

# 動作範囲が広くノイズに堅牢な コンデンサマイクロフォン

僕のノイズ  
が消える  
って本当？

マイク



筑波大学 システム情報系  
准教授 海老原 格

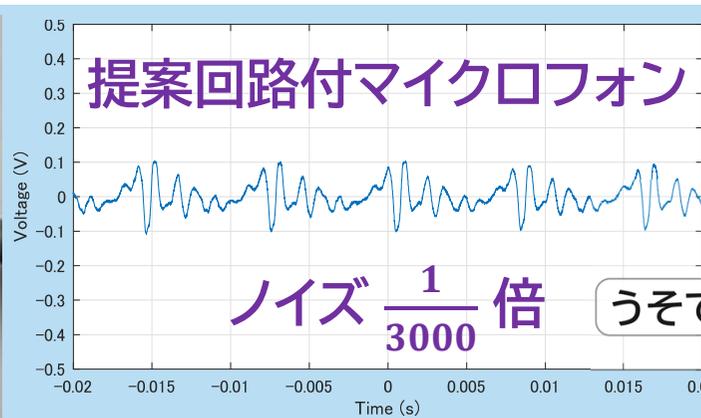
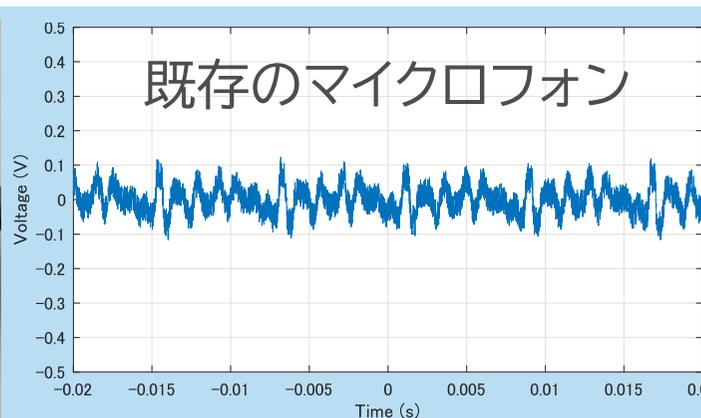
2024年11月12日

概要

# あらゆるセンサのノイズを減らす新技術

マイクロフォンの例. 提案する小型回路で大幅にノイズ改善!

意図的な電源ノイズ環境下  
での音声波形



うそでしょ!?

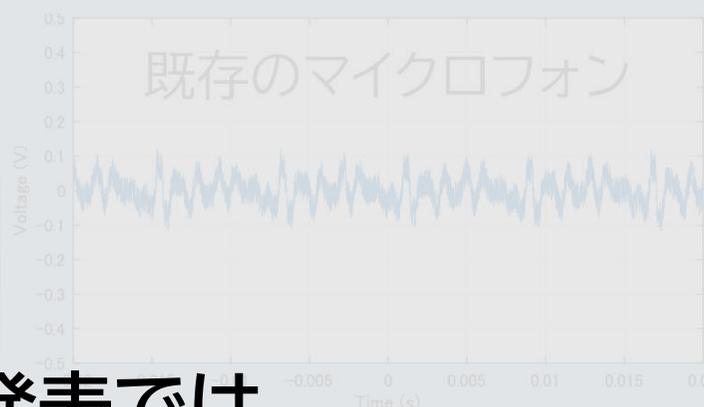


概要

# あらゆるセンサのノイズを減らす新技術

マイクロフォンの例. 提案する小型回路で大幅にノイズ改善!

