

ガス巻込みに関する流動数値解析
－差分法の適用性評価－
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)
(研究報告)

2005年7月

川崎重工業株式会社

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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2005

ガス巻き込みに関する流動数値解析
－差分法の適用性評価－

西村元彦⁽¹⁾、野中嘉治⁽¹⁾、前川勇⁽²⁾

要旨

実用化戦略調査研究において検討されているナトリウム冷却炉は原子炉容器のコンパクト化がはかられている。このため、これまでの炉に比べ冷却材流速が増大することから、自由液面から冷却材中にカバーガスを巻込まない設計とその予測手法の確立が強く要請されている。本件は、設計で遵守すべきガス巻き込みの判定基準の策定に寄与するため、計算科学的手法をベースとした流動評価手法を確立することを目的として、ガス巻き込みの解析手法の構築および既往実験を元に詳細実験解析を実施するものである。

既往実験としては、矩形流路の中に角柱の障害物が存在ししかもその下流にはやはり矩形で模擬された吸込み管を設置した体系が用いられた。角柱によってカルマン渦が発生し、その中のあるものは吸込み管に吸収されガス巻き込み渦を形成する非定常現象を対象としている。

今回の数値解析では、乱流モデルの影響に注目した。層流モデル、標準 $k-\epsilon$ モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、非線形 $k-\epsilon$ モデルおよび $k-\omega$ モデルの 5 ケースを実施した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) カルマン渦の成長、流速と圧力変動および変動のピーク値の大きさ等を比較すると、層流モデルがもっとも激しい変化、変動の大きい結果を示し、RNG モデルが層流モデルに近い変動を示しランダム性も見ることが出来た。
- 2) 一方、 $k-\omega$ モデル、非線形 $k-\epsilon$ モデル、標準 $k-\epsilon$ の順で流れの変動がより減衰し規則的なおとなしい流れになっている。
- 3) 今後、実験結果と詳細な比較検討が求められるが、渦の予測に対する乱流モデルの適用性に関し定量的なデータが得られ、既往の CFD コードの適用性に関する知見が蓄積できた。

なお、解析は STAR-CD コードを使用した。

本報告書は、川崎重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果である。

機構担当部課室：流体計算工学研究グループ

(1) 川崎重工業株式会社 技術研究所 熱技術研究部

(2) 川崎重工業株式会社 プラントビジネスセンター 新事業・技術開発部

CFD simulation of transient phenomena on gas entrainment

Nishimura Motohiko⁽¹⁾, Nonaka Yoshiharu⁽¹⁾, and Maekawa Isamu⁽²⁾

Sodium cooled FBR reactor in a feasibility study on commercialized fast reactor system has been designed so compact that flow velocity is much higher in the reactor than in the reactors so far. This design requires an evaluation method for gas entrainment from reactor free surface and effective countermeasures.

Focusing on the establishment of gas entrainment evaluation method based on CFD, CFD simulation has been carried out with analyses of an existing gas entrainment experiment. In the analyses, four turbulence models such as standard k- ϵ , RNG k- ϵ , non-linear k- ϵ and k- ω have been applied and evaluated for their analytical capability in addition to laminar model.

Main results have been obtained as follows;

- 1) Laminar model shows faster vortices behavior accompanied with strong flow and pressure fluctuations including random variations than any other turbulence models. RNG model shows the solutions more similar to the laminar model than the other turbulence models.
- 2) k- ω , non-linear k- ϵ and Standard k- ϵ models show milder vortices behavior in this order due to excess turbulence viscosity.
- 3) Main characteristics of major turbulence models have been obtained when they are applied to gas entrainment analysis.

(1) Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Technical Institute, Thermal Technology Department

(2) Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Plant Business Center, Business Development Department.

目次

	頁
1. 緒言-----	1
2. 解析モデルの構築-----	2
3. 詳細実験解析-----	3
3.1 解析対象-----	3
3.2 解析ケース-----	3
3.3 解析モデル-----	3
3.4 数値解法-----	3
3.5 解析結果と考察-----	4
4. 結言-----	7
—参考文献-----	8

表リスト

表 3.2-1 解析ケース一覧	9
-----------------	---

図リスト

図 3.1-1 ベンチマーク解析対象 : 矩形容器内自由液面トラベリング渦の水流動実験	10
図 3.5.1-1 (1/5) 自由液面の速度ベクトル:層流モデル (Case KW-1)	11
図 3.5.1-1 (2/5) 自由液面の速度ベクトル:層流モデル (Case KW-1)	12
図 3.5.1-1 (3/5) 自由液面の速度ベクトル:層流モデル (Case KW-1)	13
図 3.5.1-1 (4/5) 自由液面の速度ベクトル:層流モデル (Case KW-1)	14
図 3.5.1-1 (5/5) 自由液面の速度ベクトル:層流モデル (Case KW-1)	15
図 3.5.1-2 (1/2) 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : 層流モデル (Case KW-1)	16
図 3.5.1-2 (2/2) 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : 層流モデル (Case KW-1)	17
図 3.5.1-3 (1/2) 液深中央水平面の速度ベクトル: 層流モデル (Case KW-1)	18
図 3.5.1-3 (2/2) 液深中央水平面の速度ベクトル: 層流モデル (Case KW-1)	19
図 3.5.1-4 (1/2) 流路中央鉛直面の速度ベクトル: 層流モデル (Case KW-1)	20
図 3.5.1-4 (2/2) 流路中央鉛直面の速度ベクトル: 層流モデル (Case KW-1)	21
図 3.5.1-5 (1/2) 自由液面の渦度コンター: 層流モデル (Case KW-1)	22
図 3.5.1-5 (2/2) 自由液面の渦度コンター: 層流モデル (Case KW-1)	23
図 3.5.1-6 速度および圧力の変動履歴: 層流モデル (Case KW-1)	24
図 3.5.2-1 自由液面の速度ベクトル:標準 k- ϵ モデル (Case KW-2)	25
図 3.5.2-2 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : 標準 k- ϵ モデル (Case KW-2)	26
図 3.5.2-3 液深中央水平面の速度ベクトル: 標準 k- ϵ モデル (Case KW-3)	27
図 3.5.2-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル: 標準 k- ϵ モデル (Case KW-3)	28
図 3.5.2-5 自由液面の渦度コンター: 標準 k- ϵ モデル (Case KW-3)	29
図 3.5.2-6 速度および圧力の変動履歴: 標準 k- ϵ モデル (Case KW-3)	30
図 3.5.3-1 自由液面の速度ベクトル: RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	31
図 3.5.3-2 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	32
図 3.5.3-3 液深中央水平面の速度ベクトル: RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	33
図 3.5.3-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル: RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	34
図 3.5.3-5 自由液面の渦度コンター: RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	35
図 3.5.3-6 速度および圧力の変動履歴: RNG k- ϵ モデル (Case KW-3)	36

図 3.5.4-1 自由液面の速度ベクトル:非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	37
図 3.5.4-2 自由液面ー下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : 非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	38
図 3.5.4-3 液深中央水平面の速度ベクトル: 非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	39
図 3.5.4-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル: 非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	40
図 3.5.4-5 自由液面の渦度コンター: 非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	41
図 3.5.4-6 速度および圧力の変動履歴: 非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)	42
図 3.5.5-1 自由液面の速度ベクトル: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	43
図 3.5.5-2 自由液面ー下降管入口間中央水平面の速度ベクトル : $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	44
図 3.5.5-3 液深中央水平面の速度ベクトル: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	45
図 3.5.5-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	46
図 3.5.5-5 自由液面の渦度コンター: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	47
図 3.5.5-6 速度および圧力の変動履歴: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)	48

1. 緒言

核燃料サイクル開発機構（以下「機構」と称する）では、実用化戦略調査研究において、将来の実用炉候補として様々なプラント概念を検討している。これらの概念候補のうち、ナトリウム冷却炉に関しては原子炉容器のコンパクト化が検討されているが、出力に比して原子炉容器を小さくすると冷却材流速が増大することから、自由液面から冷却材中にカバーストームを巻き込む可能性が指摘されている。設計成立性の観点から、このガス巻き込み現象は重要な評価項目の1つとなっている。

本件は、設計で遵守すべきガス巻き込みの判定基準の策定に寄与するため、計算科学的手法をベースとした流動評価手法を確立することを目的として、ガス巻き込みの解析手法の構築および既往実験を元に詳細実験解析を実施するものである。

2. 解析モデルの構築

昨年度のガス巻き込みベンチマーク解析では、自由液面の解析手法および乱流モデルの適用性について既往実験を用いて実験解析を実施し検討した。今回はこれらの成果を踏まえて今年度の解析手法を選定した。

自由液面の解析手法としては、流れの移流拡散を CIP 法⁽¹⁾で解き、自由液面のトレースはレベルセット法⁽²⁾を使用した。得られた結果を要約すると、自由液面での気相の擾乱が大きく、液相の流況にも影響を及ぼしている。また、液面において密度変化による圧力項の駆動力が大きくなるため、液面が暴れ、この傾向はメッシュが細くなるほど顕著であった。すなわち、運動方程式：

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

において、気液界面の計算セルでは鉛直方向の圧力勾配 $\frac{\partial P}{\partial z}$ が大きくかつ密度 ρ が小さくなるため、圧力項による駆動力、言い換えれば擾乱が極端に大きくなる。さらに、レベルセット+CIP法の組み合わせモデルでは、前者は液面の保存性が、後者は質量の保存性がないため、静定した解を得ることができなかった。これらの手法は非定常現象のシミュレーションに脚光を浴びているものであるが、定常現象への適用には依然課題があることが判った。

一方、乱流モデルの適用については、レイノルズ応力モデル、k-εモデルおよび層流による計算を実施した。レイノルズ応力モデルが比較すればよい結果を与えているがモデルの差は大きくない。k-εモデルは渦粘性が大きく作用し速度の鈍りが最も大きい。また実験結果の渦周りの流れは、渦周方向成分を例に取れば 1/10 程度の速度しか出ておらずきわめて不十分であった。原因は円筒形状の試験容器をデカルト直行座標系の階段メッシュで近似したことが大きく精度を落とす原因になったものと考えられた。

以上の結果に基づき、今年度は自由液面のトレースには CIP+レベルセット法の使用は適切でなく、通常の有限差分法を用いることとし、自由液面のトレースには依然保存性が明確な VOF 法等が適切であると判断した。また、乱流モデルに関しては昨年度の形状では数値計算法そのものの特徴よりも曲面を矩形メッシュ近似で実施したための影響が大きく効いた。このため、今回はメッシュ形状が矩形であるような実験体系でもう一度モデルの効果を検討することが有意義であると判断した。

3. 詳細実験解析

3.1 解析対象

図 3.1-1 に示す岡本らによるトラベリングする自由表面渦に着目した矩形流路内の実験を解析対象とする。

3.2 解析ケース

表 3.2-1 に解析ケース一覧を示す。本研究では層流解析（乱流モデル無し）をリファレンスとし、実機解析への適用が比較的容易な高レイノルズ数型二方程式乱流モデルによる計算を実施する。すなわち、工学上最も一般的に用いられる標準 $k-\varepsilon$ モデル[3]、カルマン渦等剥離流への適用性が高いとされている RNG $k-\varepsilon$ モデル[4]、管内旋回流や曲がり管二次流れの予測に優れていると目される非線形 $k-\varepsilon$ モデル[5]および壁近傍の取り扱いがより機構論的と評されている $k-\omega$ モデル[6]を検討対象とする。

3.3 解析モデル

図 3.1-1 にメッシュ分割図を示す。渦の生成、成長および流下に影響を及ぼす角柱近傍上流から下降管近傍下流の区間は主流方向のメッシュ幅を 2.5mm とした。当該区間の前後ではメッシュ幅を 5mm とし、メッシュ幅の遷移部は公比 1.5 以下として幅を変化させた。奥行き方向および鉛直方向のメッシュ幅はそれぞれ、5mm および 2.5mm 一定とした。

入口境界は、上流側ストレナー出口において一様流速分布 0.1m/s を与えた。

下降管内は 4×4 メッシュとし、水槽底面位置に出口境界を設け一様流速分布 4m/s を与えた。これにより、下降管内の渦も模擬可能としている。

容器壁の取り扱いはノンスリップとし、自由液面のみフリースリップとした。

出口境界は、実験体系の下流側ストレナーを模擬したさらに下流に自由流出かつ圧力一定境界条件を与えた。また、下流側ストレナーにおいては、主流方向以外の速度成分を拘束した。ちなみに、下流側ストレナーを模擬しない場合、渦が出口境界まで輸送され、出口からの逆流が計算領域内の流れに非現実的な影響を及ぼすことが確認された。

非定常解析における時間刻み幅は、0.01s に設定し、実時間 40s まで計算を実施した。

3.4 数値解法

解析には市販の汎用 CFD コード STAR-CD を適用した。当コードでは質量、および運動量の保存式を有限体積法により離散化して数値解法に供している。今回の計算では、時間積分法にオイラー一次陰解法を、対流項差分法には二次の精度を有する MARS 法を適用した。数値計算アルゴリズムは PISO[7]を適用した。

3.5 解析結果と考察

(1) 層流解析

図 3.5.1-1～3 に自由液面、液面一下降管吸込口中央、および液深中央における水平断面の流況を示す。また、図 3.5.1-4 に流路中央鉛直断面の流況を、図 3.5.1-5 に自由液面の渦度コンターを示す。図には、流れ場が十分発達した時点の流況を示した。時刻 22.8s から 23.8s にかけて、下降管へ吸い込まれる強い時計回り渦が形成されている。この渦は、まず下降管近傍から発達し、その後自由液面における旋回が強くなる傾向を示している〔図 3.5.1-1 (1/5) および図 3.5.1-2(1/2)〕。時刻 24s の液面一下降管吸込口中央水平断面に着目すると、下降管近傍に反時計回りの渦が形成され始めるが、この渦は顕著な発達を見ることなく 25s 以降は減衰しながら流下して行く。次いで、26s には再び時計周りの渦が発達を開始し、27s には流下・減衰する。反時計回りの循環は 27.2s 以降にも出現するが、下降管（下降流）にトラップされることなく流下減衰する。その後、28.8s においても時計周りの循環が下降管上方の液面に見られるが、発達せずに消滅する。次に顕著な時計回りの渦が形成されるのは、33.2s 以降である。以上から当解析結果では、交互発生するカルマン渦において、下降管寄りに発生する時計回りの渦のみが下降流にトラップされて発達しており、かつ放出されるカルマン渦が毎回トラップされている訳ではないことがわかる。

図 3.5.1-6 に主流向速度成分および圧力の変動履歴を示す。モニター点①では、速度変動と圧力変動の周波数特性はよく対応している。一方、下降管入口（図中②）では、速度と圧力の変動周波数自体は対応しているが、圧力が大きく下降（-4100 Pa 以下）する頻度は少ない。すなわち、流れ発達した 20s 以降 40s までの速度と圧力の負の極値発生回数が約 7 回であることに対して、-4100 Pa 以下となる圧力の負の極値は 3 回しか発生していない。この圧力の大きな負の極値が生じている時には、下降管に渦がトラップされている。解析結果のアニメーションでは、角柱の下降管寄り側壁から生成する時計回りのカルマン渦の発生頻度 2～3 回に 1 回の割合でトラップされている。

(2) 標準 $k-\varepsilon$ モデル

図 3.5.2-1～3 に自由液面、液面一下降管吸込口中央、および液深中央における水平断面の流況を示す。また、図 3.5.2-4 に流路中央鉛直断面の流況を、図 3.5.2-5 に自由液面の渦度コンターを示す。層流解析の結果においては 0.2s 刻みで図を掲載したが、当該結果から 0.4s 刻みにて渦の挙動が捉えられることが分かるので、以下では 0.4s 刻みで解析結果を示す。また、下降管入口の速度・圧力の周期が 3s 弱であったこと、乱流解析では渦粘性により周期が伸びる可能性があることを勘案して、図には 4.4s 間の結果を掲載した。

標準 $k-\varepsilon$ モデルの解析結果においては、層流モデルに見られたような顕著な渦はなく、角柱左右の主流流速変動も極めて規則的である。この規則的挙動は、図 3.5.2-6 に示す主

流方向速度成分および圧力の変動にも現れている。すなわち、層流解析では圧力振幅自体が変動していたが、当解析では一定の振幅となっている。時刻 20s 以降における速度の負の極値発生回数は約 7 回であり、周期については層流解析と同じ結果である。また、渦度のアニメーションでは、時計回りの渦は発生毎にトラップされている。この渦の強度は未発達なため、下降管入口の圧力変動も振幅の小さい単調なサイン波状になったものと考えられる。

(3) RNG $k-\varepsilon$ モデル

図 3.5.3-1～3 に自由液面、液面一下降管吸込口中央ならびに液深中央における水平断面の流況を、図 3.5.3-4 に流路中央鉛直断面の流況を、および図 3.5.3-5 に自由液面の渦度コンターを示す。また、図 3.5.3-6 に主流方向速度成分および圧力の変動を示す。

時刻 22s 以降、時計回りの渦の生成がみられ、自由液面よりも下降管入口に近い中央水平断面（図 3.5.3-2）において先に発達しており、本体系においては吸い込み口から渦が発達することを示している。また、24.4s 以降自由液面において反時計回りの循環が形成されるが発達せず流下する。速度および圧力の変動周期は層流解析とほぼ一致しており、標準 $k-\varepsilon$ モデルには無かったランダム性も見る事ができる。また、解析結果のアニメーションにおいては、渦がトラップされている時間が層流解析および $k-\omega$ モデルの結果よりも短い。このことは、当モデルによる下降管入口の圧力波形において、層流モデルや $k-\omega$ モデルほど振幅の大きい圧力降下が見られないことと対応している。

(4) 非線形 $k-\varepsilon$ モデル

図 3.5.4-1～3 に自由液面、液面一下降管吸込口中央、および液深中央における水平断面の流況を、図 3.5.4-4 に流路中央鉛直断面の流況を示す。また、図 3.5.4-5 に自由液面の渦度コンターを、図 3.5.4-6 に主流方向速度成分および圧力の変動を示す。明確な渦の形成は見られず、速度・圧力変動についても規則的波形を示しており、標準 $k-\varepsilon$ モデルと近い結果を示している。また、解析結果のアニメーションにおいても明確な渦の形成と下降管でのトラップは確認できない。

(3) $k-\omega$ モデル

図 3.5.5-1～3 に自由液面、液面一下降管吸込口中央ならびに液深中央における水平断面の流況を、図 3.5.5-4 に流路中央鉛直断面の流況を、および図 3.5.5-5 に自由液面の渦度コンターを示す。また、図 3.5.5-6 に主流方向速度成分および圧力の変動を示す。時計回りの強い渦の形成が見られる。本ケースにおいても渦の形成は、下降管吸込口に近い断面から先に発達していることが分かる。周波数特性については、20 秒以降において、下降管入口（モニター点②）の速度変動の負の極値は 6 回発生しており、層流解析の 7 回より低頻度となっている。また、下降管に渦がトラップされた際の圧力の急減が予測

されており、層流解析と同様の傾向を示している。ちなみに、解析結果のアニメーションの分析では、角柱の下降管寄りに発生する時計回りの渦は発生2回に1回の頻度で下降管にトラップされている。

4. 結言

設計で遵守すべきガス巻込みの判定基準の策定に寄与するため、計算科学的手法をベースとした流動評価手法を確立することを目的として、ガス巻き込みの解析手法の構築および既往実験を元に詳細実験解析を実施した。

既往実験としては、矩形流路の中に角柱の障害物が存在し、しかもその下流にはやはり矩形で模擬された吸込み管を設置した体系が用いられた。角柱によってカルマン渦が発生し、その中のあるものは吸込み管に吸収されガス巻き込み渦を形成する非定常現象を対象としている。

今回の数値解析では、乱流モデルの影響に注目した。層流モデル、標準 $k-\epsilon$ モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、非線形 $k-\epsilon$ モデルおよび $k-\omega$ モデルの5ケースを実施した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) カルマン渦の成長、流速と圧力変動および変動のピーク値の大きさ等を比較すると、層流モデルがもっとも激しい変化、変動の大きい結果を示し、RNGモデルが層流モデルに近い変動を示しランダム性も見ることが出来た。
- 2) 一方、 $k-\omega$ モデル、非線形 $k-\epsilon$ モデル、標準 $k-\epsilon$ の順で流れの変動がより減衰し規則的なおとなしい流れになっている。
- 3) 今後、実験結果と詳細な比較検討が求められるが、渦の予測に対する乱流モデルの適用性に関し定量的なデータが得られ、既往のCFDコードの適用性に関する知見が蓄積できた。

なお、解析はSTAR-CDコードを使用した。

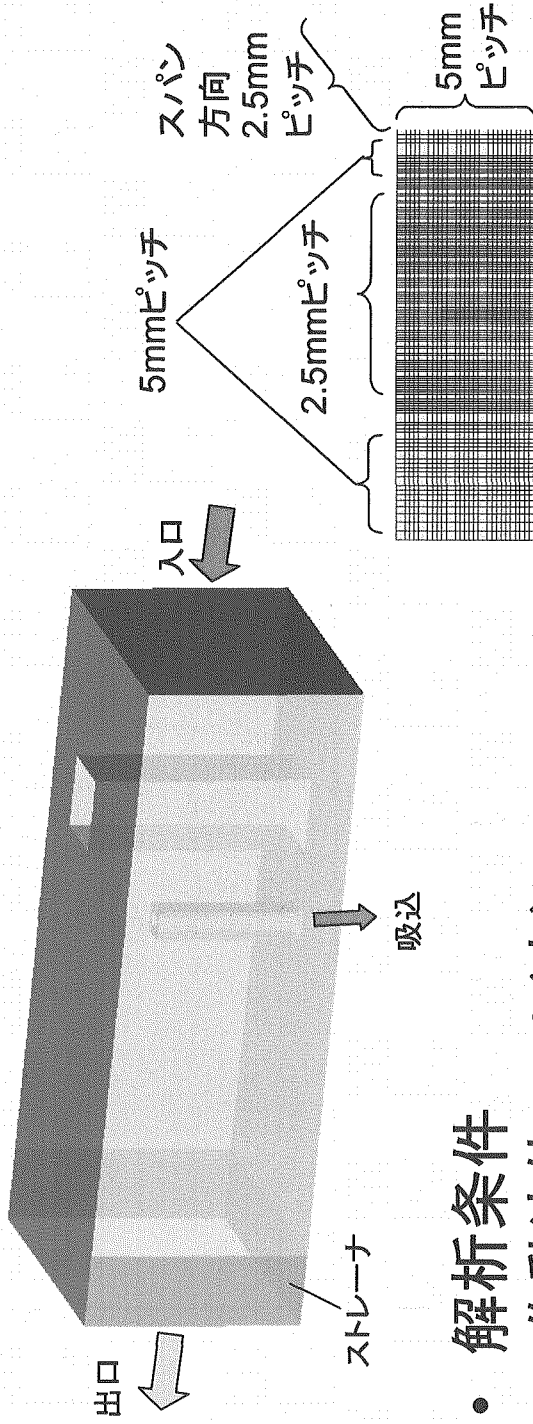
— 参考文献 —

- [1] Yabe, T. and Wang, P.Y.: "Unified Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, *J. Phys. Soc. Japan* 60-7, p.2105, (1991).
- [2] M.Sussman, P. Smereka, and S. Osher, : "Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow, *J. Comp. Phys.* 114, p141, (1994).
- [3] Launder, B.E. and Spalding, D.B.: "The numerical computation of turbulent flow," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 14, p. 269, (1974).
- [4] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G.: "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique" *Phys. Fluids*, A4, No. 7, pp.1510-1520, (1992).
- [5] Shih, T.H., Zhu, J. and Lumley, J.L.: "A realizable Reynolds stress algebraic equation model,' NASA TM-105993, (1993).
- [6] Wilcox, D.C.: "Turbulence modeling for CFD," DCW Industries. ISBN 0-963051-0-0, (1993).
- [7] Issa, R.I., Gosman, A.D. and Watkins, A.P.: "The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme," *J. Comp. Phys.*, 62, pp. 66-82, (1986)

