

論 文

CO₂ガス溶解による液体微粒化に関する研究*

津田宏二*¹, 大竹伸明*², 大島亮一郎*³

A STUDY ON LIQUID ATOMIZATION BY DISSOLVED CO₂ IN THE LIQUID

Koji TSUDA, Nobuaki OHTAKE and Ryoichiro OHSHIMA

It is considered that gases dissolved in a liquid work effectively on liquid atomization at the region of lower pressure and higher temperature than at that of dissolved conditions of gas. To clarify the atomizing characteristics of liquid, experimental studies were carried out using tap water as solvent and CO₂ and air as dissolving gas. The effects of dissolved gas, such as the quantity of air and CO₂ in tap water, on the liquid atomization under the lower pressure were measured experimentally by use of Pintle type atomizer. The test results were obtained that dissolving CO₂ in tap water worked well on the liquid atomization than dissolving air. Namely, Sauter's mean diameter in former case was smaller than that in latter case.

Key Words : Atomization, Spray Characteristics, CO₂ Dissolution, Low Pressure, Pintle Type Atomizer

1. 緒言

燃焼効率の向上手段としての微粒化研究は、近年数多くなされている。微粒化現象に注目した本研究は、フラッシングによる微粒化現象に着目し、その微粒化特性を解明しようとしたものである。液体へのガス溶解は、そのガス溶解液体の減圧場噴霧により、ガス分離挙動が液体の微粒化に効果をもたらすと考えられており、従来において、溶解ガスとしてO₂およびN₂を用い実験^{(1),(2)}が行われてきた。本研究では、液体に対する溶解度が比較的多い二酸化炭素(CO₂)を用い、液体へのガス溶解量測定およびガス溶解液体の噴霧の実験等を行った。

噴霧実験は、低圧での微粒化特性の優れ

ているピントル式噴射弁を用いて行い、噴霧流量、噴霧角、粒度分布がガス溶解することによりどのように変化するかを、ガスを溶解させない液体との噴霧特性上の比較を行った。一方、ガス溶解量測定では単体ガスとしてCO₂および空気を溶解させるほかに、CO₂とN₂の混合ガスの溶解量についても検討してみた。

なお、本研究は比較的低压領域での特性を論じており、これはディーゼル等の高压機関を対象としたものではなく、ガソリンエンジンの吸気マニホールド内あるいはボイラ等の比較的低压でしかも大気圧に近い機関を対象としている。

2: 実験装置および実験方法

本実験では、溶媒として水道水を、溶解ガスとして空気とCO₂をそれぞれ用い、溶

*平成4年8月26日 第19回液体の微粒化に関する講演会において講演、原稿受付 平成4年12月22日

*1 学生会員, 東北学院大学大学院

〒985 多賀城市中央1-13-1

TEL02236-8-1115

*2 東北学院大学大学院

*3 正員, 東北学院大学工学部

解と噴霧の実験を行った。また、大気圧中の水道水にはCO₂がほとんど溶解されず、空気のみが飽和溶解状態にあるものと仮定する。実験に当っては溶解圧力、噴霧圧力を0.1~0.7(MPa) gaugeとして比較的低压の範囲内で行った。

2. 1 ガス溶解量測定装置

溶解測定に用いた装置の概要を図1に示す。この装置は、急減圧によって液体から分離したガスの体積を測定する原理を利用しており、その方法は次のとおりである。容器①に水を予め入れておき、バルブ⑤を開放し、溶解させるガス(空気又はCO₂)で加圧することにより、水にガスを溶解させる。また、溶解手段としては、水とガスの接する圧力、すなわち溶解圧力一定の状態ですり攪拌溶解、および数時間の放置溶解(攪拌なし)を行っている。そして、ガス溶解させた水を同一ガスで溶解圧力まで加圧した容器②に移動させる。その後、大気圧下のガス分離器③でガスを液体より分離させ、体積測定器④で分離ガス体積を測定する。

