往復流型空気タービンによる呼吸量計測に関する研究

亀谷 均*・高尾 学*・瀬戸口 俊明**

Study on the Respiration Measurement by Means of the Bi-directional Air Turbine

Hitoshi KAMETANI*, Manabu TAKAO* and Toshiaki SETOGUCHI**

The turbine flowmeter for the respiration measurement using bi-directional air turbine, which is suitable for wave energy conversion, is proposed and investigated experimentally by model testing. As a result, it is seems that the flow rate of reciprocating airflow can be obtained by the turbine flowmeter.

Key Words: respiration measurement, turbine flowmeter, respiration monitor, bi-directional air turbine

1. はじめに

睡眠時無呼吸症候群などの呼吸障害の治療では、患者の呼吸機能の評価を行なうため呼吸状態のモニタリングが必要で、特に呼吸運動の解析に対しては吸気呼気流量(以下、呼吸量と呼ぶ)の測定が重要である。呼吸量計測には、一般に熱線型流量計、細管を用いた差圧型流量計や超音波流量計などが使用されている^{1)~4)}。しかし、これらの流量計では、(1)水蒸気の結露や分泌物による細管の目詰まりや熱線の汚れが生じる、(2)気体の性質により熱線の熱伝導率や音速が変化することのため、正確な呼吸量計測には測定器の保守や高精度の解析装置を必要とし、測定の容易さやコストの面で欠点を有する。

一方、呼吸量の測定器の一つであるタービン流量計^{1),2)}では、タービンの回転数と流量が比例するため、回転数を測定し、その値と比例定数の積により流量が容易に得られることから、この方法による測定器が広く使用されている。しかし、従来のタービン流量計では、慣性モーメントの影響やトルク特性が気流方向に依存するため、非定常性の強い気流に対してはタービンが追従しない。したがって、呼吸パターンによっては大きな測定誤差が生じる。また、磁気センサあるいは歪ゲージをもちいた無侵襲による呼吸計測法^{5),6)}が開発されているが、これは呼吸数をモニターするもので呼吸量の定量化には至っていない。

ところで、波力発電に利用されている往復流型空気タービンは⁷⁾その幾何形状が回転中心面に対して対称で、トルク特性が気流方向に依存せず、往復気流中で常に同じ方向に回転する。また、このタービンのトルク特性が、気流速度と回転

速度の比、すなわち流量係数に強く依存するため、発電機と連結されていない無負荷状態では、流量係数の変化がタービンの加速度に大きく反映される。したがって、往復気流中で作動する本タービンの角速度と角加速度を測定することにより、気流方向やタービンの慣性モーメントに影響されない呼吸量計測が可能であると考えられる。しかし、本方法による呼吸量計測に関する研究はなされていない。

本研究では、呼吸量測定用センサとして往復流型空気タービンを利用した新しいタービン流量計を提案し、その製作を行なうとともに、本流量計の有効性を実験的に明らかにする。

2. 往復流型空気タービンによる呼吸量計測の概要

本研究で提案する新型のタービン流量計の概要を Fig. 1 に示す。本流量計では、往復流中で気流の方向に関係なくタービンが回転できるように、往復流型空気タービンを採用し、タービン特性に及ぼす呼吸による気流の乱れの影響を少なくするため、タービン前後に整流器を設置している。流量の決定方法については、ピックアップ、カウンタおよびコンピュータにより検出されるタービンの角速度 ω および角加速度 α を、既知のタービン特性曲線に照合することにより、流量が一義的に決定できると思われる。また、図に示すように、サーミスタなどの気流方向を特定するためのセンサを組合せることにより、呼吸状態の正確なセンシングが期待できる。

3. 実験装置と方法

実験装置は、往復気流発生装置、ノズルおよびタービン試

Fig. 1 Outline of flowmeter using bi-directional air turbine

* 松江工業高等専門学校 松江市西生馬町 14-4

* Department of Control Engineering, Matsue National College of Technology, Matsue

** 佐賀大学 佐賀市本庄町 1

** Department of Mechanical Engineering, Saga University, Saga

(Received April 1, 2002)

(Revised July 9, 2002)

Fig. 2 Test equipment

Fig. 3 Test section

Fig. 4 Turbine configuration

験装置で構成される。Fig. 2 に実験装置の概要を示す。直径 120 mm, 長さ 142 mm の円筒シリンダー内において, パルスモータにより 3 本のボールネジを駆動し, ピストンを往復運動させることにより往復気流が発生する。そして, ノズル(またはディフューザ, 絞り角: 10°)を通して, タービン試験装置内に往復気流を導く。なお, 本実験では, ピストン部からの空気漏れのないことが確認されたことから, 流量については, ピストンの断面積と速度の積により算出する。

Fig. 3 は, タービン試験装置の構造を示す。内径 20 mm, 長さ 200 mm のアクリルパイプの中央に往復流型タービンを配置し, タービン前後には軸受を兼ねた長さ 60 mm の整流器を設けた。また, タービンと軸受の摩擦を少なくするため, 回転軸の両端は針状に加工され, 整流器側面の穴とは点接触をなしている。タービン回転数の測定は, タービン翼端部分にレーザー (LD) を照射し, その反射光をフォトダイオード (PD) で受光することで行なった。その際, PD の出力は増幅および波形整形されカウンタで計数される。

供試タービンとしては, 波力発電用往復流型タービンの中で最も簡素な形状を有するウエルズタービン⁷⁾を採用した。本タービンの概要を Fig. 4 に示す。その仕様は, 翼弦長: 3.75 mm, 翼型: NACA 0020, 翼枚数: 10 枚, 翼高さ: 3.5