意図的な電源ノイズ環境下  
での音声波形



本発表では、

この原理について解説していきます



## 気になるポイント

○センサには、なぜノイズが重畳するのか？

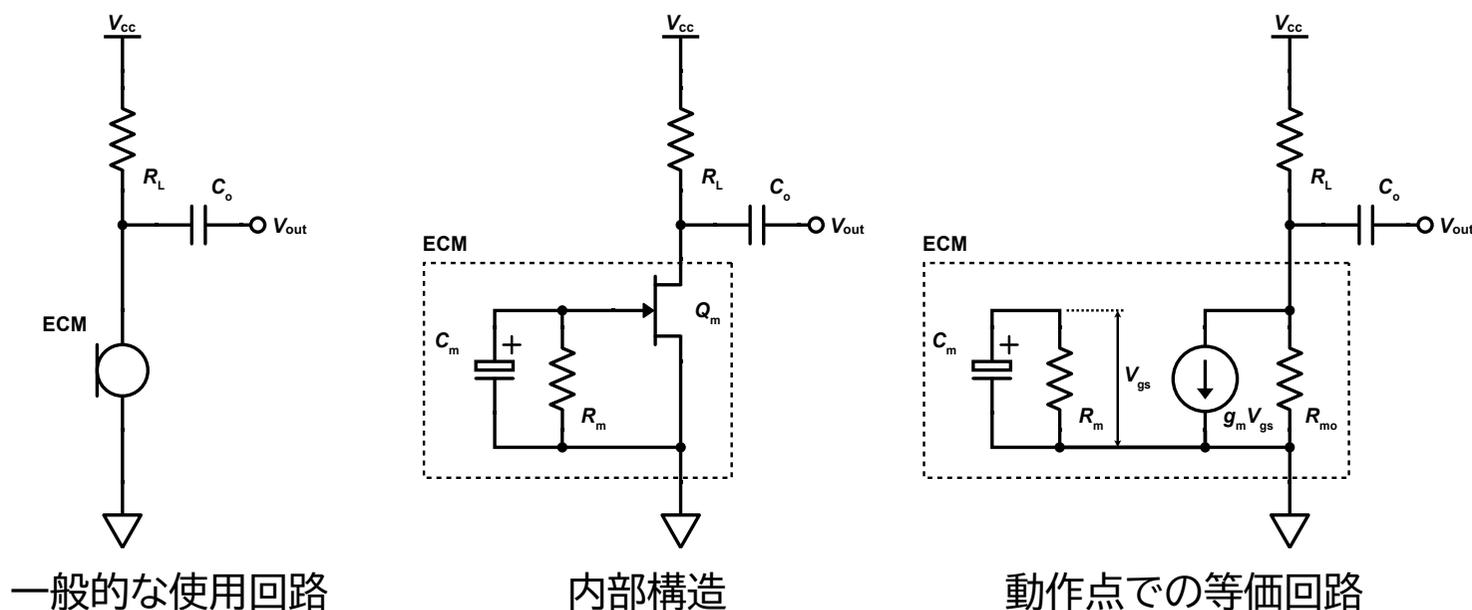
— ノイズが重畳しやすいセンサの特徴 —

○ノイズに堅牢な本技術は、どう実現するか？

— 本技術の種明かし —

## マイクロフォン(ECM)の内部構造と等価回路

ECMの解析をするため、まずは等価回路を考える。



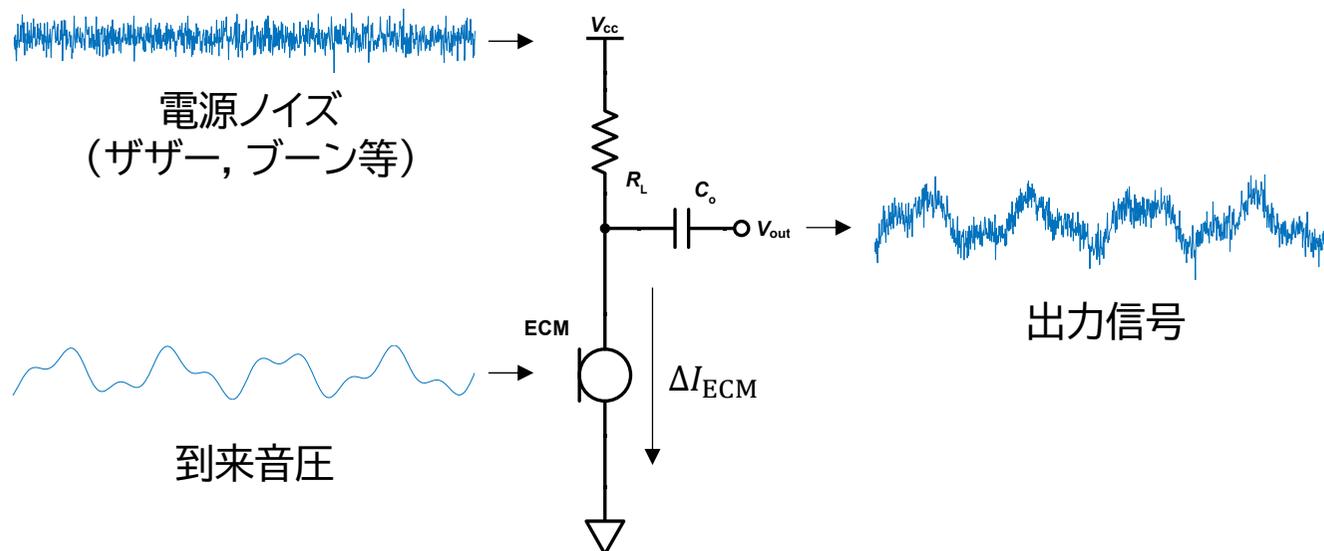
すなわち、ECMは、固定抵抗 $R_{mo}$  + 音圧制御電流源  $g_m V_{gs}$  (I)とみなせる  
**ノイズが重畳しやすい理由①**: 電流源にみなせて出力インピーダンスが高い  
ノイズを相殺するのではなく、そもそもノイズが重畳しない回路を考える。

# ノイズが重畳する理由

マイクロフォン(ECM)の既存回路は, 電源ノイズに敏感!

$$\Delta V_{\text{out}} = \Delta V_{\text{CC}} - R_L \cdot \Delta I_{\text{ECM}}$$

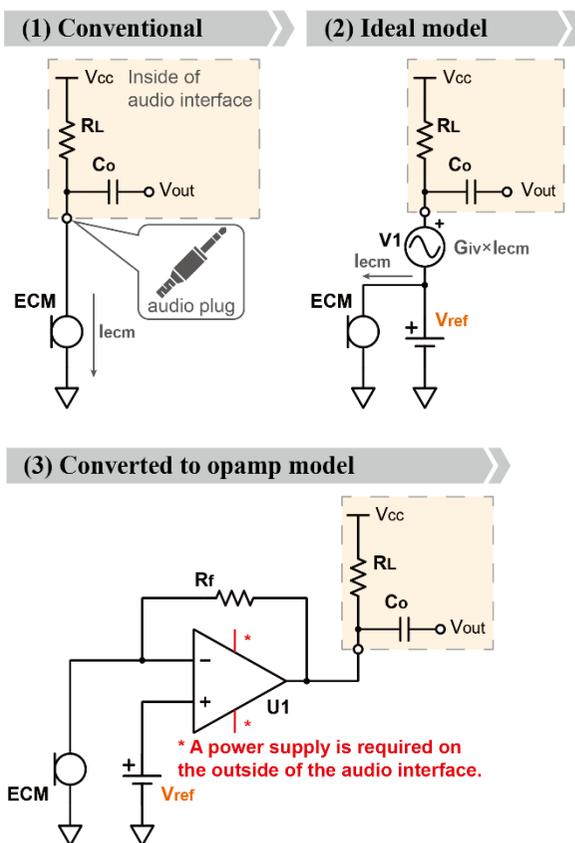
のように,  $\Delta V_{\text{out}}$ の項に $\Delta V_{\text{CC}}$ があり, マイク信号に電源ノイズが重なる.



