

# 温暖化問題、討論のすすめ エンジニアから見た 熱流体力学の数値シミュレーション

吉田英生

パリティ 2011 年 5 月号のフォーラムでもご紹介したように、筆者は、エネルギー・資源学会が隔月発行する「エネルギー・資源」誌の 2009 年 1 月号と 3 月号において、e-mail 討論「地球温暖化：その科学的真実を問う」をコーディネートした。登壇者は次の 5 名の方々である（敬称略、五十音順、所属・役職は当時のもの）。赤祖父俊一（米国アラスカ大学名誉教授）、伊藤公紀（横浜国立大学工学研究院教授）、江守正多（国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室長）、草野完也（海洋研究開発機構地球シミュレーターセンタープログラムディレクター）、丸山茂徳（東京工業大学理工学研究科教授）。メール討論の全文は、各論者の論拠となるデータとともに、エネルギー・資源学会のホームページ <http://www.jsr.gr.jp/> から自由アクセスしてダウンロード可能である。インターネットで公開したことにより、本 e-mail 討論は、国内外の多数のサイトに引用された<sup>1)</sup>。なかでも、大学受験生用の小論文問題の題材<sup>2)</sup>としても用いられたのは、まさに望外の喜びであった。

この e-mail 討論の中で、筆者はあくまでもコーディネーターとして中立な立場を貫いたつもりであるが、個人的には人為起源の温暖化説に疑問を感じている。筆者は気象学が専門ではないが、エンジニア機械工学における熱流体工学を専門とする立場から、とりわけ数値シミュレーションにおけるモデル化の視点から考えてみたい。

## 乱流を厳密に再現できる直接数値シミュレーションの威力

流体力学に大きな足跡を残したサー・ホーレス・ラム（Sir Horace Lamb, 1849-1934）が“I am an old man now, and

when I die and go to heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is quantum electrodynamics, and the other is *the turbulent motion of fluids*. And about the former I am rather optimistic.”と語ったことは、ご存じの方も多いであろう<sup>3)</sup>。

ラムが楽観できなかった後者の乱流（turbulent flow）について、現在、完全に解明されたとはもちろん言えないが、少なくともある種の乱流現象は人間が数値シミュレーションで完全に再現できるようになり、「数値風洞」という言葉まで生まれた。1987 年、NASA（アメリカ航空宇宙局）のジョン・キム（John Kim）らが、壁乱流の直接数値シミュレーション（direct numerical simulation, DNS）に成功したからだ<sup>4)</sup>。すなわち、当時としては圧倒的な計算パワーを誇る NASA のスーパーコンピューターを用いて、乱流中の小さな渦に対しても十分な分解能で、流体に対する基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式（Navier-Stokes equation, 以下 N-S 方程式）を解き、信頼できる実験データとのほぼ完全な一致を示した。それだけでなく、今でも測定困難な圧力変動と速度変動の相関などを初めて定量的に示した。

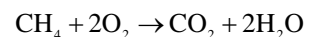
計算負荷の点から実際に計算可能なレイノルズ数（Reynolds number）が低い範囲にとどまるという欠点はあるものの、単相（single phase）の乱流の基礎的解明は、これ以降、実験ではなく DNS が主流になった。キムらの論文は、厳密な N-S 方程式を、厳密な境界条件のもとで解けば、壁乱流においても実現象を厳密に再現できるということを実証した数値流体力学研究史上の金字塔の一つといえよう。

## 熱をとともう流体数値シミュレーションの意外な限界

機械工学における数値シミュレーションの代表例は、加熱炉における燃焼やエンジンのピストン内における燃焼などである。両者ともに、実際は乱流燃焼であることが多く、後者はさらに非定常性も加わる。これらの現象は数値シミュレーションでどの程度正確に予測できるだろうか？

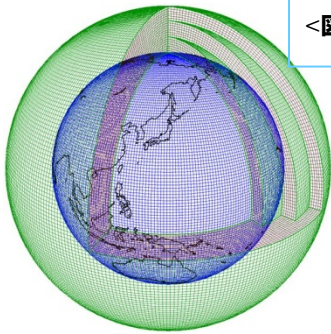
実は、これらの複雑な現象を例に挙げるまでもなく、例えばブンゼンバーナーでメタンガスを層流（laminar flow）で定常で燃焼させる場合でさえ、正確な予測は困難である。こういうと驚く読者も少なくないだろう。

