

連続溶融亜鉛めっき工程におけるパージ技術の開発 研究：酸素低減およびワイピング性能への影響

犬丸, 友希
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/3052471>

出版情報：九州大学, 2019, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：

令和元年度

修士論文

連続溶融亜鉛めっき工程におけるパージ技術の開発研究

～酸素低減およびワイピング性能への影響～

九州大学大学院総合理工学府
環境エネルギー工学専攻
エネルギー流体科学研究室

犬丸友希

指導教員 青木俊之 教授

提出年月日 令和2年2月5日

目次

第1章	序論	
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	連続溶融亜鉛めっき工程(CGL)の概要	1
1.1.2	ガスワイピング装置の概要	4
1.2	過去の研究	6
1.3	本研究の目的	6
1.4	本論文の構成	7
第2章	従来のシーリング技術およびパーシ新技術	
2.1	従来のシーリング技術	8
2.1.1	フルシーリング技術	8
2.1.2	パーシャルシーリング技術	9
2.1.3	アッパーシーリング技術	10
2.1.4	エアロダイナミックシーリング技術	12
2.2	パーシ新技術の提案および概要	15
第3章	解析モデルおよび数値解析手法	
3.1	ガスワイピング理論	16
3.1.1	基礎式	16
3.1.2	解法	19
3.1.3	ワイピングジェットの特性	20
3.2	亜音速噴流時における先細ノズルの流れ	21
3.3	支配方程式	23
3.4	乱流モデル	24
3.4.1	$k-\varepsilon$ モデル	24
3.4.2	RNG (Renormalization Group) $k-\varepsilon$ モデル	25
3.5	ソルバー理論	26
3.5.1	圧力ベースソルバー	27

3.5.1.1	圧力ベースの分離型アルゴリズム	27
3.5.1.2	圧力ベースの連成型アルゴリズム	28
3.5.2	スカラー輸送方程式	28
3.5.3	空間の離散化	29
3.5.3.1	一次精度風上差分法	29
3.5.3.2	二次精度風上差分法	29
3.5.4	時間の離散化	30
3.5.4.1	陰的時間積分	30
3.5.5	勾配と微分の評価	31
3.5.5.1	最小二乗セルベース法による勾配の評価	31
3.6	解析条件	32

第4章 解析結果および考察

4.1	ワイピングジェットの数値解析	38
4.1.1	ワイピングジェットのみの場合	38
4.1.2	シーリングジェットのみの場合	39
4.2	シングルパージジェットの数値解析	42
4.2.1	上部パージジェット	43
4.2.2	中部パージジェット	56
4.2.3	下部パージジェット	61
4.2.4	定常解析と非定常解析の比較	66
4.3	ドロス回収時におけるパージジェットの数値解析	69
4.3.1	シングルパージジェット(上部)	69
4.3.2	ダブルパージジェット	81
4.3.3	トリプルパージジェット	92
4.3.4	定常解析と非定常解析の比較	103
4.4	操業時におけるパージジェットの最適な圧力関係の検証	106
4.5	ドロス回収時におけるパージジェットの最適な圧力関係の検証	108
4.6	操業時とドロス回収時における装置内の比較検証	110

第5章 結論	114
参考文献	116
謝辭	118

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景⁽¹⁾

1.1.1 連続溶融亜鉛めっき工程(CGL)の概要

鋼板表面に亜鉛系溶融金属(溶融亜鉛)の薄膜を連続的に塗布する工程を、連続溶融亜鉛めっき工程(Continuous Galvanizing Line, 以後 CGL)という。この工程にて施された亜鉛めっき皮膜の大きな特長として、以下の二点が挙げられる。一つ目は、鋼板に対する防食皮膜として、雨風や直射日光にさらされる大気中で優れた耐食性を示すことである。これは亜鉛めっきの表面に緻密な保護皮膜が生成され、その皮膜が腐食の進行を抑えるためである。また、亜鉛めっき皮膜に傷が生じた場合でも、亜鉛の電気化学的な防食作用(犠牲防食作用)により露出部は腐食されないという長所がある。二つ目は、鋼板との密着性が極めて強固なことである。亜鉛めっき皮膜は鉄と亜鉛の合金層とその上の純亜鉛層により形成されており、この皮膜の密着性によって衝撃や摩擦等の外力を受けても容易に剥離することはない。そのため、ガードレールや橋梁、駅舎等に広く利用されている。

Fig.1.1 に典型的な CGL の概略図を示し、CGL の大まかな工程の流れを以下に説明する⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。最初は前処理部として冷間圧延され、コイル状に巻き取られた鋼板をシート状に戻し、表面をアルカリ性の液体で洗浄、乾燥させる。その後、鋼板は焼鈍炉に入って軟化され、所望の強度と成形性が付与される。焼鈍炉では、鋼板の表面で酸化鉄を鉄に還元するために炉内を 5%の水素と 95%の窒素の混合物から成る還元性ガス雰囲気下に維持する。この還元工程は、鋼板がめっき浴内に浸漬されている間に表面が完全に溶融亜鉛で覆われるために重要である。焼鈍した後、鋼板は 1~2.7m/s の速度で溶融亜鉛が入っているめっき浴に帯状で通される。めっき浴内は 450~480℃であり、その中で鋼板は溶融亜鉛と反応して表面に保護皮膜を形成する。鋼板はめっき浴から垂直に引き上げられてくると同時に過剰な溶融亜鉛を引き上げるため、窒素のワイピングジェットを吹き付けて余分な溶融亜鉛をめっき浴に戻すことで製品のめっき厚さを制御している。この手法はガスワイピング法と称され、鋼板および溶融亜鉛に非接触で亜鉛めっき付着量を制御でき、付着量均一性、薄めっき性および経済性に優れている等の利点がある⁽⁶⁾。ワイピングジェットにて鋼板表面の亜鉛めっき付着量を制御している様子を Fig.1.2 に示す。ワイピングジェット噴射後は鋼板を 60m ほどの高さまで引き上げ室温まで冷却し、スキンパスミルおよびテンションレベラーを通して表面仕上げと平滑化を行う。後処理として油を表面に塗布したのち、鋼板を

コイル状に巻き戻して本工程が終了となる。

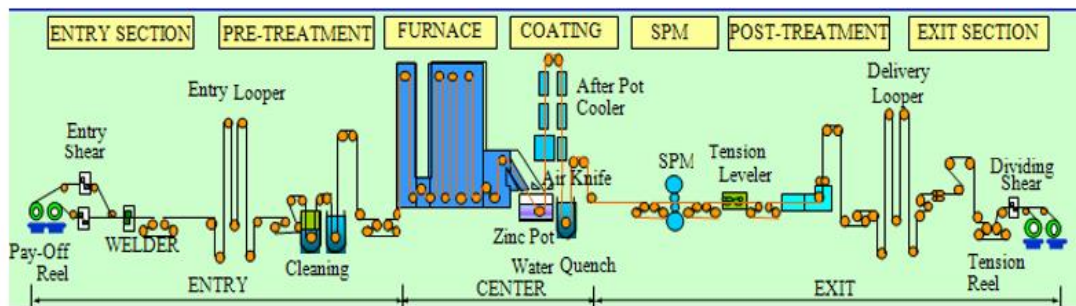


Fig.1.1 CGL 概略図(POSCO-MEXICO CGL)

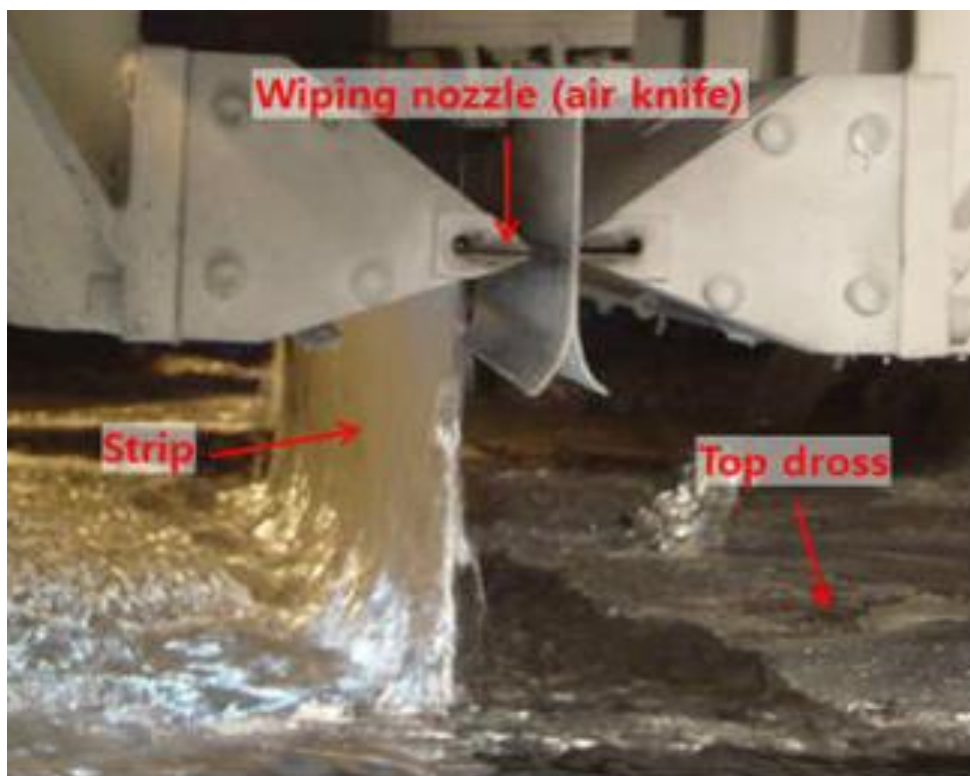


Fig.1.2 ワイピングジェット作動時の様子

Fig.1.3 に亜鉛めっき製品の概略図を示す。亜鉛系溶融金属は、主成分の亜鉛と 1~5%のアルミニウム、1~5%のマグネシウムから構成されている。アルミニウムおよびマグネシウムは、鉄と亜鉛の合金化反応を抑制することにより、鋼板表面への皮膜の密着性を向上させる働きをする。

しかしながら、CGLにおける亜鉛めっきの塗布は困難な工程とされている。その原因として、溶融状態におけるマグネシウムの酸化しやすさが挙げられる。鋼板に付着しためっきが固まる前に酸化した場合は製品の欠陥に繋がるので、表面の酸化を抑制し品質を保つ必要がある。そのため、ガスワイピング装置付近を壁面で囲い、内部を不活性雰囲気にすることで酸化を抑制するシーリング技術が開発されてきた。めっき付着量によって異なるが、一般的には鋼板付近の酸素濃度は 10%以下に維持することが必要である⁽⁷⁾。Fig.1.4 に、シールド領域を設けた場合と設けない場合の表面品質の差異を表している。Fig.1.4 より、シールド領域無しの場合には表面に縞模様などの欠陥が見られるのに対し、シールド領域有りの場合における表面欠陥は見られないことがわかる。

これまでに開発された代表的なシーリング技術については、第 2 章で説明する。

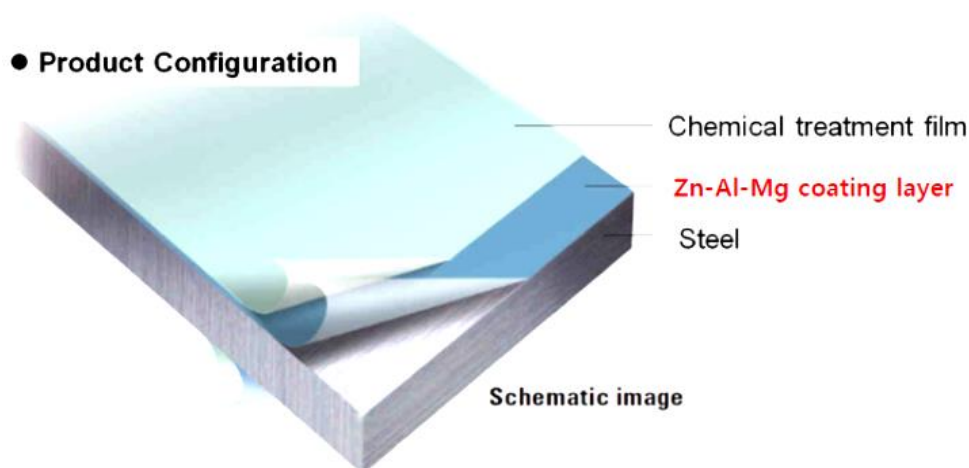


Fig.1.3 亜鉛めっき製品概略図



(a) シールド領域無し

(b) シールド領域有り

Fig.1.4 シールド領域の有無による表面品質の比較

1.1.2 ガスワイピング装置の概要

Fig.1.5 にガスワイピング装置図およびノズル出口拡大図を示す。この設備を用いてタンク内に貯蔵された窒素を装置に送り込み、ノズル出口から噴出する。鋼板表面に塗布する亜鉛めっき量は製品によって異なるが、一般的には $60\sim 275\text{g/m}^2$ となるよう制御される。

ガスワイピング装置によって鋼板表面に亜鉛めっきを施す際、鋼板に付着した熔融亜鉛の一部がワイピングジェットによって周囲に吹き飛ばされる。この現象はスプラッシュと称される。また、スプラッシュが空気によって酸化され、ドロスと呼ばれる金属酸化物となる。スプラッシュおよびドロスの生成過程を Fig.1.6 に示す。これがガスワイピング装置やめっき浴表面に堆積し、鋼板表面に付着するとめっきの品質を損なう原因となるため、ドロスは定期的に取り除く必要がある。

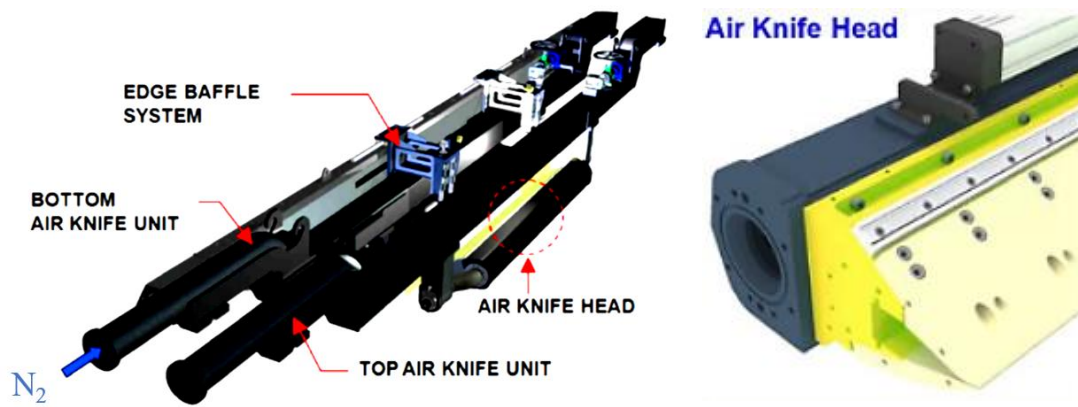


Fig.1.5 ガスワイピング装置図およびノズル出口拡大図

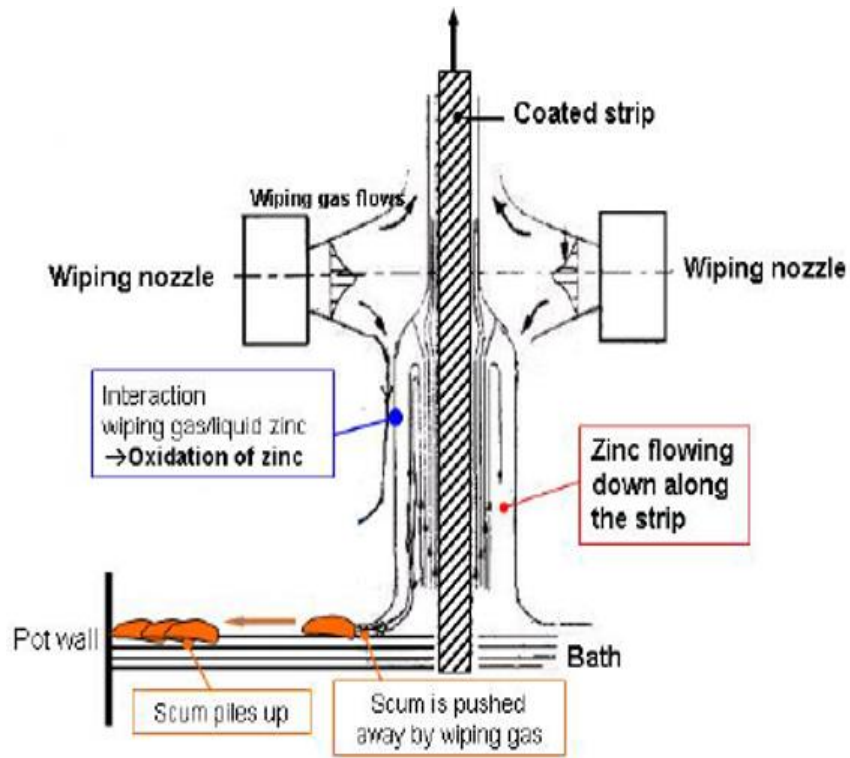


Fig.1.6 スplashおよびドロスの生成過程

1.2 過去の研究

過去の研究では、ガスワイピング装置およびめっき浴に生成したドロスの速やかな回収、かつ外部からの空気を遮断することでワイピングジェット噴射域付近の酸素濃度を低減させることを可能とする新たなシーリング技術の開発である。シーリングジェットの設計について、噴出ノズルの位置や圧力を変えてシールド領域内の渦、ワイピングジェットの鋼板衝突圧力、衝突圧力勾配、およびせん断応力を評価の対象としていた。上下非対称シーリングジェットの場合、圧力分布やせん断応力は鋼板のめっきに与える影響はほとんどみられないことがわかった。また、窒素質量分率が領域内全域で90%以上を維持し、ジェット間隔を大きくするほど良好な性能を発揮した。シーリングジェットの噴出を上下反転させた場合、流れ場は安定しなくなるため、シールド領域側は下部からのシーリングジェットが適していた。また、定常解析と非定常解析との比較より、85mm間隔では噴出後0.5s程度で定常流れとなった。したがって、エアロダイナミックシーリング技術では、上下非対称シーリングジェット(ジェット間隔85mm)が最も良好な位置であることがわかった。

しかし、ガスワイピング装置およびめっき浴に生成したドロスを回収するにはシーリングジェットを止めなければならない。それによって外部からの空気を遮断できず、領域内や鋼板付近の窒素質量分率が低下してしまう。

1.3 本研究の目的

CGLのような製品を連続的に生産する工程では、ライン速度を上昇することで生産量を増加させることができる。CGLにおいて、めっき付着量はガスワイピング法によって制御される。鋼板がめっき浴を通過した直後に鋼板に付着する溶融亜鉛の初期量は、溶融亜鉛の粘性のためにライン速度の上昇と共に増加する。そのため、めっき付着量を所望の範囲内に制御するためにはワイピングジェットの圧力を高い値に設定する必要がある。しかしながら、ワイピングジェットの高圧化によって溶融亜鉛のスプラッシュおよびドロスの生成量が増加し、これによって亜鉛めっき表面の品質劣化に繋がってしまう。そのためスプラッシュ量の低下とドロスの速やかな回収が必要となる。またドロス回収時は外部流れを遮断させるシーリングジェットを停止させなければならない。製品表面の美しさを保つためには亜鉛めっき表面の酸化を防ぐ必要があり、これらの問題を解決するための新たな技術が必要とされている。

本研究の目的は、操業中におけるガスワイピング装置内のワイピングジェット噴射域付

近のさらなる酸素濃度を低減，かつドロス回収時における酸素濃度を低減させることを可能とするパージ技術の開発である．本研究では，これらの性能を有する新たなシーリング技術を設計したのち，ANSYS 社の汎用流体解析ソフトウェアである **Fluent** ならびに可視化ソフトウェアである **CFD Post**⁽⁸⁾を用いて設計の妥当性を判断するとともに，パージ技術の提案を行うことを目的とする．

1.4 本論文の構成

本論文は全 5 章より構成されている．

第 1 章では，本研究の背景，目的，本論文の構成について述べている．

第 2 章では，従来のシーリング技術および新しく提案するパージ技術について述べている．

第 3 章では，本研究で用いた理論ならびに解析方法について述べている．

第 4 章では，解析から得られた結果とその考察について述べている．

第 5 章では，第 4 章の結果および考察から得られた本論文の結論を述べている．

第2章 従来のシーリング技術およびパージ新技術

本章では，2.1節で従来のシーリング技術について述べ，2.2節で本研究にて提案するパージ新技術の概念ならびに設計について説明する．パージ新技術は，第1章で述べた従来のシーリング技術の欠点を改善するように設計をしている．

2.1 従来のシーリング技術

2.1.1 フルシーリング技術

Fig.2.1 にフルシーリング装置の概略図を示す^{(9),(10)}．この装置は，鋼板を囲むボックス状の壁内にガスワイピング装置全体を覆うように設置されている．これにより，めっき浴から出てきた鋼板を外部空気から遮断することが可能である．Fig.2.1 中の 6a に示すように，フルシーリング装置の下部はめっき浴中に設置され，Fig.2.1 中の 7 で示すスリット状の開口部から鋼板を通過させている．Fig.2.1 中の 5 に示すワイピングノズルからワイピングジェットが噴出されることによってめっき厚さを制御することに加え，不活性ガスとしてワイピングジェットに採用されている窒素がボックス内に充填されることで効率よく酸素を置換することができることが利点である．しかしながら，装置全体が壁で覆われているため，ワイピングノズルのメンテナンスやボックス内に堆積したドロスの除去が困難であり，これらの作業が非効率的であることが欠点として挙げられる．

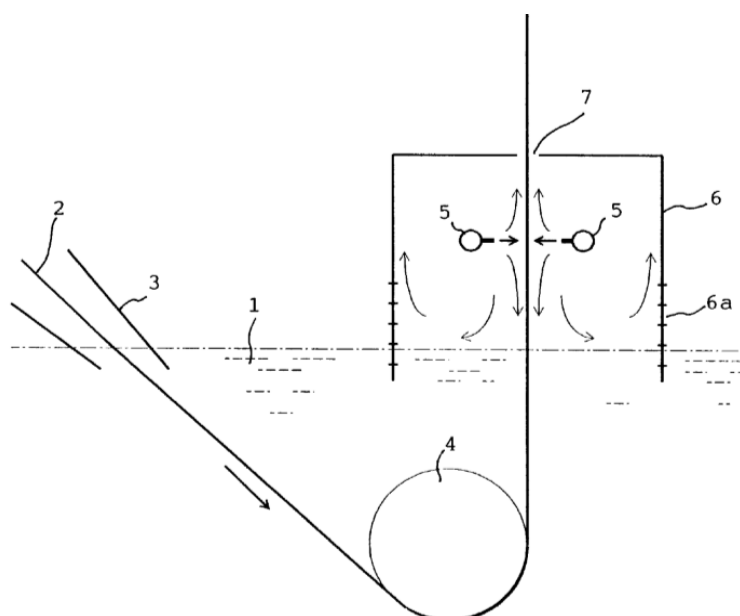


Fig.2.1 フルシーリング装置概略図

2.1.2 パーシャルシーリング技術

Fig.2.2 にパーシャルシーリング装置の概略図を示す⁽¹¹⁾。これはガスワイピング装置のノズル付近のみを覆ったものであり、ガスワイピング装置付近のジェット流れをより視認しやすい設計となっている。Fig.2.2 の 13 に示す壁により、Fig.2.2 の 12 に示すワイピングジェット噴出口の周囲を外部空気から遮断している。また、ボックスには鋼板付近に鋼板が通過するためのスリットがあるのみである。そのため、ワイピングジェットから噴出された窒素の大部分はボックス内に留まり、ボックス内の酸素を窒素に置換することが可能である。またこの技術によってめっき浴表面は壁で覆われないため、フルシーリング技術では困難であったトップドロスの除去が容易に行えるようになった。しかしながらワイピングノズルと一体で設置されているため、鋼板とワイピングノズル間の距離を調整してめっき付着量を制御する等の変更ができないという欠点がある。

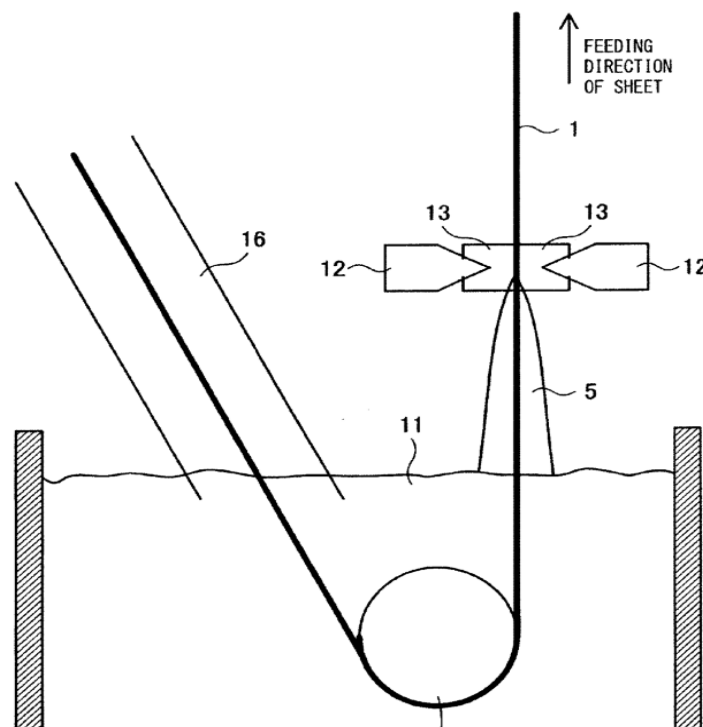


Fig.2.2 パーシャルシーリング装置概略図

2.1.3 アッパーシーリング技術

Fig.2.3 にアッパーシーリング装置の概略図を示す⁽¹²⁾。これは Fig.2.3 の 17 より噴出されるワイピングジェットが吹き付けられる範囲の下流域(ワイピングジェット噴射後の鋼板に相当する領域)を壁で囲んでいる。ボックスの上部には鋼板を通過させるためのスリットが設けられている。この技術によってボックス内に窒素が充填されるので、ワイピングジェット下流の酸素を窒素に置換することが可能である。まためっき浴のトップドロスを容易に回収でき、ワイピングジェットも視認することができるため付着量の制御も可能となった。しかしながら、長期間の操業にて発生する装置内のドロスを除去する際、それを操業中に除去することは不可能となるため一旦操業を停止する必要があることが欠点として挙げられる。

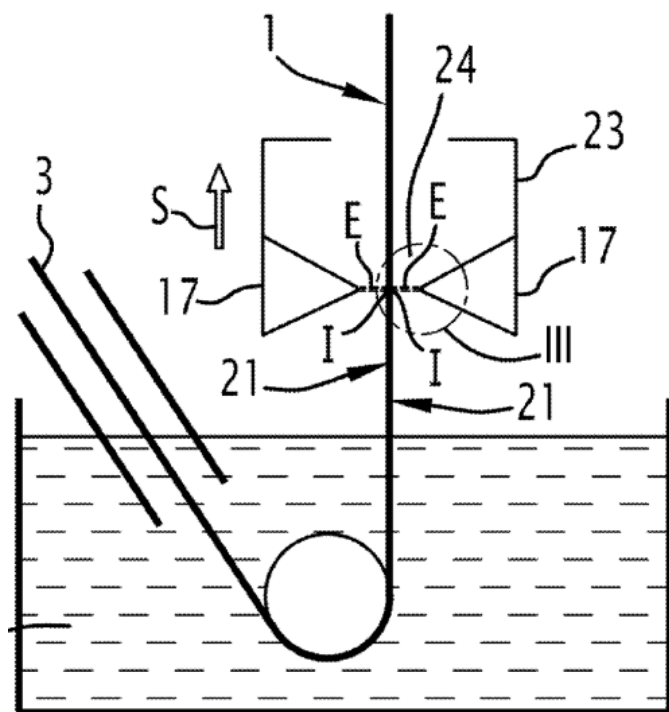
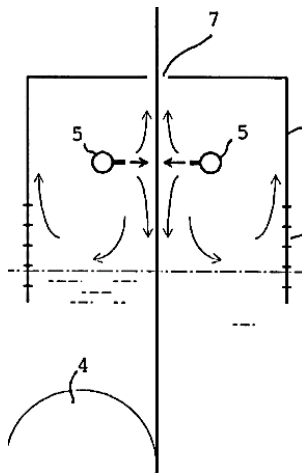
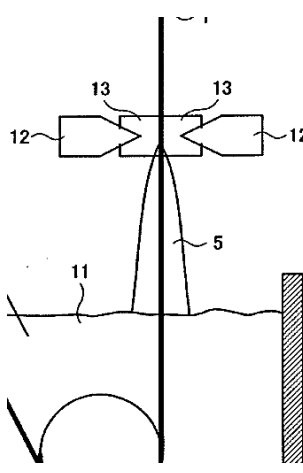
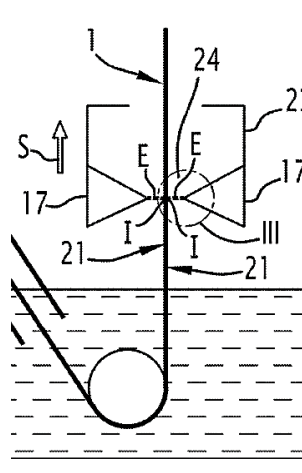


Fig.2.3 アッパーシーリング装置概略図

以上が代表的なシーリング技術であり、それらの特長を纏めたものを Table2.1 に示す。各技術について 5 つの項目に分け、それぞれの評価を○(適切)、△(中程度)、×(不適切)の 3 段階で表した。Table2.1 からわかる通り、どの技術も 5 項目を完全に達成したものは無いと考える。

Table2.1 従来のシーリング技術の性能

項目	フル シーリング技術	パーシャル シーリング技術	アッパー シーリング技術
装置概略図			
シーリング効率	○	△	×
ドロス排除効率	×	○	○
ワイピングジェット 制御性	×	×	△
製品生産効率	×	×	○

2.1.4 エアロダイナミックシーリング技術

Fig.2.4 にエアロダイナミックシーリング技術の概略図， Fig.2.5 に各ジェットの設定，噴出方向， Fig.2.6 はシーリングジェットによって作られるシーリングゾーンならびにシールド領域を示す． Fig.2.4 に示すように，ガスワイピング装置とメインフレームには複数のシーリングジェットノズルを持つジェットモジュールが備わっている．ジェットモジュールから上下方向に噴出されるジェットにより，外部流れを遮断するとともに内部流れもシールド領域内に留める役割を果たすと考える．また， Fig.2.4 中の①は水平シーリングジェットであり，これを鋼板方向に水平に噴出することによってメインフレーム上部からの外部流れの流入を防ぐ役割として設置されている．ガスワイピング装置下部からの外部流れは，めっき厚さを制御するワイピングジェットが噴出しているため，シールド領域内に流入しないと考える．

噴流は全て窒素を使用しているため，シールド領域は各ジェットによって窒素で満たされ，周囲空気よりもはるかに低い酸素濃度を維持することが可能である．また，本装置もガスワイピング装置上に設計しているため，めっき浴表面のドロスを容易に回収できる．ガスワイピング装置付近に堆積したドロスの回収時はシーリングジェットを一時停止するだけで良いため，CGL の操業を停止することなくドロスを回収することが可能である．また，壁で囲うよりもシールド領域内を視認しやすくなっているため，ガスワイピング装置のメンテナンスやドロスの堆積状況の確認を効率良く行うことができる．

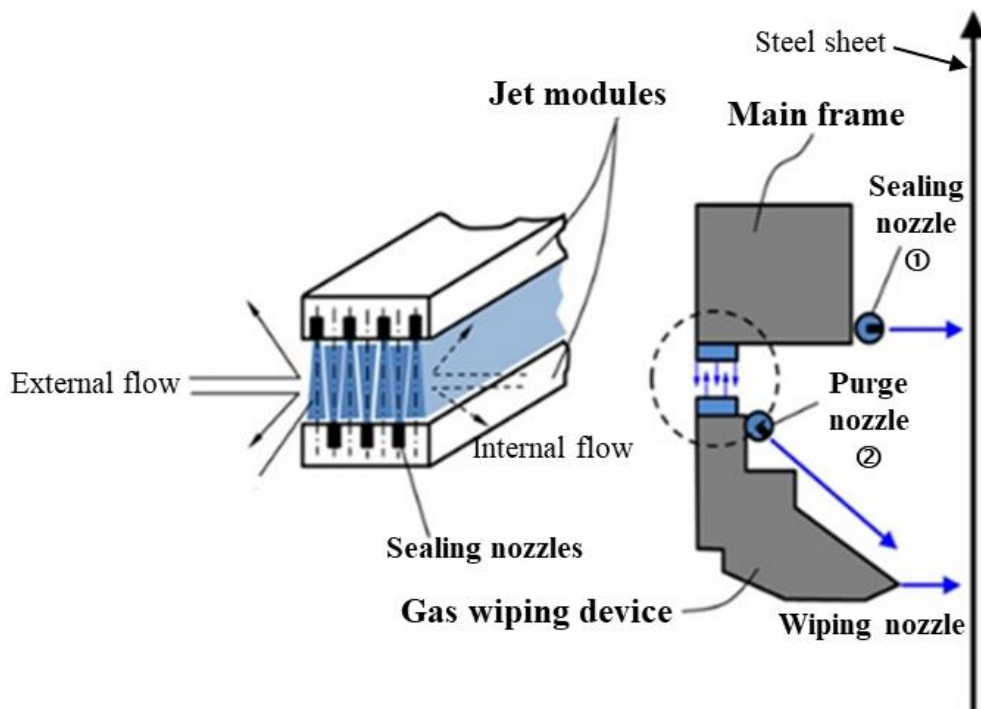


Fig.2.4 エアロダイナミックシーリング技術概略図

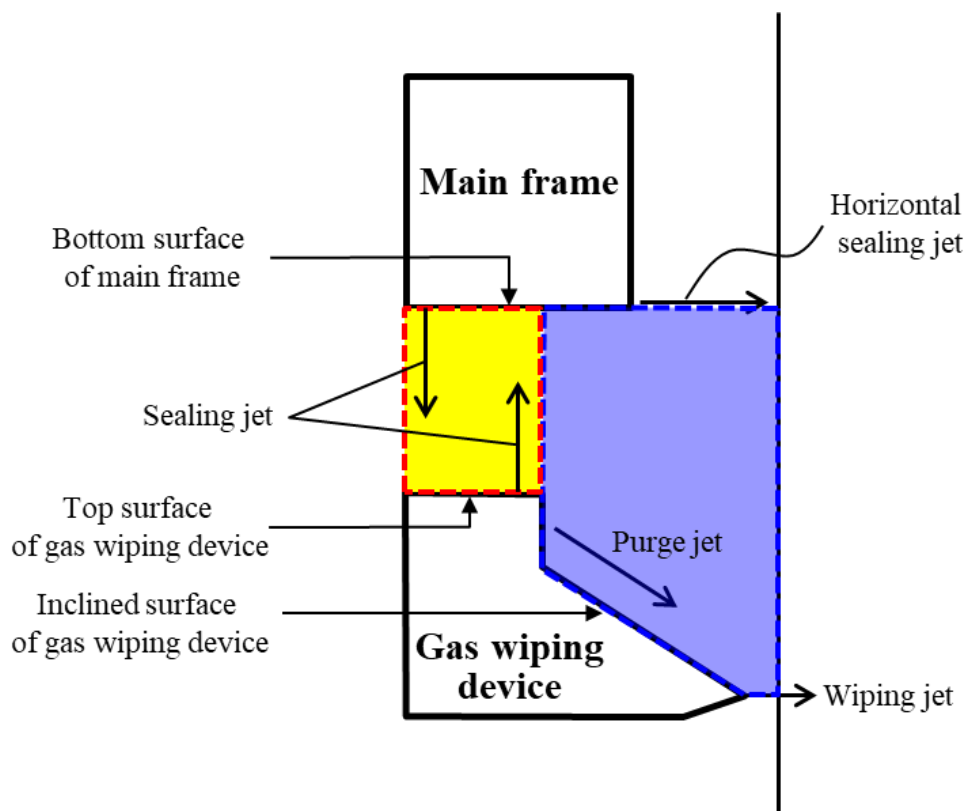


Fig.2.5 各ジェットの設定ならびに噴出方向

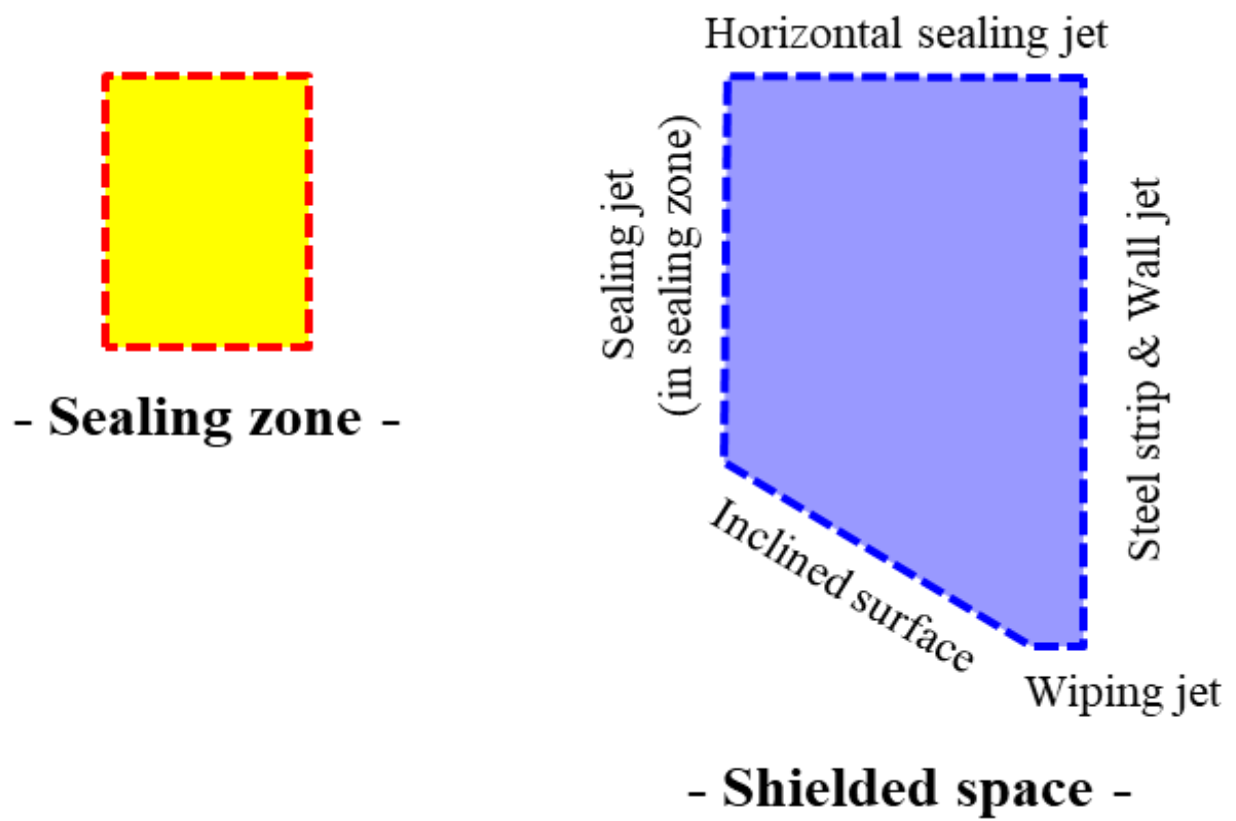


Fig.2.6 シーリング領域およびシールド領域図

2.2 パージ新技術の提案および概要

従来のシーリング技術はメンテナンス時やドロス回収時に操業を停止せず、複数箇所から窒素噴流を噴出することで壁と同じ役割を果たし外部空気を遮断していた。しかし、ドロス回収時には窒素噴流を止めなければならない。それによって遮蔽空間(シールド領域)の窒素濃度が低下し、鋼板に付着しためっき表面が酸化しやすくなり品質を保持できなくなる欠点がある。そのため、装置壁面の複数箇所から窒素噴流を噴出することで窒素濃度の低減を果たすパージ技術を提案する。Fig.2.7 にパージ技術の概略図を示す。Fig.2.7 に示すように、パージノズルジェットはガスワイピング装置に設置され、窒素ガスを斜め方向に噴出することでシールド領域内を窒素雰囲気中に置換し⁽¹³⁾、さらなるめっき表面の酸化を抑制し品質を保つ役割を果たすと考える。

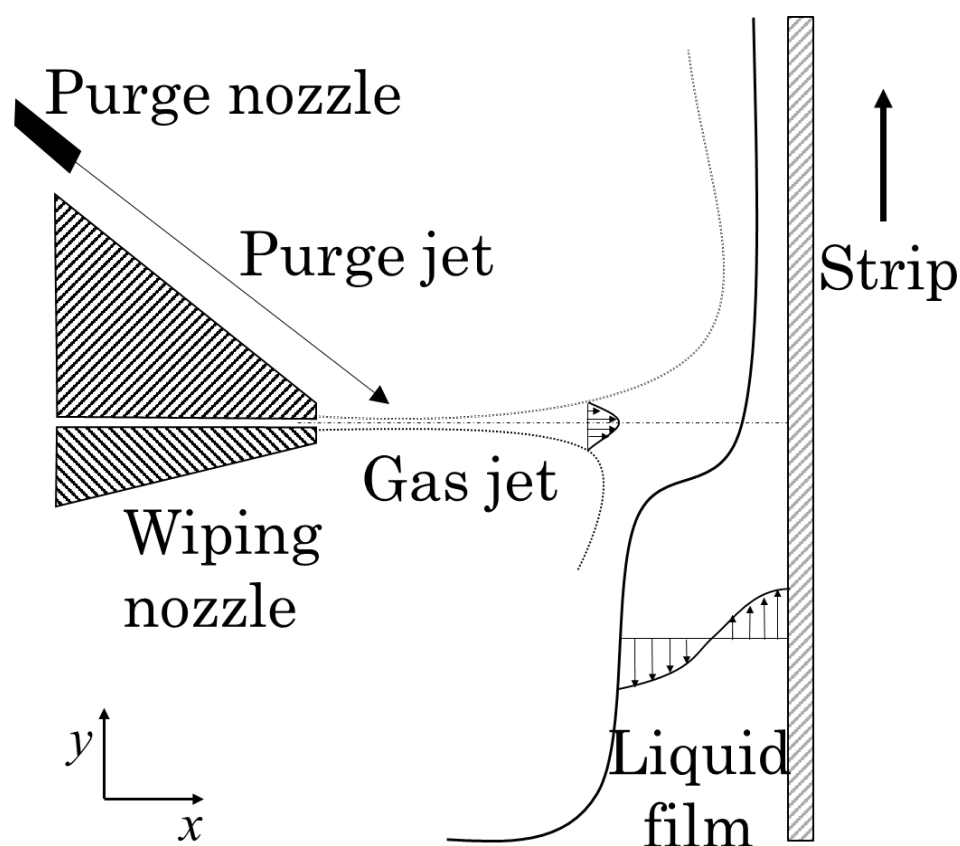


Fig.2.7 パージ技術概略図

第3章 解析モデルおよび数値解析手法

本章では、第2章で提案したシーリング新技術の概念および設計を検証するために、本研究で使用する解析モデルについて説明する。最初にガスワイピング法の理論について述べ、その後数値解析に適用する支配方程式や乱流モデルについて述べている。

3.1 ガスワイピング理論⁽⁶⁾

3.1.1 基礎式

第1章で述べたように、近年のCGLにおけるめっき付着量制御にはガスワイピング法が採用されている。溶融めっきにおける鋼板の引き上げプロセスに関しては、Hrbek⁽¹⁴⁾が最初に理論的な取り扱いを行い、鋼板への付着液膜内の速度分布を仮定することによってめっき付着量の推定式を導き、さらに実際の錫めっきラインのデータを基にロールワイピングの影響について検討を行っている。Thornton et al⁽¹⁵⁾は、ワイピングジェットによる圧力勾配を考慮する代わりに重力項を無視し、液膜厚さはワイピングジェットの圧力勾配が最大になる位置で決定されるとしてめっき付着量の推定式を導いている。その後、Tuck⁽¹⁶⁾、Tuck et al⁽¹⁷⁾およびEllen et al⁽¹⁸⁾により液膜の安定性、表面張力およびワイピングジェットのせん断応力の影響についての理論的検討が行われてきた。

