

# ローターシールド流に対するケーシング・トリートメントの影響

## Effect of Casing Treatment on Rotor Shield Flow

本城泰治, 東京理科大学大学院, 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3, E-mail:j4500643@ed.kagu.sut.ac.jp  
 戸田和之, 山本誠, 東京理科大学, 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3  
 Taiji HONJO, Science University of Tokyo, 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, 162-8601, Tokyo  
 Kazuyuki TODA, Makoto YAMAMOTO, Science University of Tokyo

Advanced jet engine is being developed. To decrease gas leakage passing through a rotor shield is one of important factors that improves the efficiency of engines. Labyrinth seal is such a device to decrease the leakage. Labyrinth seal is a non-contacting type seal, and has a complicated pass to decrease the leakage. In the present study, we calculate flow fields in labyrinth seals with the  $k$ -turbulence model (Lam-Bremhorst). The performance of each labyrinth seal is estimated from the flow pattern. We numerically clarify the effect of the location and size of casing cavity.

### 1. 緒言

現在、世界各国でジェットエンジンの開発が非常に盛んに行われており、エンジン性能を改善する方法が数多く研究されている。ローターシールドにおけるガス漏れを制御することは、その中でも重要な課題の一つとして挙げることができる。このローターシールド内の漏れ損失に強く影響するのがラビリンスシールドの形状である。ラビリンスシールドは、一般に動翼と静翼の間に取り付けられる非接触軸封装置であり、動翼における漏れの1%がエンジン効率を1%減少させると言われている。ラビリンスシールドは、入り組んだ流路、つまり迷路(labyrinth)を設けて漏れを低減させる目的で導入される。流路が屈曲することにより抵抗が増加し、圧力損失が増大して漏れ量を減少させることができる。ラビリンスシールドは簡便で高速回転に利用可能なため、現在、圧縮機、タービンなどに広く利用されている。

一方、ジェットエンジン設計段階において、安全な運転を確保する上でエンジン部品や補機類が有害な熱を吸収しないために適度な漏れが冷却空気として考慮されなければならない。したがって、ラビリンスシールドでは漏れ流量の低減と冷却空気の確保という相反する要求を満たすことが必要となり、シールド内の流れ挙動を正確に数値予測可能な方法の開発が設計上強く要求される。

本研究は、動翼先端付近のケーシング面にキャビティを有する直通型ラビリンスシールドを対象とする。キャビティ寸法及びキャビティ設置位置を様々な変化させた数値計算を実施し、ケーシング面上のキャビティ(ケーシングトリートメント)が流れ場にどのように影響するのかを明らかにする。また、流れ場の把握を通じて、より高性能なラビリンスシールド設計に対する指針を与える事を目的とする。

### 2. 数値計算法

本研究においては、ラビリンスシールド内流れ場を軸対称円筒座標系を用いて計算した。ラビリンスシールド内において、流れは高亜音速であり、圧縮性乱流と仮定できるため、流体の支配方程式としてはファールブル平均を施した連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式を使用した。計算コードは差分法を用いて作成した。支配方程式の対流項には2次精度風上型 TVD スキームを用いた。時間積分には4段階ルンゲクッタ法を採用し、さらに格子点ごとに安定条件が許す限りの非一様な時間刻みで計算する局所時間刻み法によって計算の高速化を図った。他の項には2次精度中心差分を用いた。乱流モデルには、Lam-Bremhorst(1981)による低レイノルズ数型  $k$ -モデルを採用した。

### 3. 計算条件

#### 3.1 計算領域

計算領域の概略図を図1,2に示す。計算は3枚の歯を持つ直通型ラビリンスシールドに対し、2種類の大きさのキャビティを歯の上方ケーシング面に設定したケースについて実施する。なお、図において破線はキャビティを上流側へ半ピッチ移動した場合を示している。各計算領域の寸法を表1にまとめる。

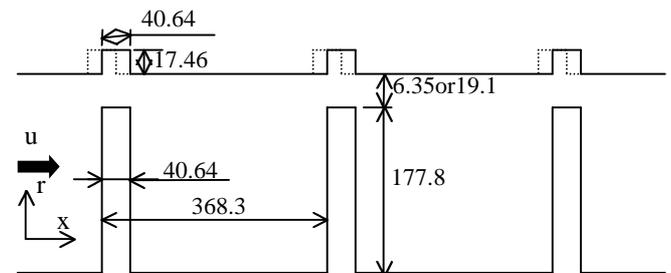


Fig.1 Schematic Diagram of Small Groove (unit:mm)

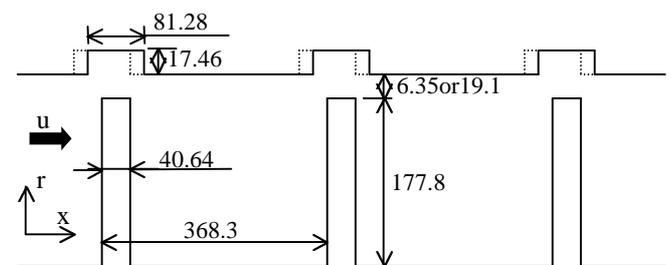


Fig.2 Schematic Diagram of Medium Groove (unit:mm)

