

スイッチングレギュレータ IC シリーズ

降圧コンバータ IC のコンデンサ計算

このアプリケーションノートは、降圧スイッチングレギュレータ IC 回路に必要なコンデンサ値の計算について説明します。

降圧型コンバータ

Figure 1 は降圧型コンバータの基本回路です。スイッチング素子 Q_1 が ON している時は、電流が入力 V_{IN} からコイル L を通り出力平滑コンデンサ C_o を充電し、出力電流 I_o が供給されます。このときコイル L に流れる電流が磁界を生み、電気エネルギーが磁気エネルギーへと変換され蓄積されます。

スイッチング素子 Q_1 が OFF するとフリーホイールダイオード D が ON し、 L に蓄積されたエネルギーが出力側へ放出されます。

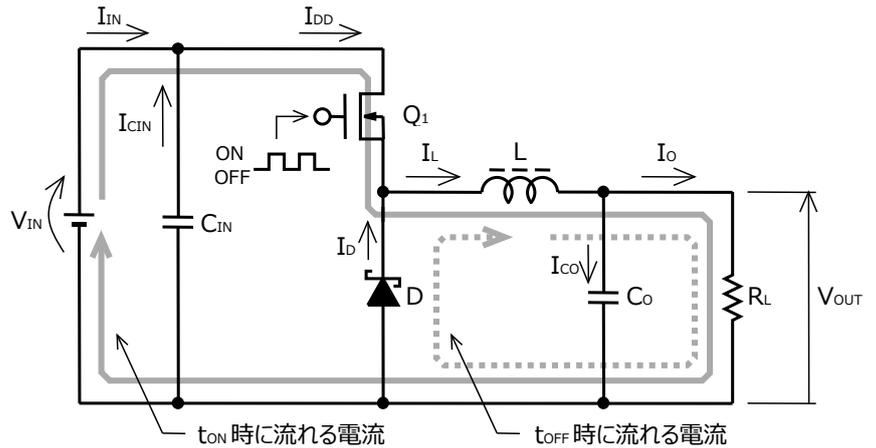


Figure 1. 降圧コンバータの基本回路

入力コンデンサの算出

入力コンデンサの定格電圧は、最大入力電圧より高い必要があります。また、コンデンサの定格リップル電流は、IC の最大入力リップル電流よりも大きい必要があります。

降圧コンバータは降圧比に応じて入力電流の平均値が小さくなりますが、Figure 2 の I_{DD} のように瞬間的には出力電流と同じ電流が流れます。

これを入力コンデンサで平均化しますが、Figure 2 の I_{CIN} から明らかなように、入力コンデンサに流れる交流リップル電流は、出力の I_{CO} に比べて大きくなります。 I_{CIN} の実効値は次式で表せます。

$$I_{CIN} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \left\{ I_o^2 \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \right) + \frac{1}{12} \Delta I_L^2 \right\}} \quad [A_{RMS}] \quad (1)$$

Figure 3 に村田製作所製セラミックコンデンサのリップル発熱特性を示します。このグラフとリップル電流の絶対最大定格より、入力コンデンサとして使用可能か否かを判断します。

