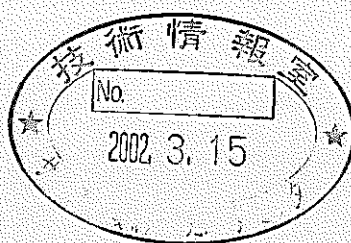


ナトリウム冷却高速炉の 原子炉容器内熱流動の研究(I)

～炉上部プレナム内流動適正化に関する解析的検討～

(研 究 報 告)



2002年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器内熱流動の研究 (I)

～ 炉上部プレナム内流動適正化に関する解析的検討 ～
(研究報告)

村松 壽晴*、村上 諭**、山口 彰*

要 旨

実用化戦略調査研究の一環として検討が進められているナトリウムを冷却材として用いる大型高速炉では、物量を削減して経済性を大幅に向上させる観点から、徹底したシステムの簡素化・コンパクト化設計を指向し、この結果、原子炉容器上部プレナム内では、冷却材流速の高速化や流況の非対称化（偏流）が顕在化するため、熱流動設計においては自由液面からのガス巻き込みや炉内構造物の流力振動、さらには熱過渡による構造物の健全性について十分な注意を払う必要がある。

本報では、同炉上部プレナム内の流動特性を把握するとともに、自由液面からのガス巻き込みを防止する観点から、プレナム流動適正化を実現するための炉内構造を数値解析的に検討した。得られた結果は、次の通りである。

- (1) バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率と圧損係数の調整だけでは、炉内全体の流動パターンの変更を通じたプレナム流動の適正化は難しい。
- (2) 切込み部へのダミープラグの挿入は、切込み部で発生する上昇噴流による偏流を抑制しつつ、上部プレナム内の流動状況を安定化させる上で、有効な方策の一つである。
- (3) バッフルリングおよび部分内筒などの整流デバイスは、ディッププレートに衝突する上昇噴流および自由液面における水平方向流速成分を抑制する上で、有効な方策の一つである。
- (4) 炉壁ギャップ部へのラビリンスの設置は、自由液面プレナムに流入する冷却材流量を抑制し、自由液面での周方向流速を低減する上で極めて有効な手段である。
- (5) 炉内中継ポットおよびコールドトラップのディッププレート貫通ギャップを閉止することにより、自由液面における水平方向流速値および自由液面高低差を効果的に抑制することが可能である。

なお、ガス巻き込み抑制に向けた炉内流動適正化に係る今後の検討では、

- (1) ディッププレートを通じた流入流出分布の（空間）平均化方策の検討
- (2) 自由液面における渦度集中挙動の緩和方策の検討
- (3) 自由液面から液中に繋がる渦度分布の切断方策の検討

が重要である。

* : 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

** : カストマシステム株式会社

Study on In-Vessel Thermohydraulics Phenomena of Sodium-Cooled Fast Reactors (I)
- Numerical Investigation for the Rationalization of Hydrodynamics in the Upper Plenum -

Toshiharu MURAMATSU*,

Satoshi MURAKAMI**,

Akira YAMAGUCHI*

Abstract

A large-scale sodium-cooled fast breeder reactor in feasibility studies on commercialized fast reactors has a tendency of consideration of thorough simplified and compacted system designs to realize drastic economical improvements. Therefore, special attention should be paid to thermohydraulic designs for a gas entrainment behavior from free surfaces, a flow-induced vibration of in-vessel components, a thermal shock for various structures due to high-speed coolant flows, nonsymmetrical coolant flows, etc. in the reactor vessel.

In-vessel thermohydraulic analyses were carried out using a multi-dimensional code AQUA to understand the thermohydraulic characteristics in the upper plenum, and to investigate suitable in-vessel structure for the elimination of gas entrainment possibility. From the analysis, the following results were obtained.

- (1) It is difficult to rationale in-vessel flow patterns through adjustments of porous ratio and pressure loss for a hold down plate and baffle plates installed in an upper core structure.
- (2) Dummy plug insertion to a slit of the upper core structure is one of effective measures to stabilize in-vessel flow patterns.
- (3) Flow guide devices such as a baffle ring and a partial inner barrel are also effective measures to eliminate impinging jet to a dipped plate (D/P) and to reduce horizontal flow velocity components at free surface.
- (4) Installations of labyrinth structures to a R/V - D/P gap is successful for decreasing of free surface horizontal flows.
- (5) Gap closing of an in-vessel fuel pot and two cold trap components has the effects of reductions for free surface horizontal flows and for the difference of free surface levels.

Following future investigations are important preventive measures against the gas entrainment from the free surface.

- (1) Flattening of spatial axial velocity distributions at the R/V - D/P gap.
- (2) Alleviation measures of vortex concentration at free surface.
- (3) Separation measures of 3-dimensional vortex distribution to internal sodium flows from free surface.

* : Thermalhydraulic Research Group, Advanced Technology Division, OEC. JNC.

** : Customer System Co. Ltd.

ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器内熱流動の研究 (I)

～ 炉上部プレナム内流動適正化に関する解析的検討 ～

目 次

第 1 章	緒 言	1
第 2 章	解析条件	2
2.1	解析体系	2
2.2	解析モデル	2
2.3	解析ケース	3
2.4	数値計算条件	4
第 3 章	解析結果	5
3.1	バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率と圧損係数	5
3.2	ダミープラグの挿入	5
3.3	各種整流デバイスの設置	5
3.4	炉壁ギャップ部ラビリンスの設置	6
3.5	炉内中継ポットおよびコールドトラップ 周りのギャップの閉止	6
3.6	コールドトラップ設置位置の変更	7
第 4 章	評価・検討	8
4.1	炉上部構造物支持板の開口率と圧損係数の組合せの影響	8
4.2	ダミープラグ挿入の効果	8
4.3	各種整流デバイスの効果	9
4.4	炉壁ギャップ部ラビリンス設置の効果	9
4.5	炉内中継ポットおよびコールドトラップ周りのギャップ閉止の効果	10
4.6	コールドトラップ設置位置の効果	11
4.7	ガス巻込み抑制に向けた炉内流動適正化に係る検討の方向性	11
第 5 章	結 言	12
参考文献		13

表リスト

表 2. 1 炉心熱流特性 (平衡炉心運転サイクル BOC)

図リスト

- 図 2. 1 原子炉容器断面
- 図 2. 2 炉心上部機構構造
- 図 2. 3 バッフル板およびホールドダウンプレーットの平面構造
- 図 2. 4 炉心構成
- 図 2. 5 デイッププレート下面までを対象とした上部プレナム解析モデル
- 図 2. 6 自由液面までを対象とした上部プレナム解析モデル
- 図 2. 7 ダミープラグ装荷イメージ
- 図 3. 1 (1/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 ($\xi=0.5$)
- 図 3. 1 (2/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 ($\xi=1.5$)
- 図 3. 2 ホールドダウンプレート 面における軸方向流速成分 W の空間分布
- 図 3. 3 バッフル板 #1 面における軸方向流速成分 W の空間分布
- 図 3. 4 バッフル板 #2 面における軸方向流速成分 W の空間分布
- 図 3. 5 バッフル板 #3 面における軸方向流速成分 W の空間分布
- 図 3. 6 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)
- 図 3. 7 バッフル板 #2 面における軸方向流速成分 W の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)
- 図 3. 8 バッフル板 #4 面における軸方向流速成分 W の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)
- 図 3. 9 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (各種整流デバイスの効果)
- 図 3. 10 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (炉壁ギャップ部ラビリンス設置の効果)
- 図 3. 11 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (貫通機器ギャップ閉止の効果)
- 図 3. 12 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (C/T 設置位置の効果)
- 図 4. 1 バッフル板軸方向通過流量の比較
- 図 4. 2 D/P 下面における水平方向流速成分 ($U^2 + V^2$) 0.5 の空間分布
- 図 4. 3 デイッププレート 下面における水平方向流速成分最大値の比較
- 図 4. 4 バッフル板外縁における径方向流速成分 U の軸方向分布
- 図 4. 5 D/P 下面における水平方向流速成分 ($U^2 + V^2$) 0.5 の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)
- 図 4. 6 D/P 下面における水平方向流速成分 ($U^2 + V^2$) 0.5 の空間分布 (各種整流デバイスの効果)

- 図 4. 7 自由液面における水平方向流速成分 ($U_2 + V_2$) 0.5 の空間分布 (各種整流デバイスの効果)
- 図 4. 8 炉容器壁面に沿う流速ベクトルの周方向断面 ($q-z$) 分布の比較 (各種整流デバイスの効果) 図 4.9 自由液面における水平方向流速成分 ($U_2 + V_2$) 0.5 分布および炉容器壁面に沿う流速ベクトルの周方向断面 ($q-z$) 分布の比較 (ラビリンス設置の効果)
- 図 4.10 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布 (ラビリンス設置の効果)
- 図 4.11 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布 (機器貫通ギャップ閉止の効果)
- 図 4.12 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布 (C/T 設置位置移動の効果)
- 図 4. 13 自由液面における渦度分布および自由液面高低分布
- 図 4. 14 ディッププレート上面位置における軸方向流速成分 (W) の空間分布

第 1 章 緒 言

高速炉の実用化に向けて、安全系の限定（減量）や多重性要求の合理化を行った場合、さらには多様な作動流体を冷却材として用いた場合など、これらがプラント熱流動特性に及ぼす影響を定量化し、これらの場合の実現性に関する検討が実用化戦略調査研究の一環として進められている^{(1), (2)}。

ナトリウムを冷却材として用いる高速炉の検討では、物量を削減して経済性を大幅に向上させる観点から、徹底したシステムの簡素化・コンパクト化設計、すなわち

- 原子炉構造自体のコンパクト化（炉容器径は実証炉と同等の 9 m 台）
- ループ数の削減（2 ループ）
- 炉上部機構簡素化（コラム型 UIS）
- 熱出力および冷却材流量の増加（実証炉の約 2.2 倍）
- 機器合体（中間熱交換器 + 1 次主冷却ポンプ）

などが採用される計画にある。

これら革新的設計の採用により原子炉容器上部プレナム内では、冷却材流速の高速化や流況の非対称化（偏流）が顕在化するため、熱流動設計においては自由液面からのガス巻込みや炉内構造物の流力振動、さらには熱過渡による構造物の健全性について十分な注意を払う必要がある。

以上に基づき、炉上部プレナム内の流動特性を把握するとともに、自由液面からのガス巻込みを防止する観点から、プレナム流動適正化を実現できる炉内構造を検討するため、汎用多次元熱流動解析コード AQUA による評価を行う。

本報告では、プレナム流動適正化を実現するための炉内構造を多次元解析結果に基づいて検討するとともに、今後の設計検討の方向性についても言及する。

第 2 章 解析条件

2.1 解析体系

解析の対象とした革新型大型ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器断面図を図 2.1 に示す。原子炉容器は、図 2.1 (a) に示すように、底部に皿型鏡板を有する円筒縦型容器（内径 9,600 ϕ 、高さ 18,700）である。炉内構造物は、炉内支持構造物、炉心支持板、炉心槽、ディッププレート、炉内中継ポット等から構成される。炉内支持構造物は、炉心支持板、炉心槽等の構造物を支持し、その重量を支えている。炉心支持板は、炉心構成要素を定められた間隔と所定の位置に支持し、その重量を支える。炉心槽は、最外周の炉心構成要素を支持する。

炉内貫通機器としては、図 2.1 (b) に示すように、原子炉入口配管 4 基（外径 863.6 ϕ ）、原子炉出口配管 2 基（外径 1,270 ϕ ）、コールドトラップ 2 基（外径 980 ϕ ）、直接炉心冷却器 1 基（外径 1,250 ϕ ）、炉内中継ポット 1 基（外径 1,150 ϕ ）、各種計装系案内管（中性子計装、ナトリウム液位、燃料破損検出、集集体出口温度）などが挿入されている。

図 2.2 は、当該原子炉を特徴づけるコラム型炉心上部機構の構造で、物量削減と上部プレナム内有効混合容積の増加の観点から、外胴の設置を省略するといった構造上の特徴を持つ。一方で、耐震性を確保する観点から、制御棒上部案内管群を一括保持するバッフル板 5 枚（厚み 30）が垂直方向に設置されている。このバッフル板 5 枚および燃料集合体の浮き上がりを防止するホールドダウンプレート 1 枚には、燃料交換器が炉心中心位置までアクセス可能のように、図 2.3 に示す切込み部を持つ構造になっている。また、両者には、制御棒上部案内管、SASS 導入管および集集体出口温度計ウェルが貫通する孔が設けられるとともに、上部プレナム内での冷却材混合を促進させる観点から、30 % の開口率を持つ多孔構造（106 ϕ × 512）となっている。

炉心は、図 2.4 に示すとおり、内側炉心 3 層、外側炉心 4 層、ブランケット 1 層、遮蔽体 3 層および制御棒集合体から構成されている。これら集合体の熱流力特性（平衡炉心運転サイクル初期）を表 2.1 に示す。

2.2 解析モデル

多次元解析は、炉心上端位置からディッププレート下面まで、あるいは炉心上端位置から自由液面までを対象とした 2 種類の解析領域を考え、これを円筒 3 次元座標全周体系でモデル化した。ディッププレート下面までを対象とした上部プレナムモデルを図 2.5 に、自由液面までを対象としたモデルを図 2.6 に示す。

解析では、上部プレナム内の各種構造物の位置および形状を可能な限り厳密にモデル化するとともに、自由液面までを対象とした場合にはディッププレートを貫通する各機器とディッププレートとのギャップ（30 mm）およびディッププレートと原子炉容器壁とのギャップ（30 mm）も全断面積が一致するようにモデル化した。

バッフル板およびホールドダウンプレートに設けられている切込み部の形状については、図 2.5 および図 2.6 に示したように、擬似矩形近似でモデル化した。

2.3 解析ケース

解析は、以下の観点での検討を前提として行った。

(1) バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率と圧損係数の組合せの効果

バッフル板およびホールドダウンプレートを上昇する流れが、炉内流動全体に与える影響を確認することが目的である。解析は、開口率と圧損係数を組合わせて、以下の条件で行う。

		開口率 γ_z		
		0.3	0.5	0.7
圧損係数 ξ	0.5	○	○	○
	1.5	○	○	○

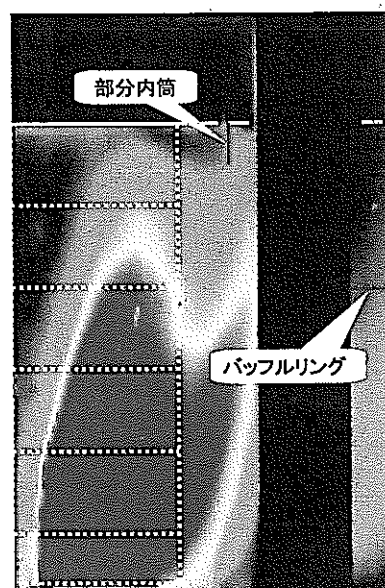
(2) 切込み部へのダミープラグ装荷（図 2.7 参照）の効果

ディッププレートと炉容器壁とのコーナー部に衝突する切込み部からの斜行流の抑制効果を確認することが目的である。解析は、ダミープラグ径と装荷本数および位置を組合わせて、以下の条件で行う。

	装荷本数	炉心中心 ← 装荷位置 → UIS 外側					
		1	2	3	4	5	6
太径ダミープラグ (380 ϕ)	1				○		
	2			○			○
	3		○		○		○
	3	○	○	○			
細径ダミープラグ (190 ϕ)	3	○	○	○			

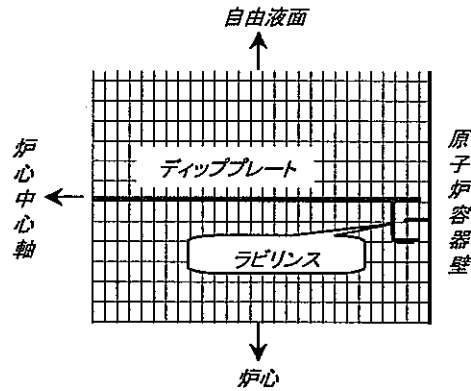
(3) 各種整流デバイス設置の効果

炉容器壁に沿って上昇する流れおよびディッププレート下面に沿う流れを抑制し、プレナム内全体の流動適正化への効果を確認することが目的である。炉容器壁に沿う流れの抑制は幅 300 mm のバッフルリング（全周設置）⁽³⁾で、またディッププレートに沿う流れの抑制は高さ 300 mm の部分内筒（全周設置）で行うものとする（右図参照）。



(4) ディッププレートと原子炉容器壁とのギャップ部へのラビリンス設置の効果

ディッププレートと原子炉容器壁とのギャップ部に、ラビリンス構造を設置した場合の効果を確認することが目的である。なお、同位置には圧損係数は設定しない。



(5) ディッププレートと炉内中継ポットとのギャップ部閉止の効果

ディッププレートと炉内中継ポットとのギャップ部に適切なラビリンスが設置されることを想定し、同ギャップを閉止した場合の効果を確認することが目的である。

(6) コールドトラップ設置位置の効果

高流速領域が発生する切込み部側に設置されているコールドトラップ 2 基の炉内流動への影響を確認することが目的である。

2.4 数値計算条件

炉心上端位置からディッププレート下面までを対象として解析を行う場合には、汎用多次元解析コード AQUA の ver. 5.0 (高次乱流モデル版)⁽⁴⁾ を、炉心上端位置から自由液面までを対象に解析を行う場合は、同コードの VOF (Volume of Fluid) 版⁽⁵⁾ を用いる。

解析では、表 2.1 に示した集合体出口温度および流速をリングモデルで規定し、定格運転状態を想定した定常解析を行う。

第 3 章 解析結果

3.1 バッフル板およびホールドダウンプレーットの開口率と圧損係数

バッフル板およびホールドダウンプレーットの開口率と圧損係数を変更した場合の、主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を図 3.1 に示す。なおここに示した結果は、旧設計条件（バッフル板合計 3 枚）^{注)} のものである。結果より分かる通り、開口率を大きくするに従って、炉心から流出した冷却材が炉心上部機構内部に流入する割合が増加する（J=37 および J=67 断面参照）とともに、切込み部を通過して上昇する冷却材流速の強度が低下する（J=1 断面参照）。この傾向は、圧損係数の値を変更した場合も保持される。図 3.2 ～ 図 3.5 に、ホールドダウンプレーットおよび各バッフル板位置における軸方向流速成分 W の空間分布の比較を示す。結果より分かる通り、炉心出口に近いホールドダウンプレーットおよび最下端バッフル板（#1）では、炉心からの冷却材が炉心上部機構内を通過して上方に向かう傾向が強いものの、バッフル板 #2 および #3 位置では、炉心上部機構よりも外側の領域を冷却材が通過している。このことは、開口率が大きく且つ圧損が小さい場合（ $\gamma_z = 0.7$ 、 $\xi = 0.5$ ）においても、炉心上部機構内を冷却材を通過させディッププレートに衝突させる流れを実現することが困難であることを示唆している。

3.2 ダミープラグの挿入

バッフル板およびホールドダウンプレーットの開口率と圧損係数を、それぞれ 0.3（ γ_z ）および 0.5（ ξ ）にした条件で、ダミープラグ挿入の効果を検討した。主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を図 3.6 に示す。なお、ここでの結果は、バッフル板が合計 5 枚装荷されている新設計条件でのものである。結果より分かる通り、切込み部断面（J=1）を通過してディッププレートに衝突する噴流挙動が、ダミープラグを挿入することにより大きく抑制されている。この抑制効果は、炉心中心側の高流速冷却材の流れを遮るようにダミープラグを配置した場合に顕著である。またこの効果は、ダミープラグ径を細くした場合（ $380^\circ \rightarrow 180^\circ$ ）においても有効に発揮される。

図 3.7 および 図 3.8 に、バッフル板 #2 および #4 位置における軸方向流速成分 W の空間分布の比較を示す。切込み部を通過して上昇する軸方向流速成分領域は、各図において右上方向の局所的な隆起部分に対応し、これがダミープラグの挿入により大きく減衰している様子が理解できる。すなわち、ダミープラグの挿入は、局所的な上昇噴流の運動量を分散させ、その運動量を空間的に拡散させる働きを有していると言える。

注) 基本設計（旧）ではバッフル板が 3 枚であったが、新設計では温度計装ウェル、FFDL サンプリング管の流力振動防止の観点から、合計 5 枚に変更されている。

3.3 各種整流デバイスの設置

第 2.3 節 (3) に記載した各種整流デバイス、すなわち、バッフルリングおよび部分内筒を設置した場合の、主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を図 3.9 に示す。なお、ここでの解析評価は、炉心上端位置から自由液面までを対象とした解析モデル（細径ダミープラグ 3 本挿入条件）を使用した。ただし、自由液面モデルは使用していない。結果より分かる通り、細径ダミープラグを 3 本挿入するもののバッフルリングおよび部分内筒ともに設置しない条件では、切込み部断面（J=1）からの噴流が炉内中継ポット壁に沿って上昇し、ディッププレート衝突後に炉心中心方向に向きを変える循環流が支配的となる。同様に一般方位（J=67）においても、炉心からの噴流が原子炉容器壁を上昇し、ディッププレート衝突後に炉心中心方向に向きを変える流れが卓越する。

一方、バッフルリングを設置した場合には、原子炉容器壁に沿って上昇する流れをディッププレート衝突前に遮り、上昇流の大半はディッププレートに到達しない（一般方位図（J=67）参照）。バッフルリングに加え、更に部分内筒を設置した場合は、一般方位での上記抑制効果を保持したまま、切込み部断面（J=1）における循環流が抑制されていることが分かる。

以上より、ダミープラグを 3 本挿入した上で、バッフルリングおよび部分内筒を設置することにより、ディッププレートに直接的に作用する流れを効果的に抑制することが可能で、結果として自由液面に与える外乱的要素も軽減されることが期待できる。なお、自由液面自体の挙動については、次章で議論する。

3.4 炉壁ギャップ部ラビリンスの設置

原子炉容器壁とディッププレートとの 30 mm のギャップ部に、第 2.3 節 (4) で記載したラビリンス構造を設置して、自由液面挙動安定化への効果を評価した。なお、ここでの解析評価には、炉心上端位置から自由液面までを対象とした解析モデルを使用するとともに、AQUA コードの自由液面 VOF モデルを用いた。図 3.10 に、主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を示す。

炉壁ギャップ部にラビリンスを設置した場合、同狭隘部を通過する冷却材流量が大きく低下するため、炉心からの冷却材の運動量がディッププレートより下側のプレナム領域内に保存され、結果として U-W 流速合成値が増加している。特に、バッフルリングの効果が現れ難い切込み部方位については、ラビリンスを設置しない場合の流況から大きく変化している様子が分かる。

3.5 炉内中継ポットおよびコールドトラップ周りのギャップの閉止

図 3.11 に、炉内中継ポットおよびコールドトラップ周りのギャップを閉じた場合の結果として、主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を比較する。なおここでの解析評価には、炉心上端位置から自由液面までを対象とした解析モデルを使用するとともに、AQUA コードの自由液面 VOF モデルを用いた。

結果より分かる通り、ディッププレートより下側のプレナム領域における流況は、第 3.4 節

で記載したものと酷似し、炉壁ギャップ部にラビリンスを設置したことによる影響が支配的となっている。

3.6 コールドトラップ設置位置の変更

2 基のコールドトラップ設置位置を、炉内中継ポット両脇から直接炉心冷却器の両側に移動させた場合の主要垂直断面（切込み部方位：J=1、出口配管方位：J=37、一般方位：J=67）における U-W 流速合成値の空間分布を、図 3. 12 に示す。ここでの結果についても同様に、炉壁ギャップ部ラビリンスを設置したことによる影響が卓越して現れている。

