

数値解析による自由液面からのガス巻込み評価手法 に関する研究

評価指針（第 1 次案）の提案 -

Study on Design Method for Gas Entrainment Prevention From a Liquid
Surface based on a Computational Fluid Dynamics Method
- 1st Proposal of the Design Guideline -

堺 公明 伊藤 啓 内堀 昭寛 木村 暢之
江連 俊樹 上出 英樹 大島 宏之

Takaaki SAKAI, Kei ITO, Akihiro UCHIBORI, Nobuyuki KIMURA
Toshiki EZURE, Hideki KAMIDE and Hiroyuki OSHIMA

次世代原子力システム研究開発部門
熱流動技術開発グループ

Thermal-Hydraulics Research Group
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to

Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

数値解析による自由液面からのガス巻込み評価手法に関する研究
- 評価指針（第1次案）の提案 -

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門
FBR 信頼性技術ユニット

堺 公明*、伊藤 啓、内堀 昭寛、木村 暢之+、江連 俊樹+、上出 英樹+、大島 宏之

(2006年8月25日 受理)

日本原子力研究開発機構は、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究の一環として、ナトリウム冷却高速炉の概念検討を進めている。実用化のためのプラントシステム概念は、経済性向上のために出力に比してコンパクトな炉容器を指向している。そのため、既存の概念と比較して炉容器内の流速が相対的に大きくなり、自由液面からのカバーガスの巻込みについてより精度の高い設計評価を行うことが重要となっている。カバーガスの巻込みは、炉心出力の変動、除熱性能劣化などの原因となり得るため、発生しないことを十分な余裕をもって示す必要がある。実機定格条件においてガス巻込みが発生しないことは、実規模に近い水試験(1/1.8縮尺部分モデル)によってほぼ確認されているが、大規模なナトリウム試験を実施するためには大きな投資が見込まれることから、数値解析によってガス巻込みを評価する手法の確立が望まれている。

そこで、大学、研究所、電力、メーカーの専門家で構成するワーキンググループを設置し、くぼみ渦によるガス巻込み現象について設計で参照すべき数値解析に基づく指針案の構築をおこなうこととし、平成14年から約4ヵ年実施した。本指針は、第1次案の提案としてワーキンググループの研究成果をまとめたものである。

大洗研究開発センター駐在：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+ 次世代原子力システム研究開発部門 FBR 安全・先進技術ユニット

* 出向職員

Study on Design Method for Gas Entrainment Prevention from a Liquid Surface
based on a Computational Fluid Dynamics Method
- 1st Proposal of the Design Guideline -

Takaaki SAKAI*, Kei ITO, Akihiro UCHIBORI, Nobuyuki KIMURA+, Toshiki EZURE+,
Hideki KAMIDE+ and Hiroyuki OHSHIMA

FBR Systems Reliability Research Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 25, 2006)

Japan Atomic Energy Agency has conducted a conceptual design study of a sodium-cooled fast reactor in a frame work of the FBR feasibility study. The plant system concept for a commercial step is intended to minimize a vessel diameter to achieve an economical competitiveness. Therefore, the coolant in the vessel has relatively higher velocity than conventional designs. Because of the high velocity, gas entrainment prevention from a liquid surface in the reactor vessel becomes one of important issues for the thermal-hydraulic design. Gas entrainment may cause the core power fluctuation or heat transfer reduction. Therefore, it is necessary to clarify the avoidance of the phenomena in the design conditions with sufficient allowance.

The prevention of gas entrainment phenomena was prospectively confirmed by a 1/1.8 scale model water experiment. The large scale sodium experiment, however, needs very high costs to validate the design. The design method by a utilization of a computational fluid dynamics (CFD) method is one of possible choices for the gas entrainment prevention design.

In this study, the gas entrainment from vortex dimples at the liquid surface was investigated by a working group that consists of members from Universities, Research institutes, Utilities and Manufacturers, in order to establish a design method for the gas entrainment prevention by a CFD method. The research work was commenced from 2002 and performed for four years. This report is the first proposal of the design guideline for the gas entrainment prevention using CFD methods, from the achievements of the working group activity.

Keywords: Gas Entrainment, Free Surface Vortex, Sodium-cooled Fast Reactor, CFD

+ FBR Safety and Innovative Technology Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

* Research Staff on Loan

目 次

免責条項	
ガス巻込み研究ワーキンググループ	
まえがき	1
1. 指針の目的	2
2. 適用対象および範囲	2
2.1. 流れ場	2
2.2. 構造物	2
3. くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき要因事象	2
4. 評価方法	2
4.1. 評価順序	2
4.2. 評価方法	3
記 号	5
付録「数値解析による自由液面からのガス巻込み評価指針」の解説	7
A1. 指針の目的	9
A1.1. 本指針の背景	9
A1.2. ガス巻込み評価手法の概要	10
A2. 適用対象および範囲	11
A3. くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき要因事象	13
A3.1. ガスコア深さの液深に達する伸長	13
A3.2. 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱	13
A3.3. ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等 によって生じるガスコアのちぎれ	14
A4. 評価方法	16
A4.1. 評価順序	16
A4.2. 評価方法	16
A5. 影響を考慮すべき事項	35
A5.1. 過渡現象	35
A5.2. 流れのスケール	38
A5.3. 乱れの影響	39
A5.4. 物性の影響	40

Contents

Exclusion Clause	
Gas Entrainment Research Working Group	
Preface	1
1. Purpose of Design Guideline	2
2. Applicable Scope of Design Guideline	2
2.1. Flow Field	2
2.2. Structural Objects	2
3. Patterns of Vortex Induced Gas Entrainment	2
4. Evaluation Method	2
4.1. Evaluation Procedure	2
4.2. Evaluation Method	3
Nomenclature	5
Appendix: Description of “Design Guideline for Gas Entrainment Prevention Using CFD Method”	7
A1. Purpose of Design Guideline	9
A1.1. Background	9
A1.2. Outline of Gas Entrainment Evaluation Method	10
A2. Applicable Scope of Design Guideline	11
A3. Patterns of Vortex Induced Gas Entrainment	13
A3.1. Extension of Gas Core to Liquid Depth	13
A3.2. Bubble Detachment from Gas Core Tip due to Velocity Gradient along Vortex Core	13
A3.3. Gas Core Breaks due to Lateral Flow near Gas Core, Large Scale Turbulence or Free Surface Instability	14
A4. Evaluation Method	16
A4.1. Evaluation Procedure	16
A4.2. Evaluation Method	16
A5. Other Factors for Vortex Induced Gas Entrainment	35
A5.1. Transient Behavior	35
A5.2. Scale Effect	38
A5.3. Influence of Turbulence	39
A5.4. Influence of Physical Properties in Fluid	40

数値解析による自由液面からのガス巻込み評価指針
(第1次案)

ガス巻込み評価指針 免責条項

この指針は、ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器上部プレナム内の自由液面で発生する可能性のあるガス巻込み現象を対象として、数値解析によるガス巻込み発生評価で必要とされる事柄を記載したもので、大学の学識経験者、公的機関研究者、メーカーおよび電力会社の技術者で構成された「ガス巻込み研究ワーキンググループ(以下、WGと略す)」の研究成果とWGメンバの知識と経験に基づくものである。この指針の目的は、ナトリウム冷却高速炉の円滑な設計・製作に資するため、数値解析によるガス巻込み発生評価法に関する基本的な考え方を示すことにある。WGは、この指針に記載されている内容の正確さと信頼性を保証するため、最大限の努力と注意を払っており、ここに含まれる内容について説明責任を持つ。しかしながら、この指針の使用に関連して、本WGが異議申立てや保証を行うものではない。それゆえ、この指針の適用によって生ずる損失やこの指針と矛盾する法規の違反に対し、本WGおよびWGメンバ所属機関は一切の責任を負わない。

ガス巻込み研究ワーキンググループ（平成 17 年度）

主査：功刀 資彰（京都大学）	(独)日本原子力研究開発機構 担当者
委員：江口 譲（(財)電力中央研究所）	大島 宏之(熱流動Gr)
委員：岡本 孝司（東京大学）	上出 英樹（機器開発Gr）
委員：賞雅 寛而（東京海洋大）	堺 公明（熱流動Gr）(事務局)
委員：田中 伸厚（茨城大学）	木村 暢之（機器開発Gr）
委員：辻 義之（名古屋大学）	内堀 昭寛（熱流動Gr）
委員：中村 秀夫（(独)日本原子力研究開発機構）	伊藤 啓（熱流動Gr）
委員：西村 元彦（川崎重工業株）	江連 俊樹（機器開発Gr）
委員：萩原 剛（株東芝）	山口 彰（嘱託、大阪大学）
委員：文字 秀明（筑波大学）	
委員：山本一彦（日本原子力発電株）	

まえがき

従来の軽水炉に比べてウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることができる高速増殖炉（FBR）は、核反応によって発生する中性子を減速せず、伝熱特性に優れた液体金属ナトリウムを冷却材として用いている。原子炉容器内には熱遮蔽や冷却材熱膨張分の体積吸収の観点から自由液面が存在し、不活性ガスであるアルゴンガスがその空間を満たしている。FBR の実用化に向けて経済性向上や高性能化のため、炉心の出力に比して原子炉容器のコンパクト化を進めれば、出力 / 流量比を変えない限り必然的に冷却材の流速は速くなり、その結果として自由液面からカバーガスを冷却材中に巻き込み易くなる。このガスの巻き込みは、炉心反応度の変化（出力の擾乱）、除熱性能・熱交換効率の劣化など、原子炉運転上様々な障害を引き起こす可能性を有している。このため、ガス巻き込みを防止する、あるいは巻き込まれても異常が発生しないように対応することが設計成立に不可欠な条件となる。後者の評価は不確実性が大きいこともあり、まずはガスを巻き込まない方策を施すことが求められる。

ガス巻き込みの形態は 1) 潜り込み、2) 碎波、3) くぼみ渦の 3 種類のタイプに分類されるが、1), 2) は上部プレナム内にディッププレートを設置するなど十分に設計対応が可能であるのに対して、3) は必ずしも設計で満たすべき普遍的条件が明確になっているわけではない。そこで日本原子力研究開発機構では、大学、研究所、電力、メーカーの専門家で構成するワーキンググループを設置し、くぼみ渦によるガス巻き込み現象の理解を深めるとともに、設計で参照すべき防止基準案の構築を平成 14 年から約 4 ヶ年実施した。

これまで電力実証炉研究等においては、スケールモデル水試験からスケール則を導出するとともに物性値の影響を勘案し実機のガス巻き込みを予測するという、いわば代表長さ・代表流速といった代表量で評価を行ってきたが、本研究は、数値解析技術・計算機能力の飛躍的向上を背景に、数値解析を利用した局所量評価でくぼみ渦によるガス巻き込みの発生を予測しようというところに特徴がある。約 4 ヶ年の研究において、最新の計測技術を用いてくぼみ渦の特性を実験的に把握するとともに、数値解析手法の適用性調査を行い、評価手順・手法の骨組みを構築した。本評価指針はこの第 1 期ワーキンググループ活動の集大成としてまとめたものである。今後さらなるデータベースの充実と、検証の積み重ねにより指針の高度化を図っていく予定である。

第 2 章では本指針の適用対象とその範囲を、第 3 章ではくぼみ渦によるガス巻き込み発生を評価するにあたって注目すべきポイントを、そして第 4 章にて評価手順と方法を示す。また、指針に添付する解説 A においては、評価手順と方法のより具体的な内容およびその根拠を端的に記載する。さらに別途発行予定の別冊の解説 B では、指針導出のベースとなった実験、数値解析、判定基準検討についてその具体的内容を詳細に示す予定である。

1. 指針の目的

本指針は、自由液面に形成されるガスコアをともなつたくぼみ渦からのガスの巻込み現象を対象とし、数値解析を用いたガス巻込み発生の有無の評価方法を示すものである。

2. 適用対象および範囲

2.1. 流れ場

- (1) 適用対象は、ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器上部プレナムに形成される自由液面を有する冷却材流れとする。
- (2) 液相は、液体ナトリウムとする。実験などで水を用いる場合は水も対象とする。
- (3) 自由液面で碎波や大きな波立ちが発生せず、堰等からの落差のある流れ込みの無い、液位変動の小さな静定した自由液面を対象とする。
- (4) 本指針は、複雑な流れ場におけるくぼみ渦によるガス巻込み現象を数値解析によって評価することを目標としており、液相内の数値解析精度の許容する範囲において一般的な自由液面を対象とすることが可能である。

2.2. 構造物

- (1) 流れ場の構造物は固定されており、流れとの連成による移動または変形等を生じないものとする。
- (2) 流れ場の構造物の表面粗度が十分小さく、流体力学的に滑らかな条件とする。

3. くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき要因事象

2.項に示す対象において、くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき発生要因事象は、以下の(1)から(3)とする。

- (1) ガスコア深さの液深（くぼみ渦の渦糸が到達しうる流体出口の没水深さ）に達する伸長
- (2) 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱
- (3) ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ

4. 評価方法

3.項(1)から(3)に示すガス巻込みの発生要因事象は、以下の 4.1～4.2 によって評価する。

4.1. 評価順序

以下の(1)～(3)の順で評価を行う。

- (1) 3次元非定常数値解析の実施
- (2) ガス巻込み判定パラメータの算定
- (3) 判定値との比較評価

4.2. 評価方法

(1) 3次元非定常数値解析の実施

推奨する数値解析手法

- (a) 解析モデル：液体側のみを考慮した单相流解析とする。
- (b) 対流項の空間離散精度：2次精度以上とする。
- (c) 時間項：非定常解析とする。タイムステップは、渦近傍における最大クーラン数が1程度のオーダー（陰解法の場合）となるように設定する。
- (d) 乱流モデル：乱流モデルを使用せずに解析を行う。乱流モデルを用いる場合は非RANS系のLES解析を行う。RANS系乱流モデルを用いる必要がある場合はRNG k-εモデルの使用が許容できる。

推奨するメッシュ解像度

- (a) 自由液面における支配的な渦を解像できるようなメッシュ解像度とする。
 - ・解析前に渦の半径が分からない場合、渦を発生させる物体（円柱等）の径から渦の半径を推測し、その値を元にメッシュ分割を決定する。ただし、吸込み管などの渦を引き伸ばす流れがある場合は、渦半径が急減するので注意を要する。
 - ・解像度を解析結果より反映可能な場合は、解析結果より得られた渦の半径に基づき、ガス巻き込み現象に対して支配的な渦発生領域のメッシュを作成する。
- (b) 境界模擬性に関しては、直交メッシュによる階段状の近似を避け、曲線からなる境界を適切に表現できる境界適合座標や非構造格子の使用が望ましい。
- (c) 吸い込み部については、渦を再現できる最低限のメッシュ分割数（例えば、ギャップ部の幅に対して少なくとも5～6メッシュなど）を設定する。

推奨する境界条件

- (a) 自由液面：変形は無視しフリースリップ壁面で模擬する。
- (b) 構造物表面：ノンスリップ条件とし、乱流モデルを用いる場合は、適当な壁面乱流条件（壁関数等）を付加する。
- (c) 流入部・流出部・吸い込み部：流速（流量）が明らかになっている部分には流速（流量）条件を、そうでない部分には圧力条件（またはそれに相当する条件）を与える。

(2) ガス巻き込み判定パラメータの算定

数値解析結果より、支配的な渦を抽出し、以下の無次元循環 Γ^* および無次元速度勾配 α^* を算定する。その際、現象の非定常なゆらぎに注意し、ゆらぎ時間に対して十分な時間長さの解析結果を対象とする。

無次元循環 Γ^* の算定

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma_\infty}{\nu} \quad (1)$$

ここで、 Γ_∞ は、 r の変化に対して循環一定の領域での値を指す。

無次元下降速度勾配 α^* の算定

$$\alpha^* = \frac{\alpha v}{gh} \quad (2)$$

ここで、 α は、自由液面での渦中心近傍における下降速度勾配である。

無次元ガスコア深さ L_{gc}/h およびガスコア深さ L_{gc} の算定

$$\frac{L_{gc}}{h} = K \cdot \alpha^* \cdot \Gamma^{*2} \quad (3)$$

K は、Burgers モデルによる理論値であり、 $K=4.389 \times 10^{-3}$ とする。

(3) 判定値との比較評価

くぼみ渦によるガス巻き込み現象を回避するためには、前項にて算定した判定パラメータについて、以下の から の評価項目をいずれも満足しなければならない。

ガスコア深さの液深に達する伸長の回避

無次元ガスコア深さ L_{gc}/h が 1 未満の条件によりガスコア深さが流出流路位置までの液深を超過することを回避できる。すなわち、Burgers モデルによる理論値を最確値として基準とし、試験結果の分散と同等の 3 倍の裕度を考慮するならば、(3)式より、次式が満足されなければならない。

$$\alpha^* \cdot \Gamma^{*2} < 76 \quad (4)$$

渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱の回避

無次元下降速度勾配 α^* について、次式を満足しなければならない。

$$\alpha^* < 10^{-7} \quad (5)$$

ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれの回避

(3)式より算定されるガスコア深さ L_{gc} について、次式を満足しなければならない。

$$L_{gc} < L_{gc,max} \quad (6)$$

ここで、最大ガスコア深さ $L_{gc,max}$ は、ユーザー設定とするが、推奨値は 0.2m とする。

以 上

記号

α :	下降速度勾配	[1/s]
α^* :	無次元下降速度勾配	[-]
Γ :	循環 ($2 \quad r \times v$)	[m ² /s]
Γ^* :	無次元循環 (/)	[-]
v :	旋回流速	[m/s]
π :	円周率	[-]
g :	重力加速度	[m/s ²]
h :	液深(くぼみ渦の渦糸が到達しうる流体出口の没水深さ)	[m]
K :	渦モデル定数	[-]
L_{gc} :	ガスコア深さ	[m]
$L_{gc,max}$:	限界ガスコア深さ	[m]
:	動粘性係数	[m ² /s]
v :	速度ベクトル	[m/s]

This is a blank page.

