

モータ制御はSimulink, マイコン・プログラムはQEMUで

TRY 仮想開発… DC ブラシレス・モータの ベクトル制御を例に

新連載

第1回 DC ブラシレス・モータの数式モデル

塩出 武

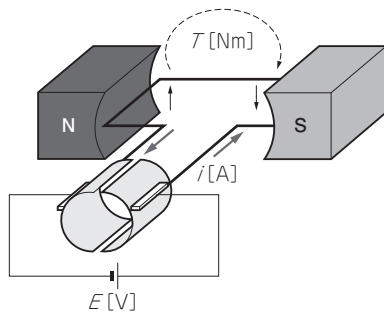


図1 DC ブラシ付きモータは電池をつなげば回る

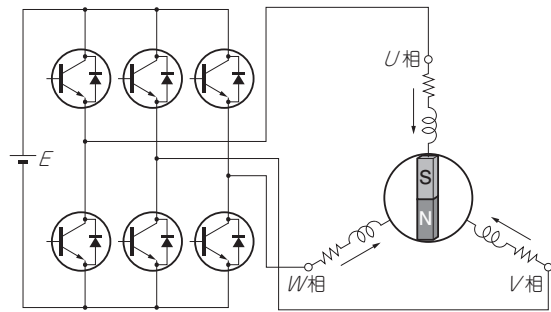


図2 DC ブラシレス・モータは専用回路が必要

DC ブラシレス・モータを回すには高度な制御が必要です。Simulinkを使えばモータ実機なしにシミュレーションで制御が正しいことを確認でき、さらにQEMUを使えばマイコン実機を使わずに制御を実装したソフトウェアが正しいことを確認できます。

そこで本連載では、数回に渡ってDC ブラシレス・モータのベクトル制御の基本から、Simulinkによるシミュレーション、QEMUによるソフトウェアのシミュレーションまでを解説します。(編集部)

DC ブラシレス・モータは、DC ブラシ付きモータ(図1)と比べて高効率、高出力、高寿命で駆動できます。一方で、その性能を引き出すためには、専用の駆動回路やソフトウェアによる駆動制御が必要となります(図2)。そして、その性能のカギとなる制御がベクトル制御です。これはDC ブラシレス・モータの磁石に対して平行方向を d 軸、直角方向を q 軸と見立て、常に q 軸方向にトルクを掛け続けるように電流を制御する方式です。DC ブラシ付きモータの場合には、その構造上、電流を掛けると巻線コイルに直角方向にトルクが発生するようになってきています。

ベクトル制御を適用して、 q 軸電流を駆動電流に見立てると、DC ブラシレス・モータも、DC ブラシ付きモータと同じように考えることができます。

● マイコンの進化によってベクトル制御が身近になものに

前述のようにベクトル制御は、モータの磁石に常に直角方向にトルクを掛けます。そのためには高速で回転するモータの角度を常に監視して、制御を行う必要があります。このことから高性能な演算能力を持つマイコンが必要なことが予想できると思います。このような背景からベクトル制御は、産業用ロボットや印刷機、電気自動車など、性能が重視される分野で適用されてきましたが、今回のRX62T(ルネサス エレクトロニクス)をはじめとして、各社から高性能なマイコンがリリースされるようになり、比較的安価にベクトル制御環境を手に入れられるようになってきました。

● 高性能ゆえに取り扱いには慎重さが必要

DC ブラシレス・モータは、DC ブラシ付きモータに比べてハイパワーで、電流値も高めのため、取り扱いには注意が必要です。ハードディスクやCDドライブ用のような小型なものもありますが、ロボット・アームや産業用の搬送機器といった比較的大きめの重量物の動作、制御でDC ブラシレス・モータを必要とする場合が多いと思います。そのような場面でベクトル制御を開発する過程において、検討段階でのプログラムのバグによってモータが振動、暴走してしまう

表1 実機環境 (RX62T 搭載低電圧モータ制御評価システム) の機材一覧

名称	役割	ライセンス	メーカー
FH6S20E-X81 (SPMSM)	DC ブラシレス・モータ	有償	日本電産サーボ
RX62T 搭載低電圧モータ制御評価システム	制御基板	有償	ルネサス エレクトロニクス
E1 エミュレータ	デバッグ・エミュレータ	有償	
CC-RX	RX マイコン用コンパイラ	有償*	
e ² Studio	統合環境	無償	

