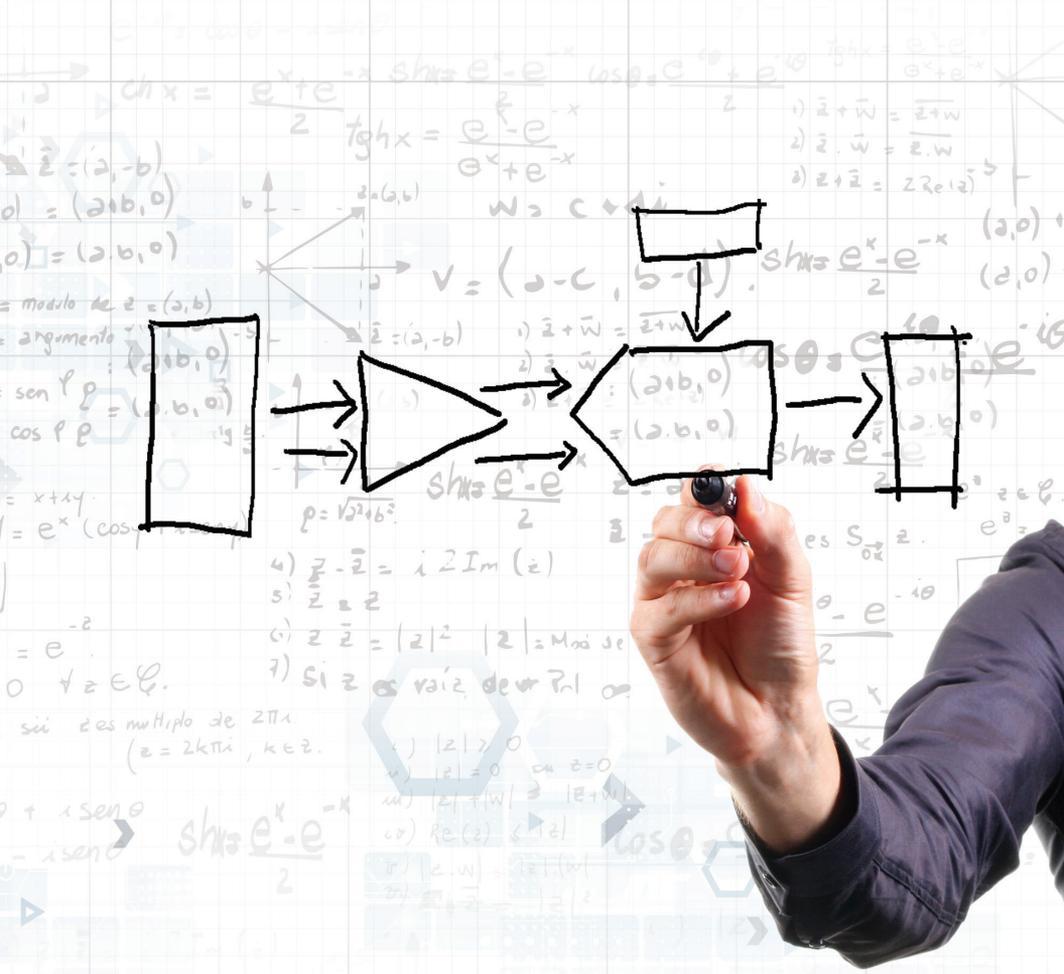


アナログ回路設計式一覽

ポケット・ガイド

編集：Art Kay、Tim Green



THESE MATERIALS ARE PROVIDED "AS IS." TI MAKES NO WARRANTIES OR REPRESENTATIONS WITH REGARD TO THESE MATERIALS OR USE OF THESE MATERIALS, EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING FOR ACCURACY, COMPLETENESS, OR SECURITY. TI DISCLAIMS ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, QUIET ENJOYMENT, QUIET POSSESSION, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS WITH REGARD TO THESE MATERIALS OR USE THEREOF. TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY THIRD PARTY CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON THESE MATERIALS. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, SPECIAL, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR INDIRECT DAMAGES, HOWEVER CAUSED, ON ANY THEORY OF LIABILITY AND WHETHER OR NOT TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES, ARISING IN ANY WAY OUT OF THESE MATERIALS OR YOUR USE OF THESE MATERIALS.

アナログ回路設計式一覧ポケット・ガイド

第4版

編集：

Art Kay

Tim Green

執筆 / 校閲：

Kevin Duke

Rafael Ordonez

John Caldwell

Collin Wells

Ian Williams

Thomas Kuehl

日本語校閲：

宮崎 仁

© 2014, 2015 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

はじめに

この「アナログ回路設計式一覧ポケット・ガイド」は、基板レベルやシステム・レベルの回路設計でよく使われるアナログ設計式を紹介しています。これまでハードコピーで断片的に利用されてきた設計式関連資料を、このようなポケット・ガイドとして一覧できる形でまとめたことにより、より多くのエンジニアの皆さまに、より頻繁に利用いただけるようになると確信しています。

本書の概要

- 主な定数と換算
- ディスクリート部品
- AC および DC アナログの公式
- オペアンプの基本構成
- オペアンプの帯域幅と安定性
- センサの概要
- PCB パターンの R、L、C
- 配線の L、R、C
- 2 進、16 進、10 進のフォーマット
- A/D および D/A 変換

このポケット・ガイドが皆様のアナログ回路設計実務に少しでもお役に立てることを心から願っています。なお、執筆、編集にあたっては、TI のエンジニアが半世紀にわたって蓄積してきたアナログに関する専門知識やノウハウが活用されています。また、日本語版の作成に際しては、アナログ回路設計で豊富な実績を持つテクニカル・ライターの方崎仁氏の校閲をいただきました。ご協力いただいた関係者の方々に、心からお礼申し上げます。

TI ではこのポケット・ガイドのほかに、エンジニアの皆様の設計現場ですぐに役立つ技術資料やサービスを提供しています。

- 「TI Precision Labs トレーニング・プログラム」(www.tij.co.jp/precisionlabs)
オペアンプなどのアナログ技術の基礎理論から実際の設計ノウハウまでを包括的に学べる、設計者向けのビデオ・カリキュラムです。
- 「TI Precision Designs リファレンス・デザイン・ライブラリ」(www.tij.co.jp/precisiondesigns)
高精度アナログ回路設計のリファレンス・デザインを収録しており、設計の迅速化に効果を発揮します。
- 「Precision Hub ブログ」(www.ti.com/thehub)
高精度アナログの最新技術動向や設計ノウハウなどをわかりやすく解説したブログ記事をお届けしています。
- 「TI E2E™ Community」(www.tij.co.jp/e2e)
TI のエンジニアとの双方向な情報共有を可能にするコミュニティで、質問への回答など、エンジニアの皆様に各種サポートを提供しています。

換算	7
物理定数	8
よく使われる 10 進接続辞	9
メートル法の換算	9
温度の換算	10
誤差の換算 (ppm とパーセント)	10
ディスクリート部品	11
抵抗のカラー・コード	12
抵抗値の標準数	13
実際のコンデンサのモデルと特性値	14
実際のコンデンサの周波数特性	15
コンデンサの種類概要	16
容量値の標準数	17
コンデンサのマーク表示と許容誤差	17
ダイオードと LED	18
アナログ	19
コンデンサの式 (直列、並列、電荷、エネルギー)	20
インダクタの式 (直列、並列、エネルギー)	21
コンデンサの充電と放電	23
RMS 電圧と平均電圧の定義	24
RMS 電圧と平均電圧の例	24
対数計算の公式	27
デシベル (dB) の定義	28
対数目盛	29
ポールとゼロの定義と例	30
時間遅れと位相遅れ	34
アンプ	35
オペアンプの基本構成	36
オペアンプの帯域幅	41
フルパワー帯域幅	42
小信号ステップ応答	43
ノイズの式	44
位相余裕	48
開ループ SPICE 解析による安定性評価	50
計装アンプのフィルタ	53
プリント基板 (PCB) と配線	55
PCB の導体間隔	56
PCB の内層パターンの自己発熱	57
PCB パターンの抵抗 (1oz および 2oz Cu)	58
パッケージの種類と寸法	60
PCB の平行平板パターンの容量	61
PCB のマイクロストリップの容量とインダクタンス	62
PCB の隣接する銅箔の容量	63
PCB のビアの容量とインダクタンス	64
一般的な同軸ケーブルの仕様	65
同軸ケーブルの式	66
各種配線の単位長さあたりの抵抗 (AWG 別)	67
各種配線の最大電流 (AWG 別)	68
センサ	69
温度センサの概要	70
サーミスタ	71
測温抵抗体 (RTD)	72
ダイオードの温度特性	74
熱電対 (J と K)	76
A/D 変換	81
2 進 /16 進変換	83
A/D 変換と D/A 変換の変換特性 (LSB、データ・フォーマット、FSR)	84
量子化誤差	90
信号対ノイズ比 (SNR)	91
全高調波歪み (THD)	92
信号対ノイズ比 + 歪み (SINAD)	94
有効ビット数 (ENOB)	94
ノイズフリー分解能と有効分解能	95
セトリング時間と変換精度	96

換算

- よく使われる 10 進接頭辞 •
- メートル法の換算 •
- 温度目盛りの換算 •
- 誤差の換算 (ppm とパーセント) •

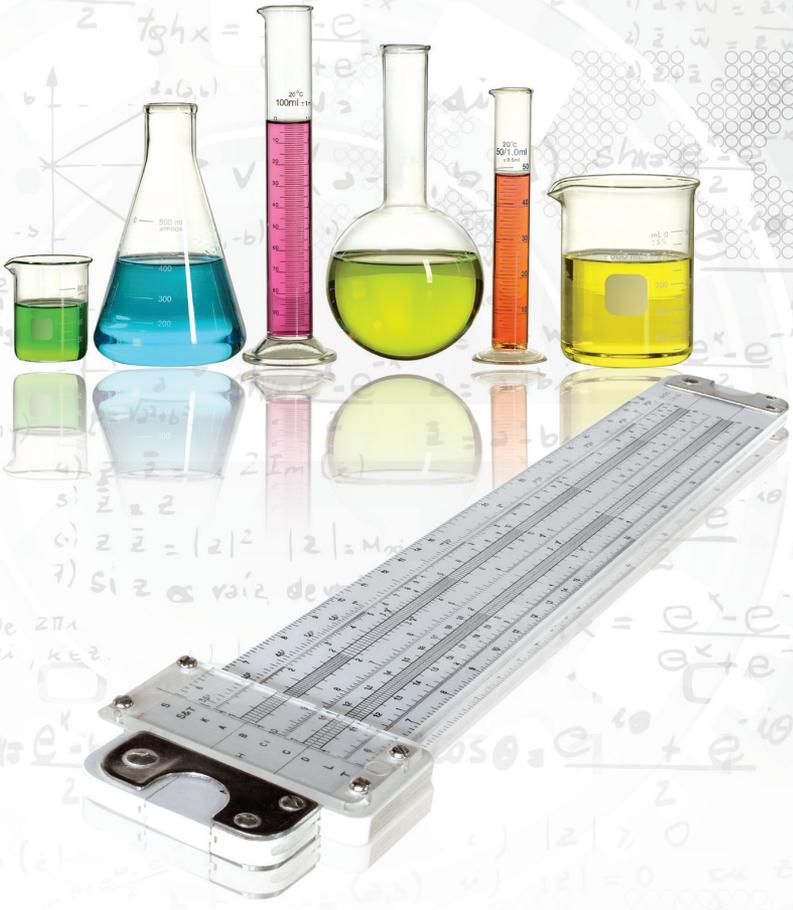


表 1: 物理定数

定数	記号	値	単位
真空中の光の速度	c	$2.997\ 924\ 58 \times 10^8$	m/s
真空の誘電率	ϵ_0	$8.854\ 187\ 817\ 620 \times 10^{-12}$	F/m
自由空間の透磁率	μ_0	$1.256\ 637\ 0614 \times 10^{-6}$	H/m
プランク定数	h	$6.626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$	J•s
ボルツマン定数	k	$1.380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$	J/K
ファラデー定数	F	$9.648\ 533\ 99 \times 10^4$	C/mol
アボガドロ定数	N_A	$6.022\ 141\ 29 \times 10^{23}$	1/mol
統一原子質量単位	m_u	$1.660\ 538\ 921 \times 10^{-27}$	kg
電気素量	q	$1.602\ 176\ 565 \times 10^{-19}$	C
電子の静止質量	m_e	$9.109\ 382\ 15 \times 10^{-31}$	kg
陽子の質量	m_p	$1.672\ 621\ 777 \times 10^{-27}$	kg
万有引力定数	G	$6.673\ 84 \times 10^{-11}$	Nm ² /kg ²
標準重力	g_n	9.806 65	m/s ²
氷点	T_{ice}	273.15	K
水の最大密度	ρ	1.00×10^3	kg/m ³
水銀の密度 (0°C)	ρ_{Hg}	$1.362\ 8 \times 10^4$	kg/m ³
気体定数	R	8.314 462 1	J/(K•mol)
空気中の音速 (273K 時)	C_{air}	3.312×10^2	m/s

表 2: よく使われる 10 進接頭辞

指数	接頭辞	略号
10^{12}	テラ (tera)	T
10^9	ギガ (giga)	G
10^6	メガ (mega)	M
10^3	キロ (kilo)	k
10^{-3}	ミリ (milli)	m
10^{-6}	マイクロ (micro)	μ
10^{-9}	ナノ (nano)	n
10^{-12}	ピコ (pico)	p
10^{-15}	フェムト (femto)	f
10^{-18}	アト (atto)	a

表 3: 英単位系からメートル法への換算

単位	記号	換算値	単位	記号
インチ	in	25.4mm/in	ミリメートル	mm
ミル	mil	0.0254mm/mil	ミリメートル	mm
フィート	ft	0.3048m/ft	メートル	m
ヤード	yd	0.9144m/yd	メートル	m
マイル	mi	1.6093km/mi	キロメートル	km
サーキュラー・ミル	cir mil	$5.067 \times 10^{-4} \text{mm}^2/\text{cir mil}$	平方ミリメートル	mm^2
平方ヤード	yd^2	0.8361m^2	平方メートル	m^2
パイント	pt	0.5682L/pt	リットル	L
オンス	oz	28.35g/oz	グラム	g
ポンド	lb	0.4536kg/lb	キログラム	kg
カロリー	cal	4.184J/cal	ジュール	J
馬力	hp	745.7W/hp	ワット	W

表 4: メートル法から英単位系への換算

単位	記号	換算	単位	記号
ミリメートル	mm	0.0394in/mm	インチ	in
ミリメートル	mm	39.4mil/mm	ミル	mil
メートル	m	3.2808ft/m	フィート	ft
メートル	m	1.0936yd/m	ヤード	yd
キロメートル	km	0.6214mi/km	マイル	mi
平方ミリメートル	mm^2	$1974 \text{cir mil}/\text{mm}^2$	サーキュラー・ミル	cir mil
平方メートル	m^2	$1.1960 \text{yd}^2/\text{m}^2$	平方ヤード	yd^2
リットル	L	1.7600pt/L	パイント	pt
グラム	g	0.0353oz/g	オンス	oz
キログラム	kg	2.2046lb/kg	ポンド	lb
ジュール	J	0.239cal/J	カロリー	cal
ワット	W	$1.341 \times 10^{-3} \text{hp}/\text{W}$	馬力	hp

例

10mmをミル (mil) に換算しなさい。

答え

$$10\text{mm} \times 39.4 \frac{\text{mil}}{\text{mm}} = 394\text{mil}$$

表 5: 温度の換算

$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32)$	華氏から摂氏
$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{C}) + 32$	摂氏から華氏
$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$	摂氏からケルビン
$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$	ケルビンから摂氏

表 6: 誤差の換算

$\text{Error}(\%) = \frac{\text{Measured} - \text{Ideal}}{\text{Ideal}} \times 100$	測定値の誤差
$\text{Error}(\% \text{FSR}) = \frac{\text{Measured} - \text{Ideal}}{\text{Full-scale range}} \times 100$	フルスケール・レンジを 100 としたパーセント誤差
$\% = \frac{\text{ppm}}{10^6} \times 100$	ppm からパーセント
$\text{m}\% = \frac{\text{ppm}}{10^6} \times 100 \times 1000$	ppm からミリパーセント
$\text{ppm} = \% \times 10^4$	パーセントから ppm
$\text{ppm} = \text{m}\% \times 10$	ミリパーセントから ppm

例

理想値 0.1V、レンジ 5V の場合、測定値 0.12V に対する誤差を計算しなさい。

答え

$$\text{Error}(\%) = \frac{0.12\text{V} - 0.1\text{V}}{0.1\text{V}} \times 100 = 20\% \quad \text{測定値の誤差}$$

$$\text{Error}(\% \text{FSR}) = \frac{0.12 - 0.1\text{V}}{5\text{V}} \times 100 = 0.4\% \quad \text{パーセント FSR}$$

例

10 ppm をパーセントとミリパーセントに換算しなさい。

答え

$$\frac{10 \text{ ppm}}{10^6} \times 100 = 0.001\% \quad \text{ppm からパーセントへの換算}$$

$$\frac{10 \text{ ppm}}{10^6} \times 100 \times 1000 = 1 \text{ m}\% \quad \text{ppm からミリパーセントへの換算}$$

ディスクリート部品

- 抵抗のカラー・コード
- 抵抗値の標準数
- コンデンサの仕様
- コンデンサの種類概要
- 容量値の標準数
- コンデンサのマーク表示と許容誤差

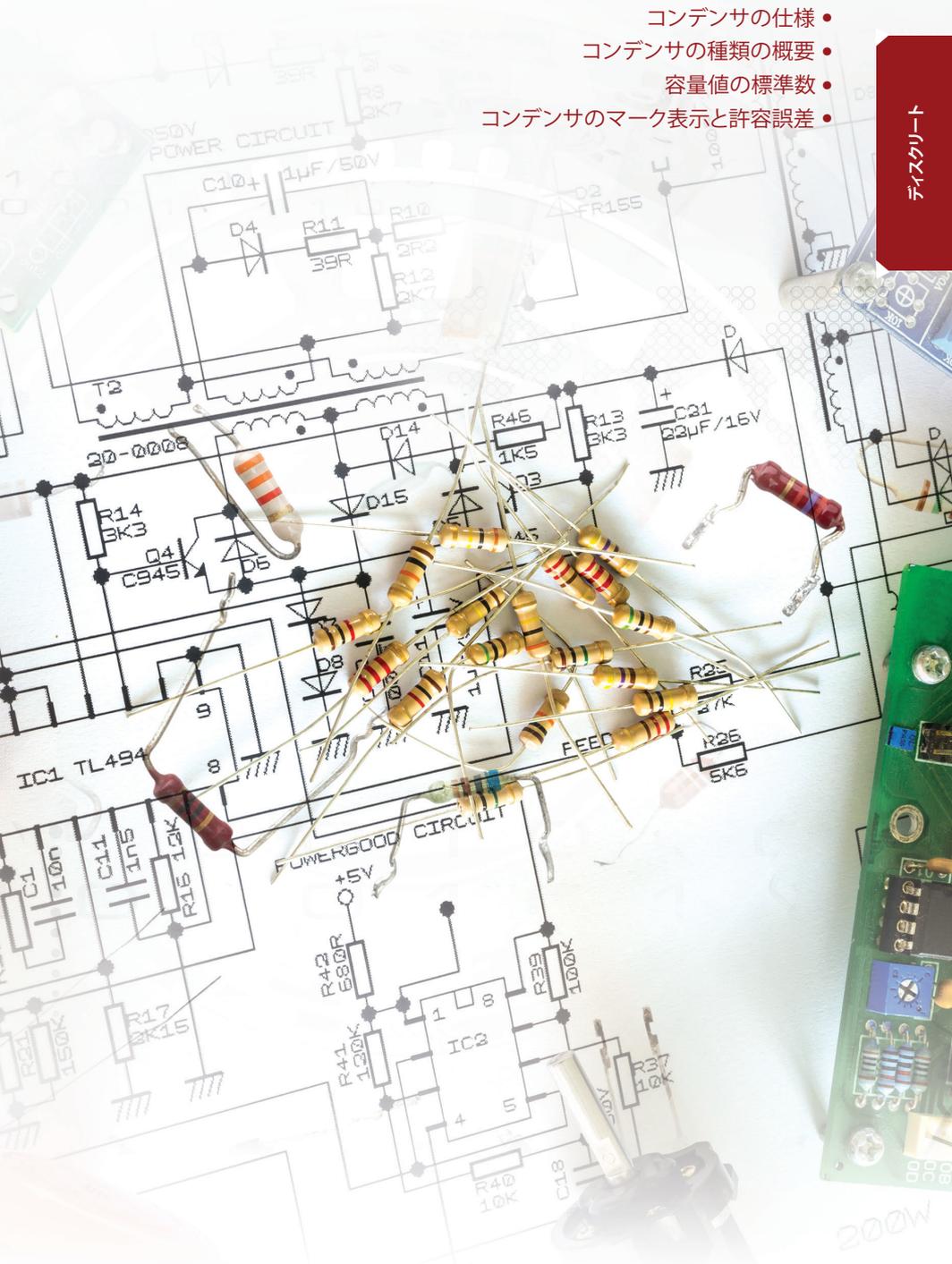


表 7: 抵抗のカラー・コード

色	桁	追加する ゼロの数 (乗数)	許容誤差	温度係数	故障率
黒	0	0		250	
茶	1	1	1%	100	1
赤	2	2	2%	50	0.1
橙	3	3		15	0.01
黄	4	4		25	0.001
緑	5	5	0.5%	20	
青	6	6	0.25%	10	
紫	7	7	0.1%	5	
灰	8	8	0.05%	1	
白	9	9			
金	該当なし	-1	5%		
銀	該当なし	-2	10%		
なし	該当なし	該当なし	20%		

