

アナログの面白さ

世界で通用するアナログのプロエンジニアを目指そう！

2017.4.11

群馬大学非常勤講師

東京電機大学非常勤講師

中谷 隆之

本日の内容

- 1)アナログ技術の学び方
- 2)アナログ回路設計の手順
- 3)オーディオに見る興味深いアナログ的话题
- 4)その他、興味深いアナログ的な話題

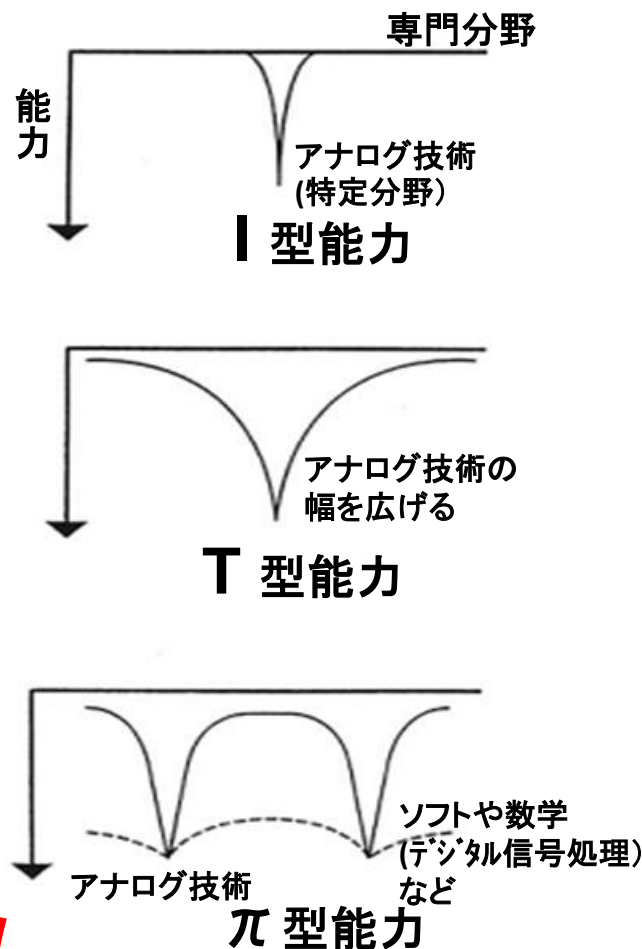
アナログ技術習得のアプローチあれこれ

アナログ技術習得は、自分にあった分野や切り口から入り、徐々に幅を広げていこう
理解は全体像イメージをつかんでから細部理解へ

徐々に技術の幅を広げよう

アナログ技術習得アプローチあれこれ

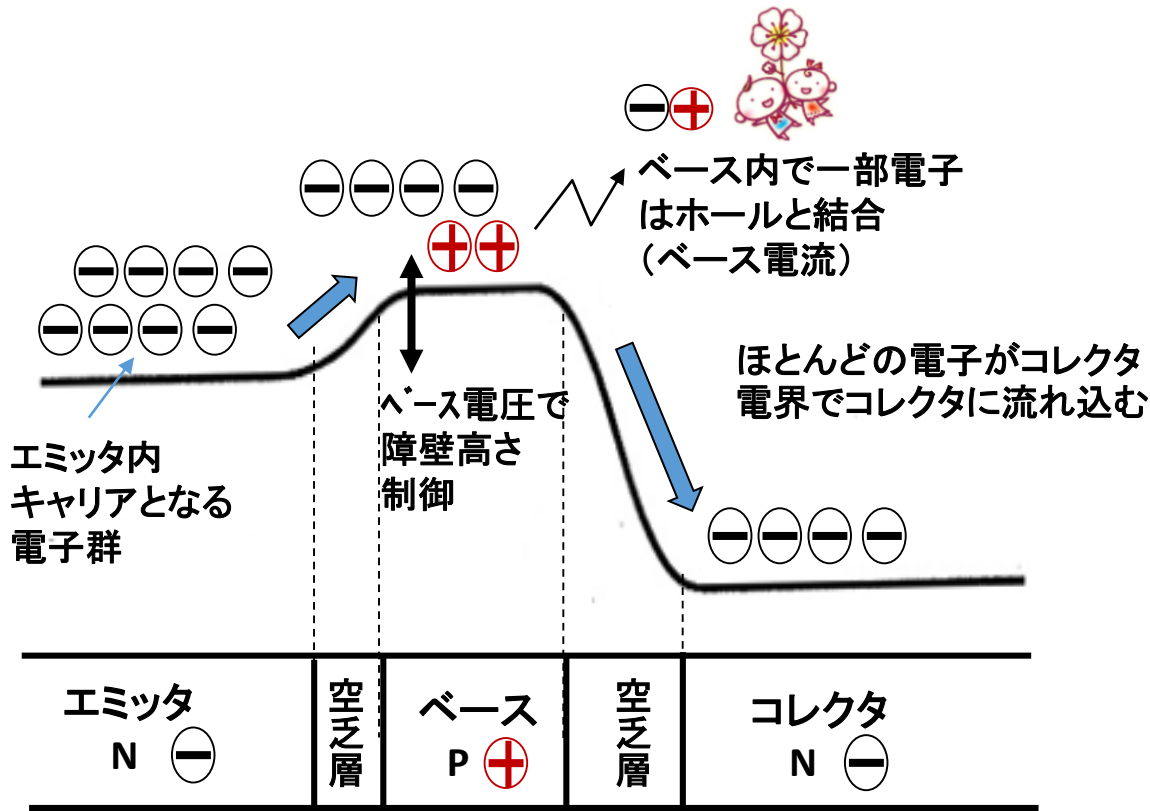
- ・書籍から学ぶ(原理、原則を理解したい)
- ・先人に学ぶ(先人の卓越した回路技術を徹底的に学ぶ)
- ・物作りが好き、実験が好き
- ・PC使うのが好きなら、回路シミュレータ使ってみる
- ・数学(デジタル信号処理)に興味ある
- ・生体機能に興味ある(例えば、耳が音を捉える仕組みなど)



アナログ技術者は将来的にも貴重な存在！

まずはイメージをつかむ

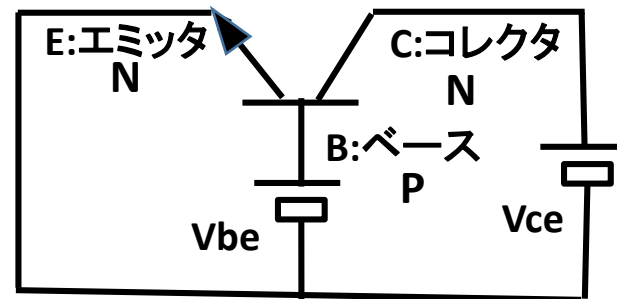
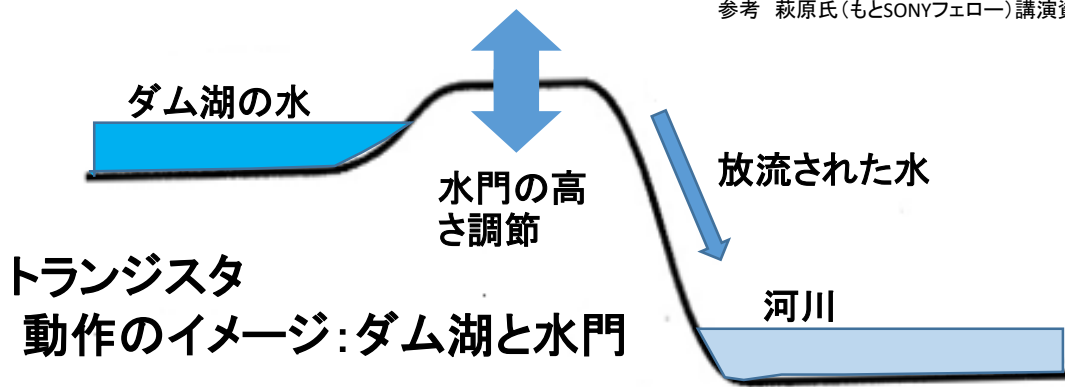
トランジスタ:なぜ増幅するの？



参考 萩原氏(もとSONYフェロー)講演資料から

NPNTランジスタの場合:

- ・エミッタには電子がつかまっている
- ・ベース障壁の高さをベース印加電圧で制御
- ・ベース電圧ゼロだと障壁高すぎてエミッタの電子が障壁を越えられない
- ・ベース電圧加えて、障壁が下がると、エミッタの電子がベース領域に流れ込む
- ・ベースにはホールが存在。ただしエミッタの電子量に比べて極めてすくない。
- ・エミッタからの電子一部とベースのホールが結合し、その分のベース電流が流れる。
- ・ベースの幅も狭いため、エミッタからの電子は、ほとんどがコレクタ電界に引き寄せられ、コレクタに流れ込む



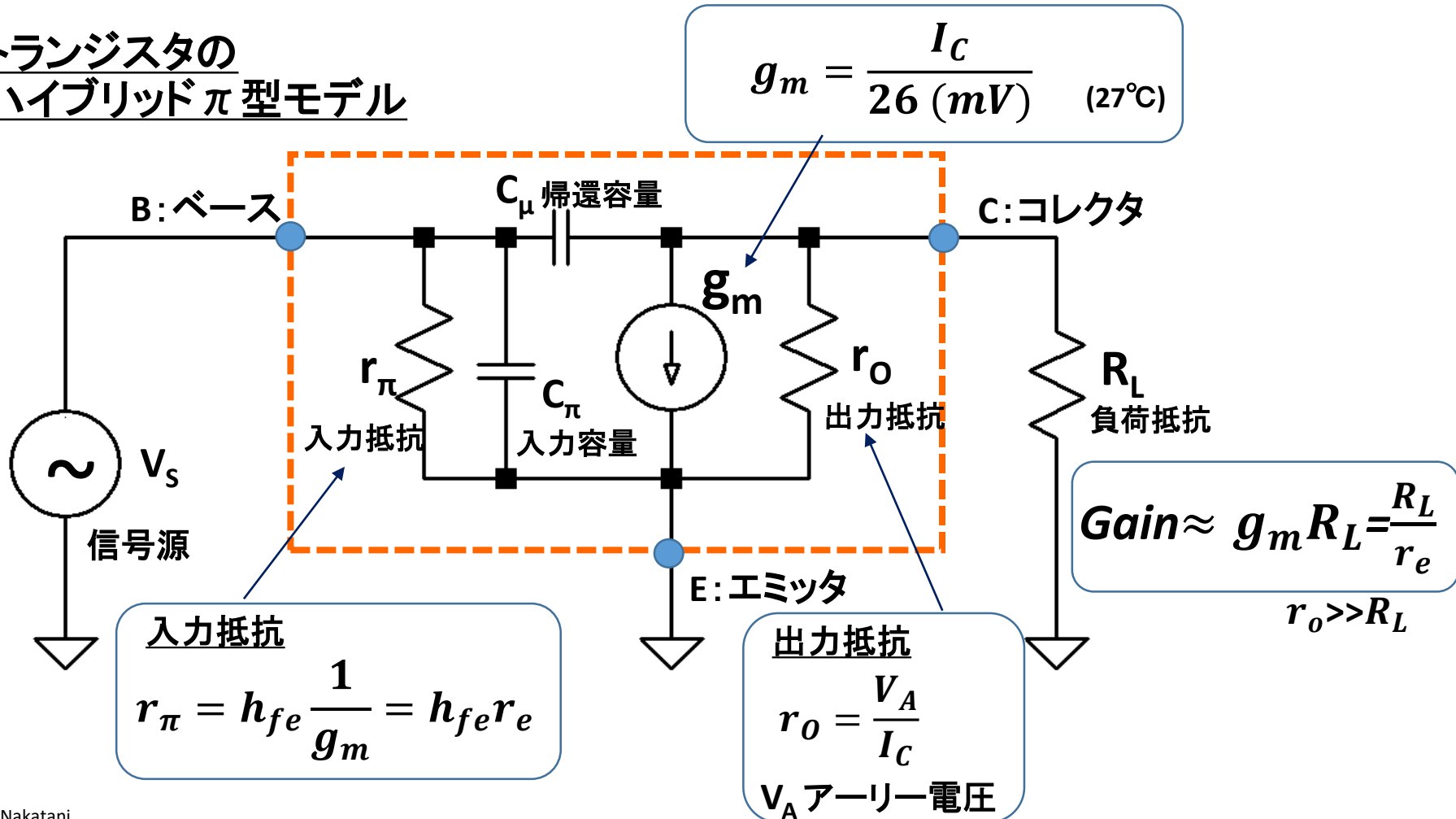
実際の回路設計では、まず

重要なパラメータは何かを知ること

通常トランジスタは下記のハイブリッドπ型モデルで示される。アナログ回路設計者は、各パラメータが回路特性にどのように影響するか、また重要なパラメータは何かの理解が必要。

例えば、トランジスタの重要なパラメータ g_m (相互コンダクタンス)は品種に関係なく動作電流で決まる。

トランジスタの ハイブリッドπ型モデル



例えば

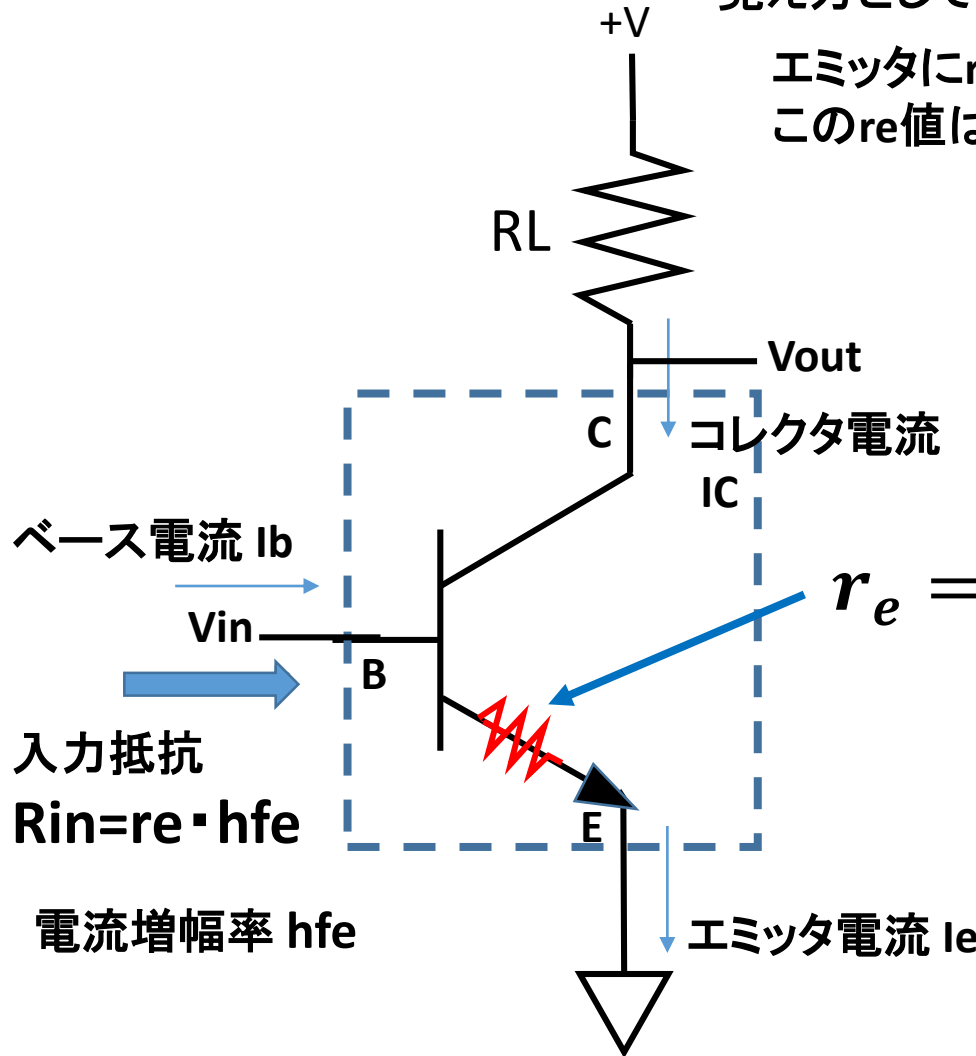
トランジスタで最も重要なのは動作電流

覚え方として、こんな考え方もある

エミッタに r_e なる内部抵抗が隠れていると考える。
この r_e 値はコレクタ電流に反比例

エミッタ接地のゲイン

$$Gain \approx g_m R_L = \frac{R_L}{r_e}$$

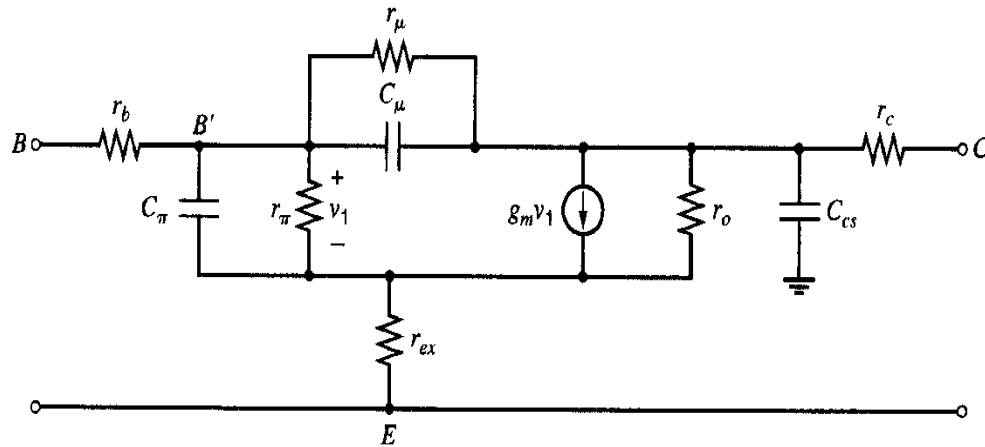


$$r_e = \frac{1}{g_m} = \frac{V_t}{I_C} = \frac{26(mV)}{I_C} (\Omega)$$

$I_C = 100\mu A$ $r_e = 260\Omega$
 $I_C = 1mA$ $r_e = 26\Omega$
 $I_C = 10mA$ $r_e = 2.6\Omega$

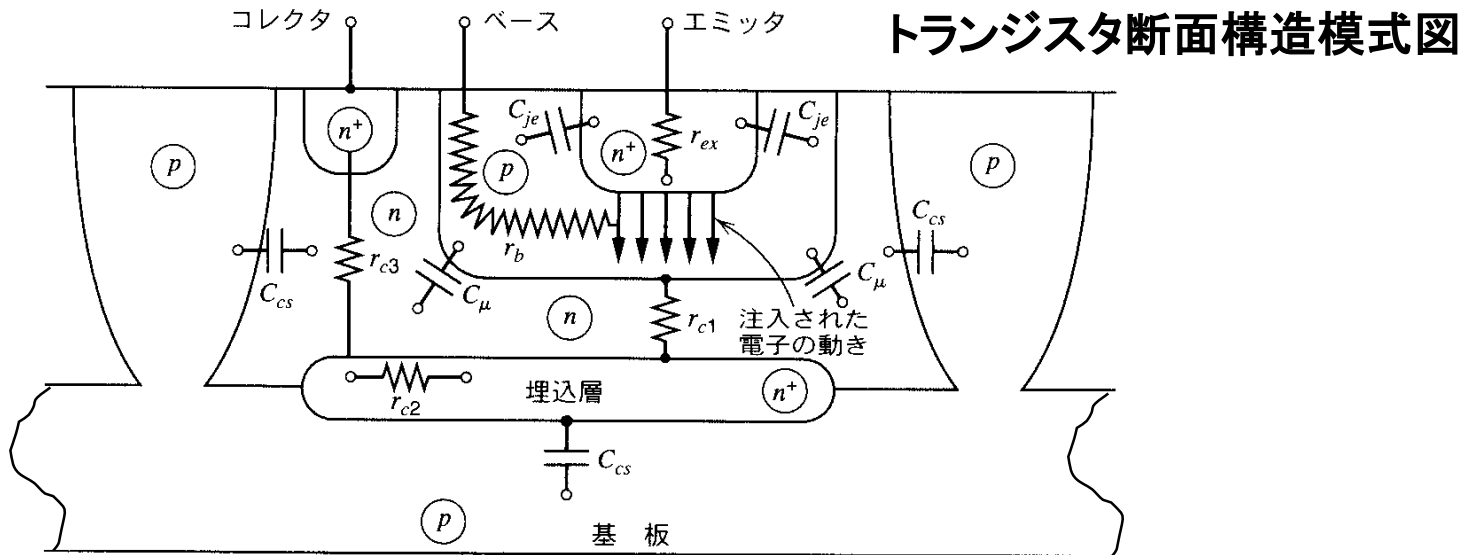
$T = 300K = 27^\circ C$

最終的には理論、原理をきちんと身につけよう



最終的には、回路モデルの意味と半導体物理(接合モデル理論)および実トランジスタのプロセスモデルとの関係を正しく理解必要。

バイポーラトランジスタのハイブリッドπ型モデル



アナログ回路のキーコンポーネントはオペアンプ

オペアンプ(演算増幅器)はアナログ回路設計における基本コンポーネント。
名前の通り、様々な演算(線形演算、非線形演算)が可能な便利なコンポーネント
アナログ屋さんとして、オペアンプを用いた回路設計技術習得が大切



**1952年世界初
商用真空管オペアンプ**
K2-W GAP/R社
(George A Philbrick)
真空管: 12AX7 2本
ゲイン: X15,000 (84dB)
電源: $\pm 300V/4.5mA$
信号レンジ: $\pm 50V$
価格: 20ドル
用途:
アナログコンピュータ

<http://www.philbrickarchive.org/>

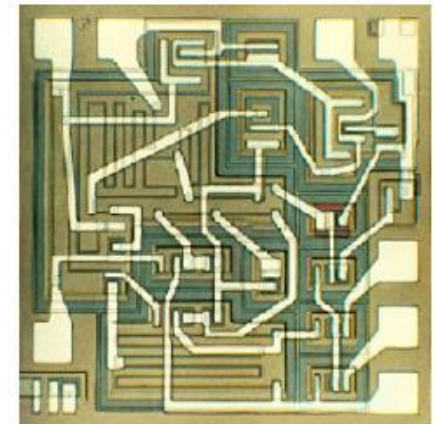
$\mu A702$ オペアンプ



1963年世界初 モノリシックオペアンプ

$\mu A702$ Fairchild
ゲイン: 68dB
電源: $+12V/-6V$
価格: 300ドル(売れず)

$\mu A702$ ダイ 10 μm プロセス



1965年
 $\mu A709$ Fairchild
ゲイン: 94dB
電源: $\pm 15V$
商業的に大成功
今でも現役!



