

平成 22 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540248

研究課題名 (和文) 可視高分散分光観測による炭素星の炭素同位体比の研究

究課題名 (英文) Study of carbon isotopic ratio of carbon stars based on the high resolution optical spectroscopy

研究代表者

橋本 修 (HASHIMOTO OSAMU)

群馬県立ぐんま天文台・観測普及研究係・主幹

研究者番号：20221492

研究成果の概要 (和文)：恒星進化末期の漸近巨星枝(AGB)にある炭素星の形成とその進化シナリオを検討するため、炭素星の可視高分散分光観測を行い、炭素の同位体比 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ を測定する。ぐんま天文台の GAOES 分光器を用いることによって、高い波長分解能でありながら、かつ広い波長領域を網羅した高精度の可視分光データを大量のサンプルに対して取得した。このような大型サンプルに対する高精度の炭素同位体比の測定はこれまでに類をみないものである。

研究成果の概要 (英文)：In order to study the formation and evolution of carbon stars in the late stage of stellar evolution of the asymptotic giant branch (AGB), we have observed a number of carbon stars for measuring the accurate isotopic ratio of $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. The GAOES spectrograph of Gunma Astronomical Observatory was used for the observation to realize both much higher spectral resolution and wider wavelength coverage for more absorption lines than any previous observations that have ever done.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	0	1,500,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	300,000	2,800,000

研究分野：天文学、天体物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：恒星, 晩期型星, 炭素星, AGB, 恒星進化, 化学組成, 炭素, 同位体比

1. 研究開始当初の背景

大気に含まれる炭素が酸素を上回るような恒星が炭素星である。その多くは赤色巨星で、HR 図上の漸近巨星枝 (Asymptotic Giant Branch: AGB) に分布する。電子が縮退した

核が中心に形成された中小質量の恒星の進化最末期の状態である。中心核を取り囲むヘリウム層では、断続的に発生する核燃焼によって炭素が生成され、それが対流によって表面に汲み上げられる。その結果、大気中の炭素が増加し、酸素を超えるようになると炭素星

として観測されるようになると考えられている。しかし、このような進化シナリオの定量的な整合性は完全に得られていないのが実情である。マゼラン雲で測定される炭素星の光度分布を十分に再現できないなど、いまだに不明な点が多く残ったままになっている。

表面の大気に汲み上げられる炭素はヘリウム層での核燃焼で生成された ^{12}C が主体であり、これが汲み上げられると、大気中の炭素の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比は変化する。したがって、分光観測から得られるこの同位体比率は、炭素星の形成とその進化の過程を定量的に知る重要な指標であると考えられている。

これまでにも、炭素星に対する炭素同位体比の測定は様々な手法で行われてきた。しかし、観測や測定手法の技術的な問題などから、確定的な測定結果が得られているとは言い難い状況にある。特に、赤外線領域と可視領域、それぞれの分光観測から得られた測定結果の間に著しい矛盾があることが大きな問題となっている。可視分光観測から得られた $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の測定値に対して、赤外線観測による値は著しく大きくなっている。このような不一致には、可視域での分光観測とその解析の難しさが大きく影響していると考えられている。可視分光観測での炭素同位体比の決定では、あまりにも多くの吸収線が存在するため、個々の吸収線を分離し精密な測定を行うことが非常に困難になっている。これを回避するためには、十分に高い波長分解能と広い波長帯域によって高い精度での測定を行う必要がある。しかし、このような研究の例は必ずしも多くはなかった。特に、多数の天体について一様に高い精度で観測がなされた例は極めて稀である。

2. 研究の目的

ぐんま天文台150 cm望遠鏡と高分散分光器GAOESを用いて十分な数の炭素星に対する可視域での高分散分光観測を行ない、炭素の同位体比率を測定する。ぐんま天文台の150 cm反射望遠鏡に設置されたGAOES (Gunma Astronomical Observatory Echelle Spectrograph) はエシエル回折格子と大型CCD検出器を用いることによって、高い分解能を維持しながら広い波長域のスペクトルを取得することが出来る観測装置である。望遠鏡の集光能力を十分に活かすことのできる1秒角幅のスリットで、およそ70,000の波長分解能を維持しながら、一度の露出で180 nm以上の波長域を網羅することが可能である。これまでの観測に比べて、遥かに高い波長分解能と広い波長帯域である。また、ぐんま天

