

自然エネルギー利用における不規則波 シミュレータ駆動2次励磁誘導発電機の適用[†]

金 文 煥*・庭 屋 晶 浩*
大 西 公 平*・宮 地 邦 夫*

ABSTRACT For the future energy crisis, random wave input electric generation system where the power is supplied from the nature is developed intensively in many countries. In this paper, secondary excited induction generator system is adopted as a superior method which easily brings the CVCF output power rather than the conventional method. To test this system in the laboratory, the torque simulator and the inverter to control the secondary current, which keeps the frequency and the output voltage constant in spite of the statistic variation of the input power, are implemented. The results of the experiment at the laboratory show the validity of the secondary excited induction generator system for generating the CVCF output from the natural energy.

1. まえがき

世界的に資源及び環境問題に於けるエネルギー危機感が高まっている現在、新エネルギーに対する開発が各国において熱心に進められている。新エネルギー源としての波力・風力などの自然エネルギーは環境問題におけるクリーンさや、無尽蔵とも言える膨大な量からその利用に注目が集っている。しかし、これらのエネルギーは不規則な形態をなしており、一般の使用に供せられるためには何等かの安定化手法を必要とする。そのため、自然エネルギーの有効利用を行なうために、エネルギー変換システムのパワーフローをまず解析する必要がある。

筆者らがすでに発表した論文^{5)~10)}では、この不規則入力発電の一例として、日本海でおこなわれた JAMSTEC (海洋科学技術センター) の衝動型空気タービンを用いた波力発電システムが^{1)~4)} 取り上げられており、その実験結果およびそのパワースペクトラムから、時間領域及び周波数領域での解析が行なわれた。その結果、システムのパワーフロー及びトルク特

性を明らかにすることができた。

本論文はその解析結果から CVCF (Constant Voltage Constant Frequency) の電気エネルギーを得る方法として適当であると思われる2次励磁誘導発電機を採用した場合について解析とシミュレータによる実験を述べたものである。

この方式には主につぎのような2つの利点がある。その一つは CVCF を得る従来の方式 (例えば交流機—Rectifier—Inverter など) に比べ電力変換装置の容量が少なく済むことであり、またもう一つは従来の方式より簡単に正弦波出力が得られること (例えば出力側の Filter が不要) である。

2次励磁誘導発電機の不規則入力発電システムへの適用について、実験室レベルで実験検討をするためには自然エネルギーと同様のランダム入力トルクを再現する必要がある。そのため、文献^{5), 6)} より明らかになったトルク特性に基づいたトルクシミュレータを製作した。更に最近注目を浴びているウェルズタービンを適用した場合¹¹⁾ についてもそのシミュレータを製作し実験を行なった。

2. 不規則入力発電システムの解析およびシミュレーション

周知の如く、自然エネルギーは一般に不規則な形態をなしており、系統などにおける負荷の要求に応える

Application of Secondary Excited Induction Generator Driven by Random Wave Torque Simulator in Natural Energy Utilization.

*慶應義塾大学理工学部電気工学科

†1986年9月16日受付

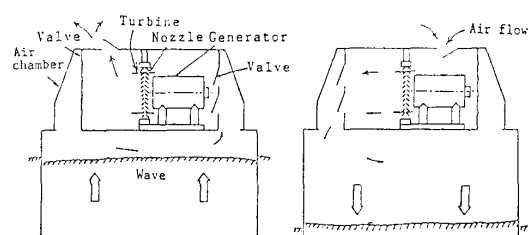


Fig. 1 Schematic diagram of wave power generator by impulse type air turbine

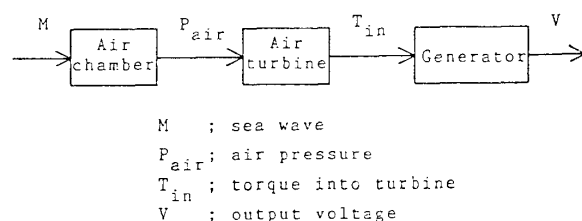


Fig. 2 Power flow diagram of generation system from sea wave

ためには制御されたエネルギー源に変換する必要がある。不規則入力発電システムにおいて CVCF を得るためには、まず全体システムのモデルを作ることが重要である。ここではその方法として、入出力波形のパワースペクトラムを利用する。この方法を利用して全システムを解析することにより、測定の難しい変数を含めてすべての変数の変化の様子が推測され、数値モデルの作製およびシミュレーションの実行が可能になる。この方法は実際規模の実験に多大の経費がかかる不規則入力発電システムの制御方法を研究するために有効な手段である^{6),8)}。