4 桁表示の例: 「黄 - 紫 - 橙 - 銀」は、「4-7-3 つのゼロ - 許容誤差 10%」を示します。
つまり 47kΩ、許容誤差 10% の抵抗です。

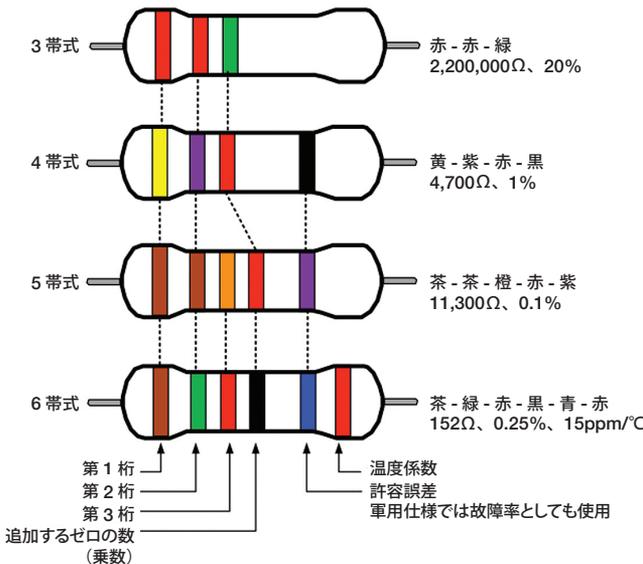


図 1: 抵抗のカラー・コード

表 8: 抵抗値の標準数

10 ~ 100 の範囲の抵抗値の標準数																						
	2%			5%			10%			1%			0.1% ~ 0.5%									
	0.1%	0.25%	0.5%	0.1%	0.25%	0.5%	0.1%	0.25%	0.5%	0.1%	0.25%	0.5%	0.1%	0.25%	0.5%							
10.0	10.0	10.0	10	14.7	14.7	14.7	21.5	21.5	21.5	31.6	31.6	31.6	46.4	46.4	46.4	68.1	68.1	68.1	88.1	88.1	88.1	108
10.1				14.9	14.9	14.9	21.8	21.8	21.8	32.0	32.0	32.0	47.0	47.0	47.0	69.0	69.0	69.0	89.0	89.0	89.0	109
10.2	10.2	10.2	15	15.0	15.0	15.0	22.1	22.1	22.1	32.4	32.4	32.4	47.5	47.5	47.5	69.8	69.8	69.8	89.8	89.8	89.8	110
10.4				15.2	15.2	15.2	22.3	22.3	22.3	32.8	32.8	32.8	48.1	48.1	48.1	70.6	70.6	70.6	90.6	90.6	90.6	112
10.5	10.5	10.5	15	15.4	15.4	15.4	22.6	22.6	22.6	33.2	33.2	33.2	48.7	48.7	48.7	71.5	71.5	71.5	91.5	91.5	91.5	113
10.6				15.6	15.6	15.6	22.9	22.9	22.9	33.6	33.6	33.6	49.3	49.3	49.3	72.3	72.3	72.3	92.3	92.3	92.3	114
10.7	10.7	10.7	16	15.8	15.8	15.8	23.2	23.2	23.2	34.0	34.0	34.0	49.9	49.9	49.9	73.2	73.2	73.2	93.2	93.2	93.2	115
10.9				16.0	16.0	16.0	23.4	23.4	23.4	34.4	34.4	34.4	50.5	50.5	50.5	74.1	74.1	74.1	94.1	94.1	94.1	116
11.0	11.0	11.0	11	16.2	16.2	16.2	23.7	23.7	23.7	34.8	34.8	34.8	51.1	51.1	51.1	75.0	75.0	75.0	95.0	95.0	95.0	117
11.1				16.4	16.4	16.4	24.0	24.0	24.0	35.2	35.2	35.2	51.7	51.7	51.7	75.9	75.9	75.9	96.0	96.0	96.0	118
11.3	11.3	11.3	16	16.5	16.5	16.5	24.3	24.3	24.3	35.7	35.7	35.7	52.3	52.3	52.3	76.8	76.8	76.8	97.0	97.0	97.0	119
11.4				16.7	16.7	16.7	24.6	24.6	24.6	36.1	36.1	36.1	53.0	53.0	53.0	77.7	77.7	77.7	98.0	98.0	98.0	120
11.5	11.5	11.5	17	16.9	16.9	16.9	24.9	24.9	24.9	36.5	36.5	36.5	53.6	53.6	53.6	78.7	78.7	78.7	99.0	99.0	99.0	121
11.7				17.2	17.2	17.2	25.2	25.2	25.2	37.0	37.0	37.0	54.2	54.2	54.2	79.6	79.6	79.6	100.0	100.0	100.0	122
11.8	11.8	11.8	12	17.4	17.4	17.4	25.5	25.5	25.5	37.4	37.4	37.4	54.9	54.9	54.9	80.6	80.6	80.6	101.0	101.0	101.0	123
12.0				17.6	17.6	17.6	25.8	25.8	25.8	37.9	37.9	37.9	55.6	55.6	55.6	81.6	81.6	81.6	102.0	102.0	102.0	124
12.1	12.1	12.1	18	17.8	17.8	17.8	26.1	26.1	26.1	38.3	38.3	38.3	56.2	56.2	56.2	82.5	82.5	82.5	103.0	103.0	103.0	125
12.3				18.0	18.0	18.0	26.4	26.4	26.4	38.8	38.8	38.8	56.9	56.9	56.9	83.5	83.5	83.5	104.0	104.0	104.0	126
12.4	12.4	12.4	19	18.2	18.2	18.2	26.7	26.7	26.7	39.2	39.2	39.2	57.6	57.6	57.6	84.5	84.5	84.5	105.0	105.0	105.0	127
12.6				18.4	18.4	18.4	27.1	27.1	27.1	39.7	39.7	39.7	58.3	58.3	58.3	85.6	85.6	85.6	106.0	106.0	106.0	128
12.7	12.7	12.7	20	18.7	18.7	18.7	27.4	27.4	27.4	40.2	40.2	40.2	59.0	59.0	59.0	86.6	86.6	86.6	107.0	107.0	107.0	129
12.9				18.9	18.9	18.9	27.7	27.7	27.7	40.7	40.7	40.7	59.7	59.7	59.7	87.6	87.6	87.6	108.0	108.0	108.0	130
13.0	13.0	13.0	13	19.1	19.1	19.1	28.0	28.0	28.0	41.2	41.2	41.2	60.4	60.4	60.4	88.7	88.7	88.7	109.0	109.0	109.0	131
13.2				19.3	19.3	19.3	28.4	28.4	28.4	41.7	41.7	41.7	61.2	61.2	61.2	89.8	89.8	89.8	110.0	110.0	110.0	132
13.3	13.3	13.3	20	19.6	19.6	19.6	28.7	28.7	28.7	42.2	42.2	42.2	61.9	61.9	61.9	90.9	90.9	90.9	111.0	111.0	111.0	133
13.5				19.8	19.8	19.8	29.1	29.1	29.1	42.7	42.7	42.7	62.6	62.6	62.6	92.0	92.0	92.0	112.0	112.0	112.0	134
13.7	13.7	13.7	21	20.0	20.0	20.0	29.4	29.4	29.4	43.2	43.2	43.2	63.4	63.4	63.4	93.1	93.1	93.1	113.0	113.0	113.0	135
13.8				20.3	20.3	20.3	29.8	29.8	29.8	43.7	43.7	43.7	64.2	64.2	64.2	94.2	94.2	94.2	114.0	114.0	114.0	136
14.0	14.0	14.0	22	20.5	20.5	20.5	30.1	30.1	30.1	44.2	44.2	44.2	65.0	65.0	65.0	95.3	95.3	95.3	115.0	115.0	115.0	137
14.2				20.8	20.8	20.8	30.5	30.5	30.5	44.8	44.8	44.8	65.7	65.7	65.7	96.5	96.5	96.5	116.0	116.0	116.0	138
14.3	14.3	14.3	23	21.0	21.0	21.0	30.9	30.9	30.9	45.3	45.3	45.3	66.5	66.5	66.5	97.6	97.6	97.6	117.0	117.0	117.0	139
14.5				21.3	21.3	21.3	31.2	31.2	31.2	45.9	45.9	45.9	67.3	67.3	67.3	98.8	98.8	98.8	118.0	118.0	118.0	140

実際のコンデンサのモデルと特性値

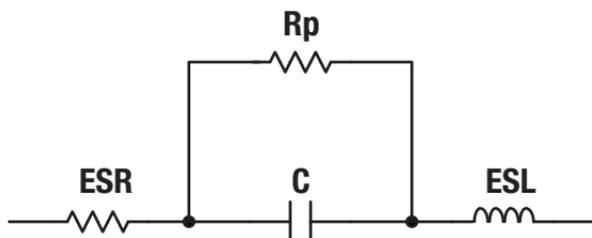


図 2: 実際のコンデンサのモデル

表 9: コンデンサの特性値

パラメータ	説明
C	静電容量の公称値 表 11 に容量値の標準数を示します。
ESR	等価直列抵抗 この値は理想的にはゼロです。 セラミック・コンデンサの ESR は最も優れています (通常数ミリオーム)。 タンタル電解コンデンサの ESR は数百ミリオーム、アルミ電解コンデンサは数オームです。
ESL	等価直列インダクタンス この値は理想的にはゼロです。 ESL は 100pH から 10nH です。
Rp	Rp は並列リーク抵抗 (または絶縁抵抗) です。 この値は理想的には無限大です。 この値はコンデンサの種類によって数十メガオーム (ある種の電解コンデンサ) から数十ギガオーム (セラミック・コンデンサ) に及ぶことがあります。
定格電圧	コンデンサに印加できる最大電圧です。 この定格値を超えるとコンデンサを損傷します。
電圧係数	ppm/V で表した、印加電圧による容量値の変化率です。 電圧係数が大きいと歪みの原因になる場合があります。 C ₀ G コンデンサは最も小さい電圧係数を持っています。 電圧係数は、フィルタ処理などの信号処理にコンデンサを使うアプリケーションでは最も重要です。
温度係数	ppm/°C で表した、温度による容量値の変化率です。 温度係数は理想的にはゼロです。 最大変化率は、コンデンサの種類によって通常 10ppm/°C ~ 100ppm/°C またはそれ以上に及びます (詳細は表 10 参照)。

実際のコンデンサの周波数特性

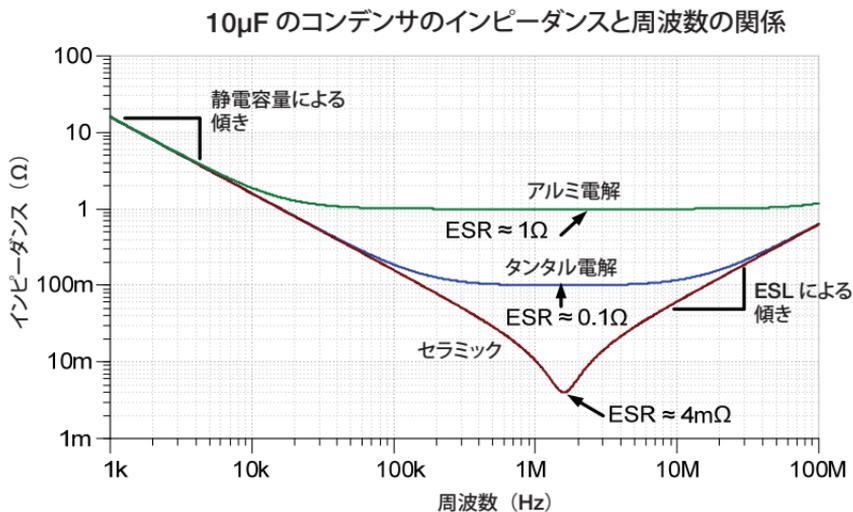


図 3: ESR と ESL がコンデンサの周波数応答に与える影響

表 10: コンデンサの種類概要

コンデンサの種類	説明
C0G/NP0 (タイプ 1: 温度補償用セラミック)	<p>信号経路、フィルタ処理、低歪み、オーディオ、高精度用途で使います。</p> <p>容量値の範囲が限定されている: 0.1pF ~ 0.47μF</p> <p>最も小さい温度係数: ±30ppm/°C</p> <p>小さい電圧係数</p> <p>最小の圧電効果</p> <p>小さい許容誤差: ±1% ~ ±10%</p> <p>温度範囲: -55°C ~ +125°C (+150°C以上)</p> <p>容量値が大きい場合、電圧範囲は制限されることがあります。</p>
X7R (タイプ 2: 高誘電率セラミック)	<p>デカップリングなどの精度と低歪みを必要としないアプリケーションで使います。</p> <p>X7R はタイプ 2 セラミック・コンデンサの一例です。</p> <p>他のタイプの詳細は EIA コンデンサ許容誤差表を参照してください。</p> <p>容量範囲: 10pF ~ 47μF</p> <p>温度係数: ±833ppm/°C (温度範囲を通じて ±15%)</p> <p>大きな電圧係数</p> <p>許容誤差: ±5% ~ -20%/+80%</p> <p>温度範囲: -55°C ~ +125°C</p> <p>容量値が大きい場合、電圧範囲は制限されることがあります。</p>
Y5V (タイプ 2: 高誘電率セラミック)	<p>デカップリングなどの精度と低歪みを必要としないアプリケーションで使います。</p> <p>Y5V はタイプ 2 セラミック・コンデンサの一例です。</p> <p>他のタイプの詳細は EIA コンデンサ許容誤差表を参照してください。</p> <p>静電容量の変動範囲: 温度範囲を通じて -20%/+80%</p> <p>温度範囲: -30°C ~ +85°C</p> <p>他の特性は、X7R やその他のタイプ 2 セラミックと同様です。</p>
アルミ電解	<p>大容量デカップリングなどの大容量を必要とするアプリケーションで使います。</p> <p>電解コンデンサには極性があり、極性を逆にして接続するとコンデンサが損傷することに注意してください。</p> <p>容量範囲: 1μF ~ 68,000μF</p> <p>温度係数: ±30ppm/°C</p> <p>大きな電圧係数</p> <p>許容誤差: ±20%</p> <p>温度範囲: -55°C ~ +125°C (+150°C以上)</p> <p>他のタイプより高い ESR を持ちます。</p>
タンタル電解	<p>容量値の範囲: 1μF ~ 150μF</p> <p>アルミ電解と同様ですがサイズが小さいです。</p>
ポリプロピレン・フィルム	<p>容量値の範囲: 100pF ~ 10μF</p> <p>電圧係数が非常に小さいです (低歪み)。</p> <p>他のタイプより高価格です。</p> <p>他のタイプより容量値あたりのサイズが大きいです。</p> <p>温度係数: 温度範囲を通じて 2%</p> <p>温度範囲: -55°C ~ +100°C</p>

表 11: 容量値の標準数の表

1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.7	3
3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

図 4: コンデンサの
マーク・コード

例
コンデンサのマークの意味を答えなさい。
2 2 3 K → "K" = ±10%
↓ ↓ ↓
22 000 pF
= 22nF = 0.022μF

表 12: セラミック・コンデンサの許容誤差の標示

コード	許容誤差	コード	許容誤差
B	±0.1pF	J	±5%
C	±0.25pF	K	±10%
D	±0.5pF	M	±20%
F	±1%	Z	+80%、-20%
G	±2%		

表 13: EIA 規格におけるコンデンサの許容誤差の標示 (タイプ 2 コンデンサ)

先頭の 文字記号	温度の 下限	2 番目の 数字記号	温度の 上限	3 番目の 文字記号	定格温度範囲を通じた 最大容量値の変動
Z	+10°C	2	+45°C	A	±1.0%
Y	-30°C	4	+65°C	B	±1.5%
X	-55°C	5	+85°C	C	±2.2%
		6	+105°C	D	±3.3%
		7	+125°C	E	±4.7%
				F	±7.5%
				P	±10.0%
				R	±15.0%
				S	±22.0%
				T	±22% ~ 33%
				U	±22% ~ 56%
				V	±22% ~ 82%

例

X7R: -55°C ~ +125°C、±15.0%

ダイオードとLED

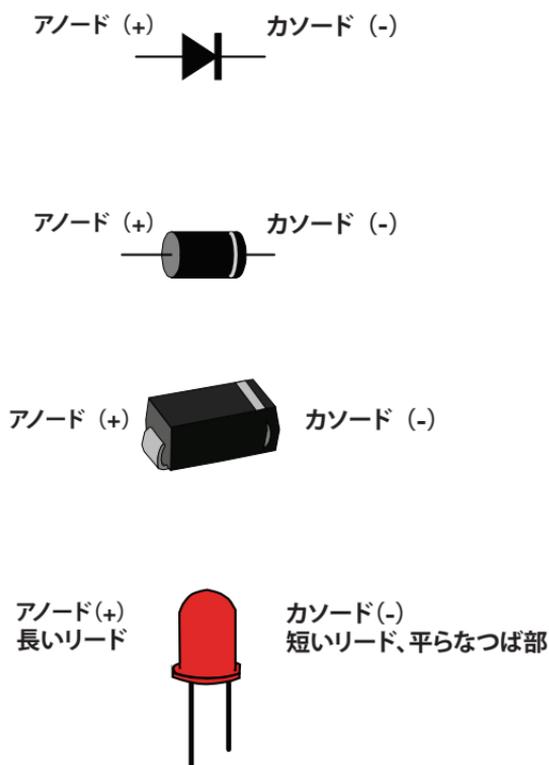


図 5: ダイオードとLEDのピン名称

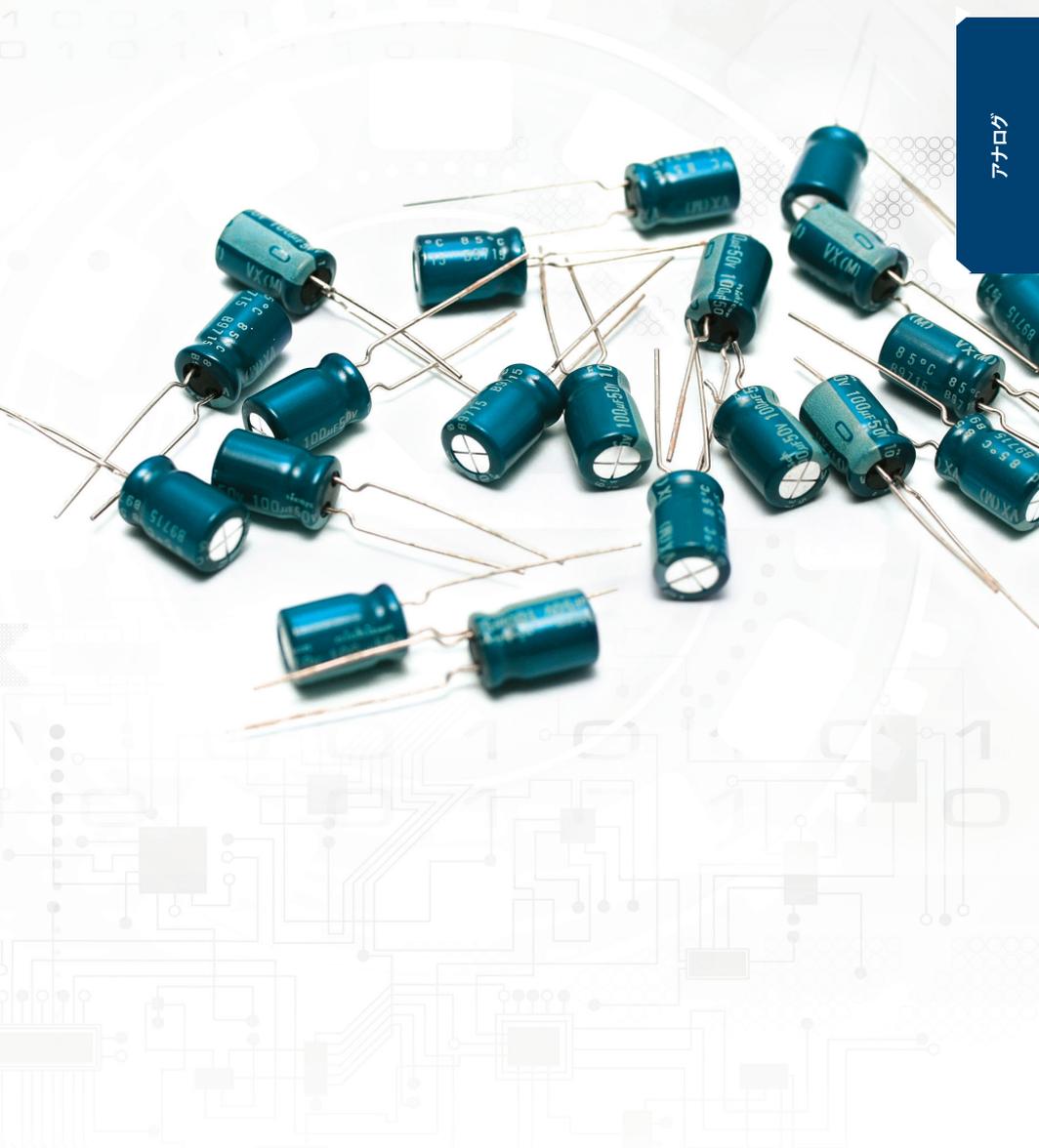
色	波長 (nm)	順電圧 (おおよその範囲)
赤外	940 ~ 850	1.4 ~ 1.7
赤	660 ~ 620	1.7 ~ 1.9
橙 / 黄	620 ~ 605	2 ~ 2.2
緑	570 ~ 525	2.1 ~ 3.0
青 / 白	470 ~ 430	3.4 ~ 3.8

表 14: 各色のLEDの順方向電圧降下の値

注: 記載した電圧は、LEDの順方向電圧降下の一般的な傾向を示すためのおおよその値です。正確な値は、メーカーのデータシートを参照してください。

アナログ

- コンデンサの式 (直列、並列、電荷、エネルギー) •
- インダクタの式 (直列、並列、エネルギー) •
- コンデンサの充電と放電 •
- RMS 電圧と平均電圧の定義 •
- 同相信号の RMS •
- 対数の法則 •
- デシベル (dB) の定義 •
- ポールとゼロの定義と例 •



コンデンサの式

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}} \quad (1) \text{ コンデンサの直列合成}$$

$$C_t = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2) \text{ 2 個の場合のコンデンサの直列合成}$$

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_N \quad (3) \text{ コンデンサの並列合成}$$

ここで

C_t = 等価な合成静電容量

C_1 、 C_2 、 $C_3 \dots C_N$ = 要素となる静電容量

$$Q = CV \quad (4) \text{ 電荷の蓄積}$$

$$Q = It \quad (5) \text{ 電荷の定義}$$

ここで

Q = クーロン (C) で表した電荷

C = ファラッド (F) で表した静電容量

V = ボルト (V) で表した電圧

I = アンペア (A) で表した電流

t = 秒 (s) で表した時間

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (6) \text{ コンデンサの瞬時電流}$$

ここで

i = コンデンサの瞬時電流

C = ファラッド (F) で表した静電容量

$\frac{dv}{dt}$ = 瞬間的な電圧変化率

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (7) \text{ コンデンサに蓄えられるエネルギー}$$

ここで

E = ジュール (J) で表した、コンデンサに蓄えられるエネルギー

V = ボルト (V) で表した電圧

C = ファラッド (F) で表した静電容量

インダクタの式

$$L_t = L_1 + L_2 + \dots + L_N \quad (8) \text{ インダクタの直列合成}$$

$$L_t = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_N}} \quad (9) \text{ インダクタの並列合成}$$

$$L_t = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (10) \text{ 2 個の場合のインダクタの並列合成}$$

ここで

L_t = 等価な合成インダクタンス

L_1 、 L_2 、 $L_3 \dots L_N$ = 要素となるインダクタンス

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (11) \text{ インダクタの瞬時電圧}$$

ここで

v = インダクタの瞬時電圧

L = ヘンリー (H) で表したインダクタンス

$\frac{di}{dt}$ = 瞬間的な電流変化率

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (12) \text{ インダクタに蓄えられるエネルギー}$$

ここで

E = ジュール (J) で表した、インダクタに蓄えられるエネルギー

I = アンペア (A) で表した電流

L = ヘンリー (H) で表したインダクタンス

RC 回路の充電の式

$$V_C = V_S \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (13) \text{ 大まかな関係式}$$

ここで

V_C = ある瞬間 (t) のコンデンサの電圧

V_S = RC 回路を充電する電源電圧

t = 秒 (s) で表した時間

τ = RC (コンデンサを充電、放電する時定数)

式 13 をグラフ化すると、以下のコンデンサ充電曲線が得られます。
 時定数の 5 倍の時点でコンデンサは 99.3% まで充電されることに注意してください。
 一般的には、この状態を**完全に充電された**とみなします。

