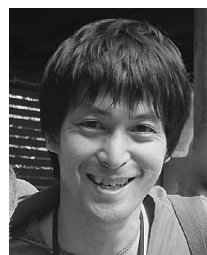


金属欠乏星データベースの成果

須田 拓馬

〈東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター
〒113-0013 東京都文京区本郷7-3-1〉
e-mail: suda@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



金属欠乏星データベース（SAGA データベース）は恒星の元素組成データを収集したデータベースであり、2008年以來オンラインで常時公開している。元素組成データは恒星内部での元素合成を知る手がかりとなるだけでなく宇宙の物質進化、星形成史を理解するうえでも重要であり、その価値は普遍的である。本稿では、SAGA データベースの概要を紹介するとともに、データ利用の現状について報告する。

1. 天文学の基礎情報としての元素組成データ

宇宙に存在する元素の大部分は恒星内部での核融合反応によって合成される。宇宙において、元素がどのように分布するかという情報は元素合成過程だけでなく、星形成、恒星進化、銀河の形成と進化、ひいては宇宙の進化を理解するうえでも重要である。その重要性は、例えば元素の存在量を測定する手段の多様性に見て取れる。

代表的な手法は恒星大気による吸収線の分光観測である。これによって恒星表面の元素組成を知ることができ、低・中質量星内部での元素合成と物質混合に関する手がかりを得ることができる。とりわけ、初期宇宙に誕生した恒星の元素組成は、大質量星進化の最終段階である超新星爆発での元素合成の痕跡が次世代の星の元素組成に反映されたと考えられている。なお、可視光による解析は恒星以外の天体に対しても行うことができ、新星や超新星から放出された物質の元素組成や銀河間ガスの成分なども知ることができる。

また、輝線の観測からも元素組成データを得ることが可能である。可視光領域の輝線観測では、

AGB段階の質量放出によって輝く惑星状星雲の元素組成が、X線領域では超新星残骸の元素組成が測定できる。

元素組成データは恒星だけでなく、他の天体の研究においても重要な役割を果たしている。星形成の現場である星間分子雲の電波観測では、星形成過程の段階を判定する指標として分子の輝線強度比が用いられる。元素の存在量は分子雲の構造や運動を求めるための基本情報と言える。また、星そのものの元素組成測定ができない遠方宇宙では、銀河全体で平均した金属量（主に酸素の存在量などで見積もられる）を測定することによって、銀河の性質が調べられている。多波長での詳細な銀河のマップが作成されたことにより、銀河の金属量と、質量、星形成率との間の相関が確立されている。元素の吸収線に関する情報は、クエーサーやガンマ線バーストの吸収線系を利用して遠方宇宙での星間・銀河間ガスの性質を調べるのにも使われている。

2. 恒星の元素組成データベース（SAGA）の開発

1章で述べたさまざまな観測手法で得られる元

素組成データの中でも、恒星表面の吸収線による観測は長い歴史をもっており、特に信頼性が高い。可視光領域には鉄の吸収線が多数存在し、金属量*1は銀河の化学進化の指標として広く用いられている。金属量の少ない星は、超新星爆発などによる宇宙空間の元素汚染が少ない環境で誕生したと考えられるため、初期宇宙の環境に関する情報を保持しているとみなすことができる。

筆者らはこのような金属量の少ない恒星、金属欠乏星の元素組成データに着目し、理論モデルと観測とを比較するためのデータベースを開発した¹⁾⁻³⁾ (Stellar Abundances for Galactic Archaeology (SAGA) データベース*2)。この背景には、(筆者のような理論天文学の研究者が作った)理論モデルと観測データとを直接比較するうえでの障壁を取り除くという目的があった。また、開発当時は、筆者は原子核反応データのデータベース検索システムの開発にかかわっており*3、学術データベースの開発・運用の現場にいられたことも大きい。恒星の元素存在量を観測から求めるには、リダクションを経たスペクトルデータに対して、星の大気モデルを仮定する必要がある。したがって、元素組成データは純粋な観測データというよりは解析データであり、論文中に解析手法の詳細な記述とともに提示される。そのため、理論モデルから予測される元素組成量、例えば $[X/Fe]$ (Xは元素の種類) といった量を観測と比較するためには個別の論文を調べなくてはならない。

この困難を克服するため、SAGA データベースは個々の論文から元素組成データを効率よく抽出し、理論モデルと観測との比較を容易に行うための環境を整備した。SAGA データベースでは、初

表1 データベースの登録データ件数.

