

建設CALSの普及過程に関するゲーム論的研究

名古屋工業大学○秀島栄三

名古屋工業大学 小池則満

名古屋工業大学 山本幸司

By Eizo HIDEISHIMA, Norimitsu KOIKE and Koshi YAMAMOTO

建設産業では、工事の発注者と受注者の間で図面、価額等の情報を再利用、共有するための規格の標準化とその運用を目的としてCALSの推進が図られている。建設企業にとってこれは有益といえるものの導入コストの負担を踏まえると必ずしもスムーズに普及していくとは限らない。そこには「囚人のジレンマ」的な状況が見出され、CALSが多数の企業に普及するプロセスはある種の進化論的ゲームとして捉えることができる。本研究ではこのようなCALSの普及過程をゲームモデルとして定式化するとともにいくつかの考察を行う。特に一般的に普及や伝播のプロセスを記述することに用いられるロジスティック方程式と進化論的ゲームの繰り返し過程との対応関係を明らかにし、また、CALSを普及させようとする公共主体の立場から政策決定に際して今後の普及状況を予測するために本ゲームモデルが有効であることを示す。

【キーワード】CALS, 企業行動, ゲーム理論

1. はじめに

建設産業へのCALS(Computer-aided Acquisition and Logistic Support)の導入についてはすでに土木学会の建設マネジメント委員会、土木情報システム委員会等において基礎概念から詳細な技術的検討にいたるまで数多くの研究が蓄積されている¹⁾。

その導入の目的は、

- ・公正・公平な建設事業の実現
- ・透明性のある建設事業の実現
- ・効率的な建設事業の実現

であるといわれている。

建設CALSの導入効果は、発注者と受注企業の間で、入札、施工計画、現場管理、竣工検査にわたり、また建設が行われる地元との間において、過去に蓄積された情報(知識)を標準化された規格で共有・再利用することによって上述の目的を効率的に達成することにある。また情報を再利用するということは長期的

に、すなわち多時点間にわたって効果を発揮しつづけるシステムの構築を必要とする。

個々の建設企業にとってはCALSの導入を費用便益面から有効と判断しなければそれに参加しないだろう。しかし情報の再利用、共有を目的とすることから一部の企業が参加しないままでは全体としての実効性が十分に発揮されないことになる。企業の参加は任意であるとすれば、CALSのために必要な協同体制に関して各企業で参加の有無を選択するゲーム的な状況が生じることになる。本研究ではこのような想定を踏まえ、CALSの普及過程が一つの進化論的ゲームとして捉えられることを示すとともに、進化論的ゲームの結果をもとに、CALSの普及をもくろむ公共側にとって普及状況を情報として得るための方法について考察を行うこととしたい。

2. CALS普及のための条件

CALSが導入されることによって次のことが実現する。

- ・ 情報の共有
- ・ 情報の再利用
- ・ 積算の効率化
- ・ 入札の透明化

である。

これらによって参加する企業には次のようなメリットが生じるであろう。

- ・ 情報を再現する労力の節約
- ・ 情報保存コストの節約
- ・ 迅速化

入札についてはその公正化が促され、結果的に産業全体にとって効率的となることが期待されている。

他方、新しい保存形式や伝送形式等の標準規格を装備したソフトウェアを導入し、また場合によってはそれら进行操作する要員のためにコストがかかる。CALSは一言で言えば使用情報の標準化ということになるが、それを実現するために少しでも多くの企業によって負担を伴う参加がなければならない。

またCALSには次のようなリスクが懸念されている²⁾。

- ・ 機密漏洩・誤伝達リスク
- ・ 不確実情報を平易に取り扱うことリスク
- ・ 役割分担が明確でないことリスク
- ・ 過度な競争が助長されることリスク

これらは企業がCALSに参加するか否かを判断する際に期待損失として計上されることとなろう。これらのリスクの程度が明らかになるまで参加を待つという企業戦略が考えられる。

建設産業にいかなる特殊性があるにしても一つの市場であることには変わらない。CALSによる標準化規格を導入することは市場の共通基盤を整備することにほかならない。それはちょうど農産物の売買のために青果市場を整備することに相当する。しかしその整備のためにかかる費用（金銭に限らない）とその便益を踏まえれば、関係する各主体にそれらの費用と便益がどのように配分されるか、言い換えれば市場を誰が整備するかが問題となる。

