

ランドスケープ理論とその周辺

木嶋 恭一

ランドスケープ理論は、複数の様々な個性を持ったエージェントが相互作用を通じて次第にアライアンス（連携・派閥）を作っていくプロセスを記述する、ABS (Agent-based Simulation) と呼ばれるシミュレーションモデルの一種である。この理論を提唱した Axelrod は、この理論を『第二次世界大戦時における連合国・枢軸国の形成』の分析などに適用し、興味深い結果を導いている。本稿では、その基本的な考え方とアルゴリズムを説明するとともに、その拡張の方向性についても検討する。

キーワード：ランドスケープ理論、アライアンス形成、親密度、フラストレーション

1. はじめに

エージェントベースシミュレーションは、個々のエージェント（自律的決定主体）のふるまい方、エージェント同士の相互作用、周囲環境との相互関係をモデル化し、多数のエージェントを仮想的環境下に発生させ、それらが全体として、いかなる振る舞いを見せるかを観察しようとする。それにより、個々のエージェントの振る舞いを定めた当初の想定からは思いもよらないエージェント群の動きの発生（創発現象）から、何らかの洞察を得ようとするのである。

なかでも、ランドスケープ理論は、集団内のエージェントが他のエージェントと提携しようとする際に感じるフラストレーション（不満）をはかり、それに基つきアライアンス（連携）の形成過程をシミュレートしようとする理論である。

一般に、集団内のエージェントは、他のエージェントに対して、親近感や嫌悪感を抱いたりするのがふつうであろう。そのため、例えば、国会内では、各政党はできるだけ親近感を感じるパートナーを求め、緊張を最小限に抑えるように派閥を形成し、連立が模索されるのである。

ランドスケープ理論は、これらの親近感と嫌悪感からエージェントごとにフラストレーションを定義し、各エージェントはこれを最小限に抑えるような相手に近づいてアライアンスを形成すると仮定し、その振る舞いをシミュレートする理論である。

2. ランドスケープ理論とは

2.1 エージェントの表現と仮定

ランドスケープ理論は、複数のエージェントがアライアンスを形成する過程をシミュレートしようとする理論であるが、各エージェントの行動に対して、次の二つを仮定する。これらの仮定はそのどちらも、各エージェントにとってそれぞれのアライアンスの価値を評価するのが困難であるという認識を反映している。

最初の仮定は、各エージェントは近視眼的評価をする、という仮定である。各エージェントは、他のエージェントとどれだけうまくやっつけられるかを考慮する際に、対象外のエージェントについては考慮しないということである。すなわち、他のエージェントに対してペア（一対）ごとの評価のみを行い、例えば、複数のエージェントの組に対する評価などの、いわば高次の評価は全く考慮に入れないということである。

2番目の仮定は、各エージェントはアライアンスの調整を漸進的に行う、という仮定である。すなわち、あるアライアンスに参加するかどうかの意思決定はエージェントごとに行われるということである。したがって、あるアライアンスに属するすべてのエージェントが協調してそっくり他のアライアンスに移動するという状況は考えない。利害関係に関する情報が曖昧で、またアライアンス形成活動から得られる利得の因果関係もあいまいである場合にはこうした仮定を置くのも妥当であるといえる。

一方、各エージェントは次の三つのパラメータで特徴づけられる。

1. エージェントの規模 例えば、エージェントが国家であればそのエージェントの規模は、人口

きじま きょういち
東京工業大学 大学院
〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1

や産業規模など、また企業であればシェアや生産力などではかることができるだろう。これは、いわばエージェントの能力を表現するパラメータであり、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パラメータである。考察対象としてのエージェントとしてなにを考へるかで、どのように規模を定義するかは自由なので、逆に適切な規模の概念が重要になる。

2. エージェント i のエージェント j に対する親密度 エージェント i のエージェント j に対する親密度 p_{ij} は、エージェント i から見たエージェント j に対する、「提携し同じアライアンスに入ろうとする意志の強さ」を表すパラメータである。両者が提携したいと思っているならば正数、対立の可能性を持っているならば負数とし、 $-1 \leq p_{ij} \leq 1$ とする。この親密度は、対称的と仮定されている。すなわち、エージェント i から見たエージェント j に対する親密度は、エージェント j から見たエージェント i に対する親密度と全く等しいと仮定されているのである。この仮定が、この理論の基本的ロジックを支える大きな役割を果たしている。