ガスワイピングによるめっき付着量制御機構として、以下に示す考え方が知られている。Fig.3.1に示すように、めっき浴から引き上げられる鋼板に付着しためっき液膜にワイピングジェットの衝突圧力と衝突後鋼板に沿って流れる壁面衝突ジェットのせん断応力が作用するとして、この液膜流れを次の仮定の下にモデル化する⁽¹⁹⁾。

[仮定]

- ①鋼板面上の液膜流れは二次元定常層流とし、鋼板に平行な方向の流れに対して、鋼板垂直な方向の流れは十分小さいとする
- ②めっき液の表面張力、酸化、鋼板の表面粗さ、合金化現象は無視する
- ③鋼板とめっき層の界面はすべらない

鋼板上の駅流れに対する運動方程式および質量保存式は次式となる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} - g + \frac{\mu_l}{\rho_l} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

境界条件は，鋼板面上で液膜にすべりが無いことおよび液膜表面にワイピングジェットによる衝突圧力 $P_\omega(x)$ とせん断応力 $\tau_\omega(x)$ が働くことより次式となる．

$$\begin{cases} u(x, y)|_{y=0} = V_s \\ P(x)|_{y=\delta(x)} = P_\omega(x) \\ \mu_l \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} |_{y=\delta(x)} = \tau_\omega(x) \end{cases} \quad (3.3)$$

よって，(3.1)および(3.2)式を(3.3)式の境界条件のもとに解くと液膜の速度分布は次式となる．

$$u(x, y) = V_s + \frac{\tau_\omega(x)}{\mu_l} y - \frac{1}{\mu_l} \left\{ \frac{dP_\omega(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \left\{ \delta(x) - \frac{y}{2} \right\} y \quad (3.4)$$

鋼板による単位幅当りの液体持ち上げ量は，

$$q = \int_0^{\delta(x)} u(x, y) dy = V_s \delta(x) + \frac{\tau_\omega(x)}{2\mu_l} \delta^2(x) - \frac{1}{3\mu_l} \left\{ \frac{dP_\omega(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^3(x) \quad (3.5)$$

となり，平均膜厚 δ_m は次式となる．

$$\begin{aligned} \delta_m &= \frac{q}{V_s} = \delta(x) + \frac{\tau_\omega(x)}{2\mu_l V_s} \delta^2(x) - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left\{ \frac{dP_\omega(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^3(x) \\ &= \delta(x) \left[1 + \frac{\tau_\omega(x)}{2\mu_l V_s} \delta(x) - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left\{ \frac{dP_\omega(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^2(x) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで，無次元化のために

$$\begin{cases} \delta_m^* = \frac{\delta_m}{\sqrt{\frac{\mu_l V_s}{\rho_l g}}} \\ \delta^*(\eta) = \frac{\delta(\eta)}{\sqrt{\frac{\mu_l V_s}{\rho_l g}}} \\ P_\omega^*(\eta) = 1 + \frac{1}{\rho_l g b_p} \frac{dP_\omega(\eta)}{d\eta} \\ \tau_\omega^*(\eta) = \frac{\tau_\omega(\eta)}{\sqrt{\rho_l \mu_l g V_s}} \end{cases} \quad (3.7)$$

ただし，

$$\eta = \frac{x}{b_p} \quad (3.8)$$

とすると，(3.6)式は次式となる．

$$\begin{aligned} \delta_m^* &= \delta^*(\eta) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \tau_\omega^*(\eta) \delta^*(\eta) - \frac{1}{3} P_\omega^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \right\} \\ &= h\{\delta^*(\eta)\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

また，液膜内の無次元速度分布は

$$u^*(\eta, \xi) = \frac{u(x, y)}{V_s} = 1 + \tau_\omega^*(\eta) \delta^*(\eta) \xi - P_\omega^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \left(1 - \frac{1}{2} \xi \right) \xi \quad (3.10)$$

ただし,

$$\xi = \frac{y}{\delta(\eta)} \quad (3.11)$$

となり, 液膜表面の無次元流速は次式となる.

$$\begin{aligned} u_s^*(\eta) &= u_s(x) \\ &= 1 + \tau_\omega^*(\eta)\delta(\eta) - \frac{1}{2}P_\omega^*(\eta)\delta^{*2}(\eta) \end{aligned} \quad (3.12)$$

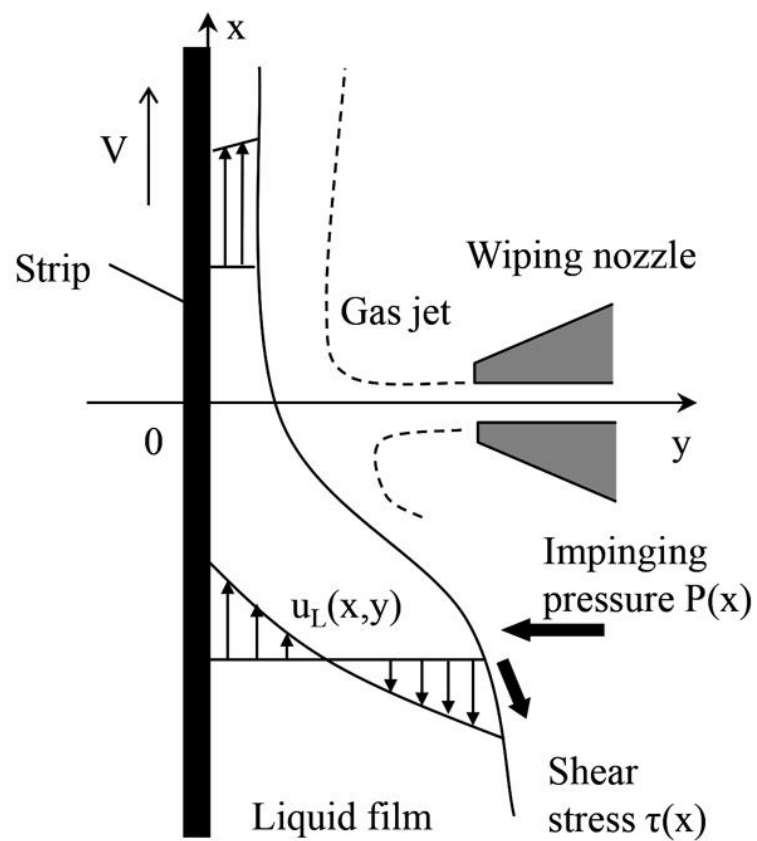


Fig.3.1 ガスワイピング法解析モデル図⁽⁶⁾

3.1.2 解法

(3.9)式により無次元液膜分布が $\delta^*(\eta)$ を求めるには、無次元平均膜厚 δ_m^* を決める必要がある。今、(3.9)式において左辺の無次元平均膜厚 δ_m^* は η によらず一定であり、右辺は無次元膜厚 $\delta^*(\eta)$ の三次関数である。したがって、(3.9)式の解は、Fig. 2 に示すように関数 $h\{\delta^*(\eta)\}$ と $h\{\delta^*(\eta)\} = \delta_m^*$ との交点であるが、(3.9)式が実在解を持つためには δ_m^* は関数 $h\{\delta^*(\eta)\}$ の正の極値より小さくならなければならない、次式を満足する必要がある。

$$\delta_m^* \leq \frac{\tau_w^*(\eta)\{\tau_w^{*2}(\eta)+6P_w^*(\eta)\}+\{\tau_w^{*2}(\eta)+4P_w^*(\eta)\}^{3/2}}{12P_w^{*2}(\eta)} \quad (3.13)$$

さらに、 $\delta^*(\eta)$ は η に対して連続関数であることより、 δ_m^* は(3.13)式右辺の η に対する最少値とならなければならない。すなわち、(3.13)式右辺の η に対する最少値を求めることにより δ_m^* が決まり、(3.9)式を $\delta^*(\eta)$ に関して解くことにより鋼板への付着膜厚分布を求めることができる。

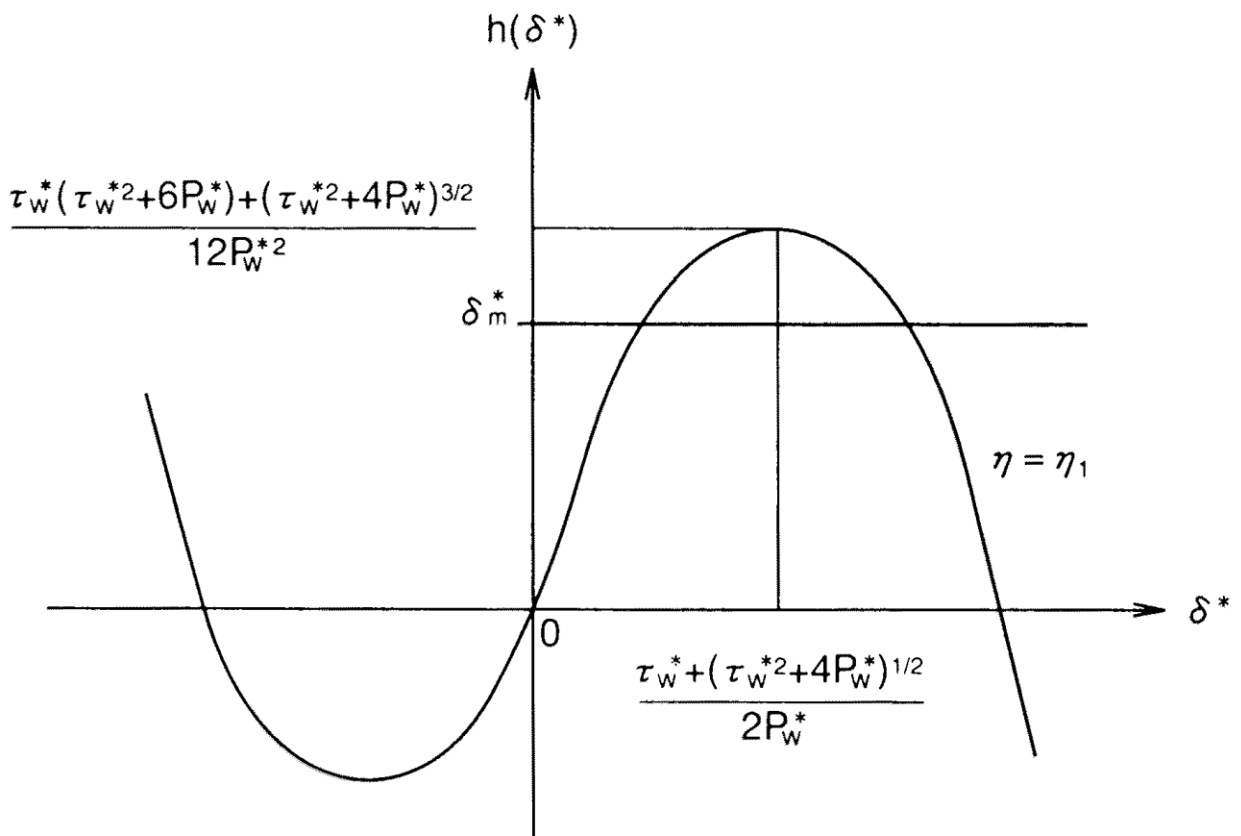


Fig.3.2 膜厚の解決策⁽¹⁹⁾

3.1.3 ワイピングジェットの特徴

ワイピングジェットの鋼板への衝突圧力分布と特性値である圧力および長さの尺度は、前報⁽²⁰⁾における結果より次式を用いる。

$$\frac{P_{\omega}(\eta) - P_a}{P_{\omega m} - P_a} = \exp(-0.695\eta^2) \quad (3.14)$$

$$\frac{P_{\omega m} - P_a}{P_n - P_a} = \left\{ 1 + \left(0.143 \frac{D}{B} \right)^{3.61} \right\}^{-0.287} \quad (3.15)$$

$$\frac{b_p}{B} = 0.112 \left(\frac{D}{B} + 1.50 \right) \quad (3.16)$$

また、衝突壁面ジェットのせん断応力については、Beltaos^{(21), (22)}による次式を用いる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{衝突ジェット領域 } (\eta \leq 2.5) \\ \frac{\tau_{\omega}(\eta)}{\tau_{\omega m}} = \text{erf}(0.833\eta) - 0.2\eta \exp(-0.695\eta^2) \\ \text{衝突壁面ジェット領域} \\ \frac{\tau_{\omega}(\eta)}{\frac{\rho_g U_{\omega m}^2}{2}} = 0.0474 R_o^{-1/5} \end{array} \right. \quad (3.17)$$

ただし、

$$\tau_{\omega m} = 0.06 \frac{\rho_g U_o^2 B}{2 D} \quad (3.18)$$

$$R_o = \frac{\rho_g U_o B}{\mu_g} \quad (3.19)$$

衝突壁面ジェットの速度の尺度(最大速度)は前報⁽²⁰⁾より次式を用いる。

$$\frac{U_{\omega m}}{U_o} = 2.17 \frac{(1 + \cos \theta)^{0.613}}{\left(\frac{D}{B} \right)^{0.542} \left(\frac{b_p}{D} \eta \right)^{0.388}} \quad (3.20)$$

3.2 亜音速噴流時における先細ノズルの流れ⁽²³⁾

本研究では、各ノズルから噴出するジェットは亜音速噴流としており、圧力はガスワイピング装置およびシーリングジェット装置、パーシジェット装置に備え付けられているタンク内のよどみ点圧力に設定している。また、実際の装置では断面積が流れ方向に徐々に小さくなり、出口において最小となる先細ノズルを使用しているため、本節では先細ノズルの流れについて説明する。

タンク内の気体の圧力を p_0 、全温度を T_0 、密度を ρ_0 とし、気体が先細ノズルで加速され、大気に放出される流れを考える。タンク内の体積は十分大きく、全圧 p_0 と全温度 T_0 は一定でノズル内は等エントロピー流れと仮定する。また大気の圧力 p_b は、ノズルを出た後の圧力という意味で背圧といわれ、今回は大気圧として $p_b = 101.3\text{kPa}$ としている。

一次元定常等エントロピー流れにおけるよどみ点状態とマッハ数 M の状態の温度比 T_0/T の式は、

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{a_0}{a}\right)^2 = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (3.21)$$

が成り立つ。また、等エントロピー流れでは

$$p/T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \text{const} \quad \text{あるいは} \quad \frac{p}{\rho^\gamma} = \text{const} \quad (3.22)$$

が成り立つため、以下の式が成り立つ。

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.23)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3.24)$$

これらの式において $M = 1$ とすれば、臨界状態とよどみ点状態の間の諸量の関係が得られ、 $\gamma=1.4$ のとき、次のようになる。

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1} = 0.833 \quad (3.25)$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.528 \quad (3.26)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 0.634 \quad (3.27)$$

式(3.26)より，空気($\gamma=1.4$)が等エントロピー的に膨張するとき，圧力が全圧の 52.8%まで減少したところでマッハ数 $M = 1$ となる．

背圧が臨界圧力より高い場合は亜音速噴流となるため，式(3.14)は

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.528 < \frac{p_b}{p_0} < 1 \quad (3.16)$$

と表される．この場合，ノズル内の流れはいたるところで亜音速の状態で，圧力分布はタンク内から徐々に減少しノズル出口で最少となる．この際の出口圧力 p_e は，出口からの噴流をとりまく背圧 p_b に等しい．

単位時間に管路のある断面を通る流れの質量流量 \dot{m} は

$$\dot{m} = \rho u A = \text{const} \quad (3.17)$$

で表される．式(3.10)を用いて式(3.17)の密度 ρ を変形すると

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{p_0}{RT_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.18)$$

また，定常な圧縮流れに対するベルヌーイの式を式(3.19)に示す．

$$\frac{u^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = \text{const} \quad (3.19)$$

式(3.19)で，左辺第 1 項と第 2 項はそれぞれ単位質量当たりの運動エネルギーと圧力のエネルギー [J/kg] を表す．第 2 項の積分を行うには，状態変化の過程における圧力 p と密度 ρ の間の関数関係を与える必要がある．

いま，流速 $u = 0$ のよどみ点状態における圧力 p_0 ，密度 ρ_0 の気体の等エントロピー流れを考えると，式(3.10)より導いた密度 ρ を式(3.19)に代入し積分すると

$$\frac{1}{2}u^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (3.20)$$

上式は定常等エントロピー流れに対するベルヌーイの式である．これを u について解くと

$$u = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left\{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}} = \sqrt{\frac{2\gamma RT_0}{\gamma-1} \left\{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}} \quad (3.21)$$

式(3.18)と式(3.21)をそれぞれ式(3.17)の ρ と u に代入すると

$$\dot{m} = \frac{p_0 A}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (3.22)$$

上式は圧力比 p/p_0 から \dot{m} を求める式である.

ノズル出口における速度 u_e とマッハ数 M_e はそれぞれ式(3.11)と式(3.21)より,

$$u_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left\{ 1 - \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}} \quad (3.23)$$

$$M_e = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p_0}{p_b} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}} \quad (3.24)$$

式(3.23)と式(3.24)より, u_e と M_e は p_b/p_0 が小さいほど大きくなるが, 式(3.16)の条件のもとでは, M_e は1より小さい. またノズル出口の断面積を A_e とすれば, ノズルを通る単位時間当たりの質量流量 \dot{m} は式(3.22)より

$$\dot{m} = \frac{A_e p_0}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (3.25)$$

と表される.

3.3 支配方程式

流体の流れは, 質量と運動量の平衡方程式を含む Navier-Stokes 方程式で表される^{(24), (25)}. それぞれ直交座標形式の質量保存則と運動量方程式は, 次のように書くことができる.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.27)$$

計算領域での質量と運動量の保存は, 圧縮性乱流 Newton 流体の連続の式と Navier-Stokes 方程式を解くことによって成り立つ. 領域内の最大圧力差による密度変化は大きいため, ワイピングジェットは理想気体の圧縮性を考慮した噴流として扱われる. 式(3.26)ならびに式(3.27)の方程式を解くためには, 適切な乱流モデルを選択する必要がある.

3.4 乱流モデル

近年の計算機と数値計算法の飛躍的な進歩によって、多くの流れを直接数値計算することが可能となったが、乱流に関しては、散逸領域まで含んだ計算を行うことは特別な流れ(周期流など)を除けば今でもほとんど不可能である。そこで、乱流の効果を繰り込んで計算するための乱流モデルが考案されてきた⁽²⁶⁾。

CGLにおけるガスワイピング理論に関する従来の研究を参照して、種々の乱流モデルの中から本研究に適した乱流モデルを紹介する⁽²⁷⁾⁻⁽³⁰⁾。これにより、乱流モデルの選定に対する試行錯誤の時間を省略することができる。本節ではガスワイピング法のモデル化に適した乱流モデルについて説明する。

3.4.1 k-ε モデル

はじめに、乱流モデルの中でも代表的なモデルである k-ε モデル⁽³¹⁾について説明する。k-ε モデルは解析精度と解析時間、安定性のバランスが良いことや、幅広い使用実績があることから広く利用されているモデルである。このモデルでは k と ε の輸送式を解くことで局所的な k, ε を取得し、ここから乱流粘性を算出する手法である。乱流粘性は式(3.28)によって導出される。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.28)$$

C_μ は無次元の定数であり、 $C_\mu = 0.09$ である。

まず k [m^2/s^2] についてであるが、これは式(3.29)のように定義される乱流運動エネルギーであり、乱れ成分の運動エネルギーを表す。

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} \left(= \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \right) \quad (3.29)$$

また、 ε [m^2/s^3] は式(3.30)にて定義されるエネルギー散逸率であり、 k が粘性摩擦で散逸する割合を示す。

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} \quad (3.30)$$

k - ε モデルの k , ε に関する輸送式をそれぞれ式(3.31), 式(3.32)に示す.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (3.32)$$

両式とも左辺第1項は時間項, 第2項は移流項, 右辺第1項は拡散項, 第2項は生成項, 第3項は散逸項である. ここで, $\sigma_k = 1.0$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ である. 時間変化, 移流, 拡散などは通常の輸送式と類似しており, これに乱れの生成項や散逸項が付け加えられている. k の方程式は比較的単純であり, 生成項は流れのひずみに応じて生成, 散逸項は散逸を表す ε を使用している. ε の方程式の生成項および散逸項に関しては, 定数などもあり, これらは半経験的に求められている.

3.4.2 RNG (Renormalization Group) k - ε モデル

3.4.1 に示したモデルが標準的な k - ε モデルとして知られているが, これを改良した RNG k - ε モデル⁽³²⁾がある. このモデルは標準的な k - ε モデルと類似の形態であるが, より物理現象に則ったモデル化がなされており, 複雑な流れにも適用できるとされている. また, RNG k - ε モデルはある程度広く認知されたモデルでもあり, 実績も豊富である.

式(3.33)に k の輸送方程式を示す.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.33)$$

式(3.33)は標準的な k - ε モデルのものと同じであるが, 拡散項(有効粘性)の取り扱いが異なっている. 有効粘性に関しては $\mu_{eff} = \mu_{lam} + C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ (定数 C_μ の数値以外は標準的な k - ε モデルと同じ)にて算出されるが, 低レイノルズ数の場合の補正を加えることが可能である.

また, 式(3.33)にかかる係数 α_k (k に関する有効プラントル数の逆数)に関しても低レイノルズ数の箇所での補正を考慮して式(3.34)より求めている.

$$\left| \frac{\alpha_k - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha_k + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{lam}}{\mu_{eff}} \quad (3.34)$$

ここで, $\alpha_0 = 1$ である.

これらにより, 流れが遅い箇所や壁面付近など領域内で低レイノルズ数となっている箇

所で、計算上乱れが小さいとする理にかなったモデル化となっている。

ε に関しては式(3.35)に示す輸送式を解いている。 R_ε は式(3.36)に示す。

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{U}_i\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho - R_\varepsilon \quad (3.35)$$

$$R_\varepsilon = \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (3.36)$$

ここで、 $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ であり、 α_ε は α_k と同様の方法にて算出できる。式(3.35)の右辺第4項は散逸項と類似の形態のため、式(3.37)のように散逸項と形式的にまとめることができ、これより散逸項の係数 $C_{2\varepsilon}$ が場所によって変化するモデルとみなすこともできる。

$$-C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho - R_\varepsilon = -C_{2\varepsilon}^* \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (3.37)$$

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.38)$$

ここで、 $\eta = Sk/\varepsilon$ (S : ひずみ速度)、 $\eta_0 = 4.38$ 、 $\beta = 0.012$ である。ひずみ速度が小さい場合 (η が小さい場合)はおおよそ標準的な k - ε モデルと同程度の散逸量になるが、ひずみ速度が大きい場合 (η が大きい場合)は $C_{2\varepsilon}^*$ が比較的小さな値となる。したがって、ひずみ速度が大きい箇所で乱流粘性を小さくする効果がある。また、旋回流に関しても乱流粘性の補正をするオプションがあり、特に強い旋回流で過大な乱れの生成を抑制できる。

このように、RNG k - ε モデルは低レイノルズ数の箇所や旋回流などで標準的な k - ε モデルよりも有効粘性を小さめに見積もる傾向があるため、過大な拡散を防ぐことができる。このような理由から、RNG k - ε モデルは標準的な k - ε モデルよりも精度が良いとされている。

3.5 ソルバー理論⁽³³⁾

本節では、本研究で使用した ANSYS Fluent 18.1(以下、Fluent)におけるソルバー理論について説明する。

3.5.1 圧力ベースソルバー

圧力ベースソルバーでは、投影法という手法に大別されるアルゴリズムを採用している。投影法においては、速度場の質量保存性に制約を課すため、圧力方程式を解いている。これは連続の式と運動方程式から導出されるが、その際は速度場を圧力で補正し、連続性を満足させている。支配方程式は非線形で互いに連成しているため、連立方程式の系全体を解が収束するまで繰り返し計算するような反復処理が含まれている。Fluent の圧力ベースソルバーには、分離型アルゴリズムと連成型アルゴリズムの 2 種類が存在する。

3.5.1.1 圧力ベースの分離型アルゴリズム

圧力ベースソルバーで用いられる計算アルゴリズムでは、支配方程式を逐次計算している。その支配方程式は非線形で連成しているため、収束した数値解を求めるには、計算ループを繰り返し実行しなければならない。

分離型アルゴリズムの場合、解変数の支配方程式を独立に逐次計算していく。支配方程式を計算している最中は、それぞれの式が他式と「非連成(分離)状態」である。分離型アルゴリズムはメモリに保存する離散化方程式が 1 本ずつで済むため、メモリ効率が良い。しかし、方程式を非連成の形で解くゆえに、計算の収束は比較的緩慢である。

分離型アルゴリズムの各反復計算は、以下のように行う。

1. 現在の解に基づいて、流体の物性値(密度, 粘度, 比熱など)を乱流粘性(拡散係数)も含めて更新する。
2. 圧力とフェース質量流束の最新更新値を用い、運動方程式を順番に解く。
3. 最新で取得された速度場と質量流束を用い、圧力補正方程式を解く。
4. ステップ 3 で求めた圧力補正でフェースの質量流束, 圧力および速度場を補正する。
5. 乱流諸量, エネルギー, 化学種といった追加スカラーがあれば、解変数の現在の値を用いてスカラーの方程式を解く。
6. 異種相の間には相互作用が起きるので、それにより生じるソース項を更新する。
7. 方程式の収束を確認する。

上記のステップを、収束条件が満足されるまで繰り返す。

3.5.1.2 圧力ベースの連成型アルゴリズム

圧力ベースの連成型アルゴリズムでは、前述の分離型アルゴリズムとは異なり、運動方程式と圧力ベースの連続方程式からなる連立方程式を解いている。そのため、本連成型アルゴリズムにおいては、分離型計算アルゴリズムのステップ 2 と 3 が単独のステップに置き換わり、そこで先ほどの連成型連立方程式を計算している。残りの式は、分離型アルゴリズムと同様、非連成の形で解く。

運動方程式と連続方程式は強連成の形で計算するので、分離型アルゴリズムと比較すると計算の収束速度は大幅に改善する。しかし、速度場と圧力場を計算するときは、運動方程式と圧力ベースの連続方程式をすべて離散化して連立方程式にまとめ、それをメモリに保存しなければならないため、要求メモリは分離型アルゴリズムの 1.5~2.0 倍に増大する。

3.5.2 スカラー輸送方程式

Fluent では、コントロールボリューム法により、一般のスカラー輸送方程式を数値的に解くことのできる代数方程式に変換する。コントロールボリューム法では、まず輸送方程式を各コントロールボリュームにおいて積分し、離散化方程式を求め、コントロールボリューム単位で保存則を実現している。

支配方程式の離散化は、スカラー量 φ の輸送に関する非定常の保存式を考えてみると、最も簡単に表すことができる。任意のコントロールボリューム V について、以下の積分方程式が成立する。

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho d\vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (3.39)$$

ここで、 ρ は密度、 \vec{v} は速度ベクトル、 \vec{A} は面積ベクトル、 Γ_φ は φ の拡散係数、 $\nabla \varphi$ は φ の勾配、 S_φ は単位体積当たりの φ のソースである。式(3.39)は、計算領域内の各コントロールボリューム、つまりセルに適用される。あるセルに関して式(3.39)を離散化すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \varphi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V \quad (3.40)$$

ここで、 N_{faces} はセルを取り囲むフェースの数、 φ_f はフェース f を通過する φ の値(対流項)、 $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ はフェースを通過する質量流束、 \vec{A}_f はフェース f の面積ベクトル、 $\nabla \varphi_f$ はフェース f における φ の勾配、 V はセルの体積である。左辺第 1 項は 3.5.4 項で示される時間の離散

化で定義される。Fluent で解く方程式の一般形は式(3.40)と同じであり，任意の多角形で構成された多次元の非構造メッシュに適用することができる。

3.5.3 空間の離散化

特に指定がない場合，Fluent ではスカラー量 φ の離散値をセル中心において格納する。しかし，式(3.40)の対流項では φ_f のフェース値が必要であるため，格納されたセル中心値から補間する必要がある。補間は，風上差分法により行う。

風上差分とは，フェース値 φ_f を，式(3.40)における垂直速度 v_n の方向を基準にした「風上」側，つまりセル上流の量から算出するということである。Fluent では，一次精度風上差分，二次精度風上差分，べき乗測，QUICK スキームと，複数の風上差分法が用意されている。式(3.40)の拡散項は中心差分であり，常に二次精度となる。

3.5.3.1 一次精度風上差分法

一次精度風上差分法では，フィールド変数のセル中心値はセル平均値であり，セル全体において同じ値であると仮定しており，フェース値はセル中心値と等しい。つまり，一次精度風上差分を選択すると，フェース値 φ_f は上流セルにおける φ のセル中心値となる。

3.5.3.2 二次精度風上差分法

二次精度風上差分法では，セルフェース値における変数値は，多次元線形再構築法により算出する。この手法では，セル中心における値をセル重心まわりでテイラー級数展開することにより，フェースにおける高次精度の値を得る。つまり，二次精度風上差分を選択すると，フェース値 φ_f は次式を用いて算出される。

$$\varphi_{fSOU} = \varphi + \nabla\varphi \cdot \vec{r} \quad (3.41)$$

ここで， φ と $\nabla\varphi$ は上流セルにおけるセル中心値とその勾配であり， \vec{r} は上流セルの重心からフェース重心への変位ベクトルである。この場合，勾配 $\nabla\varphi$ を各セルについて，3.5.5 項で示す勾配と微分の評価の検討に従って求める必要がある。また，最大値や最小値がオーバーシュートしないように，勾配 $\nabla\varphi$ の値には制限がかけられる。

3.5.4 時間の離散化

非定常解析では、支配方程式は空間および時間の両面について離散化する必要がある。時間依存性を持つ方程式の空間離散化方法は、定常解析の場合と同一である。時間の離散化では、微分方程式の各項について、時間ステップ Δt で積分を行う。非定常項の積分は、以下のように直接的に行うことができる。

変数 φ の時間発展は、一般に次式で表すことができる。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = F[\varphi] \quad (3.42)$$

ここで、関数 F には空間離散化を含む。時間微分について、後退差分を使って一次精度で離散化すると、次式となる。

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F[\varphi] \quad (3.43)$$

また、二次精度の離散化は次式で与えられる。

$$\frac{3\varphi^{n+1} - 4\varphi^n + \varphi^{n-1}}{2\Delta t} = F[\varphi] \quad (3.44)$$

ここで、 $n+1$ は次の時間レベル $t+\Delta t$ における値、 n は現在の時間レベル t における値、 $n-1$ は前の時間レベル $t-\Delta t$ における値である。時間微分が離散化されたら、 $F[\varphi]$ の評価方法を選択する。特に、どの時間レベルにおける φ の値により F を評価するかが問題である。

3.5.4.1 陰的時間積分

本研究では、 $F[\varphi]$ を未来の時間レベルで評価する陰的時間積分と呼ばれる方法を使用している。以下に詳細を示す。

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F[\varphi^{n+1}] \quad (3.45)$$

この場合、注目しているセルにおける φ^{n+1} は、関数 $F[\varphi^{n+1}]$ によって隣接セルの φ^{n+1} と関連付けられるため、「陰的」積分と呼ばれる。

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \Delta t F[\varphi^{n+1}] \quad (3.46)$$

この陰的方程式は、次の時間ステップに移行するまで、各時間ステップにおいて反復法で計算される。この方法は時間ステップの大きさに関わらず、無条件に安定しているという利点がある。

3.5.5 勾配と微分の評価

勾配はセルフェースでスカラー値を構築する場合だけではなく、二次の拡散項や速度微分を計算する場合にも必要である。流れ保存方程式の対流項と拡散項は、所定の変数 φ の勾配 $\nabla\varphi$ で離散化している。本研究では、最小二乗セルベース法と呼ばれる手法に従って計算している。

3.5.5.1 最小二乗セルベース法による勾配の評価

この手法は解の線形変化を仮定している。セル c_0 からセル c_i に至るセル値の変化は、セル c_0 の中心からセル c_i の中心に向いたベクトル δr_i に沿って、以下のように表現できる。

$$[\nabla\varphi]_{c_0} \cdot \Delta r_i = (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3.47)$$

セル c_0 を囲むセルごとに類似の式を書くと、以下の簡潔な形で書かれた方程式系が得られる。

$$[J][\nabla\varphi]_{c_0} = \Delta\varphi \quad (3.48)$$

ここで、 $[J]$ は係数行列で、幾何形状の関数である。ここでの目標は、最小二乗法を利用して、非平方行列の方程式系についての最小化問題を解き、セル勾配 ($\nabla\varphi_0 = \varphi_x \hat{i} + \varphi_y \hat{j} + \varphi_z \hat{k}$) を決定することにある。

上記の線型方程式系は過剰決定状態にあり、Gram-Schmidt プロセスで係数行列を分解すれば計算が可能である。この分解により、重み行列がセルごとにできる。したがって、最小二乗セルベース法の場合は、3成分の重み ($W^x_{i_0}$, $W^y_{i_0}$, $W^z_{i_0}$) がセル c_0 のフェースごとに生成することになる。

したがって、セル中心における勾配はこの時、重み係数に差分ベクトル $\Delta\varphi = (\varphi_{c_1} - \varphi_{c_0})$ を掛けた次式で算出できる。

$$[\varphi_x]_{c_0} = \sum_{i=1}^n w^x_{i_0} \cdot (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3.49)$$

$$[\varphi_y]_{c_0} = \sum_{i=1}^n w^y_{i_0} \cdot (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3.50)$$

$$[\varphi_z]_{c_0} = \sum_{i=1}^n w^z_{i_0} \cdot (\varphi_{c_i} - \varphi_{c_0}) \quad (3.51)$$

不規則な(反りや歪みがある)非構造メッシュにおいては、最小二乗法による勾配法の精度がノードベースの勾配法に匹敵する。しかし、最小二乗法による勾配法の方がノードベースの勾配法より計算負荷が軽い。

3.6 解析条件

本節では、本研究で使用した解析格子および境界条件、初期条件について説明している。得られた解析結果については第4章でまとめている。

本研究の解析領域概略図と境界条件を Fig.3.2, 解析格子を Fig.3.3, ノズル近傍の格子拡大図を Fig.3.4 に示す。解析格子は、ワイピング装置、めっき浴表面、鋼板および周囲流体を含んでおり、格子数は約 36 万点である。ワイピングジェット、パージジェット、シーリングジェットが噴出する領域では格子の大きさを小さくしている。境界条件として、鋼板表面とめっき浴表面は wall 条件とした。また、鋼板は実際の作業時のライン速度である 140 mpm (2.33 m/s) として鉛直上向きに移動させている。大気開放条件としては pressure outlet としている。ガスワイピング装置およびパージ装置、シーリング装置、水平シーリング装置のタンク内よどみ圧力はそれぞれ 60kPa, 5~15kPa, 5kPa, 5kPa と設定し、式(3.23)を用いてタンク内よどみ圧力から算出したノズル出口における流速を velocity inlet として適用した。パージノズルは、ジェットの最適な位置関係を検証するため噴出口を 3ヶ所ずつ設定し、それぞれの噴出口は 3mm, 間隔は真ん中のノズル(purge2)を基準に上下 30mm, ワイピングノズルまでの距離は 214mm であり、ノズルには 32° の傾斜角がつけられている。ワイピングノズルは噴出口 1mm, 鋼板までの距離は 10mm とし、めっき浴表面からの高さが 400mm の位置としている。水平シーリングノズルは噴出口 3mm, 鋼板までの距離は 130mm である。本研究における各ジェットは全て窒素、周囲流体は空気としており、窒素と空気の温度は 300K に設定している。各ジェットの位置関係を Fig.3.5, ノズル噴出口の流速をまとめたものを Table3.1 に示す。また、本研究で使用した解析条件を Table3.2 に示す。

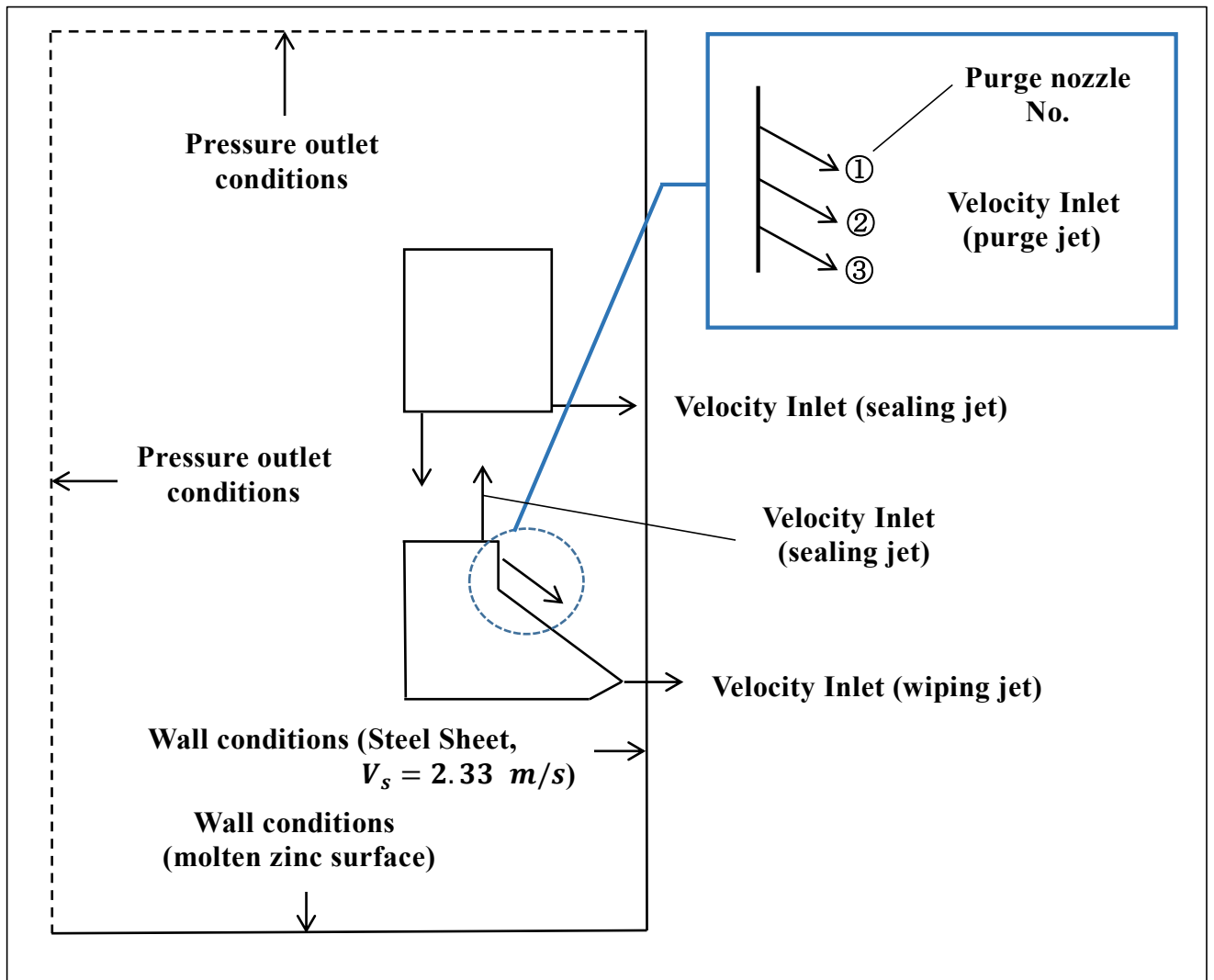


Fig.3.3 解析領域概略図および境界条件

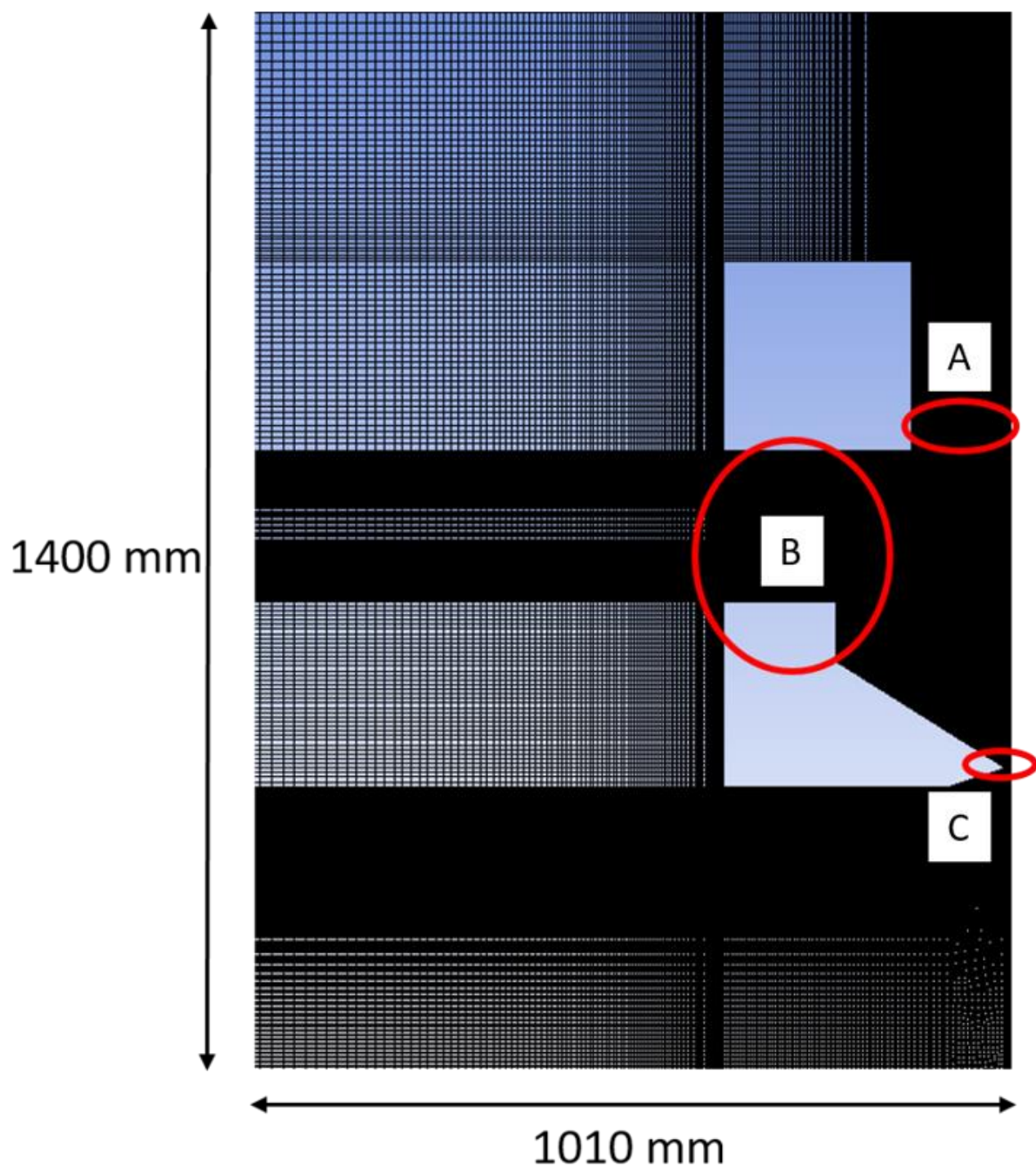
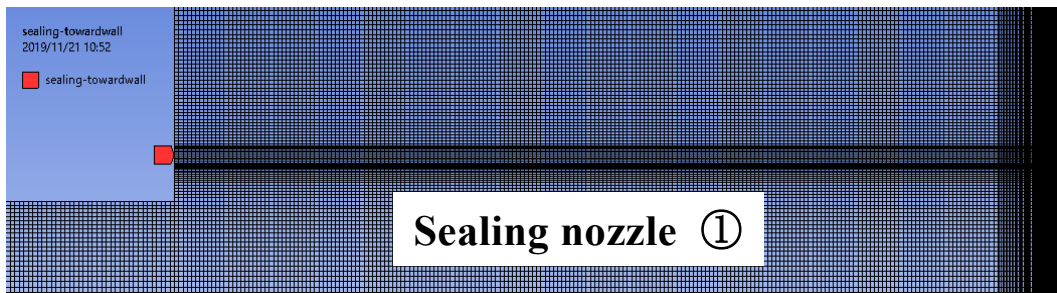
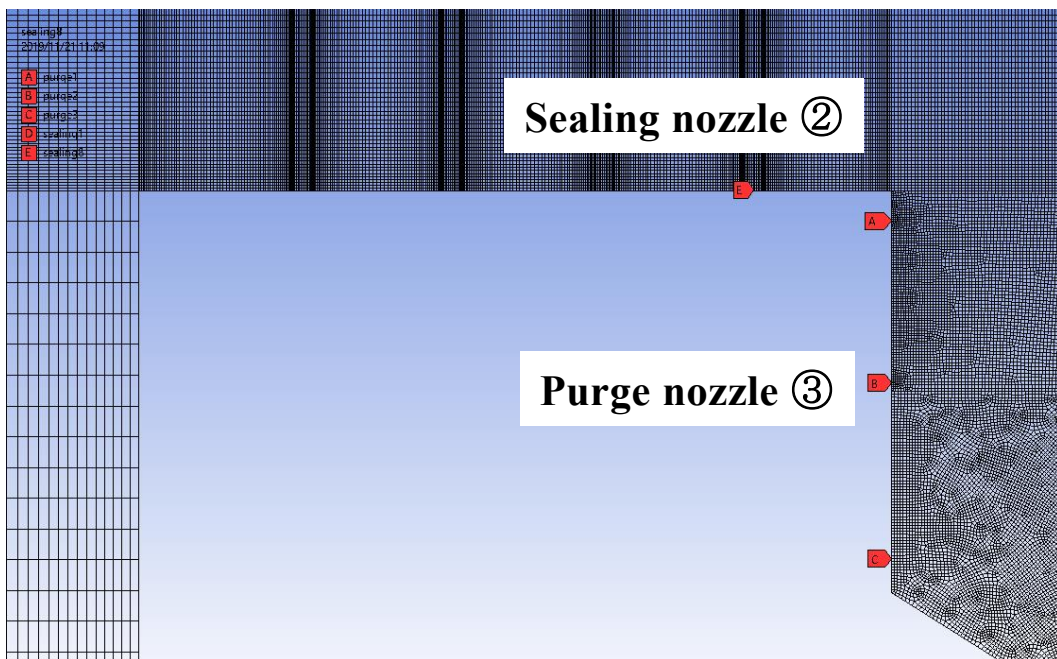


