

最適スペーサ形状探索に向けたスーパーコンピューティング

高瀬 和之*

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 研究主席

1. はじめに

超臨界圧水冷却炉[1] (Supercritical Water-Cooled Reactor, SCWR) の炉心熱設計では、燃料被覆管材料の健全性及び信頼性の観点から被覆管表面最高温度は 700 に制限される。一方、原子炉の熱効率を向上させるためには炉心出口冷却材温度を高く設定する必要がある。その結果、燃料被覆管表面温度が上昇し、部分的に 700 の温度上限を超えることが懸念されていた。そこで、スペーサによる伝熱促進効果に着目し、サブチャンネル内の乱流熱伝達率を向上させることで燃料被覆管表面の温度上昇の抑制を図った。このような伝熱促進の手法は、現行軽水炉、特に加圧水型水冷却炉ではポピュラーであるが、SCWR に対しても有効であることを確認するため、本研究を開始した[2]。乱流熱伝達率の向上には、加熱面近傍に乱れを継続的に発生させることが要求される。このような乱れの発生はスペーサの形状に大きく依存することから、設計で想定する炉心出口冷却材温度を達成できる最適なスペーサ形状が必要である。

最適形状の探索は数値流体力学の得意とするところであり、複雑な 3 次元形状を有するスペーサに対してもスーパーコンピュータを使うことで高解像度の計算が可能になり、形状に依存する伝熱特性の評価が可能になる。SCWR の設計[3,4] では、炉心入口 / 出口冷却材温度 280 ~ 550 、冷却材圧力 25MPa であり、特に超高压であるため、実験的な検討が容易ではないことから数値流体力学に基づく数値実験が有効である。本研究では、最適スペーサ形状探索のための研究の一環として実施した数値実験の結果について紹介する。

2. 超臨界流体

超臨界流体は、圧力が臨界圧力よりも高く、液体でも気体でもない状態である。物性値は図 1 に示すように、任意の温度の近傍で急峻な密度変化を示す領域が存在し、その領域で流体の定圧比熱は極大値を示す。ここで、定圧比熱が極大値を示す温度は擬臨界温度と呼ばれ、この温度は圧力に依存して変化する。これまでの実験から、擬臨界温度近傍における物性値変化の影響で超臨界流体は特異な伝熱特性を示すことが知られている。例えば、円管内を上昇する流れに対し、高熱流束の条件では熱伝達率が低下することが報告されている[5]。これまでの超臨界流体伝熱実験に基づいて複数の熱伝達率相関式が提案され、これらの式を基に超臨界火力発電プラント等の設計が行われてきた。SCWR の設計でも、擬臨界温度 (水の場合は圧力 25 MPa で 385) を含む広範な温度条件に対して炉心の熱工学的成立性を調べるために基礎的な実験が行われてきた。一方、超臨界流体は超高压であるため、コストや安全性の面から容易には実験できないことから、超臨界流体の挙動を数値的に予測する解析コードの開発も行われている。

3. 数値解析

3.1. 数値解法

本研究では、スペーサを有する SCWR 燃料集合体内サブチャンネルを簡略模擬した体系で 3 次元解析を行い、スペーサによって促進される伝熱挙動を数値的に調べた。解析には汎用流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red[6]を使用した。ここで、支配方程式は連続の式、非定常圧縮性 Navie-Stokes 方程式及びエネルギー式、解法は時間積分はオイラー陰解法、移流項の離散化は 1 次精度風上差分、圧力補正は SIMPLE 法、行列式の解法は BiCGStab 法及び ICCG 法を用いた。

*現在 国立大学法人長岡技術科学大学大学院教授

また、超臨界流体の乱流挙動を予測する乱流モデルについては、これまでの超臨界流体の解析で高い予測精度が報告されている SST $k-\omega$ モデル[7]を採用した。作動流体である超臨界水の熱物性値評価には汎用プログラム・パッケージ PROPATH[8]を用いた。

3.2. 解析条件

解析は、図 2 に示すように直径 7 mm の燃料棒 4 本に囲まれた全長 600 mm のサブチャンネル内に格子状をしたスペーサが存在する体系で行った。各燃料棒はスペーサで区切られる格子の内部に配置される。ここで隣り合う燃料棒との間隔は 1 mm である。

