

流線型柱状構造物周辺の三次元流況を対象とした RANS 型乱流モデルの検証

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は馬蹄渦とカルマン渦の形成に特徴付けられ、橋脚の局所洗掘等を予測する上で極めて重要である。特に、カルマン渦は非定常な渦発振であり、RANS 型乱流モデルの適用を困難なものにしている。しかし、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、馬蹄形渦のみに着目した検証が可能となる。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⁾。

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

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

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す。また、 ∇_j は共変微分を表し、クリストッフエル記号 Γ_{ij}^k を用いて次のように表される。

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

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⁾。

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

$$Q_1 = S^{ia} g_{ai} \Omega^{ij} + S^{j\beta} g_{\beta j} \Omega^{ij}, \quad Q_2 = S^{ia} g_{ai} S^{ij} - \frac{1}{3} S^{ia} g_{am} S^{mb} g_{\beta b} \delta_i^j g^{ij},$$

$$Q_3 = \Omega^{ia} g_{ai} \Omega^{ij} - \frac{1}{3} \Omega^{ia} g_{am} \Omega^{mb} g_{\beta b} \delta_i^j g^{ij} \quad (7)$$

$$S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j, \quad \Omega^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i - g^{ia} \nabla_a V^j \quad (8)$$

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

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

3. 計算条件：計算は Devenport 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、空間的な解像度の異なる二通りの格子で比較した。格子数は格子 1 が 80(ξ)×20(η)×15(ζ)、格子 2 が 120(ξ)×30(η)×20(ζ)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。計算結果は格子 2 の場合のみを示す。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（図 3(c)）。格子 2 の非線形モデルでは分布形状が実験とほぼ適合する（図 3(b)）。しかし、格子 1 では、全体的に乱れ強さを過小評価している（図 3(d)）。図 4 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 5 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、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 6 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) Devenport, W. J. & Simpson, R.: J. Fluid Mech., 210(1990), 23-55, 1990.

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

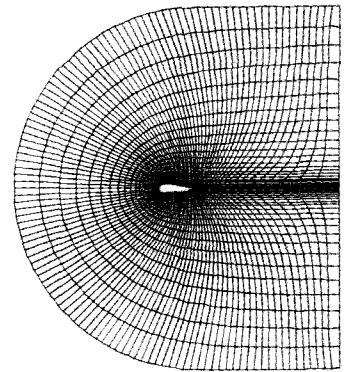


図 1 水平面内の計算格子(格子 2)

