



# 階層型自律分散モデルによる問題解決の方法論

松本, 卓也

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Date of Publication)

2016-03-15

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4006

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004006>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

# 階層型自律分散モデルによる問題解決の方法論

平成19年2月

神戸大学大学院自然科学研究科

松本卓也

---

# 目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 論文の構成	2
第2章 階層型自律分散モデル	5
2.1 はじめに	5
2.2 概要	6
2.2.1 物理ダイナミクス層	7
2.2.2 情報処理層	7
2.2.3 スーパーバイザ	8
2.3 階層型自律分散モデルの特徴	9
2.4 おわりに	10
第3章 高速道路交通システムへの適用	11
3.1 はじめに	11
3.2 高速道路交通システムにおける階層型自律分散モデルの構成	12
3.2.1 概要	12
3.2.2 道路モデル	12
3.2.3 車両モデル	14
3.2.4 運転者モデル	14
3.3 モデルの妥当性の検討	17
3.3.1 交通流の指標	18
3.3.2 シミュレーション条件	20
3.3.3 Underwood モデルとの比較…統計量	20
3.3.4 車群形成の様子…時間-空間図	20
3.3.5 自然渋滞発生の様子…サグ部	22
3.4 制限速度と交通流の関係	22
3.5 おわりに	24

---

第 4 章 資源循環システムへの適用	31
4.1 はじめに	31
4.2 資源循環システムの階層型自律分散的モデル	32
4.3 プロトタイプ・モデル	33
4.3.1 基本要素	34
4.3.2 物理的ダイナミクス	36
4.3.3 意思決定	37
4.3.4 シミュレーション手順	41
4.4 シミュレーション結果	42
4.4.1 基本シナリオ	42
4.4.2 情報的間接制御	43
4.4.3 物理的間接制御	44
4.5 微分方程式モデル	47
4.5.1 基本的な考え方	47
4.5.2 微分方程式モデル	48
4.6 シミュレーション・モデルと微分方程式モデルの比較	50
4.7 まとめ	51
第 5 章 家庭用コジェネレーションシステムへの適用	57
5.1 はじめに	57
5.2 家庭用コジェネレーションシステムの物理ダイナミクスモデル	58
5.2.1 変数	58
5.2.2 定数	60
5.2.3 関係式	61
5.3 家庭用コジェネレーションシステムの情報処理層	62
5.3.1 ニューラルネットによる需要予測	63
5.3.2 ヒューリスティックルール	64
5.4 シミュレーション	64
5.4.1 需要データの作成	64
5.4.2 シミュレーション結果	65
5.5 まとめ	66
第 6 章 結論	67
謝辞	71
参考文献	73

---

本研究に関する発表	77
付録 A 資源循環モデル詳細	79
A.1 物理的ダイナミクス詳細	79
A.2 意思決定詳細	80



---

## 目 次

2.1	物理ダイナミクス層と情報処理層. . . . .	7
2.2	階層型自律分散モデル. . . . .	8
3.1	高速道路交通システムの自律分散モデル. . . . .	13
3.2	目標速度の決定方法. . . . .	17
3.3	交通流率, 空間平均速度, 交通密度による交通特性. . . . .	19
3.4	シミュレーションによる交通特性. . . . .	21
3.5	自由流における時間空間図. . . . .	25
3.6	交通流率が最大の場合における時間空間図. . . . .	25
3.7	渋滞流における時間空間図. . . . .	25
3.8	サグ部における時間空間図. . . . .	26
3.9	実際のサグ部において計測された時間空間図 <sup>27)</sup> . . . . .	26
3.10	車両 80 台の場合の交通流率. . . . .	27
3.11	目標速度平均が 34[m/s] の場合の時間空間図. . . . .	27
3.12	目標速度平均が 44[m/s] の場合の時間空間図, その 1. . . . .	28
3.13	目標速度平均が 44[m/s] の場合の時間空間図, その 2. . . . .	28
3.14	交通量が異なるときの交通流率. . . . .	29
4.1	3 種類のエレメントからなる資源循環システムの物理ダイナミクス層. . . . .	33
4.2	製品価格. . . . .	44
4.3	リサイクル率. . . . .	45
4.4	シナリオ 1. . . . .	53
4.5	シナリオ 2. . . . .	54
4.6	シナリオ 3. . . . .	55
5.1	家庭用コジェネレーションシステム. . . . .	59
5.2	1 日の熱需要と気温の相関. . . . .	62
5.3	時間による熱需要の発生期待値. . . . .	62
5.4	1 日の電力需要と気温の相関. . . . .	63
5.5	時間による電力需要の発生期待値. . . . .	63

5.6 ある日の家庭1の電力需要とCGU1からの電力供給量. . . . . 66



---

## 表目次

2.1	各章における要点のまとめ . . . . .	10
4.1	定数の設定 . . . . .	43
4.2	情報的間接制御のシミュレーション結果 . . . . .	45
4.3	製品への補助金による物理的間接制御のシミュレーション結果 . . . . .	46
4.4	原材料への補助金による物理的間接制御のシミュレーション結果 . . . . .	47
4.5	各シナリオの設定 . . . . .	50
5.1	エネルギー効率 . . . . .	65



---

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

筆者が小学生の頃、父親の運転する車の助手席に乗っていて渋滞に巻き込まれたことがあった。私が、なぜ渋滞の先頭はもっと速く走らないのかといったことを尋ねたとき、父親が、“渋滞の先頭はどこだ？ ときいたら、後ろを走っている車の運転手がオレだよと言った”という冗談を言っていたことを、この文章を書こうとして思い出した。そのときにそれを信じたわけではないのだが、なぜ、車が多くなると、みんなノロノロ運転になってしまうのかということは当時の私にはよくわからなかった。

この、なぜ渋滞が起こるかを説明するために、よく行なわれる説明は、“複数の車両が連なって走行しているときに、先頭の車両が少し減速すると、後ろの車もそれに反応して減速を行なう。しかし、人間にはその反応にタイムラグが存在するため、だんだん強くブレーキを踏まざるを得なくなり、結局は停止してしまう。”といったものである<sup>1)</sup>。この説明には、強く自律分散的、マルチエージェント的、創発的な考えが含まれている。まず、運転者は目的地に到達するために、自分の車を前に進めることのみを考えている。そして、彼らは周りの車の情報しか得ることができず、また、全体として生じた渋滞という状態によって大きく行動に制限を受けている。前後の車とのローカルな関係の積み重ねによってシステムの大域的な挙動が生まれ、それがさらにローカルな行動に制約を与えているのである。

このように、ローカルな相互作用の積み重ねから説明できるシステムは、鳥群の行動<sup>2)</sup>、株式市場<sup>3)</sup>、棘皮動物<sup>4)</sup>など、様々なものがある。鳥たちは、周りの他の鳥との位置関係だけを考慮して飛んでいるが、全体ではまるで群れ自体が意思を持っているように行動する。株式市場などの市場では、神の見えざる手と呼ばれる価格調整機能が働いているが、それはローカルな取引の結果生まれるものである。ヒトデやナマコなどの棘皮動物は脳のような中枢神経が存在しないにもかかわらず、紐で縛ってもするりと抜け出してしまうような複雑な行動ができる。

このようなシステムのモデル化を考えると、中央集権的には扱うことができず、分散的手法が採られるが、これは非常に難しい場合が多い。その原因として、人間のような複雑な意思決定を行う要素がシステムに含まれることが多い点が挙げられる。人間の意思決定に

は、限定合理性や、情報の局所性など、簡単には取り扱えない要素が多く、モデル化の際に最も難しい部分と言えよう。しかしまた、この部分は、システムの振る舞いを決定付ける部分でもあり、疎かにすることは許されない。

本研究では、意思決定を重視した自律分散的モデルの枠組を提案する。その際、意思決定に関わる部分と、その他の物理的な部分を分けて考えることのできる階層型の自律分散システムモデルを考えることにより、人間のような複雑な意思決定機構を持つような要素を含むシステムを扱いやすくする。さらに、自律分散的なシステムに対する、マルチエージェントシミュレーション的なアプローチと、自律分散制御的なアプローチの双方を内包した枠組として、階層型自律分散モデルを提案する。また、提案モデルを用い、高速道路交通システム、資源循環システム、家庭用コジェネレーションシステムをモデル化し、シミュレーションを行うことにより、モデルの有用性やその特徴が活かされていることを確認する。また、同時にそれぞれのシステムにおけるシミュレーションにより、そのシステムに対する様々な示唆を得られることが期待できる。

### 1.2 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。まず、第2章にて階層型自律分散モデルの考え方を示した後、モデルの各層について説明する。また、階層型自律分散モデルの特徴を述べ、3章から5章における応用例における目的について整理する。

3章では、高速道路交通システムを取り上げ、階層型自律分散モデルによるモデル化を行う。高速道路交通システムの例においては、物理的要素として、道路、自動車を考え、意思決定要素として運転者を考えている。構成したモデルを用いたシミュレーションを通して、提案する階層型自律分散モデルの基本的動作について確認する。

第4章では、生産者、消費者、処理者の3種の意思決定者からなる資源循環システムをとりあげ、特に、ボトムアップ的に生成されたシステムの挙動をトップダウンに制御する枠組についてのシミュレーションを行う。ここで、ボトムアップの主体は消費者、生産者、処理者であり、トップダウンの主体としては政府・自治体などを想定する。この2者が存在するようなシステムのシミュレーションが提案モデルの中で再現できることを確認する。また、様々なシナリオを想定し、シミュレーションすることによって、トップダウン制御の効果やその難しさを調べる。また、規模の小さい問題を微分方程式によって記述し、そのモデルと結果を比較することによる、シミュレーション結果の検証について考察する。

第5章においては、家庭用コジェネレーションシステムを取り上げる。このシステムは、マンションなどの各家庭に天然ガスを入力とし、電力および熱の両方をエネルギーとして出力するユニットを設置するものである。このシステムを階層型自律分散モデルとしてモデル化し、各ユニットが自律的にガス入力量を決定する自律分散制御システムとしてシミュ

レーションを行う。その結果を通し、提案モデルが自律分散制御として利用できることを確認する。



---

## 第 2 章

### 階層型自律分散モデル

#### 2.1 はじめに

社会システムを始めとした世の中のシステムは、自律分散的に取り扱うことが有用である場合が多い。裏返すと、トップダウン的にモデル化を行ったり、中央制御的に扱うことは非常に困難であったり環境変化に対して脆弱である場合が多い。

例えば、日本というシステムを考えてみると、その構成要素としては、礎となる国土から、その地理的条件、交通網、などなどそれぞれ無限ともいえる要素が考えられるが、最も重要であるのは国民である 1 億 2 千万人の人間であることは疑いが無い。日本というシステムは巨大に過ぎるため、ここで仮りに、この日本の納豆の流通量を考えてみることにしよう。日本の納豆の流通量のモデル化である。納豆の流通量は普段はほぼ一定していると考えられるため、統計的に簡単にモデルを作ることが可能である。しかし、もしある有名テレビ番組で納豆のダイエット効果が宣伝されたらとしよう。すると消費者の需要は高まり、流通量は増えるだろう。ここでさらにその効果が虚偽であったことが放映されたらとすると、逆に需要は減り、流通量も減るだろう。ここで、この納豆の流通量のダイナミクスを予想することは難しい。統計的に得られたモデルでは、新しい状況に対しては対応できない。さて、ここで、国民の意思決定がシミュレートできた場合を考えてみよう。国民の各々の納豆を買う買わない意思決定および納豆業者の生産量をシミュレートするのである。これらのシミュレーションが可能であれば、その結果として創発する流通量を眺めるだけでよいのである。また、日本政府が国策として納豆の消費料を増やしたいと考えた場合に、採る方策としては、納豆の良さをアピールしたり、その生産に対して奨励金を出すなどの方法が考えられるが、その効果を前もって予測することは難しいだろう。しかし、これも、国民一人一人の行動をシミュレートできれば、シミュレーションの結果から自ずと分かるのである。

また、制御という観点でみると、例えば工場群の生産量を制御したいと考える場合、需要や全ての工場の全ての情報を把握することができれば、中央制御により各工場に最適な生産量を指示し、その通り生産させることは、多大な労力をつぎこめば不可能で無いように思える。しかし、例えば、機械の故障や、ある工場が火事でまるまる消失したり、といった場合に、その計画は多めに狂ってしまい、再計画にまた時間と労力を消費してしまう。ここで、

各工場がそれぞれの事情に従って、自律的に生産を行うことを考えると、トラブルなどによる環境の変化が無い場合には中央制御には効率は劣るが、非常に頑健なシステムを作ることが可能となる。また、新たな工場が建設された場合を考えても、新たに計画を作りなおす必要は無い。

以上をまとめると、

- 自律分散モデルによってシステムのシミュレーションを行い、さらにそれをトップダウンに制御することを考えたい。
- 自律分散的な制御を行いたい。

という、2つの目的があることがわかる。特に前者については、人間のような複雑な意思決定機構を持つ要素を含むものを考えたい。しかし、そのような人間をその内部に含むようなシステムを考えると、人間の意思決定のモデルを考える必要があるが、それはシステムのモデル化において特に難しい場合が多い。そこで、システムの意思決定に関わる部分、すなわち情報やその流れや意思決定主体と、それ以外のシステムの物理的部分を分け、階層構造とすることを考える。物理的部分と情報的部分を分離し、階層構造とすることによって、モデル化の見通しを良くし、システム内の物理的主体と意思決定主体のリンク構造を明確に表すことができる。本章では、上記の考えにより、階層型自律分散モデルを提案し、その概要および特徴を記す。

## 2.2 概要

基本的な考え方としては、まず、システム内の要素が相互作用を行うといった、自律分散、マルチエージェントの枠組を用いる。次に、システムの物理的側面と、情報・意思決定の側面を明確に分離することを考える。特に人間が含まれるシステムをシミュレートするとき、最も重要かつ難しいのは、その意思決定である。逆に、物理的な要素は、もちろん重要ではあるが、比較的モデル化しやすい。どのような情報を用いてどのように意思決定を行うかといった問題は、非常に難しいが、システムの振る舞いを最終的に決定づけるものである。物理的側面と、情報・意思決定の側面を分離することにより、純粹に意思決定のみを考えることができるようになり、また双方に別のアプローチを行うこともできる。

本研究で提案するモデルの模式図を図2.1に示す。ただし、この図はモデルの全体ではなく核となる部分を表しており、トップダウン制御を行うための要素は考慮していない。それを含めた全体については後述する。このモデルは大きく物理ダイナミクス層と情報処理層からなる。物理ダイナミクス層はシステムの物理的側面を表し、情報処理層はシステムの情報的側面を表す。以下、各層について詳述する。



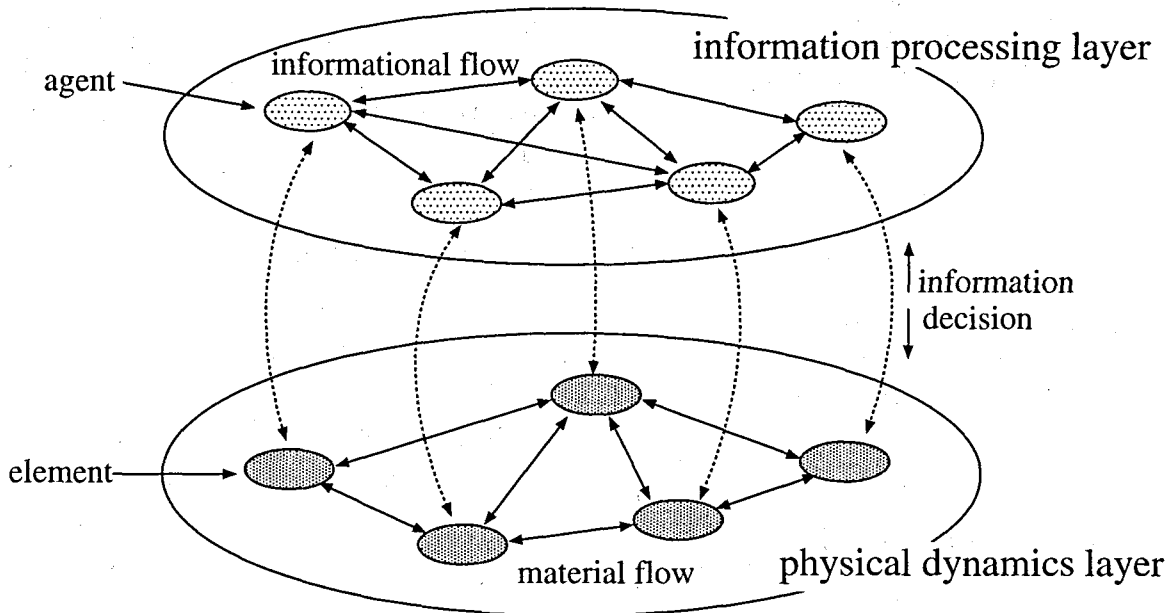


図 2.1: 物理ダイナミクス層と情報処理層.

### 2.2.1 物理ダイナミクス層

システムの物理的側面のみを扱う層を考え、これを物理ダイナミクス層と呼ぶこととする。この層は、システムの物理的主体である複数のエレメント ( $E_i$ ) とその間を流れるモノや物理的相互作用、さらに環境や物理的な場からなる層である。エレメントはモノをストックとして持ち、それを他のエレメントとやりとりすることや、また、他のエージェントと直接もしくは場を通じて間接的に物理的相互作用を行うことができる。物理ダイナミクス層のエレメントは後述の情報処理層内の意思決定主体であるエージェントのいずれかと対応しており、エージェントに自身の情報を提供するとともに、エージェントの意思決定結果に従って、行動を行うこととする。

### 2.2.2 情報処理層

情報処理層は、システム内の情報や意思決定のみを扱う層である。この層には、意思決定の主体であるエージェント ( $A_i$ ) と、その間を流れる情報、および情報の場が存在する。情報処理層内のエージェントは、物理ダイナミクス層の単数もしくは複数のエレメントと対応

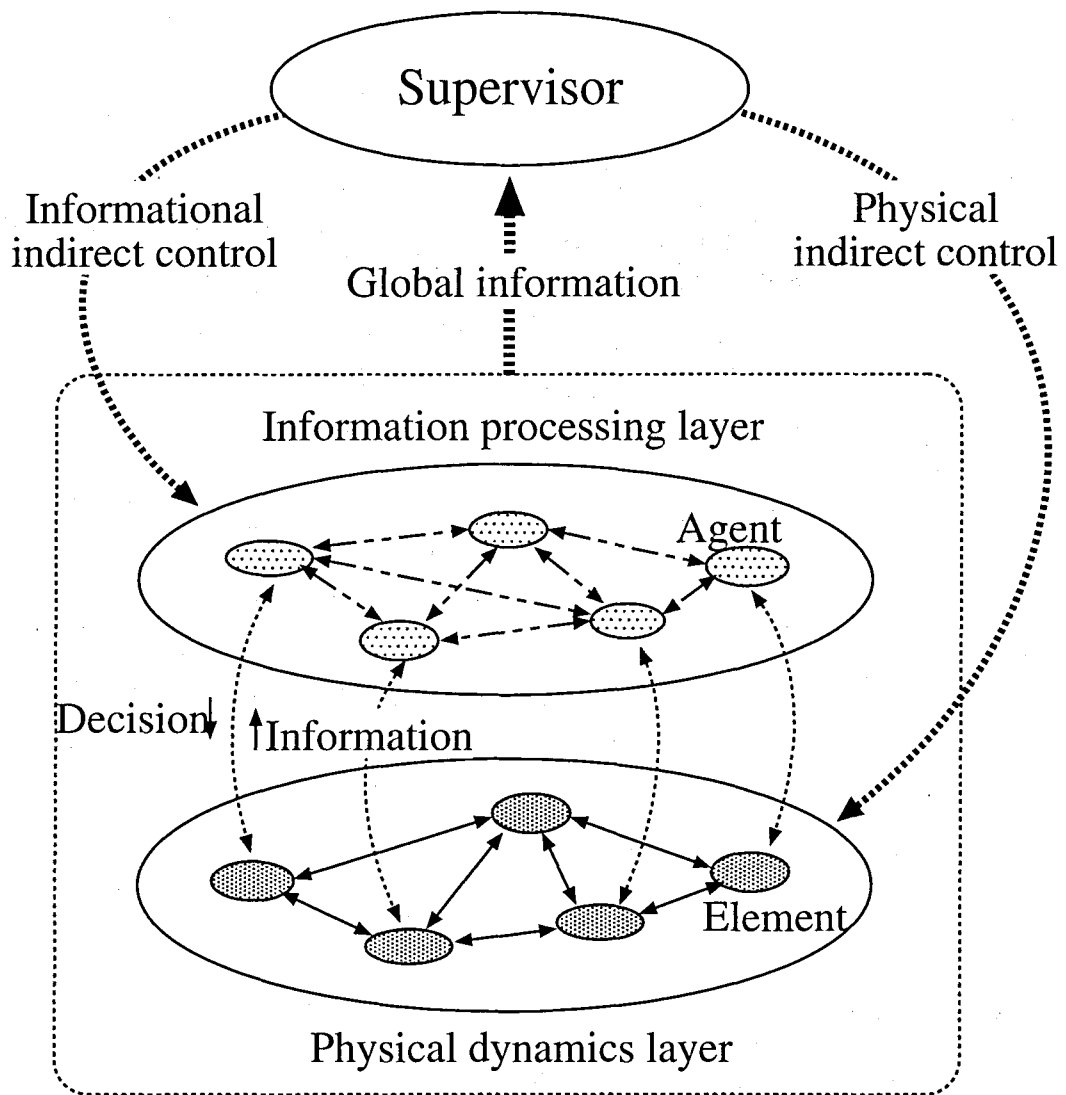


図 2.2: 階層型自律分散モデル.

しており、エレメントから情報を受け取り、他のエージェントと情報の交換をし、それらを用いて意思決定を行い、エレメントに伝える。

### 2.2.3 スーパーバイザ

前述の物理ダイナミクスと情報処理層を考えると、自律分散システムのボトムアップな挙動の生成部分を取り扱うことができる。本研究では、さらに、このボトムアップに生成されたシステムをトップダウンに制御する主体を考え、これをスーパーバイザと呼ぶ。このスーパーバイザは、システムに対し、直接・間接に制御を行う主体である。

ここで、現実のシステムを考えると、エレメントやエージェントを直接操作し制御することは、困難であると考えられる。ここでいう困難とは、制御の難しさではなく、そもそも操

作することが難しいということを含む。例えばエージェントが人間であった場合に、これを直接操作することは物理上可能であったとしても倫理上できないであろう。よしんば操作できる対象であったとしても、システム内の変数は数えきれないほど存在し、さらに操作可能な変数も大量に存在するため、それらを用いて制御を行うことは非常に困難なものとなる。従って、スーパーバイザによる制御は、システムの大域的な情報を用い、それによって、物理ダイナミクス層および情報処理層に間接的に働きかけるという形を主に考える。

本研究では、この間接的制御を行う主体スーパーバイザを、図 2.2 のように前述の 2 層に加えることで、階層的自律分散システムとする。

## 2.3 階層型自律分散モデルの特徴

提案する階層型自律分散モデルは、マルチエージェント・自律分散の枠組を用いてモデル化・シミュレーションを行う際の枠組を示すものである。従って、システム内に複数の主体が存在し、それぞれが相互に影響し合うような、社会システム、交通システム、分散ネットワークシステムなどを対象範囲としている。

物理的部分と情報的部分を分離することにより、モデルが格段に扱いやすくなることが期待できる。モデル化を行う際、本研究で主に対象とするような社会システムなどにおいては、物理的部分についてはモデル化が意思決定部分に比べてはるかに簡単であることが多い。そこで、比較的簡単な物理部分に対しては、物理部分としてモデル化を行ってしまい、意思決定部分を独立して考えることができる。これは特にシステム内の意思決定主体として人間が含まれる場合のモデル化において非常に有効であると考えられる。

物理的主体であるエレメントと、情報的主体であるエレメントを分離し、それらの結合を考えることにより、ひとつのエレメントにひとつのエージェントが対応し、意思決定を行う場合に限らず、ひとつのエージェントが複数のエレメントと結合するような場合も考えられる。これにより、ある意思決定主体が物理的世界において複数の役割を担当するような状況を再現できると考えられる。

マルチエージェントシステムにおいては、個々の要素の相互作用によってボトムアップ的に作られた大域的な挙動が、さらに個々の要素の挙動に制約を加えるといったボトムアップ・トップダウンループの考え方を用いている。ここで、主眼となるのはこの要素の挙動であり、大域的挙動はあくまでその結果生まれるものであり、制御対象は個々の要素の行動であり、システム全体として制御するものは基本的に存在しない。本論文で提案する階層型自律分散モデルでは、ここにさらにスーパーバイザというトップダウン的な制御を行う要素を追加することにより、システムを全体として制御することを考える。これにより、システムに対し、ボトムアップとトップダウンの双方からの制御アプローチが可能となることが期待できる。

表 2.1: 各章における要点のまとめ

Characteristic	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Chap. 3: Expressway Traffic	T	F	T	F	F
Chap. 4: Resources Circulation	T	F	T	T	F
Chap. 5: Residential Co-generation	F	T	F	F	F

## 2.4 おわりに

本章では、人間を含むようなシステムに対し、自律分散モデルによってシステムのシミュレーションを行い、さらにそれをトップダウンに制御すること、および、システムを自律分散的に制御したいといった2つの目的を内包した階層型自律分散モデルを提案した。以下の章では、まず、階層型自律分散システムの、物理ダイナミクス層と情報処理層の基本的な動作を確認するため、3章に高速道路交通システムを用いた例を示す。物理ダイナミクス層に道路、自動車を考え、情報処理層に運転者を考えることにより、物理的側面と情動的側面の分離を行い、シミュレーションを行い、モデルの挙動を確認する。また、スーパーバイザによる間接制御の一例として、道路の制限速度を操作することを考え、その結果を示す。