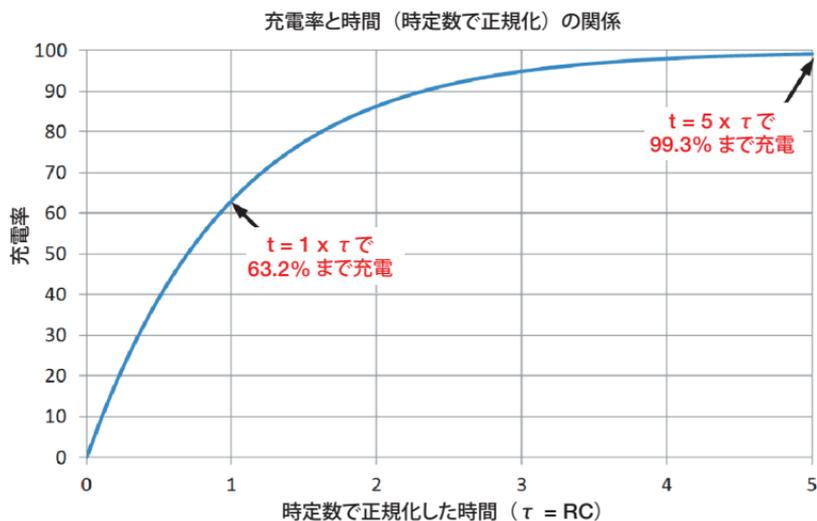


図 6: RC 充電曲線

RC 回路の放電の式

$$V_C = V_i \left[e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (14) \text{ 大まかな関係式}$$

ここで

V_C = ある瞬間 (t) のコンデンサの電圧

V_i = コンデンサの初期電圧 (t = 0s)

t = 秒 (s) で表した時間

τ = RC (コンデンサを充電、放電する時定数)

式 14 をグラフ化すると、以下のコンデンサ放電曲線が得られます。
時定数の 5 倍の時点でコンデンサは 0.7% まで放電されることに注意してください。
一般的には、この状態を**完全に放電された**とみなします。

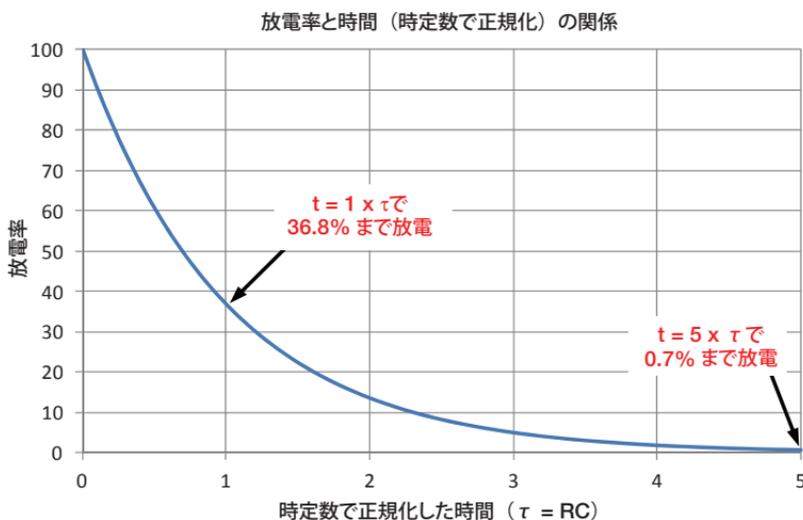


図 7: RC 放電曲線

RMS 電圧

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} [V(t)]^2 dt} \quad (15) \text{ 大まかな関係式}$$

ここで

$V(t)$ = 時間の連続関数

t = 秒 (s) で表した時間

$T_1 \leq t \leq T_2$ = 関数が定義されている期間

平均電圧

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} V(t) dt \quad (16) \text{ 大まかな関係式}$$

ここで

$V(t)$ = 時間の連続関数

t = 秒 (s) で表した時間

$T_1 \leq t \leq T_2$ = 関数が定義されている期間

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{PEAK}}}{\sqrt{2}} \quad (17) \text{ 全波整流したサイン波の RMS 値}$$

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{2 \times V_{\text{PEAK}}}{\pi} \quad (18) \text{ 全波整流したサイン波の平均値}$$

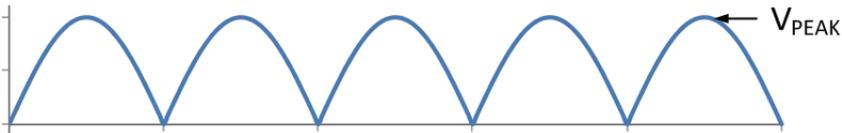


図 8: 全波整流したサイン波

RMS 電圧と平均電圧

$$V_{\text{RMS}} = V_{\text{PEAK}} \sqrt{\left(\frac{\tau}{2T}\right)} \quad (19) \text{ 半波整流したサイン波の RMS 値}$$

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{2 \times V_{\text{PEAK}}}{\pi} \left(\frac{\tau}{T}\right) \quad (20) \text{ 半波整流したサイン波の平均値}$$

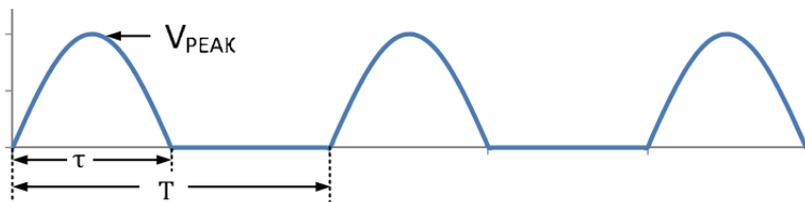


図 9: 半波整流したサイン波

$$V_{\text{RMS}} = V_{\text{PEAK}} \sqrt{\frac{\tau}{T}} \quad (21) \text{ 矩形波の RMS 値}$$

$$V_{\text{MEAN}} = V_{\text{PEAK}} \frac{\tau}{T} \quad (22) \text{ 矩形波の平均値}$$

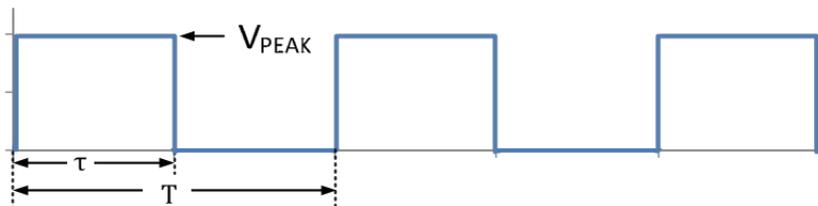


図 10: 矩形波

RMS 電圧と平均電圧

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\left(\frac{V_a^2 + V_a \cdot V_b + V_b^2}{3}\right)\left(\frac{\tau}{T}\right)} \quad (23) \text{ 台形波の RMS 値}$$

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{\tau}{2T}(V_a + V_b) \quad (24) \text{ 台形波の平均値}$$

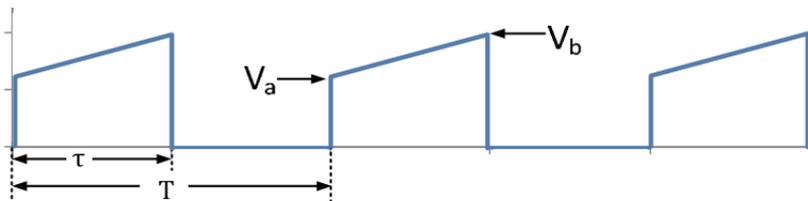


図 11: 台形波

$$V_{\text{RMS}} = V_{\text{PEAK}} \sqrt{\frac{\tau}{3T}} \quad (25) \text{ 三角波の RMS 値}$$

$$V_{\text{MEAN}} = \frac{\tau}{2T} V_{\text{PEAK}} \quad (26) \text{ 三角波の平均}$$

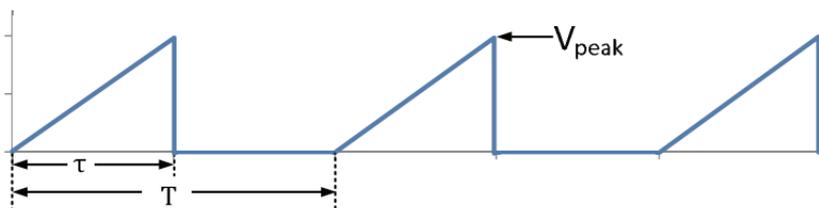


図 12: 三角波

対数計算の公式

- $\log\left(\frac{A}{B}\right) = \log(A) - \log(B)$ (27) 被除数の対数
- $\log(AB) = \log(A) + \log(B)$ (28) 積の対数
- $\log(A^x) = x \log(A)$ (29) 指数の対数
- $\log_b(X) = \frac{\log_a(X)}{\log_a(b)}$ (30) 対数関数の底の変更
- $\log_2(X) = \frac{\log_{10}(X)}{\log_{10}(2)}$ (31) 対数の底を 2 に変更する例
- $\ln(X) = \log_e(X)$ (32) 自然対数は底が e の対数
- $e = 2.718282$ (33) ネイピア数 (小数点以下 6 桁まで)

その他の表記

- $\exp(x) = e^x$ (34) 指数関数の別表記
- $3.54E-2 = 3.54 \times 10^{-2}$ (35) べき乗の指数表現
(指数関数と混同されやすいので注意)

デシベル (dB) の定義

ボード線図の基礎

振幅 (またはゲイン) の周波数応答とは、周波数の変化に応じた電圧ゲインの変化です。この変化はボード線図に表します。ボード線図は、周波数に対して、デシベル (dB) で表わした電圧ゲインをプロットした図です。ボード線図は通常、x 軸に対数目盛で周波数を、y 軸に線形目盛でゲイン (dB) をとった片対数の図として描きます。ただし、dB 自体が対数化した量なので、実際には両対数の図としての意味をもっています。もう 1 つの周波数応答は位相遅れと周波数の関係であり、周波数に対する位相角をプロットします。位相図は通常、x 軸に対数目盛で周波数を、y 軸に線形目盛で位相角をとった片対数の図として描きます。

定義

$$\text{Voltage gain (dB)} = 20 \log \left(\frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} \right) \quad (36) \text{ デシベル (dB) で表した電圧ゲイン}$$

$$\text{Power gain (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{IN}}} \right) \quad (37) \text{ デシベル (dB) で表した電力ゲイン}$$

$$\text{Power Measured (dBm)} = 10 \log \left(\frac{\text{Power Measured (W)}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (38) \text{ 入力電力または出力電力の絶対レベルを示すのに用いる。}$$

A (V/V)	A (dB)
0.001	-60
0.01	-40
0.1	-20
1	0
10	20
100	40
1,000	60
10,000	80
100,000	100
1,000,000	120
10,000,000	140

表 15: ゲイン値と dB 値の関係

ロールオフ率とは、周波数に対するゲインの低下です。

ディケード (dec) は周波数が 10 倍増加または減少することです (10Hz から 100Hz が 1 ディケード)。

オクターブ (oct) は周波数が 2 倍または半分になることです (10Hz から 20Hz が 1 オクターブ)。

図 13 に、軸のグリッドに直接乗っていない対数軸上の値を図を使って求める方法を示します。

1. 定規で測った値が $L = 1\text{cm}$ 、 $D = 2\text{cm}$ であるとしします。
2. $L/D = \log_{10}(f_p)$
3. $f_p = 10^{(L/D)} = 10^{(1\text{cm}/2\text{cm})} = 3.16$
4. デイケード範囲に合わせて調整します (この例では $f_p = 31.6\text{Hz}$)。

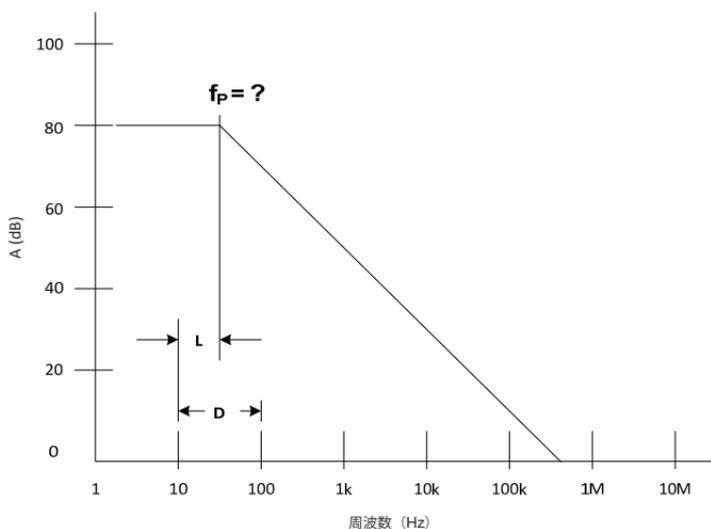


図 13: グリッド線に直接乗っていない対数軸上の値の求め方

ボード線図：ポール（極）

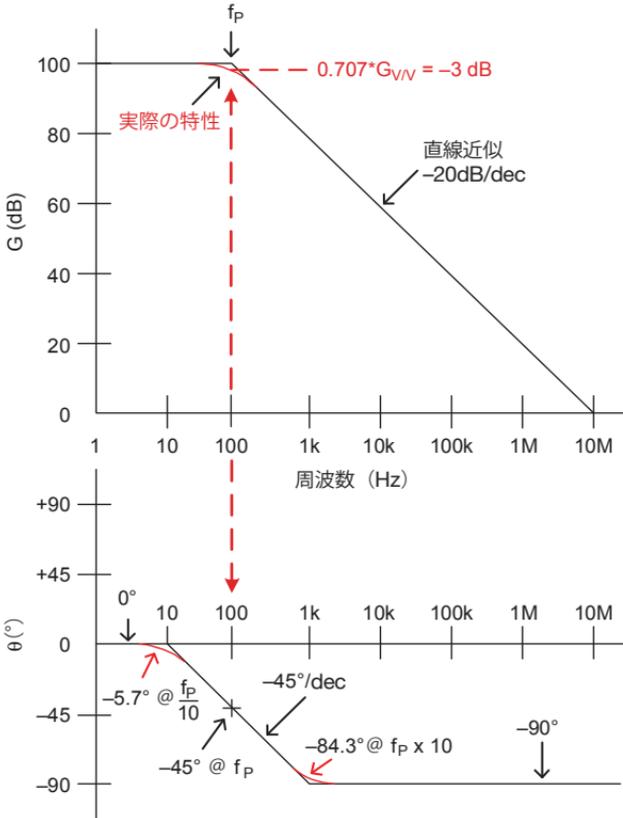


図 14: ポール・ゲインおよび位相

- ポールの位置 = f_p (遮断周波数)
- 振幅 ($f < f_p$) = G_{DC} (例: 100dB)
- 振幅 ($f = f_p$) = -3dB
- 振幅 ($f > f_p$) = -20dB/dec
- 位相 ($f = f_p$) = -45°
- 位相 ($0.1 f_p < f < 10 f_p$) = $-45^\circ/\text{dec}$
- 位相 ($f > 10 f_p$) = -90°
- 位相 ($f < 0.1 f_p$) = 0°

ポール (式)

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{G_{DC}}{j\left(\frac{f}{f_P}\right) + 1} \quad (39) \text{ 複素数表現}$$

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{G_{DC}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_P}\right)^2 + 1}} \quad (40) \text{ 振幅}$$

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_P}\right) \quad (41) \text{ 位相遅れ}$$

$$G_{dB} = 20 \text{ Log}(G_V) \quad (42) \text{ デシベル (dB) で表した振幅}$$

ここで

$G_V = V/V$ で表した電圧ゲイン

G_{dB} = デシベル (dB) で表した電圧ゲイン

G_{DC} = DC または低い周波数の電圧ゲイン

f = ヘルツ (Hz) で表した周波数

f_P = ポールを生じる周波数

θ = 入力から出力までの信号の位相遅れ

j = 虚数 ($\sqrt{-1}$)

ボード線図 (ゼロ、零点)

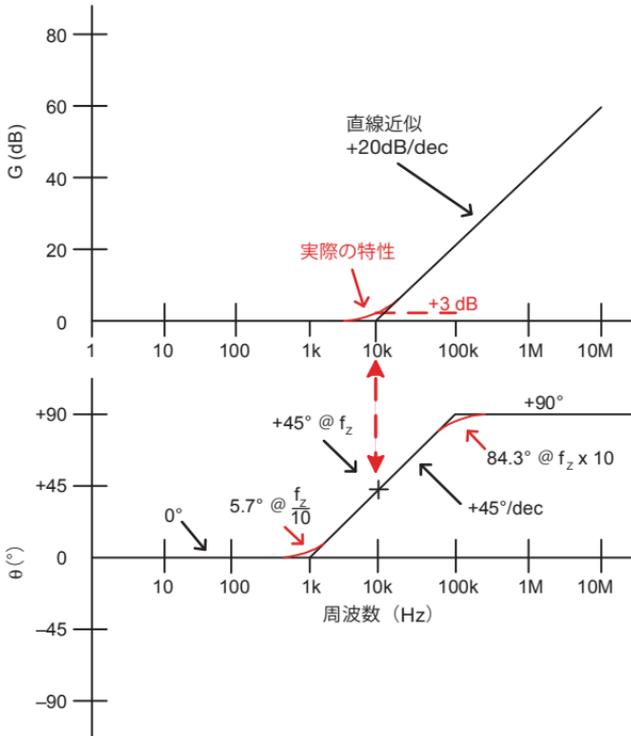


図 15: ゼロ・ゲインおよび位相

- ゼロの位置 = f_z
- 振幅 ($f < f_z$) = 0dB
- 振幅 ($f = f_z$) = $+3\text{dB}$
- 振幅 ($f > f_z$) = $+20\text{dB/dec}$
- 位相 ($f = f_z$) = $+45^\circ$
- 位相 ($0.1 f_z < f < 10 f_z$) = $+45^\circ/\text{dec}$
- 位相 ($f > 10 f_z$) = $+90^\circ$
- 位相 ($f < 0.1 f_z$) = 0°

ゼロ (式)

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G_{DC} \left[j \left(\frac{f}{f_Z} \right) + 1 \right] \quad (43) \text{ 複素数表現}$$

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G_{DC} \sqrt{\left(\frac{f}{f_Z} \right)^2 + 1} \quad (44) \text{ 振幅}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{f}{f_Z} \right) \quad (45) \text{ 位相遅れ}$$

$$G_{dB} = 20 \text{ Log}(G_V) \quad (46) \text{ デシベル (dB) で表した振幅}$$

ここで

$G_V = V/V$ で表した電圧ゲイン

G_{dB} = デシベル (dB) で表した電圧ゲイン

G_{DC} = DC または低い周波数の電圧ゲイン

f = ヘルツ (Hz) で表した周波数

f_Z = ゼロを生じる周波数

θ = 入力から出力までの信号の位相遅れ

j = 虚数 ($\sqrt{-1}$)

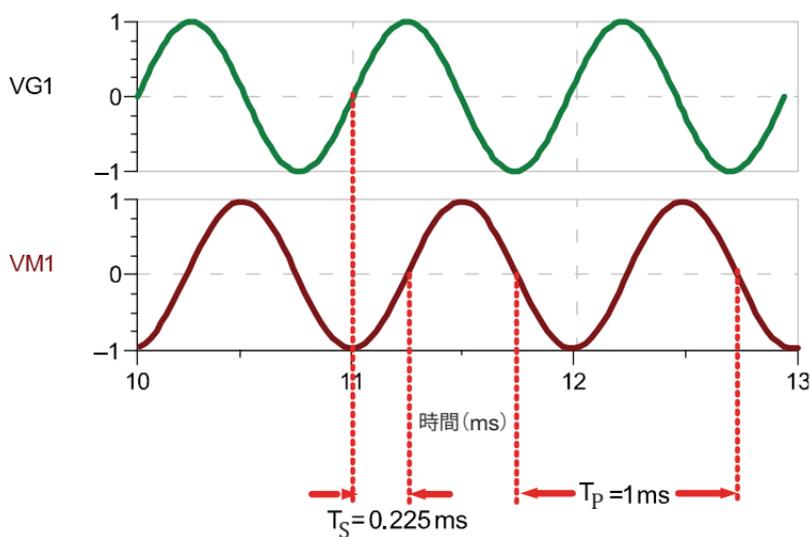


図 16: 時間遅れを位相遅れに変換

$$\theta = \frac{T_S}{T_P} \cdot 360^\circ$$

(47) 時間遅れから位相遅れを求める

ここで

 T_S = 入力から出力までの信号の時間遅れ T_P = 信号の周期 θ = 入力から出力までの信号の位相遅れ

例

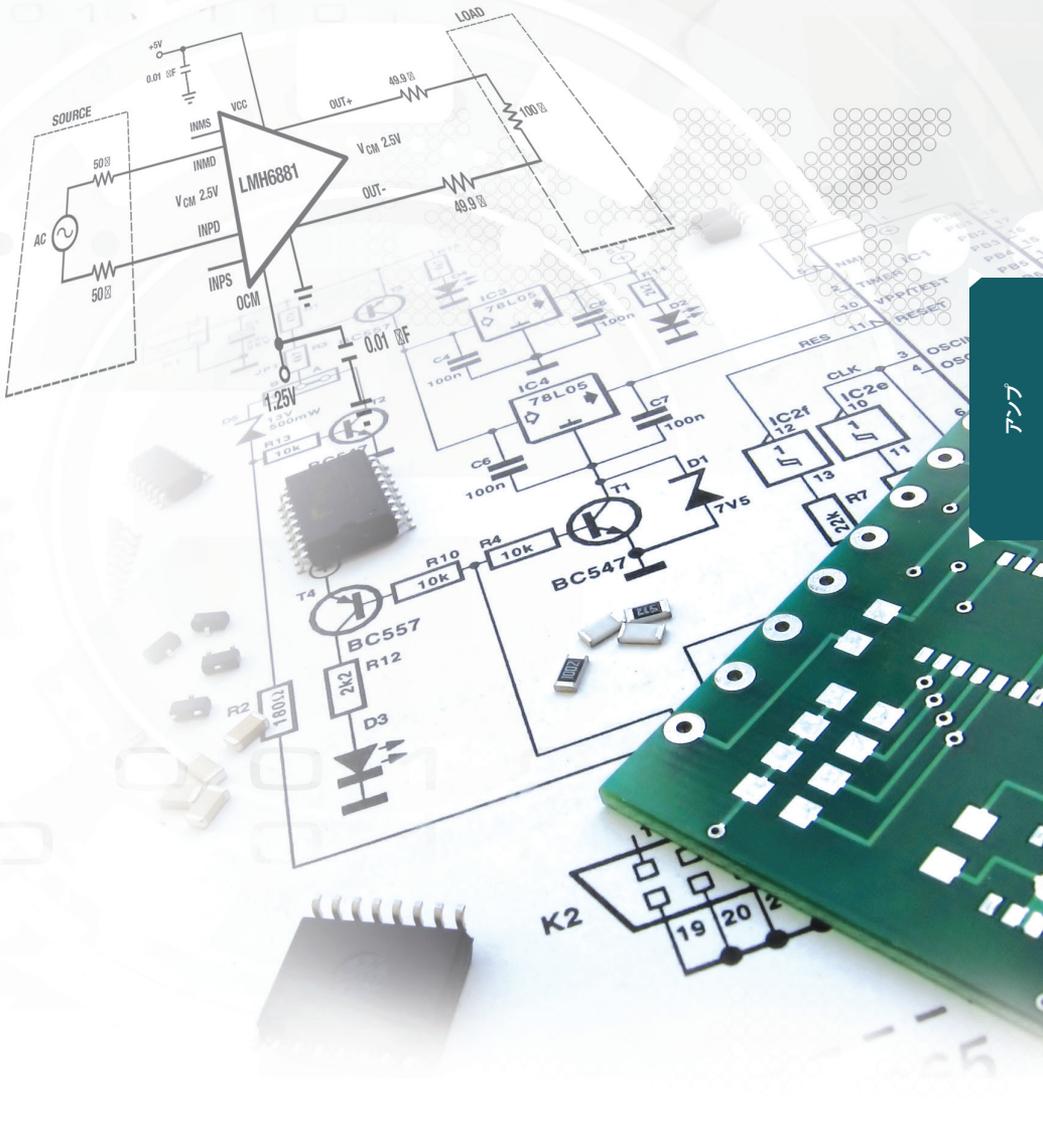
図 16 の位相遅れの角度を計算しなさい。

答え

$$\theta = \frac{T_S}{T_P} \cdot 360^\circ = \left(\frac{0.225 \text{ ms}}{1 \text{ ms}} \right) \cdot 360^\circ = 81^\circ$$

