

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  
(研究報告)

2000年11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49  
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)  
2000

## 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 (研究報告)

村松 寿晴\*、須田 一則\*、  
村上 諭\*\*、山口 彰\*

### 要 旨

高速炉の実用化に向け、多様な作動流体を冷却材として用いた場合の検討に資するため、原子炉基本設計を左右する重要熱流動課題として、(1) 自由液面揺動、(2) 温度成層化、(3) サーマルストライピングおよび(4) 自然対流の4項目を取り上げ、作動流体としてNa、Pb-Bi合金、CO<sub>2</sub>ガスを用いた場合のそれぞれの現象の特性変化を数値解析的に検討・評価した。得られた結果は、以下の通りである。

#### [自由液面揺動]

- (1) Fr数を指標とした内部流動特性および自由液面特性につき、Naを作動流体とした場合とPb-Bi合金を作動流体とした場合で有意な違いは生じない。
- (2) 液面近傍流速を指標としたガス巻込み限界につき、AQUA-VOFコードが実験結果と概ね一致する結果を与え、同コードがガス巻込み限界の1次評価に使用可能であることを確認した。

#### [温度成層化]

- (1) 連行現象(上下層剪断渦)の発生位置は、NaあるいはPb-Bi合金を作動流体とした場合、Ri数の減少とともに下流側に移動する。一方、CO<sub>2</sub>ガスの場合には、その発生位置はRi数の減少により上流側に移動する。
- (2) 温度成層界面の解消速度は、流体物性としての熱伝導度に大きく依存した特性を示す。すなわち、CO<sub>2</sub>ガス中に温度成層界面が発生した場合には、より積極的な界面解消策を講じる必要があることを示唆している。

#### [サーマルストライピング]

- (1) CO<sub>2</sub>ガスを作動流体とした場合には、大きな粘性係数と小さな熱伝導度との相乗効果によって、より下流側まで大振幅の温度ゆらぎが到達する。
- (2) 作動流体を変更した場合、温度ゆらぎ振幅を評価するためにはReを一致させる必要があるが、温度ゆらぎ周期を評価するためには流速値を一致させる必要がある。

#### [自然対流]

- (1) 基本的に、浮力噴流挙動に準じる特性を示す。ただし、自然循環力の立ち上がりの特性は、流体の熱容量および熱伝導度の影響を大きく受ける。なお、CO<sub>2</sub>ガスの場合には、自然循環ヘッドが大きい場合のみ、液体金属の場合と同様な温度過渡特性を示す。
- (2) 各作動流体を用いた場合のピーク温度到達時間は、Ra数一致条件の下で評価が可能である。

\* 大洗工学センター システム技術開発部 热流体技術開発グループ

\*\* カストマシステム株式会社

## Comparison of Thermohydraulic Characteristics in the Use of Various Coolants

Toshiharu Muramatsu\*, Kazunori Suda\*,  
Satoshi Murakami\*\*, Akira Yamaguchi\*

### Abstract

Numerical calculations were carried out for a free surface sloshing, a thermal stratification, a thermal striping, and a natural convection as key phenomena of in-vessel thermohydraulics in future fast reactor systems with various fluids as coolants. This numerical work was initiated based on a recognition that the fundamental characteristics of the phenomena have been unsolved quantitatively in the use of various coolants. From the analysis for the phenomena, the following results were obtained.

#### [ Free Surface Sloshing phenomena ]

- (1) There is no remarkable difference between liquid sodium and liquid Pb-Bi in characteristics of internal flows and free surface characteristics based on Fr number.
- (2) The AQUA-VOF code has a potential enough to evaluate gas entrainment behavior from the free surface including the internal flow characteristics.

#### [ Thermal Stratification Phenomena ]

- (1) On-set position of thermal entrainment process due to dynamic vortex flows was moved to downstream direction with decreasing of Ri number. On the other hand, the position in the case of CO<sub>2</sub> gas was shifted to upstream side with decreasing of Ri number.
- (2) Destruction speed of the thermal stratification interface was dependent on thermal diffusivity as fluid properties. Therefore it was concluded that an elimination method is necessary for the interface generated in CO<sub>2</sub> gas.

#### [ Thermal Striping Phenomena ]

- (1) Large amplitudes of fluid temperature fluctuations was reached to down stream area in the use of CO<sub>2</sub> gas, due to larger fluid viscosity and smaller thermal diffusivity, compared with liquid sodium and liquid Pb-Bi cases.
- (2) To simulate thermal striping conditions such as amplitude and frequency of the fluid temperature fluctuations, it is necessary for coincidences of Re number for the amplitude and of velocity value for the frequency, in various coolants.

#### [ Natural Convection Phenomena ]

- (1) Fundamental behavior of the natural convection in various coolant follows buoyant jet characteristics. Rising characteristics of natural convection flows were affected significantly by thermal capacity and thermal diffusivity of fluids.
- (2) Time required for peak temperatures can be evaluated in the similarity condition of Ra number.

---

\* Thermal-Hydraulic Research Group, System Engineering & Technology Division, OEC, JNC.

\*\* Customer System Co. Ltd.

## 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

## 目 次

第 1 章 緒 言	1
第 2 章 主要熱流動現象に対する支配パラメータの検討	2
2. 1 自由液面からの気泡巻込み	2
2. 2 温度成層化	3
2. 3 サーマルストライピング	3
2. 4 自然対流	3
第 3 章 数値解析による主要熱流動現象の基本特性の検討	5
3. 1 自由液面揺動	5
3. 1. 1 評価体系	5
3. 1. 2 評価条件	5
3. 1. 3 数値解析	6
3. 1. 4 検 討	7
3. 2 温度成層化	9
3. 2. 1 評価体系	9
3. 2. 2 評価条件	9
3. 2. 3 数値解析	10
3. 2. 4 検 討	11
3. 3 サーマルストライピング	11
3. 3. 1 評価体系	11
3. 3. 2 評価条件	12
3. 3. 3 数値解析	12
3. 3. 4 検 討	14
3. 4 自然対流	14
3. 4. 1 評価体系	14
3. 4. 2 評価条件	14
3. 4. 3 数値解析	15
3. 4. 4 検 討	16
第 4 章 結 言	17
参考文献	18

## 表リスト

- 図 3.1 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.2 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.3 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.4 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.5 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル W 成分分布の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.6 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル U 成分分布の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.7 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル W 成分分布の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.8 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル U 成分分布の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.9 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.10 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.11 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.12 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.13 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.14 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.15 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.16 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.17 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.18 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.19 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)
- 図 3.20 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)
- 図 3.21 Fr 数を一致させた条件での自由液面形状の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)
- 図 3.22 Fr 数を一致させた条件での自由液面勾配の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)
- 図 3.23 Fr 数を一致させた条件での自由液面流速の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)
- 図 3.24 くぼみ渦によるガス巻込み限界特性と作動流体依存性
- 図 3.25 ナトリウムを作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較
- 図 3.26 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較
- 図 3.27 CO<sub>2</sub> ガスを作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較
- 図 3.28 ナトリウムを作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較
- 図 3.29 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較
- 図 3.30 CO<sub>2</sub> ガスを作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較
- 図 3.31 ナトリウムを作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較
- 図 3.32 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較
- 図 3.33 CO<sub>2</sub> ガスを作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較
- 図 3.34 温度成層界面上昇特性の比較
- 図 3.35 温度成層界面位置における温度勾配特性の比較
- 図 3.36 瞬時渦度分布特性の比較 (Re 数一致条件)

- 図 3.37 瞬時渦度分布特性の比較 (流速一致条件)  
 図 3.38 瞬時温度分布特性の比較 (Re 数一致条件)  
 図 3.39 瞬時温度分布特性の比較 (流速一致条件)  
 図 3.40 温度時系列特性の比較 (Na; Re 数一致条件)  
 図 3.40 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi; Re 数一致条件)  
 図 3.41 温度時系列特性の比較 (CO<sub>2</sub>; Re 数一致条件)  
 図 3.42 温度時系列特性の比較 (Na; 流速一致条件)  
 図 3.43 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi; 流速一致条件)  
 図 3.44 温度時系列特性の比較 (CO<sub>2</sub>; 流速一致条件)  
 図 3.45 温度ゆらぎ変動特性の比較  
 図 3.46 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.47 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.48 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.49 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.50 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.51 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.52 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.53 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.54 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>6</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.55 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.56 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.57 空間温度分布の時間推移 (Na; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.58 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.59 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.60 空間温度分布の時間推移 (Pb / Bi; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.61 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.2 H)  
 図 3.62 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.5 H)  
 図 3.63 空間温度分布の時間推移 (CO<sub>2</sub>; Ra = 10<sup>8</sup>, h = 0.8 H)  
 図 3.64 温度時系列特性の比較 (Na, Ra = 10<sup>6</sup>)  
 図 3.65 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi, Ra = 10<sup>6</sup>)  
 図 3.66 温度時系列特性の比較 (CO<sub>2</sub>, Ra = 10<sup>6</sup>)  
 図 3.67 温度時系列特性の比較 (Na, Ra = 10<sup>8</sup>)  
 図 3.68 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi, Ra = 10<sup>8</sup>)

図 3.69 温度時系列特性の比較 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^8$ )

図 3.70 ピーク温度到達時間と熱伝導度との関係

## 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的に評価し、これらの場合の実現性の検討が進められている。

システム技術開発部熱流体技術開発グループでは、これまでナトリウム冷却大型高速炉に特徴的な以下の熱流動現象群に着目し、安全系の限定や多重性要求の合理化を行った場合、および多様な作動流体を冷却材として用いた場合の特性変化を、公開文献などに基づいて調査・検討・整理した<sup>(1)</sup>。

## (1) 気液界面現象

自由液面揺動	: 高サイクル熱疲労、機械的動荷重による疲労など
--------	--------------------------

気泡巻込み	: 反応度外乱、伝熱性能劣化など
-------	------------------

## (2) 热 - 流動相互作用現象

温度成層化	: 热荷重印加、クリープ疲労、系統熱過渡など
-------	------------------------

自然循環	: 流動不安定性、流量再配分、熱 - 流動強連結性など
------	-----------------------------

## (3) 流動 - 構造相互作用現象

流力振動	: 高サイクル機械疲労、流力弾性振動など
------	----------------------

## (4) 热 - 流動 - 構造相互作用現象

サーマルストライピング	: 高サイクル熱疲労
-------------	------------

系統熱過渡	: 热荷重印加、クリープ疲労など
-------	------------------

## (5) その他

ミスト蒸着	: 可動部固着、伝熱性能劣化など
-------	------------------

キャビテーション	: エロージョン、ポンプ性能劣化など
----------	--------------------

本報告では、原子炉基本設計を左右する重要熱流動課題として、(1) 自由液面揺動、(2) 温度成層化、(3) サーマルストライピングおよび(4) 自然対流の4項目を取り上げ、多様な作動流体(ナトリウム、鉛・ビスマス合金、炭酸ガス)を用いた場合のそれぞれの現象の特性変化を数値解析的に検討・評価する。

## 第2章 主要熱流動現象に対する支配パラメータの検討

## 2.1 自由液面からの気泡巻込み

文献(1)による結果では、気泡巻込み限界を評価するパラメータとしては、同一作動流体に対して「液面近傍流速」が、また異なる作動流体に対しては「ウェーバ数  $We = \rho v^2 d / \sigma$ 」が重要であることが結論づけられている。ここで液面近傍流速は、プレナム上昇平均流速に比例するものとして整理されており、これは慣性力と重力とのバランスを表す「フルード数  $Fr = v^2 / g d$ 」に依存することを示している。これは、幾何形状などマクロなパラメータにより変化する状態量(液面の乱れ、くぼみ渦、潜込みなど)による気泡巻込み限界を表現しているものと解釈できる。一方、慣性力と表面張力のバランスから規定される  $We$  数は、碎波などの局所的な挙動による気泡巻込み限界を表現していることから、マクロなスケールである代表径などに関する依存性は考慮しない(一定)形式でまとめられている。

文献(2)では、高速増殖炉における気泡巻込み現象に及ぼす模型縮尺効果および試験流体物性値の影響について検討し、実機での気泡巻込み評価法を提案することを目的として、縮尺の異なる3種類の相似矩形模型(模型横幅: 3.0 m, 1.0 m, 0.3 m)を用いた水流動試験ならびに表面張力係数と動粘性係数が異なる3種類の作動流体(水、エタノール、エタノール 25% 水溶液)を用いた流動試験を実施し、以下の結果を得ている。

## [液面の乱れおよびくぼみ渦による気泡巻込み]

- (1) 気泡巻込み現象は、液面の乱れに対してはプレナム上昇流速、くぼみ渦に対しては液面流速など、比較的マクロな状態量である流速がある限界以上になると発生する。
- (2) 作動流体の物性に関する影響については、表面張力係数が小さくなると気泡巻込みが発生し易くなること、また動粘性係数に対しては有意な影響は認められない。
- (3) 実機での気泡巻込み挙動を縮尺模型試験で評価するためには、模型内の局所流速を実機でのそれと一致させる必要がある。

## [潜込みによる気泡巻込み]

- (1) 気泡巻込み現象は、潜込み部での液面勾配との相関関係が強い。この液面勾配は、模型入口部での状態量で規定した  $Fr$  数の約2乗に比例する。
- (2) 作動流体の物性に関する影響については、表面張力係数および動粘性係数が小さくなると、気泡巻込み発生時の液面勾配が小さくなる。
- (3) 気泡巻込み評価では、入口  $Fr$  数を実機と一致させた縮尺模型試験から最大液面勾配を評価し、その角度から気泡巻込みの有無を判断する方法が適切である。

## 2.2 温度成層化

温度成層化現象の発生に関する支配因子が「リチャードソン数  $Ri; \equiv \beta g \Delta T d / v^2$ 」であることは、これまでの多くの研究での一致した見解であり、この  $Ri$  数は界面での軸方向温度勾配に影響を与える。また、成層界面の上昇速度に関しては、レイノルズ数  $Re (= U d / v)$  の影響を加味した上で、 $Ri$  数を用いて整理されている。

文献(3)では、高速増殖炉の原子炉構造を約1.0mのアクリル容器で単純化した試験装置を用いて試験を行い、以下の結果を得ている。

#### [成層界面の温度勾配]

- (1) 成層界面の無次元軸方向温度勾配は、 $R_i$  数が約4.0以上の状態で成層界面が安定している条件において、 $R_i$  数に概ね比例して増加する傾向を示す。
- (2) 成層界面の軸方向温度勾配は  $\beta \Delta T$  に比例し、流速の二乗に反比例する。

#### [成層界面の上昇速度]

- (1) 成層界面の無次元上昇速度は、 $R_i$  数の -0.48 乗に比例して低下する傾向を示す。一方、ナトリウムを作動流体とした試験(4)では、成層界面の上昇速度が  $R_i$  数と  $P_e$  数に依存し、 $Gr / Re$  の対数軸に対して直線的に低下する傾向が示されている。

### 2.3 サーマルストライピング

流体・構造物熱的連成系における不規則過程として特徴づけられるサーマルストライピングは、これを構成する素過程に分離した上で評価することが必要となる(5)。すなわちサーマルストライピングを、(1) 主流乱流域における高低温流体の混合特性、(2) 境界層通過による温度ゆらぎの減衰特性、(3) 流体・構造物非定常熱輸送による温度ゆらぎの減衰特性、および(4) 構造物熱的応答特性にパラメータ分離し、体系に応じた詳細な評価が現状では必要である。

なおここでは、作動流体によるサーマルストライピングに係わる全体挙動の差異を評価することとし、問題を簡単化する。すなわち、温度ゆらぎ発生源での高低温流体温度差  $\Delta T_f$  を想定した場合の構造物表面における温度ゆらぎ振幅  $\Delta T_s$  を1次元周期熱伝導問題として求め、この結果に基づいて特性の差異を評価する。

この解は、構造物側を半無限固体と仮定すると、以下のように表される(6)。

$$T = \frac{\Delta T_f h^*}{\sqrt{(h^* + k)^2 + k^2}} e^{-kx} \sin(\omega t - kx - \varepsilon) \quad (2.1)$$

ここで、 $h^* = h / \lambda$ 、 $k = (\omega / 2a)^{0.5}$ 、 $\varepsilon = \tan^{-1}(k / (h^* + k))$ 、 $h$ ：表面熱伝達率( $W / m^2 K$ )、 $\lambda$ ：構造物熱伝導率( $W / m K$ )、 $a$ ：構造物温度伝導率( $m^2 / s$ )、 $\omega$ ：温度ゆらぎ角振動数( $rad / s$ )である。

この結果から、構造物表面( $x = 0$ )での無次元温度ゆらぎ振幅  $r_t$  は、以下のように表される。

$$r_t = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_f} = \frac{1}{\sqrt{(1 + k/h^*)^2 + (k/h^*)^2}} \quad (2.2)$$

### 2.4 自然対流

自然循環状態での熱流動挙動に対する一般的な相似則については、Navier - Stokes 方程式の無次元化に基づく検討が行われ、自然循環時の流速(流量)を決定する最も基本的な因子としての自然循環ヘッドと圧力損失係数、一方プレナム内の空間温度分布に対してはブジネスク数  $Bo$  が重要であることが指摘されている(7)。なお、自然循環除熱能力は、単に自然循環ヘッドの大小関係のみによって定まるものではなく、定格運

転時の冷却材流量に対する自然循環流量の比率として評価されるべきものである。この観点より、定格運転時の1次系圧力損失に対する自然循環ヘッドの比率を下式により定義し、これを評価パラメータとすべきであることが適切あることが示されている。

$$r_p = \frac{\Delta\rho g H}{\Delta P_0} \quad (2.3)$$

ここで、 $\Delta\rho$ ：高低温流体密度差 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )、 $g$ ：重力加速度 ( $\text{m} / \text{s}^2$ )、 $H$ ：代表長さ (m)、 $\Delta P_0$ ：定格運転状態での1次系圧力損失 (Pa) である。

なお上式は、定常自然循環による除熱能力に着目した定義であるが、自然循環挙動を評価する上ではその立ち上がり過程の評価も重要である。これを定義するため、炉心内の軸方向流速に関する下記の運動量式に基づき、流速が低い条件で支配的となる右辺第1項に着目して、式(2.5)で表される加速度を評価パラメータとして用いることが有効である。

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \Delta\rho g - \partial \left( Eu \cdot \frac{\rho v^2}{2} \right) / \partial z \quad (2.4)$$

ここで、 $\rho$ ：流体密度 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )、 $Eu$ ：オイラー数 (-)、 $v$ ：炉心内軸方向流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )、 $z$ ：軸方向距離 (m) である。

$$a = \frac{\Delta\rho g}{\rho} \quad (2.5)$$

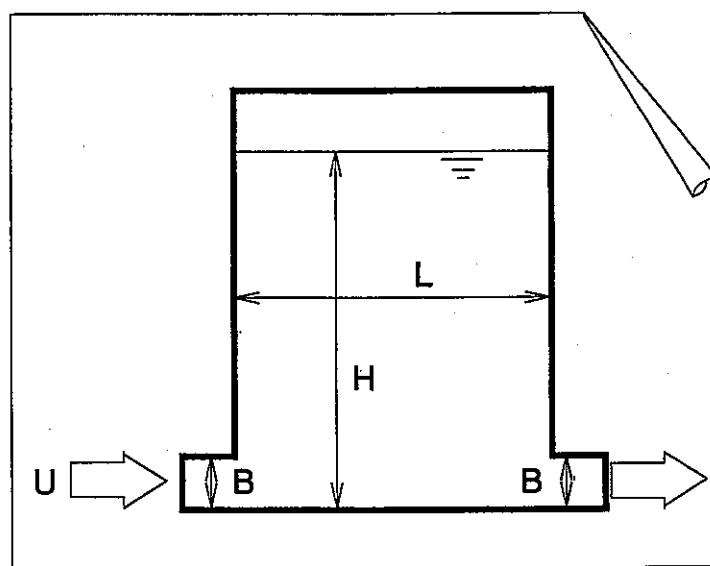
## 第3章 数値解析による主要熱流動現象の基本特性の検討

本章では、多様な作動流体を用いた場合の重要熱流動現象として、自由液面揺動、温度成層化、サーマルストライピングおよび自然対流の4種類を取り上げ、各現象の数値解析を通してそれらの基本特性を検討する。

## 3.1 自由液面揺動

## 3.1.1 評価体系

高速増殖炉におけるガス巻込み現象に及ぼす模型縮尺の効果および作動流体物性値の効果を定量化するために、電力中央研究所で行われた基礎実験形状<sup>(2)</sup>を評価体系とする。実験形状をスケッチ3.1に示す。



スケッチ3.1 ガス巻込み試験体系

試験は、縮尺の異なる3種類の相似矩形模型(模型横幅(L): 3.0 m、1.0 m、0.3 m)を用いた水流動試験、ならびに表面張力係数および動粘性係数が異なる3種類の作動流体(水、エタノール、エタノール25%水溶液)を用いて行われた。

## 3.1.2 評価条件

解析評価条件をスケッチ3.2にまとめた。作動流体は、NaおよびPb/Bi合金の2種類である。

L (m)	H (m)	B (m)	Fr (= U / (g B) ** 0.5)	U (m/s)
0.3	0.8 L = 0.24	0.024	1.0	0.727721 (Fr = 1.5)
	0.6 L = 0.18			0.485147 (Fr = 1.0)
	0.4 L = 0.12			1.328631 (Fr = 1.5)
1.0	0.8 L = 0.8	0.08	1.5	0.885754 (Fr = 1.0)
	0.6 L = 0.6			
	0.4 L = 0.4			

スケッチ3.2 解析評価条件

数値解析には、これまでの基本検証により自由液面挙動の模擬性が確認されてきている単相多次元熱流動解析コード AQUA の VOF version<sup>(8)</sup> を使用する。Na 物性値については、AQUA コード内蔵のパッケージを、Pb / Bi 合金の物性値については、伝熱工学資料<sup>(9)</sup> 記載のデータよりフィッティングした下式を用いた。

$$\text{密度} \quad \rho (\text{kg/m}^3) = 1.073 \times 10^4 - 1.218 \times T \quad (3.1)$$

$$\text{比熱} \quad C_p (\text{kcal/kg } {}^\circ\text{C}) = 0.035 \quad (3.2)$$

$$\text{動粘性係数} \quad \nu (\text{m}^2/\text{s}) = 5.5796 \times 10^{-7} - 2.5096 \times 10^{-9} \times T \quad (3.3)$$

### 3.1.3 数値解析

数値計算条件を以下にまとめる。

座 標 系 :	x - z 直交 2 次元
メッシュ分割 :	$\Delta x = \Delta z = 1.0$ (cm)
入口流速分布 :	一様 (断面平均値; スケッチ 3.2 参照)
入口温度 :	500 °C
固体壁条件 :	非スリップ、断熱
自由液面条件 :	スリップ、断熱、表面張力未考慮
乱流モデル :	不使用

#### (a) 内部流動特性

図 3.1 - 図 3.4 に、各条件における流速ベクトル図を示す。なお図中の流速ベクトルは、自由液面の変動と区別できるようにするために、解析体系より下側にスライドして表示してある。

各条件での内部流動状況より、以下の点が確認できる。

- (1) Fr 数を一致させた条件では、横幅 (L) の変化によりレイノルズ数が異なっているにも係わらず、流速ベクトルの分布は概ね一致する。試験結果と同様に、今回の条件範囲においては内部流動特性は Re 数にはほとんど影響されず、Fr 数が支配パラメータになっていると考えることができる。
- (2) Pb-Bi 合金の動粘性係数が Na のそれの約半分程度であり、作動流体の変更 (Na / Pb-Bi) に伴う内部流動状況への影響は極めて小さい。これは試験による結果、すなわち 2 倍程度の動粘性係数の差異は、内部流動特性に与える影響は無視し得る程度に小さいとする知見に従うものである。

各条件の内、横幅 (L) を 0.3 m とした場合の流速成分 U (x 方向) および W (z 方向) の等值線分布を図 3.5 - 図 3.8 に示す。これらの内、流速成分 W は、自由液面を下から突き上げることによる液面の亂れを生じさせ、ガス巻込み特性を支配する状態量である。結果より、以下の事が確認できる。

- (1) 初期液位 (H) が低いほど、また Fr 数が大きいほど、上昇流 (赤色) と下降流 (青色) との空間分布が局所的 (中間色である黄色領域が無い) であり、試験により確認された自由液面の乱れによるガス巻込み限界の特性を表現している。

(2) 作動流体の変更 ( $\text{Na} / \text{Pb-Bi}$ ) に伴う各流速成分分布への影響は極めて小さい。これは、試験による結果の内、自由液面に衝突する流速成分に関して動粘性係数の影響が極めて小さいとする知見に一致するものである。

#### (b) 自由液面特性

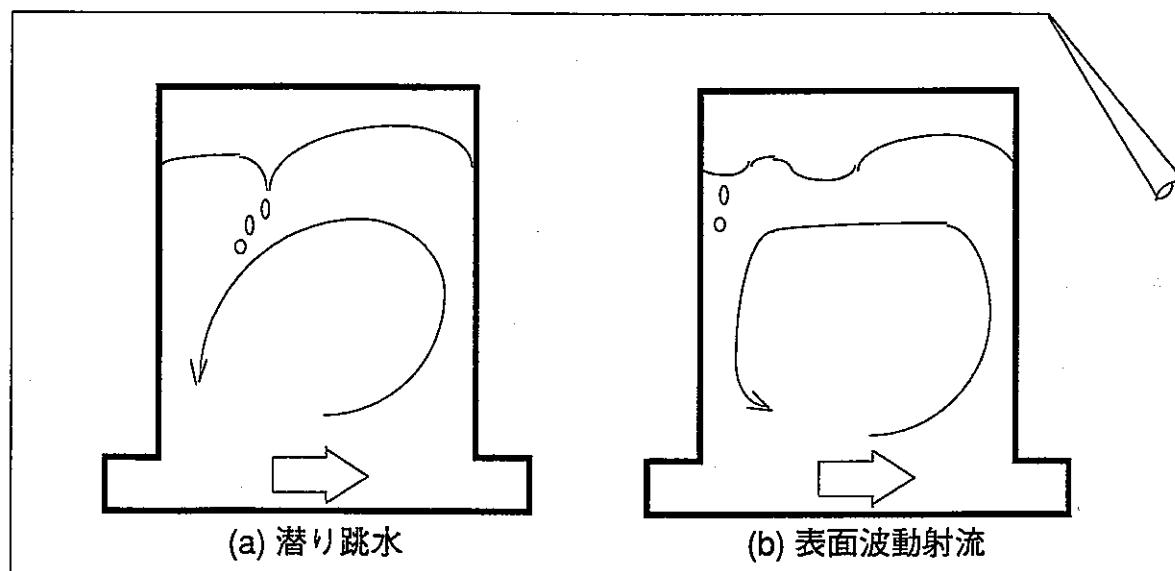
図 3.9 - 図 3.12 に、各条件における自由液面高さ分布の比較を、また図 3.13 - 図 3.16 に、各条件における自由液面勾配分布の比較を示す。自由液面高さ分布については、初期液位 ( $H$ ) が小さいほど自由液面の高低差量が大きく、また横幅 ( $L$ ) が小さいほど自由液面の高さ分布範囲が広い。これらの特徴は、作動流体に依らない。一方、自由液面勾配分布については、前述の自由液面高さ分布の特徴を反映したものとなっている。

潜込みによるガス巻込み特性に直接的な影響を与える自由液面流速の比較を、図 3.17 - 図 3.20 に示す。なお図中の自由液面流速は、試験体入口部を原点としていることからマイナス値として表示（自由液面右側から左側に向かう流れ）しているとともに、試験体入口流速で規格化を施している。全般的な傾向としては、試験体中央領域 ( $0.1 < x / L < 0.9$ ) で自由液面流速が大きくなっている。一方、試験体右側壁を上昇する内部流れ（流速  $W$  成分）が横方向にその向きを変更する領域近傍 ( $x / L = 1.0$ ) および自由液面横流れ（流速  $U$  成分）が下方向にその向きを変更する領域近傍 ( $x / L = 0.0$ ) においては、小さな値に止まっている。同一の横幅 ( $L$ ) および  $Fr$  数の条件においては、初期液面 ( $H$ ) が低い程、大きな自由液面流速が発生している。一方、 $Fr$  数および初期液面 ( $H$ ) を固定した条件では、横幅 ( $L$ ) が大きい程、自由液面流速は増大する。なおこれらの傾向は、作動流体 ( $\text{Na} / \text{Pb-Bi}$ ) により大きく変化しない。

#### 3.1.4 検討

##### (a) 自由液面形状に関する考察

$Fr$  数を一致させた条件での自由液面形状の比較結果 ( $H = 0.8 L$  条件) を、図 3.21 に示す。文献 (10) によれば、スケッチ 3.3 に示すように潜り跳水と表面波動射流の 2 種類に分類される。すなわち、潜り跳水は、



スケッチ 3.3　自由液面形状の分類

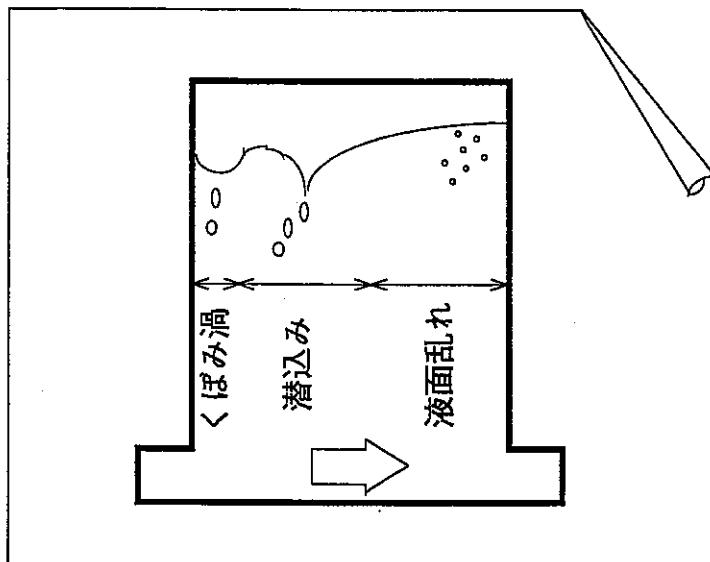
主流が流体中に潜込み、その潜込み点の下流領域に跳水あるいは淀みが生じるパターンであり、横方向単位距離当たりの自由液面勾配が比較的大きい条件の下で観察される。一方、表面波動射流は、主流が流体中に

突入せず液面を波動状に流下するパターンであり、比較的液面勾配が小さい条件で発生する。なお同文献では、内部流速の増加により、表面波動射流パターンから潜り跳水パターンに遷移することが確認されている。今回の評価条件では概略的に、横幅 ( $L$ ) が 0.3 m の場合が表面波動射流パターンに、横幅 ( $L$ ) が 1.0 m の場合が潜り跳水パターンに対応すると考えられる。更に図 3.21(a) では、Fr 数が 1.0 の場合が表面波動射流パターンに、Fr 数が 1.5 の場合が潜り跳水パターンに相当する自由液面形状を示している。なお、表面波動射流パターンから潜り跳水パターンへの遷移流速は、0.727 m/s 近傍 (入口流速換算; Fr = 1.5) 近傍であると考えられる。

図 3.21 に見られるように、試験体スケールに依らず Fr 数一致条件で自由液面高さ分布が評価できるとする試験結果の傾向は、今回の評価では得られていない。また、2 倍程度の動粘性係数の差異を持つ Na と Pb-Bi 合金では、自由液面形状に関して大きな違いは見られない。

#### (b) 自由液面勾配に関する考察

Fr 数を一致させた条件での自由液面勾配の比較結果 ( $H = 0.8 L$  条件) を、図 3.22 に示す。これまでに行われた数多くのガス巻込み試験<sup>(11)</sup>によれば、スケッチ 3.4 に示した 3 種類のパターンに大別される。



スケッチ 3.4 ガス巻込みパターンの分類

これらの内、ガス巻込みパターンを図 3.22 に示した自由液面勾配の比較結果と対応させると、横幅 ( $L$ ) が 0.3 m の場合には潜込みによるガス巻込みパターン ( $0.5 < x/L < 0.8$  で変動大) が、一方横幅 ( $L$ ) が 1.0 m の場合にはくぼみ渦および液面乱れによるガス巻込みパターンが重要になるものと考えられる。

#### (c) 自由液面流速に関する考察

図 3.23 に、Fr 数を一致させた条件での自由液面流速の比較結果 ( $H = 0.8 L$  条件) を示す。図中の自由液面流速は、試験体入口流速で規格化を施している。比較結果より、Fr 数を小さく、また横幅 ( $L$ ) を大きくした場合に、自由液面流速が大きくなることが分かる。これは、Fr 数が大きくなると自由液面右側での液面勾配が増加することにより重力方向への運動量輸送が活性化され、この結果自由液面横方向の流速が相対的に減少した結果であると解釈することができる。これはガス巻込み挙動を、自由液面流速と自由液面勾配の両者を適切に考慮して評価すべきものであることを示唆している。

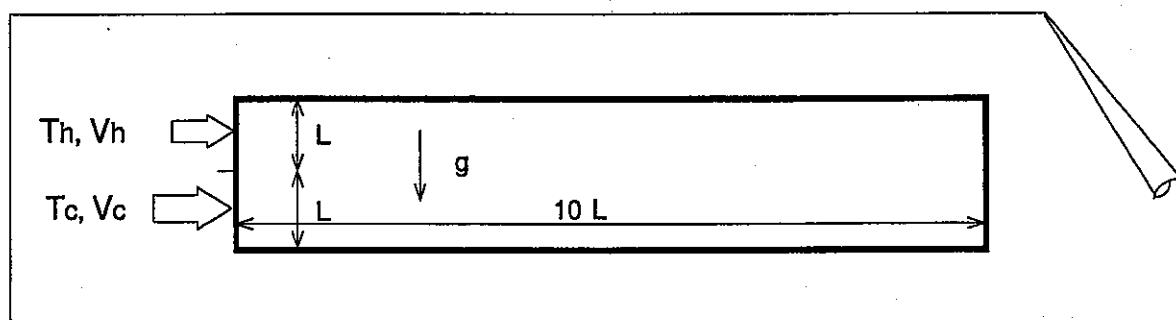
## (d) ガス巻込み限界に関する考察

試験により得られたくぼみ渦によるガス巻込み限界特性を指標として、解析による自由液面流速とガス巻込みとの関係を図3.24にまとめる。同図中(a)は初期液位( $H$ )依存性を示すものであり、(b)は横幅( $L$ )依存特性である。結果として、横幅( $L$ )が1.0mで且つ $Fr$ が1.5の場合に、水試験から得られたくぼみ渦によるガス巻込み限界値(自由液面流速 $U$ ; 約0.4m/s)を超えて、試験におけるガス巻込み生起結果と合致した。なお、表面張力係数の値は、水よりもNaの方が約2倍(Pb-Biの場合は、水の約5倍)大きいことから、安全側の評価結果を与えるものと考えられ、水試験により得られたガス巻込み限界特性を用いることは妥当であると解釈できる。また、AQUA-VOFコードによる結果は、ガス巻込み限界に関する指標を適切に評価できることを確認した。

## 3.2 温度成層化

## 3.2.1 評価体系

文献(1)で使用した安定二成層流問題を評価体系とする。幾何形状を、スケッチ3.5に示す。



スケッチ3.5 安定二成層流評価体系

## 3.2.2 評価条件

解析評価条件をスケッチ3.6にまとめる。作動流体は、Na, Pb-Bi合金およびCO<sub>2</sub>ガスの3種類である。

$L$ (m)	$V_h$ (m/s)	$V_c$ (m/s)	$Ri$ (= $g \beta 2L \Delta T / \Delta V^{**2}$ )	$T_h$ (°C)	$T_c$ (°C)	
0.1	0.033	0.117	1.0	0.1	0.01	500.0 Val.

スケッチ3.6 解析評価条件

ここでの評価では、ダクト高さ( $L$ )、高低温流速( $V_h$ および $V_c$ )および高温側温度( $T_h$ )を固定した条件下において、 $Ri$ 数(すなわち低温側温度( $T_c$ ))を変更する。

数値解析には、差分法による直接シミュレーションコードDINUS-3<sup>(12)</sup>を使用する。Na物性値については、DINUS-3コード内蔵のパッケージを、Pb-Bi合金については式(3.1)-(3.3)を、CO<sub>2</sub>ガスについては、伝熱工学資料<sup>(9)</sup>記載の5MPaでのデータをフィッティングした下式を用いた。

$$\text{密度 } \rho (\text{kg/m}^3) = 44.801 - 0.034425 \times T \quad (3.4)$$

$$\text{比熱 } C_p (\text{J/kg K}) = 1005.8 + 0.335 \times T \quad (3.5)$$

$$\text{動粘性係数 } \nu (\text{m}^2/\text{s}) = -1.8182 \times 10^{-7} + 2.8 \times 10^{-9} \times T \quad (3.6)$$

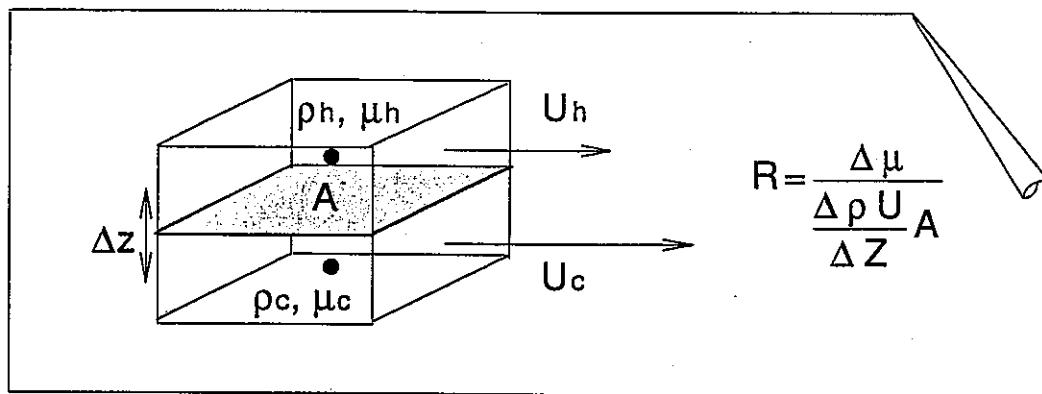
### 3.2.3 数値解析

以下に、数値計算条件をまとめます。

座標系	:	x - z 直交 2 次元
メッシュ分割	:	$100^i$ ( $\Delta x = 1.0$ (cm)) $\times 40^k$ ( $\Delta z = 0.5$ (cm))
入口流速分布	:	一様 (断面平均値; スケッチ 3.6 参照)
入口温度	:	一様 (断面平均値; スケッチ 3.6 参照)
固体壁条件	:	非スリップ、断熱
乱流モデル	:	不使用

#### (a) 渦度輸送特性

図 3.25 - 図 3.27 に、各条件における渦度輸送特性 (1 秒間隔での瞬時分布) の比較を示す。ナトリウムを作動流体とした場合 (図 3.25) では、 $Ri$  数が減少し成層化の程度が減ると、上下層間での剪断力による渦列の発生位置が下流側に移動することが分かる。この特性は、温度成層界面を挟んでの剪断力と同位置での粘性力とのバランスによって解釈することができる (スケッチ 3.7 参照)。すなわち、温度成層界面を挟んで運



スケッチ 3.7 温度成層界面における力のバランス

動量差  $\Delta \rho U$  の剪断力が断面  $A$  を通して  $\Delta Z$  の距離間に働く場を考えると、剪断渦の生起条件は同位置での粘性力とのバランス  $R$  によって支配される。現象論的には、入口部において粘性力差が運動量差を上回るため剪断渦列の発生は抑制されるものの、上下間での温度差が減少する下流側においては運動量差が粘性力差を上回るようになり、剪断渦列が生起することになる。

同様な特性は、作動流体を Pb-Bi 合金を用いた場合にも発生するものの、動粘性係数がナトリウムの約 2 倍であることから、剪断渦列の発生位置はナトリウムのそれに比べて下流側にシフトしている。

作動流体を  $\text{CO}_2$  ガスとした場合には、動粘性係数の値がナトリウムの約 4.5 倍と大きいため、剪断渦列の発生が下流側に大きくシフトする ( $Ri = 1.0$  条件)。しかしながら、 $Ri$  数の減少により、剪断渦列の生起位置が上流側にシフトする傾向を示し、液体とは異なる気体特有 (粘性力に対する温度依存性) な特徴を反映したものとなっている。

## (b) 空間温度分布特性

図 3.28 - 図 3.30 に、各条件における空間温度分布特性の比較をまとめた。各図中には、 $t = 5.0$  秒での瞬時温度分布(最大温度差で規格化; 赤: 最高温度、青: 最低温度)および 5.0 秒間(0.1 秒間隔データ)の時間平均温度分布(最大温度差で規格化; 赤: 最高温度、青: 最低温度)を記載している。作動流体を変更した場合の比較より分かる通り、剪断渦列が発生していない領域での温度分布は、各作動流体の熱伝導度に強く依存している。すなわち、熱伝導度が約 66 W/mK (627 °C) と極めて大きな値を持つナトリウムでは、入口領域から中間温度層を表す黄色領域の割合が大きく、下流領域における剪断渦層による流体混合の活性化と相俟って上下温度分布の解消過程が極めてスムーズに進んでいる。一方、Pb-Bi 合金の場合には、温度伝導度がナトリウムのそれの約 1/4 と小さいため、剪断渦列が発生していない領域での流体混合は極めて小さなものに止まる。 $\text{CO}_2$  ガスの場合にはこの傾向が更に顕著で、剪断渦列が発生していない領域において中間温度層はほとんど見られない。

以上の傾向を主流方向各断面で比較した結果が図 3.31 - 図 3.33 であり、ナトリウム以外を作動流体とした場合にあっては、剪断渦列による流体混合以外に温度分布を緩和させる要因は見あたらない。

## 3.2.4 検討

## (a) 温度成層界面上昇特性に関する考察

温度成層界面位置を最大温度差の中間値となる軸方向位置であると仮定し、この上昇特性を主流方向にまとめた。結果を図 3.34 に示す。比較結果より分かる通り、ナトリウムおよび Pb-Bi 合金を作動流体とした場合には、 $Ri$  数の増加により界面上昇速度が増しているのに対し、 $\text{CO}_2$  ガスを作動流体とした場合には  $Ri$  数に依らず概ね一定の値を取る。剪断渦列が発生していない領域における温度成層界面の上昇特性は、第 2 章に示した既往研究結果による特性とは別の状態量に支配されているものと考えることができる。

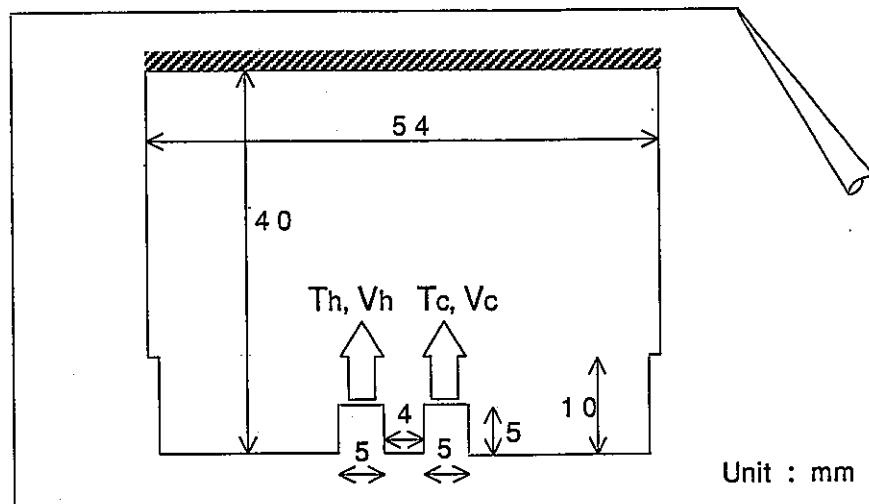
## (b) 軸方向温度勾配特性に関する考察

図 3.35 に、温度成層界面位置(図 3.34 参照)における軸方向温度勾配の流れ方向分布特性を比較する。図中の縦軸は、入口部における温度勾配(最大値)により規格化を施している。作動流体としてナトリウムおよび Pb-Bi 合金を用いた場合には、ほぼ指数関数的な減少傾向を取るのに対し、 $\text{CO}_2$  ガスの場合は、むしろ直線的な減少傾向となっている。このことは、 $\text{CO}_2$  ガス中に温度成層化が発生した場合には、より積極的な界面解消策(例えば、強制対流条件の確保)を取らなければならないことを示唆している。