アメリカ合衆国国防省に始まった軍事的CALS³⁾はこの点で明白である。発注側の立場が明らかに強い。公共目的の追求という点では日本でいえば建設事業にそのまま該当するだろう。それゆえ建設省がイニ

シアティブをとる必然性は生じるが、建設産業は必ずしも公共事業のみを取り扱うわけではない。したがって各企業が自発的にCALSに参加する誘因は公共事業に供するというだけでは弱いことになる。

また技術的理由から導入コストが高くつく企業が、この市場の「共通基盤」から排除される危険性もないわけではない。未参加企業に対して排除の可能性をもつcartelになりうる。この危険性を解決しなければ閉鎖性について批判を浴びることになるだろう。

CALSは単なる電算化とは意味が異なる。電算化された企業がそれに参入することを自由にするための（参入コストを軽減する）努力が必要となる。CALS化の目的は高度な情報交換を可能とすることだが、他方で、低い技術水準でも参入が可能でなければならない。

CALS参加者による協同体制の中に何らかの強力な権限があって、かかるコスト分担額を強制的に配分できるならば議論は異なってくるであろう。CALSによって本来的に機会の公正性は満たされる。コストの負担などにおいて配分の公正性を達成するためには配分方法の妥当性を検討しなければならない。公共事業の費用配分法については協力ゲームによる配分法の研究⁴⁾が多く行われてきており、これを参考にすることは可能であろう。

このように企業は、市場とは異なる次元において、市場の共通基盤を整備するというプロジェクトに対して参加・不参加という行動の選択を行うことができる主体とみなすことができる。企業は合理的な主体として捉えられる。企業の目的はおよそ経済効率性の追求によって表現できる。つねに費用の削減と便益の上昇は望ましい。

ただし、ある事業を実施することに対してどれだけのコストがあり、どれだけのメリットがあるかは実際には明らかにされない。この点は、個人行動の観察に較べると実証分析に取り組むことを困難にさせるだろう。例えば仮想実験⁵⁾が実際の現象を少しでも適切に把握するための一つの方策と考えられる。以下では数量的なモデルが構築されるものの定性的な議論しか意味を持たないことは認めざるを得ない。

3. ゲームの定式化

(1) 利得構造のモデル化

企業をプレイヤーとするゲームをとりあげる。企業

には、CALSに（今）参加する、（未だ）参加しない、という2種類の戦略がある。2企業間では4通りの戦略の組合せが存在する。その結果として各企業が得ることのできる利得は例えば次のような関係になるだろう。表1のような各プレイヤーの戦略に対応する利得の組合せをペイオフ行列という。

表1 2企業間のペイオフ行列

	不(未)参加	参加
不(未)参加	5, 5	8, 4
参加	4, 8	7, 7

両企業がともに参加すれば負担に優るメリットを享受できる。ともに不参加であれば、現状維持でそれなりのメリットしか得られない。一方が不参加で他方が参加する場合、不参加の方は参加する方に負担を委ねてその後にメリットを享受しようとする。この利得構造はいわゆる「囚人のジレンマ」である。この1回のゲームにおいてもたらされるナッシュ均衡（両プレイヤーの相手に対する最適反応の組合せ）は「ともに不参加」であり、パレート改善の余地がある。どちらのプレイヤーもCALSが普及することを待って参加しようとする行動規範を説明している。その結果は、どちらの企業も相手（必ずしも1社ではない）がCALSを普及させることを待とうとする。それぞれの企業がいつかは参加しようと考えているものの導入コストの負担に対してフリーライドしようとする誘因が働いている。建設産業全体としては長期的にみれば、結果としてCALS導入によって見込まれる全体としてのメリットが早期に得られない。

（2）ジレンマの解決策

ジレンマを解消し、社会的に最適な解へと結果を導くためには、一つにはプレイヤー間での所得移転による方法⁶⁾が考えられる。また第3者による強制力が必要という考え方もある。この場合、協力ゲーム理論のように強制力による協同体制の形成（拘束的協定）を

前提として主体間の利得または費用の配分を行い、これに合意（妥協）が得られるか否かという議論が有り得よう。また、このようなゲームに繰り返しがあるとすれば強制力は必ずしも必要ではないという捉え方がある。後述の理由により主体間で必ずしも協力的ではない関係から自発的な協力関係の生成が期待される。

