

## 論 文

## [1014] アジテータ内のフレッシュコンクリートの攪拌過程の可視化

正会員○橋本 親典（群馬大学建設工学科）  
 正会員 安本 礼持（住友セメント）  
 正会員 丸山 久一（長岡技術科学大学建設系）  
 正会員 辻 幸和（群馬大学建設工学科）

## 1. はじめに

トラックミキサ車は、レディミクストコンクリートの使用とコンクリートポンプ工法の普及により、都市部およびその近郊の建設現場におけるコンクリート打設に関する一連の施工システムにおいて重要な役割を果たしている。わが国で用いられているトラックミキサ車の多くは、バッチャープラントで製造されたレディミクストコンクリートを積み込んで現場まで運搬する間、骨材とモルタル分の材料分離と固化を防止するために、攪拌しながら運搬するアジテータとして使用されている[1]。

現在、このアジテータの性能は、JIS A1119『ミキサで練り混ぜたコンクリート中のモルタルの差及び粗骨材量の差の試験方法』による品質検査でしか評価されていない。この検査方法は、一般的の定置式コンクリートミキサの練り混ぜ性能と同様な検査方法である。練り混ぜ性能が重要である定置式コンクリートミキサと異なり、アジテータの場合、運搬時間内での材料分離・固化の防止や到着後の排出性能が重要となる。従って、現在の品質検査方法は、アジテータの性能を十分評価するものとは言い難い。

アジテータの性能に関する検査方法が不十分であると考えられる理由としては、対象とする実機のアジテータが大規模であることとアジテータ内のコンクリートの流動性状がブラックボックスであることが挙げられる。

著者らはこれまでに、アジテータの性能評価方法の確立を目的とし、著者らが開発してきた実験室規模で行うコンクリートの流動に関する可視化実験手法[2]を用いて、アジテータ内のコンクリートの流動解析を行っている[3, 4]。1/5スケールのアジテータモデルを用いた流動実験の結果、攪拌過程や排出過程におけるアジテータ内でのモルタル相と粗骨材粒子群の力学的挙動を目視観察することが可能であることが明らかになってきた。

本研究では、アジテータの攪拌過程における可視化実験によって得られた画像データを基に、攪拌過程におけるコンクリートの流動機構について詳細に検討した結果を報告する。

## 2. 実験概要

図-1に可視化実験装置の概要を示す。モデルア

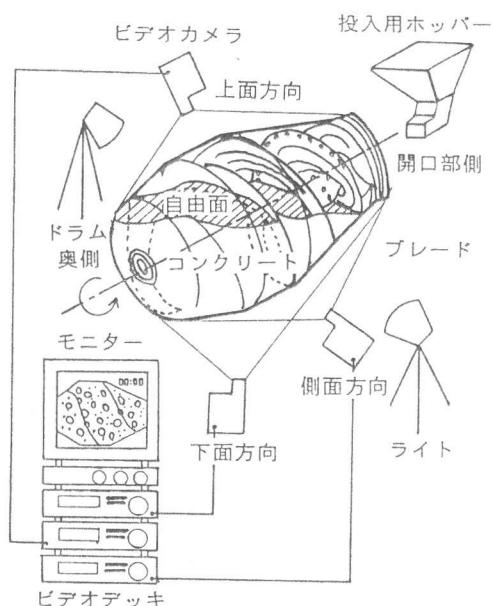


図-1 可視化実験装置の概要

ジテータの攪拌速度は40sec/回転で一定とした。これまで可視化実験手法を適用してきたコンクリートの管内流動現象は、現象の理解を簡単にするために2次元平面内の運動として取り扱ってきた。これに対し、アジテータ内のコンクリートの流動現象は3次元空間内の運動であり複雑な挙動を示す。そのため、ビデオカメラの位置を3方向とし、アジテータの上面、側面および下面方向から撮影する。

コンクリートの可視化モデル材料の詳細は、参考文献[2]に記載しているので省略する。主たる実験パラメータとしては、モデルモルタルの粘性、モルタルと粗骨材の容積比および積載量である。

アジテータ内の流動現象が複雑なため、目視観察する対象物を粗骨材粒子群の挙動とモルタル相の挙動に分けて、以下の手順で可視化実験を行った。

(a) 粗骨材粒子群の挙動に着目した流動実験：①粒径5～10mmの粗骨材粒子を白色に、粒径10～15mmの粗骨材粒子を黒色に着色し、粗骨材粒子群を2色化する。②白色骨材とモルタルを混合した可視化モデルコンクリートをアジテータに投入する。③黒色骨材とモルタルを混合した可視化モデルコンクリートを、先に投入した可視化モデルコンクリートの自由面上に静かに投入する。