今、あるエネルギー変換系の入出力関係が線形であるとすると次のような関係がなりたつ。

$$S_{*j}(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega) \cdot S_{*i}(\omega) \\ = |H(\omega)|^2 \cdot S_{*i}(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $S(\omega)$ はエネルギー源又は各エネルギー変換系出力のパワースペクトラムであり、 i, j は各エネルギー変換系の段階を示す指数、 $H(\omega)$ は周波数領域での伝達関数を意味する。ここで不規則入力発電システムのなかで、一つの典型として、波の上下運動エネルギー→空気圧→空気流→回転機械エネルギー→電気エネルギーというエネルギー変換過程を経る波力発電を例として取り上げる。Fig. 1 に 4 枚弁方式の空気室の概略図を示す。Fig. 2 に空気室、衝動型空気タービンと発電機で構成されているシステムのパワーフローを示す。これは空気室で空気流に変えられた波の上下運動エネルギーが空気タービンを回転させ、最終的に

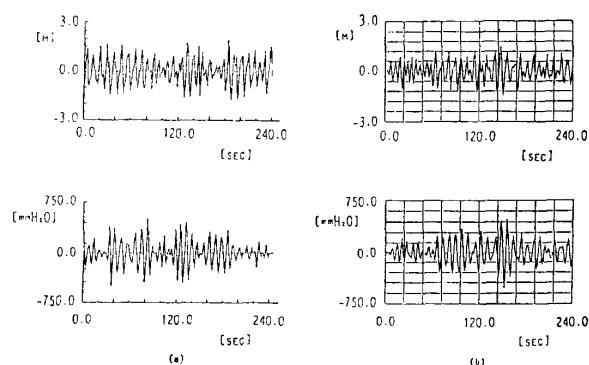


Fig. 3 Wave form of sea wave (upper) and air pressure (lower) by experimental (a) and simulation (b)

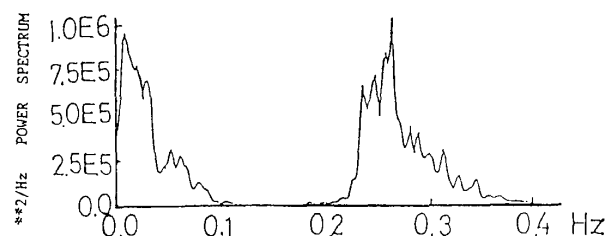


Fig. 4 Power spectrum density of air turbine torque in wave generation system

タービンと直結されている発電機から電気エネルギーが得られることを示している。

各エネルギー変換系の伝達関数は(1)式に基づき、実験結果からのパワースペクトラムより求められる。

Fig. 3 は海上実験より得られた各出力の波形と、解析結果から求められた伝達関数を用いたシミュレーション結果とを比較したものである。計算機で合成した波の模擬信号は統計的な性質をよく近似していることが推測できる。Fig. 4 は発電機を回転させている空気タービン入力トルクのパワースペクトラムである。これは実際の測定が難しいものであるが、数値モデルより簡単にパワースペクトラムを推定することができ、その特徴をつかむことが可能となる。

これらの解析などにより各変換系の近似モデルが成立し、不規則入力発電システムの構成が容易となる。この解析方式は一般性を持っており、例えばタービンをウェルズタービンに変換しても同様の議論が成立する。このウェルズタービンでは、空気室の空気流の方向が変化してもタービンは一定方向に回転する特性を持っている。Fig. 5 にウェルズタービンシステムの空気室の概略図を示す。従来のタービン（たとえば、衝動型タービンなど）を用いた場合には回転方向を一定に維持するために弁装置が必要であるが、ウェルズタ

ービンはこれが不要であり、最近注目を浴びているものである。

これら2種類のタービンを用いた場合のトルクシミュレータをそれぞれ製作して実験を行なったが、その結果は後述する。

3. 2次励磁誘導発電機システム

上記の解析とシミュレーションの結果は安定した電力を得るための2次励磁誘導発電機システムの制御方法の確立に有効である。2次励磁誘導発電機の制御の方法は次の2つの方法が基本となる。