次に、スーパーバイザの間接制御に主眼を置き、4章にて資源循環システムを取り上げる。エレメント・エージェントとして消費者、生産者、処理者を想定し、スーパーバイザとしては政府などによる広報・補助金などを想定する。シミュレーションを行うことにより、物理ダイナミクス層・情報処理層によって生まれた大域的挙動をスーパーバイザが観測し制御する枠組の動作を確認する。

また、自律分散制御として提案モデルを用いる一例として、5章において、家庭用コジェネレーションシステムを取り上げ、自律分散制御のモデルとしても提案モデルが適用できることを示す。

各章におけるポイントを表 2.1 にまとめる。表内の特徴 (Characteristic) は、

- (1) マルチエージェントシミュレーションの枠組,
- (2) 自律分散制御の枠組,
- (3) 対象システム内の人間の有無
- (4) スーパーバイザによる間接制御,
- (5) エレメントとエージェントの多対1などの複雑な対応,

となっている。

---

## 第 3 章

### 高速道路交通システムへの適用

#### 3.1 はじめに

近年の交通量の増加にともない、交通問題が大きな社会問題となっており多くの研究がされている<sup>8, 9, 10, 11, 12)</sup>。

高速道路における渋滞の原因として、事故や道路工事に起因する車線の規制など原因がはっきりしている場合もあるが、発生メカニズムが明確に分かっていない自然渋滞と呼ばれる状態が日常的に発生している。その例として、人間の目では判別のつきにくいような登り坂において自然と車両速度が低下し、その結果、後続の車両がだんだんとつまっていき渋滞が発生するといったケースが挙げられる。この他にも、交通流には多様な秩序の形成などの興味深い点が数多く含まれている。

これまでに、交通流をシミュレートするために様々なモデルが考案されてきた。それらは、車両1台1台を陽に表現するマイクロモデルと、交通流を流体もしくは車群の集まりとして表現するマクロモデルに大別される<sup>5)</sup>。近年の計算機の能力の向上により、大規模かつマクロモデルでは実現できない詳細なシミュレーションをマイクロモデルを用いて行う新しい道路交通シミュレータの研究開発が数多く報告されている<sup>6, 7)</sup>。これらのマイクロモデルに基づくシミュレーションでは、車両の動きに注目し、その動作を直接表現する方法を用いている。これらの方法では、運転者が車両を思い通りに操作しているということが前提となっており、人間である運転者の能力が考慮されていないことが多い。

そこで本章では、マイクロモデルの考え方を基に、自律分散的にモデルを作成するとともに、運転者を陽に考慮し、道路と車両および運転者に対してそれぞれモデルを構築することにより、システムの物理的な側面と情報や意思決定にかかわる側面とを明確に分離して考えることができる階層型の枠組を提案する。このように分離することによって、物理ダイナミクス部分は物理モデルとして簡潔に記述でき、情報・意思決定部分には様々なエージェント・ベースのモデルを比較的容易に適用することが可能となる。本論文ではまず、高速道路における交通流の階層型自律分散モデルを構築し、車両の局所的な相互作用が大域的な交通の流れを形成し、その大域的な交通の流れが個々の車両の挙動を拘束するという、創發現象の発現を期待する。次に、モデルに基づいたシミュレーションから計算される交通流の特性と、

実際の交通流によく合致するといわれている交通特性の数学モデルとを比較し、モデルの有効性を検討する。さらに、モデルを利用するといった観点から、一例として、交通量に応じて制限速度を変更することの有効性を調べる。

## 3.2 高速道路交通システムにおける階層型自律分散モデルの構成

### 3.2.1 概要

本研究では、運転者モデル、車両モデル、道路モデルからなる高速道路交通の階層型自律分散モデルを構築する。車両モデルおよび運転者モデルは、それぞれ車両  $V_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) および運転者  $D_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) から構成される。ここで、車両モデル、運転者モデルおよび道路モデルの概略は以下の通りであり、その模式図を図 3.1 に示す。

- (a) 道路モデル：道路形状のデータ。車両の動作に制約を与えるとともに、運転者の意思決定材料の一部となる。
- (b) 車両モデル：車両  $V_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) は運転者  $D_i$  の意思決定結果に従った各種操作量（ステアリング、アクセル/ブレーキ等）を入力として、環境（他の車両、道路）との相互作用によって状態（位置や速度）を決定。
- (c) 運転者モデル：運転者  $D_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) は自車両の状態、道路モデルから得られる道路に関する情報、および他の車両に関する情報を入力として、各種操作量を決定。この際、運転者は自身の視界（情報を取得できる範囲）内の情報のみ得ることができる。

また、シミュレーションは以下の手続きに従って行う。なお、時間をタイムステップ  $k$  を用いて離散化し、連続時間  $t$  との関係は、離散単位時間  $T_s$  を用いて  $t = kT_s$  とする。

- (1)  $k \leftarrow 0$  とする。
- (2) 運転者  $D_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) はそれぞれ道路情報、他車の情報を参照し、アクセル操作量、ハンドル操作量について決定を行う。
- (3) 運転者  $D_i$  に対応する車両  $V_i$  は、運転者  $D_i$  の操作に従い、他車両や道路モデルとの相互作用により車両の位置、速度などの状態を算出する。
- (4)  $k \leftarrow k + 1$  として 2 に戻る。

### 3.2.2 道路モデル

2次元でのシミュレーションを行おうときに、地図をそのままシミュレータで用いる等の方法が考えられるが、その方法では対象とする道路の情報量がかなり大きくなり、扱いにくくなる。そのため、道路をグラフで考える方法や、レール上を走るような方法など1次元に

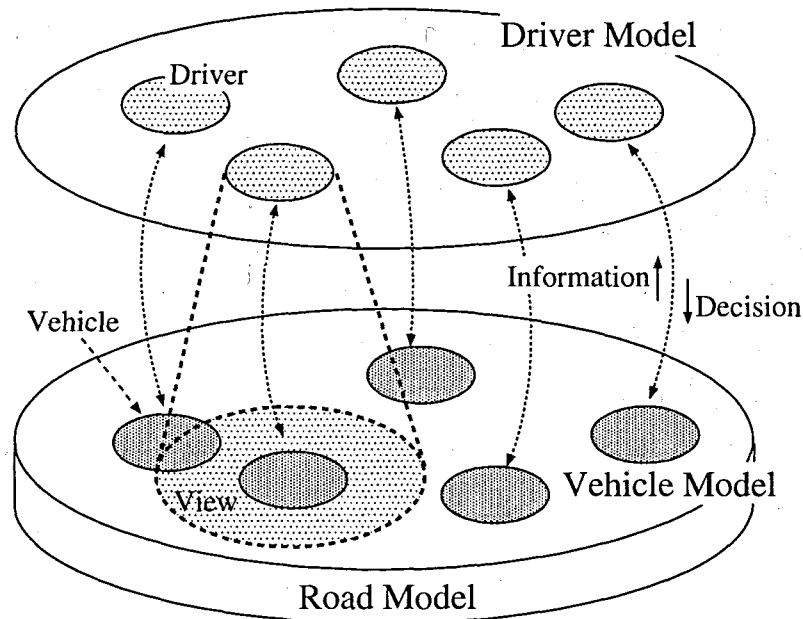


図 3.1: 高速道路交通システムの自律分散モデル.

簡略化されることが多い<sup>20, 22)</sup>. しかし、これでは運転者の操作による車両の挙動を調べるためには簡略化しすぎている. そこで、本研究ではより精緻かつ扱いやすい2次元の道路モデルを考える.

道路の設計、特に高速道路の形状の設計においては、道路の中心線が直線、円曲線、緩和曲線(クロソイド曲線)の組み合わせによって決められる<sup>22)</sup>. クロソイド曲線とは曲率の変化率が一定の曲線であり、速度一定の車両が一定の角速度でハンドルを切った際に描く車両の軌跡がクロソイド曲線になることから、高速道路などで用いられる曲線である. この中心線をもとに拡幅などの方法を用い、道路の形状が決定する. 本研究ではこの設計法に従った道路モデルを作成する. 具体的には、道路を形状(直線、円曲線、クロソイド曲線)によって分割し、各部分について長さ、曲率、幅、坂角度などの属性を持つデータベースを作成する. ここで坂角度は、道路を構成する各パーツ毎においては勾配が一定であると仮定し、その角度を示すもので、これにより、擬似的に勾配をもつ道路を扱うことができる. このような形でデータを持つことによる利点として、道路を連続量で正確に表現でき、かつデータ量が比較的少なくすむという点が挙げられる. また、従来の道路モデルでは失われがちであった道路の曲率などの幾何情報も残せるため、これらの情報を運転者の意思決定に用いることができる.

### 3.2.3 車両モデル

車両の挙動は、運転者モデルにより決定されたアクセル開度  $p(k)$  ( $-3 \leq p(k) \leq 1$ )、ハンドル操作角速度  $\omega(k)$  [rad/s]、および道路傾斜角度  $q(k)$  より加速度  $a(t)$  [m/s<sup>2</sup>] および車軸とタイヤのなす角の角速度  $\Omega(t)$  [rad/s] を求め、前後1輪ずつの2輪車に近似したモデルによって移動方向・距離を導出することによって表される。ここで、アクセル開度  $p(k)$  が負のときは、運転者がブレーキを踏んでいることを示す。

車両の加速度に関する物理モデルは、簡単のために1次遅れ系として捉え、アクセル開度が一定であった場合に十分時間がたったときの速度を  $v_\infty$  とし、時定数  $\tau$  を用い、

$$v(t+T) = v_\infty + (v(t) - v_\infty) \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \quad (3.1)$$

と表すこととする。実際には、アクセル開度  $p(k)$ 、速度  $v(k)$  [m/s]、坂の角度  $q(k)$  [rad] に関する微分方程式

$$\dot{v}(t) = \alpha_1 p(k) + \alpha_2 v(t) + \alpha_3 q(k) \quad (3.2)$$

を解き、各タイムステップ  $k$  における速度を求めるものとする。ここで、 $\alpha_1$  は車の加減速性能を表すパラメータ、 $\alpha_2$  は速度に比例して発生する負の加速度に関するパラメータ、 $\alpha_3$  は坂によって発生する加速度に関するパラメータとなる。

さらにタイヤ角速度  $\Omega(t)$  を用いて、タイヤ角を求め、これらより時間  $t+T_s$  [s] における車両の位置の座標、向きを求める。車両の物理系は簡単のため前後1輪ずつの二輪車として構築し<sup>19)</sup>、車体のヨーイングのみを考え、横滑りやピッチング、ローリングは考慮しないものとする。

### 3.2.4 運転者モデル

運転者のモデルについては、これまでも様々なもの<sup>13, 14)</sup> 現実の運転者は交通状況に対応してアクセル、ブレーキ、ハンドル等の操作を自律的に行っている。これらの操作は複雑で高度であり、不確定的である。このような意思決定をできる限り正確にかつ効率的にモデル化することを考える。

運転者が意思決定に用いる情報は自車両の速度や状態、他車両との相対速度や車間距離、道路の形や障害物などの情報であり、運転者は希望の速度を保ち、希望の軌跡を描くようにハンドル・アクセルの操作量を決定する。ここでは運転者の行動を、(1) 運転操作に必要な情報の収集、(2) 目標とする状態の設定、(3) 目標状態を実現するための操作、と3段階にわけて考える。現在、(1) に関しては運転者は完全に情報を取得できるものとしている。また運転者は通常、かなり高度な先読みをして運転していると考えられ、このことも考慮して意思決定方法を以下のように定めた。



### ハンドル操作

通常走行中のハンドル操作における目標とは走行中の車線の中心線であると考えられる。車線変更の意思があるときには、隣の車線の中心線が目標となる。ハンドル操作に関する予測として、道路形状によるもの、ずれの予測によるものを考える。

道路形状による予測とは、前方の道路形状を用いた予測である。前方の道路の形状を認識し、直線または円曲線ならばハンドル角は一定とする。クロソイド曲線のように曲率が変化している場合、その変化を表すクロソイド・パラメータ  $A$  を経験的に読みとれると考え、ハンドル操作角速度  $\omega$  [rad/sec] を  $\omega = \frac{v\dot{\theta}}{A^2}$  と決定する。ここで、 $v$  は車両の速度、 $b$  はホイールベースであり、速度とクロソイド・パラメータの正しい値を読みとれた場合は道路に沿って走ることができる。

またずれに関する予測とは、現在の状態（アクセル開度とハンドル角）を変化させなかった場合の  $k_h$  タイムステップ後のずれとし、 $\hat{z}(k+k_h)$  と表す。そしてその予想が道路に沿うようにハンドル操作を行う。

経験によってある程度は予測で走行することが可能であると考えられるものの、それだけでは目標からのずれの発生を避けられず、現実的にはそれだけで運転しているとは考えにくい。現在の状態と目標との差を埋めるような修正も行っていると考えるのが自然である。そこで、ずれを修正するような運転操作として、道路とのずれの量およびずれの変化量に応じた修正を加える。さらに道路と車両のなす角およびその変化量に応じた修正も加える。これらの意思決定方法を組み合わせて最終的なハンドル操作を (3.3) 式のように決定する。

$$w((k+1)) = \begin{cases} -\beta_1 z(k) - \beta_2 \dot{z}(k) - \beta_3 \theta(k) - \beta_4 \dot{\theta}(k) \\ \quad -\beta_5 \hat{z}(k+k_h) & \text{(straight, circle)} \\ -\beta_1 z(k) - \beta_2 \dot{z}(k) - \beta_3 \theta(k) - \beta_4 \dot{\theta}(k) \\ \quad -\beta_5 \hat{z}(k+k_h) + \frac{v(k)b}{A^2} & \text{(clothoid)} \end{cases} \quad (3.3)$$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  はパラメータ、 $z(k)$  はタイムステップ  $k$  における道路の中心とのずれ、 $\theta(k)$  は時刻タイムステップ  $k$  における道路中心線と車軸のなす角度である。

### アクセル操作

ミクロモデルの道路交通シミュレータにとって、車両速度の決定はシミュレータの性能を決める最も重要な部分のひとつである。実際に多くのシミュレータではその部分だけを切り出して、一次元でモデルを作成していることが多い<sup>15)</sup>。古くから使われているモデルとして追従モデル<sup>16, 23)</sup>がある。追従モデルと同様、よく使われているモデルとして、最適速度モデル<sup>17)</sup>がある。このモデルは最適速度を前方車との車間距離などから決定し、その最適速度に自車速度を合わせるようにアクセル操作量を決定するモデルである。追従モデルに比

べると、現実の交通流により近い挙動が期待できる。また、さらに複雑なモデルとして、一般化力モデル<sup>18)</sup>があるが、最適速度を用いている点は最適速度モデルと同様である。

本モデルにおいても加速度・速度を決定するアクセル・ブレーキ操作は重要な要素である。ここでは、最適速度モデルの考え方をもとに、運転者がまず前方車との関係から目標速度を決め、それに追従させるようにアクセル操作を決定するような意思決定方法を考える。

### 目標速度の決定

目標速度を決めるための主要な判断基準としては、前方車の速度に合わせようとする、前方車との車間距離を保とうとする、希望の速度で走ろうとする、などがあるが、ここでどの判断基準を用いるかは車間距離と相対速度によって変化すると考えられる。そこで、まず自車速度  $v$  から目標車間距離  $d_t$  をパラメータ  $\gamma_1, \gamma_2$  を用いて

$$d_t(k) = \gamma_1 v(k) + \gamma_2 \quad (3.4)$$

と計算し、運転者が持っているパラメータである希望速度  $v_w$ 、前方車を意識する車間距離  $d_a$  と前方車速度  $v_a(k)$ 、前方車との車間距離  $d(k)$  より、目標速度  $v_t(k)$  を、 $v_w > v_a$  のとき、

$$v_t(k) = \begin{cases} \frac{v_a(k)d(k)}{d_t(k)} & (d(k) < d_t(k)) \\ \frac{(v_w - v_a)(d(k) - d_t(k)) + v_a(k)}{d_a - d_t(k)} & (d_t(k) < d(k) < d_a) \\ v_w & (d_a < d(k)) \end{cases} \quad (3.5)$$

$v_w \leq v_a$  のとき、

$$v_t(k) = \begin{cases} \min \left\{ \frac{v_a(k)d(k)}{d_t(k)}, v_w \right\} & (d(k) < d_t(k)) \\ v_w & (d_t(k) < d(k)) \end{cases} \quad (3.6)$$

のように定める。(3.5)式および(3.6)式の各変数、定数の関係をそれぞれ図3.2(a)および図3.2(b)に図示する。

### 目標速度への追従

目標速度をもとに、どのようにアクセルを操作するかについて考える。人間は現在の状況だけではなく、アクセル・ブレーキ量に対して速度がどのように変化するかを予測して操作を行っていると考えられる。また予測に基づかない場合でも、アクセル・ブレーキ操作が速度に即座には反映されず、遅れて現れることを知っている。そこで、まず車の動特性に基づきアクセル操作に対する速度の変化を予測するという作業を導入する。

車両の動特性を示す(3.2)式から坂を無視し、アクセル開度  $p$  を定数とした場合の微分方程式を解き、時間  $t_t$  後に速度  $v_t$  になるようなアクセル開度

$$\hat{p}_m(k) = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{v_t(k) - v(k) \exp \alpha_2 t_t}{1 - \exp \alpha_2 t_t} \quad (3.7)$$

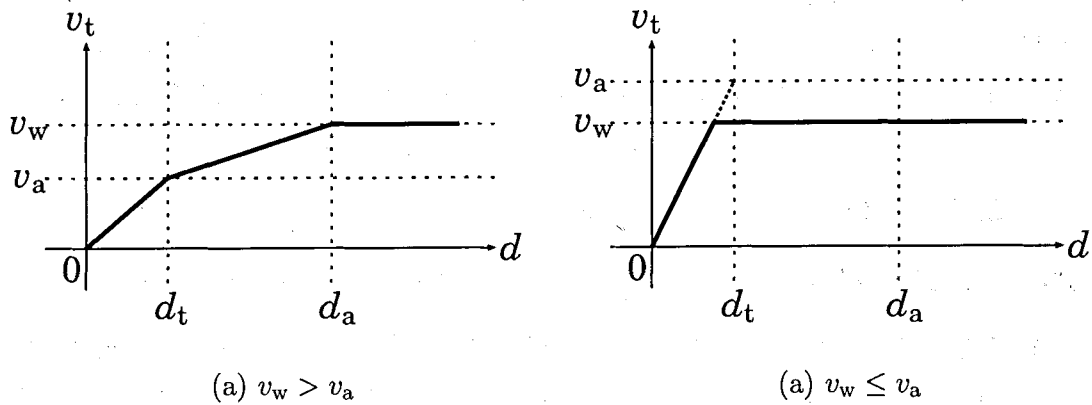


図 3.2: 目標速度の決定方法.

を求め、運転者は基本的にこのアクセル開度に沿って意思決定を行うものとする。また、ブレーキランプは運転者の操作に多大な影響を与えていると考えられ、その影響を考慮するため、前方車のブレーキランプが点灯し目標車間距離よりも車間距離が短かった場合、

$$p_b(k) = -\frac{2(d(k) - d_t(k))^2}{(d_t(k))^2} \quad (3.8)$$

のような反射的な操作を行う。このことで衝突を回避することができる。以上をまとめ、

$$p(k) = \hat{p}_m(k) + p_b(k) \quad (3.9)$$

とアクセル・ブレーキ操作を決定する。さらに、予測によるずれを修正するために、 $t_1$  秒間目標速度より低いまたは高いままの速度であった場合には、速度に比例した量の修正を考慮し、

$$p(k) = \hat{p}_m(k) + p_b(k) + \gamma_3(v_t(k) - v(k)) \quad (3.10)$$

とアクセル・ブレーキ操作を決定する。

### 車線変更

各ドライバーは、目標速度よりも前方車が一定速度以上遅く、前方車との車間距離が一定以下であり、隣車線の前方車速度が現在速度より速い場合に車線変更(移りたい車線を目標車線とする)を行う。

## 3.3 モデルの妥当性の検討

モデルの妥当性を確認するため、運転者モデルにおける意思決定方策やそのパラメータを実際の運転者の行動と比較することは重要なことであるが、それは非常に困難である。そこで前章で導入した運転者モデルのパラメータを妥当と思われる値に設定し、それによって発

生ずる交通流から得られたマクロな指標を、実際の観測データから得られた交通流の特性を表すモデルと比較することによってモデルの妥当性の評価を行う<sup>24)</sup>。さらにシミュレーションの様子を観察することで見られる状況と、現実に起きている状況の知見とを比較する。

### 3.3.1 交通流の指標

交通流を表す代表的な指標として、交通密度、平均速度、交通流率がある<sup>25)26)</sup>。

**交通密度  $K$**  道路の単位距離の区間上に、ある瞬間に存在する車の台数を交通密度 (traffic density) という。交通混雑を最も忠実に表現できる指標であり、交通密度が大きくなるに従って、感覚的には混雑がひどくなってくると感じる。実際には写真や、区間両端の通過台数から求めることができる。

**平均速度  $V$**  平均速度には、測定地点を1ヶ所に固定して、ある時間に通過する何台かの車の速度を測定し、その平均を取時間平均速度 (time mean speed) と、ある瞬間に区間上に存在する何台かの車の速度を測定し、その平均を取る空間平均速度 (space mean speed) の2種類がある。ここでは、計算の簡単のため空間平均速度を指標として用いる。

**交通流率  $Q$**  道路上の1地点をある時間に通過する車の台数を単位時間あたりの交通量に換算したものを交通流率 (flow rate) という。年々の変動、季節・月による変動、曜日による変動、1日内の時間単位の変動やもっと短い時間単位の変動等が見られる。

ここで、交通流率を  $Q$  [台/h]、空間平均速度を  $V_s$  [km/h]、交通密度を  $K$  [台/km] とすると、これらには物理的に

$$Q = KV_s \quad (3.11)$$

の関係がある。また、従来、道路交通についての実測値および理論的考察に基づいて、速度  $V_s$  と密度  $K$  の定量的関係を表すモデルが多く導かれている。実際は、勾配、ボトルネックからの距離などの道路条件や、制限速度、大型車混入率などの交通条件により異なるため、モデルを一つに特定することはできないが、その中で、指数型モデル (Underwood モデル)

$$V_s = V_f e^{-K/K_c} \quad (V_f, K_c \text{ はパラメータ}) \quad (3.12)$$

は、実際に観測される状況によく一致するモデルとして知られている。図3.3は (a) Underwood モデルによる  $K$ - $V$  曲線 (密度と速度の関係)、(b)  $K$ - $Q$  曲線 (密度と交通流率の関係)、(c)  $Q$ - $V$  曲線 (交通流率と速度の関係) を示している。 $K$ - $Q$  曲線の極大値  $q_c$  はその道路が許容できる最大交通量で、これはこの道路の交通容量である。この最大交通量が発生する際の交通密度  $k_c$  を臨界密度 (critical density)、速度  $v_c$  を臨界速度 (critical speed) という。渋滞で速度がゼロの状態における密度  $k_j$  を飽和密度 (jam density) という。 $v_f$  は自由速度 (free speed) で、自由走行車の平均速度である。

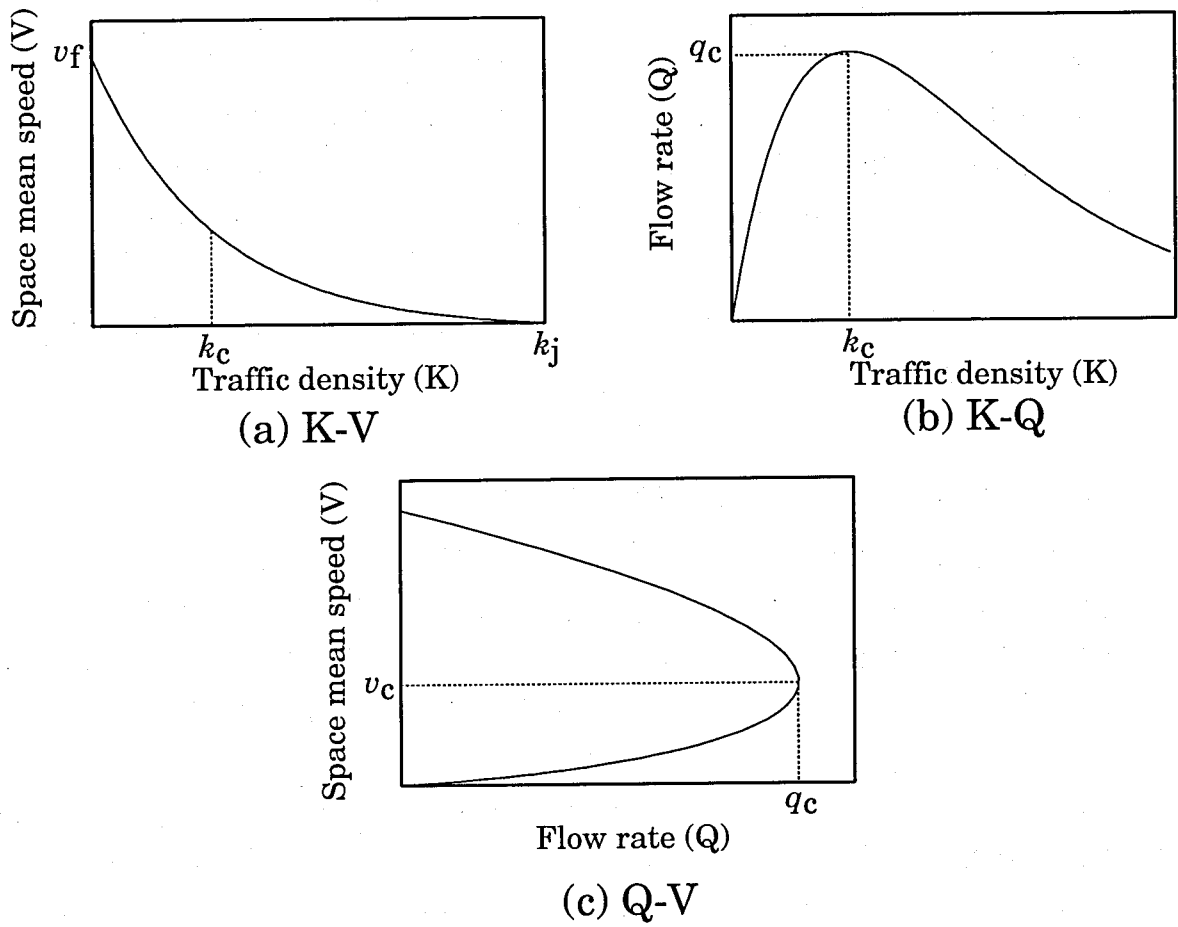


図 3.3: 交通流率, 空間平均速度, 交通密度による交通特性.

