

## 新生児保育器における流動パターンと温度分布に関する数値解析

### Numerical Studies on Flow Patterns and Temperature Distribution in a Neonatal Incubator.

塩崎孝壽\*, 平原裕行\*

Koujyu SHIOZAKI and Hiroyuki HIRAHARA

An incubator is one of the indispensable instruments for premature baby needed a medical treatment. The increase of low-birthweight neonatal appearance requires the highly efficient incubator, which can control temperature humidity etc. with high precision. We examined the flow and temperature distribution in an incubator with a numerical analysis in order to obtain the fundamental data for developing the more efficient incubator. The boundary dimensions of the incubator are 844mm (L), 413mm (D), and 495.5mm (H), and the bed for putting a neonatal to sleep is installed in the inside. Star CD which is general-purpose heat fluid analysis software was used for analysis. In a analysis of a half-domain, the solution was very stable, and the obtained solution was reliable. However, the result is completely symmetrical, of course, there still remains a problem in arguing about the phenomenon in an incubator as far. On the other hand, the solution of all the domain analyses showed that it was asymmetrical in distribution of temperature and velocity. That solution provided improvement of an incubator with useful information.

**Keywords: Incubator, Computational Fluid Dynamics, Neonatal , Infant ,Life Support, NICU**

#### 1. まえがき

##### 1.1 新生児未熟児医療の背景

保育器とは、環境への適応力が小さい未熟児に対して、適切な環境あるいは胎内と類似の環境を与える医療器具であり、温度、湿度の自動調節と酸素濃度の設定機能を備えたものである。上部は透明な合成樹脂のカバーで覆われ観察が容易で、哺乳、養護、診察、諸処置は四つの窓から手を入れて行うことができ、感染防止効果も考慮されている。Fig.1 に保育器の例を示す。

統計によると、1947年に比べて、現在の年間出生率は半分以下に、合計特殊出生率は 1/3 以下になっている。

る。一方、新生児死亡率は1947年では、新生児1000人中31人であったのに対して2000年では2人弱となっている。この新生児死亡率の低さは世界でもトップレベルで、その要因の大きなものは新生児・未熟児医療の進歩によるものだと言われている。すなわち、新生児に関しては「少産少死」の時代になったが、一方では、低出生体重児が増加しているのも事実である<sup>1)</sup>。新生児の概ね10%は出生時に何らかの支援が必



Fig.1 Incubator

\*埼玉大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science & Engineering, 255  
Shimo-Okubo,Sakuraku,Saitama,  
Saitama,338-8570,Japan

要であり、約 1%は本格的な蘇生が必要であるとのデータがある。このように、生育環境が子宮の中から外界に移るにあたり、多くの新生児が何らかの蘇生措置が必要で、その状態に応じて以下に列挙する処置を順次実施する必要がある。

- A. 容態安定のための初期対応（気道の吸引、体位、刺激）
- B. 換気
- C. 心臓マッサージ
- D. 薬剤投与または容量負荷
- E. 胎内に近い環境での保育

蘇生をさらに進めるかどうかは、3つのバイタルサイン（呼吸、心拍数、皮膚色）を同時に評価することで判断する。蘇生のステップはひとつひとつを確実にこなす必要がある。一つのステップに 30 秒程度を割り振って確実にこなす、その効果を再評価し、次のステップに進むべきかどうかを決める<sup>2)</sup>。

これらの中で、E の処置を実現するために未熟児集中管理治療室（NICU）では保育器が使用され、徹底した温度や湿度の管理、感染予防、さらには放射線や電磁波からの遮断が図られる。新生児はこのような環境の中で、自ら呼吸し、摂食する必要があり、胎内とは異なった環境に晒されることとなる<sup>3)~6)</sup>。このような環境で、新生児は一般に

