

平成23年5月16日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560172

研究課題名(和文)

コンプレッサのサージ限界に及ぼすマッハ数の影響に関する研究

研究課題名(英文)

Research on the effect of Mach number on surge limit of centrifugal compressor

研究代表者

川田 裕 (KAWATA YUTAKA)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：70440930

研究成果の概要(和文)：ターボ機械では低速回転のファンと高速回転の遠心圧縮機で羽根車失速後の挙動が大きく異なり、後者ではサージという大きい圧力変動が生じるためにその回避が重要な課題である。本研究ではターボチャージャ用遠心圧縮機を用いて実験的に4720～52000rpmの回転数変化がサージ現象に及ぼす影響を研究した。その結果、回転数の増加によりサージ範囲が拡大するとともにサージ圧力変動が急激に増大すること、また50000rpm付近で不連続にサージ範囲の拡大が計測された。またタンク容積、配管長によりサージ現象が変化すること、ある限界以下の短管路ではサージが生じないことが判明した。

研究成果の概要(英文)：The phenomena caused by the stall of turbo machinery is greatly different between fan and compressor. In case of compressor, surge phenomena with large pressure oscillation occur and the avoidance of it is very important issue. In this research, the effect of rotational speed on surge phenomena is investigated experimentally by using compressor of turbo charger.

As rotational speed is increased, it became clear that the surge region expands rapidly and it further expands abruptly above 50000rpm.

The effect of tank volume and pipe length is also tested and found that they have large influence on surge phenomena. Especially surge is proved to be extinguished at shorter pipe length of 2.0m under 20000 rpm operation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，流体工学

キーワード：サージ、コンプレッサ（遠心圧縮機）、自励振動、タンク、配管系

### 1. 研究開始当初の背景

コンプレッサは石油化学プラント，自動車用ターボチャージャ，CCSやEORといった環境関連の用途をはじめとして高速高性能化が非常に重要となっている．コンプレッサでは効率といった基本的な性能の向上以外に低流量域で発生するサージという自励振動現象への対応が重要な課題である．

コンプレッサが低流量域で運転される時にサージが発生すると，大きい圧力変動のために運転が不能になったり機器の破損を生じるなど深刻な状況を生じる．プラントや機器の設計ではサージ現象の存在が大きい制約条件となっており，回転数（マッハ数）などのサージの発生限界に影響を及ぼすパラメータの明確化が望まれていた．

### 2. 研究の目的

サージ現象に関してはこれまでサージの現象的な研究はある程度なされていたが，(1)回転数がサージ現象に与える影響（低速のファンと高速のコンプレッサとの現象の相違点），(2)配管系（タンク，管路長さ）がサージ現象に与える影響，などについてはあまり研究されておらず解明が必要とされた．またサージ発生点の予測については明確な手法がなく，実用的な予測手法の開発が必要とされている．本研究では集中常数系とCFDを用いてその適用性に関しても検討を行った．

### 3. 研究の方法

コンプレッサの回転数を変化させるためにモータ（4720rpm～20050rpm）とディーゼルエンジン（22000rpm～52000rpm）の2種類を用いて試験を行った．供試コンプレッサとしては羽根車A（羽根車径68mm）と羽根車B（羽根車径58mm）の2種を使用し，前者は



羽根車 A 羽根車 B  
図1 供試羽根車

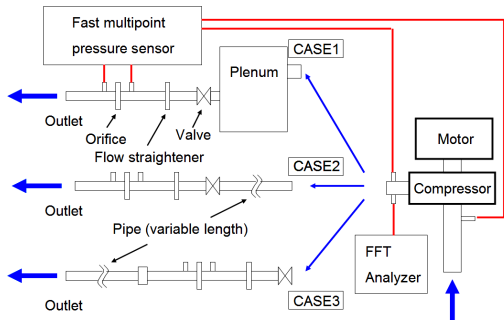


図2 供試試験管路

モータをインバータで可変速とし，後者はエンジン排気を用いたラジアルタービンで駆動して試験を行った．

試験管路はタンクを含むCASE1，配管のみCASE2，バルブ下流の配管長を変化させるCASE3の3種類とした．これを図2に示す．

サージ圧力変動の計測にはひずみゲージ式の圧力変換器，分析にはFFTを用いた．

### 4. 研究成果

#### (1) サージの基本的な性質

本研究で得られたサージの実験例を図3に示す．図に示すように特性のフラット部分から少しでも流量を低下させると急激に（この例では3.5Hz）サージ圧力変動が発生する．この流量をサージ限界流量とした．