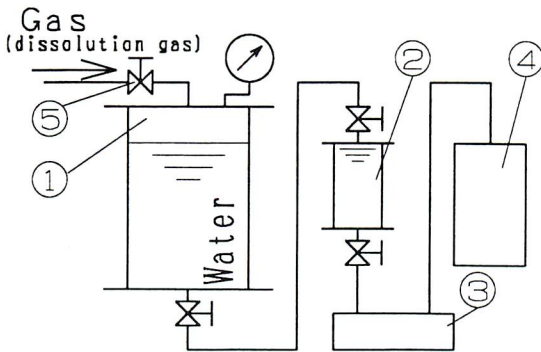


図1 溶解量測定装置概要

表1 van der Waals の定数

GAS	a(cm ⁴ · N/mol ²)	b(cm ³ /mol)
CO ₂	364 × 10 ⁻³	42.7
N ₂	141	39.1
Air	139	36.5

すなわち、分離したガスの体積は、ゲージ圧力加圧分の溶解量を示すことになる。

このような方法で、空気、CO₂の水への溶解量がHenryの法則に従うかを先ず検討した。一方、ガス溶解による加圧容器内の圧力降下から溶解量を求める原理⁽¹⁾を用い、それにより得られた結果と急減圧で求めた結果とを比較した。また、本実験では低压の溶解であるため、比較的低压で用いられるvan der Waalsの状態式(1)に代入して計算を行っている。

$$(p + n^2 a / v^2) (v - nb) = RT \quad (1)$$

ここに、p = 圧力、v = 体積、n = モル数、a、b = 一定とし、今回用いたそれらの値を表1に示す。

溶解量の計算方法としては、ガス溶解による容器内の圧力降下分より求めるものであり、RTを一定として行った。さらに、

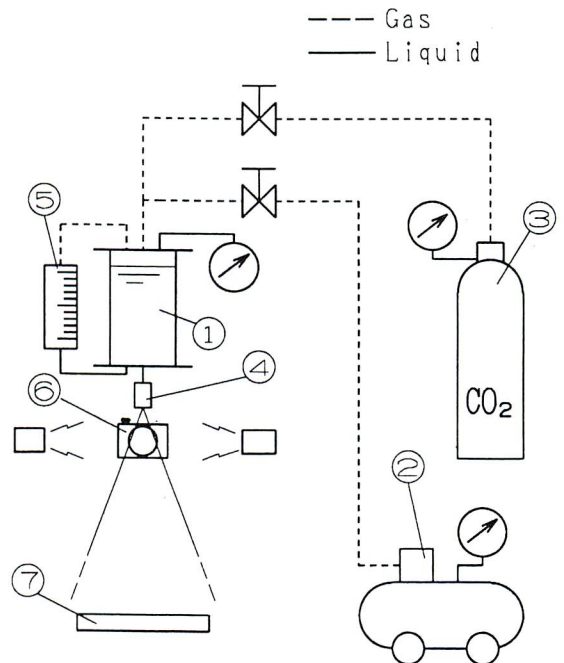


図2 噴霧実験装置概要

この圧力降下法により、CO₂とN₂の混合ガスによる溶解量測定を行っており、そのガスの混合比を変化させた時、それが Dalton の分圧則に従うか否かも検討した。混合ガスをCO₂とN₂にした理由については、燃焼排ガスよりCO₂を選択吸収させることを想定してCO₂およびN₂とした。

2. 2 噴霧実験装置

噴霧実験装置概要を図2に示す。ガス溶解部本体①内でコンプレッサー②の空気を、あるいはボンベ③のCO₂を加圧溶解させる。溶解後、コンプレッサー②で噴霧圧力を調整し、⑤の水位変化（①の水位変化）を測定しながらピントル式噴射弁④（図3）よ