グル(Guru)サンスクリット語で「指導者」「教師」
「尊敬すべき人物」などを意味する単語。
巨匠、師匠、熟練者なども意味する語。

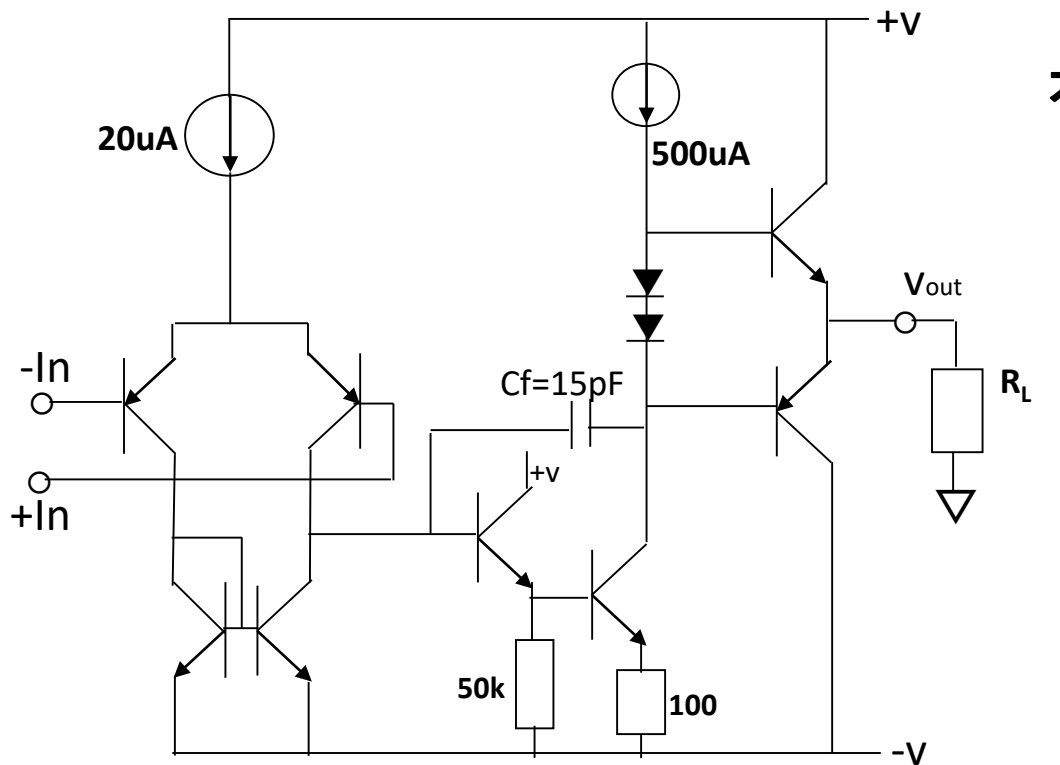
アナロググル Bob Widlarによる作品

先人の技術を学ぶ: オペアンプ

オペアンプの出現により、DC増幅が可能になり、また様々なアナログ演算が可能となった。

1960年代に発明されてから、現在でも基本回路は全く変わっていない。

トランジスタの動作原理と基本要素回路(エミッタ接地増幅、差動増幅、カレントミラー、エミッタフォロワー回路など)を理解すると電卓でゲイン、周波数特性の解析が可能。



オペアンプの内部構成

このシンプルな回路構成で
オープンループゲインが
約106dB (2×10^5)ある

差動増幅回路+
カレントミラー負荷

エミッタ接地増幅

エミッタフォロワー
出力段

先人の卓越した回路を学ぶ:オシロスコープ回路の例

昔はテレビ、ラジオやオーディオアンプ、測定器などの回路図は公開されていた。私にとって海外の測定器マニュアル(メンテナンスマニュアル)が良い教科書だった。回路図、部品表、動作原理が詳しく記載されていた。

テクトロニクスオシロスコープ

model 485 **1972年デリバリ**

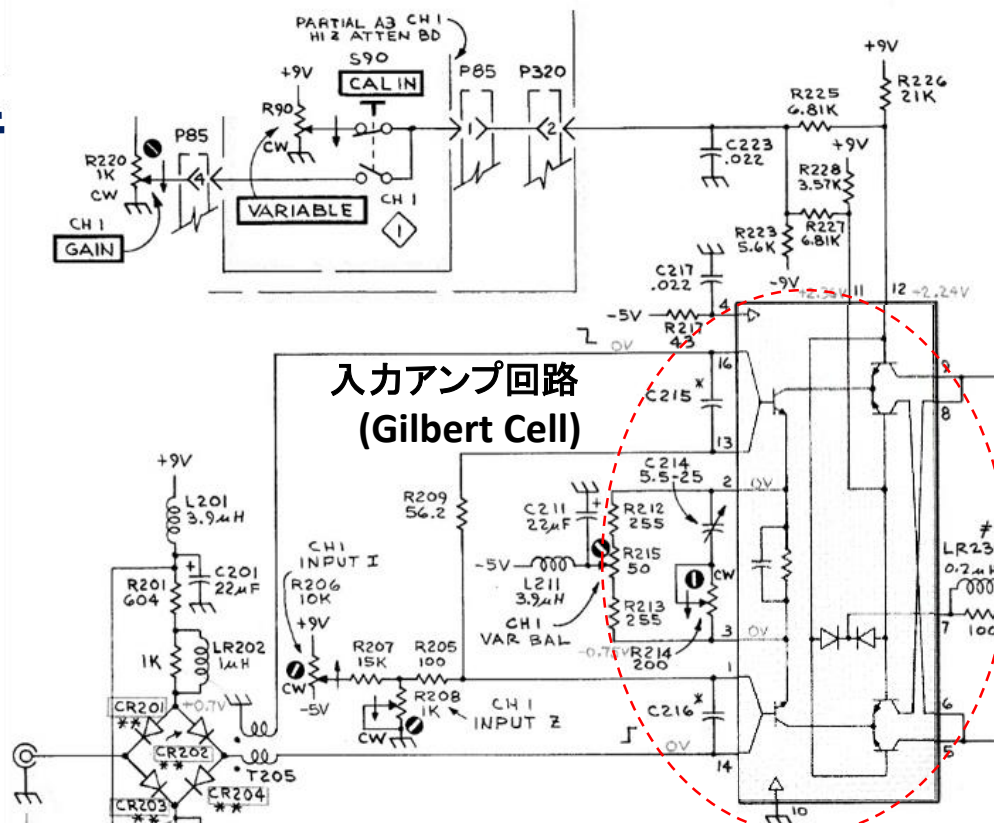
2ch入力 350MHz帯域

アナログ技術者にとって憧れの測定



主要アナログ回路設計は、アナロググルとして有名な **Barrie Gilbert**による。

485 サービスマニュアルに記載された回路一部

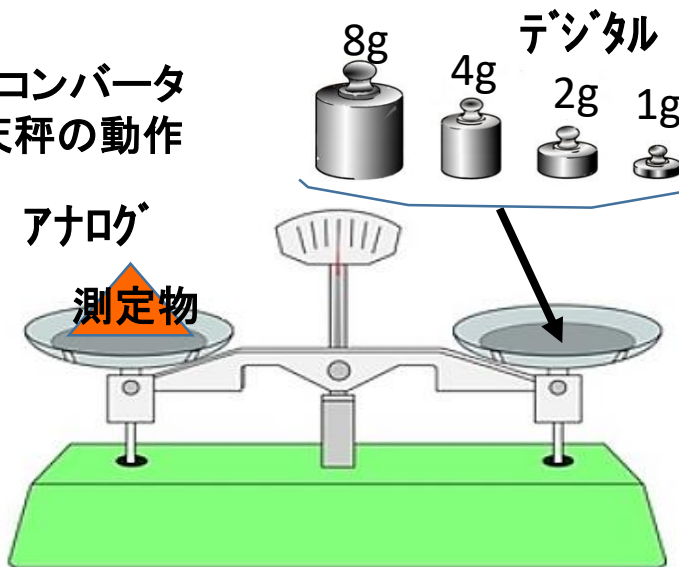


アナログIC:アーキテクチャ自体は古い

ADコンバータの変換方式の例

- ・各AD変換方式の発明は極めて古い
今でもこれら変換方式が使われている
- ・半導体技術の進歩で、
デジタル補正技術で高精度化
多重化技術(物量作戦)で高速化
が図られてきた。また低価格化も。

逐次比較型ADコンバータ
原理は、化学天秤の動作
そのもの



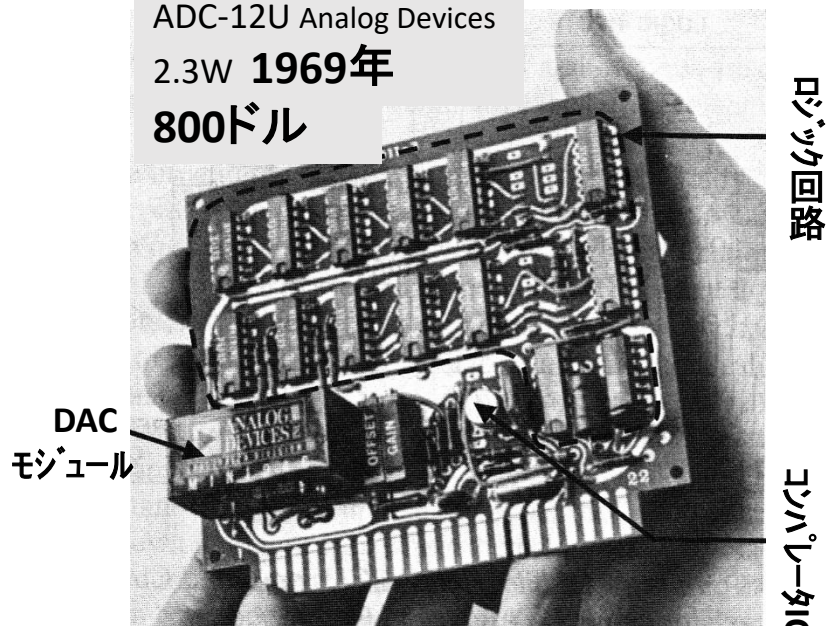
逐次比較型ADCは1946年(実に70年前)に発明

12bit 10 μ s 逐次比較型ADコンバータ

ADC-12U Analog Devices

2.3W 1969年

800ドル

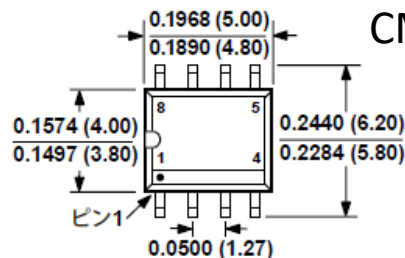


ロジック回路

コンパレータIC

Analog-Digital Conversion ADIから

現在



CMOS化12bit ADC

AD7887

8pin小型SOIC

4.5ドル

GHz高周波回路:アーキテクチャはMHz時代と変わらず

GHzになるとコイルやトランスが半導体チップ内で作れるサイズとなる。

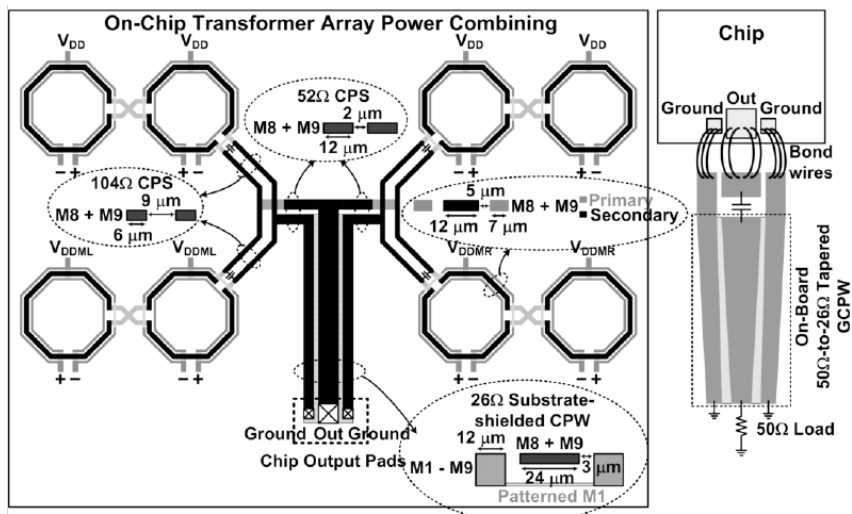
5.3GHz 高出力RF CMOSパワーアンプ

・65nm Logic CMOSで5.3GHz,帯域幅1.9GHz

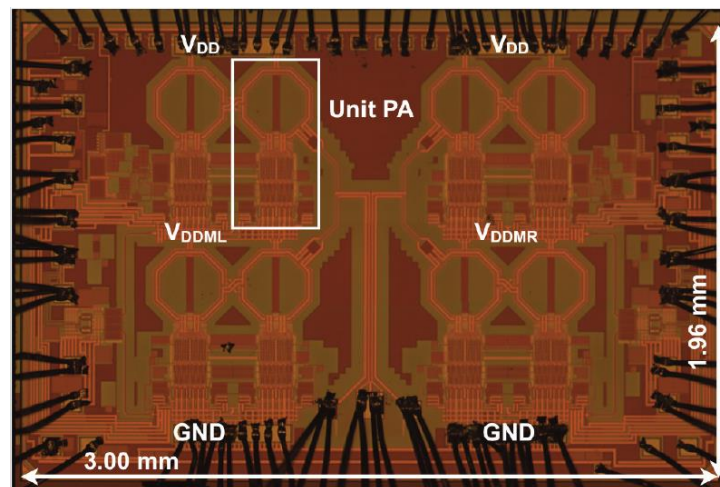
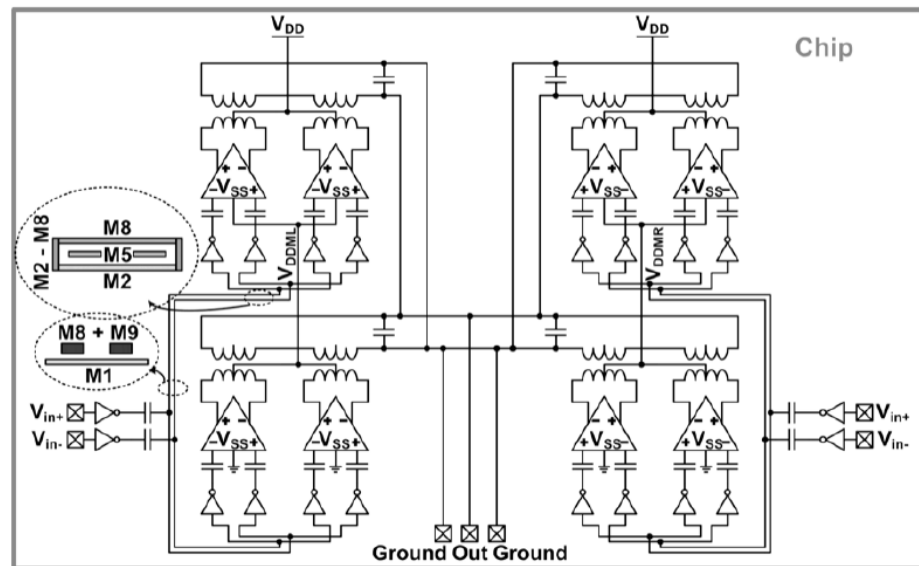
RF出力30.3dBm ($V_{DD}=6.35V$)実現

・シリアル-パラレルトランス技術と
スタックトランジスタ技術で実現

オンチップコイル&トランス



トランスアレイ使用し電力合成



「古典数学」を回路アーキテクチャに活かす

群馬大学小林研究室は、古典数学をアナログ半導体回路アーキテクチャに活かす様々なアイデアを提案。**魔方陣**もその一例。DAコンバータの線形性向上に活かすアイデア

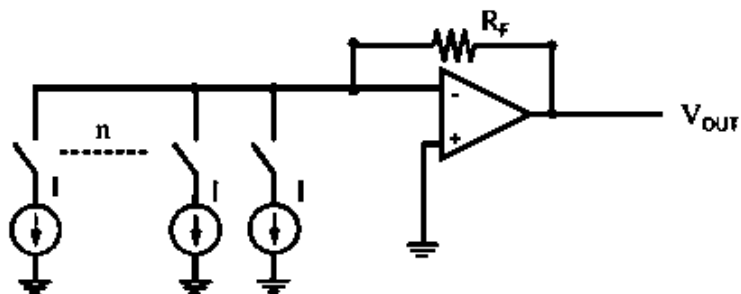


図1 DA変換器

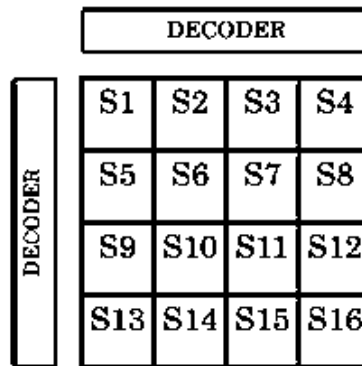


図2 単位電流セルのレイアウト

8 bit DAコンバータだと、チップ上に255個の等電流源とスイッチを2次元に配列

魔方陣

どの方向(行、列、斜め)の合計も等しい配列

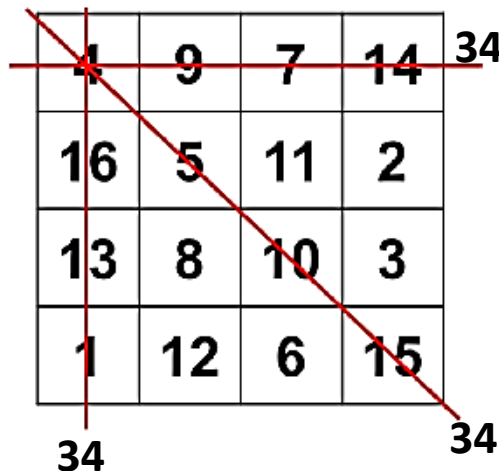
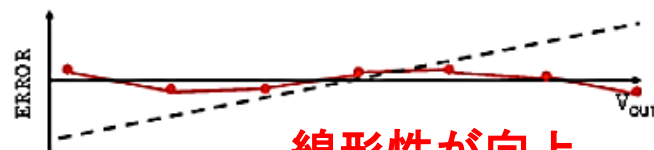
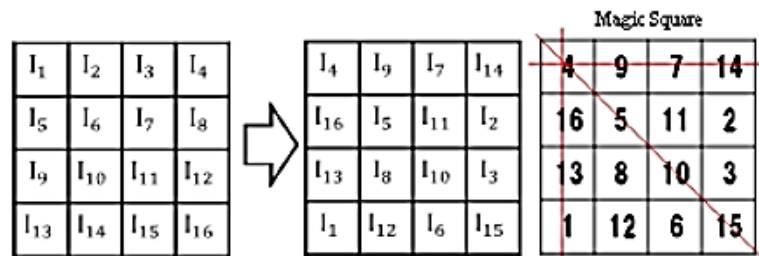


