天文と CFD

The Astrophysics and Computational Fluid Dynamics

矢部 孝、尾形 陽一 *東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻

Takashi Yabe , Youichi Ogata *Department of Mechanical Sciences and Engineering Tokyo Institute of Technology

E-mail:yabe@mech.titech.ac.jp

1 はじめに

20世紀は天文学が著しく発展した時期であった事は誰もが認める事であろう。それは例え ば相対性理論の提唱等に代表される理論の発展、ハッブル宇宙望遠鏡等にあげられる観測技 術の大きな進歩による所が非常に大きい。しかし、20世紀半ば頃から第3の手法としてコン ピュータシミュレーションによる解析が、計算機性能の向上と計算手法の発展に伴い徐々に その有効性が認知され、確固たる地位を確立するに至っている。

天文現象は「流体力学」で記述出来ることが多く、CFDの発展はそのまま天文学への応用 にも繋がっていった。また、「流体力学的手法」だけでなく、「プラズマ物理」や「磁気流体 力学(MHD)的」な手法を用いる事でより大きな進歩を遂げ、我々に大きな理解を与える事 となった。天文現象の特徴として非常に長い時間スケールの現象が存在するが、コンピュー ターで再現できる様になった事で、例えば星の一生等の様な我々が生きている間には決して 始めから終わりまで見ることは出来ない様な現象の全貌が明らかになってきた。

以下では、CFD によって明らかになった現象のシミュレーション結果を中心に紹介し、 CFD の有効性と今後の展望について触れる。

2 CFD と計算モデル

天文におけるコンピュータシミュレーションも様々なものが挙げられるが、計算モデル(基礎方程式)は扱う問題によって様々な状況を考慮する必要がある。ここで天文現象を計算する際の特徴を幾つか挙げてみる。

◎時間・空間スケールが幅広い

星間分子雲などは直径が数光年(1光年~1×10¹⁸cm)、銀河に至っては数万光年と非常に スケールが大きい。一方、我々に最も身近である太陽や太陽系で起きる現象は地球の数~数 十倍程度である。また、時間スケールも例えばガンマ線バーストの様に数十ミリ秒~数十分 で変動する様な現象もあれば、星形成・銀河形成等といった数千万年~数億年の現象も存在 する。よって、代表的な量による規格化は不可欠である。

◎重力がある

重力は地球上でも勿論存在するが、地球の半径はほぼ不変なので重力は一定である。しか し中には巨大分子雲の様に半径が収縮・膨張により大きく変化する様な現象も存在し、「自己 重力」と呼ばれる効果を考慮する必要がある。自己重力は距離の2乗に反比例しこれは電磁 気力と同じだが、引力しかないので力がシールドされる事が無く、現象を非常に複雑にして しまい、「重力不安定性(ジーンズ不安定性)」を引き起こす要因にもなる。

◎圧縮性が非常に強い事がある

我々が通常よく扱う流体は、非圧縮性流体近似で良い事が多い。しかし、天文現象の場合、 例えば分子雲の密度は約10⁻¹⁹g/cm³程度であるが、それが収縮した星は約1g/cm³となり、重 力崩壊して生じる中性子星は更に10桁以上密度が増加する。他にも太陽表面スピキュールや 降着円盤ジェット等の様に超音速になる現象も数多く、圧縮性の強い流体と仮定出来る ので例えば衝撃波捕獲も正しく行なう必要がある。

◎様々な効果を考慮する必要がある

例えば、最も典型的な圧縮性流体方程式(断熱)は以下の様に記述する事が出来る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$
⁽¹⁾

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F}$$
⁽²⁾

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) U = -\frac{p}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v} + Q \tag{3}$$

$$p = (\gamma - 1)\rho U \tag{4}$$

ここでUは内部エネルギー、Fは外力項、Qは熱源である。

しかし、例えば星形成・銀河形成等の計算では外力項 F に自己重力が入り、重力ポテンシ ャルを解く方程式が更に加わる。また、宇宙空間には数~数十µGの磁場が存在し、星形成・ 降着円盤などは磁場の影響が非常に重要であると考えられている。この様な場合基礎方程式 は「電磁流体力学(MHD)」に変わり、Maxwell 方程式を更に解く必要がある。他にも輻射・ 熱伝導項・相対論効果など天文現象を扱う時には様々な効果が生じる。一般の流体を解く時 も同様であるが、扱う現象によってどの効果が重要な項なのかを正しく把握し、それぞれに 対応した計算手法を用いる必要がある。式(1)~(4)は非保存形で書いたが、保存形で解くスキ ームも数多く、それによって種々の効果の扱いも変わってくる。

