

鈴木清太郎の元素合成論について II

内田俊郎*

1 はじめに

九州帝国大学教授をつとめた鈴木清太郎は1927年から1931年にかけて熱力学的手法を用いて恒星内の元素の存在比を研究し、一連の論文を発表した。これらは今日でいう元素の存在比に関する「平衡理論 (e Process)」に相当する。同様な研究は鈴木より6年程前にアメリカの R.C.Tolman (1922) が行っていたが、鈴木清太郎の研究は Tolman とは独立になされたもので、世界的にみても先駆的なものだったといえる。残念ながら、リアルタイムで国際的に認知されることはなく、鈴木自身も後に理論物理学や天体物理学の研究から遠ざかったこともあり、日本においても広く知られることなく歴史に埋もれてしまった。しかしながら、鈴木の研究は天体物理学の理論分野における日本人の手による最初の世界的な業績だったかもしれない。

以下では鈴木の研究の中心に、鈴木の研究を紹介する。なお本発表は平成27年度「黎明期日本天文学史研究会」における発表の続編であり、一部、重複した内容を含んでいることをお断りしておく。

2 鈴木清太郎の略歴

鈴木清太郎に関する資料は、入手し易いとは言い難い原論文や本人の著書以外多くないが、1979年に日本農業気象学会により、「鈴木清太郎論文集」が刊行されている。同書によれば、鈴木清太郎は1887年、香川県の旧三本松町に生まれた。1911年に東京帝国大学理科大学理論物理学科を卒業（長岡半太郎の弟子筋と思われる）、東北帝国大学理科大学助手、秋田県立本荘中学校教諭、愛知県立第四中学校教諭、松山高等学校教授を経て、1922年に九州帝国大学農学部助教授に就任した。その後、二年間のヨーロッパ留学、一年間の米国留学を経て、帰国後の1925年に九州帝国大学教授に就任している。1946年に九州大学を退官、1977年に死去している。また、1942年から1957年まで日本農業気象学会会長を務めている。

東北帝大助手以後、九州帝大着任までの経歴が当時のエリートコースからはずれているように思われるが、その経緯はわからない。1930年代中頃までは主として理論物理の統計熱力学の分野を研究したが、その後、気象学や農業物理学・農業気象学などに研究分野を変えていったようである。

3 忘れられた鈴木清太郎

鈴木清太郎の研究に触れている文献は非常に少ない。ここでは、筆者が知りえたものを挙げておく。武谷三男は著書「原子力発電」で、「1927年から31年にかけて、鈴木清太郎博士は、星の内

*東洋大学、明治大学、千葉商科大学等 非常勤講師

部の原子核反応について理論を展開し、新星の出現をこれによって説明し、地上の放射性元素の成因を予言した。これは今日の、天体における元素形成の理論の先駆をなすものである。」(武谷, 1976, p3)と鈴木の研究の内容に立ち入った形で言及している。また、横尾(1991)は鈴木の一連の核種間の解離平衡の研究と新星の理論との関係を明らかにした。横尾(1997)と吉田(2001)は、鈴木清太郎と平山清次の小惑星の族に関する共同実験を取り上げている。

海外の文献では、ビッグバン宇宙での元素合成の最も初期のレビューとして有名な Alpher、Herman (1950) で引用されたのが初出と思われる。その後出版された宇宙論の学説史、North (1967) と Krogh (1996) に鈴木論文が引用されている。これらの著者は Alpher、Herman (1950) を通じて鈴木の研究を知ったものと思われる。特に、後者では鈴木第二論文が、宇宙の生成を想定し、宇宙の水素とヘリウムの存在比を宇宙の生成と結びつけるアイディアを示している点を高く評価している。

4 鈴木の一連の研究

鈴木が発表した恒星内部における元素の存在比に関する論文は以下の5本である。

1. 「原子核の熱解離について」1927年、帝国学士院報告
2. 「原子核の解離の熱平衡について」1928年、日本数物学会記事(以下、第二論文と呼ぶ)
3. 「恒星進化についてのジーンズの新理論を考慮に入れた原子核解離についての研究」1928年、日本数物学会記事
4. 「高温における原子核の熱平衡」1931年、日本数物学会記事
5. 「白色矮星の内部の化学元素の相対組成」1931年、帝国学士院報告

