

# 加圧流動層内ガス吹き込みノズル 近傍の気泡挙動の可視化 (圧力の違いによる影響)

加藤 泰生\*, イルハン フェビヤント\*\*, 宮本 政英\*

## Visualization on the Behavior of Bubbles Near a Blowing Nozzle in a Pressurized Fluidized Bed

Yasuo KATOH, Febijanto IRHAN and Masahide MIYAMOTO

### Abstract

This paper described the visualization on the behavior of bubbles near a blowing nozzle in a pressurized fluidized bed. Experimental study for understanding the characteristics such as the size and interval period of bubble nucleus in the pressurized gas fluidized beds were carried out with recording image pictures taken by high speed video camera(HSV-1000). As the results from image analysis we found the bubble size decreased and the bubble shape varied with the pressure increased, also seemingly the bubble shape was strongly influenced by particle size and the bubble frequency slightly increased with pressure increased. Also a history of bubble growth was shown clearly.

### 1. 緒 言

最近、エネルギー・環境事情から石炭火力発電所の基本システムとして加圧流動層とガスタービンとの組み合わせによるコンバインドサイクル(複合サイクル)が考案されている。いわゆる、燃焼時の発生熱量は一部蒸気として取り出され蒸気タービンを回し動力に変換され、一方、燃焼ガスは、高温の加圧ガスとして取り出されガスタービンを回すことでやはり動力に変換される。このことによるエネルギー効率の上昇をねらっており、3ポイント程の上昇が見込めるといわれる。その際、流動層の特長である、脱硫性、低NOx性が生かされる。

さて流動層にはまだ様々な問題が残されている。その1つに気泡の性質がある。流動時における固気混相内で発生する気泡の性質は、複雑な挙動をなすが、加

圧時にはさらに圧力の影響を様々に受けることが知られている<sup>(1),(2)</sup>。たとえば圧力の増加とともにその径が小さくなって、上昇速度が低下することや、またその気泡頻度が大きくなることなどが Chanら<sup>(3)</sup>、Barretoら<sup>(4)</sup>、Kawabataら<sup>(5)</sup>により報告されている。しかしながら、一般に流動層の装置では、ガス吹き出し層底部でこの気泡の発生と形成が行われるがかれらの報告には、気泡発生に関して重要なガス吹き出し層底部における気泡の挙動についての詳細な報告がない。また、その層底部における気泡の発生に対する圧力増加の影響についての報告も少ない。

そこで、本研究では、圧力状態 0.1-0.3 MPaにおいて二次元流動層内の単一ノズル吹き出し部近傍に生成される気泡の挙動を高速ビデオを用い可視化観察すると共に、この気泡の一連の挙動を P-system (PIAS-LA555WS 画像処理装置)により画像処理し、生成気泡に関する諸特性(気泡径、気泡発生周期など)を定量的に調べたのでそれを報告する。

\*機械工学科

\*\*大学院機械工学専攻

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。圧縮機① から送られた気体 (空気) はエアフィルタ②, 減圧弁③ A, 耐圧用の面積式流量計(10kgf/cm<sup>2</sup>, 3000Ncc/min)⑤, 整流弁⑥を通過した後に, 耐圧容器⑨の下部に設置した真鍮製の単一ノズル (内径 φ2mm, 外径 φ4mm) から, 二次元流動層内へ吹き込まれる。その後空気はエアフィルタ⑩, リリーフ弁⑪を通過し, 排気される。吹き込む空気流量は減圧弁③ A と整流バルブ⑥によりまた容器内の圧力は減圧弁③ B により制御される。温度は径2.2mmC-C 熱電対で, また圧力はデジタルマノメータでそれぞれ測定される。流動層本体は可視化を考え, 前後を透過性の良い厚さ5mm のフロートガラスで作成し, 矩形断面 4×100mm<sup>2</sup>, 高さ180mm のものである。本実験において, 使用粒子はガラスビーズで径 d<sub>p</sub>=100, 200μm, また静止層高 L<sub>c</sub>は100mm を用意した。さらに, 耐圧容器は層底部の吹き込みノズ

