

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。

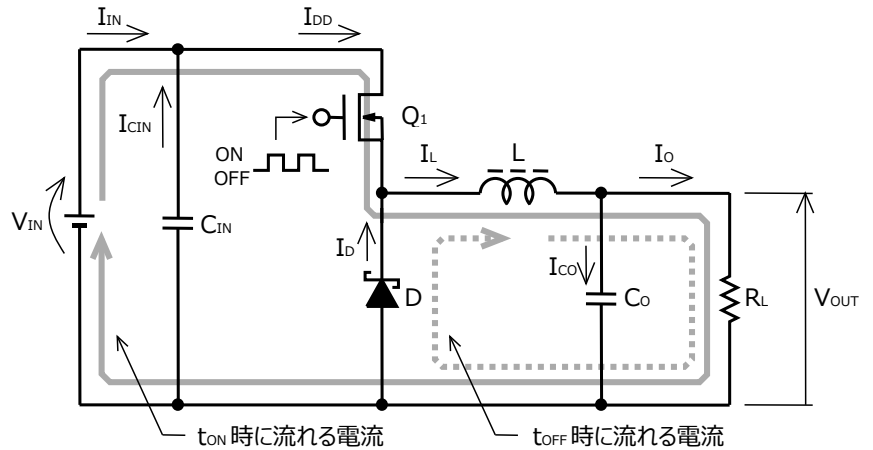


Figure 1. 降圧コンバータの基本回路

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。

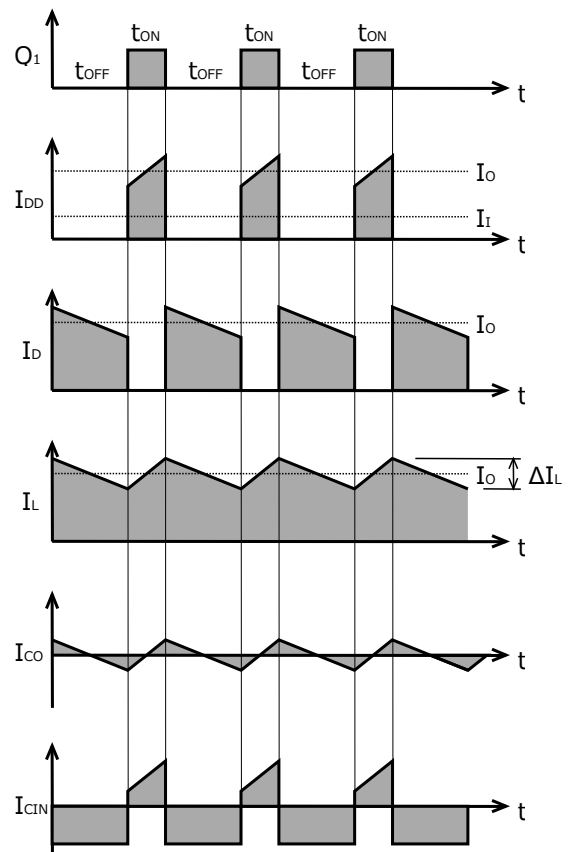


Figure 2. 各部の電流波形

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

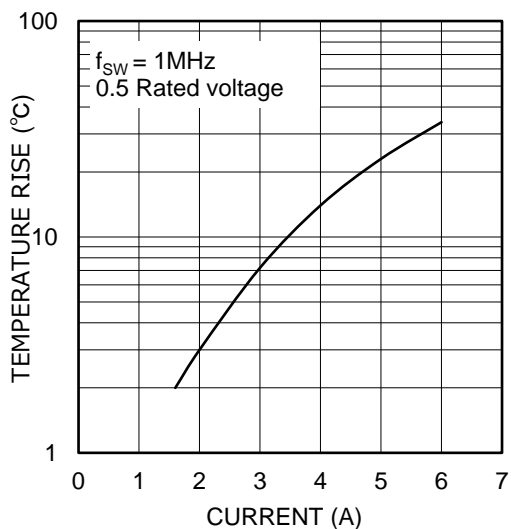


Figure 3. リプル発熱特性

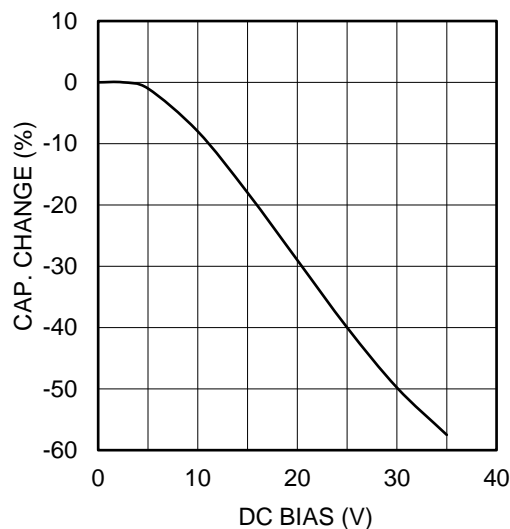


Figure 4. DC バイアス特性