アンプ

- オペアンプの基本構成
- オペアンプの帯域幅
- フルパワー帯域幅
- 小信号ステップ応答
- ノイズの式
- 安定性の式
- 開ループ SPICE 解析による安定性の評価



アンプ

オペアンプの基本構成

$$G_{CL} = 1$$

(48) バッファのゲイン

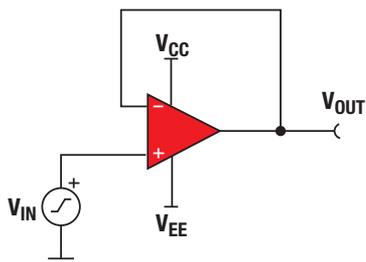


図 17: バッファの構成

$$G_{CL} = \frac{R_f}{R_1} + 1$$

(49) 非反転アンプのゲイン

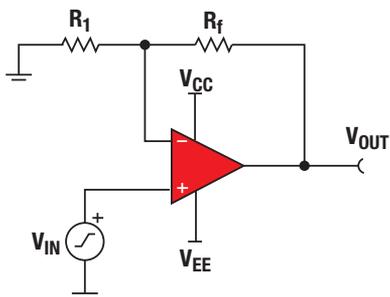


図 18: 非反転アンプの構成

オペアンプの基本構成 (続き)

$$G_{CL} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (50) \text{ 反転アンプのゲイン}$$

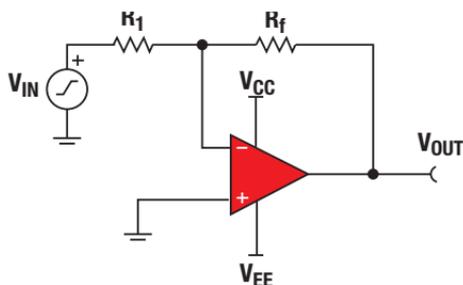


図 19: 反転アンプの構成

$$V_{OUT} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N} \right) \quad (51) \text{ 反転加算アンプの入出力の式}$$

$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R_1} (V_1 + V_2 + \dots + V_N) \quad (52) \text{ 反転加算アンプの入出力の式} \\ (R_1 = R_2 = \dots = R_N \text{ の場合})$$

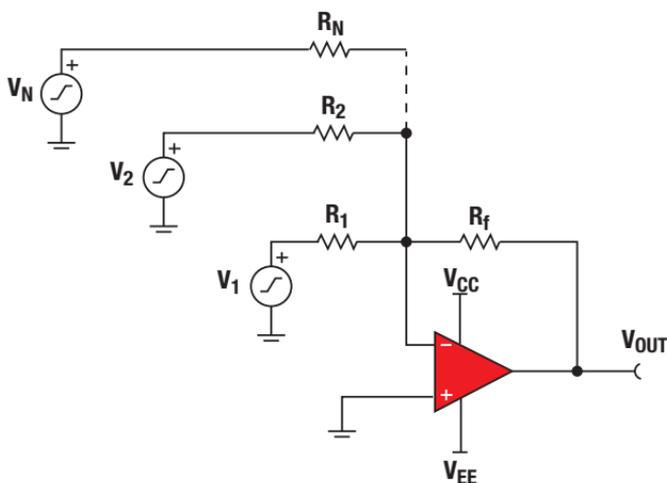


図 20: 反転加算アンプの構成

オペアンプの基本構成 (続き)

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_f}{R_{in}} + 1 \right) \left[\frac{V_1}{N} + \frac{V_2}{N} + \dots + \frac{V_N}{N} \right] \quad (53) \text{ 入力抵抗が等しい非反転加算アンプの入出力の式}$$

ここで

$R_1 = R_2 = \dots = R_N$

$N = \text{入力抵抗の数}$

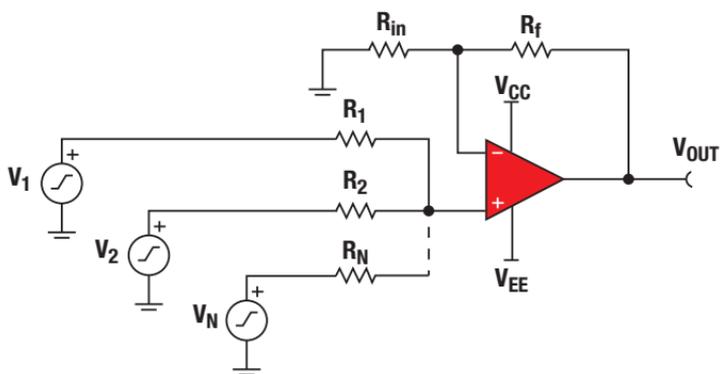


図 21: 非反転加算アンプの構成

C_f フィルタを備えた単純な非反転アンプ

$$G_{LF} = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (54) \text{ 非反転アンプのゲイン (} f < f_c \text{)}$$

$$G_{HF} = 1 \quad (55) \text{ 非反転アンプのゲイン (} f \gg f_c \text{)}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (56) \text{ 非反転アンプの遮断周波数}$$

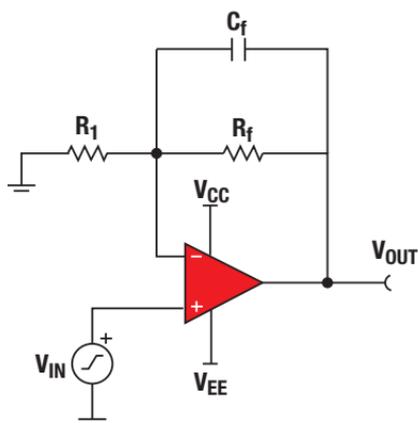


図 22: C_f フィルタを備えた非反転アンプ

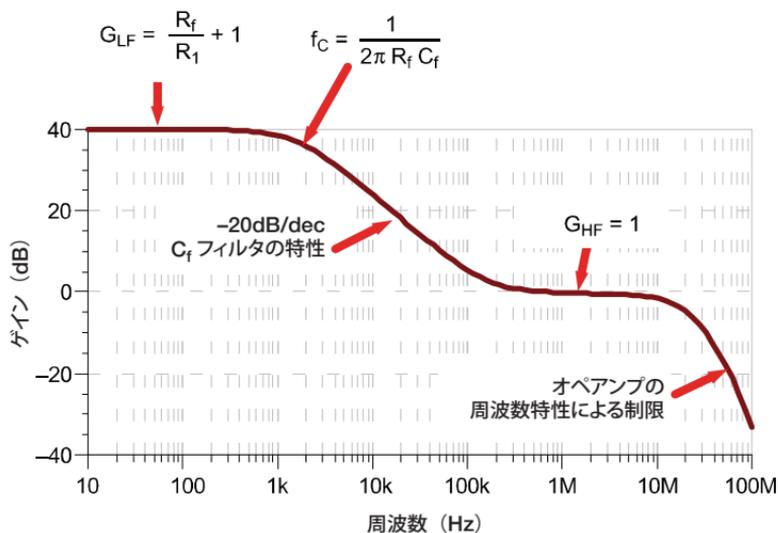


図 23: C_f フィルタを備えた非反転アンプの周波数応答

C_f フィルタを備えた単純な反転アンプ

$G_{LF} = -\frac{R_f}{R_1}$ (57) 反転アンプのゲイン ($f < f_c$)

$G_{HF} = -20\text{dB/decade after } f_c$ until op amp bandwidth limitation (58) 反転アンプのゲイン ($f > f_c$)

$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$ (59) 反転アンプの遮断周波数

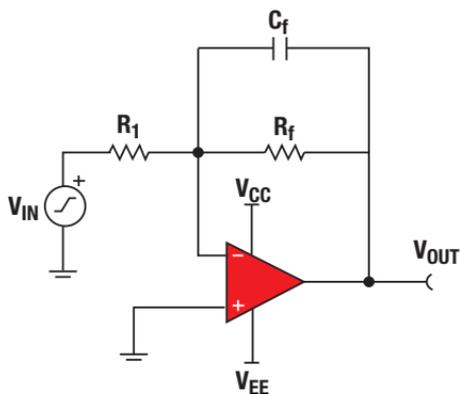


図 24: C_f フィルタを備えた反転アンプ

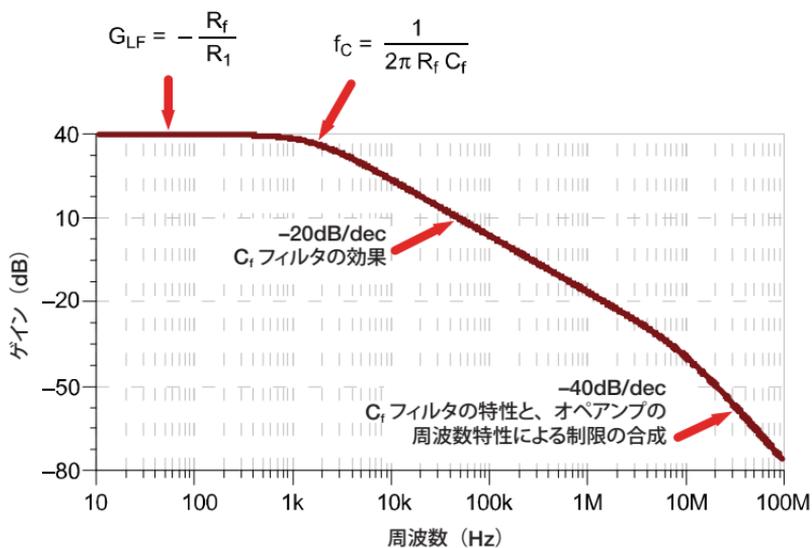


図 25: C_f フィルタを備えた反転アンプの周波数応答

オペアンプの帯域幅

$$GBW = \text{Gain} \cdot BW$$

(60) ゲイン帯域幅積の定義

ここで

GBW = オペアンプのデータシートの仕様表に記載されたゲイン帯域幅積

Gain = オペアンプのゲイン設定による閉ループ・ゲイン

BW = アンプの帯域幅

例

式 60 を使って帯域幅を求めなさい。

Gain = 100 (アンプの構成から)

GBW = 22MHz (データシートから)

$$BW = \frac{GBW}{\text{Gain}} = \frac{22\text{MHz}}{100} = 220 \text{ kHz}$$

同じ結果を、以下のように A_{OL} のグラフを使って図から求めることができます。

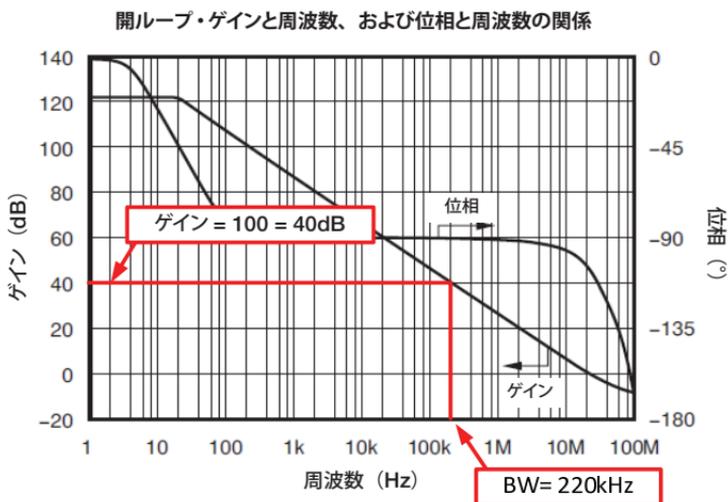


図 26: A_{OL} のグラフを使った閉ループ帯域幅の求め方

フルパワー帯域幅

$$V_P = \frac{SR}{2\pi f} \quad (61) \text{ スルー・レートによる歪みが生じない最大出力}$$

ここで

V_P = スルー・レートによる歪みが生じない最大出力電圧

SR = スルー・レート

f = 印加信号の周波数

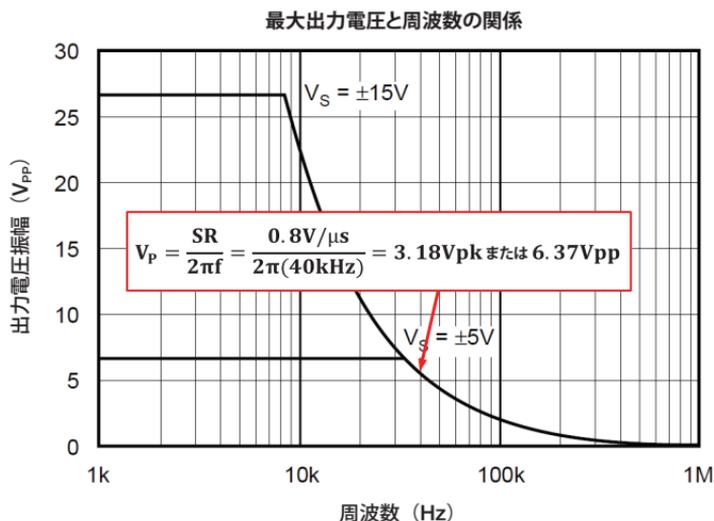


図 27: スルー・レートによる歪みが生じない最大出力

上記の図は、OPA277 について式 61 を使ってグラフ化したものです。

計算例は、OPA277 の 40kHz でのピーク電圧を示します。

これは図または式から求めることができます。

例

$$V_P = \frac{SR}{2\pi f} = \frac{0.8V/\mu s}{2\pi(40kHz)} = 3.18Vpk \text{ または } 6.37Vpp$$

小信号ステップ応答

$$\tau_R = \frac{0.35}{f_C}$$

(62) 小信号ステップの立ち上がり時間

ここで

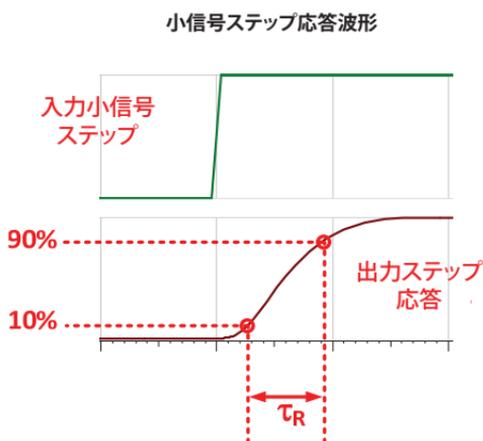
 τ_R = 小信号ステップ応答の立ち上がり時間 f_C = オペアンプ回路の閉ループ帯域幅

図 28: スルー・レートによる歪みが生じない最大出力

オペアンプのノイズ・モデル

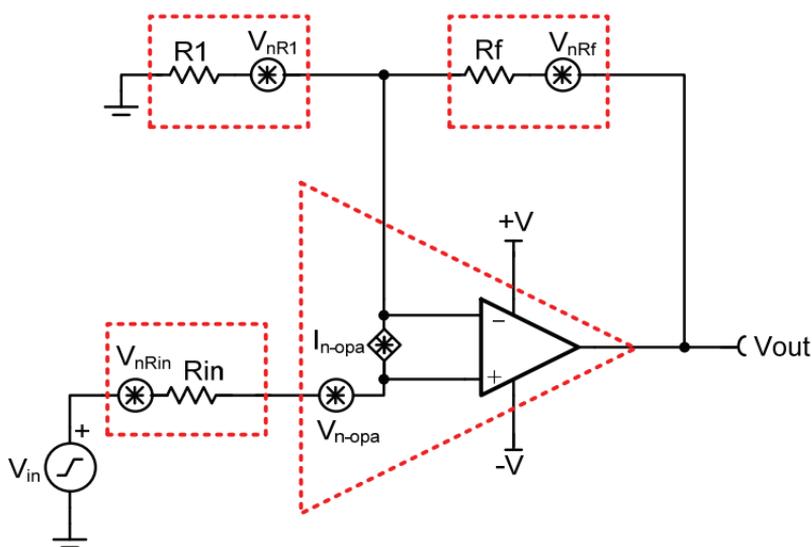


図 29: オペアンプのノイズ・モデル

オペアンプ固有のノイズには以下があります。

- オペアンプによるノイズ (電流ノイズ + 電圧ノイズ)
- 抵抗によるノイズ

ノイズの帯域幅の計算

$$BW_N = K_N f_c \quad (63) \text{ ノイズの帯域幅}$$

ここで

BW_N = システムのノイズの帯域幅

K_N = 各種フィルタ次数に対するブリック・ウォール補正係数

f_c = システムの -3dB 帯域幅

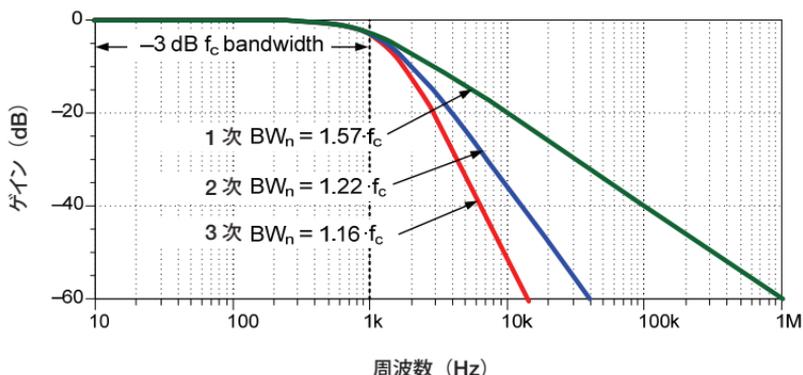


図 30: 3 種類のフィルタ次数に対するオペアンプの帯域幅

表 16: ノイズの帯域幅に対するブリック・ウォール補正係数

ポールの数	K_N (ブリック・ウォール補正係数)
1	1.57
2	1.22
3	1.13
4	1.12

広帯域総ノイズの計算

$$E_N = e_{BB} \sqrt{BW_N} \quad (64) \text{ 広帯域ノイズによる総 RMS ノイズ}$$

ここで

E_N = 広帯域ノイズによる総 RMS ノイズ

e_{BB} = 広帯域ノイズのスペクトル密度 (nV/rtHz)

BW_N = ノイズの帯域幅 (Hz)

1/f 総ノイズの計算

$$E_{N_NORMAL} = e_{BF} \sqrt{f_0} \quad (65) \text{ 1Hz で正規化した 1/f ノイズ}$$

ここで

E_{N_NORMAL} = 1Hz で正規化した 1/f ノイズ
 e_{BF} = 1/f 領域で計測したノイズのスペクトル密度
 f_0 = 1/f ノイズ e_{BF} を計測した周波数

$$E_{N_FLICKER} = E_{N_NORMAL} \sqrt{\ln \left(\frac{f_H}{f_L} \right)} \quad (66) \text{ 1/f 総ノイズの計算}$$

ここで

$E_{N_FLICKER}$ = フリッカによる総 RMS ノイズ
 E_{N_NORMAL} = 1Hz で正規化した 1/f ノイズ
 f_H = 高周波側の遮断周波数またはノイズ帯域幅
 f_L = 低周波側の遮断周波数 (通常は 0.1Hz に設定)

表 17: ピーク・ツー・ピークの変換

標準偏差の数	読み値が範囲内にある確率
2σ (±1σ と同じ)	68.3%
3σ (±1.5σ と同じ)	86.6%
4σ (±2σ と同じ)	95.4%
5σ (±2.5σ と同じ)	98.8%
6σ (±3σ と同じ)	99.7%
6.6σ (±3.3σ と同じ)	99.9%

熱ノイズの計算

$$E_{n,R} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (67) \text{ 総 RMS 熱ノイズ}$$

$$e_{n,R} = \sqrt{4kTR} \quad (68) \text{ 熱ノイズ・スペクトル密度}$$

ここで

$E_{n,R}$ = 抵抗による総 RMS ノイズ (熱ノイズとも呼ぶ)、(V rms)

$e_{n,R}$ = 抵抗によるノイズ・スペクトル密度 (熱ノイズとも呼ぶ)、(V/ $\sqrt{\text{Hz}}$)

k = ボルツマン定数 1.38×10^{-23} J/K

T = ケルビン (K) で表した温度

Δf = ヘルツ (Hz) で表したノイズ帯域幅

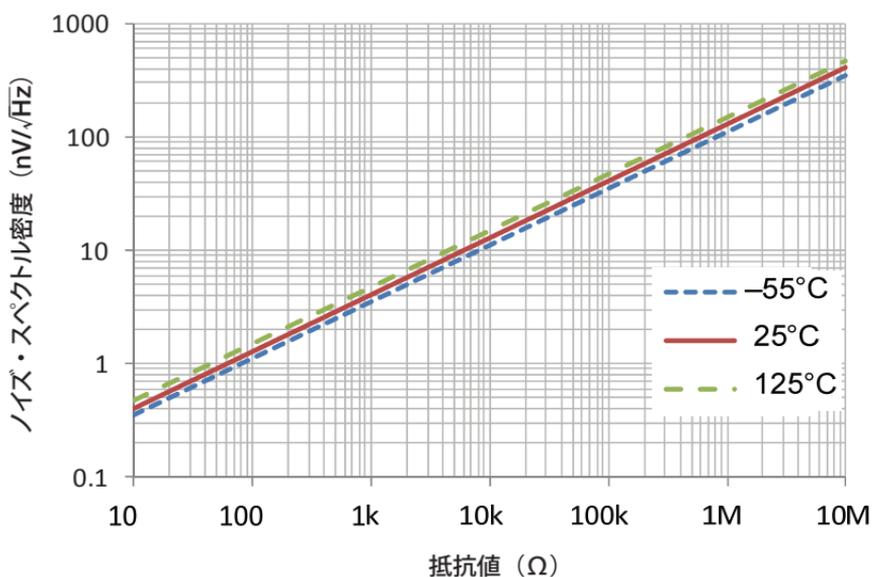


図 31: ノイズ・スペクトル密度と抵抗値の関係

AC 応答と周波数の関係 (ドミナント・2 ポール・システム)

