

制御チーム 広島大学工学部

尾形 陽一

CAE
グループ

「自動車エンジン燃焼室3次元CFDコアソフトへの
壁面熱伝達サブモデリング群への組み込み」

最終目標

次世代3Dソフト「HINOCA」への新しいSIP壁面
熱伝達サブモデル群の組み込みと検証を完了する。

実施課題

乱流計算での壁面温度・速度境界条件の基本サブモデル, SIPサブモデルのHINOCA
(Immersed Boundary: IB法を使用)に適した実装および各モデルの精度評価。

達成内容

(1) 壁面熱流束基本/SIPサブモデル実装・評価 (2) シリンダ壁面熱流束分布のCFD予測

表1: HINOCA実装壁面温度・速度モデル

温度境界条件(壁面乱流熱流束モデル)	
壁関数(梅モデル)	圧縮性モデル: Han&Reitz, Rakopoulos 非圧縮性モデル: Launder
竹モデル	解析的壁関数(AWF): Suga
	Harada&Tanahashi
速度境界条件	
壁関数	Knopp則(対数則)
解析的壁関数(AWF)	Suga

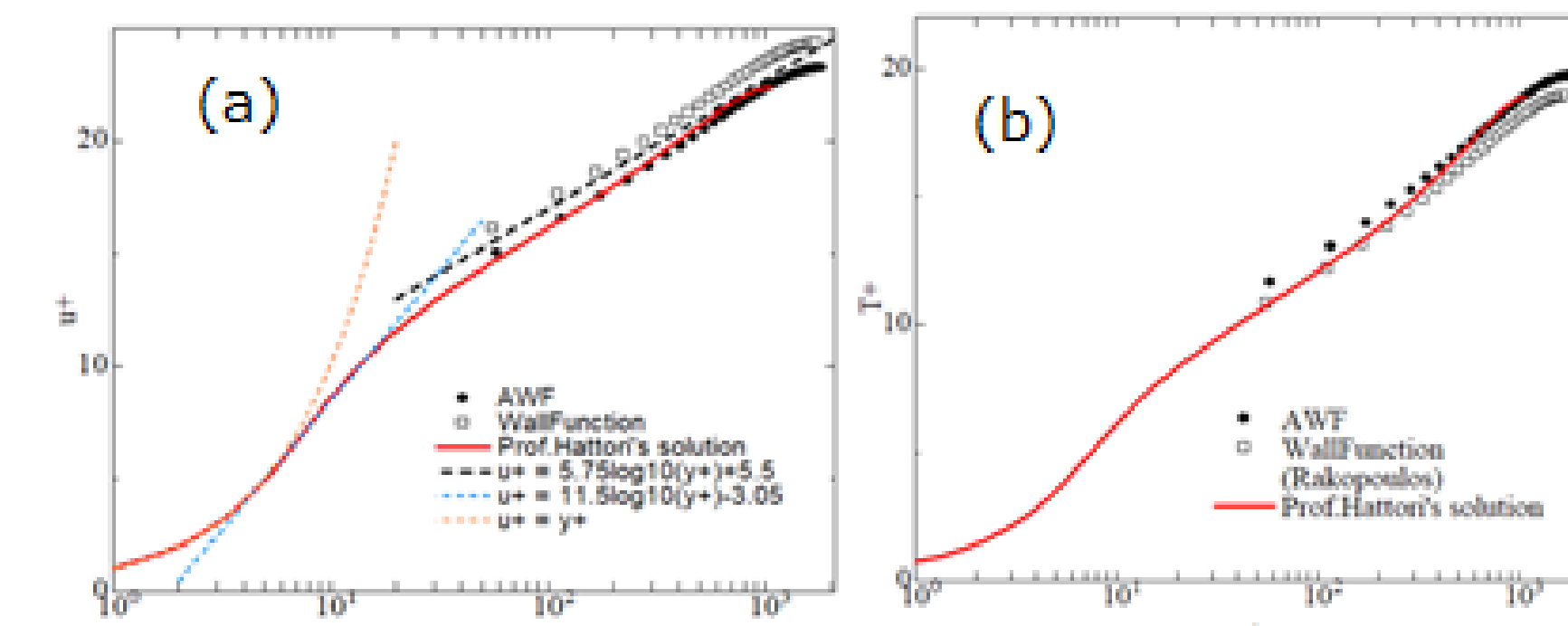


図1 円管内発達乱流 (a)速度 (b)温度. RANS-AWF, 壁関数比較. 赤線: Hattori (名工大: 先端モデル会議)