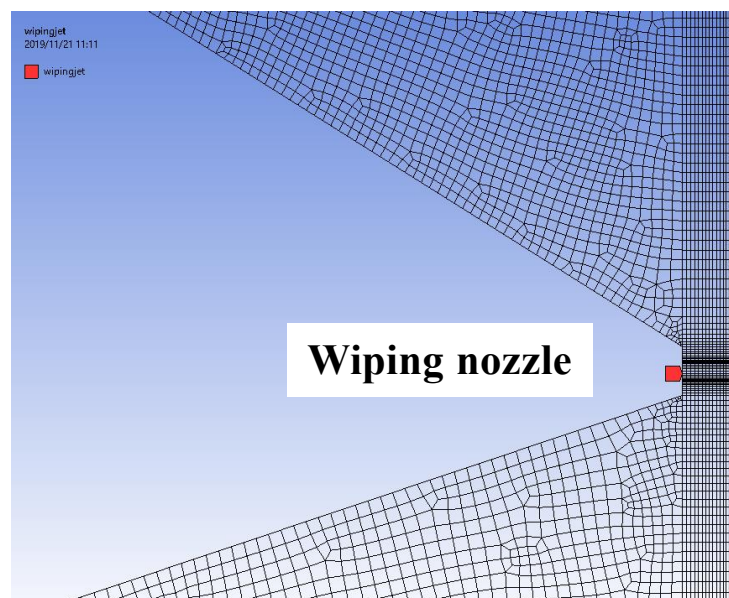
Fig.3.4 解析格子全体図



A



B



C

Fig.3.5 解析格子拡大図(A, B, Cはそれぞれ Fig.3.3 内に対応)

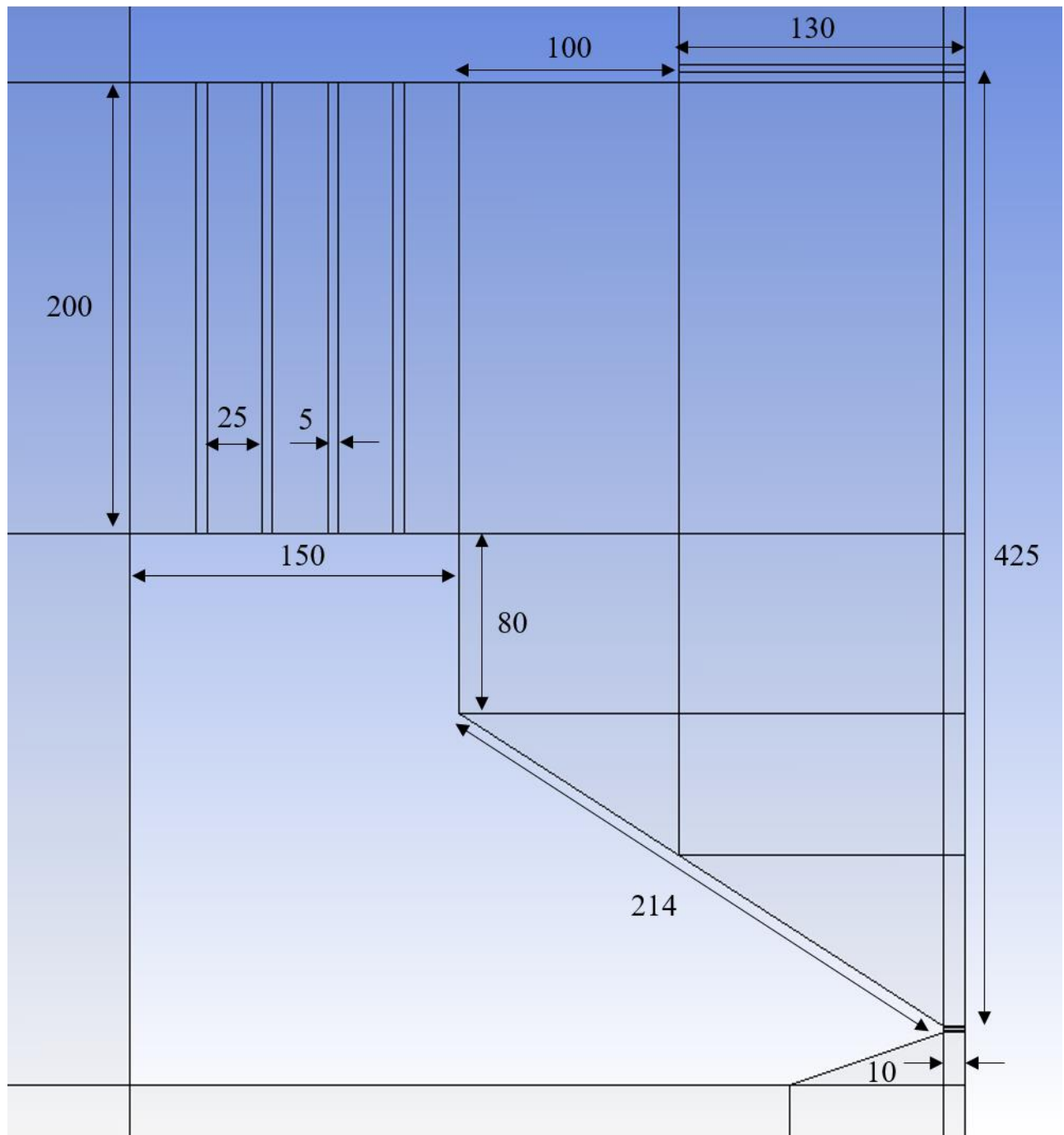


Fig.3.6 解析領域におけるノズル位置関係図 [mm]

Table 3.1 ノズル噴出口流速

ノズル名	p_0 [kPa]	u_e [m/s]
ワイピングノズル	60	278.5
シーリングノズル	5	91.2
水平シーリングノズル	5	91.2
パージノズル	5	91.2
	7	108.5
	10	128.6
	15	155.3

Table 3.2 解析条件

解析方法	2次元定常・非定常解析
解析ソフトウェア	ANSYS Fluent 18.1
数値解法	圧力ベースソルバー (連成型アルゴリズム)
空間の離散化	二次精度風上差分
勾配の評価	最小二乗セルベース法
乱流モデル	RNG $k-\varepsilon$ モデル
時間の離散化 (非定常解析)	二次精度陰解法
タイムステップ (非定常解析)	1e-5 [s]

第4章 解析結果および考察

本章では、本研究の解析結果について述べる。初めに、シーリングジェットの有無がワイピングジェットの流動に与える影響について4.1節で述べる。その後パージジェットの噴流パターンをケース毎に変更し、流速分布や圧力分布、窒素質量分率などから各ケースの流れ場の特徴について考察し、操業中およびドロス回収時における最適なパージジェットを検証する。

4.1 ワイピングジェットの数値解析

4.1.1 ワイピングジェットのみの場合

Fig.4.1に、ガスワイピング装置のノズル出口からワイピング圧力 $p_w = 60\text{kPa}$ のワイピングジェットを噴出した際の速度分布を示す。ノズル出口から噴出されたワイピングジェットは、ノズルから10mm離れた垂直鋼板に衝突し、鋼板によどみ領域および鋼板衝突噴流を形成していることがわかる。最大流速は約278m/sである。

Fig.4.2に流線を示す。Fig.4.2から、ワイピングジェットが噴出される際、周囲空気はワイピングジェットによってガスワイピング装置上面とメインフレーム下面の間に吸い込まれていることがわかる。その結果、各フレームの面から流れが剥離することによって生じる渦が形成されていることが確認できる。

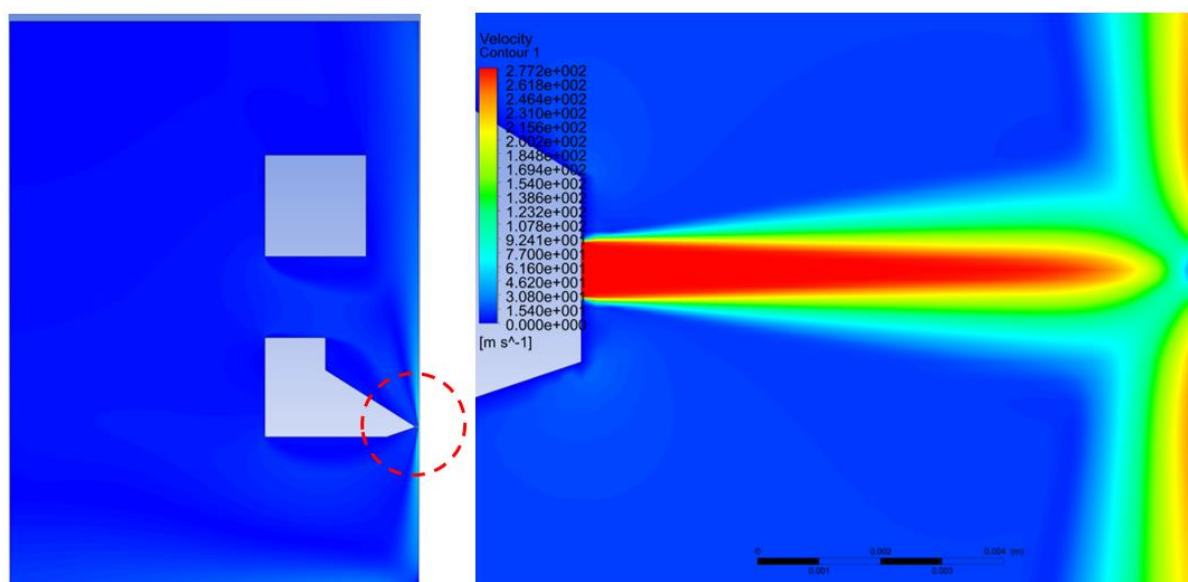


Fig.4.1 ワイピングジェット流れの速度分布

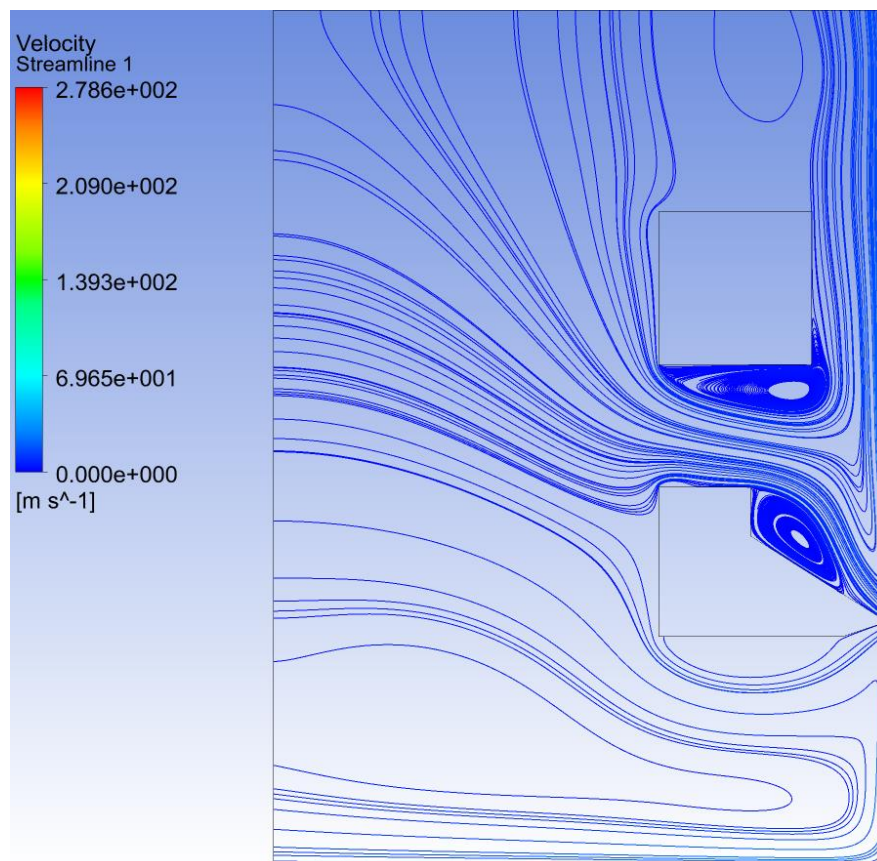


Fig.4.2 ワイピングジェット流れの流線

4.1.2 シーリングジェット有りの場合

ここでは、パーズジェットを使用しない場合を検証し、ワイピングジェットの流れに対するシーリングジェットの効果を Fig.4.3 および Fig.4.4 に示す。Fig.4.3 は各パーズ圧力によるワイピングジェットの速度分布を示している。解析結果から、ワイピングジェットはメインフレームとガスワイピング上面から噴出されたシーリングジェットによって押圧されて下方に傾いていることがわかる。Fig.4.4(a)はワイピングジェットのノズル出口から鋼板間におけるジェット中心線での圧力分布を示している。グラフ横軸の $x=0\text{mm}$ はノズル出口、 $x=10\text{mm}$ は鋼板表面を示している。シーリングジェットを使用することでジェットコア領域に相当する全圧が約 0.2kPa 上昇し、 $x=5\text{mm}$ の位置まで一定値に維持され、ワイピングジェット中心線における全圧値が小さく減少する傾向にある。これらの理由から、パーズジェットがワイピングジェットの流れに影響を与えて偏向させていると考えられる。 $x=9\text{mm}$ 付近で全圧の最小値をとり、その後鋼板表面に近づくにつれて再上昇していることがわかる。これは鋼板衝突噴流によってよどみ領域が生じ、圧力が高くなるためであると考えられる。

Fig.4.4(b)は鋼板表面に沿った衝突圧力分布を示している。横軸の $y=0\text{mm}$ はノズル出口の中心高さを表しており、 y は通板方向と同じ向き(図の上方向)を正、逆向き(図の下方向)を負としている。Fig.4.4(c)および(d)はワイピングジェットが無次元衝突圧力勾配、無次元せん断応力を示している。縦軸の $\eta=0\text{mm}$ はノズル出口の中心高さを表し、 η は y 方向の距離を圧力の半値幅で割ったものである。また、 η は通板方向と同じ向き(図の上方向)を正、逆向き(図の下方向)を負としている。Fig.4.4 より、シーリングジェット使用時、衝突圧力分布が $y<0$ の向きに移動しており、最大値も減少していることがわかる。Fig.4.4(c)はあまり変化が見られないが、Fig.4.4(d)は $\eta>0$ の向きに移動しており、最大値も増加していることがわかる。

以上の結果から、ワイピングジェットはシーリングジェットから影響を受けて偏向していることがわかる。したがって、本研究の条件下でシーリングジェットを噴出させて鋼板表面にめっきを塗布する際は、シーリングジェットによる影響を考慮した上でめっき厚さを推定する必要があると考える。

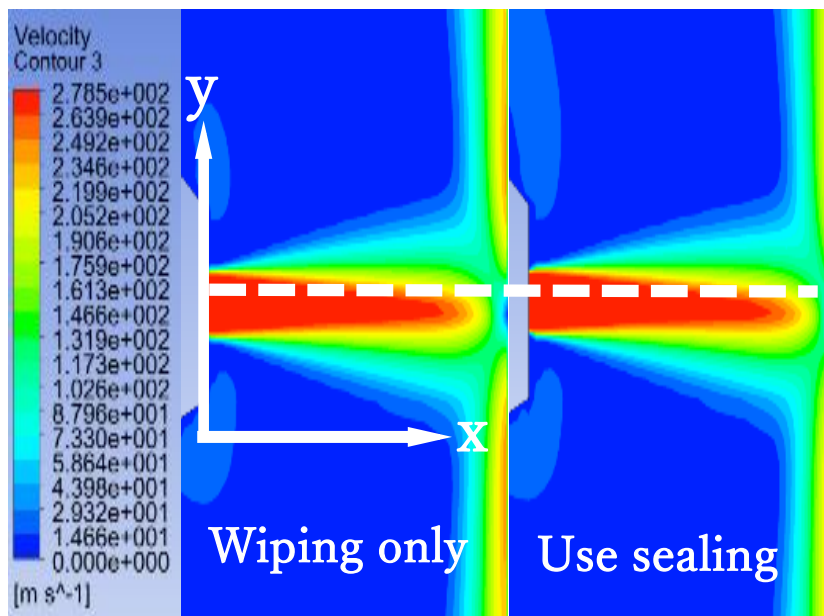
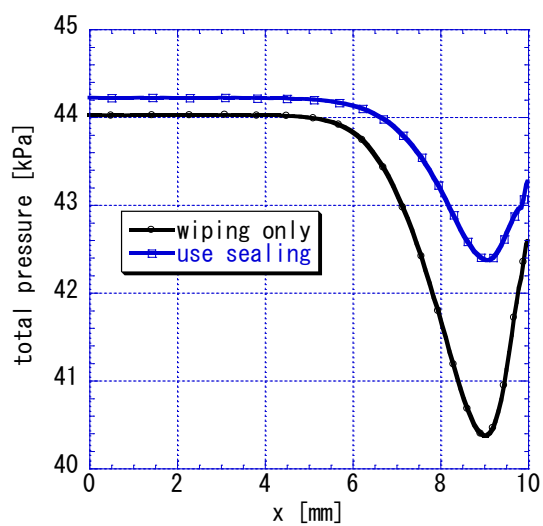
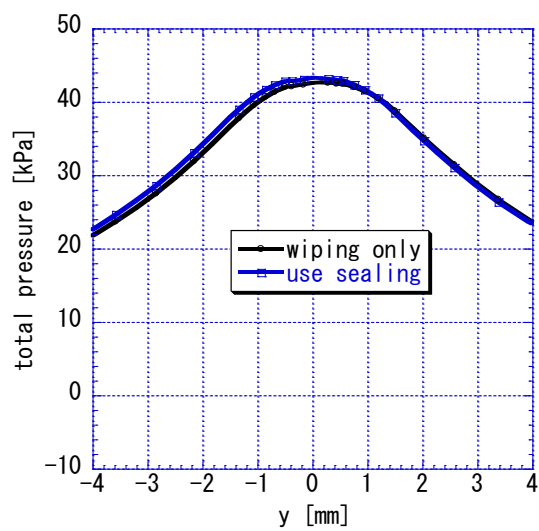


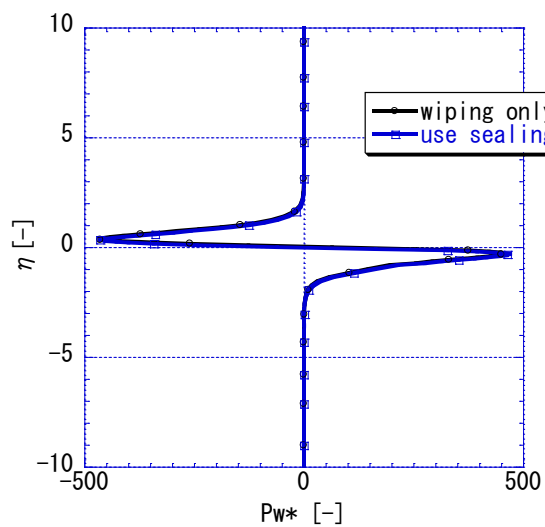
Fig.4.3 シーリングジェットによるワイピングジェット流れの速度分布



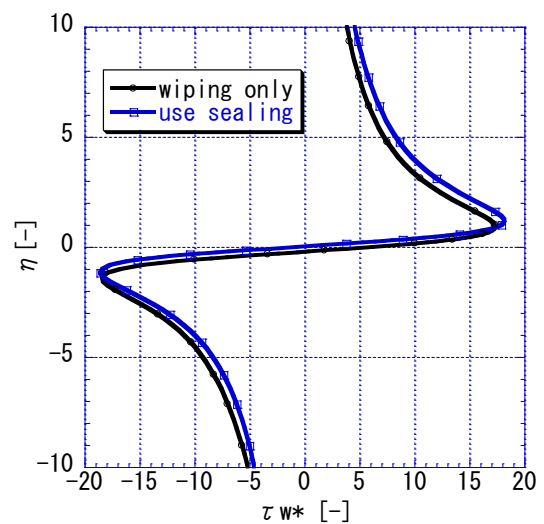
(a) ワイピングジェット中心線圧力分布



(b) ワイピングジェット衝突圧力分布



(c) ワイピングジェット衝突圧力勾配



(d) ワイピングジェットせん断応力

Fig.4.4 シーリングジェットによるワイピングジェットの流動特性への影響

4.2 シングルパーズジェットの数値解析

本節から 4.4 節にかけては、第 2 章で述べたパーズ新技術の設計とその解析結果について述べる。シールド領域には、第 3 章の Fig.3.3 に示すように 3 ヶ所の噴出口を設けている。Table4.1 に設定した様々なケースにおいて、パーズジェットならびにシールド領域内の流動特性を考察した。

Table 4.1 パーズジェット条件 (4.2~4.4 節)

装置	ジェット噴出口番号	ワイピング圧力 p_w 水平シーリング圧力 p_h シーリング圧力 p_s	パーズ圧力 p_p
上部	①	$p_w = 60$ kPa	$p_p = 5, 7, 10, 15$ kPa
中部	②	$p_h = 5$ kPa	$p_p = 5, 7, 10, 15$ kPa
下部	③	$p_p = 5$ kPa	$p_p = 5, 7, 10, 15$ kPa

4.2.1 上部パーージェット

最初に、ガスワイピング装置の上部からパーージェットを噴出させた場合について検証する。Table4.1 の通り、シールド領域に対するパーージェットの最適な圧力を見出すため、パーージェット圧力 p_p を $p_p = 5\sim 15\text{kPa}$ の範囲で変化させる。

Fig.4.5 に、各パーージェット圧力における上部パーージェットの速度分布を示す。Fig.4.5(a)に示すように、パーージェット圧力 $p_p = 5\text{kPa}$ のジェットがノズル出口からガスワイピング装置壁斜面と平行に噴出され、その後装置壁面に衝突する。衝突後、ガスワイピング装置壁面に沿って斜め左右方向に流れる。左方向に流れるジェットは上部パーージェットノズルとガスワイピング装置壁面間の領域内で時計回りに流れ、小さな渦を形成する。これは衝突噴流となって遮断したためだと考えられる。右方向に流れるジェットは壁面に沿ってワイピングノズル方向に流れワイピングジェットの鋼板衝突噴流と相互に作用している。Fig.4.5(b), (c)から、パーージェット圧力が上昇すると $p_p = 10\text{kPa}$ のパーージェットは $p_p = 5\text{kPa}$ と同様に装置壁面に衝突するが、 $p_p = 15\text{kPa}$ では壁面に衝突せず、鋼板方向に流れていることがわかる。

Fig.4.6 に各ケースの流線を示す。ガスワイピング装置を取り囲む外部領域と比較して、ジェット流れが集中するシールド領域内部では各ケース共に流線が密集していることがわかる。Fig.4.6(a)より、 $p_p = 5\text{kPa}$ の場合はシールド領域内で大きな渦が発生しているため、この渦の循環流によって領域全体に窒素が充満していると考えられる。また、シールド領域内の大きな渦に影響を与えず、領域内の窒素循環の役割を果たしていると考えられる。Fig.4.6(b), (c)の結果より、 $p_p = 10\text{kPa}$ では $p_p = 5\text{kPa}$ よりもシールド領域内の流線が密集していないことがわかる。これはパーージェットが装置壁面に沿った後、鋼板に強く作用しているからだと考えられる。 $p_p = 15\text{kPa}$ ではパーージェットの影響によりワイピングノズル上方向に新たな渦が形成されていることがわかる。これにより鋼板の膜厚に影響が出るのではないかと考える。

Fig.4.7 に各ケースの速度ベクトルを示す。Fig.4.7(a)より、シールド領域内の渦は大きな一つの渦として形成し、反時計回りに循環していることがわかる。しかし、パーージェットノズル下の領域では小さな渦が形成されており、時計回りに循環していることがわかる。Fig.4.7(b), (c)の結果より、 $p_p = 10\text{kPa}$ ではパーージェット圧力を増加させてもシールド領域の速度ベクトルの方向は大きく変わらないことがわかる。しかし、 $p_p = 15\text{kPa}$ でのシールド領域ではパーージェットノズルから噴流後、鋼板方向と装置壁面方向に分かれて流れていることがわかる。鋼板方向に流れるジェットは鋼板に沿って上方向に流れ、渦を形成し反時計回りに循

環している。装置壁面方向に流れるジェットは衝突噴流となってさらに左右に分かれ、左方向に流れるジェットは時計回りに循環し、右方向に流れるジェットはワイピングジェットの作用により反時計回りに小さく循環していることがわかる。これらの渦の形成の影響で個々の渦の強さが増大し、シールド領域内の流れが安定しなくなったと考えられる。

Fig.4.8 から Fig.4.10 に、各ケースの窒素質量分率を示す。Fig.4.8 は窒素質量分率 0~100%、Fig.4.9 は 80~100%、Fig.4.10 は 90~100%の範囲における分布を表している。Fig.4.8 の結果から、各ケースにおいてもシールド領域にて窒素雰囲気形成し、窒素質量分率が約 90%以上に達していることがわかる。Fig.4.9(a)より、 $p_p = 5\text{kPa}$ では窒素質量分率の下限を 80%に設定したところガスワイピング装置の斜面上部や鋼板付近において約 97%の領域を確認でき、領域全体では 95%の窒素雰囲気形成できることがわかる。Fig.4.9(b)より、 $p_p = 10\text{kPa}$ では鋼板付近において 96~97%の領域を確認できたが、領域全体では約 94%と $p_p = 5\text{kPa}$ の時よりも下回っていることが確認できる。これは Fig.4.6(b)での流線の密集が少ないことが原因だと考える。Fig.4.9(c)より、 $p_p = 15\text{kPa}$ ではワイピング装置斜面上部において 98%の窒素雰囲気を確認できる。Fig.4.10 より、窒素質量分率の下限を 90%に設定すると、どのケースでも 90%を超える窒素雰囲気形成できているが Fig.4.10(c)より、 $p_p = 15\text{kPa}$ では鋼板付近の領域内で上方向にいくにつれて窒素質量分率が約 2%低下していることから膜厚への影響が出るのではないかと考える。

Fig.4.11 に各ケースにおける圧力分布を示す。圧力範囲はゲージ圧で-1~1kPa に設定している。Fig.4.11(a)より、 $p_p = 5\text{kPa}$ ではパージジェットよってワイピング装置斜面上のパージノズル近辺に小さなよどみ領域が形成されていることがわかる。Fig.4.11(b)より、 $p_p = 10\text{kPa}$ では $p_p = 5\text{kPa}$ の時よりも圧力が高いよどみ領域がワイピング装置斜面上とワイピングノズル上部に形成されていることがわかる。また、パージジェット噴出口下部には負圧領域がみられる。これはパージジェットによって形成された渦の中心であり、中心は他領域よりも大きな負圧値を示していることから、強い渦であることが考えられる。Fig.4.11(c)より、 $p_p = 15\text{kPa}$ ではワイピングノズル近辺と鋼板付近に圧力が高くなっている領域がある。これはパージジェットが鋼板方向に流れ、ワイピングジェットの鋼板衝突噴流と衝突しているためであると考えられる。

Fig.4.12, Fig.4.13 に無次元液膜分布および液膜表面流速を示す。Fig.4.12 より、鋼板に付着して持ち上げられた液体がワイピングジェットにより払拭され薄膜になる様子がわかる。さらに詳細に確認すると、液膜厚さはワイピングノズル位置 ($\eta=0$)よりわずかに上部で最

少になり再び厚くなっている。Fig.4.13 より、液膜の表面流速は、ワイピングノズル位置よりわずかに下部で下向きから上向きに変化し、ワイピングノズル直下で鋼板の速度と等しく ($U_s^* = 1$) なる。さらにこれより上部では鋼板速度より速くなり、最大値を示した後再び鋼板速度に漸近していることがわかる。これはワイピングノズル位置直上では、付着液体表面に衝突壁面ジェットのせん断力が強く作用するためであり、液膜表面流速は鋼板速度より速くなりその結果液膜厚さが薄くなると考えられる。さらに上方では衝突壁面ジェットのせん断力が低下するため液膜表面流速も低下し、液膜厚さは回復することがわかる。

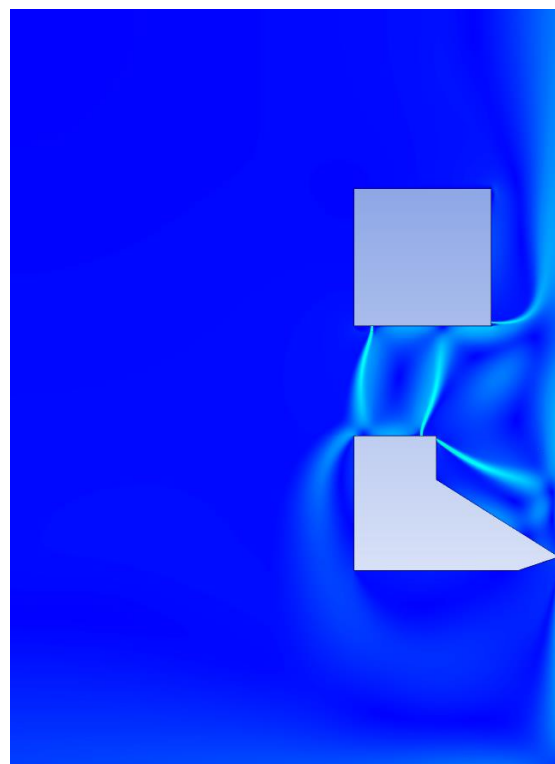
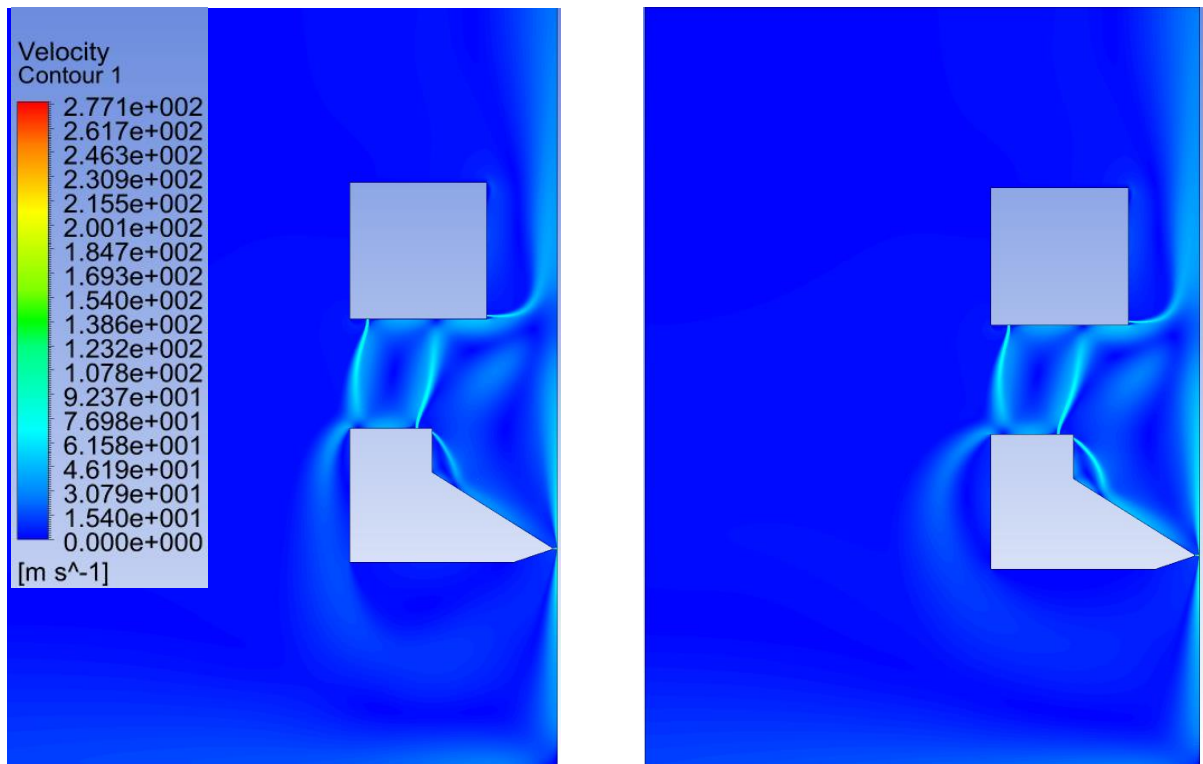


Fig.4.5 上部パーズジェット速度分布

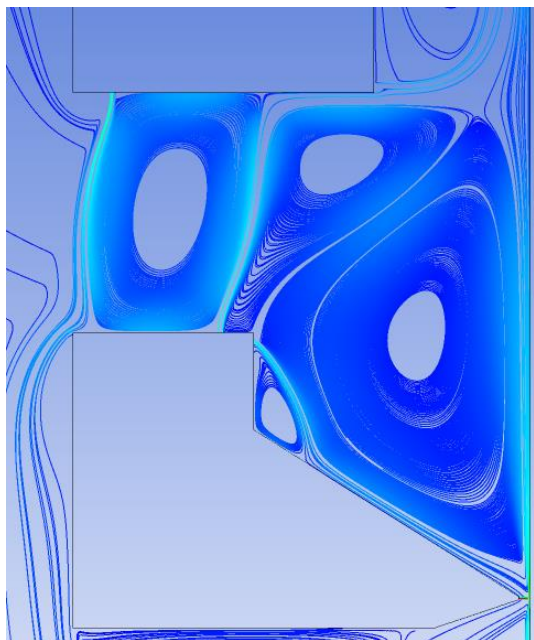
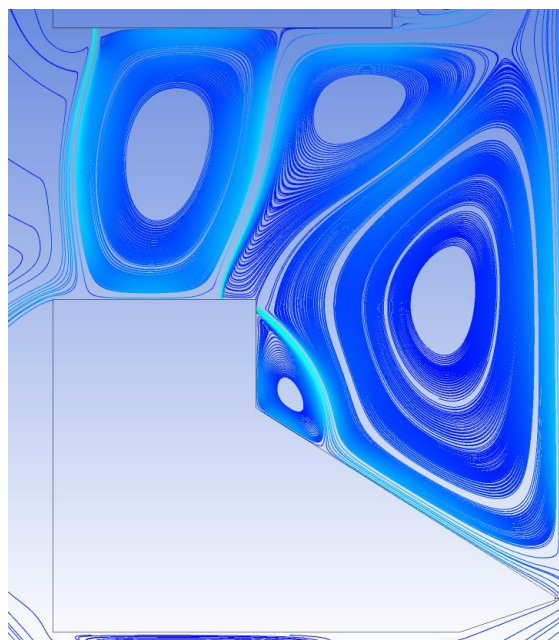
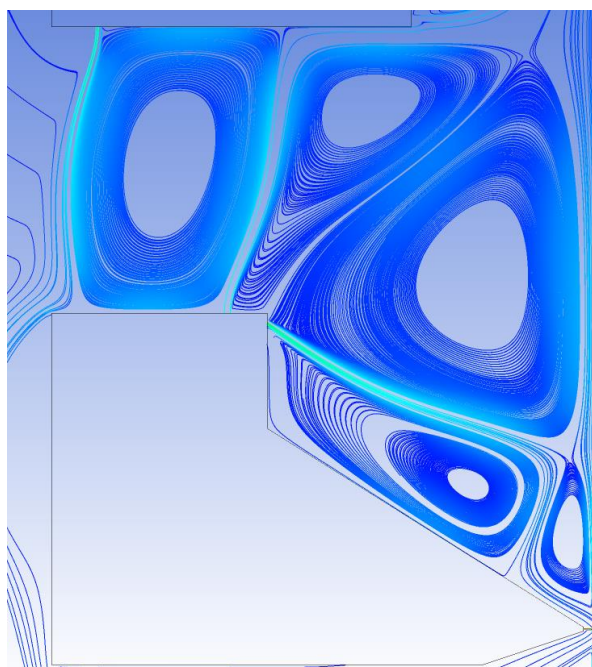
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.6 上部パーシジェット流線

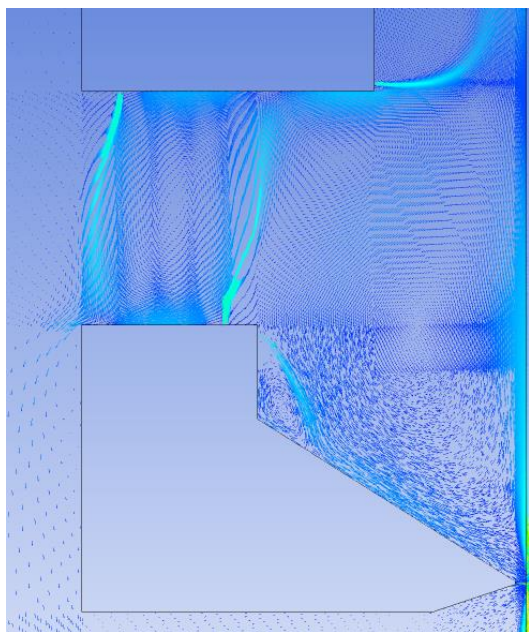
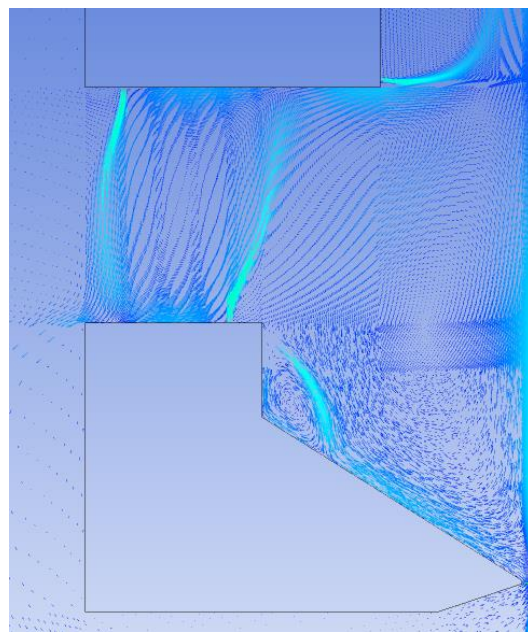
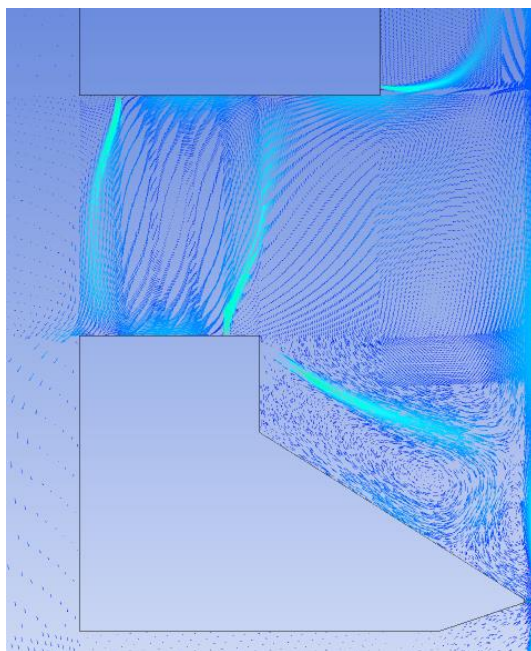
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.7 上部パーシジェット速度ベクトル

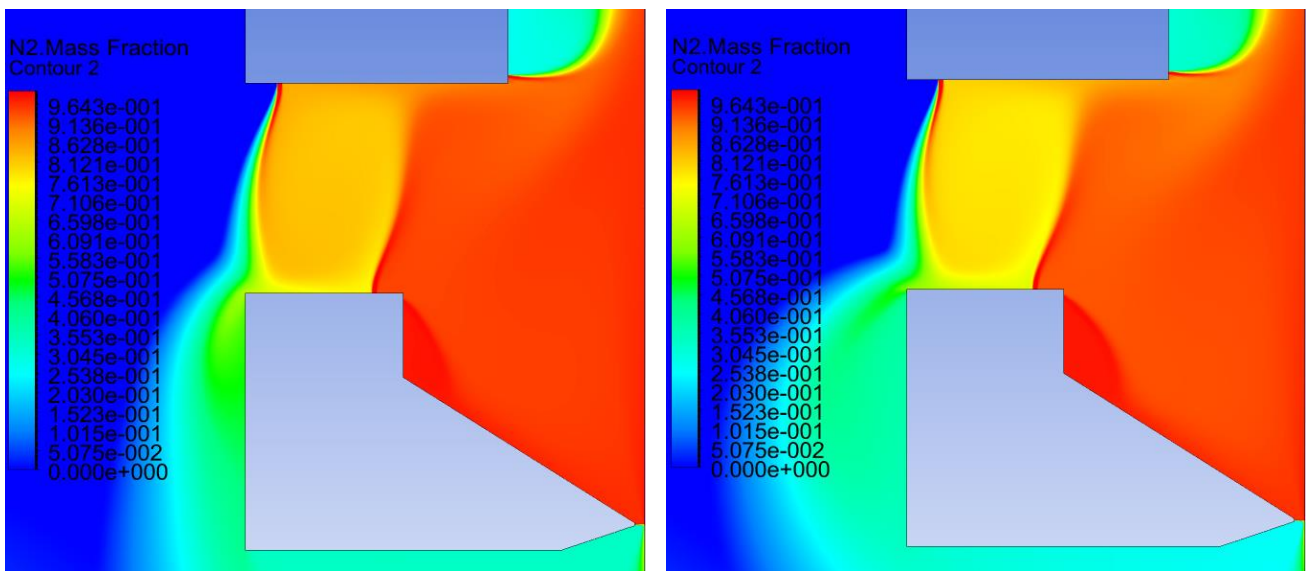
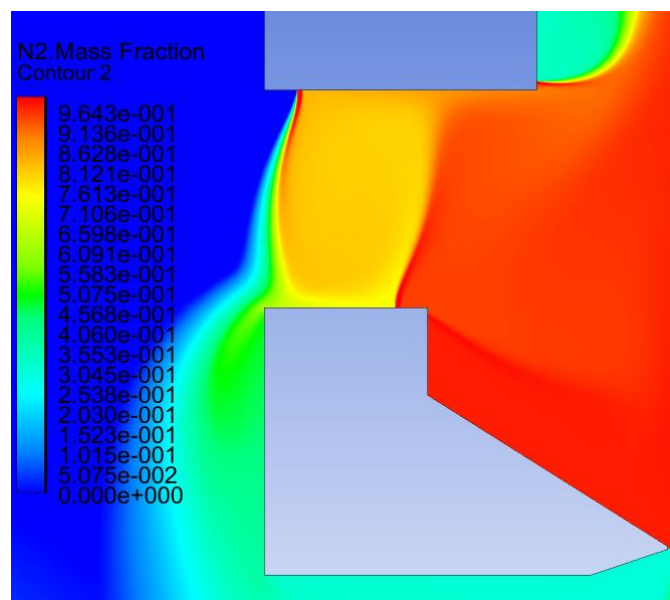
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.8 上部パーシジェット室素質量分率分布(0~100%)

