JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ランドスケープ理論と拡張モデル(<特集>ソフトサイエンス)
Author(s)	中森，義輝; 菅沼，成正
Citation	知能と情報 : 日本知能情報ファジィ学会誌，16(1): 3-7
Issue Date	2004-02-15
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7953
Rights	Copyright (C) 2004 日本知能情報ファジィ学会．中森義輝，菅沼成正，知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌），16(1)，2004，3-7.
Description	

JAIST
JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

解説

ランドスケープ理論と拡張モデル†

中森 義輝* 菅沼 成正*

1 はじめに

ランドスケープ理論(Landscape Theory)とは、国家、企業、個人などがどのようなアライアンス(提携, Alliance)を組む可能性があるかを予測する理論である。たとえば人々の集まりにおいて、各メンバーは他のメンバーを個別に評価して、ある人とは提携したがり、逆にある人とは提携したがらないという態度をとる。その際、人々は各自のフラストレーションが低くなるような提携を試みる。すべての人のフラストレーションの最小化を図ることは原理的に困難であるが、集団としては局所的安定状態に落ち着く。ランドスケープ理論は、国家、企業、個人などの状態や相互関係からどのようなアライアンス（国際連合、企業同盟、組織など)が形成されるかを予測しようとするものである。また、アライアンスの形成過程を理解することがランドスケープ・シミュレーションの目的である。

本稿では、まず、ランドスケープ理論とその適用事例を解説し、ついで、2つの拡張モデルを紹介する。

2 ランドスケープ理論

ランドスケープ理論は1993年に Axelrod と Bennett により提案された理論である[1]。この理論は、量子凝縮物性のスピングラス (spin glass) モデル[2,3] の考え方をヒントに、エージェントベース (agent-based) のシミュレーションモデル[4,5]を用いて構築される。エージェント (agent) とは、1つの国家、企業、行為者などの役を演じるプログラム・ユニット(programmed unit) である。

本節では、ランドスケープ理論の基本概念、アライアンス構成法、および適用事例を紹介する。

2.1 基本概念

ランドスケープ理論には、その理論の基礎となるいくつかの前提がある。それらの前提は、各エージェントがアライアンス活動によって生じる問題を回避するための仮説事項と、ランドスケープ理論の理論的特性事項から構成されている。

2.1.1 仮説事項

仮説事項は、近視眼的評価、漸進的な提携関係の調整の2つからなる。

- 近視眼的評価とは、他のエージェントと一対評価を行うことである。一対評価の導入により、一度に他の総てのエージェントとの組み合わせ評価を行うという困難な問題を回避している。
- 提携関係の調整を漸進的に行うのは、利害関係に関する情報や、アライアンス形成活動から得られる利得の因果関係などが曖昧であっても、各々のエージェントがその都度意思決定することにより、アライアンス活動を継続するためである。

エージェント集合 $\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$ がアライアンス関係によっていくつかに分割される。それを状態と呼び（木嶋［6］は地勢と呼んでいる）

$$X = \{X_1, X_2, \cdots, X_m\}, \quad 1 < m < n \tag{1}$$

とする。なお、オリジナルのランドスケープ理論では $m=2$ の場合のみを扱っている。

2.1.2 理論的特性事項

理論的特性は、以下の3つから構成される。

- エージェントの規模 (size)：各エージェントが他のエージェントにとってどれだけ重要な存在であるかを反映する数値である。エージェントの規模を $s_i (s_i > 0)$ と表す。
- エージェント間の態度 (propensity)：木嶋[6]は態度を親密度と呼んでいる。エージェント A_i のエージェント A_j に対する態度を数値化し p_{ij} と表す。
- エージェント間の距離 (distance)：状態 X におけるエージェント A_i とエージェント A_j の距離 $d_{ij}(X)$ は、2つのエージェントが同じアライアンスに属すとき0、異なるアライアンスに属すとき1と定義される。

距離 $d_{ij}(X)$ が対称であることは言うまでもないが、ランドスケープ理論では態度変数 p_{ij} も対称であると仮

† Landscape Theory and Extension Models
Yoshiteru Nakamori and Shigemasa Suganuma

