

## 地球環境と共生する持続的社會の探究 — 人間-環境-社會システムの計算モデル —

藤井 晴行<sup>†</sup> 谷本 潤<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

<sup>‡</sup> 九州大学大学院総合理工学研究院 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

E-mail: <sup>†</sup> hfujii@arch.titech.ac.jp, <sup>‡</sup> tanimoto@cm.Kyushu-u.ac.jp

あらまし 地球環境と共生する持続的社會のあり方を模索するために、建築環境のシミュレーションモデル、行動モデル、社會システムのシミュレーションモデルを連成し、人間-環境-社會系モデルを構築中である。本稿は、建築環境、行動、社會システムを、それぞれ、伝熱の状態方程式、クラシファイアシステム、マルチエージェントシステムを用いて実装したシミュレーションモデルによる、いくつかのケーススタディについて報告する。

キーワード 人間-環境-社會系、マルチエージェントシステム、遺伝的戦略、クラシファイア、環境調整行動

## Investigation into an Environmentally Symbiotic and Sustainable Society — A Computational Model of a Man-Environment-Society System —

Haruyuki FUJII<sup>†</sup> and Jun TANIMOTO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

<sup>‡</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University  
6-1 Kasugakoen, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580, Japan

E-mail: <sup>†</sup> hfujii@arch.titech.ac.jp, <sup>‡</sup> tanimoto@cm.Kyushu-u.ac.jp

**Abstract** The authors assume that it is necessary to find a set of solutions to the crucial issues concerning the relation between the global environment and the sustainable human society. On the basis of the assumption, the authors have been developing a human-environment-society system model to simulate the characteristic phenomena related to the issue. This paper explains the framework of the model focusing on a social dilemma in indoor climate control, where actions performed with expectation to make individual's indoor thermal environment comfortable bring about undesired environment against the expectation. Some results of the case study simulations to find some crews to deal with the social dilemma are also shown.

**Keyword** Human-Environment-Society System, Multi Agent System, Genetic Strategy, Classifier, Action to Control Indoor Climate

### 1. はじめに

本研究は地球環境との共生や持続的社會の実現を可能にする社會システムの提案を最終目標とする。

地球環境との共生に貢献すべく、環境共生型技術や地球にやさしい行動が提案されている。これらの実行は社會システムの構成主体である企業や個人の直接的な利益の追求と必ずしも相容れるものではない。しかし、不実行は人間社會の持続を脅かし、企業や個人は間接的な不利益を被る。即ち、企業や個人が目先の利益の追求という意味で合理的な行動をとれば、社會全体が環境共生及び持続的社會の実現の両側面で最適な状態を保てないという社會的ジレンマ<sup>1)</sup>に陥る。このジレンマが環境共生型技術や地球にやさしい行動の浸透を抑制しているというのは過言ではない。<sup>2)</sup>

本研究は計算機上に仮想的な人間-環境-社會系を構築し、複数の構成主体（エージェント）の行動に基づく系の振舞いのシミュレーションによって社會的ジレンマの発生解消メカニズムを解明し、変動する社會において地球環境との共生と持続的発展の両立を図るた

めの技術や行動のポートフォリオを提案することを目指している。特に、非協力的行動を抑制するインセンティブを与えるという社會制度の変容と協力的行動を促進する教育や啓蒙によるエージェントの態度の変容がジレンマ解消に如何に寄与するか注目する。本稿は環境共生や持続的社會の実現非実現に関わる現象が人間-環境-社會系モデルに基づくシミュレーションによって表現可能であるか否かを検討するものである。

### 1. 人間-環境-社會系モデル

人間と環境と社會は transaccional (交互浸透的) な関係を持ち、人間、環境、社會の振舞いは他の振舞いに影響を与え、同時に他の振舞いの影響を受けるという観点から、これらを一システムとして計算する、人間-環境-社會系モデルを試作中である。本稿で云う社會は複数の人間が相互作用する系である。人間行動、建築都市環境、社會の各システムは、スケールや拠り所とする学問領域の違いから別個に扱われる傾向にあり、システム間の交互浸透的關係は必ずしも考慮されてはいない。人間-環境-社會系モデルは、三者を連成

