

ノズル内液体の乱れが噴流に及ぼす影響

小笠原 慎*・大黒 正敏**

The Effect of the Disturbance Inside a Nozzle on Liquid Jet

Shin OGASAWARA* and Masatoshi DAIKOKU**

Abstract

The objective of this study is to investigate the influence of the generation and disappearance of cavitation bubble on the liquid breakup. Using a cylindrical nozzle, the effects of the injection pressure on the generation of cavitation and the disturbance of liquid are investigated. The variations of the pressure inside the nozzle and the liquid breakup are measured with a pressure sensor and a dual optical fiber sensor system, respectively. It was found that the liquid inside the nozzle is disturbed by the generation of cavitation bubble and it is possible to detect the liquid breakup and generation of droplets by the optical fiber sensor system.

Keywords: Atomization, Cavitation, Liquid Jet, Disturbance, Pressure Variation

1. 緒 言

高速液体噴流に関して、低圧でも微粒化促進ができるように、ノズル内キャビテーションを利用する試みが近年多くなされている。キャビテーションは、ノズル内の縮流部形状や噴射圧力等の条件の変化によって、その発生状態が変わる¹⁾ことが知られており、ノズル内の流動が乱されると、噴出後の噴流の分裂にも大きな影響が及ぼされる。

著者らは、このようなキャビテーション利用による微粒化促進に注目し、円筒ノズルを用いて、比較的低压領域でのキャビテーション発生・消滅が液体の分裂に及ぼす影響を調べ、微粒化が促進される簡単なノズルの形状を明らかにした²⁾。また、その分裂のメカニズムを明らかにするために、内部観察の容易な矩形断面を持

つ2Dノズルを用いて、ノズル内液流の挙動の観察を行った³⁾。さらに、ノズル内のキャビテーション発生・消滅に起因する圧力変動および圧力分布を調べ、これが噴流の分裂に及ぼす影響について検討⁴⁻⁵⁾し、キャビテーションによる液流の乱れと噴流の分裂との関連の解明を試みた。一方、円筒ノズルと2Dノズルとの比較も行い、両者のノズル内液流の乱れと、液体の分裂が類似している⁶⁾ことを示した。

Souら⁷⁾は、2Dノズル内に発生するキャビテーションと噴流の分裂との相関を高速度カメラ等の利用により解析しており、ノズル内のキャビテーションの発生・消滅現象が微粒化促進に及ぼす影響が解明されつつある。

そこで、本研究では、デジタルカメラによるキャビテーション挙動の観察とデュアル光ファイバセンサ投光部の信号光が、乱れの発生した噴流を透過した後の光強度を測定・解析し、さらにノズル内部での圧力変動を解析することによって、ノズル内のキャビテーションと噴出後の噴流の関係を調べる。

平成19年12月17日受理

* 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程・2年

** 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻・教授

2. 実験装置および実験条件

2.1 実験装置および供試ノズル

図1に実験装置系統図を示す。試料液体は水道水であり、フィルターを通過した後①プランジャポンプで加圧され、②圧力計で圧力を計測、③供試ノズルから噴射される。ノズル内のキャビテーション発生および内部の液体の乱れ模様、さらに噴出した液体の分裂模様は、⑤デジタルカメラを用いて、⑥マイクロフラッシュの透過光にて撮影される。⑦歪みゲージ式圧力センサからの信号は、⑧データロガーおよびPCで取得、解析した。噴流の乱れは、④光ファイバセンサ投光部（4元素LED）の信号光の噴流透過後の強度を測定することにより解析した。

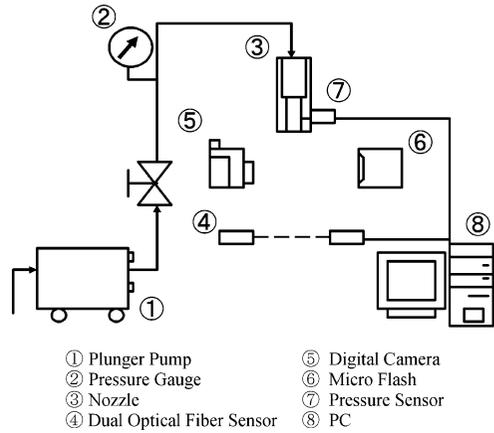


図1 実験装置系統図

図2に本研究で用いたノズルを示す。透明アクリル製の円筒状で内部の可視化が容易になっており、キャビテーションが発生しやすい急縮小部を有している。本報では、ノズル長さ L と内径 D の比 $L/D=12$ ($L=36$ mm) のノズルでの実験結果について述べる。