3. エージェント i とエージェント j の距離 各エージェントがそれぞれ親近感を持つ者同士が連携して、いくつかのアライアンスに分かれたとしよう。そのようなエージェントの分割図を地勢と呼ぶ。すなわち、地勢とは、「すべてのエージェントをいくつかの集団に組分けしたときのある一つのパターン」を意味する。ここでは形成されるアライアンス数は1ないしは2と仮定し、ある一つの地勢において、エージェント i から見たエージェント j との距離 $d_{ij}(X)$ は、2人のエージェントが同じアライアンスに属しているのなら0、もし違うアライアンスに属しているのなら1と定義する。

2.2 フラストレーションとエネルギー

各エージェントが上記三つのパラメータで規定されると、地勢 X に対するエージェント i のフラストレーション $F_i(X)$ を、自分以外のエージェントの規模と提携したいかどうかの尺度である親密度に基づき、次式で定義する。

$$F_i(X) = \sum_{j \neq i} s_j p_{ij} d_{ij}(X)$$

これは、 i が地勢 X において感じるまさに不満の度合いである。ここでまず注目すべきは、エージェントの近視眼的な行動が表現されているということである。すなわち、フラストレーションは2エージェント間の親密度等から定まり、2者以外の状況などのより複雑な相互作用には左右されていない。

さらに、フラストレーションの定義の中に、親密度だけでなく相手の規模も採り入れられていることも特徴である。これは、たとえ対立しているとしても小規模のエージェントと連携を組むことは、同じくらいの尺度で対立している大規模のエージェントと連携を組むことに比べて、たいした問題にはならないということを反映する。

漸進性の仮定により、各時点では1人のエージェントのみがフラストレーションを減らすように所属するアライアンスを変更する。その基本行動は次の二つである。一つは、協調傾向の相手と同じアライアンスに入ることである。そのときには、彼との距離は0となるので、そのエージェントへの不満は0になり、フラストレーションは減少する。二つ目は、対立傾向の相手とは違うアライアンスに入ることである。そのときには距離は1であり、また親密度は負なので不満は減少する。

次に、各エージェントの持つフラストレーションから、一つの地勢 X に対してエージェント全体が持つフラストレーションの総和（これを、地勢 X の持つエネルギーという）を次のように定義する。

$$E(X) = \sum_i s_i F_i(X) = \sum_i s_i \sum_j s_j p_{ij} d_{ij}(X)$$

ランドスケープ理論は、原理的に、エネルギーが最少となる地勢を求めようというものである。そのアルゴリズムは、次に示すように、1人のエージェントのフラストレーションの減少とシステム全体のエネルギーの減少が等価であることに基づいている (Kijima, 2000)。

実際、いま、あるエージェント $j \in N$ があるアライアンスから違うアライアンスに移動して、その結果地勢が $X_1 = \{A_1^j, A_2^j\}$ から $X_2 = \{A_1^j, A_2^j\}$ へ変化したとしよう。 i をもともとの地勢 X_1 で j と同じアライアンスに属していて新たな地勢では j と離れたエージェント、 k を新たな地勢 X_2 で初めて j と同じアライアンスに属すようになったエージェントとする。すなわち、

$$i, j \in A_1^j, k \in A_2^j, i \in A_1^j, k, j \in A_2^j$$

とする。そのとき、

補題1 $E(X_2) < E(X_1)$ と $F_j(X_2) < F_j(X_1)$ は同値である。

すなわち、 j が自分のフラストレーションを下げようと利己的に行動して所属するアライアンスを変更すると、全体のエネルギーも減少する。逆に、全体のエネルギーを減少させるように地勢が変更されると、それによって動いたエージェントのフラストレーションは必ず下がっている。

命題2 エネルギーが地勢 X で最小化されることと、地勢 X で各エージェントのフラストレーションが最小化されることは同値である。

これにより、シミュレーションにおいて全体のエネルギーを最小化するだけで、全エージェントのフラストレーションが最小化していることが保証される。

以上の補題および命題では、地勢のエネルギーが個々のエージェントのフラストレーションの加重和として定義されていること、および親密度が対称的であるという前提が本質的に効いている点に注意すべきである。

シミュレーションの具体的なアルゴリズムは次のように表現できる。

1. 初期地勢を生成する。
2. 地勢 X を選択し、そのエネルギー $E(X)$ を計算する。
3. X から到達可能なすべての地勢を生成し、そのエネルギーを計算する。
4. 3. のなかで最少なエネルギーを持つ地勢 Y を選択する (Y が複数ならランダムに選択)。
5. $E(X) > E(Y)$ が成立すれば X を Y に置き換えて2. へ戻る。
6. $E(X) > E(Y)$ が成立しなければ X を極小エネルギー地勢 (均衡地勢と呼ぶ) のリストに含め、
7. へ進む。
7. すべての地勢の検討が終了したかどうかチェックし、終了していなければ2. へ戻る。終了していればプログラムを終了する。

