

擾乱を含む気流の進入に伴う鋼管流助走域の RANS 解析における

Kato-Launder 補正の効用

Effectiveness of Kato-Launder correction on RANS simulation for entrance section of pipe flow with turbulence inflow

- 服部康男, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, yhattori@criepi.denken.or.jp
- 長谷部憂磨, DCC, 東京都千代田区神田錦町 1-16-1, hasebe@dcc.co.jp
- 須藤仁, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, suto@criepi.denken.or.jp
- 中尾圭佑, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, nakao@criepi.denken.or.jp
- 石原修二, DCC, 東京都千代田区神田錦町 1-16-1, ishihara@dcc.co.jp
- 平口博丸, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, yhattori@criepi.denken.or.jp
- Yasuo HATTORI, CRIEPI, 1646 Abiko Abiko-shi Chiba-ken JAPAN
- Yuma HASEBE, DCC, 1-16-1 Kandanishiki-machi Chiyoda-ku Tokyo-to JAPAN
- Hitoshi SUTO, CRIEPI, 1646 Abiko Abiko-shi Chiba-ken JAPAN
- Keisuke NAKAO, CRIEPI, 1646 Abiko Abiko-shi Chiba-ken JAPAN
- Shuji ISHIHARA, DCC, 1-16-1 Kandanishiki-machi Chiyoda-ku Tokyo-to JAPAN
- Hiramaru HIRAKUCHI, CRIEPI, 1646 Abiko Abiko-shi Chiba-ken JAPAN

Aiming to develop evaluation methods for estimating deposition distributions of sea salt particles on a surface in a steel pipe, we have performed numerical simulations for air flow approaching the inside of a pipe by using a low Re type turbulence model, Launder-Sharma model. The special attention was paid to the effectiveness of the Kato-Launder correlation under inflow conditions with large changes in wind speeds and directions, which mimics atmospheric turbulence. The suppression of turbulence generation with the Kato-Launder correlation for impinging and swirl flows at the pipe inlet yielded the reproduction of transition to turbulence of boundary layer along a pipe surface and also the spatial distribution of eddy viscosity in the circumferential direction appropriately

1. 緒言

屋外に設置された鋼管内部への気流の侵入過程に対する知見は、構造物の腐食性状評価などに関する工学的にも重要なものとなる。この知見を得るべく実施されている数値シミュレーションにおいて、Kato-Launder 補正を施した低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル (Launder-Sharma モデル) の有用性が確認されている⁽¹⁾。その有用性を導く機能の詳細への理解は、しかしながら、未だ十分ではない。本論文では、屋外の気流に見られる風向偏差・乱流強度の影響に留意しつつ、予測される乱流統計量の空間分布への精査を通じて、Kato-Launder 補正の効用把握を目的とする。

2. 対象・手法・条件

解析対象を電力中央研究所が実施した腐食実験体系⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を参考に設定した。本腐食実験が行われた暴露試験場は標高 10 m 未満の臨海部に位置する。鋼管 (一般構造用炭素鋼管 STK400) を暴露試験場内の海岸から約 15 m 位置での地上高さ 0.5 m に設置している。鋼管設置軸方向については、南北および東西の 2 種類のことを考慮している。この実験体系に対して、解析では、地面や支持物の効果を見せず、一様風条件下の無限空間内に置かれた円管体系とした。円管寸法は、試験と同じ内径 $D = 0.0707$ m, 長さ $L = 4.8$ m とした。円管厚さも同様に試験と同じ 0.0028 m とした。

解析には、鋼管近傍での複雑な空気の流れの輸送過程の再現に長所を有する有限体積法に基づくオープンソースコード OpenFOAM (ver. 4.1) を用いた。Reynolds 分解に基づく単相・非圧縮性の流体に対する質量保存式 (連続式) と運動量保存式 (Navier-Stokes の式) を基礎方程式とした。対流項には 1 次精度風上、その他の項には 2 次精度中心差分を施し離散化した。圧力場と連続式とのカップリングを SIMPLEC 法により行った。行列