ル上端から離脱した気泡の生成及び成長を観察するために, 容器前後部ののぞき窓 (直径 φ80mm, 厚さ10mm) に10kgf/cm<sup>2</sup> 用の耐圧強化ガラスが設置されている。撮影装置は Fig. 2 に示すように配置される。生成気泡の画像は容器後部からストロボ光で照らされた透過光による陰影像を容器前部ののぞき窓から高速ビデオカメラ (500 fps) で撮影することで得られる。

Fig. 3 にその典型的気泡形状パターンの可視化画像例を示す。一連の流れの中で合体(会合), 分離などが起こっていることが分かる。これら可視化画像の処理は次のように行った (Fig. 4 参照)。まず, P-system

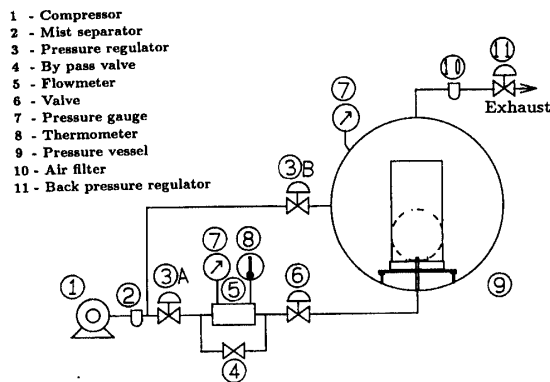


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus on PFBC

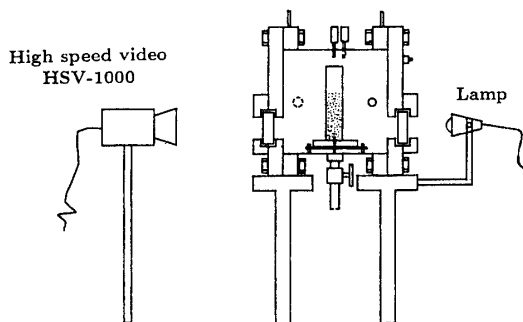
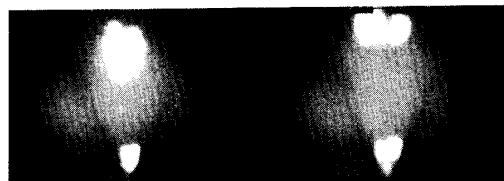


Fig. 2 Arrangement for visualization instruments



(a) 会合 (合体) (b) 会合 (合体)



(c) 分離 (d) 分離

Fig. 3 A few examples on the visualized bubble image (time interval Δτ=10msec)

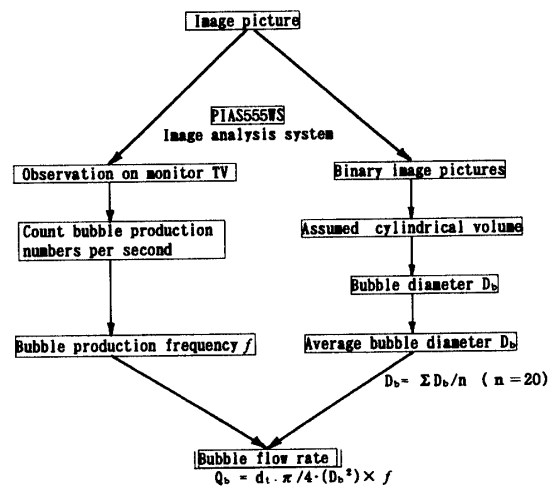


Fig. 4 Process diagram for image analysis

の画像処理ソフトを用いて、撮影した画像から、一個一個の生成気泡を観察し、測定する生成気泡をカーソルで選ぶ。その後、予め設定した輝度数の敷居値により、選択した気泡とその周囲の画像の輝度数の差を判別し、生成気泡の等価円直径  $D_b$  を仮定式から求める。ここで  $D_b$  は20個の生成気泡の画像から得られた平均値である。一方、気泡の発生周期  $f$  は、画像処理で使用した同一の画像から一秒ごとの気泡発生個数をカウントすることで得られる。さて等価円直径は以下のものである。まず、二次元流動層では気泡の形状が円筒形と仮定する<sup>(6)</sup>。但し、気泡の径が流動層の奥行きより小さい場合はこの仮定は成り立たない。画像からの解析から、気泡が流動層の前後壁に接触した際の面積を求め、その面積から気泡の等価円直径とした。また、式(1)に示したように、それらに気泡の奥行き  $d_t$  と気泡の発生周期  $f$  をかけて、生成気泡の流量  $Q_b$  が求められる。