### 3.3.2 シミュレーション条件

シミュレーションを以下の条件を用いて行った。

- 周回長 1579.04 [m] の 2 車線，車線幅 5m の周回道路を用いる。
- 車両は始点より 1 秒間隔でランダムに左右の車線より道路へ流入する。
- 車両は加減速の鈍い大型車を 30 % 含む。
- 運転者の目標速度は平均 30 [m/s]，分散 5 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] の正規分布に従ってランダムに決定される。これは実測による地点速度の分布が正規分布に近似される<sup>26)</sup> ことに依る。
- 運転者の車線変更を我慢する時間は，1 [s]，10 [s]，1000 [s] のからランダムに決定する。
- 運転者，車両のその他のパラメータは全ての車両，運転者で同一とする。各パラメータは，車両の挙動が自然に見えるようにチューニングし， $T_s = 0.1$ ， $\alpha_1 = 10$ ， $\alpha_2 = -0.2$ ， $\alpha_3 = -0.4$ ， $\beta_1 = -0.001$ ， $\beta_2 = -0.13$ ， $\beta_3 = -0.004$ ， $\beta_4 = -0.55$ ， $\beta_5 = -0.001$  とした。

以上の条件を用いて 20 分間のシミュレーションを行い，開始から 15 分後から 20 分後の間の交通特性を計測する。

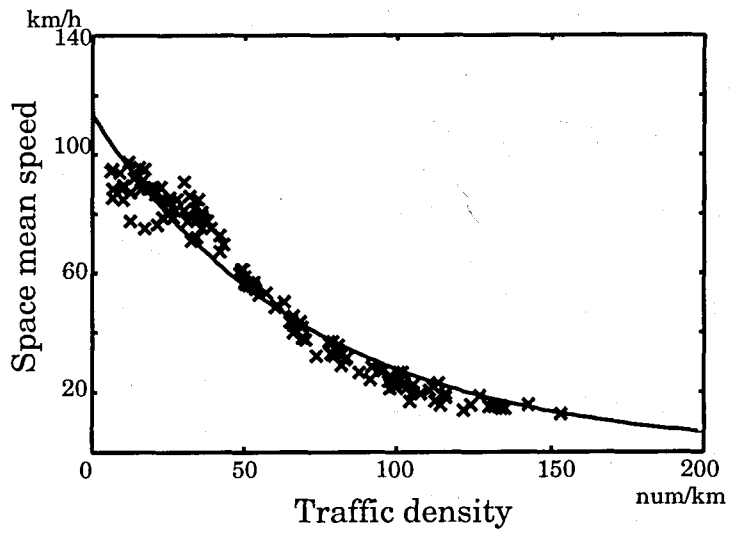
### 3.3.3 Underwood モデルとの比較…統計量

道路を走行する車両数を 10 台から 200 台まで 5 台刻みで，それぞれ乱数を変えながら 3 回実行し，K-V 特性，K-Q 特性および Q-V 特性をそれぞれ図 3.4 に示す。同時に，最小二乗法を用いて (3.12) 式の Underwood モデルのパラメータを  $V_f = 113.124$ ， $K_c = 70.3592$  と求めた。Underwood モデルによる K-V 特性，K-Q 特性および Q-V 特性の曲線を図 3.4 に併せて示す。

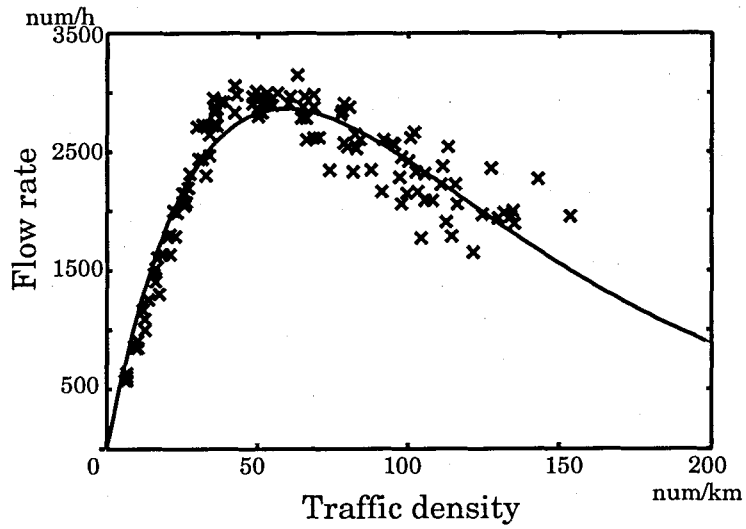
図 3.4 に示されているように，シミュレーション結果は，Underwood モデルが示す，マクロな交通特性をよく表せていることがわかる。図 3.4(c) において，空間平均速度が大きい場合に若干のずれが見られるが，これは，運転者の目標速度の平均を 108[km/h] と設定してあるため，運転者はいくら道路が空いている状態であってもそれ以上の速度で走ろうとしないことが影響していると考えられる。

### 3.3.4 車群形成の様子…時間-空間図

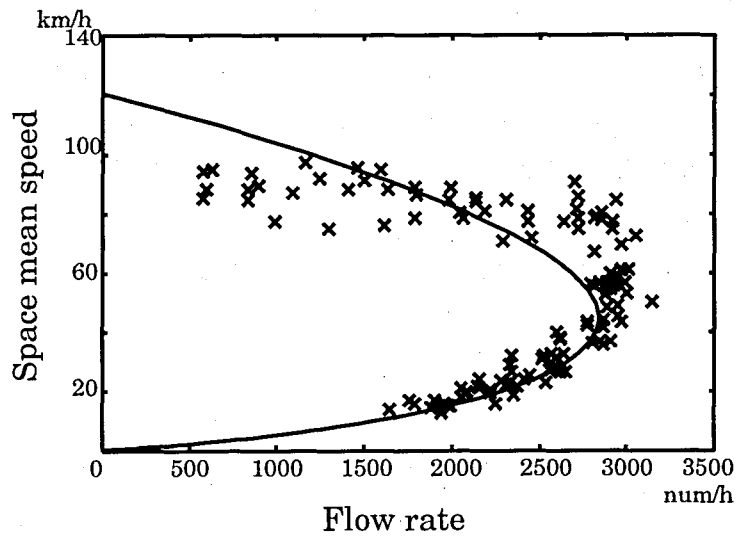
次に，交通流率の低く自由流となっている状態，交通流率が最大となる状態，渋滞により交通流率が低い状態の 3 つの状態に関して，車両の位置の時間変化の図を図 3.5，3.6 および 3.7 に示す。1 台の車両の軌跡が 1 本の線で示され，線の傾きは車両の速度を表す。濃く見える部分は速度が低下している部分であり，渋滞状態を示す。図が周期的なパターンを示す



(a) K-V



(b) K-Q



(c) Q-V

図 3.4: シミュレーションによる交通特性.

のは、周回路を用いているためである。

### 3.3.5 自然渋滞発生の様子…サグ部

現実の高速道路において、人間が気づかないような緩い下り坂から緩い上り坂への部分はサグと呼ばれ、自然渋滞の発生の起点として知られており、高速道路の単路部での自然渋滞の大半がサグで発生しているといわれる<sup>27)</sup>。

ここでは、サグにおける、シミュレーションにより得られた結果と実際の観測データを比較する。道路の475 [m] 地点から641 [m] 地点の166 [m] の区間を2 [deg] の上り勾配とし、その地点周辺での車両位置の時間変化を図3.8に示す。2本の横線の間が登り勾配となっている。また、東名高速道路東行き秦野サグ地点を上空200 [m] からビデオカメラで撮影し、渋滞の発生時に追い越し車線に到着した39台で構成された車群について、観測データを整理したもの<sup>27)</sup>を図3.9に示す。

図3.8および3.9より、両者ともに、サグ部より速度低下の波がだんだん速度低下幅を大きくしつつ上流に伝播していく様子が観察でき、非常によく似た傾向を持っている。

以上、本節では、提案したモデルによるダイナミクスをunderwoodモデルと比較し、また通常状態やサグなどでの様子を現実のものと比較することによって、モデルがある程度の妥当性をもつことを示した。次節では、このモデルを用い、制限速度の違いによる交通流の変化を調べる。

## 3.4 制限速度と交通流の関係

交通量が増えると制限速度を下げ、渋滞を未然に防ぐというシステムが2004年夏にフランス南部の高速道路に試験導入された。このシステムは、ドライバーがわれ先にアクセルを踏むよりも、そろって速度を落として走る方が渋滞がおきにくいという効果を狙い、交通量に応じて制限速度を110, 90, 70 [km/h] の3段階に変化させるものである。ここでは、制限速度の変化により運転者の希望走行速度が変化すると考え、希望走行速度の平均によって交通流率 $Q$ がどのように変化するかをシミュレーションによって観察し、このシステムの効果を検証する。

シミュレーションの設定は以下のとおりである。始点から425 [m] の地点で車両を観測する。車両は1秒おきに道路へ流入し、20分間のシミュレーションを行う。交通流特性の計測は、最後の10分間を対象に行う。その他、特記しない条件については、3.3.2節に従うものとする。

図3.5より自由流状態において、車群が形成されていることがわかる。これは運転者の目標速度が異なっているからであり、速い車は遅い車に追い付き遅い車を先頭に車群となる。



実際に高速道路では遅い車両を先頭にして車群を構成する現象が観察されている。また、図中いたるところに見られる細かな乱れは車線変更による影響であり、他車の走行が妨げられている様子や、車線を変えて速度を上げて走行する様子が観察できる。

図 3.6 は交通流率が最大となる場合の図である。この状態では多少の疎密波を形成しながらも大きな渋滞は発生せず、バランス良く車両が走行していることがわかる。また車線ごとに速度の違う車群が存在し、メッシュのような模様が現れている。また疎密波は、時間とともに道路の上流に向かって位置を変えている。

図 3.7 は交通流率が小さい場合の図であり、濃く見える部分が多く存在し、渋滞が発生していることが分かる。このシミュレーションでは渋滞の原因となるような障害物や合流などは考えていないため、これは自然渋滞である。ここでも渋滞が上流に向かって移動している様子をはっきりと見ることができる。

道路に 80 台の車を走行させ、運転者の希望走行速度の平均を 20 [m/s](72 [km/h]) から 60 [m/s](216 [km/h]) まで 2 [m/s] 刻みで変化させ、それぞれ 10 回ずつ乱数を変えたシミュレーションを行った。その結果を図 3.10 に示す。

図 3.10 より、希望速度が 35 [m/s] 付近までは、希望速度の増加に従って、それに比例する形で交通流率が増加しているが、それ以上の希望速度の増加に対しては交

通流率が緩やかに減少していることがわかる。また、大き過ぎる希望速度に対しては分散が大きくなっていることがわかる。

ここで、交通流率の平均が最も大きくなっている、目標速度が 34 [m/s] のときの時間空間図を図 3.11 に示す。また、目標速度が 44 [m/s] のうち、比較的交通流率が小さいときと大きいときの時間空間図をそれぞれ図 3.12 および 3.13 に示す。図 3.11 と図 3.12 の比較により、運転者の希望速度が大きい場合には、図 3.12 のように完全な渋滞状態が形成されてしまい、それが交通流率を下げる原因となると考えられる。希望速度が小さい場合には、図 3.11 のように、半渋滞状態が散見されるが、長時間停車してしまうような状況はほとんど無く、比較的車がスムーズに流れることにより交通流率が大きくなっていると考えられる。また、希望速度が大きいにもかかわらず、比較的交通流率が大きい場合(図 3.13)には、大きな渋滞が見られない。したがって、希望速度平均が大きい場合が必ずしも交通流率の低下を引き起こすわけではないが、その要因となる完全な渋滞が作られてしまう可能性が大きくなると考えられる。

さらに、交通量による違いを確認するために、車両台数を 50, 60, 70, 80, 100, 120 台としたときの結果を図 3.14 にあわせて示す。一定長の周回道路を用いているため、車両台数と交通量は比例の関係にある。図 3.14 より、目標速度が小さい場合には、目標速度と交通流率はほぼ線形の関係にあることが分かる。また、50 台以外の場合には、車両台数が大きくなるにつれて、小さい目標速度で交通流率は最大値を示し、それ以上の目標速度の増加に対しては、交通流率は緩やかに減少することが分かる。したがって、ある程度以上の交通量

に対しては、交通量に比して、制限速度を変化させることによる交通流率の増加、すなわち渋滞の緩和が期待できることがわかった。しかし、その効果は劇的ではなく、平均して交通流率の約10%程度であろうこともわかった。

### 3.5 おわりに

本章では、高速道路における交通流を、各車両ごとに運転者が自律的に意思決定を行って車両を操作する自律分散モデルとして捉え、さらに物理法則に基づく部分と意思決定にかかわる部分を分離することにより、階層型自律分散モデルの枠組においてモデル化し、シミュレーションを行った。

そのモデルを用いたシミュレーション結果の統計値と、交通特性の数学モデルとを比較し、概ね一致していることを確認した。また、シミュレーション結果におけるマクロな挙動が現実の交通流において観測される粗密波やサグ部での挙動を再現していることを確認した。これらの結果により、提案したシミュレーション・モデルは一定の妥当性を有するものであると判断できる。さらに、交通量に応じて制限速度を変化させるという取り組みの効果を検証するために、制限速度によって目標速度に変化が生じたときの交通流率の変化を観察し、その効果の程度を示した。

本章は、階層自律分散モデルの基本的な動作の確認を主題とするものであり、一定の成果が得られていると考えられる。今後は、実際の交通流からの観測値との比較によって提案モデルの妥当性を検討するとともに、実際的なシミュレーションを通して、モデルの利点を定量的に分析していく予定である。モデルそのものの改良点としては、道路の分岐・合流や料金所などのより複雑な交通流への対応や、より実際の人間のものに近い運転者の意思決定方法を探ることなどが挙げられる。

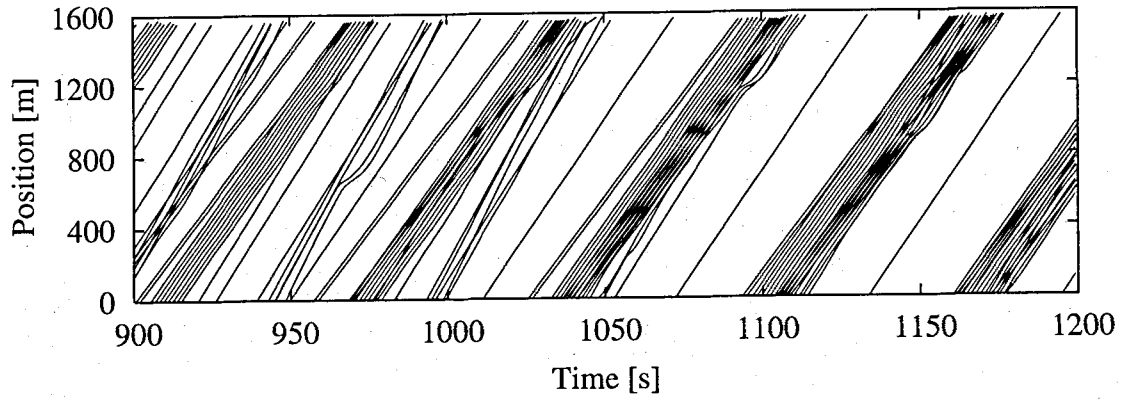


図 3.5: 自由流における時間空間図.

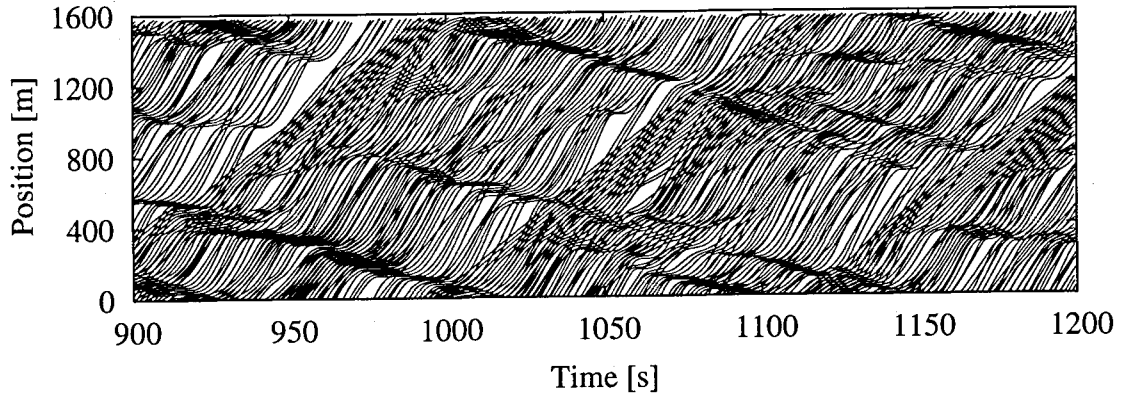


図 3.6: 交通流率が最大の場合における時間空間図.

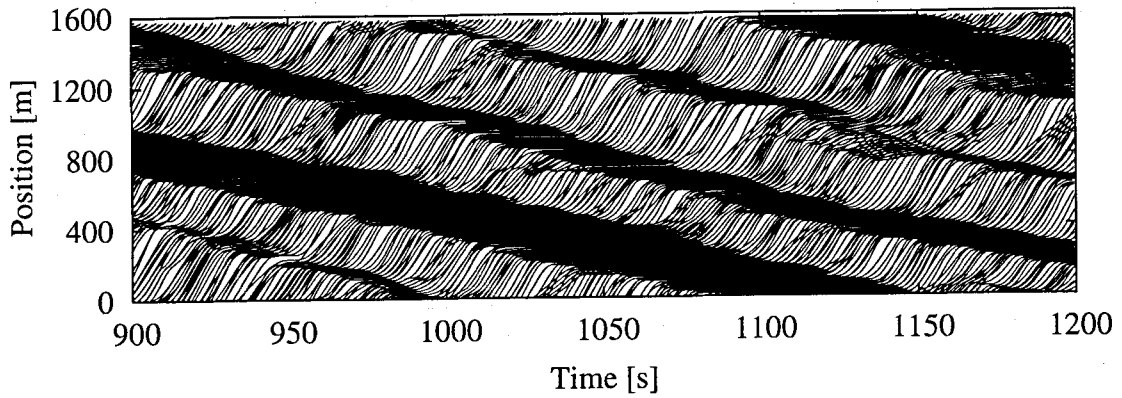


図 3.7: 渋滞流における時間空間図.

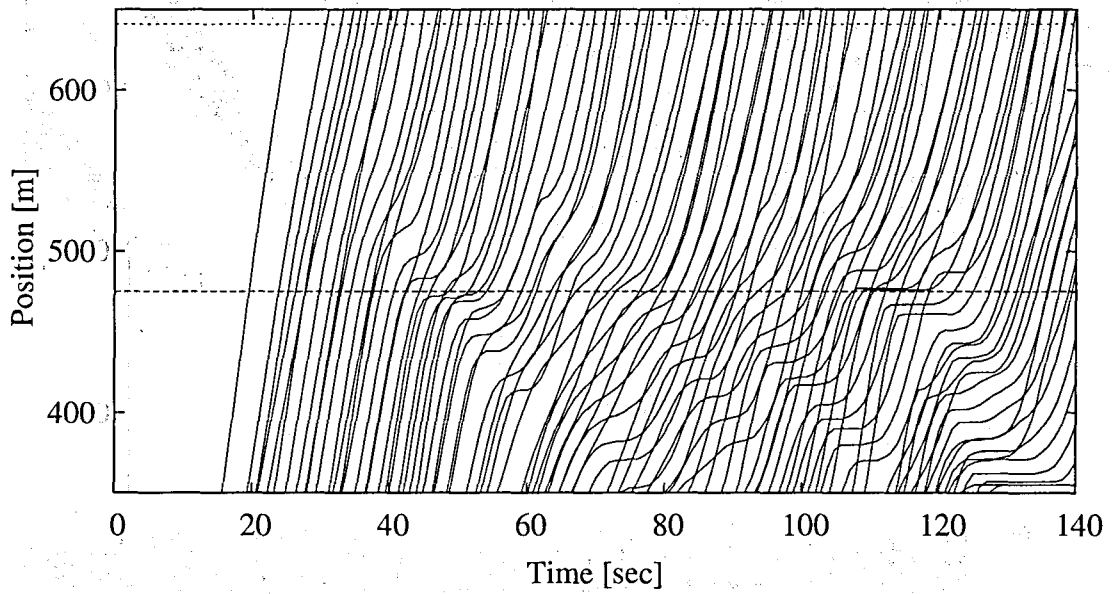


図 3.8: サグ部における時間空間図.

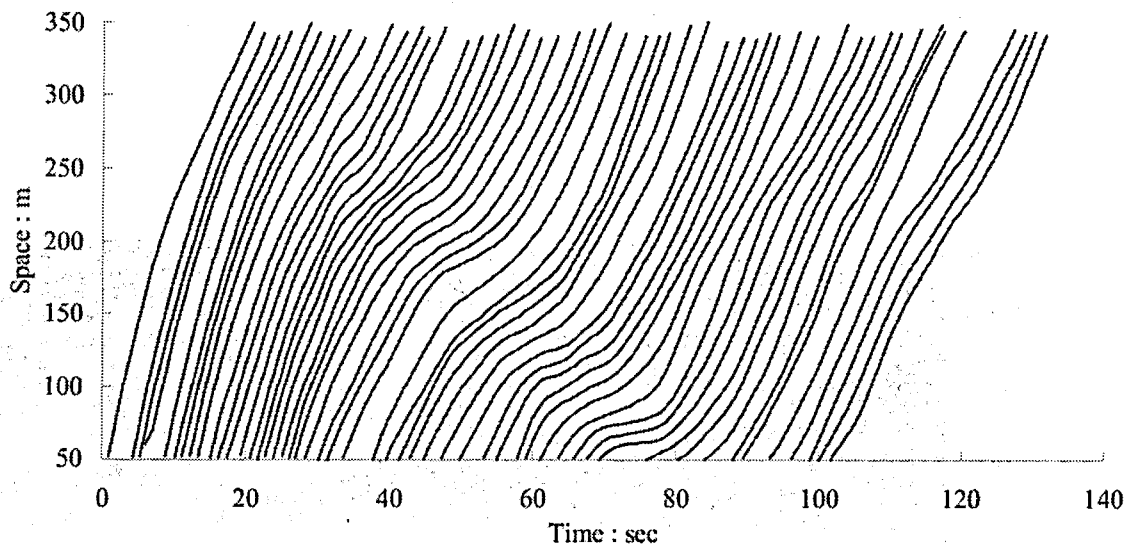


図 3.9: 実際のサグ部において計測された時間空間図<sup>27)</sup>.

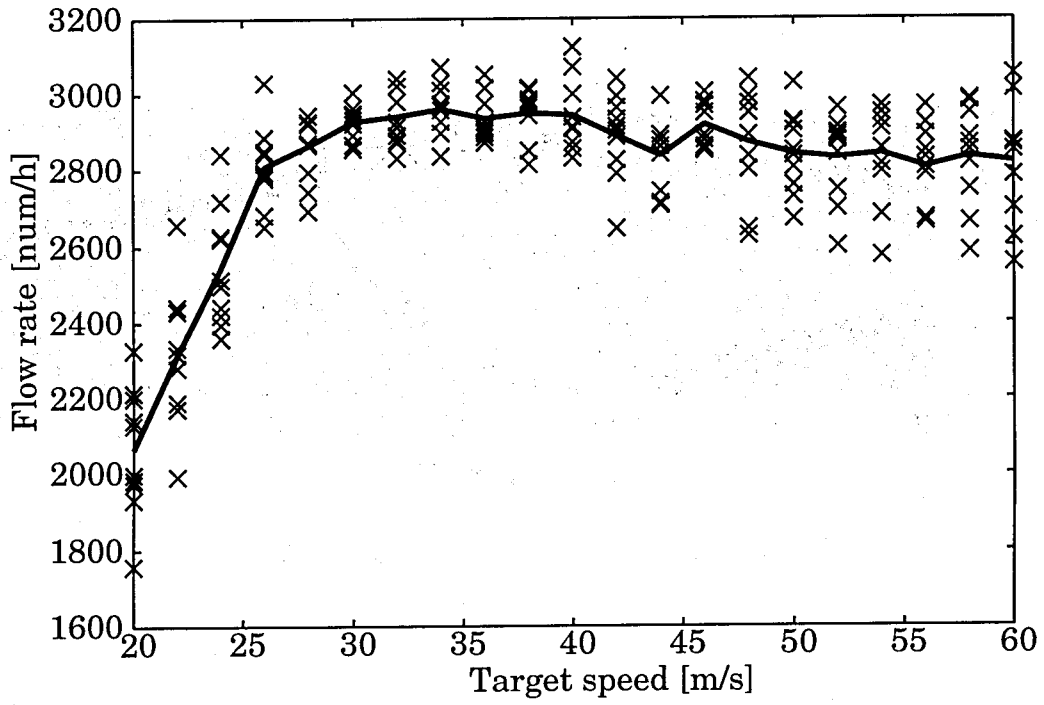


図 3.10: 車両 80 台の場合の交通流率.