ノイズが重畳しやすい理由②: 出力電圧の式に電源ノイズ $\Delta V_{\text{CC}}$ が入っていた

# 提案回路の導出過程 (1/3)

そこでノイズが重畳しない回路を理想モデルから考えていく



- (1)従来型の回路は、ノイズが重畳しやすい特性を持つ。オレンジ色の部分は、オーディオ機器の端子内部の回路を示している。

## ☆回路変形のポイント

(1)の回路ではノイズに弱いので、(2)の電圧源に変形する。ただし、ECMは、 $V_{ref}$ が1Vを超える電圧でないことと推奨動作をしない点に注意が必要。

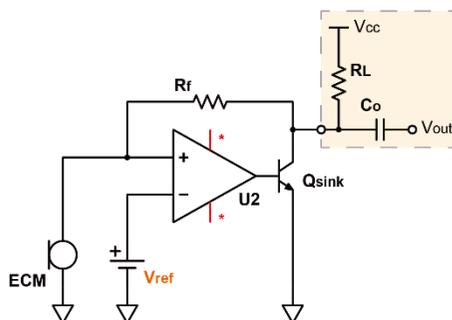
- (2)電圧源に置き換えた雑音に強い理想モデル。  
ECMに基準電圧 $V_{ref}$ が供給されている。電圧源V1は、ECMに流れる電流に比例した電圧を出力するアンプ。これで電圧出力型の回路となった。  
( $\Delta V_{out}$ の項から $\Delta V_{cc}$ が消える)

- (3)理想モデルをオペアンプで実装した場合のモデル。  
このモデルでは、オペアンプへの電源供給と基準電圧 $V_{ref}$ の供給が必要である。(×電源ノイズも気になる)  
→なんとかして信号線だけで動作する回路を考えたい。

## 提案回路の導出過程 (2/3)

回路変形の勘所は、可変シャントレギュレータにあった！

(4) Converted to open collector model



(4)さらなる変形のための中間形態

(3)の変形. トランジスタを1つ追加し, オペアンプの入力極性も反転している. 動作は同じ.

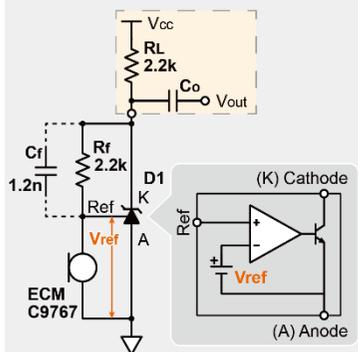
### ☆回路変形のポイント

(3), (4)は, オーディオ端子の外(橙色の外)に電源や基準電圧Vrefが必要で非常に不便(X)。

(4)の構造が可変シャントレギュレータの内部等価回路と同じであることに気が付き, (5)への回路変形。

(5) List of proposed methods

### Shunt regulator type



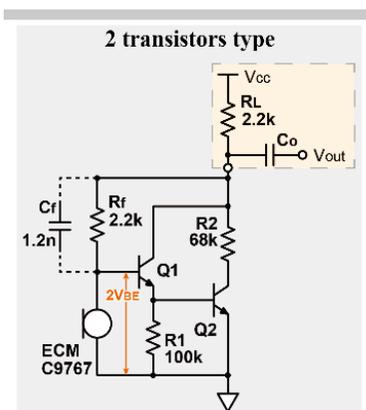
(5)Shunt regulator type

可変シャントレギュレータを使えば, シンプルに.

可変シャントレギュレータの等価回路は, 図の吹き出しで示す部分であり, (4)と等価回路は同じ. 等価回路は同じだが, (4)と異なり, オペアンプの電源Vccと基準電圧Vrefが不要となり, 可変シャントレギュレータ1個で解決. なお, 可変シャントレギュレータは, 基準電圧が1Vを超えるものを使用する.

## 提案回路の導出過程 (3/3)

熱雑音を低減するため、少数のトランジスタ・タイプも提案

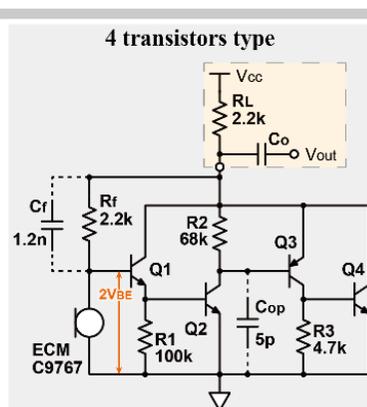
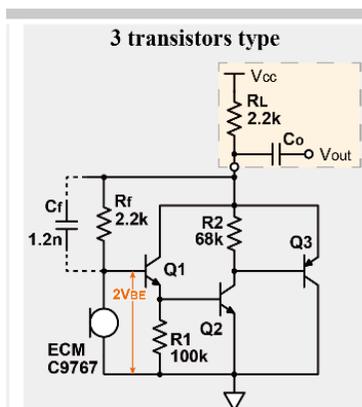


### ☆回路変形のポイント

加えて、トランジスタで組む方法も提案。  
少数のトランジスタ構成に変更し、熱雑音を低減して利用範囲を拡大した。少数のトランジスタにするため、可変シャントレギュレータの内部とは異なる回路で実現した。

### 2 transistors type

基準電圧Vrefの生成に、トランジスタのVbeを利用。  
Vbe ≒ 0.6Vは、トランジスタのコレクタ・エミッタ間での動作に必要な電圧である。ECMIは、動作に電圧1V以上を要するので、ダーリントン接続型(2段)を採用して、  
2Vbe ≒ 1.2Vの電圧がECMIに掛かるように設計した。  
(実際の回路では、Q1のIcが少なく、Vrefは実測で約1.0V。なお、抵抗R1の値を小さくすることで、Q1のIcを増加させ、Vrefを1.0Vよりもやや高く調整可能。)