メタンガスと空気（酸素）との反応は



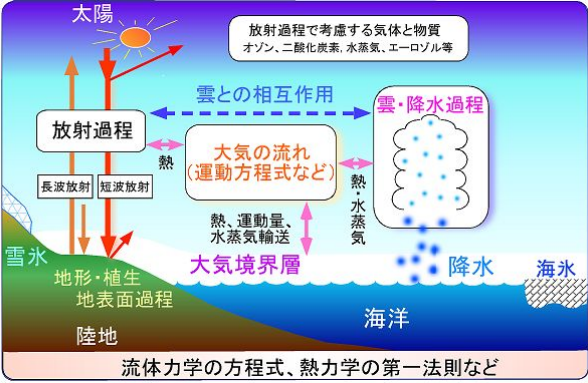
と理解する人が多いと思うが、この式はいわゆる総括反応、要するに結果的にはこの反応で代表されるだけで、現実には中間生成物や活性種とよばれる物質が生成・消滅する多数の反応式から構成されている。燃焼に対してはいろんなモデルが提案され、それらは何十、何百という素反応の組み合わせに基づいているもの、もしくは寄与の小さい素反応を間引くなどしていくぶん式の本数を減らしたものがほとんどであるが、いずれの場合も所詮はモデルであって、そこそこの精度で予測できる場合もあるが、そうでない場合も少なくない<sup>5)</sup>。

化学種が形を変える反応ではなく、単に相が変化する場合、たとえば、水が沸騰して水蒸気になる現象や、逆に空気中の水蒸気が窓ガラスに水滴となって凝縮する現象など、不均質な現象は、やはり正確な予測が難しい。確率



<図1> 数値予報モデルにおける格子点

<図2> 地球大気・海洋・陸地での諸現象



過程を考慮した経験則を取り込んでも  
自ずと限界がある。

**気候モデル:まず海洋の運動をシミュレーションするには**

次に、地球温暖化に関する議論で最重要柱である数値シミュレーションによる気候予測、いわゆる気候モデル (climate model) あるいは大気大循環モデル (general circulation model, GCM) について考えてみよう。日常の天気予報も地球温暖化に関わる長期の気候予想も原理的には同じことで、<図1>のような地球全体 (全球) に対して<図2>のような諸現象を考える<sup>6)</sup>。

まず海洋の数値シミュレーションを考えてみよう。この場合の基礎方程式は以下のように表すことができる<sup>7)</sup>。

(必ずしも専門家とは限らない一般読者も対象としている本誌では式を用いるのは適切でない面もあるかもしれないが、数値シミュレーションの実際を理解する上では有用であると思うので、お許し願いたい。)

海水密度 $\rho$ の状態方程式

$$\rho = F(T, S, P)$$

連続 (質量保存) の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

運動方程式

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \text{拡散項}$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \text{拡散項}$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g$$

温度  $T$  のエネルギー方程式

$$\frac{DT}{Dt} = \text{拡散項}$$

塩分  $S$  の拡散方程式

$$\frac{DS}{Dt} = \text{拡散項}$$

ここで、海水の密度を $\rho$ とし、時間を  $t$  とする。また、局所的に直交する (東西, 南北, 鉛直) 方向に対して、座標をそれぞれ  $(x, y, z)$ , 海水の速度成分をそれぞれ  $(u, v, w)$  とする。重力加速度  $g$ , 圧力  $P$ , 温度  $T$ , 塩分を  $S$  とする。 $f$  はコリオリパラメーターである。専門外の方には見慣れない  $D$  の微分記号は、流体力学特有のものであるが通常の微分記号  $d$  の仲間と考えてよい。また、右辺にある拡散項というのは、左辺の  $D$  微分の中に入った変数の2階微分に比例するものと考えてよい。

要するに、熱塩循環を考えるためには海水の密度を温度と塩分との関数とすればよく、連続の式、運動方程式、温度に対するエネルギー方程式、塩分に対する拡散方程式を連立させる。乱流拡散をさほど無理のない経験則にしたがって評価し、実際の複雑な海中の地形を考慮し、さらに大気との界面における境界条件で風成循環を考慮すれば、数値シミュレーションはまずまずの精度でできるであろう。