Table1 Dimensions

case	clearance (mm)	cavity	
		width(mm)	position
case1	6.35	40.64	centered
case2	6.35	40.64	displaced
case3	6.35	81.28	centered
case4	6.35	81.28	displaced
case5	19.1	40.64	centered
case6	19.1	40.64	displaced
case7	19.1	81.28	centered
case8	19.1	81.28	displaced

#### 3.2 計算条件

計算条件は、Rhode and Allen(1998)<sup>(1)</sup>の実験に準じた。各数値を表2にまとめる。

Table2 Computational Conditions

Re ( $\times 10^4$ )	K	Vc(m/s) ( $\times 10^2$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	P(Pa) ( $\times 10^3$ )
4.00	0.920	1.00	0.573	2.64

ここで、レイノルズ数、漏れ抵抗係数は以下の式により定義される。

・レイノルズ数

$$\text{Re} = rV_c(2C)/m \quad (1)$$

・漏れ抵抗係数

$$K = \frac{2\Delta P}{rV_c} \quad (2)$$

〔Vc: クリアランスにおける流速 C: クリアランス〕  
〔 $\rho$ : 流体の密度  $\mu$ : 粘性係数 P: 圧力差〕

### 3.3 境界条件

各境界条件を以下のように設定した。

入口条件は、初期静圧、温度を固定した。このことにより密度も固定となる。それ以外の変数は計算領域内の格子から一次外挿により決定した。

出口条件は、初期静圧を固定し、それ以外の変数は一次外挿により与えた。

壁境界は、滑り無し断熱壁を仮定し垂直方向温度勾配を 0 とし、レイノルズ応力の各成分及び、乱流エネルギーを 0 とした。

## 4. 結果と考察

### 4.1 フローパターン

まず初めに、フローパターンについて考察を行う。各ケースにおける速度ベクトルを図 3~10 に示す。各々(a)にキャビティ部における流れ場の拡大図、(b)に第 2、第 3 の歯の間の膨張室内の流れ場を示している。

case1 においては、図 3(a)に示すように、キャビティ内に主流の一部が入り込み大きな渦を形成する。キャビティを前方に移動した case2 においては、図 4(a)に示すように、歯とキャビティ間の流路が広がるため、キャビティ内に入り込む強い流れが生じ、キャビティ左側面で剥離を起こし、流れはキャビティ内で放物線を描くように右側面へ回り込み、大きな渦は形成されなくなることが分かる。図 3(b),4(b)より、膨張室内の流れは、キャビティの位置によらず大きな再循環領域を形成していることが分かる。

歯の 2 倍の幅を持つキャビティを中心に設けた case3 においては、歯とキャビティとの間に、より広い間隔ができるため、膨張室内で図 5(b)に示すように歯通過後、流れは放物線を形成するように流れていることが分かる。case4 においては、歯の右側面でキャビティとの間隔が狭まるため、膨張室内では図 6(b)に示すように、大きく再循環領域を形成し、case2 と類似した流れとなる。

case5 においては、図 7(a)より、case1 と同様にキャビティ内に渦を形成していることが確認できる。case6 においては、図 8(a)より、歯とキャビティ間の流路が広がるため、やはりキャビティ内左側面で剥離を生じ渦を形成するが、クリアランスが広いため、図 8(b)に示すように、クリアランス部で直進する流れが強く、キャビティ内右側面へ回り込み放物線を描く流れは見られない。膨張室内の流れとしては case5、case6 共に case1、case2 と同様に、大きな再循環領域を形成する。

case7 において(図 9 参照)流れは case3 と同様に歯通過後放物線を形成するように流れるが、クリアランスが広いためケーシング面付近の流れが強く、case3 に比べ浅い角度で

膨張室へ進入している。case8 においては、図 10 より、case4 とほぼ同様なフローパターンを示す。

フローパターンにおいて大きく蛇行するものが抵抗を増加し、圧力損失を増大させ、漏れ量を減少すると考えられる。したがって、本研究で取り上げたケースの中では、流れ場が最も大きな蛇行を示す case3 が最良であろうと考えられる。

### 4.2 圧力降下

次に歯通過時の圧力降下について考察する。図 11、12 に各々 case1~4、case5~8 の歯のクリアランス中間部の圧力降下の様子を示す。

図 11,12 から 8 ケース全てに共通して歯を通過する際に圧力降下を生じていることが分かる。全ての歯において、case3 が歯通過直後に最も大きな圧力降下を示す。しかし、膨張室内でケーシング面付近に再循環領域を形成するため、圧力は増加を示す。他の 3 ケースには膨張室での再循環領域は見られないため、膨張室での圧力増加は認められない。

図 12 より、1 番目の歯を通過する際には case6 が最も大きな圧力降下を示している。2 番目以降の歯においては図 11 と同様に歯の 2 倍の幅のキャビティを持つ case7 が歯通過直後に最も大きな圧力降下を示し、やはり膨張室で圧力上昇を伴う。case7 は case3 と異なり膨張室に再循環領域は見られないが、case3 及び case7 共に、流れが蛇行して軸方向速度が減少し、一方で流量を保つために密度が増加し、圧力の増加を生じるものと思われる。