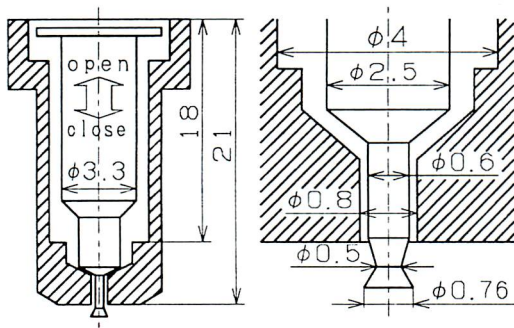


図3 ピントル式噴射弁

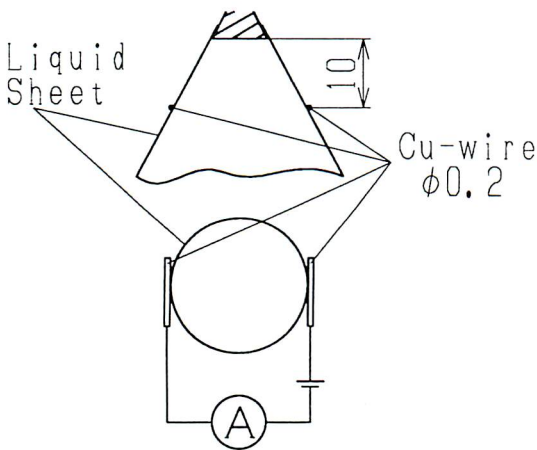


図4 噴霧角測定方法

り液体を噴霧させる。また、噴霧状態は⑥で写真撮影され、⑦の回転シャッター⁽³⁾で液滴を油浸法を用い採取する（受け止め油：シリコン油1000 cst を使用）。⑤で測定された水位変化は噴霧流量に換算される。噴霧撮影装置⑥の閃光時間は約2 μs の単発光である。

なお、回転シャッター⑦は一定時間内の噴霧液滴を採取するため、サンプリング位置は噴射弁中心下方900mmの所である。

さらに、本実験では噴霧角の測定を次のような方法で行っている。図4に示しているように噴射弁出口より形成される液膜に対し、電流計に接続したφ0.2mmの銅線を半径方向より近づけ液膜に接触させる。この接触した瞬間に電気が流れ始めるので、その時の銅線間の距離を液膜直径と定義した。この測定は、液膜が分裂する前の弁先下10mmの位置で行った。以上の実験方法で、水に空気、またはCO₂を溶解させ、ガスを溶解させない場合の噴霧との比較検討を行った。

3. 実験結果

3. 1 ガス溶解特性

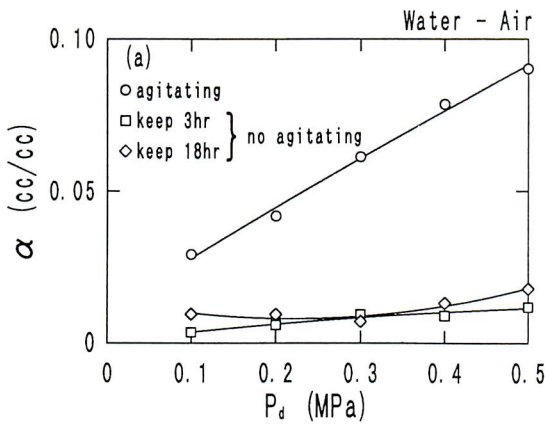
図5 (a), (b) に溶解圧力 P_d (ゲージ圧) を変化させたときの各溶解条件におけ

表2 各ガスに対する水温と理論溶解度 α_{th} の関係 (1 atm において)

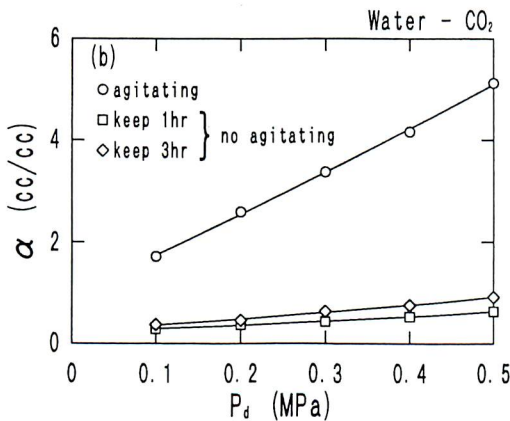
DISSOLUTION GAS	WATER TEMPERATURE					
	0°C	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
Air	0.029	0.019	0.014	0.012	0.011	0.011
O ₂	0.049	0.031	0.023	0.019	0.018	0.017
N ₂	0.024	0.016	0.012	0.010	0.009	0.009
CO ₂	1.71	0.88	0.53	0.36	—	—