表 3.2-1 解析ケース一覧

ケース	体系・メッシュ分割	数値解法			乱流モデル	自由液面モデル	境界条件		備考
		離散化法	移流項	時間項			時間積分	壁面	
KW-1	標準 + 渦発生部で2.5mm	FDM	MARS	1次	PISO	無し	無し	圧力一定 (strainer設置)	STAR-CD
KW-2	標準 + 渦発生部で2.5mm	FDM	MARS	1次	PISO	標準k-ε	無し	圧力一定 (strainer設置)	STAR-CD
KW-3	標準 + 渦発生部で2.5mm	FDM	MARS	1次	PISO	RNG k-ε	無し	圧力一定 (strainer設置)	STAR-CD
KW-4	標準 + 渦発生部で2.5mm	FDM	MARS	1次	PISO	非線形k-ε	無し	圧力一定 (strainer設置)	STAR-CD
KW-5	標準 + 渦発生部で2.5mm	FDM	MARS	1次	PISO	k-ω	無し	圧力一定 (strainer設置)	STAR-CD

- 解析モデル



- 解析条件

作動流体	H ₂ O(水)
入口条件	平均流速 0.1[m/s]
吸込条件	平均流速 4.0[m/s]
出口条件	圧力一定
時間刻幅	0.01[s] (PISO)
壁面条件	自由液面のみFree Slip, 他はNon-slip

解析格子

図 3.1-1 ベンチマーク解析対象：矩形容器内自由表面トラベリング渦の水流動実験

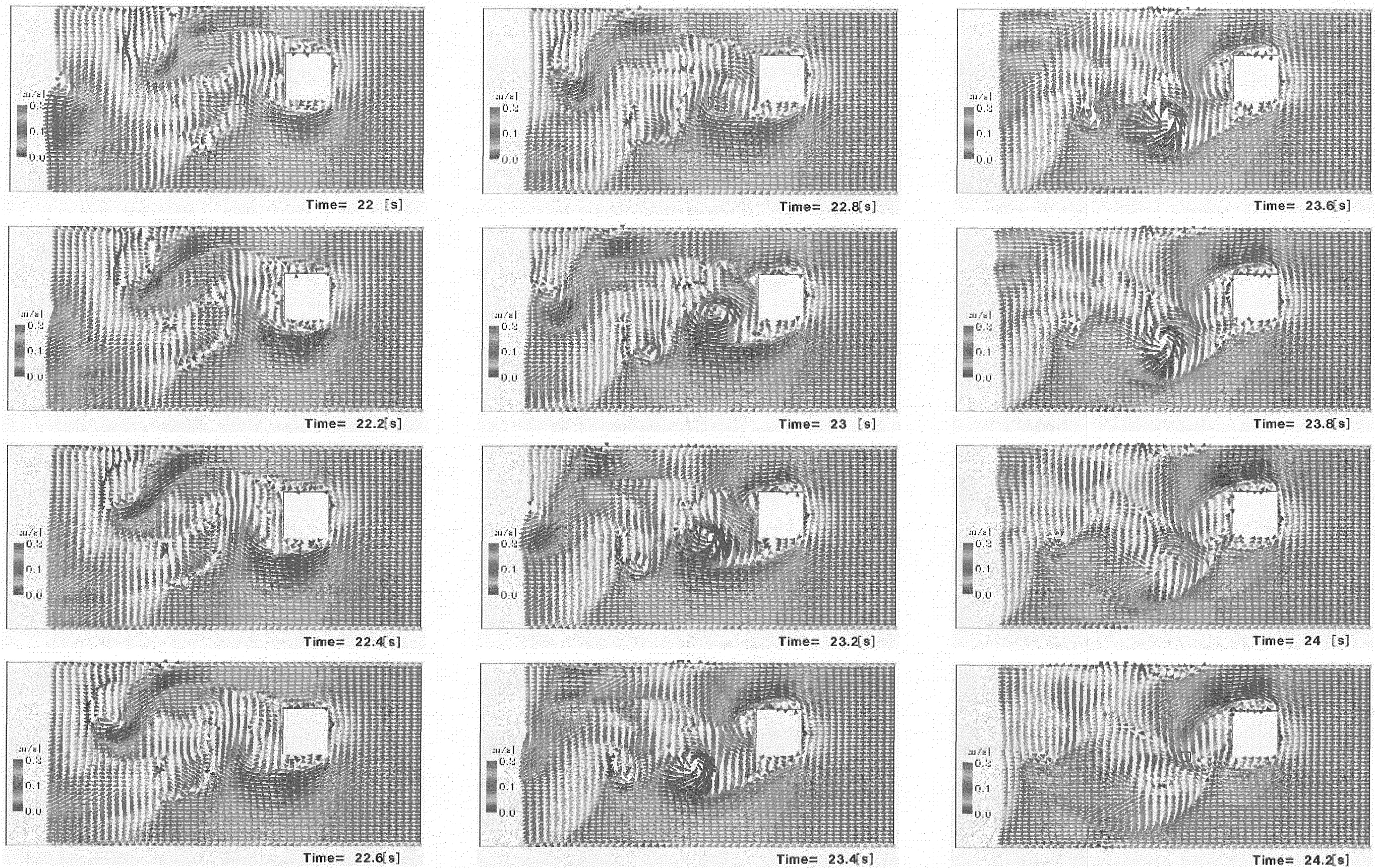


図 3.5.1-1(1/5) 自由液面の速度ベクトル：層流モデル (Case KW-1)

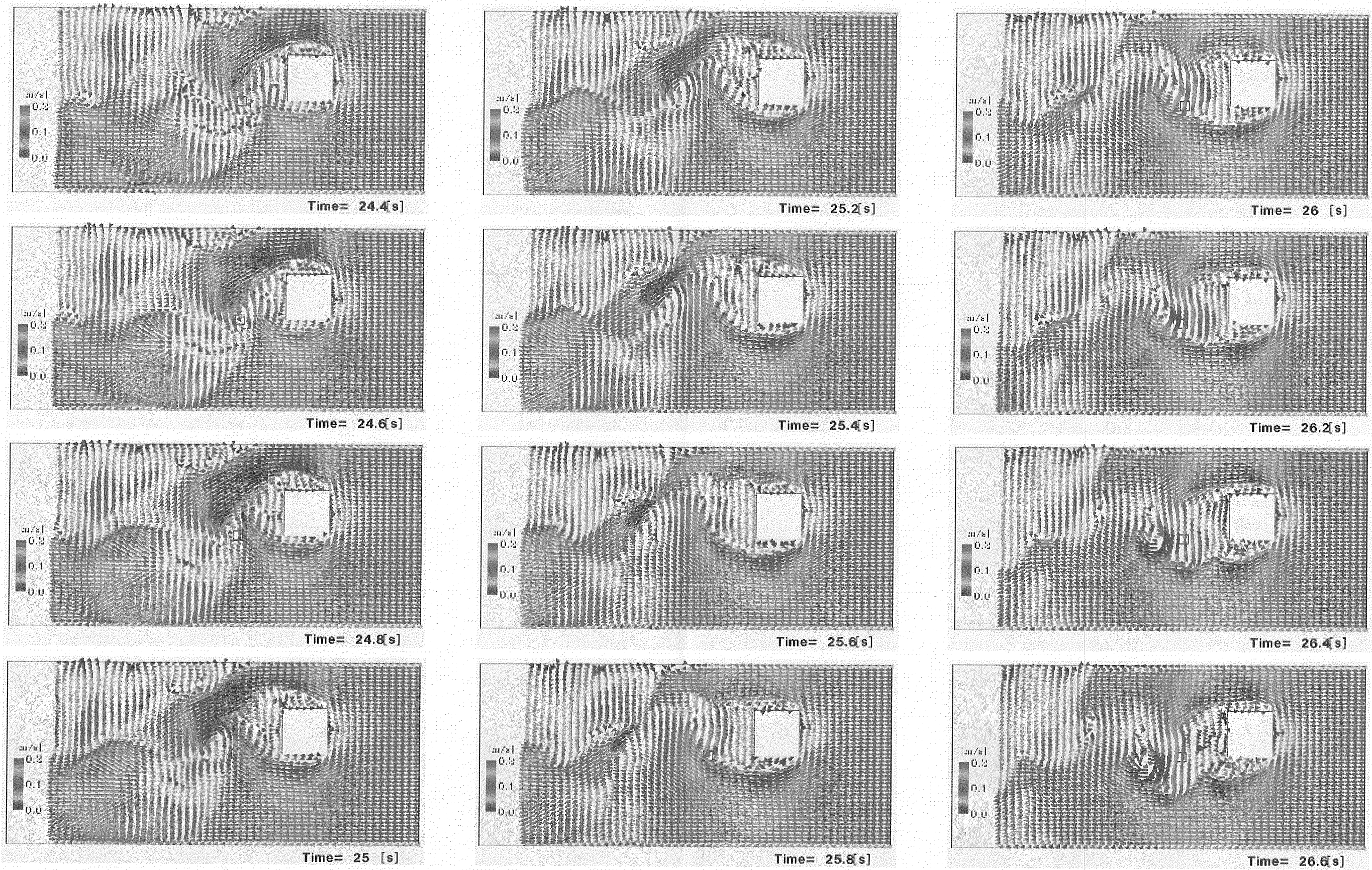


図 3.5.1-1(2/5) 自由液面の速度ベクトル：層流モデル (Case KW-1)

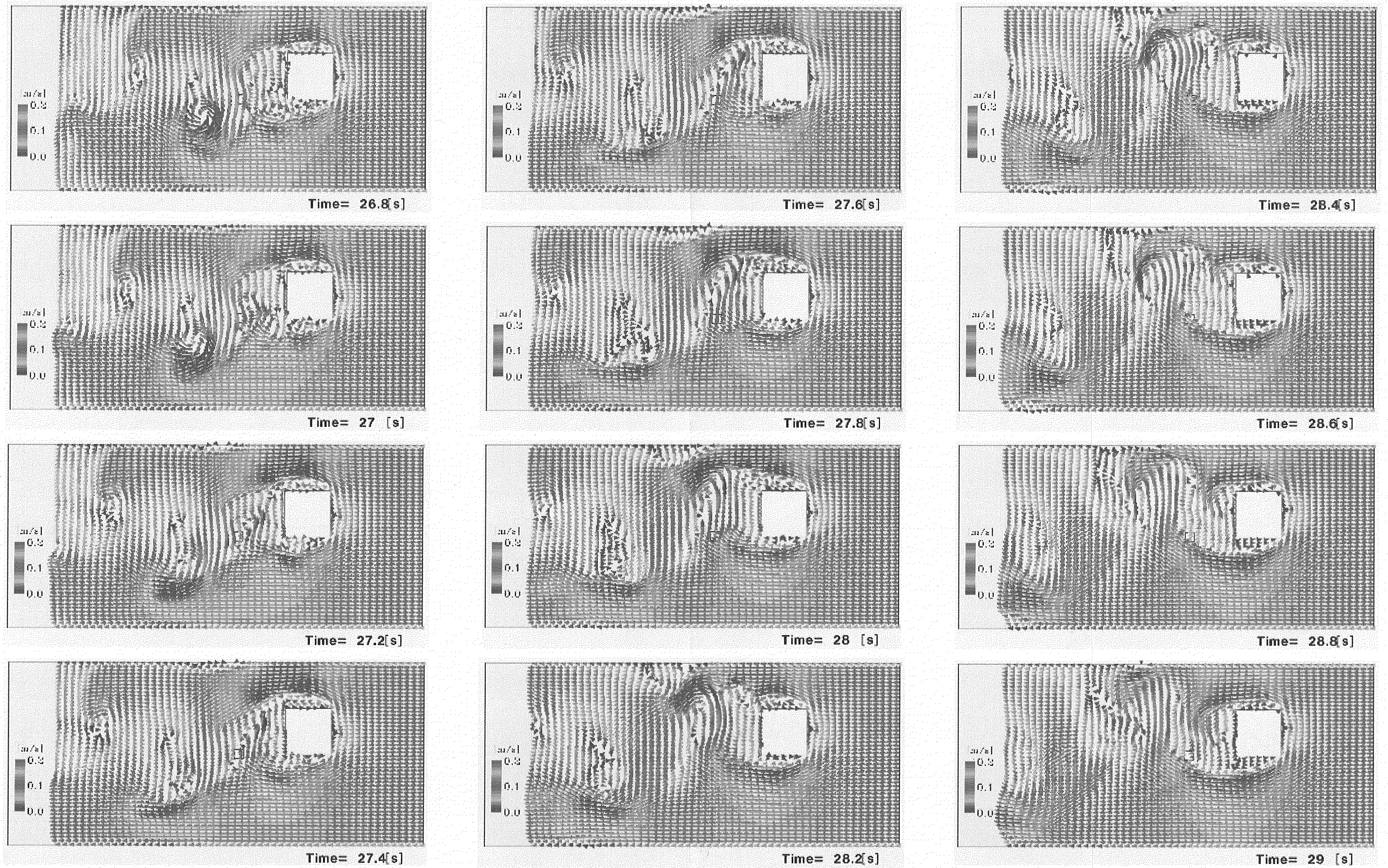


図 3.5.1-1(3/5) 自由液面の速度ベクトル：層流モデル (Case KW-1)

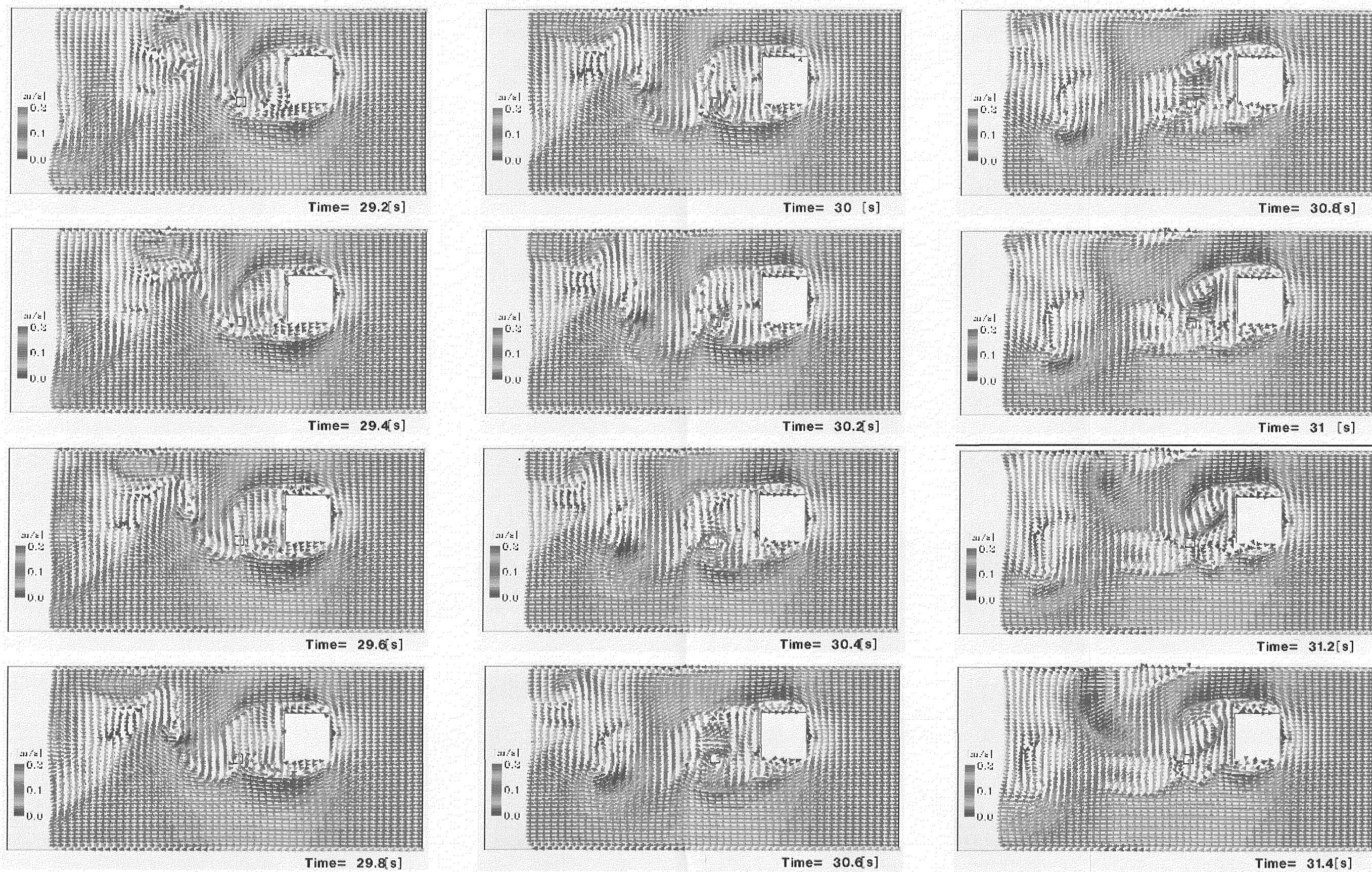


図 3.5.1-1(4/5) 自由液面の速度ベクトル：層流モデル (Case KW-1)

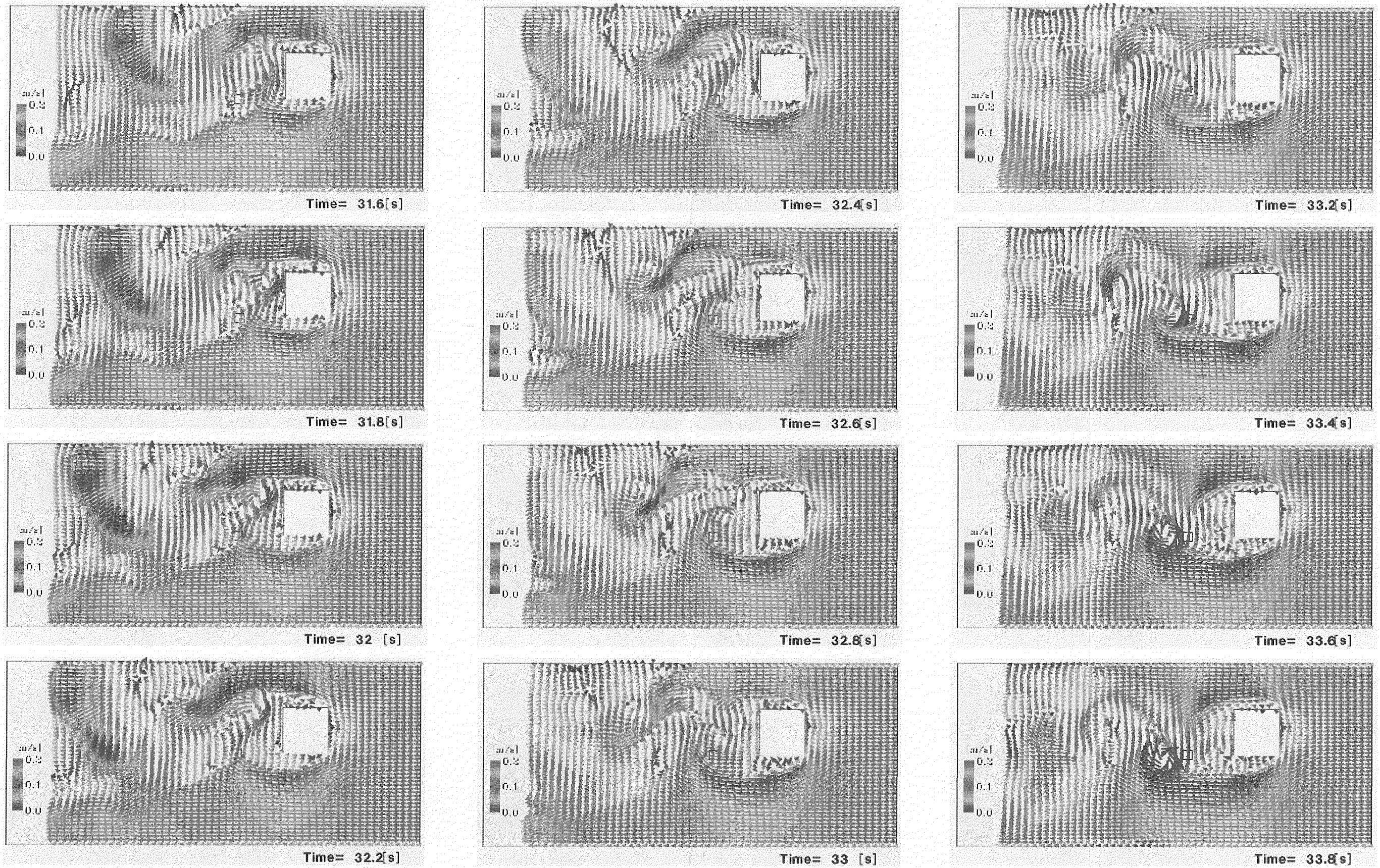


図 3.5.1-1(5/5) 自由液面の速度ベクトル：層流モデル (Case KW-1)