ランドスケープ理論の「フラストレーションの最小化」という考え方は、例えばゲーム論のような先見的な合理的意思決定の考え方とはかなり異なるものである。しかし、各エージェントが近視眼的に局所改善を図り、現実に対処するプロセスの考え方は、十分理解できるだろう。この理論の最大の目的はアライアンス形成の結果の予測そのものにあるのではなく、むしろシミュレーションによりアライアンスの形成過程をよ

りよく検証し、そこから何らかの洞察を得ることなのである。

3. ヨーロッパにおける第二次世界大戦の同盟

Axelrod は、本来国際関係の専門家であり、彼のランドスケープ理論を第二次世界大戦に先立つ数年間におけるヨーロッパのいくつかの国々の連携の形成過程の考察に応用し、戦時中に実際に起こったヨーロッパ諸国の連携を検証している。応用するに当たっては、①どのようなエージェント集団を考えるか、②各エージェントの規模とペア間の親密度をどのように定量化するかが本質的に重要なので、その点を中心に紹介する。

ここで扱うエージェントは1930年代に重要な外交にかかわったヨーロッパの17カ国である。各国の規模は、人口動態、産業、軍事力などの要素を組み合わせで算出している。さらに、他国との親密度は、民族的対立、宗教の類似性、国境紛争の有無、政治のタイプの類似性、その両国間における最近の戦争の有無の五つの要素を同じ重みで組み合わせで定義している。

具体的には、民族的対立、国境紛争、両国間に戦争の歴史がある場合、それぞれの性向は-1点としている。また、宗教の類似性は、同じ分類 (カトリック、プロテスタント、ギリシア正教、イスラム教、無宗教) 内の場合は+1点、別の分類 (キリスト教、イスラム教、無宗教) にまたがる場合は-1点として、各国の各宗教の比率に応じて合計を計算している。政治のタイプの類似性や相違は、民主主義、ファシズム、共産主義について両国を考え、同じタイプなら+1点、別のタイプなら-1点とする。恣意的な面を最小限に抑えるために、これらの5項目を等しい重みで合計して最終的な親密度を定義している。

以上の方法で、規模と親密度を計算したうえで、合計65536通りの地勢のそれぞれについてエネルギーを算出し、各国が第二次世界大戦でどのような協調をするか考察している。1936年の規模のデータを用いたシミュレーションでは、極小値を与える地勢が2カ所得られた (表1)。これらは、それぞれ分割の軸をドイツ-反ドイツ (列方向: 地勢1)、ソビエト-反ソビエト (行方向: 地勢2) にとった地勢となっている。

また、そこに到達する初期地勢の数の比較から、ランダムに初期地勢を発生させると地勢1は地勢2に比べて、到達する可能性が高く、より起こりやすいと判

表1 二つの地勢とその構成国

	地勢1の アライアンス1	地勢1の アライアンス2
地勢2の アライ アンス1	イギリス フランス チェコスロバキア 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
地勢2の アライ アンス2	ソビエト連邦 ユーゴスラビア ギリシア	

定された。この地勢1は第二次世界大戦の実際の同盟から17カ国中2カ国（ポーランドとポルトガル）を除き、他のすべての同盟を正しく計算している。さらにいえば、歴史的に見ると、ポーランドが地勢1でドイツ側に入ったという誤りは、それほど途方もない誤りではないと考えられるのである。

4. ランドスケープ理論の拡張

ランドスケープ理論の基本はきわめて単純であり、そのため拡張の方法は様々に考えられる。なかでも、その二つの大きな仮定、すなわち、親密度 k_{ij} が常に対称であるという仮定と、形成されるアライアンス数があらかじめ1または2であるという仮定を緩和するいくつかの試みが行われているので、ここではその一つを紹介する[2]。ただ、親密度の対称性は、理論の根幹を支える本質に関連するため、これを取り除くためには基本的なロジックの大幅な見直しが必要となる。

この拡張では、個人合理性をまず追求し、次に全体合理性を考えてアライアンスを形成するエージェントを想定する。すなわち、各エージェントはまず自らのフラストレーションを減らすような移動可能な地勢（隣接地勢）を（複数）考え、その中で全体のエネルギーが最少となる地勢を選ぶと仮定するのである。アルゴリズム的には、現在の地勢から次に移動する地勢を決定する際、これまでの「地勢エネルギーが最も減少する隣接地勢に移動」という条件に、「移動したエージェントのエネルギーが減少している隣接地勢に移動」という条件を加える。

