

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超臨界CO2ガスタービンサイクル用遠心圧縮機内部流の数値解析
著者(和文)	姫野 武洋, 旦 誠之, 渡辺 紀徳, 井上 智博, 宇多村元昭, 蓮池 宏
出典(和文)	第38回 日本ガスタービン学会定期講演会, , ,
発行日 / Pub. date	2010, 10

超臨界 CO₂ ガスタービンサイクル用遠心圧縮機内部流の数値解析

*姫野武洋, 且誠之, 渡辺紀徳, 井上智博(東大), 宇多村元昭(東工大), 蓮池宏(エネ総工研)

Numerical Analysis of Super-critical Carbon-dioxide Flows in a Centrifugal Compressor

*Takehiro HIMENO, Takayuki TAN, Toshinori WATANABE, Chihiro INOUE (Univ. of Tokyo), Motoaki UTAMURA (Tokyo Institute of Technology) and Hiroshi HASUIKE (IAE)

ABSTRACT

A new type of closed-cycle gas turbine utilizing supercritical carbon-dioxide (SC-CO₂) as a working fluid was proposed and has been studied. Since the thermo-fluid properties of SC-CO₂ near the critical point would change drastically by the slight change in temperature or pressure, the behavior of flow in the compressor for the SC-CO₂ gas turbine is different from that of perfect gas. In order to design the compressor of stability and performance, numerical analysis is also desired as well as experimental approach. In the present study, the flow field of SC-CO₂ in a centrifugal compressor was tried to be simulated.

Key words: centrifugal compressor, supercritical fluid, carbon-dioxide

1. 研究背景

空気を作動流体とするガスタービンは、航空エンジンや火力発電用など、化石燃料を熱源とする高効率な熱機関として各種のエネルギー変換システムに組み込まれ、様々な産業分野で利用されている。一方、近年の化石燃料枯渇や地球温暖化を背景として、これらのシステムには、更なる熱効率と環境適合性の向上が要求されており、材料技術や空力設計技術の進歩に基づく各要素性能の高度化だけでなく、従来はあまり利用されなかった、中低温域の排熱を熱源として有効利用する技術に注目が集まっている。

新規に建設される火力発電設備の排熱利用としては、ガスタービンと蒸気タービンによるコンバインドサイクルの採用が進んでいる。しかし、ボイラーや熱交換器など、大型設備の設置を伴うことから、比較的小規模な既存設備の排熱利用のために蒸気タービンを採用するのは限界がある。

2. 超臨界 CO₂ ガスタービン

これに対し、蒸気タービンを補完する熱機関として、宇多村ら¹⁾は、図 1 に示すような、作動流体として超臨界二酸化炭素を用いるサイクルを提案するとともに、小型ガスタービンによりサイクル成立性を実証する研究開発に取り組んでいる。この、超臨界 CO₂ ガスタービンは、クローズドサイクルであるため、熱交換器を通じて様々な熱源

が利用可能であり、また、10 万 kw 程度以下の中小容量領域で、蒸気タービンよりも高い熱効率を達成できる可能性がある¹⁾。

二酸化炭素の臨界点は 304 K, 7.38 MPa であり、図 2 に示すように、超臨界圧条件下で 300 K 程度から 500 K 程度まで昇温させると、液体に類似して小さな 0.3~0.4 程度の圧縮係数 $z = pV/RT$ を呈する高密度状態から、気体に類似して 1 に近い圧縮係数 z を呈する低密度状態まで、相変化を伴うことなく変化する。この特性を利用し、臨界点近傍の低圧縮係数域(高密度域)で圧縮機を作動させることで、昇圧に要する圧縮仕事を少なく抑えると同時に、熱交換器を通じた昇温過程を経て、理想気体に近い圧縮係数域(低密度域)でタービンを作動させることで、多くの膨張仕事($-\Delta p/\rho$)を獲得することができると期待される。

