【土木計画学研究・講演集　No.23(2)　2000年11月】

社会基盤整備を巡るコンフリクトにおける動的な合意形成過程のゲーム論的分析*

Game Theoretic Analysis of Dynamic Process for Agreement in Conflicts on Infrastructure Projects*

榊原　弘之**，河上　伸一***，古川　浩平****

By Hiroyuki Sakakibara**, Shinichi Kawakami***, and Kohei Furukawa****

1.　はじめに

社会基盤整備を巡るコンフリクトが合意形成に向かう過程においては，当事者（主体）が互いに提案とそれに対する応答を繰り返すと考えられる．これは，相手主体の選好構造を学習し，妥協点を見出すための過程と考えることができる．近年のゲーム理論に基づいた学習プロセスに関する研究においても，fictitious play 等の反復的なプロセスによる収束過程が注目されている [1]．本論文では，コンフリクトにおけるこのような逐次意思決定過程をモデル化するとともに，各主体の行動パターンが最終的に到達する結果に及ぼす影響について考察を行う．

2.コンフリクトの逐次意思決定過程のモデル化

（1）コンフリクトのグラフモデル

コンフリクトのグラフモデル(Graph Model for Conflict Resolution, GMCR)を定式化する [2]．$N=\{1,2,\ldots,n\}$ を主体の集合とし，$K=\{k_1,k_2,\ldots,k_u\}$ をコンフリクトにおける事象の集合とする．また N 個一組の $\{D_i\}(i=1,2,\ldots,n)$ を有向グラフ $D_i=(K,V_i)$ の集合として定義する．有向グラフ D_i のノードは事象の集合 K の要素である．リンクの集合 V_i は主体 i が事象間で可能な移行を示す． k_ak_b を事象 k_a から k_b へのリンクとする． $k_ak_b\in V_i$ であれば，主体 i は事象 k_l から k_b へ自らの意思決定の下に移行することができる．利得関数 $P_i\,|\,K\rightarrow R, i\in N$ により，主体の事象に対する選好順序が特定される．すなわち $P_i(k_a)>P_i(k_b)$ であれば，主体 i は事象 k_b よりも事象 k_a をより高く選好する．また以下の概念についても定義する．

a) 可達リスト $S_i(k_a)$：

$k_ak_b\in V_i$ であるとき，すなわち主体 i が事象 k_a から事象 k_b に一方的に移行可能なとき，k_b は事象 k_a の可達リスト $S_i(k_a)$ に属するという．

b)一方的改善 $S_i^+(k_a)$：

$k_b\in S_i(k_a)$ で，主体 i が k_a より k_b を選好するとき，k_b は事象 k_a の一方的改善 $S_i^+(k_a)$ に属する．

$k_l\in S_i(k)$ かつ $P_i(k_l)>P_i(k)$ であれば，k_l は k の一方的改善に含まれる．

GMCR において用いられる代表的な局所的安定性の概念であるナッシュ安定性と連続的安定性は，それぞれ以下のように定義される．

1．ナッシュ安定性

$S_i^+(k)=\emptyset$ のとき，事象 k は主体 i に関してナッシュ安定である．これは，主体 i が事象 k から一方的に移行可能ないずれの事象における利得も，事象 k における利得よりも小さい場合，主体 i は事象 k から移行する動機を持たないことを意味する．

2．連続的安定性

$S_i^+(k)$ に含まれるすべての k^l について，$P_i(k)\geq P_i(k^m)$ であるような $k^m\in S_j^+(k^l)$ が存在するとき，事象 k は主体 i に関して連続的安定である．これは，主体 i が事象 k から他の事象へ移行することによって利得を増加させることができたとしても，他方の主体 j が，結果として主体 i の利得が元の事象よりも小さくなるような一方的改善（これを「制裁」と呼ぶ）を有する場合，主体 i は事象 k に留まると考えられることによる．

上に示した 2 種類の安定性の定義においては，主体は「現在の事象から移行した場合，最終的にどの事象に到達するか」を検討しているわけではない．ナッシュ安定性においては，主体は現在の事象から

* キーワーズ：計画基礎論，計画手法論，市民参加，ゲーム理論

** 正員，修（工），山口大学工学部社会建設工学科
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9328,
Fax 0836-85-9301)
*** 学生員，山口大学大学院理工学研究科
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9328)
***** 正員，工博，山口大学工学部
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9328)

