多角的光学計測による次世代超希薄燃焼ガソリンエンジン壁面近傍の熱流動現象及び成層水噴射効果の解明

Investigation of Thermo-Fluid Phenomena and Stratified Water Insulation at Near-Wall Region of Super-Lean Burn Spark Ignition Engine by Optical Measurements

研究代表者　東京工業大学工学院システム制御系　助教　長澤剛
Tsuyoshi Nagasawa

Super-lean burn spark ignition engine with in-cylinder water injection can realize over-52% indicated thermal efficiency. In order to further improvement of the technologies and to obtain guideline for thermal efficiency improvement by reducing heat transfer loss, details of thermos-fluid phenomena and effect of water stratification near the engine wall should be clarified. In this study, flow field near the wall, water spray distribution, and wall heat transfer were investigated by optical measurements and heat flux measurement by using a rapid compression expansion machine and optically-accessible engine. The obtained results give valuable information related to turbulent structure and temperature stratification near the piston wall.

要旨

乗用車用ガソリンエンジンにおいて，空気過剰率を 2 程度まで上げた超希薄燃焼は比熱比向上と低温燃焼による冷却損失の低減に伴って熱効率を大幅に向上させるポテンシャルを有し，注目を集める．また筆者らは超希薄燃焼と筒内水噴射を組み合わせることにより，52%を超える図示熱効率が得られることを確認している．この大幅な効率向上メカニズムを明らかにし，本技術の高度化と熱効率の更なる向上の指針を得るためには，壁面近傍における熱流動場や水分布および壁面熱流束を正確に把握する必要がある．そこで本研究では実機エンジンや急速圧縮膨張装置において壁面近傍流速分布の計測，水分布の計測，および熱流束計測を実施し，超希薄燃焼ガソリンエンジンにおける壁面熱伝達現象と水噴射による温度成層効果について考察した．

1．　まえがき

自動車から排出される二酸化炭素の一層の削減が求められる現在，自動車用エンジンの更なる熱効率向上は喫緊の課題であり，そのためには燃焼室壁面から外部への熱損失（冷却損失）を低減することが必須である．乗用車用ガソリンエンジンにおいては，空気過剰率を 2 程度まで上げた超希薄燃焼は比熱比向上と低温燃焼による冷却損失の低減に伴って熱効率を大幅に向上させるポテンシャルを有し，近年注目を集める[(1)]．一方で超希薄燃焼は強い筒内流動と燃焼変動の増加を伴うものであり，このような従来よりも複雑な流動・燃焼場における冷却損失機構の解明が強く求められている．また筆者らは超希薄燃焼と筒内水噴射を組み合わせることにより，52%を超える図示熱効率が得られることを確認している[1]．これは図 1 に示すように，エンジン筒内のピストン上面に水を噴射して成層化させることにより，壁面近傍の温度を下げることで冷却損失低減とノック抑制を効果的に実現することを狙ったものである．しかし，超希薄燃焼において筒内水噴射が壁面熱伝達現象および冷却損失機構に与える影響ついては未解明のままである．超希薄燃焼および水噴射技術の高度化と熱効率の更なる向上の指針を得るためには，壁面近

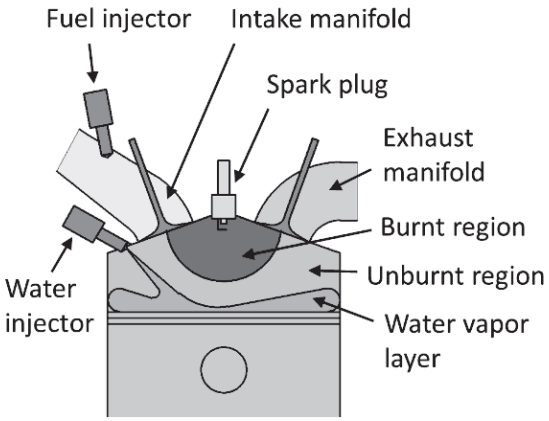

図 1 筒内水噴射の模式図

傍における熱流動場や水分布，壁面熱流束を正確に把握する必要がある．

そこで本研究では実機エンジンや急速圧縮膨張装置(RCEM)において種々の光学計測と熱流束計測を実施することにより，超希薄燃焼ガソリンエンジンにおける壁面熱伝達現象と水噴射による温度成層効果を明らかにすることを目指している．本稿では RCEM を用いた壁面近傍流動場計測，および実機エンジンにおける水噴霧分布と壁面熱流束の計測を実施したため，その内容を報告する．

