152 気液ポンプの揚水原理のモデル解析

Modeling & Analysis of the Pumping Principle in Kieki Pump, or Air Mixed Water Pump

正 ○佐藤 建吉 (千葉大), 吉岡 健 (気液工学コンサルタント), 保坂 誠 (明協電機), 名取 佑二郎 (千葉大)

Kenkichi SATO, Graduate School of Engineering, Chiba University
Takeshi YOSHIOKA, Kieki Engng Consultant, Ltd.
Makoto HOSAKA, Meikyou Electric Co.
Yojiro NATORI, Chiba University

Key Words: pump, kieki-pump, air mixed water pump, monodzukuri, performance evaluation

1. はじめに

著者の一人、吉岡は「気液ポンプ」(登録商標)と自身が名付けた空気と液体とが共存して汲み上げるポンプを開発し、その普及に努めている。そのポンプの特徴は、①構造が簡単であり、②ポンプとして液体(ここでは水)を汲み上げることができるが、③その際、名前のように、液体の中に空気泡が混じり、ある場合は液体と空気を交互に圧送できることにある。そのため、④溶存酸素の多い水を湖沼底に送り込んだり、⑤空気の浮上時に湖沼の堆積汚泥を浮上捕集したりすることも可能である等も、特徴と言え、応用の可能性が広い。

保坂は、こうした特徴をもつ気液ポンプを自社の水道事業と関連付けて実用化を図るために試作機を造り、千葉県いすみ市の東ダムで、稼動実験を行った。さらに吉岡とともに、千葉大学内の池水の浄化を、佐藤・名取の協力で行っている。

しかし、「気液ポンプ」の揚水原理については、その概要は把握されているが、全般的に理解されていない現状にあり、吉岡は「工学書に記載されていないポンプ」と表現している。

そこで、本報では、気液ポンプを簡単にモデル化して揚水原理を解析し、揚水に関わるポンプ本体の大きさ・形状、回転数と動力、そして揚程、さらには揚水効率などについて検討することにした。

2. 気液ポンプの構造

図1に気液ポンプの構造を示す。また図2には外観写真を示す。これらのように、パイプを2〜3段に密巻きして、一端を流入口(吸込口)、他端を回転中心軸に取付け流出口(吐出口)として、ポンプ本体の主要部を構成している。これを支え回転させる軸、軸受、モータ、ロータリージョイントなどが付属している。ロータリージョイントは、回転する吐出口と固定されている吐出パイプを繋ぐ部品である。

図1のように気液ポンプは、ポンプ回転軸を水面よりも少し上部に位置づけて回転させると、吸込口が回転し水中に没している間に水を汲み、水面から出ている間は空気を取り込むことになる。この動作を回転とともに順次繰り返すことにより、水と空気を交互にパイプ内に取り込み、水の部分が弁となり空気を閉じ込めて、水と空気が分離して、ネジと同じように前方(後段)へ送り込むことができる。

3. 気液ポンプの揚水原理のモデル化

上の気液ポンプの揚水原理を次のように過程分けする。

- ① 吸込口からのパイプ内への水汲み【取込み】。
- ② 取込まれた水の巻体(ドラム)の回転(図3のように反時計回転の場合)につれた低段から高段パイプ巻体への水平移動【移動】。
- ③ 次第に高段側からのパイプ内圧力の上昇が起こり、パイプ内での水/空気界面の右側での上昇、左側での降下が起こる【水位変化】。

図1 気液ポンプの構造の概念図

図2 気液ポンプの外観写真

- ④ さらにドラムが回転すると、右側の水/空気界面が、同程度の差を積み上げた形で、低段側から後段側にいくにつれて、次第に上昇するようになる【圧力上昇】。
- ⑤ さらに継続回転により、右側の水が左側へパイプ巻体頂部を乗り越え(溢れ込み)が起こり、同時に空気の左側から右側への移動(逆流)が起こる【逆流】。
- ⑥ さらに回転進行で、以上の過程が起こるが、水や空気の移動は複雑に進行する【水位・圧力再調整】。