* 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

定されている。Axelrodは国境紛争の例を挙げ、一国が紛争原因を持つなら、相手国もまた同様の非協調傾向を持つとしている。つまり、エージェントA_iのエージェントA_jに対する態度と、エージェントA_jのエージェントA_iに対する態度とは表裏一体と仮定している。すなわち、

$$p_{ij}=p_{ji} \tag{2}$$

であり、p_{ij}はエージェントA_iとエージェントA_jがアライアンスに積極的であれば、その度合いに応じたプラスの数値で、消極的であればマイナスの数値で定義される。

2.2 アライアンスの形成

ここでは、状態Xにおけるエージェント$A_1, A_2, \cdots, A_n$のフラストレーション$F_1(X), F_2(X), \cdots, F_n(X)$と、それらより導出される状態$X$のエネルギー$E(X)$を定義する。

フラストレーションとは、エージェントA_iがいくつかの提携関係に分割された状態Xにおいて、いずれかのアライアンスに所属する際に感じるフラストレーション、つまり不満足の度合いである。したがって、エージェントA_iが現在のアライアンスから他へ移ることによりフラストレーションの減少が生じるのなら、他のアライアンスへの移行を試みるというものである。エージェントA_iのフラストレーションは次式で定義される。

$$F_i(X)=\sum_{j=1}^{n} s_j p_{ij} d_{ij}(X) \tag{3}$$

エネルギー$E(X)$は状態Xにおける各エージェントのフラストレーションを加重総和したもので、次式によって定義される。

$$E(X)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} s_i s_j p_{ij} d_{ij}(X) \tag{4}$$

これによって、状態Xの総エネルギーが決まる。各エージェントは親密な相手と同じアライアンスに入る、もしくは疎遠な関係の相手とは異なるアライアンスに入るという動作を漸進的に繰り返し、フラストレーションを最小化しようと試みる。その結果、エネルギーは局所的最小値に落ち着くことになる。

状態Xのエネルギー量がわかると、エネルギー・ランドスケープが構築される。これは可能な各状態を表す点とそれに対応したエネルギー値を示すグラフである。このエネルギー値には局所的最小値、つまり安定した状態があり、そこが均衡点となる。

2.3 適用事例

Axelrodらは、ランドスケープ理論を2つのアライアンス事例に適用している。1つは、第二次世界大戦時における連合国・枢軸国の形成［1,7］についてであり、もう1つは、UNIXの標準化同盟の形成［7,8］に関するものである。

2.3.1 第二次世界大戦時のアライアンス

第二次世界大戦時の提携問題では、1国家を1エージェントとし、17ヶ国が対象となっている。各エージェントの規模は国力（国家能力指標）を基に算出され、エージェント間の態度（親密度）は、民族紛争の有無、宗教の類似度、国境紛争の有無、政治形態の類似度、20世紀に入ってからの両国間における戦争の有無という5つの要素から構成されている。

具体的には、民族的対立、国境紛争、近年の両国間に戦争の歴史がある場合－1点、両国が同じ宗教の場合は＋1点、別の分類にまたがる場合は－1点とし、各国の各宗教の比率に応じて合計を計算している。ま

表1：第二次世界大戦時のアライアンス予測（安定状態1）

アライアンス1	アライアンス2
イギリス	ドイツ
フランス	イタリア
チェコスロバキア	ポーランド
デンマーク	ルーマニア
ソビエト連邦	ハンガリー
ユーゴスラビア	ポルトガル
ギリシャ	フィンランド
	ラトビア
	リトアニア
	エストニア

（安定状態2）

アライアンス1	アライアンス2
イギリス	ソビエト連邦
フランス	ユーゴスラビア
チェコスロバキア	ギリシャ
デンマーク	
ドイツ	
イタリア	
ポーランド	
ルーマニア	
ハンガリー	
ポルトガル	
フィンランド	
ラトビア	
リトアニア	
エストニア	

た政治のタイプ（民主主義、ファシズム、共産主義）が両国間で類似する場合は＋１点、類似しない場合は－１点としている。

シミュレーションでは、1936年から1939年までの１年単位で算出されたデータを用いて、年毎にアライアンス形成状態を計算している。表１は、1936年のデータを基にシミュレーションを行った結果である。安定状態１は第二次世界大戦の同盟形態を予測しているが、ポーランドとポルトガルがドイツ側に入っていることが事実と異なっている。安定状態２は、ソビエトを軸にした同盟そのものである。なお、本稿では省略するが、1937年から1939年までは史実に即した同盟関係が予測されている。