ただ一回移行した場合に，利得が現在よりも改善されなければ，現在の事象にとどまる．連続安定性では相手主体による移行の可能性を考慮しているが，これも 2 段階先の事象を予測しているのみであり，その後のさらなる展開の可能性について考慮しているわけではない．そこで本研究では，これらの安定性の概念を，局所的安定性と呼ぶこととする．

（2）逐次意思決定過程

事業者と住民団体の間での交渉や，空港の位置決定のための協議に見られるように，社会基盤整備を巡るコンフリクトが合意形成に到る過程においては，当事者の主体が自らに可能な範囲で提案を繰り返すと考えられる．これは，相手主体の行動を把握し，合意可能な事象を見出すための学習プロセスと解釈することができよう．

本論文では，このようなプロセスを逐次意思決定過程と呼び，モデル化する．次の条件を満足する事象の集合 $\delta=(k^0,k^1,..k^l)$ をパスと呼ぶ．

$$k^{j+1}\in S_i(k^j) \quad \exists i\in N,\ j=0,1,\dots,l-1 \qquad (1)$$

i は j 期において事象間を移行する主体を意味する．また k^0 は開始点となる事象である．以下では，パスにおける個々の移行をステップと呼ぶ．

逐次意思決定過程においては，自らの選好と，提案に対する相手の応答を基に自らの行動を決定する必要がある．非協力ゲームの学習モデルの一つである fictitious play[1]においては，主体は繰り返しゲームの各期に，それぞれ行動を選択する．その結果得られる履歴に基づいて，各主体は自分以外の主体の行動に関する経験的な確率分布を形成し，それに対する最適応答となる行動を選択する．

一方 Kleimenov and Kryazhimskii[3]は，各主体がこれまでの履歴における平均的な利得を上回る事象を受容するような行動パターンや利他的行動パターン，攻撃的行動パターンなどを想定し，それぞれの行動パターンの組み合わせによる

本論文では，相手主体の提案に対する応答を決定する主体の行動パターンを戦略として定義する．これにより，パスは主体が選択する戦略に依存して決定される．主体は，K に含まれる任意の事象における移行の組としての戦略を有している．主体 i の戦略 τ_i において，パス δ を経て事象 k^l に到達した状態で，主体 i が事象 k^l から事象 k^{l+1} へ移行する場合，$\tau_i(\delta)=k^{l+1}$ とする．

逐次意思決定過程において，最終的に到達する事象を合意点と呼び，合意点となり得る事象を収束点として，以下のように定義する．

定義　収束点

逐次意思決定過程において，主体 1,2,...,n がそれぞれ戦略 $\tau_1,\tau_2,\dots,\tau_n$ を選択した場合，次式を満足するパス $\delta=(k^0,k^1,..k^l)$ が存在する事象 k^l を収束点と呼ぶ．

$$\tau_i(\delta)=k^l \qquad \forall i\in N \qquad (2)$$

実際に合意点となる事象は，開始点 k^0 と，各ステップでいずれの主体が移行するかに依存して決定される．

（3）戦略の定義

(a)　マイオピック（近視眼的）戦略

マイオピック戦略 m_i は次式により定義される．

$$m_i(\delta)=\mathop{\arg\max}_{k'\in S_i^+(k^l)} P_i(k') \qquad (S_i^+(k^l)\neq\{\varnothing\})$$

$$m_i(\delta)=k^l \qquad (S_i^+(k^l)=\{\varnothing\}) \quad (3)$$

マイオピック戦略を選択した場合，主体は現在の事象 k^l から到達可能な事象のうちで，最も利得が高い事象へ移行してゆく．すなわち，現在の事象に対する最適応答として移行先の事象が決定される．また，移行先は k^l のみによって決定され，パスには依存しない．マイオピック戦略は，相手主体との妥協の可能性を探求せず，可能な限り常により選好の高い事象へ移行しようとするような行動パターンである．

(b)　フレキシブル（柔軟対応）戦略

次に，逐次意思決定過程の過去の経過が意思決定に与える影響を考慮するために，同じ事象においてもパスによって結果が変わり得る戦略として，フレキシブル戦略 f_i を定義する．まず，現在の事象 k^l から移行するか否かを決定する閾値 $t_i(\delta)$ を次のように設定する．

$$t_i(\delta)=\begin{cases} 0 & (l=0) \\ P_i(k^l)-\dfrac{\sum_{j=0}^{l-1}P_i(k^j)}{l}-P_i^0 & (l>0) \end{cases} \qquad (4)$$