る水への空気および CO_2 それぞれの溶解度 α を示す。溶解度 α は水の単位体積当りのガスの溶解量 (0°C , 1 atm に換算した値) を示す。(a) の空気溶解の結果において、溶解条件が3時間、18時間放置溶解 (撈拌なし) では撈拌溶解ほどの溶解量は得られないことを示しており、この傾向は放置溶解時間が異なるものの CO_2 を溶解させた (b) の結果でも同様になった。

一方、両結果共に撈拌溶解に注目すると、



(a) 水-空気



(b) 水- CO_2

図5 溶解圧力 P_d と溶解度 α との関係 (水温 = $11\sim 13^\circ\text{C}$)

溶解度がほぼ溶解圧力 P_d に比例して溶解しているが、しかし、空気と CO_2 では溶解度の値が一桁以上違う結果となっている。

次に、図5 (b) の撈拌溶解の結果について、理論溶解度^{(4),(5)} α_{th} (表2参考) と α との比 α/α_{th} , および、圧力降下より導きだした溶解度 α_{1d} と α_{th} との比 α_{1d}/α_{th} と P_d の関係を図6に示す。同図より P_d に関係なく α_{1d}/α_{th} の値は $\alpha_{1d}/\alpha_{th} \cong 1$ なる関係を示している。しかし、 $P_d < 0.2\text{ MPa}$

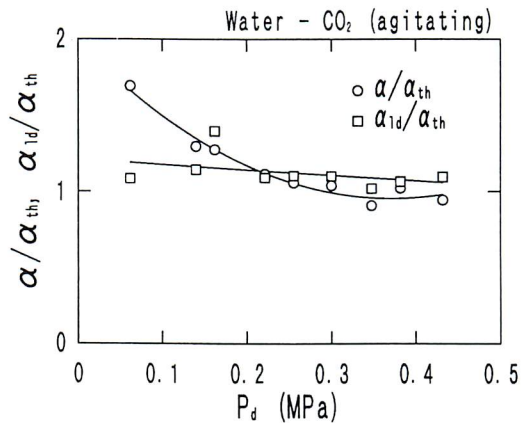


図6 溶解量の理論値と実験値の比較 (水温 = $11\sim 13^\circ\text{C}$, 水- CO_2)

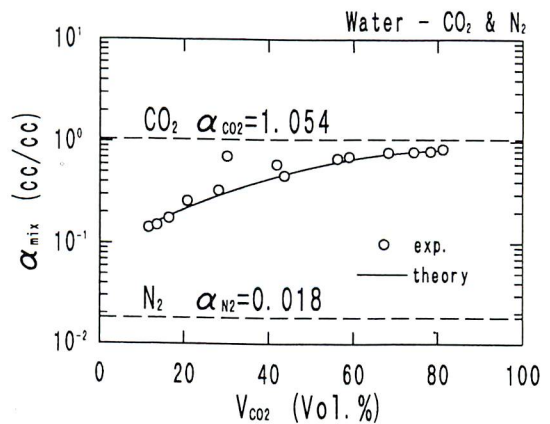


図7 ガス混合比変化における溶解量変化

では α / α_{th} の値が大きくなる傾向にあり、理論値を上回っている。この傾向は、溶解圧力測定にブルドン管を使用したため、読みとり誤差等により影響がでたものと考えられる。だが、噴霧実験時に用いた α は、図6でほぼ理論値に近い $P_d=0.4$ MPa 付近の値であり、精度上問題のない範囲と考えられる。

以上が水に空気および CO_2 を単体ガスとして溶解し得られた結果であるが、次に N_2 と CO_2 の混合ガスによるガス溶解結果について示す。混合ガス溶解実験については、単体ガス溶解実験においてほぼ理論値に近い値が得られている α_{1d} を求めた圧力降下法を用いた。

図7の横軸は混合ガスの全体積に対する CO_2 の体積比率 V_{CO_2} を示しており、縦軸にはDaltonの分圧則にもとづく混合ガス溶解度の値 α_{mix} を示し、式(2)を考慮して、圧力降下法により溶解度 α_{mix} を求めた。

$$\alpha_{mix} = V_{N_2} \times \alpha_{N_2} + V_{CO_2} \times \alpha_{CO_2} \quad (2)$$
ここで、 V_{N_2} は N_2 の体積比率を示し、 α_{N_2} と α_{CO_2} はそれぞれ N_2 、 CO_2 のガス溶解度を示している。図7より、混合ガス比を変化させても、その溶解度 α_{mix} が実験値と理論値とでほぼ一致していることから、混合

