

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540226

研究課題名(和文) 衝撃波の安定性と渦状銀河における大局的星形成

研究課題名(英文) Stability of Shock Wave and Global Star Formation in Spiral Galaxies

研究代表者

花輪 知幸 (Hanawa, Tomoyuki)

千葉大学・先進科学センター・教授

研究者番号：50172953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：渦状銀河の数値モデルに現れるWiggle instabilityの原因を探るため、強い衝撃波を伴う流れの数値解について詳細に調べた。中でも体積粘性の役割について検討した。薄い衝撃波遷移領域では体積粘性が圧力テンソルの主要項を生み出す。体積粘性は極めて小さく、遷移領域の外では無視できるが、解像度が有限であるために数値解では遷移領域が人為的に広がる。体積粘性による圧力を適正に捉えるためには、粘性の量を人為的に増さなければならない。人為的に増やすと、解像度を高くした極限で古典的な跳躍をふくむ解に収束する。また数値格子の回転やガリレイ変換に対して不変である望ましい解が得られる。

研究成果の概要(英文)：The researcher has examined numerical solutions of flows associated with strong shock in order to explore the origin of the wiggle instability appearing in the numerical models of spiral galaxies. The role of the bulk viscosity in particular has been investigated. The bulk viscosity dominates the pressure tensor in extremely thin shock transition layers, although it is negligibly small outside them. The shock transition layers are artificially broadened in numerical simulations owing to the finite resolution. Hence the bulk viscosity should be enhanced to evaluate the contribution to the pressure tensor appropriately. The numerical solutions obtained with the enhanced bulk viscosity shows convergence to the classical jump solution in the highest resolution limit. They are invariant under the rotation of the numerical grid and the Galilean transformation.

研究分野：理論天文学

キーワード：衝撃波 数値シミュレーション 安定性

### 1. 研究開始当初の背景

渦状銀河や棒渦状銀河を高解像度で数値シミュレーションすると、衝撃波面後方に Wiggle と呼ばれる細かい構造が生じることが約 10 年前に発見された。当初、数値計算手法の不備によるものであることも検討されたが、複数の研究者により複数の手法で再現されることが確認された。しかし衝撃波面は物理的に安定であるため、このような細かい構造が生まれるには何らかの説明が必要である。申請者は銀河モデルより簡単な状況でも、数値シミュレーションにはゆらぎが生じることを見出し、この不安定が数値的なものである可能性を検討することとした。またブラックホールへの降着流の研究で、衝撃波直後に流れが加速される場合には、衝撃波面が平衡位置から移動する(不安定となる)ことを見出していた。銀河衝撃波のモデルでも衝撃波を通過すると流れが加速され密度が減少していたので、このことと銀河衝撃波の安定性を関連づけたいと考えた。

### 2. 研究の目的

渦状銀河や棒状銀河では「腕」と呼ばれる弧状に延びた領域に若い星やそれらを生み出す分子雲が集中する。分子雲はガスが衝撃波により形成されると考えられるが、計算格子を用いた従来の計算法では衝撃波を適切に取り扱うことができない。衝撃波面は本来平面的であるはずだが、計算格子により物理量を離散化すると、衝撃波面も折れ線で近似せざるをえなくなるからである。折れ線で近似すると圧力勾配が正しく見積もれず、流れが誤った方向に加速される。近年の数値シミュレーションは空間分解能が高く数値粘性も低いため、一旦発生すると、たとえ偽でも歪みやゆらぎが消えずに残る。このような歪みやゆらぎは、物理的な渦やゆらぎと区別が付きにくく、数値シミュレーションの信頼性を損ねる。本研究課題では偽の渦やゆらぎを発生させない数値シミュレーション手法を開発し、それをもとに銀河衝撃波の力学的な安定性を明らかにし、銀河の大局的な星形成について新しい知見をもたらすことを目的とした。