本研究では、サブチャンネル内に乱れを積極的に発生させるため、図 3 に示すような羽根状をしたペーンをスペーサ後端部に設けた。ここで、流れ方向に対するペーンの傾き角度をパラメータとし、ペーンがない条件 (Case1) とスペーサ後端に取り付けた 1 対のペーンが 15° (Case2) 及び 30° (Case3) の傾き角度を有する条件の計 3 種類のスペーサ形状に対して解析を行った。計算格子は、流れ方向は構造格子、水平断面方向は非構造格子を採用し、固体表面近傍には境界層格子を設けた。Case1 ~ Case3 の格子数は 494 万 ~ 522 万格子である。

解析条件は、流路入口平均流速 3 m/s、燃料棒表面熱流束 560 kW/m^2 、流路入口における超臨界圧水の圧力 25 MPa と温度 360 、スペーサ及び燃料被覆管の材質はステンレスである。解析では燃料被覆管及びスペーサ材料の熱伝導を考慮した。また、燃料棒表面熱流束は燃料被覆管内面与えた。

4. 解析結果と考察

スペーサにペーンがない場合とある場合の水平断面内流速分布を図 4 に示す。ここで、(a) はペーンがない Case1 の場合、(b) はペーンの傾き角度が 15° である Case2 の場合、(c) は同様に 30° である Case3 の場合の各結果である。ペーンがない場合にはスペーサの格子位置の後流で流速が停

滞し、格子位置以外の領域では流速が加速する傾向が見られる。流速分布には対称性があり、流速の変化は水平断面内ではほぼ均一である。一方、ペーンがある場合には流速の変化は不均一であり、傾き角度に依存して流速変化の不均一性は増大する傾向にある。また、図中に示す Z はスペーサ後端からの流れ方向距離を表し、Case2 や Case3 では Case1 の結果に比べて非均一性の影響が後流まで達していることが分かる。

図 5 に、スペーサにペーンがない場合とある場合の水平断面内流体温度分布を示す。流体温度の変化は、ペーンがない場合はサブチャンネル中央の領域に見られるが、ペーンがある場合には変化の領域は拡大しており、その傾向はスペーサ後流に継続して見られる。

図 6 にスペーサ周りの流線の分布を示す。見やすいように図中にスペーサは表示していない。ペーンがない場合には流れは一様に後方に達するが、ペーンがある場合にはスペーサの後流で流れが旋回しており、強い乱れが発生していることが分かる。

図 7 はスペーサ後流の流体温度分布を 3 次元表示した結果である。図 6 で述べたように、ペーンがある場合にはスペーサ後流に強い乱れが発生し、それによって流体温度の混合が促進される。この傾向は Case2 よりも Case3 の場合に顕著であり、ペーンの傾き角度に依存している。

スペーサにペーンがない場合の流れ方向の流速分布を図 8 に示す。ここで、縦軸は入口流速 3 m/s で除した無次元流速、横軸はスペーサ中央部を原点とし、流れに垂直な断面方向の距離を表す。図中に示す各ラインは、スペーサ後端から流れ方向に -25 mm、1 mm、5 mm、25 mm、100 mm、200 mm 及び 400 mm の位置における流速の分布であり、各距離の符号は正の場合はスペーサ後端から下流、負の場合は同様に上流を示す。スペーサ後端から 1 mm 下流の位置で流速分布に大きな乱れが見られるが、25 mm 下流までにはほぼ回復する。同様に、図 9 はスペーサに傾き角度 30° のペーンがある場合の流れ方向の流速分布である。図 8 に比べてスペーサ後端からの距離が 1 mm と

5mm の場合を除き、流速分布は一様になる傾向が見られる。ベーンによって流れが攪拌されたことで流速分布の均一化が促進されたと考えられる。

図 10 はスーサに設置したベーンの傾き角度 30°の場合の流れ方向の流体温度分布を示す。ここで、縦軸は入口流体温度 360 で除した無次元温度、横軸は図 9 と同様にスーサ中央部からの流れに垂直な断面方向の距離を表す。図 9 に示す流速分布に対応し、流速が高いところでは冷却が促進されるため流体温度は低い値を示し、逆に流速が低い場合には流体温度は高くなる。また、ベーンの効果によってスーサ後端から 100mm 程度下流までの範囲では流路水平断面内の流体温度分布に均一化の傾向が見られる。例えば、スーサ後端から 25 mm 下流の領域では横軸が - 3 mm ~ + 3 mm の範囲にわたって流体温度はほぼ一様である。