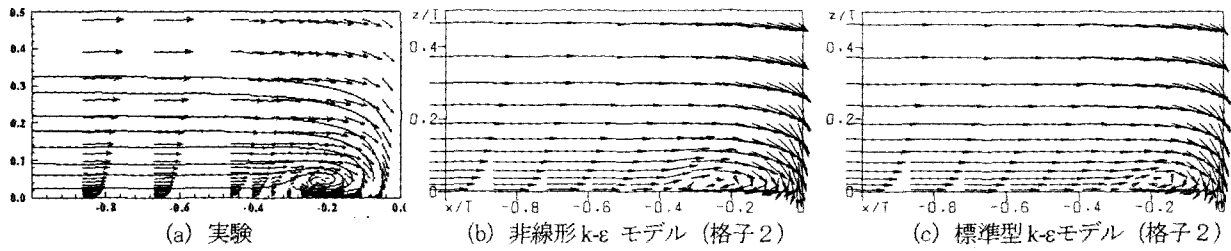
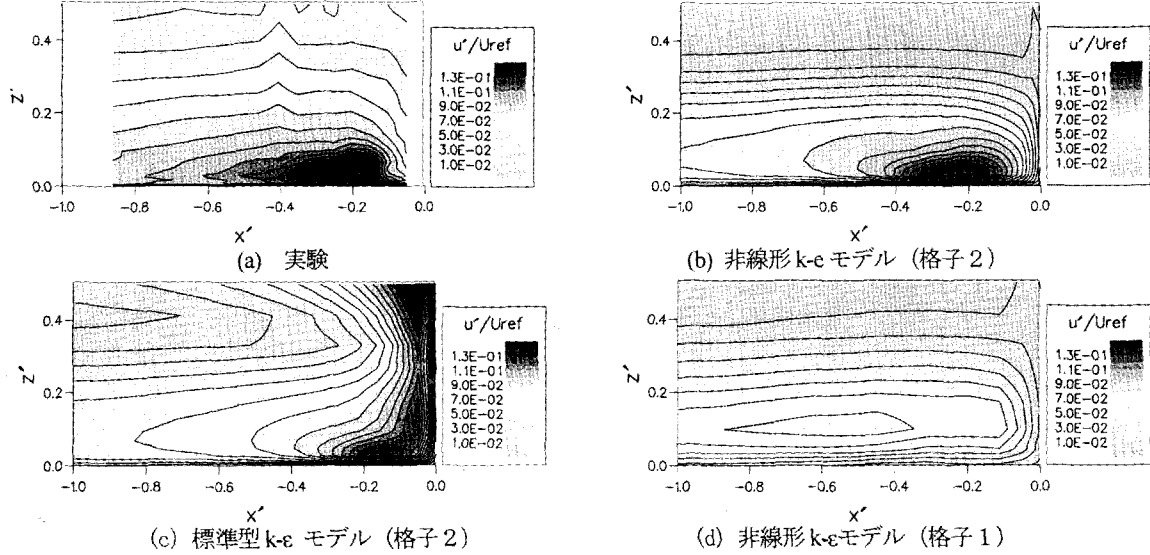
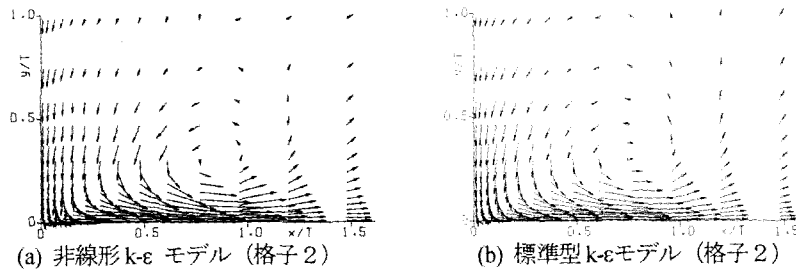
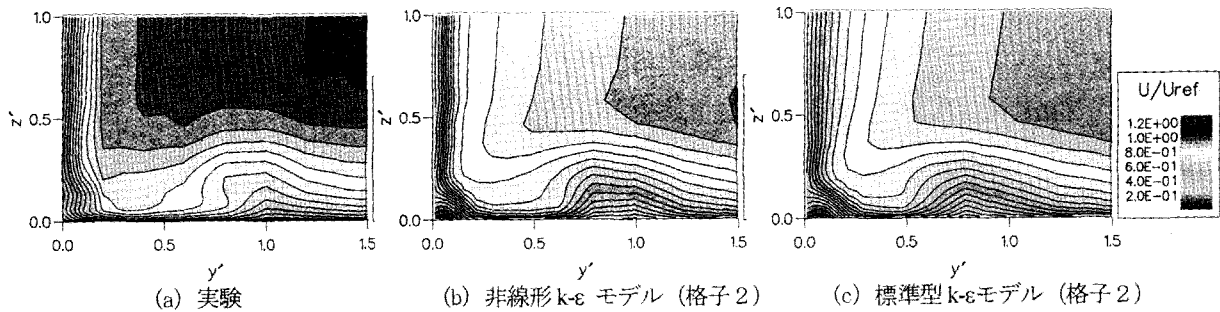
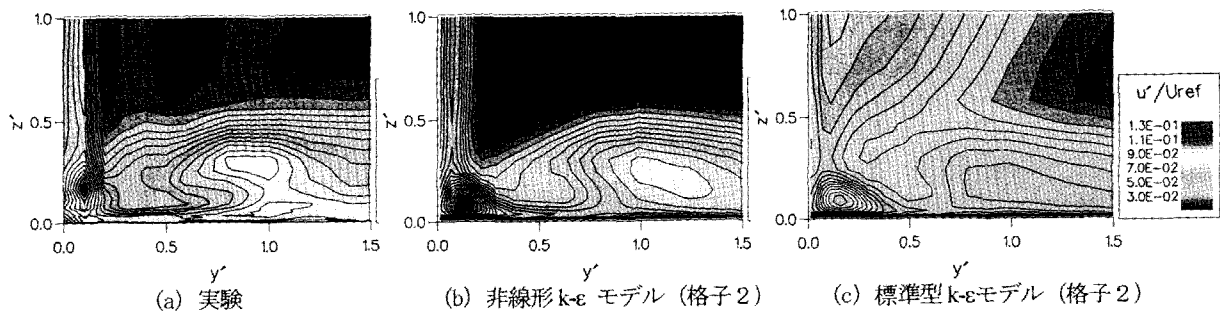


図2 構造物上流部対称鉛直面における流れの比較

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 構造物後方横断面における流速ベクトル($x/T=6.38$)図5 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6 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($x/T=4.46$)