

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
環境学専攻人間人工環境コース

修士論文

社会シミュレーションによる  
安全規制の評価

2005年2月17日提出

指導教員 古田 一雄 教授



学生証番号 36694

長瀬 雅也

# 目次

---

## 本文

要約.....	1
第1章 研究の導入.....	2
1. 研究概説.....	2
1-1. 産業社会の基本.....	2
1-2. 安全規制と規制緩和の流れ.....	2
1-3. 事故に対する不安.....	3
1-4. 安心社会の実現に向けて.....	3
2. 研究目的.....	4
3. 論文の構成.....	4
第2章 現状および先行研究.....	6
1. 事故状況と安全に対する世論.....	6
1-1. 事故の発生状況.....	6
1-2. 安全・技術に対する世論.....	7
2. 安全規制体制.....	9
2-1. 安全規制の概要.....	9
2-2. 制度改革の推進.....	10
2-3. 性能規定と仕様規定.....	11
3. 先行研究.....	12
3-1. 信頼性工学.....	12
3-2. ヒューマンエラー解析.....	14
3-3. 組織事故の分析.....	14
3-4. 安全シミュレーション.....	15
4. 現状の課題.....	15
第3章 資源配分モデル.....	17
1. 資源配分企業モデル.....	17
1-1. 部門独立仮説.....	17
1-2. 資源配分の効果.....	18
1-3. ハザードと最適操業点.....	20

1-4. 技術進歩の影響.....	22
2. 資源配分規制モデル.....	24
2-1. 安全規制の類別.....	24
2-2. 安全規制の効果.....	25
2-3. 安全規制の限界.....	27
3. シミュレーションモデルへ.....	28
<b>第4章 シミュレーションモデル.....</b>	<b>30</b>
1. 人工社会の概要.....	30
1-1. 人工社会の用語.....	30
1-2. 人工社会の構成要素.....	30
1-3. シミュレーションの流れ.....	30
2. シミュレーション企業モデル.....	31
2-1. デバイス.....	31
2-2. インストルメント.....	32
2-3. ユニット.....	33
2-4. ライン.....	34
2-5. リンク.....	35
2-6. エンタープライズ.....	35
2-7. 企業指標.....	36
3. シミュレーション淘汰アルゴリズム.....	39
3-1. 遺伝子型.....	39
3-2. 適応度基準.....	42
3-3. 選択（淘汰と増殖）.....	42
3-4. 交叉.....	43
3-5. 突然変異.....	46
4. シミュレーション規制モデル.....	48
4-1. 規制時期.....	48
4-2. 規制基準.....	48
4-3. 罰則.....	49
4-4. その他.....	49
5. シミュレーション社会指標.....	49
5-1. 企業統計.....	49
5-2. 企業属性・指標・統計平均値.....	49
5-3. 社会効用.....	49
6. 現実との対応.....	51
6-1. 解析手順.....	51

6-2. デバイスの性能設定.....	51
6-3. モデルの限界.....	52
<b>第5章 テスト.....</b>	<b>53</b>
1. 採用機器.....	53
1-1. 機器群 I .....	53
1-2. 機器群 II .....	54
2. 予備実験.....	56
2-1. 予備実験 I .....	56
2-2. 諸条件.....	58
2-3. 予備実験 II .....	58
2-4. 予備実験 III .....	61
<b>第6章 保全なしの社会.....</b>	<b>63</b>
1. 企業サイズと突然変異.....	63
1-1. 生産性および信頼性の推移.....	63
1-2. 期待・推定成績と実績の格差 .....	66
2. 事後制裁規制.....	67
2-1. 生産性・信頼性への影響 .....	68
2-2. 社会効用への影響 .....	70
2-3. 誤差の考慮 .....	73
2-4. 生産性・信頼性および平均資金・平均年齢 .....	73
3. 結果のまとめ.....	75
<b>第7章 保全ありの社会.....</b>	<b>76</b>
1. 個別スタイルごとの検討 .....	76
1-1. 規制なし.....	77
1-2. 事後制裁.....	77
1-3. 仕様規定 I .....	78
1-4. 仕様規定 II .....	81
1-5. 性能規定.....	82
2. 異なる規制スタイルの比較.....	84
2-1. 生産性・信頼性推移の比較.....	84
2-2. 到達値と累積値 .....	86
2-3. 社会効用の比較.....	88
3. 結果のまとめ.....	90
<b>第8章 社会環境の変化.....</b>	<b>91</b>

1. 規制スタイルの変化.....	91
1-1. 生産高推移 .....	91
1-2. 信頼性推移 .....	92
2. 一様でない規制.....	93
2-1. 採用機器選択比率比較.....	93
2-2. 生産高・信頼性比較.....	94
3. 技術革新.....	95
3-1. 採用機器選択比率 .....	95
3-2. 生産高推移 .....	95
3-3. 信頼性推移 .....	96
4. 後発参入.....	97
4-1. 生産高推移 .....	97
4-2. 信頼性推移 .....	98
4-3. 採用機器選択比率 .....	98
5. 結果のまとめ.....	99
<b>第9章 結論と展望.....</b>	<b>100</b>
1. 結論.....	100
1-1. 保全なしの社会 .....	100
1-2. 保全ありの社会 .....	100
1-3. 社会環境の変化.....	101
2. 展望 .....	101
謝辞.....	102
参考文献.....	103

## 図表目次

### 図一覧

図 2-1 労働災害度数率の推移.....	7
図 2-2 労働災害強度率の推移.....	7
図 2-3 科学技術の進歩による影響.....	8
図 3-1 生産性関数 F の概形.....	18
図 3-2 信頼性関数 G の概形 .....	19
図 3-3 操業関数 H の概形.....	20

図 3-4 最適操業点.....	21
図 3-5 超低ハザード産業・超高ハザード産業.....	22
図 3-6 生産性技術進歩の影響.....	22
図 3-7 信頼性技術の進歩.....	23
図 3-8 企業群の分布.....	24
図 3-9 安全規制の効果（不適企業の排除）.....	26
図 3-10 安全規制の効果（社会効用の反映）.....	27
図 3-11 異なる操業関数をもつ企業.....	28
図 4-1 デバイス模式図.....	31
図 4-2 インストルメント模式図.....	32
図 4-3 ユニット模式図.....	33
図 4-4 ライン模式図.....	34
図 4-5 リンク模式図.....	35
図 4-6 直列数・直列位置模式図.....	37
図 4-7 ライン要素の遺伝子型表現.....	40
図 4-8 ライン番号付け例.....	40
図 4-9 ノード遺伝子列・交叉模式図.....	44
図 4-10 ネットワーク遺伝子列・行交叉模式図.....	44
図 4-11 ネットワーク遺伝子列・列交叉模式図.....	45
図 4-12 ノード遺伝子列・行基準サイズ補完模式図.....	45
図 4-13 ネットワーク遺伝子列・行基準サイズ補完模式図.....	46
図 4-14 サイズ縮小模式図.....	47
図 4-15 サイズ拡大模式図.....	48
図 5-1 生産高の期待値・統計値の比較.....	57
図 5-2 信頼性の推定値・統計値の比較.....	57
図 5-3 積立率と企業分布例.....	59
図 5-4 積立率と企業の平均生存ターム数.....	60
図 5-5 企業数と期待生産高推移.....	61
図 6-1 サイズ・突然変異と期待生産高の推移.....	64
図 6-2 企業サイズ・突然変異と直列数・Bタイプ選択率.....	64
図 6-3 サイズ・突然変異と推定信頼性の推移.....	65
図 6-4 生産性格差.....	66
図 6-5 信頼性格差.....	67
図 6-6 罰金額と期待生産高.....	68
図 6-7 罰金額と推定信頼性.....	69
図 6-8 企業サイズ5の社会効用.....	70

図 6-9 企業サイズ 10 の社会効用.....	71
図 6-10 社会効用曲線=社会効用直線の例.....	72
図 6-11 社会効用曲線の凸性とリスク緩和.....	72
図 6-12 社会効用直線と社会効用領域.....	73
図 6-13 期待生産高と平均保有資金.....	74
図 6-14 推定信頼性と平均生存ターム数.....	74
図 7-1 事後制裁と生産高・信頼性（突然変異なし）.....	77
図 7-2 事後制裁と生産高・信頼性（突然変異あり）.....	78
図 7-3 仕様規定 I と生産高・信頼性（突然変異なし）.....	79
図 7-4 仕様規定 I と生産高・信頼性（突然変異あり）.....	79
図 7-5 仕様規定 II と生産高・信頼性（突然変異なし）.....	81
図 7-6 仕様規定 II と生産高・信頼性（突然変異あり）.....	82
図 7-7 性能規定と生産高・信頼性（突然変異なし）.....	83
図 7-8 性能規定と生産高・信頼性（突然変異あり）.....	83
図 7-9 規制スタイルと生産高推移.....	85
図 7-10 規制スタイルと信頼性推移.....	86
図 7-11 到達期待生産高と累積生産実績.....	87
図 7-12 到達推定信頼性と累積信頼性実績.....	88
図 7-13 規制スタイルと社会効用.....	89
図 7-14 規制スタイルと累積社会効用.....	90
図 8-1 規制スタイルの変更と生産高推移.....	92
図 8-2 規制スタイルの変更と信頼性推移.....	92
図 8-3 非一様な規制と採用機器選択比率.....	94
図 8-4 非一様な規制と生産高・信頼性.....	94
図 8-5 技術革新と採用機器選択比率の推移（規制なし）.....	95
図 8-6 技術革新と生産高推移.....	96
図 8-7 技術革新と信頼性推移.....	96
図 8-8 後発参入と生産高推移.....	97
図 8-9 後発参入と信頼性推移.....	98
図 8-10 後発参入と採用機器選択比率の推移（規制なし）.....	99

## 表一覧

表 2-1 性能規定化のタイプ.....	12
表 2-2 主な故障モード.....	13
表 2-3 主な保全モード.....	14
表 4-1 ライン構成コード化例.....	41

表 5-1 機器特性 I .....	53
表 5-2 機器構成 I .....	54
表 5-3 機器特性 II .....	55
表 5-4 機器構成 II .....	55
表 5-5 機器構成 II (追加分) .....	55
表 6-1 企業サイズおよび突然変異の影響 .....	63
表 7-1 規制スタイル一覧 .....	76
表 7-2 A10 シミュレーション結果 .....	80
表 8-1 非一様規制の種別 .....	93



# 要約

---

経済効率を追求しての世界的な規制緩和の流れは、社会的規制である安全規制にも及ぶようになった。日本でも安全規制の見直しが相次いでいる。一方で、社会では依然として安全を脅かす事故が頻発し、一般市民の“安心”が大きく揺らいでいるとされる。

したがって、単に個々の技術の信頼性を高めるだけでなく、それらを各企業に適切に運営させ、社会全体で優れた安全性を確立しなければならない。規制が企業にどう影響し、社会全体の安全性がどのように変化するのかを工学的に評価することが求められているのである。しかし、これまでは個別の技術的な対策に関する部分のみを評価する手法が中心であり、そのような研究事例はほとんど見られなかった。本研究は、社会効用に対する安全規制の影響を評価するための、社会シミュレーションを提案するものである。

本研究で提案しているモデルは、生産活動を行う多数の企業が活動・進化するマルチエージェントシステムである。企業モデルは、生産性と信頼性の両方の要素を含むものとして設計されている。安全規制は、環境としてこれら企業の活動に影響を及ぼす。このシミュレーションモデルは、単純なものから複雑なものまで拡張できるよう、柔軟に設計されている。

シミュレーション実験から、規制環境が社会を形成していくことが確認できた。企業群は、与えられた条件の中で規制に対応した進化をとげるのである。また、実験の結果から次のような知見を得ることができた。

まず、企業組織の活発な変更は効率のよい生産システムの伝播の阻害にはなるが、より安全な体制を築く手助けにもなることがわかった。事故に対する事後制裁は、確実に社会の安全性を高めるものの罰則が過度であると意味がないこと、また、そういった懲罰は必ずしも効率性向上の阻害になるとは限らず、場合によってはむしろその発展を手助けすることが示された。さらに、仕様規定は意図と全く逆の結果を生む可能性があること、事後制裁と性能規定とはほぼ同様に機能し、常に社会の安全性を向上させることが示された。

そして、社会の安全性は現に採用されている規制スタイルに依存するため、企業群がいったん高い信頼性を獲得したとしても、それを維持するためには安全規制も維持されなければならないことがわかった。また、安全規制は定期検査よりも抜き打ち検査で実施した方が効果的であることが示された。

本研究によって、安全規制を評価するための有効なモデルが開発され、上記のような、これまでシミュレーション等で検証されることのなかった多くの知見を得ることができた。

# 第1章 研究の導入

---

## 1. 研究概説

世界的な規制緩和の流れを受け、安全規制の見直し機運が高まっているが、一方で、絶えることのない事故に対する一般市民の不安もまた高まっている。本研究は、企業活動の本分を踏まえつつ、安全規制を適切に評価するためのものである。

### 1-1. 産業社会の基本

現代の社会の豊かさは工業を基盤とする産業活動のもたらす恩恵であり、現代社会はしばしば産業社会であると言われる。産業社会は、高度に発達した技術と、それを効率的に運用する生産システムによって成立している。この生産システムの担い手は企業であり、各々が自らの利潤の最大化を目指して活動しながら、結果として社会全体の効用に貢献する。これが経済理論の基本である。

しかし、社会効用の最適化を考えると、我々は企業が失敗する可能性、もしくは企業の活動によって社会が損失を被る可能性を考慮しなければならない。そのため、政府は、企業の自由な活動だけでは社会の効用が最適化されない恐れがあると判断したとき、規制などの形で企業の活動に介入する。効用最適化失敗の要因としては、代表的には、生産の最適化の失敗、企業活動に伴う外部不経済の発生が挙げられるだろう。

生産の最適化の失敗については（経済学の最も重要な研究分野の一つであるが）、本研究では取り扱わない。また、企業活動に伴う外部不経済としては、事故の発生、公害や環境破壊、製造物の欠陥に伴う被害などがある。いずれも、時代が新しくなるにつれ注目度が増してきている事項といえる。本研究が焦点をあてるのは“事故の発生”，（例えば工場操業時の工場における災害のような）“生産活動に伴う事故の発生”である。そのため、本研究でいう“企業”は製造業に従事する企業を指す。

### 1-2. 安全規制と規制緩和の流れ

さて、“事故の発生”を予防するため、政府は安全規制を設定している。安全規制は、企業の起こしうる事故を予防し、社会効用を最適化するための重要な仕組みと考えられる。（なお、ほとんど全ての企業は、事故防止・安全追求のための内部規則を設けている。が、それらは政府の制定した関連法律や省令、行政指導などを参考にしたものである。）

しかしながら一方で、規制緩和という大きな流れが世界的に見られる。この流れは、経済的効率性を重視する立場からの参入規制や産業保護規制の撤廃などからはじまった。そして近年では、安全規制にまで見直しの手が伸びつつある。(規制を、単純な経済効率性達成のための“経済的規制”と、安全規制のような外部不経済防止のための“社会的規制”に大別することがあるが、本研究では後者を取り扱う。)

規制緩和が安全規制にまで及ぶというのには、主として二つの論拠があろう。一つは、過度な、もしくは他の産業等と比べてバランスに欠ける安全規制が、生産性を著しく阻害し、社会の効用をむしろ低下させてしまうという懸念である。特に、公共的な事業においては、かつてはとにかくただ安全だけを考えればよい、という風潮があった。しかし、日本を取り巻く経済状況の変化などから、安全性と生産性の両立が求められるようになったのである。自己責任原則を徹底し、国の関与を最小限化していくというのは国際的な流れでもある。

もう一つは、従来型の安全規制が、皮肉にも、かえって安全の追求の妨げになるのではないかという発想である。例えば、新しい安全技術を素早く取り入れられるような柔軟な規制スタイルなど、新しい形の安全規制を模索する動きもまた始まっている。

### 1-3. 事故に対する不安

さて、JCOの臨界事故、三重ごみ固形燃料(RDF)発電所の出火・爆発事故(2003年8月14日)、新日本製鐵名古屋製鉄所の爆発事故(2003年9月3日)、ブリヂストン栃木工場の火災事故(2003年9月8日)、三井化学岩国大竹工場プラントからの出火事故(2003年11月12日)、関西電力美浜原子力発電所三号機の蒸気噴出事故(2004年8月9日)、マツダ広島宇品第一工場の火災事故(2004年12月15日)等々、工場や生産設備の事故が絶えることはない。

そして、事故に向けられる世論の視線は年々厳しくなっているといえる。この傾向は、主に二つの要因によるものであろう。

一つは、産業社会が成熟し、企業の生産活動による効用が飽和に向かっていることによる。つまり、企業活動の負の側面への注目度が相対的に大きくなっているといえるからである。もう一つは、事故に対する不安の高まりである。技術の高度化や企業組織の大規模に伴い、事故自体も複雑でわかりにくくなり、また、事故の影響が極めて広範囲に及び、深刻な被害を及ぼし得るようになったのである。

社会効用を最適化する安全の水準を考えると、このような事故に対する厳しい世論を忘れてはならない。

### 1-4. 安心社会の実現に向けて

このように、安全を巡って二つの動向が存在する。一つは安全規制をも見直そうという動向、

もう一つは、事故に対してますます厳しくなる世論の動向である。

前述したように、一般市民の事故に対する不安は大きくなっている。もしも安易な規制緩和によって事故が誘発されてしまうようなことがあれば、産業に対する不信を招くだろう。また、それによって規制の改革を後戻りさせ、皮肉にも安全の追求の妨げになることも考えられる。規制の見直しには慎重でなければならない。

しかし、事故を巧く予防する安全規制の在り方を見極めるのは難しい。なぜなら、事故は一見すると突発的であるかのように観察されるからである。(つまり、発生がしばらくなかったとしてもあるとき突然事故に至るかもしれないし、事故が起きたからといってそれから常に事故が起き続けるわけでもない。)

それでも、安全規制の体制が社会の生産性と安全性とのバランスに大きく影響することは確かであろう。では、その影響はどのようなものなのだろうか。安全規制を評価するにはどうすればよいか、安全規制によって生産性と安全性との関係はどう変化するのか、という疑問を投げかけている。本研究はそれに答えるものである。

## 2. 研究目的

そこで本研究では、社会全体の安全の在り方を探求するため、生産と安全とを両方とも考慮した社会モデルを構築し、社会シミュレーションによって安全規制が社会の効用に及ぼす影響を評価することを目的とする。

そのためまず、生産と安全とを考慮した企業および社会をモデル化し、安全を含めた企業活動および安全規制を社会シミュレーションによって表現する手法を開発する。その上で、仮想社会上で様々な規制を設定しながら、安全規制の効果を観察し、社会効用最適化のために有効な規制スタイルを探る。

## 3. 論文の構成

本論文の構成について概説する。

第1章では、本研究の導入を行った。すなわち、研究の背景たる日本の安全に関わる現状を確認した上で、先行研究の簡単な紹介と課題について検討した。そして、本研究の目的を述べた。

第2章では、安全を取り巻く状況と先行研究の紹介を行う。日本の事故発生状況、安全・技術に関する世論を確認し、日本の安全規制の体制を紹介する。また、安全に関わる主な先行研

究事例を紹介する。

第3章では、ミクロ経済学の基礎知識を参考にしつつ、企業の生産性・安全性への資源配分モデルを構築する。このモデルをもとに、一般的な生産性・安全性の最適化および安全規制の役割を考察する。また、シミュレーションモデルの有効性検証にも用いる。

第4章では、本研究で用いるシミュレーションモデルを構築する。社会モデルの概観を述べ、企業モデル・淘汰アルゴリズム・規制モデルを説明する。あわせて、安全規制評価に関連する指標を定義する。

第5章では、以降のシミュレーションで用いる機器を定義し、またいくつかの予備実験を行って、モデルや実装したシミュレータの有効性を確認する。必要に応じて、第3章で調べた内容と照らし合わせて検討を行う。

第6章では、保全・修理が明示的に必要でない場合のシミュレーション実験を行い、結果と考察を示す。企業サイズおよび生存企業への突然変異の適応の影響を調べ、事故発生に懲罰を加える安全規制を検証する。また、社会効用を最大化する規制を調べる。

第7章では、保全・修理が必要な場合のシミュレーション実験を行い、結果と考察を示す。様々な規制スタイルを取り上げ、生存企業への突然変異の適応の影響を含めてそれらを個別に検討すると共に、相互に比較する。

第8章では、社会環境が一定でなく、ある時間で変化するシミュレーション実験を行い、結果と考察を示す。前章の結果と照らしつつ、技術革新・後発参入・規制変更などの影響を調べる。

最後の第9章で、本論文の結論をまとめ、今後の展望を述べて締めくくる。

## 第2章 現状および先行研究

---

日本の安全状況（事故・世論・規制体制）を確認し、先行研究を紹介する。そして、改めて現状の課題を検討して、続く本研究の意義を述べる。

### 1. 事故状況と安全に対する世論

災害統計からは、事故は総じて減少傾向にあったが近年は横ばいであるとわかる。また、世論調査からは、社会が安全でなくなって来ていると思う人が非常に多いこと、科学技術の安全への貢献を低く評価していることが読み取れる。

#### 1-1. 事故の発生状況

まず、現在の日本でどのくらいの事故が起きているのかを確認する。特に、死傷者が出るような事故（いわゆる労働災害）に焦点をあてて統計データを参照しよう。

図 2-1 および図 2-2 は、厚生労働統計一覧『労働災害動向調査』<sup>1</sup>および安全衛生情報センター『労働災害統計』<sup>2</sup>から、調査全産業・製造業全体・電気産業の部分を抜粋し、グラフにしたものである。横軸に西暦年（下二桁）、縦軸に頻度率または強度率<sup>i</sup>を取っている。（ただし、電気業については、1990年以降のデータのみである。）

このように、80年代・90年代と時代が進むに連れ、労働災害は急激に減少していることがわかるが、強度率についてはややばらつきが大きいものの、全体に下げ止まりの傾向があつて、近年はほぼ横ばいであると認められる。

加えて、製造業は産業全体よりも災害発生が少なめである。電気産業については、それよりもさらに災害発生が少ない産業であることが確認できる。

---

<sup>i</sup> 「頻度率」は単位時間当たりの労働災害による死傷者数で、災害発生の頻度を表す。また、「強度率」は単位労働時間当たりの労働損失日数で、災害の重さの程度を表す。（詳しくは上記参考資料を参照のこと。）

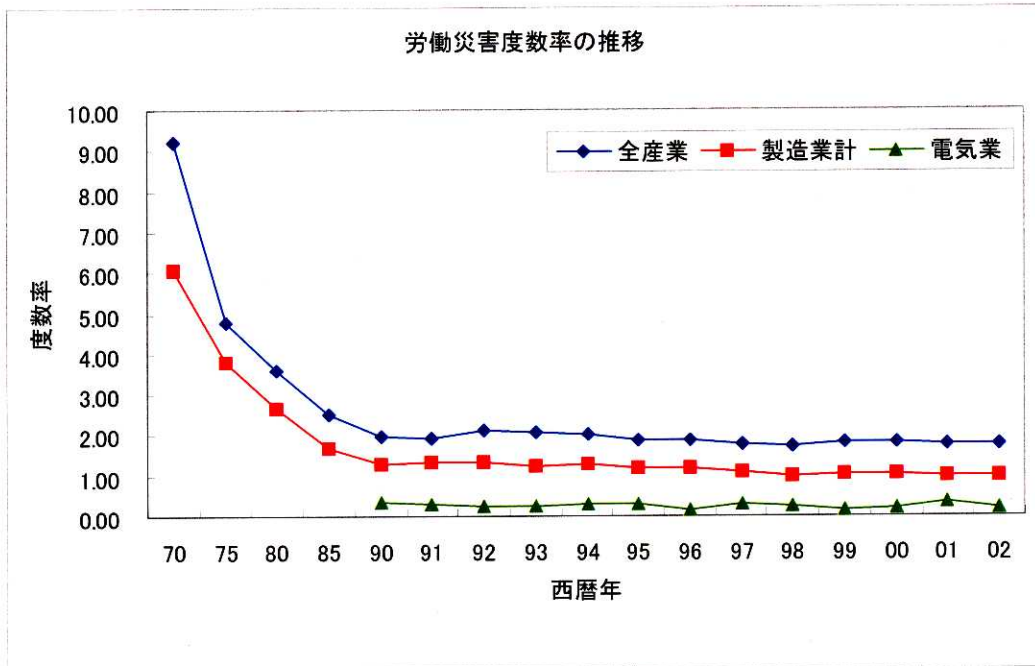


図 2-1 労働災害度数率の推移

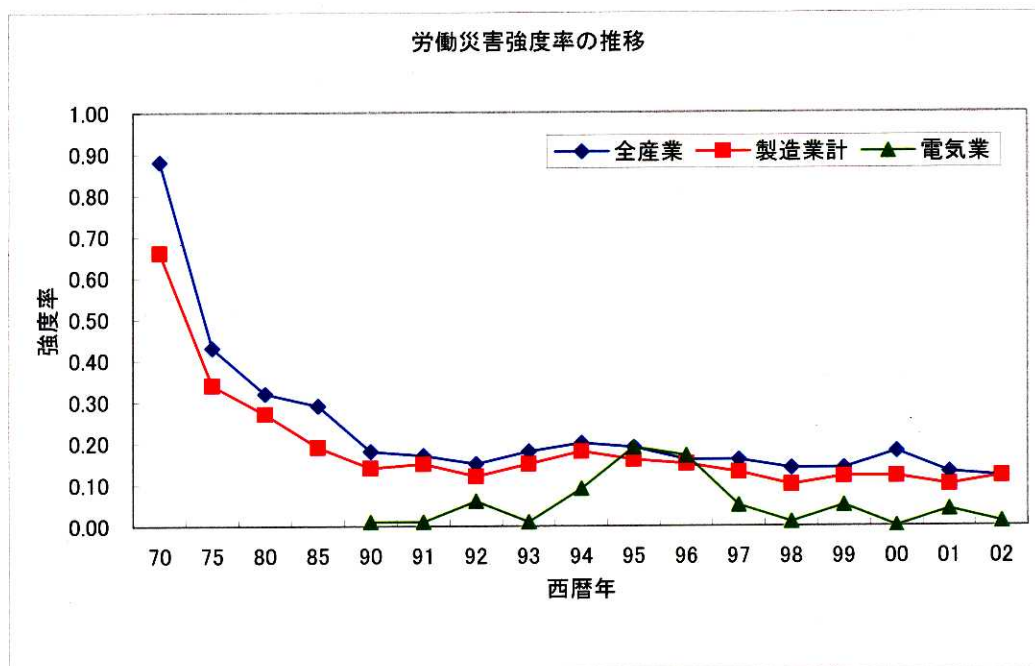


図 2-2 労働災害強度率の推移

### 1-2. 安全・技術に対する世論

では、世論は社会の安全や技術を取り巻く状況をどのように捉えているのだろうか。

2004年の『「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書』<sup>3</sup>からは、社会の安全に対する不安が全体的に高まっているとわかる。産業事故のみを対象にしているわけではないが、「日本がどの程度安全だと考えているか、特に近年身の回りの危険が増したか」という質問に対して、70.1%もの人々が、「多くなったと思う」あるいは「どちらかというが多くなったと思う」と回答したという調査結果が得られている。

2004年の『科学技術と社会に関する世論調査』<sup>4</sup>からは、一般市民が、科学技術の進歩による恩恵を認めながらも、それが必ずしも労働条件や健康状態、社会や生活の安全性には貢献していないと考えていることが伺える。この世論調査の結果を抜粋し、まとめたものを図2-3に示す。

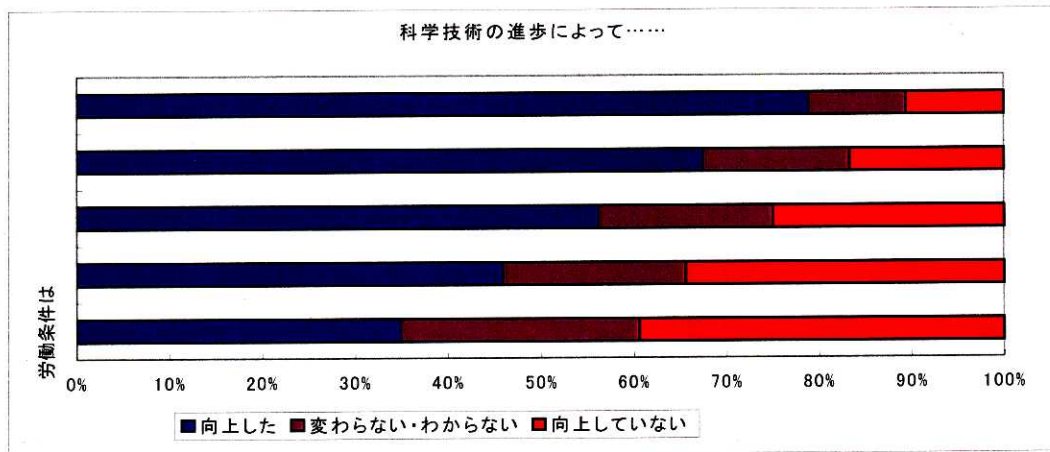


図 2-3 科学技術の進歩による影響

このような状況を反映してか、科学技術の発展に伴う課題として、「悪用されたり、誤って使われたりする危険性が増える」という意見に対して、「そう思う」とする者の割合が83.6%にもなっている。さらに、科学技術が貢献すべき分野として防災や安全対策をあげた人は、前回調査1998年に比べ、44.1%から39.6%に低下している。また、国や公的機関が取り組むべき分野として防災や安全対策をあげた人は、同じく前回調査に比べ、50.4%から36.2%に低下している。

1-1節で示したように産業全体の安全性は非常に向上しているのにも関わらず、科学技術の安全への貢献をそれほど評価しておらず、今後の貢献の必要性に対する意識も低いことがわかる。

したがって、社会の安全を直接評価するような新しい科学的手法によって“安心”を訴求することには大きな価値があると言えるだろう。



## 2. 安全規制体制

安全規制体制と、日本における安全規制分野での規制緩和の流れを確認する。また、今後特に重要な、“仕様規定”と“性能規定”についての説明を行う。

### 2-1. 安全規制の概要

次に、日本の安全規制の体制をまとめる。安全規制は、通常、法令・省令・適合検査・行政指導などの形をとって施行される。

これらは一つの見方として、産業全体に対して共通に適用されるもの、特定の産業を念頭に整備されたものに区別できる。例えば、労働安全衛生法・消防法・高圧ガス取締法・石油コンビナート等災害防止法は保安四法として総称されるが、前者2つは特定の事業者のみが守ればよいものではない。しかし、後者2つは特定事業の保安を目的として制定されたものであろう。一般には、万一事故が起きた場合、その影響が深刻で広範囲に及ぶと推測される事業に対して、その事業を特に想定した、より厳しい安全規制が設けられていると考えてよい。

法令は安全規制の理念やその目標を掲げるものであり、多くは、省令によって具体的な基準が示される。適合検査は、省令の基準を事業者が遵守しているかどうかを検査するために行われる。また、行政指導は、政府機関が特に必要と判断したとき、事業者に安全を促す狙いで実施される。

安全規制の手段（具体的な規制の対象）としては次のようなものなどが挙げられる。

- 事業開始の前に許認可を求めるもの
- 工場設備などが一定以上の安全基準を満たすよう求めるもの
- 危険な作業に携わる従業員に資格の取得や講習を義務づけるもの
- 安全確認を義務づけたり危険作業を禁止したりするなど作為義務・不作為義務を課すもの
- 安全計画を提出させるなど事業者に安全体制の確立を促すもの

加えて、例えば工場設備に対する規制では、さらに、事前の設計書などの提出・運転前の事前検査・定期的な検査などが設けられるなど、規制手段は多岐にわたる。

定められた安全規制を守らなかった場合は罰則があるのが普通である。検査時などに発見された違反で、事故に至らなかった軽微なものならば、行政指導などの注意喚起に留まることもあるが、悪質だったり、違反が度重なったりするときは、営業停止処分や許認可の取り消し、関係者の刑事訴追などの罰則が発動する。（当然、これらの罰則もあらかじめ法令などで定められている。）

これらのいわゆる事前に策定した安全規制の他、特別の行政指導が入る場合もある。例えば、第1章1-3節で述べたような事故が相次いだ後、厚生労働省は2003年11月に安全管理体制及び活動に係る自主点検を実施した<sup>5</sup>。

また、以上のような安全規制は基本的には日本政府によって運用されるが、国際的な安全への取り組みなども進んでいる。実際、多くの安全規制は、諸外国の例を参考にしながら策定されてきた。さらには、労働安全衛生マネジメントシステム<sup>6</sup>のように、労働安全に関わる基準を世界的に共通する動きが存在することも付け加えておく。(このような仕組みができれば、法令より上のレベルの基準になるだろう。)

## 2-2. 制度改革の推進

以上のような安全規制は、“社会的規制”に分類され、経済効率達成のための“経済的規制”とは区別されて論じられることが多い。

この、“経済的規制”と“社会的規制”の区別に対して、1989年の『規制緩和の経済理論』<sup>7</sup>は、“効率志向型規制”と“価値実現型規制”という区別を設けている。同書は、その区別の違いについて、前者の区別を目的別のもの、後者の区別を経済的根拠に基づくもの、としている。それによれば、価値実現型規制は、シビル・ミニマム<sup>1</sup>のような単純に経済効率だけを評価しては達成できない価値を実現するための規制である。社会的規制は、価値実現型規制の範疇に収まるものもあるが、しばしば安全確保などを根拠に“効率志向型規制”で用いられるべき体制を取っていることも多いと批判的に論じている。同書は、安全規制などは、因果関係が間接的な体制で設定すべきではなく、あくまで直接的な体制で設定すべきであると主張する。

さらに、安全規制を含む公的規制について、1998年の『規制緩和白書』<sup>8</sup>は「既存の公的規制については、常にその必要性、規制の方法・内容を見直し、不要あるいは弊害を及ぼすようになった規制について廃止、緩和を図る必要がある。」(第6章)と指摘する<sup>ii</sup>。(1997年の『行政改革会議』<sup>9</sup>の提言も同じような趣旨を含む。)