セラミックコンデンサを使用する場合は、温度およびコンデンサに印加される DC バイアスに関して注意が必要です。

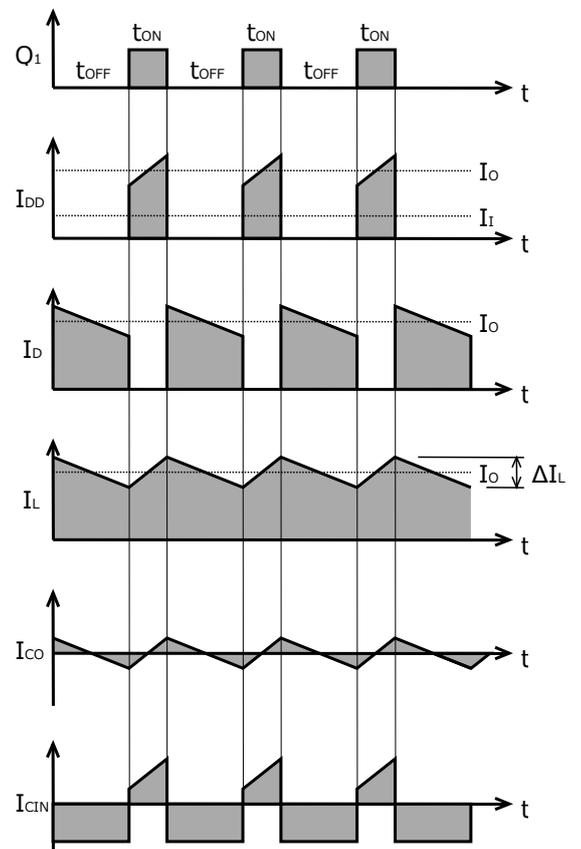


Figure 2. 各部の電流波形

温度による容量値の変化は、X5R および X7R 特性を持った高誘電率系セラミックコンデンサを使用することにより、安定な温度特性を得ることができます。

セラミックコンデンサの両端にかかる DC バイアスが増加すると、コンデンサの容量は低下します。Figure 4 に村田製作所製セラミックコンデンサの DC バイアス特性を示します。

例：村田製作所製セラミックコンデンサ GRM32ER7YA106KA12 の特性

10μF±10%, 35V, X7R

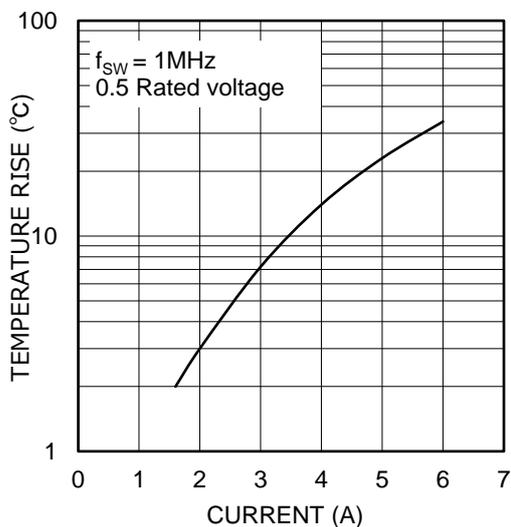


Figure 3. リプル発熱特性

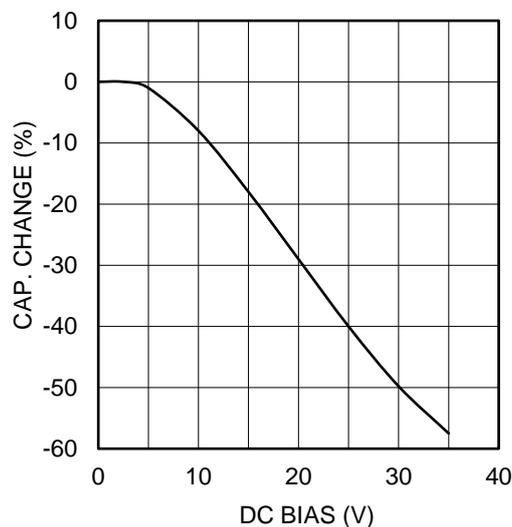


Figure 4. DC バイアス特性

入力容量の値によって、レギュレータの入力リップル電圧が決まります。入力リップル電圧 ΔV_{IN} は次式で計算できます。

$$\Delta V_{IN} = \frac{\left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \times I_{O(MAX)} \times V_{OUT}}{C_{IN} \times f_{SW} \times V_{IN}} + \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \times I_{O(MAX)} \times ESR_{MAX} \quad [V_{P-P}] \quad (2)$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

$I_{O(MAX)}$: 最大負荷電流 [A]

C_{IN} : 入力コンデンサ [F]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ESR_{MAX} : 入力コンデンサの最大等価直列抵抗 [Ω]