第 2 の歯上方のクリアランスにおいて、図 12 に比べ図 11 におけるクリアランスが小さい方が 4 ケース共に大きな圧力降下を示している。図 11 において、第 2 の歯上方のクリアランスにおける 4 ケース各々の入口出口間圧力に対する圧力降下率は、case3、4 が若干であるが高い。case3、4 においては双方ほぼ等しい圧力降下率である。

以上の圧力分布による考察から、クリアランスの大きさはキャビティ形状以上に圧力損失に強く影響するものである。

### 4.3 乱流エネルギー

次に、乱流エネルギー k の等値線分布について考察する。図 13~20 に各ケースの k 分布を示す。

case1 においては図 13 より、キャビティに進入する際に、流路が狭くなる個所で乱れが大きい。case2 においては、図 14 に示すように case1 に比べ、キャビティへ進入する際に、流路が広くなるため乱れは小さくなっている。また、歯通過時には流路が狭くなるため、乱れが強くなることが分かる。図 15 より case3 でも、キャビティ進入時に流路が狭くなる個所で乱れが大きい。case4 では、図 16 より、キャビティに進入する際の流路は他のケースより広いためにキャビティ進入時には乱れは小さい。また、歯通過時に流路は狭くなるため乱れが大きくなることが確認される。

図 17 より case5 において、キャビティに進入する際に流路が狭くなる個所で乱れは大きい。case6 において図 18 より、第 1 の歯で 8 ケースの中で最も高い k の値を示している。また、やはり流路が狭くなる個所で強い乱れが見られる。case7 においても流路が狭くなる個所で乱れが確認される。case8 では、キャビティへ進入する際には、流路は他のケースよりも広いため乱れは小さく、歯通過する際に、流路が狭くなる個所で乱れが大きくなることが確認される。

以上の乱流エネルギー分布の考察から、極端に流路が変化する個所で乱れは強くなることが分かり、乱流エネルギーの増加に伴い全圧損失が増大し、圧力降下を起こし、図 11,12 において、その効果が確かめられる。

以上の計 8 パターンにおいて、フローパターンとして理想的であるのは流れに最も蛇行を示す case3 である。また圧力

面から、圧力降下に対し、キャビティ以上にクリアランスの影響が強いことが明らかとなった。また、乱流エネルギー分布より、流路が極端に変化する個所で乱流エネルギーは強くなり全圧損失が大きくなることが確認された。

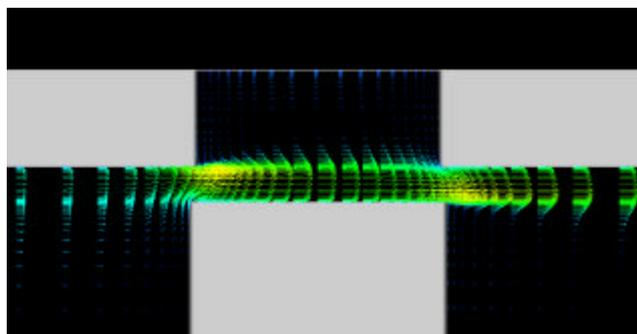
### 5. 結言

本研究において、直通型ラビンスシールに対し、クリアランスの大きさ、キャビティの大きさ、及び位置の違いによる計 8 パターンの流れ場の挙動が把握できた。流れ場、圧力降下、乱流エネルギーの観点から、本研究で取り上げたラ

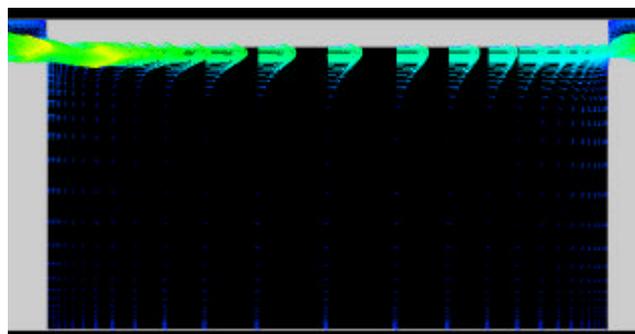
ビンスシールの中で理想的である形状は、クリアランス 6.35mm に対し歯の 2 倍の幅を持つキャビティを中心に設けたケースであることが確認された。

### 6. 参考文献

(1) David L. Rhode, Brian F. Allen “Visualization and Measurements of Rub-Groove Leakage Effects on Straight-Through Labyrinth Seal” ASME 98-GT-506 (1998)