これらの提言を受け、日本の安全規制体制は近年大幅な見直しが行われている。規制見直しの原則は以下の通りであろう。

- 自己責任原則を重視し国の関与を最小化する
- 基本的に安全レベルの維持ないし向上を原則とする
- 無駄な安全規制を撤廃し事業の効率化をはかる

<sup>i</sup> 社会全体の効用が大きくても、社会的弱者の保護が疎かであるなど、余剰の分配に著しく偏りがある状態を望ましい状態でないとする思想から、市民一般に最低限度の効用を保障すべきだという考え方。

<sup>ii</sup> 同報告書は、1988年第2次行政改革審議会の『公的規制の緩和等に関する答申』から、「社会的規制についても、社会経済情勢の変化や技術革新の進展等に対応して、常に見直しを行い、状況に適合したものとし、国民に必要以上の負担や制約をもたらすことのないようにする必要がある」との指摘を引いている。

これを受けて、主に次のようなことを柱とする規制緩和が行われて来た。

- 事業者の自主的保安確保を前提に政府の行う審査・検査を縮小する
- 技術の進歩を受け安全基準の性能規定化をはかる
- 安全規制の関連法規を整理して重複をなくし国際基準に対応させる

例えば、電気事業分野においては、早くも1995年に電気事業法が改正され、検査の縮小や簡略化などが取り入れられた。(この改正は、本章1-1節で述べた電気事業の特筆すべき安全性を背景にするものであろう。なお、続く1999年にも改正されている。)

その後も電気事業の他にも、ガス事業・石油化学事業等々で上記のような規制緩和が審議され、あるいは実施されてきている。

### 2-3. 性能規定と仕様規定

ここで、2003年の『電力安全小委員会報告』<sup>10</sup>を引用して、特に“性能規定化”について説明しておく。

安全を実現するために、一般には以下の流れに沿って仕様を決定する。どの段階を規制とするかが安全規制の性格を決める<sup>i</sup>。

1. 達成すべき安全目標を決める
2. そのために機器等がどのような機能をもつべきかを決める
3. 機能の満足すべき水準を定量的に決める
4. 上記を達成する具体的な仕様を決める

同報告では、1999年の産業構造審議会基準認証部会の答申を引いて、上記番号に対応する形で、仕様規定および性能規定を表2-1のようにまとめている。(一部省略。)

	技術基準のタイプ	例
性能規定	タイプ1 (一般的な安全要求)	感電、火災等危険が生じないこと
	タイプ2 (満たすべき必要事項を要求)	電線を他の電線と接近し施設する場合には、接触、断線等によって生じる混触による感電又は火災のおそれがないように施設しなければならない

<sup>i</sup> 段階が進むほど、仕様はより具体的になり、同時に取れる手段が限られてくる。従来の仕様規定は、自由度を阻害するものではあったが、逆に業者の自助努力の必要が少なかったとも言える。性能規定化によって自由度は増すが、業者の自助努力や責任の方も大きくなることわかる。

	タイプ3 (具体的な数値で性能要求)	低圧架空電線では安全率が2.2以上となるような弛度によって施設すること
仕様規定	タイプ4 (材質や構造を指定)	低圧架空電線は引張り強さ 3.4N 以上又は直径 3.2mm 以上の硬銅線であること。

表 2-1 性能規定化のタイプ

例えば、電気事業法の改正に伴い、電気設備の技術基準に関する旧省令 285 条が検討・整理された。新たな省令基準は 78 条になり、うち 67 条が性能規定化に伴って新たに策定されたものとなったという。

同報告はまた、関連事業者を対象に「性能規定化の導入で、柔軟な対応ができる等のメリットを感じたかどうか」を調査した。それによると、メリットを感じたのは約 40% 前後、感じていないのは約 15% 程度だったという。(残りの約半数は、わからない、と回答した。) 同報告は、特に更新サイクルが短く新技術を採用する機会が多いところほど性能規定化のメリットを感じやすいと分析している。

### 3. 先行研究

安全に関わる主な先行研究をまとめ、課題点を探る。

信頼性工学は広く普及し、個別機器の故障モード調査およびその解析的研究に大きな功績を残している。これを大規模システムに適用させた信頼性シミュレーションの研究もある。また、社会シミュレーションの応用として、企業の安全文化についてマルチエージェントモデルを適用して研究した例もある。しかし、これらはいずれも、企業の生産・安全体制のうち、生産性の部分を切り離して研究したものである。

#### 3-1. 信頼性工学

『信頼性工学入門』<sup>11)</sup>によれば、“信頼性工学”が組織的に大がかりに取り上げられたのは第 2 次世界大戦が契機であり、非常に古くから研究され、既にかなり完成された学問領域といえる。これは、システムの信頼度・保全度に注目し、システムが利用可能な状態にあるかどうかのアベイラビリティを評価することを目的としている。

信頼度とは、簡単に言うと故障を起こさない確率である。これに関連して、個々の機器の故障モードが研究されてきた。保全度とは、さらに故障に対する修理などを加味するものである。アベイラビリティはそれらをあわせた尺度といえる。

ここで、主な故障モードを表 2-2 に簡単にまとめておく。

故障モード	故障の性質	故障率	信頼度分布例
減少型 (DFR)	初期不良	単調減少	指数分布の混合
一定型 (CFE)	偶発故障	一定	指数分布
増加型 (IFR)	劣化故障	単調増加	正規分布

表 2-2 主な故障モード

なお、単位時間を  $\Delta t$  とすると、故障率とは「時間  $t$  まで故障のなかったシステムが時間  $t + \Delta t$  までに故障する確率」を意味する。故障率  $\lambda(t)$  から、信頼度  $R(t)$ ・故障密度関数  $f(t)$  を次のように計算できる<sup>i</sup>。

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right]$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

信頼度は「時間  $t$  の時点でシステムが故障していない確率」、故障密度関数は「時間  $t$  から  $t + \Delta t$  の間にシステムが故障する確率」を意味する。

一般の機器は、システムの使いはじめは初期不良があることから減少型で、初期不良に対処し老朽化するまでは一定型で、長期運用の後、老朽化が進行すると増加型で表現できることが多い。したがって、これらを組み合わせ、故障率をバスタブ曲線で表す故障モードも有用である。

また、主な保全モードを表 2-3 に簡単にまとめておく。(保全モードと故障モードを組み合わせることで、保全度を計算できる。)

保全モード	概略	有効な故障モード
事後保全	故障後の保全	一定型

<sup>i</sup> 本研究ではシミュレーションモデルを用いるので、故障率がわかれば他の値を計算する必要はない。また本研究では、特に明記しない限り、信頼性を故障率の意味で用いる。

時間計画保全	定期的な保全	増加型
状態監視保全	兆候をみでの保全	増加型

表 2-3 主な保全モード

信頼性工学においては、さらにこれらのシステムを直列あるいは並列に接続したとき、全体のアベイラビリティを計算する解析的手法などを示している。

### 3-2. ヒューマンエラー解析

信頼性工学では個々の機器の故障率をもとに考察を進めた。実際の事故は、機器の故障ばかりではなく、人間のエラーによって生じることも多い。そのため、人間のエラーモードを解析する研究も行われてきた。このような解析は、まず人間の判断モデルを構築することが肝要なので、認知工学的な検知からの研究が中心である。

例えば古田は、『認知プロセス工学』<sup>12</sup>の中で、SRK モデルなどのヒューマンモデル、およびそれに対応する形で人間のエラーモードを紹介している。

### 3-3. 組織事故の分析

前3-2節のヒューマンエラー解析は、基本的に個人の人間のエラーモードを対象としている<sup>i</sup>が、近年の大規模事故は個人の人間の責任というよりは、組織的要因をもつことが少なくない。James Reason は、“Managing the Risks of Organizational Accidents”<sup>13</sup>の中で、組織事故について詳細を検討している。

ここでは、組織が生産性と安全性という二つの普遍的目標をもつものと述べ、とかく生産性が重視されがちであると指摘している。(これは本研究の問題意識とも重なるものである。) この主な原因として次のような事項が挙げられている。

- 組織活動の資源は生産によってしか生み出されず、明らかに生産が優先される
- 生産のプロセスやノウハウの方が理解しやすく、安全のそれらは理解しにくい
- 生産は連続的で直接的な情報を得やすいが、安全については不連続で間接的である

これは組織が構造的に生産性を重視していく傾向を示すものである。

また同書は、「非難のサイクル」と称し、単純に事故を起こす個人のみを強く責めることの非を説く。さらには、安全規制の難しさにも言及し、近年の規制見直しの流れも紹介している。

<sup>i</sup>ただし、前述の『認知プロセス工学』は集団行動や集団信頼性についても言及している。

そして、“安全文化”として次の四つの要素を挙げる。

- 報告する文化
- 正義の文化
- 柔軟な文化
- 学習する文化

### 3-4. 安全シミュレーション

安全研究の分野においても、これまで多くのシミュレーションが試みられてきた。例えば、信頼性工学に基づき、複雑で大規模なシステムのアベイラビリティやコストを計算する研究、ヒューマンモデルに基づき、人間のエラー発生を観察する研究、組織モデルを構築し、安全文化を観察する研究、などがある。

## 4. 現状の課題

既存の安全研究は、企業などの活動のうち、安全に関わる部分のみを取り出して評価する手法が中心であった。信頼性工学や信頼性シミュレーションでは、機器やシステムの信頼性を特に取り出し、許容すべき信頼性をあらかじめ定めた上で、そこに関わる保全コストの最適化などを考慮するものである。また、安全文化の研究では、従業員の活動を安全に関わるものに限った上で、よりよい安全体制の充実をはかるものである。

しかし、第1章 1-1 節でも触れたように、企業活動の本質的目的は生産を達成して利潤を得ることである。そして、企業の社会への貢献は生産なしにはありえない。企業の安全体制は、常に生産性とのバランスの上で構築されるものである。（経済団体連合会の規制緩和への提言『21世紀に向け新しい規制緩和推進体制の整備を望む』<sup>14</sup>では、生産効率の向上を阻害する規制の見直しを強く求めている。）

同時に、第2章 1-2 節で述べるように、一般市民はただでさえ安全に対して不安を抱いており、安易な安全規制の変更によって事故が生じるようになれば、ますます不信感を増大させるだろう<sup>i</sup>。

今のところ、安全規制自体の評価は、事後的で具体的な事例に基づく調査が中心である。加えて、安全規制の見直しは、基本的に「現状の安全レベルを維持ないし向上させること」が原則であって、社会が許容できるリスクについて十分な考察が為されてきたとは言えない。

---

<sup>i</sup> 例えば、産業事故の問題ではないが、食肉における牛海綿状脳症（BSE）検査体制の規制を緩和しようとしている今、消費者団体などから反発と不安の声があがっていることは周知の事実である。

## 第2章 現状および先行研究

したがって、安全規制自体を、事前かつ工学的・一般的に評価する試みは大きな意味をもつであろう。ただし、そのとき真に適切な評価を行うためには、生産システムも考慮した企業モデルを導入しなければならない。そして、生産性と安全性とのバランスを含めた検討が求められる。しかし、安全規制の制度設計を、規制の社会への影響から考える研究事例はこれまで見られなかった。

第1章2節の研究目的で述べたように、本研究はそこに照準を合わせている。



## 第3章 資源配分モデル

---

まずは、企業の資源配分モデルから、一般的に生産性と安全性とのバランスがどのように取られるのかを考える。そして、それに対して安全規制がどのように働くのかを考察する。

### 1. 資源配分企業モデル

一般に、企業はある一定の財をもち、それを投資に振り分けて生産活動を行う。(例えば、『ミクロ経済学—市場原理至上主義とその限界—』<sup>15</sup>では、「企業とは、所与の生産技術のもとで土地、労働、資本の本源的生産要素を投入し、生産活動・販売活動を組織して、継続的に事業を経営する経済主体である。」と述べている。)

本研究においては、特に事故を防止するための安全投資が重要であるから、生産性部門（生産による利潤に関わる）と安全性部門（事故の確率に関わる）への財の分配を考察する。また、この“財”は、土地・労働・資本などを総合したものと考える。

#### 1-1. 部門独立仮説

本資源配分モデルは、ミクロ経済学の基本知識および次のような「部門独立仮説」に基づいて構築される。

生産性部門と安全性部門は独立である。第一に、生産性に対する投資と安全性に対する投資（またはそれらについてのコスト）は完全に分離して評価できる。第二に、一方に対する投資が、残り一方の部門に影響を与えることがない。つまり、生産性および安全性は、排他的に財を消費して獲得され、しかも両者はトレードオフの関係にある。

生産課程ならば、これは作業ステップに分割していくことができる。(例えば『産業システム経済学』<sup>16</sup>では、作業研究として、簡単に工程分析、作業分析、動作分析などを紹介している。)このとき、部門独立仮説は、一つのステップが生産か安全かのいずれかに対応するまで分割できることを要求する。そして、そのステップがもし投入財に対して何らかの付加価値を付与しているならば、それは生産性部門に関わる生産ステップである。ただし、もしも投入財に対して何ら付加価値を付与していないならば、それは安全性部門に関わる安全ステップだと見なせる。それぞれのコストは、そのステップに費やす時間などから評価できる。(例えば、安全ステップを省略したときの節約時間などからも計算できるだろう。)

## 1-2. 資源配分の効果

今、ある企業が、財  $Z$  を生産性部門と安全性部門の2つに振り分けることを決定したとしよう。生産性部門への財の投入を  $P$ 、安全性部門への財の投入を  $Q$  とすると、 $Z=P+Q$  が成り立つことになる。また、それらへの投資によって、以下のような効果が得られるものとする。

### 1-2-1. 生産性部門

生産性部門への投資により、企業の生産性が向上する。ここで、生産性とは単位時間あたりの利益を意味するものとする<sup>i</sup>。ただし、これは事故がまったく起きないと仮定したときの値である。

生産性を  $S$ 、生産性部門への投資を  $P$  とすれば、部門独立仮説により、 $S$  は  $P$  のみによって自動的に決まることになる。すなわち、関数  $S=F(P)$  が存在する。この関数  $F$  の形状は一般には不明であるが、次の性質を持つものとしてよい。(図 3-1 参照。ただし、 $F(Z)$  を  $P_1$  とおいた。)

- ある投資額  $P_0$  まではゼロである (利益をあげるためにはある程度は生産性部門への投資が必要である)
- 単調増加である<sup>ii</sup> (より大きな投資により、より大きな生産性が実現する)
- 曲線部分は上に凸である (限界効用逡減の法則<sup>iii</sup>)

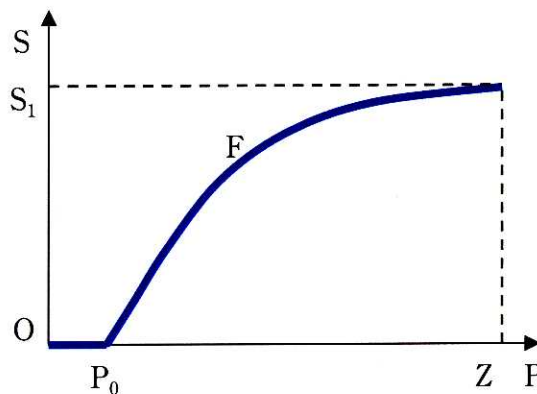


図 3-1 生産性関数  $F$  の概形

### 1-2-2. 安全性部門

安全性部門への投資により、企業の信頼性が向上する。これは、単位時間あたりの事故が発

<sup>i</sup> 生産量としてもよいが、ミクロ経済学でいう生産関数や総費用関数とは異なるので区別する。

<sup>ii</sup> 実際には限界効用が生産物の価格を越えると減少に転じるが、ここでは財がそれほど潤沢でないと仮定する。あるいは、その限界を超える投資は自動的に安全性部門に振り分けられると考えてもよい。

<sup>iii</sup> 生産性が大きいほど、さらに生産性を上げるために大きな投資を必要とすること。

生しない確率を意味するものとする<sup>i</sup>。

生産性部門と同じように、信頼性を  $R$ 、生産性部門への投資を  $Q$  とすれば、関数  $R=G(Q)$  が存在することになる。この関数  $G$  は、次のような性質をもつとしてよい。(図 3-2 参照。ただし、 $G(Z)$ を  $R_1$ とおいた。)

- 初期値  $R_0(>0)$ をもつ (安全投資がまったくなくても事故は起きないかもしれない)
- 常に、 $G(Z)<1$  である (事故確率をゼロにすることはできない)
- 単調増加である (より大きな投資により、より大きな信頼性が実現する)
- 上に凸である (限界効用逡減の法則)

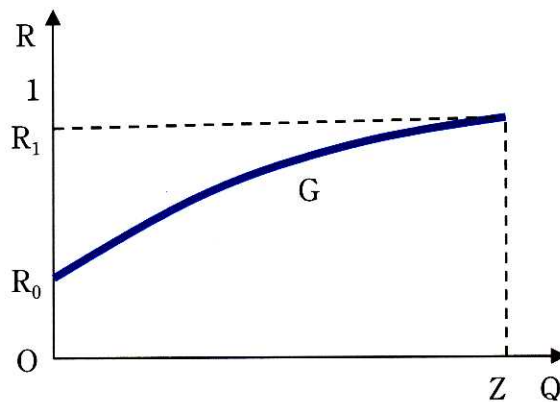


図 3-2 信頼性関数  $G$  の概形

### 1-2-3. 充足可能投資曲線

$F$  および  $G$  を用いれば、投資によって実現できる企業の生産性および信頼性の組を求めることができる。 $R=G(Q)$  より、 $R_0 \leq R \leq R_1$  であれば  $R$  は達成可能な信頼性であるから、まずこの範囲で  $R$  を定める。すると、逆関数<sup>ii</sup>  $Q=G^{-1}(R)$  から安全性部門への投資が決定する。したがって、 $P+Q=Z$  から、 $S=F(Z-G^{-1}(R))$  となる。つまり、 $S$  を  $R$  の関数  $S=H(R)$  として定めることができる。(  $H$  を操業関数と呼ぶことにする。)

<sup>i</sup> したがって、事故が発生した場合、その被害を小さくするための対策については考えないことになる。

<sup>ii</sup>  $G$  の単調性により、 $G^{-1}$  が存在する。

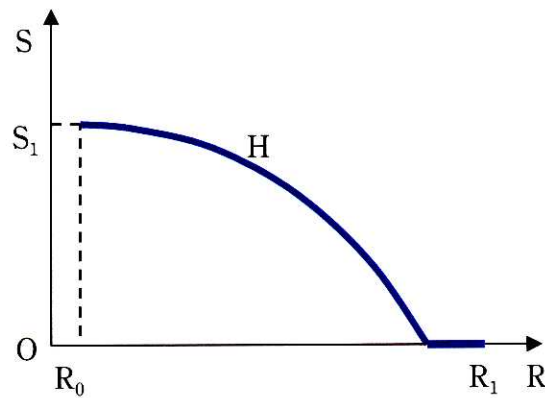


図 3-3 操業関数 H の概形

これをグラフにすると、充足可能曲線として図 3-3 のように描ける。これは、次のような性質をもつ。

- 単調減少である（生産性と安全性がトレードオフの関係にあることを意味する）
- 上に凸である（もとの F および G の凸性による）
- F および G の性質を引き継いだ“端点”をもつ

H 上のどの点においても、生産性または信頼性を向上させるためには、信頼性または生産性を犠牲にせねばならない。したがって、H は企業のパレート最適解の群を図示したものであるともいえる。

### 1-3. ハザードと最適操業点

さて、企業はあくまで自らの利益を最大化することを計画する。したがって、企業がどの生産性および信頼性の組を選択するかは、企業が信頼性 R をどのように生産性に換算するかによって決まる。そのため、事故が発生した場合の被害の大きさ（ハザード）を見積もらなければならない。このハザードを X とおくと、 $X(1-R)$  が企業の評価するリスクということになる。よって、企業が期待する利益値は効用関数  $U=S-X(1-R)$  で表される。

#### 1-3-1. 最適操業点の選択

利益期待値の式を  $S=-XR+(U+X)$  に変形して図 3-3 に追加したものが図 3-4 である。直線上の点は企業に同じ利益期待値を与える。直線は、傾きがハザードの値を表し、見込まれる効用 U (S 切片) の変化により平行に移動する。したがって、H と接点をもつとき、最大の利益期待値 U が見込まれるので、企業は図中のような操業点 M を選択する<sup>1)</sup>。

<sup>1)</sup> F および G の逆関数から投資の量を決定できる。

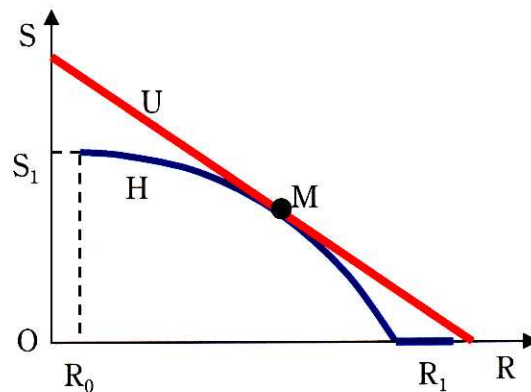


図 3-4 最適操業点

Hの各点での傾きは、その点における生産性と安全性の代替率<sup>i</sup>を示す。よって、この代替率がハザードの値と等しくなったとき、最適な操業点が実現されることになる。これは、このとき、信頼性の増加によって減少するリスクの量が、それを達成するために削減しなければならない生産性の量と一致することを意味する。(それ以前には、減少するリスクの量よりも、削減しなければならない生産性の量の方が少ない。また、それ以降は、減少するリスクの量よりも、削減しなければならない生産性の量の方が多い。)

### 1-3-2. 最適操業点の例外

生産性と安全性の代替率は逓増<sup>ii</sup>していく。また、前項で、最適な操業点はハザードの値が代替率と一致したとき実現すると述べた。そのためには、ハザードの値が最小代替率より大きく最大代替率より小さいものでなければならない。そうでない場合について説明しておく。

ハザードの値が最小代替率より小さい場合、企業は安全性部門への投資を行わない。これは、事故の程度<sup>iii</sup>が低いと予想される産業であることを意味する。(超低ハザード産業と称する。) また、ハザードの値が最大代替率より大きい場合、その産業からは利益が見込まれないと判断される。(超高ハザード産業と称する。) これは、事故の程度があまりにも大きく、操業に踏み切るには危険すぎる産業であることを意味する。(図 3-5 参照。)

<sup>i</sup> 信頼性を単位量増加させるために必要な生産性の減少量。

<sup>ii</sup> これは大きさを考えている。なお、この代替率逓増を基本的性質と認めてHの凸性を説明することもできる。

<sup>iii</sup> ただし、Xの絶対的な大きさあるいは $S_1$ との比ではなく、代替率との大小関係が重要である。

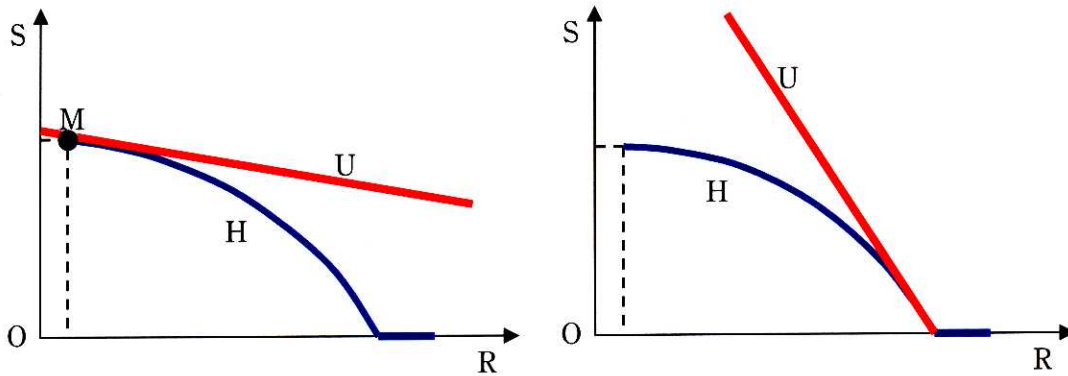


図 3-5 超低ハザード産業・超高ハザード産業

### 1-4. 技術進歩の影響

企業は、超高ハザード産業において操業に踏み切ることができないと述べた。では、どのような技術進歩があれば操業による利益が見込まれるようになるのだろうか。

#### 1-4-1. 生産性技術の進歩

まず、生産性技術が向上したときを考える。

生産性技術の向上も様々であるが、ここでは、生産性関数  $F$  が、 $F' = aF$  に進歩したものとしよう。(例えば、新技術のもたらす付加価値によって製品価格を上昇させることができるとすれば、比例的に利益が向上すると考えてよい。) すると、新しい操業関数  $H'$  も  $H' = aH$  と定義できることになる。これは、グラフでいえば、もとの  $H$  を  $S$  軸方向に  $a$  倍したものである。

したがって、最小代替率および最大代替率も  $a$  倍されるので、ハザードの値が最大代替率より小さくなる可能性がある。(図 3-6 参照。) すなわち、生産性技術の(投資量に対する利益を定数倍あげると見込ませるような)進歩は、超高ハザード産業に対する参入の道を開く可能性をもつといえる。

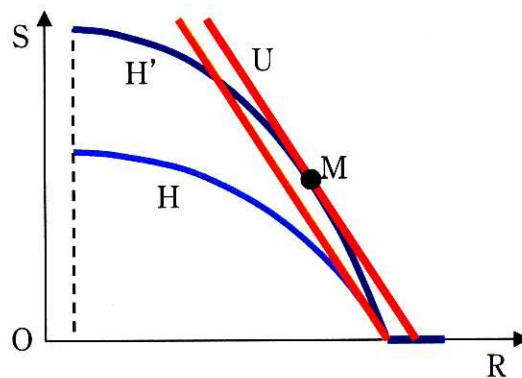


図 3-6 生産性技術進歩の影響

1-4-2. 信頼性技術の進歩

次に、信頼性技術が向上したときを考える。

さて、信頼性関数  $G$  が、生産性技術の進歩と同様に、 $G'=aG$  と進歩すると仮定してよいのだろうか。実は、そのような状況は考えにくい<sup>i</sup>。というのは、信頼性については、高い水準のものをさらに上昇させるのは難しいからである。

例えば深層防護モデルを考えてみる<sup>ii</sup>。そこで  $n$  段階の安全対策が施されていて、各段階での信頼性が  $R_i$  だったとしよう。すると、全体の信頼性  $R$  は  $R=1-\Pi(1-R_i)$  によって計算される。ここで、 $R_k$  を  $\alpha$  向上させるような技術進歩があったと仮定する。すると、新しい信頼性  $R'$  と  $R$  との差は、 $R'-R=\alpha \Pi_{i \neq k}(1-R_i)$  となる。 $\Pi_{i \neq k}(1-R_i)$  は、対象外の深層防護が機能しない確率であるから、これは他の防護の信頼性が高いほど小さい。つまり、もとの信頼性が高いほど恩恵を受けにくいのである。

図 2-1 労働災害度数率の推移および図 2-2 労働災害強度率の推移の下げ止まりの傾向にも、このようなことが現れていると考えられる。

したがって、信頼性技術の向上については、図 3-7 のような“H が膨らむ”場合を考えるのが妥当といえるだろう<sup>iii</sup>。よって、最大代替率が大きくなるので、参入の道が開かれる可能性がある。

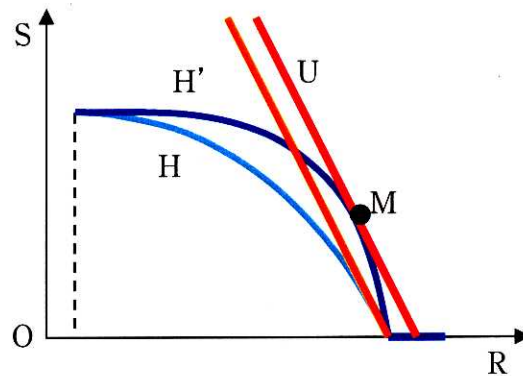


図 3-7 信頼性技術の進歩

<sup>i</sup> なお、もしそのようなことがあるとすれば、生産性技術の進歩のときと同様に考えて、 $H$  が  $R$  軸方向に  $a$  倍されることになる。すると、代替率は逆に  $1/a$  倍になるので、信頼性技術の進歩によって参入の道が閉ざされたり、あるいは逆に、信頼性技術の後退によって参入の道が開かれたりするようなパラドックスが生じることになる。

<sup>ii</sup> 安全対策は様々なエラーを防止することであるから、一般に一つの技術進歩が一つのエラーにしか効果をもたないと考えてこのようなモデルを例にあげた。

<sup>iii</sup> 図では最大の信頼性は変化しないとしたが、厳密には僅かながら信頼性が向上する。

## 2. 資源配分規制モデル

資源配分モデルにおいて、安全規制の効果がどう現れるのかを説明する。通常、企業群は、前項で説明したHのようなパレート最適解の群をあらわす曲線の内部で操業を行う。

ただし、必ずしもパレート最適解もしくは最適解に到達した企業ばかりではない。企業が真に長期的で、生産性やリスクを正確に評価できればよいのだが、一般に、特に安全に関する情報は完全ではないのである。また、頻繁な技術変遷や、市場動向の変化などから、企業群が収束していくような平衡状態は必ずしも期待できない。(図 3-8 参照。このように、企業群は、パレート最適解の内部に点在していると考えられる。)

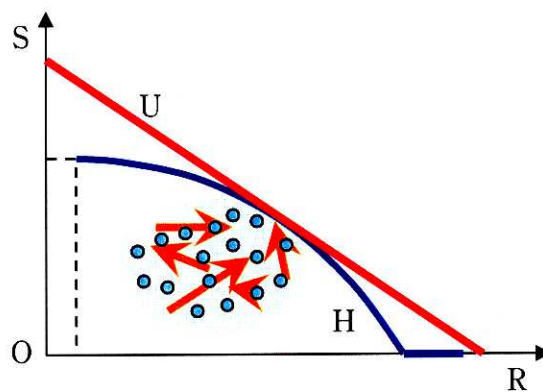


図 3-8 企業群の分布

### 2-1. 安全規制の類別

安全規制を、規制の時期（事前検査・定期検査・事後検査）、規制の形態（事後制裁・性能規定・仕様規定）の観点から、それぞれどのように企業に影響をもつかを説明していく。

#### 2-1-1. 規制の時期

安全規制は主に次のような時期に実施される。

- 事前検査、操業開始時に設備を点検する
- 定期検査、定期的に設備を点検する
- 事後検査、事故を起こしたときに立ち入り調査を行う

事前検査は企業のスタート地点に対する制約となる。また、定期検査は企業の現在地点に対する制約であり、事後検査は問題を起こした企業のそのときの地点に対する制約となる。



### 2-1-2. 規制の形態

安全規制は主に次のような形態で実施される。

- 事後制裁，事故を起こしたときの罰則（刑事罰や罰金）を提示する
- 性能規定，企業が守るべき最低限の信頼性を提示する
- 仕様規定，企業が守るべき機器の様式を提示する

事後制裁は，事故を起こしたときに企業が被る損害を大きくするものであるから，擬似的にハザードを大きくさせているものと考えられる。性能規定は，その内容の通り，企業のR位置に制約を課すものである。同じく仕様規定についても，R位置の制約を念頭に課せられるものといってよい。

## 2-2. 安全規制の効果

安全規制は主として二つの効果をもつ。一つは，明らかに不適な企業を，市場原理を損なわない範囲で排除することである。もう一つは，企業の利益とは一致しない社会の利益を反映させることである。

### 2-2-1. 不適企業を排除する規制

市場原理によれば，企業群が自由に競争を行っていくと，自然に前項で述べたような最適操業点に収束していくはずである。その意味では，社会の最適点と企業の最適点が一致する限り，政府の規制は必要ないということになる。

しかし，信頼性は，生産性と違ってただちに企業利益に貢献するものではない。信頼性は，事故があって，はじめて必要性が再認識される性質のものである。すると，短期的な利益を追う企業の事故に対する警戒が薄れ，安全性に対する投資はしばしば疎かになりがちになる。これによって，しばしば報道されるように，最低限度の安全基準も守らないような企業が出てくるともいえる。（前述のように，最適操業点にいない企業も多いと考えられる。）

したがって，むしろ政府が関与し，自由な競争を阻害しない範囲で安全基準を義務づけることが是認されるのである。

これは，資源配分モデルでいえば，パレート最適解内部の領域を動き回る企業に対して，その範囲に制限をかけることに相当する。これによって，非均衡状態にあつてなかなか淘汰が進まない不適切な企業や，信頼性を忘れて生産性のみを向上させようという企業を排除することを狙うのである。

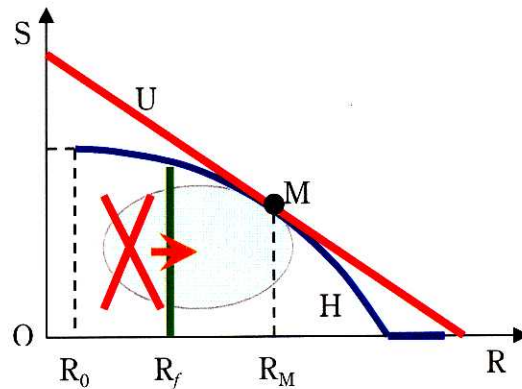


図 3-9 安全規制の効果（不適企業の排除）

さて、このような効果を狙い、最低限度の信頼性  $R_f$  を遵守させる安全規制（性能規定もしくは仕様規定）を設定するときを考える。（図 3-9 参照。）また、最適操業点  $M$  における信頼性を  $R_M$  とすれば、 $R_0 \leq R_f \leq R_M$  のときに規制は有効に働くことになる。もし  $R_f < R_0$  なら規制は必要なく煩雑な手続きを生むだけだからである。また、 $R_f > R_M$  なら市場原理を阻害してしまうからである<sup>1</sup>。

### 2-2-2. 社会効用を反映させる規制

企業はその利益を最大にするために行動する利己的な存在である。完全自由競争の市場経済においては、利己性は特に責められることではなく、むしろそれによって社会全体も利益が得られると奨励される。

しかし、事故の発生による外部不経済や、労働者等の最低限の権利を考えたとき、企業の生み出す余剰とは別に、許容できるリスクを設定しなければならないときもある。そのようなとき、企業の自主的な行動に任せるだけでは、一般市民の要求に答えることはできない。安全規制が社会的規制の文脈で語られることが多いのはこのような事情からである。