$$V/t_b = (D_b^2) \times (\pi/4) \times d_t \times f = Q_b \quad (1)$$

ここで、 $V$  は気泡体積 [ $\text{cm}^3$ ]、 $t_b$  は気泡形成時間 [sec]、 $D_b$  は気泡の等価円直径 [cm]、 $d_t$  は二次元流動層の奥行き厚さ [cm]、 $f$  は気泡発生周期 [1/sec]、 $Q_b$  は気泡流量 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] を示す。

さらに式(1)を変形することによって、二次元気泡の体積とその等価円直径の関係式(2)が得られる。

$$D_b = (4/(\pi d_t) \times Q_b \times t_b)^{0.5} \quad (2)$$

### 3. 実験結果と考察

Fig. 5 に、画像処理により求めた生成気泡の等価円

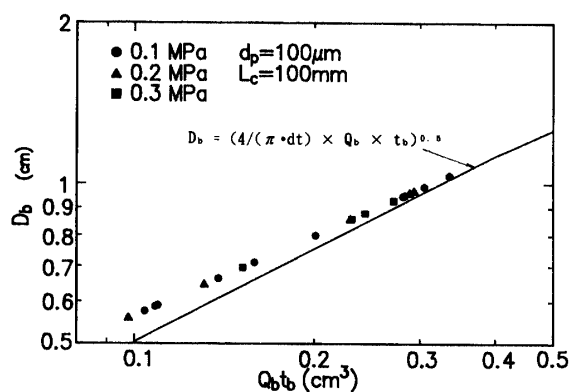


Fig. 5 Relationship between the bubble diameter  $D_b$  and the bubble volume  $Q_b$

直径  $D_b$  とその気泡の体積  $Q_b \times$  気泡形成時間  $t_b$  との関係を示す。図中の実線は式(2)で求めた値である。画像処理結果より求めた生成気泡の等価円直径を円筒形状の気泡径と仮定することにより計算された値と比較して、よく一致することがわかる。しかし、気泡の流量がかなり小さいとき画像から求めた気泡の径が理論値と比べてやや高い値をとっている事も分かる。これは気泡径が二次元流動層の奥行き厚さ  $d_t$  よりも成長した場合、二次元気泡とみなせる仮定が成り立つが、気泡の流量が小さく、気泡径がこれ以下に小さい場合、気泡そのものが三次元気泡であるとともに、このことで可視化画面上の気泡の前後には粒子が存在し、画像そのものが不鮮明になることも、やや気泡径を大きく見積もることになり、この仮定は当然成立しないものと思われる。

Fig. 6 に、圧力及び流入空気の流量  $Q_{in}$  の変化に対する気泡径の関係を示す。図より、各圧力状態において、同じ生成気泡径を発生させるために圧力  $P$  が増加すれば、それに必要な流入空気流量  $Q_{in}$  を増加させる必要があることがわかる。また図より生成気泡が大きくなる傾向は各圧力状態において、皆同様な右上がりではほぼ同じ勾配をもつ傾向がみられる。すなわち、吹き込む空気流量  $Q_{in}$  が増加すると、どの圧力においても生成気泡径  $D_b$  が大きくなるのがわかる。

次に、画像の可視化観測により得られた気泡の発生周期  $f$  と流入空気流量  $Q_{in}$  の関係を Fig. 7 に示す。各圧力状態において、空気流量が増加すると生成気泡の発生頻度は低下することがわかる。また、その低下する傾向は各圧力状態において、皆同様な傾向である。いったん、生成気泡の等価円直径及び生成気泡の発生