第 4 章 評価・検討

4. 1 炉上部構造物支持板の開口率と圧損係数の組合せの影響

図 4. 1 に、バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率と圧損係数を変更した場合の、各バッフル板での軸方向通過流量の比較を示す。なお、ここに示した結果は、旧設計条件（バッフル板合計 3 枚）でのものである。結果より分かる通り、バッフル板の開口率を増加させることにより、バッフル板を通過・上昇する流量が増加することが分かる。ただし、バッフル板 #3 を通過・上昇する流量は、最大の場合でも炉心出口前流量の 1 割程度に限られ、炉内流動全体のフローパターンを劇的に変化させるまでには至らないと考えられる。

図 4. 2 は、ディッププレート下面位置における水平方向流速成分 ($(U^2 + V^2)^{0.5}$) の空間分布を比較したものである。なお同図中の値は、燃料集合体出口流速最大値（流量領域平均値：1.45 m/s）で規格化している。ディッププレート下面における特徴的な挙動は、切込み部を通過してディッププレートに衝突した噴流が、周方向および炉心中心方向に向きを変えて広がるものである。この様子は、同図中各図の右上に見られる高流速領域の存在によって理解できる。この高流速領域の範囲およびその値は、バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率 (γ_2) と圧損係数 (ξ) をそれぞれ 0.3 および 1.5 とした場合に最大となる。これは、バッフル板およびホールドダウンプレートを上昇する冷却材流れが抑制され、切込み部に冷却材流れが集中し、ディッププレート下面に大きな運動量を持つ噴流が衝突することによる。

図 4. 3 は、バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率 (γ_2) とディッププレート下面における水平方向最大流速値との関係を示したものである。結果より分かる通り、バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率を増加させることにより、D/P 下面での水平方向流速成分最大値は減少傾向を示すものの、何れの圧損係数を用いた場合も、水平方向流速成分最大値は減少傾向は鈍化することが分かる。

バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率 (γ_2) と圧損係数 (ξ) が、バッフル板外縁での径方向流速成分の軸方向分布に及ぼす影響を図 4. 4 に比較する。結果より、バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率の増加により、バッフル板外縁での径方向流速成分の軸方向分布が平坦化する傾向であることが分かる。

4. 2 ダミープラグ挿入の効果

図 4. 5 は、ダミープラグの挿入条件を変えた場合のディッププレート下面位置における水平方向流速成分 ($(U^2 + V^2)^{0.5}$) の空間分布を比較したものである。なお同図中の値は、燃料集合体出口流速最大値（流量領域平均値：1.45 m/s）で規格化を施している。比較結果より分かる通り、ダミープラグを挿入することにより、切込み部方位に発生する高流速領域を効果的に低減させることが可能である。この内、2 本あるいは 3 本の太径ダミープラグを炉心外側位置に設置した場合（#3-#6 あるいは #2-#4-#6）、切込み部方位に発生する高流速領域を最も抑制すること

ができるものの、炉心上部機構内部のディッププレート面において大きな水平方向流速成分が発生する。切込み部方位に発生する高流速領域と炉心上部機構内部での水平方向成分を同時に抑制可能な条件は、ダミープラグ 3 本を炉心中心寄りに設置した場合（#1-#2-#3）であり、これは細径のダミープラグを挿入した場合にあっても維持される。

以上より、ダミープラグの挿入は、切込み部で発生する上昇噴流による偏流を抑制しつつ、上部プレナム内の流動状況を安定化させる上で、有効な方策の一つであると考えられる。

4.3 各種整流デバイスの効果

各種の整流デバイス（細径ダミープラグ 3 本、バッフルリングおよび部分内筒）を設置した場合のディッププレート下面位置における水平方向流速成分（ $(U^2 + V^2)^{0.5}$ ）の空間分布を、図 4.6 に比較する。図中の値は同様に、燃料集合体出口流速最大値（流量領域平均値：1.45 m/s）で規格化を施している。結果より、細径ダミープラグ 3 本の挿入と同時に、バッフルリングを設置した場合には、切込み方位と反対（180°）側で大きな値を示していた領域の水平方向流速成分が大きく低下していることが分かる。これは、第 3.3 節で述べたように、バッフルリングを設置することによって、原子炉容器壁に沿って上昇する流れをディッププレート衝突前に遮り、上昇流の大半はディッププレートに到達しないことに起因している。さらに部分内筒を設置することにより、切込み部からの噴流が炉内中継ボット壁に沿って上昇し、ディッププレート衝突後に炉心中心方向に向きを変える循環流を効果的に遮り、結果として大きな水平方向流速成分が現れる領域を限定していることが理解できる。

これら整流デバイスの効果は、図 4.7 に示した自由液面における水平方向流速成分の抑制にも寄与しており、前述と同様な位置での値の低下が確認できる。しかしながら、原子炉出口配管と原子炉容器壁に挟まれた狭隘領域では、周方向流速が依然として卓越している。これは、図 4.8 に見られるように、切込み部方位に発生する高流速噴流が、ディッププレートと炉容器壁とのギャップを通して、ディッププレート上部の自由液面プレナムに流れ込むことに起因する。したがって、自由液面プレナム内での流動安定化には、ディッププレート下部のプレナムに対する整流デバイスとは別の観点の対応策が必要であると言える。

4.4 炉壁ギャップ部ラビリンス設置の効果

ディッププレートと炉容器壁とのギャップ部に、第 2.3 節（4）で記載したラビリンス構造を設置した場合の解析結果として、自由液面における水平方向流速成分分布および炉容器壁に沿う流速ベクトル分布を図 4.9 に示す。結果より分かる通り、細径ダミープラグ 3 本、バッフルリングおよび部分内筒の整流デバイスに加え、炉壁ギャップ部にラビリンスを設置した場合には、原子炉出口配管と原子炉容器壁に挟まれた狭隘領域での周方向流速が大きく減衰している。これは、同図中に示した炉容器壁に沿う流速ベクトル分布より分かるように、自由液面プレナム内に流入しようとする切込み部方位の高流速噴流が、炉壁ギャップ部のラビリンスによって効果的に抑制されたことが主因であると考えられる。

図 4. 10 に、自由液面での水平方向流速ベクトル分布および自由液面高低差分布を比較する。同図中には参考のため、デバイスを全く設置しない場合の結果も記載した。自由液面での水平流速ベクトルの空間分布に関しては、前述のように、炉壁ギャップ部にラビリンスを設置することにより、原子炉容器壁に沿う周方向流れが大きく抑制されていることが分かる。しかしながら、炉内中継ポット周りのギャップを通して、切込み部方位の高流速噴流が自由液面プレナム内に流入するため、自由液面位置では炉心中心方向に向かう半径方向流れが卓越している。これに起因して、炉内中継ポット周りのギャップ部周辺では、自由液面の盛上りが顕著に現れ、各種の整流デバイスと炉壁ギャップ部ラビリンスを設置した場合においても、最大 4 ～ 5 cm の高低差が発生する。なお、炉壁ギャップ部ラビリンスを設置した場合の自由液面高低差 ($\Delta H=4.6$ cm) が、設置しない場合のそれ ($\Delta H=3.7$ cm) よりも大きくなる原因は、炉壁ギャップの設置によって切込み部方位の高流速噴流が遮られるため、この余剰分が炉内中継ポット周りのギャップ部に集中したためであると解釈できる。

以上より、炉壁ギャップ部へのラビリンスの設置は、自由液面プレナムに流入する冷却材流量を抑制し、自由液面での周方向流速を低減する上で極めて有効な手段であるものの、ここで遮られた冷却材の余剰分の影響をどのように緩和させるかが今後の課題であると言える。

4.5 炉内中継ポットおよびコールドトラップ周りのギャップ閉止の効果

炉内中継ポットおよびコールドトラップのディッププレート貫通ギャップ (30 mm) を閉止した場合の結果として、自由液面における水平方向流速ベクトル分布および自由液面高低差分布を図 4. 11 に比較する。同図中には、細径ダミープラグ 3 本、バッフルリングおよび部分内筒の整流デバイスと炉壁ギャップ部ラビリンスを設置した場合の結果を参考のため記載している。

まず、炉内中継ポット周りのギャップのみを閉じた場合では、切込み部方位の高流速噴流がコールドトラップ周りのギャップを通して自由液面プレナム内に流入し、同コールドトラップ近傍領域の自由液面を押し上げている様子が分かる。しかしながら、同領域から炉心中心方向に向かう半径方向流れが大きく減衰するとともに、自由液面高低差が 3.6 cm にまで低下する。なお、炉心中心方向に向かう半径方向流れの大きな減衰に伴い、内側ディッププレートと外側ディッププレートとのギャップ (30 mm) を通して上部プレナム内に流入する冷却材の影響が現れるようになる。

炉内中継ポット周りのギャップ部閉止に加え、コールドトラップ周りのギャップを閉じた場合には、結果より分かるように、炉心中心方向に向かう半径方向流れの大きな減衰とともに、自由液面高低差が 1.9 cm にまで低下する。ただし、この場合も同様に、内側ディッププレートと外側ディッププレートとのギャップを通して上部プレナム内に流入する冷却材の影響が発生する。

上述した結果は、炉内中継ポットおよびコールドトラップのディッププレート貫通ギャップを閉止しない場合のものと比較して、自由液面における水平方向流速値および自由液面高低差が大きく抑制されており、両ギャップ部に適切なラビリンス構造を設置することにより、上述の結果と同等な効果を得ることが可能であると言える。なお、自由液面からのガス巻込み防止の観点か

らは、同位置における水平方向流速値および液面高低差の抑制に加え、旋回渦挙動を支配すると考えられる渦集中（渦度）を緩和させる必要がある。

4.6 コールドトラップ設置位置の効果

炉内中継ポット両脇に設置されているコールドトラップ 2 基を直接炉心冷却器側に移動した場合の結果の内、自由液面における水平方向流速ベクトル分布および自由液面高低差分布の比較を図 4.11 に示す。なお同図中には、コールドトラップ 2 基が炉内中継ポットの両脇に置かれている場合の結果を参考用に記載した。

コールドトラップ 2 基を直接炉心冷却器側に移動した場合には、炉内中継ポット近傍領域での流況が穏やかになるものの、直接炉心冷却器近傍の流れはコールドトラップ周りのギャップを通して流入する冷却材の影響により、比較的大きな水平流速成分が現れる。しかしながら、自由液面高低差は、コールドトラップ 2 基が直接炉心冷却器側に設置されている場合（ $\Delta H=3.6$ cm）に比べ 3 割程度低下する（ $\Delta H=2.6$ cm）とともに、自由液面形状は安定化（有意な高低差分布が発生する領域が縮小）する。これは、切込み部による高流速噴流が存在しないためであると解釈できる。

以上より、切込み部等により発生する高流速噴流が位置する炉内領域には、各種の構造物を設置しないで流路を可能な限り広げ、高流速噴流の自由液面への影響を低減させる設計が望ましいと考えられる。

4.7 ガス巻込み抑制に向けた炉内流動適正化に係る検討の方向性

ここまで、炉内流動の適正化（偏流などの防止）と自由液面高低差の解消（潜込みなどダイナミックな流動挙動に起因したガス巻込みの防止）に着目して検討した。この結果、各種の整流デバイス、すなわち、細径ダミープラグ 3 本、バッフルリング、部分内筒、炉壁ギャップ部ラビリンス、機器貫通ギャップ部の閉止などを設置もしくは考慮することにより、炉内流動の適正化を達成した上で、自由液面高低差を 2 cm 程度まで低減可能であることが示された。

一方、自由液面での旋回渦によるガス巻込み挙動を防止するためには、自由液面上に発生する渦集中（渦度）を緩和するとともに、液中へ繋がる渦度分布を 3 次元的な観点から切断可能な方策を検討する必要がある。

図 4.13 に、代表的な評価ケースについて、自由液面における渦度分布と自由液面の高低差分布を比較する。なお渦度の値は絶対値であって、等値線が密な領域に渦度が集中していることを表現している。基本的な傾向は、自由液面での水平高流速が構造物を避けて流れる領域（原子炉容器壁と貫通機器の狭隘領域、制御棒上部案内管が林立する領域など）に渦度が集中し、この領域で旋回渦によるガス巻込みが生じる可能性が高い。炉内に各種の整流デバイスを設置しない場合には、原子炉容器壁と貫通機器の狭隘領域において渦度および自由液面高低差に相関が生じていることが分かる。一方、自由液面流速や自由液面高低差が効果的に抑制された条件（細径ダミープラグ 3 本、バッフルリングおよび部分内筒の整流デバイスと炉壁ギャップ部ラビリンスを設置するとともに、炉内中継ポットおよびコールドトラップのディッププレート貫通ギャップ

を閉止したケース)では、渦度の集中が大幅に緩和される。

ディッププレート上面位置における軸方向流速成分 W の水平方向分布を、図 4. 14 に示す。流速成分の正の値はディッププレートの下部から上部への流れを、負の値はディッププレート上部から下部への流れを表す。炉内に整流デバイスを設置しない場合は、基本的に炉内中継ポット設置方位および直接炉心冷却器設置方位で上昇流が、一方原子炉出口配管が設置されている 2 方位で下降流が発生している。図 4. 13 に示した渦度分布で、仮に渦が集中する領域からガスが巻込まれた場合には、ディッププレート位置で下降流が発生している原子炉出口配管設置領域に向かってガスが連行されると予想される。すなわち、コールドトラップおよび原子炉入口配管の裏側（原子炉容器壁側）で発生する剥離旋回渦が、原子炉出口配管領域での下降流と相互作用を起こしながら、液中に引込まれると考えられる。一方、自由液面流速や自由液面高低差が効果的に抑制された条件での結果では、ディッププレートを通しての流入流出の割合は減少するものの、前記と同様な領域で下降流が生じている。この条件では、自由液面での渦度の集中は比較的穏やかであるものの、液中への渦度の引込みが発生すると考えるのが妥当である。

したがって、ガス巻込み抑制に向けた炉内流動適正化に係る今後の検討では、

- (1) ディッププレートを通じた流入流出分布の（空間）平均化方策の検討
- (2) 自由液面における渦度集中挙動の緩和方策の検討
- (3) 自由液面から液中に繋がる渦度分布の切断方策の検討

が重要であると考えられる。

第 6 章 結 言

ナトリウムを冷却材として用いる大型高速炉・炉上部プレナム内の流動特性を把握するとともに、自由液面からのガス巻込みを防止する観点から、プレナム流動適正化を実現するための炉内構造を数値解析的に検討した。得られた結果は、次の通りである。

- (1) バッフル板およびホールドダウンプレートの開口率と圧損係数の調整だけでは、炉内全体の流動パターンの変更を通じたプレナム流動の適正化は難しい。
- (2) 切込み部へのダミープラグの挿入は、切込み部で発生する上昇噴流による偏流を抑制しつつ、上部プレナム内の流動状況を安定化させる上で、有効な方策の一つである。
- (3) バッフルリングおよび部分内筒などの整流デバイスは、ディッププレートに衝突する上昇噴流および自由液面における水平方向流速成分を抑制する上で、有効な方策の一つである。
- (4) 炉壁ギャップ部へのラビリンスの設置は、自由液面プレナムに流入する冷却材流量を抑制し、自由液面での周方向流速を低減する上で極めて有効な手段である。
- (5) 炉内中継ポットおよびコールドトラップのディッププレート貫通ギャップを閉止することにより、自由液面における水平方向流速値および自由液面高低差を効果的に抑制することが可能である。
- (6) 切込み部等により発生する高流速噴流が位置する炉内プレナム領域には、各種の構造物を設置しないで流路を可能な限り広げ、高流速噴流の自由液面への影響を低減させる設計が望ましい。

なお、ガス巻込み抑制に向けた炉内流動適正化に係る今後の検討では、

- (1) ディッププレートを通じた流入流出分布の（空間）平均化方策の検討
- (2) 自由液面における渦度集中挙動の緩和方策の検討
- (3) 自由液面から液中に繋がる渦度分布の切断方策の検討

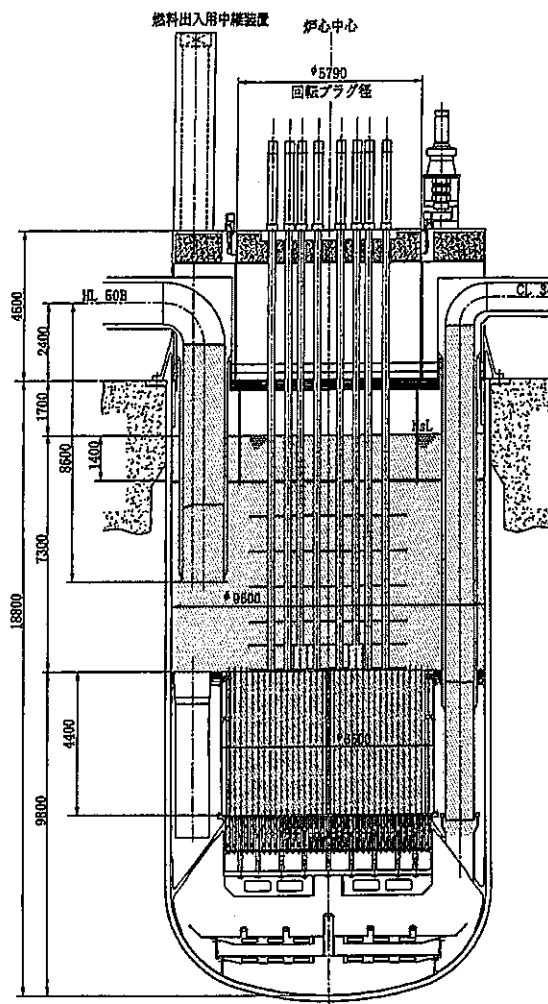
が重要である。

参考文献

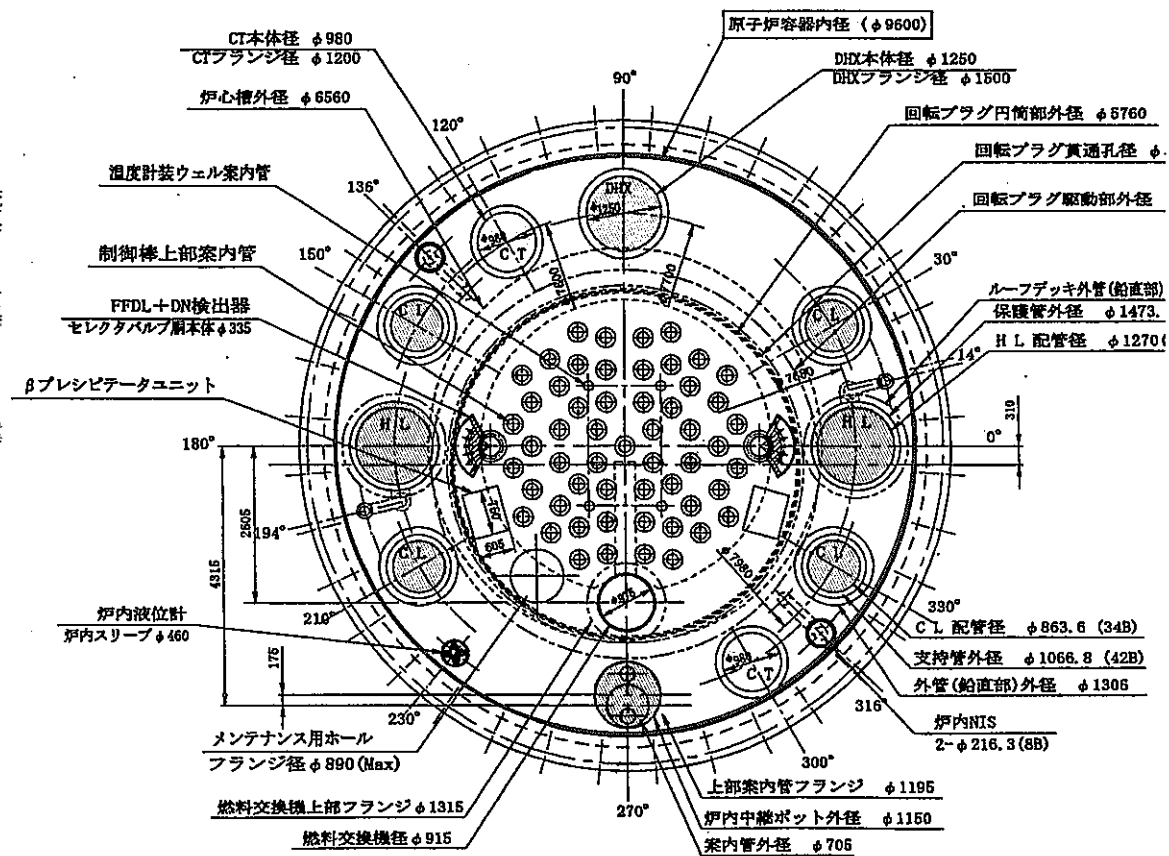
- (1) 村松 壽晴、山口 彰、多様な作動流体を用いた場合に顕在化する重要熱流動課題の摘出、JNC TN9400 2000-056 (2000).
- (2) 村松 壽晴、須田 一則、村上 諭、山口 彰、多様な作動流体を用いた場合の重要熱流動課題の特性比較、JNC TN9400 2000-109 (2000).
- (3) 村松 壽晴、一宮 正和、山口 彰 他、大型 FBR における原子炉容器上部プレナムガス巻込み防止方策の検討 (II)、Baffle Ring 設備および Porous UIS 設備の検討、PNC TN9410 92-352 (1992).
- (4) 村松 壽晴、単相多次元熱流動解析コード AQUA、乱流モデル利用手引書、PNC TN9460 94-003 (1994).
- (5) 松本 英一、村松 壽晴、AQUA-VOF コード開発、AQUA コードへの VOF モデルの組み込みと検証、PNC TN9440 95-005 (1995).