このような安全規制には主として二つの形態がある。一つは、あらかじめ社会が許容できるリスクを考え、そこから企業が守るべき信頼性  $R_f$  を設定しておく形態である。（これは前項で、評価した  $R_f$  が  $R_M$  より大きかったとしても、それを妥当だとするものである。）もう一つは、事後制裁などによって企業が評価するハザードを大きくし、外部不経済を反映させるものである。

（図 3-10 参照。新しい効用関数  $U'$  は、反映された新しいハザードの大きさに対応して傾きが急になる。それに伴い、より信頼性の高い最適操業点  $M'$  が出現する。）

<sup>1</sup> ただし、2-2-2 節でも述べるように、社会効用と企業の利益が一致しないときはその限りではない。

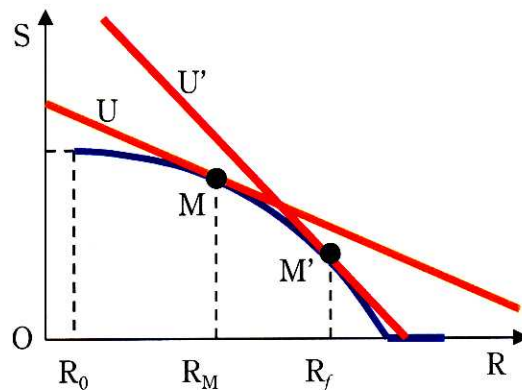


図 3-10 安全規制の効果（社会効用の反映）

前者については、実際には、ハザードとリスクだけでなく、生産性との関連で考えるべき最低限度の信頼性を正しく評価できるか、という問題がある。（2-3-2節でも述べる。）後者については、事故が起きた後の対応であるから、前項で述べたような“領域を狭める”効果がなく、結果的に事故が起きていない時期には軽視されるという問題がある。

いずれにせよ、外部不経済を正しく評価し、信頼性や制裁の程度を適当に設定すること、規制の趣旨を徹底することが重要であろう。

### 2-3. 安全規制の限界

本モデルにおいて安全規制を考えると、いくつかの限界または問題点も明らかになる。

#### 2-3-1. 技術の変遷

ある技術を前提にしていれば適性であった規制でも、技術自体の変遷によって形骸化したり、かえって安全の追求が阻害されたりする場合がある。

例えば、仕様規定は信頼性達成のための様式まで定めてしまうので、信頼性技術の進歩の恩恵を受けられないかもしれない。これについては、性能規定化を行うことで、技術の進歩に柔軟に対応できると考えられる。

#### 2-3-2. 企業の多様性

これまでは、企業群がすべて一定の操業関数  $H$  をもっていると仮定していた。しかし、現実には多様な企業が混在している。その点に関して考察を行う。

第一に、生産性関数  $F$  や安全性関数  $G$  が同じだとしても、操業関数  $H$  が一致するためには、各企業の財の総量  $Z$  が一定でなければならない。しかし、現実では規模の異なる（したがって資金力の異なる）企業が混在している。特に、中小企業に大企業と同じ義務を課すべきかどうか

か、というのは、本研究とは次元の異なる、政治的な問題であろう。

第二に、財の総量  $Z$  が一定であったとしても、生産性関数  $F$  や安全性関数  $G$  が同じだとは限らない。それぞれの企業が独自の技術やノウハウを所有しているのは考えられる状況である。この場合、 $H$  の形自体が異なることになる。(図 3-11 参照。)すると、生産性との兼ね合いで評価すべき(2-2-2 節)“最低限度の信頼性”は設定しにくいということになる。

経済効率的観点からは、生産性が高い企業については、多くの余剰を社会にもたらしていることから、やや高いリスクも許容してよいと言えるのである。しかし、現実には、企業の生産性に対してそれぞれ規制を変えるのは法律的にも問題が多い。産業ごとに異なる規制をかけるというのは比較的良好に行われているものの、実情としては、むしろ生産性が高い企業や産業ほど注目度が高くなるため、より厳しい安全性(信頼性)が求められている<sup>ii</sup>。このようなことも、やはり本研究とは次元の異なる、どちらかという政治的な問題であろう。

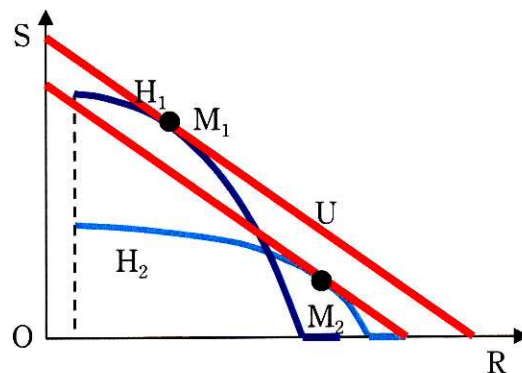


図 3-11 異なる操業関数をもつ企業

さらに、シビル・ミニマムのような地域間格差についての問題もある。すなわち、企業の生産活動の結果は社会全体に恩恵をもたらすと考えてよいが、引き起こされる事故はどちらかという工場周辺の限られた地域にのみ影響する。

### 3. シミュレーションモデルへ

資源配分モデルでは、理想的な状況で考察を行った。まず、部門独立性仮説を立て、企業が信頼性の影響を正しく評価しながら活動を行うものとした。すなわち、企業が十分な情報をもって、静的で平衡な状態に自然に遷移すると仮定した。さらに、安全規制も、企業が完全に規

<sup>i</sup> この“経済効率”には事後制裁によって外部不経済を含めることもできる。しかも、信頼性を“厳密に”評価できていないはず理想的観点である。

<sup>ii</sup> もちろん、そのような企業はハザードも大きいことが多い。また本モデルでは事故の程度は区別していないが、小さい事故が大きな事故の教訓になることから、必ずしも外的な要請とも言えない。

制を理解するものとしている。

そこで、次のシミュレーションモデルでは、企業が十分な情報をもたずに動的に活動する状況を再現することを考える。

## 第4章 シミュレーションモデル

---

本研究で用いるシミュレーションモデルを詳説する。

### 1. 人工社会の概要

本研究での社会モデルについて説明する。本研究では、コンピュータ等で仮想的に多数の企業を生成し、シミュレーションによって社会の特性を観察するので、この仮想的な社会を“人工社会”と称することにする。(人工社会の研究事例としては『人工社会－複雑系とマルチ・エージェント・シミュレーション－』<sup>17</sup>等を参照のこと。)

#### 1-1. 人工社会の用語

人工社会で用いる用語について簡単に説明する。その他の重要な概念については、企業モデルなどの説明を終えた後、解説する。

##### 1-1-1. ターム

人工社会の時間単位である。

##### 1-1-2. リソース

人工社会の財である。企業はすべてリソースを扱う活動を行い、リソースを基準に評価されることになる。

#### 1-2. 人工社会の構成要素

人工社会は、エージェントたる企業と、環境たる安全規制とで構成されるマルチエージェントシステム<sup>18</sup>である。企業は複数であり、安全規制はすべての企業に対して等しく作用する。企業は、それぞれリソースの獲得・蓄積を目指す。ただし、生産に失敗してリソースを失うこともあり、そのときは、淘汰されて新しい企業に置換される。

本研究においては、安全を含めた生産活動をモデル化し、安全規制が社会の効用にどのように影響するのかを観察していく。

#### 1-3. シミュレーションの流れ

本シミュレーションでは、基本的に次のように人工社会を動かしていく。

1. 企業を生成する
2. 全企業が独立かつ同時に生産活動を行い，リソースを増加／減少させる
3. 破綻した企業をすべて除去し，生存企業から生成した新企業で置換する
4. 1. または 2.<sup>i)</sup> に戻る

ただし，適時，企業に対して安全規制が働く

## 2. シミュレーション企業モデル

企業モデルについて説明する。企業は，エンタープライズ要素として表現されている。これは，デバイスと呼ばれる抽象要素，デバイスを実装したインストルメント要素およびライン要素，ライン要素を構成するユニット要素によって構築されるものである。なお，デバイス要素などは，他の同じ要素と区別するため，それぞれ固有の識別子を与えられている。(後述する淘汰アルゴリズムなどで参照することがある。)

### 2-1. デバイス

まずは，「デバイス」と称する抽象要素<sup>ii)</sup>を説明する。



図 4-1 デバイス模式図

デバイスは，企業システムの基本であり，一つのエージェントと考えてよい。基本的には一種のブラックボックスで，外部とは入力ゲートと出力ゲートのみによって接続されている。デバイスの機能は，入力ゲートからリソース  $z$  を受け取り，内部で処理を行って，出力ゲートからリソース  $z'$  を渡す，というものである。(図 4-1 参照。) ただし同時に，ある決められたコスト  $c$  を消費する。

また，デバイスについて，事故が生じたか，そうでないかを定義する。出力リソース  $z'$  が，

<sup>i)</sup> 企業数を一定とするなら 2. に戻るが，途中で企業数を増やすことなどもできる。

<sup>ii)</sup> 機能の外形だけが指定されていて，具体的な実装がなされていない要素のこと。オブジェクト指向言語などで使用される用語である。

(コストを引く前に) 入力リソース  $z$  を下回った場合、「そのデバイスは事故を起こした」とみなすことにする。

これは、一般的生産活動のモデル化である。例えば、企業は原材料等を仕入れ、加工処理を行って付加価値をつけ、製品を出荷する。ただし、加工課程においてコストが生じる。ここで、原材料も製品も価格を有するから、原材料も製品もコストも同じ単位をもつリソースと考えることができる。すると、仕入れを入力ゲートの機能、出荷を出力ゲートの機能と考えれば、企業もまた一つのデバイスであるとみなせる。同じようにして、個別の加工過程もデバイスに置換できる。重要なのは、入力および出力されるリソースがあること、デバイス内部でリソース変換が行われていること、そして、運用にコストを消費することである。

このブラックボックスの中身、内部処理の実装によって、デバイスは具体化する。

## 2-2. インストゥルメント

具体的なデバイスの一つで、システムの末端要素<sup>1</sup>となるのがインストゥルメントである。これはデバイスであるから、入力ゲートからリソースが取り込まれ、出力ゲートから産出される。インストゥルメントのブラックボックスは、生産性と信頼性を排他的に模擬するものとなっている。

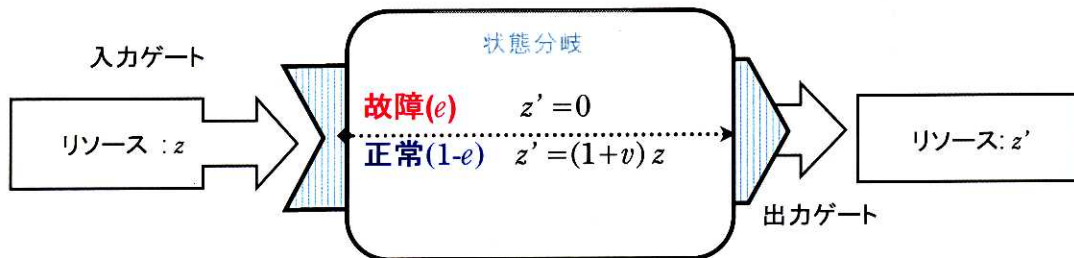


図 4-2 インストゥルメント模式図

インストゥルメントは「状態」という属性をもつ。「状態」は故障状態であって、基本的には正常か故障かのいずれかの値を取る。いま、入力リソースを  $z$  とし、出力リソースを  $z'$  としよう。インストゥルメントでは、もし状態が故障ならば、 $z'=0$ 、状態が正常ならば、 $z'=z(1+v)$  と定義されている。(図 4-2 参照。) ここで、 $v$  は生産活動による付加価値を示す。

また、正常か故障かは、1 タームあたりの故障率  $e$  で決定する。(これは一定でもよいし、時間変化してもよい。) なお、「状態」については、厳密には状態数  $s$  で定義する。これは非負整数をとるもので、 $s=0$  のとき正常、 $s>0$  のときは故障と解釈される。故障数は、故障したとき

<sup>1</sup> システムの最小要素とも呼べる。末端要素は、それ以上他の要素を包含することがない。



に、状態回復までに要する時間であり、

- もし故障数が  $s=0$  ならば、確率  $e$  で、故障数は定められた初期故障数  $F$  に変化する。  
(ただし、確率  $1-e$  で呼称数は  $0$  のままである。)
- もし  $s>0$  ならば、 $s$  は (1タームあたりに1ずつ) 小さくなっていく。(このとき、別に定義されたコスト  $r$  を消費することにしてもよい。)

コストについては  $c$  で定義するが、一般には  $v$  および  $e$  (の形態) で計算されるものになるであろう。(ただし、独立に定義してもよい。したがって、第3章とは異なり、シミュレーションモデルにおいてはコスト分離仮説を必要としない。)

インストゥルメントは末端要素であり、具体的な工程や機器を表現するものである。ここに新しい属性を追加することで、他の要素はそのままに、モデルを簡単に拡張することができる。また、逆に簡略化することもでき、いくつかの属性は省いたり、あるいはその属性を無視することに相当する値を代入したりしてもよい。

### 2-3. ユニット

ユニットは、より複雑なシステムを構築するためのものであり、後述するラインの構成要素として使われる。

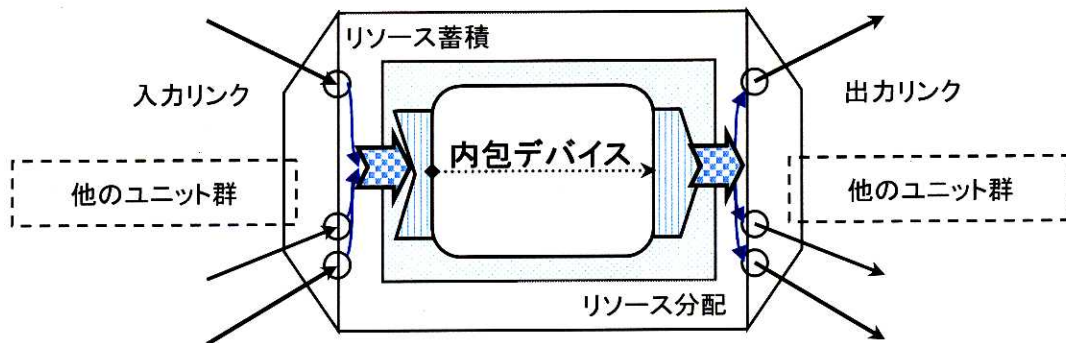


図 4-3 ユニット模式図

ユニットは1つのデバイスを内包し、他のユニットと単方向に接続される。接続には入力と出力の2方向がある。ユニットはリソースの蓄積・分配をするのが特徴である。インストゥルメントは、内部にリソースを貯めることはなく、リソースが入力ゲートから出力ゲートに遷移するものとしていた。しかしユニットは、入力リンクからのリソースをいったん蓄積する。そして、すべてのリンクからの入力を受け付けた後 (0 も含む)、それを内包デバイスで処理する。

<sup>1</sup> 例えば、 $e=0$  とすれば故障や事故を考えない工程を、 $v=0$  とすれば付加価値をつけない工程を表現できる。

その後、そのリソースを出力リンクへと分配するものである。(図 4-3 参照。)

## 2-4. ライン

そして、本システムを特徴づけるのがラインと呼ばれる要素である。(前述したユニットと併用される。)

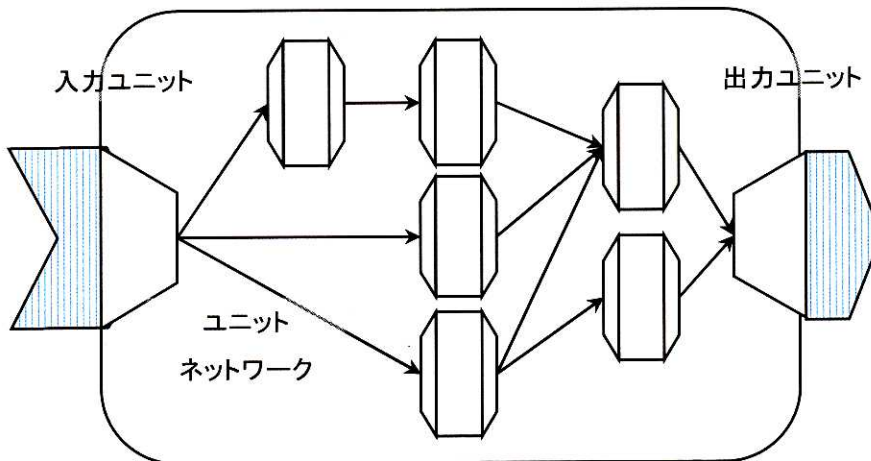


図 4-4 ラインモード図

ラインは、基本的にユニット要素をノードにもつネットワークを表現する。そしてさらに、入力ゲートと出力ゲートを備えたデバイスでもある。(図 4-4 参照。)したがって、ライン (ユニットネットワーク) がさらにユニットに内包され得ることもなる。

なお、このユニットネットワークのノード数をライン要素のサイズと呼ぶ<sup>ii</sup>。(図 4-4 のライン要素はサイズ 6 である。)

さて、ラインはデバイスでもあるから、ラインに入力したリソースは、ユニットを通過し、滞りなく出力されなければならない。また、孤立した無意味なユニットを含んではならない。具体的には、まず、ネットワークは非環状有向グラフ<sup>iii</sup>でなければならない。加えて、すべてのユニットで、入力リンクを遡っていくことで入力ユニットにたどり着けなければならない。また、すべてのユニットで、出力リンクを進んでいくことで出力ユニットにたどり着けなければならない。加工課程を模擬していることから、入力ユニットから出力ユニットへの直接的なリンクもあってはならない。

<sup>i</sup> 入力ゲートと出力ゲートには、それぞれ、出力リンクまたは入力リンクのみをもつ特別なユニット、入力ユニットと出力ユニットを配する。

<sup>ii</sup> 入力ユニットおよび出力ユニットは数に含めない。

<sup>iii</sup> 非循環とは、リンクを進んでいくことで再びもとのノードに戻ることがないということである。有向グラフはリンクが向きも持っていることを意味する。

ライン要素によって、冗長的リンクも含めて、工場ラインや複雑な機械設備を階層的に模擬できると期待される。

## 2-5. リンク

さて、ライン要素内のユニットネットワークのリンクとして2種類の方式を挙げる。それぞれ、単純リンクおよび冗長的リンクと称する。冗長的リンクは、OR に相当するネットワーク構成を可能にするものである。(AND については、ユニットを直列させることで容易に表現できる。)

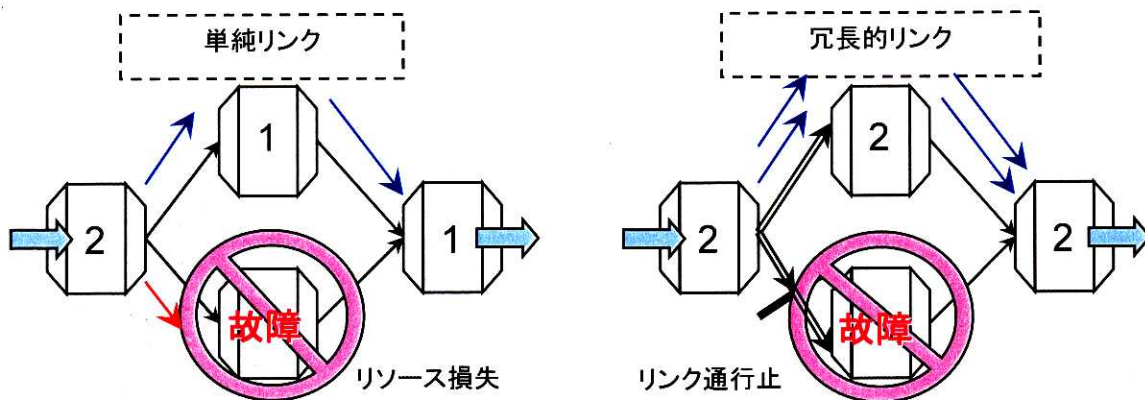


図 4-5 リンク模式図

単純リンクの場合、接続先に故障デバイスを抱えるユニットがあったとしても、リソースは流れ込んでいき、自動的な損失を生む。つまり、2つのユニットを並列すると、AND でも OR でもない、両者の中間のような働きができることになる。一方、冗長的リンクは OR を表現するものである。リンク先に「事故を起こした」デバイスを内包するユニットを感知すると、冗長的リンクは一時的に通行を停止する。(図 4-5 参照。)

なお、単純リンク・冗長的リンクのいずれも、有効なリンク先に対して、リソースは等分して分配する<sup>ii</sup>。

## 2-6. エンタープライズ

エンタープライズ要素は個体企業を表すためのものである。

エンタープライズは、ただ1つのデバイスを内包する。(このデバイスを、特にルート・デバ

<sup>i</sup> したがって、冗長的リンクを運用する際は、ラインを運転する前に、内包デバイスが事故を起こしたかどうかを判定する必要がある。

<sup>ii</sup> リンクに重み付けを与える拡張も可能だが、いたずらに複雑化させるだけであろう。

イスと呼ぶ。)そして、定められたリソース $z$  (定期投入リソースと呼ぶ) タームごとにそのデバイスに投入して、得られたリソース $z'$ から投入リソースおよびデバイスの運用コスト $c$ を除いた利益 $pf$ を得る。

エンタープライズ要素は、保有資金 $C_p$ を蓄積する。ターム $t$ の保有資金 $C_{p_t}$ は、同じくターム $t$ の利益 $pf$ 、 $C_{p_{t-1}}$ および積立率 $rv$ から次式によって計算する。ここで、積立率 $rv$ は $0 \leq rv \leq 1$ を満たす定数である。積立率は、企業が利益すべてを蓄積しているわけではないことを表現する<sup>i</sup>。企業は、例えば株主への配当金を支払ったり、蓄積してきた資金から研究開発費を捻出したりしなければならないからである。(ただし、赤字の場合はそのようなことはしない。)

$$pf = z' - z - c$$

$$\begin{cases} pf > 0 & C_{p_t} = rv(C_{p_{t-1}} + pf) \\ pf \leq 0 & C_{p_t} = C_{p_{t-1}} + pf \end{cases}$$

## 2-7. 企業指標

モデルから定義される指標などを説明する。(シミュレーションの評価などで使う。)以下は、いずれもデバイス要素において、既知の属性などから計算・定義できるものである。ただし、企業に適用する際には、特に断りのない限り、ルート・デバイスについて考えるものである。

### 2-7-1. 階層数

そのデバイスを開いていくとき、末端要素にたどり着くまでの最も大きな回数を意味する。

インストゥルメント要素の階層数は常に1とする。

ライン要素については、まず、構成ユニットの内包するデバイスがすべてインストゥルメント要素であるようなものの階層数を1とする。次に、構成ユニットの内包するデバイスに1つでもライン要素が含まれているものについては、もとのライン要素の階層数を、それら内包されているライン要素の最大の階層数+1と定義する<sup>ii</sup>。

### 2-7-2. リンク直列数

リソースがデバイスの変換処理を受ける最大回数を意味し、デバイスの直列的傾向を示す。

インストゥルメント要素のリンク直列数は常に1とする。

<sup>i</sup> これは企業の蓄積資金が発散することも防ぐ。もし平均的に $rv > 0$ が期待されるなら、 $t \rightarrow \infty$ のうちのそのような企業の資金もまた発散してしまふことがあり得る。しかし、 $rv < 1$ で $pf$ に上限があれば、高々、正の公比が1未満の無限等比級数の和になるので、企業の蓄積資金にも上限が生じるのである。これは、競争の激しい市場経済上の企業を簡潔に模擬できているといえるだろう。

<sup>ii</sup> これはいわゆる再帰的な定義であるが、構成要素が有限である限り、任意のライン要素の階層数を定義できる。

ライン要素については、入力ユニットと出力ユニットとの最長リンク距離をもってリンク直列数を定義する。また、ライン要素の各ユニットにおいて、入力ユニットとの最長リンク距離を、「直列位置」と称する。(図 4-6 参照。この例では、直列数は 3 になる。) ただし、もし必要なら、入力ユニットの直列位置は 0, 出力ユニットの直列位置は-1 と定義する。

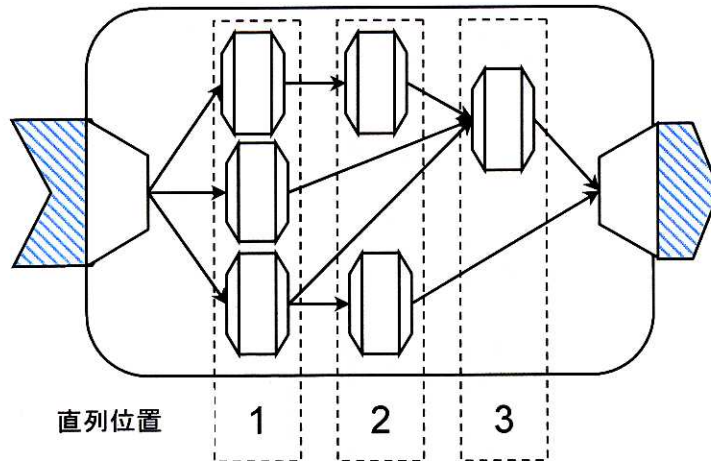


図 4-6 直列数・直列位置模式図

リソース変換は生産性をかけるものとなるため、同じデバイスを用いる場合、直列数が大きいほど生産性が增大する。ただし、直列に並ぶいずれかのデバイスの故障の影響も大きくなるため、信頼性は低下する。

### 2-7-3. リンク並列数

デバイスの並列的傾向を示す。

インストルメント要素のリンク並列数は常に 1 とする。ライン要素については、リンク直列数  $S$ , すべてのリンク数  $l$  とおいたとき、リンク並列数  $L=l/(S+1)$  と定義する<sup>i</sup>。

図 4-6 の例では、総リンク数が 10 であるから、 $L=10 \div (3+1)=2.5$  と評価できることになる。なお、サイズ  $N$  のデバイスにおいて、完全な直列ネットワークならば  $S=N$ ,  $L=1$  に、完全な並列ネットワークならば  $S=1$ ,  $L=N$  になる。

冗長的リンクを用いるならば、同じデバイスを用いる場合、並列数が大きいほどデバイス全体の信頼性は向上する。ただし、直列数は少なくなる傾向が出るため、生産性は減少する。

前項のリンク直列数の傾向とあわせ、ラインの直列数・並列数の傾向は、自然に生産性と信

<sup>i</sup>つまり、直列位置ごとの平均リンク数であるが、入力ユニットおよび出力ユニットに挟まれていることを考慮して直列数に+1している。なお、この補正により、インストルメント要素をサイズ1のライン要素に置き換えても並列数は1のままになる。

頼性とのトレードオフの関係を表現することになる。

#### 2-7-4. 最大生産高

デバイスの最大の生産性を示す。あるリソースを投入したとき産出されるリソースの最大値である。(デバイスに内包されるすべてのインストルメントが事故を起こさなかったときのもの。)第3章の“生産性”は、この最大生産高に相当するが、以降では、次項の期待生産高の方を用いる。

#### 2-7-5. 期待生産高

デバイスの生産性を示す。(最大生産性ではなく、デバイスが故障する可能性も考慮する。)あるリソースを投入したとき産出されるリソースの期待値を逐次的に計算して求める<sup>i</sup>。基本的に通常の運転と同じだが、以下の点に注意してアルゴリズムを用いる。

1. 初期投入リソースは、エンタープライズ要素の場合、定期投入リソースとする
2. ライン要素は通常と同じように動作するが、冗長的リンクは動作させない
3. インストルメント要素は故障の分岐を行わず、入力リソース  $z$  に対して  $z' = z(1+v)(1-e)$  を出力する ( $v$ : 付加価値,  $e$ : 故障率) <sup>ii</sup>
4. コストの消費は通常と同じように計算する

#### 2-7-6. 推定信頼性

デバイスの信頼性を示す。(生産性についてはまったく考慮しない。)該当するデバイスが、あるタームに事故を起こさない確率を逐次的に計算して求める。基本的には通常の運転と同じだが、以下の点に注意してアルゴリズムを用いる。(冗長的リンクの特別な操作のため、推定信頼性  $R$  を用いて説明しているが、逐次処理により、必ず末端要素であるインストルメント要素に到達するので、問題なく計算できる。)

1. 初期投入リソースは1とする
2. 各ユニットは、推定信頼性  $R$  によって、入力リソース  $z$  に対して  $z' = zR$  を蓄積する。特に、 $z=1$  のときの出力を推定信頼性と呼ぶ
3. ライン要素については、冗長的リンクについてのみ、リソースを配分するとき特別な操作を行って推定信頼性を書き換える(後述)
4. インストルメント要素については、基本的に(冗長的リンクによる書き換えがない限り)推定信頼性  $R=1-e$  と定義する ( $e$ : 故障率,) <sup>iii</sup>
5. コストの消費は考えない

<sup>i</sup> コンピュータ上でシミュレーションを行うので計算時間が速い方が望ましい。したがって、厳密な理論解ではなく、このように近似的に計算する手法を採用している。

<sup>ii</sup> つまり、インストルメント要素については出力リソースの期待値そのままである。

<sup>iii</sup> つまり、インストルメントについては事故の起きる確率そのままである。

冗長的リンクの特別な操作は次のようなものである。まず、冗長的リンクによって接続されているユニットが内包するデバイス  $D_i$  それぞれの推定信頼性  $R_i$  を求める。それによって、 $D_i$  すべての推定信頼性を  $R=1-\Pi(1-R_i)$  で書き換える。その上で、接続先を正常とみなして運転を続行する<sup>1)</sup>。

### 3. シミュレーション淘汰アルゴリズム

企業淘汰には、遺伝的アルゴリズムを採用する。(遺伝的アルゴリズムについては、“Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”<sup>19)</sup>や『ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム』<sup>20)</sup>などを参照のこと。)

本シミュレーションの遺伝的アルゴリズム適用を説明する。以下のように、一般的な遺伝的アルゴリズムに習ったものであるが、企業淘汰モデルということを踏まえ、部分的に工夫しているところもある。

1. 遺伝子型の決定
2. 適応度基準の評価
3. 選択 (淘汰と増殖)
4. 交叉
5. 突然変異

#### 3-1. 遺伝子型

本モデルにおいて、企業のほとんどの性質はそのデバイス要素の特性から来るものである。したがって、淘汰アルゴリズムにおいては、企業のルート・デバイスの遺伝子表現を主眼におく。また、交叉はルート・デバイスの直下の階層のみを対象とする。

##### 3-1-1. ライン要素のコード化

本淘汰アルゴリズムでは、ライン要素を対象として遺伝子型を定義する。この遺伝子型は、ライン要素のネットワーク構成を表現するネットワーク遺伝子列と、ノード構成を表現するノード遺伝子列とに別れる。

まず、ネットワーク遺伝子列について説明しよう。

<sup>1)</sup> したがって、完全な直列または並列ネットワークにおいては理論的な信頼性と一致するはずである。また、信頼性は随時書き換えるので、複数のユニットから入力を受け付けていても問題ない。

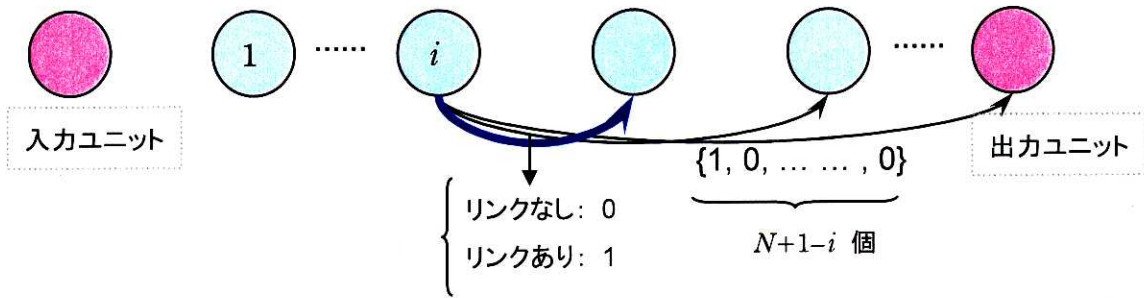


図 4-7 ライン要素の遺伝子型表現

まず、予め  $N$  個のユニットを一行に並べておく。これに、入出力のユニットを先頭および末尾に加える。 $i$  番目のユニットに対し、後方の  $j$  番目のユニットへのリンクがあるかないかを、それぞれ 0 か 1 かで表す<sup>i</sup>。 $(i < j \leq N+1)$  すると、 $i$  番目のユニットからのリンク情報が、合計で  $N+1-i$  個のビット列  $b_i$  によって表現できる。(図 4-7 参照。) これらを並べた  $[b_0, b_1, \dots, b_n, \dots, b_N]$  によって、ライン要素のリンク構成が遺伝子列としてコード化される<sup>ii</sup>。(あるいは、 $b_i$  の  $j$  番目のビットを  $B_{i,j}$  と書くこともある。)

また、図 4-8 にラインのユニットに番号付けを行った例を示す。ユニットを直列位置の順に並べればよい。(同じ直列位置ならば適当な順序で構わない。) 後はリンク構成に対応してコード化を行う。

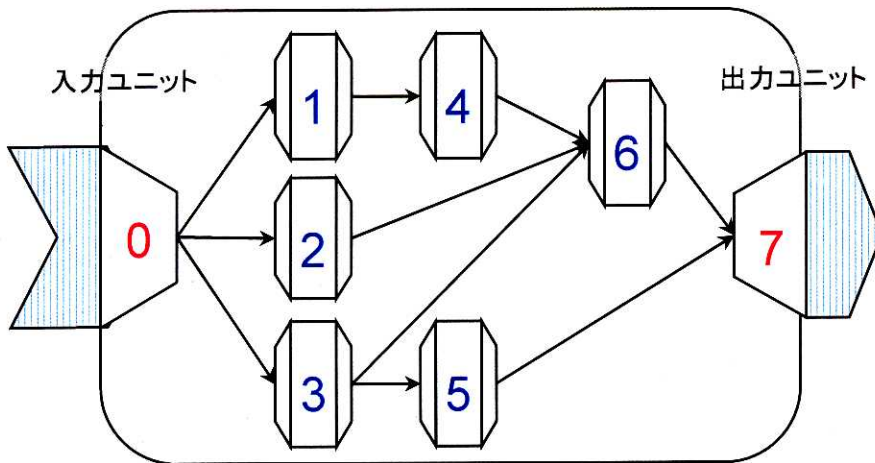


図 4-8 ライン番号付け例

ユニット番号	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$	$j=7$
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