Fig. 5 Flow rate (a) square wave flow, (b) triangular wave flow

mm, 翼端直径: 19 mm, ハブ比: 0.6, 取付け角: 0° である。

本研究では, 周期 T , 最大流量 Q の矩形波 (Fig. 5(a)) および三角波状 (Fig. 5(b)) の流量変化を有する往復気流をタービン試験装置に発生させ, その際のタービンの角速度 ω および角加速度 α を測定することにより, タービンの応答特性を求めた。

4. 実験結果と考察

4.1 矩形波状往復流に対するタービンの応答特性

本タービン流量計における往復流型タービンの形状は, 通常のタービンに比べ極めて小さいため, タービンの挙動に及ぼすレイノルズ数や軸受における摩擦の影響が大きいと思われる。そこで, タービンが往復気流に対して静止状態から起動できるかどうかを確認するため, Fig. 5(a) に示す矩形波状の入力気流パターンを用いて, タービンの応答特性を調べた。ここで, 矩形波の周期を $T=4$ s とし, 最大流量については, その影響を調べるため $30 \leq Q \leq 405$ ml/s で実験を行なった。

タービンの応答特性の結果を, Fig. 6 に示す。最大流量が $Q \geq 67.5$ ml/s では, 約 3 周期で角速度 ω が安定状態に到達し, 短時間で起動することがわかる。しかし, $Q=30$ ml/s の場合には, タービンは起動していない。これは, 低流量のため, 軸受における摩擦が強く影響したものと考えられる。

つぎに, 上述の実験から最大流量 Q と安定状態でのタービンの角速度 Ω の関係を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。図より, タービンの角速度が流量に対して線形的に変化し, 流量の大きさがタービンの挙動に強く反映することが確認できる。

4.2 三角波状往復流に対するタービンの応答特性

実際の呼吸パターンを模擬した気流として Fig. 5(b) に示す三角波状に流量変化をする気流を用いて, タービンの応答

Fig. 6 Starting characteristics under square wave flow condition

Fig. 7 Turbine angular velocity versus flow rate

特性を調べた。ここで、周期および最大流量は、それぞれ $T=6$ s, $Q=395$ ml/s とした。Fig. 8 に流量 q , 角速度 ω , 角加速度 α と時間 t の関係を示す。図より、タービンの挙動は約 2 周期で準定常状態に達するとともに、 q の変化とともに ω および α も周期的に変化し、特に ω は q と同期していることがわかる。これは、本タービン流量計により、呼吸の周期および呼吸数の測定が可能であることを示している。

つぎに、角速度および角加速度の測定により、流量が一義的に決定できる可能性を調べるため、Fig. 8 のデータを次式のように定義される無次元角加速度 α^* および流量係数 ϕ に変換し、それらの特性曲線を Fig. 9 のように求めた。

$$\alpha^* = \alpha I / (\rho U_R^2 A_t r_R / 2) = \alpha I / \{ \rho (r_R \omega)^2 A_t r_R / 2 \} \quad (1)$$

$$\phi = v_a / U_R = (q / A_t) / (r_R \omega) \quad (2)$$

ここに、 A_t : タービン流路断面積、 I : タービン慣性モーメント、 r_R : 平均半径、 U_R : 平均半径におけるタービン周速度、 v_a : タービン流路断面平均軸流速度、 ρ : 空気密度である。また、図中の○および×は、それぞれ気流の増速および減速過程を示し、実線はすべてのデータに対する近似曲線を表わす。図より、全体的な傾向として α^* は ϕ とともに増加しており、既知の相互関係を用いることで、非定常流の流量がタービンの角速度および角加速度の値から一義的に得られる可能性を示している。しかし、増速および減速過程のデータが近似曲線を境界としてほぼ二分されており、ヒステリシス⁸⁾が生じているものと考えられる。したがって、正確な流量測定を行うためには、ヒステリシスの除去が必要であると思われる。

Fig. 8 Time series data for flow rate, angular velocity and angular acceleration

Fig. 9 Dimensionless angular acceleration versus flow coefficient

5. まとめ

呼吸量測定用センサとして往復流型空気タービンを利用した新しいタービン流量計を提案し、往復気流中でのタービン特性を実験的に明らかにした。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 本タービン流量計により、呼吸の周期および呼吸数の測定が可能である。
- (2) 既知の $\alpha^*-\phi$ 特性曲線を用いることにより、呼吸量のような非定常流の流量がタービンの角速度および角加速度から一義的に得られる可能性を示した。
- (3) 非定常流の正確な流量を測定するためには、 $\alpha^*-\phi$ 特性におけるヒステリシスの除去が必要である。

参考文献

- 1) 戸川達男: 気流計測, 総合臨床, **26**-6, 1172/1176 (1977)
- 2) 高橋, 佐々木: アドバンスドセンサハンドブック, 培風館, 692/697 (1994)
- 3) 伊藤, 木村: 呼吸流量センサ, 医科器械学, **55**-12, 621/625 (1985)
- 4) 杉山吉彦: 超音波による気流計測, 呼吸, **5**-6, 641/645 (1986)
- 5) 斉藤, 堀, 木竜: 磁気センサを用いた無意識呼吸心拍動検出装置の開発, 医用電子と生体工学, **38**-2, 102/110 (2000)
- 6) 田中正造: 歪ゲージを用いた呼吸及び心拍の無拘束無侵襲自動計測, 計測自動制御学会論文集, **36**-3, 227/233 (2000)
- 7) T. Setoguchi and M. Takao: State of Art on Self-Rectifying Air Turbines for Wave Energy Conversion, Proc. 4th Int. Conf. on Mechanical Eng., 117/126 (2001)
- 8) T. Setoguchi, M. Takao and K. Kaneko: Hysteresis on Wells Turbine Characteristics in Reciprocating Flow, J. of Rotating Machinery, **4**-1, 17/24 (1998)