

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	吸気噴霧冷却システムにおけるダクト内での液滴合体分離の影響
著者(和文)	都築 宣嘉, 宇多村 元昭, 柴田 貴範, 明連 千尋, 荒木 秀文, 宇多村 元昭
出典(和文)	第42回日本ガスタービン学会定期講演会, , , A-9
発行日 / Pub. date	2014, 10

吸気噴霧冷却システムにおけるダクト内での液滴合体分離の影響

*都築 宣嘉，宇多村 元昭（東工大），
明連 千尋，柴田 貴範（MHPS）

Effect of Droplet Coalescence and Breakup in Duct of Inlet Fogging Cooling System

*Nobuyoshi TSUZUKI, Motoaki UTAMURA(Tokyo TECH),
Chihiro MYOREN and Takanori SHIBATA(MHPS)

ABSTRACT

Effect of coalescence and breakup on droplets of Inlet Fogging Cooling system was studied numerically using CFD-code, FLUENT. Coalescence and breakup of droplets may affect the diameter of the droplets, and the diameter of the droplets affects evaporating behavior which causes the cooling. Many simulation calculations were executed for this evaporation cooling, however, investigation for this droplet coalescence and breakup with a real model has not been done enough. In this study, simulation calculation with a real model of Inlet Fogging Cooling apparatus considering the coalescence and breakup effect were examined, and those results were compared with numerical results without coalescence or breakup, and experimental results about the amount of drainage water. From the result, the amount of drainage was overestimated by numerical results with the effect of coalescence and breakup, and underestimated by those without the effect. Another optimized calculation model for coalescence and breakup will be required for accurate calculations.

Key words: Inlet fogging cooling, Numerical analysis, CFD, Droplet, Coalescence, Breakup

1. 緒言

ガスタービンシステムの研究の中で，吸気に対して多量の噴霧を行い，その気化熱によって吸気を冷却することで出力を増強させる，吸気噴霧冷却システムが注目を集めている。吸気噴霧冷却システムに対してはまだ研究開発が進んでおり^{1),2)}，最適な噴霧形態を明らかにするための数多くの研究がなされている。噴霧形態の最適化には数多くの試行が必要なため，実機体系での実験を行う前段階として，数値流体解析（CFD）による最適化研究が有効である。一方，この吸気噴霧冷却システムでは噴霧直後とダクトの曲り部において急速な蒸発が発生する。急速な反応と，それが影響する長時間の安定状態の解析は，現在の計算解析が最も苦手とする分野であり，慎重に計算結果と実験によるデータとの比較を行い，精度の検証をしなければならない。特にこの吸気噴霧冷却システムでは，噴霧の状態によって，噴霧直後に液滴の合体分離が発生する³⁾⁻⁵⁾。液滴径は蒸発の速度に大きく影響し，蒸発しきれなかった液滴によって発生するドレン水の発生状況にも大きく影響する。過去の研究としては，実機の体系では液滴の合体分離の影響を入れずに単に噴霧状況だけを再現したも

の多いが，液滴の合体分離による影響の検証をして，計算解析の精度を明らかにすることには大きな意義がある。

本研究では，吸気噴霧冷却システムの試験機の体系を再現した流路形状を用い，液滴の合体分離の影響を考慮した数値解析計算を，CFD コード FLUENT 14.5⁶⁾を用いて行い，その結果を液滴の分離合体を考慮しない場合，および実試験機での実験結果と比較して，その液滴の合体分離の影響に関して考察した。

2. 計算モデル

2.1 計算形状

計算形状は，実際の吸気噴霧冷却システムの試験機を模擬した，Fig. 1 のような形状としている。吸気入口からすこし進んだところに縮流部があり，その中間地点に噴霧ノズルがある。本体系では，鉛直方向に 9 個のノズルが並んだ配置が幅方向に 16 個並んだ，計 144 個のノズルからの噴霧がある形状としている。その後，液滴を含んだ吸気はトラッシュスクリーンを通り，下降後，圧縮機に流入する。そのストラット出口までをモデル化した。

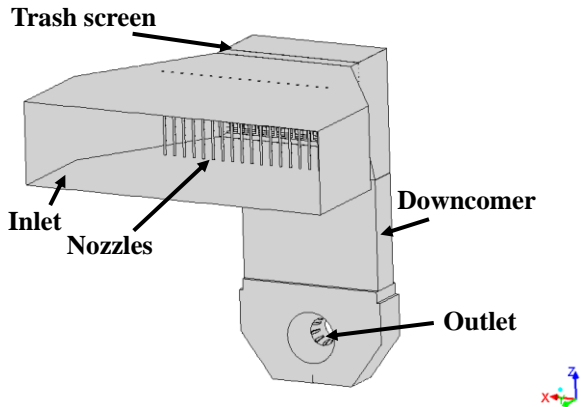


Fig. 1. Schematic figure of the calculation configuration.