- 肺でのガス交換の不良。
- 体内での熱産生が少ないうえに、熱喪失が多い。
- 感染に対する抵抗力が弱い。
- 肝臓の働きが不十分。
- 貧血になりやすい。

などの特徴を持っており保育器はそれに配慮された機能を有する必要がある。

## 1.2 保育器における課題と研究目的

以上のように保育器は低体重出産児医療には欠かせないものであるが、近年、益々、対象とする出生体重は減少する傾向にあり、いわゆる超低出生体重児（生体重 1000g 未満）出生率が増加している。これに対応するために、温度湿度などを高精度に制御できる高機能の保育器を必要とされている。我々は高機能保育器

を開発するための基礎データを得ることを目的として、現存している保育器をモデルにした数値解析から、新生児に影響を大きく及ぼす保育器内の流速場と温度場について詳細に検討した。

## 2. 保育器内の流れ解析

解析の対象となる保育器の解析領域全体を Fig.2 に、中央断面を Fig.3 に示す。主要寸法は長さ  $L=844\text{mm}$ 、奥行き  $D=413\text{mm}$ 、高さ  $H=495.5\text{mm}$  であり、内部に

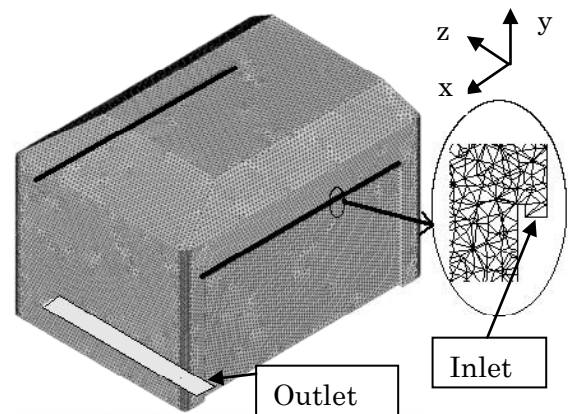


Fig.2 Over view of analysis domain

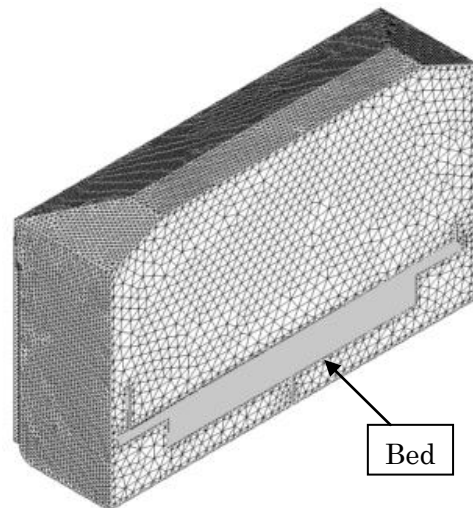


Fig.3 Cross section of analysis domain

乳児を寝かせるためのベッドが設置されている。流れは温度湿度をコントロールされた気体が側面上方に向かって噴出し、下部から流出して温度・湿度の制御部に入る循環経路をとる。解析は保育器の庫内のみとし温度・湿度の制御部は含まれていない。また、実機で

は流体は循環経路をとるが、解析においては温度を調整された気体が入口から一様流速で流入し、出口から自由に流出するとした。

### 2.1 半領域流れ解析

実機の構造が左右対称であることから、初めに対称面を境界とした半領域を計算対象とし温度を考慮しない流れのみの解析を行った。解析の条件はメッシュ 65 万、入り口流速 1.6m/s、乱流・定常であり出口は自由流出である。

