

微細気泡混入が予混合圧縮着火機関の混合気形成過程に与える影響

1. 緒言

予混合圧縮着火機関は希薄予混合気を自己着火させることで、窒素酸化物 NO_x と粒子状物質 PM を同時低減できるとして注目されている。しかし、燃焼制御が困難であり、出力増加のため燃料投入量を増加させると急峻な燃焼によりノッキングが生じるため運転領域が狭いという問題がある。この問題を解決するため、混合気形成過程を変化させることで燃焼制御を行う手法が有用である。

その1つとして、燃料に微細気泡を混入させる手法がある。久留米高専の中武ら⁽¹⁾、久留米大学の西村ら⁽²⁾は、軽油や BDF に空気の微細気泡を混入させ、ディーゼル機関に投入することで機関・排気特性に影響があると報告している。しかし微細気泡の数密度や噴霧に与える影響については調査されておらず、これを明らかにすることで燃焼制御の幅を広げることが可能となる。さらに微細気泡を着火性の異なる気体燃料とし、物理的・化学的に燃焼制御を行える。

液体燃料として、バイオディーゼル燃料 (BDF : Bio Diesel Fuel) は植物油や廃油から精製され環境循環型エネルギーとして注目されている。しかし軽油と燃料性状が異なることから噴霧や部品に悪影響を及ぼすため、既存のディーゼル機関に適用するには BDF を軽油で希釈する必要がある。ここで BDF に微細気泡を混入させると気液二相流の効果により噴霧に与える悪影響の改善が期待できる。

この研究は BDF への微細気泡混入が噴霧に与える影響と、機関に適用させた場合の機関特性・排気特性の調査を目的とする。ここでは燃料に混入させる空気微細気泡の数密度を変化させ、噴霧特性に与える影響を報告する。

2. 実験装置および実験条件

図 1 に噴霧実験を行う際に使用した実験装置の概略図を示す。高温高圧容器内で噴射した噴霧はシュリーレン法を用いて高速度カメラで撮影した。噴射ノズルはボッシュ式単孔ホールノズルを用いる。噴射ポンプはボッシュ式ポンプを一定の噴射期間で 1 回だけ噴射できるように改造している。燃料タンク内で微細気泡を一定時間発生させ、気泡数密度が安定したところで噴射ポンプへ導入させた。燃料の導入から噴射までは 2min を要し、その間、噴射管内圧力は $P_{ini}=4.1[\text{MPa}]$ にしている。

表 1 に実験条件を示す。燃料は廃食油 BDF : 20vol% と軽油 : 80vol% を混合させた B20 を用いる。微細気泡を混入させる前のものを通常燃料、30 分間バブリングし気泡

を抜いたものを溶解燃料，気泡を抜いていないものを微細気泡混入燃料とする．なお燃料の温度は 303[K]一定にしている．

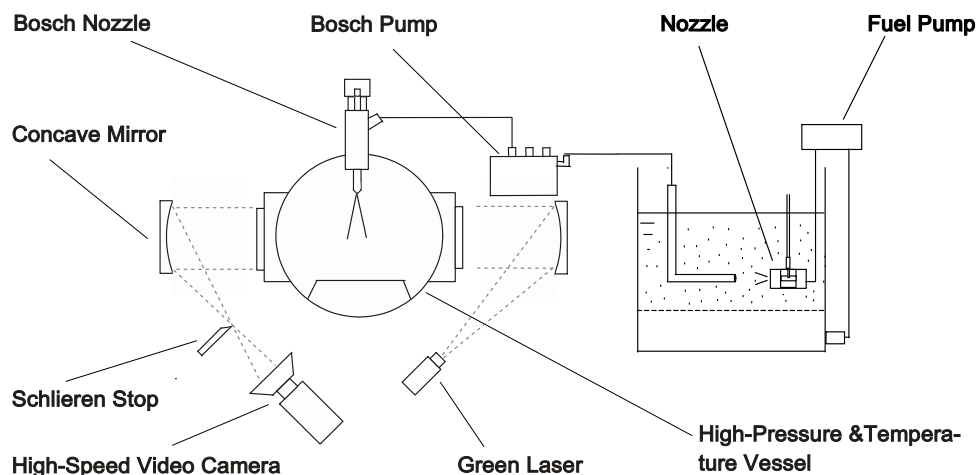


Fig.1 Schematic of Experimental Apparatus

Table.1 Experimental Condition

供試燃料	廃食油 B20	
噴射ノズル	単孔ホールノズル	
ノズル径	mm	$\phi 0.2$
雰囲気圧力	MPa	1.3
雰囲気温度	K	303
開弁圧力 P_{vo}	MPa	8.1 , 12.1 , 20.1
初期圧力 P_{ini}	MPa	4.1
噴射期間 T	ms	2.0
気泡算術平均粒径	mm	0.07
気泡数密度	Number/cm ³	6000