２．実験装置と実験方法

２．１　壁面近傍流速分布の計測

エンジン内壁面境界層の速度分布の計測には，エンジン内の吸気－圧縮－膨張－排気の 1 サイクルを模擬できる急速圧縮膨張装置(RCEM) [2] を用いた．これは電磁油圧制御駆動される直動アクチュエータによりピストンを往復駆動する装置であり，ピストンストローク，ピストン速度等を個別に電子制御できる装置である．図 2 に装置外観を示す．本研究では，ストロークは 128 mm，燃焼室ボア径は 75 mm，圧縮比は 15 で駆動した．また，圧縮時間は 30 ms であり，これは機関回転数 1000 rpm に相当する．

本実験では実際のエンジン実機を模擬したペントルーフ型燃焼器を使用した．燃焼器の断面図，速度場の可視化エリアを図 3(a)に示す．予混合タンク内でトレーサー粒子と窒素を混合させ，油圧駆動式吸気バルブをピストン運動と同期開弁することにより，実機と同様な筒内タンブル流動を再現するとともに適正数密度のトレーサー粒子を筒内へ供給した．シリンダライナには 4 枚の石英窓を設置し，側面の窓

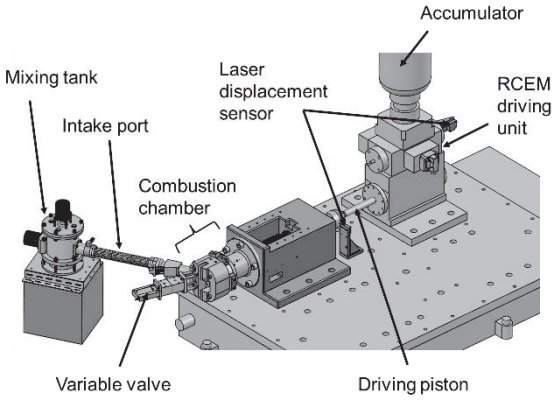

図 2 急速圧縮膨張装置(RCEM)

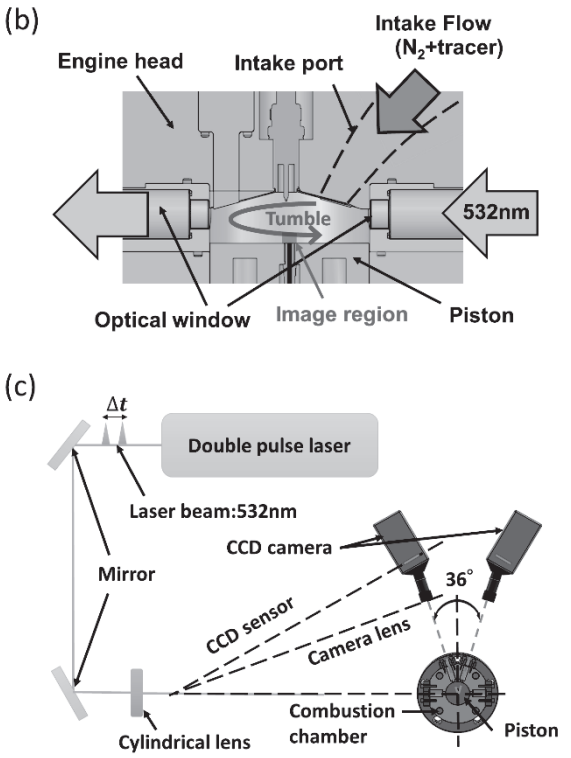

図 3 (a)燃焼室断面図 (b)ステレオマイクロ PIV の光学系

からレーザーシートを入射し上面の 2 枚の観察窓からレーザーシート上のトレーサー粒子からの散乱光を撮影する．ペントルーフの突き出し部分にはレーザーシートを入射するため，幅 1.5 mm のスリットを設けた．本研究の流速分布計測には，ステレオマイクロ PIV (2D-3CPIV) を用いた．撮影光学系の概要を図 3(b)に示す．本研究では，2 台のカメラを用いたステレオ撮影によってレーザーシート内の 2 次元 3 成分の速度を計測した．撮影エリアの全域で焦点が合うように，CCD のセンサ面とカメラレンズ面，レーザーシート面の延長線上が一点に交わるシャインフルーグ条件でカメラを配置した．カメラの視差角は 36 度である．レーザー光の波長は 532 nm であり，カメラの第一フレームと第二フレームに 2 つのパルスレーザーがまたがるようにタイミングを調節し，レーザー照射間隔 Δt を 2 μs に設定した．レーザーシートの厚さは約 0.8 mmである．トレーサー粒子には，直径 1.5～2.0 μm のシリカ粒子を用いた．計測は初期充填圧力 0.1 MPa，初期気体温度 298 K の非燃焼条件にて行い，TDC 前 4 ms～1.8 ms(TDC を 360 deg.CA としたとき，329～346 deg.CA)の複数時刻にて，それぞれ 2～3 ショットずつ撮影を実施した．