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、実際の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

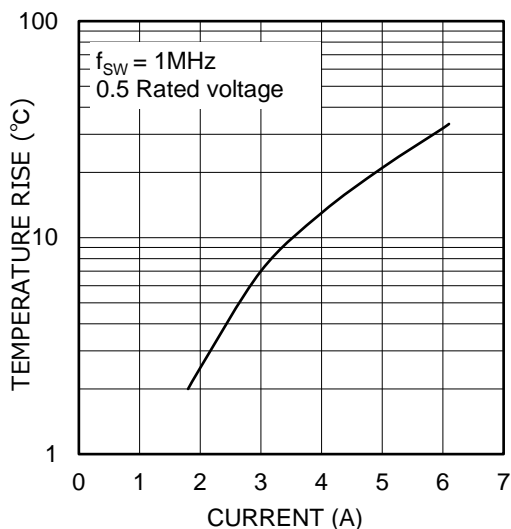


Figure 5. リップル発熱特性

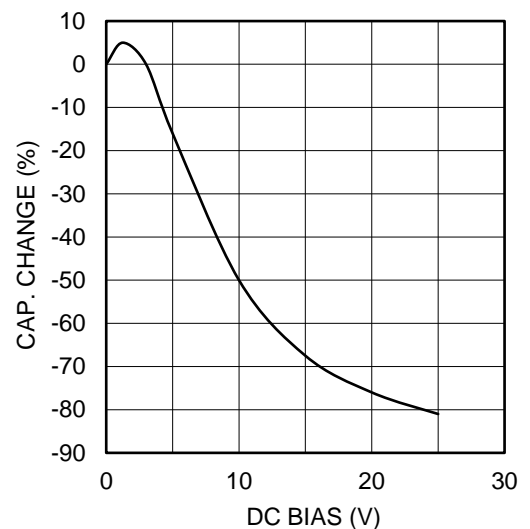


Figure 6. DC バイアス特性

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]

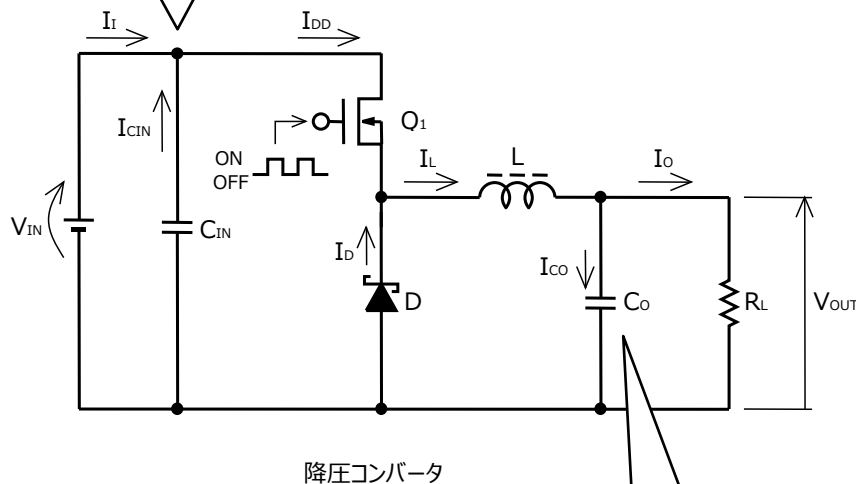
ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]
(通常 I_o の 20~50%)