囚人のジレンマでは、プレイヤーがゲームと相手のプレイヤーに関して完全な知識をもつ（すなわち、合理的である）と仮定して一回きりのゲームを行うだけでは協力解は実現しない。プレイヤー間で事前にコミュニケーションをとることが許されていたとしても、合意というものに拘束力がある保証はどこにもない。協力への自発的な動機（インセンティブ）はどのようにして発現するか、あるいはどのようにして発現させればよいかが考察すべき課題となる。

現実をみれば随所において協力関係は生じている。長期的な関係においては、例えば逸脱や裏切りに対して報復行動をとることができる。協力関係から逸脱することによる利益と報復されることによる損失を比較すると協力行動の方が利益をもたらすものと認識される場合がある。このように長期にわたって誘発される協力関係の形成プロセスを説明する方法として進化論的ゲームがある。

（3）進化論的ゲーム

先に示したようにプレイヤーは一回のゲームにおいてCALSに参加する、しないの意思決定を行う。ここで異なるいくつかのプレイヤーが存在するとする。プレイヤーは繰り返されるゲームごとに出会う相手が変わることにより、その相手に対応して戦略を変えていく。

各プレイヤーには戦略について一つの原則（プログラム）を与えることも可能である。例えば「初回は協調戦略、次回からは過去の履歴に逸脱を含む場合に限って逸脱戦略をとる」「初回は協調戦略、次回からは相手の前回の行動を繰り返す」などである。前者は「永久懲罰戦略」、後者は「Tit for Tat（おうむ返し）戦略」と呼ばれるものである。

集団の中でプレイヤーを様々に組み合わせる。毎回

異なるプレイヤーたちが過去の履歴を知ることなく1ステージずつプレイする。繰り返しの結果、それぞれのプログラムを選択する個体がどれだけ生き残るかが明らかとなる。シミュレーションでは初期条件として各集団の人口比を設定し、毎回ランダムに出会う相手を決め、そのときのゲーム解を得て各集団の人口比が変化する過程が観察される。

なお、進化論的ゲームの具体例として「タカ・ハトゲーム」⁷⁾がよく説明に用いられる。各プレイヤーがタカ戦略とハト戦略のうちどちらを選ぶかを定めるゲームというよりも戦略自体をプレイヤーとみなした方がいい。タカ戦略とハト戦略と呼ばれる2種類の集団において、任意のプログラムが対峙したときの利得が確定しているものとする。

表2 タカ・ハトゲームのペイオフ行列

	タカ	ハト
タカ	$\frac{v-c}{2}, \frac{v-c}{2}$	$v, 0$
ハト	$0, v$	$\frac{v}{2}, \frac{v}{2}$

パラメータ v は餌の価値、パラメータ c は戦う場合の費用をあらわす。ハト同士であれば、戦わずに手に入

れた餌を分配しあう。タカ同士では食い合いになる。またタカはハトに対しては戦わずしてハトを餌にしてしまう。 m 個のプログラムが相対するならば、 $m \times m$ の利得の組合せがあることになる。上表で $v \geq c$ のとき、囚人のジレンマである。このときタカ戦略が唯一のナッシュ均衡であり、タカだけが集団的に安定なプログラムとなる。 $v = c$ のときにはハトもタカに対する最適反応である。「ハト同士」はナッシュ均衡であるが、ハトもタカに劣らずうまくやれる。

ここで次の進化的安定戦略を定義する。

プログラム P が進化的安定戦略 (ESS) であるとは、プログラム P が他の全てのプログラム Q に対して

$$u(P, P) \geq u(Q, Q)$$

および

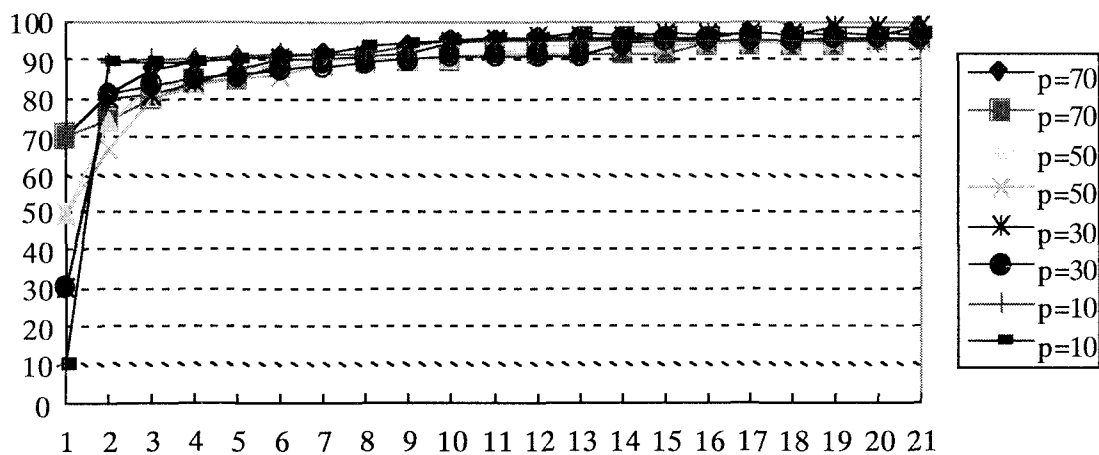
$$\text{もし } u(P, P) = u(Q, P) \text{ ならば}$$