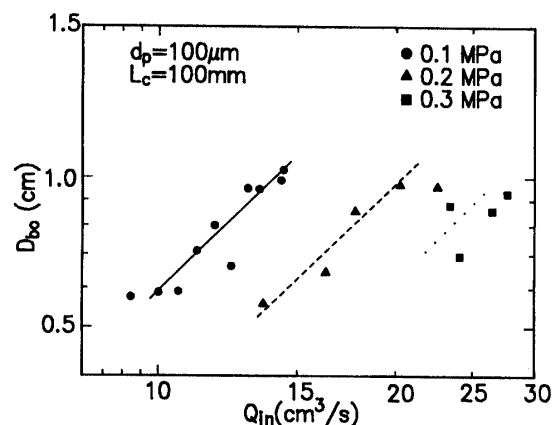


Fig. 6 Relationship between the bubble diameter  $D_b$  and the inlet flow rate  $Q_{in}$

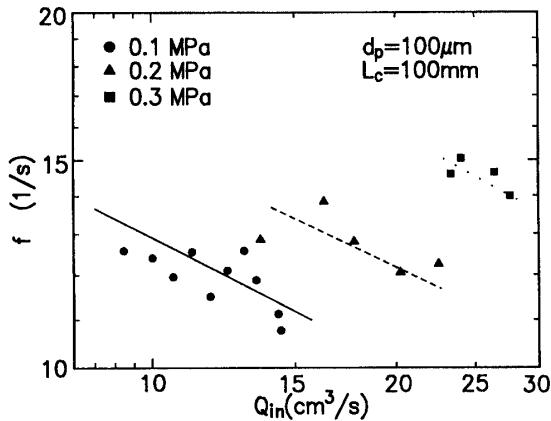


Fig. 7 Relationship between the bubble frequency  $f$  and the inlet flow rate  $Q_{in}$

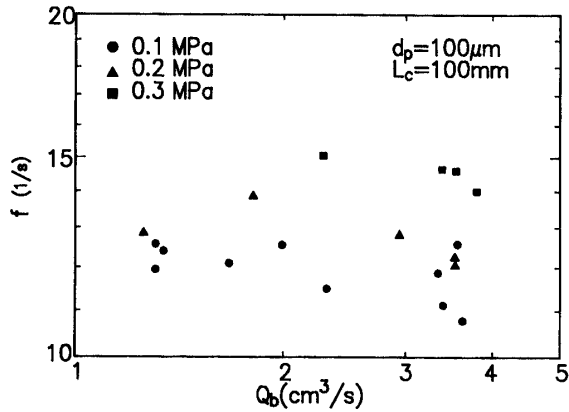
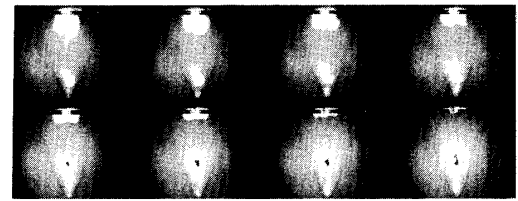


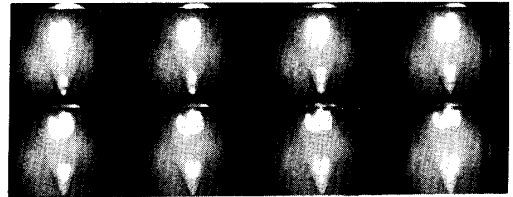
Fig. 8 Relationship between the bubble diameter  $D_b$  and the bubble volume  $Q_b$

周期が求められると、式(1)を用いて生成気泡の流量を求めることができる。Fig. 8より、気泡の流量が増加するとともに生成気泡径が大きくなっている。圧力状態  $P=0.1\text{MPa}$  と  $0.2\text{MPa}$  においては、圧力増加による気泡径の減少は見られないが  $P=0.3\text{MPa}$  の場合、おなじ気泡流量であっても、先の  $P=0.1\text{MPa}$  と  $0.2\text{MPa}$  における生成気泡の径と比較してやや小さくなる傾向が見られる。従って、気泡流量が大きくなるとともにその圧力の影響が顕著に見られるようである。可視化画像 Fig. 9 から明らかにこれらの傾向は説明される。