<sup>i</sup> もしも 2 種類以上のリンクが混在するなら、リンク種類によって番号を使い分けられよい。

<sup>ii</sup> この手法は、非循環有向グラフの遺伝子型表現として一般に有効である。



$i=0$	1	1	1	0	0	0	0
$i=1$	-	0	0	1	0	0	0
$i=2$	-	-	0	0	0	1	0
$i=3$	-	-	-	0	1	1	0
$i=4$	-	-	-	-	0	1	0
$i=5$	-	-	-	-	-	0	1
$i=6$	-	-	-	-	-	-	1

表 4-1 ライン構成コード化例

図 4-8 のライン構成をコード化したものが表 4-1 である<sup>i</sup>。(行はその行に対応する  $i$  番目のユニットからの出力を, 列はその列に対応する  $j$  番目のユニットへの入力を表示する。)ただし, ライン要素の項で述べたようなことから, 次の制約が生じる。

- すべてが 0 になるような行もしくは列が存在してはならない<sup>ii</sup>
- したがって, 「 $i=0, j=0$ 」 および 「 $i=N, j=N+1$ 」 は常に 1 となる<sup>iii</sup>
- $i=0, j=N+1$  は常に 0 となる<sup>iv</sup>

これが守られていないと, ライン要素のネットワークとしては無効な, 致死遺伝子となってしまう。

ノード遺伝子列は, ユニットの内包するデバイスの識別子をコードとしてつくられる。上記の例で, 各ユニットが識別子  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$  のデバイスを内包するならば,  $\{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$  が遺伝子コードである。

これらネットワーク遺伝子列とノード遺伝子列とのセットでラインの遺伝子表現とする。なお, 遺伝子のサイズを定義し, もととなったライン要素のサイズと一致させる。

<sup>i</sup>  $(i, j)$  はユニット  $i$  からユニット  $j$  へのリンクを示す。非循環有効グラフであることから,  $j \geq i$  なるリンクは考えない。

<sup>ii</sup> 「入力のないユニットや行き止まりのユニットがあってはならない」ということから来る制約である。

<sup>iii</sup> 第 1 列および最終行は 1 つのビットしかないからである。

<sup>iv</sup> 入力ユニットから出力ユニットへの直通リンクがあってはならないということからくる制約である。

### 3-1-2. インstrument要素のコード化

Instrument要素を対象として遺伝子型表現を生成する際は、一時的にライン要素として解釈する。(実際、あるInstrument要素 A と、デバイス A を内包するユニットを1つだけでもライン要素は、デバイスとして共にまったく同じ挙動を示す。)

したがって、ネットワーク遺伝子列は常に $\{1, 0\}$ ,  $\{1\}$ となり、ノード遺伝子列はそのInstrument要素の識別子そのものとなる。また、遺伝子サイズは1である。

### 3-1-3. 遺伝子列のランダム生成

企業をランダムに配置するとき、遺伝子列をランダムに生成することで、新規ルート・デバイスから作成する。遺伝子列をランダムに生成するときは以下の手順に従う。

1. サイズを与える (またはランダムにサイズを決める)
2. ノード遺伝子列を、それぞれ社会に存在するデバイスからランダムに選ぶことで決める
3. ネットワーク遺伝子列の各ビットを、そのビットが属する行の長さ  $n$  に対して、 $1/n$  の確率で1、その他のとき0にするように決める

## 3-2. 適応度基準

企業の適応度の評価基準は、企業の保有資金そのものとする。これは、企業が生産活動を通しての資金獲得・蓄積を目的としていることから定義するものである。

### 3-3. 選択 (淘汰と増殖)

本研究の淘汰アルゴリズムでは、企業の適応度 (保有資金) に応じて、次のように企業の生存・死滅/置換を決定する。

- 保有資金  $C_p > 0$  ならば生存 (親候補になる)
- 保有資金  $C_p = 0$  ならば生存 (ただし親候補からは外れる)
- 保有資金  $C_p < 0$  ならば死滅 (新しい企業で置換される)

死滅した企業は新しい企業で置換する。このとき新しい企業は、2つの親企業から、後述する交叉によって生成する。ただし、親企業は適応度比例方式によって選択する。すなわち、親候補である生存企業  $E_k$  の保有資金を  $C_{p_k}$  として、これらの企業の集合  $S$  を  $\{E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_n\}$  としたとき、企業  $E_k$  が親企業として選択される確率  $P_k$  を次式によって決めるのである。

$$P_k = \frac{Cp_k}{\sum Cp_i}$$

ただし、S が空集合の場合はランダムに新規生成する。また、上記の選択によって両親が同一の企業になってしまった場合、片方の親はランダムに新規生成した企業とする<sup>i</sup>。

このような適応度比例方式の親選択は、保有資金が大きい企業の手法が、成功例として模倣され、あるいはそれらの企業が合併会社をつくるなどして、広まっていくことを模擬するものである。

### 3-4. 交叉

新しい企業（エンタープライズ要素）のルート・デバイスは、以下に述べる交叉によって親企業から生成する。（交叉には、行を基準とする行交叉と、列を基準とする列交叉とがある。）その他の属性値は、保有資金については0にリセットし、定期投入リソース等その他についてはランダムに選ばれた片親のそれと一致させる。

交叉は次のように進行する。

1. 基準となる親をランダム<sup>ii</sup>に決定する
2. 行交叉にするか列交叉にするかランダムに決定する
3. 交叉点をランダムに決定する
4. 同じ交叉点に従ってネットワーク遺伝子列とノード遺伝子列をそれぞれ交叉する

以下、基準となる親を親1、そうでない親を親2と呼ぶ。また、新しく生成されるものを子と呼ぶ。交叉点は、親1の遺伝子サイズSに対して  $0 \leq i < S$  かつ  $i < j \leq S$  なる、整数の組  $(i, j)$  としてランダムに決定する。

#### 3-4-1. 同サイズ行交叉

交叉の基本となる、同じサイズの遺伝子の、行を基準とした交叉について説明する。同サイズ同士の交叉であるから、子遺伝子サイズは親のそれと同じである。

子・ノード遺伝子列を  $\{cn_k\}$ 、親1・ノード遺伝子列を  $\{pn_k^1\}$ 、親2・ノード遺伝子列を  $\{pn_k^2\}$  とする。 $cn_k$  を、 $k \leq i$  のときは  $cn_k = pn_k^1$ 、 $k > i$  のときは  $cn_k = pn_k^2$  と決めて、子・ノード遺伝子列を生成する。（図 4-9 参照。）

<sup>i</sup> これは、親候補が少なくなることがあり得るアルゴリズムであるため、個体の偏りが生じるのを防ぐために設けた措置である。

<sup>ii</sup> ランダムとは、可能な各候補がそれぞれ等確率で選ばれ得るような選択を行うことである。

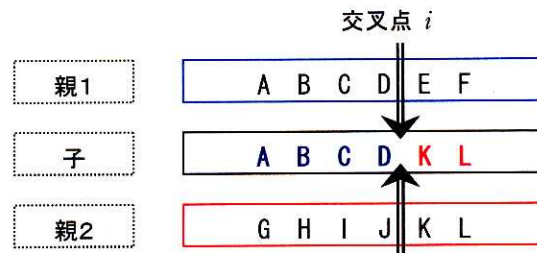


図 4-9 ノード遺伝子列・交叉模式図

次に、ネットワーク遺伝子列については、遺伝子列を、行を基準に取り出し、そのまま並べて交叉させる。

式的には次のようなことである。子・ネットワーク遺伝子列を $\{cw_{k,l}\}$ 、親1・ネットワーク遺伝子列を $\{pw^1_{k,l}\}$ 、親2・ネットワーク遺伝子列を $\{pw^2_{k,l}\}$ とする。 $cw_{k,l}$ を、 $k < i$  または  $k = i, l \leq j$  のときは  $cw_{k,l} = pw^1_{k,l}$ 、 $k > i$  または  $k = i, l > j$  のときは  $cw_{k,l} = pw^2_{k,l}$  と決めて、子・ネットワーク遺伝子列を生成する。(図 4-10 参照。図は、表 4-1 のようにライン構成を書き出したもので交叉の様子を示している。)

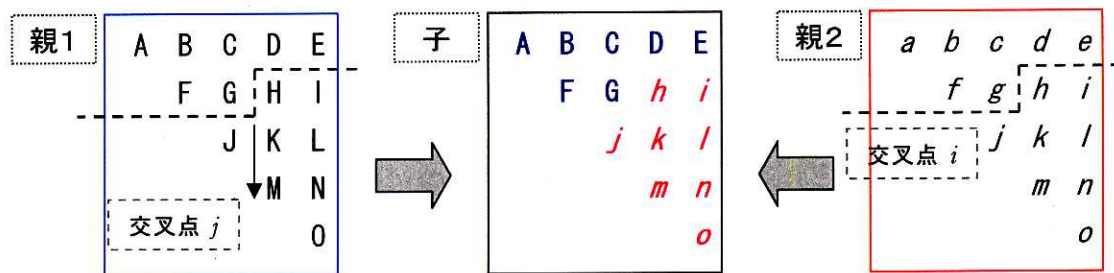


図 4-10 ネットワーク遺伝子列・行交叉模式図

なお、行交叉は、親1および親2の交叉選択部分を、出力リンクを概ね保存しながら接合させる方法であるといつてよい。

### 3-4-2. 同サイズ列交叉

同じサイズの遺伝子の、列を基準とした交叉について説明する。基本的には行交叉と同じであるが、列を主体として $i, j$ を入れ替えたもので交叉を行う。

まず、ノード遺伝子列については、行交叉の $i$ を $j-1$ で読み替えたもので実施する。

次に、ネットワーク遺伝子列については、列を基準に取り出し、そのまま並べて交叉させる。

(式の説明は行交叉とほとんど同じであることから省略する。図 4-11 参照。)

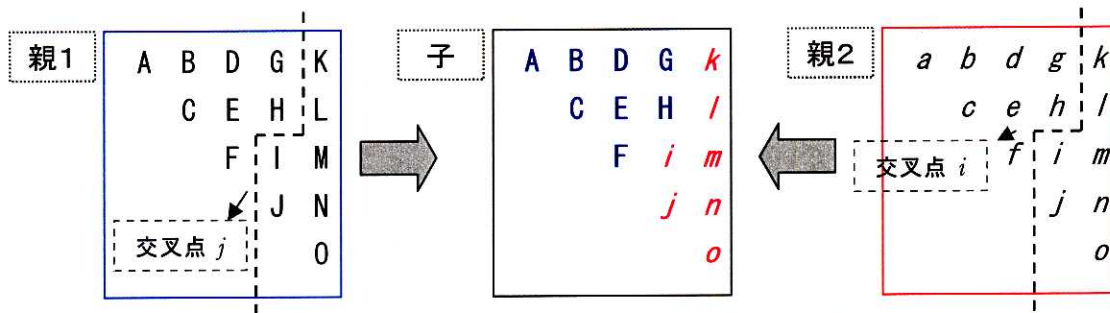


図 4-11 ネットワーク遺伝子列・列交叉模式図

なお、列交叉は、親1および親2の交叉選択部分を、入力リンクを概ね保存しながら接合させる方法であるといつてよい。

### 3-4-3. 異サイズ行・列交叉

次に、異サイズ遺伝子の交叉について説明する。これについては、はじめに仮想的にサイズを揃え、後は基本的に同サイズ交叉と共通する手法を用いる。

サイズ補完は、小さい方の遺伝子列を大きい方と同じサイズに拡大し、適当に“貼り付け”を行った上で、不足部分を大きい方の遺伝子列で補完することによって実現する。行交叉を行うときは、常に以下で説明する行基準サイズ補完を行い、列交叉を行うときは常に列基準サイズ補完を行う。

ノード遺伝子列に対する行基準サイズ補完は、親1・ノード遺伝子列を  $\{pn_k^1\}$ 、そのサイズを  $N^1$  とする。親2・ノード遺伝子列を  $\{pn_k^2\}$ 、そのサイズを  $N^2$  とする。さらに、 $N^1 < N^2$  として、拡大・補完した遺伝子列を  $Pn_{k,i}$  とする。 $i = k - N^2 + N^1$  において、 $0 \leq k < N^2 - N^1$  のときは  $Pn_k = pn_k^2$ 、 $N^2 - N^1 \leq k \leq N^2$  のときは  $Pn_k = pn_i^1$  と決めて、親1・ネットワーク遺伝子列を拡大・補完する。(図4-12参照。)

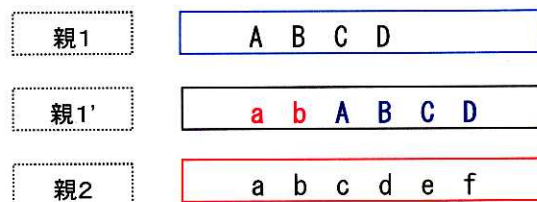


図 4-12 ノード遺伝子列・行基準サイズ補完模式図

ネットワーク遺伝子列に対する行基準サイズ補完は、式的には以下のような方法である。親1・ネットワーク遺伝子列を  $\{pw_{k,i}^1\}$ 、そのサイズを  $N^1$  とする。また、親2・ネットワーク遺伝子列を  $\{pw_{k,i}^2\}$ 、そのサイズを  $N^2$  とする。さらに、 $N^1 < N^2$  として、拡大・補完した遺伝子列を

$Pw_{k,l}$ とする。 $i=k-N^2+N^1$ において、 $0 \leq k < N^2-N^1$ のときは  $Pw_{k,l}=pw^2_{k,l}$ 、 $N^2-N^1 \leq k \leq N^2$ のときは  $Pw_{k,l}=pw^1_{i,l}$ と決めて、親1・ネットワーク遺伝子列を拡大・補完する。(図4-13参照。)

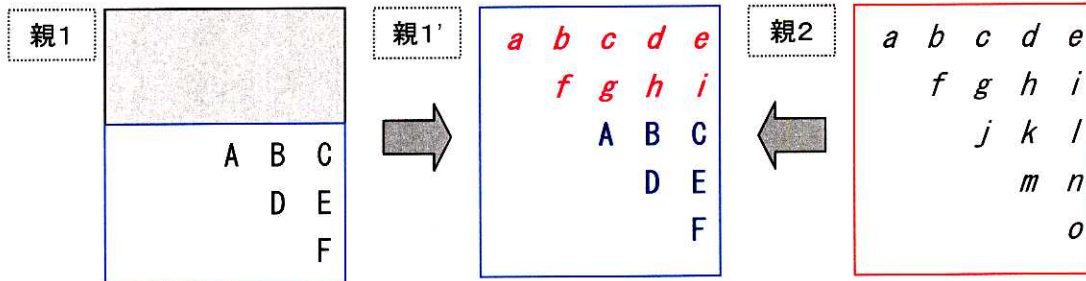


図4-13 ネットワーク遺伝子列・行基準サイズ補完模式図

その後の行交叉は同サイズの場合と同様だが、交叉点は、 $i \geq N^2-N^1$ になるように選ぶ<sup>i</sup>。

なお、列基準サイズ補完では、行基準サイズ補完と比べて以下の点が異なる。

- ノード遺伝子列について、行基準サイズ補完では親1を「右方」に貼り付けたが、列基準の補完では「左方」に貼り付けるようにする。
- ネットワーク遺伝子列について、行基準サイズ補完では親1を「右下」に貼り付けたが、列基準の補完では「左上」に貼り付けるようにする。
- 交叉点は、 $j < N^2-N^1$ になるように選ぶ。

### 3-5. 突然変異

次に、あらかじめ定められた確率で突然変異を誘起する。突然変異については、生存企業に対して適用させてもよい。(なお、ほとんどの突然変異で致死遺伝子を生成する可能性があるが、最後に修復を行うのでとりあえず考慮しなくてよい。)

#### 3-5-1. ネットワーク遺伝子列突然変異

各行ごとにランダムに選んだリンクを入れ替える。(ビットを反転させる。)例えば、 $B_{i,j}$ を選んだならば、新しいリンク  $B'_{i,j}$ を  $B'_{i,j}=1-B_{i,j}$ とする。

#### 3-5-2. ノード遺伝子列突然変異

ランダムに選んだ一つのノードを入れ替える。すなわち、ユニットが内包するデバイスを、人工社会に存在する別のデバイスで置換する。

<sup>i</sup> 片親とまったく同じような配列になってしまうのを防ぐためである。

### 3-5-3. サイズ縮小

ランダムに選んだある一つのノードを削除し、関係するリンクも削除する。遺伝子サイズを縮小することで、それに伴ってもとのライン要素のサイズも縮小する。

例えば、ユニット  $k$  を削除することを考える。ノード遺伝子列の  $d_k$  が削除され、ノード遺伝子列は1つ短い列になる。また、ネットワーク遺伝子列の  $B_{i,k}$  および  $B_{k,j}$  が削除され、1つの行がすべて削除されるとともに、各行もそれぞれ1列分削除される。(図 4-14 参照。)

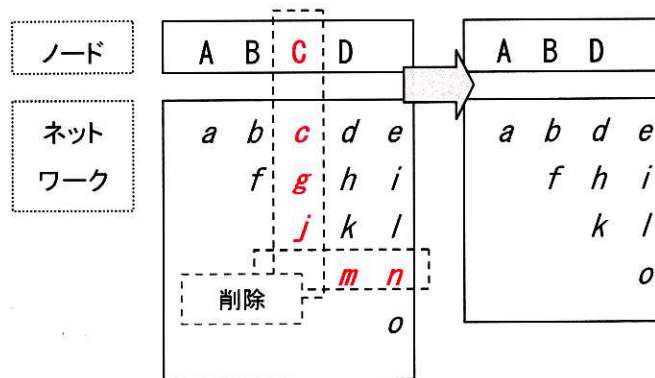


図 4-14 サイズ縮小模式図<sup>i</sup>

### 3-5-4. サイズ拡大

ランダムに選んだ箇所に、ランダムに一つのノードを挿入し、関係するリンクを作成する。遺伝子サイズを拡大することで、それに伴ってもとのライン要素のサイズも拡大する。

例えば、ユニット  $k$  の次に新しいユニットを挿入することを考える。ノード遺伝子列に  $d'_k$  が挿入され、ノード遺伝子列は1つ長い列になる。また、ネットワーク遺伝子列の  $B_{i,k}$  および  $B_{k,j}$  が挿入され、1つの行が新規に追加されるとともに、各行もそれぞれ1列分追加される。(図 4-14 参照。) ネットワーク遺伝子列のビットは基本的に0を入れておく<sup>ii</sup>。

<sup>i</sup> ネットワーク遺伝子列の最右列は、出力ユニットに対する出力を意味する。したがって、対応するノード遺伝子が存在せず、ノード遺伝子列の右端は空白になっている。

<sup>ii</sup> 後述する致死遺伝子修復で、いずれかのビットが1に置換される。

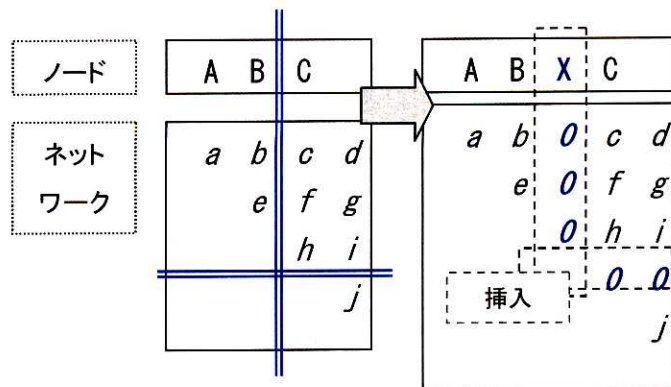


図 4-15 サイズ拡大模式図

### 3-5-5. 致死遺伝子修復

最後に、ネットワーク遺伝子列をチェックし、致死遺伝子がある場合は修復する。具体的には次のような処理を行う。

- すべてが 0 になるような行もしくは列が存在する場合、その行もしくは列において、ランダムに選んだ 1 つのビットを 1 で書き換える

## 4. シミュレーション規制モデル

安全規制は、環境として全企業に等しく作用する。

### 4-1. 規制時期

どのタイミングで規制を適用するか。(検査時期と称する。) 主として以下のようなスタイルを考える。

- 事前検査、企業生成時（操業開始時）に規制をかけるもの
- 定期検査、定期的に（企業操業前に）規制をかけるもの
- 事後検査、企業が事故を起こしたとき（企業操業後）に規制をかけるもの

### 4-2. 規制基準

何に対して規制をかけるか。主として以下のようなスタイルを考える。

- 仕様規定、企業の使用するデバイスの属性に条件を定めるもの
- 性能規定、ルート・デバイスの信頼性に条件を定めるもの
- 事後制裁、属性や信頼性に関係なく、事故を起こしたこと自体に制裁を加えるもの



### 4-3. 罰則

規制違反に対してどのような制裁を加えるか。主として以下のようなスタイルを考える。

- 罰金，企業から資金（リソース）を徴収するもの
- 営業停止，定められた期間、活動を強制停止するもの

### 4-4. その他

その他にも規制のバリエーションは考えられる。

- 事故回数の考慮，事故が相次ぐ場合、罰則を厳しくしていくもの
- カバー率，規制が企業に適用される確率を定めるもの

## 5. シミュレーション社会指標

人工社会の性質を調べるため，社会および経過ターム数を明らかにして，以下のような指標を取る。

### 5-1. 企業統計

各企業について，年齢（生成されてからの経過ターム数），実績平均生産高，実績事故率などの統計値を求めることがある。

### 5-2. 企業属性・指標・統計平均値

個別企業の属性・指標・統計を全企業について計算し，その総和，平均値，標準偏差，さらにはこれらのターム総和を，社会指標の一つとして用いる場合がある。データの信頼性を上げるため，同じ条件で複数回のシミュレーションを行い，社会指標の平均値を原則として95%の信頼区間<sup>i</sup>と共に求める。

### 5-3. 社会効用

社会効用は，社会指標から計算する。基本的に，実績値・期待値と，現在値・累積値の別をおく。前者の別は，用いる社会指標をこれまでの生産高総和および統計的事故発生率から求めたか，現在の生存企業の期待値・推定値から求めたかの差による。後者の別は，人工社会のその時点で期待される値であるか，シミュレーション開始時からの社会効用の累積値であるかの差による。

<sup>i</sup> 試行回数が十分に大きいので母集団は正規分布を仮定している。

## 5-3-1. 定義

社会効用  $U$  は、社会指標のうち期待生産高平均値（または実績生産高平均値） $P$  および推定事故率平均値（または実績事故率平均値） $A$  から、次式によって求める。

$$U = P - LA$$

ただし、 $L$  は事故によって社会が被る損失を意味する<sup>i</sup>。（ $L$  を等価事故損失と呼ぶ。 $LA$  は社会からみた事故によるリスクということになる。） $L$  の値は、事業（すなわち起きうる事故）の内容や社会の性質によって、リソース単位で定まる。

なお、 $L=0$  のときの  $U(=P)$  を基本効用、 $U=0$  を達成する  $L=L_{max}$  を特に許容最大事故損失<sup>ii</sup> と呼ぶことにする。

## 5-3-2. 累積値

ターム  $T$  における累積社会効用を  $U_T$  は、ターム  $t$  における社会効用  $U_t$  および割引率  $r$  を用いて次式によって求める。

$$U_T = \sum_{i=0}^T \left( \frac{1}{1+r} \right)^{T-i} U_i$$

割引率  $r$  については、積立率  $rv$  の別の解釈として、 $r=1/rv-1$  すなわち  $rv=1/(1+r)$  で決めても良いだろう。なお、これはターム  $T$  の時点から過去を振り返り、時間的に離れたときの影響を小さく見るといふ考えからくるものである。ターム  $T$  をどこに取るかが問題になり、十分に大きい  $T$  ならば収束後の  $U$  が一定になることから、累積値を用いる必要はなくなる。

逆に、未来を予想し、ターム  $0$  の時点から考えるなら次式を用いる。 $T$  を十分大きくとることと、収束までのスピードも考慮に入れた効用を計算していることになる。

$$U_T = \sum_{i=0}^T \left( \frac{1}{1+r} \right)^i U_i$$

本研究では特に  $r=0$  の単純総和を考える。（上2式は一致する。）これについては第7章2-2節で取り上げる。

<sup>i</sup>  $L$  は、実際には事故の内容による変数になるはずである。しかし、今回のモデルでは、事故を起きたか起きていないかのみで表現しているので簡略化してある。統計値から考えているので、事故損失の期待値と考えてもよい。

<sup>ii</sup> それ以上の事故損失だとその産業からは社会効用を得られないので事業を廃止すべきである。

## 6. 現実との対応

最後に、現実の生産システムを本シミュレーションモデルに対応させる方法を簡単に述べる<sup>i</sup>。

### 6-1. 解析手順

次のような手順に従って解析を行う。

1. 生産システムの原材料価格・製品価格・信頼性・運用コスト等を評価する
2. 現実の生産システムをフローチャート化する
3. フローチャートの各部の投入材・付加価値・コスト等を評価する
4. フローチャートに対応したデバイス（ライン・インストルメント）を作成する
5. デバイスごとに生産性や信頼性を設定する

ただし、フローチャートで作業課程の分割単位は、モデル適応者の裁量にゆだねられている。これは、本モデルが多様な階層でシステムを評価できるためである。また、協調した作業が行われる部分（例えば機器とそれを操作する従業員）は一つのデバイスにまとめる。

### 6-2. デバイスの性能設定

一般に、生産性についてはトップダウン方式で、安全性についてはボトムアップ方式で評価できるだろう。

#### 6-2-1. コスト評価

機器の価格や従業員の給与、作業時間等から計算できるはずである。

#### 6-2-2. 生産性評価

まず、システム全体の付加価値を計算する。作業途中の個々の部品等は、例えばそこだけ外注にする場合の価格から算定することもできるだろう。

もしも、コストが生産性部門と安全性部門とに分離できているなら次のような方法もある。全体の生産性を、個々のデバイスに対して、生産性部門のコストに応じて配分するのである。

#### 6-2-3. 信頼性評価

FTA<sup>21</sup>などで個々のデバイスについて信頼性が評価できればよい<sup>ii</sup>。

<sup>i</sup> シミュレーションであるから、現実と対応しているかどうか、という多重な検証が必要であろう。

<sup>ii</sup> 信頼性工学などで深く研究されてきた分野である。

### 6-3. モデルの限界

本モデルはもちろん万能ではなく、現実を反映しきれない面もある。

#### 6-3-1. 企業の独立性

企業の活動を機器の性能として独立に定めているが、実際には特に生産性の部分について、他の企業との相互関係に依存して決まるところが大きい。本モデルでは、各企業が生産性と信頼性を両方考慮していることを簡潔に表現した。

#### 6-3-2. 事故の程度

本モデルでは、出力リソースが入力リソースよりも小さいときに一律に事故を起こしたと定めた。すべての事故は事故として等価に扱われるが、実際には事故の程度に差がある。しかし、特に効用として評価するときはそれらを総和するので、事故の期待値を代表値として用い平均化し近似していることになる。

#### 6-3-3. 淘汰・置換

本モデルでは、遺伝的アルゴリズムを用いて、多くの資本を所有する企業のノウハウが伝播することを模擬した。このような実装では遺伝的アルゴリズムの特性に依存するところが大きくなる可能性がある。しかし、遺伝的アルゴリズムが広く用いられ、様々な適応に応用できることから採用している。

# 第5章 テスト

まず機器群の設定を行い、予備実験を実施して以降のシミュレーションの基本設定を定める。

## 1. 採用機器

### 1-1. 機器群 I

機器群 I として、保全を必要としない機器構成を定義する。

採用する機器の特性として、生産性  $V$ 、信頼性（非故障率） $R$ 、コスト修正項  $Cd$  を設定する。ここで、信頼性（非故障率）は機器が故障状態にない確率であり、毎タームごとに独立して判定する。また、コスト  $C$  は、修正項  $Cd$  を用いて、 $V$  および  $R$  から次のように計算する。

$$C = (1+V)R + Cd$$

また、それぞれについて A タイプと B タイプを用意し、表 5-1 のように定めることにした。

項目	値
$V$	$V_A=0.2, V_B=0.1$
$R$	$R_A=0.99, R_B=0.9$
$Cd$	$Cd_A=-0.8, Cd_B=-0.2$

表 5-1 機器特性 I

これらを組み合わせて、表 5-2 のような機器を用意した。生産性と信頼性とのトレードオフの関係を表すため、 $V_A$  かつ  $R_A$  の組み合わせは取り除いてある。また、機器の  $X_B$  タイプはコスト修正項が劣ったダミーである。

項目	組み合わせ
$1_A$	$V_A, R_B, Cd_A$

1 <sub>B</sub>	$V_A, R_B, Cd_B$
2 <sub>A</sub>	$V_B, R_A, Cd_A$
2 <sub>B</sub>	$V_B, R_A, Cd_B$
3 <sub>A</sub>	$V_B, R_B, Cd_A$
3 <sub>B</sub>	$V_B, R_B, Cd_B$

表 5-2 機器構成 I

### 1-2. 機器群 II

機器群 II として、保全を必要とする機器構成を定義しておく。

採用する機器の特性として、生産性  $V$ 、初期信頼性（初期非故障率） $R_0$ 、劣化進行率  $D$ 、保全周期  $M$ 、コスト修正項  $Cd$  を設定する。ここで、信頼性（非故障率）は初期信頼性および劣化進行率から次式によって毎タームごとに計算する。ただし、 $t$  は前回の保全または修理からの経過ターム数である。

$$R = R_0 - tD$$

保全または修理によって、この  $t$  はゼロにリセットされる。保全は  $M$  タームごとに定期的に行うが、 $M$  の値に関わらず、故障が発生すれば修理が行われる。ただし、保全・修理には費用  $C_M$  を要する。 $C_M = 5C$  である。

また、コスト  $C$  は、修正項  $Cd$  を用いて次のように計算する。

$$C = (1+V)(R_0 - 5D) + Cd$$

機器特性は表 5-3 のように定めることにした。

項目	値
$V$	$V_A=0.2, V_B=0.1$
$R_0$	$R_0=1.0$

$D$	$D_A=0.002, D_B=0.02$
$M$	$M_0=0$ (or $\infty$ ), $M_5=5$
$Cd$	$Cd=-0.2$

表 5-3 機器特性 II

これらを組み合わせて、表 5-4 のような機器を用意した。

項目	組み合わせ
$A_5$	$V_B, R_0, D_A, M_5, Cd$
$A_0$	$V_B, R_0, D_A, M_0, Cd$
$B_5$	$V_A, R_0, D_B, M_5, Cd$
$B_0$	$V_A, R_0, D_B, M_0, Cd$

表 5-4 機器構成 II

機器構成 I と異なり、いわゆるダミー機器はない。機器構成 II でも、生産性と信頼性とのトレードオフの関係を表すため、 $V_A$  かつ  $D_A$  の組み合わせは取り除いてある。ただし、第 8 章 3 節において、表 5-5 のような項目  $S_X$  を追加する。

項目	組み合わせ
$S_5$	$V_A, R_0, D_A, M_5, Cd$
$S_0$	$V_A, R_0, D_A, M_0, Cd$

表 5-5 機器構成 II (追加分)

なお、保全を考慮した修正済期待生産高  $E'$  は、保全を考慮しない期待生産高  $E$  から次式のように計算する。ここで、 $C_M/M$  は平均の保全費用、 $(1-R)C_M$  は平均の修理費用である。(な

お、保全なしの場合、 $M=\infty$ とみなす<sup>i)</sup>。

$$E' = R \left( E + \frac{C_M}{M} \right) + (1-R)C_M$$

## 2. 予備実験

### 2-1. 予備実験 I

次に、期待生産高および推定信頼性が実態を正しく予想しているかどうかを検証しておく。まず、ランダムに生成した100個の企業群を100タームだけ進化させることを100回繰り返す。それらの各々の状態を10タームごとに記録し、別に取り出して、淘汰を行わない環境で1000回のシミュレーションを実行する。このときの統計的な生産高・信頼性（統計値と称する）と期待値・推定値とを比較する<sup>ii)</sup>。

なお、生産高統計 $E_A$ および信頼性統計 $R_A$ を次式により定義<sup>iii)</sup>する。 $T$ は経過ターム数、 $P$ は各タームの実際の実績生産高、 $N(a)$ は過去に事故を起こした回数である。

$$E_A = \frac{\sum P}{T}$$

$$R_A = 1 - \frac{N(a)}{T}$$

また、第7章2-2節では、この式によって $T$ までの全企業活動を計算し、社会全体の統計値を求める。

#### 2-1-1. 期待生産高と統計的平均生産高

図5-1に期待生産高と実績生産高をプロットしたものを示す。

<sup>i)</sup> すなわち、 $E' = RE + (1-R)C_M$ となる。

<sup>ii)</sup> なお、示される信頼区間は回数による分布に基づくもので、統計サンプルが1000回に限られていることは含んでいない。

<sup>iii)</sup> ただし、 $T=0$ のときは、 $E_A=0$ 、 $R_A=1$ と定義する。



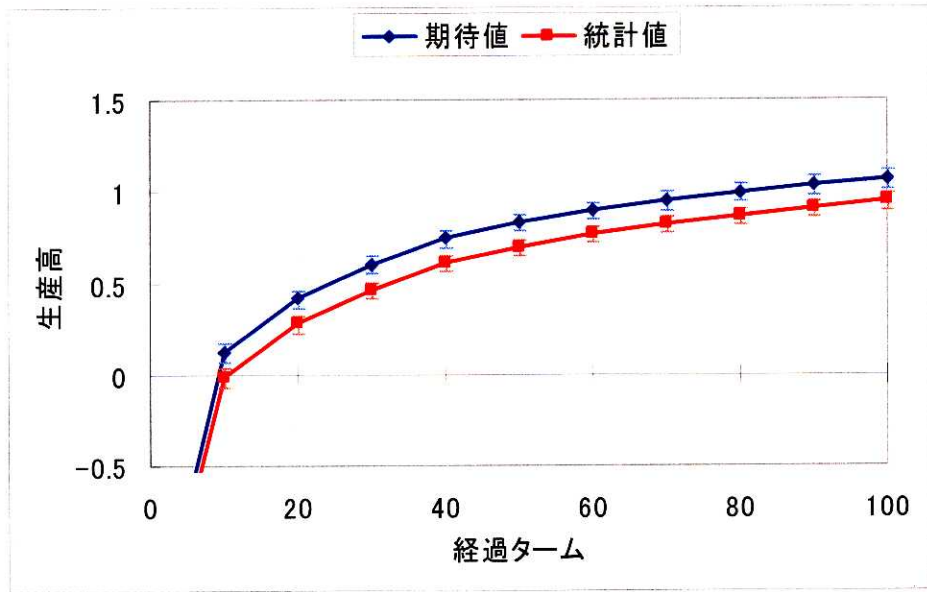


図 5-1 生産高の期待値・統計値の比較

全体としてやや期待値の方が大きいですが、値の変化は正しく捉えられていることがわかる。つまり、真の値との差はランダムなものではないと考えられるので、以下、期待値を参照して考察を行っていったよい。