### 3. 研究の方法

銀河衝撃波を信頼できる精度でシミュレーションできる計算法を開発するために、数値計算法の開発と、衝撃波を伴う流れの安定性を明らかにする理論の開拓を行った。

数値計算法の開発では、密度や速度、圧力分布が半解析的に求められる 1 次元遷音流を題材とした。流れは 1 次元であるが、流れに対して傾いたデカルト座標を採用して、座標系の取り方によらず解析解に収束する数値解を得られる方法を探す。得られた数値計算法を銀河衝撃波のモデルに適用し、Wiggle instability が数値的なものであるかどうかを確かめる。

また Wiggle instability が起こる原因を同定するため、1 次元流に摂動論を適用し、衝撃波が安定となる条件の定式化を試みる。

これらの結果にもとづき、銀河での大局的な星形成について論じる。

### 4. 研究成果

さまざまな試行錯誤の末、強い衝撃波を伴う流れを安定かつ正確に解くためには体積粘性を人為的に強化すれば良いという結論に達した。本報告では最初に結論にする必要があるという結論に達し、具体的な手法を考案した。本報告ではこのような結論に至った経緯を最初に述べ、次にその解決策、銀河衝撃波への応用を論じる。

#### (1) これまでの計算法の問題点

銀河ガスを含め、天体プラズマでは系がガスの平均自由行程に比べて極めて大きい。このため物理的な粘性は無視できるほど小さいので、銀河モデルを含めた多くの数値シミュレーションでは粘性が陽に取り入れられていない。しかし、衝撃波では速度が急激に変化するため、小さくても粘性は圧力テンソルに大きな寄与をする。

図 1 は粘性による項が衝撃波面では圧力テンソルの重要な要素となることを示している。この図では衝撃波面( $x = 0$ )を境に、速度(青実線)は減少し、密度(青破線)は増加する。これらの積である質量流速は一定に保たれるが、動圧と圧力の和として定義される全圧力( $P + \rho v^2$ )は波面で大きく凹む。赤一点破線で示された粘性項を考量することにより、運動量流束が一定(Rankine-Hugoniot 関係)となる。

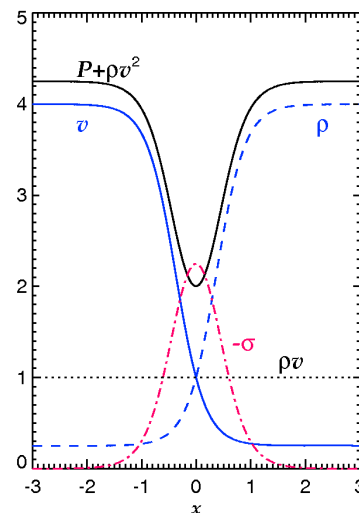


図 1. 衝撃波面での密度( ), 速度( $v$ ), 全圧力( $P + \rho v^2$ )の変化。

このように粘性による寄与が大きくなる遷移領域の厚みは粘性に比例する。銀河ガスでは粘性が小さいので、その厚みは十分無視

できると考えられてきた。しかし実際のシミュレーションでは空間分解能が有限であるため、遷移領域の幅は人為的に空間分解能の数倍に広がられる。広がられた遷移領域では全圧力が下がるので、粘性によりその減少を補わなければならない。数値計算では陽に粘性を取り入れなくても、自然に補われると考えられてきたが、この考えが正しくないことを研究の過程で見出した。

