

## 人力発電装置に関する基礎的研究

田中 良明・花本 剛士\*・神谷 晃司\*\*

### Basic Research on Man Power Generating System

Yoshiaki TANAKA, Tsuyoshi HANAMOTO\* and Koji KAMIYA\*\*

#### Abstract

The dc brushless motor of the power-assisted bicycle was used as a 3-phase synchronous generator. The wattmeter equipped with the one-chip microcomputer was produced to measure and display the output electric power. It was confirmed that the calculation accuracy of the produced wattmeter was accurate from the measurement result of a single phase bridge circuit and three phase bridge rectifier circuit. For the electric power measurement of the manpower generating system, the selected sampling period was accurate enough for practical usage. The rectified voltage from the 3-phase AC voltage is influenced considerably by the commutation reactance caused by armature winding. The value of the commutation reactance can be obtained from the experiment results and also regarding the influence of this reactance is investigated. The generating system obtained  $128[\text{W}] \times 60[\text{s}] = 7680[\text{J}]$  electrical energy..

*Keywords : manpower generating system, power-assisted bicycle, dc brushless motor, one-chip microcomputer, commutation reactance*

#### 1. まえがき

近年、化石燃料の枯渇に備えた代替エネルギーの開発が切望されている。それらのエネルギー源の一部として、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを利用した発電システムの開発が世界各国で進められている<sup>(1)</sup>。また、地球環境問題が深刻になっている現代において、これらの自然エネルギーを利用した発電システムは、クリーンなエネルギー源としても注目されている。しかしながら、これら自然エネルギーを利用した発電システムは、気象条件や設置環境に大きく依存し、安定した出力の供給ができないという欠点がある。そこで、本研究ではこれら自然エネルギー利用発電援用のために、雨天時・夜間の太陽光発電の不足電力や、無風および強風時の風力発電の援用に人が役立てないかという観点から、人力発電システムに着目した。人間の発生できる仕事量は微々たるものであるが、場所と時間を選ばずいつでも自由に利用できるという特徴を持っている。

本研究では微小出力ながら、家庭やオフィスなどで利用される各種2次電池の充電用電源として、あるいは緊急の自然災害発生時などのバックアップ電源としてなど、時間を選ば

ず何時でも自由に電力を発生、そして利用可能な人力発電システムの開発を目的とする。

ワンチップマイコンを用いた発生電力及び積算電力量等のデータ収集・表示システムの設計・試作を行い、実用上十分な精度を有するサンプリング周期を選定し、本システムでの発生電力量を調べた。さらに、電力変換システムについては、発生した3相交流から直流へ変換する際に電機子巻線に起因する転流リアクタンスの大きさ及びその影響について調べた。

#### 2. システム構成

人力発電システム構成の概略を図1に示す。ここでは写真1に示す電動アシスト自転車のDCブラシレスモータ（定格240W, 3000rpm）を発電機として利用した。発電機の駆動方式は自転車ペダル側のスプロケットとモータ軸側のスプロケット間に直接チェーンを掛け人力でこいで発電している。

発生最大電力及び積算電力量はH8マイコンによって演算される。そして、このH8マイコンは直流に変換された出力電圧あるいは電流を安定化するためのDC/DCコンバータ、バックレギュレータの制御をも兼ねる。

\* 九州工業大学大学院生命体工学研究科

\*\* NOK株式会社

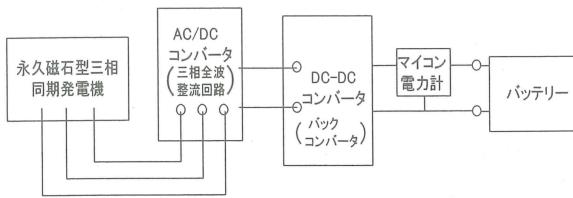


図 1 システム構成概略図



写真 1 電動アシスト自転車

### 3. マイコン電力計

#### 3. 1 単相全波整流回路の電力測定

マイコン電力計の測定精度を検証するために図2に示される単相ダイオードブリッジ整流回路の電力測定を行う。

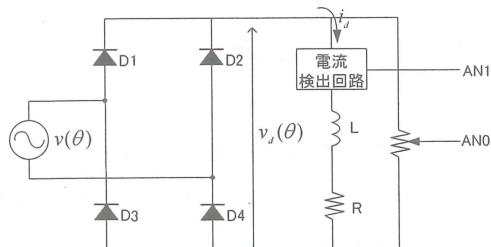


図 2 単相ブリッジ整流回路

交流電源電圧を  $v(\theta) = V_m \sin \theta$  とすれば、  
 $0 \leq \theta \leq \pi$  [rad]において、D1, D4 がオンしているので

$$v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} = v(\theta) = V_m \sin \theta \quad (1)$$

