

4.3 DFCD の最適化（タグチメソッドの動特性解析）

4.3.1 はじめに

エンジニアード・システムのノイズに対する強さを表す尺度は、出力が入力につれて動くという意味で動特性の SN 比と呼ばれている。このため、エンジニアード・システムそのものも、簡単に動特性と呼ばれることが多い。本節では、前節と同様に DFCD の最適化を実施するが、入力に対して出力が動く最適化である、動特性の最適化を実施する。

4.3.1.1 動特性の最適化の概念

我々が開発活動などで取り扱う製品、それに使用する技術、あるいは製造工程のほとんどは、入出力の関係を持つエンジニアード・システム（動特性）である。前節で扱った、望大特性のシステムも、エンジニアード・システムの入力を一点に固定してのものであると言える。動特性のパラメータ設計を説明するために、本節で取り扱う DFCD の最適化を例にとって説明する。

図 4.3.1 のような、DFCD の最適化を考える。ここでの設計パラメータは前節と同じものであるとする。目標はフィルム効率を最大化することである。いま、実験（または解析）によって主流の流入角 α によって、フィルム効率が変化することを発見したとする。このとき、ある設計と別の設計に関して、横軸に吹き出し比の逆数を取り、縦軸にフィルム効率をプロットしてみると、図 4.3.2 のようになったとする。図より、ある $1/BR$ に固定してその条件で最適化を行い（4.2 節）、その条件でノイズ（今は α を示す）の影響を小さくしても、 $1/BR$ が変化してしまうとノイズの影響が変化してしまう。図 4.3.2 のように、 $1/BR$ によってノイズの影響が変わるかどうかを知るには、 $1/BR$ と α の二次元配置、つまり、入力を固定せず、値を変化させながら評価を行う必要がある。実験の中で、値を変化させる入力を信号因子と呼び、信号因子の値を変えながら出力変動を評価するところに動特性解析の最適化の特徴がある。

図 4.3.3 のように、最適化を実施できれば、 $1/BR$ を変えることにより広い範囲の目標に対応できるので、設計の汎用性を高めることができる。以上のような、どの入力に対してもフィルム効率が高く、さらにノイズの影響が少ないものを生み出すのが、動特性の最適化であり、動特性の最適化の最大の利点である。

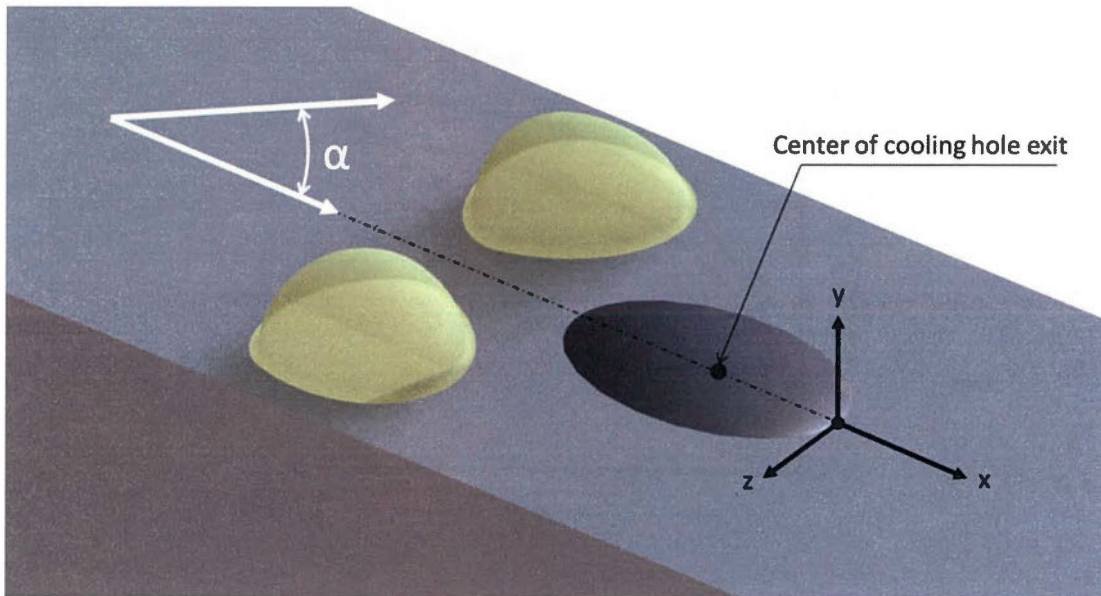


図 4.3.1 DFCD の最適化(流入角の効果)

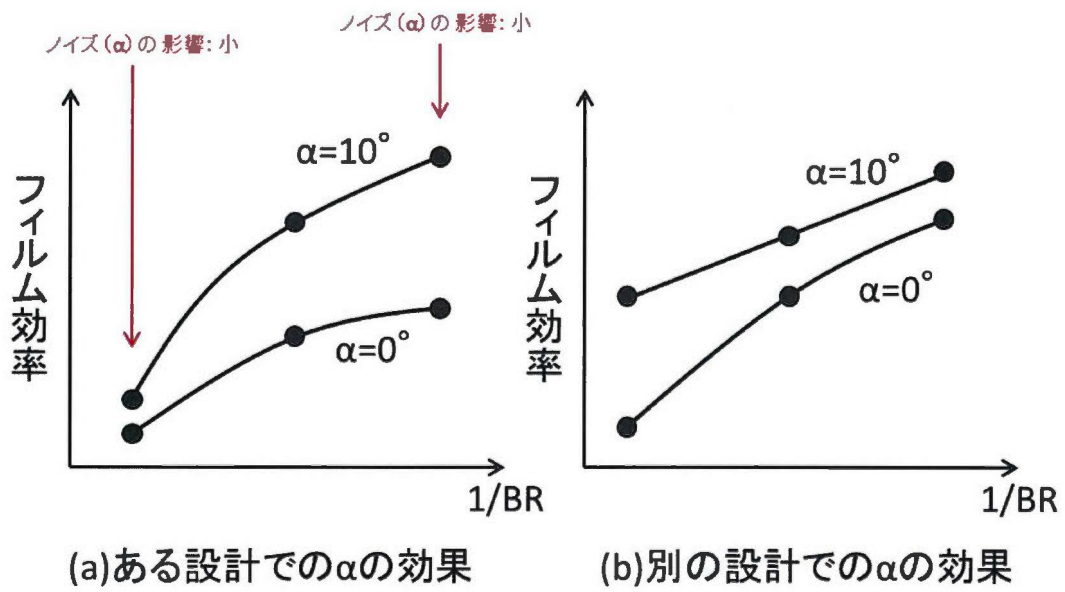


図 4.3.2 流入角の効果

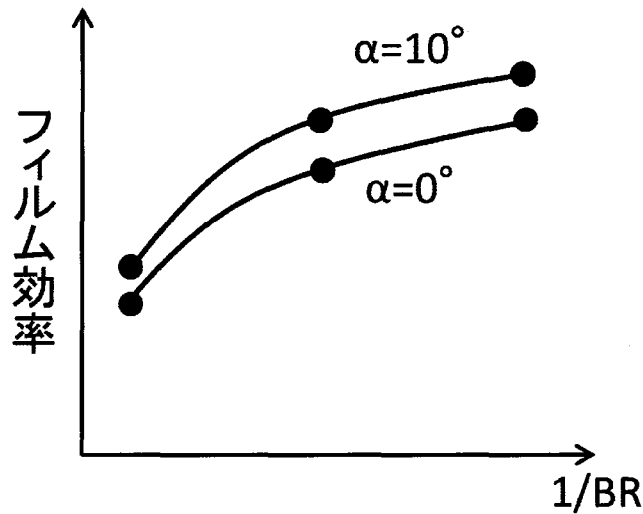


図 4.3.3 理想的な設計

4.3.1.2 動特性の最適化の手順

動特性の最適化の手順は、次の点を除いて望大特性を用いた静特性の最適化と同じである。

- ① システム入出力の検討
- ② 理想機能の検討
- ③ SN 比の計算方法

この3点について以下に説明する。

(1) システム・チャートによる入出力の検討

ほとんどの製品・技術が入出力の関係を持つエンジニアード・システムであることは理解できても、現在取り扱っている製品・技術の入出力を考えるがある。動特性のパラメータ設計においては、システム・チャートと呼ばれる図を用いて、何が入力で、何が出力なのかを検討することになる。システム・チャートとは、エンジニアード・システムの図の中に入力、出力、ノイズ、パラメータなどを具体的に記入したものであり、この図があれば複数の技術者で議論がしやすい。

今回は、実際に本節の最適化問題として取り上げる、DFCD の最適化について、流入角をノイズとしたシステム・チャートを検討してみる。今回、システムで求められる機能としてはフィルム効率を最大化することであり、出力は面平均フィルム効率である。出力である面平均フィルム効率を変えるものがエンジニアード・システムの入力であり、予備的な実験から $1/BR$ によって、出力が変化することが分かったので、これを入力としている。吹き出し比を逆数にして理由に関しては後に説明を行う。図 4.3.4 には、本節で行う最適化のシ

ステム・チャートを示す。ノイズに関しては、主流の流入角としている。主流の流入角の効果については前節までで説明を行っているとおりであり、出力を変化させるノイズとしては採用に足るものであると判断できる。DFCD の設計パラメータに関しては静特性の解析と同様であり、DFCD のフィレット半径等を採用するものとする。

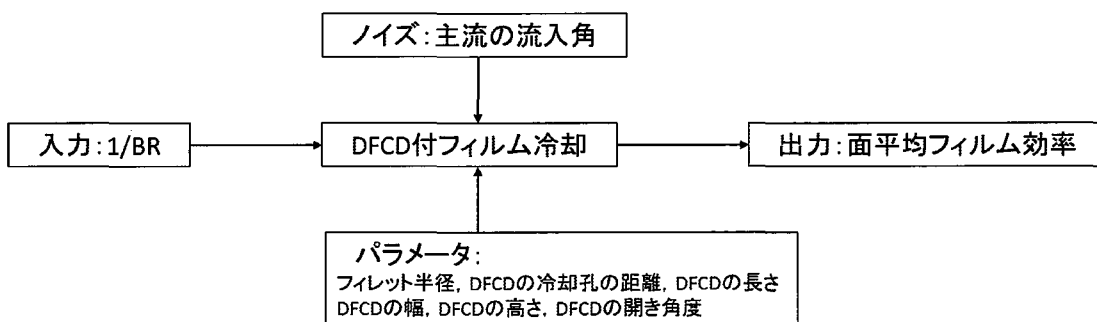


図 4.3.4 DFCD 付フィルム冷却のシステム・チャート

(2) 理想機能の検討

入力と出力を明確にした後は、次のステップでは、入力と出力の間の理想関係を検討する。理想機能の検討は動特性の最適化において最も重要なステップである。

(i) 入出力が線形関係にある場合

簡単で分かりやすい理想機能は、入力 M の変化に対して出力 y が直線的に変化するのが理想という場合である。以下の3つのシステムがあるが、多くのシステム・技術はこのうち①を理想としている。

① ゼロ点比例式 (図 4.3.5①)

入力がゼロの時は出力がゼロであり、入力の増加に比例して出力が上がっていくのを理想とするものである。数式で表すと以下ようになる。ノイズは入出力の傾きを変える。

$$y = \beta M \quad (4.3.1)$$

② 一次式 (図 4.3.5②)

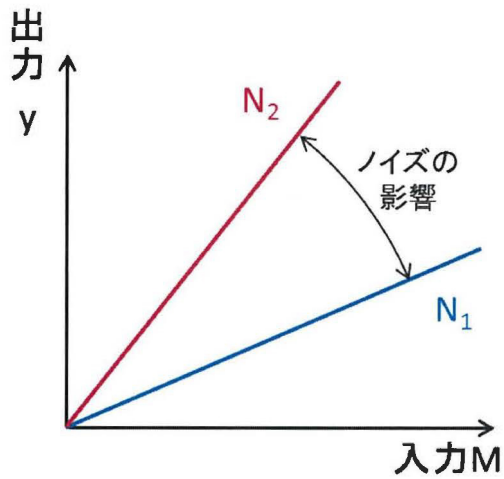
入力がゼロでも技術の原理上、出力がゼロにならないもの(出力をゼロにしたいものを含む)があり、これを理想とするものである。数式で表すと以下ようになる。このシステムでは、ノイズが入出力を平行移動させる。

$$y = \alpha + \beta M \quad (4.3.2)$$

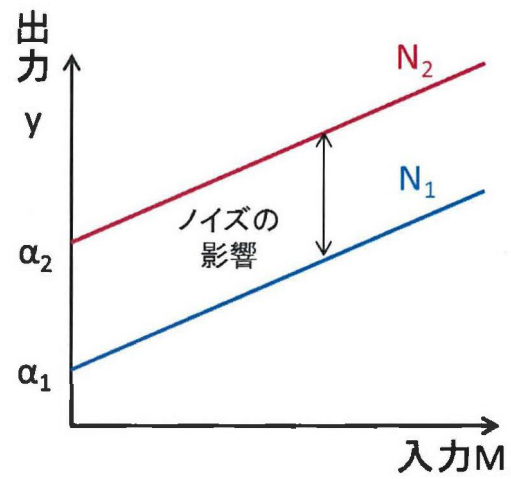
③基準点比例式 (図 4.3.5③)

入出力の関係が原理上ゼロではない, ある決まった点を通り, これを理想とする機能である. 数式で表すと以下のようなになる. このシステムでは, ノイズが入出力の傾きを変える.

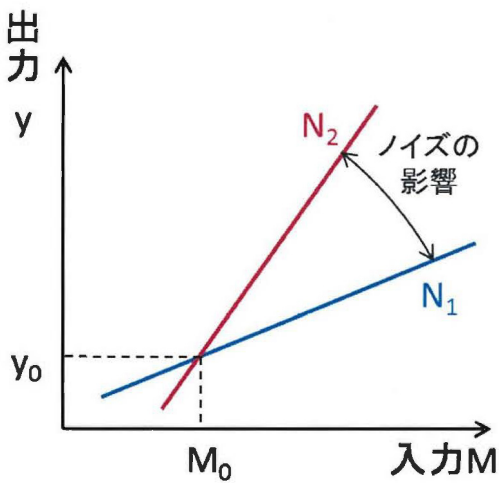
$$y - y_0 = \beta(M - M_0) \quad (4.33)$$



①ゼロ点比例式



②一次式



③基準点比例式

図 4.3.5 理想的機能 (線形関係)

(ii) 入出力が非線形関係にある場合

入力に対して出力が非線形に変化することを理想としたもので、以下の 2 つのケースが存在する。

① 変数変換により線形関係に置き換えられるもの

たとえば、出力 y が入力 M に対して、 A を定数として、

$$y = A \times e^{\beta M} \quad (4.3.4)$$

の関係を持つことを理想とするものは、両辺の自然対数を取れば、

$$\ln y = \ln A + \beta M \quad (4.3.5)$$

となり、 $\ln y$ を新変数 Y と見なせば、

$$Y = \ln A + \beta M \quad (4.3.6)$$

となり、線形関係の基準点比例式が適用できる。非線形関係の入出力の多くは物理現象によるものなので、変数変換により線形関係に置き換えることができる。

② 技術的要求によるもの

技術的要求から、入力 M に対して出力 y がある形の曲線に従うことを理想とする場合がある。

(3) 動特性のロバストネスの定量化

動特性では、入出力が線形関係にあることが理想的である場合、次のような SN 比 η と感度 (入出力の傾き) S を考える。式の中の σ^2 は、様々なノイズの影響の大きさを示す。

$$\text{動特性のSN比} \quad \eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (4.3.7)$$

$$\text{動特性の感度} \quad S = \beta^2 \quad (4.3.8)$$

SN 比 η と感度 S をデータ解析するときには、両者とも $10 \log$ を取って、以下のデシベル値を使う。

$$\text{動特性のSN比[db]} \quad \eta = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (4.3.7)$$

$$\text{動特性の感度[db]} \quad S = 10 \log \beta^2 \quad (4.3.8)$$

図 4.3.6, 図 4.3.7 には、動特性解析において SN 比と、感度 S が示す意味をイメージで示している。

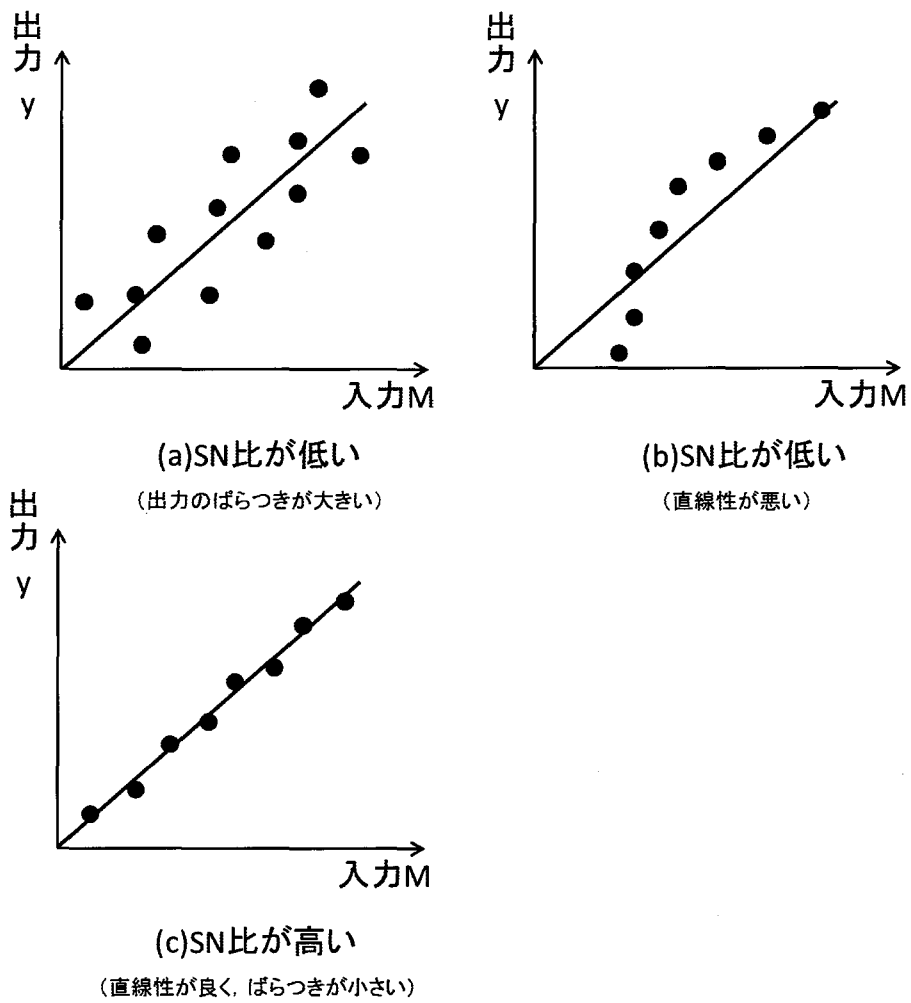


図 4.3.6 動特性の SN 比の意味

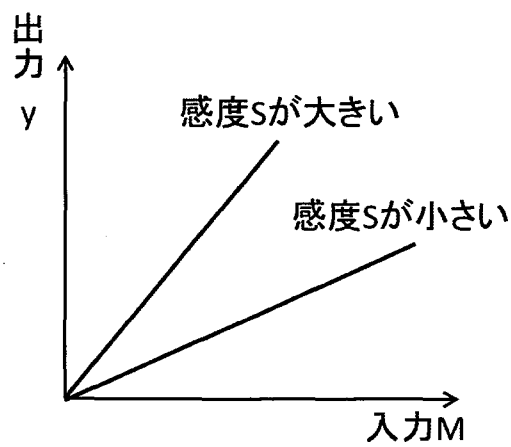


図 4.3.7 動特性の感度の意味

4.3.2 動特性解析の条件

4.3.2.1 最適化のターゲット

今回は4.2節と同様にDFCDの最適化を動特性解析によって行うが、4.2節とは誤差因子と入力を加えることで最適化を行っている。目標は面平均フィルム効率の最大化である。動特性解析を行う際の入力は $1/BR$ とした。 BR を逆にするのは、入出力の理想的関係を検討する際にゼロ点比例式を用いるためである。実際に実験を行う際の、 BR と入力の関係は以下の表に示す。

表 4.3.1 BR と入力の関係

BR	$1/BR$ (入力)
1.0	1.00
0.75	1.33
0.5	2.00

動特性解析を行う際のノイズは主流流入角 α とした。主流の流入角は3.5節で用いた供試体を用いるために $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ の3条件に変化させることとした。制御因子と各水準は4.2節と同じものを使用しており、図4.3.8、表4.3.2へ示す。

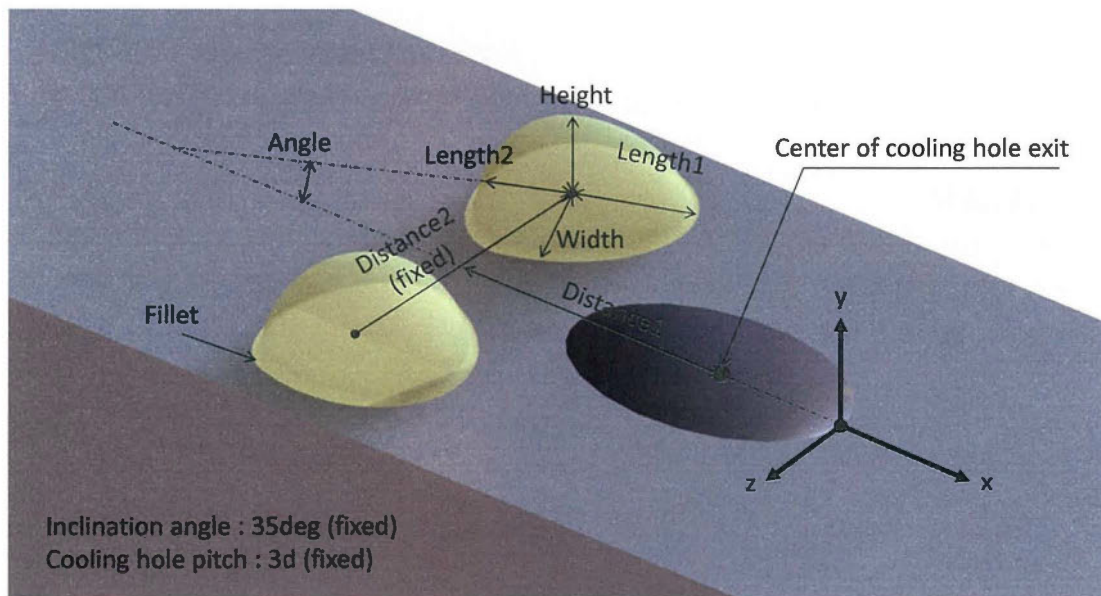


図 4.3.8 デバイス形状と設計パラメータ

表 4.3.2 制御因子とその水準

	制御因子	第一水準	第二水準	第三水準
A	Fillet	3mm	1mm	
B	Distance1	35mm	40mm	45mm
C	Length1	7mm	15mm	20mm
D	Length2	7mm	15mm	20mm
E	Height	3mm	6mm	10mm
F	Width	3mm	6mm	10mm
G	Angle	0deg	7.5deg	15deg

4.3.2.2 数値解析要領

動特性解析を行う場合、今回は入力 3 条件、ノイズ 3 条件としたために実験数は $18 \times 3 \times 3 = 162$ 条件となってしまふ。これを、実験的な調査で検証するのは難しいと判断したため今回は数値解析を用いた調査を行うことで、DFCD の最適化を実施することとした。

(1) 解析領域

解析領域は 4.2 節と同様である。

(2) 計算格子

今回は解析数が非常に多くなるため、解析にかかる時間を低減するために 4.2 節で用いた計算格子の内 Grid 3 (最も計算格子が少ない格子) を用いて解析を実施することとした。

(3) 解析条件

今回は乱流モデルを SST モデルとし、定常計算を実施している。主流入口には $Re=16,400$ となるように流速を与えるが、スパン方向へ速度成分を与えることで流入角を 3 条件に変化させる。その他の境界条件に関しては、4.2 節と同様である。

4.3.3 最適化結果

4.3.3.1 フィルム効率

図 4.3.9～図 4.3.11 には、 α を変化させた時の $BR=0.5$ におけるフィルム効率分布を示す。 $\alpha=0^\circ$ の場合は、4.2 節の結果と同様であるが、 α が増加すると、フィルム効率分布が各形態で変化する。 $\alpha=0^\circ$ においてフィルム効率が低い形態 (Case05 等) を見ると、 α が増加すると分布のセンターライン上の局所的なフィルム効率が増加する傾向になっていることが分かる。一方で、 $\alpha=0^\circ$ に置いてフィルム効率が低い形態 (Case13 等) では、 α が増加すると無冷却の領域が増加しており、フィルム効率が低下しているように見られる。

図 4.3.12～図 4.3.14 には、 α を変化させた時の $BR=0.75$ におけるフィルム効率分布を示す。 BR が増加すると、二次空気が lift-off する傾向になり、無冷却の部分が増加する形態が存在する (Case15 等) が、流入角が増加するに従って、無冷却の部分が減る傾向が見られ、冷却にはプラスの効果になっていることが分かる。一方で、Case17 のような、 $\alpha=0$ でも二次空気の付着性が高い形態に関しては、 α の増加に従って、局所的なフィルム効率が増加するが、冷却面積に関しては減少していることが観察される。

図 4.3.15～図 4.3.17 には、 α を変化させた時の $BR=1.0$ におけるフィルム効率分布を示す。 $BR=1.0$ の場合は、二次空気の運動量が高いために、 $\alpha=0^\circ$ では殆どの形態においてフィルム効率分布が観察できず、無冷却になっている。 α が増加すると、付着面積が全体的に増える傾向を示しており、フィルム効率は増加していると考えられる。

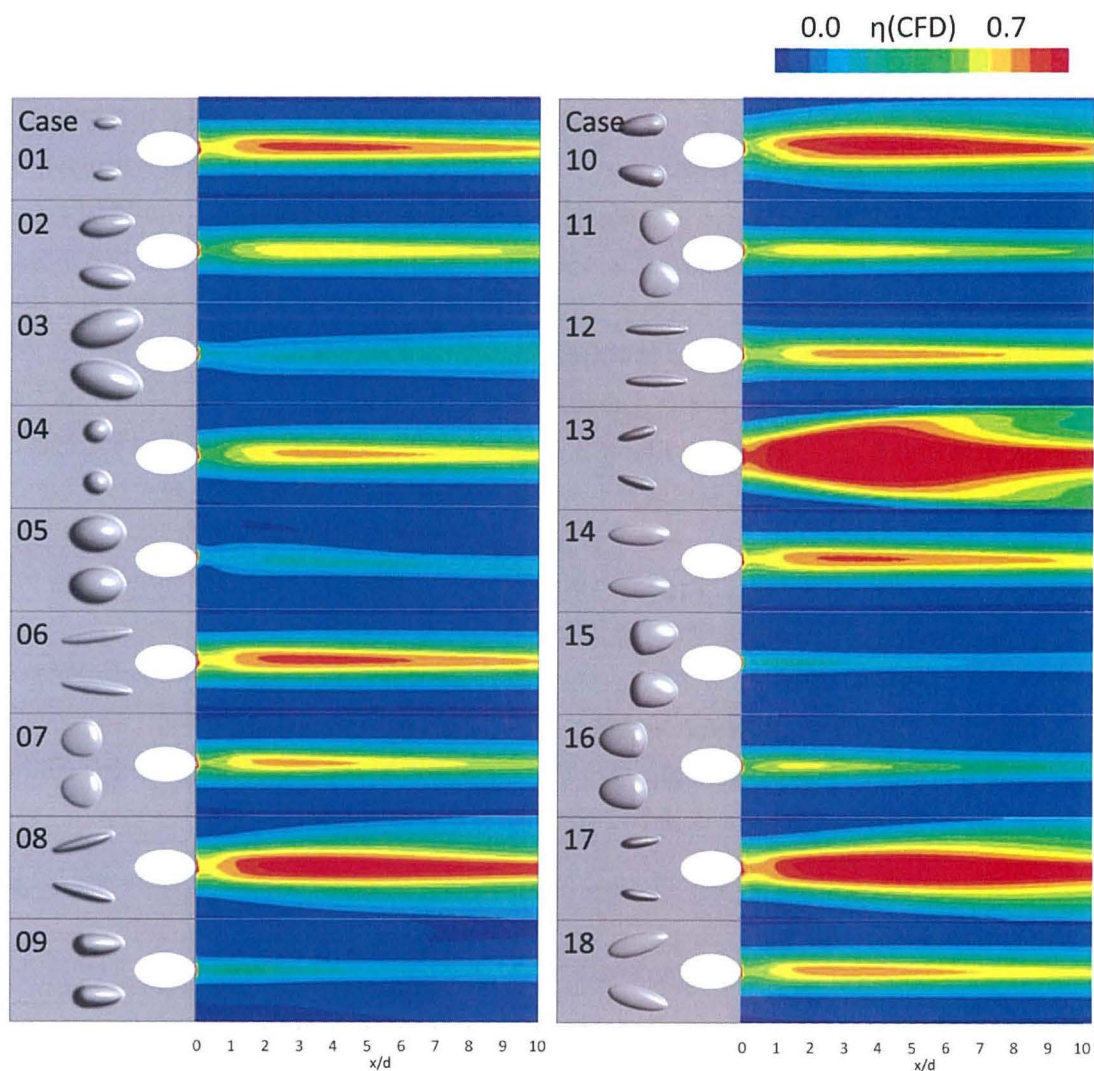


図 4.3.9 フィルム効率分布($BR=0.5, \alpha=0^\circ$)

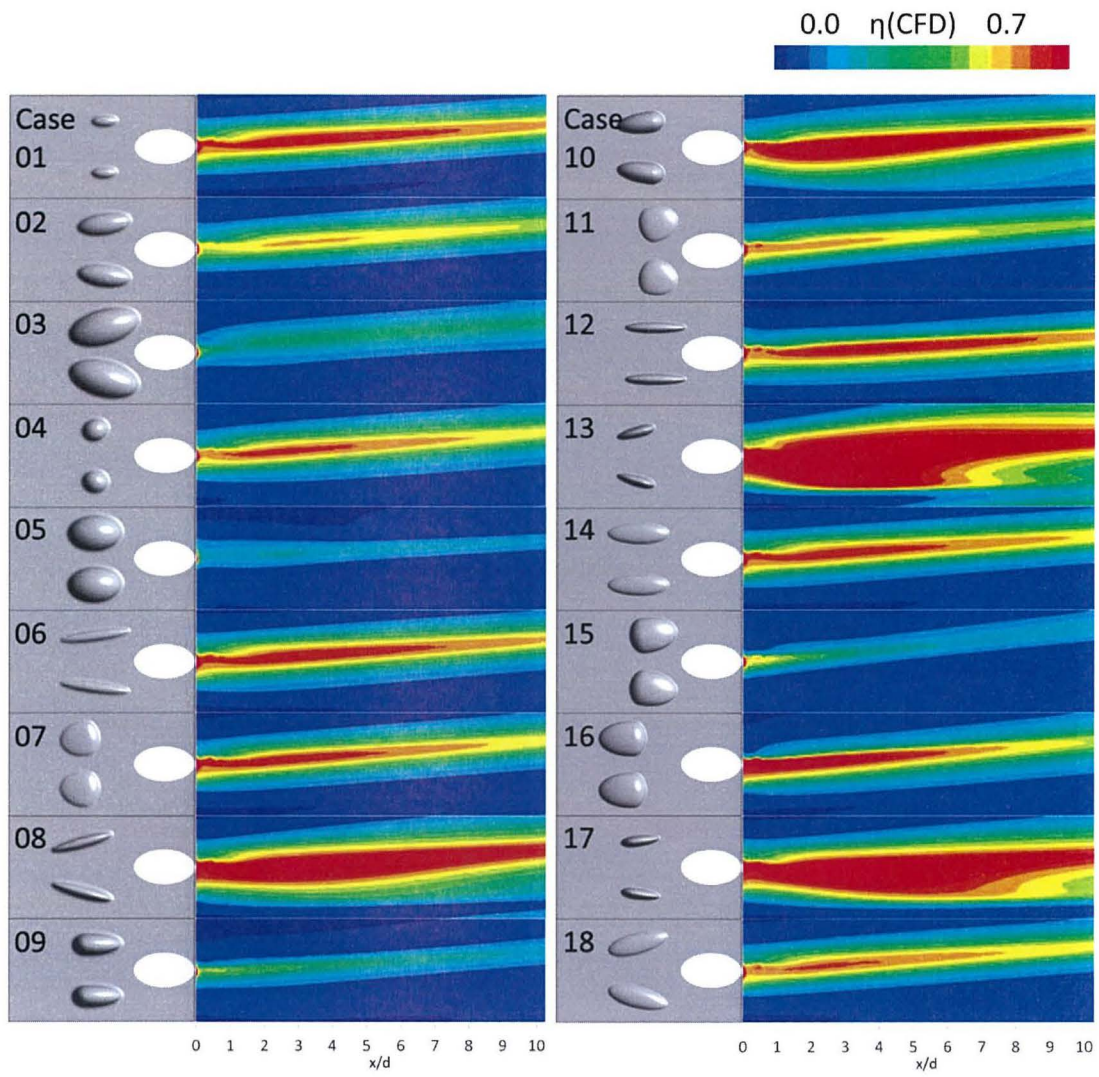


図 4.3.10 フィルム効率分布($BR=0.5, \alpha=5^\circ$)

