

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560189

研究課題名（和文） ディスク式絞り機構の熱的非平衡

研究課題名（英文） Non-equilibrium of disk-type flow contraction

研究代表者

刑部 真弘（Masahiro OSAKABE）

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：00204173

研究成果の概要（和文）：

圧力容器健全性確保のために減圧操作を行う安全弁や逃し弁は、ボイラや原子炉等の最重要機器として認識されている。これらの減圧弁の放出流量は、ディスクと弁座に挟まれたディスク式絞り機構によって制限されることが多い。この絞り機構流れは、縮流現象、膨張遅れや熱的非平衡に大きく影響される。このため、単純なディスク式絞り機構を作成し、異なる弁リフト量、ディスク板材質およびシート形状における放出流量を計測した。実験結果を流出モデルと比較した結果、強い非平衡の存在等の多くの知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

The safety or relief valves to depressurize the pressure vessel are recognized as the most important safety devices for boiler and nuclear facilities. The discharging flow is usually restricted with the minimum flow area between disk and seat. The flow rate is significantly affected with the vena contraction at minimum flow area, the delay of expansion and the non-equilibrium. The simple disk-type flow contraction was fabricated to measure the discharging flow rate at different valve lifts, disk materials and seat configurations. A lot of knowledge such as the significant non-equilibrium was obtained from the comparison of the experimental results with the flow model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：熱流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：(1) 臨界流 (2) 二相流 (3) 熱的非平衡 (4) 絞り機構 (5) 安全弁

1. 研究開始当初の背景

当時、ISOでは安全弁に関する国際規格を制定しようとしていた。蒸気等の単相流を放出する安全弁に関しては、その作業はほぼ終了していた。二相放出弁についての議論を精

力的に行っていたが、十分な実験結果や特に熱的非平衡度に関する知見が不足していた。特に、ISO規格で採用しようとしている熱的非平衡度の経験式については賛否両論があり、各国の意見をまとめるのが困難な状

況にあった。このため、国際ベンチマークとして定量的な二相臨界放出流量のデータが渴望されていた。また、バルブを模擬した単純なディスク式絞り機構における現象理解も必要であるとされていた。

二相臨界流は、これまでに原子炉の事故時安全性や安全弁の放出流量に関連して研究されてきた。報告者らも、原子炉事故模擬実験や実際のディスク式安全弁からのサブクール水放出実験を行うとともに、熱的非平衡を考慮可能な臨界流モデルを提案し、適当な熱的非平衡度を仮定すれば二相臨界流の予測がある程度可能であることを報告してきた。この式が、ISO規格として採用されよとしていた。ただし、熱的非平衡度が何に影響されるのかが解っていない。熱的非平衡度は、弁のど部等での縮流の状況、すなわち弁リフト量と弁座口径の比などに大きく依存すると考えられていた。縮流係数自体も単相流と二相流では異なるという報告があり、これらを含めた熱的非平衡についての新たな知見を是非得たいと考えていた。学術的にも、熱的非平衡度は、いまだに解決されていない二相流の重要問題であり、その応用範囲は広いと考えられた。

2. 研究の目的

安全弁を模擬したディスク式絞り機構を用いて、サブクール水からクオリティ 0.5 程度までの二相流の臨界流量を求める。沸騰遅れに代表される熱的非平衡度が、臨界流量に大きな影響を与えることは既知の事実であるが、学術的に解明されていない熱的非平衡度に関する知見を、産業的にも重要な絞り機構で得る。また、この成果により熱的非平衡度を合理的に反映できる予測モデルを作成し、当時議論を進めていた安全弁に関する ISO 国際規格作成に資する。

3. 研究の方法

平成 22 年度は、ディスク板が交換可能で、弁リフト量の調整も容易に可能なディスク式安全弁を模擬した絞り機構を作成する。さらに、サブクール水を種々弁リフト量の条件で絞り機構に流し臨界流量を求める。平成 23 年度は、サブクール水からクオリティ 0.5 程度までの二相流の臨界流量を求める。平成 24 年度は、ディスク板性状が臨界流量に与える影響を検討する。また、新たな予測モデルを作成し、安全弁に関する ISO 国際規格に反映させる。