## 3.3 サーマルストライピング

## 3.3.1 評価体系

文献(1)で使用した平行衝突噴流問題を評価体系とする。幾何形状を、スケッチ 3.8 に示す。ここでの評価の着目点は、噴流孔から流出した温度の異なる作動流体が混合を始めてからその下流側に位置する衝突物までの区間につき、発生する流体温度ゆらぎ挙動の振幅と周波数の空間分布についての差異を確認することにある。すなわち、サーマルストライピングを特徴づける 4 種類のパラメータ((1) 主流乱流域における高温流体の混合特性、(2) 境界層通過による温度ゆらぎの減衰特性、(3) 流体 - 構造物非定常熱輸送による温度ゆらぎの減衰特性、および(4) 構造物熱的応答特性)の内、(1) の主流域における乱流混合特性を比較検討することにある。したがって、ここでの評価では、流体と構造物との熱的な相互作用による各種特性変化には言及しない。



スケッチ 3.8 サーマルストライピング評価体系

### 3.3.2 評価条件

解析評価条件を、スケッチ 3.9 に示す。作動流体は、Na, Pb-Bi 合金および  $\text{CO}_2$  ガスの 3 種類とする。

	$V_h$ (m/s)	$V_c$ (m/s)	$\beta$ ( $V_h / V_c$ )	Re, AVE	$T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Na	2.0	2.0	1.0	25,500	320.0	280.0
Pb-Bi	0.968	0.968			320.0	280.0
$\text{CO}_2$	2.556	2.556			260.0	220.0
Na	0.968	0.968	1.0	12,300	320.0	280.0
Pb-Bi				25,500	320.0	280.0
$\text{CO}_2$				9,700	260.0	220.0

スケッチ 3.9 解析評価条件

ここでの評価は、Re 数を一致させた条件での 3 ケースおよび流測值を一致させた条件での 3 ケースの合計 6 ケースとする。

数値解析には、直接シミュレーションコード DINUS-3<sup>(12)</sup> を使用する。Na 物性値については、DINUS-3 コード内蔵のパッケージを、Pb-Bi 合金については式 (3. 1) - (3. 3) を、 $\text{CO}_2$  ガスについては式 (3. 4) - (3. 6) を用いた。

### 3.3.3 数値解析

以下に数値計算条件をまとめると。

- 座標系 : x - y - z 直交 3 次元
- メッシュ分割 :  $108^i (\Delta x = 0.5 \text{ (mm)}) \times 3^j (\Delta y = 0.5 \text{ (mm)}) \times 80^k (\Delta z = 0.5 \text{ (mm)})$
- 入口流速分布 : 一様 (断面平均値; スケッチ 3.9 参照)
- 入口温度 : 一様 (断面平均値; スケッチ 3.9 参照)
- 固体壁条件 : 非スリップ (粘着条件)、断熱
- 乱流モデル : 不使用

## (a) 湍度空間分布特性

図 3.36 に  $Re$  数を一致させた場合の瞬時湍度分布特性の比較を、図 3.37 に流速を一致させた場合の同分布特性の比較を示す。 $Re$  数一致条件での瞬時湍度分布の比較では、Na を作動流体とした場合と Pb-Bi 合金を作動流体とした場合の結果について、空間的な湍度分布に相似性が認められる。しかしながら、 $CO_2$  ガスを作動流体とした場合の空間湍度分布は前者の 2 つとは異なり、下流側に向かうに従って湍度スケールが細分化している様子が分かる。これら細分化した渦の強度は、下流側においても顕著な減衰傾向が見られず、慣性力が粘性力を大きく上回った結果であると解釈できる。一方、Na を作動流体とした場合の結果と Pb-Bi 合金を作動流体とした場合の結果は、概ね流速差に起因して、湍度強度に差異が現れている。すなわち、Na を作動流体とした場合の噴流流速が 2.0 m/s と Pb-Bi 合金を作動流体とした場合のそれの約 2 倍と大きいことから、湍度の値自体が大きめとなっている。

図 3.37 に示した流速一致条件での比較では、空間的な湍度分布に大きな違いは見られない。また、湍度値自体についても、有意な違いは確認できない。

以上より、サーマルストライピングに係わる湍度分布特性を含む流動挙動は、流速に大きく支配されていると解釈できる。

## (b) 空間温度分布特性

$Re$  数を一致させた場合の瞬時温度分布特性の比較および流速を一致させた場合の同分布特性の比較を、それぞれ図 3.38 および図 3.39 に示す。 $Re$  数一致条件での瞬時温度分布の比較(図 3.38)では、Na を作動流体とした場合と Pb-Bi 合金を作動流体とした場合の結果について、概ね同様な空間温度分布傾向を与えるものの、Pb-Bi 合金を作動流体とした場合の方が連行渦の影響がより下流側にまで達する。これは正に、流体物性としての熱伝導度の違いによるものと解釈でき、熱伝導度が Na の約 1/4 と小さい Pb-Bi 合金の場合、連行渦が混合しないまま下流側に輸送されるためと考えることができる。 $CO_2$  ガスを作動流体とした場合も同様に、連行された渦がより下流側にまで到達し、広い空間領域で温度分布が現れている。ただしこの場合、流速値自体が大きいことに起因した乱流混合によって、温度を均一化しようとする効果は Pb-Bi 合金を作動流体とした場合よりも大きい。

流速一致条件での比較(図 3.39)では、熱伝導度の違いが顕著に現れたものとなっている。すなわち Na を作動流体とした場合には、きわめて滑らかな空間温度分布が生じ、高温流体(赤色および青色)は天井面に配置した構造物表面まで到達していない。一方、熱伝導度が Na の約 1/4 と小さい Pb-Bi 合金を作動流体とした場合には、空間的な温度分布が下流側に大きく広がるとともに、高温流体が天井面まで到達する。このような傾向は、 $CO_2$  ガスを作動流体とした場合にはより顕著で、噴流孔から流出した高温流体が全く混合しないまま天井面にまで到達している。

図 3.40 - 図 3.44 に、各条件における温度時系列特性を比較する。温度時系列データの抽出空間位置は、両噴流孔の中間軸に沿う軸方向 6 点( $k=20$  : 噴流孔上端面から 5 mm 位置、 $k=30$  : 同面から 10 mm、 $k=40$  : 同面から 15 mm、 $k=50$  : 同面から 20 mm、 $k=60$  : 同面から 25 mm、および  $k=70$  : 同面から 30 mm(天井面から 5 mm))である。各図中には、全シミュレーション時間を時間軸としたものと、この中から 0.05 秒間だけの結果を抜き出した短時間軸のものを併記した。

全体的な傾向としては、噴流孔出口面から下流側に向かうにしたがって、温度ゆらぎ挙動の振幅と周波数が急激に減少する。また、Na を作動流体とした場合の温度ゆらぎ波形は、比較的正弦波に近いものの、Pb-Bi 合金および  $CO_2$  ガスを作動流体とした場合には、正弦波振動から外れるようになる。特に  $CO_2$  ガスの

場合はこの傾向が顕著で、小スケールの渦の発生に伴う高周波成分が正弦波上に重畠した挙動を示す。

### 3.3.4 検討

#### (a) 温度ゆらぎ変動特性に関する検討

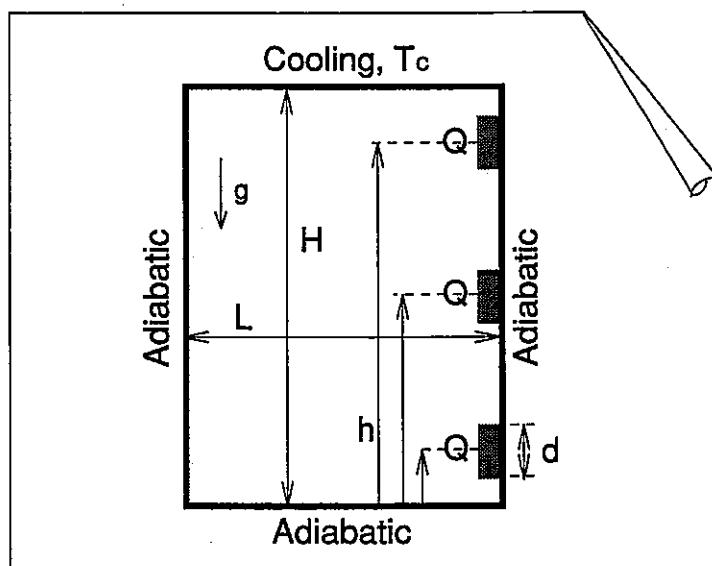
図3.45に、温度ゆらぎ挙動の振幅および周波数を、軸方向について比較する。温度ゆらぎ振幅と周波数の規定では、レインフロー法<sup>(13)</sup>による波形分解結果の中から、最も度数の多い波を代表抽出した。図中の温度ゆらぎ振幅値は、噴流孔での最大温度差により規格化している。まず、Re数一致条件での温度ゆらぎ振幅の比較では、作動流体に依らず概ね相似形の軸方向分布となっている。この内Naについては、その高い熱伝導度からその他の値よりも若干低めの振幅値を取る。一方、流速一致条件での温度ゆらぎ振幅の比較では、大きな違いが見られ、Re数に従う乱流強度が温度ゆらぎ振幅分布に大きな影響を与えていていると考えることができる。温度ゆらぎ周期については、Re数を一致させた条件で各作動流体間に大きな違いが見られ、逆に流速を一致させた条件で概ね同一の結果を示している。なお、温度ゆらぎ周期は、流速の変化に対して概ね線形に増減する傾向示していることが分かる。

以上より、サーマルストライピング特性の内、流体温度ゆらぎ振幅を評価する上ではRe数を一致させることが必要となり、温度ゆらぎ周期を評価するためには流速値を一致させる必要があると言える。

### 3.4 自然対流

#### 3.4.1 評価体系

作動流体を変更した場合の自然循環力の立ち上がり特性を比較する観点より、スケッチ3.10に示す矩形容器内サーマルキャビティ問題を評価体系とする。



スケッチ3.10 解析評価体系

#### 3.4.2 評価条件

解析評価条件をスケッチ3.11にまとめる。解析上のパラメータは、スケッチ3.10に示した通り、(1)内部発熱部の軸方向高さ(h)および(2)Ra数である。なお、Ra数は内部発熱を体系内に含む場合の式(3.7)を用いて規定する。

$$Ra = \beta \rho^2 g C_p Q d^3 / (\mu \lambda^2) \quad (3.7)$$

ここで、 $\beta$ ：体積膨張率、 $\rho$ ：流体密度、 $g$ ：重力加速度、 $C_p$ ：流体比熱、 $Q$ ：体積発熱量、 $d$ ：内部発熱領域高さ、 $\mu$ ：流体粘性係数、 $\lambda$ ：流体熱伝導度である。作動流体は、Na, Pb-Bi 合金および  $\text{CO}_2$  ガスの 3 種類である。

H (m)	L (m)	d (m)	h (m)	$\text{Ra} (= \beta \rho^2 g C_p Q d^3 / (\mu \lambda^2))$	$T_c (^{\circ}\text{C})$	$Q (\text{W/m}^3)$
1.0	0.5	0.1	0.2 H	$10^6$	$10^8$	Val.
			0.5 H			
			0.8 H			

スケッチ 3.11 解析評価条件

数値解析には、単相多次元熱流動解析コード AQUA の version 5.0<sup>(14)</sup> を使用する。Na 物性値については、DINUS-3 コード内蔵のパッケージを、Pb-Bi 合金については式 (3.1) - (3.3) を、 $\text{CO}_2$  ガスについては式 (3.4) - (3.6) を用いた。

### 3.4.3 数値解析

数値計算条件を以下にまとめる。

- 座標系 : x - z 直交 2 次元
- メッシュ分割 :  $50^i$  ( $\Delta x = 1.0$  (cm))  $\times 1^j$  ( $\Delta y = 1.0$  (cm))  $\times 100^k$  ( $\Delta z = 1.0$  (cm))
- 初期流体温度 :  $400$   $^{\circ}\text{C}$
- 固体壁条件 : 非スリップ、断熱
- 乱流モデル : 代数応力モデル (ASM)

#### (a) 空間温度分布過渡特性

図 3.46 - 図 3.63 に、各条件における空間温度分布の過渡特性を 1,000 秒までの区間について示す。なお各図中の温度色は、1,000 秒間に体系内に現れた最高温度と最低温度とを用いて規格化を施している。これら最高最低温度の値は、各図中の右端に記載した。

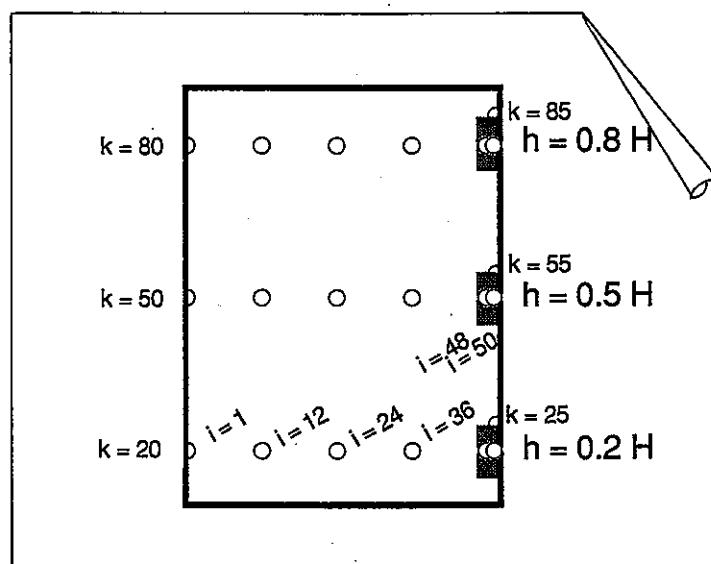
Na を作動流体とした場合の挙動 (図 3.46 - 図 3.48;  $\text{Ra} = 10^6$  および図 3.55 - 図 3.57;  $\text{Ra} = 10^8$  参照) は、基本的に浮力噴流としての特徴を持ち、体積発熱量の大きな場合 ( $\text{Ra} = 10^8$ ) に連行領域の半幅が小さくなる様子を見ることができる。この場合、熱伝導などによるエンタルピ拡散は相対的に小さく、浮力に伴う上昇運動量が支配的となる対流型の特性を示す。

Pb-Bi 合金を作動流体とした場合 (図 3.49 - 図 3.51;  $\text{Ra} = 10^6$  および図 3.58 - 図 3.60;  $\text{Ra} = 10^8$  参照) にも基本的には同様な傾向を示すものの、Na を作動流体とした場合と比較すると、エンタルピ輸送に大きな時間遅れが生じていることがわかる。これは、Pb-Bi 合金の熱容量が Na の場合の約 1.5 倍、また熱伝導度が約 1/4 であることに起因している。

$\text{CO}_2$  ガスの場合の挙動(図 3.52 - 図 3.54;  $\text{Ra} = 10^6$  および図 3.61 - 図 3.63;  $\text{Ra} = 10^8$  参照)は、前記 2 種類の液体金属の場合と異なり、密度が小さいことに起因して自然循環力が発生し難い状況であることを裏付けている。

### (b) 温度時系列特性

図 3.64 - 図 3.69 に、各条件での温度時系列特性を比較する。温度抽出点は、スケッチ 12 に示すように各ケースについて 7 点である。



スケッチ 3.12 解析評価条件

$\text{Na}$  および  $\text{Pb-Bi}$  合金を作動流体とした場合の発熱部領域各点での過渡挙動は、発熱開始とともに温度上昇を開始し、ピーク値に到達した後一旦温度降下し、この後緩やかな温度上昇に転ずる点が共通である。一方、 $\text{CO}_2$  ガスの場合には、自然循環ヘッドが大きい場合のみ前記 2 種類の液体金属の場合と同様な挙動を示すものの、自然循環ヘッドが小さい場合には概ね単調増加の傾向を示す。

### 3.4.4 検 計

#### (a) 自然循環立ち上がり特性に関する検討

図 3.70 に、ピーク温度到達時間と熱伝導度との関係を示す。なお、 $\text{CO}_2$  ガスを作動流体とし、 $\text{Ra}$  数を  $10^6$  とした場合には、明瞭なピーク挙動が見られなかつたため、データから除外してある。また、ピーク温度到達時間に、発熱領域の軸方向位置の依存性が見られなかつたため、 $h = 0.5 \text{ H}$  の値を代表値として表示している。図に示した結果より分かるように、各作動流体を用いた場合のピーク温度到達時間は、 $\text{Ra}$  数一致条件の下で評価可能であることが分かる。

## 第4章 結言

高速炉の実用化に向け、多様な作動流体を冷却材として用いた場合の検討に資するため、原子炉基本設計を左右する重要熱流動課題として、(1)自由液面揺動、(2)温度成層化、(3)サーマルストライピングおよび(4)自然対流の4項目を取り上げ、作動流体としてNa、Pb-Bi合金、CO<sub>2</sub>ガスを用いた場合のそれぞれの現象の特性変化を数値解析的に検討・評価した。得られた結果は、以下の通りである。

## [自由液面揺動]

- (1) Fr数を指標とした内部流動特性および自由液面特性につき、Naを作動流体とした場合とPb-Bi合金を作動流体とした場合で有意な違いは生じない。
- (2) 液面近傍流速を指標としたガス巻込み限界につき、AQUA-VOFコードが実験結果と概ね一致する結果を与え、同コードがガス巻込み限界の1次評価に使用可能であることを確認した。

## [温度成層化]

- (1) 連行現象(上下層剪断渦)の発生位置は、NaあるいはPb-Bi合金を作動流体とした場合、Ri数の減少とともに下流側に移動する。一方、CO<sub>2</sub>ガスの場合には、その発生位置はRi数の減少により上流側に移動する。
- (2) 温度成層界面の解消速度は、流体物性としての熱伝導度に大きく依存した特性を示す。すなわち、CO<sub>2</sub>ガス中に温度成層界面が発生した場合には、より積極的な界面解消策を講じる必要があることを示唆している。

## [サーマルストライピング]

- (1) CO<sub>2</sub>ガスを作動流体とした場合には、大きな粘性係数と小さな熱伝導度との相乗効果によって、より下流側まで大振幅の温度ゆらぎが到達する。
- (2) 作動流体を変更した場合、温度ゆらぎ振幅を評価するためにはReを一致させる必要があるが、温度ゆらぎ周期を評価するためには流速値を一致させる必要がある。

## [自然対流]

- (1) 基本的に、浮力噴流挙動に準じる特性を示す。ただし、自然循環力の立ち上がりの特性は、流体の熱容量および熱伝導度の影響を大きく受ける。なお、CO<sub>2</sub>ガスの場合には、自然循環ヘッドが大きい場合のみ、液体金属の場合と同様な温度過渡特性を示す。
- (2) 各作動流体を用いた場合のピーク温度到達時間は、Ra数一致条件の下で評価が可能である。

## 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、サイクル機構  
公開資料 JNC TN9400 2000-056 (2000).
- (2) 守屋祥一、米山 望、江口 讓、自由液面からのガス巻込み評価手法の検討、- 模型縮尺および試験流体物  
性値の効果 -、電力中央研究所 研究報告 U93004 (1993).
- (3) S. Moriya, et al., Effects of Reynolds Number and Richardson Number on Thermal Stratification in Hot Plenum,  
Nuclear Engineering and Design, Vol. 99, pp. 441-451 (1987).
- (4) 桃井 一光、林 謙二 他、上部プレナム内温度成層化現象 (1)、成層界面上昇速度、日本原子力学会 1995 年  
春の年会、A38 (1995).
- (5) 村松 壽晴、笠原 直人 他、サーマルストライピングに関する研究の現状と今後の研究計画、サイクル機  
構 公開資料 JNC TN9400 2000-010 (2000).
- (6) 日本機械学会、伝熱工学資料 改訂 第 4 版、pp. 14 (1997).
- (7) H. Takeda, et al., Study on Similarity Rule for Natural Circulation in LMFBR, Proc. FR '91, Vol. 4, pp. 19. 1 -  
19. 10 (1991).
- (8) 松本 英一、村松 壽晴、AQUA-VOF コードの開発、- AQUA コードへの VOF モデルの組み込みと検証 -、  
動燃事業団 資料 PNC TN9440 95-005 (1995).
- (9) 伝熱工学資料 改訂第 4 版、日本機械学会 (1997).
- (10) 後藤 修次、箱石 憲昭、低角度放流水脈の減勢に関する実験的研究、日本土木学会 第 47 回年次講演会、  
pp. 224-225 (1992).
- (11) 江口 让、自由液面でのガス巻込み現象におけるスケール効果、電力中央研究所 研究報告 U91005 (1991).
- (12) T. Muramatsu, Single-Phase Multi-Dimensional Thermohydraulics Direct Numerical Simulation Code DINUS-3,  
~ Input Data Description ~, PNC Technical Report PNC TN9520 98-001 (1998).
- (13) T. Endoh, Damage Evaluation of Metals for Random of Varing Loading, Proc. Sympo. on Mechanical Behavior of  
Materials, Vol. 1, pp. 371 (1974).
- (14) 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 -、動燃事業団 資料 PNC  
TN9460 94-003 (1994).

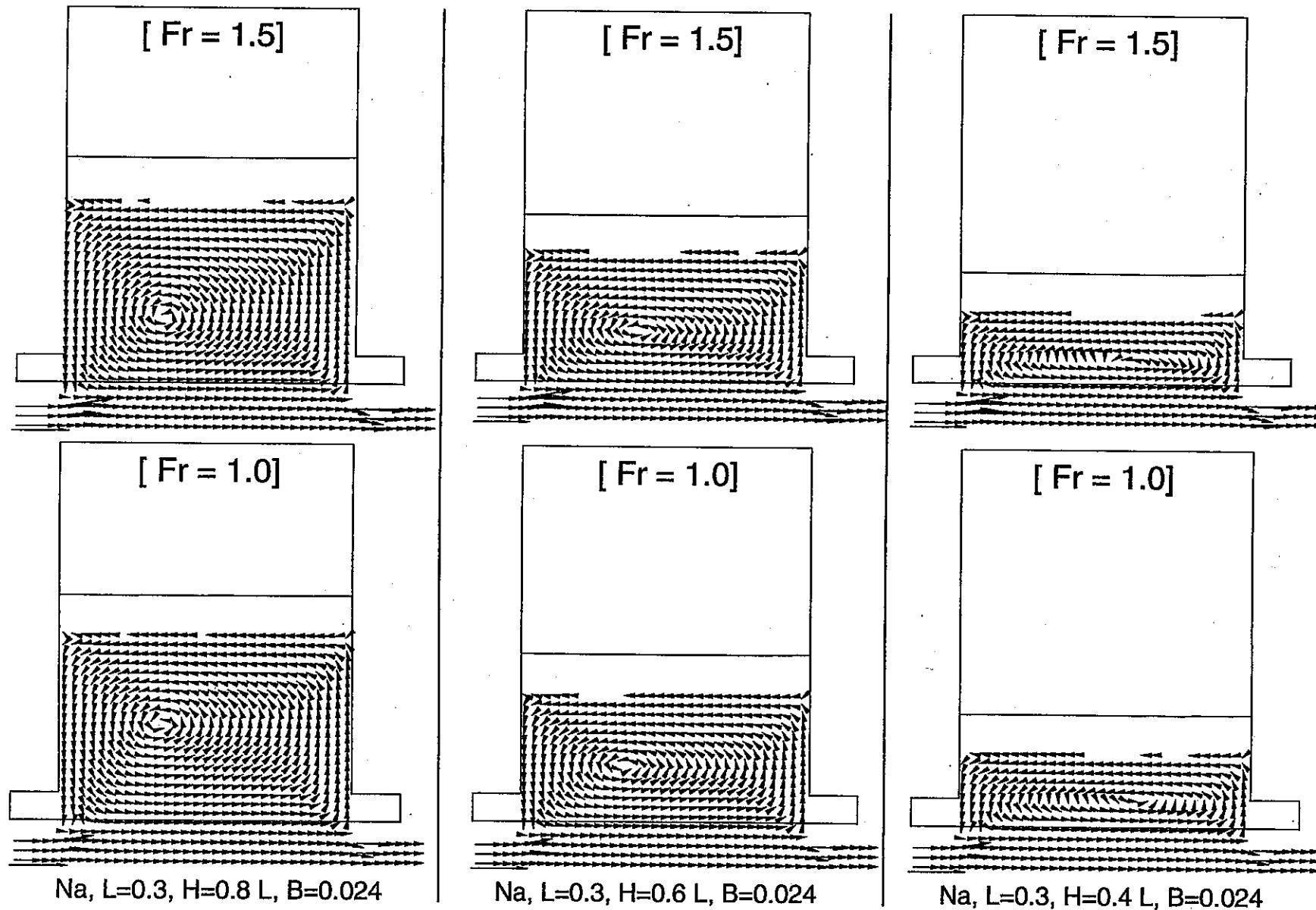


図 3.1 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)

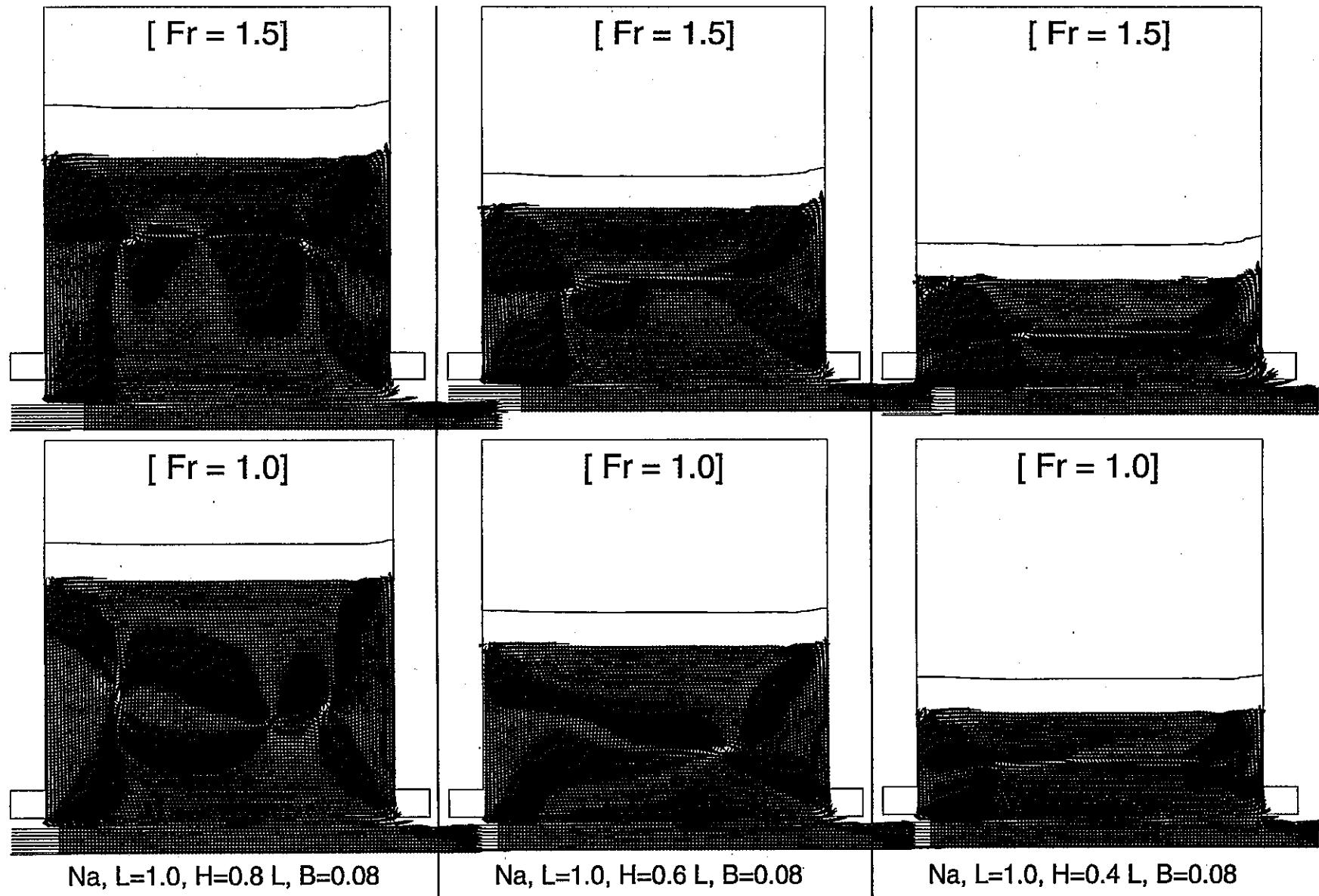


図 3.2 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)

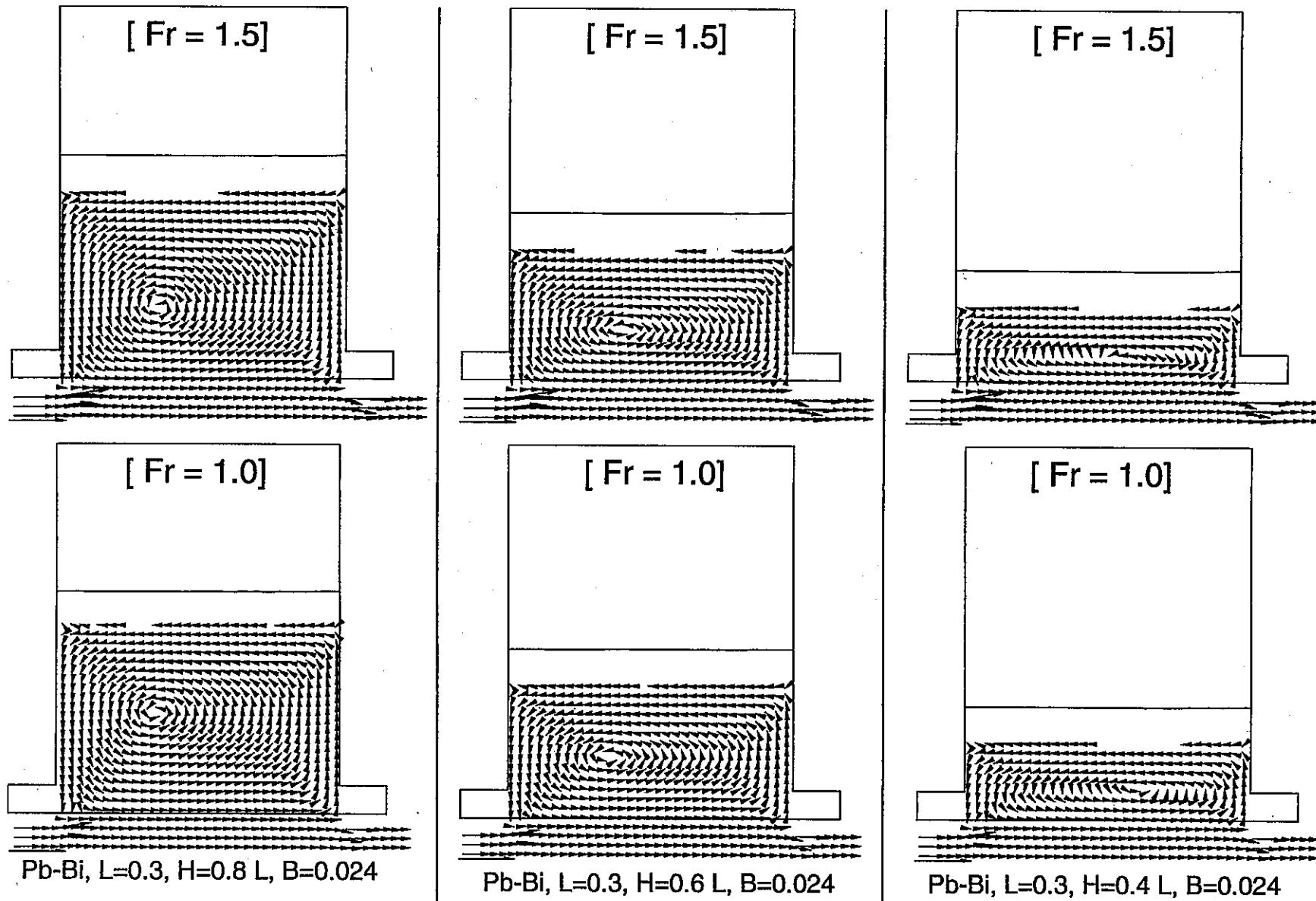


図 3.3 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 (L = 0.3 m 条件)

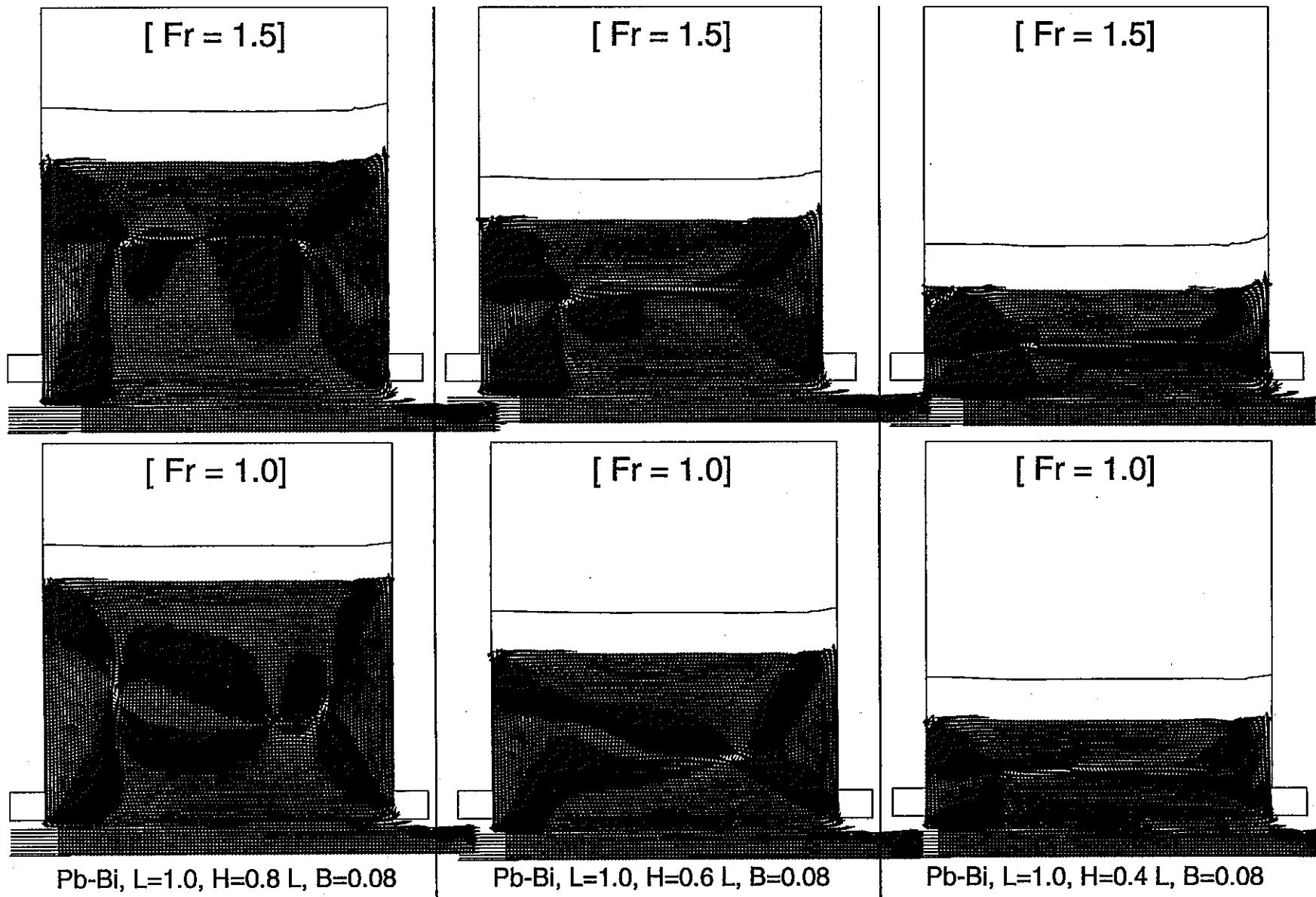


図 3.4 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル場の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)

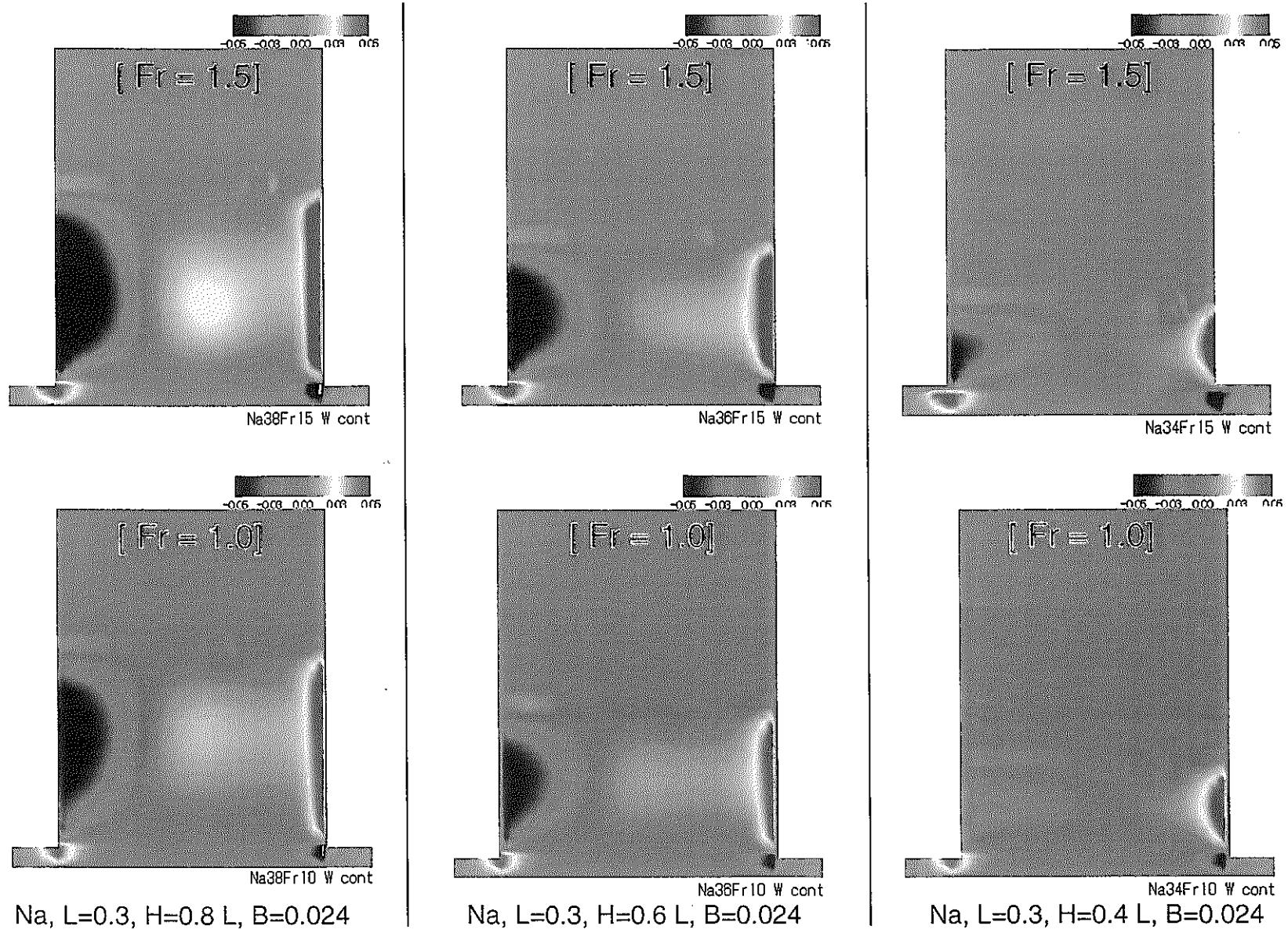


図 3.5 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル  $W$  成分分布の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

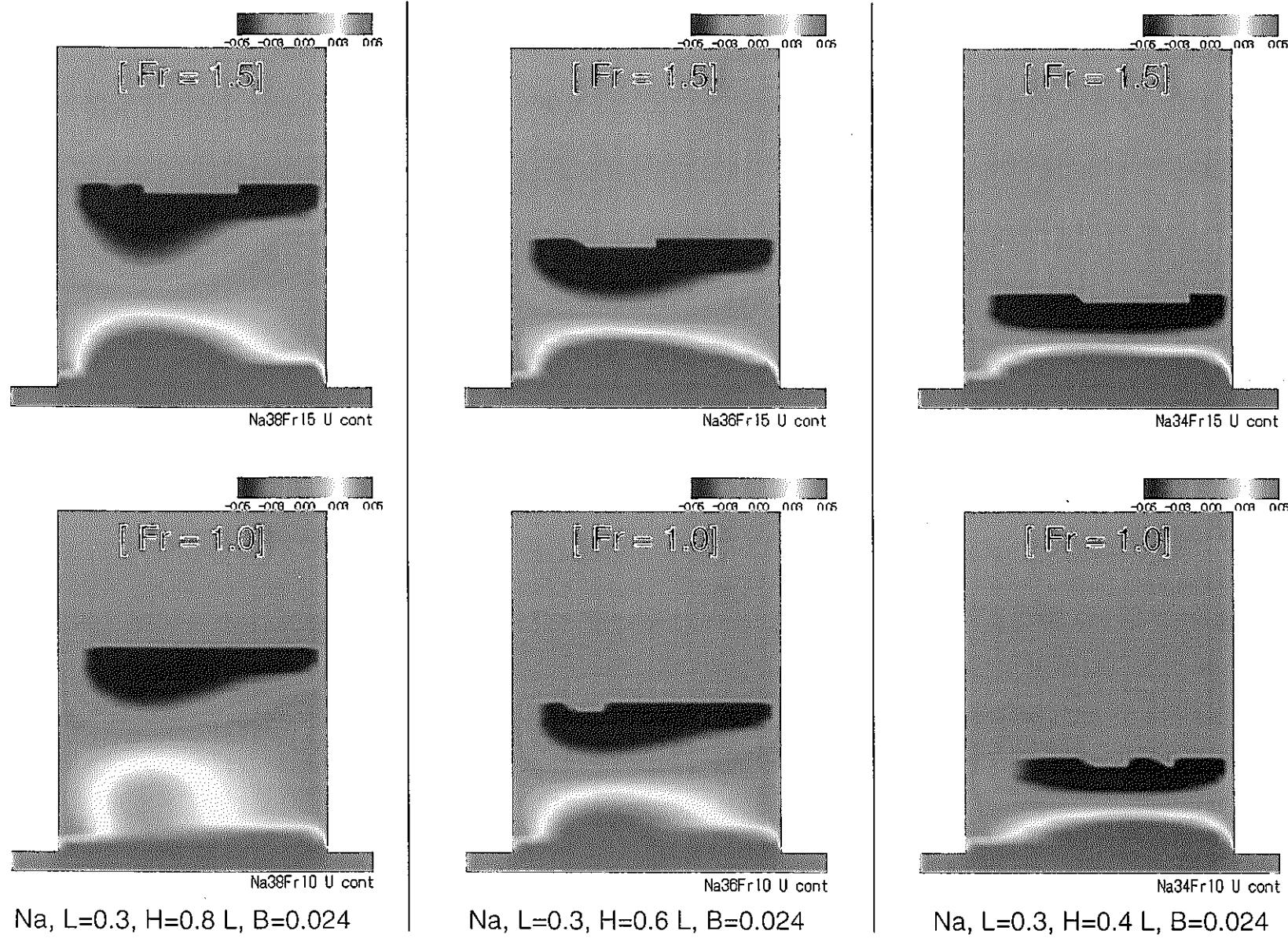


図 3.6 ナトリウムを作動流体とした場合の流速ベクトル  $U$  成分分布の比較 ( $L = 0.3\text{ m}$  条件)

