

論文の要旨

題目 内部混合型二流体噴射弁による重質燃料の微粒化と燃焼に関する研究
(Research on spray atomization and combustion of heavy fuel oil injected by internal mixing twin-fluid atomizer)

氏名 橋口和明

CO₂問題で石炭が矢面に立つ最近の情勢下でも、石油の堅調な需要が今後も見込まれている。それに伴い原油から製品の収率を上げるアップグレード設備の増設が相次いでおり、特に溶剤脱れき SDA (Solvent De-Asphalted process) が開発され、近年に普及が進んできた。この SDA から副生される残渣油 (ピッチ) は石油を深絞りしているため、粘度が一般的な重油よりも高く、かつ硫黄分、窒素分、残留炭素分および重金属類の含有量も非常に多いため、一般市場で流通させることは難しく、製油所内のボイラ用燃料利用に限られている。

この残渣油焚きボイラは、我が国が世界に先駆けて実用化に成功してきたが、地球に優しいクリーンな燃焼が要求されていることから、さらなる低公害燃焼技術開発が求められている。残渣油をボイラ燃料とする社会的需要に応えるために、残渣油に含まれる窒素分や残留炭素分などのボイラ燃焼時において排気に含まれる NO_x 濃度とばいじん濃度の低減を両立させることが重要である。

これらの課題に対し、本研究では 2 つのアプローチで取り組んだ。まず、微粒化に優れる内部混合型二流体噴射弁の噴射弁内部の気液二相流動と微粒化の関係を数値解析と可視化実験を併用しながら解明し、その結果に基づき気液衝突方式を改良して粗い液滴の発生を抑制することに成功した。一方、噴霧された液滴の飛跡を数値解析し、それらの旋回流動を制御する新型スワラを開発し、バーナにおける着火保炎性を改善した。最後に 10 MW 級の残渣油燃焼試験により保炎性能と排気特性の改善効果の同時達成を実証した。本論文は 6 章から成る。

第 1 章では、本研究で取り扱う内部混合型二流体噴射弁の微粒化について、ボイラ用のバーナ開発における課題および従来の主要な研究を概説し、課題を抽出するとともに本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、内部混合室内の気液衝突部の一次混合流動メカニズムと噴流の分裂挙動の要因を明らかにした。液流の側壁から気流を衝突させる二流体噴射弁の要素モデルを試作し、ノズル内に形成される環状流の液膜厚さや波の変動が噴出後の分裂に及ぼす影響を調べた。その結果、気液衝突部で液体に対する気体の運動量流束が増大するにつれて、液流は円筒状から液膜状へと変形して噴孔内に環状流を生じた。噴射弁から噴出した液膜流には周期的変動があつて、それらは中空の液球列となる。また、液球の内外面には、液膜表面の乱れに起因する皺上の変形が見られた。空気流速が増すと、液膜表面が乱れて変形し、周囲の静止した空気とのせん断により液糸状に分裂して比較的粗い液滴が生じる。一方で、噴射弁内部の液膜の表面には気体と液体との相対速度にもとづく波を生じ、一部の波頭の

頂部からは比較的微細な液滴を生じ、噴霧流の混在も示唆された。これらにより微粒化促進法の足掛かりと開発の方向性が明瞭になった。

第 3 章では、混合室の先端に単一の噴孔が開く内部混合型噴射弁を透明なアクリルモデルで試作し、混合室内部の圧力や気液比といった運用条件が噴射弁内部の二相流動状態に及ぼす影響を論じた。幅広い運用条件下で液体と気体の流量様式の組み合わせ変化が噴流の液滴サイズに及ぼす影響を PDA (Phase Doppler Anemometry) で測定し、噴射条件と微粒化特性を関連づけた。その結果、気液比 GLR (Gas to Liquid mass ratio) は流動様式へ及ぼす影響が大きく、GLR が増加すると、流動様式はスラグ流から環状スラグ流、環状流へと変化し、さらに環状流の液膜が薄い場合に液滴は小さくなることがわかった。GLR が小さい場合は、GLR の増加によりザウタ平均粒径 SMD (Sauter Mean Diameter) は急激に縮小する。しかし GLR が大きくなるとその影響は小さく、SMD は噴射圧力には左右されないこともわかった。実機の高粘性油を模擬し、グリセリン添加の溶液を供試し、高粘性状態が噴霧に及ぼす影響を調べ、代表的な SMD だけでなく粒径分布に占める粗い液滴の割合を評価した。高粘性液体は、SMD が変化しなくとも粒径分布は大きく変化し、粗い液滴を含む二峰性の粒径分布を生じることから、SMD のみでは高粘度液体の噴霧品質は評価が不十分であることを指摘した。

