

流体過渡現象解析プログラム（TRAP III）による 軸流ポンプ始動トルク特性のシミュレーション

滝田 茂雄* 新井 和敏*
江藤 文宣* 梅村 堅一**

Simulation of Axial Flow Pump Startup Torque Characteristics by Fluid Transient Analysis Program (TRAP III)

by Shigeo TAKITA, Kazutoshi ARAI, Fuminori ETO, & Kenichi UMEMURA

The torque characteristics during an axial flow pump startup, focusing on the operating point transition of a not fully water-filled startup, were studied. Comparison was made among numerical results of model case analysis, actual in-site data, and analytical data. TRAP III, a fluid transient analysis program developed by Ebara, was used for the simulation. The effectiveness of this program was confirmed and the use of this method of evaluating the torque characteristics of axial flow pumps is looked forward to.

Keywords: Axial flow pump, Startup torque, one-dimensional unsteady flow analysis, Not fully water-filled startup pipe, Siphon, Inertial effect coefficient, Complete characteristics, Static friction torque, Adding mass of water, Locus of operating point

1. はじめに

軸流ポンプは、締切軸動力が大きくなる特性を有しており、始動方法には注意を払う必要がある。特に、サイホン機場では、吐出し配管が充水されておらず実揚程 0 m の状態から始動してサイホン形成過程を経て定常運転状態へ移行するため、実際の始動トルク特性を評価することが難しい。

今回、軸流ポンプの始動トルク特性を評価するためにモデルケースについて数値的なケーススタディを行い、ポンプ始動トルクに与える影響要因について把握することができた。更に、実機場で実測したデータと解析結果を比較して検討を行った。いずれも解析には、当社製の流体過渡現象解析プログラム（当社略称 TRAP III、以下 TRAP III と略す）を用いている。

始動トルク特性の実測値と軸流ポンプ始動時の運転点移行の実態に着目した解析値がよく一致し、始動トルク

特性の適正評価方法として期待できる結果を得たので報告する。

2. 流体過渡現象解析プログラム（TRAP III）

ここで、TRAP III について簡単に紹介する。

ステーションと呼ぶポンプ設備を構成するポンプ、バルブ、水槽などの機器をブロック化したモデルが用意されており、そのステーションや配管を接続して全体モデルを組み上げる。各ステーションで初期条件、境界条件を設定して、容易に次元非定常解析を行うことができる。計算の基礎となっている手法は特性曲線法である。また、当社製ポンプの完全特性や各種バルブ特性などいろいろな機器特性がデータベース化されており、精度のよい解析が行えるとともに、用意された標準関数やユーザが工夫して作成した関数を組み込むことにより様々な事象について検討を行うことができる。

当社には TRAP III による豊富な解析あるいは計算実績と実験やフィールド試験による検証実績があり、TRAP III は水撃検討などに日常的に使用されている。パイプライン系の流体過渡現象における安全性・健全性評価のほか、流体輸送系の種々の機器の動作や制御の事象において挙動説明や応答性の解析も可能で、広範囲の検

* 風水力機械カンパニー 社会システム事業統括部 技術室
流体解析技術グループ

* 同 技術・建設統括部 社会システムプロジェクト室 第一設計グループ

討に適用できる。

今回の検討では、TRAP IIIによって解析モデルを作成して、データベースから今回対象の軸流ポンプに相当する比速度Nsの完全特性、原動機トルクテーブル、原動機始動方式の関数を設定し、ポンプ始動トルクのシミュレーションを行った。

3. モデルによるケーススタディ

満水始動のとき軸流ポンプは締切始動トルクが大きくなる特性を有しているため、始動途中に原動機にとって厳しいトルク領域がある。

一方、実際の軸流ポンプ機場では、吐出し配管が充水されておらず、実揚程0 mの状態から始動してサイホン形成過程を経て定常運転状態へ移行する。実揚程0 mの状態から始動する場合と満水始動する場合とで運転点の軌跡を比較すると図1のように想定される。