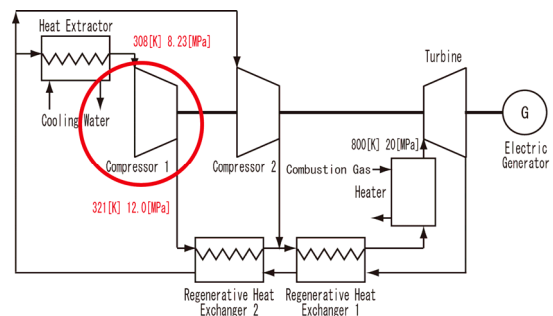


Fig.1 Schematic of SC-CO₂ gas turbine¹⁾

Table 1 Types of EOS and their constants

Equation	u	w	a	b
van der walls	0	0	$\frac{27R^2Tc^2}{64Pc}$	$\frac{RT}{8Pc}$
Redrich-Kwong	1	0	$\frac{0.42748R^2Tc^{2.5}}{PcT^{0.5}}$	$\frac{0.08664RT}{Pc}$
Soave-Redrich-Kwong	1	0	$\frac{0.42748R^2Tc^2}{Pc} [1 + f(\omega)(1 - Tr^{0.5})]^2$	$\frac{0.08664RT}{Pc}$
Peng-Robinson	2	-1	$\frac{0.45724R^2Tc^2}{Pc} [1 + f(\omega)(1 - Tr^{0.5})]^2$	$\frac{0.07780RT}{Pc}$

where $f(\omega) = 0.37464 + 1.5423\omega - 0.26992\omega^2$, $Tr = T/Tc$

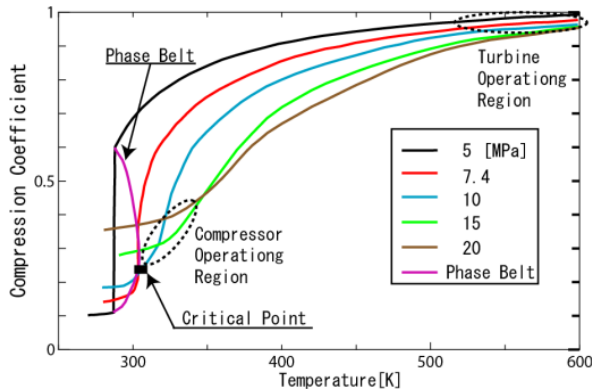


Fig.2 Compression coefficient z of CO_2 in SC- CO_2 GT

超臨界 CO_2 ガスタービンの実現に向けた技術課題の一つは臨界点近傍で作動する遠心圧縮機の設計である。作動流体の僅かな静圧変化に応じて大きな密度変化が生じるため、相似則に基づく圧縮機特性の推算が難しい。本報では、超臨界 CO_2 を作動流体とする小型遠心圧縮機内部における流動構造の把握と、設計指針の獲得を目指した、実在気体効果を考慮した数値流体解析の試みについて述べる。

3. 計算手法

3.1 状態方程式と物性値

臨界点近傍の状態にある超臨界流体を解析対象とする場合、流れ場における密度や粘度などの物性値を適切に評価することが重要であり、理想気体の状態方程式ではなく、実在流体効果を考慮した状態方程式を採用する必要がある。実在流体効果を考慮した近似的な状態方程式として良く知られている van der walls 型状態方程式を次式に示す。

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + ubV + wb^2} \quad (1)$$

ここで、 p , T , V , R はそれぞれ 圧力[Pa], 温度[K], 比容積[m³/kg], 気体定数[J/(kg · K)]を表す。また、式中の係数 u , w , a , b は、状態方程式の種類によって様々なものが提案されており、例えば、van der walls式, Redrich- Kwong (RK)式, Soave-Redrich-

Table 2 Critical Constant and Acentric Factor for CO_2

Tc [K]	Pc [MPa]	Vc [cm ³ /mol]	ω	M [g/mol]
304.1	7.377	94.12	0.239	44.01

Kwong (SRK) 式, Peng-Robinson (PR) 式の4種類について表1のように与えられる。また、二酸化炭素の各臨界定数(Tc : 臨界温度, Pc : 臨界温度, Vc : 臨界体積, 偏心係数(ω), および分子量(M)を表2にまとめる。

今回、採用すべき状態方程式を決定するために、二酸化炭素の各種物性値をSRK 式とPR 式に基づいて算出し、NIST のデータ²⁾ との比較を行った。

まず、密度と定圧比熱についての結果を図3と図4にそれぞれ示す。注目しているのは、超臨界状態の二酸化炭素であるから、300[K]よりも高い温度範囲で実在流体(NIST)との相関を確認すれば良いと考えた。結果を比較すると、密度と定圧比熱のいずれにおいても、SRK 式よりPR 式の方が、よりNISTデータに近い値を示している。また、大気圧条件下、ならびに、15.0 MPa においても同様の比較を行い、PR 式の方がより良い相関を与えることを確認した。