図2 魔方陣

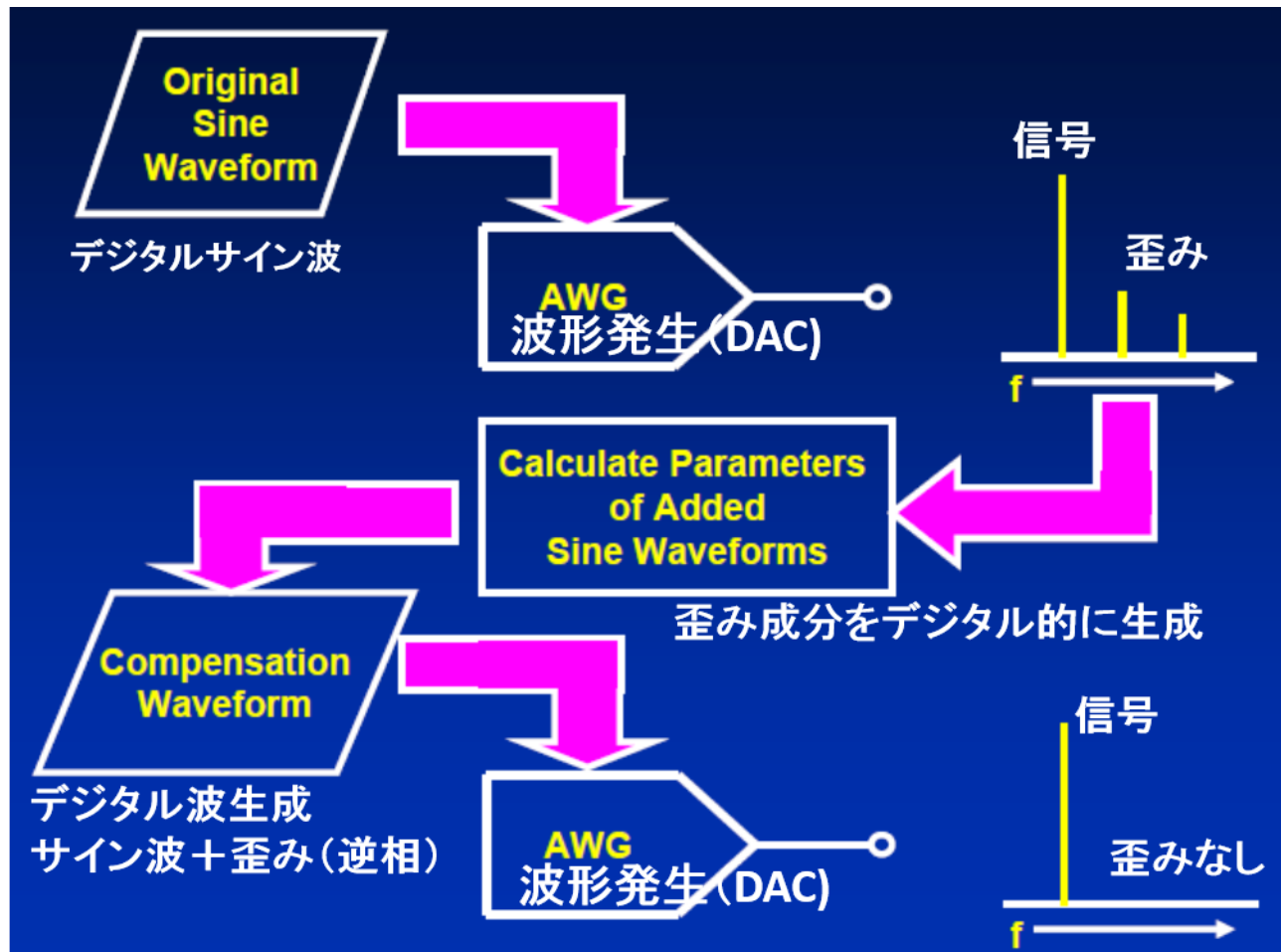


線形性が向上

図3 魔方陣レイアウトを用いた DA 変換器 単位セルレイアウト

デジタル信号処理で高精度化

デジタル信号処理技術を用いて、高精度アナログ信号(サイン波)発生させる例
波形発生器(DAC+アンプ)で発生する歪み成分を、デジタル信号段階でサイン波に歪み逆相成分
をあらかじめ加算して波形発生器に入力。群馬大学小林研でもユニークなアイデア多数提案。



アナログ回路設計の手順

1)仕様の決定

2)実現方法の検討

アナログでやることとデジタルでやることの分担を決める

3)回路検討

出来るだけ実績ある回路を活用すべき。ただし動作を正しく理解して利用する

4)使用部品の検討

アナログ設計では性能とコストのバランスが重要

5)SPICEによる回路シミュレーション

シミュレータはあくまでツール。回路動作は理解したうえで使いこなすことが必須

6)アナログ回路の部分バラック実験

データシート記載データだけでは設計できないことが多い。

7)回路図 & 部品表作成

アナログセンスを活かした回路図作成

8)プリント基板設計

重要アナログ部品の配置、配線を設計者が決める。

9)出来上がった部品搭載基板を測定器を使用して詳細検証

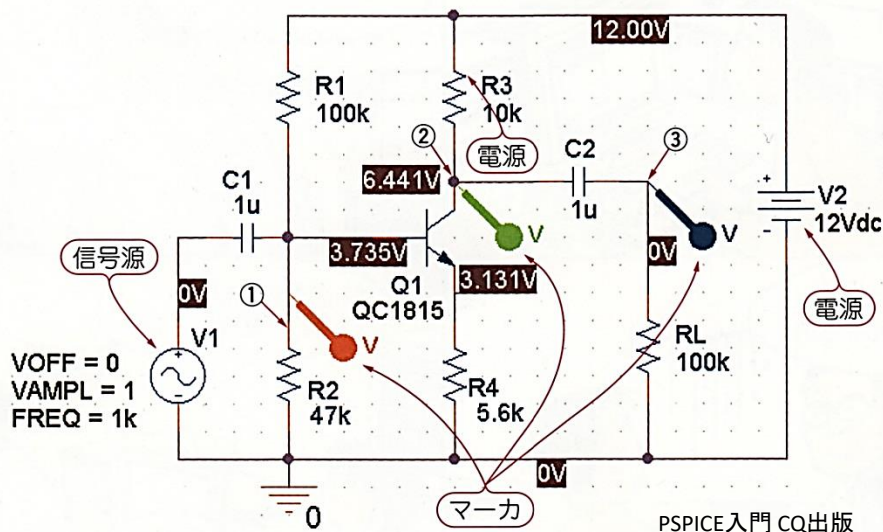
10)プリント基板の改版

高性能アナログ回路や高周波回路の回路基板は1発で完成は難しい

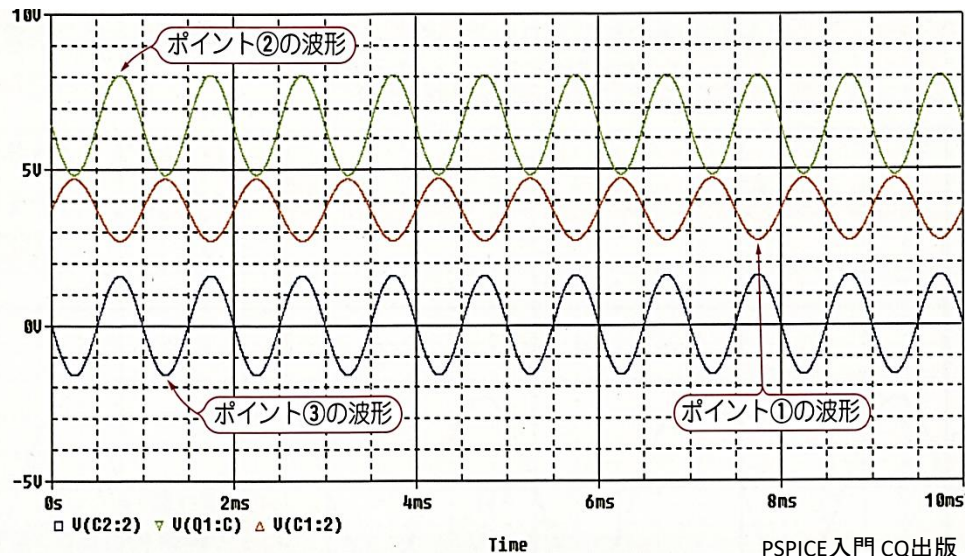
アナログ回路シミュレータ SPICE

- ・開発したアナログ回路の機能や性能が目標通りであるかどうかを事前に確認したり、特性が出なかった時の原因分析にアナログ回路シミュレータを使用
- ・アナログ回路シミュレータはアナログ技術者にとって不可欠なtoolだが、使い方次第では誤った答えを出すので注意が必要
- ・シミュレータには数多くの種類があるが、アナログ回路のシミュレータの種類は多くない。
実に40年以上前に開発された「**SPICE**」と呼ぶシミュレータが今でも広く使われている。

回路図を入力するとシミュレーションしてくれる



各ノードの電圧や電流を表示



SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)

カリフォルニア大バークレー校のNagelとPedersonにより1973年発表(もともとは学位論文)

回路シミュレータSPICEを活用しよう

SPICEの主な解析機能は3つ

- ・DC解析 **電圧計、電流計、半導体パラメータアナライザの機能**
信号源の直流電圧/電流が変化した時の、回路各部の電圧、電流を解析
- ・AC解析(周波数特性) **スペクトラムアナライザやネットワークアナライザの機能**
信号源の周波数を変化させた時の利得と位相を解析
- ・過渡(トランジェント)解析 **オシロスコープの機能**
信号源の変化に対して、回路各部の電圧/電流変化を解析。

アナログ技術者はSPICEを使いこなそう

- ・まずはLTSPICE(無償のSPICE)を自分のパソコンにダウンロードしよう
- ・授業で習ったトランジスタやMOS FETの基本動作をシミュレーションで確認してみよう
- ・先人の卓越した回路をシミュレーションしてみる。そして動作原理を理解しよう
- ・思いついた回路を即シミュレーションしてみる
- ・SPICE使いこなして重要なのは素子のモデルパラメータ
- ・「SPICEに使われる」のではなく、「使いこなす」こと。

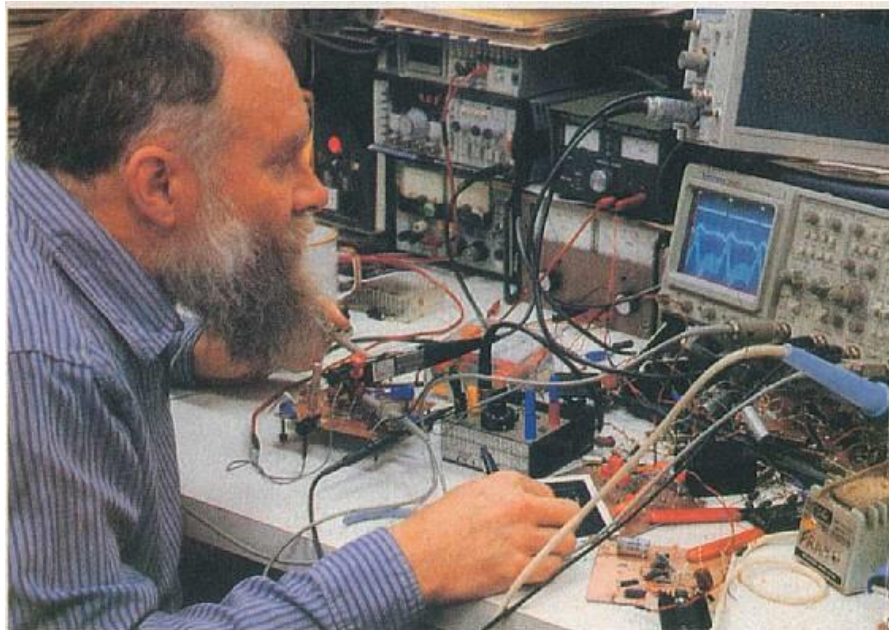
SPICEは回路設計をしてくれない！

さらに、数学(デジタル信号処理)が絡むときは、MATLAB,LabView,Mathematicaなども活用しよう

アナログは実験 & 評価が重要

- ・アナロググル(達人)は実験を重要視している
- ・アナログ回設計はデータシートによる机上検討やシミュレーションだけでは不十分
- ・検討デバイスにより実際に回路を組み、測定器を用いでデータ取得、解析が不可欠
- ・まずはバラック実験により、データシートに記載ない実使用回路でのAC特性などを確認
- ・実際にプリント基板作成し評価。基板化した後の、配置配線による性能影響を確認

アナロググル Bob Pease



「実験＝ものづくり」は楽しいよ！

アナロググルJim Williams実験室



アナログ設計で実験が必要なわけ、一例

同一型番でも製造メーカー異なると、かなり歪み値が異なる。データシートでは分からない

汎用/オーディオ用オペアンプ2次+3次歪み特性例

周波数4KHz、負荷2.5K Ω 、電源 $\pm 15V$

シリーズ	型番	メーカー	歪み(%)
5532/34	NE5534P	TI	0.00040
	NE5532AP	TI	0.00040
	NJM5532DD	NJRC	0.00077
	NE5532N	Signetics	0.00123
4500系	NJM4556ADD	NJRC	0.00077
	NJM4580DD	NJRC	0.00094
	UPC4570	NEC	0.00126
	NJM4565D	NJRC	0.00153
	UPC4560C	NEC	0.00210
	RC4558P	TI	0.00299
	NJM4560DD	NJRC	0.00421
	NJM4558DD	NJRC	0.00435
	UPC4558C	NEC	0.01450
2000系	NJM2068DD	NJRC	0.00081
	NJM2043DD	NJRC	0.00086
	NJM2041D	NJRC	0.00180
741系	UPC741C	NEC	0.00909
	MC1741CP	Motorola	0.04030
	UA741CN	STM	0.04160

同じ実験回路で評価して
~3倍もの特性差が見られる

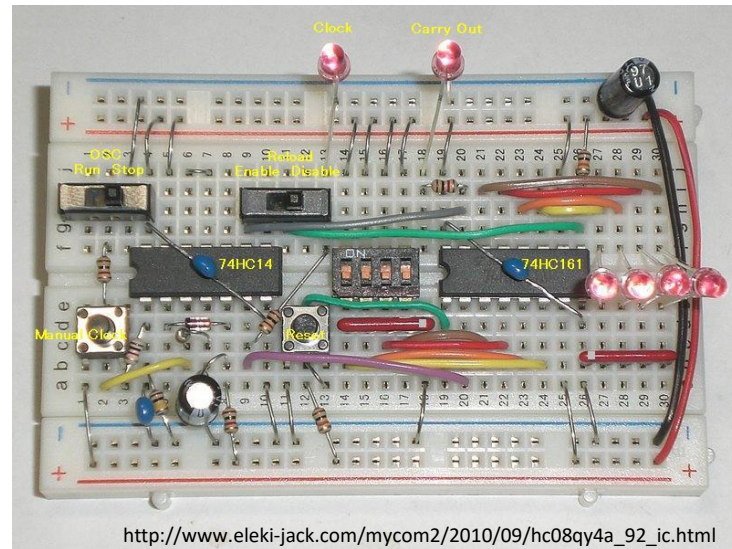
汎用オペアンプTHD測定例

型番	THD 1KHz(dB)	THD 10KHz(dB)
NJM5532	-122	-117
NJM4580	-120	-105
NJM4560	-117	-101
NJM2082	-112	-94
NJM2114	-121	-115
OPA627	-122	-113
LM833	-119	-105
LF356	-118	-90
TL072	-108	-91

アナログ回路のバラック実験方法

- ・ブレッドボードを使用した回路実験は、本格的なアナログ回路の実験にはお勧めできない(精度、高周波特性など)
- ・ネットの試作プリント基板を利用。数万円で基板作れる
- ・ベタ基板のうえに回路を作成。ベタ銅箔面はGNDとする。ビデオ帯域からうまく作ればGHz帯域までの実験が可能。

ブレッドボードによる実験

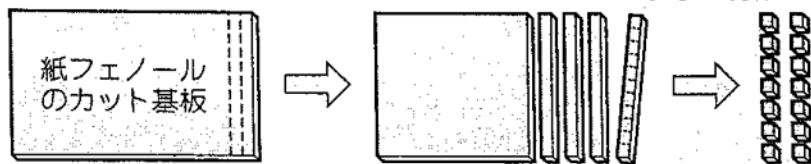


ベタ基板を用いて実験回路を作る

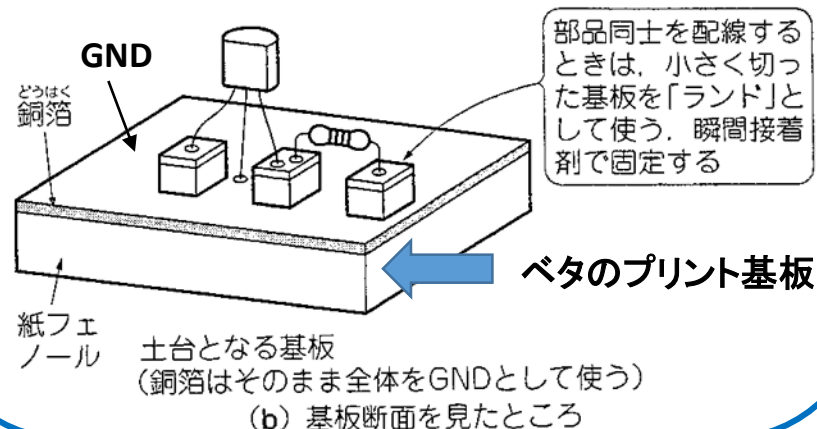
ハンダ付け用の
ランドを作る

Pカッターで
細く切る

ニッパで
小さく切る

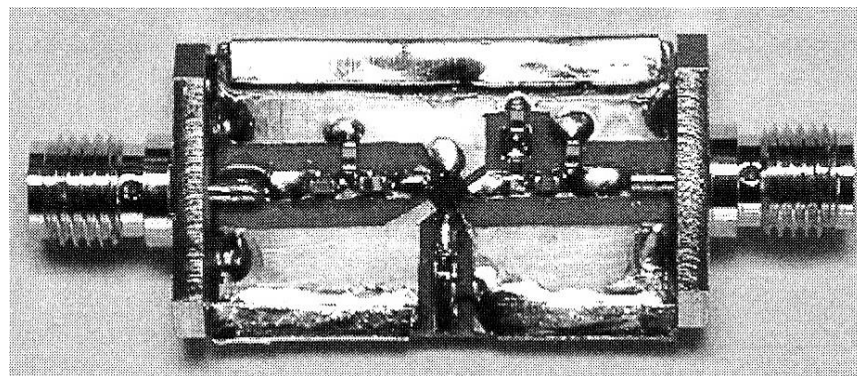


(a) 紙フェノールのカット基板のカット方法



(b) 基板断面を見たところ

GHz回路をベタ基板に作成
カッターナイフでパターン作成。
部品はチップ部品をハンダ付け



良い回路図はパターン & 部品配置情報も示す

図1も図2も回路動作(結線)は全く同じであり書き方のみ異なる。

良い回路図は回路動作が解りやすい他に、回路図自体に部品配置や配線情報が示されている。

図1では、雑音影響受けやすいオペアンプの反転入力(高入力インピーダンスノード)が短く書かれ、R1やR2も反転入力近くに書かれている。

雑音影響受けにくいオペアンプ出力(低インピーダンスノード)ラインが引き回されている。

電源パスコンについても、オペアンプ電源ピン近くに配置すべき高周波特性の良いC1やC2(0.1uFセラコン)が、オペアンプ近くに書かれ、多少離れて大容量ケミコンC3,C4(10UF)が書かれている。