論文数	241
天体数	4,491 (延べ9,269)
組成データ ($[X/H]$)	84,134
測光データ (V等級)	2,039
位置情報	1,522

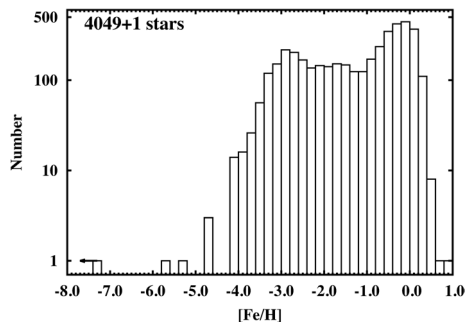


図1 銀河系ハロー星の金属量分布. データはSAGA データベース¹⁾より取得. $[Fe/H] = -2.5$ 以下の星についてはすべての文献を網羅しているが、 $[Fe/H] = -2.5$ 以上の星については完全にはデータ登録されていない. 上限値をもつデータ ($[Fe/H] < -7.3$) は手動で加えたものである.

期宇宙に誕生した銀河系ハロー内部にある星の収集に特化しており、金属欠乏星 ($[Fe/H] \leq -2.5$ をもつ星)の元素組成解析を行った全論文を採録するという方針である。採録対象となるデータは、文献情報、天体情報、観測ログ、測光データ、大気モデル、連星に関する情報、等価幅データ、元素組成データである。データ採録候補論文の登録、データ入力、データ検索といった作業は、Perl CGI, MySQL, JavaScriptで構築されたWebシステムを使って行われる。

表1に2015年7月末日時点でのデータベースに登録されたデータを集計した。登録された4,491

*1 元素の組成は単位体積中に含まれる元素の個数比 (個数密度の比) として表される。金属量とは鉄の水素に対する個数比であり、太陽組成で規格化した値として次のように定義される: $[Fe/H] = \log(n_{Fe}/n_H) - \log(n_{Fe}/n_H)_{\odot}$ 。例えば、 $[Fe/H] = 0$ が太陽と同じ鉄組成比であり、 $[Fe/H] = -3$ は鉄の量が太陽の千分の一であることを意味する。

*2 <http://sagadatabase.jp>. 旧アドレスは<http://saga.sci.hokudai.ac.jp>.

*3 原子核反応データベース研究開発センター, <http://jcporg.org>.

