社会シミュレーションによる安全規制の評価

長瀬 雅也*・古田 一雄**

Assessment of Safety Regulation by Social Simulation

Masaya NAGASE* and Kazuo FURUTA**

Following the worldwide trend of deregulation, safety regulation is under re-consideration, whereas various accidents still endanger our society. Some method that can take both production and safety management into account is therefore required to assess safety regulation. This research proposes a social simulation to assess influence of safety regulation on social utility.

The model used in this study is a multi-agent system where many production companies act and evolve under the common environment. The model of each company contains elements related to both productivity and reliability. Safety regulation influences companies' activities as the environment. This simulation model is so flexible that it can be extended from simple to more complicated ones.

In conclusion, a useful method for assessment of safety regulation has been developed, and then several insights were obtained from test simulation comparing various regulation styles and methods.

Key Words: social simulation, safety regulation, multi-agent system, genetic algorithm

1. はじめに

市場原理に基く競争的で活力ある社会の実現を意図した世界的な規制緩和の流れは、重要な社会制度である安全規制にもおよび、わが国でも安全規制の改革が求められている¹⁾。これと並行して、行政に説明責任を求める傾向が高まっており、限られた行政リソースで最大の効果をあげるために、科学的・合理的かつ効率的な規制行政への要請も大きい。一方で、社会では依然として安全を脅かす事故や事件が頻発し、一般市民の「安心」がゆらいでいる。

安全規制改革の一つの方向として、安全確保の具体的手段を事細かく規制する仕様規定ではなく、目標として安全性能だけを規制してその達成手段は状況や技術進歩に合せて事業者の裁量に委ねる性能規定化、リスク情報や性能指標を活用した規制など、安全規制のさまざまな考え方が提唱されている。欧米諸国ではこうした概念に沿った安全規制合理化が進められており、わが国でも国際的動向に整合的な国内制度の改革が進められているが、必ずしも順調とはいえない^{2), 3)}。すなわち、こうした概念をそのままわが国安全規制に導入し

ようとする場合には、さまざまな困難が予想され、いかなる条件においてそれらが従来型の安全規制概念に比較して期待される効果を発揮するのかも明かではない。

以上の背景から、安全規制が企業活動にどう影響し、社会全体の安全水準の向上にどう貢献するのかを科学的に評価することが求められている。ところが、安全規制の問題は社会経済的な評価の対象とはなっても⁴⁾、工学的あるいは定量的に扱われた例は少ない。工学分野ではこれまで、確率論的安全評価をはじめ特定の工学システムの安全性を評価する方法⁵⁾、あるいは安全に関する社会組織の問題を分析する試み⁶⁾などはあったが、安全に関する社会制度の在り方を理論的に評価しようとする研究はほとんど見られなかった。

そこで本研究では、マルチエージェントシステムおよび遺伝的アルゴリズムを応用し、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。さらにさまざまな条件下でのシミュレーションを行ない、安全規制の制度設計に役立てるための知見を得ることを目的とする。

2. シミュレーションモデル

現代社会においては、あらゆる産業分野が安全規制の対象となっているが、これらすべてを対象とする評価モデルを構築することは不可能である。そこで本研究では、万一の事故が起きた場合に直接的被害が発生する製造業型の産業分野を主な対象とする。

シミュレーションの対象は、事業主体である多数の企業の集団によって形成される仮想社会である。このような社会を、

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科

東京都文京区本郷 7-3-1

** 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

* Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

** Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received April 18, 2005)

(Revised November 21, 2005)

各企業をエージェントとするマルチエージェントシステム⁷⁾でモデル化し、安全規制は環境として全企業に等しく作用するものとする。

2.1 企業

企業は所有する設備を用いて何らかの生産活動を行ない、生産物を販売して事業資金と利益を獲得する。なお簡単のため、製品はすべて売却できるものとする。企業の生産活動をリソースのフローによって表現し、経済価値はこのリソースを単位に計量する。企業は一つのデバイス（後述）であり、出力リソースから入力リソースおよび生産コストを引いた収益 G を事業資金として蓄積する。出力リソースが入力リソースを下回る状況を設備事故と見なし、また、保有資金 CP が負になれば企業は倒産する。