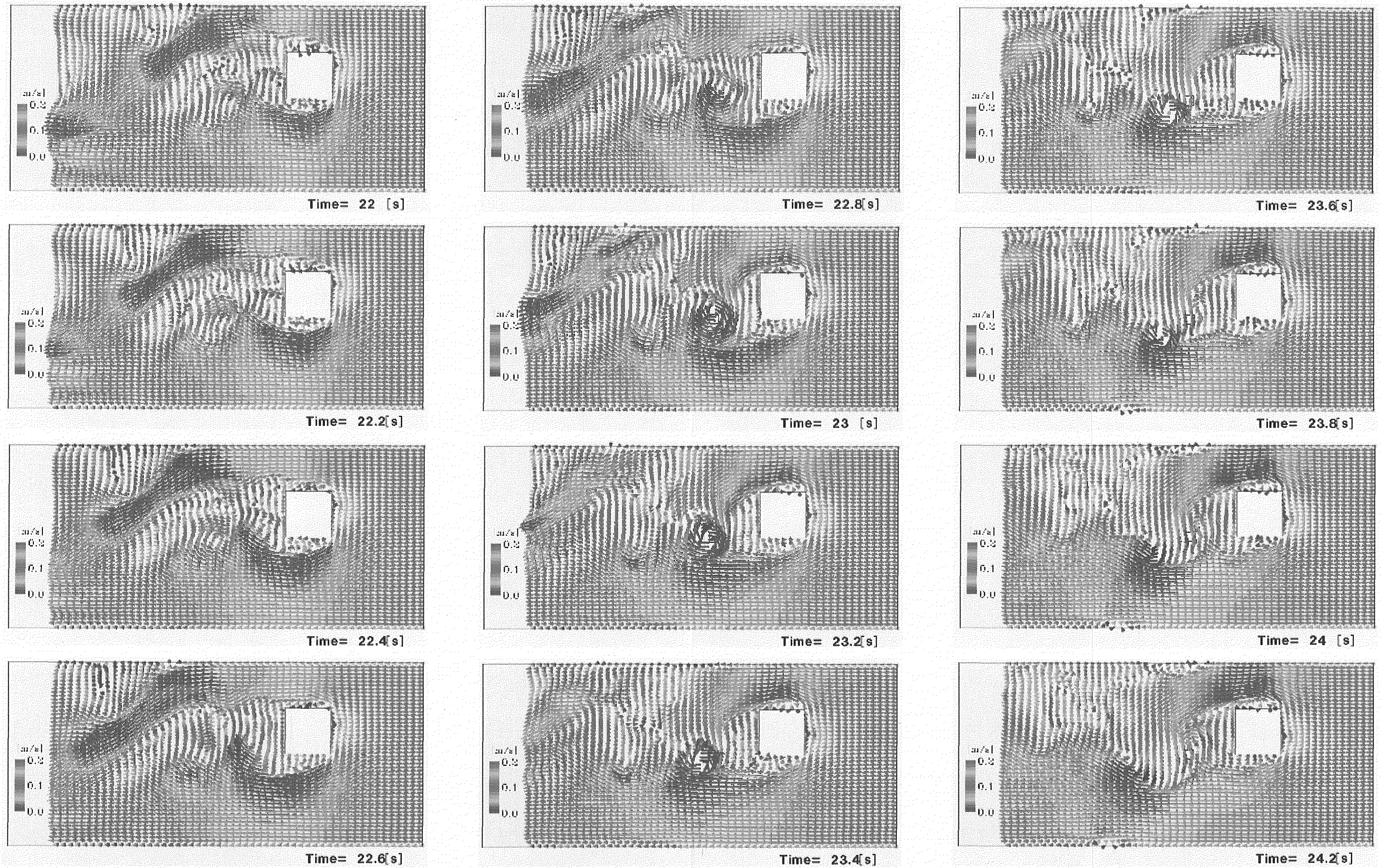


図 3.5.1-2 (1/2) 自由液面—下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
層流モデル (Case KW-1)

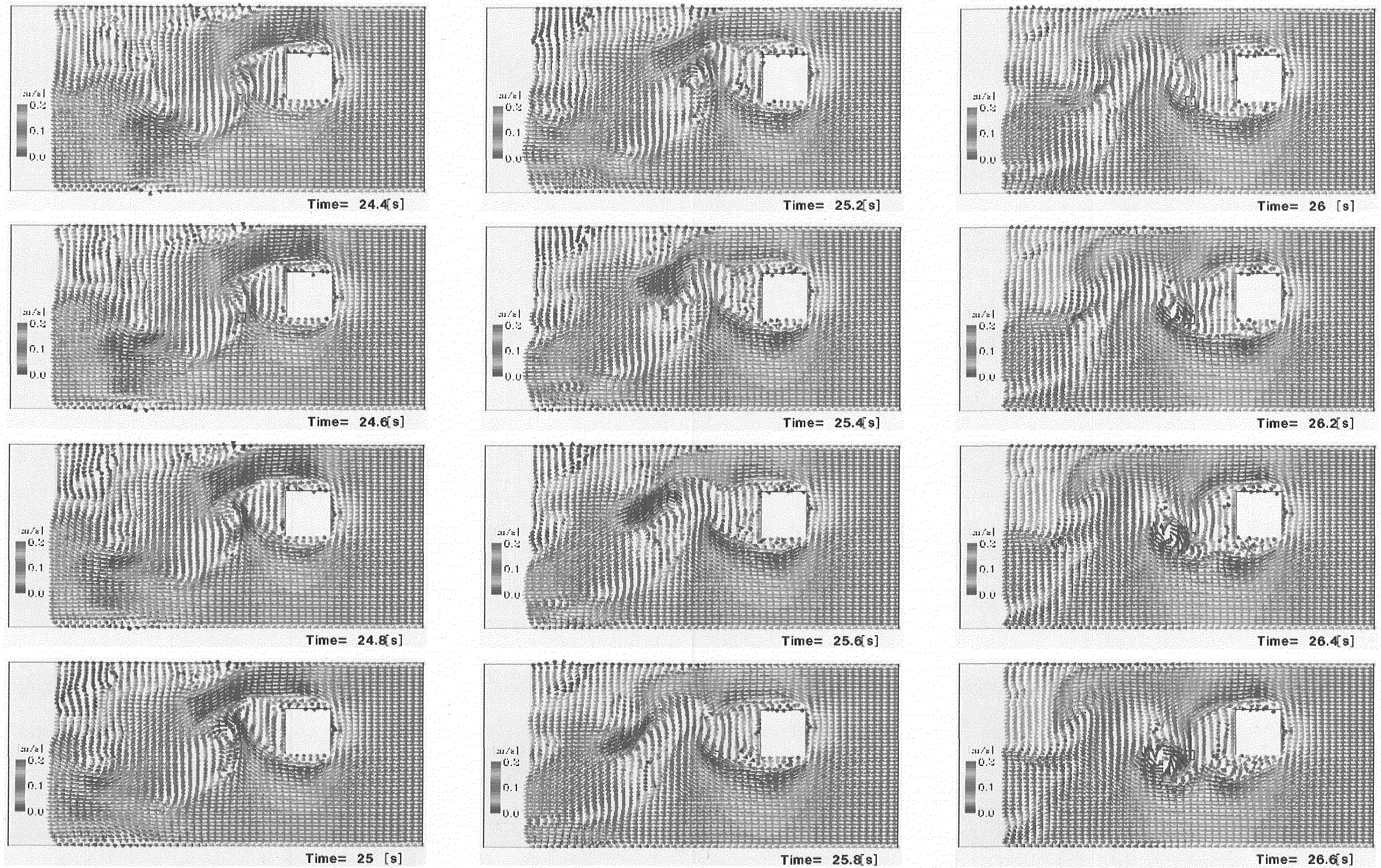
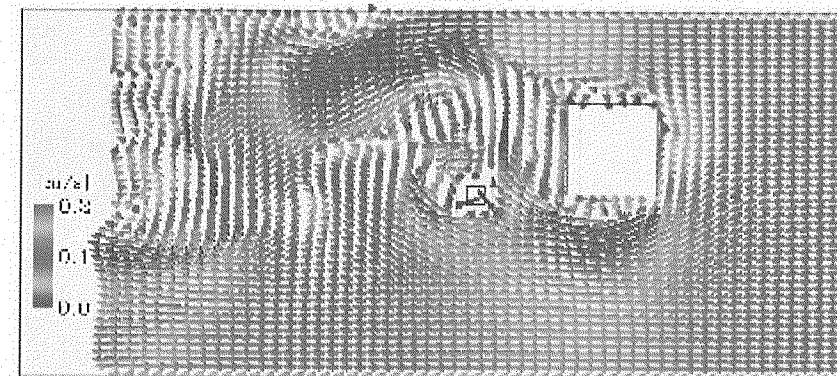
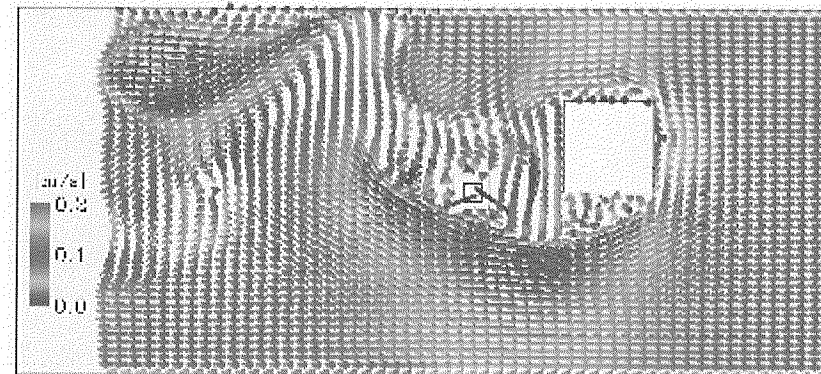


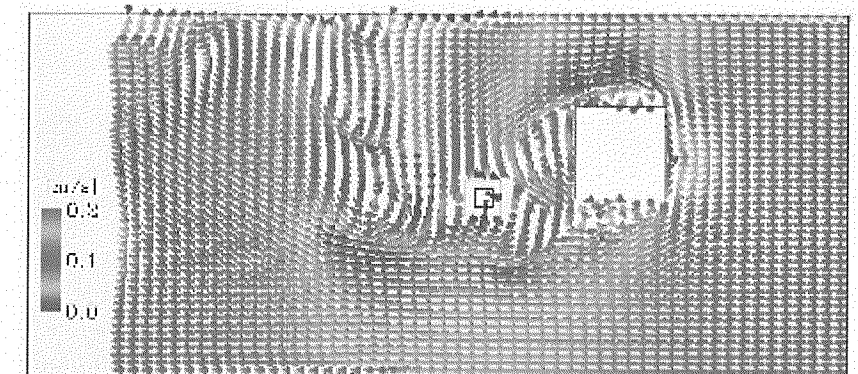
図 3.5.1-2 (2/2) 自由液面—下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
層流モデル (Case KW-1)



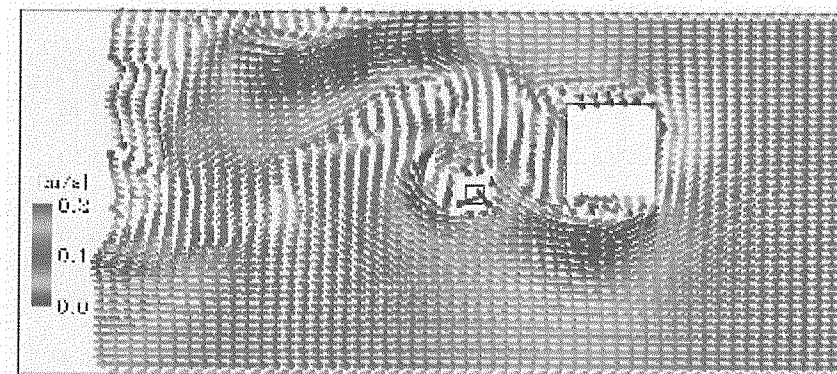
Time= 22 [s]



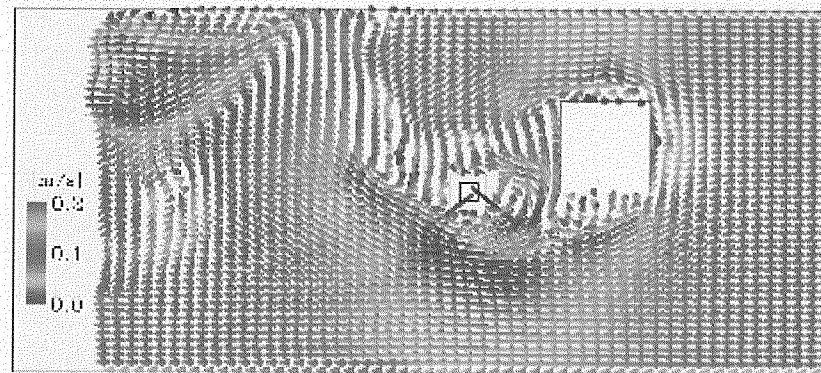
Time= 22.8[s]



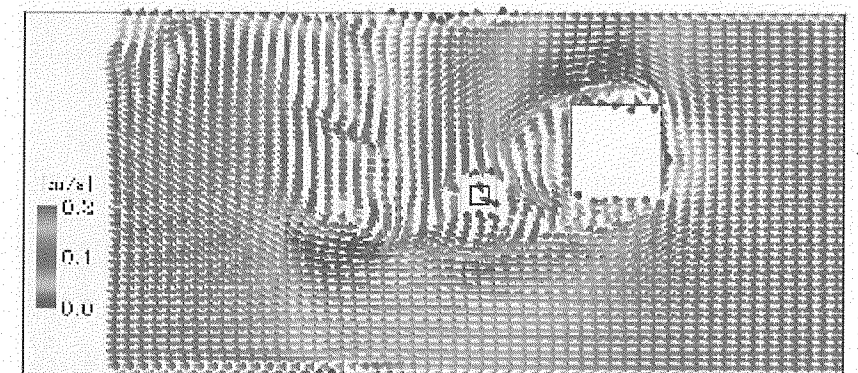
Time= 23.6[s]



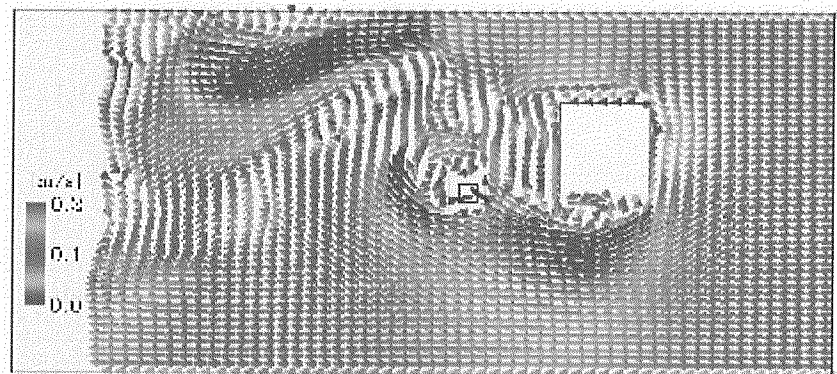
Time= 22.2[s]



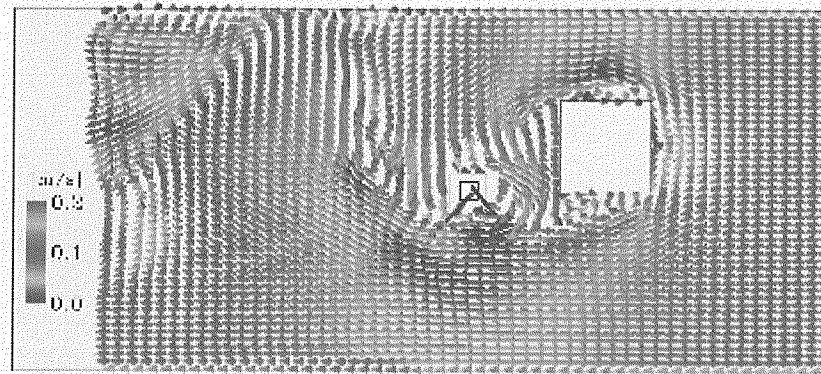
Time= 23 [s]



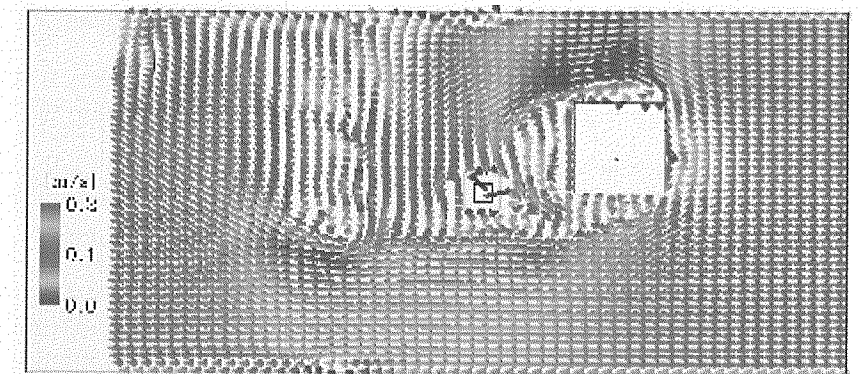
Time= 23.8[s]



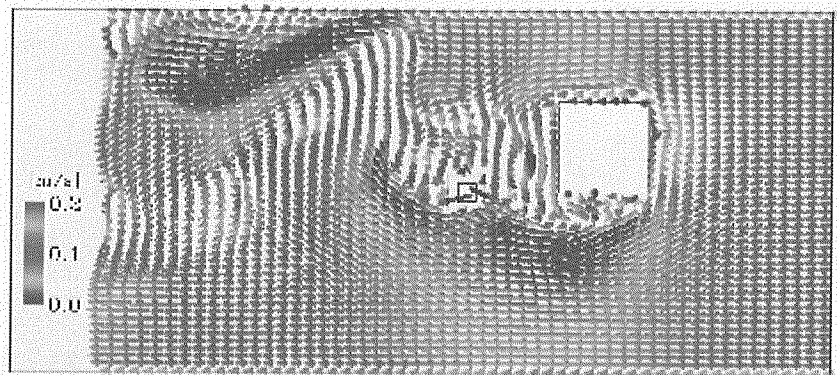
Time= 22.4[s]



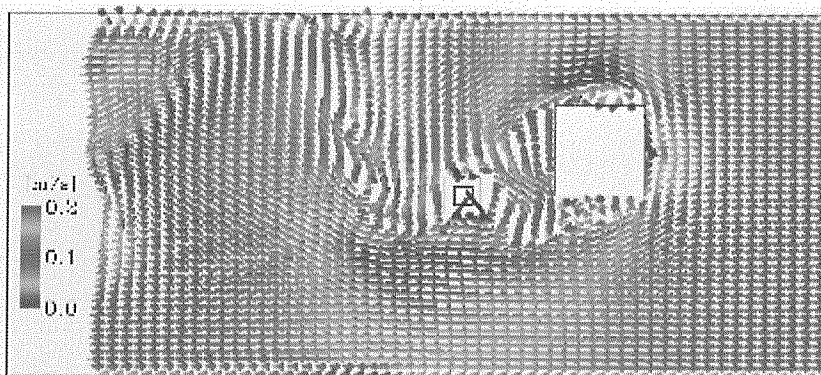
Time= 23.2[s]



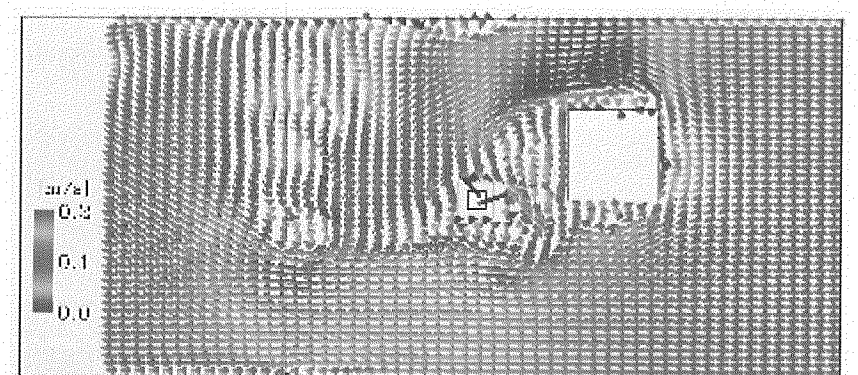
Time= 24 [s]



Time= 22.6[s]



Time= 23.4[s]



Time= 24.2[s]

図 3.5.1-3 (1/2) 液深中央水平面の速度ベクトル：層流モデル
(Case KW-1)

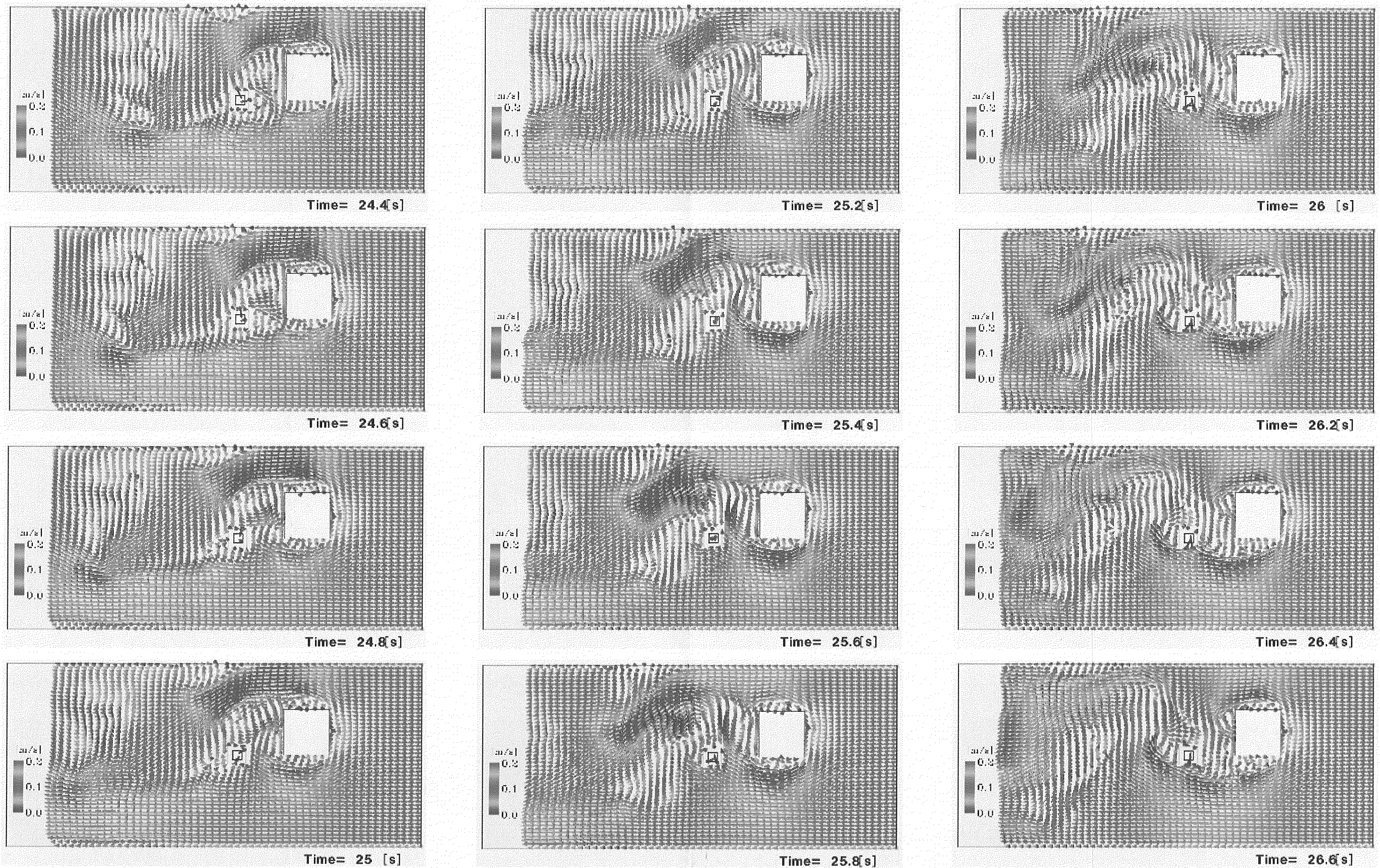


図 3.5.1-3 (2/2) 液深中央水平面の速度ベクトル：層流モデル
(Case KW-1)

