

平成 23 年度国土政策関係研究支援事業 研究成果報告書

大規模地震発生時における建設系廃棄物・がれ  
き類の高速撤去・再利用を実現する災害時迅速  
復旧シミュレーターの開発に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 講師

北垣 亮馬



# 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| I. 研究目的・意義                       | 4  |
| II. 研究手法                         | 4  |
| III. 成果内容                        | 5  |
| ○ 要旨                             | 5  |
| ○ キーワード                          | 5  |
| ○ 本編                             | 5  |
| 1. はじめに                          | 5  |
| 2. 津波被害地域の同定と建築物への被害の連成          | 7  |
| 2-1. 建築物の損壊の推定                   | 8  |
| 3. 仮置き場，がれき焼却炉の設定の考え方について        | 10 |
| 3-1. 仮置き場の考え方                    | 10 |
| 3-2. ストックヤードの容量の定義               | 10 |
| 4. 災害復旧シミュレーター・既往の研究の紹介          | 11 |
| 4-1. 資源循環シミュレータ・ecoMAについて        | 11 |
| 4-2. 経済的要因をシミュレーションしたマルチエージェント研究 | 14 |
| 4-3. 進化論的手法                      | 15 |
| 4-4. 参考文献                        | 17 |
| 5. シミュレータへの遺伝的プログラミングの適用可能性の検証   | 18 |
| 5-1. 蟻の餌集めモデル Ant                | 18 |
| 5-2. ポーランド記法とスタックカウント            | 19 |
| 5-3. 結果と考察                       | 20 |
| 5-4. シミュレーションモデルへの組み込み           | 21 |
| (1) シミュレーション全体の流れ                | 21 |
| (2) 言い値と評価値の算定                   | 24 |
| (3) 適合度の算定                       | 26 |
| 5-5. シミュレーション結果                  | 43 |
| (1) シミュレーションの条件                  | 43 |
| (2) 結果と考察                        | 45 |
| 5-6. 参考文献                        | 50 |
| 6. 東北大震災の復興試算と今後の復興のボトルネックなどの検討  | 51 |
| 6-1. シナリオ設定                      | 51 |
| 6-2. 結果分析                        | 53 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 7. 関東直下型大地震に関する必要な政策のキーポイント ..... | 55 |
| 7-1. 仮置き場の具体的な指定化 .....           | 55 |
| 7-2. がれきの運搬コンセプトの検討 .....         | 55 |
| 7-3. がれきの撤去優先度の検討 .....           | 56 |
| 7-4. 災害時広域廃棄物処理の必要性 .....         | 56 |

## I. 研究目的・意義

2011年3月11日に起こった東北関東大震災は、今後起こりうる大規模地震の被害が構造物の倒壊による即時的・物理的な被害だけでなく、インフラが機能しないことによって長期的に起こりうる社会的な被害、二次災害の甚大さと、可能なかぎり早期に生活機能を復旧することの重要性を我々にあらためて強く印象づけるものであった。我が国の主要な大都市圏では、地震ハザードマップとそれに基づく簡易な復旧計画、連絡体制、緊急物資の備蓄を事前に準備しているものの、がれきの高速・高効率撤去を中心とした精緻な復旧ロードマップを整備していない。仮に大震災が起こった場合、行政は管区内の被災状況を情報収集し、必要な備蓄物資を配布した上で、その後、どの業界団体と連絡をとりあってがれき撤去を始めるか、どの仮置き場候補地に運搬するか、といった程度までは指示可能であるが、道路の寸断状況が、空間分布としてどのように広がっているのか、そして、優先度としてどの道路からがれきを撤去すべきなのか、仮置き場としてはどこを優先的に利用すべきか、といった具体的で精緻な指示・判断については準備しきれていないのが現状と考えられる。そこで、本研究では、地震災害によって発生する建設系廃棄物による交通インフラ閉塞の早期解決と、被災地再整備への震災がれきの積極的再利用を実施することで、被災地の高効率復旧を実現するため、(1)建設系廃棄物の種類別排出分布状況(2)道路寸断状況を明らかにした上で、(3)これらを入力値として最適な撤去計画や再利用計画を出力する災害時迅速復旧シミュレーターを開発し、(4)得られる試算とシナリオ評価に基づき、関東一都三県の直下型地震災害を想定した場合の迅速復旧に資する復旧ロードマップを作成・提案することを目的とする。

## II. 研究手法

以下の手順で研究を進める予定をたて、現在、実行している。

0)過去の地震後の建設廃棄物の排出状況、資源循環状況を明らかにするために、まず基礎データの整備・地震被害・復旧報告書について文献調査を行い、1)構造種類別耐久性に基づく建設系廃棄物の種類別排出分布予測モデル、2)建物階数、土木構造物高さに基づく道路寸断区域予測モデルを開発し、3)これらを0)の空間分布データに導入することで、地震災害後の建設系廃棄物分布、道路閉塞率分布、資源循環関連施設の立地・能力残存率分布を統合した「地震後空間データ」を構築し、さらに地震後の建設系廃棄物の撤去・積極的再利用、道路クリアランスの準最適な時系列経路を計算・出力できるプログラムを開発する。申請者である北垣はこれまでマルチエージェントベースの物質・資源の社会的循環を模擬することで地域で発生した廃棄物・CO<sub>2</sub>排出量を算出するプログラム *ecoma* を開発してきており、これを拡張することで、効率的に災害時迅速復旧シミュレーターも開発可能であると考えられる。

### Ⅲ. 成果内容

#### ○要旨

地震災害によって発生する建設系廃棄物による交通インフラ閉塞の早期解決と、被災地再整備への震災がれきの積極的再利用を実施することで、被災地の高効率復旧を実現するため、(1) 建設系廃棄物の種類別排出分布状況 (2) 道路寸断状況を明らかにした上で、(3) これらを入力値として最適な撤去計画や再利用計画を出力する災害時迅速復旧シミュレーターを開発し、(4) 得られる試算とシナリオ評価に基づき、迅速復旧に資する復旧ロードマップを作成・提案を行った。

○キーワード 震災復旧, がれき, シミュレーション, マルチエージェント

#### ○本編

##### 1. はじめに

東北関東大震災の被災者を整理すると表 1-1 のようになる。国内の自然災害で死者・行方不明者の合計が 1 万人を超えたのは戦後初であり、死者数や破壊家屋等の被害は太平洋戦争以来の被害規模である。また、自然災害に限定すれば関東大震災以来の被害規模である。

表 1-1 東北関東大震災の影響の整理

|        |          |
|--------|----------|
| 死者*1   | 10,489 人 |
| 行方不明*1 | 16,621 人 |
| 重軽傷者*1 | 2,777 人  |

警察庁, “平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震について 被害状況と警察措置”,

プレスリリース 2011 年 3 月 27 日

図 1-2 は、被災者の地域別分布である。この分布に着目して、明治三陸大津波の被災者の分布を示したものが図 1-2 である。これを見ると、時代がかなり進んだために絶対数は少なくなるが、それにもかかわらず被災者数は十分抑えこまれたわけではない。むしろ技術やインフラ整備にもかかわらず被害は抑えられていないと考えるべきである。

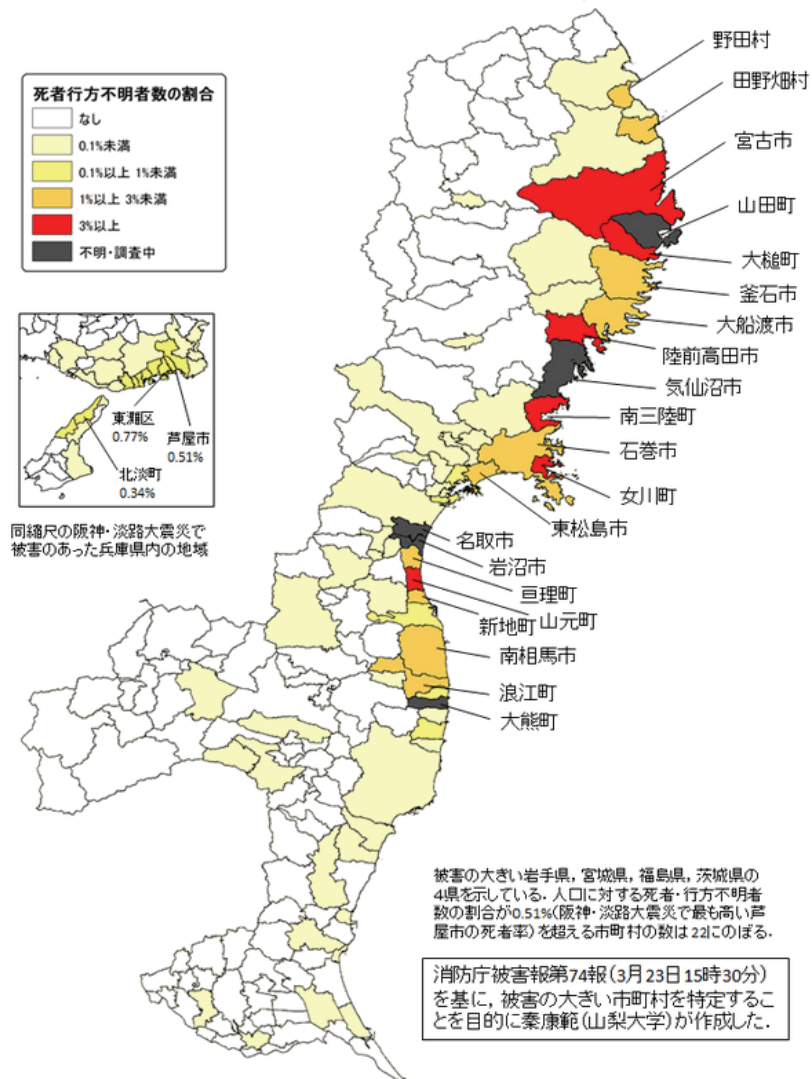


図 1-1 東日本大震災 死者・行方不明者数の人口に対する割合  
(山梨大学・秦康範氏作成)

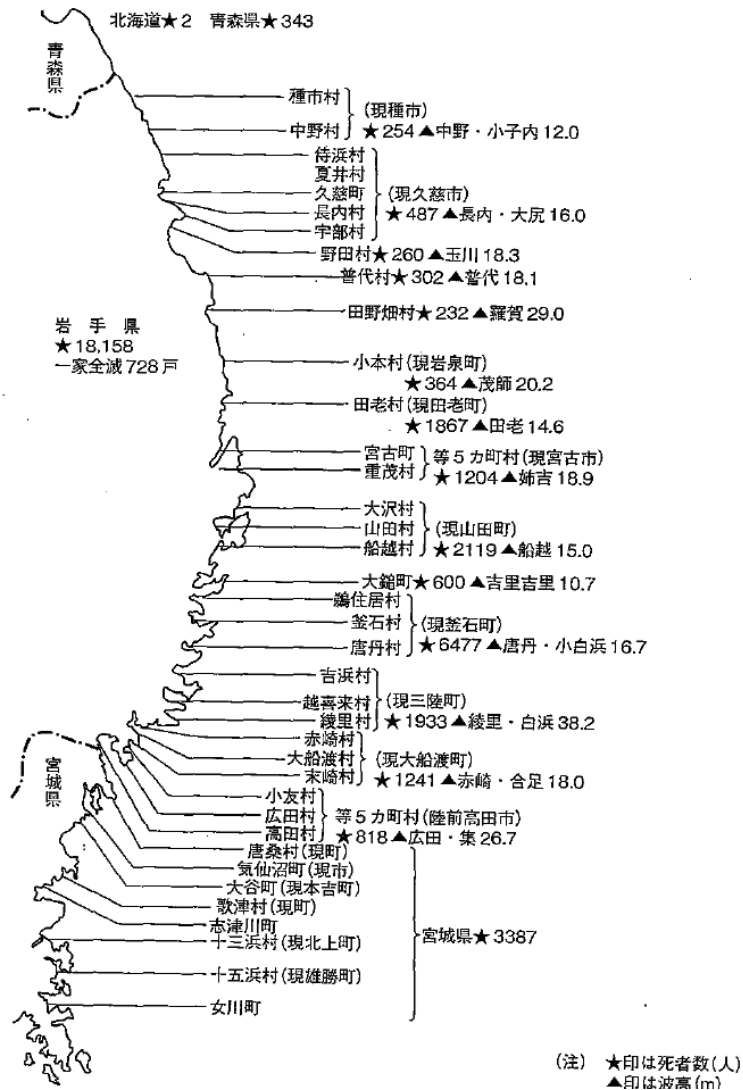


図 1-2 明治三陸大津波の死者数と波高・畑村洋太郎著 技術と創造の設計より

このように、地震、津波などの大災害においては、従前の建造物の安全性が被害量に影響を与えることはもちろん、準備が万端でもなかなか被害は最小化しにくいものである。そこで本研究では、地震および津波のような自然災害において、建築物が倒壊した場合に、どれくらいの期間を使って復旧が実現するか評価できるようになるシミュレーターの開発を行い、これによって、復旧期間がどれくらいで律速するものなのかを試算することを目的とする。

## 2. 津波被害地域の同定と建築物への被害の連成

津波被害地域から建築物の被害を推定するために次の手順をもちいて推定を行った。



- (1) 航空写真より青森地域から福岡地域にいたるまで津波到達地域のラインデータを整理
- (2) 国土地理院の地域メッシュ(3次)を重ねあわせ被害者数, 被害地域を同定
- (3) 人口あたりの延床建築面積を国土交通省・建築ストック調査より算出これを歩掛りとして利用
- (4) 被災地域, 被災件数, 被災面積を推定
- (5) 最終的に実報告とすりあわせて推定精度を検証

以下に具体的な手順を示す.

## 2-1. 建築物の損壊の推定

衛星画像より被災4県の津波被害エリアは, 約 1309 km<sup>2</sup> であり, 全面積: 22173km<sup>2</sup> に比較して 5.9%が被害エリアと推定される. 次に, 津波被災地域の人口数は, 708728 人に対して, 該当地域の全人口: 7270806 人となり, 被災者の比率として 9.7%と推定されている. このことから, 津波には人口密度の高いエリアに津波が襲ったと考えられる.

また, 住宅損壊による廃棄物推計は, 可燃廃棄物: 6,586,789 トン, 不燃廃棄物: 28,984,380 トンである. また, 名知らは, コンクリート廃棄物発生分布と人口分布が比例していることを指摘しており, 本研究においてもこの仮定が成り立つものとして推定を行う. 下記は日本国内全体の種類別建築物の延床面積と人口の関係を示す.