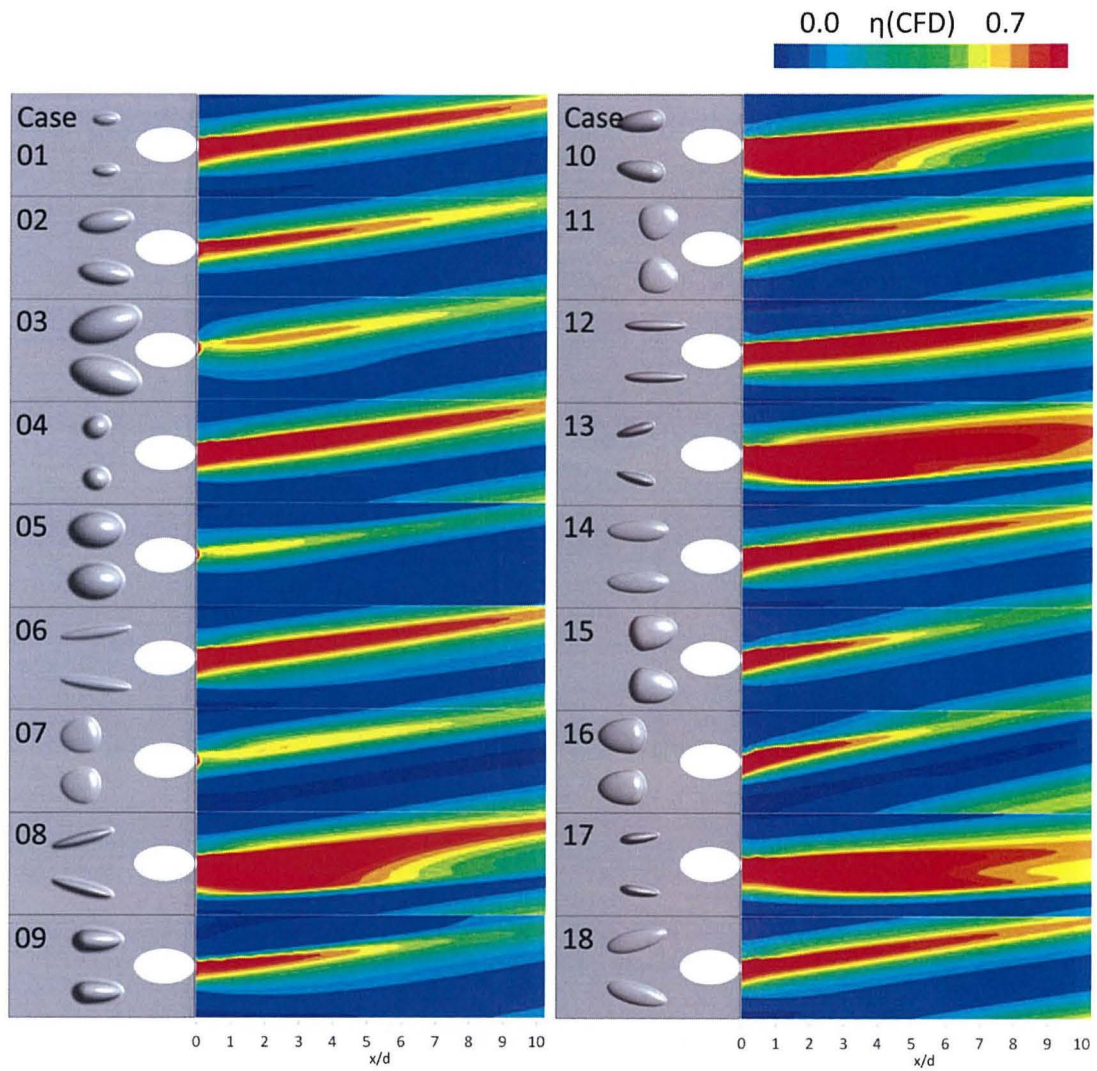


図 4.3.11 フィルム効率分布($BR=0.5, \alpha=10^\circ$)

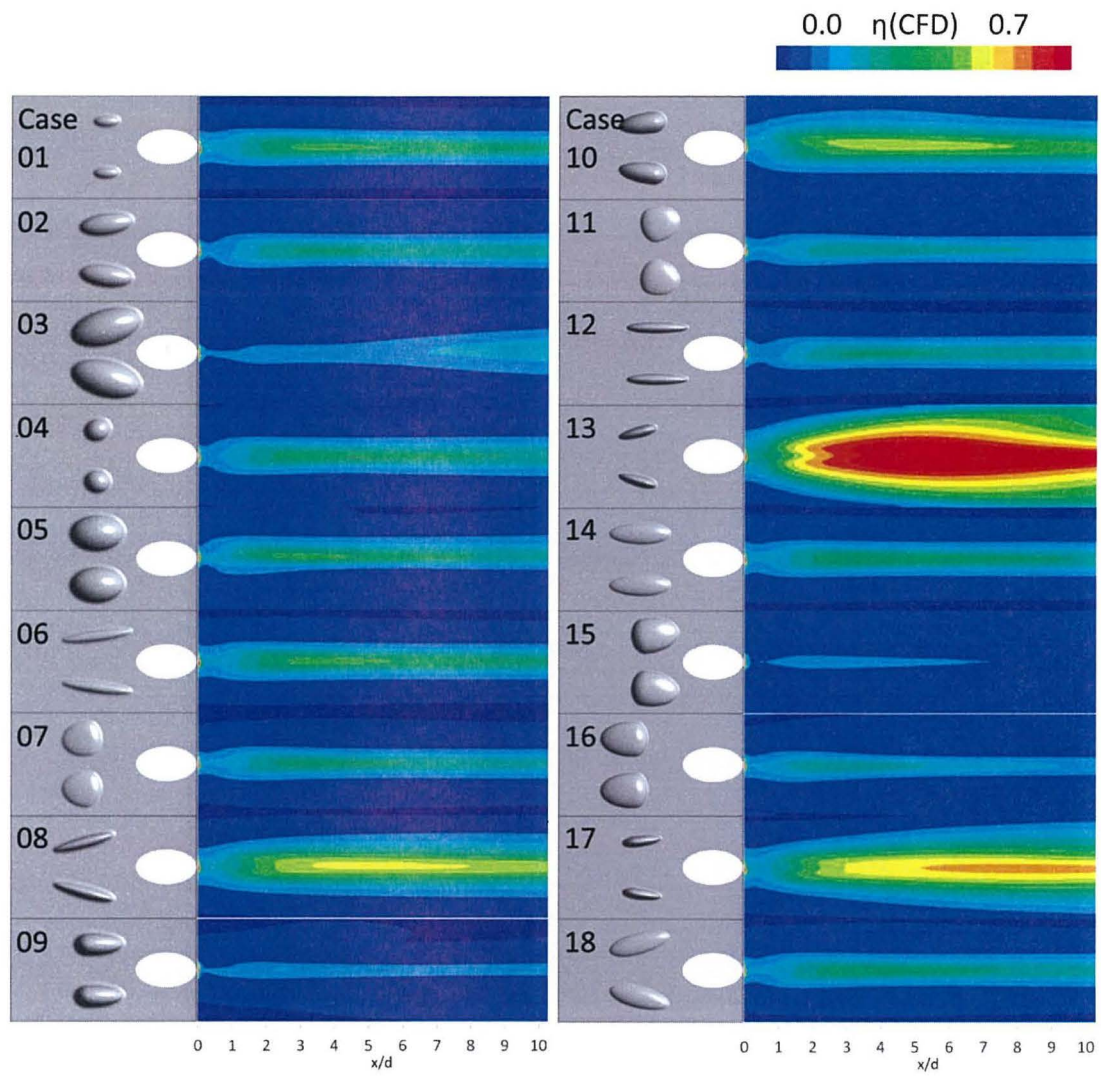


図 4.3.12 フィルム効率分布($BR=0.75, \alpha=0^\circ$)

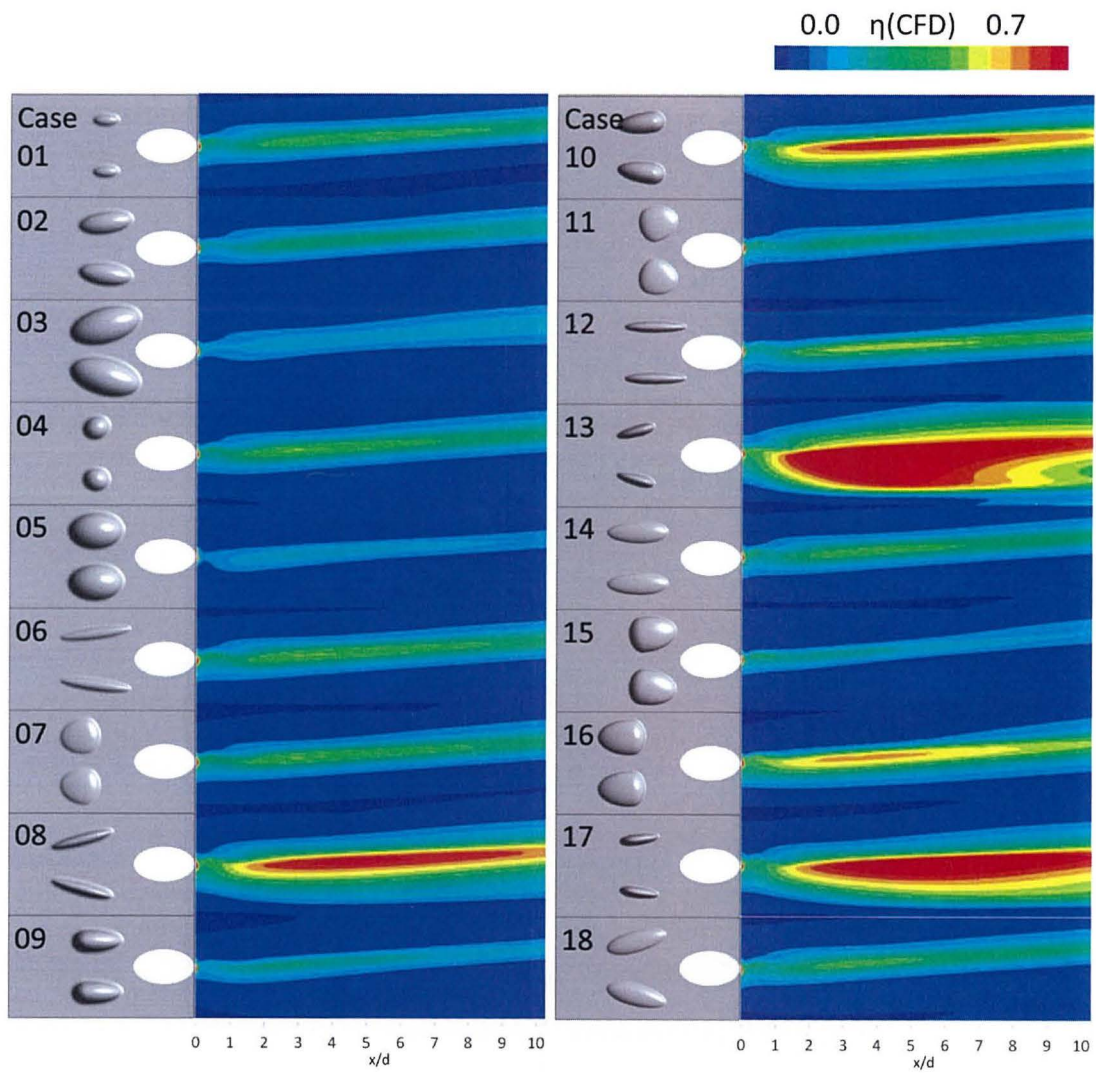


図 4.3.13 フィルム効率分布($BR=0.75, \alpha=5^\circ$)

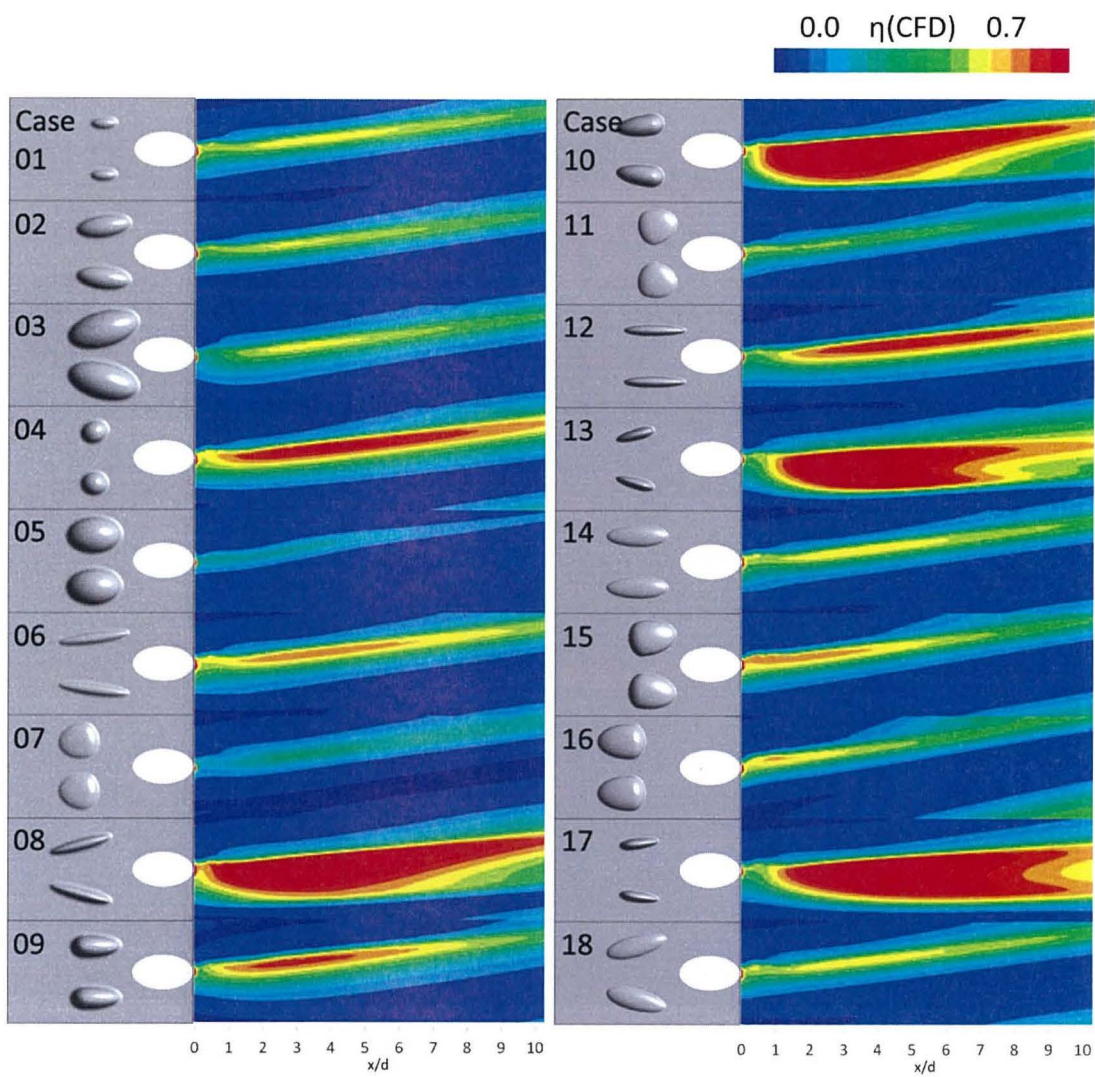


図 4.3.14 フィルム効率分布($BR=0.75, \alpha=10^\circ$)

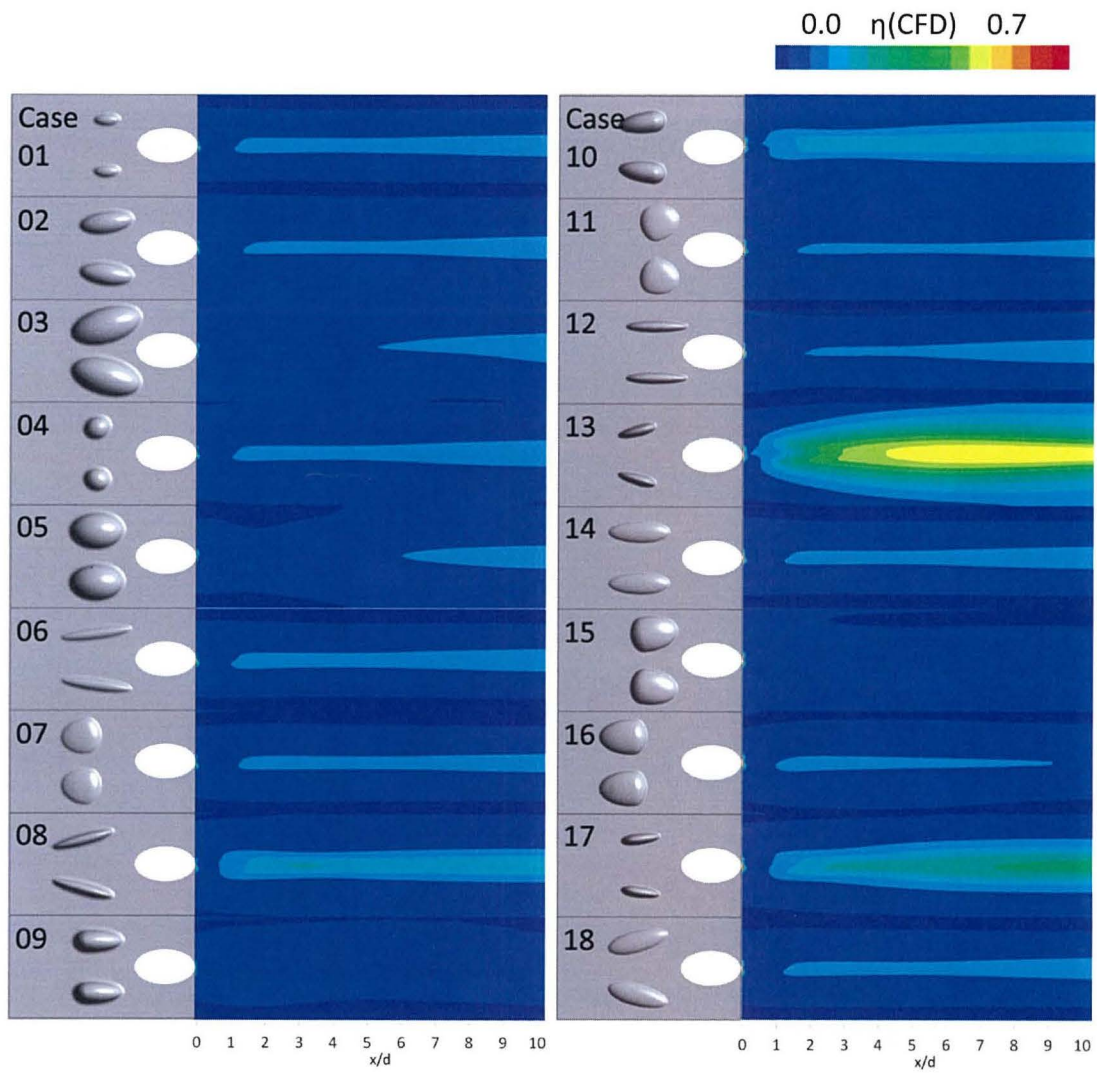


図 4.3.15 フィルム効率分布($BR=1.0, \alpha=0^\circ$)

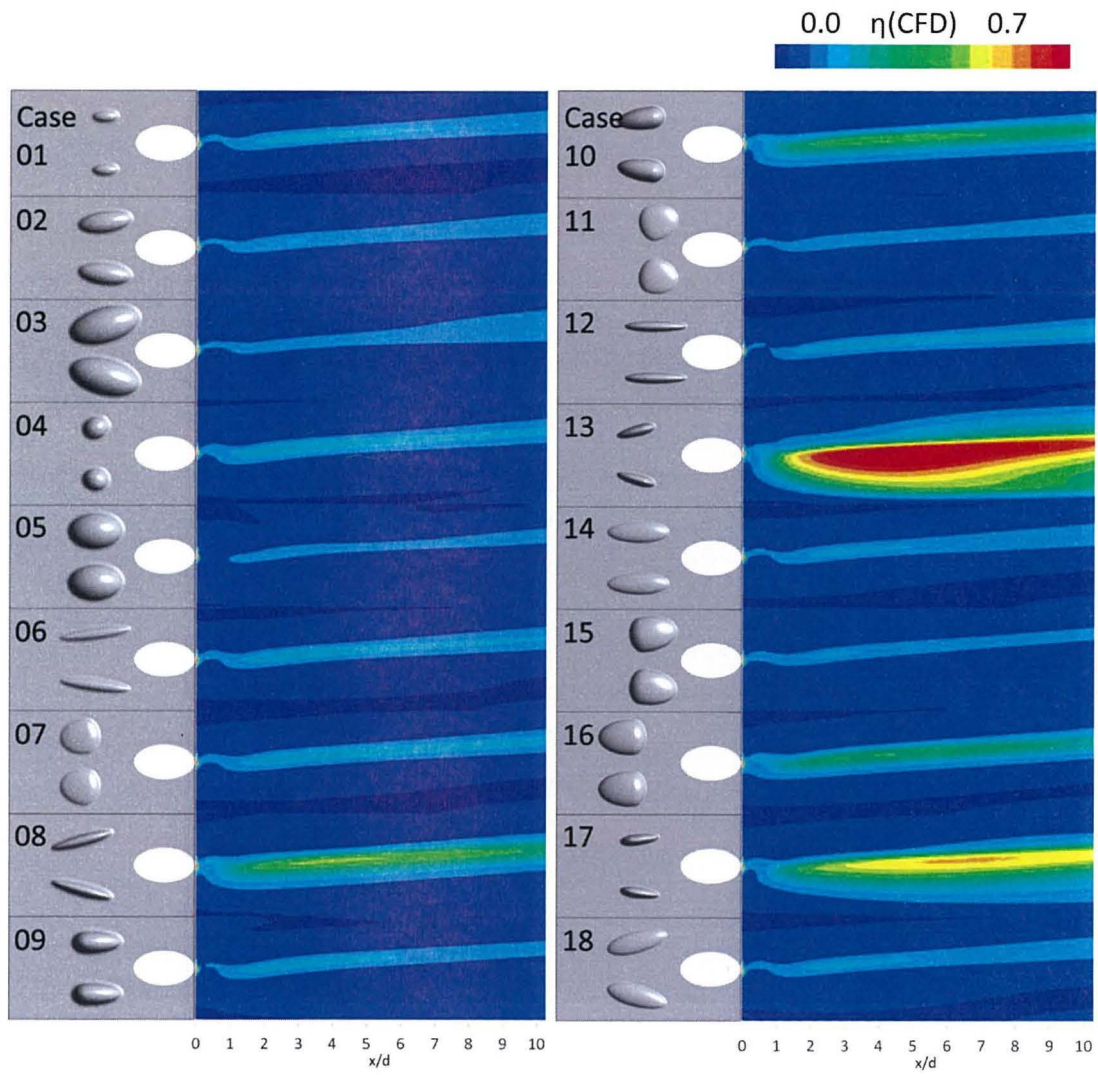


図 4.3.16 フィルム効率分布($BR=1.0, \alpha=5^\circ$)

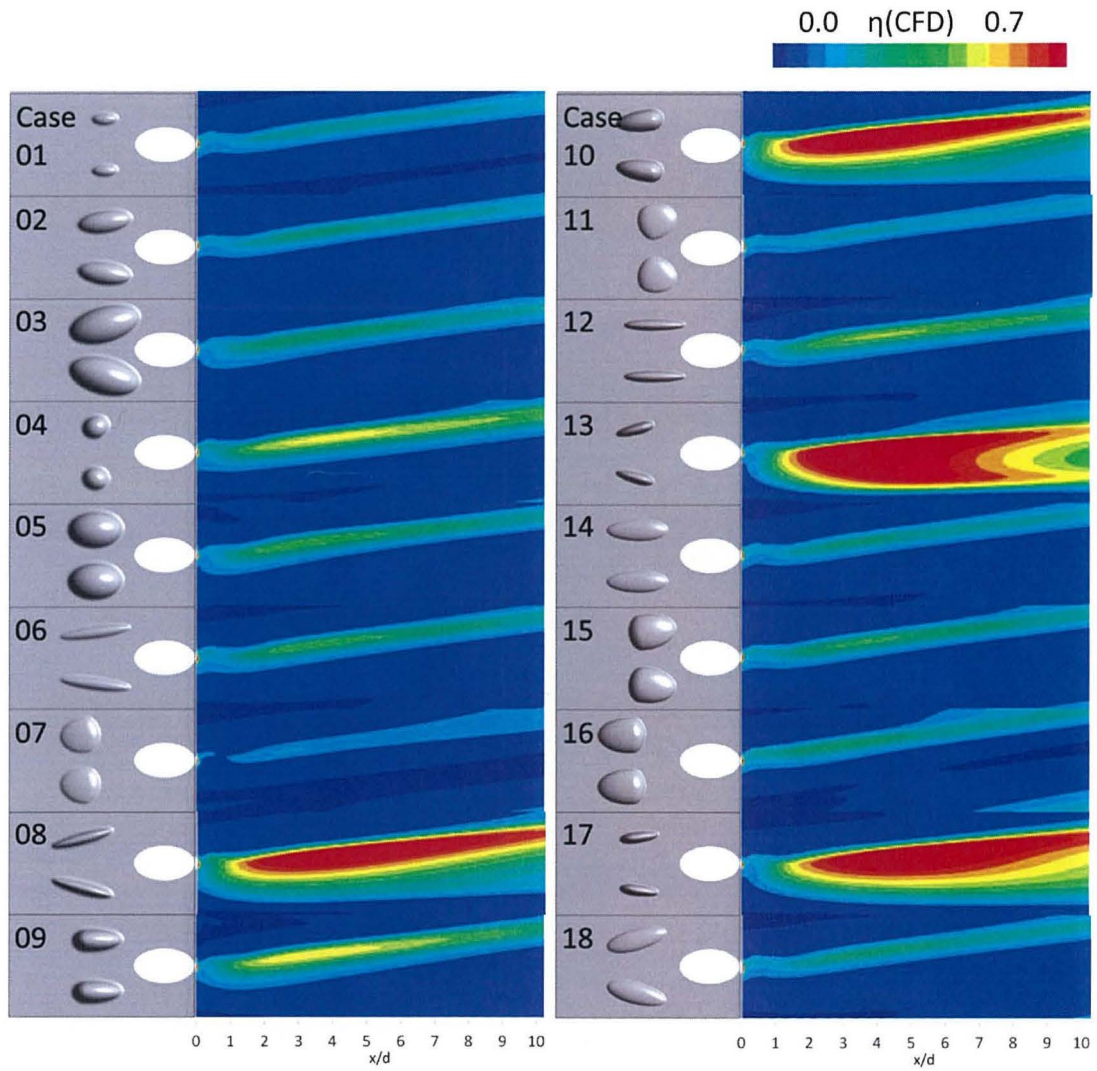


図 4.3.17 フィルム効率分布($BR=1.0, \alpha=10^\circ$)

表 4.3.3 には、CFD によって得られた面平均フィルム効率の一覧表を示す。表中の N はノイズを示しており、N1, N2, N3 はそれぞれ $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ のノイズ条件を示している。表では傾向が分かりにくいいため、グラフにしたものを以下の図 4.3.18～図 4.3.20 に示した。今回の最適化においては、理想的なシステムをゼロ点比例式としているが、グラフから入力 ($=1/BR$) と出力 η_{ave} の関係を見ると、概ねゼロ点比例式のシステムになっていることが分かる。唯一ゼロ点比例式とかけ離れたシステムとなっているのは、Case05 の場合であった。これは、Case05 は DFCD の体積が大きいため、計算格子を作成する時に、歪が生じてしまっているために、冷却孔のセンターラインに対して非対称な格子が出来てしまったためであると考えられる。

ノイズに対するロバスト性を観察すると、Case01 や Case02 のような形態はノイズによって、面平均フィルム効率のばらつきが少なくなっており、ノイズに対してはロバストであると言える。しかし、感度 S (グラフ中の傾き) に関しては、小さく、面平均フィルム効率は全体的に低く推移している。一方で、Case13 に関しては、グラフを見ると、ノイズに対するロバスト性が高く、さらに感度も高くなっており、面平均フィルム効率は全体的に高い値で推移した。また、Case13 において、注目すべき点は、N3 の場合に、 $1/BR=2$ においては、N1 のフィルム効率を下回ることである。これは、他の形態では見られない傾向であり、DFCD を取り付けた場合はおおむね全形態において N3 の $1/BR=2$ 条件ではフィルム効率が増加したが、Case13 に限っては、ノイズに対して弱い形態になっていると言える。ノイズに対して弱い形態に関しては、Case09, Case15 のような形態であると言える。この形態に関しては、特定の形態に関において、出力値がノイズに対して大きな差を持つようになっており、ノイズに対するロバスト性が低い。

表 4.3.3 面平均フィルム効率一覧

M(=1/BR) Exp.	1			1.333333			2		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
1	0.027104	0.029705	0.04221	0.067751	0.077587	0.107558	0.17374	0.185082	0.2148
2	0.028462	0.028515	0.040021	0.061355	0.06761	0.091843	0.143023	0.148704	0.168011
3	0.038879	0.040708	0.057816	0.066281	0.064728	0.117809	0.092423	0.103985	0.173513
4	0.032682	0.033632	0.094979	0.072445	0.083972	0.19837	0.163796	0.177296	0.269004
5	0.026606	0.02352	0.054782	0.066667	0.033754	0.02668	0.046753	0.030984	0.068559
6	0.028071	0.030931	0.055919	0.0709	0.081678	0.136329	0.180842	0.191298	0.237264
7	0.023556	0.03323	0.032063	0.053335	0.082444	0.064722	0.127773	0.172962	0.129911
8	0.051444	0.081178	0.232539	0.14655	0.206445	0.306229	0.2895	0.317866	0.351029
9	0.010788	0.021222	0.076885	0.021704	0.036589	0.126019	0.041071	0.053806	0.125228
10	0.061622	0.077202	0.226068	0.124108	0.187988	0.29061	0.270866	0.270359	0.315849
11	0.023216	0.025626	0.036616	0.047978	0.057378	0.085203	0.113034	0.129958	0.171649
12	0.027254	0.034013	0.0725	0.059215	0.087798	0.175613	0.150667	0.182585	0.249877
13	0.203846	0.254666	0.292147	0.370814	0.352364	0.326413	0.44035	0.43096	0.374985
14	0.027098	0.029041	0.045503	0.06505	0.073645	0.111031	0.16469	0.172712	0.21005
15	0.009857	0.020901	0.057239	0.017795	0.038879	0.123187	0.033906	0.057921	0.162679
16	0.015311	0.06014	0.063341	0.031854	0.123874	0.137183	0.069966	0.173311	0.178105
17	0.089826	0.14828	0.293534	0.228121	0.279999	0.33427	0.370519	0.363226	0.361471
18	0.026361	0.028469	0.048667	0.060895	0.069985	0.11584	0.146856	0.160038	0.211602