図 32 に、異なる AC ピーキングを持つ 4 例のボード線図を示します。

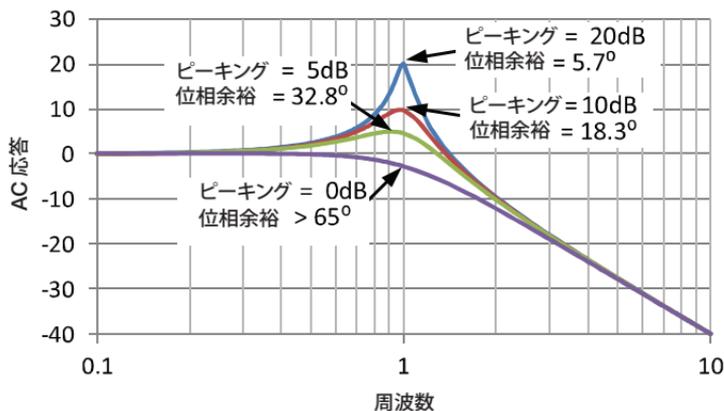


図 32: 安定性 - AC ピーキングとの関係の例

位相余裕と AC ピーキングの関係

このグラフは、与えられた AC ピーキング・レベルに対する位相余裕を示します。安定に動作するためには、45°以上の位相余裕が必要であることに注意してください。

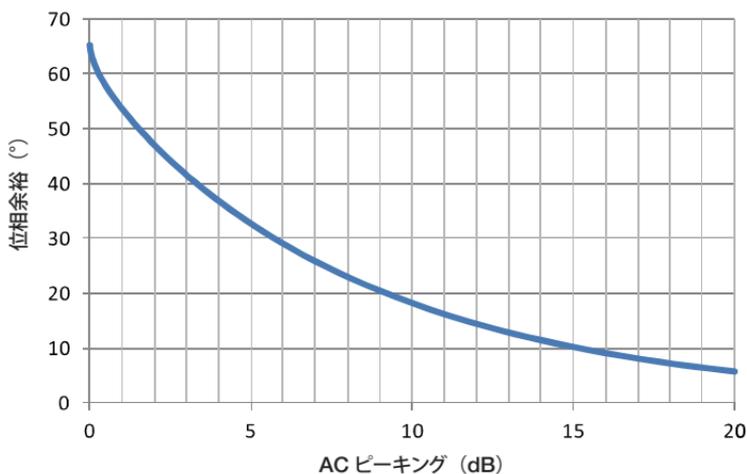


図 33: 安定性 - 2 ポール・システムの位相余裕とピーキングの関係

オーバーシュート (ドミナント・2 ポール・システム)

図 34 に、2 つの異なるオーバーシュート率の過渡応答の例を示します。

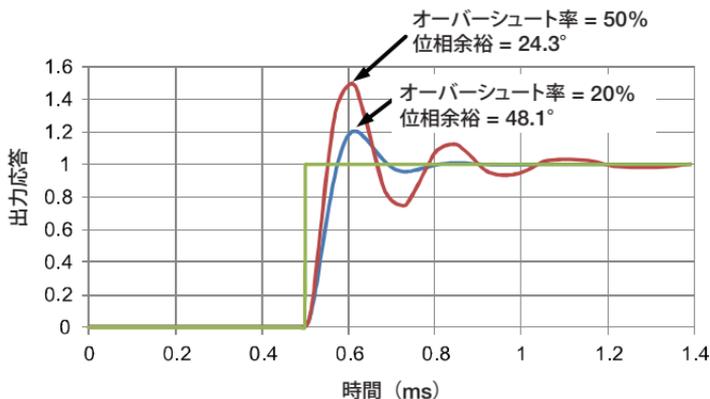


図 34: 安定性 - オーバーシュートの例

位相余裕とオーバーシュート率の関係

このグラフは、与えられたオーバーシュート・レベルに対する位相余裕を示します。安定に動作するためには、 45° 以上の位相余裕が必要であることに注意してください。

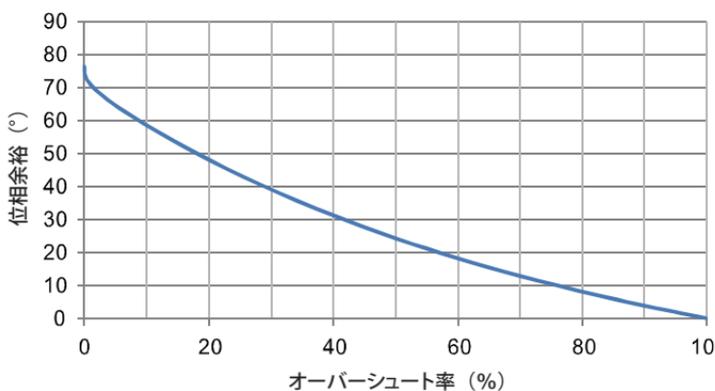


図 35: 安定性 - 位相余裕とオーバーシュート率の関係

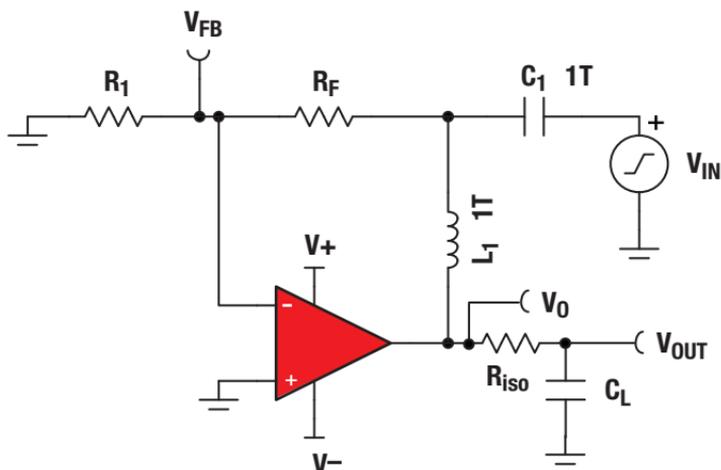


図 36: 安定性を調べるための一般的な SPICE テスト回路

$$A_{OL_LOADED} = \frac{V_O}{V_{FB}} \quad (69) \text{ 負荷を接続した状態の開ループ・ゲイン}$$

$$\beta = V_{FB} \quad (70) \text{ 帰還係数}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{V_{FB}} \quad (71) \text{ 閉ループ・ノイズ・ゲイン}$$

$$A_{OL_LOADED} \times \beta = V_O \quad (72) \text{ ループ・ゲイン}$$

ここで

V_O = オペアンプの出力端の電圧

V_{OUT} = 負荷に印加される電圧出力
アプリケーションにとっては重要ですが、安定性解析では考慮されません。

V_{FB} = 帰還電圧

R_F 、 R_1 、 R_{iSO} 、 C_L = オペアンプの帰還ネットワークと負荷
オペアンプの回路構成が異なると帰還ネットワークも異なります。
しかし、ほとんどの場合テスト回路は同様です。
図 37 にその例外 (多重帰還) を示します。

C_1 と L_1 は SPICE 解析を容易にするための素子です。これらの素子の値は大きい (1TF、1TH) ので、回路は DC では閉ループ、AC 周波数帯では開ループになります。SPICE を収束させるために、DC では閉ループで動作させる必要があります。

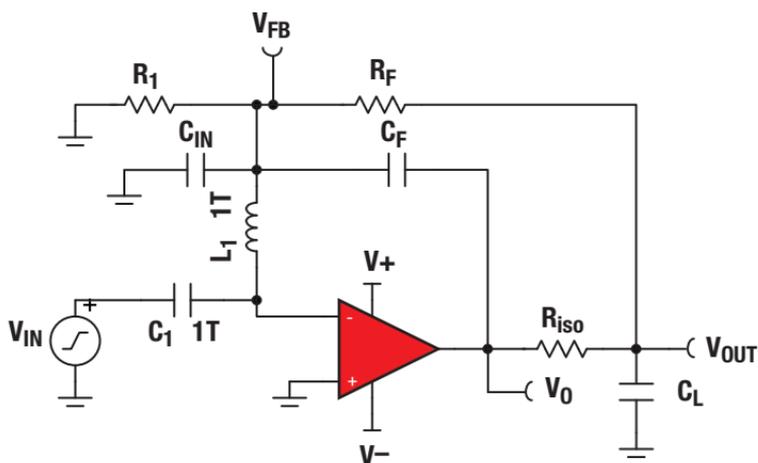


図 37: 安定性を調べるための SPICE テスト回路 (多重帰還の例)

$$A_{OL_LOADED} = V_O \quad (73) \text{ 負荷を接続した状態の開ループ・ゲイン}$$

$$\beta = \frac{V_{FB}}{V_O} \quad (74) \text{ 帰還係数}$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{V_O}{V_{FB}} \quad (75) \text{ 閉ループ・ノイズ・ゲイン}$$

$$A_{OL_LOADED} \times \beta = V_{FB} \quad (76) \text{ ループ・ゲイン}$$

ここで

V_O = オペアンプの出力端の電圧

V_{OUT} = 負荷に印加される電圧出力アプリケーションにとっては重要ですが、安定性解析では考慮されません。

V_{FB} = 帰還電圧

R_F , R_1 , R_{iso} , C_F = オペアンプの帰還ネットワーク
帰還経路が 2 つあるため、入力でループが切れています。

C_1 と L_1 は SPICE 解析を容易にするための素子です。これらの素子の値は大きい (1TF、1TH) ので、回路は DC では閉ループ、AC 周波数帯では開ループになります。SPICE を収束させるために、DC では閉ループで動作させる必要があります。

C_{IN} = オペアンプ・データシート記載の等価入力容量
この容量は、通常はモデルに含まれているため、追加する必要はありません。しかし、このシミュレーション方法を使う場合、 C_{IN} は 1TH インダクタでアイソレーションされています。

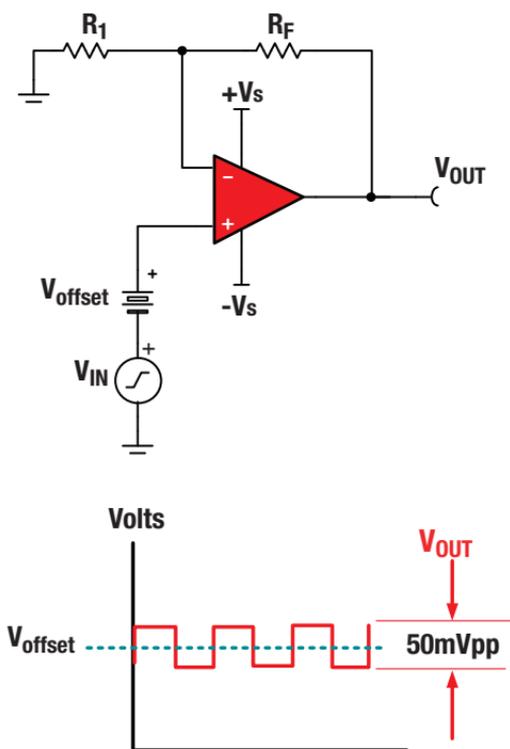


図 38: 実動作での過渡安定性のテスト

テストのヒント

- f_{cl} より十分低いテスト周波数を選択します。
- AC 出力は小振幅 ($V_{pp} \leq 50 \text{ mV}$) の矩形波 (例: 1kHz) とします。
- 出力が $50mV_{pp}$ 以下になるように V_{IN} 振幅を調整します。
- ワorstケースは通常 $V_{offset} = 0$ (R_O を最大にして $I_{OUT} = 0A$ にする) の時です。
- 希望の V_{offset} を使ってすべての出力動作点で安定性を確認します。
- オシロ・スコープを AC 結合に設定し、垂直軸を拡大して V_{OUT} 上のオーバーシュート、アンダーシュート、リングング量を調べます。
- V_{OUT} を最高の分解能で計測するには、1x スコープ・プローブを使います。

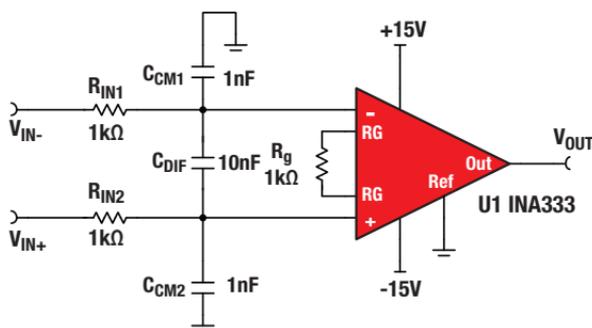


図 39: 計装アンプの入力フィルタ

Select $C_{DIF} \geq 10C_{CM1}$

(77) 差動フィルタでは、コモンモード・フィルタの10倍に設定

$R_{IN1} = R_{IN2}$

(78) 入力抵抗は等しくする

$C_{CM1} = C_{CM2}$

(79) コモンモード容量は等しくする

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi R_{IN1} C_{CM1}}$$

(80) 差動フィルタの遮断周波数

$$f_{DIF} = \frac{1}{2\pi(2R_{IN1})(C_{DIF} + \frac{1}{2}C_{CM1})}$$

(81) コモンモード・フィルタの遮断周波数

ここで

f_{DIF} = 差動遮断周波数

f_{CM} = コモンモード遮断周波数

R_{IN} = 入力抵抗

C_{CM} = コモンモード・フィルタ容量

C_{DIF} = 差動フィルタ容量

注: $C_{DIF} \geq 10 C_{CM}$ を選択することで、差動モードの遮断周波数をコモンモード遮断周波数の10分の1にします。これにより、部品のばらつきによるコモンモード・ノイズが差動ノイズに変換されないようにします。

プリント基板 (PCB) と配線

- PCB パターンの抵抗 (1oz および 2oz Cu) •
- 安全な動作のための PCB の導体間隔 •
- 銅箔の許容電流 •
- パッケージの種類と寸法 •
- PCB のパターンの容量とインダクタンス •
- PCB のビアの容量とインダクタンス •
- 一般的な同軸ケーブルの仕様 •
- 同軸ケーブルの式 •
- 各種配線の長さあたりの抵抗 (AWG 別) •
- 各種配線の最大電流 (AWG 別) •

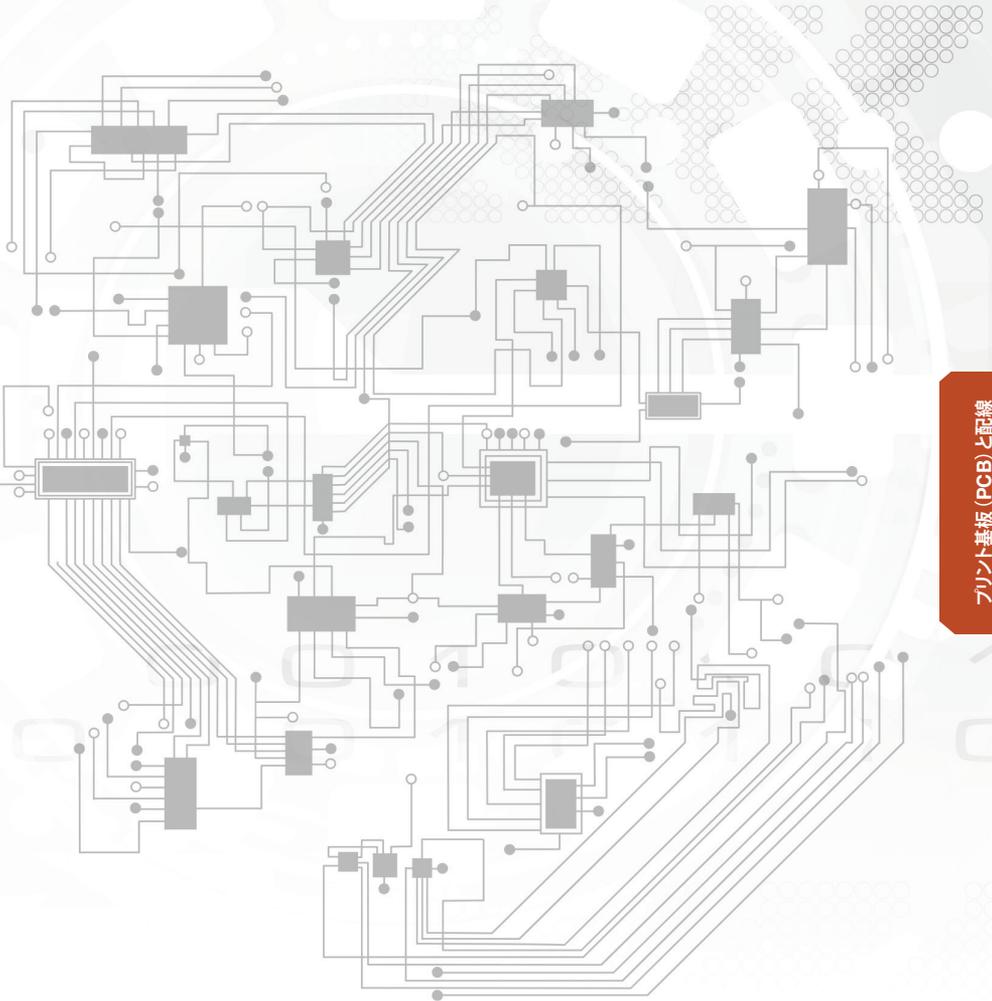


表 18: PCB の導体間隔

導体間の電圧 (DC または AC ピーク)	最小間隔						
	ペア・ボード (PCB パターン)				組み立て品		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]
16-30	0.05 mm [0.00197 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.1 mm [0.0039 in]	0.05 mm [0.00197 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.25 mm [0.00984 in]	0.13 mm [0.00512 in]
31-50	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.6 mm [0.024 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.13 mm [0.00512 in]
51-100	0.1 mm [0.0039 in]	0.6 mm [0.024 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.13 mm [0.00512 in]	0.5 mm [0.020 in]	0.13 mm [0.00512 in]
101-150	0.2 mm [0.0079 in]	0.6 mm [0.024 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
151-170	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	3.2 mm [0.126 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
171-250	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	6.4 mm [0.252 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.4 mm [0.016 in]
251-300	0.2 mm [0.0079 in]	1.25 mm [0.0492 in]	12.5 mm [0.492 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.4 mm [0.016 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]
301-500	0.25 mm [0.00984 in]	2.5 mm [0.0984 in]	12.5 mm [0.492 in]	0.8 mm [0.031 in]	0.8 mm [0.031 in]	1.5 mm [0.0591 in]	0.8 mm [0.031 in]

B1: 内部導体

B2: 外部導体 (コーティングなし、海拔 3050m 以下)

B3: 外部導体 (コーティングなし、海拔 3050m を超える場合)

B4: 外部導体 (パーマネント・ポリマー・コーティングで被覆、任意の高度)

A5: 組み立て品の外部導体 (絶縁保護コーティングで被覆、任意の高度)

A6: 組み立て品の外部リード / 端子 (コーティングなし、海拔 3050m 以下)

A7: 組み立て品の外部リード / 端子 (絶縁保護コーティングで被覆、任意の高度)

許可を得た上で IPC-2221B の表 6-1 から抜粋しました。

詳細は、以下のウェブサイトから仕様書全体をダウンロードしてください。

www.ipc.org

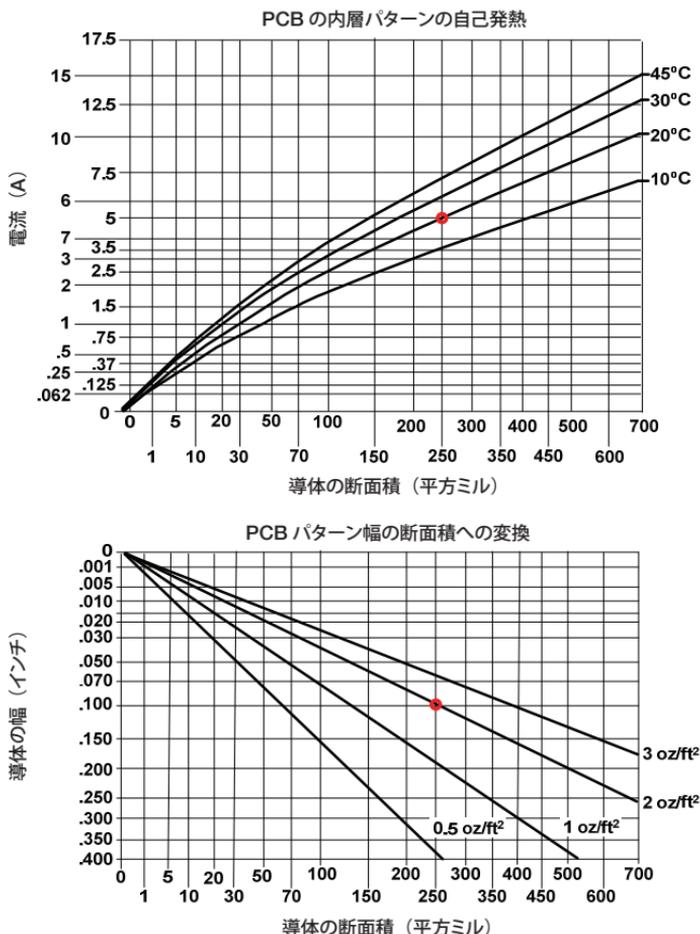


図 40: PCB の内層パターンの自己発熱

例

2oz/ft² の銅箔を使った幅 0.1 インチの PCB パターンを 20°C 上昇させる電流を求めなさい。ただしパターンは PCB の外部導体であると仮定します。

答え

最初に、下のグラフから幅 0.1 インチを断面積 250 平方ミルに換算します。次に、上のグラフから 20°C と 250 平方ミルに対応する電流を求めます (答え = 5A)。

許可を得た上で IPC-2152 の表 5-1 から抜粋しました。

詳細は、以下のウェブサイトから仕様書全体をダウンロードしてください。

www.ipc.org

PCB パターンの抵抗 (1oz Cu)

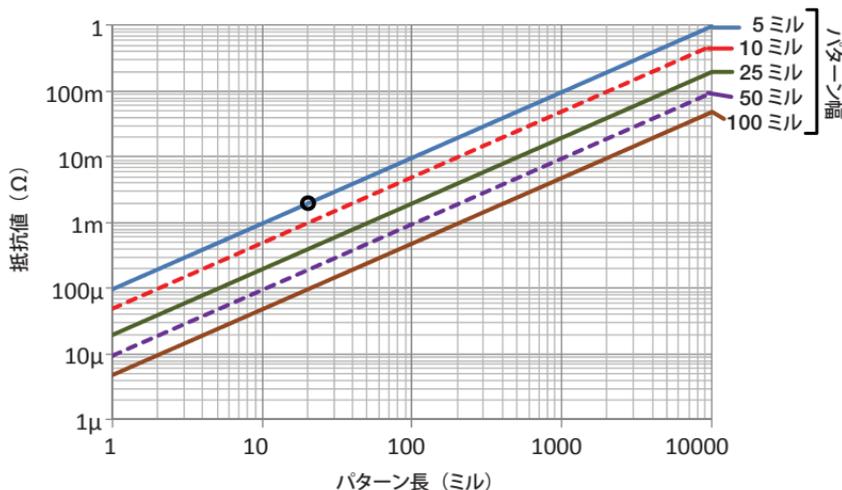


図 41: PCB パターンの抵抗と長さ、幅の関係 (1oz Cu, 25°C)

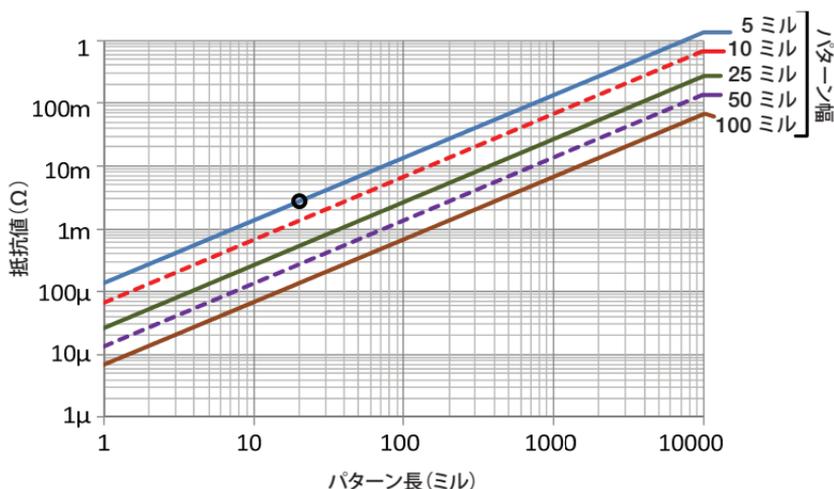


図 42: PCB パターンの抵抗と長さ、幅の関係 (1oz Cu, 125°C)