図 11 に流れ方向の平均熱伝達率分布を示す。ここで、横軸 0 はスーサの下端位置を表し、負の符号は上流側、正の符号は下流側を示す。また、縦軸に示す平均熱伝達率 α は次式から算出した。

$$\alpha_x = \frac{q}{\overline{T}_{w_x} - \overline{T}_{b_x}} \quad (1)$$

ここで、 q は燃料棒表面熱流束、 T_w は燃料棒壁面温度、 T_b は流体温度、添字 x は流れ方向の任意位置、 T_w 及び T_b の上部に示すバーは水平断面内平均値を示す。図には燃料棒表面熱流束が 280 及び 560 kW/m² でベーンがない場合と 560 kW/m² でベーンの傾き角度が 30°の場合の計 3 ケースの結果を示す。横軸に示すようにスーサが設置されている領域では各ケースともに高い熱伝達率 (1st peak) を示す。また、スーサ後流直後で熱伝達率の高い領域 (2nd peak) が見られるが、これはスーサ後端で剥離した流れが燃料棒表面に再付着することによって伝熱が促進されるからである。一方、スーサの後流では、ベーンがない場合には 2nd peak の値から熱伝達率は次第に低下する傾向が見られるが、ベーンがある場合には 2nd peak から熱伝達率は低下するものの、その

後はわずかに上昇する傾向が見られ、ベーンによる伝熱促進が有効に寄与したことが理解できる。式(1)から q が大きいほど熱伝達率は大きな値になるが、これに関しても図に示すように q が 560 kW/m² の結果は 280 kW/m² の結果よりも熱伝達率が上昇しており、式(1)を満足することが確認できる。

5. まとめ

本研究によって、超臨界圧水冷却炉の被覆管表面最高温度を減少させる手段として、ベーン付きスーサが有効であることを数値的に確認するとともに、スーサの最適形状探索にスーパーコンピューティングが有効であることを示した。

単相流の分野では直接解析手法や Advance/FrontFlow/red のようなパワフルコードを使って、本報に示すような最適形状探索のための数値実験を実施できることは分かっているが、超臨界流体のように物性値が温度や圧力によって過渡的に変化する条件、相変化を伴う二相流、固気液が複雑にコンバインドされた混相流など、工学上課題となる現象は単相流のように単純ではなく、実験も容易ではない場合が多く、このような複雑な物理現象に対しても高解像度の数値実験が実現できるように解析手法の開発や解析機能の拡張が要求される。特に、原子炉では、安全性向上を図る研究の一環として、現行軽水炉や将来型炉を計算機上に再現する数値原子炉の研究が米国[9]や EU[10,11]で実施され、日本でも発電用原子炉の安全対策高度化事業の一環としてモデリング&シミュレーション技術の高度化[12]を目指した検討が行われた経緯があり、このような大規模体系の高速計算に対応できるスーパーコンピューティング技術が確立されることを期待する。

参考文献

- [1] Y. Oka, et al., Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors, Springer, (2014).
- [2] K. Takase, et al., Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement by Spacers in

Subchannels at Supercritical Pressure Condition, Proceedings of 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2013) ICJWSF-2013-1216, Nagoya, Japan, (2013).

- [3] 東芝, 他, , 革新的実用原子力技術開発費補助事業 平成 23 年度成果報告書 GIF の国際協力による超臨界圧水冷却炉(SCWR) の開発(フェーズ 1), (2012).
- [4] M. Ruzickova, et al., Thermal-Hydraulics and Safety, GIF-INPRO Meeting, March 4-5, (2015).
- [5] J.I. Lee, et al., Deteriorated turbulent heat transfer (DTHT) of gas up-flow in a circular tube: Experimental data, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.51, Issues 13-14, pp.3259-3266(2008).
- [6] 杉中隆史, 他, 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red の使い方, アドバンスソフト, (2011).
- [7] F. R. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA J., Vol.32, No.8,1598-1605(1994).
- [8] 九州大学情報基盤研究開発センター, 流体の熱物性値プログラム・パッケージ PROPATH, <https://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/system/library/PROPATH/PROPATH.html>.
- [9] CASL (The Consortium for Advanced Simulation of LWRs) Project, <http://www.casl.gov/>.
- [10] <http://www.nuresafe.eu/>, NURESAFE (NUclear REactor SAFETY simulation platform) Project.
- [11] <http://www.nuresim.com/www/nurisp/index.php?art=24>, NURISP (NUclear Reactor Integrated Simulation Project).
- [12] 三菱総研、平成 24 年度発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(モデリング・シミュレーションの高度化) 成果報告書、平成 24 年 3 月。