上式を  $i_d(0) = I_0$  の初期条件のもとに解くと

$$i_d(\theta) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\theta - \varphi) + e^{-\alpha\theta} \sin \varphi] + I_0 e^{-\alpha\theta} \quad (2)$$

$$\text{ここで、 } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \alpha = \frac{R}{\omega L}, \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

そして初期値  $I_0$  は、  $i_d(0) = I_0(\pi) = I_0$  より求められ、

$$I_0 = \frac{V_m}{Z} \left( \frac{1+e^{-\pi\alpha}}{1-e^{-\pi\alpha}} \right) \sin \varphi \quad (3)$$

従って、瞬時電力  $p(\theta)$  は

$$p(\theta) = v_d(\theta) \cdot i_d(\theta)$$

$$= \frac{V_m^2}{Z} [\sin(\theta - \varphi) \cdot \sin \theta + \sin \varphi \cdot e^{-\alpha\theta} \sin \theta] + V_m I_0 e^{-\alpha\theta} \sin \theta \quad (4)$$

と表されるので、平均電力  $P$  は次式で求められる。

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi p(\theta) d\theta = \frac{V_m^2 R}{2 Z^2} + \frac{2 V_m I_0 (\omega L)^2}{\pi Z^2} \quad (5)$$

製作した電力計は図3に示すように瞬時電力とサンプリング周期との積で電圧・時間面積を求め、それらを加算していく電力量を演算するようになっている。従って、平均電力は瞬時電力の積和をサンプリング回数で割ることにより演算される。

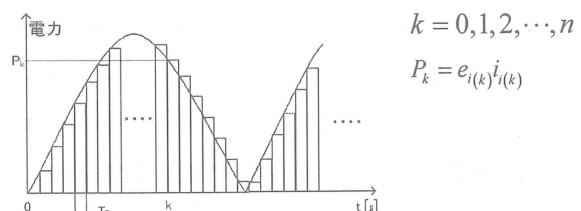


図 3 電力演算の概念図

そして例として、測定条件の厳しい、 $L=0$ とした電流脈動の大きい場合に対して電力量  $W_m$  および平均電力  $P_m$  は測定時間を  $T$  [s]、サンプリング周期を  $T_s$  [s]、サンプリング回数  $n$  とすれば以下の2式で求められ、ここでサンプリング回数  $n$  は  $T/T_s$  の整数值で与えられる。

$$W_m = \sum_{i=1}^n V_m I_m \sin^2 \omega i T_s \times T_s$$

$$= V_m I_m \times T_s \left[ \sum_{i=1}^n \sin^2 (2\pi \times 60 \times i T_s) \right] \quad (6)$$

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_m I_m \sin^2 \omega i T_s \quad (7)$$

周波数 60[Hz]の単相交流を印加し、測定時間  $T$  を全波整流波形の 4 周期間、すなわち  $T = 1/30[\text{s}]$  としてサンプリング周期を  $T_s = 200[\mu\text{s}]$  とすればサンプリング回数  $n$  は 166 回から 167 回となる。 $T = 1/30[\text{s}]$ 、 $T_s = 200[\mu\text{s}]$ 、 $n=166$  を (5) 式及び (6) 式に代入すると、

$$W_m \doteq 16.667 \times 10^{-3} V_m^2 / R_d [\text{W} \cdot \text{s}] , P_m \doteq 0.502 V_m^2 / R_d [\text{W}]$$

が得られる。

(5) 式に  $L=0$  を代入すれば、電力及び電力量の理論値は

$$P = V_m I_m / 2 = 0.5 V_m^2 / R_d [\text{W}]$$

$$W = V_m I_m T / 2 = 16.667 \times 10^{-3} V_m^2 / R_d [\text{W} \cdot \text{s}]$$

