

風力の直接熱変換に関する実験的研究

松村 博久・十田 正文・原口 和広*

(受理 昭和60年5月31日)

EXPERIMENTAL STUDIES FOR CONVERSION OF WIND POWER DIRECTLY INTO THERMAL ENERGY

Hirohisa MATSUMURA, Masafumi JUTA and Kazuhiro HARAGUCHI*

The results of an experiment which directly converted wind power into thermal energy by means of the agitator with impeller blade in water is reported.

The efficiency of the conversion was explored in relation to : the diameter and the rotational frequency of impeller, the number of fixed vanes, the distance between impeller blade and fixed vane.

In the analysis it was shown that the efficiency of conversion is related to the flow pattern of agitating the water and that the circulating flow in the tank is an efficient way to convert wind power into thermal energy.

1. ま え が き

石油危機以後化石エネルギー資源有限の概念が広く認識され、石油の代替エネルギーとして自然エネルギーの有効利用がエネルギー安定供給の上で重要な課題となっている。そのため太陽熱、風力、海洋エネルギーなどに関する研究が多く行われてきた。風力エネルギーは風車により容易に機械的エネルギーに変換できることから、その利用方法は揚水、製粉、発電、熱変換など多様で、歴史的に古いものもある。その中で風力の熱エネルギー変換については電気、固体摩擦、油圧とオリフィスの組み合わせ、流体かくはんなどの方法が研究^{1),2),3)}されているが、これらは変換された熱エネルギーを水と熱交換した温水で利用することが多く、一般に小規模なシステムとして浴用、養魚、温室加温^{5),6)}などに見られる。

本研究ではコストを考慮して、できるだけ単純な熱変換装置で効率的にも良好である風力エネルギーを直接熱エネルギーに変換する方法を取りあげた。これは風力エネルギーを風車により機械的エネルギーに変換して、ロータ（回転羽根取付け板）で流体をかくはん

することにより流体に与えられた運動エネルギーを流体の粘性応力、壁摩擦などで熱エネルギーに変換する方法である。この実験においては風車の代りに可変速モータを、かくはん流体として水を使用して、風力の熱エネルギー直接変換の最適条件を見出すことを目的とし、熱変換効率におよぼすロータ直径、ステータ羽根枚数、ロータ回転数、ロータとステータの羽根先端間隔などの影響を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。実験装置は可変速モータと減速ギヤからなる駆動部、運動エネルギーから熱エネルギーへの熱変換を行う保温材で覆った流体かくはんタンク、およびその中間の流体かくはんの回転数とトルクを測定する検出部などで構成している。図2にタンク内部のかくはん装置概略を示す。流体かくはんタンクは円筒形で、直角羽根タービン型のロータ（回転羽根取付け板）およびステータ（固定羽根取付け板）を内蔵している。かくはんタンクには図2に示すように水温およびタンク外壁温度を測定する熱電対を取り付けてある。装置の主な寸法は、かくはんタン