表 2-1 日本国内全体の建築物の延べ床面積と人口の関係

|                |               |                  |
|----------------|---------------|------------------|
| 公共_非住宅_事務所     | 2,459         | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_非住宅_事務所・店舗 | 54,836        | 万 m <sup>2</sup> |
| 不詳_非住宅_工場・倉庫   | 1,011         | 万 m <sup>2</sup> |
| 不詳_非住宅_事務所・店舗  | 918           | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_住宅_一戸建・長屋   | 355,850       | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_非住宅_事務所・店舗  | 2,348         | 万 m <sup>2</sup> |
| 公共_非住宅_医療施設    | 106           | 万 m <sup>2</sup> |
| 公共_非住宅_教育施設    | 66            | 万 m <sup>2</sup> |
| 公共_非住宅_その他     | 970           | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_住宅_一戸建・長屋  | 32,832        | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_住宅_その他     | 922           | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_住宅_共同住宅    | 136,869       | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_非住宅_その他    | 37,274        | 万 m <sup>2</sup> |
| 非木造_非住宅_工場・倉庫  | 75,569        | 万 m <sup>2</sup> |
| 不詳_非住宅_その他     | 276           | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_住宅_その他      | 700           | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_住宅_共同住宅     | 12,621        | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_非住宅_その他     | 5,063         | 万 m <sup>2</sup> |
| 木造_非住宅_工場・倉庫   | 2,977         | 万 m <sup>2</sup> |
| 合計             | 7,236,691,931 | 平米               |
| 日本の人口          | 127,450,460   | 人                |

表 2-1 より，一人あたりの木造（平米） =29.7809789，一人あたりの非木造（平米） =26.99945116 となる．また，延床平米あたり出てくるガレキ（トン/m<sup>2</sup>） は種類別に以下のように求められる．

表 2-2 延床平米あたり出てくるガレキ（トン/m<sup>2</sup>）

|       |       |
|-------|-------|
| 木造可燃  | 0.206 |
| 木造不燃  | 0.599 |
| RC 可燃 | 0.117 |
| RC 不燃 | 0.854 |
| 鉄骨可燃  | 0.053 |
| 鉄骨不燃  | 0.358 |

以上より，被災メッシュ人口をもとに，地域別・被災人口順のガレキ推定量を示す．

表 2-3 地域別・被災人口順のガレキ推定量

| 県名  | 地域名   | 被災メッシュ人口 | 被災メッシュ面積 (km <sup>2</sup> ) | 被災密度 (人/km <sup>2</sup> ) | 木造可燃物 (トン) | 木造不燃物 (トン) |
|-----|-------|----------|-----------------------------|---------------------------|------------|------------|
| 宮城  | 石巻    | 109252   | 68                          | 1607                      | 670248     | 1948925    |
| 宮城  | 塩竈    | 83333    | 37                          | 2252                      | 511238     | 1486561    |
| 宮城  | 仙台東南部 | 48400    | 52                          | 931                       | 296928     | 863398     |
| 宮城  | 気仙沼   | 37222    | 40                          | 931                       | 228353     | 663996     |
| 福島県 | 相馬中村  | 31219    | 68                          | 459                       | 191525     | 556910     |
| 宮城  | 仙台東北部 | 29230    | 13                          | 2248                      | 179323     | 521428     |
| 岩手県 | 大船渡   | 25764    | 38                          | 678                       | 158059     | 459599     |
| 岩手県 | 宮古    | 23519    | 27                          | 871                       | 144286     | 419551     |
| 宮城  | 広瀬    | 23145    | 18                          | 1286                      | 141992     | 412879     |
| 宮城  | 仙台空港  | 20593    | 46                          | 448                       | 126336     | 367355     |
| 福島県 | 原町    | 15145    | 23                          | 658                       | 92913      | 270169     |
| 岩手県 | 大槌    | 14444    | 24                          | 602                       | 88612      | 257664     |
| 宮城  | 小野    | 13677    | 42                          | 326                       | 83907      | 243981     |
| 宮城  | 荒浜    | 12818    | 36                          | 356                       | 78637      | 228658     |

地域別・被災密度順のガレキ推定量

| 県名  | 地域名   | 被災メッシュ人口 | 被災メッシュ面積 | 被災密度 | 木造可燃物 (トン) | 木造不燃物 (トン) |
|-----|-------|----------|----------|------|------------|------------|
| 青森県 | 八戸東   | 8244     | 3        | 2748 | 50576      | 147063     |
| 青森県 | 八戸西   | 11824    | 5        | 2365 | 72539      | 210926     |
| 宮城  | 塩竈    | 83333    | 37       | 2252 | 511238     | 1486561    |
| 宮城  | 仙台東北部 | 29230    | 13       | 2248 | 179323     | 521428     |
| 岩手県 | 盛     | 3352     | 2        | 1676 | 20564      | 59796      |

|     |       |        |    |      |        |         |
|-----|-------|--------|----|------|--------|---------|
| 宮城  | 石巻    | 109252 | 68 | 1607 | 670248 | 1948925 |
| 宮城  | 広瀬    | 23145  | 18 | 1286 | 141992 | 412879  |
| 宮城  | 鹿折    | 2794   | 3  | 931  | 17141  | 49842   |
| 宮城  | 仙台東南部 | 48400  | 52 | 931  | 296928 | 863398  |
| 宮城  | 気仙沼   | 37222  | 40 | 931  | 228353 | 663996  |
| 宮城  | 岩沼    | 2754   | 3  | 918  | 16895  | 49128   |
| 岩手県 | 宮古    | 23519  | 27 | 871  | 144286 | 419551  |
| 岩手県 | 大船渡   | 25764  | 38 | 678  | 158059 | 459599  |
| 福島県 | 原町    | 15145  | 23 | 658  | 92913  | 270169  |

また、上表推定値に対して、実際の被災戸数を見ると下表のようになっている。

表 2-4 3月末時点で総務省消防庁調査の住宅被害・全壊数

| 県   | 市                       | 全壊数    |
|-----|-------------------------|--------|
| 岩手県 | 宮古市                     | 3,669  |
|     | 大船渡市                    | 3,629  |
| 宮城県 | 石巻市                     | 28,000 |
|     | 気仙沼, 塩釜, 仙台など重被災地はまだ調査中 |        |

重量原単位：t／延べ床㎡

ここから、阪神淡路大震災の神戸市の木造・歩掛りで換算すると、石巻だけで、木造可燃物：834,052 トン、木造不燃物：2,425,231 トン（ガラ、サイディングなど）となり、今回の推定に概ね合致する。

以上より、被災ガレキについては次のような推定値をシミュレーションの入力値として採用するものとする。

### 3. 仮置き場、がれき焼却炉の設定の考え方について

#### 3-1. 仮置き場の考え方

がれきは被災地で再利用することができるが、復旧のためには一回別の場所で保管しなければならない。逆に保管する場所が不足すれば復興に必要な場所が足りず遅れる可能性がある。この意味でも仮置き場は潤沢に整備することが必須である。しかし、どの程度整備すれば良いのか？また、がれきを焼却する場合、焼却炉の個数とのバランスはどのように保てばもっともコスト安く、かつ効率よく行くのか？

仮置き場については復旧速度を大きく左右する要因となる。そこで次の手順により仮置き場の設定を試みた。

#### 3-2. スtockヤードの容量の定義

Stockヤードに平積みした場合、そもそも平米あたり何トン詰めるのかを設定する。一般的な産業廃棄物処理にのっとり、がれきの安息角=30度、最大積上げ高さ=10m、

また、がれきのかさ密度=1.5 トン/立米と考えると、

中規模中間処理場の平均ストックヤード面積：10m×30m=300 平米

大規模中間処理場の平均ストックヤード面積：30m×50m=1500 平米

とできる。中規模中間処理場の保管可能量=1500 トン、大規模=7500 トン

これを最大で0.5月で処理する。従って、中規模で年間18,000トン、大規模で年間90,000トン処理することができる。この設定値をもとに仮置き場、がれき焼却場の規模設定を行うものとする。

## 4. 災害復旧シミュレーター・既往の研究の紹介

### 4-1. 資源循環シミュレーター・ecoMAについて

本研究で利用している災害時迅速復旧シミュレーターは資源循環シミュレーター ecoMA をベースにしている。これは、東京大学建築学専攻材料学研究室で始まった ecoMA というシミュレーションツール開発の研究の流れを汲むものである。

藤本郷史らの研究<sup>[1]</sup>によって ecoMA の開発は始まった。CO<sub>2</sub> 排出削減のための新技術、政策を環境負荷低減に役立てるためにどのような企業経営や資源循環が必要かという社会的適用性、資源循環可能性の評価を目的としていた。ecoMA は、社会情勢、地理情報、時間情報を考慮した点に特色がある。社会情勢のモデル化のため、AI・経済学分野で多く用いられるマルチエージェントシステム手法を導入した。ゼネコン、各材料の生産企業、最終処分場、政府といった各エージェントがそれぞれの戦略に基づいて行動することで、市場における受注競争や政策への対応をエージェントの相互作用としてモデル化した。地理情報は標準地域メッシュ (JIS X 0410) によって与えられ、輸送経路距離は直線距離に係数 1.25 を乗算して与えている。これによって、生コンの輸送距離制限や環境負荷の違いを考慮している。時間情報のモデル化のため、エージェントの行動を引き起こす社会現象をイベント概念としてモデル化した。ecoMA を使い、現状のまま (シナリオ 1)、加熱すりもみ骨材工場を作り、社会全体として加熱すりもみ骨材を可能な限り利用する社会 (シナリオ 2)、シナリオ 2 に加えて加熱すりもみ工程からの微粉をセメント原料として利用する社会 (シナリオ 3) を比較すると、70 年という実行期間で常にシナリオ 1 が CO<sub>2</sub> 排出量最小となった。これは加熱すりもみ工程の CO<sub>2</sub> 排出量が多いこと、コンクリートがらは今後予想される需要をすべて再生骨材でまかなっても大量に最終処分される可能性が高いことによる。CO<sub>2</sub> 削減のための要素技術や政策がはたして CO<sub>2</sub> 削減につながるのか、詳細な検討が必要であることが明らかになったと言える。

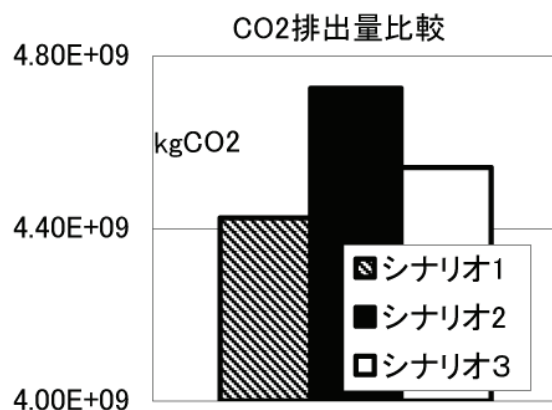


図 4-1 藤本らの研究<sup>[1]</sup>におけるシナリオごとの CO2 排出量の比較

北垣亮馬らの研究<sup>[2]</sup>では、北海道と関東の廃コンクリート塊の中間処理業全体について実態調査を行っている。そして、まず現状の中間処理場・最終処分場を、Voronoi 分割を利用して再現しシミュレーションを行っている。それによって、広域で見れば十分な処理能力があるのに、局所的に規模の小さい中間処理場が偏在していることが原因で輸送量が大きくなり、結果として広域的な CO2 排出量が必要以上に大きくなっている可能性があるということが明らかとなった。そこで、中間処理場の集約化シナリオをいくつか設定し、集約率（(集約後の工場数) / (実在工場数)）によって変化する CO2 排出量について評価を行い、最大 20%程度の CO2 削減が可能であるという結論に至っている。

長井宏憲らの研究<sup>[3]</sup>では北海道を対象としてコンクリート関連産業にアンケート調査を実施している。生コンクリート工場の稼働率が高くなるほど電力消費効率が高くなっており、しかも北海道では建築需要の低下に伴い稼働率が落ちていることから、生産活動の集約化によって消費エネルギー・環境負荷の低減につながると分析した。しかし ecoMA によりシミュレーションを行うと、輸送に伴う CO2 排出量が増大するため、生コンクリート工場の集約率は 30%までに抑える必要があることが分かった。

北垣亮馬らの研究<sup>[4]</sup>では、道路距離が直線距離にほぼ比例するという既往の研究<sup>[5]</sup>に対し、地理情報システム (GIS) を用いることにより実道路距離を算出し、両者を比較している。東京では、GIS を用いた道路距離は既往の算出方法による道路処理に比べ直線距離に対する比率が小さくなった。一方北海道では、既往の研究による道路距離に比べ GIS による道路距離は直線距離に対する比率が大きい。つまり、道路網の荒い北海道に比べ、道路網の細かい東京都では、工場間の道路距離は直線距離に近似することが明らかになった。

岩田彩子らの研究<sup>[6]</sup>では関東 1 都 3 県及び北海道の中間処理場の集約化についてシミュレーションを行い、排出量の大きい関東は集約化におけるスケールメリットがあるため CO2 削減効果が大きい、北海道では同じシナリオでもまったく異なる挙動となり、

環境負荷削減には地域に合った政策の導入が不可欠であることを明らかにした。

野口貴文らの研究<sup>[7]</sup>では、首都圏と北海道を対象として、コンクリート関連産業における地域性・規模性を考慮した CO<sub>2</sub> 排出原単位の算定を行っている。結果を工場種（生コンクリート工場、砕石工場、砂利工場、アスファルト合材工場、中間処理場、最終処分場）別に比較すると、CO<sub>2</sub> 排出原単位が最も大きいのはセメント工場であり、もっとも小さいのは生コンクリート工場であった。アスファルト合材工場、中間処理場、最終処分場は工場の規模による CO<sub>2</sub> 排出原単位への影響が顕著であった。また、いずれの工場種についても生産量の大きな工場ほど CO<sub>2</sub> 排出量が減少することが定量的に示された。地域性については、アスファルト合材工場、中間処理場において地域による差が顕著であった。

竹田真梨子らの研究<sup>[8]</sup>では香川県における中間処理場の集約化による CO<sub>2</sub> 削減効果の評価した。再生製品の需要低下により最終処分される廃コンクリート塊が増加し、CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に増加することが明らかとなり、最終処分場のインベントリデータ整備の重要性が指摘された。

岩田彩子らの研究<sup>[9]</sup>は、コンクリート関連産業の地域特性および工場規模が環境負荷原単位に及ぼす影響を明らかにした。工場規模の影響に関しては、生産量の多い工場ほど、スケールメリットが働くことによりエネルギー効率が向上し、CO<sub>2</sub> 排出原単位は小さくなる傾向を示した。また、規模が小さな工場では、CO<sub>2</sub> 排出原単位は大きくばらつく傾向を示した。地域特性に関しては、首都圏に比べて小規模な工場が多い北海道では、CO<sub>2</sub> 排出原単位は大きくなった。

筆者らの研究<sup>[10]</sup>ではコンクリート混和材量である高炉スラグ、フライアッシュの利用が首都圏で進んだ場合、どの程度の環境負荷低減効果が期待できるかを明らかにしたものである。高炉スラグを利用することで関東一都三県の CO<sub>2</sub> 排出量は約 300 万トン削減される。これは地域コンクリート産業の排出量の約 44%に相当する。フライアッシュを利用することでは、約 55 万トン削減される。これは地域コンクリート産業の排出量の約 8%に相当する。