「数値解析による自由液面からのガス巻込み評価指針」の解説

(解説 A)

目 次

A1.	指針の目的-----	9
A1.1.	本指針の背景-----	9
A1.2.	ガス巻込み評価手法の概要-----	10
A2.	適用対象および範囲-----	11
A3.	くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき要因事象-----	13
A3.1.	ガスコア深さの液深に達する伸長-----	13
A3.2.	渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱-----	13
A3.3.	ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等 によって生じるガスコアのちぎれ-----	14
A4.	評価方法-----	16
A4.1.	評価順序-----	16
A4.2.	評価方法-----	16
A5.	影響を考慮すべき事項-----	35
A5.1.	過渡現象-----	35
A5.2.	流れのスケール-----	38
A5.3.	乱れの影響-----	39
A5.4.	物性の影響-----	40

This is a blank page.

A1. 指針の目的

A1.1. 本指針の背景

日本原子力研究開発機構（JAEA）にて実施している FBR サイクル実用化戦略調査研究において概念設計を進めているナトリウム冷却高速炉は、その経済性向上のために出力に比してコンパクトな炉容器を指向しているが、炉容器内の流速が相対的に大きくなるため、自由液面からカバーガスを巻込む可能性が指摘されている。カバーガスの巻込みは、炉心出力の擾乱、除熱性能劣化など原子炉運転上障害を引き起こす可能性があるため、その防止は設計成立上重要である。ガス巻込みの形態は 1) 潜り込み、2) 砕波、3) くぼみ渦の 3 種類のタイプに分類されるが、1), 2) は上部プレナム内にディッププレートを設置するなど十分に設計対応が可能であるのに対して、3) は必ずしも設計で満たすべき普遍的な防止条件が明確になっていない。そこで、大学、研究所、電力、メーカーの専門家で構成するワーキンググループを設置し、くぼみ渦によるガス巻込み現象の理解を深めるとともに、設計で参照すべき防止指針案の構築を、平成 14 年から約 4 ヶ年実施した。本指針は、この第 1 期ワーキンググループの研究成果をまとめたものである。昨今の数値解析技術および計算機の進歩を背景に、ガス巻き込み発生評価に数値解析による局所量評価を用いるところに特色がある。

A1.2. ガス巻込み評価方法の概要

本指針は、自由液面に形成されるガスコアをともなったくぼみ渦からのガスの巻込み現象を対象とし、数値解析を用いたガス巻込み発生の有無の評価方法を示すものである。図 A1.2-1 に示されるように、まず、対象とする流れ場の3次元非定常数値解析を実施し、流れ場の流速分布に関する解析結果を得る。その際、液面についてはフリースリップ条件とする。その解析結果から液面の支配的な渦を抽出し、ガス巻込み判定パラメータを算定する。判定パラメータを用いて、

- (1)ガスコア深さの液深に達する伸長の回避
- (2)渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱の回避
- (3)ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれの回避

について、判定条件との比較を実施し、ガス巻込みの発生回避を評価する。全ての条件を満たすことによって、ガス巻込みの回避が確認される。条件を満たさない場合は、設計変更を実施する。あるいは、解説 A5 の影響を考慮すべき事項を参照してそれらの影響を考慮することによって、工学的な見通しを得ることができる。さらに精度の高い評価を必要とする場合は、本指針によらず、より詳細な解析あるいは実験等の適切な方法によってガス巻込みの回避を評価することができる。

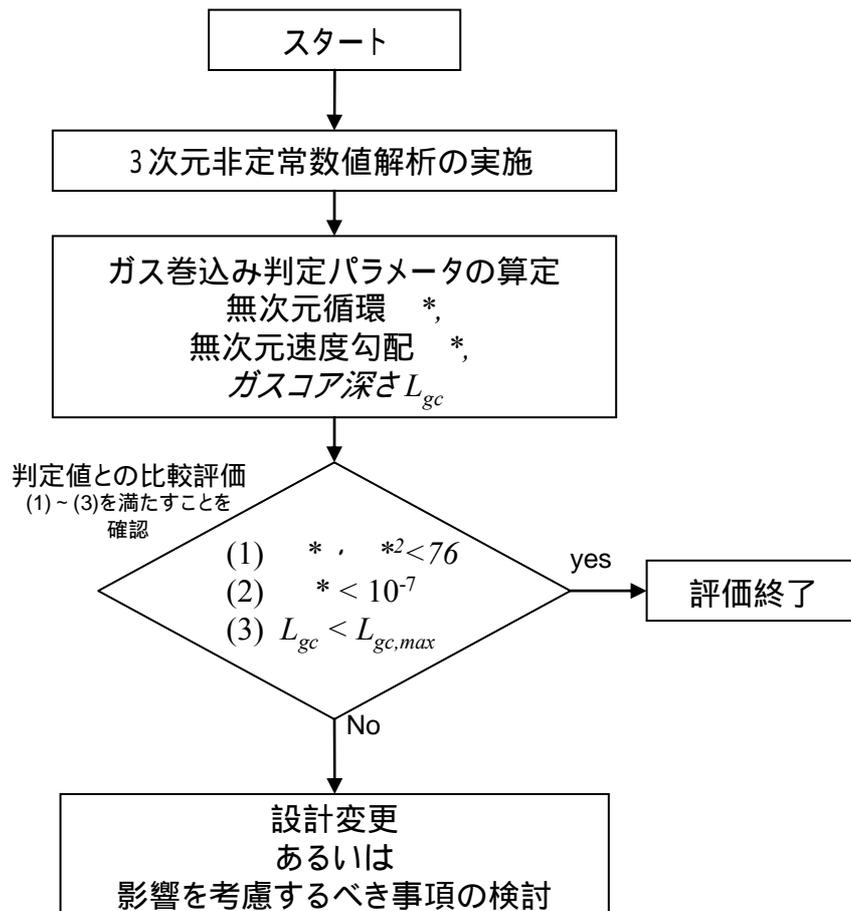


図 A1.2-1 くぼみ渦によるガス巻込み評価フロー

A2. 適用対象および範囲

本指針は、ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器上部プレナムに形成される自由液面でのガス巻き込みを対象としており、液相の流体は液体ナトリウムで気相の流体はアルゴンガスなどの不活性ガスとする。実験などでは、現象の観測性・実験での取り扱いやすさ・経済性の観点から液相の模擬流体として常温の水を、気相の流体として空気を用いる場合が多い。ガス巻き込みの発生原因としては 自由液面の局所的な液位差による高液位部から低液位部への潜り込み、自由液面で砕波や大きな波立ち、くぼみ渦がある。本指針は、堰などの局所的に液位差を発生させる構造物はないものとし、 の原因によるガス巻き込みは対象としない。また、 の原因でのガス巻き込みを排除するため、自由液面の流速が概ね 0.1m/s 未満の範囲としている。これは自由液面の流速が自由液面で発生する波の位相速度よりも遅いことを確保するためであり、この条件が満たされれば、流れは常流(subcritical flow)となり大きな波成ちは発生しない。なお、自由液面で発生する波の位相速度は以下の式で評価され、波長をパラメータとした波の位相速度は図 A2-1 のようになる。

$$c = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}\right) \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad \text{----- (A2-1)}$$

ここで、 c : 位相速度、 g : 重力加速度、 λ : 波長、 σ : 表面張力係数、 ρ : 流体密度、 h : 液深を表す。

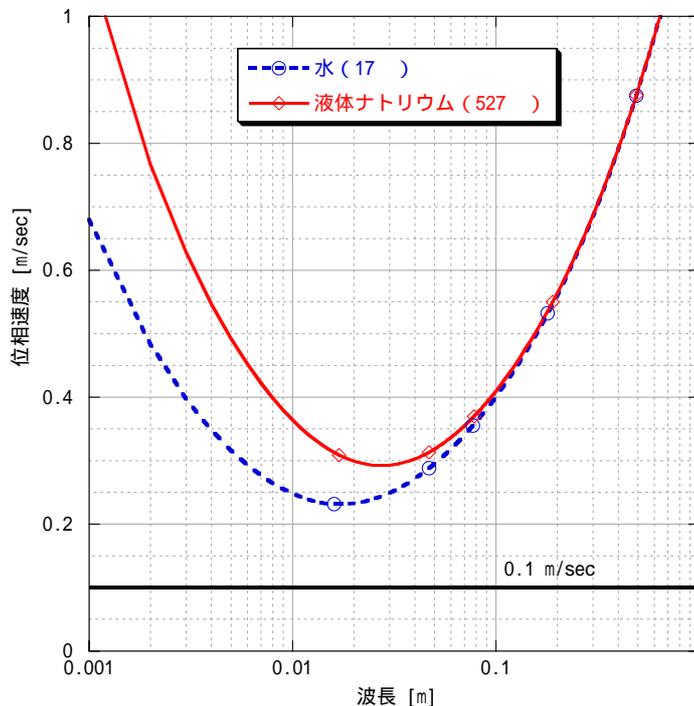


図 A2-1 波長をパラメータとした波の位相速度 (液深 h : 1m ~ 10m で計算した場合)

また、自由液面上の気相の流速が大きい場合は、自由液面との速度差による剪断応力が発生し自由液面の波成ちの原因となるので、本指針では、自由液面上の気相の流速が十分に小さい場合

に限定する。

流れ場の境界を構成する構造物の位置は固定されており、流れの圧力によって構造物が移動・振動または変形しないものとする。さらに、円柱状の構造物では表面粗度の大きさによって剥離点の位置が変化する場合があるので、本指針では、構造物の表面は流体に対して滑らかな条件とする。具体的には、円柱構造物の場合は概ね $d/D < 5 \times 10^{-4}$ (ここで、 d は粗度高さ、 D は円柱外径) を目安とする。(A2-1,2)

以上の条件が満たされる場合は、本指針はナトリウム冷却高速炉以外の一般的な自由液面流れにも適用することができ、各条件でのくぼみ渦によるガス巻き込み現象の数値解析的評価法として利用することが可能である。

A2. 参考文献

- (A2-1) Achenbach, E. and Heinecke, E., "On vortex shedding from smooth and rough cylinders in range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 ", J. Fluid Mech., Vol. 109, pp.239-251, 1981.
- (A2-2) 安達 勤ら、“高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ(表面粗さの影響)”, 日本機械学会論文集(B編) 55巻 511号(1989-3), No.88-0600A, pp.685-692.

A3. くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき発生要因

本指針では、くぼみ渦によるガス巻込み現象として評価すべき発生要因事象として、以下の A3.1 から A3.3 を考慮する。

A3.1. ガスコア深さの液深に達する伸長

A3.2. 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱

A3.3. ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ

なお、本解説書では、本指針で考慮していないが、影響を考慮すべき事項について、A5 項にて解説する。

以下、A3.1.から A3.3.の各現象の測定例を示す。

A3.1. ガスコア深さの液深に達する伸長

自由液面の旋回渦は、渦中心に液面のくぼみを形成する。指針ではこのくぼみをガスコアと呼び、その液面に垂直方向の長さを「ガスコア深さ」と呼ぶ。図 A3.1-1 および 2 に示すように、ガスコア深さが配管等の吸い込み口に達した場合、出口流に連続的に大量の気相の連行を生じることから、ガス巻込みを防止する観点から第 1 に回避しなければならない。



図 A3.1-1 出口配管位置に達するガスコア深さの伸長例 1 (Okamoto^(A3.1-1))

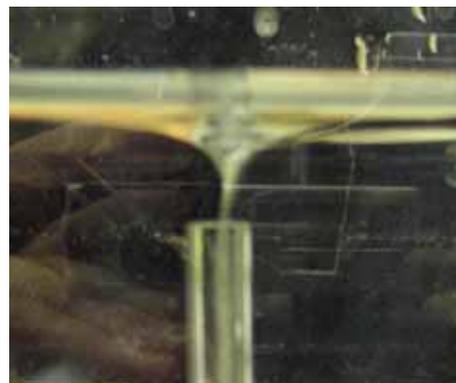


図 A3.1-2 出口配管位置に達するガスコア深さの伸長例 2 (辻^(A3.1-2))

A3.2. 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱

くぼみ渦に形成されるガスコアは、そのガスコア深さが液深に到達しない条件においても、渦糸方向の速度勾配が大きい場合、ガスコア先端から垂直方向に気泡の離脱を生じる。図 A3.2-1 に

気泡離脱に関する測定例を示す。この気泡の離脱は定常的に発生し、離脱気泡は流れに連行されることから、ガス巻き込みを防止する観点から回避しなければならない。

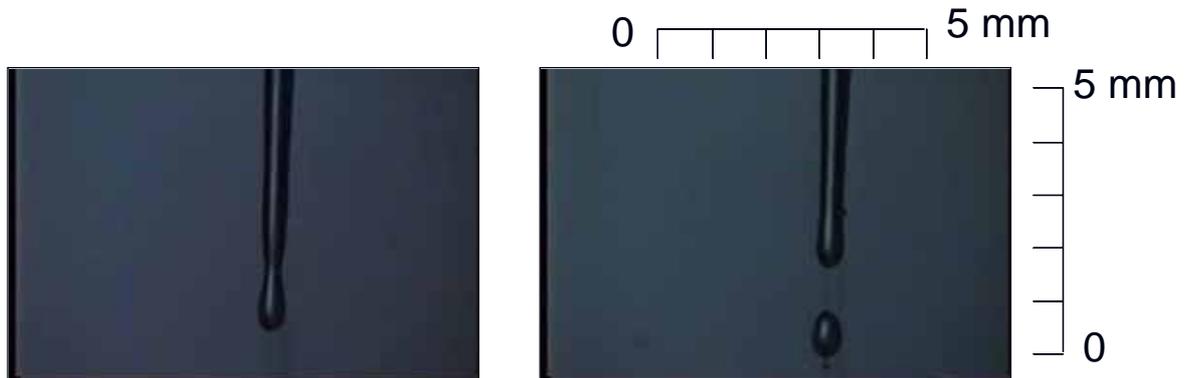


図 A3.2-1 ガスコア先端から垂直方向への気泡離脱例 (Monji^(A3.2-1))

A3.3. ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ

液位が比較的深く、垂直方向に急峻な速度勾配が生じない体系においても、安定な渦が発生する場合にはガスコアは長く成長し、渦の移動等の影響によりガスコアがちぎれて気泡を生じる場合がある。図 A3.3-1 に流れのよどみに生じるくぼみ渦の可視化例を示す。本現象による気泡発生頻度は比較的小さいと考えられるが、ガス巻き込みを厳密に防止する場合は、発生を回避する必要がある。

このようなガスコアのちぎれの要因として、ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、ガスコア深さの急激な変動、ガスコアの気液界面の不安定性等が推定されるが、物理的なメカニズムの特定には至っていない。しかしながら、いずれの要因であっても、ガスコアの一定長さ以上の伸長が原因となることは自明である。よって、ガスコア深さが液深に到達しない場合においても、一定以上の長さ（最大ガスコア深さ $L_{gc,max}$ ）に達する事象は、ガス巻き込みを防止する観点から回避しなければならない。（後述するが、数値解析結果に基づくガスコア深さ予測は、保守性を有することから、最大ガスコア深さ $L_{gc,max}$ として、0.2m を推奨する。しかしながら、根拠データが十分に取得できなかったため、最大ガスコア深さはユーザー設定とした。）