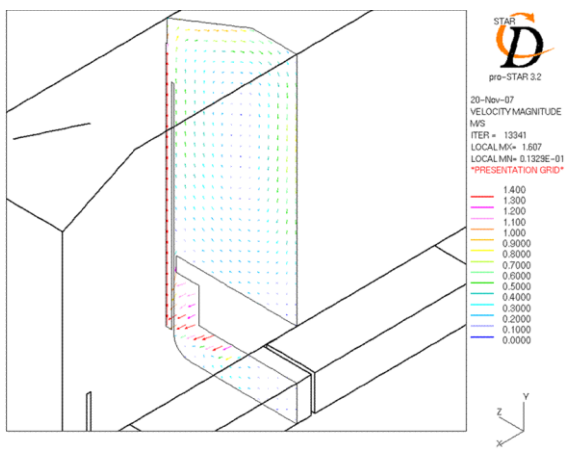


Fig.4 The vector diagram on a y-z section

Fig.4 に y-z 断面上の流速分布を示す。保育器内では安定した回転する流れが見られる。図は省略したが x 方向には壁面近傍を除きほぼ様な結果となった。この結果は、保育器内に発生する、基本的な対称流れを表している。対称流れは必然的に非対称流れへの崩壊していくが、本計算結果は、流入と流出の条件が形成する循環流の程度を表すものとして有用である。

### 2.2 半領域温度解析

流れ解析に引き続き、温度を考慮した解析を行った。それらの条件は、保育器内初期温度 298K、流入気体温度 313K、熱抵抗 0.16Km<sup>2</sup>/W (2重ガラス窓相当)、構成材料の熱容量は 0 である。温度を考慮しない状態での流れの収束解を初期条件として解析を開始した。

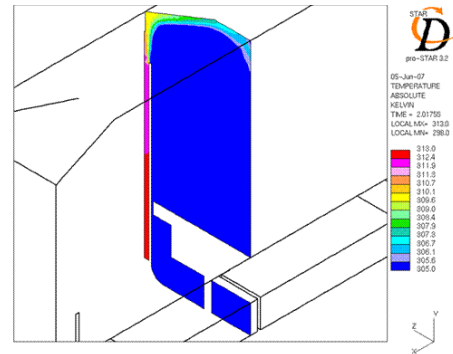


Fig.5 Temperature distribution after 2 sec.

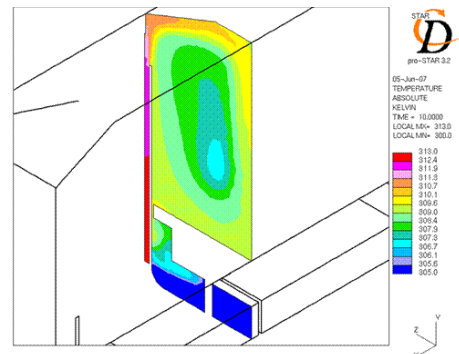


Fig.6 Temperature distribution after 10 sec.

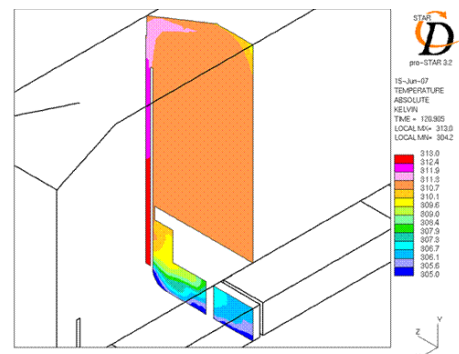


Fig.7 Temperature distribution after 120 sec.

Fig.5～Fig.7 に時間とともに保育器内温度が変化する様子を示す。温度を考慮した解析開始から 2 秒ほどで高温気体が庫内上部に到達し、半領域の中央付近は外周部分に比べて温度上昇が遅れ 10 秒ほどで低温の部分が生成される。さらに時間が経過し、120 秒経過すると保育器内は 1 度程度の範囲内で一定温度となる。x 方向に 1 断面のみ図示したが、解析結果は両端部を除くとほぼ様な温度分布となることが分かった。解析結果は概ね与えた境界条件から予想されるような結

果が得られているが、実機に比べると、比較的早く定常温度に達していると考えられる。これはエアカーテン部（噴出し部）の温度が実機のように徐々に立ち上がるのではなく突然一定温度 313K となったとしたこと、および保育器構造材の熱容量が考慮されていないことが大きな原因と考えられる。したがって熱的な条件についてはさらに改良を加える必要がある。

### 2.3 クーラン数の影響

非定常解析においてクーラン数は重要であり大きな値をとると解析精度が悪くなる、一方小さくすると解析時間が長くなる。この解析は 3 次元でメッシュ数が大きいことから解析時間をなるべく節約しかつ解析精度が悪くならないクーラン数を選ぶ必要がある。