２．２　水噴霧分布と壁面熱流束の計測

ここでは実機エンジン筒内における水噴霧分布(散乱光計測)と壁面熱流束の計測を実施した．本研究における散乱光計測では，可視化単気筒SIエンジンを用いた．本エンジンの燃焼室形状は実際の超希薄燃焼実機試験[1]および前節のRCEM試験と同様であるが，図4(a)のようにシリンダライナが石英ガラスで出来ており，筒内の可視化計測が可能である．エンジンヘッドには幅1 mmの溝が設けられており，レーザーシートを燃焼室内に到達させられる．圧縮比は13，ストローク/ボア比は1.5，点火コイルは安定した希薄燃焼を実現可能にするために6個取り付けられている．またピストンには図4(a)に示されるように高応答の熱流束センサ[3]が3本埋め込まれている．本研究では図4(b)に示すように，可視化単気筒SIエンジンの燃焼室内にレーザーシートを照射し，筒内で噴射された水粒子の散乱光を高速度カメラで撮影することで，水噴霧の挙動を観測した．光源にはNd:YAGレーザー(波長532 nm，周波数12 kHz)を，カメラはフレームレート12 kHzの高速度カメラを使用することにより，2000 rpmにて1 deg.CAごとの撮影を実現した．実験における回転数は2000 rpmにて固定し，非燃焼条件とλ = 1.6の燃焼条件の両方の実験を実施した．水噴射量は一定とし，噴射タイミングを−150 deg.ATDC，−60 deg.ATDC，0 deg.ATDCと変化させて実験を行った．