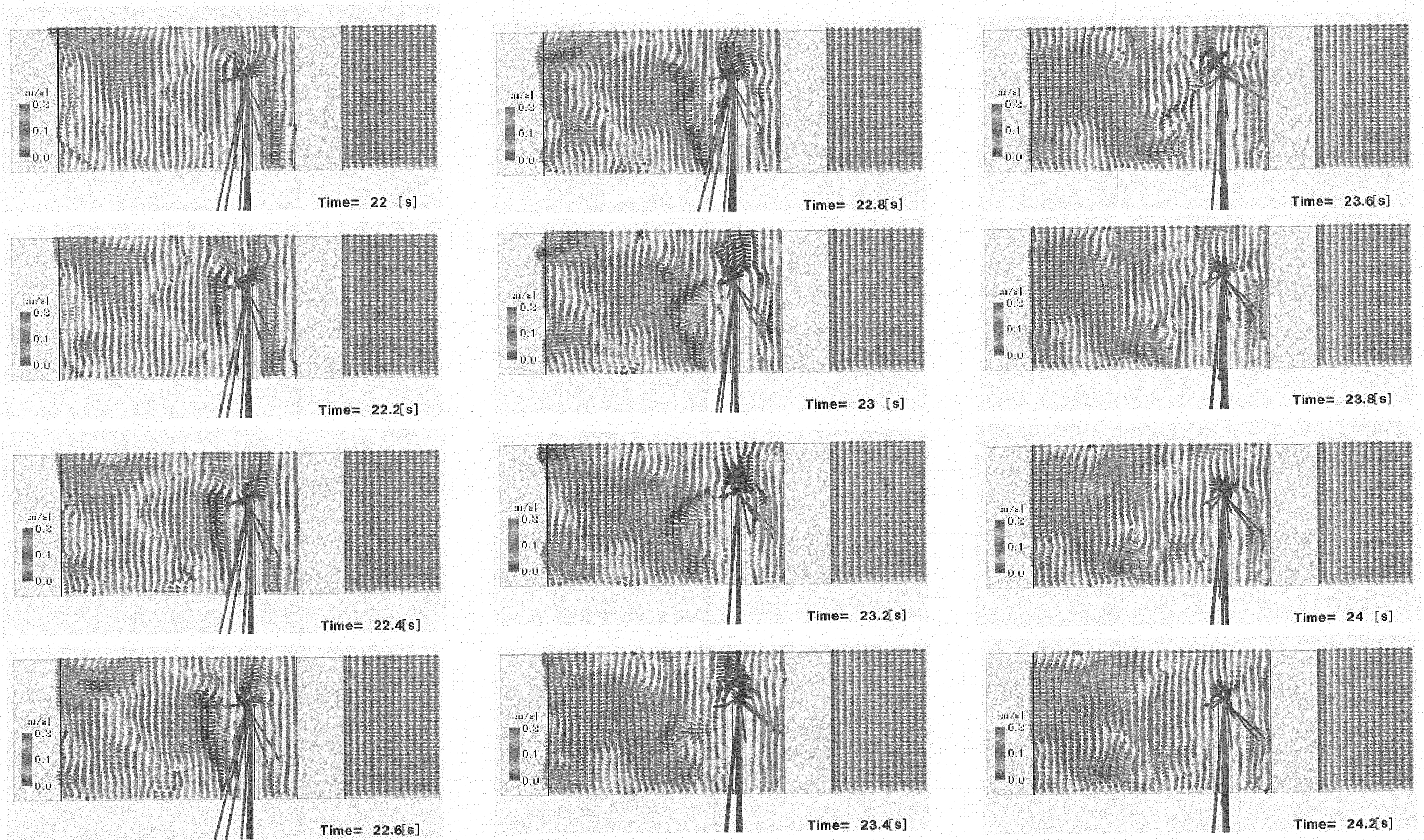


図 3.5.1-4 (1/2) 流路中央鉛直面の速度ベクトル：層流モデル
(Case KW-1)

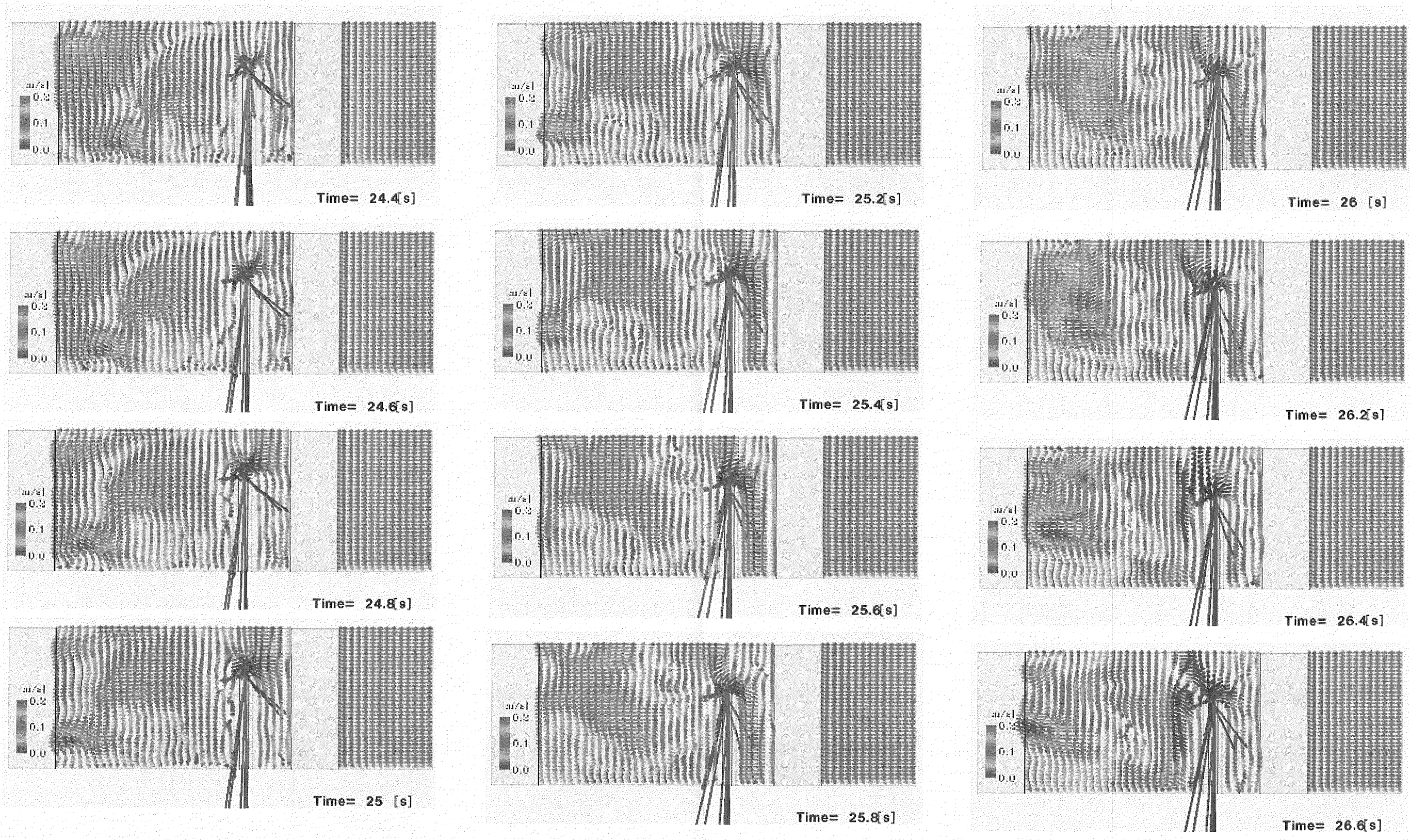


図 3.5.1-4 (2/2) 流路中央鉛直面の速度ベクトル：層流モデル
(Case KW-1)

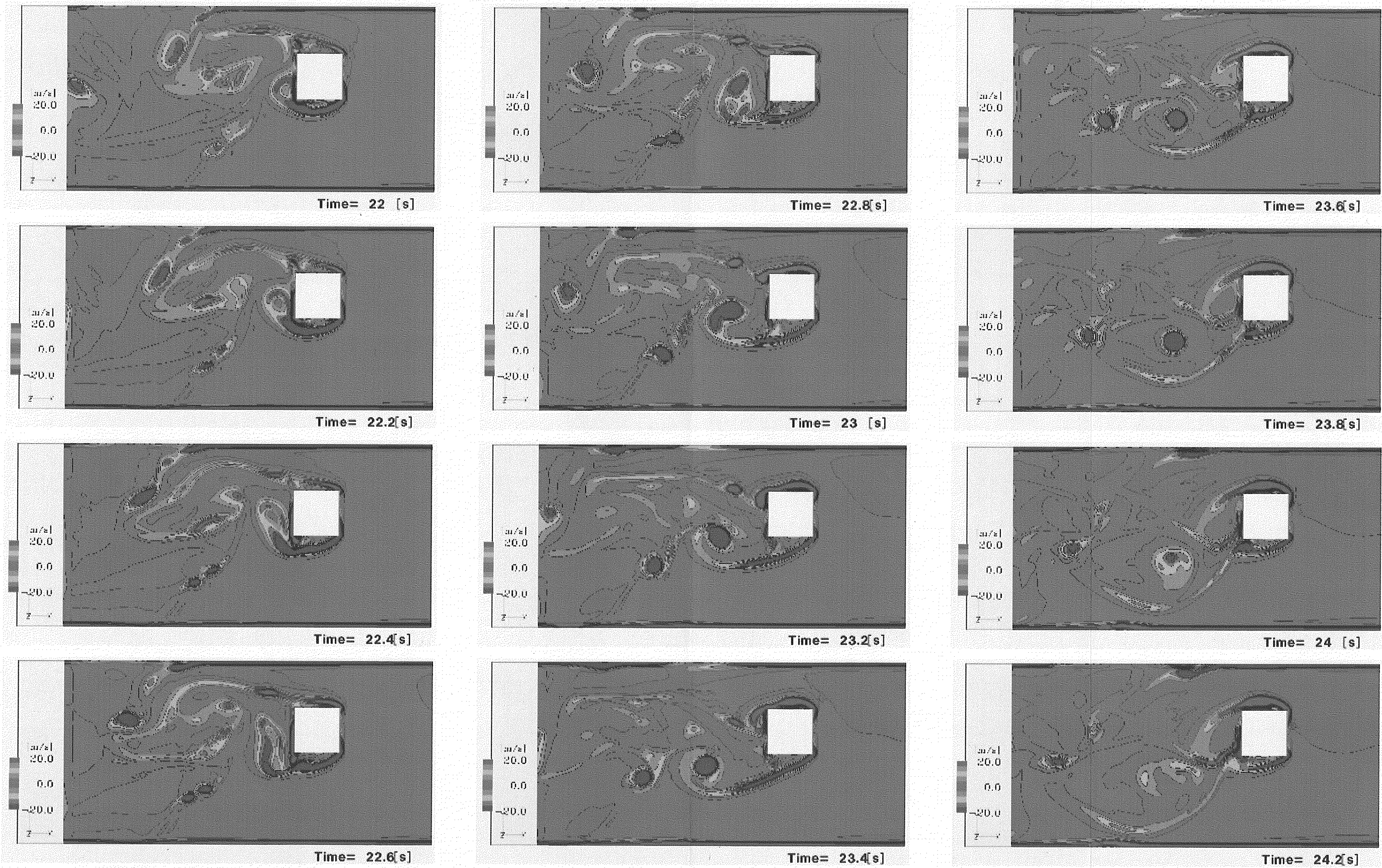


図 3.5.1-5 (1/2) 自由液面の渦度コンター：層流モデル (Case KW-1)

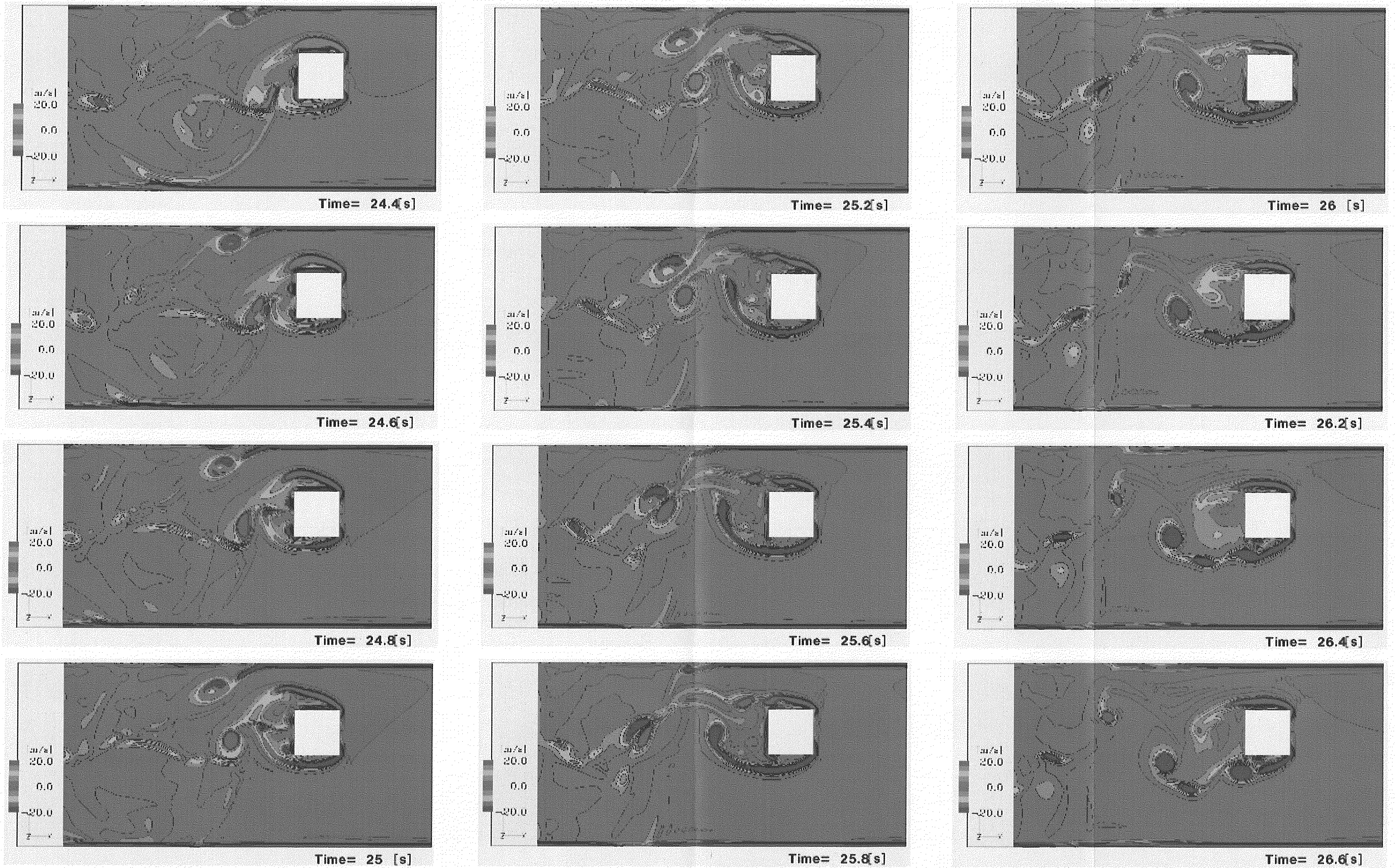
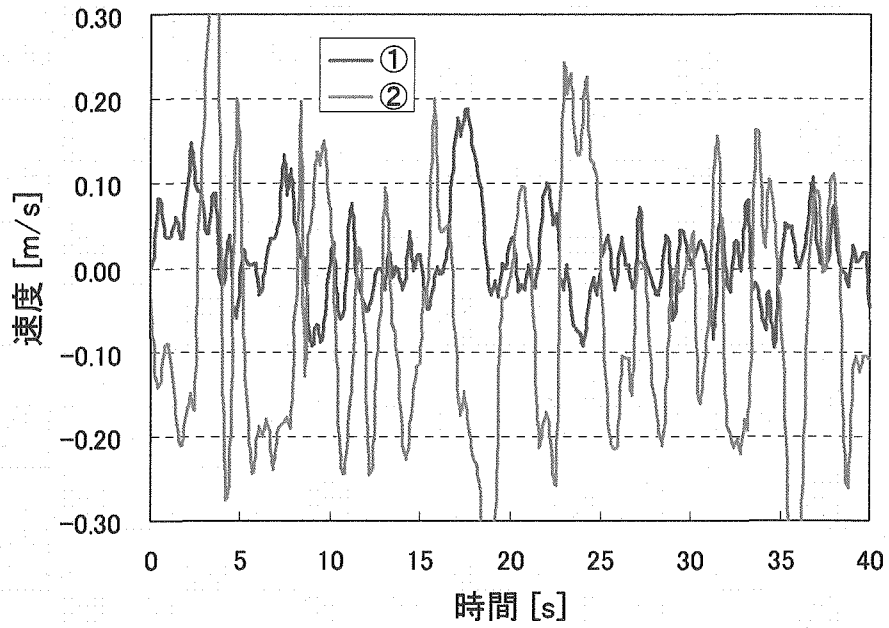
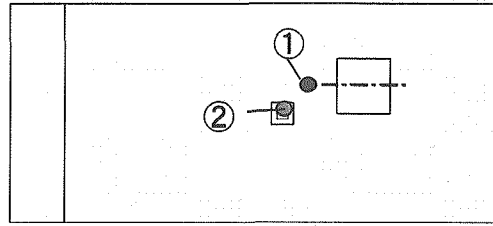
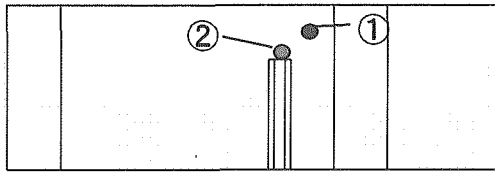
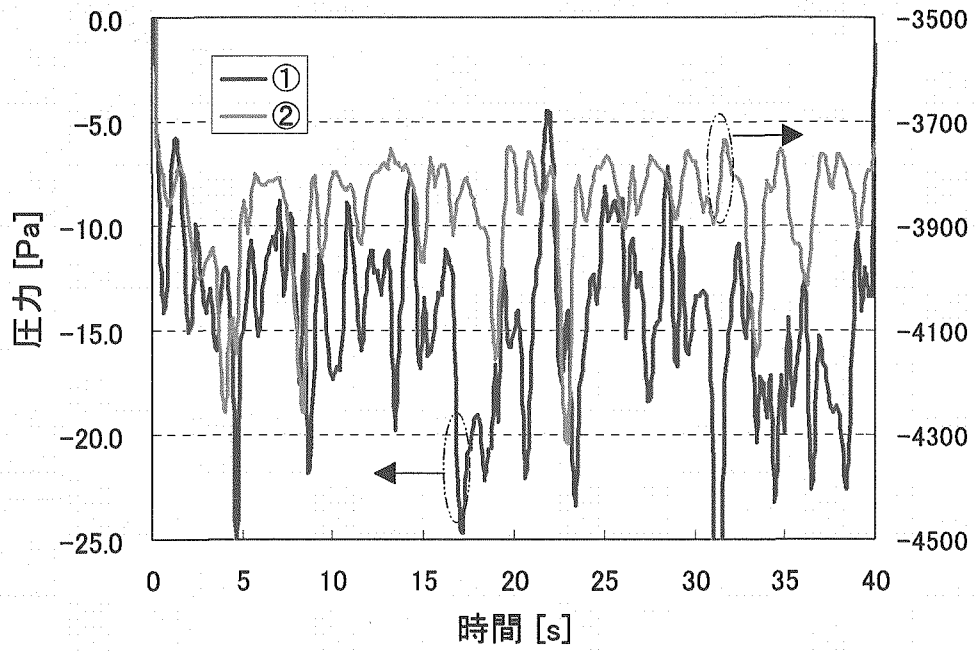


図 3.5.1-5 (2/2) 自由液面の渦度コンター：層流モデル (Case KW-1)



(a) 速度変動



(b) 圧力変動

図 3.5.1-6 速度および圧力の変動履歴：層流モデル (Case KW-1)

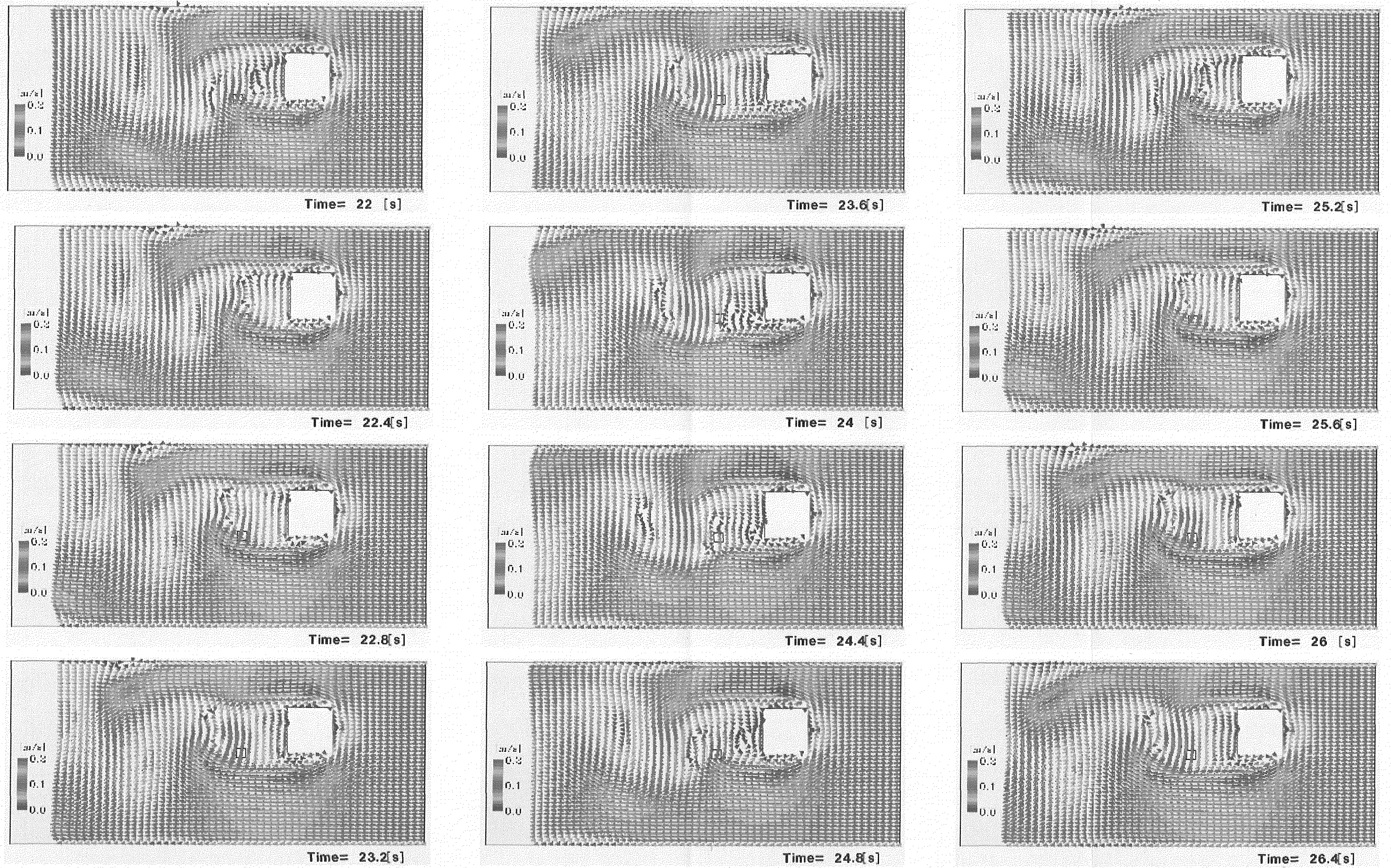


図 3.5.2-1 自由液面の速度ベクトル：標準 $k-\varepsilon$ モデル (Case KW-2)