機能: 局所壁面乱流熱流束分布が計算可能。

優位性: 従来の壁関数に対し, 解析的壁関数 (Analytical Wall Function: AWF), Harada&Tanahashiモデルを実装. エンジンシリンダ壁面の詳細な熱流束空間分布取得 ⇒ モータリング運転条件での冷却損失評価

研究開発の内容

★モデル構築用境界層内方程式

$$\text{流速} \quad \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0 \quad + \frac{\partial (p + \rho u u)}{\partial x} \equiv C_T$$

$$\text{温度} \quad \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = -\frac{dP}{dt} + C_p \frac{\partial (\rho u T)}{\partial x} \equiv C_u$$

梅モデル^{1), 2)}
(壁関数, 対数則)
⇒ 原理的制約△

Analytical Wall Function
(AWF: 解析的壁関数³⁾)
⇒ 方程式を解析的に積分○
⇒ 壁面接線勾配考慮○

- Han Z., and Reitz R.D, Int. J. Heat Mass Transfer (1997)
- Rakopoulos. C.D., et.al, Appl. Energy (2010)
- Suga, K., et.al, Int.J.Heat and Fluid Flow (2006) : AWF
- Harada, Y., Tanahashi. M., et.al, COMODIA (2017)
- Inagaki, M., Hattori, H., Nagano, Y., Int.J.Heat and Fluid Flow (2012) : MTS

★先端モデル会議, ガソリン冷却損失班との連携 ⇒ SIPサブモデルの実装

●壁面熱流束基本サブモデル・竹モデル⁴⁾・AWF³⁾の実装

$$\text{Han\&Reitz} \quad q_w = \frac{\rho u_\tau C_p T_f \ln \left(\frac{T_f}{T_{wall}} \right)}{2.1 \ln y^+ + 2.5} \quad \rightarrow \quad \text{Harada\&Tanahashi} \quad u_\tau \Rightarrow u_{\tau,h} = \begin{cases} u_\tau \left(\frac{\text{Re}_{dev}}{\text{Re}_\tau} \right)^{\frac{1}{4}} & \text{LES} \\ \left(\frac{c_{ph}}{c_{ph}} \frac{\text{Re}_{dev}}{\text{Re}_\tau} k \right)^{\frac{1}{4}} & \text{RANS} \end{cases}$$

●温度(熱流束)・速度(壁面せん断応力)AWF for LES

$$q_w(AWF) = -\frac{\rho C_p \sqrt{k} A_\tau}{\mu} n_i, \quad A_\tau = \frac{\mu (T_f - T_w) / \text{Pr} + C_T E_T}{D_\tau}$$

⇒ SGS乱流エネルギー k_{SGS} → スケール相似則³⁾

⇒ HINOCAは等間隔格子 Δh を使用, 整合性◎

$$k_{SGS} = C \left\{ (u_j - \bar{u}_j)(u_j - \bar{u}_j) \right\} \quad \bar{f} = f + \frac{\bar{\Delta}^2}{24} \nabla^2 f, \left(\frac{\bar{\Delta}}{\Delta h} \right)^2 = 2$$

●混合時間スケール(MTS)乱流渦粘性モデル⁵⁾導入

⇒ HINOCA-LESで使用. k_{SGS} を用いる

$$\nu_t = C_{MTS} k_{SGS} \tau_s, \quad \frac{1}{\tau_u} = \frac{1}{\tau_\Delta} + \frac{1}{\tau_s}$$