2.2 計算モデル

境界条件は、入口は速度入口条件とした。実機での実験条件と合わせて設定し、温度は 289 K、絶対湿度を 0.0065 kg/kgDA とした。また、出口は圧力出口条件とし、これも実機での実験結果と極力条件を合わせた。ノズルは前節に示したとおり 144 点から粒径 15 μm の液滴を中実コーン状で噴出させ、その空気に対する液滴の質量比率は 1.56 wt%、温度 303.15 K とした。

計算コードは ANSYS FLUENT 14.5 を使用。乱流モデルは計算の収束を考慮して Standard k- ϵ とし、壁関数を用いた。液滴は FLUENT 付随の分散相モデル (DPM) を用い、液滴の合体分離に関しては、考慮する計算と、考慮しない計算との両方を行った。合体分離のモデルは FLUENT に内蔵されている O'Rourke のアルゴリズム⁹⁾を用いている。その際、壁面と衝突した液滴はドレンとなり計算体系から取り除かれるものとした。圧力と速度の連成手法には SIMPLE を、圧力の離散化スキームには PRESTO! を用いた。計算の収束性を考慮して、乱流エネルギー k、乱流散逸速度 ϵ は一次精度で、その他は二次精度で離散化を行った。

3. 計算結果と考察

3.1 計算結果

上記の計算体系において、液滴の合体分離を考慮しない／考慮する設定の両方を用いて計算し、それぞれの場合の結果を示す。

Fig. 2 に噴霧した液滴の流線を示す。(a)が液滴の合体分離を考慮しない体系での結果であり、(b)が液滴の合体分離を考慮する体系での結果である。また、線の色は液滴の流速を表している。Fig. 2 より、流線に関しては液滴の合体分離は大きく影響しておらず、流速分布にも大きな違いは見られない。Fig. 3 には出口の付近での滞留時間で色分けし

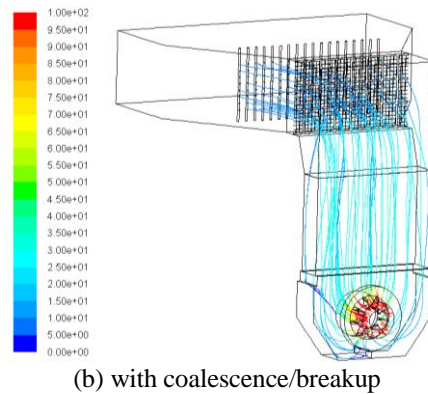
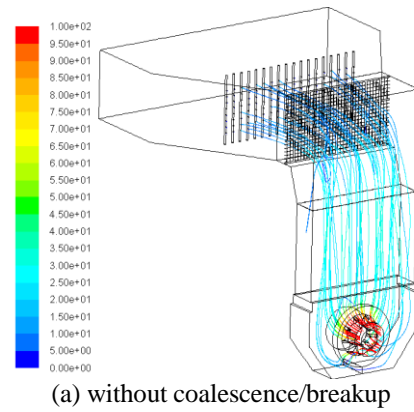


Fig. 2. Streamlines of the droplets. The color means velocity magnitude of the droplets.

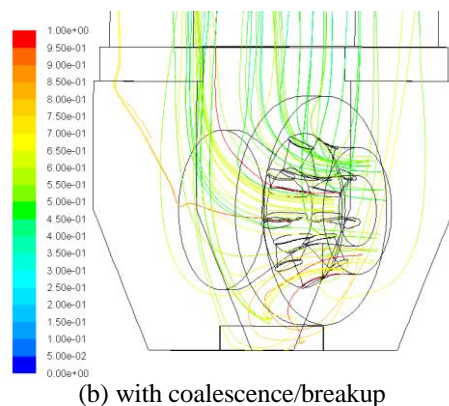
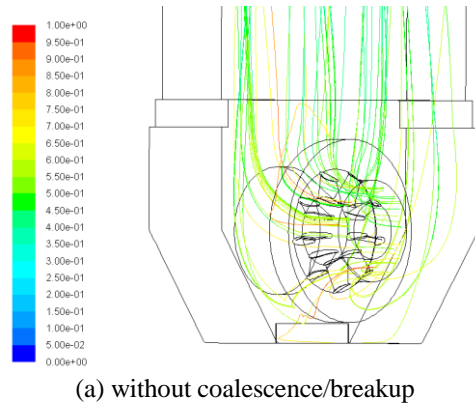


Fig. 3. Streamlines of the droplets with their flow time. The color indicates the flow time.