*大分県立佐賀関高等学校

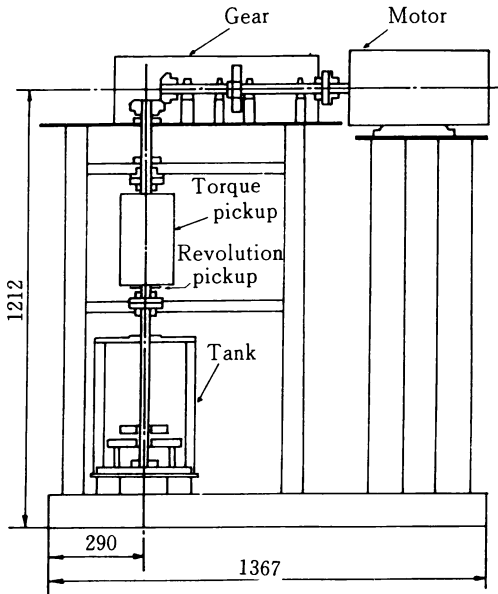
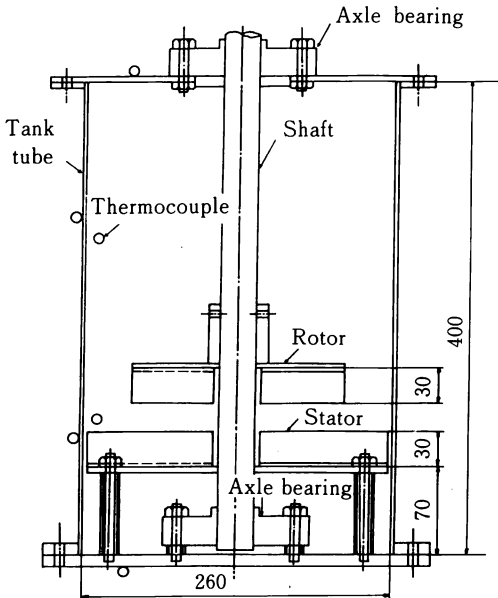


図1 実験装置概略



○：熱電対取り付け位置

図2 かくはん装置概略

クの内径 260 mm および高さ 400 mm, ロータ直径 180 ~ 250 mm, ステータ直径 254 mm, ロータおよびステータの羽根高さ 30 mm であり, ステータまでの液深さは最大 330 mm である。

実験は水量 18 kg f (ステータまでの液深さ 300 mm)

およびロータ羽根枚数 12 枚を一定とし, ステータ羽根枚数, ロータ直径, ロータ回転数, ロータとステータの羽根先端間隔を表 1 に示すように系統的に変えて,

表 1 実験条件

ステータ羽根枚数 (枚)	0, 4, 8
ロータ直径 (mm)	180, 220, 240, 250
ロータ回転数 (rpm)	300, 400, 500
ロータとステータの羽根先端間隔 (mm)	15, 30, 50, 100

それらの熱変換効率への影響を調べるために行った。実験に供試した水は常温とし, 所定の実験条件でロータを回転させて水をかくはんする。設定した回転数において, 一定時間毎にかくはんトルク, 水温, およびタンク外壁温度を測定する。実験は水温が約 60°C 程度に達するまで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水温変化と熱変換効率

タービン型ロータによるかくはんの流動状態は流体とロータの相対速度の小さい円周方向の回転流, およびロータ半径方向の吐出流とそれに伴う回転軸方向の上下流からできる循環流になる⁷⁾。本実験装置の場合, まずロータ回転による遠心力によりロータ羽根内部の流体が半径方向に流出する吐出流が生じ, これがタンク内壁に衝突して上下方向にわかれる。次に吐出流が生じて負圧となったロータ羽根内部にロータ下面より流体が吸い込まれるために循環流が形成される。ロータだけによるかくはんでは流れの安定期前に循環流が発生するが, 時間と共に吐出流の持つ回転モーメントにより回転流が生長して安定期には吐出流が弱まり, 循環流の小さい流れとなる。したがって回転流と循環流が熱変換効率にどのような影響を持つか調べるために, 上下方向にわかれた吐出流の回転モーメントによる円周方向の流れを半径方向の流れに転換して循環流を持続させる目的でステータを取り付けた。図 3 にステータの羽根枚数をパラメータとして, かくはん時間 T に対する水温 θ の温度変化の例を示す。実験条件はロータ直径 240 mm, ロータ回転数 400 rpm, ロータとステータの羽根先端間隔 15 mm である。一定時間に上昇する温度はステータ羽根枚数が増加するに