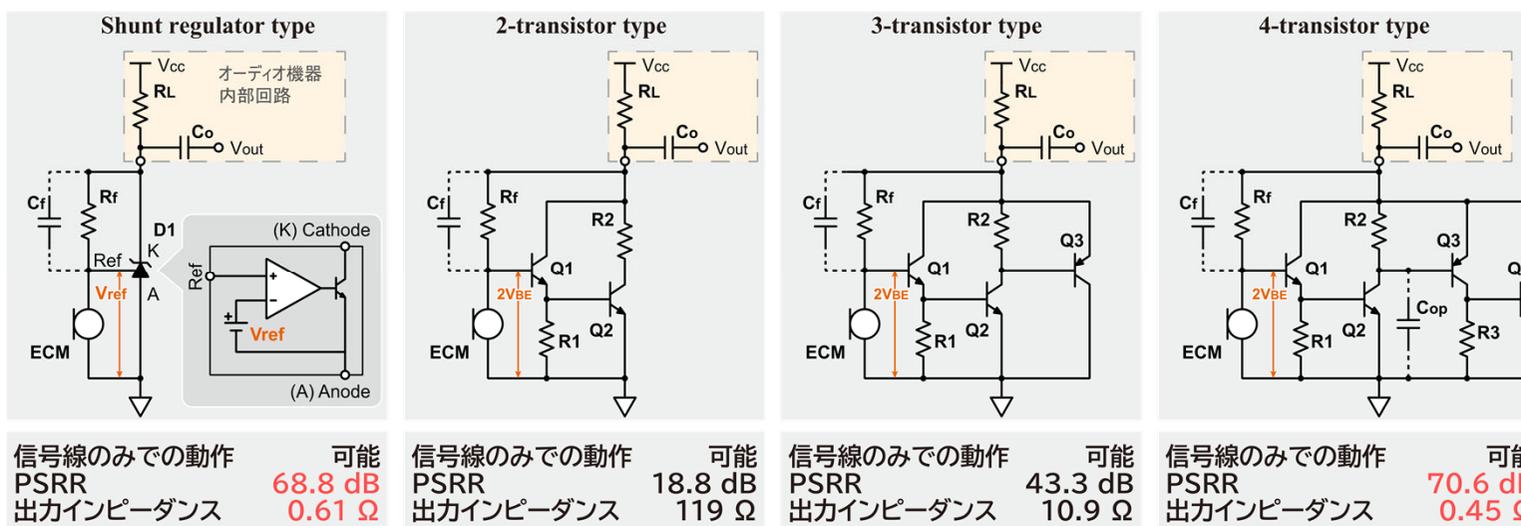


### 3 transistors typeと4transistors type

Q3やQ4を追加。これは、Q1とQ2のIcを一定に保つための定電流回路である。Q3やQ4により、Vrefがさらに安定し、結果として、出カインピーダンスやPSRRが性能向上する。

# これが本技術の提案回路

使いたい用途に合わせて4種類から回路を選択できる



信号線のみで動作する回路を作成

用途に合わせて、回路を選択できるようにいくつかのタイプを用意。  
回路の特性が、それぞれ異なる。

## 気になるポイントに対する回答

○センサには、なぜノイズが重畳するのか？

— ノイズが重畳しやすいセンサの特徴 —

- (1) センサは「電流源」で出力インピーダンスが高い
- (2) 出力電圧の式に電源ノイズ $\Delta V_{cc}$ が入っていた

○ノイズに堅牢な本技術は、どう実現するか？

— 本技術の種明かし —

- (1) 出力インピーダンスを下げる
- (2) 出力電圧の式にノイズが入らない回路を作る

## 気になるポイント②

○設計のパラメータはどう決めるのか？

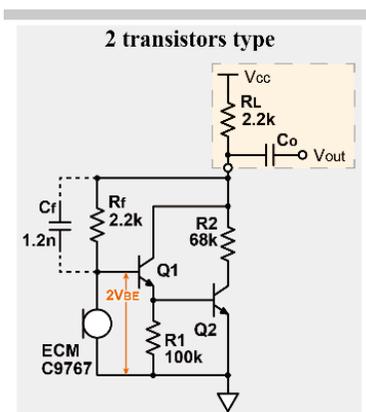
— 設計は難しいのか？ —

○実測の特性はどうなのか？

— 十分な性能が出るのか検証 —

# 設計のパラメータ(1/2)

増幅率は、抵抗1本の値で決まりシンプルである



提案された各回路においては、抵抗 $R_f$ によってI-Vゲインが決まる。ECMの電流 $i_{ECM}$ の大部分が、抵抗 $R_f$ に流れると仮定すると、トランスインピーダンス・ゲインは、

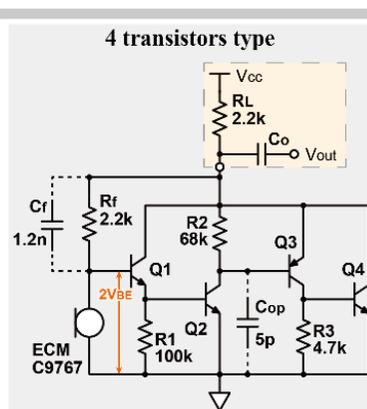
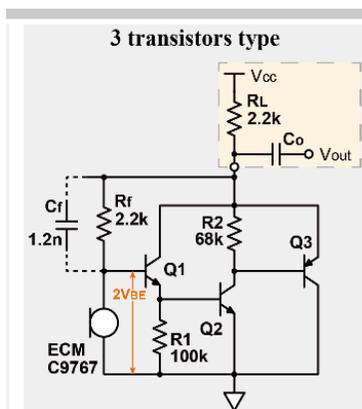
$$R_f \text{ (V/A)}$$

と表現できる。ただし、 $R_f$ の値は、制限なく決定できるわけではない。

具体的には、抵抗 $R_f$ は値が過大であると、回路が正常に動作しなくなるため、適切な値を慎重に選定する必要あり。理想的な条件では、

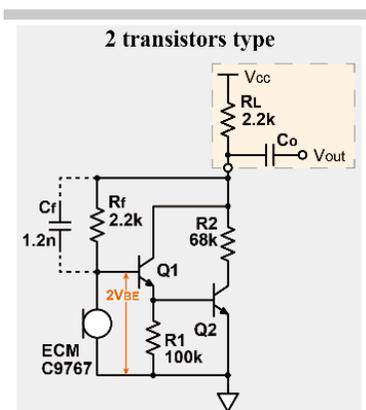
$$V_{CC} \gg V_{ref} + i_{ECM}(R_f + R_L)$$

を満たすように、 $R_f$ の値は決定する。実際の設計時には、提案回路の消費電流も考慮し、余裕を持った設計が望ましい。この式を満たさない場合、出力波形が飽和する。



