

# エントロピー最大化モデルにおけるアナロジーとレトリック

水野 勲

## I はじめに

理論・計量地理学は、1960年代後半以降、「人間がない」とか「現状維持的」などと批判され、近年ではモデル作りへの関心自体が下火になっている。その反面、各種の統計パッケージや地理情報システム（GIS）を用いた研究は、むしろ人文地理学の中に確実に定着しつつある。このことは、近年の人文地理学（特に日本の）において、経験論への志向が強まっていることを示している。しかし、科学史・科学哲学が明らかにしたように（ヘッセ、1986a）、事實は「あるがままの」観察データとして存在するのではなく、既存の理論、モデルを背景とした解釈によって現れるのである。さらに、既存の理論、モデルは、経験的データの数量的予測、適合度のみから、正当化されるわけでもない。ここで、経験論とは別の二つの問いが浮かび上がってくる。すなわち、モデルを作る人は、どのような思考過程を経て、モデルを作っているのだろうか。また、同時期に発表された多くのモデルの中で、なぜ特定のモデルが高く評価されるのだろうか。言い換えれば、人文地理学の理論、モデルの中でアナロジー（類比）、レトリック（修辞）は、どのような役割を果たしているか、という問題である。

1970年代以降のポスト実証主義の影響を受けた経済学者は、アナロジーやレトリックを経済理論にとってきわめて重要なものとみなしてきた。たとえばMirowski(1989)によれば、経済学における「限界革命」が、19世紀半ばの物理学の一分野であるエネルギー論からの影響が顕著であるという。これは、新古典派経済学が物理学のアナロジーなしには理論を構成しえなかったことを示したものである。またマクロスキー（1992, p. xiii: [1985]）によれば、「経済学は数学的モデルや統計的検定や市場を持ち出す議論を使うが、これら

はみな文学的な眼で見るとよそよそしい外見をしている。しかしよく見てみるとそれほど掛け離れたものではないのだ。それは文彩——隠喩、類比、権威への依拠——と見ることが出来よう」という。さらに塩野谷（1998, p. 5）は「経済学の方法のかなりの部分は、真理の証明よりも人々の説得を主眼とするレトリックである」と述べ、この観点からシュンペーターの経済思想の独自性を読み解こうとしている。

これに対して、地理学でも、モデルの多くが物理的アナロジーによるものであると述べ、その役割を積極的に考察した人たちがいる（Chorley, 1964; Couclelis, 1984; Pumain, 1989）。しかし、一般に理論・計量地理学では、アナロジーを、より進んだ諸科学からモデルを「借りる」こととみなし、あくまで便宜的なものと考えられてきた。たとえば、Wilson（1969, p.159）は、「研究の一部はアナロジーによって前進するが、最終的にはアナロジーを捨てなければならない」としている。アナロジーをある種の必要悪と考えることは、「計量革命」に付随する科学主義を反映していた。これとは逆に、非実証主義の地理学者は、地理思想におけるアナロジー、または異分野間の理論の移動を、地理的想像力にとって重要なものと考えてきた（Livingston and Harrison, 1980; Mills, 1982; Buttimer, 1993; Gregory, 1994）。それらの研究は大いに刺激的であるが、アナロジーやレトリックの問題を検討すべきは、むしろ、それらの問題が存在しないかのようにみなす理論・計量地理学においてであろう。この点で、ポスト実証主義の科学哲学・科学社会学に基づいて、経済地理学の理論におけるアナロジーやレトリックの問題を提起したBarnes（1996, 2001, 2002）の研究は貴重である。

本稿の目的は、エントロピー最大化モデルを事例として、理論・計量地理学におけるアナロジーとレトリックの役割を検討することである。エントロピー最大化モデル（Wilson, 1967, 1970, 1974）

は、その研究上、政策上における影響力からみて、理論・計量地理学のモデルとして取り上げるに値する事例である。そのことは、このモデルを発表した A. G. Wilson が、31歳の若さでリーズ大学地理学教室教授、*Environment and Planning* 誌（後に A～D に分冊）の初代編集長に迎えられ、1970、80年代を通じて論文の被引用数からみた地理学者ランキングで最上位に位置したこと（矢野、1996）に表れている。なお本稿は、空間的相互作用に関する新しいモデル作りを目ざすものではない。A.G.Wilson のモデル作りにおけるアナロジー、レトリックを検討することを通じて、理論・計量地理学におけるモデル作りを、非実証主義の地理学と「共通の基盤」(Gould and Olsson, 1981) の下で議論することを目指しているのである。

II 章では、エントロピー最大化モデル（特に二重制約型モデル）の概要を述べる。これを受けて、III 章では、エントロピー最大化モデルを生み出した統計力学のアナロジーを検討する。さらに IV 章では、Wilson の論文の構成、論点の出し方から、エントロピー最大化モデルのレトリックを解明する。最後に V 章では、理論・計量地理学におけるアナロジーとレトリックの役割についての若干の展望を行う。

## II エントロピー最大化モデルの概要

### (1) モデルの制約条件

今日、エントロピー最大化モデルと呼ばれているモデルは、もともと通勤トリップの空間的分布を予測する統計理論であった (Wilson, 1967)。これが後に、エントロピー最大化モデルまたは広義の重力モデルと呼ばれるようになり (Wilson, 1970)、さらに空間的相互作用モデル (族) となった (Wilson, 1974)。しかも、最初に論文として発表されたのは、地理学ではなく交通工学の雑誌上であった。こうした事情をふまえ、さまざまにあるエントロピー最大化モデルのうち「二重制約型」モデルを例に、その概要を Wilson の原論文に忠実にレビューしておく (高阪, 1979; 杉浦, 1986; 石川, 1988 も参照)。