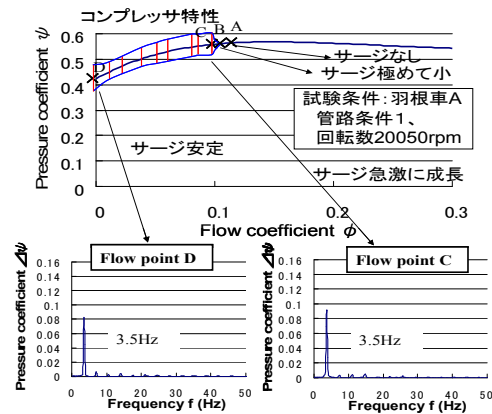


図3 サージの計測結果例

#### (2) 回転数がサージに及ぼす影響

2種の羽根車を用いて達成可能な最大回転数までの試験を行い，回転数（マッハ数）がサージに及ぼす影響について実験的な検討を行った．羽根車Aの計測結果を図4に示す．図より回転数の増大に伴い圧力変動の大きさが急激に増大するとともにサージ発生範囲が拡大することが判る．図5には無次元特

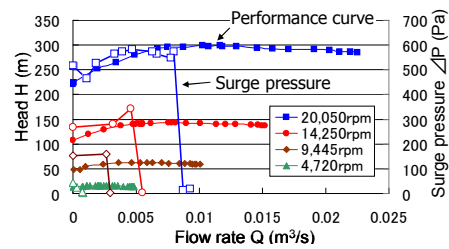


図4 回転数変化時のサージ特性の変化

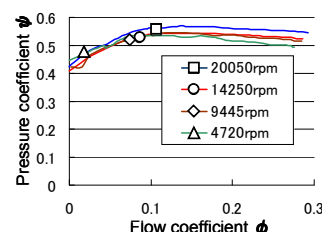


図5 無次元特性上におけるサージ限界の変化

性上にサージ発生限界を示す。サージの発生範囲は相似則から予想されるよりも回転数の増加に大きく影響され、特に4720rpmから9440rpm間で大きく増加していることが判る。

羽根車Bによる試験結果を図6に示す。羽根車Bでは駆動機の制約から回転数を一定にすることが出来なかったため試験中の回転数の変化範囲をパラメータにして実験を行った。図6に示すように22000rpmから52000rpmの高速回転数変化の範囲では特性は無次元化特性上でほぼ一定となった。図7にはサージ限界流量の実験結果を示す。22000rpmからサージ限界はほぼ一定の流量係数を保つが50000rpmで急激にサージ限界が増加することが判明した。

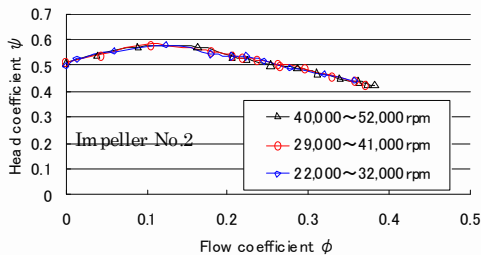


図6 羽根車Bの特性計測結果

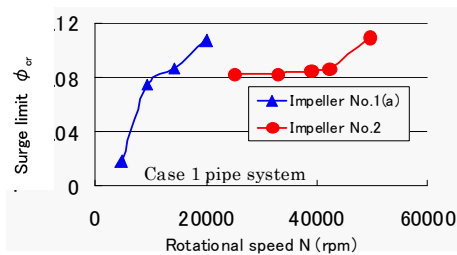


図7 羽根車A, Bのサージ発生限界流量特性比較

以上の結果からサージ限界は5000rpmから10000rpm付近で急激に増加した後増加速度をゆるめ、その後50000rpm付近から再度急激に範囲を拡大する傾向があるものと考えられる