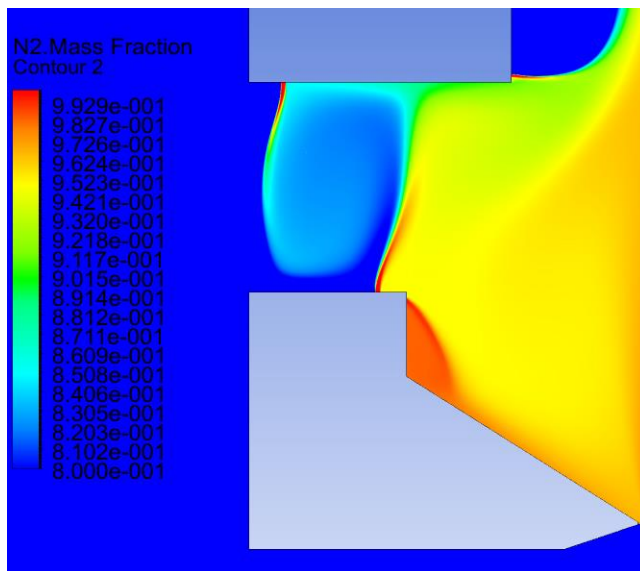
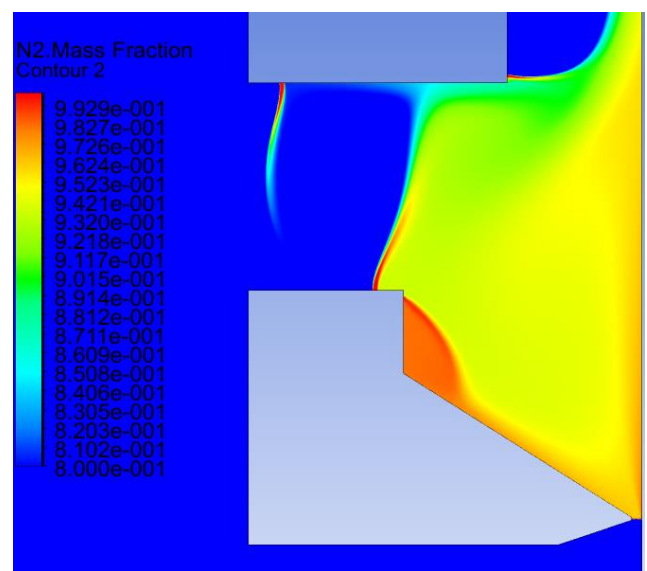
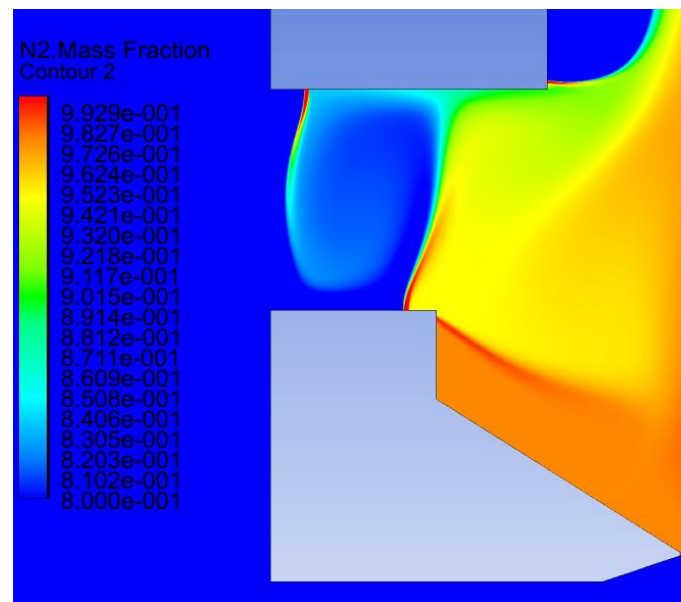
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.9 上部パーシジェット室素質量分率分布(80~100%)

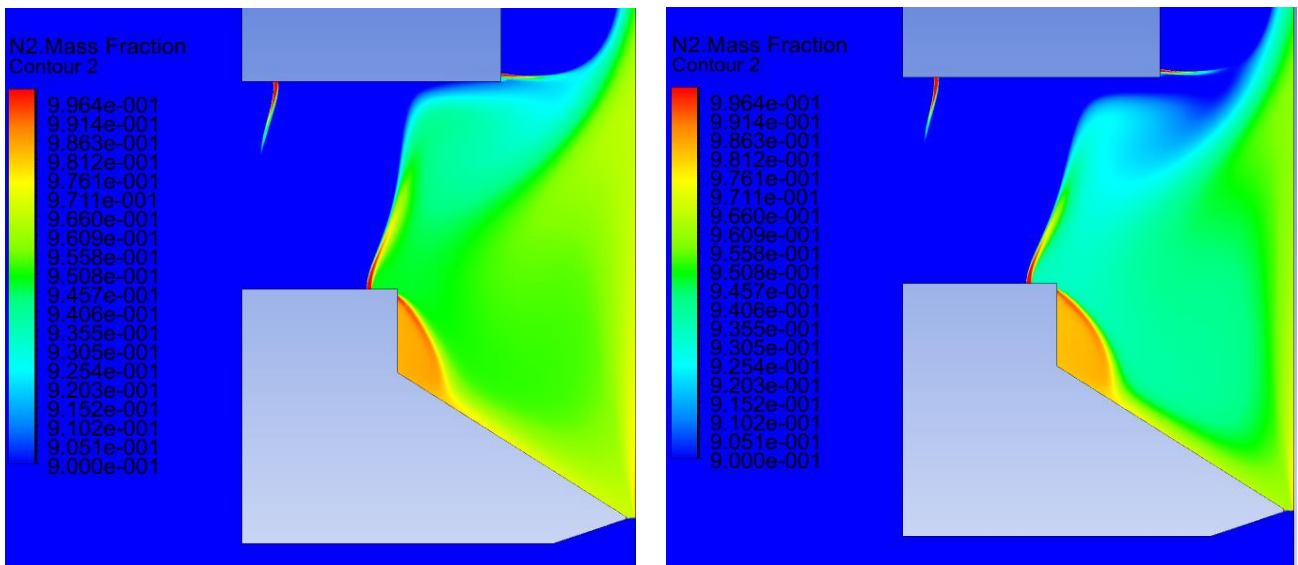
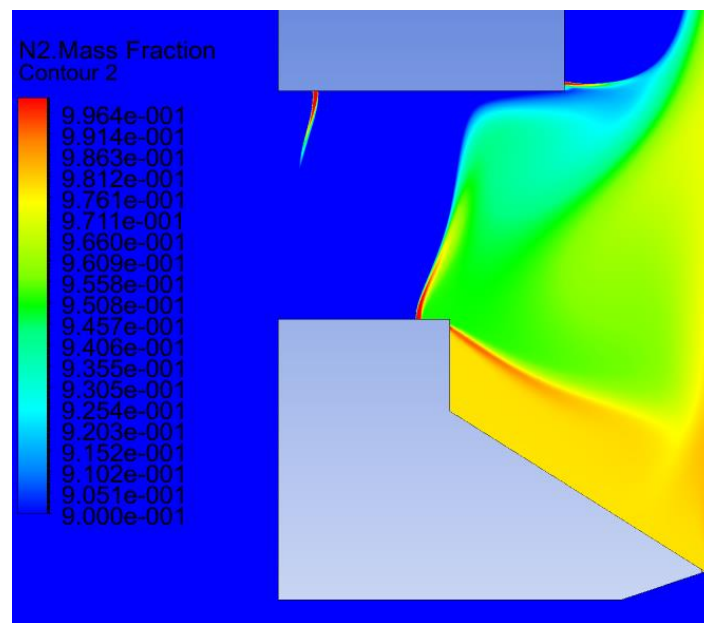
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.10 上部パーシジェット室素質量分率分布(90~100%)

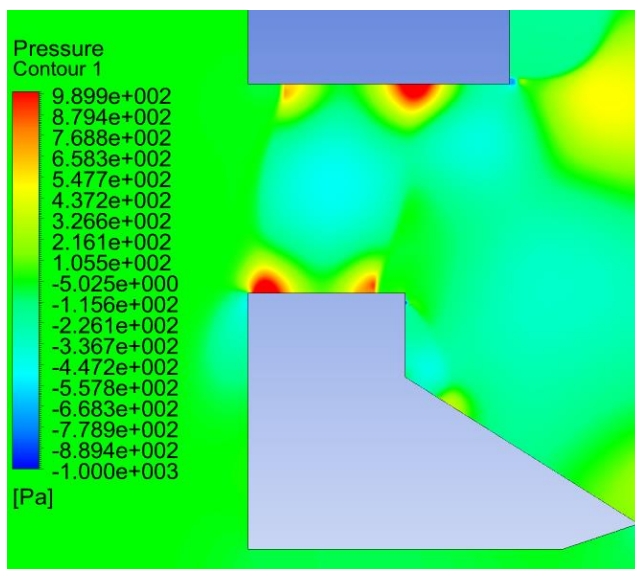
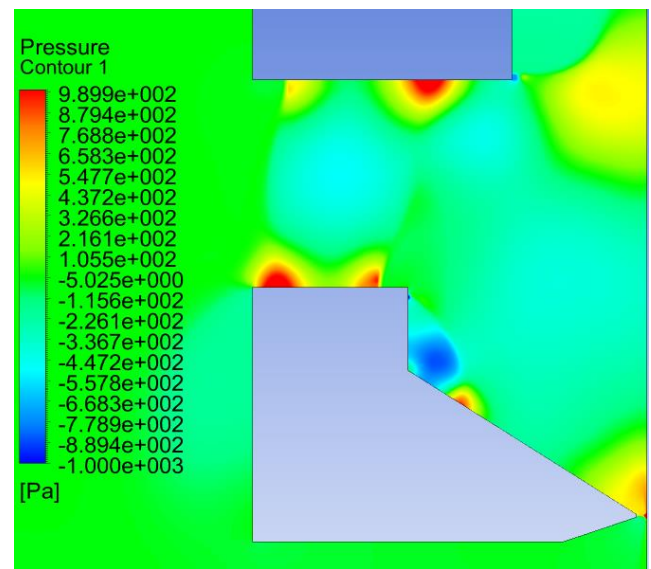
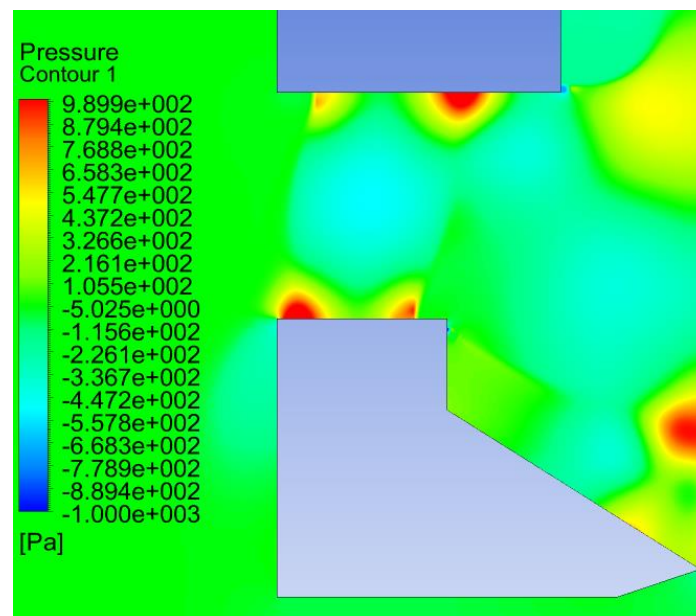
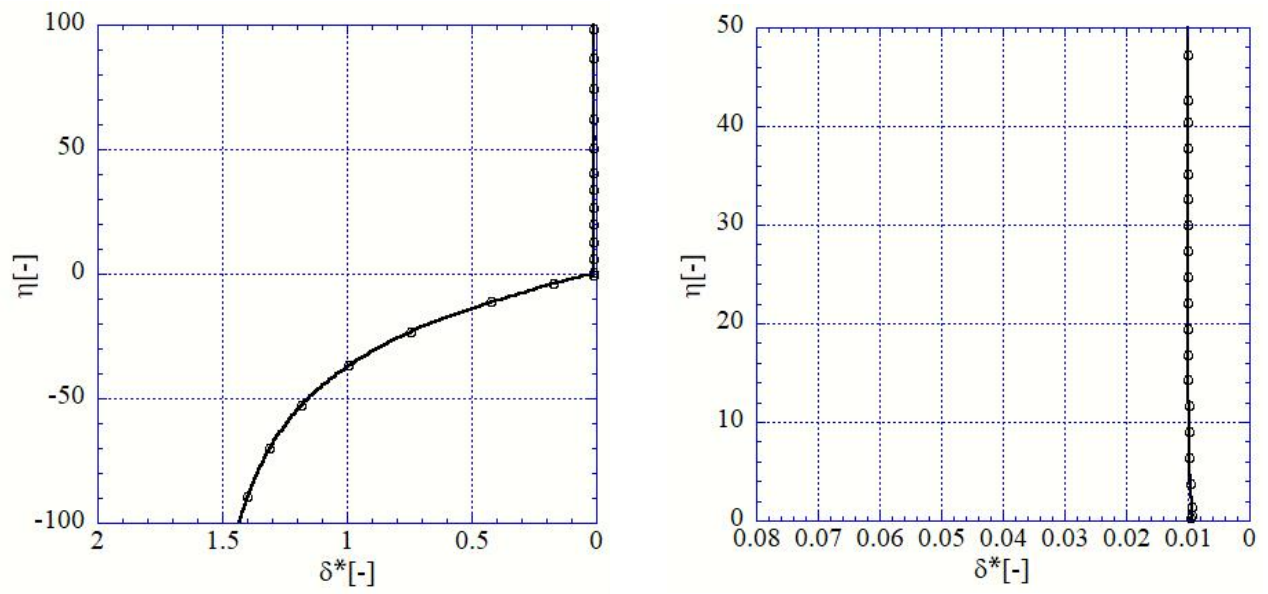
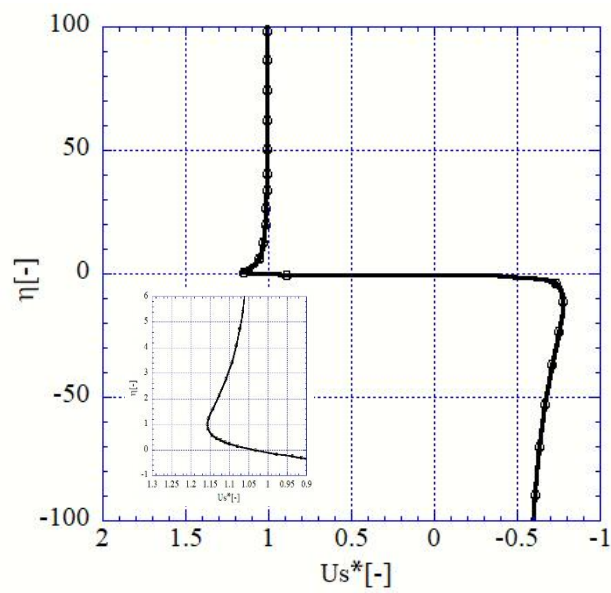
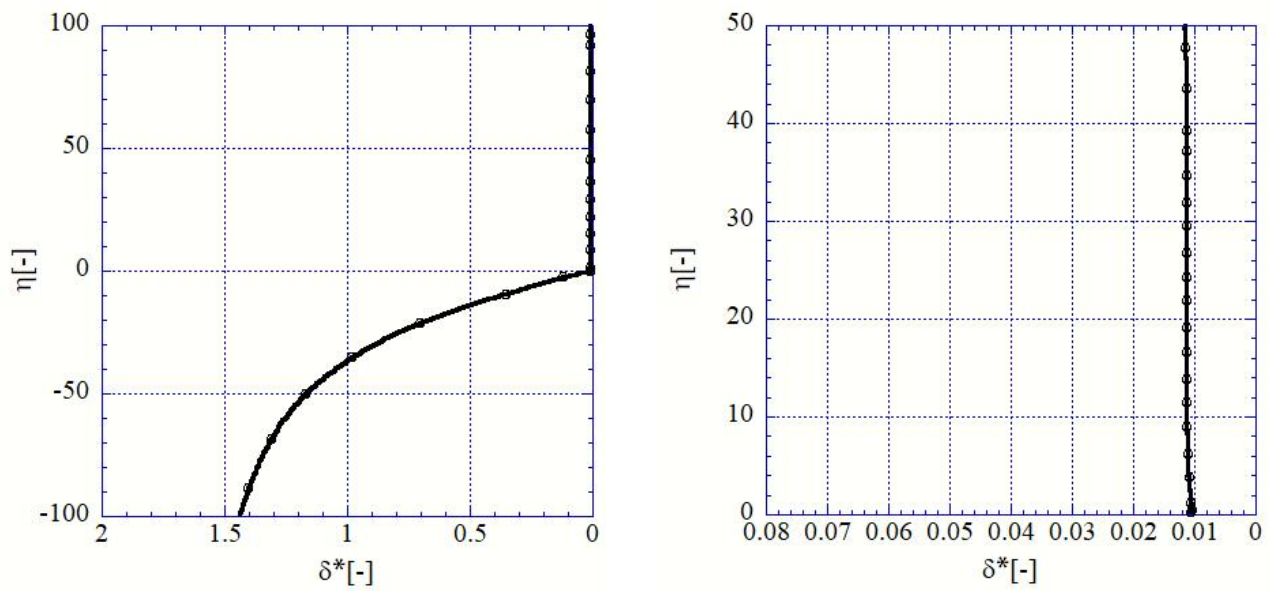
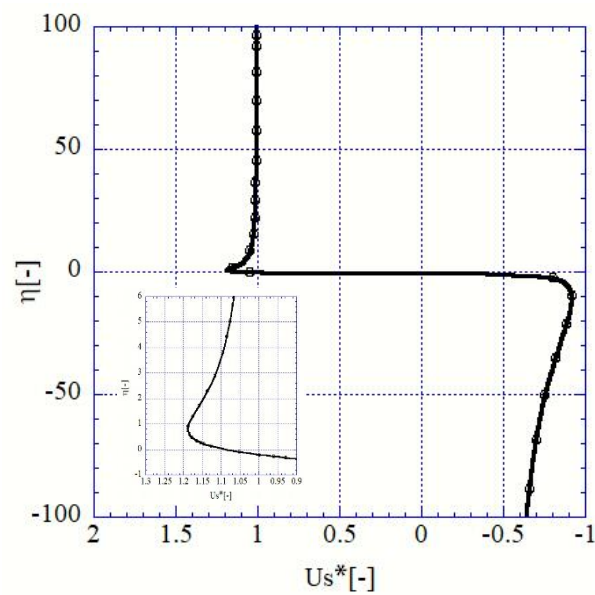
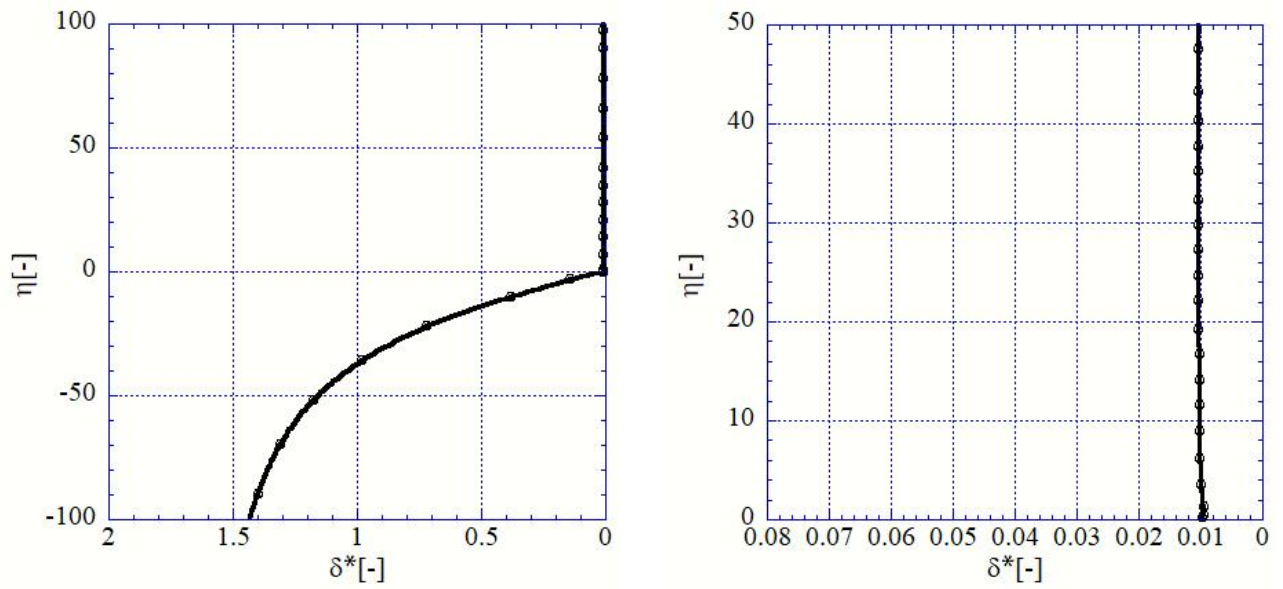
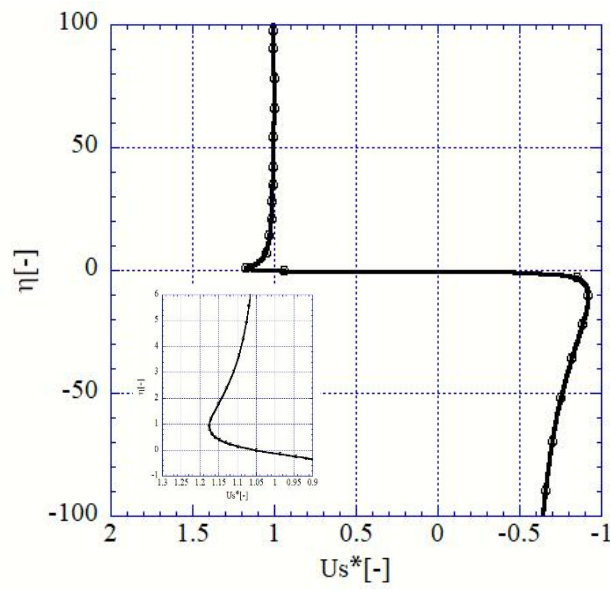
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.11 上部パーズジェット圧力分布

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.12 上部パージジェット無次元液膜分布($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.13 上部パージジェット無次元液膜表面流速($p_p = 5\text{kPa}$)

(c) $-100 \leq \eta \leq 100$ (d) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.14 上部パーゼジェット無次元液膜分布($p_p = 10\text{kPa}$)Fig.4.15 上部パーゼジェット無次元液膜表面流速($p_p = 10\text{kPa}$)

(e) $-100 \leq \eta \leq 100$ (f) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.16 上部パーシジェット無次元液膜分布($p_p = 15\text{kPa}$)Fig.4.17 上部パーシジェット無次元液膜表面流速($p_p = 15\text{kPa}$)

4.2.2 中部パージジェット

次に、ガスワイピング装置の中部からパージジェットを噴出させた場合について検証する。本項においてはパージ圧力 p_p を $p_p = 5\text{kPa}$ に設定し、上部の場合との違いを確認する。

Fig.4.18 に中部パージジェットの速度分布を示す。解析結果より、パージジェットは上部パージの時のように安定した流動となっている。また、装置外側のメインフレームから噴流するシーリングジェットが 4.2.1 項の時と比べて大きく湾曲してガスワイピング装置外部に流出するが、シーリングジェットはガスワイピング装置上面に沿って壁面衝突噴流し、よどみ領域を形成しているためシーリング領域が外部流れを遮断していると考えられる。一方パージジェットについても、4.2.1 項と同様にパージジェット噴出後ガスワイピング装置の斜面上部に沿ってワイピングジェットの方向に流れていることがわかる。

Fig.4.19, Fig.4.20 に流線および速度ベクトルを示す。Fig.4.19 ではパージノズルがガスワイピング装置斜面の近くで噴流する分、装置壁面に衝突後、装置上面での流速が速くなっていることがわかる。Fig.4.20 より、4.2.1 項と比べてベクトル方向に変化はなく、同様の渦の形成が見られることがわかる。

Fig.4.21 に窒素質量分率を示す。Fig.4.21(a)より、シールド領域内の窒素質量分率が約 95% 以上であることがわかる。しかし、Fig.4.21(b), (c)より、4.2.1 項の時と比べて鋼板付近の窒素質量分率が低下し、範囲が小さくなっていることがわかる。また、シールド領域内全体の窒素質量分率が低下していることがわかる。

Fig.4.22 に圧力分率を示す。解析結果から、パージジェットが装置壁面に衝突した部分において圧力が高くなっているが、シールド領域内では 4.2 節のパージ圧力 $p_p = 5\text{kPa}$ 時の圧力分布と類似していることがわかる。

Fig.4.23 に無次元液膜分布を示す。Fig.4.23(a)より、4.2.1 項の $p_p = 5\text{kPa}$ の時と類似していることがわかるが、Fig.4.23(b)より、 η の範囲を $0 \leq \eta \leq 50$ にすると液膜が増えていることがわかる。実際の膜厚値に変換すると約 $0.2 \mu\text{m}$ 増加している。これはパージジェットが装置の斜面上部に沿って流れた後、ワイピングジェットに影響を与え偏向させていると考えられる。また、Fig.4.24 の無次元液膜流速より、 $\eta=0$ 直下では 4.2.1 項の $p_p = 5\text{kPa}$ よりも負の値が大きくなっていることからワイピングジェットに影響を与えていることがわかる。

以上の結果から、中部パージではシールド領域内の窒素質量分率が低下し、ワイピングジェットに影響が出るのでパージ新技術として適さないと考える。

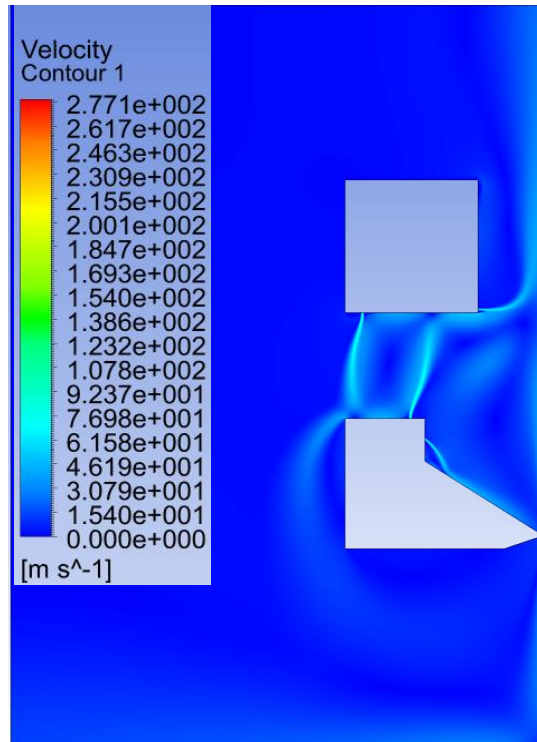


Fig.4.18 中部パージジェット速度分布($p_p = 5\text{kPa}$)

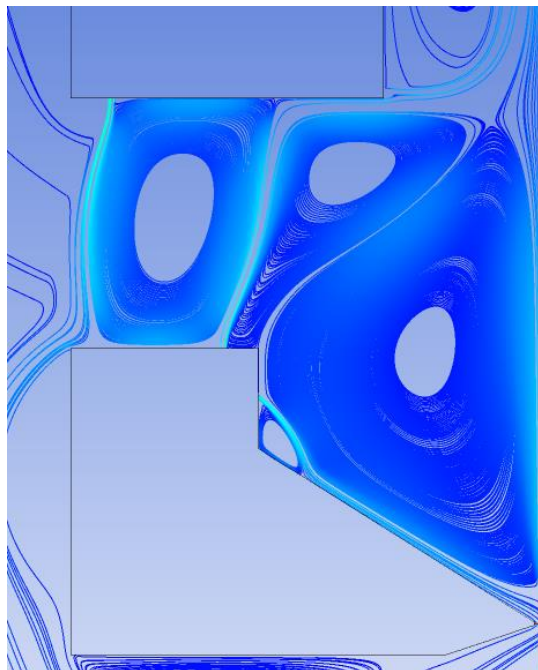


Fig.4.19 中部パージジェット流線($p_p = 5\text{kPa}$)

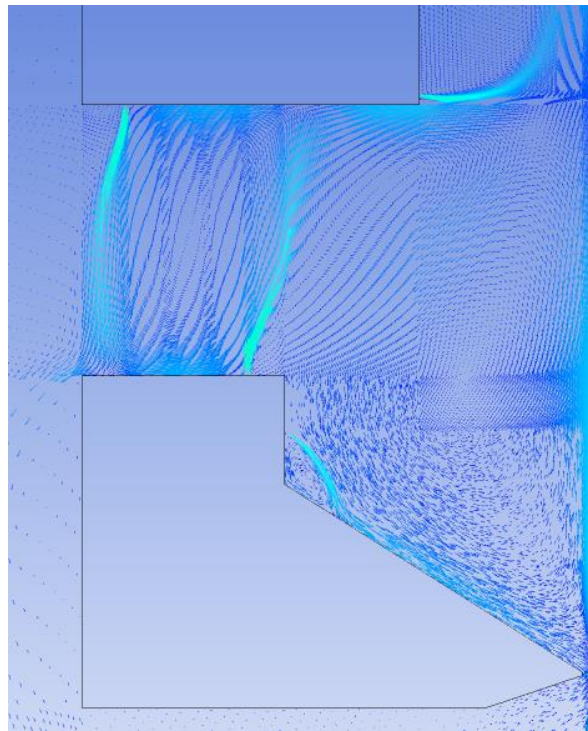
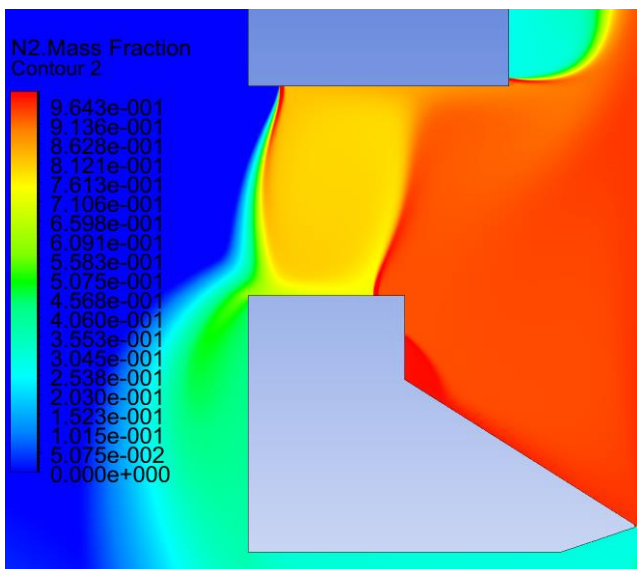
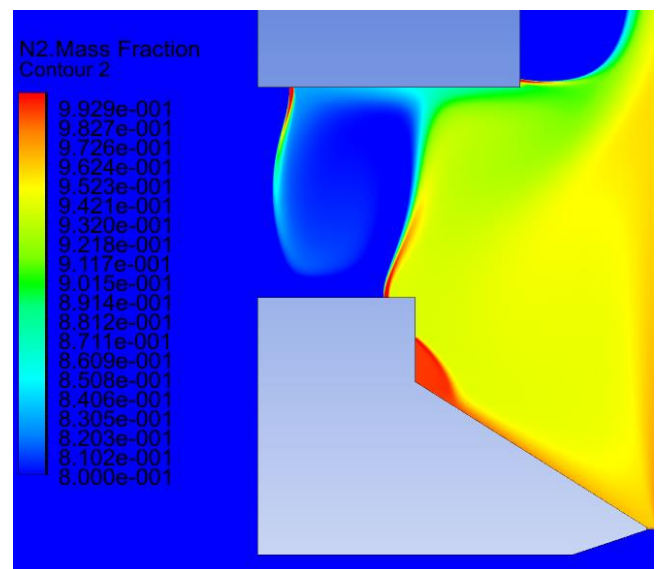


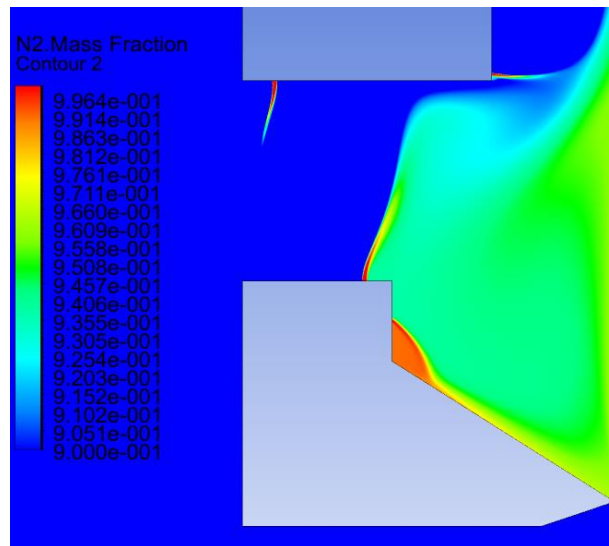
Fig.4.20 中部パーシジェット速度ベクトル($p_p = 5\text{kPa}$)



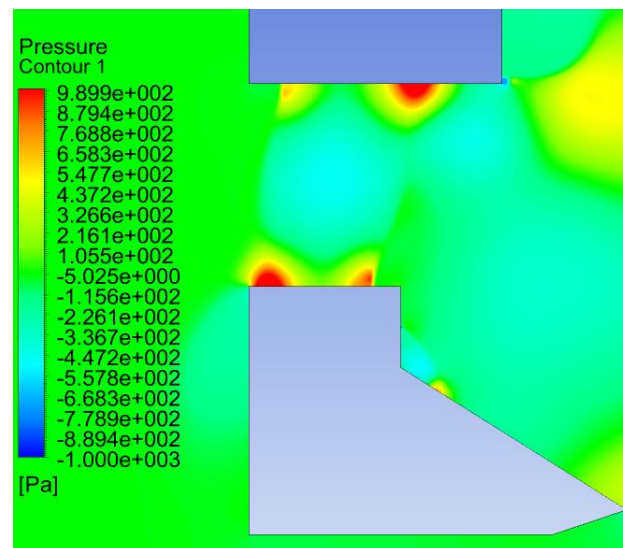
(a) 窒素質量分率 0~100%

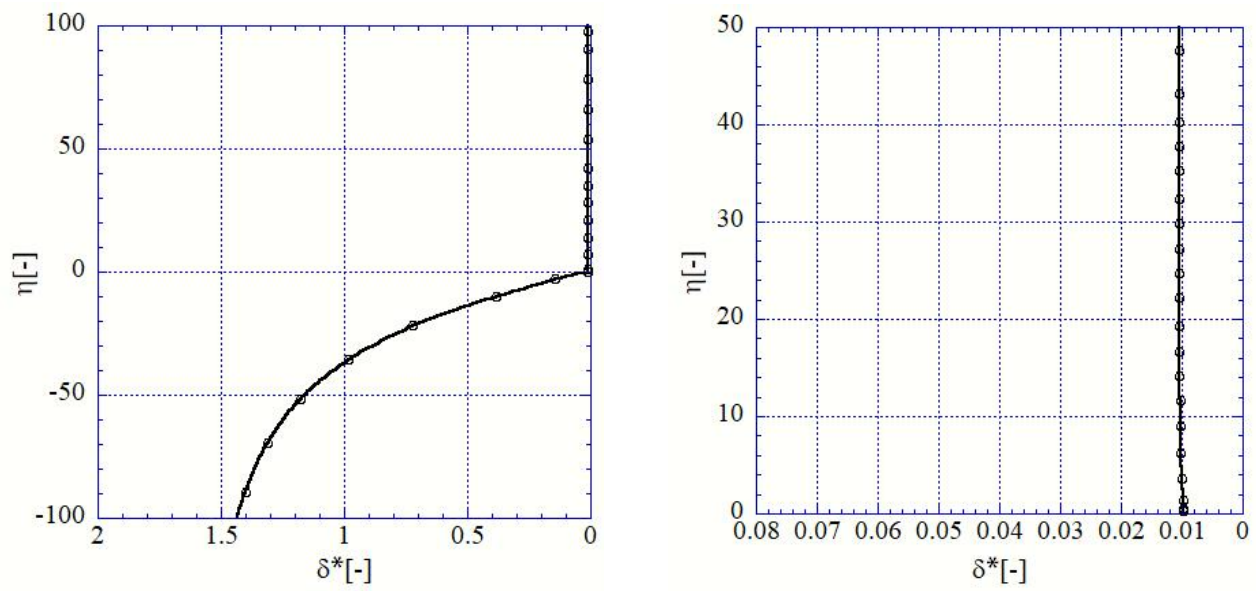
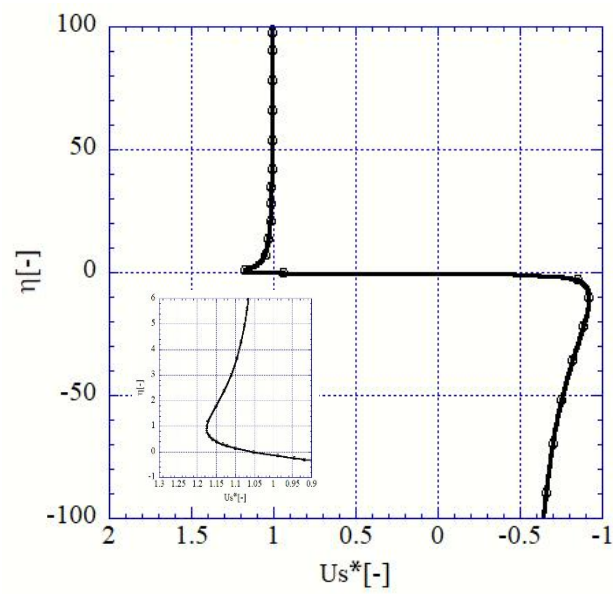


(b) 窒素質量分率 80~100%



(c) 窒素質量分率 90~100%

Fig.4.21 中部パーシジェット窒素質量分率($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.22 中部パーシジェット圧力分布($p_p = 5\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.23 中部パーズジェット無次元液膜分布($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.24 中部パーズジェット無次元液膜表面流速($p_p = 5\text{kPa}$)

4.2.3 下部パーージジェット

次に，ガスワイピング装置の下部からパーージジェットを噴出させた場合について検証する．本項においてもパーージ圧力 p_p を $p_p = 5\text{kPa}$ に設定し，上部および中部の場合との違いを確認する．

Fig.4.25 に中部パーージジェットの速度分布を示す．解析結果より，本ケースにおいても4.2.1 項および4.2.2 項と同様にパーージジェットは上部，中部パーージの時のように安定した流動となり，またシーリングジェットも壁面衝突噴流し，よどみ領域を形成しているためシーリング領域が外部流れを遮断していると考えられる．さらにシーリングジェットの噴流形成は4.2.2 項と似ていることがわかる．一方，パーージジェットは噴流直後，壁面に衝突せず，そのまま装置の斜面部に沿ってワイピングジェットの方向に流れていることがわかる．

Fig.4.26, Fig.4.27 に流線および速度ベクトルを示す．Fig.4.26 では4.2.1 項および4.2.2 項とは異なり，パーージジェットによるノズル下部の渦形成がないことがわかる．Fig.4.27 より，4.2.1 項および4.2.2 項と同様の速度ベクトル方向であり，あまり変化が見られないことがわかる．

Fig.4.28 に窒素質量分率を示す．Fig.4.28(a)より，本ケースにおいてもシールド領域内の窒素質量分率が約95%以上であることがわかる．Fig.4.28(b)より，装置の斜面部に沿って，パーージノズル噴出後からワイピングノズル付近まで約98%以上に保たれていることがわかる．Fig.4.28(c)より，下限を90%に設定すると鋼板付近において4.2.2 項に比べて若干低下していることがわかる．

Fig.4.29 に圧力分率を示す．解析結果から，4.2.1 項および4.2.2 項に比べてワイピングノズル付近の圧力が高くなっており，パーージジェットがワイピングジェットに対して影響を与えていることが顕著に現れている．これにより液膜の厚さに影響を及ぼすと考えられる．

Fig.4.30 に無次元液膜分布を示す．Fig.4.30(b)より，ワイピングジェット噴流後の液膜は4.2.1 項および4.2.2 項に比べて厚みを増していることがわかる．これはワイピングジェットの流れ方向が $\eta < 0$ に傾いていると考えられる．またFig.4.31の無次元液膜表面流速より，4.2.2 項と同様の傾向が見られ，ノズル直下での負の値が増加したのはパーージジェットとワイピングジェットの相互作用による影響だと考えられる．

以上の結果から窒素質量分率は4.2.1 項よりも劣り，無次元グラフからパーージジェットがワイピングジェットへの作用が大きいことがわかるため，装置の斜面部付近での噴流は

適さないと考える.