* : リンク・サイズ 128K バイトまで無償

表2 シミュレーション環境で使用するソフトウェア一覧

名称	役割	ライセンス	備考
MATLAB, Simulink	モータ・シミュレーション用	有償	MathWorks
CC-RX	RX マイコン用コンパイラ	有償*	ルネサス エレクトロニクス
e ² Studio	統合環境	無償	
rx-elf-gdb	RX マイコン用 GDB デバッガ	無償	Open Source Tools for RENESAS からダウンロードの場合は要登録
QEMU-6.0.0	RX マイコン・エミュレート	無償	既存の QEMU-RX に RX62T 機能追加
VisualStudio Community2019	プロセス間通信用 DLL 作成	無償 (個人ライセンス)	組織ライセンスの場合はエンタープライズ条件により有償

* : リンク・サイズ 128K バイトまで無償

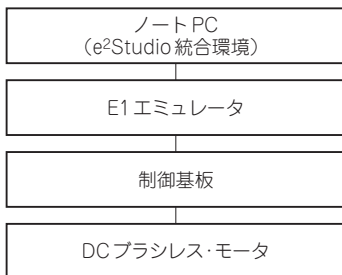


図3 実機環境の構成 (実機による確認はしばらく先の予定、まずは仮想環境で評価するところをしっかりとやる)

と、メカ機構やプリント基板を破損しかねません。

DC ブラシレス・モータを DC ブラシ付きモータのように扱えると記載しましたが、逆に言えば DC ブラシ付きモータでは、そのブラシ機構によって電池をつなげると簡単にモータを回せていた部分を、新たにソフトウェアで制御しなければならぬため、制御も複雑になります。

また、ソフトウェアの評価を行いたくても、モータが駆動中のため、ログ・トレースとロジック・アナライザやオシロスコープによる波形評価が必要になります。一般的な評価手法である、変数を printf したり、デバッガでじっくりステップ実行して検証することは困難です。

● やること…シミュレーションでベクトル制御を検証

そこで、いきなり実機動作に行く前に、シミュレーションであらかじめベクトル制御プログラムを検証できないか検討します。今回は RX62T マイコンと、同マイコン上で実行するベクトル制御プログラムを用いて、シミュレーションと実機確認を行い、事前検証の効果を確認します。シミュレーション構成として、DC ブラシレス・モータの数式モデルを MATLAB と Simulink で作成し、マイコン側の実行プログラムを動作させるためのエミュレータとして QEMU を使用します。実機の検証には RX62T 搭載低電圧モータ制御評価システム (ルネサス エレクトロニクス) を用いました。

使用機材

評価で使用した実機、ソフトウェアの機材を表1に示します。また、シミュレーション評価で使用したソフトウェアを表2に示します。

図3にシミュレーション環境の構成を示します。シミュレーション評価の目的は、RX62T マイコンを用いた DC ブラシレス・モータの制御プログラムを評価することです。

今回は Windows PC でシミュレーションします。RX62T マイコンを用いた DC ブラシレス・モータの制御プログラムは、図4左上側のサンプル・アプリケーションとなります。ここは実機と同じように e²Studio で作成し、実行用の ROM データをビルドします。

