

# 循環流動層壁近傍落下粒子の流動挙動の可視化

加藤 泰生\*・宮本 政英\*・L.R.Glicksman\*\*  
M.C.Lints\*\*

## Visualization of Particle Behavior near the Wall of a CFB

Yasuo KATOH, Masahide MIYAMOTO, LEON R. GLICKSMAN  
and MIKE C. LINTS

### Abstract

The particle behavior near the wall of a circulating fluidized bed has a significant effect on the heat transfer characteristics and material erosion in the fluidized bed. Visualization of the particle behavior proves useful in understanding the hydrodynamics involved. In this study we used photography to study the particle behavior near the wall for two configurations. In one case, the model wall was in an inclined position and the particle behavior of a falling thin film of particles was observed. In the other case, the vertical wall of a circulating fluidized bed at atmospheric pressure was observed. Both experimental cases were conducted with and without an obstacle step on the wall. It was found that the individual particles forming a flow stream had a random behavior. With a thin step at the wall a serious disruption of the flow over the step and downstream of the step is produced.

### 1. 緒 言

循環流動層内粒子は、熱伝達の促進、化学反応の促進、あるいは循環に要する動力の軽減のために、それに適切な粒子が選ばれる<sup>(1)</sup>。

最近の実用化された循環流動層においてとりわけ問題化してきているのが、循環流動層を形成する要素内壁が摩耗・浸蝕（エロージョン）により重大な損傷を受けていることである<sup>(2)(3)(4)</sup>。そして、このような摩耗がいつ、どこで、どの様にして起るのかを知るために、その粒子との因果関係あるいはそのメカニズムの詳細をはっきりする必要がある。そのことは、とりもなおさず、循環流動層の基本構造、その材質、使用粒子の選択（材質、大きさ、性質）、あるいは、運転条件

の設定など循環流動層を応用する上で有益な情報を与えてくれる。壁近傍のみならず循環流動層内の粒子挙動に触れた論文は多い。また粒子を粒子塊（クラスター）と考えて、その挙動に触れた論文も多い。しかしながら、それら従来の研究が、光ファイバーセンサー、電気容量センサーなどセンサーの信号を介しての粒子あるいは粒子塊の挙動の推察であり<sup>(5)(6)</sup>、主流流路でのファイバースコープによる可視化からクラスターの定性的観察を試みたもの<sup>(7)</sup>等である。著者の1人は循環流動層での熱伝達等の研究を継続して行っており、もう既に、壁に沿って流れる粒子速度を、壁の外側から高速ビデオカメラを使って測定している<sup>(8)</sup>。またそれに類する可視化に関する研究報告も幾つか報告されている<sup>(9)(10)</sup>。本論文では、その点を踏まえて循環流動層での粒子挙動の可視化を、内壁面近傍でそれも層内から行うことで得られた結果を基に報告するものであり、主に粒子あるいはクラスターのメカニズムを観たものである。

\*機械工学科

\*\*Massachusetts Institute of Technology

本報告は、基本的には2種のモデル形態に於ける粒子挙動のビデオ観察による。

1つは、傾斜板上に大気圧下での循環流動層内で使用される物と同じガラス粒子を膜状に落下させ、その壁上に垂直断面で切断した面で粒子挙動を観たもの、もう1つは、大気圧下での循環流動層内のライザー上部において同様の壁上に垂直断面で切断した面で壁近傍の粒子挙動を観たものである。その上で、両者とも壁近傍に障害物となるステップを置いて、その粒子挙動の変化を再び観察したものである。

以下、その結果の写真を交えて考察する。さらに、デジタル画像処理により、そのクラスターのイメージが捕まえられるのでその結果も併せて考察する。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は図1の形態で行われた。1つは図Aのように傾斜壁を落下する粒子膜内の粒子の挙動を観たものである。傾斜角 $23.2^\circ$ 、アクリル壁状の上方向に設置された二次元ロート状の出口から平均径 $100\mu\text{m}$ のガラスビーズ粒子を落下させ、その粒子層内を観察したものである。もう1つは、コールドモデルの大気圧下での循環流動層内を流動する同じく平均径 $100\mu\text{m}$ のガラスビーズ粒子の挙動を観察したものである。循環流動層は20cm径、7.4m高さのもので、riserの下4mはアクリルできており、流れの状態等を十分外から観察されるようになっているが、今回は、図Bのような内側断面での粒子の挙動を観ることを主としている。流れの、観察位置は、そのアクリル部分の上部附近で、Lバルブから約3.8mの位置である。実験に於ける観察は、図