## 設計のパラメータ(2/2)

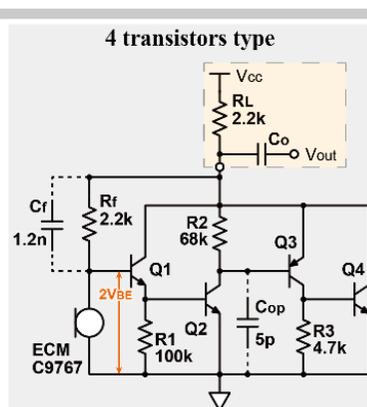
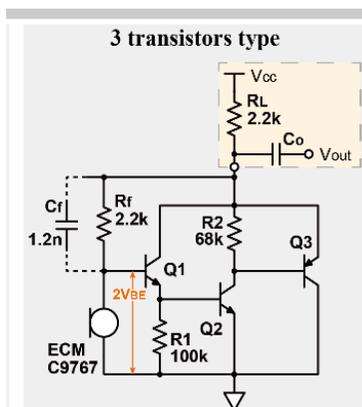
使用帯域(カットオフ周波数)は, 抵抗・コンデンサ1個で決定できる



提案手法のカットオフ周波数 $f_{-3dB}$ は,  $R_f$ と $C_f$ によって決定される. 具体的には,

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \text{ (Hz)}$$

となる. ECMに使用する場合,  $f_{-3dB}$ を可聴域よりも少しだけ高い周波数に設定することが望ましいと考えられる. アンプ回路は一般に, 帯域が広いと, 意図しない発振を引き起こしてしまう可能性がある.

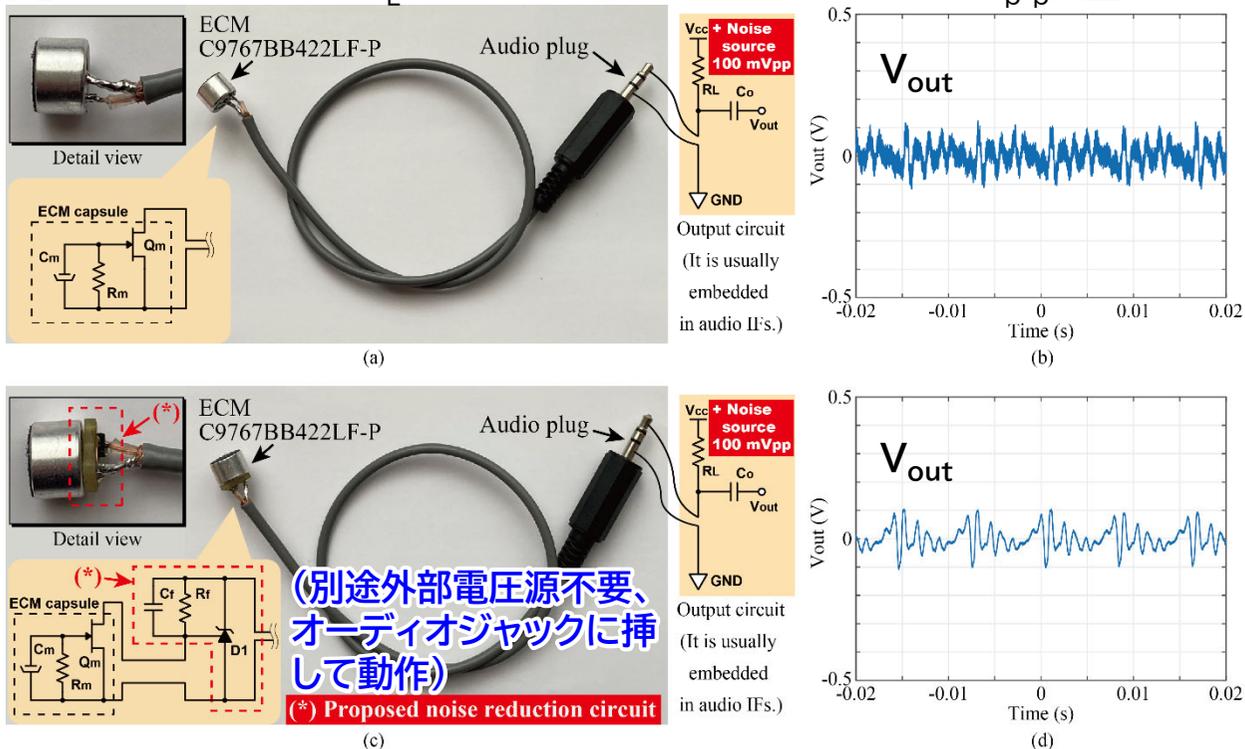


$C_f$ や $C_{op}$ は, 発振防止用のコンデンサとして機能. ECMからオーディオインターフェイスまで離れている場合には, 長いケーブルで容量性負荷が発生し, 発振しやすくなる. そのような意図しない発振を防ぐ役目がある. この発振防止用のコンデンサは, 実用上入れた方がよい.