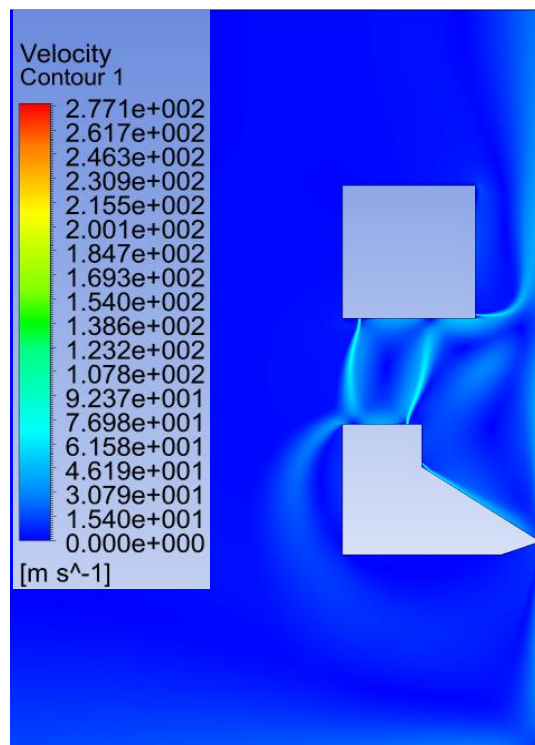


Fig.4.25 下部パージジェット速度分布($p_p = 5\text{kPa}$)



Fig.4.26 下部パージジェット流線($p_p = 5\text{kPa}$)

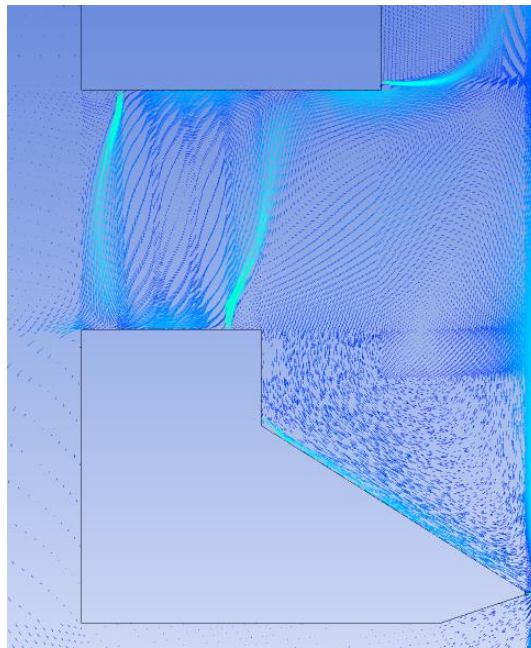
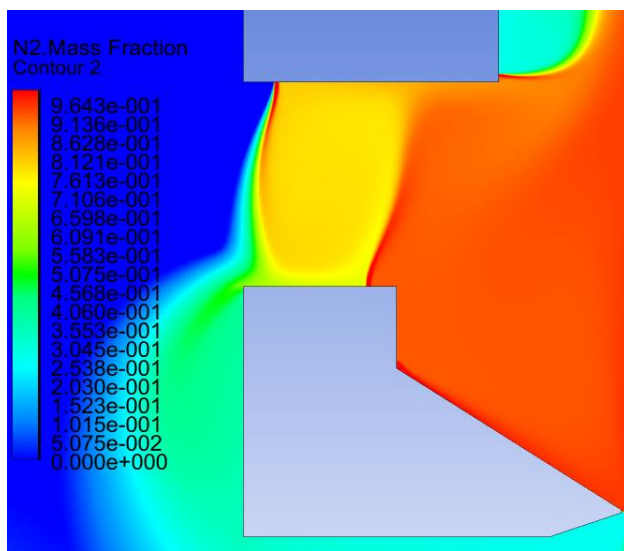
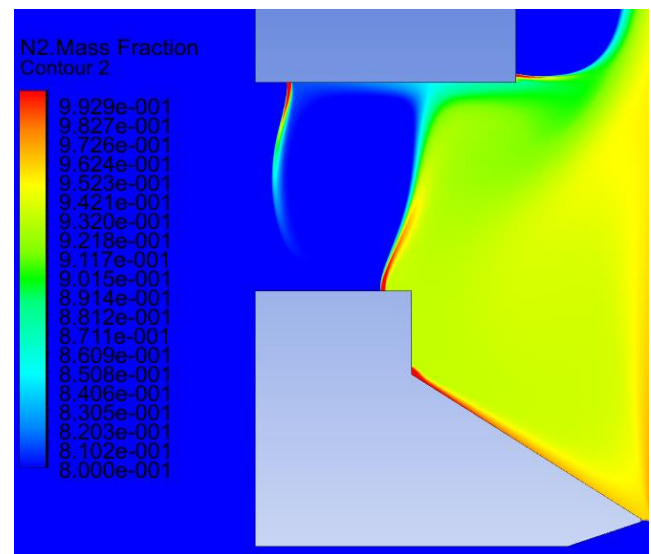


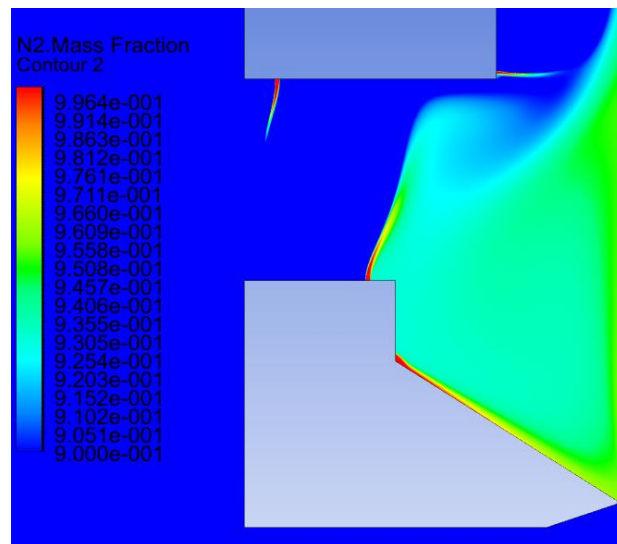
Fig.4.27 下部パージジェット速度ベクトル($p_p = 5\text{kPa}$)



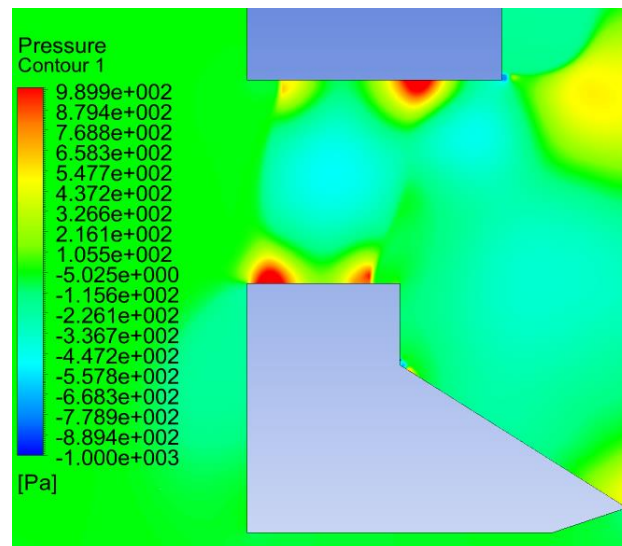
(a) 窒素質量分率 0~100%

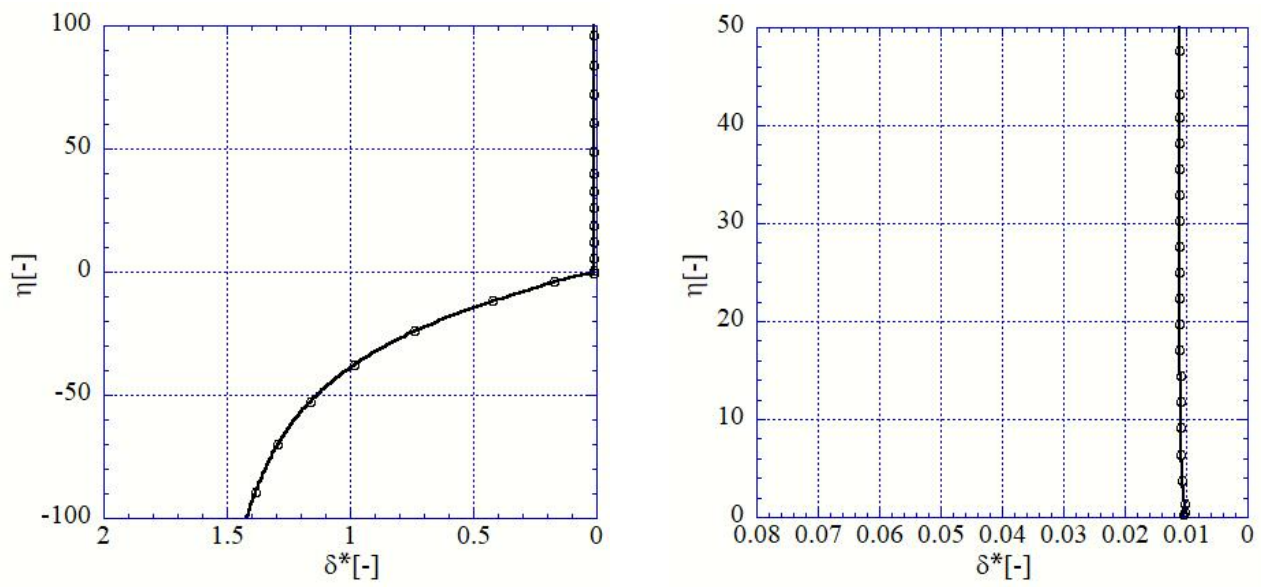
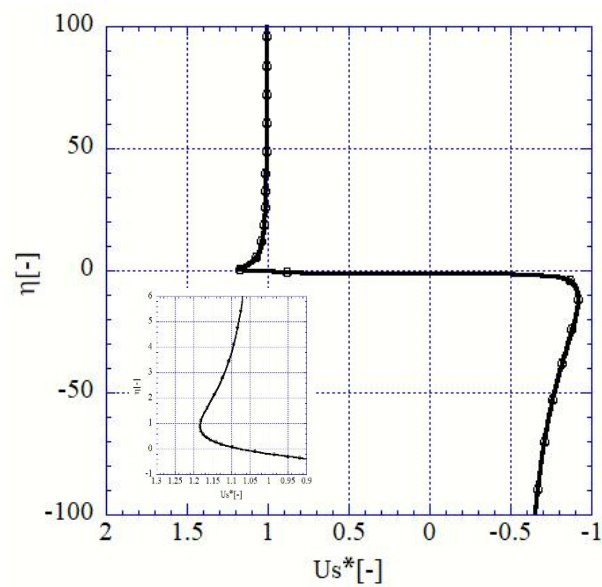


(b) 窒素質量分率 80~100%



(c) 窒素質量分率 90~100%

Fig.4.28 下部パーシジェット窒素質量分率($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.29 下部パーシジェット圧力分布($p_p = 5\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.30 下部パーシジェット無次元液膜分布($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.31 下部パーシジェット無次元液膜表面流速($p_p = 5\text{kPa}$)

4.2.4 上部パーシジェットにおける定常解析と非定常解析の比較

本項では、パーシジェットの噴流位置として最も有効であると考えられる上部パーシジェットにおいて、定常解析と非定常解析の比較を行う。これにより、定常解析によって得られた流れ場になるために要する時間を推測することができる。

Fig.4.32 より、非定常解析によって得られた各時間の速度分布を示す。結果を示す時間については、 $t=0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4\text{s}$ における流れ場を示している。Fig.4.32(a)から(c)より、 $t=0.1\text{s}$ までは各時間における上部パーシジェットの流れは湾曲が大きいため、安定しないことがわかる。また、シーリングジェットにおいても流れが乱れているので安定しないことがわかる。 $t=0.15\text{s}$ から 0.2s にかけては、シーリングジェットがガスワイピング装置の上面に衝突し、外部流れを遮断できていることがわかる。さらに、 $t=0.25\text{s}$ から 0.4s にかけては、時間変化による流れ場の変化は見られない。よって、流れ場は各ジェットの噴出後 0.25s 経過した辺りから安定していると考えられる。

Fig.4.33 および Fig.4.34 に、定常解析と $t=0.4\text{s}$ における非定常解析の速度分布と流線について比較した結果を示す。両図より、速度分布および流線はほとんど一致していることがわかる。以上の結果から、上部パーシジェットでは、噴出後約 0.25s で安定した流動を示すと考えられる。

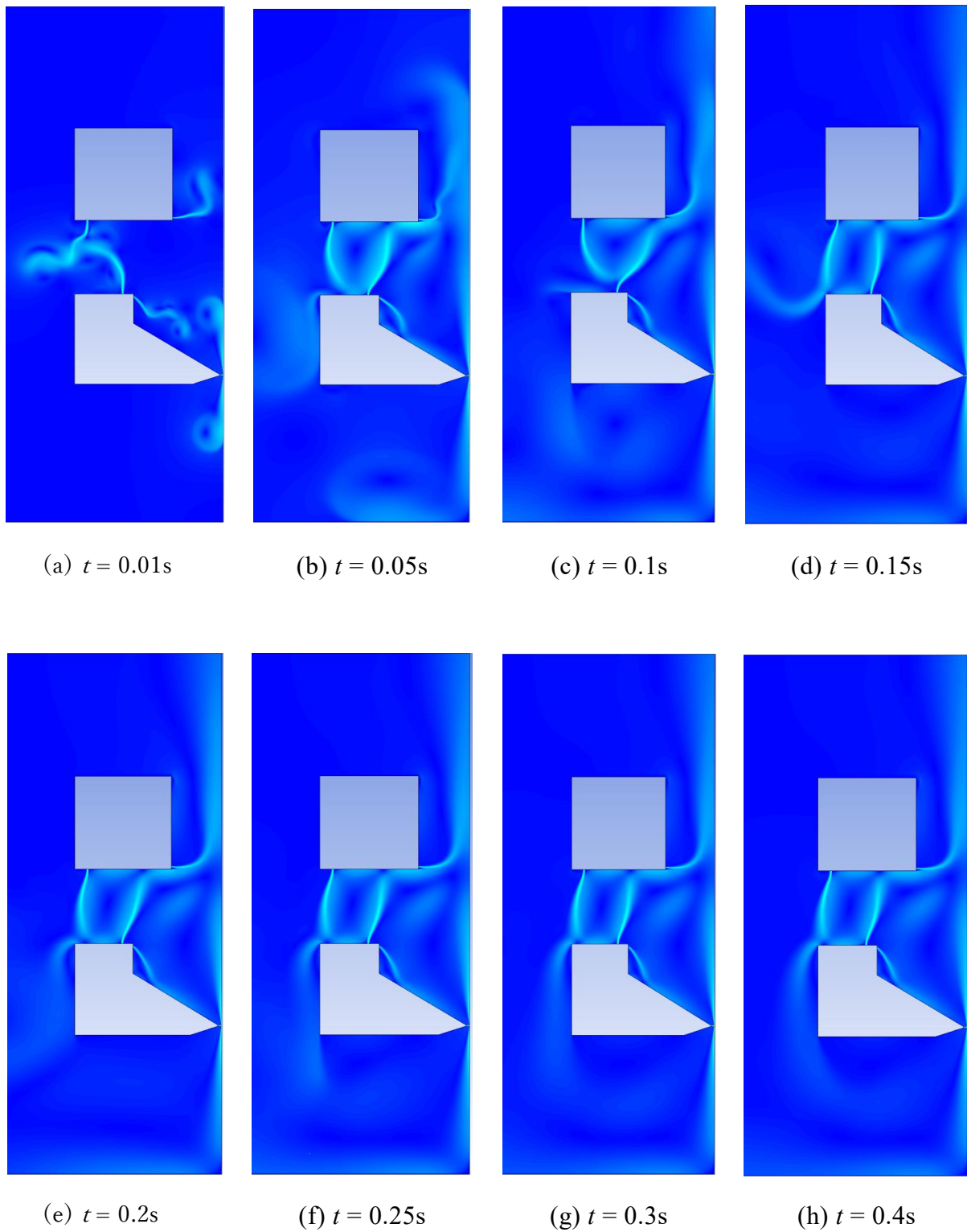
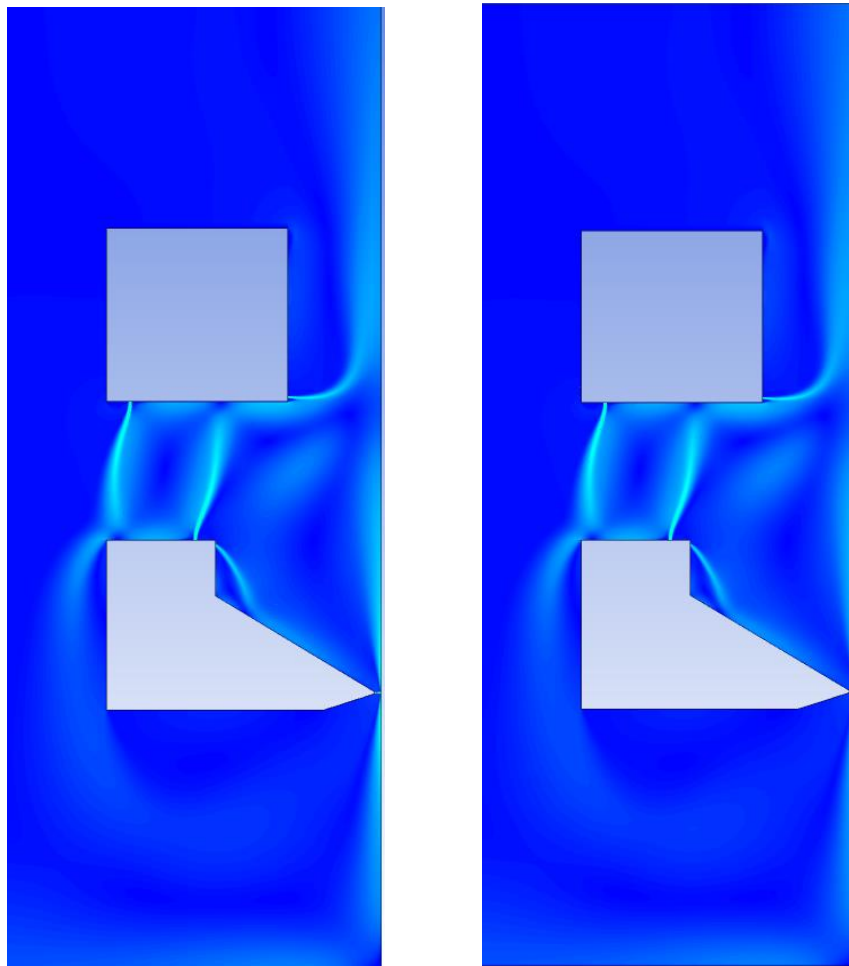


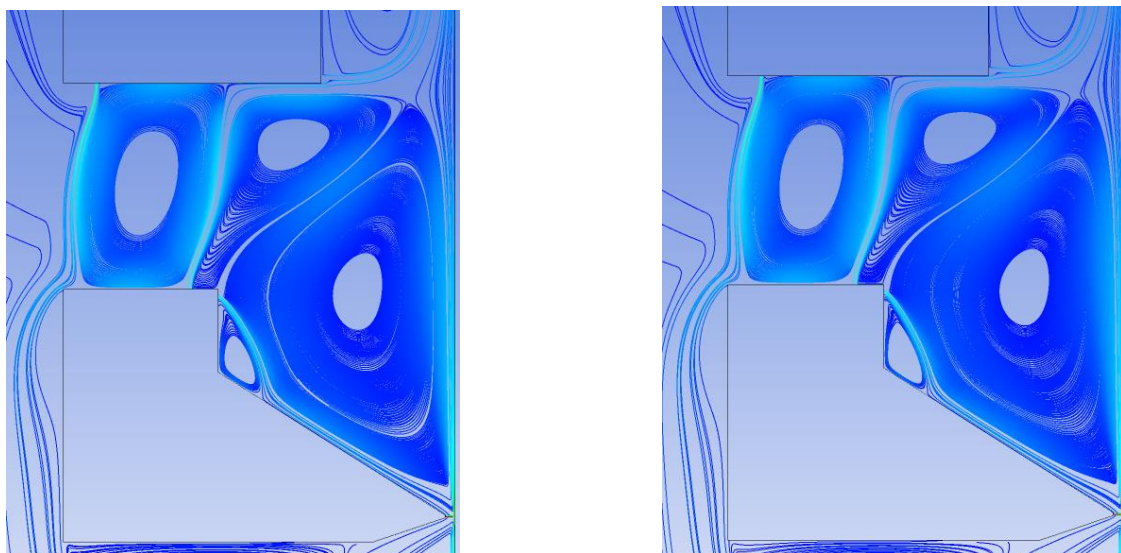
Fig.4.32 上部パーシジェット(非定常解析)速度分布推移



(a) 定常解析

(b) 非定常解析 ($t = 0.4s$)

Fig.4.33 定常解析と非定常解析の速度分布比較



(a) 定常解析

(b) 非定常解析 ($t = 0.4s$)

Fig.4.34 定常解析と非定常解析の流線比較

4.3 ドロス回収時におけるパーシジェットの数値解析

本項は、ドロス回収時におけるパーシジェットの解析結果について述べる。4.1 項と同様に Table4.1 に設定した様々なケースにおいて、パーシジェットならびにシールド領域内の流動特性を考察した。

4.3.1 シングルパーシジェット(上部)

4.2 項においてパーシノズル位置を高くすることで、シールド領域内の大きく乱れの少ない渦と、酸素低減を確立できたことから本項においても最初に、ガスワイピング装置の上部からパーシジェットを噴出させた場合について検証する。Table4.1 の通り、シールド領域に対するパーシジェットの最適な圧力を見出すため、パーシ圧力 p_p を $p_p = 5\sim 15\text{kPa}$ の範囲で変化させる。

Fig.4.35 に、各パーシ圧力におけるシングルパーシジェット(上部)の速度分布を示す。Fig.4.35(a)に示すように、シーリングジェットを止めたことで、メインフレームから鋼板方向に流れるシーリングジェットが湾曲し外部からの空気を遮断できていないことがわかる。パーシジェットは 4.2 項と同様にノズルから噴流後、ガスワイピング装置壁斜面と平行に噴出され、その後装置壁面に衝突する。衝突後、ガスワイピング装置壁面に沿って斜め左右方向に流れる。しかし、左方向に流れるジェットは 4.2 項の時とは異なり、速度が上がっていることがわかる。さらに、鋼板付近を上方向に流れるジェットも速度が上がり、範囲を増していることがわかる。これらはシーリングジェットの作用がなくなったことでシールド領域内の流れ場が複雑になり、渦が形成しにくくなったと考えられる。Fig.4.35(b), (c)から、パーシ圧力が上昇すると $p_p = 10\text{kPa}$ のパーシジェットの時は鋼板方向に流れるシーリングジェットがさらに湾曲し、パーシノズルの方に引っ張られていることがわかる。一方 $p_p = 15\text{kPa}$ ではシーリングジェットが噴流していないにもかかわらず、他のジェットは Fig.4.35(a), (b)と同様なジェットの流れになっていることがわかる。

Fig.4.36に各ケースの流線を示す。Fig.4.36(a)より、シールド領域内の流線の数が少なく、密集していないことがわかる。これによってシールド領域内で大きな渦が発生しなくなり、領域全体に窒素が充満しにくくなると考えられる。また、パーシジェットの下部に形成した渦は流線が密集していることから、パーシジェットが大きな渦を形成させる作用を果たしていないと考える。Fig.4.36(b), (c)から、パーシ圧力が上昇すると Fig.4.36(a)よりもシールド領域内の流線が密集していることがわかる。特に Fig.4.36(c)ではより大きな渦が形成していることがわかる。これよりシーリングジェット使用時に近い窒素質量分率が得られ

るのではないかと考えられる。

Fig.4.37 に各ケースの速度ベクトルを示す。どのケースもシーリング領域内を通過して外部流れをしていることがわかる。また、パージジェットや鋼板方向に噴流するシーリングジェットは鋼板に沿って上方向に流れを作用させているが、シールド領域内の渦の形成にあまり作用していないことがわかる。

Fig.4.38 から Fig.4.40 に窒素質量分率を示す。Fig.4.38 より、どのケースにおいてもシールド領域内全体に窒素が充満していないことがわかる。特に鋼板付近においては約 50~60% しか窒素を満たしておらず、シーリングジェットの湾曲によりシールド領域内に外部流れが流入していることがわかる。Fig.4.39 より、窒素質量分率の下限を 80% に設定してもパージノズルと鋼板方向に噴流するシーリングジェット付近において 80% を上回る領域を確認できるが、領域内全体にわたって十分な窒素雰囲気形成できていないことがわかる。Fig.4.40 より、窒素質量分率の下限を 90% に設定すると、どのケースでも 90% を超える窒素雰囲気を形成できていないことがわかる。

Fig.4.41 に各ケースにおける圧力分布を示す。Fig.4.41(b) より、 $p_p = 10\text{kPa}$ ではパージジェットによってワイピング装置斜面部とワイピングノズル付近によどみ領域が形成されていることがわかる。また、パージジェット噴出口下部と鋼板方向に噴流するシーリングジェット噴出口下部には負圧領域がみられる。これはシーリングジェットやパージジェットによって形成された渦の中心であり、中心は他領域よりも大きな負圧値を示していることから、強い渦であることが考えられる。ワイピングノズル付近によどみ領域が形成されていることから膜厚に影響を与え、シーリングジェット使用時よりも液膜が小さくなると考えられる。

Fig.4.42 に無次元液膜分布を示す。Fig.4.42(b) より、4.2 項よりも液膜が増えていることがわかる。これはワイピングジェットの先端が曲がったことによりめっきに及ぼす圧力が小さくなったからだと考えられる。また、Fig.4.42 の無次元液膜流速より $\eta=0$ 直下において流速が負の値に増加していることからワイピングジェットが湾曲していることがわかる。

以上の結果から、シールド領域内の渦の強さが小さく、パージジェットの噴流量が不足していると考えられる。また、液膜が 4.2 項のような操業中の液膜と比べて厚いことから本ケースでは適さないと考える。

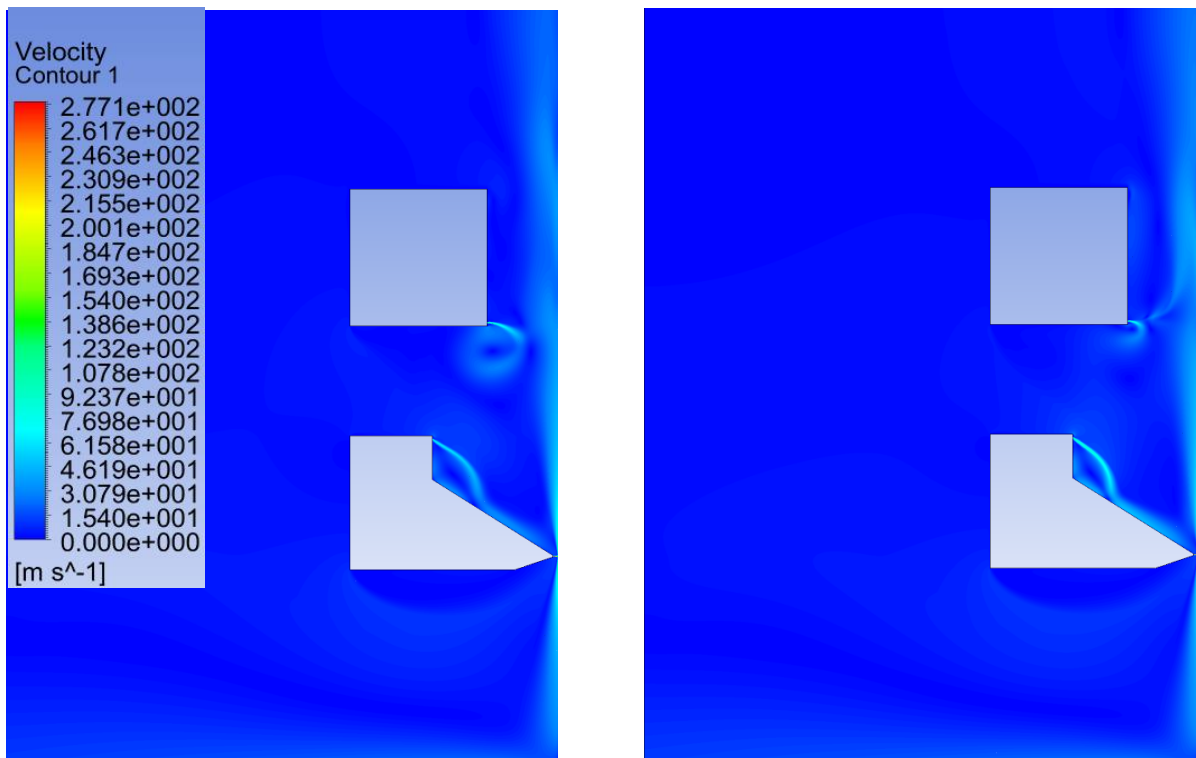
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.35 シングルパージジェット(上部)速度分布

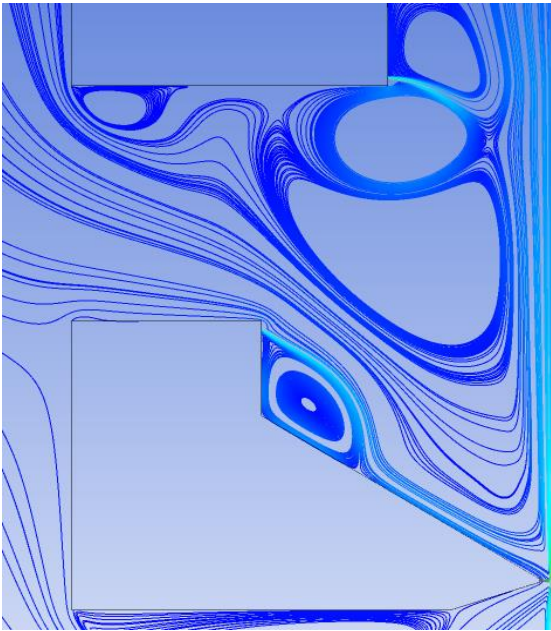
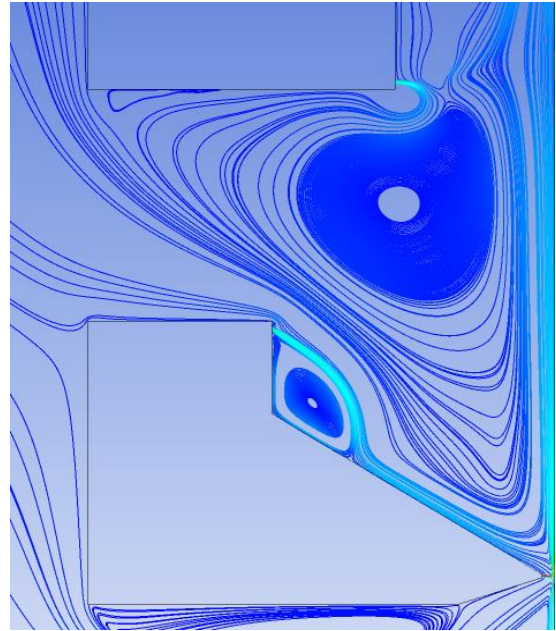
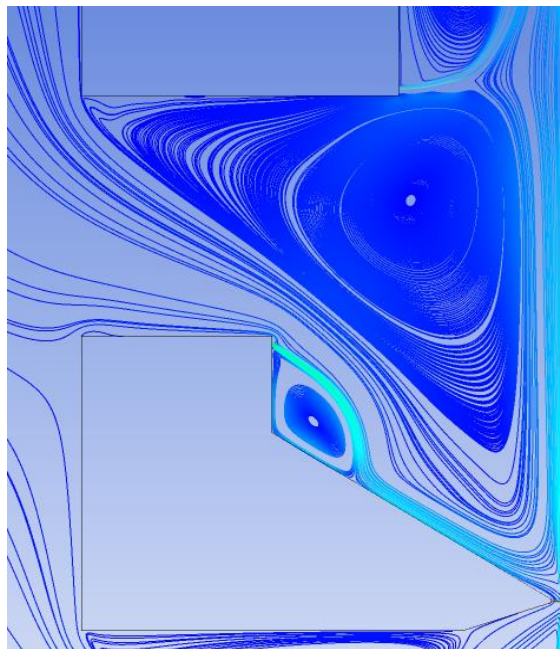
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.36 シングルパーズジェット(上部)流線

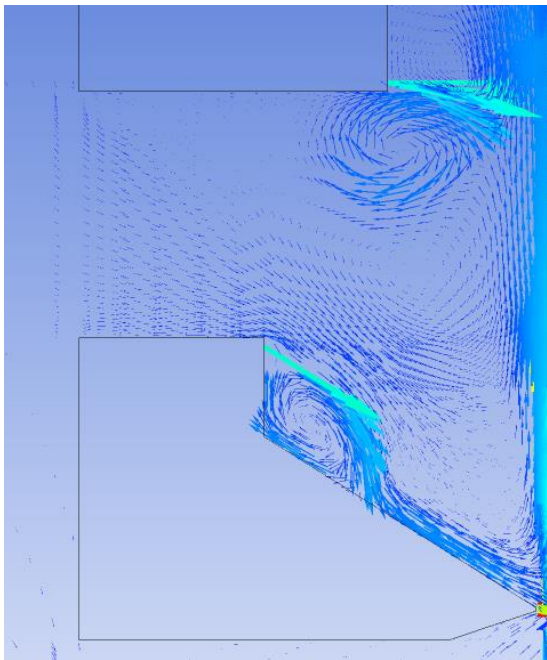
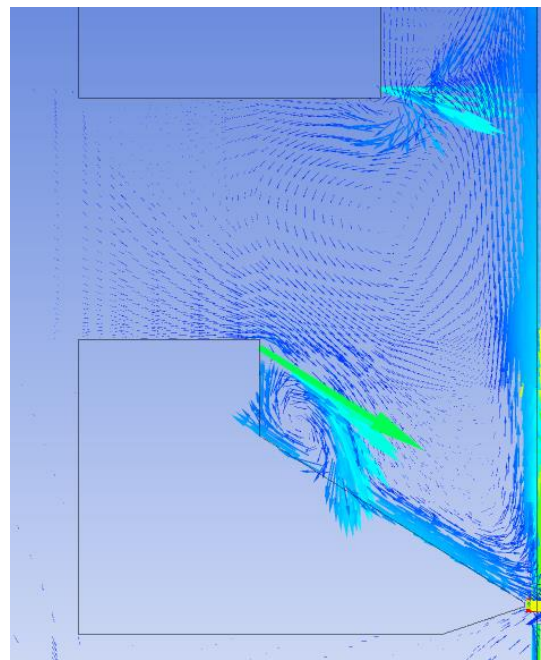
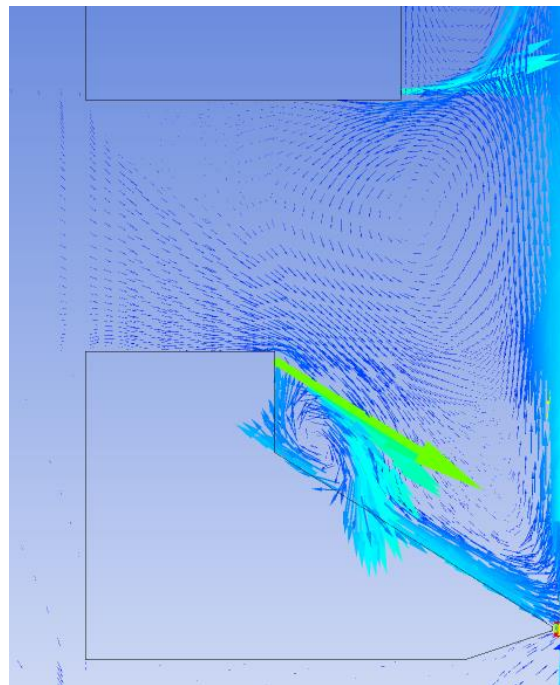
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.37 シングルパージジェット(上部)速度ベクトル

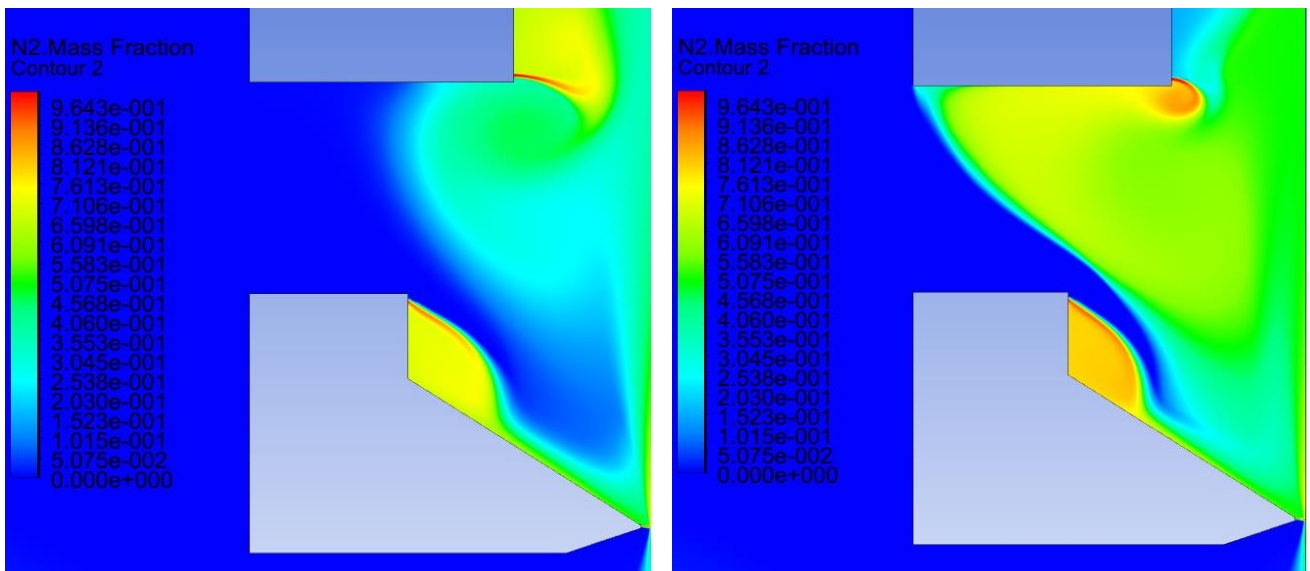
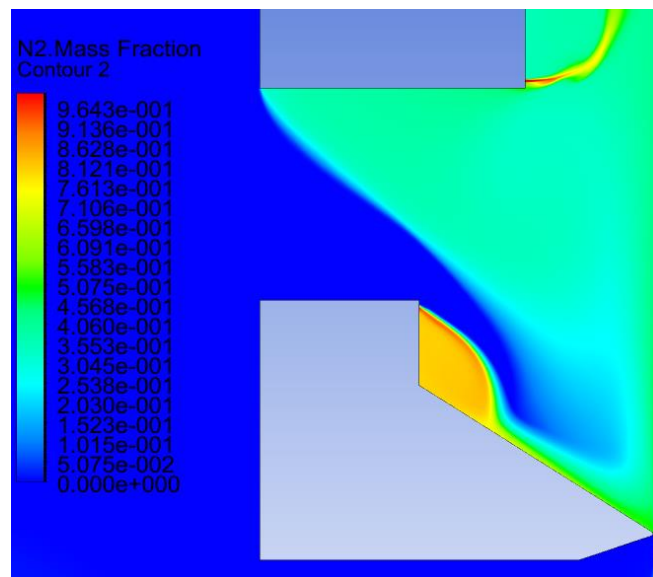
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.38 シングルパーズジェット(上部)窒素質量分率分布(0~100%)

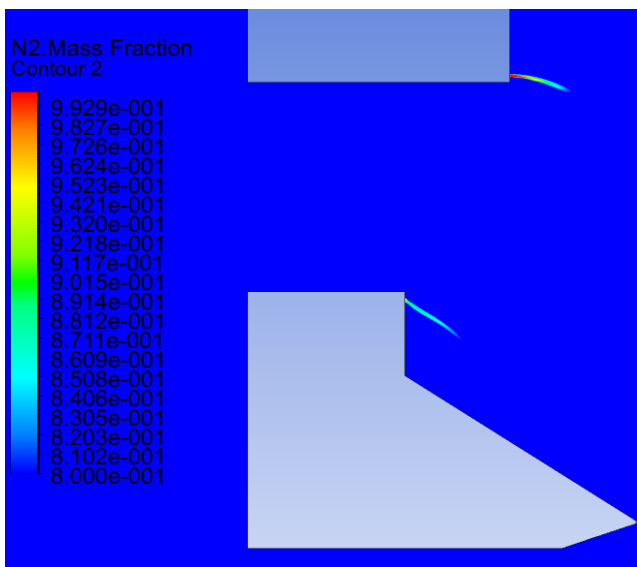
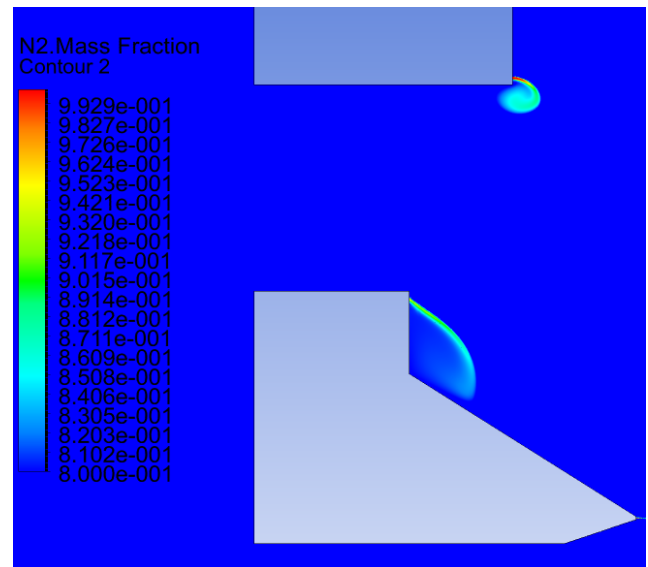
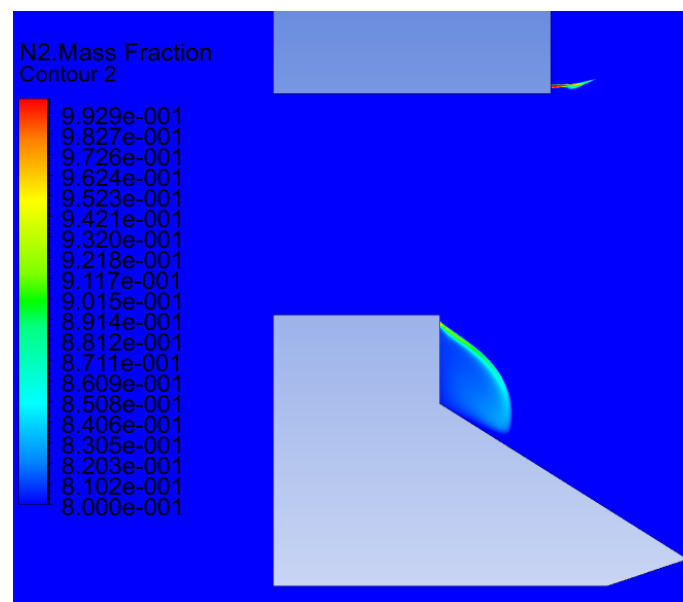
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.39 シングルパーズジェット(上部)窒素質量分率分布(80~100%)

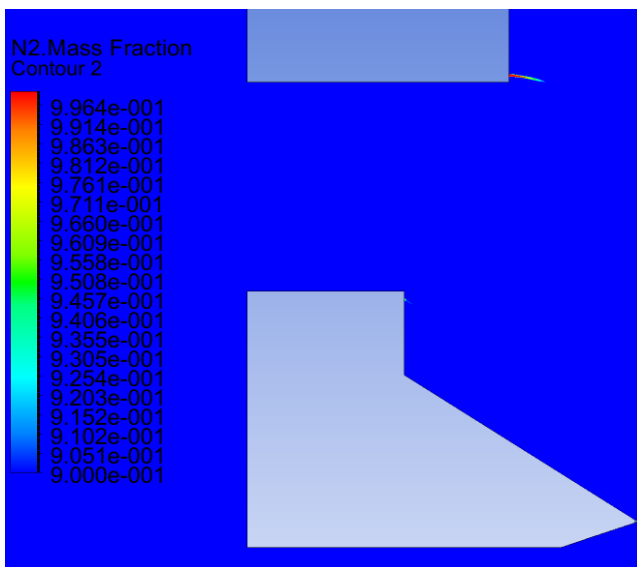
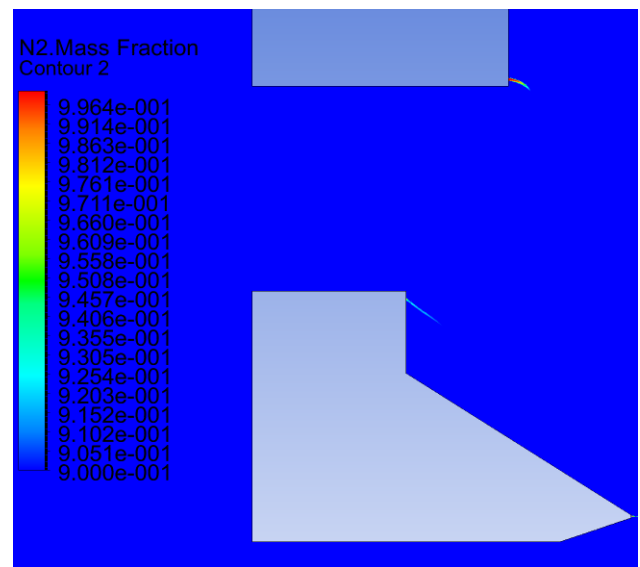
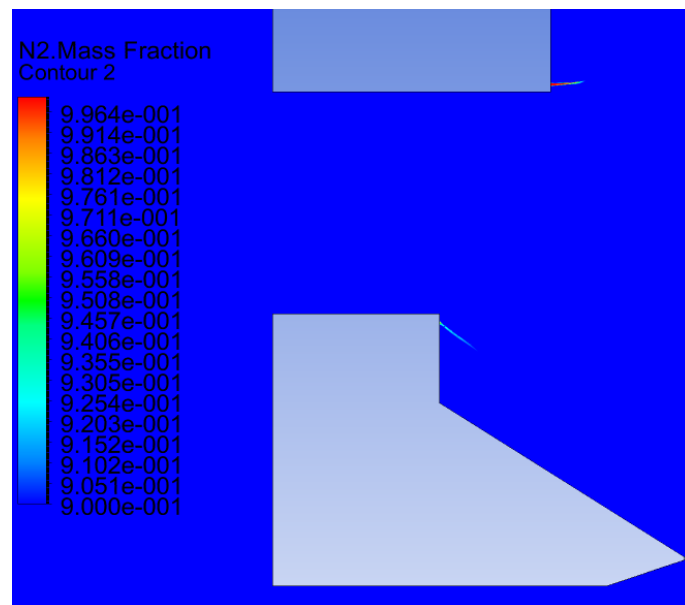
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.40 シングルパーズジェット(上部)窒素質量分率分布(90~100%)