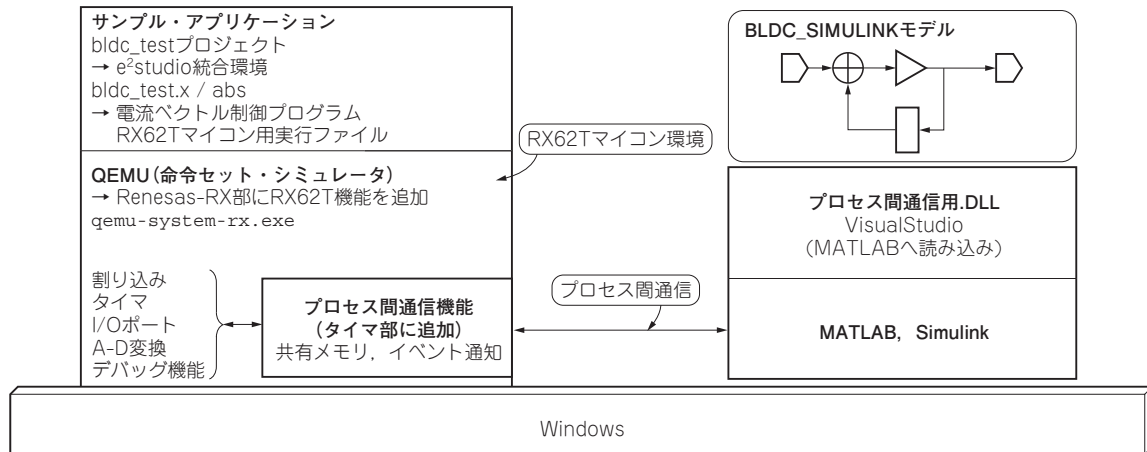


図4 シミュレーション環境の構成

DC ブラシレス・モータそのものは、図4の右側に示すようにMATLAB, Simulinkでモデリングとシミュレーションを行います。一方、ROMデータを走らせるためのRX62Tマイコン環境は、図4左側の中ほどに示すように、QEMUを用いて仮想のマイコン基板を作成しています。前述のモータ制御用プログラムは、QEMU上で走るゲストROMとして実行されま

す。しかし、このままの状態では、SimulinkとQEMUの両シミュレーションが別々に実行されてしまい、センサ情報は共有されず、制御割り込みのタイミングも全く取れません。そこで、図4の左下に示すように、QEMU側にプロセス間通信用の共有メモリとイベント通知機能を設けて、これをDLL (ダイナミック・リンク・ライブラリ) の形でMATLAB側に読み込み、シミュレーション時にSimulinkから呼び出すことで、センサ情報と割り込みタイミングを両シミュレーション間で同期させます。このような構成にすることで、実機での評価と同じようにマイコン上で走るプログラムから、DC ブラシレス・モータを制御する状態を実現しています。

DC ブラシレス・モータの数式モデル

Simulinkモデルの作成に向けて、DC ブラシレス・モータの数式モデルを作成します。

● DC ブラシレス・モータの構造による違い

DC ブラシレス・モータ (永久磁石同期電動機: PMSM) には、大きく分けて2つあります。

- 表面型永久磁石同期電動機: SPMSM [図5 (a)]
- 埋込磁石同期電動機: IPMSM [図5 (b)]

これらはモータの電気的な挙動に違いがあります。数式的にはSPMSM型の方がUVW相の相互インダクタンスM項を同じ定数として扱えるため式が簡単になります。今回使用したシステムでは、SPMSM型となっています。以下、式(1)と式(2)に回路方程式を示します。なお、筆者は仕事において、マイコンのプログラマではありますが、モータ制御の専門家ではないため、数式は文献(1)～(7)を参考としています。

今回のRX62T搭載低電圧モータ制御評価システムで使用するDC ブラシレス・モータはSPMSM型ですので、電気的な挙動は式(2)となります。

▶ IPMSM 型

$$\begin{aligned}
 v_u &= Ri_u + \frac{d}{dt}(L_u i_u + M_{uv} i_v + M_{uw} i_w) - \omega_r \psi \sin \theta \\
 v_v &= Ri_v + \frac{d}{dt}(L_v i_v + M_{vu} i_u + M_{vw} i_w) - \omega_r \psi \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\
 v_w &= Ri_w + \frac{d}{dt}(L_w i_w + M_{wu} i_u + M_{wv} i_v) - \omega_r \psi \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right)
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(1)$$