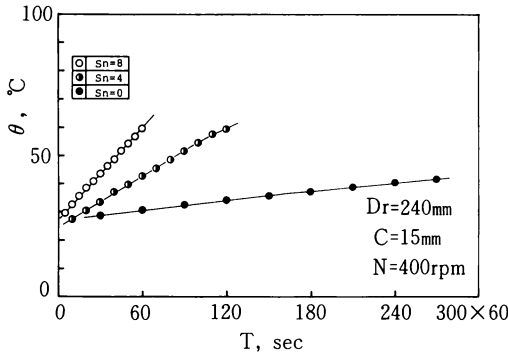


図3 かくはん時間による温度変化

つれて高くなることがわかる。

かくはんによる仕事（入力エネルギー） J_i および熱に変換された仕事（出力エネルギー） J_o から熱変換効率 η を式（1）により定義する。入力エネルギー J_i はロータ回転数 N ，かくはんトルク M ，かくはん時間 T より式（2）で求める。出力エネルギー J_o は水の保有エネルギー J_w ，タンクの保有エネルギー J_t および外部へ漏出したエネルギー J_r として式（3）で求める。水の保有エネルギーは，かくはんにより上昇した水温 $\Delta\theta_w$ および水熱当量 E_w として式（4）で求め，またタンクの保有エネルギーは，かくはんにより上昇したタンク外壁温度 $\Delta\theta_t$ およびその水熱当量 E_t として式（5）で求める。

$$\eta = (J_o / J_i) \times 100 \quad (1)$$

$$J_i = \frac{2\pi MNT}{60 \times 10^3} \quad (2)$$

$$J_o = J_w + J_t + J_r \quad (3)$$

$$J_w = E_w \Delta\theta_w \quad (4)$$

$$J_t = E_t \Delta\theta_t \quad (5)$$

外部に漏出したエネルギーはタンク表面温度と大気温度の温度差の計測値から自然対流による熱伝達により求める。実験結果の整理にあたっては，それぞれの実験の初期水温が異なるので，水の粘性について温度条件を一定とするために，水が 35℃ から 50℃ に上昇するまでのかくはん時間 T を用いて計算を行った。

3. 2 ステータ羽根枚数の影響

図4はステータ羽根枚数 S_n と熱変換効率 η との関係を示す。図5はステータ羽根枚数 S_n と入力仕事率 W_i ，出力仕事率 W_o と関係を示す。実験条件はロータ直径 240 mm，ロータとステータの羽根先端間隔 15 mm，ロータ回転数 400 rpm である。図からス