2-1-2. 推定信頼性と統計的平均信頼性

図 5-2 に推定信頼性と統計的平均信頼性をプロットしたものを示す。

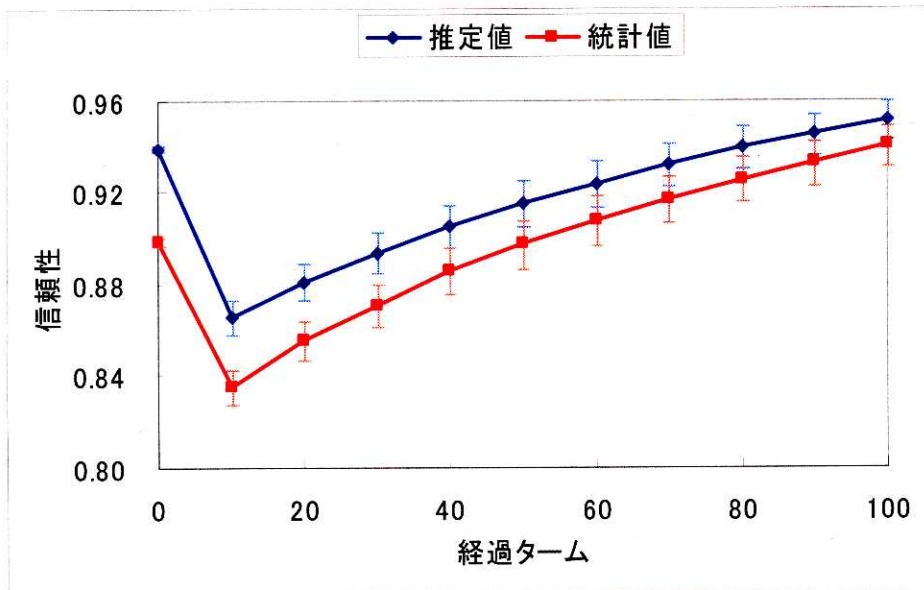


図 5-2 信頼性の推定値・統計値の比較

推定信頼性についても、推定値の方が全体として高いが、値の変化はやはり正しく捉えられていることがわかる。よって、以下、信頼性についても推定値を用いて考察していくことにする。

## 2-2. 諸条件

次に、既定値を置くべき条件を設定する。

### 2-2-1. 試行回数

シミュレーションの試行回数を多数回に設定することによって、各条件での社会特性の真の平均値をより確からしく推定することができる。これは、事前に明確な基準をもって決めることはできないので、特に明記がない限りとりあえず100回と決め、特に必要なときのみ、試行回数を変更することにする。

### 2-2-2. 企業サイズ

一般的な経済モデルにおいては、ある生産関数に対して利潤を最大化する適切な投資の量が決まっている。これは、規模のメリットや管理費用の増大などから定まるものであるが、本モデルにおいては、企業のサイズに伴うコストは定式化されていない<sup>i</sup>。したがって、設定した機器の特性は、条件に対してある程度最適化されていると考えることにする。

予備実験においては企業サイズを10とする。企業サイズの変化による影響は次の実験で調べる。また、定期投入リソースは企業サイズに等しく設定する。

## 2-3. 予備実験Ⅱ

次に、遺伝的アルゴリズムの特性に注意しつつ、基本的なシミュレーション条件を設定する。そのため、前述の機器構成および諸条件Ⅰのもと、予備実験Ⅰを行った。この実験は、積立率を設定するためのもので、企業数100で積立率を $0.7 \cdot 0.8 \cdot 0.9 \cdot 1.0$ の4通りに変化させたものである。これは、500タームまでのシミュレーションであり、ある1回の結果のみを取り上げる。

### 2-3-1. 企業群の進化

まず、ある1回のシミュレーションについて、ターム $T=0$ およびターム $T=500$ で、全企業の期待生産高・推定信頼性の組をプロットしたものを示す。 $T=500$ のものについては、積立率

<sup>i</sup> 例えば比較実験において有意な差が生じているか検討したいときなどである。

<sup>ii</sup> これらはすべてコスト関数によって反映することになる。企業サイズによってコスト関数の形状を変えるという拡張も可能であるが、本研究の本旨から外れるので実装されていない。

を  $rv$  で示した<sup>i</sup>。

初期配置の期待生産高<sup>ii</sup>はほとんどがマイナスであるにも関わらず、いずれの場合も期待生産高が正の企業集団に進化していることがわかる。また、1回のシミュレーションではあるが、高い積立率の場合、比較的横に広く分布し、低い積立率では信頼性の高い方に偏る傾向があることもわかる。

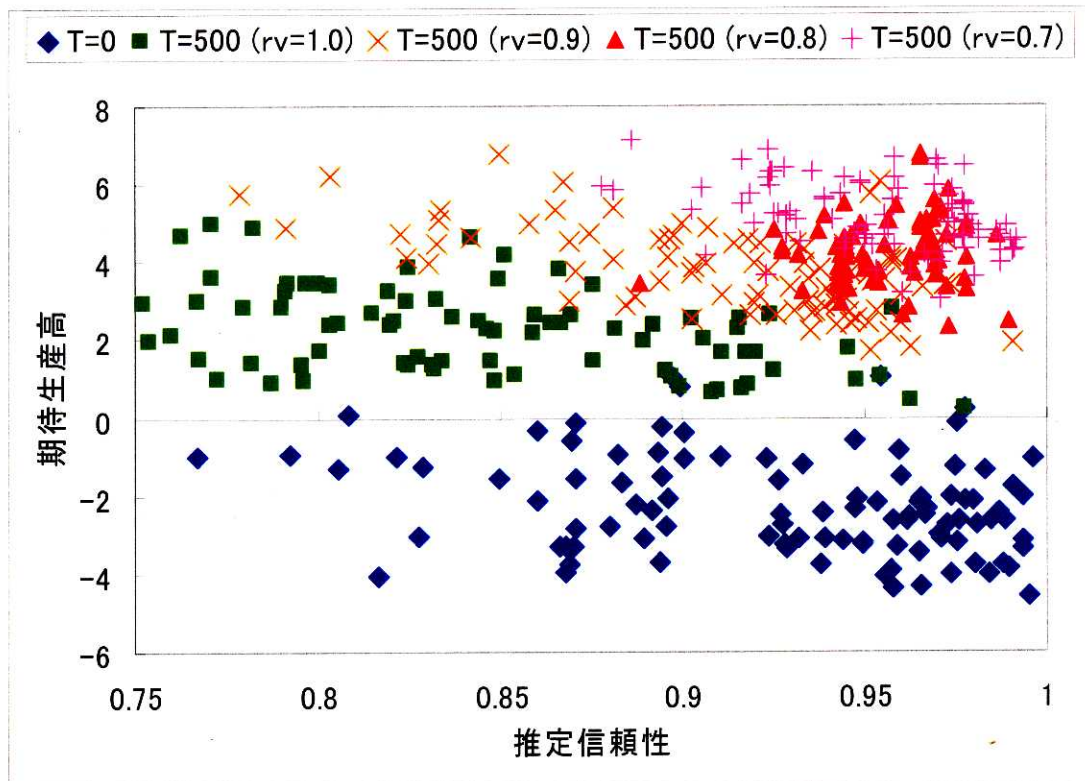


図 5-3 積立率と企業分布例

これは主として二段階によるものと考えられる。まず、期待生産高が負であっても、事故を起こさずに生存した企業の、優れた生産性を発現する遺伝子が広がる。次に、タームが進むにつれ、優れた安全性を発現する遺伝子も広がる。結果として、期待生産高が急速に改善していく<sup>iii</sup>。これから、遺伝的アルゴリズムが機能していることが確認した。

低い積立率で右側に偏るのは、倒産リスクと信頼性との関係による。これについては、第6章 2-4-2 節で確認する。

<sup>i</sup> T=0 の分布は積立率に関係なくほぼ同様なので1つのみを示した。

<sup>ii</sup> 第3章と異なり、縦軸の期待生産高は事故の影響も考慮したものであることに注意する。

<sup>iii</sup> 実際の詳しい時間推移については多数回の平均を取った上で、後にまた確認する。

## 2-3-2. 積立率の影響

また、積立率( $rv$ )が 1.0 および 0.9 の場合では比較的幅広く分布しているが、積立率 0.8 および 0.7 の場合では領域が収束していることが読みとれる。特に、積立率 1.0 においては、期待生産高がわずかに 0 を上回ったあまり最適化が進んでいない企業も生存している。

これは積立率が 1.0 の場合、期待生産高が正であれば、生存ターム数の増大と共に、果てしなく資金を蓄積することができるので、ほとんど倒産・淘汰することがなくなることから来るものである。一方、積立率が 1.0 より小さい場合、蓄積できる資金に上限ができるので、倒産する確率はゼロに収束していくことはない。また、このように進化した企業で蓄積資金が減少するのは事故を起こしたときだけであるから、積立率が大きい場合よりも信頼性を高める遺伝子の重要性がより高くなるのである。

積立率ごとの  $T=500$  における企業の平均生存ターム数を図 5-4 に示す。特に  $rv=1.0$  の場合は、シミュレーション時間と平均生存ターム数がほぼ等しくなっていくとわかる。

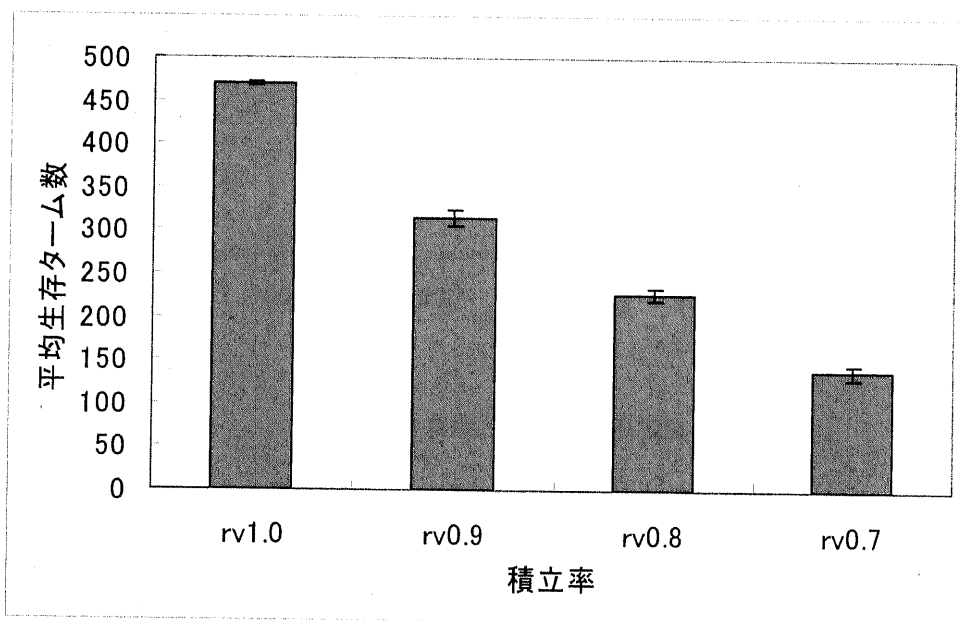


図 5-4 積立率と企業の平均生存ターム数

また、社団法人生命保険協会のまとめた『株主への利益還元状況等について』<sup>22)</sup>によると、日本企業の配当性向はおよそ 20%程度となっている。(配当性向は、内部留保も含めて分配を行う本モデルの積立率とは異なるが、2004 年のマイクロソフト社の特別配当<sup>23)</sup>のように、過剰な内部留保を配当する例はある<sup>ii)</sup>。) これと前述の結果を考慮して、以降は、積立率を原則とし

<sup>i)</sup> 企業の当期純利益に対する配当金支払額の割合を示す。

<sup>ii)</sup> さらに、前述のように、積立率はその他の諸費用も含むものである。

て0.8に固定することにする。

## 2-4. 予備実験Ⅲ

さらに、企業数および試行ターム数を設定するために、積立率0.8で企業数を10・25・50・100・150の5通りに変化させて実験を行った。

まず、平均の期待生産高の推移を図5-5に示す。

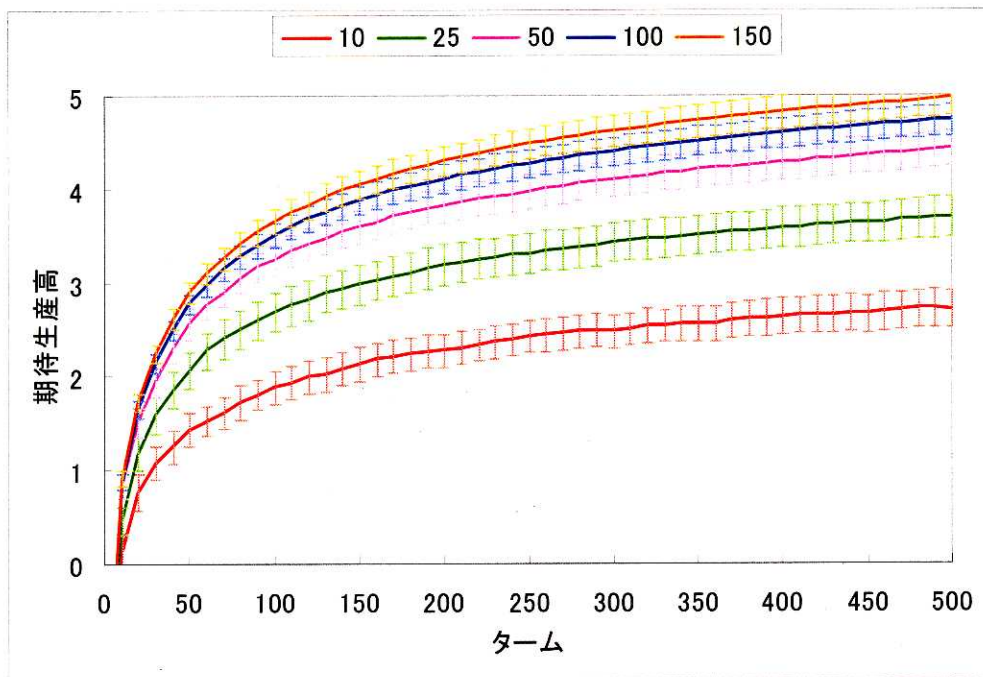


図 5-5 企業数と期待生産高推移

### 2-4-1. 企業数の影響

企業数が10および25の場合は、他と比べて十分な水準まで進化できていないことが読みとれる。本モデルでは、遺伝的アルゴリズムによって企業群が進化していく。よって、企業数が少ない場合、初期の遺伝子群に必要な多様性が確保されず、社会の最適化が十分な水準まで進行しないのである。しかし、それなりに適応した企業が生成できているなら、不必要に多い企業は計算時間の増大を招くだけで、社会の最適化にはほとんど貢献しない。

以上から、企業数は原則として100で固定することにした。

### 2-4-2. 試行ターム数

また、期待生産高の大きな変化は概ねはじめの100ターム程度であることがわかる。

社会環境が一定であれば、遺伝的アルゴリズムを採用している本モデルは、やがて安定的かつ均衡的な社会に収束すると期待される。というのは、遺伝的アルゴリズムが巧く機能すれば、環境に適した企業が生成され、その遺伝子が社会全体に広がると考えられるからである。

ただし、社会全体がこのような状態に至るには非常に長い時間がかかる。実際、完全に進化が停止するにはより時間が必要であると読みとれる。社会特性の傾向が概ね読みとればよいと考え、以降、試行ターム数は原則として250まで取ることにする。

## 第6章 保全なしの社会

本章では、表 5-2 機器構成 I に基づき、保全なしの社会をシミュレーションする。

### 1. 企業サイズと突然変異

まず、企業サイズおよび生存企業に対する突然変異適応による影響を調べる実験を行った。表 6-1 のように、企業サイズは 5 および 10、それぞれ生存企業に対する突然変異があるものとないものの、計 4 つの社会をシミュレーションした。ただし、定期投入リソースは共に 10 とした。規制はなしである。

条件	企業サイズ	生存企業への突然変異
S5	5	× なし
S10	10	× なし
S5wM	5	○ あり
S10wM	10	○ あり

表 6-1 企業サイズおよび突然変異の影響

#### 1-1. 生産性および信頼性の推移

生産性および信頼性の時間推移を示す。

##### 1-1-1. 生産性推移

図 6-1 に社会の期待生産高の推移を示す。全体として、生産高は単調に増加している。サイズ 5 とサイズ 10 とを比べると、サイズ 10 の方が優れた成績を示すことがわかる。また、突然変異ありの場合、ある水準で生産性の改善が停止してしまうことがわかる。それに対し、突然変異なしの場合は順調に改善が継続する。

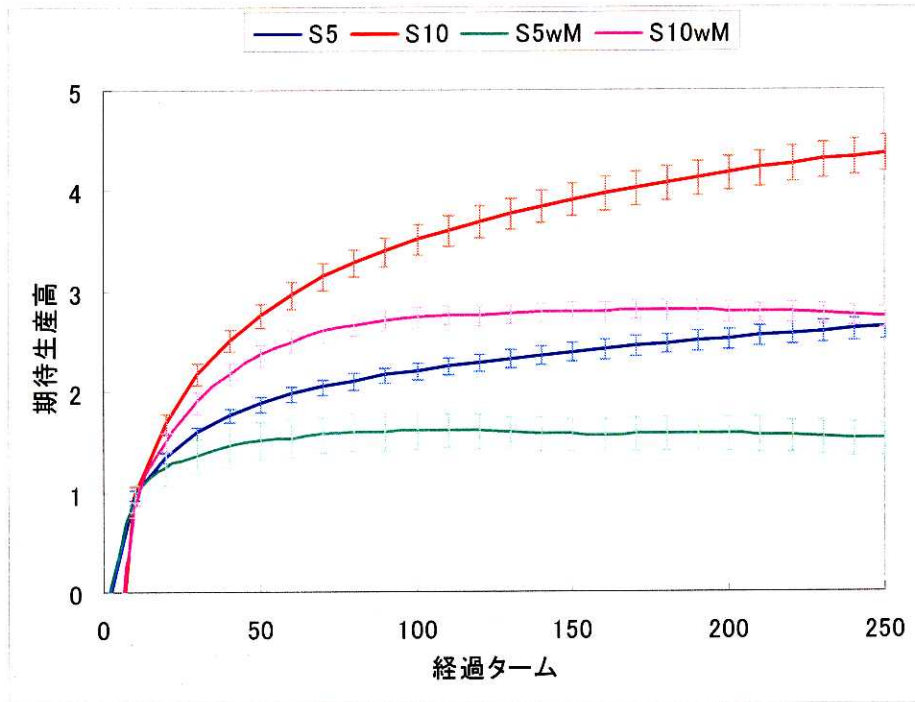


図 6-1 サイズ・突然変異と期待生産高の推移

まず、サイズが大きい場合により大きな期待生産高を達成できるのは、サイズが大きいとルート・デバイスの直列数をより大きくできるからである。また、生存企業に突然変異を適用すると、Bタイプのものを選択するような変化などが生じるため、生産高に頭打ちの傾向が生じてしまうことになる。T=250での生存企業の直列数およびBタイプ選択率を図6-2に示す。

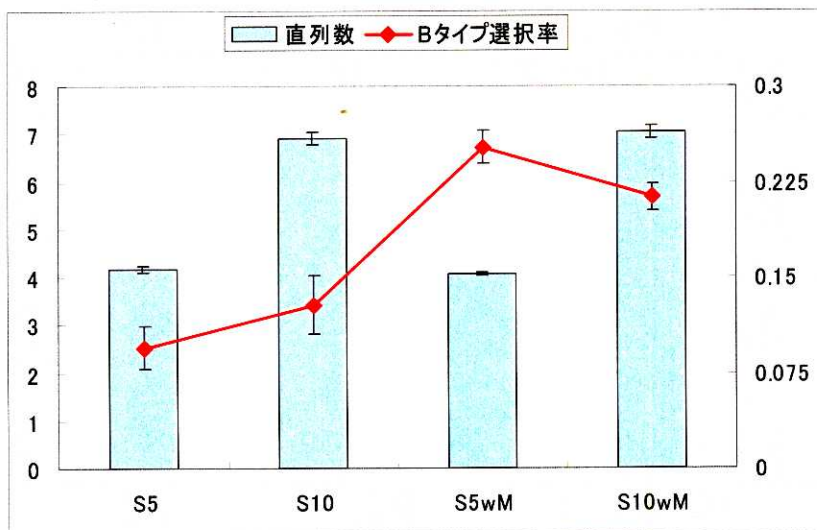


図 6-2 企業サイズ・突然変異と直列数・Bタイプ選択率



生存企業への突然変異の適応は生産性の発達を阻害することがわかる。

### 1-1-2. 信頼性推移

図 6-3 に社会の推定信頼性を示す。

まず、全体にはじめの 10 ステップにおいてはいったん低下することがわかる。また、サイズ 5 とサイズ 10 とを比べると、サイズ 5 の方が優れた成績を示すことがわかる。さらに、サイズ 5 の場合は突然変異ありとなしとの差はほとんどなく、サイズ 10 の場合は突然変異ありの方が優れた成績を示している。

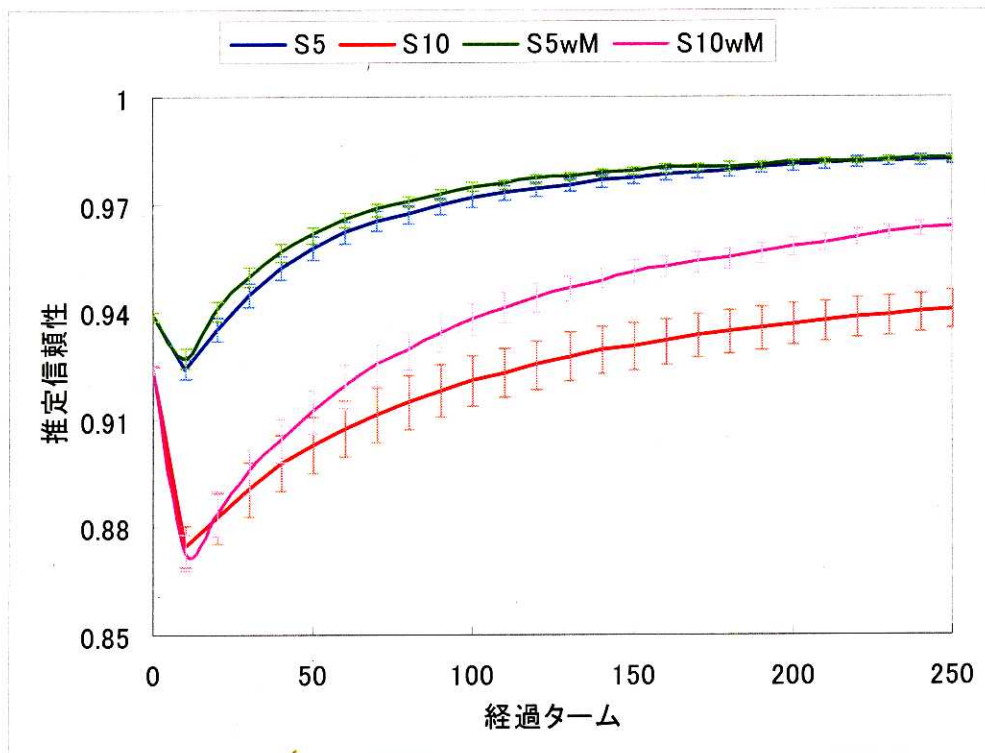


図 6-3 サイズ・突然変異と推定信頼性の推移

はじめの 10 ステップほどで信頼性が低下するのは、開始直後は期待生産高を引き上げるのが重要であるため、生産性を大きくする遺伝子の方が生存しやすいからである。しかし、信頼性もある程度高い方が期待生産高も大きくなるので、それ以降は生産性も増大していく。サイズが小さい方が信頼性に優れるのは、図 6-2 で示されているように、比較的直列型に近いラインを形成していることによる。

また、生産性と異なり、信頼性を低下させるような変化は倒産を招く危険性が高いので、信頼性においては突然変異が阻害にならないと考えられる。

## 1-2. 期待・推定成績と実績の格差

特にサイズ5の場合（S5, S5wM）を取り上げ、生存企業の実績と真の性能とには差があることを示す<sup>1</sup>。実績値の定義は第5章2-1節で用いた統計値と同じである。ただし、個別に取り出して再計算するのではなく、生存企業とそのタームまでのデータで計算する。

### 1-2-1. 生産性格差

図6-4は生産高における期待値と実績との差を示したものである。（“wM”は「S5wM」のもの、他は「S5」のものである。）特に初期のタームで格差が大きいことがわかる。また、突然変異ありの場合、最後まで格差が縮まることがない。

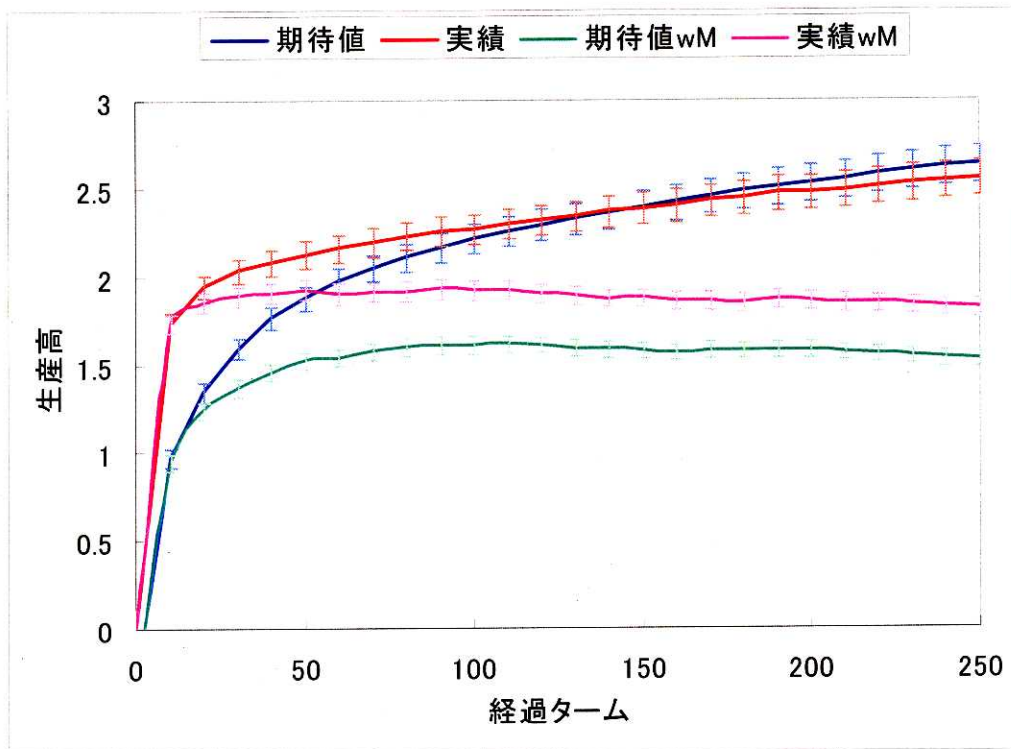


図 6-4 生産性格差

本モデルにおいては、確率的動作を行うのは故障の部分なので、基本的に生産高の格差は信頼性の格差から派生するものである。

### 1-2-2. 信頼性格差

図6-5に信頼性における推定値と実績との差を示す。やはり特に初期の格差が大きく、突然

<sup>1</sup> 第5章2-1節で確認したように、期待値および推定値が実績よりもやや高く性能を評価することにも注意する。

変異ありの場合は、格差が最後まで縮まないことがわかる。突然変異なしの場合は、最初こそ格差があるものの、やがて推定値と実績の差はゼロに近付いていく。

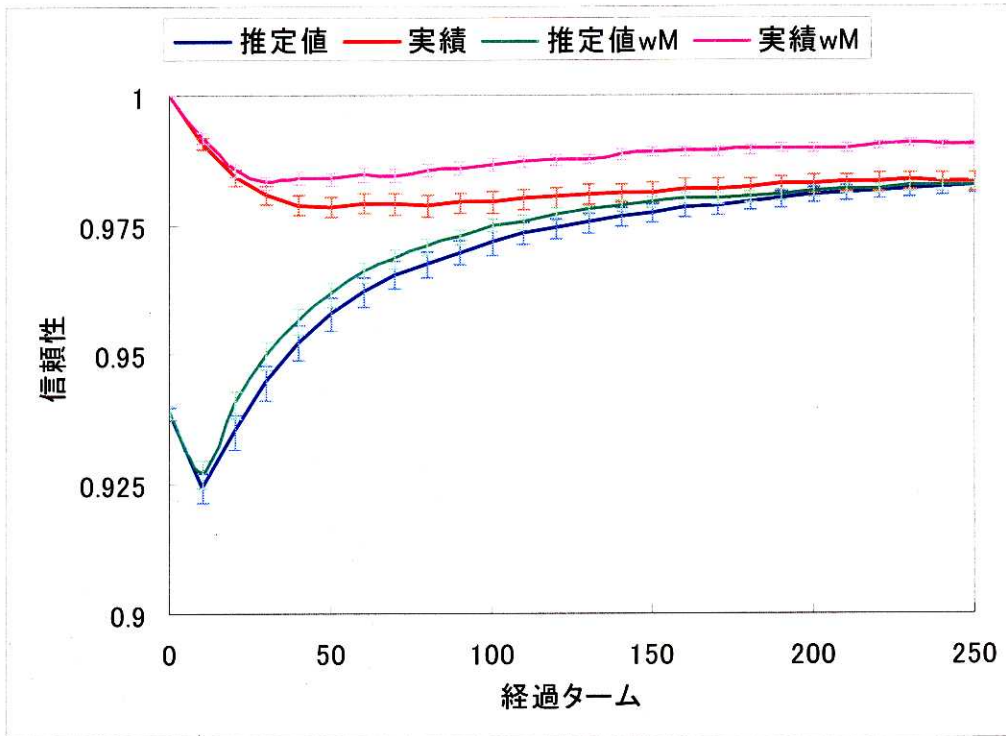


図 6-5 信頼性格差

これは、特に初期タームにおいては、事故を起こした企業は淘汰されやすいので、結果的に事故を起こしていない企業が多く生き残るからである。ただし、十分な時間が経過すると、このような統計的事故確率は推定値に近付いていく。ただし、突然変異ありの場合、生存している企業の信頼性も変化していくので、統計値と推定値はいつまでも一致しないことになる。

## 2. 事後制裁規制

次に、事後制裁のみを安全規制として採用した人工社会を検証する。企業サイズは5または10で、それぞれについて様々な罰金額でシミュレーションを実行した。ただし、生存企業への突然変異の適用はしない。また、企業サイズ10の罰金額15以下のものについては、特にシミュレーション試行回数を500回に設定してある<sup>1</sup>。以後、企業サイズ5のものをS5、企業サイズ10のものをS10と称する。

<sup>1</sup> 期待生産高のピークを見極めるためである。

## 2-1. 生産性・信頼性への影響

250 タームのシミュレーション終了時の生存企業について、制裁が生産性と信頼性にどのように影響するかを示す。

### 2-1-1. 生産性への影響

図 6-6 に事後制裁の罰金額と期待生産高をプロットしたものを示す。

S5 の場合、罰金額の増加によって期待生産高も単調に現象していく様子が見えてくる。また、罰金額が 10 以上では、期待生産高にほとんど差はない。S10 の場合<sup>1</sup>、罰金額の増加によっていったん期待生産高が増加し、その後で減少に転じる。大きな罰金額で変化が小さくなるのは同様である。

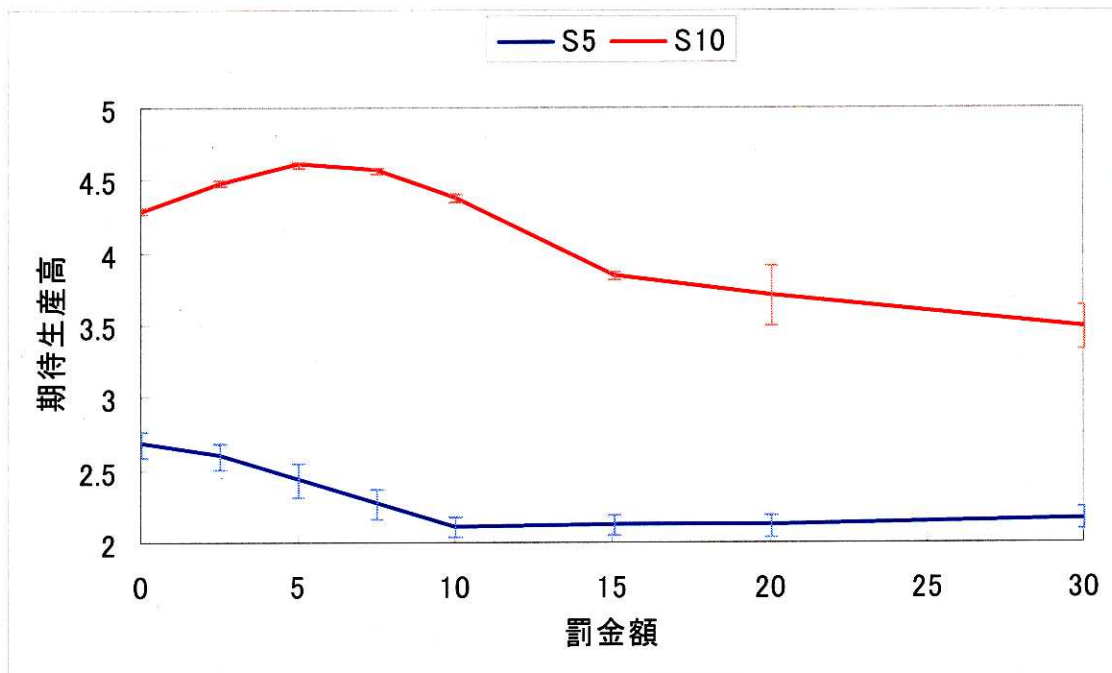


図 6-6 罰金額と期待生産高

産業規模が小さい場合、いわゆる工夫の余地が少ないならば、一般に言われているように、効率性追求という観点からは、安全規制が妨げにしかならない、ということの意味する。規制なしの場合に最適化されている社会の信頼性は、もともと期待生産高を最大にするように調整されている。しかし、罰金を上乗せし事故のリスクを大きくすると、後述のようにさらに信頼性を上昇させざると得ない。これは、調整された信頼性をずらすことになるので、期待生産高の低下を招くのである。