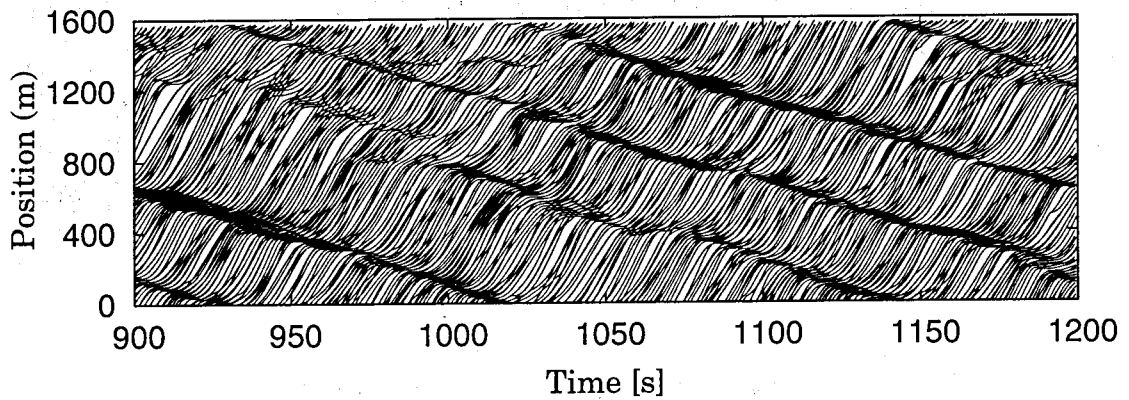


図 3.11: 目標速度平均が 34[m/s] の場合の時間空間図.

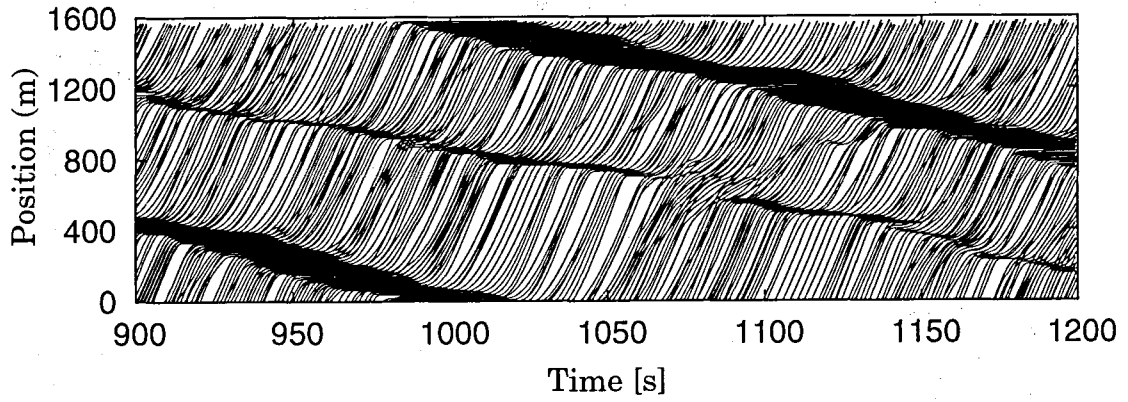


図 3.12: 目標速度平均が 44[m/s] の場合の時間空間図, その 1.

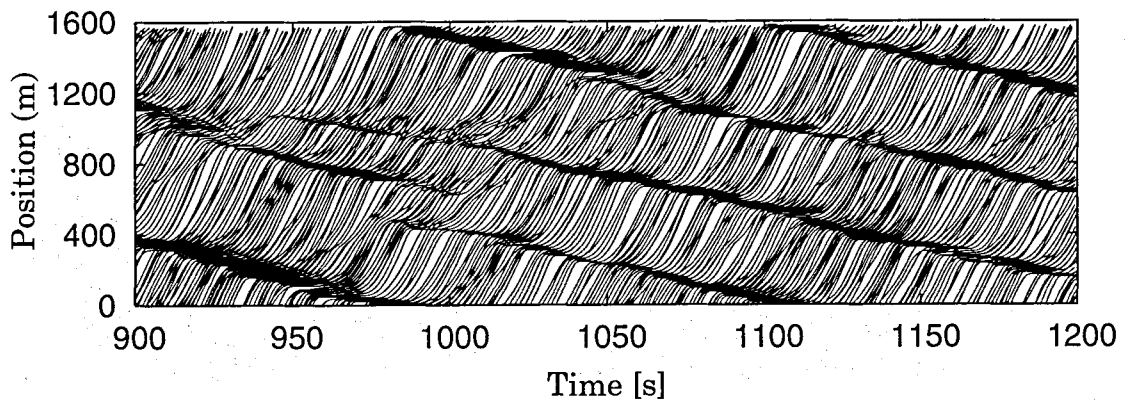


図 3.13: 目標速度平均が 44[m/s] の場合の時間空間図, その 2.

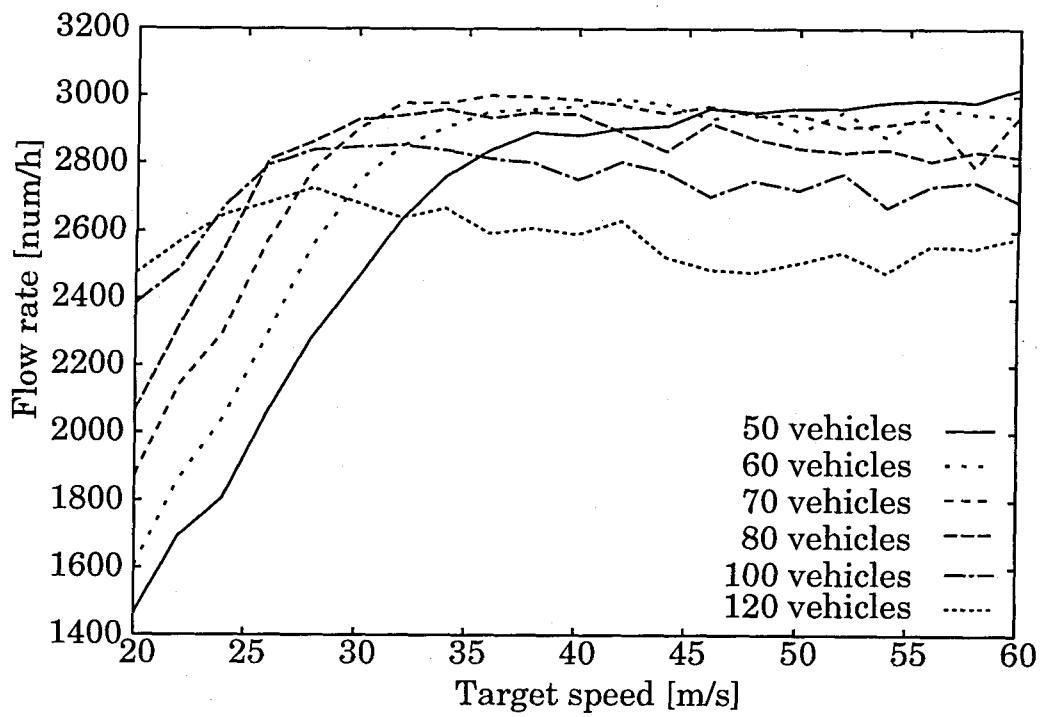


図 3.14: 交通量が異なるときの交通流率.





---

## 第 4 章

### 資源循環システムへの適用

#### 4.1 はじめに

近年、持続的発展が可能な資源循環型社会を実現しようという動きが活発化してきており<sup>28, 29)</sup>、そのためには資源循環システムを設計し維持するための方法論が不可欠である<sup>30)</sup>。この循環型社会の実現には、これまでも様々な取り組みがなされており、それらは、政府などのスーパーバイザによるトップダウン的アプローチと、消費者や企業などの振舞の結果としてのボトムアップ的アプローチに大別される。このうち、トップダウン的アプローチは、社会全体への高い制御性とそれに伴う効果を期待できるが、それゆえに、社会としての活気を損なってしまう恐れがある。一方、ボトムアップ的アプローチは活気を損なう恐れは無いが、社会全体に資源循環のループを形成するには到っていない。これら2つのアプローチを融合し、互いの長所を取り入れ、かつ短所を互いに補い合うようなアプローチの方法論が求められる<sup>31, 32)</sup>。

資源循環システムは、様々な要素が有機的につながりループ構造を形成する非常に複雑なシステムである。このような複雑なシステムの一例として、複雑系経済学において提唱されている人工市場がある<sup>33)</sup>。

人工市場は、多数のエージェントの相互作用によりボトムアップにシステム全体の挙動が作られ、それがまた個々のエージェントに影響するといったボトムアップ・トップダウンのループを持つという特徴を持ち、価格形成などのマクロな現象をエージェントの意思決定や行動などのミクロな要素に関連づけて考えることができる<sup>33)</sup>。しかしながら、モデル化の際には、ボトムアップ的な挙動をモデル化することに焦点が当てられ、トップダウン的な制御ルール等は陽には扱われていない。我々は、外部からトップダウン的な制御を行なうことを考え、ミクロからマクロ(ボトムアップ)、マクロからミクロ(トップダウン)のループを取り扱うことを目的とし、資源循環システムをボトムアップ的にモデル化し、さらに、トップダウン的に間接制御を加える<sup>32)</sup>ことによる2つのアプローチの融合についての研究を進めてきた<sup>34, 35)</sup>。

本章では、まず資源循環システムの自律分散モデルを構築し(ボトムアップ)、それに基づく単一のループを持つプロトタイプモデルを作成し、ダイナミクスを観察することにより、

単一のループ構造からでも複雑な挙動を示すことを確認する。さらにそのモデルに間接制御(トップダウン)を加えることにより、間接制御(トップダウン)の効果とその有効性について考察することにより階層型自律分散モデルにおけるスーパーバイザによる間接制御について確認する。

構成は以下の通りである。まず4.2節で資源循環システムの階層型自律分散モデルを示し、4.3節にそのモデルを用いたシミュレーションのためのプロトタイプモデルについて述べる。次に4.4節でシミュレーション結果と考察を示し、4.7節がまとめである。

## 4.2 資源循環システムの階層型自律分散的モデル

資源循環システムをモデル化するにあたって、また、そうでない物理的な部分を明確に分けて考えることができるように、物理ダイナミクス層と情報処理層の2層からなるモデルを構築する。

### 物理ダイナミクス層

資源循環システムのモノに関連する物理的側面を表す層を物理ダイナミクス層と呼び、生産者や消費者などの物理部分であるエレメントと、その間を流れる製品、原材料、通貨などのモノからなる。層内には複数のエレメントが存在し、それぞれがモノを所有している。エレメントは、後述の情報処理層にあるエージェントの意思決定に従って、生産、購入、リサイクルなどを行い、その結果エレメント間にモノの流れが発生する。

### 情報処理層

意思決定に用いられる情報と意思決定主体からなる層を情報処理層と呼ぶ。生産者や消費者などの意思決定を受け持つ部分をエージェントと呼ぶ。このエージェントは、物理ダイナミクス層のエレメントと1対1に対応している。各エージェントは、物理層の対応するエレメントから情報を受け取り、エージェント間で情報のやりとりを行う。エージェントはその情報を元に意思決定を行い、その結果をエレメントに伝え、エレメントはそれによって行動する。

これらの物理ダイナミクス層および情報処理層によって、ボトムアップ的に資源循環システムが形作られる。この資源循環システムをトップダウンに制御するために、ここに第3の層として、資源循環システムへのトップダウン的アプローチのための要素を設け、これをスーパーバイザと呼ぶ(図2.2)。スーパーバイザは、大域的な情報を元に意思決定を行い、補助金・規制などの制御を行うが、現実の制約を考慮すると、目的の変数、例えばリサイクル率などを直接操作することは困難であり、間接的な制御にならざるを得ない、これを間接制御

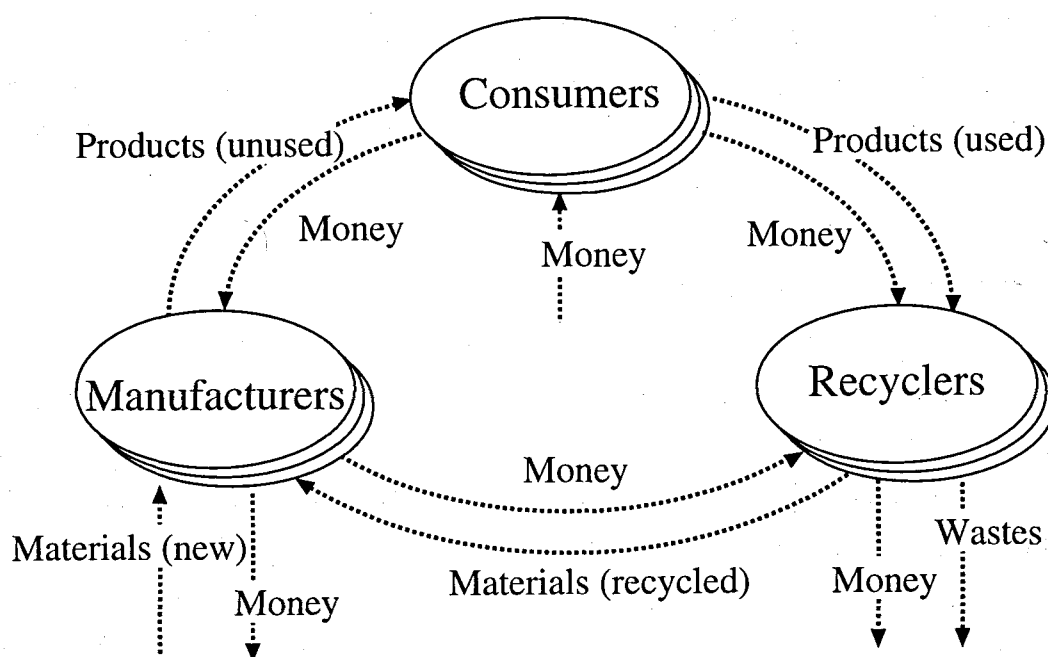


図 4.1: 3 種類のエレメントからなる資源循環システムの物理ダイナミクス層。

と呼び、間接制御には、情報処理層に対して行う広報・宣伝などの情報的間接制御と、物理ダイナミクス層に対して行う規制・補助金などの物理的間接制御が考えられる。

### 4.3 プロトタイプ・モデル

資源循環システムは、様々な要素がサブシステムやループ構造を形成している非常に複雑なシステムである。ここでは、単純化のため、ループ構造を持つという点に注目し、プロトタイプモデルとして、図 4.1 のような生産者、消費者、処理者の 3 種のエージェント/エレメントからなる単一のループ構造を考える。このような単純なモデルであっても、あるエージェント/エレメントからの出力が、それ以降の自分自身の入力に影響し、それには他のエージェント/エレメントの挙動も影響するため、十分にループ構造を持つことに起因する複雑なダイナミクスを示すことが期待できる。

また、システムの評価としては、システム全体のリサイクル率を考え、それを上昇させるような間接制御をスーパーバイザが行なうものとする。

ここで想定するプロトタイプモデルの物理ダイナミクス層を流れるモノは、図 4.1 に示すように、製品、原材料、貨幣とする。製品および原材料は複数種類が存在し、ある製品を生産するには複数の原材料種がそれぞれ決まった個数必要であるとする。また、生産者、消費者、処理者もそれぞれ複数存在し、それぞれ以下に示す役割を担うものとする。

- 生産者は原材料を新規にシステム外から購入するかいずれかの処理者から購入する。

さらに、それを用いて製品を生産し、在庫としてストックする。

- 消費者は、それぞれの製品を必要数所有しているが、期の進行とともに製品は寿命を迎えるため、その製品を新たにいずれかの生産者から買い入れる。また、寿命が尽きた製品については、いずれかの処理者に処理を委託する。
- 処理者は、消費者から委託された製品を廃棄するかリサイクルして原材料に戻し、リサイクルされた原材料を在庫として持つ。

マルチエージェントの市場モデルにおけるエージェントの取引の形態には、全体のエージェントの需要と供給の均衡をとるものと、多数の2者間の相対取引により経済過程が進行するものがある<sup>36)</sup>。ここで、前者は株式市場の取引形態にはよく合致するものの、人間の視野の限界や合理性の限界を考慮していないため、資源循環システムにおいて想定される家庭用電気製品などの取引形態には合致しない。従って、本研究では後者を採用し、サービスの供給者が価格を定め、これに対して需要者が自分の価値観に合った供給者を選択することによって2者のペアリングが行なわれ、その積み重ねによってシステム全体の挙動が形成されると考える。ここで、エージェントの意思決定のよりどころとなるエージェント固有の価値観には様々なものが考えられるが、ここでは、より重要であると考えられるコストとリサイクルに対する2つの価値観を考え<sup>32)</sup>、エージェントの意思決定に利用する。

また、新規原材料購入や、製品・原材料の在庫維持費として費される通貨は、消費者の収入として還元されるため、通貨の総量は一定に保たれるものとする。以下、このモデルにおいて使用する基本要素を示し、物理ダイナミクス層における関係式、エージェントの意思決定の方法について記す。その後、このモデルを用いたシミュレータの手順について概略を示す。

#### 4.3.1 基本要素

モデルにおいて用いる基本要素を次に示す。各要素の頭の記号は、-シンボル、\*決定変数、●定数、◇ストック変数、・フロー変数、○その他の従属変数、および、\*スーパーバイザによって変更され得る特殊な定数である。

##### (a) 規模定数

- 期数  $T$
- 原材料種類数  $M$
- 製品種類数  $L$
- 生産者数  $I$
- 消費者数  $J$
- 処理者数  $K$

## (b) モノ

- 原材料種類  $K_m^S$  ( $m = 1, \dots, M$ ):

- 新規原材料価格  $p_m^{SN}$

- 製品種類  $K_\ell^P$  ( $\ell = 1, \dots, L$ ):

- 必要原材料  $z_{\ell m}$
- 標準寿命(期)  $y_\ell^S$

## (c) エレメント・エージェント

- 生産者  $M_i$  ( $i = 1, \dots, I$ ):

\* 価値観  $w_i^M = (w_i^{MR}, w_i^{MC})$

$w_i^{MR}$ : リサイクル価値観

$w_i^{MC}$ : コスト価値観

\* 製品販売価格  $p_{i\ell}^M$

\* 製品生産数  $a_{i\ell}$

\* 原材料調達数  $b_{imk}^M$  ( $k = 0$  は新規原材料)

\* リサイクル率(原材料ベース)  $r_i^M$

◇ 製品在庫数  $v_{i\ell}^M$

◇ 資産  $h_i^M$

• 新規原材料購入支出  $e_i^{Mn}$

• リサイクル原材料購入支出  $e_i^{Mr}$

• 製品売却収入  $e_i^{Ms}$

• 製品生産コスト支出  $e_i^{Mp}$

• 製品在庫維持コスト支出  $e_i^{Mk}$

• 利益  $g_i^M$

- 消費者  $C_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ):

\* 価値観  $w_j^C = (w_j^{CR}, w_j^{CC})$

$w_j^{CR}$ : リサイクル価値観

$w_j^{CC}$ : コスト価値観

• 製品必要数  $s_{j\ell}^C$

\* 製品購入数  $b_{j\ell i}^C$

\* 製品処分数  $d_{j\ell k}^C$

◇ 製品保有数  $v_{j\ell}^C$

◇ 資産  $h_j^C$

• 収入  $e_j^{Ci}$

- ・ 製品購入支出  $e_j^{Cb}$
  - ・ 製品処分支出  $e_j^{Cd}$
  - ・ 収支  $g_j^C$
- 処理者  $T_k$  ( $k = 1, \dots, K$ ):
- \* 価値観  $w_k^T = (w_k^{TR}, w_k^{TC})$ 
    - $w_i^{TR}$ : リサイクル価値観
    - $w_i^{TC}$ : コスト価値観
  - 原材料廃棄コスト  $z_{km}^D$
  - 原材料リサイクルコスト  $z_{km}^R$
  - \* 製品引受価格  $p_{kl}^{TL}$
  - \* リサイクル原材料価格  $p_{km}^{TM}$
  - \* 製品リサイクル率  $x_{kl}$
  - ◇ リサイクル原材料在庫  $v_{km}^T$
  - ◇ 資産  $h_k^T$ 
    - ・ 原材料処分支出  $e_k^{Td}$
    - ・ 原材料リサイクル支出  $e_k^{Tr}$
    - ・ 原材料在庫維持支出  $e_k^{Tk}$
    - ・ 製品処分引受収入  $e_k^{Ta}$
    - ・ リサイクル原材料売上収入  $e_k^{Ts}$
    - ・ 利益  $g_k^T$
  - リサイクル率  $r_k^T$

なお、決定変数(\*), ストック変数(◇), および、フロー変数(・)は、期  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ ) に依存した変数である。

### 4.3.2 物理的ダイナミクス

物理ダイナミクス層におけるダイナミクスを、以下のようにストック変数の時間差分(単位は期)の形で与える。ただし、そこに含まれる決定変数については、エージェントの意思決定によるものとする。なお、特に紛らわしくない場合には、 $\sum_{x=1}^X$  を  $\sum_x$  と略記している。

(a) 生産者  $(t+1)$  期の製品在庫数は、

$$v_{il}^M(t+1) = v_{il}^M(t) + a_{il}(t) - \sum_j b_{jli}^C(t) \quad (4.1)$$

のように、 $t$  期の在庫数からその期での生産数を加え売却数を減ずることによって定まる。

また、 $(t+1)$  期の資産は、

$$h_i^M(t+1) = h_i^M(t) + g_i^M(t) \quad (4.2)$$

のように  $t$  期の資産にその期の収支を加えることによって定められる。ここで利益  $g_i^M(t)$  は、新規原材料購入支出  $e_i^{Mn}$ 、リサイクル原材料購入支出  $e_i^{Mr}$ 、製品生産コスト支出  $e_i^{Mp}$ 、製品在庫維持コスト支出  $e_i^{Mk}$ 、および、製品売却収入  $e_i^{Ms}$  の収支の総和である。

(b) 消費者  $(t+1)$  期の製品保有数は、

$$v_{j\ell}^C(t+1) = v_{j\ell}^C(t) + \sum_i b_{j\ell i}^C(t) - \sum_k d_{j\ell k}^C(t) \quad (4.3)$$

のように、 $t$  期の在庫数からその期での購入数を加え処分数を減ずることによって定まる。また、 $(t+1)$  期の資産は、生産者の場合と同様に

$$h_j^C(t+1) = h_j^C(t) + g_j^C(t) \quad (4.4)$$

と定められ、ここで収支  $g_j^C(t)$  は、収入  $e_j^{Ci}$ 、製品購入支出  $e_j^{Cb}$ 、および、製品処分支出  $e_j^{Cd}$  の収支の総和である。

(c) 処理者 処理者の  $(t+1)$  期のリサイクル原材料在庫数は、 $t$  期の在庫数にその期のリサイクル原材料製造数を和し、リサイクル原材料売却数を減じたものと定められ、

$$v_{km}^T(t+1) = v_{km}^T(t) + \left[ \sum_j d_{j\ell k}^C(t) x_{k\ell}(t) \right] - \sum_i b_{imk}^M(t) \quad (4.5)$$

と表される。ここで、右辺第2項はリサイクル原材料製造数、3項がリサイクル原材料売却数である。また、 $(t+1)$  期の資産は、

$$h_k^T(t+1) = h_k^T(t) + g_k^T(t) \quad (4.6)$$

と表され、利益  $g_k^T$  は、原材料処分支出  $e_k^{Td}$ 、原材料リサイクル支出  $e_k^{Tr}$ 、原材料在庫維持支出  $e_k^{Tk}$ 、製品処分引受収入  $e_k^{Ta}$ 、および、リサイクル原材料売上収入  $e_k^{Ts}$  の収支の総和である。

### 4.3.3 意思決定

物理ダイナミクス同様、またそれ以上に、エージェントの意思決定は様々な情報を元に複雑な過程を経るものであると考えられるが、本研究でのプロトタイプにおいては、以下のように簡略化したものを想定する。なお、4.4節のシミュレーション結果で確認できるように、このように簡略化された意思決定によっても、生じるダイナミクスは極めて複雑である。

意思決定に関連する決定変数は選択的なものと数量的なものに分類される。ここで、選択的な決定については、価値関数を参照に選び出すという方法を考え、数量的な決定については、if-then型のルールに基づく方法を考える。いずれの方法においても、エージェントの

意思決定に多様性を持たせるため、エージェント毎に異なる価値観を設定し、この価値観に基づいて意思決定を行うものとする。

以下の  $N$  と  $P$  は期  $t$  に依存する変数であるが、表記の簡単化のため“( $t$ )”を省略して表記している。

(a) 生産者 生産者は、時々刻々の製品の売上個数と利益を観察し、売上個数と利益が共に増加傾向にあれば、さらなる利益を求めため大幅に価格を上げる。また、売上個数は増加しているが利益が減少傾向にあれば、価格が安過ぎると判断し、価格を上げる。売上個数が減少傾向かつ利益も減少している場合には、価格が高すぎて売れていないと判断し価格を下げ、売上個数は減少傾向だが利益は増加している場合には、現状維持を選択する。具体的には、 $t$  期の製品価格を、過去5期間の売上数  $N_{il}^{MR}$ 、利益  $P_{il}^{MR}$  と、その更に過去5期間の売上数  $N_{il}^{MB}$ 、利益  $P_{il}^{MB}$  を比べることによって把握できる売上個数・利益の増減の傾向より、

$$p_{il}^M(t) = \max \left\{ \alpha_{il}^{M1}(t) p_{il}^M(t-1), A^{M1} \right\} + \alpha_{il}^{M2}(t) \quad (4.7)$$

と決定する。ここで、

$$\alpha_{il}^{M1}(t) = \begin{cases} 1 + A_1^{M2} A_2^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \\ 1 + A_2^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ 1 - A_2^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ 1 & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\alpha_{il}^{M2}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_i^M(t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } g_i^M(t-1) = 0 \\ -1 & \text{if } g_i^M(t-1) < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