続いて、Chug らの方法³⁾ に従って算出される分子粘性係数, Scalabrin らの方法⁴⁾ によって算出される熱伝導率について比較を行った。粘性係数についての結果を図5に示す。これらの物性値を算出式には、流体の密度が含まれるため、SRK 式よりPR 式を用いた場合の方が、実測値とより良い相関が得られることを確認した。

以上の検討から、超臨界流体に特徴的な熱物性変化を捉えるために、状態方程式としてPR 式を採用することにした。

3.2 流体解法

計算では、3次元圧縮性 RANS 方程式を基礎方程式とし、非粘性流束を3次 MUSCL 補間により高精度化された SHUS⁵⁾ により評価した。また、乱流モデルとして $k-\omega$ モデルを採用、時間進行法に LU-SGS 陰解法を適用して定常解析を行った。

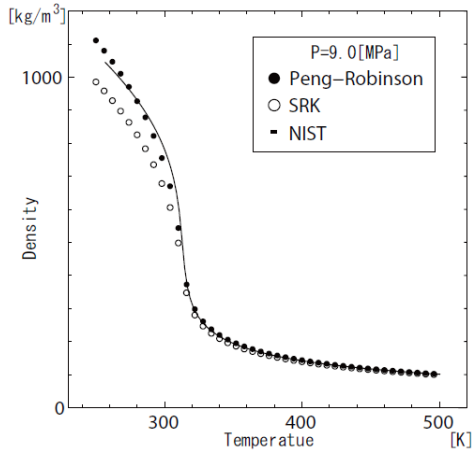


Fig.3 Density of CO₂ at 9.0 MPa

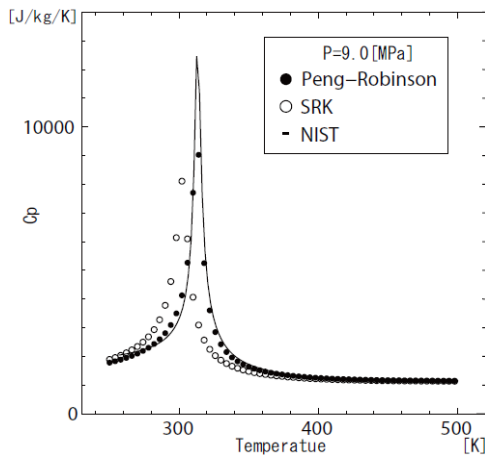


Fig.4 Cp of CO₂ at 9.0 MPa

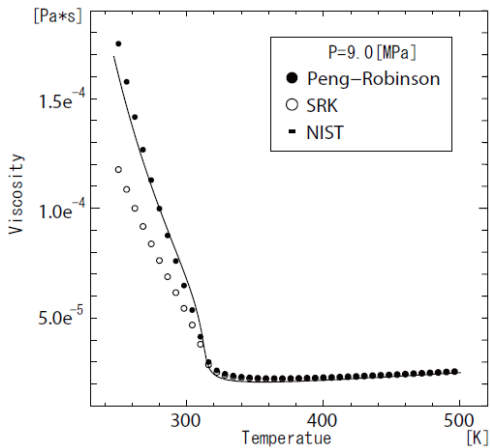


Fig.5 Viscosity of CO₂ at 9.0 MPa

実在流体効果を考慮する状態方程式の多くが圧力と温度を引数とすることに対応し、数値解法における独立変数を基本量(T, p, u, v, w, k, ω)とした⁶⁾。

4. 検証計算：二次元ラバルノズル

状態方程式としてPR式を採用した今回の解析手法の妥当性を確認するために、二次元ラバルノズルを対象とした計算を行い、Renzoによる報告⁷⁾

との比較を行った。解析対象のノズルは、Renzoの計算と同形状とし、流れ方向の断面積を次式によって与えた。

$$A(x) = 2.5 + 3 \left(\frac{x}{x_{th}} - 1.5 \right) \left(\frac{x}{x_{th}} \right)^2 \quad (2)$$

for $x \leq x_{th}$

$$A(x) = 3.5 - \frac{x}{x_{th}} \left[6 - 4.5 \frac{x}{x_{th}} + \left(\frac{x}{x_{th}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

for $x \geq x_{th}$

where area at nozzle throat : $A_{th} = 1$

position at nozzle exit : $x_{max}/x_{th} = 2$

本研究で想定する遠心圧縮機内部における二酸化炭素の状態は、状態図の超臨界領域でも擬臨界点より高圧側の状態であり、液体に近い高密度流体である。Renzoにより計算されているのは、超臨界領域でも擬臨界点より低圧側の低密度流体である。そこで、まず支配方程式と状態方程式が適切に連成されていることを確認するため、まず低密度流体を対象とした検証を試み、続いて高密度流体を対象とした計算を実施した。

