

流線型断面を有する柱状構造物周辺の三次元流に対する乱流モデルの適用性

松江工業高等専門学校土木工学科 正会員 木村 一郎
 京都大学大学院工学研究科 正会員 細田 尚
 京都大学大学院工学研究科 学生員 音田慎一郎

1.はじめに：平面上に設置された柱状構造物周辺の流れ構造は，馬蹄形渦とカルマン渦の形成に特徴付けられる．これらの流れ構造の解明は，橋脚周辺の局所洗掘現象等を予測する上で極めて重要といえる．馬蹄形渦は基本的に定常現象であるが，一方でカルマン渦は非定常な渦発振であり，RANS タイプの乱流モデルの適用を困難なものにしている．しかし，柱状構造物の断面形状が流線型の場合には一般にカルマン渦が発生せず，馬蹄形渦の形成のみに着目した検証が可能となる．本研究はこのような流れ場を対象に，代表的な RANS モデルである非線形 k-εモデルの適用性を検証する．

2. 数値解析手法：本研究では，次に示すような一般曲線座標系における反変成分表示の基礎式を用いる¹⁾．

[連続式] $\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^\alpha \sqrt{g}}{\partial \xi^\alpha} = 0$ (1) [運動方程式] $\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i V^j] = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j [-v^i v^j] + 2\nu \nabla_j e^{ij}$ (2)

[k 方程式] $\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k V^j] = -g_{ii} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - \varepsilon + \nabla_j \left\{ \left(\frac{D_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i k \right\}$ (3)

[ε方程式] $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon V^j] = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} g_{ii} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla_j \left\{ \left(\frac{D_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i \varepsilon \right\}$ (4)

ここに， ξ^i ：計算空間座標， t ：時間， V^i ：流速ベクトル反変成分， v^i ：乱れ速度ベクトル反変成分， p ：圧力， ν ：動粘性係数， ρ ：密度， k ：乱れエネルギー， ε ：散逸率， g_{ij}, g^{ij} ：計量テンソルの共変及び反変成分， g ：計量テンソルの共変成分から成る行列の行列式， F^i ：重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表わす．また， ∇_j は共変微分を表し，クリストッフェル記号 Γ_{ij}^k を用いて次のように表される．

$\nabla_i A^k = \frac{\partial A^k}{\partial \xi^i} + A^j \Gamma_{ij}^k$ (5)

表1 計算条件

弦長	最大翼幅	前縁形状	後縁形状	平均流速
303mm	71.7mm	3：2 楕円	NACA0020	26.75m/s

乱流モデルには，次の高レイノルズ数型の

2次非線形 k-εモデルを用いた¹⁾．

$-\overline{v^i v^j} = D_i S^{ij} - \frac{2}{3} k \delta_s^i g^{sj} - \frac{k}{\varepsilon} D_i [\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3]$ ， $D_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ (6)

$Q_1 = S^{i\alpha} g_{\alpha l} \Omega^{lj} + S^{j\beta} g_{\beta l} \Omega^{li}$ ， $Q_2 = S^{i\alpha} g_{\alpha l} S^{lj} - \frac{1}{3} S^{k\alpha} g_{\alpha m} S^{m\beta} g_{\beta k} \delta_l^i g^{lj}$ ，

$Q_3 = \Omega^{i\alpha} g_{\alpha l} \Omega^{lj} - \frac{1}{3} \Omega^{k\alpha} g_{\alpha m} \Omega^{m\beta} g_{\beta k} \delta_l^i g^{lj}$ (7)

$S^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i + g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j$ ， $\Omega^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i - g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j$ (8)

モデル係数は S: Strain parameter, Ω : Rotation parameter の次の関数で与える．

$\alpha_1 = -0.1325 f_M$ ， $\alpha_2 = 0.0675 f_M$ ， $\alpha_3 = -0.0675 f_M$ ， $f_M = [1 + 0.02 M^2]^{-1}$ ，
 $C_\mu = \min[0.09, 0.3 / (1 + 0.09 M^2)]$ ， $M = \max(S, \Omega)$ (9)

