

波力発電用ウェルズタービンの流れ場と数値解析による解明 CFD Analysis on Flow around Wells Turbine for Wave-Power Generating System

鈴木正己, 東大工, 文京区本郷7-3-1, E-mail: wells@cfdl.t.u-tokyo.ac.jp
荒川忠一, 東大情報学環, 文京区本郷7-3-1, E-mail: arakawa@cfdl.t.u-tokyo.ac.jp
Masami SUZUKI, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
Chuchi ARAKAWA, Interfaculty Initiative in Information Studies, Univ. of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Wells turbine has the cascade whose stagger angle is 90 degrees, namely the blades are perpendicular to the axial velocity. The blades can rotate in the same direction irrespective of reciprocating airflow. The good performance is required from 0 to 90 degrees of attack angle because the turbine is operated in the oscillating airflow produced with wave energy. Furthermore, very interesting and complex flows are experimentally observed by the oil film method with a water tunnel in the large attack angle where the performance such as self-starting is strongly influenced. In order to understand these phenomena in detail, CFD code is developed by authors with SIMPLE algorithm and domain decomposition. This paper tries to analyze the mechanism of these three-dimensional flows around the turbine with the numerical analysis, focusing on the off-design condition.

1. 緒 言

空気タービン方式の波力発電システムは、波浪エネルギーを往復空気流に変換する空気室とタービン発電機により構成されている。ここに使用されるウェルズタービンは波により生成された往復空気流中においても、常に一方方向に回転することができ、形状、構造が簡単であるなど多くの利点を有している。特殊な翼配置（食違い角90度）であるため、定常流中における効率は50%前後と低くなるが、波浪中での駆動に適し効率低下が少ないため40%程度の平均効率を得ることができる。

ウェルズタービンに関する研究は性能試験を中心に、運動量理論を用いた解析や2次元、3次元のポテンシャル計算、流線曲率法による準3次元計算により特性の解明が試みられている。また、最近では市販の粘性計算コードを用いた数値解析が行われ、失速域を除く設計点付近の定性的な流れ場の推定がなされている^{(1)~(3)}。しかし、定量的には実験結果との一致が十分とは言えない段階である。

波力発電用の空気タービンは波高が不規則に変化する波浪中で運転されるため、起動特性の改善と作動範囲の拡大が重要な研究課題である。鈴木らはより詳細な特性を把握し改善の糸口を得ようと、油膜法を使用した水流中の可視化を行い⁽⁴⁾⁽⁵⁾、翼面上の流れ場を実験的に明らかにしている。特に失速直後の翼面上のはく離パターンは2次元失速とは大きく異なることから、このような流れが生じるメカニズムを解析することは失速の生成機構を解明する上で重要である。

本研究は実験から得られている失速前後の流れ場を数値解析により再現し、この計算結果から失速のメカニズムを解明することを目的としている。

2. 実験装置

計算対象のウェルズタービンはケーシング内径304.4mm、ハブ径215mmである。供試ロータは翼弦長73.5mm、翼端すきま1mm、翼型がNACA0021の8枚翼である。翼弦長、翼端周速を用いたレイノルズ数は迎え角0度で 1.7×10^5 、15度で 1.6×10^5 、19度で 1.2×10^5 となっている。