4.1 低密度流体による検証計算

Renzoの計算では、流入境界で温度と密度を固定して、 $T = 1.001 \times T_c$ 、 $\rho = \rho_c$ とそれぞれ与え、流出境界では静圧を

$$p_{outlet} = 0.83049 \times p_{inlet} \quad (4)$$

により与えた。一方、温度と圧力を引数とする状態方程式を採用した本計算では、これと対応する境界条件として、流入境界で全圧 22.0 MPa と全温 400 K から算出される全エンタルピーとエントロピーを固定する条件を課した。このとき、 $\rho = \rho_c$ は満たされている。また、流出境界では式(4)に従って静圧を与えた。

今回の計算で得られた密度分布を、ノズル中心軸に沿ってRenzoの計算結果と比較して図6に示す。図中の縦軸は入口密度(=臨界密度 ρ_c)で無次元化された密度を表している。また、今回の計算で状態方程式にPR式を用いて得られた圧縮係数の分布を可視化して図7に示す。

まず、理想気体を仮定した計算について、両者の結果は良好に一致しており、スロート下流に生じる衝撃波の位置も適切に捉えられていることがわかる。次に、実在流体効果を考慮した計算についても、理想気体の場合に比べて、密度分布が高い側にシフトする様子を含め、両者は良く一致している。この条件では、図7に示したように、スロートに近づくにつれて圧縮係数が小さくなり実在気体効果が顕著に表れ、衝撃波を挟んで圧縮係数

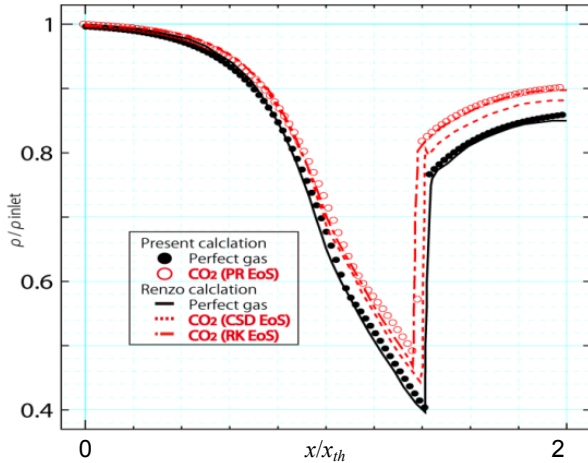


Fig.6 Density profiles in steady nozzle flow

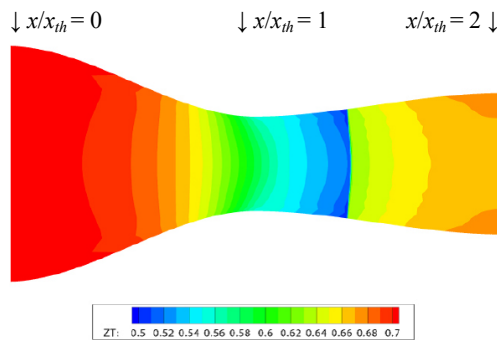


Fig.7 Compression coefficient in 2-D nozzle Near critical point

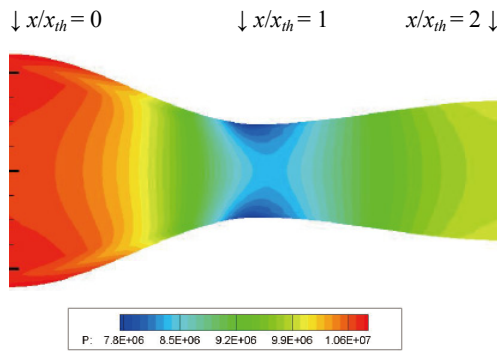


Fig.8 Static Pressure in 2-D nozzle. Super critical and high density condition

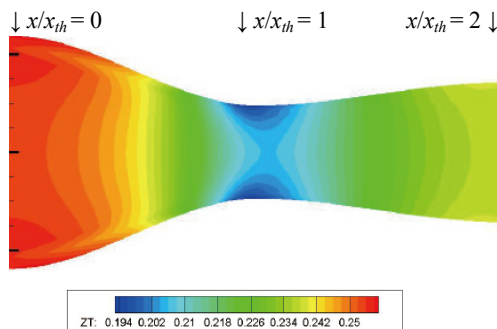


Fig.9 Compression coefficient in 2-D nozzle Super critical and high density condition