表 2.1 炉心熱流力特性 (平衡炉心運転サイクル BOC)

流量領域	集合体流量 (kg/s)	集合体発熱量 (MW)	集合体出口温度 (°C)
1	33.0	7.56	577.0
2	31.5	6.76	566.0
3	27.0	6.28	580.0
4	30.0	6.19	559.0
5	27.0	5.66	562.0
6	24.0	4.89	557.0
ブランケット	9.15	1.80	551.0
PCR	3.87	0.50	477.0
BCR	2.34	0.20	463.0
遮蔽体	0.64	~ 0.0	395.0



(a) 原子炉容器垂直断面



(b) 原子炉容器水平断面

図 2.1 原子炉容器断面

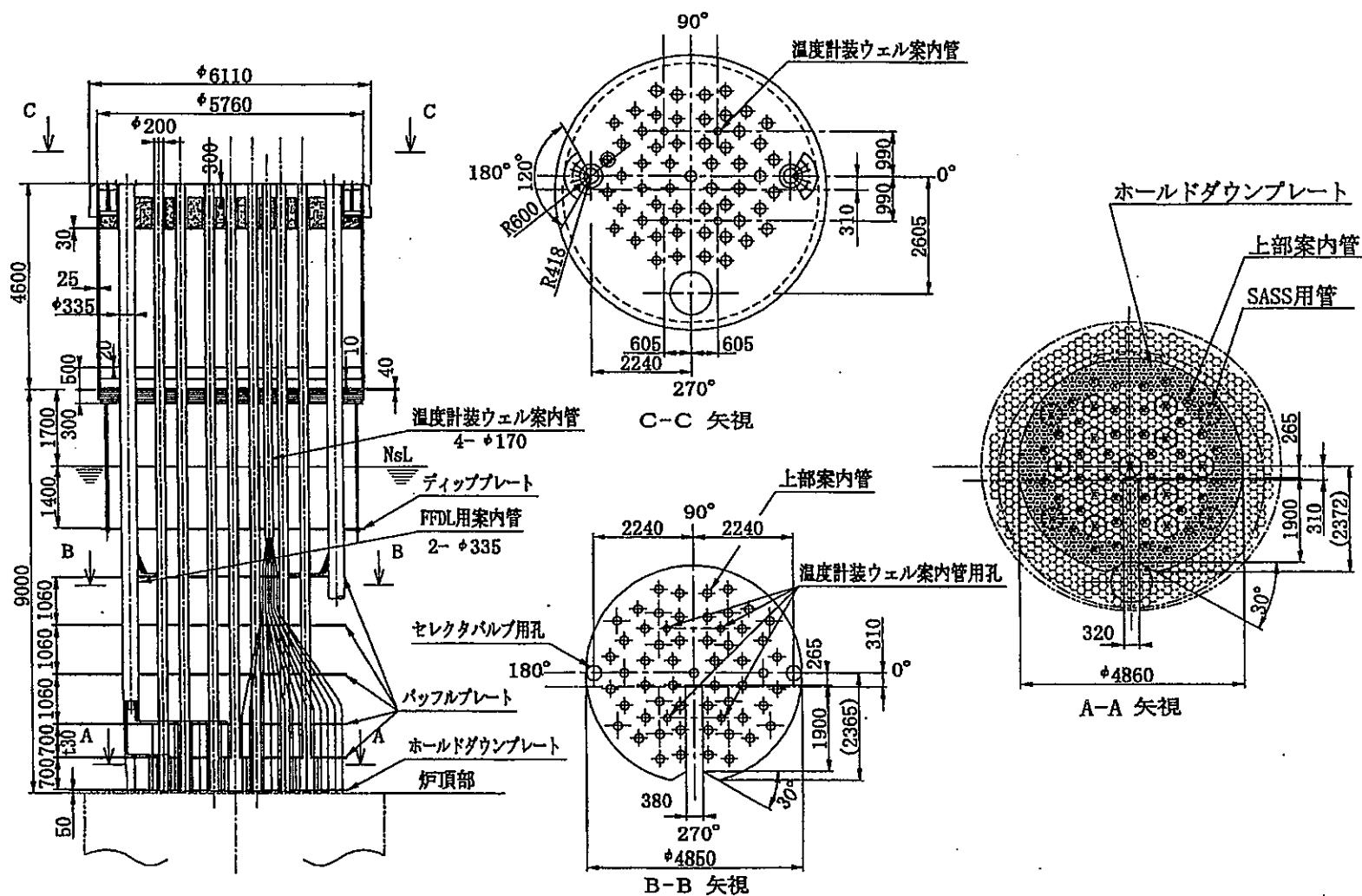


図 2.2 炉心上部機構構造

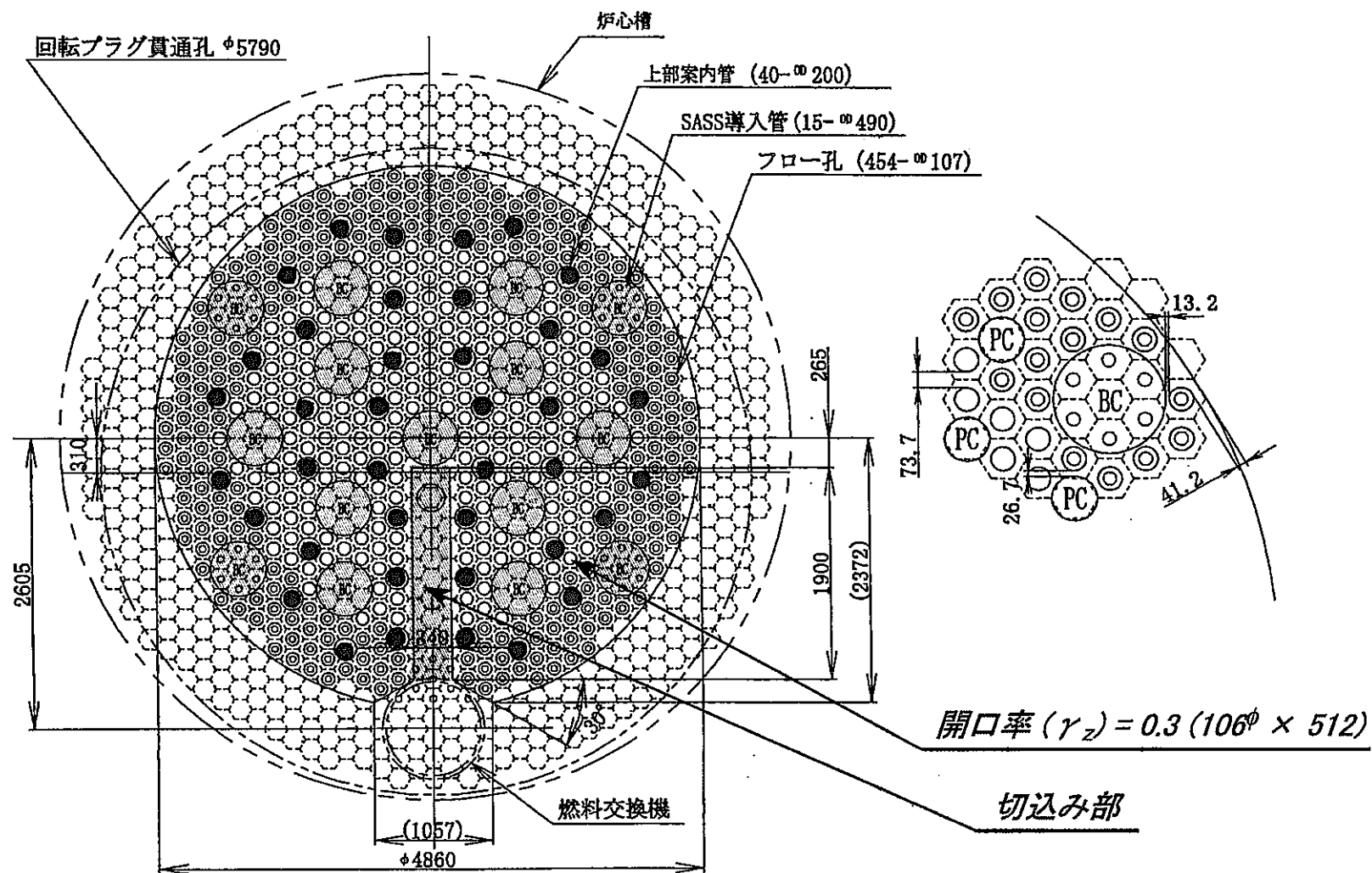
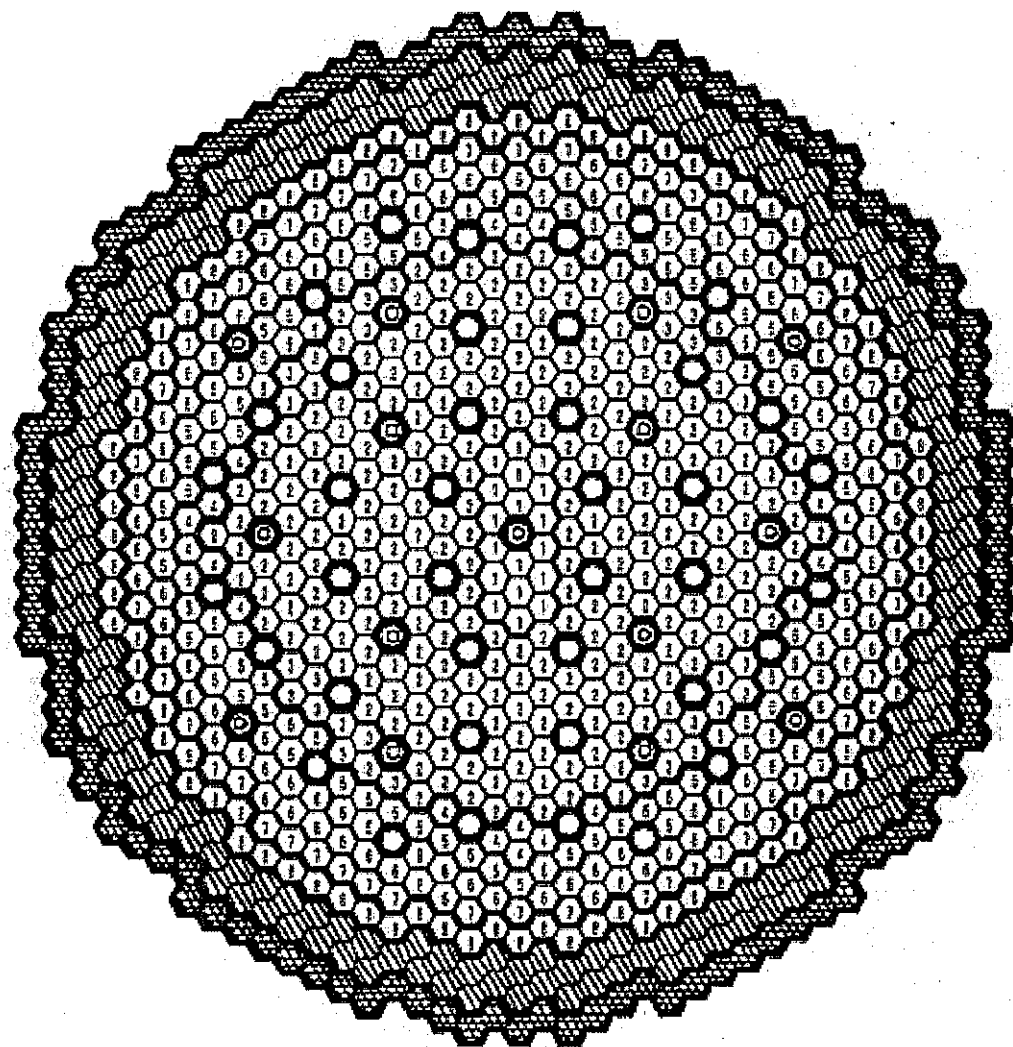


図 2.3 バッフル板およびホールドダウンプレーットの平面構造



- ① 第1 流量領域 (内側炉心)
- ② 第2 流量領域 (内側炉心)
- ③ 第3 流量領域 (内側炉心)
- ④ 第4 流量領域 (外側炉心)
- ⑤ 第5 流量領域 (外側炉心)
- ⑥ 第6 流量領域 (外側炉心)
- ⑦ 第7 流量領域 (外側炉心)
- ⑧ 第8 流量領域 (径ブラ)
- ⊙ BCR 15
- ⬡ PCR 40
- ▨ RD/SH 198
- ▩ ZrH 114

図 2.4 炉心構成

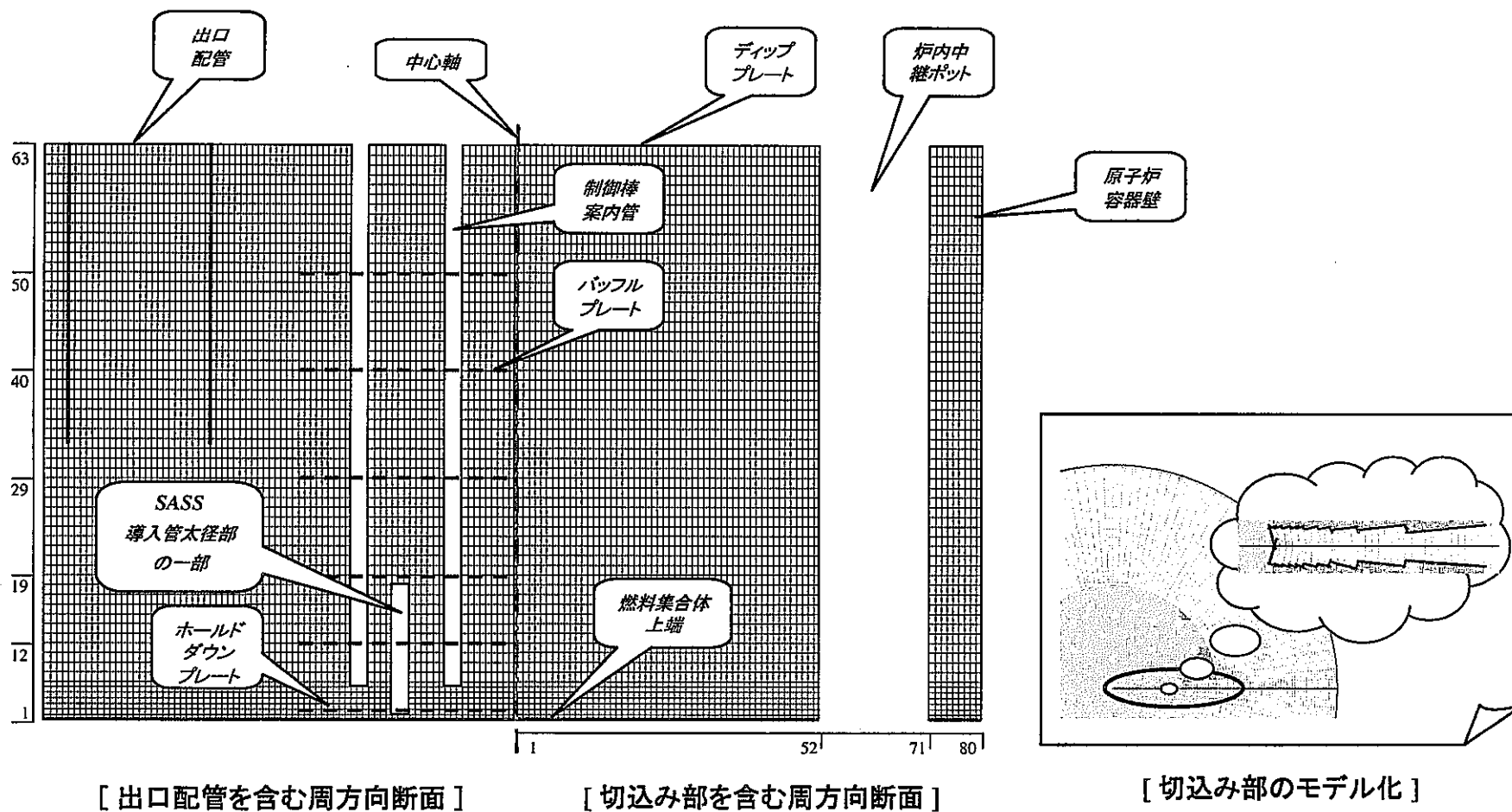


図 2.5 ディッププレート下面までを対象とした上部プレナム解析モデル

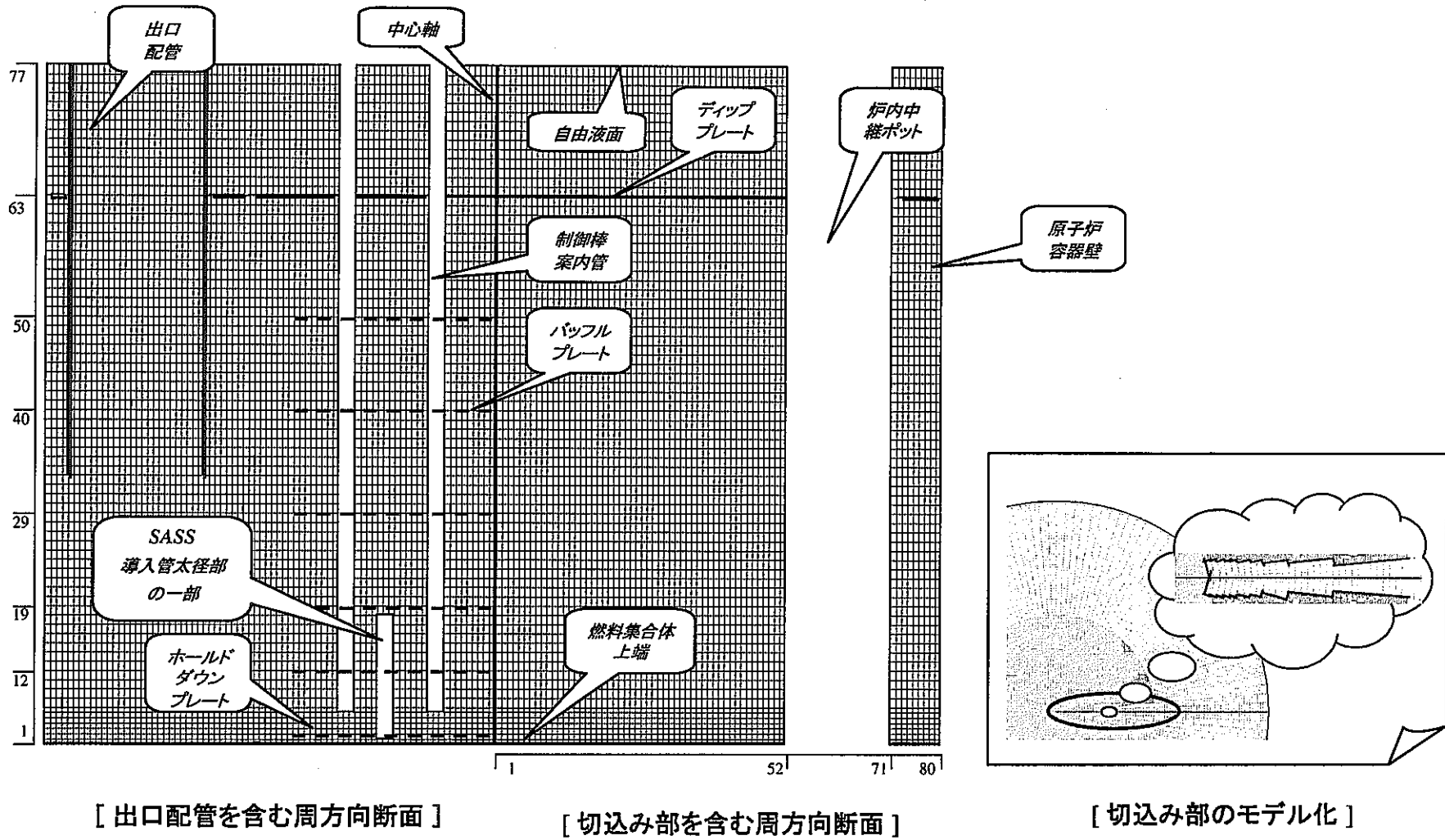


図 2.6 自由液面までを対象とした上部プレナム解析モデル

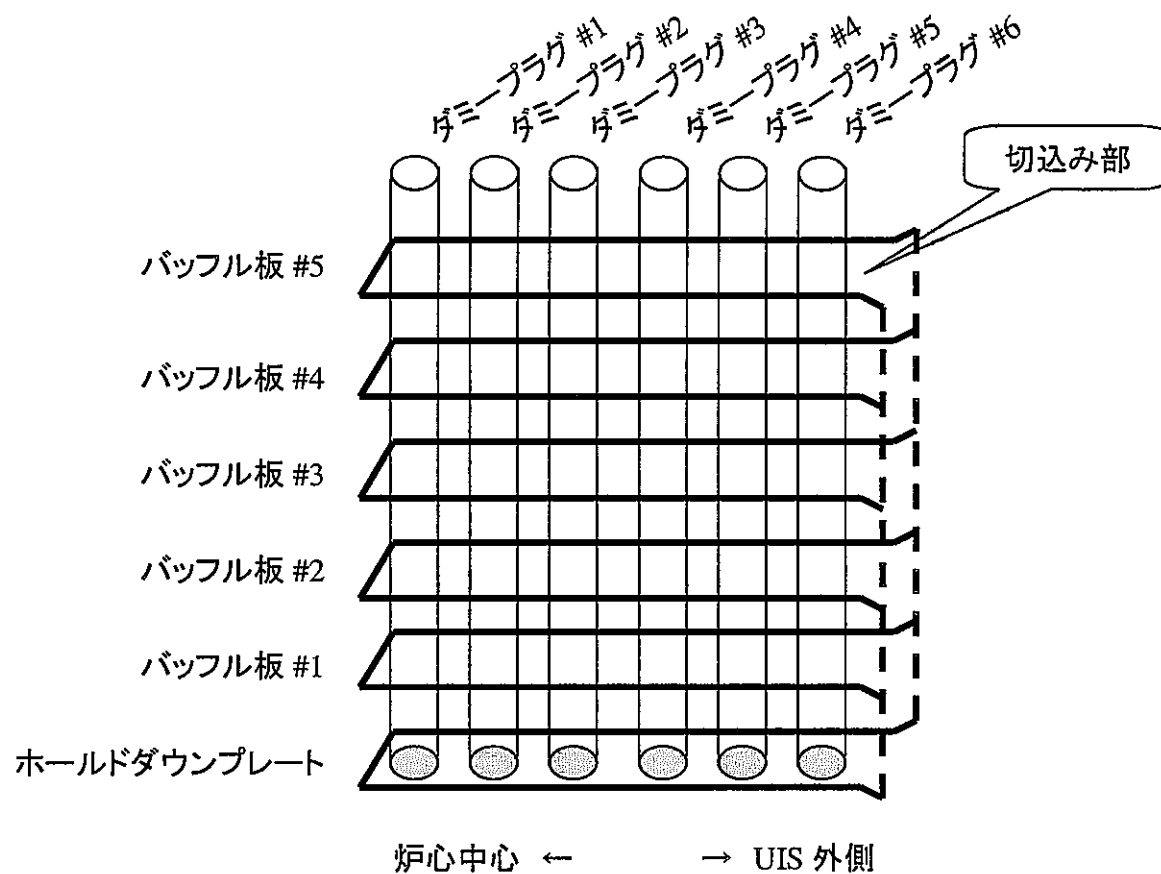


図 2.7 ダミープラグ装荷イメージ

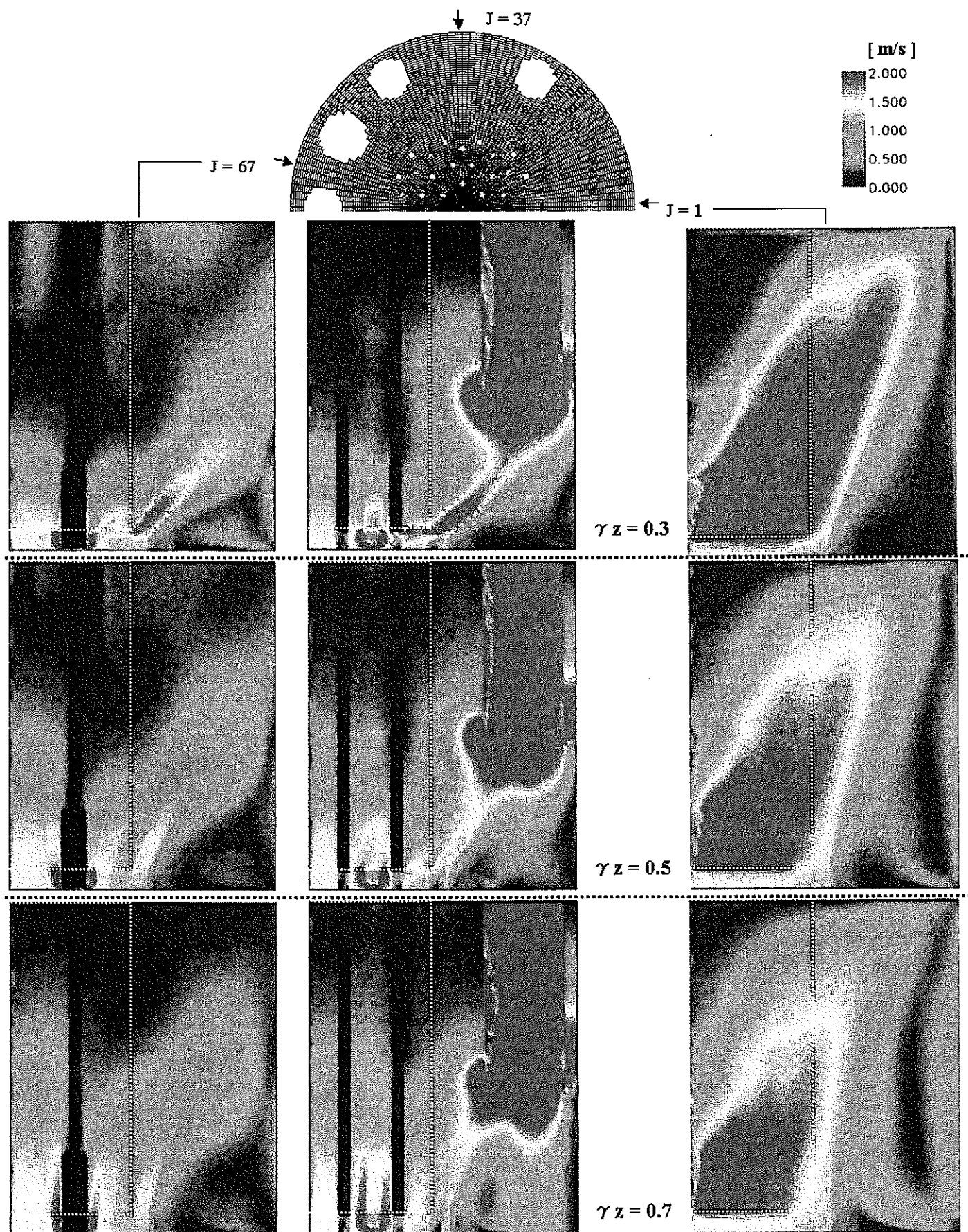


図 3.1 (1/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 ($\xi=0.5$)