3. 数値解析手法および計算対象

3.1 数値解析手法

支配方程式は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式であり、

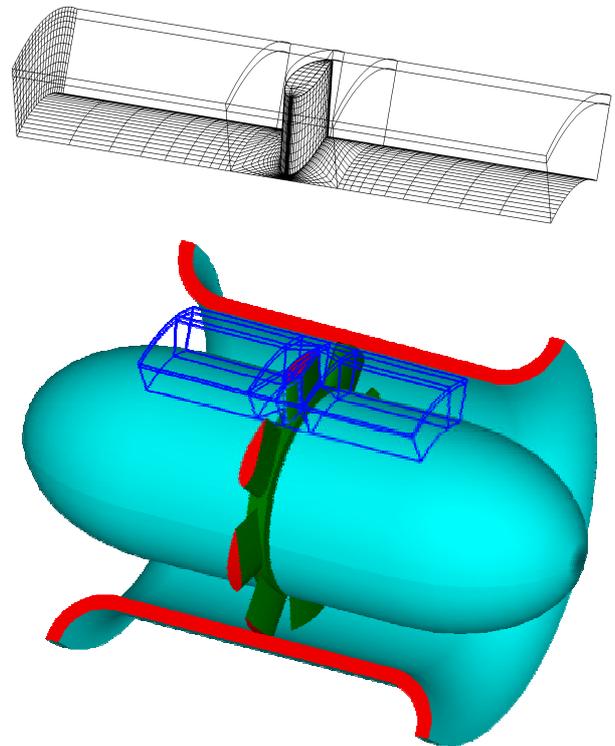


Fig.1 Grid system of domain decomposition around Wells turbine

集中格子による一般座標系を用いている。数値解法はSIMPLEアルゴリズムを用いた定常計算で、対流項および粘性項はハイブリッド・スキームで離散化している。

本実験結果のレイノルズ数は翼端でも $Re = 1.5 \times 10^5$ と小さく、吸い込み型の実験装置であるため入口の乱れが小さいことから層流から乱流までの遷移領域を含む流れ場となっている。現状ではこのように遷移を含む流れ場を適切に取り扱うことができる乱流モデルは存在しない。このため、層流計算または乱流計算のどちらかで解析することになるが、本

計算では第一段階として層流計算を試みることにした。また、失速の生成メカニズムが本質的に層流、乱流で変わらないであろうと推測したからでもある。

3.2 計算格子

複雑な形状にも対応できるよう複合格子による計算コードを製作している。図1はこの計算に用いたウェルズタービンまわりの格子を示す。翼列計算にはH型格子が一般に用いられるが、翼面上に必ず特異点が現れる。この問題点を軽減するため、翼まわりにはC型格子を配置している。24の領域に分割され、その内の4領域は翼端すきま内の格子であり、総格子点数は約32万点である。半径方向の格子点数は44点、その内5点を翼端すきまに割り当てた。

図1には計算格子形状を説明するための粗格子(23000点)が表されている。タービンの翼枚数が8枚であるので円周方向1/8領域を計算対象にし周期境界条件を用いて計算している。32万点の計算格子では、上流側にタービン半径の1倍、下流側に3倍の距離を設けた。

3.3 境界条件

境界条件は入口速度を固定し、出口速度はノイマン条件、壁面はno-slip条件としている。圧力はすべての境界でノイマン条件である。領域間は隣り合う点の平均値を使用するようにしている。

4. 計算結果

図2は油膜法によるウェルズタービン動翼面上の実験結果で、実験の翼端すきまは1mmである。図2の(a)は迎え角 $\alpha = 0^\circ$ 、(b)は失速直前の迎え角 $\alpha = 15^\circ$ であり、(c)は失速後の迎え角 $\alpha = 19^\circ$ である。

図3には対応する計算結果を示す。また、失速角が正確に予測できていないことから、図中には計算上完全に失速している迎え角 $\alpha = 30^\circ$ の結果も併せて示すことにした。

図2と図3を比較するとこれらの油膜パターンは良く類似していることがわかる。図2-(a)は迎え角 $\alpha = 0^\circ$ であり、前縁から後縁に進むにつれ遠心力の影響でハブから翼端に向けて対数螺旋状の流れが現れている。図3-(a)の計算結果はこれらの流れを良く表現していることがわかる。図2-(b)は失速直前の迎え角 $\alpha = 15^\circ$ で、後縁に大きなはく離域が形成されている。この流れで特に注目すべき点は後縁の翼端から前縁に向かう太い油膜の線が見えることである。これははく離線で、前縁からの流れと後縁からの逆流がこの線上で衝突しはく離するために生じている。そして、前縁からの流れも後縁からの流れも、このはく離線に沿って前縁方向に流されるとともに、このはく離線は迎え角が大きくなるにつれ成長していく。この流れが引き金となって失速すると推定され、図2-(c)に示す反時計回りに渦巻くような流れが生じ、失速が起こっていると考えられる。図3-(b)と(c)の計算結果は多少誇張しすぎの感はあるが、これらを良く再現している。そして、迎え角が 30° の計算結果はより明確な反時計回りの渦を生成している。