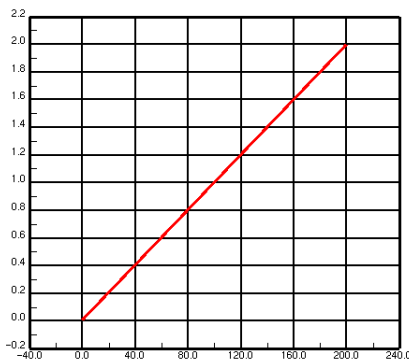


Fig.8 Analysis time vs. time step

Fig.8 に解析における時間経過と時間ステップの関係を示す。解析初期において時間ステップは 0.01 秒であり 200 秒経過後の時間ステップは約 2 秒で、対応するクーラン数はそれぞれ 2, 400 である。前述の温度解析結果はこれを用いたものであるが、クーラン数 ~ 1 としたときの解析とほぼ同様の結果となったことから現在の計算ではクーラン数をある程度大きくとっても安定して計算が実行でき、かつ定常解に近づくことが確認できた。

### 2.4 全領域流れ解析

半領域解析の結果と考察をもとにして、解析領域を全領域に拡張した。解析条件は解析領域が 2 倍になっ

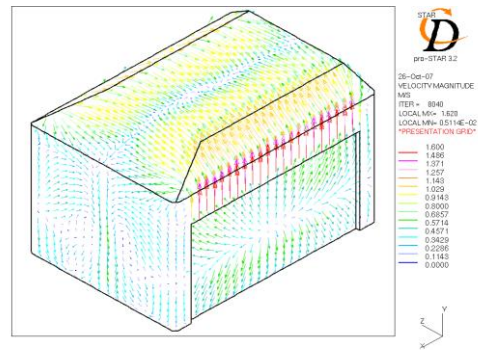


Fig.9 The 3-dimensional vector on the surface of a wall

たことからメッシュ数も 2 倍の 130 万となった以外は半領域の解析と同様である。Fig. 9 に、全体的な流れの様子を見るための壁面上 3 次元ベクトルを示した。結果は大きく見て幾何形状は対称であるにもかかわらず、非常に非対称性の強い流れとなっている。実機では当然非対称な流れが予想されるが数値解析においても非対称な結果となった。

