

土木計画分野における遺伝的アルゴリズム : 最適化と適応学習

有村 幹治¹・田村 亨²・井田 直人³

¹正会員 株式会社ドーコン 交通部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1-5-4-1)
ma1517@docon.jp

²正会員 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)
tamura@mmm.muroran-it.ac.jp

³正会員 北海道工業大学 工学部 社会基盤工学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7-15-4-1)
idanaoto@hit.ac.jp

土木計画分野においては、遺伝的アルゴリズム (GA) は離散的最適化問題の解法として認識され、既に多くの適用研究が蓄積されている。本研究の目的は、土木計画分野におけるGAの適用研究の今後の方向性を検討することにある。そのために、現状のGAの適用状況と最適化アルゴリズムとしての課題を整理し、計算工学分野における応用分野を踏まえた上で、適応学習アルゴリズムとして戦略ゲーム型GAを提案する。ケーススタディから、適応学習アルゴリズム、また動学的相互作用系に対する思考実験装置としてのGAの今後の可能性について検討する。

Key Words : *genetic algorithms, discrete optimization, adaptive learning, infrastructure planning*

1. はじめに

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms ; 以下, GA と記す) は生物の進化過程を基礎とした計算手続きであり、土木計画分野においては主として、離散的組み合わせ最適化問題等の、NP 困難な計算量クラスの問題に対する最適化手法として応用されている。しかし近年の土木計画を取り巻く環境変化に伴い、土木計画学における GA が果たす役割も変化しつつある。高度成長期における社会基盤整備計画では、各種統計や調査結果に基づいた施設配置や交通ネットワーク計画等が検討されたが、近年は、インフラ供用や新しい制度施行前後における組織や企業行動の変化、また、外部環境や将来の不確実性を考慮した計画が必要とされている。複雑で予測がつかない相互作用系における計画行為は困難であり、現実的には事後観測的なマネジメントが実施される。Holland¹⁾は、進化計算の概念を論じた著書の序章において、“*What kinds of economic plan can upgrade an economy's performance in spite of the fact that relevant economic data and utility measures must be obtained as the economy develops? How does an organism use its experience to modify its behavior in beneficial ways (i.e., how does it learn or “adapt under sensory guidance”)?*”^{補注1}と記しており、限定的な情報処理能力における計画行為と、環境に

応じた適応学習方法についての問題意識を提示している。社会基盤整備計画から社会基盤マネジメントとして土木計画が変化しつつある現在、GA の適用方法に関しても、最適化手法から不完備情報下においても自律的に学習可能な組織やシステムのありかたを探るためのシミュレーションツールとしての視点が導入されていくものと考えられる。

本研究の目的は、土木計画分野におけるGAの今後の方向性について考察することにある。そのために、まず土木計画分野におけるGAの適用状況と課題を整理し、計算工学分野における応用分野を踏まえた上で、GAを用いた適応学習アルゴリズムとして戦略ゲーム型GAを提案する。ケーススタディから戦略ゲーム型GAの特徴について考察し、適応学習アルゴリズムとしての可能性、また動的に変化する相互作用系に対する現象再現による思考実験装置としてのGAの今後の発展可能性について検討する。

本論文の構成は、まず第2章でGAの特徴を述べ、第3章では土木分野における適用状況、GAに対する批判、及び経験則的な適用規範を整理する。第4章では計算工学分野における適用分野について述べ、その上で、適応学習システムの一拡張方法としての戦略ゲーム型GAを紹介し、第5章で結論とする。

2. GAの概要

GA は 1960 年代に Holland¹⁾により提案され、Goldberg²⁾により単純 GA (Simple Genetic Algorithm: 以下, SGA と記す) として整理され、交叉や淘汰処理等の基本的計算手続きが一般化された。工学分野では主に最適化手法として用いられるが、計算工学分野では進化的計算の一つの概念モデルとして考えられることも多く、多様なアルゴリズムが提案されている。

一般に以下のような離散的最適化問題に適用される。

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{目的関数} \\
 f(\{I\}) \rightarrow \min \\
 \text{制約条件} \\
 g_j(\{I\}) \leq 0 \\
 \text{設計変数} \\
 \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\} \\
 \text{or} \\
 \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_1, \dots, I_n\}, I_i \in \{0, 1\}
 \end{array} \right\} (1)$$

SGA の基本的な計算過程を以下に整理する。

- (1) 遺伝子線列の生成：人口サイズ分の遺伝子線列を初期線列として生成する。
- (2) 目的関数の計算：遺伝子線列をデコードし、目的関数により評価する。
- (3) 淘汰処理：線列集団すべての目的関数値の分布より、目的関数値を適応関数値に変換する。適応関数値が低い遺伝子線列は確率的に淘汰される。
- (4) 繁殖処理：淘汰された遺伝子線列の代わりに、生き残った遺伝子線列集合から任意の遺伝子線列を確率的に選択し、人口サイズを満たすようにコピーして補充する。
- (5) 交叉処理：遺伝子線列集団から確率的に一对の線列を選択し部分的に交換する。
- (6) 突然変異処理：遺伝子線列集団から任意の確率で線列を選択し部分的に他の離散要素に変換する。

以上、(1)で生成された遺伝子線列を初期探索点として、(2)～(6)までの操作を収束条件を満たすまで繰り返すことで準最適解を得る。

最適化手法としてのGAの特徴として、(1)最適化が遺伝子間の空間そのものでなく、遺伝子から生成される表現形の評価関数で行われる、(2)探索が複数点で行われることで局所解に収束することが回避される、(3)最適化において勾配情報は用いられず、評価関数のみで探索するため、微分不可能な評価関数も扱える、(4)適応関数値によって、確率的に優位な次期探索点が決定される、以上が挙げられる。

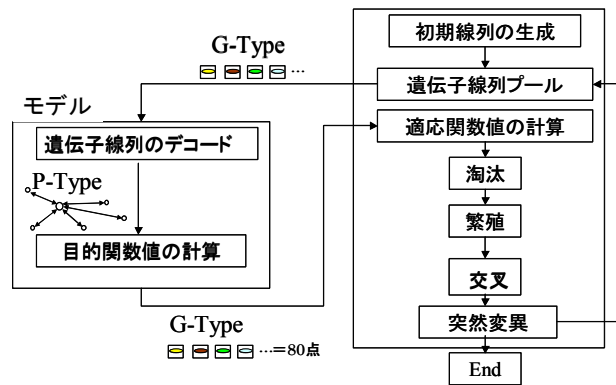


図-1 SGAのフローチャート

3. 土木計画分野におけるGAの適用状況と課題

(1) GAの解法上の特徴と土木計画分野での適用事例

土木計画分野が対象とする諸問題において GA が度々用いられる理由は、経済学における最適化モデル³⁾では、財の可分性や目的関数の連続性と微分可能性、効用・生産技術の凸性といった仮定を考慮することが多いが、土木計画が扱う問題は、施策実施の有無やタイミング、規格の採用決定といった離散変数を扱う必要性が存在することにある。離散的な要因を含む数理計画問題は、従来、整数計画法の範疇にあり、代表的な問題としては、ナップサック問題、ハミルトン閉路問題、巡回セールスマン問題、最大クリーク問題、一般化割当問題等が挙げられる。これらの厳密解法としては、分岐限定法や動的計画法等多くの解法が開発されている。しかし、大規模な離散的組み合わせ問題に関しては、問題を構成する離散要素の関係性を記述することでシステム自体をモデル表現することは容易であっても、解集合が指数的に増大することから、現実的な計算時間で解くことは困難となる。このような NP 困難な計算クラスの問題に対しては、現実的な計算時間で、分析者が満足できる解を得る近時解法が有効なアプローチとなる。GA を土木計画分野の各種の最適化問題に適用することの利点は、NP 困難な計算クラスの問題に対して、多項式時間で準最適解を得ることができる点であり、これにより分析対象を拡大することに尽きる。

国内における土木分野の GA 適用研究は 1992 年頃から活発に報告されている。杉本らはトラス構造物の離散的最適設計に GA を適用しており、外点ペナルティ関数によって制約条件のある最小化問題を無制約の最小化問題へ変換する方法と、目的関数の適応関数への変換方法、及び線列の改良による解探索の効率化が検討された⁴⁾。1993 年には、杉本らによって離散的構造最適設計への GA の適用が試みられており、GA における用語と淘汰

理論の整理が行われた⁵⁾。また、秋山はファジィ理論の土木計画への応用についてまとめる中で、ファジィ推論が全体を非線形関係により説明していることに着目し、メンバシップ関数などのパラメータ決定に対するGAの有用性を論じている⁶⁾。さらに、秋山は、交通安全対策についての組合せ最適化問題において、現実的な大規模多地点問題を対象とした解法としてGAの適用を検討している⁷⁾。また、同年には土木学会構造工学委員会において第1期「AL(人工生命)技術の構造システム最適化への応用に関する小委員会」が構造最適化問題への応用に関する研究活動を行うことを目的として組織されている。委員会の成果としては、GAおよびニューラルネットワークについて構造最適化問題への適用が十分可能であることを明らかにした点にある⁸⁾⁹⁾。1994年には、田村らにより道路整備順位決定問題への適用事例が報告されており、予算制約下での道路整備スケジュール最適化が行われ、厳密解法とランダムサーチとを比較した結果から、GAの手法の有効性の検討が行われた¹⁰⁾。また、高山らにより道路網全体の持つサービスレベルを全点間信頼度から評価する際のグラフ分割方法にGAを適用する近似計算法が提案されている¹¹⁾。さらに、織田らは、信号制御パラメータの最適化に対するGAの適用を検討した¹²⁾。