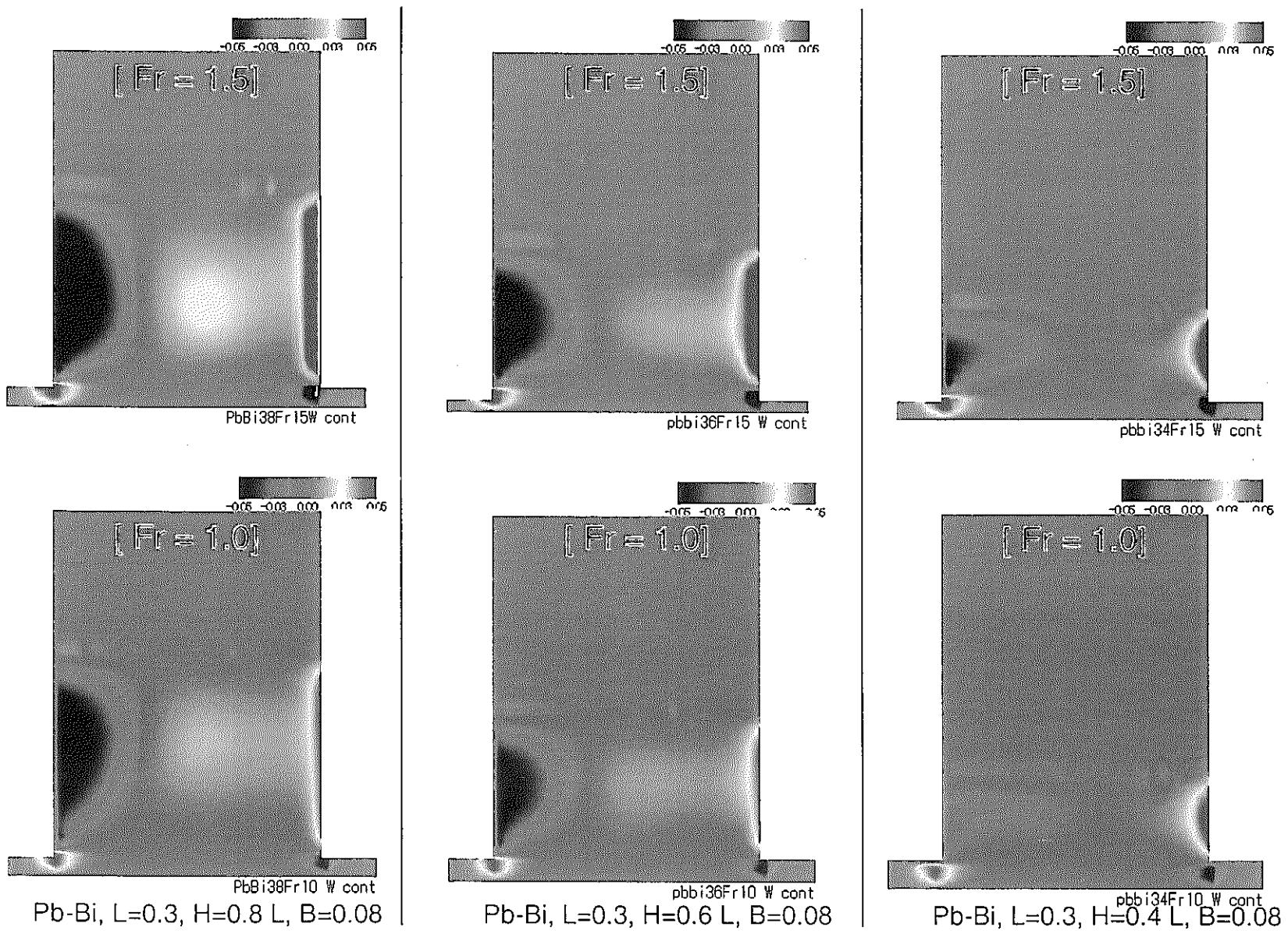


図 3.7 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル  $W$  成分分布の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

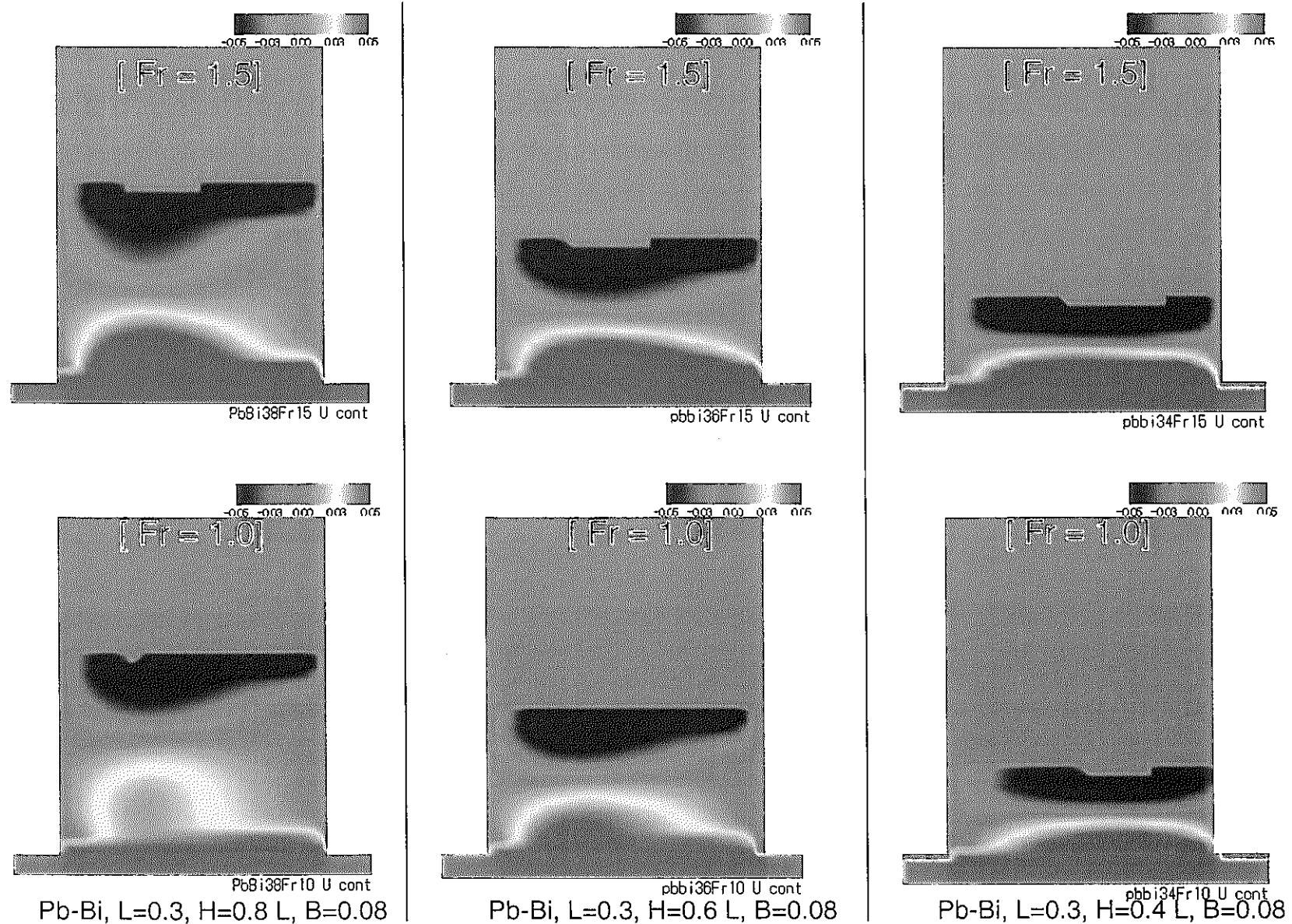
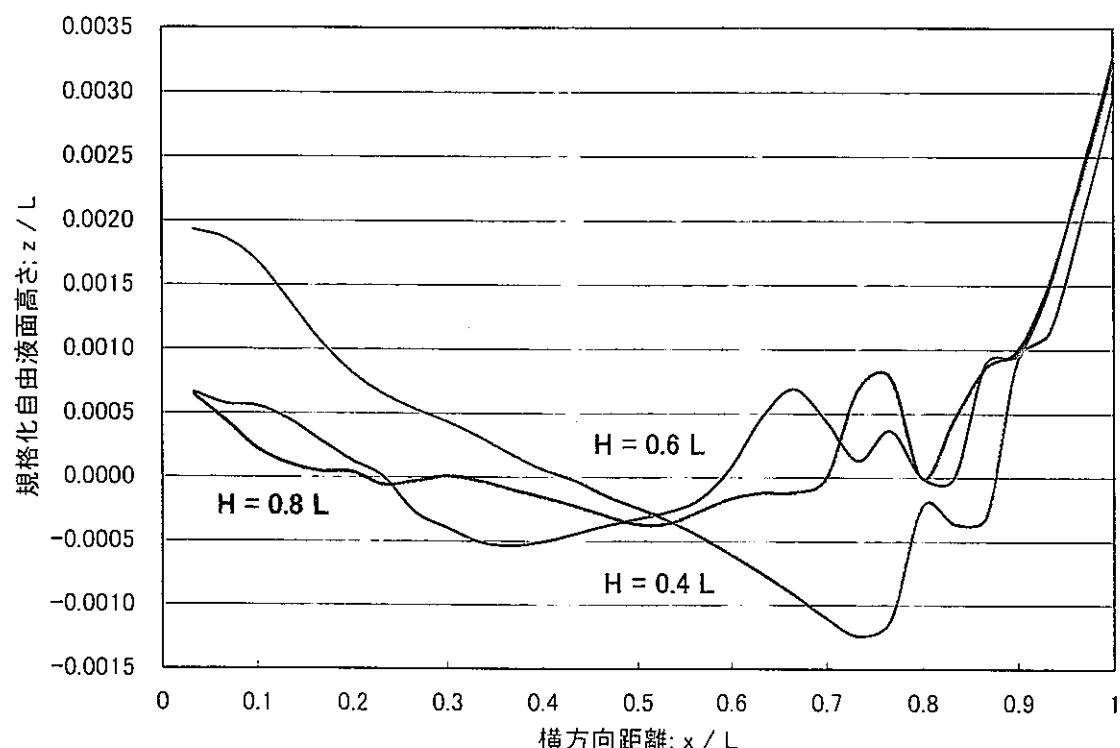
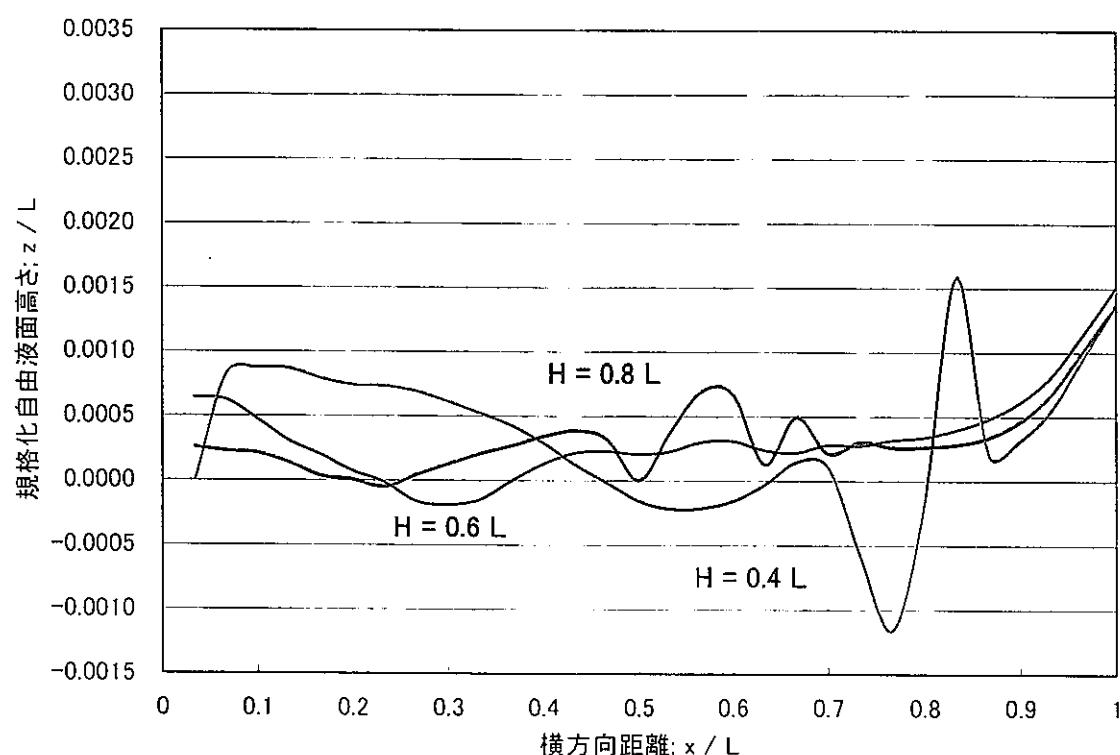


図 3.8 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の流速ベクトル  $U$  成分分布の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

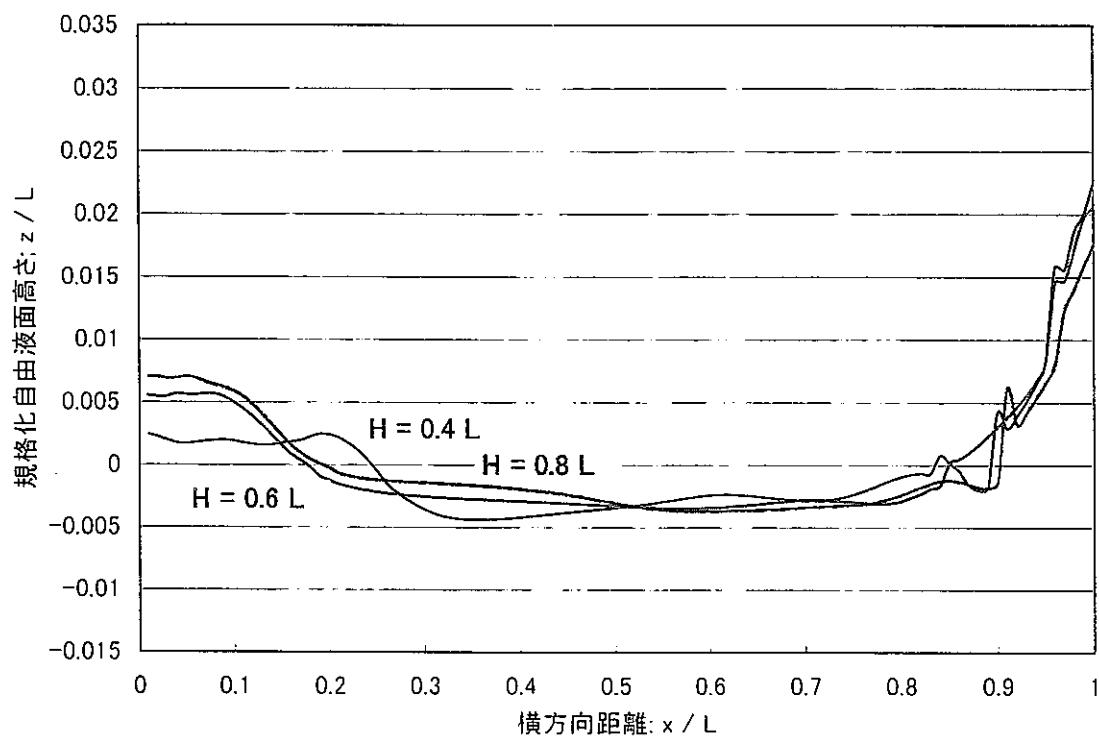


(a)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.5, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

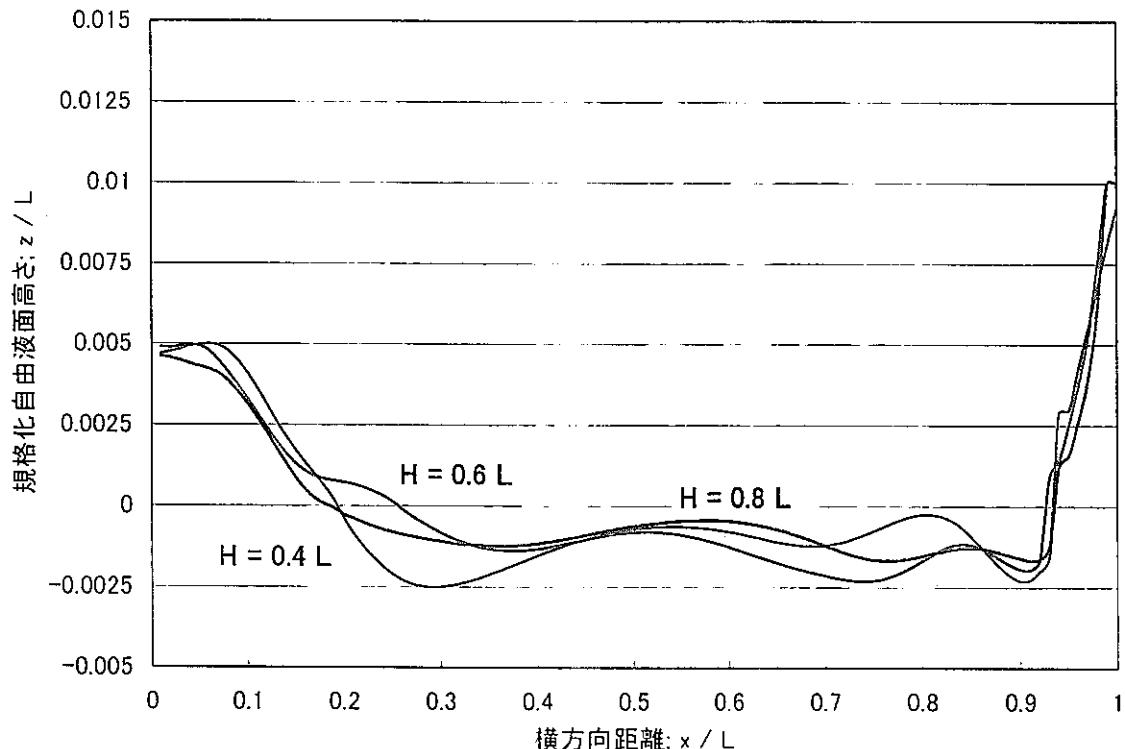


(b)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.0, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

図 3.9 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)

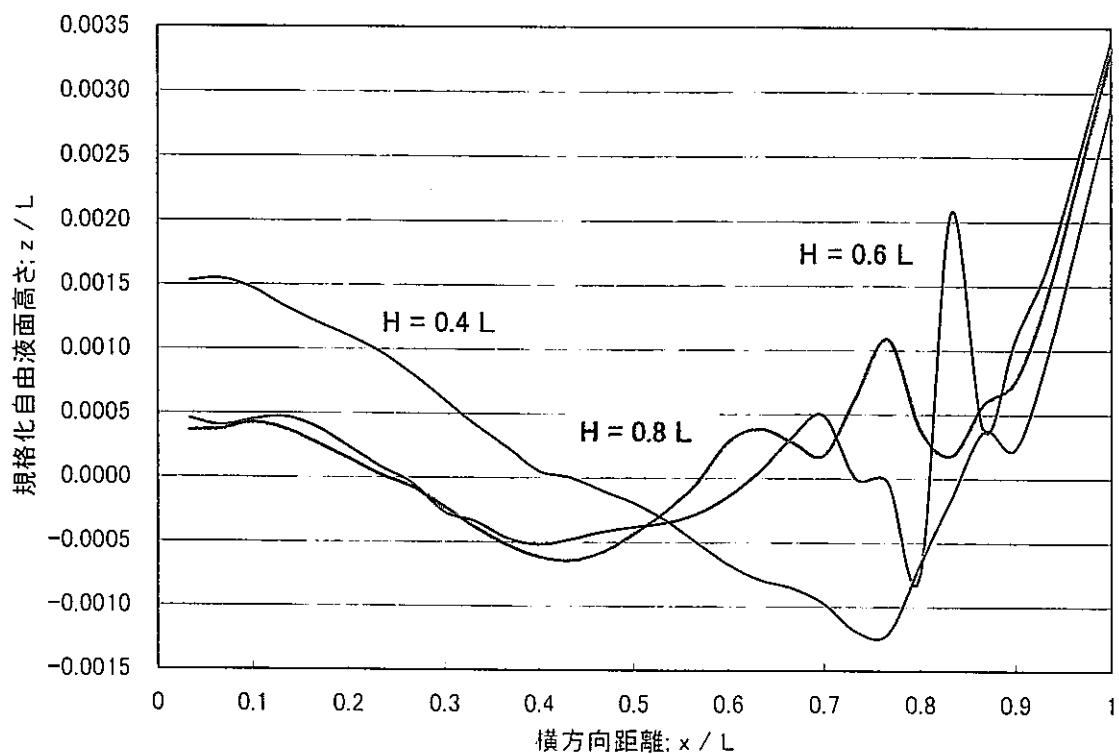


(a)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.5, L = 1.0 \text{ (m)}, B = 0.08 \text{ (m)}$

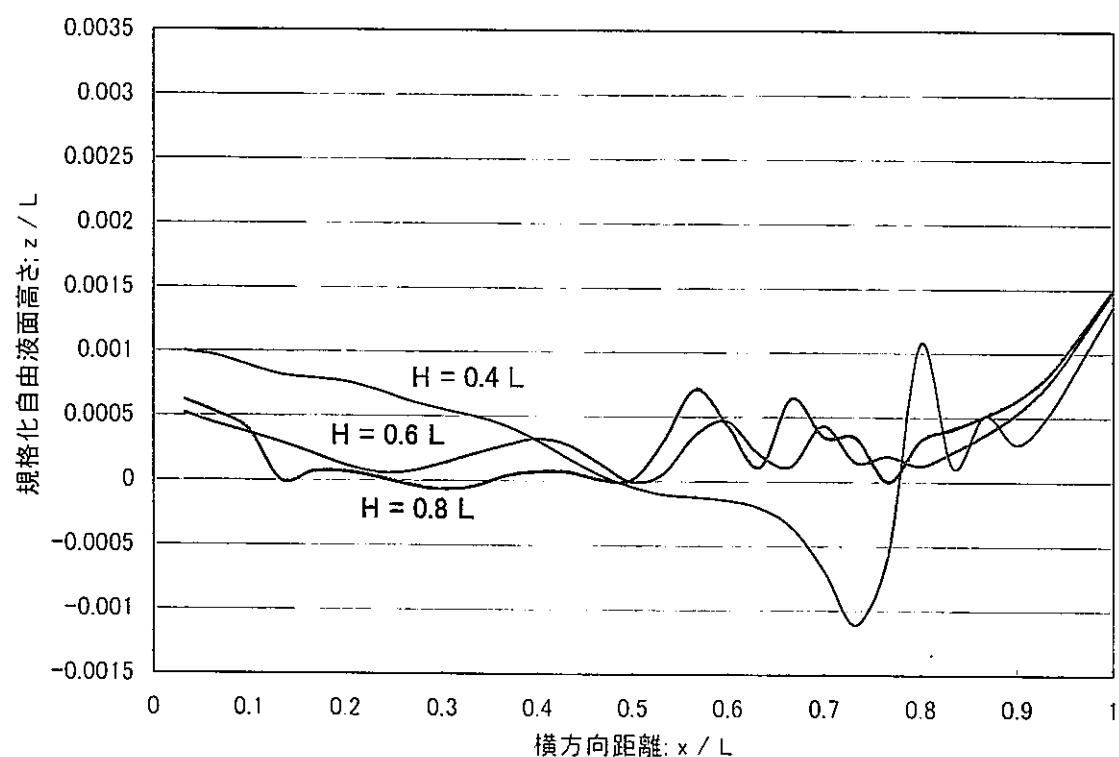


(b)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.0, L = 1.0 \text{ (m)}, B = 0.08 \text{ (m)}$

図 3.10 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)

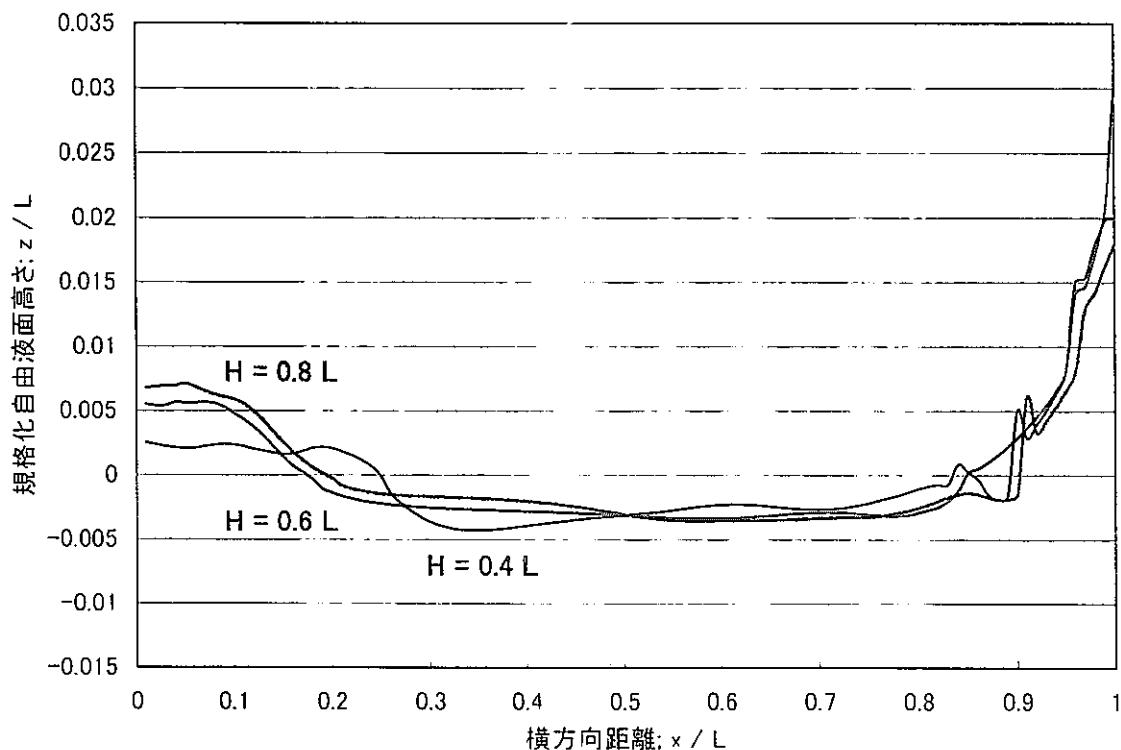


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

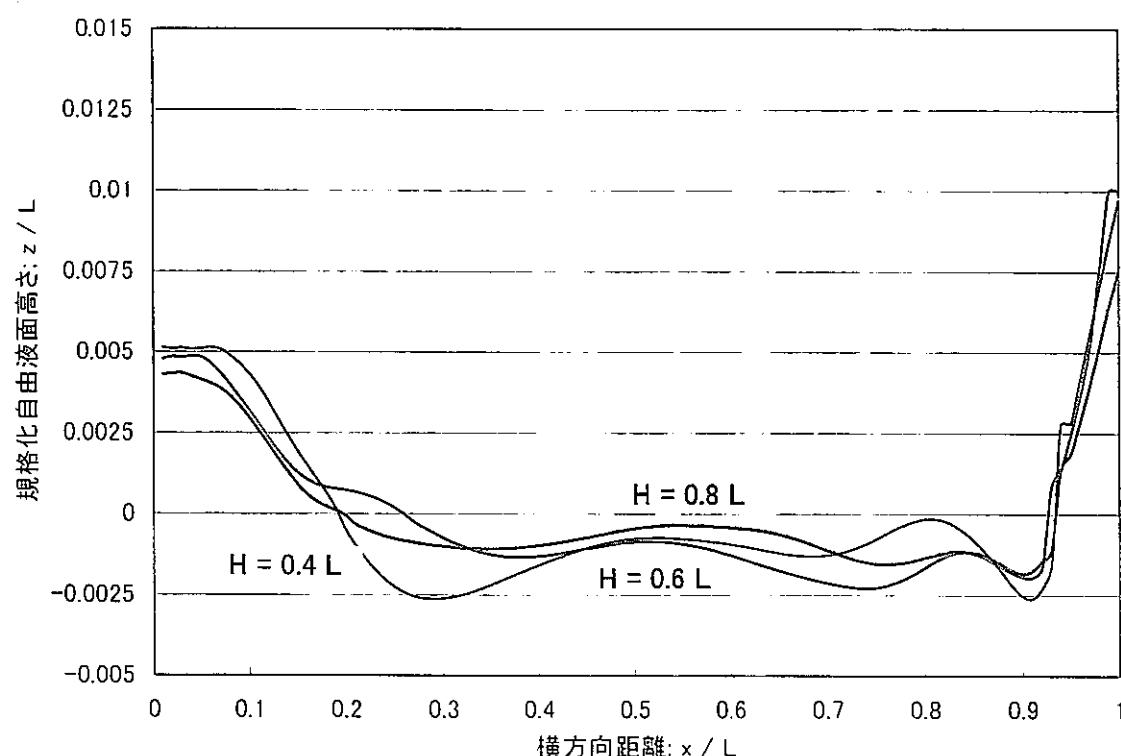


(b) Pb - Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

図 3.11 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

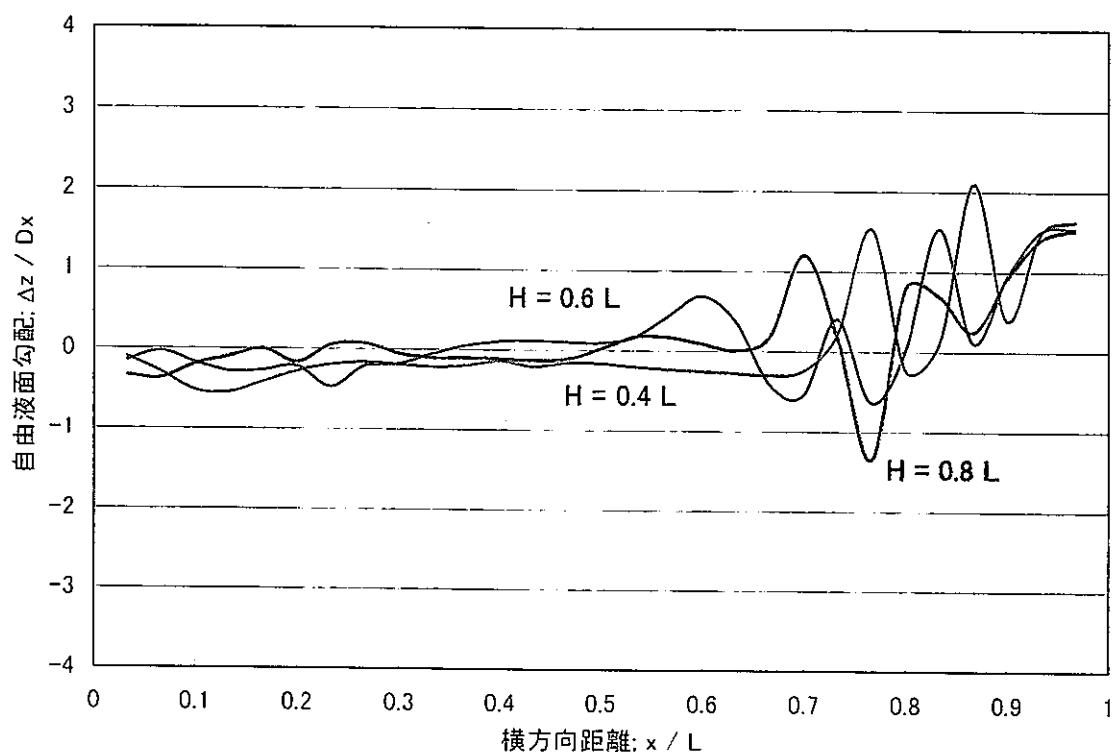


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.024$  (m)

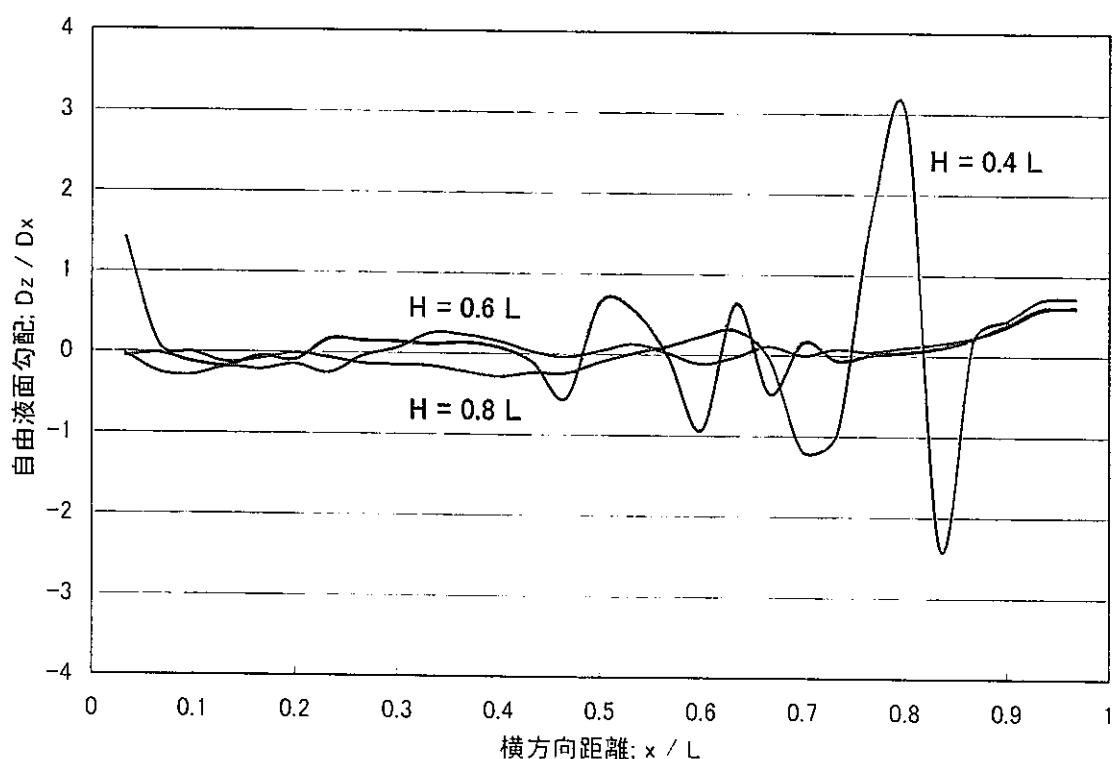


(b) Pb - Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.024$  (m)

図 3.12 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面形状の比較 ( $L = 1.0$  m 条件)

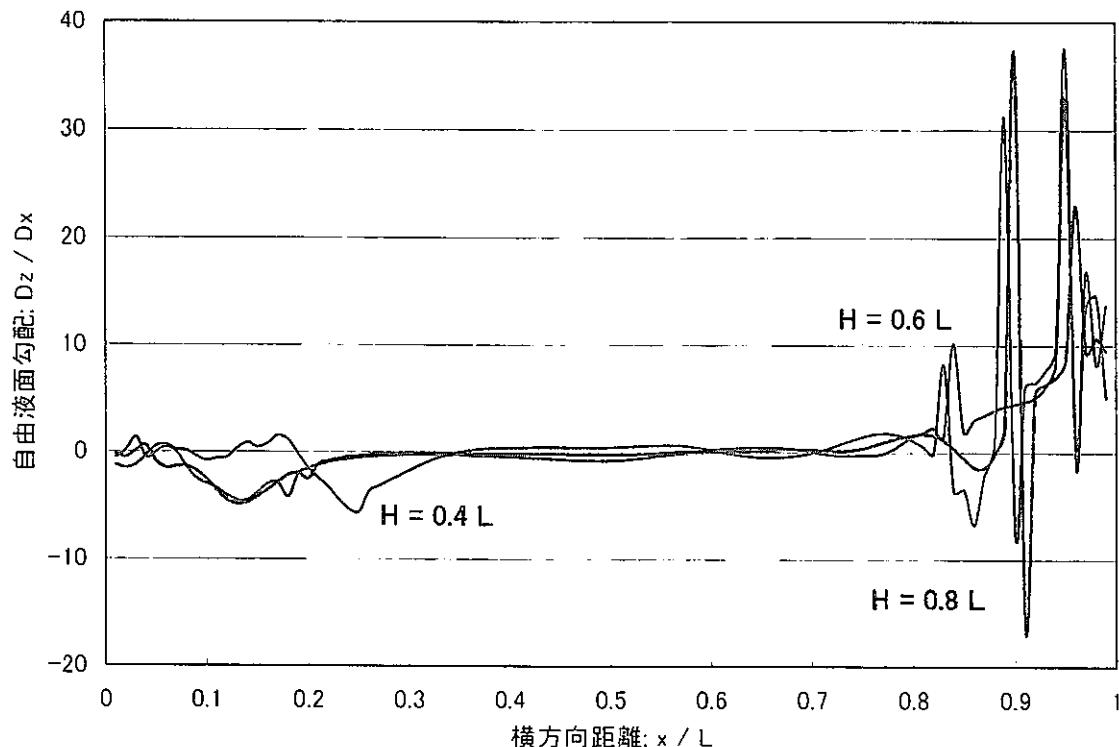


(a)  $Na, Fr = 1.5, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

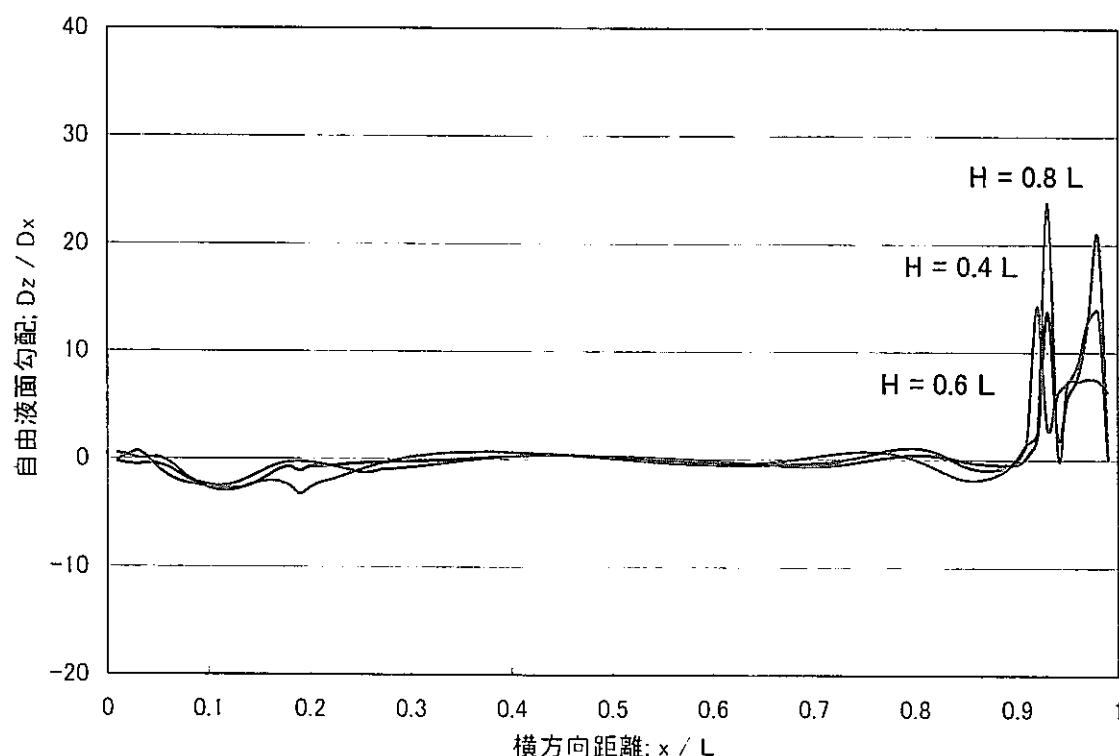


(b)  $Na, Fr = 1.0, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

図 3.13 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)

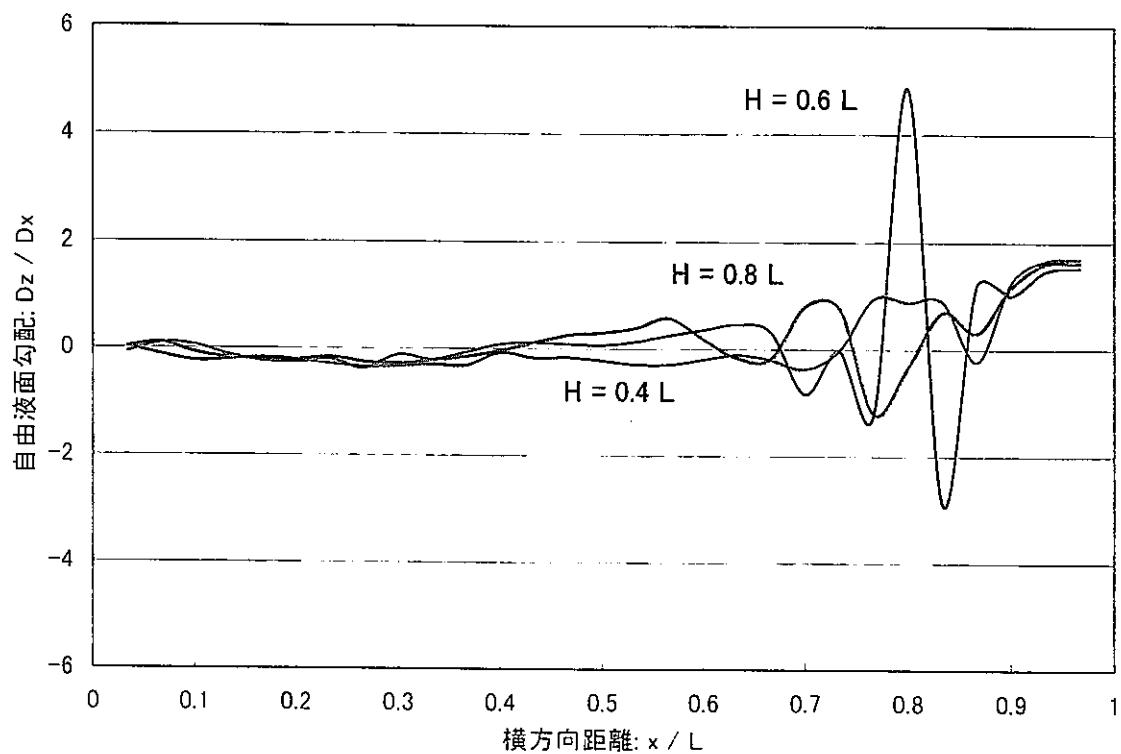


(a)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.5, L = 1.0 \text{ (m)}, B = 0.08 \text{ (m)}$

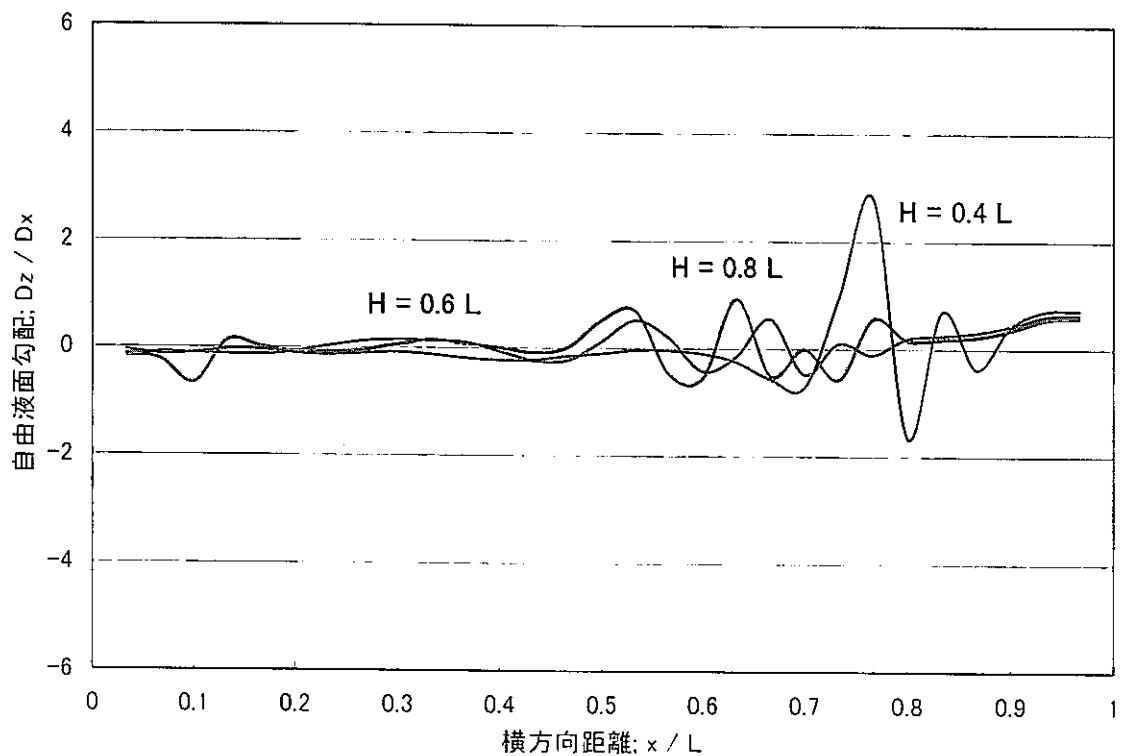


(a)  $\text{Na}, \text{Fr} = 1.0, L = 1.0 \text{ (m)}, B = 0.08 \text{ (m)}$

図 3.14 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 1.0 \text{ m}$  条件)