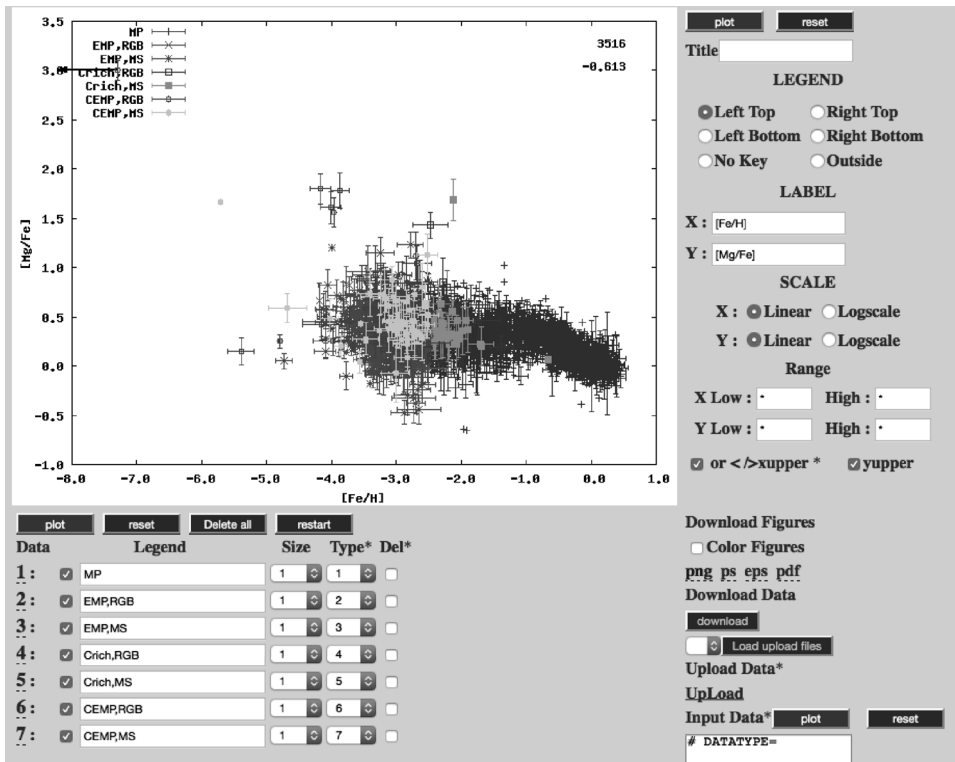


図2 鉄組成とマグネシウムの組成比についてデータベース検索システムを使ってプロットしたもの。金属量，炭素組成の増大量，星の進化段階によってデータ点が分類される。

天体の金属量分布を図1に示した。[Fe/H] ≤ -2.5の星については2014年までに出版された論文を網羅した。金属量の多い星については、これらの論文に含まれている星のほかにディスク星を対象とした論文14編のデータを追加しているが、銀河系の星の分光データを完全に網羅しているわけではない。

SAGAデータベースの検索システムを用いて元素組成の相関を図示する際の画面を図2に示した。描画にはgnuplotを利用しており、ブラウザ上で図の編集ができるほか、データと図を再現するスクリプトをダウンロードすることができる。画面上の各点にはリンクが張られており、各恒星データに関する情報を含んだファイルを開覧することができる。

3. SAGA データベースの利用例

SAGAデータベースの利用方法は銀河の化学進化モデルの検証，恒星進化モデルとの比較，過去の観測データとの比較など多岐にわたる。ADSによると、2008年のSAGAデータベースの開発・公開を発表した論文¹⁾の被引用件数は本稿執筆時点（2015年6月）で95件である。引用文献での引用目的を筆者が確認したところでは、先行研究との比較としてデータベースを活用している例が最も多いようである。以下では利用例の一部を紹介する。

理論研究の成果を発表した論文については、化学進化モデルと金属欠乏星の組成分布の比較によってモデルの妥当性を検証しているものが多い。特にデータ数の多いBaやSrのような宇宙初

期における r 過程元素の蓄積の指標として用いられる元素の進化の傾向が検証されている⁴⁾⁻¹⁰⁾。また、化学進化モデルの中でも高赤方偏移銀河を対象としたCNO元素やMgのデータとの比較にも用いられている^{11), 12)}。

恒星進化モデル、元素合成モデルとの比較を行った論文では、炭素過剰金属欠乏星やAGB段階での s 過程元素合成に関連したモデル計算との比較でよく用いられている¹³⁾⁻¹⁷⁾。特に、金属量の少ないAGB星を扱う論文では、比較対象となる天体が豊富にあるため利用価値が高いようである¹⁸⁾⁻²¹⁾。また、超新星爆発による元素合成モデルとの詳細な比較²²⁾や、連星種族合成モデルとの比較²³⁾もSAGAデータベースを用いて行われている。炭素過剰金属欠乏星は金属欠乏星のうち炭素過剰を示す天体であり、その存在比率は近傍の金属量の多い星と比較して有意に大きいことが知られている^{2), 24)}。これらの星をSAGAデータベースのデータと比較することによって、初期質量関数を制限する研究も行われている²⁵⁾⁻²⁷⁾。