P_i^0 を定数とする．パスにおいて k^{l-1} までに経験した事象の利得の平均値と P_i^0 の和が，k^l における利得を下回るとき，$t_i(\delta)$ は正となる．これは，k^l の利得が，パスに依存して決定される一定の水準を充足してい

ることを意味する．このときフレキシブル戦略を選択した主体は，$S_i^+(k^l) \neq \{\emptyset\}$ であっても，k^l から移行しない($f_i(\delta)=k^l$)ものとする．すなわち，フレキシブル戦略においては，移行に対する慣性が存在する．

一方 $t(\delta) \leq 0$ の場合，次式により移行先事象が決定されるとする．

$$f_i(\delta) = \underset{k' \in S_i(k^l)}{\arg\max}\, P_i(k') \tag{5}$$

式(5)は，主体 i が k^l から移行可能な事象のうち，利得が最大の事象に移行することを意味する．すなわち，フレキシブル戦略の下では，$S_i^+(k^l)=\{\emptyset\}$ の場合に k^l よりも選好の低い事象へ移行することもあり得る．フレキシブル戦略は，現在の事象の利得がパスにおける平均利得を上回っている場合は現在の事象を受容し，下回っている場合は新たな提案を行ってより選好の高い事象への移行を探索するような行動パターンである．

3. 局所的安定性と合意点の関係

すべての主体がマイオピック戦略を選択した場合，収束点は必ずナッシュ安定となる．従って合意点もまたナッシュ安定である．一方フレキシブル戦略を選択した場合の例として，**図1**のグラフ構造を有する2主体のコンフリクトを想定する．図中の円は事象を示し，左図は主体1が可能な移行（矢印）と利得（円内の数），右図は主体2が可能な移行と利得を示している．**図1**中で実線によって囲まれた事象は当該主体に関してナッシュ安定の事象，破線によって囲まれた事象は連続的安定の事象を示している．

左上の事象（主体1の利得7，主体2の利得9）を開始点 k^0 とし，主体1から交互に事象間を移行する逐次意思決定過程を想定する．両主体が移行を続けている間は，l が偶数のステップは主体1による移行，奇数のステップは主体2による移行となる．両主体がマイオピック戦略を選択した場合の合意点は k_m（主体1の利得3，主体2の利得3）である．

一方，主体1がフレキシブル戦略($P_i^0=0$)，主体2がマイオピック戦略を選択した場合のパスを**図2**に示す．実線は主体1，破線は主体2による移行を示し，数字は各ステップにおいて移行する主体の利得を示している．また**図3**は各ステップにおける $P_1(k^l)$ と