以上より  $P_m$  と  $P$  並びに  $W_m$  と  $W$  とは極めてよい一致を示すので、理論上、サンプリング周期  $T_s$  は 200[μs] で十分であることが判明した。

10 ビット分解能を有する H8マイコンの A/D コンバータ入力 AN0、AN1 に電流、電圧をそれぞれ入力して瞬時電力を求め、それらを積算の後に平均電力を演算し、LCD に平均電力・積算電力を表示する。尚、検証用に用いたデジタルパワーメータ (YOKOGAWA WT-230) のサンプリング周期は約 20[μs] で A/D コンバータの分解能は 16 ビットである。

表 1 に  $L=0$ 、抵抗負荷の場合、表 2 には  $R-L$  負荷における電力の測定値、理論値及び誤差率を示す。ここで、 $R=20.84[\Omega]$ 、 $L=100[mH]$  である。

表 1 の測定結果から分かることおり、測定条件の厳しい場合に対して実用上十分な測定精度を有していることが分かる。

そして、表 2 の  $L \neq 0$  の場合では直流電流脈動の低減のために演算誤差が改善されていると思われる。

表 1 電力測定例 ( $L=0$ )

$V_m$ [V]	電力理論値 [W]	電力測定値 [W]	誤差率 [%]	パワーメータ [W]
94.2	213.1	218.9	2.71	217.0
93.8	211.7	215.4	1.75	217.0
78.4	147.4	151.6	2.85	150.0
78.2	146.8	149.6	1.90	150.0

表 2 電力測定例 ( $L \neq 0$ )

電力理論値 [W]	電力測定値 [W]	誤差率 [%]	パワーメータ [W]
172.1	174.0	1.08	173.5
172.5	173.4	0.53	173.4
119.5	120.6	0.89	121.0
118.8	119.1	0.23	119.3

### 3. 2 三相全波整流回路の電力測定

図 4 に示される三相ダイオードブリッジ整流回路の電力測定を行ってみる。

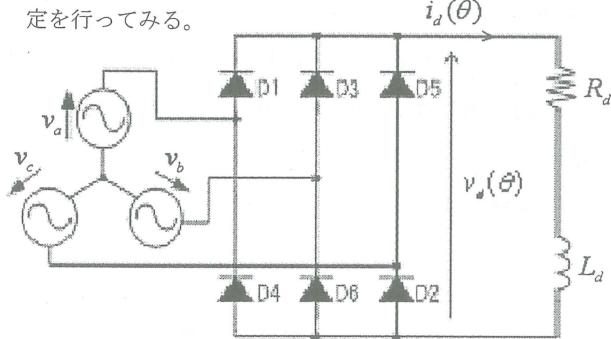


図 4 三相ブリッジ整流回路

ここで、 $v_{ac}(\theta) = \sqrt{3} V_m \sin \theta$  とすれば、電力は

$$P = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} v_d(\theta) i_d(\theta) d\theta \\ = \frac{9 V_m^2}{2 \pi Z^2} \left\{ \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\pi}{3} \right) R + \frac{(\omega L)^2}{Z^2} \left[ \sqrt{3} R + \frac{1 + e^{-\alpha \pi/3}}{1 - e^{-\alpha \pi/3}} \omega L \right] \right\} \quad (8)$$

表 3 に、 $L=0$  すなわち  $R$  負荷の場合の測定例を示す。

ここで、抵抗  $R = 31.2[\Omega]$ 、サンプリング周期  $T_s = 200[\mu\text{s}]$  で、測定時間は整流三相全波整流波形の 3 周期分、すなわち  $T = 1/120[\text{s}]$  である。

表 3 三相ブリッジ整流回路の電力測定例 ( $L=0$ )

$\sqrt{3} V_m$ [V]	電力理論値 [W]	電力測定値 [W]	誤差率 [%]	パワーメータ [W]
147.8	639.5	639.1	-0.07	643.0
148.0	641.4	640.2	-0.18	642.0
148.1	642.3	638.9	-0.52	642.0