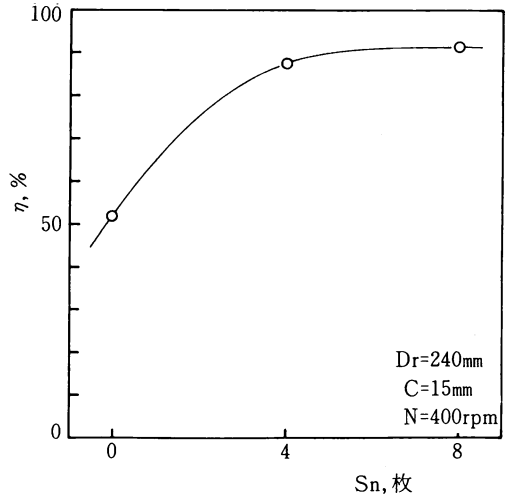


図4 ステータ羽根枚数と熱変換効率の関係

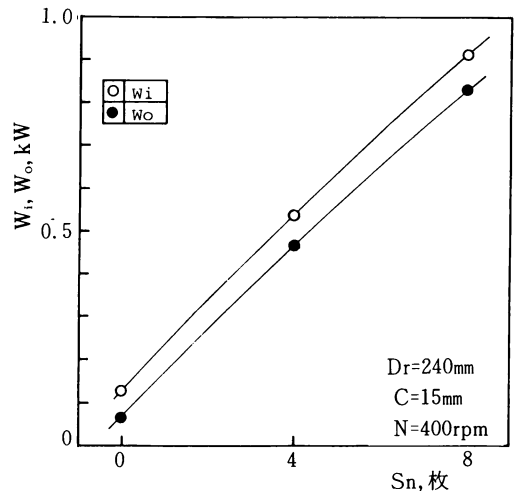


図5 ステータ羽根枚数と入力仕事率，出力仕事率の関係

テータ羽根枚数が増加するにつれて熱変換効率は高くなることがわかる。ステータ羽根がある場合とない場合とでは熱変換効率に大きな差が見られ，特に入力仕事率と出力仕事率については，ステータ羽根枚数を増すと直線関係で増加することからステータ羽根枚数により流動状態が大きく異なることが推定される。ステータ羽根のない場合，回転流の生長を妨げる要因が少なく吐出流の弱い回転流の状態にあると考えられる。ステータ羽根のある場合，タンク内壁に衝突し下方に流れた吐出流がその回転モーメントにより円周方向と半径方向の速度成分の合成ベクトルの流れとなり，

ステータ羽根に到達するに要する時間は、一定条件でステータ羽根間の円周距離に関係する。そして到達時間が長くなるにつれて回転流の生長が大きくなり吐出流の弱くなった流れの状態にあると考えられる。したがってステータ羽根枚数が増加するにつれて循環流の持続した流れになると思われる。以上のことから、流体かくはんによる熱変換はロータおよびステータの羽根内部ならびにロータとステータの間における流体の直線変位および回転変位により生じる粘性応力によって主に行われ、また粘性応力は回転流より吐出流をとまなう循環流に多く影響を受ける。そのため循環流の持続が熱変換効率に関係し、ステータ羽根枚数の増加につれて熱変換効率は高くなる。このことは、流体かくはんによる熱変換に寄与する流れは吐出流をとまなう循環流であり、循環流の持続にステータが有効であることを示している。しかしステータの羽根高さ、ロータ直径、ロータ回転数などの条件によっては、ステータ羽根枚数の増加とともにステータ羽根内部での渦運動が大きくなり、吐出流が妨げられて回転流が生長するために熱変換効率は増加せず、場合によっては減少することが考えられる。このことは今後検討する必要がある。

3. 3 ロータ直径の影響

図6はロータ直径とタンク内径の比（ロータ直径比） Dr/Dt と熱変換効率 η との関係を示す。図7はロータ直径比 Dr/Dt と入力仕事率 W_i 、出力仕事率 W_o との関係を示す。実験条件はステータ羽根枚数8枚、ロータとステータの羽根先端間隔15mm、ロータ回転数400rpmである。ロータ直径比が増加するにつれて熱変換効率は高くなるが、ロータ直径比0.96付近になると低下が見られる。これはロータ直径比の増加に対して、入力仕事率、出力仕事率は増加するが、ロータ直径比が0.92を過ぎると出力仕事率の増加割合が入力仕事率の増加割合と比較して急に減少するためである。ロータ回転数一定でロータ直径が増加するとロータの周速度が大きくなって、遠心力による吐出流は強くなり循環流が持続した流れとなるため熱変換効率が高くなると考える。ロータ直径比0.96の場合、タンク内壁とロータの間隔は5mmしかなく、タンク内壁に衝突して上方向に流れた吐出流がロータ縁を通過するには狭いために、その流れの多くがロータに妨げられてロータ羽根出口付近で大きな渦運動を生じ吐出流の弱められた流れとなる。したがって周速度と比