第 4 章では、新型内部混合噴射弁の開発について述べた。第 2 章および第 3 章で得られた環状噴霧流の液膜厚さが粗粒に及ぼす知見を踏まえて、気液衝突方式に改良を施した実機スケールの多孔内部混合型噴射弁を試作した。数値解析で気液の過渡的混合挙動を推察するとともに、実験で噴霧粒径の縮小効果を検証する。その結果、気液衝突部の流動形態は噴孔にまで関与し、噴孔内における液流の偏りが微粒化特性に強くかかわるという確信を得た。これは透明な噴射弁モデルで観察してもなかなかわからない知見であった。具体的には、液体を混合室中心軸に沿って供給し、混合室周囲から微粒化用気体を衝突させる液ストレートフロー方式 (LSF, Liquid Straight Flow) は、噴孔入口において偏った厚い液膜が存在した。これに対し、液体を混合室の外周側から中心軸側へ集めるように送り、微粒化用気体を混合室中心軸に沿って供給する液クロスフロー方式 (LCF, Liquid Cross Flow) では、噴孔入口で一様に薄く広がる液膜が生じた。LCF の方が、噴射弁中心側の SMD が小さく液滴速度も小さいことから、噴孔入口の液膜に偏りが少なく、噴孔において液膜が一様に薄い方が微粒化促進に有利なことがわかった。さらに、数値解析では μs オーダの時間刻みで非定常的に計算して気液衝突部における擾乱を調べ、内部混合室内部では液体が気体と衝突して波打つように高速変形することがわかり、その周期は 1000~3000 Hz 程度であった。実験では高速度カメラで噴出直後の噴霧流を反射光で高速撮影し、高濃度部の周期的な変動もやはり高速で、噴孔内の変動周波数特性に符合する。

第 5 章はバーナ要素開発の成果を纏めている。実機バーナで多方向に噴霧される燃料液滴の流動を制御するために、残渣油焚きバーナの案内羽根の角度等の形状に工夫を施して旋回特性を改善し新しいスワラを開発した。空気の再循環流動を数値解析した結果、新し

いスワラ (Wing-curved swirler) は、案内羽根の曲げ角度が中央側から外周側にかけて深くなる構成としているが、案内羽根の曲げ角度を一定とした従来のスワラ (Bent plate swirler) よりもスワール数の軸方向における減衰が少ない。さらに、スワラの後流に生じる再循環流も広範囲に及ぶことがわかった。スワラの中央から広角に噴霧した液滴は、Wing-curved swirlerの方が Bent plate swirler よりも強く旋回し、飛跡が長くなった。最終的に、10 MW 級の大型燃焼試験炉において残渣油燃焼試験で両スワラを比較した。開発した Wing-curved swirler スワラの方が、Bent plate swirler よりも着火位置が近くなりばたつきも見られず保炎性が大幅に改善した。排気に含まれるばいじん濃度は、Wing-curved swirler スワラを用いるバーナで燃焼させた方が Bent plate swirler よりも低くなる。

第 6 章は本研究の総括である。

以上のように、本研究ではこれまで不明瞭であった内部混合型二流体噴射弁の混合室内及び噴孔の二相流動の役割を明らかにし、微粒化特性への影響を把握した。これらの基礎的知見を踏まえた上で、実機スケールの大容量の内部混合型多孔二流体噴射弁を試作し、気液衝突部に改良を施して微粒化の改善を示した。さらに、案内羽根の角度等の形状に工夫を施した新型スワラを試作して再循環流の違いを調べ、実機スケールの 10 MW 級の残渣油燃焼試験により、保炎性能と排気特性の改善効果を実証した。今後も、石油の堅調な需要が見込まれ、それに伴い副生される残渣油はさらに深絞りが進行し、これまで以上に粘性が高く、かつ硫黄分、窒素分、残留炭素分が高くなることが予想される。特に、極端な粘度の増大は残渣油を単純な液体とみなして良いかという根源的な課題もある。これらを将来的な研究及び開発の課題としたい。