**気候モデル:つぎに大気—「雲をつかむ」のはやはり難しい**

地球表面の平衡温度を、入射エネルギーと放射エネルギーのバランスから簡単な仮定をして求めると-18℃程度になるが、実際には主に水蒸気による温室効果により 30℃以上も高くなる<sup>8)</sup>。もちろん二酸化炭素などのいわゆる温室効果ガス (greenhouse gas, GHG) の寄与もあるが、まずは水蒸気、そしてその密な集合体としての雲の挙動が重要である。

そこで、雲の数値シミュレーションはどのようなモデルに基づいているのか一例を挙げて紹介しよう。雲の生成・消滅の素過程はミクロな現象であるが、空間をメートルあるいはキロメートル単位の計算格子で分割して行う大気計算には、そのような素過程を考慮するのは不可能に近いと言ってよく、ためにパラメタリゼーション (parameterization) という手法が用いられる。その具体例として、いささか古いがわかりやすさという点からスーザイ・スング (S.-T. Soong) ・小倉義光のモデル<sup>9)</sup>を以下に示す。

温位 (断熱変化を考慮した温度)  $\theta$  の式

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{L}{c_p \pi} \left( -\frac{dQ_{vs}}{dt} - E_r \right) + \text{拡散項}$$

水蒸気存在割合  $Q_v$  の式

$$\frac{DQ_v}{Dt} = \frac{dQ_{vs}}{dt} + E_r + \text{拡散項}$$

雲粒存在割合  $Q_c$  の式

$$\frac{DQ_c}{Dt} = -\frac{dQ_{vs}}{dt} - A_r - C_r + \text{拡散項}$$

雨粒存在割合  $Q_r$  の式

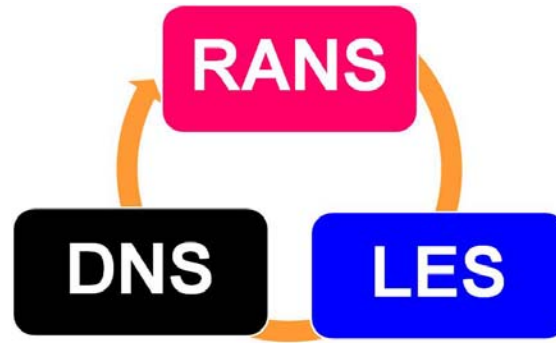
$$\frac{DQ_r}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} V_r Q_r) + A_r + C_r - E_r$$

ここで、 $Q_v$ ,  $Q_c$ ,  $Q_r$  の式の右辺に現れる  $A_r$ ,  $C_r$ ,  $E_r$  などは日々加えると消えてしまうので、水の諸形態の間の移行を表すことは直感的に理解できる。これらの項のパラメタリゼーションとして以下のようなモデルが導入される。

$$A_r = \begin{cases} k_1(Q_c - a) & : Q_c > a \\ 0 & : Q_c \leq a \end{cases}$$

$$C_r = k_2 Q_c Q_r^{0.875}$$

<図3> 乱流の数値シミュレーション



$$E_r = \frac{1}{\rho} \frac{[1 - (\rho_v / \rho_{vs})] c (\bar{\rho} \bar{Q}_r)^{0.525}}{5.4 \times 10^5 + (0.41 \times 10^7 / e_s)}$$

$$V_r = 3634 (\bar{\rho} \bar{Q}_r)^{0.1364}$$

(正しくは、モデル中の係数は関係物理量の次元を規定しないと意味をなさないがここでは省略する。) 係数の中には、物理的根拠をもつものもあるが単なる経験値であるものもある。もちろん、このようなパラメタリゼーションは日進月歩で、予測値と観測値との比較などからチューニングが進んでいるだろうが、それでも普遍性に欠ける場合は少なくないだろう。

加えて重要なことは、そのような現状での不確かさがたとえ払拭できたとしてもにせよ、廣田勇<sup>10)</sup>が強調するように「予測の議論でさらに難しいのは、その当否を確認できない領域(時間・空間・状況)に踏み込もうとするときである。」換言すれば、未確認の領域に(希望的観測で)外挿的に用いられることに対する警鐘である。