(以上の原論文は全て欧文、タイトルは筆者が訳した。)これらは基本的に核種間の熱平衡状態を統計熱力学の手法で研究したものであり、熱力学的な平衡理論の特性が、当時まだ知られていなかった核反応の詳細をぬきにした議論を可能にしている。上記論文のうち1927年の第一論文より、第二論文、1928年の「原子核の解離の熱平衡について」の方が今日的には興味深い内容を持つと思われるので、本論では以下、この論文を中心に内容を検討することとする。

5 当時の原子核物理学・天体物理学

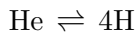
鈴木の研究に立ち入る前に、鈴木の研究当時の原子核物理学の状況を概観しておく。原子核を構成する粒子としては、1914年、ラザフォードにより陽子(水素原子核)が発見されていた。また、1920年頃までにはアストンの質量分析により、ヘリウムの質量が水素4個の質量の合計より小さいことも明らかにされており、1920年代にはエディントン等により、水素のヘリウムへの変換が恒星のエネルギー源であるとの考えも述べられていたようである。

一方でチャドウィックによる中性子の発見は1932年を待たねばならず、鈴木の一連の研究は中性子発見以前になされたものであり、鈴木の研究は当時、一部で考えられていた原子核が陽子と電子でできているという描像に立脚している。今日では分子の分解に対して用いて、原子核に対しては用いない解離(dissociation)という語が論文タイトルに表れているのはそのためである。以下では鈴木論文に従い原子核の分解にも解離という語を用いることとする。中性子の発見を契機に核物理学は急速に進展していくことになる。

天体物理学の分野では 1920 年から 21 年にかけて M. N. サハによる恒星大気における電離平衡の理論が発表された。鈴木は第二論文はサハの電離平衡の理論を原子核の解離平衡に置き換えたものとも考えられ、引用、論旨の展開からもサハの研究から大きな影響を受けたものであることが窺われる。

6 鈴木第二論文の概要

鈴木第二論文では始めに、サハの恒星大気における電離平衡の論文を引用したのち、同様な方法を原子核の解離平衡に拡張する意図が述べられる。鈴木はヘリウム原子核が 4 個の水素原子核から作られていて、高温ではヘリウム核は水素核に分解しようとの考えから、ヘリウムと水素の混合理想気体中で次式のようなヘリウムが解離し 4 個の水素原子が生じる反応が存在すると仮定し、この反応の熱平衡状態でのヘリウムと水素の組成を問題にした。



この式は核反応式とみると電荷が保存していないので、原子の反応式と理解すべきであろう。まさしく核種間の平衡を解離平衡として扱ったわけである。また、鈴木は（あるいは当時の物理学者は）、不安定な原子核の放射性崩壊との類推から、重元素の崩壊ないしは解離により軽元素が形成されるという今日の元素合成論とは反対の考えをもっていたことが垣間見られ興味深い。

理想気体の 1 モルあたりのエントロピー S は次の式 (Sackur-Tetrode の式) で表される。

$$S = \frac{5}{2} \ln T - R \ln P + R \left[\frac{k_B^{5/2} (2\pi m)^{3/2} e^{5/2}}{h^3} \right]$$

ここで記号は通例の使い方に従った。上式で原子の質量 m を原子質量単位で表したものを M 、圧力 P の単位を気圧で表すこととし、 M 、 P 、温度 T に依存する項を残し、計算できる部分を計算し対数を常用対数に書き換えると、鈴木論文の第 3 式

$$\frac{S}{2.3 \times R} = \frac{5}{2} \log T - \log P + \frac{3}{2} \log M - 0.505$$