解法として、圧力には幾何学的マルチグリッド法 (GAMG)、その他の物理量には Gauss-Seidel 法を採用した。緩和係数を 0.7 とした。OpenFOAM のデフォルト出力である L1 ノルムについて、 10^{-7} 以下への減少をもって収束を判定した。ただし、この条件を計算が満足しない場合については、収束回数 20000 回にて計算の打ち切りを行った。

図 1 に、解析領域全域での鉛直方向断面内での解析格子の配置を示す。図中にて、円管は朱記の箇所となり、気流の向きは、左側から右側となる。領域サイズを $15\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$ とし、円管を 2.6 m, 5 m, 1 m の地点に配置した。座標系として、円管端部からの軸方向距離および円管内壁表面からの垂直方向距離をそれぞれ x , y とした。原点を流入側円管端部の円管内壁表面とした。メッシュ生成には cfMesh を用いた。基本格子を 0.5 m (x 方向) \times 0.45 m (y 方向) \times 0.37 m (z 方向) で生成した後、乱流モデルが求め

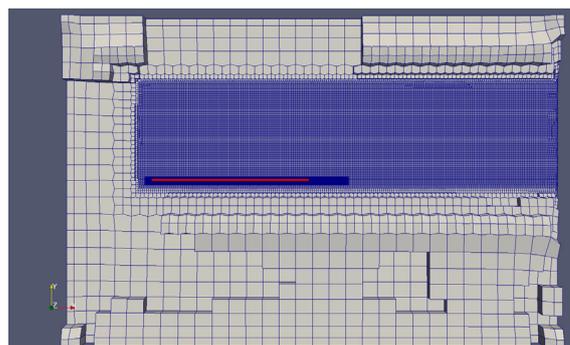
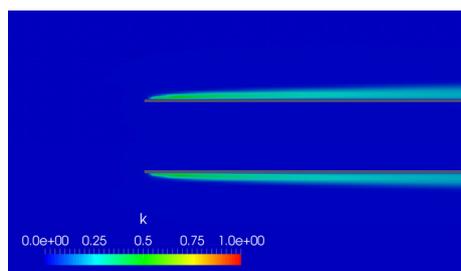
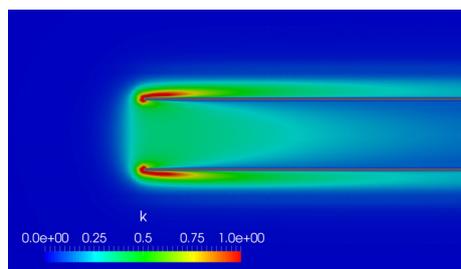


Fig. 1 Numerical grid arrangement.

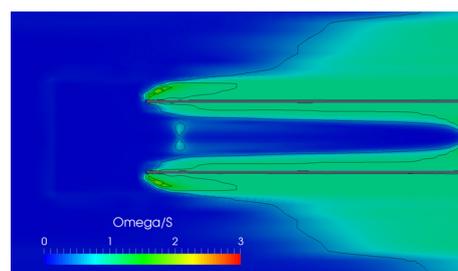


(a) with KL correlation

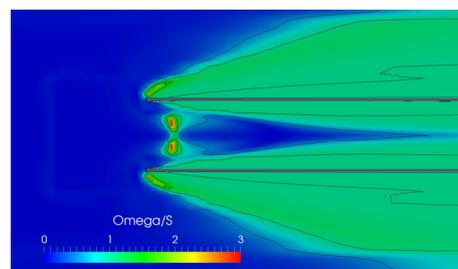


(b) without KL correlation

Fig. 2 Contour of turbulence kinetic energy near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 1%