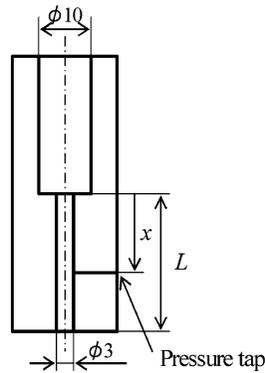


図2 円筒ノズル

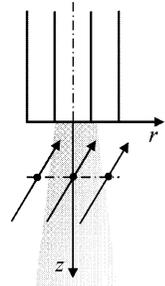


図3 分裂の測定位置

2.2 実験条件

本研究では、キャビテーション発生・消滅など基本的な現象の把握に重点をおくために、噴射圧力 P_{inj} は低く、その範囲は、 $P_{inj}=0.3\sim 1.0$ MPa (gauge) である。なお、液体は大気中に定常噴射し、その流量は、 $Q=7.25\sim 12.0$ L/min の範囲である。

ノズル内の圧力は、ノズル急縮小部を基準 ($x=0$ mm) とし、ノズル上流部 ($x=9$ mm)、中間部 ($x=18$ mm)、下流部 ($x=26$ mm) の3箇所 (図2) で測定を行った。

2.3 デュアル光ファイバセンサ

図3に噴流の乱れを測定するために用いたデュアル光ファイバセンサの測定位置を示す。ノズル出口を原点 ($z=0$ mm) とし、垂直軸下方 $z=5, 40, 60$ mm の3水平面において、ノズ

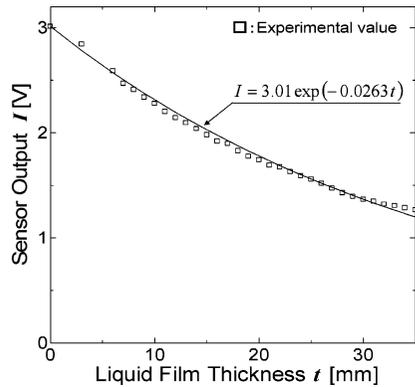


図4 光ファイバセンサの特性

ルの中心から、半径方向 r に 1 mm ごとに測定を行った。

図 4 に本研究で用いた光ファイバセンサの特性を示す。これは、予備実験として、ガラス水槽に水を満たし、その膜厚（水深）による透過光強度の変化を求めたものである。膜厚 t が大きくなるにつれて、透過光強度が減少していることがわかる。この場合、入射光強度 ($I_0=3.01$) と透過光強度 I の関係は、

$$I=3.01 \exp(-0.0263 t) \quad (1)$$

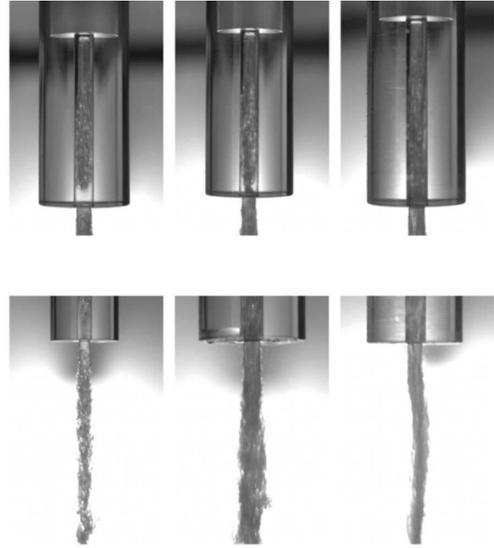
で表され、Lambert-Beer の法則に従っていることがわかる。また、センサの応答時間は約 1 ms であり、膜厚が変動する場合にも利用可能であると考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1 噴流の観察