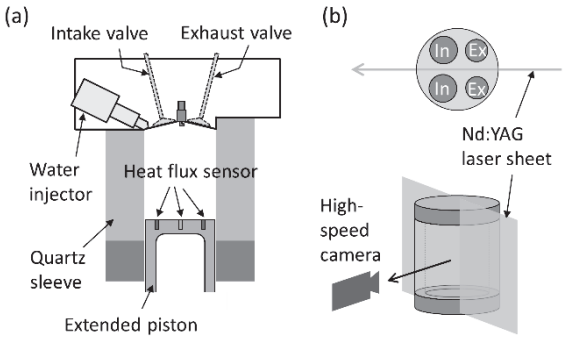

図4 (a)可視化エンジン (b)水噴霧分布計測におけるレーザーシートと高速度カメラの位置関係

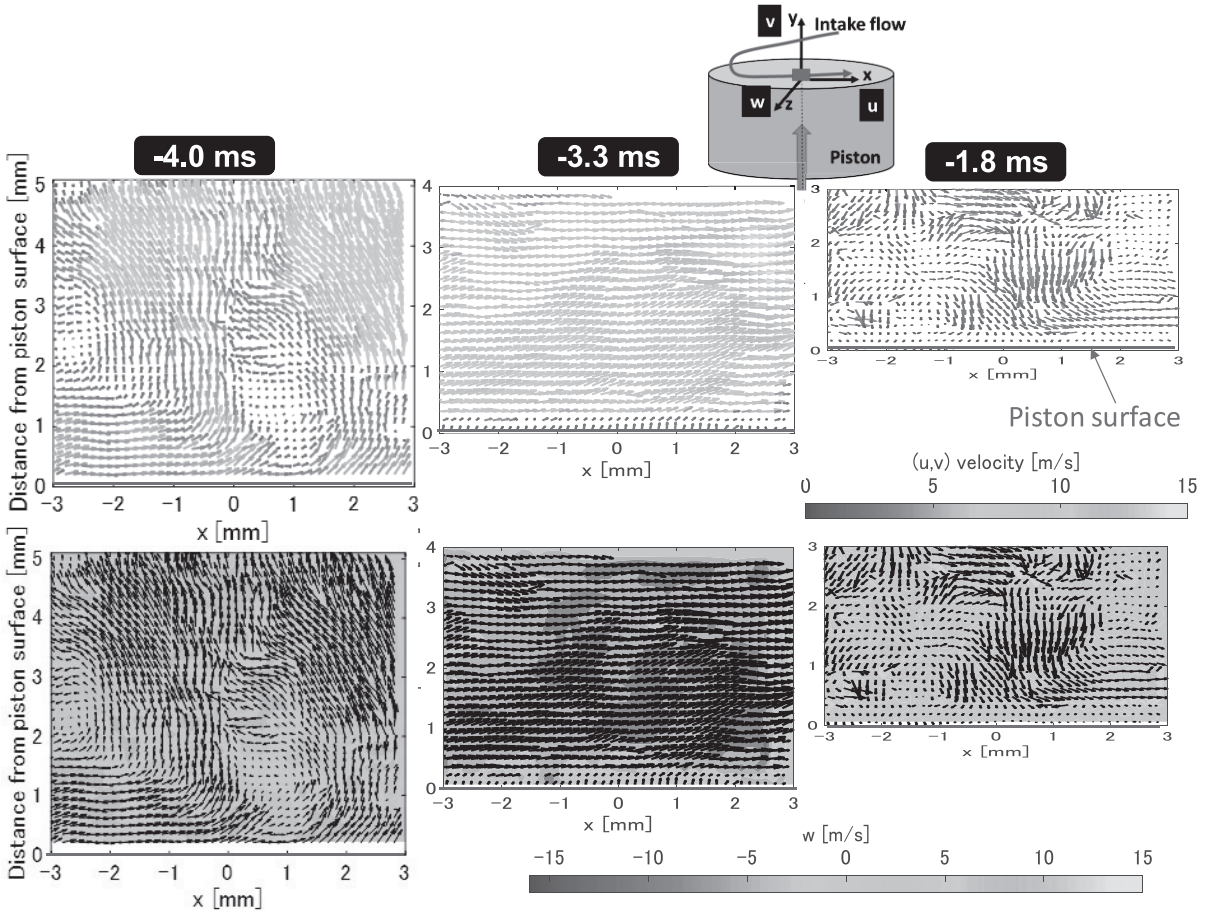

図5 RCEM内ピストン頂面近傍の瞬時速度ベクトル分布．上段に(u, v)ベクトルを，下段に(u, v)ベクトルとwカラーコンターを重ねた図を示す．座標系は図の上方に示す通り．

３．結果と考察

３．１　エンジン内壁面近傍の流速分布

図５にRCEMにてステレオマイクロPIVにより得られた上死点前4.0 ms，3.3 ms，1.8 msにおけるピストン頂面近傍の瞬時流速ベクトル(u，v)（上段），同ベクトル図に，計測断面垂直方向速度成分(w)の大きさを表すカラーコンター図を重ねて表示したもの（下段）を示す．なお，得られた速度場は別サイクルにおけるデータである．壁面に沿って最大で15 m/s程度の流動がみられる．これは上死点に向かうにつれ減衰する．また，計測断面に垂直な速度成分wの大きさも最大で15 m/s程度であり，かつ，計測ごとに向きが異なることから，ピストン頂面における主流方向が大きく変動している様子がわかる．図６にはy軸方向上方から見た(図５の座標系において上方から−y方向に見下ろした)，各位置におけるベクトル（u，w）を重ねて示す．この図からも主流方向がサイクルごとに変化しており，タンブル回転軸が変動していることがわかる．また図５と６より，上死点に近づくことによる速度成分の減衰の程度は，u，v成分と比較してw成分は小さいことが分かる

次に流速分布に対して様々な解析を行い，乱流としての特徴を抽出した．まず得られた瞬時流速分布に２次元FFT解析を行い，パワースペクトルを求めた．図７にu成分のパワースペクトルの時間変化を示す．これから，パワースペクトルの傾きは上死点前では−5/3よりも小さい（傾きが急である）が，上死点に近づくにつれて−5/3に漸近している様子がわかる．これから，ピストン壁面近傍の流れ場は上死点で