表3 噴霧実験における溶解条件

DISSOLUTION GAS	DISSOLUTION PRESSURE Pd (MPa)	DISSOLUTION GAS RATIO α (cc/cc)
No gas	—	$\alpha = 0$
Air	Pd = 0.4	0.08
CO_2	0.4	4.22
CO_2	0.7	6.64

ガス溶解が分圧則に基づいて溶解していることが確認できた。

3. 2 噴霧特性

今回使用したピントル式噴射弁の流量係数をガス溶解なしの液体を用い、本実験の噴霧圧力内で変化させたときの結果を図8に示す。噴霧圧力 ΔP (ゲージ圧)を増加させると流量係数がやや増加を示すものの、大きな変化はみられない。

次に、噴霧特性実験について結果を示し、実験時のガス溶解諸条件(攪拌溶解)を表3に示す。同表より空気に比べかなり多い CO_2 の溶解量で噴霧実験を行っていることになる。

始めに、噴霧模様写真を図9(a)、(b)に示し、噴霧圧力をそれぞれ $\Delta P=0.4$ MPa、 0.7 MPaとしている。(a)の噴霧圧力が $\Delta P=0.4$ MPaの条件での噴霧模様写真をみると、(1)と(2)の溶解無し(No gas)と空気溶解ではその噴霧に大きな違いはみられないが、(3)と(4)の溶解量の多い CO_2 溶解では、ガス溶解無しと比べ、かなり噴霧が広がる様子が観察できる。さらに CO_2

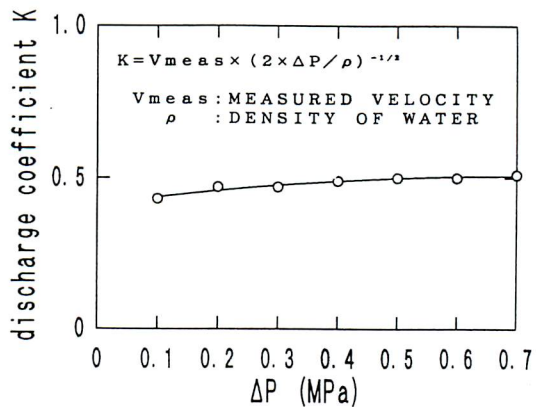
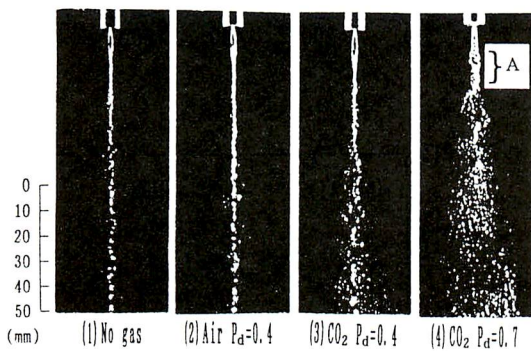


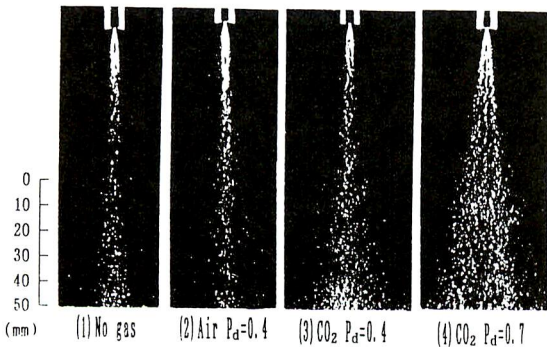
図8 噴霧圧力 ΔP と流量係数の関係

溶解でも溶解量の多い(4)の方が噴霧角の広がりが顕著である。(a)の傾向は(b)の噴霧圧力を $\Delta P = 0.7 \text{ MPa}$ としたときにも同様な傾向として得られている。