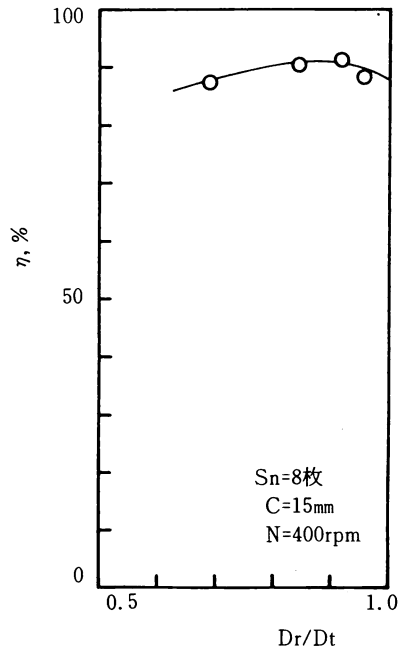


図6 ロータ直径比と熱変換効率の関係

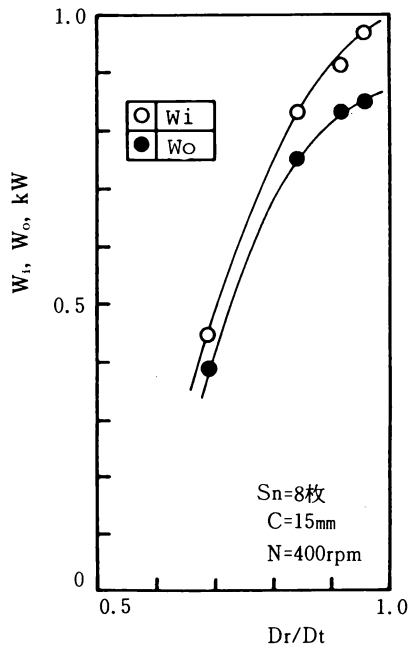


図7 ロータ直径比と入力仕事率、出力仕事率の関係

較して吐出流の弱い流れとなり、出力仕事が入力仕事と比較して小さくなるために熱変換効率が低下すると考える。以上のことより吐出流がタンク内壁に衝突し上下方向にわかれて、流れを妨げられないでロータ縁を通過することにより循環流を持続させて高い熱変換効率を得るためには吐出流の強さに対してロータとタンク内壁の間隔を効果的にとる必要がある。したがってロータ直径の大きさはタンク内径およびロータ回転数により制限されることが予想される。

3. 4 ロータ回転数の影響

図8はロータ回転数 N と熱変換効率 η との関係を示す。図9はロータ回転数 N と入力仕事率 W_i 、出力仕事率 W_o との関係を示す。実験条件はロータ直径 250 mm、ステータ羽根枚数 4 枚、ロータとステータの羽根先端間隔 15 mm である。ロータ回転数が増加するにつれて熱変換効率は高くなるが、ロータ回転数がほぼ 400 rpm 以上になると一定となる。しかし入力仕事率、出力仕事率はロータ回転数に対し幾分曲線的増加関係にある。ロータ直径一定でロータ回転数が増加するとロータの周速度が大きくなり、吐出流の強い流れとなるために熱変換効率は高くなる。ロータ回転数 500 rpm 付近の場合、吐出流の強さに対してロータとタンク内壁の間隔が狭いためにロータ付近で大きな