が大きく変化する流れ場となるが、安定に収束解を得ることができた。

4.2 高密度流体

続いて、擬臨界点よりも高圧の条件を与えた場合について、同様の計算を行った。流入境界では、全圧11 MPa、全温305 K から算出される全エンタルピーとエントロピーを固定して与え、流出境界で静圧を固定した。この条件では、ノズル内の静温は臨界温度近傍から亜臨界温度の範囲となり、図8に示すように、静圧はノズル内全域において臨界圧以上となる。また、図9に示すように、圧縮係数も1 から大きく離れており、実在流体効果が顕著に表れる条件である。このような条件を課した場合でも、計算が安定に進行し収束解を得られることを確認した。

5. 遠心圧縮機に関する計算例

以上に述べた手法を適用し、遠心圧縮機内部の超臨界二酸化炭素流れの解析を試みた⁸⁾。解析対象は、出力10kw級の超臨界CO₂ガスタービン実証試験用に設計された小型遠心圧縮機であり、図10に示すように、翼枚数は13枚のシュラウド無しインペラと、ベーンレスディフューザを採用している。設計点回転数は100000 rpm、概念設計の段階で推算された流量と圧力比は、それぞれ1.2kg/s、1.46である。その他の寸法を表3に掲げる。



Fig.10 Configuration of centrifugal compressor

Table 3 : Dimensions and specs of centrifugal compressor

Number of impeller blades	13
Mass flow rate [kg/sec]	1.2
Design wheel speed [rpm]	100000
Inlet hub diameter [mm]	5.23
Inlet tip diameter [mm]	10.46
Outlet impeller diameter [mm]	20
Outlet diffuser diameter [mm]	40
Tip clearance [mm]	0.15
Pressure ratio(outlet : static , inlet : total)	1.46
Adiabatic efficiency(outlet : static , inlet : total)	0.729

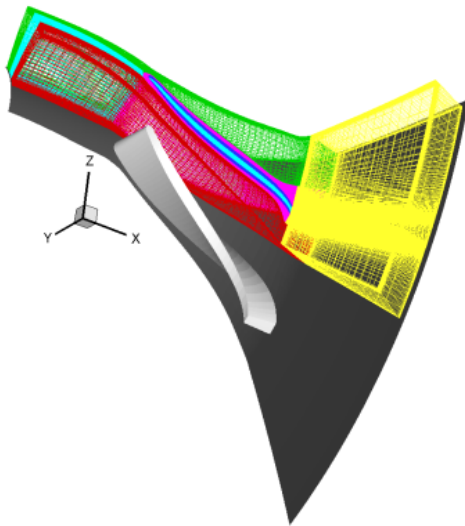


Fig.11 Computed domain and grid systems

また、流れ場の周期性を仮定して翼列の1流路分を計算領域とし、図11のように、翼周りにC型格子、翼間部分にH型格子を配置し、翼端間隙部をC型およびH型格子で埋めた。なお、格子点数は、ピッチ方向に156点、スパン方向に52点で、総格子点数は686400点である。

入口境界条件として、よどみ点圧力および温度から計算される全エンタルピーおよびエントロピーを固定し、計算領域内側の格子点から静圧を外挿し、エントロピー固定条件から入口静温を定め、全エンタルピー固定条件より絶対流速を求めることにした。他方、出口境界条件は、ディフューザ出口における静圧(背圧)を一様に与えた。その他、周方向に周期境界条件を課し、固体壁には粘着断熱条件を課した。

5.1 計算例と流れ場の特徴

入口条件と回転数の組み合わせに対し、背圧を色々に変化させて計算を実施した。一例として、入口全温および全圧を308 K、8.23 MPaとし、回転数を100000 rpm、圧力比が1.25となるよう背圧を設定した場合について、密度と圧縮係数の分布を可視化して、図12および図13にそれぞれ示す。