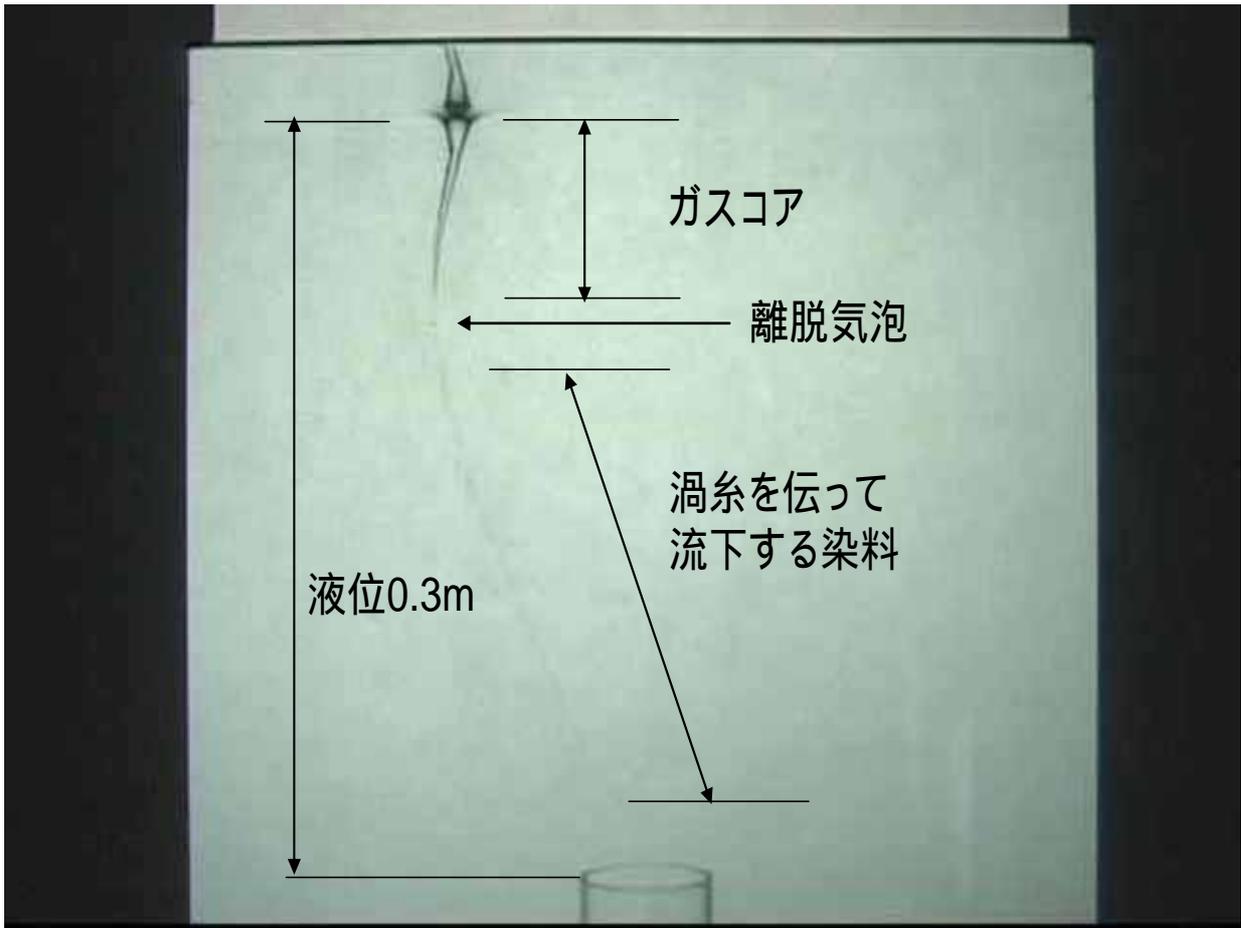


図 A3.3-1 ガスコア近傍の横流れ等による気泡離脱例 (江連^(A3.3-1))

A3.参考文献

- (A3.1-1) K. Okamoto, K. Takeyama and M. Iida, "Dynamic PIV measurement for the transient behavior of a free-surface vortex", NTHAS4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp186.
- (A3.1-2) 辻義之, 松家由起, 木村暢之, 上出英樹, 「ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込みに関する研究 ガス巻き込み渦に与える界面ゆらぎの効果 - 」, 日本原子力学会 2005 年秋の大会, G52(2005)
- (A3.2-1) H. Monji, T. Akimoto, D. Miwa, H. Kamide, "Unsteady behavior of gas entraining vortex on free surface in cylindrical vessel", NTHAS4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp190.
- (A3.3-1) 江連俊樹, 木村暢之, 小林順, 上出英樹, 「自由液面でのガス巻き込みに関する実験研究 - ガスコア深さと循環の相関 - 」, 日本原子力学会 2006 年春の年会, L25(2006).

A4. 評価方法

A4.1. 評価順序

本指針では、様々な体系での種々の流動条件におけるガス巻込みをより簡便に設計評価する観点から、数値解析に基づく評価方法を導入しており、以下の(1)～(3)のステップで評価を行う。

- (1) 3次元非定常数値解析の実施
- (2) ガス巻込み判定パラメータの算定
- (3) 判定値との比較評価

特に、数値解析を導入することによって、従来困難であった流れ場の局所条件によるパラメータを用いた判定が可能となる。しかしながら、数値解析はモデルに依存して解析精度が変化することから、ワーキンググループでは、種々の解析方法について比較評価を実施することによって、それらの影響を評価した。詳細については、別途発行する解説B編を参照のこと。

また、くぼみ渦からのガス巻込みの発生を評価すべき現象事象は、実験によって解明されたA3項の3つを設定した。「ガスコア深さの液深に達する伸長」については、Burgersのいわゆる伸長渦モデル^(A4.1-1)によって、ガスコア深さを理論的に評価した。また、「渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱」については、数値解析結果の局所量から求めた無次元数によって、実験結果の整理マップを作成することによって、判定条件を設定した。「ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ」については、ガスコア深さ L_{gc} を判定パラメータとするが、現状十分な根拠データが蓄積されていないと判断し、判定値となる最大ガスコア深さ $L_{gc,max}$ は推奨値とともに、ユーザー設定を可能とした。

各評価ステップの方法、背景、設定根拠等についてA4.2に示す。

A4.2. 評価方法

(1) 3次元非定常数値解析の実施

高速炉上部プレナム模擬流動実験において観察されるくぼみ渦は、成長・減衰、トラベリングを伴うため非定常性が強く、また、構造物を過ぎる流れや構造物周りの隙間流れなど複雑な流れ場によって支配され複雑な3次元運動を行う。このため、くぼみ渦によるガス巻込み現象の評価には、3次元非定常数値解析を適用する。数値解析の予測精度は、使用する物理モデルやパラメータ、支配方程式の離散化手法、解析メッシュなどに大きく影響を受けることから、ガス巻込み発生評価には、評価に必要な物理量を要求される精度で再現できる手法を適用する必要がある。ここでは、指針4.2(1)項にて推奨した数値解析手法、メッシュ解像度および境界条件の設定根拠を示す。

推奨する数値解析手法

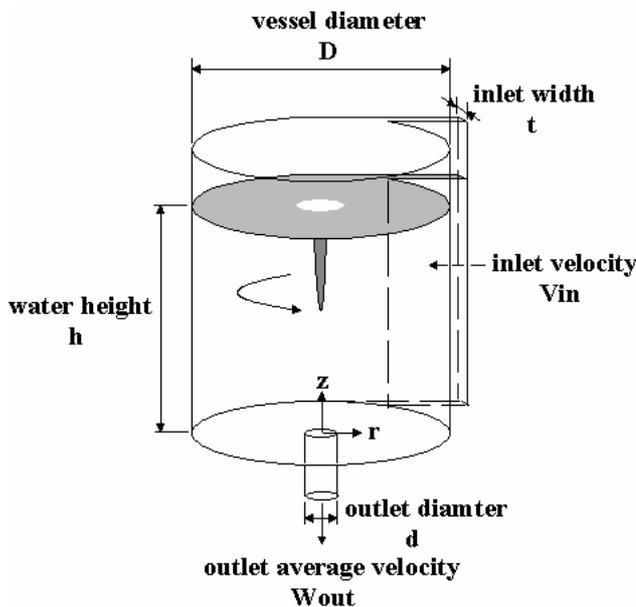
(a) 自由液面の取り扱い

ガス巻込み現象は気液界面が変形することで気体が液体中に巻き込まれる現象であり、

現象を完全に再現するためには気液界面挙動を詳細に解析する必要がある。しかし、界面変形モデルを用いた解析は概して計算負荷が大きく、大規模体系における評価解析においては液面モデルを用いない解析を行うことが望ましい。そのため、図 A4.2-1 に示すような守屋^(A4.2-1)による円筒容器内くぼみ渦試験体系を対象とした解析を実施し、界面変形モデルの有無の比較を行った。その結果、図 A4.2-2 に示すように、比較的粗いメッシュを用いた解析では気液界面変形モデルの有無による解析結果の渦流速分布の差異は小さく、そのため、流速分布から計算される、循環・下降流速勾配等のガス巻き込み評価パラメータも両者でほぼ等しくなることが明らかになった。原子炉内のガス巻き込み評価にあたっては、大規模体系を比較的粗いメッシュで解析することになるため、本指針においては、気体側の流動および自由液面の変形を無視し、流体側のみを考慮した単相流解析を推奨する。

(b)対流項の空間離散化精度

渦はその中心近傍において大きな流速勾配を有するため、数値解析において不適切な



離散化手法を用いると渦中心近傍部に過大な数値粘性が発生し、流速分布を精度良く再現することができない。図 A4.2-3 に対流項離散化精度の比較図を示す。2次精度風上差分を用いた結果では渦中心近傍で周方向流速が大きく増大しているが、1次精度風上差分の結果では周方向流速の増大はわずかである。本指針においては、1次精度離散化を用いることによる過度の数値粘性の付加を抑制するため、2次精度以上の高次離散化の使用を推奨する。

図 A4.2-1 円筒容器内くぼみ渦試験体

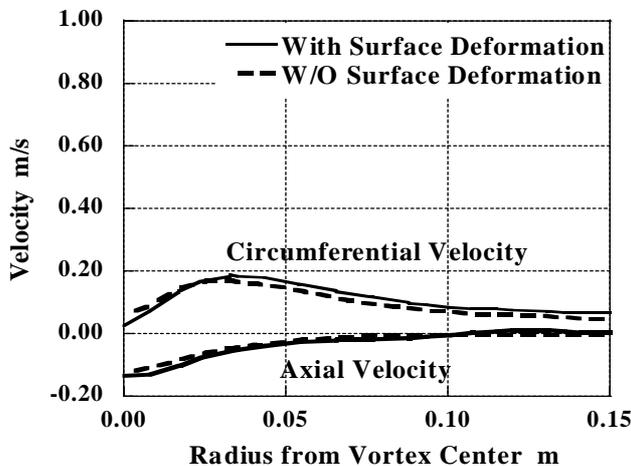


図 A4.2-2 気液界面変形モデル有無の比較 (円筒容器体系)

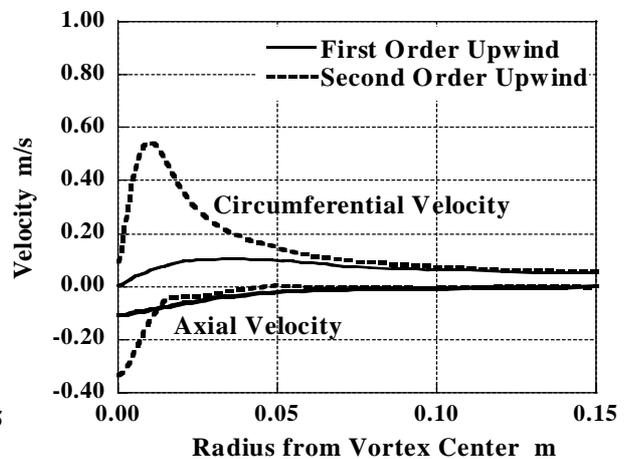


図 A4.2-3 対流項離散化精度の比較 (円筒容器体系)

(c)時間ステップ幅

渦の非定常挙動を精度良く解析するためには、1 タイムステップあたりの渦の移動量が陰解法においてもメッシュ幅を大きく超えないことが望ましいことから、渦中心近傍の最大クーラン数を基準として、1 程度のオーダーとなるようにタイムステップを設定することを推奨する。

(d)乱流モデル

高速炉上部プレナム内の流れ場はレイノルズ数が高く乱流状態にある。非定常挙動を精度よく解析するためには乱流モデルを用いない方法が良いが、実機のような大きな体系においては、計算が安定しない、あるいは膨大な計算量となってしまう可能性がある。大規模体系における現実的な解析には、乱流モデルの使用は必然である。

乱流モデルとしては、時間平均系の RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルおよび局所空間平均系の LES (Large Eddy Simulation) モデルの使用が考えられる。図 A4.2-4 に後流渦体系における、乱流モデルを用いない解析および RANS モデルを用いた解析における流速の時間変動挙動を示す。用いた乱流モデルは、RANS モデルの中でも一般的に使用頻度が高く、比較的 low コストで高精度の解析結果が得られる $k-\varepsilon$ モデルであり、その中でも最も一般的な標準 $k-\varepsilon$ モデル、および渦粘性を相対的に低めに評価する傾向のある RNG (Renormalization Group) $k-\varepsilon$ モデルである。乱流モデルを用いない場合、流速は比較的ランダムに変動し、実験結果と近い傾向を示した。乱流モデルを用いた場合、RNG $k-\varepsilon$ モデル解析では、乱流モデルを用いない解析と比較して、細かい流速変動は抑えられているが、同様の非周期的挙動を示したが、標準 $k-\varepsilon$ モデル解析では過度の渦粘性により非周期的挙動が抑制され、周期的挙動となった。

図 A4.2-5 に LES モデルを用いた解析の結果を示す。LES 解析は、乱流モデルを用いない解析と同様に、非周期的な流速変動を再現しており、正しい渦挙動を与えていると考えられる。ただし、LES モデルを用いる場合、RANS モデルに比べて相対的に詳細なメッシュを用いて解析を行う必要があり、粗いメッシュによる解析ではガス巻き込み発生を過小評価する可能性があることが明らかになっている。

以上より、本指針では、まずは乱流モデルを用いない解析を行うことを推奨するが、乱流モデルを使用する場合は LES モデルを推奨する。RANS モデルを用いる場合は、RNG $k-\varepsilon$ モデルの使用が許容できる。

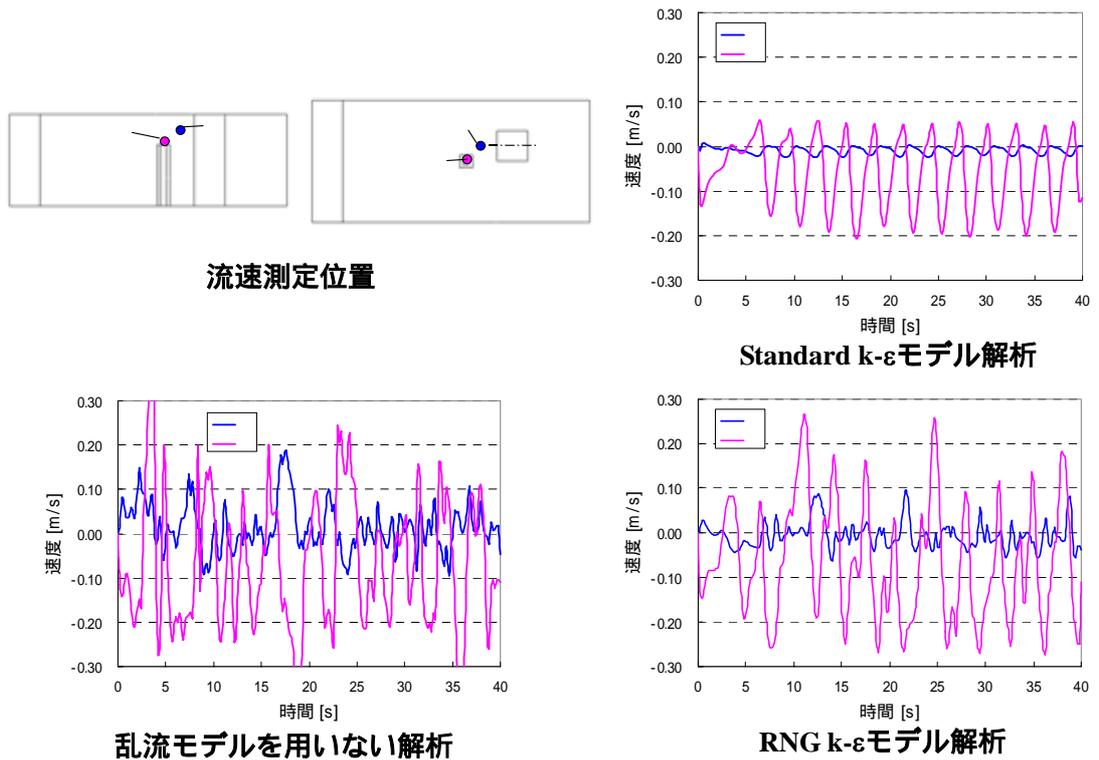


図 A4.2-4 RANS 系乱流モデルを使用した解析結果(後流渦体系)