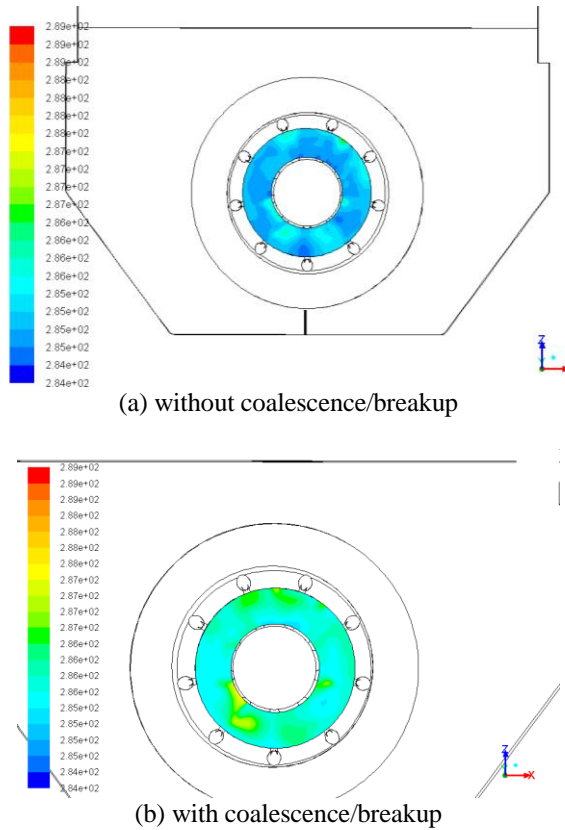


Fig. 4. Contour plots of temperature at the outlet.

た流線図を示す。Fig. 2 同様、(a)が液滴の合体分離を考慮しない体系、(b)が液滴の合体分離を考慮する体系での結果であるが、両者に大きな違いは見られない。

一方、Fig. 4 は出口における温度分布を示したものである。Fig. 4 より、(b)の液滴合体分離を考慮する体系では、(a)の液滴合体を考慮しない体系よりも出口温度が約 1 K 高く、液滴の合体分離を考慮したことにより液滴の蒸発速度が遅くなっていることが見て取れる。

Table 1. Summary of the experimental and numerical results.

	Experimental	Numerical without c/b	Numerical with c/b
Drainage ratio	27.1%	13.5%	52.0%
Temperature decrease at the outlet	4.1 [K]*	4.13 [K]	3.25 [K]
Absolute humidity at the outlet	0.0086 [kg/kgDA]*	0.0088 [kg/kgDA]	0.0083 [kg/kgDA]
Sauter mean diameter at the outlet	14.0 [μm]*	14.3 [μm]	30.9 [μm]

*: Trace data by one-dimensional analysis

液滴合体を考慮しない体系 (without c/b) と考慮する体系 (with c/b) の計算結果と、実機での実験結果の比較を行うと、Table 1 のようになる。計算結果はほぼ実験結果と整合している。一方、液滴の合体分離を考慮しない体系での結果では実験結果よりもドレン化率が低く出口における絶対湿度の高い結果となり、考慮する体系での結果では逆に、実験結果よりもドレン化率が高く出口における絶対湿度が低くなる結果となっている。すなわち、この結果からも液滴の合体分離を考慮する系ではしない系と比べて液滴の蒸発速度が遅くなり、そのためドレン化率が大きく、出口における絶対湿度が小さくなっていると考えられる。また、実験結果はその中間にあることがわかる。

3.2 液滴合体分離の影響に関する考察

計算結果、あるいは実験値との比較により、液滴の合体分離を考慮すると液滴の蒸発速度が遅くなり、ドレン化率が大きく、出口における絶対湿度が小さくなる。この現象を考察するために、計算形状の各断面を通過した液滴の流量とその液滴の Sauter 平均径(D_{32})を、液滴の合体分離を考慮する、あるいは考慮しない体系の計算からそれぞれ算出した。Fig. 5 にそれぞれの断面の位置を表した模式図を、Table 2 にその結果を示す。

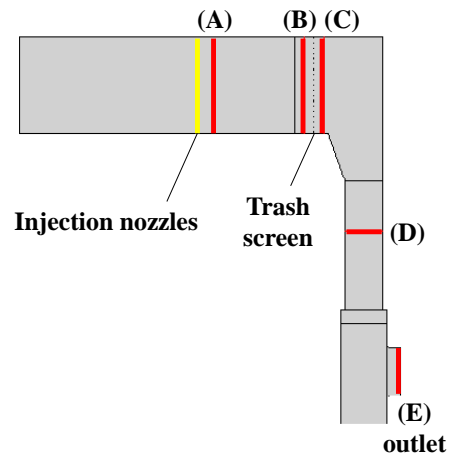


Fig. 5. Position of cross-sectional planes.