現在、土木計画分野におけるGAの適用対象は多岐に渡り、主にNP困難な離散的組み合わせ最適化問題、もしくは非線形最適化問題の解法として用いられている。前者はモデルの変数が離散的に表現される問題であり、組み合わせ最適化問題や巡回セールスマン問題、ナップサック問題、またこれらが混成する問題に対象を帰着させ、コーディング方法を工夫することでGAが適用されている。後者は変数が連続かつ目的関数が非線形なモデルに対して、実数を扱えるGAにより最適なパラメータを推定するものである。これらの解法としてのGAの役割は今後とも変わらないものと考えられる。本研究では、適用対象個々の問題固有の課題の詳細は記述しないが、国内における適用状況について、土木学会論文集、及び土木計画学研究・論文集を中心に列挙すると、橋梁マネジメントシステム¹³⁾¹⁴⁾、災害復旧支援¹⁵⁾¹⁹⁾、道路整備スケジュール最適化問題²⁰⁾²¹⁾、避難行動²²⁾、シティロジスティクス²³⁾²⁴⁾、道路ネットワーク計画²⁵⁾、バス割当²⁶⁾、交通スケジュールリング²⁷⁾³¹⁾、軌道保守管理³²⁾、ロードプライシング³³⁾、ニューラルネットワークとのハイブリッド化による評価モデル³⁴⁾、交通流制御³⁵⁾、発生交通量推定の逆推定³⁶⁾、渋滞シミュレーション³⁷⁾等が挙げられる。また、海外における適用状況を、Transportation Research Record, Transportation Researchを中心に列挙すると、列車編成問題³⁸⁾、信号制御³⁹⁾⁵⁰⁾、舗装マネジメン

ト⁵¹⁾⁵⁷⁾、ニューラルネットワークの構造同定⁵⁸⁾、舗装設計⁵⁹⁾、モデルパラメータの逆解析⁶⁰⁾、道路線形最適化問題⁶¹⁾⁶³⁾、輸配送問題⁶⁴⁾⁶⁶⁾、ロードプライシング⁶⁷⁾⁶⁸⁾、動的交通配分⁶⁹⁾、確率的均衡配分⁷⁰⁾、土地利用交通モデルへの適用⁷¹⁾⁷³⁾、OD量推定⁷⁴⁾、多項プロビットモデルのパラメータ推定⁷⁵⁾、交通シミュレーションのパラメータ推定⁷⁶⁾⁷⁷⁾、ミクロ交通流モデルのパラメータ推定⁷⁸⁾⁷⁹⁾、公共交通管理⁸⁰⁾⁸¹⁾、緊急医療サービスの配置割当⁸²⁾、橋梁マネジメント⁸³⁾、交通需要の不確実性を考慮したBOTスキーム評価⁸⁴⁾、ネットワークデザイン問題⁸⁵⁾、動的経路選択の最適化⁸⁶⁾、ナンバープレート読取装置設置箇所の多目的最適化⁸⁷⁾、ドライバー学習を考慮したネットワーク分析⁸⁸⁾、と多くの問題に適用されている。

(2) GA適用に関する諸批判

多くの既存研究が蓄積される一方、最適化手法としてのGAを用いることに対する批判も少なからず存在する。筆者らが知る限りでは、(1)解析的に解ける問題に対して安易に適用されることに対する批判、(2)理論的に解明されていない手法であり、探索解が最適解である保証が無いことに対する批判、(3)探索解空間を決定するコーディング方法や人口サイズ、また交叉率や突然変異確率といった、各パラメータの決定に明確な規則が確立していないことに対する批判、の三点である。

批判(1)、及び(2)に関しては、無論、他の効率的な解法がある問題に対してGAを安易に適用するべきではない。GAの理論研究としては、1989年にGoldbergがGAの基本原則としてスキーマ定理²⁾を示すことから始まり、人口サイズと処理されるスキーマ量、問題に応じた最適なパラメータ設定についての研究が行われている。しかし、工学的な目的と汎用性の高さから、理論研究の進展を待たずして、個々の問題に応じたヒューリスティックな解探索上の工夫や、他手法とハイブリッド化されたアルゴリズムが乱立していることが、GAに対する批判の一要因となっている。批判(3)に関しても、上記で述べた理論研究が途上であることと関連して、いまだ決定的な方法はない。GAパラメータの設定方法は、一つの研究対象になっており、例えばEiben et al.⁸⁹⁾は交叉確率と突然変異確率の最適な設定は対象問題によって異なることを指摘し、GAを含む進化計算アルゴリズムのパラメータ設定方法として、アルゴリズム実行前にパラメータを設定するアプローチと、アルゴリズム実行中に制御するアプローチに分類した。後者に関しては、決定論的制御、適応的制御、自律的適応制御の三種に分類している。廣安らは、初期世代を生成する際に、各設計変数を各遺伝子線列に効率的に割り付けることにより、少ない人口サイズでも効率的に解探索が進むことを報告してい

る⁹⁰⁾。また、澤井らによりパラメータ設定を必要としないGAも提案されている⁹¹⁾。また、理論的研究では遺伝子の一部分が評価関数に与える影響を定量的に評価するスキーマ解析手法に関する研究が進んでおり⁹²⁾、今後の研究蓄積の進展が望まれる。

しかし、いずれにしろGAが確率的な近似最適解法であることを分析者が認識し、NP困難な計算クラスの問題に対して適用すること、また現実問題として、他手法では良好な解を得られない問題に対して、分析者がGAの限界を認識して適用するのであれば上記の批判は回避できる。むしろ重要な点は、工学的見地から考えるに、計算可能性が増すことにより、分析者がモデリング対象とする事象を、より拡大できる点を評価するべきである。

(3) 適用上の経験則

a) GAパラメータの設定と計算時間

理論的背景が研究途上としても、多くの応用研究の蓄積から、各種パラメータ設定に関する経験則的規範は存在する。ここでは、現実的な時間内に良好な解を得るための目安として、筆者らがSGAに対して採用している設定方法を整理する。

人口サイズは遺伝子線列長に依存する。少なくとも遺伝子線列長のバイナリ数以上の人口サイズを確保する必要がある。人口サイズと交叉率、突然変異率により各世代の目的関数の計算量が決定する。筆者らは目的関数に要する時間から推定して、0.6-0.9程度の交叉率を採用している。突然変異率については、最大で各世代の集団の一つの遺伝子線列が突然変異するように設定している。これらのパラメータを組み合わせ、計算コストの制約が許容する範囲で複数回最適化を実行する。また、探索された解については、必ずモンテカルロ・シミュレーションと比較することで、解の有効性の確認を行っている。全体の計算時間は、GAの処理に要する計算時間と、目的関数の計算に要する時間により決定する。計算時間が問題となるのは目的関数の計算に要する時間が大きい場合である。この場合、初期世代の全ての遺伝子線列と、各世代において交叉処理と突然変異により新しく生成された遺伝子線列については、必ず目的関数値が計算され

$$CT \geq (PS + SG \times CR + PS \times MR) \times CO \times MG \quad (2)$$

CT：計算時間

PS：人口サイズ

SG：淘汰された遺伝子線列数

CR：交叉確率

MR：突然変異確率

CO：目的関数の計算に要する時間

MG：最大世代数

るため、単純なGAの大まかな計算時間は式(2)で見積もることができる。式中の淘汰された遺伝子線列数は、各世代における遺伝子線列集合の適応関数値の分布状況に依存するため、事前に知ることはできないが、最大でも人口サイズ数を上回ることはない。なお、最大世代数は計算打ち切り条件としての外生変数である。

巡回セールスマン問題等、目的関数の計算に要する時間が短い問題においては、人口サイズや最大世代数を大きく設定できるが、大規模ネットワークの均衡配分等、一つの代替案の評価に時間を要する問題の場合は、コーディング方法と交叉方法を工夫することで、少ない評価回数でより良い解を探索することが求められる。また、非線形最適化問題におけるパラメータ推定では、一度評価した探索点から解空間をニューラルネットワーク等で近似しつつ、淘汰処理や交叉する遺伝子列を選択する等の適応制御的な工夫が考えられる。離散的組み合わせ問題において多峰性を有する解空間での初期探索点の効率的な設定や交叉方法、淘汰処理方法の工夫による解探索効率化はGAの理論研究の大きな課題である。

b) コーディングと交叉¹⁷⁾

一般的にコーディングは、用いる記号は少ない方が良く、また、無意味な個体が生成されない符号化が良い⁹³⁾とされている。コーディング・交叉の評価規範は表-1にまとめられる⁹⁴⁾。

コーディングにおいて難しいのは、制約条件の取り扱いである。GAに制約条件を取り込む方法は2つあり、それは、(1)制約条件をペナルティとして適応度関数に取り込み、制約を破る組み合わせを淘汰する方法、(2)制約条件が破壊されないようなコード化・交叉を行い、制約条件を満足する組み合わせで解空間を構成する方法である⁹⁵⁾。(1)の方法は、制約を満足しない組み合わせも生成しうるコーディングを行うものである。遺伝子線列はデコーディングされ、評価されるが、もし制約を破る組み合わせが生成された場合、目的関数に罰金項を設定し、適用関数に変換する際にペナルティ値を与えて淘