# 電源ノイズ除去効果（実測結果1/5）

電源ノイズ除去の効果をも、使用シーンを想定したデモで確認

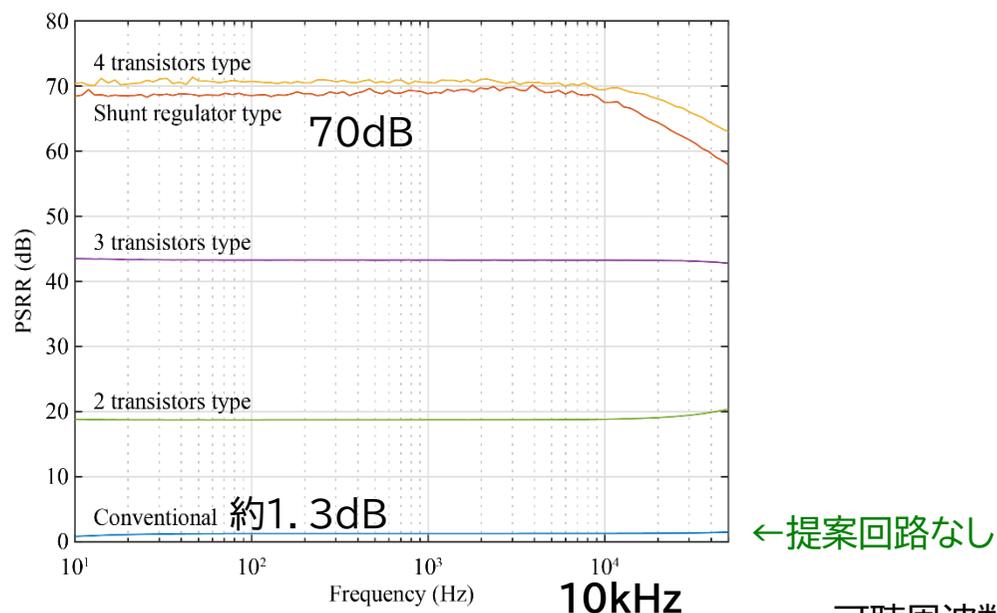
■測定条件:  $V_{cc}: 2.7V$   $R_L: 2.2k\Omega$  電源ノイズ  $\Delta V_{cc}: 100mV_{p-p}$  重畳