始動トルク特性に与える各パラメータの影響を考察するため、まず、図2に示す単純なモデルでケーススタディを行った。

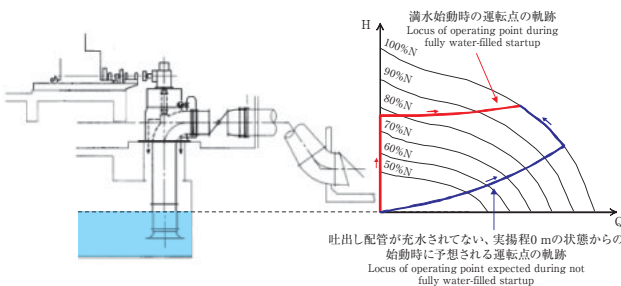


図1 軸流ポンプ始動時の運転点の軌跡

Fig. 1 Locus of operating point during axial flow pump startup

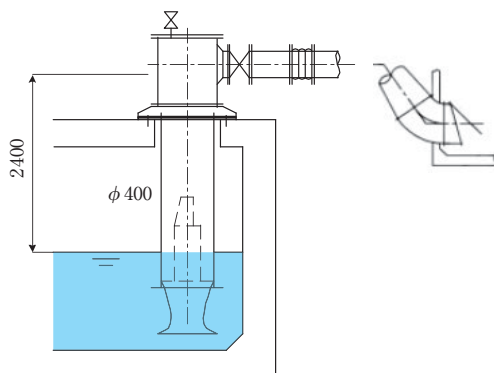


図2 モデルケース
Fig. 2 Model case

3-1 モデル

満水始動のモデルは、吸込水槽、ポンプ、吐出し配管、フラップ弁、吐出し水槽を単に接続し、吸込水槽、吐出し水槽を所定の初期水位としている。

吐出し配管が充水されてない実揚程0 mの状態から始動するモデルは、吐出し側の始動時の水位は吸込水槽水位に合わせており、堰のモデルを組み込み満水後吐出し水槽へ流れるようにしている。

始動トルク特性には、慣性効果係数 GD^2 (以下、 GD^2 と略す) の条件が大きく影響することから、モデル標準値と標準値以上の値5とおりの計6とおりについてケーススタディを行った。満水始動の解析は標準値についてだけ行った。 GD^2 の条件により、100%回転速度へ到達する始動所要時間が変わることとなる。

3-2 モデルにおける解析結果

解析結果を図3及び図4に示す。

図3は、始動時の水の慣性の影響を考察するため、ポンプ直後に水のボリュームを見込み水の慣性を付加した場合である。図4は、水の慣性を付加しない場合である。解析において配管損失は無視している。図3、4各々で同じように GD^2 の条件を変えて解析している。

図3、4の各々で (1) が $Q-H$ 特性を描いた運転点の軌跡であり、(2) が電動機のすべりとトルクの関係を描いた軌跡である。 GD^2 の違いによるケーススタディについて、 $1/K$ という指標にてまとめている。 K は慣性係数であり次式で示される。

$$K = \frac{375 \times T_0}{GD^2 \times N_0} \dots \dots \dots (1)$$

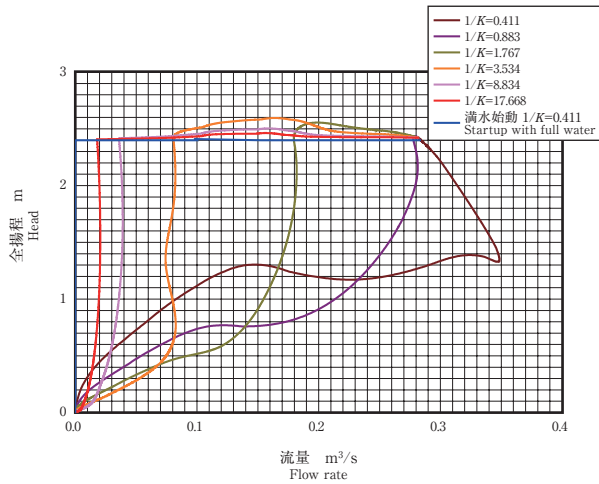
ここに、 T_0 及び N_0 は計算における定格トルク及び定格回転速度を示す。原動機はかご型電動機で計算に用いた電動機トルクも併記している。