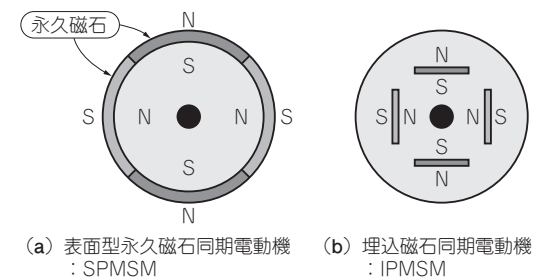


図5 2種類のDC ブラシレス・モータ

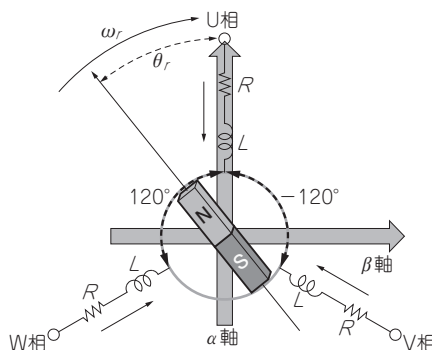


図6 U相を基準として回路方程式を直交αβ座標で表現

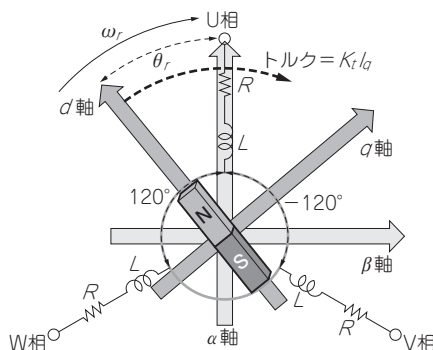


図7 αβ座標を磁石位置を基準としたdq座標へ回転

▶ SPMSM型

$$\begin{aligned}
 v_u &= Ri_u + \frac{d}{dt}(Li_u + Mi_v + Mi_w) - \omega_r \psi \sin \theta \\
 v_v &= Ri_v + \frac{d}{dt}(Li_v + Mi_u + Mi_w) - \omega_r \psi \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\
 v_w &= Ri_w + \frac{d}{dt}(Li_w + Mi_u + Mi_v) - \omega_r \psi \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right)
 \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

式(1)と式(2)の $v_u \sim v_w$, $i_u \sim i_w$ はUVWの各相電圧, 相電流となります。DCブラシレス・モータは3相の入出力を持ちますが, よく見ると R_i や Ld_i/dt の項が含まれており, DCブラシ付きモータの電気的要素も含んでいることが分かります。そこに, 各相との相互インダクタンスの項が追加された形となっています。また, DCブラシ付きモータと異なりブラシによる整流作用はないため, ω を含む逆起電力項や, 駆動のための相電流, 電圧は実質交流となります。

一方で, モータのメカ的な挙動は, 式(3)となります。こちらはDCブラシ付きモータと同じです。

$$F = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega \dots\dots\dots(3)$$

DCブラシ付きモータの場合には, 回路方程式から得られる電流 i にトルク係数を掛けてメカ側のトルク入力とできていました。しかしDCブラシレス・モータの場合には, 3相の回路方程式となります。式(2)より各相が120°の位相差を持つことは分かりますが, これらがどのようにメカ側へのトルク入力に変換されるのか, 式(2)の状態では分かりません。そこで, 式(1)に座標変換を掛けて, メカ側へ入力されるトルク電流の式を導出します。

● αβ変換により3相を2相直交座標へ変換

ここからモータのUVW相を2軸に変換していきます。まず, U相と並行にα軸を取り, そしてα軸と直交するようにβ軸を取ります。モータのUVW相とαβ軸との関係を図6に示します。ここで θ_r と ω_r はそれ

ぞれ, U相から磁石までの角度 z [rad], 磁石の回転速度 [rad/s] です。式(2)に, 式(4)に示す座標変換の式を掛けることによりUVW相をα軸, β軸の2相に変換します。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 \cos \left(\frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(-\frac{2}{3} \pi \right) \\ \sin 0 \sin \left(\frac{2}{3} \pi \right) \sin \left(-\frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

これにより式(2)が式(5)の形に変換できます。途中の計算過程は次回に記載します。

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \rho L' & 0 \\ 0 & R + \rho L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega_r \psi \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} \dots\dots(5)$$

● 直交座標αβ軸をdq変換によって磁石の位相に合わせる

αβ変換によってDCブラシレス・モータの回路方程式を3相から2相に変換できました。しかし, αβ変換の時点では, モータの回転座標はU相の位置となっており, 実際の磁石の位置に合わせた直交座標になっていません。そこで, αβ軸に式(6)のdq変換を掛けることで, 図7に示すように, モータの磁石位置を基準とした直交座標に変換します。

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

変換によって式(5)は式(7)となります。途中の計算過程は次回に記載します。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \rho L' & -\omega_r L' \\ \omega_r L' & R + \rho L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \psi' \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots(7)$$

なお, SPMSM型では, d軸, q軸のインダクタンス成分 L_d , L_q はどちらも $L' = L - M$ となります。式(7)の電流 i_q がモータの磁石に対して直角方向のトルクを発生する電流で, DCブラシ付きモータの駆動電