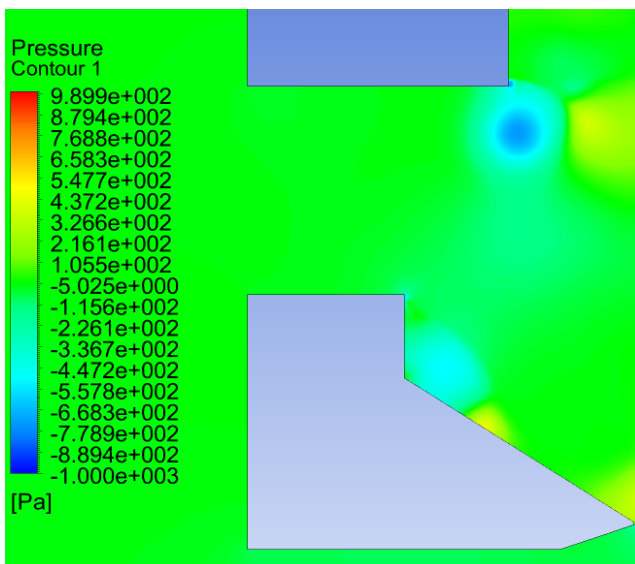
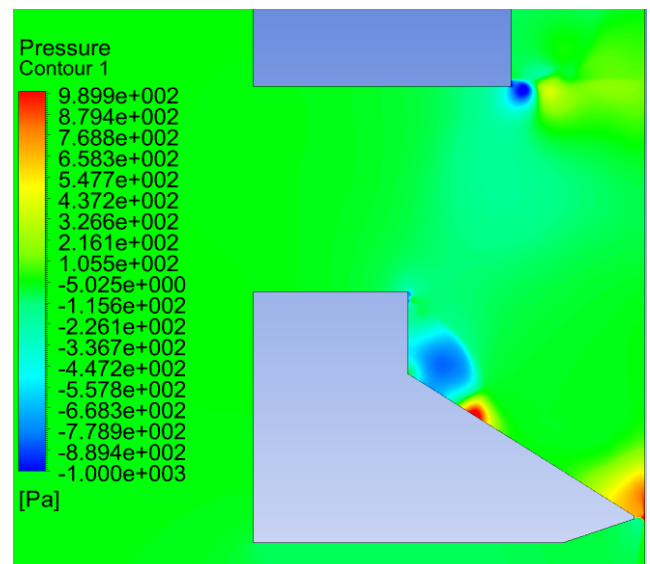
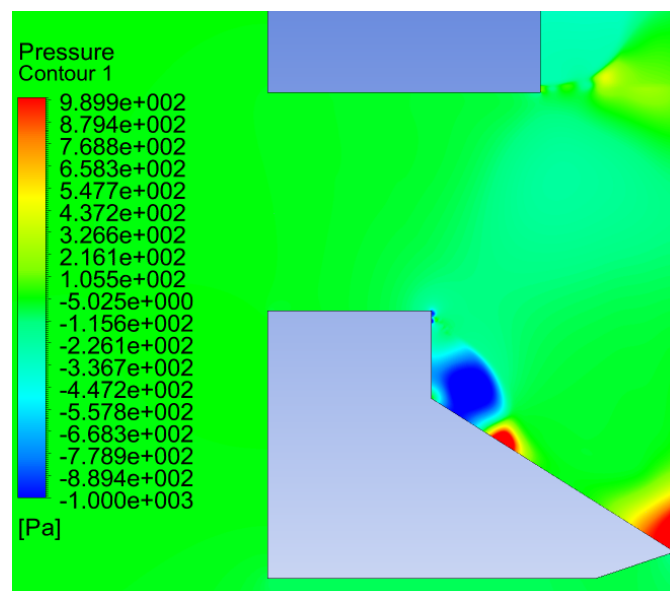
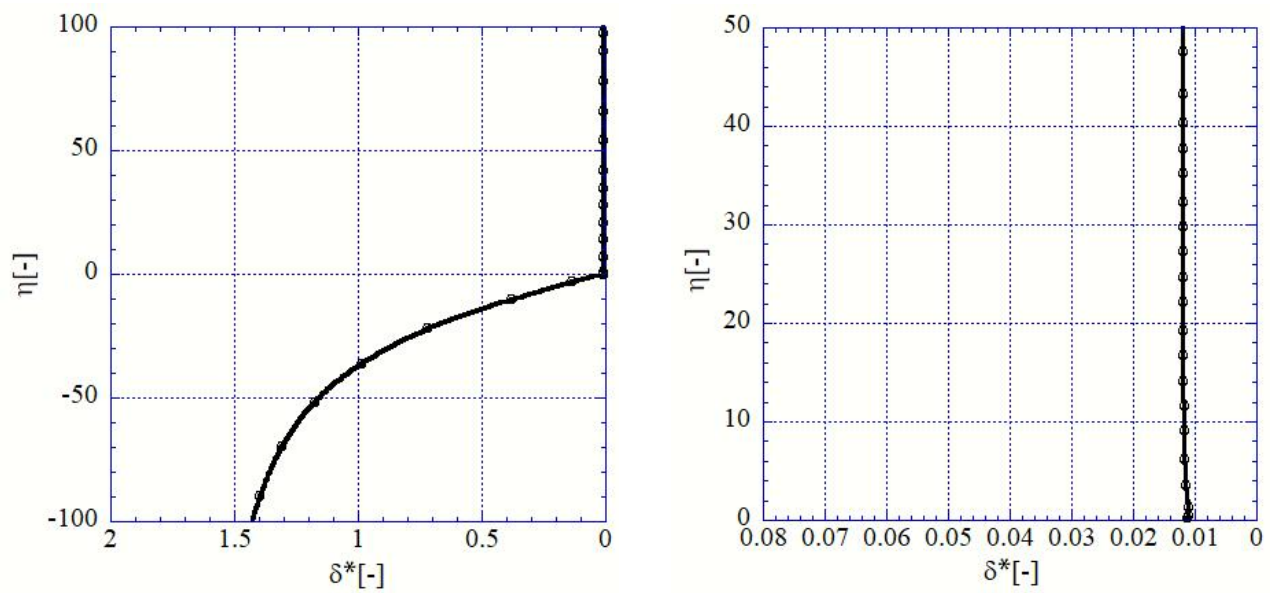
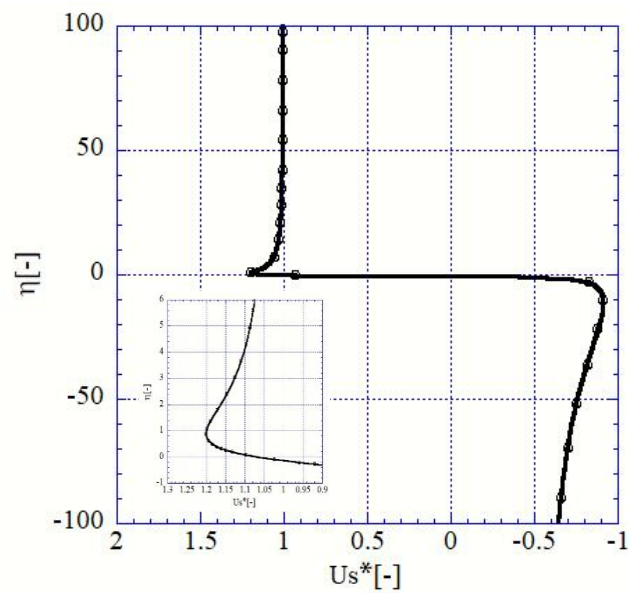
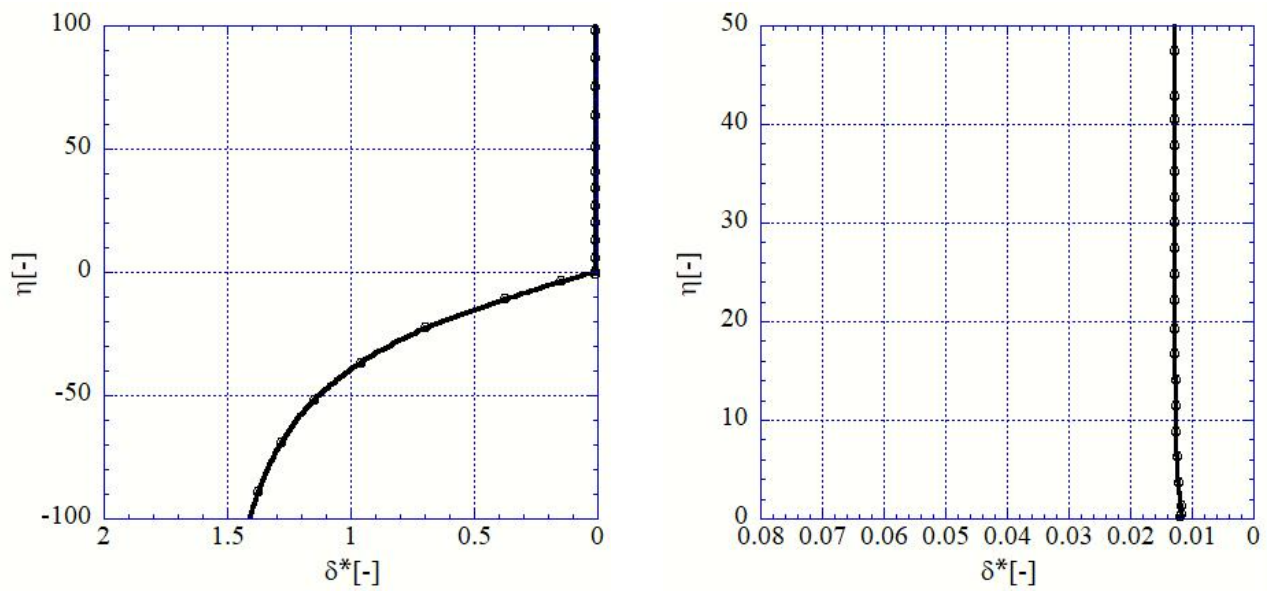
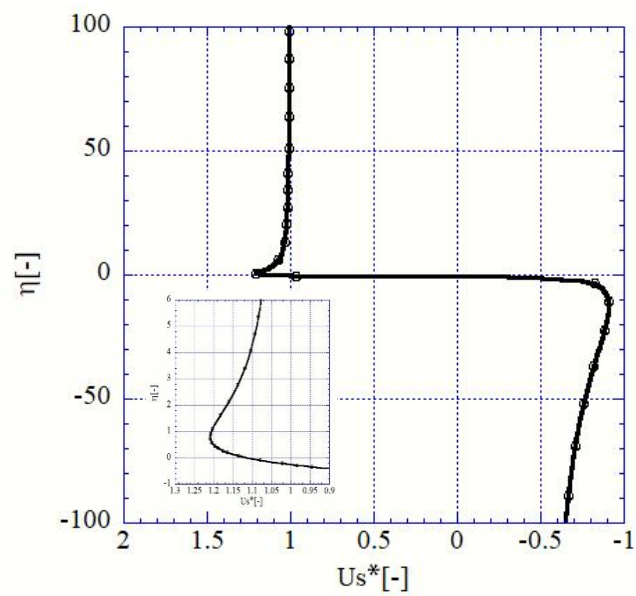
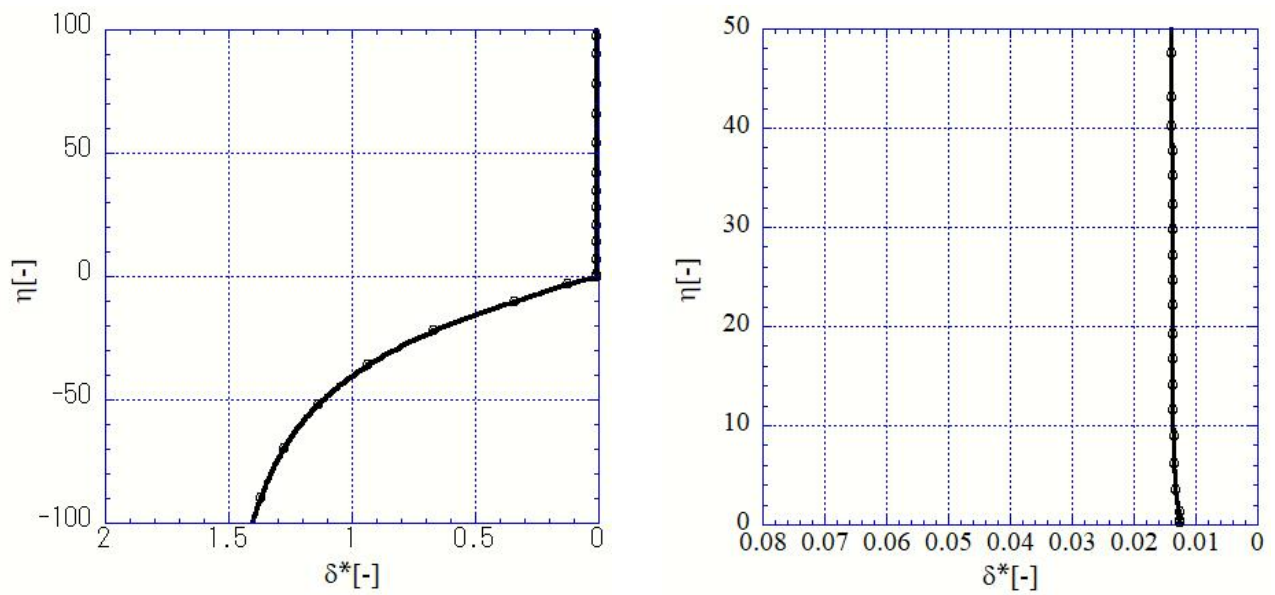
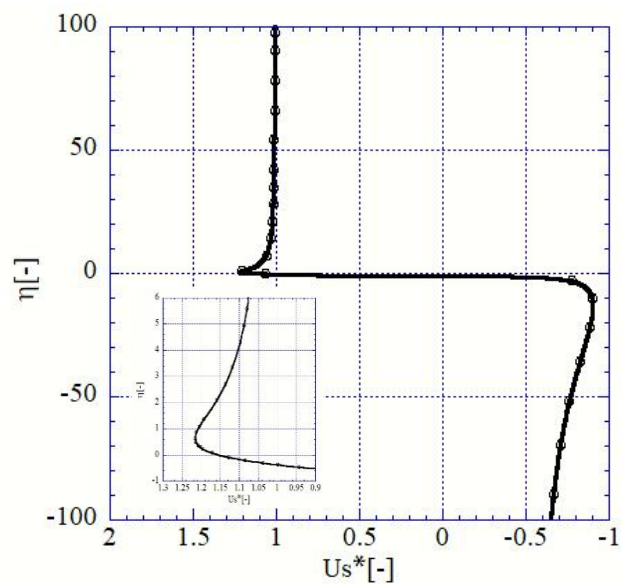
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 10$ kPa(c) $p_p = 15$ kPa

Fig.4.41 シングルパーズジェット(上部)圧力分布

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.42 シングルパージジェット(上部)無次元液膜分布($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.43 シングルパージジェット(上部)無次元液膜表面流速($p_p = 5\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.44 シングルパージジェット(上部)無次元液膜分布($p_p = 10\text{kPa}$)Fig.4.45 シングルパージジェット(上部)無次元液膜表面流速($p_p = 10\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.46 シングルパージジェット(上部)無次元液膜分布($p_p = 15\text{kPa}$)Fig.4.47 シングルパージジェット(上部)無次元液膜表面流速($p_p = 15\text{kPa}$)

4.3.2 ダブルパーシージェット

4.3.1 項ではパーシ圧力を増加させてもシールド領域内に窒素質量分率が十分に満たされていなかったため、本項ではパーシノズルを1つ追加してジェットを噴出させた場合について検証する。パーシノズルの組み合わせに関しては、Table4.1 のジェット噴出口番号①②、②③、①③で行い、パーシ圧力 p_p を $p_p = 5\text{kPa}$ に設定する。

Fig.4.48 に速度分布を示す。Fig.4.48(a)では鋼板方向に噴流するシーリングジェットが湾曲しているが、(b)、(c)では湾曲していないことがわかる。パーシジェットは各ケース共に噴流後、ワイピング装置の斜面部に衝突し、ワイピングノズル方向に流れていることがわかる。

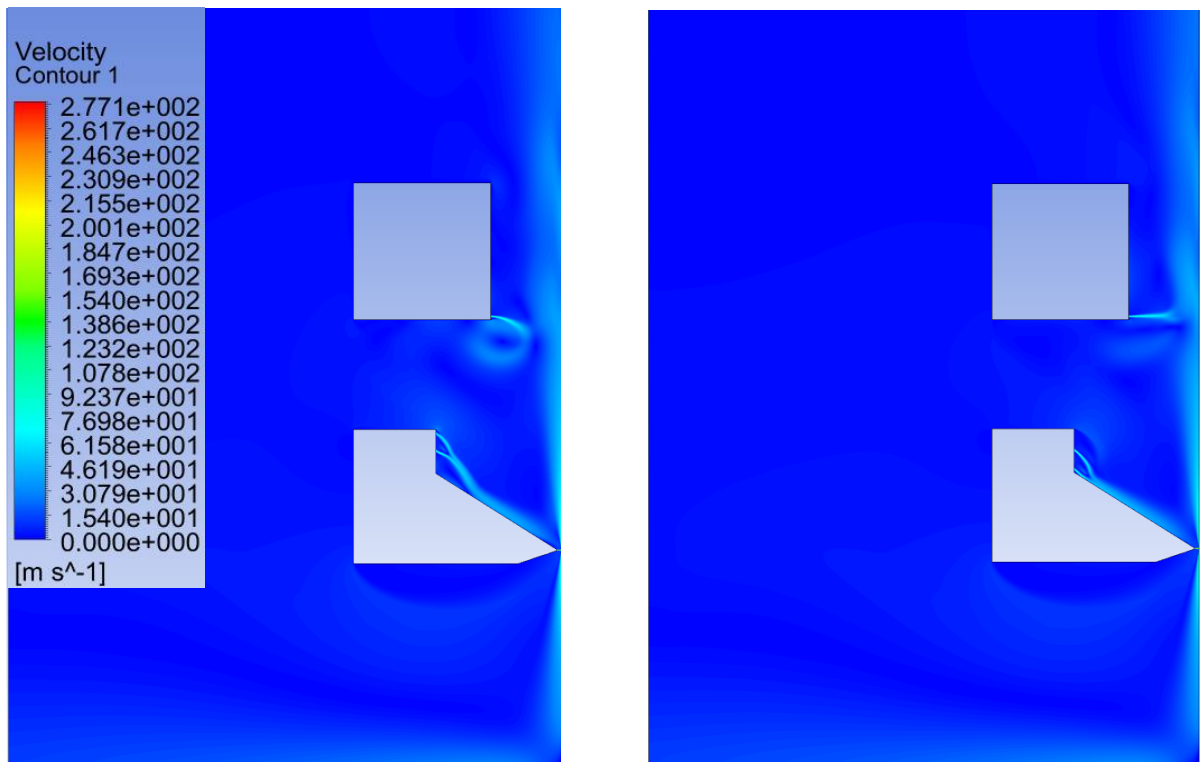
Fig.4.49 に流線を示す。Fig.4.49(a)より、鋼板方向に流れるシーリングジェットの湾曲の影響からシールド領域内に渦が複数形成されていることがわかる。また大きな渦は流線があまり密集していないことから渦の循環機能が小さく窒素質量分率が小さいと考えられる。Fig.4.49 (b)、(c)より、流線の密集が(a)よりも多いが、渦が複数形成されていることがわかる。特に(c)は(a)、(b)よりも渦が大きく外部流れへの影響が小さくなると考えられる。

Fig.4.51 に窒素質量分率を示す。Fig.4.51(c)のようにノズル位置を離すことでシールド領域内全体に窒素質量分率を高くできることがわかる。しかし、鋼板付近の窒素質量分率は約50~60%であるので4.3.1 項の時とあまり変化がない。Fig.4.52, Fig.4.53 よりパーシノズル付近では90%以上あるものの、鋼板付近や他の領域において十分な窒素雰囲気形成できていないことがわかる。

Fig.4.54 に圧力分布を示す。Fig.4.54(a)より、シーリングノズル付近では負圧値が大きくなっていることから Fig.4.49(a)に示す小さな渦が他の渦よりも強いことが考えられる。一方、ワイピングノズル付近の圧力が4.3.1 項と比べて高くないことからワイピングジェットにあまり影響を及ぼしてないと考えられる。

Fig.4.55 から Fig.4.60 に無次元液膜分布および無次元液膜表面流速を示す。各ケース比べても変化はなく、また4.3.1 項と比較しても変わらないことがわかる。

以上の結果から、4.3.1 項よりも窒素質量分率が高くなったが、50~60%で十分な窒素雰囲気形成できていない。また、液膜厚さにおいても4.3.1 項と同様であったことから本ケースでは適さないと考える。



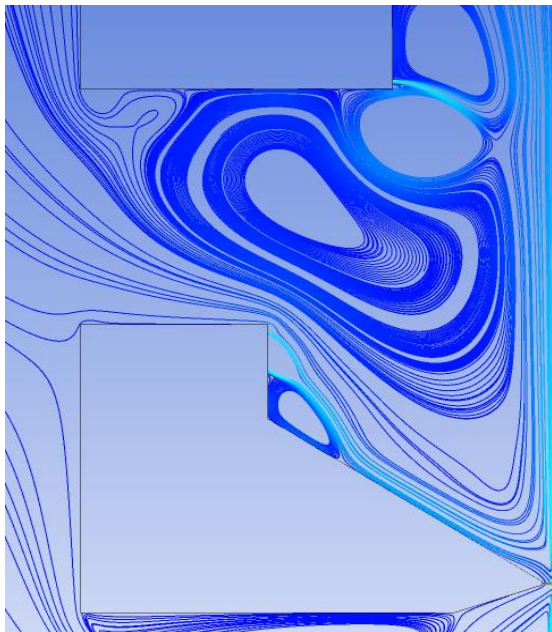
(a) ①②

(b) ②③

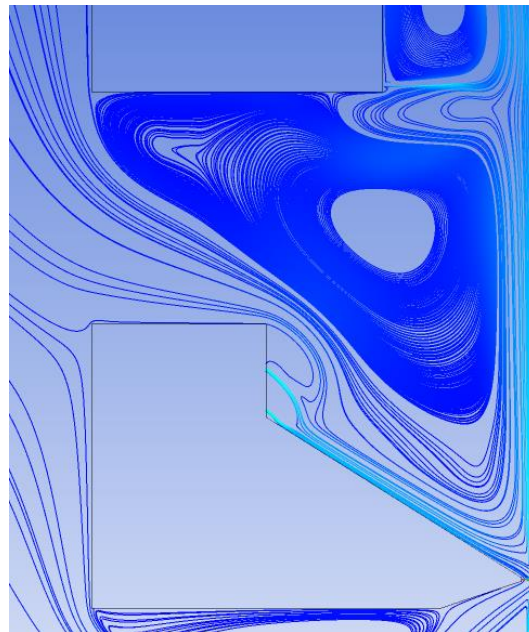


(c) ①③

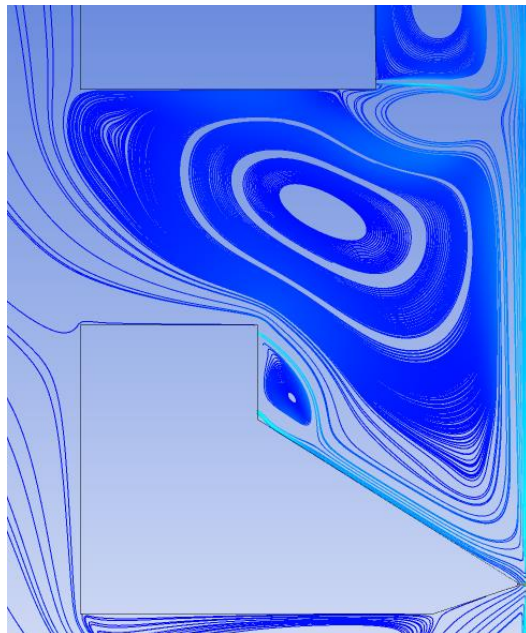
Fig.4.48 ダブルパージジェット速度分布



(a) ①②

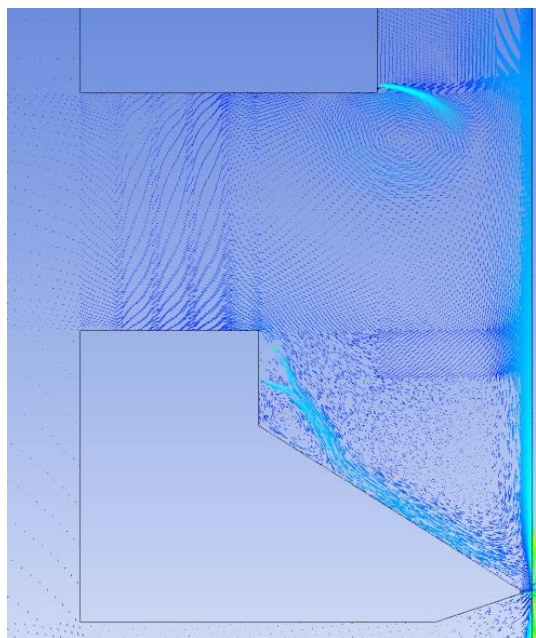


(b) ②③

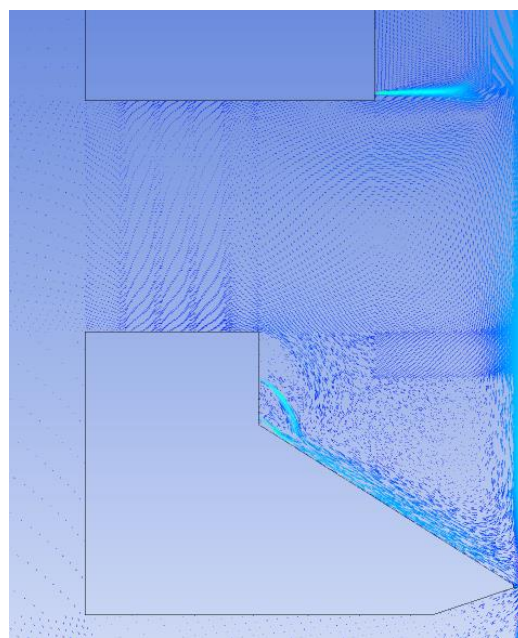


(c) ①③

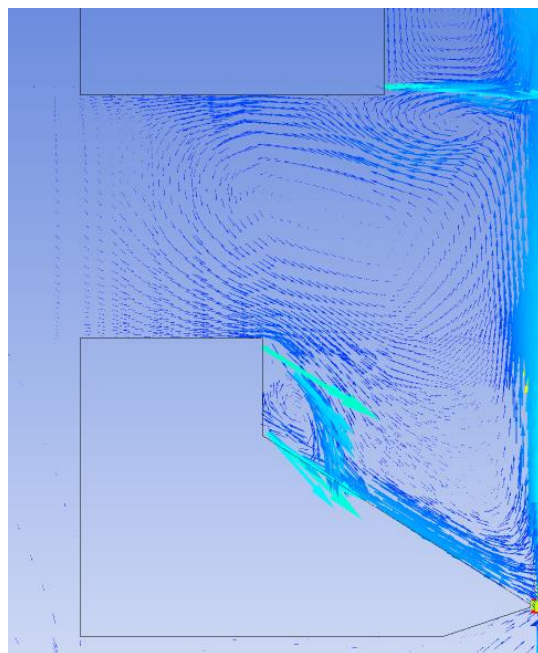
Fig.4.49 ダブルパーシジェット流線



(a) ①②

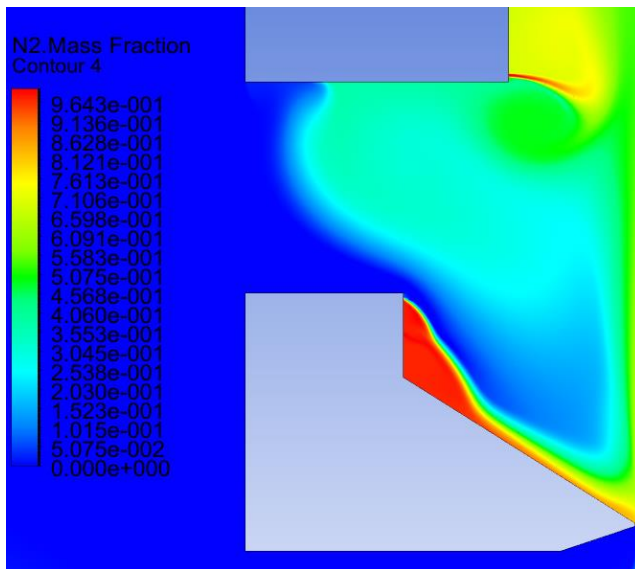


(b) ②③

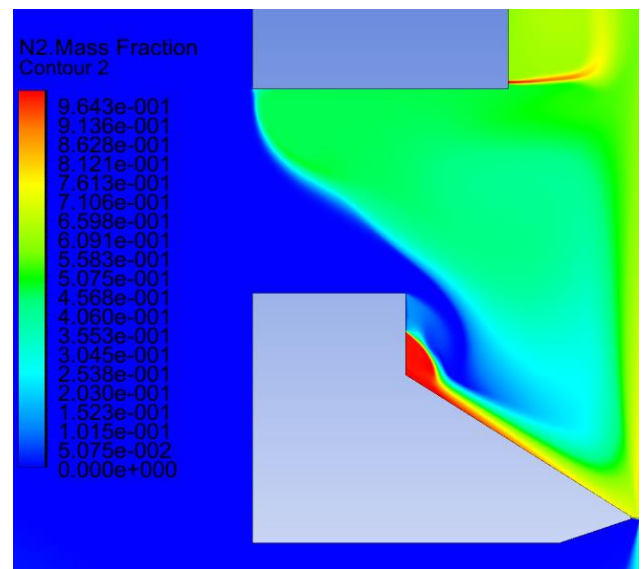


(c) ①③

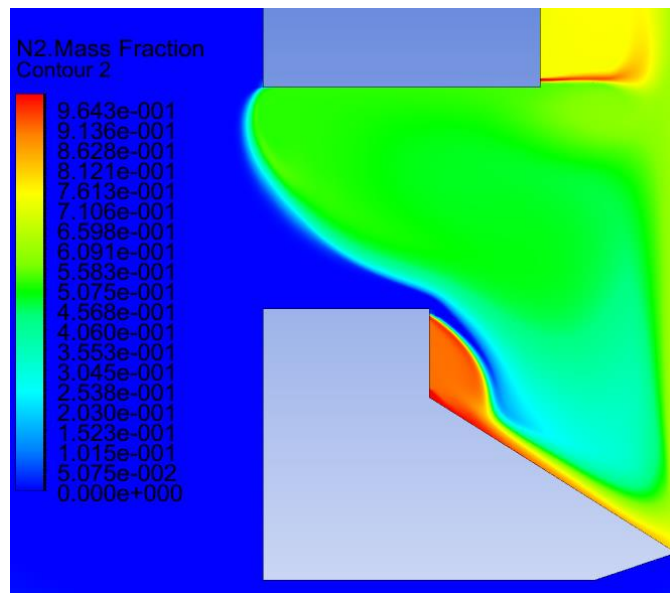
Fig.4.50 ダブルパーズジェット速度ベクトル



(a) ①②

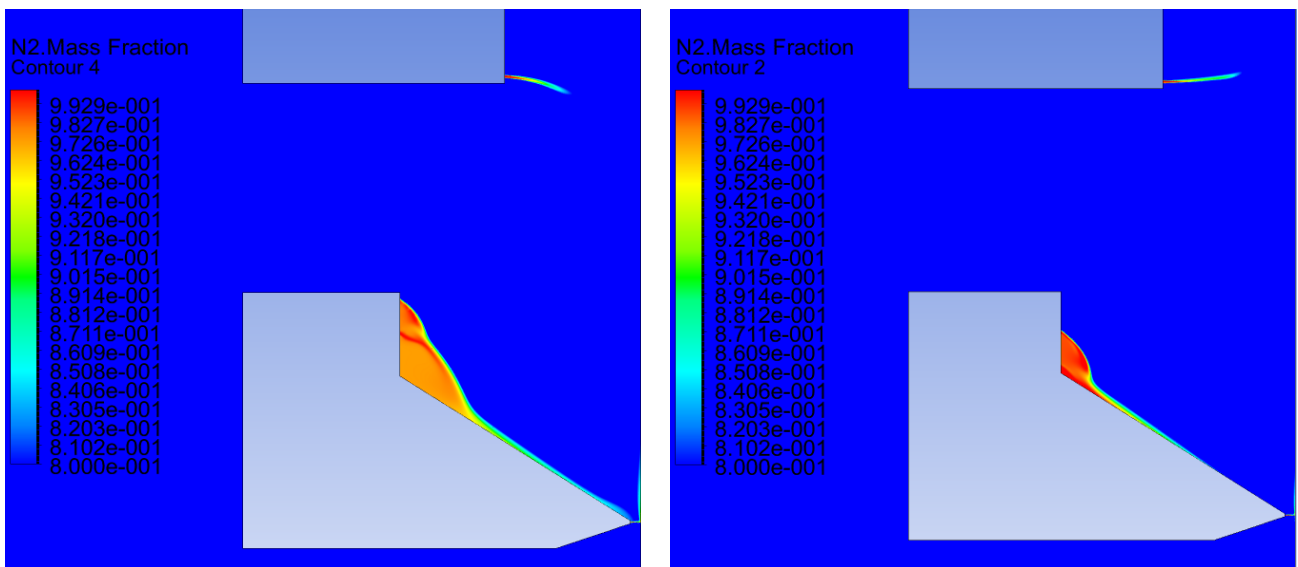


(b) ②③



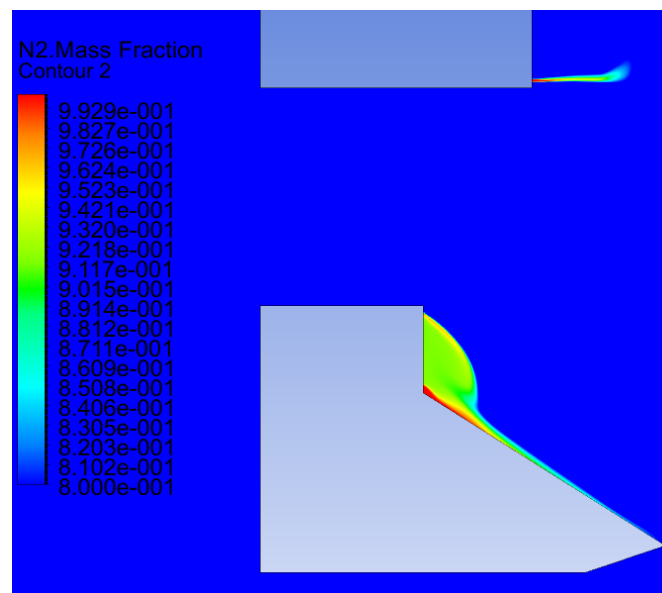
(c) ①③

Fig.4.51 ダブルパーズジェット窒素質量分率分布(0~100%)



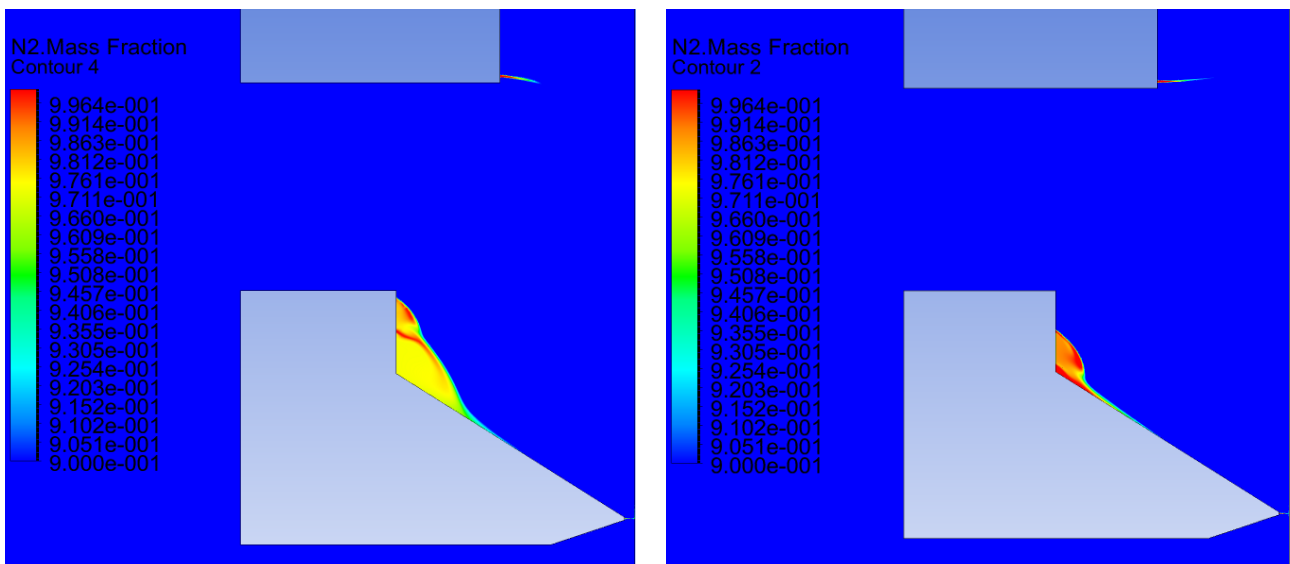
(a) ①②

(b) ②③



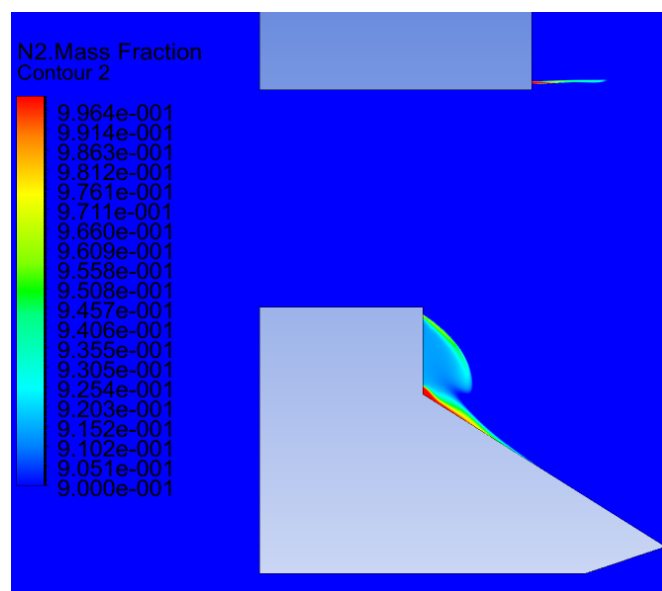
(c) ①③

Fig.4.52 ダブルパーフォレーションジェット窒素質量分率分布(80~100%)



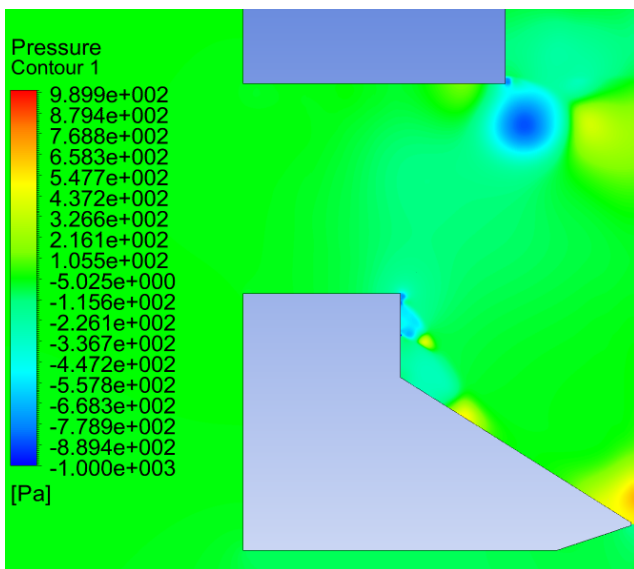
(a) ①②

(b) ②③

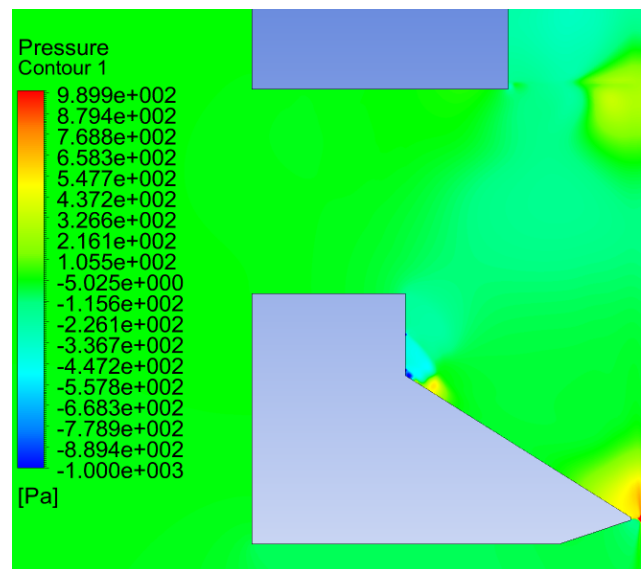


(c) ①③

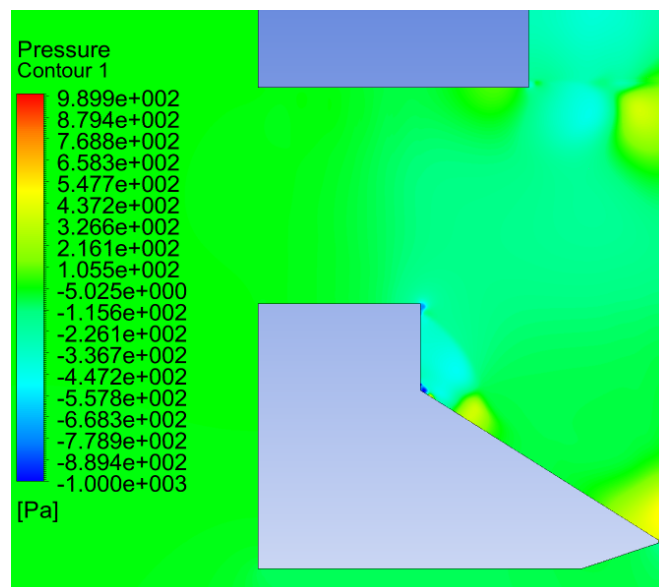
Fig.4.53 ダブルパージジェット窒素質量分率分布(90~100%)



(a) ①②



(b) ②③



(c) ①③

Fig.4.54 ダブルパーズジェット圧力分布

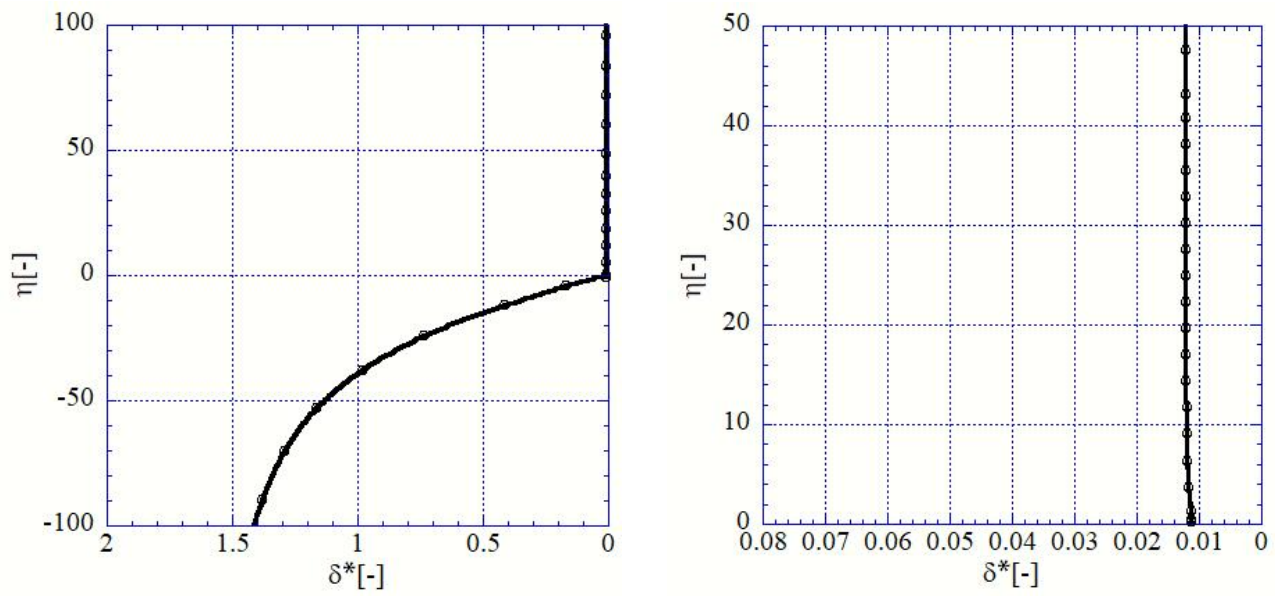
(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$