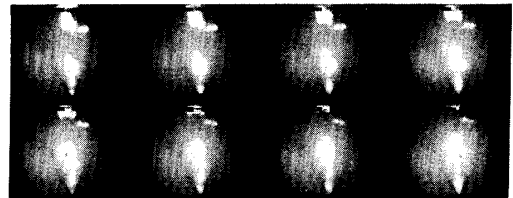
また、Fig. 10に流入した空気量に対する発生気泡から計算した流量の割合を示す。各圧力状態において、流入した空気流量が大きくなると、それ以上に発生気泡流量が増加することがわかる。又その空気流量が減少するとその比はある値に漸近するようであるがまだ



(a)  $p=0.1\text{ MPa}$ ,  $Q_{in}=13.43\text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_b=3.34\text{ cm}^3/\text{s}$



(b)  $p=0.2\text{ MPa}$ ,  $Q_{in}=19.93\text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_b=3.50\text{ cm}^3/\text{s}$



(c)  $p=0.3\text{ MPa}$ ,  $Q_{in}=26.46\text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_b=3.38\text{ cm}^3/\text{s}$

Fig. 9 A few examples on the visualized bubble image(in the pressure range of 0.1-0.3 MPa)

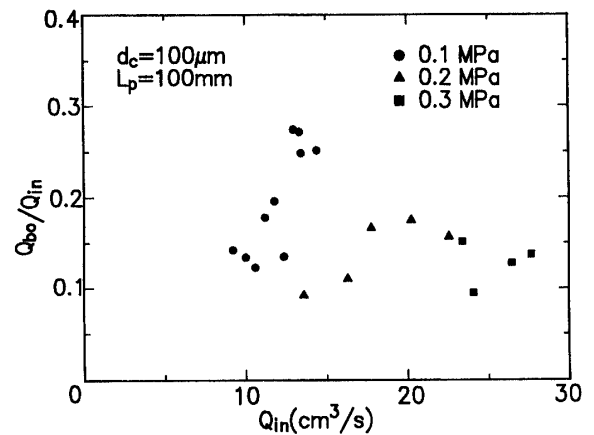


Fig. 10 Relationship between the bubble frequency  $f$  and the bubble volume  $Q_b$

明確にその値は分からない。予測では、それぞれの圧力に対応した、気泡流量の最小気泡発生流量と呼ばれる値かとも思われる。

Fig. 11は、気泡形状への圧力、流量の影響をみたものである。気泡の長径(垂直長さ)と短径(水平長さ)