- 1) 発電機の回転速度が変動しても1次側の出力周波数を一定とするためのすべり周波数の制御
- 2) 発電機の回転速度が変動しても1次側の出力電圧を一定とするための2次電流の制御

これについては簡単な説明を加える。Fig. 6に誘導機の断面図を示す。回転子の回転速度が $(1-s)\omega_0$ (rad/sec) で回っているとき2次側を $s\omega_0$ (rad/sec) で励磁すると、回転子の速度が変動しても回転磁界の回転速度は両方の合計の ω_0 で回転するため、出力の周波数が一定となる。

$$s\omega_0 + (1-s)\omega_0 = \omega_0 \quad (2)$$

次に2次励磁の誘導機の定常解析を(3)式の2軸理論を用いて行なう。一般に、自然エネルギーのパワースペクトラムは極めて低いことが多く(約 0.1 Hz)、(3)式を用いた解析で充分である。

$$\begin{bmatrix} V_{1\alpha} \\ V_{1\beta} \\ V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & -\omega_0 L_1 & 0 & -\omega_0 M \\ \omega_0 L_1 & R_1 & \omega_0 M & 0 \\ 0 & -s\omega_0 M & R_2 & -s\omega_0 L_2 \\ s\omega_0 M & 0 & s\omega_0 L_2 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{1\alpha} \\ -i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 α, β 軸は回転磁界と共に回転するものとする。下添字 1, 2 はそれぞれ1次, 2次側を示し、 ω, s, V, I, R, L, M はそれぞれ回転速度、すべり、電圧、電流、巻線抵抗、自己インダクタンス、励磁インダクタンスである。(3)式から、 I_2 と V_2 は次式のように求められる。

$$i_2 = \frac{R_L + R_1 + j\omega_0 L_1}{j\omega_0 M} i_1 \quad (4)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{s\omega_0^2 (M^2 - L_1 L_2) + R_2 (R_1 + R_L) + j\omega_0 \{L_1 R_2 + sL_2 (R_1 + R_L)\}}{j\omega_0 M} i_1 \quad (5)$$

また、1次側出力 P_1 、2次側入力 P_2 及び機械入力 P_m は(6)~(8)式のように表せる。

$$P_1 = -R_1 I_1^2 + \omega_0 M (i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (6)$$

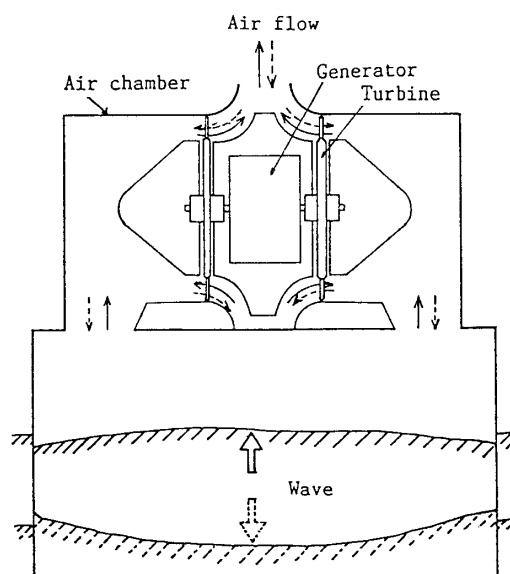


Fig. 5 Air chamber for Wells turbine

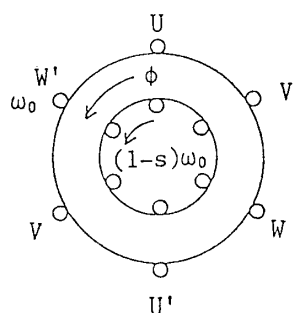


Fig. 6 Schematic sectional view of induction generator

$$P_2 = R_2 I_2^2 + s\omega_0 M (i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (7)$$

$$P_m = (1-s)\omega_0 M (i_{2\beta} i_{1\alpha} - i_{2\alpha} i_{1\beta}) \quad (8)$$