すなわち、回路図に部品配置や配線情報が含まれている。

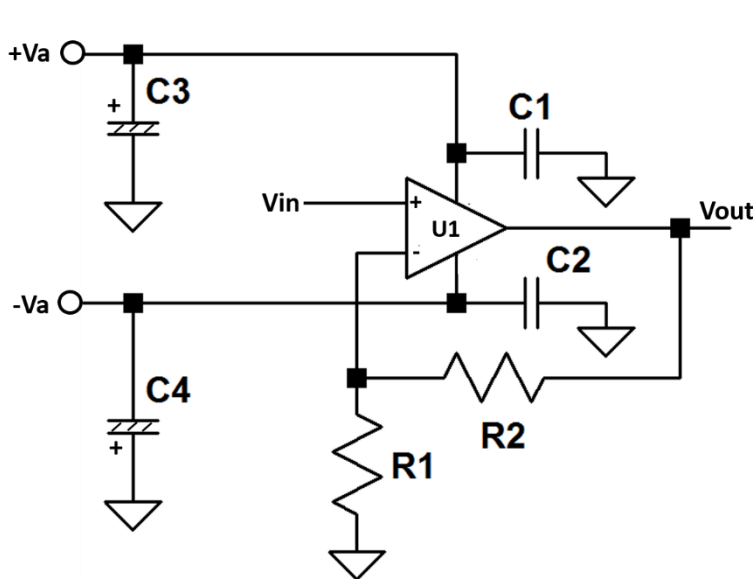


図1 良い回路図

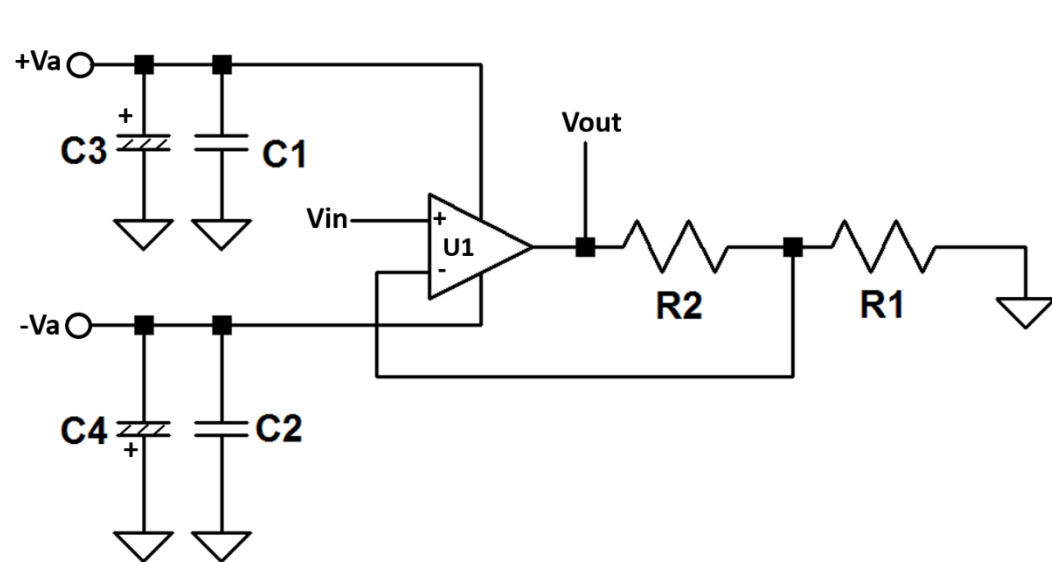


図2 良くない回路図

完成度の高いものを見て学ぼう

美しい回路基板

アナログを極めた設計者のデザインは、回路図を見ても、出来上がった基板を見ても、実に美しいもの。

回路図は信号の流れの通りに描かれており、回路図がほぼそのまま基板の部品配置、配線となっている。

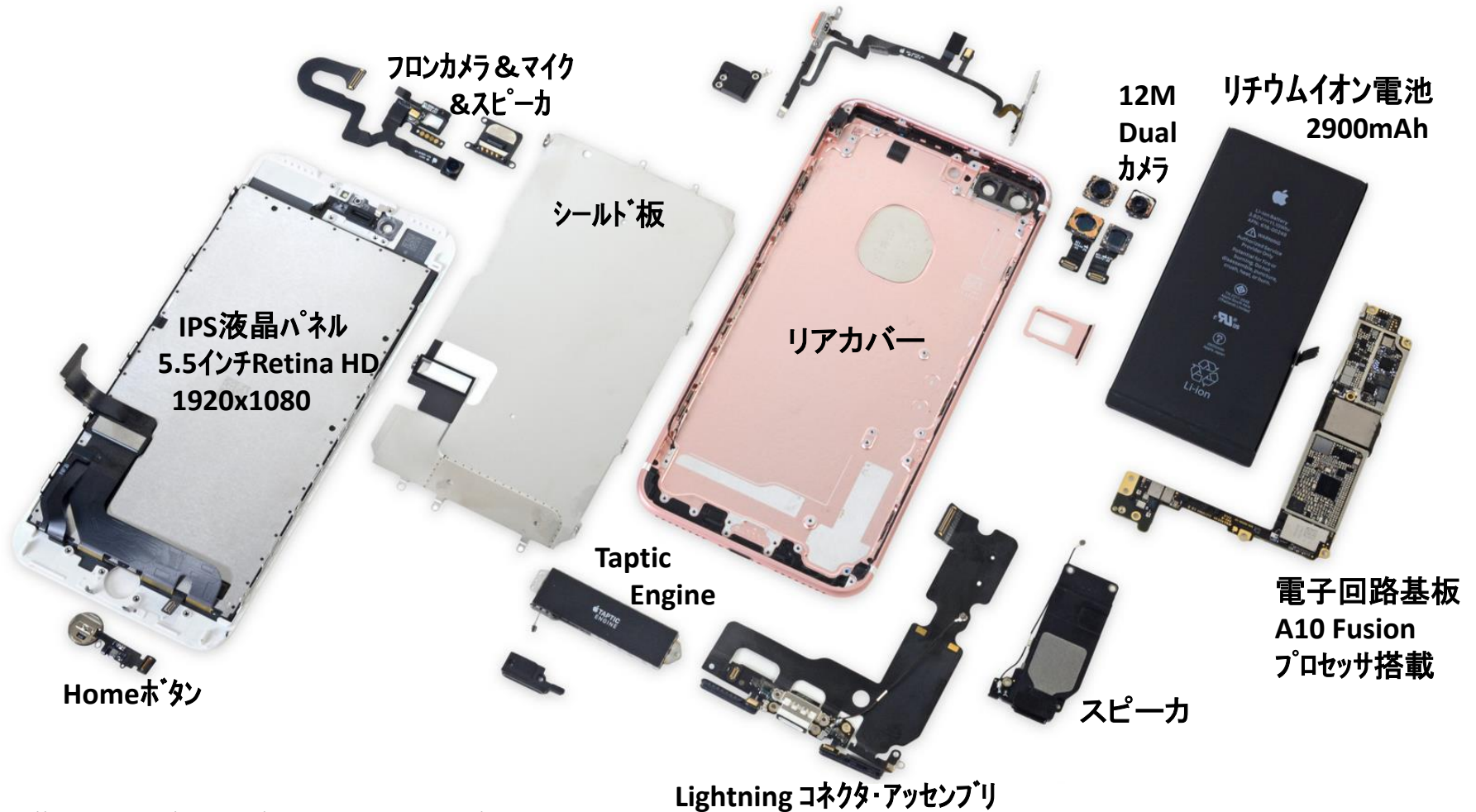
テクトロニクスオシロスコープ 200MHzプラグインアンプ7A26 1974年



完成度の高いものは美しい: Apple iPhone 7

2016.9.16

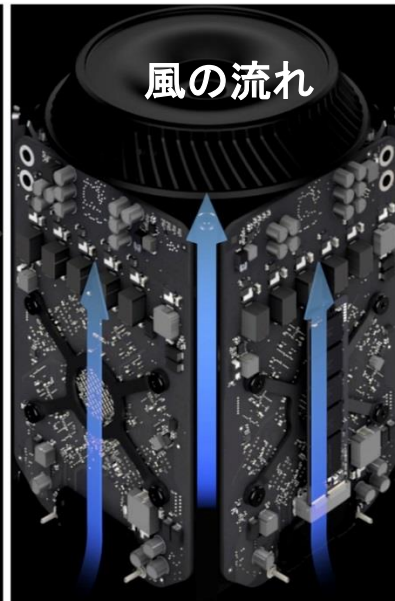
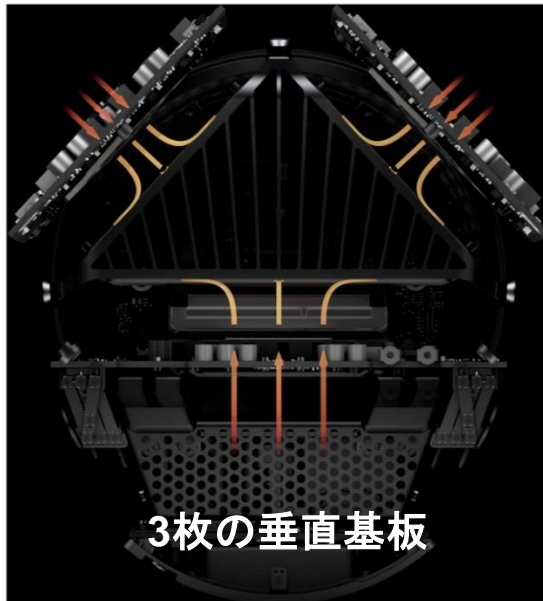
- Appleの製品は極めて高い完成度.デザインの秀逸さ、シンプルな美しさを持つ
- 内部まで手を抜かない作り.ケースはアルミ材の削り出し
- 世界の最先端技術を活用



Apple製品の作りは芸術品:Apple MacPro

2013年12月

驚きの円柱形デザイン、しかし冷却構造として理想的。上部に大きなファンがあり下部から空気を取り込む。円柱形の本体は、アルミ材をくり抜いている。すごいコストをかけている。美しいの一言・・・Jobs流健在



Nintendo Switch

2017年3月

内部は興味深い作り。汎用部品を多用してコスト低減しつつ、熱対策とEMI対策にコストかけている。

販売価格4万円に対し、製造原価約257米ドル



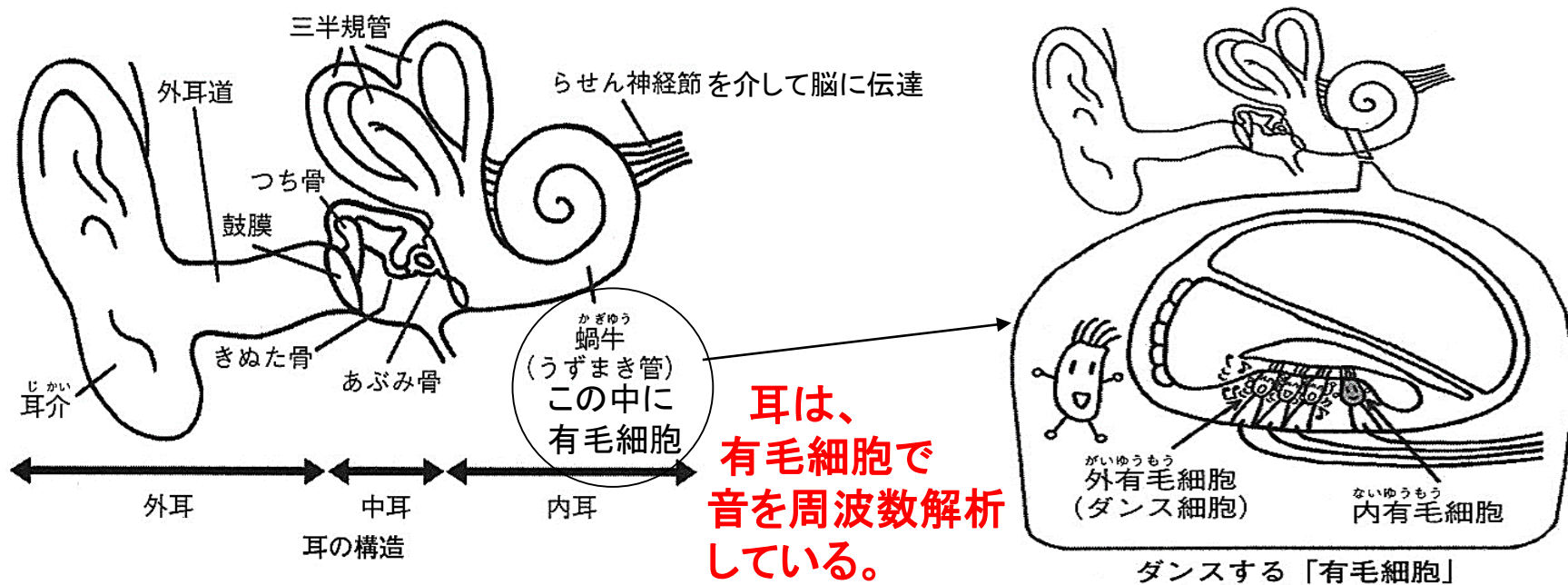
左右にJoy-Con 2個

- ・Joy-Conと本体はBluetoothで通信
- ・Joy-Conに振動フィードバック機能搭載

オーディオ分野における 興味深いアナログ的課題

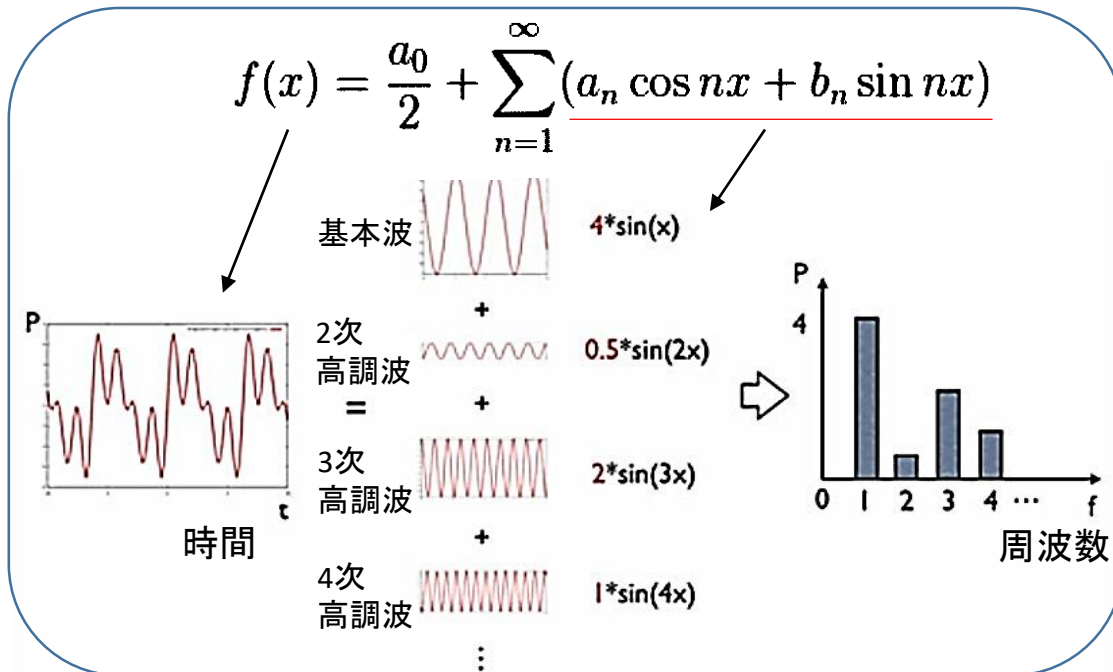
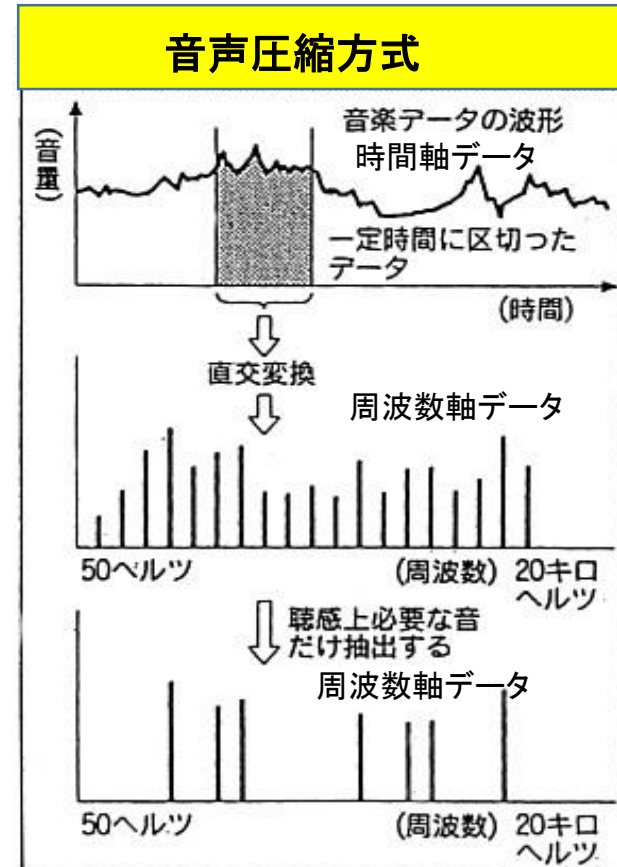
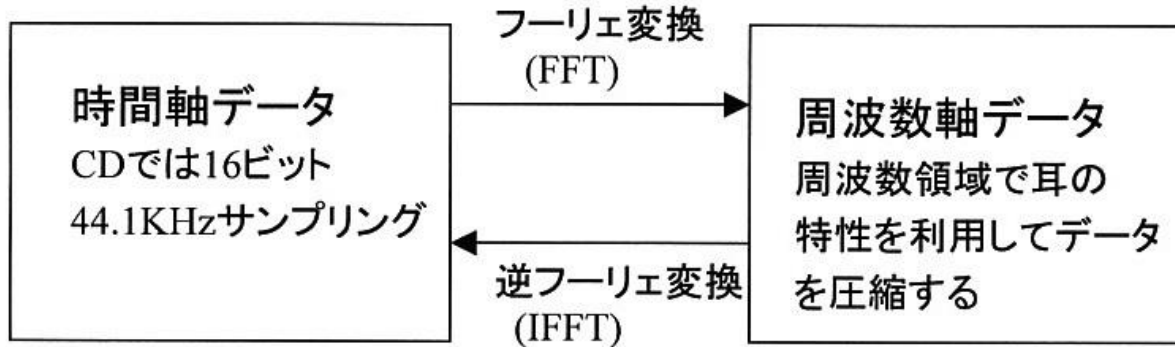
耳の構造と音が脳に伝わる仕組み