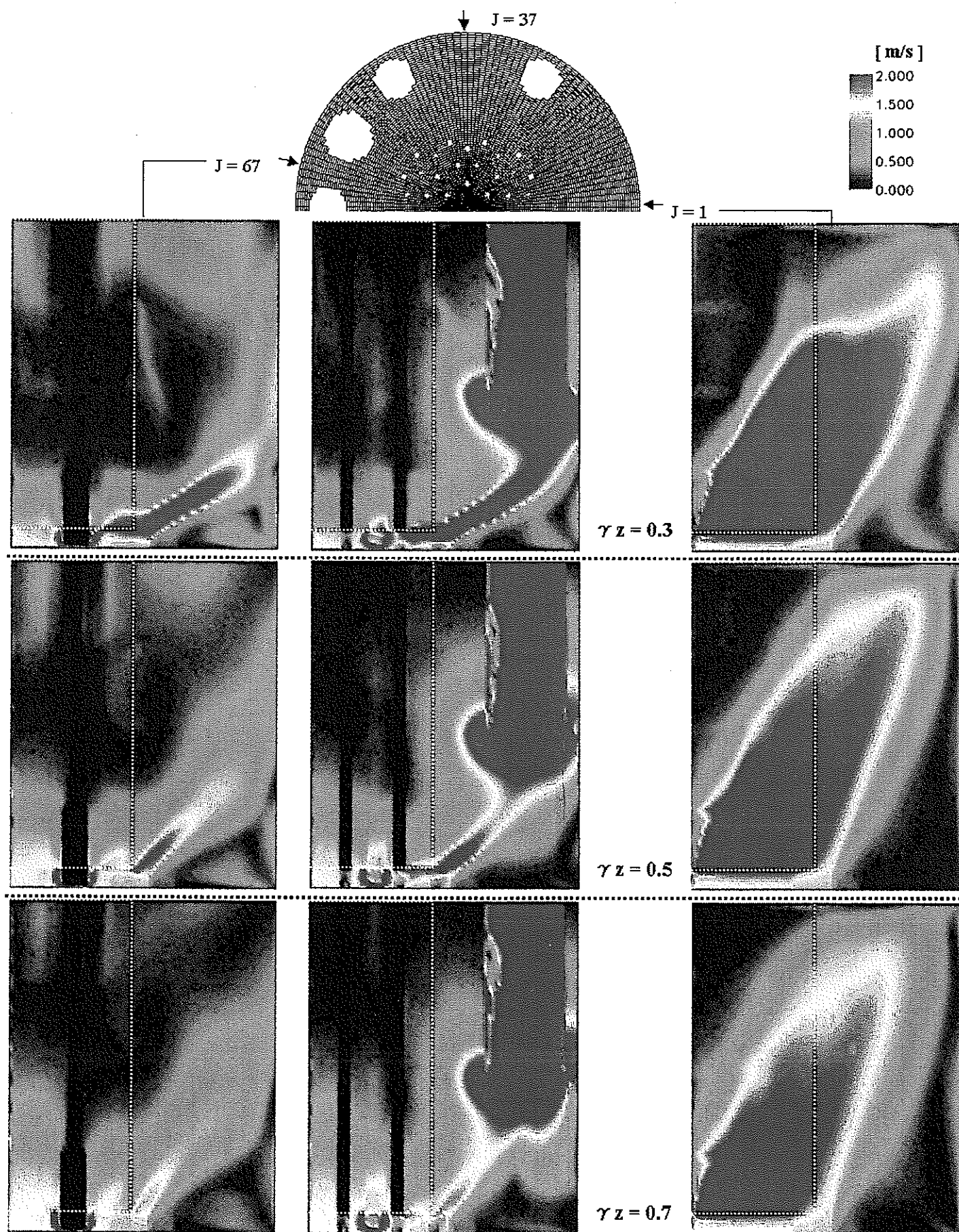
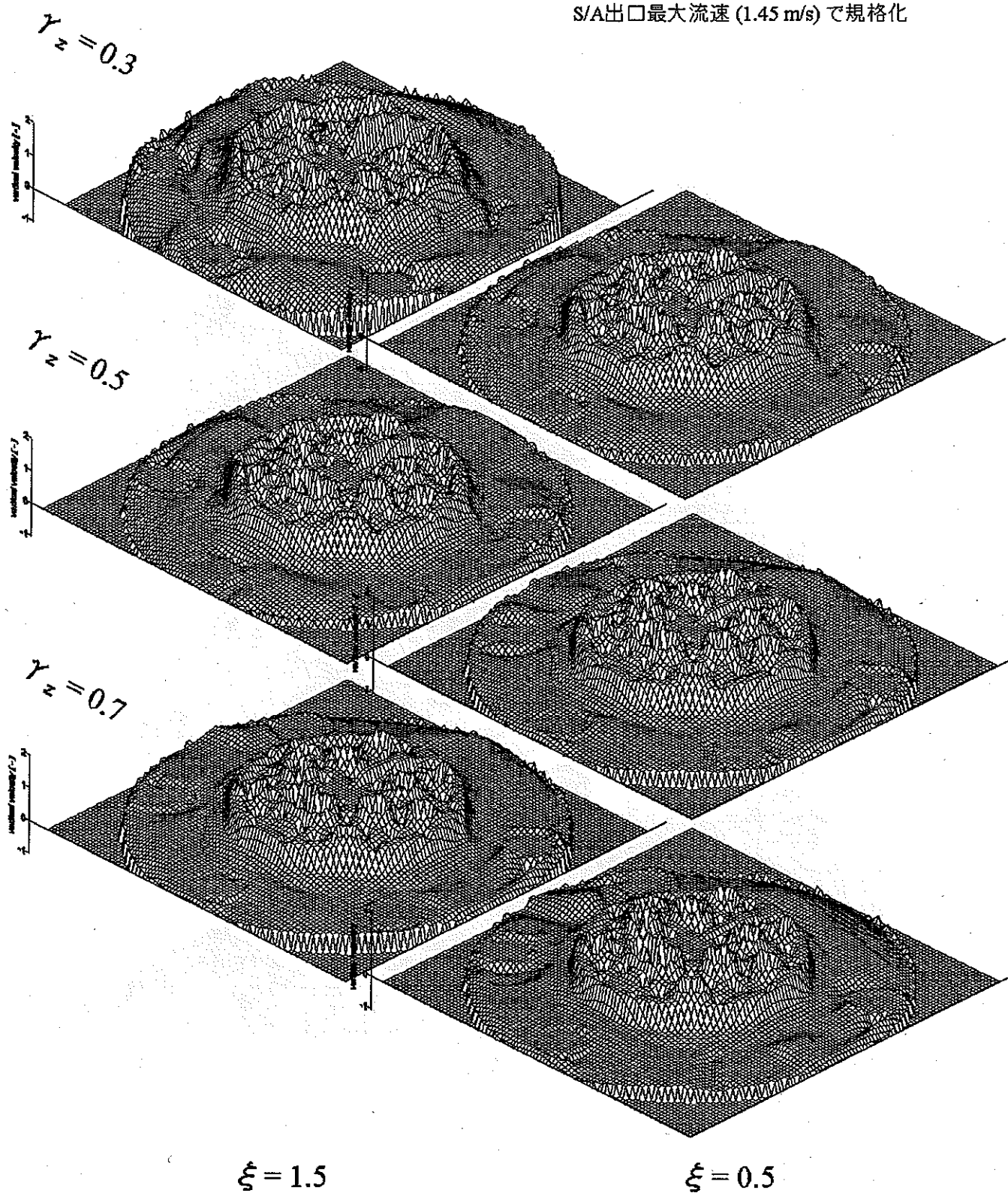
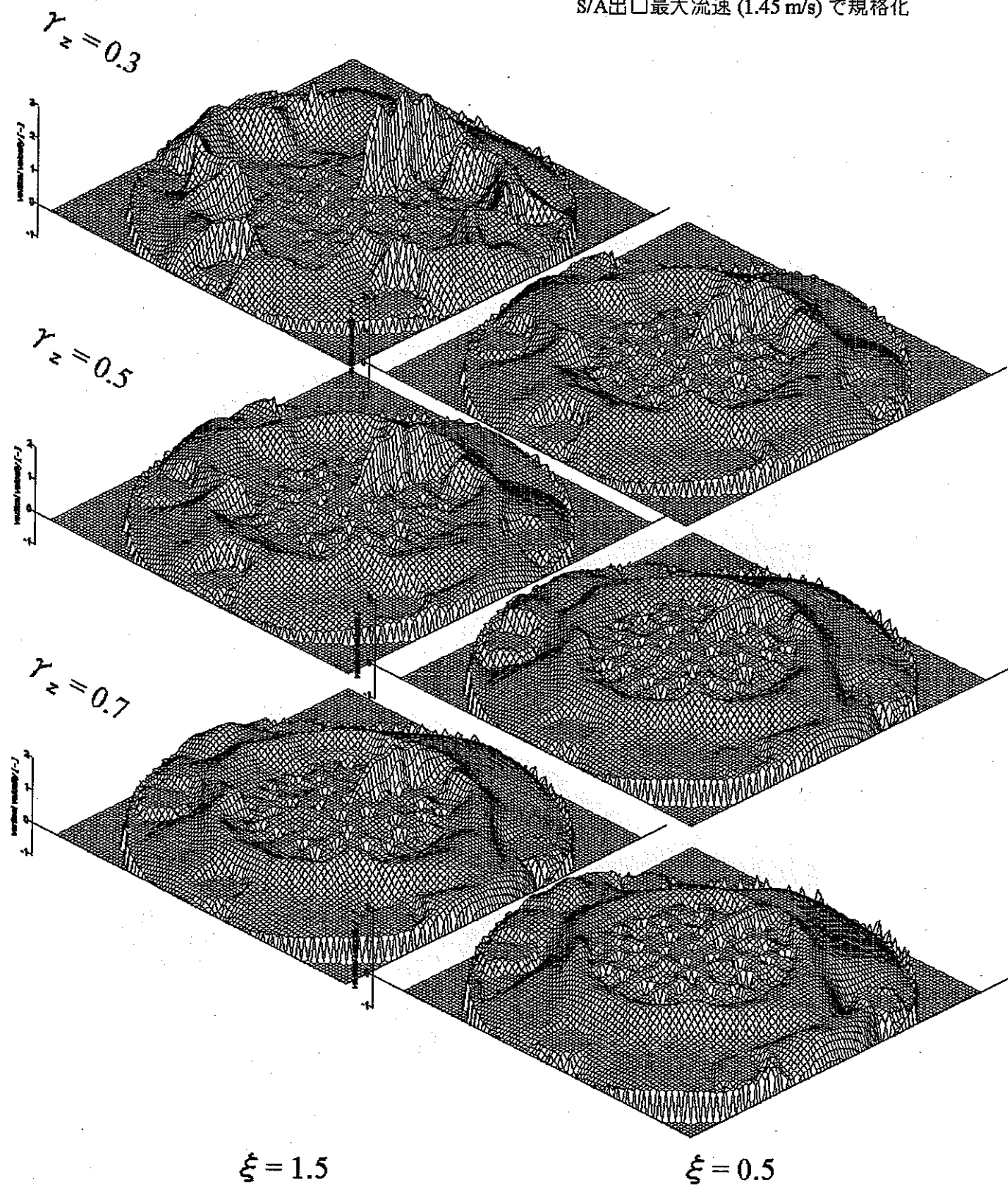


図 3.1 (2/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 ($\xi=1.5$)

S/A出口最大流速 (1.45 m/s) で規格化

図 3.2 ホールドダウンプレート面における軸方向流速成分 W の空間分布

S/A出口最大流速 (1.45 m/s) で規格化

図 3.3 バッフル板 #1 面における軸方向流速成分 W の空間分布

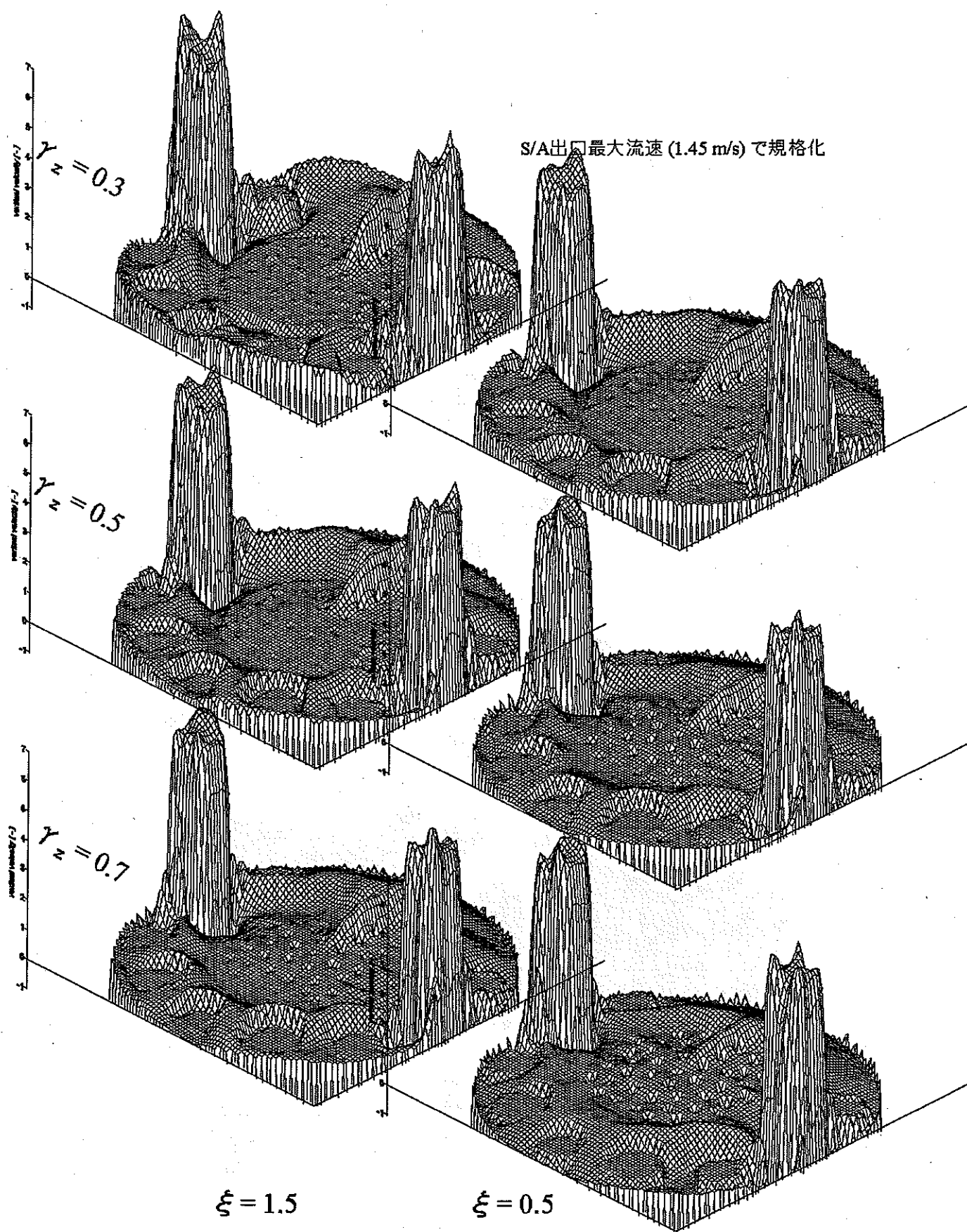


図 3.4 バッフル板 #2 面における軸方向流速成分 W の空間分布

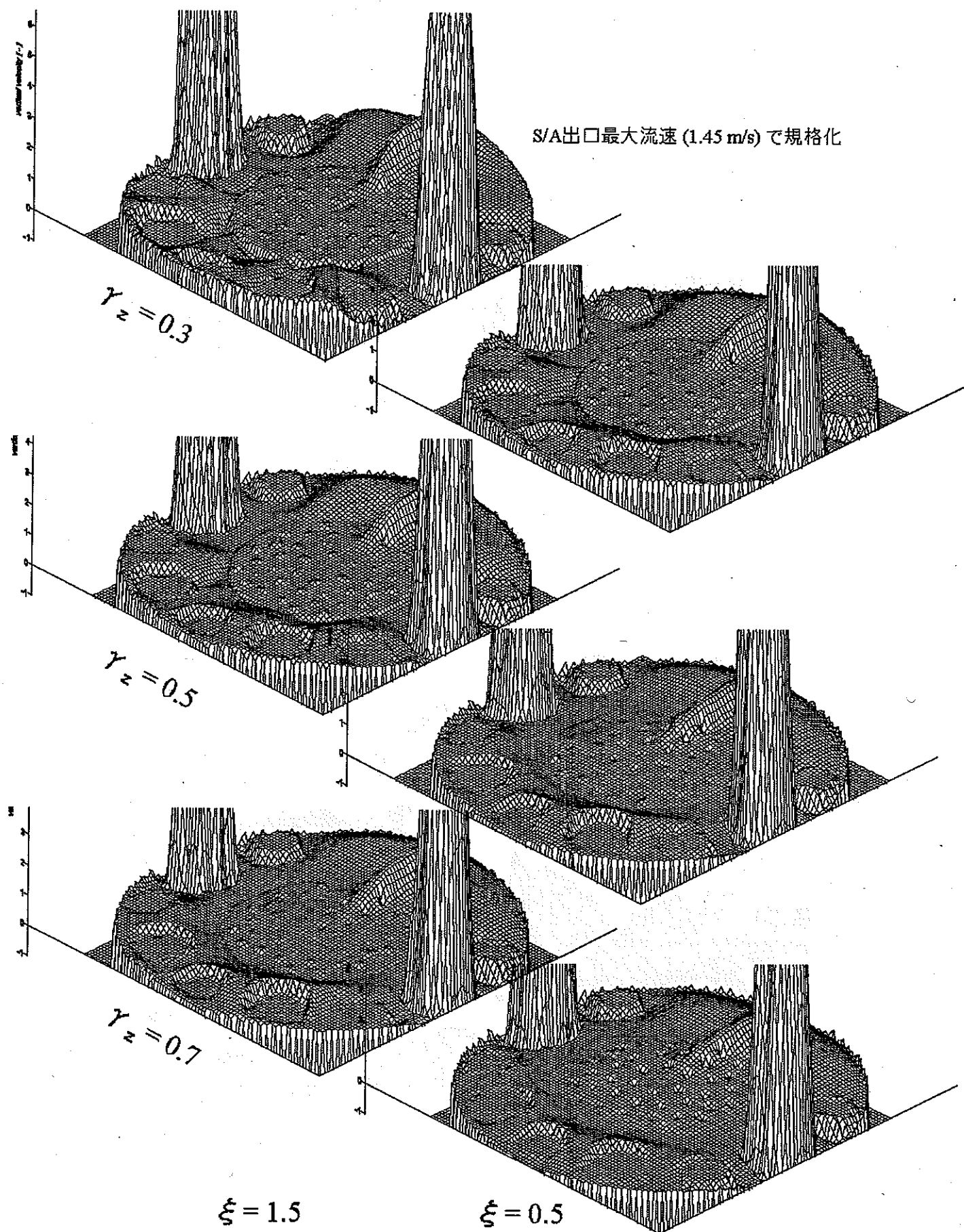


図 3.5 バッフル板 #3 面における軸方向流速成分 W の空間分布

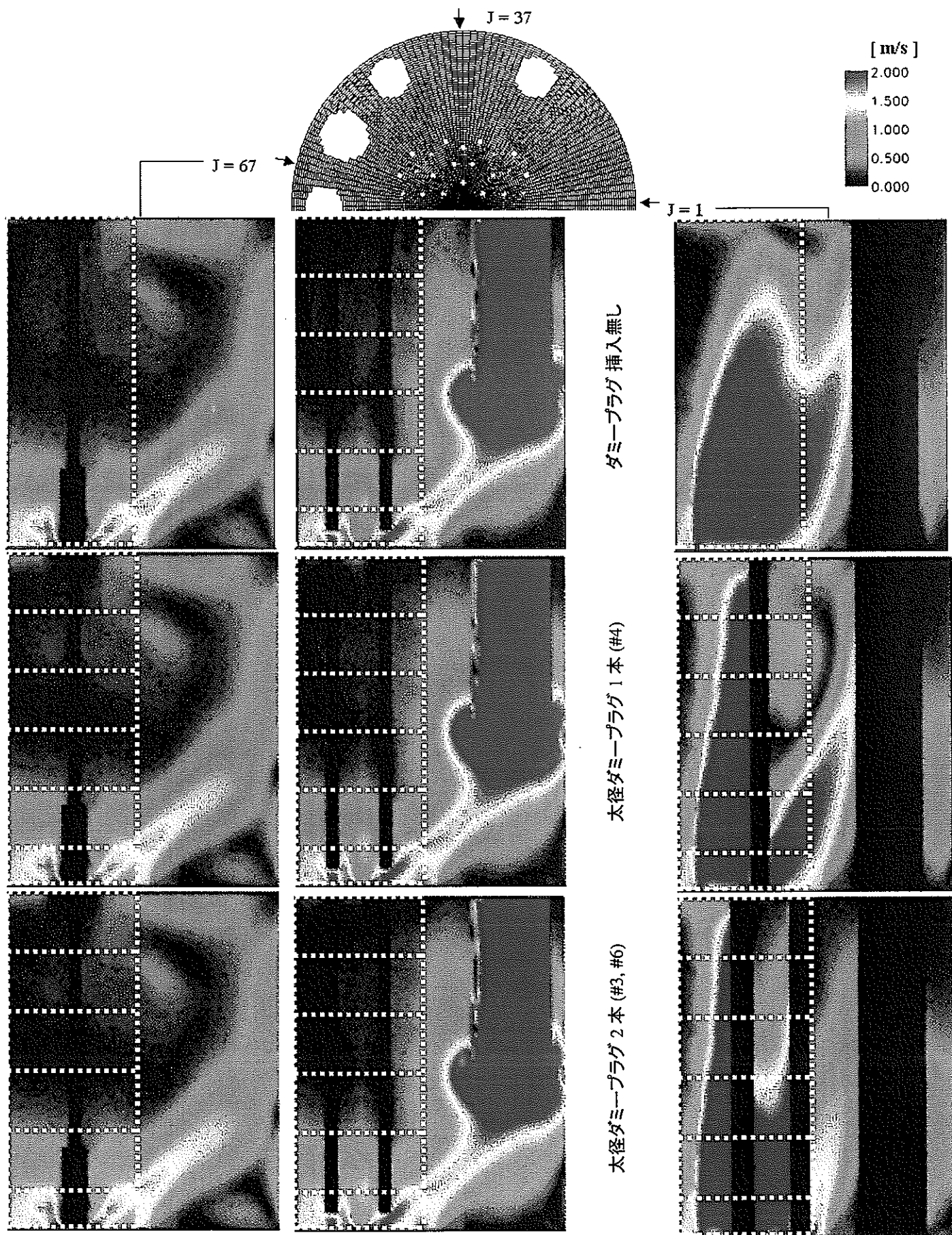


図 3.6 (1/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)