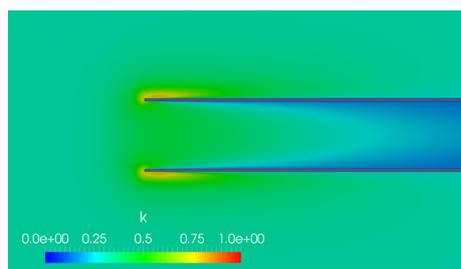


(a) with KL correlation

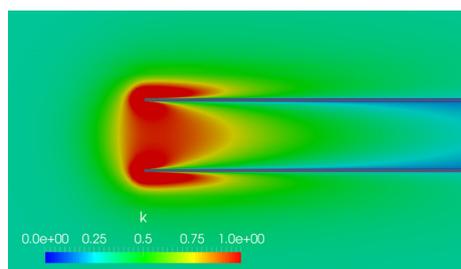


(b) without KL correlation

Fig. 4 Contour of rotation normalized with shear near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 1%

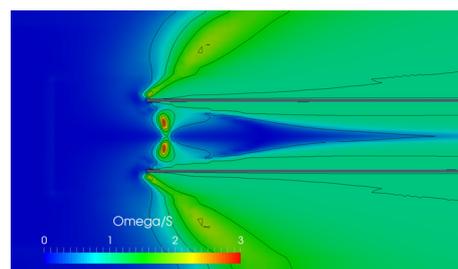


(a) with KL correlation

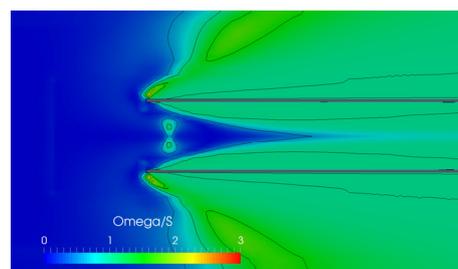


(b) without KL correlation

Fig. 3 Contour of turbulence kinetic energy near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 10%



(a) with KL correlation



(b) without KL correlation

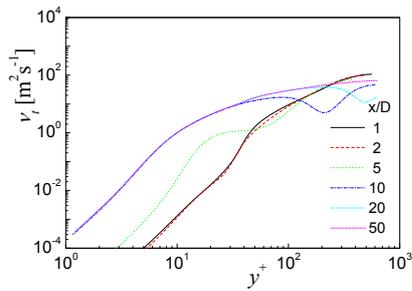
Fig. 5 Contour of rotation normalized with shear near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 10%

る壁面近傍での格子解像度に対応して、7段階の8分木細分化を施した。円管表面近傍第一格子点の表面からの距離を 2.7×10^2 mm とし、粘性底層に位置されるようにした。ただし、格子解像度は、円管内の格子配置が円筒座標系に沿っていないことから、周方向に対して非一様となる。セル数は約405万である。

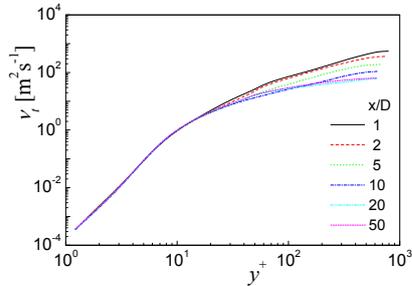
境界条件として、円管表面では、non-slip 条件を与えた。解析領域の流入部では、風速 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を与えた。圧力については勾配 0 とした。流出部では、風速について勾配 0、圧力について 0 とした。流入・流出部以外の境界面では、風速についてフリースリッ

プ、圧力について勾配 0 を付与した。流入風境界条件として、自然の風に含まれる風向・風速変動の影響評価のため、円管軸に対して風向のなす角が 0° 、 45° の 2 ケース、乱流強度 10%、1% の 2 ケースを考慮した。ここで、接近流の乱流エネルギー散逸率の算出には、混合長 0.2m を付与した。さらに小さい乱流強度を付与した計算では、乱流エネルギー k およびその散逸率 ϵ の輸送方程式の収束計算での不安定性を確認した。