三谷卓摩らの研究<sup>[11]</sup>では、それまで直線距離で輸送距離を算出していた ecoMA に実道路ネットワーク計算モジュールを組み込み計算することを可能にした。関東一都三県のコンクリート産業界について実際にシミュレーションを行い、直線距離と道路ネットワーク距離では発注先が変わってくること、また工場の生産量は道路事情によってかなりダイナミックに変化することが明らかになった。また三谷らの研究<sup>[12]</sup>では、それまで道路のみでシミュレーションしてきた輸送手段を船舶、鉄道にも拡張した。これは国内においても長距離大量輸送では船舶等の利用が多いというコンクリート産業の実態を反映したものとなった。

このように既往の ecoMA の研究では、廃棄物や物質の輸送や調達についてのシミュレーションが十分可能であり、これに加えて、環境負荷低減効果を地域特性を考慮して

定量的に把握することが可能である。ただし、資材のやり取りにおいて、経済的な取引の影響が考慮されておらず、また結果がほぼ線形であり非線形、複雑系の挙動を示す現実社会の諸要素の導入が必要であると考えられる。

#### 4-2. 経済的要因をシミュレーションしたマルチエージェント研究

陳らの研究<sup>[13]</sup>はマルチエージェントシステムに共進化遺伝的プログラミングを導入して株価の変動をシミュレーションすることを可能にしたものである。これと同様の手法を用いて、すなわちマルチエージェントシステムにおいて遺伝的プログラミングによる学習機能をエージェントに持たせることによって、ecoMA において建材価格をシミュレーションすることが可能になると考え、筆者は研究を行うこととした。しかし、この研究は株式市場と複数のエージェントとの 1 対多の取引であり、これと同じ手法が ecoMA で行われる多対多の取引において有効であるかどうかは未知数であった。本研究では取り込むことはしなかったが、この陳らの研究では共進化という手法を用い、また、複数種類のエージェントが共存する環境を想定している。遺伝的プログラミングについての詳しい説明は次節に譲るが、共進化とは進化に必要となる知識ベースをエージェント間で共有するというものである。図 4-2 において、第 1 類エージェント、第 3 類エージェントはそれぞれエージェント固有の知識ベースを持つと同時に、その知識ベースによる成績が思わしくない場合第 2 類、第 4 類のエージェントが共有している知識ベースにアクセスすることもある。第 1 類、第 2 類のエージェントは予測モデルと呼ばれる株価予測式に基づいて行動し、第 3 類、第 4 類のエージェントは行動ルールと呼ばれる行動パターンに基づいて行動する。第 5 類エージェントはそういった学習行動をとらずに株取引を行う。これらのエージェントが混在する環境を想定したことが、複雑な株価変動を生み出すことに成功した重要な要素であったと言えるだろう。

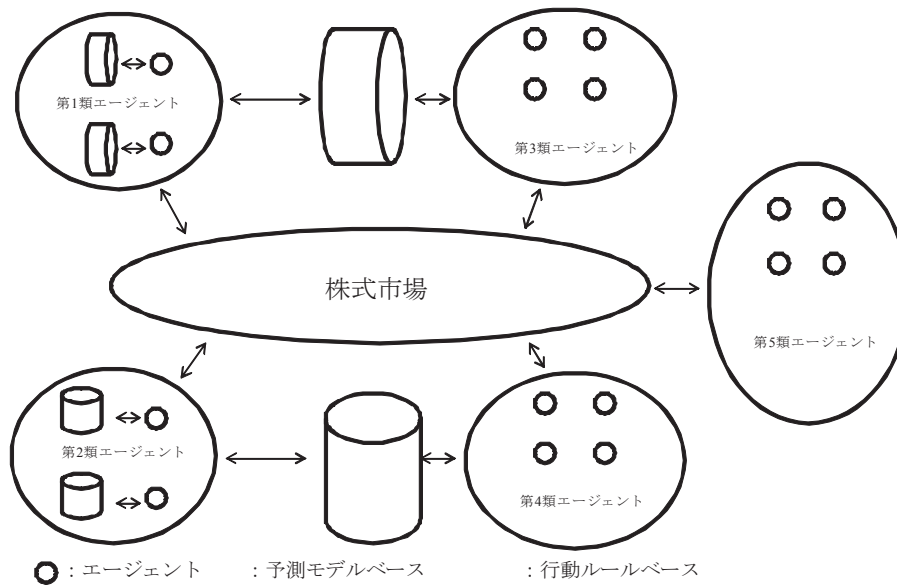


図 4-2 陳らの研究<sup>[13]</sup>におけるエージェント群

### 4-3. 進化論的手法

本節では、前に述べた遺伝的プログラミング(GP)、およびその元となった遺伝的アルゴリズム(GA)について概説する。

GA とは Michigan 大学の John Holland によって開発された、進化論的手法を用いて最適化、学習、推論を行う手法である。遺伝子型と呼ばれるデータ構造とその発現である表現型という 2 層構造のアルゴリズムで、表現型の環境への適合度に基づいて遺伝子型に GA オペレータを作用させ繰り返し世代交代を行っていくというものである。それによって、自然界で生物の淘汰が起こるがごとく、遺伝子型の選別が行われるのである。

GA オペレータには交叉(Crossover)、逆位(Inversion)、突然変異(Mutation)の 3 つがある。これらの生殖活動は適合度の高い個体ほど起こりやすく、また適合度の低い個体ほど死滅しやすい。そのため世代  $t+1$  の集団は世代  $t$  の集団より集団全体として適合度が上がっていることが期待される。こうして世代が進むにつれ集団全体が良くなっていく、というのが GA の基本的な仕組みである。

世代交代の手順をもう少し詳しく見る。生殖活動を行う個体を選び出すことを選択と呼ぶが、この選択において最も広く使われるのがルーレット選択である。これは、適合度に比例した面積を有するルーレットをつくり、そのルーレットを回して当たった場所の個体を選択するというものである。また、世代交代の際全ての個体が入れ替わるとは限らず、適合度の大きな個体を一定数次世代に残すことがしばしば行われる。これをエリート戦略と呼び、最適解への収束が速くなる一方、局所最適解に陥りやすいという欠点もある。



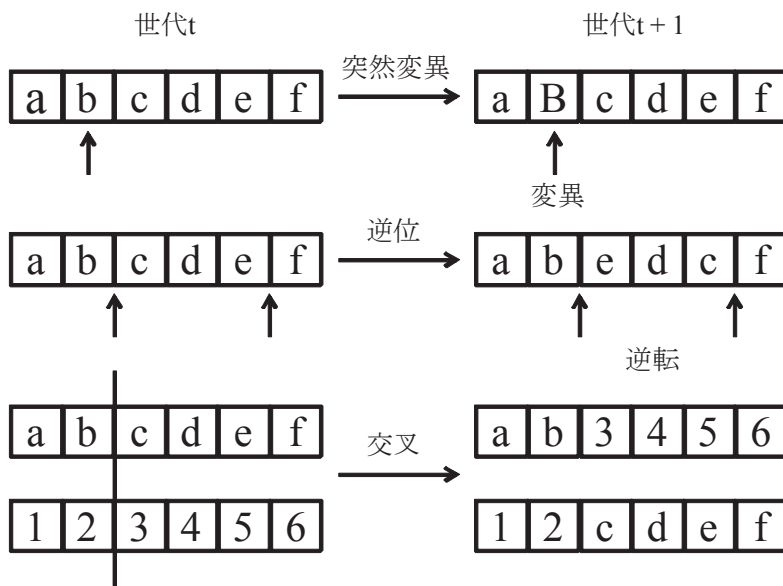


図 4-3 GA オペレータ(伊庭<sup>[14]</sup>より)

この GA が扱うデータ配列だけでなくデータ構造の変動にまでに拡張したのが Stanford 大学の John Koza である。その際採用した木構造はサイクルを持たないグラフ構造と考えることができ、配列と比較して学習や人工知能などの知識構造を表現するのに適している。Koza が遺伝的プログラミングに当初使用したのは LISP 言語であり、その後 C 言語への移植が行われた。扱うデータ構造の違いを除いて、選択や世代交代、淘汰といった基本的な考え方は GA と同じである。

数式 
$$\{[X \div (-3.7)] - X \times (2.3 + 2.0)\} \times (-1.6) \times X \times 0.071$$

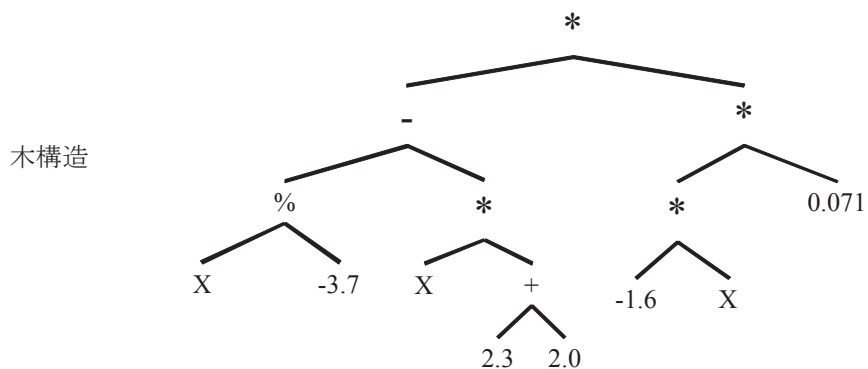


図 4-4 数式の木構造による表現の例(伊庭<sup>[15]</sup>より)

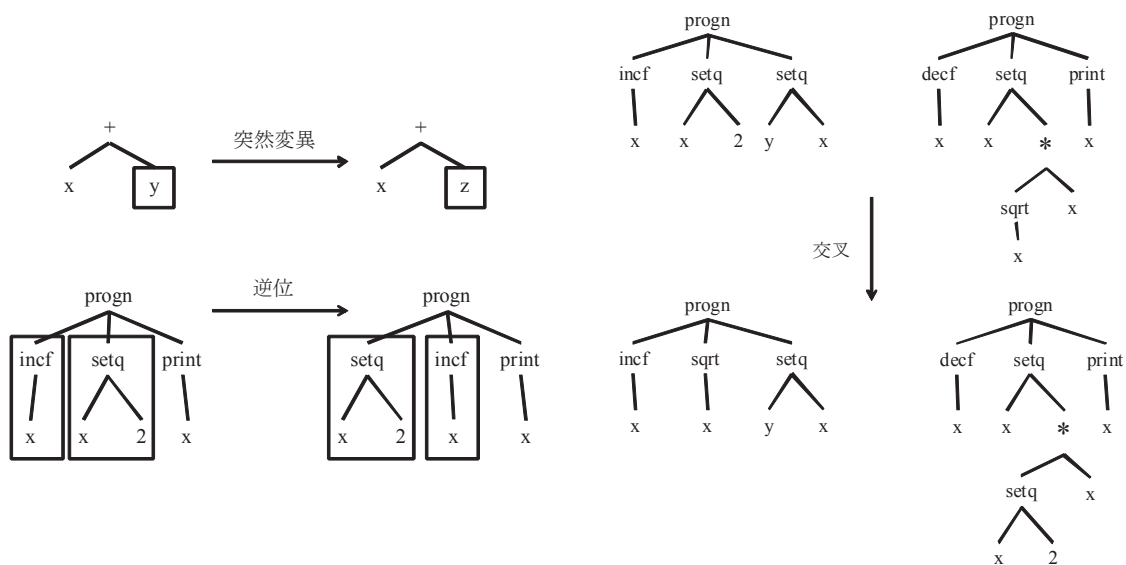


図 4-5 GP オペレータ(伊庭<sup>[15]</sup>より)

#### 4-4. 参考文献

- [1] 藤本郷史、北垣亮馬、兼松学、野口貴文、間宮尚、鈴木宏一：コンクリート関連材料分野の資源循環シミュレーション手法の開発，日本建築学会学術講演梗概集、pp.1021-1022、2005
- [2] 北垣亮馬、野口貴文、兼松学、長井宏憲、岩田彩子、藤本郷史：地域特性を考慮したコンクリートの環境性能評価手法の開発，一その2 首都圏および北海道の廃コンクリート塊処理業の実態調査を中心として一
- [3] 長井宏憲、藤本郷史、北垣亮馬、野口貴文、兼松学：コンクリート材料分野を対象とした資源循環シミュレーションシステム (ecoMA) の開発，一その4 北海道における調査概要と解析例一，日本建築学会学術講演梗概集、A-1、pp.475-476、2007
- [4] 北垣亮馬、岩田彩子、兼松学、長井宏憲、藤本郷史、野口貴文：資源循環における輸送距離に対する東京と北海道のGISによる比較，日本LCA学会研究発表会講演要旨集 No.3、pp.132-133、2008
- [5] 腰塚武志、小林純一：道路距離と直線距離，第18回日本都市計画学会学術研究発表会論文集、pp.43-48、1983
- [6] 岩田彩子、北垣亮馬、長井宏憲、兼松学、藤本郷史、野口貴文：ecoMAを用いたコンクリートの資源循環シミュレーション，一東京都と北海道のインパクト比較一，日本LCA学会研究発表会講演要旨集 No.3、pp.130-131、2008
- [7] 野口貴文、岩田彩子、兼松学、北垣亮馬、長井宏憲、藤本郷史：コンクリート材料分野を対象とした資源循環シミュレーションシステム(ecoMA)の開発，一その5 コン

クリート関連産業における CO2 排出原単位の算定一，日本建築学会学術講演梗概集、A-1、pp.1229-1230、2008

[8] 竹田真梨子、北垣亮馬、堺孝司：香川県におけるコンクリート系廃棄物フローとその環境負荷低減に関する研究，日本コンクリート工学協会年次大会論文集 pp.43-50、2008

[9] 岩田彩子、兼松学、野口貴文、長井宏憲、北垣亮馬、藤本郷史：実態調査に基づくコンクリート関連産業の CO2 排出原単位に及ぼす地域特性・工場規模の影響，日本建築学会技術報告集、Vol.16、No32、pp.43-48、2010

[10] 山岸英輝、三谷卓摩、北垣亮馬、長井宏憲、野口貴文、藤本郷史、兼松学：ecoMA を用いたコンクリートの資源循環シミュレーション，一混和材料を含めたコンクリート関連産業の環境性能評価の研究一，日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 No.5、pp.152-153、2010

[11] 三谷卓摩、北垣亮馬、長井宏憲、野口貴文、藤本郷史、兼松学：実道路ネットワークを考慮した地域別 CO2 排出量算出のためのシミュレーションシステムの開発，日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 No.5、pp.148-149、2010

[12] 三谷卓摩、北垣亮馬、長井宏憲、野口貴文：複数輸送手段を考慮した資源循環シミュレータ ecoMA の拡張によるコンクリート産業の CO2 排出量評価，日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 No.6、pp.232-233、2011

[13] 陳曉榮、時永祥三：共進化 GP を用いたマルチエージェントシステムの構成とその人口市場分析への応用，電気情報通信学会論文誌 A Vol.J86-A No.10 pp.1038-1048、2003