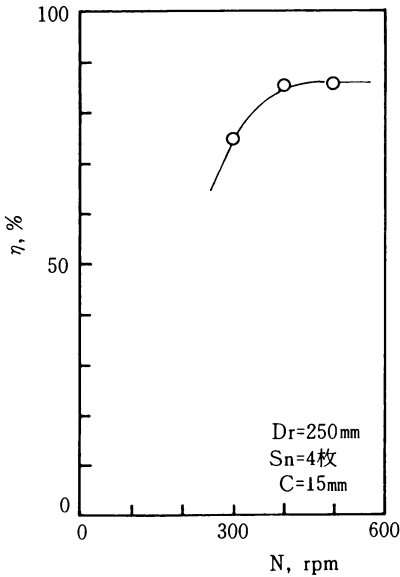


図8 ロータ回転数と熱変換効率の関係

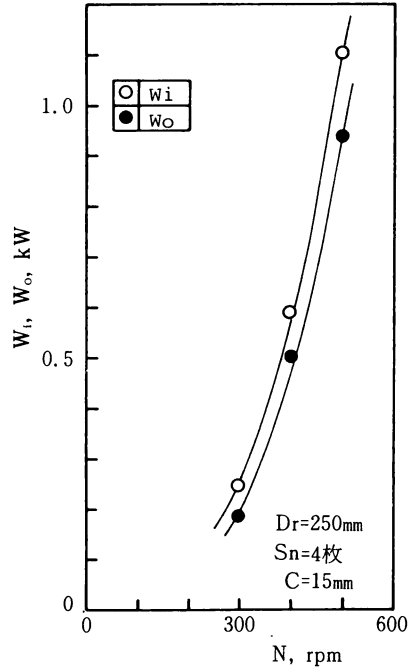


図9 ロータ回転数と入力仕事率、出力仕事率の関係

渦運動を生じ、またロータ羽根の背面でも渦運動を生じるために、ロータ回転数の増加ほど出力仕事は増加しないので熱変換効率が一定もしくは低下すると考えられる。したがってロータ回転数はロータ直径およびタンク内径の関係により限定されるであろう。

3. 5 ロータとステータの羽根先端間隔の影響

図10はロータとステータの羽根先端間隔とロータ直径の比（羽根間隔比） C/Dr と熱変換効率 η の関係を示す。図11は羽根間隔比 C/Dr と入力仕事率 W_i 、出力仕事率 W_o の関係を示す。実験条件はロータ直径 240 mm、ステータ羽根枚数 8 枚、ロータ回転数 400 rpm である。羽根間隔比に対する熱変換効率は、ほぼ一定である。しかし入力仕事率、出力仕事率は羽根間隔比が増加するにつれて低下している。吐出流の強さに対してロータとタンク内壁の間隔が効果的にとられる場合、羽根間隔比が増加するにつれて下方向の吐出流のステータ羽根に到達するに要する時間が長くなり、回転モーメントによる回転流の生長が大きくなるため吐出流が弱められた流れの状態になると考えられる。したがって入力仕事率および出力仕事率は羽根間隔比が増加するにつれて減少するが入力仕事率、出力