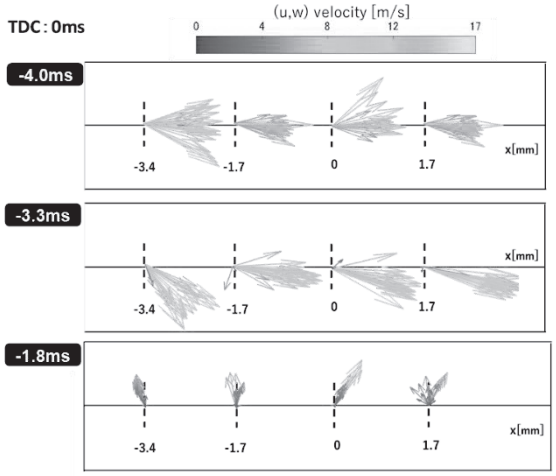

図６ 速度ベクトル（u，w）の分布

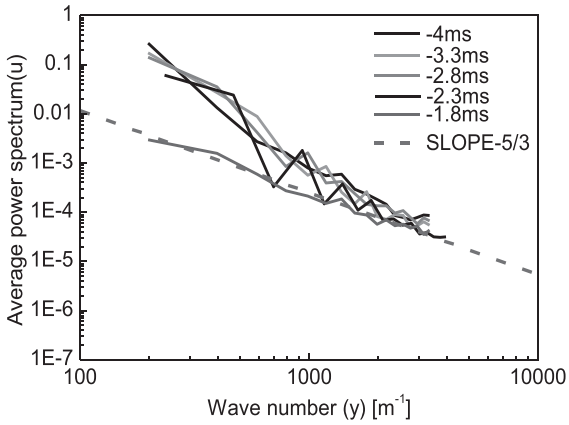

図７ 壁面平行速度成分uのパワースペクトル

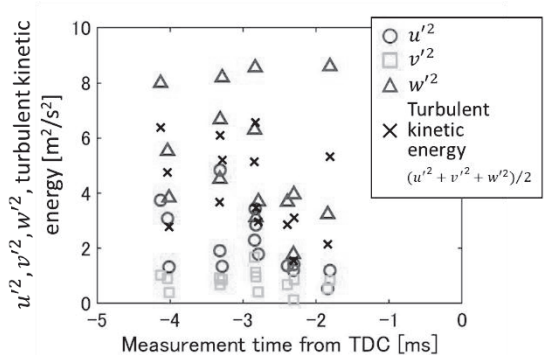

図８ 乱流運動エネルギーの時間変化．各速度成分の寄与も示している．

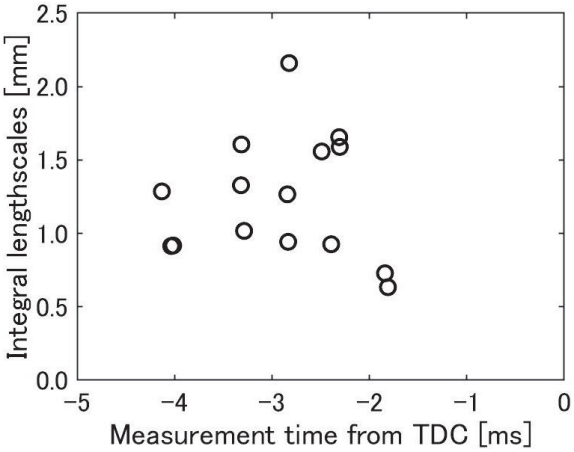

図９ 乱流積分スケールの時間変化

は慣性小領域に近い乱流になっていると推察される．次に瞬時流速分布に空間フィルターを適用し，大スケールの流れと小スケールの流れに分離した．小スケールの流れ成分(u’，v’，w’)より算出した乱流エネルギーを図８に示す．同図には各成分の寄与も同時に示している．図８より，実験ごとにばらつきはあるものの，乱流運動エネルギー*TKE*は2〜6 m^2/s^2程度であることが分かる．また，*TKE*への寄与はw’，

u’，v’の順に大きく，特にw’は他と比較して明確に大きいことから，上死点付近の壁面近傍においては非等方的な乱流となっていることが示唆される．図 9 には得られた乱流速度分布の自己相関から求めた積分スケールの時間変化を示す．これも実験ごとにばらつきはあるものの，筒内乱流の積分スケールは1～2 mm程度であることが分かる．

３．２　エンジン筒内の水噴霧分布と壁面熱流束

図10に可視化エンジンを用いた散乱光計測によって得られた水噴霧分布の時間変化を示す．各画像の左上が吸気ポートの方向であり，エンジン壁面およびピストン面を黄色線で示している．また図中にはピストン頂面の 3 つの熱流束センサの位置も示されている．ここでは水噴射時期SOIwが−150 deg.ATDC，−60 deg.ATDC，0 deg.ATDCの各条件について，非燃焼条件の50サイクル連続計測のうち，筒内圧の最大値がアンサンブル平均に最も近いサイクルの結果を代表として示している．

SOIw = −150 deg.ATDCの場合，噴射された水は排気ポート側のシリンダ壁へ向かった後，タンブル流に乗ってピストン頂面へと向かっている．噴射された水は筒内に均一に混合せず，水の多くがピストン頂面近傍に偏在することがわかる．また，点火時期付近である−30 deg.ATDCには水粒子からの散乱光が見られないことから，蒸発がほぼ完了していると考え