④白色骨材と黒色骨材が混合・攪拌されていく過程をビデオ撮影する。

(b) モルタル相の挙動に着目した流動実験：①モルタルのトレーサ粒子として発泡スチロール粒子を混入した可視化モデルコンクリートを、モデルアジテータに投入し攪拌を行う。②トレーサ粒子の移動の状況をビデオ撮影し、攪拌過程におけるモルタル相の流動状況をトレーサ粒子の運動から観察する。

### 3. 攪拌過程におけるコンクリートの流動機構

#### 3-1 流動機構と混合度曲線の関係

粗骨材粒子群の挙動に着目した流動実験において、可視化実験によって得られた画像データを2値化し、白色骨材と黒色骨材が混合されていく過程をLaceyの混合度M3[5]によって定量化した。アジテータ下面に設定したある領域内における混合度が、経過時間に伴い変化する状況を図-2に示

す。攪拌経過時間が初期の段階では、急激に混合度が上昇し、一定の混合度に到達する。それ以降は、混合度は一定の値を中心に振動し、混合作用と分離作用が動的に平衡に達した状態に至る。

一般に粉体工学の分野では、“混合操作”とは、2成分以上の不均一な成分からなる粉粒体に適当な操作を加えることにより、成分濃度を均一にする操作を意味する。一方、“攪拌操作”は、既に混合された粉粒体を一定の成分濃度に維持する操作を意味する。

図-2に示す混合度曲線において、攪拌開始直後の混合度が零の状態から最大混合度に到達するまでのアジテータ内の流動機構は、主として“混合操作”が卓越している。その後の混合作用と分離作用が平衡状態にあるアジテータ内の流動機構は、主として“攪拌操作”が卓越している。

本流動実験では、粗骨材粒子群を2色化することにより、攪拌開始において混合度が零である初期条件を与えていたため、混合操作と攪拌操作が混合度曲線上で明確に確認できた。従って、通常の粗骨材粒子群を用いた可視化モデルコンクリートの攪拌過程においても、混合操作と攪拌操作は常に存在していると考えられる。

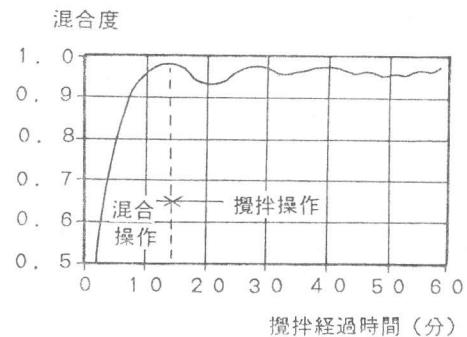


図-2 混合度曲線の一例

そこで、本研究では、流動実験から得られる画像データを基に、混合操作はアジテータ全体のコンクリートの流動機構とし、攪拌操作はコンクリートがブレードに接する局部的領域で行われている流動機構と分離した。

### 3-2 混合操作におけるコンクリートの流動機構

混合操作におけるコンクリートの流動機構を、図-3に示す。

混合操作におけるコンクリートの流動は、アジテータ内全体としての循環流による粗骨材粒子群の位置移動によって行われる。ブレードおよびドラム回転により、コンクリート全体がドラム内全域を連続体として位置的変化を行い、循環流を形成する。全体的な循環移動のため、コンクリート内部の局部的な相対位置を変化させる攪拌操作は行われない。

ドラム奥側の底部にあるコンクリートは、ブレードに沿って円運動により回転軸中心方向に流動する。ブレードの回転によって自由面上昇したコンクリートは、自由面の高低差によってドラム開口部側へブレードを越流しながら流動する。ドラム開口部側の自由面に達したコンクリートは、コンクリート自由面先端においてブレードの越流によって逆流し、ドラム壁面付近を押し出されながらドラム奥側に移動する。この循環流によって、コンクリートが比較的大きな集団としてアジテータ内部を流動する。なお、越流過程と押し出し過程については、次節で詳細に説明する。