Wilson は、通勤トリップ分布の統計理論を構成するにあたり、次のように明確な目的を述べている。すなわち、「 $T_{ij}$  を (仕事のための) トリップ数、 $d_{ij}$  を地区  $i$  と  $j$  の間の距離、 $O_i$  を  $i$  における

仕事のためのトリップの起点数の合計、 $D_j$  を  $j$  における仕事のためのトリップの終点数の合計としよう。空間分布モデルでは、 $T_{ij}$  を  $O_i$ 、 $D_j$ 、 $d_{ij}$  の関数として推定することになる」(Wilson, 1967, p.253)。そして、この推定の方法は、「統計力学という、物理学の中でも重力法則とは異なる分野からのアナロジーによる」(Wilson, 1967, p.255) としている。

Wilson (1967, p.256) によると、トリップ行列  $T_{ij}$  は次の二つの制約条件を「満たさなければならない」という。

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad (1)$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad (2)$$

また Wilson (1967, p.256) は、もう一つの制約式すなわち交通費用の制約式を「満たされるものと仮定する」としている。

$$\sum_i \sum_j T_{ij} c_{ij} = C \quad (3)$$

ここで「 $c_{ij}$  は、 $i$  と  $j$  の間でトリップする際の摩擦抵抗、もしくは一般化された費用」であり、「ある時点において、この地域全体でトリップのために使用される総額が一定額  $C$  である」。

### (2) モデルの導出過程

上記の3つの制約式のもとで、「分布  $\{T_{ij}\}$  が起こる確率は、この分布を生じさせ、制約式を満足させるシステムの状態数に、比例する」(Wilson, 1967, p.257) という基本的仮定をおく。すなわち、 $T_{ij}$  に関する多項分布の状態数  $w$  は、

$$w(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (4)$$

となる。ただし、

$$T = \sum_j D_j = \sum_i O_i \quad (5)$$

ここで、Wilson は、式(1)～(3)の制約式において、状態数を表す式(4)を最大化したものを、「最も起こりやすい状態」とした。それを導く方法は、ラグランジュの未定乗数法であり、次の式を最大化するように未定乗数  $\lambda_i^{(1)}$ 、 $\lambda_j^{(2)}$ 、 $\beta$  を求めることである。

$$T = \log w + \sum_i \lambda_i^{(1)} (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \lambda_j^{(2)} (D_j - \sum_i T_{ij}) + \beta (D_j - \sum_i \sum_j T_{ij} c_{ij}) \quad (6)$$

となる。ここで、式の導出を容易にするために  $w$  の代わりに  $\log w$  とし、次のスターリングの近似式を用いている。

$$\log N! = N \log N - N \quad (7)$$

式(6)を  $T_{ij}$  に関して偏微分し、ゼロとにおいて  $M$  の最大値を求める。その式の導出の過程は、本来ならば長く続くが、Wilson はかなり省略して次のモデルを定式化している。

$$T_{ij} = A_i O_j B_j D_{ij} e^{-\beta c_{ij}} \quad (8)$$

ただし、

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_{ij} e^{-\beta c_{ij}}} \quad (9)$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i B_i D_{ij} e^{-\beta c_{ij}}} \quad (10)$$

である。定数群  $A_i$ 、 $B_j$  は逐次的に求められる。

これらの式(8)~(10)をもって、Wilson (1967, p.258) は「この統計的導出は、重力モデルの新たな理論的根拠を与える」としている。

### III アナロジーについて

#### (1) 科学史・科学哲学と Wilson のアナロジー観

Wilson (1967, p.253) は、重力モデルがニュートンの万有引力の法則とのアナロジーによるもので、理論的根拠に乏しい旨を述べている。その欠陥を埋めるといふ動機の下に、彼は統計力学のアナロジーによるモデル作りを行ったのである。後に、自らの研究を回顧した際、Wilson (1984, p.205) はこう述べた。「偶然にも私は、学生として深く、学科目としての統計力学を学んでいた。私はそれを、美的に (aesthetically) ととても愉快で面白いものとみなしていた」。Wilson はモデル作りの過程で、しだいに都市における人間集団を気体集団とみなすようになり、当初「空間的分布の統計理論」としていたモデルを「エントロピー最大化モデル」と呼ぶようになる (Wilson, 1970)。しかし、古典力学からのアナロジーは悪くて、統計力学からのアナロジーは良いと主張することは当然できず、すぐに「空間的相互作用モデル」と言い直している (Wilson, 1974)。そして、後に Wilson を中心とするリーズ学派が形成されるにつれ、空間的相互作用モデルはエントロピー最大化という「一般的な方法の共通性」(Wilson, 1981, p.74) を用いたもので、統計力学のアナロ

ジーによるものではないと、Wilson は弁明するようになった (第1表)。

このような紆余曲折した Wilson の弁明にもかかわらず、エントロピー最大化モデルは、その一部においてではなく、概念化、定式化、式の誘導というモデル作り全般において統計力学のアナロジーを実践している。これに比べると、重力モデルは万有引力の法則の直接的な「翻訳」にすぎない。つまり、エントロピー最大化モデルは、重力モデル以上に、物理的アナロジーへの依存度が高いと言わなければならない。たとえば、熱・統計力学の啓蒙書である朝永 (1979, 第3章)、藤原・兵頭 (1995, 第6章) を読み、次に Wilson (1967) を読めば、Wilson がボルツマンの統計力学の理論を交通工学の用語に全般的に「翻訳」したことが誰にもわかる (第2表)。もっとも、そのことで、Wilson (1967) に独自性がないと言いたいわけではない。逆に、数学と理論物理学を専攻していた Wilson が、統計力学における形式化を交通工学の文脈に持ち込んだ巧みさに、エントロピー最大化モデルの新しさがあると主張したいのである。