乱流モデルに関して、Launder-Sharma モデル⁽⁵⁾とそれに Kato-Launder の補正⁽⁶⁾を加えたものとの比較を行った。

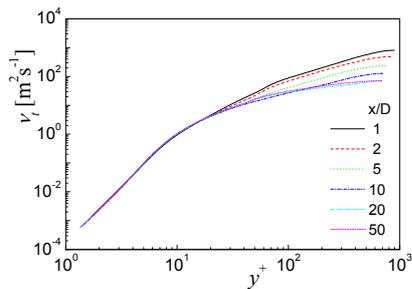


(a) with KL correlation

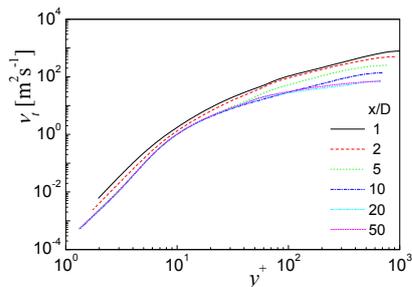


(b) without KL correlation

Fig. 6 Change in near wall behavior of turbulence kinetic viscosity in pipe along axial direction under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 1%



(a) with KL correlation



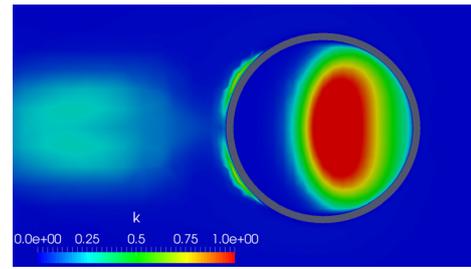
(b) without KL correlation

Fig. 7 Change in near wall behavior of turbulence kinetic viscosity in pipe along axial direction under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 10%

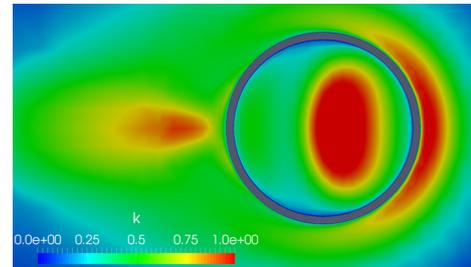
Kato-Launder 補正では、衝突噴流などを対象とした RANS シミュレーションでの乱流エネルギーの過大評価を改善することを目的に、乱流エネルギー k の輸送方程式における生成項 P に回転の効果を加え、 $P = \mu S \Omega$ とする ($\Omega = [(\partial u_i / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_i)]^{1/2}$)。実際の計算では、OpenFOAM が実装している Launder-Sharma モデルのライブラリに対して、該当箇所の修正を施した。

3. 結果

はじめに、流入風が円管軸と合致するケースでの円管流入部か

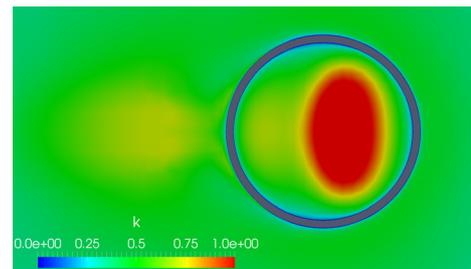


(a) with KL correlation

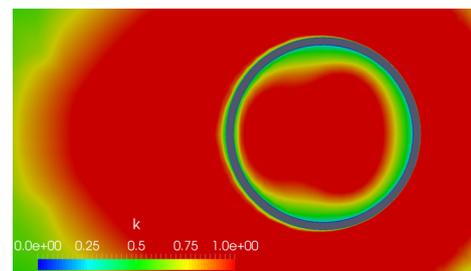


(b) without KL correlation

Fig. 8 Contour of turbulence kinetic energy near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 1%



(a) with KL correlation

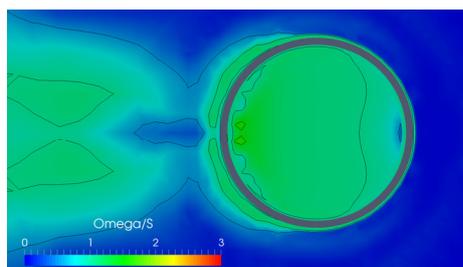


(b) without KL correlation

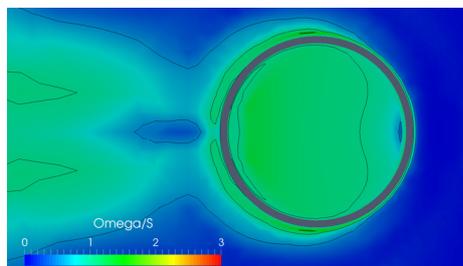
Fig. 9 Contour of turbulence kinetic energy near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 10%

