インデューサ付遠心ポンプの吸込性能の予測*

田原 晴 男**, 真 鍋 明***
岩 崎 仁†, 中 村 誠**

Prediction of the Suction Performance of a Centrifugal Pump with an Inducer

by Haruo TAHARA, Akira MANABE,
Hitoshi IWASAKI, and Makoto NAKAMURA

The required NPSH (net positive suction head) of a pump with an inducer is determined by the suction and total head performance of the inducer and the suction performance of the pump. The authors have indicated that the influence of the performance mentioned above on suction performance in combined operations depends on the pump discharge. The operating discharge range of the pump with an inducer is divided into three parts, in which the total head decrease occurs in the inducer and/or pump sections.

In this report, the influence of the suction performance of the inducer and pump on suction performance in combined operations is investigated, and a method is suggested to predict the suction performance of the centrifugal pump with an inducer over the whole operating discharge range. The predicted results are compared with the results obtained experimentally.

Key Words: Hydraulic machine, Centrifugal pump, Inducer, Suction performance, Required NPSH

1. 結 言

インデューサの取付けは遠心ポンプの吸込性能を改善するために有効な方策であるといわれており、インデューサ単体の吸込性能^{(1)~(3)}、インデューサ付ポンプの吸込性能に関する研究^{(4)~(6)}は多数報告されている。しかし、遠心ポンプにインデューサの取付けを計画するときには、両者の単体性能から組合せ状態における吸込性能を予測することが望ましいが、この予測法については Stripling⁽⁷⁾、高松ら⁽⁸⁾の研究の外にはあまり報告されていない。

組合せ状態の吸込性能すなわち総合必要 NPSH と流量との関係は、インデューサの全揚程、インデューサの吸込性能、遠心ポンプの吸込性能の三つの要素によって決まり、組合せ状態の吸込性能を決定する際にこれら三つの要素が果たす役割は、それらの相互関係によって決まる。著者らは、すでに入口角と出口角の異なるインデューサを用いた実験結果から、流量によ

ってそれぞれの役割が異なることを示した⁽⁹⁾。それぞれの役割の違いによって流量範囲は三つの領域に分割され、それぞれの領域では揚程降下がインデューサ、遠心ポンプのいずれかまたはその両方において発生する。

本論文は、インデューサの全揚程、インデューサの吸込性能、遠心ポンプの吸込性能の三つの要素の流量特性から、それぞれの要素が組合せ状態の必要 NPSH を決定する役割を求め、その結果を用いてインデューサ付遠心ポンプの吸込性能を全流量域にわたって予測する方法について述べたものである。すでに報告した実験⁽⁹⁾によって求められた組合せ状態の吸込性能と予測された吸込性能とを比較し検討した結果についても述べる。

2. 吸込性能を決定する
インデューサとポンプの役割

インデューサ付遠心ポンプの必要 NPSH は、その総合全揚程が 3% 降下したときの NPSH である。この 3% の揚程降下は

- (1) インデューサ部のみで発生する場合
- (2) ポンプ部のみで発生する場合
- (3) インデューサ部とポンプ部の両方で発生し、

* 昭和 60 年 10 月 1 日 第 63 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 3 月 29 日。

** 正員、筑波大学構造工学系 (〒305 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1)。

*** 正員、筑波大学大学院。

† 学生員、筑波大学大学院。

‡ 筑波大学。

その和が総合全揚程の3%になる場合の三つのおりの場合が考えられる。すでに報告したように⁽⁹⁾、組合せ状態の必要NPSHを決定する揚程降下の発生状況を、これら三つの場合に分類し、それらに対応する流量の領域を

- (1) インデューサ支配領域
- (2) ポンプ支配領域
- (3) 遷移領域

と呼ぶことにする。各流量領域におけるインデューサとポンプの吸込性能の関係および総合吸込性能を決定するポンプとインデューサの役割は次のとおりである。

- (1) インデューサ支配領域 インデューサの全揚程が十分高く、この領域では式(1)が成立する。

$$(H_{SV})_{ID3} + (H)_{ID3} > (H_{SV})_{MP0} \dots\dots\dots (1)$$

この領域では3%の揚程降下はすべてインデューサ部で発生する。ここで $(H_{SV})_{ID}$ 、 $(H_{SV})_{MP}$ 、 $(H)_{ID}$ は、インデューサ、遠心ポンプの必要NPSHおよびインデューサの全揚程を示し、添字の3または0は必要NPSHを決める揚程の降下量を総合全揚程の3%または0%としたことを示す。組合せ状態の必要NPSH $(H_{SV})_{MP+ID3}$ は式(2)により表される。