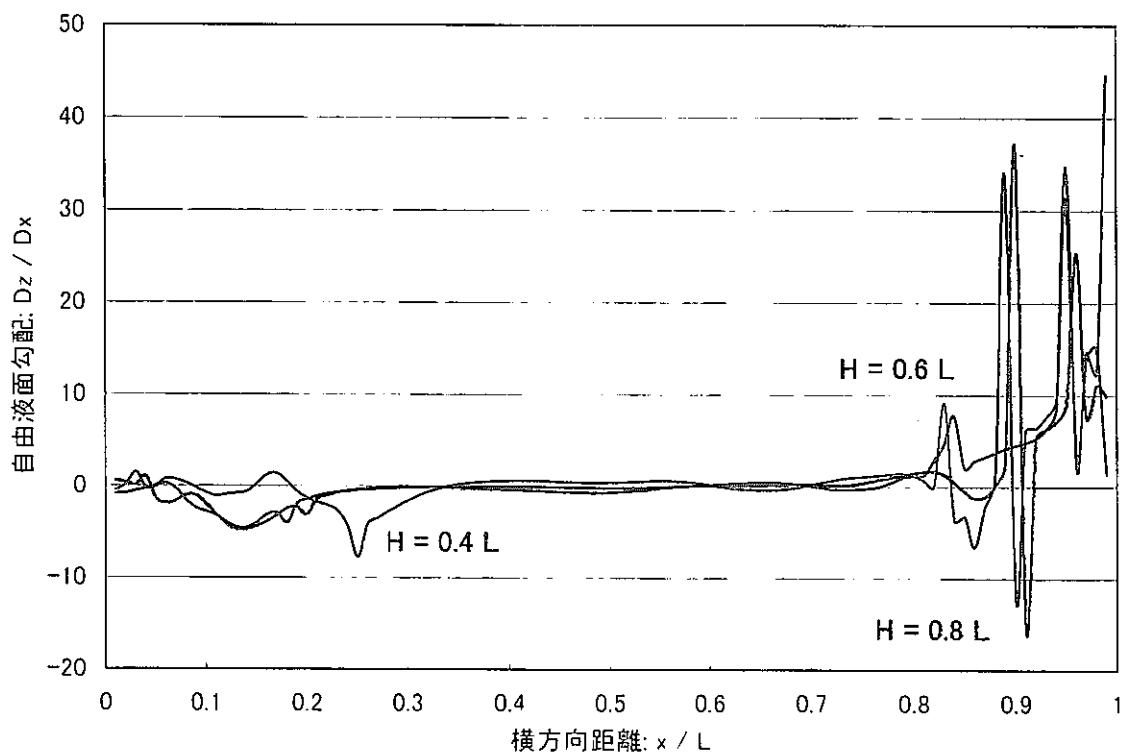


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

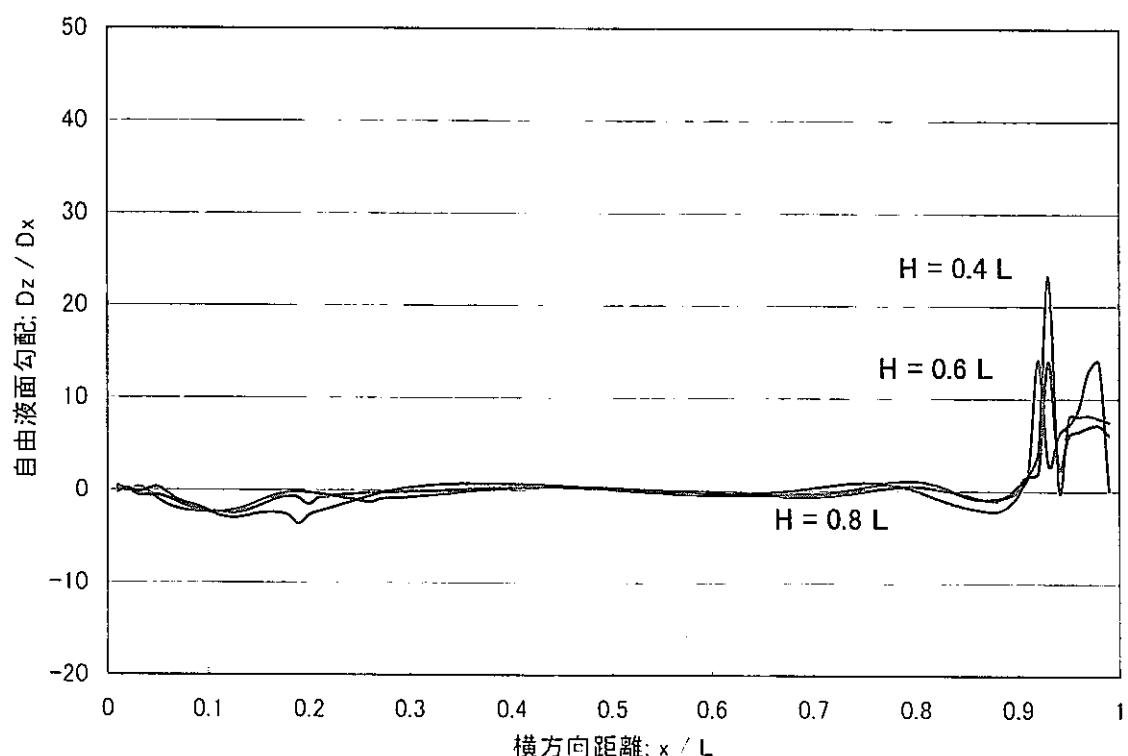


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

図 3.15 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

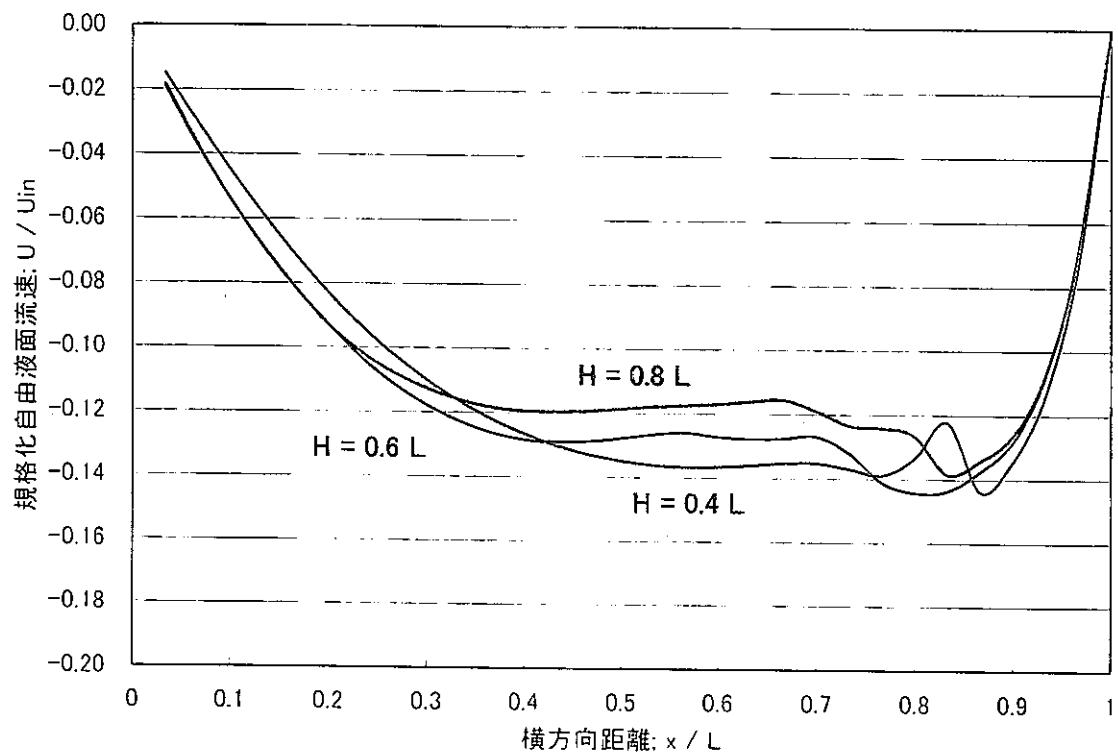


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

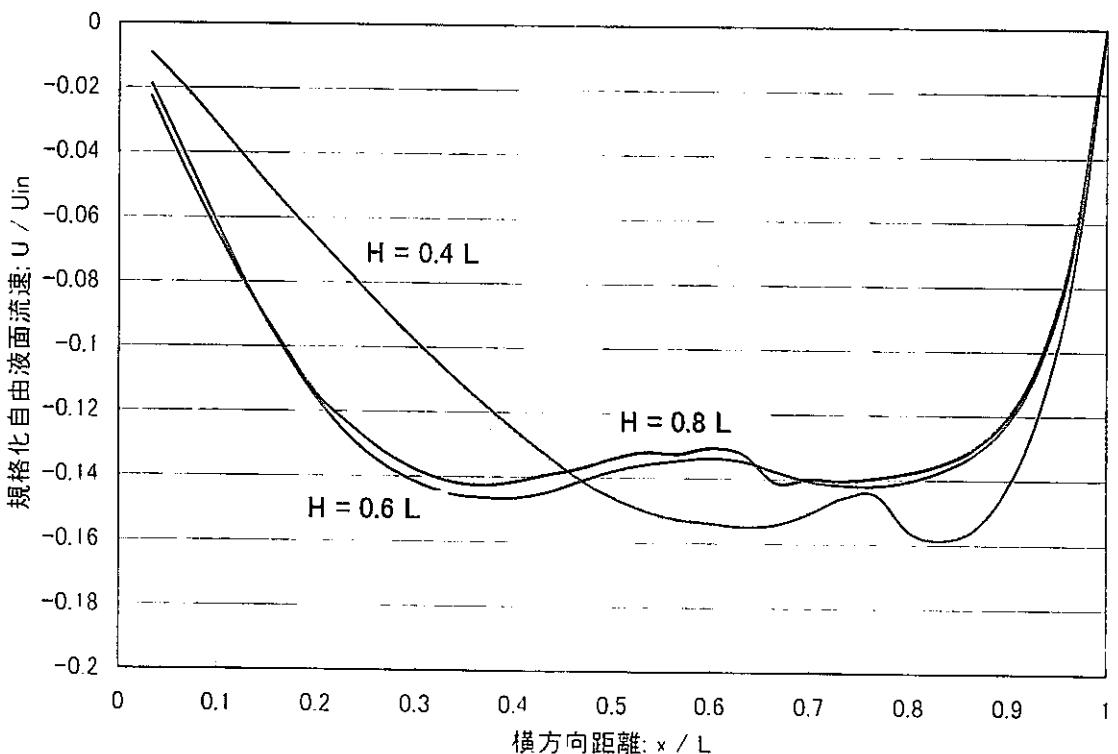


(a) Pb - Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

図 3.16 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面勾配の比較 ( $L = 1.0$  m 条件)

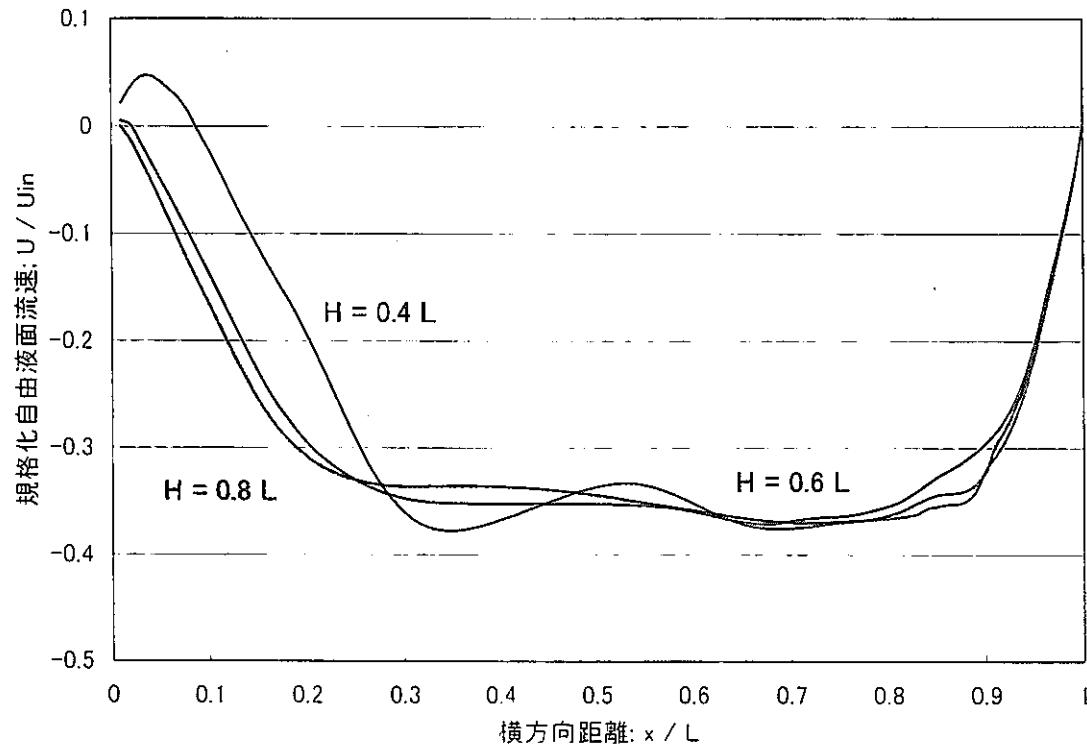


(a)  $Na, Fr = 1.5, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

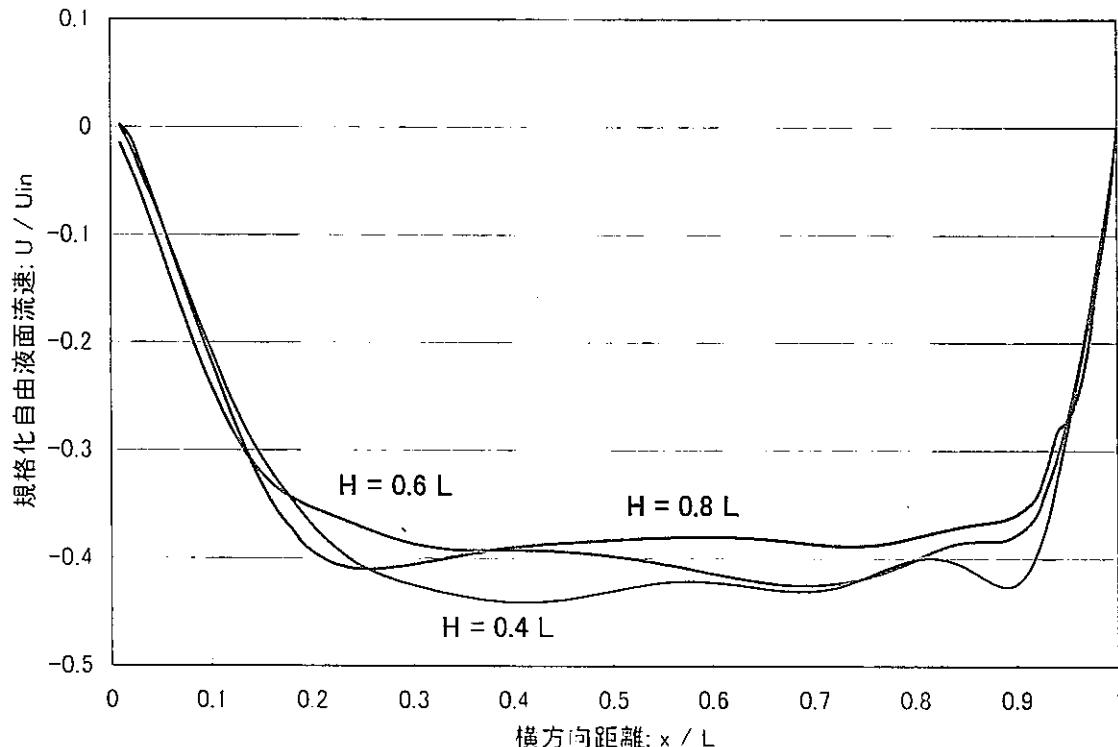


(b)  $Na, Fr = 1.0, L = 0.3 \text{ (m)}, B = 0.024 \text{ (m)}$

図 3.17 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 0.3 \text{ m}$  条件)

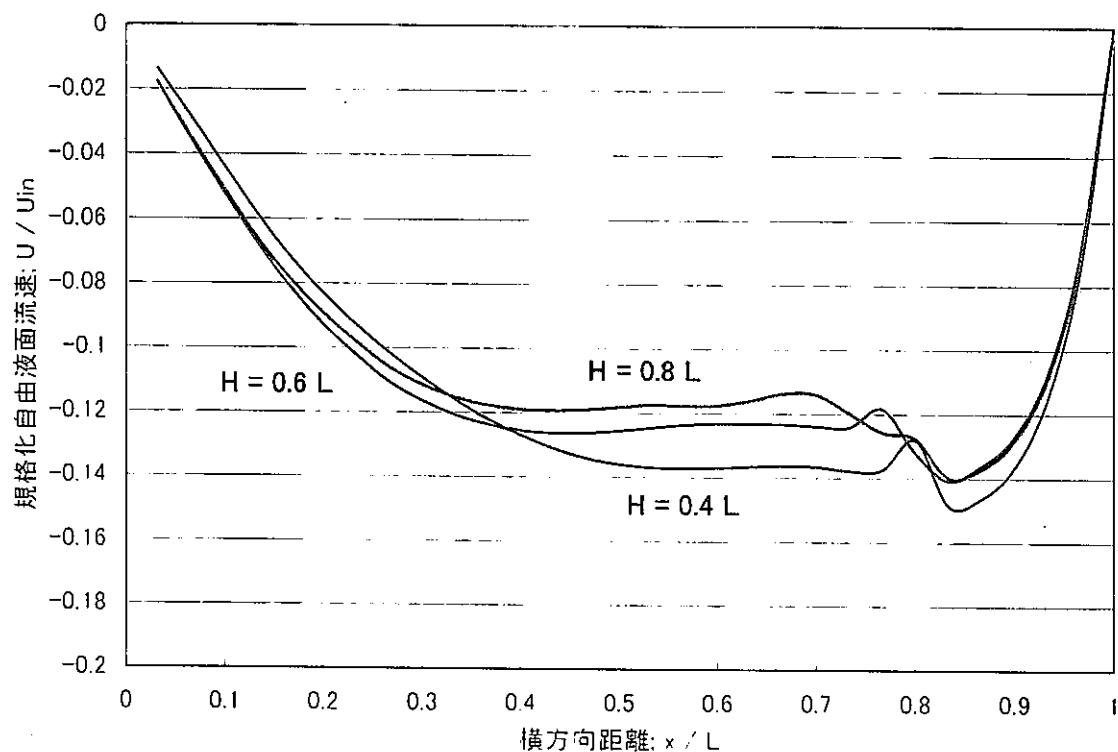


(a)  $Na, Fr = 1.5, L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

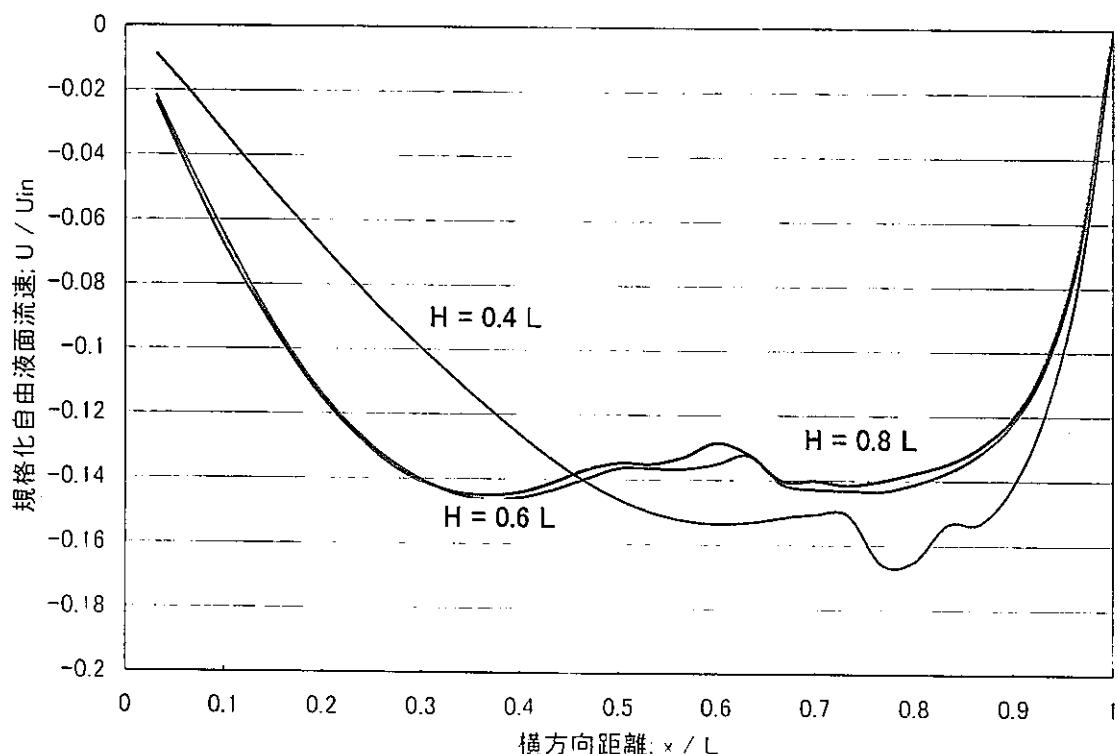


(b)  $Na, Fr = 1.0, L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

図 3.18 ナトリウムを作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 1.0$  m 条件)

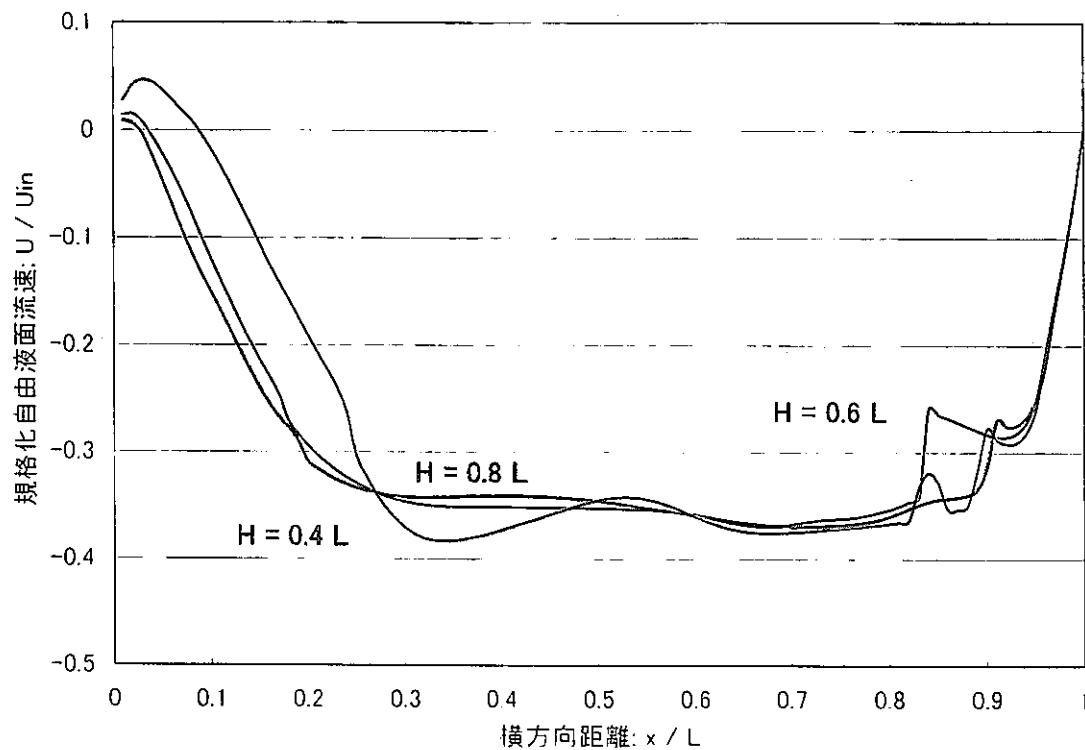


(a) Pb-Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

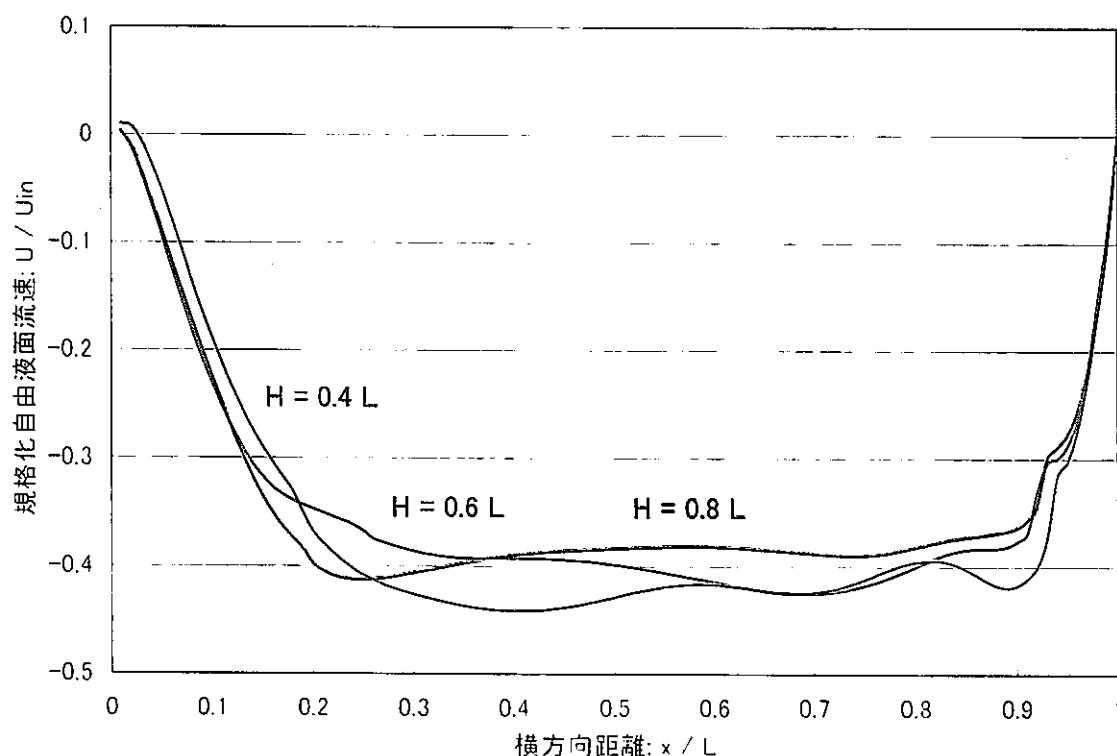


(b) Pb-Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

図 3.19 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 0.3$  m 条件)

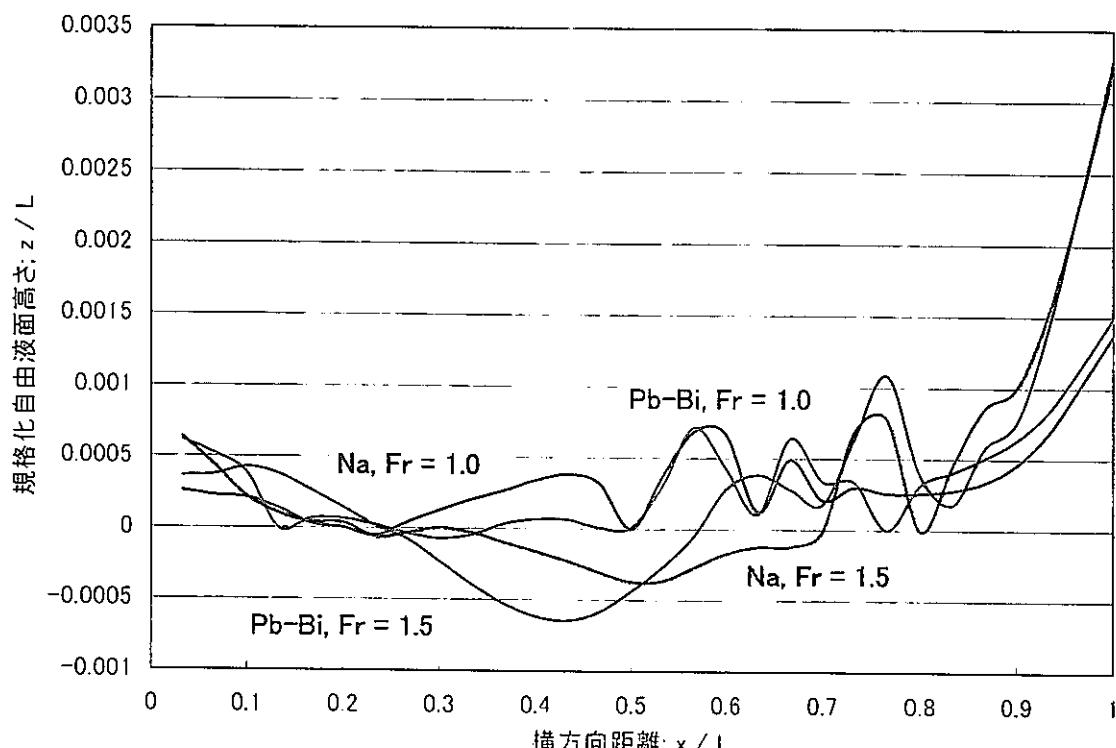
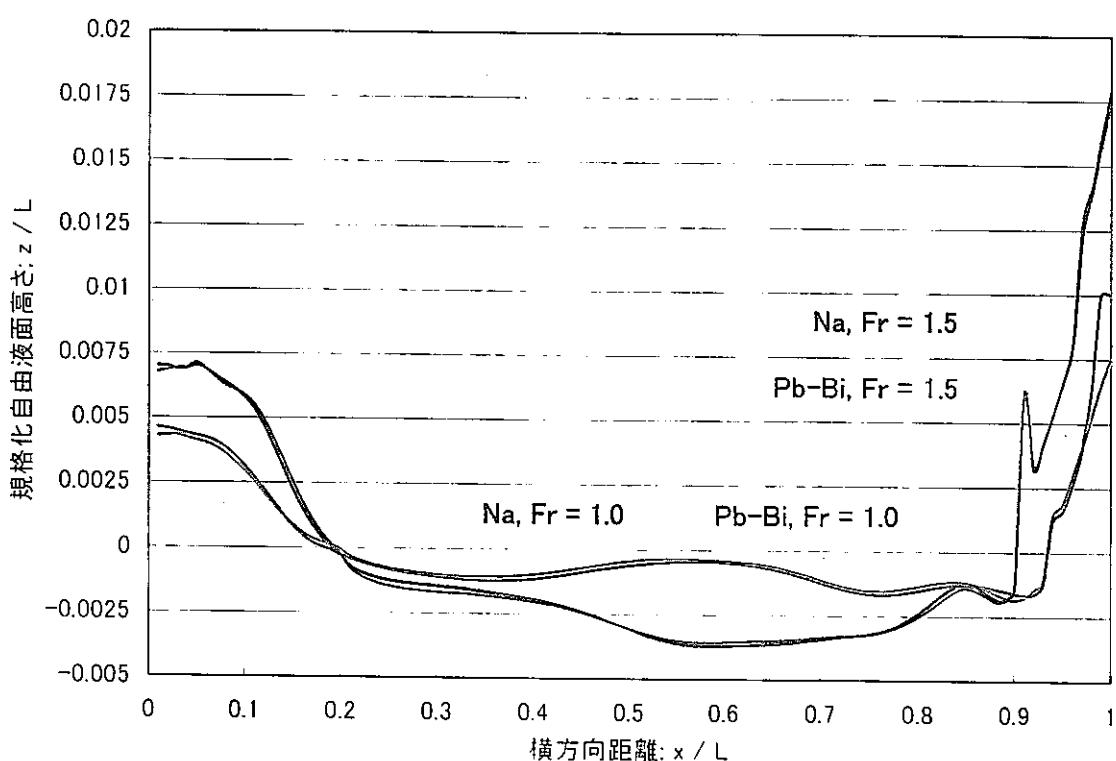


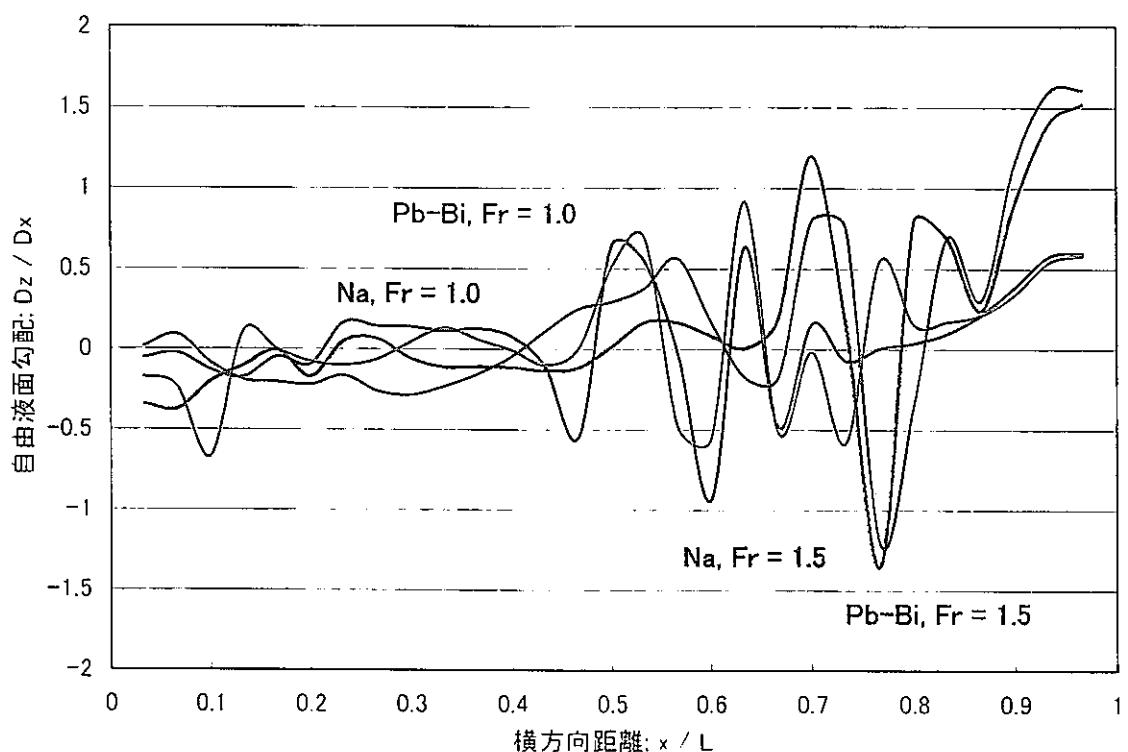
(a) Pb-Bi,  $Fr = 1.5$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)



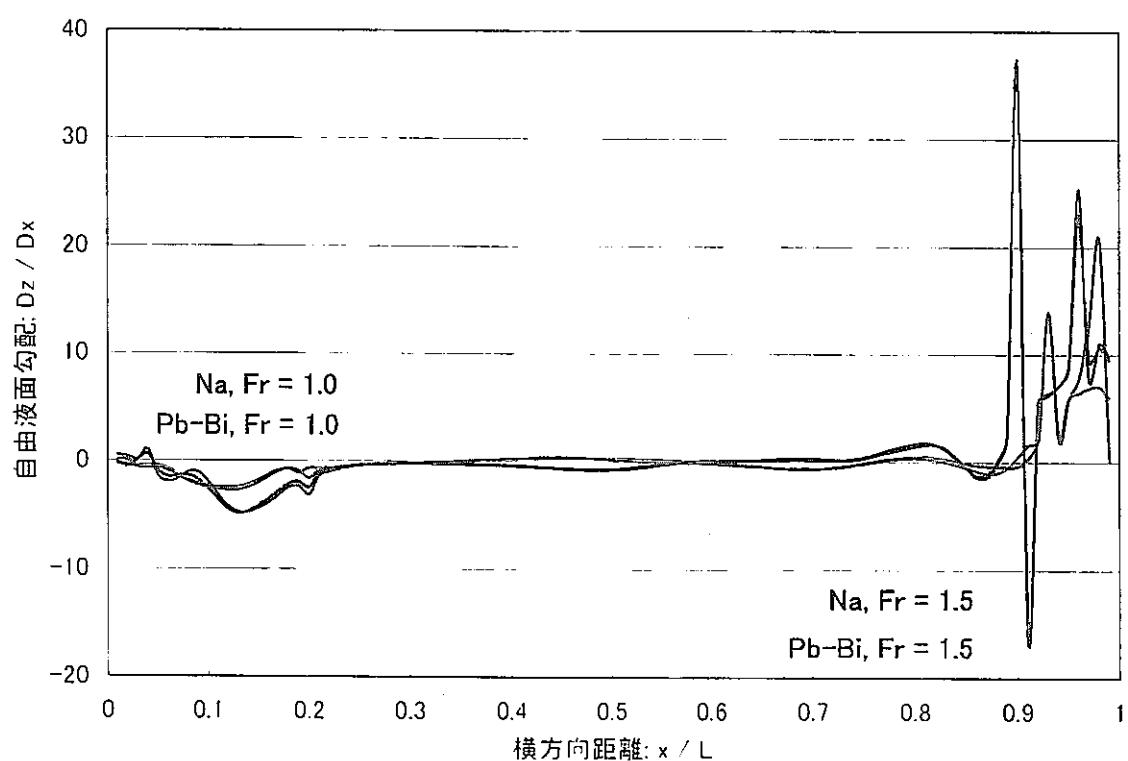
(b) Pb-Bi,  $Fr = 1.0$ ,  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

図 3.20 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の自由液面流速の比較 ( $L = 1.0$  m 条件)

(a)  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)(b)  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)図 3.21 Fr 数を一致させた条件での自由液面形状の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)

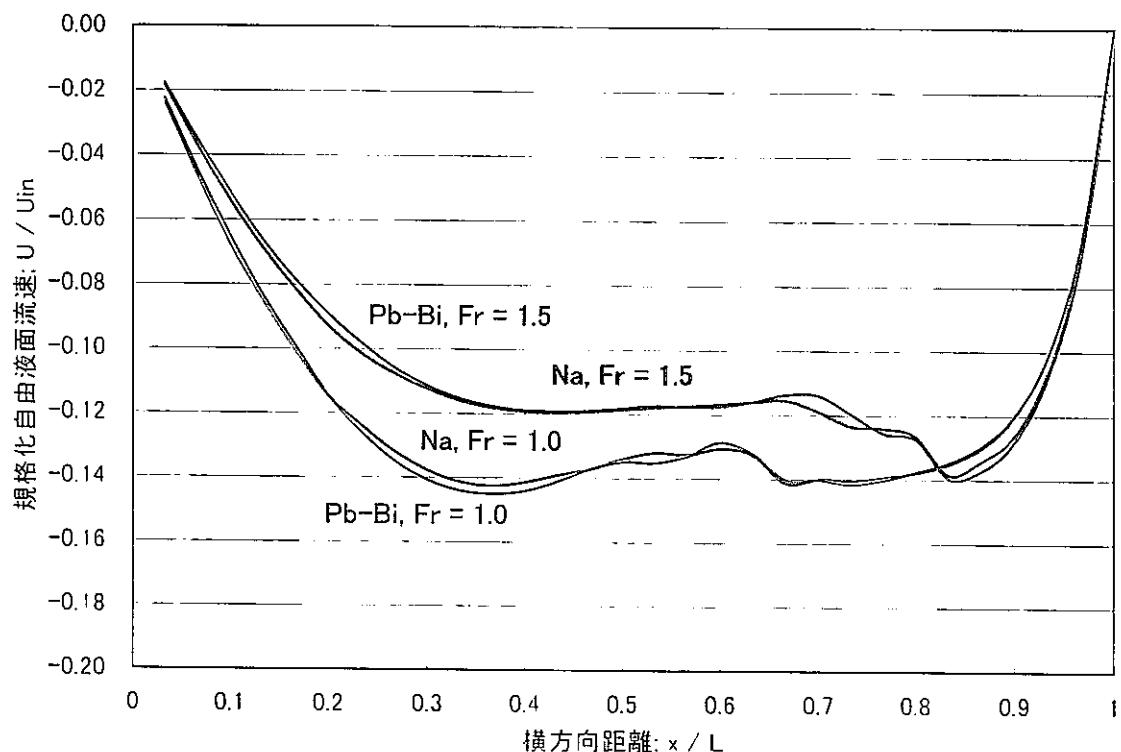


(a)  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

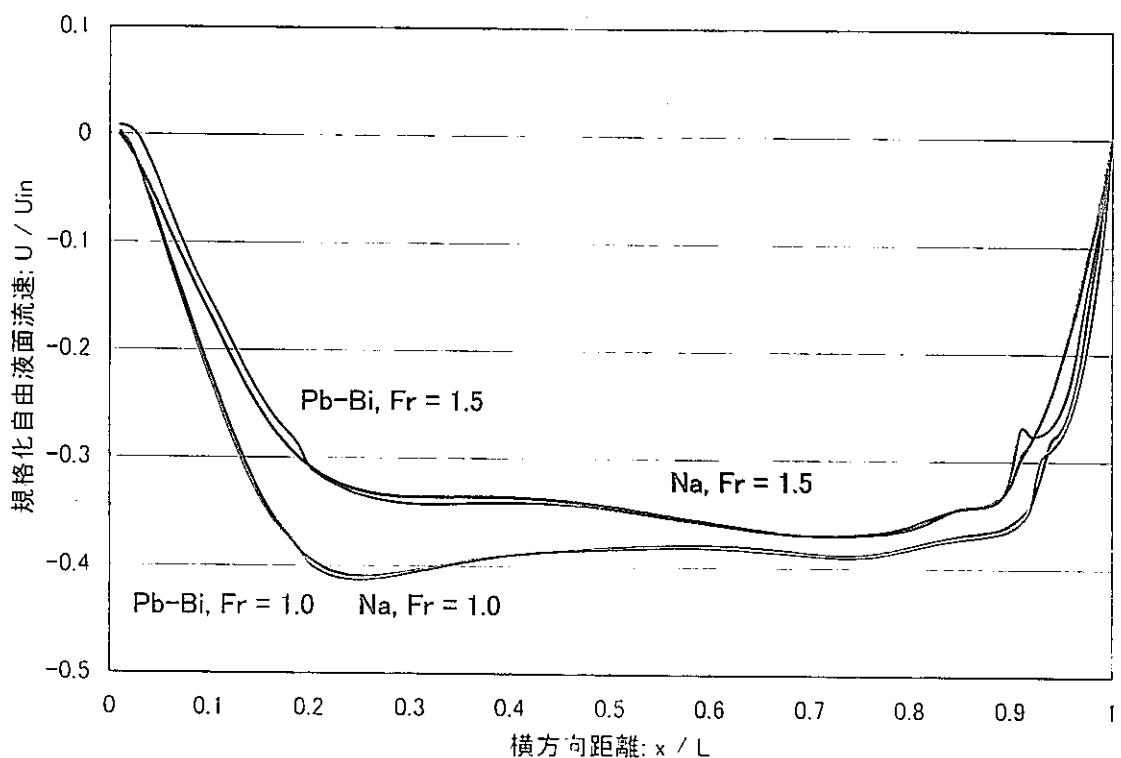


(b)  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

図 3.22  $Fr$  数を一致させた条件での自由液面勾配の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)

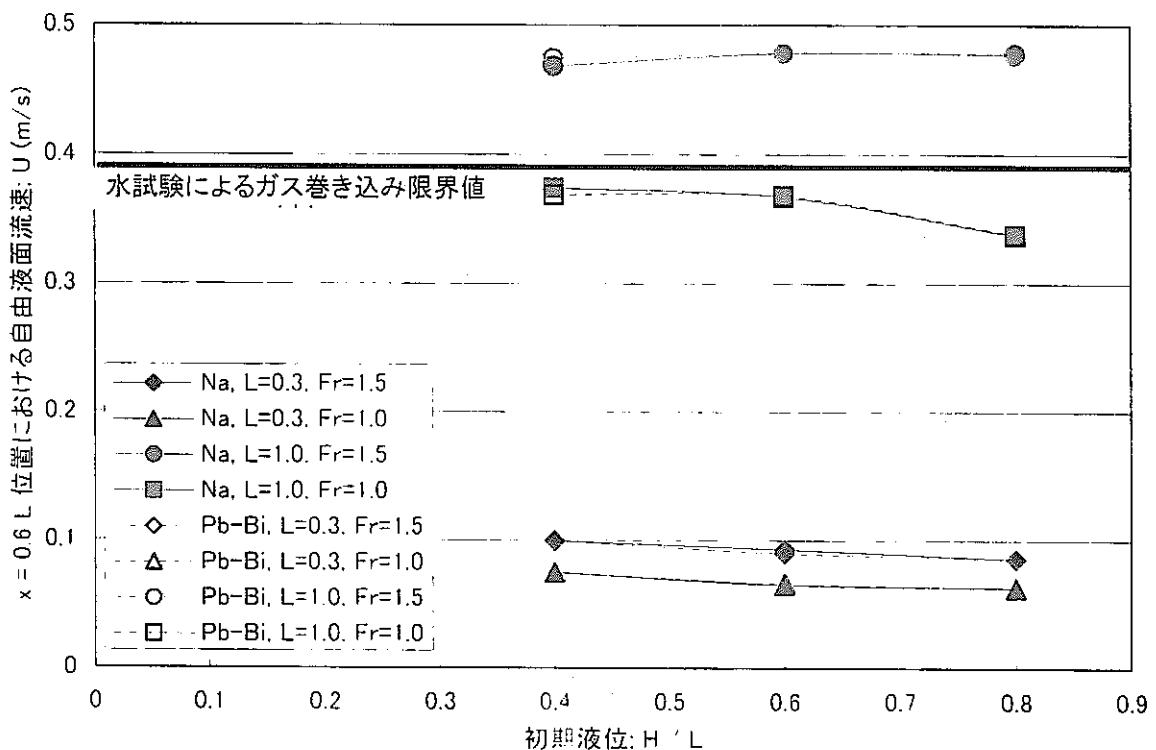


(a)  $L = 0.3$  (m),  $B = 0.024$  (m)