であり、 $A^{M1}$  は価格下限、 $A_1^{M2}$ 、および、 $A_2^{M2}$  は価格調整に用いられる定数である。

製品生産数については、製品価格に用いる情報と同じものを用いて、売上個数と利益が共に増加していれば生産数を微増させる。利益が落ちていけば、売上個数の増減傾向にかかわらず、赤字を減らすために生産数を落とす。売上個数は減っているが、利益が増えていけば、さらなる利益を求めて生産量を増やす。

$$a_{il}(t) = \begin{cases} a_{il}(t-1) + \beta_{il}^M(t) & \text{if } v_{il}^M < B^{M1} \\ 0 & \text{if } v_{il}^M \geq B^{M1} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\beta_{il}^M(t) = \begin{cases} B_1^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \\ B_2^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ B_3^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ B_4^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$



と決定される。

生産者のリサイクル率は、製品生産時の原材料使用量のうちのリサイクル原材料の割合である。ここでは、各生産者が持つリサイクル価値観が直接反映されるものとし、リサイクル価値観を用いて、

$$r_i^M(t) = \{w_i^{MR}(t)\}^2 \quad (4.12)$$

と決定されるとする。

原材料購入数  $b_{imk}^M$  については、処理者の評価値を

$$w_i^{MC}(t)p_{km}^{TM}(t-1) + w_i^{MR}(t)r_k^T(t-1) + C_1 v_{km}^T(t) \quad (4.13)$$

とし、最も評価値の大きい処理者  $T_{k_{\max}}^M$  から購入するものとする。ここで、 $C_1 (< 1)$  は重み係数である。

(b) 消費者 消費者は、生産者(処理者)の提示する価格およびリサイクル率と自身の持つ価値観を照し合せ、最も評価の高い生産者(処理者)を選択し、購入(処分委託)する。ここで、予算制約上、消費者は全ての必要な製品を買えるわけではなく、必要数に満たない期間が長い製品種類について、購入優先順位が高くなるようにする。

具体的には、各消費者は、生産者および処理者の評価値を、それぞれ

$$w_j^{CC}(t) \frac{p_{il}^M(t)}{\sum_i p_{il}^M(t)} + w_j^{CR}(t)r_i^M(t) + C_2 u_{je}(t) \quad (4.14)$$

$$w_j^{CC}(t) \frac{p_{kl}^{TL}(t)}{\sum_k p_{kl}^{TL}(t)} + w_j^{CR}(t)r_k^T(t) \quad (4.15)$$

のように計算した上で、最も評価値の大きい生産者  $M_{i_{\max}}$  から製品を購入し、最も評価値の大きい処理者  $T_{k_{\max}}^C$  に製品処分を依頼する。ここで、 $C_2 (< 1)$  は重み係数であり、 $u_{je}(t)$  は、製品欠乏期間、つまり期  $t$  から過去への連続した製品保有数  $v_{je}^C$  が製品必要数  $s_{je}^C$  に満たない期数である。

(c) 処理者 処理者は、時々刻々の消費者からの引受数および利益を観察し、引受数が増加傾向にあれば値上げする。引受数が減少傾向にあるが利益が増加傾向であれば現在の価格を維持し、引受数および利益が共に減少傾向にある場合には価格を下げる。また、ある期間の間、ひとつも引受が無かった場合には、大幅な値下げを敢行し、引受を図る。

具体的には、製品引受価格を、生産者の製品価格と同様に、過去5期間の引受数  $N_{il}^{AR}$  および利益  $P_{il}^{TR}$ 、その更に過去5期間の引受数  $N_{il}^{AB}$  および利益  $P_{il}^{TB}$ 、 $(t-1)$  期の価格を用いて、

$$p_{kl}^{TL}(t) = \max \left\{ \left[ \alpha_{kl}^{T2}(t) \{p_{kl}^{TL}(t-1) + \alpha_{kl}^{T1}(t)\} \right], 0 \right\} \quad (4.16)$$

のように決定する。ここで、

$$\alpha_{k\ell}^{T1}(t) = \begin{cases} A_1^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \\ A_2^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ A_3^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ A_4^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\alpha_{k\ell}^{T2}(t) = \begin{cases} A^{T2} & \text{if } \min_m(v_{km}^T) = 0 \text{ and} \\ & \sum_{\tau=1}^{10} \sum_{j=1}^J d_{j\ell k}^C = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.18)$$

であり、 $A_1^{T1} \dots A_4^{T1}$  は価格の変化量、 $A^{T2}$  は価格調整乗数である。

処理者のリサイクル原材料については、基本的に引受価格と同等の意思決定を行なう。また、処理者に公的機関的側面を持たせるため、利益が正であれば値下げ、負であれば値上げと、非営利的な意思決定をさせるものとする。

具体的には、過去5期間の売上数  $N_{i\ell}^{SR}$  および利益  $P_{i\ell}^{TR}$ 、その更に過去5期間の売上数  $N_{i\ell}^{SB}$  および利益  $P_{i\ell}^{TB}$  を比べ、さらに  $(t-1)$  期の価格を用いて、以下のようにリサイクル原材料価格を決定する。

$$p_{km}^{TM}(t) = \max\{[\beta_{km}^{T2}(t)\{p_{k\ell}^{TL}(t-1) + \beta_{km}^{T1}(t)\}] + \beta_{km}^{T3}(t), 0\} \quad (4.19)$$

ここで、

$$\beta_{km}^{T1}(t) = \begin{cases} B_1^{T1} & \text{if } N_{km}^{SR} - N_{km}^{SB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \\ B_2^{T1} & \text{if } N_{km}^{SR} - N_{km}^{SB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ B_3^{T1} & \text{if } N_{km}^{SR} - N_{km}^{SB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ B_4^{T1} & \text{if } N_{km}^{SR} - N_{km}^{SB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\beta_{km}^{T2}(t) = \begin{cases} B^{T2} & \text{if } \sum_{\tau=1}^{10} \sum_{k=1}^K b_{imk}^M(t) = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\beta_{km}^{T3}(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } g_k^T(t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } g_k^T(t-1) = 0 \\ 1 & \text{if } g_k^T(t-1) < 0 \end{cases} \quad (4.22)$$

であり、 $B_1^{T1}, \dots, B_4^{T1}$  は価格の変化量、 $B^{T2}$  は価格調整乗数である。

リサイクル率はリサイクル価値観を用いて、

$$x_{k\ell} = w_k^{TR} \quad (4.23)$$

と決定され、製品リサイクル率として使われる。

ここに示した意思決定方法は、需要者の要求が完全に満たされる場合のものである。要求に対して、供給者の在庫に不足があった場合には、優先度順に引当が行われ、引当が受けられなかった需要者は、次善の供給者に対して不足分の要求をし、引当を受けることを繰り返

す。また、消費者の製品購入については、資産が0以下になった時点で、それ以上の購入はしないものとする。

#### 4.3.4 シミュレーション手順

シミュレーションの手順の概略を以下に示す。期を、初期処理フェイズと期末処理フェイズ、さらに各エージェントの意思決定フェイズと行動フェイズを考慮ることにより、8つのフェイズに分割する。I-1, I-2, I-3はそれぞれ生産者、消費者、処理者エージェントの意思決定フェイズであり、P-1, P-2, P-3は同順の要素の行動フェイズである。シミュレーション手順は、初期処理→I-1→P-1→I-2→P-2→I-3→P-3→期末処理の順であり、その後、次の期の処理に進む。各フェイズにおける動作は、次に示すとおりである。

- 初期処理：全てのストック変数が、前期のストック変数とフロー変数の値から計算される。
- I-1：生産者意思決定フェイズ：
  - ★ 製品販売価格  $p_{il}^M$ ,
  - ★ 製品生産数  $a_{il}$ ,
  - ★ 生産者のリサイクル率  $r_i^M$ ,
  - ★ 原材料調達数  $b_{imk}^M$  を決定。
- P-1：処理者と生産者間のモノの移動フェイズ：
  - － 処理者エレメントが原材料売却；生産者エレメントが原材料購入,
  - － 生産者エレメントが製品を生産。
- I-2：消費者意思決定フェイズ；
  - ★ 製品購入数  $b_{jli}^C$ ,
  - ★ 製品処分数  $d_{jlk}^C$  を決定。
- P-2：生産者と消費者間のモノの移動フェイズ：
  - － 生産者エレメントが製品売却；消費者エレメントが製品購入。
- I-3：処理者意思決定フェイズ；
  - ★ 製品処分価格(単位数当り)  $p_{kl}^{TL}$ ,
  - ★ リサイクル原材料価格(単位数当り)  $p_{km}^{TM}$ ,
  - ★ 製品リサイクル率  $x_{kl}$  を決定。
- P-3：消費者と処理者間のモノの移動フェイズ：
  - － 消費者エレメントが使用済製品を処分委託；処理者が製品を引き受け,

－ 処理者エレメントが製品を廃棄・原材料にリサイクル。

- 期末処理：エイジング，維持コストの計算。

#### 4.4 シミュレーション結果

4.3節のプロトタイプモデルを用いて，まず，スーパーバイザによる間接制御を行わない場合のシミュレーションを行ない，モデルの基本的な振舞いを確認する．次に，物理層や情報層にスーパーバイザからの間接制御を加えた場合についてシミュレーションを行ない，考察する．

モデルにおける規模定数や意思決定に用いられる定数を表4.1に示すように設定する．資産の初期値や価格の初期値などは紙面の都合上割愛する．

各エージェントの価値観については，

- 生産者  $M_i (i = 1, \dots, 5)$  のリサイクル価値観  $w_i^{\text{MR}}$  をそれぞれ 0.7, 0.1, 0.3, 0.3 および 0.3,
- 処理者  $T_k (k = 1, \dots, 3)$  のリサイクル価値観  $w_k^{\text{TR}}$  を 0.3, 0.3 および 0.3,
- 消費者  $C_j (j = 1, \dots, 100)$  については，国勢調査の結果<sup>37)</sup>を参考に，
  - 0.00 ( $1 \leq j \leq 21$ )
  - 0.00 から 0.05 の一様分布 ( $22 \leq j \leq 60$ )
  - 0.05 から 0.10 の一様分布 ( $61 \leq j \leq 86$ )
  - 0.10 から 0.15 の一様分布 ( $87 \leq j \leq 90$ )
  - 0.00 から 1.00 の一様分布 ( $91 \leq j \leq 100$ )

とする．コスト価値観についてはそれぞれ 1 からリサイクル価値観を減じた値とする．

以下では，全体のリサイクル率  $r(t)$  を，全体のリサイクル原材料使用数  $N^{\text{R}}(t)$  と全体の原材料使用数  $N^{\text{A}}(t)$  から，

$$r(t) = N^{\text{R}}(t)/N^{\text{A}}(t) \quad (4.24)$$

$$N^{\text{R}}(t) = \sum_{\tau=0}^{99} \sum_i \sum_m \sum_{k=1}^K b_{imk}^{\text{M}}(t-\tau) \quad (4.25)$$

$$N^{\text{A}}(t) = \sum_{\tau=0}^{99} \sum_i \sum_m \sum_{k=0}^K b_{imk}^{\text{M}}(t-\tau) \quad (4.26)$$

とし，間接制御の評価の指針のひとつとして用いる．

##### 4.4.1 基本シナリオ

スーパーバイザによる間接制御を全く行わない基本的なシミュレーションを行う．図4.2は生産者毎の製品4および製品7の価格の時間的推移である．価格はある程度の範囲に収束し

表 4.1: 定数の設定

$T$	$M$	$L$	$I$	$J$	$K$	$A^{M1}$	$A_1^{M2}$	$A_2^{M2}$	$B^{M1}$	$B_1^{M2}$	$B_2^{M2}$	$B_3^{M2}$
10000	5	10	5	100	3	200	5	0.01	100	5	-2	-2
$B_4^{M2}$	$A_1^{T1}$	$A_2^{T1}$	$A_3^{T1}$	$A_4^{T1}$	$A^{T2}$	$B_1^{T1}$	$B_2^{T1}$	$B_3^{T1}$	$B_4^{T1}$	$B^{T2}$	$C_1$	$C_2$
5	1	1	-1	0	0.5	1	1	-1	0	0.5	0.001	0.01

ており，作成したモデルが積極的な価格調整機構を有していないにもかかわらず，価格調整機能を持つことが分かる．個別にみると，製品4については全ての生産者が他の生産者に追従するような価格をつけており，また製品7については複数の価格帯が存在するような結果となっている．これらの価格追従や，複数の価格帯は，実際の市場でも観察される現象であり，現実の市場をある程度再現できていることが分かる．また，価格にはある範囲への収束が見られるものの，激しく変動しており，このような比較的単純なモデルからであっても，複雑な振舞いが発現していることが見て取れる．

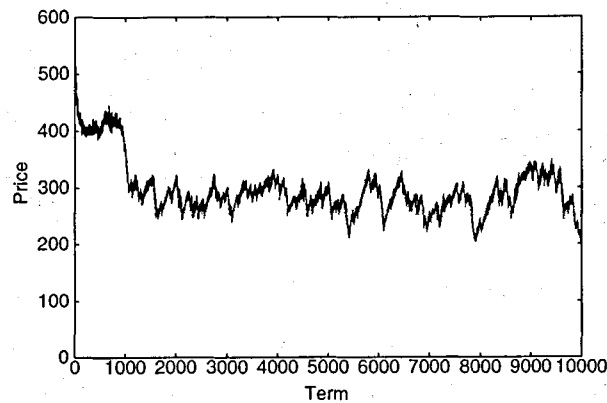
また，図4.3はリサイクル率 $r(t)$ の時間的推移であり，平均すると0.195であった．今後，この基本シナリオをシナリオ0と呼び，他のシナリオとの比較に用いる．

#### 4.4.2 情報的間接制御

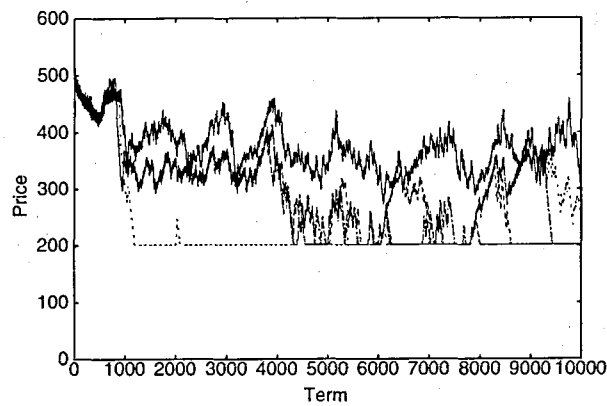
情報的間接制御は，広報などによって人々の意識・価値観を変化させることであるが，そのプロセスを表すことは非常に困難である．そこでここでは，情報的間接制御によってエージェントの価値観が変更されたときのシステムの振る舞いの変化を調べる．シナリオは次の5つを用意し，それぞれのシナリオにおいて，期間の中間である $t = 5000$ に間接制御が加えられるものとする．

- シナリオ 1-1：消費者のリサイクル価値観 $w_i^{CR}$ を0.1増加させ，コスト価値観 $w_i^{CC}$ を0.1減少させる．
- シナリオ 1-2：シナリオ 1-1の変更値が0.2の場合．
- シナリオ 1-3：生産者のリサイクル価値観 $w_i^{MR}$ を0.2増加させ，コスト価値観 $w_i^{MC}$ を0.2減少させる．
- シナリオ 1-4：処理者のリサイクル価値観 $w_i^{TR}$ を0.2増加させ，コスト価値観 $w_i^{TC}$ を0.2減少させる．
- シナリオ 1-5：全てのエージェントのリサイクル価値観 $w_i^{MR}$ を0.2増加させ，コスト価値観 $w_i^{MC}$ を0.2減少させる．

実験結果を表4.2に示す．表4.2より，シナリオ 1-1, 1-2, 1-3および1-5において， $t = 5000$ 以降にリサイクル率 $r$ が上昇していることが分かる．しかしながら，シナリオ 1-4においては，リサイクル価値観を上昇させたにもかかわらず全体のリサイクル率 $r$ がシナリオ0より



(a) Product 4



(b) Product 7

図 4.2: 製品価格.

も小さくなっている。これは、シナリオ0において処理者が十分なりサイクル原材料を供給していたため、処理者のリサイクル価値観の上昇によるリサイクル原材料の供給の増加が、全体のリサイクル率の上昇に結びつかなかったからと考えられる。この例では、生産者のリサイクル価値観を上昇させることが最も効率的であった。生産者がリサイクル率の上昇のネックになっていたと考えられる。

これらの結果から、以下のことが示唆される。

- リサイクル価値観を変更することによってリサイクル率の上昇が期待できる。しかし必ずしも上昇が起こるとは限らない。
- ネックがどこであるかを特定できれば効率的な間接制御が行えるのではないか。

#### 4.4.3 物理的間接制御

4.4.2では情報的間接制御として、エージェントの価値観の変更成功した場合を想定して実験を行った。しかしながら現実には人間の価値観の変更を行うことは困難である。ここ

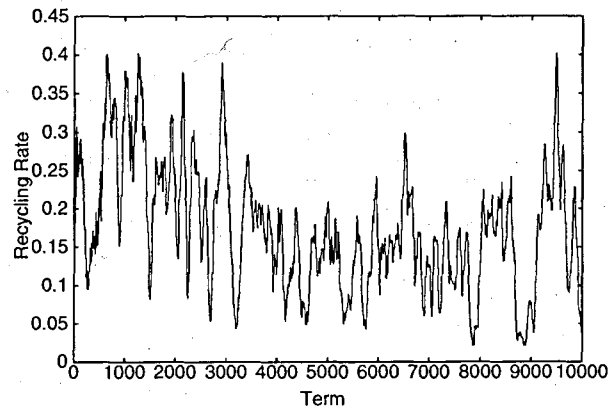


図 4.3: リサイクル率.

表 4.2: 情報的間接制御のシミュレーション結果

Scenario	Average recycling rate		
	Overall	Before $t=5000$	After $t=5000$
1-0	0.149	0.153	0.145
1-1	0.154	0.153	0.155
1-2	0.176	0.153	0.199
1-3	0.208	0.153	0.262
1-4	0.140	0.153	0.127
1-5	0.233	0.153	0.314

では、人間の感覚の中では比較的合理的であるコスト感覚に訴えることを考え、リサイクル率に応じた補助金を投入する物理的間接制御のシナリオを用意し、補助金を製品価格に対して投入する場合およびリサイクル原材料価格に対して投入する場合のそれぞれについてシミュレーションを行う。

#### 製品への補助金

製品価格を減少させるように各生産者のリサイクル率  $r_i^M$  に比例した補助金を投入する。ここで、 $r_i^M$  は、

$$r_i^M(t) = N_i^{IR}(t)/N_i^{IA}(t) \quad (4.27)$$

$$N_i^{IR}(t) = \sum_m \sum_{k=1}^K b_{imk}^M(t) \quad (4.28)$$

$$N_i^{IA}(t) = \sum_m \sum_{k=0}^K b_{imk}^M(t) \quad (4.29)$$

と定義される。生産者  $M_i$  に対する補助金による割引率は、係数  $\delta$  を用いて、 $z_i^D = \delta r_i^M$  と表され、従って消費者は製品  $K_i^P$  を  $(1 - z_i^D)p_{il}^M$  で購入することができる。補助金の効果  $z^E$

表 4.3: 製品への補助金による物理的間接制御のシミュレーション結果

Scenario	Rate $\delta$	Average recycling rate				Discount rate $z^D \times 100[\%]$	Efficiency $z^E$
		Overall		After $t=5000$			
		mean	s.d.	mean	s.d.		
0	—	0.195	0.025	0.148	0.020	0.00	—
2-1	0.1	0.212	0.030	0.183	0.031	1.83	19.1
2-2	0.2	0.230	0.033	0.218	0.030	4.36	16.1
2-3	0.25	0.236	0.027	0.231	0.024	5.78	14.4
2-4	0.3	0.237	0.035	0.232	0.044	6.96	12.1
2-5	0.35	0.251	0.022	0.261	0.013	9.14	12.4
2-6	0.4	0.256	0.024	0.270	0.017	10.8	11.3
2-7	0.5	0.261	0.020	0.280	0.014	14.0	10.9
2-8	0.6	0.263	0.022	0.284	0.007	17.0	8.00
2-9	1.0	0.271	0.037	0.300	0.080	30.0	5.01
2-10	2.0	0.268	0.025	0.293	0.013	58.6	2.47

は以下のように定義する。

$$z^E = \Delta r / z^D \quad (4.30)$$

ただし、 $\Delta r$  および  $z^D$  は、それぞれシナリオ 1-0 からの  $r$  の時間平均の上昇量、および  $z_i^D (= \delta r)$  の時間平均である。

割引率係数  $\delta$  の異なる 2-1 から 2-10 のシナリオを用意する。各シナリオの乱数のシードの異なる 20 回のシミュレーション結果の平均、標準偏差を表 4.3 に示す。表 4.3 より、大きな補助金により高いリサイクル率  $r$  が得られていることが分かる。補助率を大きくすると、それだけ大きなリサイクル率  $r$  が期待されるが、その効果  $z^E$  は緩やかに減少することも読みとれる。

#### 原材料への補助金

原材料価格を減少させるように各処理者のリサイクル率  $r_k^T = x_{kl}$  に比例した補助金を投入する。ここで、製品への補助金と同様に係数  $\delta$ 、割引率  $z_i^D$ 、効率  $z^E$  を定義する。シナリオは、 $\delta$  の異なる 3-1 から 3-9 を用意する。各シナリオの乱数のシードの異なる 20 回の実験の平均、標準偏差を表 4.5 に示す。この図より、シナリオ 3-1 から 3-3、すなわち  $\delta$  が 0.125 以下の場合には、有意なリサイクル率の上昇は見られない。しかし、シナリオ 3-3 と 3-4 の間、すなわち  $\delta$  が 0.125 と 0.15 の間に大きなリサイクル率の上昇が見られる。またシナリオ 3-5 から 3-9 においても、シナリオ 3-6、3-7 間に大きな上昇が見られるものの、他のシナリオ間では、 $\delta$  の違いに効果は認められない。原材料を購入する生産者エージェント数が 5 と非常に小数であるため、ある生産者の意思決定を変更するのに十分な補助金であったかど



表 4.4: 原材料への補助金による物理的間接制御のシミュレーション結果

Scenario	Rate $\delta$	Average recycling rate				Discount rate $z^D \times 100[\%]$	Efficiency $z^E$
		Overall		After $t=5000$			
		mean	s.d.	mean	s.d.		
0	-	0.195	0.025	0.148	0.020	0.00	-
3-1	0.05	0.198	0.027	0.154	0.026	0.765	6.54
3-2	0.1	0.196	0.028	0.150	0.026	1.50	1.33
3-3	0.125	0.195	0.026	0.147	0.022	1.84	-0.54
3-4	0.15	0.302	0.022	0.361	0.008	5.42	39.3
3-5	0.175	0.306	0.020	0.370	0.009	6.48	34.3
3-6	0.2	0.306	0.019	0.370	0.011	7.40	30.0
3-7	0.3	0.303	0.022	0.363	0.008	10.9	19.7
3-8	0.4	0.303	0.022	0.363	0.008	14.5	14.8
3-9	0.5	0.303	0.021	0.364	0.005	18.2	11.9

うかが大きくリサイクル率に影響していることが原因と考えられる。効率は、今回の実験では、シナリオ 3-4 の  $\delta = 0.15$  のときが最も良いことが分かる。

以上、4.4.3 および 4.4.3 の結果より、以下のことが示唆される。

- 補助金の投入はリサイクル率の上昇に効果があるが収穫低減の傾向がある。また、必ずしも大きな補助金が大きな効果を生むとは限らない。
- 製品への補助金と原材料への補助金によるリサイクル率の増加量を比べると、原材料へ補助金を投入した場合の方が大きく、これにより、消費者よりも直接原材料を扱う生産者に訴える補助金の方が、リサイクル率に与える影響が大きいと考えられる。

## 4.5 微分方程式モデル

前節で述べたように、シミュレーション・モデルのダイナミクスはストック変数の差分方程式で表されるが、その挙動の時系列の導出には、計算機によるシミュレーションが不可欠であり、システムの規模によっては膨大な時間を必要とする。そこで、本節では、シミュレーション・モデルのダイナミクスを微分方程式を用いて近似し、解析的にもしくは簡単な数値計算などによってシステムの挙動を得ることを考える。以下にその概要を述べ、続いてその適用例について記す。

### 4.5.1 基本的な考え方

プロトタイプ・モデルにおいて、物理的なダイナミクスは、在庫数や資産などのストック変数の簡単な差分方程式によって記述されている。あるストック変数  $x_1(t)$  はシステム内の

全ての変数を  $x_1, x_2, \dots, x_N$  とすると,

$$x_1(t+1) = x_1(t) + f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)) \quad (4.31)$$

と表すことができる。ただし、ここで初期値  $x_1(0), x_2(0), \dots, x_N(0)$  は既知であるとする。ここで次のこと,

- (1) 単位時間が十分細かく、連続変数とみなすことができる,
- (2) 整数変数の絶対値が十分大きく連続変数とみなせる。もしくは、確率的に連続とみなして差し支えない,

を仮定すると、この時間差分方程式を微分方程式の形で近似することが可能であり、(4.31)式は、

$$\frac{dx_1(dt)}{dt} = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)) \quad (4.32)$$

のように表すことができる。さらに、この初期値問題を解くことができれば、シミュレーションを行うこと無く、システムの近似的な挙動を得ることが可能である。

ここで、微分方程式の可解性は主にエージェントの意思決定の複雑さに関連する。エージェントが意思決定のために参照する変数が多くなればなるほど急激に方程式は複雑化し、解析的にも数値的にも解くことが困難になるであろうことは容易に想像できる。また非負変数への対応、言い替えると、在庫切れなどに対応するための例外的な意思決定も方程式を複雑にする一因となる。これらの問題点については、今後の検討課題としたい。