(6)~(8)式を用い同期速度以上と以下でのパワーフローを表すと Fig. 7 を得る。

回転子が同期速度以下で回転しているとき、1次側へ伝達されるパワー $P_{12} (= P_m / (1-s))$ は発電機への機械入力 P_m より大きい。その差が2次側からのパワー $P_2 (= sP_{12})$ であり、これをインバータで供給すれば1次側には供給すべき電力 $P_1 (= P_{12})$ が得られる。また同期速度以上では P_m は P_1 より大となり、その余剰のパワー sP_{12} は2次側のインバータを通じて P_2 として回生される。

つまり、2次励磁誘導発電機システムは2次側電力 P_2 を制御するので、従来の1次側出力 P_1 をコンバータ又はインバータを用いて変換して CVCF を図る方式に比べ電力変換装置の容量が少なく済む。

CVCF を得るには負荷電圧と回転速度を測定して、これを2次電流制御部分(具体的には2次側に接続さ

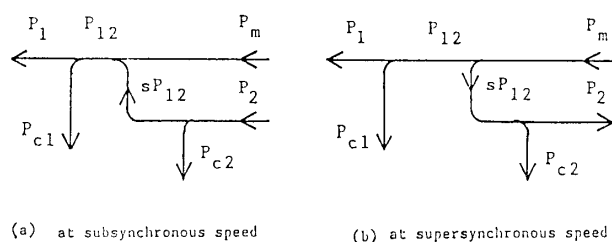


Fig. 7 Power flow at sub- and supersynchronous speed of rotor

れたインバータ)にフィードバックしている。従って、文献¹²⁾のように系統に接続しなくても CVCF の出力を得ることが可能であり、孤立電源として離島などでの設置にも向いている。具体的な制御法については次章で触れる。

4. 2次励磁誘導発電機の CVCF 出力制御

Fig. 8 に波力発電システムに適用した2次励磁誘導発電機の実験システムを示す。ノイズジェネレータからの白色雑音を波力発電の解析結果から求められた伝達関数の整形フィルタを通し、波力発電システムの各出力波形の波、空気圧、整形された一定方向の空気流と不規則入力トルクを再現している。そのトルクシグナルに基づき、直流モータをPWMチョップ制御することにより波力発電の空気タービンをシミュレートできる。

出力周波数を一定に維持するためには(2)式のすべり周波数を制御する必要がある。ここでは簡単でかつ定常偏差のないデルタ変調方式を用いて制御を行なう。即ち、ある時間のサンプリングされたすべり周波数と基準のすべり周波数を比較し、その差により次の段階のインバータの周波数を決め、すべり周波数を1段階上げるかまたは下げるかの制御を行なう。この決められたすべり周波数は、また次の段階においての基準周波数となる。以下、同じ操作を行なう。

発電電圧は2次電流の大きさとすべりにより決定される。2次電流の大きさは3相純ブリッジサイリスタ整流回路の点弧角により決まる。その制御には基準の出力電圧値とフィードバックされた出力電圧を比較、周波数制御と同様、デルタ変調方式を用いて制御を行なう。実験では整流回路の点弧角の1ステップ幅を 0.75° として行った。この電圧のフィードバック制御により、出力電圧を負荷の変動にも拘らず一定に維持できる。

5. 実験結果

実験室のシミュレーションシステムにおいてトルク

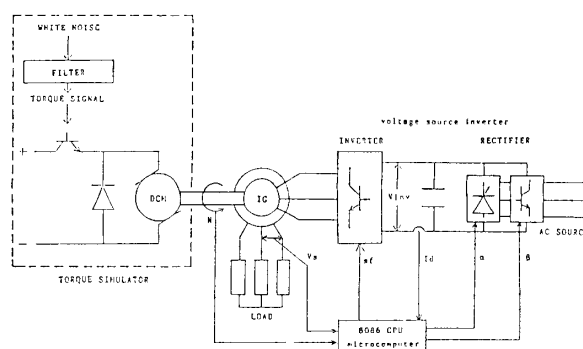


Fig. 8 Experimental generation system based on secondary excited induction generator driven by random torque simulator

Table 1 Nameplate data of wound induction generator and dc motor used in the experiments

1) Separately excited dc motor			
ratings		constants of circuit	
output power	2 (KW)	R_a	3.36 (Ω)
poles	2 (Pole)	K_e	0.622 (V $\cdot$ A/rad)
armature current	20.0 (A)		
field current	0.62 (A)		