<sup>1</sup> 罰金額 20 以上は試行回数が 100 回なので他と比べて信頼区間が広い。

しかしながら、産業規模が大きい場合、適切な規制の設定が、かえって生産効率の上昇に資することもある。特に、本モデルでそうであるように、利潤があげやすく、生存が比較的容易である場合、総合的な生産性効率の追求も疎かになる場合がある。規制の設定によって、期待生産高自体も増加することになる。

生産性効率頭打ちの傾向については次項の信頼性への影響で述べる。

### 2-1-2. 信頼性への影響

図 6-7 に事後制裁の罰金額と推定信頼性をプロットしたものを示す。

S5, S10 いずれの場合も罰金額が大きいほど信頼性も向上する。頭打ちの傾向が出るのは期待生産高の場合と同様である。

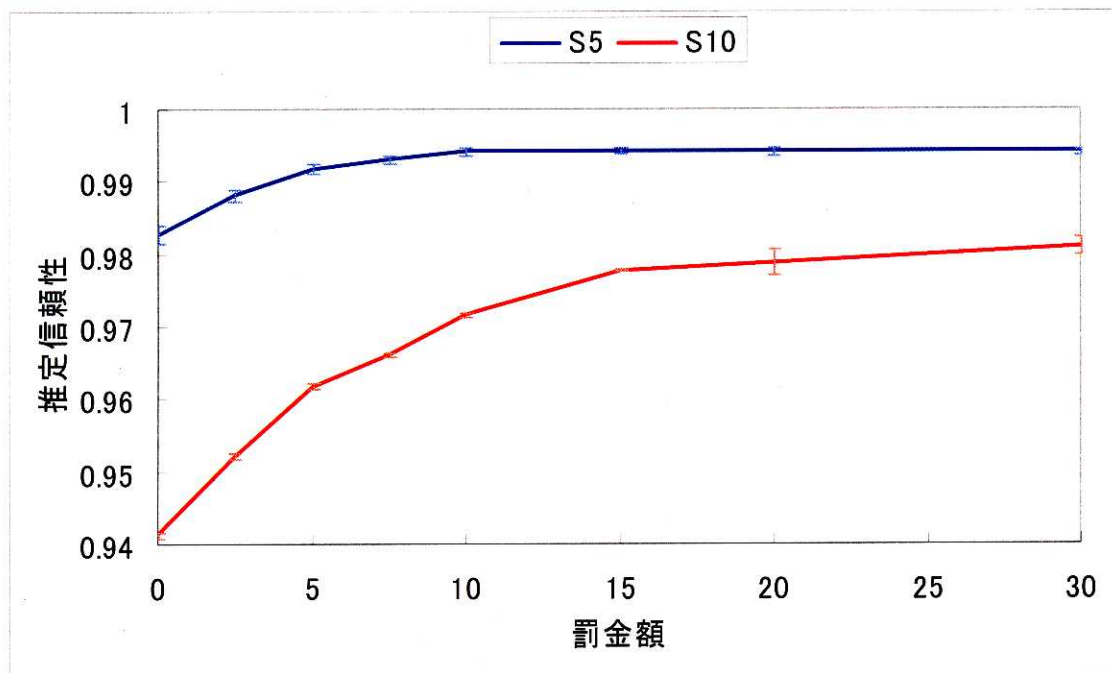


図 6-7 罰金額と推定信頼性

さて、前述した生産性上昇の頭打ちの傾向は、この信頼性上昇の頭打ちの傾向から来るものと考えることができる。積立率の設定により、決まった生産性の企業が蓄えられる資金には限界があるので、例えば一企業を倒産させる以上の罰金は意味がないということを反映している。(非常に大きな罰金額は、事故を起こした企業を自動的に取り除く操作に相当する。)

これらから、安全規制の設定が常に信頼性向上に資するというを確認できる。ただし、過剰な罰金額は、信頼性向上に貢献しない。前述したように生産性も阻害していることから、そのような制裁には意味がない。

## 2-2. 社会効用への影響

前述のように、安全性の向上は、生産性とのトレードオフによって獲得されている。そこで、第4章5-3節で説明した社会効用  $U$  を用いて、様々な条件のもとで、どの社会が優れているのかを考察する。

### 2-2-1. 企業サイズ5の社会効用

図6-8は企業サイズ5の社会効用をプロットしたものである。ただし、期待生産高から徴収された罰金を引くことはしていない。なぜなら、罰金は政府等の収入になって再び社会に還元されると考えられるからである。事故の損失評価は  $L$  によって行う。

事故損失が大きい領域で社会効用を最大化するには罰金を課す必要があることがわかる。ただし、そのような領域の事故損失は、課せられるべき罰金額よりも一般に大きいことが読み取れる。

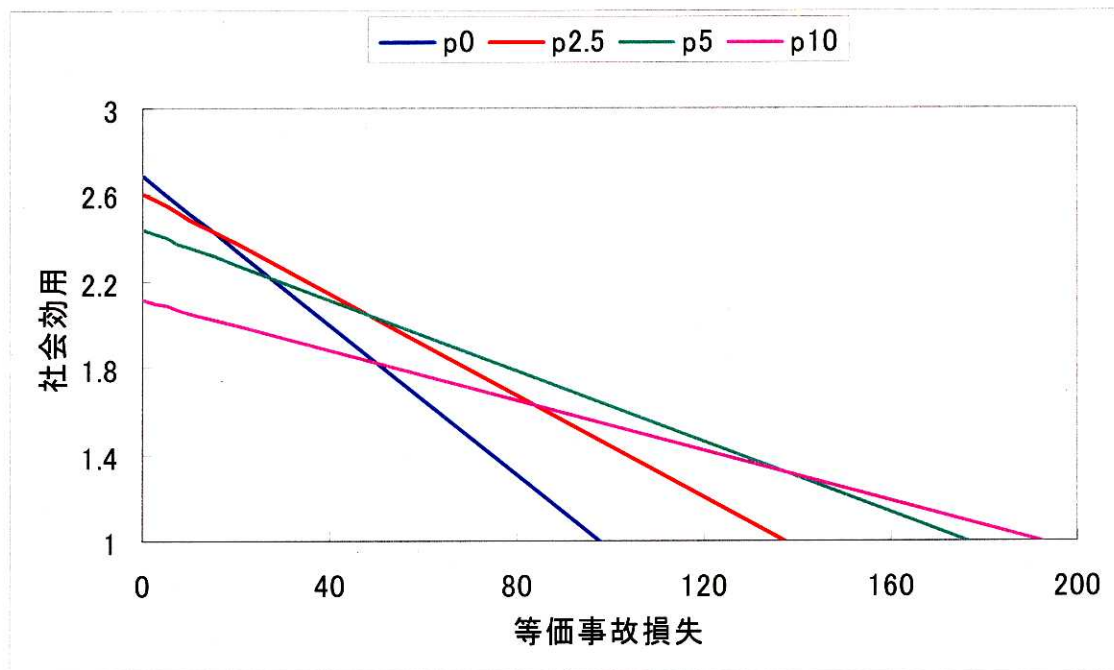


図 6-8 企業サイズ5の社会効用

### 2-2-2. 企業サイズ10の社会効用

図6-9は企業サイズ10の社会効用をプロットしたものである。

S5のときと同様の傾向を有することがわかる。ただし、事故損失がゼロ<sup>i</sup>の場合も罰金が課せられている方がよい。また、全般に罰金額が大きめになる。事故損失がゼロであっても罰金を課すべきというのが、社会シミュレーション特有の結果であり、第3章で説明した資源配分モデルと異なる部分である。

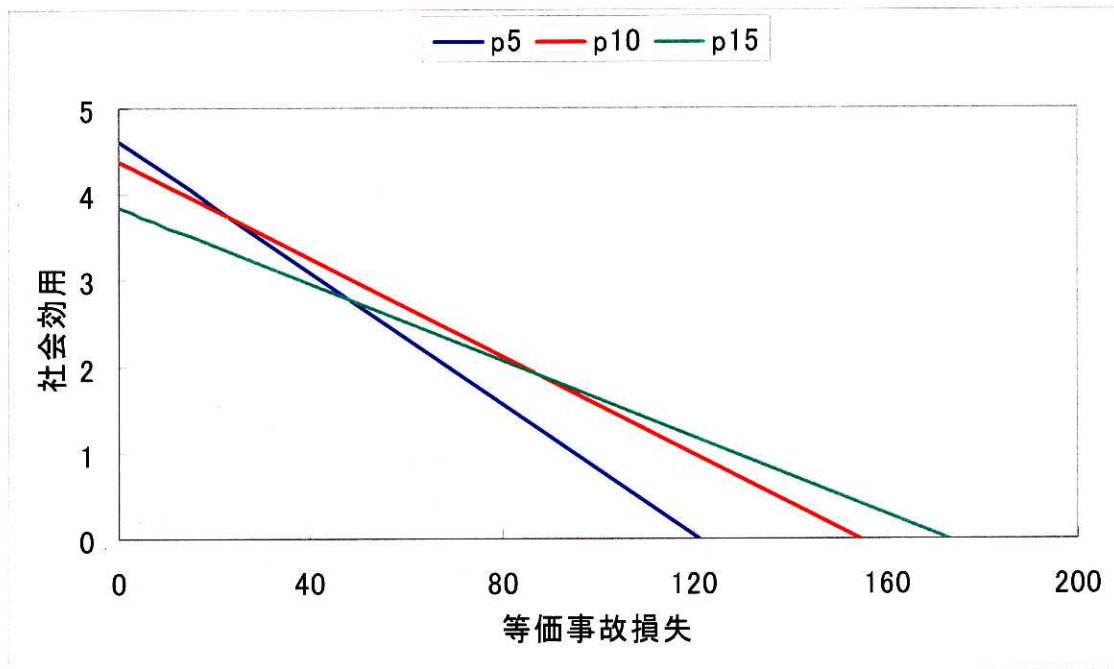


図 6-9 企業サイズ 10 の社会効用

### 2-2-3. 社会効用曲線

また、社会効用を表す直線（社会効用直線と呼ぶ）のうち、各事故損失で最大の部分をつなぎ合わせると単調減少で下に凸の曲線（社会効用曲線と呼ぶ）が描ける<sup>ii</sup>ことがわかる。（もちろん、信頼性上昇に頭打ちの傾向があれば、事故損失の大きな部分については直線になるだろう。）事故の損失を見積もり、このような曲線を考えることで、適切な罰金額を設定することができるのである。

社会効用曲線の凸性は必ずしも自明な性質ではない。図 6-10 のように、生産性の減少に比して信頼性の増加が十分でない場合、社会効用曲線は単一の社会効用直線と一致してしまう。信頼性の上昇に限界があればある水準以上では凸性を失うことになる。また、そもそも一つの規制スタイルがどんな条件でも最善であれば、全体が直線になることもあるだろう。

<sup>i</sup> ここでいう事故損失は企業外に及ぼす被害などを含めてのものであるが、事故による生産停止による損失は含まれていないことに注意する。

<sup>ii</sup> 図 6-8 では離散的な罰金額でグラフを描いたが、連続的な罰金額でグラフを描けば繋ぎ合わせた部分は滑らかになると考えられる。

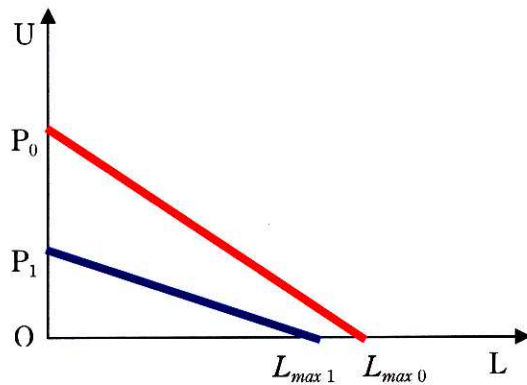


図 6-10 社会効用曲線=社会効用直線の例

社会効用曲線が凸性をもつためには、ある2つの社会効用直線が第一象限で交点を持たなければならない。基本効用のより小さい社会効用直線において、その許容最大事故損失が他方よりも大きくなるのがその条件である。例えば、図 6-10 では  $P_0 > P_1$  なので、 $L_{max1} > L_{max2}$  であれば交点を持ち、曲線を描くことができた。

社会効用曲線が下に凸であるならば、無視できない事故損失（ハザード）がある場合、規制スタイルを変更し社会構造を変革することで、そのリスクを緩和できる。逆にいえば、事故損失が減少した場合、規制緩和を行うことで社会効用がより大きく向上する。（図 6-11 参照。）

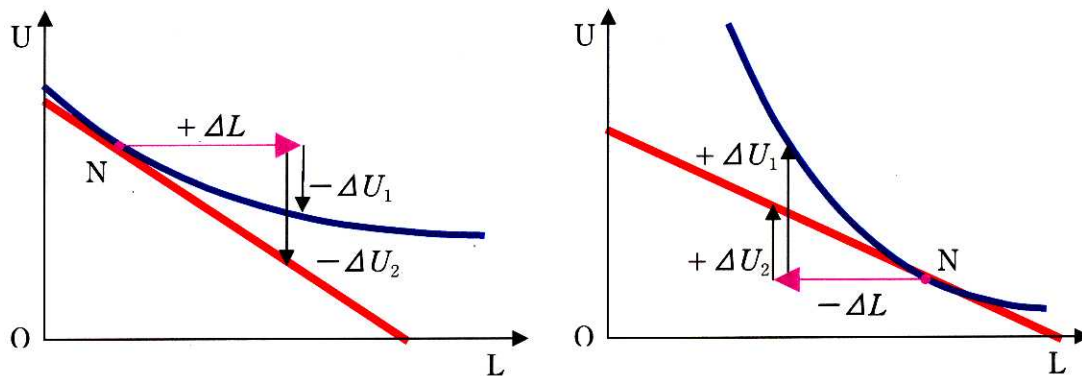


図 6-11 社会効用曲線の凸性とリスク緩和

最初の社会効用および事故損失は、曲線上の点 N によって図示される。いま、ハザードの変動を  $\Delta L$  としよう。適切な規制スタイルの変更は、点 N を含む凸性のある社会効用曲線にしたがって効用が変化することを意味する。対して、現行の規制スタイルの維持は、点 N 上の接線にしたがって効用も変化することを意味する。左図も右図も、社会効用曲線にしたがって効用



を変化させた方が、社会の効用が優位になることを示している<sup>1</sup>。

### 2-3. 誤差の考慮

なお、これまでは直線で示したが、誤差を考えると厳密には図 6-12 のように領域となる。特に事故損失が大きい部分で広がっていくことになるが、誤差が十分に小さい場合や、単に概要を掴みたいだけならば直線で考えてもよいだろう。

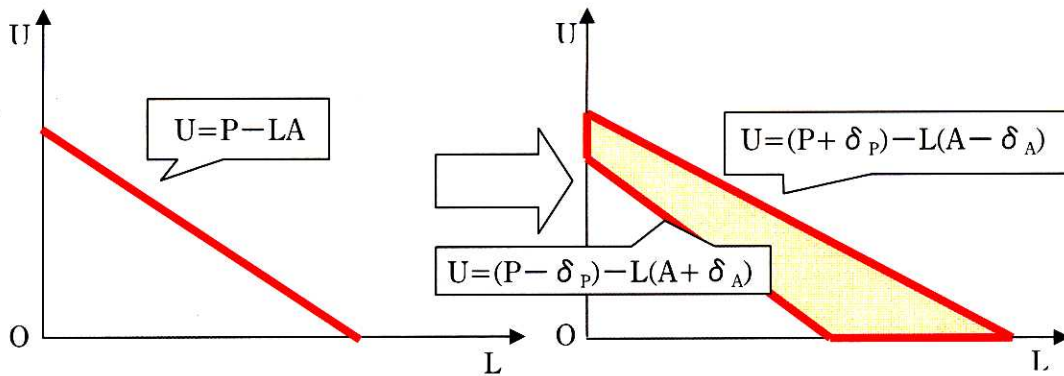


図 6-12 社会効用直線と社会効用領域

すなわち、直線  $U = P - LA$  ではなく、誤差を考慮した2直線  $U = (P - \delta_P) - L(A + \delta_A)$  と  $U = (P + \delta_P) - L(A - \delta_A)$  に挟まれた領域になる。

### 2-4. 生産性・信頼性および平均資金・平均年齢

さて、これまで述べてきたように、生産性と信頼性はトレードオフの関係にある。社会の効用は直接これらから決まると考えてよい。では、企業においては、リスクを考慮した期待生産高だけを最大化させればよいのだろうか？ 企業にとって特に重要な保有資金（利潤）および生存ターム数（倒産リスク）と、生産性・信頼性との関係を調べる。

#### 2-4-1. 生産性と平均保有資金

期待生産高はタームあたりの利潤であるから、平均保有資金は生産性と強い相関があると考えられる。図 6-13 はそれをプロットしたものである。保有資金は生産性と強い正の相関をもつことが確認できる。

<sup>1</sup> 左図なら  $-\Delta U_1 > -\Delta U_2$ 、右図なら  $+\Delta U_1 > +\Delta U_2$  である。

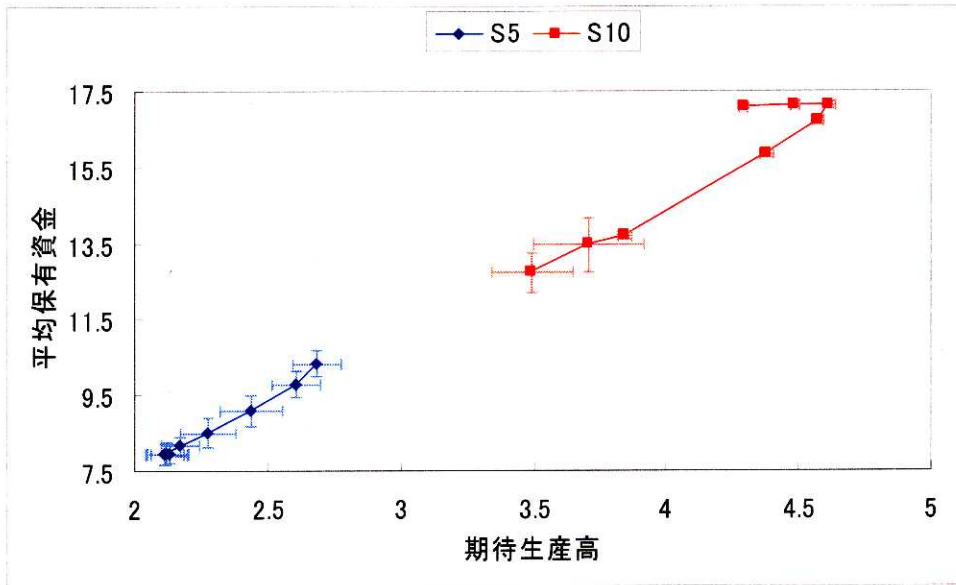


図 6-13 期待生産高と平均保有資金

#### 2-4-2. 信頼性と生存ターム数

図 6-14 は推定信頼性と生存ターム数との関係を示したものである。これによると、平均生存ターム数は、推定信頼性との間に負の相関をもつことが読み取れる。

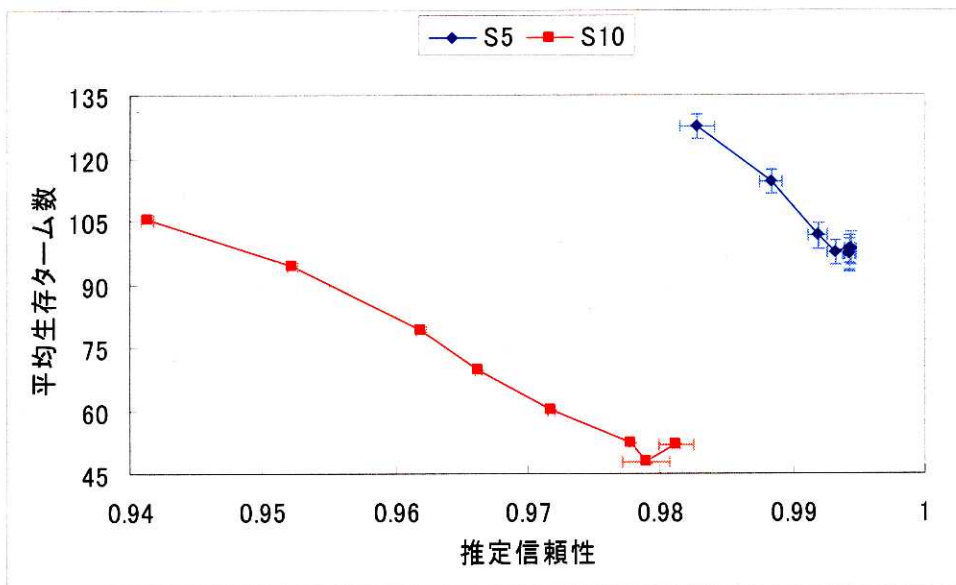


図 6-14 推定信頼性と平均生存ターム数

すなわち、社会全体の企業倒産リスクは規制が厳しい場合の方が高くなる。

しかしながら、これによって単純に個々の企業についても、信頼性よりも生産高の方が倒産リスクを下げる効果があるとは言えない。というのは、罰金額が大きい場合は、事実上、事故が即倒産という結果になってしまうからである。(罰金額小さければ事故を起こしても倒産には至らないかもしれない。)

個々の企業の倒産リスクを下げる手段として、有事に備えてより多くの保有資金を蓄える方法と、有事の可能性そのものを低くする方法があるが、そのどちらが有効かは同一の社会の中で比較する必要がある。

### 3. 結果のまとめ

本章の結果をまとめる。

1. 生存企業の突然変異は社会の生産性の観点からは発達への阻害になるが、信頼性の観点からは阻害ではない
2. 生存企業の見かけ上の特性、特にその信頼性は、実際の信頼性よりも低い
3. 事後制裁として事故に対して罰金を課すと企業の信頼性を高めることができるが、その向上には上限がある
4. 事後制裁は企業の生産性に対しては阻害となることが多いが、産業規模が大きいときに適切な水準で設定すれば、かえって発展を手助けすることがある
5. 規制政策の変更が有効なのは、規制スタイルごとの社会効用直線を重ね合わせるとき、下に凸な社会効用曲線が描ける場合である
6. 厳しい規制によって社会が高い信頼性を獲得する一方で、企業群の平均生存ターム数は小さくなる

## 第7章 保全ありの社会

本章では、表 5-4 機器構成Ⅱに基づき、保全・修理のある社会をシミュレーションする。表 7-1 のような、異なるタイプの規制スタイルを比較していく。

規制スタイル	コード <sup>i</sup>	規制の概要
規制なし	Free(F)	なし
事後制裁	Penalty(P)	事故後に制裁を課す
仕様規定Ⅰ	Ra(A)	A <sub>x</sub> タイプの使用を義務づける
仕様規定Ⅱ	Mainte(M)	X <sub>5</sub> タイプの使用を義務づける
性能規定	R0.98(R)	推定信頼性 0.98 以上を維持するよう義務づける

表 7-1 規制スタイル一覧

規制なしおよび事後制裁はこれまで使用してきたものである。仕様規定Ⅰは劣化進行度の低い機器の使用を義務づける。仕様規定Ⅱは定期的な保全を義務づける。また、性能規定はルート・デバイスの信頼性を 0.98 以上に保つように義務づける。

規制違反への罰則はすべて罰金の徴収とする。規制は各々一つのみとする。(例えば仕様規定や性能規定では、事故を起こしただけでは罰金をすることはない。あくまで、仕様規定違反や性能規定違反の場合のみ、罰金を徴収する。)

ただし、企業サイズは 5、定期投入リソースは 10 に設定した。また、生存企業への突然変異の適応はありのものとなしのもの両方をシミュレーションした。

### 1. 個別スタイルごとの検討

まず、規制に違反したときの罰金額を適切な水準で設定するため、同じ規制で罰金額を変えてシミュレーションを行う。なお、ここでは突然変異の有無を比較するが、後では突然変異あ

<sup>i</sup> 図中などでは以下の表記を用いる。

りの場合で考察を続ける。

### 1-1. 規制なし

規制なし社会の特性はその他の規制と比較する形で提示する。

### 1-2. 事後制裁

#### 1-2-1. 突然変異なし

事後制裁規制 (P) については、罰金額を 2・5・10 に設定して期待生産高および推定信頼性を求めた。まず、突然変異なしの場合で、規制なしの場合と併記し、図 7-1 に示す<sup>i</sup>。第 6 章 2-1 節の場合と同様に、罰金額の増加によって信頼性が向上し、生産性が落ち込む様子がわかる。

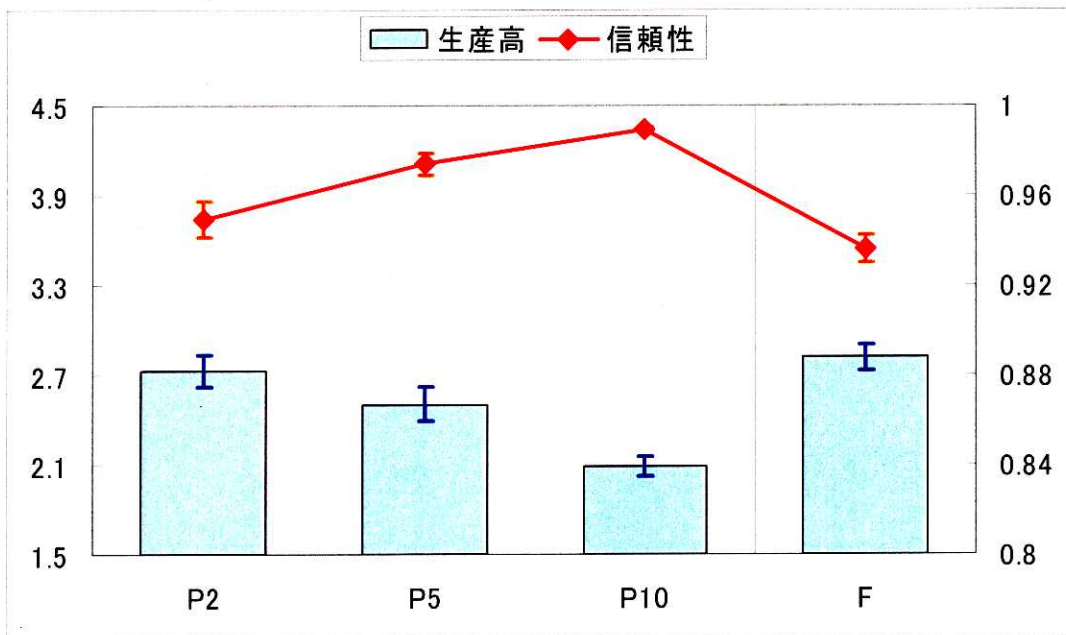


図 7-1 事後制裁と生産高・信頼性 (突然変異なし)

#### 1-2-2. 突然変異あり

図 7-2 は突然変異ありの場合である。第 6 章 1 節で述べたように、期待生産高が低め、推定信頼性が高めの傾向がある。

<sup>i</sup> PX は罰金額 X を意味する。以下の規制スタイルの検討でも同様である。

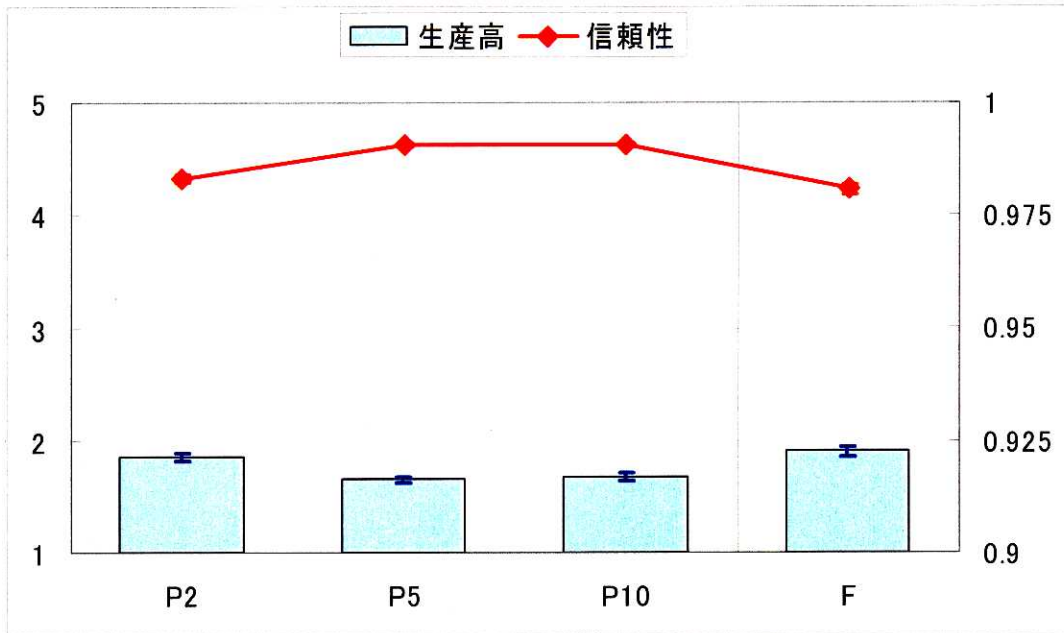


図 7-2 事後制裁と生産高・信頼性（突然変異あり）

事後制裁の罰金額としては、ある程度の信頼性を獲得する罰金額 5 を採用する。

### 1-3. 仕様規定 I

まず、性能劣化の少ない機器の使用を強制した場合の考察を行う。この規制は実は、後述のように完全に失敗する。

#### 1-3-1. 突然変異なし

仕様規定 I (A) については、罰金額を 1・2・5 に設定して期待生産高および推定信頼性を求めた。規制なしの場合と併記し、図 7-3 に示す。

仕様規定 I は生産性を増加させるが、信頼性についてはむしろ減少させるとわかる。生産高の増加効果は罰金額が 2 のときに最も著しいが、信頼性の低下も顕著である。また、罰金額が最大の場合には優位性がない。

このように、規制の意図と反する結果が生じる理由については、突然変異ありの場合の結果も確認した上で考察する。

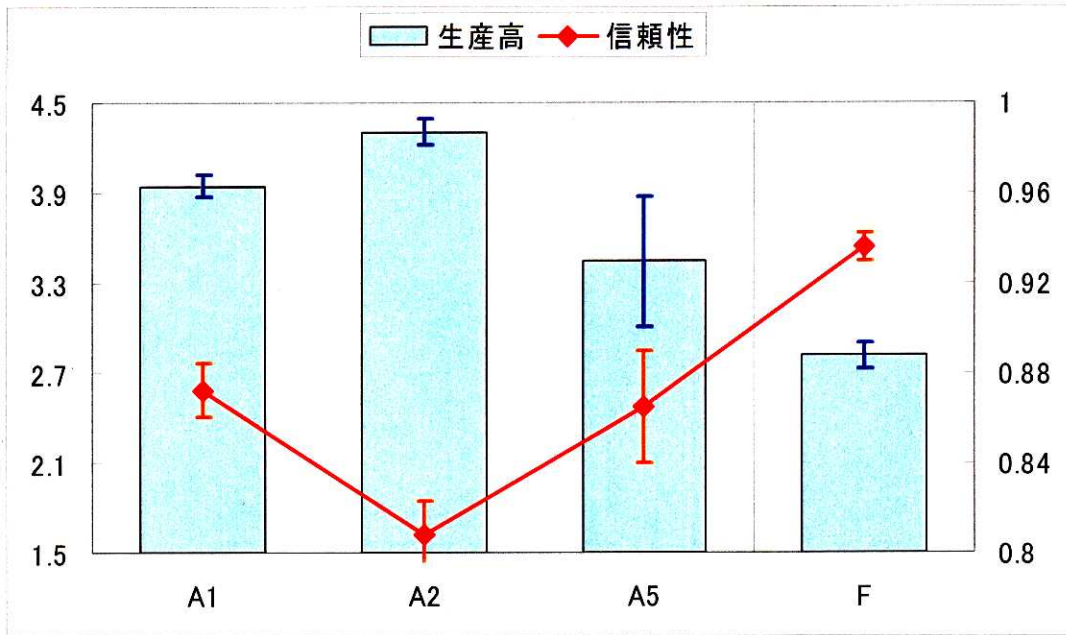


図 7-3 仕様規定 I と生産高・信頼性 (突然変異なし)

1-3-2. 突然変異あり

図 7-4 は突然変異ありの場合である。こちらは、罰金額と期待生産高に相関があり、大きい方が優れた成績を残すことがわかる。ただし、信頼性低下も著しい。(繰り返すが、期待生産高は事故リスクも考慮している。)