文台では大規模な共同利用体制はとっておらず、独立な運営を行っているため、比較的小数の特定研究テーマに重点を置く柔軟な観測スケジュールの設定が可能である。すなわち、特定の観測目的に従って多数の観測データを取得するような本研究課題に適した運用形態であると言える。GAOESの優れた性能に加え、ぐんま天文台のこのような運用上の特長も活用し、多数の炭素星に対して高分散分光観測を集中的に行う。これより、十分なサンプル数からなる可視高分散分光スペクトルの観測データベースを構築し、ここから炭素同位体比 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ を測定する。これを基に炭素星の形成と進化の研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 分光器のCCD検出器を高感度・高精度のものに換装するとともに、制御機構を中心にGAOES分光器の改修・整備を行う。さらに、望遠鏡を含めたシステム全体の見直しと整備も行い、観測システムの感度と精度の大幅な向上を図る。これにより、観測効率も改善し、高い波長分解能と広い波長域を同時に達成できるGAOESの特長を最大限に活用できる環境を整える。

(2) 整備された望遠鏡と分光器を用いて対象となる炭素星の高精度高分散分光観測を実行する。統計的な議論にも意味をもたせるため、十分な数のサンプルとして、50個ほどの炭素星の高分散スペクトルを取得する。

(3) 計算機環境を整備し、観測から得られたデータを効率良く処理できる環境を構築する。複雑な観測データ処理の手法を確立し、全ての観測データを、一次元化し、波長較正などを行った後に、観測時の各種ステータスデータを取り込んだ形式で保存する。これによって、直ちに様々な解析に利用できるようなスペクトルのデータベースを形成する。

(4) 詳細な解析に用いるために、辻による低温度星大気の数値モデル(Tsuji 1965, PASJ 17, 152, Tsuji 1976, PASJ 28, 543)や、測定対象の炭素を含む分子に関する吸収線のデータを入手し、手元の計算機で利用できるよう用意・整備する。

(5) ここで確立された解析およびデータ処理の環境と材料を駆使して、観測データを解析し、炭素同位体比を測定し、AGB天体の内部と進化について考察する。特に、Lambert et al. (1986, ApJS 62, 373)による赤外線による測定結果との比較を行う。

4. 研究成果

観測は計画通りに遂行され、予期した以上の精度で、多数の天体からのデータを取得することができた。2009年度末までに、50個ほどの炭素星の高分散スペクトルが得られている。これは、本研究課題の遂行に十分なサンプルの数である。観測された炭素星は、表1-3のリストに示した通りである。

表1 GAOESで観測された炭素星(N-type)

Star	Sp.	Vmag
SU And	CII	8.14
ST Cas	Nv	8.97
AQ And	Nv	7.81
Z Psc	N	6.76
R Scl	CII	5.77
X Cas	Ne	4.72
U Cam	N	7.35
AC Per	Nv	9.10
ST Cam	N	6.67
TT Tau	CII	7.91
R Lep	CHe	8.10
W Ori	CII	5.88
RT Ori	CII	7.97
HD37212	CII	7.67
TU Gem	CII	7.36
Y Tau	CII	6.81
BL Ori	CII	6.31
UU Aur	CII	5.45
VW Gem	CII	8.24
RV Mon	CII	7.47
RY Mon	N	7.19
W CMa	CII	6.73
HD59643	R	8.01
RY Hya	Ce	8.83
X Cnc	CII	6.21
T Cnc	N	8.54
Y Hya	C	6.68
U Hya	CII	4.93
VY UMa	CII	5.95
V Oph	CII	9.03
RX Sct	CII	9.03
HK Lyr	CII	7.97
S Sct	CII	6.81
V Aql	CII	6.78
U Lyr	Ne	7.20
AW Cyg	Nv	7.07
TT Cyg	N	7.55
AX Cyg	CII	7.85
X Sge	CII	8.36
V460 Cyg	C	5.99
RV Cyg	CII	7.10
DG Cep	C+	8.83
TX Psc	CII	5.04

表2 GAOESで観測された炭素星(J-type)

Star	Sp.	Vmag
WZ Cas	C9,2JLi	7.06
UV Cam	C5,4J	7.60
BM Gem	C4,5J	8.43
Y CVn	C7I	4.99
HD52432	C4,5J	7.01
HD156074	C2,1	7.59

表3 GAOESで観測された炭素星(SC-type)

Star	Sp.	Vmag
RR Her	K5	8.60

望遠鏡や分光器その他の観測環境の整備はほぼ計画通り達成された。この種の観測システムとして、日本国内で最高級の性能を誇り、東アジア地域でも絶対的な存在である国立天文台岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡に設置された高分散分光器 HIDES にほぼ匹敵する性能を GAOES は達成するまでに至っている。今日では、国内で利用できる貴重な高性能高分散分光器のひとつとして、本課題以外の研究でも GAOES は利用されるようになってきている。