こうした揚水原理を理解するために模型モデルを用いて検討・考察を行った。その結果は、以下のようであった。

○吐出側が開いている場合（開口）

気液ポンプは、回転軸が水平の時、吐出側が開口しているときには、ドラムが回転によって水は高段に移動する。この時、パイプ内の水は、外部の水面と一致している。揚水という実用において、吐出側が開口していることはなく、通常は縦パイプや長い横パイプが吐出口に連結しているので、吐出側には圧力抵抗がある。

○吐出側が閉じられている場合（閉口）

この場合には、ドラムの駆動回転によりパイプ巻体に吸込口から水が流入する。水は、1段目、2段目、3段目と高段へ流入する。その時、水は、パイプ巻体の最頂部を乗り越える必要はなく、パイプ巻体の底部に水塊として留まっているだけでよい。しかし、水塊が高段に行くにつれ吐出側での抵抗が増し圧力上昇が起こる。

このため低回転速度である時には、パイプ巻体での水塊の水位分布は、図3のように、各段で平均水位差 ΔH の階段状になる。さらにドラムが継続して回転すると、圧力分布に、ばらつきが生じ水位分布は乱れが現れる。それは、水と空気の量的および、おそらく段毎の空気圧の調整のために、水と空気が最頂部を超えて移動して生じたものである。

回転速度が高くなると、各段での水塊が最頂部直前までに達し、次に上述の量的・空気圧の調整のために、水と空気が最頂部を超えて移動する。この移動は、高段にはなく低段、つまり吸込口側に移動する。それは、水の逆流である。この現象は、高速回転において起こりやすい（後述）。

図3 パイプ巻体内の水位の変化

4. 揚水原理のモデル解析

気液ポンプでは、駆動回転させることが必須でありそのトルク・動力の推算は重要である。そのための必要なトルク・動力は、おもに次の四つになる。

- a) ドラムを回転させるためのトルクに対する動力： P_{rot}
- b) 各段のパイプ巻体内での【水位変化】（これが吐出揚程（ H ）に対応する圧力（ $p = \rho g \Delta h$ ））による左右側でのアンバランスによるトルク P_{head} に対抗して回転させる動力： P_{head}
- c) ドラムの下部が水中に浸かり回転することによる水の粘性抵抗に打ち勝つためのトルク T_{res} に対する動力： P_{res}
- d) その他、軸受・軸・ロータリージョイント等の接触抵抗（機械損失）トルクに対する動力： P_{loss}

以上の合計は、軸動力 $P = P_{rot} + P_{head} + P_{res} + P_{loss}$ となる。

その見積りにおいては、以下のように諸量を定めた。

パイプ巻体をドラムに巻いた時の平均直径 D_m [m]、パイプ巻体の内径 d [m]、パイプ巻体の段数 m [段]、パイプ巻体の層数 n [層]、パイプ巻体の水浸長さ L [m]、パイプ巻体各段での水位差 ΔH [m]、揚程 H [m]、吐出口での圧力 p [Pa]、水の比重量 γ [N/m³]、回転速度 N [rpm]、流量 Q [m³/s] (l/min)、トルク T [Nm]、軸動力 P [kW]、水ポンプ効率 η 。

- a)は、起動時に大きなトルクであり、定常回転時は小さい。
- b)は、最も支配的なトルク、動力であり、 $T_{rot} = F \cdot D_m / 2$ に基づき計算した。
- c)は、ニュートンの粘性法則 $F = \mu \Delta u / \Delta y$ に従い、ドラム下部で回転するパイプ周りの粘性抵抗と、ドラム側板の回転による粘性抵抗を求め、トルク T_{res} を計算した。
- d)は、機械損失であり、全体の9%の動力を加算した。