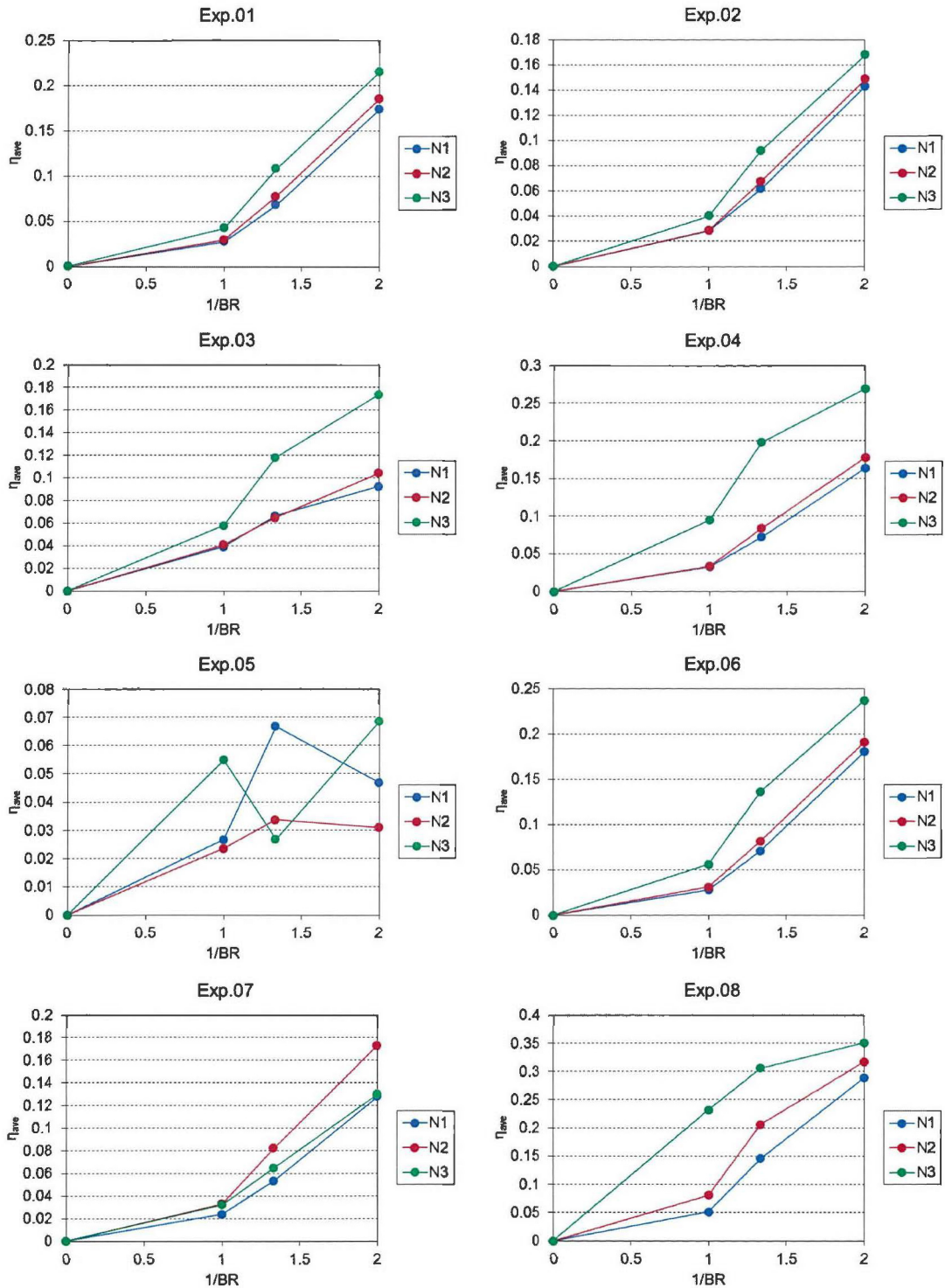


図 4.3.18 各ノイズに対する面平均フィルム効率の推移

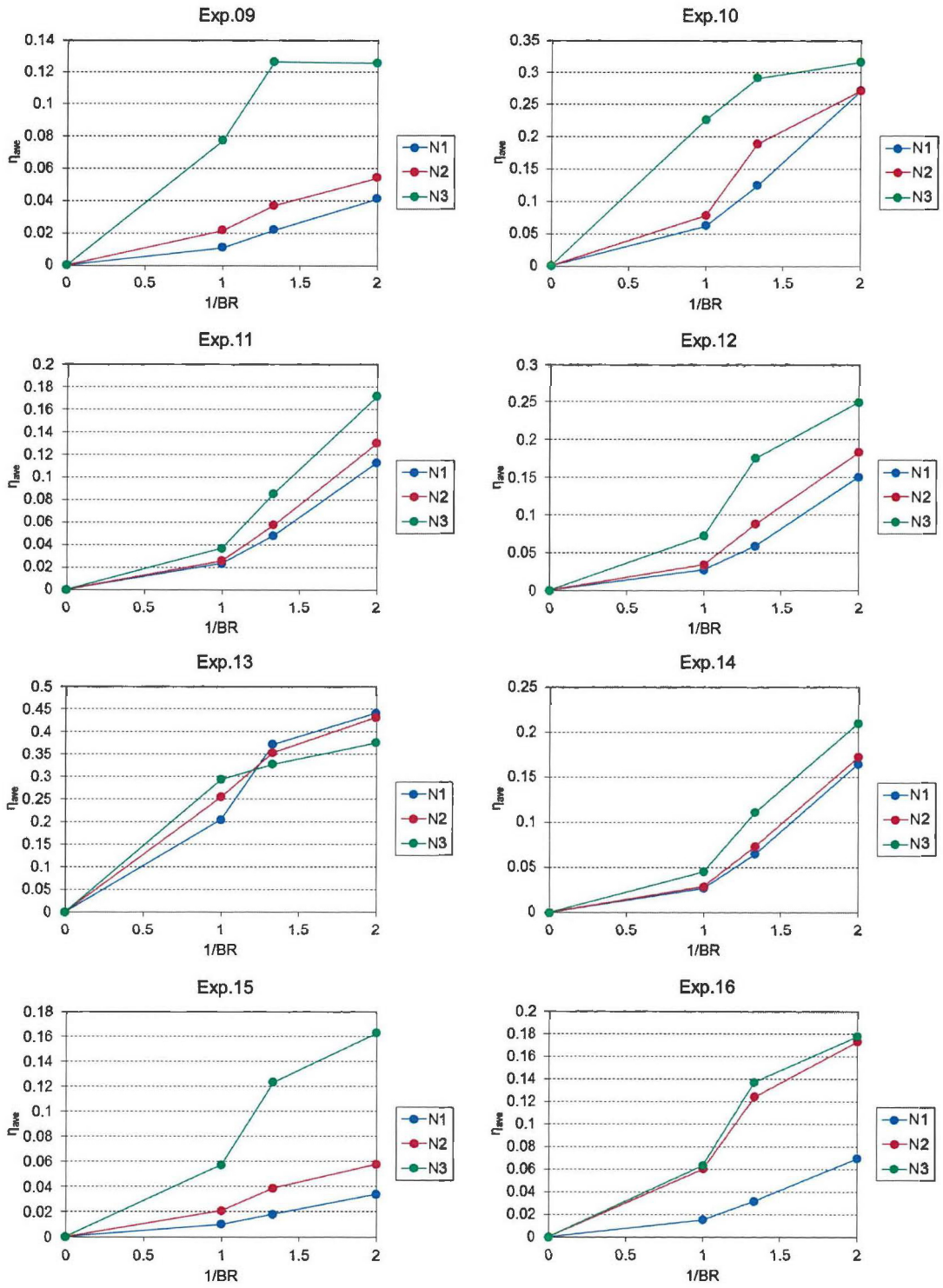


図 4.3.19 各ノイズに対する面平均フィルム効率の推移

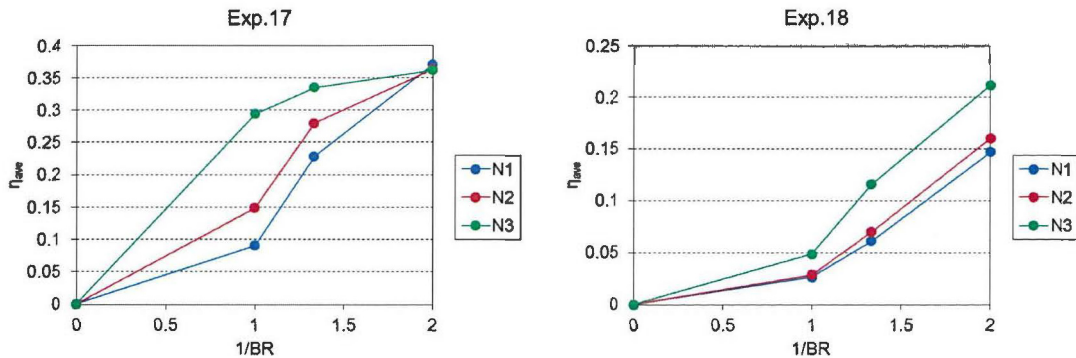


図 4.3.20 各ノイズに対する面平均フィルム効率の推移

4.3.3.2 要因効果図と最適化

図 4.3.21 には CFD 結果を元にして、算出した要因効果図を示している。要因効果図の中で、SN 比、感度の最大値を取る水準に関しては赤色の丸で示している。最適化の方針としては、SN 比を最大にし (=ノイズに対するロバスト性を高める)、感度も最大にする (出力自体を大きくとる) 方針が必要である。もしも、SN 比と感度が互いにトレードオフの関係になっていた場合は、設計上必要な選択を検討することとした。以下には要因効果図を元にして選択した最適形態と、選択理由を述べる。

(1) フィレット半径 (Fillet : A2)

フィレット半径に関しては、要因効果図において A2 の水準を取った場合に、SN 比と感度を高めることが可能になっている。従って、最適形態としては A2 の水準を選択することとした。

(2) 冷却孔と DFCD の距離 (Distance1 : B3)

Distance1 に関しては SN 比を最大にする水準が B1 であるのに対して、感度を最大にする水準が B3 となっており、トレードオフの関係が成立している。今回は、フィルム効率を最大化することを優先して B3 を選択することにした。この際、SN 比はわずかに低くなるため、ロバスト性は低下すると考えられるが、他の水準をよりも SN 比の減少率は少ないことから、ロバスト性に与える影響は少ないと考えられる。

(3) 流れ方向の DFCD 前方長さ (Length1 : C1)

Length1 に関しては、Fillet と同様であり、SN 比を高くすると感度も高くなるような要因効果図となっている。従って、最適水準としては C1 を選択した。

(4) 流れ方向の DFCD 後方長さ (Length2 : D3)

Length2 に関しては、Distance1 と同様の傾向化が観察される。今回も Distance1 と同様に

感度を優先することにした。Length1 は D1 の水準において SN 比を大きくさせる結果が出ているが、D3 の水準に関しては D1 程 SN 比を低下させることはないを読みとり、最適形態として D3 を選択することにした。

(5)DFCD 高さ (Height : E3)

Height に関しても、Length1 と同様の方針で、E3 を最適形態として選択した。

(6)DFCD の幅 (Width : F1)

Width に関しては SN 比を最も高くする効果を持っていることが要因効果図から読み取ることができる。さらに、感度に関しても同時に高くすることが可能になっており、最適化の過程において最も重要な水準であると考えられる。今回は、最適形態として F1 を選択した。方針としては Length1 と同様の考え方である。Width に関しては、今回の最適化では F1 が最適形態となったが、一方で Width が細い形態では DFCD 自体の耐久性は低くなってしまふと考えられる。従って、今回の最適化においては F1 が選択されたが、今後耐久性の面から DFCD を見直すことが必要であると考えられる。

(7)DFCD の開き角度 (Angle : G3)

DFCD の開き角度は、SN 比の要因効果図を見ると、G3 の水準は 2 番目にロバスト性を高める因子として観察される。さらに、G3 の水準は感度に対する影響も高くなっており、Angle も最適化においては重要なファクターであることが分かる。今回は最適形態として G3 の水準を選択することとした。

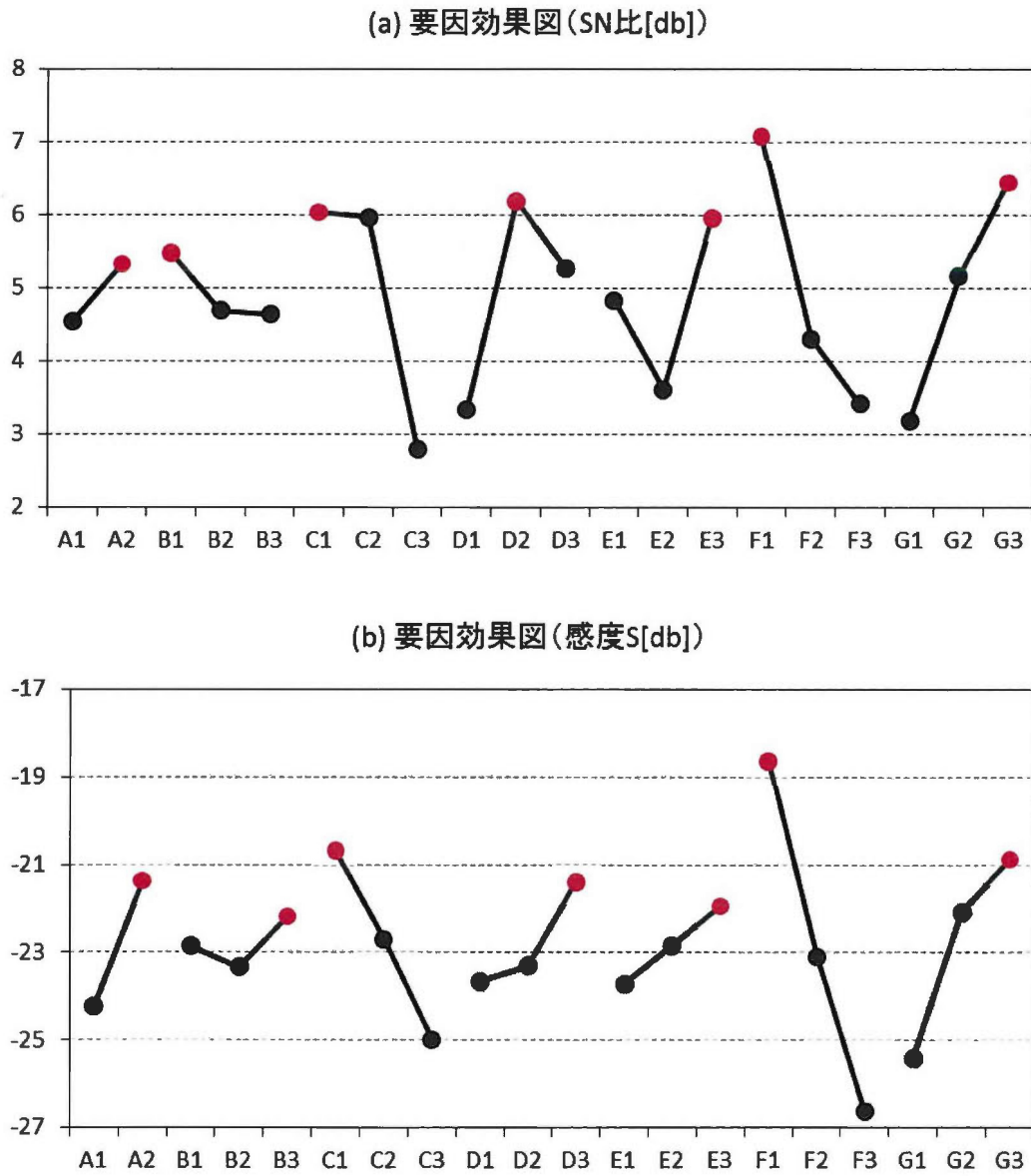


図 4.3.21 要因効果図 (SN 比と感度)

4.3.3.3 最適形態の比較

4.2 節においては、入力の条件を $\alpha=0^\circ$ に絞った最適化を行っていると言え、最適形態は Case13 と一致する結果となった。今回、入力と出力の関係をゼロ点比例式とし、様々な吹き出し比において、SN 比と感度を高める形態を探索した結果、以下の形態が得られた。表 4.3.4 に示したものは、 $\alpha=0^\circ$ 条件での最適形態であり、オレンジ色のハイライトの部分最適水準を示す。それに対して、表 4.3.5 は流入角を考慮した場合での最適形態を示している。表中は、最適形態をハイライトしているが、表 4.3.4 と違う水準で最適水準が導かれた場合には、水色のハイライトで最適水準を示している。今回、ノイズである流入角に影響を及ぼす因子として違いが表れたのは、Distance1 と Length2 であった。流入角が変化した場合、DFCD から発生する渦の形態や、その干渉効果が $\alpha=0^\circ$ と異なるための、その挙動の違いが今回の最適化結果に反映されたものと考えられる。

表 4.3.4 最適水準一覧(4.2 節)

	Level1	Level2	Level3
Fillet	3mm	1mm	
Distance1	35mm	40mm	45mm
Length1	7mm	15mm	20mm
Length2	7mm	15mm	20mm
Height	3mm	6mm	10mm
Width	3mm	6mm	10mm
Angle	0°	7.5°	15°

表 4.3.5 最適形態一覧(動特性解析)

	Level1	Level2	Level3
Fillet	3mm	1mm	
Distance1	35mm	40mm	45mm
Length1	7mm	15mm	20mm
Length2	7mm	15mm	20mm
Height	3mm	6mm	10mm
Width	3mm	6mm	10mm
Angle	0°	7.5°	15°

4.3.3.4 最適化形態の性能とその流れ場

(1) フィルム効率

図 4.3. 22～図 4.3. 24 には、最適形態における各 BR と流入角でのフィルム効率分布を示す。 $BR=0.5$ の場合、 $\alpha=0^\circ$ から増加するに従って、最適形態では無冷却の面積が下流側で増加しているが、スパン方向へ広いフィルム効率は α が大きな場合でも維持されていた。Case01 と比較すると、Case01 の $\alpha=10^\circ$ では局所的なフィルム効率が増加するものの、最適形態には及ばない。 $BR=0.75$ の場合、Case01 では DFCD の効果が殆ど表れていないために、二次空気が lift-off する傾向が観察される。一方で、最適形態に関してはスパン方向に高いフィルム効率分布が観察されるうえ、局所的なフィルム効率も高くなっている。 $BR=1.0$ でも $BR=0.75$ と同様の傾向が観察されるが、局所的なフィルム効率の増加は α が大きくなるとともに得られることが顕著に観察することができる。

図 4.3. 25 には、面平均フィルム効率を最適形態と Case01 で比較したグラフを示す。Case01 でも、流入角に対するロバスト性に関しては高いことが確認できるが、フィルム効率が全体的に低く推移していることが弱点になっている。一方で、最適形態に関しては感度が高く設計してあるために、面平均フィルム効率は全体的に高い値で推移している。ロバスト性に関しては、流入角が大きくなるにしたがって、面平均フィルム効率が低下する傾向が観察され、ロバスト性がある程度低くなっているが、面平均フィルム効率の高さが、ロバスト性の低さをカバーする形となっている。これは、要因効果図から得られる知見とも一致しており、要因効果図から最適水準を選択する際に、ロバスト性のある程度犠牲にして、感度を高くするように設計した効果が表れていると考えられる。今回は、流入角が最大の条件において、最適形態では面平均フィルム効率が 0.35 となって、 α が低い条件よりもフィルム効率は低いが、DFCD の効果が殆ど表れていない Case01 の面平均フィルム効率の 1.5～2 倍となっており、十分最適化されたとと言える。

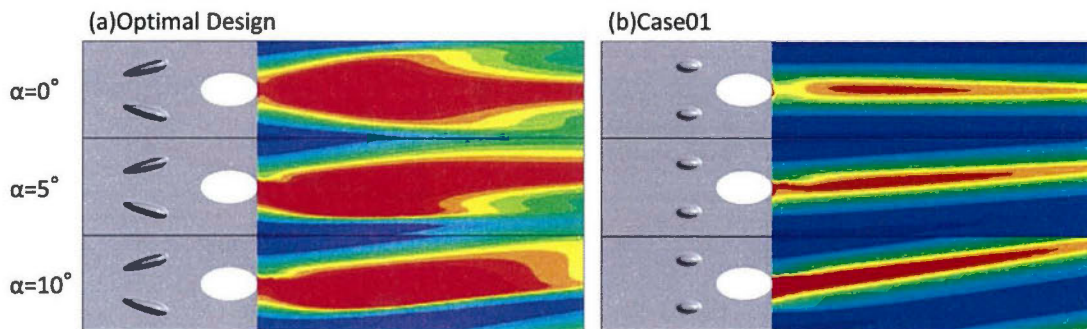


図 4.3. 22 フィルム効率分布(Optimal Design vs Case01, $BR=0.5$)

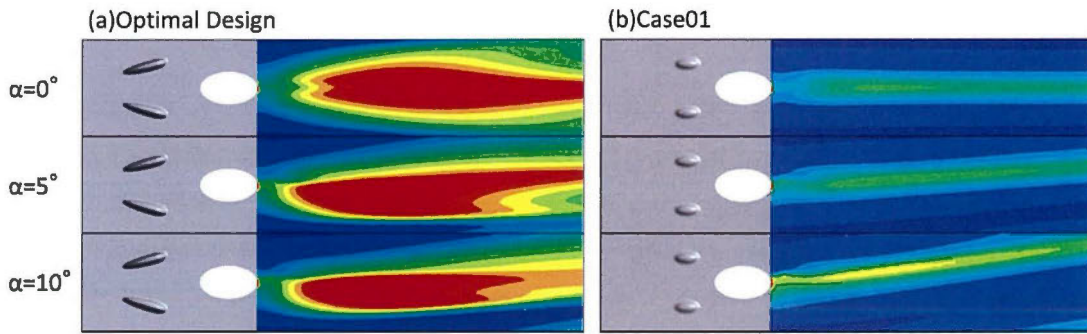


図 4.3.23 フィルム効率分布(Optimal Design vs Case01, $BR=0.75$)

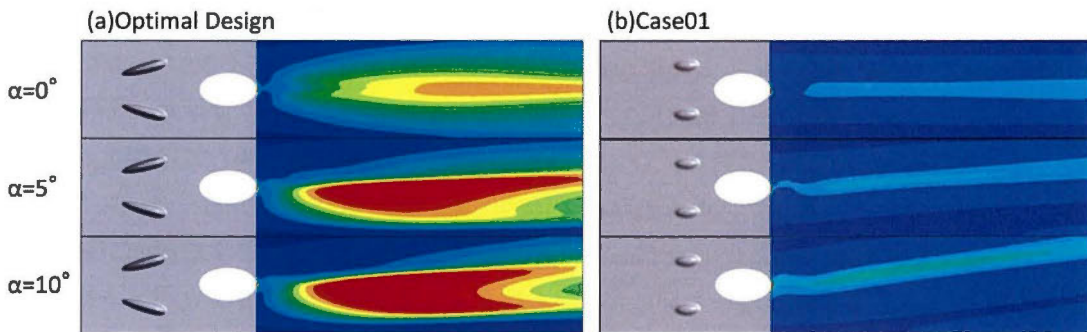


図 4.3.24 フィルム効率分布(Optimal Design vs Case01, $BR=1.0$)

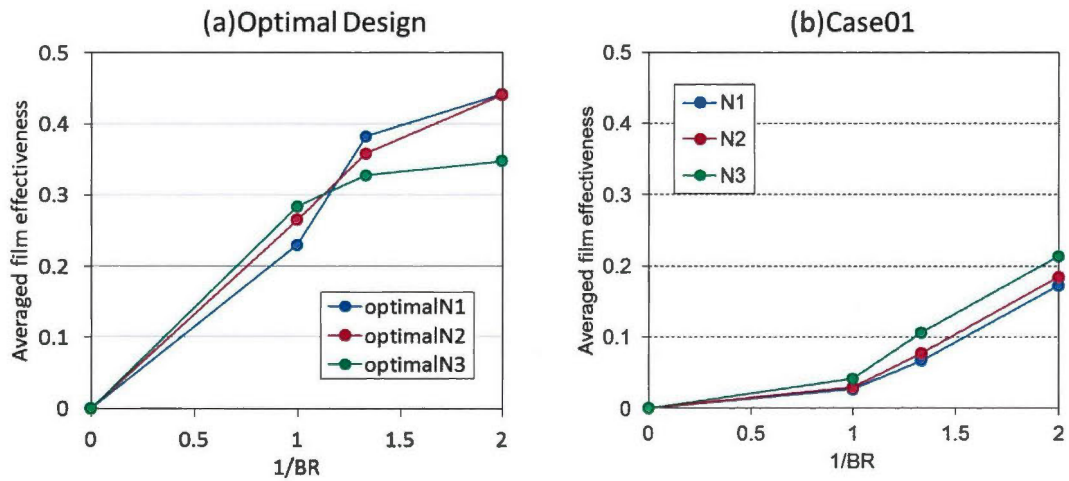


図 4.3.25 面平均フィルム効率

(2) 冷却孔下流領域の渦度

図 4.3.26 には、 $BR=0.5$ における最適形態と、Case01 の $x/d=3$ での渦度分布を示す。 $z/d=0$ の付近に見られる、渦ペアは冷却孔から発生した CRVP であり、どちらの形態にも共通して観察することができる。 流入角が変化した場合、Case01 に置いては、 α の増加に従って、CRVP が z が製の方向に寄るような形になっており、青色の渦度（時計回り）が卓越するような流れ場になっている。 一方、Case13 の方も α の増加と共に非対称な流れ場が形成されている。 特に特徴的なのは、DFCD から発生した縦渦の挙動であり、DFCD から発生した縦渦の内、時計回りの渦度（青色のコンター:A）が、流入角の増加に伴って強くなってきていることが分かる。 $\alpha=0^\circ$ において観察された、反時計回りの渦度(B)に関しては、 α の増加と共に次第に消えてきており、 α が 10° の条件では殆ど観察することができなかった。 このように、 α の増加と共に DFCD から発生した渦の内片方が卓越することにより、その領域においては、二次空気の付着性が高まると考えられ、局所的なフィルム効率が増加する原因となっている。

図 4.3.27 には、 $BR=0.5$ における最適形態と、Case01 の $x/d=3$ での渦度分布を示す。 BR が増加した場合、二次空気の吹き出しにより発生する CRVP は大規模化するために中心付近の渦ペアも大規模化しているように見える。 α の増加に伴う流れの非対称性に関しては、最適形態においては、Case01 と同様に DFCD から発生する渦の内時計回りの渦度が卓越してくるが、冷却孔から発生する渦度も強いために、完全に CRVP を抑制することはできず、冷却孔の全たーライン上では、CRVP による渦度が α が最大の条件においても観察される。 Case01 の渦度に関しては、 α の増加と共に、渦ペアが z が正の方向に移動するだけで、主だった変化は観察できなかった。

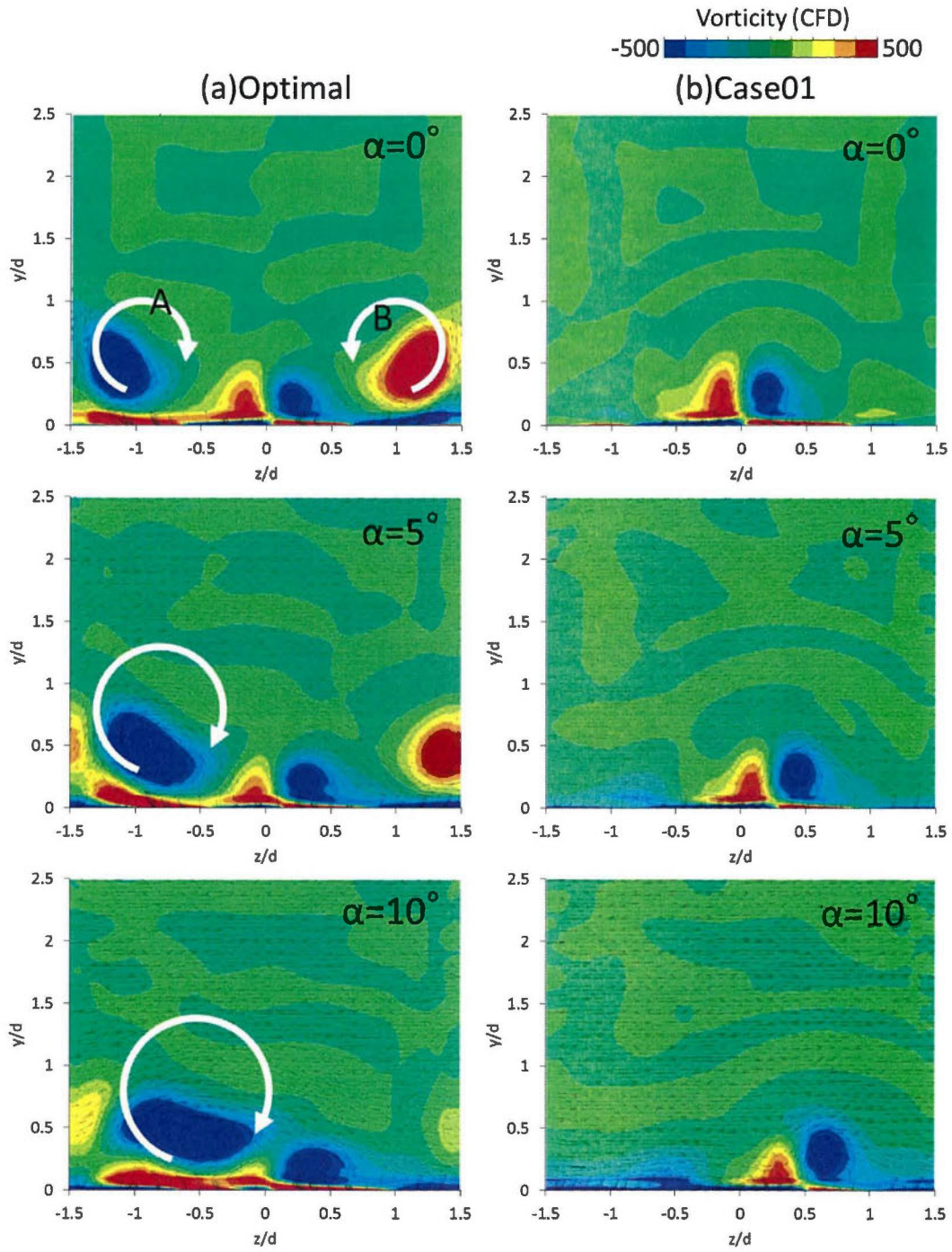


図 4.3.26 渦度分布 ($x/d=3$, $BR=0.5$, Optimal Design vs Case01)