エシエル回折格子を用いた分光器特有の複雑なデータ処理についても、観測システムの改良・整備の結果を取り入れながら発展させ、最終的に実用的な手法を確立させている。全ての観測データは、一次元化と波長較正などが行われ、如何なる解析処理にも直ちに利用できるように、データベースとして整理・保存されている。解析に必要な観測時における望遠鏡の各種ステータス情報なども含まれた利用しやすいものである。これらのデータは、今後広く公開する予定である。

観測から得られた炭素星の高分散スペクトルの例として、ぐんま天文台の150 cm望遠鏡とGAOESで取得した炭素星 TX Piscium のスペクトルを図1に示す。極めて多数の吸収線からなる複雑な構造が、炭素星のスペクトルの特徴である。あまりに多数の吸収線のため、全体は幅の広い帯のように見えている。幅1秒角のスリットを用いることによって、R ~ 70,000 程度の波長分解能が達成されている。一枚のCCD 検出器で撮られたスペクトルでありながら、695 nm から878 nm の183 nmもの波長範囲を網羅している。同種の研究で、過去に得られた最も高品質の可視分光スペクトルの例が、マクドナルド天文台の口径270 cm望遠鏡で取得された Dominy et al. (1978,

ApJ 223, 949) によるスペクトルであるが、波長分解能は 40,000、波長範囲は 81 nm であり、これと比較しても GAOES による我々の観測データは圧倒的に優れた特性を達成している。

彼らが観測した二つの炭素星のひとつである V460 Cygni について、スペクトルの一部を詳細に比較したのが図2である。GAOES で取得されたスペクトルの方が遥かに滑らかで、吸収線の形態も明確であることがわかる。観測に利用した望遠鏡の口径が著しく小さいにもかかわらず、GAOES で取得したデータの方が、S/N 比も遥かに高く高品質のものであり、改良・整備されたGAOES の観測システムとしての優れた能力が示されている。

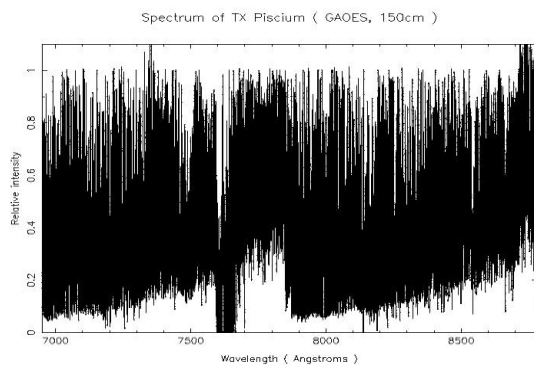


図1 GAOESで得られた炭素星TX Pscのスペクトル R ~ 70,000, 695–878 nm, S/N ~ 1000

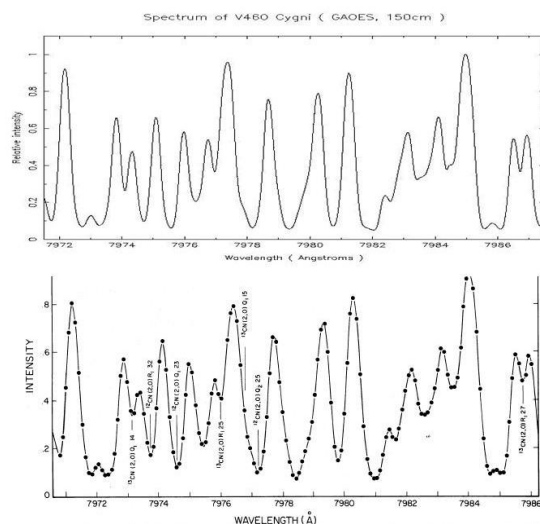


図2 GAOESで取得した炭素星 V460 Cyg の高分散スペクトル (R ~ 70,000, S/N ~ 700), と Dominy et al. によるスペクトル (R ~ 40,000, S/N ~ 200) との比較

現在は、観測から得られたスペクトルを用いて炭素同位体 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ を測定し、過去の可視スペクトルや赤外線観測からの結果と比較を試みる段階になっている。データの解析に必要な低温度巨星大気の数値モデルや、測定対象の炭素を含む分子に関する吸収線のデータなども、手元の計算機で利用できるよう整備が進んでおり、データの取得および解析手段の準備はほぼ完了した状態である。また、サンプルの数を更に増やすための観測も継続している。