金属欠乏星モデルとの比較では、高速回転する大質量星での炭素過剰星形成モデルが提案されており、観測データとの比較にSAGAデータベースが使われている²⁸⁾。また、大質量星での s 過程²⁹⁾や、ダストによる星形成³⁰⁾との比較にも用いられている。

金属欠乏星との比較以外の用途としては、ビッグバン元素合成モデルとの比較³¹⁾や、原子核反応率の検証のための比較³²⁾などが挙げられる。

一方、観測の論文では、過去の観測データと比較する場合に用いられる場合が最も多い。Li³³⁾、C³⁴⁾、Si³⁵⁾、Eu³⁶⁾、といった個別の元素に焦点をあてて比較した場合や、天体の起源を検証するために複数の元素で比較した論文^{37), 38)}もあり、広く利用されている。データベースの発展的な活用方法として、データの再解析のために等価幅の情報を全面的に利用した特筆すべき例³⁹⁾のほか、

大気モデルや鉄組成について過去の文献値の調査に用いた例^{40), 41)}、金属欠乏星探査手段の検証をする例⁴²⁾、などもある。また、高分散分光観測による追観測を網羅していることから、金属量が十分少ない星 ($[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3$) に対して、金属欠乏星の個数や個数比が引用されることもある⁴³⁾⁻⁴⁵⁾。銀河系ハローの星を球状星団の星と比較したり^{46), 47)}、近傍矮小銀河の星と比較する⁴⁸⁾場合にも用いられている。惑星状星雲の組成解析からAGB星起源かどうかを調べるためにSAGAデータベースを利用している研究例もあった⁴⁹⁾。

論文の引用として記録されない場面でもSAGAデータベースは利用されている。筆者の印象では、国内外の学会、研究会での発表スライドで、データベースのシステムを利用して作った図を目にする機会が年々増えつつあるように思われる。筆者が利用する例を挙げると、計算結果について議論する際に、観測データの傾向を調べる場合、特定の天体の元素組成を詳しく知りたい場合、また同一データの論文による違いを調べる場合などである。こうしたチェックに要する時間が大いに省けるため、他の研究者にとっても利用価値が高いものと思われる。また、観測の専門家にとっても観測項目や観測対象の選定に役立っているとのことである。

4. SAGA データベースの利用統計

図3にSAGAデータベースのアクセス履歴を示した。Webサイトにアクセス解析^{*4)}を設置し、記録の残っている2008年11月以降のログを基に月間のファイルアクセス数とサイトへの訪問者数をプロットした。図を見ると2013年5月に急激な上昇が見られるが、この原因は筆者にも不明なままである。SAGAデータベースが広く認知されるきっかけとして、国際会議でのAstronomical Toolsに関するセッションでの招待講演(2012年8月)が考えられるが、ややタイムラグが大きい。