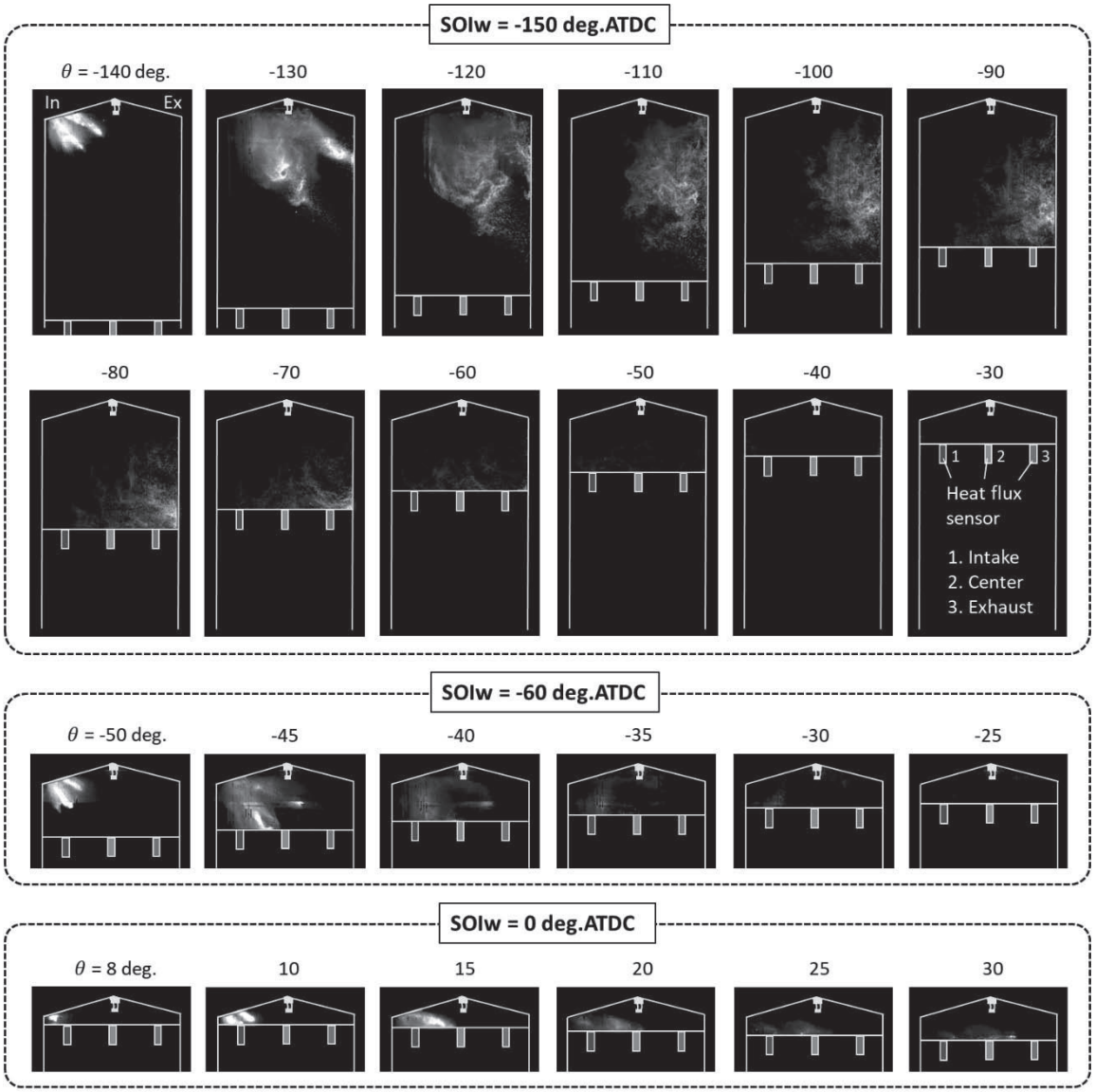

図10　可視化エンジンにおける筒内水噴霧分布の時間変化．水噴射時期SOIwが−150 deg.ATDC，−60 deg.ATDC，0 deg.ATDCの3条件について示している．図中にはピストン頂面の3つの熱流束センサの位置も示している．