図3と図4とも、 $Q-H$ 特性を見ると、ポンプ始動時に GD^2 が大きい、すなわち、始動所要時間が長いほど小流量での揚程の立ち上がりが大きなかう配をもって定格点へ移行する運転点の軌跡を描き、満水始動の状況に近づく。

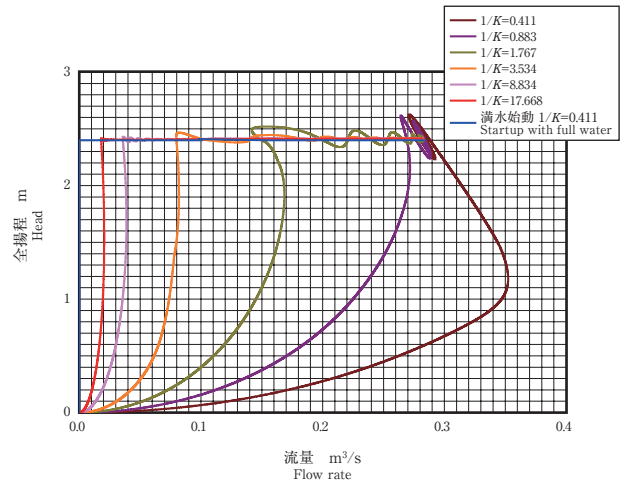
一方、 GD^2 が小さい、すなわち、始動所要時間が短いほど揚程の立ち上がり小さくゆるやかなこ配で速やかに大流量側へ移行した後、定格点へ移行する運転点の軌跡を描いている。

始動トルク特性を見ると、 GD^2 小 (始動所要時間小) の場合、ポンプトルクが満水始動のトルクカーブよりも下回っており、 GD^2 大 (始動所要時間大) の場合、トルクの変曲点の見られる満水始動に近い挙動を示している。

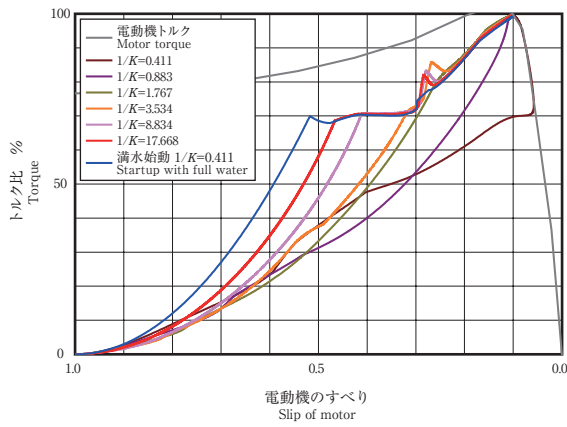
図3と図4を比較すると、 GD^2 が小さい場合の $Q-H$ 特



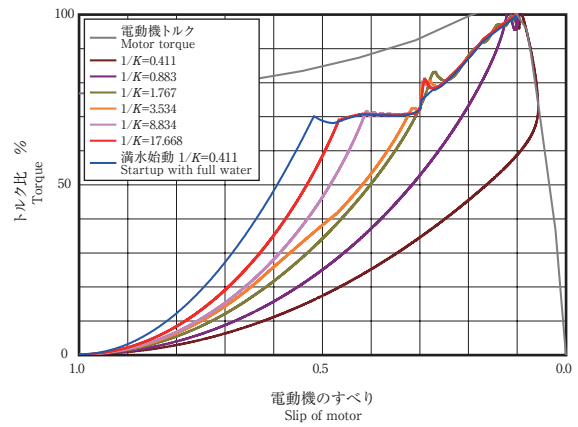
(1) $Q-H$ 特性
Characteristic of $Q-H$



(1) $Q-H$ 特性
Characteristic of $Q-H$



(2) 始動トルク特性
Characteristic of startup torque



(2) 始動トルク特性
Characteristic of startup torque

図3 運転点の軌跡 (水の慣性を付加した解析結果)
Fig. 3 Locus of operating point (Analysis result considering inertia of water)

図4 運転点の軌跡 (水の慣性を付加しない解析結果)
Fig. 4 Locus of operating point (Analysis result not considering inertia of water)