系として一体的に捉え、相互影響による非線形効果の表現を意図するものである。既報した人間-環境系モデル<sup>3)</sup>と人間-社会系モデル<sup>4)-6)</sup>をサブモデルとする。

### 1.1. 仮想コミュニティ

問題の本質を明確にするために単純化かつデフォルメしたコミュニティを想定する。このコミュニティの住人はエージェントである。エージェントは一人ずつ部屋に隠り、連続して室温を調節する。室には窓と冷房があり、エージェントはこれら进行操作する。また、エージェントは2種類の信号を発する。これらの行動は状況及び状況の来歴に応じて選択、生起される。状況は環境や社会の状態及びエージェントの内部状態に基づいて認識される。具体的には、冷房の強弱の状態、窓の開閉の状態、外気温と室温の関係、自分からの信号の発生状況、自分以外のエージェント達による信号の発生状況、自室の快適性などが状況を構成する。信号の発生は個人から社会へのメッセージの発信の比喻であり、エージェント間でのコミュニケーションや協調行動の創発を期待して設定する基本行動である。

#### 1.1.1. 熱環境系モデル

熱環境系モデルは主に建物内外の温熱環境や建物の熱的挙動を熱回路網理論に基づいて数値計算する。ケーススタディで用いるモデルを図1に示す。熱容量や熱コンダクタンスの算出の根拠となる物性値や換気量は扱う問題を際立たせるために恣意的に与えた架空の値である。温度や排熱量の値自体は実際の世界に対応する意味を持たぬが、その変動や相対的關係などの定性的特徴は物理法則に法る。工学的観点からは現象を定量的に再現しない乱暴なモデルであるとの批判もあるが、人間-社会系と連係した問題の把握の可能性を巨視的に見積もるには適切な措置であると考えられる。

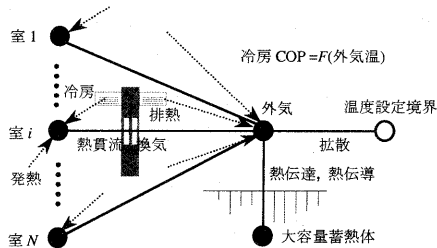


図1 熱環境系モデル

### 1.2. 社会系モデル

社会の振舞いは社会を構成する個々の主体の振舞いによるものである。一方、交互浸透的な関係により、各主体の振舞いは社会の振舞いに影響される。人間-社会系モデルは複数のエージェントとエージェントが存在する空間とからなるマルチエージェントシステムである。エージェントは状況を認識して行動をなす個体の計算モデルであり、エージェント達が構成する社会全体や局所的な社会と相互に作用しつつ自律的に行動する人間の計算モデルである。ケーススタディ用モデルの空間には窓、冷房、信号(掲示板の比喻)があり、エージェントはこれらの状態を踏まえて行動をなし、これらの状態を変える。

### 1.3. エージェント(行為者モデル)

エージェントは環境、社会、自分自身の状態やその履歴に基づいて行動をなす<sup>7),8)</sup>。また、交互浸透的な関係により、行動は環境や社会の状態を変える。人間-環境-社会系モデルのエージェントは状況の認識と行動を繰り返すことによって環境や社会に適合する行動を学習する。適合性は生物学的な観点、社会学的な観点などを踏まえて定義される。地球環境と共生する持続的社会の実現の問題に関して言えば、個人の快適性を追求する、多少不便でも快適性の追求を抑える、経済性を優先する、地球環境への配慮を優先する、などの価値観を踏まえて適合性が評価されるが、普遍的かつ統合的な評価は困難である。ケーススタディでは個人的な快適の度合いと環境配慮の度合いとをエージェントの適合性の評価に用いる。

各エージェントは Classifier System を持ち、室温を快適域に保つ、または、近付ける行動をなした場合に正の報酬を得、快適域から遠ざける行動をなした場合に負の報酬を得る。