3. 実験結果および考察

3. 1. 通常 BDF の基本噴霧特性

図 2 に通常 B20 で開弁圧力を変化させ，噴射後 1.0ms 後の噴霧の画像を示す．開弁圧力が増加するに伴い，噴霧先端到達距離は長くなっている．これは開弁圧力が上がったことで燃料が軸方向に強く押されたからである．燃料液滴の数密度が高い黒い領域は，高い開弁圧になるほど多くなっており，同一噴射期間では燃料が多く噴射されていることがわかる．微粒化された燃料の存在を示している白い領域は $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ では多いが， $12.1[\text{MPa}]$ になると少なくなっている．これは $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ では貫徹力が低く，半径方向へ噴霧が広がったためだと考えられる．さらに $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ から

$P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ になると白い領域が増加しており、これはノズル内キャビテーションにより液中の分裂が促進されたためだと考えられる。

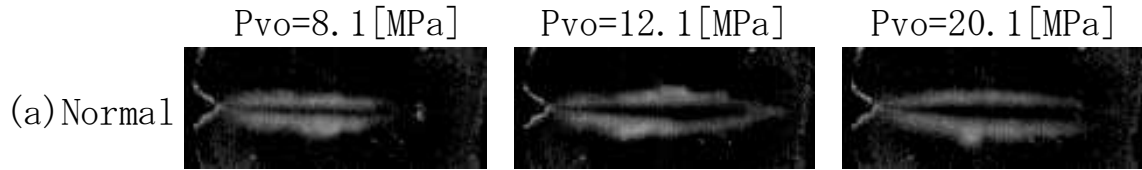


Fig.2 Photographs of Spray (Normal B20)

この噴霧画像を解析した結果を図3に示す。開弁圧力は $P_{vo}=8.1, 12.1, 20.1[\text{MPa}]$ とし、横軸は噴射後経過時間 $[\text{ms}]$ で、縦軸は (a)噴霧先端到達距離 $[\text{mm}]$, (b)噴霧角 $[\text{deg.}]$, (c)噴霧面積 $[\text{mm}^2]$ である。

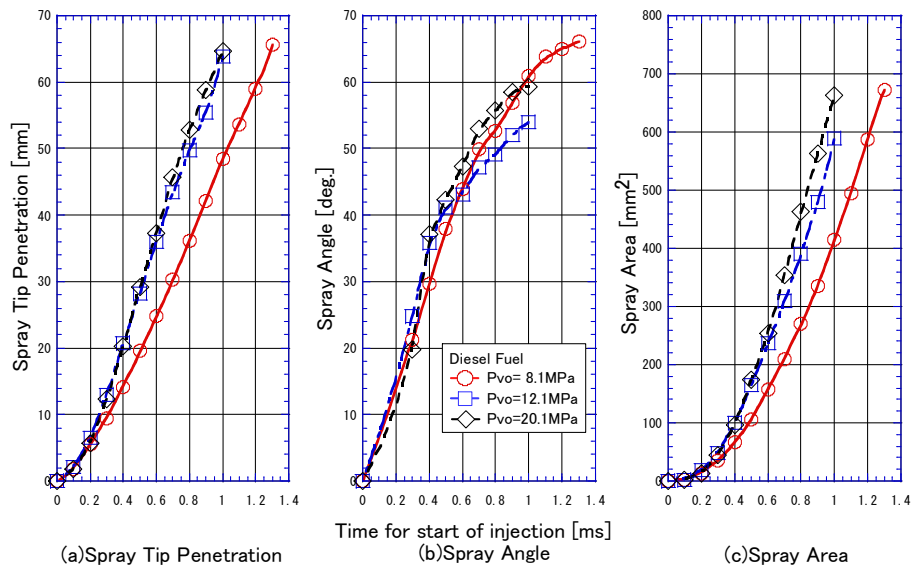


Fig.3 Characteristics of Spray (Normal B20)