- ・鼓膜の振動が耳小骨(つち骨、あぶみ骨、きぬた骨)を振動。耳小骨にて、音が増幅または減衰される
- ・耳小骨に伝わった音が蝸牛(かぎゅう)に伝わる。蝸牛の内部はゼリー状液体
- ・音が蝸牛内の1万個以上ある有毛細胞を刺激。有毛細胞にも音の増幅作用および減衰作用がある
- ・1KHz純音だと800Hz,1KHz,1.2KHzを受け持つ有毛細胞が振動する。耳は有毛細胞で音を周波数解析している
- ・耳の中にカチッと音の刺激がひとつ入ると有毛細胞が振動するが、音が終わっても有毛細胞は10msくらいはダンスを続ける。
- ・このため連続した音が入っても、直ちには有毛細胞は反応出来ない。この様な耳の特性を利用して音声圧縮する。
- ・有毛細胞が小さな電気信号を発生し、らせん神経を介して脳に伝わる



音声圧縮のKey技術はフーリエ変換

デジタル化された音声データ量は膨大。そのままでは無線による通信や半導体などの記憶媒体に記録する事は難しい。そこでデータ圧縮が不可欠となる。耳の聴覚特性を使って、音質劣化を最小限としつつ音声データを最大限圧縮する技術が重要。このキーとなる技術がフーリエ変換



周波数領域における聴覚特性を利用し音声データ圧縮

周波数による可変量子化

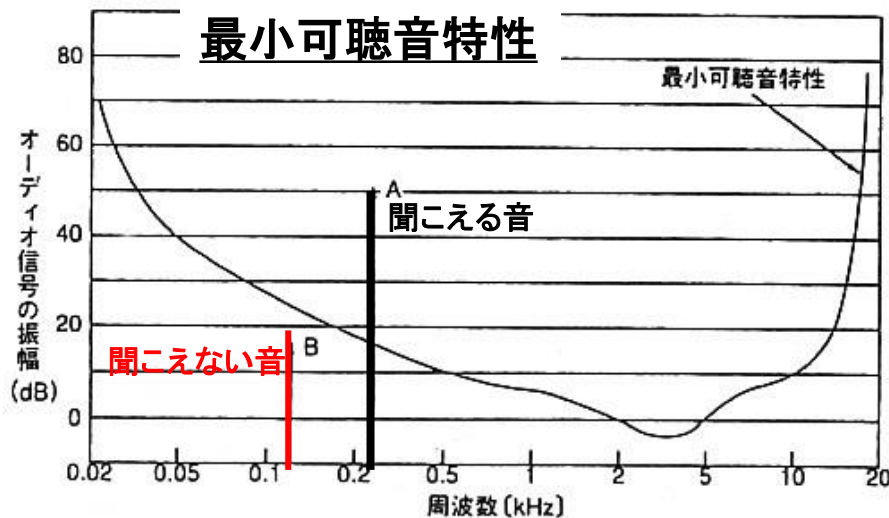
人間の耳は周波数特性を有する。低い周波数と高い周波数ほど人間の耳の感度は低下する。感度の良い中域には量子化ビットを多く、感度の悪い低域と広域では量子化ビット数を減らす。

最小可聴音特性

人間の聴覚は低い周波数と高い周波数ほど感度が低下する。

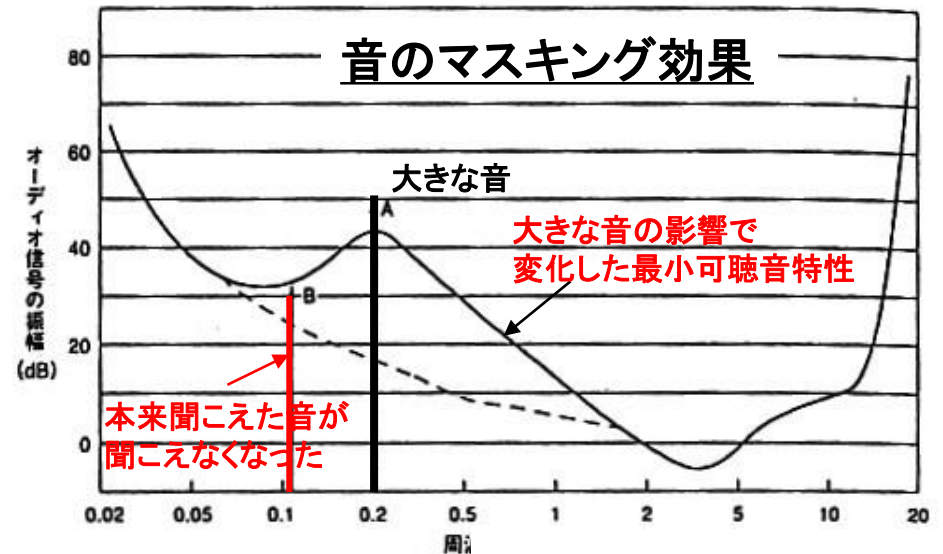
耳が聞き取れる周波数特性を多数の人にて調査したのが、最小可聴音特性。

この特性以下の小さな音は聞こえないため、音声圧縮では、最小可聴音特性以下の信号は取り除く。これでデータ圧縮できる。



音のマスクング効果

- ・人間の聴覚は、強い音があると、その周辺の弱い音はマスクされ聞こえなくなる。例えば、聴いているメロディが強いパーカッションやシンバルにより一瞬間聞こえなくなるこれが音の”マスクング効果”
- ・マスクング効果で、聴覚の最小可聴音特性が変化する。
- ・マスクング効果で聞こえなくなる音の成分を周波数データ上で解析し取り除く。すなわちデータ圧縮される。



デジタル信号処理を駆使

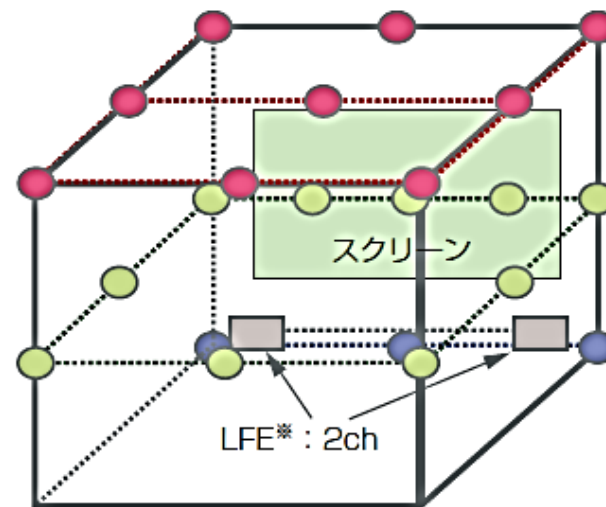
8Kスーパーハイビジョン 22.2ch 3D音響システム

- ・145型のスーパーハイビジョンプラズマディスプレイと組み合わせた、スピーカーアレイ
- ・デジタル信号処理を駆使して、ディスプレイ4隅に配置された128個スピーカ(116個の7cmスピーカと12個の小型ウーファ)にて、**22.2chの3Dバーチャルサラウンド**を再現

ディスプレイ4隅に配置された128個スピーカ



22.2ch音響システム



白いスピーカが
「バーチャル再生用
リアと上部」からの
音を再生

高音質デジタルオーディオ:ハイレゾ

- ・従来のデジタルオーディオ音源が、16bit/～22KHz帯域までを扱うのに対し、ハイレゾでは24bit/～96KHz帯域までの高分解能、超高周波音を再生可能
- ・CDのデータ転送量は1.411Mbpsに対しハイレゾでは4.6Mbps～11.289Mbpsと3倍～8倍に及ぶ
- ・従来の音楽配信128kbpsに比べて36～88倍

現行CD:

44.1kHz/16bit

ハイレゾ音源:

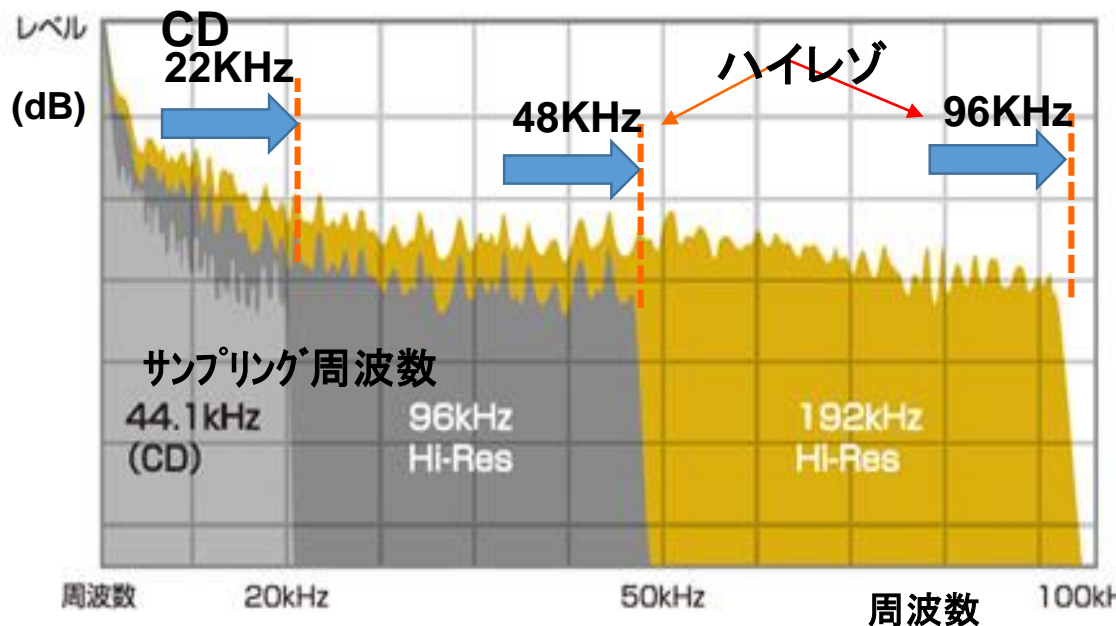
96kHz/24bit

192kHz/24bit

DSD/2.8MHz/1bit (SACD)

DSD/5.6MHz/1bit

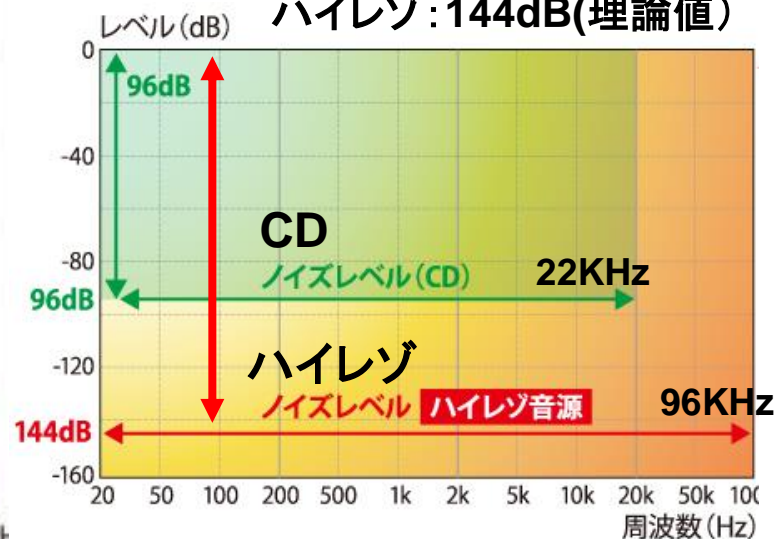
再生可能な周波数帯域



ダイナミックレンジ

CD:96dB(理論値)

ハイレゾ:144dB(理論値)

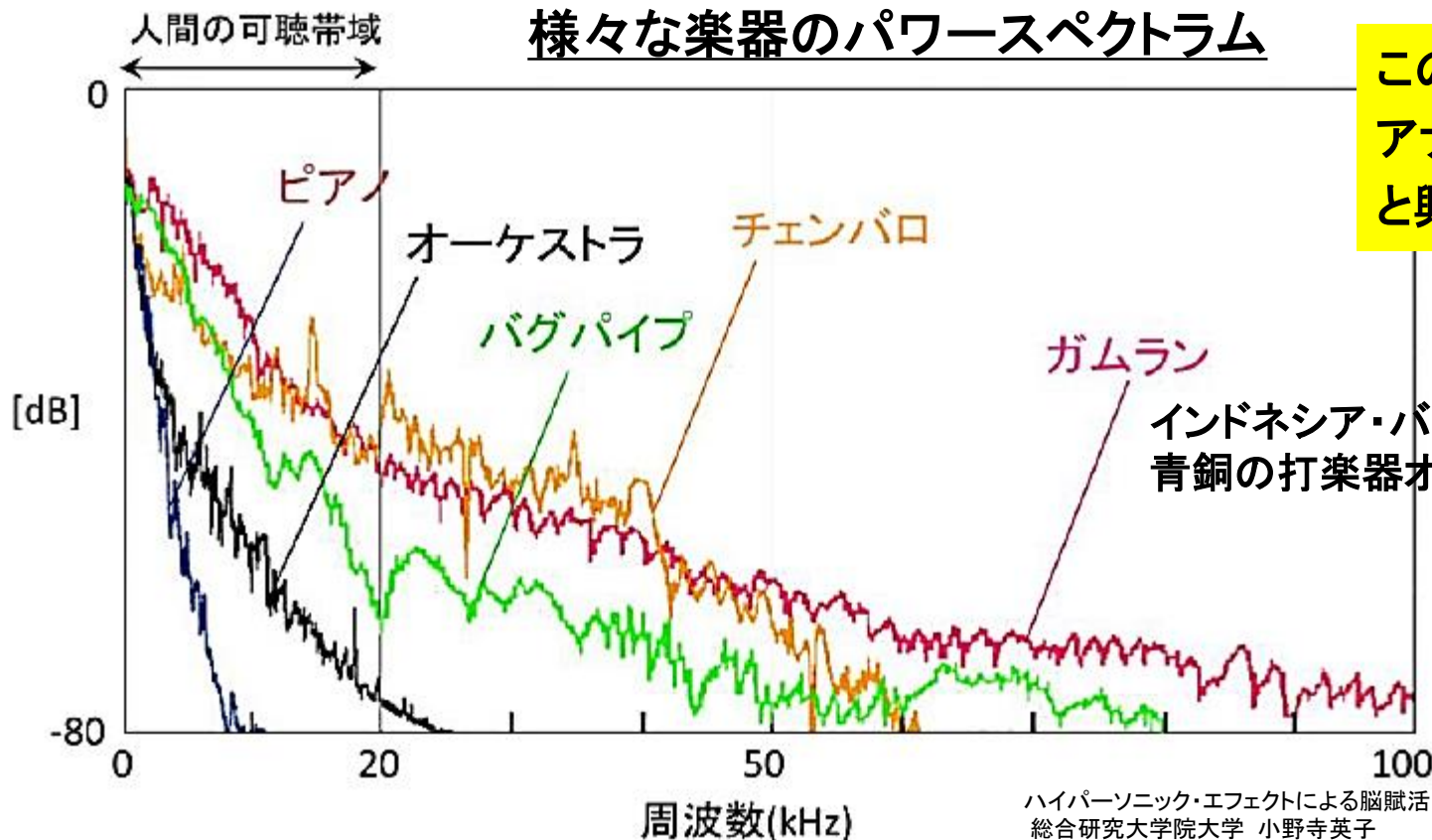


人間の耳に聞こえない20KHz以上の超高周波がなぜ意味あるのか？

ハイパーソニック・エフェクト

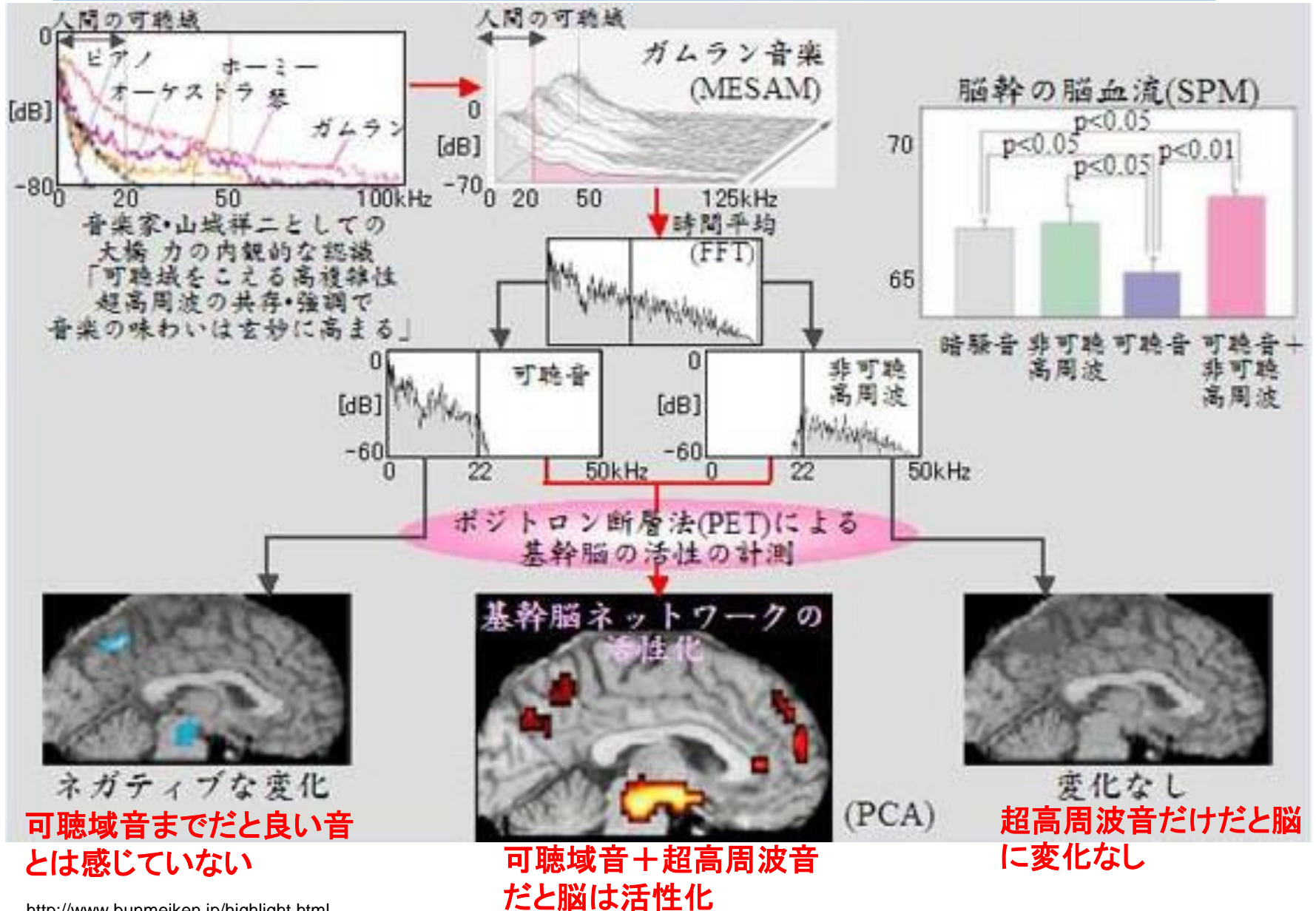
- ・ハイパーソニックエフェクトとは、人間の可聴域上限をこえる超高周波成分を豊かに含む高度に複雑に変化する音が、基幹脳を活性化する現象
- ・領域脳血流の増大、脳波α波の増強、免疫活性の上昇、ストレス性ホルモンの減少、音のより快く美しい受容の誘起、音をより大きく聴く行を誘導する
- ・こうした効果をもつ音(ハイパーソニック・サウンド)は、人類の遺伝子が進化的に形成された熱帯雨林の環境音や邦楽をはじめとする民族音楽の中に見出されている