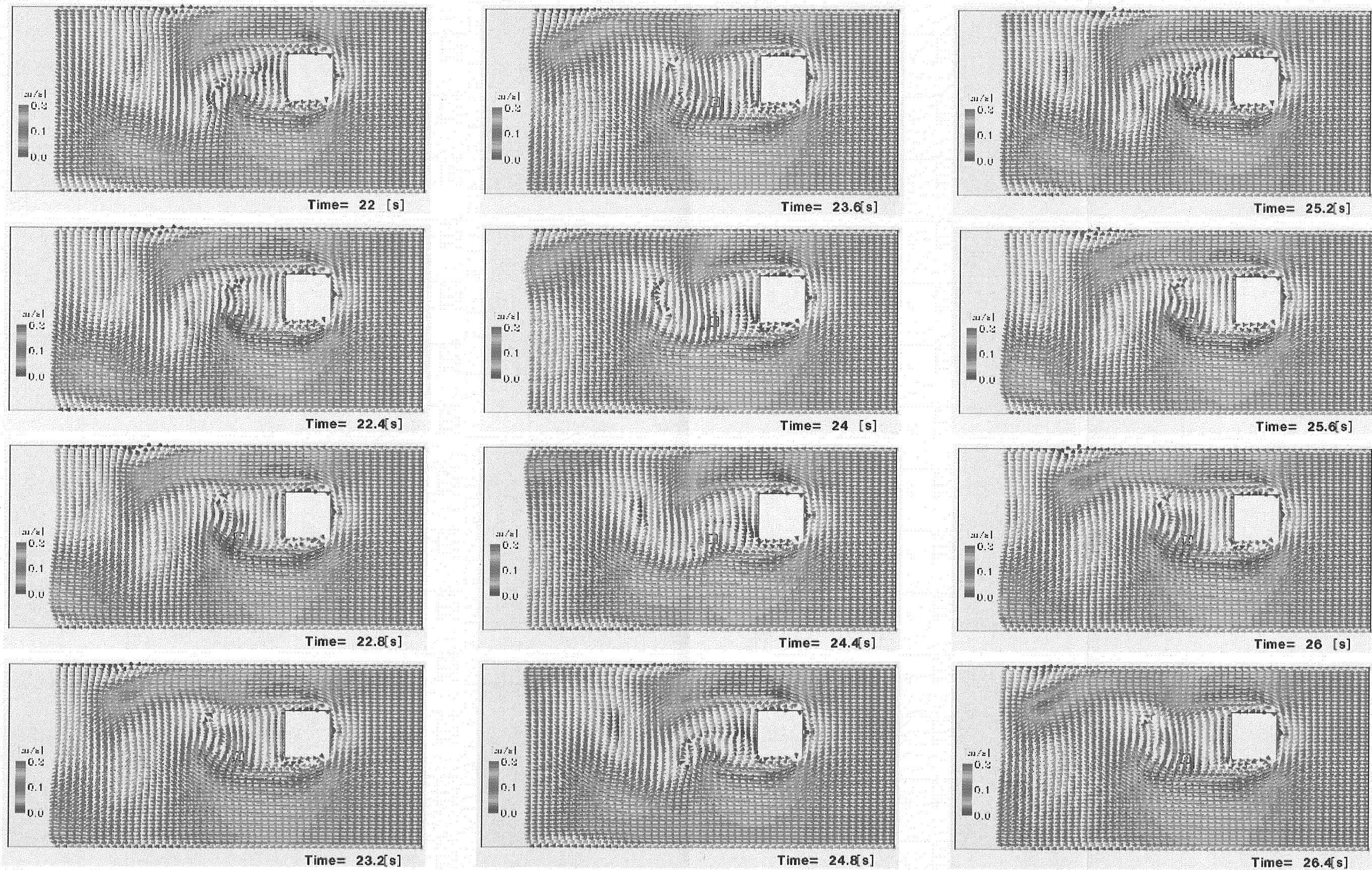


図 3.5.2-2 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
標準 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-2)

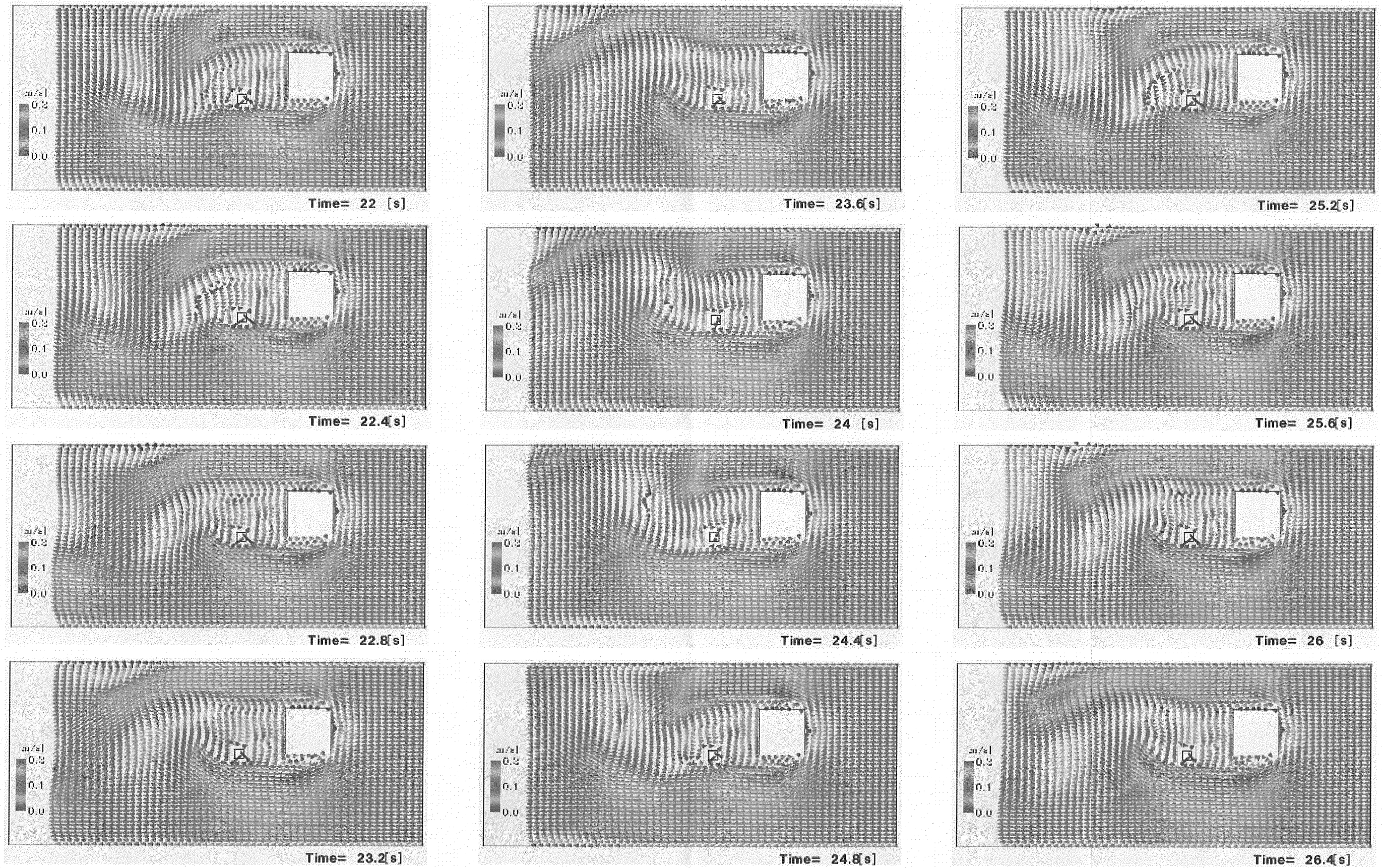


図 3.5.2-3 液深中央水平面の速度ベクトル：標準 $k-\epsilon$ モデル
(Case KW-2)

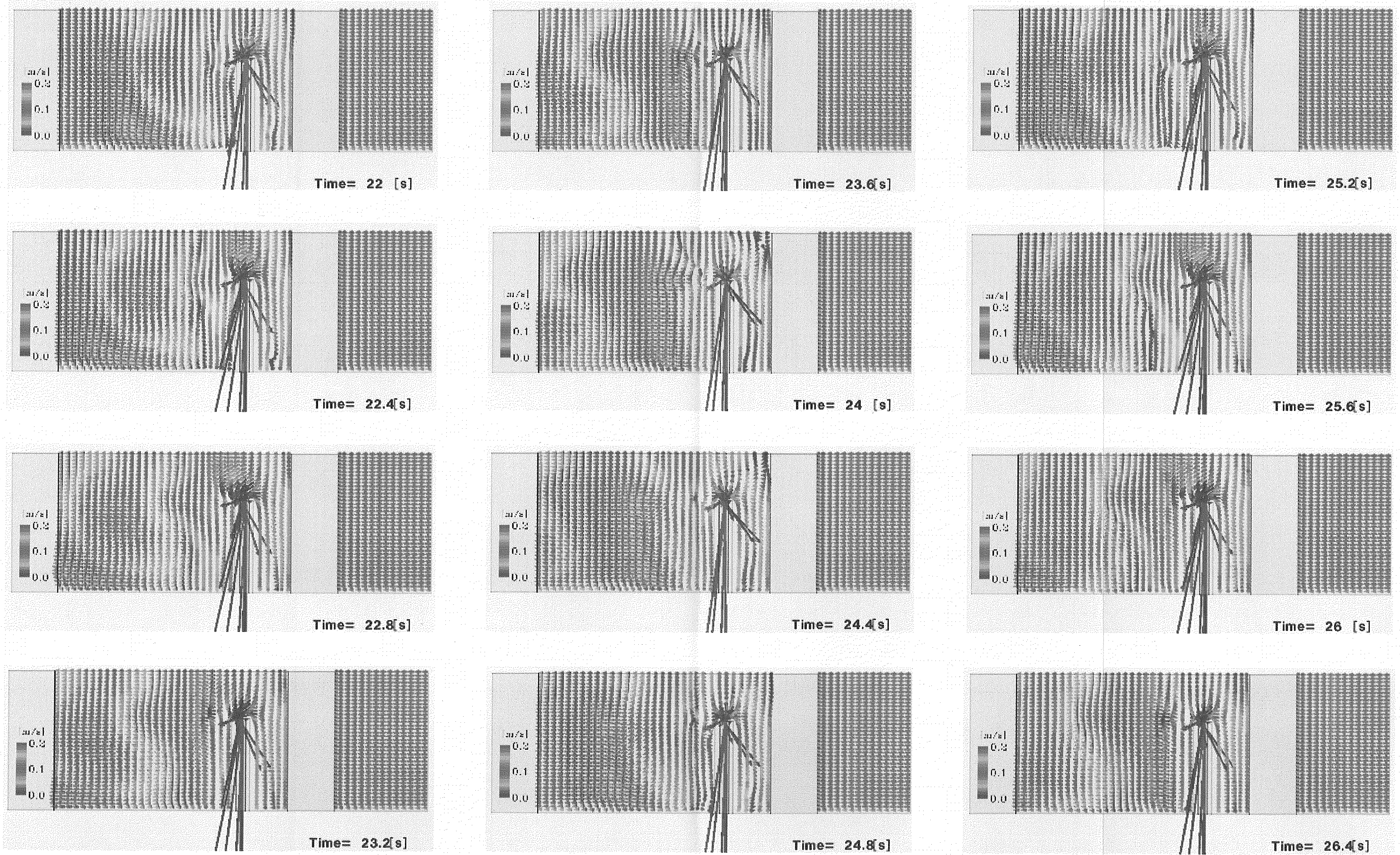


図 3.5.2-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル：標準 $k-\epsilon$ モデル
(Case KW-2)

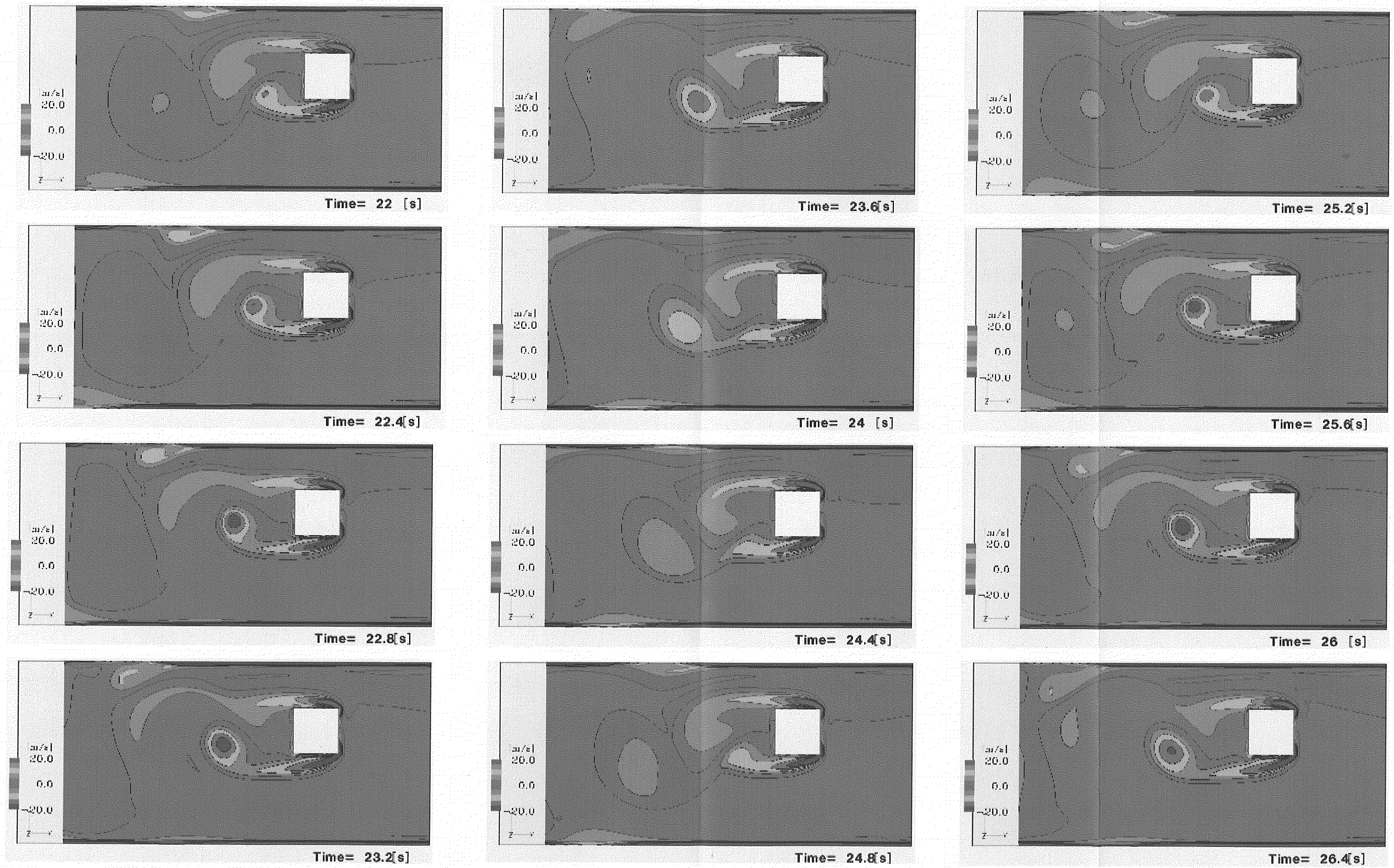
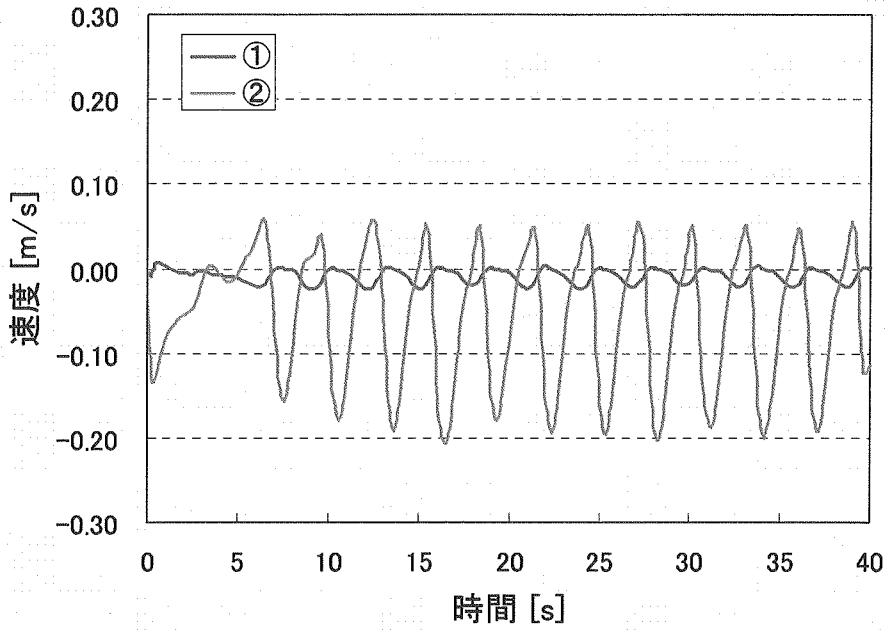
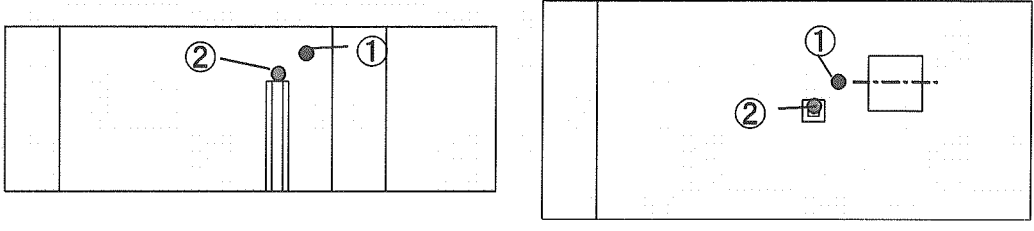
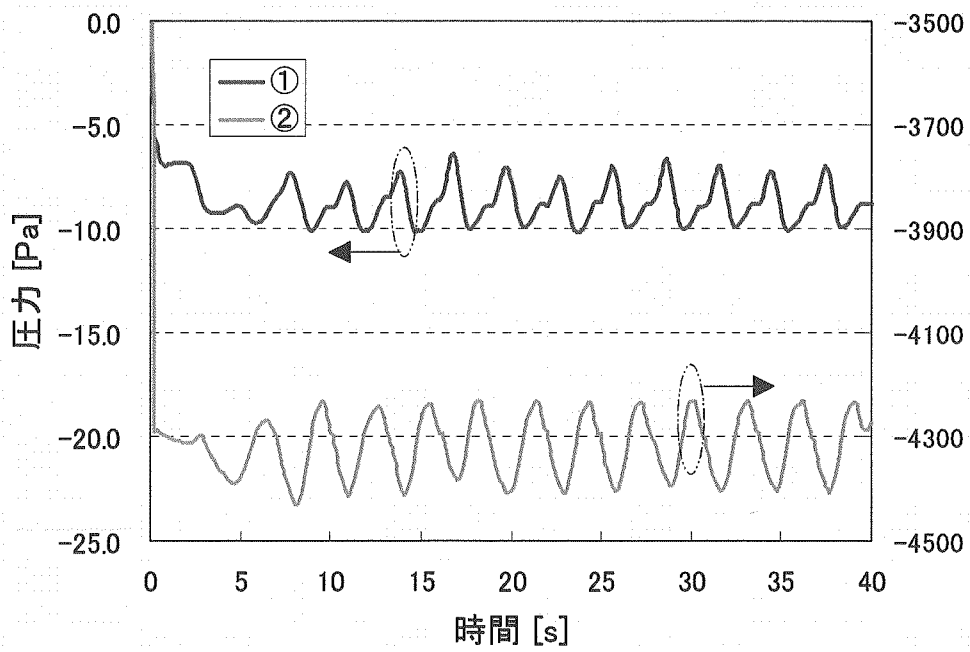


図 3.5.2-5 自由液面の渦度コンター：標準 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-2)



(a) 速度変動



(b) 圧力変動

図 3.5.2-6 速度および圧力の変動履歴：標準 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-2)

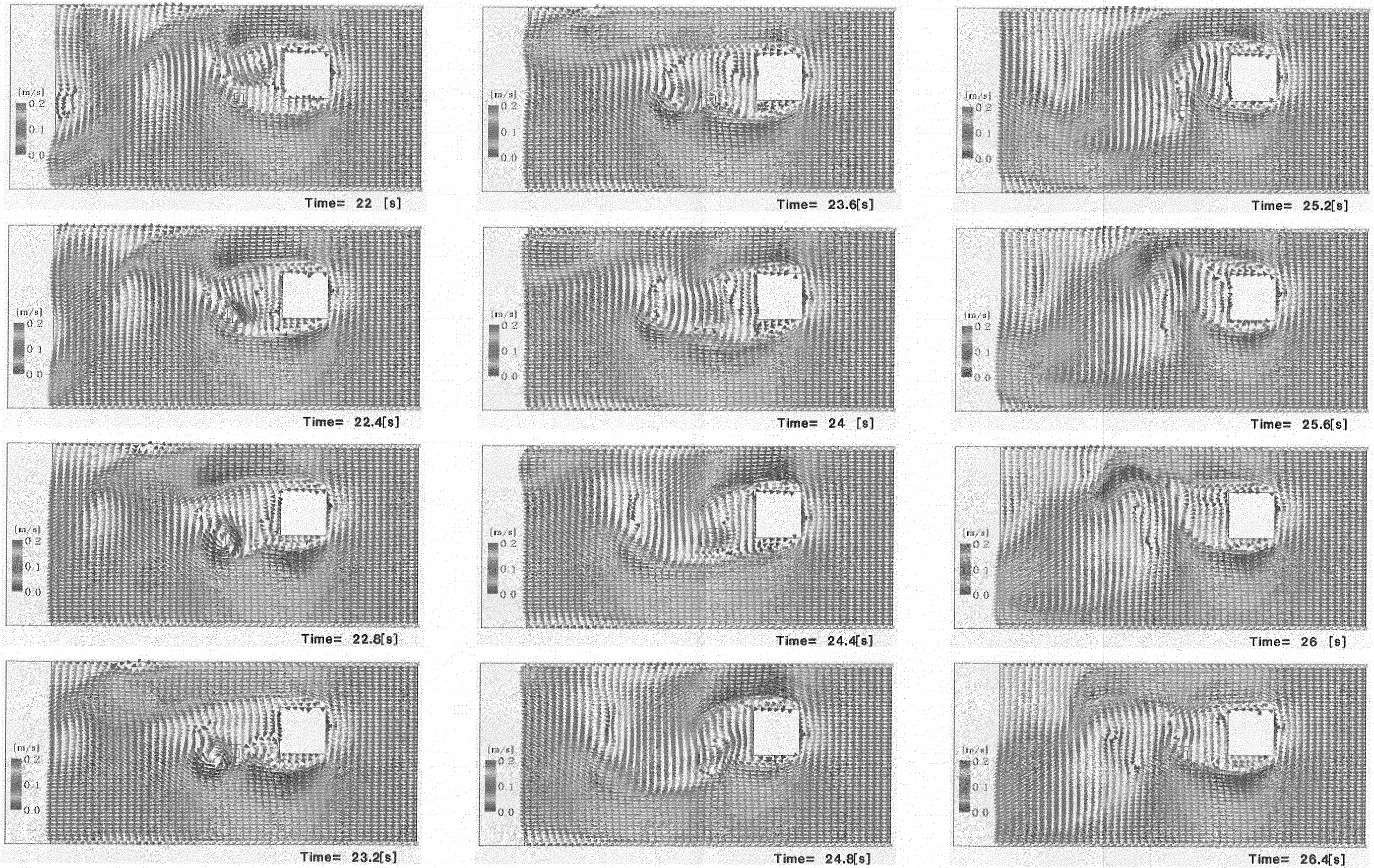


図 3.5.3-1 自由液面の速度ベクトル：RNG $k-\epsilon$ モデル (Case KW-3)