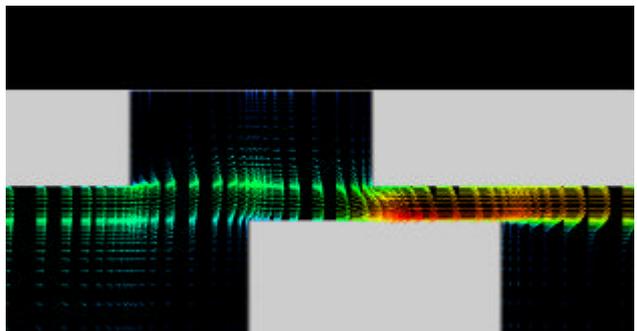


(a) Cavity

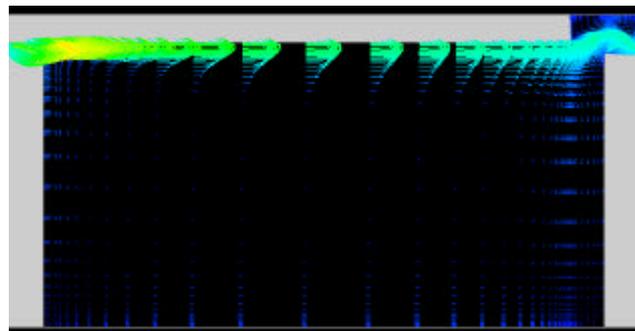


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.3 Velocity Vecotrs (case1)

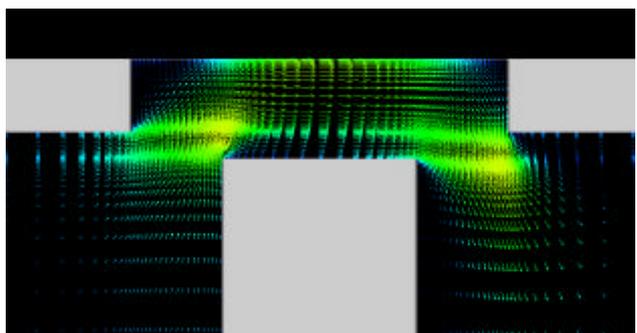


(a) Cavity

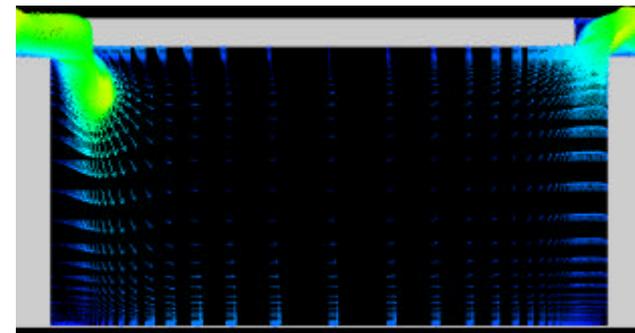


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.4 Velocity Vecotrs (case2)

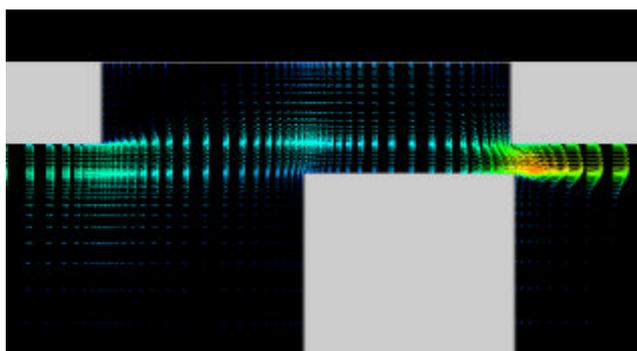


(a) Cavity

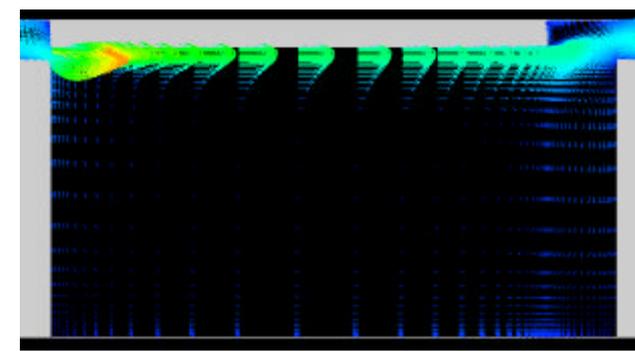


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.5 Velocity Vecotrs (case3)