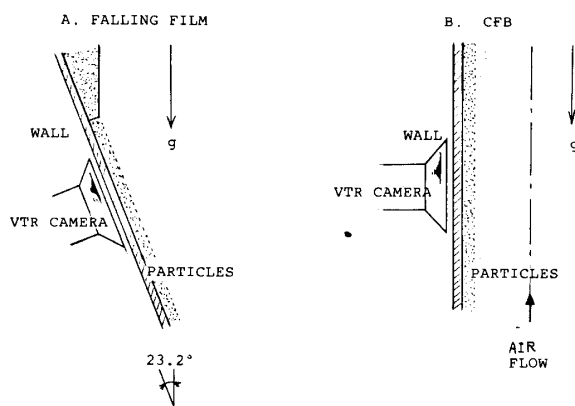


Fig. 1 Experimental configurations

2のような位置関係にある実験装置を使用している。形状モデル1も2も同様な配置である。ストロボから発せられた光は、右上図の様なアクリル壁上に作られた約1mmのスリット部より細い光の帯となって、内部粒子の流れ場をおよそ10mm程度の深さで照す。但し、この深さは粒子濃度に依る。そして、粒子の複雑な動きの様子をガラスプレートの半径方向に切られた断面で2次的に観る。このために照された光はこのガラス面と、この上下のアクリルプレート面とそしてもう一方の鏡面で流動場とで完全に密閉された空間を通り、この鏡面で反射し、VTRカメラへと入射する。VTRカメラは30コマ/秒の通常の市販のRCA社製で75mmレンズに+6mmのマクロレンズを装着して、粒子の挙動状態を、20倍以上の大きさに拡大して観察している。

## 3. 実験結果と考察

写真1以下の写真は、幾分不鮮明な原ビデオテープから全てビデオプリンターにより得られたものを複製しているため、写りは幾分不鮮明ではあるが、これら写真は粒子のミクロな挙動をよく捕まえているし、また粒子のたまかな流れも得られている。

### 落下粒子膜の場合

図3は、落下粒子膜の場合のモデル図であり、写真1はその落下粒子膜内での粒子挙動の例である。実験はステップがない場合とステップがある場合の2種の条件で行っている。落下粒子膜の速度は自由落下の場合

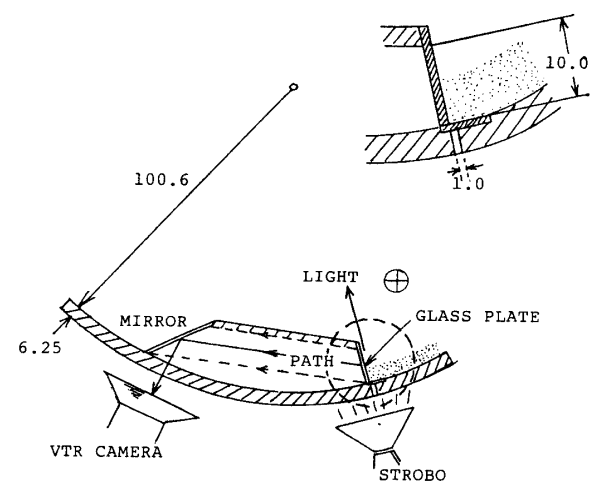


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

合とほぼ同程度以下の1m/sを越えない程度である。ステップがない落下粒子膜内の粒子挙動は予想に反して壁面に沿って滑るように流れてはいなく、粒子は壁面上を跳ねるようにランダムに壁をうちながら落下しており、その粒子はときどき接触している。写真において、その接触する面の形状が、テコボコであることから、この粒子流れがランダムであることが明確に示される。次に右図の様な、ステップがある場合であるが、写真から解るように、ランダムに流れてきた粒子膜が、この厚さ100 $\mu$ m、長さ2mmのテープ状ステップの前縁に衝突すると、そこで粒子の流れに剥離が生じ、その後、後縁を飛び越えある位置で再付着している。また粒子の流れは、剥離後は、希薄で厚い流れの層となって落下して行っていることがわかる。この場合、壁そのものが傾斜しているため、再付着そのものは意味をもたないが、落下粒子の流れは、ステップがかなり薄いものであっても相当大きく崩されてしまうと言う興味ある結果が示されている。