様々な楽器のパワースペクトラム



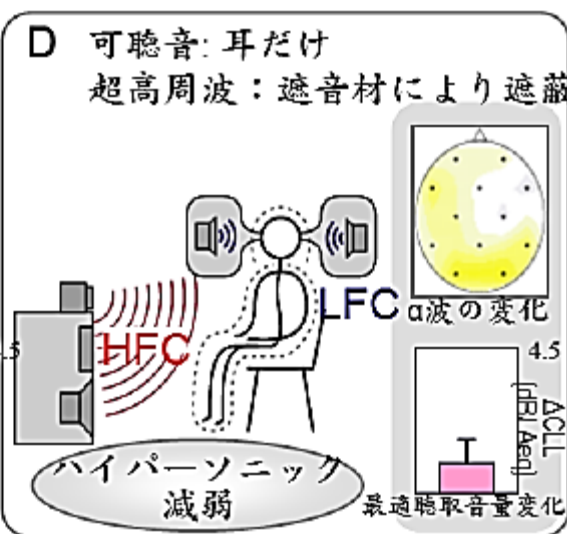
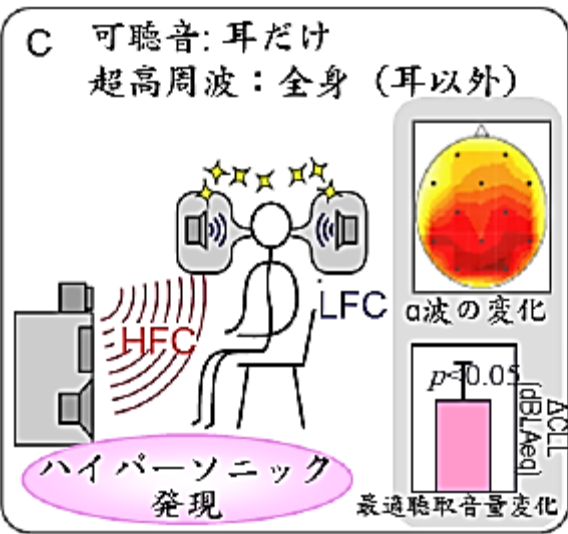
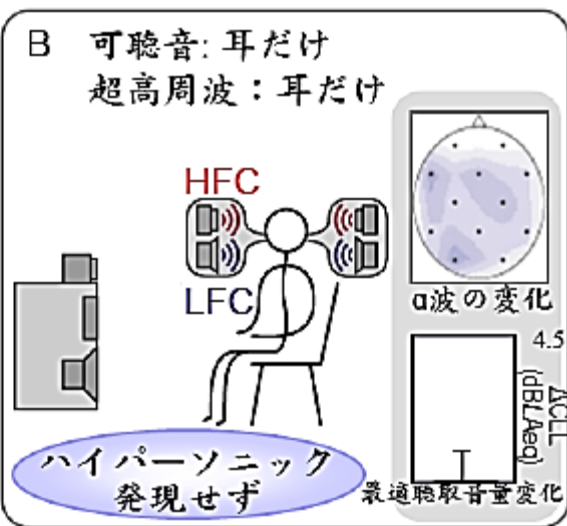
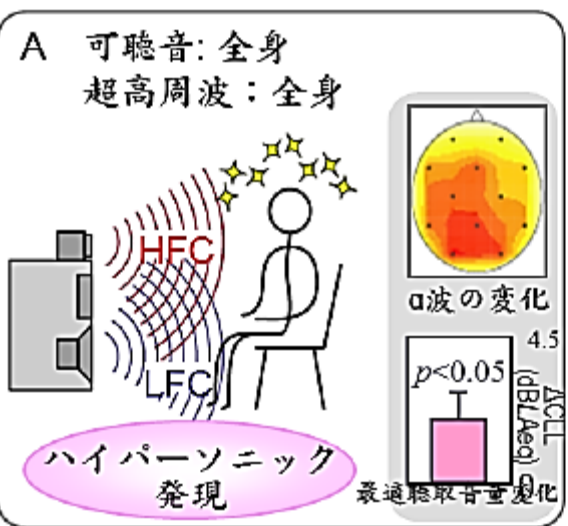
このような研究は
アナログ的センス
と興味が大切

検証実験: 超高周波音は脳を活性化させる

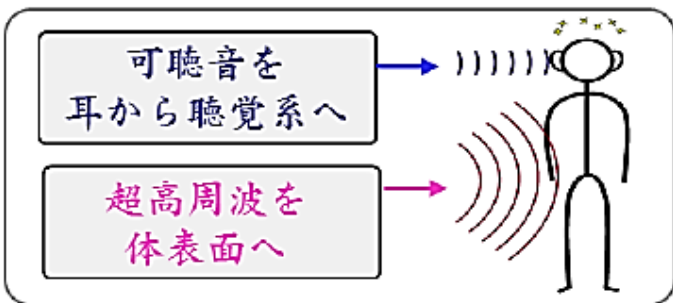


ハイパーソニック・エフェクト実験

耳に聴こえない超高周波振動を感受しているのは、耳ではなく体表面



ハイパーソニックを
発現させる
条件



ハイレゾ対応イヤホンでは
超高周波音は骨伝導で感受
している可能性がある。

皆もハイレゾ音源を
体感してみよう!

ハイエンドオーディオの世界

- ・ハイエンドオーディオの世界も興味津々
- ・回路技術や素材にとことんこだわる
回路は各社各様で解析すると面白い。
プリント基板に高価な低誘電率テフロン基板を使用など
さらにパターンは金メッキ
- ・装置一式揃えると数百万円以上

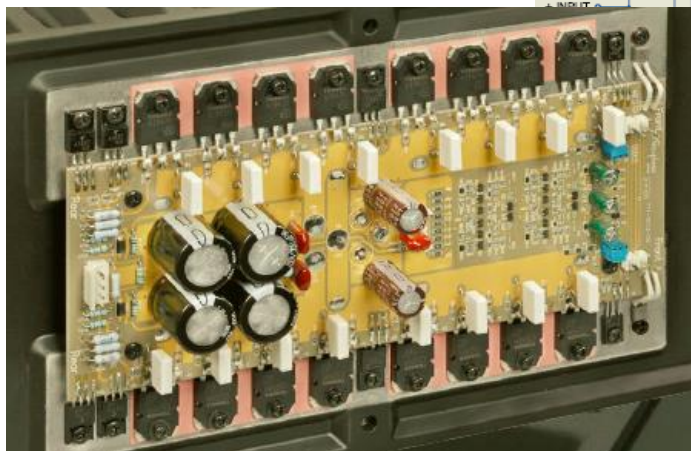
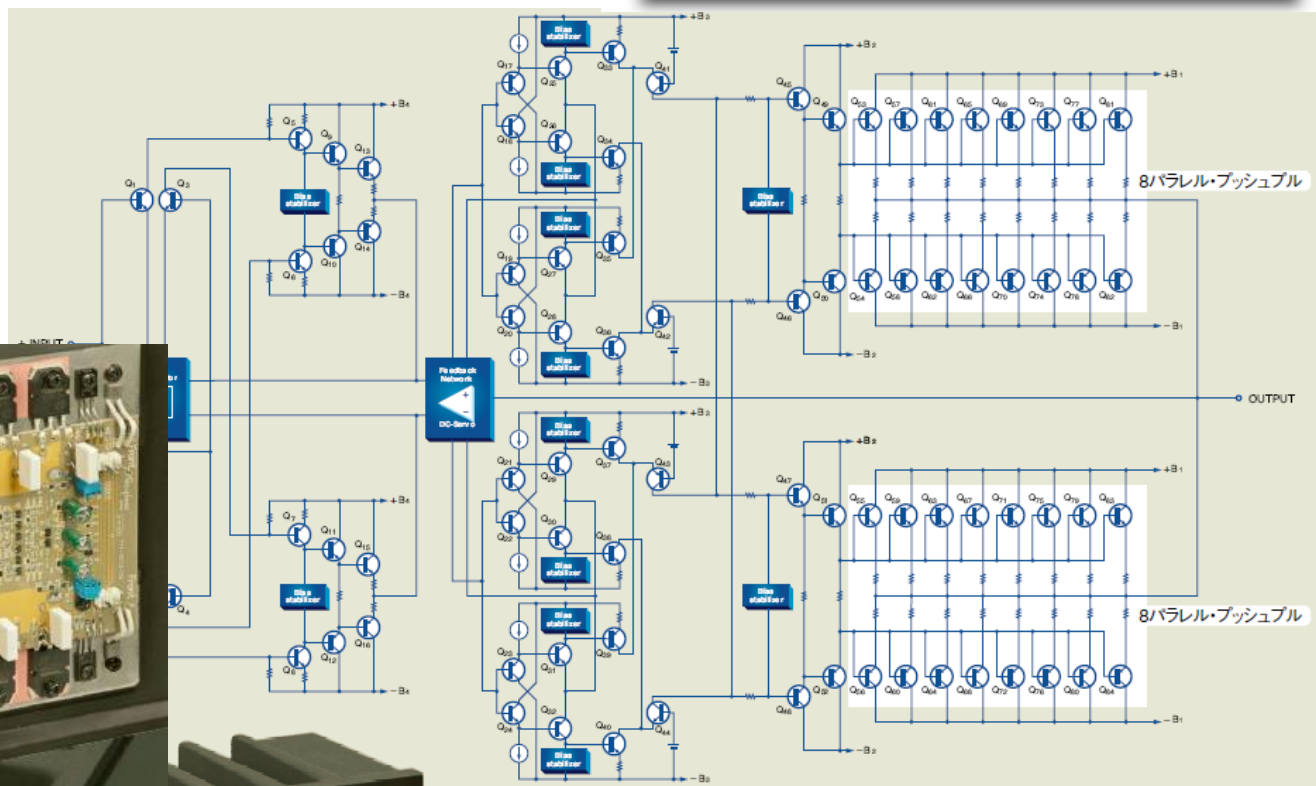


Accuphase

M-6200 パワーアンプ

最大出力: 1200W/1Ω

価格: 90万円/モノラル



高級オーディオ用オペアンプ: 新日本無線 MUSES03

汎用オペアンプ1個数十円以下に対して、MUSES03は1個4500円！

2017.3

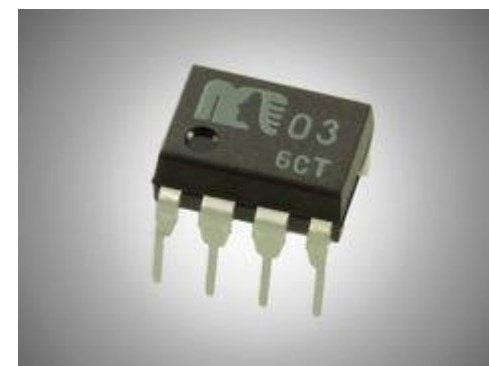
音質に徹底的こだわり開発された高級オーディオ用オペアンプ

汎用オペアンプは8ピンパッケージでデュアル型が多いが、MUSES03では干渉をさけてシングル型

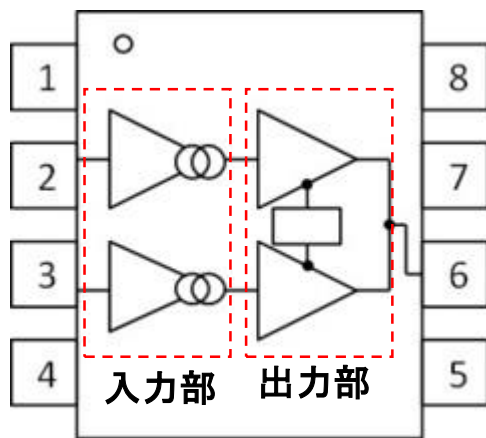
特徴:

- ・全高調波歪(THD)が0.00003%(1KHz)と驚異的
- ・内部回路は全差動型
- ・入力部と出力部を別チップ構成(出力部の電流変動や熱影響低減)
サーマルデistーション
- ・FET入力、低雑音(7.5nv/VHz)
- ・動作電源電圧は±3.5～±18V
- ・無酸素銅リードフレーム

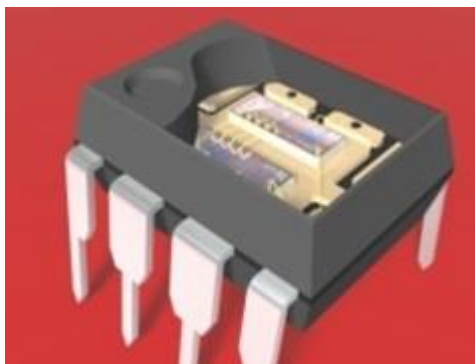
MUSES03



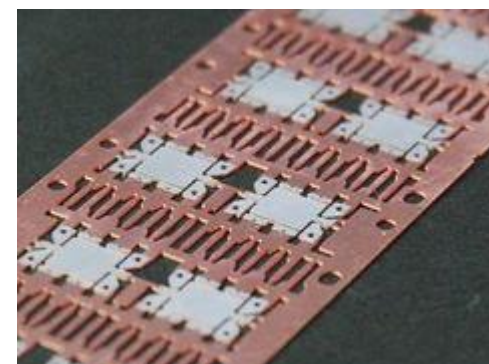
内部回路は差動型



入出力を別チップで構成



無酸素銅リードフレーム

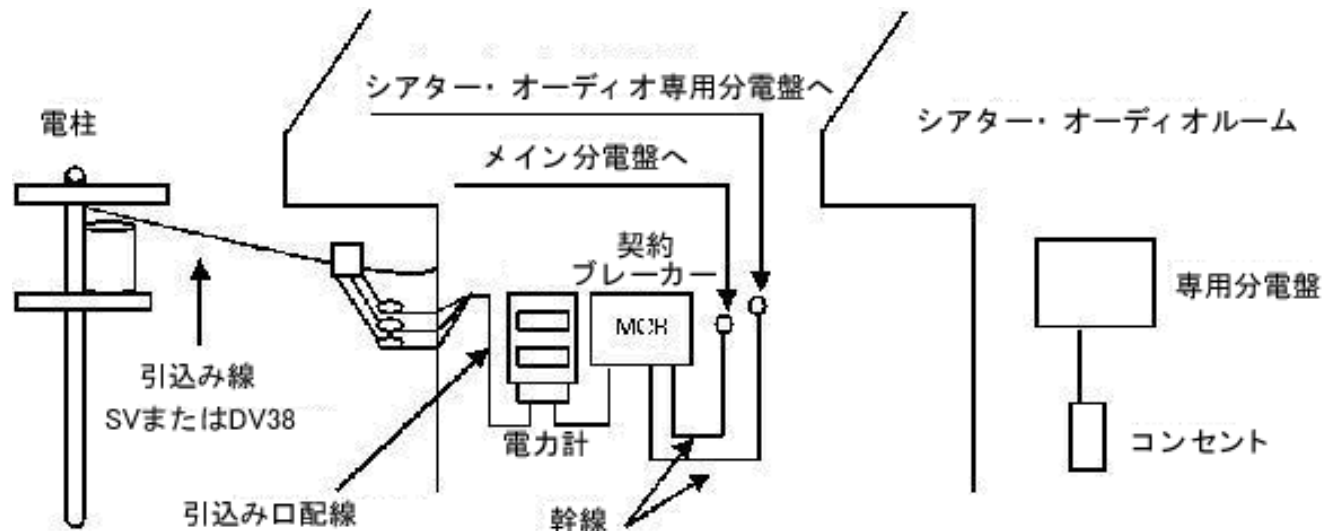


究極のオーディオマニアが行き着く「マイ電柱」

通常の電源ではとても満足できない——

- ・オーディオマニアは「ピュアな」電源を求め、約100万円をかけて庭に高さ12mのコンクリート製電柱を設置。電柱の真ん中に付いている円柱形のトランスから自分の家だけに電気が供給される「**マイ電柱**」
- ・通常の電柱ではトランスを近隣の多くの家と共用しているため、電氣的干渉で信号にノイズが生じ、微妙な音が聴こえなくなったり、演奏に奥行きがなくなったりする。
- ・自宅敷地内に専用トランス設けるため、負荷電流変化に対する電圧変動が少ない

我が家専用の 電柱とトランス (6KVから200/100V降圧)



真空管(Vacuum Tube)

真空管とは、限りなく真空中に近い状態の容器(ガラスや金属等)の内部に電極を封入し、電子を放出する電極(陰極)を高温(ヒーターやフィラメントにて)にして、陰極表面から電子を放出させ、この電子をグリッド(制御格子)で電圧制御し、発振、変調、検波、増幅などの作用を行うことができる電子管。エジソンが白熱電球の実験中に発見したエジソン効果(1884年)が端緒

各種真空管

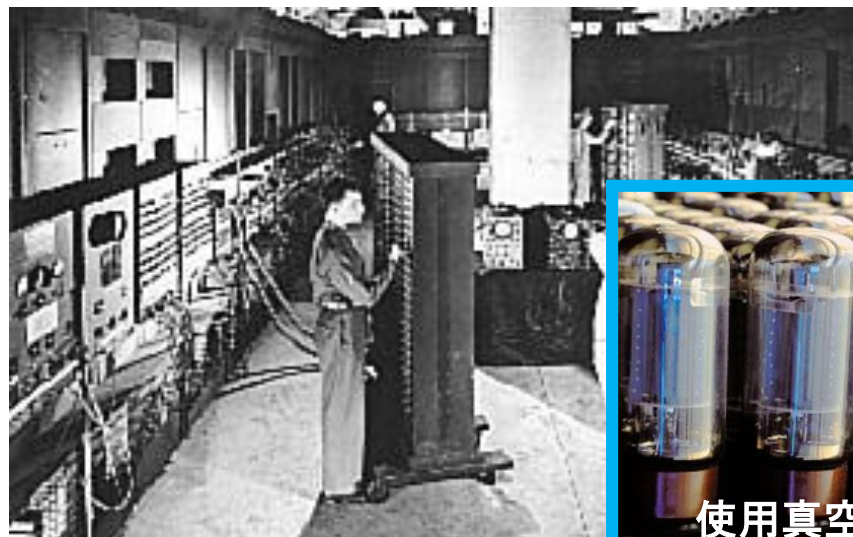
左から:ST管,GT管,MT管



1950年代まで、電子回路は真空管が中心だった(ラジオ、テレビなど)

Eniacコンピュータ(1946年)

17,468本の真空管を使用。消費電力150kW



真空管健在なり

2010年に35年ぶりの国産真空管デビュー：高槻電気工業

オーディオマニア、楽器用アンプで、今でも真空管アンプが人気



タイプ	ST 型真空管
品名	TA-300B
型式	直熱3 極管
フィラメント電圧/ 電流	5V/1.2A AC またはDC
最大プレート電圧	450V
最大プレート電流	100mA
最大プレート損失	40W

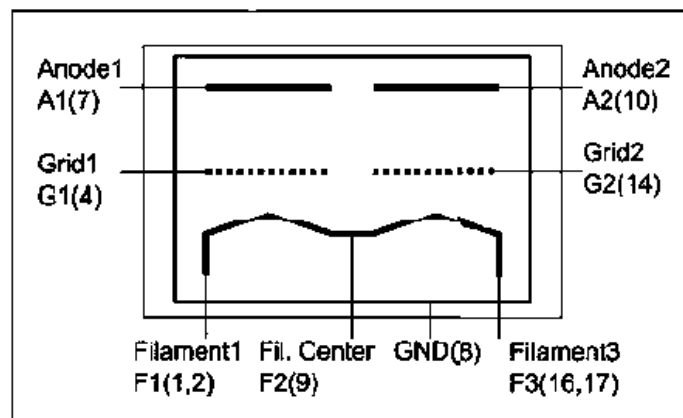
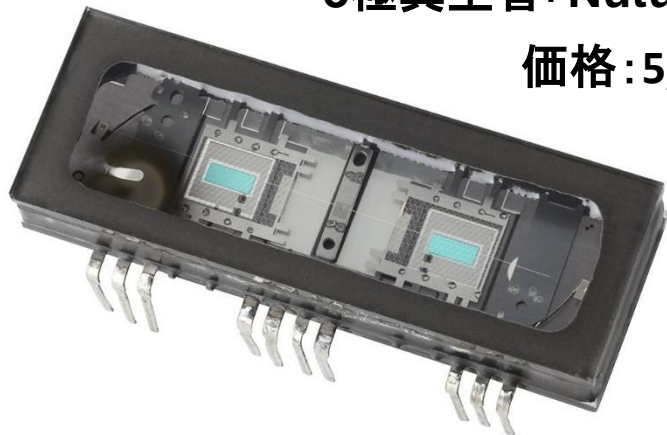
タイプ	ST型真空管
品名	TA-274B
型式	直熱双二極管(整流管)
フィラメント電圧/ 電流	5V/2A AC
最大プレート電圧(RMS)	660V/ プレート毎
最大DC 出力電流	225mA
最大過渡電流	2.5A 20msec 以内
ピークプレート電流	700mA/ プレート毎