◎不安定な現象が多い。

流体現象に欠かせない要素の1つに不安定性があるが、天文現象の中にも不安定性によっ

て引き起こされるものが非常に多い。重力の所でも多少述べたが、電磁力と違い引力しかな い重力はある程度以上の擾乱があると不安定が発生し、更に相対論を考慮するとその様相が 変わってくる。また、例えば我々がよく知る「レーリーテーラー不安定性」は超新星内部の 物質混合や降着円盤のジェット発生に大きな役割を果たす事が最新の計算で明らかになり, 「ケルビンヘルムホルツ不安定性」は流速差が大きいと発生し、身近な例では太陽風によっ て地球磁気圏上に発生する。また、磁場の存在も様々な不安定性を引き起こし例えば「パー

カー不安定性」「磁気回転不安定性」等は太陽表面活動・降着円盤・星間分子雲・銀河活動等に大きく影響を及ぼす事が分かってきた。

他にも不安定を引き起こす要因は様々であるが、この様な現象の CFD 非定常解析では不安 定成長の際に系が徐々に複雑になるため、スキームによっては数値粘性による成長モードの 減衰や数値不安定性等が発生する事もあるため、空間・時間高精度スキームが必要不可欠で ある。

◎境界条件

CFD で最も頭を悩ませる問題の1つに境界条件がある。周期境界であれば比較的問題は 簡単であるが、自由境界等は一般の流体では例えば特性曲線法を用いた無反射境界条件によ り、境界外部へ出て行く波が計算領域内に跳ね返らない様にする事もある程度可能である。 しかし MHD の様に磁場が入ると一般の流体の波のモードの他にアルフベン波等の磁場に起 因した波の影響も考慮しなくてはならない。

CFD にとって天文は困難な点が多いが、それだけに解きがいのある話題であるとも言える。 次章では、非保存形スキームの高精度解法である CIP 法[1][2][3]を用いた計算例を紹介する。

3 計算例

<降着円盤>

まず始めに「降着円盤」の計算例を示す。降着円盤は宇宙では様々な所で生じる現象で 中性子星やブラックホールの周り等にも存在し、星が誕生する前の段階としても存在する。 星の形成は、分子雲のコアが重力収縮と回転による遠心力によって徐々に円盤になった後、 円盤の中心に向かって物質が降着する事によって中心部に高密度領域が生じる事から生まれ ると考えられているが、降着円盤を観測するとジェットの様なものが見られる事がある。

図1(a)はハッブル宇宙望遠鏡で観測されたジェットの写真である。この様なジェットが何 故発生するのかは謎であったが、工藤(国立天文台、現 Western Ontario 大学)らによって 移流項は CIP 法、磁場の誘導方程式は MOCCT 法を用いた CIP-MOCCT 法による 2.5 次元 軸対称 MHD 計算[4][5]によって解析された。

初期条件として質量中心に対して回転平衡状態にあるトーラス型円盤を置き、円盤の赤道 面に垂直な磁場が円盤を貫いている。また、磁気拡散等の効果は無視し、流体は磁力線に凍 り付いているとしている。

図1(b)はジェットが発生している時の温度分布を表している。円盤が回転すると貫いてい

る磁場がねじれる事によりねじれアルフベン波が発生し、円盤外部の高温領域(コロナ)を 伝播していく。その際円盤内の角運動量が外部コロナに輸送され、円盤自身の角運動量は減 衰するので円盤の物質が質量中心に向かって落下を始める。







図 1(a) ハッブル宇宙望遠鏡によるジェット観測。(b) 降着円盤ジェットの 2.5 次元 計算(CIP-MOCCT法):工藤、柴田、松元, APJ (1998)