らの境界層発達に注視しつつ、流入風の風向 0° に対する結果を述べる。乱流強度 10%、1% の 2 ケースについて、Kato-Launder の補正を加えた結果と加えていない結果との比較を行った。

図 2, 3 に、円管流入側端部近傍での鉛直断面内における乱流エネルギー k のコンターを示す。Kato-Launder 補正は、流入風の乱流強度に依らず、円管流入部での乱流エネルギーの抑制をもたらす。この減衰は、円管流入側端部への気流の衝突域周辺で顕著となる。Kato-Launder 補正を加えない計算は、 $x/D \leq 1$ 以下の円管内部および円管に沿った外面近傍において乱流エネルギーの大きな値を予測

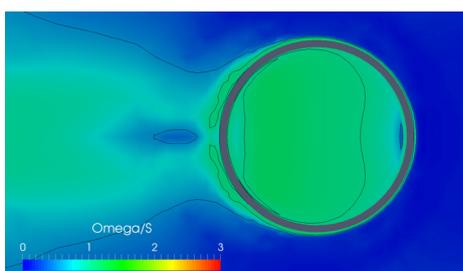


(a) with KL correlation

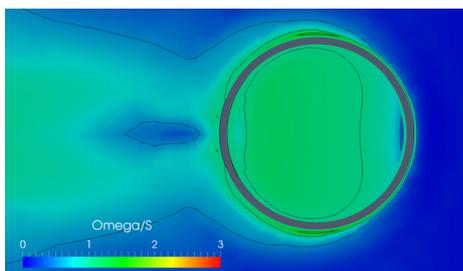


(b) without KL correlation

Fig. 10 Contour of ratio of rotation to shear near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 1%



(a) with KL correlation

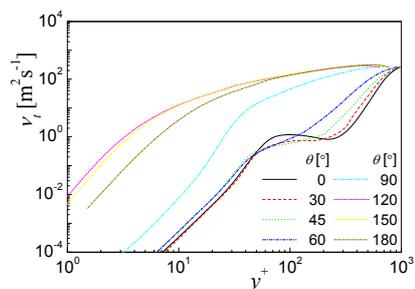


(b) without KL correlation

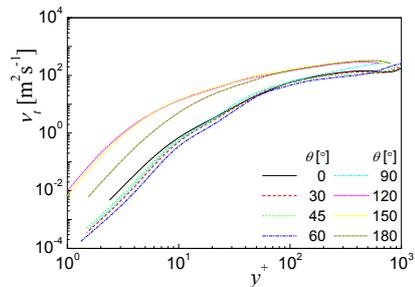
Fig. 11 Contour of ratio of rotation to shear near inlet in vertical plane along a centerline of pipe under inflow condition with wind direction of 0° and turbulence intensity of 10%

する。このような Kato-Laundar 補正の効果は x/D とともに減少する。円管内部での乱流エネルギーは、いずれのケースにおいても一定の値に漸近する。

図 4, 5 に、円管流入側端部近傍での鉛直断面内におけるせん断 $S (= [(\partial u_i + \partial u_j)^2]^{1/2})$ で規格化した回転 $\Omega (= [(\partial u_i - \partial u_j)^2]^{1/2})$ のコンターを示す。回転 Ω は、Kato-Laundar 補正による乱流エネルギーの抑制が確認された円管流入側端部近傍において 1 以下となり、乱流エネルギーの生成項の減少を確認できる。局所的な増減を呈しており、局所的には乱流エネルギーの活発化をもたらす効果を有す