#### 1.3.1. Classifier の進化的学習

Classifier の学習に遺伝的戦略を併用する。本研究では各 Classifier を遺伝子と、Classifier System を構成する全 Classifier の集合を遺伝子プールと看做し、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する。Classifier の強さが遺伝子の適合度に相当する。

#### 1.3.2. 啓蒙による Classifier System の更新

適合度に応じてルーレット選択されたエージェントが自分のもつ強い Classifier のいくつかを任意に選択したエージェントに渡す。ある価値観における第一人者が自分の行動規範の一部を他者に伝授する行為の比喻である。適合度を2種類設定する。報酬Aは環境からどれだけの"快"を享受したかを示す尺度であり、Classifier System が環境から得る報酬の日積算値である。報酬Bは環境にどれだけのインパクトを与えたかを示す尺度であり、冷房による消費エネルギーの日積算値である。前者は個人的な快適性の追求を善とする価値観、後者は環境への配慮(親環境性)を善とする価値観の比喻である。

#### 1.3.3. 行動及び行動による環境と社会の変化

環境に対する行動と社会に対する行動を想定する。環境への行動は冷房出力の変更(一段階強くする/一段階弱くする)と窓の開閉(開く/閉じる)の4種類である。社会への行動は信号Aを発する/発しない、信号Bを発する/発しない、の4種類である。冷房出力の変更は熱環境系における室への冷熱投入量の変更及び外気への排熱量の変更に対応する。窓開閉は室と外気との換気回数の変更に対応する。信号AまたはBの発生行動の有無は社会システムにおいて当該信号を発するエージェントの割合の算出の根拠となる。

#### 1.3.4. Classifier への入力 Message

Classifier への入力として0,1からなる9ビットの Message を設定する。ケーススタディ用の Ad Hoc な設定である。

快不快を示す記号列(2bit)

11: 室温がエージェントの快適域の上限を超える、

- 10: 室温が快適域内かつ快適域の中間値を超える、
- 01: 室温が快適域内かつ快適域の中間値以下である、
- 00: 室温が快適域の下限を下回る、

窓の状態を示す記号 (1bit) 1: 開, 0: 閉、

エアコンの状態を示す記号 (1bit) 1: On, 0: Off、

外気温と室温の関係を示す記号 (1bit)

- 1: 外気温が室温より高い、
- 0: 外気温が室温以下である、

信号 A を発するエージェントの割合 (1bit)

- 1: 過半数, 0: 半数以下、

信号 B を発するエージェントの割合 (1bit)

- 1: 過半数, 0: 半数以下、

自分が信号 A を発生したか否か (1bit)

- 1: 発生した, 0: 発生しなかった、

自分が信号 B を発生したか否か (1bit)

- 1: 発生した, 0: 発生しなかった、

## 2. シミュレーションによるケーススタディ

人間-環境-社会系モデルを用いてシミュレーションを行う。計算上の1日を1周期として温度設定境界の温度を22~30(度)の間で変化する正弦波として与える。1/16 時間ステップで各系の計算を連成する。継続時間を200日とする。温度、熱量、時間の絶対値は実際の世界に対応する意味を持たない。

### 2.1. 計算条件

5 ケースを想定する。エージェントの Classifier System の初期構成、エージェントの適合性を測る価値観、学習の有無などがケース間で異なる。熱環境系モデルと社会系モデルは全ケース共通である。

**CASE-0:** 他ケースの特徴を見るベンチマークである。社会的ジレンマが生じ易い設定である。エージェントは室温が快適域より高い場合に冷房を強め、快適域より低い場合に冷房を弱める。Classifier の学習、進化、啓蒙を行わない。快適域は22(度)以上26(度)未満であり、これは他のケースも同様である。