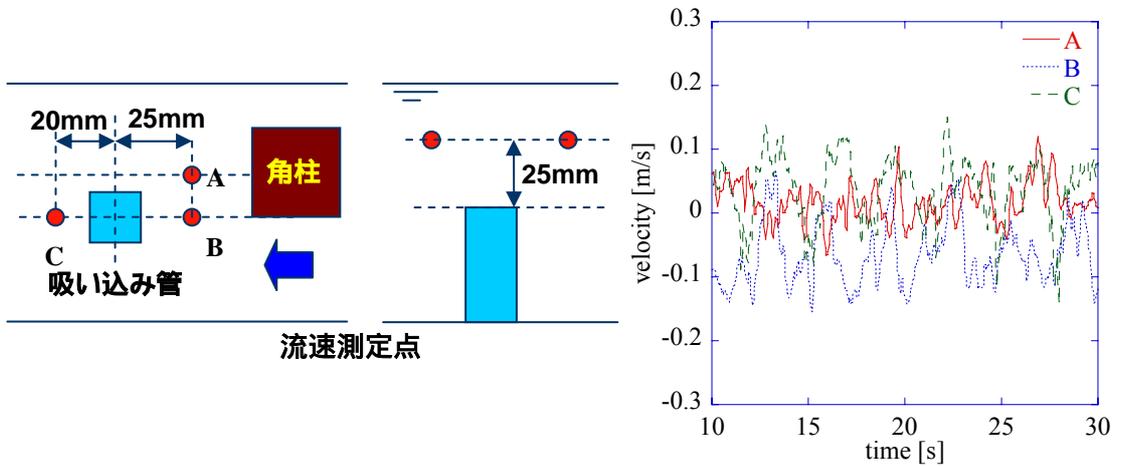


図 A4.2-5 LES 解析結果(後流渦体系)

メッシュ生成の方針

(a) 渦を解像できるメッシュ解像度

くぼみ渦によるガス巻込みを評価するためには、ガス巻込みに関して支配的な渦を解像する必要がある。図 A4.2-6 に 3 種類のメッシュを用いた場合の円筒容器内くぼみ渦の解析結果を示す。Case1、Case2、Case3 の順に渦発生位置のメッシュ解像度が高くなるが、それに伴って、渦中心近傍の解析精度が大幅に向上しており、くぼみ渦の解析精度はメッシュ解像度に依存することが分かる。但し、渦中心から 0.05m 以上離れた

位置では3種類の解析結果および試験結果は一致しており、渦中心近傍を除けば、ある程度粗いメッシュでも渦の特徴を捉えることが可能である。従って、渦中心から離れた位置の値を使って求まる物理量(循環、下降速度勾配)に関しては、比較的粗いメッシュを用いて解析を行っても、精度良く評価することが可能である。

図 A4.2-7 に後流渦体系における解析結果を用いた、ガス巻き込み評価パラメータの抽出結果を示す。解析は、比較的粗いメッシュ(渦半径 10mm 程度に対し、メッシュ幅 5mm : ただし、渦半径は第2不変量分布に基づき決定)を用いて実施し、Burgers 渦モデルに基づいて評価パラメータを抽出したが、循環、ガスコア深さ共に解析結果と試験結果は同程度の値となっており、比較的粗いメッシュを用いた解析結果からでも、ガス巻き込み評価パラメータを精度良く抽出できることが明らかになった。

以上より、本指針においては、ガス巻き込み判定に用いる数値解析を実施するためには、渦外周部の挙動を再現できる程度の解像度を持つメッシュを用いることを推奨する。

渦半径の決定法に関しては、ガス巻き込み評価用解析の前に予備解析を実施することが可能であれば、予備解析結果から渦半径を決定し、そのサイズに対応したメッシュを作成する。この場合、渦中心周りの第2不変量分布から渦半径を計算する。予備解析の実施が不可能な場合、体系内の渦発生機構(流れ場中の構造物等)のサイズを基に発生する渦の半径を推測する。ただし、吸込み(下降速度)的作用により渦が引き伸ばされる場合、引き伸ばしに伴って渦半径が減少するため、強い吸込み等が存在する流れ場においては、渦の伸張による効果を考慮した上で適当と考えられるサイズのメッシュを作成する必要がある。

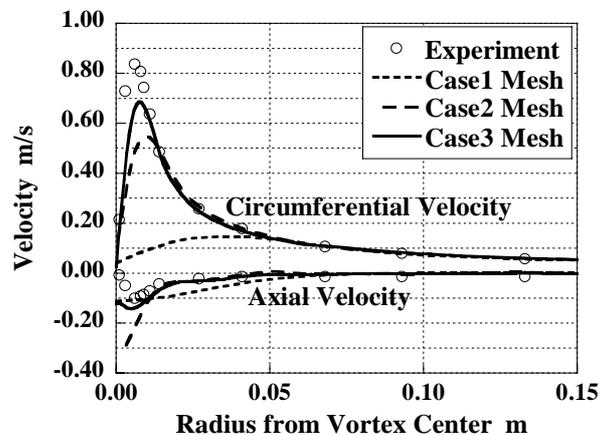
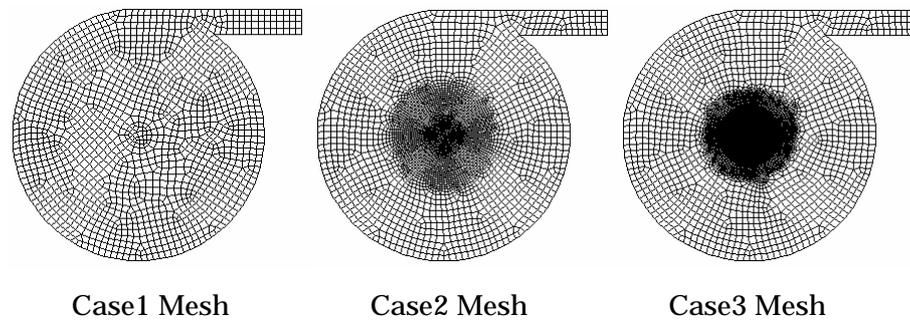


図 A4.2-6 メッシュ解像度の比較(円筒容器体系)

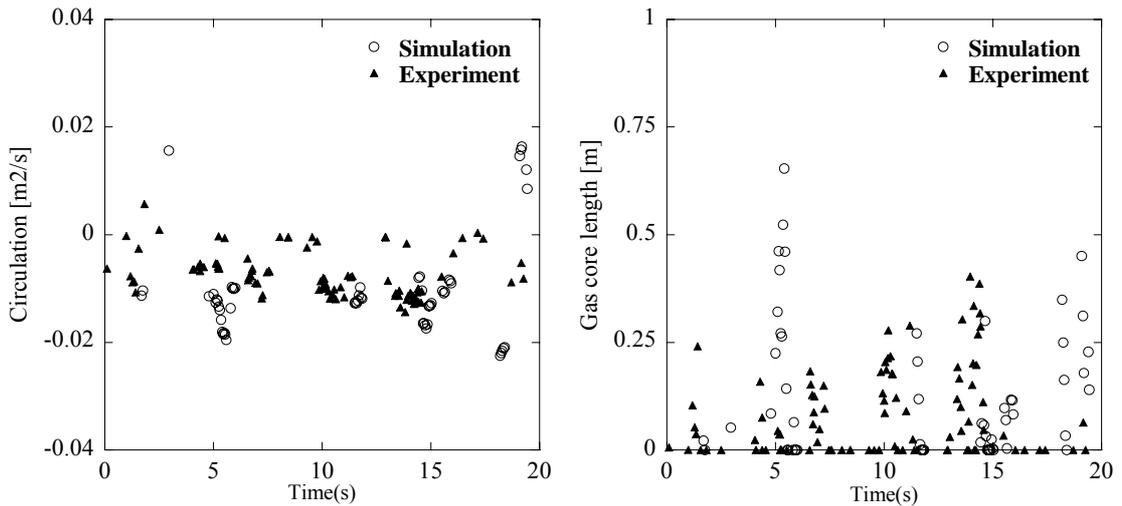


図 A4.2-7 ガス巻き込み評価パラメータの抽出結果(後流渦体系)

(b)境界模擬性

複雑体系内に発生するくぼみ渦の挙動は、体系内構造物の位置や形状によって大きな影響を受ける。特に、曲線状の構造物表面を通る流れによって渦の循環が形成されるような体系の場合、構造物の表面形状を正しく模擬せず直交メッシュを用いて階段状の近似を行うと、表面上の凹凸によって循環の形成が著しく阻害され、くぼみ渦の挙動が正しく解析できない可能性がある。従って、本指針では、正しい境界形状を与える解析メッシュを用いて解析を実施するために、境界適合座標や非構造格子を用いることを推奨する。

推奨する境界条件

(a)自由液面

の(a)で述べたように、自由液面の变形は無視するため、液面变形モデルは用いない。初期静定液面位置においてフリースリップ壁面を設定して液面を模擬し、数値解析を実施することを推奨する。

(b)構造物表面

構造物後流に発生する渦は、構造物表面での流れのせん断によって形成されるため、渦の放出を計算するためには構造物表面におけるせん断を模擬する必要がある。従って、構造物表面においては、ノンスリップ条件を用いることを推奨する。

乱流モデルを用いる場合、構造物表面での流れのせん断を精度良く模擬するため、構造物表面上の境界条件として、それぞれのモデルに適した壁面乱流条件(壁関数等)を用いることを推奨する。

(c)流入部・流出部・吸込み部

流入部における流速分布の存在は、流れ場の形成に影響を与え、ガス巻き込み挙動にも影響するため、流入部の流速分布が試験的に計測されている場合、計測された流速分布に基づいた流速条件を与えることを推奨する。

流出部の流速分布も流入部と同様に流れ場の形成に影響を与えるため、流速分布が計測されている場合、計測された流速分布に基づいた流速条件を与えることを推奨する。

吸込み部に関しては、流速分布が計測されており、流速の非定常性が小さい場合、計測結果に基づく流速条件を与えることを推奨する。液深が小さい体系など、渦が吸込み部まで到達する場合は、吸込み部の流速は渦の移動や成長・減衰に伴って変動するため、圧力条件もしくは自由流出条件等を用いることを推奨する。

ただし、全ての境界に流速条件を与えて解析を実施した場合、解が発散する可能性が高いため、適当に圧力条件もしくは自由流出条件等を付加する境界を定めることを推奨する。

(2) ガス巻き込み判定パラメータの算定

ガス巻き込みの発生を回避するための判定パラメータは、くぼみ渦からのガス巻き込みの発生を評価すべき現象事象のそれぞれについて、以下のパラメータを設定した。

ガスコア深さの液深に達する伸長： $\alpha^* \Gamma^{*2}$ 無次元速度勾配 α^* および 無次元循環 Γ^*
 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱：無次元速度勾配 α^*
 ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ： L_{gc}

これらの判定パラメータは、いずれも Burgers の伸長渦モデル^(A4.1-1)に基づき導出される。また、一般的な流れ場から渦を抽出し Burgers の伸長渦のパラメータを決定する方法の中で第 2 不変量を利用することから、以下では Burgers の伸長渦や第 2 不変量などについて説明する。

Burgers の伸長渦モデル

まず、Burgers モデルは、界面の旋回渦に関する図 A4.2-8 に示すような円筒座標系の速度場について以下を仮定する。

仮定 1：全ての物理量は周方向 θ に変化しない。すなわち、 $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$

仮定 2：鉛直方向流速成分 u_z は高さ z のみの関数であり、 z に比例して増加する。

すなわち、 $u_z = \alpha \cdot z$ α ：正定数（下降流速勾配）

仮定 3：中心軸での渦度は有限の値 ω_0

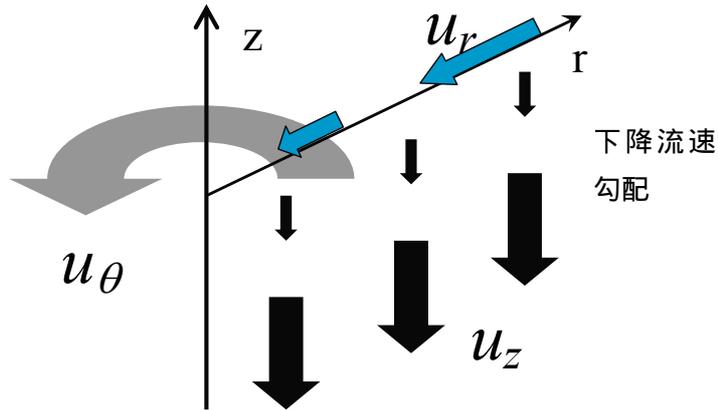


図 4.2-8 界面の旋回渦に関する速度

以上の仮定より、非圧縮性流体運動の基礎方程式である質量保存則と運動量保存則 (Navier-Stokes 方程式) から以下が導かれる。

$$u_r = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot r \text{ ----- (A4.2-1)}$$

$$u_\theta = \frac{\Gamma_\infty}{2\pi r} \left\{ 1 - \exp\left(-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \right\} \text{ ----- (A4.2-2)}$$

$$u_z = \alpha \cdot z \text{ ----- (A4.2-3)}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot \exp\left\{-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\} \text{ ----- (A4.2-4)}$$

$$\Gamma_\infty = \pi\omega_0 \cdot r_0^2 \text{ ----- (A4.2-5)}$$

$$r_0 = 2\sqrt{\nu/\alpha} \text{ ----- (A4.2-6)}$$

いま、代表流速を $u_0 = \Gamma_\infty / 2\pi r_0$ で定義し、無次元半径 $R=r/r_0$ を用いて旋回流速 u_θ を無次元化すると以下が得られる。

$$u_\theta / u_0 = \frac{1}{R} \left\{ 1 - \exp(-R^2) \right\} \text{ ----- (A4.2-7)}$$

一方、Burgers 渦の流速と圧力が満たすべき定常 Navier-Stokes 方程式 (r 方向・ z 方向) は以下のように記述できる。

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{u_\theta^2}{r} \quad \text{----- (A4.2-8)}$$

$$u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad \text{----- (A4.2-9)}$$

対流項は無視できるほど小さいものと仮定し、無次元座標 $Z=z/r_0$ を用いると、これらの式は以下のように無次元化される。

$$\frac{\partial P}{\partial R} = \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2 \quad \text{----- (A4.2-10)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\frac{gr_0}{u_0^2} \equiv -\frac{1}{Fr^2} \quad \text{----- (A4.2-11)}$$

ここで、無次元圧力 P およびフルード数 Fr は以下で定義されるものである。

$$P = \frac{p}{\rho u_0^2} = \frac{p}{\rho(\Gamma_\infty / 2\pi r_0)^2} \quad \text{----- (A4.2-12)}$$

$$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{gr_0}} \quad \text{----- (A4.2-13)}$$

式(A4.2-10)を R 方向に積分すると、 $f(Z)$ を積分定数として以下が得られる。

$$\begin{aligned} P(R, Z) &= \int_0^R \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2 dR + f(Z) \\ &= \int_0^{R^2} \frac{1}{2t^2} \{1 - \exp(-t)\}^2 dt + f(Z) \\ &= \left[-\frac{\{1 - \exp(-t)\}^2}{2t} \right]_0^{R^2} + \int_0^{R^2} \frac{\exp(-t) \{1 - \exp(-t)\}}{t} dt + f(Z) \\ &= -\frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} + [Ei(-t) - Ei(-2t)]_0^{R^2} + f(Z) \end{aligned} \quad \text{----- (A4.2-14)}$$

ここで、 $Ei(-t)$ は積分指数関数と呼ばれるもので、初等関数では表現できない。 γ をオイラーの定数 ($\gamma=0.57721\dots$)とすると、 $Ei(-t)$ などは具体的には以下で定義される。

$$\begin{aligned} Ei(-t) &= \int_\infty^t \frac{\exp(-t)}{t} dt = \log t + \gamma - t + \frac{t^2}{2 \times 2!} - \dots + \dots + \frac{(-t)^n}{n \times n!} + \dots \\ Ei(-2t) &= \int_\infty^{2t} \frac{\exp(-t)}{t} dt = \log 2t + \gamma - 2t + \frac{(2t)^2}{2 \times 2!} - \dots + \dots + \frac{(-2t)^n}{n \times n!} + \dots \end{aligned} \quad \text{--- (A4.2-15)}$$

式(A4.2-14)の積分定数 $f(Z)$ は Z 方向の式(A4.2-11)を考慮して定めることができるので、無次元圧力は以下のように求められる。

$$P(R, Z) = -\frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} + [Ei(-t) - Ei(-2t)]_0^{R^2} - \frac{1}{Fr^2} Z \quad \text{----- (A4.2-16)}$$

自由液面形状の導出

いま、自由液面の形状を無次元で $Z=H(R)$ で表すものとする、自由液面では $P(R, Z)=P_a$ (一定: 無次元) であるので、これらの関係を式 (A4.2-16) に代入すると以下が満足される。

$$H(R) = -Fr^2 P_a - Fr^2 \frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} + Fr^2 [Ei(-t) - Ei(-2t)]_0^{R^2} \quad \text{----- (A4.2-17)}$$