アナロジーはしばしば根拠の乏しい推論をもたらす危険があると考えられ、特に物理的アナロジーを人文・社会科学の研究者は嫌う傾向がある。人間や社会は物理ではないという一見してわかりやすい理由が、その背景にはある。しかし、物理学において自然現象を探索するのは、現実世界に生きる物理学者という名の人間であることが忘れられている。社会学者ギデンズ (1989, p.281) は、人間の社会活動の性格に関する理解の軸と、自然科学の論理形式に関わる軸が、まったく別個の努力ではなくて、共通の問題源泉から出てきたものであることに注意を促している。また科学史・科学哲学の成果によれば、ニュートンの万有引力の法則では、「宗教的背景をもつ“力によって支配されている宇宙”という古くからあるイデーの新しい型での台頭」(吉仲, 1979, p.122) が見られたという。さらに、アナロジーは推論を飛躍させる新たな論理形式と新たな問題設定を提供し、世界をこれまでと違った仕方でも記述するという (デヴィッドソン, 1987; ローティ, 1988)。そうであるならば、人文地理学においてアナロジーを (もちろん、物理学からのアナロジーも) 正しいか誤っているかという判断とは別に、当該のアナロジー

第1表 A. G. Wilson 関連年表

年	学歴・職歴	研究略歴とその関連
1939	ヨークシャーにて生まれる ケンブリッジ大学で数学、理論物理学を専攻 国立原子力研究所技官 オックスフォード大学経済・統計研究所研究員	社会科学プロジェクトの中で重力モデルによる交通流動の研究を行う
1967	運輸省経済計画理事会数理諮問局長	トリップ分布の統計理論を <i>Transportation Research</i> 誌創刊号に発表
1969	国立環境研究センター副所長	論文中に「エントロピー」の語を使い始める P. Haggett からの要請により <i>Environment and Planning</i> 誌初代編集長になる 最初の著書 <i>Entropy in Urban and Regional Planning</i> を出版
1970	リーズ大学地理学教室都市・地域地理学教授	
1972		P. Gould によるレビュー論文 (A.A.A.G. 誌) でエントロピー最大化モデルが絶賛される この頃から、「空間的相互作用」という語を多用し始める
1974		都市モデル研究の集大成 <i>Urban and Regional Models in Geography and Planning</i> を出版 この頃から、リーズ大学同僚、大学院生との共同研究を活発に行う
1976		A. Sayer による都市モデル研究の批判 ( <i>Progress in Planning</i> 誌) E. S. Sheppard によるエントロピー最大化モデルの批判 ( <i>Environment and Planning A</i> 誌)
1977		M. J. Webber によるエントロピー概念を一般化したレビュー論文 (A.A.A.G. 誌)
1978		商業立地のカタストロフ・モデルを発表 ( <i>Environment and Planning A</i> 誌、B. Harris と共著)
1981		カタストロフ理論を用いた著書 <i>Catastrophe Theory and Bifurcation</i> を出版
1983		この頃から、数値シミュレーションを用いた動態的モデルに取り組む (Birkin, Clarke と)
1987		T. J. Barnes による物理的アナロジー批判 ( <i>Canadian Geographer</i> 誌)
1989		構造化された多元主義の立場を表明 ( <i>Remodelling Geography</i> )
1991	リーズ大学学長	

高阪(1979)、杉浦(1986)、石川(1988)、矢野(1996)を参考に作成。

がこれまでとは違うどのような世界の見方を示したかを明示化することが重要であろう (水野, 1995)。

## (2) エントロピー最大化モデルのアナロジーの諸側面

科学哲学者ヘッセ (1986b, p. 8: [1966]) によると、モデルにおけるアナロジーには、同質性 (肯定的アナロジー)、異質性 (否定的アナロジー) の他に、同質とも異質とも分からない性質 (中立的アナロジー) があるとし、中立的アナロジーの存在こそが新しい説明をもたらすとしている。そこで、Wilson のエントロピー最大化モデルについて、統計力学とのアナロジー関係をヘッセの用語を使って整理してみよう (第2表)。

まず肯定的アナロジーとして、Wilson は統計力学の基本的な考え方を、実に巧みに通勤トリップモデルに取り込んでいることが分かる。すなわ

ち、統計力学では熱現象 (とくに熱力学第2法則) を力学的に基礎づけようとするボルツマンの動機があったのに対して、エントロピー最大化モデルでは重力モデルを統計的に基礎づけようとする Wilson の動機があった。前者は気体 (マクロ) - 分子 (ミクロ) 関係を、後者は集団 (マクロ) - 個人 (ミクロ) 関係を、統計的に扱った。その際に、両者とも、ラグランジュの未定乗数法、すなわち制約条件付き最大化の方法 (新古典派経済学の基本的な方法でもある) を用いている。こうしたアナロジーが成功した背景には、そもそもマックスウェルやボルツマンが19世紀後半に統計力学を構想した際、当時発達しつつあった国家統計学の概念や理論を使用したことがある (朝永, 1979, Ⅲ章3節)。さらに付け加えるなら、国家統計学の基礎には、力学におけるガウスの誤差論や天文学者ケトレの社会物理学がある。つまり、自然科学と人文・社会科学との間に、力学→国家