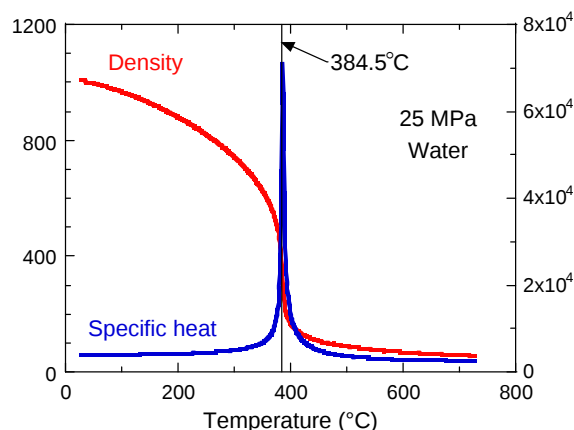


図 1 超臨界水の密度と定圧比熱の温度依存性

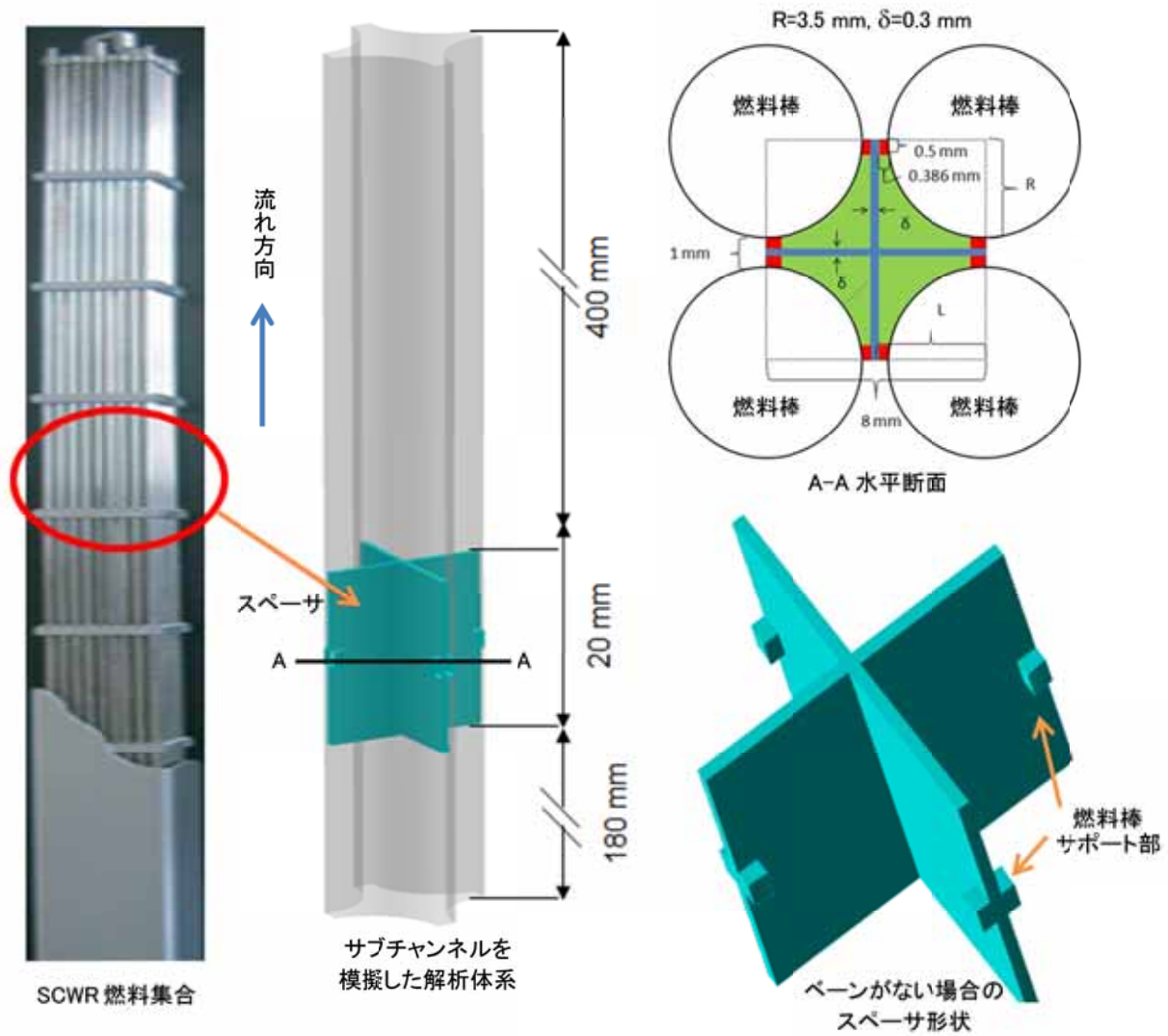


図 2 解析体系とスパーサ形状

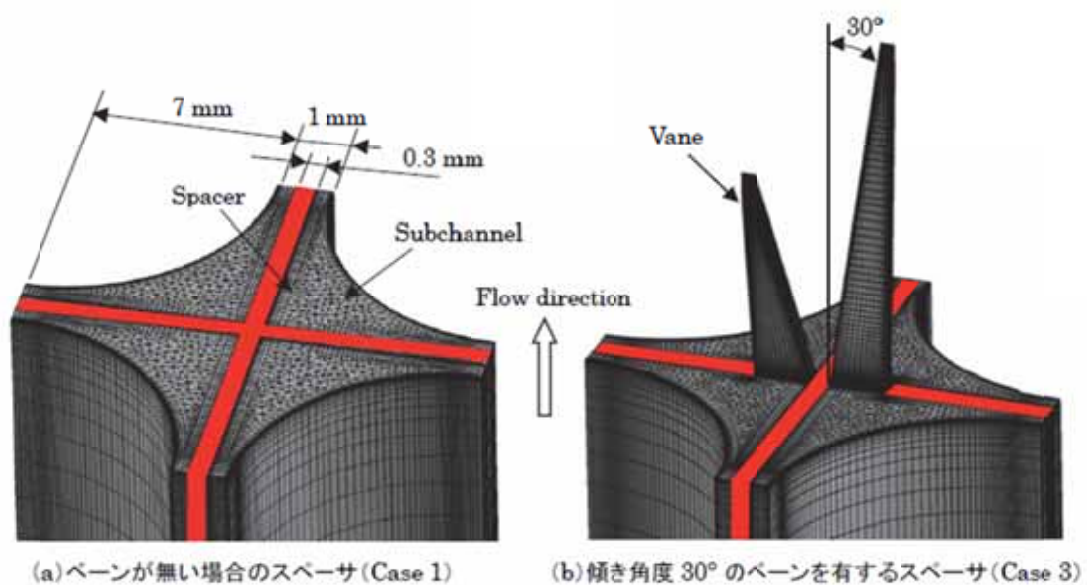


