英のデータを使用
 - 旧規格は英国のデータのみ
 - 日本のデータが40%にのぼるとはいえ, 参加各国のメンバーが地道にデータを測定, 解析し, 顔つき合わせて議論した18年間もの努力が実ったもの
- ISO 226: 2023
 - 2019年に最小可聴値に関する国際規格 ISO 389-7が20Hzで0.4dB低下
 - ISO 226: 2003 と20Hzで少しとはいえ矛盾することに
 - そこで……

実質的に ISO 226:2003 と変わらない

- ラウドネス関数のモデルパラメータを再計算
 - このパラメータ値を用いてELCを再度計算
- 2003年版との違いは最大0.6dBに留まっている



ISO 226: 2023掲載
のELC

X: 周波数(Hz)

Y: 音圧レベル(dB)

デジタルテレビジョン放送における 音の大きさの評価と調整

テレビジョン放送の音の大きさ調整法

- アナログTV時代: VU計 (シンプルな電圧計測)
 - 時定数: 300ms (騒音計の時定数FとSの中間)
 - 周波数重み付け補正なし
 - 低周波成分の多い音信号を過大評価
 - 基準値がNHKと民放で異なる
- デジタルTV: ITU-R BS.1770
 - 2000 年: ITU-R*において「番組音のラウドネスを一定にするために使用する新メータの勧告化」に向けた検討を開始
 - 2006 年: 「音声番組のラウドネスと実ピークレベルの測定アルゴリズム」
 - 2011年 第2版: 無音区間の取り扱いを明確化 (実用版)
 - 2012年: 国内のデジタルテレビ放送の音声信号レベル決定基準として採用
 - NHKと民放の双方が使用
 - 2015年 第4版: 22.2chを含む任意の3D音響に対応

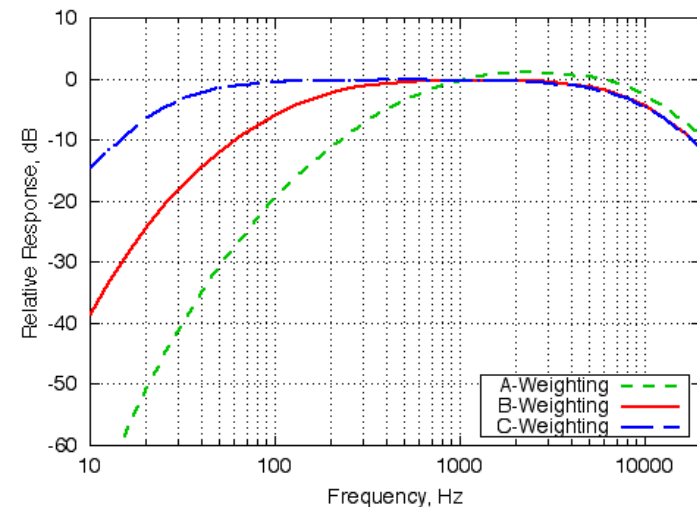
* ITU-R : ITU(国際電気通信連合)の無線通信部門

ISO 226 と ITU-R BS.1770

- では、ISO 226: 2003 と ITU-R BS. 1770 の関係は？
- 実はこれら両者の間に直接的な関係はない！
 - ITU-R BS.1770ではラウドネスを意識したとはいえ、等価騒音レベル (L_{Aeq}) と同様の、音の強さ (=パワー) の時間平均を基盤にしている
- 私の勝手な推定....
 - ITU-Rの検討とISO 226全面改定の時間関係
 - ITU-R検討開始の2000年はISO 226の国際規格改訂が大詰め
 - ISO 226はITU-R BS. 1770 一次案の2006年以前に成立
 - このような時間関係から、ITU-Rの関係者に「ラウドネス」の工学的有用性を示しえた可能性があるのではないか
 - これが、VU計へのこだわりを避け、ラウドネスを基盤する雰囲気を醸成できたのではないかと（すくなくとも日本では）

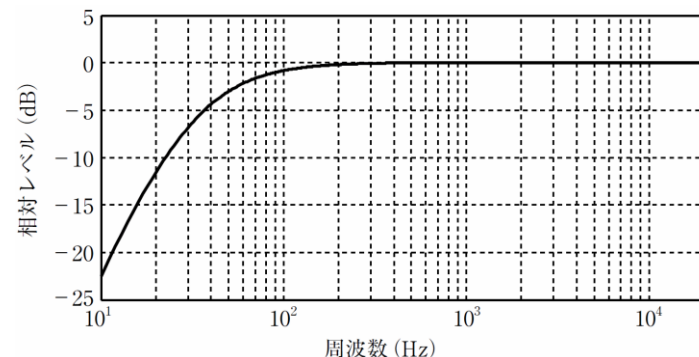
ISO 226 と ITU-R BS.1770の意外な縁

- A特性 B特性 C特性
 - フレッチャー・マンソンによるELCの 40, 70, 100 phon の逆特性に由来
- RLBフィルタ
 - ITU-R BS.1770で低周波数域のラウドネスの過大評価を避けるために使用 (右下図)
 - 名前から明らかなようにB特性由来！
- ISO 226:2003はB特性にも根拠を与えたのだった
 - ISO 226: 2003の策定が，結果として支えになったと言えよう
- 一見分野違いでも，人間の特性である以上，同じ基盤にあることを意味すると考えたい