$I_{O(MAX)}$: 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]

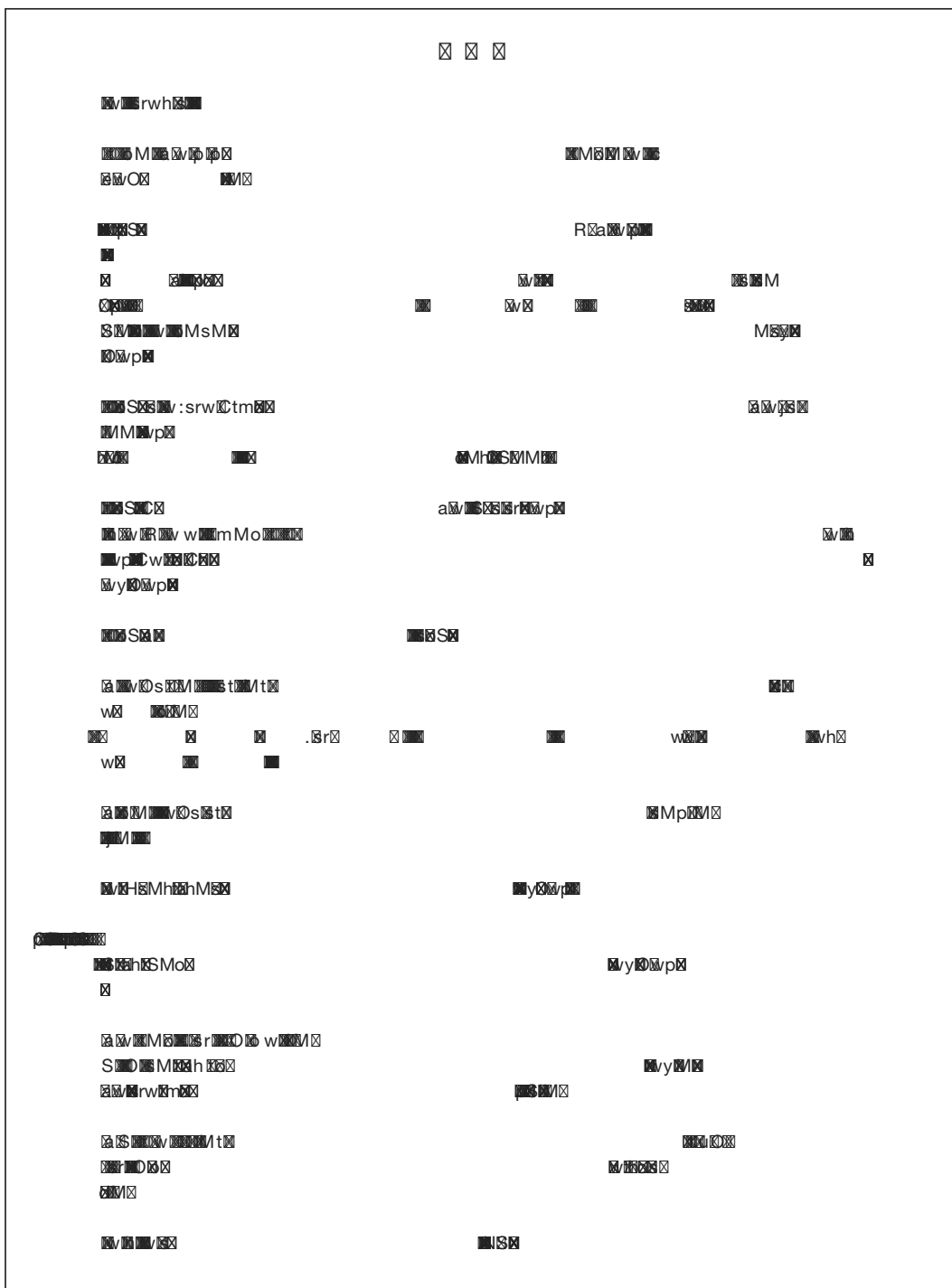
f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

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]



ROHM

Support

ROHM Customer Support System

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