**CASE-1:** CASE-0 と同じ冷房操作と不快な場合に窓を開け、窓が開いていて外気温が室温より不快な場合に窓を閉める行動に対応する Classifier とランダムに生成された Classifier が初期設定される。Classifier System は時間ステップ(1/16 時間)毎に学習するとともに1日毎に進化的学習をする。また、50日経過後は快適性追求の価値観から選択されたエージェントが他のエージェントに自己の行動規範を啓蒙する。

**CASE-2:** 全 Classifier が任意に初期設定され、冷房操作、窓開閉の行動規範は与えられない。他の条件はCASE-1 と共通する。

**CASE-3:** エージェントの適合性を測る価値観のみがCASE-1 と異なる。エージェント間で宣布される優性行為に関する情報を快適性でなく親環境性を基準に選択する。本モデルではエネルギー消費の縮減が親環境的な行為であり、親環境性と経済性は同義である。

**CASE-4:** エージェント毎に異種の Classifier を初期設定する。25%のエージェントはCASE-0 と同じ冷房操作のみがプリセットされ、25%のエージェントはCASE-1 に示した窓開閉のみがプリセットされる。残りのエージェントはランダムに生成された Classifier をもつ。他者を啓蒙するエージェントは親環境性の観点から選択される。他の条件はCASE-1, 2 と共通する。

## 2.2. 結果及び考察

CASE-0 は標準ケースに相当する。計算開始200日後の時変動図2をみると、朝方の最低外気温発生時に冷房を緩め、日中ピーク時にはパワー大に操作し、これに伴い、外気温度が鋭敏に応答していることが確認できる。計算全日を通じて冷房運転が行われているため、外気温度は上昇し(図5)、付随して発生する外気からの熱取得の増大と冷房 COP の低下とによってエネルギー消費は増大している(図4)。設定パラメータに依存する様々な感度(例えば消費エネルギーの増大に対する外気温度上昇の感度)は本モデル特有のものではあるが、現下、昂進しつつある都市高温化と同様の vicious cycle (悪循環) の構造が再現されると云えるであろう。

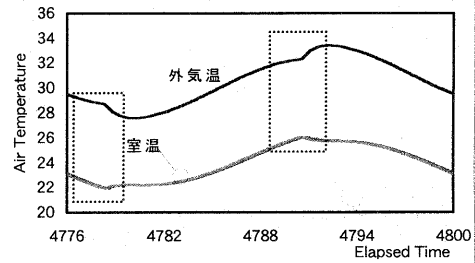


図2 外気温と各室温の変動 (CASE-0, 200日目)

以下、CASE-0 との比較を通じて、他ケースの結果を概観する。

まず、CASE-1. Classifier は冷房と窓開閉に関して適正な操作がプリセットされ、50日目以降から始まるエージェント間相互作用は、最も快適性向上を達成した者が他者に影響を付与するとしたケースである。図3をみると、50日目には自己の快適性達成のため適切に窓の開閉を行い得ているグループとただ閉雲に冷房を使用し快適室温下限を下回った状況を現出してしまっているグループとに分離している。この状況は本 Classifier の条件設定下で学習を遂行した結果、偶々生じたものではあるが、後者は、例えば、必要以上に冷房を使用しながらあまりの室温の低さに着衣量を増すなどして過ごしている場合の比喻に相当するだろう。冷やし過ぎのオフィス、夏季の列車内環境、或いは多消費型のライフスタイルにまま観る、冗乱浪費の室内環境制御をしておきながら恬(てん)として疑義を抱かぬと云った状況は、遺憾ながら我々の周囲に未だ散見する事柄でもある。

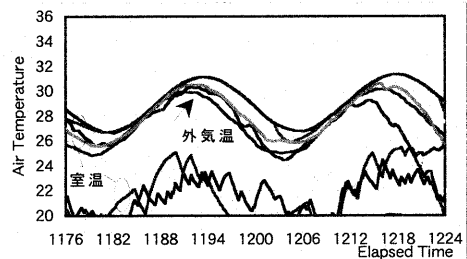


図3 外気温と各室温の変動 (CASE-1, 50, 51日目)