例

長さ 20 ミル、幅 5 ミル、厚さ 1oz Cu のパターンの 25°C と 125°C での抵抗値はいくつですか。

答え

$R_{25C} = 2\text{m}\Omega$ 、 $R_{125C} = 3\text{m}\Omega$ です。グラフ上の該当する点を丸で囲んでいます。

PCB パターンの抵抗 (2 oz Cu)

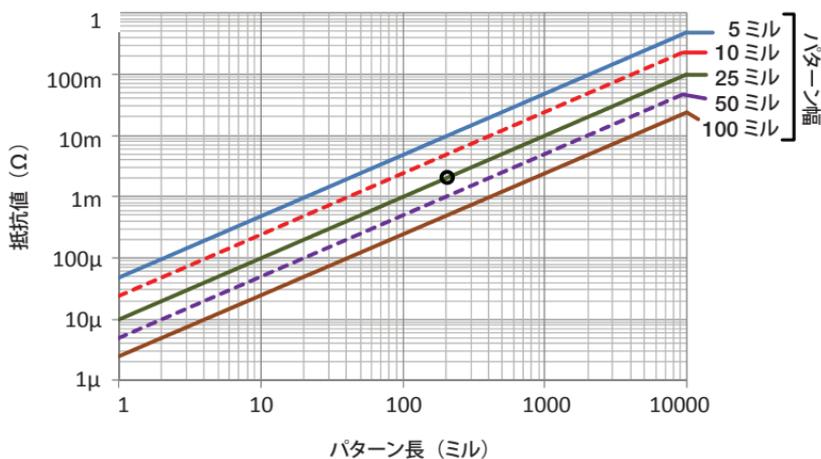


図 43: PCB パターンの抵抗と長さ、幅の関係 (2 oz Cu, 25°C)

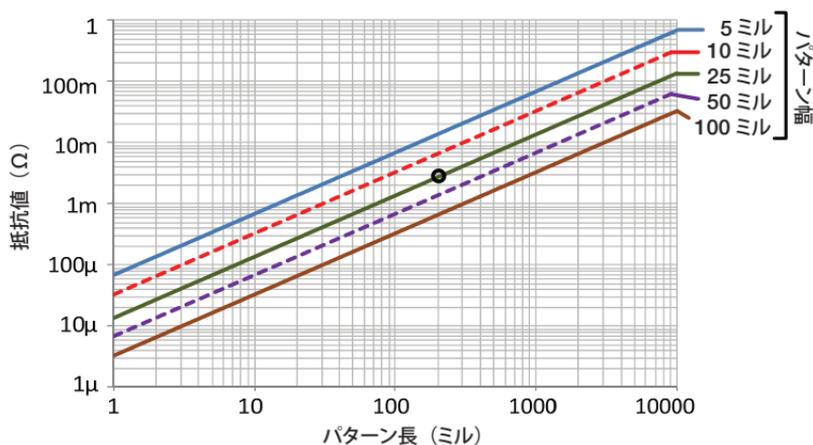


図 44: PCB パターンの抵抗と長さ、幅の関係 (2 oz Cu, 125°C)

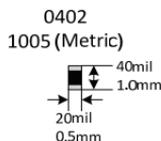
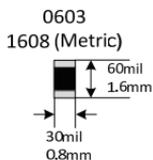
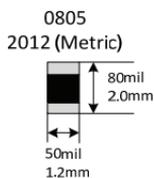
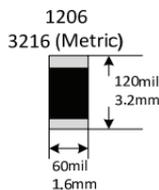
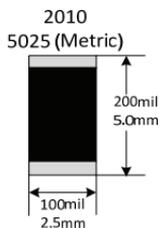
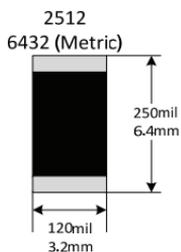
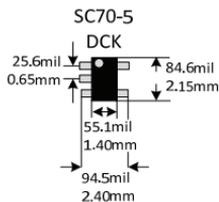
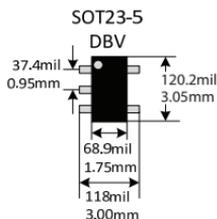
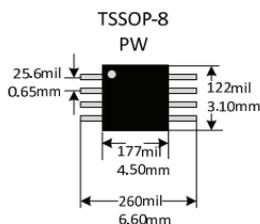
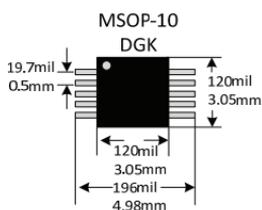
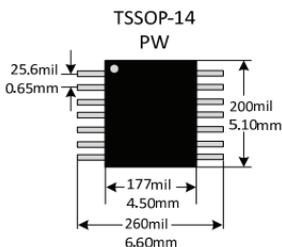
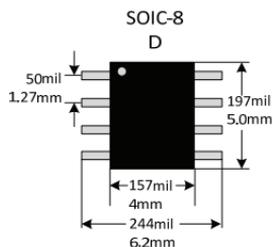
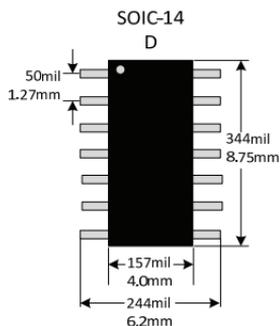
例

長さ 200 ミル、幅 25 ミル、厚さ 2 oz Cu のパターンの 25°C と 125°C での抵抗値はいくつですか。

答え

R_{25C} = 2mΩ、R_{125C} = 3mΩ です。グラフ上の該当する点を丸で囲んでいます。

一般的なパッケージの種類と寸法



PCB の平行平板パターンの容量

$$C(\text{pF}) = \frac{k \cdot \ell \cdot w \cdot \epsilon_r}{h} \quad (82) \text{ 銅の平行平板容量}$$

ここで

k = 自由空間の透磁率

メートル法と英単位系の両方での定数を示します。

$k = 8.854 \cdot 10^{-3} \text{pF/mm}$ または $2.247 \cdot 10^{-4} \text{pF/mil}$

ℓ = 長さ (メートル法: mm、英単位系: mil)

w = 幅 (メートル法: mm、英単位系: mil)

h = 平板間の距離 (メートル法: mm、英単位系: mil)

ϵ_r = PCB の比誘電率 (FR-4 の場合、 $\epsilon_r \approx 4.5$)

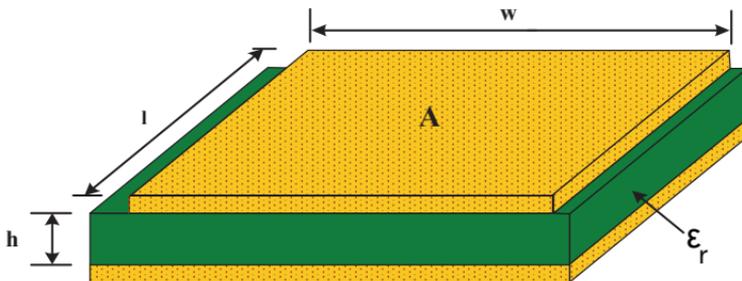


図 45: PCB の平行平板パターンの容量

例

$\ell = 5.08\text{mm}$ 、 $w = 12.7\text{mm}$ 、 $h = 1.575\text{mm}$ 、 $\epsilon_r = 4.5$ のパターン容量を計算しなさい。

$$C(\text{pF}) = \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{pF/mm}) \cdot (5.08\text{mm}) \cdot (12.7\text{mm}) \cdot (4.5)}{1.575\text{mm}} = 1.63\text{pF}$$

例

$\ell = 200\text{mil}$ 、 $w = 500\text{mil}$ 、 $h = 62\text{mil}$ 、 $\epsilon_r = 4.5$ のパターン容量を計算しなさい。

$$C(\text{pF}) = \frac{(2.247 \cdot 10^{-4} \text{pF/mil}) \cdot (200\text{mil}) \cdot (500\text{mil}) \cdot (4.5)}{62\text{mil}} = 1.63\text{pF}$$

マイクロストリップの容量とインダクタンス

$$L(\text{nH}) = k_L \cdot \ell \cdot \ln\left(\frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot w + t}\right) \quad (83) \text{ マイクロストリップのインダクタンス}$$

$$C(\text{pF}) = \frac{k_C \cdot \ell \cdot (\epsilon_r + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot w + t}\right)} \quad (84) \text{ マイクロストリップの容量}$$

ここで

k_L = PCB の単位長さあたりのインダクタンス

メートル法と英単位系の両方での定数を示します。

$k_L = 2\text{nH/cm}$ または 5.071nH/in

k_C = PCB の単位長さあたりの容量

メートル法と英単位系の両方での定数を示します。

$k_C = 0.264\text{pF/cm}$ または 0.67056pF/in

ℓ = マイクロストリップの長さ (メートル法: mm、英単位系: mil)

w = マイクロストリップの幅 (メートル法: mm、英単位系: mil)

t = 銅の厚さ (メートル法: mm、英単位系: mil)

h = 平板間の距離 (メートル法: mm、英単位系: mil)

ϵ_r = 比誘電率約 4.5 (FR-4 PCB)

英単位系:
銅の厚さ (mil) =
1.37 • (オンス)
例: 1oz Cu = 1.37mil
例: ½oz Cu = 0.684mil

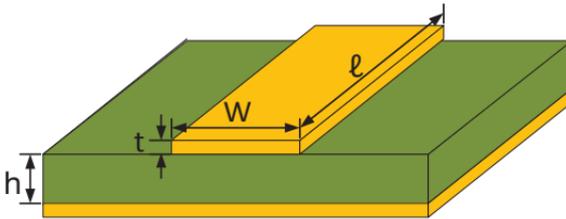


図 46: PCB のマイクロストリップの容量とインダクタンス

例

$\ell=2.54\text{cm}$, $w=0.254\text{mm}$, $t=0.0356\text{mm}$, $h=0.8\text{mm}$, $\epsilon_r = 4.5$ (FR-4) のマイクロストリップ配線のインダクタンスと容量を計算しなさい。

$$L(\text{pF}) = (2 \text{ nH/cm}) \cdot (2.54\text{cm}) \cdot \ln\left(\frac{5.98 \cdot 0.8\text{mm}}{0.8 \cdot 0.254\text{mm} + 0.0356\text{mm}}\right) = 15.2\text{nH}$$

$$C(\text{pF}) = \frac{(0.264\text{pF/cm}) \cdot (2.54\text{cm})(4.5 + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98 \cdot 0.8\text{mm}}{0.8 \cdot 0.254\text{mm} + 0.0356\text{mm}}\right)} = 1.3\text{pF}$$

例

$\ell=1\text{in}$, $w=10\text{mil}$, $t=1.4\text{mil}$, $h=31.5\text{mil}$, $\epsilon_r = 4.5$ (FR-4) のマイクロストリップ配線のインダクタンスと容量を計算しなさい。

答え: $L = 15.2\text{nH}$, $C = 1.3\text{pF}$ 注: これは上の問題を英単位系にしたものです。

隣接する銅箔

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k \cdot t \cdot \ell}{d} \quad (85) \text{ 同じ層}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k \cdot \epsilon_r \cdot w \cdot \ell}{h} \quad (86) \text{ 異なる層}$$

ここで

ℓ = 銅箔の長さ (メートル法: mm、英単位系: mil)

$k = 8.854 \cdot 10^{-3} \text{pF/mm}$ または $k = 2.247 \cdot 10^{-4} \text{pF/mil}$

t = パターンの厚さ (メートル法: mm、英単位系: mil)

d = 同じ層のパターン間の距離 (メートル法: mm、英単位系: mil)

w = パターンの幅 (メートル法: mm、英単位系: mil)

h = 平板の間隔 (メートル法: mm、英単位系: mil)

ϵ_r = PCB の比誘電率 (FR-4 の場合、 $\epsilon_r = 4.5$)

英単位系:
銅箔の厚さ (mil) =
1.37 • (オンス)
例: 1oz Cu = 1.37mil
例: ½oz Cu = 0.684mil

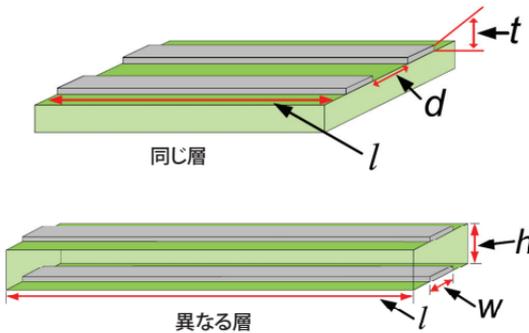


図 47: 隣接する銅箔の容量

例: $\ell = 2.54 \text{mm}$ 、 $t = 0.0348 \text{mm}$ 、 $d = 0.254 \text{mm}$ 、 $w = 0.635 \text{mm}$ 、 $h = 1.6 \text{mm}$ 、 $\epsilon_r = 4.5$ (FR-4) の配線の容量を、同じ層と隣接する層の両方について計算しなさい。

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}) (0.0348 \text{ mm}) (2.54 \text{ mm})}{0.254 \text{ mm}} = 0.0031 \text{ pF (同じ層)}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(8.854 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}) (4.5 \text{ mm}) (0.635 \text{ mm}) (2.54 \text{ mm})}{1.6 \text{ mm}} = 0.04 \text{ pF (隣接する層)}$$

例: $\ell = 100 \text{mil}$ 、 $t = 1.37 \text{mil}$ 、 $d = 10 \text{mil}$ 、 $w = 25 \text{mil}$ 、 $h = 63 \text{mil}$ 、 $\epsilon_r = 4.5$ (FR-4) の配線の容量を、同じ層と隣接する層の両方について計算しなさい。

$C = 0.0031 \text{pF}$ (同じ層)、 $C = 0.04 \text{pF}$ (隣接する層)

注: これは上の問題を英単位系にしたものです。

PCB のビアの容量とインダクタンス

$$L(\text{nH}) \approx k_L \cdot h \left[1 + \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right] \quad (87) \text{ ビアのインダクタンス}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{k_C \cdot \epsilon_r \cdot h \cdot d_1}{d_2 - d_1} \quad (88) \text{ ビアの容量}$$

ここで

k_L = PCB の単位長さあたりのインダクタンス

メートル法と英単位系の両方での定数を示します。

$$k_L = 0.2\text{nH/mm} \text{ または } 5.076 \cdot 10^{-3}\text{nH/mil}$$

k_C = PCB の単位長さあたりの容量

メートル法と英単位系の両方での定数を示します。

$$k_C = 0.0555\text{pF/mm} \text{ または } 1.41 \cdot 10^{-3}\text{pF/mil}$$

h = 平板の間隔

d = ビアの直径

d_1 = ビアの周囲のパッドの直径

d_2 = 内層グラウンド・プレーンとの距離

ϵ_r = PCB の比誘電率 (FR-4 の場合、 $\epsilon_r = 4.5$)

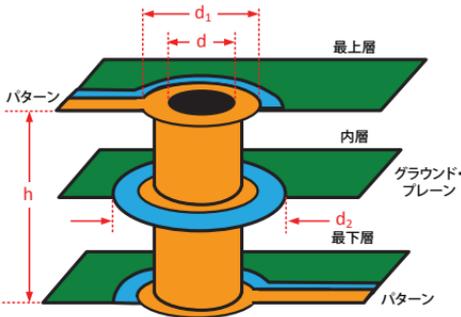


図 48: ビアのインダクタンスと容量

例: $h=1.6\text{mm}$ 、 $d=0.4\text{mm}$ 、 $d_1=0.8\text{mm}$ 、 $d_2=1.5\text{mm}$ のビアのインダクタンスと容量を計算しなさい。

$$L(\text{nH}) \approx (0.2 \text{ nH/mm}) \cdot (1.6\text{mm}) \left[1 + \ln \left(\frac{4 \cdot 1.6\text{mm}}{0.4\text{mm}} \right) \right] = 1.2\text{nH}$$

$$C(\text{pF}) \approx \frac{(0.0555\text{pF/mm}) \cdot (4.5) \cdot (1.6\text{mm}) \cdot (0.8\text{mm})}{1.5\text{mm} - 0.8\text{mm}} = 0.46\text{pF}$$

例: $h=63\text{mil}$ 、 $d=15.8\text{mil}$ 、 $d_1=31.5\text{mil}$ 、 $d_2=59\text{mil}$ のビアのインダクタンスと容量を計算しなさい。

答え: $L = 1.2\text{nH}$ 、 $C = 0.46\text{pF}$ 注: これは上の問題を英単位系にしたものです。

表 19: 同軸ケーブルの情報

タイプ	Z ₀	容量 / 長さ (pF/フィート)	外径 (インチ)	減衰量 dB/100 フィート (750MHz の場合)	誘電体のタイプ	用途
RG-58	53.5Ω	28.8	0.195	13.1	PE	数百ワット、約 200MHz までの テスト機器と RF 電源
RG-8	52Ω	29.6	0.405	5.96	PE	数 kW、数百 MHz までの RF 電源
RG-214/U	50Ω	30.8	0.425	6.7	PE	
9914	50Ω	26.0	0.405	4.0	PE	
RG-6	75Ω	20	0.270	5.6	PF	ビデオおよび CATV アプリケーション 数百ワット、数百 MHz (損失を許す場合は さらに高周波まで) の RF
RG-59/U	73Ω	29	0.242	9.7	PE	
RG-11/U	75Ω	17	0.412	3.65	PE	数 kW、数百 MHz までの RF 電源
RG-62/U	93Ω	13.5	0.242	7.1	ASP	一部のテスト機器と 100Ω ビデオ アプリケー ションに使用
RG-174	50Ω	31	0.100	23.5	PE	主にテスト機器の内部接続に使う小型同軸。 損失が大きいため通常短い配線に使用
RG-178/U	50Ω	29	0.071	42.7	ST	

同軸ケーブルの式

$$\frac{C}{\ell} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (89) \text{ 長さあたりの容量}$$

$$\frac{L}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (90) \text{ 長さあたりのインダクタンス}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (91) \text{ 特性インピーダンス}$$

ここで

L = ヘンリー (H) で表したインダクタンス

C = ファラッド (F) で表した静電容量

Z = オーム (Ω) で表したインピーダンス

d = 内部導体の直径

D = 外部導体の内径 (絶縁体の直径)

ε = 絶縁体の誘電率 (ε = ε_r ε₀)

μ = 透磁率 (μ = μ_r μ₀)

ℓ = ケーブル長

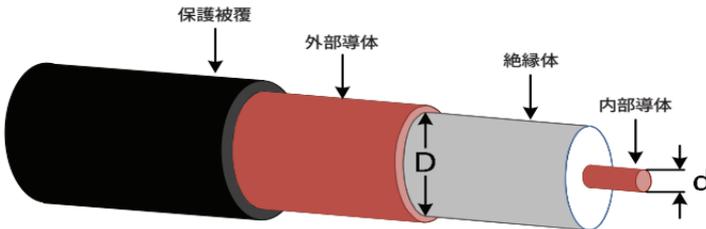


図 49: 同軸ケーブルの構造

表 20: 各種配線 (AWG) の長さあたりの抵抗

AWG	構造	外径		断面積		DC 抵抗	
		in	mm	サーキュラー・ミル	mm ²	Ω/1000ft	Ω/km
36	単線	0.005	0.127	25	0.013	445	1460
36	7/44	0.006	0.152	28	0.014	371	1271
34	単線	0.0063	0.160	39.7	0.020	280	918
34	7/42	0.0075	0.192	43.8	0.022	237	777
32	単線	0.008	0.203	67.3	0.032	174	571
32	7/40	0.008	0.203	67.3	0.034	164	538
30	単線	0.010	0.254	100	0.051	113	365
30	7/38	0.012	0.305	112	0.057	103	339
28	単線	0.013	0.330	159	0.080	70.8	232
28	7/36	0.015	0.381	175	0.090	64.9	213
26	単線	0.016	0.409	256	0.128	43.6	143
26	10/36	0.021	0.533	250	0.128	41.5	137
24	単線	0.020	0.511	404	0.205	27.3	89.4
24	7/32	0.024	0.610	448	0.229	23.3	76.4
22	単線	0.025	0.643	640	0.324	16.8	55.3
22	7/30	0.030	0.762	700	0.357	14.7	48.4
20	単線	0.032	0.813	1020	0.519	10.5	34.6
20	7/28	0.038	0.965	1111	0.562	10.3	33.8
18	単線	0.040	1.020	1620	0.823	6.6	21.8
18	7/26	0.048	1.219	1770	0.902	5.9	19.2
16	単線	0.051	1.290	2580	1.310	4.2	13.7
16	7/24	0.060	1.524	2828	1.442	3.7	12.0
14	単線	0.064	1.630	4110	2.080	2.6	8.6
14	7/22	0.073	1.854	4480	2.285	2.3	7.6

表 21: 各種 AWG の最大電流

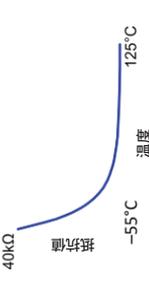
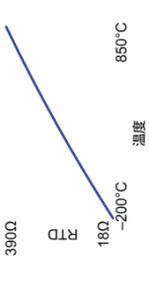
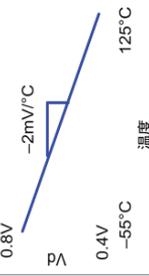
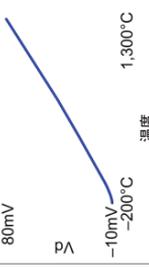
ゲージ	ポリエチレン ネオプレン ポリ塩化ビニル (半硬質) @ 80°C	ポリプロピレン ポリエチレン (高密度) @ 90°C	ポリ塩化ビニル ナイロン @ 105°C	カイナー ポリエチレン 熱可塑性物質 @ 125°C	カプトン テフロン シリコーン @ 200°C
AWG	I _{max} (A)	I _{max} (A)	I _{max} (A)	I _{max} (A)	I _{max} (A)
30	2	3	3	3	4
28	3	4	4	5	6
26	4	5	5	6	7
24	6	7	7	8	10
22	8	9	10	11	13
20	10	12	13	14	17
18	15	17	18	20	24
16	19	22	24	26	32
14	27	30	33	40	45
12	36	40	45	50	55
10	47	55	58	70	75

注: 配線は 25°C の自由空気中にあるものとします。

例
30AWG のテフロン配線の室温での最大電流はいくらですか。
自己発熱はどれだけですか。

答え
I_{max} = 4A
配線温度 = 200°C

表 22: 温度センサの概要

	サーミスタ	RTD	ダイオード	熱電対
温度範囲				
コスト	低い	高い	低い	低い
精度	温度が一定の場合、高精度 (温度範囲全体では精度が下がる)	高精度	校正しない場合、低精度	多項式補正を使うことで 良好な精度
直線性	非常に劣る 対数関数の逆数に従う	かなり直線的 非直線性はフルスケールの 4.5% 未満 比較的単純な 2 次関数	かなり直線的な傾き $\approx -2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 傾きはバイアス電流、 ダイオードのタイプ、 ダイオードのプロセスで異なる	かなり直線的 非直線性はフルスケールの 10% 未満 (複雑な 10 次多項式で補正)
構造	丈夫でない	タイプによって丈夫なものもある	丈夫	最も丈夫
出力範囲	フルスケールで通常数十〜数百 kΩ 非常に多くの抵抗値の バリエーションがある	18Ω ~ 390Ω (PT100) 180Ω ~ 3.9kΩ (PT1000)	0.4V ~ 0.8V	数十 mV
用途	汎用	学術、産業用	低コスト温度モニタ、 低コスト線形応答	産業用温度計測
その他	バイアス電流が必要	バイアス電流が必要	バイアス電流が必要	自己出力型 冷接点補償が必要