無次元の自由液面形状 $Z=H(R)$ は r_0 で無次元化されているので、有次元のくぼみ深さ L_{gc} は以下で与えられる。

$$L = r_0 \{H(\infty) - H(0)\} = r_0 Fr^2 \log 2 = \frac{\log 2}{g} \left(\frac{\Gamma}{2\pi r_0} \right)^2 = \frac{\log 2 \cdot \alpha \Gamma_\infty^2}{4g\nu(2\pi)^2} \quad \text{----- (A4.2-18)}$$

なお、指針本文では、対数が自然対数であることを明示するため、 \log の代わりに \ln を用いている。

上述の導出では表面張力を考慮していないが、表面張力がある場合は液面の圧力は表面張力係数 σ と曲率 κ の積の分だけ減圧または加圧される。つまり、

$$p(r, z) = p_a - \sigma \kappa = p_a - \sigma \left(\frac{h'}{r\{1 + (h')^2\}^{1/2}} + \frac{h''}{\{1 + (h')^2\}^{3/2}} \right) \quad \text{----- (A4.2-19)}$$

ここで、 $z=h(r)$ は有次元での液面形状を表し、 h' は r に関する $h(r)$ の微分を表すものとする。式 (A4.2-19) を ρu_0^2 で除して無次元化し、 $h(r)/r_0=H(R)$, $r/r_0=R$ などの関係を用いると以下が得られる。

$$P(R, Z) = P_a - \frac{1}{We^2} \left(\frac{H'}{R\{1 + (H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1 + (H')^2\}^{3/2}} \right) \quad \text{----- (A4.2-20)}$$

ここで、 H' は R に関する $H(R)$ の微分を表すものとし、ウエーバー数 We は以下で定義される。

$$We = \sqrt{\frac{r_0 \rho u_0^2}{\sigma}} \quad \text{----- (A4.2-21)}$$

いま、無次元の自由液面形状を $Z=H(R)$ で表すものとする、自由液面の圧力 $P(R, Z)$ は式 (A4.2-20) で与えられるので、これらの関係を (A4.2-16) に代入すると以下が得られる。

$$H(R) = -Fr^2 P_a - Fr^2 \frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} + Fr^2 [Ei(-t) - Ei(-2t)]_0^{R^2} + \frac{Fr^2}{We^2} \left(\frac{H'}{R\{1 + (H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1 + (H')^2\}^{3/2}} \right) \quad \text{----- (A4.2-22)}$$

第2不変量による渦抽出

数値解析などの流れ場から渦の発生位置を特定するために、Hunt^(4.2-2)らや Chong and Perry^(4.2-3)は、以下の非圧縮性流体の速度勾配第2不変量を使うことを提唱している。以下ではその理論的背景について説明する。

第1不変量、第2不変量、第3不変量は3×3の行列要素を有する速度勾配行列 $\mathbf{J}=[u_{i,j}]$ の固有値 σ に関する特性方程式の係数に相当する1次、2次、3次の物理量である。ここで、 u_i は i 方向の流速を、 $u_{i,j}$ は i 方向の流速を j 方向の座標で偏微分したものを表す。つまり、

$$\mathbf{J} = [u_{i,j}] = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \text{----- (A4.2-23)}$$

行列 $\mathbf{J}=[u_{i,j}]$ の固有値 λ に関する特性方程式は以下のように記述され、固有値 λ によって流れのパターンを分類することができる。

$$\lambda^3 + Q_1 \lambda^2 - 0.5 Q_2 \lambda - Q_3 = 0 \text{----- (A4.2-24)}$$

ここで、 Q_1, Q_2, Q_3 はそれぞれ第1不変量、第2不変量、第3不変量と呼ばれ、以下で定義されるものである。(文献によっては $-0.5Q_2$ や $0.5Q_2$ を第2不変量と呼ぶものもあるが、ここでは以下で定義する Q_2 を第2不変量と呼ぶ。)

$$Q_1 = -\text{tr}(\mathbf{J}) \text{----- (A4.2-25)}$$

$$Q_2 = \text{tr}(\mathbf{J}^2) \text{----- (A4.2-26)}$$

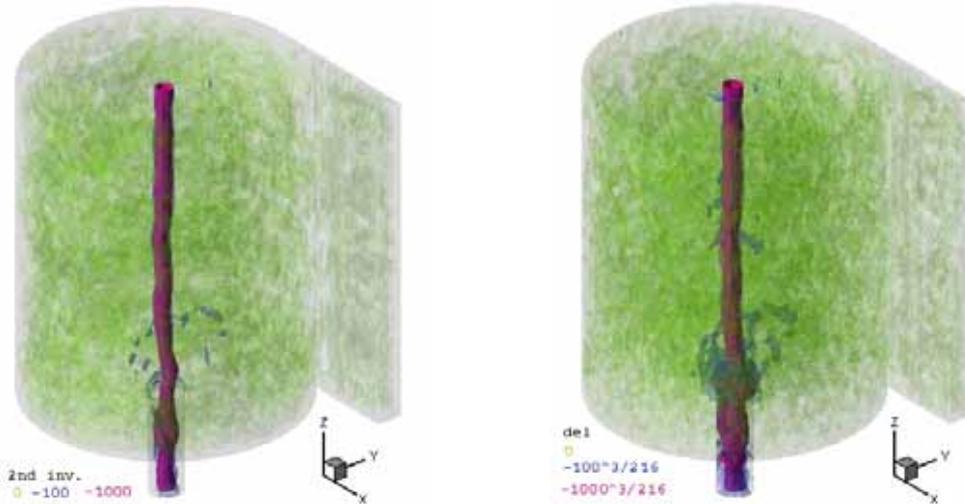
$$Q_3 = \det(\mathbf{J}) = \text{tr}(\mathbf{S} \mathbf{S} \mathbf{S} + 3 \mathbf{S} \mathbf{\Omega} \mathbf{\Omega}) / 3 \text{----- (A4.2-27)}$$

ここで、 $\mathbf{S}=[S_{ij}]=[0.5(u_{ij} + u_{ji})]$ 、 $\mathbf{\Omega}=[\ \ \]_{ij}=[0.5(u_{ij} - u_{ji})]$ と定義し、 $\text{tr}(\mathbf{J})$ および $\det(\mathbf{J})$ はそれぞれ行列 \mathbf{J} のトレースおよび行列式を表す。また、 $\|\mathbf{S}\|$ は行列の大きさ(行列 \mathbf{S} の全行列要素の2乗和の平方根)を表すものであり、 $\|\mathbf{S}\| = [\text{tr}(\mathbf{S} \mathbf{S}^T)]^{0.5}$ で定義される。

固有値 λ が複素共役で $\lambda = \mu \pm i\omega$ と表される場合、流れの軌道(適切な面に投影したものは)螺旋軌道 $r = D_0 \exp(m\theta)$ ($m = \mu/\omega$ 、 r : 原点からの距離、 D_0 : 初期条件に依存する距離、 θ : 角度)となることが示される^(4.2-3)。さらに、固有値が複素共役となるための条件は、以下のように第2不変量、第3不変量に関する不等式で表現される。

$$\Delta = Q_2^3 / 216 - Q_3^2 / 4 < 0 \text{----- (A4.2-28)}$$

なお、 $\Delta < Q_2^3 / 216$ が常に成立するので、Hunt ら^(4.2-2)の $Q_2 < 0$ (つまり $Q_2^3 / 216 < 0$) の条件で抽出された領域は Chong ら^(4.2-3)の $\Delta < 0$ の条件を常に満たす。一例として、円筒容器内旋回渦(守屋の実験)の解析結果について第2不変量 Q_2 および Δ の分布を計算すると図 4.2-9 (a), (b) に示すものとなり、両者による渦抽出性能に大きな差はないことが示されている。



(a) Hunt ら^(4.2-2)の第2不変量 Q_2 に基づく方法 (b) Chong ら^(4.2-3)の Δ に基づく方法
 図 4.2-9 円筒容器内旋回渦（守屋の実験^(4.2-1)）の解析結果を対象とした渦抽出

また、第2不変量 Q_2 は以下のように変形できることから、 $Q_2 = \text{tr}(\mathbf{J}^2) = \|\mathbf{S}\|^2 - \|\boldsymbol{\Omega}\|^2$ が成立し物理的には速度ひずみテンソルと回転テンソルの大きさのバランスを表す指標であることが分かる。

$$Q_2 = \sum_{i,j=1}^3 u_{i,j} u_{j,i} = \frac{1}{4} \sum_{i,j=1}^3 \{ (u_{i,j} + u_{j,i})^2 - (u_{i,j} - u_{j,i})^2 \} = \sum_{i,j=1}^3 (S_{ij}^2 - \Omega_{ij}^2) \quad \text{----- (A4.2-29)}$$

さらに、非圧縮流体では Navier-Stokes 方程式の空間微分式と非圧縮性条件を用いて、速度勾配第2不変量と密度で除した圧力のラプラシアンとの和はゼロとなることが導出される。つまり、

$$Q_2 = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 p \quad \text{----- (A4.2-30)}$$

これは、速度勾配第2不変量が負で絶対値が最大の場合、圧力が最小になりうることを示している。上式に Burgers モデルの圧力勾配式(A4.2-10)を適用すれば、伸長渦での無次元第2不変量を以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{Q_2}{u_0^2} &= -\nabla^2 P = -\frac{\partial^2 P}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \\ &= -\frac{2}{R^4} \left[2R^2 \{1 - \exp(-R^2)\} \exp(-R^2) - \{1 - \exp(-R^2)\}^2 \right] \quad \text{----- (A4.2-31)} \end{aligned}$$

Burgers 伸長渦の圧力とそのラプラシアン（第2不変量の負値）は図 A4.2-10 に示す分布となる。また、Burgers モデルの周方向流速・循環・第2不変量の分布は図 A4.2-11 に示すものとなる。図 A4.2-10 に示すように、第2不変量は渦中心近傍にて符号が変化するので、 $Q_2=0$ の位置を調べることによって、流れ場の渦を抽出することができるものと考えられる。

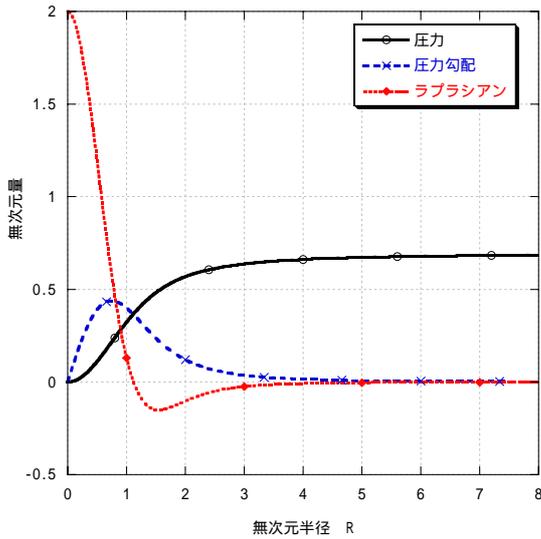


図 A4.2-10 Burgers 伸長渦の無次元圧力とその勾配・ラプラシアン分布

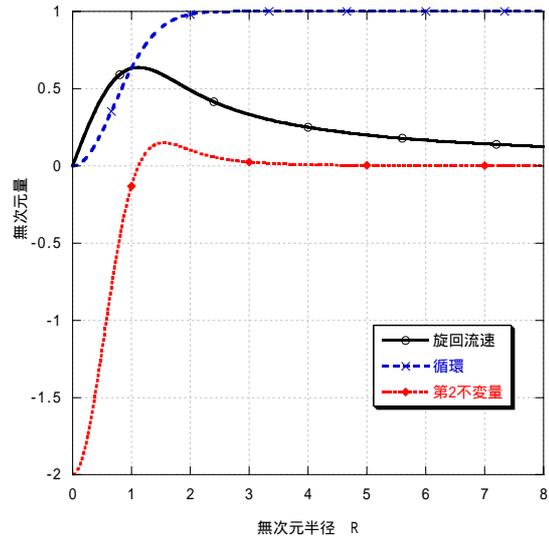


図 A4.2-11 Burgers 伸長渦の周方向流速・循環・第2不変量の分布

無次元パラメータ Γ^* と α^* の定義

以上の渦抽出方法によって、数値解析結果より、支配的な渦を抽出し、判定パラメータである無次元循環 Γ^* 、無次元速度勾配 α^* およびガスコア深さ L_{gc} を算定する。無次元循環 Γ^* と無次元速度勾配 α^* は、Burgers モデルのガスコア深さ式 (A4.2-18) を液深 h により無次元化することによって導出される。すなわち、

$$\frac{L_{gc}}{h} = \frac{\ln(2)}{16\pi^2} \left(\frac{\alpha v}{gh} \right) \left(\frac{\Gamma_\infty}{v} \right)^2 = K \cdot \alpha^* \cdot \Gamma^{*2} \text{----- (A4.2-32)}$$

により導出される。ここで、 K は Burgers モデルによる理論値であり、 $K=4.389 \times 10^{-3}$ である。また、無次元循環 Γ^* は、

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma_\infty}{v} \text{----- (A4.2-33)}$$

により定義する。この無次元数は、コリオリ力と粘性力の比（エクマン数 E の逆数）を意味する。 Γ_∞ は、 r の変化に対して循環一定の領域での値を指す。一般に、 Γ は、自由液面におけるくぼみ渦回りの循環であり、以下のような速度ベクトル u の閉曲線 C に対する周回積分により定義される。

$$\Gamma = \oint_C u ds \text{----- (A4.2-34)}$$

例えば、軸対称くぼみ渦では $\Gamma=2\pi r \times v_\theta$ である（ここで、 r は渦中心からの半径、 v_θ は半径 r

における渦の旋回速度を示す)。それぞれの判定者による評価方法の影響を排除するため、非定常流れ場における判定パラメータの算定は、評価ツール(Stream Viewer)などを用いることとする。

また、無次元速度勾配 α^* は、

$$\alpha^* = \frac{\alpha v}{gh} \text{----- (A4.2-35)}$$

により定義する。この無次元数は、粘性力と重力の比を示している。ここで、 h は、配管系等の流出口位置からの液位とする。 α は、自由液面での渦中心近傍における下降流速勾配である。下降流速勾配は、半径方向の分布を有することから、渦中心近傍の下降流速勾配を平均した値を用いる。具体的な判定パラメータの算定は、評価ツール(Stream Viewer)などを用いることとする。

(3) 判定値との比較評価

指針では、A3 項に示したように、くぼみ渦によるガス巻き込み現象として評価すべき発生要因事象として、以下の3つの事象を考慮する。

- (a) ガスコア深さの液深に達する伸長
- (b) 渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱
- (c) ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれ

くぼみ渦によるガス巻き込み現象を回避するためには、上記の3つ事象について、(1)項にて算定した判定パラメータを算定し、それぞれの判定基準値を満足しなければならない。以下、各判定パラメータに関する設定根拠を示す。

ガスコア深さの液深に達する伸長の回避

無次元ガスコア深さ L_{gc}/h が1未満の条件でガスコア深さが流出流路位置までの液深を超過することを回避できる。すなわち、Burgers モデルによる理論値を最確値として基準とする場合、(A4.2 - 32)式より、次式が満足されなければならない。

$$\alpha^* \cdot \Gamma^{*2} < 228 \text{----- (A4.2-36)}$$

図 A4.2-12 に Burgers model によって予測した円筒体系でのくぼみ渦深さの比較結果を示す。横軸は酒井ら (A4.2-4), 守屋 (A4.2-1), Monji ら (A4.2-5) の各試験条件に対して数値解析を実施し、その結果から求めた $\alpha^* \Gamma^{*2}$ を示しており、エラーバーは、数値解析結果の時間的な揺らぎの幅を示している。縦軸はガスコア深さ比 (L_{gc}/h) であり、測定値をプロットしている。直線で示