図2 磁力線に揺らぎを入れた時のジェットの計算(温度分布):工藤、柴田、松元, APJ(2002) 中心に向かって落下した物質が外部に向かってジェットの様に加速されるかどうかは重力 と遠心力から決まる有効ポテンシャルの勾配によって決まる。仮定により流体は磁力線に付いているので落下と共に磁力線も中心に向かって曲げられるため、遠心力(実際は磁気力が 起源になっているので「磁気遠心力」と呼ばれている[4][5])が重力より大きい領域内の物 質は更に磁気圧の加速を受け磁力線に沿って上方に加速され、ジェットになる事が分かった。

また、ジェットの質量排出率 \dot{M}_{W} ・速度 V_{z} はそれぞれ

$$\dot{M}_W \propto B_0$$
 (5)

$$V_{z} \propto \left(\frac{\Omega_{F}^{2} B_{0}^{2}}{\dot{M}_{W}}\right)^{1/3} \propto B_{0}^{1/3}$$
(6)

の様な依存性がある事が示された。ここで B_0 は初期磁場強度、 Ω_F は回転角速度である。

式(6)は Michel(1969)らによってされた定常解の解析式と同一である。この事から、非定常計算であるにも関わらず定常解理論である程度現象を説明出来る事も明らかになった。

図2は円盤内に更に正弦関数型の微小な擾乱を入れた計算である[6]。図は温度分布であり、 白い線は磁力線を表す。非一様な条件下でも磁気回転不安定性によって揺らぎが大きく成長 し、磁気ピンチによって回転軸方向にジェットが噴出する事が明らかになった。

<シューメーカーレビー第9彗星>

先例は非常に大きな時間・空間スケールの計算であったが、次に我々の住む太陽系で起き た未だ記憶に新しい、1994年に木星に衝突したシューメーカーレビー第9彗星(SL9)のシ ミュレーションを紹介する。木星大気に突入する際に彗星核がどの様に崩壊するかを2次元 軸対称および3次元シミュレーションである。



図3 SL9 木星衝突の2次元軸対称計算:矢部、青木、田島ら Geophys.Res.Lett.(1995) 彗星衝突のシミュレーションは固体(主成分は氷と考えられている)である彗星核と気体

である木星大気との相互作用を正しく計算する事が必要となる。本計算では氷の状態方程式 はタイト方程式と呼ばれる式を用い、木星大気は理想気体として、固気液統一解法である CCUP 法を用いて計算を行なった。

図3は2次元軸対称計算である[7]。彗星は約60km/secで木星大気に衝突するが、本計算では木星大気を60km/secで左から右へ流している。よどみ点である中心軸上の点から徐々に動圧によって穴が開き、彗星表面から物質が徐々に削られた後、上下2つに分裂する様子が計算されている。

図4は更に3次元計算を行った結果である。2次元軸対称計算と同様に、彗星表面から穴が開いている様子が分かる。また、興味深い事に対称的に崩壊するのではなく彗星表面に波が発生し、その振幅が徐々に大きくなり崩壊していくという計算結果となった。



図4 SL9衝突の3次元計算による彗星核崩壊の様子:田島、矢部



図5(a)ハッブル宇宙望遠鏡による木星表面衝突痕の時間経過(b)大気突入時の彗星核の爆 発シミュレーション

この SL9 衝突の観測で興味深い結果が得られている。図5(a)はハッブル宇宙望遠鏡による

木星大気衝突後の SL9 の衝突痕を観測した写真である。計算結果では衝突した彗星核は約2,3 秒で崩壊してしまうのだが、観測では衝突後1ヶ月以上経過しているにも関わらず木星表面 に衝突痕が残されている事が確認された。

この現象の理由の一つとして、渦の存在が影響していると考えられている。理想流体での 渦度方程式は

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \times (\omega \times u) = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p$$

(7)

で表される。これは密度勾配と圧力勾配が平行でない時は右辺の項(バロクリニック項)に より渦度が発生する事を意味している。彗星衝突時にこの項による渦度が発生した後(図 6(b))、圧力勾配と密度勾配が平行になるに従って徐々に右辺は0に近づくに連れて、正と負 のそれぞれの循環は一定値に近づき(図 6(c))、ケルビンの循環定理に近づく様子が計算で再 現された。実際は木星大気の粘性散逸や木星表面の流速が非常に速い事から徐々に衝突痕の 形状は崩れてしまうが、ケルビンの循環定理では循環はラグランジュ的に保存される非常に 安定な物理量であり、この効果によって長い間衝突痕が残っていたという事が説明できる事 が分かった[8]。