2) Wound induction generator			
ratings		constants of circuit	
output power	2.2 (KW)	R_1	0.776 (Ω)
poles	6 (Pole)	R_2	1.030 (Ω)
primary current	13.0 (A)	L_1	3.11 (mH)
primary voltage	200 (V)	L_2	3.11 (mH)
secondary current	9.7 (A)	M	33.69 (mH)
secondary voltage	137 (V)	turn ratio	1.38

3) Constant of system			
total inertia	J		0.0311 (kgm ²)

シミュレータには2極、2(KW)の直流電動機、2次励磁誘導発電機には6極、2.2(KW)巻線型誘導機を用いた。これらシステムの定格および定数を **Table 1** に示す。また8086マイクロコンピュータシステムによりインバータの周波数、コンバータの点弧角の制御を行なう。回転速度、出力電圧のサンプリング時間は波力発電システムの入力トルクの変動周期などに比べて充分短いと考えられる5m secにした。

上で述べた如く、実験室でのシミュレーションでは2種類の空気タービン(衝動型とウェルズ型)のシミュレータを製作し、実験を行なった。

Fig. 9—10の実験結果から波力発電の各出力波形がよくシミュレートされていることがわかる。**Fig. 9**, **10**, と **Fig. 12** は衝動型空気タービン, **Fig. 11** はウェルズタービンのシミュレータを用いた場合の実験結果である。**Fig. 9**と**Fig. 11**は純抵抗一定負荷の場合であり, **Fig. 10**は負荷変動のあるときの応答である。これらの結果は負荷の変動があっても出力電圧の実効

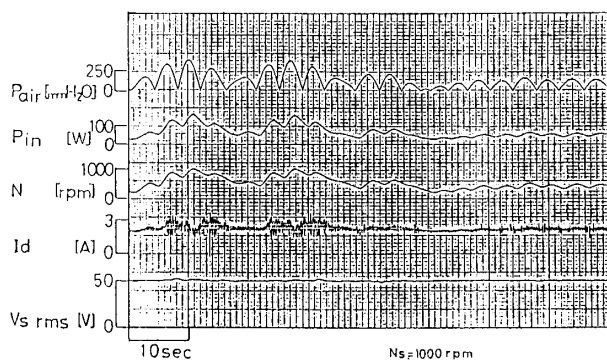


Fig. 9 Experimental example of time response (impulse type, under constant load)

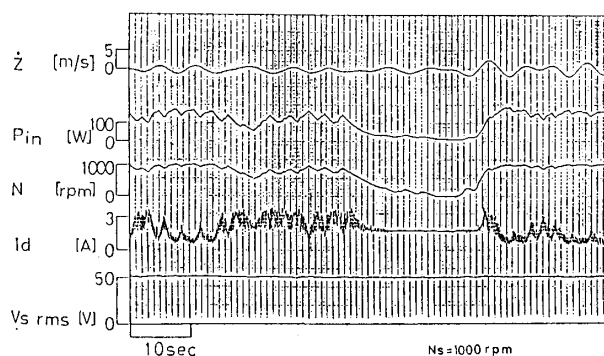


Fig. 11 Experimental example of time response (Wells turbine, under constant load)

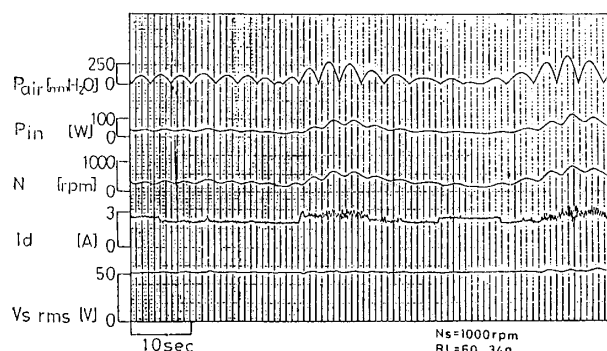


Fig. 10 Experimental example of time response (impulse type, under varying load)