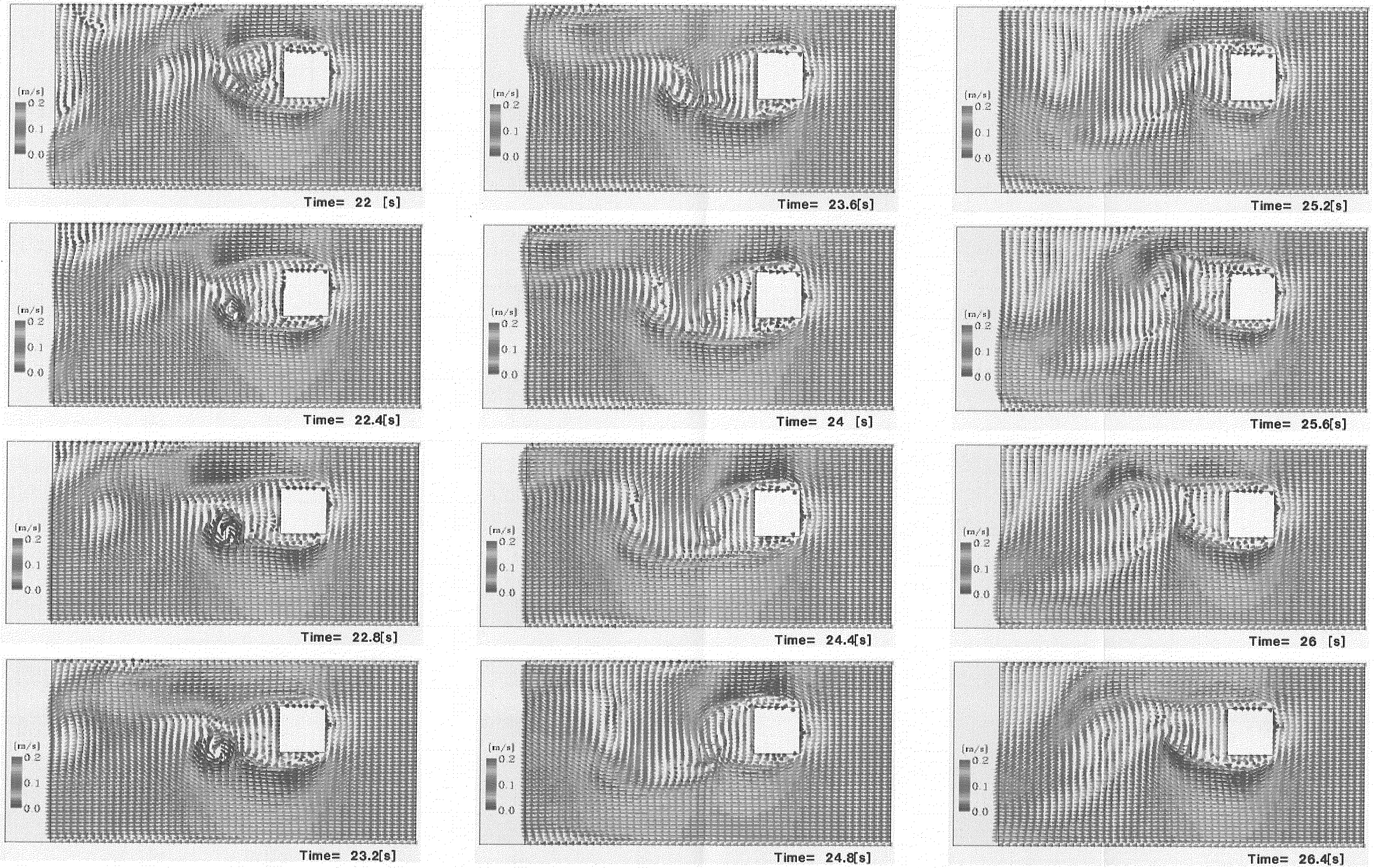


図 3.5.3-2 自由液面一下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
RNG $k-\varepsilon$ モデル (Case KW-3)

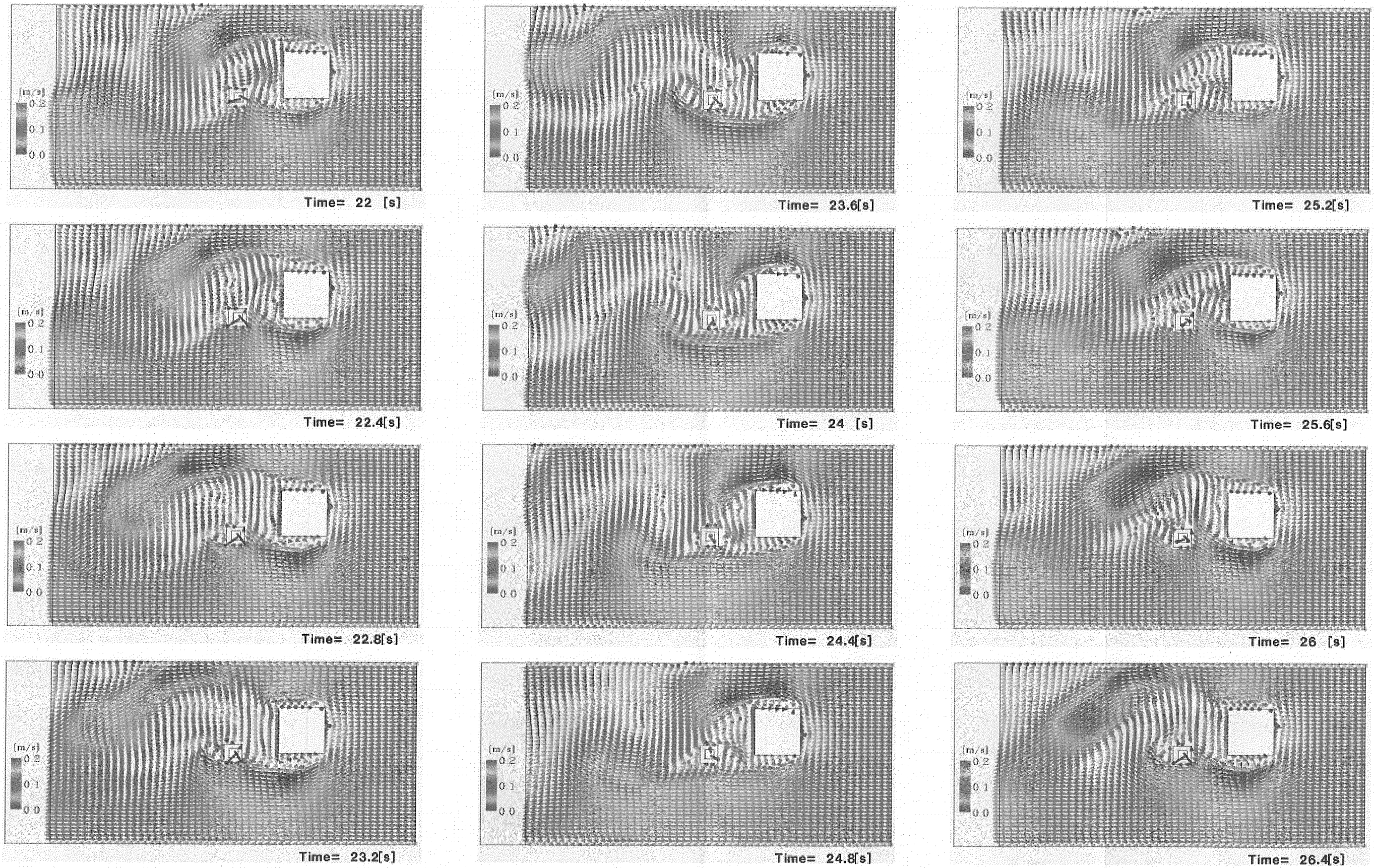


図 3.5.3-3 液深中央水平面の速度ベクトル：RNG $k-\epsilon$ モデル
(Case KW-3)

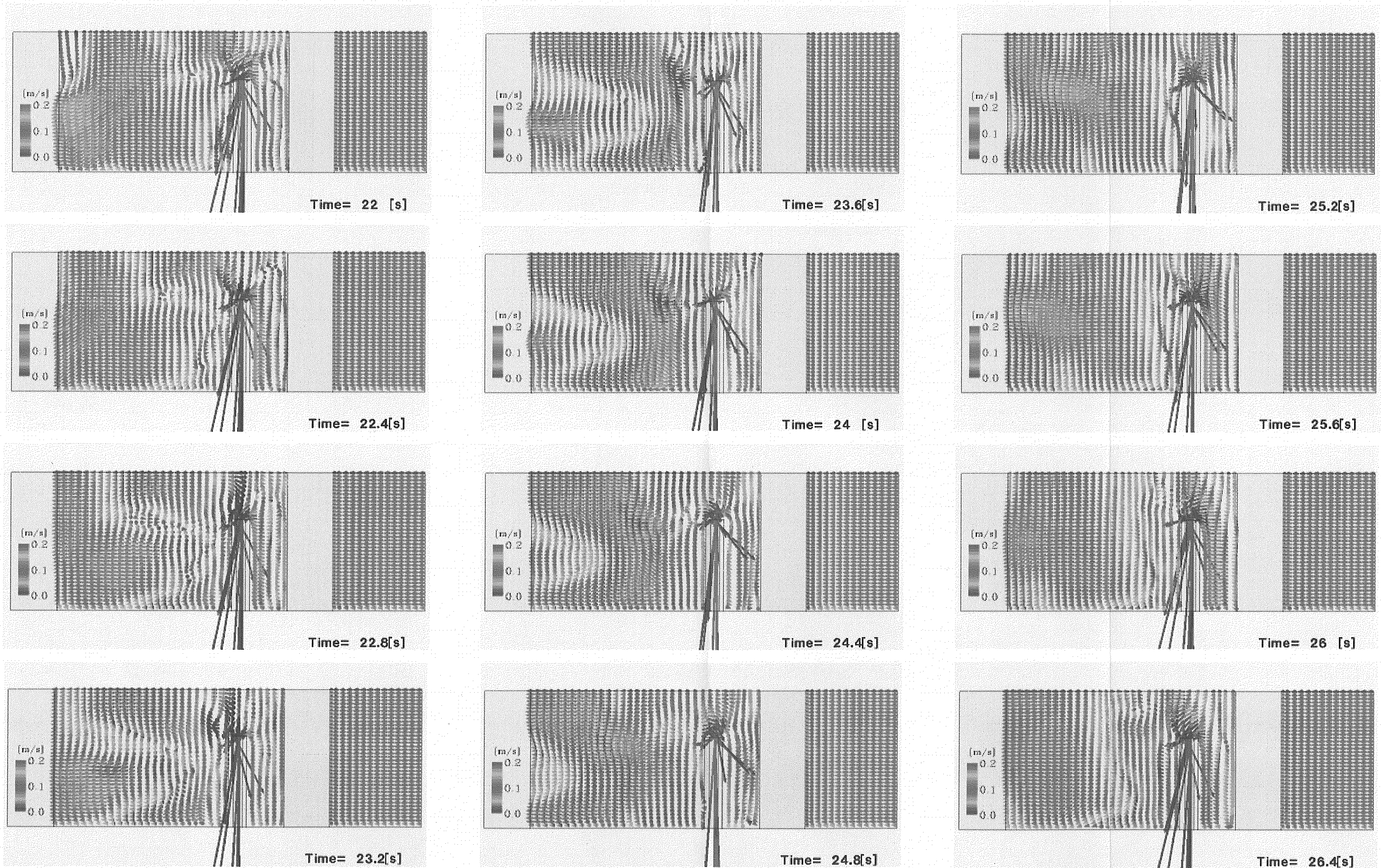


図 3.5.3-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル：RNG $k-\epsilon$ モデル
(Case KW-3)

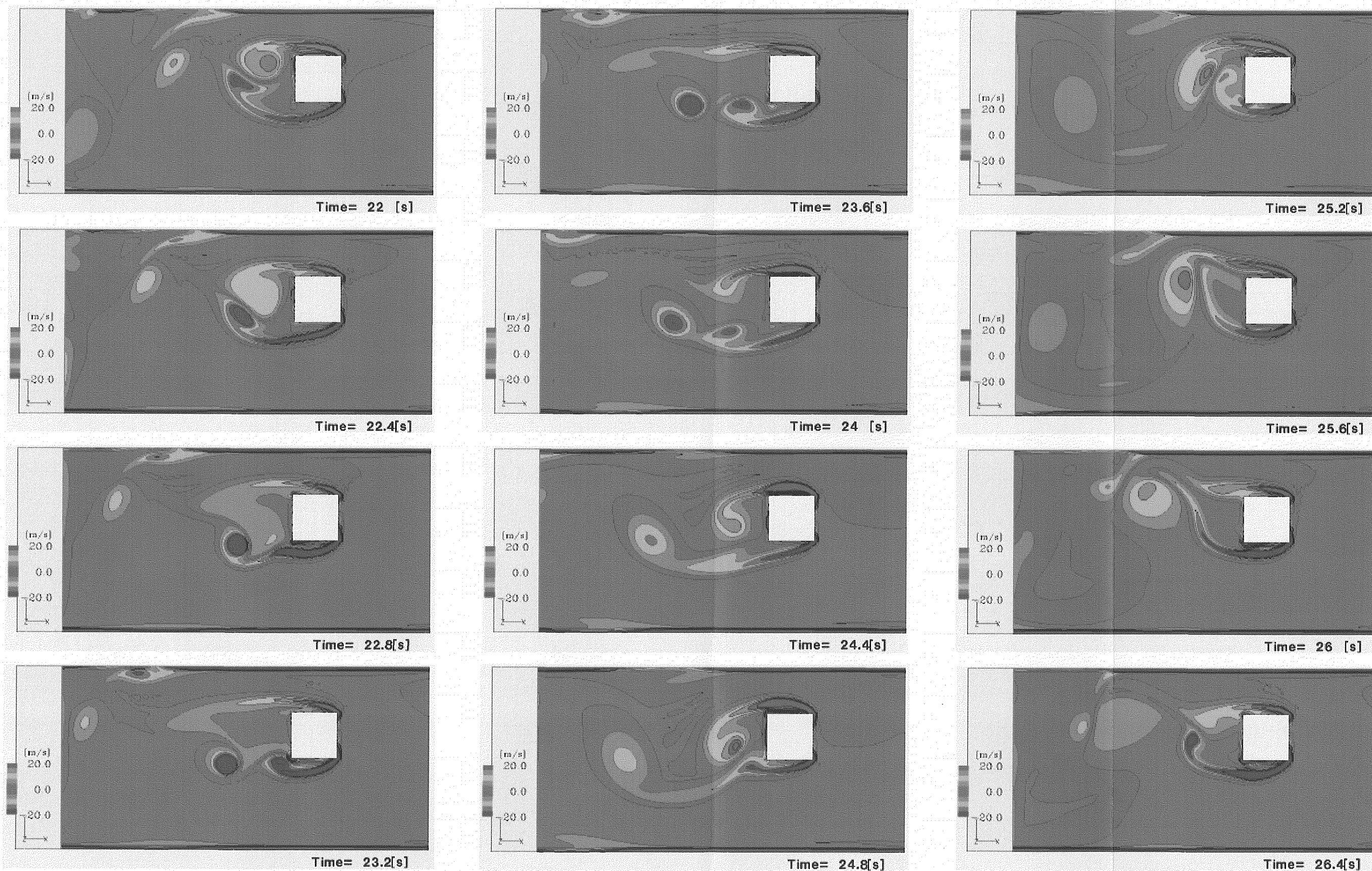
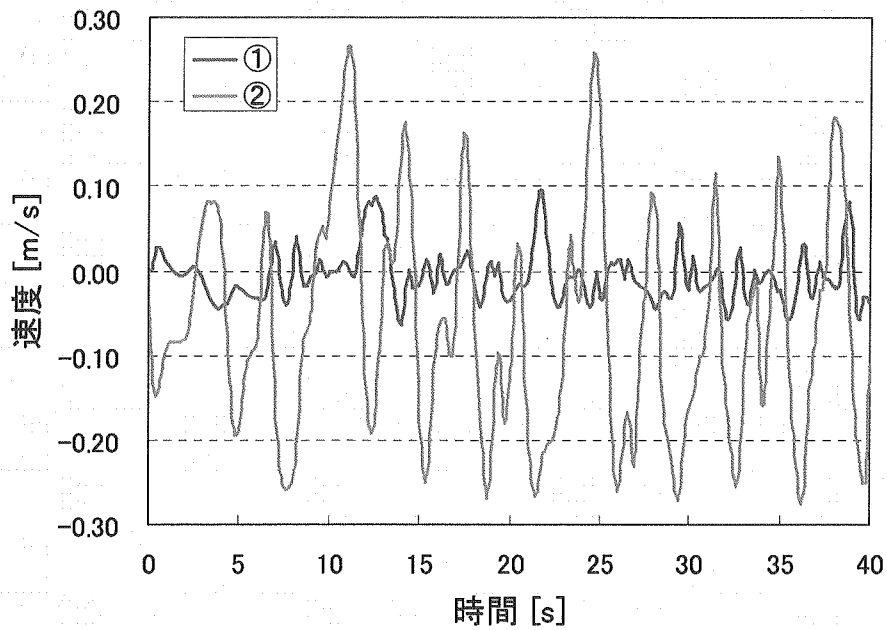
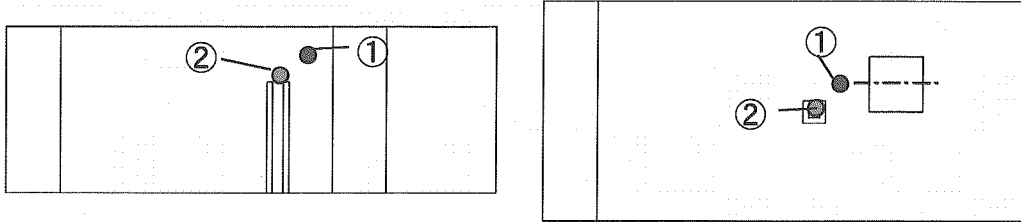
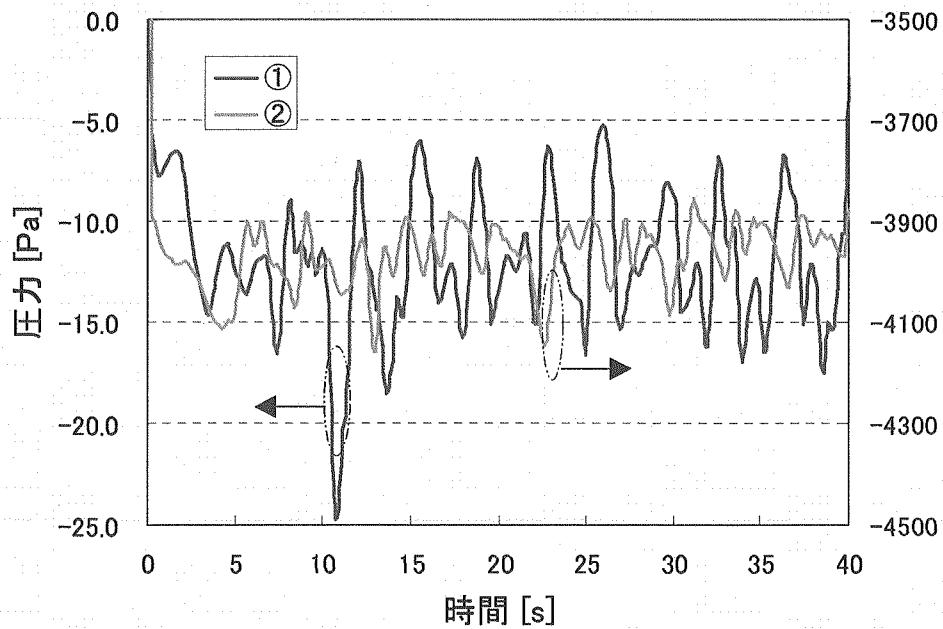


図 3.5.3-5 自由液面の渦度コンター：RNG $k-\epsilon$ モデル (Case KW-3)



(a) 速度変動



(b) 圧力変動

図 3.5.3-6 速度および圧力の変動履歴：RNG $k-\epsilon$ モデル (Case KW-3)