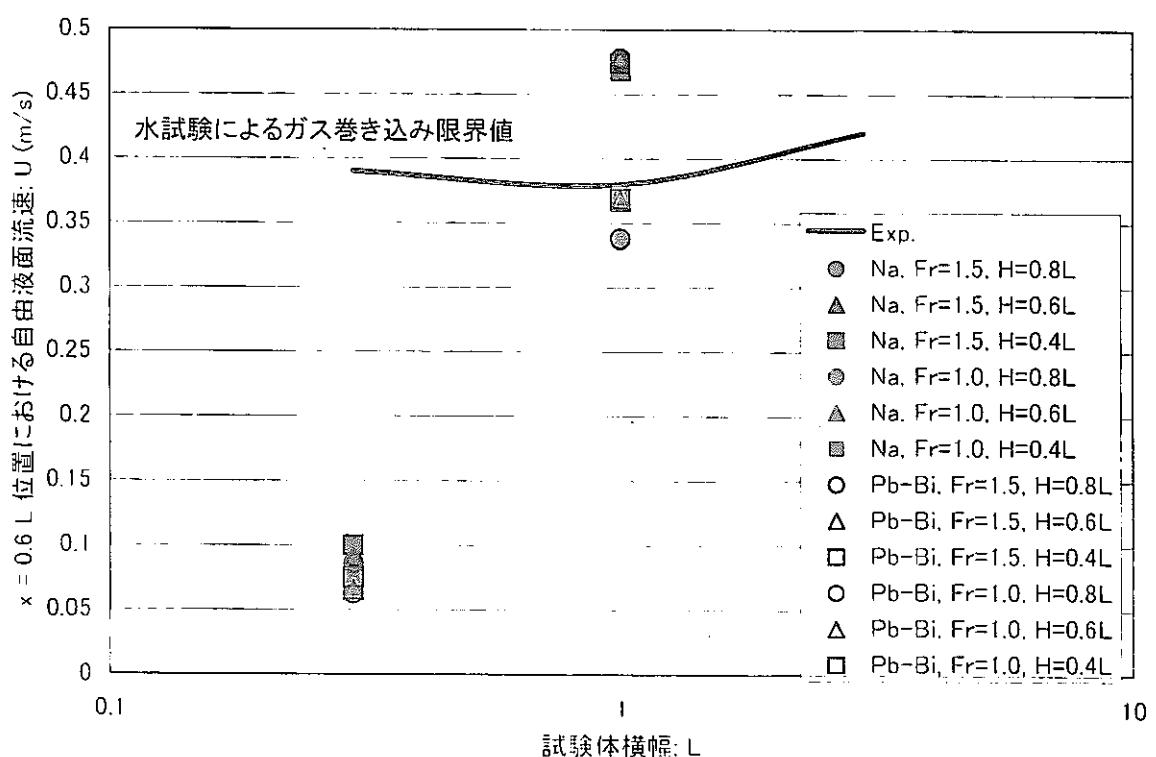


(b)  $L = 1.0$  (m),  $B = 0.08$  (m)

図 3.23  $Fr$  数を一致させた条件での自由液面流速の比較 ( $H = 0.8 L$  条件)



(a) 初期液位による自由液面流速の変化とガス巻き込み限界値



(b) 試験体横幅による自由液面流速の変化とガス巻き込み限界値

図 3.24 くぼみ渦によるガス巻き込み限界特性と作動流体依存性

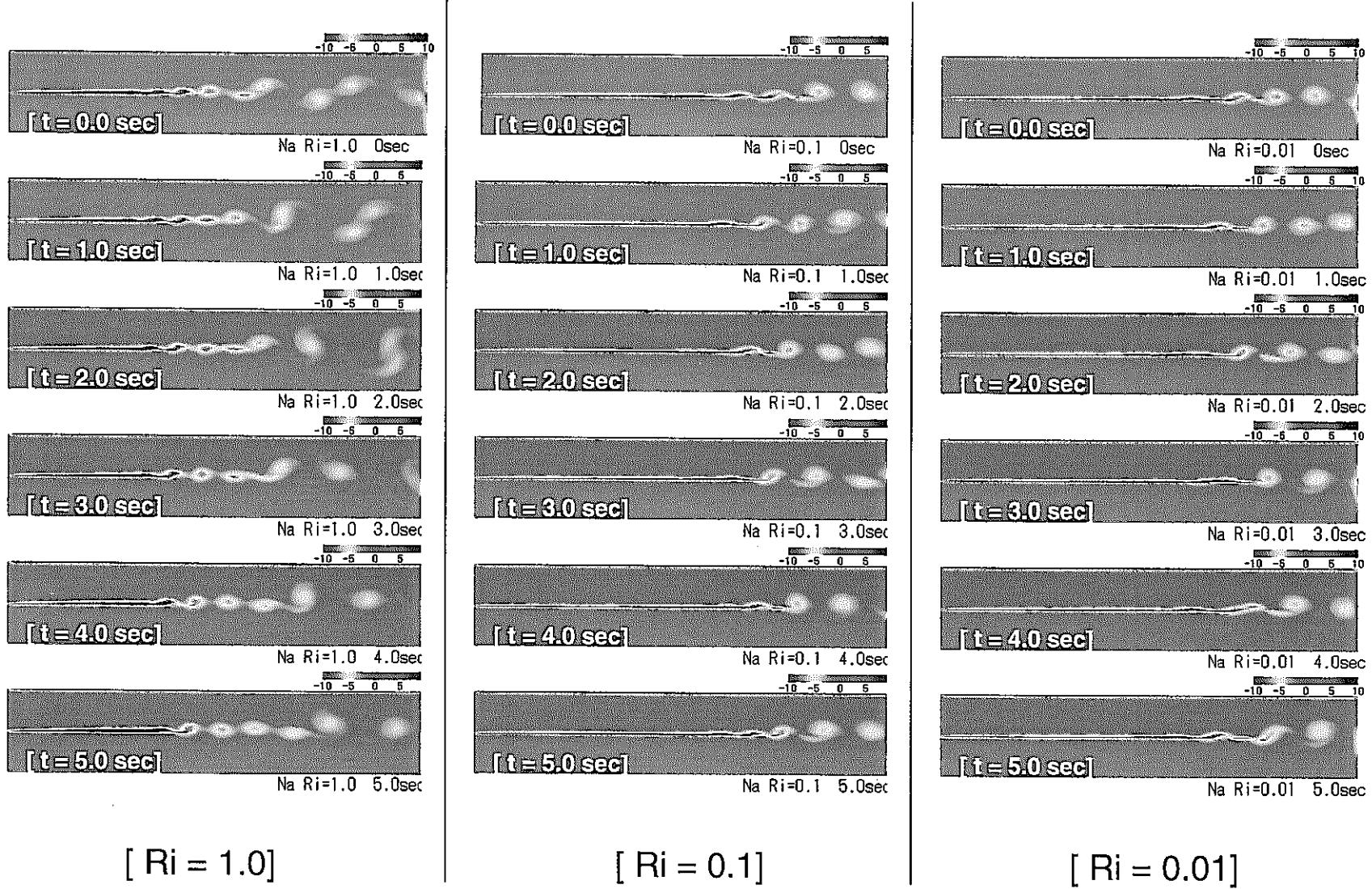


図 3.25 ナトリウムを作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較

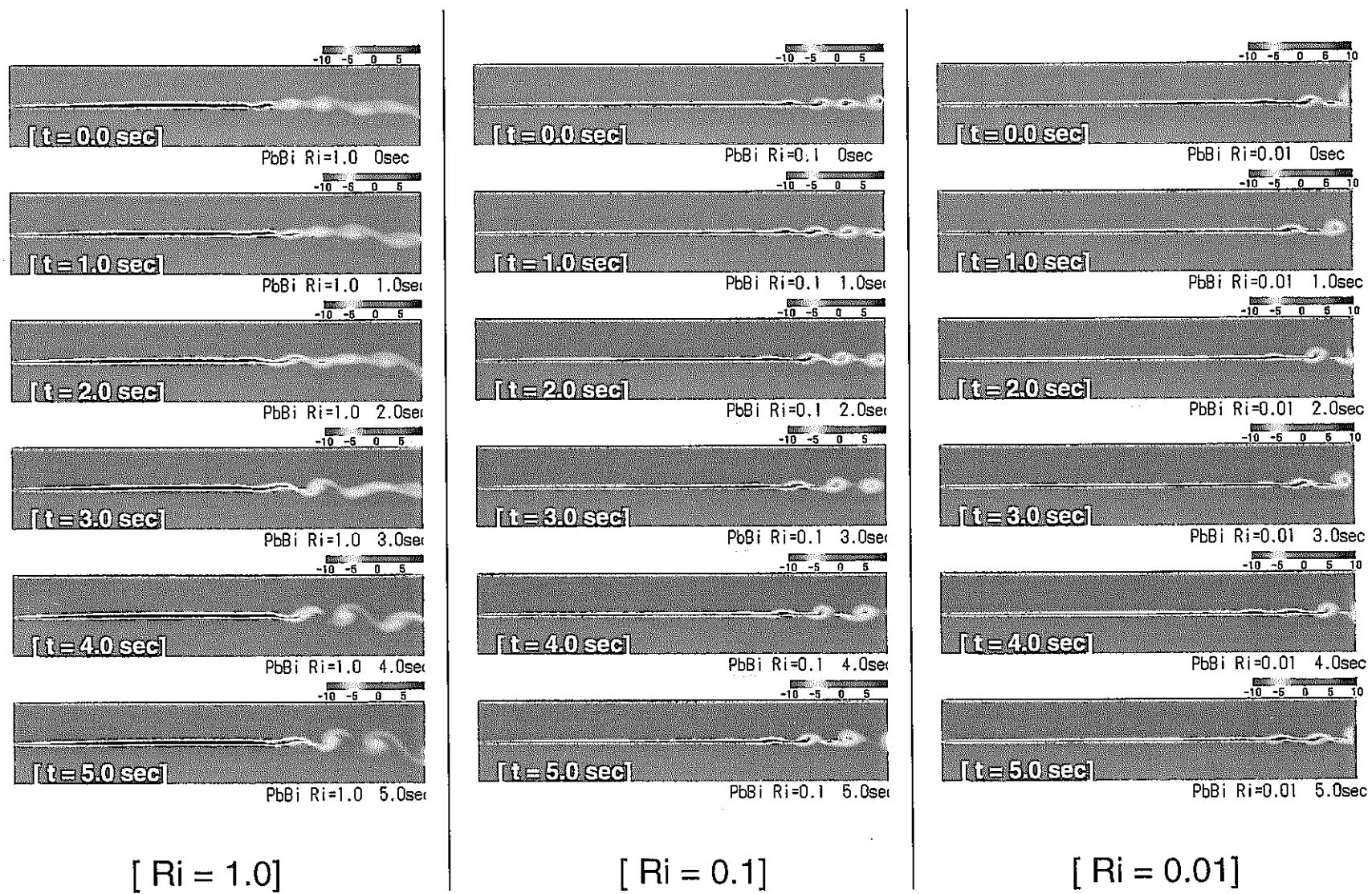


図 3.26 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較

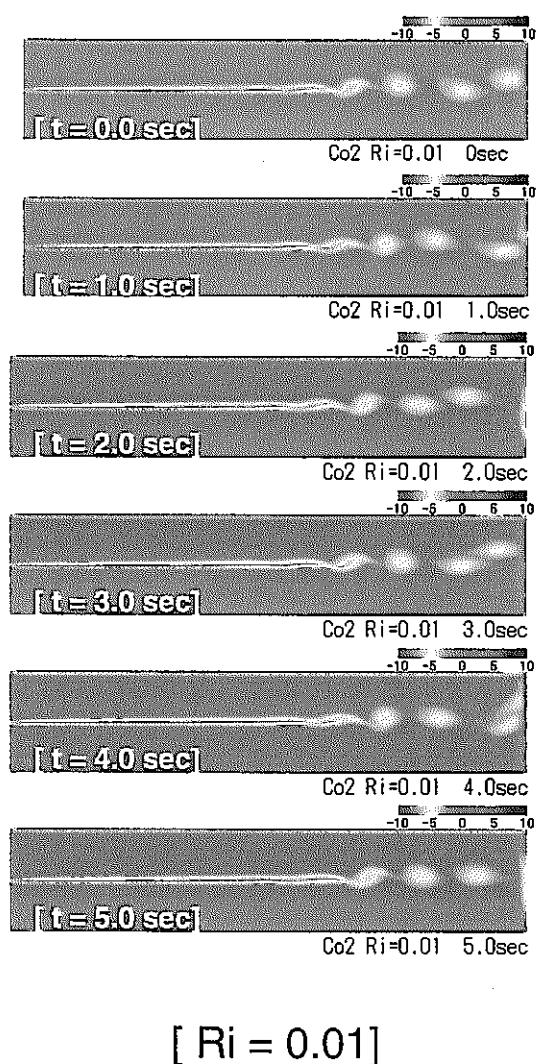
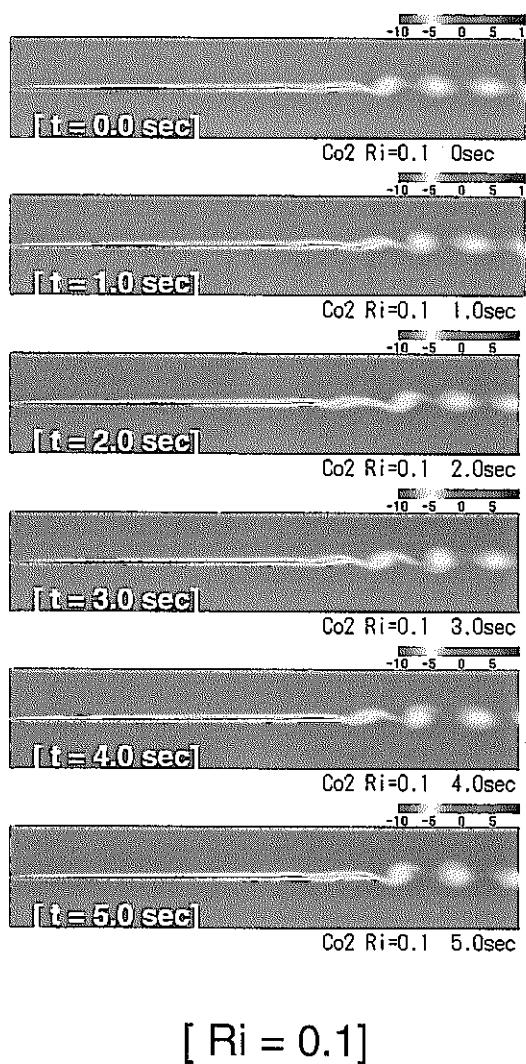
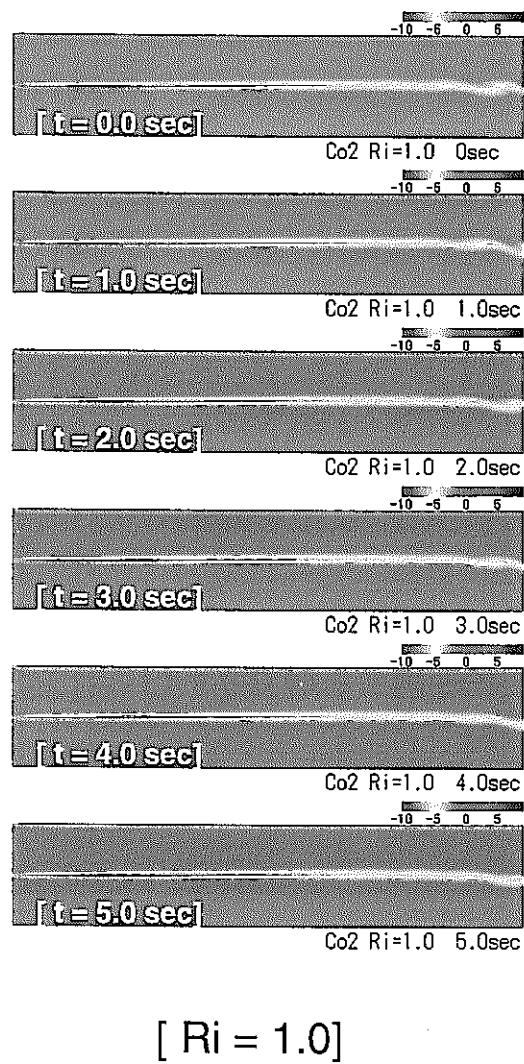
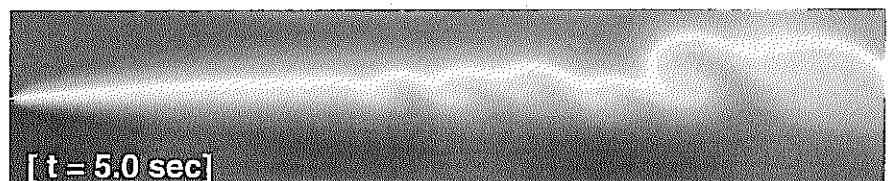
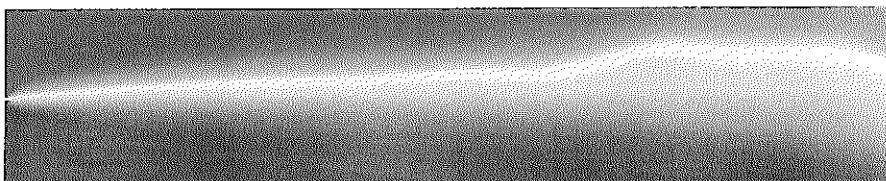


図 3.27  $\text{CO}_2$  ガスを作動流体とした場合の渦度輸送特性の比較

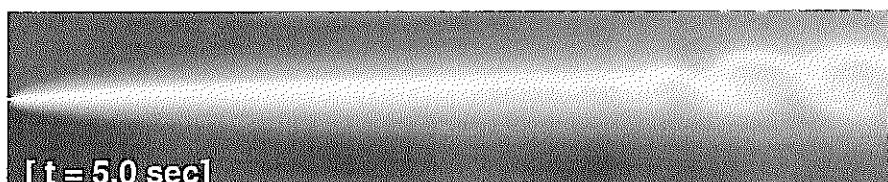


[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]

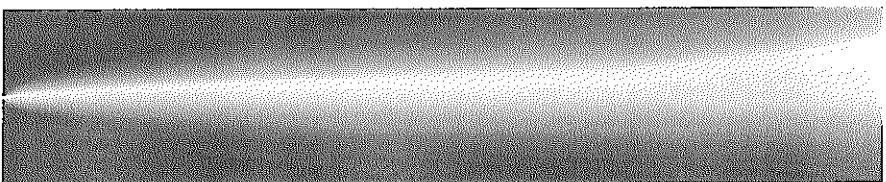


[ 5.0 秒間の時間平均分布 ]

[  $Ri = 1.0$  ]

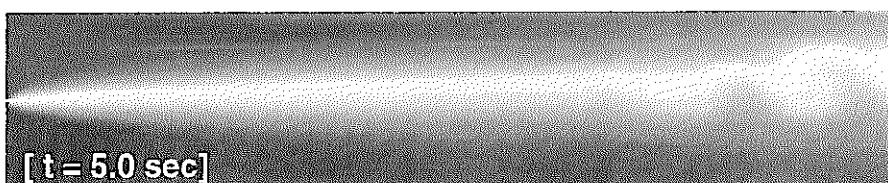


[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]

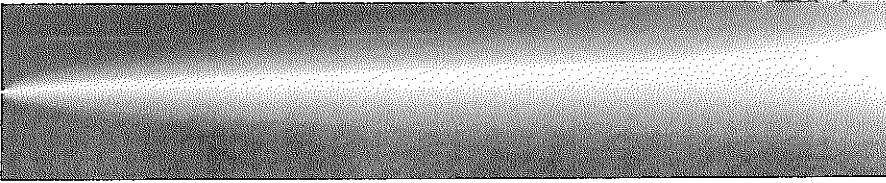


[ 5.0 秒間の時間平均分布 ]

[  $Ri = 0.1$  ]



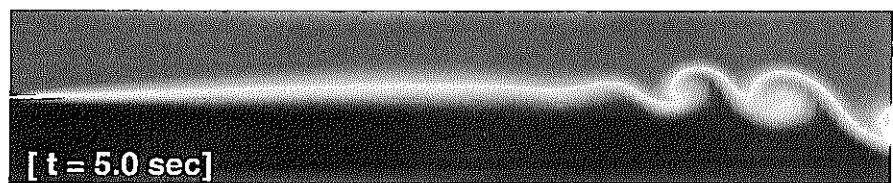
[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]



[ 5.0 秒間の時間平均分布 ]

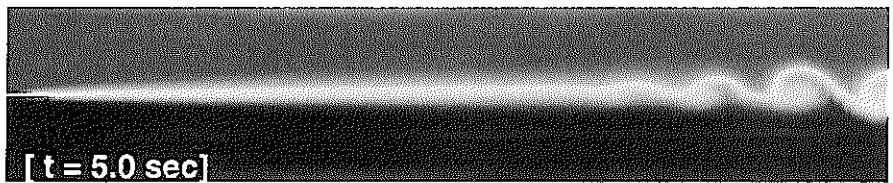
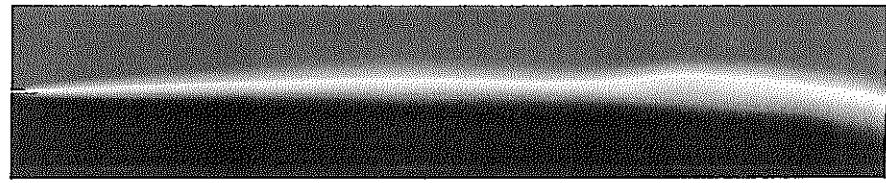
[  $Ri = 0.01$  ]

図 3.28 ナトリウムを作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較



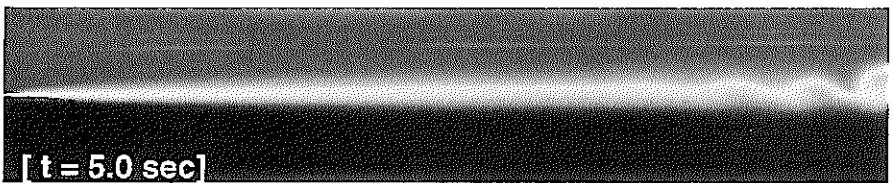
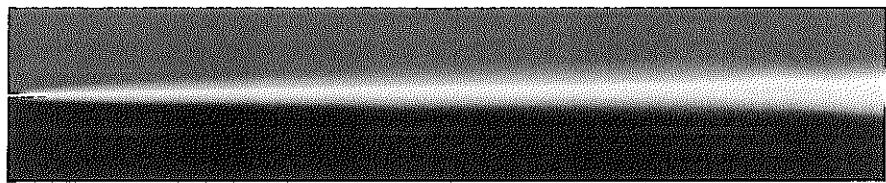
[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]

[ Ri = 1.0 ]



[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]

[ Ri = 0.1 ]



[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]

[ Ri = 0.01 ]

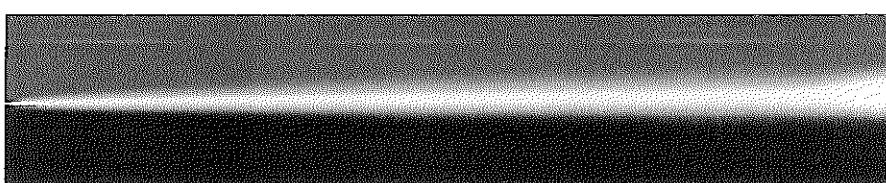
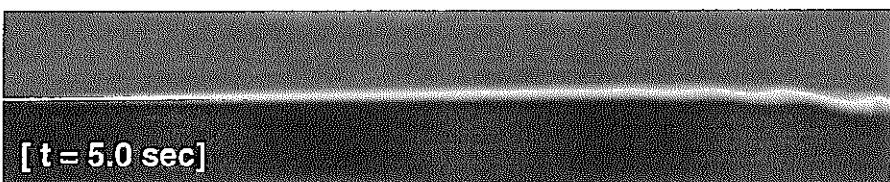
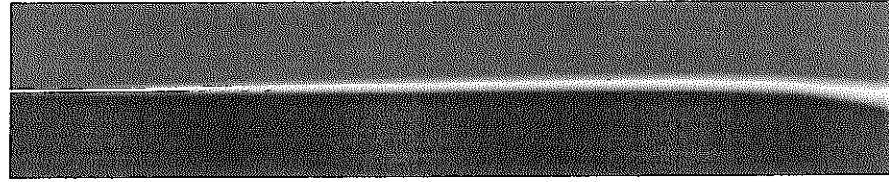


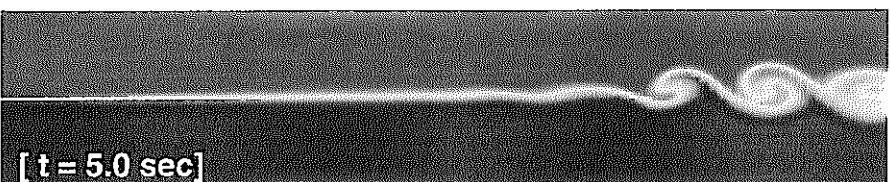
図 3.29 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較



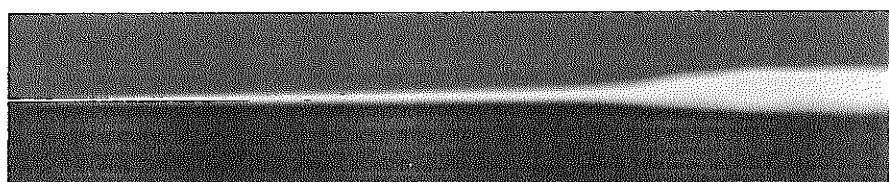
[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]



[  $Ri = 1.0$  ]



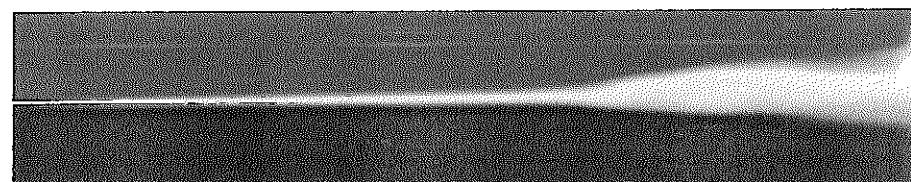
[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]



[  $Ri = 0.1$  ]



[ t = 5.0 秒での瞬時分布 ]



[  $Ri = 0.01$  ]

図 3. 30  $\text{CO}_2$  ガスを作動流体とした場合の空間温度分布特性の比較

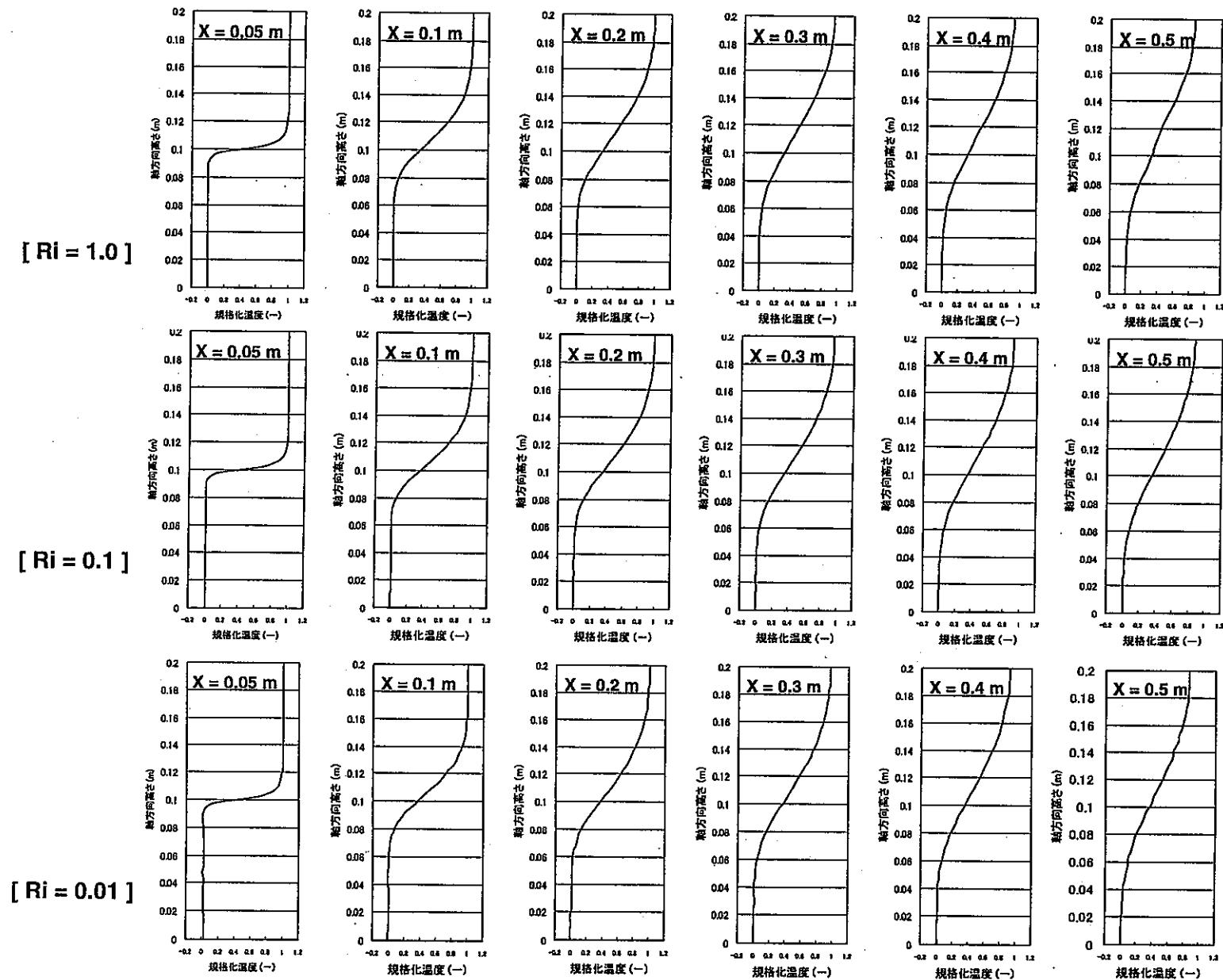


図 3.31 ナトリウムを作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較

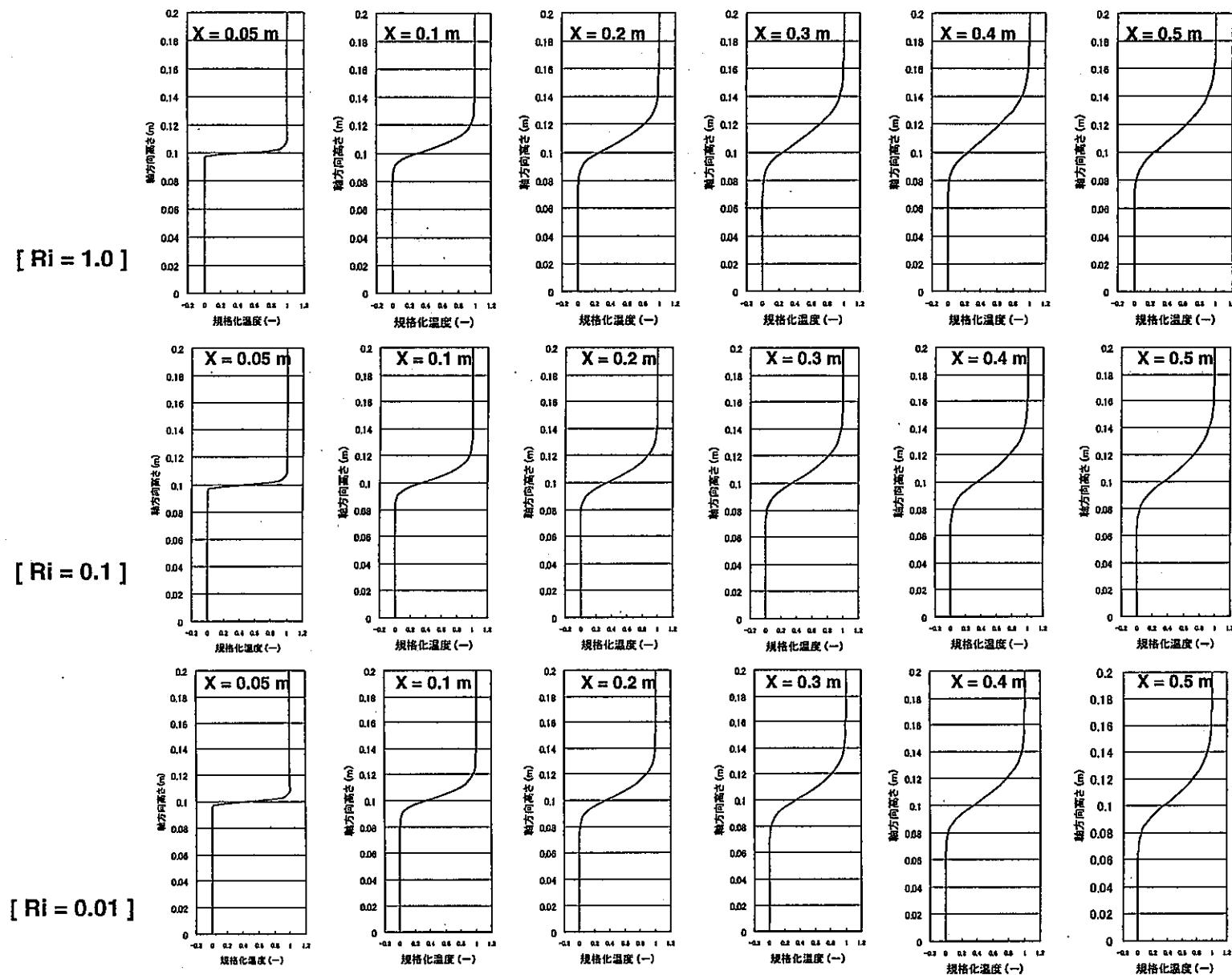


図 3.32 Pb / Bi 合金を作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較

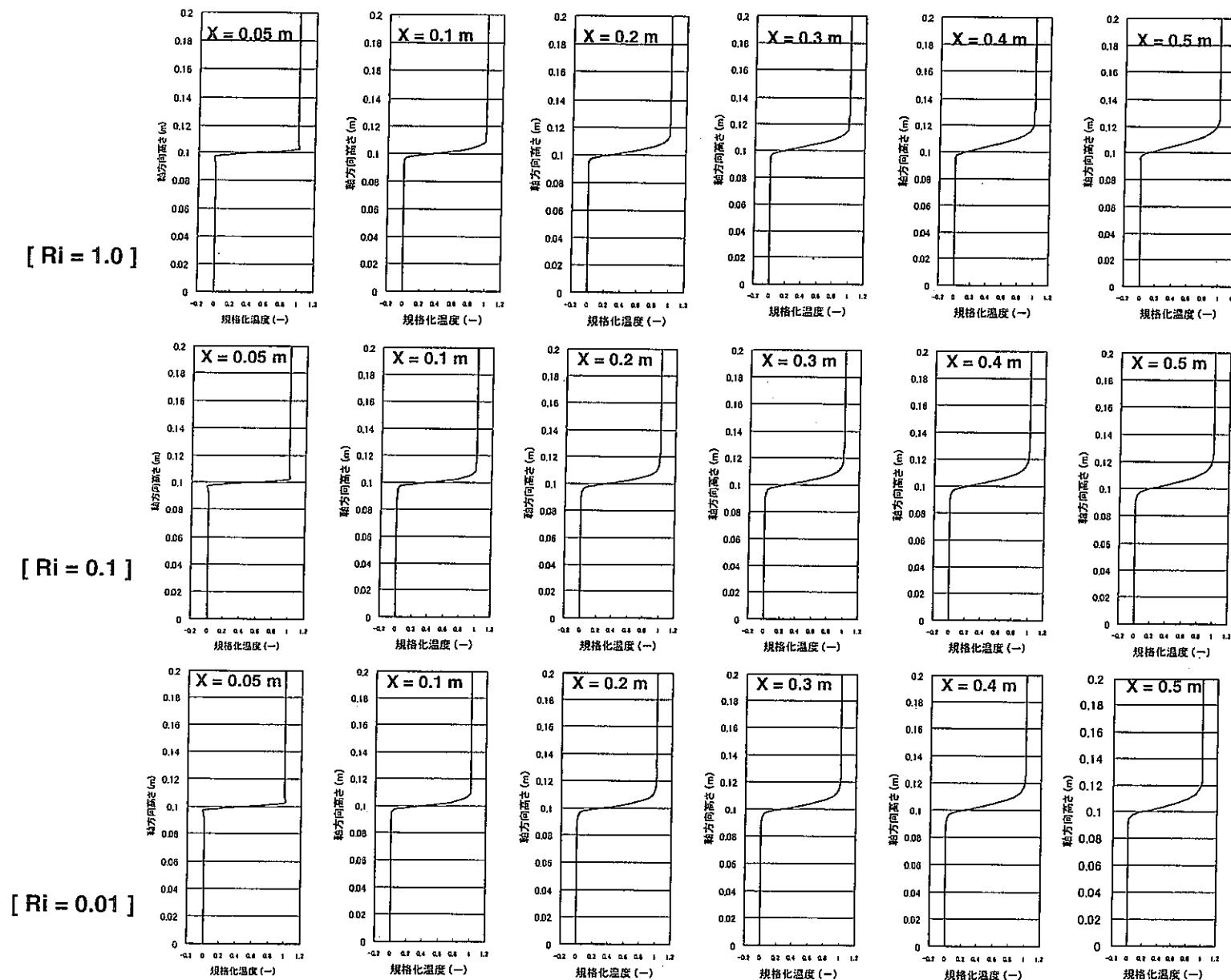


図 3.33  $\text{CO}_2$  ガスを作動流体とした場合の軸方向温度分布特性の比較

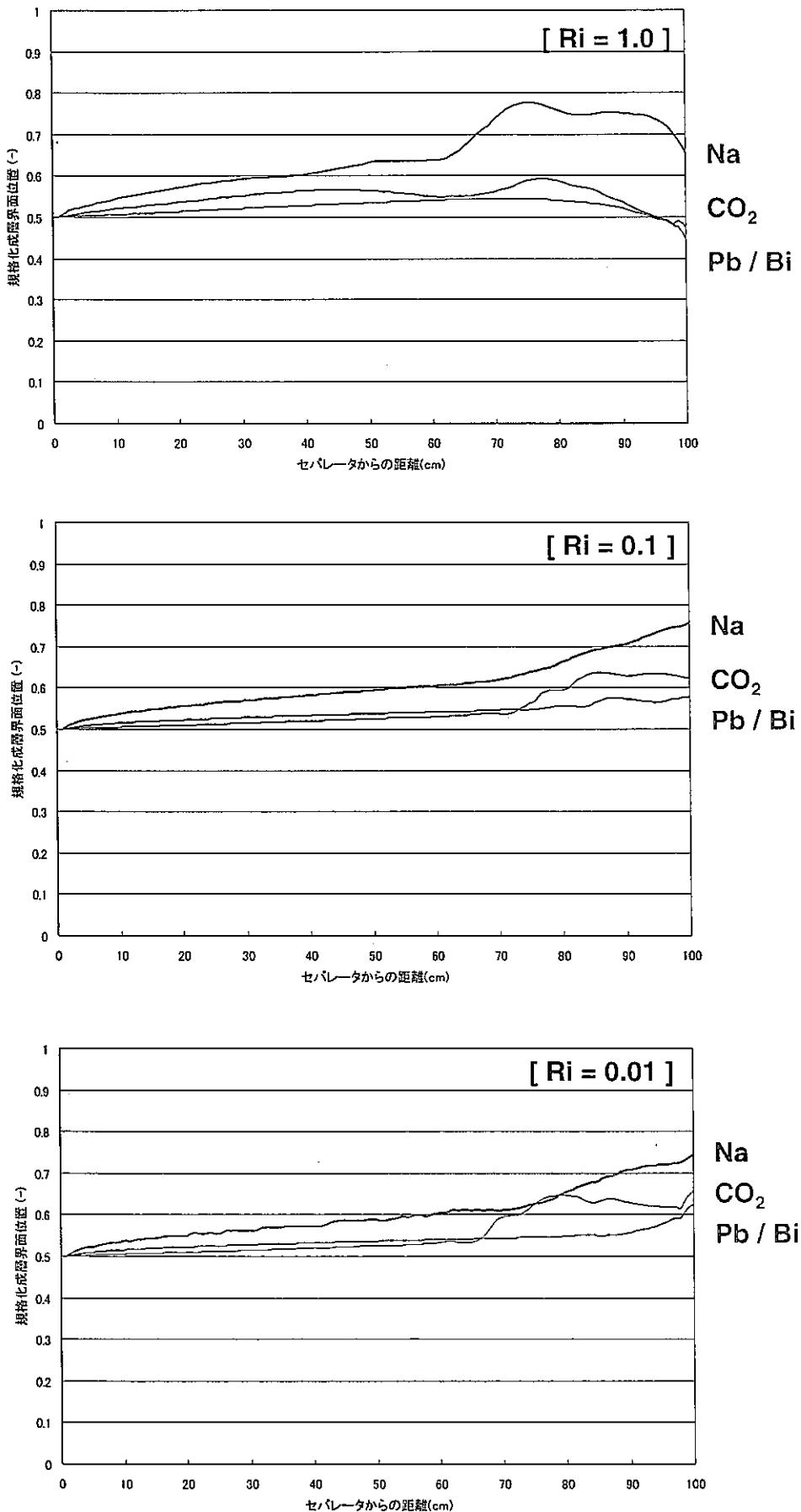


図 3.34 温度成層界面上昇特性の比較

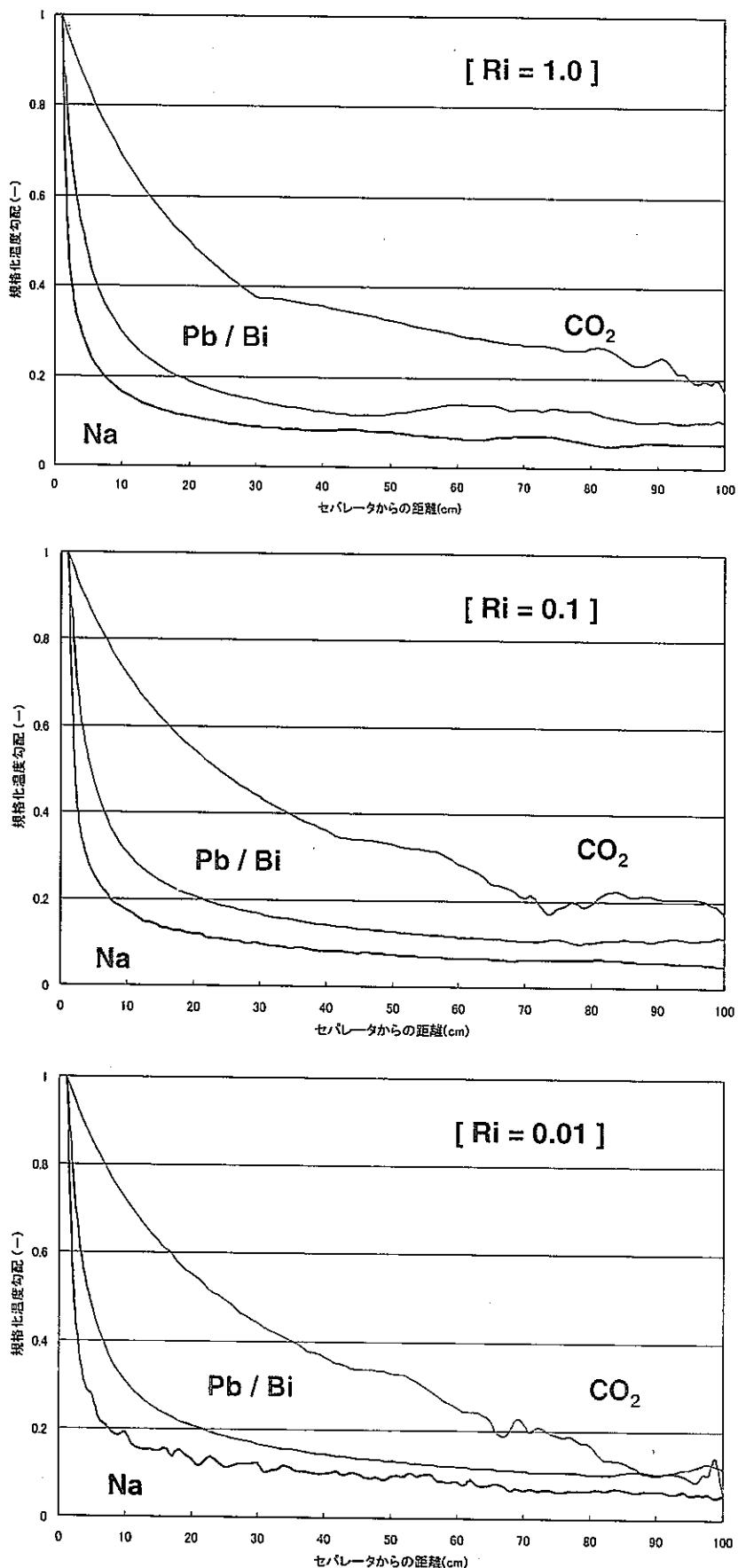


図 3.35 温度成層界面位置における温度勾配特性の比較

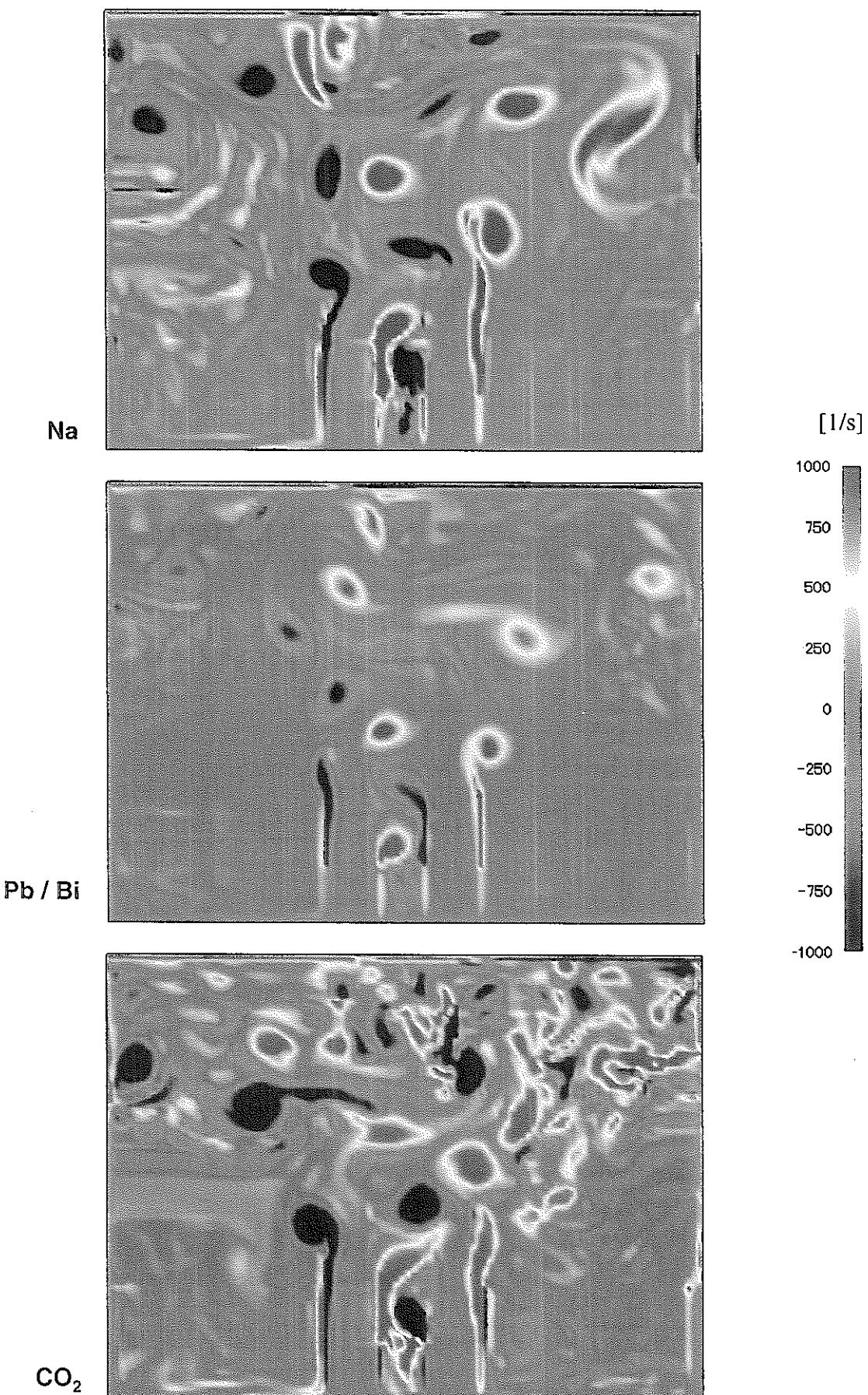


図 3.36 瞬時渦度分布特性の比較 (Re 数一致条件)