表-1 コーディング・交叉の評価規範

コーディングの評価規範	
完備性	問題空間上の全ての解候補はGA空間上の遺伝子線列として表現されること
健全性	GA空間上の遺伝子線列は問題空間上の解候補に対応づけられること
非冗長性	問題空間上の解候補とGA空間上の遺伝子線列は1:1に対応づけられること
交叉の評価規範	
形質保存性	親の形質は子に適切に継承されること

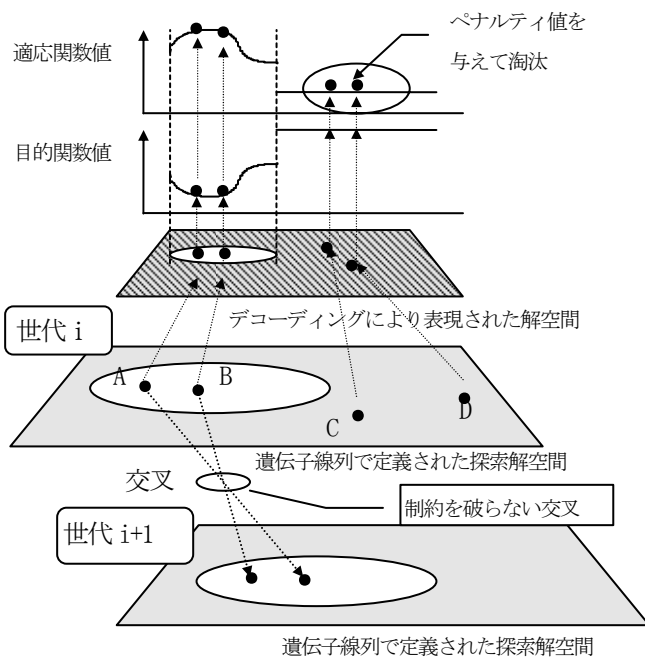


図-2 解の探索空間の世代交代による推移

汰する方法となる (図-2, 点 C, D) . (2)の方法は, 遺伝子線列自体の構造が問題の制約を満足するコーディングを行い, また交叉プロセス自体も制約を保存する工夫を行うことで, 解探索の過程で制約を破る組み合わせを生成させない方法である (図-2, 点 A, B) . (1)の方法は制約が多くなると実行不可能な解 (致死遺伝子) が多数生成されてしまう難点があり, GA のコーディングを困難にする場合がある. 一方, (2)の方法は遺伝子線列によって定義される解探索空間があらかじめ制約を充足しているため, 効率的に解を探索することができるが, コーディングに応じた交叉・突然変異を工夫して, 制約を破らない解空間を確保する必要がある. 複雑なコーディングの場合, 制約を全て満足する遺伝子線列構造を求めることは困難となる. そこで, できるだけ(2)の観点から遺伝子線列の設計を行い, コーディングの構造的に扱えない制約について(1)の方法を用いることが望ましいといえる.

4. 適応学習アルゴリズムへの拡張

(1) 計算工学分野の GA 研究の分類と土木計画への期待

さて, 前章までは最適化手法としての GA の研究動向について述べた. しかし, そもそも GA は, 生物世界にみられる, 目標認識, 外部環境との相互作用, 記憶の保存 (学習) といった性質を, 複合的に組み合わせたときに生じる自己組織化現象に着目したアルゴリズムである. 工学分野では主に最適化手法として適用される事例は多

いものの, 計算工学分野における GA の応用分野は広範囲に及ぶ. 大まかには, (1) 組み合わせ最適化問題及び非線形最適化問題の近似解法, (2) 生物進化のモデル及び検証ツール⁹⁶⁾, (3) 適応システムまたは自律分散システムの制御アルゴリズム⁹⁷⁾, (4) ニューラルネットワーク, オートマトン等とのハイブリッドシステム⁹⁸⁾, (5) 免疫システムの基本アルゴリズム⁹⁹⁾, (6) 人工生命の基本アルゴリズム¹⁰⁰⁾, と分類される. 工学の応用分野として密接に関係してくるのは主に(1), (3), (4)である. (4)のハイブリッドモデルは, 例えばニューラルネットワークのネットワーク構造とニューラルの接続パラメータの同時推定等に用いられる. (2)は生物学的な応用分野であり, (5), (6)は学際領域の分野となる. 土木計画分野では, 特に(1)についての研究蓄積が多く, (3)の適応・自律分散システム, 及び(6)の人工生命の観点から研究事例はあまり行われていない. これはこの研究分野が新しいということと, 特に人工生命に関しては, その定義も様々であることが挙げられる. しかし, 個々の主体の行動結果により全体現象が創発するボトムアップシステムとして, 主体間の相互作用を考慮するマルチエージェントシステムや, 離散的空間要素の相互作用を考慮するセルラーオートマトンと同様に, GA は創発システムの基本アルゴリズムとして応用できる.

なお, このような適応・自律分散アルゴリズムに対して GA を拡張する方法としては, 免疫アルゴリズム (Immune Algorithm) や遺伝的プログラミング (Genetic Programming) が考案されており, それぞれ, 秋山らによる交通安全対策組み合わせ問題への適用事例¹⁰¹⁾, また山口らによる土木構造物の被害予測とリスク分析への適用事例¹⁰²⁾がある. 土木計画分野におけるソフトコンピューティングの可能性については, 秋山が具体的な応用方法について言及している¹⁰³⁾.

では, 適応・自律分散システムや人工生命アルゴリズムは土木計画に恩恵をもたらさだろうか. この問いに対しては, 現在我々を取り巻く社会構造が変化中での計画行為を考察する必要がある. 現在, 計画者に求められる課題として, 例えば, グローバルな観光市場に対応した地域経営・地域間交流, 合意形成の場に参加する適切な集団規模やコミュニケーション技法, 行政マネジメントにおける評価サイクルの速度と評価指標の選定, 地域社会のソーシャルキャピタルの維持, ITS 等社会的技術のネットワーク外部効果の発現速度と普及過程の経路依存性, 等が挙げられる.

これらは問題の規模に関わらず, 土木計画分野においても, 個と全体の情報伝達と相互作用の問題が論じられるようになったためである^{104), 105)}. 情報伝達と相互作用の問題は, 個々人や社会は無論, 人間と物質間において

も存在している。社会基盤の機能は、それを生み出した環境に依存して設計される。社会基盤は物質として存在し続けることで、その機能を人間に主張し続ける¹⁰⁶⁾。我々の思考は、過去の思考や記憶が内在した制度や慣習、技術に囲まれ、認知可能な環境に依存して形成されている。

問題は、このように動的に相互作用が働く経済現象に対する分析手法上のパラダイムを土木計画分野が共通認識として持ち得ていないことである。例えば、交通分野における均衡配分モデルを始め、多くの土木計画分野の分析ツールは、完全情報を持つ合理的経済人を仮定した経済モデルが用いられている。新古典派経済モデルにおける合理的経済人の仮定、すなわち知識や情報、記憶、選好、また不確実性に対する確率的な認識の完全性は、モデルの記述上有用であり、確かに分析可能な事象も多い。しかし、現実的には経済主体の認知能力と計算能力には限界があり、また経済主体の選択肢集合や価値体系は過去の経験に依存して形成されるものと考えられる。

では、このような限定合理性と経路依存性の存在を前提とした経済人の集合体は、均衡状態に至ることができるのだろうか。至るのであれば、どのような過程によるのだろうか。外部性が存在する経済においては、どのような環境において協力や秩序が生成されるのだろうか。我々は、限られた能力で外部環境の変化に応じて、自らの均衡へと至ることができるのだろうか。また、そのための個人や組織の思考方法や情報伝達、コミュニケーションのデザインはどうあるべきだろうか。自発的な社

会資本の形成過程とコミュニケーションに着目することは、今後のより良い土木計画に必須な発想に思える。

適応・自律分散システムや人工生命アルゴリズムは、限られた計算能力の要素と、その要素間の相互作用が動的に繰り返されることによる全体现象の発現をシミュレートできる。合意形成や知識伝播プロセス、自発的協調行動の発現等の現象再現モデルとして、新しい思考実験手段を提供するものと考えられる。