図2は空間5次時間3次のMP5法を用いて計算したMach数4の比較的強い衝撃波を伴う等温遷音速流の計算例である。

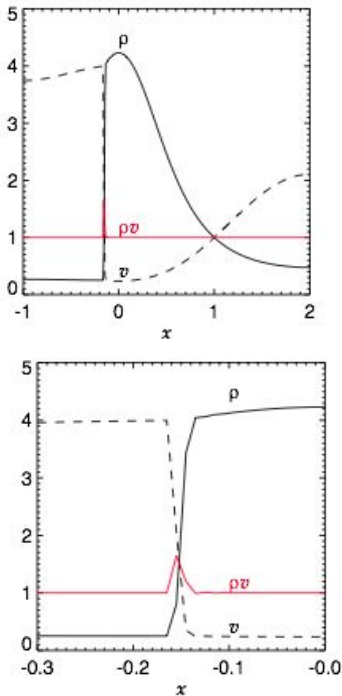


図2. (上) 衝撃波を伴う1次元の等温な遷音速流を従来の手法で計算した例。(下) 衝撃波近傍の拡大図。

衝撃波での速度の低下と密度の増加は鮮明に捕らえられているが、数値格子の中心で評価した質量流束は明らかな増加を示している。数値解が定常状態にあるのは、数値格子の境界で評価した流束が一定となっているためである。この2つの質量流束の違いは、衝撃波下流から上流へ拡散に数値粘性による流れが生じていることを示している。このような流れは不自然なもので、本来、排除しなくてはならない。

同じ問題は断熱衝撃波でも起こる。ただし断熱衝撃波の場合は、強い衝撃波の極限でも上流と下流の密度比は4程度でさほど大きくない。このため欠点が深刻に見えない。流れが等温で衝撃波が強い場合は上流と下流で密度の比がとても大きくなる(図1の例では16倍密度が上昇)。従って衝撃波下流から上流への不自然な拡散流が目立つ。

しかし断熱流でも2次元シミュレーションでは明確な問題をもたらす。図3は比熱比が $\gamma=5/3$ の衝撃波を伴う断熱1次元流の流れに対して傾いた数値格子を用いて計算した例である。

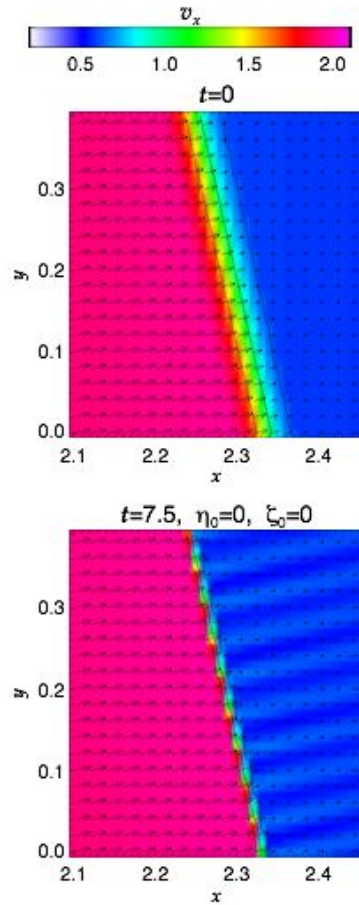


図3. 1次元の衝撃波を伴う断熱遷音速流を傾いた数値格子で計算した例。色は波面に平行な速度成分。時刻 $t=0$ では一様であるが、 $t=7.5$ (下)では下流に縞模様の速度変化が現れる。

数値格子が傾いているため、衝撃波面はジグザグの折れ線で近似される。このため局所的な圧力勾配の向きと大きさは場所により異なる。これが原因となって速度や密度分布に準周期的な変化(縞模様)が見られる。流れが等温の場合は縞模様が発展し、渦を伴った流れがでてくる。この模様は数値格子と流れのなす角度により変化するので、数値計算法の不備によると断定できる。

## (2) 解決策: 体積粘性の人為的強化

前節で見た問題は、粘性を陽に入れなかったことに起因する。現在の数値シミュレーション法の多くは粘性を陽に考慮していない。粘性のない流れの厳密解であるRiemann解と