図 5 に噴射圧によるノズル内流動と噴流の挙動変化を写真撮影した結果を示す。噴射圧 $P_{inj}=0.3$ MPa (図 5 (a)) では、急縮小部から、キャビテーションが発生し、ノズル内で消滅し、また、噴出後の噴流外縁部からは、粗いながらも液滴が生成されていることがわかる。噴流表面からの液滴の分裂は、一般に気液相対速度の増加が原因であるが、この場合はノズル内部でのキャビテーションの消滅による大きな圧力変動も原因となっていると考えられる。また、噴流が連続流を保持し得ない分裂位置(分裂長さ)は、ノズル出口から下方約 90 mm で確認された。

$P_{inj}=0.5$ MPa (図 5 (b)) では、ノズル出口付近でキャビテーション領域がほぼ消滅しており、 $P_{inj}=0.3$ MPa の場合と同様に、噴流外縁部からは、液滴が生成されていることがわかる。液滴径は、 $P_{inj}=0.3$ MPa の場合よりも小さく、また、噴流は、わずかながら半径方向に広がっていることが確認できた。この観察結果は、キャビテーション領域がノズル長さと同程度になる



(a) $P_{inj}=0.3$ MPa (b) $P_{inj}=0.5$ MPa (c) $P_{inj}=1.0$ MPa

図 5 ノズル内流動と噴流の挙動変化

と、噴流の広がりが大きくなるという Sou らの実験結果⁷⁾と一致している。また、噴流の分裂長さは、 $P_{inj}=0.3$ MPa の時よりも短く、約 60 mm 程度になっていることが確認された。これは、キャビテーションの消滅による大きな圧力変動がノズル出口付近で起こり、ノズル内の液流を攪乱しているためと考えられる。

それに対して、 $P_{inj}=1.0$ MPa (図 5 (c)) では、キャビテーション領域がノズル内で完全に消滅することなく、噴出していることが確認できる。この場合、 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa の場合に比べて、流量が多く、気液相対速度が大きいかかわらず、噴流外縁での液滴の生成はほとんど見られない。これは、キャビテーションの消滅による大きな圧力変動がノズル内で起こることがないためと考えられる。また、キャビテーション領域が、ノズル内で消滅する低圧の場合、噴流の乱れは、その表面近傍での液滴の生成に至る程度の乱れであるが、高圧になると、キャビテーション領域がノズル全体に広がり、ノズル内の液流がかく乱されたまま噴出しているた

め、ノズル出口における噴流の噴出方向が定まらず、その結果、噴流が蛇行すると考えられる。

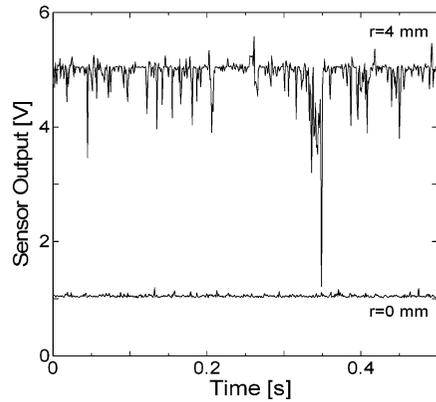
3.2 噴流の乱れ

前節では、噴射圧力による噴流の分裂や振れへの影響が確認された。そこで、光ファイバセンサを用いて、時間の経過とともに噴流の直径やその変動およびその近傍での液流の存在の特性を知ることが可能と考えられるため、ノズル出口近傍の噴流の変動の解析を試みた。

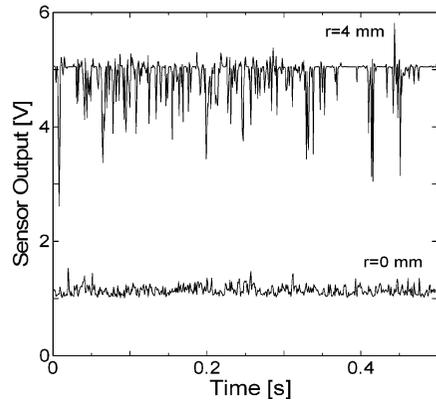
図6に、ノズル出口から、垂直軸下方 $z=5$ mm の水平面内 (半径方向 $r=0, 4$ mm) で噴流透過後の光の減衰を測定した結果を示す。図6(a)は $P_{inj}=0.3$ MPa, (b)は 0.5 MPa, (c)は 1.0 MPa の場合をそれぞれ示している。レーザーとセンサ間に噴流が存在しない場合には、センサ出力は約 5 V であり、噴流が存在すれば、光は減衰し、出力が低下することがわかる。したがって、噴射圧力によらず、噴流の中心部 $r=0$ mm では、透過光強度が著しく減少する。