入力コンデンサの算出例

この設計例では表 1 に示すパラメータを使用します。使用する入力コンデンサは、前述の村田製 10 μ F / 35V セラミックコンデンサを想定します。

パラメータ	値
入力電圧範囲 V_{IN}	7V~28V
出力電圧 V_{OUT}	3.3V
入力リップル電圧 ΔV_{IN}	300mV
出力リップル電圧 ΔV_O	33mV (出力電圧の 1%)
出力定格電流 I_O	3A
インダクタリップル電流 ΔI_L	0.9A (出力定格電流の 30%)
動作周波数 f_{SW}	1MHz

表 1. 設計パラメータ

各パラメータを、式(1)へ代入して、入力リップル電流を計算します。

$$I_{CIN} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \left\{ I_O^2 \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \right) + \frac{1}{12} \Delta I_L^2 \right\}} = \sqrt{\frac{3.3}{7} \left\{ 3^2 \left(1 - \frac{3.3}{7} \right) + \frac{1}{12} \times 0.9^2 \right\}} = 1.508 \text{ [ARMS]} \quad (3)$$

Figure 3 よりリップル電流容量は十分なマージンが得られています。

次に各パラメータを式(2)へ代入して、入力リップル電圧を計算します。この時、セラミックコンデンサの DC バイアス特性を考慮する必要があります。この例の場合は、コンデンサへ印加される最大電圧が 28V なので、Figure 4 より定格容量値から 48%減少します。また、セラミックコンデンサの ESR は 2m Ω です。

$$\begin{aligned} \Delta V_{IN} &= \frac{\left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \times I_{O(MAX)} \times V_{OUT}}{C_{IN} \times f_{SW} \times V_{IN}} + \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \times I_{O(MAX)} \times ESR_{MAX} \text{ [V}_{P-P}\text{]} \\ &= \frac{\left(1 - \frac{3.3}{28} \right) \times 3 \times 3.3}{(10 \times 10^{-6} \times 0.52) \times 1 \times 10^6 \times 28} + \left(1 - \frac{3.3}{28} \right) \times (3 \times 2 \times 10^{-3}) = 65.3 \text{ [mV}_{P-P}\text{]} \end{aligned} \quad (4)$$

また、最小入力電圧時のリップル電圧は以下の式になります。

$$\Delta V_{IN} = \frac{\left(1 - \frac{3.3}{7} \right) \times 3 \times 3.3}{(10 \times 10^{-6} \times 0.96) \times 1 \times 10^6 \times 7} + \left(1 - \frac{3.3}{7} \right) \times (3 \times 2 \times 10^{-3}) = 81.0 \text{ [mV}_{P-P}\text{]} \quad (5)$$

設計要件の入力リップル電圧である 300mV 以下になることが判りました。入力コンデンサ両端の最大電圧は $V_{IN(MAX)} + \Delta V_{IN}/2$ となります。さらに電圧マージンを得るには、4.7 μ F / 50V コンデンサを 2 個並列に使用することを検討してください。また、実際の入力リップル電圧は、PCB レイアウトに起因した寄生成分および電圧源（前段回路）の出力インピーダンスによって大きな影響を受け、計算値よりも大きくなる場合があるので注意してください。

出力コンデンサの算出

出力コンデンサの設計で重要な要素は、定格電圧、リップル定格電流、および ESR（等価直列抵抗）です。コンデンサに印加される電圧およびリップル電流は最大定格以下にする必要があります。ESR はインダクタ電流とともに出力リップル電圧を決定する重要な要素です。

出力電流に含まれる交流成分であるリップル電流は、Figure 2 の I_{CO} のように三角波なので、その実効値は次式で表せます。

$$I_{CO} = \frac{1}{\sqrt{12}} \times \frac{V_{OUT}(V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{L \times f_{SW} \times V_{IN(MAX)}} \quad [A_{RMS}] \quad (6)$$