サーミスタ：抵抗値を温度に変換する Steinhart-Hart 式

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c (\ln(R))^3 \quad (92) \text{ サーミスタの抵抗値を温度に変換}$$

ここで

T = ケルビン (K) で表した温度

a、b、c = Steinhart-Hart 式の定数

R = オーム (Ω) で表した抵抗値

サーミスタ：温度を抵抗値に変換する Steinhart-Hart 式

$$R = \exp \left[\left(y - \frac{x}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(y + \frac{x}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (93) \text{ サーミスタの温度を抵抗値に変換}$$

$$x = \frac{a - \frac{1}{T}}{c} \quad (94) \text{ 式 93 で使う係数}$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{b}{3c} \right)^3 + \frac{x^2}{4}} \quad (95) \text{ 式 93 で使う係数}$$

ここで

R = オーム (Ω) で表した抵抗値

T = ケルビン (K) で表した温度

a、b、c = Steinhart-Hart 式の定数

x、y = 温度から抵抗値への変換式で使う Steinhart-Hart 係数

温度を抵抗値に変換する RTD の式

$$R_{\text{rtd}} = R_0 [1 + A_0 T + B_0 T^2 + C_0 (T - 100) T^3] \quad (96) \text{ RTD の抵抗値 } (T < 0^\circ\text{C})$$

$$R_{\text{rtd}} = R_0 [1 + A_0 T + B_0 T^2] \quad (97) \text{ RTD の抵抗値 } (T > 0^\circ\text{C})$$

ここで

$R_{\text{rtd}} = \text{RTD の抵抗値 (温度範囲: } -200^\circ\text{C} < T < 850^\circ\text{C)}$

$R_0 = 100\Omega \text{ (PT-100) または } 1000\Omega \text{ (PT-1000)}$

$A_0, B_0, C_0 = \text{Callendar-Van Dusen 係数}$

$T = \text{摂氏 } (^\circ\text{C}) \text{ で表した温度}$

抵抗値を温度に変換する RTD の式 ($T > 0^\circ\text{C}$)

$$T = \frac{-A_0 + \sqrt{A_0^2 - 4B_0 \left(1 - \frac{R_{\text{RTD}}}{R_0}\right)}}{2B_0} \quad (98) \text{ RTD の抵抗値 } (T > 0^\circ\text{C})$$

ここで

$R_{\text{RTD}} = \text{RTD の抵抗値 (温度範囲: } -200^\circ\text{C} < T < 850^\circ\text{C)}$

$R_0 = 100\Omega$

$A_0, B_0, C_0 = \text{Callendar-Van Dusen 係数}$

$T = \text{摂氏 } (^\circ\text{C}) \text{ で表した温度}$

表 23: 各種 RTD 規格の Callendar-Van Dusen 係数

	IEC-751 DIN 43760 BS 1904 ASTM-E1137 EN-60751	JISC 1604	US Industrial Standard D-100 American	US Industrial Standard American	ITS-90
A_0	+3.9083E-3	+3.9739E-3	+3.9787E-3	+3.9692E-3	+3.9888E-3
B_0	-5.775E-7	-5.870E-7	-5.8686E-7	-5.8495E-7	-5.915E-7
C_0	-4.183E-12	-4.4E-12	-4.167E-12	-4.233E-12	-3.85E-12

例

ITS-90 PT100 の抵抗値が 120Ω の時の温度を答えなさい。

答え

$$T = \frac{-(3.9888 \cdot 10^{-3}) + \sqrt{(3.9888 \cdot 10^{-3})^2 - 4(-5.915 \cdot 10^{-7}) \left(1 - \frac{120}{100}\right)}}{2(-5.915 \cdot 10^{-7})} = 50.5^\circ\text{C}$$

抵抗値を温度に変換する RTD の式 ($T < 0^{\circ}\text{C}$)

$$T = \sum_{i=0}^n \alpha_i (R_{\text{rtd}})^i \quad (99) \text{ RTD の抵抗値 } (T < 0^{\circ}\text{C})$$

ここで

T = 摂氏 ($^{\circ}\text{C}$) で表した温度

R_{RTD} = RTD の抵抗値 (温度範囲: $T < 0^{\circ}\text{C}$)

α_i = RTD の抵抗値を温度に変換する多項式の係数 ($T < 0^{\circ}\text{C}$)

表 24: RTD の抵抗値を温度に変換する 5 次の係数

	IEC-751 DIN 43760 BS 1904 ASTM-E1137 EN-60751	JISC 1604	US Industrial Standard D-100 American	US Industrial Standard American	ITS-90
α_0	-2.4202E+02	-2.3820E+02	-2.3818E+02	-2.3864E+02	-2.3791E+02
α_1	2.2228E+00	2.1898E+00	2.1956E+00	2.1973E+00	2.2011E+00
α_2	2.5857E-03	2.5226E-03	2.4413E-03	2.4802E-03	2.3223E-03
α_3	-4.8266E-06	-4.7825E-06	-4.7517E-06	-4.7791E-06	-4.6280E-06
α_4	-2.8152E-08	-2.7009E-08	-2.3831E-08	-2.5157E-08	-1.9702E-08
α_5	1.5224E-10	1.4719E-10	1.3492E-10	1.4020E-10	1.1831E-10

例

ITS-90 PT100 の抵抗値が 60Ω の時の温度を答えなさい。

答え

$$T = (-2.3791\text{E} + 02) \cdot (60)^0 + (2.2011\text{E} + 00) \cdot (60)^1 + (2.3223\text{E} - 03) \cdot (60)^2 + \dots + (2.3223\text{E} - 03) \cdot (60)^5 = -98.6^{\circ}\text{C}$$

ダイオードの式と温度の関係

$$V_D = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) \quad (100) \text{ ダイオードの電圧}$$

ここで

V_D = ダイオードの電圧 (温度と電流の関数)

n = ダイオードの理想係数 (1 ~ 2 の範囲)

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (ボルツマン定数)

T = ケルビン (K) で表した温度

$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (電気素量)

I = アンペア (A) で表したダイオードの順方向電流

I_S = 飽和電流

$$I_S = \alpha T^{(3/n)} \exp\left(-\frac{qV_G}{nkT}\right) \quad (101) \text{ 飽和電流}$$

ここで

I_S = 飽和電流

α = 接合の断面積に関連する定数

V_G = ダイオードの電圧 (温度と電流の関数)

n = ダイオードの理想係数 (1 ~ 2 の範囲)

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (ボルツマン定数)

T = ケルビン (K) で表した温度

$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (電気素量)

ダイオードの電圧と温度の関係

図 50 にダイオードの温度ドリフトの例を示します。

ダイオードの特性と順方向電流によって、この曲線の傾きとオフセットは変化します。しかし、代表的なダイオードのドリフトは約 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ です。室温での順方向電圧降下の代表的な値は 0.6V です。

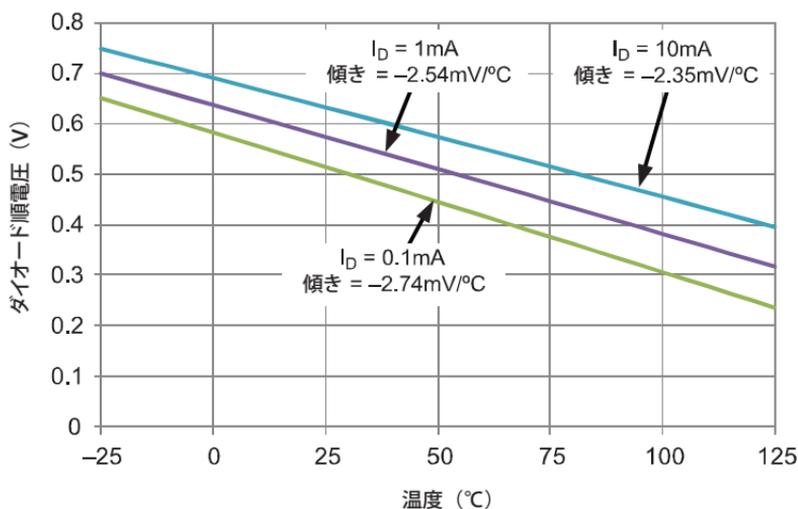


図 50: ダイオードの順方向電圧降下と温度の関係

タイプ J 熱電対による温度から電圧への変換 (ITS-90 規格)

$$V_t = \sum_{i=0}^n c_i (T)^i \quad (102) \text{ 熱電電圧}$$

ここで

 V_T = 熱電電圧

T = 摂氏 (°C) で表した温度

 c_i = 変換係数

表 25: タイプ J 熱電対の温度から電圧への変換係数

	-219°C ~ 760°C	760°C ~ 1,200°C
c₀	0.0000000000E+00	2.9645625681E+05
c₁	5.0381187815E+01	-1.4976127786E+03
c₂	3.0475836930E-02	3.1787103924E+00
c₃	-8.5681065720E-05	-3.1847686701E-03
c₄	1.3228195295E-07	1.5720819004E-06
c₅	-1.7052958337E-10	-3.0691369056E-10
c₆	2.0948090697E-13	—
c₇	-1.2538395336E-16	—
c₈	1.5631725697E-20	—

タイプ J 熱電対による電圧から温度への変換 (ITS-90 規格)

$$T = \sum_{i=0}^n c_i (V_t)^i \quad (103) \text{ 温度}$$

表 26: タイプ J 熱電対の電圧から温度への変換係数

	-219°C ~ 0°C	0°C ~ 760°C	760°C ~ 1,200°C
c₀	0.000000000E+00	0.000000000E+00	-3.113581870E+03
c₁	1.952826800E-02	1.978425000E-02	3.005436840E-01
c₂	-1.228618500E-06	-2.001204000E-07	-9.947732300E-06
c₃	-1.075217800E-09	1.036969000E-11	1.702766300E-10
c₄	-5.908693300E-13	-2.549687000E-16	-1.430334680E-15
c₅	-1.725671300E-16	3.585153000E-21	4.738860840E-21
c₆	-2.813151300E-20	-5.344285000E-26	—
c₇	-2.396337000E-24	5.099890000E-31	—
c₈	-8.382332100E-29	—	—

タイプ K 熱電対による温度から電圧への変換 (ITS-90 規格)

$$V_T = \sum_{i=0}^n c_i (T)^i \quad (104) \text{ 熱電電圧 (} T < 0^\circ\text{C)}$$

$$V_t = \left[\sum_{i=0}^n c_i (T)^i \right] + \alpha_0 e^{[\alpha_1 (T - 126.9686)]^2} \quad (105) \text{ 熱電電圧 (} T > 0^\circ\text{C)}$$

ここで

V_T = 熱電電圧

T = 摂氏 ($^\circ\text{C}$) で表した温度

c_i = 変換係数

α_0 、 α_1 = 変換係数

表 27: タイプ K 熱電対の温度から電圧への変換係数

	-219°C ~ 760°C	760°C ~ 1,200°C
c_0	0.0000000000E+00	-1.7600413686E+01
c_1	3.9450128025E+01	3.8921204975E+01
c_2	2.3622373598E-02	1.8558770032E-02
c_3	-3.2858906784E-04	-9.9457592874E-05
c_4	-4.9904828777E-06	3.1840945719E-07
c_5	-6.7509059173E-08	-5.6072844889E-10
c_6	-5.7410327428E-10	5.6075059059E-13
c_7	-3.1088872894E-12	-3.2020720003E-16
c_8	-1.0451609365E-14	9.7151147152E-20
c_9	-1.9889266878E-17	-1.2104721275E-23
c_{10}	-1.6322697486E-20	—
α_0	—	1.1859760000E+02
α_1	—	-1.1834320000E-04

タイプ K 熱電対による電圧から温度への変換 (ITS-90 規格)

$$T = \sum_{i=0}^n c_i (V_t)^i \quad (106) \text{ 温度}$$

表 28: タイプ K 熱電対の電圧から温度への変換係数

	-219°C ~ 0°C	0°C ~ 760°C	760°C ~ 1,200°C
c₀	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-1.3180580E+02
c₁	2.5173462E-02	2.5083550E-02	4.8302220E-02
c₂	-1.1662878E-06	7.8601060E-08	-1.6460310E-06
c₃	-1.0833638E-09	-2.5031310E-10	5.4647310E-11
c₄	-8.9773540E-13	8.3152700E-14	-9.6507150E-16
c₅	-3.7342377E-16	-1.2280340E-17	8.8021930E-21
c₆	-8.6632643E-20	9.8040360E-22	-3.1108100E-26
c₇	-1.0450598E-23	-4.4130300E-26	—
c₈	-5.1920577E-28	1.0577340E-30	—
c₉	—	-1.0527550E-35	—

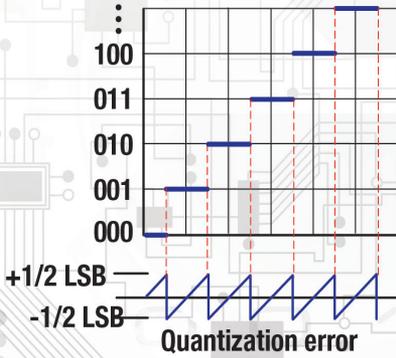
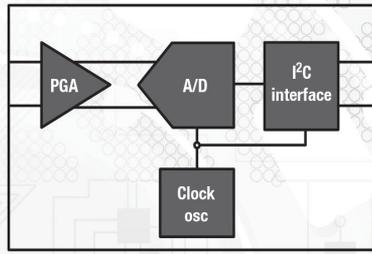
表 29: 各種材料のゼーベック係数

材料	ゼーベック係数	材料	ゼーベック係数	材料	ゼーベック係数
アルミニウム	4	金	6.5	ロジウム	6
アンチモン	47	鉄	19	セレン	900
ビスマス	-72	鉛	4	シリコン	440
カドミウム	7.5	水銀	0.6	銀	6.5
炭素	3	ニクロム	25	ナトリウム	-2.0
コンスタンタン	-35	ニッケル	-15	タンタル	4.5
銅	6.5	白金	0	テルル	500
ゲルマニウム	300	カリウム	-9.0	タングステン	7.5

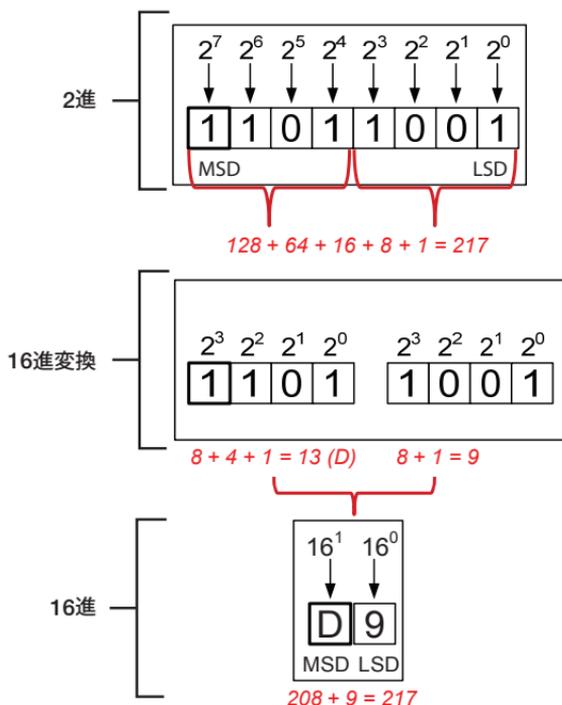
注: 単位は $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ です。すべて 0°C でのデータです。

A/D 変換

- 2進 /16進変換
- A/D 変換と D/A 変換の変換特性
- 量子化誤差
- 信号対ノイズ音比 (SNR)
- 信号対ノイズ比+歪み (SINAD)
- 全高調波歪み (THD)
- 有効ビット数 (ENOB)
- ノイズフリー分解能と有効分解能

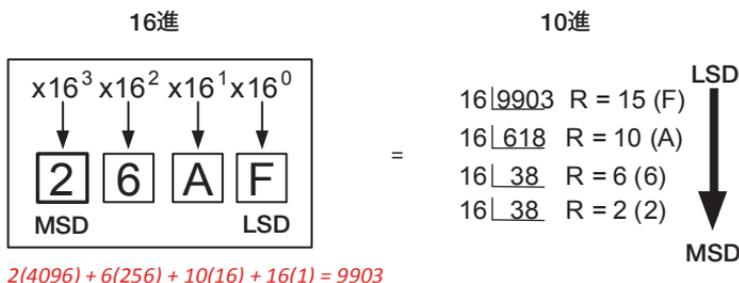


変換例 : 2 進から 16 進



変換例 : 16 進から 10 進と 10 進から 16 進

10進 (基数10)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16進 (基数16)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F



LSD = Least Significant Digit
MSD = Most Significant Digit

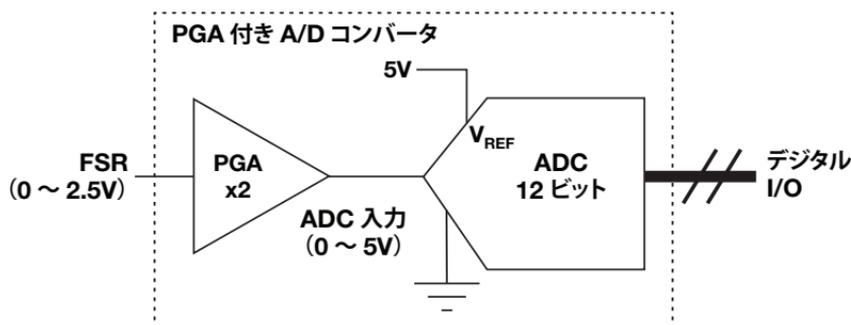


図 51: ADC フルスケール範囲 (FSR) ユニポーラ

フルスケール範囲 (FSR) ユニポーラ

$$\text{FSR} = \frac{V_{\text{REF}}}{\text{PGA}}$$

$$1\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^n}$$

上記回路の計算例

$$\text{FSR} = \frac{V_{\text{REF}}}{\text{PGA}} = \frac{5\text{V}}{2} = 2.5\text{V}$$

$$1\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^n} = \frac{2.5\text{V}}{2^{12}} = 610.35\mu\text{V}$$

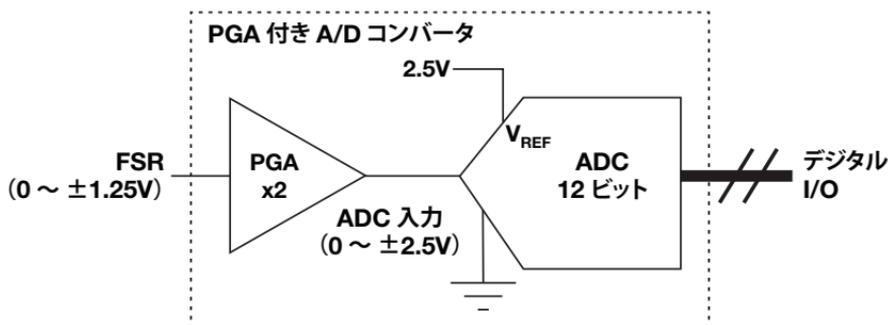


図 52: ADC フルスケール範囲 (FSR) バイポーラ

フルスケール範囲 (FSR) バイポーラ

$$\text{FSR} = \frac{V_{\text{REF}}}{\text{PGA}}$$

$$1\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^n}$$

上記回路の計算例

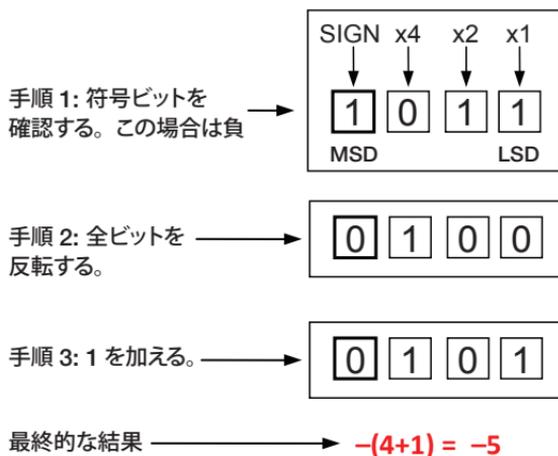
$$\text{FSR} = \frac{\pm V_{\text{REF}}}{\text{PGA}} = \frac{\pm 2.5\text{V}}{2} = \pm 1.25\text{V} \Rightarrow 2.5\text{V}$$

$$1\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^n} = \frac{2.5\text{V}}{2^{12}} = 610.35\mu\text{V}$$

表 30: 差動データのフォーマット

コード	ストレート・バイナリ	オフセット・バイナリ	2の補数
バイナリ	10進値	10進値	10進値
11111111	255	127	-1
11000000	192	64	-64
10000000	128	0	-128
01111111	127	-1	127
01000000	64	-64	64
00000000	0	-128	0

2の補数から10進値への変換: 負の数の例



2の補数から10進値への変換: 正の数の例



表 31: LSB 電圧と分解能および基準電圧の関係

		FSR (フルスケール範囲)			
		1.024V	1.25V	2.048V	2.5V
分解能	8	4mV	4.88mV	8mV	9.76mV
	10	1mV	1.22mV	2mV	2.44mV
	12	250 μ V	305 μ V	500 μ V	610 μ V
	14	52.5 μ V	76.3 μ V	125 μ V	152.5 μ V
	16	15.6 μ V	19.1 μ V	31.2 μ V	38.14 μ V
	18	3.91 μ V	4.77 μ V	7.81 μ V	9.53 μ V
	20	0.98 μ V	1.19 μ V	1.95 μ V	2.384 μ V
	22	244nV	299nV	488nV	596nV
	24	61nV	74.5nV	122nV	149nV

表 32: LSB 電圧と分解能および基準電圧の関係

		FSR (フルスケール範囲)			
		3V	3.3V	4.096V	5V
分解能	8	11.7mV	12.9mV	16mV	19.5mV
	10	2.93mV	3.222mV	4mV	4.882mV
	12	732 μ V	806 μ V	1mV	1.221mV
	14	183 μ V	201 μ V	250 μ V	305 μ V
	16	45.77 μ V	50.35 μ V	62.5 μ V	76.29 μ V
	18	11.44 μ V	12.58 μ V	15.6 μ V	19.07 μ V
	20	2.861 μ V	3.147 μ V	3.91 μ V	4.768 μ V
	22	715nV	787nV	976nV	1.192 μ V
	24	179nV	196nV	244nV	298nV

DAC の定義

分解能 = n	出力を定量化するのに使うビット数
コード数 = 2^n	入力コードの組み合わせの数
フルスケール範囲出力 = FSR	コンバータの出力範囲と LSB 電圧を設定
$LSB = FSR / 2^n$	各 LSB の電圧ステップの大きさ
フルスケール出力電圧 = $(2^n - 1) \cdot 1LSB$	DAC のフルスケール出力電圧
フルスケール入力コード = $2^n - 1$	書き込みできる最大のコード
変換特性: $V_{out} = \text{コード数} \cdot (FSR/2^n)$	出力電圧と入力コードの関係