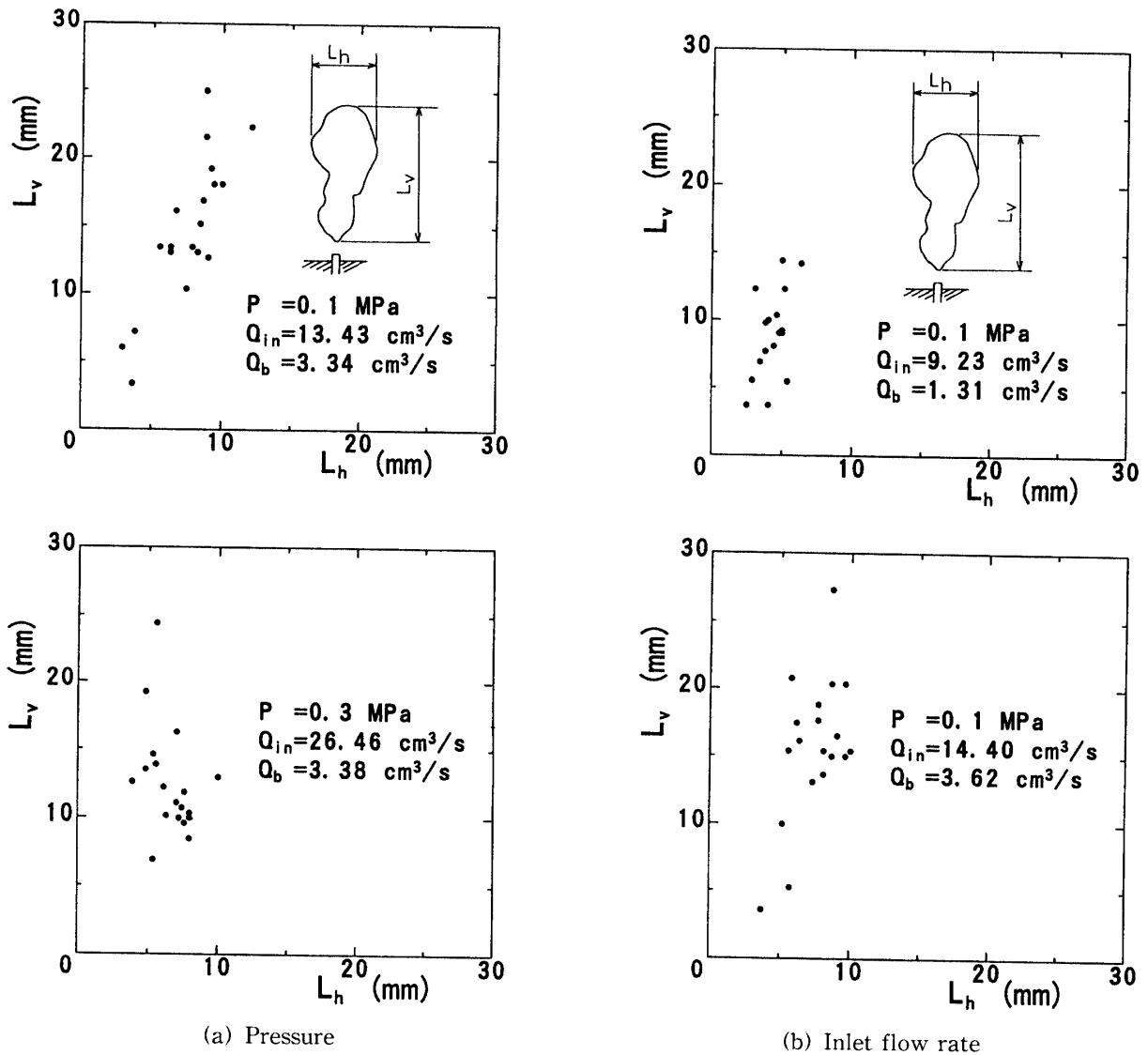


Fig. 11 Relationship between the bubble shape ( $L_h, L_v$ ) and the pressure  $P$  and inlet flow rate  $Q_{in}$

を画像から求めて、それぞれプロットしたものである。バラツキの幅はかなり大きいですが、特徴として、圧力増加の影響で、気泡径が小さくなるとともに、短径の変化量に比して長径の変化量が大きくみられる事が分かる。さらに流量増加はそのまま気泡の大きさを変えるのみでその比はほぼ変わらない。

#### 4. 結 論

本実験の結果を以下にまとめる

(1) 圧力の増加による気泡径の増加が顕著にみられる。

(2) 各圧力状態において、気泡流量が大きくなるとその気泡発生頻度の増加は顕著に見られる。

(3) 実験で得られた生成気泡の等価円直径から算出される生成気泡の体積は二次元流動層内気泡形状の仮定による推算値とほぼ一致する。

(4) 圧力増加の影響から、気泡形状において短径の変化量に比して長径の変化量が大きくみられる。

(5) 高速ビデオカメラによる可視化観察で、層底部の吹き出しノズル近傍の気泡の挙動に関する理解がより深まった。

## 文 献

- 1) D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidization Engineering (1992), 2nd ed., Butterworth-Heinemann
- 2) D. Gidaspow, Multiphase Flow and Fluidization (1993), London, Academic Press
- 3) I.H. Chan, C. Sishla and T.M. Knowlton, Pow. Tech., 53 (1987), pp.217-235
- 4) G.F. Barreto, J.G. Yates and P.N. Rowe, Chem. Eng. Sci., 48 (1984), pp.1935-1950
- 5) J. Kawabata, M. Yumihama, Y. Tazaki and S. Honma, J. Chem. Eng., 14 (1981), pp.85-89
- 6) T. Chiba, K. Terashima and H. Kobayashi, Chem. Eng. Sci. Japan (1972), vol.2, pp.965-972  
(平成6年10月15日受理)