4. 研究成果

図 1 はディスク式絞り機構を表している。流体はディスクと弁座に挟まれた絞り部から流出される。この機構から流体が流出されるとき、流量はディスクと弁座の間隙を示す

リフト量 L から算出される最小流路面積(カーテン面積)に制限される。しかし、この最小流路面積から算出される予測流量より、実際の流量は少なくなることが知られている。その主な原因は、カーテン面積よりも流体が縮まって流れる縮流現象によるものと考えられている。この縮流と流れの損失等を含んだものが弁流出係数 c_v であり、現在安全弁などの設計において流量予測をする際に用いられている。この流出係数は、米国規格である API において水単相 0.65, 二相流 0.8 とされている。一方、国際規格である ISO では水単相 0.61, 二相流は放出流体のボイド率を用いて計算するが、やはり水単相よりも高い値が採用された。二相流の流出係数が水単相に比べて高い明確な説明はないが、安全裕度を確保しつつ経験的に採用されてきたのが現状である。さらに、気体等の圧縮性流体が流出する場合には、膨張遅れ等の非平衡状態も想定され、更なる検討が必要である。そこで本研究では、境界条件のはっきりした単純なディスク式絞り機構を制作し、相変化をしない水および空気単相、水/空気二相流の流出係数について実験および理論的な検討を行った。

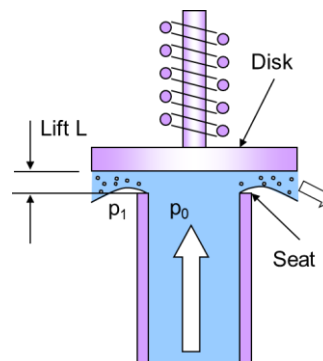


図 1 ディスク式絞り機構

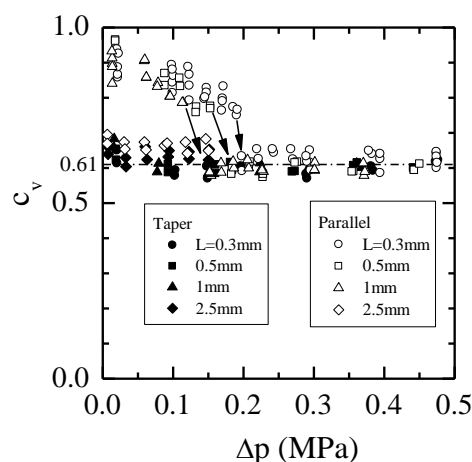


図 2 水単相流の流出係数

(1) 単相および非沸騰二相流

図2は、流出係数 c_v と絞り部前後の差圧 $\Delta p (=p_0 - p_1)$ の関係を示している。弁リフトが小さい平行弁座における実験では、差圧が低い領域にて流出係数が 0.61 以上になっている。そして特定の差圧で、図中の矢印で示したように流出係数は突然小さくなり、変化後は 0.61 一定となる。テーパ弁座のすべての条件及び平行弁座で差圧または弁リフトが大きき場合には、水単相の流出係数は約 0.61 だった。水流出係数が 0.61 より大きくなった原因として、流れが弁座に付着し縮流が緩和されたと考えられた。

噴き出し部の縮流現象について、図3に示したように考察した。図3(左)は平行弁座において流出係数が 0.61 より大きくなった場合である。図に示すように弁座に流体が付着し流れるため、吹き出し部直後に死水域(はく離部)が生じ、その部分の圧力が低下しキャビテーションが形成される。この現象では死水域部の圧力低下により流量が増え、流出係数も大きくなった。

一方、図3(中央)には、流出係数が 0.61 となった場合を示す。差圧を増大させたことにより流出速度が増え、弁座に流体が付着しなくなり死水域も消滅する。流体はディスク