第2表 統計力学とエントロピー最大化モデルの比較

アナロジーの種類	統計力学 (マックスウェル、ボルツマン)	エントロピー最大化モデル (ウィルソン)
(肯定的アナロジー) モデル構築の動機 実体 説明変数 定式化された関係  手法 パラメータ $\beta$ の解釈	熱現象の力学的基礎づけ 気体分子 気体分子の統計集団の挙動 気体分子速度 (ミクロ) と気体圧力 (マクロ)	重力モデルの統計的基礎づけ 個人 個人の集計量の挙動 地区間トリップ数 (メソ) と総トリップ数 (マクロ) ラグランジュの未定乗数法 距離抵抗 (移動しにくさ) に関係
(中立的アナロジー) 行動原理 制約式1 制約式2 目的関数  個体数のオーダー 観察可能性	等確率性、相互独立性 質量保存の法則 $\sum m_i = M$ エネルギー保存の法則 $\sum e_i m_i = E$ 状態数 (多項分布 * 位相空間) の最も起こりうる状態 $10^{23}$ 以上 (スターリングの近似式が成立) 気体の質量、圧力、温度	不確実性、相互独立性 総トリップ数の所与性 $\sum_i T_{ij} = O_i, \sum_i T_{ij} = D_j$ 総交通費の所与性 $\sum_i c_{ij} T_{ij} = C$ 状態数 (多項分布) の最も起こりうる状態 $10^0 \sim 10^4$ (スターリングの近似式に一定誤差) トリップ数、発地・着地トリップ総数、距離
(否定的アナロジー) エントロピー概念 システムの閉鎖性 エルゴード性 空間的自己相関 運動論 (行動論) 時間変数	熱力学的エントロピーと $H$ 定理の同一視 実験ではほぼ満たされる 満たされることが証明される 考慮する必要なし 速度分布を考慮 あり	統計力学的エントロピーと最大状態数の同一視 観察ではほとんど満たされない 観察期間では満たされない 考慮する必要あり 移動性向を考慮せず なし

藤原・兵頭(1995)、Wilson(1967)から作成。

統計学→統計力学→エントロピー最大化モデルという、概念、理論の度重なる移動が行われていたことは、注目すべき事実である。

次に、否定的アナロジーを見てみよう。第2表における否定的アナロジーの項目は、エントロピー最大化モデルを応用する際に有効性の限界があることを示している。たとえば、Wilsonは1967年の論文ではエントロピーという語を用いていないが、これはある意味で適切であった。なぜならば、ボルツマンの統計力学的エントロピーは、単に式(4)の最大化を指して言っていたのではなく、気体分子集団の状態量 (位置  $x, y, z$ ; 速度  $v_x, v_y, v_z$ ; 時間  $t$ ) を示す  $H$  関数が時間とともに不可逆に増大することを、熱力学的エントロピーの増大に対応するものと考えたからであった。Wilson (1970) は自らのモデルをエントロピー最大化モデルと呼ぶようになるが、それは時間変数も移動性向も考慮していない式(6)の最大化にすぎず、熱力学的エントロピーの核心である不可逆性の概念とは無関係であった。また統計力学的エントロピーの核心にあるエルゴード性 (十分に時間がたてば、空間上のあらゆる点を通過しうる) の仮定とも無関

係である。そもそも統計力学では、自由運動する超大数の分子集団によるエルゴード性の仮定をおくからこそ、気体分子の状態数の最大化が経験的な意味をもったのであった。

さらに、中立的アナロジーを検討してみる。このアナロジーは、異質とも同質とも決めかねる曖昧な性質であり、この部分にアナロジーが生産的であるかどうかがかかっているということは、先述したとおりである。まず行動原理では、気体分子が相互に独立かつ等確率に運動するのに対して、人間も同様にみなしてよいかという問題がある。バージェスやアロンゾの都市圏の居住分化モデルによれば、都心からの距離に応じて職業や所得の階層差による居住分化が見られており、そこにはさまざまな人間集団が前提されていた。しかし、Wilson (1967) のモデルの場合、同一の人間集団を前提とし、それによって確率を計算することができたのである。マックスウェルとボルツマンの統計力学では、さまざまな速度分布で運動する気体分子が想定されており、このアナロジーを進めるとバージェスやアロンゾのモデルとの関連が出てくるかもしれない。Wilson (1967, Chap.3) は、

複数の交通モード（たとえば、自動車保有者と非保有者）によるトリップ分割についてのモデルを展開しており、この人間集団のハイブリッド化は後のWilsonの多様な空間的相互作用モデル族を導き出す源泉となっている。

次に制約条件式では、物理学における質量保存の法則とエネルギー保存の法則を、Wilson (1967) は見事にトリップの総流出数、総流入数、総交通費に置き換えたものの、よく考えると奇妙な定式を行っている。なぜトリップ数 $T_{ij}$ は、制約条件式(1)、(2)を「常に満たされなければならない」(恒等式)と、Wilsonは主張するのであるか。既知とされる二つの変数 $O_i$ 、 $D_j$ の定義に、推定すべき未知の変数 $T_{ij}$ が混入している。このような定義の不完全さを意識したためか、後にWilson (1970, p. 4) は序論での一般的定義で「 $O_i$  は $i$ に住む労働者の総数(所与)、 $D_j$  は $j$ における仕事の総数(所与)」としている(ただし、後の章では、この定義は使われず、元の定義を採用している)。このような定義に従ったならば、二つの変数の定義は未知の変数 $T_{ij}$ から独立し、仮説を含んだ経験的な定式を導出しえたであろう。しかし、そうすると今度は、式(1)、(2)が「常に満たされなければならない」というWilsonの言明は成り立たなくなるのである。なぜなら、二つの変数 $O_i$ 、 $D_j$ の値の中に、対象地域 $R$ (地区1,2,...,N)内部のフローの他に、外部とのフローが含まれてしまうからである。したがって、対象地域 $R$ の相互作用に関する開放性を考慮に入れた、より複雑なモデル作りが必要となってくる。そのモデル修正の試みが、Wilson (1970, Chap. 5)による欠損(または追加)情報を考慮したモデルと言えるかもしれない。総輸送費一定の仮定である制約条件式(3)も、多くの論者が指摘するように、奇妙である。そもそも交通費総額 $C$ は定数ではなく、本来は当該地域の経済状態や交通政策に依存した変数であろう。またもし $C$ が、当該地域全体の家計支出に占める通勤費の総額を指すものだとすると、その値はトリップ量推定以前に知られるものであろうか。式(8)~(10)で $C$ を含まない定式を行っているが、それは式(6)を偏微分する際に、 $C$ を定数(事前の情報)とみなすからこそ導出できた結果である。