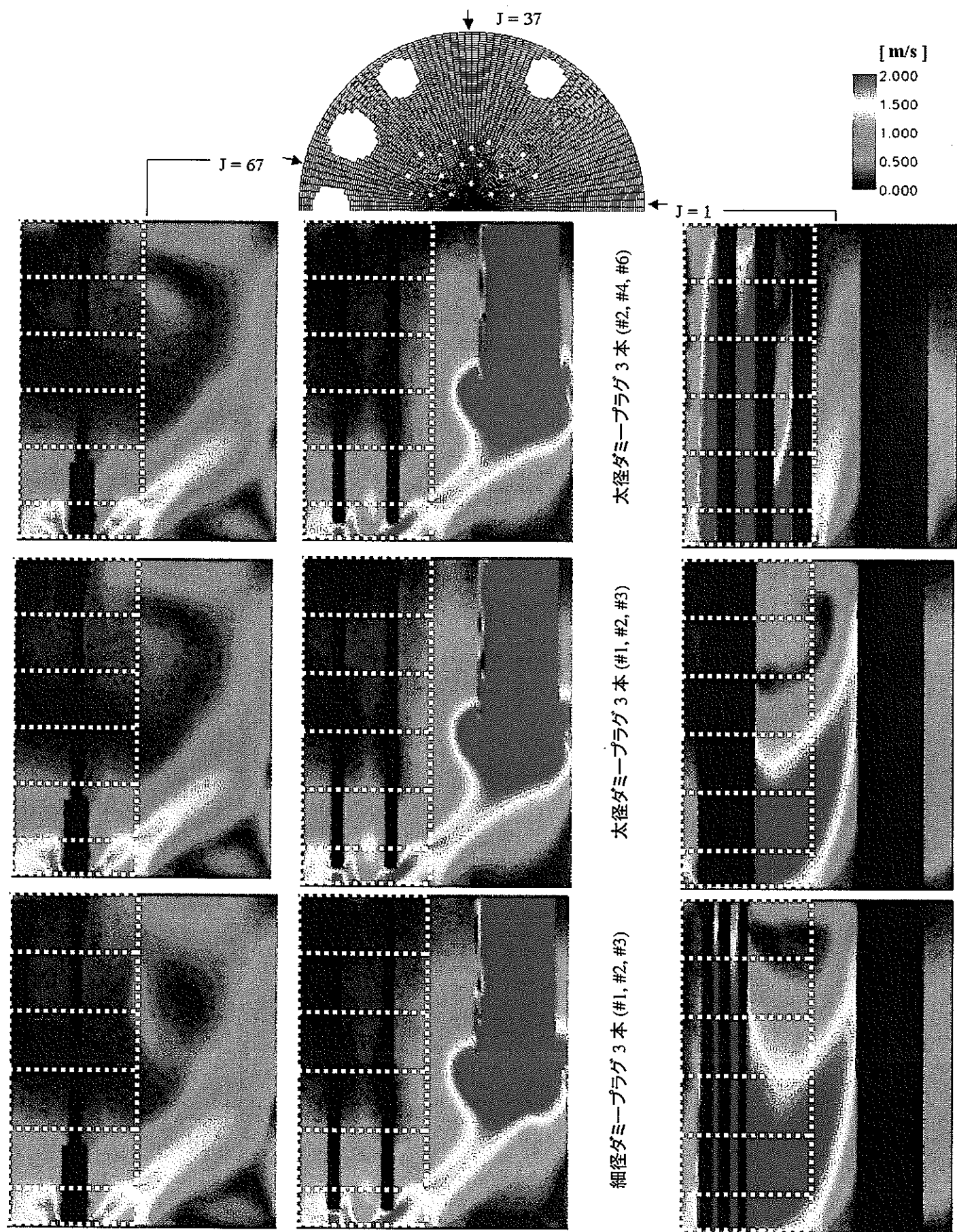


図 3.6 (2/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)

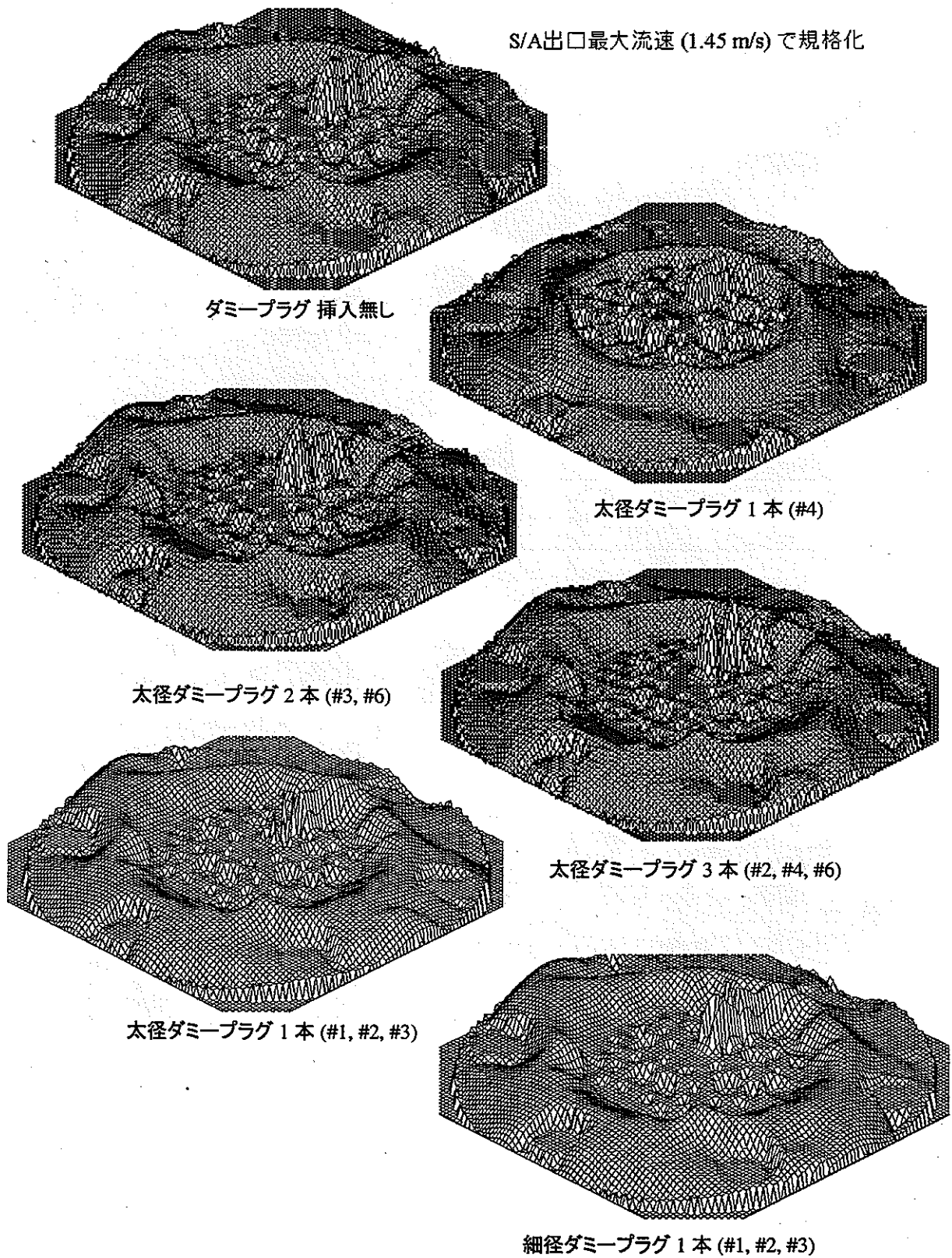


図 3.7 バッフル板 #2 面における軸方向流速成分 W の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)

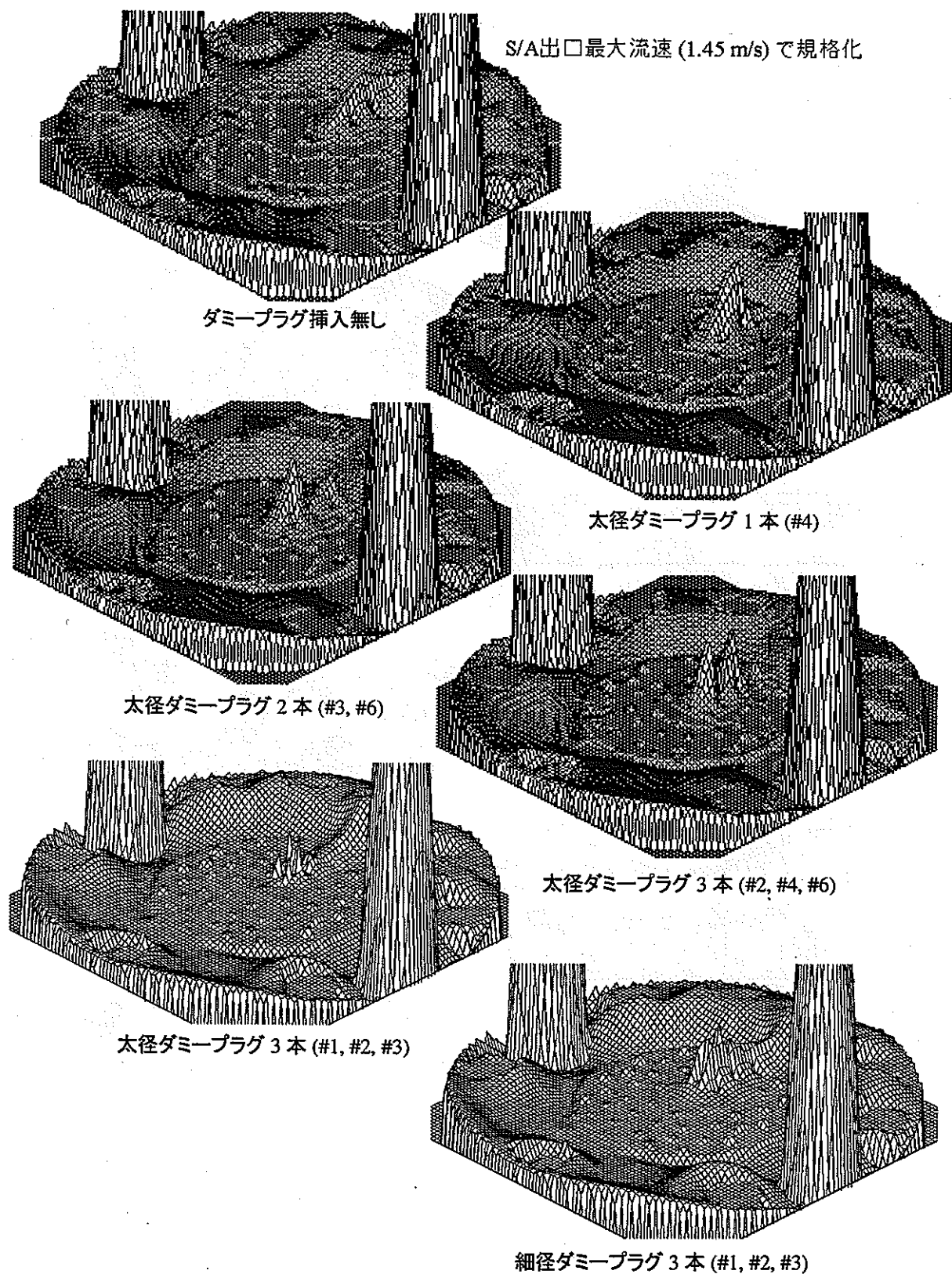


図 3.8 バッフル板 #4 面における軸方向流速成分 W の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)

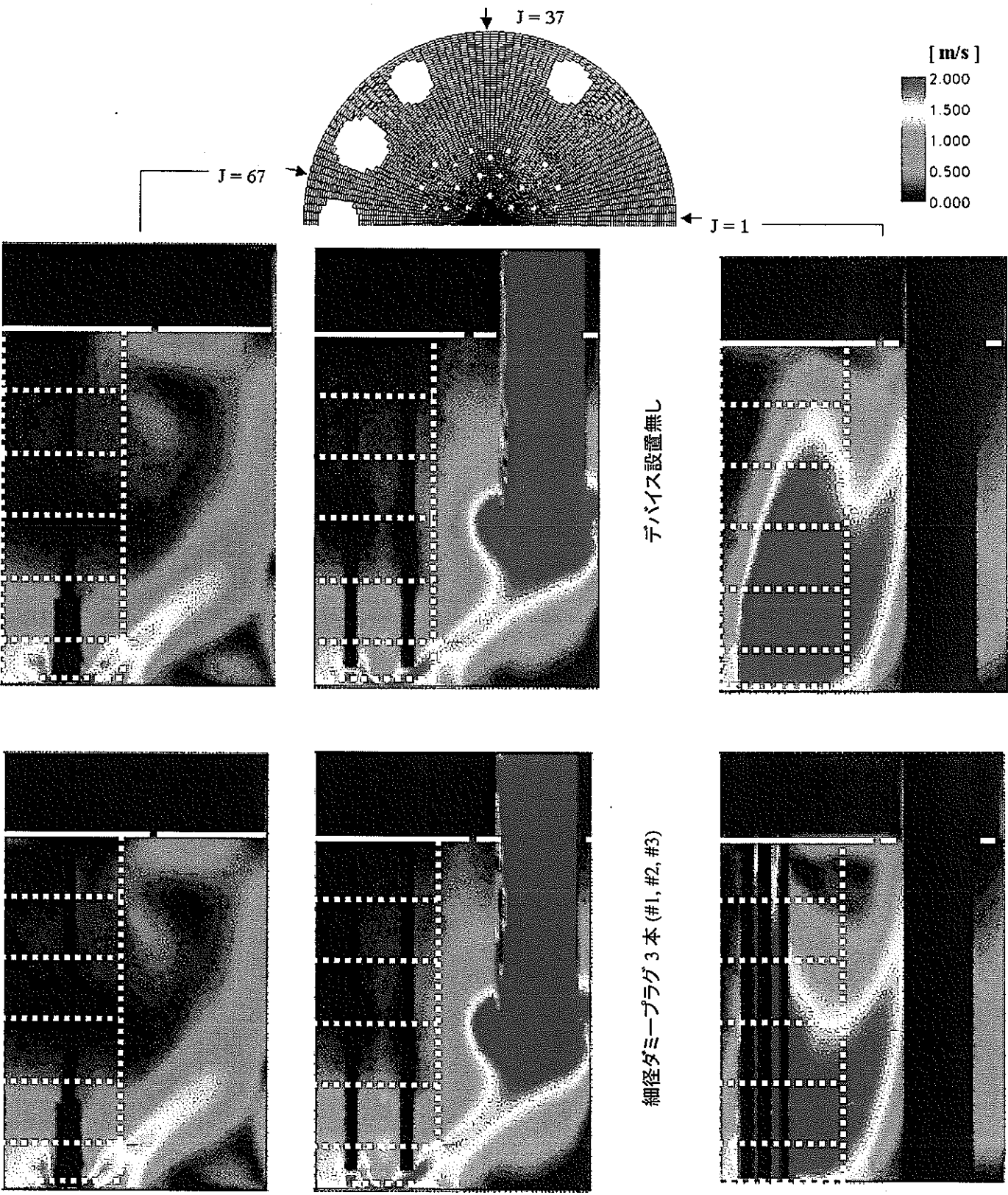


図 3.9 (1/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (各種整流デバイスの効果)

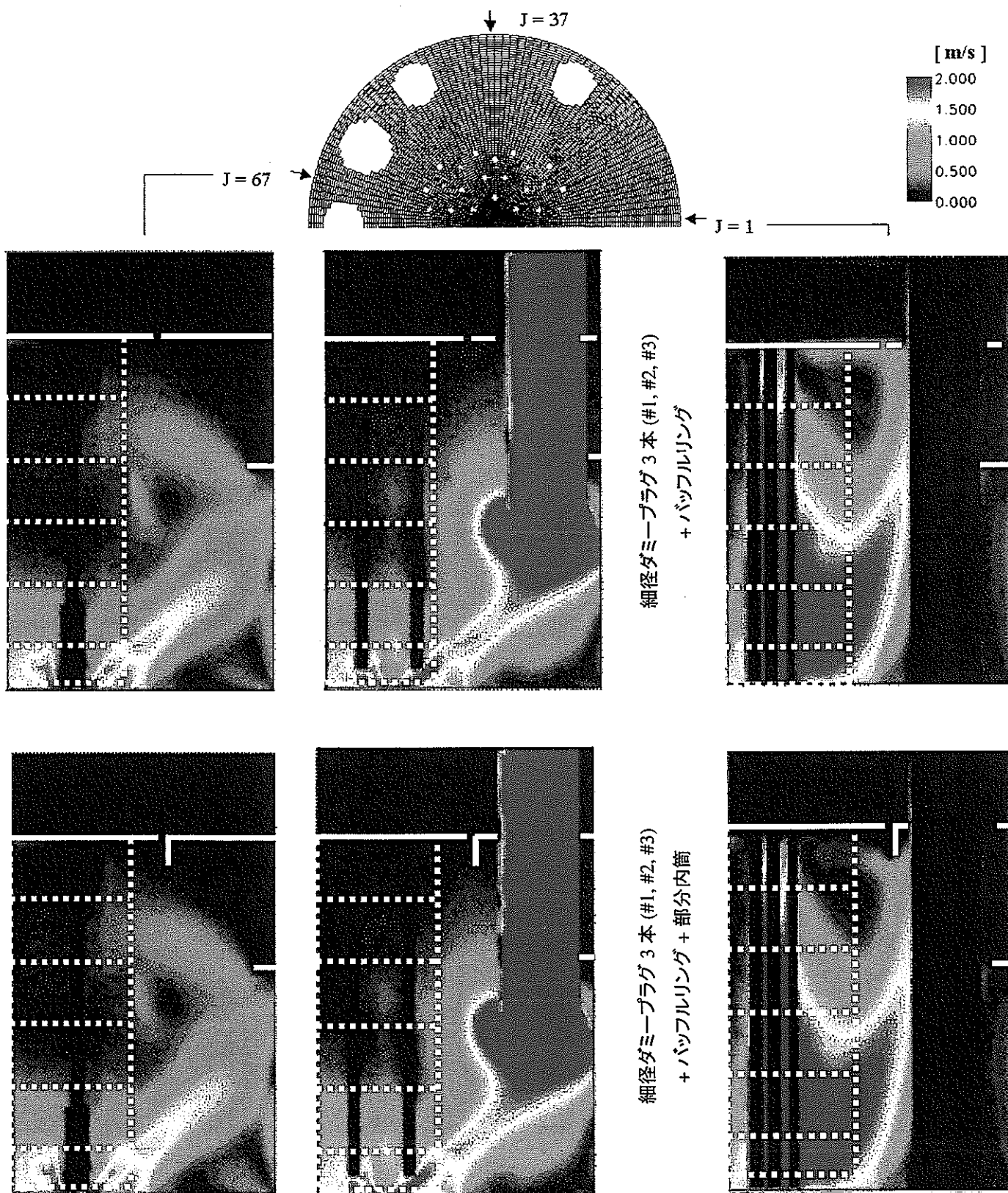


図 3.9 (2/2) 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (各種整流デバイスの効果)

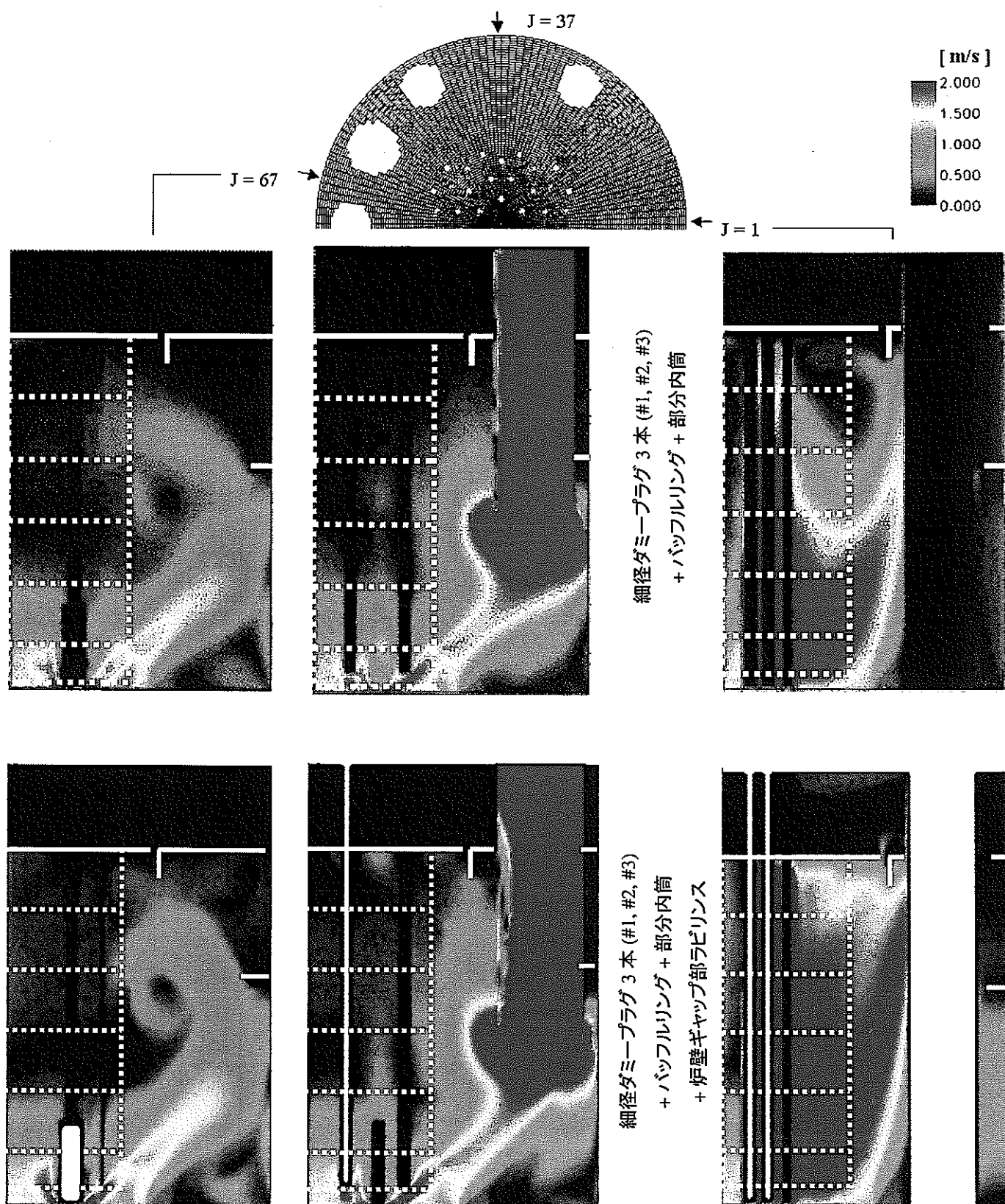


図 3.10 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (炉壁ギャップ部ラビリンス設置の効果)