2.3.2 UNIX 標準化に向けてのアライアンス

UNIX の事例では、1企業を1エージェントとし、1987年までに UNIX の標準化の開発に大きく携わった９社を対象としている。規模については、各社のシェアが尺度として採用されている。ただし AT&T に関しては、その当時にワークステーションを製造していなかったので、AT&T 社が UNIX の標準化に及ぼす影響の点から重要度の推測を行い、規模を算出している。また、エージェント間の態度は近いライバルか遠いライバルかの特定と分類、ライバル関係のパラメータを基に算出されている。

シミュレーションの結果、表２に示すような２つの局所的最小値（状態、地勢）が得られ、安定状態１に関しては、UNIX インターナショナル (UII) とオープン・ソフトウェア同盟（OSF）という形での分割を予測するものであった。この中で IBM の予測結果だけが事実と異なっている。なお、安定状態２は意味のある結果ではないと思われ、Axelrod も解説していない。

表２： UNIX 標準化のアライアンス予測

（安定状態１）

アライアンス１	アライアンス２
Sun	DEC
ATT	HP
Prime	Apollo
IBM	Intergraph
	SGI

（安定状態２）

アライアンス１	アライアンス２
Sun	AT&T
DEC	Prime
HP	IBM
	Apollo
	Intergraph
	SGI

3 拡張モデル

ここでは、ランドスケープ理論を拡張した２つのモデルについて解説する。態度の非対称化への拡張[9,10]と、アライアンス集合のファジィ化への拡張［11］である。

3.1 態度の非対称化

木嶋［9,10］は、従来のランドスケープ理論で基礎となる仮説事項に注目し、態度の非対称化 $p_{ij} \neq p_{ji}$ と、アライアンス数を限定しないという２点を拡張したモデルを試みている。

この拡張理論は航空業界のアライアンス形成事例に適用されている。１企業を１エージェントとし、10社が対象となっている。各エージェントは年間乗客数を企業規模とし、エージェント間の態度（親密度）は、自社の路線ネットワークの拡大という点から自他の路線比較を行い、その点から自社にとっての魅力の有無によって決定されている。

木嶋らは、非対称な態度、かつ３以上のアライアンスが存在する状況において、現実に近いシミュレーション結果を導いている。

3.2 アライアンスのファジィ集合化

菅沼ら［11］は、アライアンスへの完全な棲み分けができない状況も起こりうると考え、ファジィ集合論を用いてランドスケープ理論の拡張を行っている。エージェントがアライアンスに帰属する度合の曖昧さを認めた場合におけるアライアンス形成を考えるものである。

エージェント A_i のアライアンス X_k へのメンバシップ値 $u_{ik} \in [0;1]$ を導入し、エージェント A_i とエージェント A_j の距離をつぎのように定義しなおす。

$$d_{ij}(X) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}(u_{ik} - u_{jk})^2 \tag{5}$$

ここで、$U = (u_{ik})$ とすれば、エネルギーは

$$E(X, U) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} s_i s_j p_{ij} \sum_{k=1}^{m}(u_{ik} - u_{jk})^2 \tag{6}$$

となる。

したがって、以下の条件のもとで上の $E(X, U)$ を最小化するメンバシップ値の集合 $\{u_{ik}\}$ を求めることが目標となる。

$$0 \leq u_{ik} \leq 1, \ ^{\forall}i, \ ^{\forall}k \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{n} u_{ik} > 0, \ ^{\forall}k \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^{m} u_{ik} = 1, \ ^{\forall}i \tag{9}$$

なお、以下の数値例では、安定状態をGAによって求めている。

3.2.1 第二次世界大戦前のアライアンス

表3は1936年のデータを適用したアライアンス予測である。表1の安定状態2と同じく、ソビエトを軸にした同盟関係を予測している。また、1937年と1939年のデータでも安定状態2を予測している。1938年のデータではAxelrodらのシミュレーション結果よりも史実に即した結果を予測している。なお、表中の帰属度はアライアンス1へのメンバシップ値を表している。

表3： 拡張モデルによる国家間アライアンス

アライアンス1	帰属度	アライアンス2	帰属度
イタリア	0.9991	ソビエト連邦	0.0014
イギリス	0.9980	ギリシャ	0.0107
ポーランド	0.9973	ユーゴスラビア	0.0324
ラトビア	0.9972		
フランス	0.9971		
ドイツ	0.9967		
チェコスロバキア	0.9947		
エストニア	0.9912		
デンマーク	0.9827		
ポルトガル	0.9760		
ルーマニア	0.9759		
リトアニア	0.9758		
フィンランド	0.9678		
ハンガリー	0.9609		