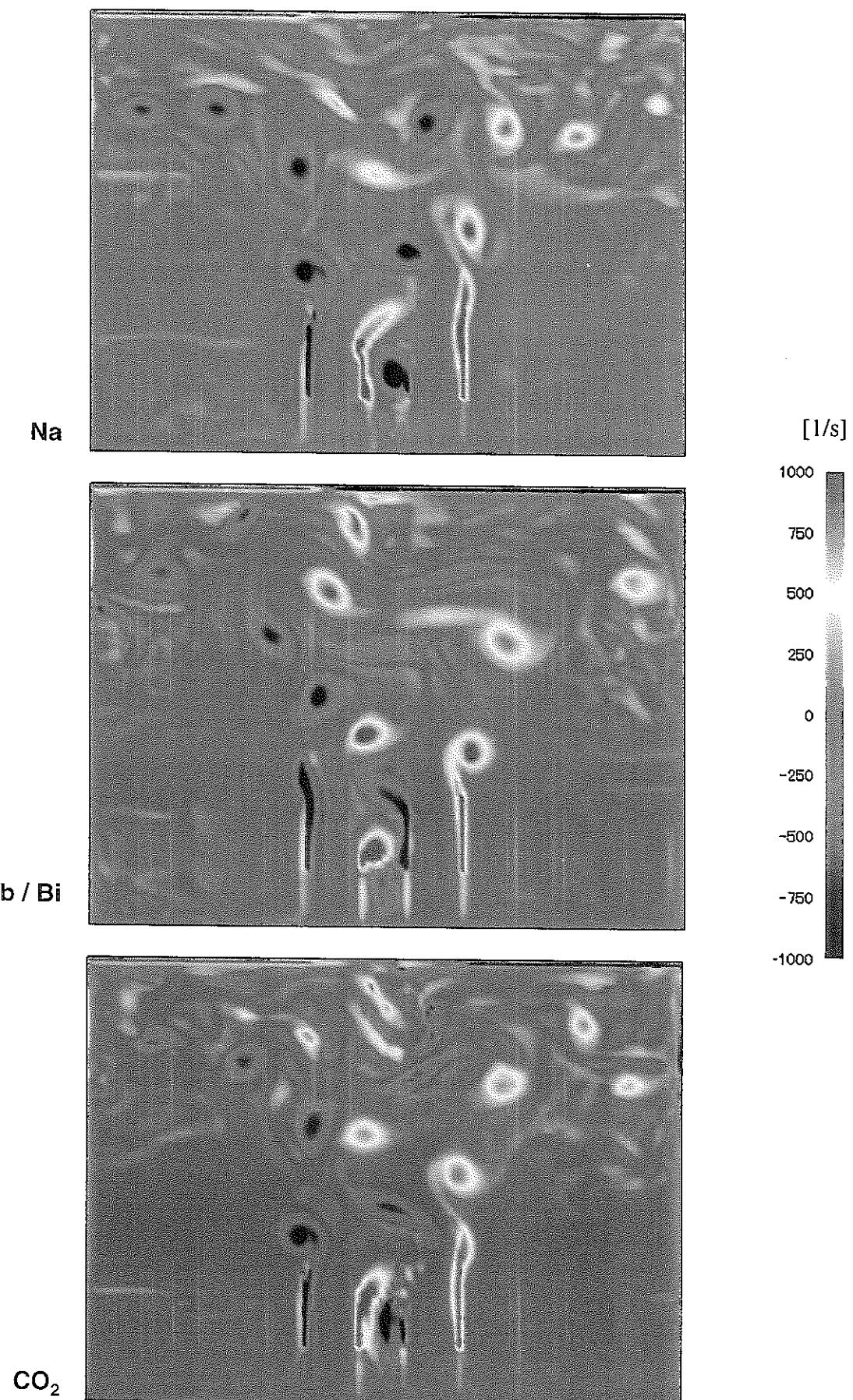


図 3.37 瞬時渦度分布特性の比較(流速一致条件)

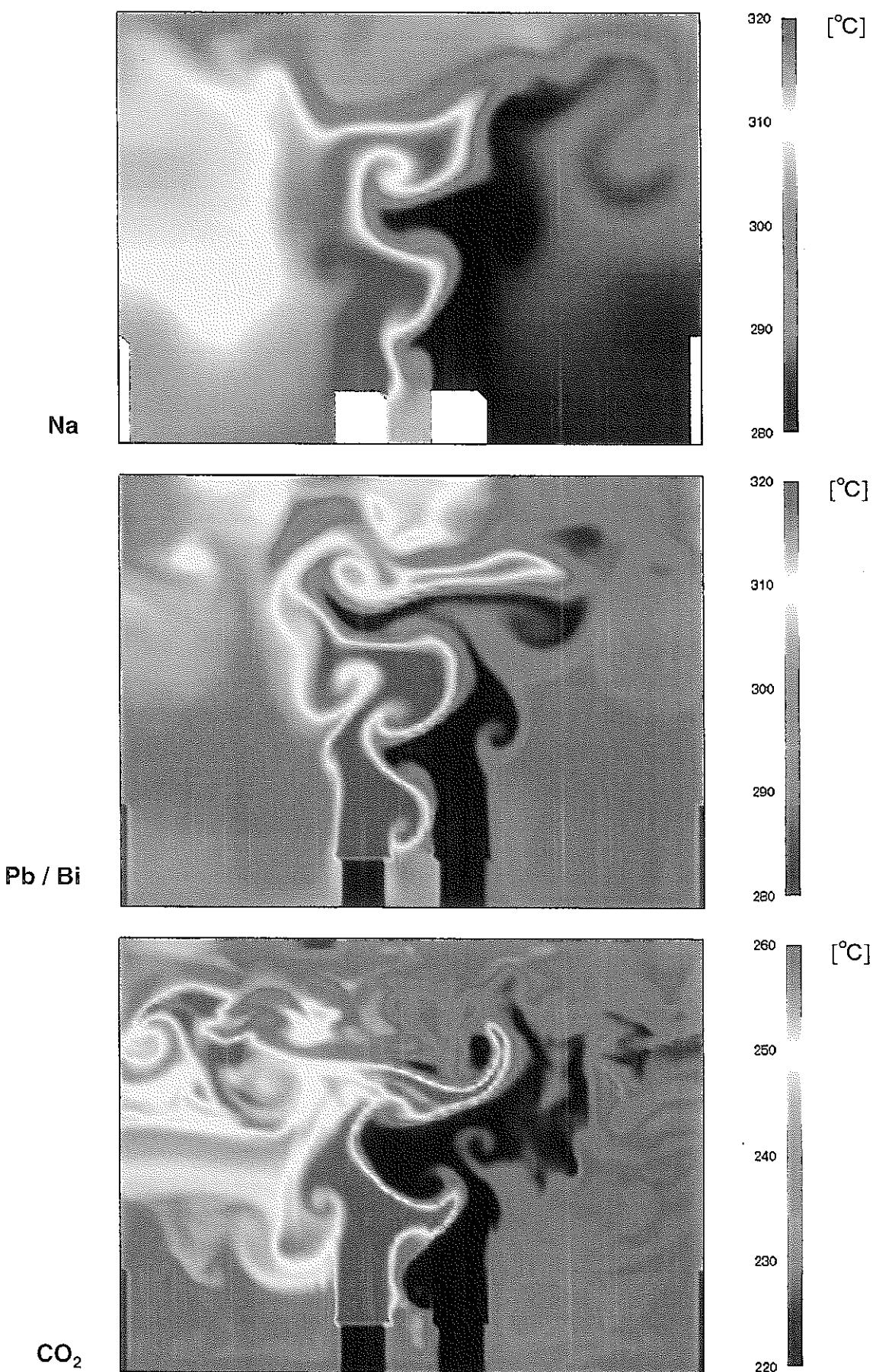


図 3.38 瞬時温度分布特性の比較 (Re 数一致条件)

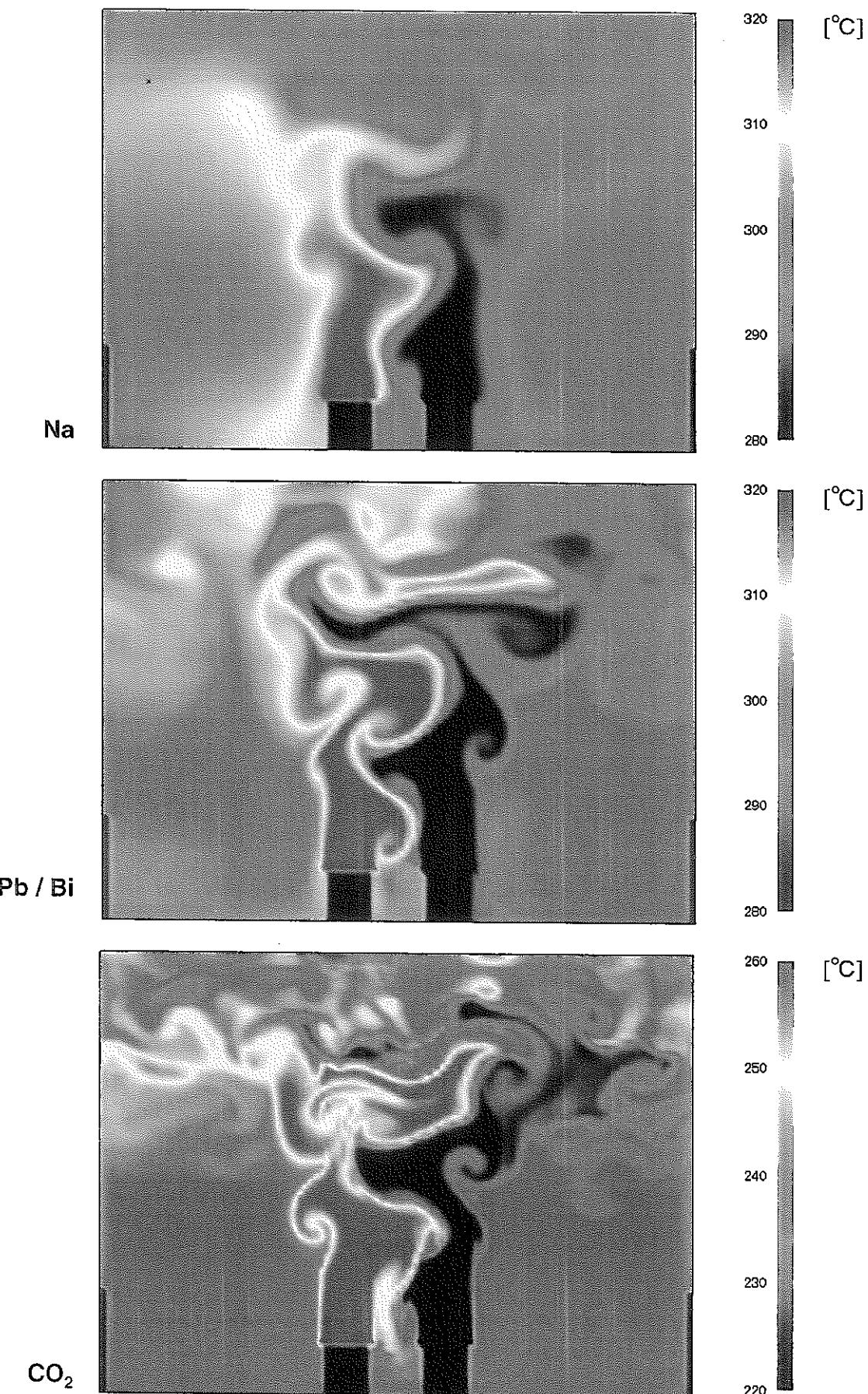
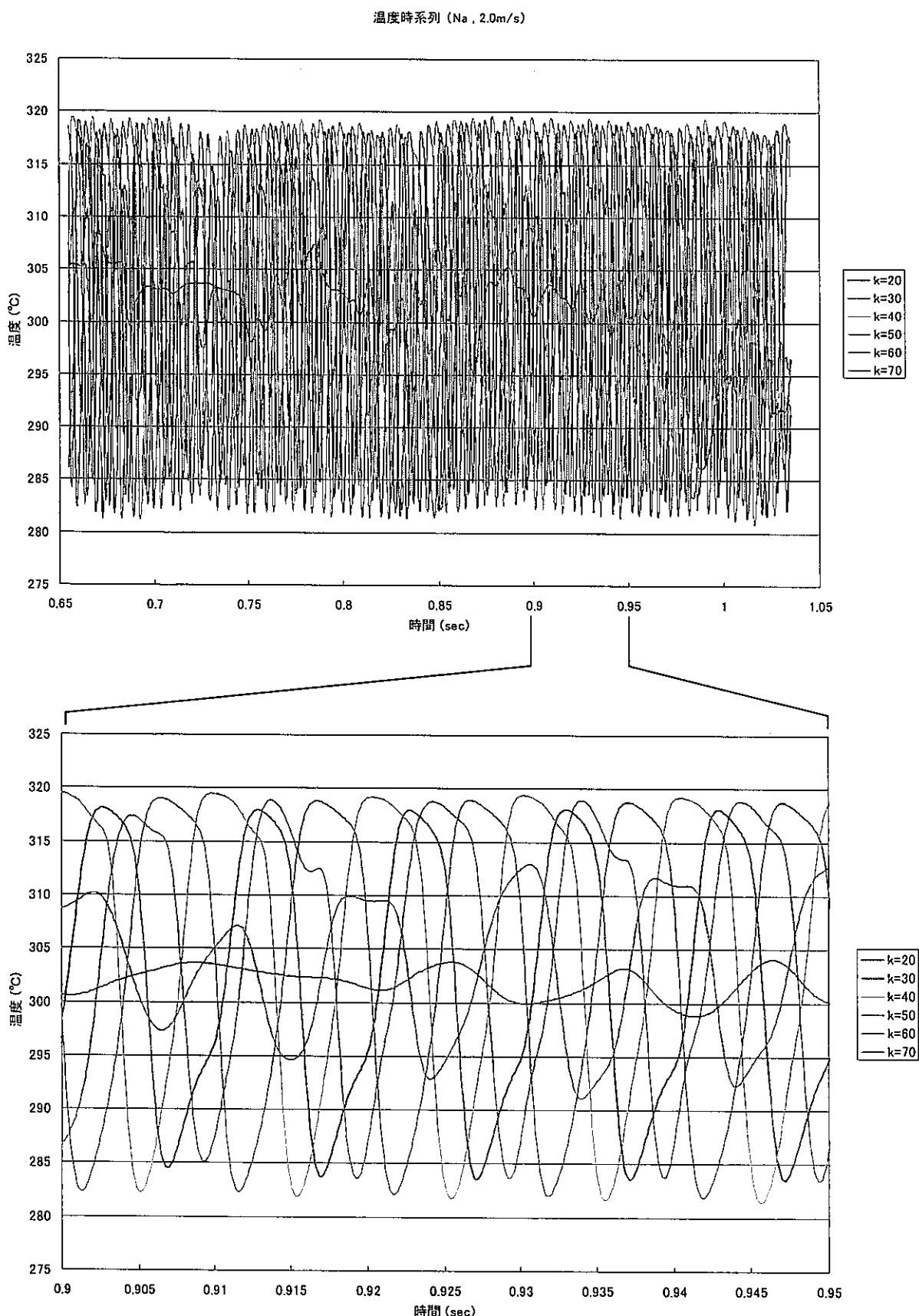


図 3.39 瞬時温度分布特性の比較(流速一致条件)

図 3.40 温度時系列特性の比較 ( $\text{Na}$ ;  $\text{Re}$  数一致条件)

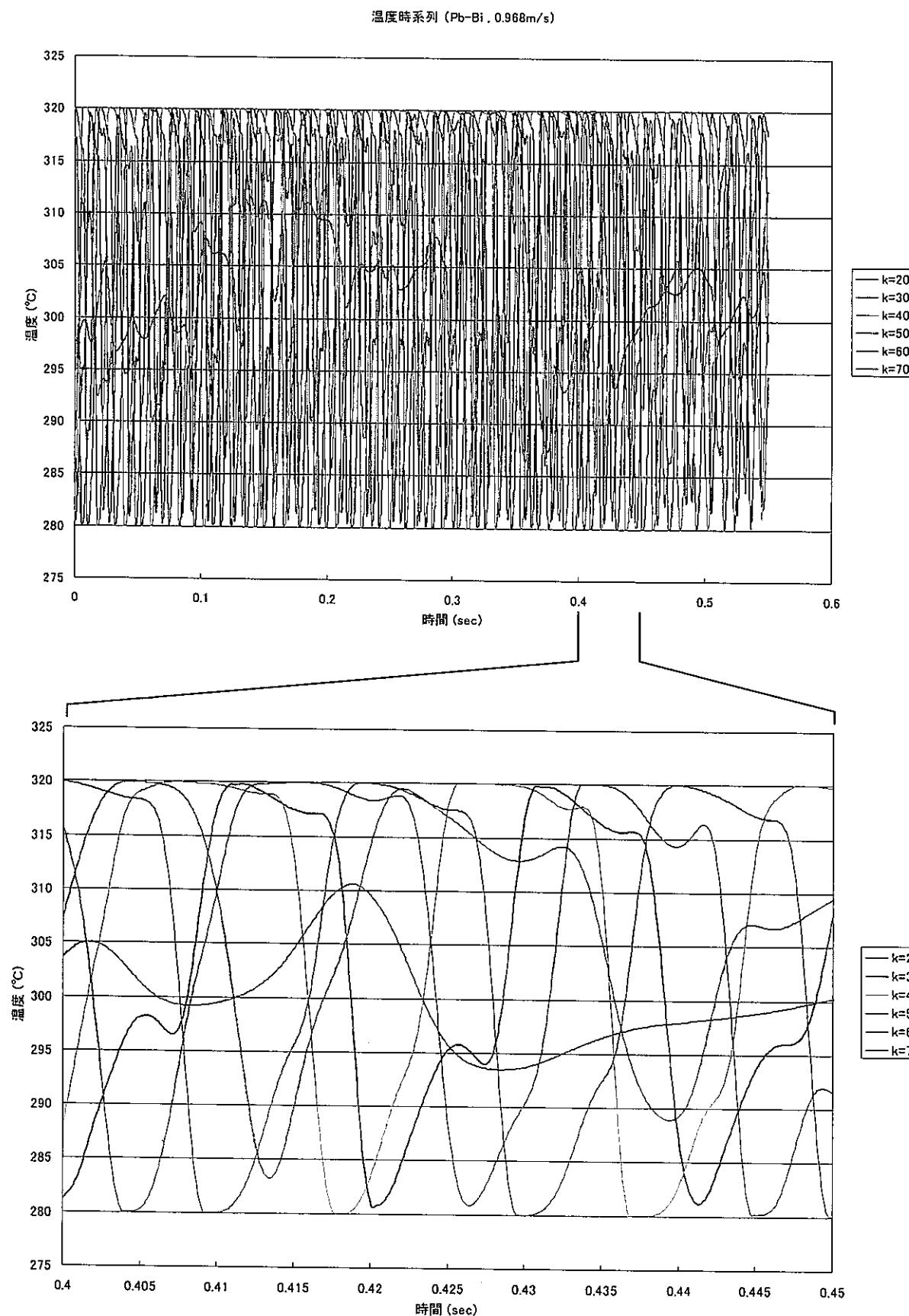
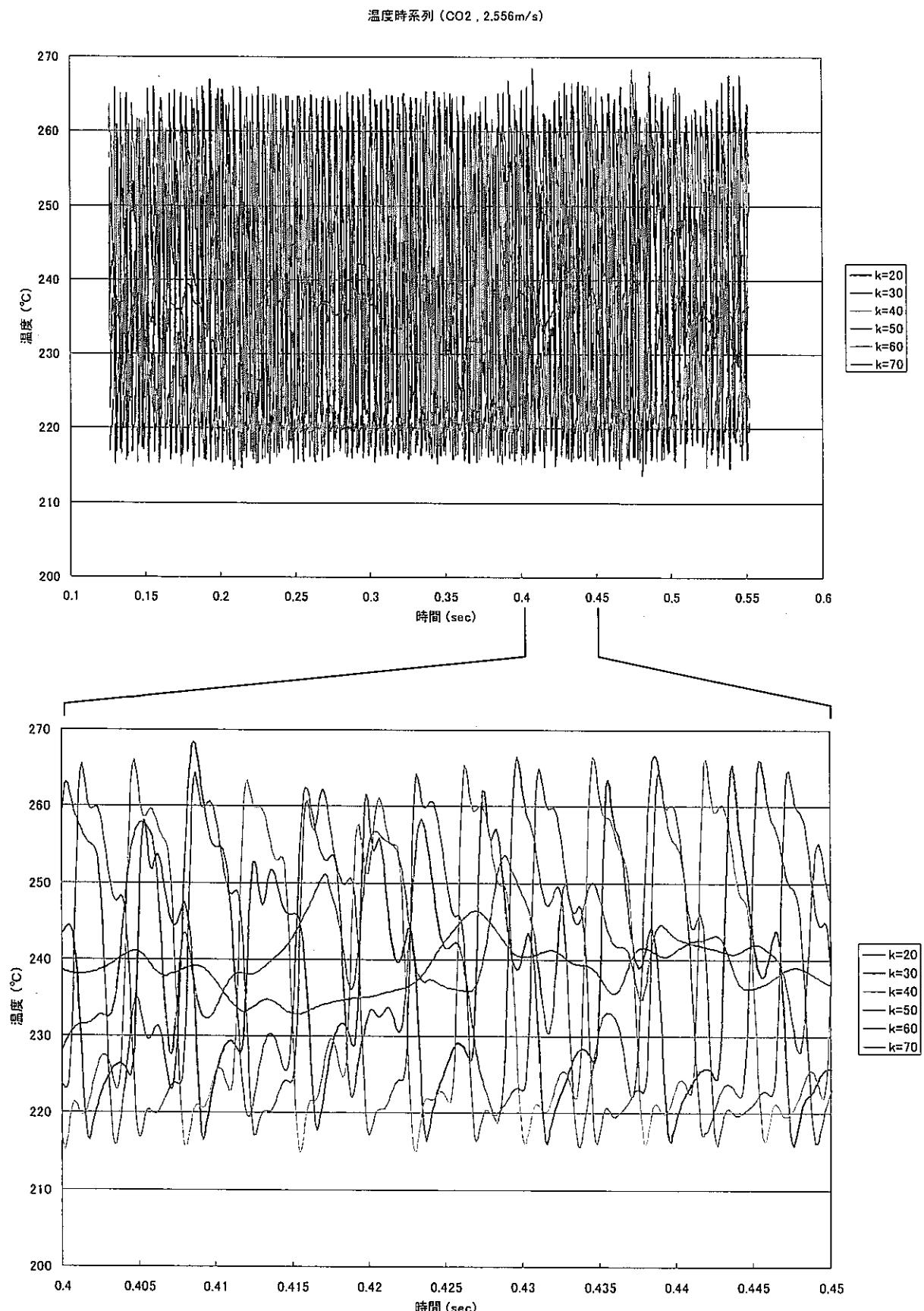
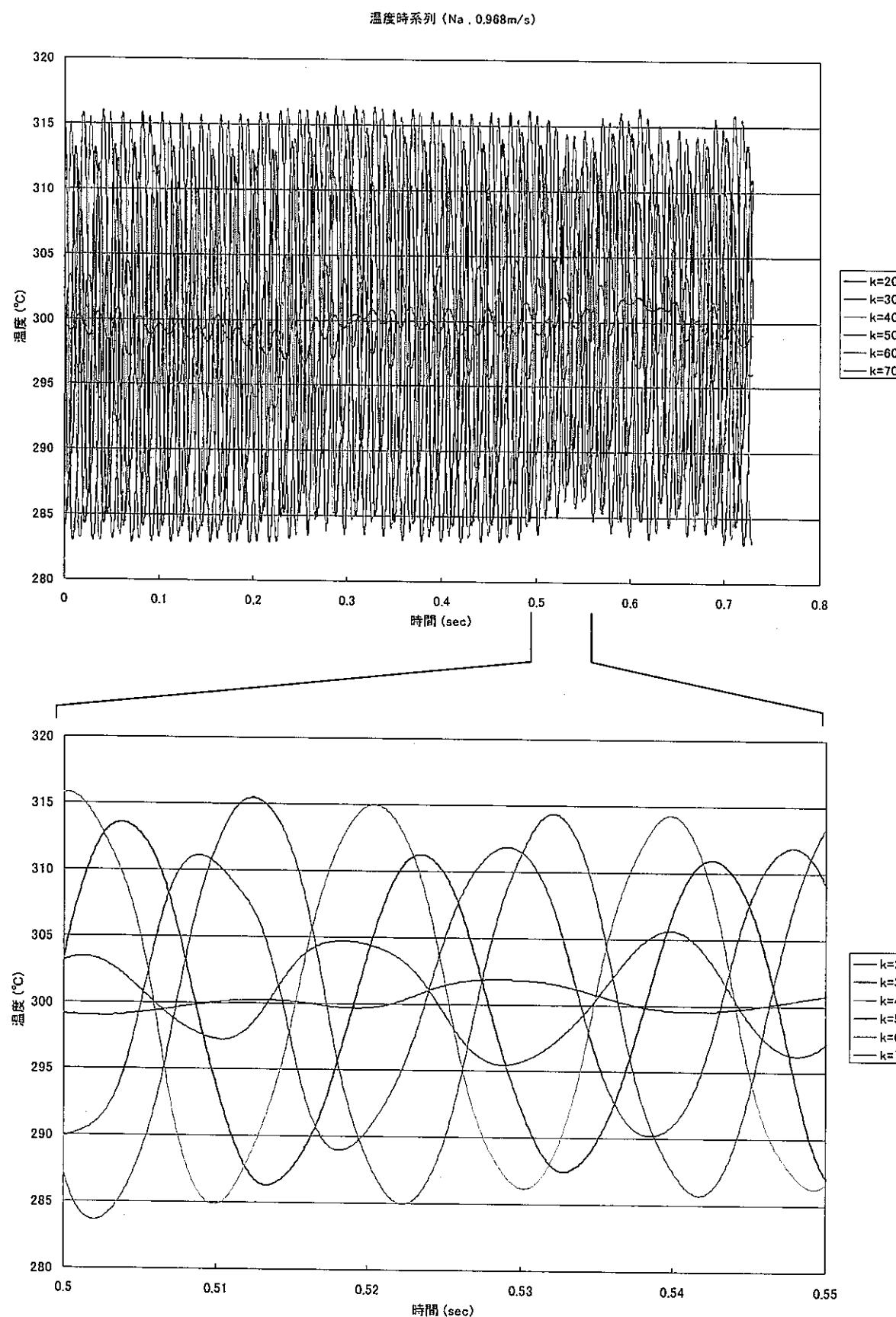
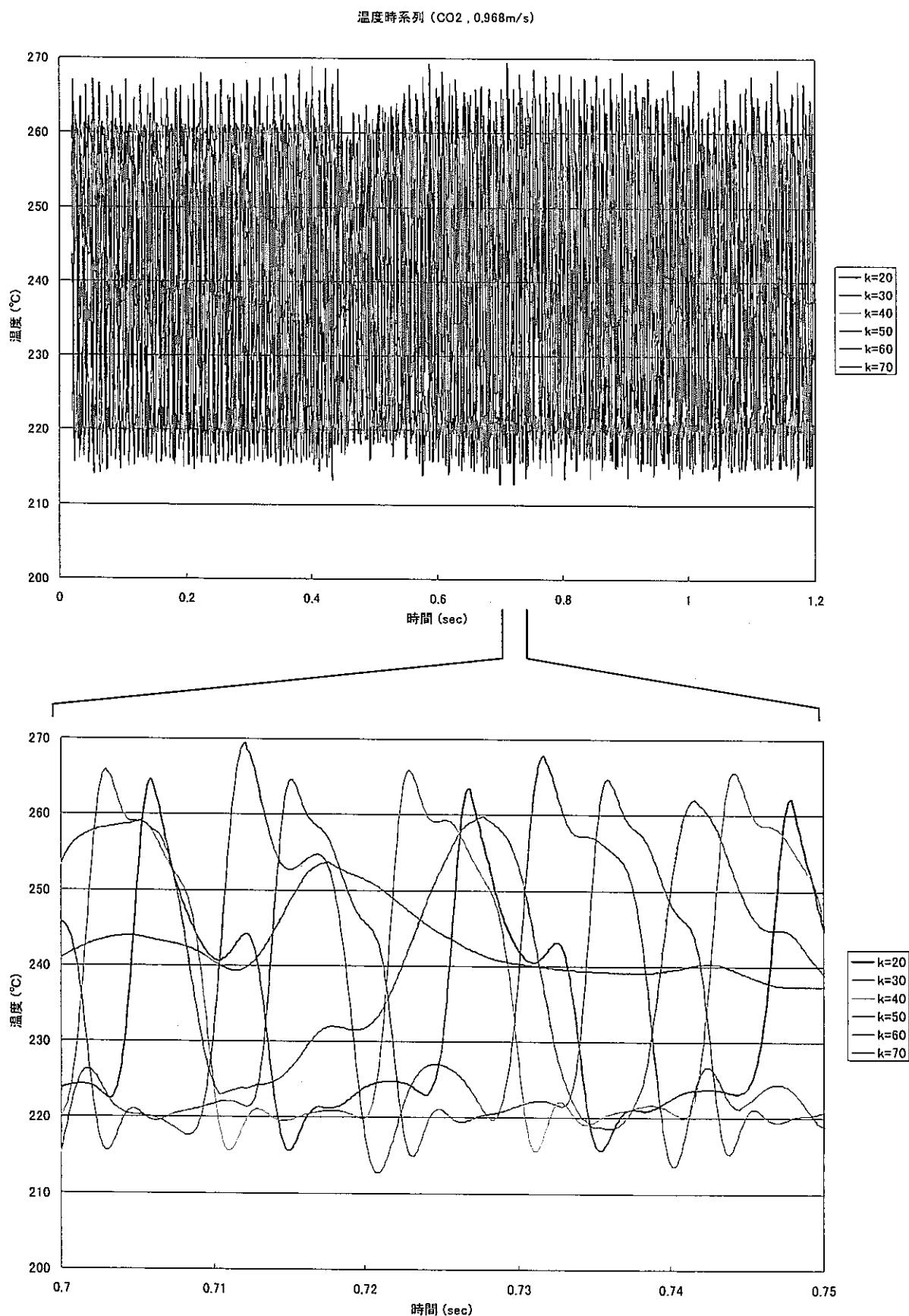


図 3.41 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi; Re 数一致条件)

図 3.42 温度時系列特性の比較 ( $\text{CO}_2$ ; Re 数一致条件)

図 3.43 温度時系列特性の比較 ( $\text{Na}$ ; 流速一致条件)

図 3.44 温度時系列特性の比較 ( $\text{CO}_2$ ; 流速一致条件)

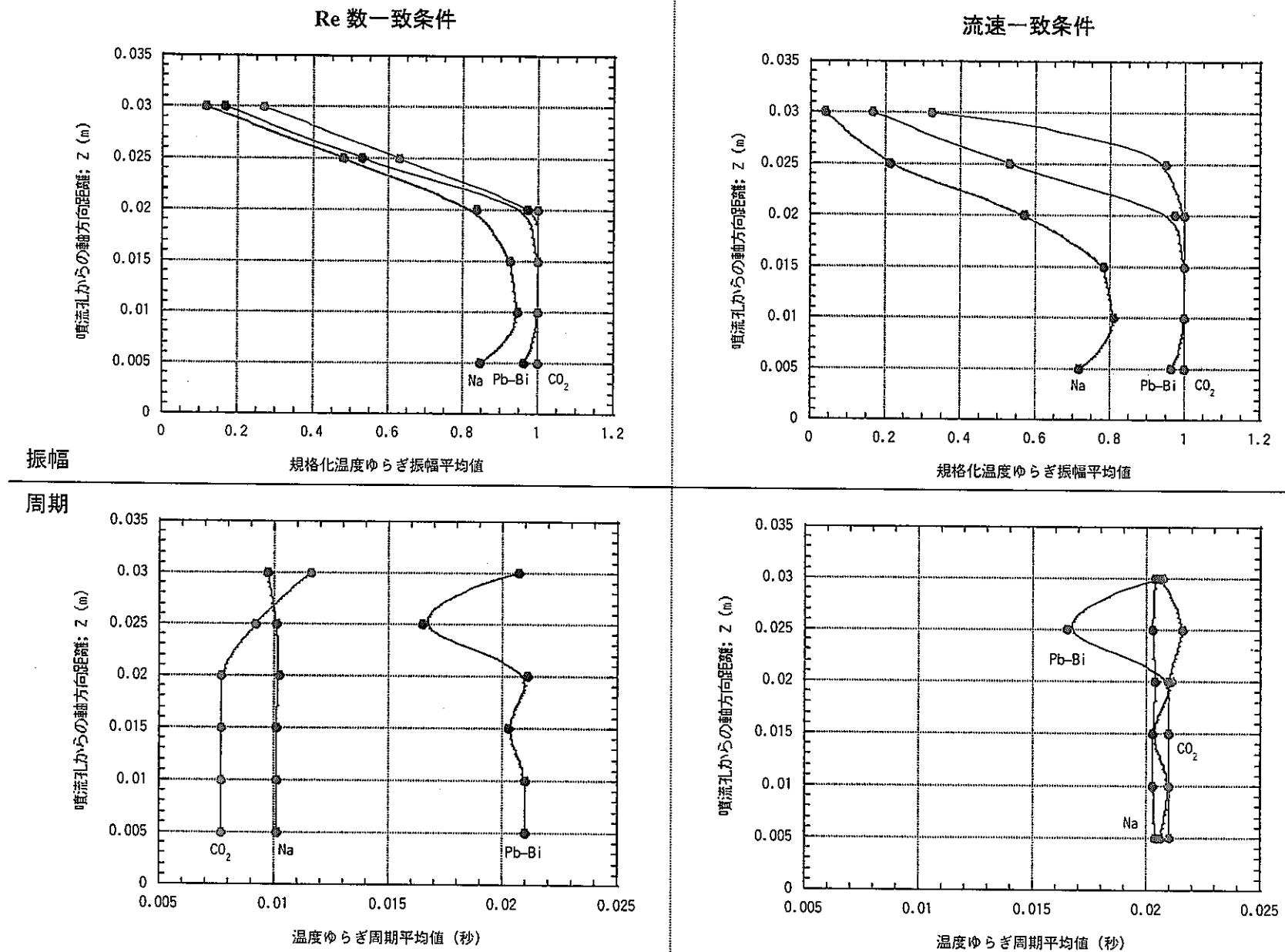
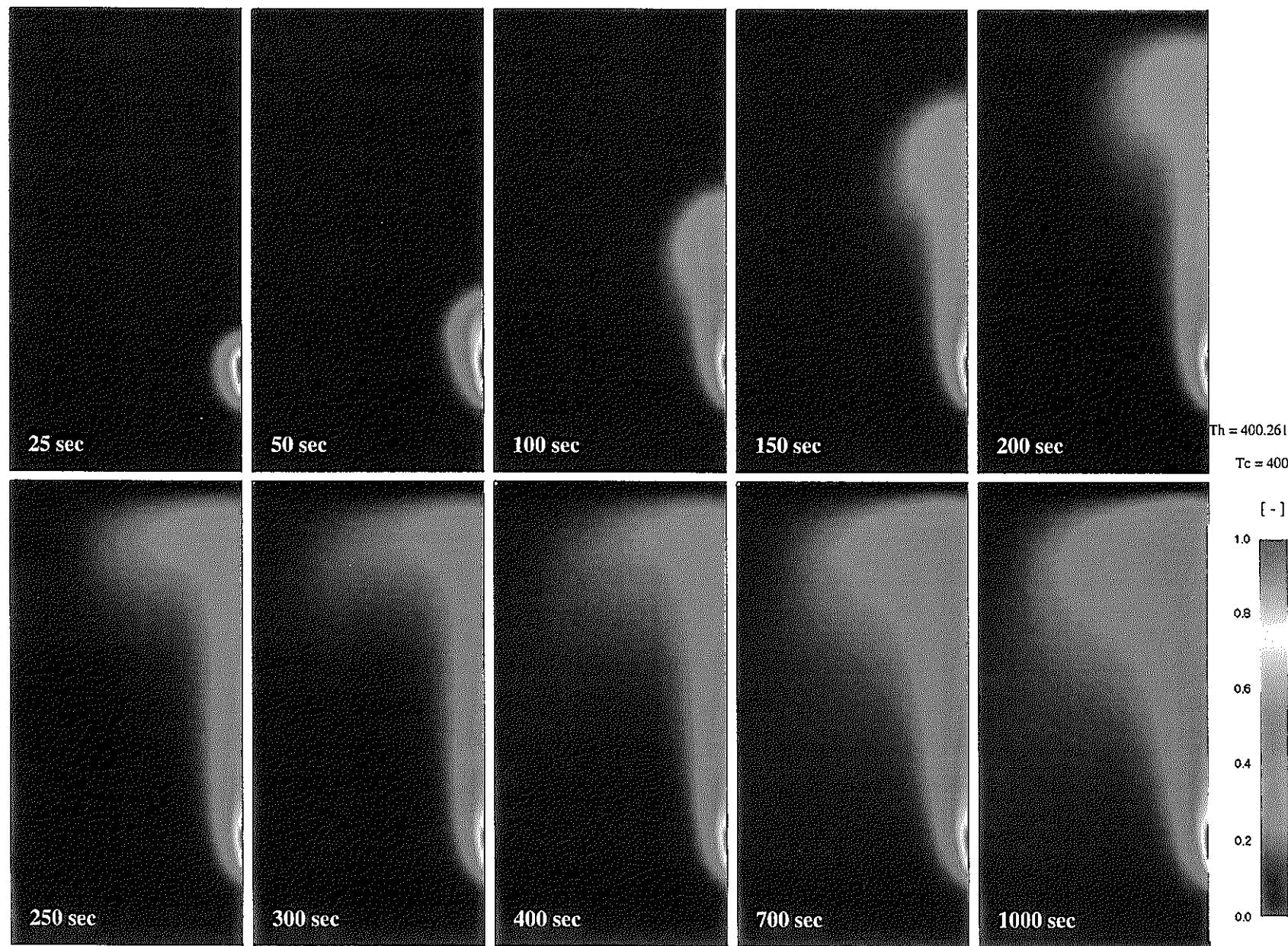


図 3.45 温度ゆらぎ変動特性の比較

図 3.46 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^6, h = 0.2 \text{ H}$ )