噴射圧 $P_{inj}=0.3$ MPa の場合、中心部 ($r=0$ mm) では、透過光強度が減少し、かつ変動は小さいながらも確認できる。これは、ノズルから噴出直後でも、液体噴流表面に細かな乱れが存在するためである。それに対して、中心部から離れる ($r=4$ mm) と、透過光強度は大きく、その変動も大きい。これは、噴流外縁では、常に液流が存在するのではなく、しばしば液滴が生成され、噴流表面から分裂しているためである。特に透過光強度の減少が大きい場合 (Time = 0.35 s), 粒径の大きい液滴が生成されていることに対応している。

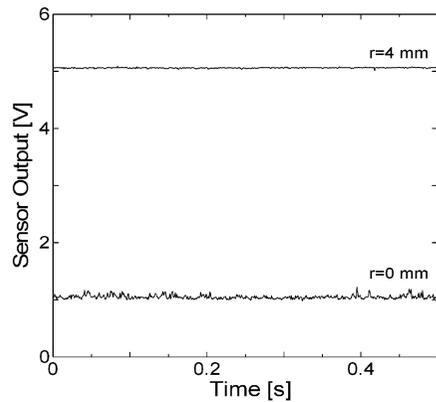
噴射圧 $P_{inj}=0.5$ MPa の場合、中心部 ($r=0$ mm) では、 $P_{inj}=0.3$ MPa と同様に、透過光強度が減少し、その変動は $P_{inj}=0.3$ MPa よりも大きい。これは、ノズル出口付近でのキャビテーション領域の消滅による大きな圧力変動が生じているため、ノズルから噴出直後でも液体噴流表面に乱れが存在するためと考えられる。それに対して、中心部から離れる ($r=4$ mm) と、透



(a) $P_{inj}=0.3$ MPa, $z=5$ mm



(b) $P_{inj}=0.5$ MPa, $z=5$ mm



(c) $P_{inj}=1.0$ MPa, $z=5$ mm

図6 時間に対する出力電圧の変化

過光強度は大きく、センサ出力の変動の振幅が多いことが確認できる。これは、 $P_{inj}=0.3$ MPa の場合よりも噴流外縁からの液滴の生成、噴流表面からの分裂が多くなっていることに対応していると思われる。さらに、ノズル出口付近でのキャビテーション領域消滅による圧力変動にともない、ノズル内の液流が攪乱され、噴流が広がっているためと考えられる。この結果は、ノズル長さと同程度の場合、ノズル出口近傍でのキャビテーション領域の消滅による乱れの増大が、噴出後の噴流の表面からの液系の形成に大きな役割を果たしているという、Souらの結果⁷⁾と一致している。

噴射圧 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合、中心部 ($r=0$ mm) では、 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa と同様に、透過光強度が減少し、程度は小さいながらも噴流表面の乱れによる変動が確認できる。それに対して、中心部から離れると ($r=4$ mm)、透過光強度は大きく、しかも出力の変動が極めて小さいことがわかる。これは、ノズル内でキャビテーション領域が消滅することなく噴出しているため、噴流外縁からの液滴の生成がほとんどないためである。

3.3 ノズル内圧力変動

噴流の観察と噴流の乱れの測定により、噴流の分裂や液滴の生成は、キャビテーション領域の消滅による大きな圧力変動が原因と考えられるため、ノズル内部の圧力測定を行った。

図7 (a) は測定位置 $x=9$ mm, (b) は $x=18$ mm, (c) は $x=26$ mm での圧力測定結果を、噴射圧 $P_{inj}=0.3, 0.5, 1.0$ MPa について示したものである。ノズル内の圧力は、噴射圧 P_{inj} によらず負圧で、かつ噴射圧力とともに上昇することがわかる。

測定位置 $x=9$ mm (図7 (a)) でのノズル内の圧力は、負圧で変動が比較的小さい。 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa では、圧力変動が小さいのに対して、 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合は、圧力変動が大きいことがわかる。これは、噴射圧の増大にともな