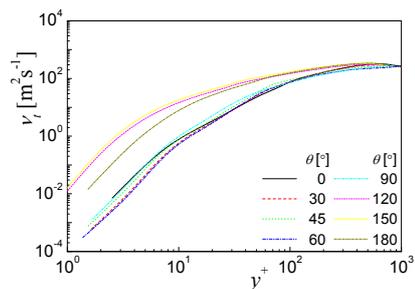


(a) with KL correlation

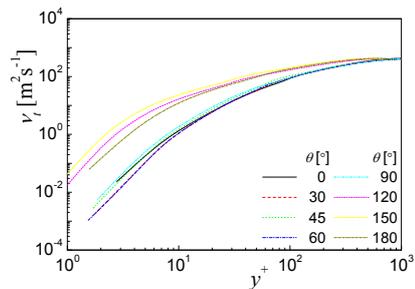


(b) without KL correlation

Fig. 12 Change in near wall behavior of turbulence kinetic viscosity near inlet of pipe ($x/D=1$) along xx direction under inflow condition with wind direction of 45° and turbulence intensity of 1%



(a) with KL correlation



(b) without KL correlation

Fig. 13 Change in near wall behavior of turbulence kinetic viscosity near inlet of pipe ($x/D=1$) along xx direction under inflow condition with wind direction of 45° and turbulence intensity of 10%

ることを理解できる。なお、 x/D の増加とともに 1 に漸近し、Kato-Laundar 補正の効用が顕著となる領域の局在化を視認できる。

図 6, 7 に、鋼管内部における渦動粘性係数 ν_t について、壁面漸近挙動を調べるべく対数スケールによる内層のパラメータで規格化した鋼管内面からの垂直距離 y^+ ($y^+ = yu_\tau/\nu$; u_τ : 摩擦速度, ν : 動粘性係数) に対する変化を示す。軸方向位置について $x/D = 1, 2, 5, 10, 20, 50$ での結果を例示した。渦動粘性係数は、壁面近傍において、 y^+ の 3 乗で変化するという理論⁶⁾と整合する。ただし、Kato-Laundar 補正を加えた場合に格子依存性によるものと推

測されるわずかな勾配の変調を呈する。また、流入風に含まれる乱流強度 0% の挙動に注視すると、Kato-Launder 補正を加えた場合に、 $x/D = 1, 2$ では壁面近傍で極めて小さな値（他と比べて 10^{-3} 以下）となる。一方、Kato-Launder 補正を加えた場合や乱流強度 10% の場合には、 x/D に依存することなく類似の分布・値を有する。

次に、流入風が円管軸と偏向するケースでの円管流入部近傍での周方向変調に注視しつつ、流入風の風向 45° に対する結果を述べる。乱流強度 10%、1% の 2 ケースについて、Kato-Launder の補正を加えた結果と加えていない結果との比較を行った。

図 8, 9 に、円管流入側端部ごく近傍 ($x/D = 1$) での横断断面内における乱流エネルギー k のコンターを示す。Kato-Launder 補正は、円管外部における気流衝突域および円管後流域での乱流エネルギーの抑制だけでなく、円管内部に生じる偏流に起因した乱流エネルギーの急変への再現を与える。流入風に含まれる乱流強度に依らず、Kato-Launder 補正を施さない計算による乱流エネルギーは、円管内部において大きな値を与える。加速域とはく離域との間での急変を緩和する。

図 10, 11 に、円管流入側端部ごく近傍 ($x/D = 1$) での横断断面内におけるせん断 $S (= [(\partial u/\partial y)^2]^{1/2})$ で規格化した回転 $\Omega (= [(\partial u/\partial y - \partial u/\partial x)^2]^{1/2})$ のコンターを示す。回転 Ω は、円管外部においては、Kato-Launder 補正による乱流エネルギーの抑制が確認された領域円管流入側端部近傍において 1 以下となり、乱流エネルギーの生成項の減少を確認できる。一方、円管内部においては、顕著な増減を有しておらず、上流側からの移流により乱流エネルギーの強弱が生じることを示唆する。