50 日目以降、優性エージェントの影響が他者に伝播する過程で、過冷房がマジョリティとなる期間（図 5 の 80 日目前後など）とこれからのリバウンド効果（過冷房は快適性保持上マイナス効果と看做されるので）で冷房を止め換気により涼を得る期間（上記 80 日目前後の直後）とを交互に繰り返し、最終的には冷房を一切停止せず、外気温度とエネルギー消費が急増

するとのカタストロフィックな結末を迎えている。過度に冷房するとの間違った行動規範がエージェント内で情報伝搬することで、過冷房と冷房停止かつ換気の両行為の振幅が漸増し、最終的には親環境性からも個々人の快適性確保の観点からも、誤った行動がコミュニティ内に蔓延してしまうとの結果は、真に正しい情報を社会に宣賞していくこと、或いは、所謂、環境

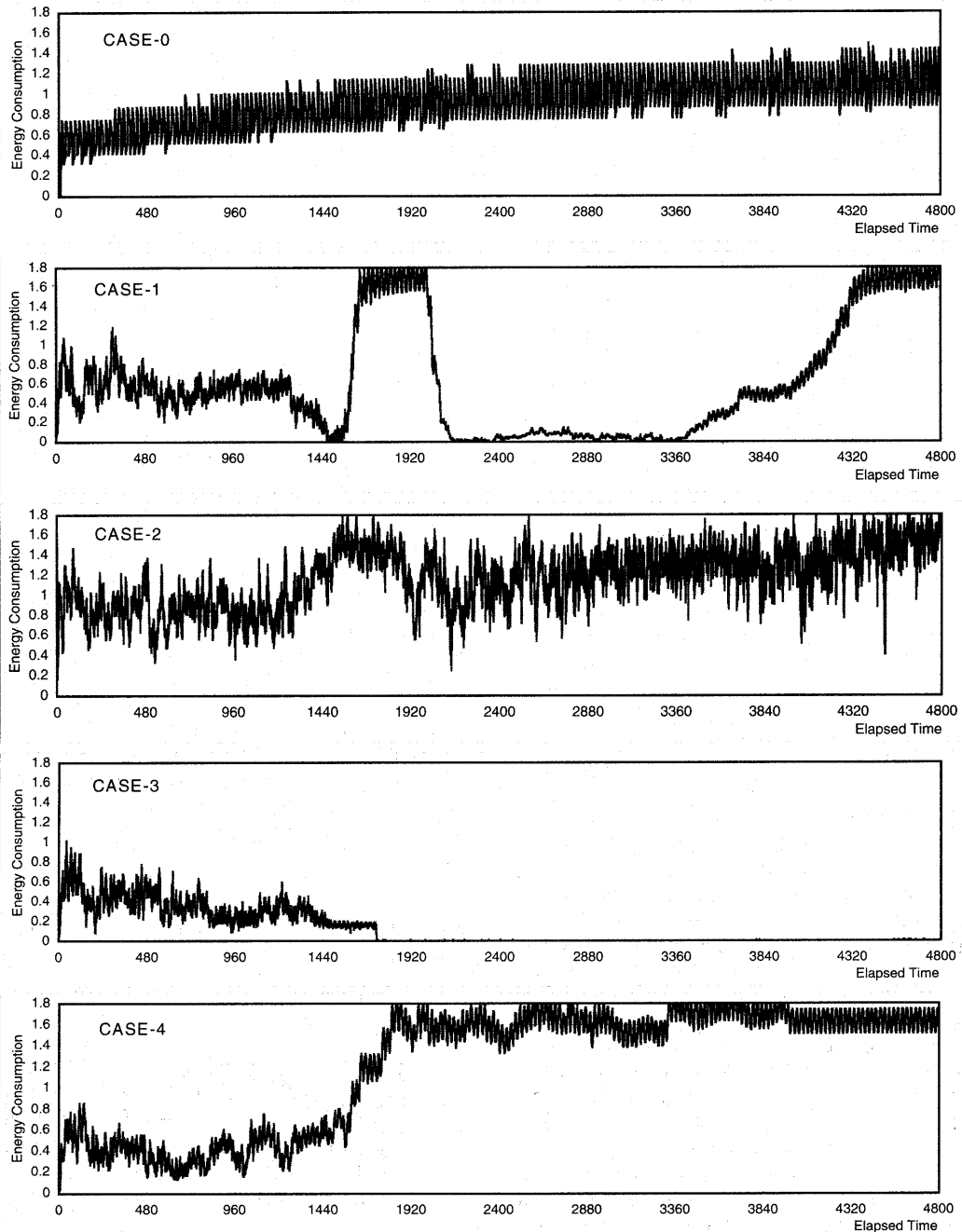


図 4 冷房用消費エネルギーの推移（全室合計）

教育の大切さを暗示しているが如くである。

このことは、Classifier をプリセットせず全くランダムに付与した CASE-2 の結果を観ても首肯されよう。期間中、一貫して冷房が使用され（図 5）、エネルギー消費増大（図 4）、外気温上昇（図 5）の単調トレンドをしている。図 6 の 200 日目の結果で、室温推移が快適域内にありながら、微妙な乱高下を繰り返しているのは、窓を開け放して冷房を最大にしている状況が現出しているからである。初期にコミュニティ内に合理的な情報が付与されなかったため、自己の快適性を

コントロールするのに、“窓の開閉と云うパッシブな行動と冷房と云うアクティブな行動との相互因果を無視し独立な手段として行使する”との致命的に誤った学習が行われてしまったのである。

CASE-3 では、パッシブなライフスタイルがマジョリティを得、70 日目前後からほとんど冷房は使用されなくなっている。冷房を使用しないことが都市温度を低下させ、窓開閉だけ（図には示していないが 200 日目には窓開け放しと締め切りのエージェントが併存していることを行動記録にて確認）で、各戸の快適性