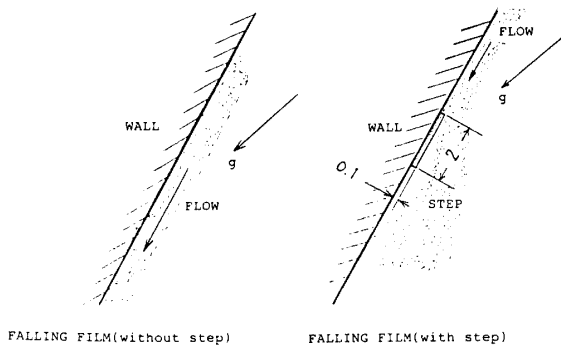


Fig. 3 Model of falling film

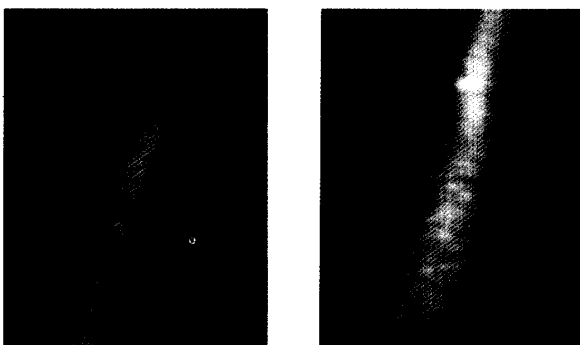


Photo. 1 Falling film  
(L; without step, R; with step)

大気圧下での循環流動層内の粒子挙動

図4は形状1と同様に大気圧下での循環流動層内粒子挙動のモデル図である。空気流は、下から上に流れている。形状1と同様に実験は、ステップのない場合とある場合の2種について、ガスの流速、流動粒子の濃度を若干変えて行なわれている。表1は、この時の実験条件をまとめたものである。上欄のRun 1~4がステップのない場合、下欄のRun 5~8がステップのある場合でそれぞれRun 1とRun 5と言うように、基本的にはその条件が対応するように選択している。写真2は、ステップのない場合の写真である。Run 2のように粒子密度が大きいと、その粒子膜も厚く乱反射の程度が大きくなり、粒子の挙動を把握するのが困難となる。そして粒子膜の厚さは、流速と、粒子密度の程度に依存していることが分る。原ビデオによる画像から判断して、粒子の流れの膜が一瞬にして壁を覆い、それが揺らいだかと思うと、一瞬にして散逸しており、またそれが周期的に起こる。このテストセクションでの粒子の流れは、外壁を通して観察すると、一旦吹上げられた粒子が、パイプの内壁を滑るように落下して見えるが、前述のように滑り落ちる現象とは幾分異なるようである。次に、写真3で観られるように、壁に厚さ100 $\mu$ m、長さ2mmのテープ状のステップを装着するとその粒子挙動が、ステップの無い場合の粒子挙動に比べてかなり異なることが分る。大きく異なるところは、ステップの影響で壁からの剥離が主にステップ下方から観察され、一瞬ではあるが、粒子が上流から下流へ流れていることが分る。また程度の差はあれ、この剥離はどの粒子速度、どの粒子密度でも起こって