Fig.4.55 ダブルパージジェット①②無次元液膜分布

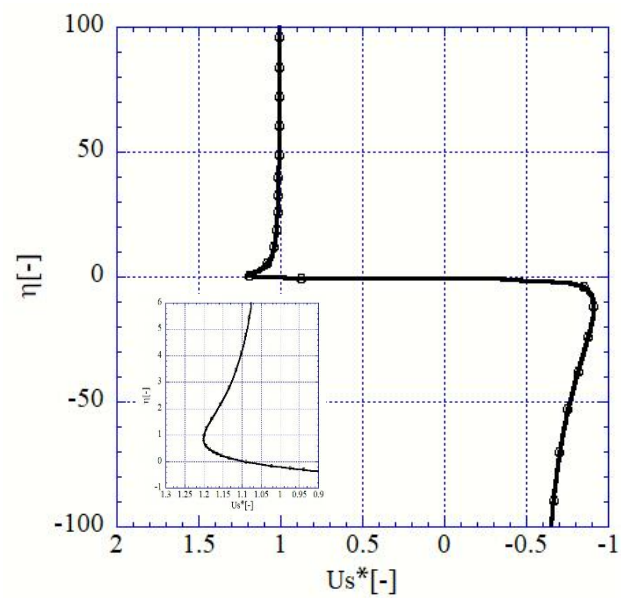


Fig.4.56 ダブルパージジェット①②無次元液膜表面流速

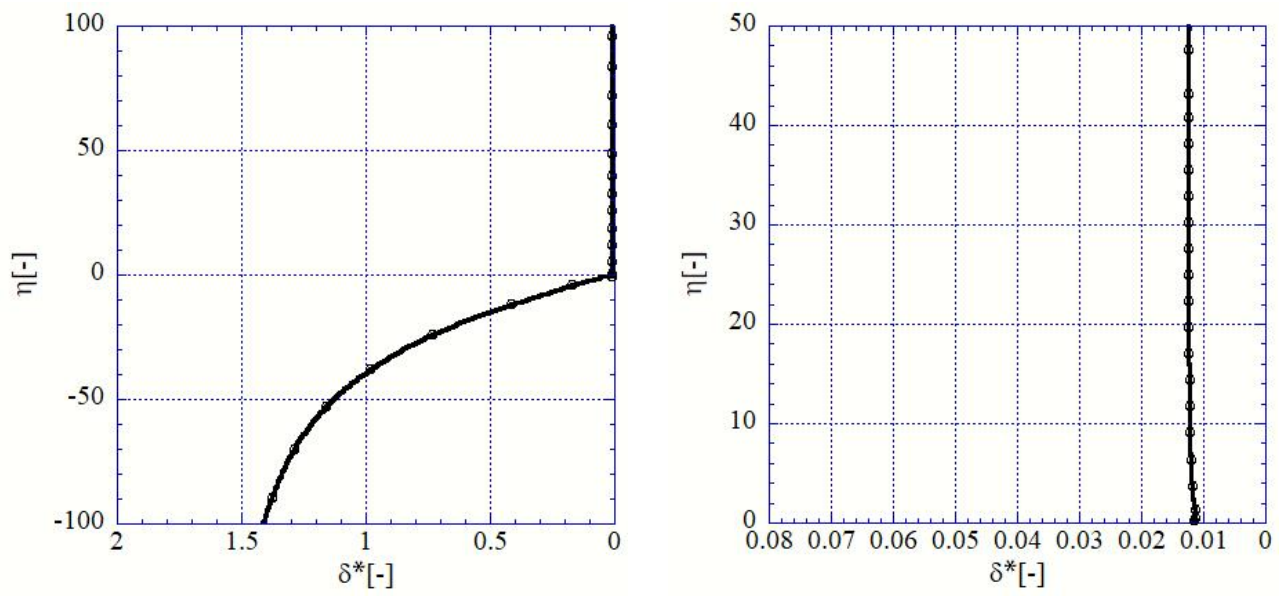
(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$

Fig.4.57 ダブルパージジェット②③無次元液膜分布

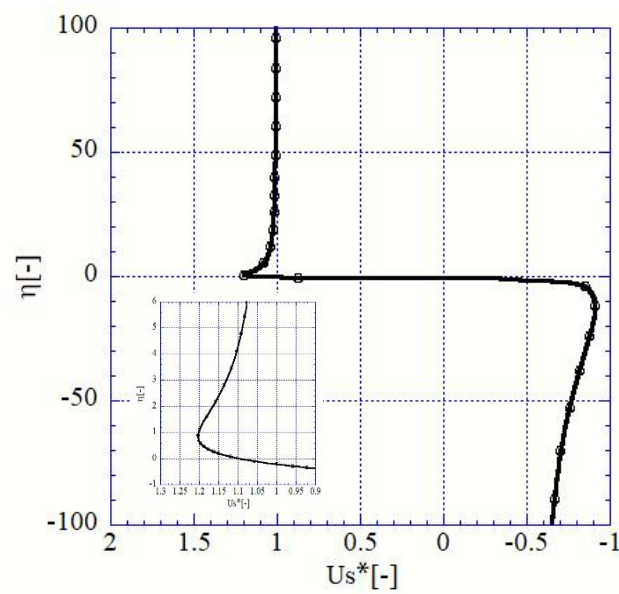


Fig.4.58 ダブルパージジェット②③無次元液膜表面流速

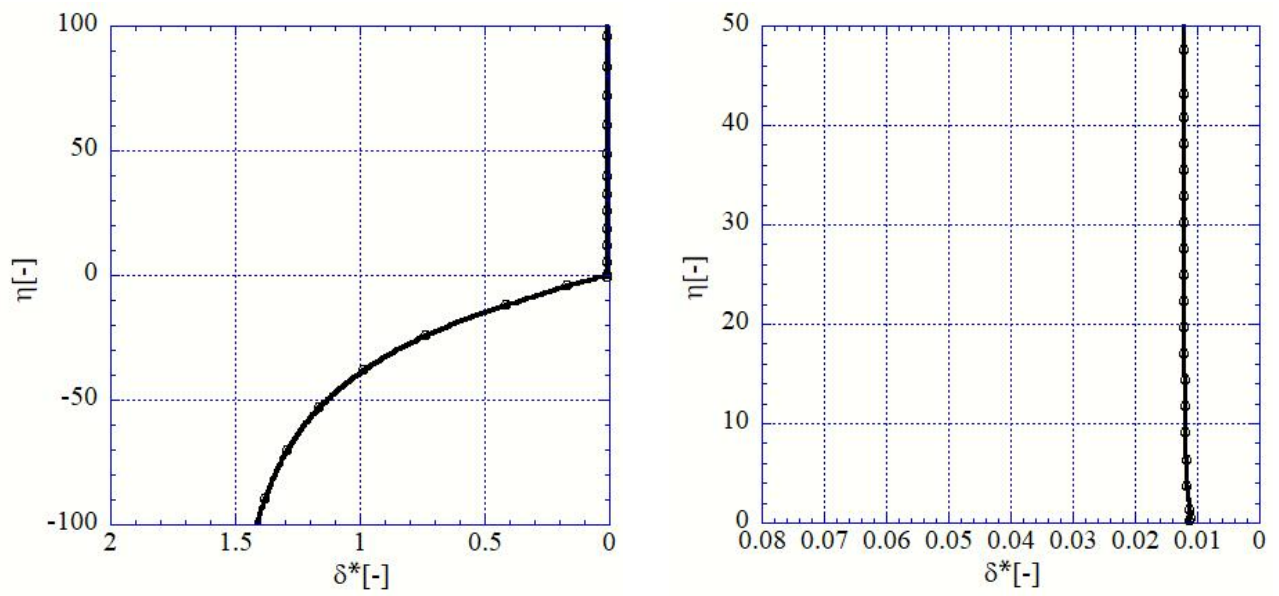
(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$

Fig.4.59 ダブルパージジェット①③無次元液膜分布

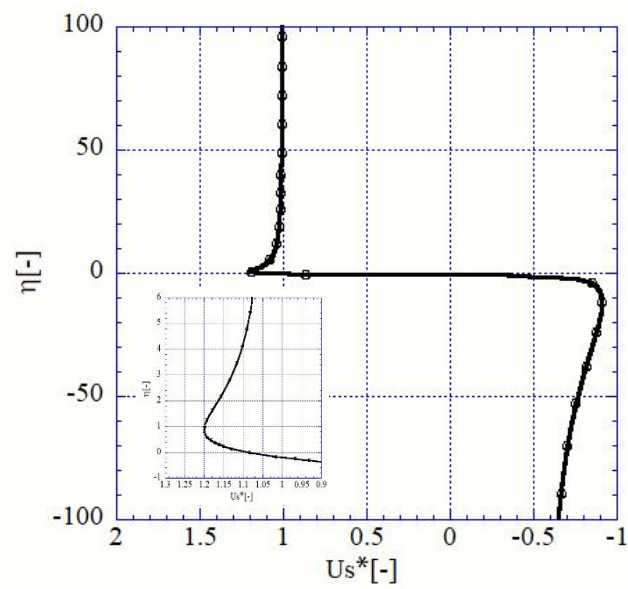


Fig.4.60 ダブルパージジェット①③無次元液膜表面流速

4.3.3 トリプルパーズジェット

4.3.2 項においてもシールド領域内に窒素質量分率が十分に満たされていないので、本項ではパーズノズルを3つに追加してジェットを噴出させた場合について検証する。パーズ圧力 p_p を $p_p = 5\sim 10\text{kPa}$ の範囲で変化させ、3ヶ所同じ圧力で噴流させる。

Fig.4.34 に、各パーズ圧力における速度分布を示す。3ヶ所それぞれ圧力を変化させるとシーリングジェットが停止しているにもかかわらず、4.2.1 項と類似の流れ場を形成していることがわかるため、安定した流動となっていることが考えられる。Fig.4.61 に示す流線の結果より、Fig.4.61(a)においてシーリングノズル付近に小さな渦が形成されているが、装置内の大きな渦がシールド領域とシーリング領域の境を大きく覆っているため、外部流れを遮断する機能に近い性能が見込める。

Fig.4.62 に速度ベクトルを示す。解析結果から、速度ベクトルにおいてもパーズ圧力による各ジェット方向の大きな違いは見られず、4.2.1 項と類似の流れ場を示している。

Fig.4.64 から Fig.4.66 に窒素質量分率を示す。Fig.4.64(a)より、鋼板付近において90%を超える窒素雰囲気形成できていることがわかる。また、シールド領域内の窒素雰囲気は約70%で形成されており、これは大きな渦がシールド領域まで窒素雰囲気を形成でき、外部流れの侵入を低減していると考えられる。本ケースではパーズ圧力を増加させるにつれてシールド領域内の窒素質量分率は増加せず、窒素雰囲気が拡大しないことがわかる。

Fig.4.67 に圧力分布を示す。Fig.4.67(a)よりワイピングノズル付近の圧力が(b), (c)よりも低くなっていることがわかる。これはパーズジェットが鋼板方向に引っ張られ、その後渦の形成として機能していると考えられる。

Fig.4.68 から Fig.4.71 に無次元液膜分布および無次元液膜表面流速を示す。 $0 \leq \eta \leq 50$ において Fig.4.68(b)より 4.2.1 項に近い数値であることがわかる。

以上の結果からパーズジェットを3ヶ所噴流し $p_p = 5 \text{ kPa}$ にすることでシールド領域内に大きな渦を形成することができ、鋼板付近に高い窒素濃度を保つことができた。したがってドロス回収時にシーリングジェットを止めても領域内の酸素低減促進として本項のパーズ技術は有効であると考えられる。

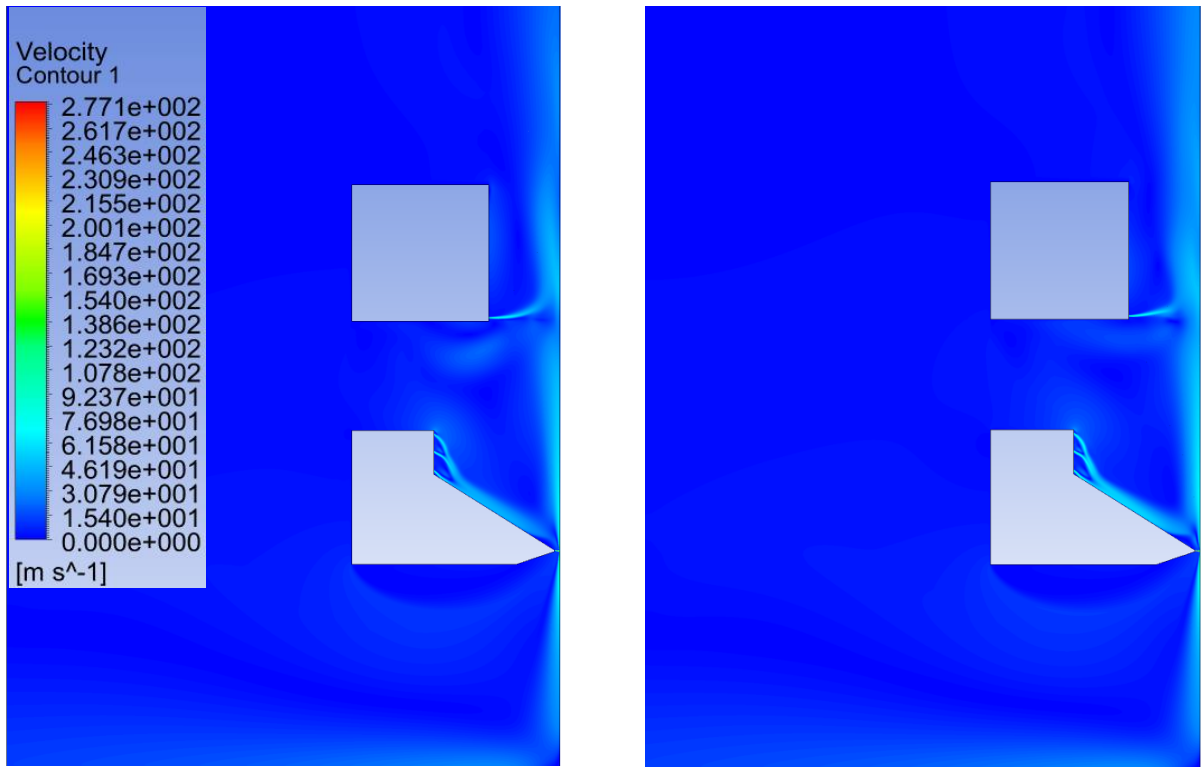
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.61 トリプルパージジェット速度分布

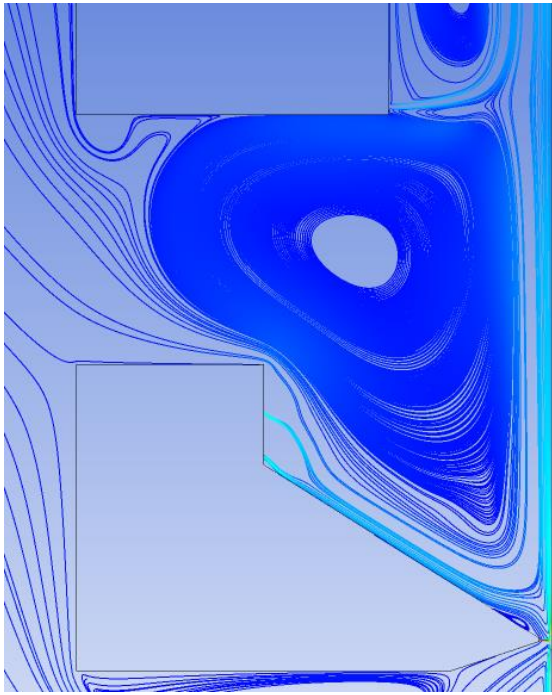
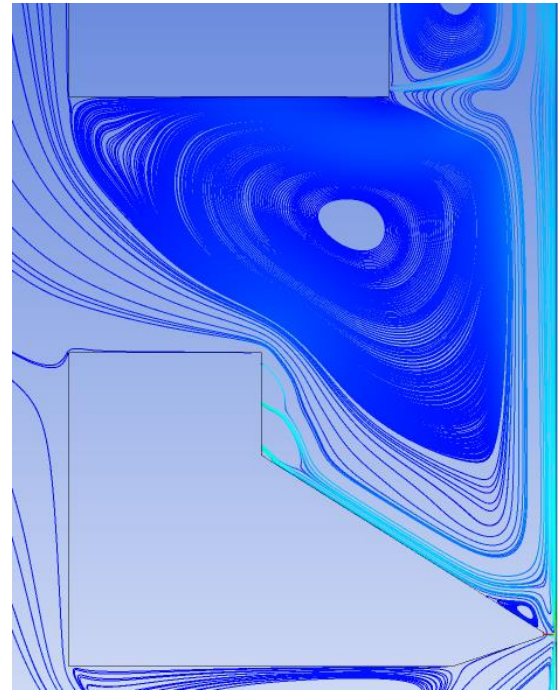
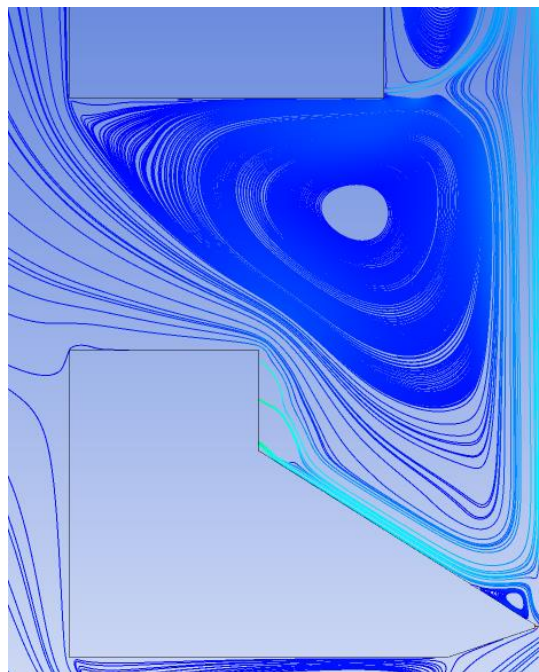
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.62 トリプルパーズジェット流線

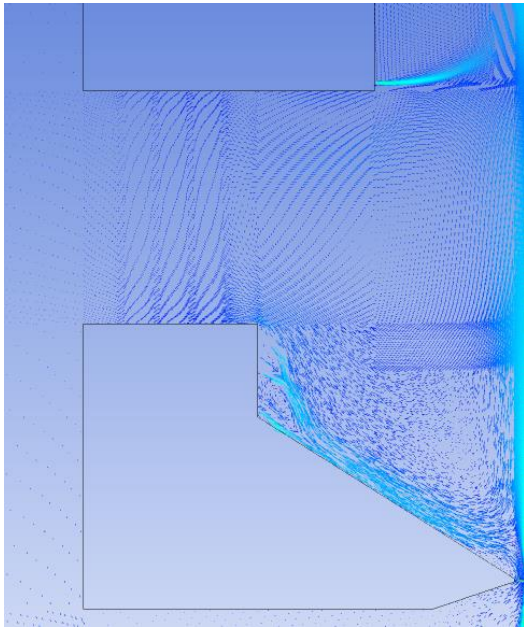
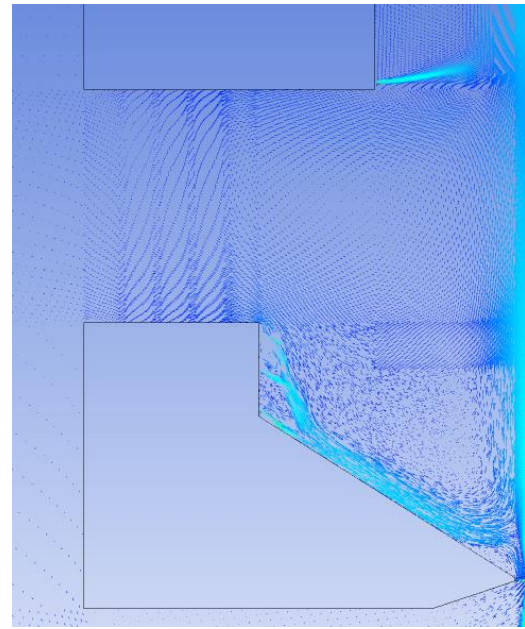
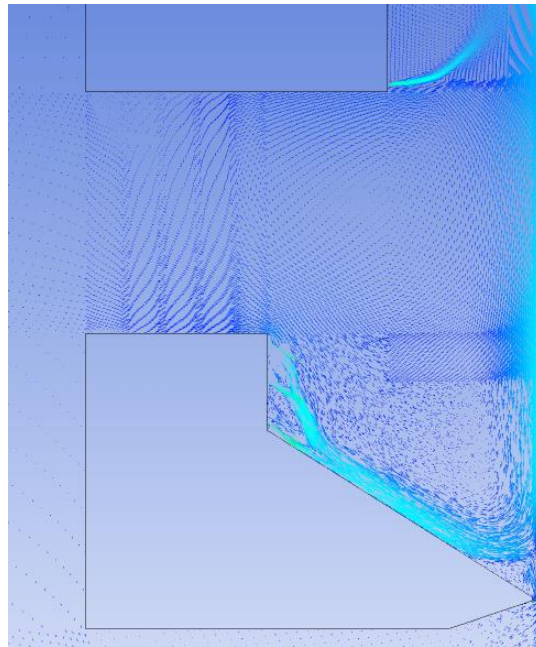
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.63 トリプルパーズジェット速度ベクトル

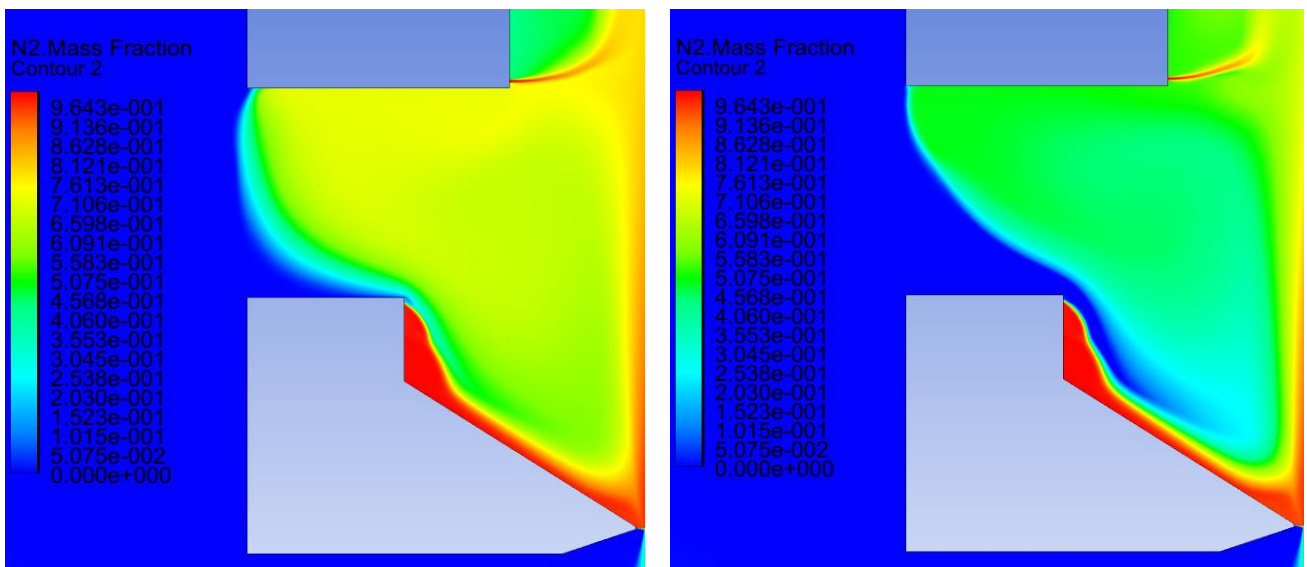
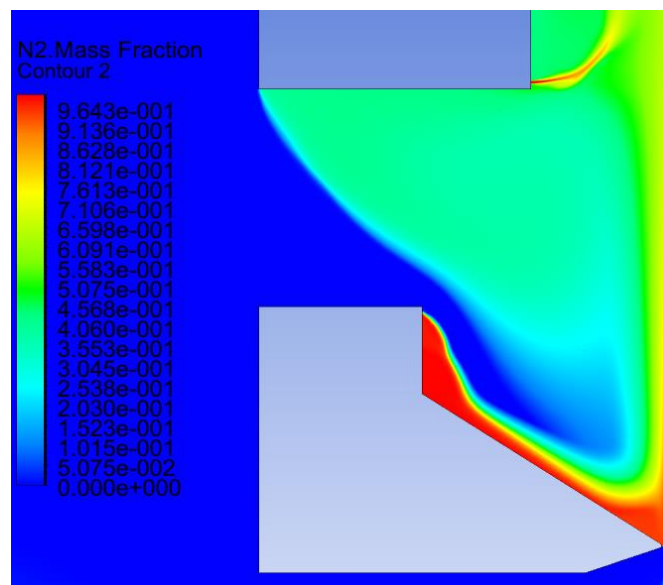
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.64 トリプルパーズジェット室素質量分率分布(0~100%)

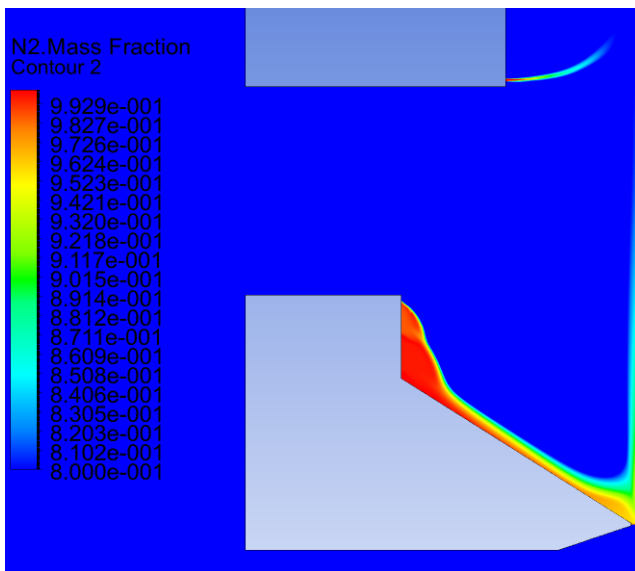
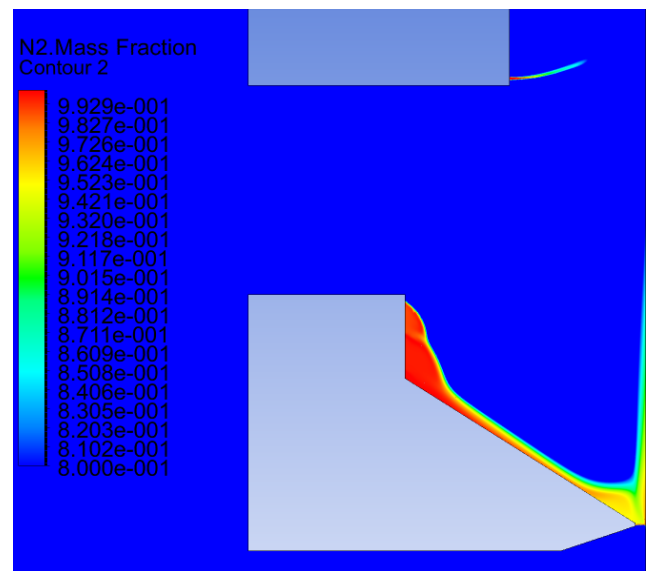
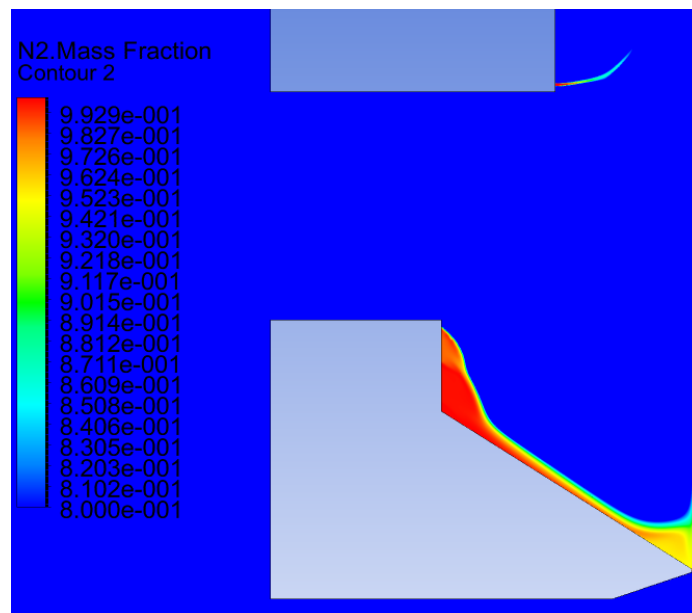
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.65 トリプルパーズジェット窒素質量分率分布(80~100%)

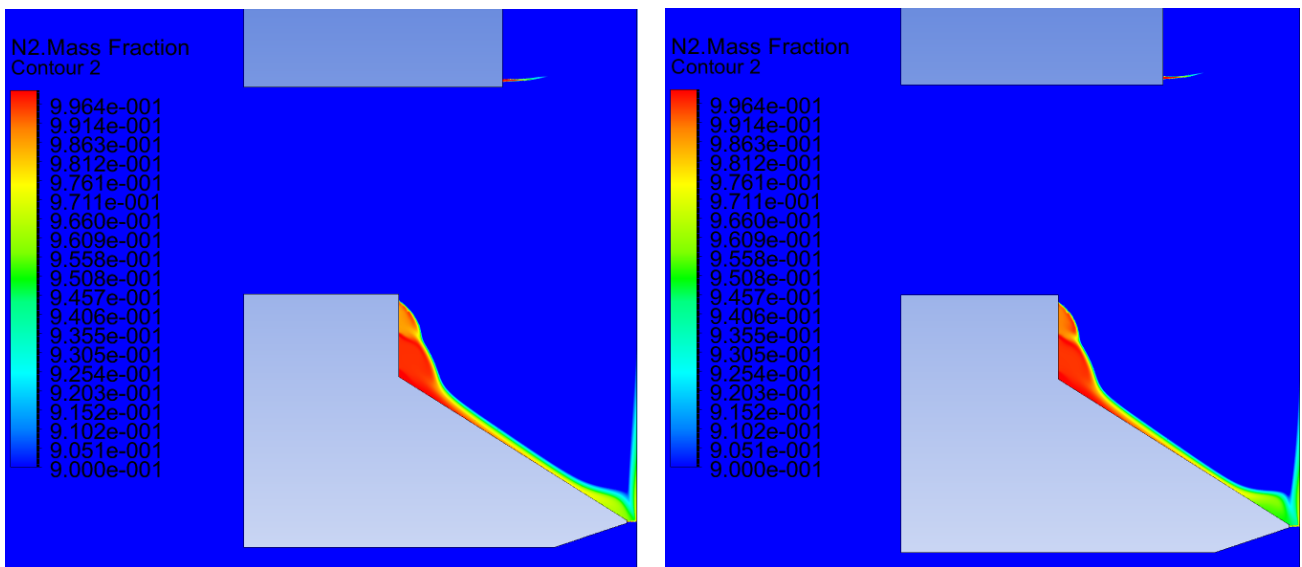
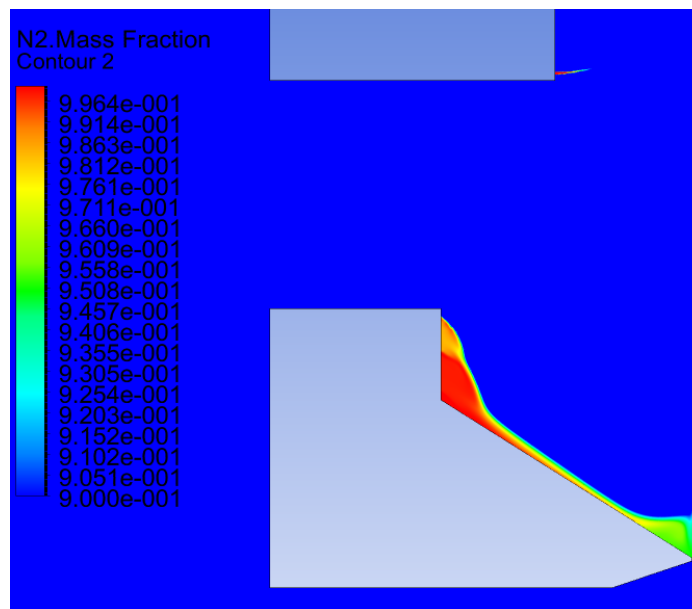
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.66 トリプルパーズジェット室素質量分率分布(90~100%)

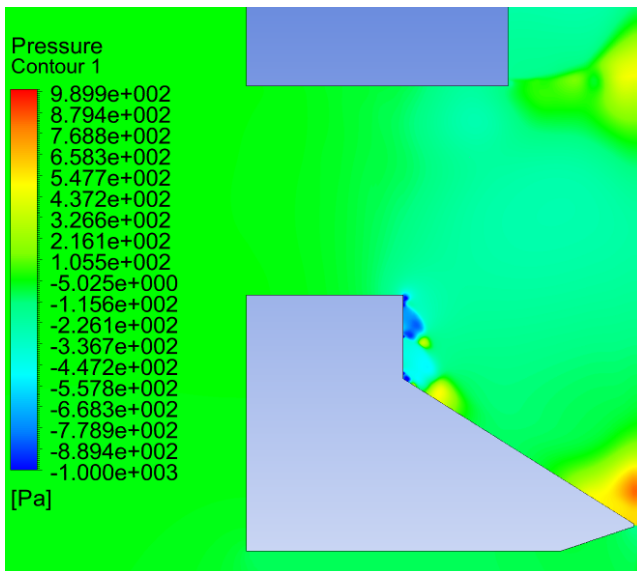
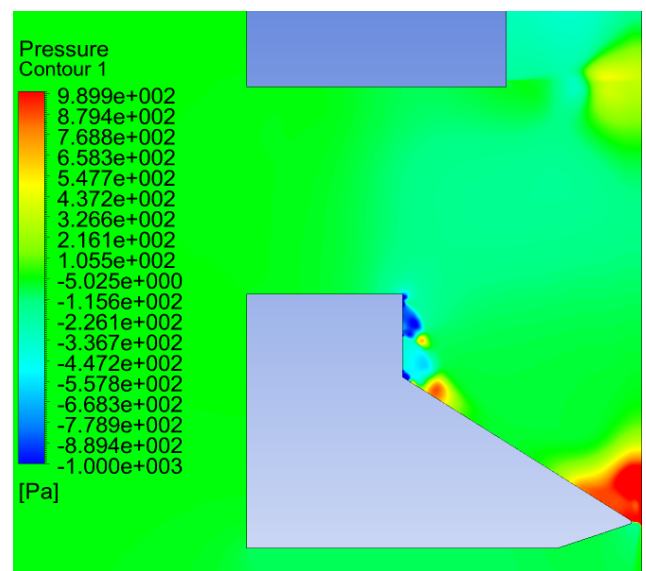
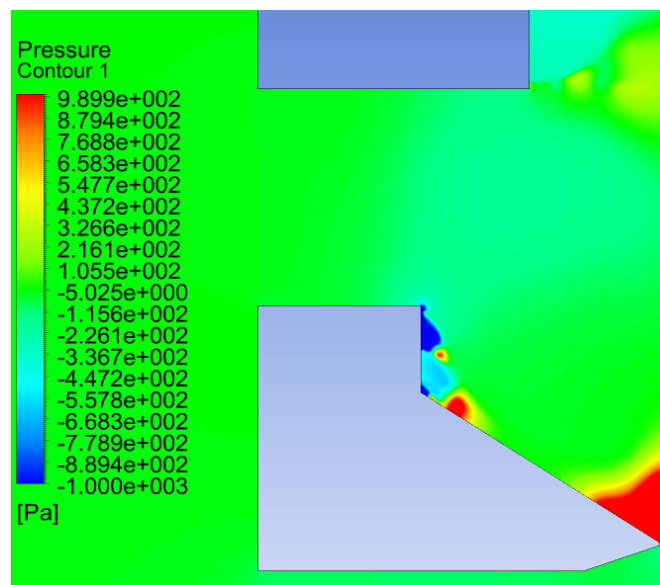
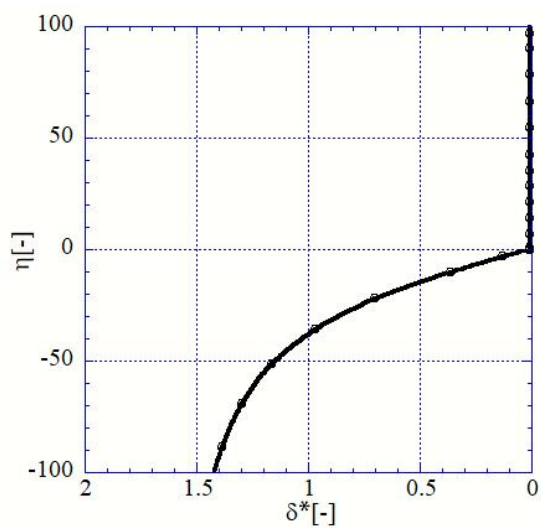
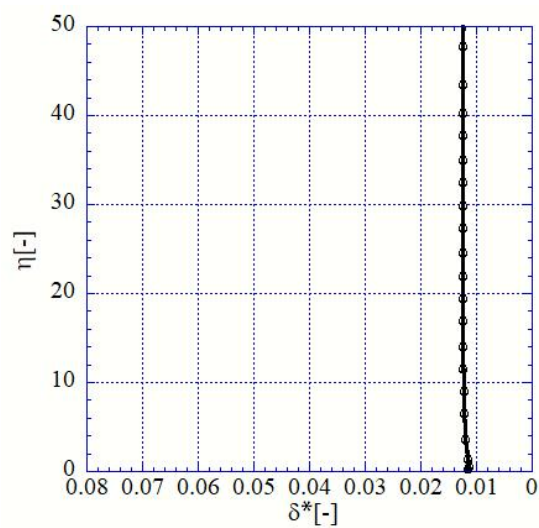
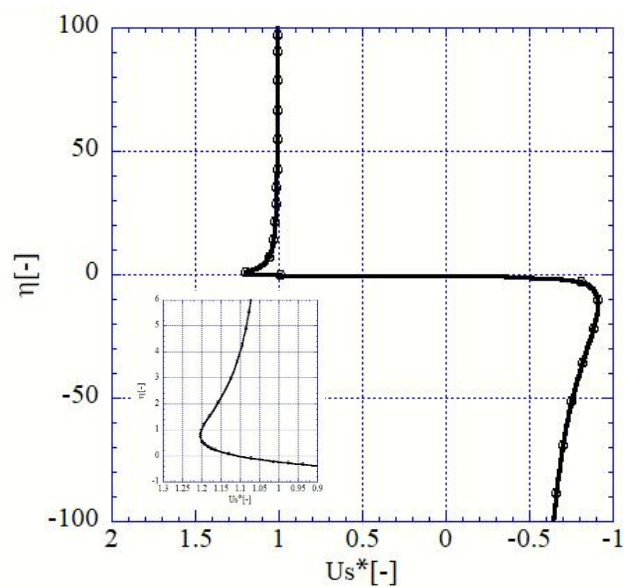
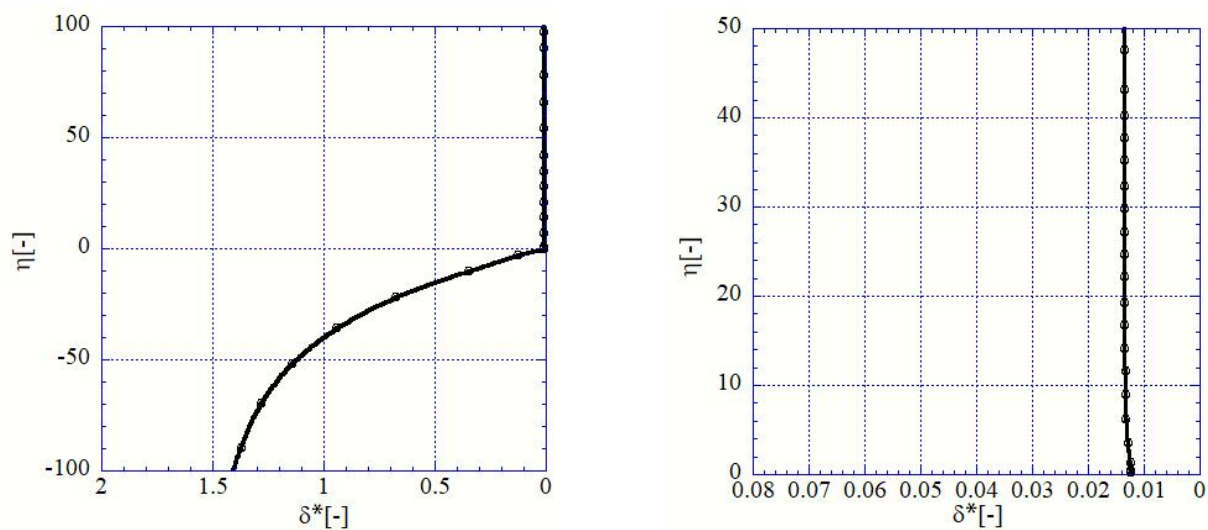
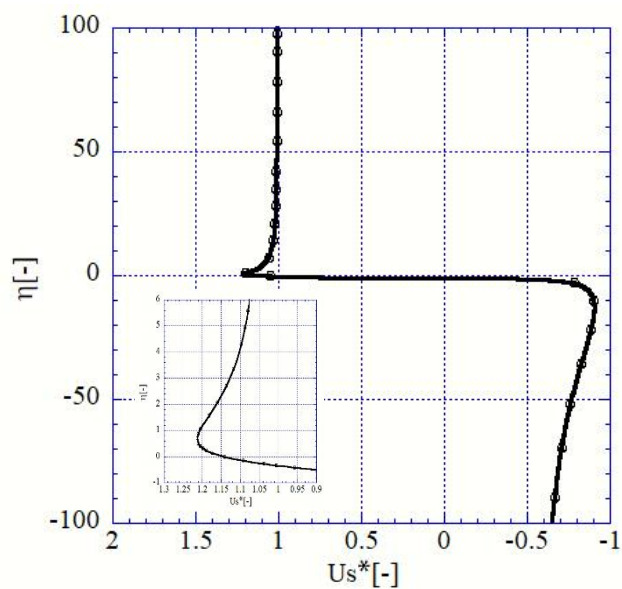
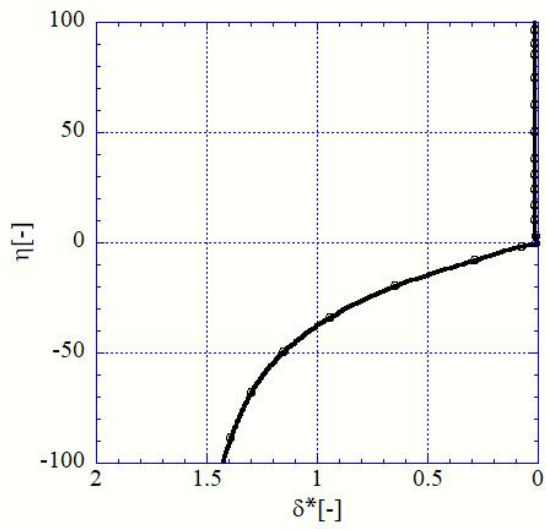
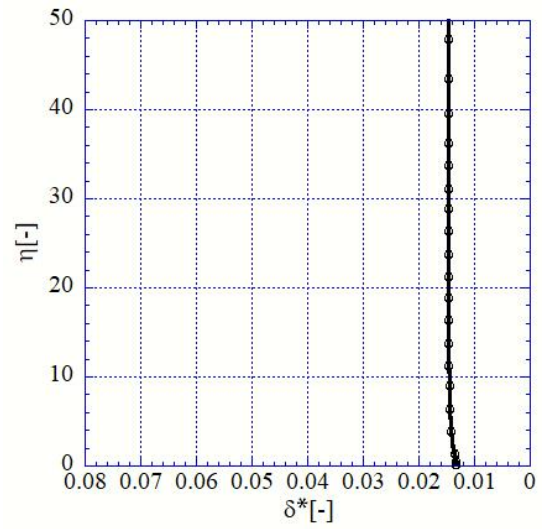
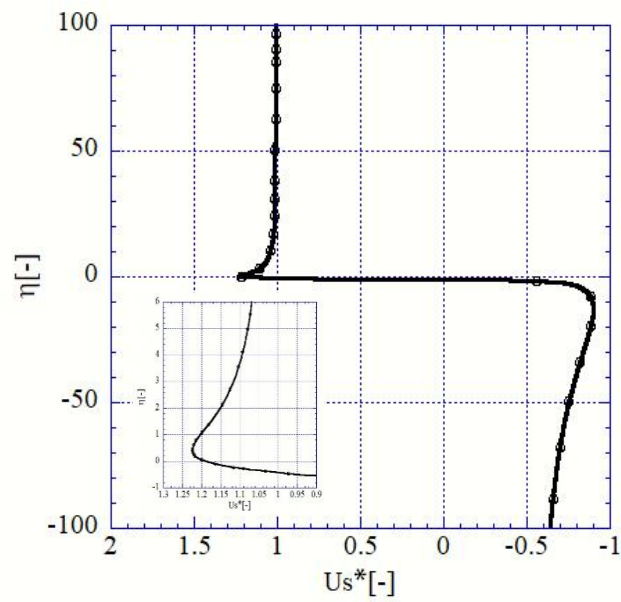
(a) $p_p = 5$ kPa(b) $p_p = 7$ kPa(c) $p_p = 10$ kPa