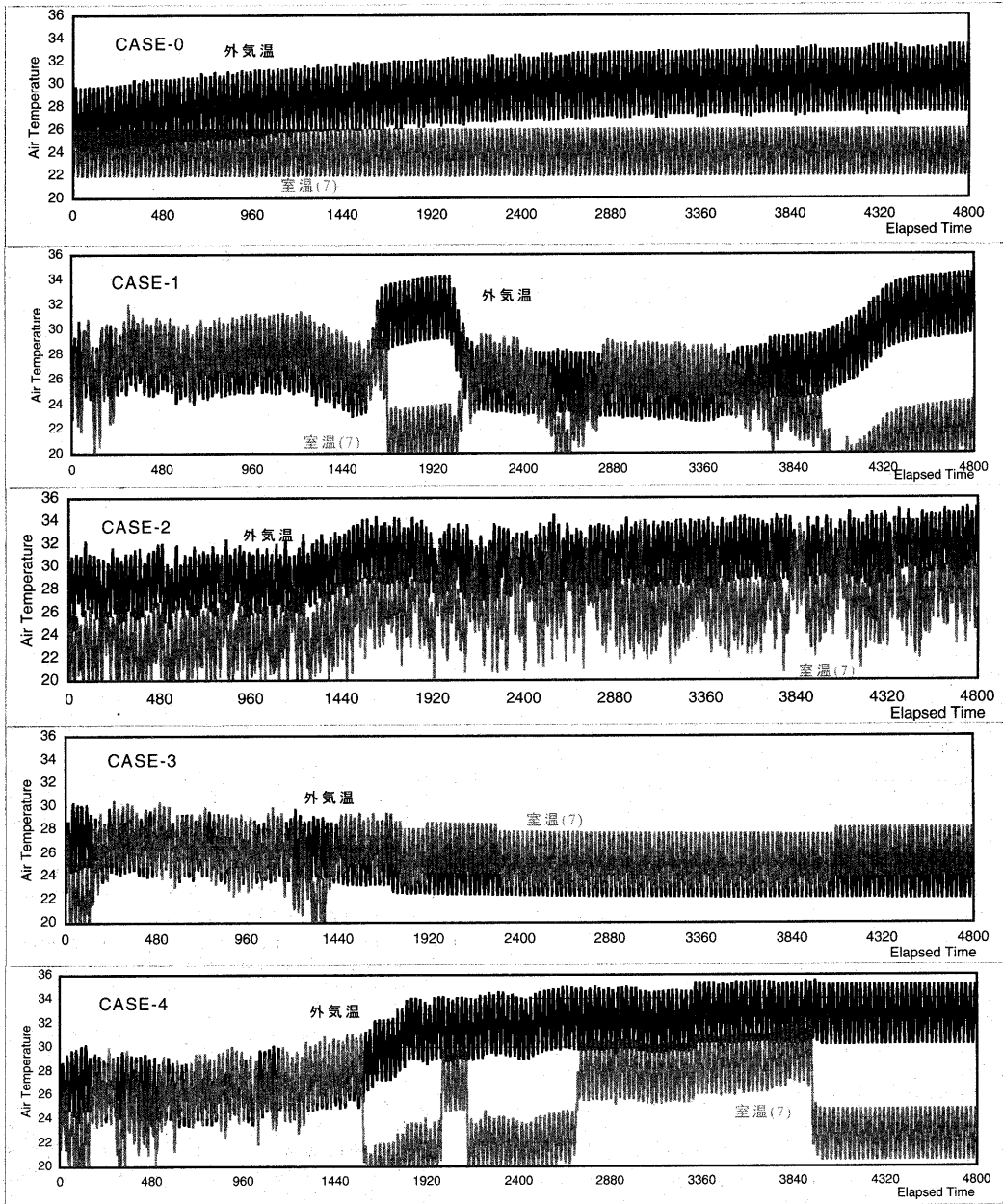


図 5 室温(室 7)と外気温の推移(上から CASE-0~CASE-4)

がコントロールできるとの好循環を生んでいる。

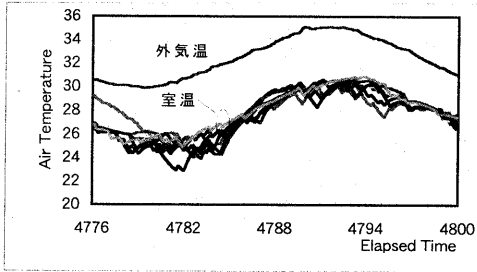


図6 外気温と各室温の変動 (CASE-2, 200日目)

CASE-4 は初期の Classifier 設定状況にエージェント間で変化を付けた場合である。設定がランダムなエージェントも、優性エージェントからの知識獲得 (50日目以降) により、社会全般は親環境性と云う観点から見て良好な方向に学習が推移するかと思われたが、結果は異なっている。経済性 (親環境性) を優性エージェント選択基準に据えながら、各戸は中から強まて様々に冷房し (本稿では割愛したが行動記録にて確認)、100日目以降、都市気温、エネルギー消費とともに高値安定してしまっている。理由の一つとして、優性エージェント選定基準は親環境性としながら、各エージェントの Classifier 集合の陶冶 (進化的学習により毎日行われている) は快適性に関する報酬を得て行われる (快適性を軸に Classifier は進化していくと看做すよい)、との不一致が、ス様の結果を招来したと考えられる。即ち、真に親環境性を指向するのであれば、各個人レベルの行動規範も環境を評価軸に据える必要があると云うことである。ここからの示唆を掬取なら、社会に環境性指向を謳った表層的ブームが存在しても、「これまで享受してきた“快”を多少犠牲にすると」との強い意志が個人に共有されないかぎり、目標の達成は覚束ないと云うことだろう。