[14] 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎-GA の謎を解，オーム社、1994

[15] 伊庭斉志：遺伝的プログラミング，東京電機大学出版局、1996

## 5. シミュレータへの遺伝的プログラミングの適用可能性の検証

### 5-1. 蟻の餌集めモデル Ant

Ant の GP 部分を除く基本的な動作については伊庭<sup>[5]</sup>の著書を参考とした。この問題は次のようなものである。図 5-1 に示すような 32×32 のマス目上に 89 か所の餌(図の灰色部分)がある。この中で人工蟻は自分の限られたエネルギーの範囲内で餌の探索ができる。人工蟻は向きを変えつつ前方に 1 歩ずつ進む。斜めには進めない。また、壁を越えて進むことはできない。人工蟻はセンサを持ち、自分の前方に餌があるか否かが分かる。人工蟻は動作を行うたびにエネルギーを 1 単位消費する。エネルギーは 400 と有限なので、人工蟻はできるだけ効率的に餌を探索する必要がある。ただし、人工蟻は左上の(0, 0)のマスから出発する。

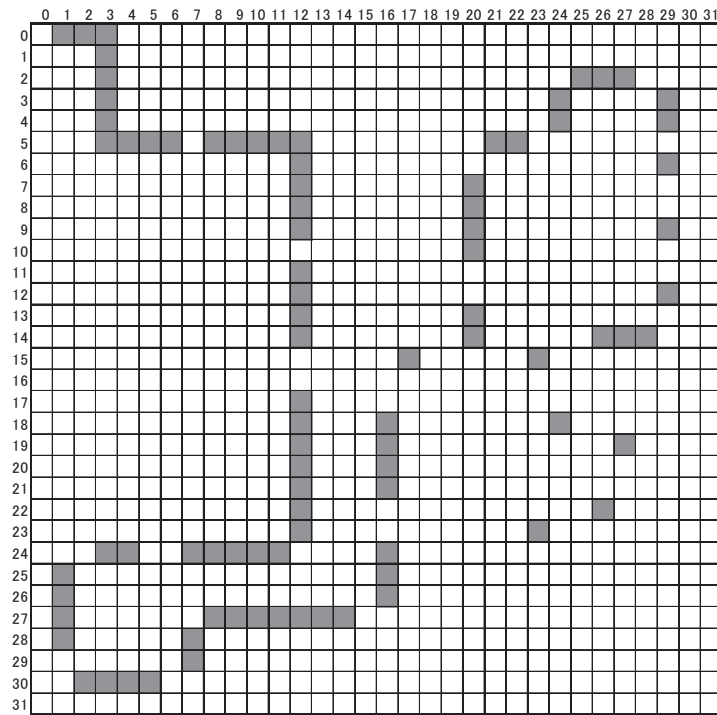


図 5-1 Ant の世界

## 5-2. ポーランド記法とスタックカウント

GP 部分の設計は徳井ら<sup>[2]</sup>の研究を参考とした。彼らの研究はそれまで C 言語で構築された GP システムの多くがポインタで表現された木構造を遺伝子として扱うのに対し、配列のようなリニアな遺伝子を扱うことを可能とするものであり(LGPC : Linear GP System in C), これと同じ方式を採用することとした。

LGPC において要となるのがポーランド記法とスタックカウントという概念である。ポーランド記法とは引数の前に関数を書く数式の記述方法であり、例えば図 5-2 のようになる。

$$\begin{array}{cccccccccccccccc}
 * & - & \% & X & (-3.7) & * & X & + & 2.3 & 2.0 & * & * & (-1.6) & X & 0.071 \\
 -1 & -2 & -3 & -2 & -1 & -2 & -1 & -2 & -1 & 0 & -1 & -2 & -1 & 0 & 1
 \end{array}$$

図 5-2 ポーランド記法数式とスタックカウント

スタックカウントとは、ポーランド記法の式を左から読んで行った際に、終端ノード(木構造の枝の先に当たる部分に来るノード)では+ 1、非終端ノード(木構造の枝分かれの根本に来るノード、n 項演算子)では+1-n した合計の数のことで、木構造全体、また部分木の先頭から末尾までの合計が必ず 1 になることが知られている。これによって、リニアな遺伝子でも木構造を扱うことができるようになるのである。

表 5-1 Ant で用いたノード記号

| ノード記号の数 | 6                           |               |      |
|---------|-----------------------------|---------------|------|
| ID      | 説明                          | 名前            | 引数の数 |
| 0       | 目前に餌があるとき第1引数、ないとき第2引数を実行する | If_Food_Ahead | 2    |
| 1       | 第1,2引数を順に実行                 | PROG2         | 2    |
| 2       | 第1,2,3引数を順に実行               | PROG3         | 3    |
| 3       | 右に90° 向きを変える                | RIGHT         | 0    |
| 4       | 左に90° 向きを変える                | LEFT          | 0    |
| 5       | 一步前に進む                      | FORWARD       | 0    |

### 5-3. 結果と考察

以上のような設定で Ant を構築し、適合度の上昇を示したのが図 5-3 である。ただしここでは選択方式はルーレット選択とし、エリート戦略は導入しなかった。

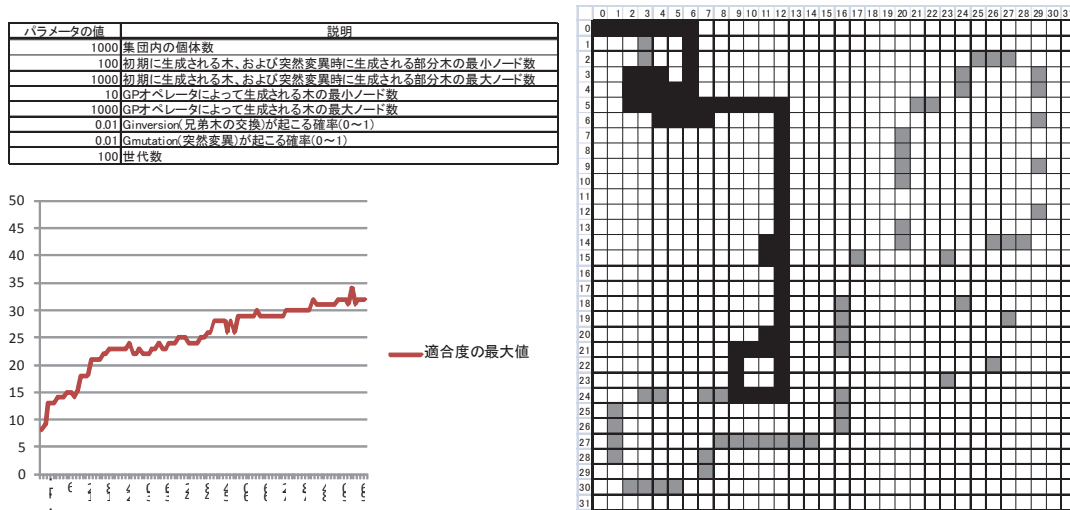


図 5-3 Ant の実行結果(最大ノード数 1000)

世代を重ねるごとに人工蟻が学習し適合度が上昇していく様子が分かるであろう。

追記として、木構造の最大ノード数を増やした結果も示しておく。最大ノード数を増やすことで適合度の上昇が速くなるものの、89 箇所の餌を集めきって最適解に到達することはなかった。

| パラメータの値 | 説明                                 |
|---------|------------------------------------|
| 1000    | 集団内の個体数                            |
| 100     | 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最小ノード数 |
| 1000    | 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最大ノード数 |
| 10      | GPオペレータによって生成される木の最小ノード数           |
| 5000    | GPオペレータによって生成される木の最大ノード数           |
| 0.01    | Gi(nversion(兄弟木の交換)が起こる確率(0~1))    |
| 0.01    | Gm(utation(突然変異)が起こる確率(0~1))       |
| 100     | 世代数                                |

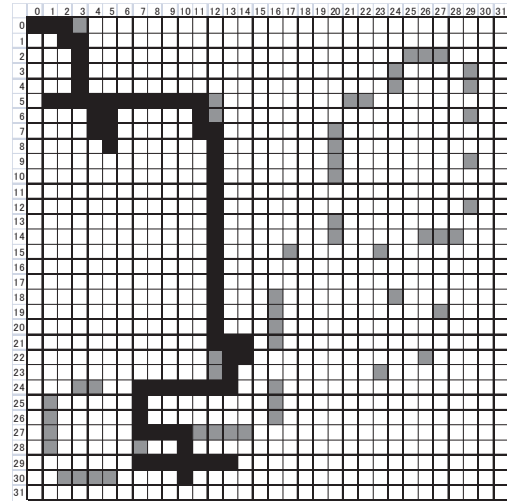
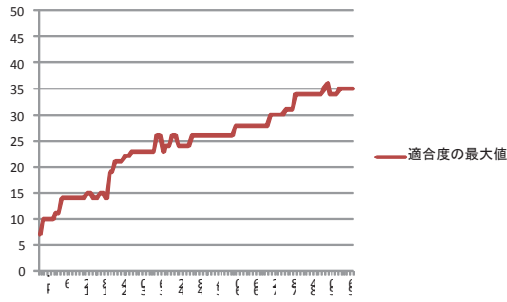


図 5-4 Ant の実行結果(最大ノード数 5000)

| パラメータの値 | 説明                                 |
|---------|------------------------------------|
| 1000    | 集団内の個体数                            |
| 100     | 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最小ノード数 |
| 1000    | 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最大ノード数 |
| 10      | GPオペレータによって生成される木の最小ノード数           |
| 10000   | GPオペレータによって生成される木の最大ノード数           |
| 0.01    | Gi(nversion(兄弟木の交換)が起こる確率(0~1))    |
| 0.01    | Gm(utation(突然変異)が起こる確率(0~1))       |
| 100     | 世代数                                |

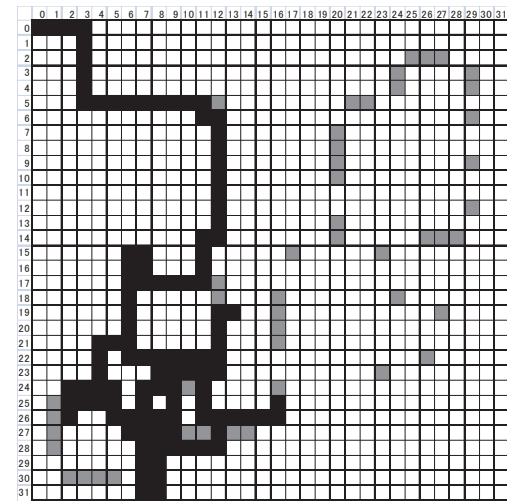
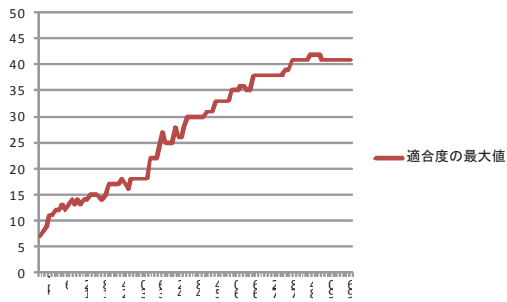


図 5-5 Ant の実行結果(最大ノード数 10000)

## 5-4. シミュレーションモデルへの組み込み

### (1) シミュレーション全体の流れ

前章より、GP の本研究への適用が可能であることが確認されたので、いよいよ進化的手法を用いたマルチエージェントシステムの構築を行う。このシステム全体の流れは次のようになっている。

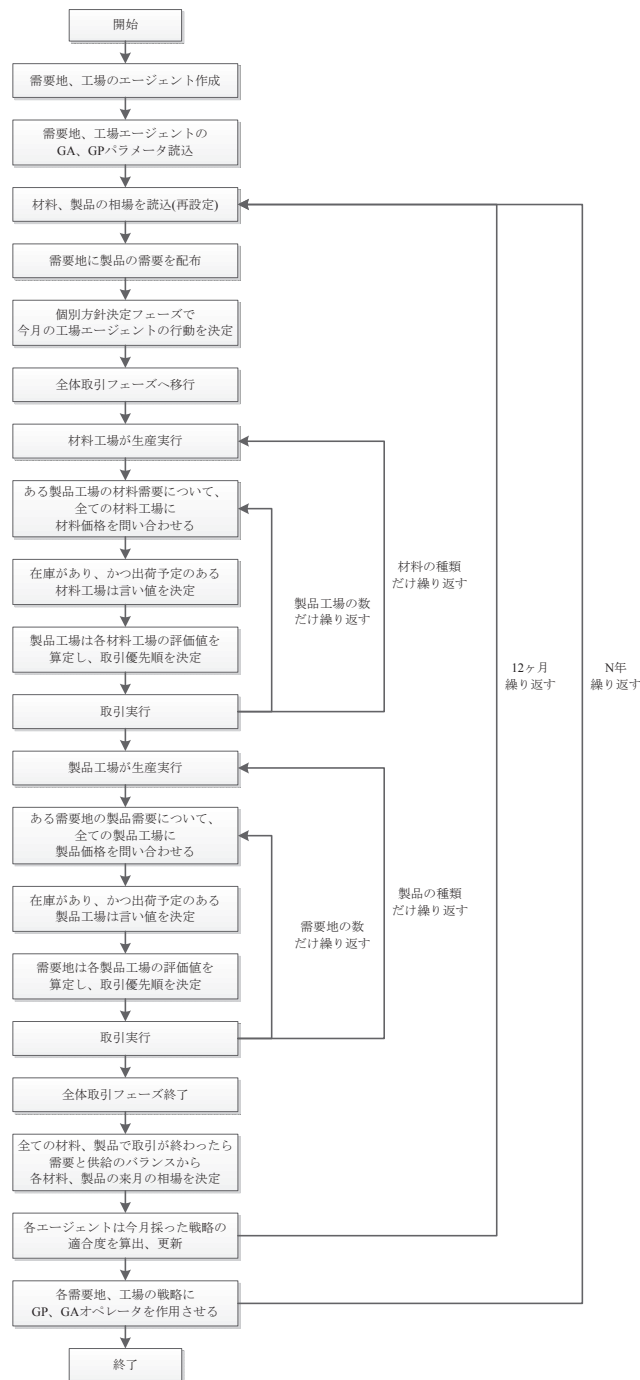


図 5-6 シミュレーション全体の流れ

今回のシミュレータでは、コンクリート系廃棄物を中心とするがれきの撤去を中心とするので、今回は、GPを組み込む際に、まずコンクリート産業への組み込みを基本に行った。具体的には材料として、セメント、砕石、砂を指し、生コンを想定しておくものとし、まず個別方針決定フェーズで工場エージェントがGPによってその月の生産予定量、出荷予定量、入荷予定量を決定する。このGPにおいて工場は材料、製品の相場