一部の関係式を示せば、以下のようである。

$$Q = \pi d^2 / 4 \cdot L \cdot N / 60 \quad : H = m \Delta H = p / \gamma \quad : P = \gamma Q H / \eta$$

○見積り例

実際に稼働している気液ポンプの条件で、評価を行った。諸量が $D_m = 0.37$ m, $d = 0.032$ m, $m = 2$, $n = 7$, $L = 0.46$ m, $\Delta H = 0.37$ m, $\gamma = 9800$ N/m³, $N = 40$ rpm であるとき、流量 $Q = 16.6$ l/min, 最大揚程 $H = 5.0$ m, トルク $T = 12.2$ Nm, 軸動力 $P = 35.3$ W, 水ポンプ効率 $\eta = 40.0\%$ が得られた。これらは、実際の測定値を見積り、評価している。

○限界回転速度

上記の見積りにおいては、回転速度が大きくなると流量 Q や動力 P が増加するが、前述の⑤の【逆流】現象が生じて、流量は増えないのが実際である。したがって、実用上の限界回転速度を設定したほうが良い。その設定は、水塊の大きさによるが、パイプの半分に水塊が成長したときを考え、その全てが逆流するときの条件式は次式で与えられる。

衝撃的なトルク変動により水塊が逆流するためには、重力以上の接線力が生じた時であり、これを等置すると、

$MR \cdot d\omega / dt = Mg$ となる。これから $d\omega / dt = g / R \cdots (i)$ が得られる。その時の角加速度の値は、 $g / R = 9.8 / 0.185 = 53.0$ [1/s²] である。一方、水塊に作用している圧力差も次の大きさのトルクを作るので、これも逆流に貢献する。その関係式は、

$I \cdot d\omega / dt = \gamma \Delta H \cdot \pi d^2 / 4 \cdot R = 2 \pi \cdot Mg \cdot R$ で、慣性モーメントは $I = MR^2$ であるので、 $d\omega / dt = 2 \pi \cdot (g / R) \cdots (ii)$ が得られる。両者の差 (i)-(ii) の角加速度をつくる衝撃的なトルクが、追加的に与えられると逆流が生じる。その時の角加速度の値は、 $(\pi - 2) \cdot \pi \cdot g / R = (\pi - 2) / \pi \cdot 9.8 / 0.185 = 19.2$ [1/s²] である。

半周の水塊が一度に逆流する最も激しい場合には、回転角の式は、上で導出した角加速度を用いると、

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + 0.5 \times 53.0 t^2 \text{ と与えられるので、ここで、}$$

$\theta = \pi$, $\theta_0 = 0$ において、この方程式から ω_0 を求めると逆流開始時の角速度が得られる。ただし逆流を完了するまでの時間長さによって ω_0 (すなわち回転速度 N_0) が異なる。ここでは $t = 0.2$ [sec] として求めると、 $\omega_0 = 5.1$ [1/s²] となる。その時の回転速度は、 $N_0 = 48.7$ [rpm] となる。これを、臨界回転速度の例として規定できる。

この速度以上の回転速度では、このような大掛かりな逆流現象が起きやすいことになり、これが起こると、流量は低下し、ポンプ機能が弱くなる。ただし、臨界回転数は、逆流する水塊の大きさや時間長さの基準により異なる。高速回転すると逆流が起きやすいことは、確かなことである。

5. おわりに

以上のように、気液ポンプの揚水原理について、簡単な模型実験と力学的推察によって、性能を評価する試みを、おもに水の挙動について行った。この解析では、パイプ各段における水位変化と、回転速度によるパイプ内水塊の挙動に注目し、揚水原理と軸動力、揚水特性について検討した。軸動力のうち、水動力（ $= \gamma Q H$: 流量 $\times$ 揚程）が主要に関係している。ポンプ効率は40%程度であった。今後、個別要素法などを適用して、実際の水流と空気層の圧送の様子をシミュレーションすることを考えている。（文献省略）