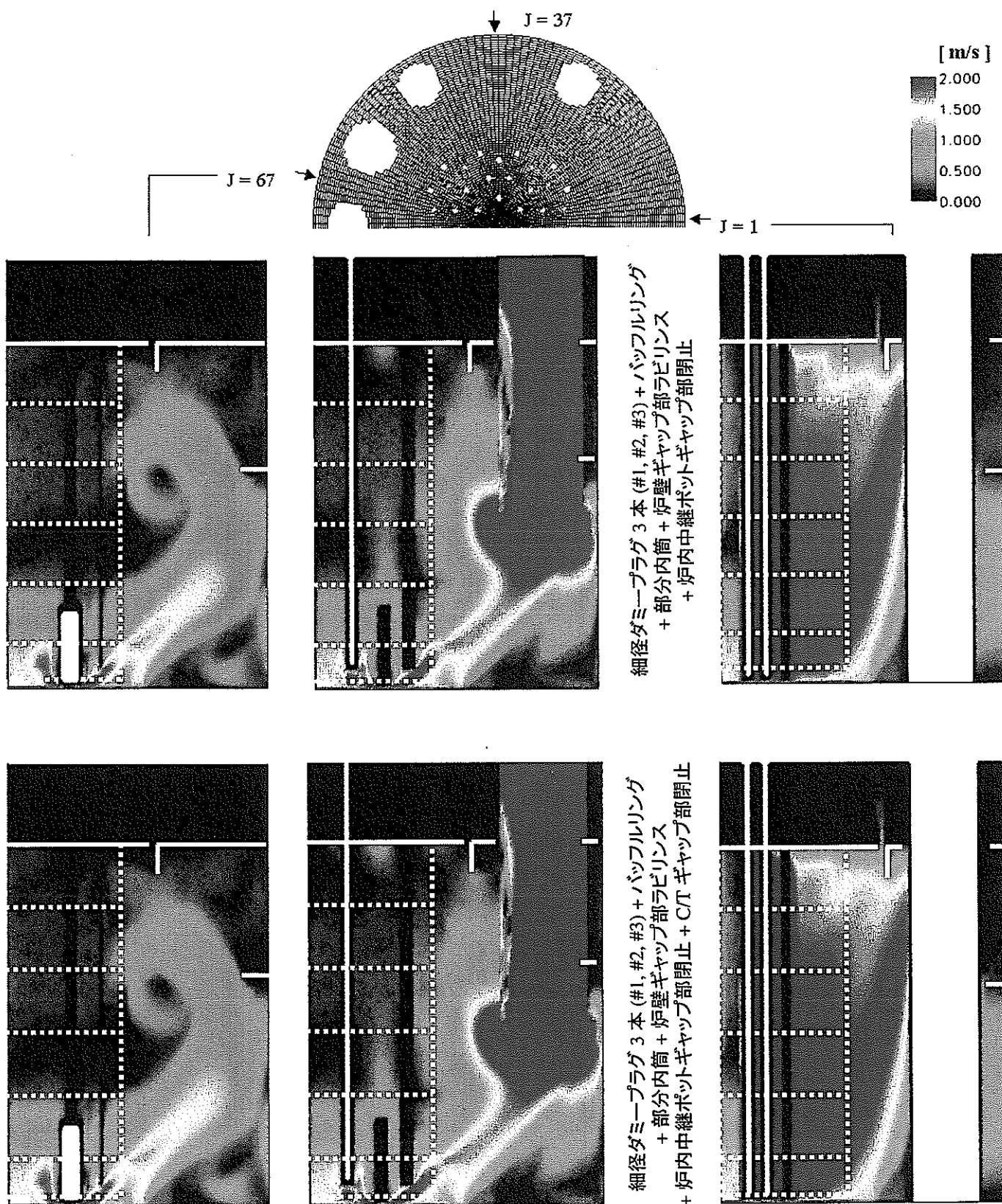


図 3.11 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (貫通機器ギャップ閉止の効果)

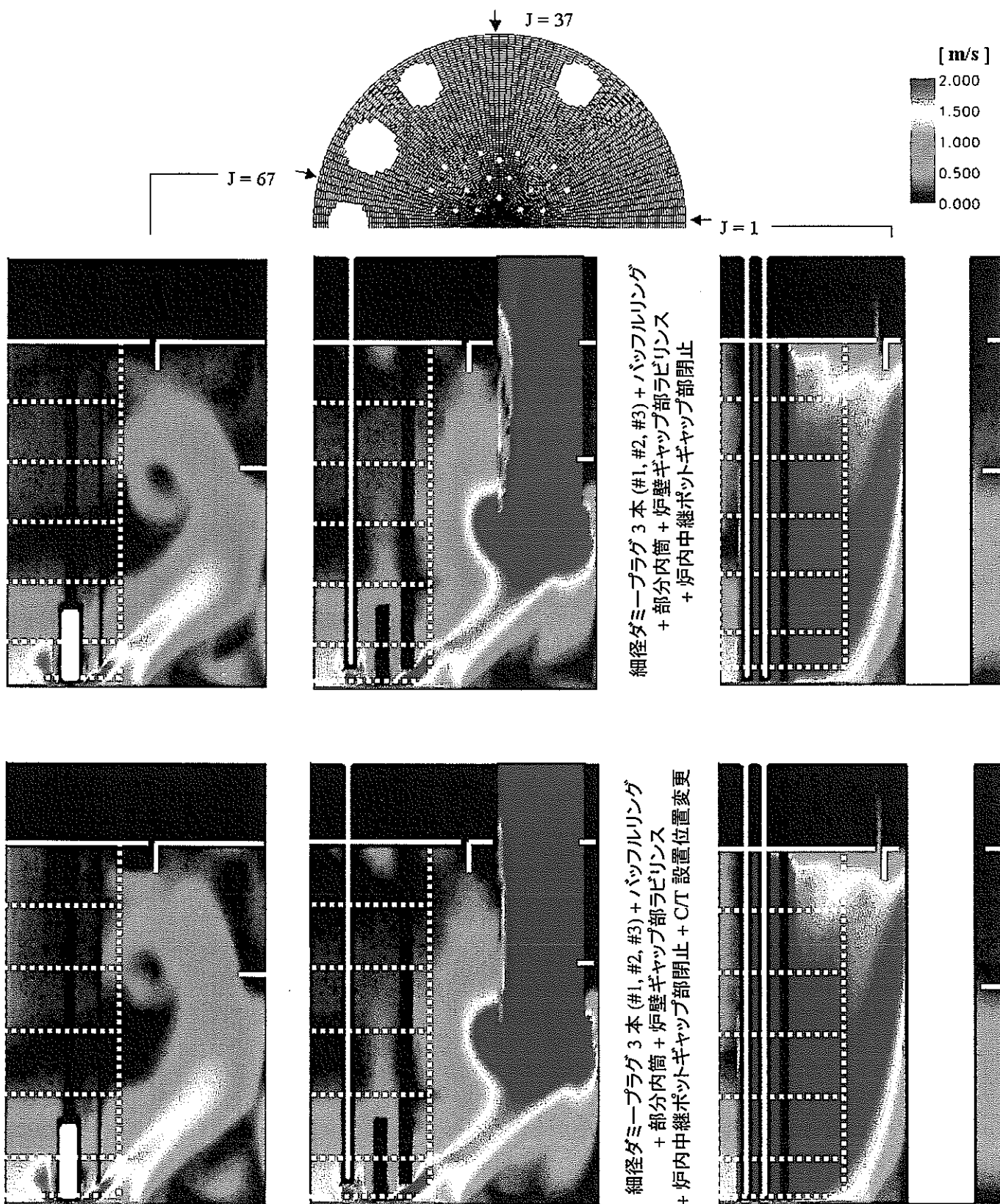


図 3.12 主要垂直断面における U, W 流速合成値の空間分布 (C/T 設置位置の効果)

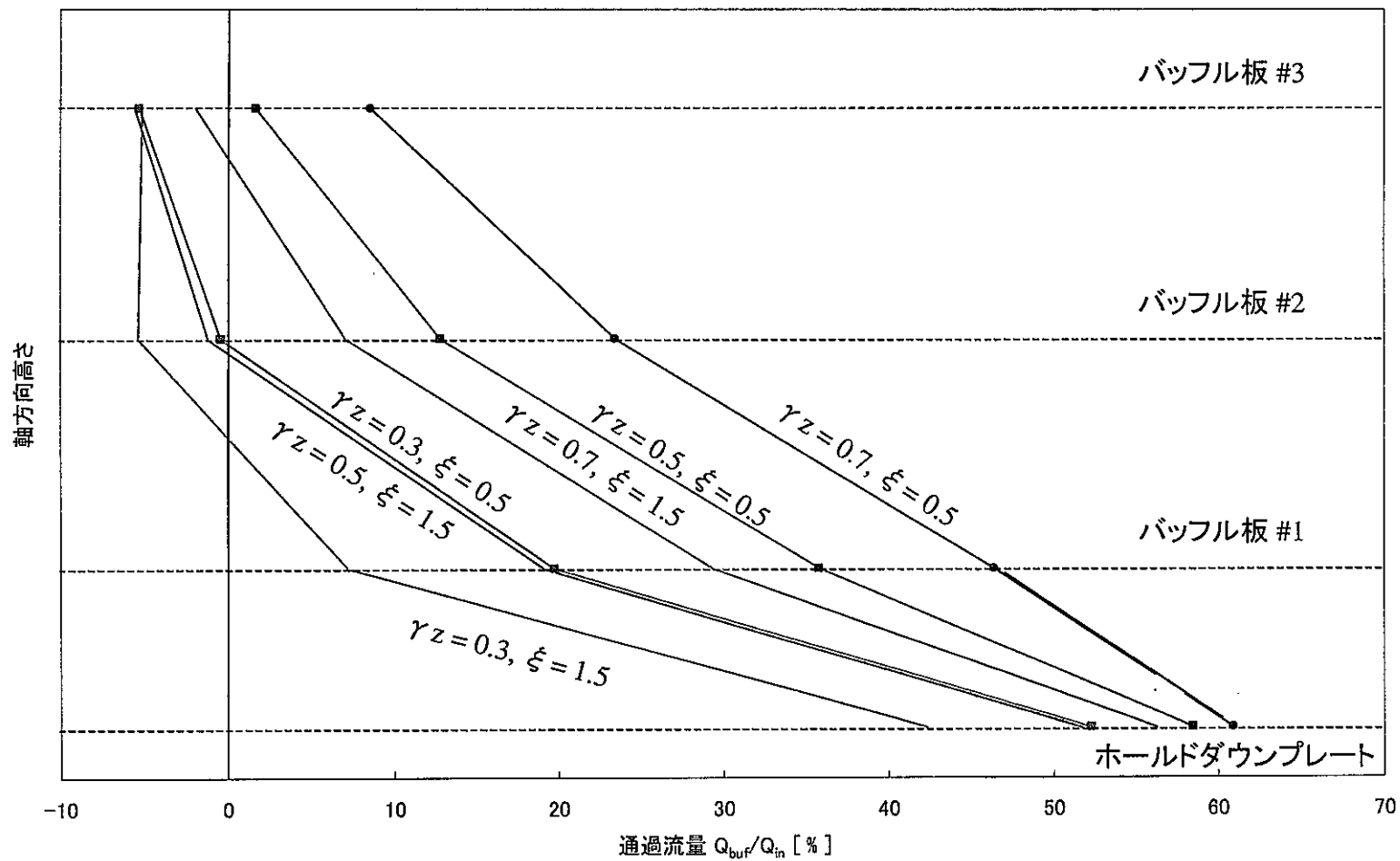
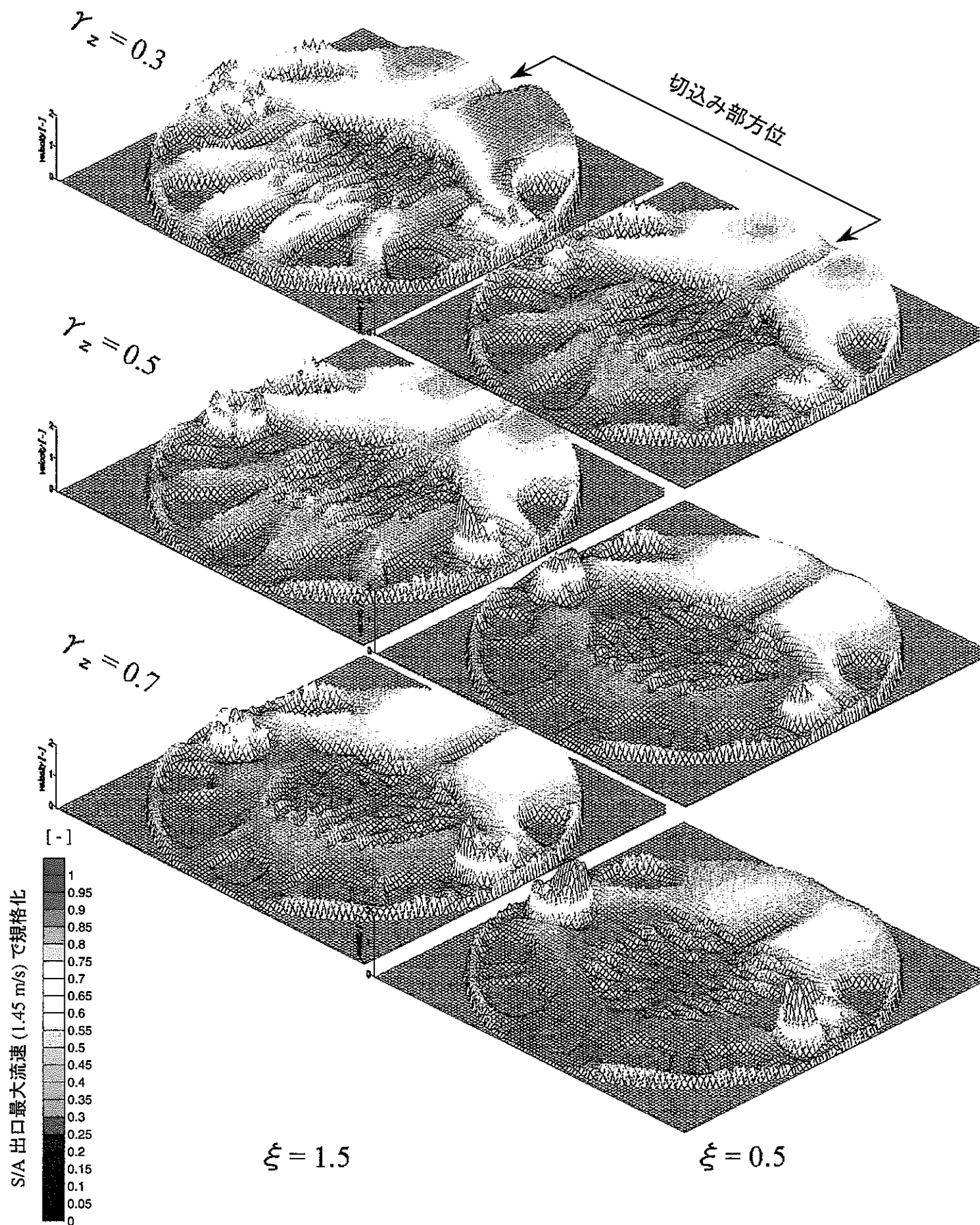


図 4.1 バッフル板軸方向通過流量の比較

図 4.2 D/P 下面における水平方向流速成分 $(U^2 + V^2)^{0.5}$ の空間分布

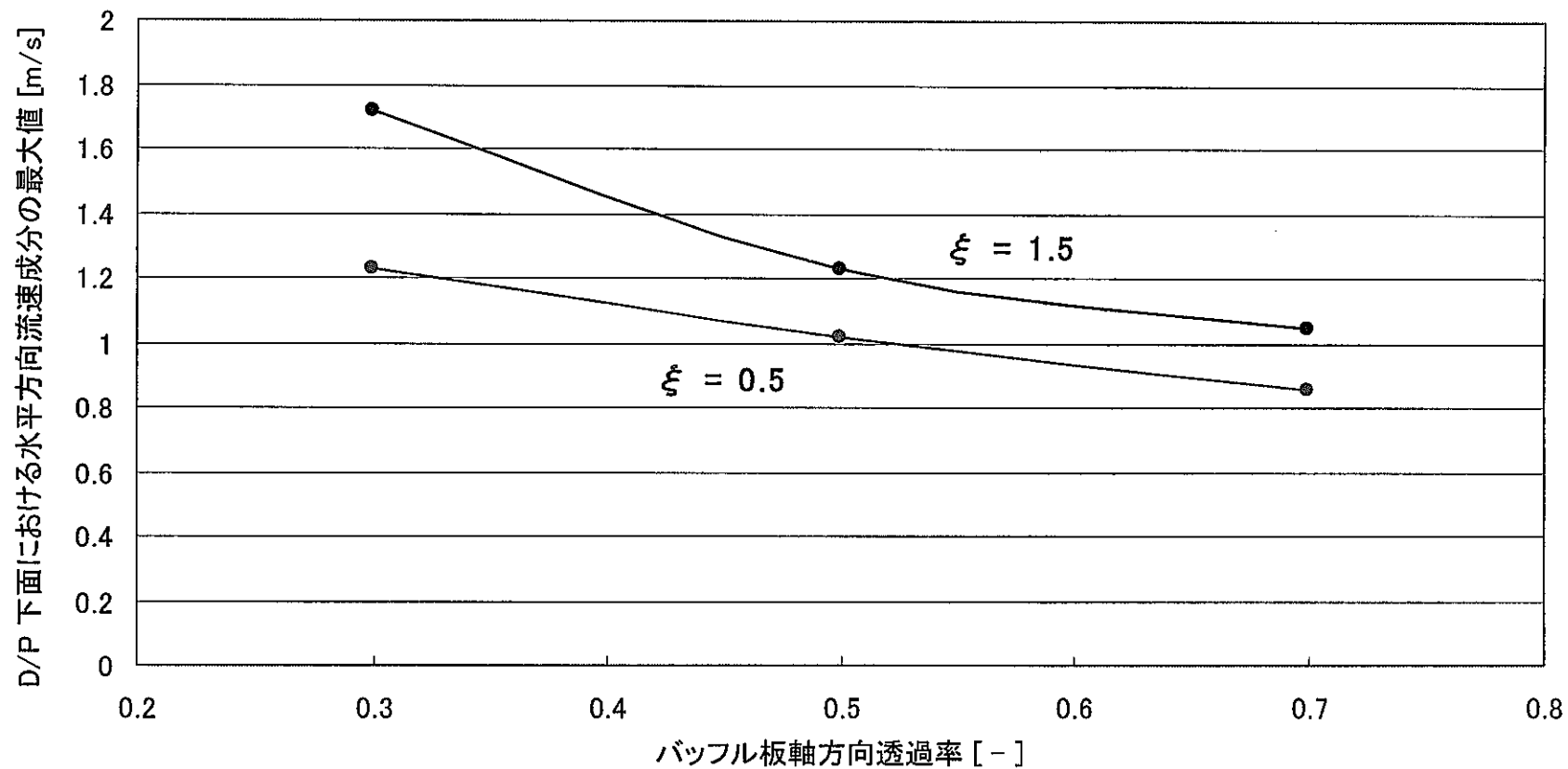
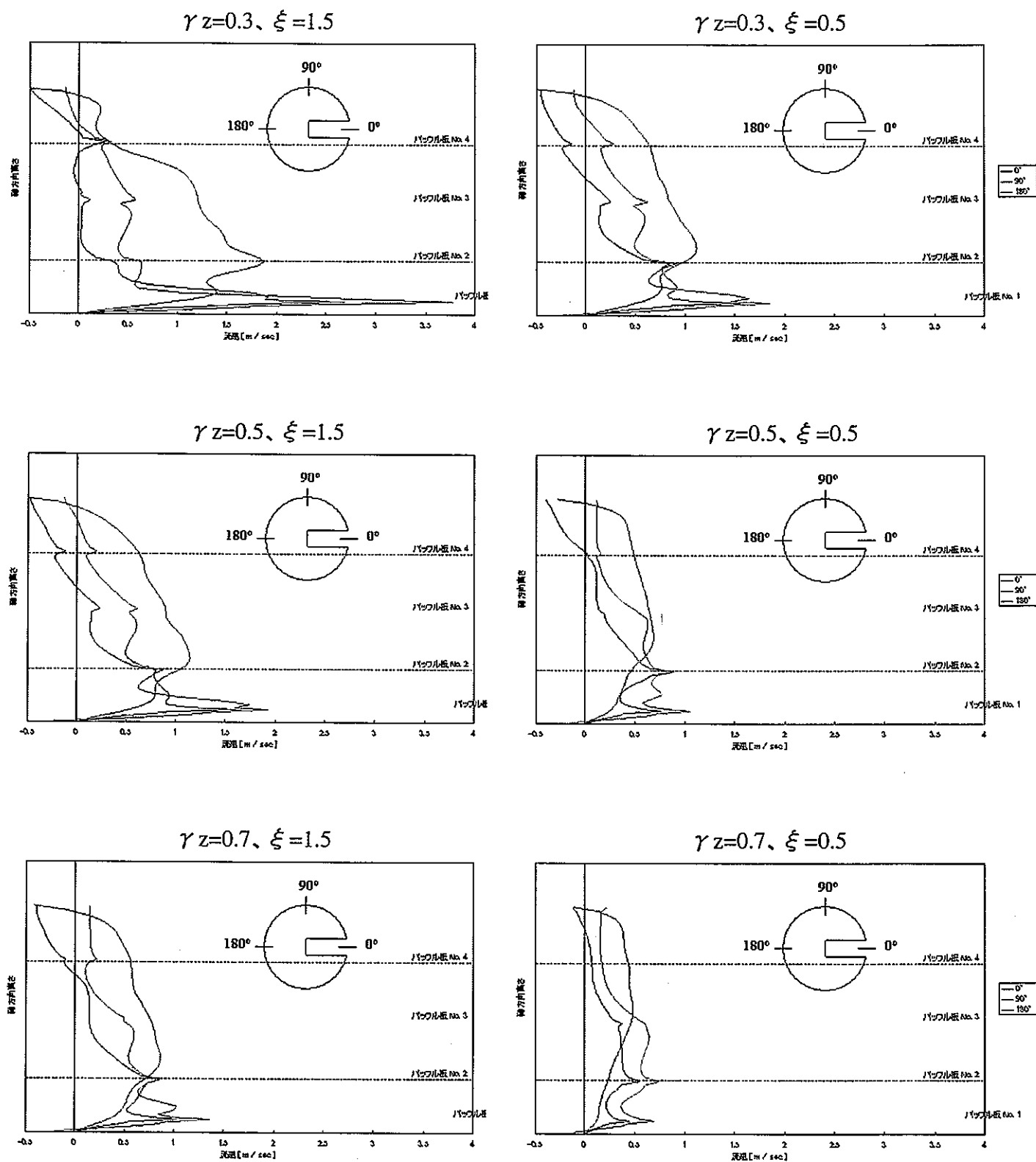


図 4.3 ディッププレート 下面における水平方向流速成分最大値の比較

図 4.4 バッフル板外縁における径方向流速成分 U の軸方向分布

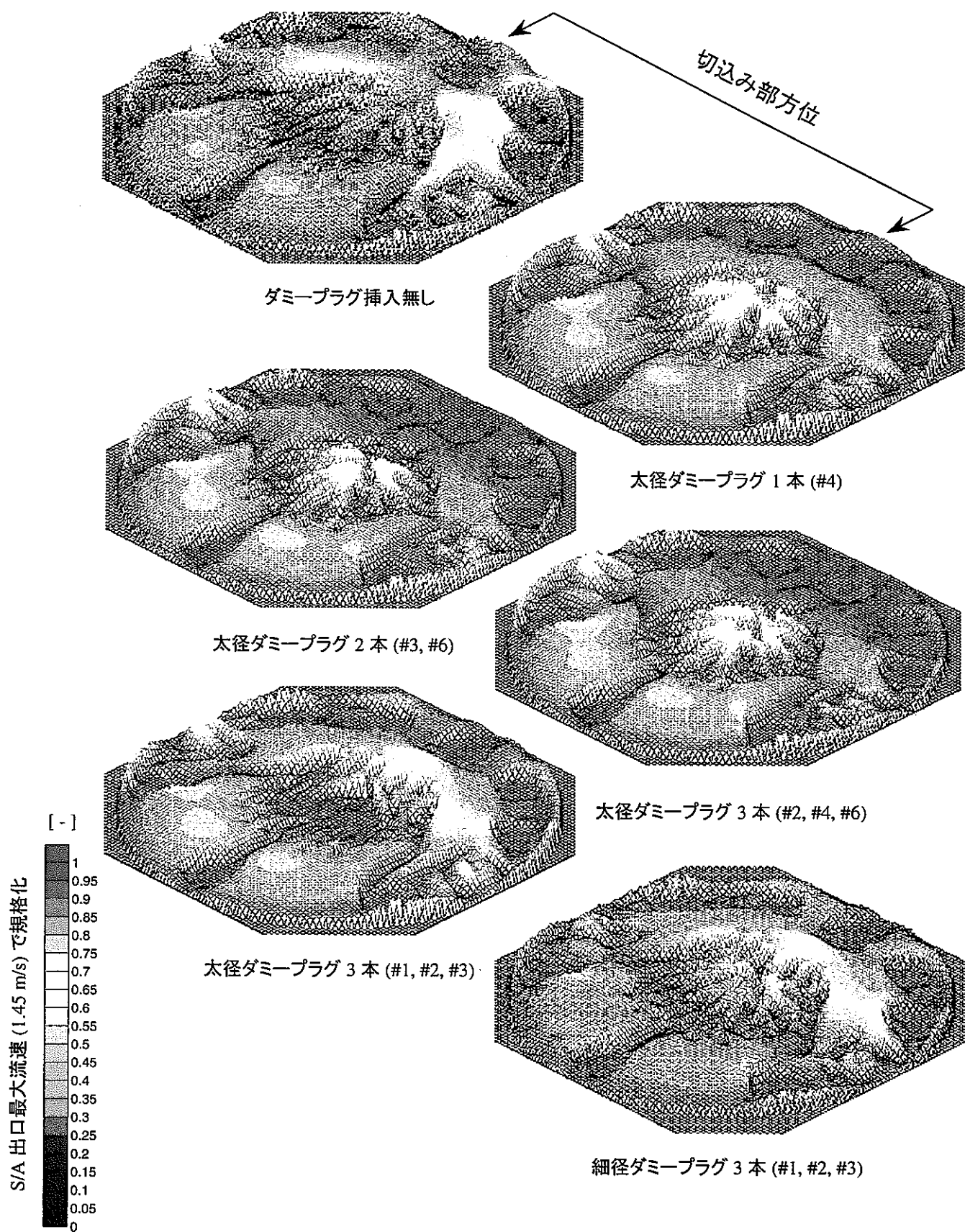


図 4.5 D/P 下面における水平方向流速成分 $(U^2 + V^2)^{0.5}$ の空間分布 (ダミープラグ装荷の効果)