#### 4. 転流現象

図5に三相ブリッジ整流回路を示す。ここで、電圧  $v_a, v_b, v_c$  は発電機の誘起起電力を表し、リアクタンス  $X_a = \omega L_a$  は電機子巻線に起因する転流リアクタンスを表す。

$v_{ac}(\theta) = \sqrt{3} V_m \sin \theta$  とおけば、 $\theta = 0$ においてダイオード D5 から D1 への転流が開始される。 $X_a = 0$ であれば、この転流は瞬時に完了するが、この  $X_a = \omega L_a$  のためダイオード電流  $i_s$  は瞬時にゼロとはなりえず転流重なり期間が生じる。この期間中、 $a$  相と  $c$  相とが転流リアクタンスを介して短絡されるため、電源電圧に転流ノッチと呼ばれる切れ込みを生じ、同一電源に接続された計測機器類に悪影響を与える。<sup>(2)</sup> この重なり期間を  $u$  [rad] と置けば、図6に示されるように転流によって電圧の減少が生じる。ここでは転流リアクタンス及び電圧の減少分の大きさを実験的に求めてみる。

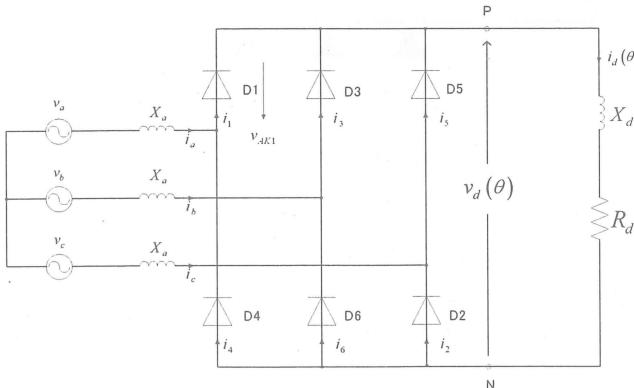


図5 転流リアクタンスを考慮した三相ブリッジ整流回路

解析を簡略化するためにここでは、直流側のインダクタンス  $L_d$  が非常に大きい( $X_d = \omega L_d \gg R_d$ )とし、 $i_d(\theta) = I_d$  (一定)と仮定する。そして三相全波整流回路の場合には出力電圧脈動が小さいので近似的ではあるがこの条件は比較的容易に満足される。

$0 \leq \theta \leq u$  の転流期間中  $i_1(\theta) + i_5(\theta) = i_d(\theta) = I_d$  (一定) であるので次式が成立する。

$$2X_a \frac{di_1(\theta)}{d\theta} = v_{ac}(\theta) \quad (9)$$

$$I_d = \int_0^{I_d} d i_1 = \frac{1}{2X_a} \int_0^u v_{ac}(\theta) d\theta = \frac{\sqrt{3} V_m}{2X_a} (1 - \cos u) \quad (10)$$

また、転流に伴う直流出力電圧平均値の減少分  $\Delta V_d$  は次式で求められる。

$$\Delta V_d = \frac{3}{\pi} \int_0^u X_a \frac{di_1(\theta)}{d\theta} = \frac{3}{2\pi} \int_0^u v_{ac}(\theta) d\theta = \frac{\sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 - \cos u) \quad (11)$$

従って、出力電圧の観測波形より  $I_d$  及び重なり角  $u$  を読み取れば (10) 式より転流リアクタンス  $X_a$  の値を、(11) 式からは直流出力電圧平均値の減少分  $\Delta V_d$  の値を求めることができる。