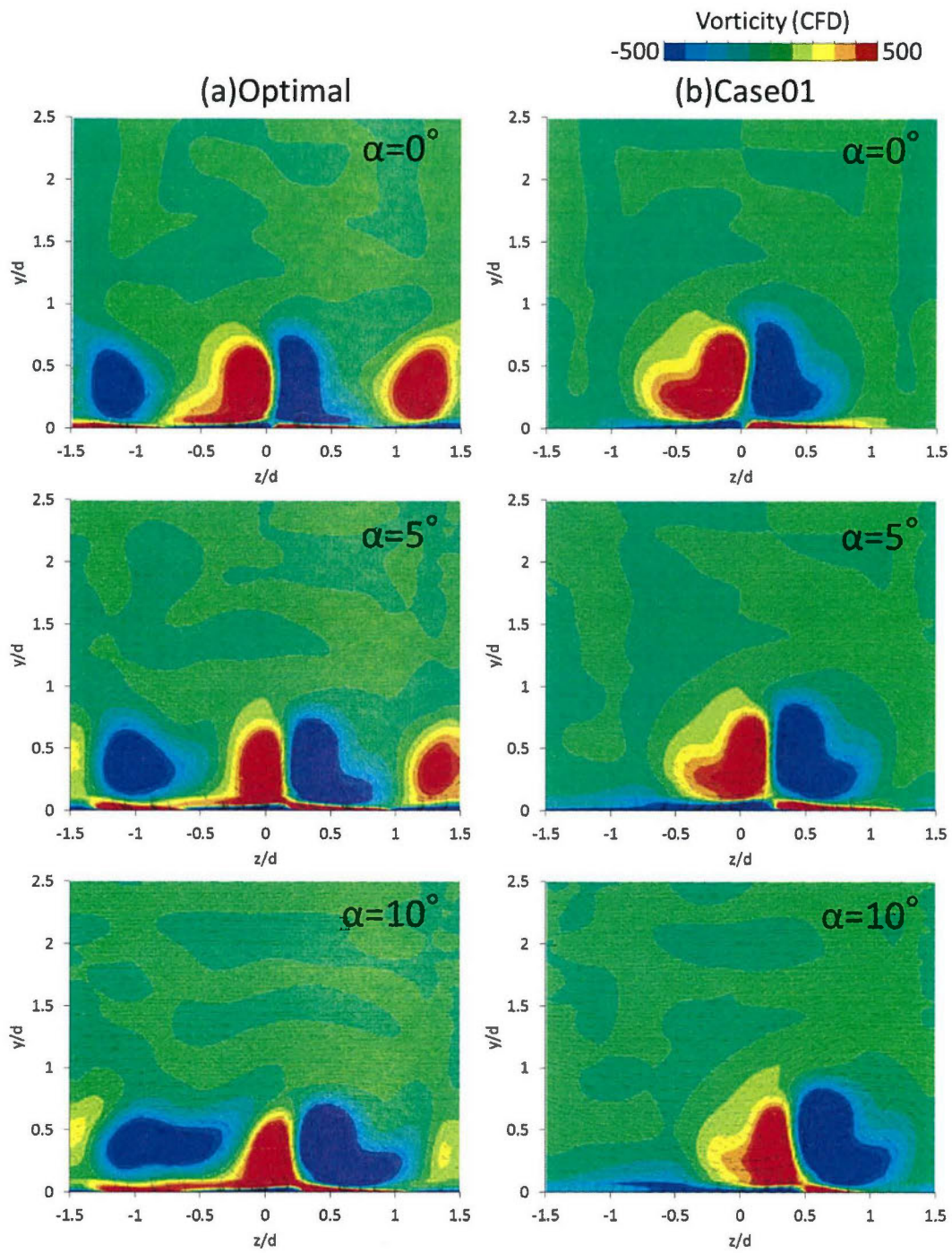


図 4.3.27 渦度分布($x/d=3$, $BR=1.0$, Optimal Design vs Case01)

(3) 冷却孔下流領域の温度場

図 4.3.28 には、 $BR=0.5$ における最適形態と、Case01 の $x/d=3$ での無次元温度分布を示す。Case01 の場合、 α の増加と共に二次空気の付着領域が変化している。特に、A の領域に関しては、 α の増加に伴って、二次空気が壁面へ付着する傾向が観察されており、局所的なフィルム効率が高くなっているよう域である。これは、 α の増加に伴って、CRVP が非対称になり、片方の渦が卓越していくためである。一方で、B の領域に関しては、逆に二次空気が壁面から離れるような挙動を示していることが分かる。最適形態に関しては、 α の増加に伴って、C の領域を中心に二次空気が付着する挙動を示している。しかし、片方の渦が卓越するのに伴って、渦の巻き上がりが発生しており、局所的なフィルム効率の増加と共に付着面積の低下を招いている様子が観察される。さらに、 $z/d=1.5$ の付近においても二次空気が壁面から離れている様子が観察される。これにより、流入角の増加と共に無冷却の面積が増加したものと考えられる。

図 4.3.29 には、 $BR=1.0$ における最適形態と、Case01 の $x/d=3$ での無次元温度分布を示す。 $BR=1.0$ の場合は、Case01、 $\alpha=0^\circ$ の場合は二次空気が lift-off しており、温度場が壁面からわずかに離れている様子が観察される。 α が増加した場合、二次空気の片側の領域(D)において、二次空気の付着性が増加している領域が観察される。最適形態に関しては、 α の増加と共に E の領域において二次空気の付着性が増加している領域が目立ってきている。一方で、 $\alpha=0^\circ$ の場合においては、F の領域において二次空気の付着が観察されていたものの、 α が増加していくと G の領域を中心として、二次空気が壁面から lift-off しているような挙動が観察される。これによって、最適形態に関しては α の増加と共に無冷却の面積が大きくなってしまい、 $\alpha=0^\circ$ の流入条件よりも面平均フィルム効率が低下してしまったと考えられる。

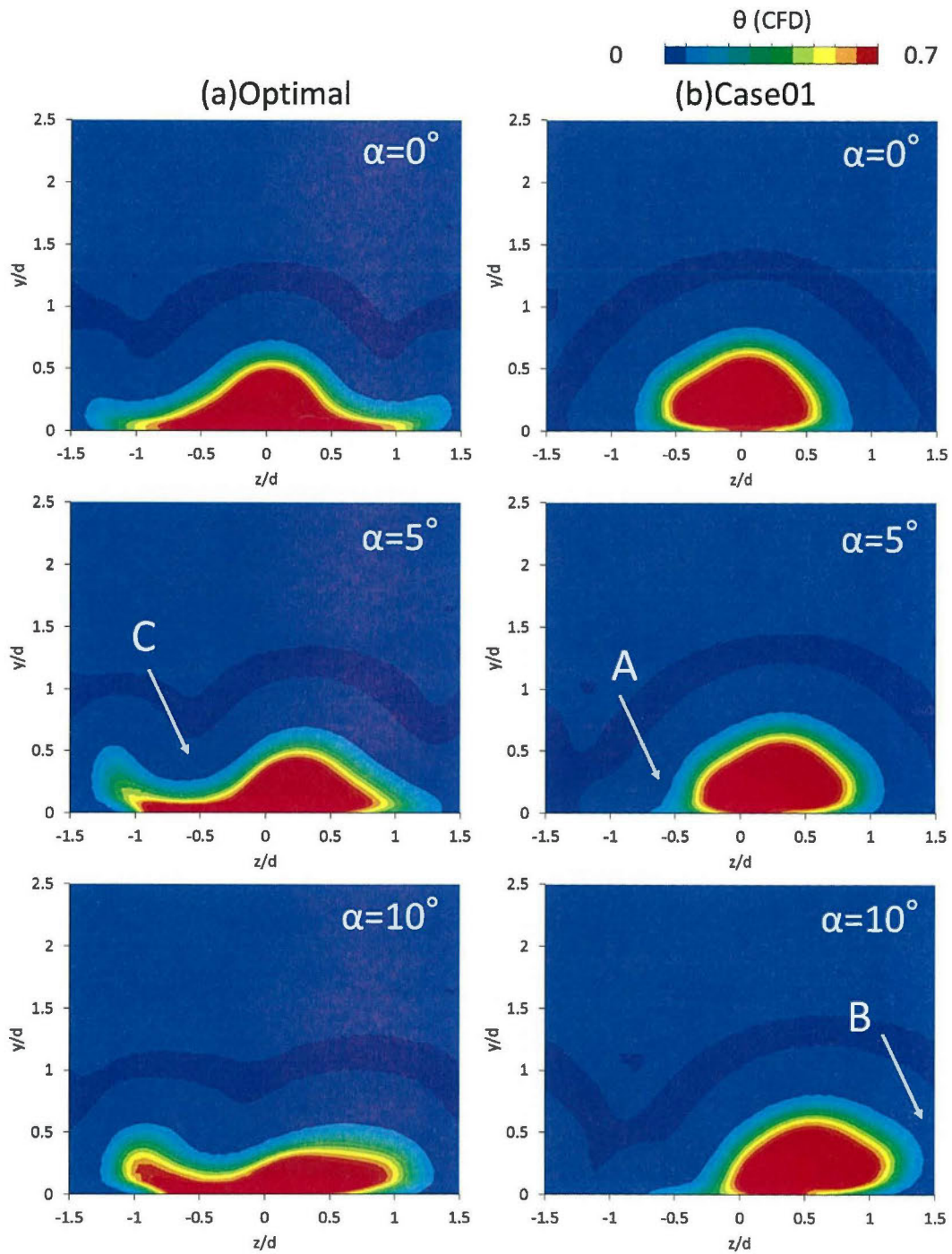


図 4.3.28 無次元温度分布($x/d=3$, $BR=0.5$, Optimal Design vs Case01)

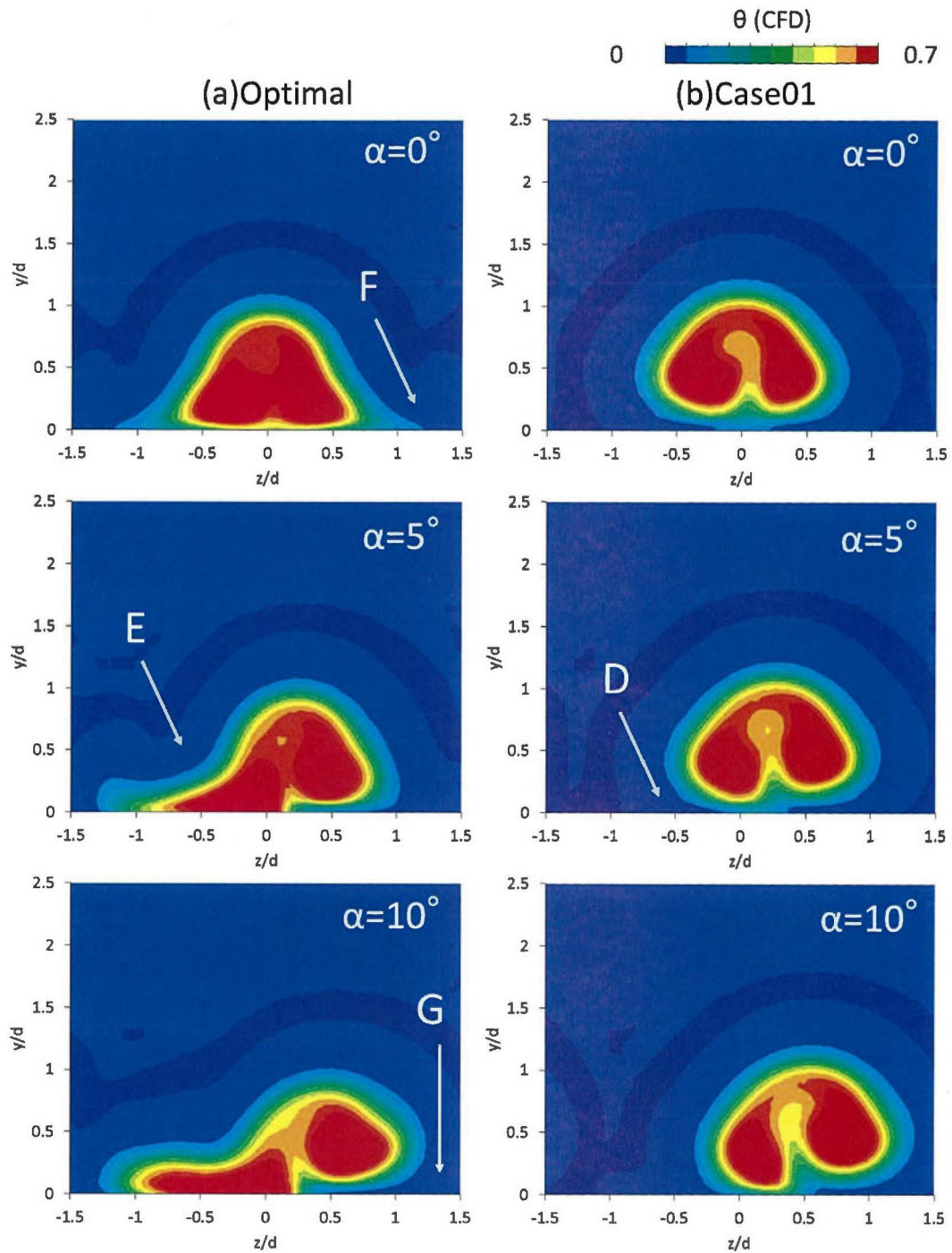


図 4.3.29 無次元温度分布($x/d=3$, $BR=1.0$, Optimal Design vs Case01)

(4) DFCD での渦構造(Q 値)

図 4.3. 30 には、Q 値の等値面を渦度で色付けした結果を示す。Case01 の場合、DFCD から発生する渦は殆ど確認できず、冷却孔から発生する CRVP が確認できる。流入角が大きい条件については、CRVP を構成する片方の渦が次第に卓越している様子が観察できる。最適形態については、DFCD から発生する渦が目立っているが、特に α が高い条件については、DFCD から発生する渦の内、反時計回りのもの（赤の等値面）が次第に縮小してきており、剥離渦が低減していることが分かる。逆に、時計回りの渦（青の等値面）に関しては、次第にスパン方向へ渦構造が大きくなっている様子が観察できた。図 4.3. 31 には、 $BR=1.0$ の場合の結果を示しているが、基本的な傾向は $BR=0.5$ と殆ど変らなかった。ただし、冷却孔から発生した CRVP の渦構造が大きくなっている様子は異なっている。

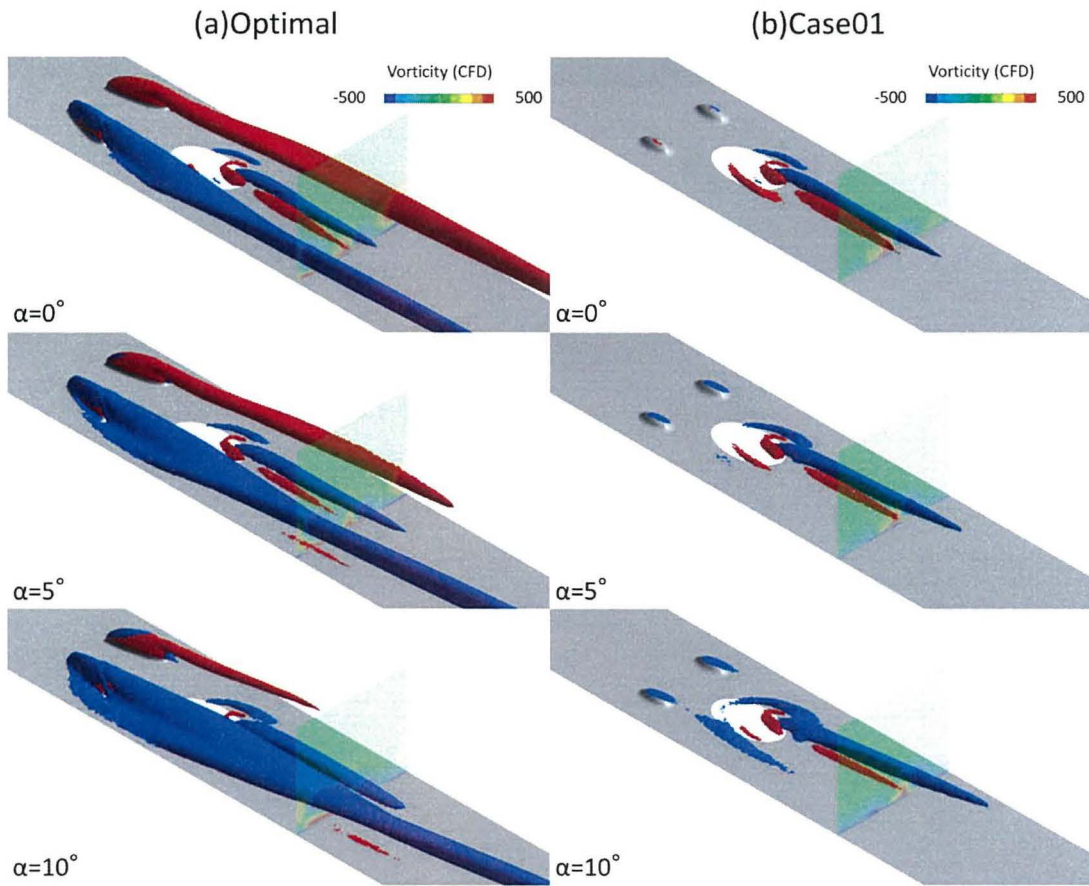


図 4.3. 30 Q 値の等値面($BR=0.5$)

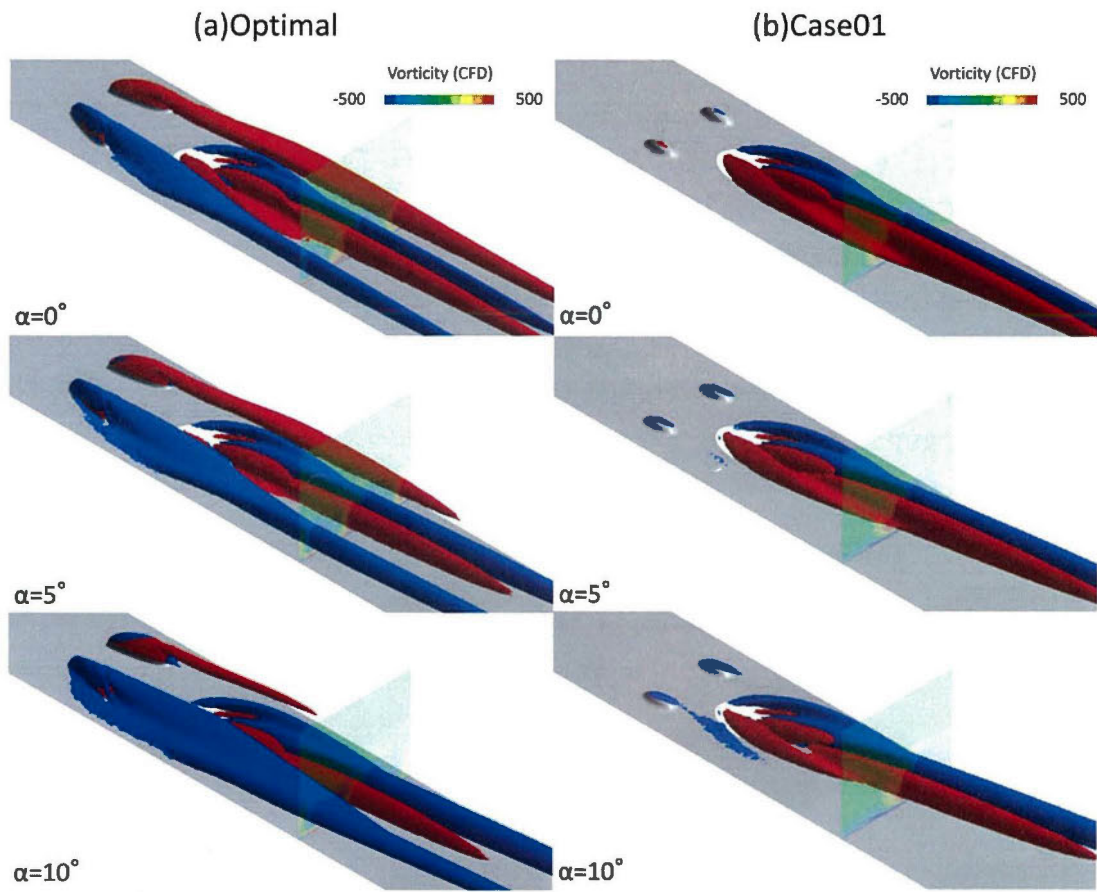


図 4.3.31 Q 値の等値面(BR=1.0)

(5) 空力損失

図 4.3.32 には、 $BR=0.5$ における α を変化させた時の全圧損失係数分布を示す。 $BR=0.5$ の場合は、冷却孔センターライン位置で全圧損失係数が高くなっている領域が観察される。これは、二次空気と主流の混合によって発生したミキシングロス領域である。一方で、センターラインの脇には、Optimal の条件において全圧損失係数が高くなっている領域が確認できる。これは、DFCD から発生した渦によるミキシングロス領域を示しており、壁面法線方向にロス分布が拡散している様子が確認できる。 α が変化した場合、CRVP による損失領域はスパン方向へ移動するが大きな挙動の変化は観察できなかった。一方で、DFCD から発生した渦による損失領域に関しては α の増加と共に、片方の渦による損失領域（図中 A）が次第に卓越することが観察できる、CRVP による損失領域と合体するような挙動を見せた。A と反対方向の渦の損失領域に関しては大幅に低減した。

図 4.3.33 には、 $BR=0.75$ における全圧損失係数分布を示す。 BR が増加した場合は、冷却孔センターライン位置での損失領域が、CRVP の大規模化に伴って壁面法線方向に拡大する。しかし、局所のロスに関しては減少している様子が観察できる。これは、全圧損失係数でロスを定義する場合は、吹き出し比の増加に伴って、二次空気的全圧が高くなるため、下流側の領域において、二次空気の高い全圧の影響を受けるためである。 α の増加に伴う挙動の変化としては、 $BR=0.5$ の条件と同様に、DFCD から発生した渦による損失領域が CRVP と干渉している様子が確認できる。図 4.3.34 には、 $BR=1.0$ における全圧損失係数分布を示す。 $BR=1.0$ の場合は、二次空気的全圧が高くなっているために、DFCD から発生した渦による損失領域と、CRVP による損失領域は合体していない。

図 4.3.35 には、 $x/d=20$ の位置における面平均の運動エネルギー損失を棒グラフにして示している。結果に関しては case01, $BR=0.5$, $\alpha=0^\circ$ の条件で正規化している。運動エネルギー損失でロスを定義した場合には、吹き出し比の増加に伴ってロスが増加している様子が観察され、これは DFCD の形態によらないことが分かる。また、DFCD を取り付けた啓太に関しては、case01 と比較するとどの条件においても平均のロスが増加していることが分かる。流入角によるロスの変化に関しては、変化量が非常にわずかであり、 α が増加するのに伴って、ロスが増加する条件や、低減する条件の両方が観察される。

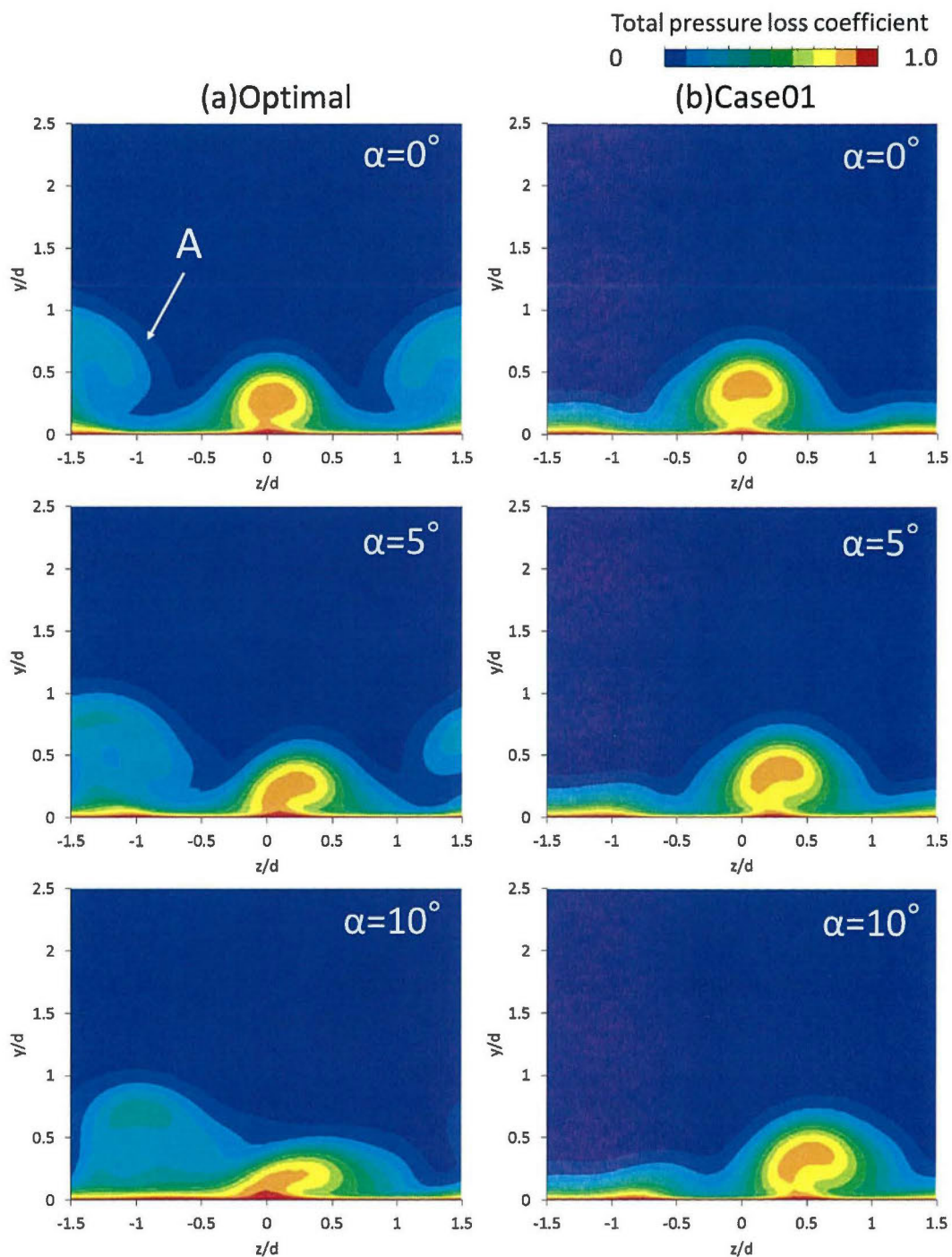


図 4.3.32 全圧損失係数分布($BR=0.5, x/d=20$)

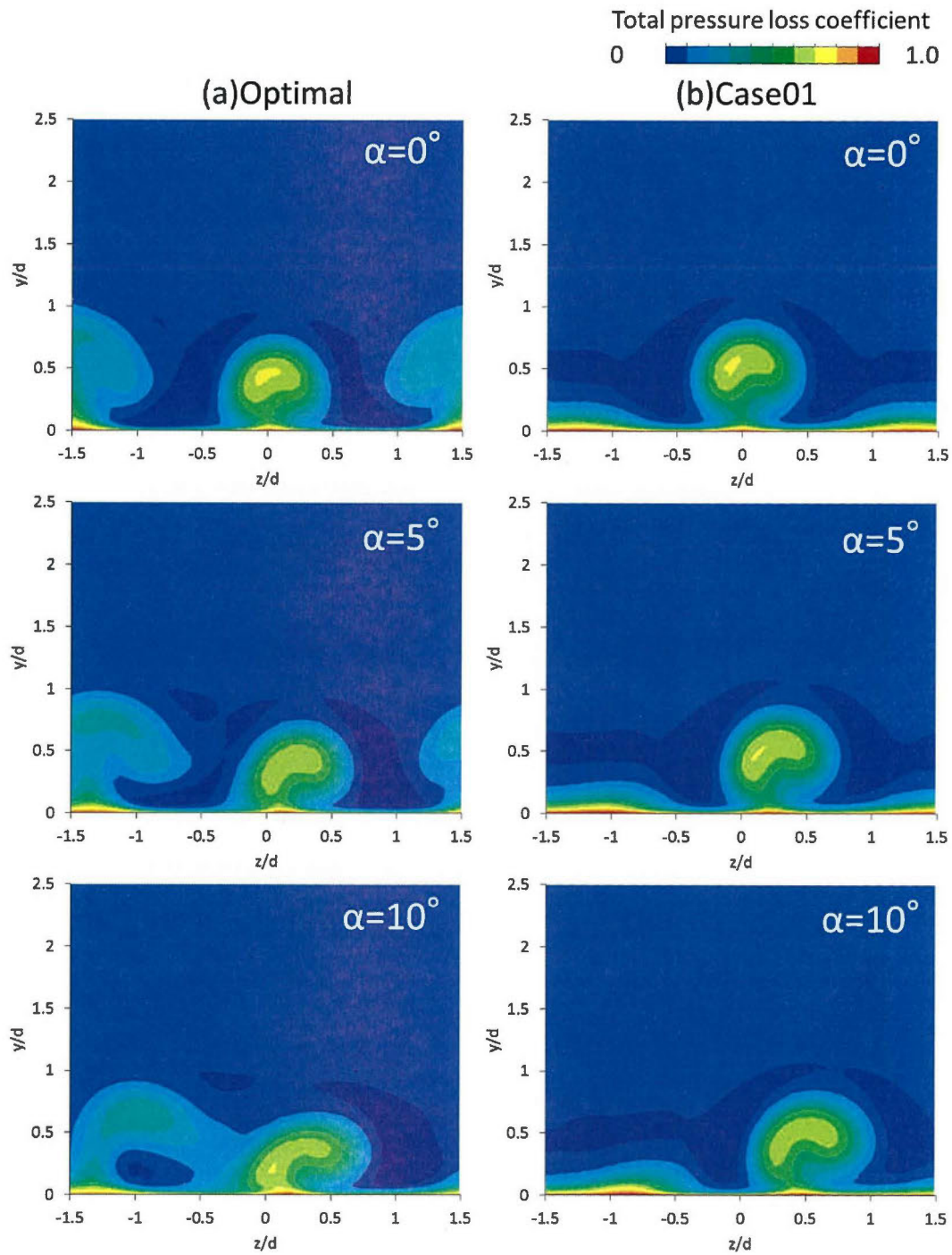


図 4.3.33 全圧損失係数分布($BR=0.75, x/d=20$)

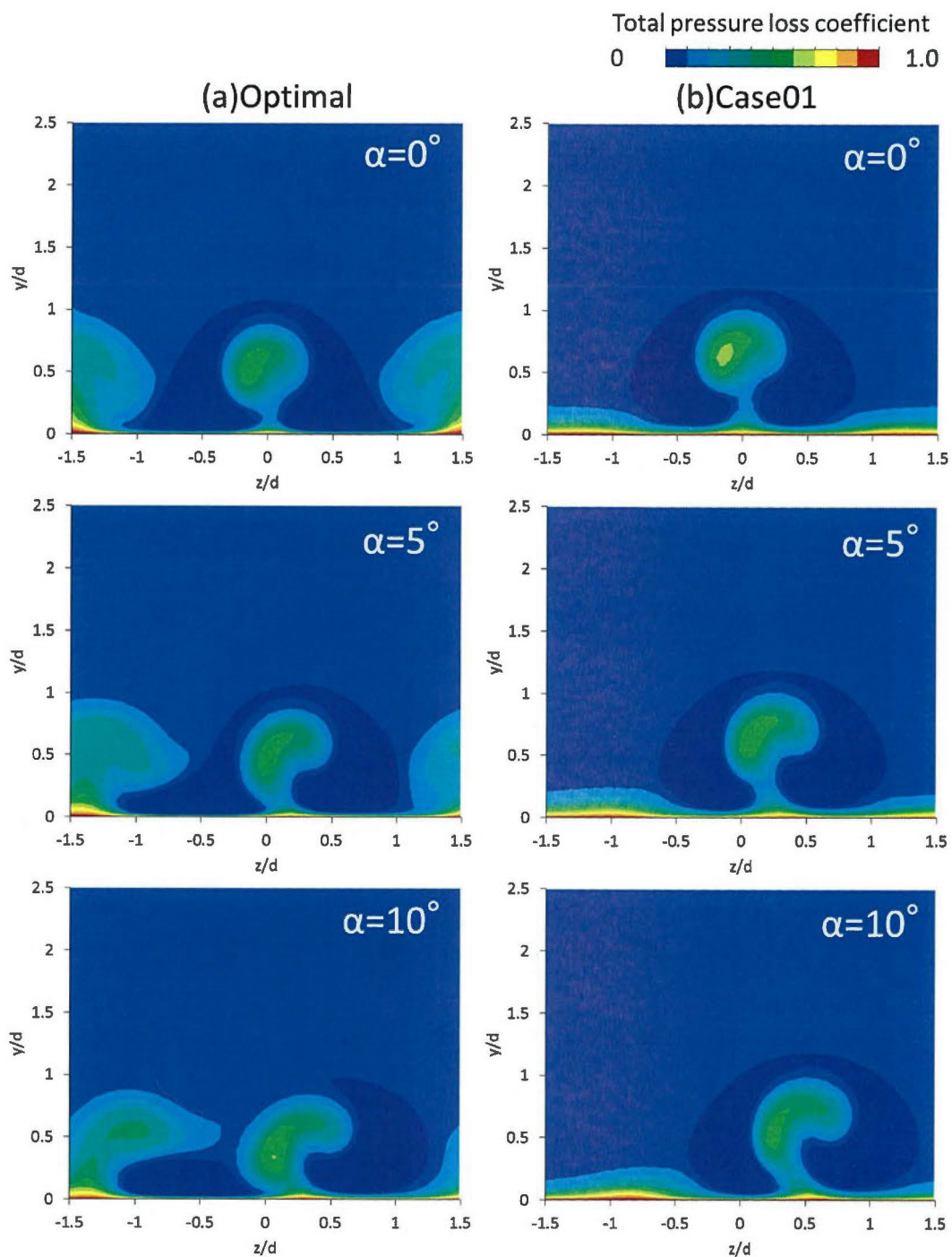


図 4.3.34 全圧損失係数分布($BR=1.0, x/d=20$)