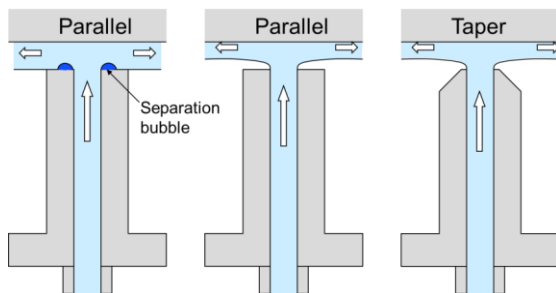


図3 噴き出し部の縮流現象

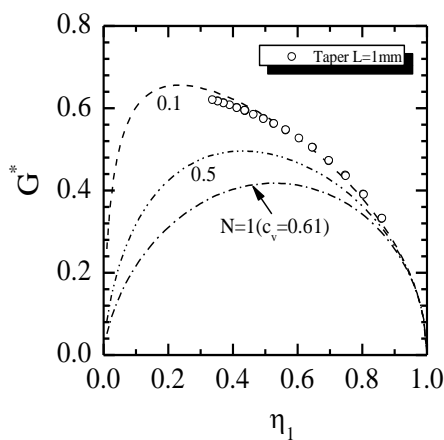


図4 空気単相実験結果

上を液膜状に流れ、結果として流出係数が小さくなった。リフト量または差圧が大きくなると弁座に流体が付着しなくなる。この場合には、流出係数は 0.61 となる。

図3(右)にはテーパ弁座における流れを示す。リフト量が小さかつ差圧が低い状態においても、弁座を 45° 切削したことにより流体が弁座に付着することがなくなった。この為、すべての条件下においても流出係数が低い状態となった。

空気単相実験結果は、臨界圧力比以下になっても流量が増える傾向を示していた。この現象を説明するために、膨張遅れを考慮した圧縮性流体の無次元質量流束式を提案した。絞り部前後の圧力比を η_1 とした実験結果は、図4に示したように膨張遅れ $N=0.1$ とした予測曲線とほぼ一致し、急激な縮流により不足膨張現象が生じていることを示唆していた $N=1$ が完全平衡状態であり $N=0$ が完全非平衡状態、すなわち非圧縮性流体と同じである。

図5は、水/空気二相流における入口オリティ x_0 と、気液速度スリップおよび気相の膨張もない均質二相流と仮定した流出係数の関係であるが、流出係数が 1 を超えたものも多くみられ、水や空気単相流とは明らかに異なった。また、水みかけ流速 j_L が低いほど高い流出係数を示し、系統的な整理は困難であった。均質二相流で気相の膨張もないとした仮定が適切ではないと考えられた。

このため、気液スリップおよび気相の膨張を考慮した二相流モデルを提案した。二相流の場合には流れが振動的であり、単相流のように縮流が発生しないと考えると、流出係数は 1.0 に近くなる。実験データは、流出係数を 1.0 とした二相流モデルの予測の範囲内に