した Burgers model による予測は、 $\alpha^* \Gamma^{*2}$ が比較的小さい領域において過小評価し、 $\alpha^* \Gamma^{*2}$ が比較的大きい領域にて過大評価する傾向にある。それらの分散の幅を考慮すれば、Burgers モデルによるガスコア深さ理論値に対して3倍程度の裕度を見込む必要があり、以下を満足すべきである。

$$\alpha^* \cdot \Gamma^{*2} < 76 \text{ ----- (A4.2-37)}$$

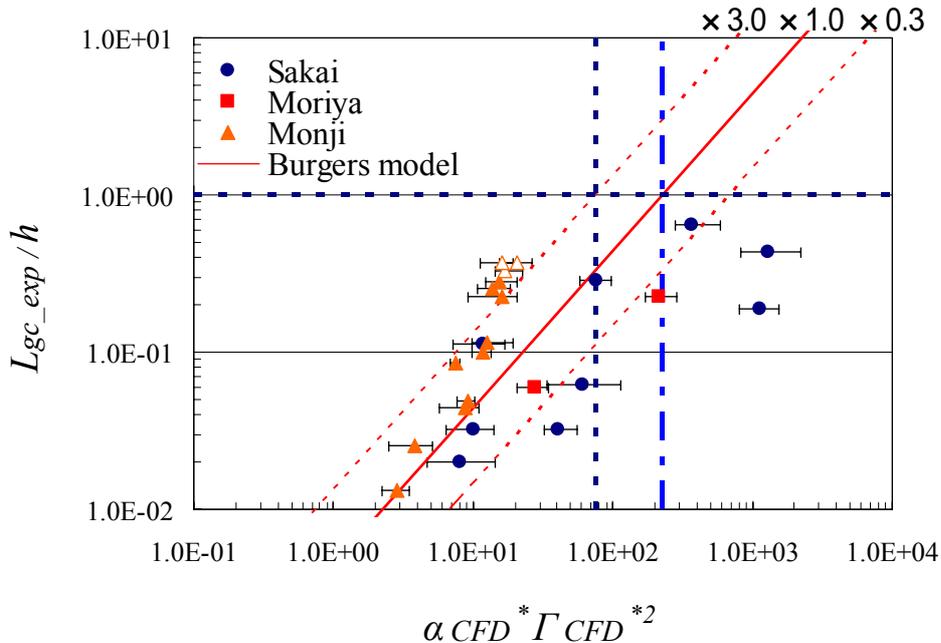


図 A4.2-12 くぼみ渦深さ比に関する Burgers model と測定結果の比較

渦糸方向の速度勾配に起因するガスコア先端からの気泡離脱の回避

渦糸方向の速度勾配に起因してガスコア先端から気泡が離脱する現象については、無次元加速度 α^* によって、整理したマップに基づき、次式により判定することとした。

$$\alpha^* < 10^{-7} \text{ ----- (A4.2-38)}$$

図 A4.2-13 に、各試験条件について、数値解析結果を無次元数によって整理した判定マップを示す。守屋のリングプレート試験(A4.2-6)および Monji らの気泡離脱の発生したケースは、白抜きのプロットにより表示している。気泡離脱が発生したケースは、無次元速度勾配 α^* が 10^{-7} 以上の領域であり、ここでは、 10^{-7} を判定値とした。

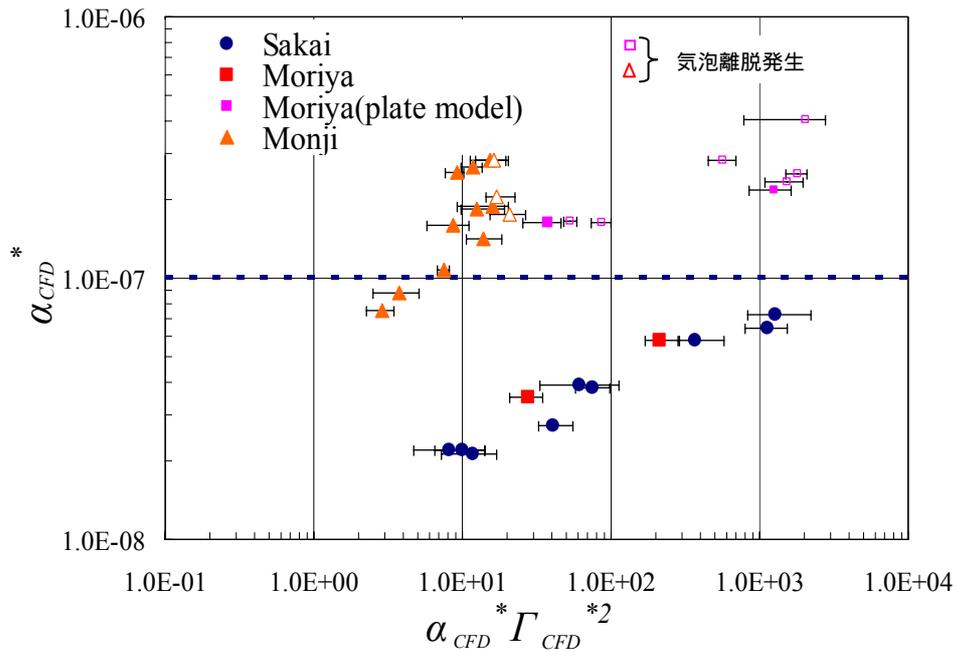


図 A4.2-13 気泡離脱条件に関する判定マップ

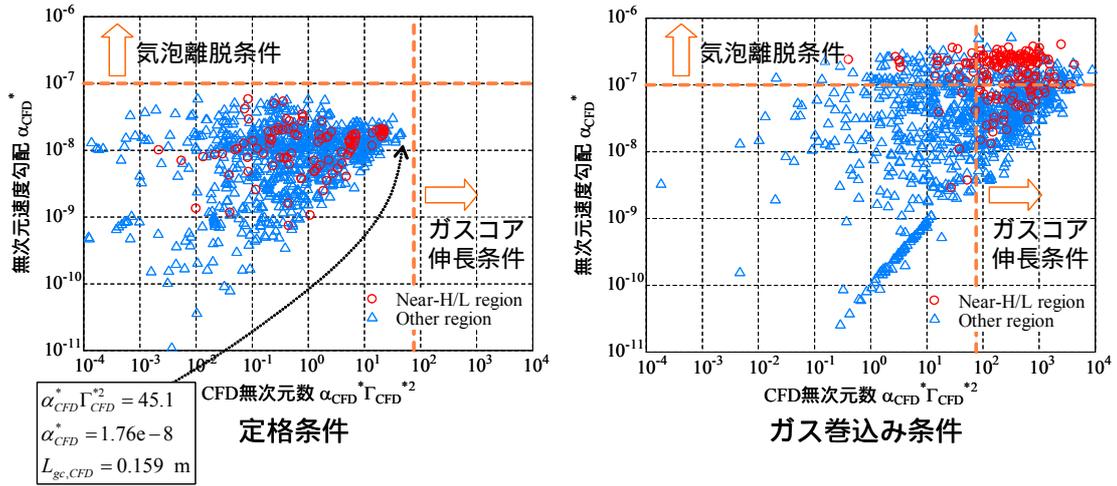
ガスコア近傍の横流れ、大規模な乱れ、および、界面の不安定性等によって生じるガスコアのちぎれの回避

(A4.2 - 32)式より算定されるガスコア深さ L_{gc} について、次式を満足しなければならない。

$$L_{gc} < L_{gc,max} \text{ ----- (A4.2-39)}$$

ここで、最大ガスコア深さ $L_{gc,max}$ は、ユーザー設定とするが、推奨値は 0.2m とする。

ここでは十分な根拠データが得られていないと判断し、判定値ではなく推奨値とした。推奨値は、現状の知見に基づくものであり、新たな知見によって変化する値である。日本原子力研究開発機構では、原子炉容器の液面部分について、1/1.8のスケールにてガス巻き込みに関する試験を実施している(A4.2-7)。同試験では、ガスコアがちぎれるタイプのガス巻き込みが観察されており、本推奨値の設定に関し参照値とすることとした。同試験について数値解析を実施し、判定マップを作成した結果を図 A4.2-14 に示す。ガス巻き込みが発生しない定格条件については、ガスコア深さおよび気泡離脱条件ともに判定条件を満たすが、試験にてガス巻き込みが発生した Case2 については、ガスコア深さおよび気泡離脱条件ともに判定条件を満たしていないことが分かる。また、Case2 では、試験にてガス巻き込みが発生した位置近傍の渦(赤のプロット)がより厳しい条件に集中している。Case1 について、最もガスコア深さを長く予測した渦は約 16cm であるが、試験の観察結果では液面は静定しており、評価手法は大きな保守性を有している。



	要素数	液位	D/P間隙部流速	入口流速	試験結果
定格条件	252072	0.805 m	実機流速一致条件	実機流速一致条件	ガス巻き込みなし
ガス巻き込み条件	189456	0.46 m	定格の4倍	定格の4.9倍	ガス巻き込み発生

図 A4.2-14 1/1.8 モデル試験解析結果による判定マップ

もうひとつの例として、図 A4.2-15 に示すように、岡本らの試験(A4.2-8)では、移動する渦について下降流速を与えた場合のガス巻き込みの測定が実施された。液位を増大した結果、0.07m以上の液位にてガス巻き込みの発生が防止された。同条件について数値解析を実施し、ガスコア深さを評価した結果、ガス巻き込みがまったく発生しない0.07mのケースについてもガスコアの深さを0.2m以上に予測する結果が示された。以上のような評価例より、ガスコアのちぎれによるガス巻き込みの判定に関する判定値は、 $L_{gc,max}=0.2m$ を推奨することとした。

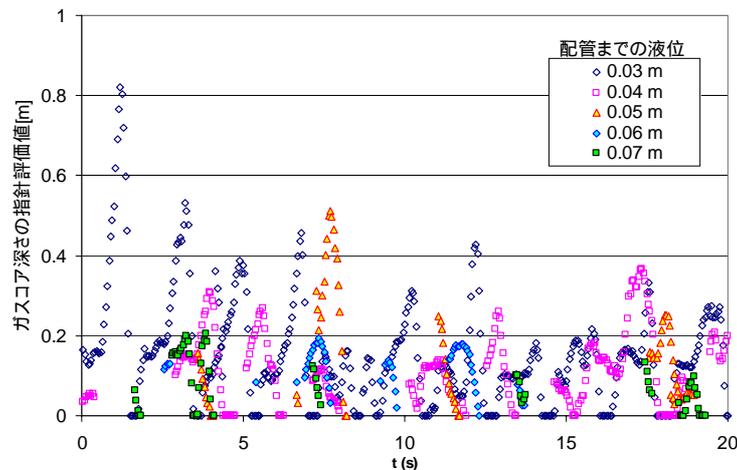
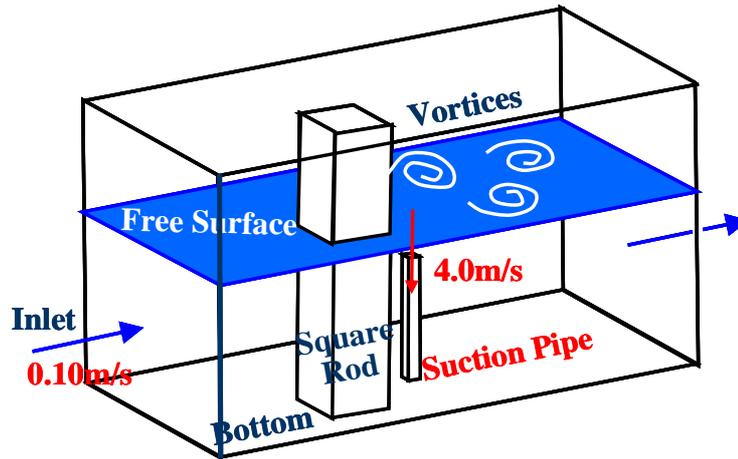


図 A4.2-15 岡本試験体系とガスコア深さ予測結果

A4.参考文献

- (A4.1-1) J.M. Burgers, "A mathematical model illustrating the theory of turbulence", Advances in applied mechanics edited by R.Mises, T.Karman, Academic Press INC, New York, 1948.
- (A4.2-1) 守屋祥一, 「伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価」, 電力中央研究所報告, U97072 (1998)
- (A4.2-2) J.C.R. Hunt, A.A. Wray P. Moin, "Eddies, Stream and convergence zones in turbulent flows", Center for Turbulence Research report, CTR-S88, 1988.
- (A4.2-3) M.S. Chong, A.E. Perry, "A general classification of three-dimensional flow fields", Physic of Fluids A, 2, pp. 756-777, 1990.
- (A4.2-4) 酒井清吾, 班目春樹, 岡本孝司, 「有限容器内に形成されるくぼみ渦周りの流れ場の測定」, 日本機械学会論文集 (B 編), 63 巻 614 号, pp.3223, 1997.
- (A4.2-5) H. Monji, T. Akimoto, D. Miwa, H. Kamide, "Unsteady behavior of gas entraining vortex on free surface in cylindrical vessel", NTHAS4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp190.
- (A4.2-6) 守屋祥一, 「自由表面渦のガス巻込み発生限界に及ぼす模型縮尺効果」, 電力中央研究所報告, U97073(1998).

- (A4.2-7) N. Kimura, J. Kobayashi, A. Tobita, K. Hayashi, H. Kamide, "Experimental Study on Gas Entrainment at Free Surface in Reactor Vessel for a Compact Sodium Cooled Fast Reactor", NTHAS-4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp.179-185.
- (A4.2-8) K.Okamoto, K. Takeyama, and M. Iida, "Dynamic PIV Measurement for the Transient Behavior of a Free-Surface Vortex", NTHAS4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp186.

A5. 影響を考慮すべき事項

ガス巻込み発生の支配因子として、Burgers モデルにより、下降流速勾配、循環、粘性コア半径などが代表的な物理量であると考えられる。渦の位置、循環を形成する周方向流速、下降流速などが時間的に変化しない場合、ガスコア深さは、表面張力と渦中心部の圧力、および下降流速勾配とのバランス（Burgers モデル）のみに支配されると考えられる。つまり、Burgers モデルの渦の場合、ガスコア深さの発達に要する時間は無限大としていることになる。一方、1/10 縮尺炉上部プレナム試験、および 1/1.8 縮尺液面部分モデル試験では、渦が全体的な水平流により、移動しつつ渦の発達・減衰が起こっていることが確認された。つまり、Burgers モデルに含まれない影響因子として、渦の発達・減衰に要する時間の項（過渡現象）をどのように評価すべきであるかが課題として残されている。過渡現象におけるある有限時間での渦の発達・減衰であると考えれば、発達・減衰の速度も重要な因子となりうる。過渡現象において考慮すべき項目としては、ガスコア発達・減衰に係る現象そのものの特性時間（現象特性時間）と、プラント/試験装置（実体系に対する縮尺比、配管のサイズ）体系および運転条件（流量など）により決定される体系に依存した特性時間（体系特性時間）の関係が考えられる。体系特性時間は、スケール効果に含まれる重要な因子であると考えられる。加えて、運転条件の中での流量などの時間変動（ここでは、エルゴード性を有した乱れ成分を指す）が、Burgers モデルに含まれる諸種の物理量、および現象特性時間/体系特性時間に与える影響を考慮する必要がある。また、上記項目以外の影響として、流体の物性が考えられる。Burgers モデルには、流体の粘性の影響は考慮されているが、それ以外の物性（表面張力等）は考慮されていない。

本節では、ガス巻込み発生に係る各種影響因子について、既存の知見、本指針作成に向けて実施した試験・解析により得られた知見、および今後の課題について記述する。

A5.1. 過渡現象

一般に、ガス巻込みの発生に至る過程において、液面でくぼみが発生し始めてから、吸込口までガスコアが達するまでには、時間遅れが生じる。当然、液面でのくぼみが発生するためには、液面近くでの旋回流の存在が不可欠となることから、液面近傍での小さな旋回流の発生からガスコアが吸込口まで達する時間まで見ると、液面でのくぼみの発生より、さらに時間を要することは自明である。

一般的な円筒容器試験は、接線方向に流体を流入させ、円筒下部中央から流出させる体系を採用している。このような体系では、接線方向からの流入に伴い増加する循環がある一定値に到達し、その循環の強さとバランスするガスコアが形成される。つまり、循環の強さとガスコア深さ是一对対応し、時間遅れを考慮する必要はない。しかしながら、1/10 試験や 1/1.8 試験で見られるように、渦そのものが移動する場合、循環の強さとガスコア深さに依存関係は存在するが、両者の関係が完全に一対一になっているかどうかは不明である。

図 A5.1-1 に文字(A5.1-1)らの円柱体系試験によって得られた、接線方向から流入する流量を周期的に変化させた場合（結果的に同位相で下降流速も変化）の、ガスコア深さ、循環についての関係を示す。が最も下降流速が小さい時刻、が最も下降流速が大きい時刻に相当する。それによると、循環は下降流速の変化にかかわらずほとんど変化が見られないが、ガスコア深さは、下降流速変化にほぼ追従して変化することがわかった。