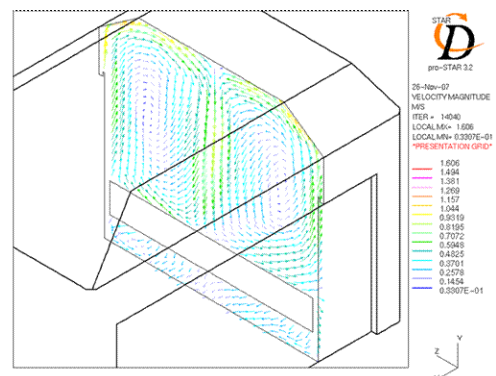


Fig.10 The vector diagram on a y-z section  $x/L=0.237$

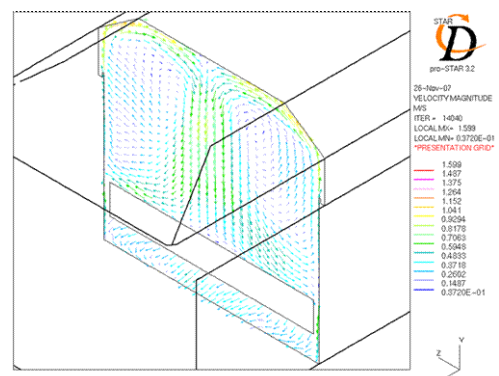


Fig.11 The vector diagram on a y-z section  $x/L=0.474$

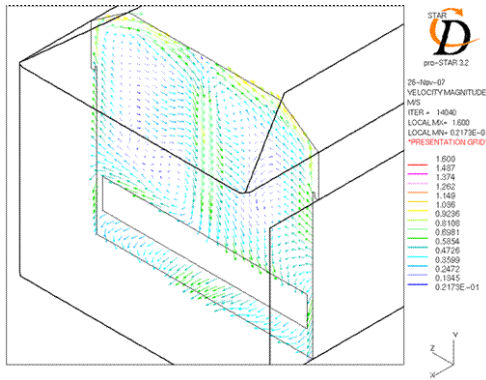


Fig.12 The vector diagram on a y-z section  $x/L=0.711$

y-z 断面上の流速分布を Fig.10～Fig.12 に示す。解析結果は保育器内流れは x 軸方向に一定ではなく、断面毎に流れ場は大きく異なり全体図でも示したように強い 3 次元性を示している。

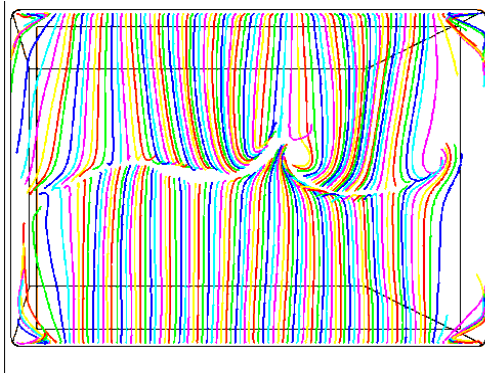


Fig.13 The top view of streak line

Fig.13 にエアカーテン部から吹き出した空気の 0～0.55 秒間の保育器上方から見た流跡線を示す。概ね 0.55 秒で流れは中央付近に到達し、合流した後、下方に向かうが、その位置は中心線上には無いことを示している。流跡線の描画条件は、開始位置、 $x/L=0.012 \sim 0.925$ ,  $z/D=0.012, 0.988$ ,  $y/H=0.706$ , プロット数は両側に 100, 描画時間 0～0.55 秒である。

Fig.14 は向かって右側から流入した気体の流跡線である。ここでは庫内で循環することなく反対側下部を通り出口（温度湿度制御部）へと向かう流体の存在を示している。従ってこのような流れが起こるとエアカーテンから庫内に流入した気体はその温度湿度を調整すること無しに流出し、保育器にとって好ましくない流れとなる。このような流れが起こることを防ぐためには庫内でできるだけ対称な流れ場が生成されるよ

うに上部に流れの安定板を設置することが有効と考えられるが、乳児の邪魔にならない工夫などが必要であり今後の課題である。

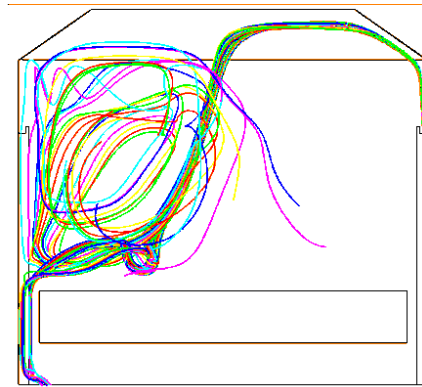


Fig.14 Gas which flowed in from right-hand side streak line

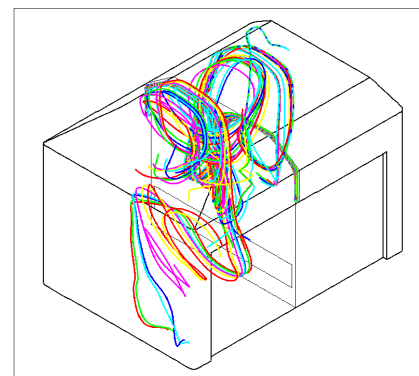


Fig.15 Three-dimensional streak line

Fig.15 にほぼ x 軸方向中央部から流入する気体の流跡線を 3 次的に示す。流れは非常に複雑な経路を辿り保育器出口（温度・湿度制御部入り口）に向かっている。流跡線の描画条件は、開始位置、 $x/L=0.474$ ,  $z/D=0.002 \sim 0.022$ ,  $y/H=0.706$ , プロット数 20, 描画時間 0～5 秒である。