しかし、(a) $\Delta P = 0.4 \text{ MPa}$ において溶解条件が CO_2 $P_d = 0.7$ のA部に注目すると、噴射弁からの液膜が非定常的に形成されているのが観察できる。この噴霧条件では、溶解圧力以下の噴霧圧力となるので噴射弁内で既に液体からのガス分離が起こっているためこのような結果が得られたと考えられる。



(a) $\Delta P = 0.4 \text{ MPa}$



(b) $\Delta P = 0.7 \text{ MPa}$

図9 噴霧模様

図10に、各溶解条件において、噴霧圧力 ΔP の値を変化させたときの噴霧角 2θ の変化を示す。 ΔP の増加により 2θ が次第に広がり、 CO_2 溶解の方が噴霧角が広がる結果を示し、このことは、噴霧写真撮影結果とほぼ一致する。しかし、 $P_d = 0.7 \text{ MPa}$ だけは他の溶解条件で得られた傾向とは異なり、 2θ に ΔP の影響を見ることはできない。これは、 $\Delta P = 0.7 \text{ MPa}$ 未満が溶解圧力以下の噴霧となるので、噴射弁内で既に液体からのガスの分離が起こっているための影響と考えられる。

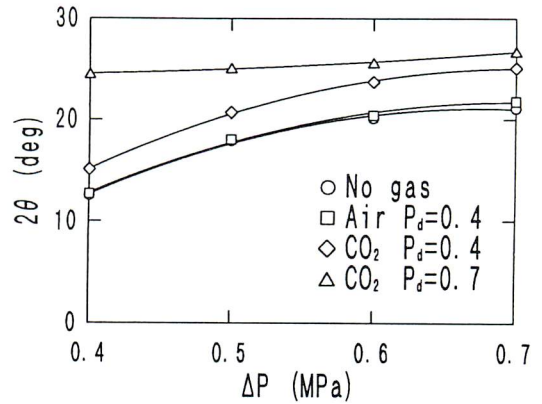


図10 噴霧圧力 ΔP と噴霧角 2θ との関係

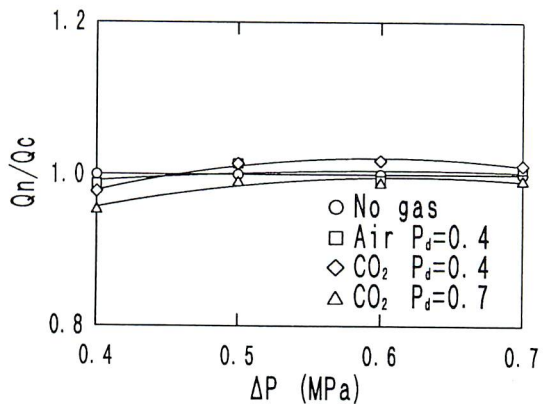


図11 噴霧圧力 ΔP と噴霧流量 Q_n との関係

図11に噴霧流量測定結果を示し、縦軸に各 ΔP 値においてのガスを溶解していない噴霧流量と、各溶解条件における噴霧流量をそれぞれ Q_c , Q_n としたときのその比 Q_n/Q_c を示している。各ガス溶解条件において ΔP を変化させると、 Q_n/Q_c に変化は見られるものの一様の傾向は得られていない。ここで、さきに噴霧写真結果と噴霧角測定結果で、溶解圧力以下の噴霧において液体からのガス分離の影響と思われる傾向が得られている $P_d=0.7$ MPa の溶解条件に注目してみる。溶解圧力以下の噴霧圧域で Q_n/Q_c の値がわずかであるが減る傾向にあり、溶解圧力以下の噴霧圧力では噴射弁内で液体からのガス分離が起こるためと説明した図9と図10の結果と定性的に一致する。

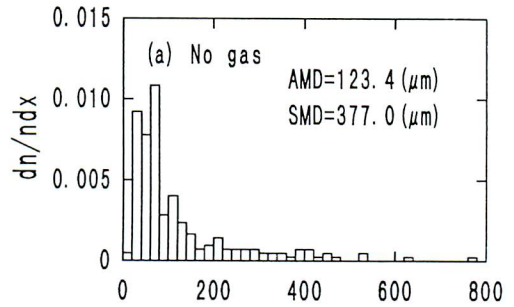
3. 3 微粒化特性 (α は図中に併記)