保有資金は下記の式によって計算する。

$$CP_t = r(CP_{t-1} + G_t) \quad (1)$$

CP_t はターム t 終了時の保有資金、 G_t はターム t での収益、 r は積立率で、獲得したすべての資金を蓄積できるわけではないことを示す。以下では $r = 0.98$ を採用した。

企業を構成する要素は以下の通りである。

(1) デバイス

システムの抽象的要素で、リソース Z の入力に対して何らかの変換を行ない、リソース Z' を出力する。運転にはコスト C を要する。ここで、 $Z' < Z$ のときをデバイスの故障と定義する。デバイスが故障しない確率を信頼性と呼ぶ。また、デバイスとしての企業を特に「ルートデバイス」と称し、ルートデバイスの故障を事故と定義する。

(2) インストールメント

具体化されたデバイスで、属性として生産性に関する付加価値率 V 、安全性に関する信頼性 R 、運転コスト C をもつ。リソース入力 Z に対して、確率 R で $Z' = (1+V)Z$ を、確率 $1-R$ で $Z' = 0$ を出力する。この判定はタームごとに独立かつ同時に行なう。設備の劣化を考慮する場合には $R = R_0 - TD$ とし、前回の保全活動からの経過ターム数 T に応じて信頼性を低下させる。 D は劣化率である。

(3) ユニット

任意のデバイスを格納するライン（後述）の要素である。入力リンクからリソースを集め、格納するデバイスで処理した後、出力リンク先に分配する。

(4) リンク

ユニット間のリンクには「冗長的リンク」と称するリンクを用いる。冗長的リンクは、論理和に相当するネットワーク構成を可能にするもので、リンク先に故障したデバイスを内包するユニットを感知すると、一時的にそのリンクを停止する。この処理はタームごとに独立に行なう。論理積については、ユニットを直列させることで容易に表現できる。

(5) ライン

具体化されたデバイスで、ユニットをノードとする非環状有向グラフで、ラインに含まれるノード数をそのラインのサ

Fig. 1 An example of line

イズと呼ぶ。ラインの例を Fig. 1 に示す。以下では、企業のルートデバイスはラインとし、このラインのサイズを企業サイズと呼ぶことにする。

2.2 自然淘汰

経済的競争環境下における企業の自然淘汰を模擬するため、企業集団を遺伝的アルゴリズム⁸⁾によって進化させる。

(1) 遺伝子コーディング

遺伝子配列は、企業のルートデバイスのライン構成を表わすライン構成配列と、使用するデバイスの種類を表わすデバイス名配列で構成される。

ライン構成配列については、まず入力ユニットからの階層に従ってライン内のユニットに 0 から順に番号を割り振る。つぎに、ユニット i からユニット j ($i < j$) へのリンクがある場合を 1、ない場合を 0 としたビット列を生成する。たとえば、Fig. 1 のライン構成の例では、ユニット 0 から順に $\{1, 1, 1, 0, 0, 0, 0\}$ $\{0, 0, 1, 0, 0, 0\}$ $\{0, 0, 0, 1, 0\}$ $\{0, 1, 1, 0\}$ $\{0, 1, 0\}$ $\{0, 1\}$ $\{1\}$ のようなビット列を生成する。このビット列を結合して遺伝子とする。

デバイス名配列は、ユニット i に内包されるデバイスの種類を示す識別子を並べたものを遺伝子配列とする。

(2) 遺伝子操作

本モデルでは、各個体は既定の寿命をもたない。保有資金が負になった企業は倒産し、倒産した企業を選択された親から生成した新しい企業と置換する。親の選択は、企業の保有資金を適応度とする適応度比例方式を採用した。これは資金力のある企業が新規事業を開拓し、またそのノウハウが伝播していくことを想定したものである。