$$(H_{SV})_{MP+ID3} = (H_{SV})_{ID3} \dots\dots\dots (2)$$

- (2) ポンプ支配領域 インデューサの全揚程の高さが十分でない場合で

$$(H_{SV})_{ID0} + (H)_{ID0} < (H_{SV})_{MP3} \dots\dots\dots (3)$$

が成立する場合である。3%の揚程降下はすべてポンプ部で発生し、総合必要NPSHは式(4)により表される。

$$(H_{SV})_{MP+ID3} = (H_{SV})_{MP3} - (H)_{ID0} \dots\dots\dots (4)$$

- (3) 遷移領域 この領域は式(5)の関係が成立する場合である。

$$\left. \begin{aligned} (H_{SV})_{ID3} + (H)_{ID3} < (H_{SV})_{MP0} \\ (H_{SV})_{ID0} + (H)_{ID0} > (H_{SV})_{MP3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

この場合の揚程降下は、インデューサ部とポンプ部の両方で発生する。そこで、この場合にインデューサ部とポンプ部で、総合全揚程のそれぞれX%、Y%の揚

程降下があったとすると、X%に対応するインデューサの必要NPSH $(H_{SV})_{IDX}$ とY%に対応する遠心ポンプの必要NPSH $(H_{SV})_{MPY}$ との関係は、式(6)および(7)により表される。

$$(H_{SV})_{IDX} + (H)_{IDX} = (H_{SV})_{MPY} \dots\dots\dots (6)$$

$$X + Y = 3 \quad (0 \leq X \leq 3) \dots\dots\dots (7)$$

このときの総合必要NPSHは、式(8)で表される。

$$(H_{SV})_{MP+ID3} = (H_{SV})_{MPY} - (H)_{IDX} \dots\dots\dots (8)$$

図1は、例として入口角と出口角がいずれも約12°のインデューサを遠心ポンプと組合せた場合について流量領域が上述の三つの領域に分割されることを示したものである。ここで、 $F(X, Y)$ は式(9)により定義された関数である。

$$F(X, Y) = (H_{SV})_{MPY} - (H)_{IDX} \dots\dots\dots (9)$$

図1には実験の結果から得られた総合必要NPSH $(H_{SV})_{MP+ID3}$ および $X=3, 2, 1, 0\%$ に対応する $F(X, Y)$ と流量比 Φ (=流量/規定流量)との関係を示してある。 $F(X, Y)$ と総合必要NPSHとの交点④、③、②、①はインデューサにおける揚程降下がそれぞれ3, 2, 1, 0%となる流量比を示す。④が示す流量比以下の領域はインデューサ支配領域、①が示す流量比以上の領域はポンプ支配領域であり、①④間は遷移領域である。

なお本章では総合必要NPSHとして総合全揚程の降下が3%の場合について述べたが、総合必要NPSHを揚程降下が2, 1, 0%の場合に対応して定義し、それぞれの場合について実験結果から総合必要NPSH曲線と $F(X, Y)$ 曲線を求めれば、同様の手続きによりインデューサとポンプの役割を決定する領域を区分することができる。

3. インデューサの全揚程と吸込性能

検討に使用したインデューサの諸元を表1に示す。表1中に示すインデューサの名称は、入口角および出口角を示し、例えばID(12-8)は、入口角約12°、出口角約8°のインデューサであることを意味する。遠心ポンプは、吐出し量1.6 m³/min、全揚程30 m、軸動力約10 kWの単段の遠心ポンプであり、実験装置、実

図1 流量領域の分割(MP+ID(12-12))

表1 インデューサ主要諸元

Inducer	ID(12-12)	ID(12-8)	ID(8-12)
Inlet Angle	11.9°	11.9°	8.3°
Outlet Angle	11.9°	8.3°	11.9°
Solidity	2.49	2.93	2.93

験方法は既報⁽⁶⁾に示したとおりである。

インデューサの全揚程は、遠心ポンプとの組合せ状態において、インデューサの出口流れの測定から得られた半径方向に分布する全圧ヘッドを流量荷重平均したもので、流量比との関係を図2に示す。