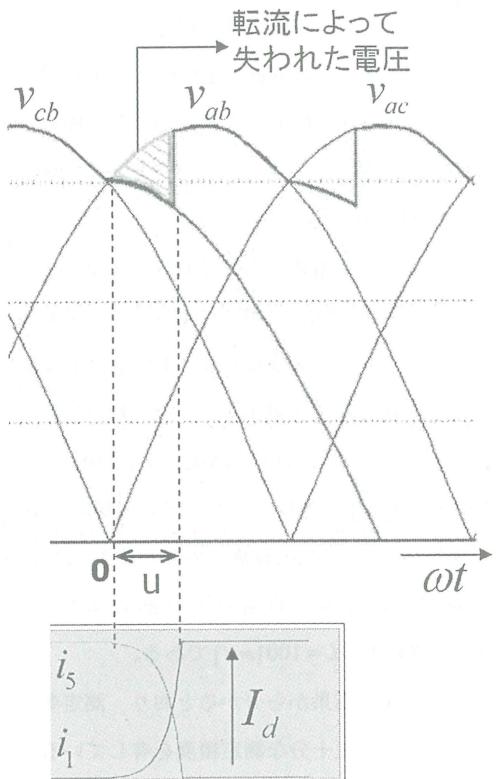


図6 転流過程

図7に直流出力電圧・電流波形の測定例を示す。これより  $\sqrt{3} V_m$ 、 $I_d$  及び転流重なり角  $u$  を読み取り、転流インダクタンス  $L_a$  の値を (10) 式より求めた。この  $L_a$  の測定例を表5に示す。モータ定格の詳細は知ることができないが、定格回転数 3 0 0 0 r p m の 20 極機とすれば、定格周波数は 500 [Hz] と推測されるので、実験結果からインダクタンスの概略値は測定できるものと思われる。

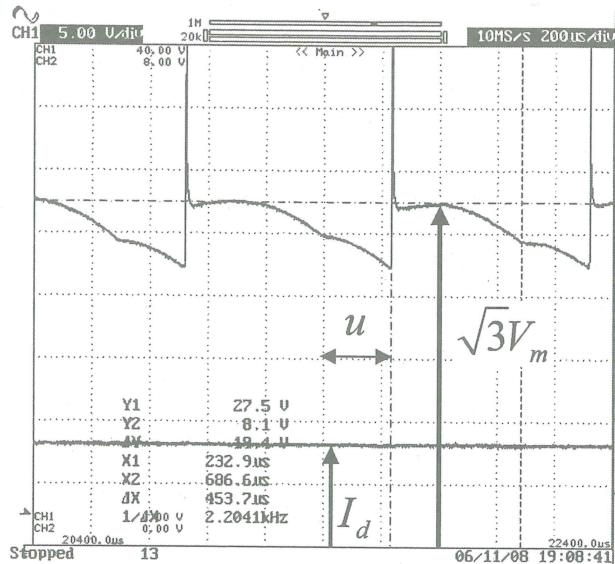


図7 出力波形の測定例

表4 転流インダクタンスの測定値例

周波数 [Hz]	転流インダクタンス [mH]
178.0	0.365
239.6	0.364
424.0	0.361

### 5. 発生電力の測定

実際に自転車をこぎ、1分間の発生電力量及び平均電力の測定を行い、人力発電システムの電力形としてのサンプリング周期の検討を行う。デジタルパワーメータWT 230（サンプリング周期約20[μs]）の積算機能を用いて発生電力量の測定を行い、製作したマイコン電力計の値と比較を行った。このとき自転車を一定速度でこぐことが困難のため電力量の理論値は算出できないので、デジタルパワーメータの指示値を真値とみなして誤差率を計算した。

製作したマイコン電力計のサンプリング周期  $T_s$  を20[ms]、100[ms]、500[ms]と変化させ、電力及び電力量を測定した結果を表5に示す。これから分かるとおりパワーメータWT 230に対し4%程度の測定精度が得られた。

サンプリング周期は発電機回転数、すなわち発生交流の周

波数に依存するが三相交流であること及び人間のペダルをこぐ時の1回転に要する時間(供試機で約400~800ms)中における出力変動等を考慮すれば実用的には100msで十分であると思われる。また、最大発生電力量は三相交流を整流した直流側で約2.1[Wh]、1分間換算で128[W]×60[s]=7680[J]を得ることができた。

図8(a)に低速駆動時の直流出力電圧  $v_d$  及び電流波形  $i_d$  を同図(b)には高速駆動時のそれらを示す。

表5 発生電力・電力量の測定例

サンプリング周期	電力 [W]	電力量 [W·s]	パワーメータ [W·s]	誤差率 [%]
500ms	39.9	2396	2413	-0.71
	75.2	4516	4558	-0.93
	123.7	7424	7651	-2.97
100ms	29.8	1788	1800	-0.69
	31.3	1879	1903	-1.25
	64.4	3867	3974	-2.7
20ms	37.0	2220	2267	-2.09
	60.4	3630	3672	-1.14
	63.4	3795	3888	-2.39