Fig.4.67 トリプルパーズジェット圧力分布

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.68 トリプルパーズジェット無次元液膜分布($p_p = 5\text{kPa}$)Fig.4.69 トリプルパーズジェット無次元液膜表面流速($p_p = 5\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.70 トリプルパーズジェット無次元液膜分布($p_p = 7\text{kPa}$)Fig.4.71 トリプルパーズジェット無次元液膜表面流速($p_p = 7\text{kPa}$)

(a) $-100 \leq \eta \leq 100$ (b) $0 \leq \eta \leq 50$ Fig.4.72 トリプルパーズジェット無次元液膜分布($p_p = 10\text{kPa}$)Fig.4.73 トリプルパーズジェット無次元液膜表面流速($p_p = 10\text{kPa}$)

4.3.4 トリプルパーズジェットにおける定常解析と非定常解析の比較

本項では、ドロス回収時における装置内の酸素低減として最も有効であると考えられるトリプルパーズジェットにおいて、定常解析と非定常解析の比較を行う。これにより、定常解析によって得られた流れ場になるために要する時間を推測することができる。Fig.4.74 より、非定常解析によって得られた各時間の速度分布を示す。結果を示す時間については、 $t=0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\text{s}$ における流れ場を示している。Fig.4.74(a)から(c)より、 $t=0.1\text{s}$ までは各時間における各ジェットの流れは湾曲が大きいため、安定しないことがわかる。また、シーリングジェットにおいては $t=0.2\text{s}$ まで流れが乱れているので安定しないことがわかる。 $t=0.3\text{s}$ から 0.5s にかけては、時間変化による流れ場の変化は見られない。よって、流れ場は各ジェットの噴出後 0.3s 経過後から安定していると考えられる。

Fig.4.75 および Fig.4.76 に、定常解析と $t=0.5\text{s}$ における非定常解析の速度分布と流線について比較した結果を示す。両図より、速度分布および流線はほとんど一致していることがわかる。以上の結果から、トリプルパーズジェットでは、噴出後約 0.3s で安定した流動を示すと考えられる。

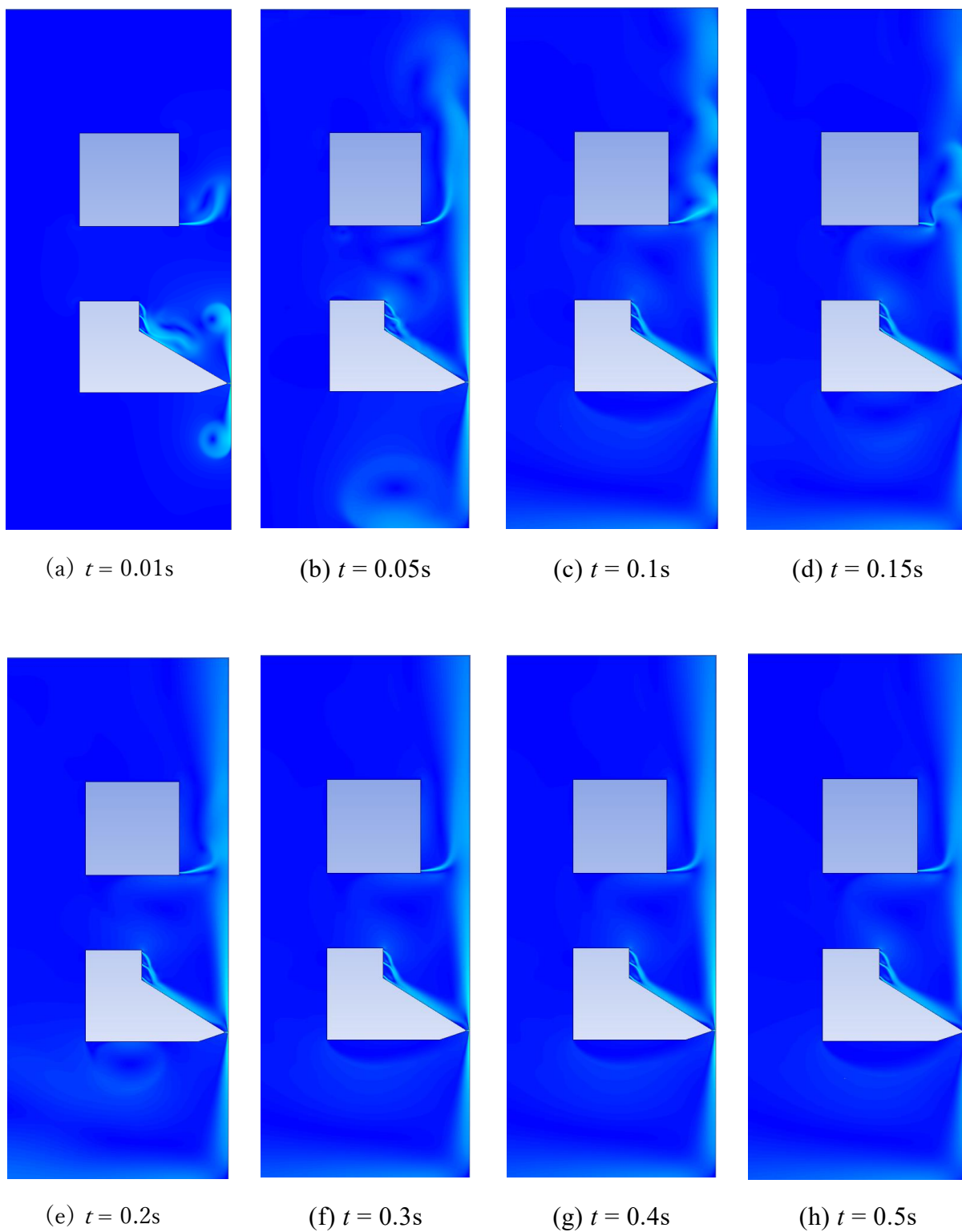


Fig.4.74 トリプルパーズジェット(非定常解析)速度分布推移

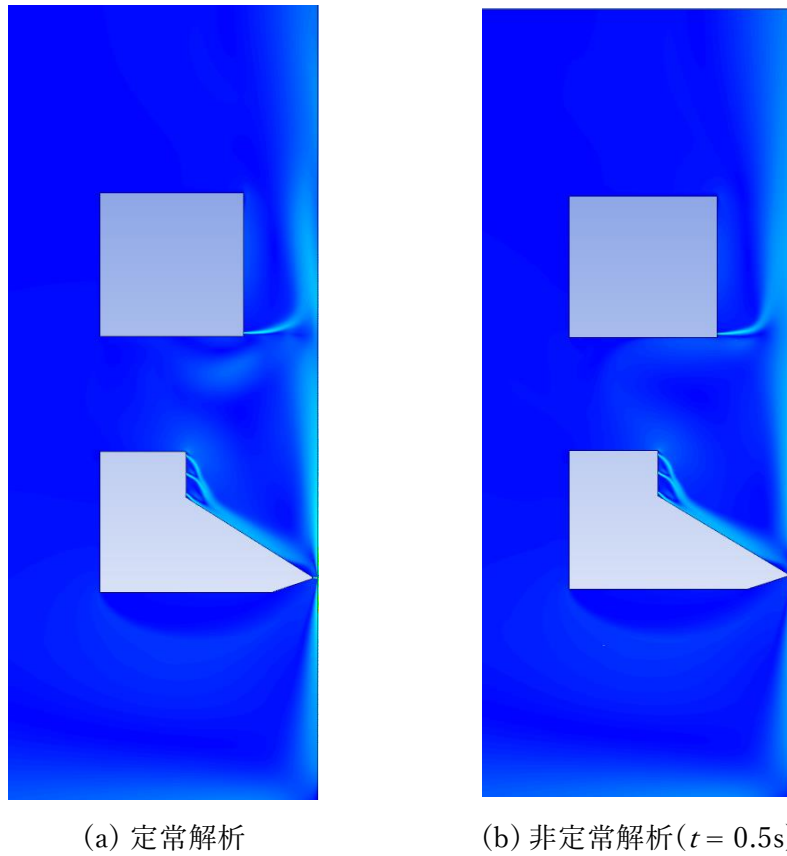


Fig.4.75 定常解析と非定常解析の速度分布比較

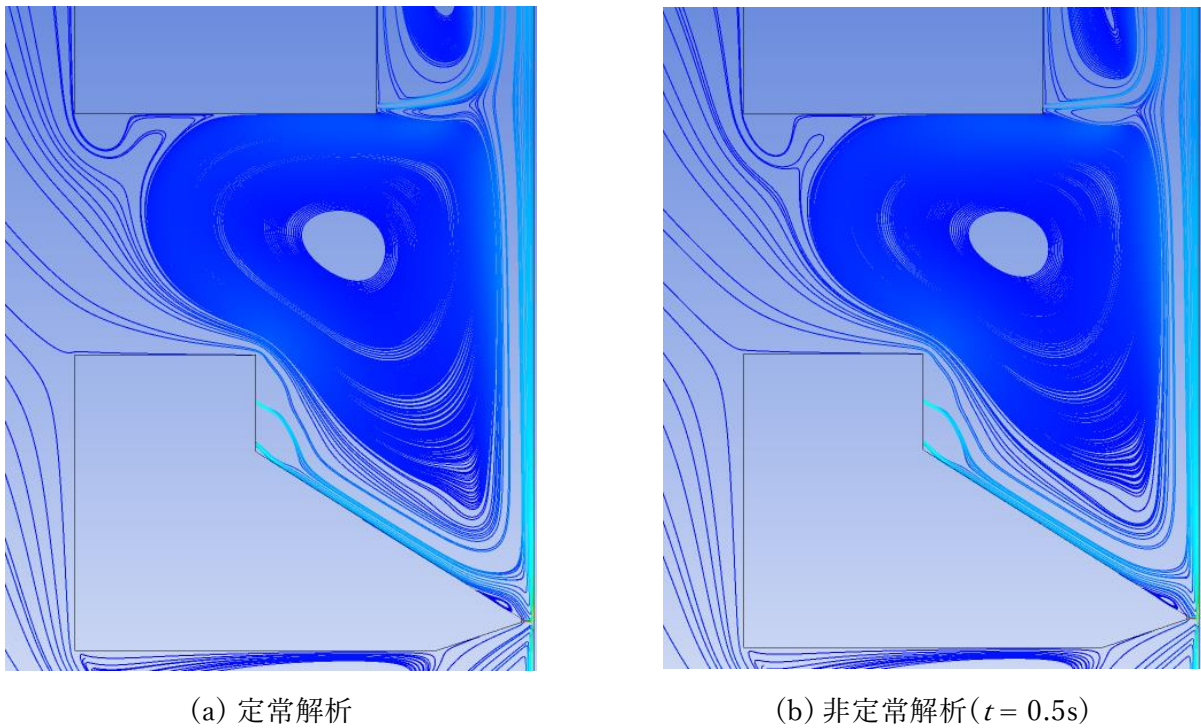


Fig.4.76 定常解析と非定常解析の流線比較

4.4 作業時におけるパージジェットの最適な圧力関係の検証

4.2 節で、パージジェットの噴出パターンによってシーリング領域とシールド領域の流れ場がどのように変化するのかについて考察した。解析結果から、4.2.1 項の上部パージジェットが、渦の安定性や窒素質量分率などの点において良好な結果を示したことがわかった。しかしながら、鋼板に対する圧力分布の影響や鋼板付近の窒素質量分率については細かく検証していない。そこで本節では、鋼板表面での圧力分布ならびに窒素質量分率を定量的に考察する。パージ圧力に関しては、 $p_p = 5, 10, 15\text{kPa}$ の 3 パターンにわけて実施している。

Fig.4.77 に鋼板表面における圧力分布を示す。Fig.4.77(a)は、ワイピングノズル位置 ($y=0\text{mm}$)から水平シーリングジェットの高さ ($y=430\text{mm}$)までの間に鋼板表面に生じる圧力分布を表している。グラフより、各ケースとも $y=400\text{mm}$ の位置で約 43kPa の圧力が生じていることがわかる。これはワイピングジェットによる衝突圧力である。また、両ケースとも鋼板の位置が高くなるにつれて鋼板上にかかる圧力は減少しており、Fig.4.77 (a)では圧力分布に大きな差異は見られないことがわかる。Fig.4.77(b)は、ワイピングノズル位置 ($y=0\text{mm}$)からワイピング装置の上辺の高さ ($y=200\text{mm}$)までの間に範囲を狭めた際の鋼板表面に生じる圧力分布を表している。 $80 \leq y \leq 200$ においてパージジェットが $p_p = 15\text{kPa}$ の時約 1kPa 上昇していることがわかる。これはパージジェットの壁面噴流によって生じていると考える。Fig.4.77(c)は、ワイピングジェットの鋼板衝突圧力を示す。4.2 節の各ケースの無次元液膜グラフにおいてあまり変化が見られなかったのはジェットの先端である鋼板衝突圧力が各ケース類似しているからだと考える。

Fig.4.78 に鋼板表面における窒素質量分率を示す。 $p_p = 15\text{kPa}$ の時は他のケースよりも高くなっていることがわかる。これは鋼板付近に形成した小さな渦による影響だと考える。しかしながら、各ケース共に 90%以上の窒素雰囲気形成できているので表面の酸化を抑制し品質を保てられると考える。

以上の結果から、コスト面も考慮した上で作業時におけるパージジェットは $p_p = 5\text{kPa}$ で噴流することが最適だと考える。

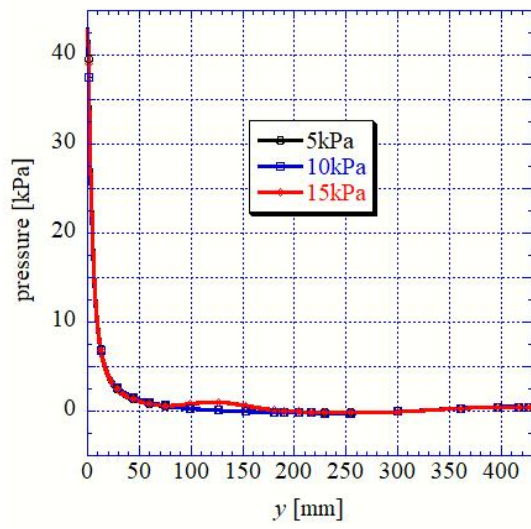
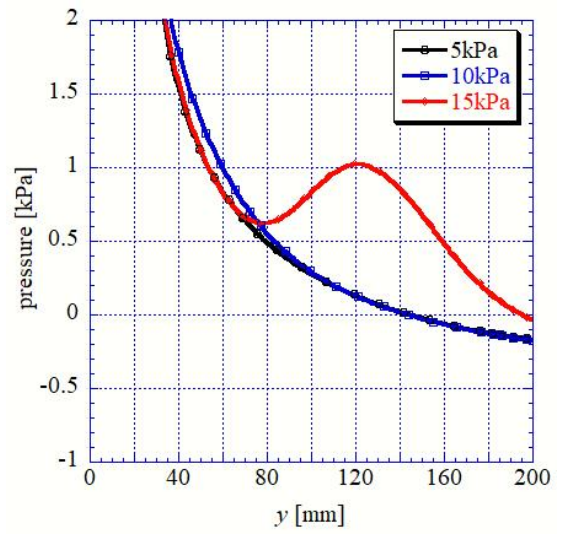
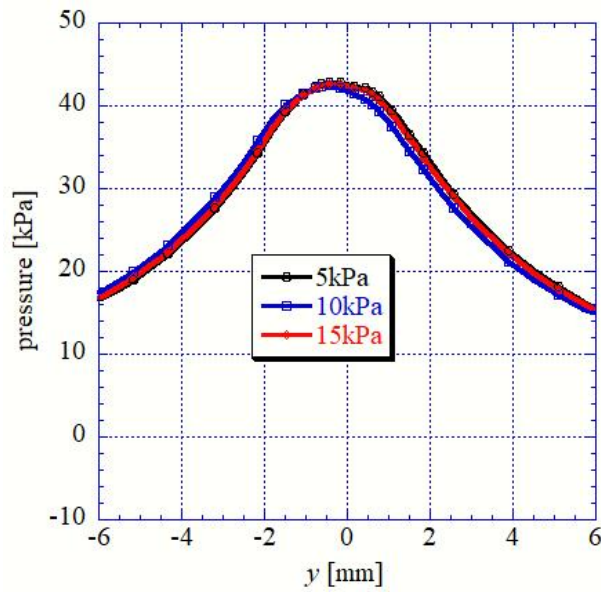
(a) $0 \leqq y \leqq 430$ (b) $0 \leqq y \leqq 200$ (c) $-3 \leqq y \leqq 3$

Fig.4.77 鋼板表面における圧力分布

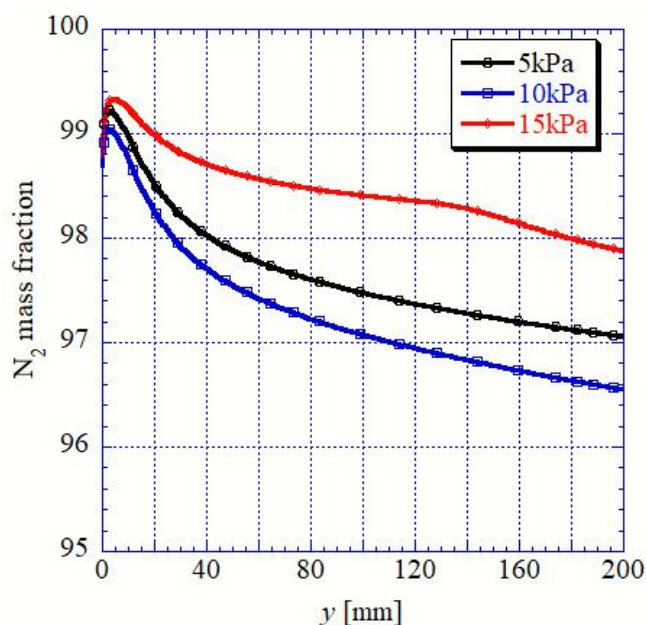


Fig.4.78 鋼板表面における窒素質量分率

4.5 ドロス回収時におけるパージジェットの最適な位置関係の検証

本節も同様にドロス回収時におけるトリプルパージジェットの鋼板表面での圧力分布ならびに窒素質量分率を定量的に考察する．パージ圧力に関しては， $p_p = 5, 7, 10\text{kPa}$ の3パターンにわけて実施している．

Fig.4.79 に鋼板表面における圧力分布を示す．Fig.4.79(a)より，圧力分布に大きな差異は見られないことがわかる．Fig.4.79(c)ではパージジェットの圧力を上げることでワイピングジェットの先端が y 軸負の方向に傾いていることがわかる．これは，ワイピングノズル付近の渦による影響でパージジェットが作用していないからだと考える．

Fig.4.80 に鋼板表面における窒素質量分率を示す． $p_p = 5\text{kPa}$ 以外は途中で 90%を下回るので表面の酸化を抑制しにくくなると考える．

以上の結果から，本節もドロス回収時におけるパージジェットは $p_p = 5\text{kPa}$ で噴流することが最適だと考える．

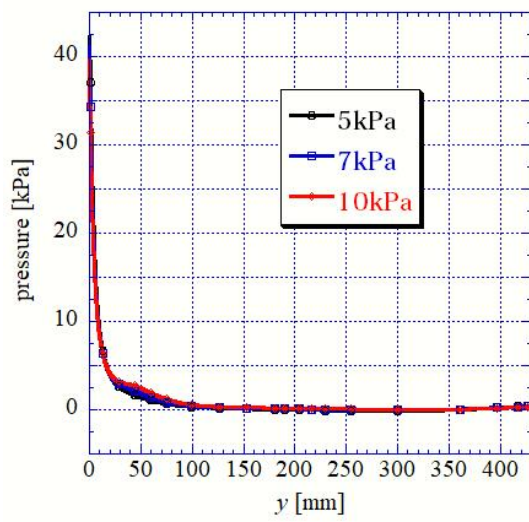
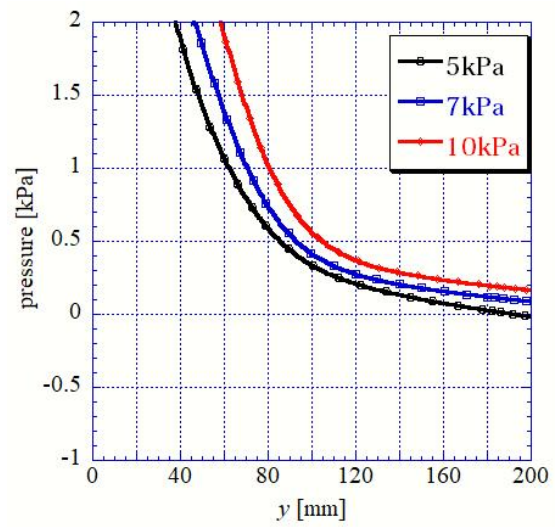
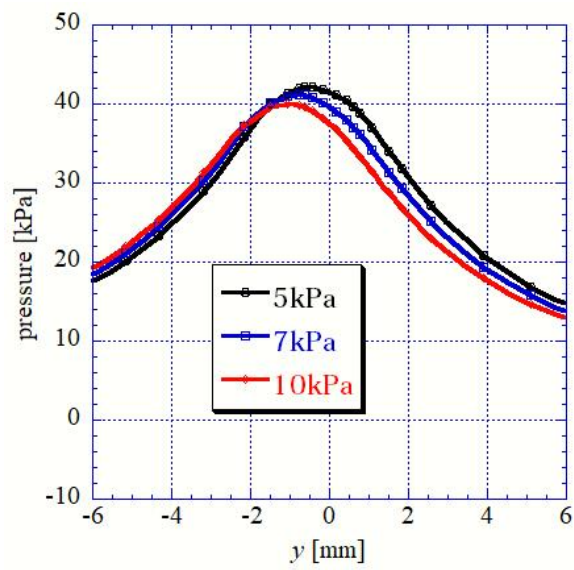
(a) $0 \leqq y \leqq 430$ (b) $0 \leqq y \leqq 200$ (c) $-3 \leqq y \leqq 3$

Fig.4.79 鋼板表面における圧力分布

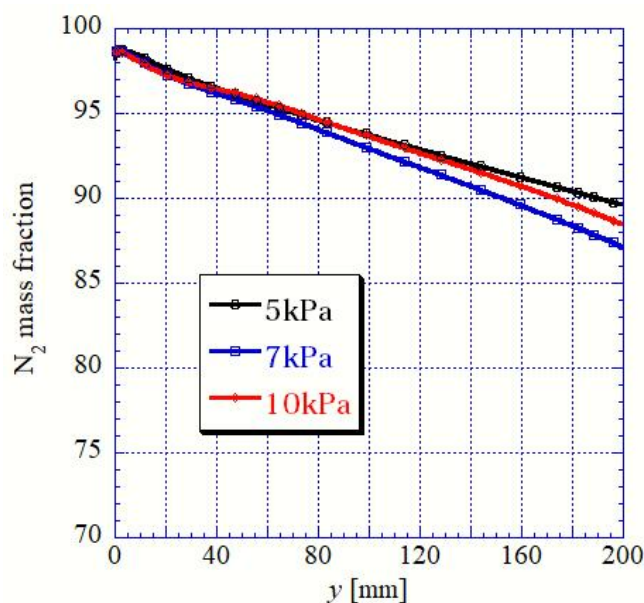


Fig.4.80 鋼板表面における窒素質量分率

4.6 操業時とドロス回収時における装置内の比較検証

本節は、パーシジェットの性能により操業時とドロス回収時における装置内や鋼板における圧力分布や窒素質量分率について比較し考察をする。

Fig.4.81 に鋼板表面における圧力分布を示す。Fig.4.81(a)より、どちらも大きな差異が見られないことがわかる。Fig.4.81(c)より、ドロス回収時では y 軸負の方向に若干移動しているが、圧力の頂点がほぼ同値なので液膜の変化に大きな差が出ることはないと考えられる。

Fig.4.78 にワイピングノズル近郊の速度ベクトル分布を示す。ドロス回収時においてワイピングノズル近郊で右回りの渦を形成していることがわかる。また Fig.4.78 の圧力分布より、ドロス回収時では 400Pa 以上高くなっていることがわかる。これらは 3ヶ所パーシジェットを噴流することで鋼板付近の流速に引っ張られるジェットとワイピングジェットに引っ張られるジェットに分かれ、ワイピングノズル方向のジェットが装置壁面に衝突し、逆流しているからだと考える。

Fig.4.80 に鋼板表面における窒素質量分率を示す。ドロス回収時においても装置内で 90% 以上占めているので表面の酸化を抑制し品質を保てられると考える。

以上の結果から、ドロス回収時にパーシノズルを 3ヶ所噴流すると操業時に近い性能を発揮することがわかる。

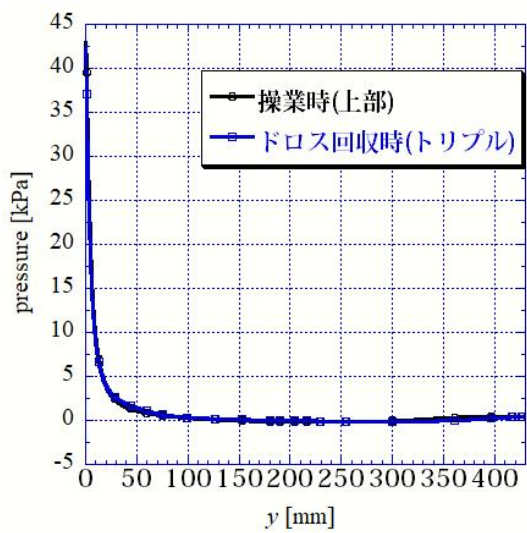
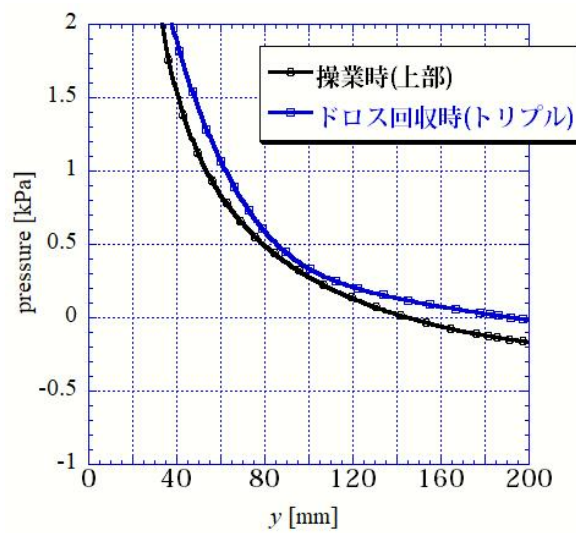
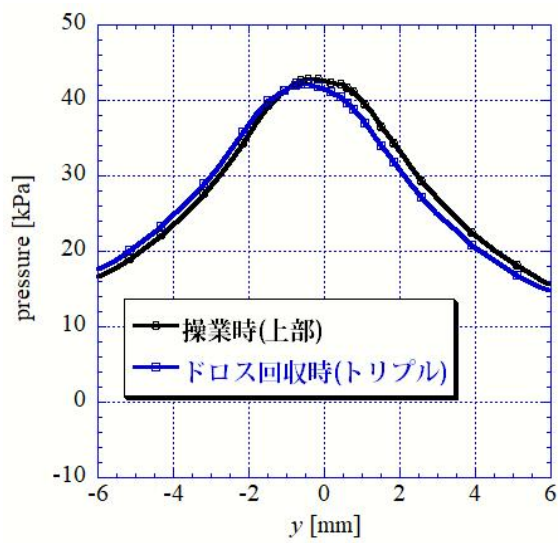
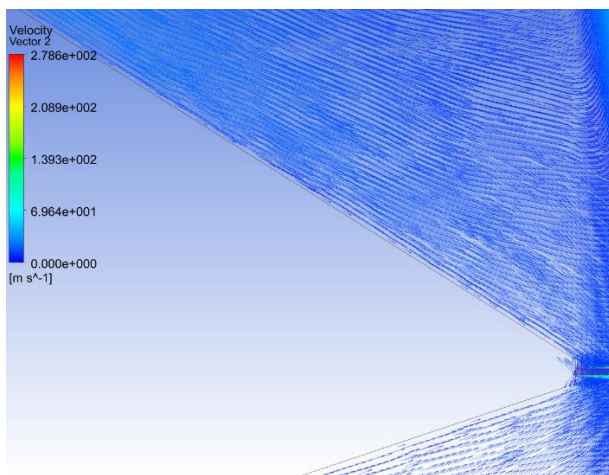
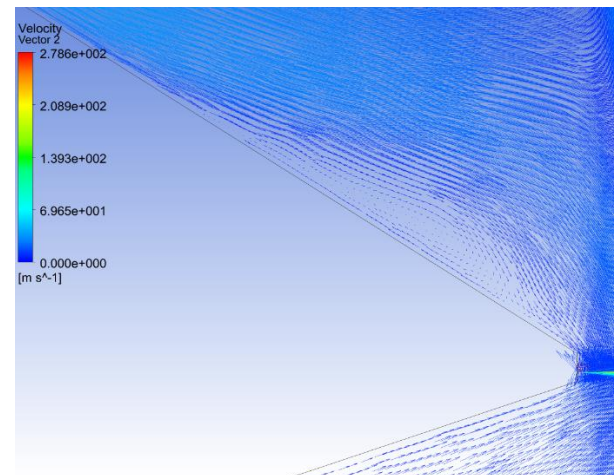
(a) $0 \leqq y \leqq 430$ (b) $0 \leqq y \leqq 200$ (c) $-3 \leqq y \leqq 3$

Fig.4.81 鋼板表面における圧力分布

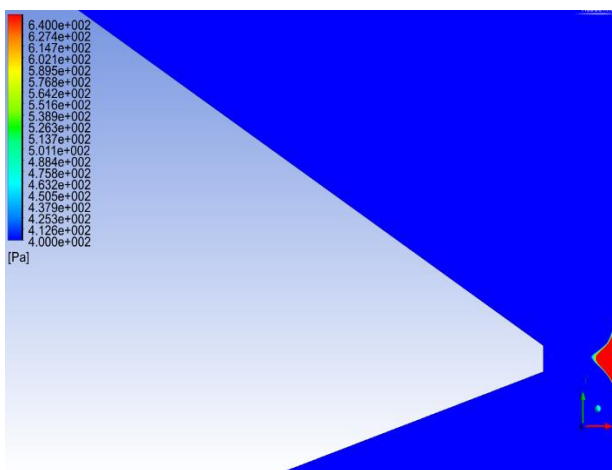


(a) 操業時(上部)

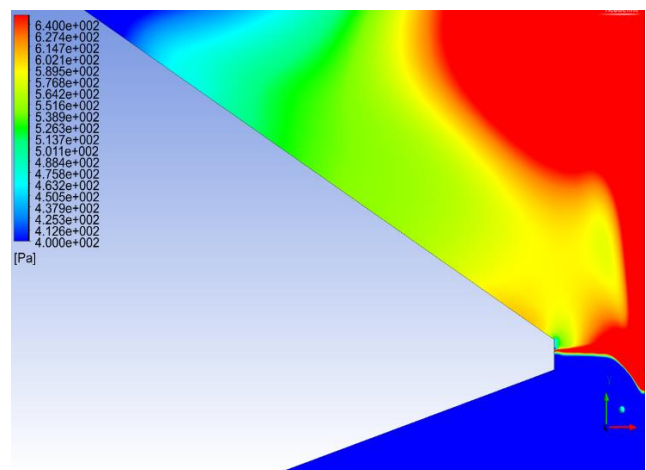


(b) ドロス回収時(トリプル)

Fig.4.82 ワイピングノズル近郊の速度ベクトル分布



(a) 操業時(上部)



(b) ドロス回収時(トリプル)

Fig.4.83 ワイピングノズル近郊の圧力分布

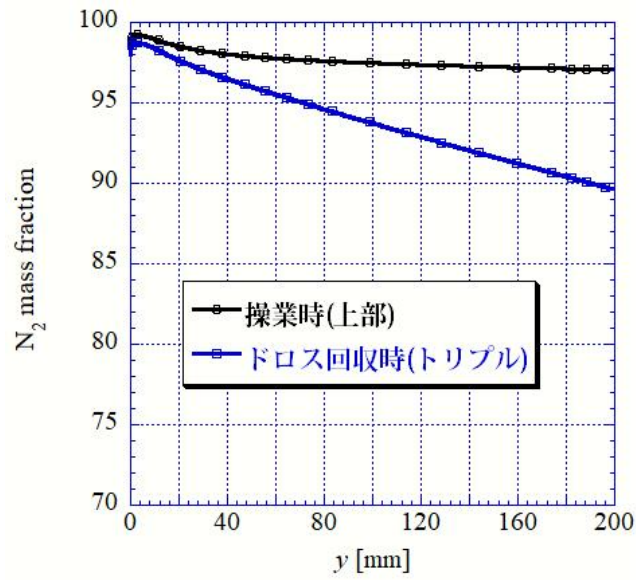


Fig.4.84 鋼板表面における窒素質量分率

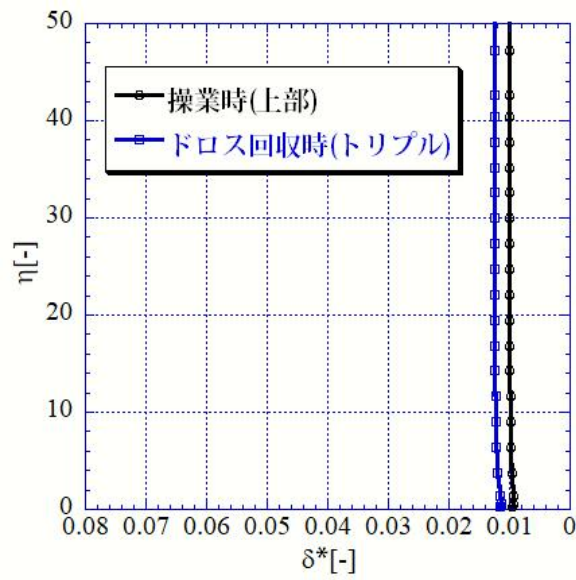


Fig.4.85 鋼板表面における無次元液膜分布

第5章 結論

本研究は、亜鉛めっき塗布工程における酸素低減を目的とした、パージ技術の設計に対して流れ場の流動解析を行い、以下の結果を得た。

1. 操業時におけるパージジェット的设计について

- 上部パージジェットの場合、 $p_p = 5\text{kPa}$ ではシールド領域内に大きな渦を形成させ、鋼板付近の窒素質量分率を約 97%維持できているため、良好な性能を発揮している。また、パージジェットが外部流れを遮断するシーリングジェットに影響を与えていないのでパージ技術として適している。定常解析と非定常解析との比較より、噴出後 0.25s 程度で定常流れとなる。
- 中部パージジェットの場合、同じ $p_p = 5\text{kPa}$ おいてもシールド領域内の渦や流れ方向に変化はないが、上部パージジェットの時よりも鋼板付近の窒素質量分率が低下し、領域範囲が小さくなっている。したがって上部パージジェットの性能を超えないため、パージ技術としては適さない。
- 下部パージジェットの場合、液膜の厚さに差があるが、中部パージジェットとほぼ同値の窒素質量分率を発揮しているため、本ケースも同様パージ技術としては適さない。

2. ドロス回収時におけるパージジェット的设计について

- シングルパージジェット(上部)の場合、操業時における上部パージジェットと比較してパージ圧力を増加させても、シールド領域内の流線の数少なく密集していないことから、パージジェットの噴流量が不足している。また、ワイピングジェットに対する作用が小さいことから液膜の増加が顕著に現れている。さらに、鋼板付近の窒素質量分率が約 50%で十分に満たしていないため、ドロス回収時におけるパージ技術としては適さない。
- ダブルパージジェットの場合、噴流箇所を1つ増やし、パターンを3ケース検証すると、各ケースとも鋼板付近における窒素質量分率が約 60~70%に増加したが、表面品質を維持するために一般的にはおよそ 90%以上満たす必要があるため本ケースでは満たしていない。したがって、本ケースも同様にパージ技術としては適さない。
- トリプルパージジェットの場合、 $p_p = 5\text{kPa}$ では鋼板付近の窒素質量分率が 90%以上に

保つことができ、作業時に近い性能を発揮している。また、装置内の渦がシーリング領域とシールド領域の境を塞ぎ、外部流れを遮断させるに近い大きさであるので装置内全体に窒素を充満させることができる。定常解析と非定常解析との比較より、噴出後 0.3s 程度で定常流れとなる。

- 作業時とドロス回収時での良好な性能を示した上部パーシジェットおよびトリプルパーシジェットについて、パーシジェットの噴出によって鋼板表面に及ぼす影響を考察した結果、圧力分布は両者とも鋼板のめっきに与える影響はほとんどみられないことがわかった。また、鋼板付近における窒素質量分率は表面品質を維持するために必要な 90%以上を満たしている。したがって、パーシ技術では、作業時は上部ノズルから、ドロス回収時は 3ヶ所噴出する方法が最も良好であると提案する。

参考文献

- (1) Y-H.Kweon, T.Aoki and K.Nakamura, “New Wiping Technique to Efficiently Control Coating Layers at High Line Speed in the Continuous Galvanizing Line (CGL)”, *Final Report to POSCO*, March 31, 2018.
- (2) C.Koutsaris, “Metallic Foam Formation During Continuous Hot-Dip Galvanizing of Steel Sheet”, *Master Thesis in University of Montreal*, 2011.
- (3) A.K.Neghab, “Improving Galvanizing Bath Hardware”, *Master Thesis in the University of Western Ontario*, 2015.
- (4) S.Alibeigi, “Experimental Investigation of Air-Knife Geometry in Continuous Hot-Dip Galvanizing”, *Master Thesis in McMaster University*, 2013.
- (5) K.Myrillas, “Experimental and Numerical Investigation of Gas Jet and Liquid Film Interaction”, *Ph.D.Thesis in von Karman Institute for Fluid Dynamics*, 2011.
- (6) 武田 玄太郎, 高橋 秀行, 壁矢 和久, “連続溶融亜鉛めっきラインのガスワイピングにおける3スリットノズルの噴流形態”, *鉄と鋼*, Vol.102, No.10, pp.24-30, 2016.
- (7) Nissin Steel Co., Patent JP2002-348651.
- (8) ANSYS® Academic Research CFD, Release18.1.
- (9) S.Koga(Nisshin Steel Co.), “Gas Wiping Device”, *US Patent*, 2013/0239884 A1, 2013.
- (10) A.Komatsu, T.Tsujimura, K.Watanabe, N.Yamaki, A.Andoh and T.Kittaka(Nisshin Steel Co.), “Hot-Dip Zn-Al-Mg Coated Steel Sheet Excellent in Corrosion Resistance and Surface Appearance and Process for the Production Thereof”, *US Patent*, US 6235410 B1, 2001.
- (11) T.Oohashi, M.Kageyama, S.Uchida and K.Hamaguchi, “Method for Producing Hot-Dip Plated Steel Sheet and Apparatus for Hot-Dip Plating”, *US Patent*, US/2011/0177253 A1, 2011.
- (12) ArcelorMittal, “Method for Producing a Sheet Having a ZnAlMg Coating With Optimized Wiping and Corresponding Sheet”, *US Patent*, US/2016/0340767 A1, 2016.
- (13) 橋田 拓弥, 山下 竜二(日新製鋼), “Mg含有溶融亜鉛めっき鋼板の製造方法及び製造装置”, 日本国特許庁, 公開特許公報, 2002/348651, 2002.
- (14) A.Hrbek, “Metal Finishing J.”, pp.298, 1961.
- (15) J.a.Thornton and H.F.Graff, “Metall.Trans.B”, pp.607, 1976.
- (16) E.O.Tuck, “Phys Fluids”, pp.2352, 1983.

- (17) E.O.Tuck and J.M.V.Broeck, "AICHE Journal", pp.808, 1984.
- (18) C.H.Ellen and C.V.Tu, "Trans.ASME J.Fluids Eng.", pp.399, 1984.
- (19) 武石 芳明, 山内 昭良, 宮内 澄隆, "連続溶融めっきにおけるガスワイピング機構", 鉄と鋼, Vol.81 (1995), No.6.
- (20) 武石 芳明, 青木 健郎, 鉄と鋼, Vol.81 (1995), p.135.
- (21) S.Beltaos, and N.Rajaratnam J.Hydraulic Research, 11 (1973), p.29.
- (22) S.Beltaos, J.Hydraulics Division ASCE, 102, HY9 (1976), p.1177.
- (23) 松尾 一泰, "圧縮性流体力学 内部流れの理論と解析", 理工学社, 1994.
- (24) Y-H.Kweon and H-D.Kim, "Study on the Wiping Gas Jet in Continuous Galvanizing Line", *Journal of Thermal Science*, Vol.20, No.3, pp.242-247, 2011.
- (25) S-B.Kwon, Y-D.Kim, S-J.Lee, S-Y.Shin and G-Y.Kim, "Numerical Analysis for the Coating Thickness Prediction in Continuous Hot-Dip Galvanizing", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.23, pp.3471-3478, 2009.
- (26) 社団法人日本流体力学学会, "第2版 流体力学ハンドブック", 丸善株式会社, pp.375-376, 1998.
- (27) K.Myrillas, P.Rambaud, J-M.Mataigne, P.Gardin, S.Vincent and J-M.Buchlin, "Numerical Modeling of Gas-Jet Wiping Process", *Journal of Chemical Engineering and Processing*, Vol.68, pp.26-31, 2013.
- (28) P.Naphade, A.Mukhopadhyay and S.Chakrabarti, "Mathematical Modeling of Jet Finishing Process for Hot-Dip Zinc Coatings on Steel Strip", *ISIJ International Journal*, No.2, pp.209-213, 2005.
- (29) P.Tamadonfar, "Numerical Investigation of Multiple-Impinging Slot Jets in the Gas-Jet Wiping of Liquid Zinc Coatings", *Master Thesis of McMaster University*, 2010.
- (30) C.Pfeiler, M.Mataln, A.Kharicha, G.Angeli and C.K.Riener, "Simulation of Zinc Film Formation during Continuous withdrawal of Steel Strips from Galvanizing Baths", Conference of Metal 2014, Brno, Czech Republic.
- (31) ANSYS® Academic Research CFD, Release18.1, Help System, No.FL01534, ANSYS, Inc.
- (32) ANSYS® Academic Research CFD, Release18.1, Help System, No.FL01525, ANSYS, Inc.
- (33) ANSYS® Academic Research CFD, Release18.1, Help System, 21.Solver Theory, ANSYS, Inc.

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々に多大なるご指導を頂きました。お世話になった方々へ、ここに感謝の意を表します。

青木俊之 教授には、本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始熱心なご指導を頂きました。厚く感謝を申し上げます。時に応じて厳しくご指導いただいたこと、また励ましてくださったことを通して、私自身の至らなさを実感することができたことは今後の努力の糧になるものであります。心から御礼申し上げます。

安養寺正之 准教授には、講義を通して専門分野の知識をご教授頂きました。また、中間諮問での確かな助言を頂いたり、研究以外のことでもアドバイスを頂いたりしたことに心より感謝申し上げます。

大和裕里 秘書には、学生が研究以外の雑務におわれることは一切なく、快適に研究生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

原智子 専攻事務には、就職活動時や事務的手続きなどで、大変な世話になりました。ありがとうございました。

本研究室で共に研究に励んだ修士2年の後藤逸平 君、野見山友也 君、横山恭平 君、金川昌弘 君、栗野大志 君、皆様のおかげで有意義な研究および普段の会話や研究室行事等、充実した生活を送ることが出来ました。心より感謝の意を表します。

修士1年の大野晴之 君、梶原克弥 君、小林亮太 君、土黒聖人 君、平松修一 君、王文才 君、また学部4年の青木拓未 君、宇佐見 一輝 君、廣詩敏 さん、みな個性的であり、おかげで楽しく過ごすことができました。益々のご活躍を祈っております。ありがとうございました。

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、温かく見守りそして辛抱強く支援してくださった両親に対しては深い感謝の意を表して謝辞と致します。