(3) c 配管条件がサージに及ぼす影響  
コンプレッサが設置された配管系の条件もサージ発生限界に大きい影響を及ぼす

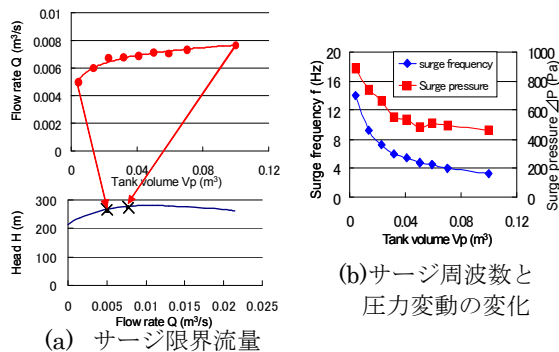


図8 CASE1のサージ限界流量とその他特性計測結果

ものと考えられるため、その効果を実験的に検討した。実験にはタンクを含む系(CASE1)と配管のみの系(CASE2)の2種を用いた。

図8にCASE1におけるタンク容積変化時の実験結果を示す。タンク容積の減少に伴いサージ限界流量は減少するが、サージ周波数とともにサージ圧力変動が増加することが判る。

図9にCASE2における配管のみの実験結果を示す。配管長さを減少すると2.3mまでは周波数と圧力変動が増大するが配管長さが2.3m以下になると圧力変動が急激に減少しほとんど圧力変動が消滅することが判明した。

図10には配管とタンクの容積を同一とした実験結果を示す。図から明らかなようにサージ圧力変動はタンクに比べて配管系では抑制されており、系の構成により全く異なることが判る。

図11にはタンクと配管長を変化した場合のサージ挙動の差を示す。系の中の空気体積を減少する場合、タンクを設けた系ではサージ限界流量が減少するのに対して配管の系では図9に示したごく短い配管長の場合を除いてサージ限界流量が増加することが判った。このように2種の配管系ではサージ限界流量が正反対の傾向を示すことが明らかになった。

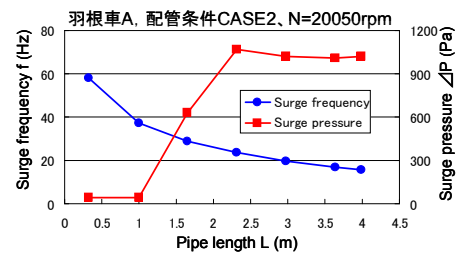


図9 配管条件CASE2のサージ特性

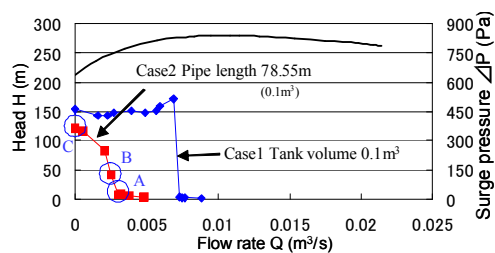


図10 配管条件によるサージ圧力変動の比較

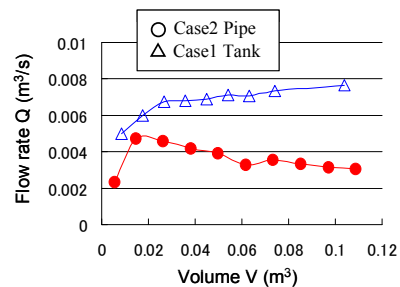


図11 配管条件によるサージ限界流量の比較

(4) サージ現象の解析

① サージ発生限界の予測

サージ発生限界の予測に関して集中定数系を用いた解析を行った。タンク体積、管路長さ・断面積を考慮して1次元の特性方程式を導き、その解の安定限界を複素固有値の実部が0になる条件で求めた。

得られた結果を図12に示す。タンクを有する系の場合にはタンク体積の減少とともにサージ限界流量が減少する傾向は安定判別解析で得られるものの、解析値は実験値よりも大きい値となった。これは解析では減衰を過小評価しているためと考えられる。配管のみの系の場合には1次元の安定判別解析ではほとんど実験結果を表現できないことが明らかになった。