### 3-3 攪拌操作におけるコンクリートの流動機構

アジテータはドラムを正転（左回り）することにより、ドラム壁面にらせん状に設置された2枚のブレードが回転して、コンクリートの攪拌操作を行う。コンクリートと接するドラム開口部側のブレードに着目すると、ドラム回転によるブレードの位置とコンクリートの自由面の高さが変化し、図-4(a)に示すコンクリートがブレードを越流する流動と、図-4(b)に示すブレードによってコンクリートがドラム奥へ押し出される流動が存在する。この2種類の流動は、ドラム1回転において2回ずつ繰り返される。

次に、上面、側面および下面から撮影したコンクリートの流動状況を図5～7に示す。

越流時では、コンクリートがブレードを越流することにより、開口部側と奥側に自由面の高低差が生じ、表層部のコンクリートがドラム開口部側へ流下する。表層部のコンクリートの回転軸方向移動が行われる（図-5(a)参照）。

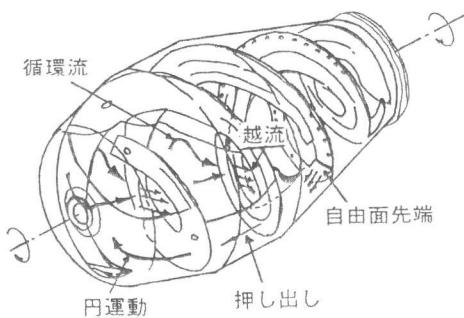
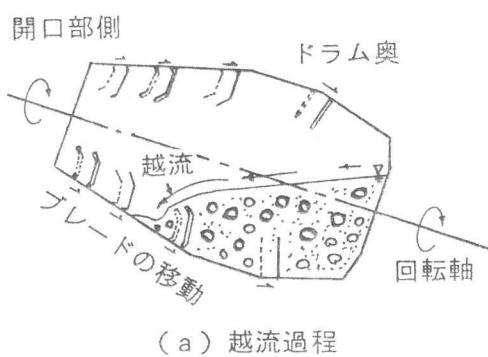
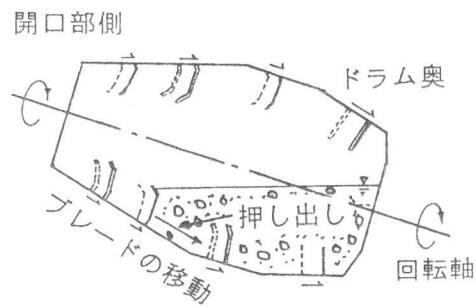


図-3 混合操作におけるコンクリートの流動機構



(a) 越流過程



(b) 押し出し過程

図-4 攪拌操作におけるコンクリートの流動機構

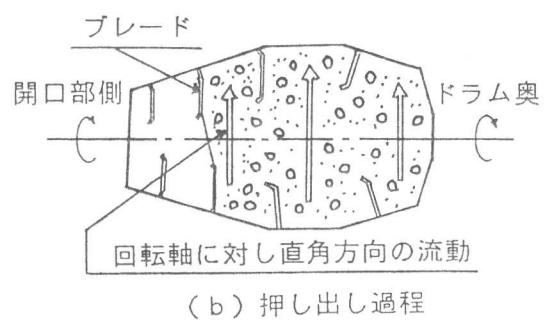
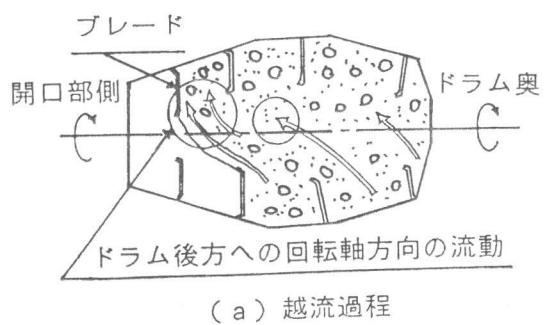


図-5 アジテータ上面方向から見た流動状況

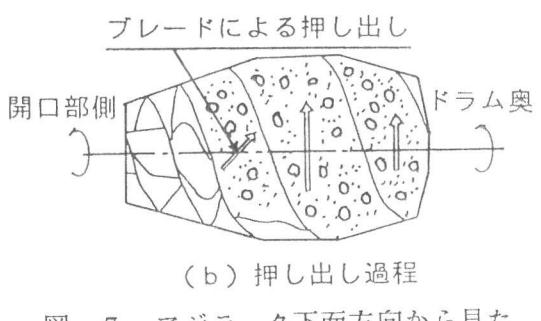
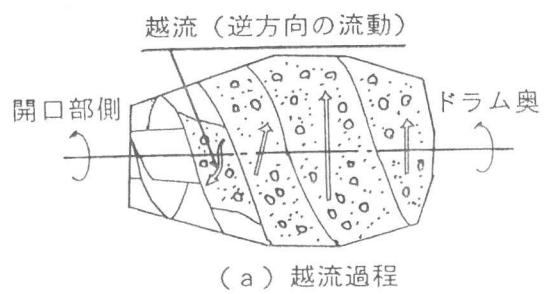