### 3. 環境ポートフォリオに向けて

人間-環境-社会系モデルによるケーススタディが、現在、明らかにしていることは、動的な環境や社会においてエージェントが学習や啓蒙を通じて社会的ジレンマから脱する行動規範を獲得せんとすれば、一時的には小康の安定と見える状態を生むものの、長期的には不安定な状態と小康状態とが繰り返される場合があるということである。少試行である故、不安定な状態が人間-環境-社会系モデルの構造によるのか、モデルが抽象化しようとする実際の人間-環境-社会系の特質によるのかの判定は未だできない。多くの可能性の中のマジョリティを占めるか否かも今は不明である。逸脱を畏れずに解釈を加えれば、限定された価値観に基づいて得られた均衡は、少なくとも周期的定常状態に達しない限り、一時的なものにすぎない。地球環境共生型持続的社会的実現のための普遍にして不変な唯一無二の価値基準を見出すことは不可能であるかもしれない。ある価値観は一時的には通用するが、環境や社会が変化し続ける限り、不安定な状態の種にもなりうる。複雑系としての人間社会が予想困難で不確定な状態を作り出しているとするれば、私たち科学者或いは工

学者が貢献できることは、限定された価値観の元でのみ最適な解を見つけることだけではなく、予想し得ない状況にあっても通用の可能性を包摂した複数の解の組を検索することであり、著者らはこれらの営為を爾今「環境ポートフォリオ」と呼ぶことにする。眼下の危機回避のための技術開発に注力するとともに、今は有用性が判定できなくとも予測を超えた未来に備えて解の多様性を確保することも肝要と思われる。

### 4. 今後の課題とまとめ

環境共生型持続的社会的実現に関わる社会的ジレンマの微視的機構を探究する人間-環境-社会系シミュレーションについて報告した。本稿におけるモデル実験は、現下、仮構の域にあり、人工社会の詳細構成やモデル定数など向後の検討を要すべき課題は多々ある。

### 謝辞

本研究の一部 (2章) は文部科学省科学研究補助金 (基盤研究 C, 課題番号 13650667) を受けている研究及び文部科学省科学研究補助金 (萌芽研究, 課題番号 14658122) を受けている研究の一部をなす。また、3章は日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 A1, 課題番号 14205087) 「複雑系科学による人間・環境に適應する建築・都市・社会のシステムデザイン」の援助を受けている。納税者ならびに関係者各位に謝意を表す。

### 文献

- [1] 広瀬幸雄; 環境と消費の社会心理学 - 共益と私益のジレンマ, 名古屋大学出版会, 1995.
- [2] 出口弘; 複雑系としての経済学, 日科技連, 2000.
- [3] 藤井晴行; 屋内環境の変動と居住者の環境調整行動との相互作用の計算モデル, 日本建築学会計画系論文集 No.540, pp.15-22, 2001.2.
- [4] 谷本潤, 藤井晴行, 片山忠久, 萩島理; 複雑系モデルに基づくアカデミック・ソサエティの盛衰予測に関する研究 日本建築学会・建築関連大学における実事求是の模索, 日本建築学会計画系論文集 No.547, pp.252-262, 2001.9.
- [5] 谷本潤, 藤井晴行; 複雑系モデルに基づくアカデミック・ソサエティの盛衰予測に関する研究 大学における研究組織と効率に関する考察, 日本建築学会計画系論文集 No.559, pp.299-306, 2002.9.
- [6] 藤井晴行, 谷本潤; 社会システムとしての学術組織のエージェントに基づくシミュレーション, 日本建築学会計画系論文集 No.561, pp.189-196, 2002.11.
- [7] 藤井晴行, 谷本潤; 意図的とみなせる行動の発生に関する思考実験, 日本建築学会計画系論文集 No.547, pp.149-155, 2001.9.
- [8] Gero, John S., Fujii, H.; A Computational Framework for Concept Formation in a Situated Design Agent, *Knowledge-Based Systems* Vol.13, No.6, pp.361-368, 2000.
- [9] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲; マルチエージェントシステムの基礎と応用 - 複雑系工学の計算パラダイム-, コロナ社, 2002.
- [10] 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 大原健志; 改良・建築-都市-土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析 第1報 モデルの理論構成及び標準解, 日本建築学会計画系論文集 No.550, pp.79-86, 2001.12.