エントロピー最大化モデルは、統計力学のアナロジーなしに作られることはなく、それがもたら

した新しい世界の見方が、以後にリーズ学派による多くの都市モデル研究を生み出す源泉になったと言える。そして、エントロピー最大化モデルの今後の発展の可能性は、アナロジーをさらに徹底し、形式化した果てに見出されるものであろう。アナロジーは、モデルのレトリックの一部としてあり、次に他のレトリックについて検討してみる。

#### IV レトリックについて

空間的相互作用モデルの核心に「エントロピー最大化」と呼ばれる方法があるが、エントロピー概念そのものを扱った論文は、他の人文・社会科学と同様、当時の人文地理学でも少なくなかった(Curry, 1964; Medvedkov, 1966, 1967, 1970; Berry, 1967; Berry and Schwind, 1969; Chapman, 1970; Semple and Golledge, 1970; Marchand, 1972; Batty, 1974)。熱力学や統計力学におけるエントロピー概念について、同時期の多くの研究は直観的で記述的であったとはいえ、人文地理学の現象にエントロピー概念を新しい形で(集中-分散、秩序化-無秩序化の指標として)導入していたと筆者は考える。またWilson (1984, p.206)によれば、1967年時点でノルウェイ、日本、オーストラリアの研究者による、エントロピー最大化モデルと類似したモデルが作られていたという。にもかかわらず、人文地理学の中で特にエントロピー最大化モデルが熱狂的に支持されたのは、なぜであろうか。それは、エントロピー最大化モデルの経験的妥当性というよりも、むしろレトリック(特に読者に一般性、厳密さ、美しさなどを訴えるもの)によるものであったと主張したい。

##### (1) 一般性

まずWilson(1967)の論文を書く動機となった、古典的重力モデルをその一部とする、より「一般性」をもったモデルの構築、というレトリックを取り上げてみよう。数式だけを追うなら、ほぼ重力モデルと同型のモデルをエントロピー最大化モデルが導出していることがわかる。Wilson (1967, p.258)は「この統計的導出は、重力モデルの新たな理論的根拠を与える」と宣言し、Senior (1979)も「重力モデルからエントロピー最大化へ」というレビュー論文を書き、それ以後、重力/エントロピー最大化モデルと呼ばれるよう

になった。しかし、正確に言えば、エントロピー最大化モデルは、重力モデルとは違う問題を設定しているのである。

Wilson (1967, p.253) は論文の冒頭で、重力モデルの矛盾を簡単な数値例で指摘している。すなわち、地区*i*のトリップ発生と地区*j*のトリップ吸収がどちらも2倍になると、地区*i, j*間のトリップ数は2倍になるはずであるが、重力モデルでは4倍になってしまっていて、不適切であるというものである。この指摘は、レトリックとして効果的である。しかし、実はWilson (1967) は、重力モデルを通常とは微妙に違う形式で提示しているのである。古典的重力モデルが人文地理学で用いられるとき、それは通常、次のような形式のものであった (Stewart, 1947)。

$$T_{ij} = \alpha \frac{P_i P_j}{d_{ij}^\beta} \quad (11)$$

ここで、 $P_i$ は都市*i*の人口規模、 $d_{ij}$ は都市*i, j*間の距離、 $\alpha, \beta$ はパラメータである。これは、都市*i, j*間の相互作用(フロー)が相互の人口規模(ストック)に比例し、地点間の距離に反比例するというものである。この式では、先にWilsonが指摘したような論理的矛盾は発生しない。式(11)は万有引力の法則からのアナロジーであり、無限宇宙のモデルである。しかし、Wilson(1967)は、先行研究を何ら引用せず、いきなり次の式を重力モデルとして提示した。すなわち、

$$T_{ij} = k \frac{O_i D_j}{d_{ij}^2} \quad (12)$$

である。これは、変数の記号を変えた以上の変更であると言わなくてはならない。式(12)の分子は、地区*i, j*の発地および着地のトリップ総数(フロー)となっていて、「集計レベル」のフロー量から「非集計レベル」のフロー量を推定するモデルに変えられ、しかも閉鎖システムのモデルになっている。この変更により、重力モデルの問題設定は別のものに置き換えられたのである。そもそもエントロピー最大化モデルが、古典的重力モデルを本当に理論的に基礎づけるなら、個々の人間行動に関する心理学、社会学、経済学などの行動科学の研究に依拠すべきであろうが、Wilsonはそうした文献を一切、引用していない。もっとも、問題設定の移動が多く、派生的問題を生み出したという意味で、Wilsonのアナロジーは成功していた。

Wilsonによるエントロピー最大化法による既存モデルの理論的基礎づけの試みは広範なもので、それ自体、アナロジーを何度も実践した結果と言える。たとえば、Wilson (1967) は重力モデルを発地制約型、着地制約型の場合に拡張した他、介入機会モデル、交通モードモデルをも、エントロピー最大化法によって再定式化しようとした。さらに、彼は同じ方法を用いて、通勤トリップのモデルから、地域間産業連関、レクリエーション移動、買い物行動などのモデルも定式化し (Wilson, 1970)、古典的立地論の複数のモデルをも統一的な定式の下におこうとした (Wilson, 1974)。しかし、エントロピー最大化法によるこれらの既存モデルの再定式化は、既存のモデルを理論的に「基礎づけ」、包含したというより、エントロピー最大化モデルから既存のモデルがどのように見えるか(モデル間の関連)を示したと言ふべきであろう。