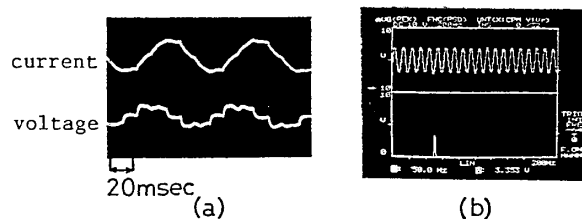


Fig. 12 (a) Waveform of secondary current and voltage (b) Power spectrum density of output voltage

値は一定値をなしていることを示している。Fig. 12 にはその出力電圧の波形とそのパワースペクトラムを示す。電圧型インバータにより制御される出力周波数は一定周波数であり、その波形は正弦波に近い。これら実験室規模の実験より不規則入力発電への2次励磁誘導発電機システムの適用の有効性が示されたと言えよう。

6. あとがき

パワースペクトラムを用いた解析方法により不規則入力発電システムのトルクシミュレータが製作でき、実験室規模の発電システムの実験が可能になった。また実験結果より本方法が従来の方式に比べ、電力変換装置が小容量で済む点や出力波形が正弦波に近いことなどから有利であることがわかった。従って、2次励磁誘導発電機を利用した CVCF 発電方式が不規則入力発電に適していることが明らかにされた。

本論文で提案する不規則入力発電システムの解析方法及び2次励磁誘導発電機のシミュレータによる実験システムは一般性があり、他の不規則入力発電システ

記号表

s	: 誘導発電機のすべり
R_1	: 固定子抵抗
R_2	: 回転子抵抗
R_L	: 負荷抵抗
L_1	: 固定子インダクタンス
L_2	: 回転子インダクタンス
M	: 励磁インダクタンス
I_1	: 固定子電流
I_2	: 回転子電流
V	: 誘導起電力
P_1	: 1次側出力
P_{12}	: 1次から2次への伝達電力
P_{c1}	: 総固定子損失
P_{c2}	: 総回転子損失
P_m	: 機械入力パワー
P_r	: 2次側電力
N	: 回転速度
V_s	: 線間電圧
I_d	: 直流リンク電流
P_{air}	: 空気圧
P_{in}	: タービン出力
Z	: 波高値

ム（例えば風力・潮力等）へ適用してそれぞれの方式に応じたきめ細かい制御方式を確立することも容易であろう。この面で、本論文が自然エネルギーの有効利用に役立てば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 益田, 宮崎: 消波発電装置“海明”の実験, JAMSTECTR (海洋科学技術センター試験研究報告), 3, pp. 75/81 (1979)
- 2) 大野, 益田: 波力発電装置“海明”の実験, (第2報), JAMSTECTR, 5, pp. 109/124 (1980)
- 3) 大野, 益田: 波力発電装置“海明”の実験, (第3報), JAMSTECTR, 5, pp. 125/132 (1980)
- 4) 大野, 益田: 波力発電装置“海明”の実験, (第4報), JAMSTECTR, 5, pp. 133/154 (1980)
- 5) 河原田, 金, 大西, 宮地: 波力発電のシステム解析について, 電気学会, 新・省エネルギー研究会 (EC-82-45), (1982)
- 6) 金, 大西, 宮地: 波力発電システムの最適化の研究, 電気学会, 回転機研究会 (RM-83-64), (1983)
- 7) 野田, 金, 大西, 宮地: 不規則入力発電のトルクシミュレータと2次励磁誘導発電機への適用, 電気学会, 回転機研究会 (RM-83-45), (1983)
- 8) 金, 大西, 宮地: 不規則入力発電システムのシミュレーションによる解析 (波力発電), 日本シミュレーション学会第4回研究発表会, (1983)
- 9) M. Kim, E. Noda, K. Ohnishi, K. Miyachi: A micro-computer-based secondary current control system of wound-rotor induction generator for random wave input generation system, Proc. IEEE IECON '84, 1, pp. 175/179 (1984)
- 10) 金, 大西, 宮地: 波力発電システムのシミュレーションによる研究, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム (東京) 予稿集, 海洋科学技術センター, pp. 311/317 (1984)
- 11) 木下, 増田, 宮島, 加藤: 固定式水柱波浪発電装置のシステム・シミュレーション, 日本造船学会論文集第156号, pp. 255/263 (1984)
- 12) G. A. Smith: Wind energy recovery by a static Scherbius induction generator, IEE Proc., Vol. 128-C, 6, pp. 317/324 (1981)