Table 2. Summary of the mass flow rate (m_d) and Sauter mean diameter (D_{32}) of the droplets at each cross-sectional plane (A)-(E).

	Without c/b		with c/b	
	m_d [kg/s]	D_{32} [μm]	m_d [kg/s]	D_{32} [μm]
(A)	2.045	14.72	2.092	20.65
(B)	1.955	14.51	1.841	24.78
(C)	1.881	14.48	1.833	31.25
(D)	1.792	14.38	1.674	36.56
(E)	1.561	14.25	0.595	30.88

Table 2 より、液滴の合体分離を考慮する体系では、その影響により各断面での Sauter 平均径が大きくなっている。また、液滴の合体と分離、両方の事象を考慮したモデルを導入したが、元の液滴径が小さいためか分離の影響はあまり見られず、合体の影響ばかりが目立つ結果となった。液滴径が大きくなるとドレン化しやすくなるため、液滴の流量は噴霧直後 (A) を除いて液滴合体分離を考慮しない場合と比べて小さくなり、すなわちドレンが多くなっていることが明らかとなった。また、その液滴流量は (D) と (E) の間で格段に少なくなっており、出口近傍で流れの方向が下向きから横向きに曲げられる箇所において、大きな径を持つ液滴は流れについていくことができずに壁面と衝突してドレンとなり、多量のドレンが発生する計算結果となっていることが明らかとなった。

以上の結果より、液滴の合体分離の影響を考慮することで、噴霧液滴の径が増大することが示された。そのため、液滴の蒸発速度が遅くなって、出口温度は約 1 K 上昇し、ドレン水量はドレン化率で比較して約 4 倍となることが示された。

一方、実機を用いた実験結果では、ドレン水量はその中間であり、液滴の合体分離を考慮する計算ではドレン水量を過大評価し、液滴の合体分離を考慮しない計算ではドレン水量を過小評価した。

4. 結言

ガスタービンの吸気噴霧冷却システムに関して、実際の実験機の流路形状を用い、その噴霧液滴の合体分離を考慮する計算を行って、その影響に関して考察した。

FLUENT14.5 と付随の分散相モデルを用いて、吸気噴霧冷却システムの試験機の流路形状に対して計算を行い、液滴の合体分離を考慮する、あるいは考慮しない体系での結果を得た。

その計算結果より、液滴の合体分離を考慮することでその液滴径は増大し、そのため蒸発速度が遅くなる。その出口温度は液滴の合体分離を考慮しない体系での計算結果と比較して約 1 K 上昇し、ドレン化率としては約 4 倍となることが明らかとなった。また、液滴の合体分離を考慮して液滴径が増大することによって、出口付近で流れの向きが変わるところにおいて径の大きな液滴は流れに乗れずに曲がりきれず、壁面と衝突してドレン化すると考えられる。その結果もあって、液滴の合体分離を考慮する体系ではドレン水量が増えていると考えられる。

吸気噴霧冷却システム実試験機による実験結果

と比較すると、ドレン水量としては液滴の合体分離を考慮する体系としない体系の間にある。実験結果をより精度良く予測・再現するためには、新たな液滴合体分離のモデルを提案する必要性があることも示された。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からエネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（高効率ガスタービン技術実証事業）の支援を受けた研究成果の一部である。支援に対し深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Myoren, C., Takahashi, Y., Yagi, M., Shibata, T., Kishibe, T., Evaluation of Axial Compressor Characteristics under Overspray Condition, Proc. ASME Turbo Expo 2013, July, 2013, San Antonio, US, GT2013-95402.
- 2) 明連千尋, 高橋康雄, 森崎哲郎, 川村康太, 柴田貴範, 岸部忠晴: 高温分空気利用ガスタービンシステム総合試験設備を用いた吸気噴霧冷却時の軸流圧縮機性能検討, 第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 2013-10, 沖縄, A-20.
- 3) Chaker, M., Meher-Homji, C. B., Mee, T., Inlet Fogging of Gas Turbine Engines – part A, B and C, Proc. ASME Turbo Expo 2002, June, 2002, Amsterdam, NED, GT2002-30562 to -30564.
- 4) Payne, R. C., Rick, W., Lotzerich, M., Computational Analysis of Droplet Motion in Industrial Compressor Intake, Proc. ASME Turbo Expo 2010, June, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22168.
- 5) Chaker, M., Meher-Homji, C. B., Mee, T., Inlet Fogging of Gas Turbine Engines – Experimental and Analytical Investigations on Impaction Pin Fog Nozzle Behavior, Proc. ASME Turbo Expo 2003, June, 2003, Atlanta, US, GT2003-38801.
- 6) ANSYS Inc., FLUENT Theory Guide, Release 14.5.7, 2012, ANSYS Inc.