図-7 アジテータ下面方向から見た流動状況

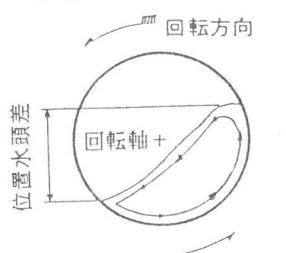
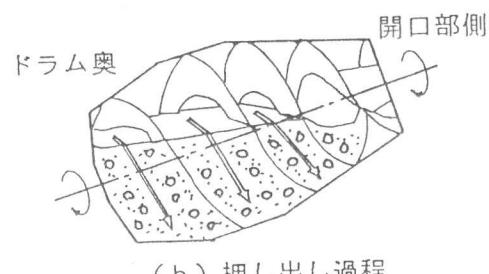
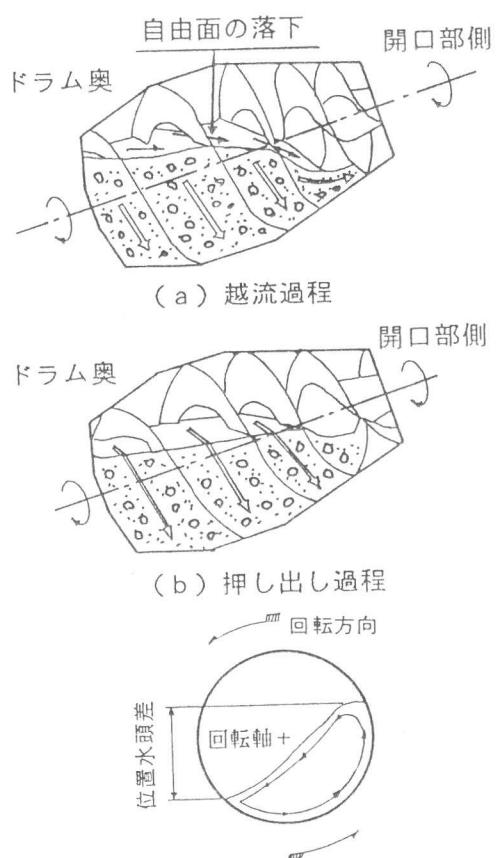


図-6 アジテータ側面方向から見た流動状況

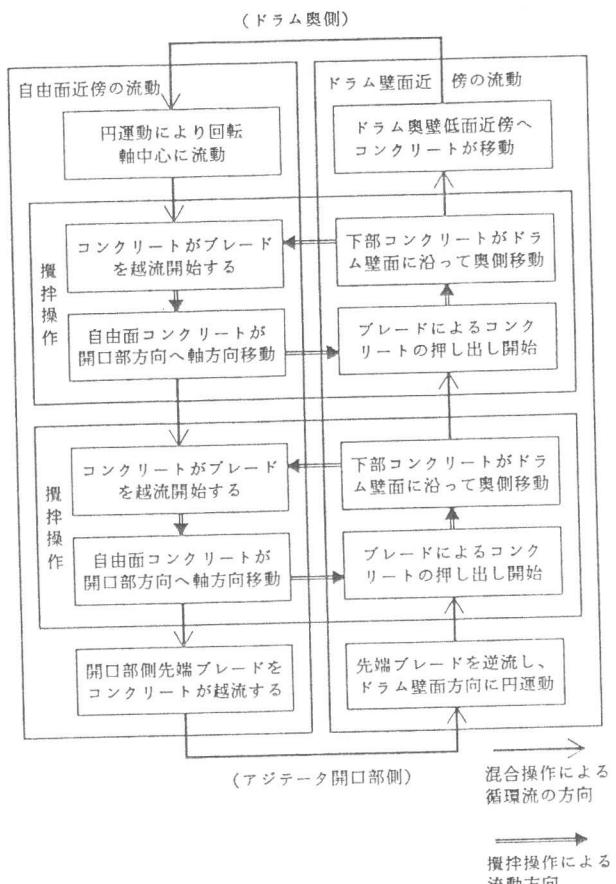


図-8 攪拌過程のフローチャート

押し出し時では、回転軸方向のコンクリート表層部の移動が行われない。ドラムの回転により、自由面のコンクリートは右から左側に回転軸に直角に移動する（図-5 (b)参照）。