保存則を組み合わせることにより、必要な粘性が適切に取り込まれることが暗に仮定されている。しかし前節で見たように、そのような解では質量の拡散といった不適切な拡散も発生する。むしろ、必要な粘性を導入して非物理的な拡散を防ぐべきである。物理的粘性には速度発散に比例する体積粘性と、速度剪断に比例するシア粘性がある。衝撃波では速度の発散が負となるので( $\nabla \cdot v < 0$ )、体積粘性の係数を人為的に増やせば問題が解決しそうである。

図4は体積粘性を衝撃波面の近傍で人為的に増やし、図1に示したものと流れを解いた結果である。遷移領域でも質量流束ほぼ一定に保たれている。

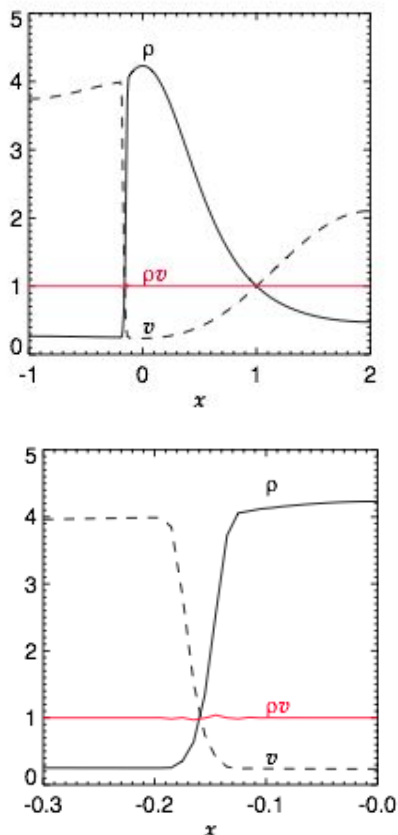


図4. 体積粘性を人為的に増大させて図1と同じ流れを解いた結果。

遷移領域の幅に比べて十分に細かい数値格子を採用すれば、衝撃波面を高精度で捉えることができる。遷移領域の幅は粘性に比例するので、達成したい精度に応じて適切な粘性を設定することができる。必要な粘性は衝撃波の強さにより異なるが、遷移領域が数値格子の4倍程度になるように設定すれば実用上は天体物理を論じるのに十分な精度が得られることを見出した。

可能ではあるが、体積粘性の値を計算領域全体で一定とすると、衝撃波から離れた領域でも粘性が働いてしまう。これを避けるために粘性係数を密度勾配( $|\ln \rho|$ )比例させた。

このように設定すると、粘性が実質的に働く領域は遷移領域の中だけなる。粘性係数を密度勾配の2乗に比例させると、遷移領域を狭くできるが、遷移領域の端で速度勾配が不連続になるので、高精度の解が得られにくくなる。従って体積粘性を密度勾配の絶対値に比例させるのが適当と結論付けた。本研究ではSuresh & Hyunh (1998) によるMP5を基本の計算法として採用したが、結論は計算法に依存しない可能性が高い。