い、ノズル内の乱れが増大する (図5 (c)) ためと考えられる。

測定位置 $x=18$ mm (図7 (b)) では、 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa の場合の圧力変動が小さい。これは、測定位置が、キャビテーション領域の中心部に覆われているためと考えられる。また、 $x=9$ mm と同様に、 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合に圧力変動が、大きいことがわかる。これも、噴射圧の増大にともない、ノズル内の乱れが増大するためと考えられる。

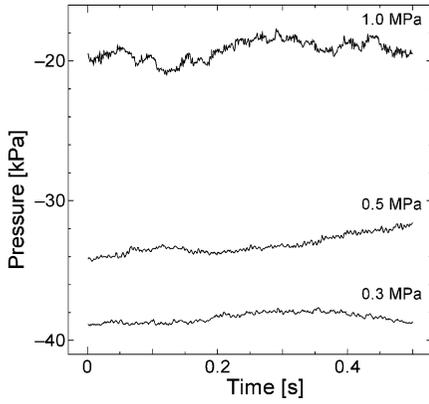
測定位置 $x=26$ mm (図7 (c)) では、 $x=9, 18$ mm と比べ、ノズル内の圧力が高くなっていることがわかる。また、 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa の場合の $x=18$ mm と比べて、圧力変動が大きいことがわかる。これは、キャビテーション領域の先端位置が、ノズル内での流れ方向で変動するためと考えられる。さらに、 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合、測定位置 $x=9, 18$ mm と同様に、他の噴射圧力の場合と比べて変動が大きくなることがわかる。

3.4 ノズル内圧力変動のパワースペクトル

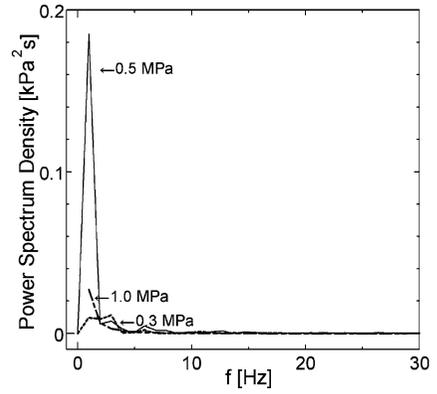
図8に、図7で示したノズル内圧力変動のパワースペクトルを求めた結果を示す。

測定位置 $x=9$ mm (図8 (a)) の場合、 $P_{inj}=0.3$ MPa では、測定部がキャビテーション領域に覆われているためか、特定の周波数でのピークは見当たらない。それに対して、 $P_{inj}=0.5$ MPa の場合には、低周波数に大きなピークが確認できる。これは、噴射圧の増大とキャビテーション領域の変動があるためと考えられる。

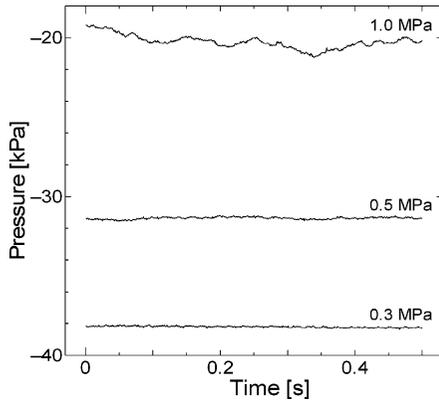
測定位置 $x=18$ mm (図8 (b)) では、圧力変動の小さい $P_{inj}=0.3$ MPa の場合、測定部がキャビテーション領域に覆われているためか、特定の周波数でのピークは見当たらない。それに対して、 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合、低周波数にピークが確認できる。スペクトル密度の値が小さいのは、ノズル内の液流の乱れが小さいためと考えられる。低周波数のピークは、噴射圧の増大とキャビテーション領域の変動があり、そ