や在庫量によって行動を変化させる。各工場の GP におけるノード記号は表 4-1 のようになる。単位量はその工場の最大生産量の 1/10 を基準とした。例えば生コン工場のノード記号 Receive\_Coarse\_Aggregate では、最大生産量の 1/10 を生産するのに必要な碎石の量を入荷するといった具合である。碎石工場においては、碎石と砂は同時に生産されその後分級して出荷されるものであるため、碎石と砂の生産量比率を定めて同時に生産されるものとした。

表 5-2 各工場の GP におけるノード記号

・生コン工場

| ノード記号の数 | 11                                    |                          |      |
|---------|---------------------------------------|--------------------------|------|
| ID      | 説明                                    | 名前                       | 引数の数 |
| 0       | 先月比で生コンの価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する   | If_Month_Concrete_Price  | 2    |
| 1       | 前年同期比で生コンの価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する | If_Year_Concrete_Price   | 2    |
| 2       | 先月比で生コンの在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する     | If_Month_Concrete_Stock  | 2    |
| 3       | 前年同期比で生コンの在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する   | If_Year_Concrete_Stock   | 2    |
| 4       | p1、p2を順に実行する                          | PROG2                    | 2    |
| 5       | p1、p2、p3を順に実行する                       | PROG3                    | 3    |
| 6       | 生コンを単位量生産する                           | Produce_Concrete         | 0    |
| 7       | 生コンを単位量出荷する                           | Ship_Concrete            | 0    |
| 8       | セメントを単位量入荷する                          | Receive_Cement           | 0    |
| 9       | 碎石を単位量入荷する                            | Receive_Coarse_Aggregate | 0    |
| 10      | 砂を単位量入荷する                             | Receive_Fine_Aggregate   | 0    |

・セメント工場

| ノード記号の数 | 8                                      |                       |      |
|---------|----------------------------------------|-----------------------|------|
| ID      | 説明                                     | 名前                    | 引数の数 |
| 0       | 先月比でセメントの価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する   | If_Month_Cement_Price | 2    |
| 1       | 前年同期比でセメントの価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する | If_Year_Cement_Price  | 2    |
| 2       | 先月比でセメントの在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する     | If_Month_Cement_Stock | 2    |
| 3       | 前年同期比でセメントの在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する   | If_Year_Cement_Stock  | 2    |
| 4       | p1、p2を順に実行する                           | PROG2                 | 2    |
| 5       | p1、p2、p3を順に実行する                        | PROG3                 | 3    |
| 6       | セメントを単位量生産する                           | Produce_Cement        | 0    |
| 7       | セメントを単位量出荷する                           | Ship_Cement           | 0    |

・碎石工場

| ノード記号の数 | 13                                   |                                 | 碎石と砂の生産量比率(碎石/砂) | 1.3975 |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------|--------|
| ID      | 説明                                   | 名前                              | 引数の数             |        |
| 0       | 先月比で碎石の価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する   | If_Month_Coarse_Aggregate_Price | 2                |        |
| 1       | 前年同期比で碎石の価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する | If_Year_Coarse_Aggregate_Price  | 2                |        |
| 2       | 先月比で碎石の在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する     | If_Month_Coarse_Aggregate_Stock | 2                |        |
| 3       | 前年同期比で碎石の在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する   | If_Year_Coarse_Aggregate_Stock  | 2                |        |
| 4       | 先月比で砂の価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する    | If_Month_Fine_Aggregate_Price   | 2                |        |
| 5       | 前年同期比で砂の価格が上がった場合はp1、下がった場合はp2を実行する  | If_Year_Fine_Aggregate_Price    | 2                |        |
| 6       | 先月比で砂の在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する      | If_Month_Fine_Aggregate_Stock   | 2                |        |
| 7       | 前年同期比で砂の在庫が増えた場合はp1、減った場合はp2を実行する    | If_Year_Fine_Aggregate_Stock    | 2                |        |
| 8       | p1、p2を順に実行する                         | PROG2                           | 2                |        |
| 9       | p1、p2、p3を順に実行する                      | PROG3                           | 3                |        |
| 10      | 碎石・砂を単位量生産する                         | Produce_Aggregate               | 0                |        |
| 11      | 碎石を単位量出荷する                           | Ship_Coarse_Aggregate           | 0                |        |
| 12      | 砂を単位量出荷する                            | Ship_Fine_Aggregate             | 0                |        |

次に全体取引フェーズに移る。ここではある製品、材料を入荷予定のエージェントがそれを出荷予定のエージェントすべてに発注をかける。そして発注を受けたエージェントはその製品、材料の言い値を返し、発注側はその言い値に対する評価値を定め、最も評価値が高かった工場との間で取引が成立する。実際の取引において、言い値はエージェントどうしの過去の取引回数が多いほど、またその取引の発注量が多いほど安くなるはずである。またその言い値に対する評価値も過去の取引回数が多いほど高くなる、つ



まり発注先として選択されやすくなるはずである。そういった商慣行を再現するため、次節で説明するように言い値と評価値の算定方法を決定した。そしてその算定に使用されるパラメータは工場ごとに GA で学習するものとした。その取引の結果得られた利益、残った在庫量などに応じてその月の戦略の適合度が定まるはずである。これについては次節で説明する。

さて、ここで2つの問題が発生する。1つ目は GP、GA という2つの進化論的手法を用いるにも関わらず、適合度が1つしか定まらないことである。これについては、GP、GA で共通の適合度を使用することとした。また2つ目は全ての戦略について適合度を算出することが不可能であるということである。一般的に GP、GA では全ての戦略について適合度を算出することが可能である。陳ら<sup>[1]</sup>の研究や Ant ではそれが可能であった。しかし、多対多のエージェントの取引をシミュレーションする本研究では、その月に選択した戦略に対してしか適合度を算出することができない。そこで筆者は今回仮の適合度という概念を実験的に導入することとした。これは適合度の高い親からは適合度の高い子が生まれるはずという予測に基づいている。具体的には、突然変異、逆位で生成される子は親の適合度をそのまま受け継ぎ、交叉によって生成される子は2つの親の適合度を足して2で割ったものとした。

全体取引フェーズが終了すると、最後に GP、GA の操作と相場の変動とが起こる。GP、GA の操作、相場の変動については陳ら<sup>[1]</sup>の研究になった。

$$P_{t+1} = P_t \left( 1 + \alpha \tanh \frac{V_t^{demand} - V_t^{supply}}{V_t^{demand}} \right)$$

$P_{t+1}$  : 来月の相場

$P_t$  : 今月の相場

$V_t^{demand}$  : その製品、材料の全体での需要量

$V_t^{supply}$  : その製品、材料の全体での供給量

つまり、需要量が多いほど相場は上がり、供給量が多いほど相場は下がる。その変動を変数  $\alpha$  が決定するとした。

## (2) 言い値と評価値の算定

### (6) 言い値の算定

全体取引フェーズで行われる取引について、例えば生コンの取引について見てみることにする。生コンの買い手である需要地は出荷予定のあるすべての生コン工場に対して需要量を発注する。それに対して売り手である各生コン工場は生コンの単価、すなわち言い値を算定し、需要地に返す。そして需要地はその言い値に基づいて各生コン工場の

評価値を算定し、最も高い評価値を持った生コン工場から生コンを入荷する。

以上のような取引において、言い値と評価値を定める式を以下で決定する。まず言い値であるが、これに影響するパラメータは生コンの相場、発注量、そして過去の取引回数であろう。相場が上がれば当然言い値も上がるし、発注量が多ければ規模の経済が働き言い値は下がる。また、過去の取引回数の多い得意先に対しては言い値が下がるであろう。以上を定式化すると次のようになる。

$$P^{asked} = P^{market} \times \left\{ 1 - a \times (V^{ordered} - V_0^{ordered}) - b \times (N^{history} - N_0^{history}) \right\} + P^{transport}$$

$P^{asked}$  : 言い値

$P^{market}$  : 相場

$P^{transport}$  : 輸送コスト

$V^{ordered}$  : 発注量

$N^{history}$  : 過去の取引回数

$a, b$  : パラメータ重みづけ変数

$V_0^{ordered}, N_0^{history}$  : パラメータの閾値

但し輸送コストは出荷側が負担すると仮定している。式 1-1 において  $V^{ordered}$ 、 $N^{history}$  を正規化すると、

$$P^{asked} = P^{market} \times \left\{ 1 - a \times \frac{V^{ordered} - V_0^{ordered}}{V_0} - b \times \frac{N^{history} - N_0^{history}}{N} \right\} + P^{transport}$$

$V_0$  : 発注量を正規化する変数

$N$  : 総ターン数

ここで、 $\frac{a}{V_0}$  は 1 つの変数にまとめられる。また、 $N_0^{history}$  の最適値が  $N$ 、 $N^{history}$  の増加に

よって変化すると不都合なので、

$$P^{asked} = P^{market} \times \left\{ 1 - \frac{V^{ordered} - V_0^{ordered}}{V_0} - k \left( \frac{N^{history}}{N} - n \right) \right\} + P^{transport}$$

$k$  : パラメータ重みづけ変数

$n$  : パラメータの閾値

と変形し、これを最終的な言い値の式とする。GA パラメータは  $V_0^{ordered}$ 、 $V_0$ 、 $k$ 、 $n$  の 4 つである。また、式 1-3 はセメント、砕石、砂といった他の材料の取引についても適用可能である。

$V^{ordered}$ 、 $N^{history}/N$  を変化させた時の  $P^{asked}$  の変化を表現したグラフを次に示す。発注量が増えるほど、また過去の取引回数が多いほど言い値が下がる様子が分かるであろう。

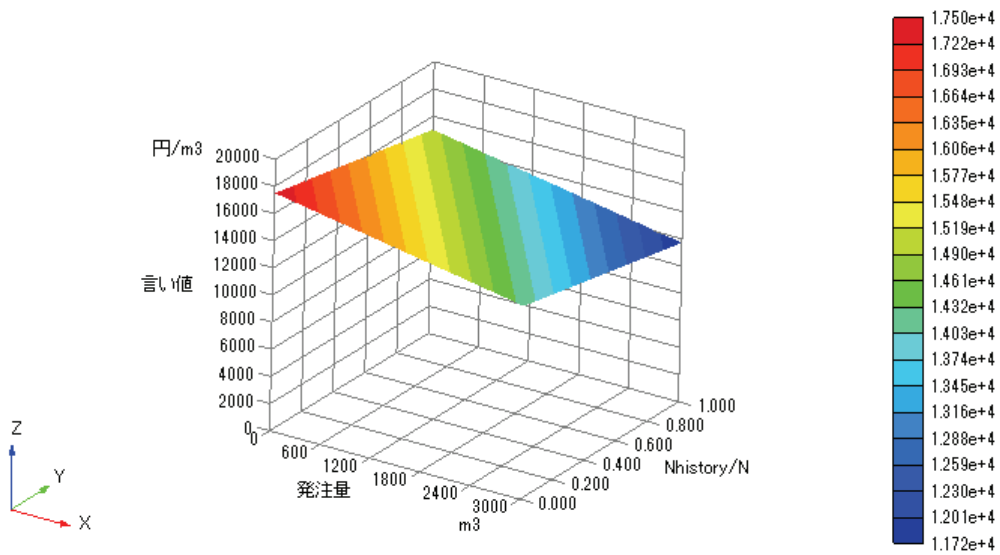


図 5-7 発注量、過去の取引回数に伴う言い値の変化

### (7) 評価値の算定

次に、需要地が入荷する生コン工場を選択する際の評価値を定式化する。これに影響するパラメータは言い値、過去の取引回数である。言い値が安いほど、また過去の取引回数が多いほど評価値は高まると考えられるので、

$$E = P^{market} - P^{asked} + l \times \frac{N^{history}}{N}$$

$E$ : 評価値

$l$ : パラメータの重みづけ変数

のように表される。GA パラメータは  $l, N^{history}$  の 2 つであり、式 1-4 も式 1-3 と同様セメント、砕石、砂といった他の材料の取引にも適用可能である。

### (3) 適合度の算定

#### (1) 工場エージェントの適合度

経済主体の戦略に進化論的手法を適用しようとするとき、その適合度はその戦略によって得られた利潤であろう。ただしここでは法的、経済的な利潤の定義とその網羅的な内容を考えることはせず、工場という経済主体について本シミュレーション手法で評価し得る重要な利潤についてのみ議論する。まず利潤を金銭的なものと物的なものに分けると、前者を営業利益、後者を資産の増分と呼ぶことができるであろう。そして、営業利益は製品を販売して得た売上高から、変動費と固定費を除いたものがある。変動費と

は稼働率の向上に応じて一定比率で増大するコストのことで、固定費とは稼働率にかかわらず設備を持つことによって常にかかるコストである。それぞれ詳細に内訳を考えると図 5-8 のようになる。ここで労務費は加工費の一部として考える。また、いわゆる財テクなどの資産運用は工場にとって主たる経済活動ではないとして除外した。

$$(\text{適合度}) = (\text{営業利益}) + (\text{資産の増分})$$

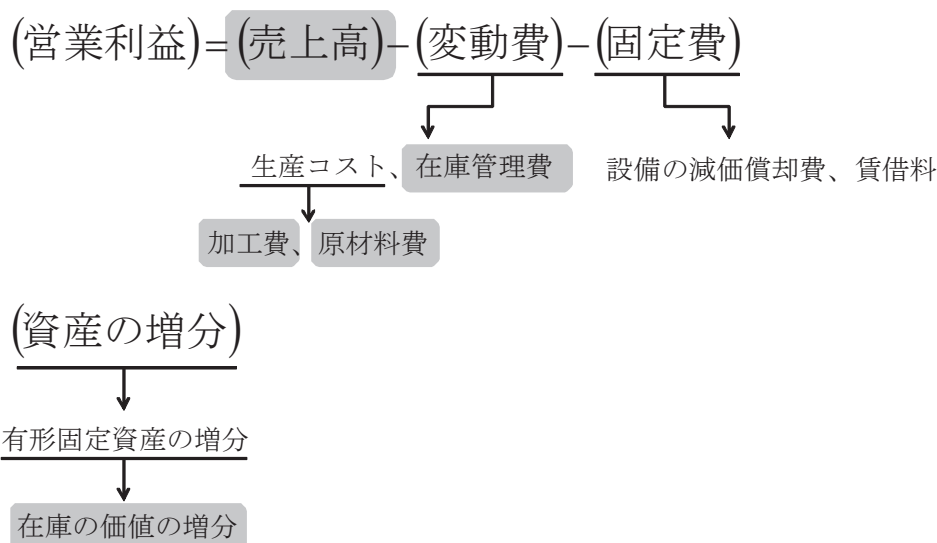


図 5-8 適合度の決定

ここで売上高、加工費、原材料費、在庫管理費、在庫の価値の増分の 5 つを適合度の決定項目として採用した。これらにスケーリングを行い、選択がスムーズに進むよう調整する必要がある。

$$\begin{aligned}
 (\text{適合度 } F) &= (\text{売上高}) - (\text{加工費}) - (\text{原材料費}) \\
 &\quad - (\text{在庫管理費}) + (\text{在庫の価値の増分}) \\
 &= f_1(X_1) - f_2(X_2) - f_3(X_3) - f_4(X_4) + f_5(X_5)
 \end{aligned}$$