性の運転点の軌跡は水の慣性を付加した図3の方が、途中揚程が大きく盛り上がっており、これにより始動トルクも途中大きくなっている。これは、水の慣性のため、流体を加速するトルクが必要になったためである¹⁾。ただし、ある GD^2 以上 (ある K 値以下) では計算値がほぼ一致し、水の慣性の影響は無視できることが分かる。

なお、計算では、静止摩擦の影響を考慮しておらず、実際の回転速度は、計算結果より幾分緩やかに増加していくと考えられる。また、図3 (1)、図4 (1) にみられる管頂実揚程に到達後の途中の揚程の変動は、解析上のモデルの影響と考えられるが、本計算の目的は GD^2 の影響のケーススタディであり、その傾向はよくとらえるこ

とができていると考える。

3-3 始動特性に与える影響

GD^2 の大小、すなわち、始動所要時間の長短による始動特性の変化は、満管到達前に全速に到達するか、加速途中で満管になるかである。模式的に表すと図5のようにまとめることができる。

全速到達前に満管となる場合が①で、満水始動に近い状態となる。

全速到達後に満管となる②の場合は、満水状態による計画トルクをポンプ始動トルクが下回ることとなる。両者の時間が一致する場合には、③のように設計運転点に向けて滑らかに移行する。

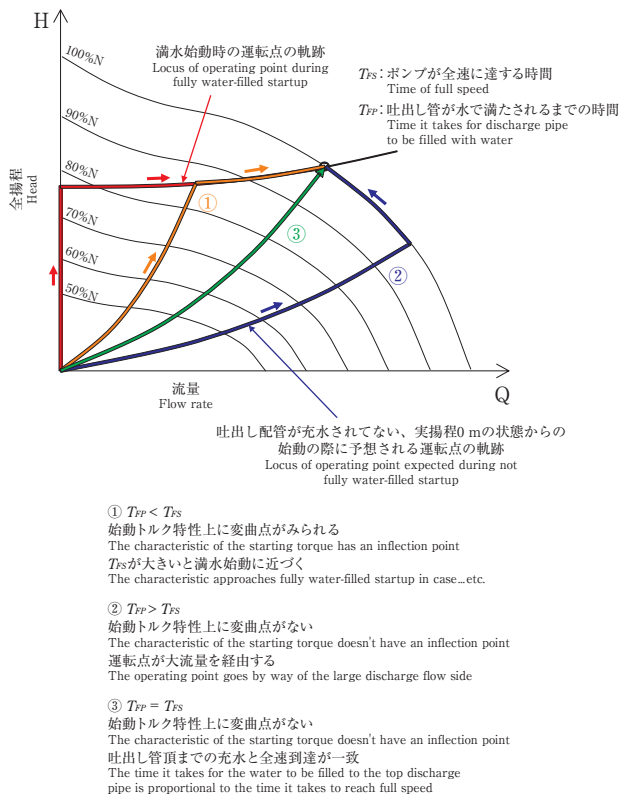


図5 始動時間と始動特性の関係

Fig. 5 Relation between startup time and startup characteristic

以上の傾向は、吸込水位から管頂高までの吐出し管長 (L寸) の影響も同様と考えられ、吸込水位によっても変化することとなる。

つまり、軸流ポンプ機場におけるポンプ始動トルク特性は、吐出し管頂までの満水時間に対する全速到達時間の相対的な大きさにより異なり、慣性効果係数 GD^2 、吐出し管口径と管頂までの吐出し管長、始動時の吸込水位の条件により大きく変化する。

なお、(2) 式によるポンプ始動時間の概算、及びその時間での吐出し量と吐出し管内の水位変化による運転点移行を概算することが、実運転点を考慮した始動トルク特性が図5の①、②、③のどの傾向になるか予想を立てる上で参考となる。

$$t = \frac{\sum GD^2 \times N}{375 \times T_a} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 N は回転速度 (min^{-1})、 T_a は平均加速トルク ($\text{kgf}\cdot\text{m}$) である。

4. 実機データとの比較

4-1 検討対象の実機特性

実機は口径3600 mmの軸流ポンプの典型的なサイホン機場で、原動機は始動方式が二次金属抵抗制御の巻線形電動機である。なお、実測時の吸込水位は設計水位より高く、実測時のサイホン吐出し管頂までのレベル差は設計点に対し約83%程度である。また、今回の検討条件では $1/K \approx 3.6$ である。