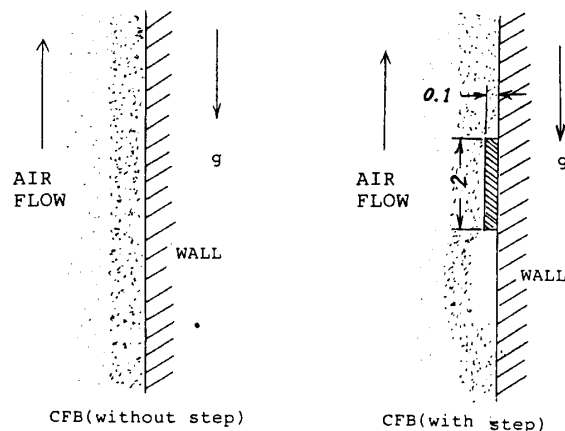


Fig. 4 Model of CFB

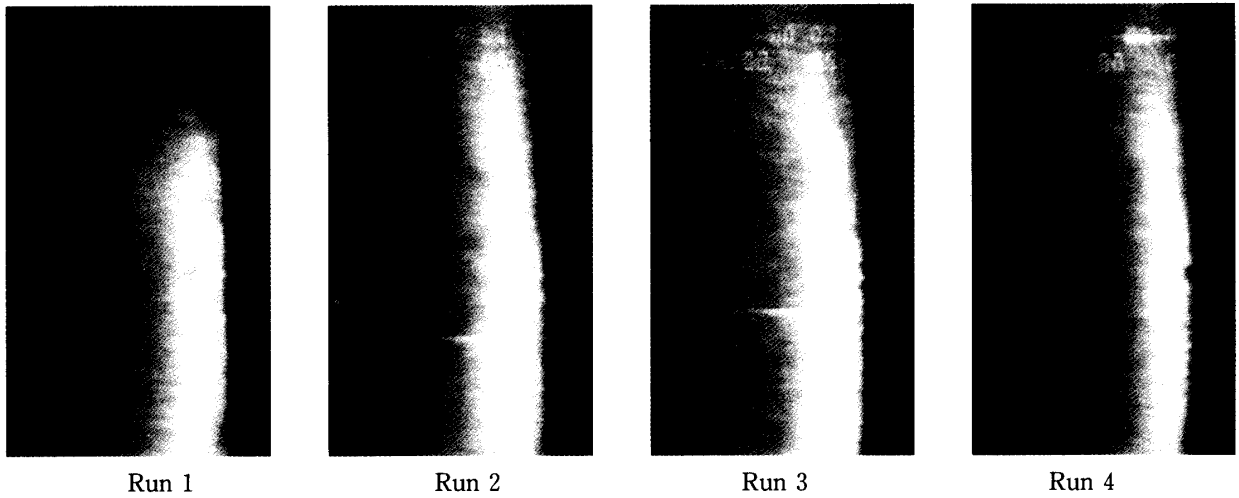


Photo. 2 Flow patterns without step in CFB.

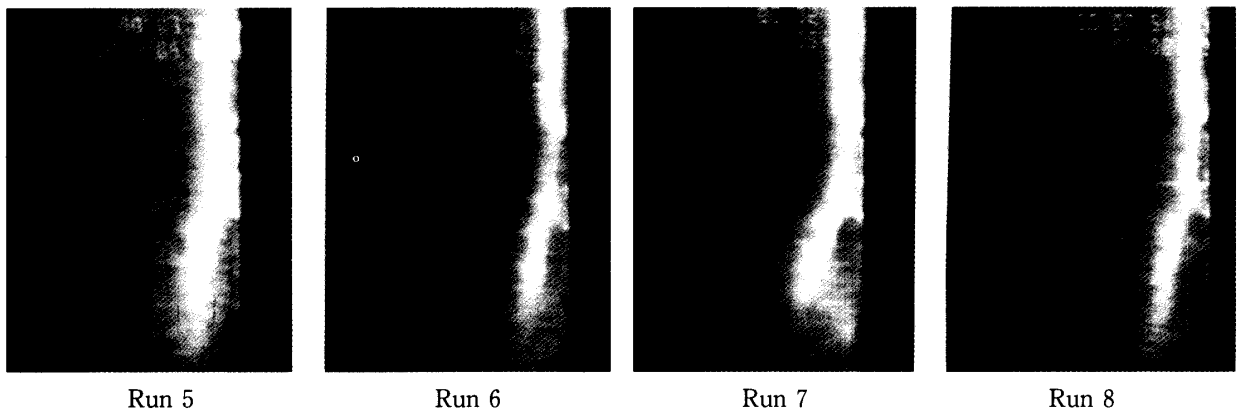


Photo. 3 Flow patterns with step in CFB.