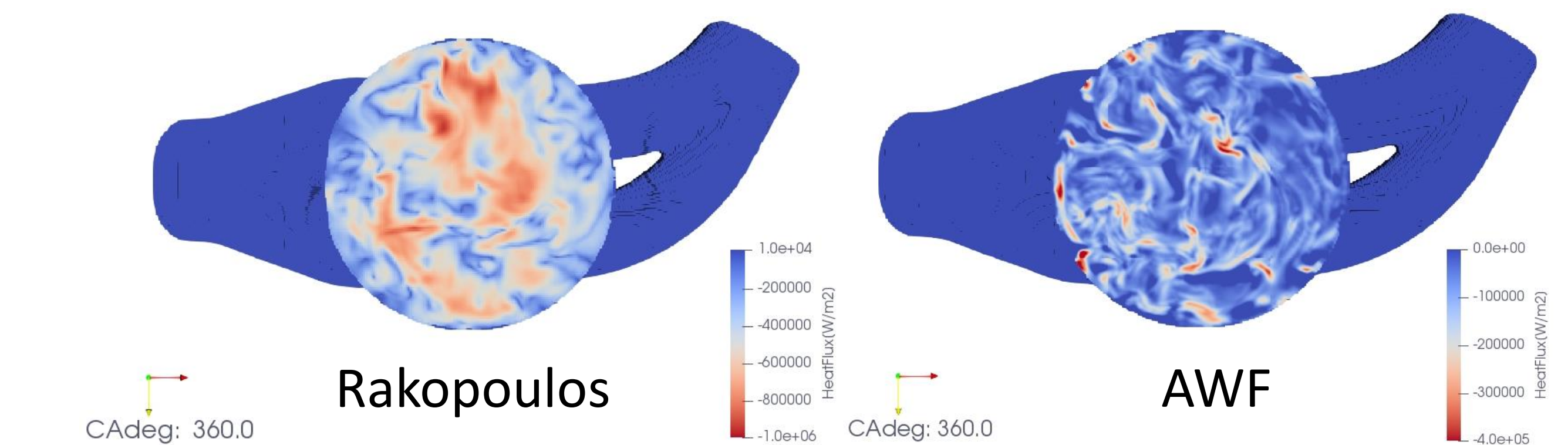


図2 壁面熱流束@TDC: 梅モデル - AWF比較. LES, 混合時間スケール渦粘性

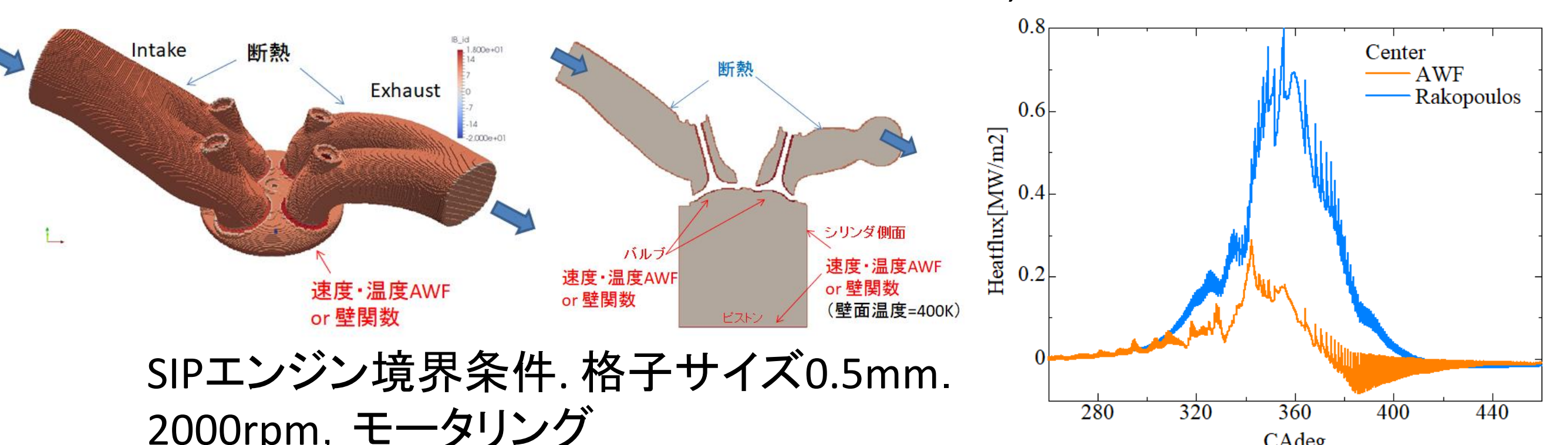


図3 ピストン中心の局所壁面熱流束(図2)1サイクル目のクランク角変化. 梅モデル - AWF比較. LES ⇒ 数〜数十サイクルの評価が今後必要