を得る。以下、鈴木論文に従い、ヘリウムの物理量には 1、水素の物理量に 2 の添字を付けて表すと次の 2 式が成り立つ。

$$\frac{S_1}{2.3 \times R} = \frac{5}{2} \log T - \log p_1 + \frac{3}{2} \log M_1 - 0.505$$

$$\frac{S_2}{2.3 \times R} = \frac{5}{2} \log T - \log p_2 + \frac{3}{2} \log M_2 - 0.505$$

ここで、 p_1 、 p_2 それぞれヘリウム、水素の分圧である。解離平衡の条件として、鈴木は原論文の第 4 式

$$4S_2 - S_1 = \frac{U}{T}$$

を用いた。 U は 4 個の水素原子核とヘリウムの質量差に相当するエネルギーである。今日では解離平衡の条件は化学ポテンシャルを用いて表すのが普通だが、同等の結果を与える。

解離度を x 、全圧力を p とすると、 $p_1 : p_2 = 1 - x : 4x$ から

$$p_1 = \frac{1-x}{1+3x}p, \quad p_2 = \frac{4x}{1+3x}p$$

となる。 S_1 、 S_2 を解離平衡の式に代入し、上の p_1 、 p_2 の表式を使うと、原論文の最後の 2 式

$$\begin{aligned}\log \frac{(4^4) p^3 x^4}{(1+3x)^3(1-x)} &= -\frac{U}{2.3 RT} + \frac{15}{2} \log T + \frac{3}{2} \log \frac{M_2^4}{M_1} - 1.515 \\ &= -\frac{1.4 \times 10^{11}}{T} + 7.5 \log T - 2.418\end{aligned}$$

を得る。(ただし、原論文では左辺の対数の中の分子に係数 4^4 が落ちているように思われる。) 上式は、以下のように書き換えられる。

$$\log p = -\frac{1}{3} \log \frac{(4^4) x^4}{(1+3x)^3(1-x)} + \frac{1}{3} \left[-\frac{1.4 \times 10^{11}}{T} + 7.5 \log T - 2.418 \right]$$

すなわち

$$p = 10^A, \quad A = -\frac{1}{3} \log \frac{(4^4) x^4}{(1+3x)^3(1-x)} + \frac{1}{3} \left[-\frac{1.4 \times 10^{11}}{T} + 7.5 \log T - 2.418 \right]$$

上式から解離度 x と温度 T が与えられれば、圧力 p が求められることになる。原論文では、最終的な計算結果を TABLE 1 としてまとめているが、上式の 10 の指数部分 A を計算し、圧力を 10^A の形で表したものと思われる。

TABLE I.							
The degree of dissociation, temperature and pressure. (Pressure being expressed in atmosphere).							
Temperature x (%)	$10^9 \times 1.7$	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3
1	10^{-2}	10^{-1}	1	10^2	10^3	10^4	10^5
10	10^{-4}	10^{-2}	10^{-1}	10	10^2	10^3	10^4
20	10^{-4}	10^{-3}	10^{-1}	0	10	10^2	10^3
30	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	10^2	10^3
40	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	10^2	10^3
50	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	10^2	10^3
60	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	11^2	10^3
70	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	11^2	10^3
80	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	0	10	10^2	10^3
90	10^{-5}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-1}	10	10	10^2
99	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-1}	10	10	10^2

図 1: 原論文の TABLE 1

解離度については 10% ごと、および 1% と 99% の 11 個の値を、温度については $1.7 \times 10^9 \text{K}$ から $0.1 \times 10^9 \text{K}$ きざみで $2.3 \times 10^9 \text{K}$ まで 7 個の温度の値についての計算結果が表にしている。図 1 に