Table. 1 Experimental conditions in CFB

	(Without step)			
	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
$U_g$ (m/s)	1.94	1.84	1.86	2.49
$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0.455	1.35	1.49	2.44
$\rho_{BED}$ (kg/m <sup>3</sup> )	25.7	85.7	50.0	50.0
	(With step)			
	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8
$U_g$ (m/s)	1.24	1.56	2.34	2.55
$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0.080	0.976	1.32	2.37
$\rho_{BED}$ (kg/m <sup>3</sup> )	25.7	57.1	42.9	61.4

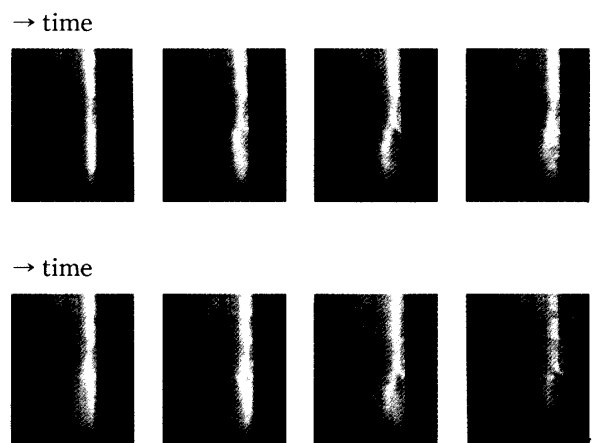


Photo. 4 Variation of flow patterns on marching times in CFB.

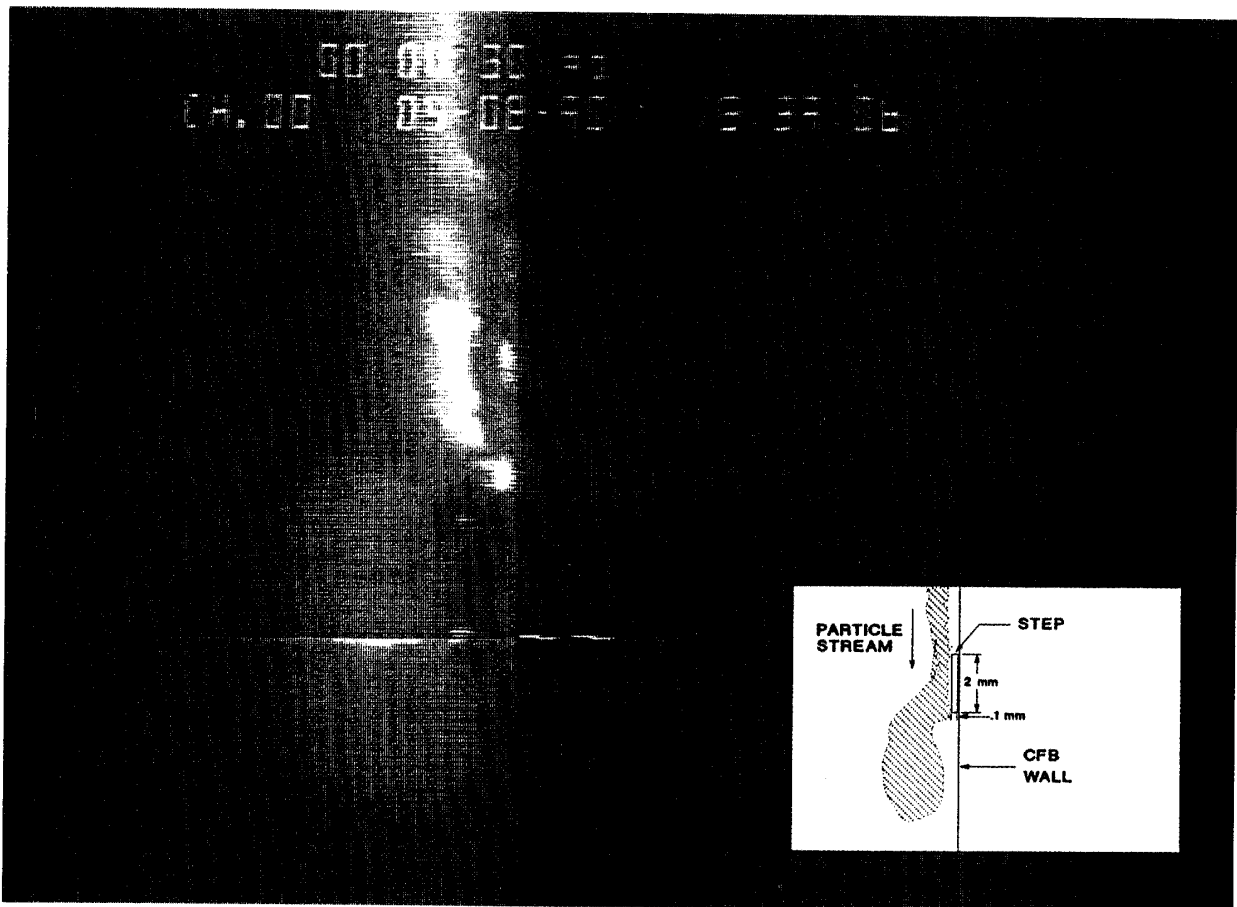


Fig. 5 Cluster image near the wall of CFB.