実測した時系列変化を図6に示す。サイホン形成過程へ入る前にポンプ起動から約23秒ほどで100%回転速度に到達しポンプ始動完了となっているが、始動直後約4秒程度で80%回転速度に到達し、その後緩やかに100%回転速度へ到達している。図6(2)が始動後25秒経過

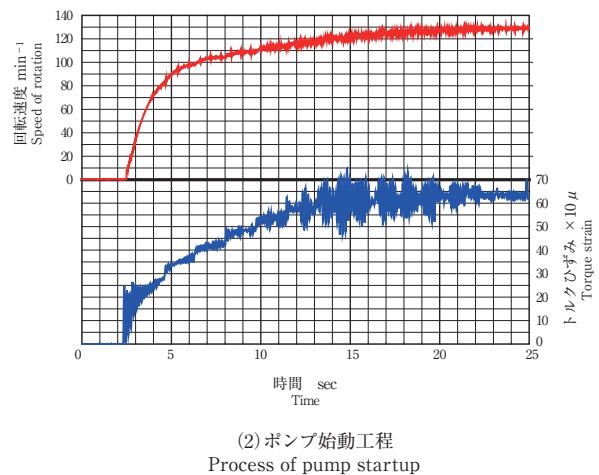
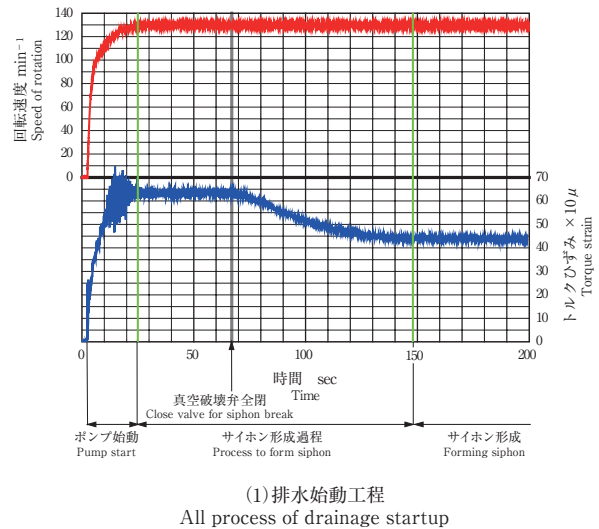


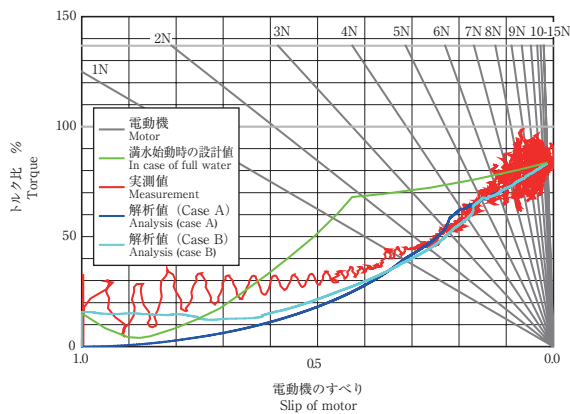
図6 実測値
Fig. 6 Measurement result

でのポンプ始動行程を示した図であり、二次金属抵抗のノッチ切り替えにより増速している様子が分かる。

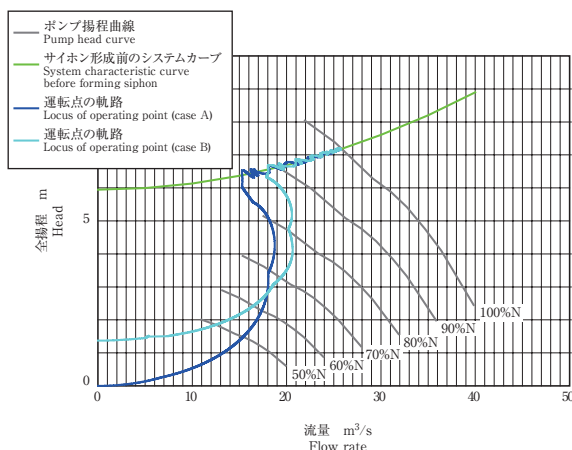
4-2 解析結果と実データとの比較

解析では、ポンプ完全特性のデータベース中で今回対象の軸流ポンプに相当する比速度 N_s ($=1600$) の完全特性を用いた。また電動機始動トルク特性における二次金属抵抗制御始動方式の特性を外部関数により定義して、始動後25秒経過までの範囲について始動トルク特性の解析を行った。