マイクロフォンユニットを用いて音声信号を集音した場合の信号波形例を示す図

## 電源ノイズ除去比（実測結果2/5）

電源ノイズは、最大1/3000倍に除去されることを確認



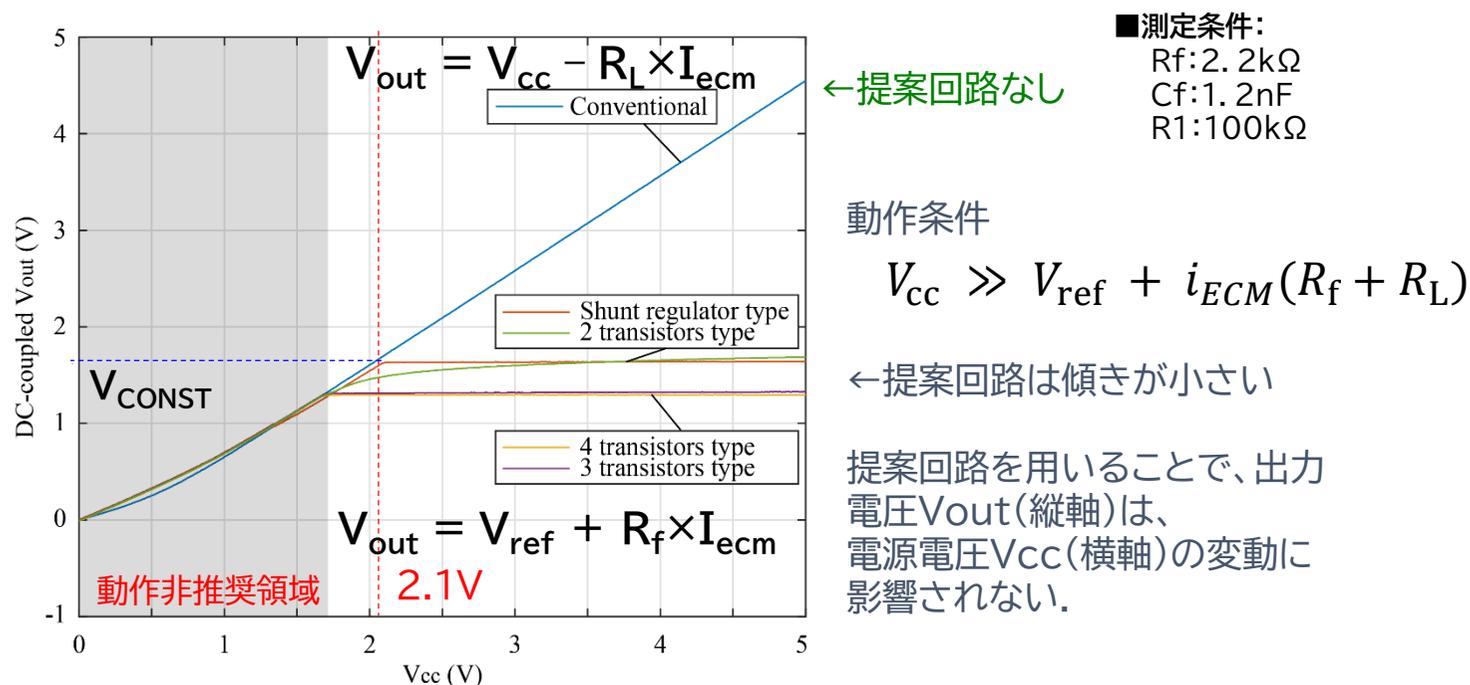
電源電圧変動除去比を実測した結果例を示す図

可聴周波数帯域：  
20-20kHz

例えば、可変シャントレギュレータ型・4-トランジスタ型を用いることで、PSRRを70dB改善でき、すなわち電源ノイズの振幅を1/3000程度に低減

# 電源電圧と出力電圧との関係(実測結果3/5)

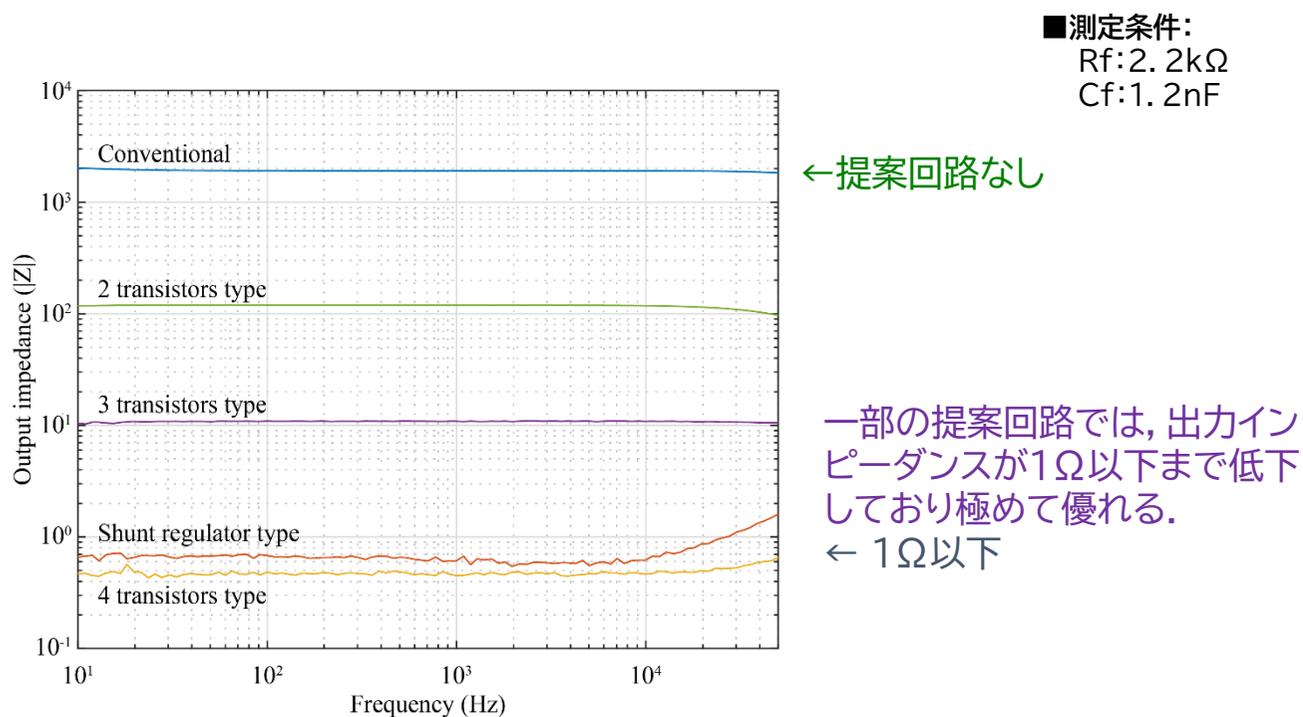
一般的なオーディオジャックで動作するよう設計できている



オーディオジャックの電源電圧Vccと出力端子Voutから出力される出力電圧の関係を実測した結果例

# 出カインピーダンス低減効果(実測結果4/5)

電源ノイズだけでなく伝送線路ノイズにも堅牢



電子回路における出カインピーダンスを実測した結果例

# ノイズフロア, THD: 全高調波歪 (実測結果5/5)

提案回路4種類中3種類は, 提案回路がノイズを出さない

■測定条件:  
Rf: 2.2kΩ  
Cf: 1.2nF

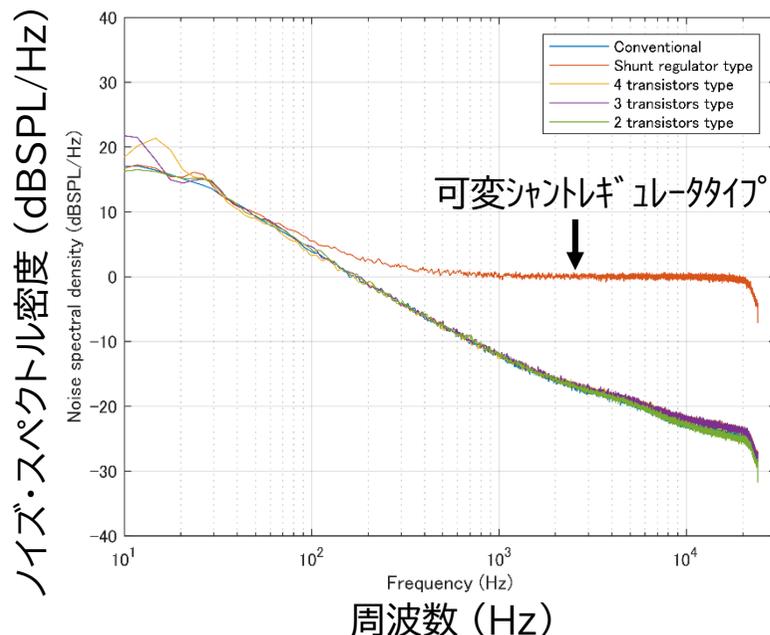


Table 6.1: Methods Comparison

Parameter	PSRR	Output Z	Noise floor*	THD
Test conditions	1 kHz	1 kHz	0-24 kHz	**
Unit	(dB)	( Z )	(dB) (dBA)	(dBc)
Conventional	1.29	$1.91 \times 10^3$	<b>33.0</b> <b>23.1</b>	<b>-37.1</b>
Shunt regulator type	<b>68.8</b>	<b>0.61</b>	43.8 40.3	-34.7
4-transistor type	<b>70.6</b>	<b>0.45</b>	<b>34.2</b> <b>23.4</b>	-33.0
3-transistor type	43.3	10.9	<b>34.5</b> <b>23.5</b>	<b>-37.0</b>
2-transistor type	18.8	119	<b>33.0</b> <b>23.2</b>	-35.2

\* The noise floor includes noise from the microphone and PCM recorder.

\*\* The total harmonic distortion (THD) includes distortion from the acoustic calibrator, microphone, and PCM recorder.

ノイズフロアを実測した結果例

可変シャントレギュレタタイプ以外は, ノイズ増加なし.

トランジスタタイプはノイズを出さない新構造を提案するもの。  
トランジスタタイプの回路を元に, 低ノイズ可変シャントレギュレタ (ワンチップIC) を製造できる→メーカー募集.

各手法を表で比較.  
THDの若干悪化が一部見られる.  
(THDを求めた設計をしていないため.)

## 気になるポイントに対する回答②

○設計のパラメータはどう決めるのか？

— 設計は難しいのか？ —

抵抗1本・コンデンサ1個で設計でき簡単.

○実測の特性はどうなのか？

— 十分な性能が出るのか —

あらゆる角度から検証して優れた性能を示した.