いる。また粒子の密度が高いほど剥離部での粒子挙動が不鮮明であり、流れがかなり崩されていることがわかる。ステップの厚さ $100\mu\text{m}$ 程度では粒子密度、流速が大きい時は、流れを支配するまでには至らず、攪乱を与えるにとどまっていることが推察される。またPhoto. 4からステップの無い場合と同様に、粒子流れの層は一瞬にして壁を覆い、それが揺らいだかと思うと、一瞬にして散逸しており、またそれが周期的に起こっている。装置の固有の振動の影響とも思えるが現段階では何とも言い難い。

図5は、これらの流れの1つをデジタル化してイメージとして打出したもの<sup>(11)</sup>で、右図にその輪郭を結んだ図を付記している。これは、粒子の流れが明らかに粒子塊として捉えられており、著者らが考える粒子塊(クラスター)の流れが不定型で縦長の粒子塊であると言うイメージと十分合致しており極めて興味ある結果である。そしてこの結果は、他の条件での循環流動層の粒子の流れにも当然あてはまるものと考え。そして、

この粒子塊(クラスター)の挙動が循環流動層に於ける摩耗・侵蝕現象、あるいは熱伝達にとって何等かの興味ある影響を与えているであろうことが分る。

#### 4. 結 論

得られた結果をまとめるとつぎの様である。

1. 傾斜平板上の落下粒子膜内の粒子挙動の観察から粒子と壁との接触がランダムであり、その粒子は滑る落ちるものではない。ステップ状障害物を通過する際、剥離を生じ粒子の流れがかなり崩れてしまう。この事は粒子流れの基本的性質と思われる。
2. 大気圧下の循環流動層内粒子挙動の観察から粒子流れの層は一瞬にして壁を覆い、それが揺らいだかと思うと、一瞬にして散逸しており、またそれが周期的に起こっている。
3. 大気圧下の循環流動層でステップ状障害物を置いた際の粒子挙動から、明らかに粒子の流れの層が、揺

らいでおり、それとともにステップ状障害物下方での剥離の程度が振動的に変化している。

4. この時の流れをデジタル化してイメージとして捉えると、著者らが考える粒子塊（クラスター）の流れが不定形で縦長の粒子塊であると言うイメージと十分合致しており極めて興味ある結果である。

5. 循環流動層における熱伝達機構や摩耗の現象において、この粒子塊の挙動が何等かの影響を及ぼしているのではないかと推察される。

#### 参考文献

- (1) Geldart, D.; Powder Tech., 7, (1973) 285
- (2) Elsner, R. W. & Friedman, M. A.; Proc. Workshop on Material Issues in CFB, Electric Power Research Center, CA, 1990
- (3) Johnk, C. & Wietzke, D.; Ibid.
- (4) Bixler, A. D.; Ibid.
- (5) Hartge, E. Li, Y. & Werther, J.; CFB Tech., Basu, P., ed., Pergamon Press (1986)
- (6) Horio, M. et al.; CFB Tech. II, Basu, P. & Large, J. F., eds., Pergamon Press (1988)
- (7) Takeuchi, H. and Hiramata, T.; Proc. of 3rd Int. conf. on CFB. (1990) No. 4-29
- (8) Glicksman, L. R., CFB Tech. II, Basu, P. & Large, J. F., eds., Pergamon Press (1988)
- (9) Li, H. et al.; Proc. of 3rd Int. conf. on CFB. (1990) No. 4-30
- (10) Rhodes, M. J. et al.; Proc. of 3rd Int. conf. on CFB. (1990) No. 4-17
- (11) Lints M. C., Private Communication (1990)

(平成3年10月30日受理)