$$u(P, Q) > u(Q, Q)$$

である。

タカ・ハトゲームの進化的安定戦略は

- ・ $v > c$ のとき、ハトが唯一のESS
- ・ $v = c$ のとき、タカもハトもタカに対する最適反応であるが、ハトに対してはタカが最適反応であるからタカが唯一のESSとなる。



縦軸：CALS への参加社数の全社数に占める割合(%)、横軸：接触機会 (図2、図3も同様)

図1 進化論的ゲームの試行結果パターン

- ・ $v < c$ のとき、 $p(H) = v/c$ 、 $p(D) = 1 - v/c$ で与えられるプログラム P が唯一の ESS となる。このような混合戦略における戦略の選択確率は、それぞれの戦略を選択するプレイヤー数、すなわち各プログラムを選択する集団の規模とみなすことができる。

表 1 に示した CALS 導入における企業間のゲームの利得構造も囚人のジレンマに相当する。しかしこのゲームではひとたび CALS に参加すればその後は脱退という戦略をとる誘因はない。図 1 は先述のシミュレーションの試行結果の一部を示すが、本問題では協力関係 (alliance) に属する人口は増えていくのみである。繰り返し過程の中で「全プレイヤーが CALS に参加する」「一部のプレイヤーが依然として CALS に参加しない」のいずれかの結果になる。個々のプレイヤーをみたとき、CALS に加入しない姿勢をいつまでも貫くとは限らない。いつか加入するかもしれない。

CALS の導入によって建設産業の市場競争の激化が推察される²⁾が、どれだけ普及していても市場の構造に影響を与えるものではない。本来、市場は競争していくものであり、「激化」は産業構造の変化を意味するものではない。ゲームの設定自体は繰り返し過程を経ても変わらないだろう。

建設マネジメントの分野においては談合を題材としたゲーム理論を用いた研究⁸⁾がある。入札過程もまた「囚人のジレンマ」を呈するものであるが、入札では繰り返し過程において cartel から脱退することも合理的となる場合がある。CALS の普及過程を説明する場合、後の時点で不参加を選択することがあり得ない点が入札とは異なる点である。

さて、このようにして「参加する」企業の集団と「参加しない」企業の集団に安定化することを示すことができる。この結果はそれぞれの企業の戦略プログラム（それは企業にとっては合理的な根拠を持っているはずだが、集団的にみればその内容を知ることはできない）によって、当初、全企業とも加入していない状況であれ、少数の企業が CALS を始めたという状況であれ、一定の割合に安定的に収束することが示唆される。またパラメータの大きさの比をある値以上にすることが全社加入の条件となる。

(4) 伝播方程式との対応関係

ところで商品の普及や伝染ウイルス等が一定人口に伝播する過程を記述するものに次に示すロジスティック曲線がある。

$$x(t) = A / \{1 + (A/a_0 - 1) \exp(-ax(t))\} \quad (1)$$

これは (2) 式の微分方程式に示されるメカニズムに基づく。即ち普及したものを知っている者の人口 x の増加率は、まだ知らない者（その人口を y とする）と知っている者が接触した回数（のべ人数）に比例するということである。パラメータ a は接触が普及の速度に与える影響度を示す。ここで総人口 (A) は一定不変であるとする ($y + x = A$)。また $x(0) = a_0$ とする。

$$dx(t) / dt = a x(t) y(t) \quad (2)$$

図 2 に示すように進化論的ゲームの繰り返し過程はいかなる初期状態からでも最終的にロジスティック曲線とほぼ同様の推移をたどるが、それぞれの試行例がこれに対して左右に変動する。なお図 2 では協力から逸脱に戦略を変更しうるゲームを取り上げているが、CALS の普及過程を示した曲線もロジスティック曲線（パラメータ設定によっては S 字状にはならず、弧状となる）と同様の関係をもつ。