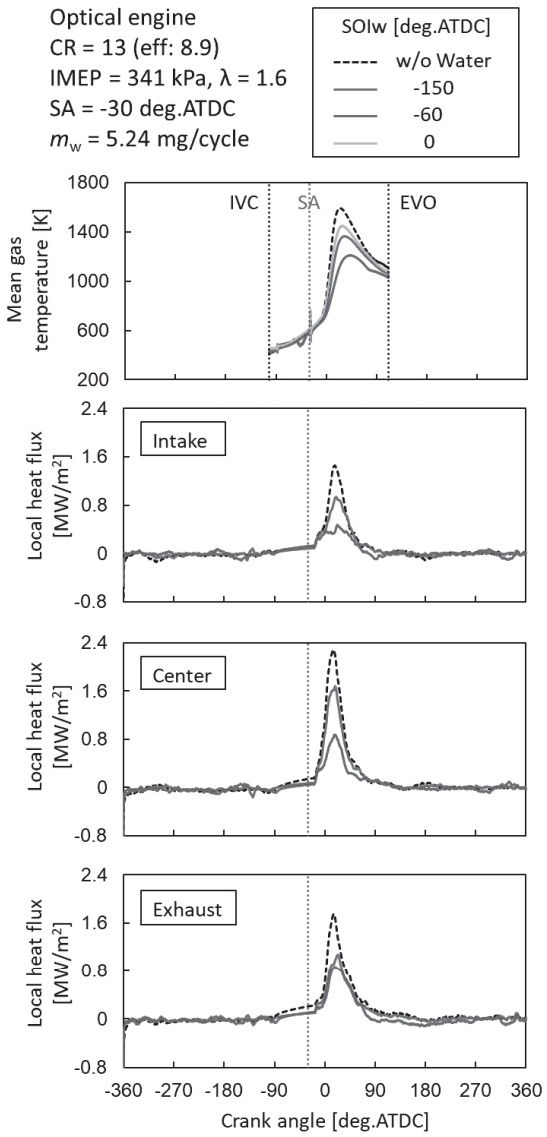

図11 可視化エンジンの燃焼条件(IMEP = 341 kPa, λ = 1.6)における筒内平均ガス温度およびピストン頂面 3 箇所の熱流束. SOIw = 0 deg.ATDC の熱流束については，センサ面への水噴霧衝突によるノイズが大きく出たため，除外した.

表1 可視化エンジンの燃焼条件(IMEP = 341 kPa, λ = 1.6)におけるピストン頂面熱流束の積分値(−360〜360 deg.ATDC にて積分).

SOIw [deg.ATDC]	w/o Water	-150	-60
Σq (Intake) [kJ/m²]	4.74	3.77	2.13
Σq (Center) [kJ/m²]	7.23	5.50	2.71
Σq (Exhaust) [kJ/m²]	7.10	4.62	2.39

られる. SOIw = −60 deg.ATDC の場合，水噴霧がタンブル流の主流と衝突して点火プラグ側に押し退けられており，特に点火時期付近において点火プラグ周囲に水が多く分布するようになる. そのため，着火や火炎伝播を阻害する可能性がある. SOIw = 0 deg.ATDC の場合，水噴霧は噴射されてすぐにピストン面に衝突して，その後ピストン面に沿って進む. しかし噴霧先端はピストン中央付近までしか到達せずピストン面に広く分布しておらず，燃焼後期となる膨張行程前半でも水が一部蒸発せずに残る. 実際の単気筒エンジン試験においても，−150deg.ATDC 噴射の場合は燃焼安定性を保ちつつノック・冷却損失低減効果が得られ，熱効率が上昇する. これに対し−60deg.ATDC 噴射では燃焼の悪化，0deg.ATDC 噴射ではノックの増加によって熱効率の向上は見られず，これらは水噴霧の可視化結果から予想される傾向と一致する.

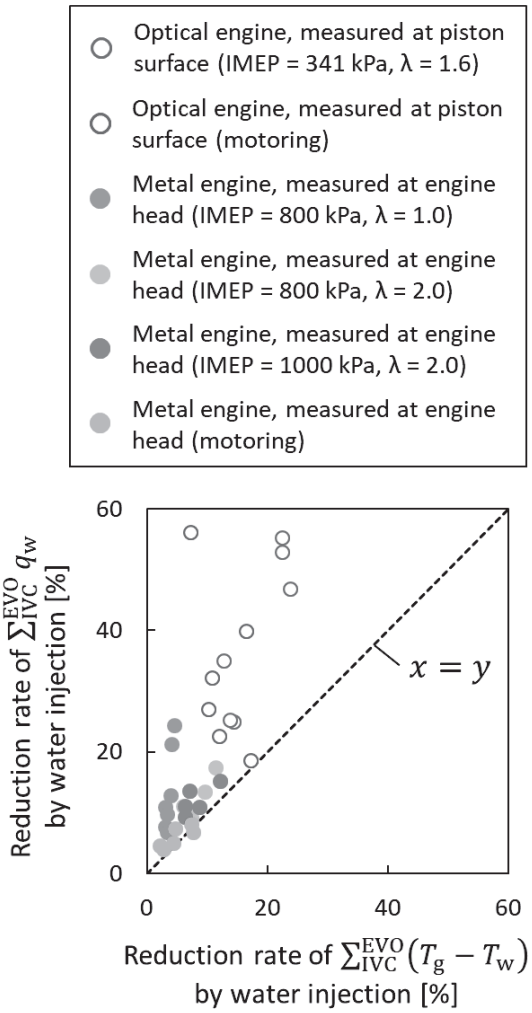

図12 水噴射が筒内壁面熱流束の積算値と平均気体温度−壁温差に与える影響.