## (2) 厳密さ

次に、エントロピー最大化モデルの「厳密さ」の主張は、そのモデル導出の過程のすべてで表現されている。すなわち、①制約条件式(1)、(2)は「満足しなければならない」と強い調子で述べ、②トリップ分布の状態数を多項分布式(4)で決定論的ではなく確率論的に述べ、③式(6)でラグランジュの未定乗数法という一般的な方法を用い、④式(7)でスターリングの近似式を用いて階乗の式を簡単にしている。①から④までの数式導出は、統計力学におけるボルツマンの理論の簡略版と言えるが、いずれにせよ、3つの制約式と多項分布式を組み合わせ、最後に式(8)~(10)という単純な式を示したことは、人文地理学の読者に驚きを与えるに十分である。事実、このモデルのレビュー論文を書いたGould (1972) は、これらの数式の導出過程に感激して、最大級の賛辞を送っている。①の制約条件の事後的(ex post)性格については、Sayer (1976) が包括的に指摘した。②と③では、各状態の等確率性が前提されているが、これは人文地理学の現象を説明するには単純化しすぎているかもしれない。残りの④について、スターリングの近似式(7)を例に、以下にWilsonの「厳密さ」への訴えをみていきたい。

スターリングの近似式は、気体分子の運動のように超大数( $10^{23}$ 以上)で成り立つものの、人文

第3表 スターリングの近似式の精度

N	logN!	NlogN  N	誤差率 (%)	NlogN  N (1/2)log(2πN)
...				
10	15.104	13.068	- 13.761	15.096
20	42.336	39.915	- 5.719	42.331
30	74.658	72.036	- 3.512	74.655
40	110.321	107.555	- 2.510	110.319
50	148.478	145.601	- 1.937	148.476
60	188.628	185.661	- 1.572	188.627
70	230.439	227.395	- 1.321	230.438
80	273.673	270.562	- 1.147	273.672
90	318.153	314.983	- 0.996	318.152
100	363.739	360.517	- 0.886	363.739
...				

地理学のフロー現象ではオーダーがこれよりきわめて小さく、無視し得ない誤差が発生してしまう。すなわち、スターリングの近似式(7)において、N=10のときに約14%の誤差が、N=100のときに約1%の誤差が、それぞれ生じる(第3表)。対象地域Rの中で遠く離れた地区間では、地区間の通勤トリップが、N=10~100のオーダーとなることもありうるであろう。こうした誤差を避けようとすれば、地区の集計単位を大きく設定するしかない。しかし、そうすると今度は、地区間の距離を定義するとき、各地区の代表点の信頼度がかなり落ちてしまうのである。もっともWilsonはスターリングの近似式の誤差範囲が気になっていたのか、論文の1ページほどを割いて、多項分布式(4)の最大値が極端に大きな値であることを証明しようとしている。しかし、それはトリップ数が少ない場合のスターリングの近似式の誤差範囲をモデルに組み込んでいないばかりか、式の導出中にスターリングの近似式を用いるというトートロジーに陥っているのである。ちなみに、統計力学の教科書では、スターリングの近似式は等号ではなく近似記号で表記されるが、Wilsonは等号で示している。これは、Wilsonがエントロピー最大化モデルに「厳密さ」の印象をもたせようとしたからであろう。さらに「エントロピー」「最も起こりやすい状態」「ダーウィン=ファウラー法」という概念や用語も、人文地理学における解釈が与えられず、統計力学がもつ数学的な「厳密さ」の権威にWilsonは訴えている。

(3) 美しさ

さらに、エントロピー最大化モデルの「美しさ」

の主張を検討してみよう。一般に、自然科学者が数式の単純性と対称性の中に美を見ており、それが理論を作る上での大きな動機となっていることはよく知られている(ヴェスクラー, 1997; チャンドラセカール, 1998)。Wilsonのエントロピー最大化モデルでは、「美しさ」に対する直接的な言及はないが、定式化、推論の過程において審美的判断(aesthetics)が働いていることを指摘できる。

まず、制約条件式(1)と式(2)の添え字*i, j*に関して、また式(8)の変数、パラメータに関して、さらに式(9)と式(10)の循環的定義に関して、それぞれ見られる単純性と対称性は、数学的に美しいものである。この美しさの感覚は、制約条件式におけるシグマ記号、多項分布式における階乗記号を含みながらも、ラグランジュの未定乗数法を経て導出された結果が、なお単純性、対称性を保持していることへの驚きからもくる。さらに、導出された結果が、古典的重力モデルと同型の式で示されている(ただし、Wilsonが古典的重力モデルを違う形で提示していたことは、すでに述べた)。もっとも、この見事な数式の誘導それ自体を最初にもたらしたのは、物理学者ボルツマンであり、人文地理学の現象のモデルを作ろうとしたWilsonは、本来ならばスターリングの近似式をもっと厳密にして $1/2\log(2\pi N)$ という項を加えてもよかった。あるいは、制約条件式(1)~(3)、開放システムを前提としたものにも書き直してもよかった。しかし、そうすると、式(8)~(10)はかなり不恰好に導出されるだけでなく、古典的重力モデルとの同型性を示すことが困難になってしまう。つまり、Wilsonは、人文地理学の現象の特性を厳密に捉えることよりも、数学的な美しさの追求において厳密であったと言えるかもしれない。

V おわりに

人文地理学においてモデル作りの典型であるエントロピー最大化モデルを例に、そこで用いられたアナロジーとレトリックの機能について検討した。その結果、わかったことは次のことである。第1に、エントロピー最大化モデルは統計力学のアナロジーなしに作れなかったはずであるが、人文地理学における物理的アナロジーに対する批判を受けて、Wilsonはしだいにモデルのアナロジ



一的基礎を曖昧にするようになった。しかし、エントロピー最大化モデルを今後、新たに作り直すとき、アナロジーが新たに切り開いた世界を意識化する必要がある。第2に、エントロピー最大化モデルを導出する際のWilsonのレトリックは、読者に対してモデルの一般性、厳密さ、美しさなどに訴えかけるものであり、そのことが同時期のエントロピー概念を用いた多くの研究の中で際立って注目された理由となったものと思われる。モデルの名前の付け方、数学的展開の見事さ、理論的基礎づけという問題設定において、Wilsonのモデルは多くの読者をひきつけた。