図4は失速した迎え角 $\alpha = 19^\circ$ の反時計回りの渦を斜め下流側から見た計算結果であり、翼面上の前縁から流した流線を示している。計算結果は翼面から少し離れた位置ではつきりした渦が生成されていることを示している。

何故このような失速が起こるのかについては非常に興味深いとともに、これらの機構が明確になることにより失速特性を改善する対策を講じることが可能になると考えられる。

これらの生成機構を解明するために、計算結果を以下で詳細に検討してみる。

5. 失速の生成機構

図5は動翼下流の速度ベクトルを示し、(a)は前縁から翼弦

長の50%、(b)は75%位置での計算結果を表している。図中の x, l は前縁からの距離と翼弦長を示している。翼端すきまから吹き出す流れに誘起されて、翼端では翼端渦が生成され、これに誘起された2次渦も生じている。また遠心力の影響で翼面上の境界層内ではハブからケーシングに向けた流れが生じ、翼端すきまと遠心力の影響で生じた流れやハブとケーシングの極端な軸流速の差によって下流側には大きな渦も形成されている。ハブのソリディティは翼端に比較して非常に大きいため、動翼下流の軸流速はハブ側で0に近い状態になり、ケーシング側では大きな速度となる。翼端渦とハブ近傍を含む大規模渦は回転方向が同じであるため、逆向きに接し衝突する領域が現れるが、ここでは互いに打消し合って旋回速度は0になり真直ぐ下流に流れる。A点およびC点から描かれている点線は、点線より上の領域で逆流していることを表している。失速域では翼端渦やその2次渦は後縁から前縁に向けて流れている。

図3-(c)と図5の流れを対比する。それぞれの図中のA点とB点は2次渦が翼面からはがれるときのはく離線であり、図3-(c)のはく離線との交点Cは図5-(b)には明確に現れていない。これは後縁はく離線の厚みが薄く、さらに図3-(c)に示された後縁の逆流がほぼ円周に沿って流れているため、この矢印を識別しがたいのである。このように後縁の逆流が周方向に沿って流れていることから、はく離域では遠心力の影響を強く受けていないように見えるであろう。しかし、図3-(c)では図5の大規模渦などの影響により主流が斜め右上に流れ、この流れが後縁ではく離して逆流すると斜め左下に流れることになる。これに遠心力が強く働いた結果ほぼ周方向に沿った(少し斜め左上)逆流が現れたものであり、大きな遠心力の影響を受けているものと推察できる。

図6は動翼まわりの流れを示し、図中のRは半径、添え字cはケーシングを表す。数値解析における翼端は $R/R_c = 0.993$ 、ハブは $R/R_c = 0.706$ の位置になっている。ミッドスパン($R/R_c = 0.85$)からハブ付近($R/R_c = 0.72$)にかけては後縁だけにはく離が生じているが、翼端付近($R/R_c = 0.99$)においては境界層内の遅い流れが遠心力により翼端付近に集められるため、翼面上の境界層が厚くなり逆圧力勾配に抗しきれずに前縁付近から後縁にかけてはく離が生じたと考えられる。

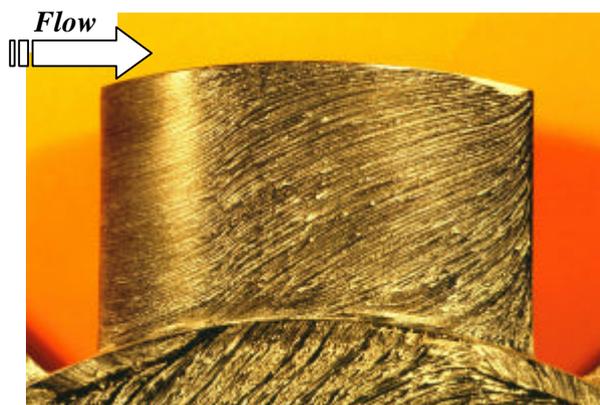
図7以上の結果を整理した失速メカニズムの説明図を示す。数値解析によると翼面上に図中～の流れが生じ、反時計回りの渦が生成される。