噴霧先端到達距離はいずれの開弁圧力でも時間が経過するにつれて長くなっている。開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ から $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ になると同一時間で比較すると長くなっている。これは開弁圧力が増加したことで貫徹力が増加したためである。しかし $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ から $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ の変化率は $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ と比較して小さくなっている。これは分裂長さが短くなり噴霧が半径方向に広がったことで貫徹力が小さくなったためだと考えられる。

噴霧角はいずれの開弁圧力でも時間経過に伴い大きくなっているが、噴射後経過時間 $t=0.5[\text{ms}]$ 以降に増加率に変化が見られる。これは噴射中に噴出速度が大きくなり貫徹力が増加したためである。さらに開弁圧力が増加するに伴い短時間で変化しており、 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ では $t=0.8[\text{ms}]$, $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ では $t=0.7[\text{ms}]$, $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ では $t=0.6[\text{ms}]$ となっている。開弁圧力が増加したことで噴出速度が最大になるまでの時間が

短縮されたと考えられる。

噴霧面積はいずれの開弁圧力においても時間経過に伴って増加率が変化しながら大きくなっている。噴霧先端到達距離と噴霧角度の関係からその変化がわかる。開弁圧力が増加すると同一経過時間での噴霧面積も増加しているが、これは噴出速度が大きくなり燃料の噴射量が増加したためである。

3. 2 空気の溶解と開弁圧力が B20 の噴霧特性に与える影響

3. 1 節において基本的な噴霧特性がわかったため、次に燃料に空気を溶解させたときの噴霧を比較する。

図 4 に通常 B20 と溶解 B20 の噴霧画像を開弁圧力別に示す。溶解 B20 の開弁圧力による変化は 3. 1 節と同様である。しかし通常 B20 と比較すると、いずれの開弁圧力でも噴霧は細くなっており、特に白い領域が減少していることがわかる。ガス溶解燃料の噴霧はキャビテーションによる乱れが大きくなり噴霧は太くなるという報告がある。しかし BDF は酸化により燃料性状が変化することから、噴霧は小さくなったと考えられる。

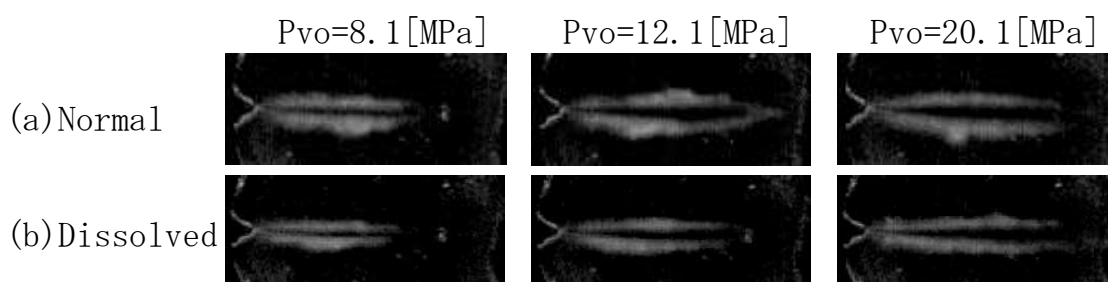


Fig.4 Photographs of Spray (Normal-Dissolved B20)

図 5 に通常 B20 と溶解 B20 の噴霧特性を示す。

通常 B20 と溶解 B20 の噴霧先端到達距離を比較すると、いずれの開弁圧力でも噴霧初期に増加率の違いが見られ、その後は同じ増加率になっている。開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ では溶解 B20 の噴霧先端到達距離が短くなっている。山根の報告^③によると BDF が酸化劣化すると動粘度が増加する。そのためノズル内の流動抵抗が大きくなったと考えられる。開弁圧力 $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ の場合は長くなっているが、これは動粘度が大きくなったことからキャビテーションが発生しにくくなり、貫徹力が低下しなかったためだと考えられる。

噴霧角は開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ の場合、全体的に小さくなっていることがわかる。これは BDF が酸化し動粘度が高くなり拡散性が落ちたと考えられる。しかし開弁圧力が高くなるに伴い減少率が小さくなった。これはノズル内キャビテーションの振動が強くなり拡散性が向上したためと考えられる。