## 再び乱流のシミュレーションにもどって

ここで冒頭に述べた乱流のシミュレーションに話を戻そう。乱流のシミュレーションは、何もモデル化せずに基礎方程式を直接解くのが原理的にはいちばん簡単であるが計算負荷がいちばん重く、モデル化を進めるにつれ考え方は込み入っていくが計算負荷が軽くなる(計算負荷を軽くするためにモデル化の知恵を巡らせるというのが正確)という特徴がある。つまり、大雑把に表現すると、計算機の発達とともに、モデルはその衣を少しずつ脱ぎ捨て裸に近くなってきたといえる。

具体的に、DNS から時代を逆行する

と、まず大規模渦シミュレーション(large eddy simulation, LES)の時代となり、LESには高名な気象学者ヨーゼフ・スマゴリンスキー(Joseph Smagorinsky)の名を冠したモデルなどが登場する。

LESよりさらに遡ると、通称「乱流モデル」とも呼ばれることの多いレイノルズ平均数値シミュレーション(Reynolds averaged numerical simulation, RANS)となる。コンピューターが普及し始めた1970年代に精力的に研究が展開された当時、方程式の数に基づいて、 $k-\epsilon$  2方程式モデル、レイノルズ応力3方程式モデルなどと呼ばれた( $k$ と $\epsilon$ は、それぞれ乱流エネルギーと乱流散逸)。RANSは、瞬間ではなく(準定常的な)時間平均挙動を解析するもので、とりわけ機械工学では、時間平均の抵抗係数や混合度合いが重要であることから、この分野の研究は機械工学の独壇場といっても過言ではない。そして、このような歴史的にはいちばん古いRANSの最近の展開を後押ししているのが、最新のDNSから得られた知見である(図3)。

## 乱流モデルと気候モデルの歴史のアナロジー

おそらく現行の気候モデルも将来的には乱流モデルと似通った経緯、歴史のアナロジーを示すに違いないと筆者は考える。ただし、気候モデルの方は乱流モデルに比べて桁違いに多い因子に支配される。因子の数は何桁違いか筆者には想像もつかない。乱流モデルにおける高次の因子(たとえば圧力勾配、流線曲率、回転場、圧縮性の影響など)への修正だけでもなかなか進まないことを考えると、宇宙からの影響も含めた地球上の森羅万象を取り込

む必用のある気候モデルは、相対的にはまだまだ未熟であることも間違いない(関係者のご努力とこれまでの進展には心からの敬意を表すが)。しかも、問題にしている温度変化も地球全体で1°Cという、われわれの頭部と足下の間でも存在する微小な量である。

結論として、現行の気候モデルに関して、くれぐれも謙虚さを忘れないことは重要である。そして、本稿を最後まで書き終えて振り返ってみると、廣田勇「地球温暖化を見つめ直す」<sup>11)</sup>に書かれていることのごく一部を具体的に表現したにすぎないことに気付いた。

### 参考文献

- 1) H. Yoshida: Proc. of Int. Conf. on Power Eng.-09 (ICOPE-09), 2-317 (2009).
- 2) よみうり入試必勝講座: よみトク小論文講座 2009年4月 (2009). [http://www.yomiuri.co.jp/education/kouza/kokugo/0904/k0904\\_1.htm](http://www.yomiuri.co.jp/education/kouza/kokugo/0904/k0904_1.htm)
- 3) たとえば Center For Turbulence Research: <http://www.stanford.edu/group/ctr/articles/tackle.html>
- 4) J. Kim, P. Moin and R. Moser: J. Fluid Mech., 177, 133 (1987)
- 5) 三好明: 日本燃焼学会誌, 50, 154, 325 (2008).
- 6) 気象庁のホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>
- 7) 遠藤昌宏: 海洋大循環のシミュレーション, 岩波講座 地球惑星科学 7巻, 数値地球科学 (1997), p.127.
- 8) 小倉義光: 一般気象学 [第2版], 東京大学出版会 (1999), p.114.
- 9) S.-T. Soong and Y. Ogura: J. Atmos. Sci. 30, 879 (1973).
- 10) 廣田勇: グローバル気象学, 140, 東京大学出版会 (1992).
- 11) 廣田勇: 地球温暖化を見つめ直す, 環境新聞 2008年4月23日と30日, 「エネルギー・資源」誌でのメール討論におけるデータとして以下のURLからダウンロード可能, <http://www.jsr.gr.jp/activity/e-mail/2009.3/3gw5-11.pdf>