(2) 戦略ゲーム型 GA

土木計画分野における相互作用系への GA の適用可能性を検討するために、先の6つの分類のうち「適応システムまたは自律分散システムの制御アルゴリズム」への GA の拡張を行う。ここでは、拡張方法の一例として、筆者らにより構築された、戦略ゲーム型 GA (Genetic Algorithm for Strategy Game: 以下、GASG と記す)を紹介する。GASG は以下のような戦略形 n 人ゲーム G を扱う。

$$G = (N, \{S_i\}_{i \in N}, \{f_i\}_{i \in N}) \tag{3}$$

N : プレイヤー集合 $\{N = (1, \dots, n)\}$

S_i : プレイヤー i の選択可能な戦略集合

f_i : プレイヤー i の利得関数で直積集合

ここで、GASG では、各プレイヤーが GA、各プレイヤーの戦略は遺伝子線列により表現され行われるものとする。一般的には式(4)で示される。

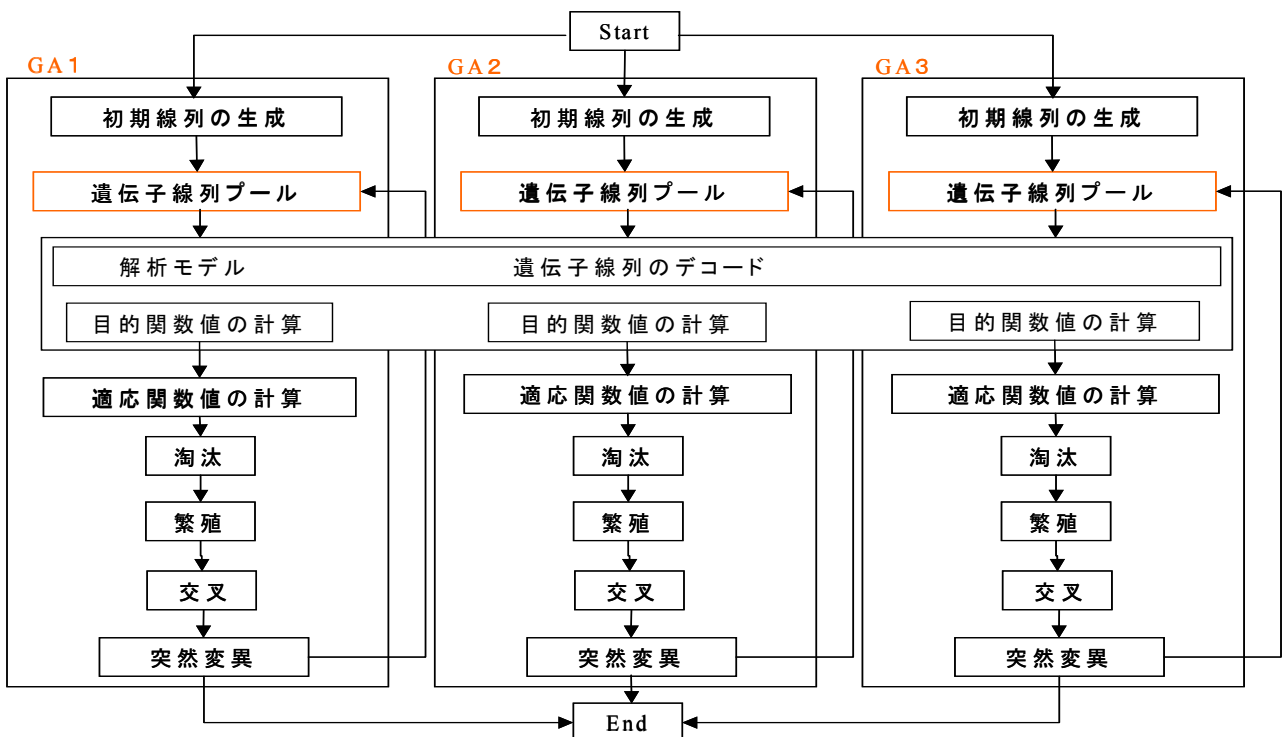


図-3 GASGのフローチャート (3プレイヤーの場合)

$$\left. \begin{aligned} &F_i(\{I_i, I_{-i}\}_{i \in N}) \rightarrow \max \\ &g_i(I_i) \leq 0 \\ &g(I_i, I_{-i}) \leq 0 \\ &I_i \in PSZ_i \\ &I_i = \{I_1, I_2, \dots, I_{m_i}\} \\ &or \\ &I_i = \{I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_{m_i}\}, \forall I_k \in \{0,1\} \\ &ただし I_i \in PSZ_i \subset X_i \end{aligned} \right\} \rightarrow \forall GA_i \quad (4)$$

- GA_i : プレイヤー i
- F_i : プレイヤー i の目的関数値 (利得)
- g_i : プレイヤー i の制約条件式
- g : 全プレイヤーのゲームにおける制約条件式
- N : プレイヤー集合 $\{N: 1, \dots, n\}$
- I_i : プレイヤー i の戦略集合
- I_{-i} : プレイヤー i 以外の戦略集合
- m_i : 戦略要素数
- X_i : コーディング上可能なプレイヤー i の全戦略集合
- PSZ_i : 各世代におけるプレイヤー i の戦略集合

GASG は SGA を並列化することで構築される(図-3)。特徴としては、(1)学習可能なプレイヤー i に GA_i が割り当てられること、(2)遺伝子線列により戦略を離散的に表現できること、(3)戦略の目的関数値は同世代の戦略集合から計算されること、(4)最適化処理は各プレイヤー内部で行われること、の四点が挙げられる。各世代の戦略集合が前の世代の目的関数値の結果から確率的に選択される点については SGA と同様である。各世代の戦略集合は、同世代の他プレイヤーの戦略集合に影響を受け、世代交代は同期的に行われる。

生成された戦略を評価するために、他プレイヤーの戦略全てについて利得計算を行うことは計算時間の増大を招くことから適当ではない。プレイヤー i の遺伝子線列全てについて、他プレイヤーの遺伝子線列集合から任意の回数、無作為に戦略の抽出によるランダム・マッチングにより戦略が取り得る利得関数を評価する(図-4)。各プレイヤーの人口サイズが等しい場合、ランダム・マッチングは、抽出されない戦略(遺伝子線列)が存在しないように設定することが効率的な解探索と、計算時間短縮のために望ましい。

ランダム・マッチングの利得関数として、(1)利得の平均値、(2)利得の最小値、以上の二つを目的関数として用いることが考えられる。

$$F_i(I_i^j) = ave(f_i(I_i^j, I_{-i}^k)_{k \in K}) \quad (5-a)$$

$$or \\ F_i(I_i^j) = \min(f_i(I_i^j, I_{-i}^k)_{k \in K}) \quad (5-b)$$

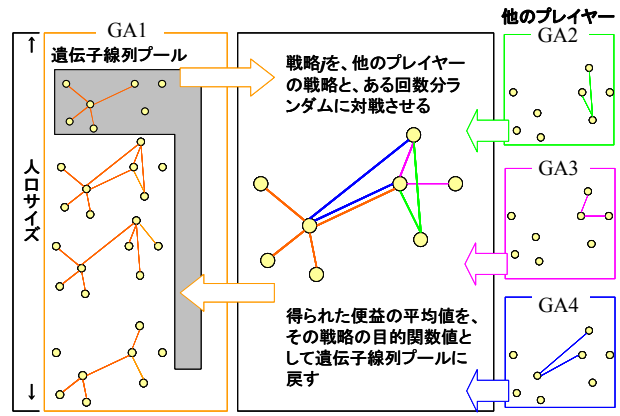


図-4 ランダム・マッチング (4プレイヤーの場合)

- $I_i^j \in PSZ_i$
- K : ランダムマッチの回数
- I_i^j : プレイヤー i の戦略 j
- f_i : プレイヤー i の目的関数値
- $F_i(I_i^j)$: プレイヤー i の戦略 j の利得
- K : ランダムマッチング回数
- I_i^j : プレイヤー i の遺伝子線列集合から抽出された戦略 j
- I_{-i}^k : プレイヤー i の以外のプレイヤーの戦略 k
- $f_i(I_i^j, I_{-i}^k)$: I_i^j が得る利得
- $F_i(I_i^j)$: プレイヤー i の遺伝子線列 j の目的関数値

(3) GASG のケーススタディ

本研究ではケーススタディとして GASG を航空ネットワークの競合問題に適用した。なお、航空ネットワークを考慮した旅客流動に関する研究としては、黒田らが国内航空旅客市場を対象として、キャリアを先手、利用者を後手としたシュタッケルベルグ均衡問題として定式化し、関西国際空港開港以降の国内航空ネットワークを最適化した場合の旅客流動への影響を分析している¹⁰⁾。

GASG のケーススタディとして用いた理由としては、キャリア間の完全情報を仮定した最適ネットワークは現実には達成されず、航空キャリアは、常に限定された情報から他キャリアの企業戦略を推定しつつ自身の行動を決定すること、またネットワーク構造を、キャリアの戦略として離散表現することができることによる。

ケーススタディでは、航空キャリアは純便益を最大化させるネットワーク形状を戦略として探索するものと仮定し、各プレイヤーが提示する航空ネットワークに応じて利用者が経路選択を行うシュタッケルベルグ計画問題として設定した。

利用者は最短時間距離の経路選択を行うものと仮定し、All-or-Nothing により配分した。また、経路上に複数

の就航路線がある場合、各就航路線に等しく配分するものと仮定した。就航されないノードからの旅客は、他の交通モードで移動するものとし、各航空企業の就航路線間に配分された旅客は全て運送するものとした。各キャリアのフリースの座席数と運行コスト、及び空港間の運賃を所与とした同じ値を設定した。

仮想ネットワークを図-5に示す。戦略となる航空ネットワーク形状はノード間の接続の有無をバイナリコーディングすることにより表現した。目的関数は式(5-a)を用いた。

プレイヤーの目的関数を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{Benefit}_n &= \sum_{(i,j) \in L_n} [\delta_{i,j} \times OD_{i,j} \times P_{i,j}] \\ \text{Cost}_n &= \sum_{(i,j) \in L_n} \left[\delta_{i,j} \times \min_{k \in K_n} \left(\frac{OD_{i,j}}{S_{k \in K_n}} \times C_{k \in K} \right) \right] \\ \text{Object}_n &= \text{Benefit}_n - \text{Cost}_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