交配はライン構成配列、デバイス名配列のおのおのに関して、遺伝子配列をランダムな位置で切断して接合する。たとえば、親のライン構成配列を B_1, B_2 、デバイス名配列を D_1, D_2 とし、子のライン構成配列を B 、デバイス名配列を D とすると、ランダムに交叉位置 k, l, m を選んで、下記のように交叉を行ない、新規企業を生成する。

$$B(i, j) = \begin{cases} B_1(i, j) & (i < k; i = k, j \leq l) \\ B_2(i, j) & (i > k; i = k, j \geq l) \end{cases} \quad (2)$$

$$D(i) = \begin{cases} D_1(i) & (i \leq m) \\ D_2(i) & (i > m) \end{cases} \quad (3)$$

交叉によって非環状有向グラフにならない致死遺伝子が発生

Table 1 Characteristics of instrument group 1

Parameter	Values
Rate of additional value (V)	$V_A = 0.2, V_B = 0.1$
Reliability (R)	$R_A = 0.99, R_B = 0.9$
Deterioration rate (D)	$D = 0.0$
Maintenance interval (M)	$M = \infty$ (no maintenance)
Correction cost (Cd)	$Cd_A = -0.8, Cd_B = -0.2$

した場合には、ライン構成配列の要素がすべてゼロである行または列のビットをランダムに反転させることによって修復する。

突然変異はビット列またはデバイス列をランダムに書き換えることで行なう。

2.3 安全規制

安全規制は、具体的には検査という形で実施されるものとし、そのスタイルを規定する要因は検査の時期と基準である。

(1) 検査時期

事前検査、定期検査、事後検査を考える。事前検査は企業生成時に、定期検査は決められた周期でターム開始時に行なわれ、検査基準を満足しない企業に罰金を課す。事後検査は事故発生時に行なわれ、事故を起した企業に罰金を課す。

(2) 検査基準

事後制裁、仕様規定型、性能規定型を考える。事後制裁は結果的に事故を起した企業に制裁を加える規制であり、事後検査にのみ適用される。仕様規定型は使用するインストルメントの属性や、保守点検のやり方に制約を加えるものである。性能規定型は生産設備全体の信頼性、すなわちルートデバイスが事故を起さない確率に制限を設けるものである。

(3) 罰金額と検査率

罰金は企業から定められた資金を徴収するもので、いくら罰金を課すかが一つのパラメータである。検査時期に規制が適用される確率を検査率と定義する。検査率が100%をかなり下回る場合、検査があるかどうかはランダムに決められるので、このような検査は実質的に抜打ち検査を意味する。

3. 保全を考慮しない場合

まず、Table 1 に示すインストルメント属性の組み合わせによって定義される機器を使用したシミュレーションを行なった。個々の常用機器の信頼性 R は定数であり、よって故障時以外に保全を必要としない設備である。ただし、生産性と信頼性とのトレードオフの関係を表わすために、 V_A かつ R_A の組み合わせを除いた。コスト C は次式で計算した。

$$C = (1 + V)(1 - R) + Cd \quad (4)$$

上記コストは設備の償却費と運転費の両者を含むものとし、 Cd はコストの補正項である。規制は事故後に罰金を課す事後制裁とし、企業サイズが5および10の2つのケースで、さまざまな罰金額を設定した。

以下、特に断りのない限り100個の企業群からなる社会でシミュレーションを100回または500回（企業サイズ10で

Fig. 2 Relation between penalty and productivity

Fig. 3 Relation between penalty and reliability

罰金額が15以下)行ない、その平均に95%の信頼区間を添えて結果を示す。また、社会の特性値は全企業の各特性値の平均とみなし、シミュレーション終了時の生存企業について集計した。