$V_{IN(MAX)}$: 最大入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

L : インダクタ値 [H]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

出力リップル電圧は、インダクタ電流のリップル分が出力コンデンサに流入して、静電容量、ESR、ESL により発生した合成波形で、次式で表せません。

$$\Delta V_{ORPL} = \Delta I_L \left(\frac{1}{8 \times C_O \times f_{SW}} + ESR \right) + ESL \frac{V_{IN(MAX)}}{L} \quad [V_{P-P}] \quad (7)$$

$V_{IN(MAX)}$: 最大入力電圧 [V]

ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]

C_O : 出力コンデンサ [F]

L : インダクタ値 [H]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ESR : 出力コンデンサの等価直列抵抗 [Ω]

ESL : 出力コンデンサの等価直列インダクタンス [H]

出力コンデンサに ESR と ESL が大きな、リードタイプのアルミ電解コンデンサを使用した場合は、ESR と ESL によるリップルが、容量によるリップルよりも大きくなることに注意してください。

出力コンデンサの算出例

この設計例では表 1 に示すパラメータを使用します。使用する入力コンデンサは、村田製 22μF / 25V セラミックコンデンサを想定します。各パラメータを、式(6)へ代入して、リップル電流を計算します。コイル L は 4.7μH を使用することにします。

$$I_{CO} = \frac{1}{\sqrt{12}} \times \frac{V_{OUT}(V_{IN(MAX)}-V_{OUT})}{L \times f_{SW} \times V_{IN(MAX)}} = \frac{1}{\sqrt{12}} \times \frac{3.3(28-3.3)}{4.7 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^6 \times 28} = 0.18 \text{ [A}_{RMS}] \quad (8)$$

Figure 5 よりリップル電流容量は十分なマージンが得られています。

次に各パラメータを式(7)へ代入して、出力リップル電圧を計算します。この時、セラミックコンデンサの DC バイアス特性を考慮する必要があります。この例の場合は、コンデンサへ印加される電圧が 3.3V なので、Figure 6 より定格容量値から 2%減少します。また、セラミックコンデンサの ESR は 2mΩ、ESL は 0.4nH です。

$$\begin{aligned} \Delta V_{ORPL} &= \Delta I_L \left(\frac{1}{8 \times C_O \times f_{SW}} + ESR \right) + ESL \frac{V_{IN(MAX)}}{L} \\ &= 0.9 \left(\frac{1}{8 \times (22 \times 10^{-6} \times 0.98) \times 1 \times 10^6} + 2 \times 10^{-3} \right) + 0.4 \times 10^{-9} \left(\frac{28}{4.7 \times 10^{-6}} \right) = 9.4 \text{ [mV}_{P-P}] \quad (9) \end{aligned}$$

出力要件の出力リップル電圧が 33mV なので、値を満たしていることが判りました。しかし、実際出力リップル電圧は、PCB レイアウトに起因した寄生成分およびコンデンサの ESR、ESL 成分により大きな影響を受け、計算値よりも大きくなる場合があるので注意してください。