- n : 企業 n
- K_n : 企業 n の保有機材の集合
- $OD_{i,j}$: i, j 間に配分された旅客数
- $\delta_{i,j}$: i, j 間に就航路線がある場合1,無い場合0
- L_n : 企業 n の就航路線の集合
- $P_{i,j}$: i, j 間の運賃
- $S_{k \in K}$: 機材 k の座席数
- $C_{k \in K}$: 機材 k の就航コスト

プレイヤー数は4、目的関数値はランダム・マッチングの平均値と設定した。プレイヤーの学習能力を等しくするために、各プレイヤーに割り当てられた人口サイズは100及び300と設定した。また、突然変異確率0.01、最大世代300、ランダム・マッチングの回数は10回と設定した。図-6は人口サイズ100、図-7は人口サイズ300の場合の各プレイヤーの各世代の戦略集合の目的関数値の

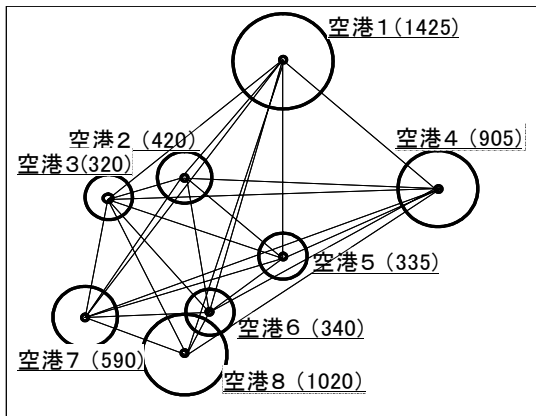


図-5 仮想ネットワーク

最大値（図中の上線）と平均値（図中の下線）の推移を示している。世代が早い段階では、各プレイヤーの戦略集合は広範囲に分布しており、戦略集合の目的関数値の最大値と平均値は乖離しているが、世代が進むにつれて収束していく様子が観察できる。ケーススタディでは、各プレイヤーのパラメータを等しく設定した。そのため、戦略の収束は同程度の速度で進行する。人口サイズ100として実行した図-6では、200世代を越えた段階で、各プレイヤーの戦略集合が収束しており、最終世代では各プレイヤーの戦略の目的関数値が乖離している。一方、人口サイズ300として実行した図-7では、各プレイヤーの戦略集合は280世代付近で収束しており、最終的に収束した各プレイヤーの目的関数値に大きな乖離は見られない。

各プレイヤーの解の収束状況は、(1)各プレイヤーの戦略集合の分布状況、(2)他プレイヤーの戦略集合の分布状況、に依存し、世代単位で同期して推移する。各プレイヤーの収束速度が異なる場合、戦略集合の収束状況が他プレイヤーの解探索に影響を与えてしまう。他プレイヤーの戦略に対して安定的に利得を得る解を探索するためには、各プレイヤーの解の収束速度と、全プレイヤーの解の収束速度を同期させる必要がある。

本研究では、収束した戦略が他のプレイヤーの戦略に対して安定的に利得を獲得することを確認するために、モンテカルロ・シミュレーションを行った。図-8は、各プレイヤーの戦略をランダムに、10000回、50000回、100000回発生させてゲームを行った場合、各戦略が得られる目的関数値の発生頻度を示している。この場合、各プレイヤーの目的関数の分布形は、ほぼ同じ形状を示している。次に、GASGの初期世代と最終世代において最も適応関数値が高かった戦略を固定して、他プレイヤーの戦略をランダムに生成して対戦させた結果が図-9、図-10である。

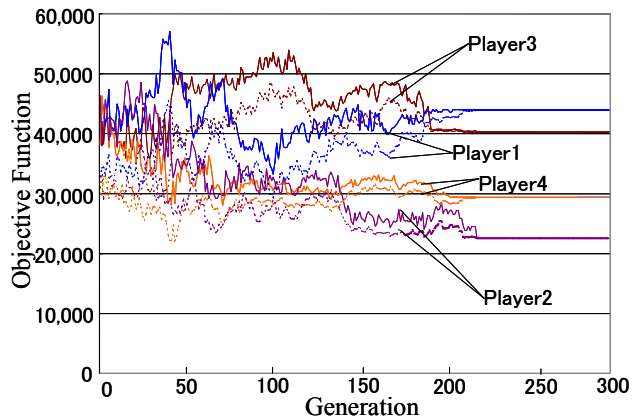


図-6 目的関数値の推移状況 (人口サイズ100)

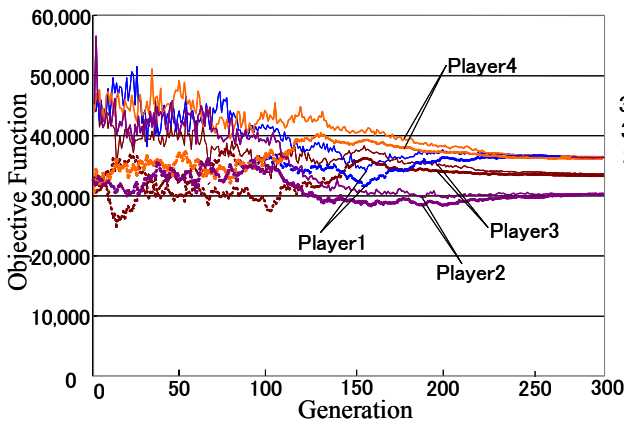


図-7 目的関数値の推移状況 (人口サイズ 300)

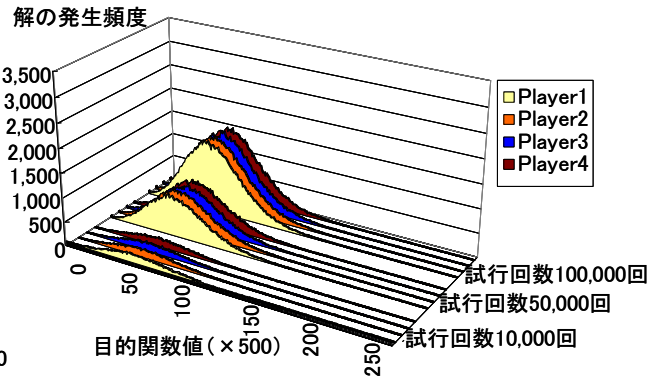


図-8 モンテカルロ法による解の発生頻度 (戦略をランダムに生成)

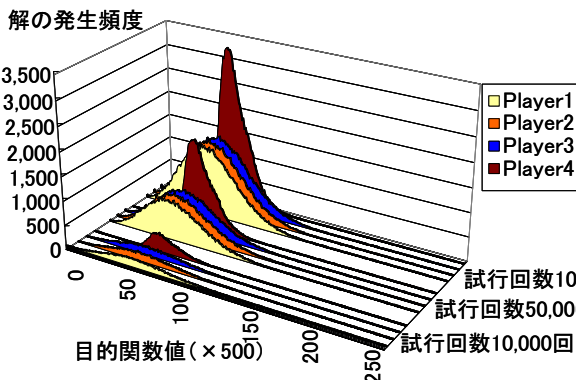


図-9 モンテカルロ法による解の発生頻度 (初期世代のプレイヤー 4 の戦略を固定)

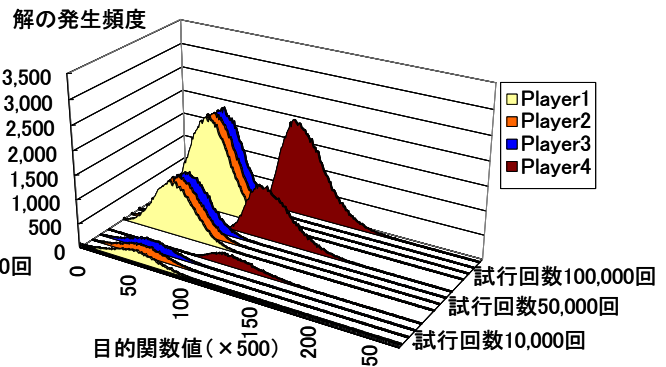


図-10 モンテカルロ法による解の発生頻度 (最終世代のプレイヤー 4 の戦略を固定)

ここではプレイヤー4の戦略を用いてモンテカルロ・シミュレーションを試みた。図-9は、初期世代で最も高い適応関数値を示した戦略にランダムに生成された他プレイヤーの戦略を対戦させた結果である。初期世代で最も適応関数値が高い戦略は他戦略に対して低い利得を示す回数は低いものの、高利得を得る戦略でも無いことが確認できる。一方、最終世代で得られた戦略に対してランダムに生成された戦略を対戦させた図-10では、探索された戦略が安定して高い利得を獲得していることが確認できる。このように、モンテカルロ・シミュレーションの結果から、GASGにより安定的に利得を得ることができる解が探索できたことが確認できる。より精緻な解を得るためには、(1)適切な人口サイズの確保、(2)各パラメータの調整による収束速度の同期、(3)十分なランダムマッチによる戦略評価の必要性、が考えられる。

(4) 適応学習アルゴリズムとしてのGASGに関する考察

GASGは離散的に戦略が表現されるゼロサムゲームの解探索を試みたものである。GASGを最適化アルゴリズムとして解釈すると、戦略を組み合わせ最適化問題として帰着させて、ゲームの近似解を探索しているに過ぎない。

適応学習アルゴリズムとして解釈すると、ゲームにおける他プレイヤーの戦略に対する完全予見性と、戦略決定の合理性がGASGでは仮定されていない。各プレイヤーの学習は独立して行われ、自身の戦略の利得情報について不完備な状態によりゲームを繰り返し、より多くの利得を獲得できるように戦略を変化させている。