#### 4.5.2 微分方程式モデル

プロトタイプ・モデルにおける物理ダイナミクスの差分式は情報処理層におけるエージェントの意思決定によって定められる決定変数を含んでいる。その意思決定には他の様々なストック変数の値が反映されているため、解析的に解くことは難しい。従って、ここでは、消費者の製品保有数  $v_{j\ell}^C(t)$  および生産者の製品在庫数  $v_{i\ell}^M(t)$  を取り上げ、単純化された意思決定方法を用いることにより、それにより発生するダイナミクスを解析することを試みる。

##### 消費者の製品保有数

プロトタイプ・モデルにおける  $t+1$  期の消費者の製品保有数  $v_{j\ell}^C(t+1)$  は、

$$v_{j\ell}^C(t+1) = v_{j\ell}^C(t) + \sum_i b_{j\ell i}^C(t) - \sum_k d_{j\ell k}^C(t) \quad (4.33)$$

のように  $t$  期の製品保有数  $v_{j\ell}^C(t)$  に製品購入数  $b_{j\ell i}^C(t)$  を加え、製品処分数  $d_{j\ell k}^C(t)$  を減じることで求められる。微分方程式の形に近似すると、

$$\frac{v_{j\ell}^C(t)}{dt} = \sum_i b_{j\ell i}^C(t) - \sum_k d_{j\ell k}^C(t) \quad (4.34)$$

となる。ここで、製品購入数  $b_{j\ell i}^C(t)$  を、常に在庫を必要量  $s_{j\ell}^C$ (定数) に保ち、それぞれの生産者から同数ずつ購入するように意思決定方法を定めると、

$$b_{j\ell i}^C(t) = \frac{s_{j\ell}^C - v_{j\ell}^C(t)}{I}. \quad (4.35)$$

を得る。  $I$  は生産者数である。また、単位期に寿命を迎える製品の個数は、製品の寿命  $y_\ell^S$ (定数) を用いて  $1/y_\ell^S$  と確率的に近似することができるので、意思決定を寿命の尽きた製品を処理者に同数ずつ処分すると定めると、製品処分数  $d_{j\ell k}^C(t)$  は、処理者数  $K$  を用いて、

$$d_{j\ell k}^C(t) = \frac{v_{j\ell}^C(t)}{Ky_\ell^S} \quad (4.36)$$

となる。(4.34) 式に (4.35), (4.37) 式を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{dv_{j\ell}^C(t)}{dt} &= s_{j\ell}^C - v_{j\ell}^C(t) - \sum_k \frac{v_{j\ell}^C(t)}{Ky_\ell^S} \\ &= -\left(1 + \frac{1}{y_\ell^S}\right) v_{j\ell}^C(t) + s_{j\ell}^C \end{aligned} \quad (4.37)$$

となり、  $v_{j\ell}^C(0) = s_{j\ell}^C$  として解くと、

$$v_{j\ell}^C(t) = \frac{1}{y_\ell^S + 1} s_{j\ell}^C \exp\left\{-\left(1 + \frac{1}{y_\ell^S}\right)t\right\} + \frac{s_{j\ell}^C}{1 + \frac{1}{y_\ell^S}} \quad (4.38)$$

を得る。

#### 生産者の製品在庫数

また、生産者の製品在庫数  $v_{i\ell}^M(t)$  は、

$$v_{i\ell}^M(t+1) = v_{i\ell}^M(t) + a_{i\ell}(t) - \sum_i b_{j\ell i}^C(t) \quad (4.39)$$

のように製品生産数  $a_{i\ell}(t)$  と、消費者の製品購入数  $b_{j\ell i}^C$  から決められる。ここで、製品生産数を、

$$a_{i\ell}(t) = \frac{1}{2} (B^{M1} - v_{i\ell}^M(t)) \quad (4.40)$$

のように、目標在庫数に満たない分の半分を補填する形で決定すると定めると、消費者の製品購入数  $b_{j\ell i}^C$  は (4.35) 式のように定められているため、

$$\begin{aligned} v_{i\ell}^M(t+1) &= v_{i\ell}^M(t) + \frac{1}{2} (B^{M1} - v_{i\ell}^M(t)) \\ &\quad - \sum_j \frac{s_{j\ell}^C - v_{j\ell}^C(t)}{I} \end{aligned} \quad (4.41)$$

を得る。ここで、(4.38) 式を用いて、すでに求められている消費者の製品保有数  $v_{j\ell}^C(t+1)$  代入して整理すると、

$$v_{i\ell}^M(t+1) - v_{i\ell}^M(t) = -\frac{1}{2} v_{i\ell}^M(t) + \frac{1}{2} B^{M1} +$$

$$\frac{\sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{1}{y_\ell^S} \right) t \right\} - \frac{\sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)} \quad (4.42)$$

となり、ここで微分方程式を用いて近似すると、

$$\begin{aligned} \frac{dv_{i\ell}^M(t)}{dt} &= -\frac{1}{2}v_{i\ell}^M(t) + \frac{1}{2}B^{M1} + \\ &\frac{\sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{1}{y_\ell^S} \right) t \right\} - \frac{\sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

となる。ここで  $v_{i\ell}^M(0) = B^{M1}$  として解くと、

$$\begin{aligned} v_{i\ell}^M(t) &= \frac{4 \sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 2)} \exp \left( -\frac{1}{2}t \right) \\ &- \frac{2y_\ell^S \sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)(y_\ell^S + 2)} \exp \left\{ - \left( 1 + \frac{1}{y_\ell^S} \right) t \right\} \\ &+ B^{M1} - \frac{2 \sum_j s_{j\ell}^C}{I(y_\ell^S + 1)} \end{aligned} \quad (4.44)$$

を得る。

#### 4.6 シミュレーション・モデルと微分方程式モデルの比較

本節ではシミュレーション・モデルによる結果と、微分方程式モデルによる結果を比較する。

今回用いたモデルにおいて、微分方程式モデルにおける微分方程式は解析的に解けるため、計算時間は存在しない。解析的に解けない場合は、数値解法によって求めるため計算時間が発生するが、規模が大きくなるとシミュレーションモデルの計算時間は指数関数的に増加するため、計算時間の点において、微分方程式モデルの有効性は明らかである。以下では、シナリオ1から3(表4.5)を用意し、2つのモデルによる結果の比較を行う。

図4.4は、シナリオ1を用いたシミュレーション・モデルによるシステムの挙動と微分方程式モデルによるシステムの挙動を示したものである。(a)は50期までの消費者の製品保有数、(b)は同じく50期までの生産者の製品在庫数の時間的变化を示している。十分時間が経過すると、シミュレーション・モデルによる挙動はある範囲へ収束している(安定期と呼ぶ)。

表 4.5: 各シナリオの設定

Scenario	$s_{j\ell}^C$	$y_\ell^S$	$B^{M1}$	$I$	$J$
1	300	10	300	5	10
2	30	10	30	5	10
3	300	5	100	5	10

安定期の平均値は、プロトタイプ・モデルと近似モデルはほぼ一致している。また、シナリオ2 (図 4.5) は、目標保持数と目標在庫数をシナリオ1の1/10の30とした場合であるが、この場合にも、安定期のシミュレーション・モデルによる挙動の収束範囲と、微分方程式モデルの挙動はほぼ一致していることがわかる。しかし、シミュレーション・モデルによる挙動は、安定期における値の揺れがその絶対値に対して大きくなっており、離散変数の連続化による誤差がシナリオ1に比べて大きいことがわかる。従って、離散変数の連続化は、安定期の平均値についてはよく近似できるが、値がばらついてしまうような場合においては、大きな誤差を生じてしまうであろうことがわかった。

シナリオ3の結果 (図 4.6) をみると、2つのモデルにおいて、値がかなり乖離してしまっていることがわかる。これは、生産者の生産量に比べて消費者の要求量が非常に大きいためである。シミュレーション・モデルでは、在庫には非負制約が課せられているため、在庫が0になった時点で、消費者は意思決定がどうであろうと、それ以上購入することができなくなる。しかし近似モデルでは、非負制約が緩和されているため、意思決定どおりに消費者は行動することができてしまう。このように、在庫不足のような例外的な意思決定を必要とする状況が頻繁に出現するような場合、その影響を無視できないことがわかる。しかし、そのような状況に対応する例外的な処理を含んだ方程式は、解くことが非常に困難となってしまうであろうことが予想される。

以上より、単純な意思決定を用い、変数の非負条件によりその意思決定結果が実行不可となることが少ない場合、シミュレーション・モデルの平均的挙動と、微分方程式モデルの挙動は、安定期においてほぼ一致することが示された。従って、このような場合は微分方程式モデルによってシステムの挙動の特性を知ることが可能である。しかし、意思決定における条件緩和の仮定が成立し難い状況においては、微分方程式モデルによる結果と、シミュレーション・モデルの結果とが大きく乖離してしまうことがわかった。

また補足として、条件によっては安定期での挙動が一致したことから、シミュレータの妥当性が示されたといえる。複雑なマルチエージェント・シミュレーションにおいて、シミュレーション結果を事前に予測することは難しいため、シミュレータに不具合があり、結果が誤っていた場合にもそれに気づかないことが多い。しかし、エージェントの意思決定をモジュール化し、簡単な意思決定に置き換え、パラメータを適切に設定した上で、シミュレーション・モデルによる結果と微分方程式モデルによる結果とを比較することにより、シミュレータの妥当性を判断することができると考えられる。

## 4.7 まとめ

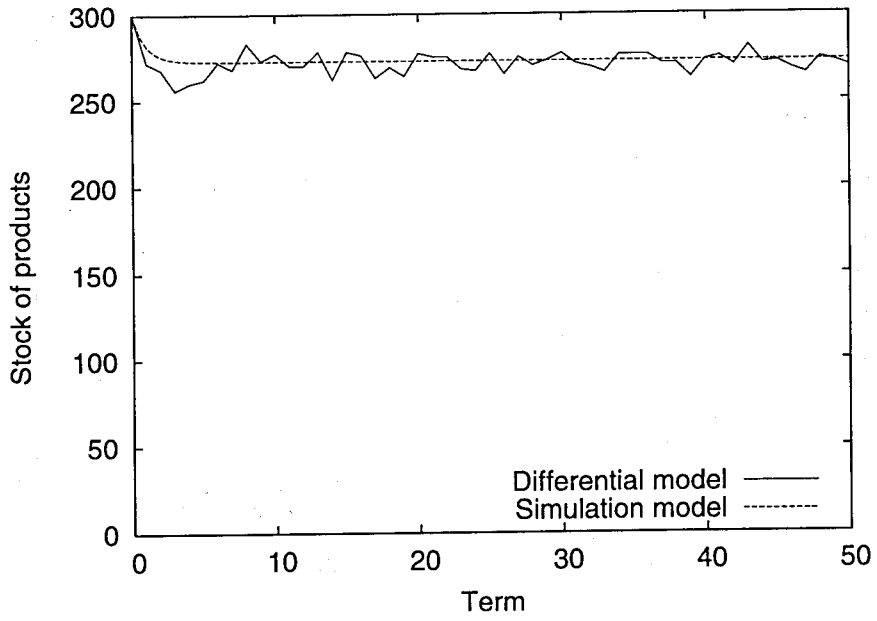
本論文では、資源循環に対するボトムアップ的アプローチとトップダウン的アプローチの融合を目指し、資源循環システムをボトムアップ的にモデル化しトップダウン的に間接制御

することにより、様々な間接制御の有効性を探る枠組みを提案した。まず、資源循環システムの階層型自律分散モデルを構成し、次に、そのモデルに基づき、生産者、消費者、処理者の3種のエレメント/エージェントからなるシミュレーションモデルを作成し、いくつかのシナリオを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果より、作成したモデルが価格調整機能を含め、非常に複雑な挙動を表すダイナミクスをシミュレートできることが分かった。また、価値観の変更による情報的間接制御と、補助金による物理的間接制御についてのシミュレーションにより、それらが有効であることを示し、物理的間接制御は収穫逓減の傾向があり、また効果の予想は難しいが、生産者に訴えるような補助金が効果が大きいことが示唆された。以上により、階層型自律分散システムにおけるスーパーバイザによる間接制御の動作を確認し、それが有効であることの示唆を得ることができた。

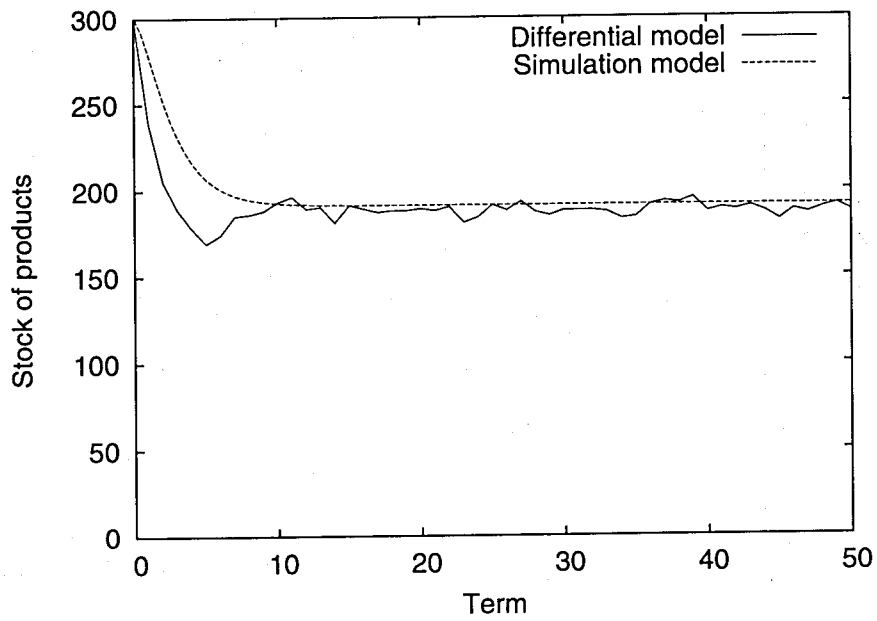
さらに、提案した資源循環システムの階層型自律分散モデルのシミュレーション・モデルにおけるダイナミクスを微分方程式を用いて近似することにより、微分方程式モデルを作成し、システムの挙動を近似する枠組を示した。また、シミュレーション・モデルの挙動と、微分方程式モデルの挙動を比較した結果、以下のことが確認された。

- (a) 概ね2つのモデルによる結果は、特に安定期においてよく合致していた。しかしながら、仮定が成立し難い状況では結果に大きな乖離が見られた。
- (b) 微分方程式モデルを、シミュレーション・モデルの妥当性の評価に用いることができる。

現時点では、意思決定機構やマテリアルフローが単純なモデルとなっており、今後の課題としては、それらの改良、とくにリサイクルに係わる部分の改良が挙げられる。

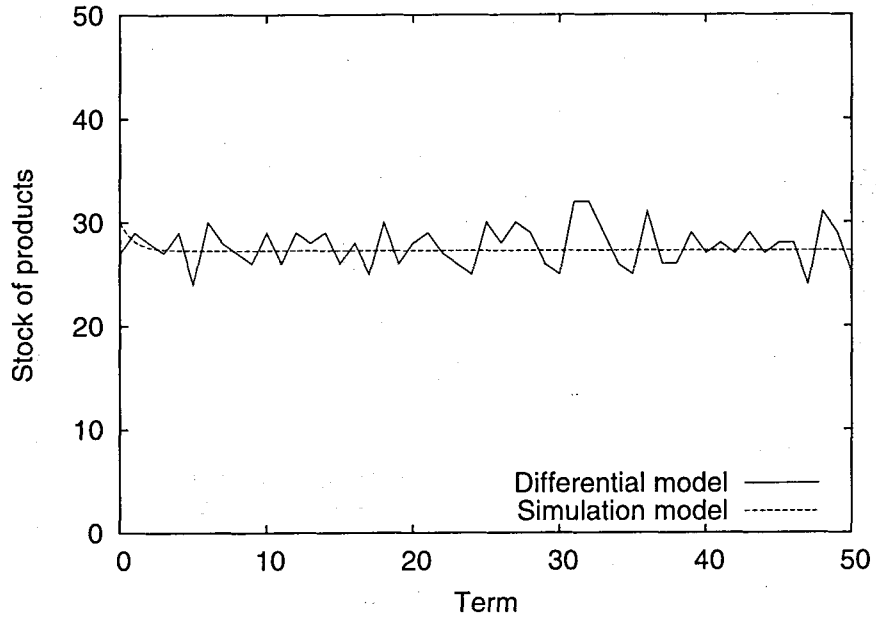


(a) 消費者の製品保有数

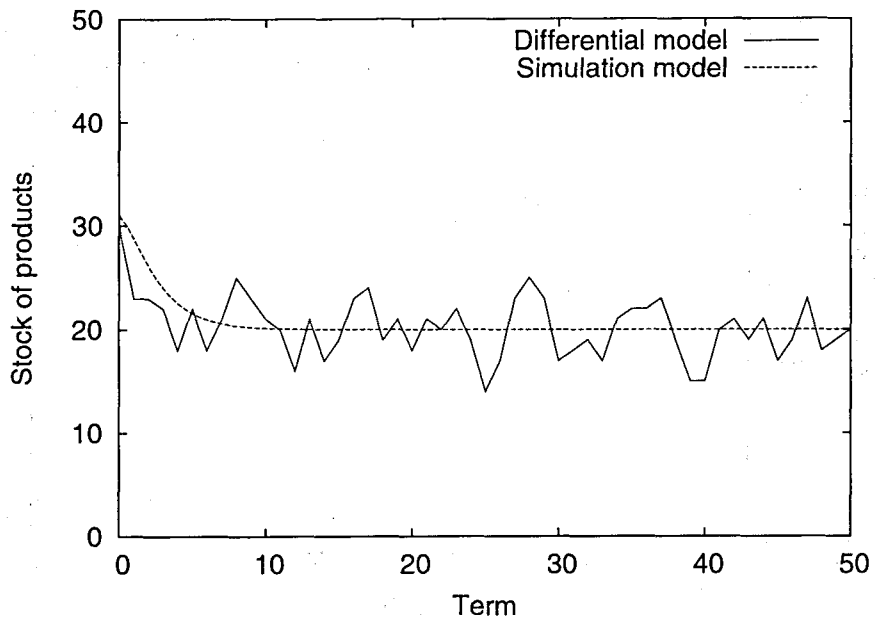


(b) 生産者の製品在庫数

図 4.4: シナリオ 1.



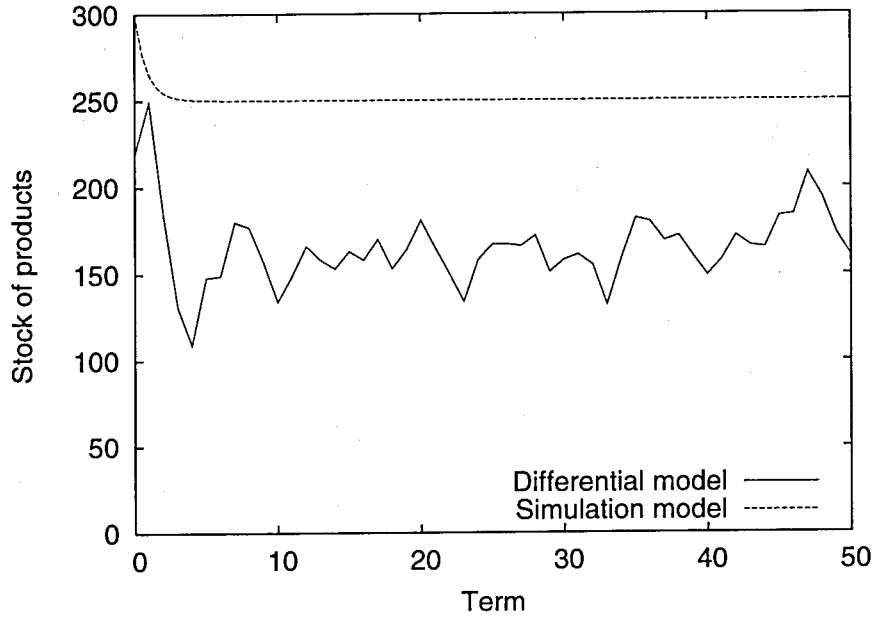
(a) 消費者の製品保有数



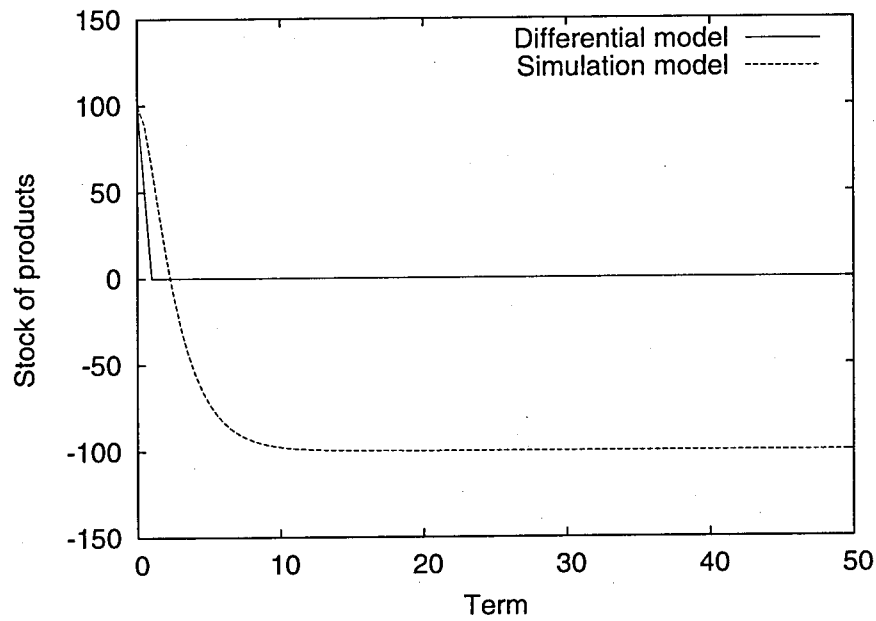
(b) 生産者の製品在庫数

図 4.5: シナリオ 2.





(a) 消費者の製品保有数



(b) 生産者の製品在庫数

図 4.6: シナリオ 3.