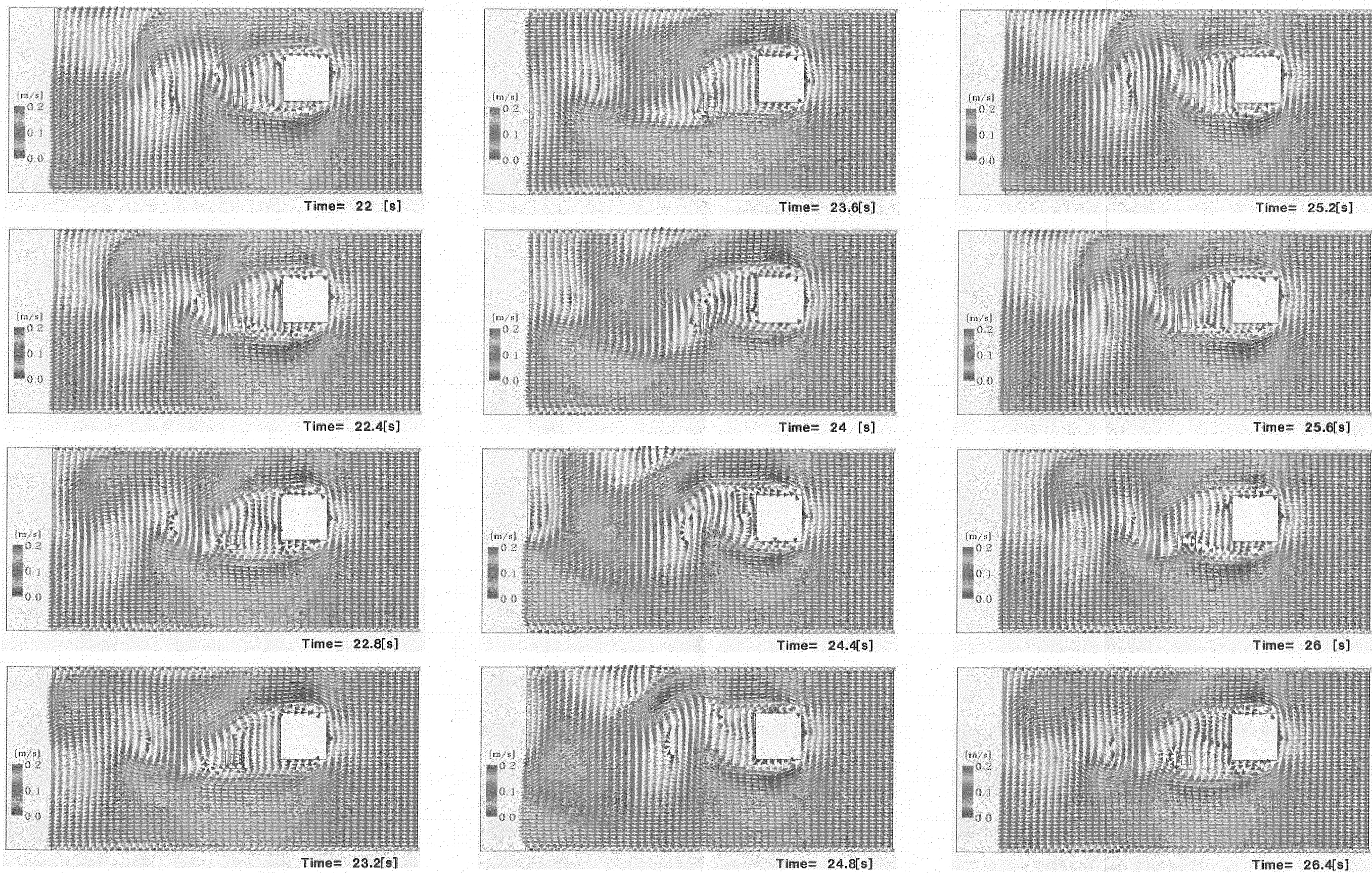


図 3.5.4-1 自由液面の速度ベクトル：非線形 $k-\varepsilon$ モデル (Case KW-4)

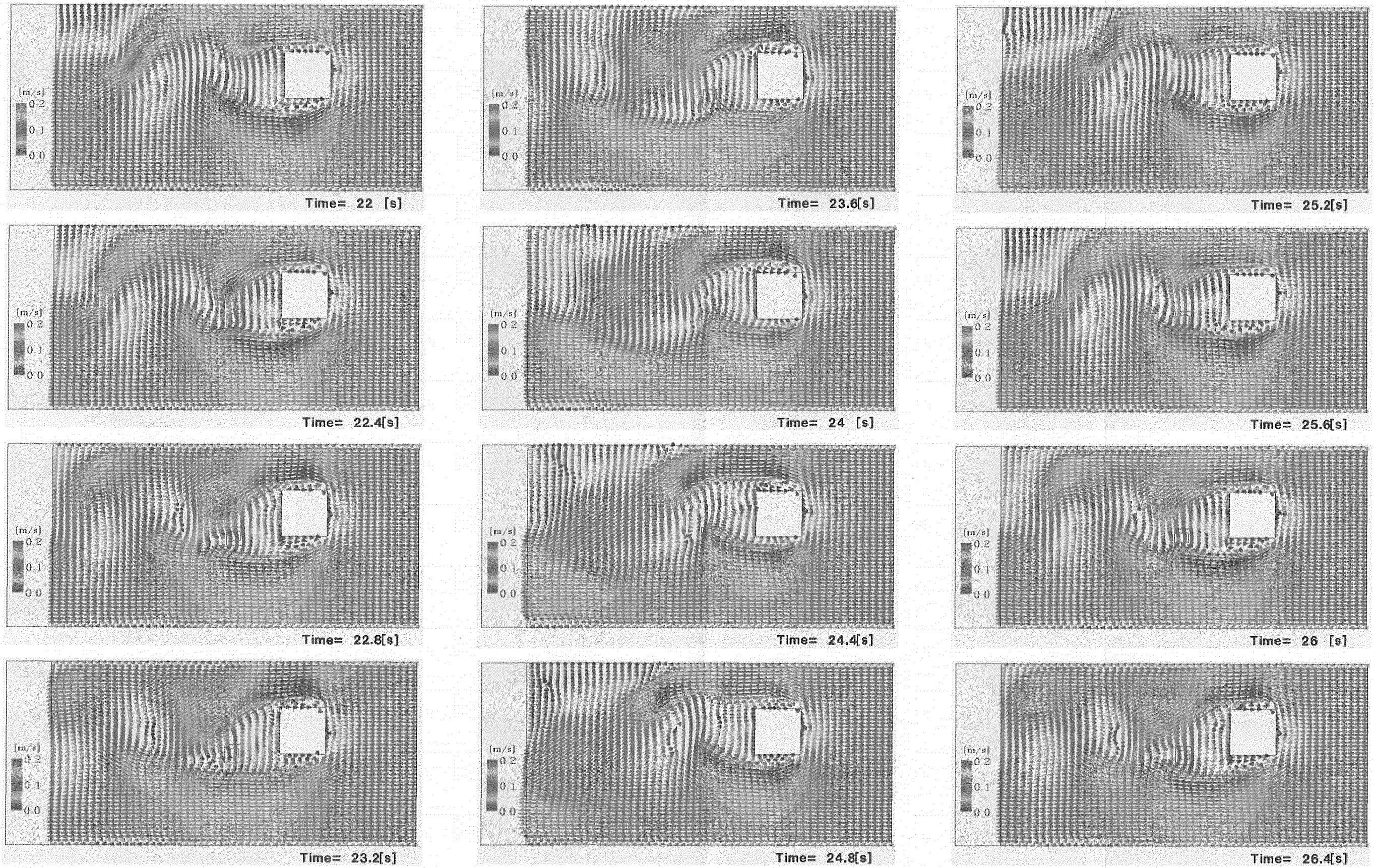


図 3.5.4-2 自由液面-下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)

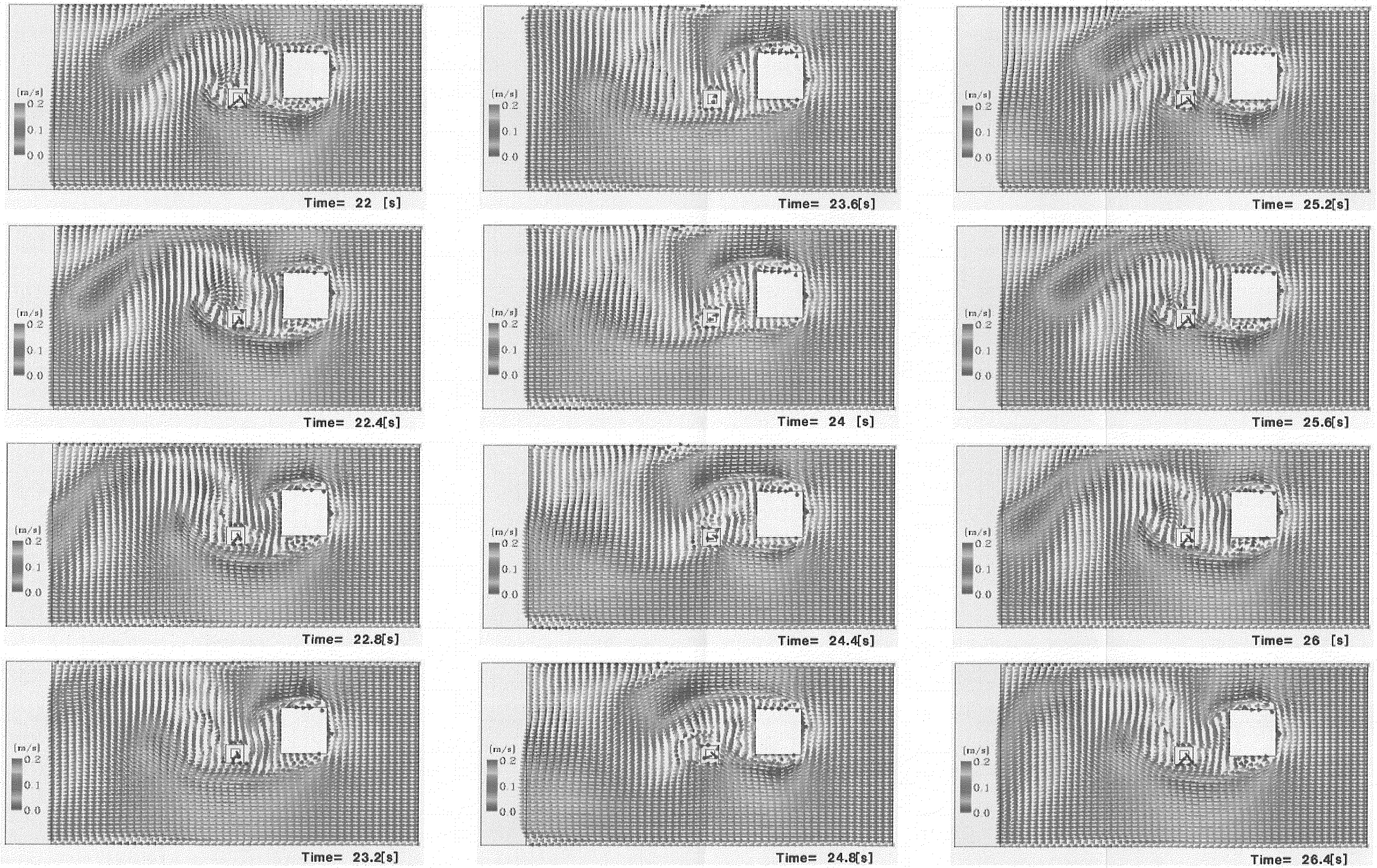


図 3.5.4-3 液深中央水平面の速度ベクトル：非線形 $k-\varepsilon$ モデル
(Case KW-4)

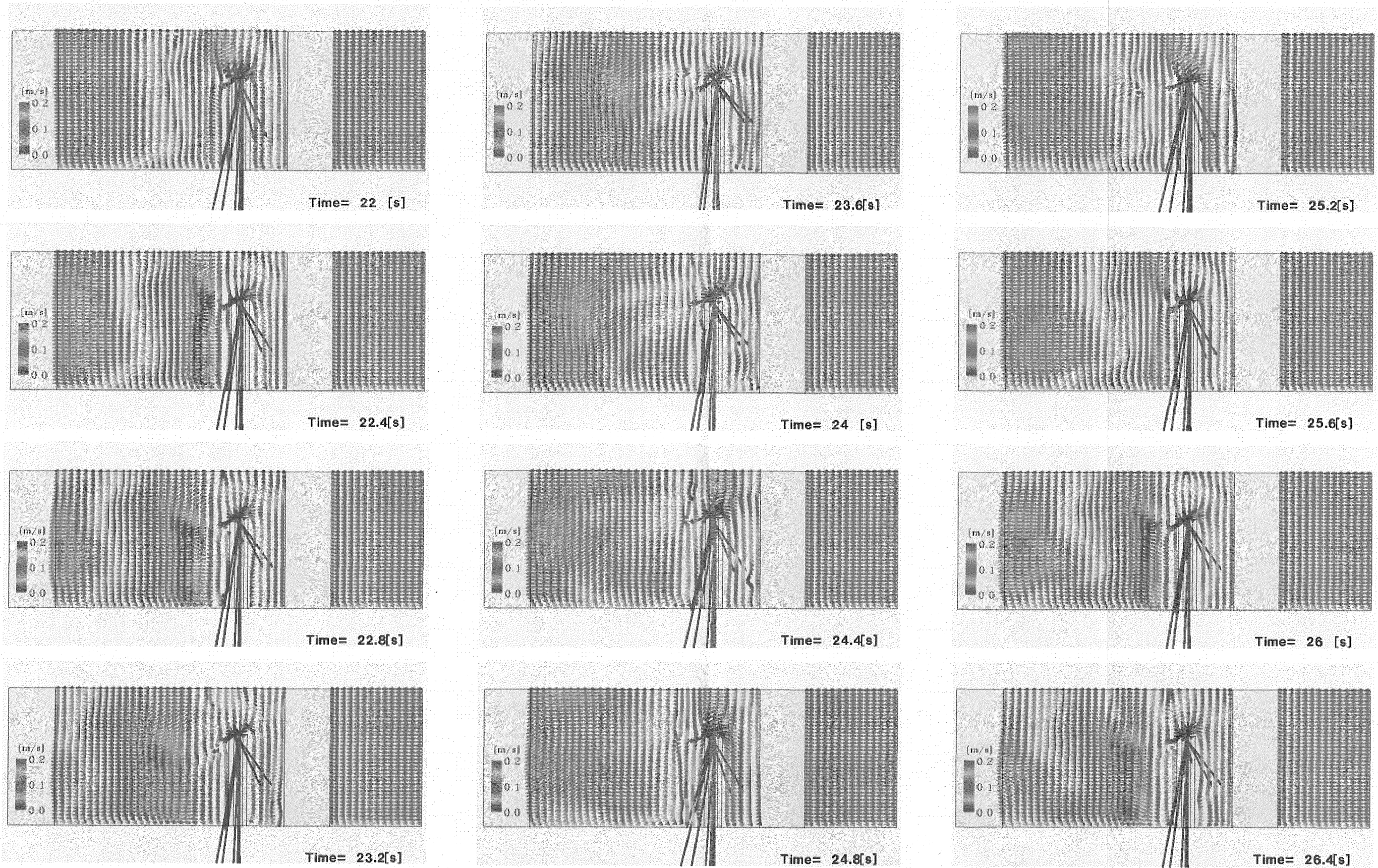


図 3.5.4-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル：非線形 $k-\varepsilon$ モデル
(Case KW-4)

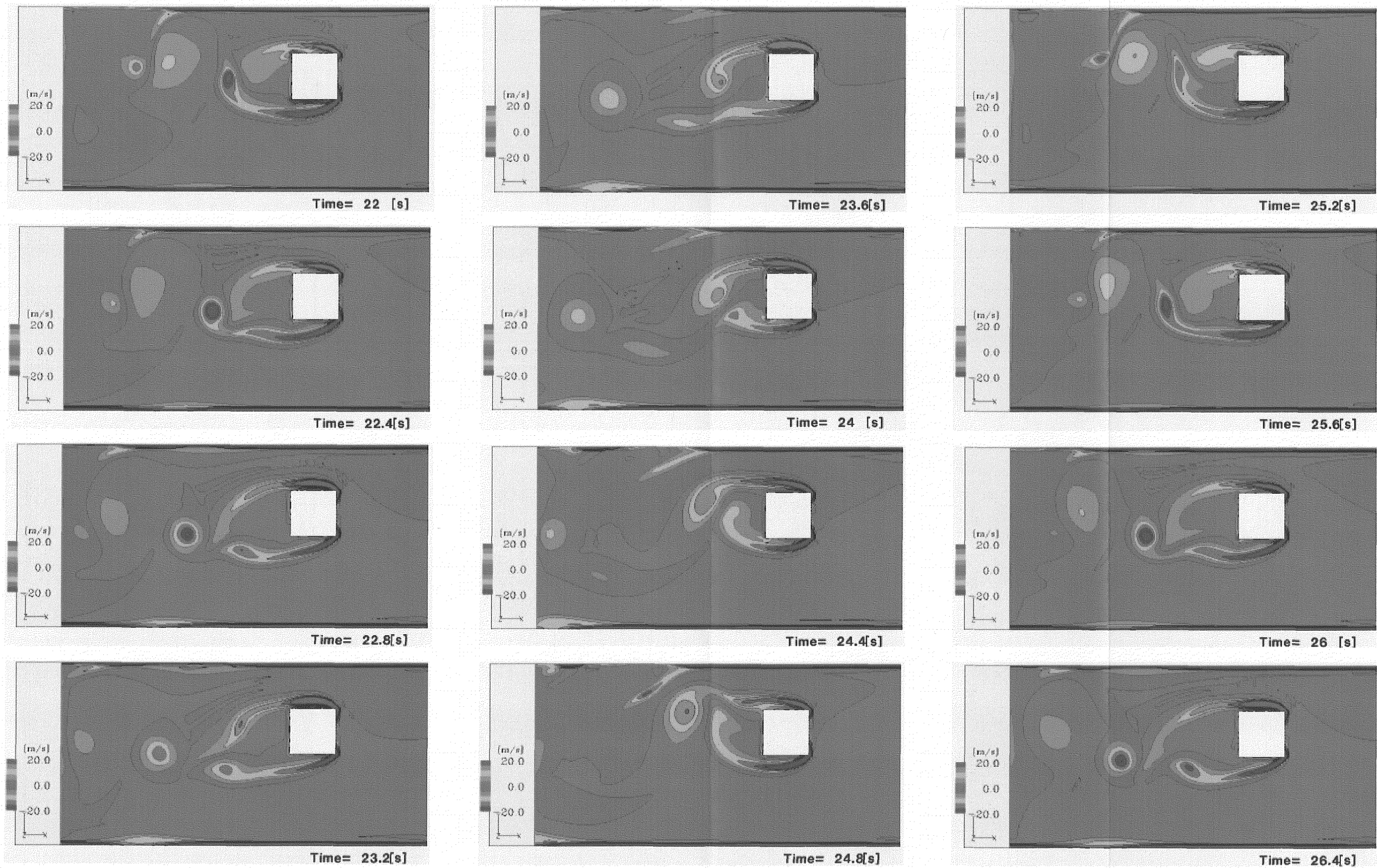
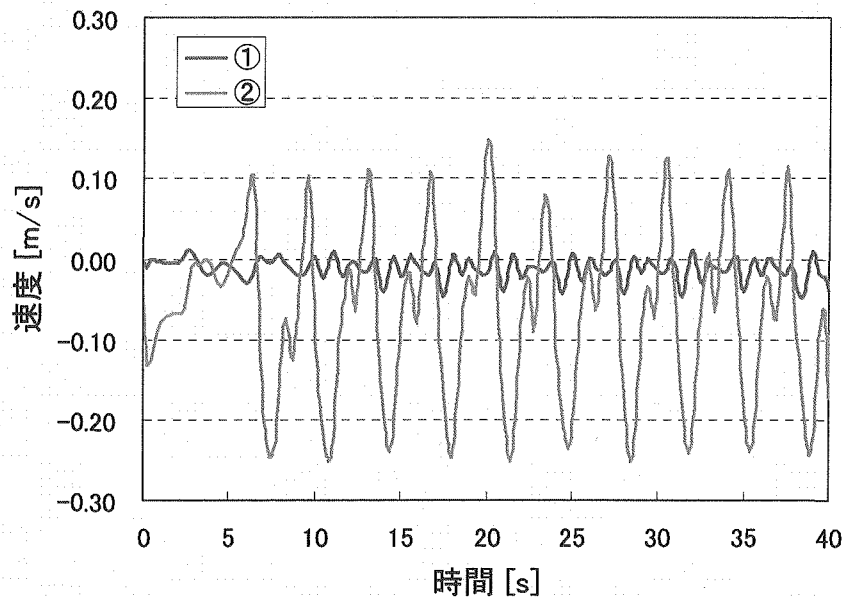
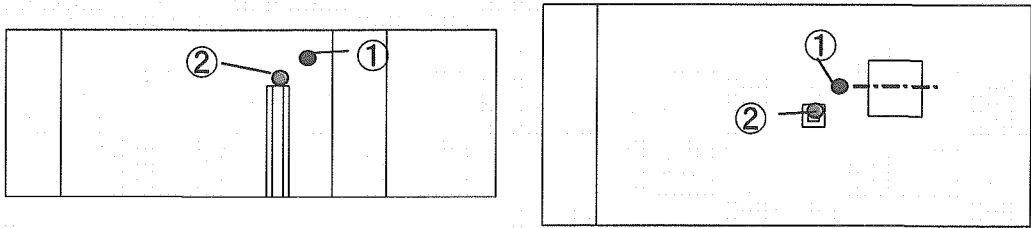
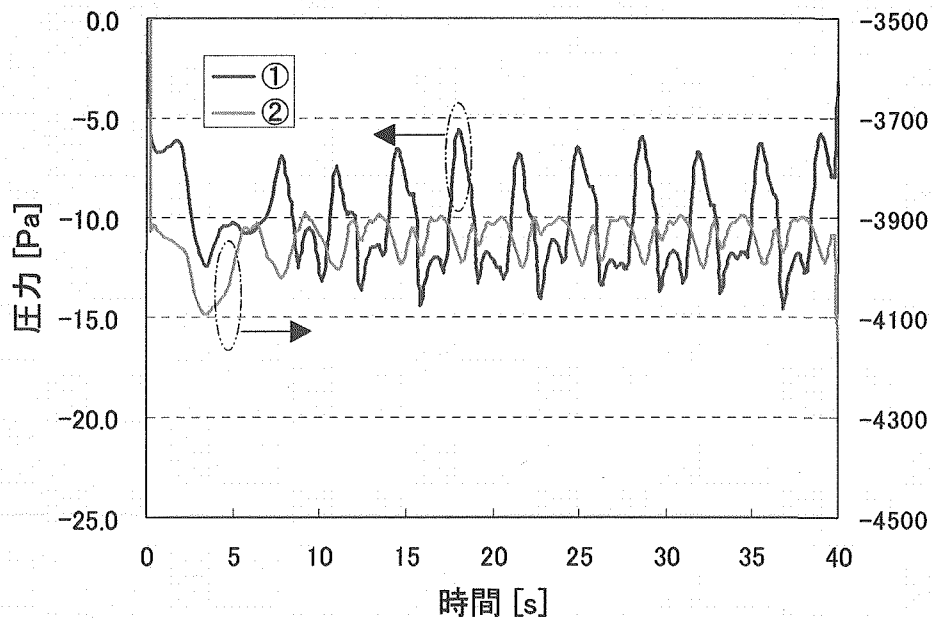


図 3.5.4-5 自由液面の渦度コンター：非線形 $k-\varepsilon$ モデル (Case KW-4)



(a) 速度変動



(b) 圧力変動

図 3.5.4-6 速度および圧力の変動履歴：非線形 $k-\epsilon$ モデル (Case KW-4)