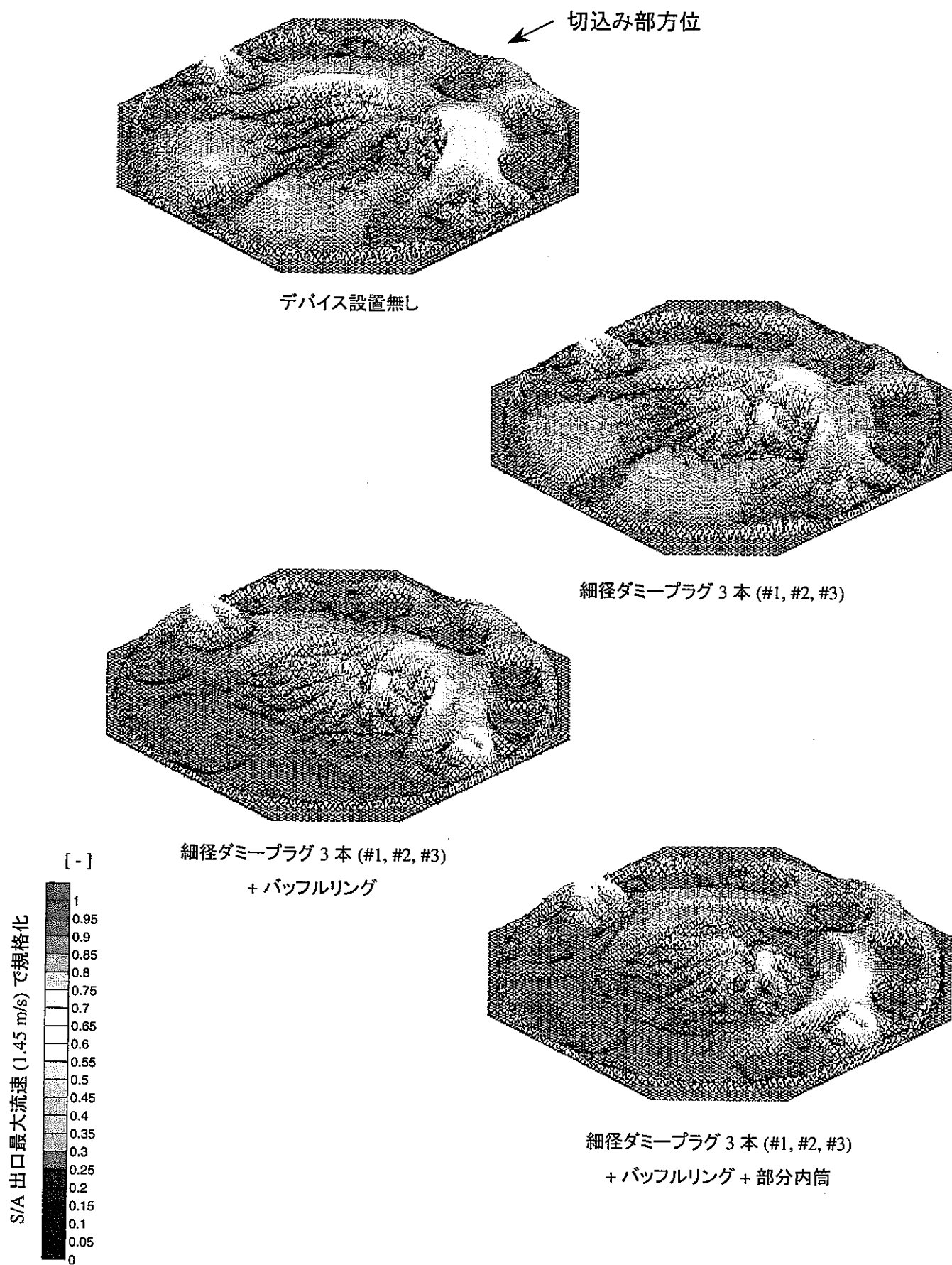


図 4.6 D/P 下面における水平方向流速成分 $(U^2 + V^2)^{0.5}$ の空間分布 (各種整流デバイスの効果)

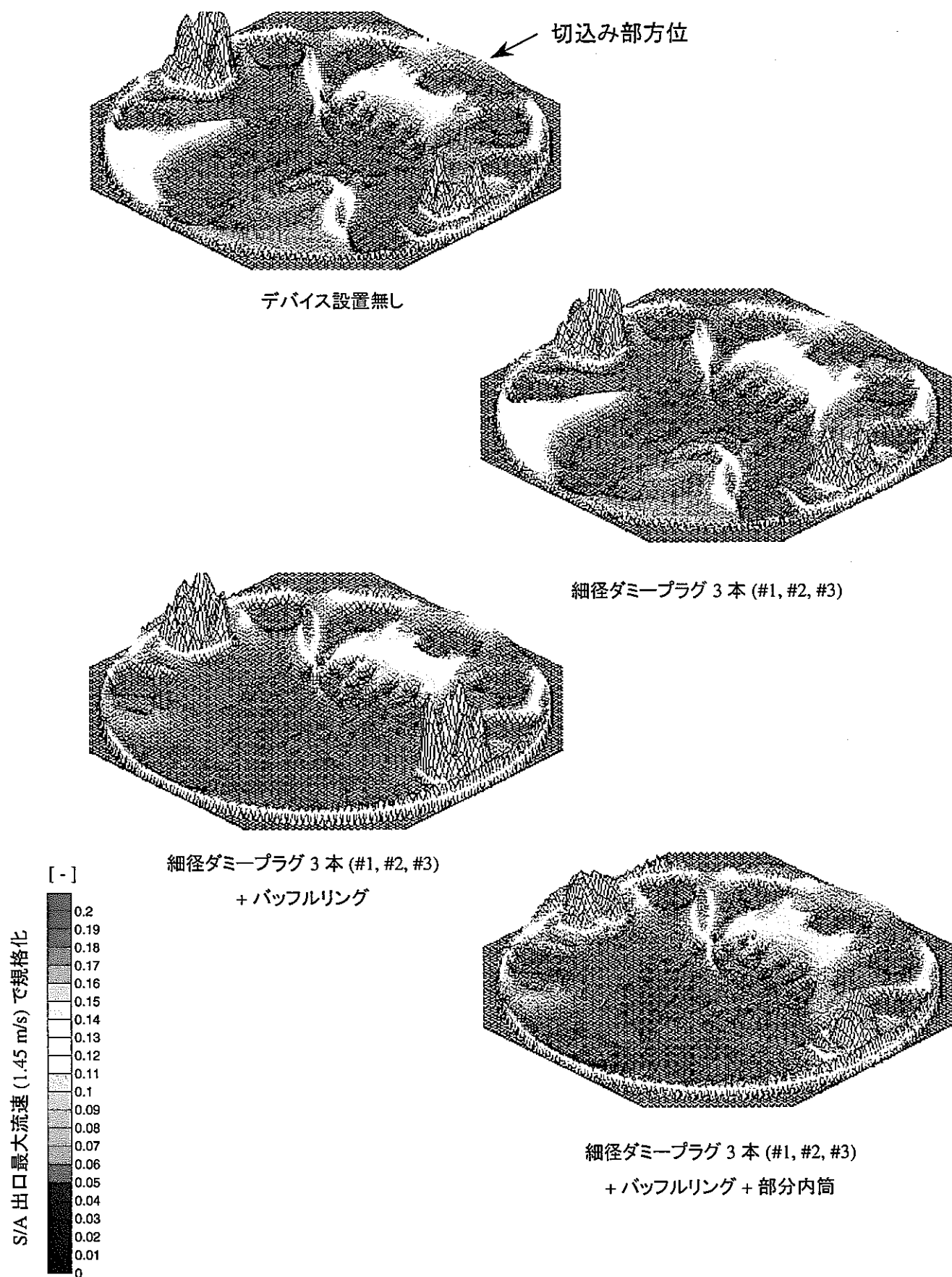


図 4.7 自由液面における水平方向流速成分 $(U^2 + V^2)^{0.5}$ の空間分布 (各種整流デバイスの効果)

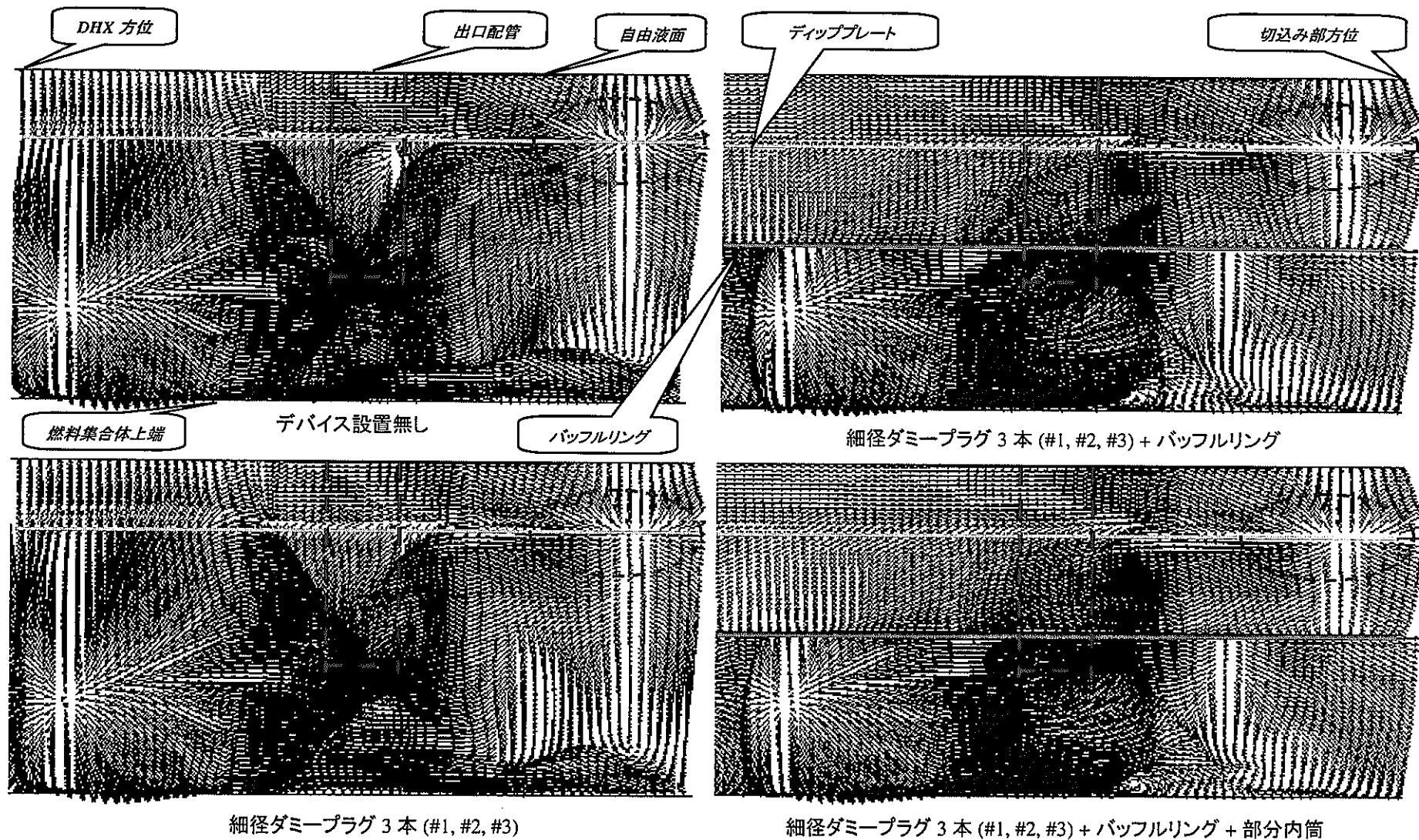
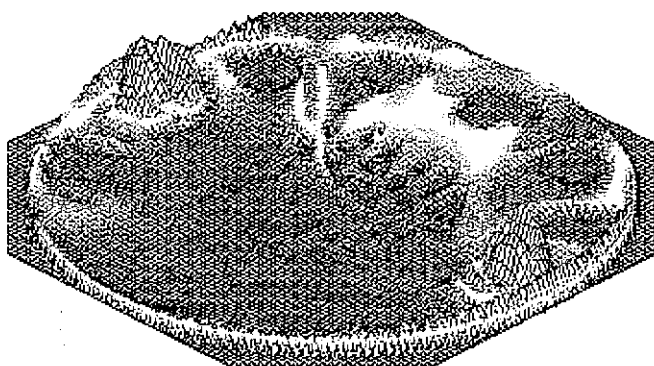
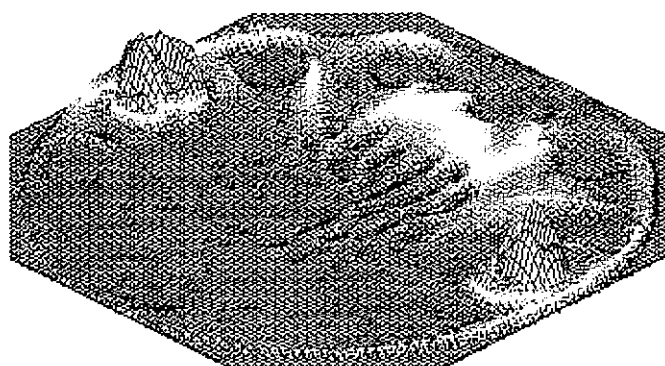


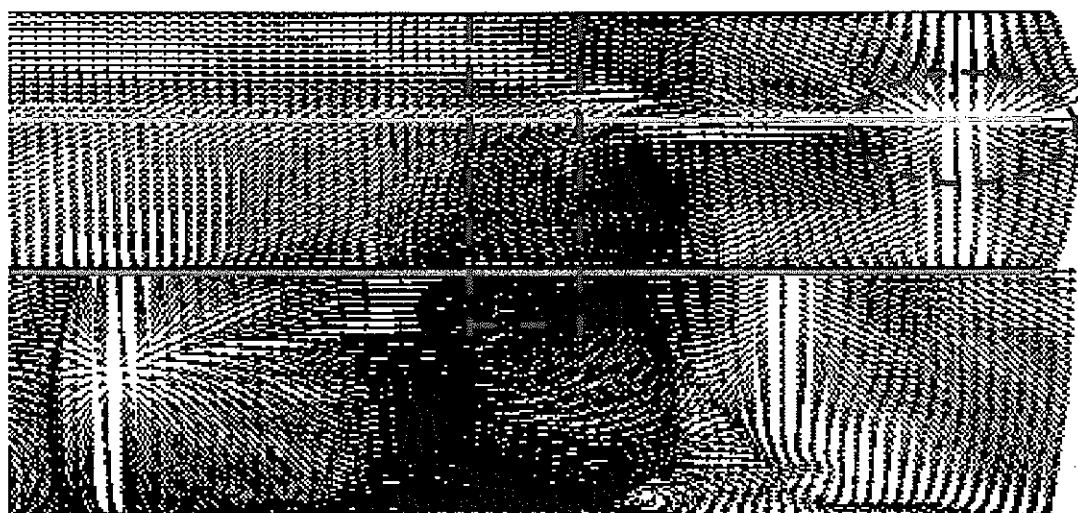
図 4. 8 炉容器壁面に沿う流速ベクトルの周方向断面 (θ - z) 分布の比較 (各種整流デバイスの効果)



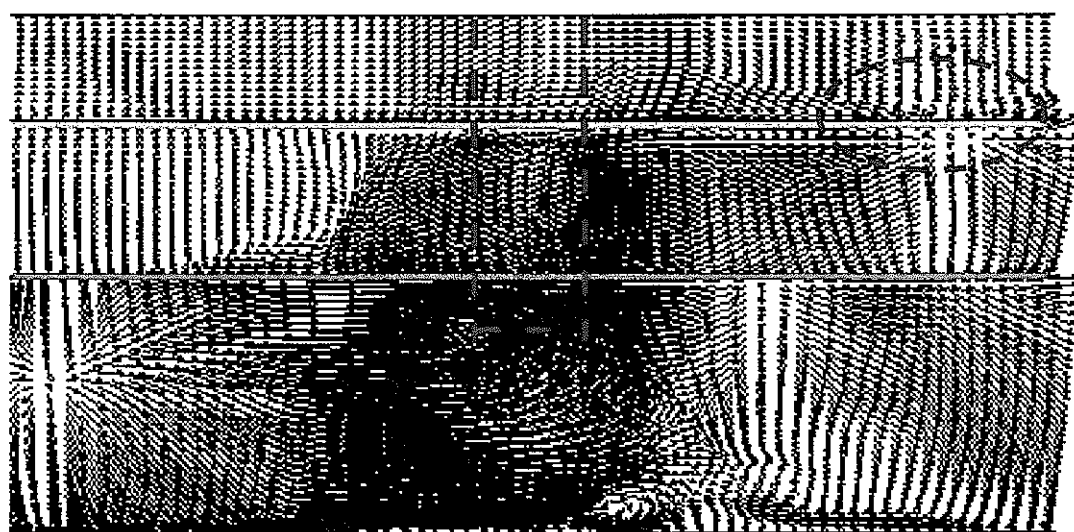
細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3) + バッフルリング
+ 部分内筒



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3) + バッフルリング
+ 部分内筒 + ラビリンス

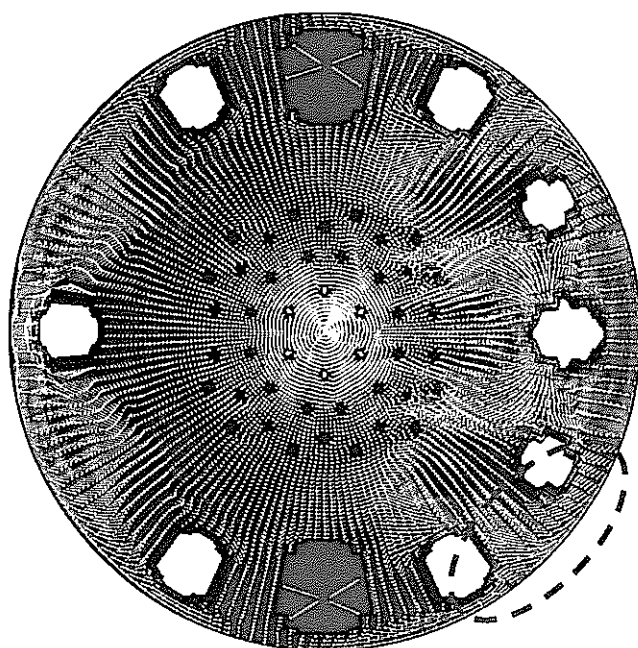


細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3) + バッフルリング + 部分内筒



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3) + バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス

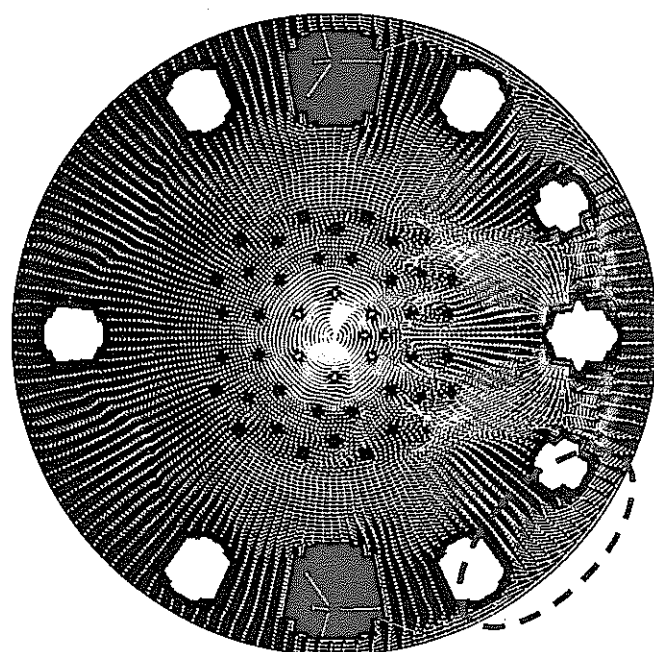
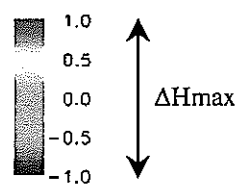
図 4.9 自由液面における水平方向流速成分 ($U^2 + V^2$)^{0.5} 分布および
炉容器壁面に沿う流速ベクトルの周方向断面 (θ - z) 分布の比較 (ラビリンス設置の効果)



1.0 [m/sec]

デバイス設置無し

$\Delta H_{\max} = 5.8 \text{ cm}$

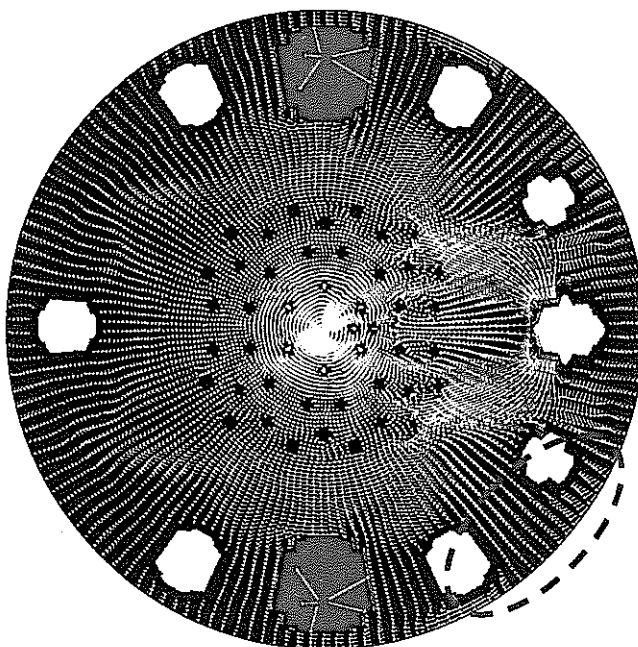


1.0 [m/sec]

細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)

+ バッフルリング + 部分内筒

$\Delta H_{\max} = 3.7 \text{ cm}$



1.0 [m/sec]

細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)