図 3 スパーサ後端に取り付けたベーンの形状及び計算格子

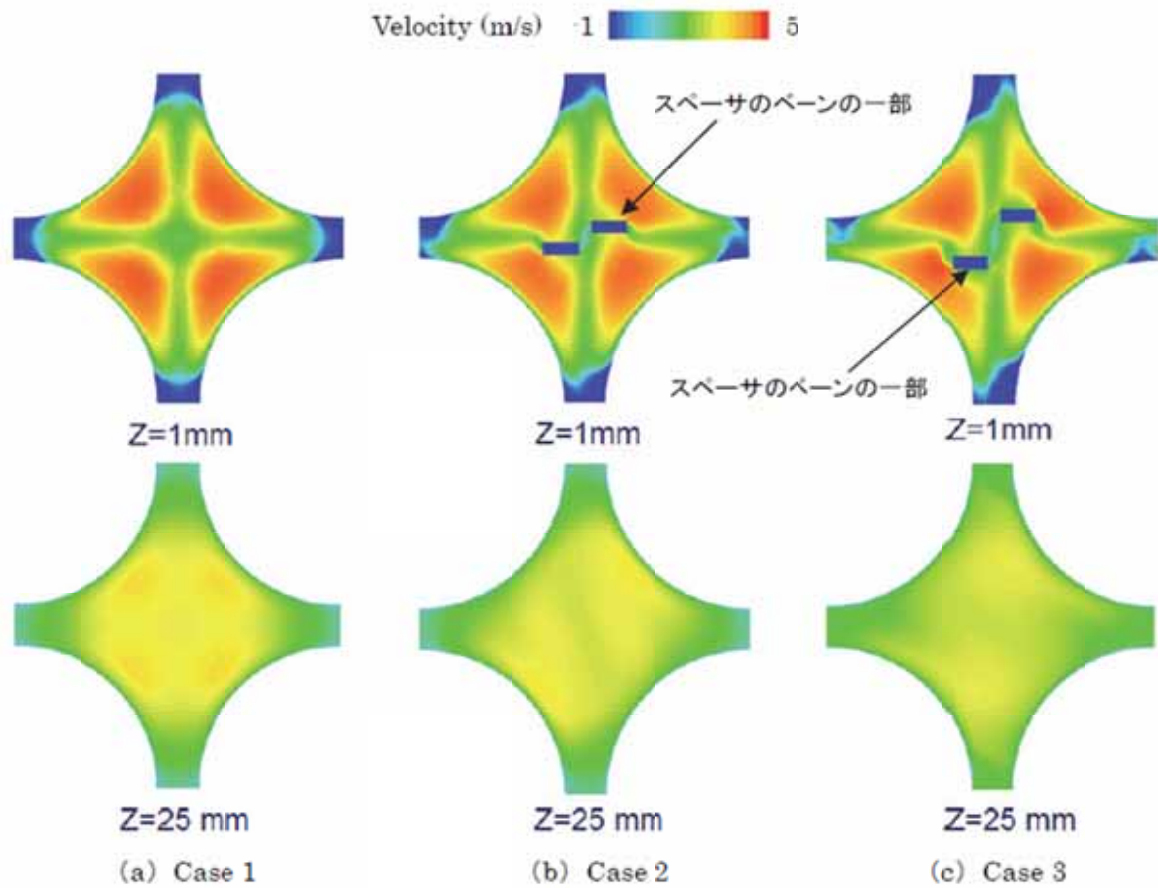


図 4 ベーンがない場合とある場合の水平断面内流速分布

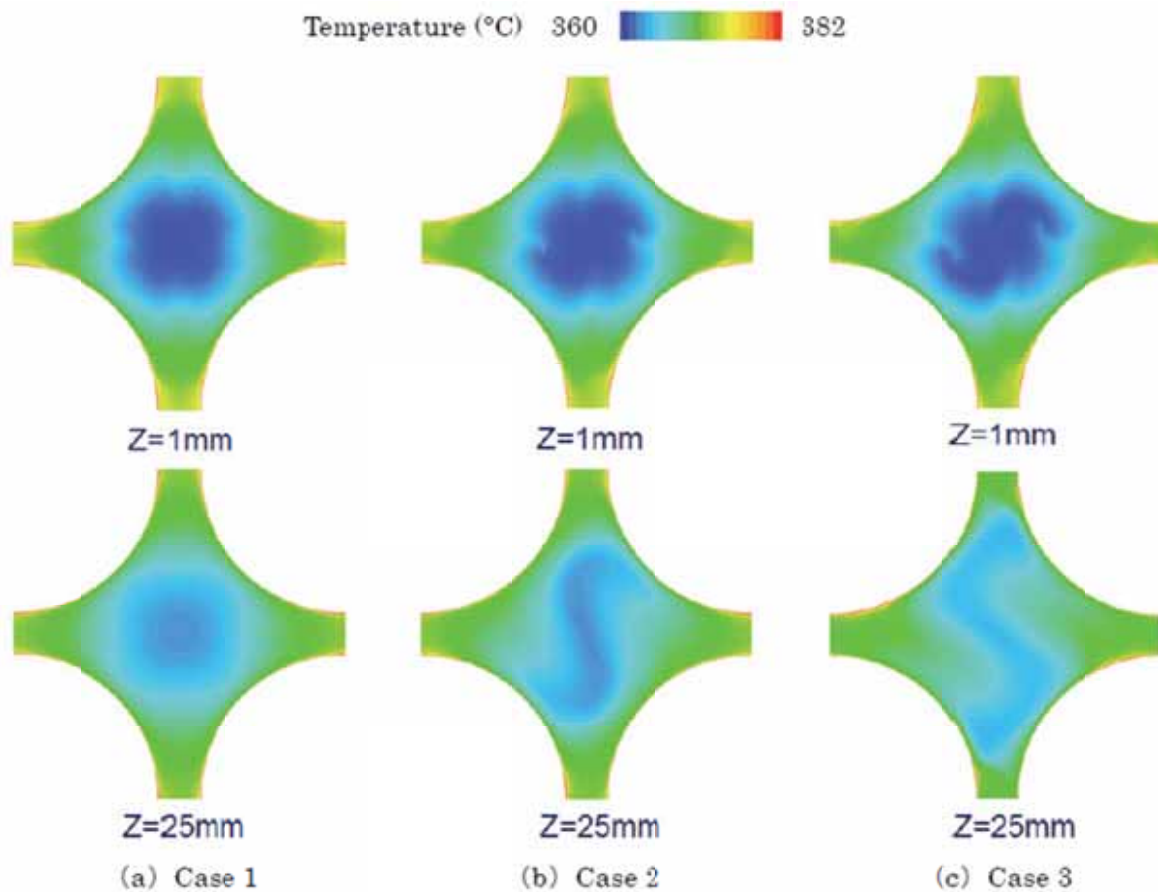