## 2.5 全領域温度解析

Fig.16～Fig.18 に 298K の保育器内に、313K の気体が吹き出しを開始してから 10 秒後の温度分布を示す。温度解析の初期状態の流れ場は、速度のみの流れ解析結果を初期条件として用いている。結果は流れのみの解析からも予想されるように幾何学的対称面に対して温度分布は対称ではなく、また、x 軸方向にも非一様であり、強い 3 次元性を有している。



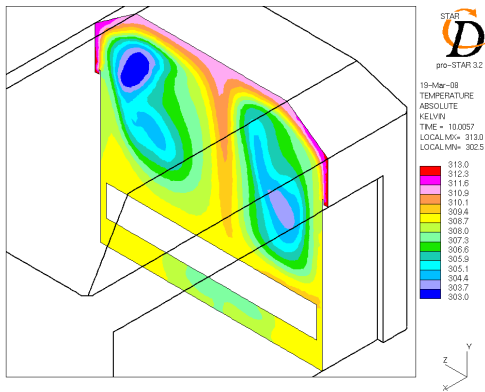


Fig. 16 The temperature distribution.  
x/L= 0.237

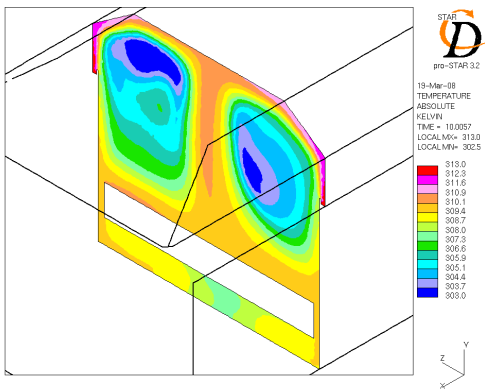


Fig. 17 The temperature distribution.  
x/L=0.474

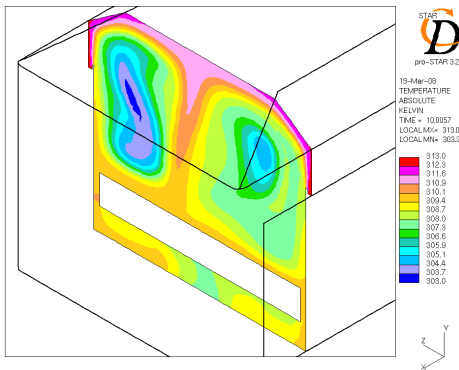


Fig.18 The temperature distribution.  
x/L=0.711

### 3. 考察とまとめ

保育器内の流れ場および温度場についてそれぞれ対称面の片側（半領域）および器内全体(全領域)の解析を行った。解析には汎用熱流体解析ソフト STAR-CD を用いた。その結果、以下の結論が得られた。

1. 半領域の解析においては、安定した循環流が得られた。この流れは、供給気体と排気との循環量によって形成される保育器内の基本的な流れのパターン、いわゆる渦領域とその強さを示すものである。

2. 全領域を対象とした解析では、流れ場は対称とはならず非対称な解が得られた。保育器内は噴流速度と保育器全体の容量から3次元的な乱流を形成しているものと考えられる。新生児の管理にはこれは良い影響とは言えず流れの安定化が必要となる。流れを安定させ、かつ、温度場を安定させるためには、速度場を安定させる翼、またはガイドベーンなどを設置することも有効であると考えられる。

### 文 献

- 1) 厚生労働省人口動態統計など
- 2) 愛媛大学救急医学教室災害医学・抄読会  
心肺蘇生と緊急心血管治療のための科学と治療の推奨  
に関わる国際コンセンサス 2005 第7部：新生児の蘇生
- 3) 特許広報 特開 2002-153523 保育器 九州白水
- 4) 特許広報 特開 2007-89829 保育器フード用カバー
- 5) 特許広報 特開 2005-334109(P2005-334109A)  
新生児保育器
- 6) 特許広報 特開 2001-190606(P2001-190606A)  
保育器の運転法