A特性, B特性, C特性の周波数応答

<http://replaygain.hydrogenaud.io/>



ITU-R 1770 に用いられているRLB
(Revised Low-frequency B-weighting) フィルタ
(松永, JAS Journal 2013 53 (3) による)

ひとにやさしい技術のさらなる高度化にむけて

- ITU-R BS 1770 適用以来, CMなどで突然テレビの音が大きくなりあわてて音量を絞ることが少なくなった
- 臨場感はラウドネスが大きいほど画角が広いほど高まる
 - しかし強い刺激の追求は, ひとにやさしいといえない*
 - 一方, 迫真性では, ほどよい刺激が高い値を示す*
- ラウドネスに関する基礎研究が, ひとにやさしく高い迫真性を実現する技術の礎になれたなら大変うれしいこと
- ただしITU-R BS 1770 でいうラウドネスは, ISO 532 と違い, ラウドネス知覚過程を反映したものではない
 - L_{Aeq} と同様に周波数重み付けした「音の強さ」の時間平均
 - 今後, 本質的なラウドネス知覚過程の反映により, 一層ひとにやさしい技術の実現も可能であろう
- そうなれば, ひとの情報処理過程とその工学応用に強い興味を持つ筆者にとって更にうれしいこと

* 行場次郎, “臨場感と迫真性の感性心理学的特性,” 信学会誌, 101, 793–797 (2018).

謝辞

- 本研究の全共同研究者と関係各位に深く感謝する
 - 曽根敏夫博士と研究室仲間
 - 竹島久志博士, 熊谷正純博士, 小澤賢治博士ほか
 - 電総研(産総研)の歴代リーダーと担当者
 - 三浦甫博士, 佐藤宗純博士, 藤森威氏, 蘆原郁博士ほか
 - ISO TC/43 PTメンバー
 - Dr. Hellman R (米), Dr. Møller H (丁), Dr. Mellert V (独), Mr. Nielsen L (丁) ほか
- 科研費
 - 一般研究(C) 01550346 (1989-90)
 - 総合研究(A) 02302049 (1990-91)
 - 試験研究(B) 0355089 (1991-92)
- NEDO
 - 国際共同研究グラント (2000-02)
- サウンド技術振興財団
現: カワイサウンド技術・音楽振興財団
 - 研究助成 (1986, 87)

主な参考文献

1. 鈴木陽一, 竹島久志, “人の等ラウドネス曲線の測定と国際規格化,” 電気学会誌, 124, 715–718 (2004).
2. 鈴木陽一, 竹島久志, “最小可聴値と等ラウドネス曲線をめぐる最近の話題,” 音響学会誌, 58, 130–137 (2002).
3. 黒住幸一, 岡本幹彦, “放送局用の「リアルタイムラウドネスレベルメータ」の開発と規格化の動向,” 映像情報メディア学会誌, 60, 1012–1017 (2006).
4. 入交英雄, “放送におけるラウドネスとは,” 映像情報メディア学会誌, 66, 310–311 (2012).
5. 松永英一, “デジタルテレビ放送におけるラウドネス運用規定の国内標準化,” JAS Journal, 53, 22–29 (2013).
6. 松永英一, 南澤貞巳, 入交英雄, “ラウドネスメータによる放送音声のレベル監視：民放連での取り組み,” 音響学会誌, 70, 345–351 (2014).
7. https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2003/pr20031022/pr20031022.htm (参照2021-12-13) .
8. Y. Suzuki and H. Takeshima, “Equal-loudnesslevel contours for pure tones,” J. Acoust. Soc. Am., 116, 918–933 (2004).
9. H. Fletcher and W. A. Munson, “Loudness, its definition, measurement and calculation,” J. Acoust. Soc. Am., 5, 82–108 (1933).
10. D. W. Robinson and R. S. Dadson, “A redetermination of the equal-loudness relations for pure tones,” Br. J. Appl. Phys., 7, 166–181 (1956).
11. K. Ozawa and M. Miyasaka, “Effects of reproduced sound pressure levels on auditory presence,” Acoust. Sci. & Tech., 25, 207–209 (2004).
12. 行場次朗, “臨場感と迫真性の感性心理学的特性,” 信学会誌, 101, 793–797 (2018).