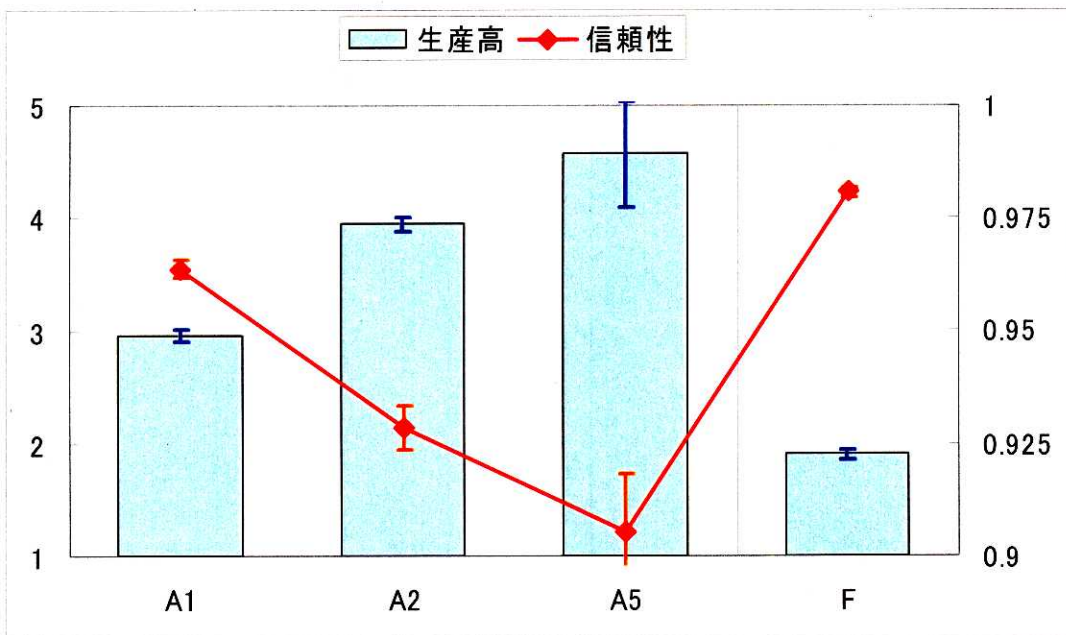


図 7-4 仕様規定 I と生産高・信頼性 (突然変異あり)

さて、このような規制の意図と逆の結果が生じるのは、 $A_x$ 系の機器が生産性を高めるのに不利だからである。さらに、企業サイズが5であることから、「すべて  $A_x$ タイプ」という企業は初期集団にほとんど存在せず、ほとんどの企業が制裁を課せられることになる。すると企業は、この恒常的な罰金に耐えられるような、大きな生産高を達成しようと進化していく。仕様規定 I は、逆に大きな生産性と小さな信頼性を選択するような遺伝子を選別してしまうのである。

この現象を確認するために、罰金額を 10 に設定して同様のシミュレーションを実行してみた。表 7-2 に主な結果をまとめる。ほとんどが最大の生産性を小さなコストで達成する  $B_0$ タイプのみを使用していることがわかる。(  $B_0$ タイプの選択率は  $24.40 \pm 1.40\%$ であり、併せて  $95.10 \pm 2.80\%$ となる。) しかも、企業の直列数は約 5・並列数は約 1 であり、ラインはほぼ完全な直列を形成している。すなわち、考えられる最大の生産性を発揮するタイプがほとんどである。もちろん、信頼性も最も低いので、平均の寿命は極めて短い。

項目	値
$B_0$ タイプ選択率	$70.70 \pm 1.40\%$
直列数	$4.99 \pm 0.0038$
並列数	$1.04 \pm 0.0030$
平均生存ターム数	$4.64 \pm 0.075$

表 7-2 A10 シミュレーション結果

この極端なタイプは死滅しやすいことから、期待生産高が高くても他の条件下ではまず生き残れない。しかし、仕様規定 I の厳しい条件は、逆にこういったタイプを選別してしまうのである。(罰金額が小さい場合には、上のような極端なタイプが多数を占めることはないが、これは単に罰金額を上回る生産性が比較的容易に達成できるからである。)

完全な直接システムは信頼性を大きく低下させるが、機器に対する規制の影響を受けることはない。このように、企業システムには、規制の及ばないしかし信頼性と深く関係する要素が存在することがある。

すなわち、特に初期において、守ることが極端に難しい規制は、規制を無視する風潮をつくり、かえって安全性を損なってしまうことがわかる。

<sup>1</sup> なお、規制なしの場合の平均生存ターム数は  $79.6 \pm 1.62$ であった。



なお、規制スタイルの比較としては、仕様規定Ⅰの罰金額としては、生産高が比較的高い罰金額5を採用する<sup>1</sup>。

## 1-4. 仕様規定Ⅱ

### 1-4-1. 突然変異なし

仕様規定Ⅱ（M）については、罰金額を1・2・5に設定して期待生産高および推定信頼性を求めた。規制なしの場合と併記し、図7-5に示す。仕様規定Ⅱも、生産性を増加させ、信頼性をむしろ減少させていることがわかる。また、最も罰金額の少ない1で生産性・信頼性ともに最高の結果を達成する。

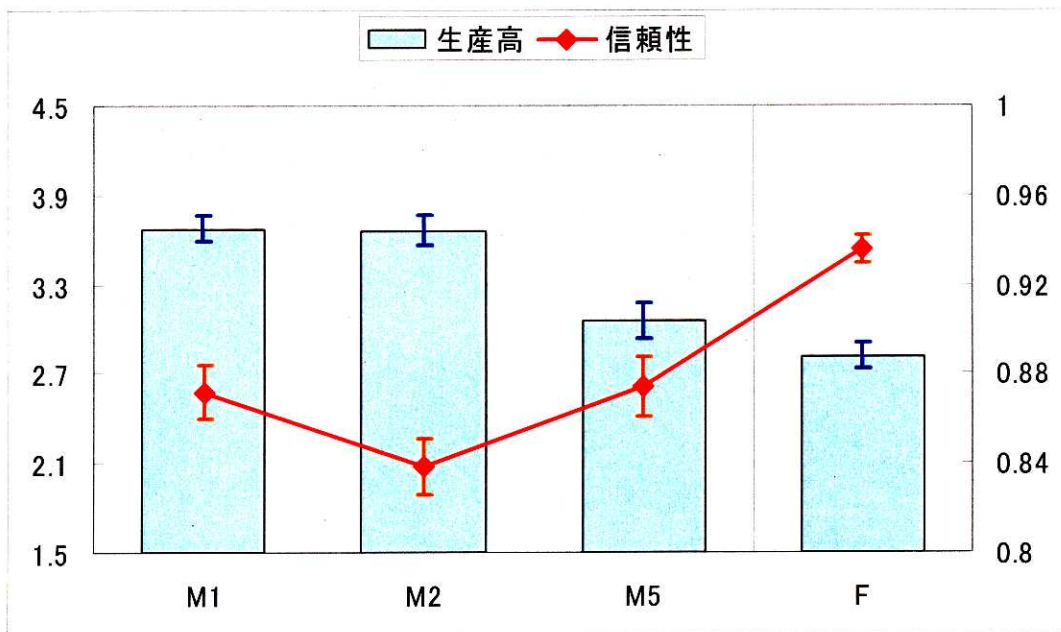


図 7-5 仕様規定Ⅱと生産高・信頼性（突然変異なし）

### 1-4-2. 突然変異あり

図7-2は突然変異ありの場合である。第6章1節で述べたように、期待生産高が低め、推定信頼性が高めの傾向がある。

<sup>1</sup> 罰金額1の場合は後述の仕様規定Ⅱとほぼ同様になる。

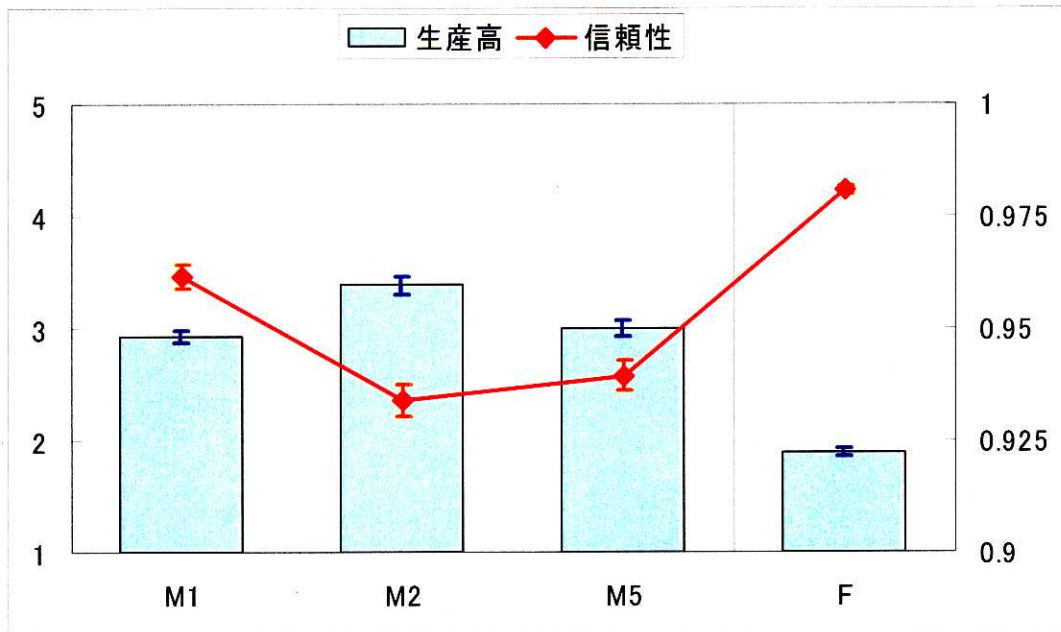


図 7-6 仕様規定Ⅱと生産高・信頼性（突然変異あり）

仕様規定Ⅰで述べたように、高い生産性は  $B_x$  タイプを直列させることによって達成できる。仕様規定Ⅱの条件下においては、 $B_5$  タイプが規制に適合しかつ高い信頼性を達成できるものである。よって、このタイプに選択を偏らせる現象が起きる。

突然変異なしの場合に、罰金額が最も大きい場合にパフォーマンスが低下しているのは、遺伝子の多様性が失われているためだと考えられる。特に初期において、 $X_5$  以外の機器を採用している企業が次々に死滅していき、限られた遺伝子でしか進化できないのである。対して、罰突然変異があれば、多様性を確保できるのである程度低下を防ぐことができる。

仕様規定Ⅱの罰金額としては、高い生産高を維持し、信頼性もある程度押えている罰金額 1 を採用する。

## 1-5. 性能規定

### 1-5-1. 突然変異なし

性能規定 (R) については、罰金額を 1・2・5 に設定して期待生産高および推定信頼性を求めた。規制なしの場合と併記し、図 7-7 に示す。全体の傾向は事後制裁の場合と似通っていることがわかる。罰金額 1 の場合は目標を達成していないが、それ以外では 0.98 を越える信頼性を獲得している。

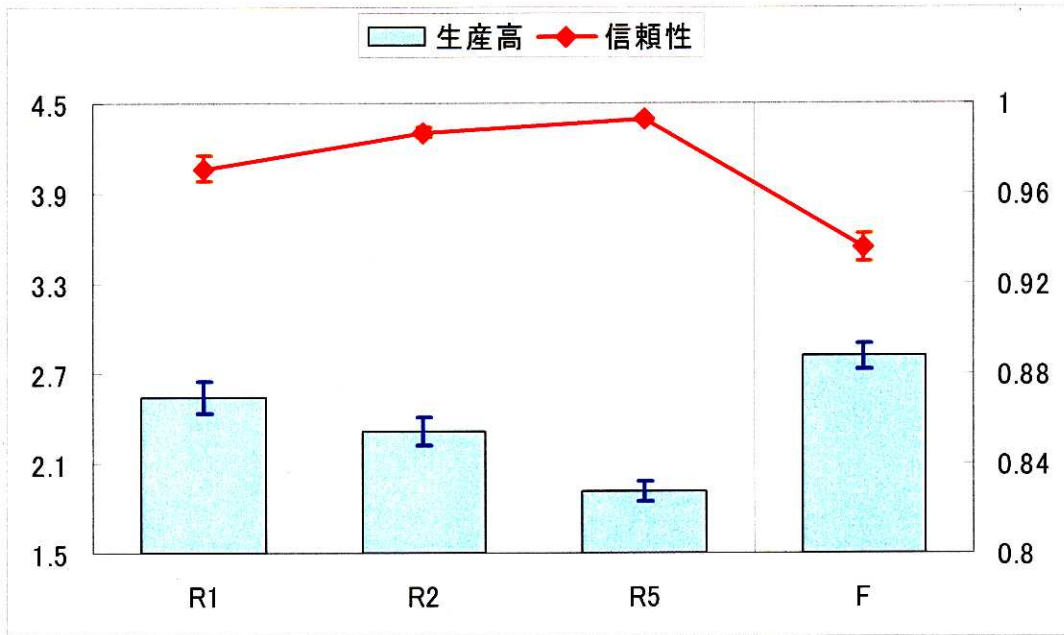


図 7-7 性能規定と生産高・信頼性（突然変異なし）

1-5-2. 突然変異あり

図 7-2 は突然変異ありの場合である。第 6 章 1 節で述べたように、期待生産高が低め、推定信頼性が高めの傾向がある。

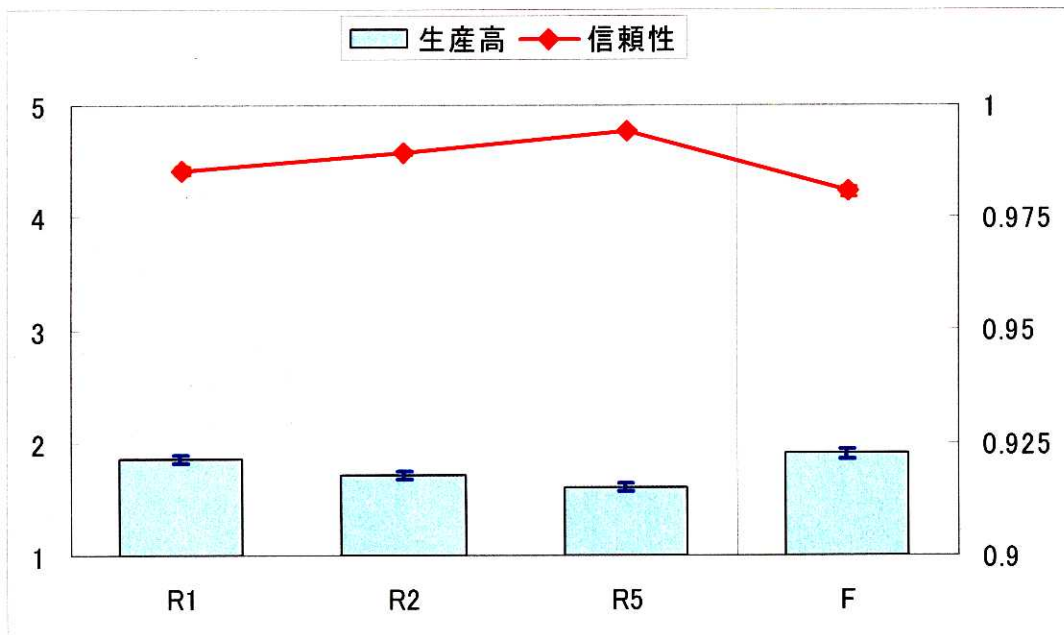


図 7-8 性能規定と生産高・信頼性（突然変異あり）

全体として事後制裁と非常に似た傾向を示すことがわかる。

罰金額が大きいときに生産性が落ち込むのは、やはり遺伝子の多様性が損なわれるためだと考えられる。ただし、直接的な目標があるので、信頼性が低下することはない。また、目標を達成するためには、ある程度厳しい罰則を設ける必要があることもわかる。その場合、全体の信頼性を誘導する規制が有効に機能することが確かめられた。

また、性能規定は、システム全体の信頼性を決めるので、ラインの構成なども規制の対象になっているといえる。

性能規定の罰金額としては、目標を達成している罰金額2を採用する。

## 2. 異なる規制スタイルの比較

以上のような規制スタイルを相互に比較する。

もう一度まとめると、採用した規制スタイルは5つで、[1] 規制なし (Free), [2] 罰金額 5 の事後制裁 (Penalty), [3] 罰金額 5 の仕様規定 I (Ra), [4] 罰金額 2 の仕様規定 II (Mainte), [5] 罰金額 5 の性能規定 (R0.98) である。

### 2-1. 生産性・信頼性推移の比較

まず、規制スタイルの変化が生産性や信頼性の推移にどのように影響するのかを調べる。

#### 2-1-1. 生産性推移

図 7-9 は採用された規制スタイルごとに生産性の推移をプロットしたものである。仕様規定とその他の大きく分けて2つのグループに分かれている。また、仕様規定でない場合、はじめの10タームで期待生産高が落ち込むことがわかる。

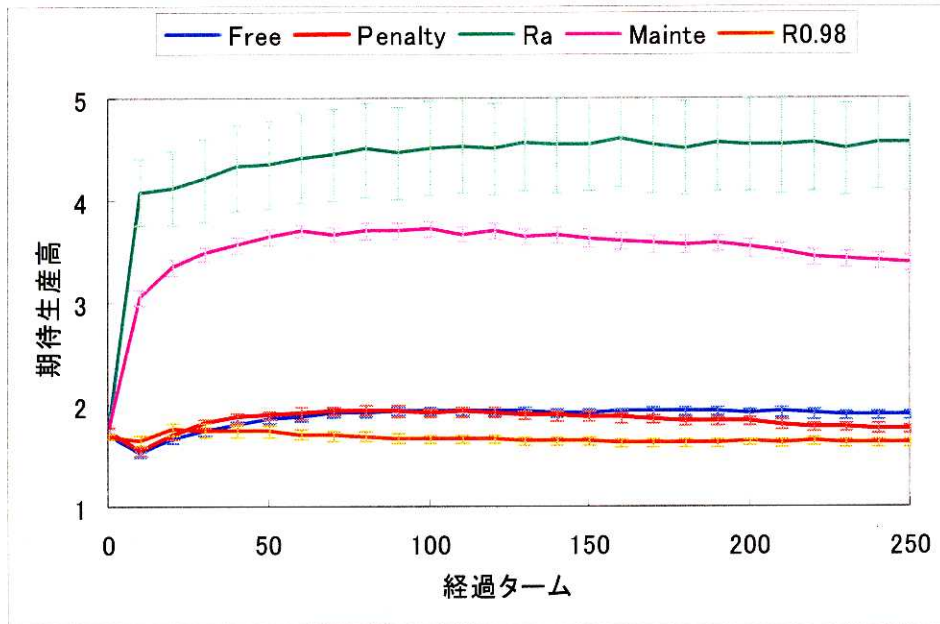


図 7-9 規制スタイルと生産高推移

機器構成Ⅱにおいては、信頼性が初期値 1 から劣化していくので、その対処のない場合には期待生産高が落ち込んでしまうと考えられる。仕様規定によって特定の性能のよい機器の選択が強制されることで、はじめの落ち込みがないばかりか、早い段階から急速に成長する。

### 2-1-2. 信頼性推移

図 7-10 は採用された規制スタイルごとに生産性の推移をプロットしたものである。信頼性が初期値 1 から劣化していくので、いずれも開始からは低下していく。性能規定および事後制裁、規制なし、仕様規定と大きく分けて 3 つのグループに分かれている。性能規定および事後制裁はいったん低下した信頼性が再び上昇していく。ただし、事後制裁よりも性能規定の方が信頼性回復のペースが速い。規制なしは、ある程度の信頼性まで低下したところで横ばいになる。仕様規定は他と比べて信頼性の下降が著しい。

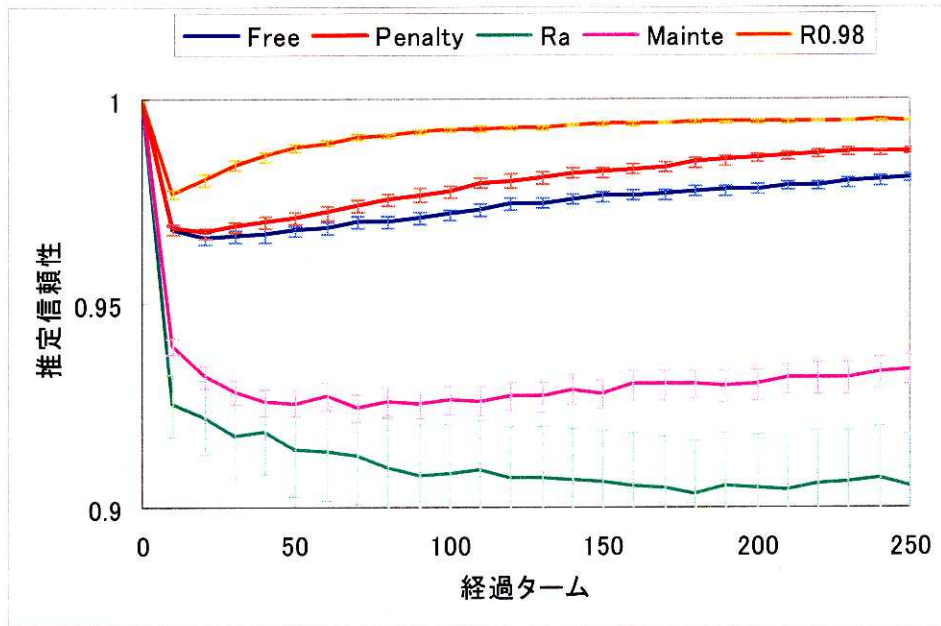


図 7-10 規制スタイルと信頼性推移

保全を考えたこの系においては、仕様規定の場合、信頼性向上が行われないこと、かえって信頼性が低下していくとわかる。性能規定や事後制裁の場合、信頼性自体に規制を設けるか、もしくは事故自体を罰するので、信頼性向上が継続することになる。

## 2-2. 到達値と累積値

ところで、これまでは 250 ターム終了時の生存企業の特値値を取り上げて考察をしてきた。これは、このとき企業の特値が収束に近く、したがって非常に長期に渡って規制を運用するならば、その収束値をもとに有効性を判断すべきという発想によるものである。

しかし、特に産業の熟成期においては、安全規制が社会の効用に実効的にどう影響してきたかを評価することにも意義があろう。これは、第4章 5-3-2 節で説明した、ある期間 (250 ターム) までの各タームの企業の活動を累積することにより推測できる<sup>1)</sup>。

前者の終了時の生存企業の特値値を到達値、後者の 250 タームまでの総和を累積値と呼び、それらを比較してみる。ただし、到達値は期待生産高・推定信頼性によるもので、統計値とは若干の差があることに留意する。

### 2-2-1. 生産高の差

図 7-11 は生産高において到達値と累積値を比べたものである。到達値と累積値の大小関係

<sup>1)</sup> 第4章 5-3-2 節で述べたように、割引率  $r=0$  として単純に総和で考える。

は一致することがわかる。また、仕様規定において累積値が優位にある、その他の場合はほとんど差がないか、もしくは累積値の方が劣っていることがわかる。

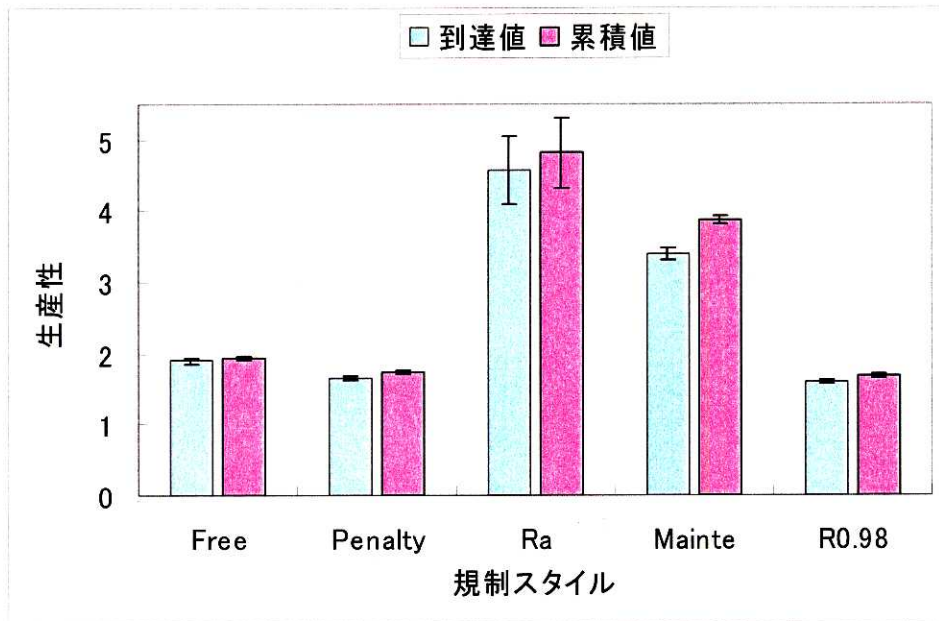


図 7-11 到達期待生産高と累積生産実績

この傾向は推定信頼性における差から生じるものであると考えられるから、次項でその原因を考察する。

### 2-2-2. 推定信頼性の差

さらに図 7-12 は信頼性において到達値と累積値を比べたものである。生産性の場合と同じく、大小関係については一致することがわかる。さらに、仕様規定においては累積値が優位にあり、その他の場合はほとんど差がないか、もしくは累積値の方が劣っている。この傾向も推定生産性と同様であるが、前述した通り、信頼性における到達値と累積値の差が生産性においても差を生んでいると考えられる。

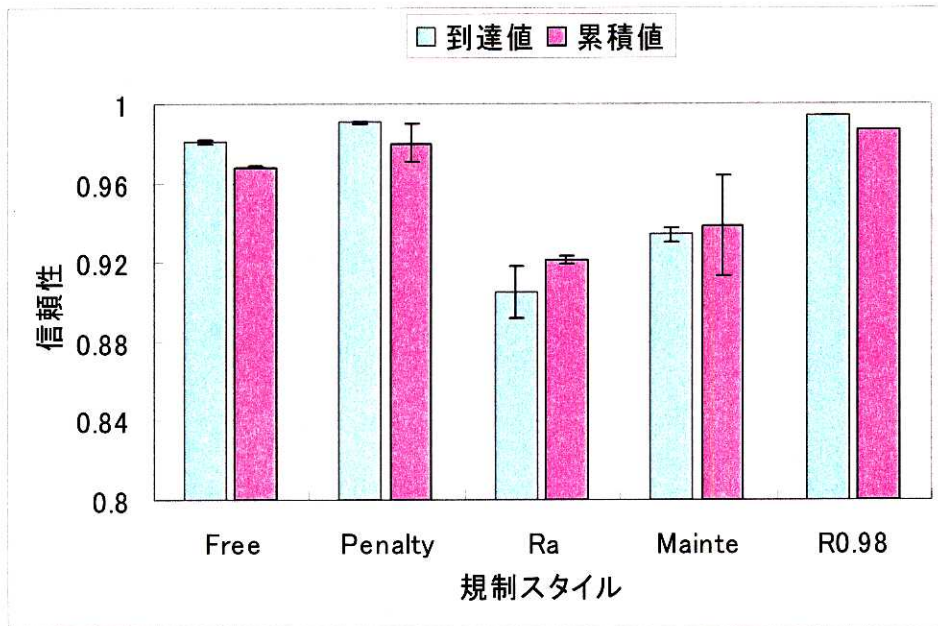


図 7-12 到達推定信頼性と累積信頼性実績

これは主として二つの効果から来ると考えられる。

第一に、仕様規定では信頼性は全体として徐々に低下していく。そのため、最も信頼性の低い最終段階での到達値よりも、それほど低下していなかったときの値も含めた累積値の方が、信頼性が高くなるのである。信頼性増加のなかった規制なしで大きな差がないのは、初期で淘汰された劣った企業の事故が累積値ではカウントされるためである<sup>1</sup>。(仕様規定ではそれらの効果を加味してもなお、累積値の方が優れていた。)

第二に、推定信頼性はそのターム時点での信頼性を評価することによる。しかし、仕様規定では、劣化進度が遅いかもしくは定期的な保全を義務づけている。したがって、タームが進行しても企業の性能が劣化しにくいということも考えられる。

### 2-3. 社会効用の比較

到達値と累積値を用いて、規制スタイルごとの社会効用を比較する。

#### 2-3-1. 到達社会効用

到達値を用いて社会効用直線を重ね合わせたものが図 7-13 である。規制なしは、事故損失がどの大きさでも、別の何らかの規制スタイルに比べて劣っていることがわかる。また、事故損失の小さい段階では仕様規定が、ある程度大きい場合はだいたい性能規定が優れていること

<sup>1</sup> したがって、累積値は期待生産高もしくは推定信頼性の推移を積分する値と一致するわけではない。



も読み取れる。

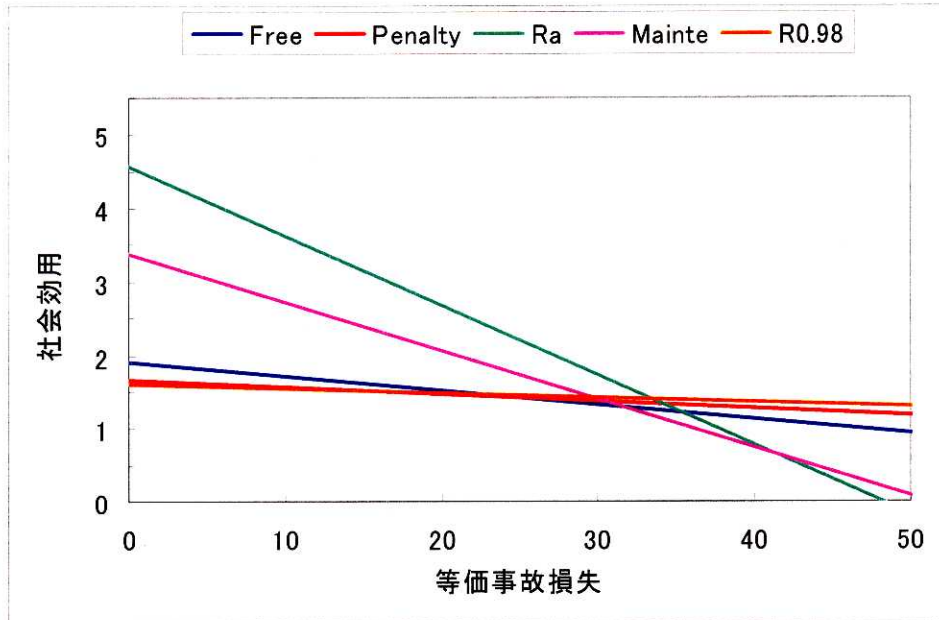


図 7-13 規制スタイルと社会効用

特に厳しい事後制裁や性能規定を用いて高い信頼性が達成できれば、事故損失が非常に大きい場合でも社会効用を正に保て、したがって事業を継続できることもわかる。ただし、事故損失が小さい場合には不要な場合が多い。

なお、グラフにおいて事故損失が 35 よりやや小さいところに社会効用直線同士の交点が集まっているが、図 6-8 企業サイズ 5 の社会効用や図 6-9 企業サイズ 10 の社会効用でそうではなかったことから、普遍的な性質をもつ現象ではないと考えられる。ただ、特にこの条件下においては、そのような事故損失ならば、どの規制スタイルを採用しても同じ社会効用が達成される、ということになる。

### 2-3-2. 累積社会効用

累積値を用いて社会効用直線を重ね合わせたものが図 7-14 である。採用すべき規制スタイルは到達値の場合と同じであるが、規制を切り替えるべき事故損失がより大きい。これは仕様規定において、累積値が到達値よりも優れていることによる。

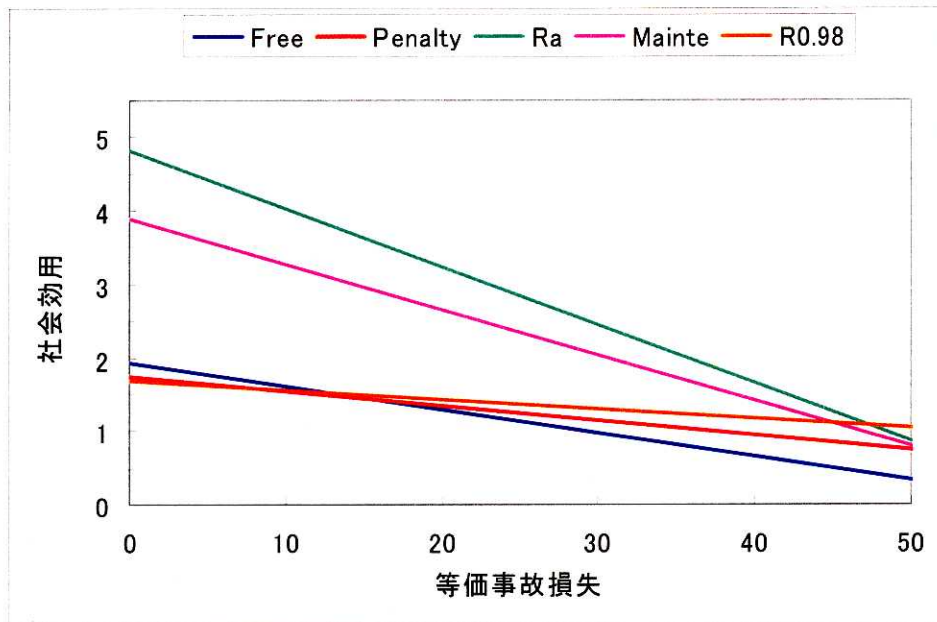


図 7-14 規制スタイルと累積社会効用

### 3. 結果のまとめ

本章の結果をまとめる。

1. 仕様規定は企業の多様性を奪う場合があり、そのとき、生存企業の突然変異が生産性の向上に資する場合がある
2. 不適切に設定された仕様規定は意図とはまったく逆の結果を生むことがある。
3. 企業は、システムの信頼性に関係すると判断したある部分に規制を課されても、規制の及ばない部分の生産性・信頼性を調整することがある。
4. 事後制裁および性能規定はほぼ同様に機能し、企業の信頼性を向上させる。(そして生産性の阻害となる。)
5. 安全規制は、それによって得られる均衡状態から評価する手法と、それまでに辿る過程から評価する手法があるが、両者に有意な差が生じる場合がある

## 第8章 社会環境の変化

---

これまでは、規制スタイル・使用できる機器構成は一定、つまり社会環境は一定であるとしてきた。また、基本的に企業数は全段階で一定であるとし、同一のサイズの企業群を扱ってきた。さらに、規制も一様に適用されるとしてきた。

本章では、規制スタイル・機器構成の変化、途中からの企業の参入、異サイズの企業の混入、確率的な規制の適用など、社会環境の変化を導入する。基本的に引き続き表 5-4 機器構成 II を採用するが、場合によっては  $S_x$  を追加する。採用する規制スタイルも、第7章のものを基本とする。

### 1. 規制スタイルの変化

前章まで、安全規制スタイルは常に一定のものとしてきた。しかし、規制緩和を考えると、規制スタイルの変更をシミュレーションすることにも意義がある。(例えば、現実では、仕様規定から性能規定への変化などが考えられている。)