- (1) 翼後縁側の全域に現れる2次元的是く離は迎え角が増すにつれ拡大する。
- (2) そのはく離域の流体は遠心力を受けて翼端側に集積するため(流れ)，翼端では境界層が厚くなる。
- (3) 翼端側に集積した低エネルギー流体は、弦長方向の逆圧力勾配に抗しきれずに、前縁側へと逆流し、翼端では前縁失速するようになる(流れ)。このとき、後縁のはく離線は前縁にまで伸び、翼端に沿ったはく離線(図2-(b)の)が形成される。
- (4) 翼端とは逆に、ハブ側では翼面上の流体が遠心力による吸い上げ作用や大規模渦(Fig5-(a)の)により、ハブ面上の翼面方向に向かう流れによって補われる。これにより境界層は薄くなりはく離が起こりにくく前縁失速が抑えられている。このためハブ側は順流(流れ)を維持し、その流れは後縁のはく離線に近づくと減速される。そして、遠心力の影響を受けて半径方向の流れを生じつつはく離線に到達する(図2-(c)のAやB点)。
- (5) その後、この順流ははく離線に沿った流れへと移行し、

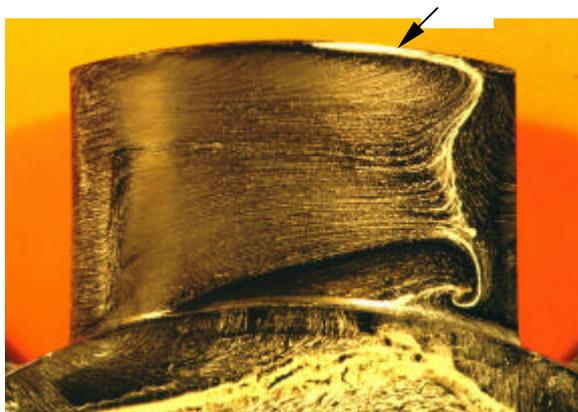
前縁に達することになる。

- (6) 前縁はく離していないハブ側は大きな負圧が維持されている。このため、翼端前縁の逆流域がハブ側へ吸い寄せられることにより、翼端側の前縁付近にはく離線はハブ側に進行する（流れ ）。このく離線に沿った流れがハブ側へ向かい、前縁失速は翼端からハブ側に拡大される（図 3 - (d)の前縁）。

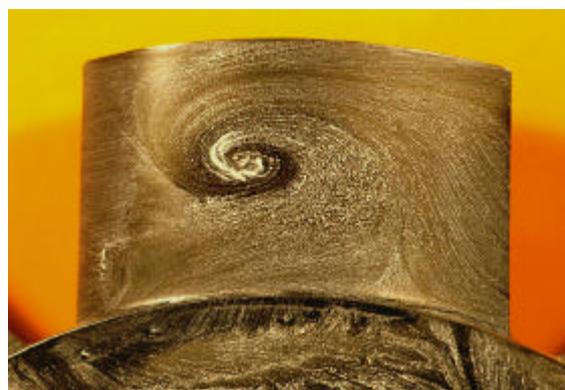
このようにスパン方向の全面に渡って失速とはならず、後縁はく離が翼端に沿って前縁に進行し、翼端で前縁失速を形成するようになる。このとき前縁のハブ側に生じた順流（流れ ）が後縁（流れ ），翼端（流れ ），そして前縁のはく