*4 アクセス解析ソフトはWebalizer (<http://www.webalizer.org>) を利用。

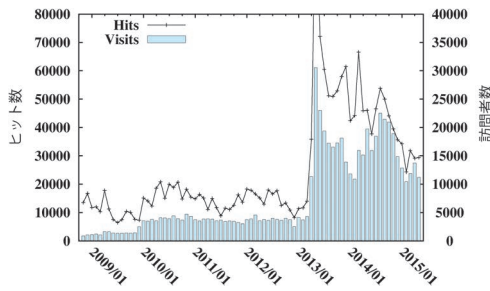


図3 ホームページへのアクセス履歴。

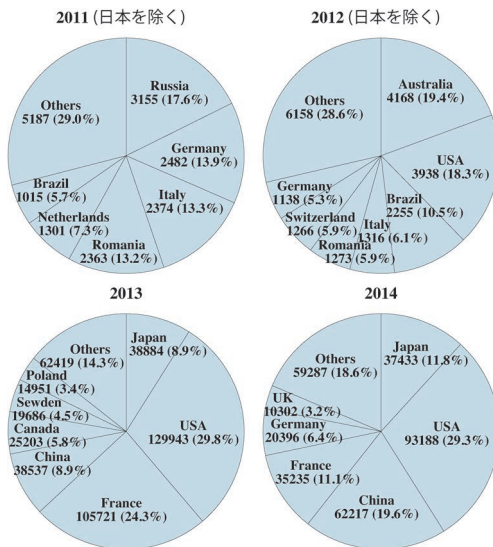


図4 SAGA データベース利用者の国別割合。

図4には過去4年分の国別のアクセス数を示した。ただし、2011、2012年については日本からのアクセスを除いてある。2012年までは国内からのアクセスが最も多く、全アクセス数の7-8割を占めていた。外国からのアクセスは関連分野の研究者が一定以上いると思われる国にほぼ均等に分布しており、月ごとの変動も少ない。2013年5月以来の急激なアクセスの増加(図3)はアメリカ、フランス、中国からのアクセスが大部分を占め、以降は日本国内からのアクセス総数は3位以下となっている。

5. SAGA データベースの今後

データベースのシステムにはまだまだ改良の余地があり、筆者ら開発陣やユーザーからの改良提案が手元にあるものの実装されていないものが多々ある。

恒星の元素組成データ収集については、銀河系内の恒星だけでなく、近傍矮小銀河をも含んだデータベースへと拡張する予定である。近傍矮小銀河のデータは2013年度出版分まではほぼ網羅しており、検索の統合環境はできている。すでに20以上の矮小銀河について5,000個以上の恒星の組成データが登録されている。

データの規模としてはすでに十分と言えるレベルになってきたが、今後はデータの質にもより注意を払っていきたい。データベースの質を向上させるうえで最も重要と思われる点は、複数の著者が同一の天体を観測している場合のデータの取り扱いである。この場合の検索、作図をどのように扱い、どのような機能を実装するかは現在検討中である。また、データベースを採録していると誤植を発見することがあるが、オンラインのシステムであればデータの訂正が可能であり、正しい情報を提供できるというメリットもある。

今後もユーザーの意見を効率的に取り入れる仕組みを整備するなど、継続的な管理・運用ができるよう工夫していきたい。

謝 辞

本稿を執筆するにあたって、青木和光氏、大谷友香理氏、藤本正行氏、増山美優氏には有益なコメントをいただいた。SAGA データベースを運用するにあたり、これまで多くの方の力を借りることができた。特にシステムの開発、データ入力では勝田豊氏、山田志真子氏の貢献が大きい。勝田氏にはサーバーの保守でも中心的な役割を果たしていただいている。本研究は研究成果公開促進費(データベース)“銀河考古学のための金属