噴霧面積もいずれの開弁圧力でも、噴射初期に影響が見られ、その後の増加率に変化

は見られなかった．開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ では面積は全体的に小さいものの， $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ では同程度， $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ では大きくなっている．開弁圧力の増加に伴う噴霧先端到達距離の増加，噴霧角の減少率の改善から溶解 B20 では開弁圧力が高いほど噴霧面積が増えることがわかった．

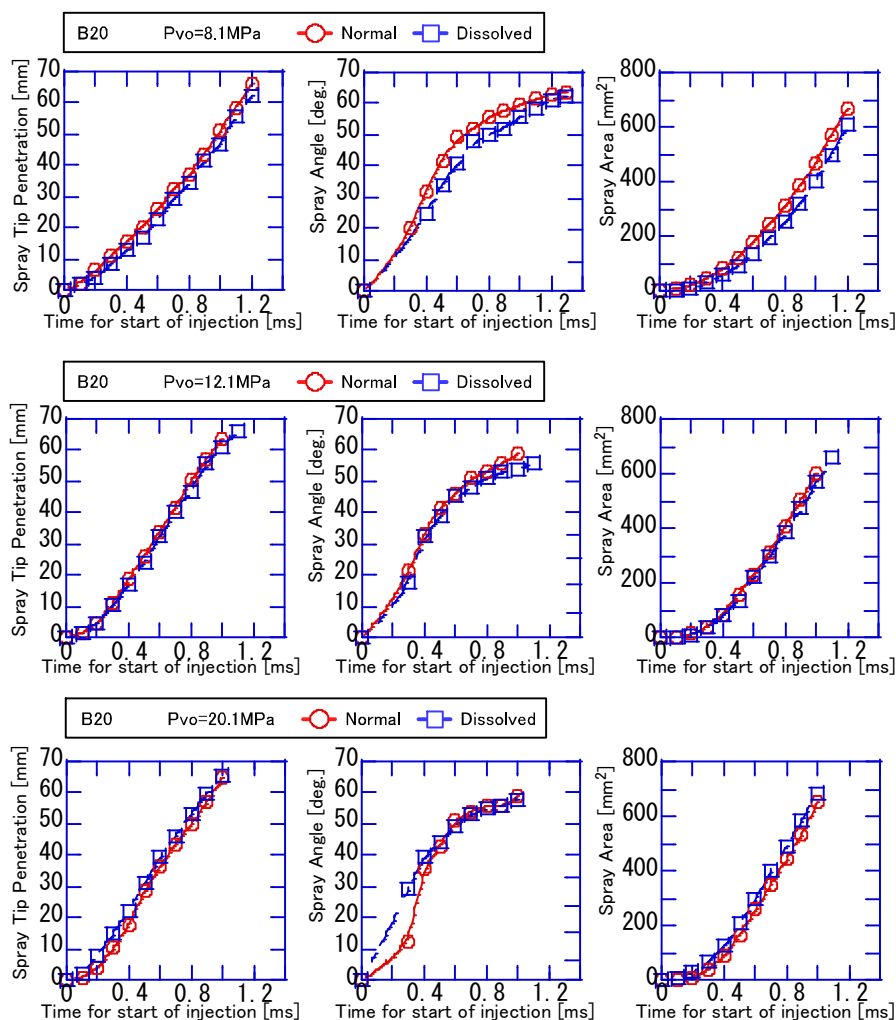


Fig.5 Characteristics of Spray (Normal-Dissolved B20)

3. 3 微細気泡混入による影響

次に溶解 B20 に微細気泡を混入させて実験を行った．微細気泡の混入密度はいずれの開弁圧力でも $6000[\text{Number}/\text{cm}^3]$ とした．図 6 に溶解 B20 と微細気泡混入 B20 の噴霧画像を示す．これまでの実験結果と同様に噴霧の黒い領域は開弁圧力の増加に伴い大きくなっている．しかし，いずれの開弁圧力でも白い領域が大きくなっており，拡散性が向上したことがわかる．微細気泡を混入させたことで空気の溶解量が増加し，キャビテーションが発生しやすい状態になったためだと考えられる．