原論文 TABLE 1 のコピーを載せるが、表中央付近に見られる 0 の値は、 $10^0 (= 1)$ の誤記と考えられる。

鈴木はこの結果をおおよそ以下のようにまとめている。

- 水素が多量に現れるのは圧力が 10 から 0.1 気圧、温度が $2.1 \times 10^9 \text{ K}$ ほどに高くなったとき（表の右下あたり）であり、これまでに観測された最も高い恒星の表面温度は 30000K 程度であるが、この温度ではヘリウムの水素への解離は生じない。
- より高温な恒星内部なら解離が生じる可能性がありうる。ここで求めた式は星の内部の解離度を評価するのに使うことができる。
- エディントンによれば恒星の中心温度と圧力は $10^6 \sim 10^7 \text{ K}$ 程度、圧力は 10^7 atm 程度である。中心温度として 10^7 K を圧力を 10^7 atm とすると解離度は、 $x = 10^{-3500}$ 程度になる。したがって、星の（内部の）温度が 10^7 K 程度であるならば、星に現実に存在する水素が熱的にヘリウムから生成したとすることはできない。
- おそらく全ての元素の原子核の解離熱はおそらくここで仮定した程度であろうから、軽元素の存在を重い元素の解離平衡で説明することはできないが、もし、宇宙が形成されたときの温度が 10^9 K を越えるような温度であれば、この結論は正しくない。

7 考察など

鈴木の見解の出発点はサハの恒星大気における電離平衡の理論を、恒星内部での原子核の解離平衡の理論へ置き換えることだった。そのことは熱力学の普遍性から完全に正しいのだが、その際、当時の、原子核が陽子と電子からなるという誤った描像に立脚したことが、原子核と原子・分子の質的差異を乗り越え同じ平衡理論を適用することを容易にしたのではないかと考えられる。

鈴木の見解は平衡理論であるから、水素が融合してヘリウムができると考えても、ヘリウムが解離して水素ができると考えても結果は同一である。しかし、鈴木の研究の背後には重元素から軽元素が作られるという考えが根底にあったことは留意すべきであろう。それでも、Kragh (1996) が指摘するように、論文の最後の段において宇宙の生成および生成時の温度と元素の存在比を結びつける発想が見られる点は時代を先んじた卓見だったといえるだろう。

8 まとめ

今回は鈴木清太郎の 1928 年の論文の内容を式の導出も含め紹介した。今後は、鈴木清太郎の一連の研究の全貌の紹介、鈴木の研究に対して当時、国内でどのような反応があったのか、なかったのか、日本の天文学者がどのように鈴木の研究を受け止めたかなど明らかにすべき課題は多い。

参考文献

- Alpher R.A. , Herman R.C. (1950) 「Theory of the Origin and Relative Abundance Distribution of the Elements」 Rev. Mod. Phys., **22** p153
- Kragh, H. (1999) 『Cosmology and Controversy』 Princeton University Press
- North J.D. (1991) 『The Measure of the Universe』 Dover Publications

- Suzuki S. (1927) 「On the Thermo-dissociation of Atom-nuclei」 Proc. Im. Acad., **10** p650
- Suzuki S. (1928) 「On the Thermal Equilibrium of Dissociation of Atom-nuclei」
Proc.Phys.Math.Soc.Japan, **10**, p166
- Suzuki S. (1928) 「Further study on Thermo-dissociation of Atom-nuclei with a Remark on
Jeans' New Theory of Stellar evolution」 Proc.Phys.Math.Soc.Japan, **11**, p119
- Suzuki S. (1931) 「The Thermo-Equilibrium of Atom-nuclei at High Temperature」
Proc.Phys.Math.Soc.Japan, **13**, p277
- Suzuki S. (1931) 「The Relative Abundance of Chemical Elements in White Dwarf and
its Electrification」 Proc. Im. Acad., **7** p307
- Tolman R.C. (1922) 「Thermodynamic Treatment of the Possible Formation of Helium from
Hydrogen」 J.Am.Chem.Soc **44** p1902
- 武谷三男 (1976) 『原子力発電』 岩波新書 岩波書店
- 日本農業気象学会編 (1979) 『鈴木清太郎論文集』 日本農業気象学会
- 横尾広光 (1991) 『地球外文明の思想史』 恒星社厚生閣
- 横尾広光 (1997) 「理研での小惑星衝突実験と鈴木清太郎
ー平山族の成因をしらべる 1930 年代の室内実験ー」 天文月報 **90** p273
- 吉田省子 (2001) 「平山清次と鈴木清太郎 - 天文学者の関心に導かれた室内破壊実験 -」
科学史研究 **40**, p129