---

## 第 5 章

### 家庭用コジェネレーションシステムへの適用

#### 5.1 はじめに

近年、石油の枯渇や、環境への配慮などの問題から、省エネルギーが重要視されてきている。その中で、コジェネレーションシステムと呼ばれる、ひとつのエネルギー源から2種類以上のエネルギーを取り出すシステムが注目を集めている。例えば、火力発電所では石油を燃やした熱によりタービンを回し、発電し、需要家に送電を行っているが、ここで熱を遠方に運ぶことは難しく、余った熱は捨てているのが実状である。しかし、ここで、発電を需要家の手元で行うことを考えると、この発電時に発生する熱を捨てること無く利用することができるのである。従って、大規模な発電所と比べ発電効率の劣る小規模な発電設備であっても、その排熱を利用することにより、トータルのエネルギー効率は非常に大きくなる。以上の理由により、コジェネレーションシステムは、低コスト、低環境負荷なエネルギーシステムとして注目されている。

従来は、コジェネレーションシステムは、工場などの大口需要家によって利用されていたが、近年、出力が1[kW]ほどの、小型のコジェネレーションユニットが開発され、一般家庭においてもそれを利用できるようになった。しかし、小型であるがゆえに、大型のものと比べると、エネルギー効率は低く、効果的に利用するためには、発生した電力および熱の双方を無駄無く利用する必要がある<sup>41, 38, 43</sup>)。ここで、この家庭用のコジェネレーションユニットは、都市ガスを入力とし、改質器によって水素を取り出し、その水素を用いた燃料電池により発生する電力及び熱を出力とするものを考える<sup>?)</sup>。熱は、湯として貯湯タンクに蓄えられ、必要によって使用されるが、電力は貯めておくことができず、発生したその時点で使われなければならない。また、湯(熱)は、コジェネレーションユニットを置いている家庭のみでしか利用できないが、電力については、他の家庭に融通することができる。

この家庭用コジェネレーションシステムを運用するにあたってのポイントを整理すると、以下のことが挙げられる。

- コジェネレーションユニットは、水素を入力として熱エネルギーと電力エネルギーを発生するものであり、熱エネルギーと電力エネルギーの発生量をそれぞれ独立に操作することはできない。

- 熱エネルギーは貯湯タンクに湯として蓄えられ、必要に応じて使われるが、電力エネルギーはストックすることはできず、発生と同時に使われなければならない。使われなかった分は捨てられることとなる。
- 一方、熱エネルギーは、コジェネレーションユニットと対応した家庭でのみ消費できるのに対し、電力エネルギーは、システム内のどの家庭であっても利用することができる。
- さらに、コジェネレーションユニットの出力を短時間に大きく変えることはできず、停止状態から最大出力状態にするまでにはおおよそ20分の時間を必要とする。

このような条件の元、時々刻々変化する家庭のエネルギー需要に対応するのは非常に困難である。したがって本章では、階層型自律分散モデルを用いて家庭用コジェネレーションシステムをモデル化し、自律分散的に制御することにより、システム全体のエネルギー効率を高めることを目指し、同時に階層型自律分散モデルが自律分散制御においても適用できることを示すことを目的とする。

本章の構成は次の通りである。2節にて階層型自律分散モデルについて概観し、3節で家庭用コジェネレーションシステムのモデルを示す。4節では、家庭によるエネルギー需要の予測方法について述べる。5節にてコジェネレーションユニットの制御手法について述べ、6節にシミュレーション結果を示す。

## 5.2 家庭用コジェネレーションシステムの物理ダイナミクスモデル

ここで想定するコジェネレーションシステムは、図5.1に示すような、各家庭にコジェネレーションユニットが置かれている状況を考える。各家庭においては、電力と熱の需要が発生し、それを電力についてはPEFCによる発電および商用電力によって供給し、熱については、PEFCからの熱を貯湯タンクに貯めたものおよびガスヒーターにより供給される。コジェネレーションユニットから発生した熱エネルギーは貯湯タンクに蓄えられ、そのタンクから家庭に供給される。もし、タンクが空になった場合には、熱需要に対する不足分はガスヒーターにより供給される。また、電力需要に対する供給不足については、商用電力により補われる。従って、需要が満たされない状況にはならない。

家庭用コジェネレーションシステムにおける物理ダイナミクスモデルを以下のように定める。

### 5.2.1 変数

(\*)は情報処理層のエージェントによって定められる決定変数であり、(o)は需要などのシステム外で定まる変数であり、システム内では定数として扱われるものである。

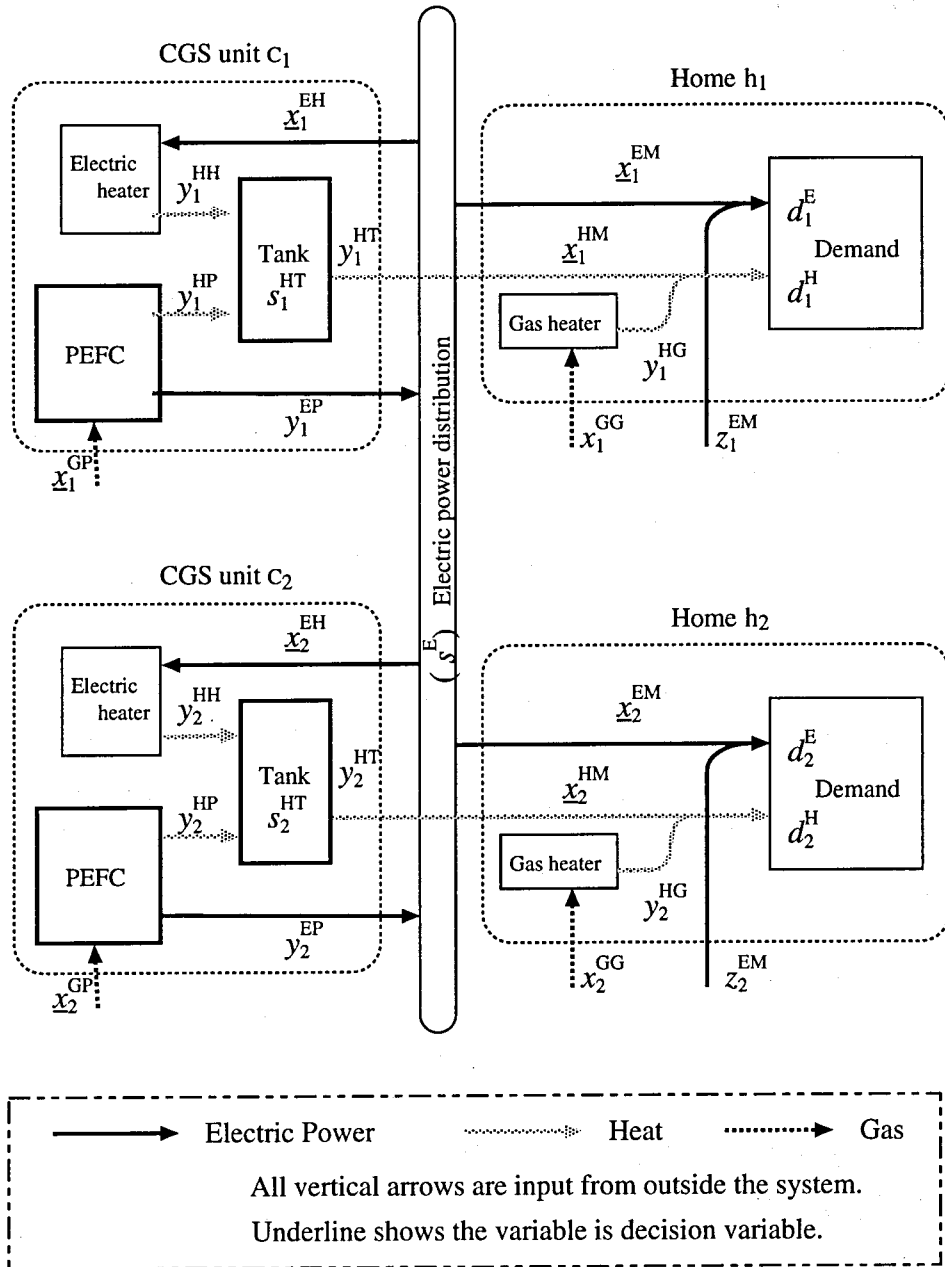


図 5.1: 家庭用コジェネレーションシステム.

コージェネレーション・ユニット  $C_i$  ( $i = 1, \dots, n^C$ )

- $x_c^{GP}(t)$  : 燃料電池へのガス入力率.
- $y_c^{HP}(t)$  : 燃料電池からの熱出力量.
- $y_c^{EP}(t)$  : 燃料電池からの電力出力量.
- $z_c^{EP}(t)$  : 燃料電池からの実電力出力量.
- $x_c^{EH}(t)$  : 電気ヒータへの電力入力量.
- $y_c^{HH}(t)$  : 電気ヒータからの熱出力量.
- $y_c^{HT}(t)$  : 貯湯槽からの熱出力量.
- $s_c^{HT}(t)$  : 貯湯量.
- $z_c^{HT}(t)$  : 貯湯槽からの排熱量.

家庭  $M_j$  ( $j = 1, \dots, n^M$ )

- $x_m^{HM}(t)$  : 家庭への熱入力量.
- $x_m^{GG}(t)$  : ガスヒータへのガス入力量.
- $y_m^{HG}(t)$  : ガスヒータからの熱出力量.
- $x_m^{EM}(t)$  : 家庭への電力入力量.
- $z_m^{EM}(t)$  : 商用電力入力量.
- $d_m^H(t)$  : 熱需要量.
- $d_m^E(t)$  : 電力需要量.

### 5.2.2 定数

- $X^{\min}$  : 燃料電池へのガス入力率下限.
- $X^{\max}$  : 燃料電池へのガス入力率上限.
- $\Delta y^{\max}$  : 燃料電池からの最大出力電力上昇量.
- $\Delta y^{\min}$  : 燃料電池からの最大出力電力減少量.
- $\alpha^{HP}$  : 燃料電池熱出力定数.
- $\alpha^{EP}$  : 燃料電池電力出力定数.
- $\beta^{EP}$  : 燃料電池電力出力定数.
- $S^{H\max}$  : 最大貯湯量.
- $\alpha^{HH}$  : 電気ヒータ出力効率.
- $\alpha^{HG}$  : ガスヒータ出力効率.
- $\alpha^{EM}$  : 商用電力効率.

## 5.2.3 関係式

- 燃料電池へのガス入力率

$$x_c^{\text{GP}}(t) = 0, \quad X^{\text{min}} \leq x_c^{\text{GP}}(t) \leq X^{\text{max}} \quad (5.1)$$

熱エネルギー

- 燃料電池からの熱出力量

$$y_c^{\text{HP}}(t) = \alpha^{\text{HP}} x_c^{\text{GP}}(t) \quad (5.2)$$

- 電気ヒータからの熱出力量

$$y_c^{\text{HH}}(t) = \alpha^{\text{HH}} x_c^{\text{EH}}(t) \quad (5.3)$$

- 貯湯槽の熱量及び熱変化量

$$\begin{aligned} & s_c^{\text{HT}}(t) - s_c^{\text{HT}}(t-1) \\ &= y_c^{\text{HP}}(t) + y_c^{\text{HH}}(t) - y_c^{\text{HT}}(t) - z_c^{\text{HT}}(t) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$s_c^{\text{HT}}(t) \leq S^{\text{Hmax}} \quad (5.5)$$

- ガスヒータからの熱出力量

$$y_m^{\text{HG}}(t) = d_m^{\text{H}}(t) - y_m^{\text{HT}}(t) \quad (5.6)$$

- ガスヒーターへのガス入力量

$$x_m^{\text{GG}}(t) = \frac{1}{\alpha^{\text{HG}}} y_m^{\text{HG}}(t) \quad (5.7)$$

電力エネルギー

- 燃料電池からの電力出力量

$$y_c^{\text{EP}}(t) = \alpha^{\text{EP}} x_c^{\text{EP}}(t) + \beta^{\text{EP}} \quad (5.8)$$

$$z_c^{\text{EP}}(t-1) - \Delta y^{\text{min}} \leq y_c^{\text{EP}}(t) \leq z_c^{\text{EP}}(t-1) + \Delta y^{\text{max}} \quad (5.9)$$

- 電気ヒーターへの電力入力量

$$x_c^{\text{EH}}(t) = z_c^{\text{EP}}(t) - y_c^{\text{EP}}(t) \quad (5.10)$$

- 家庭への商用電力入力量

$$z_m^{\text{EM}}(t) = d_m^{\text{E}}(t) - x_m^{\text{EM}}(t) \quad (5.11)$$

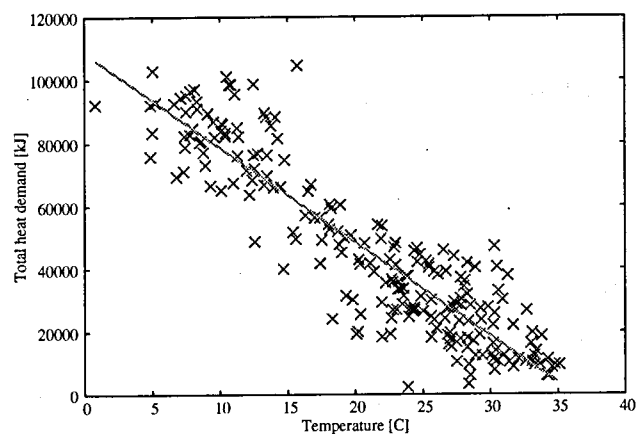


図 5.2: 1日の熱需要と気温の相関。

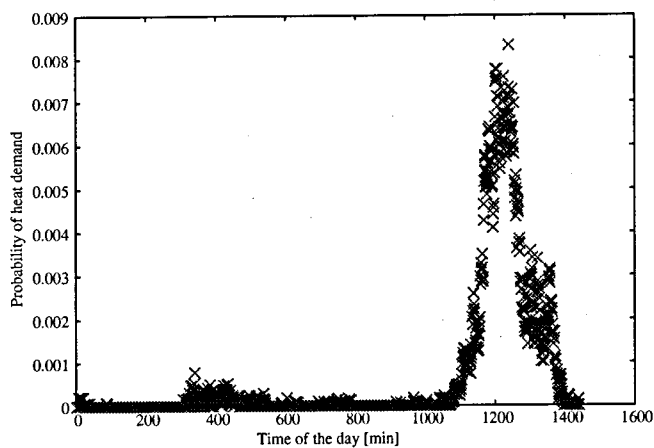


図 5.3: 時間による熱需要の発生期待値。

### 5.3 家庭用コジェネレーションシステムの情報処理層

燃料電池は、すぐに稼働率を変化させられないため、時々刻々の需要に完全に追従して運転することはできない。従って、家庭用コジェネレーションシステムを効率良く運用するためには、家庭の熱及び電力エネルギーの需要を予測することが重要である。そこで、ニューラルネットを用い、各家庭の熱需要を予測する枠組を考える。この熱需要の予想結果を用いて、ヒューリスティックルールによってコジェネレーションユニットへのガス入力量を決定する。



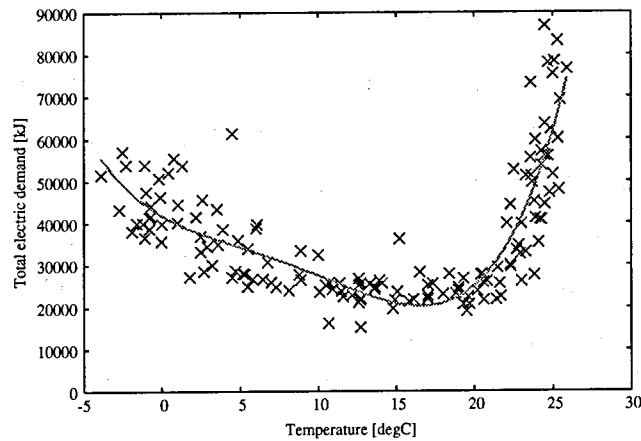


図 5.4: 1日の電力需要と気温の相関.

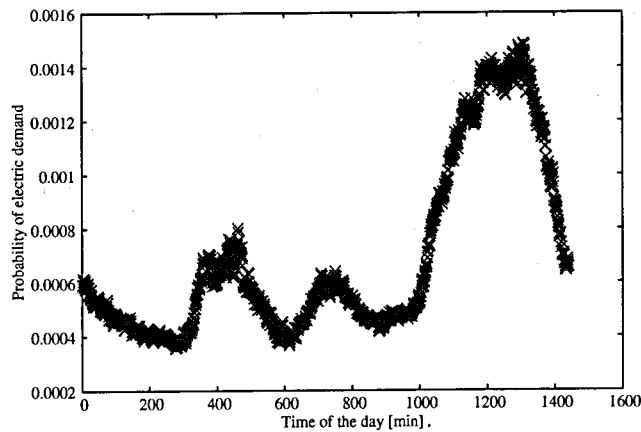


図 5.5: 時間による電力需要の発生期待値.

### 5.3.1 ニューラルネットによる需要予測

熱は湯としてストックできるため、一瞬一瞬の需要はそれほど重要ではなく、ある時間帯に総じてどれくらいの熱需要があるかが重要である。それが予測できれば、その時間までに、タンクにそれだけの熱をストックしておけば良いのである。そこで、 $t = 500, 1200, 1440$  の3代表時刻における、それまでの累積熱需要の予測を行うこととする。

一般家庭における熱需要は、気温に大きく左右される。また、生活にあるリズムが存在することを考えると、ある日の需要は、その前日の需要と大きく相関を持つことが考えられ、気温も前日とそれほど大きく変わることはない。従って、NNの入力として、前日の気温  $t^1$  と、3代表点における累積熱需要  $d^{11}, d^{12}, d^{13}$  と、前々日の気温  $t^2$  および  $d^{21}, d^{22}, d^{23}$  を考える。また、出力は、3代表点の累積需要予測値  $d^{P1}, d^{P2}, d^{P3}$  とする。

### 5.3.2 ヒューリスティックルール

NNによって得られた累積熱需要予測値を用い、CGUへのガス入力量を決定する。ここで、基本的な方針として、累積熱需要予測値までは、対応する家庭の電力需要に追随するように運転を行い、累積熱需要予測値に達した場合、そこでCGUの運転を停止する。ここで、燃料電池には、急激な出力変化ができない(最大1分あたり最大出力の5%)という制約があるため、余ったり足りなかったりすることが考えられる。この過不足分は、他の家庭とやりとりすることによって全体として平滑化されると考えられる。それでも余った分は、電気ヒータにより熱に変え、貯湯タンクに蓄えられる。

## 5.4 シミュレーション

### 5.4.1 需要データの作成

シミュレーションを行う際に、大量の需要データを必要とするが、我々の手元には、ある家庭における1年間の分単位の電力および給湯の需要データしかない。そこで、このデータを解析し、気温から需要データを推定することを考える。まず、季節による需要の違いに注目し、気温により1日の総需要を予想し、そのあとで、1日の中での需要の分布を予想することとする。

#### 熱需要

熱需要は、夏期と冬期において、その値が大きく異なる。これは熱需要が気温に大きく相関を持つことが原因だと考えられる。図5.2に、手元のデータからの最高気温と1日の総熱需要の関係を示す。また、直線に最小二乗法を用いてフィッティングした結果を併せて図5.2に示している。ここで、最高気温を用いたのは、平均気温、最低気温に比べ、よりフィッティングした直線からのバラツキが小さかったからである。この直線および平均二乗誤差を用いて、総需要を予測する。

次に、得られた総需要予測値を用い、1日の需要データをつくることを考える。まず、1日のうちでの、時間帯による熱需要の多寡を調べた。図5.3は、1年のデータの分毎の総和をとり、それを確率に直したものである。また、各々の時間での需要量には、それほど差はみうけられない。以上のことを考慮し、図5.3に示す確率に従いランダムに、1500[kJ]の一定量の需要を発生させていき、総需要予測値に達するまでそれを繰り返し、需要データとする。

表 5.1: エネルギー効率

No.	Efficiency
1	0.531
2	0.579
3	0.583

## 電力需要

電力需要も、基本的に熱需要と同じ手続きで作成する。5.4 は、手元のデータからの最低気温と1日の総熱需要の関係を示したものである。図中の曲線は、最小2乗近似により4次関数にフィッティングしたものであり、

$$f(x) = 0.75118x^4 - 23.3966x^3 + 235.393x^2 - 2195.09x + 41837.9$$

である。図 5.5 は、1年のデータの分毎の総和をとり、それを確率に直したものである。これらを熱需要と同じように用い、需要データを作成する。この際、12 [kJ/min] の定常的な需要があるとし、さらに、定常需要以外の需要は大きさとその持続時間をランダムに決めた。

### 5.4.2 シミュレーション結果

コジェネレーションシステムの有効性を確かめるため、以下のような状況におけるシミュレーションを行った。

4家庭が連携したコジェネレーションシステムにおいて、以下の3つの条件でシミュレーションを行った。

- 1 4家庭がそれぞれコジェネレーションユニットを使わない場合（すなわち、電力需要は全て商用電力で賄い、熱需要は全てガスヒーターにより賄う場合）。
- 2 コジェネレーションユニットを用いるが他家庭との連携は電力のシェアだけの場合。
- 3 コジェネレーションユニットを用いかつ情報的にやりとりをする場合。

表 5.4.2 に、それぞれのシミュレーションにより得られた、1年間のエネルギー効率を示す。表 5.4.2 より、コジェネレーションユニットを用いることにより、高いエネルギー効率を得られ、さらにコジェネレーションユニットが連携することにより、より高いエネルギー効率を得られていることがわかる。

図 5.6 は、ある1日の間のシミュレーション 3 における、CGU1 の電力需要と燃料電池からの電力出力である。図 5.6 より、基本的には自らの対応する家庭の需要を満たしつつ、貯

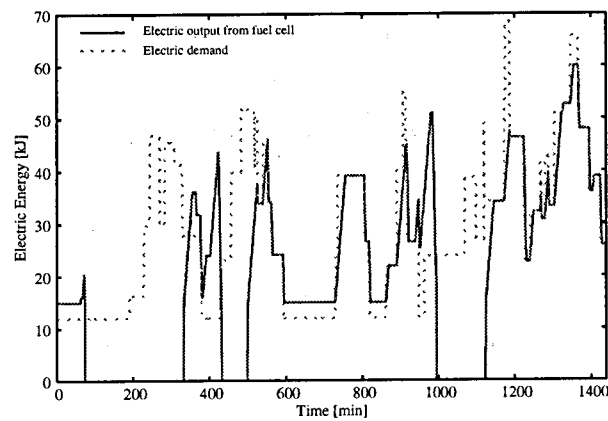


図 5.6: ある日の家庭 1 の電力需要と CGU1 からの電力供給量.

湯量が十分になった場合には、運転を止め、ときには他の家庭の需要の分も運転をしている様子が見て取れる。

## 5.5 まとめ

本章では、家庭用コジェネレーションシステムに階層型自律分散モデルの適用を試み、自律分散制御が階層型自律分散モデルの枠組内で表されることを示した。

また、シミュレーションを通じて、以下のことが分かった。4つのコジェネレーションユニットからなるコジェネレーションシステムを想定したシミュレーションにより、コジェネレーションシステムを構築することにより、商用電力およびガスヒーターを用いた通常のエネルギー供給システムよりも高いエネルギー効率を得られることがわかった。さらに、コジェネレーションユニットが自律的に連携を行うことにより、さらに大きいエネルギー効率を得られることがわかった。今後の課題として、さらに大規模なシステムを想定したシミュレーションを行い、その場合のコジェネレーションユニットの連携の仕方とエネルギー効率の関係を調べることがあげられる。

---

## 第 6 章

### 結論

本論文では、複数の主体からなりそれぞれが個別に意思決定を行うような複雑なシステムにおいて、ボトムアップにモデル化を行いトップダウンに制御を行うシミュレーション、および、システムの自律分散的制御の2つの目的を内包した階層型自律分散モデルを提案した。このモデルは、物理ダイナミクス層、情報処理層、スーパーバイザの3層からなる階層モデルである。モデルの有効性を確かめるため、その応用例として、システムの構造やシステム内の意思決定要素の異なる、高速道路交通システム、資源循環システム、家庭用コジェネレーションシステムの3つのシステムに対し、階層型自律分散モデルとしてモデル化を試みた。3章では高速道路交通システムにより、ボトムアップにシステム全体の挙動が形作られていることなど、物理ダイナミクス層と情報処理層の基本的動作を確認した。4章では、資源循環システムを例にとり、特にスーパーバイザに主眼を置き、物理ダイナミクス層・情報処理層によって生まれた大域的挙動をスーパーバイザが観測し制御する枠組の動作を確認した。5章では、自律分散制御として提案モデルを用いる一例として、家庭用コジェネレーションシステムを用い、自律分散制御のモデルとしても提案モデルが適用できることを示した。以下、3章から5章についてまとめる。

第3章では、階層型自律分散モデルの概要を示している。このモデルは物理ダイナミクス層、情報処理層、スーパーバイザの3層からなるモデルである。物理ダイナミクス層は、システムの物理的側面のみを扱う層である。この層は、システムの物理的主体である複数のエレメントとその間を流れるモノや物理的相互作用、さらに環境からなる層である。情報処理層は、システム内の情報や意思決定のみを扱う層である。この層には、意思決定の主体であるエージェントと、その間を流れる情報が存在する。情報処理層内のエージェントは、物理ダイナミクス層の単数もしくは複数のエレメントと対応しており、エレメントから情報を受け取り、他のエージェントと情報の交換をし、それらを用いて意思決定を行い、エレメントに伝える。このように、システムの物理的部分と情報・意思決定にかかわる部分を明確に分離することにより、モデル化の見通しをよくするとともに、重要なファクターである意思決定を重点的に考えることができる。スーパーバイザは、システムの制御を行うための要素である。現実のシステムを制御する際、エレメントやエージェントを直接操作し制御することは、困難である。また、システム内の情報についても得られるものは限られる。従って、

スーパーバイザの制御は、システムの大域的な情報を用い、それによって、物理ダイナミクス層および情報処理層に間接的に働きかけるという形となる。

第3章では、高速道路交通システムを階層型自律分散システムによってモデル化した。物理ダイナミクス層として、道路および車両のモデルを作成し、情報処理層モデルとして、運転者のアクセル・ブレーキ、ハンドルの操作および車線変更の意思決定をモデル化した。シミュレーションを行うことにより、現実の交通流にみられるような、車両のクラスタ形成とその波状の時間変化および自然渋滞の発生がみられ、モデルの妥当性を示した。さらに、斜線規制やサグ部を設けることによって、渋滞が発生することも確認した。また、このモデルを用い、制限速度を変化させた場合のシミュレーションを行うことにより、交通流が増えるほど、制限速度を下げた方が全体としての交通流率が大きくなることを示し、交通量に応じて制限速度を変化させることが渋滞の緩和に影響を与えうることを示した。

第4章では、それぞれ複数の生産者・消費者・処理者からなる資源循環システムを階層型自律分散モデルによってモデル化した。生産者→消費者→処理者→生産者のループ構造からなるシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行い、このような非常にシンプルなシミュレーションであっても、非常に複雑な結果が得られることを示した。またこの際、それぞれのエージェントにはコストとリサイクルに対する価値観を設定し、その価値観の違いによる全体のリサイクル率の変化について考察を行った。その結果、このモデルにおいては生産者の意思決定がリサイクル率に対して最も重要であることを示した。また、微分方程式によるモデルと比較を行うため、さらに単純化したシミュレーションモデルを設定し、階層型自律分散モデルによる結果と微分方程式モデルによる結果の比較を行った。微分方程式モデルとして扱うために緩和された制約が大きく満たされない場合においては、結果が大きく異なり、非常に単純なシステムであっても、微分方程式モデルでは扱えないことを示した。しかし、条件をうまく設定し、緩和された制約が犯されないようにした場合、システムの定常状態においては、システムの定常状態と微分方程式モデルの結果はよく一致することを示した。マルチエージェントシミュレーションにおいて、そのシミュレーション結果を予測することは難しく、プログラムのバグを発見することも容易ではない。その際、簡略化したモデルを作り、微分方程式モデルでの結果と比較することにより、階層型自律分散モデルでのシミュレーションの妥当性を評価できるのではないかということがいえる。

第5章では、家庭用コジェネレーションシステムをとりあげ、シミュレーションを行っている。シミュレーションを行うに当たって必要な需要データを人工的に作成する方法を示した。4つのコジェネレーションユニットからなるコジェネレーションシステムを想定したシミュレーションにより、コジェネレーションシステムを構築することにより、商用電力およびガスヒーターを用いた通常のエネルギー供給システムよりも高いエネルギー効率を得ることがわかった。さらに、コジェネレーションユニットが自律的に連携を行うことにより、さらに大きいエネルギー効率を得られることが示された。

以上、3章、4章においては、階層型自律分散モデルの、ボトムアップ的にシステムのシミュレーションを行い、さらにそれをトップダウンに制御する側面について、それぞれ高速道路交通システムと資源循環システムを例にとり、検証を行った。まず3章において、物理ダイナミクス層と情報処理層によりボトムアップにシステムの挙動が作られる振る舞いが、階層型自律分散システムの枠組の中で達成できていることを示した。また、4章においては、ボトムアップに作られたシステムに対してトップダウンに制御を行うことについて動作を確認した。また、4章では、階層型自律分散モデルの枠組の中で、自律分散制御ができることを示した。さらに、各例題のシミュレーションの過程で、それぞれのシステムにおける様々な示唆を得ることができた。