自由面を流下して、ドラム内壁の左側面に到達したコンクリートは、ドラムと共に円運動に入る。図-6 (a)(b)(c)は、越流時および押し出し時の円運動の状況を示す。円運動に入ったコンクリートは、ブレードによってドラム奥側へ押し出される。

ドラム奥への押し出し移動距離はコンクリートのブレード越流量によって決まり、越流量が多い場合は、回転軸方向に移動する（図-7 (a)参照）。逆に、越流量が少ない場合、ドラム奥に押し出せるコンクリート量がなく、コンクリートはドラム内壁と共に回転軸と直角方向に移動する（図-7 (b)参照）。従って、攪拌効率は、1回の回転におけるブレード越流量を大きくすることが重要である。

アジテータの攪拌過程における混合操作と攪拌操作の関係を、図-8に示す。アジテータ内の攪拌性能を高めるためには、コンクリートをドラム全域で円滑に循環させ、開口部への移動量を増やし、ブレード越流による攪拌操作効率を高めることが重要である。

#### 4. モルタル相と粗骨材粒子群の材料分離発生機構

モルタル相の挙動に着目した流動実験により、コンクリートの積載量が多い場合やモルタルと粗骨材の容積比が高い場合、モルタルの粘性の大小に関係なく、攪拌を継続するとやがて図-9に示すようにモルタル相と粗骨材粒子群の材料分離が生じることが明らかになった。

材料分離が発生した流動実験に関する画像データを観察した結果、図-10に示すフローチャートで、攪拌過程における材料分離の発生が行われていると考えられる。

①モルタルの壁面摩擦力が、モルタルと粗骨材間の摩擦力よりも大きいために、ドラム右側に接するコンクリート表層部に薄いモルタル層が形成される（図-11参照）。  
②ドラムと共に円運動を行っていた粗骨材粒子は自由面に到達した後、ドラム内壁の付着から離れて自由面を流下する。これに対し、モルタル層はドラム内壁に付着したまま、ブレードによってドラム奥側へ送られる（図-12参照）。

③アジテータの容量に対してコンクリートの積載量が過大である場合、ドラム奥側のエアドーム（コンクリート自由面と上部ブレードの隙間）が減少する。表層に形成されたモルタル層が、越流時に開口部側へ流下する際、上部ブレードに堰止められ、ドラム奥側に堆積する（図-13参照）。その結果、ドラム奥側は、モルタル相の濃度が高く、ドラム開口部側は粗骨材濃度が高くなる。