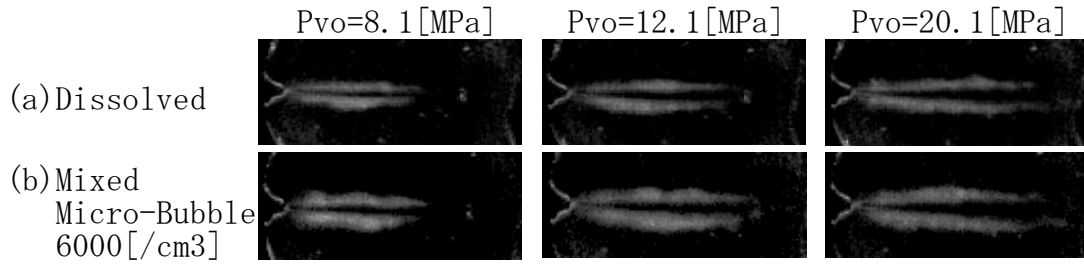


Fig.6 Photographs of Spray (Dissolved, Mixed Micro-Bubbles B20)

図 7 に溶解 B20 と微細気泡混入 B20 の噴霧特性を示す。

まず開弁圧力 $P_{vo}=8.1$ [MPa]での噴霧特性を比較する。噴霧先端到達距離は増加率に変化が見られ、全体的に小さくなった。これは液柱中の気泡の存在が半径方向への拡散を促進させ、貫徹力が小さくなったからだと考えられる。同様に噴霧角は大きくなったが、噴霧面積に差が見られないのは、噴霧角は大きくなったものの噴霧先端到達距離が短くなったためである。

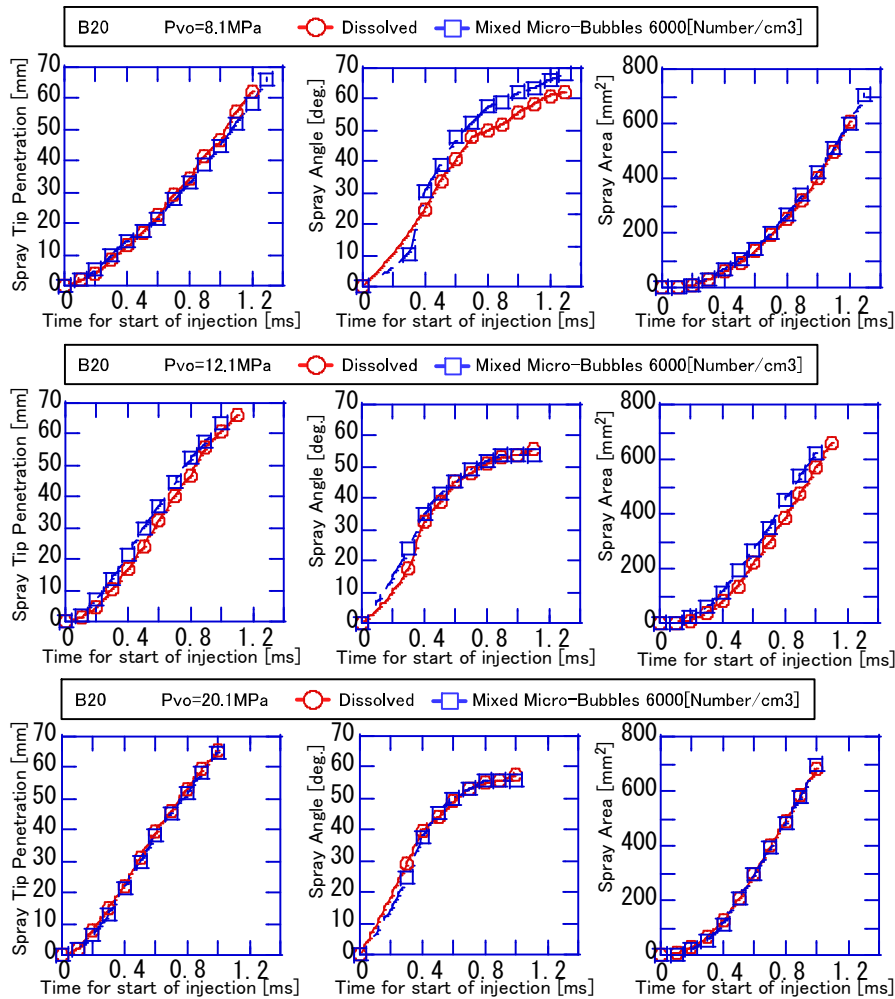


Fig.7 Characteristics of Spray (Dissolved, Mixed Miro-Bubbles B20)