図 5 ベーンがない場合とある場合の水平断面内流体温度分布

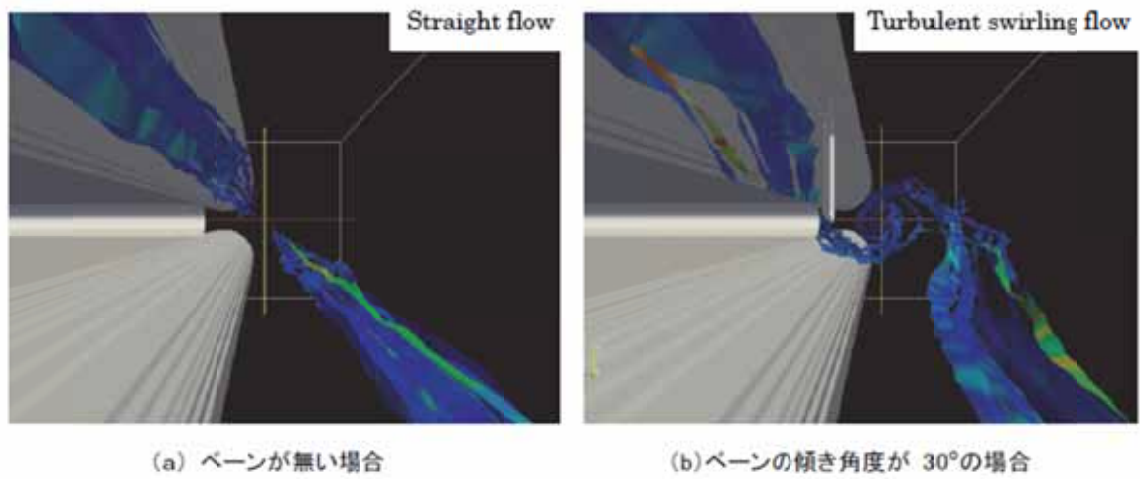


図 6 ベーンがない場合とある場合の流線の比較

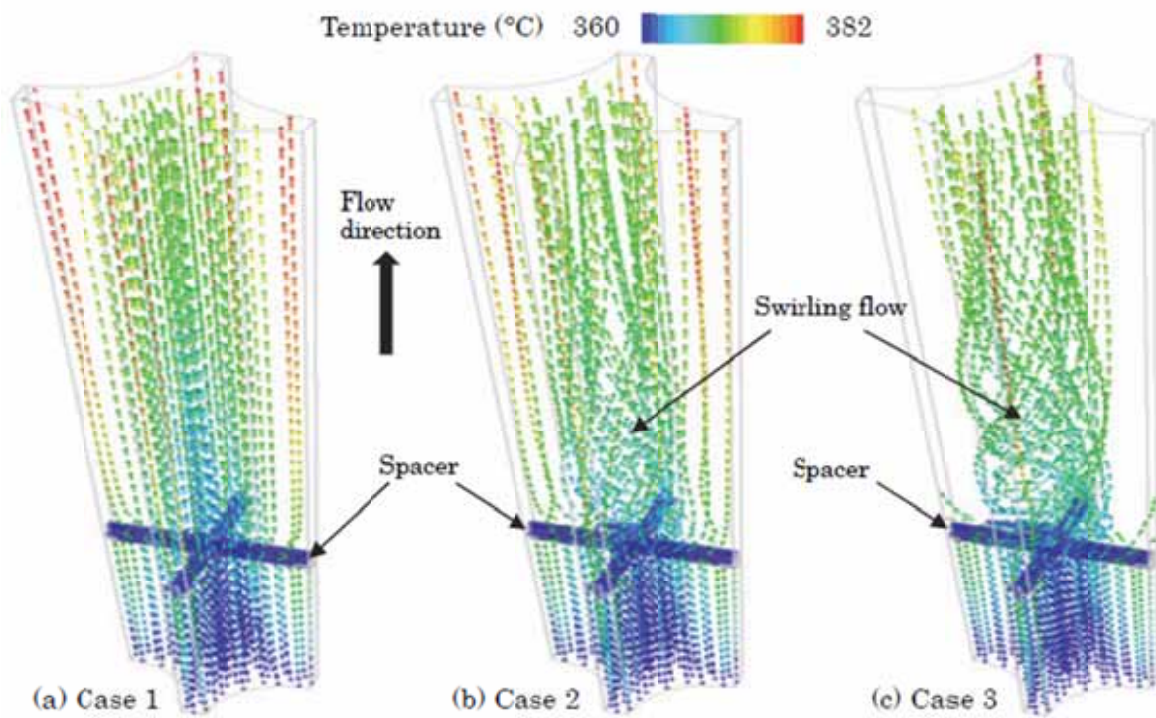


図 7 スペース後流に見られるベーンによる温度混合の促進