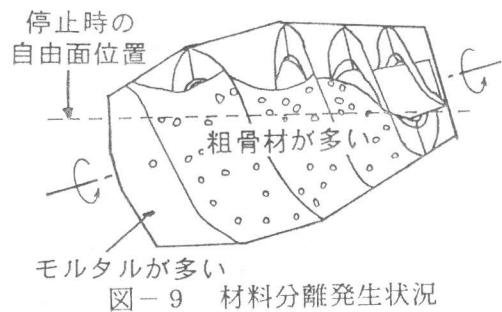


図-9 材料分離発生状況

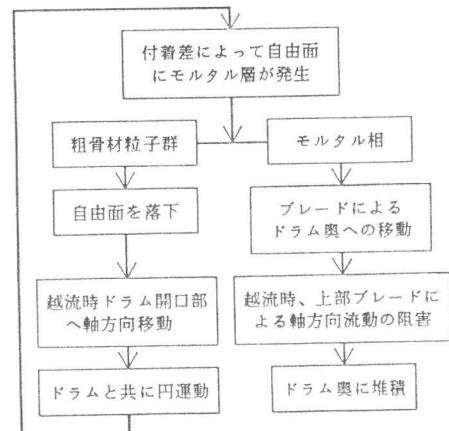


図-10 材料分離発生フローチャート

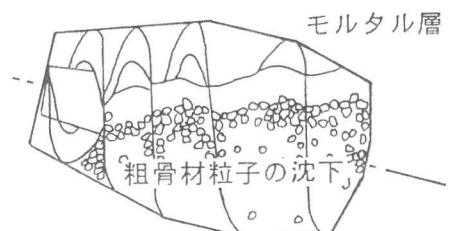


図-11 自由表面のモルタル層

## 5. 結論

アジテータの攪拌過程におけるコンクリートの流動機構は複雑であるが、概ね以下のようにまとめることができる。

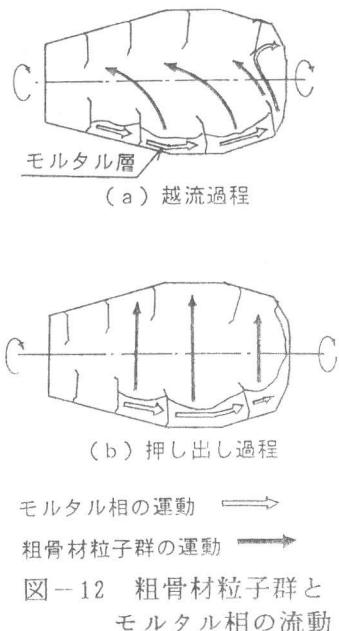
- 1) ドラム壁低面近くのコンクリートは、ドラムと共に円運動を行いながらブレードによって、ドラム奥へ押しやられる。ドラム回転により、自由面に到達後、表層流となり、開口部側で生じるブレードの越流過程によって、開口部の方に逆流してくる。開口部近くでブレードを越流すると、壁底部に落下し、再びブレードに押されてドラム奥方向の流れとなり、アジテータ内を循環する。この循環流動が円滑に行われるとき、攪拌性能は良好となる。
- 2) アジテータの容量に対して、コンクリートの積載量が過大になると、表層部のコンクリートの流れが上側ブレードによって堰止められ、ドラム奥側にモルタルが堆積し、材料分離現象が発生する。

今後の研究課題としては、攪拌時間が60分から90分間においてアジテータ内のフレッシュコンクリートのスランプが著しく低下する特性（スランプロス現象）が、攪拌過程に及ぼす影響を検討する必要がある。この為には、経過時間に伴うモルタルの品質変化を再現した可視化モデルコンクリートの開発が必要となる。

〈謝辞〉本研究を実施するにあたり、ご協力を頂いた新明和工業(株)開発技術本部ならびに佐野工場建設物流車両部の関係各位に、心から御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) (社)日本建設機械化協会編：コンクリートポンプハンドブック 付：トラックミキサ、森北出版、pp. 229-230、1979 .12
- 2) 橋本親典・丸山久一・清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学、Vol. 26、No. 2、pp. 119-127、1988. 2
- 3) 安本礼持・丸山久一・橋本親典・林善弘：可視化実験手法によるアジテーター内部のコンクリートの流動解析、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 710-711、1990. 9
- 4) 橋本親典・丸山久一・安本礼持・林善弘：コンクリートアジテータ内でのフレッシュコンクリートの流動の可視化、可視化情報、Vol. 10 Suppl. 、No. 2、pp. 259-262、1990. 11
- 5) 白戸紋平 編著：化学工学 機械的操縦の基礎、pp. 97-99、丸善、1980. 3



モルタル相の運動 →  
粗骨材粒子群の運動 →  
図-12 粗骨材粒子群と  
モルタル相の流動

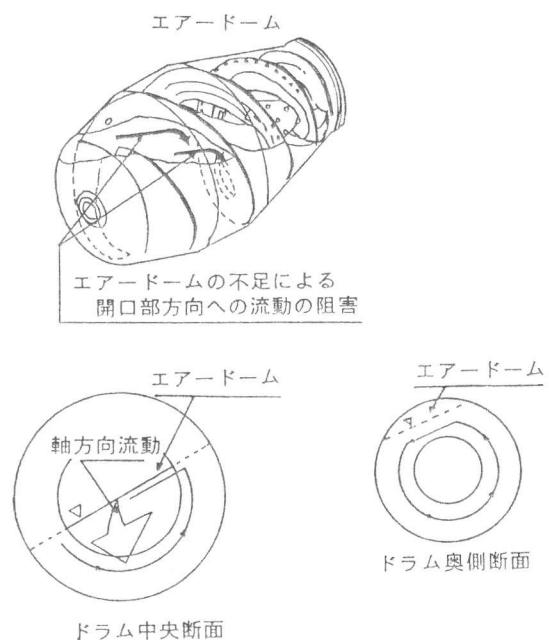


図-13 エアードーム不足による  
軸方向流動の阻害