3.2.2 UNIX標準化のアライアンス

UNIX標準化のケースに関しては表4の結果が導かれている。UNIXインターナショナル(UII)とオープン・ソフトウェア同盟(OSF)という分割がなされている。実際の状況と比較するとPrimeだけが異なっているが、Axelrodは「IBMだけが異なっている状況よりも、Primeだけが異なっている状況の方がより良い」と述べている。なお、表4においても帰属度はアライアンス1へのメンバシップ値を表している。

表4： 拡張モデルによるUNIX標準化アライアンス

アライアンス1	帰属度	アライアンス2	帰属度
AT&T	1.0000	IBM	0.0000
Sun	0.9993	DEC	0.0001
		HP	0.0002
		Prime	0.0003
		Apollo	0.0007
		Intergraph	0.0014
		SGI	0.0022

おわりに

本稿では、ランドスケープ理論によるアライアンスの形成予測法について解説を行った。また、態度の対称化への拡張と、アライアンスのファジィ集合化への拡張モデルを紹介した。アライアンスのファジィ集合化については、本稿の例の場合はクリスプ分割に近いものになっているが、多くの実際問題において有意義なモデルになりうると思われる。ただし、大域的な最適値のみならず、局所的な最適値も探索する必要があるという意味において、通常の最適化問題とは異なっている。

参考文献

[1] R. Axelrod and D. Bennett: A landscape theory of aggregation. *British Journal of Political Science* Vol. 23, pp. 211-233, 1993.

[2] A. Philip: Spin glass V: real power brought to bear. *Physics Today* (July), pp. 9-10, 1989.

[3] M. Waldrop: *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Simon and Schuster, pp. 138-139, 1992.

[4] J. Epstein and R. Axtell: *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press; and Cambridge, Mass. 1996.（服部正太・木村香代子訳：人工社会 - 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション．共立出版，1999.）

[5] 高玉圭樹： 入門：計算組織論とは何か？- 社会シミュレーションの基礎から最近の研究まで -．第25回システム工学部会研究会，pp. 66-67，2002.

[6] 木嶋恭一：ドラマ理論への招待：多主体複雑系モデルの新展開．オーム社，pp. 58-63，pp. 140-156，2001.

[7] R. Axelrod: *The Complexity of Cooperation: Agent-based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press, 1997.

[8] R. Axelrod, W. Mitchell, R. Thomas, D. Bennet and E. Bruderer: Coalition formation in standard-setting alliances. *Management Science*, Vol. 41, pp. 1493-1508, 1995.

[9] K. Kijima: Generalized landscape theory: agent-based approach to alliance formations. *Civil Aviation Industry Journal of Systems Science and Complexity*, Vol. 14, No. 2, pp. 113-123, 2001.

[10] 入内島正之：ランドスケープ理論の拡張とその適用．東京工業大学大学院社会理工学研究科価値システム専攻修士論文，1999.

[11] S. Suganuma, V. N. Huynh, Y. Nakamori, S. Wang, K. K. Lai: A framework of fuzzy landscape theory with an application to alliance analysis. *Journal of Systems Science and Complexity*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-12, 2003.

(2003年12月12日　受付)

[問い合わせ先]
中森 義輝
〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科
TEL：(0761) 51-1755
FAX：(0761) 51-1149
E-mail：nakamori@jaist.ac.jp

著者紹介

中森 義輝（なかもり よしてる）［正会員］

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

1979年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士課程修了。工学博士。甲南大学理学部応用数学科勤務を経て、1998年4月より北陸先端科学技術大学院大学教授。1984年10月より1985年11月まで、国際応用システム解析研究所研究員。1986年4月より環境庁国立環境研究所客員研究員。1992年9月より大連理工大学客員教授兼務。日本ファジィ学会、計測自動制御学会、環境科学会、IEEE などの会員。

菅沼 成正（すがぬま しげまさ）［正会員］

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

2000年3月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了、2000年4月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科後期課程入学、2002年4月～2003年3月まで中国科学院数学与系統科学究院研究員、この間、2002年10月香港城市大学経営科学科研究員、2003年4月～2004年3月までの予定で清華大学経済管理学院管理科学与工程高級進修生。エージェントベース・シミュレーションとその社会問題への応用研究に従事。