欠乏星データベース” (268020, 15HP7004) の援助をもとに行われた。

参考文献

- 1) Suda T., et al., 2008, PASJ 60, 1159
- 2) Suda T., et al., 2011, MNRAS 412, 843
- 3) Yamada S., et al., 2013, MNRAS 436, 1362
- 4) Ishimaru Y., Wanajo S., Prantzos N., 2015, ApJL 804, L35
- 5) van de Voort F., et al., 2015, MNRAS 447, 140
- 6) Wehmeyer B., Pignatari M., Thielemann F.-K., 2015, arXiv 1501.07749
- 7) Tsujimoto T., Shigeyama T., 2014, ApJL 795, L18
- 8) Tsujimoto T., Shigeyama T., 2014, A&A 565, L5
- 9) Aoki W., Suda T., Boyd R. N., Kajino T., Famiano M. A., 2013, ApJL 766, L13
- 10) Komiya Y., Yamada S., Suda T., Fujimoto M. Y., 2014, ApJ 783, 132
- 11) Vangioni E., Olive K. A., Prestegard T., Silk J., Petitjean P., Mandic V., 2015, MNRAS 447, 2575
- 12) Rollinde E., et al., 2009, MNRAS 398, 1782
- 13) Placco V. M., Frebel A., Beers T. C., Stancliffe R. J., 2014, ApJ 797, 21
- 14) Abate C., Pols O. R., Izzard R. G., Mohamed S. S., de Mink S. E., 2013, A&A 552, A26
- 15) Lugaro M., Karakas A. I., Stancliffe R. J., Rijs C., 2012, ApJ 747, 2
- 16) Bisterzo S., Gallino R., Straniero O., Cristallo S., Käppler F., 2011, MNRAS 418, 284
- 17) Stancliffe R., Church R. P., Angelou G. C., Lattanzio J. C., 2009, MNRAS 396, 2313
- 18) Nishimura T., Aikawa M., Suda T., Fujimoto M. Y., 2009, PASJ 61, 909
- 19) Gil-Pons P. et al., 2013, A&A 557, A106
- 20) Cristallo S., et al., 2009, PASA 26, 139
- 21) Iwamoto N., 2009, PASA 26, 145
- 22) Tominaga N., Iwamoto N., Nomoto K., 2014, ApJ 785, 98
- 23) Izzard R. G., Glebbeek E., Stancliffe R. J., Pols O. R., 2009, A&A 508, 1359
- 24) Yong D., et al., 2013, ApJ 762, 27
- 25) Suda T., et al., 2013, MNRAS 432, L46
- 26) Lee Y.-S., Suda T., Beers T. C., Stancliffe R. J., 2014, ApJ 788, 131
- 27) Pols O. R., Izzard R. G., Stancliffe R. J., Glebbeek E., 2011, A&A 547, A76
- 28) Meynet G., et al., 2010, A&A 521, 30
- 29) Pignatari M., et al., 2010, ApJ 710, 1557
- 30) Chiaki G., et al., 2015, MNRAS 446, 2659
- 31) Kusakabe M., Kajino T., Yoshida T., Mathews G. J., 2009, PhRvD 80, 103501
- 32) Suda T., Hirschi R., Fujimoto M. Y., 2011, ApJ 741, 61
- 33) Masseron T., et al., 2012, ApJ 751, 14
- 34) Takeda Y., Takada-Hidai M., 2013, PASJ 65, 65
- 35) Ji A. P., Frebel A., Bromm V., 2014, ApJ 782, 95
- 36) Aoki W., Beers T. C., Honda S., Carollo D., 2010, ApJL 723, L201
- 37) Roederer I., 2013, AJ 145, 26
- 38) Aoki W., Tominaga N., Beers T. C., Honda S., Lee Y. S., 2014, Science 345, 912
- 39) Yong D., et al., 2013, ApJ 762, 26
- 40) Lawler J. E., Guzman A., Wood M. P., Sneden C., Cowan J. J., 2013, ApJS 205, 11
- 41) Lindegren L., Feltzing S., 2013, A&A 553, A94
- 42) Placco V. M., et al., 2011, AJ 142, 188
- 43) Sono T., Shibahashi H., 2012, PASJ 64, 2
- 44) Valcarce A. A. R., Catelan M., 2011, A&A 533, 120
- 45) Ito H., Aoki W., Beers T. C., Tominaga N., Honda S., Carollo D., 2013, ApJ 773, 33
- 46) Sakari C. M., Shetrone M., Venn K., McWilliam A., Dotter A., 2013, MNRAS 434, 358
- 47) Ness M., Asplund M., Casey A. R., 2014, MNRAS 445, 2994
- 48) Ishigaki M. N., Aoki W., Arimoto N., Okamoto S., 2014, A&A 562, A146
- 49) Otsuka M., Tajitsu A., Hyung S., Izumiura H., 2010, ApJ 723, 658

Outcome of the Stellar Abundances for Galactic Archaeology Database

Takuma SUDA

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0013, Japan

Abstract: The Stellar Abundances for Galactic Archaeology (SAGA) database compiles the element abundance data of stars and has been accessible via the internet since 2008. The abundance data provides an insight into not only the nucleosynthesis in stars but also the matter evolution in the universe and the star formation history, and its value is permanent. In this article, we report the outline of the SAGA database and the current status and usage.