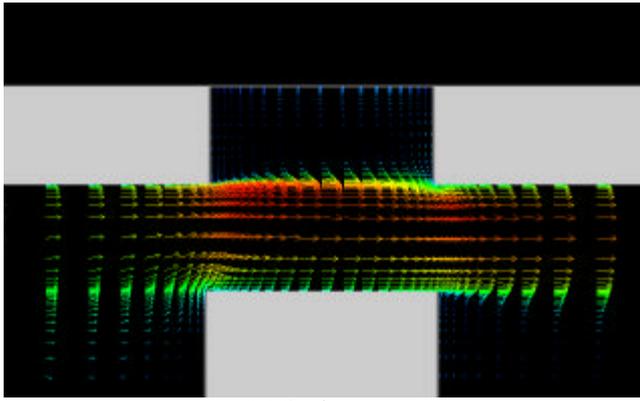


(a) Cavity

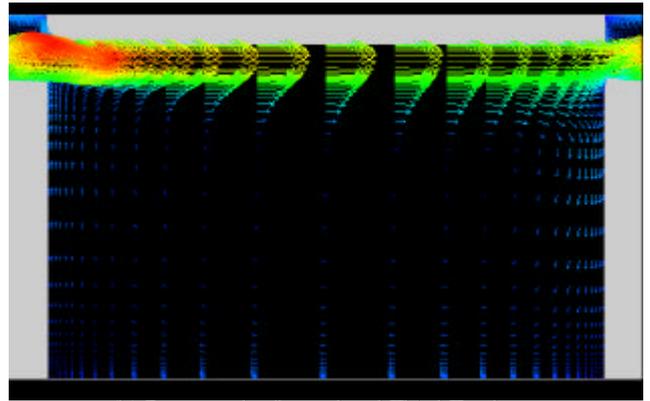


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.6 Velocity Vecotrs (case4)

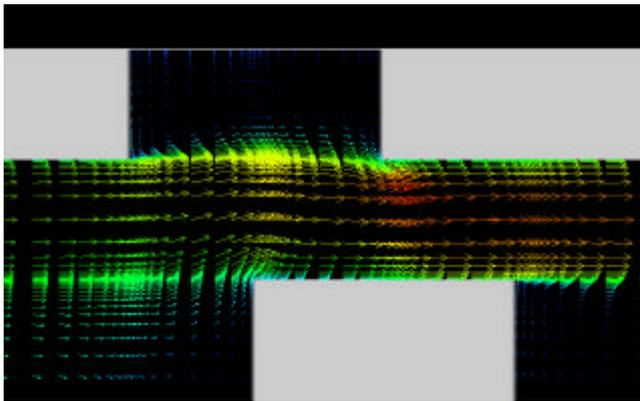


(a) Cavity

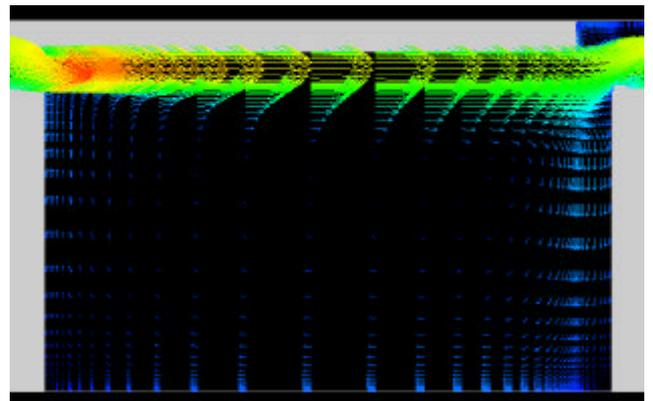


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.7 Velocity Vecotrs (case5)

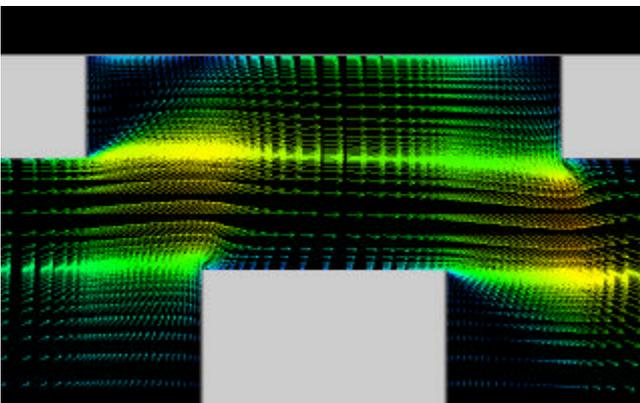


(a) Cavity

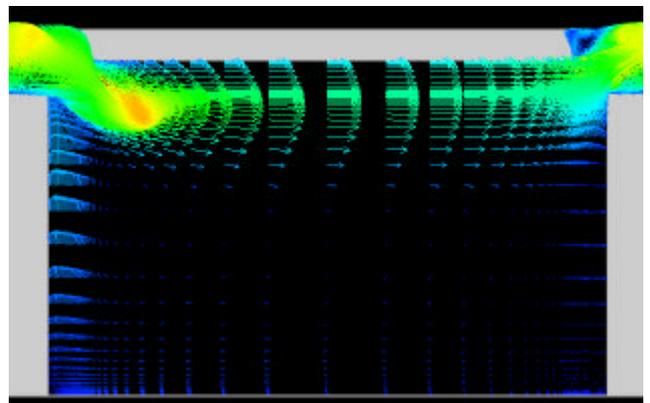


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.8 Velocity Vecotrs (case6)