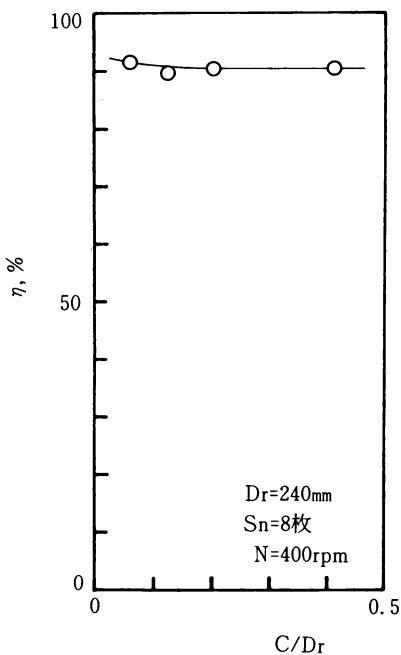


図10 羽根間隔比と熱変換効率の関係

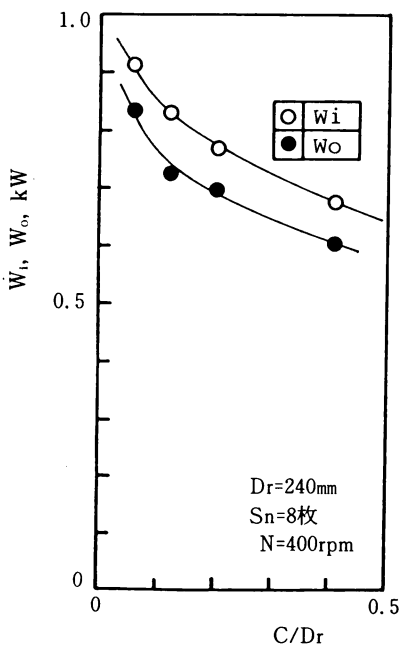


図11 羽根間隔比と入力仕事率, 出力仕事率の関係

仕事率の減少割合がほぼ同じであるため熱変換効率は高く、ほとんど一定であると考えられる。

4. 結 論

風力の熱エネルギー直接変換をする場合の最適熱変換効率条件を見いだすことを目的として、ステータ羽根枚数、ロータ直径、ロータ回転数、ロータとステータの羽根先端間隔などの影響を実験的に調べた。そして実験条件と熱変換効率の関係について考察を行い、次の結果を得た。

(1) かくはんによる熱変換に寄与する流れは、流体とロータの相対速度の小さい回転流ではなく、吐出流を伴う循環流である。

(2) ステータ羽根枚数、ロータとステータの羽根先端間隔の条件一定における入力仕事率、出力仕事率は周速度の増加につれて高くなる。吐出流はロータ回転による遠心力で生じるため周速度つまりロータ直径とロータ回転数が、かくはんによる熱変換の大きな要因となる。

(3) ステータ羽根枚数が増加するにつれて吐出流が優勢となるため熱変換効率は高くなる。しかし、この関係はステータ羽根高さ、ロータ直径、ロータ回転数などの条件により制限されると考えられ、今後の検討が必要である。

(4) ロータ直径およびロータ回転数が増加すると吐出流が強くなり、熱変換効率は高くなる。しかしこの関係はタンクの内径により限定されると考える。

(5) ロータとタンク内壁の間隔が吐出流の強さに対して効果的な場合、入力仕事率および出力仕事率は吐出流の強さに対して一定の関係にある。したがってロータとステータの羽根先端間隔の増減は熱変換効率にあまり影響を与えない。

おわりに本研究について助言いただいた井手英夫助手、実験に協力を得た学部卒業の梅元勝久、瓦剛己、吉見一郎の諸氏ならびに実験装置製作を担当された中央実験工場の各位に感謝の意を表します。

主な使用記号

C : ロータとステータの羽根先端間隔 (mm)
(Sn=0の場合ステータ羽根取付け板までの距離)

Dr : ロータ直径 (mm)

Dt : タンク内径 (mm)

- J_i : かくはんに要した仕事 (入力エネルギー) (kJ)
 J_o : かくはんにより熱変換された仕事 (出力エネルギー) (kJ)
 L : 液深さで水面からステータ羽根取付け板までの距離 (mm)
 M : かくはんトルク (Nm)
 N : ロータ回転数 (rpm)
 Rn : ロータ羽根枚数 (枚)
 Sn : ステータ羽根枚数 (枚)
 T : かくはん時間 (s)
 W_i : 入力仕事率 (kW)
 W_o : 出力仕事率 (kW)
 η : 熱変換効率 (%)

参考文献

- 1) 宮本邦男：風から熱への道，風力エネルギー，Vol. 2, № 2, 39-50 (1978)
 2) 木村壮三：農業における風力利用 (3) 加温，農耕と園芸，38巻，10号，211-213 (1983)
 3) 吉田直：風力-熱変換の一方法，応用物理学会九州支部講演会講演予稿集，Vol. 8, 21-24 (1982-12)
 4) 奥谷順一：養魚施設熱源への風力利用，第4回風力エネルギー利用に関するシンポジウム講演集，65-69 (1982-11)
 5) 泊 功：施設園芸への風力利用，第4回風力エネルギー利用に関するシンポジウム講演集，1-12 (1982-11)
 6) 喜多康雄：温室熱源等への風力利用，第4回風力エネルギー利用に関するシンポジウム講演集，58-64 (1982-11)
 7) 竹田邦彦：乱流攪拌槽内の流れとメカニズム，最近の化学工学 1966年，127-145 (1966)

1) 宮本邦男：風から熱への道，風力エネルギー，