3. 計算条件：計算は Deavenport らによる実験 (表1)²⁾と同条件で行う．水平

面内の格子は図1に示すC型であり，鉛直格子は等比級数とした，格子数は 120()×30()×20()である．

4. 結果と考察：図2は構造物上流側対称軸上における鉛直縦断面内の流速ベクトルを示したものである．実験における柱付け根の渦は馬蹄渦の一部と思われる．計算では非線形モデルによる渦の規模は実験値より大きく，標準型は実験よりも小さい．図3は同様に主流方向の乱れ強さを比較したものである．標準型モデルでは衝突部付近の再現性の低さが従来から指摘されており，今回の結果でも柱衝突部の広い範囲にわたって乱れ強さが過剰生成されている．非線形モデルでは分布形状が実験とほぼ適合する．図4はレイノルズ応力について同様に比較したものであり，やはり標準型モデルでは衝突部における再現性が劣っている．図5は翼後方の横断面における流速ベクトルを示しており，乱流モデルの次数によらず馬蹄渦が再現されている．図6は翼後方の横断面における主流方向の流速コンターであり，モデルによる差は小さいが，

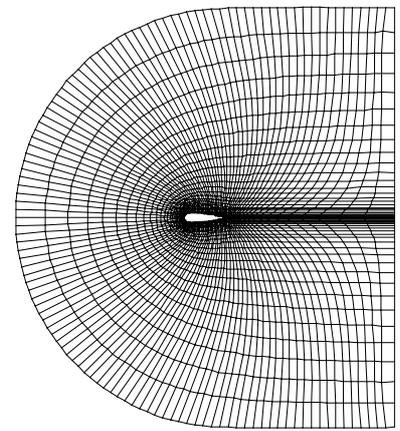


図1 水平面内の計算格子

キーワード：流線型構造物，非線形 k-εモデル，CFD，RANS，馬蹄形渦

〒690-8518 松江市西生馬町 14-4 松江工業高等専門学校土木工学科 木村一郎 Tel 0852-36-5111, Fax 0852-36-5119

馬蹄渦に伴う底面付近のコンターの張り出しは、非線形モデルの方が明瞭に捉えている。図7は主流方向の乱れ強さについて同様に比較したもので、非線形モデルの再現性の高さが際立っている。

参考文献 1).木村他, 四日市大学環境情報論集, 5(2001), 145-170. 2) Deavenport, W. J. & Simpson, R.: *J. Fluid Mech.*, **210**(1990), 23-55, 1990.