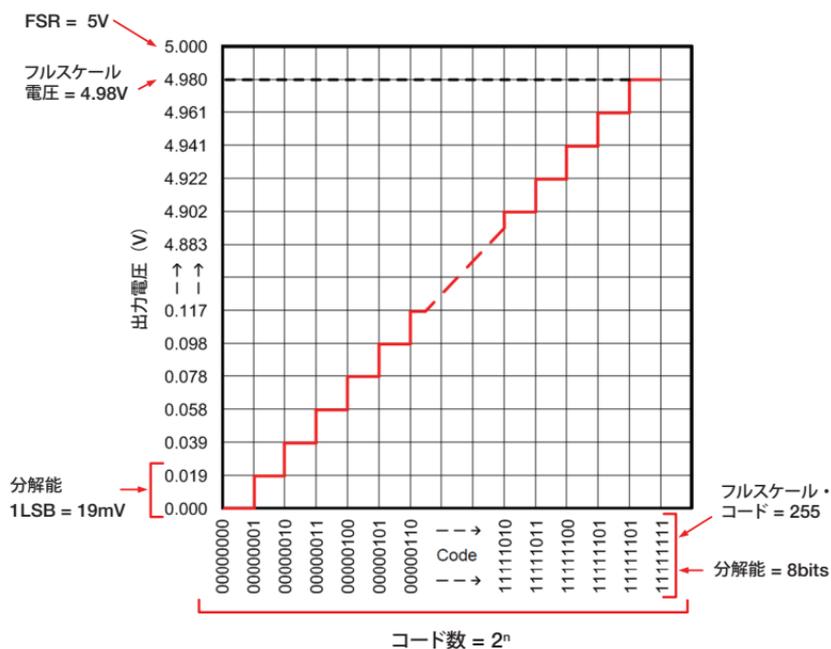


図 53: DAC の変換特性

ADC の定義

分解能 = n	入力を定量化するのに使うビット数
コード数 = 2^n	出力コードの組み合わせの数
フルスケール範囲入力 = FSR	コンバータの入力範囲と LSB 電圧を設定
$LSB = FSR / 2^n$	各 LSB の電圧ステップの大きさ
フルスケール入力電圧 = $(2^n - 1) \cdot 1LSB$	ADC のフルスケール入力電圧
フルスケール出力コード = $2^n - 1$	読み出しできる最大のコード
変換特性: コード数 = $V_{in} / (FSR/2^n)$	入力電圧と出力コードの関係

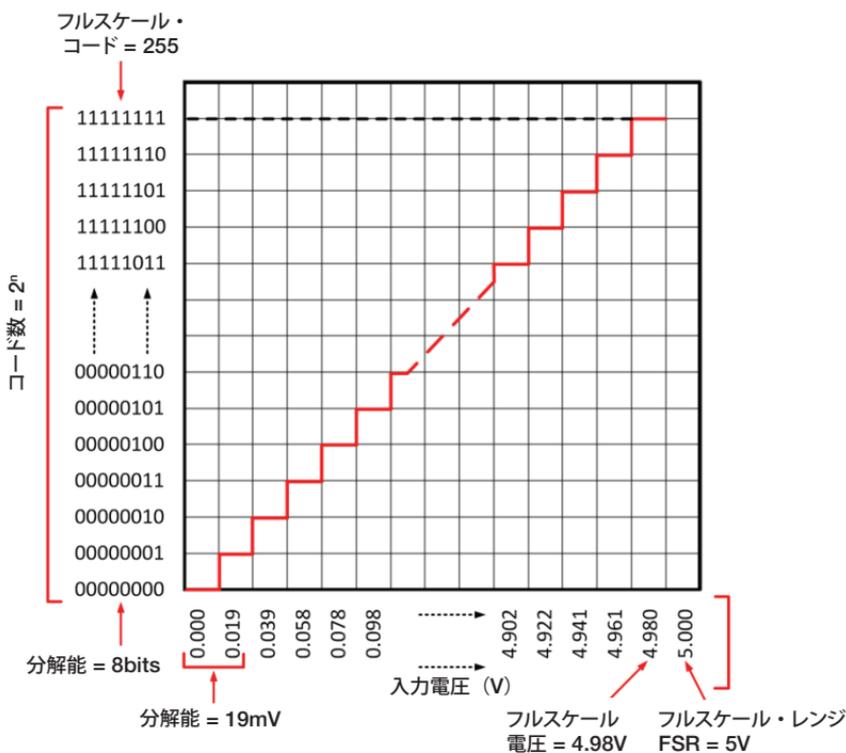


図 54: ADC の変換特性

ADC の量子化誤差

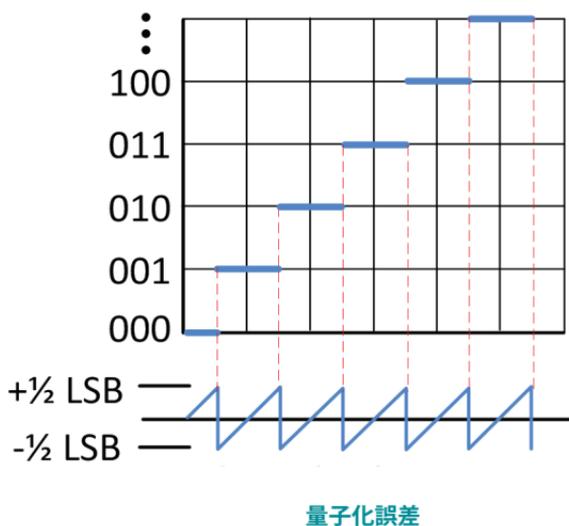


図 55: A/D コンバータの量子化誤差

量子化誤差

量子化プロセスの結果生じる誤差です。この誤差の量はコンバータの分解能の関数です。A/D コンバータの量子化誤差は $\frac{1}{2} \text{ LSB}$ です。量子化誤差信号は実際に印加した電圧と ADC 出力の差です (図 55)。量子化誤差信号の RMS は $1\text{LSB}/\sqrt{12}$ です。

量子化ノイズのみによる信号対ノイズ比 (SNR)

$$\text{MaxRMSSignal} = \frac{\text{FSR}/2}{\sqrt{2}} = \frac{1\text{LSB} \times 2^{N-1}}{\sqrt{2}} \quad (107)$$

$$\text{RMSNoise} = \frac{1\text{LSB}}{\sqrt{12}} \text{ from quantization only} \quad (108)$$

$$\text{SNR} = \frac{\text{MaxRMSSignal}}{\text{RMSNoise}} = \frac{1\text{LSB} \times 2^{N-1}/\sqrt{2}}{1\text{LSB}/\sqrt{12}} = 2^{N-1}\sqrt{6} \quad (109)$$

$$\text{SNR(dB)} = 20\log(\text{SNR}) = [20\log(2)]N + 20\log\left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right) \quad (110)$$

$$\text{SNR(dB)} \approx 6.02N + 1.76 \quad (111)$$

ここで

FSR = A/D コンバータのフルスケール範囲

1LSB = 1LSB の電圧、 $V_{\text{REF}}/2^N$

N = A/D コンバータの分解能

MaxRMSSignal = ADC のフルスケール入力に相当する RMS 値

RMSNoise = 量子化による RMS ノイズ

SNR = RMS ノイズに対する RMS 信号の比

例

量子化ノイズのみを仮定した場合、基準電圧 5V の 8 ビット A/D コンバータの SNR を求めなさい。

答え

$$\text{SNR} = 2^{N-1}\sqrt{6} = 2^{8-1}\sqrt{6} = 314$$

$$\text{SNR (dB)} = 20\log(314) = 49.9\text{dB}$$

$$\text{SNR (dB)} = 6.02(8) + 1.76 = 49.9\text{dB}$$

全高調波歪み (Vrms)

$$\text{THD}(\%) = \left(\frac{\text{RMSDistortion}}{\text{MaxRMSSignal}} \right) \cdot 100 = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (112)$$

$$\text{THD}(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{\text{RMSDistortion}}{\text{MaxRMSSignal}} \right) \quad (113)$$

ここで

THD = 全高調波歪み (RMS 信号に対する RMS 歪みの比)

RMSDistortion = 全高調波成分の RMS 総和

MaxRMSSignal = 入力信号の RMS 値

V_1 = 基本波 (通常は入力信号)

V_2 、 V_3 、 V_4 、 \dots 、 V_n = 基本波の高調波

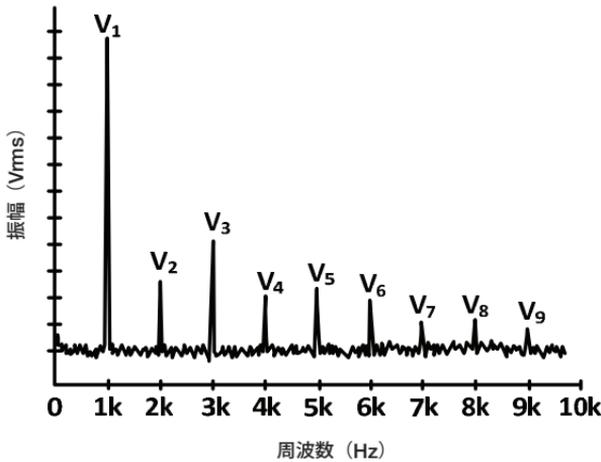


図 56: 基本波と高調波 (Vrms)

全高調波歪み (dBc)

$$\text{THD(dBc)} = 10 \log \left[10^{\left(\frac{D_2}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{D_3}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{D_4}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{D_n}{10}\right)} \right] \quad (114)$$

ここで

THD = 全高調波歪み (RMS 信号に対する RMS 歪みの比)

D_1 = 基本波 (通常は入力信号) これは 0dBc に正規化されています。

D_2 、 D_3 、 D_4 、 \dots D_n = 基本波 (0dBc) に対する高調波の相対値

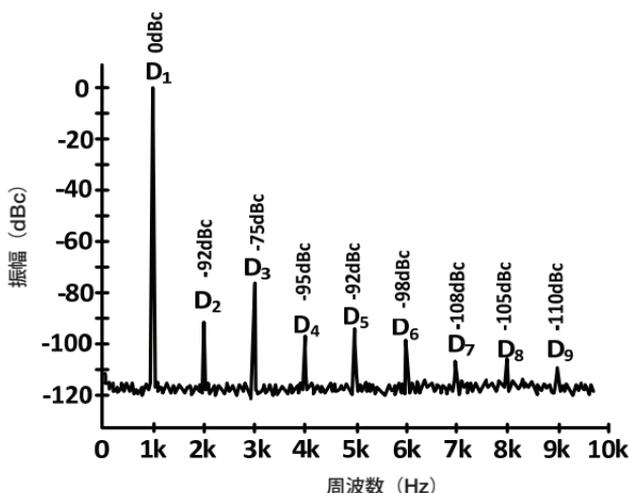


図 57: dBc で表した基本波と高調波

例

上記の例に対する THD を求めなさい。

答え

$$\text{THD(dBc)} = 10 \log \left[10^{\left(\frac{-92}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-75}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-95}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{-110}{10}\right)} \right]$$

$$\text{THD(dBc)} = -74.76 \text{ dB}$$

AC 信号

信号対ノイズ比+歪み (SINAD) と有効ビット数 (ENOB)

$$\text{SINAD(dB)} = 20 \log \left(\frac{\text{MaxRMSSignal}}{\sqrt{\text{RMSNoise}^2 + \text{RMSDistortion}^2}} \right) \quad (115)$$

$$\text{SINAD(dB)} = -20 \log \left(\sqrt{10^{\left(\frac{-\text{SNR(dB)}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{\text{THD(dB)}}{10}\right)}} \right) \quad (116)$$

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD(dB)} - 1.76\text{dB}}{6.02} \quad (117)$$

ここで

MaxRMSSignal = ADC のフルスケール入力に相当する RMS 値

RMSNoise = A/D コンバータ全体の RMS ノイズ

RMSDistortion = 全高調波成分の RMS 総和

SINAD = フルスケール SNR と歪みの比

THD = 全高調波歪み (RMS 信号に対する RMS 歪みの比)

SNR = RMS ノイズに対する RMS 信号の比

例

以下の条件で、SNR、THD、SINAD、ENOB を計算しなさい。

MaxRMSSignal = 1.76Vrms

RMSDistortion = 50μVrms

RMSNoise = 100μVrms

答え

$$\text{SNR(dB)} = 20 \log \left(\frac{1.76 \text{ Vrms}}{100 \mu\text{Vrms}} \right) = 84.9 \text{ dB}$$

$$\text{THD(dB)} = 20 \log \left(\frac{50 \mu\text{Vrms}}{1.76 \text{ Vrms}} \right) = -90.9 \text{ dB}$$

$$\text{SINAD(dB)} = 20 \log \left(\frac{1.76 \text{ V rms}}{\sqrt{(100 \mu\text{Vrms})^2 + (50 \mu\text{Vrms})^2}} \right) = 83.9 \text{ dB}$$

$$\text{SINAD(dB)} = -20 \log \left(\sqrt{10^{\left(\frac{-83.9 \text{ dB}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-90.9 \text{ dB}}{10}\right)}} \right) = 83.9 \text{ dB}$$

$$\text{ENOB} = \frac{83.9\text{dB} - 1.76\text{dB}}{6.02} = 13.65$$

DC 信号

ノイズフリー分解能と有効分解能

$$\text{NoiseFreeResolution} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{PeaktoPeakNoiseinLSB}} \right) \quad (118)$$

$$\text{EffectiveResolution} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{rmsNoiseinLSB}} \right) \quad (119)$$

$$\text{PeaktoPeakNoiseinLSB} \approx 6.6 \times \text{rmsNoiseinLSB} \quad (120)$$

$$\text{EffectiveResolution} \approx \text{NoiseFreeResolution} + 2.7 \quad (121)$$

注：最大有効分解能は ADC の分解能より高くなることはありません。
例えば、24 ビットコンバータは、24 ビットを超える有効分解能は持つことができません。

例

ピーク・ツー・ピーク・ノイズを 7LSB とした場合の 24 ビットコンバータのノイズフリー分解能と有効分解能を求めなさい。

答え

$$\text{NoiseFreeResolution} = \log_2 \left(\frac{2^{24}}{7} \right) = 21.2$$

$$\text{EffectiveResolution} = \log_2 \left(\frac{2^{24}}{6.6} \right) = 23.9$$

$$\text{EffectiveResolution} = 21.2 + 2.7 = 23.9$$

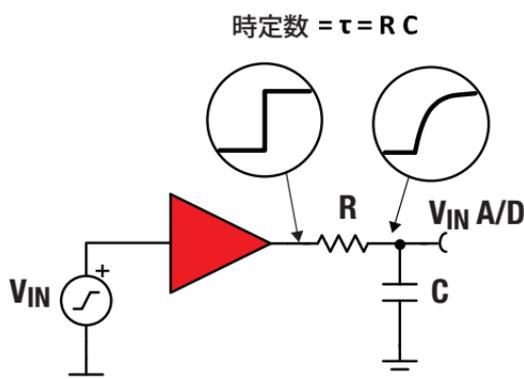


図 58: A/D コンバータに接続した RC 回路のセリング時間

表 33: 指定した時間後に達する変換精度

時定数 (N_{TC}) で 正規化したセリング時間	ビット (N) で表した 精度	時定数 (N_{TC}) で 正規化したセリング時間	ビット (N) で表した 精度
1	1.44	10	14.43
2	2.89	11	15.87
3	4.33	12	17.31
4	5.77	13	18.76
5	7.21	14	20.20
6	8.66	15	21.64
7	10.10	16	23.08
8	11.54	17	24.53
9	12.98	18	25.97

$$N = \log_2(e^{-N_{TC}}) \quad (122)$$

ここで

N = 時定数で正規化した時間 N_{TC} の後、RC 回路が達する精度のビット数

N_{TC} = RC 時定数で正規化した時間

注: PGA フロント・エンドを持たないシングルエンド入力 ADC に、FSR のステップ (立ち上がり波形) が入力される場合を仮定しています (ただし、FSR (フルスケール範囲) = V_{REF})。

表 34: 指定した変換精度に達するのに必要な時間

ビット (N) で表した 精度	時定数 (N_{TC}) で 正規化したセトリング時間	ビット (N) で表した 精度	時定数 (N_{TC}) で 正規化したセトリング時間
8	5.5	17	11.78
9	6.24	18	12.48
10	6.93	19	13.17
11	7.62	20	13.86
12	8.32	21	14.56
13	9.01	22	15.25
14	9.70	23	15.94
15	10.40	24	16.64
16	11.04	25	17.33

$$N_{TC} = \ln(2^N) \quad (123)$$

ここで

$N_{TC} = N$ ビットのセトリング精度を得るのに必要な時間 (時定数で正規化)

$N =$ 精度のビット数

注: PGA フロント・エンドを持たないシングルエンド入力 ADC に、FSR のステップ (立ち上がり波形) が入力される場合を仮定しています (ただし、FSR (フルスケール範囲) = V_{REF})。

$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$
 $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$
 $\operatorname{tg} x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{e^{ix} + e^{-ix}}$

$z = a + bi$
 $\bar{z} = a - bi$
 $|z|^2 = z \bar{z} = a^2 + b^2$
 $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$

$\operatorname{Re}(z) = a$
 $\operatorname{Im}(z) = b$

$z = |z| e^{i\theta}$
 $\bar{z} = |z| e^{-i\theta}$

$z + \bar{z} = 2 \operatorname{Re}(z)$
 $z - \bar{z} = 2i \operatorname{Im}(z)$

$z \bar{z} = |z|^2$
 $z \bar{z} = |z|^2$

$z = a + bi$
 $\bar{z} = a - bi$
 $z + \bar{z} = 2a$
 $z - \bar{z} = 2bi$

$z = |z| e^{i\theta}$
 $\bar{z} = |z| e^{-i\theta}$

$z \bar{z} = |z|^2$
 $z \bar{z} = |z|^2$

$z = a + bi$
 $\bar{z} = a - bi$
 $z + \bar{z} = 2a$
 $z - \bar{z} = 2bi$

$z = |z| e^{i\theta}$
 $\bar{z} = |z| e^{-i\theta}$

$z \bar{z} = |z|^2$
 $z \bar{z} = |z|^2$

$z = a + bi$
 $\bar{z} = a - bi$
 $z + \bar{z} = 2a$
 $z - \bar{z} = 2bi$

$z = |z| e^{i\theta}$
 $\bar{z} = |z| e^{-i\theta}$

$z \bar{z} = |z|^2$
 $z \bar{z} = |z|^2$

$z = a + bi$
 $\bar{z} = a - bi$
 $z + \bar{z} = 2a$
 $z - \bar{z} = 2bi$

$z = |z| e^{i\theta}$
 $\bar{z} = |z| e^{-i\theta}$

$z \bar{z} = |z|^2$
 $z \bar{z} = |z|^2$



ご注意

Texas Instruments Incorporated 及びその関連会社 (以下総称して TI といいます) は、最新の JESD46 に従いその半導体製品及びサービスを修正し、改善、改良、その他の変更をし、又は最新の JESD48 に従い製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての半導体製品は、ご注文の受諾の際に提示される TI の標準販売契約約款に従って販売されます。

TI は、その製品が、半導体製品に関する TI の標準販売契約約款に記載された保証条件に従い、販売時の仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査及びその他の品質管理技法は、TI が当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメーターに関する固有の検査は、適用される法令によってそれ等の実行が義務づけられている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TI は、製品のアプリケーションに関する支援又はお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI 製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI 製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションに関連する危険を最小のものとするため、適切な設計上及び操作上の安全対策は、お客様にてお取り下さい。

TI は、TI の製品又はサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、又は方法に関連している TI の特許権、著作権、回路配置利用権、その他の TI の知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしておりません。TI が第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TI が当該製品又はサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証又は是認するということを含みません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない、又は TI の特許その他の知的財産権に基づき TI からライセンスを得なければならない場合があります。

TI のデータ・ブック又はデータ・シートの中にある情報の重要な部分の複製は、その情報に一切の変更を加えること無く、且つその情報と関連する全ての保証、条件、制限及び通知と共になされる限りにおいてのみ許されるものとします。TI は、変更が加えられて文書化されたものについては一切責任を負いません。第三者の情報については、追加的な制約に服する可能性があります。

TI の製品又はサービスについて TI が提示したパラメーターと異なる、又は、それを超えてなされた説明で当該 TI 製品又はサービスを再販売することは、関連する TI 製品又はサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、且つ不公正で誤認を生じさせる行為です。TI は、そのような説明については何の義務も責任も負いません。

TI からのアプリケーションに関する情報提供又は支援の一切に拘わらず、お客様は、ご自身の製品及びご自身のアプリケーションにおける TI 製品の使用に関する法的責任、規制、及び安全に関する要求事項の全てにつき、これをご自身で遵守する責任があることを認め、且つそのことに同意します。お客様は、想定される不具合がもたらす危険な結果に対する安全対策を立案し実行し、不具合及びその帰結を監視し、害を及ぼす可能性のある不具合の可能性を低減し、及び、適切な治癒措置を講じるために必要な専門的知識の一切を自ら有することを表明し、保証します。お客様は、TI 製品を安全でないことが致命的となるアプリケーションに使用したことから生じる損害の一切につき、TI 及びその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI 製品につき、安全に関連するアプリケーションを促進するために特に宣伝される場合があります。そのような製品については、TI が目的とするところは、適用される機能上の安全標準及び要求事項を満たしたお客様の最終製品につき、お客様が設計及び製造ができるようお手伝いすることにあります。それにも拘わらず、当該 TI 製品については、前のパラグラフ記載の条件の適用を受けるものとします。

FDA クラス III (又は同様に安全でないことが致命的となるような医療機器) への TI 製品の使用は、TI とお客様双方の権限ある役員の間で、そのような使用を行う際について規定した特殊な契約書を締結した場合を除き、一切認められていません。

TI が軍需対応グレード品又は「強化プラスチック」製品として特に指定した製品のみが軍事用又は宇宙航空用アプリケーション、若しくは、軍事的環境又は航空宇宙環境にて使用されるように設計され、かつ使用されることを意図しています。お客様は、TI がそのように指定していない製品を軍事用又は航空宇宙用に使う場合は全てご自身の危険負担において行うこと、及び、そのような使用に関して必要とされるすべての法的要求事項及び規制上の要求事項につきご自身のみの責任により満足させることを認め、且つ同意します。

TI には、主に自動車用に使われることを目的として、ISO/TS 16949 の要求事項を満たしているとして特別に指定した製品があります。当該指定を受けていない製品については、自動車用に使われるようには設計されてもいませんし、使用されることを意図しておりません。従いまして、前記指定品以外の TI 製品が当該要求事項を満たしていなかったことについては、TI はいかなる責任も負いません。

Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

1. 静電気

- 素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。
- 弊社出荷梱包単位 (外装から取り出された内装及び個装) 又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で (導電性マットにアースをとったもの等)、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。
- マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。
- 前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

2. 温・湿度環境

- 温度：0~40℃、相対湿度：40~85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。(但し、結露しないこと。)

- 直射日光が当たる状態で保管・輸送しないこと。

3. 防湿梱包

- 防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。

4. 機械的衝撃

- 梱包品 (外装、内装、個装) 及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。

5. 熱衝撃

- はんだ付け時は、最低限 260℃ 以上の高温状態に、10 秒以上さらさないこと。(個別推奨条件がある時はそれに従うこと。)

6. 汚染

- はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質 (硫黄、塩素等ハロゲン) のある環境で保管・輸送しないこと。
- はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。(不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。)

以上