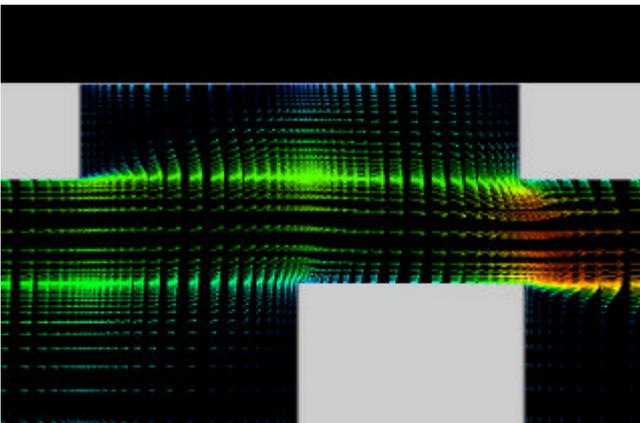


(a) Cavity

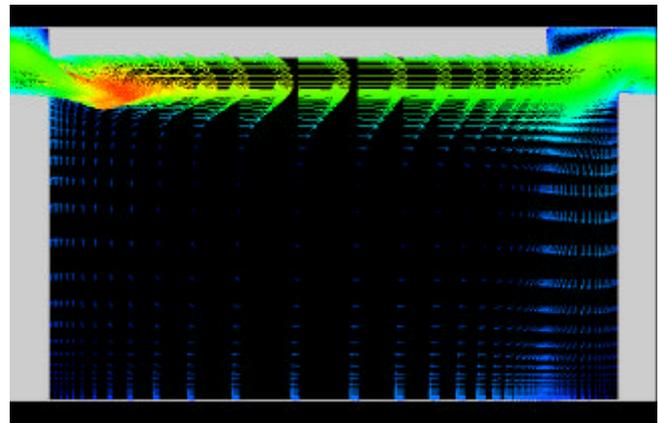


(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.9 Velocity Vecotrs (case7)



(a) Cavity



(b) Between the Second and Third Tooth

Fig.10 Velocity Vecotrs (case8)

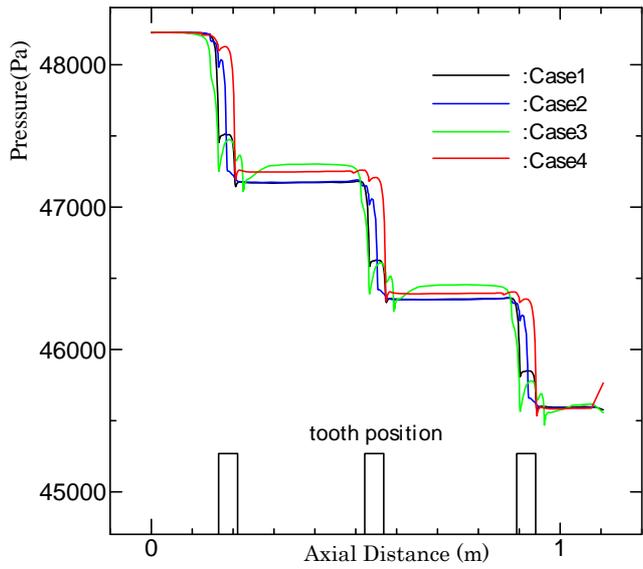


Fig.11 Pressure Distribution (Clearance of 6.35mm)

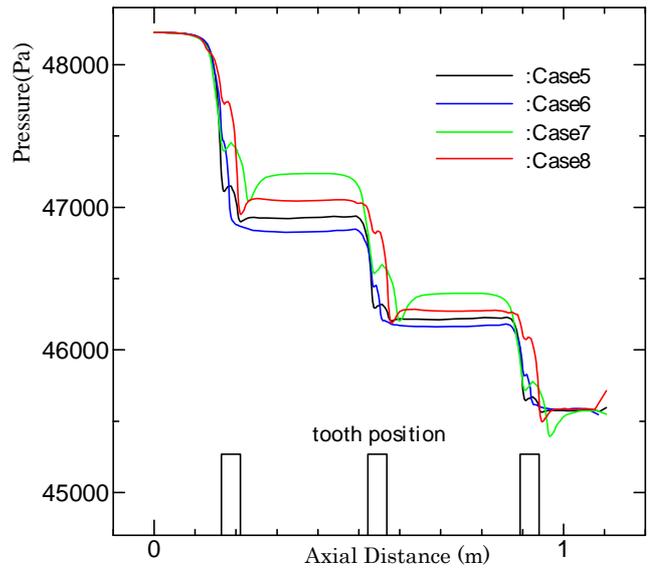


Fig.12 Pressure Distribution (Clearance of 19.1mm)

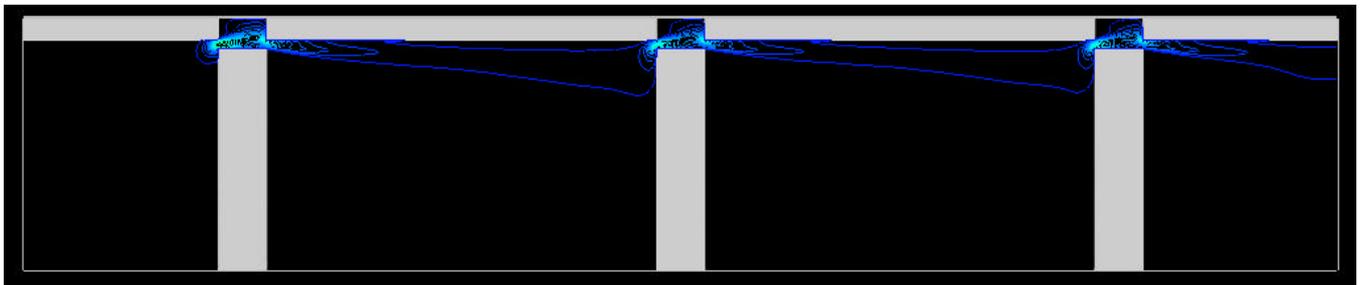


Fig.13 K Distribution (case1)