$X_1$  : 売上高の正規化値

$X_2$  : 加工費の正規化値

$X_3$  : 原材料費の正規化値

$X_4$  : 在庫管理費の正規化値

$X_5$  : 在庫価値の増分の正規化値

である。各項目の正規化値に重みづけ関数を作用させ足し合わせることで適合度を算出する。以下各論に入る。

## (2) 生コン工場の適合度

売上高の正規化値  $X_1$  は

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{asked\_concrete}} \times V_i^{\text{ship\_concrete}})}{P^{\text{market\_concrete}} \times V^{\text{max\_produce\_concrete}}}$$

$n$ : 需要地との取引回数

$P_i^{\text{asked\_concrete}}$ : 取引  $i$  での生コンの言い値

$P^{\text{market\_concrete}}$ : 生コンの相場

$V_i^{\text{ship\_concrete}}$ : 取引  $i$  での生コンの出荷量

$V^{\text{max\_produce\_concrete}}$ : 生コンの最大生産量

とする。 $X_1$  の値域は  $X_1 \geq 0$  であるが、およそ  $0 \leq X_1 \leq 1$  の値をとるようにパラメータを調整してある。ここで関数  $f_1$  を定めるわけだが、 $X_1 = 0$  で  $f_1(X_1) = 0$ 、 $X_1 = 1$  で  $f_1(X_1) \approx 1$  となるような、かつ  $X_1 \rightarrow +\infty$  のとき  $f_1(X_1) \rightarrow 1$  となるような関数が望ましい。

そのためにシグモイド関数  $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$  を利用する。ゲイン  $a$  を変化させたときのシグモイド関数の変化を次に示す。

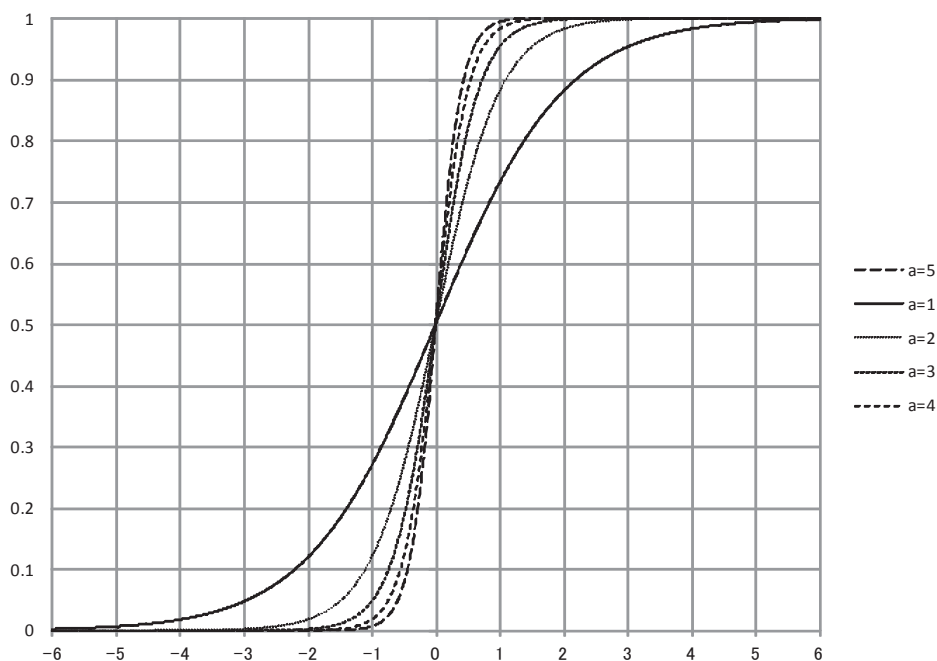


図 5-9 ゲイン  $a$  を変化させたときのシグモイド関数  $\sigma$  の変化

この関数を利用して  $f_1$  を定め、

$$f_1(X_1) = \frac{2}{1 + e^{-3X_1}} - 1$$

とする。図 5-10 から分かる通り、 $f_1(X_1)$ の値域は $0 \leq f_1(X_1) < 1$ である。

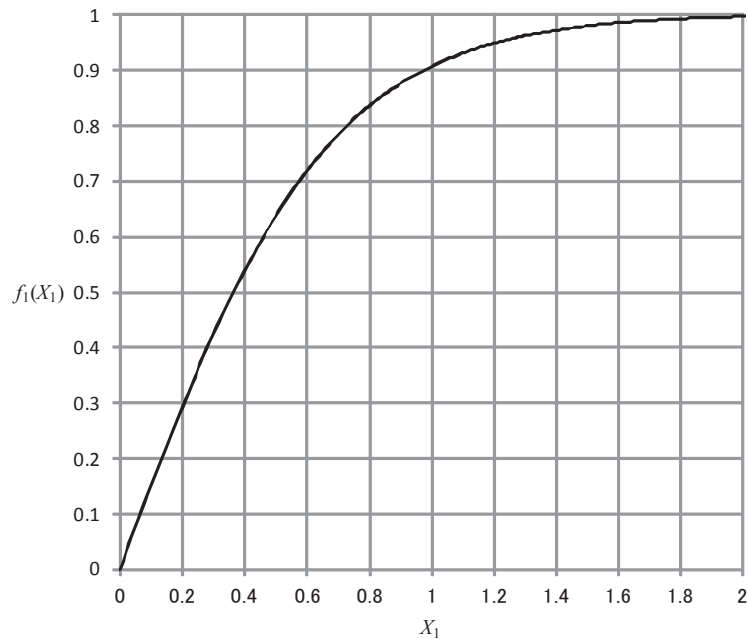


図 5-10  $f_1(X_1)$ の値の変化

加工費の正規化値  $X_2$  は

$$\begin{aligned} X_2 &= \frac{P^{\text{market\_concrete}} \times c \times V^{\text{produce\_concrete}}}{P^{\text{market\_concrete}} \times V^{\text{max\_produce\_concrete}}} \\ &= c \times \frac{V^{\text{produce\_concrete}}}{V^{\text{max\_produce\_concrete}}} \end{aligned}$$

$V^{\text{produce\_concrete}}$  : 生コンの生産量

$c$  : 生コンを単位量生産するための加工費の、  
製品単価に対する割合

とする。ここで注意すべきは  $c$  で、一般的に工場の稼働率が上がるほど単位当たり加工

費が低下する現象がみられる。これを稼働効果と呼ぶが、 $\alpha = \frac{V^{\text{produce\_concrete}}}{V^{\text{max\_produce\_concrete}}}$  とおくと、

$c$  が  $\alpha$  の関数であることは容易に想像できる。また、 $\alpha$  の値域は  $0 \leq \alpha \leq 1$  である。関数  $c$  が  $\alpha$  の変化に伴って  $0.25 < c \leq 0.75$  の値をとることをここで仮定すると、先述のシグモイド関数を利用して、

$$c = 0.75 - \left( \frac{1}{1 + e^{-4\alpha}} - 0.5 \right)$$

$$= 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\alpha}}$$

とする。

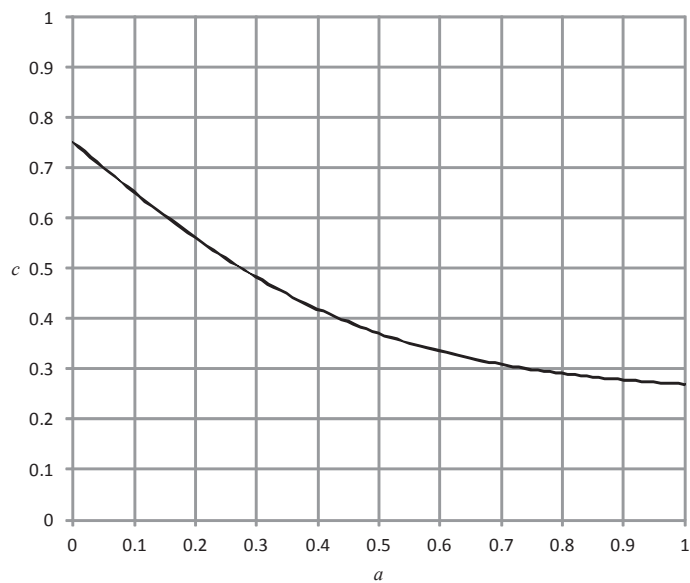


図 5-11  $c(\alpha)$ の値の変化

よって、

$$X_2 = c(\alpha) \times \alpha$$

となり、 $X_2$ の値域は図 5-12 より  $0 \leq X_2 < 0.27$  程度であることが分かる。よって

$$f_2(X_2) = 3.7 \times X_2$$

として、 $f_2$ の値域が  $0 \leq f_2(X_2) < 1$  となるようにする。

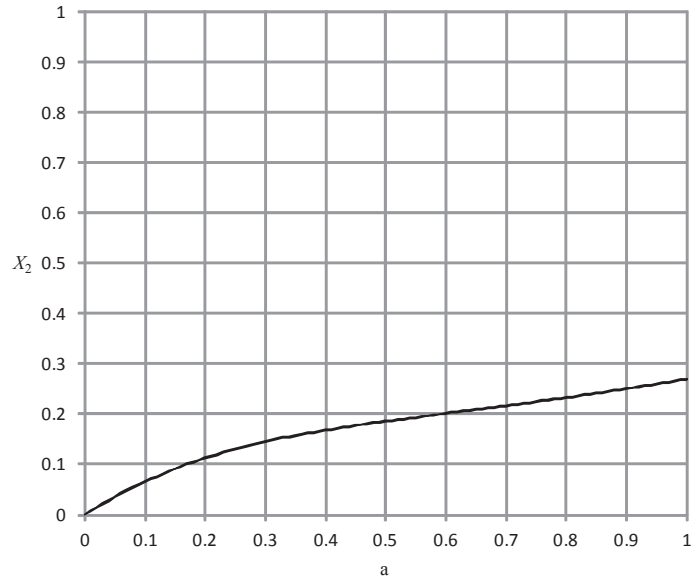


図 5-12  $X_2$  の値の変化

原材料費の正規化値  $X_3$  は

$$X_3 = \frac{A}{B}$$

$$A = \sum_{i=1}^l (P_i^{\text{asked\_cement}} \times V_i^{\text{received\_cement}}) \\ + \sum_{i=1}^m (P_i^{\text{asked\_coarse\_aggregate}} \times V_i^{\text{received\_coarse\_aggregate}}) \\ + \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{asked\_fine\_aggregate}} \times V_i^{\text{received\_fine\_aggregate}})$$

$$B = P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_storage\_cement}} \\ + P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_coarse\_aggregate}} \\ + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$



- $l$ :セメント工場との取引回数  
 $m$ :砕石工場との砕石の取引回数  
 $n$ :砕石工場との砂の取引回数  
 $P_i^{asked\_cement}$ :取引 $i$ でのセメントの言い値  
 $P_i^{asked\_coarse\_aggregate}$ :取引 $i$ での砕石の言い値  
 $P_i^{asked\_fine\_aggregate}$ :取引 $i$ での砂の言い値  
 $P^{market\_cement}$ :セメントの相場  
 $P^{market\_coarse\_aggregate}$ :砕石の相場  
 $P^{market\_fine\_aggregate}$ :砂の相場  
 $V_i^{received\_cement}$ :取引 $i$ でのセメントの入荷量  
 $V_i^{received\_coarse\_aggregate}$ :取引 $i$ での砕石の入荷量  
 $V_i^{received\_fine\_aggregate}$ :取引 $i$ での砂の入荷量  
 $V^{max\_storage\_cement}$ :セメントの最大在庫量  
 $V^{max\_storage\_coarse\_aggregate}$ :砕石の最大在庫量  
 $V^{max\_storage\_fine\_aggregate}$ :砂の最大在庫量

とする。 $X_3$  の値域は  $X_3 \geq 0$  であるが、およそ  $0 \leq X_3 \leq 0.037$  の値をとるようにパラメータを調整してある。関数  $f_3$  は、 $X_3 = 0$  で  $f_3(X_3) = 0$ 、 $X_3 = 0.037$  で  $f_3(X_3) \approx 1$  となるような、かつ  $X_3 \rightarrow +\infty$  のとき  $f_3(X_3) \rightarrow 1$  となるような関数が望ましい。よってシグモイド関数を利用して、

$$f_3(X_3) = \frac{2}{1 + e^{-80X_3}} - 1$$

とする。 $f_3(X_3)$  の値域は  $0 \leq f_3(X_3) < 1$  である。

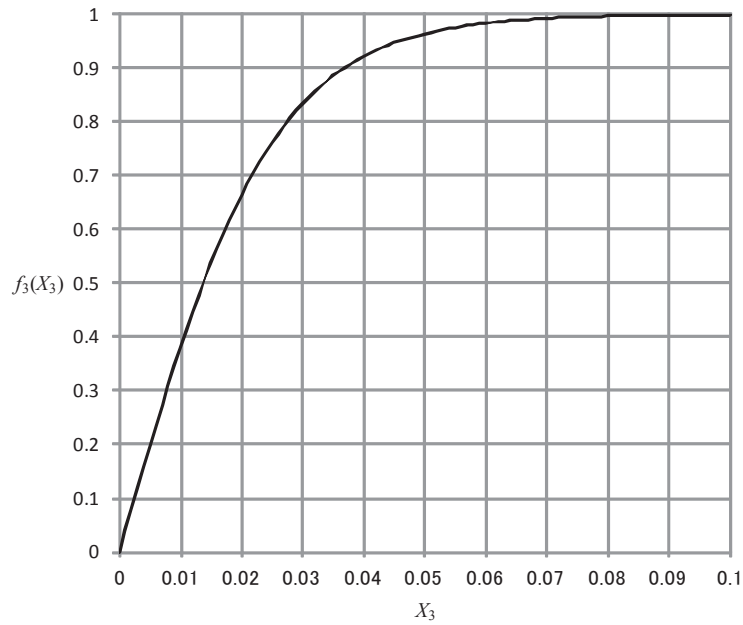


図 5-13  $f_3(X_3)$ の値の変化

これまでと同じように考えると在庫管理費の正規化値  $X_4$  は、

$$X_4 = \frac{C}{D}$$

$$\begin{aligned}
 C = & P^{\text{market\_concrete}} \times s_1 \times V^{\text{storage\_concrete}} \\
 & + P^{\text{market\_cement}} \times s_2 \times V^{\text{storage\_cement}} \\
 & + P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times s_3 \times V^{\text{storage\_coarse\_aggregate}} \\
 & + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times s_4 \times V^{\text{storage\_fine\_aggregate}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D = & P^{\text{market\_concrete}} \times V^{\text{max\_storage\_concrete}} \\
 & + P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_storage\_cement}} \\
 & + P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_coarse\_aggregate}} \\
 & + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_fine\_aggregate}}
 \end{aligned}$$