また陽に取り入れられた体積粘性が、速度シアにより発生するKelvin-Helmholtz不安定が人為的に抑制することはないことを数値実験により確かめた。

### (3) 銀河モデルへの適用

前節の方法により衝撃波を安定に捉えることができる方法を適用したところ、弱い腕構造をもつ銀河モデルでは衝撃波を安定に計算できることが確認できた(図5参照)。

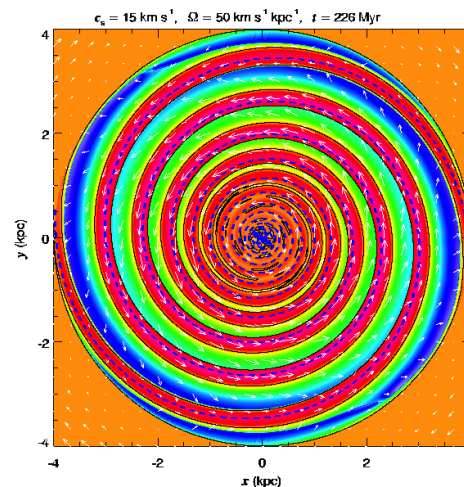


図5 銀河モデルの例。

しかし腕のポテンシャル強くなると、渦状衝撃波は不安定となる。安定なモデルでは衝撃波通過後にガスが減速されるのに対して、不安定なモデルでは加速されている。衝撃波が同じ場所に留まるためには、衝撃波通過後のガスが減速される必要がある。2014年にソウル大学のW.T. Kim教授らが提唱したように、Wiggle instabilityはガスが衝撃波を繰り返し通過することに発生した可能性がある。彼らのモデルでも、ガスは衝撃波通過後に加速されている点は一致している。

### (4) 垂直な磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の構造と安定性

上記の研究とは独立に、大局的な星形成に大きな影響をもたらす磁場の力について理論的解析を行った。細く伸びたフィラメント状分子雲に対して磁場が垂直な場合も、磁束管あたりのガスの質量が  $1/2 G$  を超える

と磁場による支えが効かなくなることを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

T. Hanawa, K. Tomisaka, Structure and Stability of Filamentary Clouds Supported by Lateral Magnetic Field, *Astrophys. J.*, 査読有, 801 巻, 2015, 1 号, Article ID 11, 11 頁

S. Takakuwa, M. Saito, K. Saigo, T. Matsumoto, J. Lim, T. Hanawa, P.T.P. Ho, Angular Momentum Exchange by Gravitational Torques and Infall in the Circumbinary Disk of the Protostellar System L1551 NE, *Astrophys. J.*, 査読有, 796 巻, 2014, 1 号, Article ID 1, 17 頁

T. Hanawa, E. Audit, Reformulation of the M1 model radiative transfer, *J. Quant. Spec. Rad. Tran.*, 査読有, 145 巻, 2014, pp. 9-16

DOI: 2014JQSRT.145....9H

M. Fukagawa, T. Tsukagoshi, M. Momose, 他 15 名 (T. Hanawa 12 番目), Local Enhancement of the Surface Density in the Protoplanetary Ring Surrounding HD 142527, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 65 巻, 2013, 6 号, Article No. L14, 5 頁

DOI: 10.1093/pasj/65.6.L14

Y. Kanno, T. Harada, T. Hanawa, Kinetic Scheme for Solving the M1 Model of Radiative Transfer, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 65 巻, 2013, 4 号, Article No. 72, 19 頁

DOI: 10.1093/pasj/65.4.72

[学会発表](計 4 件)

T. Hanawa, Wiggle instability revisited: the role of bulk viscosity, 9<sup>th</sup> Numerical Modeling of Space Plasma Flows ASTRONUM-2014, 2014 年 6 月 24 日, Long Beach (U.S.A.)

花輪 知幸, 銀河衝撃波の安定性: 体積粘性の効果, 日本天文学会, 2014 年 9 月 11 日, 山形大学 (山形県・山形市)

T. Hanawa, Wiggle instability revisited: the necessity of the bulk viscosity for a shock, 6<sup>th</sup> East Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2014 年 9 月 16 日, Suwon (South Korea)

花輪 知幸, 垂直な磁場に貫かれたフィラメン状分子雲: 最大質量磁束比と安定性, 日本天文学会, 2015 年 3 月 19 日, 大阪大学, (大阪市・大阪府)

[図書](計 1 件)

T. Hanawa, Wiggle instability revisited: the role of bulk viscosity, in *Numerical Modeling of Space Plasma Flows ASTRONUM-2014*, ed. N.V. Pogorelov et al. San Francisco: Astron. Soc. Pacific 印刷中 6 頁

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://ohtaka.cfs.chiba-u.ac.jp/Wiki/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

花輪 知幸 (Tomoyuki Hanawa)

千葉大学・先進科学センター・教授

研究者番号: 50172953