音楽・音響機器用真空管「Nutube」 ノリタケ+コルグ 2015年1月

- ・真空管は、ギターアンプやオーディオ機器など、楽器/音響機器に真空管でしか表現することができない豊かな音質で今でも人気
- ・蛍光表示管技術を応用してその構造を工夫し、新しい真空管「Nutube(ニューチューブ)」を開発。従来の真空管に比べ、大幅な省電力化、小型化、品質向上に成功
 - 1) 大幅な省電力化を実現(従来の真空管比2%以下の電力で動作)
 - 2) 小型化に成功(容積比で従来真空管の30%以下)
 - 3) 高信頼性、長寿命(日本製、連続期待寿命 30,000時間)
 - 4) 基板への直接取り付けが可能(取付け治具不要)

3極真空管「Nutube」

価格:5,000円



フィラメント電圧/電流:0.7V/17mA
最大アノード電圧/電流/損失:80V/~34 μ A/1.7mW
トランスコンダクタンス $g_m=40\mu$ A/V、
増幅率 $\mu=12$ 、出力抵抗 $r_p=300k\Omega$

ちょっとした回路アイデアで、

オペアンプ回路で3極真空管特性を実現

オーディオマニアでは3極真空管
出力の音が人気。
ただし、3極管は低電流領域で歪む。

理想3極真空管特性を半導体回路で実現。
真空管 E_p-I_p 特性のカーブ群を全て等間隔
で平行に出来るuLTC回路考案
ultra Linear Triode Circuit

回路は極めてシンプル

オペアンプ+パワートランジスタ
+3個の抵抗のみ。

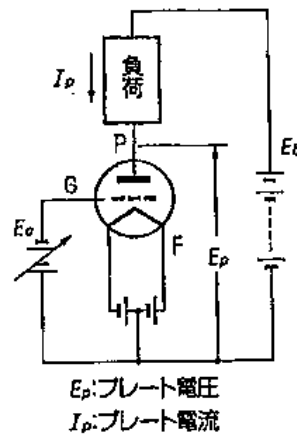
抵抗値決め方で、特性制御可能。

オーバオール負帰還なし、

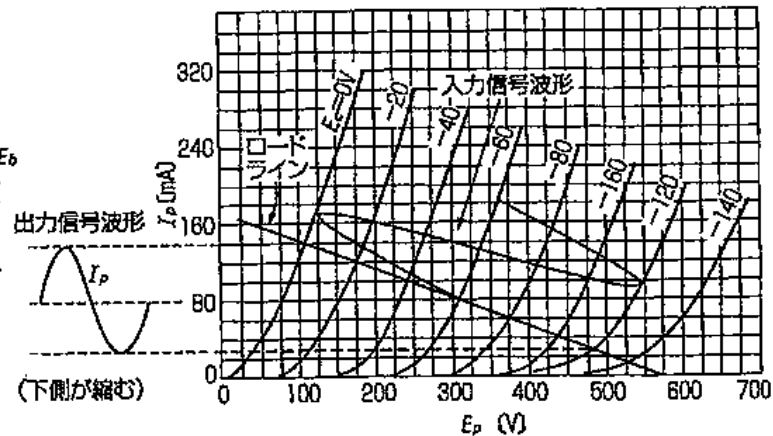
パワーアンプ設計可能。

ダンピングファクタも抵抗値設定で
制御可能。

アイデアは無限

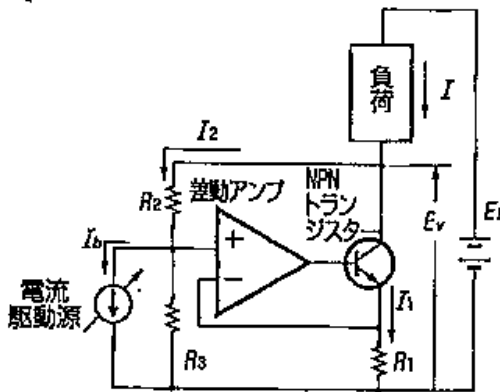


(a)基本回路

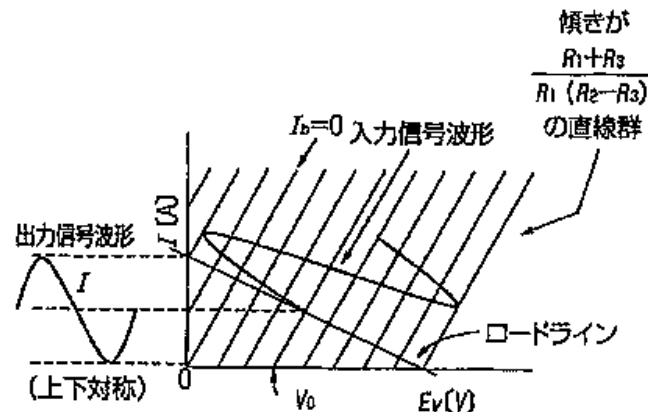


(b)WE300Bの E_p-I_p 特性と入出力波形例

$$\begin{cases} I=I_1+I_2 \dots\dots\dots(1) \\ R_3(I_2-I_b)=R_1 \cdot I_1 \dots\dots(2) \\ R_3(I_2-I_b)+R_2 \cdot I_2=E_v \dots(3) \end{cases} \quad I = \frac{R_1+R_3}{R_1(R_2+R_3)} \cdot E_v - \frac{R_3(R_2-R_1)}{R_1(R_2+R_3)} \cdot I_b \dots(4) \quad V_0 = \frac{R_3(R_2-R_1)}{R_1+R_3} \cdot I_b \dots(5)$$



(a)基本回路



(b) E_v-I 特性と入出力波形例

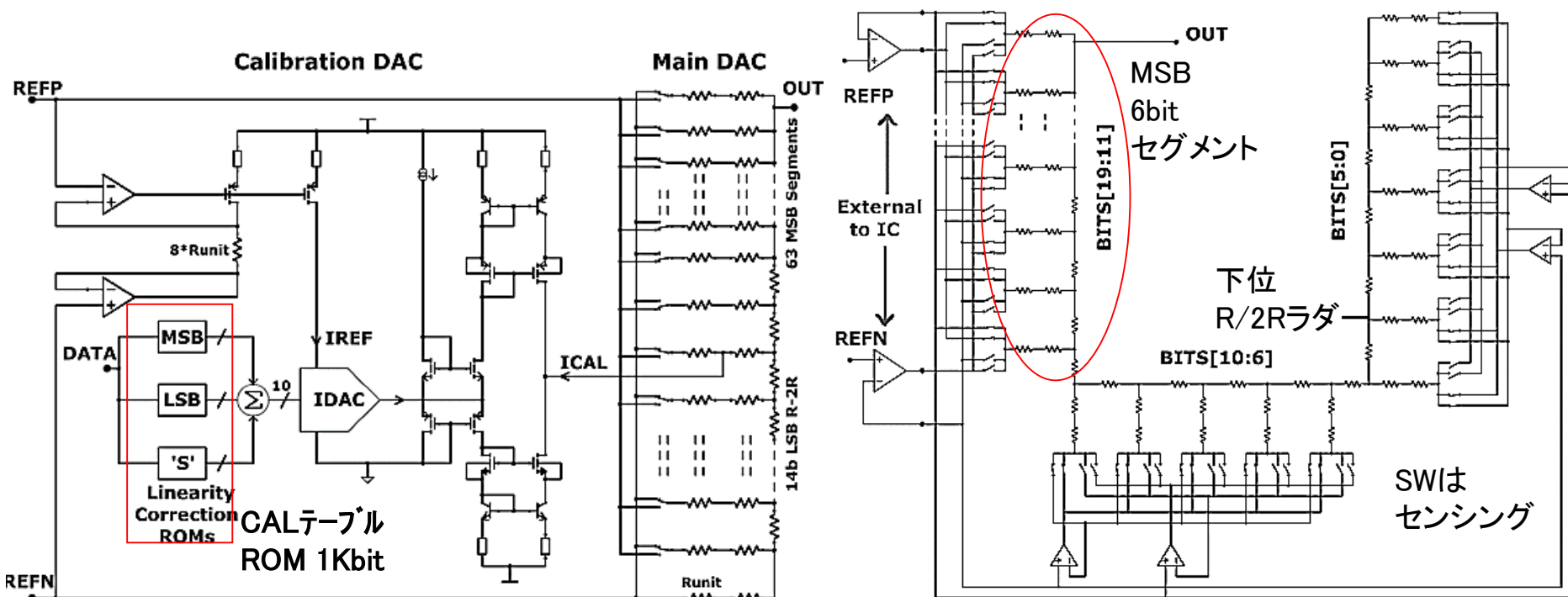
興味深いアナログICと アナログ話題のあれこれ

20bit 0.35LSBリニアリティモノリシックDAC

超高精度20bitモノリシックDA変換器IC

- ・DA変換方式はオーソドックスな上位6bitセグメント+14bit R-2R方式
- ・各セグメント抵抗は220kΩ (Rout=3.4KΩ)
- ・スイッチはON抵抗影響低減のためセンシングして高精度化
- ・高精度化のため高度CAL技術搭載。上位10bitをCALし内蔵FuseROMに書込み
- ・セグメント抵抗の自己発熱による非線形誤差をデジタル補正
- ・0.6μm BiCOSプロセスでモノリシックIC化

いかにも経験豊かな
「アナログの匠」が
設計したICとを感じる

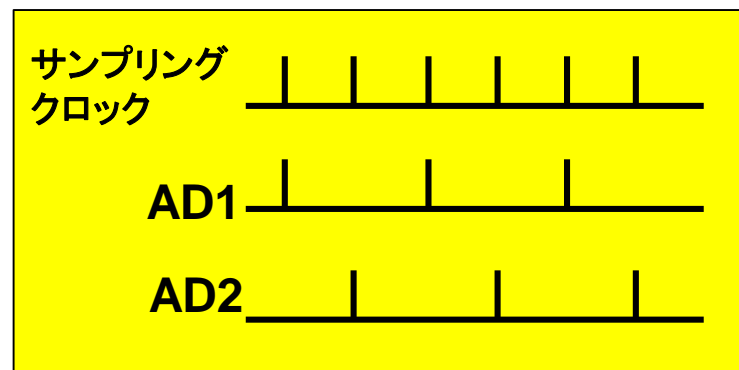


超多重インターリーブ型8bit/90Gbps超高速ADC

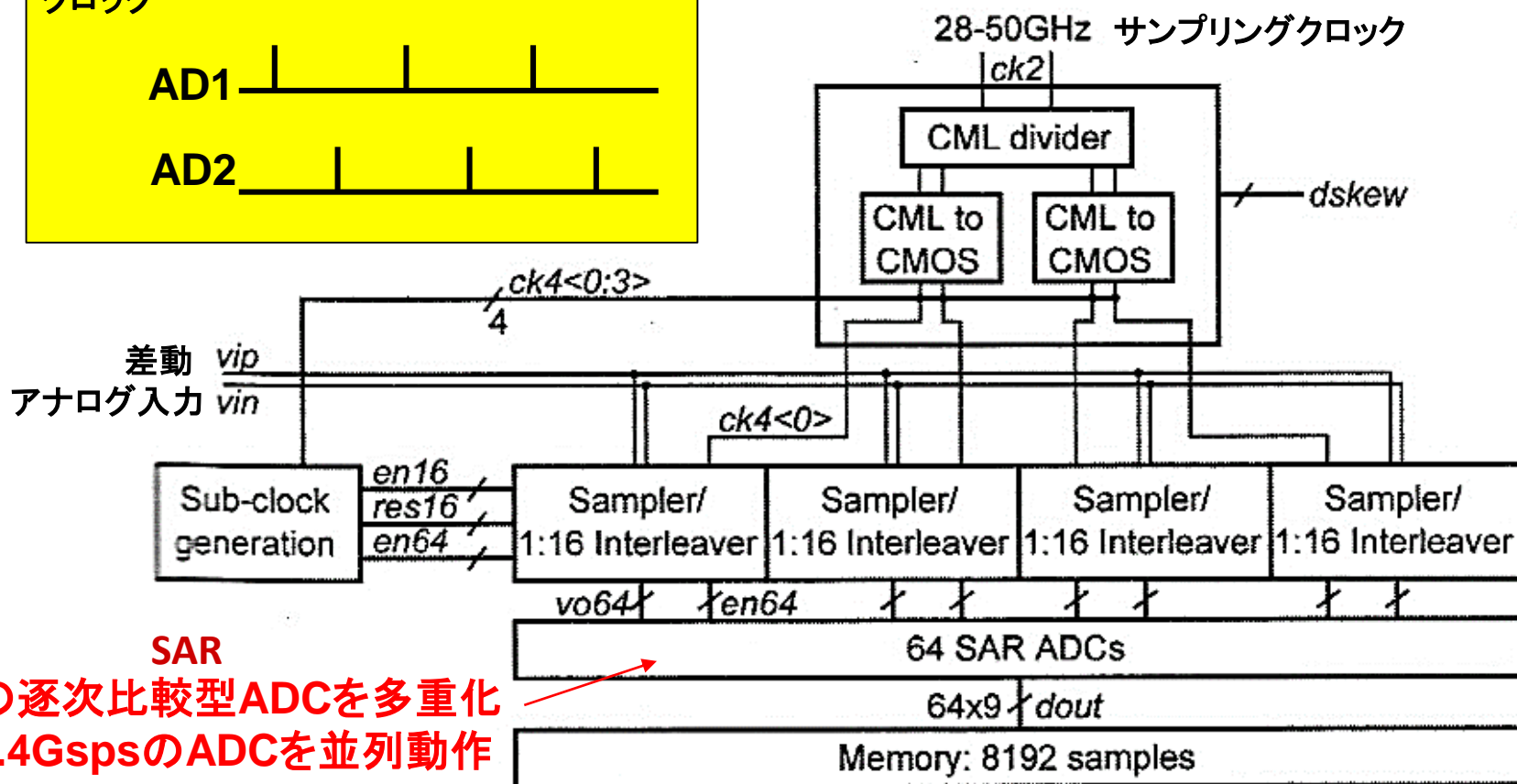
8bit/90Gbps CMOS ADC:64個のSAR方式ADCを多重化して高速化

電源電圧:1.2V、消費電力:667mW、プロセス:32nmSOI、エリア:470x960 μm

インターリーブ動作



ただし、インターリーブ多重方式ではデジタル補正技術が極めて重要



SAR
64個の逐次比較型ADCを多重化
8bit/1.4GbpsのADCを並列動作

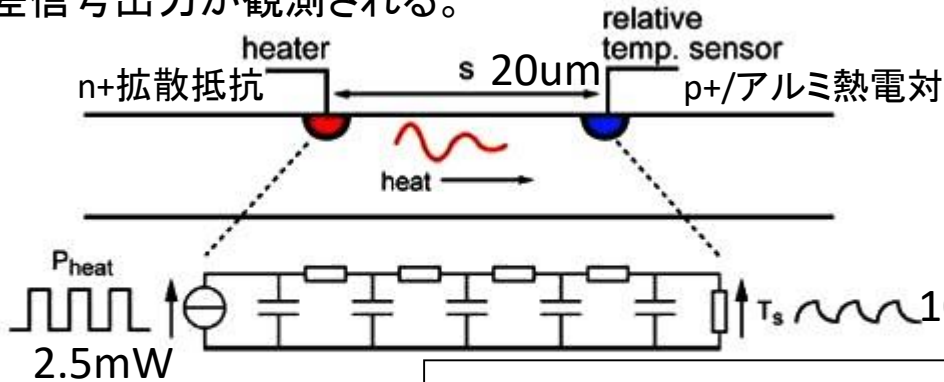
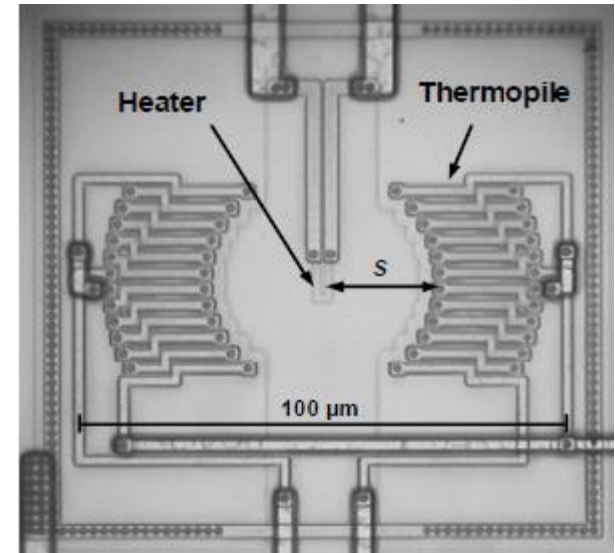
ETF技術による高精度温度計:Delft大

物質の熱拡散率を利用した高精度温度センサ

熱拡散率は物質固有の値であり、製造ばらつきの影響を受けにくい。トリムなしで高精度温度計測可能。

シリコン上にて、周波数 f_{drive} でヒータ駆動すると、距離 s 離れた温度センサ(熱電対)には、周囲温度 $T^{0.9}$ に比例した位相差信号出力が観測される。