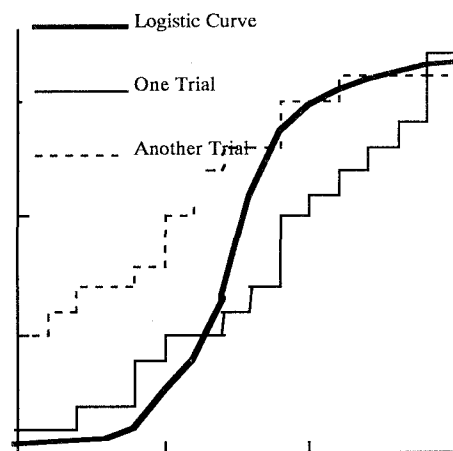


図 2 繰り返し過程とロジスティック曲線

未参加企業が参加企業に接触して変更が生じるということはロジスティック方程式が示すプロセスにほか

ならない。先述のゲーム的過程は、未参加企業が参加企業の数に影響を受けて戦略を変更することから、そのような接触が微分方程式に示すメカニズムとほぼ同様の効果をもたらしていることになる。

CALSの普及過程をもしもロジスティック曲線で表現するとすれば、企業は自らの判断でなく機械的に戦略の選択を変更していることになる。進化論的モデルの方が社会現象のメカニズムを適切に表現しており、ロジスティック曲線はそれを単純化したものと考えられる。

4. 普及状況の把握

(1)参加企業数を考慮にいれた戦略の変更

ロジスティック方程式は普及や伝染といった何らかの伝播プロセスを現象として記述する。例えば伝播率50%（人口 $A/2$ ）を達成する時点はパラメータ a によって決定付けられる。パラメータ a が事前にわかっているならば普及の段階をいつ迎えるかがわかるが、残念ながらそれを知ることは一般にできない。

ここでの課題は、仮定として与えている繰り返しのゲームの回数が意味するものである。現実にはまるでオークションのようにゲームを定期的に開催しているわけではない。現実はこの回数に相当するものを各企業がどのように認識するかである。

企業が知ることのできる情報は参加企業数である。すでに参加している企業はともかく、まだ参加していない企業は、参加企業数を自分の参加の可否の判断の材料として用いることは大いに考えられる。すなわち、戦略のプログラムとして、参加企業数（上述のモデルで p がそれを表す）をもとに戦略を変更するという仮定を加える。また参加企業が一定数を増える時点を境に戦略の変更を行うプログラムも考えられる。以下ではこれのモデル分析を行うこととする。

ここでは前時点での参加企業数がある値を超えると、戦略の選択の変更を行うこととする。

$t = 1$	参加しない
$t = 2, \dots, t^*$ ただし $p_{t-1} \geq p^*$	即参加する
$t = t^*, \dots$	参加する

簡単のため p^* は全ての企業で等しいとする。 p^* の値を変化させてシミュレーション分析を行ってみよう。結果は図3に示すとおりである。当然ではあるが p^* が小さければ各社とも参加に慎重であり、大きければ早いうちに参加するようになる。

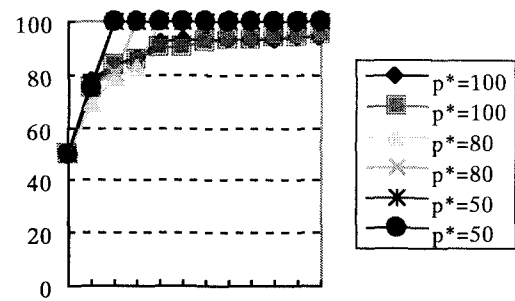


図3 参加企業数を考慮に入れた戦略の変更

(2)政策情報として

CALSにどれだけの企業が参加するかを知ろうとするのは企業だけではない。普及を推進することとなるであろう公共主体も同様である。参入のプロセスがロジスティック曲線で単純に表現できるようなものではない場合、CALSの成否を予測する立場にある公共主体は、その普及の程度をどのように評価すればよいであろうか。

結論からいえば、これについて進化論的ゲームの解は有効である。無限回の繰り返し試行における平均利得の収束値とそれを最大にする混合戦略の結果が適用可能となる⁹⁾。先述のように混合戦略の確率値は進化論的ゲームでいえばそれぞれの戦略を選択する集団の構成比を表す。公共主体としては表1のような一回のゲームにおける利得行列を知り、各企業がとる戦略プログラムを想定することができるならば、混合戦略の確率値（先述の p ）を最終的な参加企業数として、現在の参加状況をこれと比較することができる。