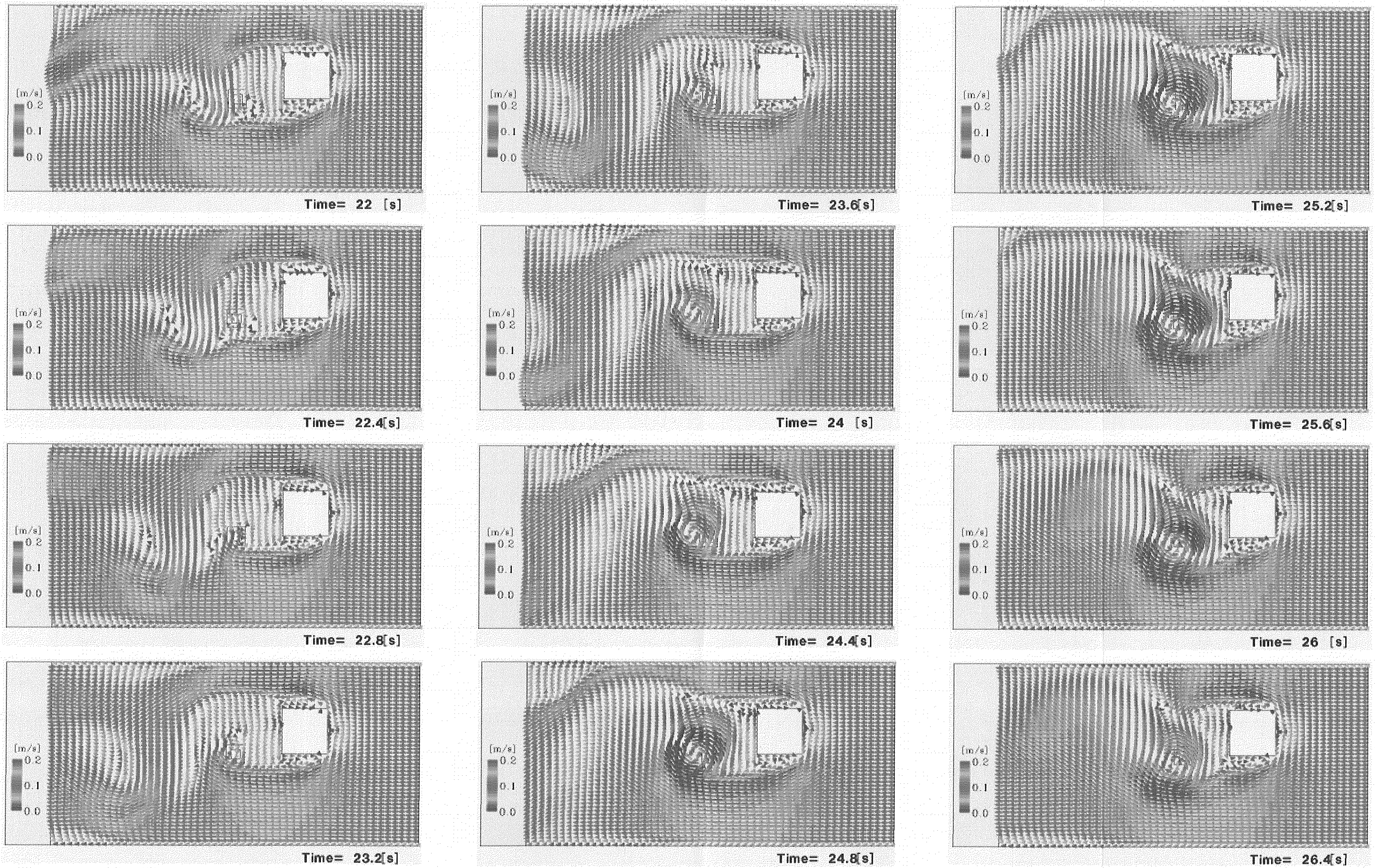


図 3.5.5-1 自由液面の速度ベクトル： $k-\omega$ モデル (Case KW-5)

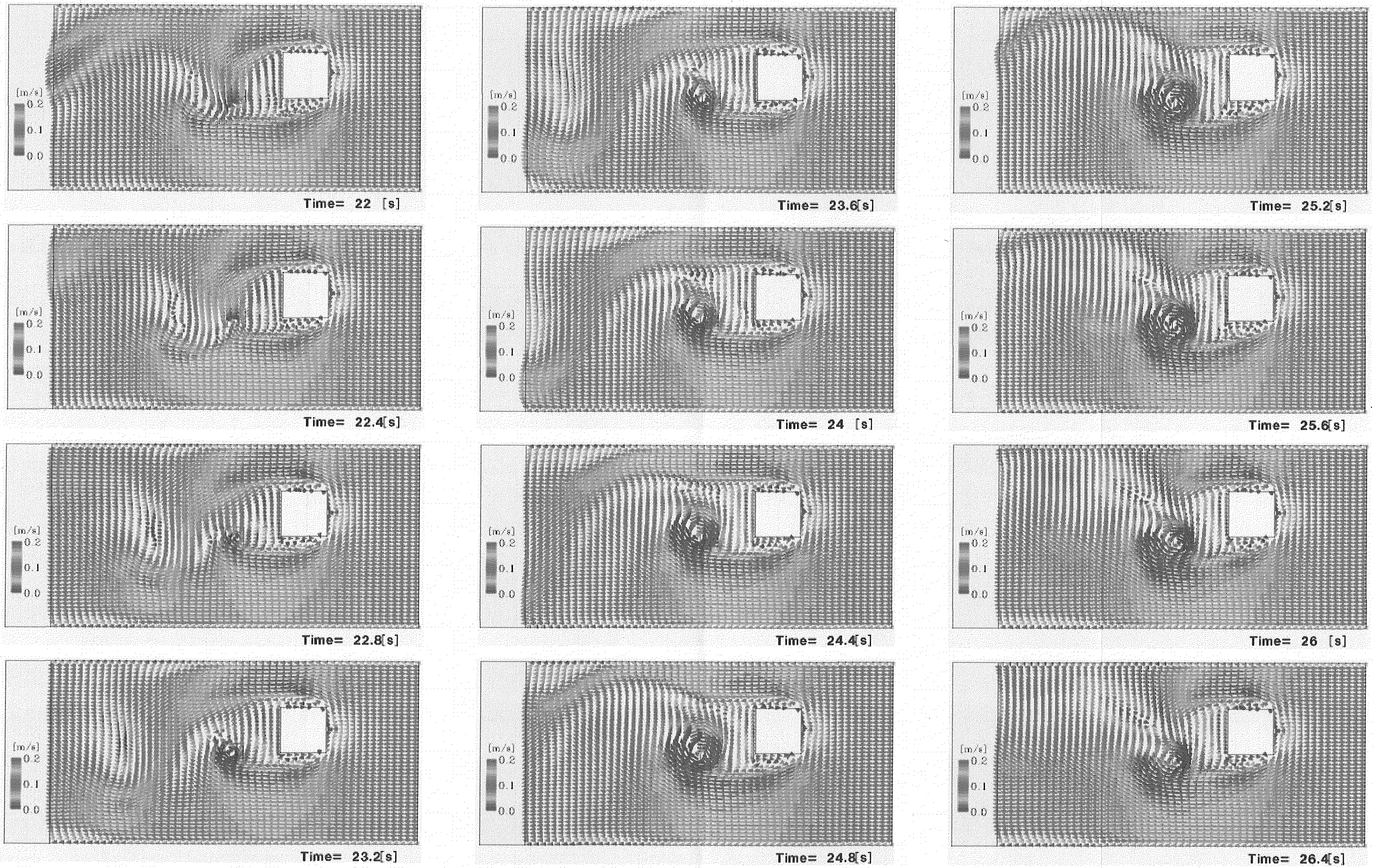


図 3.5.5-2 自由液面ー下降管入口間中央水平面の速度ベクトル：
k- ω モデル (Case KW-5)

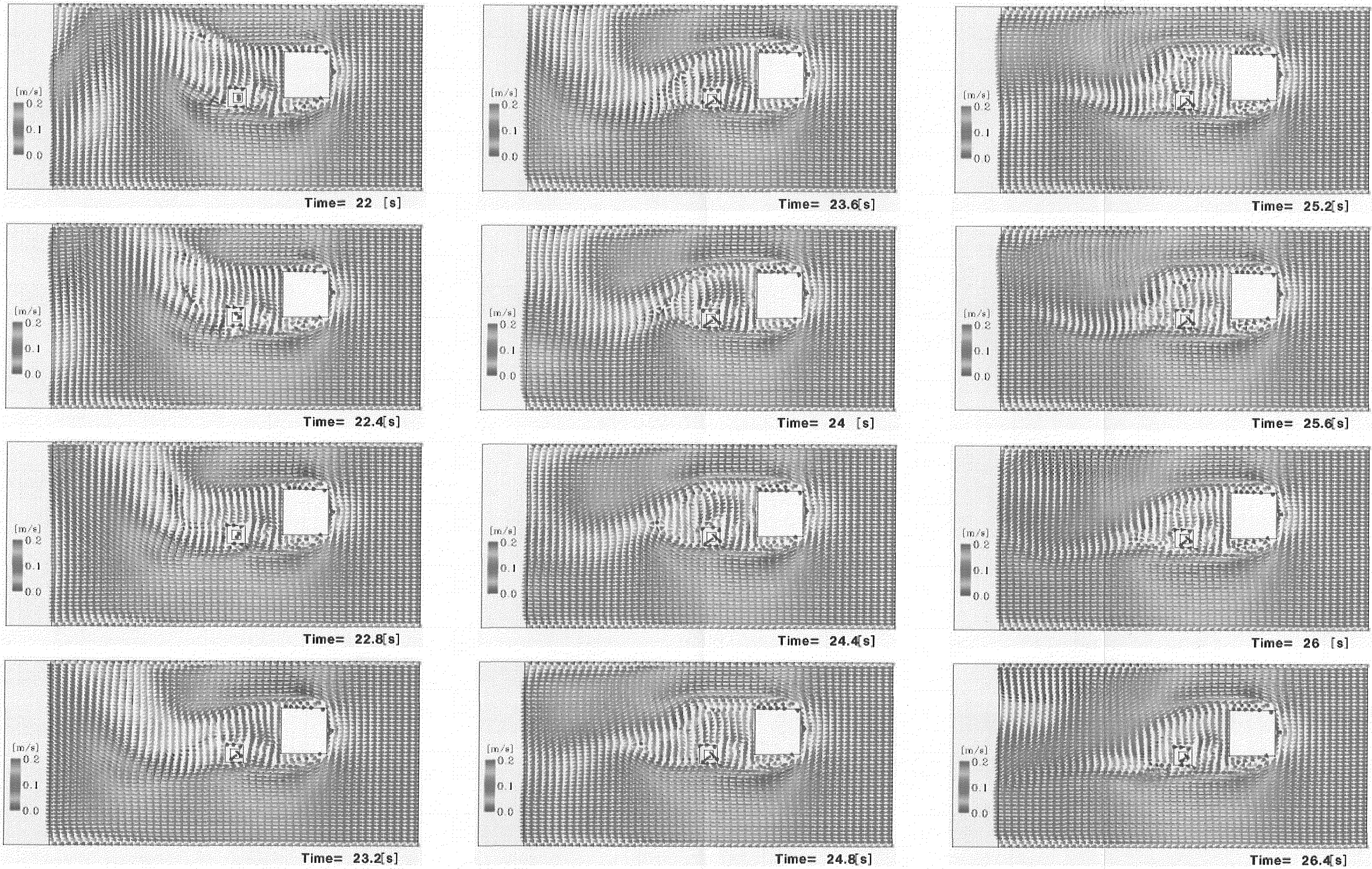


図 3.5.5-3 液深中央水平面の速度ベクトル: k - ω モデル (Case KW-5)

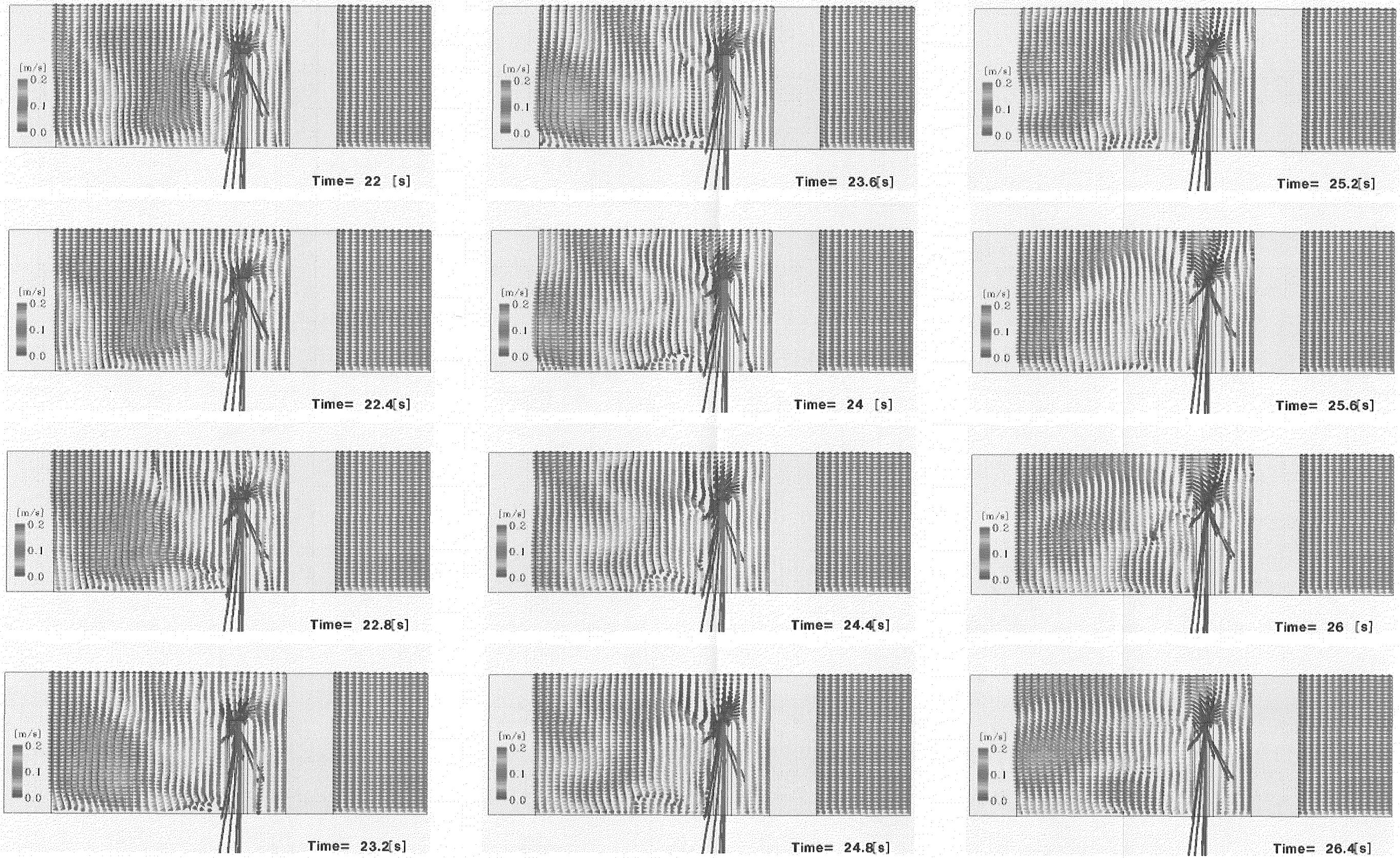


図 3.5.5-4 流路中央鉛直面の速度ベクトル: $k-\omega$ モデル (Case KW-5)

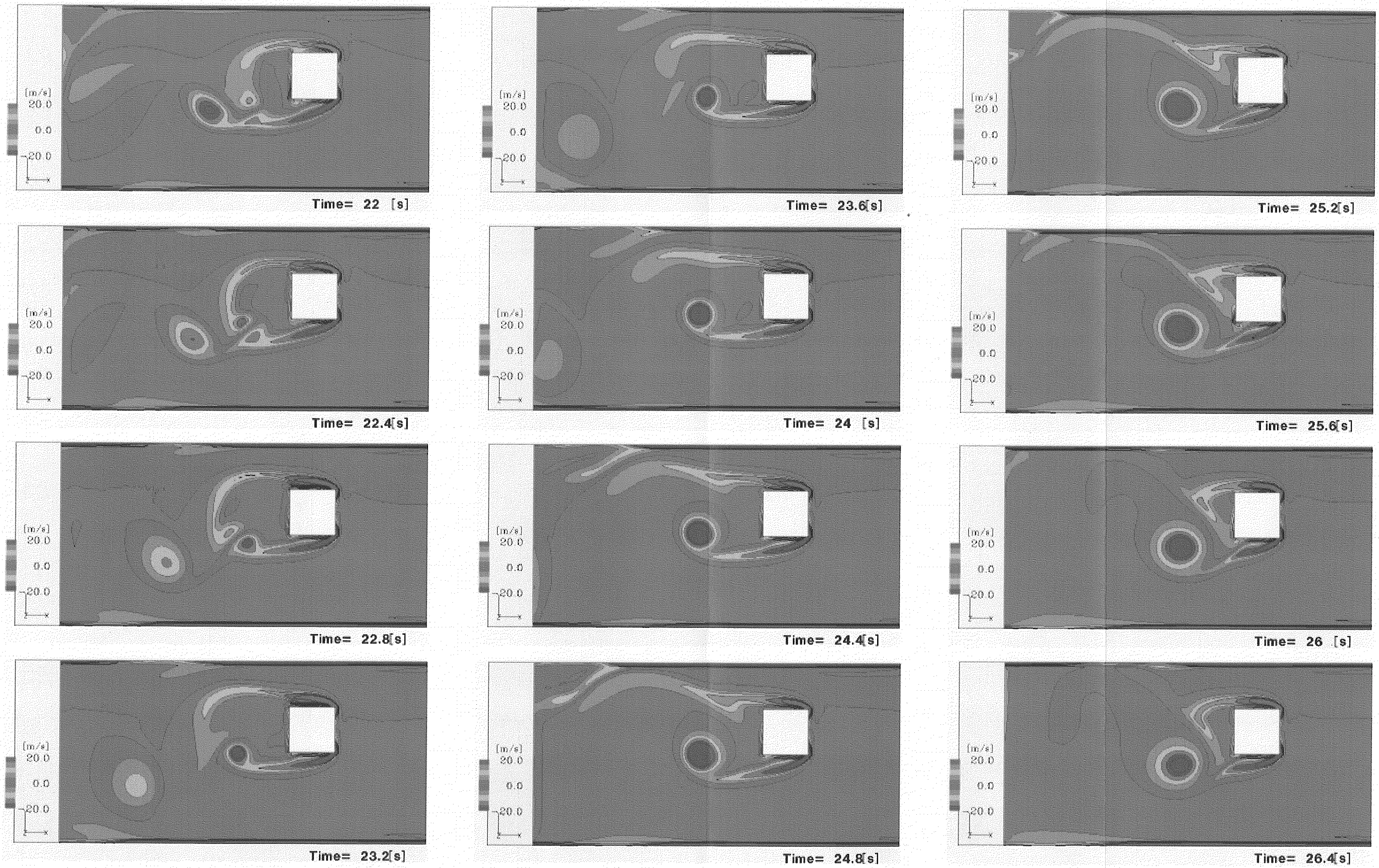
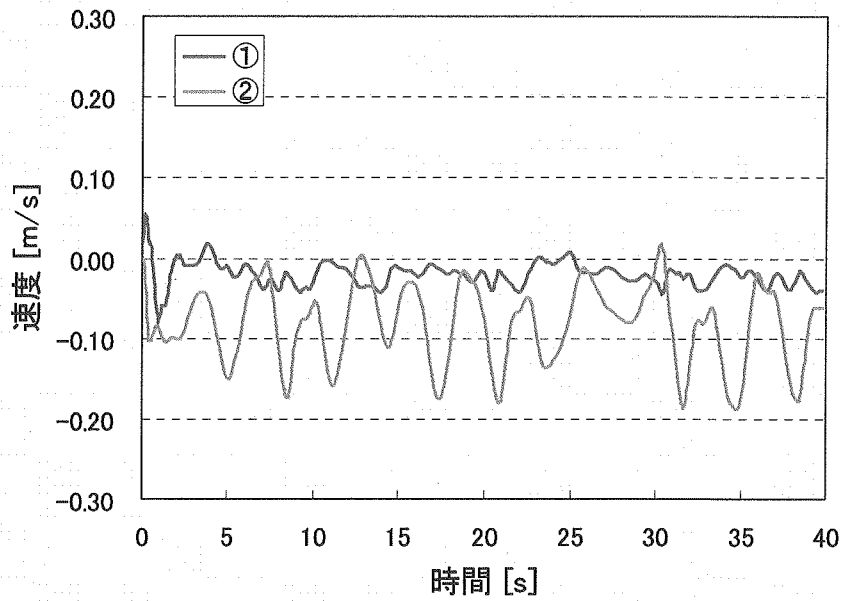
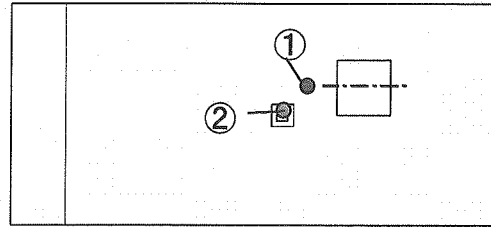
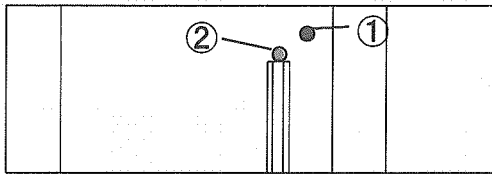
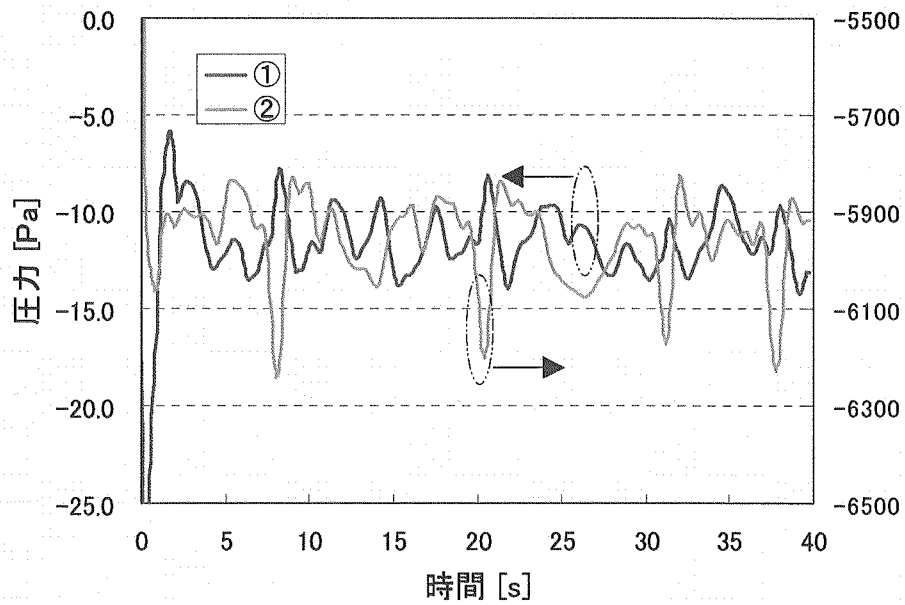


図 3.5.5 自由液面の渦度コンター： $k-\omega$ モデル (Case KW-5)



(a) 速度変動



(b) 圧力変動

図 3.5.5-6 速度および圧力の変動履歴： k - ω モデル (Case KW-5)