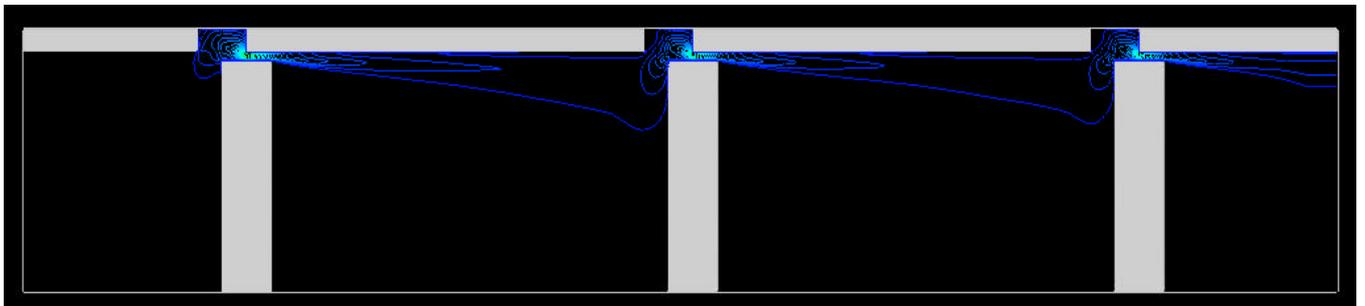


Fig.14 K Distribution (case2)

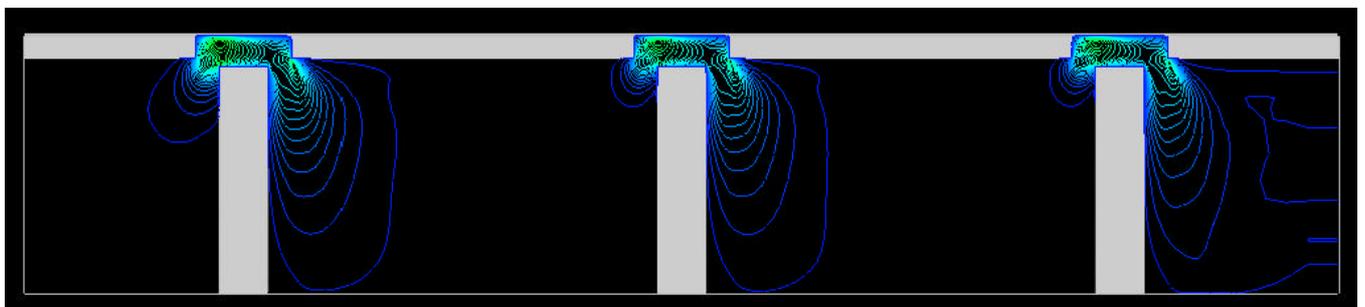


Fig.15 K Distribution (case3)

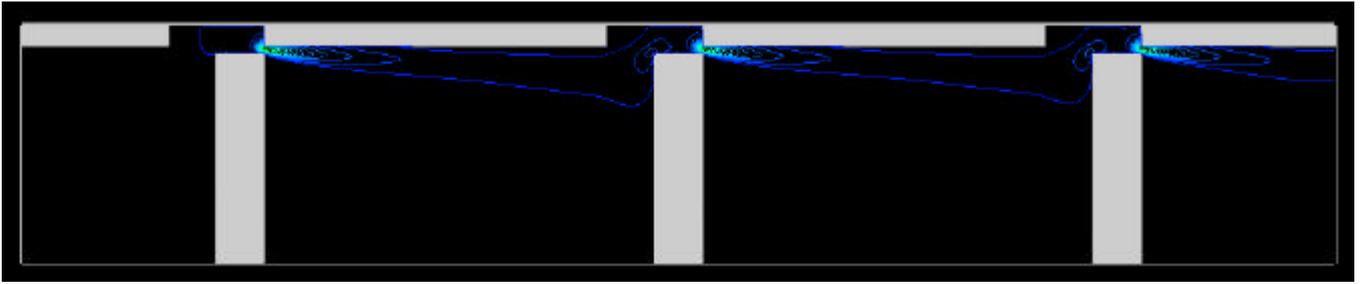


Fig.16 K Distribution (case4)