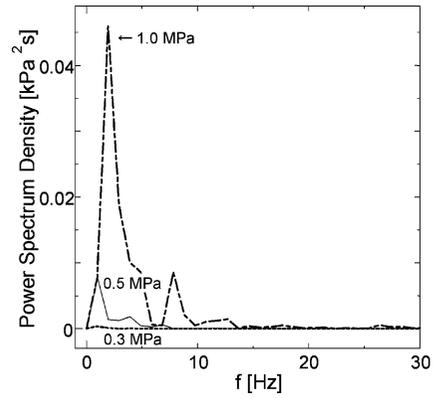
(a) $x=9$ mm



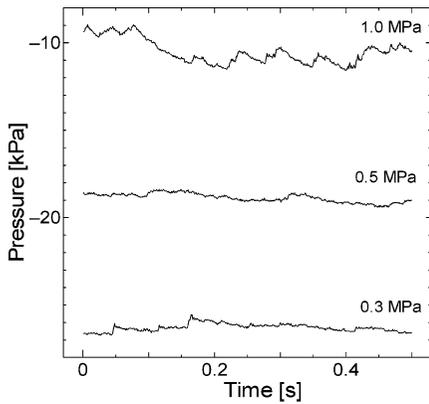
(a) $x=9$ mm



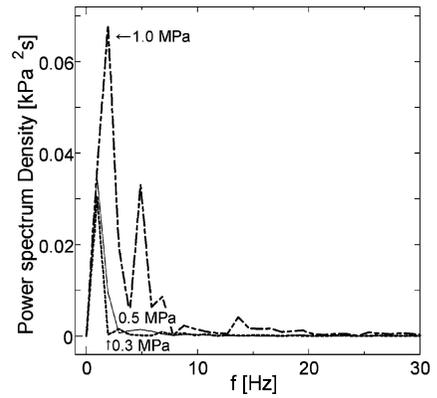
(b) $x=18$ mm



(b) $x=18$ mm



(c) $x=26$ mm



(c) $x=26$ mm

図7 内圧力の時間変化

図8 ノズル内圧力変動のパワースペクトル

の影響と考えられる。

測定位置 $x=26$ mm では、 $x=9, 18$ mm 前と比較してノズル内の圧力変動が大きい。特に、 $P_{inj}=0.3, 0.5$ MPa のパワースペクトル (図 8 (c)) は、低周波に大きいピークがある。これは、キャビテーション領域が、ノズル出口付近で変動しながら消滅しているためと考えられる。さらに、 $P_{inj}=1.0$ MPa の場合は、低周波数域に広がって複数のピークが確認できる。この低周波数のピークは、測定位置 $x=9, 18$ mm の場合と同様に、噴射圧の増大とキャビテーション領域の変動と先端部からのキャビテーション気泡の発生・消滅による変動が混在しているためと考えられる。そのため、ノズル内の液流が大きく乱れるためと考えられる。

4. 結 言

本研究では、ノズル内キャビテーションによる微粒化促進を目的に、ノズル内の液体の流動と噴流の乱れとの関係を調べた。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) キャビテーション発生により、ノズル内の液流が攪乱され、噴出後の噴流の乱れは大きくなる。
- 2) ノズル出口付近でキャビテーション領域が消滅すると液滴が生成され、噴流の広がりがあることを確認した。

- 3) ノズル内の圧力は、キャビテーション領域の影響を受けて変動する。
- 4) 圧力変動のパワースペクトル密度のピークは低周波数に存在し、これは、キャビテーション領域の変動および、ノズル内のスケールの大きな乱れを示している。
- 5) 圧力変動のパワースペクトル密度のピークは低周波数に存在し、これは、キャビテーション領域の変動および、ノズル内のスケールの大きな乱れを示している。
- 6) ノズル内でのキャビテーション領域の消滅による微粒化の促進を確認した。

参 考 文 献

- 1) 古館・大黒・加賀, 日本機械学会講演論文集, 001-2, (2000), 43-44
- 2) 大黒・古館, 日本機械学会論文集 B, 68-671, (2003), 1998-2005
- 3) 大黒・古館・野田, 日本機械学会論文集 B, 69-685, (2003), 2024-2029
- 4) 大黒・古館・野田, 第 11 回微粒化シンポジウム講演論文集, (2002), 68-73
- 5) Daikoku, M., Furudate, H., Noda, H., Inamura, T., Poo. of ICLASS 2003, (2003), 17-6, (CD-ROM)
- 6) Daikoku, M., Ogasawara, S., Inamura, T., Poo. of International Symposium on Scale Modeling-V, (2006), 61-66
- 7) Sou, A., Ilham, M.M., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Poo. of ICLASS 2006, (2006), 06-43, (CD-ROM)