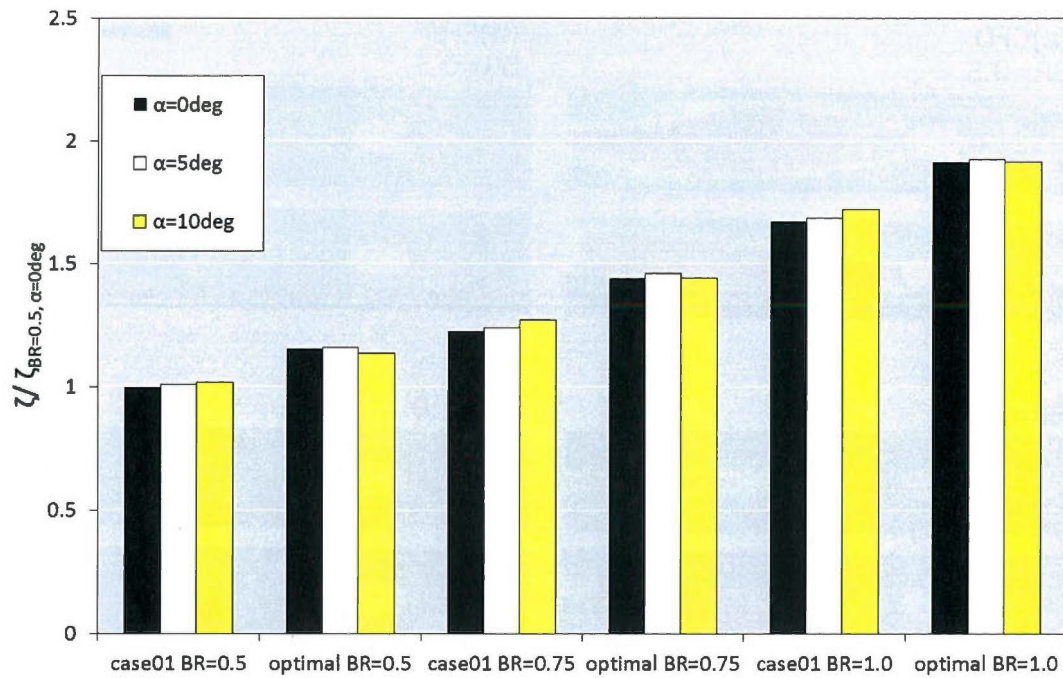


図 4.3.35 運動エネルギー損失の比較(x/d=20)

(6) 実験による性能の確認

図 4.3.36 には、最適化形態に関して、実験と CFD でフィルム効率を算出した値を示す。実験的にフィルム効率分布を確認してみると、最適化で得られた傾向が概ね捉えられており、スパン方向にフィルム効率分布を広げる効果が得られている。しかし、BR=1.0 で、流入角 10deg の条件に関しては、CFD でのフィルム効率の傾向が十分には捉えられておらず、予測精度が悪かった。

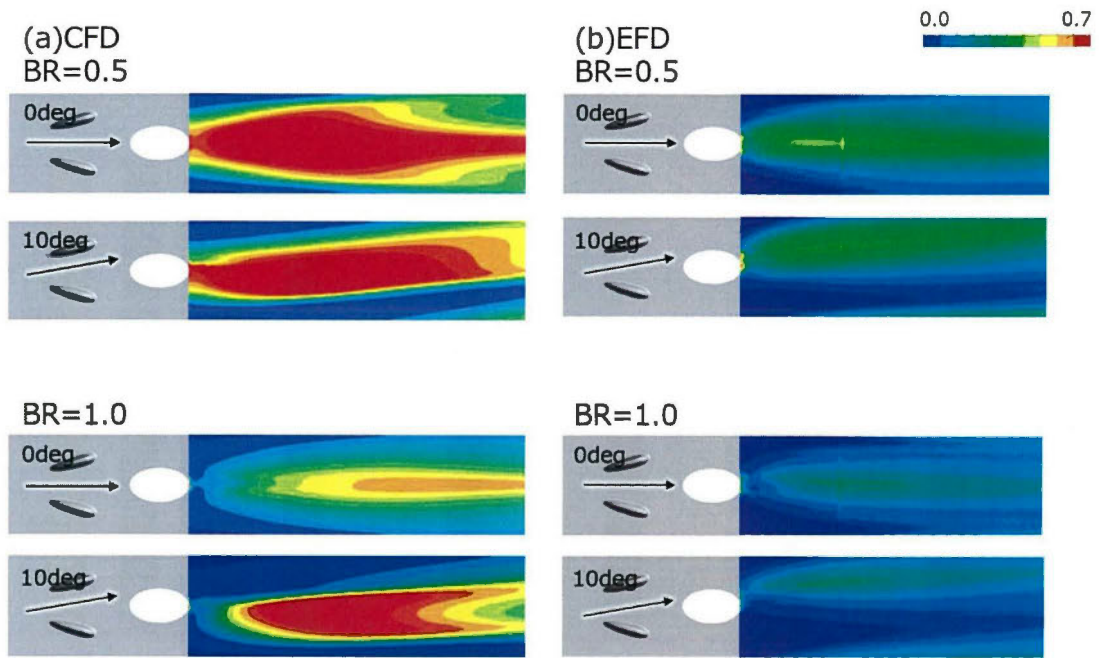


図 4.3.36 実験結果との比較

4.4 DFCD の最適化（多目的解析）

4.4.1 はじめに

前節までで取り上げた最適化に関しては、フィルム効率の最大化を目的としており単目的の最適化を行ってきた。さらに、単目的の最適化であれば、先に示したようにある程度実験と CFD の傾向は一致しており、最適水準の信頼性も高いものと考えられる。しかし、フィルム冷却構造の最適化を行う際には、フィルム効率だけを考慮した最適化では不十分であり、空力損失や、その他のファクターを考慮した最適化を実施することが求められる。前節を見ると、流入角を考慮した最適化においては、DFCD を取り付けることにより損失が増加している様子が確認され、フィルム効率最大化を目的にするだけでは、設計として不十分であることが分かる。

本節では、フィルム効率を最大にし、空力損失を低減することをターゲットにした最適化を実施しており、両者を考慮した最適な DFCD を導き出すことを目的としている。最適化の手法には、実験計画法や、応答局面法などが考えられるが、今回は過去のデータを利用するメリットを活かし、実験での再現を容易にするために実験計画法での最適化を実施している。

4.4.2 最適化条件

4.4.2.1 最適化手法

図 4.4.1 には、今回の解析における最適化の手順を示す。最適化に必要なデータは前節で取得した静特性解析の CFD データであり、前節までにおいてはフィルム効率のみを取得していたが、今回は、空力損失のデータを新たに取得する (Step①~②)。その後、フィルム効率のデータに関しては、フィルム効率を最大化する目的で望大特性のタグチメソッド解析を実施する。一方で、空力損失のデータに関しては、空力損失を最小化する意味で、望小特性のタグチメソッド解析をそれぞれ実施することにする (Step③)。このデータを解析すると、それぞれの解析において、要因効果図が得られ、各因子と水準においてフィルム効率の増加予想量と、空力損失の低減予想量が算出される。最後のステップにおいては、両者の要因効果図を加味して、フィルム効率と空力損失の増減の間を取る形で最適形態を導き出すことにした。

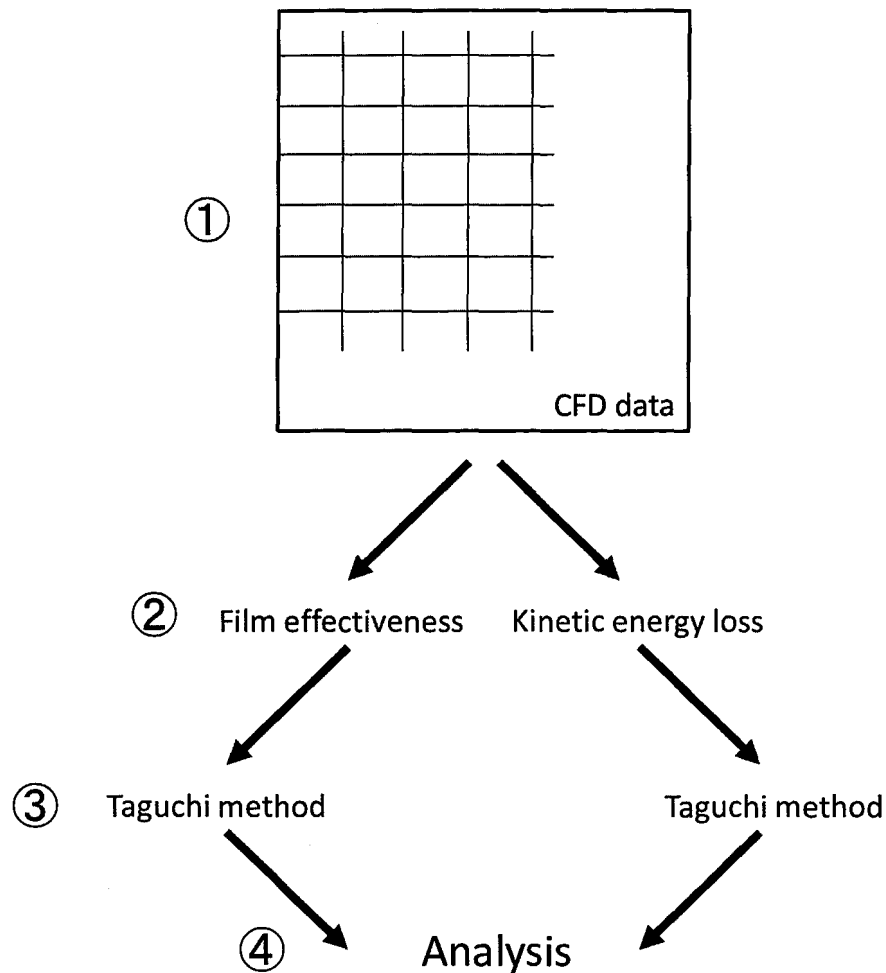


図 4.4.1 最適化手法

4.4.2.2 最適化のターゲット

今回の最適化のターゲットは、前節と同様の DFCD モデルであり、図 4.4.2 に DFCD の形状と、各制御因子を示す。表 4.4.1 には、制御因子の各水準値を示している。前節まではフィルム効率を最大化することを最適化のターゲットとしてきたが、本節では、フィルム効率を向上させ、空力損失を低減することを最適化のターゲットとする。具体的な性能目標に関しては特に定めなかった。これは、最適形態を何形態化導き出した後に、実験的な検証を行い、最適化の精度検証を行うためである。誤差因子は、前節までと同様に吹き出しとし、 $BR=0.5, 0.75, 1.0$ の 3 条件に変化させる。

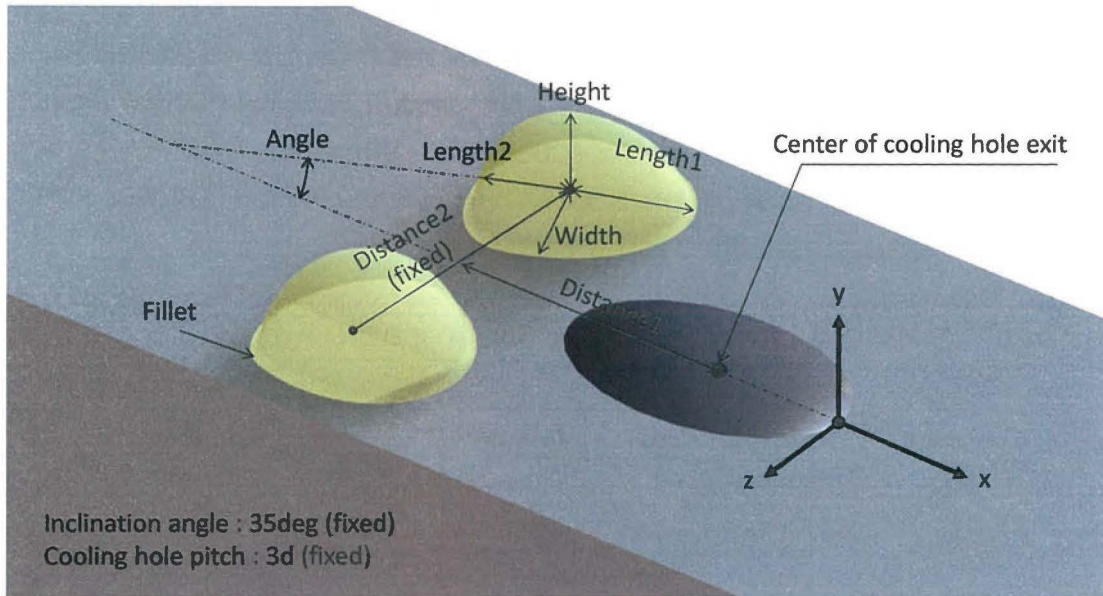


図 4.4.2 デバイス形状と設計パラメータ

表 4.4.1 制御因子とその水準

	制御因子	第一水準	第二水準	第三水準
A	Fillet	3mm	1mm	
B	Distance1	35mm	40mm	45mm
C	Length1	7mm	15mm	20mm
D	Length2	7mm	15mm	20mm
E	Height	3mm	6mm	10mm
F	Width	3mm	6mm	10mm
G	Angle	0deg	7.5deg	15deg

4.4.2.3 データ評価方法

前節では、最適化データを評価する際にはフィルム効率に生値を用いていたが、本節では性能を分かりやすく表現するために、フィルム効率と空力損失を規格化された値で示す。フィルム効率に関しては、DFCD を取り付けない形態での $BR=0.5$ における、 $0 \leq x/d \leq 10$ の面平均フィルム効率で、全て規格化した。一方、空力損失に関しては $x/d=20$ での、 $BR=0.5$ における面平均運動エネルギー損失で全て規格化した。さらに、各形態の空力、伝熱性能を以下の全体効率を以下の Φ_{heat} , Φ_{aero} でそれぞれ表す。

$$\Phi_{heat} = \frac{Y_{i, BR=0.5} + Y_{i, BR=0.75} + Y_{i, BR=1.0}}{3} \quad (4.4.1)$$

$$\Phi_{aero} = \frac{Y_{i, BR=0.5} + Y_{i, BR=0.75} + Y_{i, BR=1.0}}{3} \quad (4.4.2)$$

ここで、 Y に入る値は特性値を示しており、伝熱性能評価の際は面平均フィルム効率、空力性能評価の際は、面平均運動エネルギー損失である。両者は前述したように、規格化された値である。 i は任意の実験番号を示している。正規化された値では、具体的な値が示されないため、以下の表 4.4. 2、表 4.4. 3 には、DFCD を設けない場合のフィルム効率と空力損失の値を記載しておく。以下の表より DFCD 無しの条件では全体効率がそれぞれ、 $\Phi_{heat} = 0.511$ 、 $\Phi_{aero} = 1.301$ （規格化後の値を用いて計算）であった。

表 4.4. 2 フィルム効率面平均値(DFCD 無し条件)

実験条件	生値	規格化後
BASE $BR=0.5$	0.181409	1
BASE $BR=0.75$	0.066462	0.366367
BASE $BR=1.0$	0.030221	0.166588

表 4.4. 3 運動エネルギー損失面平均値(DFCD 無し条件)

実験条件	生値	規格化後
BASE $BR=0.5$	0.091727	1
BASE $BR=0.75$	0.112672	1.228349404
BASE $BR=1.0$	0.153722	1.675872923

4.4.2.4 数値解析要領

(1)解析領域

解析領域は前節までと同様である。

(2)計算格子

今回の解析では、計算数が 18 形態× $BR3$ 条件のため、流れ場の解像度を優先し前節の Grid1 を用いた解析を実施した。今回は新たに解析を行うのではなく、前節で取得したデータを再度後処理することによって最適形態を導き出す。

(3)解析条件

境界条件に関しては前節と同様である。

(4)データ評価方法

タグチメソッドを行う際に使用するデータは以下の 2 つである。

① $0 \leq x/d \leq 10$ の領域における 1 ピッチ分の面平均フィルム効率

② $x/d=20$ における運動エネルギー損失の面平均値

以上のデータを解析するには、DFCD 無しの条件で $BR=0.5$ の①、②のデータで全て正規化を行った。これは、フィルム効率や平均損失をより分かりやすく表現するためである。

4.4.3 最適化結果

4.4.3.1 空力損失

図 4.4. 3, 図 4.4. 4 には, $x/d=10$, $BR=0.5$ における全圧損失係数分布を示す. $BR=0.5$ の場合, 冷却孔センターライン位置での損失が卓越しており, その両脇に存在する損失は CRVP による損失よりは小さい値を示している. Device の体積が小さい場合 (Case01 等) は, Device から発生した渦による損失分布は, 壁面法線方向には上がらず, ほとんどが境界層内の損失分布と同化している. Device の体積が大きい場合 (Case03 等) は, Device 下流側のミキシングロスが増加することにより, 損失分布は壁面法線方向へ広がっている. Device の体積は小さくても, Device から発生する渦が大規模な場合 (Case13 等) に関しても, 損失領域は壁面法線方向へ拡散している様子が確認できる. この場合は, CRVP から発生した損失領域が壁面に寄せられている.

図 4.4. 5, 図 4.4. 6 には, $x/d=10$, $BR=0.75$ における全圧損失係数分布を示す. この条件では, Case05 において, 損失係数分布がスパン方向に非対称になっているが, これは Device の体積が大きいため, 計算格子にひずみが生じているためである. $BR=0.75$ の場合は, CRVP 内の局所的な全圧損失係数は全体的に提言している様子が確認でき, 損失領域が壁面法線方向へ持ち上がっている. Device から発生した渦の挙動自体は $BR=0.5$ から変化が殆ど見られなかった.

図 4.4. 7, 図 4.4. 8 には, $x/d=10$, $BR=1.0$ における全圧損失係数分布を示す. 吹き出し比が高い場合には, 二次空気の運動量が高いために CRVP の大規模化が起こっており, Device から発生する全圧損失係数分布はスパン方向へ広げられている様子が確認できた.

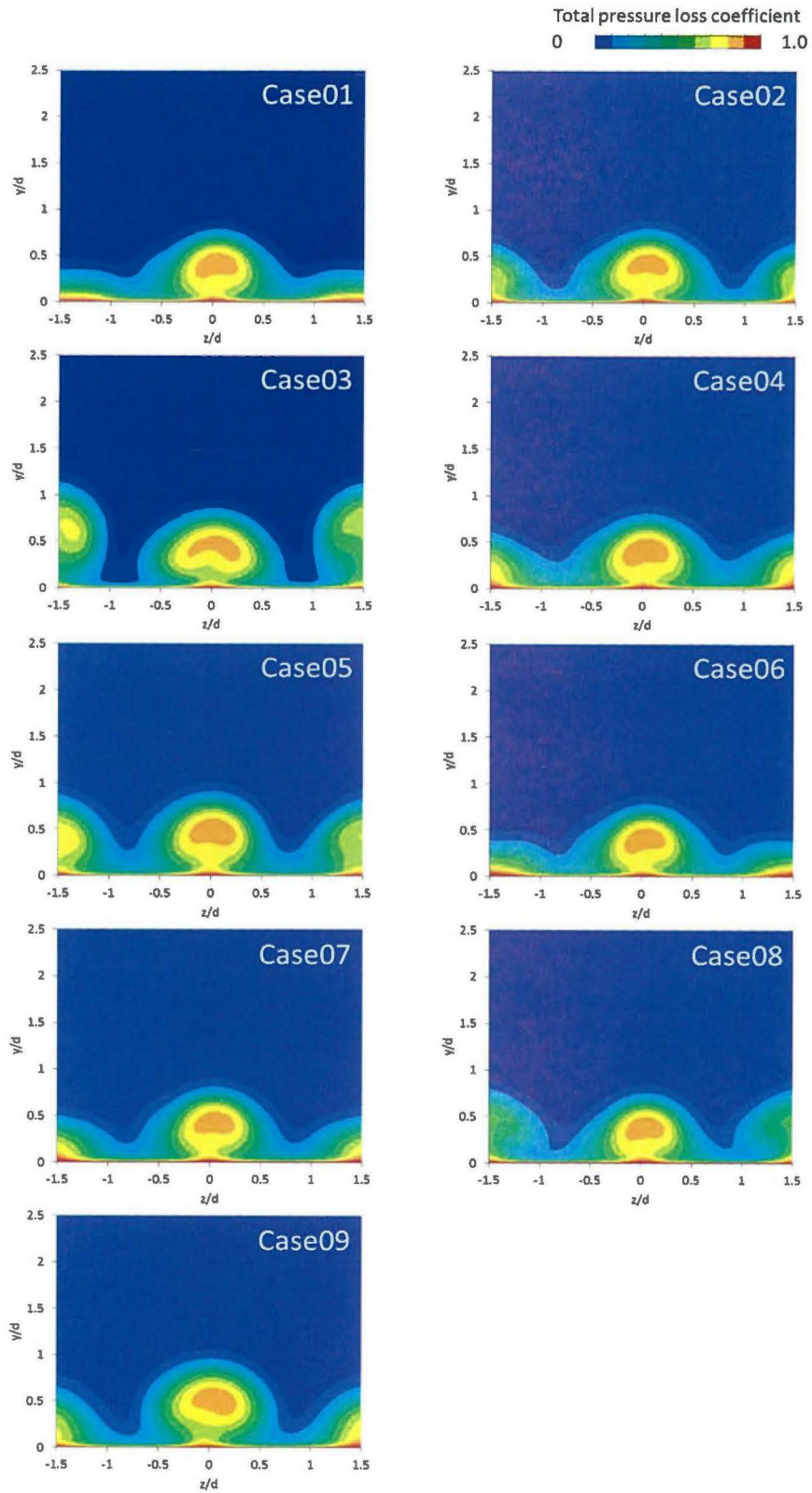


図 4.4.3 全圧損失係数分布($x/d=10, BR=0.5_1$)

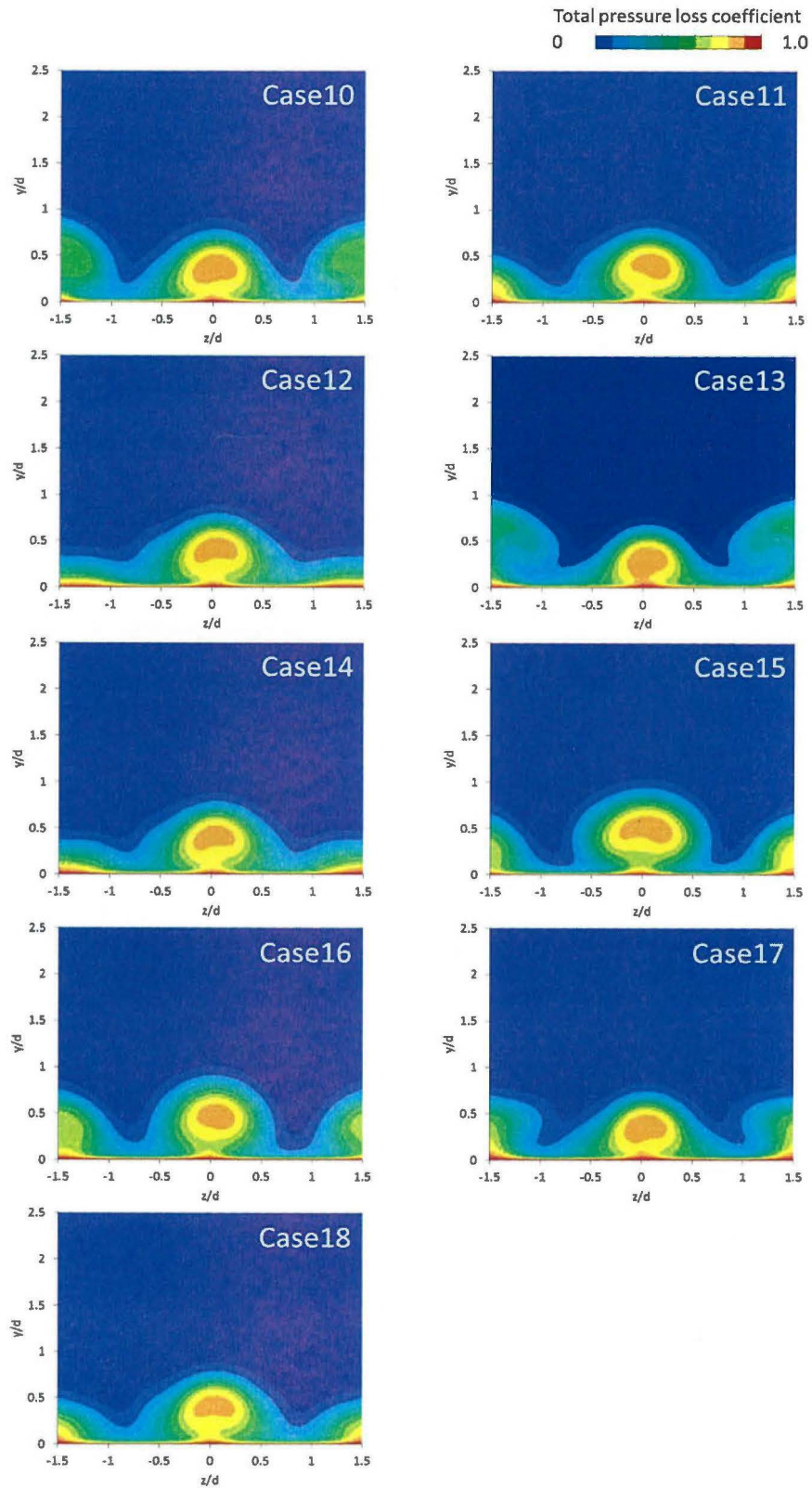


図 4.4.4 全圧損失係数分布($x/d=10, BR=0.5_2$)

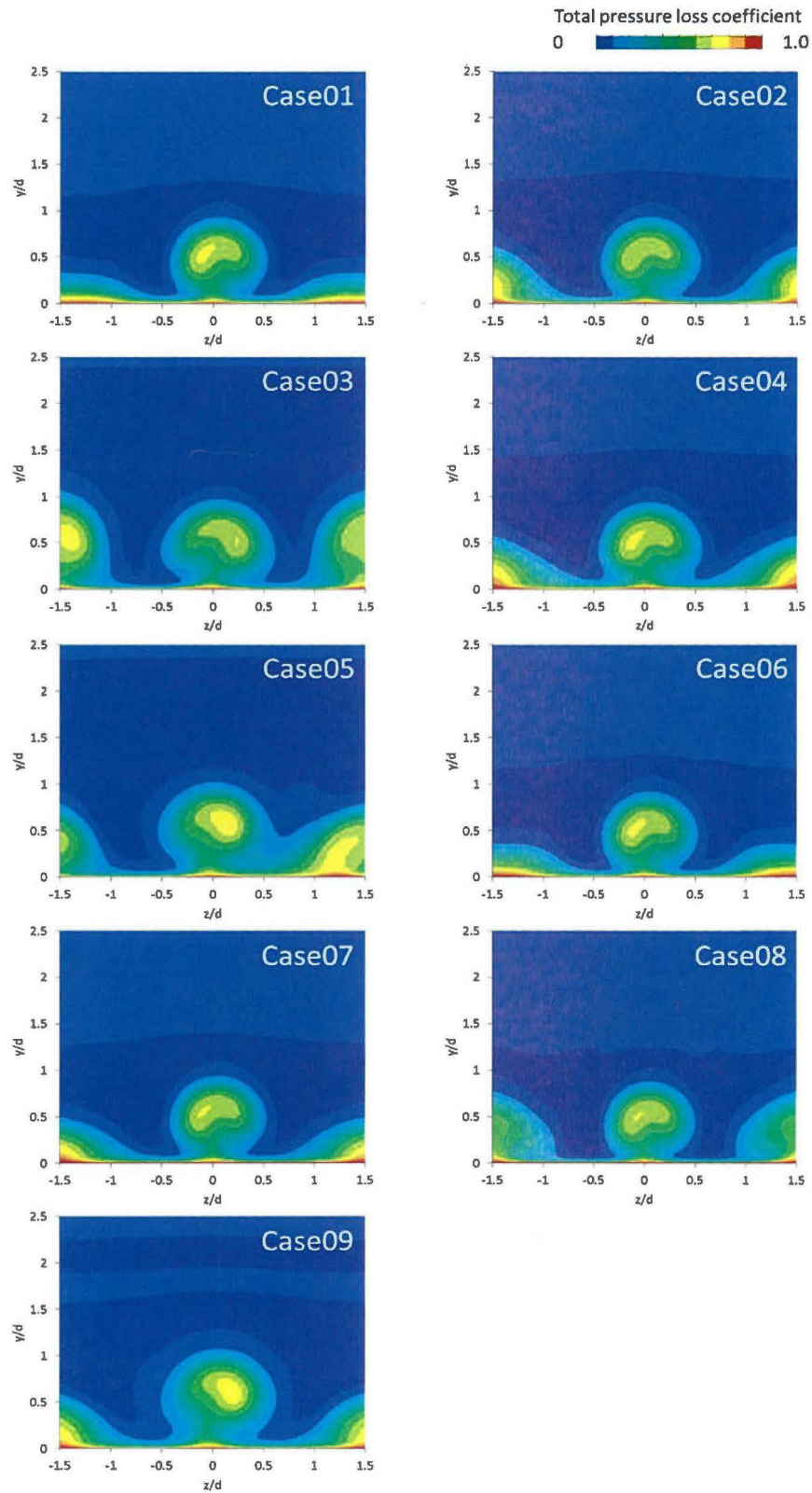


図 4.4.5 全圧損失係数分布($x/d=10, BR=0.75_1$)

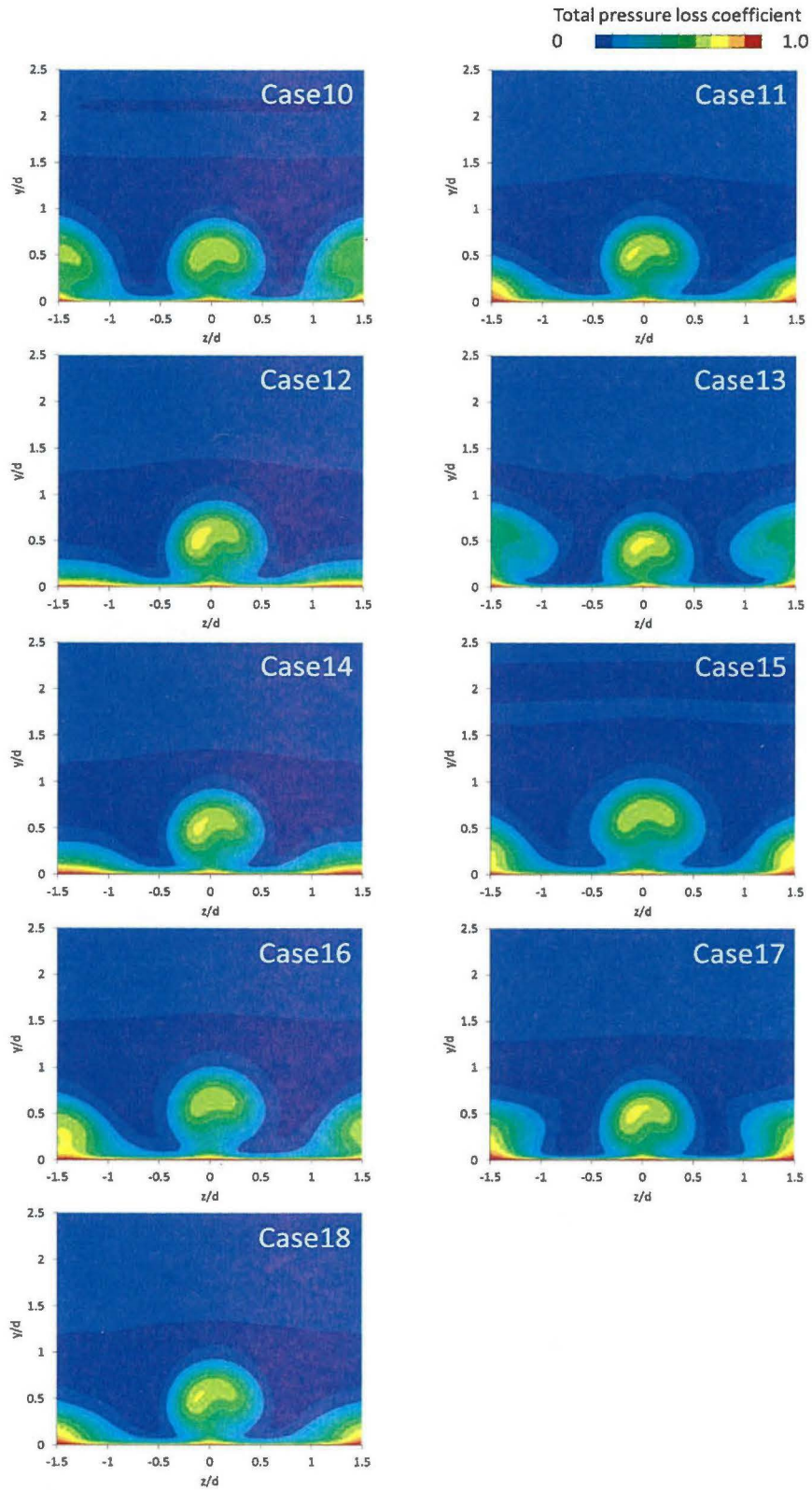


図 4.4.6 全圧損失係数分布($x/d=10, BR=0.75_2$)