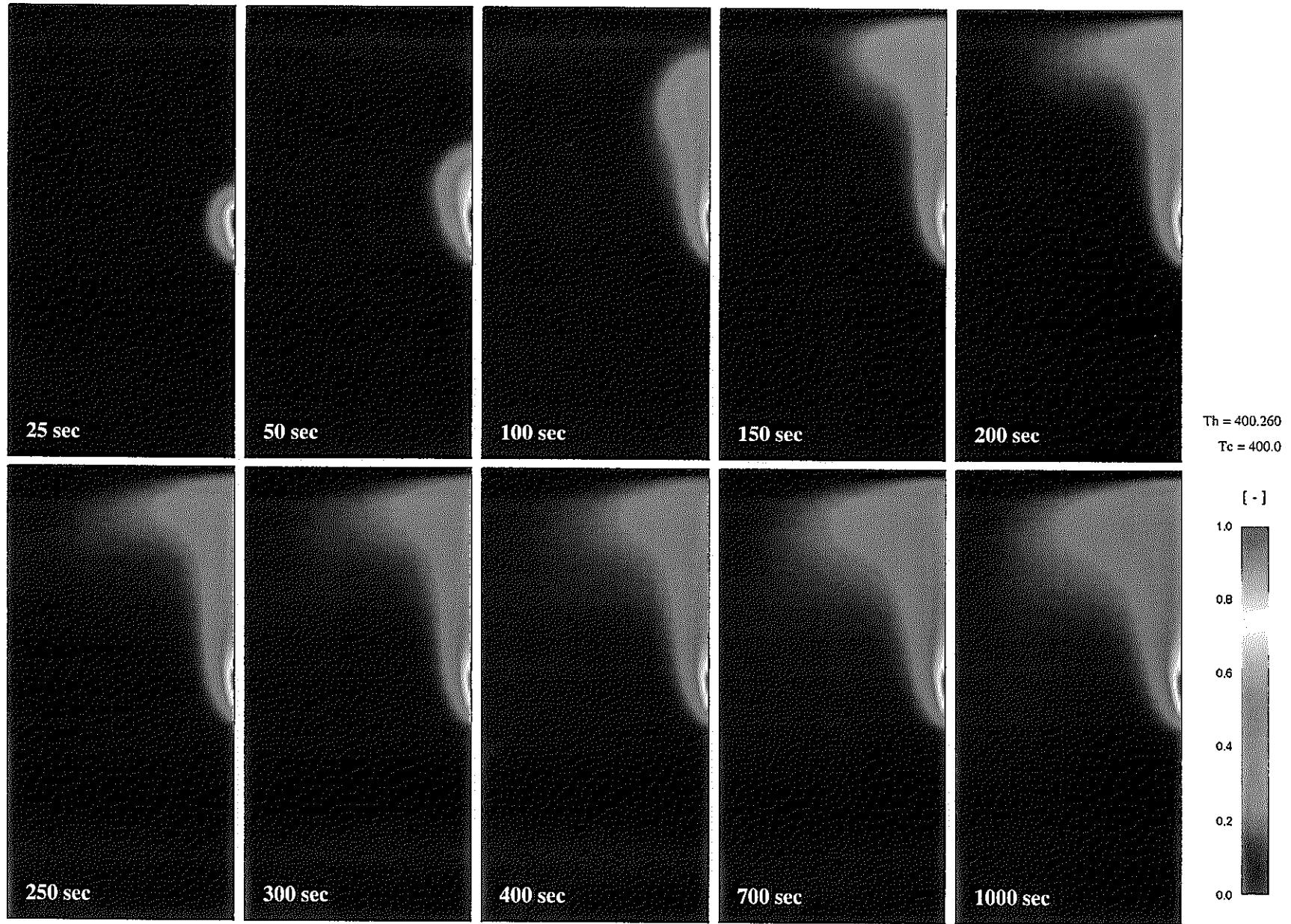
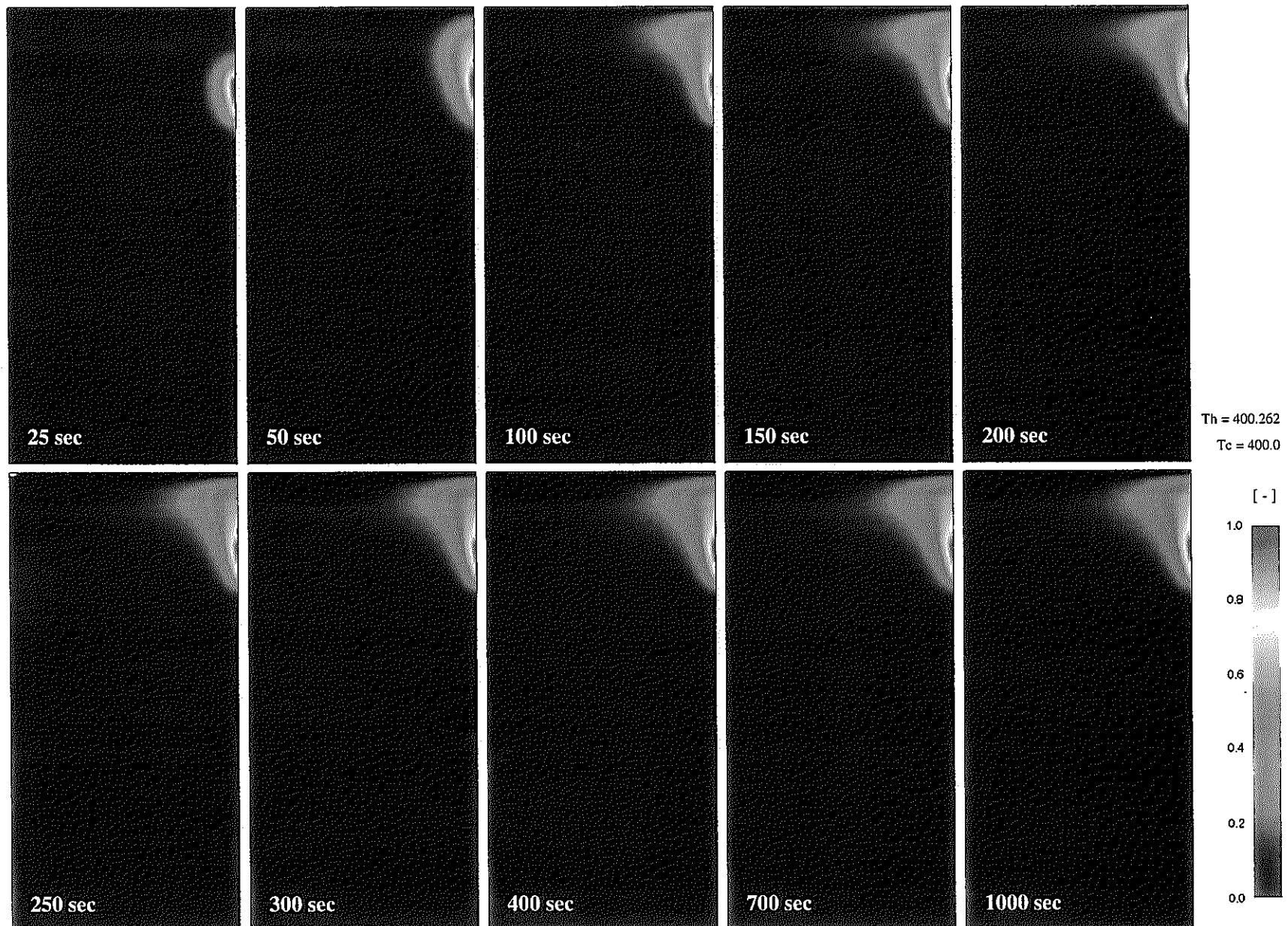
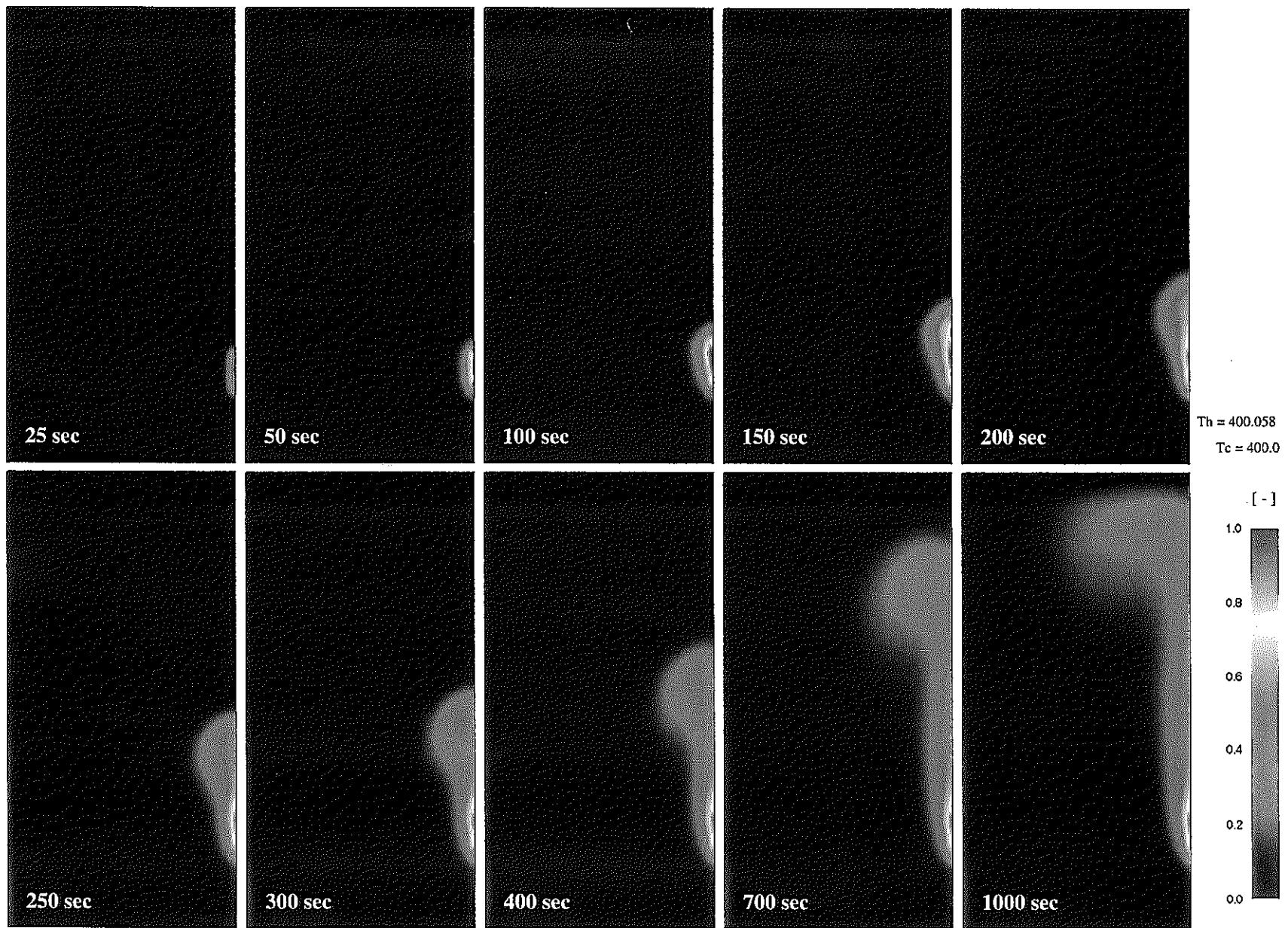


図 3.47 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^6, h = 0.5 \text{ H}$ )

図 3.48 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^6, h = 0.8 \text{ H}$ )

図 3.49 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^6, h = 0.2 H$ )

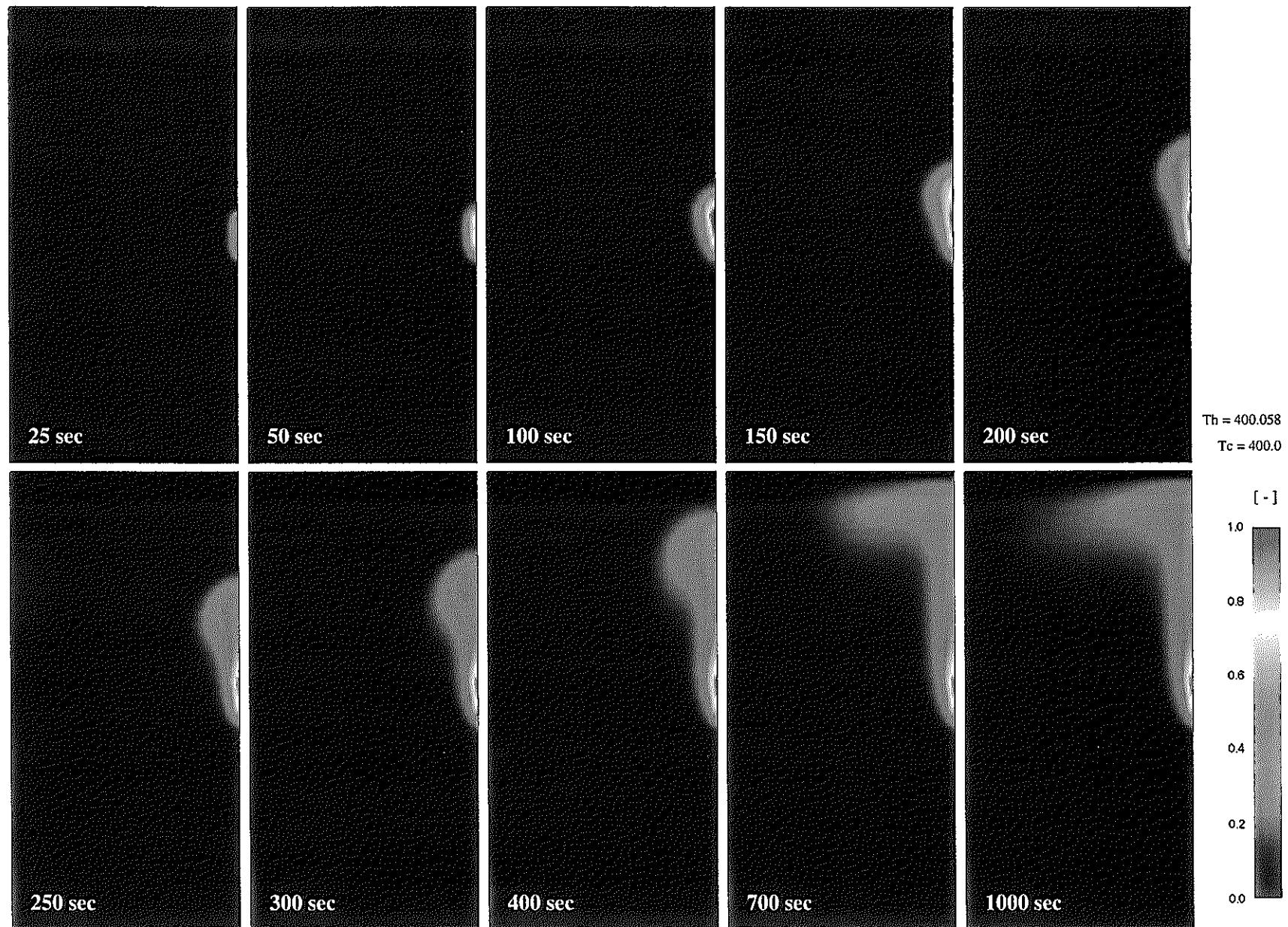


図 3. 50 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^6, h = 0.5 H$ )

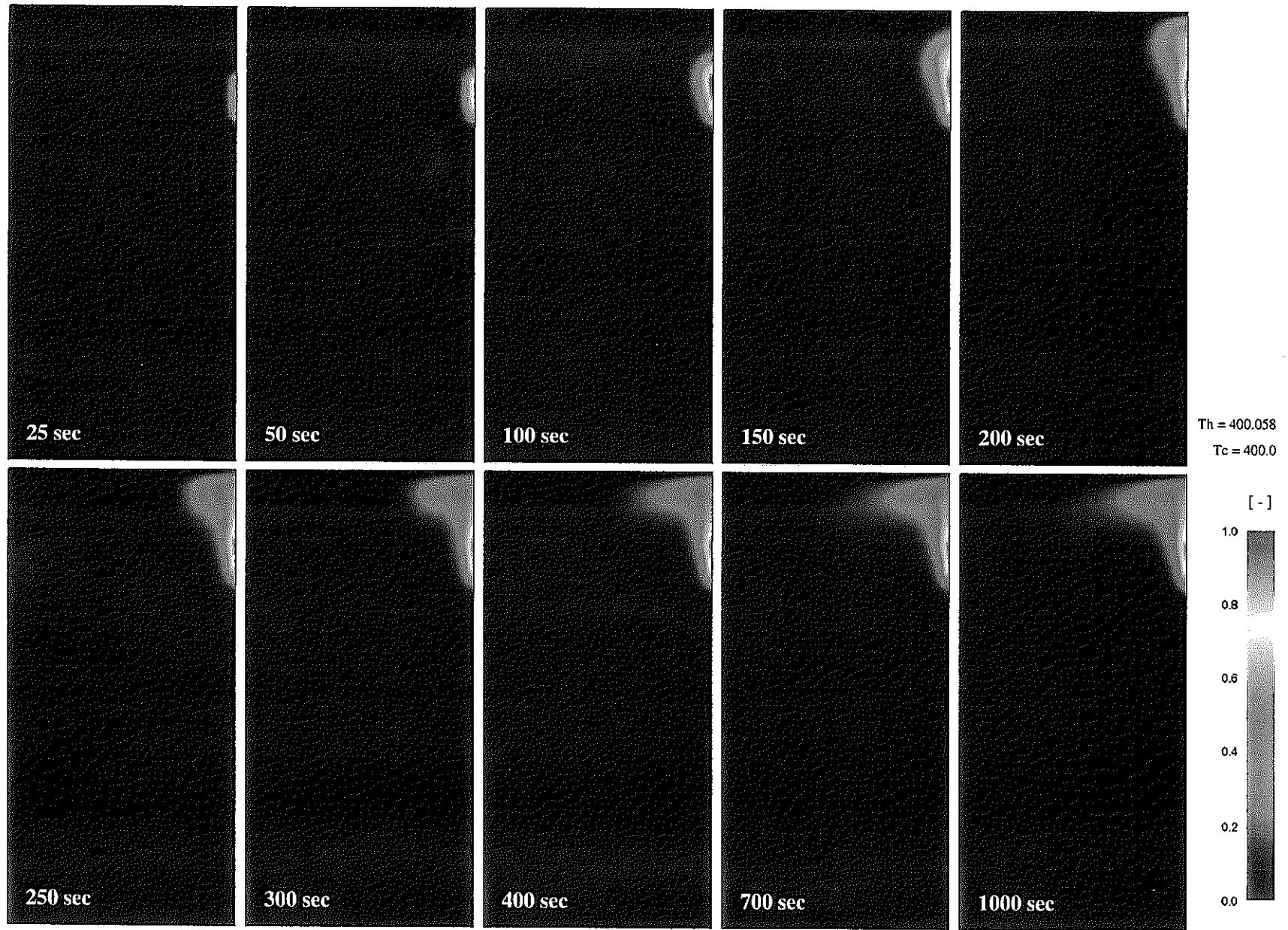
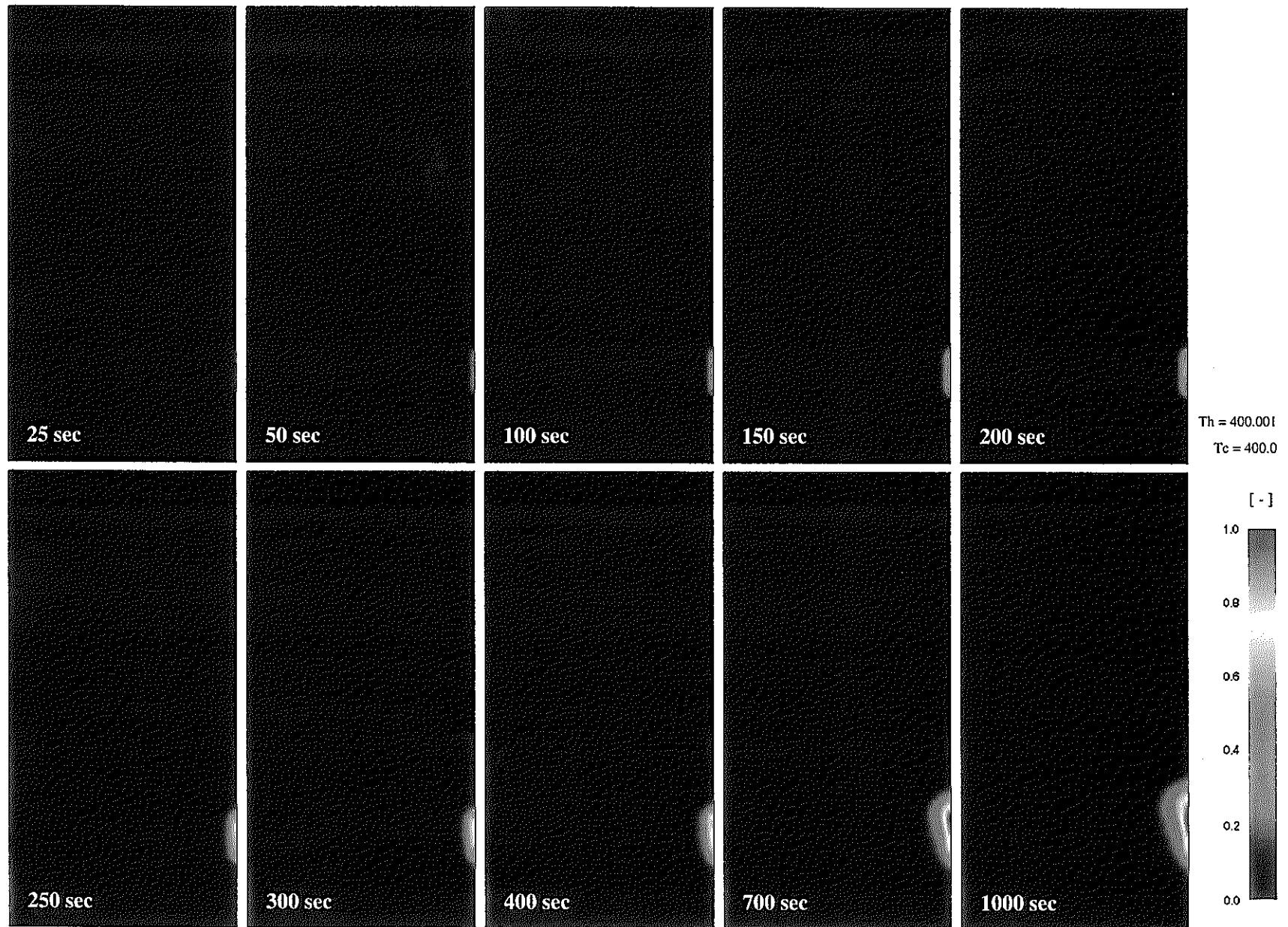


図 3.51 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^6, h = 0.8 \text{ H}$ )

図 3.52 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^6$ ,  $h = 0.2 \text{ H}$ )

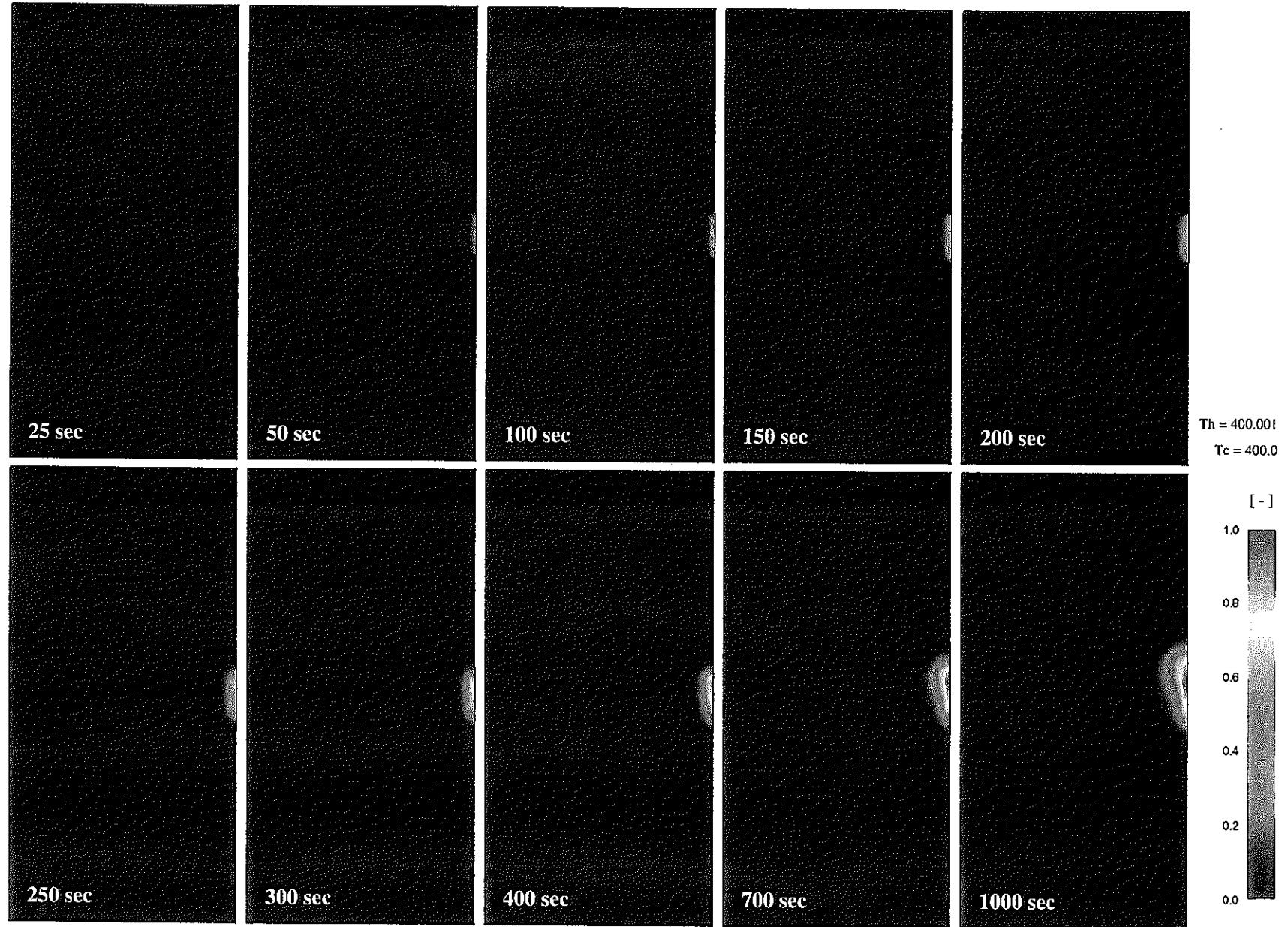


図 3.53 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^6$ ,  $h = 0.5 \text{ H}$ )

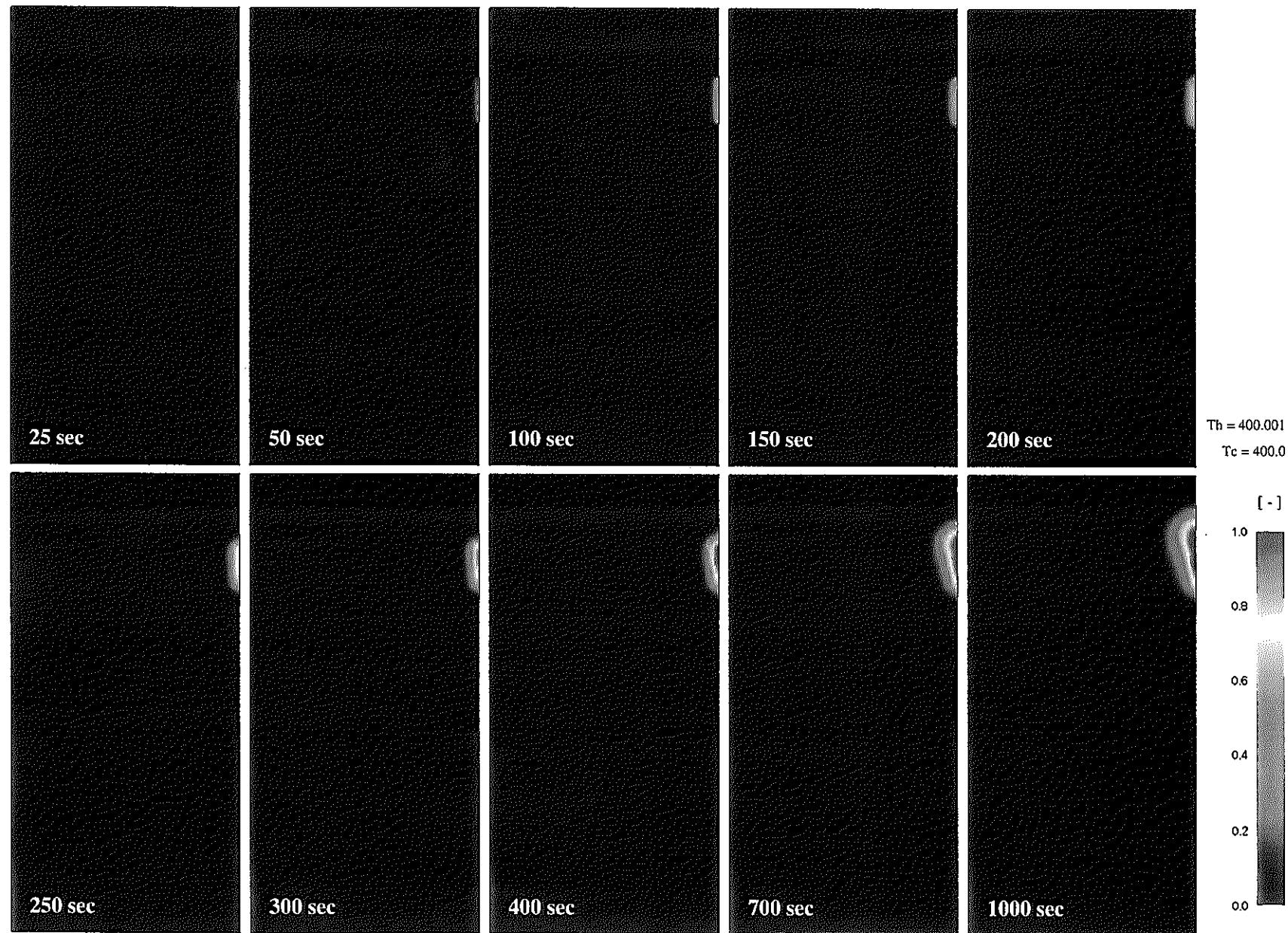


図 3.54 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^6$ ,  $h = 0.8 \text{ H}$ )

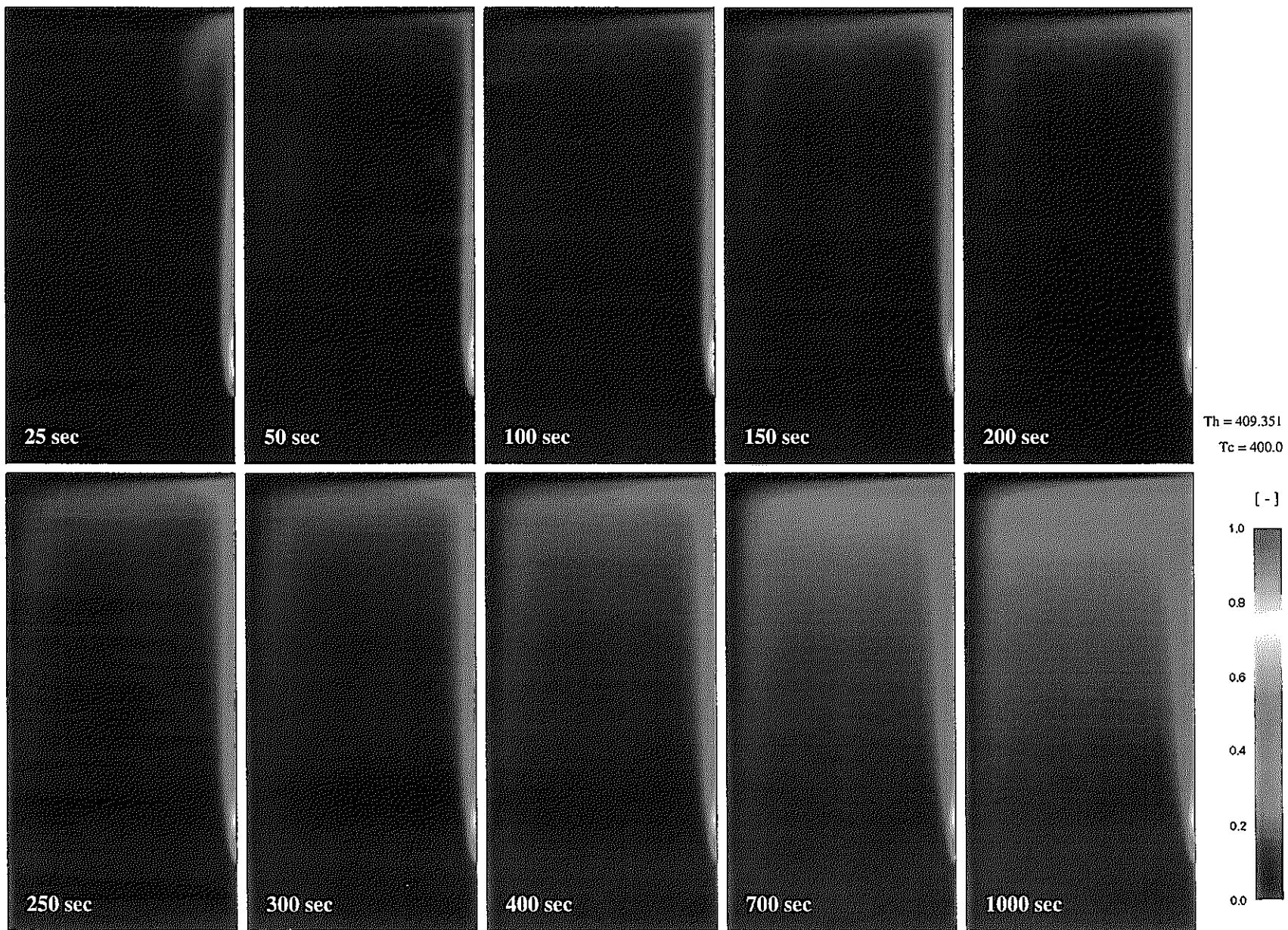
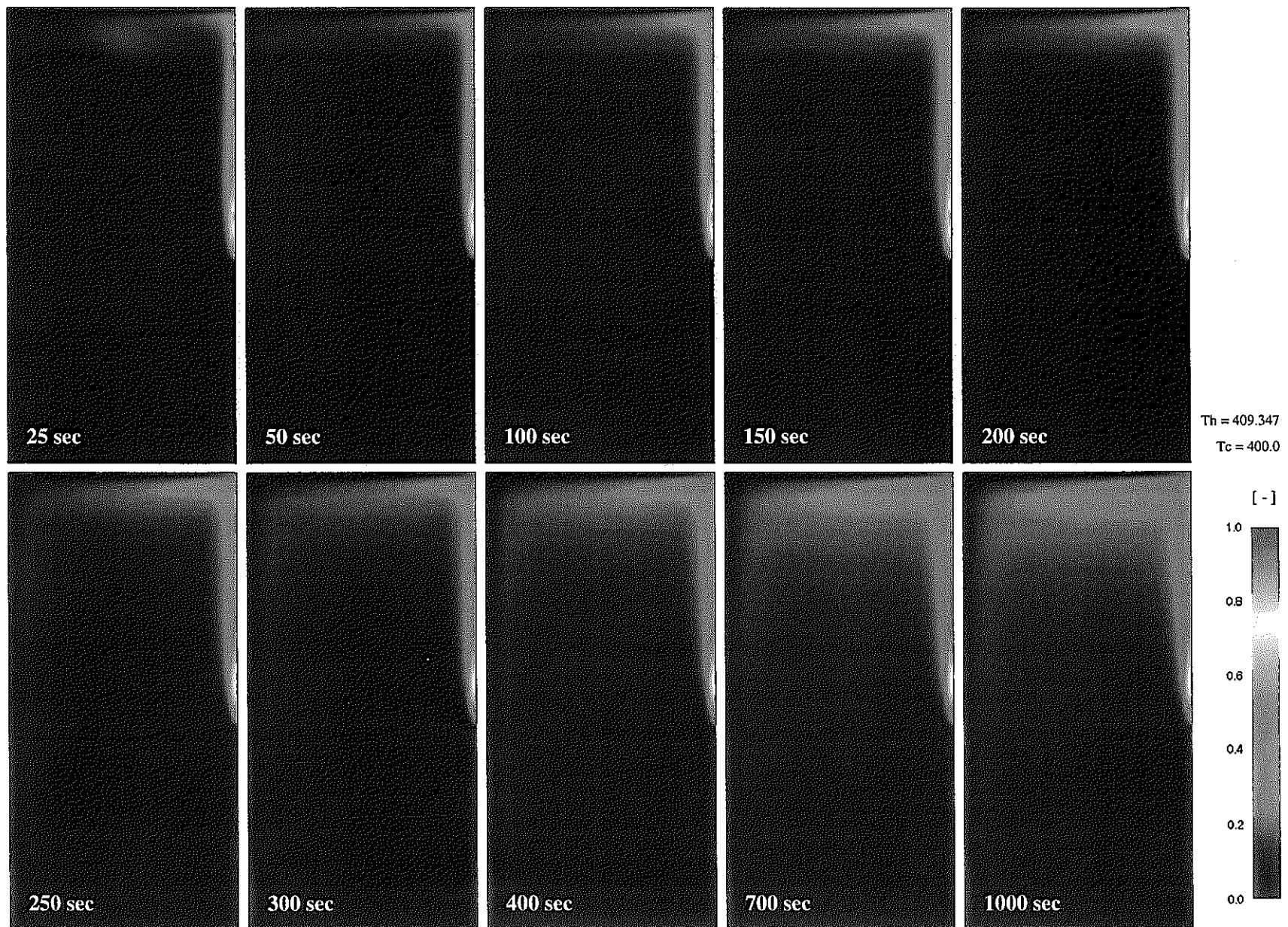
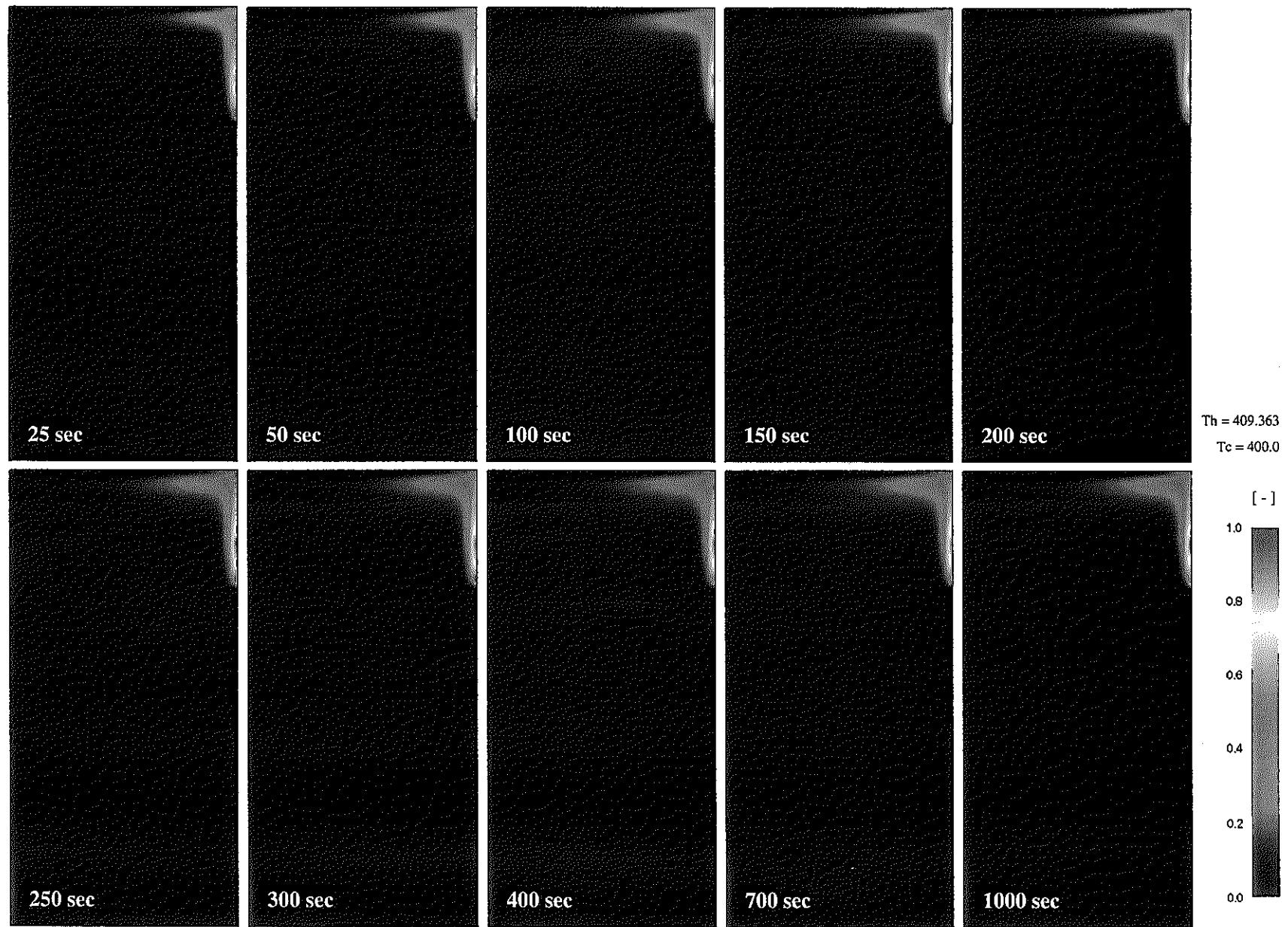


図 3.55 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^8, h = 0.2 \text{ H}$ )

図 3.56 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^8, h = 0.5 \text{ H}$ )

図 3.57 空間温度分布の時間推移 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^8, h = 0.8 \text{ H}$ )

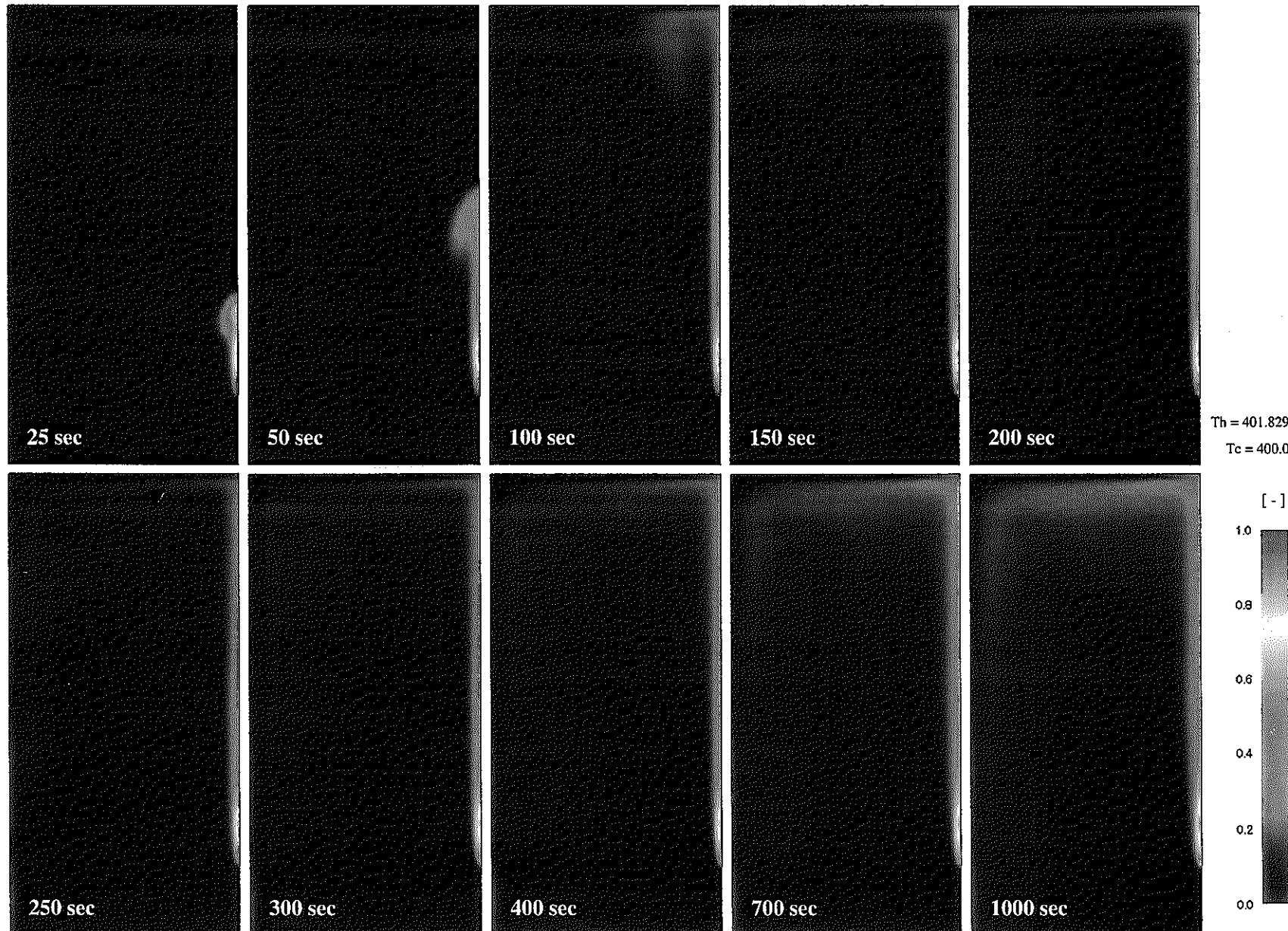


図 3.58 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^8, h = 0.2 H$ )