電動機のすべりとトルクの関係における実測値と解析値の比較を、ポンプ始動トルク特性（満水始動での設計値）と電動機始動トルク特性（設計値）を重ねて図7の(1)に示す。図7中凡例に示すA, Bは解析を行った以下の2ケースを示している。



(1) 始動トルク特性
Characteristic of startup torque



(2) Q-H特性
Characteristic of Q-H

図7 実測値と解析値の運転点の軌跡と比較

Fig. 7 Comparison between measurement value and analysis values in locus of operating point

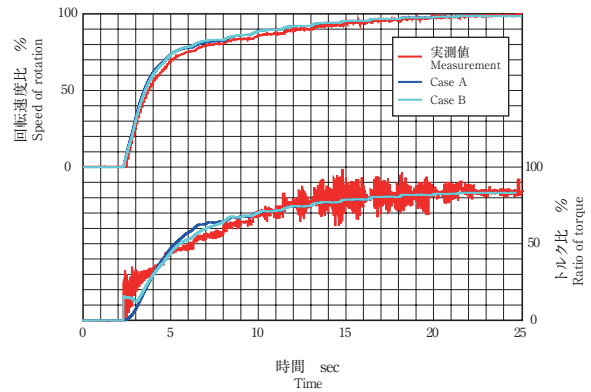


図8 実測値と解析値の時系列比較

Fig. 8 Comparison in time trends between measurement and analysis values

Case A. 静止摩擦トルクを考慮していない

Case B. 始動時に静止摩擦トルクに相当する軸動力が必要となるような実揚程を付加

実測データでは、満水始動での始動トルク設計値にあるような顕著な変曲点は見られず、満水始動のポンプ始動トルク曲線よりも下回っている。

解析結果も実測データと同様に、いずれも顕著な変曲点は見られず、実測データと同じ傾向であり、特に、回転速度が70%付近以降はいずれの解析結果も実測データとよく合っている。

Case Aにおける回転速度70%付近までの誤差は最初に静止状態を離脱する静止摩擦トルクの影響などメカニカル上の考慮が不十分であることなどに起因した誤差である。これに対し、静止摩擦トルクの影響に相当する初期実揚程を付加した解析結果 (Case B) は全体として傾向がよく再現できている。

図7(2)のQ-H特性における運転点の軌跡の解析結果を見ると、前述したモデルのケーススタディによる図3, 4において実機条件の $1/K$ の値とほぼ同じ $1/K=3.534$ の場合に近いものとなっている。

実機場計測データと解析結果の時系列的な比較として回転速度とトルクについて図8に示す。いずれの解析結果も実測データとよく合っている。

5. まとめ

今回のケーススタディにより、軸流ポンプ機場における実際の運転点の軌跡に基づいた始動時の挙動をTRAP IIIによって解析し、ポンプ始動トルクに大きく影響する GD^2 の大きさと、吐出し配管が充水されてなく実揚程0 m

の状態からの始動における運転点の軌跡・ポンプ始動トルク曲線の関係を求めた。

更に、実機データとの比較照合では解析値が実測値によく一致し、吐出し配管が充水されておらず実揚程0 mの状態からの始動における軸流ポンプの始動トルク特性をTRAP IIIによって精度よく評価できることが分かった。

慣性効果係数 GD^2 、吐出し管口径と管頂までの吐出し管長、始動時の吸込水位の条件等のパラメータを入力す

ることで、軸流ポンプの始動トルク特性を解析し適正評価する方法として本シミュレーションが活用されることを期待する。

参考文献

- 1) 斎藤:ポンプ始動時の過渡特性-圧力, 吐出し量の動的応答-, エバラ時報, No.116 (1981-4).