図 12, 13 に、鋼管内部流入側端部ごく近傍 ($x/D = 1$) における渦動粘性係数 ν_t について、壁面漸近挙動を調べるべく対数スケールによる内層のパラメータで規格化した鋼管内面からの垂直距離 y^+ ($y^+ = yu_\tau/\nu$; u_τ : 摩擦速度, ν : 動粘性係数) に対する変化を示す。周方向位置について円管内面上部を 0° と定義した $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ での結果を例示した。渦動粘性係数は、壁面近傍において、 y^+ の 3 乗で変化するという理論⁶⁾と整合する。周方向への変化を有するが、その変化の幅を流入風に含まれる乱流強度 0% のときの Kato-Launder 補正を加えた場合に顕著とする。この場合、減速領域において、層流相当の値のみを保持する。

4. 結言・考察

本論文では、屋外に設置された鋼管内部での腐食性状評価に資するべく、その内部への気流の侵入過程を対象に数値流体解析を実行した。乱流表現に高い実用性を有する RANS モデルのうち低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデルのひとつである Launder-Sharma モデルを選択した。屋外の気流に見られる風向偏差・乱流強度の影響に留意しつつ、予測される乱流統計量の空間分布への精査を通じて、Kato-Launder 補正の効用を把握した。

Kato-Launder 補正の効用として 2 種類のを明らかにした。一つは、流入する気流の風向が鋼管の軸と合致する場合に見られる円管流入部近傍での境界層の乱流遷移過程への再現性向上である。もう一つは、流入する気流の風向が鋼管の軸と異なる場合に見られる円管流入部近傍でのく離域における渦動粘性係数への再現性向上である。Kato-Launder 補正は、前者において、円管流入側端部での気流の衝突に起因する乱流エネルギーの生成を適切に抑制し、円管内流入部近傍での境界層の層流状態の維持を実現した。後者において、く離域での極めて小さな渦動粘性係数の生成を適切に再現した。Kato-Launder 補正を加えない計算は、乱流エネルギーの生成に対するせん断の寄与およびその下流側への移流の効果を過大に評価し、渦動粘性係数の軸方向・周方向分布の適切な再現

に至らなかった。

また、Kato-Launder 補正は、渦動粘性係数が急変する流れ場に対しても、壁面漸近挙動への良好な結果を与えた。一方、回転 Ω の算出などに起因する格子依存性も有した。境界層の乱流遷移への再現性の保持など、その詳細を今後検討したい。

本研究の推進にあたり、電力会社より貴重なご助言を賜った。布施貴朗氏（電力計算センター）には、計算実行に関する有益な知見を頂いた。長沼淳氏、大原信氏、正木浩幸氏、布施則一氏（以上、電力中央研究所）には観測データの提供およびその評価に関するご助言を頂いた。足立和郎氏、谷純一氏、堀康彦氏、石川智巳氏（以上、電力中央研究所）から研究計画に関するご助言を頂いた。江口譲氏、森田良氏（以上、電力中央研究所）からは、論文構成に関する有益なご指摘を頂いた。ここに深謝いたします。

参考文献

- (1) 服部, 長谷部, 須藤, 中尾, 石原, 平口, "外部からの気流侵入に伴った鋼管内面壁面せん断応力分布の特性把握," 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号. (査読中)
- (2) 長沼, 谷, 布施, 堀, "送電鉄塔用鋼管の内面腐食速度および海塩付着量分布評価," 電力中央研究所 研究報告 Q14004, (2015).
- (3) 長沼, "送電鉄塔用鋼管内腐食分布のモニタリング," 電力中央研究所 研究報告 Q12003, (2013).
- (4) 正木, 大原, 長沼, 服部, 谷, "送電鉄塔用鋼管の内面腐食に関わる水膜計測への赤外水分計の適用," 電力中央研究所 研究報告 V15005, (2016).
- (5) Launder, B.E. and Sharma, B.I., "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc," Letters in Heat Mass Transf, 1 (1974), pp.131-138.
- (6) Kato, M. and Launder, B.E., "The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders," Proc 9th Symp Turbulent Shear Flows, (1993).
- (7) Kalitzin, G, Medic, G, Iaccarino, G and Durbin, P., "Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions," J Comp Phys, 204 (2005), pp.265 - 291.