GASGでは、戦略が遺伝子線列として表現され、戦略に対する利得が教師信号となり、各GA内部の人口サイズに占める戦略のシェアが確率的に推移する。GAの人口サイズは所与であり、また戦略の評価値を得る機会はランダムマッチング回数に依存する。

人口サイズや交叉確率等、各プレイヤーのGAパラメータを等しく設定してGASGを構成した場合、単体のGAの収束速度は殆ど同時となり、ランダムマッチングの回数が、プレイヤー間の戦略集合の収束過程に影響を与える。各世代の戦略が、どのような利得をランダムマッチングで得ようとも、戦略集合の中で相対的に算出される適応関数値により、次世代に生き残る確率が決定される。適応関数値が高い戦略は、世代交代による戦略集合の推移により確率的に増殖し、戦略集合の大半を占有するようになる。この段階、つまり目的関数値が更新さ

れず、同じ戦略が人口の大半を占めた状態で探索を終了する。GASG では、このように限定合理的なプレイヤー群が繰り返しゲームを行うことで、プレイヤー群の戦略分布が固定化される状態に至る過程を再現している。

では、GASG の近似均衡解はどのような特徴を持つのだろうか。この問いに関しては、John Maynard Smith と George R. Price により 1973 年に提唱された進化ゲーム理論における“進化的に安定な戦略 (Evolutionarily Stable Strategy, 以下 ESS と記す)”の概念が大きな示唆を与えてくれる¹⁰⁸⁾。利得行列が完全に予見できるゲームでは、プレイヤーは相手の戦略を自分の戦略の組み合わせから、最も利得が高い戦略を採用できる。しかし、進化ゲームでは、このような利得に関する情報は不完備であり、実際に行われたゲームにより知り得た戦略の利得に応じて、その戦略のシェアが増減する。その結果、ある戦略が生き残ったり、複数の戦略の利得が均衡して戦略シェアの固定化現象が生じる。

ESS は GA の探索過程と得られる最適解と同様の特徴を持つ。GA の収束判定は、計算コスト上、便宜的に設定される最大世代数での計算打ち切り以外、遺伝子線列集合が均質化して更新されなくなる場合、つまり遺伝子線列集合が、ある戦略で完全に占められた状態、もしくは利得が高い複数の戦略集合が一定の割合で安定した状態であるからである。探索された均衡解が、どの程度、他の戦略に対して安定的に利得を獲得するかについては、限定合理的かつ学習可能なプレイヤーによる繰り返しゲームの均衡解の精緻化の議論が今後必要となる。

ケーススタディでは、GASG は航空キャリアの企業間競争に対する企業戦略の学習過程に用いられているため、利潤最大化という各企業の目的関数と戦略集合、またゲームの利得関数の構造が所与とされている。また、プレイヤーの総数は増減しない。GASG のシミュレーションの結果からは、プレイヤー全体の学習の推移は、プレイヤーの戦略分布が相互に影響を及ぼすと同時に、互いに利得が高い戦略分布を規定ながら、安定した状態に至る共進化プロセスとして理解できる(図-7)。十分に他プレイヤーとコミュニケーションが図られた戦略は、他戦略に対して安定的に利得を得る。しかし人口サイズが小さく設定される等、環境に対する学習能力が低いプレイヤー同士が共進化した場合、均衡状態に至る前に各プレイヤーの戦略集合が収束してしまう(図-6)。これは最適化の視点からは明らかな初期収束であるが、全体と個の学習過程として捉えると、他のプレイヤーに対して、自らが保有する戦略集合に関するシグナリングを行う機会を逸したまま、戦略が固定化されたといえる。GASG ではプレイヤーの総数は一定で増減しないが、仮にプレイヤーの淘汰も考慮したメタ GASG を考えると、学習

能力が高いプレイヤーが他に存在する場合、このような弱い戦略で固定化された市場は新規参入を許し、プレイヤーの一部が淘汰される可能性がありえる。

市場における企業淘汰や協調、棲み分け、寄生、新規参入等の侵入等の生命的現象は、GASG に淘汰処理やプレイヤー間の戦略集合の交叉処理を取り込むことで再現できると考えられる。

5. おわりに

以上、本研究では、土木計画分野における GA の研究動向と課題整理、また適応学習アルゴリズムとしての側面を GASG を一例として紹介し、現象再現モデルとしての可能性を考察した。

今後の土木計画分野における GA の適用方法として期待される研究方向を以下に記す。一つ目は、大規模な最適化問題への適用であり、最適化手法の特性を追求することである。大規模な非線形最適化やシミュレーションモデルを通じた解評価による最適化、多目的最適化問題等の多様な観点からのアルゴリズムの検討が考えられる。二つ目は、計算速度に着目することであり、例えば情報通信技術により大量に得られるデータをリアルタイムに処理することで、制御に用いる方向性である。三つ目の方向性は、複雑適応アルゴリズムや学習システムとしての拡張である。これは上記二つの方向性と関係するが、例えば、現状では複雑系システムの現象理解に用いられるセルラーオートマトンやマルチエージェントシステムの基本アルゴリズムとして用いることが挙げられる。本研究で紹介した GASG は、セルラーオートマトンやマルチエージェントシステムに密接に関係してくる^{補注3)}。多数のエージェント間の相互作用の結果として顕在化する実際現象をいかにして正確に記述するか、また、どのような指標をもって記述の妥当性を示すのか、これらについては今後の研究課題となる。ここに挙げた三つの方向性については、今後、適用対象を絞り込んで研究を進めていく予定である。

最後に GA を含む進化計算論における計算素子の多様性と土木計画分野との関係性について記す。我々はコンピュータの利用を前提に議論を進めることが多いが、計算素子はどのような物質でもよい。事実、進化的分子計算に関する研究では分子を利用して有向ハミルトン経路問題が解かれている¹⁰⁹⁾。逆にマクロ的視点に立ち、限定合理的経済人を計算素子として考え、実社会を巨大な並列演算装置として見立てることもできる。この並列演算装置は、個人や社会としての知識や記憶、文化といった豊富なスキーマを有形無形に有しており、通信や交

通といったコミュニケーション手段のデザイン次第により環境変化に対して高い適応能力を発揮できる可能性がある。また、このようなネットワークにおける計画行為は、将来予測的なアプローチではなく、システム内部からシステム全体の緩やかな演算過程を観測しつつ、そのシステムに自ら関わることで、望ましい状況を“創造”していくことになると考えられる。

補注 1

本文中で引用した文章の全文を以下に記述する。

How does evolution produce increasingly fit organisms in environments which are highly uncertain for individual organism?

What kinds of economic plan can upgrade an economy's performance in spite of the fact that relevant economic data and utility measures must be obtained as the economy develops?

How does an organism use its experience to modify its behavior in beneficial ways (i.e., how does it learn or “adapt under sensory guidance”)?

How can computers be programmed so that problem-solving capabilities are built up by specifying “what is to be done” rather than “how to do it”?

What control procedures can improve the efficiency of an ongoing process, when details of changing component interactions must be compiled and used concurrently?

補注 2

生物進化をベースとした GA の用語は、多様に存在する。ここに、本論文で用いた用語、及びこれに類似する用語を整理する。

- ・ 遺伝子線列：各設計変数に対応する値を符号化したもの（＝個体，線列，string，遺伝子列，染色体）
- ・ 人口：各世代における遺伝子線列群（＝個体群）
- ・ 人口サイズ：各世代における遺伝子線列数（＝個体群サイズ，集団サイズ）
- ・ 淘汰：適応関数の値を用いて環境に適する適応度評価を行い、適応度の低い遺伝子線列は確率的に消滅させること（＝選択）
- ・ 交叉：遺伝子線列集団の中から親となる線列を 2 つ選び、その一部分を交換することで 2 つの新たな線列（子線列）を作ること
- ・ 突然変異：局所解に陥る危険を防ぐため、遺伝子線列集団から任意の確率で線列を選択し、部分的に他の離散要素に変換すること
- ・ 繁殖：淘汰された遺伝子線列の代わりに、生き残った遺伝子線列集合から任意の遺伝子線列を確率的に選択し、人口サイズを満たすようにコピーして補充すること（＝再生，増殖）

補注 3

GASG はマルチエージェントシステム（Multi Agent System: 以下 MAS と記す）の一種であると考えられる。MAS として GASG を捉えると、プレイヤーの戦略集合

は有限であり、利得行列の全てを事前情報として持たないという意味で、限定合理的性を表現している。また、GA の各世代の戦略集合の収束過程は、初期世代で生成される戦略集合の分布状況と対戦する他エージェントの戦略分布に依存するという経路依存性を表現している。なお、社会学的文脈で MAS に GA を用いた研究としては、Axelrod による囚人ジレンマモデル¹¹⁰⁾、地域文化伝播モデル¹¹¹⁾が挙げられる。