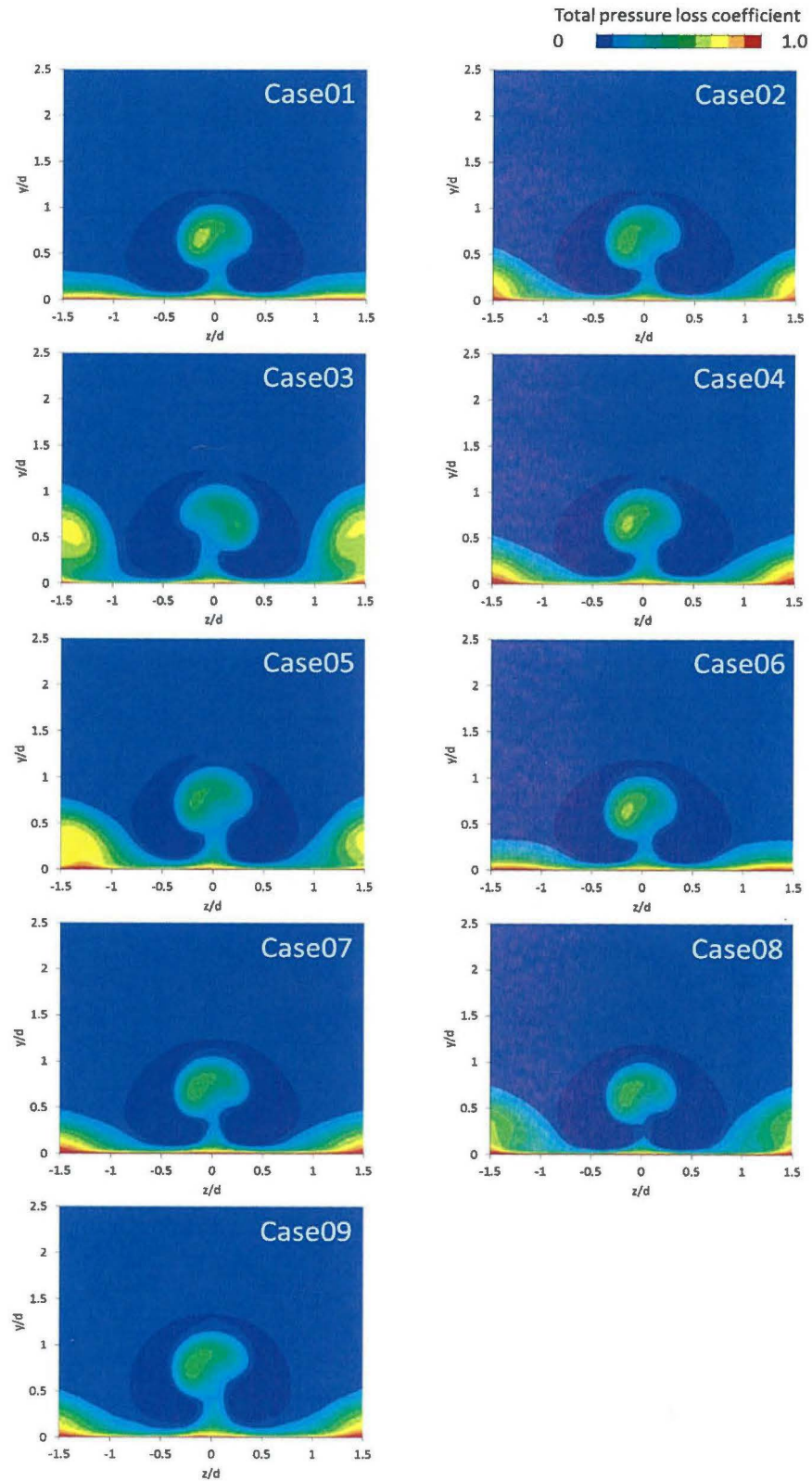


図 4.4.7 全圧損失係数分布($x/d=10, BR=1.0_1$)

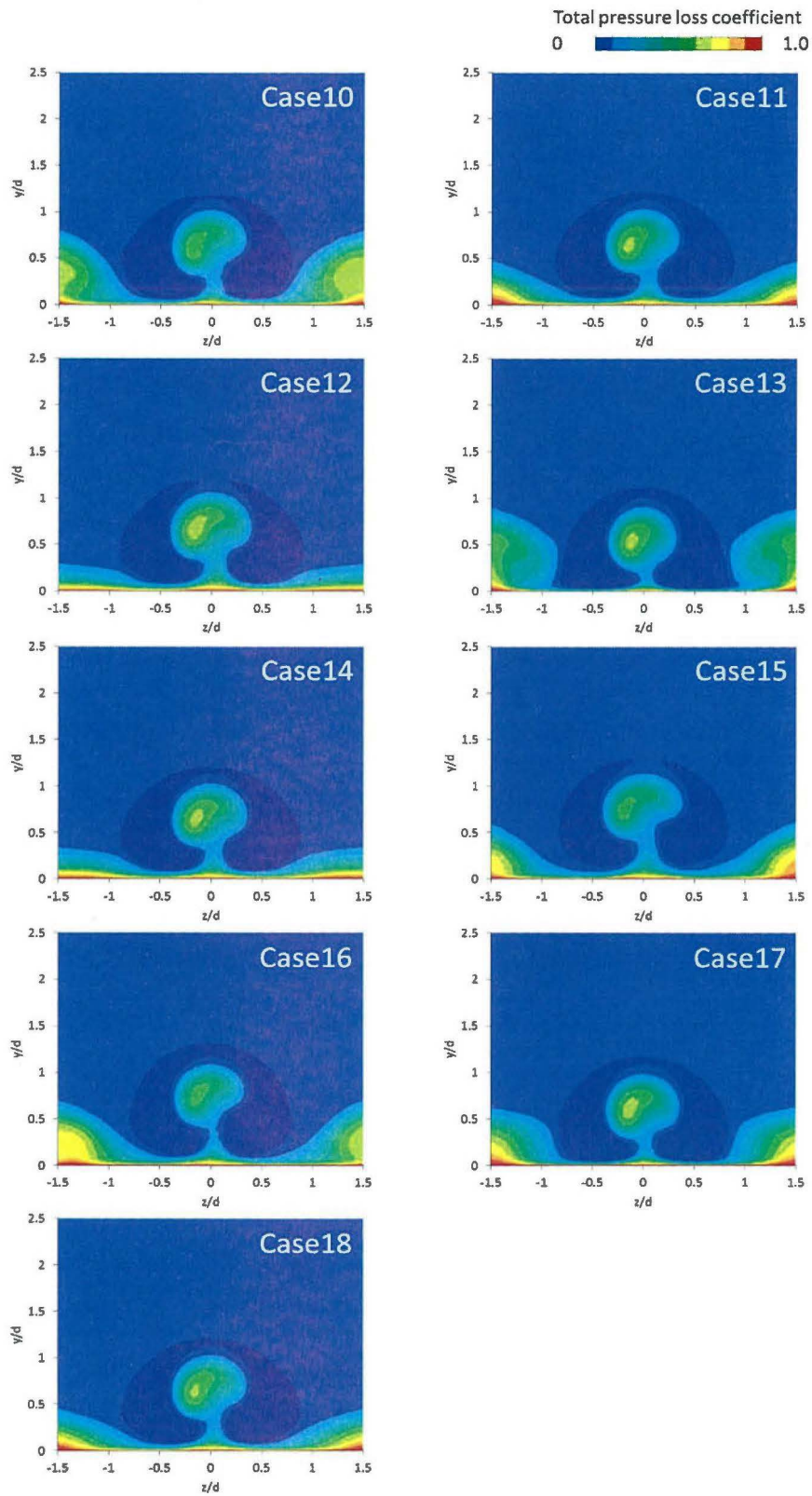


図 4.4. 8 全圧損失係数分布($x/d=10$, $BR=1.0_2$)

図 4.4.9 には、 $x/d=20$ における面平均運動エネルギー損失と、参考のため面平均フィルム効率を追加で示す。結果に関しては 2.8.2.3(4)で説明したように、DFCD を取り付けない条件の $BR=0.5$ における結果で正規化している。 BR による、損失の効果を確認すると、全圧損失係数の分布の傾向とは異なり、損失が BR と共に増加している様子が確認できる。特にロスが高かった形態は主に 2 種類に大別される。1 つは、Device の体積が大きい形態となっており、下流側で Device から発生した渦によりミキシングロスが増加し、比較的大きな運動量エネルギー損失を生み出している。これは、特に Case03 のような形態で顕著に表れた。ただし、この形態に関しては面平均フィルム効率が比較的低くなっており、DFCD は効果的に機能していないことが分かる。一方で、Case13 もロスが高くなっているが、これは Device の体積が小さいが、比較的大規模な縦渦を発生させることができている形態を示している。特に Case13 に関しては、比較的ロスは大きいですが、フィルム効率の増加分も大きくなっている。最適化の観点で検討すると、Case17 に関してはフィルム効率が比較的高く、ロスに関しても Ca13 よりは少なくなっており、最適解に近い結果が得られているものと考えられる。

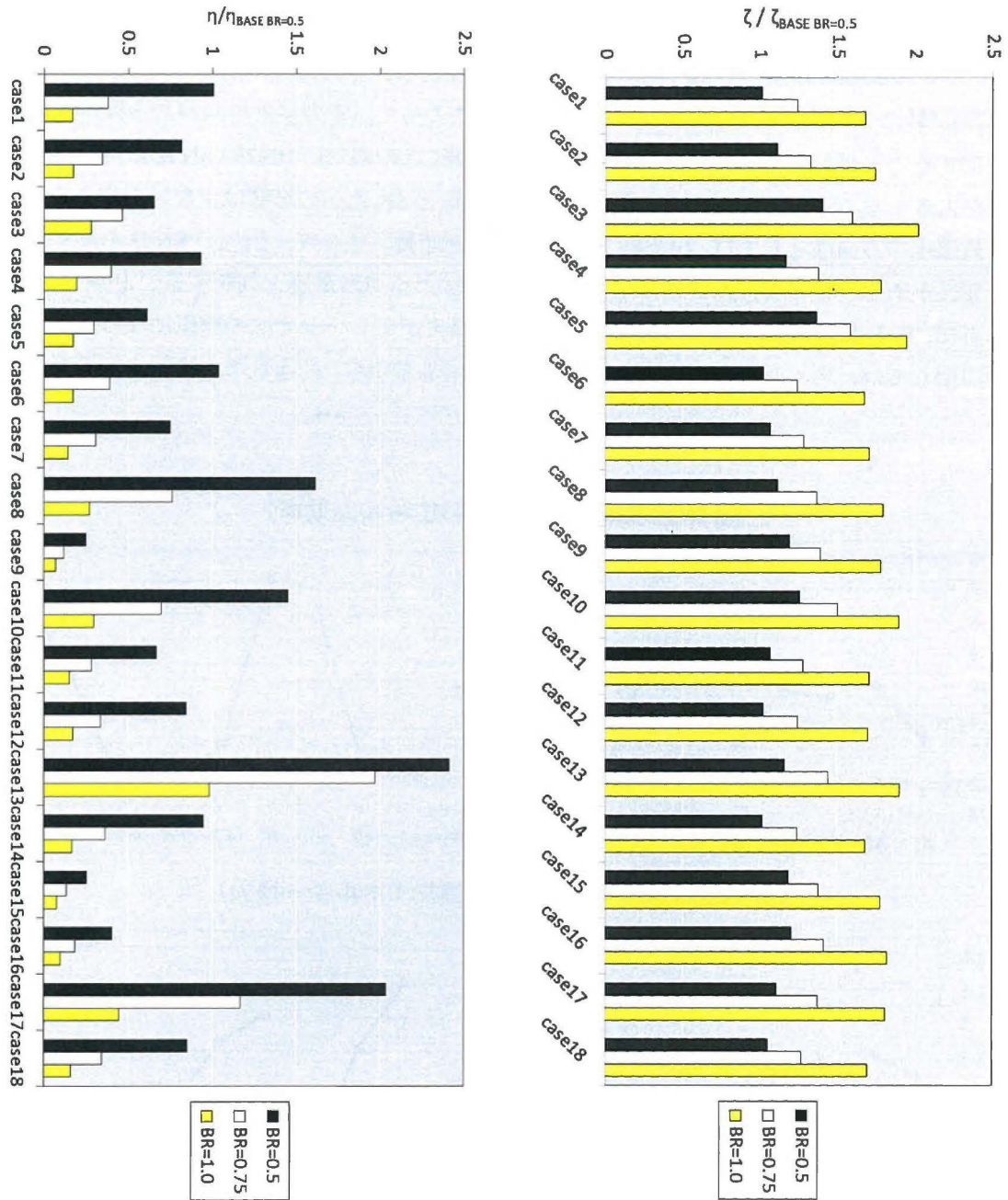


図 4.4.9 運動エネルギー損失平均値とフィルム効率平均値

4.4.3.2 要因効果図

図 4.4. 10 には、解析結果から得られたフィルム効率と空力損失に関する要因効果図を示す。フィルム効率に関しては、前節の水準と同様である。空力損失に関しては、E(DFCD の高さ)が特に支配的であり、E の水準の選択方法によって、空力損失のロバスト性が大きく変化することが分かる。他の因子に関しては、F(DFCD の幅)が、比較的 SN 比に対する影響度が大きくなっているが、E の水準と比較すると殆ど SN 比への影響は少ないと言える。

最適化の方向性としては、面平均フィルム効率と運動エネルギー損失の SN 比を高くする必要がある。従って、A の水準を例にとると A2 の水準が最適と判断することができる。一方で、B の水準のような、フィルム効率と空力損失がトレードオフの関係になっている因子に関しては、フィルム効率とエネルギー損失の増加量から、最適水準を検討する必要がある。

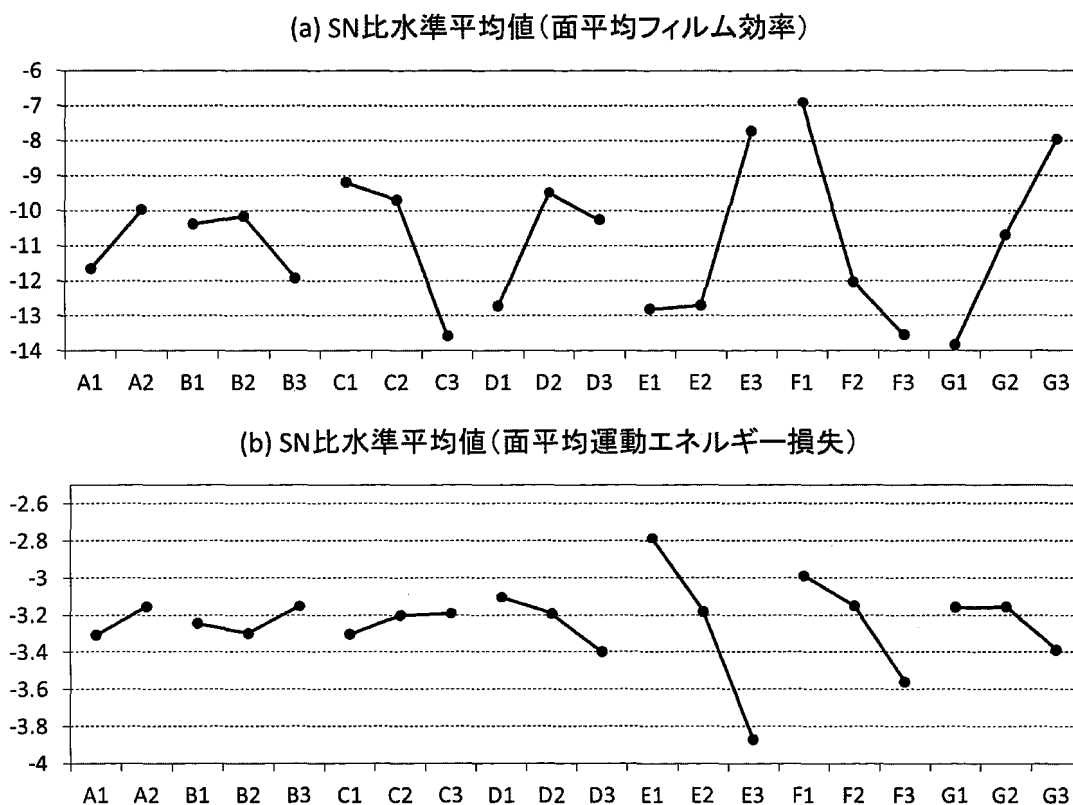


図 4.4. 10 要因効果図

2.8.3.3 水準平均値と最適解の決定

多目的の最適化をしていくに当たり、今回はフィルム効率と空力損失の微妙な性能予測をする必要がある。従って、どの水準を選択した場合に、どの程度フィルム効率と空力損失が増加もしくは現象するのか、を予め知っておく必要がある。図 4.4. 11 には、数値解析結果を元にして得られた水準平均値を示している。これにより、各水準を選択した時の平均的な効果を統計的に算出することが可能になる。たとえば、E3 を選択した場合、フィルム効率は高くなり、E3 を用いた形態の面平均フィルム効率は 0.8 程度となる。一方で、空力損失に関しては 1.55 近くの空力損失となる。この図を用いることで、この問題に関して定義した全ての水準と、全ての組み合わせに(=2×3⁶=1458 通り)に関して、フィルム効率と空力損失の値をあらかじめ予想することが可能になる。

図 4.4. 12 には、最適化に用いた全ての因子の組み合わせに関して、予想される SN 比をプロットしたグラフを示す。縦軸と、横軸はそれぞれ予想される SN 比の統計的な平均値である。ここでも、“Case”と書かれているが、この Case は新規に番号を振り直したものを示しているため、図 4.4. 9 に示されるような、L18 直交表で導き出される実験番号とは異なっている。

今回は、図中のドットを大きくした形態において、最適と思われる性能が見られた。図中の Case1020 (赤のドット) は、単目的の最適解を示しており、フィルム効率の予想 SN 比は最大値を取っていることが分かる。その他の主な形態としては、Case777 は、フィルム効率が Case1020 に極めて近い値を取っているが、空力損失の SN 比に関しては増加量がわずかであり、空力損失の低減量としてはあまり期待できないものと判断した。水色のドットで示した形態に関しては、フィルム効率が最大値に近い形態を示しており、フィルム効率の向上が期待できるうえに、空力損失の SN 比も大きくなっているために、空力損失の面での性能向上も期待できる形態である。緑とオレンジ色のドットに関しては、フィルム効率の向上よりも、さらに空力損失低減に重点目標を置いた形態を示しており、SN 比の上昇量は Case1020 よりも抑えられているが、空力損失の上昇量は大きくなっている。

今回は、最適化の予測精度を検証するために、確認実験を実施する最適解の候補を 3 種類に絞った。図 4.4. 13 には、最適形態の候補と、その形状を示している。この図は、図 4.4. 12 の一部分をクローズアップした形で示している。各形態の制御因子の水準に関しては、以下の表 4.4. 4 に示した。Case1020 は前節で取り上げた、単目的の最適形態であり、比較することを目的として検証の対象とした。Case1344 では、フィルム効率の SN 比が Case1020 よりも低いですが、空力損失の SN 比は Case1020 よりも高く、空力損失の低減が期待できる形態である。Case1011 は、さらにフィルム効率の SN 比が Case1020 に比べると低くなっているが、空力損失の SN 比は他の形態よりも高くなっており、特に空力損失の低減を目的とした形態である。

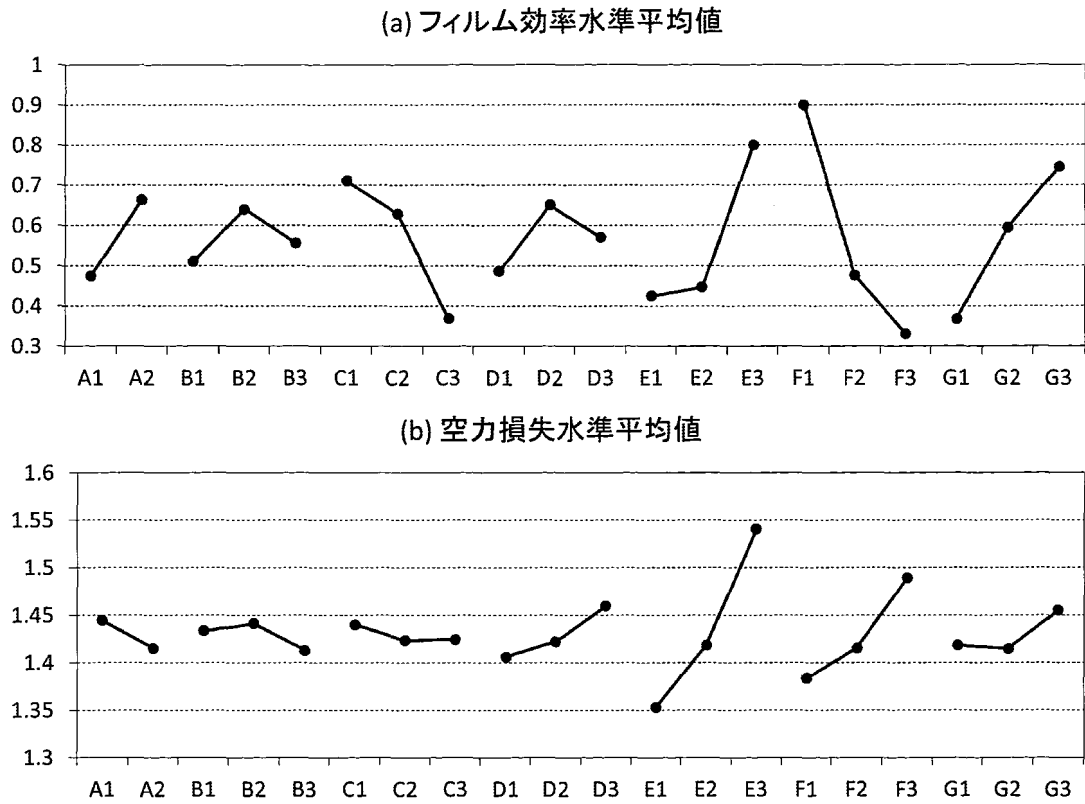


図 4.4.11 水準平均値

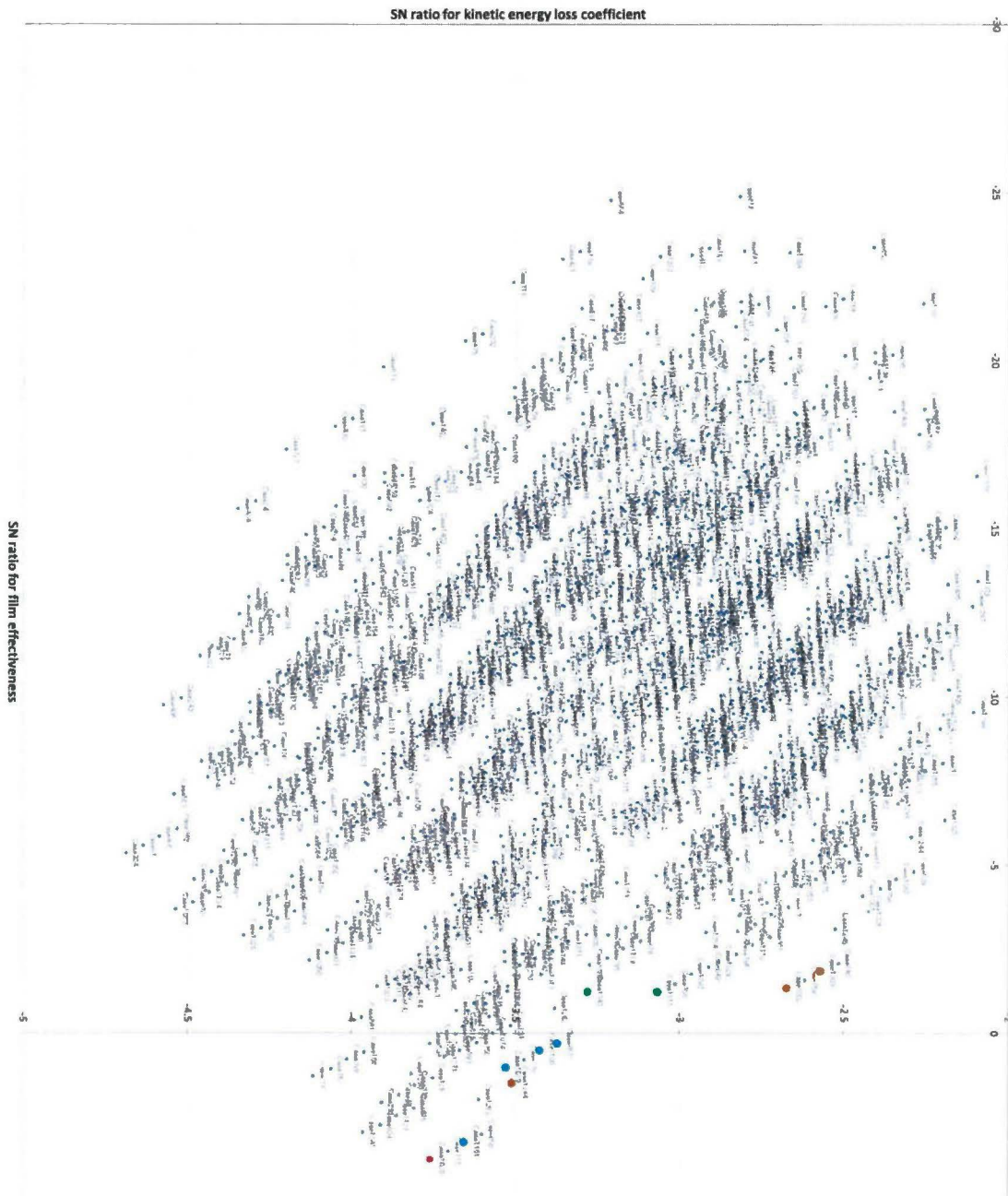


図 4.4.12 全ケース予測

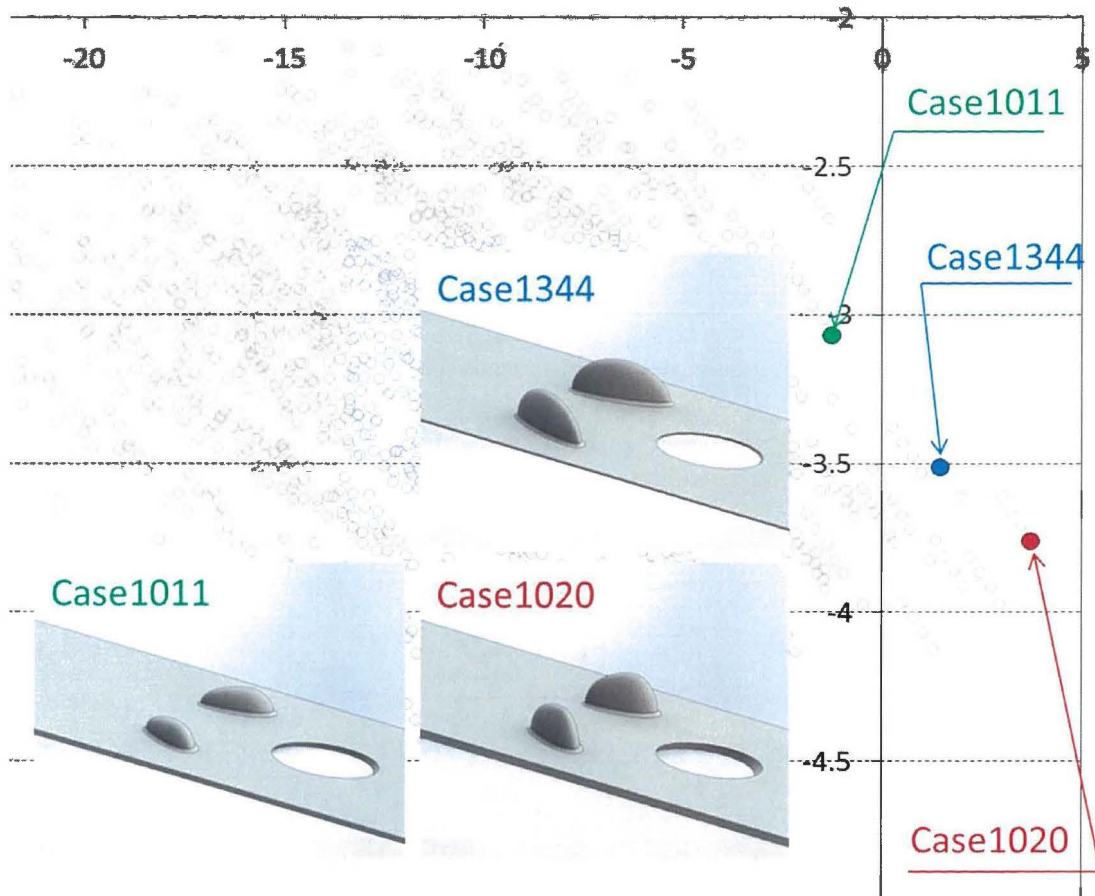


図 4.4.13 最適解の候補

表 4.4.4 各因子の水準

	A	B	C	D	E	F	G
Case1020	A2	B2	C1	D2	E3	F1	G3
Case1344	A2	B3	C2	D2	E3	F1	G3
Case1011	A2	B2	C1	D2	E2	F1	G3

4.4.3.4 タグチメソッドの再現性と確認実験

今回は前節で選択した検証形態に関してタグチメソッドの再現性を確認する。今回は、CFD を使って、各形態の条件で解析を実施し、再現性を確認した。

図 4.4.14 には、CFD によって行った確認実験で得られたフィルム効率分布を示す。BASE と比較すると、Case1020 と、Case1344 ではスパン方向に広いフィルム効率分布を確認することができ、DFCD の効果が発揮されている。この両者の違いは非常にわずかに見え、フィルム効率分布にはほとんど差異が確認できなかった。この両ケースでは、BR が高い条件においても、冷却孔の直後以外では、二次空気の付着が確認でき、BASE の弱点を克服していると言える。一方、Case1011 では、Case1020 や Case1344 よりもフィルム効率分布がスパン方向に広がっていない様子が確認できる。これは、DFCD から発生する渦の強さが弱いからであると考えられる。この形態に関しては、BR=1.0 において二次空気の付着が殆ど観察されなかった。