3.1 事後制裁と社会特性の関係

(1) 生産性

Fig. 2 は罰金額と社会の生産性（事故のリスクも含めた生産期待額）の関係を示したものである。

サイズ5の場合は規制によって生産性が単調に低下して行くが、サイズ10の場合は一定の罰金額を課すときに生産性がピークに達する。これは、企業サイズが大きい場合にはライン構成が複雑化し、単純な淘汰だけでは最適化が完全には進まないためであり、安全規制がかえって生産性を高める淘汰圧として働いた結果であると考えられる。

(2) 信頼性

Fig. 3 は罰金額と社会の信頼性の関係を示したものである。いずれの企業規模においても信頼性は単調に増加し、Fig. 2 とあわせると、おおむね生産性と信頼性の間にトレードオフの関係が成立することがわかる。なお、サイズ5のケースの信頼性が高いのは、故障する可能性のある機器の数が異なり、どこかしの故障が原因となって事故に至るリスクがサイズ

Fig. 4 Social utility achieved by various penalty

10のケースのほうが大きいからである。また、罰金額を引き上げて行くと信頼性の上昇が頭打ちになるのは、事故を起したら直ちに倒産という限度以上に罰金を引き上げてほとんど効果がないからである。

3.2 社会効用直線と社会効用曲線

ここで、生産性 P の低下と信頼性 R の上昇のトレードオフを評価するため、社会効用 U を以下のように定義する。

$$U = P - L(1 - R) \quad (5)$$

L は事故によって社会が被る損失額で、等価事故損失と呼ぶ。 L の値は、事業に対応して起りうる事故の規模や社会の性質によって定まり、リソース単位で表わす。

Fig. 4 はサイズ5の場合であり、罰金額ごとに社会効用を図示したものである。このとき、それぞれの罰金額における社会効用を表わす直線を社会効用直線と呼ぶ。

事故損失が小さい場合には罰金を軽くして生産性を優先するほうが社会効用は大きくなるが、事故損失が大きくなると罰金を重くして事故防止へのインセンティブを高めたほうが社会効用は大きくなる。こうして、事故損失の変化とともに最大の社会効用をもたらす社会効用直線は交代し、社会効用を最大にする罰金の水準は事故損失の増加とともに高くなる。

Fig. 4 では4通りの離散的な罰金額に対して社会効用直線を描いているが、罰金額を連続的に変化させて事故損失のレベルごとに最大の社会効用を求めてプロットすると、社会効用直線を包絡する下に凸な曲線が描かれる。これを社会効用曲線と呼ぶことにする。社会効用曲線に接する社会効用直線が社会効用を最大にする罰金額を決定するので、社会シミュレーションにより社会効用曲線を求めることにより、最適な安全規制のかけ方を設定することが可能になる。

4. 保全を考慮する場合

つぎに、Table 2 に示すインスツルメント属性の組み合わせによって定義される機器を使用してシミュレーションを行った。ただし、ここでも V_A かつ D_A の組み合わせを除いた。このケースでは劣化によって個々の機器の信頼性が低下

Table 2 Characteristics of instrument group 2

Parameter	Values
Rate of additional value (V)	$V_A = 0.2, V_B = 0.1$
Initial reliability (R_0)	$R_0 = 1.0$
Deterioration rate (D)	$D_A = 0.002, D_B = 0.02$
Maintenance interval (M)	$M_A = \infty, M_B = 5$
Correction cost (Cd)	$Cd = -0.8$

するので、保全活動が意味をもつ場合である。なおコスト C は次式で計算する。

$$C = (1 + V)(1 - 5D) + Cd \quad (6)$$

ただし、保全活動には上記の通常コストの5倍のコストを要するものとする。

規制スタイルには、規制なし (No regulation)、事後制裁 (Penalty-based)、劣化率が D_A の機器の使用を要求する仕様規定型1 (Specification-based type 1)、5 ターンごとの保全活動を要求する仕様規定型2 (Specification-based type 2)、生産設備の信頼性が0.98を越えることを要求する性能規定型 (Performance-based) を考慮した。仕様規定型2の罰金額は2、他のケースの罰金額は5である。