## 最後に

○新技術の特徴・競合技術との比較

— 本技術の優れた点は？ —

○実用化に向けた課題の解決

○想定される用途

○企業への期待

# 技術比較～競合技術にはない優位性がある

## センサの根元につける「だけ」で使える技術は無かった！

	本発明	競合技術① (演算増幅器でノイズキャンセル)†	競合技術② (反転型電流－電圧変換回路)‡
構成	可変シャントレギュレータ (演算増幅器+トランジスタ) リファレンス端子:信号電流入力、抵抗 Rbによる負帰還	演算増幅器 非反転入力端子(+):信号入力、RC 並列回路による負帰還 反転入力端子(-):ノイズ成分入力、 RC並列回路による負帰還	反転型演算増幅器 非反転入力端子(+):基準電圧 反転入力端子(-):信号電流入力、 抵抗による負帰還
得られる特性	利得:2200(Rb=2.2kΩ時) 出力インピーダンス:≦1Ω PSRR:70dB(10kHzまで周波数依存 性無し)	電源ノイズに対する高い耐性(ノイズ 成分を演算増幅器でキャンセル) ただし性能を得るには、素子のマッ チングが必要	PSRR:>50-90dB ※条件付 周波数帯域:100-10kHz 消費電力:96μW(バッファ込み)
適用分野	電流出力型センサ(特に、圧力計、流量計、 マイクロフォン)	マイクロフォン	マイクロフォン
特徴	シンプルな回路構成 <u>別途外部電圧源が不要、オーディオ ジャックに挿して動作</u> センサ高感度化 電流出力型センサと直接接続	<u>別途外部電圧源が必要</u> 多くの外付け回路部品が必要	<u>別途外部電圧源が必要</u> 電流出力型センサと直接接続

†特許第5319368号(2013.7.19登録)

‡Michael W. Baker and Rahul Sarpeshkar, IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 38, NO. 10, pp.1671-1678, 2003.

21/26

# 実用化に向けた課題をクリア

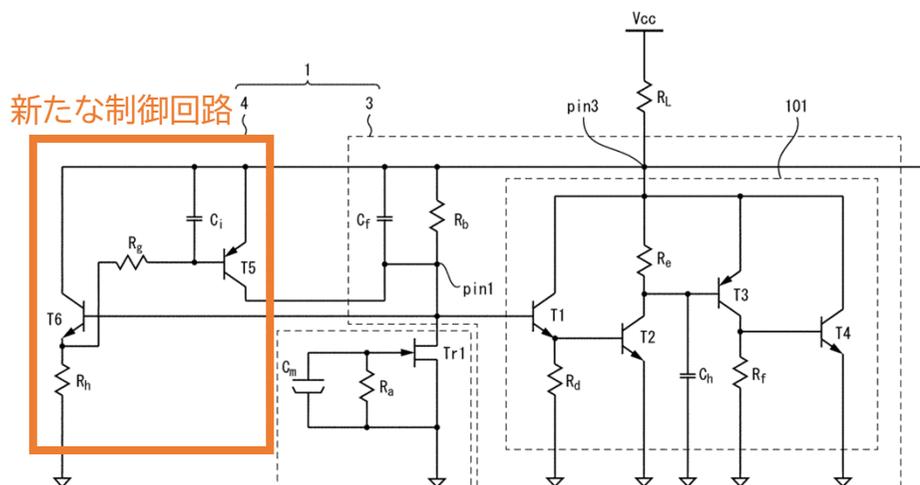
動作範囲を制約する条件式が「低電圧化」の課題になっていた

課題だった動作条件

$$V_{CC} \gg V_{ref} + i_{ECM}(R_f + R_L)$$

抵抗 $R_f$ は値が過大であると、回路が正常に動作しなくなるため、適切な値を慎重に選定する必要があった。

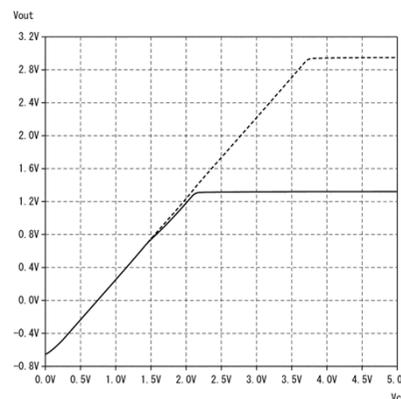
この式を満たさない場合に、出力波形が飽和する課題があった。



新たな制御回路を追加した実施例の1つ  
(実施形態は数多くあり)

昨今の省電力デバイスでも使用できるよう工夫したもの

「新たな制御回路」を入れることで、問題を解決した。



← 新たな制御回路なし時の  
 $R_f$ が過大な例

← 新たな制御回路あり  
低電圧化できている

## あらゆるセンサ用途に好適

ノイズで困らない体験を, エンジニア・消費者へ

- マイクロフォン・圧電センサ・圧力センサ・加速度センサ・光学センサ など.
- 電源ノイズや伝送線路ノイズ(ザザー・ブーン等)が気になるセンサ用途.
- ケーブルで延長するセンサや, 電源ノイズが気になるセンサへの利用.

## 企業様のライセンス利用を募集

- センサを製造・販売するメーカー  
(マイクに限らず, 圧力センサ・光学センサなど)  
ライセンス利用を募集.
- 本技術のワンチップIC化へのライセンス利用.
- ノウハウを蓄積しておりますので, 設計のご相談も  
お気軽にどうぞ.
- また, 大学—企業との共同研究も可能.

## 本技術に関する知的財産権

発明の名称 : 変換回路  
出願番号 : 特願2024-041547  
出願人 : 筑波大学  
発明者 : 於保拓高, 海老原格, 若槻尚斗

発明の名称 : 変換回路、及び電子回路  
公開番号 : WO 2024/128156 A1  
出願人 : 筑波大学  
発明者 : 於保拓高, 海老原格, 水谷孝一, 若槻尚斗

お問い合わせは、本学産学連携まで

筑波大学産学連携企画課

TEL : 029-859-1659

FAX : 029-859-1693

e-mail : [event-sanren@un.tsukuba.ac.jp](mailto:event-sanren@un.tsukuba.ac.jp)

ライセンス利用 / 共同研究 / 技術相談 /  
関連特許の紹介 / 公開・未公開情報の提供 など