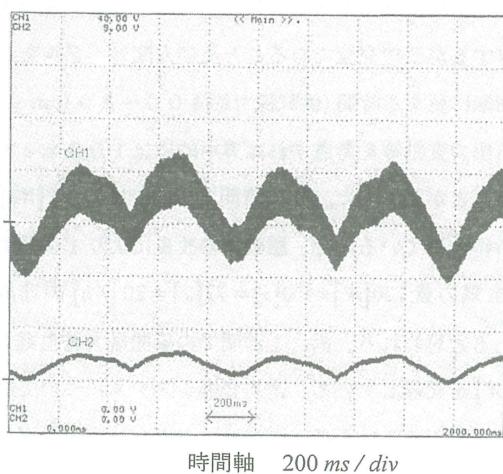


図8 (a) 低速駆動時波形 (R-L負荷)

CH1 :  $v_d(\theta)$  (5V/div)

CH2 :  $i_d(\theta)$  (1A/div)

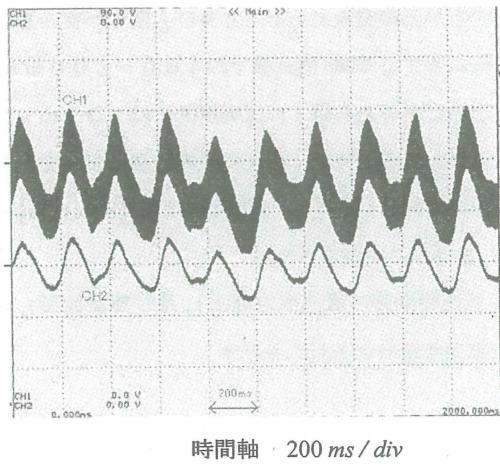


図 8 (b) 高速駆動時波形 (R-L負荷)

尚、図 8(a)において自転車の左右ペダル位置による上死点および下死点のため、 $v_d(\theta)$  波形の周期は約  $200 \times 4 = 800$  [ms] である。

#### 6. まとめ

H8 ワンチップマイコンを用いた発電電力及び電力量等のデータ収集・表示装置を作成し、横河製ディジタルパワーメータ WT230 に対し 4 % 程度の測定精度が得られた。

サンプリング周期は発電機回転数、すなわち発生交流の周波数に依存するが三相交流であること及び人間のペダルをこぐ時の 1 回転に要する時間(供試機で約 400 ~ 800 ms) 中における出力変動等を考慮すれば実用的には 100 ms で十分であることが判明した。駆動時間 1 分間では約 2.1 [Wh] の電力量が得られているので、駆動系の改良により 10 分間定格で発生電力量  $120[W] \times 600[s] = 72[J] = 20[Wh]$  の達成は可能であると思われる。尚、1 秒間での瞬間最大発生電力は 330 [W] を記録している。電力変換システムについては電機子巻線に起因するいわゆる転流リアクタンス(インダクタンス)の大きさを実験的に求めその影響について検討した。

今後の展望としては電動アシスト自転車の回生制動時のみならず非走行状態での発電システムが一般家庭において比較的普及しやすい形態と考えられる。さらに、スポーツジム等

におけるトレーニングマシンや健康器具を利用した発電システムが実用化できれば健康増進を図りつつエネルギー発生も可能となる。

**謝辞** 自転車駆動系に関してご助言を頂いたナショナル自転車株式会社(現パナソニックサイクルテック株式会社)の商品開発部 要素開発チームの安見氏並びに谷田氏に感謝致します。また、卒業研究としてマイコン電力計の製作や実験を遂行して頂いた山本勇太君(現ソニーEMCS(㈱長野テック)をはじめとする卒研生諸君に感謝致します。

本研究の一部は平成 15 年度～18 年度科学研究費補助金(基盤研究(C))の援助を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- (1) 日本電設工業協会技術委員会 新エネルギー利用専門委員会 編: 新エネルギー利用ガイドブック(その 1)、電設技術 9 月号(2000)
  - (2) 電気学会・半導体電力変換システム調査委員会 編: パワーエレクトロニクス回路(オーム社、2000)
- (2007年10月12日 受理)