ここでは、規制スタイルが事後制裁から規制なしに切り替わった場合 (P→F) を考えてみる。T=0 から T=100 まで「事後規制 (罰金額 10)」でシミュレーションを行い、T=100 から T=250 までは「規制なし」に切り替えてシミュレーションを続行するものである。(最初から最後まで当初の事後制裁だった場合、同じく常に規制なしだった場合と比較する。)

#### 1-1. 生産高推移

図 8-1 は、上記のように規制スタイルを切り替えたときの期待生産高の推移を示したものである。もともとそれほど差がなく大きく拡大したグラフなので、信頼区間が重なり合っただけで判別しづらいが、概ね両規制スタイルの中間に移ると見て取れる。

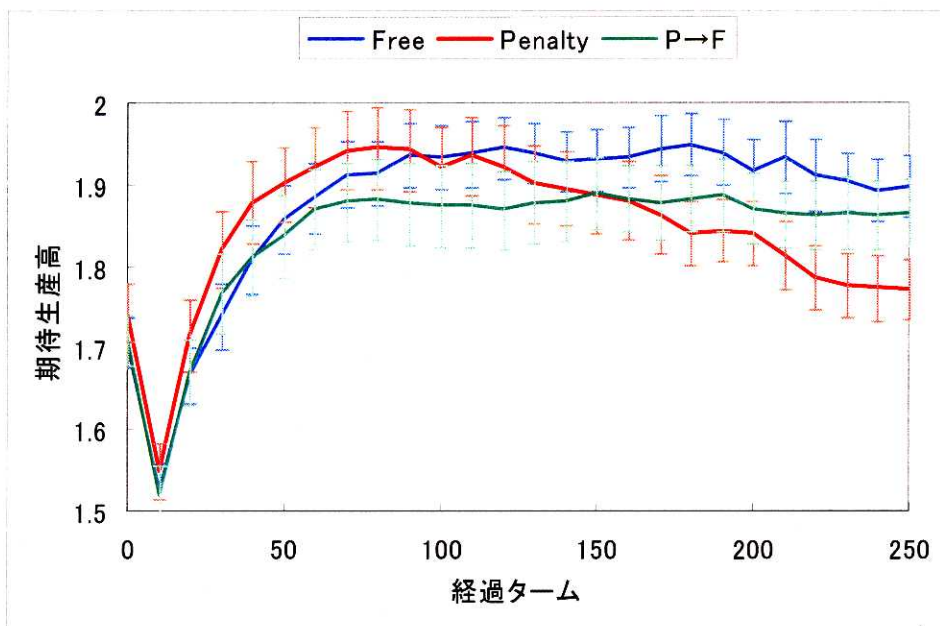


図 8-1 規制スタイルの変更と生産高推移

### 1-2. 信頼性推移

図 8-2 は、規制スタイルを切り替えたときの信頼性の推移を示したものである。当初高かった信頼性が、やがて規制なしの場合と同じ水準まで信頼性が低下してしまうことが見て取れる。

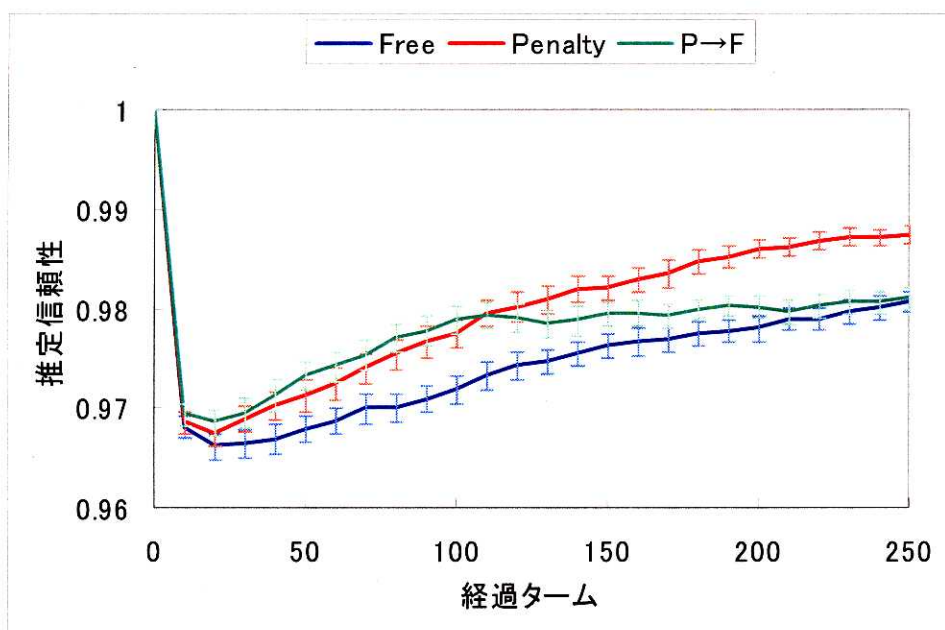


図 8-2 規制スタイルの変更と信頼性推移

すなわち、それなりに高い信頼性を獲得しても、安全規制を全く撤廃してしまうと、やがて当初から規制のなかった水準まで信頼性は低下してしまう。(代償として期待生産高は向上する。) 社会の安全性は規制環境に依存して決まる物で、安全性を維持するためにはそれなりの規制が必要であるといえる。

## 2. 一様でない規制

これまで、規制は毎ターム一様に機能するとしてきた。しかし、実際には安全点検のチェックをすり抜ける例などが報告されているし、検査(規制への適合のチェック)は間隔を置いて行われるのが普通である。そこで、平均すると同じ頻度になる2つの規制を考え、社会の特性に変化が現れるかどうか検証してみる。

検査を要する規制として性能規定で比較を行った。規制条件は表 8-1 の通りである。ここで検査確率は規制が実施される確率<sup>i</sup>を、検査間隔は規制が実施される周期<sup>ii</sup>を示す。(いずれも1ターム1企業あたりの平均罰金額は1.0である。) 定期は、一定の検査間隔で定期的に検査を行うスタイルを、抜き打ちは、毎タームの規制ながら必ずしも検査対象にならないスタイルを意味する。ただし、いずれの場合でも事故を起こした後には自動的に検査が入る。これらを、第7章 1-5 節の罰金額 1 および 5 の性能規定と併せて比較する。

項目	コード	罰金額	検査確率	検査間隔
定期	Term	5.0	1.0	5
抜き打ち	Some	5.0	0.2	1

表 8-1 非一様規制の種別

### 2-1. 採用機器選択比率比較

図 8-3 は、4つの規制条件で T=250 における採用機器の選択比率を比較したものである。罰金額 5 の場合と定期検査の場合でやや  $R_A$  タイプの選好が多いが、だいたいにおいて、いずれの場合も大きな差はないことがわかる。

<sup>i</sup> 例えば有効確率 0.2 なら、全企業がそれぞれ 20%の確率で検査を受ける。80%の確率でそのまま放置される。確率 1.0 は常に規制がある場合でこれまでと同様である。

<sup>ii</sup> 例えば検査周期が 5 なら、企業生成時を起点に、5タームに一回ずつ検査が入る。周期 1 はこれまでと同様である。

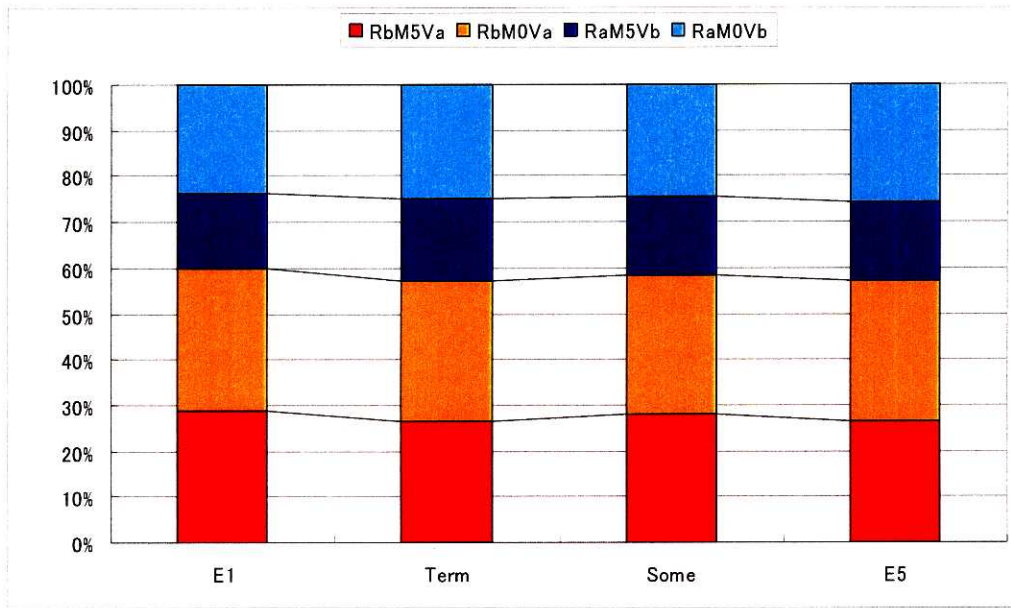


図 8-3 非一様な規制と採用機器選択比率

## 2-2. 生産高・信頼性比較

図 8-4 は、4つの規制条件で T=250 における期待生産高・推定信頼性を比較したものである。定期検査の場合，“罰金額÷検査間隔”に等しい罰金額 1 の場合とほぼ同様の特性を示す。しかし、抜き打ち検査の場合，罰金額 5 ほどではないものの，罰金額 1 の場合よりも高い信頼性（と低い生産高）を達成できていることがわかる。

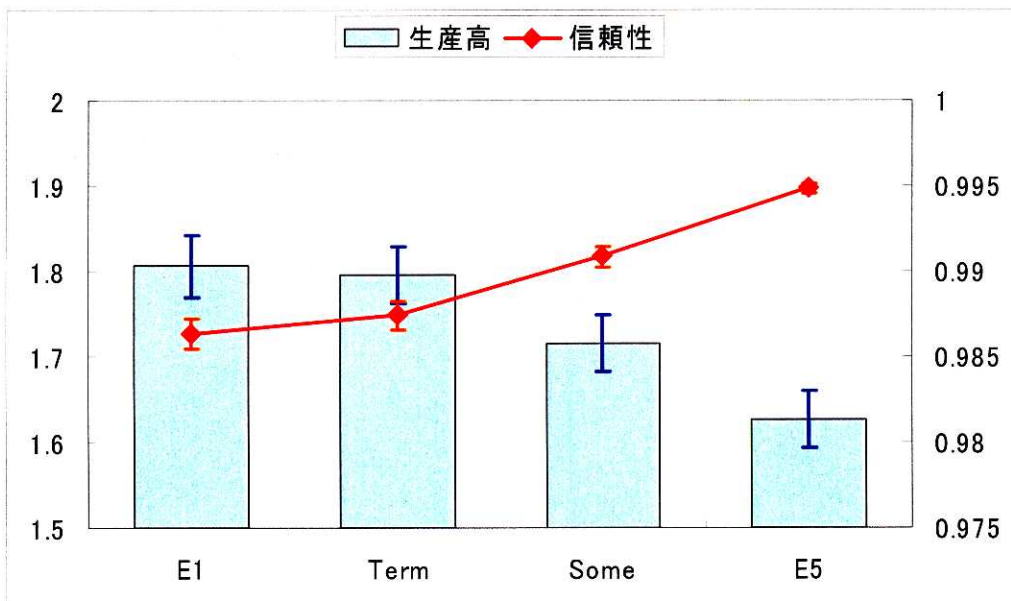


図 8-4 非一様な規制と生産高・信頼性

したがって、同じ懲罰・平均すると同じ頻度ならば、定期的に必ず検査を行うよりも、抜き打ち的に検査を行った方が効果を上げられるといえる。(なお、このとき2-1節から、採用機器よりもリンクの構成などで差が生じていると推測される。)

### 3. 技術革新

性能規定の長所の一つとして、技術革新に素早く対応できる点が挙げられている。機器構成Ⅱからスタートし、 $T=100$ の時点で新しい機器  $S_x$  が導入される場合を取り上げてみる。はじめに規制なしの場合で採用機器選択比率の推移を確認し、規制なし・事後制裁(罰金額5)・性能規定(要求信頼性0.98)の3つで特性の推移を比較する。

#### 3-1. 採用機器選択比率

図8-5は、規制なしの場合で、採用機器選択比率の推移を示したものである。 $T=0$ のときは、初期に選択可能なものを万遍なく採用しているが、 $T=100$ では若干  $R_B$  タイプに偏りが見られる。 $T=250$ では新機器の選択が進んでいることがわかる。

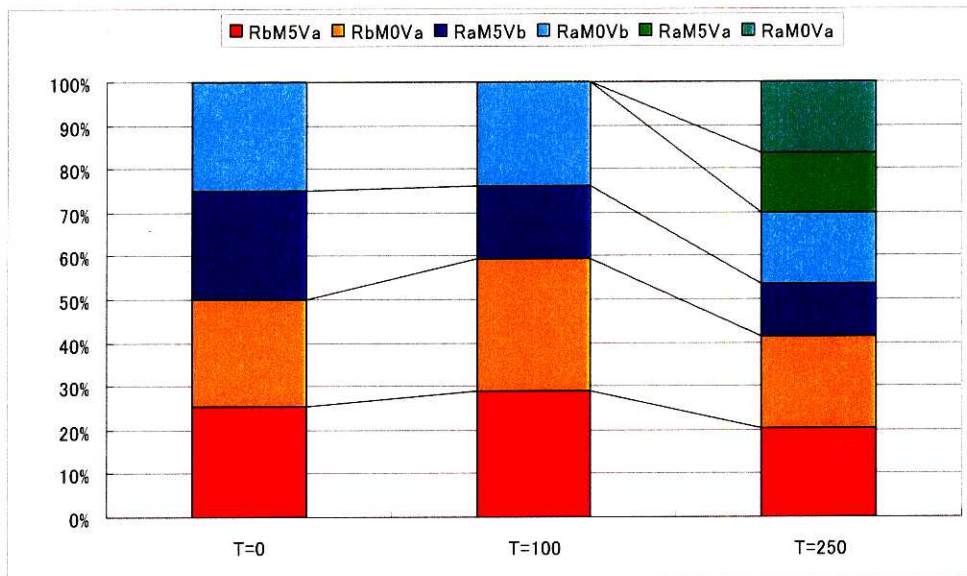


図 8-5 技術革新と採用機器選択比率の推移 (規制なし)

#### 3-2. 生産高推移

図8-6は、各々の規制スタイルごとの期待生産高の推移を示したものである。なお、技術革新のない場合を細い線で併記してある。(見やすさを考慮して信頼区間は省略した。)  $T=100$ のあたりから期待生産高が徐々に上昇していく様子が見て取れる。上昇のスピード・上げ幅自体

には大きな差はない。

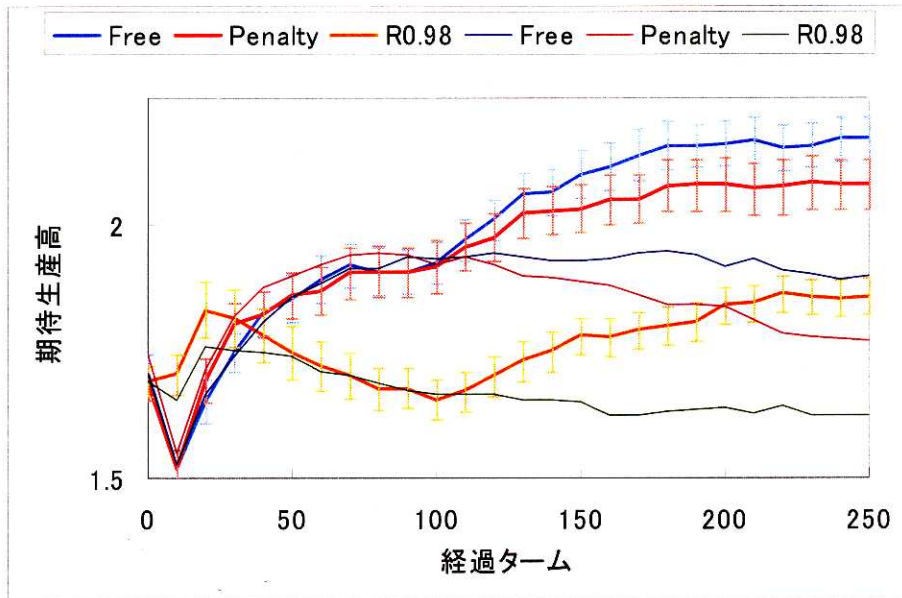


図 8-6 技術革新と生産高推移

### 3-3. 信頼性推移

図 8-7 は、信頼性の推移を示したものである。規制なしおよび事後制裁では信頼性が向上しているが、性能規定の場合は技術革新のないときとほとんど差がない。

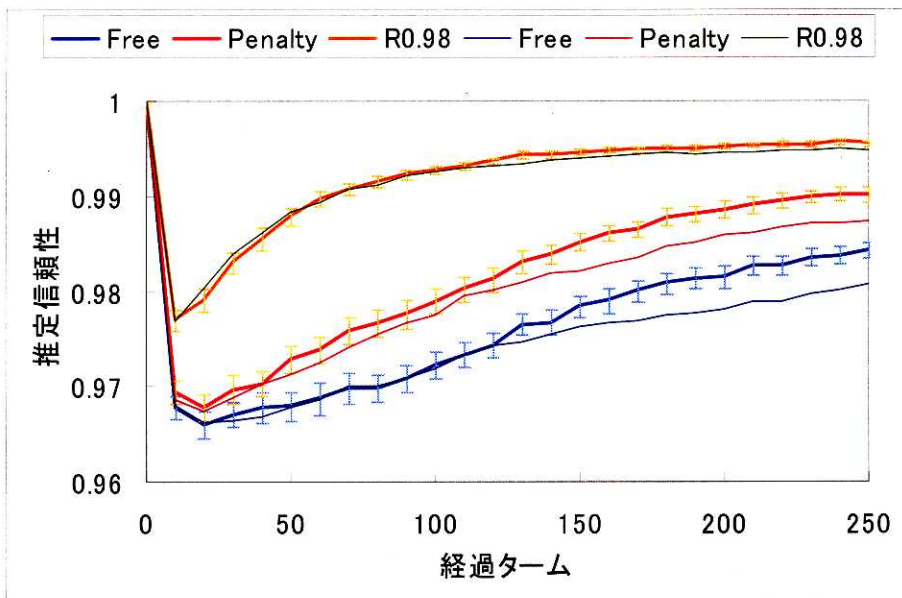


図 8-7 技術革新と信頼性推移



もともと高い信頼性を達成している性能規定では新機器採用による信頼性の変化がないのである。すなわち、技術革新の恩恵の、新しい機器が同じ信頼性で高い生産性を発揮するところを受けていることがわかる。仕様規定でないどの規制スタイルでも技術革新の恩恵は享受される。機器の改善された部分そのまま特性の向上となる。

## 4. 後発参入

規制緩和は、しばしば経済的規制と社会的規制との双方を同時に緩和する場合がある。本モデルは経済的規制を扱うものではないが、新規参入を扱うことはできる。まず、 $T=0$  の時点では企業数 50 でシミュレーションを開始し、それらが概ね進化する  $T=100$  の時点でさらに（ランダムに生成した新規の）企業 50 を追加してみる。

### 4-1. 生産高推移

図 8-8 は、各々の規制スタイルごとの期待生産高の推移を示したものである。後発参入のない場合を細い線で併記してある。（信頼区間は省略した。）性能規定の場合はほとんど差がないが、規制なし・事後制裁においては大きく劣ることがわかる。また、企業数が少ないため、信頼区間が非常に幅広くなっていることがわかる。（回数ごとのばらつきが大きい。）

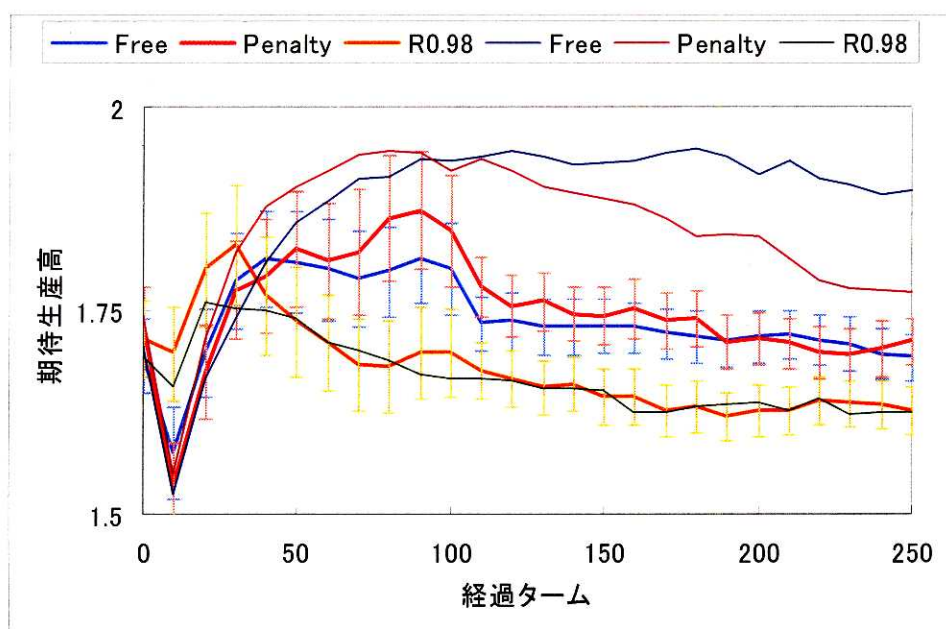


図 8-8 後発参入と生産高推移

初期の遺伝子の多様性がない場合は進化が巧く進まず、また、100 タームの段階で最適化さ

れていない企業が“ノイズ”となって全体に企業数 100 の場合の生産性を達成できなかったの  
 であろう。ただし、性能規定のように、もともと形態に制約ができる場合、遺伝子の分布など  
 が企業数にそれほど依存しないのだと考えられる。

#### 4-2. 信頼性推移

図 8-9 は、信頼性の推移を示したものである。性能規定の場合に差がないのは同様であるが、  
 その他の場合は高くなっている。特に、企業を追加する T=100 の後に大きな信頼性の向上が  
 見られる。

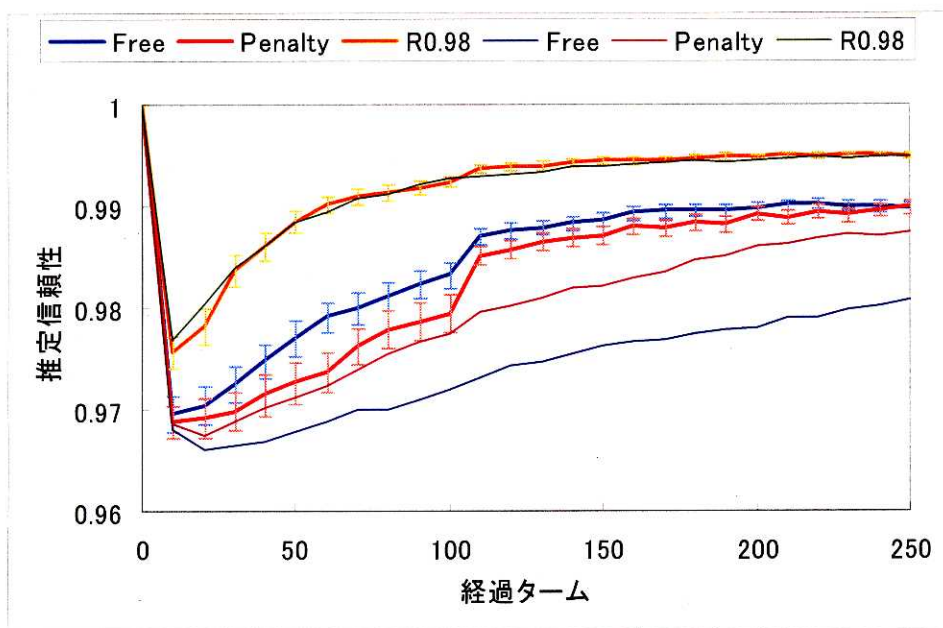


図 8-9 後発参入と信頼性推移

期待生産高がそれほどないため、生き残りやすい、より高い信頼性の企業が選別されたので  
 であろう。性能規定に変化がないのは、やはり可能な形態が限られているせいだと考えられる。

#### 4-3. 採用機器選択比率

図 8-10 は、規制なしの場合で、採用機器選択比率の推移を示したものである。参入がはじ  
 まる T=100 のときと、シミュレーションを終了 T=250 のときとで選択に差がほとんどないこ  
 とがわかる。

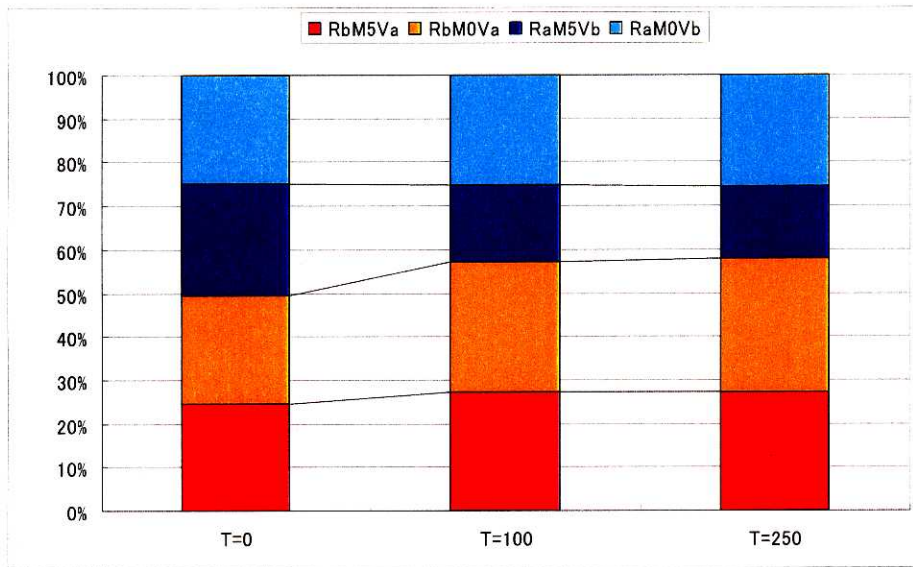


図 8-10 後発参入と採用機器選択比率の推移（規制なし）

後発参入による特性の変化は、採用される機器の変化を通じてのものではなく、リンク構成などを通じてのものであると言える。

## 5. 結果のまとめ

本章の結果をまとめる。

1. 信頼性は推移に関わらず、採用されている規制スタイルの水準に向かう
2. 信頼性は、性能規定で同じ懲罰・平均すると同じ頻度ならば、定期検査よりも抜き打ち検査で実施した方が効果を上げられる
3. 事後制裁や性能規制が技術革新の導入を妨げることはなく、改善された部分の恩恵を受けることになる
4. 性能規定は後発参入の影響をほとんど受けないが、規制なしや事後制裁では生産性が低下し信頼性が向上する

# 第9章 結論と展望

---

## 1. 結論

本研究は、社会シミュレーションによって安全規制を評価するモデルを構築・実装し、それによって有効な知見が得られることを示した。

シミュレーションモデルは、資源配分モデルを踏まえた上で、柔軟で拡張的に構築できた。それによって、条件を次第に複雑化して実験を行うことなどが可能になったのである。

得られたシミュレーション結果から分析した知見として、これまでほとんど検証されて来なかった規制の効果を以下にまとめる。なお、ほとんどの結果において、規制環境が社会を形成するといつてよく、企業群は、選択できる条件（機器構成）の中で規制に対応した進化をとげることが確認できた。

### 1-1. 保全なしの社会

第6章 保全なしの社会において得られた結果を解釈する。

1. 企業組織の活発な変更は効率のよい生産システムの伝播の阻害になるが、より安全な体制を築く手助けになる
2. 現存する企業は、ほとんどの場合、見かけよりも安全でない
3. 事故に対する懲罰は社会の安全性を高めるが、過度な罰則には意味がない
4. 事故に対する懲罰は効率性の阻害となることが多いが、産業規模が大きいときに適切な水準で設定すれば、かえって発展を手助けすることがある
5. 規制政策の変更が有効なのは、規制スタイルごとの社会効用直線を重ね合わせるとき、下に凸な社会効用曲線が描ける場合である
6. 企業は、厳しい規制によって高い信頼性を獲得するが、一方で全体の倒産リスクは増加する

### 1-2. 保全ありの社会

第7章 保全ありの社会において得られた結果を解釈する。

1. 仕様規定は企業の多様性を奪う場合があり、そのとき、企業組織の活発な変更が効率

---

<sup>i</sup> 生存企業への突然変異の解釈である。

のよい生産システムの開発に繋がる場合がある

2. 仕様規定は安全を目的とする間接的な規制であるが、不適切に設定されると意図とはまったく逆の結果を生むことがある。
3. 安全規制を課しても、企業が規制の及ばない部分の生産性・信頼性を調整することで対応する場合があり、結果的に安全目標を達成できないことがある。
4. 事後制裁および性能規定は安全を目的とする直接的な規制であり、ほぼ同様に機能し、社会の安全性を向上させる。(そして生産性の阻害となる。)
5. 安全規制は、それによって得られる均衡状態から評価する手法と、それまでに辿る過程から評価する手法があるが、両者に有意な差が生じる場合がある

### 1-3. 社会環境の変化

第8章 社会環境の変化において得られた結果を解釈する。

1. 信頼性は現に採用されている規制スタイルに依存するため、いったん高い安全性を獲得したとしても、それを維持するためには安全規制も維持しなければならない
2. 安全規制は、定期検査よりも抜き打ち検査で実施した方が効果を上げられる
3. 事後制裁や性能規制が技術革新の導入を妨げることはなく、改善された部分の恩恵を受けることになる
4. 性能規定は後発参入の影響をほとんど受けませんが、規制なしや事後制裁では生産性が低下し信頼性が向上する

## 2. 展望

本研究の今後の展望としては、より詳細にパラメータ条件を設定・精査し、社会特性の変化と安全規制との関係を探求していくことが考えられる。条件を単純化してシミュレーションを行ってきたが、基本的な性質を押えた上で、より複雑な条件を設定していく等の方向性がある。

また、属性や要素を追加し、より現実に近いモデルに拡張していてもよい。例えば、企業の中に明示的に“人間”を導入する等が考えられる。さらに、新しい規制を表現したり、規制の認証機関をエージェント化したりするなどの発展もあるだろう。

これらは、本研究で構築したモデルが柔軟であることから、拡張的に実装することが可能である。

<sup>i</sup> 例えば、企業サイズを変更する突然変異・異なる企業サイズ同士の交配などを実装したが、実験はしなかった。

## 謝辞

---

本論文は、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻人間人工環境コース人工環境学大講座認知システム工学分野古田研究室において執筆されたものです。研究を行い、さらに論文を完成させるにあたり、各方面からのたいへんな助力がありました。

論文の執筆にあたって最もお世話になったのは研究室の面々です。古田一雄教授からは、日頃の研究室会および節々で懇切丁寧なご指導を賜りました。また、井上先輩を筆頭に、方さんや山崎さん、他の修了していった研究室の諸先輩方から、数々の有益な助言をいただきました。同期の清水君、飯野君、石井君とは互いに切磋琢磨することができ、大いに刺激を受けました。さらに、修士および卒論生の後輩にも色々と協力をしてもらったと思います。(例えば、高橋君と望月君は折よく計算機資源を提供してくれました。)研究室での時間自体が有意義であり、研究・論文の糧となりました。ここに改めて厚く御礼申し上げます。

さらに、この研究は研究室だけでなく大学を中心とした多方面の方々の存在があって成立したものです。特に、家族・親族の私への愛情なしにはそもそも大学院で研究すること自体ありえなかったことを考え、学生生活の区切りとなる本論文の完成を機に、両親および兄、その他の親族にもう一度感謝の念を表したいと思います。

# 参考文献

---

- 1 厚生労働省統計表データベース・労働災害動向調査（厚生労働省）
- 2 労働災害統計（安全衛生情報センター）
- 3 「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書（安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会，2004年）
- 4 科学技術と社会に関する世論調査（内閣府大臣官房政府広報室，2004年）
- 5 大規模製造業事業場における安全管理に係る自主点検について（厚生労働省労働基準局安全衛生部，2004年）
- 6 労働安全衛生マネジメントシステムに関する指針について（労働省，1999年）
- 7 規制緩和の経済理論（経済企画庁総合計画局，大蔵省印刷局，1989年）
- 8 規制緩和白書（総務庁，1998年）
- 9 行政改革会議最終報告（行政改革会議，1997年）
- 10 電力安全小委員会報告（電力安全小委員会 [総合資源エネルギー調査会，原子力安全・保安部会]，2003年）
- 11 信頼性工学入門（塩見弘，丸善株式会社，1982年）
- 12 プロセス認知工学（古田一雄，海文堂出版，1998年）
- 13 *Managing the Risks of Organizational Accidents* (James Reason, Ashgate, 1997)
- 14 21世紀に向け新しい規制緩和推進体制の整備を望む（経済団体連合会，1997年）
- 15 ミクロ経済学—市場原理主義とその限界—（大矢野英次，五紘舎，2002年）
- 16 産業システム経済学（長尾高明，東京大学出版会，1993年）
- 17 人工社会—複雑系とマルチ・エージェント・シミュレーション— (Joshua M. Epstein, Robert Axtell 著，服部正太・木村香代子訳，構造計画研究所・共立出版，1999年)
- 18 *Multi-Agent Systems -An Introduction to Distributed Artificial Intelligence-*(Jacques Ferber, Addison Wesley, 1999)
- 19 *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* (David E. Goldberg, Addison Wesley, 1989)
- 20 ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム（萩原将文著／白井克彦監修，産業図書，1994年）
- 21 FMEA・FTA 実施法（鈴木順二郎・牧野鉄治・石坂茂樹著，日科技連，1982年）
- 22 株主への利益還元状況等について（社団法人生命保険協会，2003年）
- 23 マイクロソフト、四半期配当、四年間にわたる株式買い戻し、および特別一時配当の計画を発表 <http://www.microsoft.com/japan/presspass/detail.aspx?newsid=2006>（マイクロソフト株式会社，2004年）