図12に $\Delta P=0.7$ MPa の条件での溶解ガスおよび溶解量が異なる噴霧で得られた粒度分布、算術平均粒径 (AMD) および Sauter 平均粒径 (SMD) の結果を示す。溶解条件として (a) はガスは溶解してなく、(b) の空気溶解 ($\alpha=0.062$ cc/cc) と (c) の CO_2 溶解 ($\alpha=4.718$ cc/cc) はそれぞれ $P_d=0.4$ MPa でガスを溶解させており、 α の比較では CO_2 溶解の方が約80倍近く多くのガスを溶解していることがわかる。

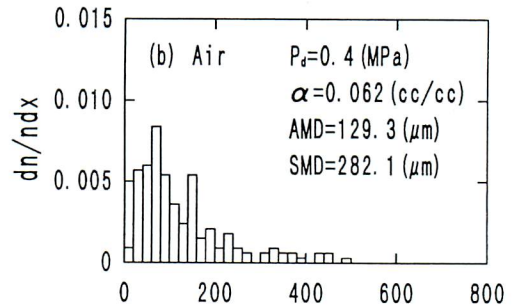
まず、粒度分布については、ガスを溶解していない噴霧の方が比較的小さな粒径が多く得られるが、得られた粒径も範囲が広がっている。しかし、ガスを溶解させることにより、大きい粒径は少なくなり、特に CO_2 溶解ではこの傾向が顕著となる。

平均粒径の結果では、AMD は各溶解条件ともに、その値に差はない。SMD で比較

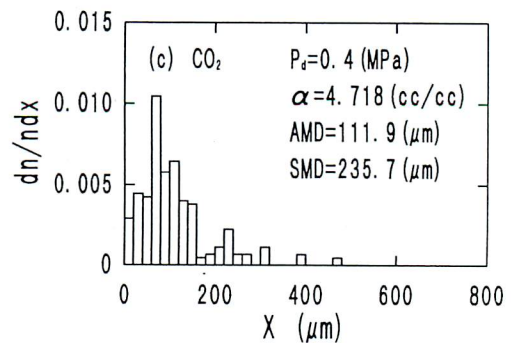
すると、ガス溶解によりその値は小さくなり、溶解度の多い CO_2 溶解でその値は最小となっており、その値は溶解無しの噴霧と比べてみるとかなり小さい値を示している。ここで、溶解無しの条件で SMD が大きな値をとる理由としては、 $800 \mu m$ 付近まで粒径が観察されているための影響と考えられる。



(a) No gas



(b) Air



(c) CO_2

図12 粒度分布と平均粒径 ($\Delta P=0.7$ MPa)

4. 結言

水温、気温が15°C付近、溶解圧及び噴霧圧が0.1~0.7 (MPa) _{gauge}の低圧条件下での、溶解圧変化に対する水へのガスの溶解度変化、およびガスを溶解させた水の噴霧においての液体微粒化促進効果について得られた結果を要約すると、以下の結論となる。

(1) 噴霧撮影と噴霧角測定から、CO₂溶解の方がガス溶解なしと比べ、噴霧が広がるという結果が得られた。また、粒度分布においても、Sauter 平均粒径が小さくなるという結果が得られた。しかし、溶解量の少ない空気溶解では、溶解なしとの結果に差は見られなかった。

(2) 溶解ガスの対象を燃焼排ガスとした場合、CO₂とN₂の混合ガス溶解では、その溶解量が Dalton の分圧側に従い溶解することが確認できた。また、単体ガスの溶解では、Henry の法則に従い溶解する結果を得ることができた。

文 献

- (1) 柄沢・ほか2名, 第10回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1982-8), 25.
- (2) 柄沢・ほか3名, 第11回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1983-8), 59.
- (3) 岡田・ほか2名, 第18回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1991-8), 85.
- (4) 丸善出版, 理科年表 昭和63年, (1988), 453.

- (5) 山崎, 日刊工業新聞社, キャピテーション工学, (1978), 69.