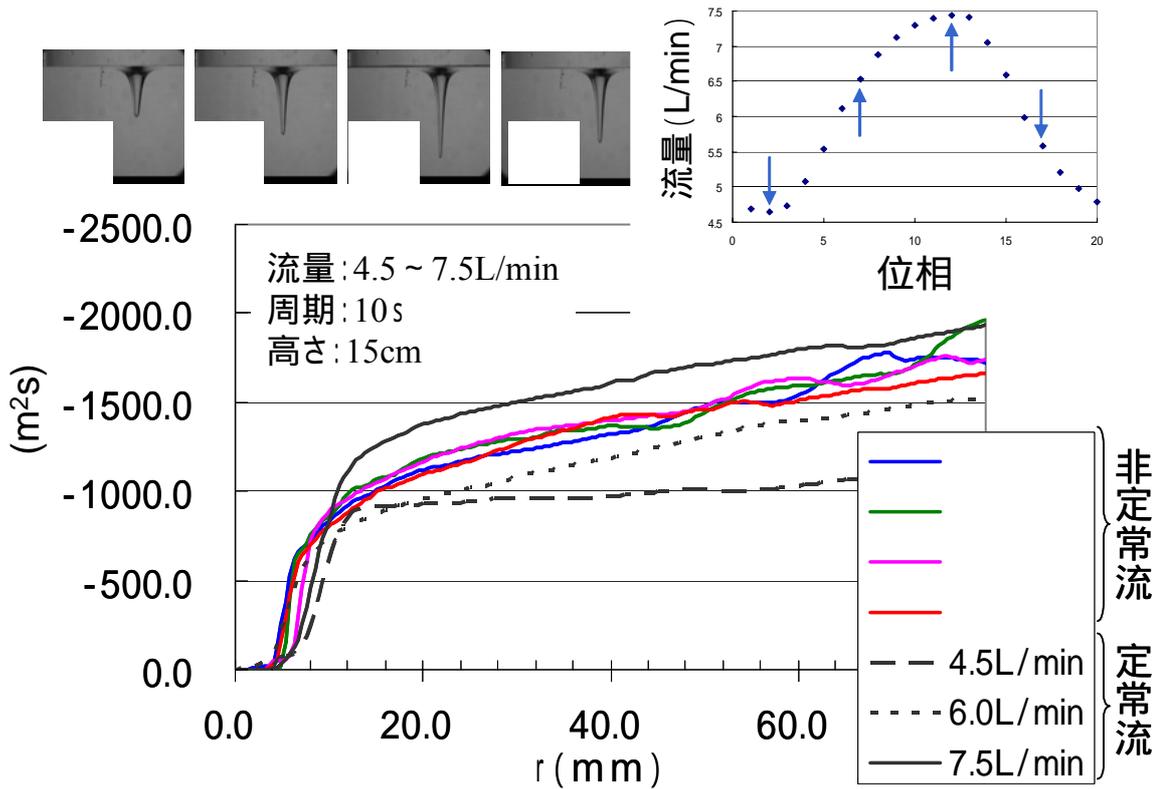


図 A5.1-1 下降流速変動に伴うガスコア深さおよび循環の変動の関係

また、江連らによる試験(A5.1-2)では、渦そのものが移動する体系で、循環とガスコア深さの同時計測を実施した。図 A5.1-2 に循環とガスコア深さの時間変化を示す。それによると、ガスコアは、循環値の増大に対して時間遅れを有して発達することが明らかとなった。ここでは、下降流速が未知（計測できていない）であるために、下降流速とガスコア深さの相関は明らかにされていないが、循環と下降流速、ガスコア深さには密接な相互作用があると考えられる。

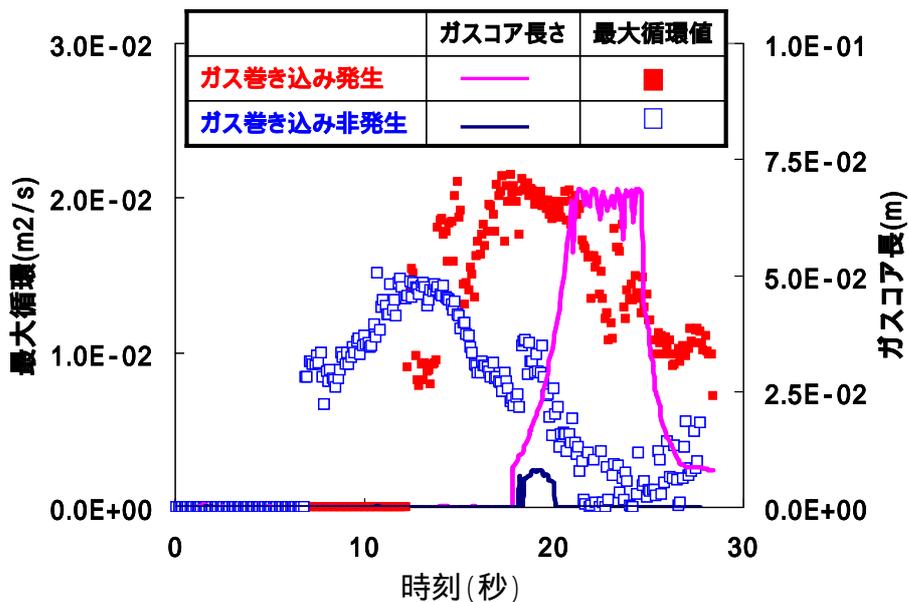


図 A5.1-2 循環とガスコア深さの関係

下降流速に関しては、岡本ら^(A5.1-3)によるガルバノミラーを用いた PIV 複数断面同時計測により、移動する渦に対する下降流速とガスコアの関係が明らかにされつつある。図 A5.1-3 に PIV により得られた鉛直断面瞬時流速分布の一例を示す。吸込管近傍で発生する下降流速が、何らかの要因で液面近傍まで到達、あるいは液面近傍に存在していた旋回流の直下にある局所的な下降流速と接続されることにより、液面近傍の循環が発達し、液面からのガスコア発達に至ることが推測できる実験結果が得られた。

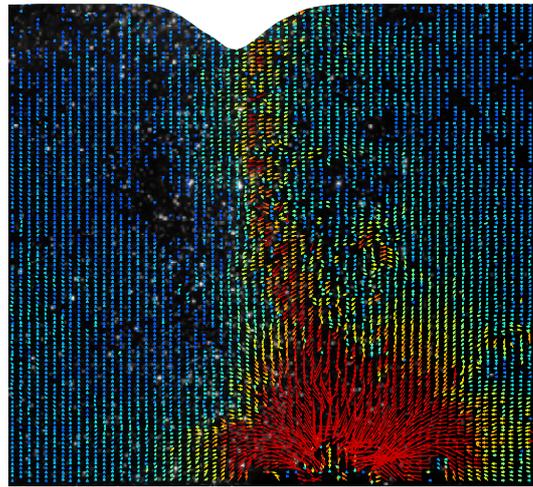


図 A5.1-3 鉛直断面流速分布の一例

吸込管での下降流速が液面近くまで到達するためには、ある程度の時間が必要であり、液面での循環の発達時において、その下降流速が維持されていることがガスコアの発達には重要な因子となりうる。つまり、渦の成長には、ガス巻き込み発生の条件が満たされた後に、その条件の維持時間がある程度必要であると考えられる。水平流速が大きい場合、物体の後流に発生する循環の強さは大きくなるが、その循環と下降流速との相互作用を考慮した場合、両者が一体化するために、ある程度の時間が必要となる。下降流速が発生する領域は、当然吸込管周りに分布しており、水平方向流速に対する下降流速発生エリアの依存性は小さい。一方、液面近くで発生した循環は、水平流れによって下流方向に移動するために、下降流速発生エリアを通過する時間が短くなる。水平流速増加に伴い、液面近くでの循環値は大きくなるが、液面近くの循環と下降流速の相互作用が発生しうる時間が小さくなるほうが、影響としては大きく、その結果として、水平流速を大きくすることによって、ガス巻き込みの発生が抑制されると考えられる。江連らの試験[A5.1-2]において、水平流速を増加させるとガス巻き込みの発生が抑制される傾向があることが明らかにされた(図 A5.1-4 参照)。水平流速の増加に伴い、液面の乱れ、流体中の乱れの増加という要因もあるが(詳細は後述)、江連らの試験では、水平流速を増加させた場合でも、大きな液面の乱れは観察されなかった点を考慮すると、水平流速増加に伴い、十分な渦の成長時間が確保できなかったために、ガス巻き込みの発生が阻害された可能性が高い。

以上のことから、本指針で用いている Burgers モデルは定常状態の渦を想定しており、循環に対して、時間遅れなしでガスコアの成長に至ると仮定している。上記実験結果は、過渡的なガス巻き込みの発生において、ガスコアの発達はある程度の時間遅れを有しており、循環の発達が即座にガス巻き込みの発生とはならないことを示唆している。循環の発達過程で、吸込管とくぼみ渦近傍の下降流速のつながりが水平流れなどによって途切れた場合は、ガス巻き込みに至らない可能性

がある。つまり、ガス巻き込み現象に対して過渡現象である効果を考慮すると、定常状態を仮定している本指針は保守的であると考えられる。

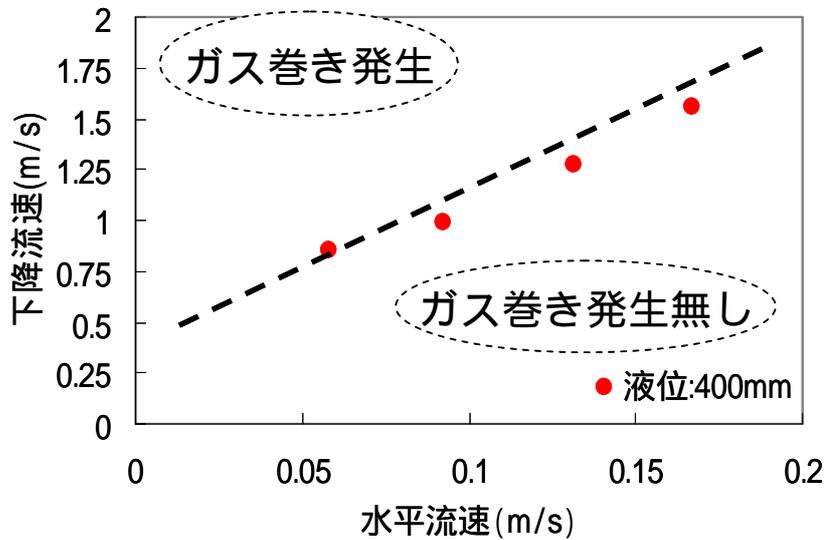


図 A5.1-4 ガス巻き込み初生条件における水平流速と下降流速の関係

A5.2. 流れのスケール

岡本ら (A5.1-3)、および辻ら (A5.2-1) の試験と江連ら (5.1-2) の試験を比較すると、岡本・辻の試験では、液位が 10mm 程度と小さい条件でのみガス巻き込みの発生が観察されるのに対し、江連らの試験では、400mm 程度の液位において、ガス巻き込みの発生が見られた。その一つの要因として、吸込管の径が異なることが考えられる。岡本らの試験での吸込管は内径 10mm であるのに対し、江連らの試験では内径 50mm と 5 倍になっている。前節で記述した、下降流速と液面近傍の循環との相互作用でガス巻き込みが発生するとすれば、下降流速を発生させる吸込管の径が大きい場合、下降流速の発生エリアが広がると考えられる。その影響で、吸込管径が大きい場合、ガス巻き込みがより高液位で発生すると考えられる。

一方、液面近傍の循環に対するスケールの影響として、1/1.8 試験 (5.2-2) および江連らの試験で得られたガス巻き込み発生時の循環は、 $2 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ 程度となり、試験体系に依存せず、ほぼ同等であった。このことは、液面のくぼみは、表面張力と循環により発生した遠心力による渦中心部の圧力低下のバランスで決定されていることを示唆している。渦の大きさに違いがある場合でも、くぼみ渦が発生するのに必要な循環はほぼ同程度であると考えられる。自由渦の場合の渦の循環は、渦中心の粘性コアの領域の外側では、ほぼ一定の領域が存在する。循環一定となる領域が形成できる程度の流れを再現できるスケールの試験を実施すれば、実規模でのガス巻き込みの判定が可能であると考えられる。吸込領域においては、吸込管径がある縮尺比で模擬されている場合、下降流速の発生領域と縮尺比の関係を明らかにすれば、流れのスケールに対するモデルの妥当性を議論できると考えられる。実証炉での 1/3 以上の縮尺比、実機流速一致条件という判断基準は、吸込管については、縮尺比分の液位を低下させ、循環値が一定となる領域が形成される程度の渦が模擬でき、流速一致条件で循環算出に必要な流速が模擬できるという点から、妥当な結果が得られたものであると推定される。

A5.3. 乱れの影響

水平流速を増加させた場合、ガス巻込みの発生が抑制される結果が得られたが、その因子としては、A5.1 節で記述した渦の成長時間に対する影響に加え、液面あるいは流体内部の乱れ成分による影響が考えられる。辻ら^(A5.2-1)の試験において、水平流速を一定条件とし、液面に送風機および造波器により液面に乱れを付加した場合のガス巻込み発生条件の比較を行った。図 A5.3-1 に液面に乱れを付加した場合のガス巻込みの発生条件を示す。それによると、液面に乱れを付加することによって、ガス巻込みの発生が抑制されることが確認された。液面に乱れを付加した場合においても、水平流速が増加するのに伴い、ガス巻込みの発生が抑制されていることがわかる。つまり、液面近傍のみに外部から乱れを付加したことによって、液面の乱れによる抑制効果が顕在化した。それ以外に、水平流速増加によって、何らかのガス巻込みの抑制効果が存在していることがわかる。その一つが、渦の成長時間であり、その他の要因としては、流体内部での乱れの影響と考えられるが、ガス巻込み発生に対する流体内部の乱れの影響は、現在のところ評価に至っていない。

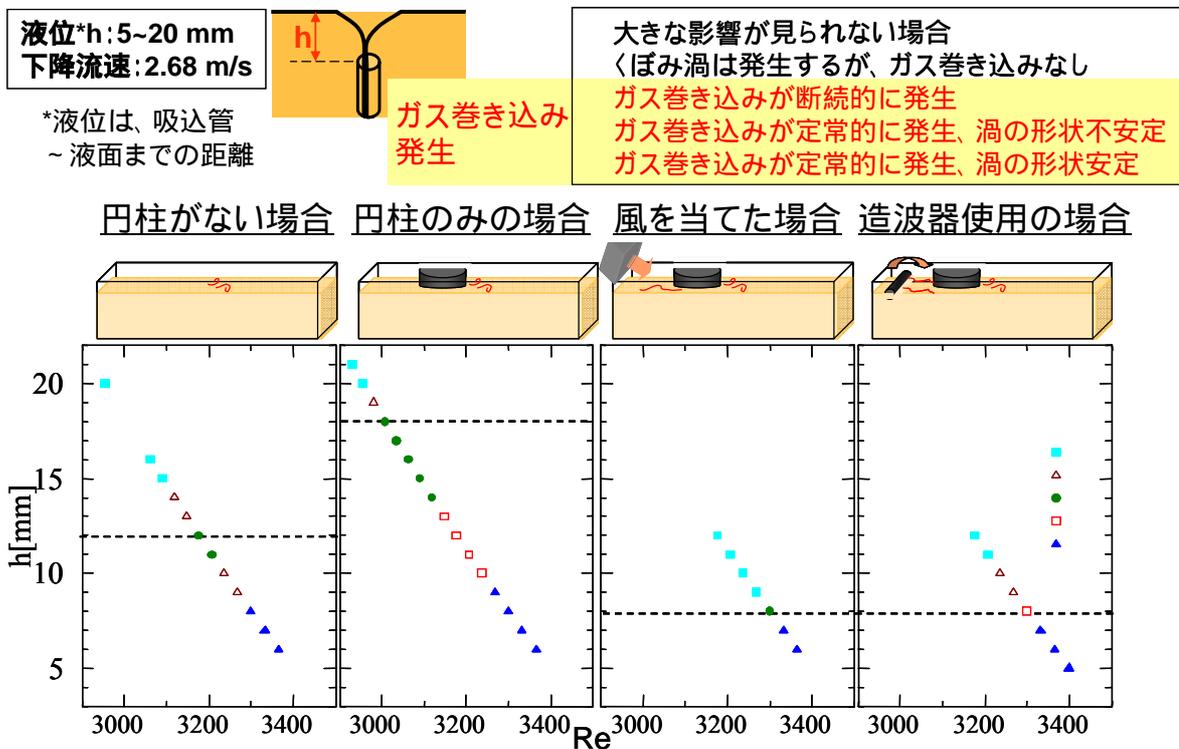


図 A5.3-1 液面に乱れを付加した場合のガス巻込みの発生条件

流体内部の乱れについて、1/1.8 試験^(A5.2-2)では、大きな水平流速の場合には、液面近くで広い領域でくぼみが発生し、ガスコアが長く伸びることなく先端から気泡がちぎれる渦が観察された。一方、文字らの試験^(A5.1-1)では、液面近くでくぼむ領域は狭いものの、ガスコアが長く伸びる渦が観察された。1/1.8 試験で観察された渦は、大きな横流れによって、渦が引きちぎられることにより、気泡が離脱すると考えられる。一方、文字らの試験では、長く伸びたガスコアの先端から、連続的に気泡が離脱するのが観察された。同じ試験条件では、気泡が離脱する位置はほぼ同じであり、気泡が離脱後、ガスコアがその分伸びて、同じ位置で気泡が離脱することを繰り返している。また、気泡離脱については、液位を低下させ、円筒下部からの流出流速を同じにした場合（つまり、液面の下降流速をゼロと仮定すると、液位低下に伴い、下降流速勾配が増加）気泡離脱は、