この場合、エージェントが移動することによって、その移動した者と全体のエネルギーが減少していることだけしかいえない。実際、あるエージェント j が移動して地勢が変化したとしても、移動した j のエネルギー減少が他の地勢に移った場合の方が大きかったという場合が起こりうる。また、エージェント i, k をそれぞれ、 j が移動する前と移動した後に属するアライアンスの任意のエージェントとすれば、エージェント i, k の総エネルギーの減少が最大になっているとも限らない。エージェント i, k の総エネルギーがそもそも減少せず、逆に増加している可能性も否定できない。

さらに、形成されるアライアンスの数をあらかじめ限定はせず、エージェントの行動によっては最大でエージェントと同数のアライアンスが形成できるように修正する。そのとき、距離 $d_{ij}(X)$ の定義そのものは、従来と同様とする。つまり自分と同じアライアンスに属しているならば距離 $d_{ij}(X)=0$ 、そうでなければ他のどのアライアンスに属しようとも $d_{ij}(X)=1$ と定義する。

5. 拡張したモデルによる航空業界のアライアンス形成のシミュレーション

航空業界には、コードシェアリングをはじめとして共同運航、広告・宣伝などの共同プロモーション、空港施設の共用、整備や運航の協力、CRS（コンピュータ予約システム）の提携、座席販売や予約管理の協力、人的資源の交流などによって、1999年現在大きく分けて四つのグループがある。

こうした背景を踏まえて、アライアンス形成に拡張されたランドスケープ理論を適用する。ここでも、各エージェントの規模とペア間の親密度をどのように定量化するかを中心に、実際の結果はどうなったかを含めて説明する。

規模としては年間乗客数をとり、親密度を航空路のネットワークから定めるとというのが基本的な考え方である。運賃、サービスの質などは年間乗客数に反映される。また、アライアンスを形成することで年間乗客数が増加すると期待できるので、各社は乗客数の多い相手と組む動機が強い。したがって、企業規模 s_i を年間乗客数で表すことにする。

次に、親密度を路線ネットワークを用いて定める。一般に、航空会社がアライアンスを組む最大の目的は自社の路線ネットワークの拡大である。自分の持たない路線を持つ相手に対してはその路線から相手の乗客

を取り込める可能性があるため、強い魅力を感じると考えられる。

具体的には、相手の持つある一つの路線をとりあげ、それを自分の持つ全路線と比較してその路線に対する評価を決定する。

まず、相手のその路線が自分の持つ路線と重複する場合、自分の乗客をシェアされて半減すると考える。次に、相手のその路線が自分の持つ路線と全く重複しない場合は、その相手の路線に対する評価は、その路線と自分の持つ各路線とを一对比較し、自分の各路線から見たその相手路線への評価をそれぞれ出す。この一对比較の評価の際には、相手の路線が自分の路線と『接続できる』か、また自分が『その接続した先へ直行できる路線を持っている』かを考慮する。

相手の全路線に対する評価がすべて終わった時点で

その評価の総和を求め、それを自分の持つ総路線数で割り、親密度とする。この自分の持つ総路線数で割ることによって、路線規模の小さな企業ほど新路線への渴望が大きくなり、路線規模の大きな企業ほど重複路線への抵抗は少なくなるということを表現できる。なお、ここでは、親密度の対称性ととも $-1 \leq \rho_{ij} \leq 1$ の制約もはずしている。

5.1 データとシミュレーション結果

表2に、シミュレーションで考察対象とした航空会社10社と、年間乗客数(千人)、路線数を示す。これらはアメリカ、アジア、ヨーロッパの主要なアライアンス形成過程に大きな役割を果たした企業である。

以上のデータをもとに親密度を求めたところ表3のような結果が得られた。ほとんどすべての親密度が非対称となっている。親密度の大きさを見ると、所属地域が同じ航空会社間の親密度は互いに低い傾向にある。特に各アメリカ航空会社間の親密度はすべて負になっている。これはアメリカの各航空会社の持つ路線の多くが国内のものであり、またそのうち主要な都市へはどのアメリカの航空会社も乗り入れていることによる。つまりアメリカの企業間では接続が可能な路線が多いものの、その接続先に直行できる路線もまた各社が多く持っているために、互いの親密度は低くなっている。