かつて理論・計量地理学が英米圏の地理学界を席卷していたとき、地理教育の世界にモデルおよびモデル作りの意義を伝えようとした『地理学におけるモデル』(Chorley and Haggett, 1967)が出版された。その後、この本を20年後に記念して編集された、『地理学の再モデル化』(Macmillan, 1989)、『地理学における新しいモデル』(2巻本, Peet and Thrift, 1989)が出版された。この同年に出版された編著書は、地理学におけるモデルの意義を説く点では変わらないものの、その方向性が違う。『再モデル化』は『モデル』の構成をそのまま踏襲し、もっぱら理論・計量地理学内部の発展を、1970年代以降の実証主義批判をも含めつつ、まとめている。これに対して、『新しいモデル』の方は、マルクス主義、ジェンダー、批判的社会理論を含む政治経済学的アプローチから地理学のモデルを考察しており、モデル概念を数学の世界から解放し、拡張している。これらの編著書から示唆されるのは、人文地理学において生のデータ、感覚所与という観念の中で実証的研究が行われるなら、それは認識論的に素朴な経験論に終わること、そしてそのことを知るきっかけとして「計量革命」があったということである。

本稿では、エントロピー最大化モデルのアナロジーとレトリックを批判的に検討してきた。批判はしばしば否定と同視され、非生産的とみなされがちであるが、Wilson (1967)も引用した科学哲学者ポパー (1971)は逆の考えをもっていた。ポパーは既存の理論、モデルの反復と改良という「通常科学」よりも、反駁される可能性を理論、モデルに用意しておくことが、実り豊かな結果をもたらすと考えていた。それは、批判が、理論やモデルに「他者」を導入し、「独断論」からの解

放を目指すものであるからである。その意味では、エントロピー最大化モデルを分岐点として、1970年代後半に理論・計量地理学から政治経済学的アプローチに移行した3人の地理学者の批判は、きわめて興味深いものである。すなわち、後にリアリスト地理学を提起するA. Sayerは、エントロピー最大化モデルにおける抽象の様式および因果関係の特定に根本的な問題があるとし(Sayer, 1976)、後に分析的マルクス主義地理学を唱えるE. S. Sheppardは、集計レベルの決定論的効用理論と個人レベルの確率論的選択理論との間の論理的不整合を指摘し(Sheppard, 1976)、同様にM.J. Webberは、エントロピー概念の皮相さを、地理学において有効な概念へと拡張するようにレビュー論文を書いた(Webber, 1977)。エントロピー最大化モデルに対するこうした批判的研究は、中立的アナロジーの再考によって、今後モデル作りに生かされるべきものである。そうすることにより、Wilson(1989)が後に主張した「構造化された多元主義」が可能になるであろう。それは、理論・計量地理学と人文主義やマルクス主義の地理学との間に、緊張関係を保ちながらも相互に議論や反駁ができる「共通の基盤」をもつことにほかならない。

[付記] 本稿は、日本地理学会「地理思想の伝統と革新研究グループ」とグレコ会の共催による研究集会(お茶の水女子大学、1998年3月30日)で発表した内容をもとに、加筆したものである。

## 文献

- 石川義孝(1988):『空間的相互作用モデル:その系譜と体系』、地人書房。  
ヴェクスラー、J.編著、金子務監訳(1997):『科学にとって美とは何か』、白揚社。Wechsler, J. ed. (1979): *On aesthetics in science*. The MIT Press.  
ギデンズ、A.著、友枝敏雄・今田高俊・森重雄共訳(1989):『社会理論の最前線』、ハーベスト社。  
Giddens, A. (1979): *Central problems in social theory*. University of California Press.  
高阪宏行(1979):空間的相互作用モデルとその展開。人文地理学研究3, pp. 1-13.  
塩野谷祐一(1998):『シュンペーターの経済観:レトリックの経済学』、岩波書店。  
杉浦芳夫(1986):空間的相互作用モデルの近年の展開:重力モデルからエントロピー最大化モデルへ。野上