例：村田製作所製セラミックコンデンサ GRM32ER71E226ME15 の特性
22μF±20%, 25V, X7R

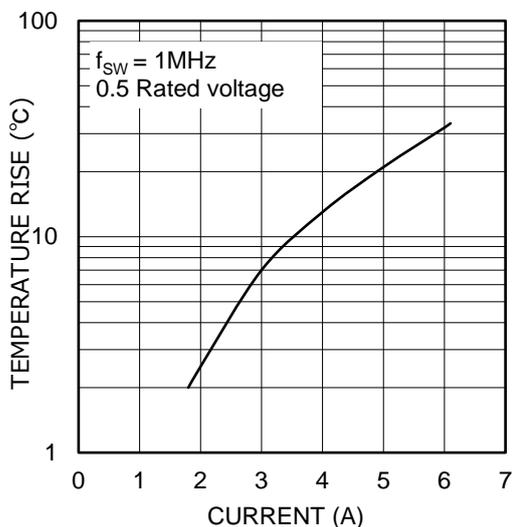


Figure 5. リップル発熱特性

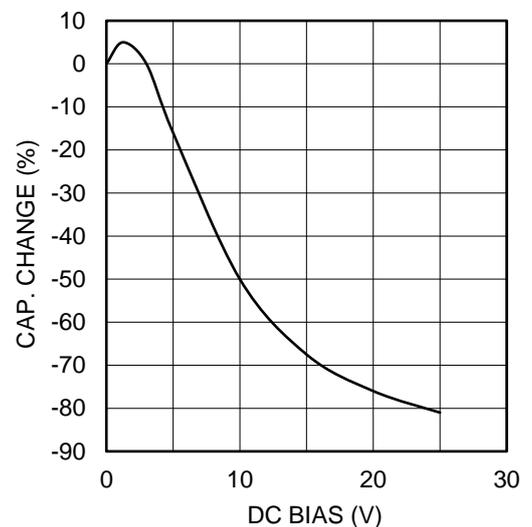


Figure 6. DC バイアス特性

降圧コンバータのコンデンサ計算式

・入力コンデンサに流れるリップル電流の実効値

$$I_{CIN} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \left\{ I_o^2 \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} \right) + \frac{1}{12} \Delta I_L^2 \right\}} \quad [A_{RMS}]$$

・入力リップル電圧

$$\Delta V_{IN} = \frac{\left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \times I_{O(MAX)} \times V_{OUT}}{C_{IN} \times f_{SW} \times V_{IN}} + \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) \times I_{O(MAX)} \times ESR_{MAX} \quad [V_{P-P}]$$

V_{IN} : 入力電圧 [V]

$V_{IN(MIN)}$: 最小入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

I_o : 出力定格電流 [A]

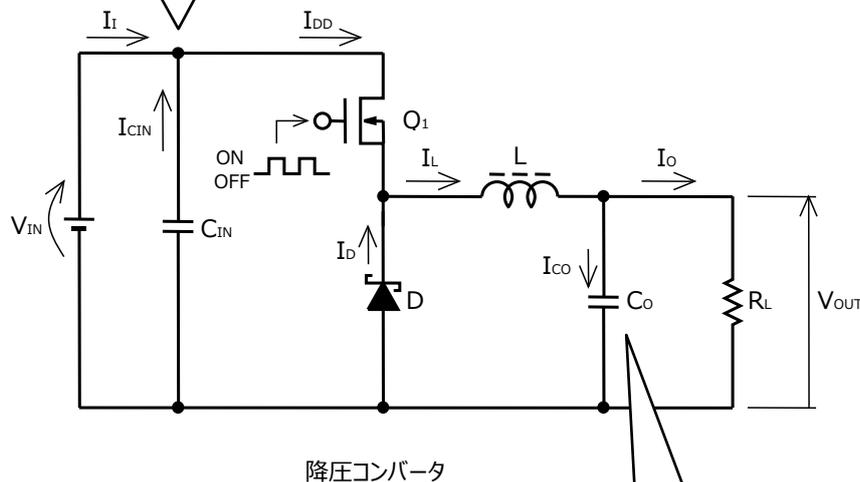
ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]
(通常 I_o の 20~50%)

$I_{O(MAX)}$: 最大負荷電流 [A]

C_{IN} : 入力コンデンサ [F]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ESR_{MAX} : 入力コンデンサの最大等価直列抵抗 [Ω]



・出力コンデンサに流れるリップル電流の実効値

$$I_{CO} = \frac{1}{\sqrt{12}} \times \frac{V_{OUT}(V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{L \times f_{SW} \times V_{IN(MAX)}} \quad [A_{RMS}]$$

・出力リップル電圧

$$\Delta V_{ORPL} = \Delta I_L \left(\frac{1}{8 \times C_o \times f_{SW}} + ESR \right) + ESL \frac{V_{IN(MAX)}}{L} \quad [V_{P-P}]$$

$V_{IN(MAX)}$: 最大入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

L : インダクタ値 [H]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]
(通常 I_o の 20~50%)

C_o : 出力コンデンサ [F]

ESR : 出力コンデンサの等価直列抵抗 [Ω]

ESL : 出力コンデンサの等価直列インダクタンス [H]

ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>