図11は可視化エンジンの燃焼条件(IMEP = 341 kPa, λ = 1.6)における筒内平均ガス温度およびピストン頂面3箇所の熱流束を示す. なお SOIw = 0 deg.ATDC の熱流束については，センサ面への水噴霧衝突によるノイズが大きく出たため，ここでは除外した. この図より，水噴射によって筒内平均ガス温度が低下し，

それに伴ってピストン頂面の熱流束ピーク値も低下していることが分かる．表1は図11の熱流束を-360～360 deg.ATDCの範囲で積分したものである．これより，いずれの位置においても水噴射によって熱流束積算値は20%～最大66%程度低下することが分かる．

次に水噴射による温度成層化の効果を議論するため，可視化エンジンピストン頂面にて計測された熱流束と実機エンジンシリンダヘッド(可視化エンジンと同形状)の下面にて別途計測された熱流束と併せて考察を行った．図 12 に筒内水噴射した場合の，シリンダヘッド下面とピストン頂面における壁面熱流束の計測値から得た壁面伝熱量に与える影響（水噴射による伝熱量の減少割合）を，水噴射による筒内平均温度と壁面温度の差に与える影響（水噴射による温度落差の減少割合）に対しプロットした．これより水噴射による壁面伝熱量の減少割合は，筒内平均温度の低下による熱落差の減少割合よりも大きく，水噴射による冷損低減効果は，平均気体温度の低下だけでは説明できず．水蒸気層が壁面近傍に偏在化することで冷損低減効果を挙げている可能性が高いことがわかる．またこの効果はシリンダ壁面よりもピストン頂面においてより大きいことから，ピストン表面近くに水蒸気層が形成されて低温となる温度成層化が起きていることが示唆された．

4．まとめ

超希薄燃焼ガソリンエンジンにおける壁面熱伝達現象と水噴射による温度成層効果を明らかにすることを目的に，光学計測と熱流束計測によって筒内壁面近傍の熱流動現象を調査した．

強流動火花点火エンジン内の流動を模擬した急速圧縮膨張装置において，ピストン表面近傍の速度分布を拡大2D-3DPIVにより計測し，以下の知見を得た．

(1) ピストンが上死点に近づくにつれて，各速度成分は減衰するが，タンブル軸方向速度成分wの減衰の割合はピストン平行(主流)方向 u，垂直方向 v 成分と比較して小さい．また，w の方向はサイクル毎に変動する．

(2) 上死点近傍における乱流運動エネルギーは 2～6 m^2/s^2であり，w’の寄与は，u’，v’と比較して大きい．

(3) 乱流の積分スケールは 1～2 mm程度である．

次に可視化エンジンを用いて筒内水噴射時の水噴霧分布とピストン頂面熱流束を計測した結果，以下の知見を得た．

(4) 上死点前 150 deg.ATDC に水噴射を行うことにより，水はタンブル流に乗って吸気側からピストン表面近くに輸送され，層状に分布する．

(5) 筒内水噴射を行った場合，同一の平均気体温度の低下に対して，ピストン側の熱流束低減割合はヘッド側より大きい．

発表論文

[1] Tsuyoshi Nagasawa, Yuichi Okura, Ryota Yamada, Susumu Sato, Hidenori Kosaka, Takeshi Yokomori, Norimasa Iida, Thermal efficiency improvement of super-lean burn spark ignition engine by stratified water insulation on piston top surface, *International Journal of Engine Research* Vol. 22(5), 1421-1439 (2021).

[2] Yoko Yamakita, Jaeok Bae, Tsuyoshi Nagasawa, Hidenori Kosaka, Stereoscopic Micro-PIV Measurement of Near-Wall Velocity Distribution in Strong Tumble Flow under Motored SI Engine Condition, *SAE Technical Paper* 2020-01-2019 (2020).

[3] 長澤 剛, 神戸 聡一, 木村 岳, 佐藤 進, 小酒 英範, 希薄燃焼 SI エンジンにおける筒内水噴射方向が燃焼特性に与える影響, 自動車技術会論文集 Vol. 51, No. 5, pp. 747-753 (2020).

[4] 長澤 剛, 木村 岳, 神戸 聡一, 大倉 優一, 佐藤 進, 小酒 英範, SI エンジンにおける空気過剰率および筒内水噴射が壁面熱伝達に与える影響, 自動車技術会論文集 Vol. 51, No. 5, pp. 739-746 (2020).

参考文献

（1） 飯田訓正, 横森剛, 津江光洋, 北川敏明, 小酒英範, 三好明, 森吉泰生, SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームの研究成果―高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発―, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.197, pp.178-192 (2019).

（2） Shigeharu Kobori, Takeyuki Kamimoto, Development of a Rapid Compression-Expansion Machine Simulating Diesel Combustion, SAE Technical Paper 952514 (1995).

（3） 石井大二郎, 三原雄司, 同軸型薄膜温度センサを構成する材料が熱接点位置および計測精度に与える影響, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.871, 18-00395 (2019).