$V^{storage\_concrete}$  : 生コンの在庫量  
 $V^{storage\_cement}$  : セメントの在庫量  
 $V^{storage\_coarse\_aggregate}$  : 砕石の在庫量  
 $V^{storage\_fine\_aggregate}$  : 砂の在庫量  
 $V^{max\_storage\_concrete}$  : 生コンの最大在庫量  
 $s_1, s_2, s_3, s_4$  : それぞれ生コン、セメント、砕石、砂の  
 在庫単位量あたりの在庫管理費の、  
 製品単価に対する割合

と表せるであろう。しかし、このままでは少々扱いにくいので便宜上次のような式に変更する。

$$\begin{aligned}
 X_4 &= k \times \frac{P^{market\_concrete} \times s_1 \times V^{storage\_concrete}}{P^{market\_concrete} \times V^{max\_storage\_concrete}} \\
 &+ l \times \frac{P^{market\_cement} \times s_2 \times V^{storage\_cement}}{P^{market\_cement} \times V^{max\_storage\_cement}} \\
 &+ m \times \frac{P^{market\_coarse\_aggregate} \times s_3 \times V^{storage\_coarse\_aggregate}}{P^{market\_coarse\_aggregate} \times V^{max\_storage\_coarse\_aggregate}} \\
 &+ n \times \frac{P^{market\_fine\_aggregate} \times s_4 \times V^{storage\_fine\_aggregate}}{P^{market\_fine\_aggregate} \times V^{max\_storage\_fine\_aggregate}} \\
 &= k \times s_1 \times \frac{V^{storage\_concrete}}{V^{max\_storage\_concrete}} + l \times s_2 \times \frac{V^{storage\_cement}}{V^{max\_storage\_cement}} \\
 &+ m \times s_3 \times \frac{V^{storage\_coarse\_aggregate}}{V^{max\_storage\_coarse\_aggregate}} + n \times s_4 \times \frac{V^{storage\_fine\_aggregate}}{V^{max\_storage\_fine\_aggregate}}
 \end{aligned}$$

$k, l, m, n$  : それぞれ生コン、セメント、砕石、砂の  
 在庫管理費の重みづけ係数

$$\beta = \frac{V^{storage\_concrete}}{V^{max\_storage\_concrete}} \quad \gamma = \frac{V^{storage\_cement}}{V^{max\_storage\_cement}} \quad \delta = \frac{V^{storage\_coarse\_aggregate}}{V^{max\_storage\_coarse\_aggregate}}$$

$$\varepsilon = \frac{V^{storage\_fine\_aggregate}}{V^{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$

とすると、 $s_1, s_2, s_3, s_4$  はそれぞれ  $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  の関数であり、 $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  の値域は  $0 \leq \beta, \gamma, \delta, \varepsilon \leq 1$  である。これで各項に対して加工費の正規化値  $X_2$  を求めた際と同様の手法を用いることができる。さて、具体的に  $s_1, s_2, s_3, s_4$  を求めるのだが、生コンはセメント、砕石、砂とは違った在庫管理上の性質を持っている。よって前者を非倉庫型、後者を倉庫型と名付けて詳細に見ることにする。

生コンは在庫が劣化するリスクが非常に高い。すなわち、硬化してしまえば捨コンという廃棄物になってしまうため、在庫が積みあがるほど単位在庫管理費が高くなるはずである。よって、 $\beta = 0$  で  $s_1(\beta) = 0$ 、 $\beta = 1$  で  $s_1(\beta) \approx 1$  となるような、かつ  $\beta \rightarrow +\infty$  の

とき  $s_1(\beta) \rightarrow 1$  となるような関数が望ましい。これは図 5-10 で見た  $f_1(X_1)$  と同じ関数であると考えられるため、式 1-3 と同様シグモイド関数を利用して、

$$s_1(\beta) = \frac{2}{1 + e^{-3\beta}} - 1$$

となる。グラフは省略するが、値域は  $0 \leq s_1(\beta) < 1$  である。

$$S_1 = s_1(\beta) \times \beta$$

とすると、 $S_1$  のグラフは次のようになり、値域は  $0 \leq S_1 < 0.91$  である。

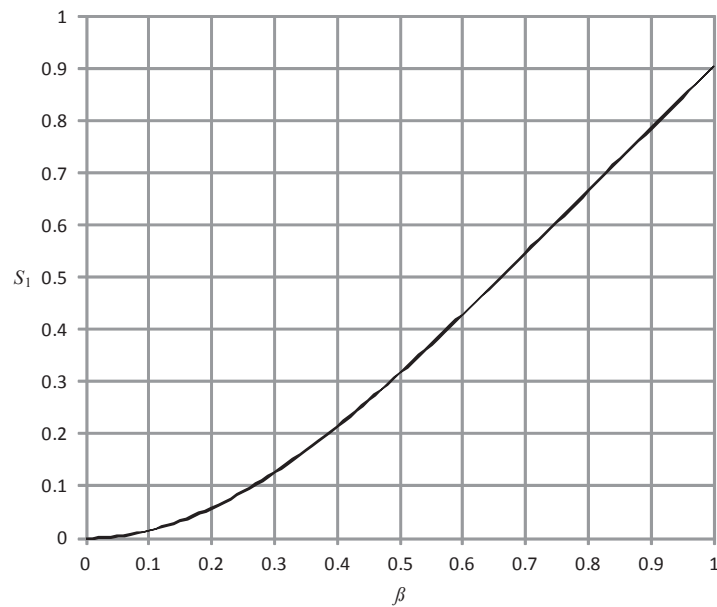


図 5-14  $S_1(\beta)$  の値の変化

次に倉庫型のセメント、碎石、砂の在庫管理費について考える。これらは生コンと比較して劣化するリスクが小さい。よって同じ倉庫なら中の在庫量が増えるほど単位在庫管理費が安くなるはずである。関数  $s_2$  が  $\gamma$  の変化に伴って  $0.25 < c \leq 0.75$  の値をとることをここで仮定すると、式 1-5 と同様に、

$$s_2 = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\gamma}}$$

と表せる。

$$S_2 = s_2(\gamma) \times \gamma$$

とすると、 $S_2$  の値域は図 5-12 より  $0 \leq S_2 < 0.27$  程度であることが分かる。

碎石、砂についてもセメントと同様にそれぞれ  $s_3, s_4, S_3, S_4$  を定めると値域は  $0 \leq S_3 < 0.27, 0 \leq S_4 < 0.27$  となる。ここで  $k, l, m, n$  の値を定めるわけだが、最終的に  $f_4(X_4)$  の値域が  $0 \leq f_4(X_4) < 1$  となるようにすると都合がよい。よって、 $S_1, S_2, S_3, S_4$  の値

域をもとに各材料均等に重みづけして、 $k = 0.27, l = 0.92, m = 0.92, n = 0.92$ 、すなわち

$$f_4(X_4) = X_4 \\ = 0.27S_1 + 0.92S_2 + 0.92S_3 + 0.92S_4$$

とする。

在庫の価値の増分の正規化値  $X_5$  は、

$$X_5 = \frac{E}{F}$$

$$E = P^{\text{market\_concrete}} \times (V^{\text{produce\_concrete}} - V^{\text{ship\_concrete}}) \\ + P^{\text{market\_cement}} \times (V^{\text{receive\_cement}} - V^{\text{produce\_concrete}} \times 0.3523) \\ + P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times (V^{\text{receive\_coarse\_aggregate}} - V^{\text{produce\_concrete}} \times 0.9953) \\ + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times (V^{\text{receive\_fine\_aggregate}} - V^{\text{produce\_concrete}} \times 0.7122) \\ F = P^{\text{market\_concrete}} \times V^{\text{max\_storage\_concrete}} + P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_storage\_cement}} \\ + P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_coarse\_aggregate}} \\ + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$

$V^{\text{ship\_concrete}}$  : 生コンの出荷量

$V^{\text{receive\_cement}}$  : セメントの入荷量

$V^{\text{receive\_coarse\_aggregate}}$  : 砕石の入荷量

$V^{\text{receive\_fine\_aggregate}}$  : 砂の入荷量

となるであろう。ただし、0.3523、0.9953、0.7122 は生コン  $1\text{m}^3$  の材料として使用されるセメント、砕石、砂の量(単位:t)である。  $X_5$  の値域は  $-1 \leq X_5 \leq 1$  であるが、概ね  $-0.1 \leq X_5 \leq 0.1$  の値をとるようにパラメータを設定してある。そのため関数  $f_5$  は、 $f_5(0) = 0$  ,  $f_5(-0.1) \approx -1$  ,  $f_5(0.1) \approx 1$  となるような、かつ  $X_5 \rightarrow -\infty$  のとき  $f_5(X_5) \rightarrow -1$  となり、  $X_5 \rightarrow +\infty$  のとき  $f_5(X_5) \rightarrow 1$  となるような関数とするのが望ましい。そこでシグモイド関数を利用して、

$$f_5(X_5) = \frac{2}{1 + e^{-30X_5}} - 1$$

と定める。 $f_5(X_5)$  のグラフは次のようになる。

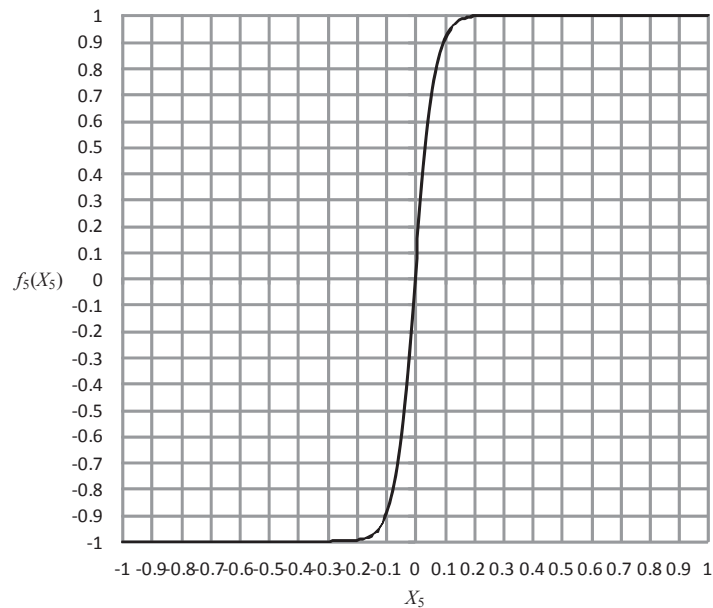


図 5-15  $f_5(X_5)$ の値の変化

図 5-15 からわかるように値域が  $-1 < f_5(X_5) < 1$  となる。

以上で生コン工場の適合度を定めるための正規化値  $X_1 \sim X_5$  と関数  $f_1 \sim f_5$  を求めたわけだが、最後にこれらを統合し適合度  $F$  を定める必要がある。しかし、式 1-1 の通りにすると計算機処理で不都合がある。というのも、ルーレット選択において適合度を正の整数の値に丸めて使用するからである。適切な選択圧を持つようここでは適合度  $F$  を、

$$F = \begin{cases} (f_1(X_1) - f_2(X_2) - f_3(X_3) - f_4(X_4) + f_5(X_5) + 2) \times 100, & \text{for } F \geq 0 \\ 0, & \text{for } F < 0 \end{cases}$$

と線形スケーリングする。

### (3) セメント工場の適合度

売上高の正規化値  $X_1$  は、

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{asked\_cement}} \times V_i^{\text{ship\_cement}})}{P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_produce\_cement}}}$$

$n$ : 生コン工場との取引回数

$V_i^{\text{ship\_cement}}$ : セメントの出荷量

$V^{\text{max\_produce\_cement}}$ : セメントの最大生産量

とする。生コン工場の場合と同様に  $f_1(X_1)$  を定め、

$$f_1(X_1) = \frac{2}{1 + e^{-3X_1}} - 1$$

とする。\$f\_1(X\_1)\$の値域は\$0 \leq f\_1(X\_1) < 1\$である。グラフは図 5-10 と同様になるので省略する。

加工費の正規化値 \$X\_2\$ は

$$\begin{aligned} X_2 &= \frac{P^{\text{market\_cement}} \times c \times V^{\text{produce\_cement}}}{P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_produce\_cement}}} \\ &= c \times \frac{V^{\text{produce\_cement}}}{V^{\text{max\_produce\_cement}}} \end{aligned}$$

\$V^{\text{produce\\_cement}}\$ : セメントの生産量

\$c\$ : セメントを単位量生産するための、加工費の、  
製品単価に対する割合

とする。生コン工場の場合と同様、稼働効果を再現するように \$c\$ を

$$c = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\alpha}}$$

と定めると、\$\alpha = \frac{V^{\text{produce\\_cement}}}{V^{\text{max\\_produce\\_cement}}}\$ として

$$X_2 = c(\alpha) \times \alpha$$

となり、

$$f_2(X_2) = 3.7 \times X_2$$

とすると、\$f\_2\$の値域が\$0 \leq f\_2(X\_2) < 1\$となる。

シミュレーションプログラムの都合上、石灰石等セメント原料はセメント工場に無限に備蓄されていると仮定しているので原材料費の正規化値 \$X\_3 = 0\$ またその関数 \$f\_3(X\_3) = 0\$ とする。

在庫管理費の正規化値 \$X\_4\$ は、

$$\begin{aligned} X_4 &= k \times \frac{P^{\text{market\_cement}} \times s \times V^{\text{storage\_cement}}}{P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_storage\_cement}}} \\ &= k \times s \times \frac{V^{\text{storage\_cement}}}{V^{\text{max\_storage\_cement}}} \end{aligned}$$

\$s\$ : セメントの在庫、単位量当たりの在庫管理費の  
製品単価に対する割合

\$k\$ : セメントの在庫管理費の重みづけ係数

とする。\$\frac{V^{\text{storage\\_cement}}}{V^{\text{max\\_storage\\_cement}}} = \beta\$ とすると、\$s\$ は \$\beta\$ の関数である。セメントは倉庫型の材料

であるから、

$$s = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\beta}}$$

として、 $k = 3.7$  とすると、

$$\begin{aligned} f_4(X_4) &= X_4 \\ &= 3.7 \times s(\beta) \times \beta \end{aligned}$$

となり、値域が  $0 \leq f_4(X_4) < 1$  となる。

在庫の価値の増分の正規化値  $X_5$  は、

$$\begin{aligned} X_5 &= \frac{P^{\text{market\_cement}} \times (V^{\text{produce\_cement}} - V^{\text{ship\_cement}})}{P^{\text{market\_cement}} \times V^{\text{max\_storage\_cement}}} \\ &= \frac{V^{\text{produce\_cement}} - V^{\text{ship\_cement}}}{V^{\text{max\_storage\_cement}}} \end{aligned}$$