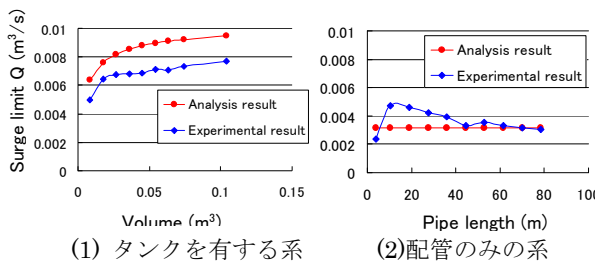


図12 安定判別解析結果と実験結果の比較

② CFDによるサージ現象の解析

熱流体解析ソフト ANSYS CFX12.0 を使用してコンプレッサの3次元数値解析を行った。解析にはコンプレッサ管路とともに吐出側および吸込側タンクも解析領域に含めた。

定常解析で得られた解析結果を図14に示す。図に示すようにサージが発生するま

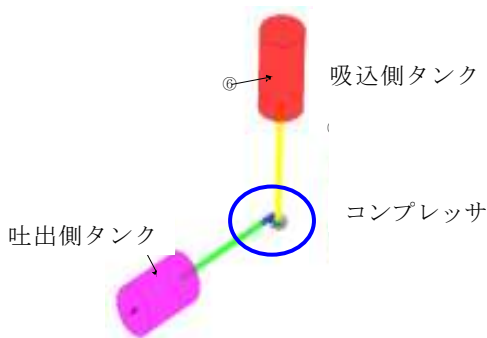


図13 解析モデル

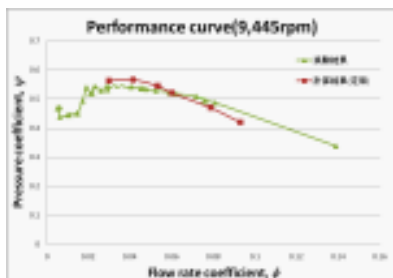


図14 定常解析結果

での特性曲線は実験結果とほぼ一致することが判る。

サージ発生点以下の流量条件では変動状態の現象を表現するために非定常解析を用いた。図15に非定常解析結果の例を示すが流量、圧力が変動しながら低流量域でリサージュ図形を描いていることが判る。このリサージュの上には固有値の変動が乗っていることも判る。このような非定常条件での計測は出来ていないが興味深い結果であると考えられる。

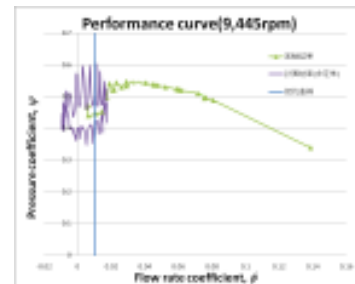


図15 非定常解析結果

(5) 結論

コンプレッサのサージに関して回転数(マッハ数)と配管系の及ぼす影響を実験と解析により明らかにした。マッハ数の影響に関しては低マッハ数からマッハ数を上昇させるとサージ発生限界流量は最初急に増加するがその後一定になり更に上昇するとまた増加傾向が急になることが判った。配管系の影響に関してはタンクを含む系と含まない系でサージの様相が全く異なることや配管系では一定以上に管路を短くするとサージが消滅することが判った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計3件)

- ① Effect of Pipe System and Casing Configuration on Surge Phenomenon of Centrifugal Compressor, Shouta Ayukawa, Ken Inoue, Kazunari Fukuyama, Koichiro Morita, Yoshinobu Tsujimoto and Yutaka Kawata, IGTC2011, 2011年11月, 大阪 Grand Cube Osaka, 発表確定
- ② 遠心圧縮機サージ特性に関する研究, 井上謙, 辻本良信, 川田裕, 日本機械学会 関西支部第86期定時総会講演会(京都工芸繊維大学), 2011年3月20日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田 裕 (KAWATA YUTAKA)  
大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：70440930

(2) 研究分担者

辻本 良信 (TSUJIMOTO YOSHINOBU)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50112024

(3) 連携研究者 無し