+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス

$\Delta H_{\max} = 4.6 \text{ cm}$

図 4.10 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布 (ラビリンス設置の効果)

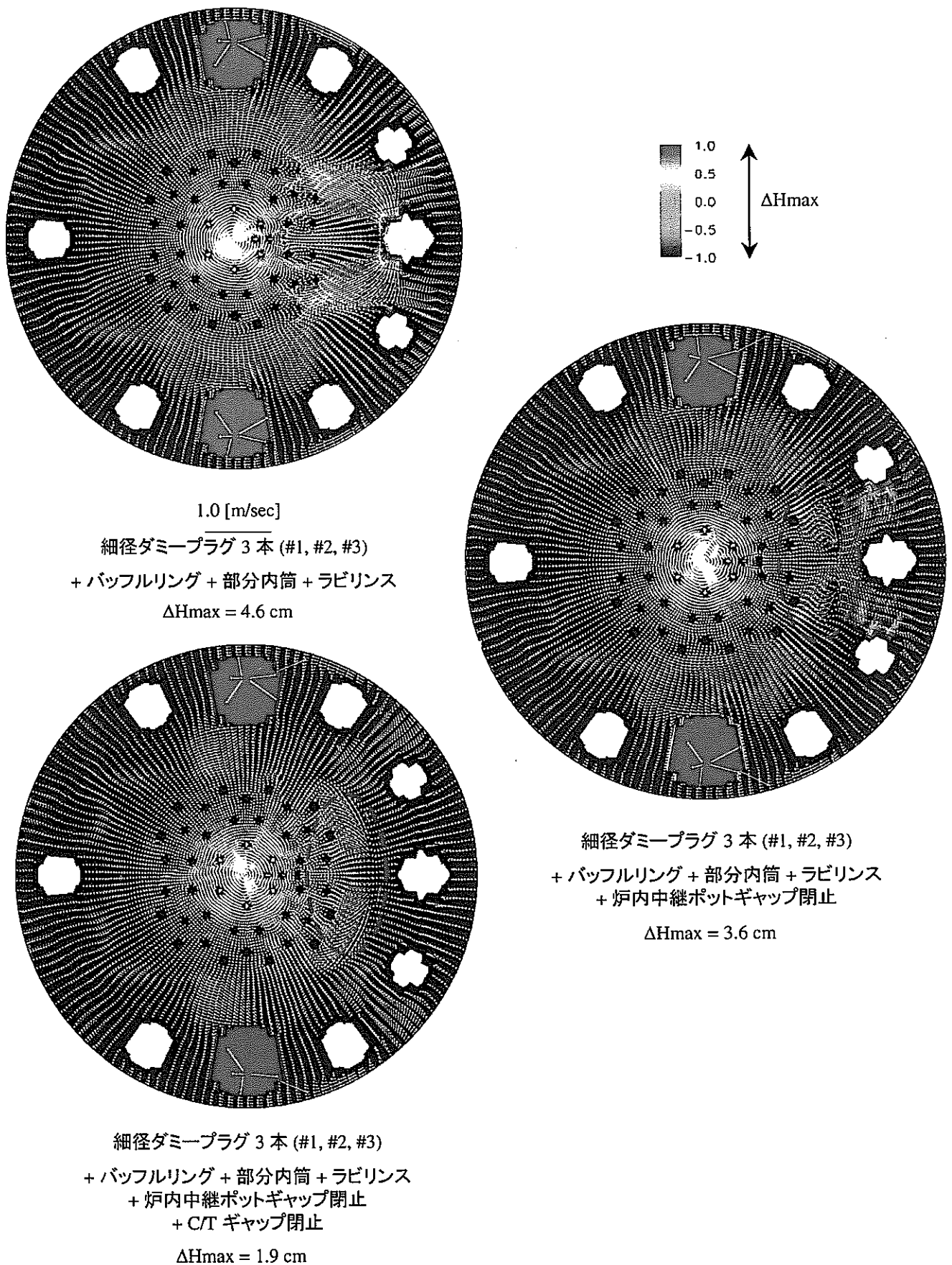
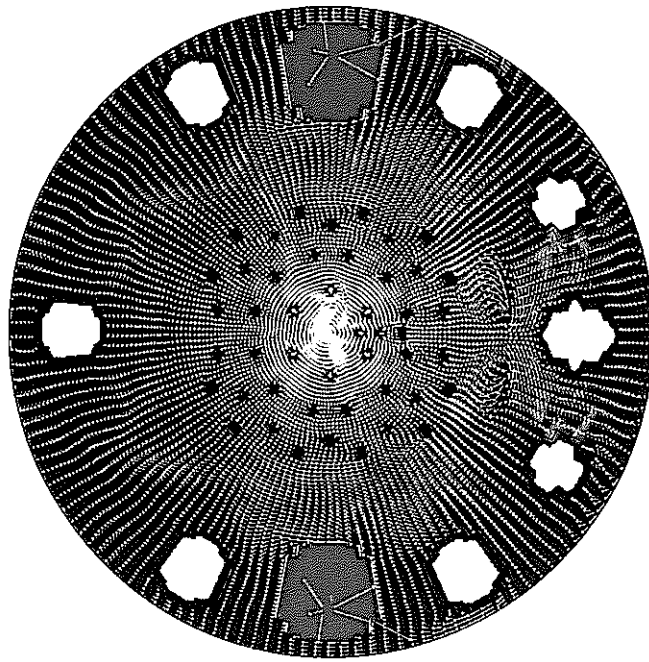
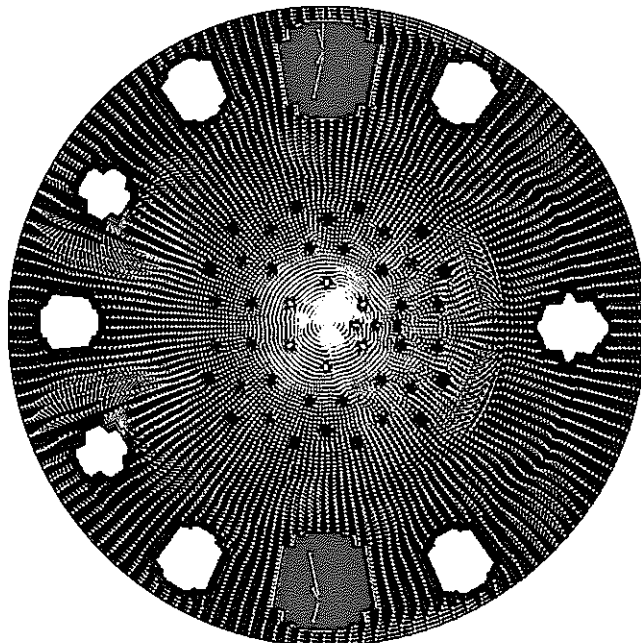


図 4.11 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布（機器貫通ギャップ閉止の効果）



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ポットギャップ閉止

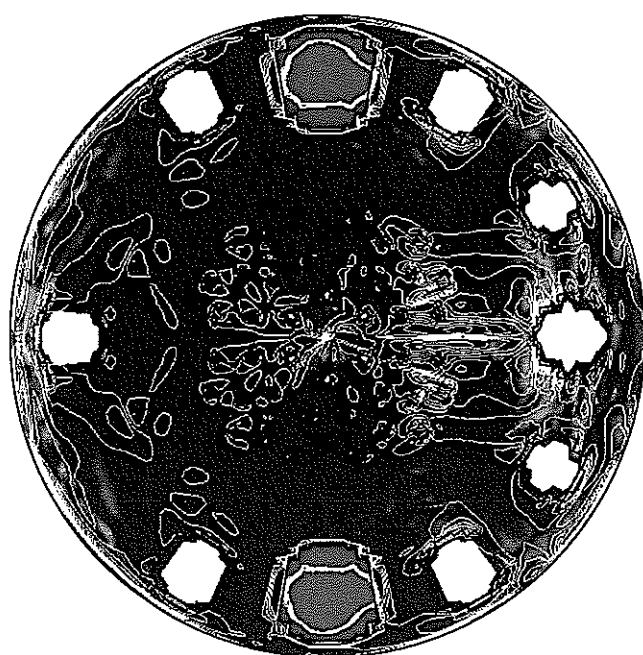
$\Delta H_{\max} = 3.6 \text{ cm}$



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ポットギャップ閉止 + C/T 移動

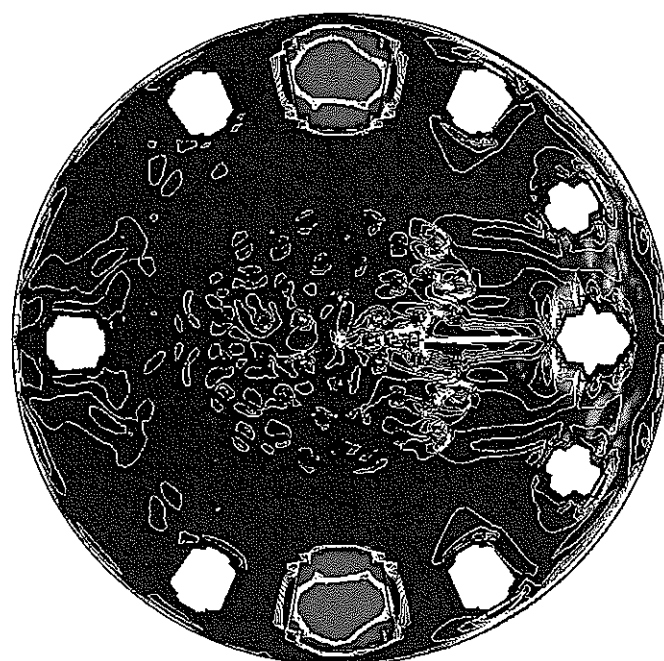
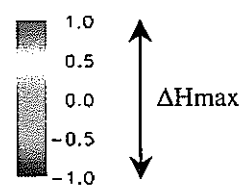
$\Delta H_{\max} = 2.6 \text{ cm}$

図 4.12 自由液面における水平方向流速分布および自由液面高低分布 (C/T 設置位置移動の効果)



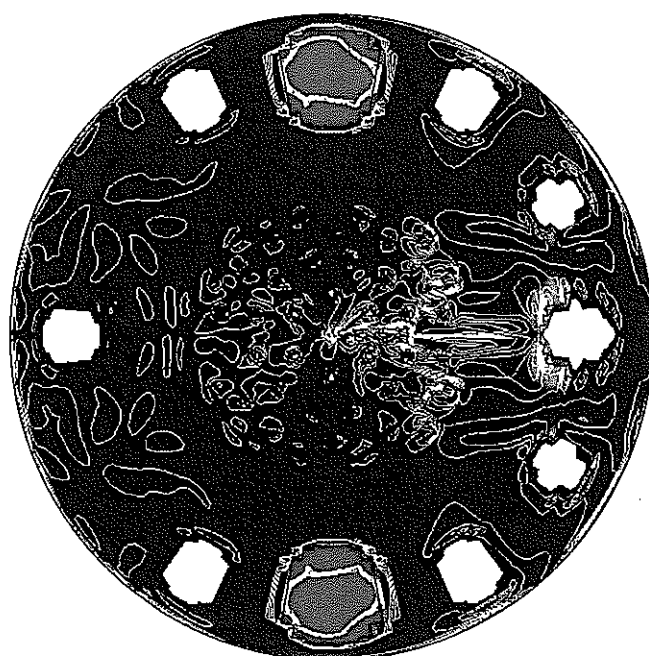
$\Delta H_{\max} = 5.8 \text{ cm}$

デバイス設置無し



$\Delta H_{\max} = 3.7 \text{ cm}$

細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒



$\Delta H_{\max} = 4.6 \text{ cm}$

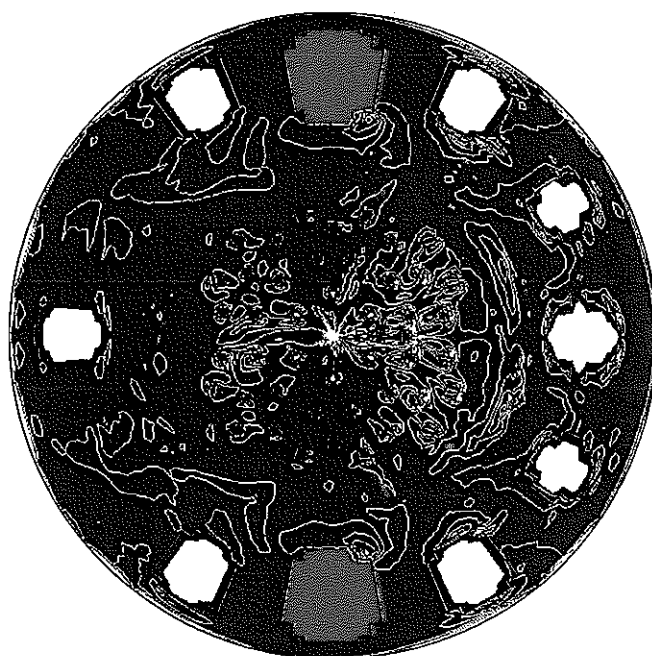
細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス

図 4. 13 (1/2) 自由液面における渦度分布および自由液面高低分布



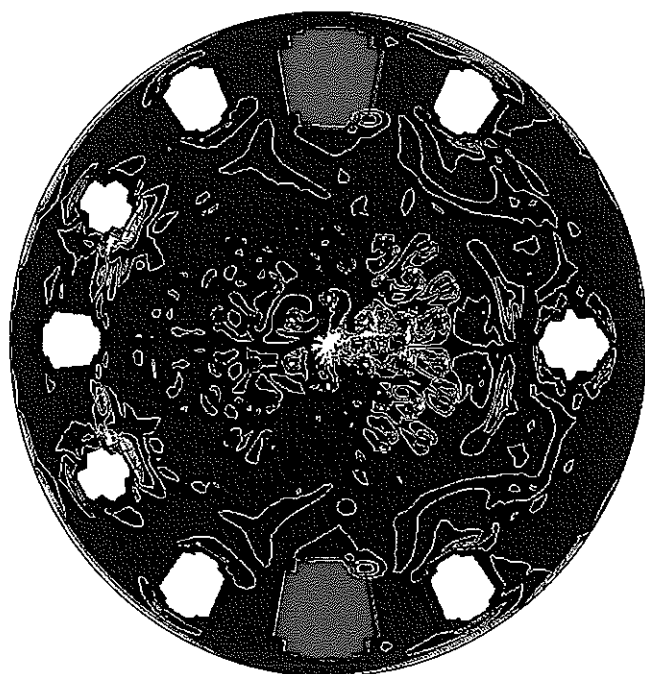
$\Delta H_{\max} = 3.6 \text{ cm}$

細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ポットギャップ閉止



$\Delta H_{\max} = 1.9 \text{ cm}$

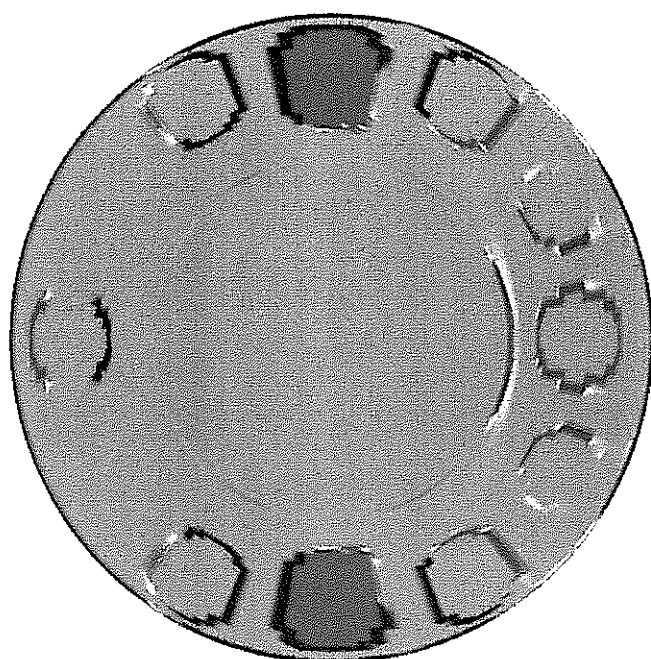
細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ポットギャップ閉止
+ C/T ギャップ閉止



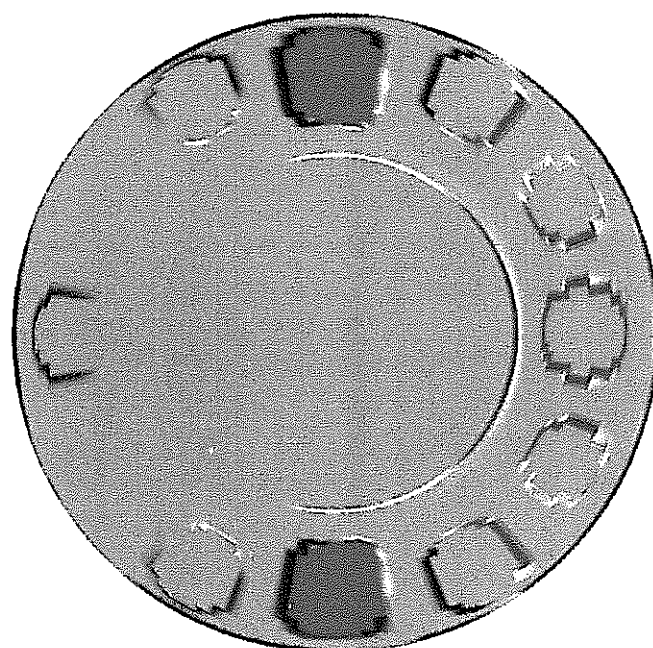
$\Delta H_{\max} = 2.6 \text{ cm}$

細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ポットギャップ閉止 + C/T 移動

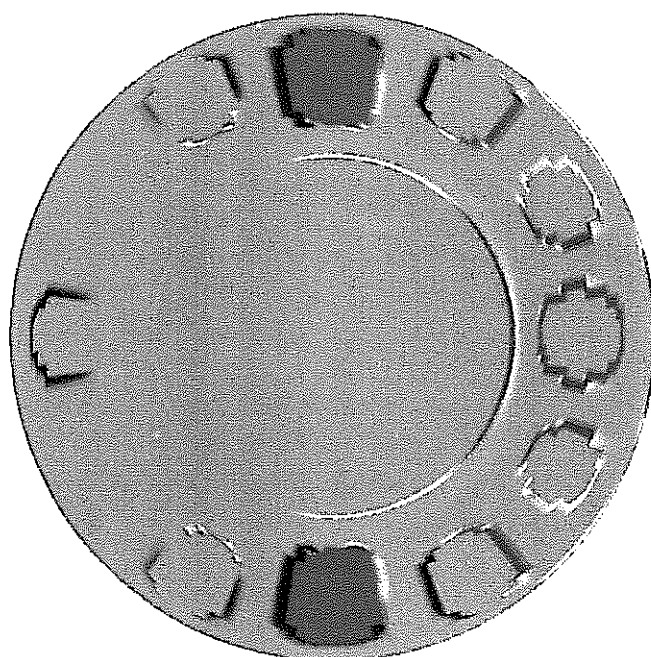
図 4. 13 (2/2) 自由液面における渦度分布および自由液面高低分布



デバイス設置無し



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス

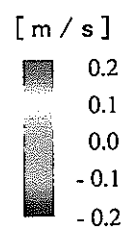
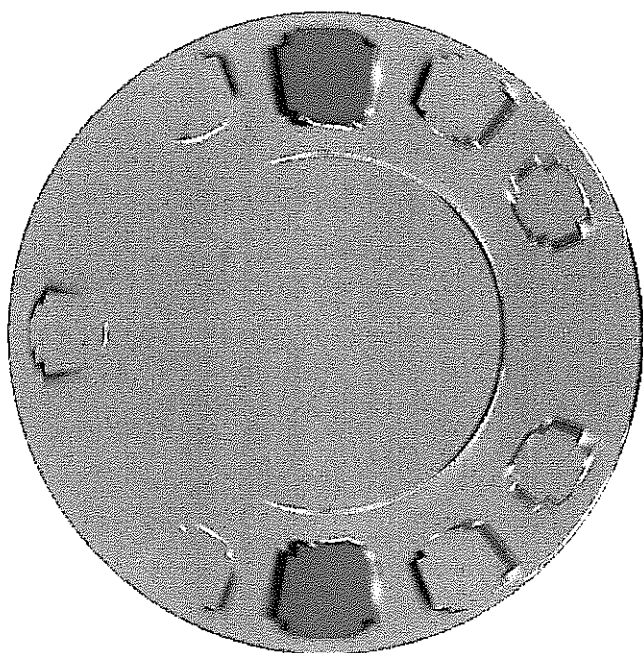
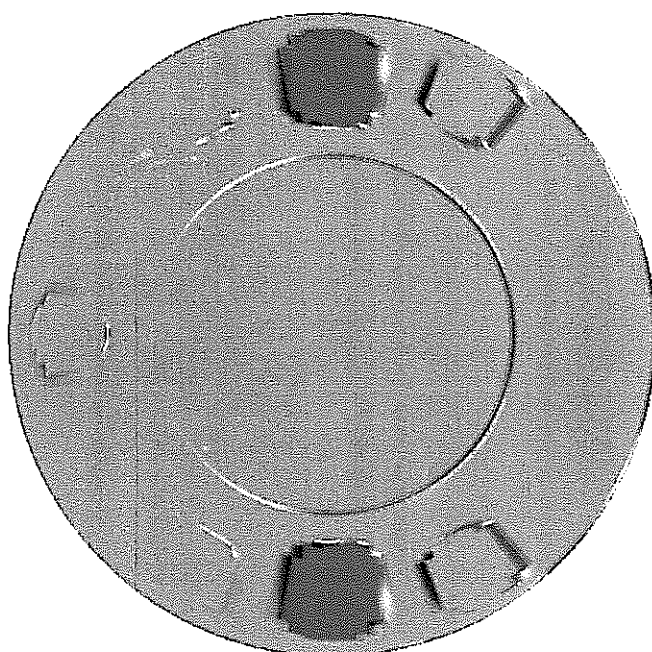


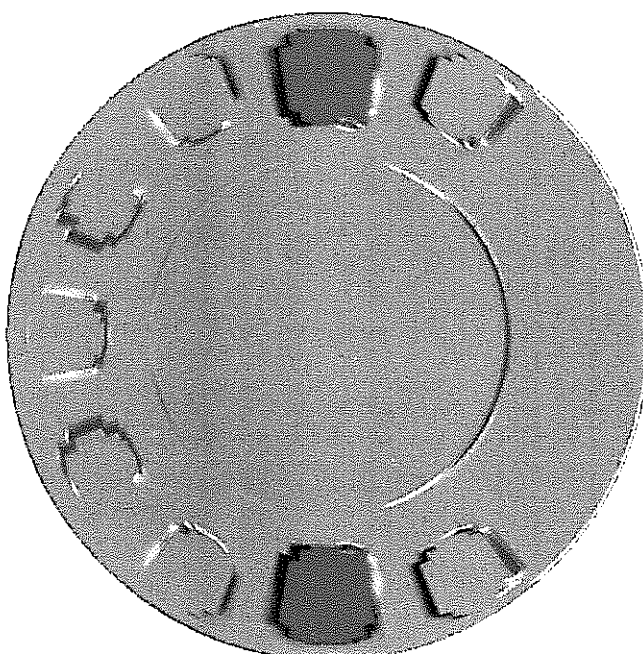
図 4. 14 (1/2) ディッププレート上面位置における軸方向流速成分 (W) の空間分布



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ボットギャップ閉止



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ボットギャップ閉止
+ C/T ギャップ閉止



細径ダミープラグ 3 本 (#1, #2, #3)
+ バッフルリング + 部分内筒 + ラビリンス
+ 炉内中継ボットギャップ閉止 + C/T 移動

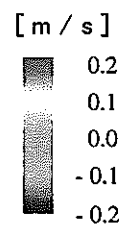


図 4. 14 (2/2) ディッププレート上面位置における軸方向流速成分 (W) の空間分布