参考文献

- 1) Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- 2) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- 3) 西村清彦: 経済学のための最適化理論入門, 東京大学出版会, 1990.
- 4) 杉本博之: GA の工業設計への応用にむけてトラス構造物の離散的最適設計を例として, 数理科学, No.353, pp.45-50, 1992.
- 5) 杉本博之, 鹿汴麗, 山本洋敬: 離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 6) 秋山孝正: ファジ理論を用いた道路交通流解析, 土木計画学研究・論文集, No.11, pp.13-27, 1993.
- 7) 秋山孝正: 交通安全対策の費用・有効度からみた計画立案方法, 土木計画学研究・講演集, No.16(2), pp.165-168, 1993.
- 8) 土木学会構造工学委員会 AL 委員会: 新しい構造システム最適化手法～人工生命技術の応用～, 1996.
- 9) 土木学会構造工学委員会 AL 委員会: AL (人工生命) 委員会活動報告書, 土木学会, 1999.
- 10) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994.
- 11) 高山純一, 石井信通: GA によるグラフ分割を導入した部分グラフ集約化による全点間信頼度の近似解法, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, pp.322-323, 1994.
- 12) 織田利彦, 津久家智光, 音喜多亨, 増山義人: 遺伝的アルゴリズムによる信号制御パラメータ最適化, 第 14 回交通工学研究発表会論文集, pp.1-4, 1994.
- 13) 近田康夫, 橋謙二, 城戸隆良, 小堀為雄: GA による既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.151-159, 1995.
- 14) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- 15) 佐藤忠信, 一井康二: 遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.245-256, 1996.
- 16) 杉本博之, 片桐章憲, 田村亨, 鹿汴麗: GA によるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.517-524, 1997.
- 17) 杉本博之, 田村亨, 有村幹治, 斎藤和夫: 復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.135-148, 1999.
- 18) 有村幹治, 上西和弘, 田村亨, 杉本博之, 榎谷有三: 都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.333-340, 1997.
- 19) 有村幹治, 上西和弘, 杉本博之, 田村亨: 最適除雪道路選択モデ

- ルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.16, pp.387-392, 1999.
- 20) 田上博, 清田勝, 樗木武, 角知憲: 工事形態を考慮した工事リンクのグループ化とその優先順位, 土木学会論文集, No.604/IV-41, pp.1-10, 1998.
- 21) 田上博, 清田勝, 樗木武: グループ内の施工パターンを内生化した道路整備の優先順位決定手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.703-710, 1996.
- 22) 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.257-266, 1996.
- 23) 谷口栄一, 則武通彦, 山田忠史, 泉谷透: 物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究, 土木学会論文集, No.583/IV-38, pp.71-81, 1998.
- 24) 山田忠史, 則武通彦, 谷口栄一, 多賀慎: 物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用, 土木学会論文集, No.632/IV-45, pp.41-50, 1999.
- 25) 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一: リダンダントな道路網の構成に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.733-742, 1996.
- 26) 西村悦子, 今井昭夫: 複数解を考慮した遺伝的アルゴリズムによる公共バスの割当法, 土木計画学研究・論文集, Vol.16, pp.827-834, 1999.
- 27) 田村亨, 金子裕一, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムを用いた航空機材スケジューリングの最適化, 土木計画学研究・論文集, Vol.11, pp.247-254, 1993.
- 28) 高山純一, 宮崎耕輔: バスダイヤを考慮した最適バス路線網再編計画策定に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.827-836, 1996.
- 29) 浦田康滋, 有村幹治, 田村亨, 榎谷有三, 斎藤和夫: GAを用いた複数モードのスケジューリング, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.821-826, 1996.
- 30) 高山純一, 宮崎耕輔, 塩土圭介: 快速バスを導入した最適バス路線網計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.679-688, 1998.
- 31) 高山純一, 柳沢吉保, 中野泰啓, 加藤隆章: コミュニティバスの路線網策定システムの構築, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, pp.705-711, 2001.
- 32) 三和雅史, 内田雅夫: 遺伝的アルゴリズムによるMTT運用計画法, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.827-834, 1997.
- 33) 野村貴博, 秋山孝正: 遺伝的アルゴリズムによる道路都市網ゾーン別混雑料金の設定, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, pp.455-462, 2001.
- 34) 秋山孝正, 片桐雅之: 色彩イメージによる都市高速道路網の評価方法について, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.77-84, 1995.
- 35) 森地茂, 清水哲夫: 都市高速道路における新たなリアルタイム流入制御手法に関する研究—遺伝的アルゴリズムの適用—, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.915-922, 1996.
- 36) 高山純一, 杉山智美: 吸収マルコフ連鎖を用いた観測交通量からのOD推計法に関する研究, 土木学会論文集, No.569/IV-36, pp.75-84, 1997.
- 37) 小川圭一, 秋山孝正: 遺伝的アルゴリズムを用いた渋滞シミュレーションの実証的構造設定方法, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, pp.737-746, 2001.
- 38) Martinelli, D., Teng, H.: A genetic algorithm approach for solving the train formation problem, *Transportation Research Record*, No. 1497, pp.62-69, 1995.
- 39) Memon, G. Q., Bullen, A. G.: Multivariate optimization strategies for real-time traffic control signals, *Transportation Research Record*, No.1554, pp.36-42, 1996.
- 40) Abu-Lebdeh, G., Benekohal, R. F.: Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials, *Transportation Research Record*, No.1603, pp.119-127, 1997.
- 41) Abu-Lebdeh, G., Benekohal, R. F.: Computational issues in micro-genetic algorithms for traffic management, *Transportation Research Record*, No.1679, pp.112-118, 1999.
- 42) Park, B., Messer, C. J., Urbanik II, T.: Traffic signal optimization program for oversaturated conditions genetic algorithm approach, *Transportation Research Record*, No.1683, pp.133-142, 1999.
- 43) Duert, P. A.: Dynamic right-of-way for transit vehicles: Integrated modeling approach for optimizing signal control on mixed traffic arterials, *Transportation Research Record*, No.1731, pp.31-39, 2000.
- 44) Girianna, M., Benekohal, R. F.: Dynamic signal coordination for networks with oversaturated intersections, *Transportation Research Record*, No.1811, pp.122-130, 2002.
- 45) Park, B., Chang, M.: Realizing benefits of adaptive signal control at an isolated intersection, *Transportation Research Record*, No.1811, pp.115-121, 2002.
- 46) Ceylan, H., Bell, M. G. H.: Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach including drivers routing, *Transportation Research Part B* 38, pp.329-342, 2004.
- 47) Park, B., Messer, C. J., Urbanik, T. II: Enhanced genetic algorithm for signal-timing optimization of oversaturated intersections, *Transportation Research Record*, No.1727, pp.32-41, 2000.
- 48) Park, B., Roupail, N. M., Sacks, J.: Assessment of stochastic signal optimization method using microsimulation, *Transportation Research Record*, No.1748, pp.40-45, 2001.
- 49) Park, B., Santra, P., Yun, I., Lee, D. H.: Optimization of time-of-day breakpoints for better traffic signal control, *Transportation Research Record*, No.1867, pp.217-223, 2004.
- 50) Kovvali, V. G., Messer, C. J., Chaudhary, N. A., Chu, C. L.: Program for optimizing diamond interchanges in oversaturated conditions, *Transportation Research Record*, No.1811, pp.166-176, 2002.
- 51) Taha, M. A., Hanna, A. S.: Evolutionary neural network model for the selection of pavement maintenance strategy, *Transportation Research Record*, No.1497, pp.70-76, 1995.
- 52) Fwa, T. F., Chan, W. T., Hoque, K. Z.: Analysis of pavement management activities programming by genetic algorithms, *Transportation Research Record*, No.1643, pp.1-6, 1998.
- 53) Fwa, T. F., Cheu, R. L., Muntasir, A.: Scheduling of pavement maintenance to minimize traffic delays, *Transportation Research Record*, No.1650, pp.28-35, 1998.
- 54) Pilson, C., Hudson, W. R., Anderson, V.: Multiobjective optimization in pavement management by using genetic algorithms and efficient surfaces, *Transportation Research Record*, No.1655, pp.42-48, 1999.
- 55) Tack, J. N., Chou, E. Y. J.: Multiyear pavement repair scheduling optimization by prestrained genetic algorithm, *Transportation Research Record*, No.1816, pp.3-9, 2002.
- 56) Chan, W. T., Fwa, T. F., Tan, J. Y.: Benefits of information integration in budget planning for pavement management, *Transportation Research Record*, No.1889, pp.3-12, 2004.
- 57) Tsai, B. W., Kannekanti, V. N., Harvey, J. T.: Application of genetic algorithm in asphalt pavement design, *Transportation Research Record*, No.1891, pp.112-120, 2004.
- 58) Shekharan, A. R.: Assessment of relative contribution of input variables to pavement performance prediction by artificial neural networks, *Transportation Research Record*, No.1655, pp.35-41, 1999.