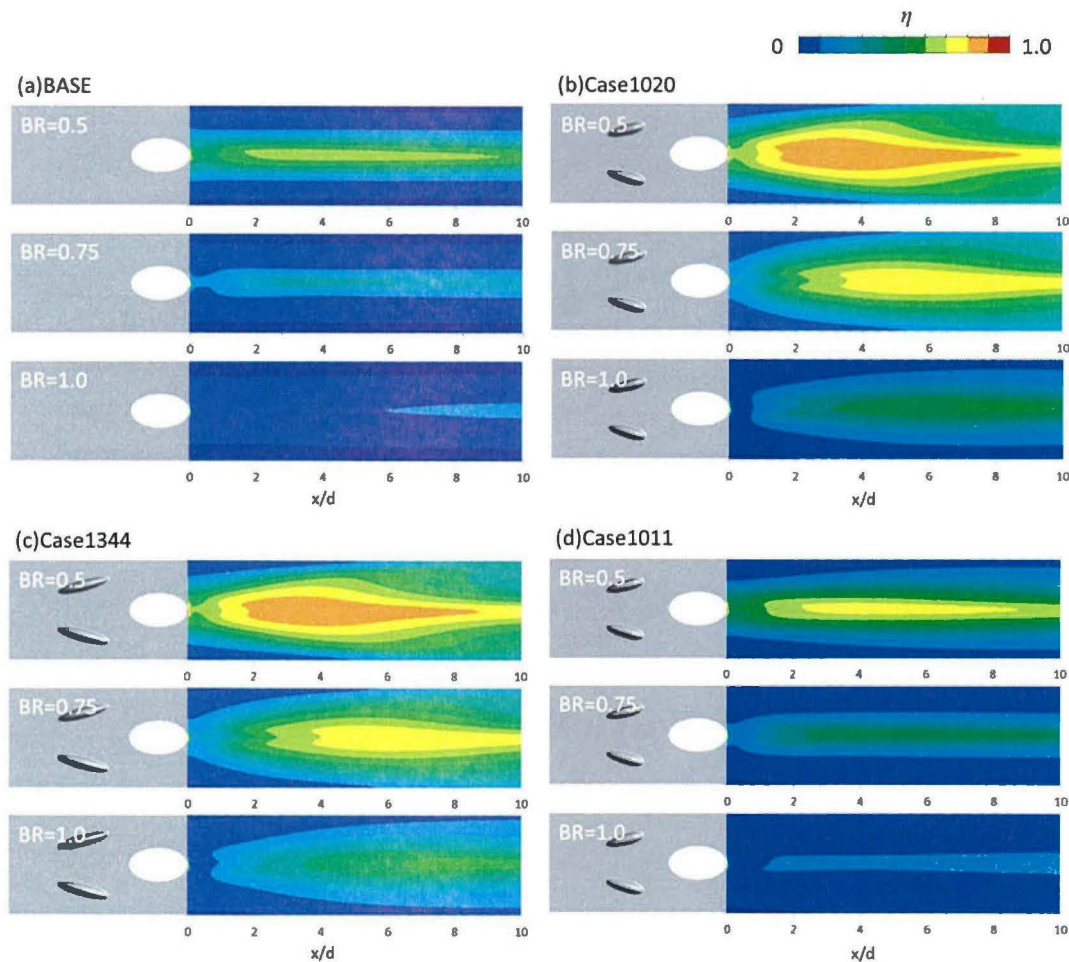


図 4.4.14 フィルム効率分布（確認実験，CFD）

図 4.4.15 には、吹き出し比の変化による、面平均フィルム効率の値の変化を示している。Case1020 と Case1011 は、フィルム効率分布でもほとんど差が見られなかったが、面平均値もほとんど差が無かった。この 2 形態に関しては、BR=1.0 においても、フィルム効率の面平均値が高く、ロバスト性が高い形態であると言える。一方で、Case1011 に関しては、フィルム効率の面平均値は BASE を基本的には上回っているが、BR=1.0 では、BASE とほとんど同じフィルム効率の面平均値となっており、BR の増加と共に DFCD の適応性が低下してきていることが分かる。

表 4.4.5 には、フィルム効率の面平均値に対する SN 比の推定値と、CFD で実施した確認実験値の差を示している。今回の場合、Case1020 に関しては推定値と確認実験値の値が小さくなっており、タグチメソッドの再現性の基準である $\pm 3\text{db}$ の基準内にあることが分かる。一方で、Case1344、Case1011 では、推定値と確認実験値の差が開いており、SN 比の推定値が低い形態ほど、確認実験値との差が次第に大きくなることが分かった。特に、Case1011 に関してはタグチメソッドの再現性の基準を満たしていない。以上のことから、この形態に関しては、制御因子の選択方法が不適切だったか、統計的な手法では整理することができない問題であることが考えられる。

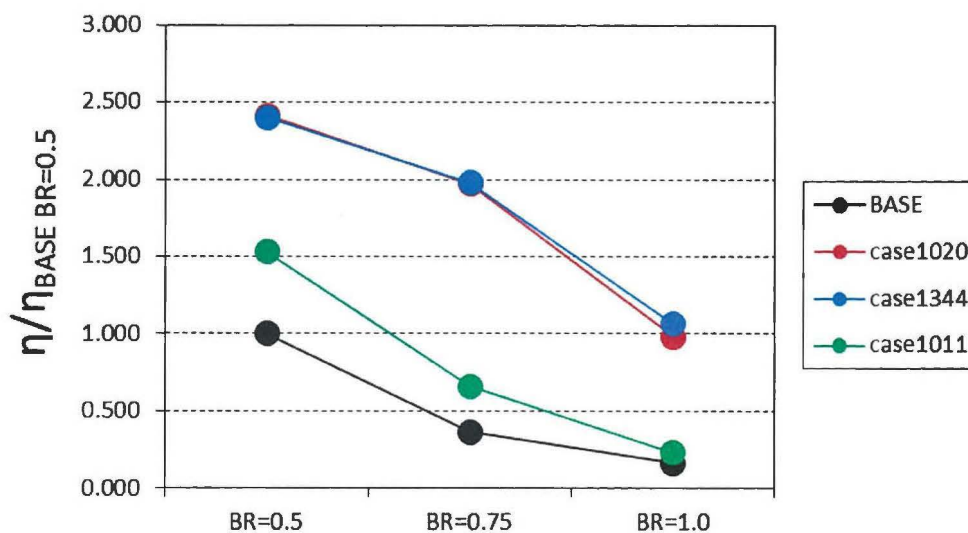


図 4.4.15 フィルム効率 (確認実験値, CFD)

表 4.4.5 フィルム効率の SN 比 (推定値と確認実験 (CFD) の結果)

	SN 比 (推定)	SN 比 (確認)	両者の差
BASE		-11.711	
Case1020	3.728	3.114	0.614
Case1344	1.476	3.592	2.116
Case1011	-1.245	-8.461	7.216

次に、全体効率の値に関して、推定値と、確認実験値を比較する。以下の表 4.4.6 には、全体効率 Φ_{heat} に関して、推定値と CFD によって実施した確認実験値の差を示している。Case1020 については、推定値と確認値の差がわずかであったが、Case1344 と Case1011 では SN 比が低かった形態ほど、両者の差が開いていることが分かる。今回は、Case1344 ではフィルム効率を推定時に過少に評価しており、Case1011 に関しては推定値の方が過大に評価してしまっていた。

表 4.4.6 全体効率 (推定値と確認実験 (CFD) の結果)

	BR=0.5	BR=0.75	BR=1.0	Φ_{heat} (推定)	Φ_{heat} (確認)	両者の差
BASE	1.000	0.366	0.167		0.5110	
Case1020	2.413	1.970	0.983	1.705	1.789	0.084
Case1344	2.398	1.977	1.065	1.538	1.813	0.275
Case1011	1.531	0.661	0.234	1.352	0.808	0.544

以上の検証は、CFD による検証結果を示している。今回、SN 比が低い形態に関して SN 比の再現性が取れなかったのは、Case1011 のような形態に関してタグチメソッドの統計的な処理が十分に通用しないことを示している。従って、SN 比が低くなるような条件（今回は二次空気が lift-off し易い条件）に関しては最適化の信頼性が低いことが分かった。

次に、実験によって実施した確認実験の結果を以下から示していく。今回は CFD 結果で推定し、CFD によって確認実験を行った場合には、Case1020 と Case1344 で、再現性があることが分かった。しかし、実現象を最適化によって予測されていなければ、最適化の信頼性は低くなってしまう。

図 4.4.16 には、CFD によって実施した確認実験と、実験によって実施した確認実験において得られたフィルム効率分布を示す。実験と CFD で結果を比較すると、CFD では局所のフィルム効率を過大に評価しており、RANS の計算では温度の拡散が十分に予測できない効果が表れている。定性的な傾向に関しては、CFD でも実験の傾向を予測できていることが分かるが、BR が高い条件に関しては、CFD の方で二次空気の付着が見られない形態でも、二次空気が付着しているような温度場が捉えられている。

図 4.4.17 には、確認実験によって得られた面平均フィルム効率を示している。この値は、実験は実験同士、CFD は CFD 結果同士で規格化を行っている。実験と CFD で結果を比較すると、SN 比が高かった条件である Case1020 や Case1344 に関しては、実験と CFD でほぼ同様の傾向を捉えていることが分かる。一方で、Case1011 に関しては実験と CFD 結果の差が大きくなっていた。とくに、これは吹き出し比が大きい条件で見られた傾向であった。

以上のことより、SN 比が高い条件に関しては、CFD 同士の推定と確認値の差が小さいだけでなく、実現象を捉えられる可能性が高いことが分かった。従って、CFD で最適化を行う場合は、SN 比が高い形態に関しては、実現象を捉えられるという意味でも、最適化の信頼性が高いことが分かった。

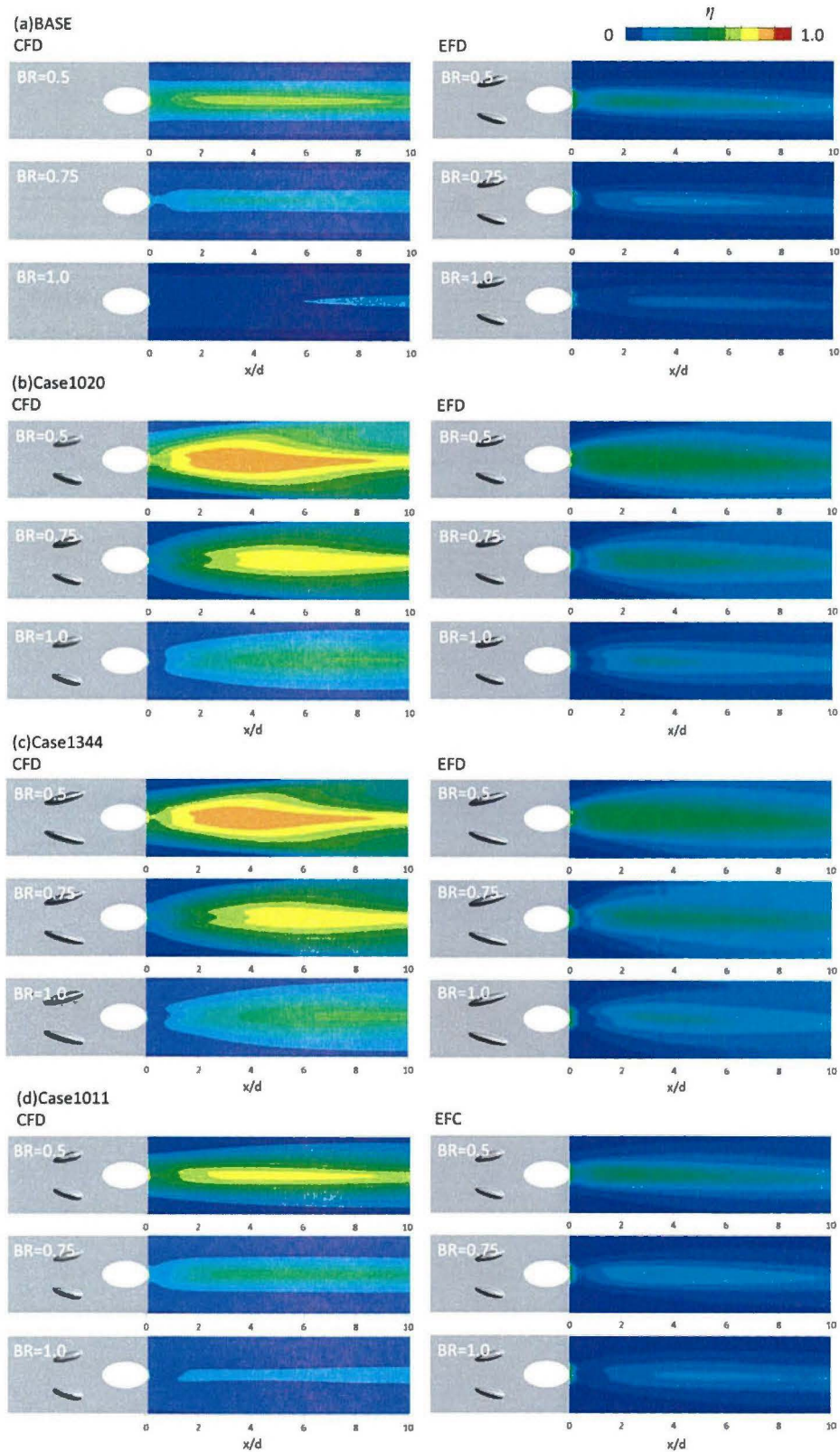


図 4.16 フィルム効率分布 (CFDvsEFD)

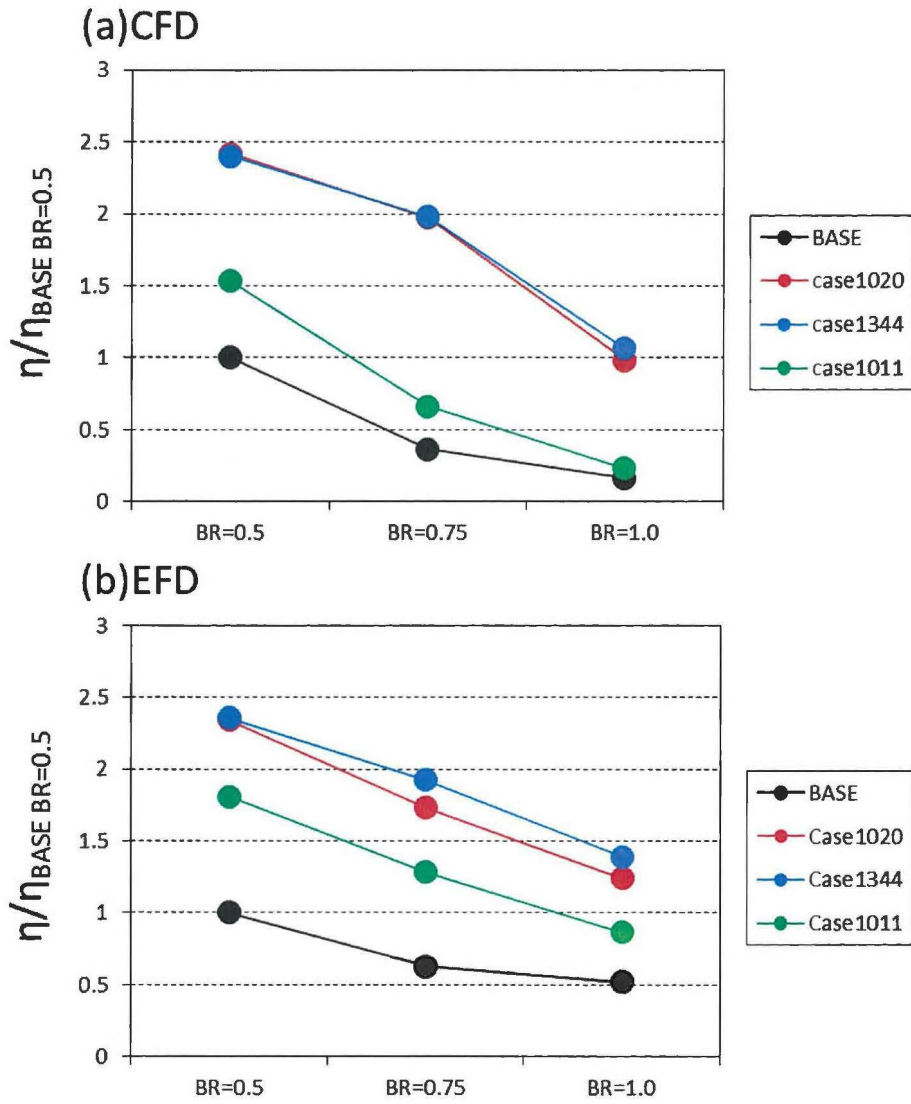


図 4.4.17 フィルム効率確認実験値

次に、空力損失について最適化の予測精度を検証する。図 4.4. 18 には、CFD によって得られた全圧損失係数分布を示す。BASE と比較すると Case1020 と、Case1344 に関しては、冷却孔のセンターライン脇に大きな損失分布が観察される。これは、DFCD から発生した渦によるミキシングロス領域を示しており、DFCD から発生する渦が大規模になるに従って、損失領域も大きくなっていることが分かる。これは、Case1011 の損失分布が縮小していることから言える。図 4.4. 19 には、CFD による確認実験を行った結果得られた、面平均運動エネルギー損失を示している。運動エネルギー損失は、BR が高くなるにしたがって増加しているが、各形態の中でも Case1020、Case1344 の損失が比較的高くなっている。これは、DFCD から発生した渦による空力損失が影響したものである。

表 4.4. 7 には、空力損失の SN 比に関して、CFD 結果を元に算出された推定値と、CFD 結果を元にして算出された確認実験値を示している。確認実験値と推定値を比較すると、今回はフィルム効率とは異なり、推定値と確認実験値の差が非常に小さく、タグチメソッドの基準である $\pm 3\text{db}$ の基準を満たしている。従って、空力損失については、再現性の基準を満たしていることが分かった。空力損失についても、全体効率の予測精度について比較を行う。表 4.4. 8 には、推定される全体効率と、CFD の確認実験によって得られた全体効率の値を示している。この結果を見ても、タグチメソッドの予測精度は十分であり、確認実験で得られた傾向は、推定値の傾向を捉えていた。以上のことから、空力損失の推定については、タグチメソッドの統計的な処理方法が通用し、十分な予測精度が得られることを確認した。これは、フィルム効率の結果で得られた傾向とは異なっている。

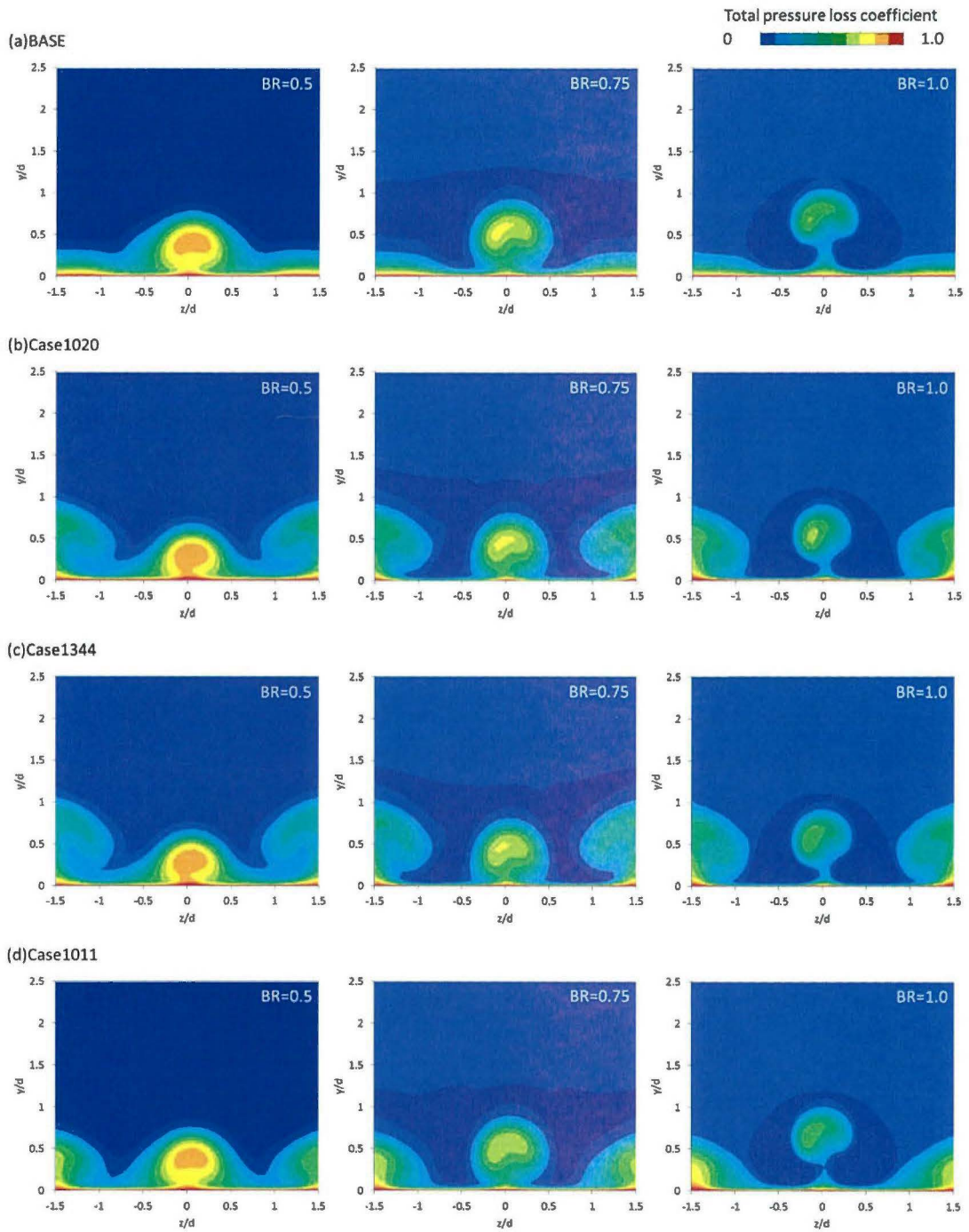


図 4.4.18 全圧損失分布 (検証形態)

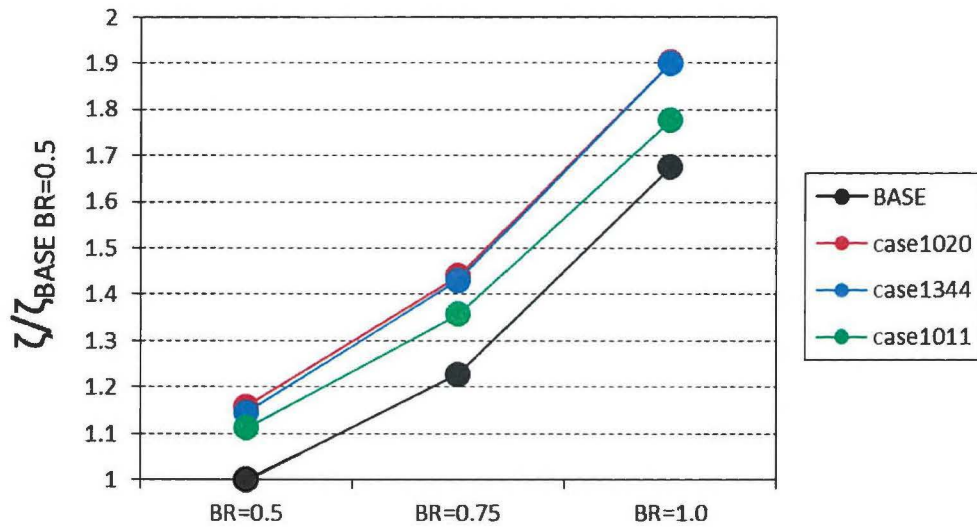


図 4.4.19 面平均運動エネルギー損失（確認実験値，CFD， $x/d=20$ ）

表 4.4.7 空力損失の SN 比（推定値と確認実験（CFD）の結果）

	SN 比 (推定)	SN 比 (確認)	両者の差
BASE		-2.486	
Case1020	-3.760	-3.700	0.060
Case1344	-3.512	-3.666	0.154
Case1011	-3.069	-3.179	0.110

表 4.4.8 全体効率（推定値と確認実験（CFD）の結果）

	$BR=0.5$	$BR=0.75$	$BR=1.0$	Φ_{aero} (推定)	Φ_{aero} (確認)	両者の差
BASE	1.000	1.228	1.676		1.3014	
Case1020	1.158	1.440	1.902	1.514	1.500	0.014
Case1344	1.145	1.432	1.902	1.469	1.493	0.024
Case1011	1.112	1.358	1.777	1.392	1.416	0.024

次に、実験による検証結果を示す。今回の実験は $BR=0.0$ での運動エネルギー損失を計測することにした。これは、現在の実験装置では二次空気の流量変動が大きく、吹き出しを伴った条件では、十分な計測精度が得られなかった為である。しかし、 $BR=0.0$ の実験条件でも、空力損失の傾向は捉えられると考えられる。図 4.4.20 には、実験と CFD によって得られた運動エネルギー損失の分布を示している。実験においては、計測プローブの直径が大きいため、壁面付近の損失分布を捉えられない。従って、壁面法線方向の計測座標の最小値は $y/d=0.1$ となっている。実験と、CFD を比較すると、CFD 結果の方がロスを過大に評価している傾向にあるが、渦が発生している位置では、運動エネルギー損失が大きくなっており、概ね実験の傾向を捉えていると言える。さらに、DFCD の高さが低い条件においては、ロスの壁面法線方向の分布が低くなっており、ロスがわずかに低減されていることが分かる。図 4.4.21 には、実験と CFD によって得られた、面平均フィルム効率の値をグラフに示している。このグラフも、フィルム効率の面平均値と同様に、CFD 結果は CFD 結果で、実験結果は実験結果で規格化を行っている。今回は、計測の不確かさを BASE $BR=0.0$ の運動エネルギー損失を 3 回計測した時に、平均値から差を取得し、その差を B タイプの不確かさ評価方法で評価している。今回は、実験と CFD 結果を比較すると、実験と CFD では十分に傾向を予測できていることが分かった。さらに、Case1011 の損失が低下している様子も確認することができる。以上のことから、最適化における空力損失の評価は、CFD による解析は、実験値とも一致することから、非常に信頼性が高いものであることが分かる。

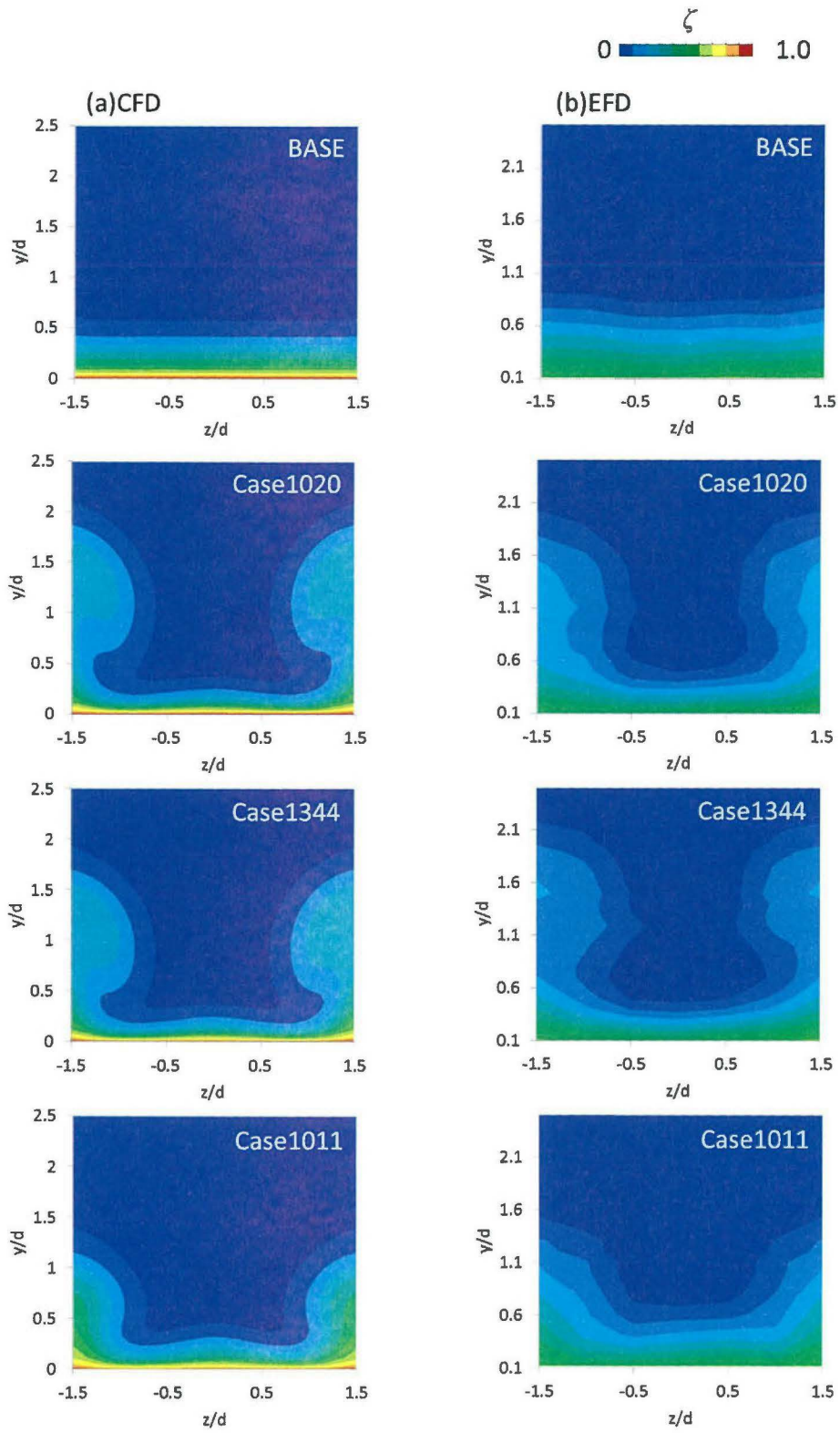


図 4.4.20 運動エネルギー損失分布(確認実験値, CFDvsEFD)

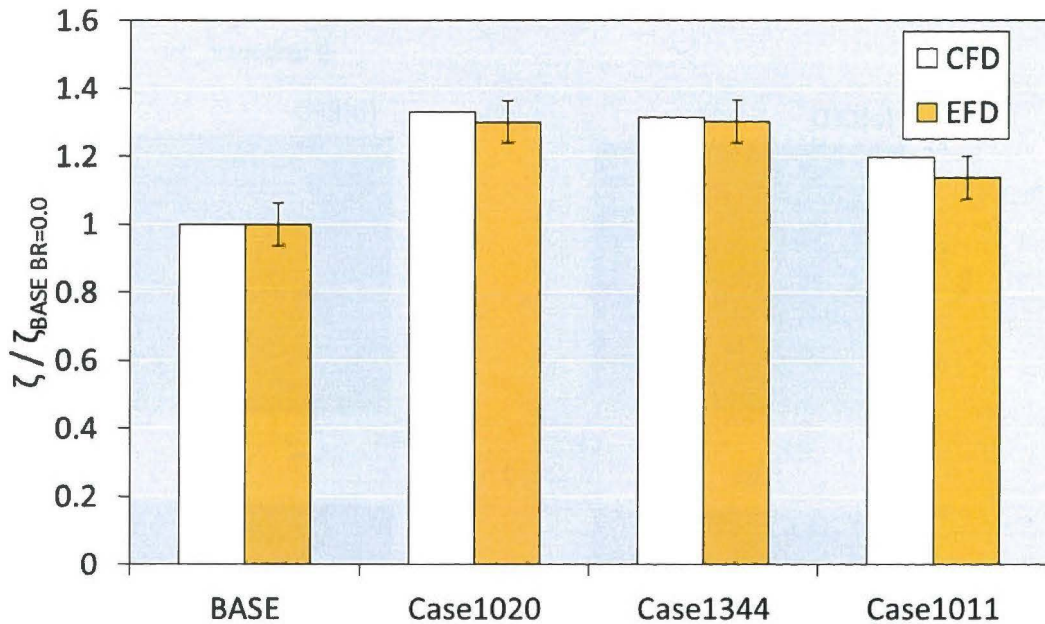


図 4.4.21 面平均運動エネルギー損失

4.4.4 実験データを用いた最適形態の推定

前節まででは、多目的の最適化を行う場合、フィルム効率の推定に問題があることが分かった。本節では、先を取得した実験データを元に、CFD データを利用したフィルム効率の推定性能と、実験データを利用した場合のフィルム効率の推定性能を比較する。

タグチメソッドにおいて、フィルム効率の SN 比を推定する場合、統計的な処理方法を使って推定を実施する。統計的に、SN 比を算出する場合は SN 比の要因効果図から、各制御因子とその水準に対する平均 SN 比の値を用いることになる。今回は、SN 比の予測性能に差が表れたことから、平均 SN 比の差が影響していると考えられる。図 4.4.22 には、実験と CFD によって得られた要因効果図を示している。EFD と CFD で SN 比を比較すると、EFD の SN 比の方が全体的に高い値を示している。この要因効果図を元にして検証形態の推定 SN 比を算出する。