GAOES を用いた観測から得られた炭素星の分光データは、極めて広範な波長範囲とそこに含まれる膨大な数の吸収線を持ち、また高い波長分解能により、より深く鋭い吸収線の輪郭形態を示している。これらは、事前の予想を大きく超えたもので、現実の観測データは所期の想定以上に、はるかに高精度で、かつ膨大な情報量を持つことが明らかになってきた。このため、解析にも当初の計画を上回る細心の取り扱いが必要になっている。現在は、観測データと解析手法を詳細に吟味し、最も適切な方法を確認する作業を行っているが、この想定を超えた作業のため、研究計画は、最終段階で予定よりやや遅れぎみである。

しかし、観測装置やデータ解析などの研究のための環境は、基本的に計画通りに整備・準備が完了しており、観測から得られた分光データも質・量ともに十分なものである。ここまでは所期の計画を完全に達成しており、観測データの持つ精度と情報量を活用した解析も進行中である。若干の遅れはあるものの、当初の方向性から大きく外れているところはない。したがって、現在の作業を今後も継続することによって、比較的早期に、期待していた成果を確実に得ることができると見込んでいる。

また、改良・整備によってより優れた観測性能を発揮できるようになったGAOESを活用し、基本的な組成解析が比較的容易な炭素星以外の天体についての観測と分光データの分析も並行して行ってきた。これによって、著しく向上した分光器の能力や処理手法の妥当性をやや異なった視点から確認することが可能になっている。

GAOES 観測システムの整備の状況や、これを用いて得られた観測の結果、あるいは計画の進捗状況などは、以下に示されるように、論文や学会、研究会などで適宜報告されている。今後得られる結果や途中経過についても随時公表して行く予定である。

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 9 件)

① O. Hashimoto, H. L. Malasan, H. Taguchi, H. Takahashi, S. Honda
“Gunma Astronomical Observatory Echelle Spectrograph (GAOES) in GAO-ITB collaboration”

In Proc. ITB-GAO Joint Workshop in Astronomy and Science Education, 45-49 (2009) 査読無

② O. Hashimoto, S. Honda, H. Taguchi, H. Takahashi

“Spectroscopic observation of AGB stars at Gunma Astronomical Observatory”

In Proc. AGB stars and related phenomena, 90-91, (2009) 査読無

③ H. Funayama, Y. Itoh, Y. Oasa, E. Toyota, O. Hashimoto, T. Mukai

“Metallicity measurements of Pleiades young dwarfs”

PASJ 61, 930-939 (2009) 査読有

④ Y. Takeda, H. Taguchi, K. Yoshioka, O. Hashimoto, T. Aikawa, S. Kawanomoto

“Abundances of volatile elements in Post-AGB candidates”

PASJ 59, 1127-1140 (2007) 査読有

⑤ H. Izumiura, Y. Nakada, O. Hashimoto, H. Mito, T. Hayashi

“Detection of an 0.1 pc dust shell of the carbon star U Hydrae through optical light”

ASPC 378, 305- (2007) 査読無

[学会発表] (計 10 件)

① 橋本修

ぐんま天文台における炭素星の高分散分光観測

日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009-9-15
山口大学

② 橋本修

ぐんま天文台における観測活動の特長と様々な連携

日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008-9-13
岡山理科大学

③ 高橋英則

ぐんま天文台 150cm 望遠鏡焦点面観測装置
日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008-9-11
岡山理科大学

④ 高橋英則

県立ぐんま天文台 150cm 望遠鏡高分散分光器の検出器改良と性能評価

日本天文学会 2008 年春季年会, 2008-3-25
国立オリンピック記念青少年総合センター

⑤ 本田敏志

県立ぐんま天文台 150cm 望遠鏡高分散分光器の制御系改良と試験観測

日本天文学会 2008 年春季年会, 2008-3-25
国立オリンピック記念青少年総合センター

[その他]

「世界天文年」国際企画「望遠鏡 80 台世界一周」参加, 2009-4-3

本研究遂行のための観測が同企画の中継に用いられた。

<http://www.eso.org/public/events/special-evt/100ha/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 修 (HASHIMOTO OSMAU)

ぐんま天文台・観測普及研究係・主幹

研究者番号: 20221492

(2) 研究分担者

高橋 英則 (TAKAHASHI HIDENORI)

ぐんま天文台・観測普及研究係・主任

研究者番号: 80361567

本田 敏志 (HONDA SATOSHI)

ぐんま天文台・観測普及研究係・主任

研究者番号: 20425408

田口 光 (TAGUCHI HIKARU)

ぐんま天文台・観測普及研究係・主任

研究者番号: 20356132

衣笠 健三 (KINUGASA KENZO)

ぐんま天文台・観測普及研究係・副主幹

研究者番号: 00356132