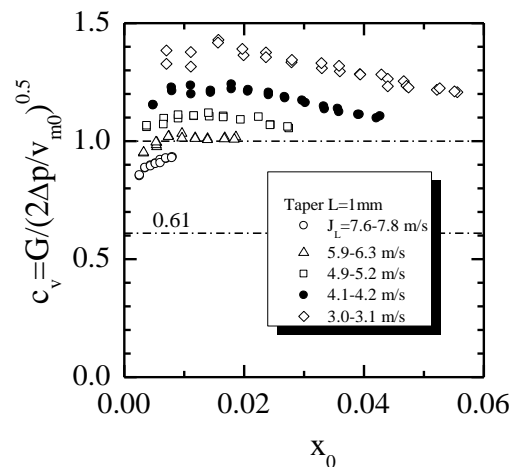


図5 均質二相流とした流出係数

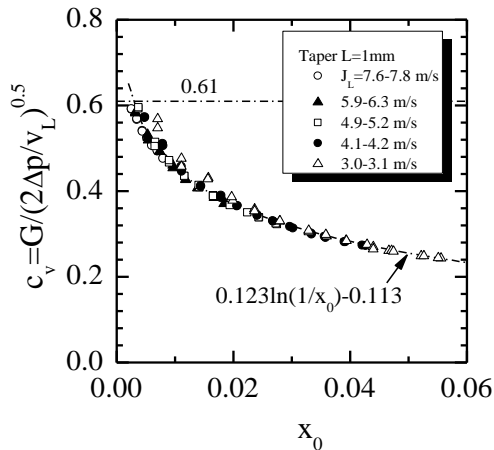


図6 水の比容積を用いた二相流の流出係数

あることが示された。なお、モデルにおいては、気液スリップ比は、絞り部入口の垂直管における値 1.3 から 4.5 とした。

次に、均質二相比容積の代わりに水の比容積を用いて流出係数を求めてみた。この場合、図6に示したように、入口クオリティ x_0 の増加とともに、流出係数は水の 0.61 より滑らかに減少し、すべての実験データが1本の曲線で近似できた。

(2) 相変化流体

相変化する液体が流出する場合には、沸騰遅れ等の非平衡状態も考慮する必要がある。このため、報告者らによって、蒸気状態の近似式を用いた非平衡臨界流モデルが提案され、国際規格である ISO 規制式として採用されたが、予測精度等の更なる検討が必要である。そこで、減圧沸騰を伴うサブクール水および水/蒸気二相流の流出挙動について理論および実験的な検討を行った。減圧沸騰挙動に影響を与える可能性のあるディスク板には、可視化観察を可能とする透明耐熱ガラス、真鍮およびテフロンコーティングを施した真鍮を用いた。

蒸気表を直接用いて計算する非平衡二相臨界流モデルを提案した。従来の蒸気表の近似式を用いた方法は、圧力変化が比較的小さい場合には精度が良いが、非平衡が強く低い圧力で臨界になるような場合には誤差が大きい。蒸気表を直接用いることにより、より精度の高い予測が可能となった。

図7は、入口がサブクール水とした実験での、入口サブクール度 ΔT_{sub} と無次元臨界質量流束の関係を示す。図中の予測線は、入口圧力 0.35 MPa, 流出係数 $c_v=0.61$ および非平衡パラメータ $N=1.0 \sim 0.001$ として計算した

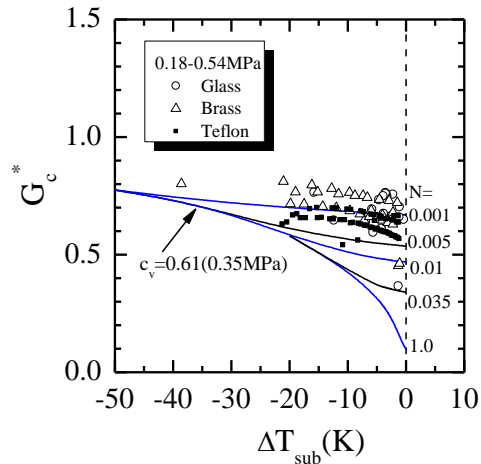


図7 サブクール水の無次元流出流束

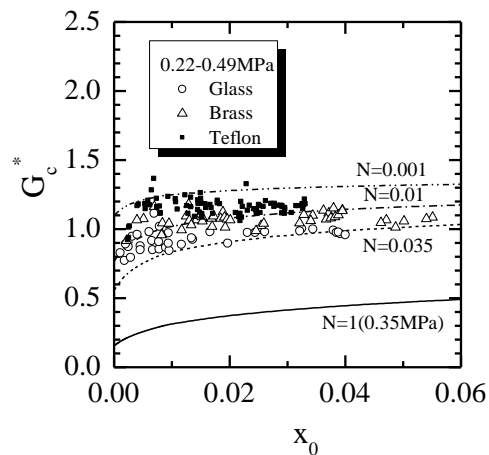


図8 二相放出流の無次元質量流束

無次元臨界質量流束である。無次元質量流束を用いて整理すると、入口圧力による大きな違いはなかったため、実験を行った条件のほぼ平均である 0.35 MPa を用いた。3種類のディスクを用いた多くの実験値は、非平衡度が非常に大きい $N=0.001$ とほぼ一致するが、サブクール度が低い場合やテフロン被膜ディスクの場合は、非平衡が緩和され $N=0.035$ の予測線に近づく場合もあった。相変化が完全に抑制されたとして求めた流出係数は、水単相流で求められた $c_v=0.61$ とほぼ一致するが、サブクール度が低い場合やテフロン被膜ディスクの場合は、それよりも低くなった。