5.2 シミュレーション結果と考察

この親密度の計算結果をもとにシミュレーションを行ったところ、表4が得られた。表4において、例えば『1112223324』という10個の数字の並びはその地勢の状況を表す。この地勢内の各数字は企業の所属するアライアンス番号を示し、その並び方は表2で示した企業No.の順である。例えば『1112223324』とい

表2 航空会社とそのパラメータ (文献[5]に基づき計算)

企業No.	企業名	年間乗客数	路線数
1	AA	81139	827
2	BA	34159	545
3	Cathay	10000	142
4	UA	84245	298
5	Luf	33340	839
6	SAS	20783	129
7	Thai	14982	95
8	NW	54650	368
9	KLM	14507	185
10	Delta	103295	885

表3 親密度マトリクス

社名	AA	BA	Cathay	UA	Lufut	SAS	Thai	NW	KLM	Delta
AA	-5.000	0.156	0.093	-0.644	0.434	0.033	0.025	-0.562	0.052	-1.132
BA	0.499	-5.000	0.007	-0.066	0.506	0.035	0.077	0.167	-0.011	0.371
Cathay	0.415	0.000	-5.000	0.028	1.901	0.127	-1.331	-0.282	-0.352	0.338
UA	-2.409	0.624	0.322	-5.000	1.393	0.077	0.158	-1.292	0.463	-2.809
Luf	0.149	-0.043	-0.046	0.004	-5.000	-0.050	-0.042	0.026	-0.434	0.091
SAS	1.140	1.814	0.287	0.636	2.380	-5.000	0.271	0.147	0.481	0.163
Thai	0.621	1.484	-1.189	0.095	4.158	0.253	-5.000	-0.400	0.337	0.421
NW	-2.647	0.217	0.190	-1.663	1.090	0.049	-0.038	-5.000	0.293	-4.302
KLM	0.535	-5.573	-1.081	-0.330	-8.103	-1.243	-0.589	0.292	-5.000	-0.097
Delta	-2.197	-0.252	0.073	-0.940	0.087	0.045	-0.001	-0.870	-0.044	-5.000

表4 シミュレーション結果

地勢No.	均衡地勢	到達地勢数	エネルギー
1	1112111334	5399	-132663.187
2	1122212334	3650	-131229.812
3	1222222314	3449	-133711.531
4	1223222412	1717	-128873.773
5	1234222213	921	-129032.734
6	1233333412	744	-129882.242
7	1232424413	355	-127842.179
8	1232323413	300	-127669.914
9	1223444412	201	-126097.015
10	1223414412	60	-125843.445

う地勢は、企業 No. 1~3 が一つ、No. 4~6 と No. 9 で一つ、No. 7 と 8 で一つ、No. 10 は単独で、それぞれのアライアンスを形成していることを意味する。

結果として得られた 10 の均衡地勢のすべてにおいて形成されるアライアンス数が、現実と全く同じ 4 であった。ここから、現実の航空業界のアライアンスは四つに落ち着く可能性が最も高かったということができよう。またその内訳も現実のアライアンス状況と一致し、アメリカの航空会社 4 社がすべての均衡地勢において四つのアライアンスに 1 社ずつ属し、互いにパートナーとなることがない。これは現在の各アライアンスがアメリカの航空会社を軸として形成されていることを示しているといえる。

また現実の地勢を表すと『1112222334』となるが、それに最も近いのは地勢 No. 2 である。ここではキャ

セイ航空と SAS が入れ替わる形となっている。ただ現実のアライアンス状況が、アメリカ企業を軸とするような構造になっていることからすれば、他地域の企業がアメリカの航空会社のいずれと組んでもおかしくないと考えられるので、この地勢 No. 2 のようなアライアンス状況も現実として全くありえなかったことではないだろう。

6. おわりに

本稿では、ランドスケープ理論の基本的な考え方を、適用事例を交えながら解説した。また、モデルが単純で柔軟性に富んでいることから、その拡張の方向については様々な方向が考えられるが、その一つを適用事例とともに紹介した。違った角度からの新たな拡張アルゴリズムの提案が期待される。

参考文献

- [1] Axelrod, R.: *Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press, 1997 (寺野監訳, 対立と協調の科学, ダイアモンド社, 2003).
- [2] Kijima, K.: Generalized Landscape Theory: Agent-based Approach to Alliance Formations in Civil Aviation Industry, *Journal of Systems Science and Complexity*, 14, 2, pp. 113-123, 2001.
- [3] OAG Air Travel Atlas: Worldwide, OAG Worldwide, 1999.
- [4] 木嶋恭一: ドラマ理論への招待, オーム社, 2001.
- [5] 杉浦一機: 世界のビッグエアライン, 中央書院, 1999.