もちろんこれらの仮定に現実性がどれだけあるかは検討の余地があるが今後の課題としたい。ただこの問題において厳密な利得値を知る必要はなく、ペイオフ行列に示される企業間の利得の大小関係と戦略プログ

ラムを想像する力さえあればかなりのことがわかる。少なくともロジスティック方程式に用いられるパラメータ a よりも事前を知ることでできる可能性は高いものと思われる。

5. おわりに

本稿では、今後に想定される CALS の普及過程を、企業をプレイヤーとする進化論的ゲームとして捉えた。それは企業間の相互作用を極めて単純化することによって定式化されるロジスティック方程式よりも普及という社会現象をより本質的に表現しているといえる。さらに公共主体の立場から CALS への参加状況を確認するために無限繰り返し過程において求められる集団規模の期待値を指標として用いればよいことを示した。

さらに以下の点が今後の課題として残されている。

・複数規格の同時普及

唯一の規格による標準化は望ましいが、結果的に異なる規格が台頭するとき、本論文に示したプロセスとは異なる事態が進展するであろう。一方の集団から他の集団への移転等が生じる。ゲーム論的考察は今後に譲ることとしたいが、微分方程式によるアプローチであれば、2種類の規格の普及が（競争的に）進展する過程は以下のロトカ＝ボルテラ方程式で表現できる。

$$\begin{aligned} dX / dt &= r_1 X \{1 - (X + aY) / k_1\} \\ dY / dt &= r_2 Y \{1 - (bX + Y) / k_2\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここでは X, Y はそれぞれ2種類の規格に従う企業数を表す。 r_1, r_2, a, b, k_1, k_2 はパラメータである。本式は $Y=0, dY/dt=0$ とすれば(1)式に一致する。

・戦略プログラムの多様性

実際の企業がとるであろう戦略の組合せ（プログラム）は多様であると考えられる。企業が直面するゲームは単純ではなく、同時に他の意思決定を図らなければ

ならない場合がある。これらの複数のゲームが相互関係をもつ可能性もある。具体的に言えば、各企業は CALS に関する意思決定を、他の意思決定と絡めて行う可能性がある。これを説明することは CALS の普及過程に限らず協同体制の自発的な形成という問題において重要な課題である。

参考文献

- 1) 土木学会建設マネジメント委員会技術小委員会編：建設 CALS 概念分科会研究報告書，1997.、土木学会土木情報システム委員会：情報共有技術小委員会平成9年度活動報告書，1998.
- 2) 池田将明：建設 CALS のニューパラダイムを求めて，建設マネジメント研究論文集 Vol.5, pp.18-24, 1997.
- 3) CALS 推進協議会編：日本版 CALS, オーム社, 1995.
- 4) 岡田憲夫：水資源開発事業の費用割り振り法に関する基礎的考察，土木計画学研究・論文集, No.10, pp.199-206, 土木学会, 1992.
- 5) 津田剛彦・谷下雅義・鈴木義規：室内実験による入札行動の分析，建設マネジメント研究論文集 Vol.5, pp.67-74, 1997.
- 6) Carraro, C and Siniscalco, D.: New Directions in the Economic Theory of the Environment, Cambridge University Press., 1998.
- 7) Maynard Smith, J and Price, G.R.: The logic of Animal Conflict, Nature, London, Vol.246, pp.15-18, 1973.
- 8) 島崎敏一：ゲーム理論による談合の分析，建設マネジメント研究論文集 Vol.4, pp.21-28, 1996.
- 9) 中山幹夫：はじめてのゲーム理論，有斐閣，1997.

The CALS is to be shared in use for Japanese construction industry. This is arranged for the purpose of the standardization of the available data that would be reused and/or shared by the clients and the constructors. It requires a certain amount of the initial cost for each constructor to arrange the software and some equipments, while it will be profitable in some points. It is, therefore, anxious that some constructors would not participate in the alliance of the CALS at once. The situation is regarded as “Prisoners’ Dilemma”. Thus we observe the prevailing process of the CALS from the viewpoint of game theory. We firstly formulate the prevailing process as the recursive process of evolutionary game. Then we compare the logisitic equation and the evolutionary game modeling as the method of describing the prevailing or epidemic process among the population. We moreover obtain the indicator for the policy implication from the game modeling.