本論文では、階層型自律分散モデルの特徴のうち、エレメントとエージェントの多対一の関係については、検証できていない。そのような構造をもった例題での検証や、さらにダイナミックにその関係構造を変化させるようなシステムについては今後の課題である。本論文での例では、情報処理層におけるエージェントの意思決定には、簡単なルールなどのそれほど複雑でないモデルを用いている。このような意思決定においてもシステムは複雑な挙動を示すが、今後、意思決定方法を改良し、さらに現実に則したシミュレーションを行えるモデルにしていきたいと考えている。





---

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、適切なお指導およびご助言を賜りました神戸大学大学院自然科学研究科 上原邦昭教授に厚く御礼を申し上げます。また、懇切なるご指導およびご討論を戴きました神戸大学工学部 貝原俊也教授に謹んで感謝の意を表します。

神戸大学工学部 玉置久教授には、筆者が学部生のころから、本研究を進めるきっかけを与えて下さると共に、終始懇切・適切なお指導およびご鞭撻を賜りました。厚く御礼申し上げます。

神戸大学理事・副学長 北村新三 神戸大学名誉教授には、懇切に御指導、御助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

研究全般にわたり、ご指導およびご討論を戴きました神戸大学国際文化学部 村尾元助教授に深く感謝の意を表します。株式会社創発システム研究所 前田和男氏には、本研究に懇切なお指導およびご教授を賜りました。慎んで感謝を申し上げます。

筆者が、神戸大学大学院自然科学研究科博士課程後期課程に進学したとき、同課程の先輩方であった、榊原一紀 博士、稲元勉氏には、研究全般に渡り、ご助言をいただきました。心から感謝の意を表します。

北川郁氏(元神戸大学工学部技官)には、研究環境の整備など、研究途上において公私ともに助けて戴きました。心から感謝いたします。日頃の研究生活の中で、様々に御世話になりました。玉置研究室、およびその前身である北村研究室の皆様には、いろいろな面で支えられました。心より感謝いたします。特に、永吉雅人氏、丹治陽介氏には、格別にご協力戴いたことを感謝します。

最後になりましたが、ここまで支えてくれた両親に深く感謝の意を表します。



---

## 参考文献

- 1) 西成活裕：渋滞学，新潮社.
- 2) 井庭崇，福原義久：複雑系入門，NTT 出版.
- 3) 和泉潔：市場現象のエージェントベースモデル，計測と制御，Vol. 43, No. 12, 950-955, 2004.
- 4) 本川達雄：ヒトデ学，東海大学出版会.
- 5) 小西敬治，小亀英己：交通流科学の新しい展開-システム制御理論の視点から，システム/制御/情報，Vol. 45, No. 4, pp. 197 - 204 (2001)
- 6) 交通工学研究会：やさしい交通シミュレーション，丸善株式会社，pp. 23 - 36 (2000)
- 7) B. Argall, E. Cheleshkin, J. M. GREENBERG, C. Hinde and P. Lin: A Rigorous Treatment of a Follow-The-Leader Traffic Model with Traffic Lights Present. *SIAM, J. Appl. Math.*, Vol. 63, No. 1, pp. 149-168, 2002.
- 8) A. Niehaus and R. F. Stengel, An Expert System for Automated Highway Driving Control *Systems Magazine, IEEE*, Vol. 11, No.3, 1991.
- 9) 松浦廣樹，鈴木祐太，井庭崇：高速道路の新料金制度の提案とシミュレーション分析，社団法人情報処理学会研究報告，97-104, 2006
- 10) M. schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel and N. Ito: Discrete Stochastic Models for Traffic Flow, *Physical Review E*, Vol. 51, No. 4, 1995
- 11) B. S. Kerner and H. Rehborn, Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow, *Physical Review Letters*, Vol. 79, No. 20, 1997.
- 12) 尾崎晴男：高速道路における自動車交通流の隘路現象，日本流体学会「ながれ」，Vol. 22, No. 2, 123-129, 2003.
- 13) 佐川大介，佐川雄二，杉江昇：ドライバの行動決定モデルに基づく交通流シミュレーションに関する研究，電気学会論文誌 C，Vol. 124, No. 3, 2004
- 14) R. Fuller: Towards a General Theory of Driver Behavior, Accident Analysis and Prevention Vol. 37, 461-472, 2005.
- 15) 杉山雄規：交通流の物理，日本流体学会「ながれ」，Vol. 22, No. 2, 95-108.
- 16) D. C. Gazis, R. Herman and R. W. Rothery: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, *Operations Research* Vol. 9, 545-567, 1961

- 17) M. bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical Review E*, Vol. 51, No. 2, 1035-1042, 1995
- 18) Dirk Helbing and Benno Tilch: Generalized force model of traffic dynamics, *Physical Review E*, Vol.58, No. 1, 133-138, 1998
- 19) 三浦登, 福田水穂: 自動車設計と解析シミュレーション, 培風館, 160-194, 1990.
- 20) 猪飼國夫, 佐藤章: 微視的道路交通シミュレーションのためのオブジェクト指向道路モデルの構築とその検証, 日本シミュレーション学会, Vol. 18, No. 3, 109-112, 1999.
- 21) 武部健一, 交通工学研究会: 道路の計画と設計, 技術書院, 50-65, 1988.
- 22) 武部健一: 道路の計画と設計, 技術書院, 50-65, 1988.
- 23) 大口敬: 自動車ドライバの追従挙動, 計測と制御, Vol. 41, No. 5, 372-377, 2000.
- 24) 交通シミュレーション自主研究委員会(編): 交通シミュレーションの標準検証プロセス, 交通工学研究会, 2002.
- 25) 福田正: 交通工学, 朝倉書店, 42-68, 1994.
- 26) 卷上安爾, 井上矩之, 三星昭宏: 交通工学, 理工図書, 73-99, 1990.
- 27) Xing J.: A study on bottleneck phenomenon and car-following behaviour on motorways, Ph.D thesis, University of Tokyo, 1992.
- 28) 片谷教孝, 鈴木嘉彦: 循環型社会入門, オーム社 (2001)
- 29) 吉川弘之: ライフサイクルデザインの意義, 計測と制御, Vol.43, No.5, pp. 383-387(2004)
- 30) 鈴木 胖, “資源循環社会とリサイクル”, 計測と制御, Vol. 36, No.10, pp. 686-690 (1997)
- 31) I. Hatono, K. Yokoyama, T. Shiose and T. Taura: A Study on Bottom-Up Resources Circulation Systems Based on Hierarchical Modeling, *Proc. of 3rd Int. Symp. on Emergent Synthesis*, 181/186 (2001)
- 32) Kouji Yokoyama, Takayuki Shiose, Toshibharu Taura: An Indirect Control Method for Sustainable Society, *Proc. of the 4th Int. Conf. on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'01)*
- 33) 和泉 潔, 植田 一博: 人工市場入門, 人工知能学会誌, Vol. 15, No.6, pp. 941-950 (2000)
- 34) 松本卓也, 玉置 久, 村尾 元, 北村 新三: 資源循環システムの自律分散型シミュレーション・モデル, 第15回 SICE 自律分散システム・シンポジウム資料, 97/102 (2002)
- 35) Takuya Matsumoto, Hisashi Tamaki, Hajime Muraio, Shinzo Kitamura: Simulation-Based Study on Resources Circulation Systems, *2003 IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, CD-ROM paper (2003)

- 36) 塩沢 由典: 自律分散複雑系としての市場経済, 計測と制御, Vol. 38, No. 10, pp. 658-662 (1999)
- 37) 環境省, “平成 14 年版 環境白書 動き始めた持続可能な社会づくり” (2002)
- 38) K. Fujita, S. Akagi, N. Hirokawa and K. Yoshida: Optimal Planning Method of Energy Plant Configurations based on a Genetic Algorithm, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 64, No. 617C, 354 – 361, 1998.
- 39) R. A. Jacobs: Increased rates of convergence through learning rate adaptation, *Neural Networks*, Vol. 1, 295 – 307, 1988.
- 40) T. Matsumoto, H. Tamaki, H. Murao and S. Kitamura: Expressway Traffic Simulation Using Hierarchical Autonomous Decentralized Model, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol. 18, No. 12, 458 – 466, 2005.
- 41) 小原伸哉, 工藤一彦, 黒田明慈: 部分負荷および負荷変動を考慮した住宅用コジェネレーションシステムの検討, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 67, No. 655, 229 – 237, 2001.
- 42) T. J. Sejnowski, and C. R. Rosenberg: Parallel Networks that Learn to Pronounce English Text, *Complex System*, Vol. 1, 145 – 168, 1987.
- 43) N. Zhou, C. Marnay, R. Firestone, W. Gao, M. Nishida: The Potential for Distributed Generation in Japanese Prototype Buildings: A DER-CAM Analysis of Policy, Tariff Design, Building Energy Use, and Technology Development, LBNL-56359 , 2004
- 44) W. Knopse, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg: Human Behavior as Origin of Traffic Phases, *Physical Review E*, Vol. 65, 015101(R), 2002.
- 45) 藤田喜久雄, 赤木新介, 廣川敬康, 吉田清峰 遺伝的アルゴリズムによるエネルギープラントの機器構成設計法に関する研究 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 64, No. 617, 354-361, 1998



---

## 本研究に関する発表

### 論文発表

- (1) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三, 前田和男: 階層型自律分散モデルによる高速道路シミュレーション, システム制御情報学会論文誌, Vol. 18, No. 12, pp. 458-466 (2005)
- (2) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムの自律分散型モデルとシミュレーションによる基礎的考察電気学会論文誌 C, Vol. 126-C, No. 7 (2006)
- (3) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 階層型自律分散モデルによる家庭用コジェネレーションシステムの運用制御, (投稿準備中)

### 紀要

松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムのダイナミクスに関する基礎的考察, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, No. 23-B, pp. 1-11 (2003)

### 国際会議

- (1) T. Matsumoto, H. Tamaki, H. Murao, S. Kitamura: Simulation-Based Study on Resources Circulation Systems, Proc. of 2003 IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CD-ROM paper (2003)
- (2) T. Matsumoto, H. Tamaki and H. Murao: Planning and Control of Residential Co-Generation Systems Based on a Hierarchically Decentralized Model, Proc. of the 6th International Workshop on Emergent Synthesis IWES '06, pp. 199-204 (2006)

### 口頭発表

- (1) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムの自律分散型モデリングとエージェント・ベースト・シミュレーション, 第46回システム制御情報学会研究発表講演会 (2002)

- (2) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムの自律分散型モデリングとシミュレーションバイオセミオーシス研究交流会ワークショップ (2003)
- (3) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムの自律分散型シミュレーション・モデル, 第15回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 97-102 (2003)
- (4) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三: 資源循環システムの自律分散型モデルとシミュレーションによる数値的考察, 第16回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 85-90 (2004)
- (5) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三, 前田和男: 高速道路の自律分散型シミュレーション・モデルと意思決定, 第17回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 143-146 (2005)
- (6) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三, 前田和男: 高速道路交通シミュレーションの階層型自律分散モデル, 第49回システム制御情報学会研究発表講演会 (2005)
- (7) 松本卓也, 玉置久, 村尾元, 北村新三, 前田和男: 階層型自律分散モデルを用いた高速道路シミュレーションにおける運転者の意思決定, 第18回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 295-298 (2006)



---

## 付録A

### 資源循環モデル詳細

#### A.1 物理的ダイナミクス詳細

4.3.2における物理的ダイナミクスをここに詳述する。ストック変数( $\diamond$ )の時間差分の形で与える。そこに含まれる決定変数は、エージェントの意思決定によるものである。

##### (a) 生産者

$$\diamond v_{i\ell}^M(t+1) = v_{i\ell}^M(t) + a_{i\ell}(t) - \sum_j b_{j\ell i}^C(t) \quad (\text{A.1})$$

$$\diamond h_i^M(t+1) = h_i^M(t) + g_i^M(t) \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} g_i^M(t) = & -e_i^{\text{Mn}}(t) - e_i^{\text{Mr}}(t) - e_i^{\text{Mp}}(t) \\ & -e_i^{\text{Mk}}(t) + e_i^{\text{Ms}}(t) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$e_i^{\text{Mn}}(t) = \sum_m p_m^{\text{SN}} b_{im0}^M(t) \quad (\text{A.4})$$

$$e_i^{\text{Mr}}(t) = \sum_k \sum_m p_{km}^{\text{TM}}(t) b_{imk}^{\text{M0}}(t) \quad (\text{A.5})$$

$$e_i^{\text{Mp}}(t) = \sum_\ell c_{i\ell}^M a_{i\ell}(t) \quad (\text{A.6})$$

$$e_i^{\text{Mk}}(t) = \sum_\ell q_\ell^P v_{i\ell}^M(t) \quad (\text{A.7})$$

$$e_i^{\text{Ms}}(t) = \sum_j \sum_\ell p_{i\ell}^M(t) b_{j\ell i}^C(t) \quad (\text{A.8})$$

##### (b) 消費者

$$\diamond v_{j\ell}^C(t+1) = v_{j\ell}^C(t) + \sum_i b_{j\ell i}^C(t) - \sum_k d_{j\ell k}^C(t) \quad (\text{A.9})$$

$$\diamond h_j^C(t+1) = h_j^C(t) + g_j^C(t) \quad (\text{A.10})$$

$$g_j^C(t) = -e_j^{\text{Cb}}(t) - e_j^{\text{Cd}}(t) + e_j^{\text{Ci}}(t) \quad (\text{A.11})$$

$$e_j^{\text{Cb}}(t) = \sum_i \sum_\ell p_{i\ell}^M(t) b_{j\ell i}^C(t) \quad (\text{A.12})$$

$$e_j^{Cd}(t) = \sum_k \sum_\ell p_{k\ell}^{TL}(t) d_{j\ell k}^C(t) \quad (\text{A.13})$$

$$e_j^{Ci}(t) = \left\{ \sum_i (e_i^{Mp}(t) + e_i^{Mk}(t) + e^{Mn}(t)) \right. \\ \left. + \sum_k (e_k^{Td}(t) + e_k^{Tr}(t) + e_k^{Tk}(t)) \right\} / C \quad (\text{A.14})$$

(c) 処理者

$$\diamond v_{km}^T(t+1) = v_{km}^T(t) + \left[ \sum_j d_{j\ell k}^C(t) x_{k\ell}(t) \right] \\ - \sum_i b_{imk}^M(t) \quad (\text{A.15})$$

$$\diamond h_k^T(t+1) = h_k^T(t) + g_k^T(t) \quad (\text{A.16})$$

$$g_k^T(t) = -e_k^{Td}(t) - e_k^{Tr}(t) - e_k^{Tk}(t) \\ + e_k^{Ta}(t) + e_k^{Ts}(t) \quad (\text{A.17})$$

$$e_k^{Td}(t) = \sum_\ell \left[ \sum_j d_{km}^C(t) x_{k\ell}(t) \right] z_{km}^R \quad (\text{A.18})$$

$$e_k^{Tr}(t) = \sum_\ell \left[ \sum_j d_{km}^C(t) x_{k\ell}(t) \right] z_{km}^D \quad (\text{A.19})$$

$$e_k^{Tk}(t) = \sum_m q_m^S v_{km}^T(t) \quad (\text{A.20})$$

$$e_k^{Ta}(t) = \sum_j \sum_\ell p_{k\ell}^{TL}(t) d_{j\ell k}^C(t) \quad (\text{A.21})$$

$$e_k^{Ts}(t) = \sum_i \sum_m p_{km}^{TM}(t) b_{imk}^M(t) \quad (\text{A.22})$$

## A.2 意思決定詳細

4.3.3の詳細を記述する。以下の $N$ と $P$ は $t$ に依存する変数であるが、“(t)”を省略して表記している。

(a) 生産者  $t$ 期の製品価格は、 $(t-1)$ 期の利益を用いて $(t-1)$ 期の価格からの差分を定めることにより、以下のように決定する。

$$p_{i\ell}^M(t) = \max \left\{ \alpha_{i\ell}^{M1}(t) p_{i\ell}^M(t-1), A^{M1} \right\} \\ + \alpha_{i\ell}^{M2}(t) \quad (\text{A.23})$$

ここで、

$$\alpha_{i\ell}^{M1}(t) = \begin{cases} 1 + A_1^{M2} A_2^{M2} & \text{if } N_{i\ell}^{MR} - N_{i\ell}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \\ 1 + A_2^{M2} & \text{if } N_{i\ell}^{MR} - N_{i\ell}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ 1 - A_2^{M2} & \text{if } N_{i\ell}^{MR} - N_{i\ell}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ 1 & \text{if } N_{i\ell}^{MR} - N_{i\ell}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

$$N_{il}^{MR} = \sum_{\tau=1}^5 \sum_j b_{jli}^C(t - \tau) \quad (\text{A.25})$$

$$N_{il}^{MB} = \sum_{\tau=6}^{10} \sum_j b_{jli}^C(t - \tau) \quad (\text{A.26})$$

$$P_i^{MR} = \sum_{\tau=1}^5 g_i^M(t - \tau) \quad (\text{A.27})$$

$$P_i^{MB} = \sum_{\tau=6}^{10} g_i^M(t - \tau) \quad (\text{A.28})$$

$$\alpha_{il}^{M2}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_i^M(t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } g_i^M(t-1) = 0 \\ -1 & \text{if } g_i^M(t-1) < 0 \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

であり,  $A^{M1}$  は価格下限,  $A_1^{M2}, A_2^{M2}$  は価格調整乗数に用いられる定数である。製品生産数は, 理想製品在庫数  $B^{M1}$  と, 製品生産数変化量  $B_1^{M2} \dots B_4^{M2}$  を用いて,

$$a_{il}(t) = \begin{cases} a_{il}(t-1) + \beta_{il}^M(t) & \text{if } v_{il}^M < B^{M1} \\ 0 & \text{if } v_{il}^M \geq B^{M1} \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

$$\beta_{il}^M(t) = \begin{cases} B_1^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \\ B_2^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} > 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ B_3^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} \leq 0 \\ B_4^{M2} & \text{if } N_{il}^{MR} - N_{il}^{MB} \leq 0 \text{ and } P_i^{MR} - P_i^{MB} > 0 \end{cases} \quad (\text{A.31})$$

と決定される。

リサイクル率はリサイクル価値観を用いて,

$$r_i^M(t) = w_i^{MR}(t)^2 \quad (\text{A.32})$$

と決定され, リサイクル原材料の使用率として使われる。

原材料購入数  $b_{imk}^M$  については, 最も評価値の大きい処理者  $T_{k_{\max}^M}$ ,

$$k_{\max}^M = \arg \max_k \left\{ w_i^{MC}(t) p_{km}^{TM}(t-1) + w_i^{MR}(t) r_k^T(t-1) + \frac{v_{km}^T(t)}{10^3} \right\} \quad (\text{A.33})$$

から

$$b_{imk}^M = \begin{cases} \sum_l z_{lm}(t) a_{il}(t) & k = k_{\max}^M \\ 0 & k \neq k_{\max}^M \end{cases} \quad (\text{A.34})$$

個購入する。

(b) 消費者 各消費者は, 最も評価値の大きい生産者  $M_{i_{\max}}$ ,

$$i_{\max} = \arg \max_i \left\{ w_j^{CC}(t) \frac{p_{il}^M(t)}{\sum_i p_{il}^M(t)} + w_j^{CR}(t) r_i^M(t) + \frac{u_{jl}(t)}{10^2} \right\} \quad (\text{A.35})$$

から製品を次の個数購入する。

$$b_{j\ell i}^C(t) = \begin{cases} s_{j\ell}^C(t) - v_{j\ell}^C(t), & i = i_{\max} \\ 0, & i \neq i_{\max} \end{cases} \quad (\text{A.36})$$

ここで、 $u_{j\ell}(t)$  は、製品欠乏期間、つまり期  $t$  から過去への連続した製品保有数  $v_{j\ell}^C$  が製品必要数  $s_{j\ell}^C$  に満たない期数である。

また、最も評価値の大きい処理者  $T_{k_{\max}^C}$ ,

$$k_{\max}^C = \arg \max_k \left\{ w_j^{CC}(t) \frac{p_{k\ell}^{TL}(t)}{\sum_k p_{k\ell}^{TL}(t)} + w_j^{CR}(t) r_k^T(t) \right\} \quad (\text{A.37})$$

に次の個数、製品処分を依頼する。

$$d_{j\ell k}^C(t) = \begin{cases} \gamma_{j\ell}(t), & k = k_{\max}^C \\ 0, & k \neq k_{\max}^C \end{cases} \quad (\text{A.38})$$

ここで  $\gamma_{j\ell}(t)$  は  $t$  期において生産者  $C_j$  の持つ製品寿命の 0 になった製品の個数を表す。ただし、製品寿命は製品毎に、消費者の購入時に標準寿命  $y_{\ell}^s$  の 0.5 から 1.5 倍の一様分布に従って確率的に決定され、1 期経る毎に 1 ずつ減じられるとする。

(c) 処理者 製品引受価格は、 $(t-1)$  期の価格から、

$$p_{k\ell}^{TL}(t) = \max \left\{ [\alpha_{k\ell}^{T2}(t) \{p_{k\ell}^{TL}(t-1) + \alpha_{k\ell}^{T1}(t)\}], 0 \right\} \quad (\text{A.39})$$

のように決定する。ここで、

$$\alpha_{k\ell}^{T1}(t) = \begin{cases} A_1^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \\ A_2^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} > 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ A_3^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} \leq 0 \\ A_4^{T1} & \text{if } N_{k\ell}^{AR} - N_{k\ell}^{AB} \leq 0 \text{ and } P_k^{TR} - P_k^{TB} > 0 \end{cases} \quad (\text{A.40})$$

$$N_{k\ell}^{AR} = \sum_{\tau=1}^5 \sum_j d_{j\ell k}^C(t-\tau) \quad (\text{A.41})$$

$$N_{k\ell}^{AB} = \sum_{\tau=6}^{10} \sum_j d_{j\ell k}^C(t-\tau) \quad (\text{A.42})$$

$$P_k^{TR} = \sum_{\tau=1}^5 g_k^T(t-\tau) \quad (\text{A.43})$$

$$P_k^{TB} = \sum_{\tau=6}^{10} g_k^T(t-\tau) \quad (\text{A.44})$$

$$\alpha_{k\ell}^{T2}(t) = \begin{cases} A^{T2} & \text{if } \min_m (v_{km}^T) = 0 \text{ and } \\ & \sum_{\tau=1}^{10} \sum_{j=1}^J d_{j\ell k}^C = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.45})$$

であり、 $A_1^{T1} \dots A_4^{T1}$  は価格の変化量、 $A^{T2}$  は価格調整乗数である。

同様に、 $(t-1)$ 期の価格から以下のようにリサイクル原材料価格を決定する。

$$p_{km}^{\text{TM}}(t) = \max \left\{ \left[ \beta_{km}^{\text{T2}}(t) \left\{ p_{k\ell}^{\text{TL}}(t-1) + \beta_{km}^{\text{T1}}(t) \right\} \right] + \beta_{km}^{\text{T3}}(t), 0 \right\} \quad (\text{A.46})$$

ここで、

$$\beta_{km}^{\text{T1}}(t) = \begin{cases} B_1^{\text{T1}} & \text{if } N_{km}^{\text{SR}} - N_{km}^{\text{SB}} > 0 \text{ and } P_k^{\text{TR}} - P_k^{\text{TB}} > 0 \\ B_2^{\text{T1}} & \text{if } N_{km}^{\text{SR}} - N_{km}^{\text{SB}} > 0 \text{ and } P_k^{\text{TR}} - P_k^{\text{TB}} \leq 0 \\ B_3^{\text{T1}} & \text{if } N_{km}^{\text{SR}} - N_{km}^{\text{SB}} \leq 0 \text{ and } P_k^{\text{TR}} - P_k^{\text{TB}} \leq 0 \\ B_4^{\text{T1}} & \text{if } N_{km}^{\text{SR}} - N_{km}^{\text{SB}} \leq 0 \text{ and } P_k^{\text{TR}} - P_k^{\text{TB}} > 0 \end{cases} \quad (\text{A.47})$$

$$N_{km}^{\text{TR}} = \sum_{\tau=1}^5 \sum_i b_{imk}^{\text{M}}(t-\tau) \quad (\text{A.48})$$

$$N_{km}^{\text{TB}} = \sum_{\tau=6}^{10} \sum_i b_{imk}^{\text{M}}(t-\tau) \quad (\text{A.49})$$

$$P_k^{\text{TR}} = \sum_{\tau=1}^5 g_k^{\text{T}}(t-\tau) \quad (\text{A.50})$$

$$P_k^{\text{TB}} = \sum_{\tau=6}^{10} g_k^{\text{T}}(t-\tau) \quad (\text{A.51})$$

$$\beta_{km}^{\text{T2}}(t) = \begin{cases} B^{\text{T2}} & \text{if } \sum_{\tau=1}^{10} \sum_{k=1}^K b_{imk}^{\text{M}}(t) = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.52})$$

$$\beta_{km}^{\text{T3}}(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } g_k^{\text{T}}(t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } g_k^{\text{T}}(t-1) = 0 \\ 1 & \text{if } g_k^{\text{T}}(t-1) < 0 \end{cases} \quad (\text{A.53})$$

であり、 $B_1^{\text{T1}} \dots B_4^{\text{T1}}$ は価格の変化量、 $B^{\text{T2}}$ は価格調整乗数である。

リサイクル率はリサイクル価値観を用いて、

$$x_{k\ell} = w_k^{\text{TR}} \quad (\text{A.54})$$

と決定される。

ここに示した意思決定方法は、需要者の要求が完全に満たされる場合のものである。要求に対して、供給者の在庫に不足があった場合には、優先度順に引当が行われ、引当が受けられなかった需要者は、次善の供給者に対して不足分の要求をし、引当を受けることを繰り返す。また、消費者の製品購入については、資産が0以下になった時点で、それ以上の購入はしないものとする。