(a) $a = 0^\circ$



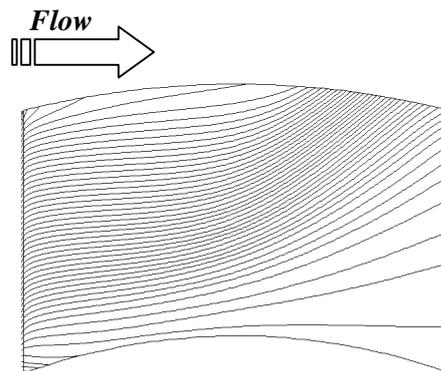
(b) $a = 15^\circ$



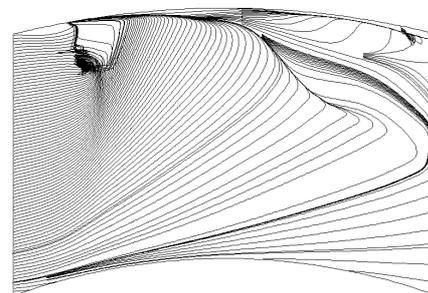
(c) $a = 19^\circ$

Fig. 2 Flow patterns on the suction side surface derived by the oil film

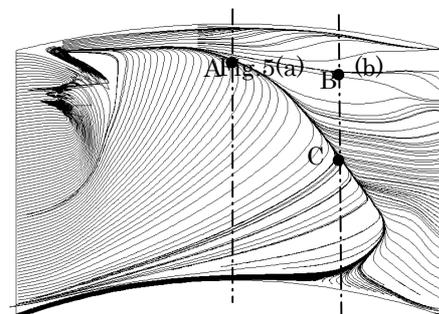
離線(流れ)に沿って流れることにより反時計回りの渦 を形成する。これらを視野に入れて図 4 を再び観察することにより、3次元的な渦構造が理解できるであろう。以上がウエ



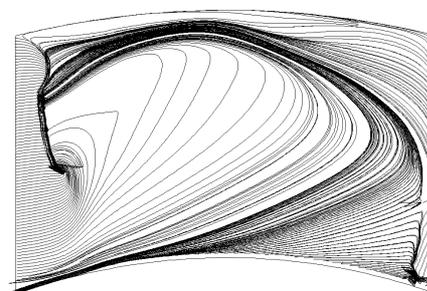
(a) $a = 0^\circ$



(b) $a = 15^\circ$



(c) $a = 19^\circ$



(d) $a = 30^\circ$

Fig. 3 Flow patterns on the suction side surface derived by the calculation.

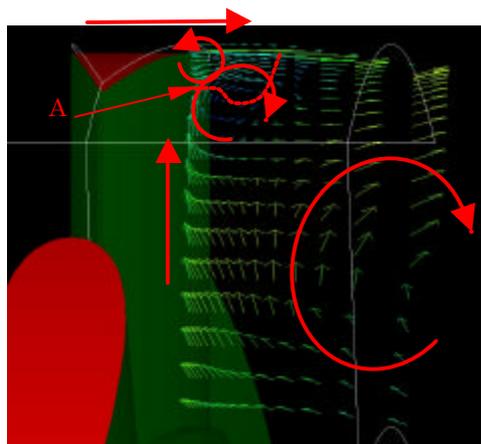
ルズタービンにおける失速の生成機構と推定できる。

6. 結 言

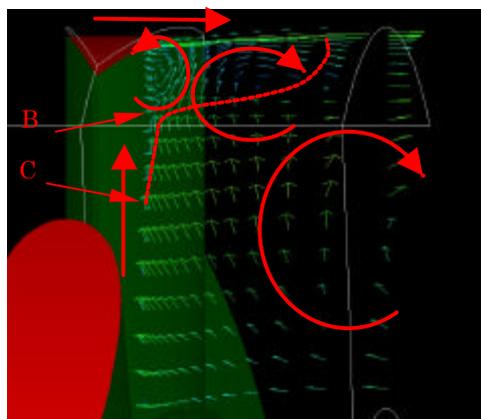
ウェルズタービンのように回転翼まわりの流れは複雑であり、失速などの生成機構を実験的に明らかにするための詳細なデータの取得は現状では難しいと考えられる。ウェルズタービンの動翼面上の油膜写真は2次元的な前縁失速とは異なる興味深い流れ場を提示しており、翼性能の改善にはこのメカニズムを解明する必要がある。



Fig. 4 Vortex flow created on the blade going downstream



(a) $x/l=0.5$



(b) $x/l=0.75$

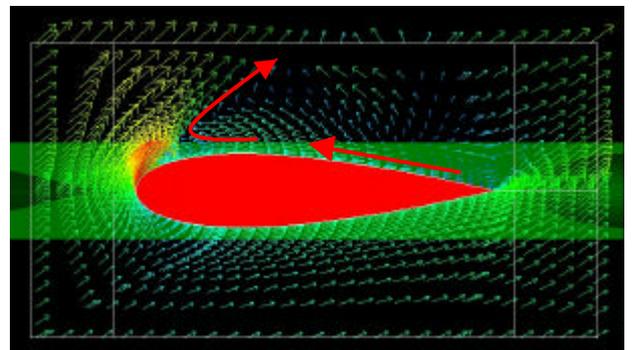
Fig. 5 Flows including tip vortices in the downstream of the blade at $\alpha = 19$ degrees in numerical analysis