インデューサの吸込性能は、遠心ポンプとの組合せ状態において、総合全揚程をもとにした必要NPSHと、インデューサ入口から出口に至る壁面静圧の上昇量 h をもとにしたインデューサの必要NPSHとの測定結果を総合して求めた。インデューサ単体の吸込性能を求める際に、測定上の困難さから、インデューサの全揚程として入口と出口の壁面静圧ヘッド上昇量をもとにする場合がある⁽⁴⁾。図3は、キャビテーションが発生していない状態におけるインデューサの全揚程および静圧上昇量と流量比の関係を示す。図3によれば、ある流量比以上ではいずれのインデューサについても両者はほぼ一致する。これは、流量比が大きくなるに伴い、出口静圧ヘッドの半径方向分布が一様に近

図2 インデューサ全揚程

図3 インデューサの全揚程と壁面静圧ヘッド上昇量

づくことと、全圧ヘッドのうち静圧ヘッドの占める割合が大きくなるためであると考えられ、両者の一致する範囲は、2章で述べた遷移領域とポンプ支配領域にほぼ相当する。またキャビテーションが発生している状態のインデューサ出口流れに関する報告⁽¹⁾⁻⁽³⁾によれば、揚程が急降下するまでは、流速分布の変化は小さく、静圧と全圧はボスからチップまでほぼ一様に小さくなる。これらの結果から、本論文では遷移領域とポンプ支配領域では、壁面静圧ヘッド上昇量によって求めたインデューサ吸込性能を使用するものとした。インデューサ支配領域では、式(2)から総合吸込性能がインデューサ吸込性能を表すものと考えられる。このようにして求めた全流量域にわたるインデューサの吸込性能を図4に示す。図4には、3%の揚程降下に対応する必要NPSHのほか、2.1, 0%の揚程降下に対応する必要NPSHについても、同様にして領域の区分を行い求めた結果を示してある。

なお、ポンプ支配領域においては、インデューサ部の揚程降下は発生しないから、この領域では組合せ状態の実験結果からインデューサ単体の吸込性能を求めることができない。このためインデューサ ID(12-8)に

(a) ID(12-12)

(b) ID(12-8)

(c) ID(8-12)

図4 インデューサの必要NPSH

については、60 ないし 80 %以上の流量における吸入性能が得られていないが〔図 4 (b)〕, 総合吸入性能を予測するにはこの領域の資料は必要でない。

4. 遠心ポンプの吸入性能

図 5 に 3, 2, 1, 0 %の揚程降下に対応する遠心ポンプの必要 NPSH を全流量域にわたって示す。遠心ポンプの吸入性能は、インデューサを取り外した状態で実験を行い求めたものである。

インデューサとの組合せ状態におけるポンプの吸入性能は、インデューサの出口流れによってポンプ入口の流れの状態が変わるために、ポンプ単体のときとは異なることが予想され、規定流量付近ではこの影響を考察して吸入性能を予測する方法についての研究が行われているが⁹⁾, 全流量範囲に対応する組合せ状態における吸入性能については十分解明されていないと考えられるため、本論文では組合せ状態における吸入性能を予測する資料として、ポンプ単体の吸入性能をそのまま使用するものとした。

5. 組合せ状態における吸入性能の予測

本章では、それぞれの吸入性能が既知であるインデューサと遠心ポンプを組合せた場合に、組合せ状態における吸入性能に対し、インデューサとポンプとがどのような役割を果たすかを全流量範囲にわたって求めることにより、インデューサ付ポンプの総合吸入性能を予測する方法について述べる。

図 6 は、インデューサの吸入性能と $F(X, Y)$ の値から総合必要 NPSH を求める説明図である。点 A は $(H_{sv})_{103}$ と $F(3, 0)$ との交点であり、この点が示す流量比以下は、式 (1) が成立するインデューサ支配領域である。この領域における組合せ状態の必要 NPSH は、式 (2) により A-A 線で示される。点 B は $(H_{sv})_{100}$ と $F(0, 3)$ の交点であり、この点が示す流量比以上の流量領域は、式 (3) が成立するポンプ支配領域である。この領域における組合せ状態の必要 NPSH は、式