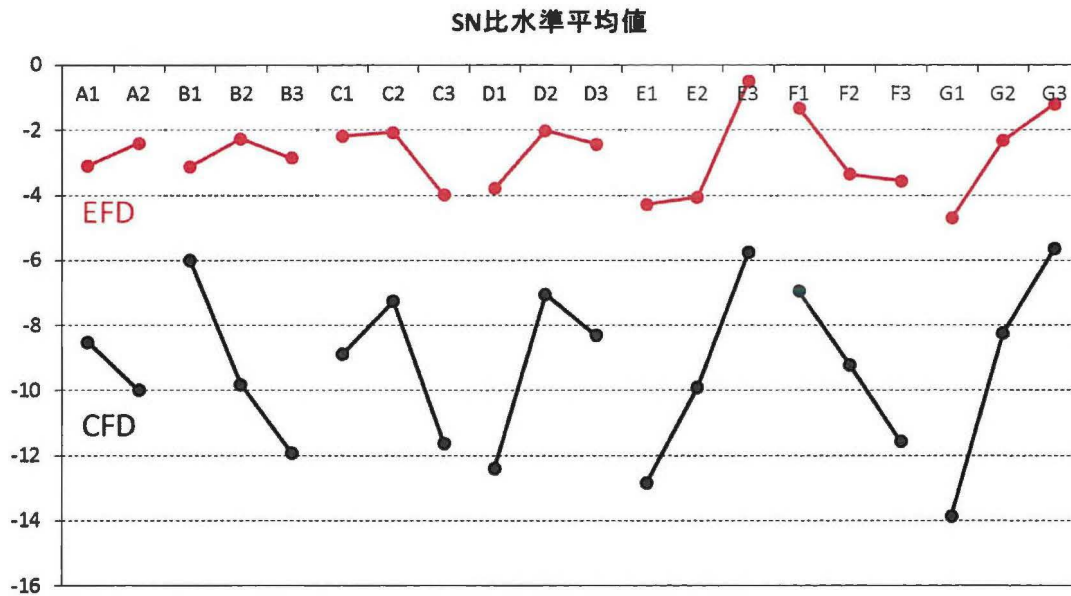


図 4.4.22 SN 比要因効果図 (EFD vs CFD)

表 4.4.9 には、実験と CFD によって算出した推定 SN 比と、確認実験で得られた SN 比を示している。推定 SN 比を実験と CFD で比較すると、Case1020 では推定 SN 比の値の差が小さくなっているが、その他の形態に関しては差が大きくなっている。これは、Case1020 に関しては、SN 比の水準平均値の最大を取るような形態であるが、実験と CFD の SN 比水準平均値の差は、他の水準よりも小さい値となっている。従って、Case1020 に関しては実験と CFD で推定値の差が比較的小さかったと考えられる。次に、確認実験で得られた SN 比を推定値と比較する。実験データを元にした場合、推定値と確認実験で得られた SN 比の値は非常に近い値となっており、タグチメソッドの再現性の基準である $\pm 3\text{db}$ の基準を満たしている。従って、もしも最適化を実験データだけで行えば、SN 比の再現性は高くなり、十分な推定精度が得られることが分かる。確認実験の結果を CFD と実験結果で比較すると両者の差は非常に大きいものとなって表れている。以上のことから、多目的の最適化においてはタグチメソッドの統計的な処理方法よりも、CFD の予測性能が問題となって、十分なフィルム効率の予測が出来なくなっていると考えられる。

表 4.4.9 推定 SN 比と確認実験での SN 比

	SN 比 (推定 CFD)	SN 比 (確認 CFD)	SN 比 (推定 EFD)	SN 比 (確認 EFD)
BASE		-11.711		-3.808
Case1020	3.728	3.114	4.796	4.107
Case1344	1.476	3.592	4.331	4.907
Case1011	-1.245	-8.461	1.256	1.253

4.4.5 熱伝達率解析と熱流束比

前節まででは、伝熱性能を評価する方法としてフィルム効率を用いてきた。これは、フィルム効率の計測は、現在の実験装置で計測可能であり、評価が容易であるためである。しかし、本来フィルム冷却の伝熱性能は、熱流束を評価する必要がある。本節では、熱流束比（フィルム冷却を施す前と後の比）を取得することで、伝熱性能の評価を試みた。データ取得に関しては、CFD を用いている。これは、現在の実験装置では、二次空気のみを加熱した試験を実施しているため、フィルム効率=0 の領域の熱伝達率を算出することができないためである。

4.4.5.1 データ評価方法

今回は、CFD を用いて各形態の熱流束を算出することで、伝熱性能の評価を行う。フィルム効率の性能評価の際には、2.8.2.3 で示したように、何も DFCD を取り付けていない条件の BR=0.5 の結果を用いて規格化していたが、今回は以下のような式 (4.4.3) を用いて熱流束比を評価する。

$$\frac{q_{DFCD}}{q_{BASE}} = \frac{h_{DFCD}}{h_{BASE}} \frac{\left(1 - \frac{\eta_{DFCD}}{\phi}\right)}{\left(1 - \frac{\eta_{BASE}}{\phi}\right)} \quad (4.4.3)$$

- η : フィルム効率
- h : 熱伝達率
- ϕ : 冷却効率
- DFCD : DFCD を取り付けた条件
- BASE : BASE 条件

この式は、BASE 条件における熱流束と、DFCD を取り付けた時の熱流束の比を示しており、ここで、BASE とは何も DFCD を取り付けていない時の BR=0.5 における熱流束を示している。以上の式を用いて L18 直交表から導かれた形態に対して評価し、SN 比の要因効果図を作成する。タービンの平均冷却効率を示す ϕ は今回、0.6 の値を用いている。

4.4.5.2 解析要領

熱流束の値を算出するためには、フィルム効率を求めるだけでなく、熱伝達率を求める必要がある。しかし、フィルム効率を算出するために実施した CFD では、熱伝達率を直接求めることができない。そこで、熱伝達率のデータを取得するために、新たに解析を実施することにした。この解析の際には、主流と二次空気の温度を一致させ、壁面は等温条件を与えている。

4.4.5.3 解析結果

図 4.4. 23 には、CFD によって得られた熱伝達率分布を示す。DFCD が設けられている形態に関しては、DFCD の下流領域で比較的高い熱伝達率が観察される。これは、DFCD から発生する渦に起因していると考えられる。前節までで示した、流れ場解析の結果より、Case13 は強い渦度を下流側で形成していることが分かっているが、Case13 の局所的な熱伝達率は、他の形態に比べると低い。その代わりに、スパン方向にほぼ一様に熱伝達率の高い領域が広がっていることが分かった。一方で、Case03 等のスパン方向に広い DFCD に関しては、下流領域の局所的な熱伝達率が特に高い値を示している。図 4.4. 24～図 4.4. 26 には、 $BR=0.0$ ～ $BR=1.0$ における、熱伝達率分布を示している。まず、Case00(=DFCD を取り付けていない形態を指す)だけに注目すると、二次空気の吹き出しを伴う場合には、DFCD を取り付けた時のように、熱伝達率の高い領域が二又に分岐している。これは、冷却孔から時間平均的に発生している、CRVP によるものと考えられ、 BR の増加と共に CRVP による局所的な熱伝達率も高くなっていることが分かる。これに、DFCD を付与する場合、熱伝達率は変わらず二又になっているが、CRVP と DFCD から発生する渦の干渉により、さらに熱伝達率が高くなることが分かった。

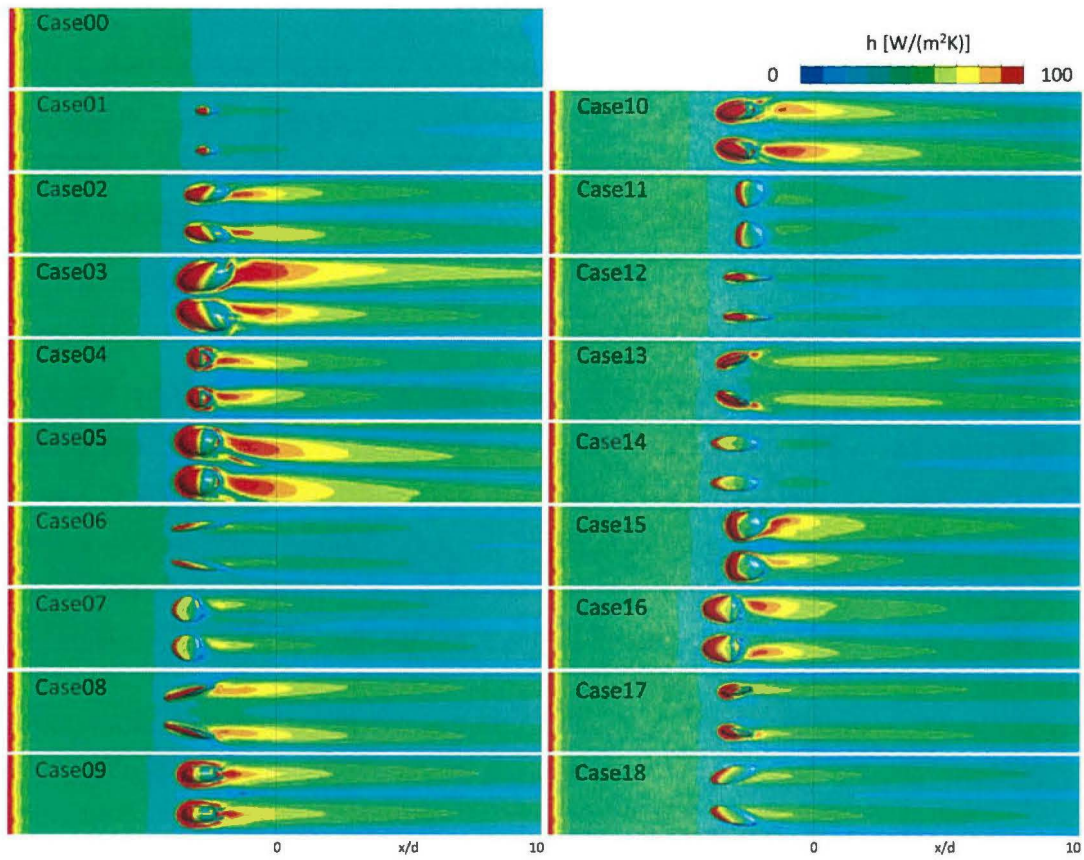


図 4.4.23 熱伝達率分布 ($BR=0.0$, CFD)

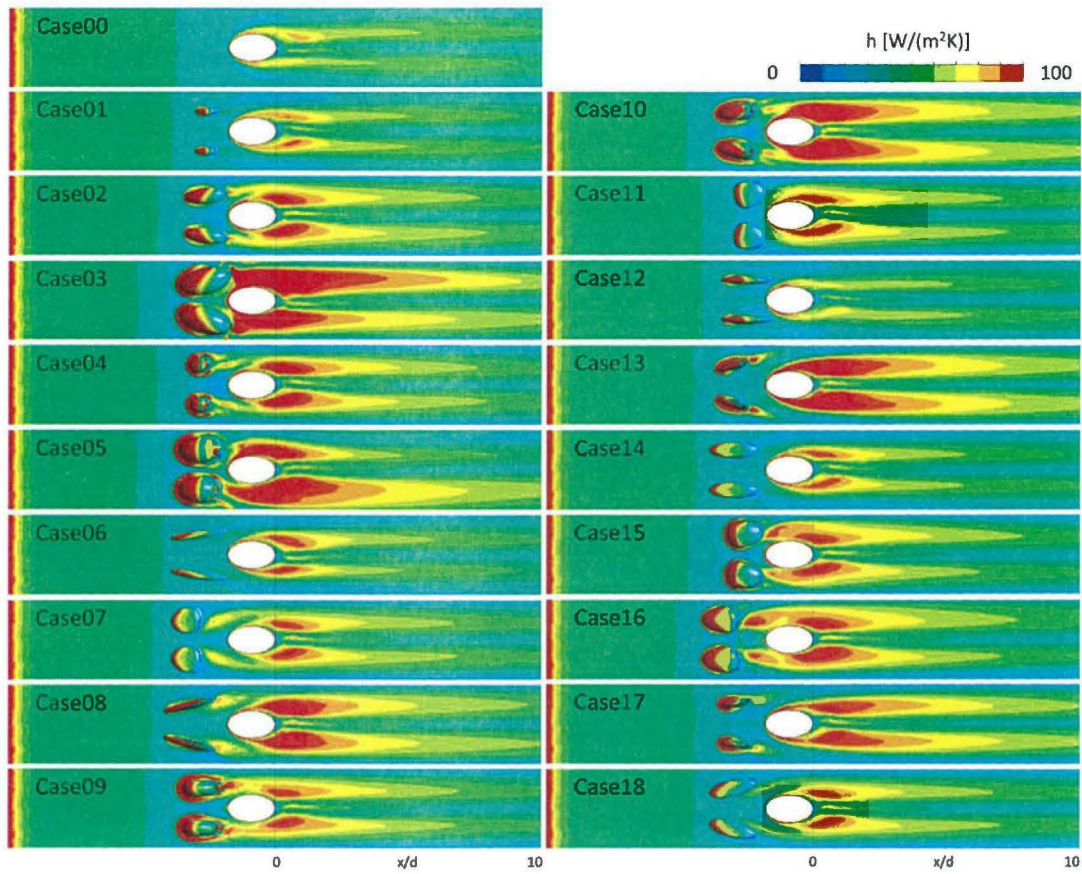


図 4.4.24 熱伝達率分布 (BR=0.5, CFD)

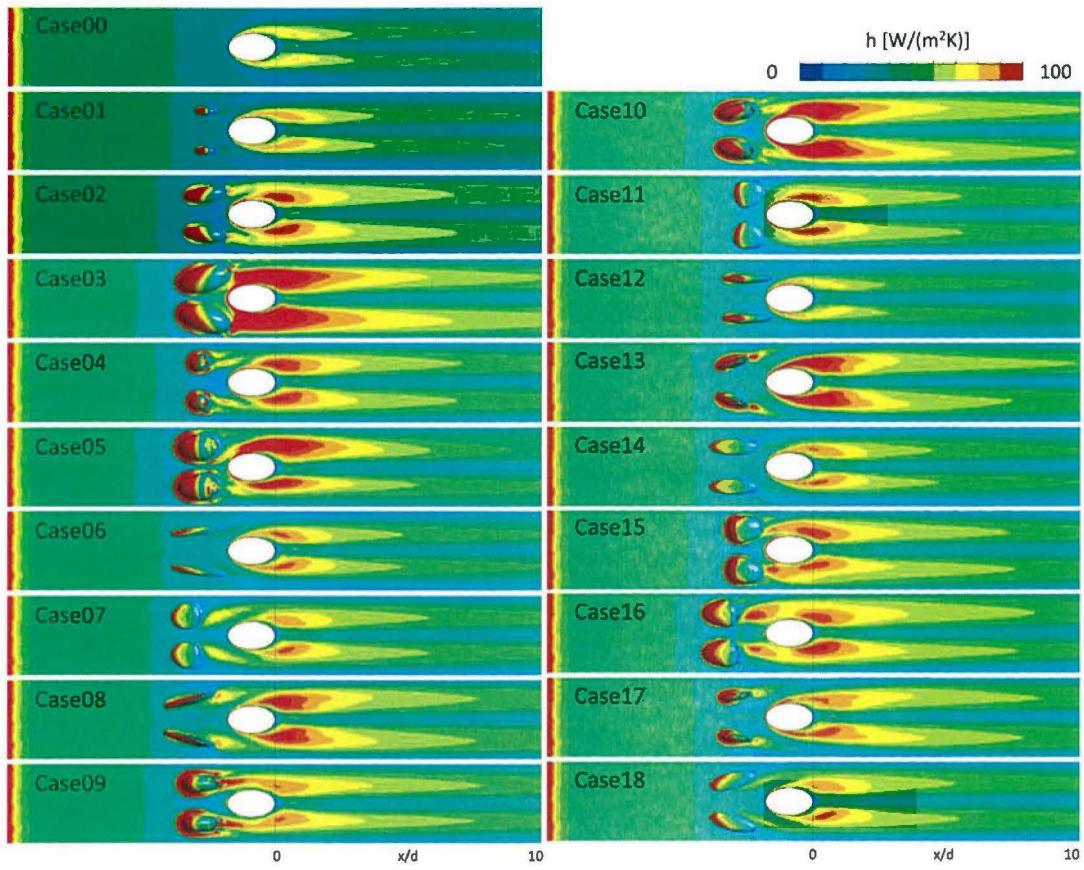


図 4.4.25 熱伝達率分布 ($BR=0.75$, CFD)

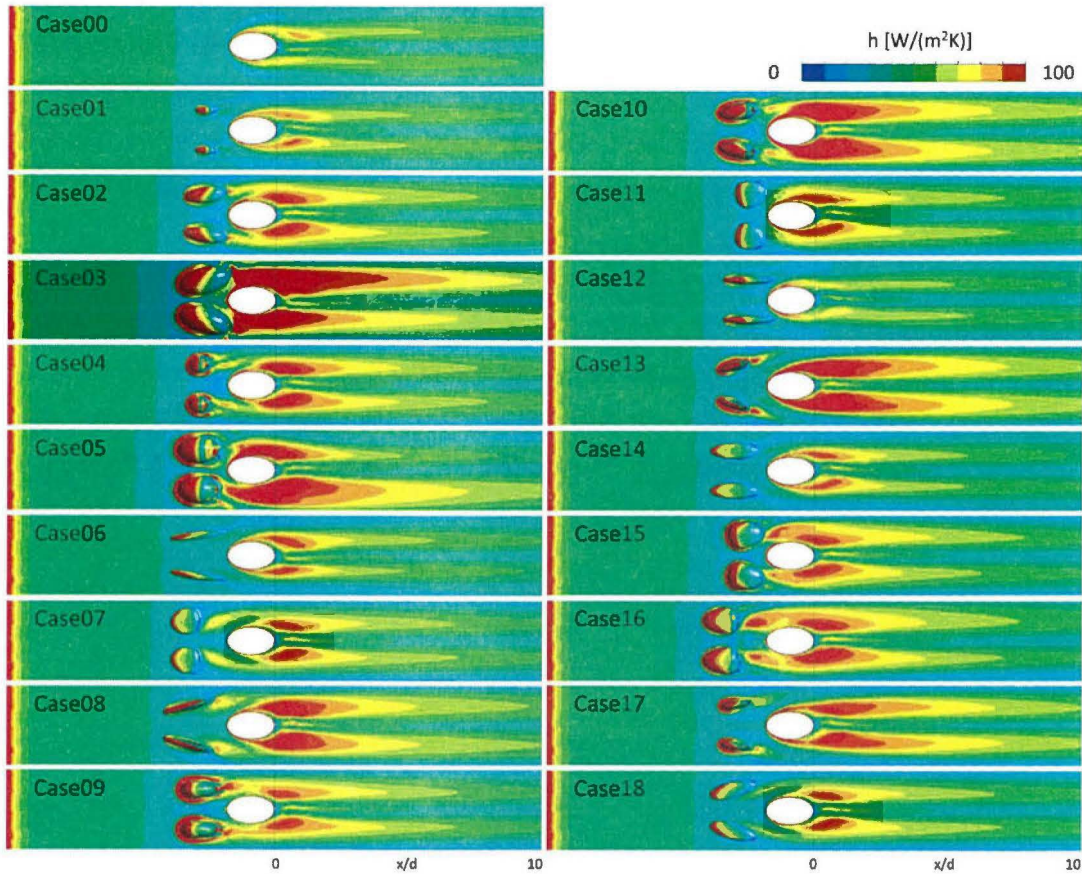


図 4.4.26 熱伝達率分布 ($BR=1.0$, CFD)

図 4.4.27 には、熱流束比と熱伝達率比の面平均値を示している。面平均の値は $0 \leq x/d \leq 20$ の領域において計算を行った。熱伝達率を観察すると、熱伝達率分布から予想されるように、DFCD を設置した条件では全体的に高い熱伝達率を示しており、多くの場合で熱伝達率比が 1 を上回っていた。どの形態でも見られる傾向としては、 BR の増加と共に熱伝達率比が増加する傾向が挙げられる。これは、熱伝達率分布を見て明らかになったように、 BR の増加によって、冷却孔センターライン脇の領域の熱伝達率が上昇しているためである。

熱流束比に関しては、BASE 条件の定義方法によって性能の考え方が変わるために、今回は熱流束比の大小のみで考察を行う。特に、今回熱流束比が低かった形態としては Case13 が挙げられる。Case13 は、フィルム効率を最大化するための最適形態であるが、今回はフィルム効率が高いという効果を受けて、熱流束比は低くなったと考えられる。それは、熱伝達率比が 1 を超えているにも関わらず、熱流束比は低い値を取ったことから伺える傾向である。その他の形態でも、フィルム効率が高かった形態 (Case17 等) に関しては熱流束比が低くなっていた。一方で、Case3, Case15, Case16 のような、DFCD の幅が広い形態に関しては、熱流束比が特に高くなっており、熱負荷が増大してしまっている。

図 4.4.28 には、熱伝達率と熱流束比に関する SN 比の要因効果図を示している。今回は、

熱伝達率比, 熱流束比共に低い方が好ましいと考え, どちらの SN 比も望小特性の SN 比の算出方法を用いて算出した. 熱伝達率の SN 比に関しては, E の水準(DFCD の高さ)が最も SN 比に影響を及ぼしており, DFCD の高さが低くなるほど, 熱伝達率低減の効果が強いことが分かる. その他の形態としては, DFCD の幅が狭いもの, DFCD の開き角が小さいものの方が熱伝達率低減の効果を示すことが分かった. これは, フィルム効率の要因効果図と照らし合わせると, E や, G の水準はフィルム冷却性能とトレードオフの関係になっていることが分かった. 熱流束比に関しては, フィルム効率と熱伝達率を含んだ計算となっているため, 最も問題が複雑であると言える. 今回の分析結果では, F1 (DFCD の幅が最も狭い水準)が突出して, SN 比を高くしており, 伝熱性能に大きな影響を及ぼしていることが分かった. その他の水準に関しては, 特に目立った傾向は観察されず, 殆ど横ばいの水準であると言える. 今後, F 以外の水準は, 設計空間を広くして解析を行うことも有効であると考えられる.

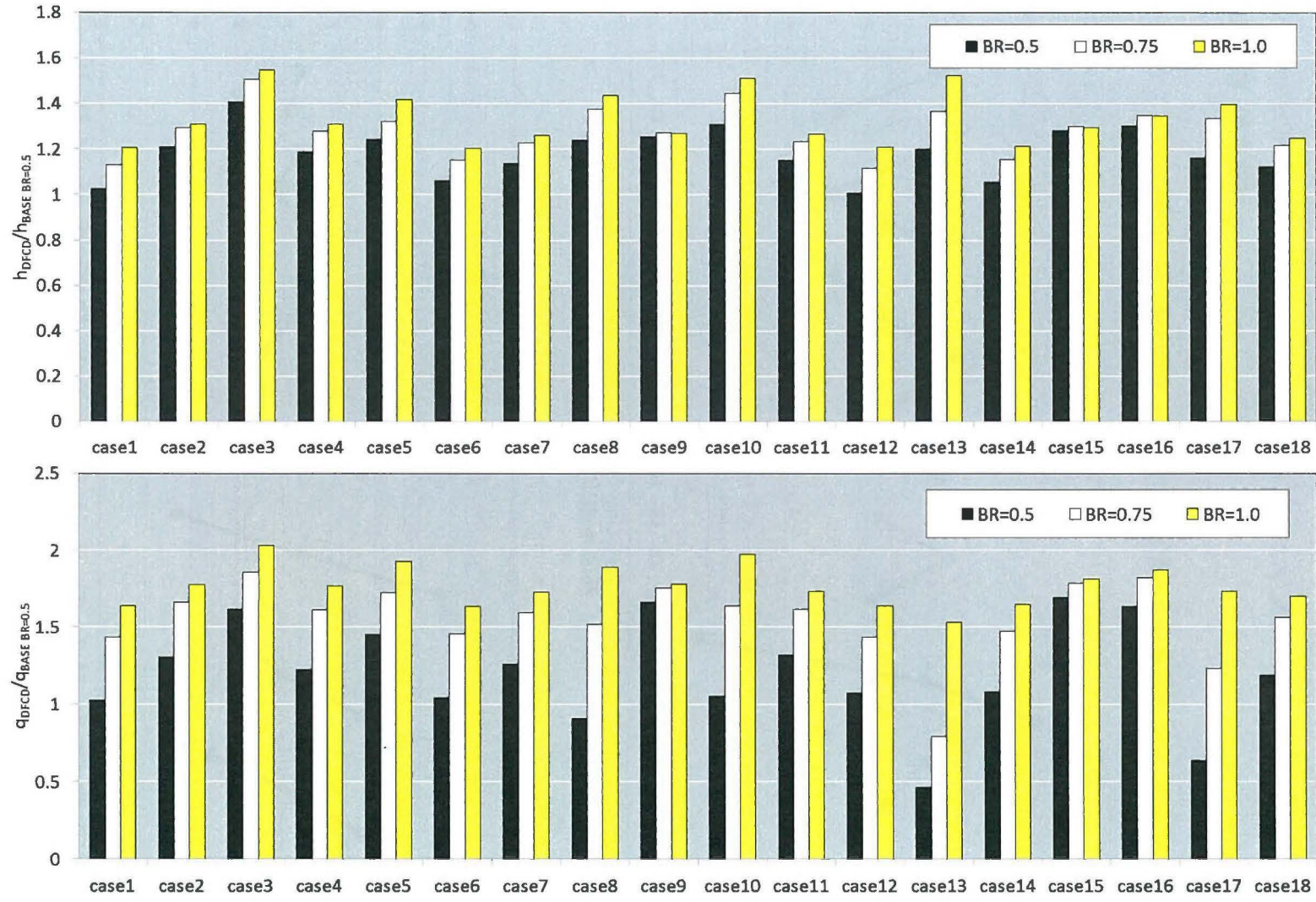


図 4.4.27 熱伝達率比と熱流束比

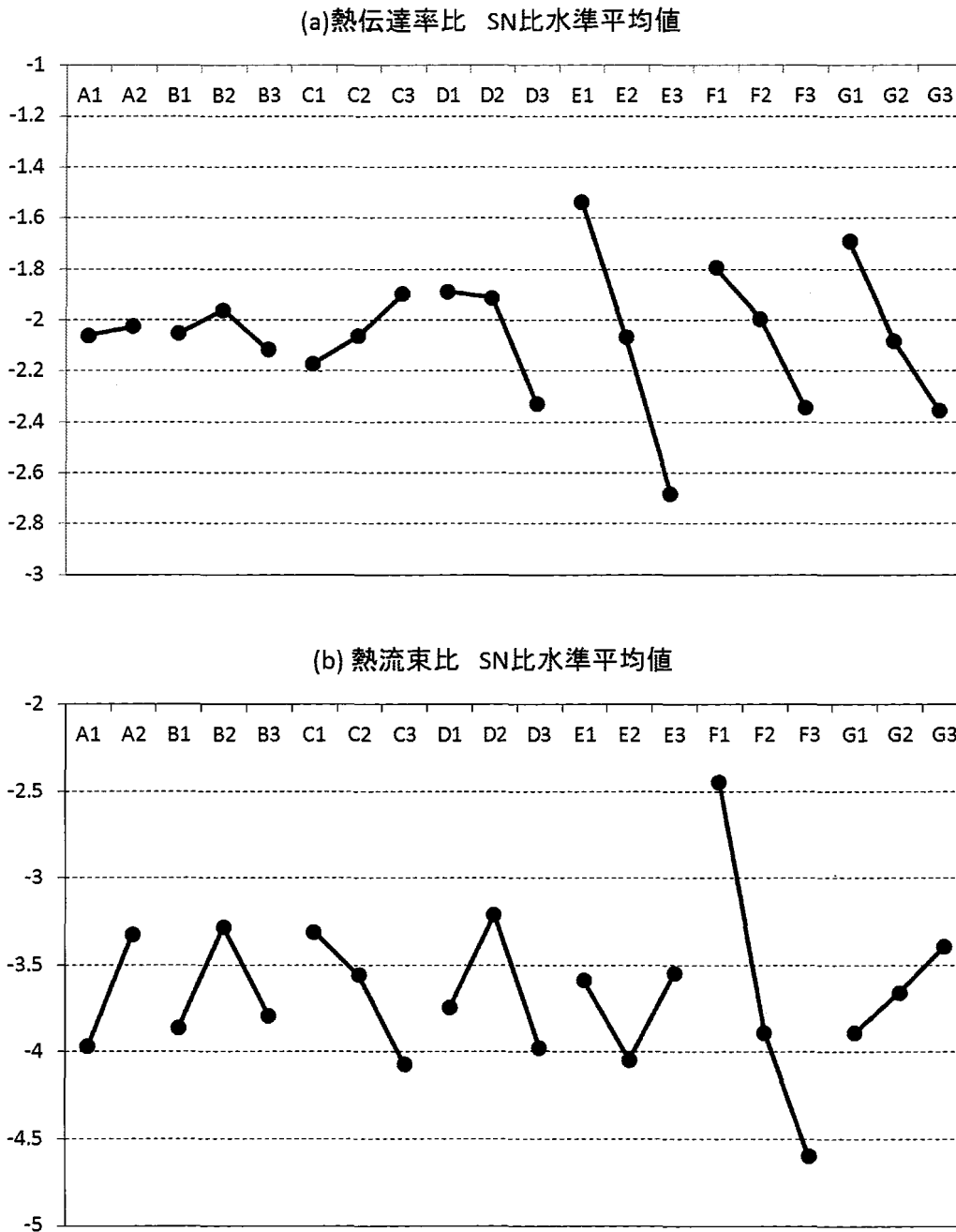


図 4.4.28 熱伝達率と熱流束比の SN 比要因効果図

参考文献 (4.4 節)

- (1) Lewis, S., Ai, W., Fletcher, T. H., Barker, B. and Bons, J. P., 2009, "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Near Deposit-Laden Film Holes", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 133, 031003.

4.5 本章のまとめ

本章では品質工学を用いてタグチメソッドの静特性、動特性を利用したデバイス形状の最適化を行った。また、最適化の信頼性評価を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 静特性解析結果と最適化の信頼性

- 実験と数値解析を用いて形状最適化を行った結果、数値解析で乱流モデルに SST モデルを用いた場合は、最適形態が実験と数値解析で一致した
- 数値解析は格子依存性、乱流モデルの影響を受けるが、定性的に実験値と同じ傾向が捉えられる場合には、数値解析結果と実験結果の最適解は一致すると考えられる。特にデバイスを用いた最適化を行う場合は、デバイスの剥離の予測精度が解の信頼性に影響を与えるため、定性的な現象を数値解析によって捉えられるかどうか、最適化の予測精度に影響を与えると考えられる
- 今回は統計的な手法を用いてフィルム効率を最大化することができたが、フィルム冷却効率の定量値に関しては実験値と CFD 結果では異なっているため、最適解の予測にはある程度のサンプル数が必要であると言える

(2) 動特性解析と多目的解析

- タグチメソッドの動特性解析を行うことで、複数の流量条件で高いフィルム効率を發揮するデバイスの解を得ることができる
- 流入角を入力とした最適化を実施することで、各流入角におけるフィルム効率を高めることはできたが、流入角に対するロバスト性は低下した。これは、感度を優先した最適化を実施したためであり、ロバスト性が犠牲になったためである。流入角に対するロバスト性を向上させるためには、最適化の段階で設計パラメータの再調整や、再選択を施す必要性もある。
- 多目的の最適化を行う場合、フィルム効率よりも空力性能の予測精度の方が悪く、解の再現性を低下させた。これは、多目的解析を行う場合には、フィルム効率を最大化する問題とは異なり、フィルム効率に影響を与えるパラメータを定性的に把握するだけではなく、最適化の過程で、定量値の精度が求められるためである。したがって、多目的の最適化を RANS で実施するためには、高い数値解析の予測精度が必要となる。
- 静特性の解析とは異なり、多目的の最適化には大量のデータサンプルが必要であり、実験的な検証をすることは難しい。したがって、熱流束や、空力損失を考慮した最適化の予測精度に関しては厳密に評価することは難しかった。今後は、最適化の予測精度検証方法を検討すると共に、各データサンプルの予測精度を向上させる必要がある。