- 59) Fwa, T. F., Tan, C. Y., Chan, W. T.: Back calculation analysis of pavement-layer model using genetic algorithms, *Transportation Research Record*, No.1570, pp.134-142, 1997.
- 60) Nakatsuji, T., Kawamura, A., Maeda, T.: Inverse estimation of friction coefficient of winter road surface with vehicular motion data measured by GPS-equipped probe vehicles: *Transportation Research E-Circular E-C063, SNOW04-043*, pp.442-454, 2004.
- 61) Jong, J. C., Schonfeld, P.: Cost functions for optimizing highway alignments, *Transportation Research Record*, No.1659, pp.58-67, 1999.
- 62) Jong, J., Schonfeld, P.: An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments, *Transportation Research Part B* 37, pp.107-128, 2003.
- 63) Kim, E., Jha, M. K., Son, B.: Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach, *Transportation Research Part B* 39, pp.339-360, 2005.
- 64) Jung, S., Haghani, A.: Genetic algorithm for a pickup and delivery problem with time windows, *Transportation Research Record*, No.1733, pp.1-7, 2000.
- 65) Jung, S., Haghani, A.: Genetic algorithm for the time-dependent vehicle routing problem, *Transportation Research Record*, No.1771, pp.164-171, 2001.
- 66) Huang, B., Liu, N.: Bilevel programming approach to optimizing a logistic distribution network with balancing requirements, *Transportation Research Record*, No.1894, pp.188-197, 2004.
- 67) Zhang, X., Yang, H.: The optimal cordon-based network congestion pricing problem, *Transportation Research Part B* 38, pp.517-537, 2004.
- 68) Yang, H., Zhang, X.: Optimal toll design in second-best link-based congestion pricing, *Transportation Research Record*, No.1857, pp.85-92, 2003.
- 69) Sadek, A. W., Smith, B. L., Demetsky, M. J.: Dynamic traffic assignment: genetic algorithms approach, *Transportation Research Record*, No.1588, pp.95-103, 1997.
- 70) Ceylan, H., Bell, M. G. H.: Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion, *Transportation Research Part B* 39, pp.169-185, 2005.
- 71) Balling, R. J., Taber, J., Day, K., Wilson, S.: Land use and transportation planning for twin cities using a genetic algorithm, *Transportation Research Record*, No.1722, pp.67-74, 2000.
- 72) Balling, R., Lowry, M., Saito, M.: Regional land use and transportation planning with a genetic algorithm, *Transportation Research Record*, No.1831, pp.210-218, 2003.
- 73) Taber, J. T., Balling, R., Brown, M. R., Day, K., Meyer, G. A.: Optimizing transportation infrastructure planning with a multiobjective genetic algorithm model, *Transportation Research Record*, No.1685, pp.51-56, 1999.
- 74) Kim, H., Baek, S., Lim, Y.: Origin-destination matrices estimated with a genetic algorithm from link traffic counts, *Transportation Research Record*, No.1771, pp.156-163, 2001.
- 75) Liu, Y. H., Hani, S. M.: Global maximum likelihood estimation procedure for multinomial probit (MNP) model parameters, *Transportation Research Part B* 34, pp.419-449, 2000.
- 76) Ma, T., Abdulhai, B.: Genetic algorithm-based optimization approach and generic tool for calibrating traffic microscopic simulation parameters, *Transportation Research Record*, No.1800, pp.6-15, 2002.
- 77) Nakatsuji, T., Nakano, K., Nanthawichit, C., Suzuki, H.: Estimation of turning movements at intersections: joint trip distribution and traffic assignment program combined with a genetic algorithm, *Transportation Research Record*, No.1882, pp.53-60, 2004.
- 78) Ranjekar, P., Nakatsuji, T., Asano, M.: Performance evaluation of microscopic traffic flow models with test track data, *Transportation Research Record*, No.1876, pp.90-100, 2004.
- 79) Schultz, G. G., Rilett, L. R.: Analysis of distribution and calibration of car-following sensitivity parameters in microscopic traffic simulation models, *Transportation Research Record*, No.1876, pp.41-51, 2004.
- 80) Chien, SI-J, Tsai, F. M., Hou, E.: Optimization of multiple-route feeder bus service: application of geographic information systems, *Transportation Research Record*, No.1857, pp.56-64, 2003.
- 81) Karlaftis, M., Kepaptsoglou, K., Stathopoulos, A.: Genetic algorithm-based approach for optimal location of transit repair vehicles on a large urban network (with discussion), *Transportation Research Record*, No.1879, pp.41-50, 2004.
- 82) Yang, S., Hamed, M., Haghani, A.: Integrated approach for emergency medical service location and assignment problem, *Transportation Research Record*, No.1882, pp.184-192, 2004.
- 83) Hegazy, T., Elbeltagi, E., El-Behairy, H.: Bridge deck management system with integrated life-cycle cost optimization, *Transportation Research Record*, No.1866, pp.44-50, 2004.
- 84) Chen, A., Subprasom, K., Ji, Z.: Mean-variance model for the build-operate-transfer scheme under demand uncertainty, *Transportation Research Record*, No.1857, pp.93-101, 2003.
- 85) Chen, A., Yang, C.: Stochastic transportation network design problem with spatial equity constraint, *Transportation Research Record*, No.1882, pp.97-104, 2004.
- 86) Sadek, A. W., Smith, B. L., Demetsky, M. J.: Artificial intelligence search algorithms for dynamic traffic routing, *Transportation Research Record*, No.1679, pp.87-94, 1999.
- 87) Chen, A., Chootinan, P., Pravinongvuth, S.: Multiobjective model for locating automatic vehicle identification readers, *Transportation Research Record*, No.1886, pp.49-58, 2004.
- 88) Nakayama, S., Kitamura, R., Fujii, S.: Drivers' learning and network behavior dynamic analysis of the driver-network system as a complex system, *Transportation Research Record*, No.1676, pp.30-36, 1999.
- 89) Eiben, A. E., Hinterding, R., Michalewicz, Z.: Parameter control in evolutionary algorithms, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.3, No.2, pp.124-141, 1999.
- 90) 廣安知之, 三木光範, 上浦二郎: 実験計画法を用いた分散遺伝的アルゴリズムのパラメータ推定, 数理モデル化と応用, Vol.43, No.SIG10, 2002.
- 91) 澤井秀文, 木津左千夫, 足立進: パラメータ設定不要の遺伝的アルゴリズムとその並列分散処理, 遺伝的アルゴリズム 4, 産業図書, 2000.
- 92) 高島一哉, 宮内秀和, 岡田三郎: 遺伝的アルゴリズムにおけるスキーマ解析の一手法, 数理モデル化と応用, Vol.1995, No.093, 1995.
- 93) 波多野寿昭: GAによる最適化, 計測と制御, 第32巻, 第1号, pp.52-53, 1993.
- 94) 小林重信: 遺伝的アルゴリズムの現状と課題, 計測と制御, 第32巻, 第1号, pp.2-9, 1993.
- 95) 山村雅幸, 小林重信, 山岸誠, 阿瀬始: 遺伝的アルゴリズムによるナーススケジューリング, 遺伝的アルゴリズム 2, pp.89-124, 産業図書, 1995.
- 96) 例えば, Smith, J.R.: Designing Biomorphs with an Interactive Genetic Algorithms, *Proceeding of 4th International Conference on Genetic Algorithms*, pp.535-538, 1991.
- 97) 例えば, Koza, J.: Genetic programming: A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems, *Report No. STAN-CS-90-1314, Dept. of Computer Science, Stanford Univ.*, 1990.
- 98) 例えば, Kitano, H.: Designing neural networks using genetic algorithms with graph generation system, *Complex Systems*, Vol.4, 1990.

- 99) 例えば, 大平徹: 免疫システムの進化的適応モデル, 遺伝的アルゴリズム 2, 産業出版, 1995.
- 100) 例えば, 北野宏明: 人工生命の進化・発生・学習の統合, 数理科学, No.353, pp.24-31, 1992.
- 101) 秋山孝正, 小川圭一, 寺嶋真穂: 交通安全対策の組み合わせ最適化に対する免疫アルゴリズムの適用性の検討, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, pp.975-982, 2003.
- 102) 山口仁史, 小藤智久, 佐藤尚次: 遺伝的プログラミングを用いた土木構造物の被害予測とリスク分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部, Vol.57, pp.101-102, 2002.
- 103) 秋山孝正: ソフトコンピューティング技術の土木計画における応用と課題, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, CD-ROM, 2003.
- 104) 福田大輔, 上野博義, 森地茂: 社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析, 土木学会論文集, No.765/IV-64, pp.49-64, 2004.
- 105) 藤井聡: 自動車利用抑制コミュニケーションに対する心理的リアクタンスについての理論実証研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, pp.571-580, 2003.
- 106) 佐々木正人, 三嶋博之, 松野孝一郎: アフォーダンス 複雑系の科学と現代思想, 青土社, 1997.
- 107) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 正木智也, 松蔭信豊: シュタツケルベルグ均衡による国内航空旅客需要予測モデルの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部, Vol.53, pp.282-283, 1998.
- 108) Smith, J.M., Price, G.R.: The logic of animal conflict, *Nature*, Vol.246, pp.15-18, 1973
- 109) 萩谷昌己, 西川明男: DNA 計算, 遺伝的アルゴリズム 4, pp.3-48, 産業出版, 2000.
- 110) Axelrod, R.: The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma, *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, pp.32-41, Pitman, 1987.
- 111) Axelrod, R.: The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization, *Journal of Conflict Resolution*, vol.41, pp.203-226, 1997.

(2005. 4. 13 受付)

GENETIC ALGORITHMS IN THE INFRASTRUCTURE PLANNING : OPTIMIZATION AND ADAPTIVE LEARNING

Mikiharu ARIMURA, Tohru TAMURA and Naoto IDA

Genetic Algorithms (GA) are recognized as the solution of a discrete optimization problem as NP-hard problem, and many application researches have been accumulated in the infrastructure planning field. This paper aims to consider the future directivity of the application research of GA in the infrastructure planning field. Therefore, after arranging the present situation of GA-applied researches, subjects as the optimization algorithm, and the applications in the computational science, we propose the GA for strategy game as the adaptive learning algorithm. The future possibility of GA as the adaptive learning algorithm and the thought experiment system to dynamic interaction system is considered by the case study.