開弁圧力 $P_{vo}=12.1[\text{MPa}]$ では噴霧先端到達距離は長く、噴霧角は変化がみられず、噴霧面積は大きくなっている。噴霧先端到達距離は 3. 2 節と同様に噴射初期の増加率に違いが見られ、その後の増加率は同じである。噴霧先端到達距離が長くなったのは、気泡の存在がキャビテーションを大きく成長させノズル内で流れの剥離が起こり、拡散性が低下し貫徹力が大きくなったためだと考えられる。しかし噴霧角に変化が見られないのは、不完全に溶解した空気が析出したためだと考えられる。噴霧面積は噴霧先端到達距離は長くなったが噴霧角に変化がなかったため増加した。

開弁圧力 $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ では、噴霧先端到達距離、噴霧角、噴霧面積ともにほとんど変化が見られなかった。開弁圧力が高く、空気が溶解したことで酸化劣化が促進され、動粘度の増加によるキャビテーションの抑制と空気溶解によるキャビテーションの促進が相殺されたためだと考えられる。

3. 4 空気溶解、微細気泡混入が噴霧角に与える影響

ここまで通常 B20、溶解 B20、微細気泡混入 B20 と実験を行ったが、噴霧特性は複雑に変化した。そこで最も変化の大きかった噴霧角に注目し、噴射後経過時間 $t=1.0[\text{ms}]$ 後の変化の差をとった。その結果を図 8 に示す。

いずれの開弁圧力でも溶解 B20 は通常 B20 と比較して噴霧角は小さくなった。微細気泡混入 B20 と溶解 B20 との差は、開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ において増加しているが、開弁圧力が増加するに伴って減少している傾向が見られた。総合すると、通常 B20 に微細気泡を混入させることで噴霧角が広がったのは開弁圧力 $P_{vo}=8.1[\text{MPa}]$ の時のみであった。 $P_{vo}=20.1[\text{MPa}]$ ではどの条件でも噴霧角は小さくなることから、微細気泡混入 B20 の噴霧においては開弁圧力が低いほど噴霧角度は大きくなることがわかった。

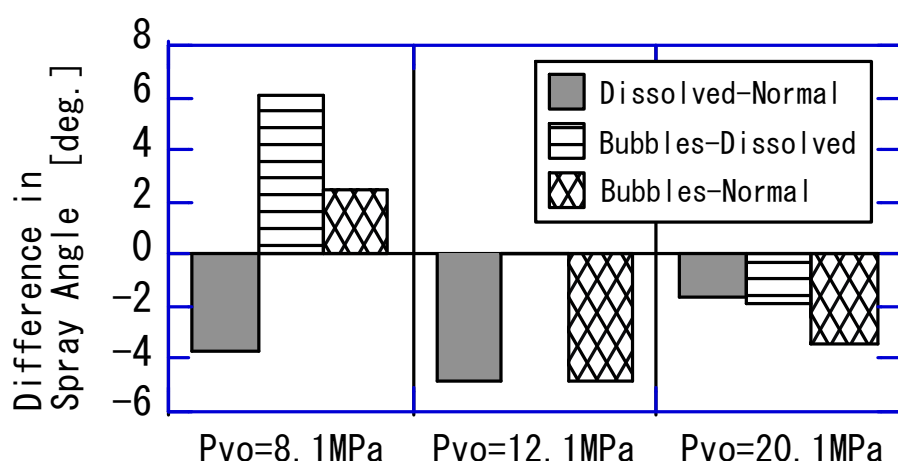


Fig.8 Difference in Spray Angle

4. 結言

B20 に空気を溶解させた場合，溶解 B20 に微細気泡を混入させた場合の噴霧特性について調査した結果，以下の知見を得られた．

1. B20 に空気を溶解させることで酸化劣化が促進され，開弁圧力が高いほど噴霧特性に与える影響が小さくなった．
2. 溶解 B20 に微細気泡を混入させることで，開弁圧力が低い場合に噴霧角の拡大が見られた．
3. 通常 B20 と微細気泡混入 B20 では，開弁圧力が低い場合に噴霧角が拡大した．

5. 参考文献

- (1) 中武，渡辺：超微細気泡混入軽油によるディーゼル機関の環境負荷低減，日本マリンエンジニアリング学会誌 第 46 巻 第 6 号 pp.75(2011)
- (2) 西村，渡辺：マイクロバブルを用いたバイオディーゼルの研究，日本機械学会講演論文集 No.128-1 pp.351(2012)
- (3) 山根：バイオディーゼル燃料に対する酸化防止剤の効果，オレオサイエンス 第 12 巻 第 5 号 pp,189 (2012)