図 5 遠心ポンプの必要 NPSH

(4) により B-B 線で示される。A-B 間は式 (5) が成立する遷移領域である。この領域では $(H_{sv})_{102}$ と $F(2, 1)$ の交点 C, $(H_{sv})_{101}$ と $F(1, 2)$ の交点 D などによって各流量比における総合必要 NPSH が求められる。したがって遷移領域における組合せ状態の必要 NPSH は、 $(H_{sv})_{10x}$ と $F(X, Y)$ の交点を通る A-B-C-D 曲線で示される。すべての領域において求められた組合せ状態の必要 NPSH を総合するとインデューサ付遠心ポンプの予測総合吸入性能 (A-A-B-C-D-B) が得られる。

このようにして求めた予測結果と実験結果の比較を図 7 に示す。例として使用したインデューサは、表 1 に示したもので、これらのインデューサはそれぞれに特徴のある性能を持っている。図 7 (a) はインデューサ ID(12-12) と遠心ポンプを組合せた場合である。このインデューサは全流量域にわたって優れた吸入性能と十分高い全揚程をもち、遠心ポンプと組合せた場合において流量比 120 % 以下ではポンプ支配の領域が現れず、ここに挙げた例の中では最もよい性能を示している。図 7 (b) はインデューサ ID(12-8) を組合せた場合である。このインデューサの吸入性能はインデューサ ID(12-12) とほぼ同じであるが、全揚程が低く過大流量域では負の値となる。この場合は、流量比が約 80 % 以上で流量比の増加とともに組合せ状態における必要 NPSH が急激に増大する。図 7 (c) はインデューサ ID(8-12) を組合せた場合である。このインデューサは全揚程は ID(12-12) とほぼ等しいが、吸入性能は流量比が 80 % を超えると急激に悪くなる。この場合には、ポンプ支配の領域は流量比が 120 % 以上になるまでは現れないが、組合せ状態における必要 NPSH は、遷移領域の範囲内で急上昇する。これは、遷移領域でインデューサの必要 NPSH が増大し、遷移領域とポンプ支配領域を区分する曲線 $F(0, 3)$ とインデューサの必要 NPSH を示す曲線 $(H_{sv})_{100}$ とが交わらないた

図 6 インデューサ付ポンプの必要 NPSH の予測

(a) MP+ID(12-12)

(b) MP+ID(12-8)

(c) MP+ID(8-12)

図 7 実験結果と予測結果の比較

めである。上述の三つの例はそれぞれ異なった傾向の吸入性能をもつ組合せであるが、予測した結果と実験から得られた結果との間にはいずれの場合についてもかなりよい一致が見られ、この予測法がいくつかの仮定を含んでいるにもかかわらずいずれの場合について

も有効であることを示している。

6. 結 言

インデューサ付遠心ポンプの吸入性能は、インデューサの全揚程、インデューサの吸入性能、ポンプの吸入性能によってきまり、それらの果たす役割はそれらの相互関係によってきまる。

本論文では、インデューサとポンプの性能の相互関係に注目して、組合せ状態における総合吸入性能を全流量域にわたって予測する方法を提案し、いくつかの例について予測結果と実験結果との比較を行った。例として用いたインデューサは吸入性能と全揚程性能について異なる特徴をもつものであるが、いずれの場合においても、流量の広い範囲にわたって予測性能と実験結果がほぼ一致し、この方法が有効であることが認められた。

なお、遠心ポンプの吸入性能に及ぼすインデューサ組合せの影響を省略して検討を行ったが、この影響を広い範囲にわたって解明することは今後の課題である。

終わりに、本研究の実施に際して、研究の計画、装置の設計など終始ご協力をいただいた(株)日立製作所田中定司研究員、有力な助言をいただいた筑波大学正司秀信講師に深じんなる謝意を表する。

文 献

- (1) Solits, R. F., ほか 2 名, NASA Tech Note, D-1170 (1962).
- (2) 上條・鈴木, 航空宇宙技術研究所報告, TR-345 (昭 48).
- (3) 高松・ほか 3 名, 機論, 44-379 (昭 53), 950.
- (4) 大島, 機論, 35-276 (昭 44), 1686.
- (5) 上條・ほか 7 名, 航空宇宙技術研究所報告, TR-415 (昭 50).
- (6) 田原・真鍋, 機論, 50-458, B (昭 59), 2619.
- (7) Stripling, L. B., Trans ASME, Ser. D, 84-3 (1962), 339.
- (8) 高松・ほか 2 名, 機論, 44-379 (昭 53), 960.
- (9) Tahara, H. and Manabe, A., Proc. China-Jpn. Joint Conf. Hydraul. Mach. Equip. (1984), 263.