このような目的で計算を行い以下の結果を得た。

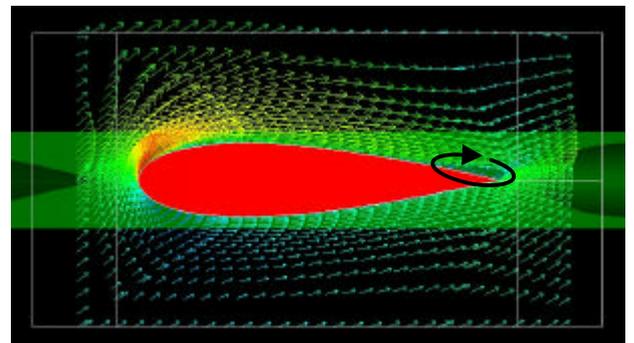
- (1) 油膜法による翼面上の流れと類似の結果が得られ、その流れ場から失速のメカニズムと考えられる推論を導出できた。
- (2) タービン性能は失速前までの迎え角では実験結果と良好な一致を示した。
- (3) 流れ場に関しては迎え角0度から失速に到るまで定性的に推定することが可能となった。ただ、失速後の流体力および失速角は、定量的に評価できる段階に到っておらず、非定常計算による検討や計算精度の向上を図ることが必要である。

文 献

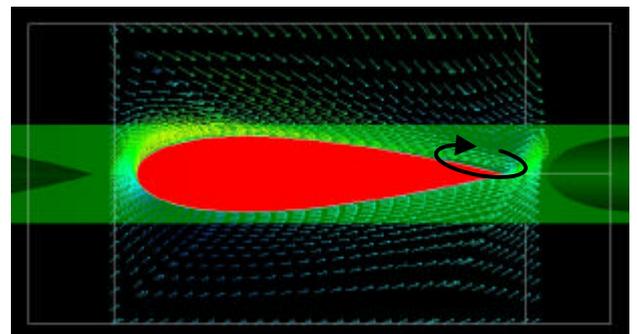
- (1) Watterson, J. K. and Raghunathan, S., Computed Effects of Solidity on Wells Turbine Performance, JSME ICFE-97-608, (1997), 833-838.
- (2) Watterson, J. K. and Raghunathan, S., Computed Effects of the Tip Clearance on Wells Turbine Performance, AIAA Paper 97-0994, (1997), 1-9.
- (3) Lee, H. G., Kim, J. H., Lee, Y. W., Setoguchi, T. and Kang, C. S., Numerical Analysis of Flow



(a) $R/Rc=0.99$



(b) $R/Rc=0.85$



(c) $R/Rc=0.72$

Fig. 6 Velocity vectors around the blade at $\alpha = 19$ degrees in numerical analysis

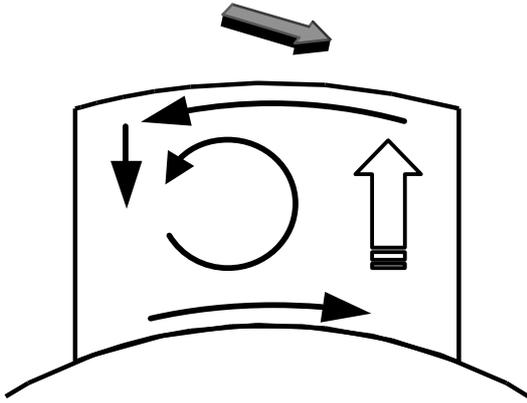


Fig. 7 Creative mechanism of the stall in Wells turbine

Characteristics in a Wells Turbine for Wave power Conversion, Proc. 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. I, (1998), 427-433.

- (4) 鈴木正己・荒川忠一, 波力発電用ウェルズタービンにおける動翼面上の流れ, 流れの可視化学会誌, Vol.4, Suppl., (1984), 51-56.
- (5) 鈴木正己・荒川忠一, 波力発電用ウェルズタービンにおける動翼面上の流れ (第2報, 前進翼および後退翼), 流れの可視化学会誌, Vol.5, No.18., (1985), 241-244.
- (6) 鈴木正己・荒川忠一・田古里哲夫, ウェルズタービンと空気室からなる波力発電装置の基礎研究, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, (1984), 201-210.