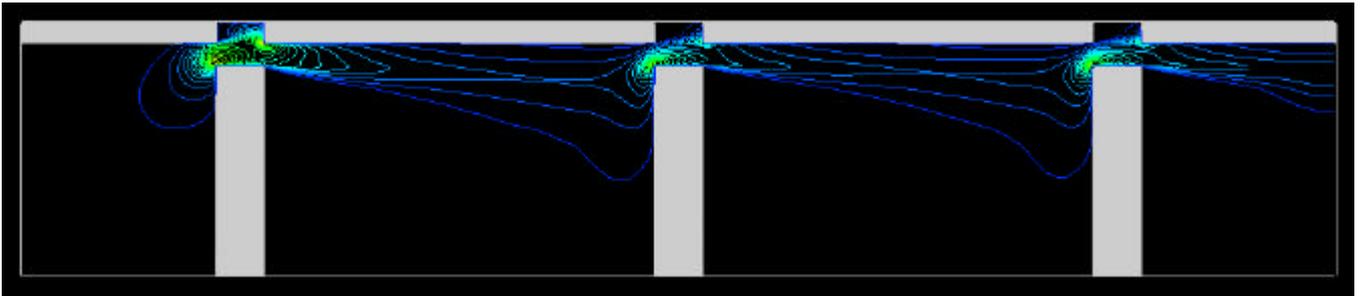


Fig.17 K Distribution (case5)

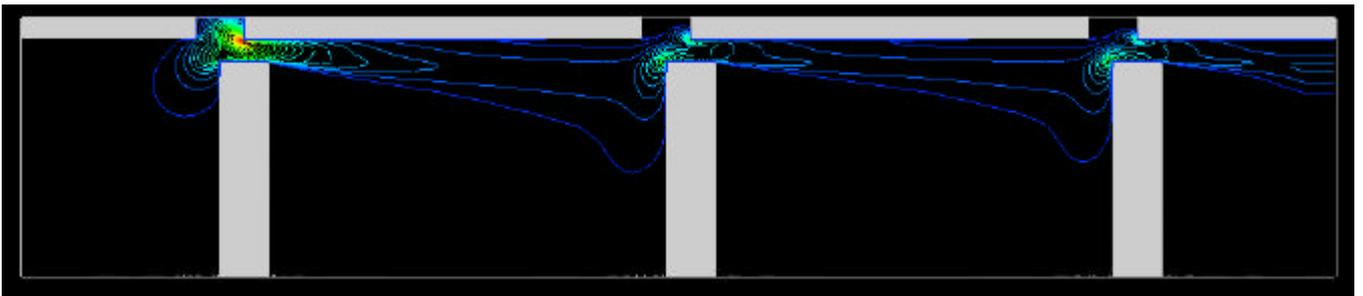


Fig.18 K Distribution (case6)

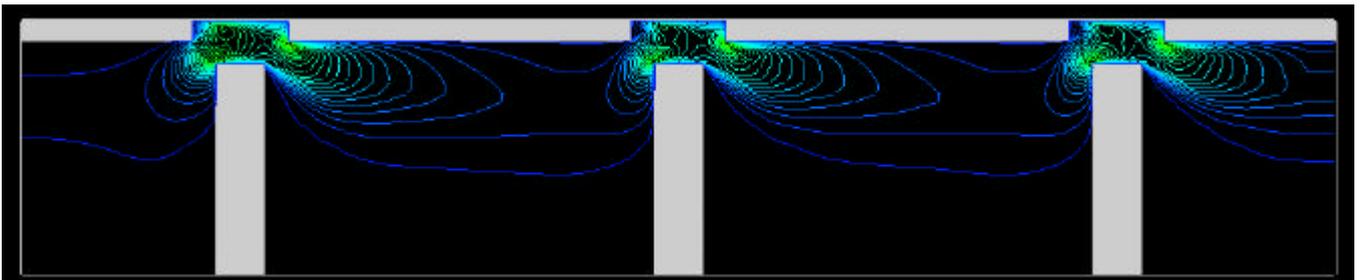


Fig.19 K Distribution (case7)

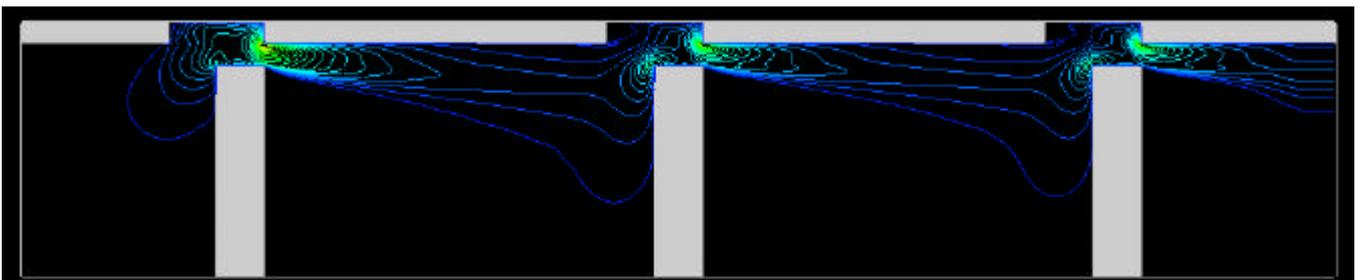


Fig.20 K Distribution (case8)