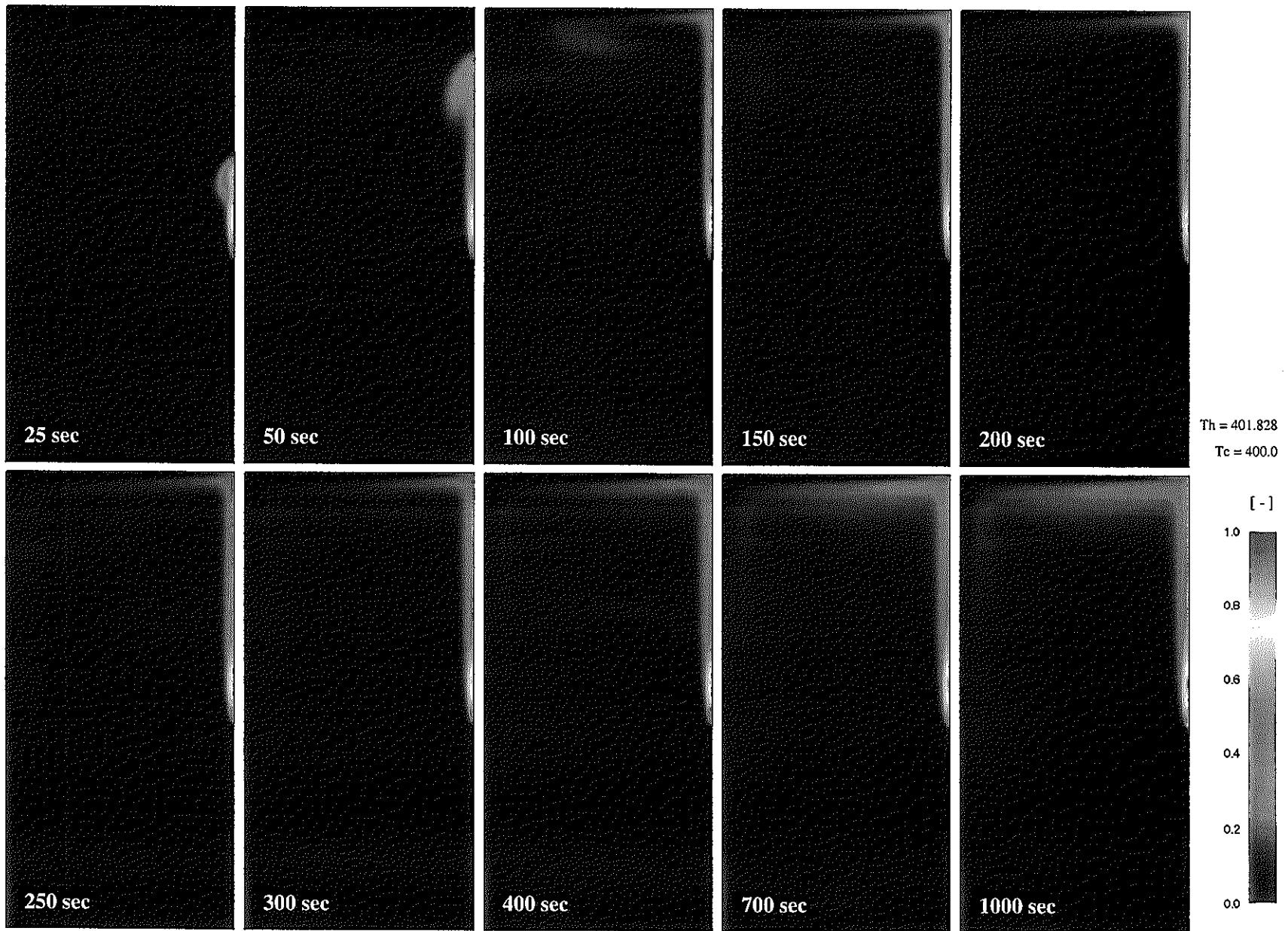
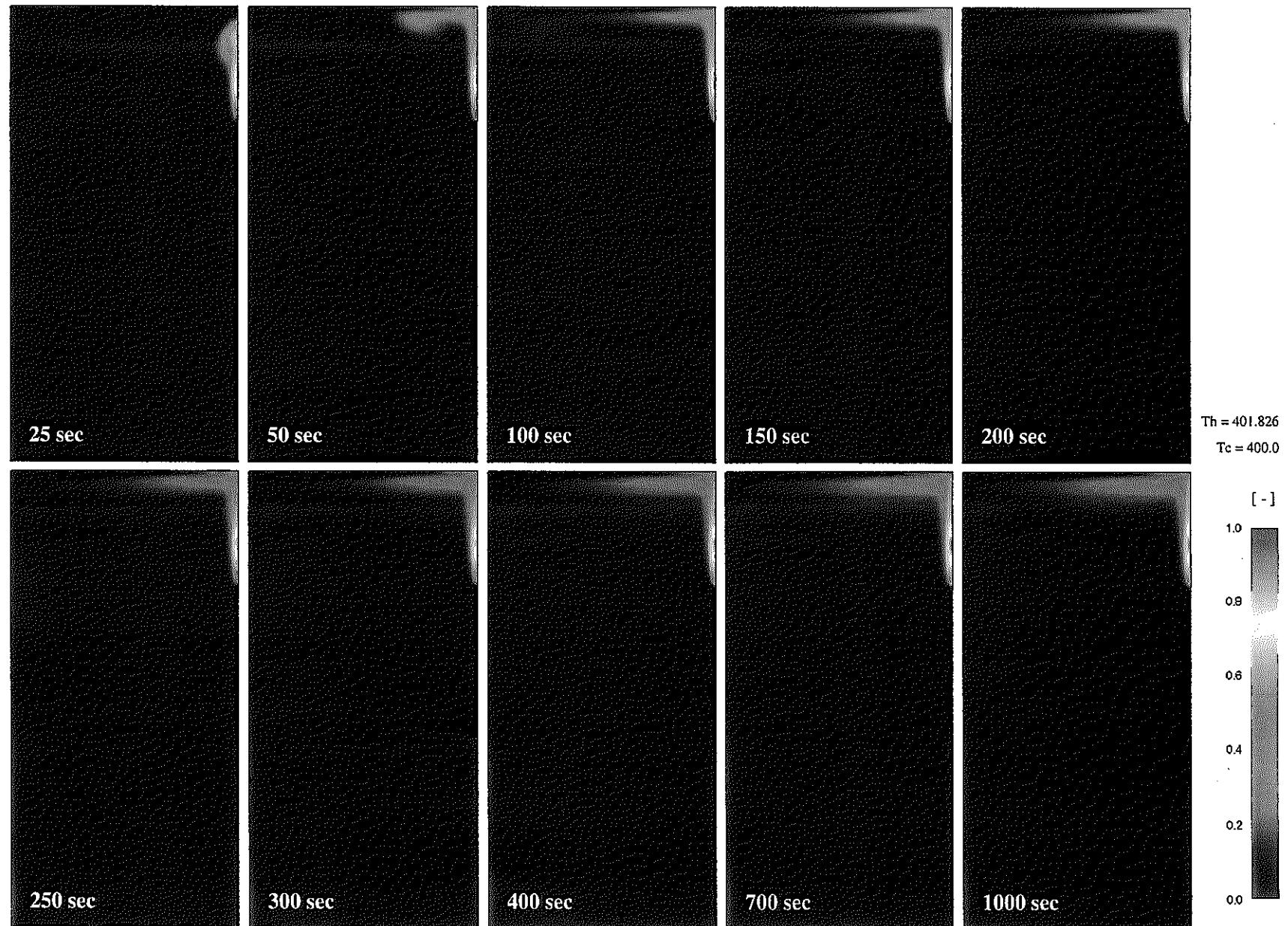
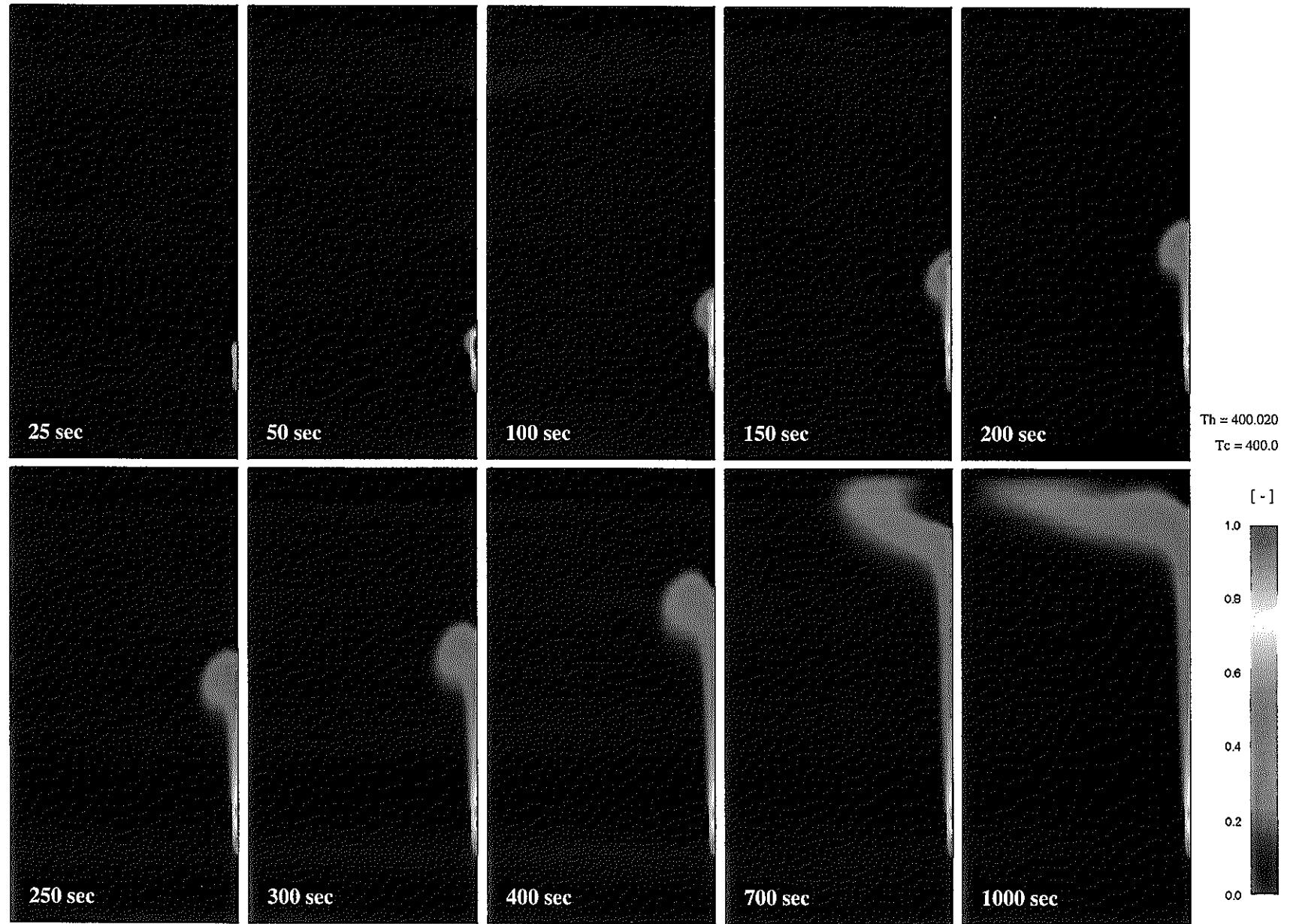
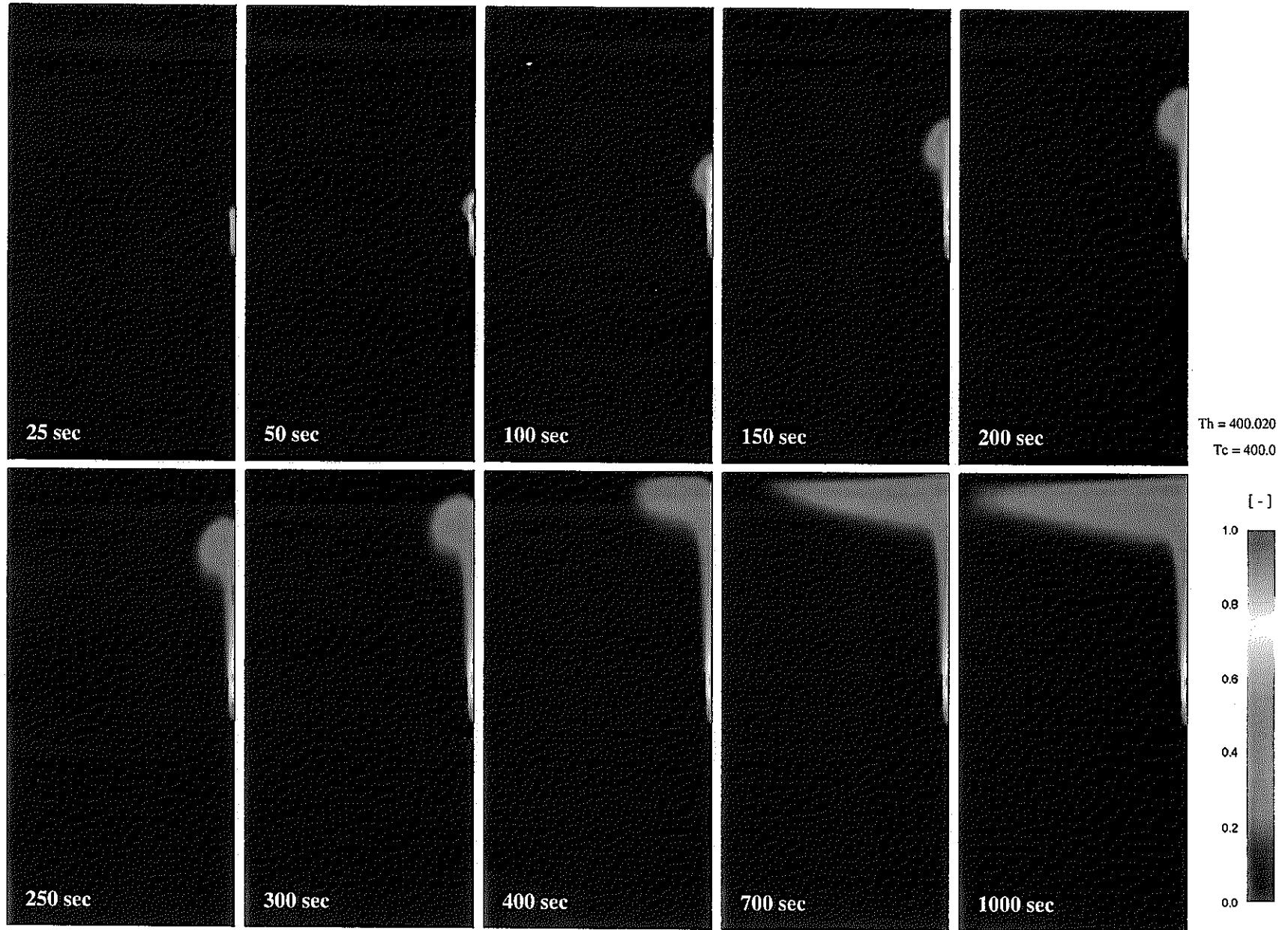


図 3.59 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^8, h = 0.5 H$ )

図 3. 60 空間温度分布の時間推移 ( $Pb / Bi, Ra = 10^8, h = 0.8 \text{ H}$ )

図 3.61 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^8$ ,  $h = 0.2 \text{ H}$ )

図 3. 62 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^8$ ,  $h = 0.5 \text{ H}$ )

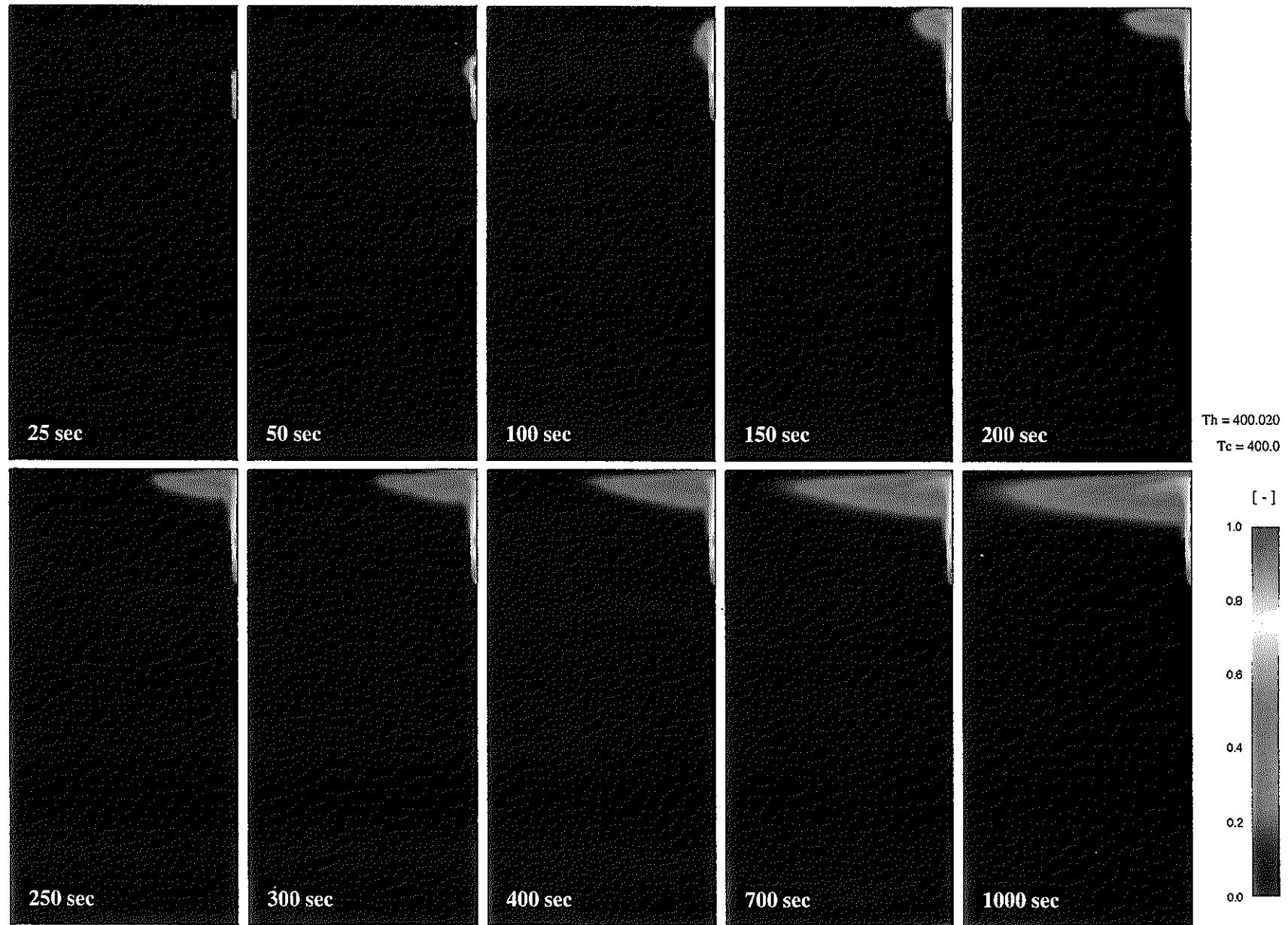


図 3.63 空間温度分布の時間推移 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ra} = 10^8$ ,  $h = 0.8 \text{ H}$ )

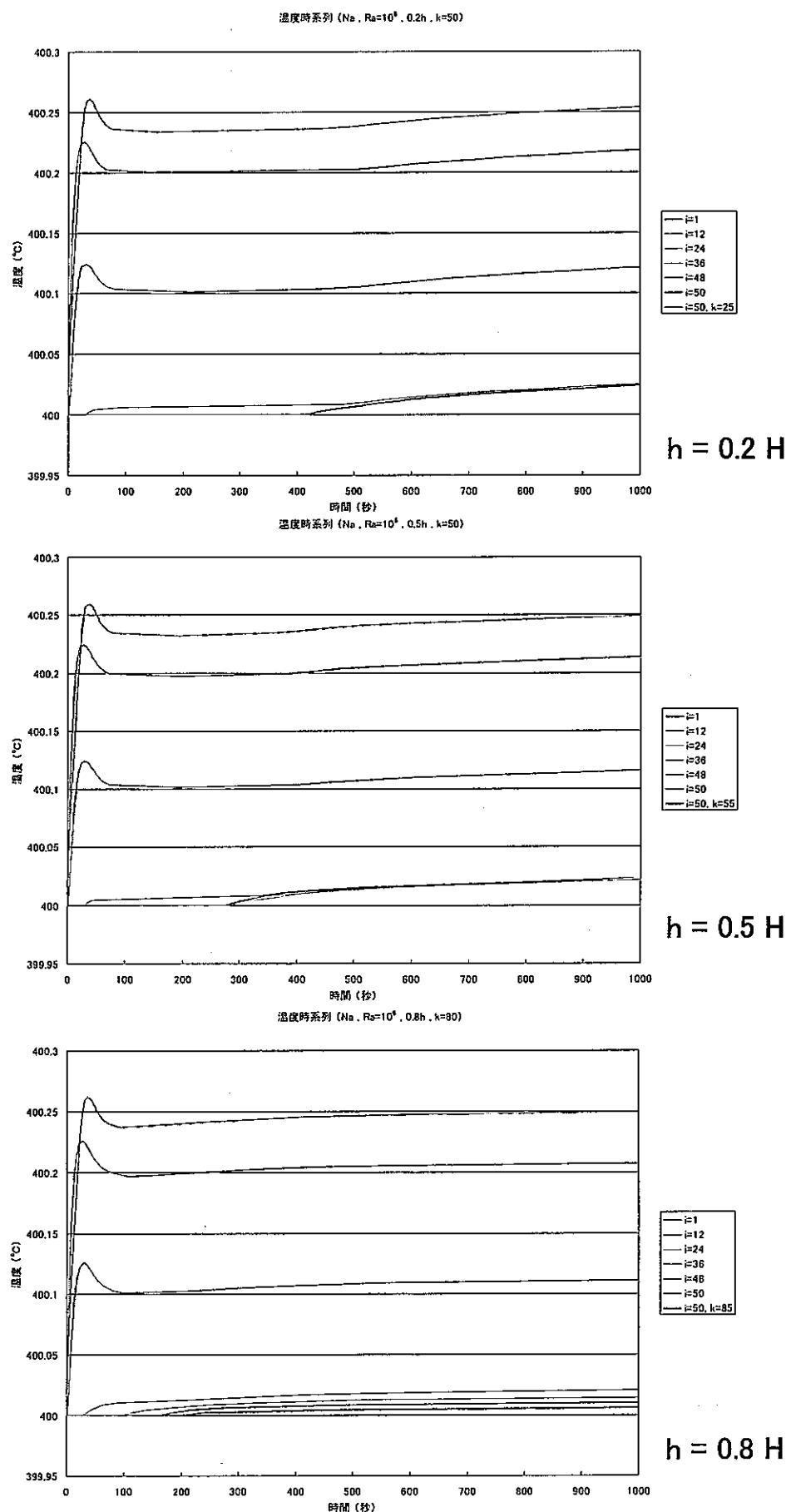
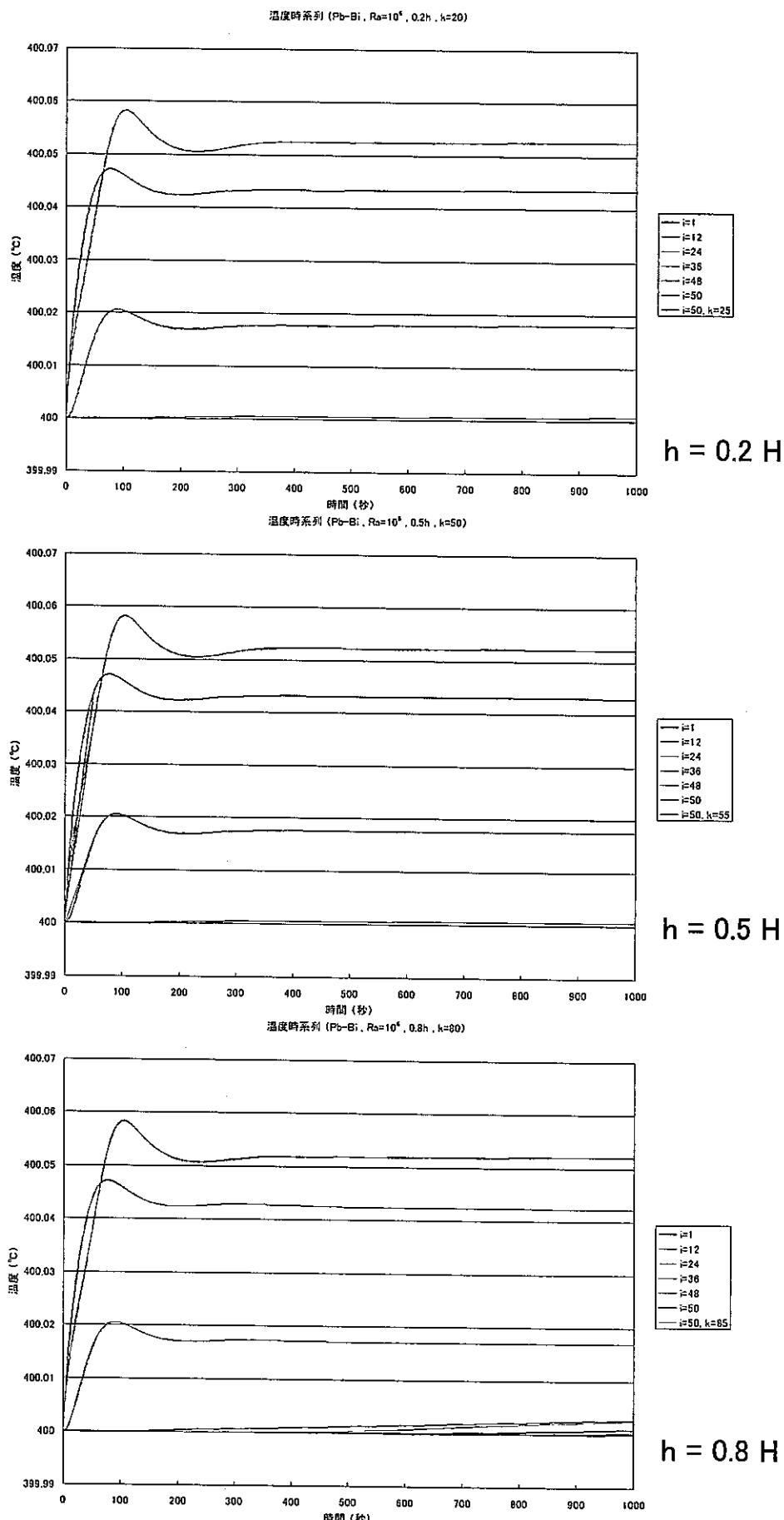
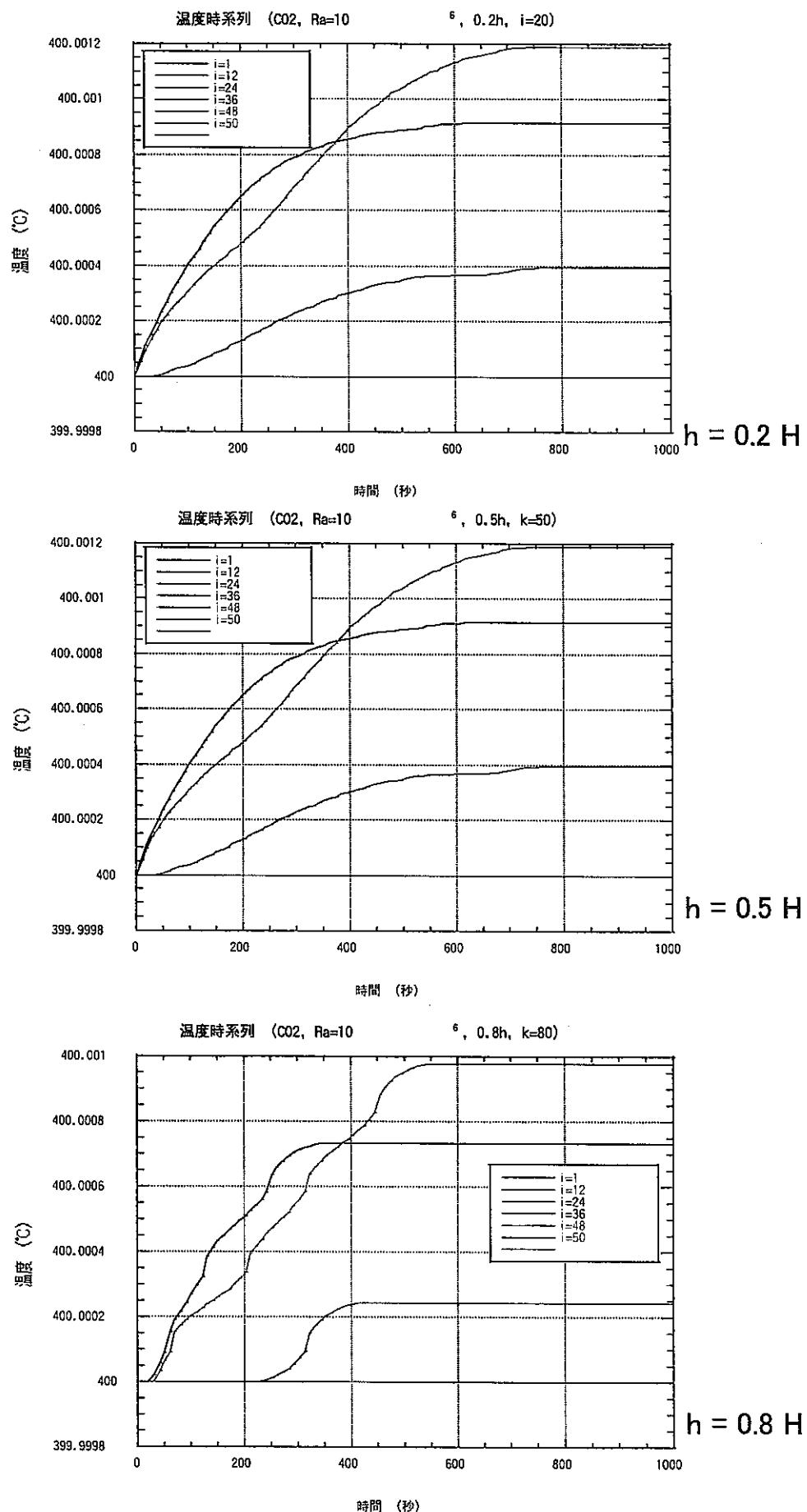


図 3.64 溫度時系列特性の比較 ( $\text{Na}, \text{Ra} = 10^6$ )

図 3.65 溫度時系列特性の比較 (Pb / Bi, Ra = 10<sup>6</sup>)

図 3.66 温度時系列特性の比較 ( $\text{CO}_2, \text{Ra} = 10^6$ )

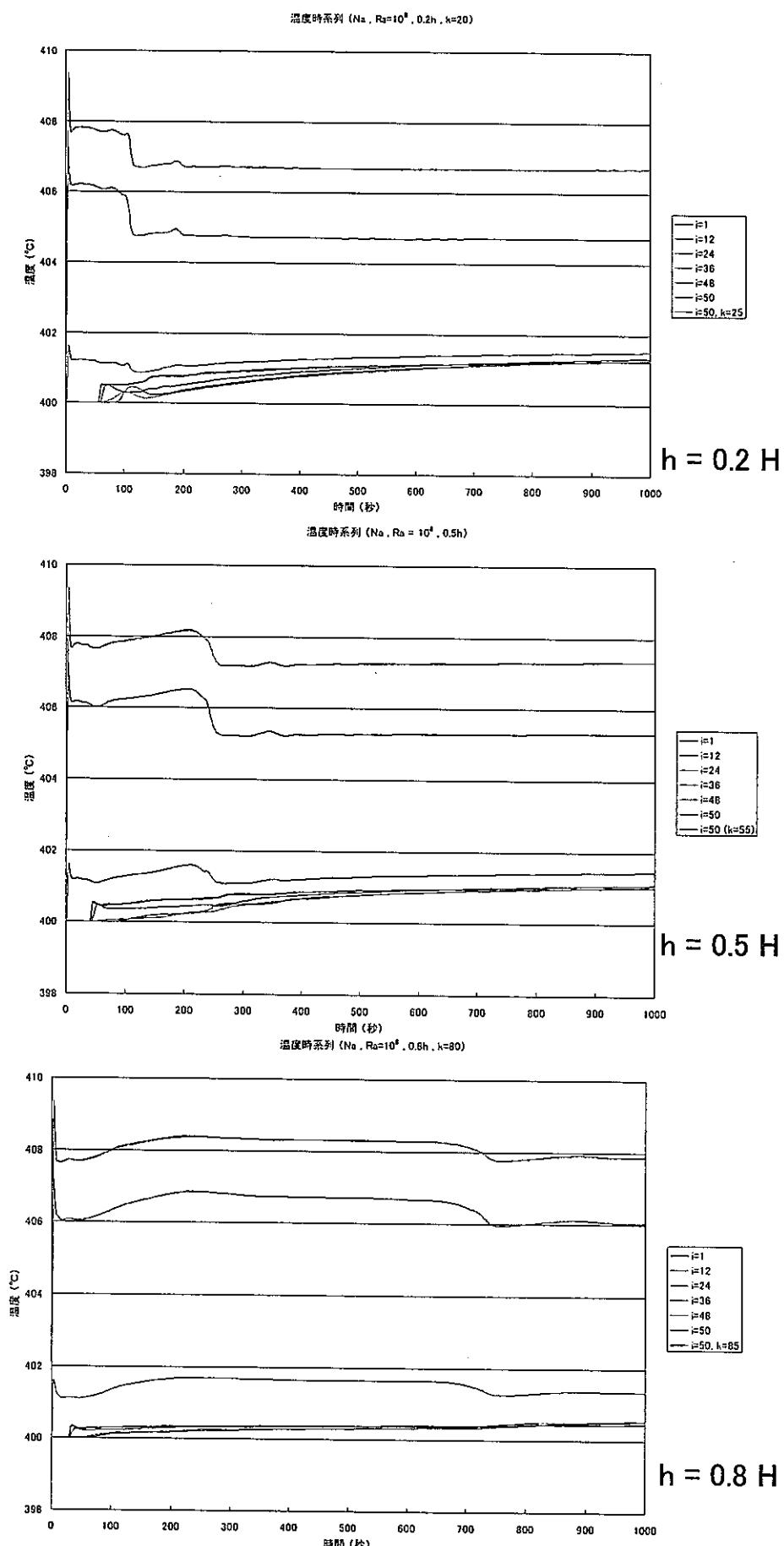


図 3.67 溫度時系列特性の比較 ( $Na, Ra = 10^8$ )

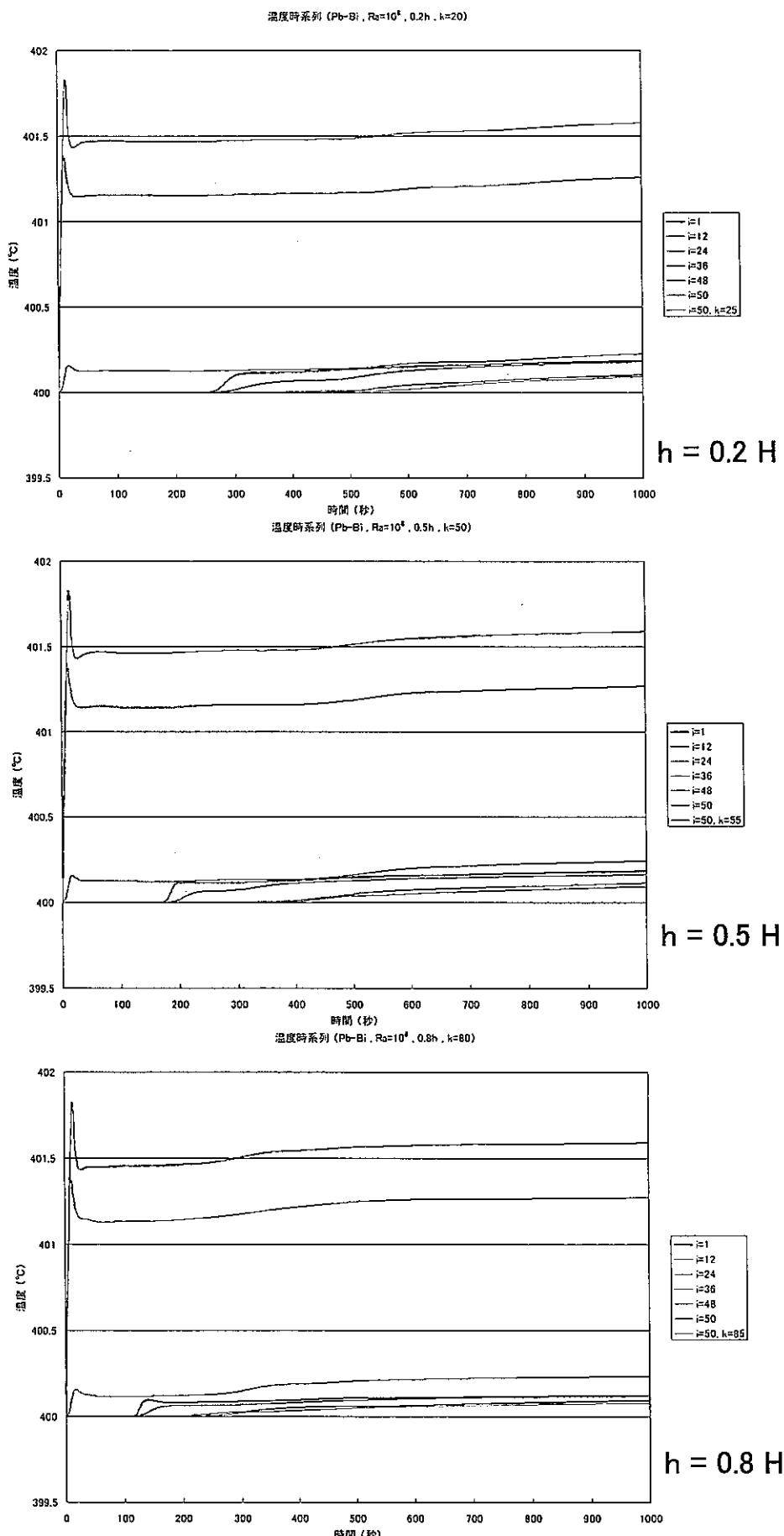


図 3.68 温度時系列特性の比較 (Pb / Bi,  $Ra = 10^8$ )

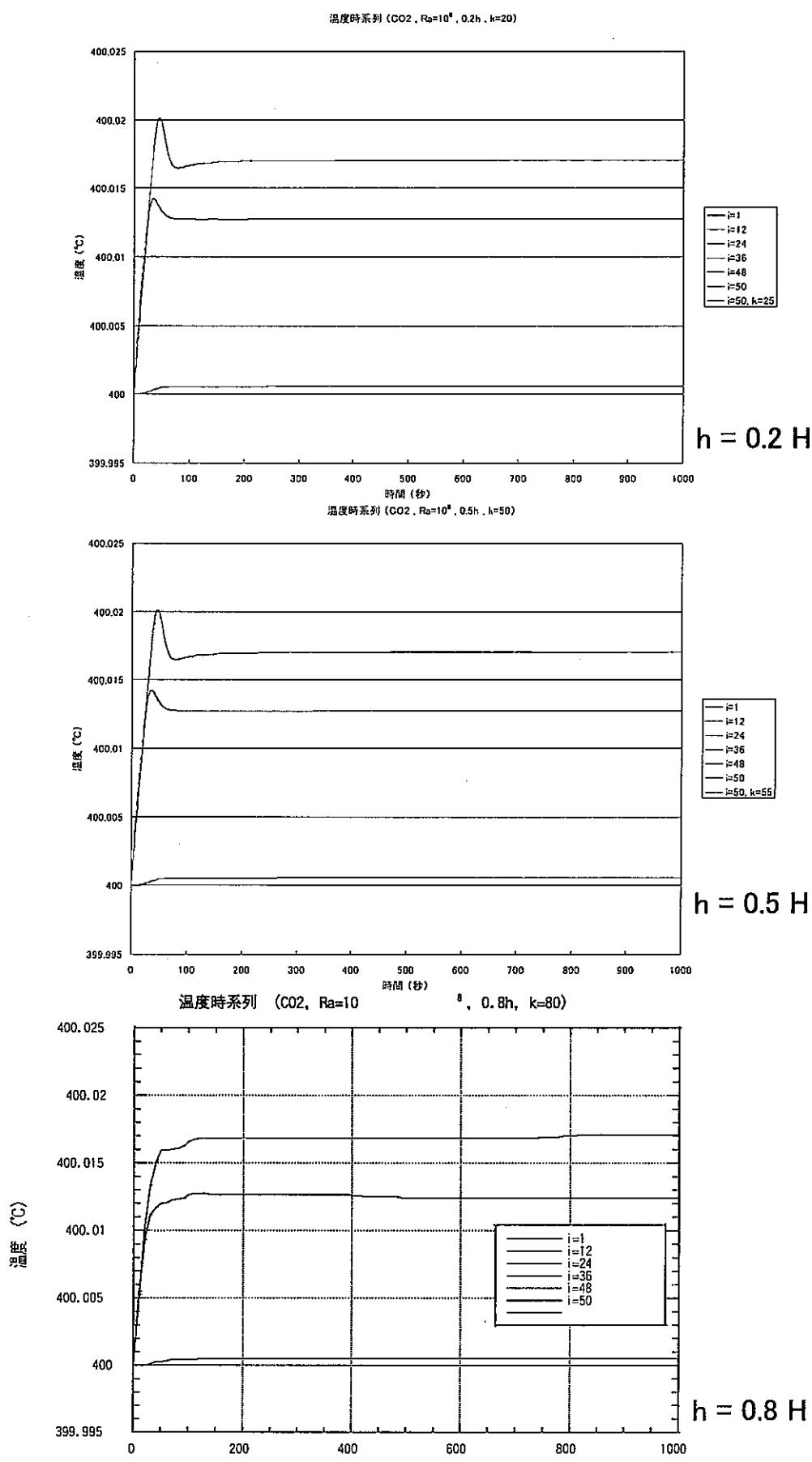


図 3.69 溫度時系列特性の比較 ( $\text{CO}_2, \text{Ra} = 10^8$ )

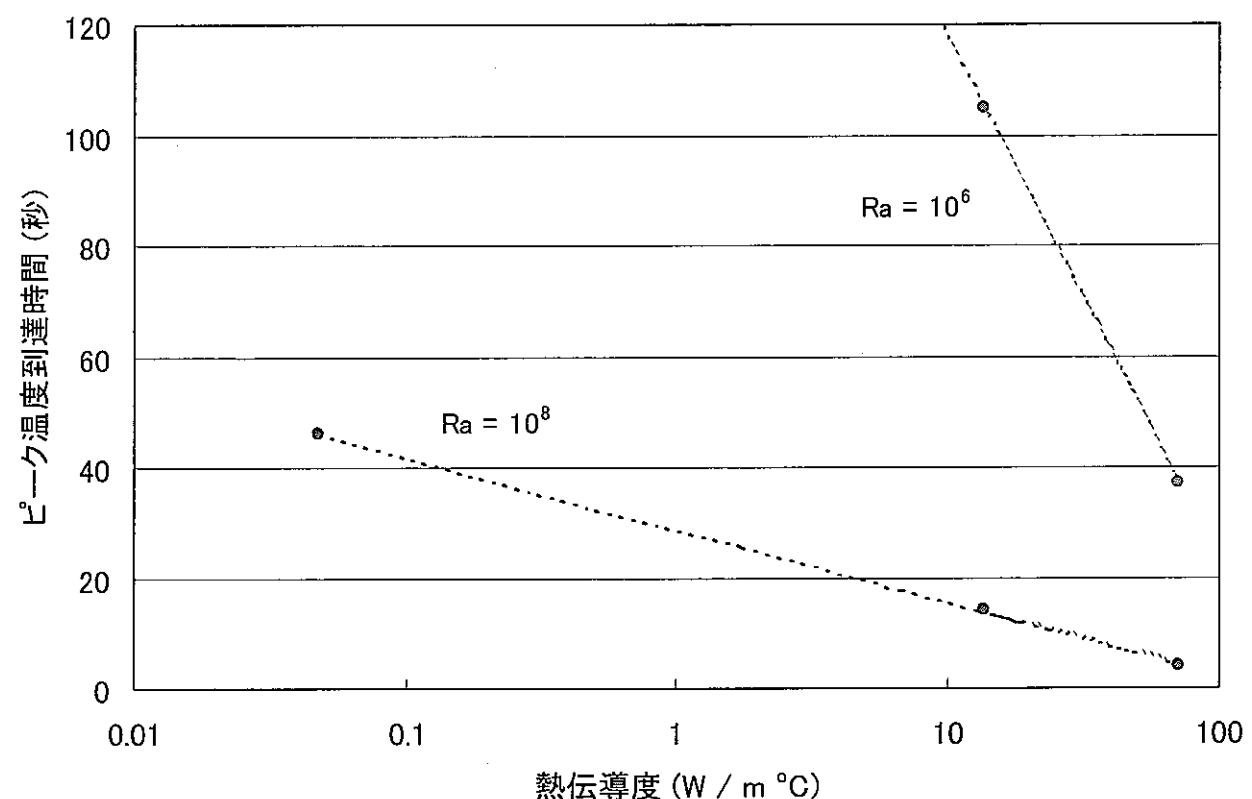


図 3. 70 ピーク温度到達時間と熱伝導度との関係