4.1 規制スタイルの比較

劣化が少ない機器の使用を要求する仕様規定型1は、安全規制としては失敗する。Fig. 5 は仕様規定型1を罰金額1～5の範囲で変えながらテストした結果得られた社会特性を示したものである。規制によってむしろ信頼性が低下し、逆に生産性が向上して行くことがわかる。これは、規制を守るよりも、逆に罰金を支払い続けることができるような収益構造に企業群が進化した結果である。現実には違反を繰返しながら操業することはできないので、この状況は違反の隠蔽への動機につながる事が予想される。いずれにしても、規制のやり方によっては企業群が規制意図とは逆の方向に進化してしまうことがある。

Fig. 6 は規制スタイルごとの信頼性を図示したものである。ただし、シミュレーション終了時における生存企業の到達値 ($T = 250$) に加えて、シミュレーションの全期間における平均値 ($T = 0 \sim 250$) も求めた。

仕様規定型2では企業はおおむね規制を守っているが、やはり規制なしの場合よりも信頼性が低下してしまう。このように、設備の信頼性は個別の機器だけでなく、ラインの構成にも依存して決まるので、画一的な性能規定型規制は意図と逆の結果を生んでしまうことがある。

しかし、事後制裁および性能規定型はどちらも信頼性を向上させる効果を見せている。安全性能に直接かわる規制は有効に機能するといつてよいだろう。

4.2 評価基準の違いによる影響

前節では、到達値と平均値とで有意な差が生じる可能性が示されている。到達値は社会特性の収束値と考えることができ、長期的な評価と考えられる。一方、あるタイムステップまでの平均値は社会の成熟過程も考慮した短中期的な実績と

Fig. 5 Performance achieved by specification-based regulation of type 1

Fig. 6 Reliability achieved by various regulation styles

考えることができる。これらのどちらを基準に評価するかによって結果に差が生じる可能性があることがわかる。

Fig. 7 および Fig. 8 はそれぞれ、到達値 ($T = 250$) と平均値 ($T = 0 \sim 250$) による社会効用を示したものである。ここで、生産性および信頼性の両者に有意な差があっても、規制スタイルごとの順序は保たれている。したがって、直線の基本的な上下関係は共通しているが、有意な差を反映して、直線が交叉する位置が異なる。これは、事故による被害の見積もりによっては、短中期的に最適な規制スタイルと、長期的に最適な規制スタイルが異なることを意味する。

4.3 検査方法の比較

設備信頼性の下限値を 0.98 に制限する性能規定型規制において、Table 3 に示す 4 通りの検査方法により達成される生産性、信頼性を比較した結果が Fig. 9 である。

ケース P5/T5 (Penalty = 5 / Inspection interval = 5 terms, 以下同様) および P5/U (Penalty = 5 / Unannounced inspection) は平均的には同じ検査頻度であり、ま

Fig. 7 Social utility achieved at $T = 250$

Fig. 8 Average social utility for $T = 0 \sim 250$

Table 3 Test cases for comparison of inspection methods

Case	P1/T1	P5/T5	P5/U	P5/T1
Inspection interval	1	5	1	1
Penalty	1	5	5	5
Probability of inspection	1.0	1.0	0.2	1.0
Average penalty per term	1	1	1	1

たどちらも罰金額の期待値で見た場合、ケース P1/T1 と同じ規制を課していることになる。そして、定期検査に相当するケース P5/T5 と P1/T1 の間に有意な差はない。しかし、抜き打ち検査に相当するケース P5/U は P1/T1 よりも信頼性が高くなり、より厳しいケース P5/T1 に近い成果を得ている。

現実において、規制の適合性チェックはある間隔において実施することになる。本シミュレーションの結果を見る限り、平均的に同じ頻度ならば完全に定期的な検査より抜き打ち検査を行なったほうが高い効果を上げられるといえる。