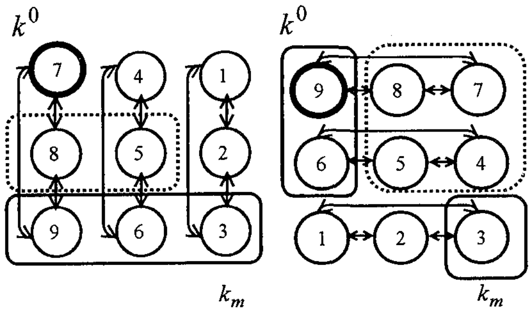

図1　2主体のコンフリクトの例

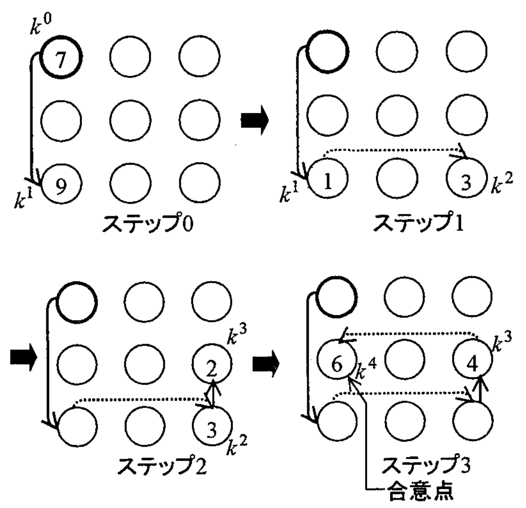

図2　主体1がフレキシブル戦略を選択した場合のパス

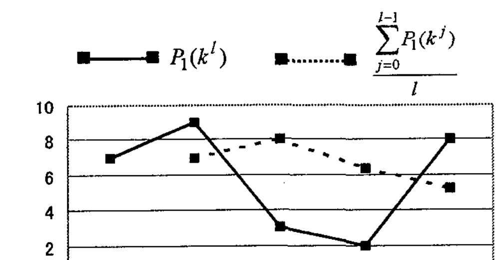

図3　各ステップにおける $P_1(k^l)$ と $\sum_{j=0}^{l-1} P_1(k^j)/l$

$\sum_{j=0}^{l-1} P_1(k^j)/l$ の値を示している．この場合，ステップ4において，$t_1(\delta)$ が正となり，合意点に到達する．この合意点は，主体1に関して連続的安定な事象である．さらに合意点における利得（主体1の利得8，主体2の利得6）は，両主体がマイオピック戦略を選択した場合の合意点 k_m（両主体に関してナッシュ安定）の利得を上回っている．以上から，主体がフレキシブル戦略を選択することにより，連続的安定で，かつ利得がナッシュ安定な事象を上回る合意点が実現し得ることがわかる．

4．不完備情報下での逐次意思決定過程

式(3)～式(5)から明らかなように，マイオピック戦略及びフレキシブル戦略の実行には，相手主体の選好に関する情報を必要としない．従って主体の選好に関する情報が不完備な状況下でも，逐次意思決定過程によって合意点に到達することは可能である．

例として，**図1**と同様のグラフ構造を有する2主体のコンフリクトを想定する．主体1の利得として**図4**に示す2種類のケースを想定する．また，主体2の選好順序を，すべての順序が等確率で生起するようにランダムに発生させた．**図5**及び**図6**は，**図1**中の左上の事象を k^0 として，主体1から交互に事象間を移行する逐次意思決定過程の，合意点における利得の分布を，累積確率により示したものである．実線はフレキシブル戦略 $(P_i^0=0)$，破線はマイオピック戦略を示す．例えば利得5のときの値は，収束点における利得が5以上となる確率を示している．

ケース1では，フレキシブル戦略の方が，マイオピック戦略よりも高い利得の収束点を実現する可能性が高い．これは先述したように，フレキシブル戦略によって連続的安定な事象が収束点と成り得ることによる．一方ケース2においては，両戦略における累積確率分布が一致する．このように，一方の主体の選好構造によって戦略の優位性は変化し得る．

5．．おわりに

今後の課題として，主体による戦略の選択のモデル化の必要性が挙げられる．

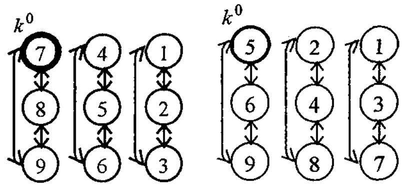

図4　ケース1（左）及びケース2（右）における主体1の利得

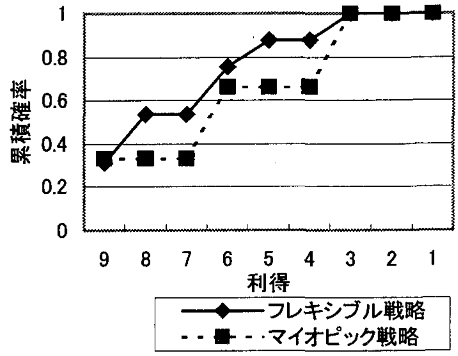

図5　合意点の利得の累積確率分布（ケース1）

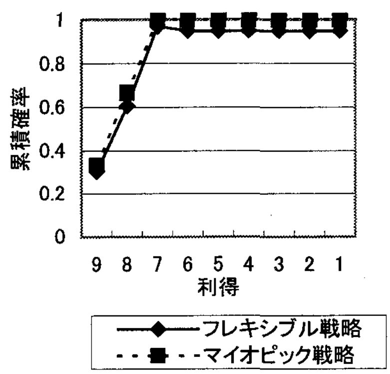

図6　合意点の利得の累積確率分布（ケース2）

参考文献

1) Fudenberg, D. and D. Levine: The Theory of Learning in Games, MIT Press, 1998.
2) Fang, L., K. W. Hipel, and D. M. Kilgour: Interactive Decision Making — the Graph Model for Conflict Resolution, Wiley-Interscience, 1993.
3) Kleimenov, A. and A. Kryazhimskii: Normal Behavior, Altruism and Aggression in Cooperative Game Dynamics, IIASA Interim Report, IR-98-076, International Institute for Applied Systems Analysis, 1998.