図 6 (a):彗星衝突時の密度・渦度変化。左半分が密度、右半分が渦度。彗星は上から下に向かって大気に突入している (b):式(7)の右辺の時間発展 (c):渦度と循環の時間発展 松永、矢部 CFD Journal(2001)

固体・液体・気体を同時に解くという事は、各相の状態方程式を如何に正しく計算し、それを流体方程式の数値解法に反映させるかが大きな要素である。本計算例は天体物理に近い ケースであるが、他にも重要な例としては超新星爆発・中性子星の計算が挙げられる。

概略だけ述べると、恒星は内部の水素が核融合反応する事により燃え続ける事が出来るが、 その水素が無くなると中心部から徐々に核融合が進みヘリウム・炭素、最終的には鉄等の重 元素へと変化した後、中心に向かって重力崩壊を起こす。重力崩壊によって収縮したコアは 超高密度になるため内部では収縮が止まるが、外層は落下し続けるのでコアに衝突し衝撃波 が発生する。外層を伝播する衝撃波は外層を高温化し膨張させ、その膨張速度がコアの重力 速度を超えると大部分の外層を吹き飛ばす。これが超新星爆発の主なメカニズムと考えられ ており、一方、吹き飛んだ後に残された星のコアが中性子星になる。

衝撃波の計算は当に CFD の分野であるが、ここで問題となるのはその計算モデルである。 ニュートリノと物質の相互作用が伝播する衝撃波に大きく影響を及ぼす事が明らかになった が、コアの状態方程式や内部のレプトン比等も衝撃波の発生・伝播の成否を決定する。また、 回転による遠心力や磁場の効果、流体不安定性による物質の混合等が爆発に大きく影響する 事も数値計算で明らかになった事である。

4 終わりに

幾つかのシミュレーション結果を通じて CFD の天文現象における有効性を示してきたが、 近年の計算機性能の向上と数値計算手法の発展に伴い、間接的にしか観る事の出来ない様々 な現象がが CFD によって徐々に明らかになってきた。しかし未だ解明されていない問題も数 多く、それらは理論・観測の問題のみならず一般的に我々が扱う流体問題と同様、現象の性 質上・非線形性により数値的にも解く事が難しい問題がある事も忘れてはならない。こうい った問題を克服する為にも、「CFD」自体の研究はよりその重要性を増し、そしてその結果が 天文学に大いに貢献する事であろう。

また、膨大なスケールの現象の内部を詳細に捉える為には、更に大規模な計算は必要不可 欠でありまた、詳細な内部構造を得る為には LMR・AMR の様な処理も必要になる。特に 3 次元計算では、より詳細に計算結果から現象のメカニズムを把握する為には可視化の研究も 重要な分野である。

今後 CFD の天文における役割は一層大きくなると思われるが、理論・観測結果を証明する だけでなく、CFD による計算結果から理論・観測に対し新しい発見が進む事が期待される。

参考文献

[1]T.Yabe and T.Aoki, Comput.Phys.Commun(1991) 66,p219

[2]T.Yabe,T.Ishikawa,P.Y.Wang,T.Aoki,Y.Kadota and F.Ikeda, Comput.Phys.Commun (1991) **66**,p233

[3] T.Yabe, F.Xiao and T.Utsumi, J.Comput.Phys(2001) 169,p556.

[4]T.Kudoh, R.Matsumoto and K.Shibata, APJ(1998) 508,p186

[5]T.Kudoh, R.Matsumoto and K.Shibata, Adv.Space.Res(1999) 23,p1101

[6]T.Kudoh, K.Shibata, R.Matsumoto, PASJ(2002) 54, p121

[7]T.Yabe, T.Aoki, M.Tajima, F.Xiao, S.Sasaki,Y.Abe and J.Watanabe, Geophys.Res.Lett . (1995) **22** No.17, p2429

[8]E.Matsunaga and T.Yabe, CFD Journal(2001) 9 No.4, p401