- 道男・杉浦芳夫『パソコンによる数理地理学入門』、古今書院、pp. 137-185.
- チャンドラセカール、S.著、豊田彰訳 (1998):『真理と美：科学における美意識と動機』、法政大学出版会。
- Chandrasekhar, S. (1987): *Truth and beauty: Aesthetics and motivation in science*. University of Chicago Press.
- デビッドソン、D.著、高頭直樹訳 (1987):『隠喩は何を意味するのか。現代思想 15(6), pp. 49-69. Davidson, D. (1979): What metaphor mean. In Sacks, S. (ed.): *On metaphor*. University of Chicago Press, pp. 29-45.
- 朝永振一郎 (1979):『物理学とは何だろうか 下』、岩波書店。
- 藤原邦男・兵頭俊夫 (1995):『熱力学入門：マクロからミクロへ』、東京大学出版会。
- ヘッセ、M.著、村上陽一郎他訳 (1986a):『知の革命と再構成』、サイエンス社。Hesse, B. (1980): *Revolutions and reconstructions in the philosophy of science*. Indiana University Press.
- ヘッセ、M.著、高田紀代志訳 (1986b):『科学・モデル・アナロジー』、培風館。Hesse, M. (1966): *Models and analogies in science*. University of Notre Dame Press.
- ポパー、K.著、大内義一・森博共訳 (1971):『科学的発見の論理 (上) (下)』、恒星社厚生閣。Popper, K.R. (1959): *The logic of scientific discovery*. Hutchinson.
- マクロスキー、D.N.著、長尾史郎訳 (1992):『レトリカル・エコノミクス：経済学のポストモダン』、ハーベスト社。McCloskey, D.N. (1985): *The rhetorical economics*. Wisconsin University Press.
- 水野 勲 (1995): 数理地理学は何をめざすか。地理 40(2), pp. 37-41.
- 矢野桂司 (1996): アラン・G・ウィルソン (20世紀の地理学者たち 21)。地理 41(6), pp. 86-93.
- 吉仲正和 (1979):『力学的世界の創造』、中央公論社。
- ローティ、R.著、富田恭彦訳 (1988): プラグマティズム・デヴィッドソン・真理。『連帯と自由の哲学：二元論の幻想を超えて』、岩波書店、pp. 217-281. Rorty, R. (1986): Pragmatism, Davidson, and Truth. In Lepore, E. (ed.): *Truth and interpretation*. Basil Blackwell.
- Barnes, T.J. (1996): *The logics of dislocation*. The Guilford Press.
- Barnes, T.J. (2001): Lives lived and lives told: Biographies of geography's quantitative revolution. *Society and Space*, 19, pp. 409-429.
- Barnes, T.J. (2002): Performing economic geography: Two men, two books, and a cast of thousands. *Environment and Planning A*, 34, pp. 487-512.
- Batty, M. (1974): Spatial entropy. *Geographical Analysis*, 6, pp. 1-31.
- Berry, B.J.L. (1967): *The geography of market centers and retail distribution*. Englewood Cliffs.
- Berry, B.J.L. and Schwind, P. (1969): Information and entropy in migrant flows. *Geographical Analysis*, 1, pp. 5-14.
- Buttimer, A. (1993): *Geography and the human spirit*. The Johns Hopkins University Press.
- Chapman, G.P. (1970): The application of information theory to the analysis of population distributions in space. *Economic Geography*, 46, pp. 317-331.
- Chorley, (1964): Geography and analogue theory. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 54, pp. 127-137.
- Chorley, R. and Haggett, P. eds. (1967): *Models in geography*. Methuen.
- Couclelis, H. (1984): The notion of prior structure in urban modelling. *Environment and Planning A*, 16, pp. 319-338.
- Curry, L. (1964): The random spatial economy: An exploration in settlement theory. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 54, pp. 138-146.
- Gould, P. (1972): Pedagogic review. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 62, pp. 689-700.
- Gould, P. and Olsson, G. (1981): *A search for common ground*. Pion.
- Gregory, D. (1994): *Geographical imaginations*. Blackwell.
- Livingston, D.N. and Harrison, R.T. (1980): Meaning through metaphor: Analogy as epistemology. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 71, pp. 95-107.
- Macmillan, B. ed. (1989): *Remodelling geography*. Basil Blackwell
- Marchand, B. (1972): Information theory and geography. *Geographical Analysis*, 4, pp. 234-257.
- Medvedkov, Y. (1966): The concept of entropy in settlement pattern analysis. *Papers of the Regional Science Association*, 18, pp. 165-168.
- Medvedkov, Y. (1967): An application of topology in central place analysis. *Papers of the Regional Science Association*, 20, pp. 77-84.
- Medvedkov, Y. (1970): Entropy: An assessment of potentialities in geography. *Economic Geography*, 46, pp. 306-316.
- Mills, W.J. (1982): Metaphorical vision: Changes in Western attitudes to environment. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 72, pp. 237-253.
- Mirowski, P. (1989): *More heat than light: Economics as social physics, physics as nature's economics*. Cambridge University Press.
- Peet, R. and Thrift, N. eds. (1989): *New models in geography*, Vol. 1 and 2. Unwin and Hyman.

- Pumain, D. (1989): Spatial dynamics and urban models. In Hauer, J., Timmermans, H. and Wrigley, N. eds.: *Urban dynamics and spatial choice behaviour*. Kluwer Academic Publication, pp. 155-173.
- Sayer, A.R. (1976): A critique of urban modelling: From regional science to urban and regional political economy. *Progress in Planning*, **6**, pp. 175-210.
- Semple, R.K. and Golledge, R.G. (1970): An analysis of entropy changes in a settlement pattern over time. *Economic Geography*, **46**, pp. 157-160.
- Senior, M.L. (1979): From gravity modelling to entropy maximizing: A pedagogic review. *Progress in Human Geography*, **3**, pp. 175-210.
- Sheppard, E.S. (1976): Entropy, theory construction and spatial analysis. *Environment and Planning A*, **8**, pp. 741-752.
- Stewart, J.Q. (1947): Empirical mathematical rules concerning the distribution and equilibrium of population. *Geographical Review*, **37**, pp. 461-485.
- Webber, M.J. (1977): Pedagogy again: What is entropy? *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, **67**, pp. 254-266.
- Wilson, A.G. (1967): A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, **1**, pp. 253-269. 下総薫監訳 (1988): 『都市解析論文集』、古今書院、pp. 170-194.
- Wilson, A.G. (1969): The use of analogies in geography. *Geographical Analysis*, **1**, pp. 225-233.
- Wilson, A.G. (1970): *Entropy in urban and regional modelling*. Pion.
- Wilson, A.G. (1974): *Urban and regional models in geography and planning*. John Wiley & Sons.
- Wilson, A.G. (1981): *Catastrophe theory and bifurcation: Applications to urban and regional systems*. Cloom Helm.
- Wilson, A.G. (1984): One man's quantitative geography: Frameworks, evaluations, uses and prospects. In Billinge, M., Gregory, D. and Martin, R. (eds.): *Recollections of a revolution: Geography as spatial science*. Macmillan Press, pp. 200-226.
- Wilson, A.G. (1989): Classics, modelling and critical theory: Human geography as structured pluralism. In Macmillan, B. (ed.): *Remodelling geography*. Basil Blackwell, pp. 61-69.