5. 社会環境変化の影響

最後に、4 章と使用する機器などが基本的に同じ条件を用いて、社会環境が変化する場合のシミュレーションを行なった。Fig. 10 は、規制なし (NR)、事後制裁 (PB)、 $T = 100$ まで事後制裁でその後は規制なし (PB / NR) の 3 つの安全

Fig. 9 Performance achieved by various inspection methods

Fig. 10 Effect of change in regulation style

規制スタイルで、社会の信頼性の変化を図示したものである。

PB / NR では、規制スタイルが変更された後、信頼性の向上が停止し、やがて規制なしの場合と同じ水準になることがわかる。すなわち、社会特性は環境に依存し、どの段階で規制スタイルを適用しても、やがてその規制に適合した状態に推移して行くと考えられる。

6. 結 論

進化型のマルチエージェントモデルを用いたシミュレーション実験から、規制環境が社会特性を決定することが確認できた。企業群は、与えられた条件の下で規制スタイルに適応するように進化をとげる。その結果を観測することによって、ある規制スタイルが所期の目的達成に有効か否かを評価することが可能である。

また、シミュレーションの結果からつぎのような知見を得ることができた。事故に対する事後制裁は、必ずしも生産性向上の障害になるとは限らず、場合によってはむしろそれを促進することがわかった。また、生産性と信頼性とのトレードオフの関係と、それらを総合して社会効用を評価する手法を示した。さらに、仕様規定型規制が意図と全く逆の結果を生む可能性のあること、評価期間によって最適な規制スタイルが異なる可能性のあることが示された。社会的安全性は現在採用されている規制スタイルに依存するため、たとえば途

中で規制を撤廃すると、信頼性はやがて規制がない場合と同じ水準になってしまうことが示された。また、検査は定期検査よりも抜き打ち検査で実施したほうが信頼性を向上させるのに効果的であることがわかった。

本研究によって、安全規制制度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理論的に検証されることのなかった知見を得ることができた。

今後の展望としては、より詳細にパラメータ条件を設定し、社会特性の変化と安全規制との関係を探求して行くことが考えられる。本研究では条件を単純化してシミュレーションを行なったが、基本的な性質を押えた上で、より複雑な条件を設定し、あるいは属性や要素を追加する方向がある。たとえば、本モデルでは生産中断として単純に事故を定義したが、事故の規模を考慮したり、企業の中に明示的に組織を導入したりすることなどが考えられる。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。

参 考 文 献

- 1) 総合規制改革会議: 規制改革推進 3ヵ年計画 (改訂) <http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/020329/>
- 2) 原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会: 原子力発電施設の技術基準の性能規定化と民間規格の活用に向けて (2002)
- 3) 大野, 城山: 化学プロセスにおける安全規制の課題と今後の制度設計, 社会技術研究論文集, 1, 317/326 (2003)
- 4) 八代尚宏: 社会的規制の経済分析, 日本経済新聞社 (2000)
- 5) H. E. Roland and B. Moriarty: System Safety Engineering and Management, John Wiley & Sons, New York (1990)
- 6) J. Reason: Managing the Risks of Organizational Accidents, Ashgate, Aldershot: US (1997)
- 7) J. Ferber: Multi-Agent Systems, Addison Wesley, Harlow: UK (1999)
- 8) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading: US (1989)

[著 者 紹 介]

長 瀬 雅 也

2003年東京大学工学部システム創成学科卒業, 2005年東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻修了。現在, 富士写真フイルム(株)。

古 田 一 雄 (正会員)

1986年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士), 同年電力中央研究所, 87年東京大学工学部講師, 89年同助教授, 99年東京大学大学院新領域創成科学研究科教授, 2004年同工学系研究科教授, 現在に至る。専門は認知システム工学, ヒューマンインタフェース学会, 日本原子力学会などの会員。