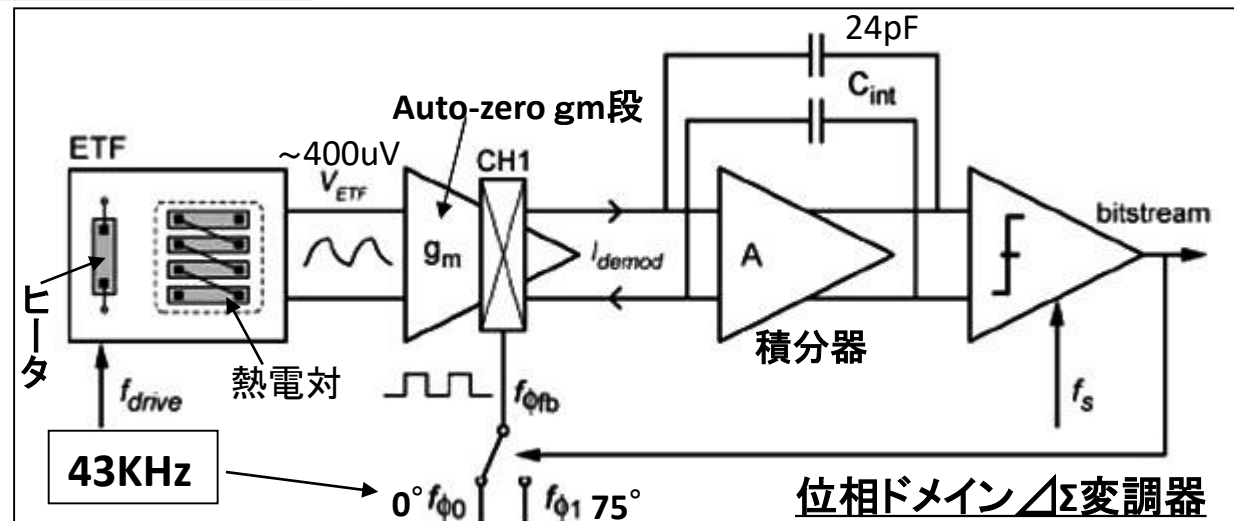
ETF部



100KHz駆動で90°遅れ(室温)

$$\phi_{ETF} \propto s \sqrt{f/D} \propto T^{0.9}$$

ϕ_{ETF} : ヒータと温度センサの信号位相差
 s : ヒータとセンサの距離
 D : シリコンの熱拡散率
 T : 温度

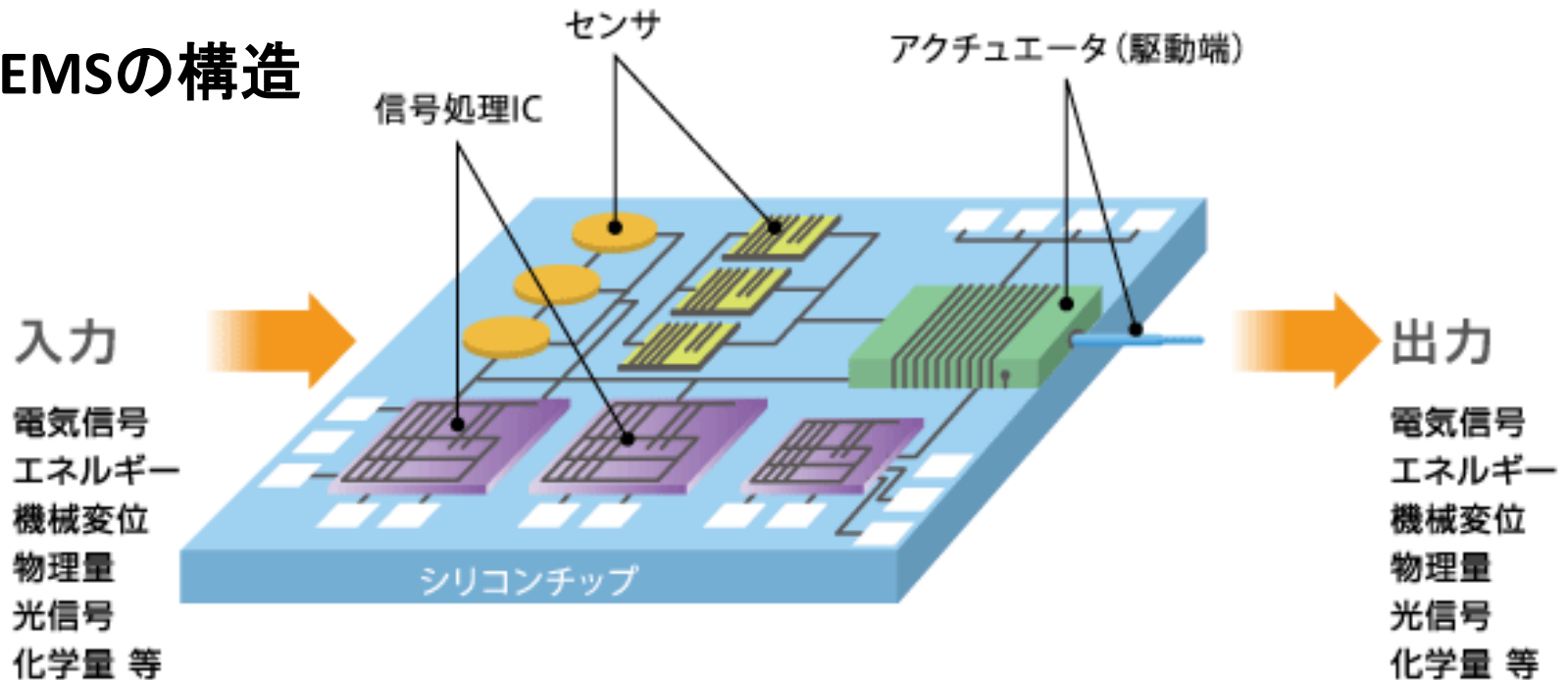


位相ドメインΔΣ変調器

MEMSについて

- MEMS(Micro Electro Mechanical Systems: 微小電子機械システム)は、半導体プロセスで1チップ上に電子回路と微小機械部品(センサやアクチュエータ)を集積したデバイス。
- 現在、身の回りの様々なところで使用されている。インクジェットプリンタのノズル、加速度センサ、シリコンマイク、プロジェクタ表示素子(DLP)など
- MEMSに搭載されるアナログ電子回路は極めて重要。**
高性能、高感度、低消費電力化などの回路設計技術が必要となる

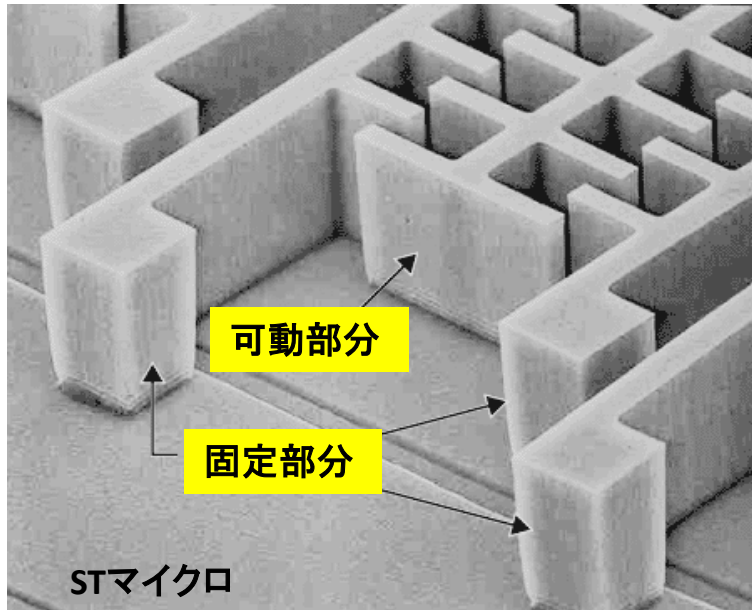
MEMSの構造



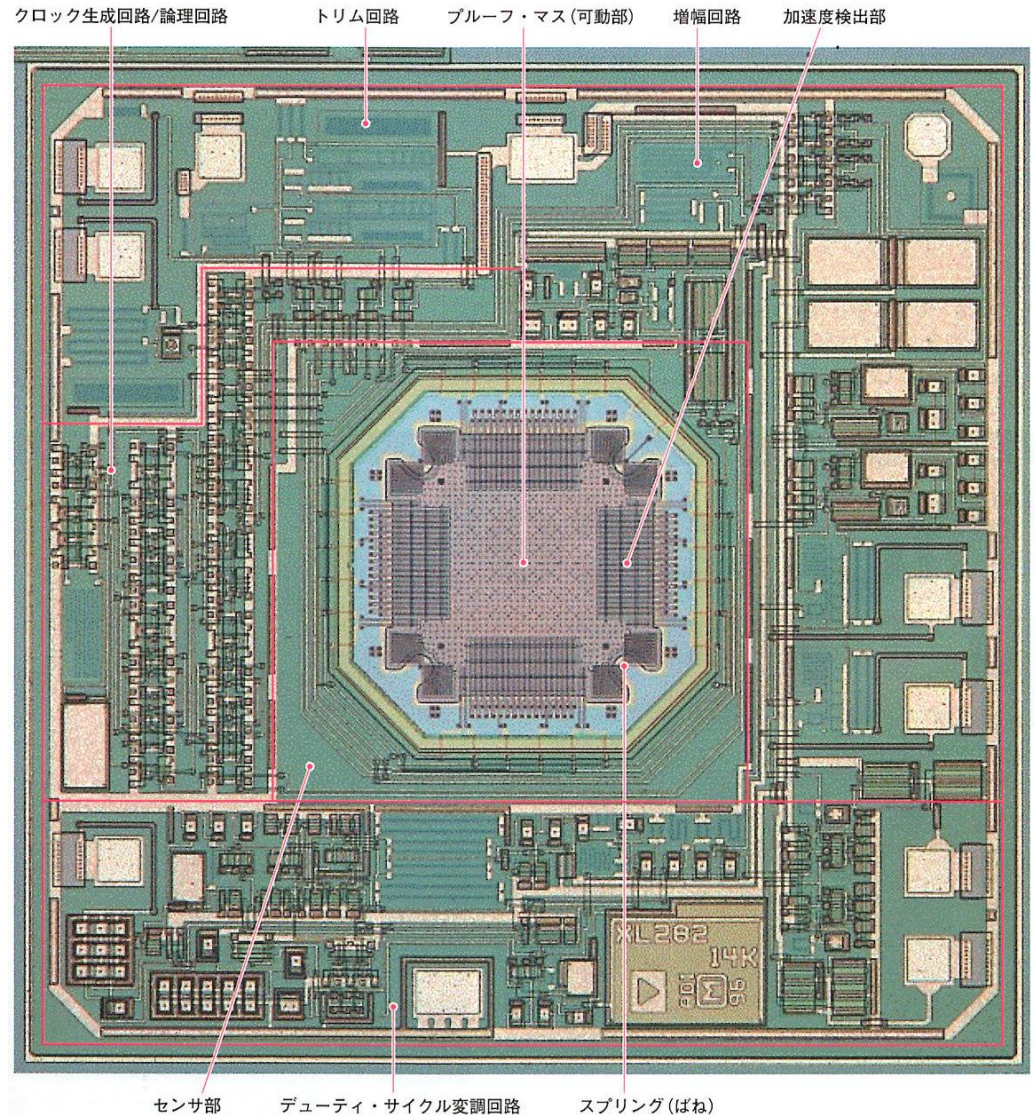
MEMS加速度センサ

半導体プロセスで、微小なメカニカル部品(センサ)と、アナログ信号処理電気回路を1チップ化。

質量を持つ可動部が加速度で動き、固定部分とで微小な容量変化を生じる。この容量変化を電気信号に変換する。チップ中央にセンサ部が、周辺に電気回路が集積されている。

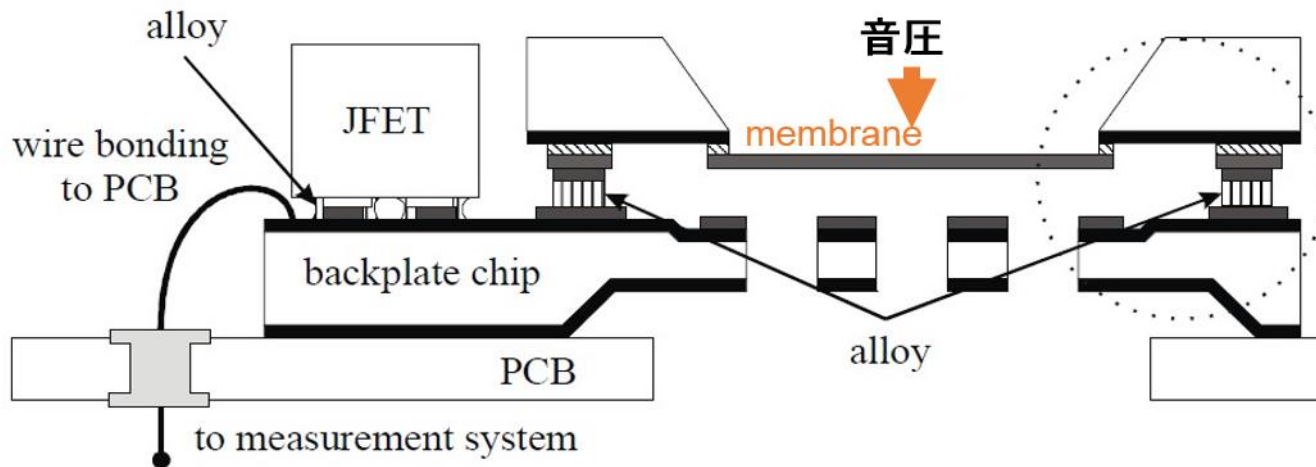


3軸加速度センサADXL202 Analog Devices

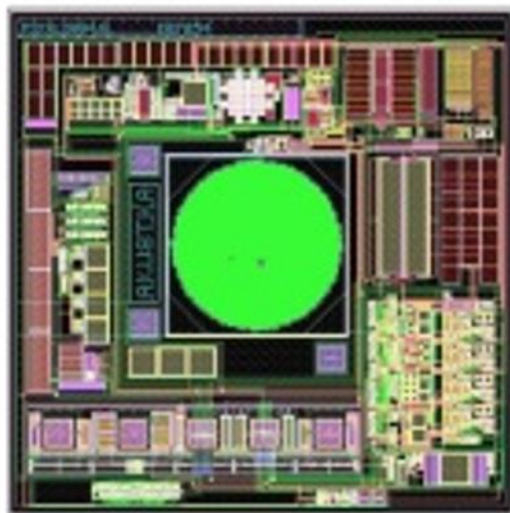


半導体技術によるMEMSシリコンマイク

最近のマイクロフォンは半導体プロセスを用いたMEMSシリコンマイク

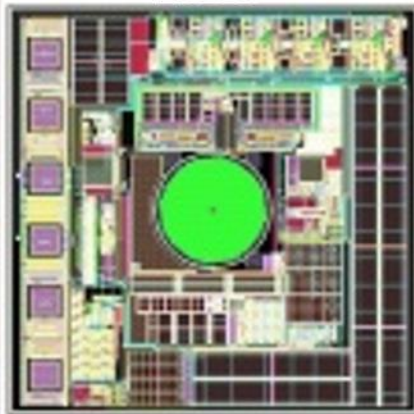


2006



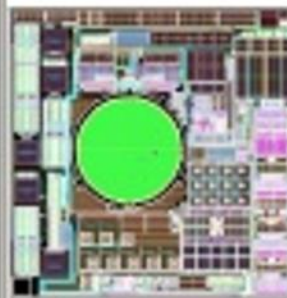
1.9mm x 1.9mm

2008



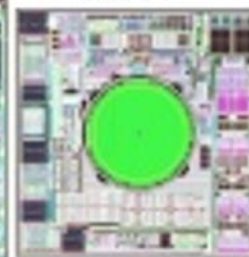
1.4mm x 1.4mm

2009



1.0mm x 1.0mm

2011



0.84mm x 0.84mm

シリコンマイクの進化

SONY「CLEDIS」 2017年1~3月発売

2016年5月発表

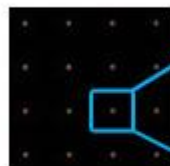
- ・CLEDISは、**画素ごとに微細なRGB-LED素子を配置した自発光高画質ディスプレイ技術**
- ・403×453mmの画面サイズを持つディスプレイユニットとディスプレイコントローラで構成
RGBのLEDで構成する画素数は1ユニット当たり320×360(=11万5200個)のLEDで構成
- ・ユニットの画面には枠がないため、複数ユニットを組み上げることで、目地のない大画面が構築
- ・72ユニットを並べると 220インチ(4.8m x 2.7m 対角5.5m)ディスプレイが構成できる
- ・RGBを1画素とする光源サイズは0.003mm²。画面表面の黒色が占める割合を99%以上
100万対1以上の高コントラストを実現



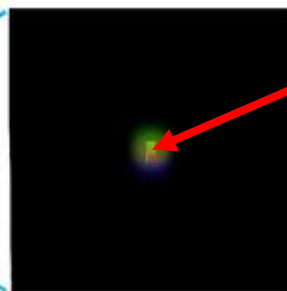
スケーラブル
超大型ディスプレイ

価格は220型の
4K×2Kシステム
で約1.2億円

ディスプレイユニット



403×453mm
320 x 360画素



1画素

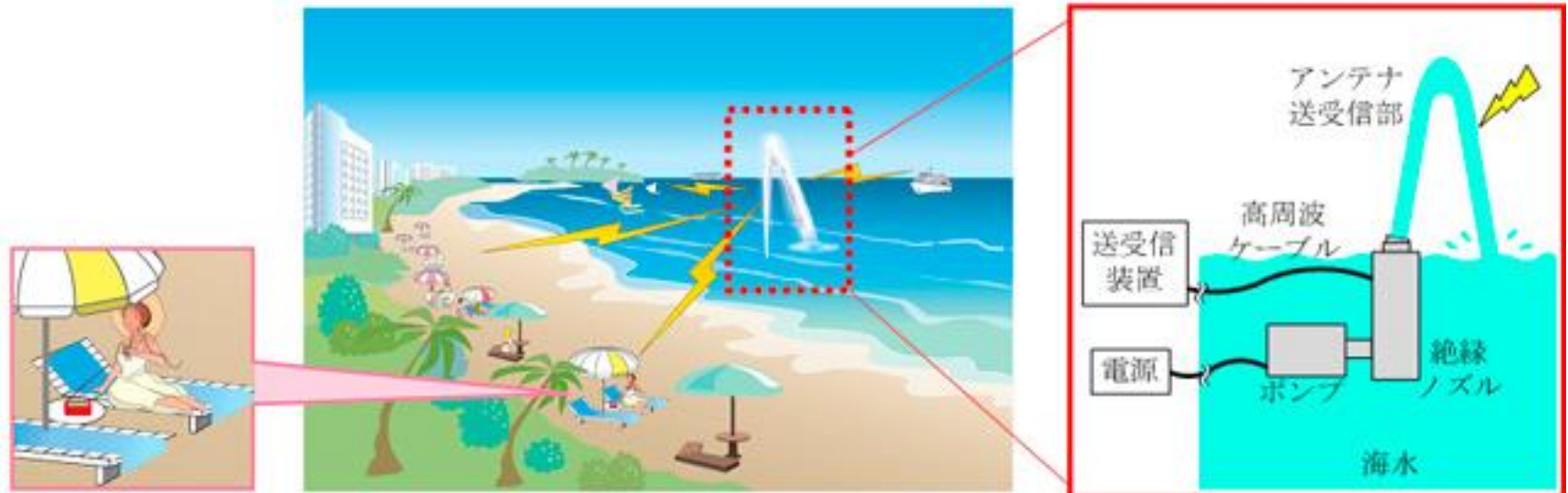
約0.003mm²の光源サイズを実現。
黒色が占める面積を99%以上

製造技術が興味津々。どうやって作るの？
220インチで800万個の極小LEDを使用

海水を噴射したらアンテナになる：三菱電機

2016.1

- ・導電性のある海水を空中に噴出し、生じた水柱をアンテナとして利用した海水アンテナ
- ・海岸や海上など海水があればどこにでも大規模構造物なしに容易に設置で移動も簡単
- ・形状を変えると様々な周波数や指向特性を得られる
- ・地上デジタル放送の受信実験を行い画像受信確認
- ・海水アンテナの効率は約70%
(スマホ内蔵アンテナでは30~80%)



生物模倣技術：シャープの家電

- ・「生物模倣技術」は、自然界に生息する生き物の機能や仕組みを参考にして、新たな技術開発や性能向上に結びつける技術のこと。例えば生物の羽形状や表面の微細な凹凸構造の活用など
- ・「生物模倣技術」を家電分野に積極的に取り入れてきたのがシャープ
- ・シャープは、「イルカ」「アホウドリ」「トンボ」「ネコ」「アサギマダラ(蝶)」といった動物や昆虫を参考にした白物家電製品を送り出してきた

トンボ、アホウドリ、イヌワシを参考にしたエアコン



生物の機能に学ぶ



極めた人が、世の中を変える力を持つ

Apple「Think Different」

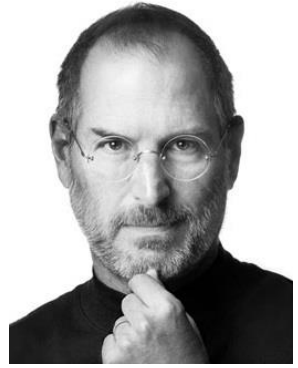


ジム・ヘンソン、マーティン・ルーサー・キング、マリア・カラス、パブロ・ピカソ、アルベルト・アインシュタイン、リチャード・ブランソン、マハトマ・ガンディー、ボブ・ディラン、アメリア・イアハート
これ以外にもジョン・レノンやモハメド・アリ他が取り上げられた。

<http://theinspirationroom.com/daily/commercials/2005/10/Apple-think-different.jpg>

ジョブズの想いが凝縮したキャンペーン
--自らを彼らに重ね合わせている--

クレージーな人たちに乾杯。
はみ出し者。反逆者。厄介者。変わり者。
ものごとが世間と違って見える人。
ルールなどわずらわしいだけの人。
現状など気にもしない人。
彼らを引き合いに出すことはできる。
否定することもできる。
たたえることもけなすこともできる。
できないことはおそらくただひとつ
---彼らを見無視すること。
なぜなら彼らは物事を変える人だから。
人類を前に進める人だから。
彼らをおかしいと評する人もいるけれど、
我々はそこに天才の姿を見る。
なぜなら、世界を変えられると信じるほど
おかしい人こそ、本当に世界を変える人なのだから。



**アナログの世界で名を残した
アナロググルには変わり者が多い！**