本実験のような単純な絞り機構では、流量に影響を与えるような発泡が縮流部上流で起こりにくいことが示された。従来の実験で用いた温水逃し弁では、最も流路面積の小さいカーテン面積の上流に、構造上もう一つの面積縮小部があり、この部分が非平衡を緩和

している可能性が示唆された。

図8に示したように、3種類のディスクを用いた、入口クオリティ x_0 の二相流とした場合の無次元質量流束の多くは、 $\Lambda=0.035\sim 0.001$ とした予測値の間に位置し、完全平衡状態である $\Lambda=1$ の2倍程度になっていた。単純なディスク式絞り機構の非平衡度は非常に大きいことが明らかとなった。

なお、本研究の絞り機構では非平衡度が非常に強いと考えると、一部分の実験データは臨界圧力比になっていないことも考えられた。このため、非平衡が非常に強く相変化が完全に抑制されたとして流出係数を求めてみた。このとき、均質二相流よりも水の比容積を用いた方が実験データを良好に整理できた。図9に示したように、入口クオリティの増加とともに、流出係数は水の0.61より滑らかに減少し、すべての実験データが1本の曲線で近似できた。

(3) 実際の安全弁について

本研究の対象とした単純な絞り機構では、流れが急速に絞られるため非常に大きな非平衡がみられた。このことは流出流量を増加させるが、一方では縮流も大きくし流出流量を減少させる。

実際の安全弁や逃し弁では、最も流路面積の小さいカーテン面積の上流に、構造上もう一つの面積縮小部があり、この部分が非平衡や縮流を緩和している可能性が示唆された。今後、実際の安全弁の流れを分析する際や、新たな安全弁を設計するときに、本研究の単純な絞り機構は重要なベンチマークとなることが期待される。

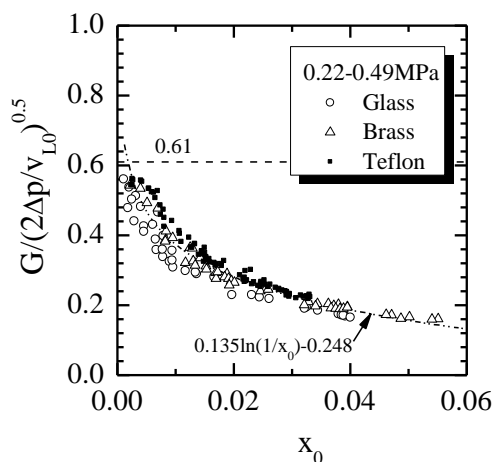


図9 水の比容積を用いた流出係数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

千葉典子, 吉川和寛, 堀木幸代, 刑部真弘, 安全弁における相変化流体の流出挙動, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 78(794), p.1749-1758, (2012)

千葉典子, 吉川和寛, 堀木幸代, 刑部真弘, 安全弁における单相及び二相流の流出挙動, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 78(794), p.1739-1748, (2012)

Noriko CHIBA, Kazuhiro KIKKAWA and Masahiro OSAKABE, Discharging flow behavior from disk-type flow contraction, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 47(3), 58-63, (2012)

刑部真弘, ディスク式絞り機構における流体噴き出し特性に関する研究, バルブ技報, 査読無, 26(2), 61-84, (2011)

N. CHIBA, K. KIKKAWA and M. OSAKABE, Discharging flow behavior from disk-type flow contraction, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME), 査読有, Paper-ISME106, (2011)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~osakabe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

刑部 真弘 (Masahiro OSAKABE)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号: 00204173