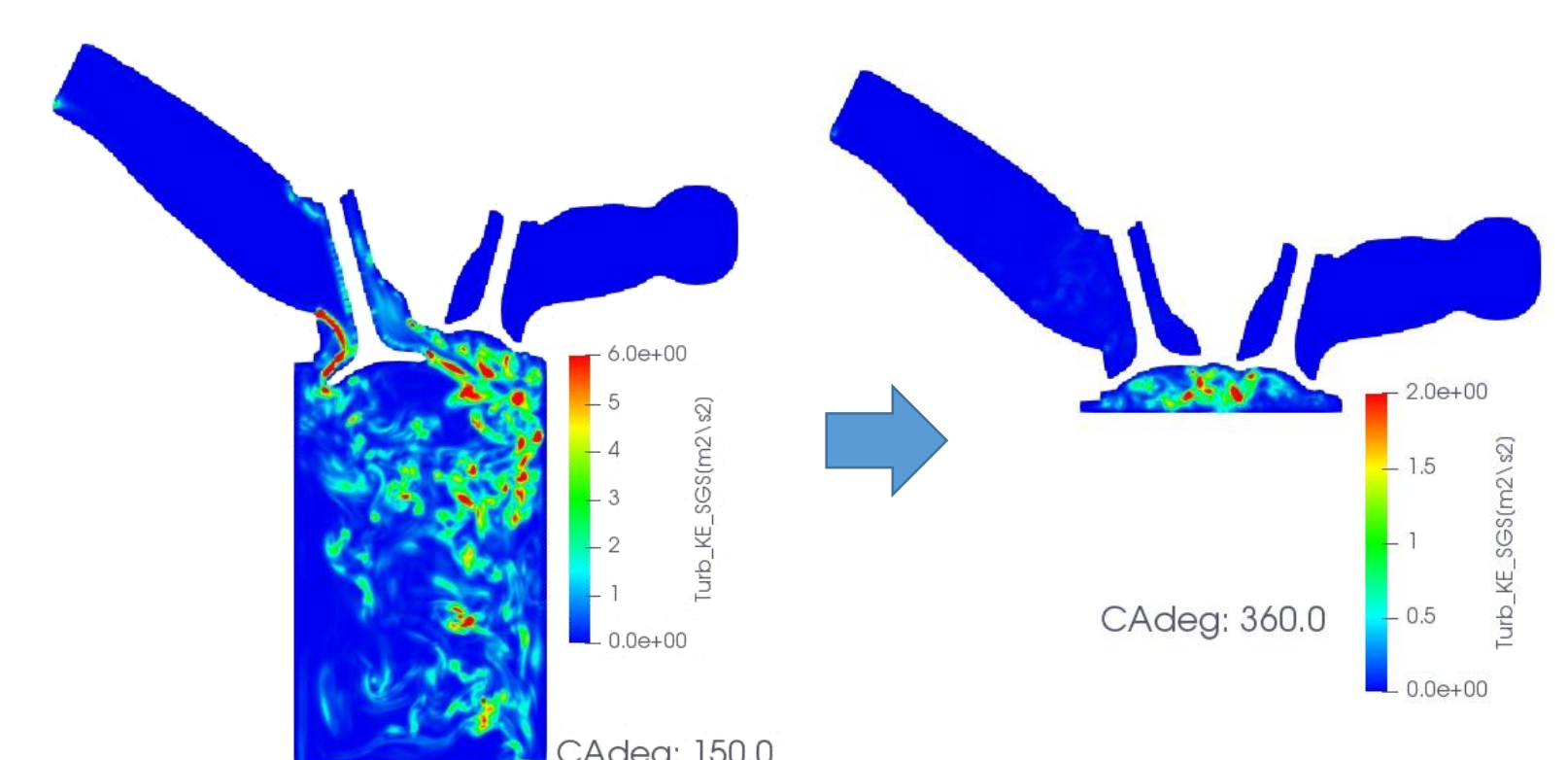


図3: LES_AWFでの k_{SGS} 計算例

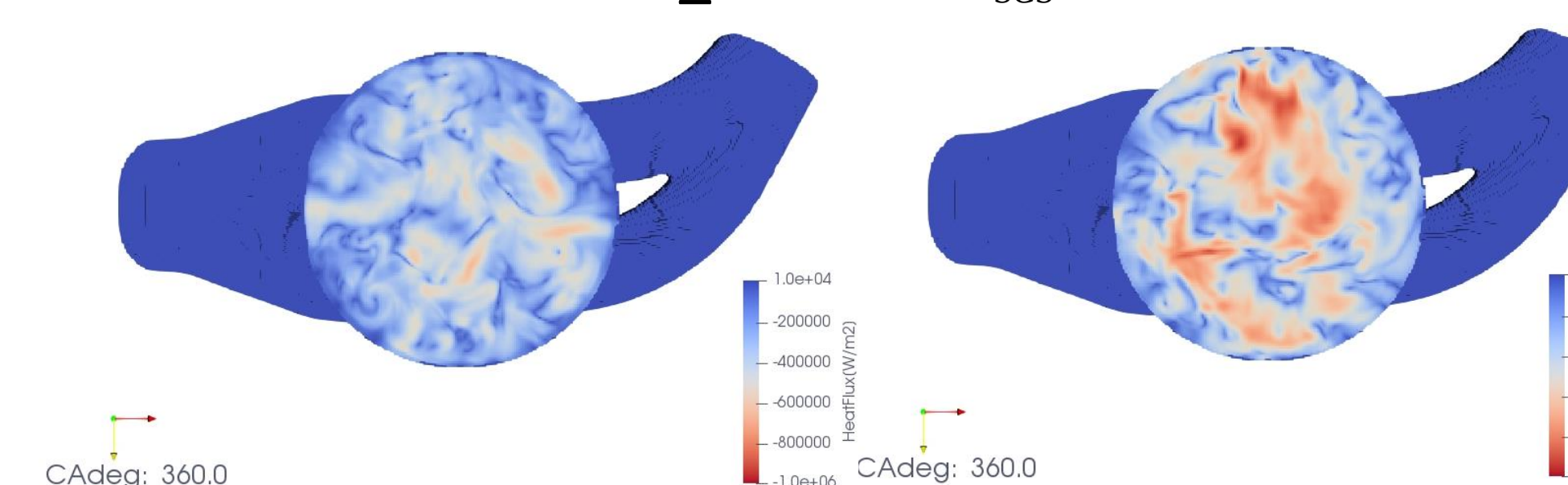


図4: 壁面熱流束(Rakopoulos)の渦粘性比較
左: Smagorinsky, 右: 混合時間スケール(Multi-time scale: MTS). Smagorinskyの方がMTSより小さく評価される傾向.
⇒ 今後様々なモデル組合せ, 壁面粗さ等の効果も考慮。

SIP後の展開, 発展性

(1) 産学連携によるSIP壁面サブモデルの発展 ⇒ 最先端・高精度エンジン解析ソフト

(2) HINOCAによる高精度冷却損失予測 ⇒ 冷損低減予測技術の発展