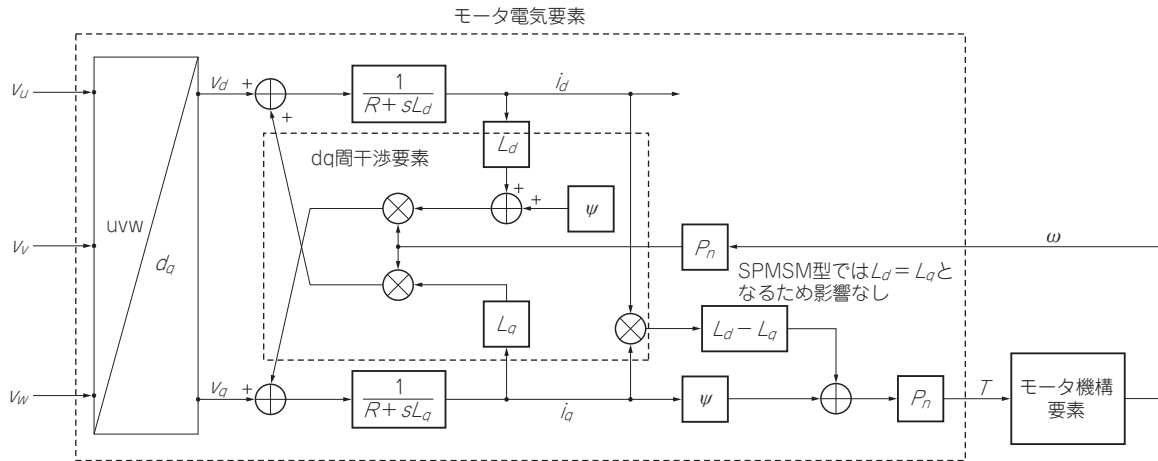


図8 dq座標系で表現したDCブラシレス・モータ回路モデル

流に相当します。これにトルク定数 $K_t = P_n \psi$ を掛けると、式(8)のトルク式となります。

$$T = P_n \{ \psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} = P_n \psi i_q = K_t i_q \dots \dots (8)$$

ただし、 P_n ：モータ極対数、 ψ ：モータ鎖交磁束 [wb]

● 3相電圧のdq変換

DCブラシレス・モータをdq変換により2相モデル化しましたが、マイコン上で走るプログラムからモータ実機の入力はPWMによる3相電圧です。そこで、これらもdq変換を掛けて、 $v_u, v_v, v_w \rightarrow v_d, v_q$ へ変換します。具体的には式(9)のように v_u, v_v, v_w 電圧に左側から順番に $\alpha\beta$ 変換、dq変換を掛けていきます。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \\ & \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \left(\frac{2}{3}\pi\right) & \cos \left(-\frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin 0 & \sin \left(\frac{2}{3}\pi\right) & \sin \left(-\frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \theta_r \cos \left(\frac{2}{3}\pi\right) + \sin \theta_r \sin \left(\frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \theta_r \cos \left(\frac{2}{3}\pi\right) + \cos \theta_r \sin \left(\frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} \cos \theta_r \cos \left(-\frac{2}{3}\pi\right) + \sin \theta_r \sin \left(-\frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta_r \cos \left(-\frac{2}{3}\pi\right) + \cos \theta_r \sin \left(-\frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \dots \dots (9) \end{aligned}$$

Simulinkでのモデリングに向けて、ここまでの結

果を図8に示します。

ここで、 v_u, v_v, v_w [V]はマイコンから入力されるUVW相指令電圧、 v_d, v_q [V]はモータ側でdq軸に割り当てられる指令電圧、 L_d, L_q [H]はdqに割り当てられるモータ・インダクタンス、 ψ [wb]はモータ磁束、 R [Ω]は抵抗、 T [Nm]はトルク、 P_n はモータ極対数、 ω [rad]は角速度となります。

* * *

今回は、ここまで説明した数式をSimulinkでモデリングします。

◆参考文献◆

- (1) 挑戦！EVモータ制御プログラミング、MOTORエレクトロニクス、No.3、CQ出版社。
- (2) ベクトル制御による高効率モータ駆動法、グリーンエレクトロニクス、No.14、CQ出版社。
- (3) 大黒 昭宜；ST マイコンで始めるブラシレス・モータ制御、CQ出版社。
- (4) 見城 尚志、佐渡 友茂/高橋 久/久保 雅俊/寺内 美奈/高田 雅行/藤田 敦；実験とシミュレーションで学ぶモーター制御、日刊工業新聞社。
- (5) 三田 宇洋；MATLAB/Simulinkによるモデルベースデザイン入門、オーム社。
- (6) 電気学会センサレスベクトル制御の整理に関する調査専門委員会；ACドライブシステムのセンサレスベクトル制御、オーム社。
- (7) 永久磁石同期モータのエンコーダ利用ベクトル制御編 Rev.1.00 - Sample Code, ルネサス エレクトロニクス。
- (8) QEMU.
<https://www.qemu.org/>

しおで・たけし