より短いガスコア深さで発生することがわかった（図 A5.3-2）。ガスコア先端からの気泡のちぎれを発生させる要因として、流体中の乱れ以外に、定常的な水平流れによる影響が考えられるが、この点については明確になっておらず、今後の課題である。

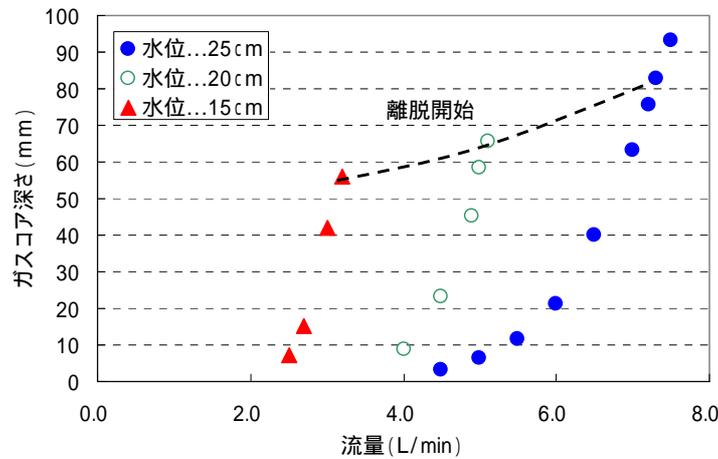


図 A5.3-2 水位とガスコア深さの関係

A5.4. 物性の影響

本指針を作成するに当たって実施した試験は、すべて水試験であり、実機（ナトリウム炉）を評価するにおいては、ガス巻き込み現象に対する水とナトリウムの物性の違いの影響を評価しておくことが重要である。実証炉研究において、円筒体系で水とナトリウムを用いたガス巻き込みの発生限界を把握したものがあ。これによると、ナトリウムの方が水に比べてガス巻き込みが発生しにくいことが明らかになっている^(A5.4-1)。

図 A5.4-1 に文字らが実施した、水温を変化させることにより、水の粘性を変えた場合のガス巻き込みの初生条件の把握を行った結果を示す。これによると、粘性低下により、ガス巻き込みが発生しやすくなる傾向が得られた。しかしながら、本指針で使用している Burgers モデルにおいて粘性の影響は考慮しており、図 A5.4-2 に示すように数値解析においてその影響が評価可能であることがわかる。

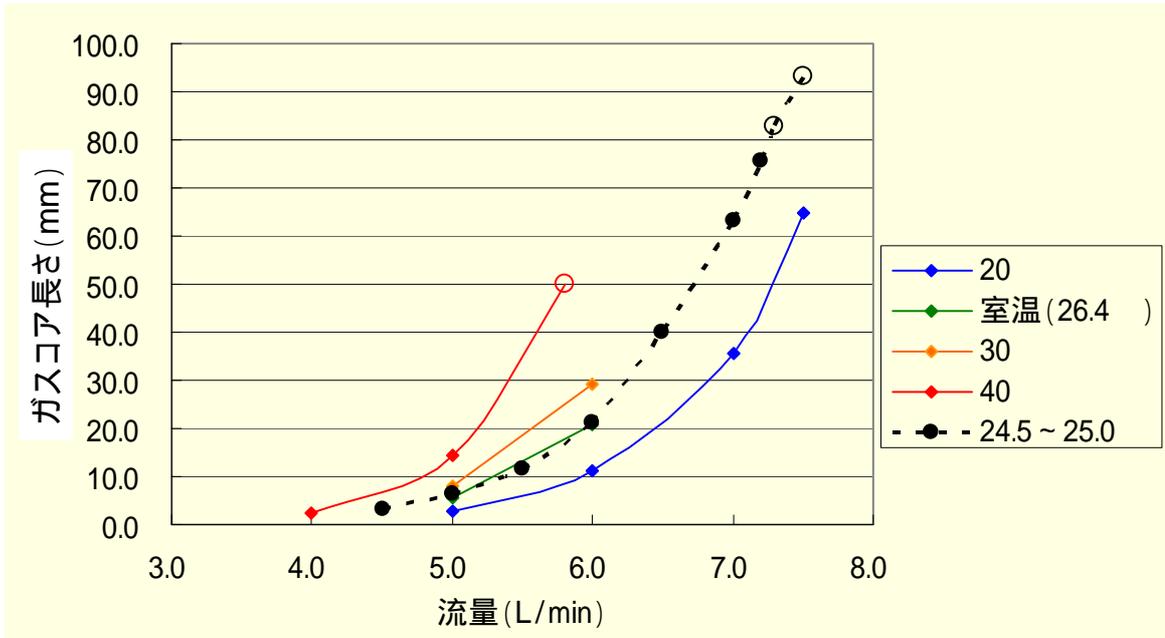


図 A5.4-1 水温（粘性）とガスコア挙動の関係

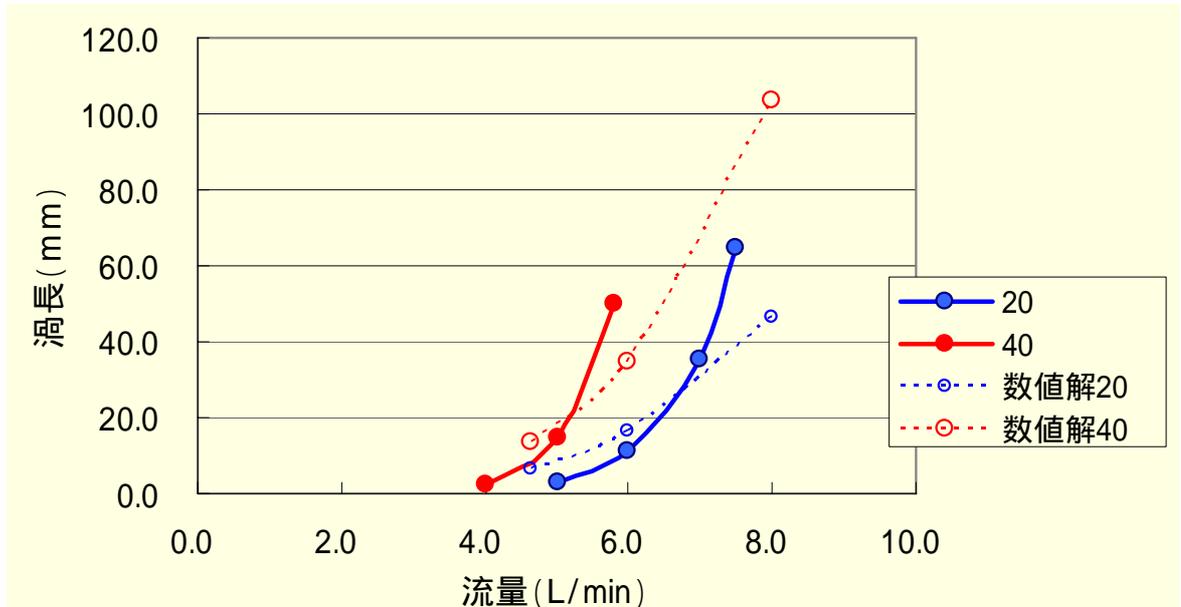


図 A5.4-2 粘性の影響に対するガスコア深さの数値解析との比較

また、表面張力はガス巻き込みに対しては重要な物性値となってくると考えるが、実証炉研究では、表面張力の依存性は小さいとされている（Weber 数の依存性小）。

液面形状については、机上ベースで以下の検討を実施した。

式(A4.2-22)により、Fr 数と We 数を与えると無次元液面形状 $H(R)$ を定めることができる。ただし、式(A4.2-22)は非線型微分方程式であるので、ここでは数値微分と繰り返し計算によって数値解を得た。

まず、守屋が行った液位 0.5[m] の円筒容器内旋回渦実験^(A5.4-2)を対象として液面形状の計算を行った。守屋の実験では水深が 0.15[m] にて詳細な旋回流速分布を計測しており、その分布に適合する Burgers 伸長渦のパラメータとして $\Gamma = 0.0442 \text{ [m}^2/\text{sec]}$, $r_0 = 5.48 \text{ [mm]}$ を得ている（注：文献^(A5.4-1)では Γ を 2π で除したものを循環と定義している）。そこで、 $u_0 = \Gamma / 2\pi r_0 = 1.28 \text{ [m/sec]}$ を代表流速として、常温の水の物性値（ $\rho = 1000 \text{ [kg/m}^3]$, $\sigma = 0.073 \text{ [N/m]}$ ）を用いて Fr 数と We 数を計算して、無次

元液面形状 $H(R)$ を数値解析により得た。これを有次元で表すと図 A5.4-3 に示すものとなる。この図では実験で観測された液面形状もプロットしており、実験結果は表面張力を考慮した解析結果（理論曲線）と表面張力なしの場合の解析結果の中間に位置することが分かる。文献^(A5.4-3)などによると純水を用いていない実験などでは不純物の中に表面活性物質が混入している可能性が指摘されている。つまり、この実験の水の表面張力係数が低下していたと推定すると、この結果は合理的なものと考えられる。

同様に、Burgers 伸長渦のパラメータとして $\Gamma = 0.03[\text{m}^2/\text{sec}]$, $r_0 = 3.5[\text{mm}]$ ($u_0 = \Gamma / 2\pi r_0 = 1.36[\text{m}/\text{sec}]$) を選定し、常温の水 ($\rho = 1000[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\sigma = 0.073[\text{N}/\text{m}]$) と 800[K]相当のナトリウム ($\rho = 830[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\sigma = 0.154[\text{N}/\text{m}]$) の場合の液面形状を計算した。有次元の液面形状は図 A5.4-4 に示すものとなり、ナトリウムの場合は、水に比べて、ガスコア先端で 2 倍程度の液面持ち上がり効果を有することが分かる。

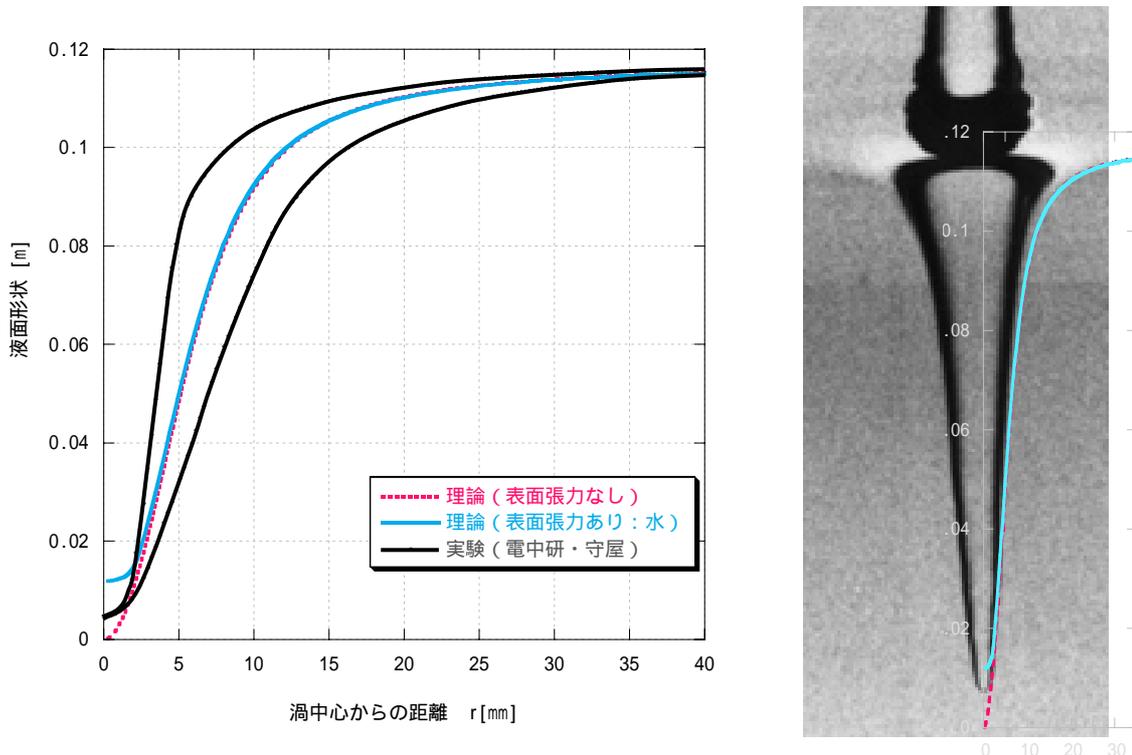
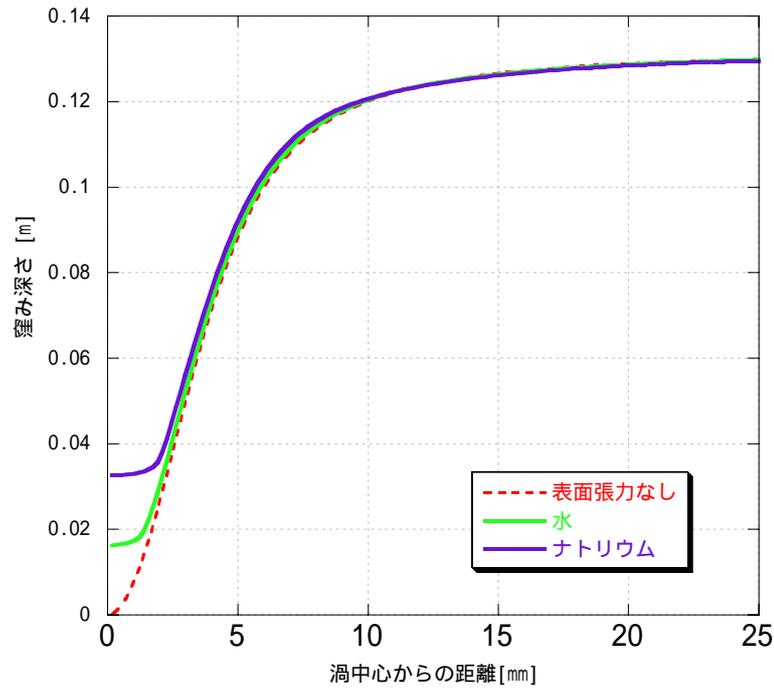


図 A5.4-3 円筒容器内旋回渦実験¹⁾を対象とした液面形状計算と実験結果との比較

(渦中心から 40mm の位置での液位が実験と理論計算で一致するように調整している。なお、実験の渦芯は鉛直方向と一致していないため、左右 2 本の液面形状曲線で表現している。)



図A5.4-4 常温の水($\rho=1000[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\sigma=0.073[\text{N}/\text{m}]$)と800[K]相当のナトリウム($\rho=830[\text{kg}/\text{m}^3]$, $\sigma=0.154[\text{N}/\text{m}]$)の場合の液面形状計算 ($\Gamma=0.03 [\text{m}^2/\text{sec}]$, $r_0=3.5 [\text{mm}]$)

A5.参考文献

- (A5.1-1) H. Monji, T. Akimoto, D. Miwa, H. Kamide, “Unsteady behavior of gas entraining vortex on free surface in cylindrical vessel”, NTHAS4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp190.
- (A5.1-2)江連俊樹、木村暢之、小林順、上出英樹、「自由液面でのガス巻き込みに関する実験研究 - ガスコア深さと循環の相関 - 」, 日本原子力学会 2006 年春の年会、L25(2006).
- (A5.1-3)岡本孝司、武山洪二郎、石川正明、上出英樹、「ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込みに関する研究 ; (7) ガルバノミラーを用いたダイナミック PIV による三次元計測」, 日本原子力学会 2005 年秋の大会、G53(2005).
- (A5.2-1)辻義之、松家由起、木村暢之、上出英樹、「ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込みに関する研究 ガス巻き込み渦に与える界面ゆらぎの効果 - 」, 日本原子力学会 2005 年秋の大会、G52(2005).
- (A5.2-2)N. Kimura, J. Kobayashi, A. Tobita, K. Hayashi, H. Kamide, “Experimental Study on Gas Entrainment at Free Surface in Reactor Vessel for a Compact Sodium Cooled Fast Reactor”, NTHAS-4, Sapporo, Japan, Nov.28-Dec.1 (2004) pp.179-185.
- (A5.4-1)岩重健五、平沼健、床井博見、高桑正行、田中弘一、「ナトリウム中の旋回渦によるガス巻き込み限界の評価(II) - ナトリウム中ガス巻き込み実験 - 」, 日本原子力学会 1998 年秋の大会、G21(1998).
- (A5.4-2)電力中央研究所 研究報告 U97072 (守屋祥一), 伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価 , 平成 10 年 3 月.
- (A5.4-3) <http://web.mit.edu/1.63/www/Lec-notes/Surfacetension/Lecture4.pdf>

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光度 (放射能)	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻¹	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹	
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²	
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹	
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹	
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A	
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A	
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²	
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²	
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹	
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³	
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³	
放射輝度	ワット毎平方メートル	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バー	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴¹ x
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