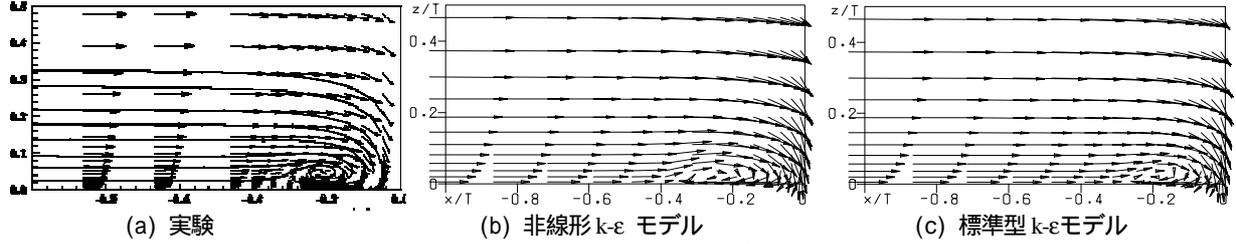


図2 構造物上流部対称鉛直面における流れの比較

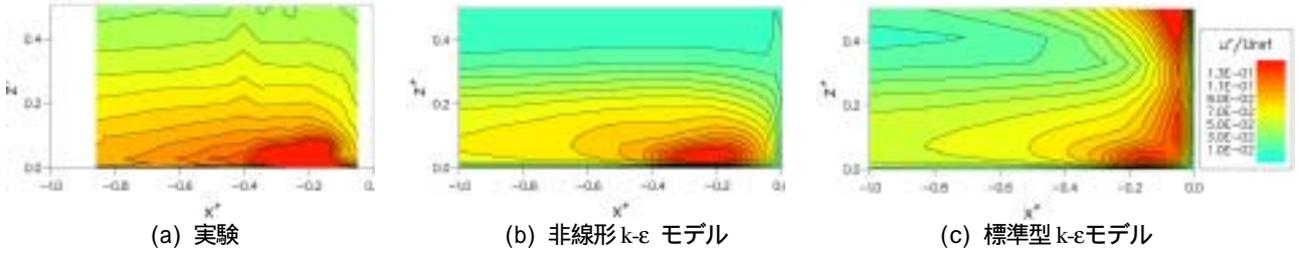


図3 構造物上流部対称鉛直面における主流方向乱れ強さ(u' / U_{ref})の比較

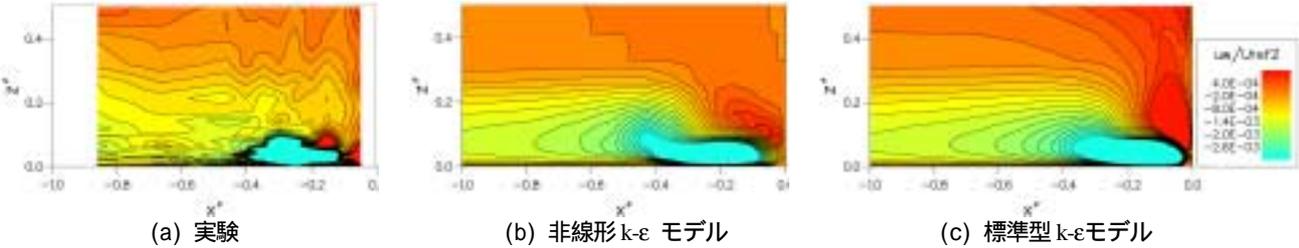


図4 構造物上流部対称鉛直面におけるレイノルズ応力 ($\overline{wu' / U_{ref}^2}$)の比較

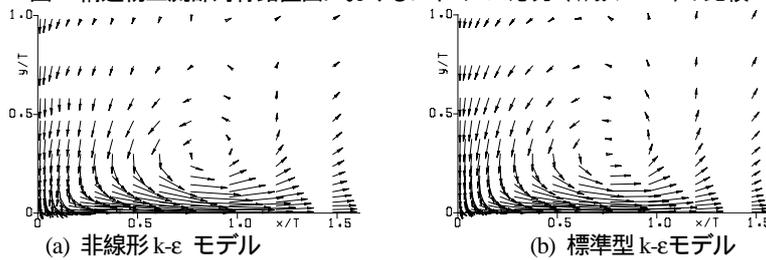


図5 構造物後方横断面における流速ベクトル($x/T=6.38$)

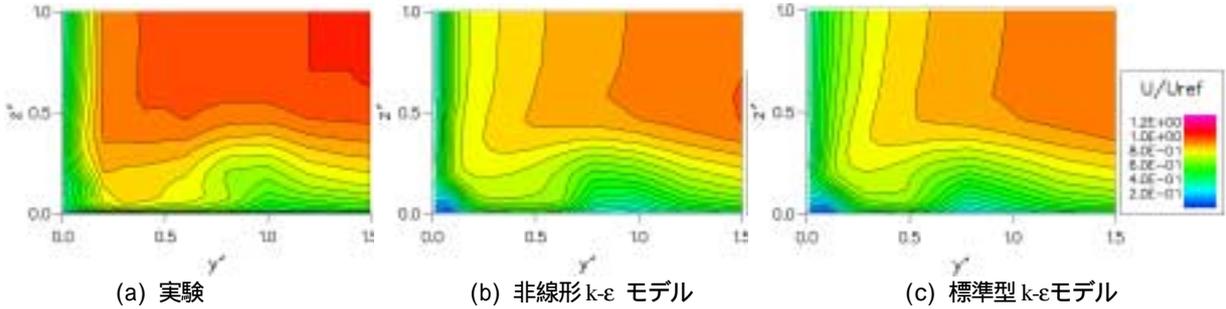


図6 構造物後方横断面における主流流速コンター($x/T=4.46$)

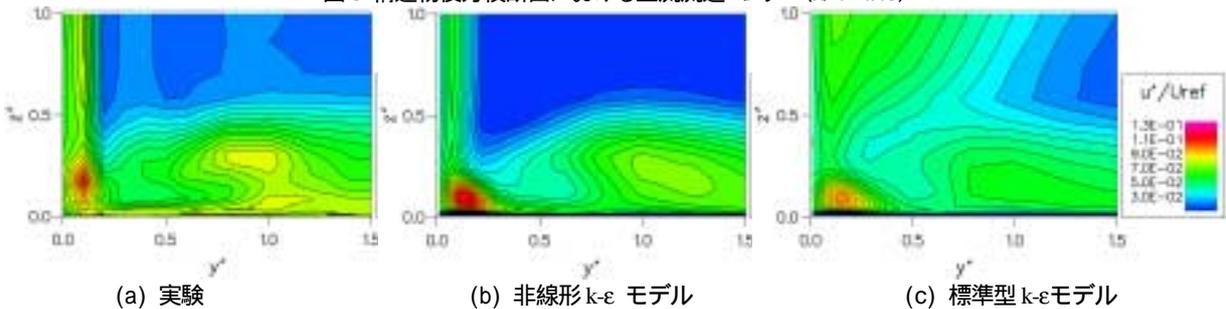


図7 構造物後方横断面における主流方向乱れ強さ(u' / U_{ref})の比較($x/T=4.46$)