図中、翼前縁付近間隙部から生じる流れ渦の流線を重ねて示している。図12から、この渦芯付近には擬臨界線を跨いだ低圧かつ低密度の領域が生じているのが判る。図13には、 $z=0.46$ の等値面が示されているが、境界層内部や剥離、渦崩壊領域に顕著な全圧損失により、擬臨界線を跨いで z が大きく周囲より低密度の状態に至った流体は、インペラからの流出に至るまで、再び擬臨界線を跨いで z が小さな状態に戻らないことが見て取れる。圧縮仕事の抑制という観点からは、低密度領域の出現と拡大は好ましくないと考えられる。

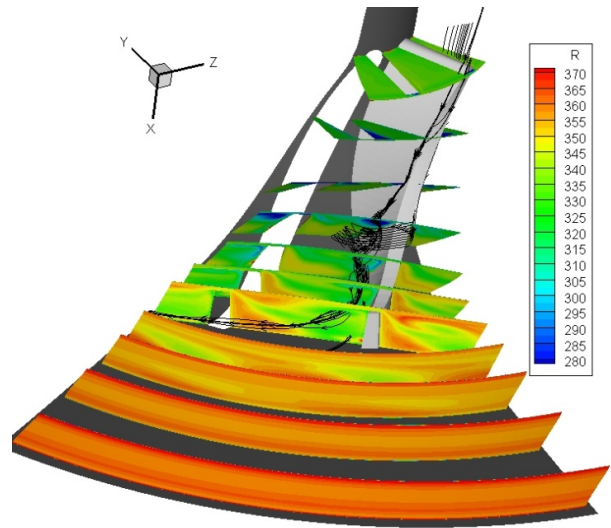


Fig.12 : Distribution of density.

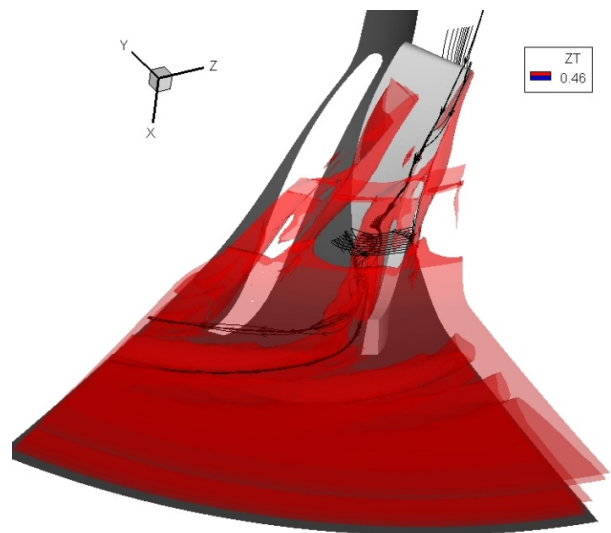


Fig.13 Iso-contour of compression coefficient $z=0.46$

6. まとめ

超臨界CO₂を作動流体としたクローズドサイクルガスタービンの実証試験用に設計された小型遠心圧縮機を対象とし、実在流体効果を考慮した数値流体解析を試みた。その結果、圧力損失が顕著である領域とその下流は、圧縮係数が大きく、密度の低い流体に占められることが確認された。

参考文献

- 1) 宇多村元昭, 他, 熱交換器の伝熱制限を考慮した超臨界CO₂ガスタービンサイクル特性の解析, 日本ガスタービン学会誌 Vol.36, No.2(2008).
- 2) NIST (<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)
- 3) Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, and John P.O'Connell, "The Properties of GASES AND LIQUIDS FIFTH EDITION"
- 4) G. Scalabrin, P. Marchi, and F. Finezzo, "A Reference

Multiparameter Thermal Conductivity Equation for Carbon Dioxide with an Optimized Functional Form”, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.35, No.4, 2006

- 5) 嶋英志, 城之内忠正, “設計における数値解析の活用について (その 12) 一粒子的風上法とその検証”, 航空技術研究所特別資料 27 号, 第 12 回航空計算空気力学シンポジウム論文集, pp.255-260
- 6) 山本悟, “前処理法と Peng-Robinson 状態方程式に基づく気・液・固体の数値解法”, 日本機械学会 第 17 回計算力学講演会講演論文集No.04-40
- 7) Renzo Arina, “Numerical simulation of near-critical fluids”, Applied Numerical mathematics 51, 2004, pp.409-426
- 8) 旦誠之, “超臨界二酸化炭素を作動流体とする遠心圧縮機内部流れの数値解析”, 東京大学修士論文(2010)