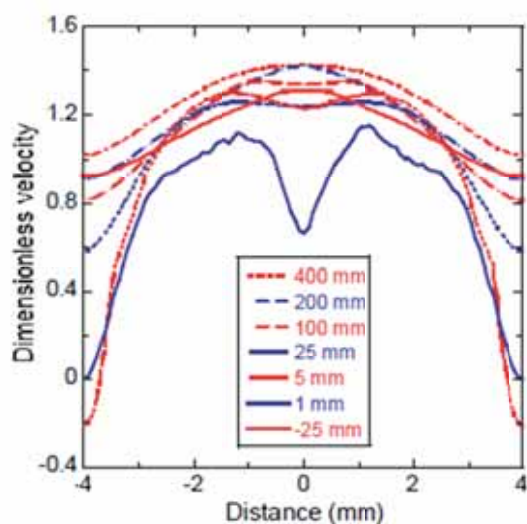


図 8 流れ方向無次元流速分布 (Case 1)

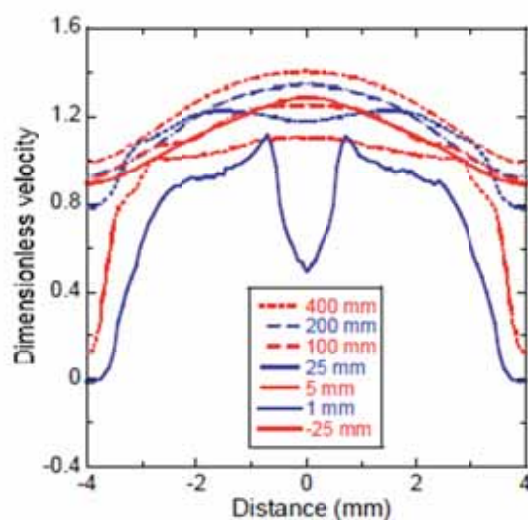


図 9 流れ方向無次元流速分布 (Case 3)

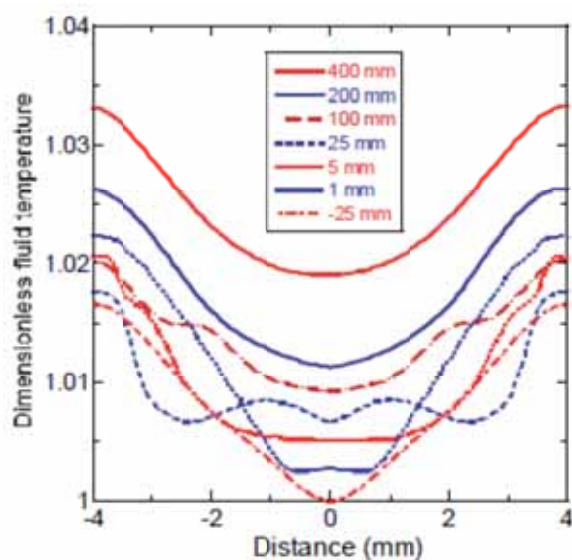


図 10 流れ方向無次元流体温度分布 (Case 3)

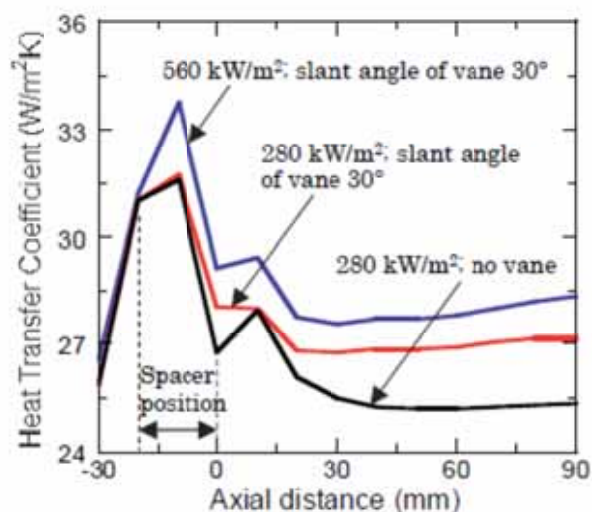


図 11 流れ方向の平均熱伝達率分布

技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)