$V^{\text{ship\_cement}}$ :セメントの出荷量

とする。 $X_5$ の値域は  $-1 \leq X_5 \leq 1$  であるが、およそ  $-0.1 \leq X_5 \leq 0.1$  の値をとるようにパラメータを調整してある。そこでシグモイド関数を利用して、

$$f_5(X_5) = \frac{2}{1 + e^{-30X_5}} - 1$$

とすると、値域が  $-1 < f_5(X_5) < 1$  となる。

適合度  $F$  を線形スケーリングして、

$$F = \begin{cases} (f_1(X_1) - f_2(X_2) - f_4(X_4) + f_5(X_5) + 2) \times 100, & \text{for } F \geq 0 \\ 0, & \text{for } F < 0 \end{cases}$$

とする。但し、計算機処理の都合上、適合度は正の整数の値に丸めて使用する。

#### 4.3.1. 砕石工場の適合度

売上高の正規化値  $X_1$  は、

$$X_1 = \frac{A}{B}$$

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^m (P_i^{\text{asked\_coarse\_aggregate}} \times V_i^{\text{ship\_coarse\_aggregate}}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{asked\_fine\_aggregate}} \times V_i^{\text{ship\_fine\_aggregate}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times V^{\text{max\_produce\_coarse\_aggregate}} \\ &\quad + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times V^{\text{max\_produce\_fine\_aggregate}} \end{aligned}$$



$V_i^{ship\_coarse\_aggregate}$  : 取引*i*での砕石の出荷量

$V_i^{ship\_fine\_aggregate}$  : 取引*i*での砂の出荷量

$V^{max\_produce\_coarse\_aggregate}$  : 砕石の最大生産量

$V^{max\_produce\_fine\_aggregate}$  : 砂の最大生産量

となる。 $X_1$ の値域は $X_1 \geq 0$ であるが、およそ $0 \leq X_1 \leq 1$ の値をとるようにパラメータを調整してある。よって関数 $f_1$ は生コン工場、セメント工場と同様 $X_1 = 0$ で $f_1(X_1) = 0$ 、 $X_1 = 1$ で $f_1(X_1) \approx 1$ となるような、かつ $X_1 \rightarrow +\infty$ のとき $f_1(X_1) \rightarrow 1$ となるような関数が望ましいので、

$$f_1(X_1) = \frac{2}{1 + e^{-3X_1}} - 1$$

と定めることができる。

加工費の正規化値 $X_2$ は

$$X_2 = \frac{C}{D}$$

$$C = P^{market\_coarse\_aggregate} \times c_1 \times V^{produce\_coarse\_aggregate}$$

$$+ P^{market\_fine\_aggregate} \times c_2 \times V^{produce\_fine\_aggregate}$$

$$D = P^{market\_coarse\_aggregate} \times V^{max\_produce\_coarse\_aggregate}$$

$$+ P^{market\_fine\_aggregate} \times V^{max\_produce\_fine\_aggregate}$$

$V^{produce\_coarse\_aggregate}$  : 砕石の生産量

$V^{produce\_fine\_aggregate}$  : 砂の生産量

$c_1$  : 砕石を単位量生産するための加工費の、  
製品単価に対する割合

$c_2$  : 砂を単位量生産するための加工費の、  
製品単価に対する割合

となる。ただこの式のままでは扱いが難しいので、

$$\begin{aligned} X_2 &= k \times \frac{P^{market\_coarse\_aggregate} \times c_1 \times V^{produce\_coarse\_aggregate}}{P^{market\_coarse\_aggregate} \times V^{max\_produce\_coarse\_aggregate}} \\ &+ l \times \frac{P^{market\_fine\_aggregate} \times c_2 \times V^{produce\_fine\_aggregate}}{P^{market\_fine\_aggregate} \times V^{max\_produce\_fine\_aggregate}} \\ &= k \times c_1 \times \frac{V^{produce\_coarse\_aggregate}}{V^{max\_produce\_coarse\_aggregate}} + l \times c_2 \times \frac{V^{produce\_fine\_aggregate}}{V^{max\_produce\_fine\_aggregate}} \end{aligned}$$

$k, l$  : それぞれ砕石、砂の加工費の重みづけ係数

と変形する。  $\alpha = \frac{V_{produce\_coarse\_aggregate}}{V_{max\_produce\_coarse\_aggregate}}$  ,  $\beta = \frac{V_{produce\_fine\_aggregate}}{V_{max\_produce\_fine\_aggregate}}$  とすると、稼働効  
果が働くので  $c_1, c_2$  はそれぞれ  $\alpha, \beta$  の関数である。生コン工場、セメント工場の場合と  
同様にシグモイド関数を利用して、

$$c_1 = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\alpha}}$$

$$c_2 = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\beta}}$$

とする。図 5-12 より、  $c_1(\alpha) \times \alpha$  ,  $c_2(\beta) \times \beta$  の値域はともに、  $0 \leq c_1(\alpha) \times \alpha < 0.27$  ,  
 $0 \leq c_2(\beta) \times \beta < 0.27$  程度となる。よって砕石と砂を均等に重みづけすると、  $k = l = 1.8$   
となり、

$$X_2 = 1.8 \times c_1(\alpha) \times \alpha + 1.8 \times c_2(\beta) \times \beta$$

$$f_2(X_2) = X_2$$

として、  $f_2$  の値域が  $0 \leq f_2(X_2) < 1$  となる。

シミュレーションプログラムの都合上、原石等の砕石、砂原料は砕石工場に無限に備  
蓄されていると仮定しているので原材料費の正規化値  $X_3 = 0$ 、その関数  $f_3(X_3) = 0$  で  
ある。

在庫管理費の正規化値  $X_4$  は、

$$X_4 = \frac{E}{F}$$

$$E = P_{market\_coarse\_aggregate} \times s_1 \times V_{storage\_coarse\_aggregate}$$

$$+ P_{market\_fine\_aggregate} \times s_2 \times V_{storage\_fine\_aggregate}$$

$$F = P_{market\_coarse\_aggregate} \times V_{max\_storage\_coarse\_aggregate}$$

$$+ P_{market\_fine\_aggregate} \times V_{max\_storage\_fine\_aggregate}$$

となるであろうが、扱いやすくするために

$$X_4 = m \times \frac{P_{market\_coarse\_aggregate} \times s_1 \times V_{storage\_coarse\_aggregate}}{P_{market\_coarse\_aggregate} \times V_{max\_storage\_coarse\_aggregate}}$$

$$+ n \times \frac{P_{market\_fine\_aggregate} \times s_2 \times V_{storage\_fine\_aggregate}}{P_{market\_fine\_aggregate} \times V_{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$

$$= m \times s_1 \times \frac{V_{storage\_coarse\_aggregate}}{V_{max\_storage\_coarse\_aggregate}} + n \times s_2 \times \frac{V_{storage\_fine\_aggregate}}{V_{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$

$m, n$ : それぞれ砕石、砂の在庫管理費の重みづけ係数

と変形する。  $\gamma = \frac{V_{storage\_coarse\_aggregate}}{V_{max\_storage\_coarse\_aggregate}}$  ,  $\delta = \frac{V_{storage\_fine\_aggregate}}{V_{max\_storage\_fine\_aggregate}}$  とすると、  $s_1, s_2$  はそれ

ぞれ  $\gamma, \delta$  の関数である。砕石、砂は倉庫型の材料であるから、

$$s_1 = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\gamma}}$$

$$s_2 = 1.25 - \frac{1}{1 + e^{-4\delta}}$$

として、砕石と砂を均等に重みづけすると  $m = n = 1.8$  となり、

$$X_4 = 1.8 \times s_1(\gamma) \times \gamma + 1.8 \times s_2(\delta) \times \delta$$

$$f_4(X_4) = X_4$$

となる。このとき、 $f_4$ の値域は  $0 \leq f_4(X_4) < 1$  である。

在庫の価値の増分の正規化値  $X_5$  は、

$$X_5 = \frac{G}{H}$$

$$G = P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times (V^{\text{produce\_coarse\_aggregate}} - V^{\text{ship\_coarse\_aggregate}}) \\ + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times (V^{\text{produce\_fine\_aggregate}} - V^{\text{ship\_fine\_aggregate}})$$

$$H = P^{\text{market\_coarse\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_coarse\_aggregate}} \\ + P^{\text{market\_fine\_aggregate}} \times V^{\text{max\_storage\_fine\_aggregate}}$$

$V^{\text{ship\_coarse\_aggregate}}$  : 砕石の出荷量

$V^{\text{ship\_fine\_aggregate}}$  : 砂の出荷量

とする。 $X_5$ の値域は  $-1 \leq X_5 \leq 1$  であるが、およそ  $-0.1 \leq X_5 \leq 0.1$  の値をとるようにパラメータを調整してある。そこでシグモイド関数を利用して、

$$f_5(X_5) = \frac{2}{1 + e^{-30X_5}} - 1$$

とすると、値域が  $-1 < f_5(X_5) < 1$  となる。

適合度  $F$  を線形スケールリングして、

$$F = \begin{cases} (f_1(X_1) - f_2(X_2) - f_4(X_4) + f_5(X_5) + 2) \times 100, & \text{for } F \geq 0 \\ 0, & \text{for } F < 0 \end{cases}$$

とする。但し、計算機処理の都合上、適合度は正の整数の値に丸めて使用する。

#### (4) 需要地の適合度

本シミュレーションにおいて需要地の適合度は生コンの買値であり、できるだけ小さい買値で生コンを調達するほど適合度が高いとする。買値の正規化値  $X$  を、

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{asked\_concrete}} \times V_i^{\text{receive\_concrete}})}{P^{\text{market\_concrete}} \times V^{\text{receive\_concrete}}}$$

$V_i^{receive\_concrete}$  :取引*i*での生コンの入荷量

$V^{receive\_concrete}$  :生コンの入荷量

とする。 $X$ の値域は $X \geq 0$ であるが、およそ $0.8 \leq X \leq 1.2$ の値をとるとようにパラメータが設定してある。この値が小さいほど適合度が大きくなるので、関数  $f(X)$ は  $f(0.8) \approx 1$ ,  $f(1) = 0.5$ ,  $f(1.2) \approx 0$ ,  $X \rightarrow 0$ で  $f(X) \rightarrow 1$ ,  $X \rightarrow +\infty$ で  $f(X) \rightarrow 0$ となるように定めるのが望ましい。よってシグモイド関数を利用して、

$$f(X) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-10(X-1)}}$$

とする。

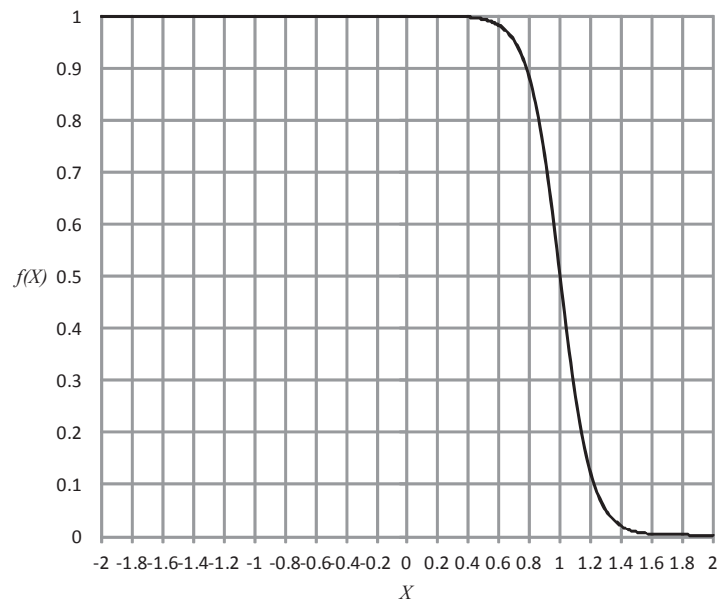


図 5-16  $f(X)$ の値の変化

ここで線形スケールリングを適用して適合度  $F$ を次のように定め、適切な選択圧を持つようにする。

$$F(X) = f(X) \times 100$$

## 5-5. シミュレーション結果

### (1) シミュレーションの条件

財団法人経済調査会発行の積算資料(2011年10月)[1]より、各材料、製品の初期相場

を次のように定めた。

表 5-3 各材料、製品の初期相場

| material name | 生コン              | セメント | 砕石   | 砂    | 運搬費用   |
|---------------|------------------|------|------|------|--------|
| unit          | 円/m <sup>3</sup> | 円/t  | 円/t  | 円/t  | 円/t・km |
| 初期相場          | 12500            | 9900 | 2120 | 2380 | 64     |

また、各需要地、工場の GP、GA パラメータを次のように定めた。需要地は GA 遺伝子の要素が 1 つしかないため交叉が起こる確率は設定しなかった。

表 5-4 各需要地、工場の GP、GA パラメータ

・ GPパラメータ

| 説明                                 | 生コン工場 | セメント工場 | 砕石工場 |
|------------------------------------|-------|--------|------|
| 集団内の個体数                            | 20    | 20     | 20   |
| 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最小ノード数 | 20    | 8      | 12   |
| 初期に生成される木、および突然変異時に生成される部分木の最大ノード数 | 100   | 40     | 60   |
| GPオペレータによって生成される木の最大ノード数           | 200   | 80     | 120  |
| Gcrossover(交叉)が起こる確率(0~1)          | 0.6   | 0.6    | 0.6  |
| Ginversion(逆位)が起こる確率(0~1)          | 0.05  | 0.05   | 0.05 |
| Gmutation(突然変異)が起こる確率(0~1)         | 0.05  | 0.05   | 0.05 |

・ GAパラメータ

| 説明                         | 需要地 | 生コン工場 | セメント工場 | 砕石工場 |
|----------------------------|-----|-------|--------|------|
| 集団内の個体数                    | 20  | 20    | 20     | 20   |
| Gcrossover(交叉)が起こる確率(0~1)  | -   | 0.6   | 0.6    | 0.6  |
| Gmutation(突然変異)が起こる確率(0~1) | 0.4 | 0.05  | 0.05   | 0.05 |

また相場変動の式 4-1 の  $\alpha$  の値は 0.1 とした。生コンの調合は JASS5<sup>[2]</sup>を基に設計基準強度 18N/mm<sup>2</sup>のコンクリートとした。シミュレーション期間は 10 年とした。

エージェントは 2 通りの入力を行った。まず 1 通り目は、東京都周辺で適当に設定したテストデータである。100 個の需要地、3 個の生コン工場、2 個のセメント工場、2 個の砕石工場を配置した。生コンの総需要量は何度かシミュレーションを回した結果を見ながら 7000m<sup>3</sup>と定めた。

2 通り目は東京都周辺の実データである。需要地エージェントは東京都、生コン工場エージェントは東京都所在の生コン工場、セメント工場エージェントは関東地方全体のセメント工場、砕石工場は関東 1 都 3 県(東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県)の砕石工場とした。生コン工場を東京都所在のものに限ったのは、生コンは 50km という輸送距離制限があるためである。砕石工場はそれと比べると比較的高範囲に出荷される傾向があるが、製品価格と比較して輸送費が高つくためセメントよりは狭い範囲の工場に限定した。実データをもとにして、1471 個の需要地エージェント、139 個の生コン工場、

7 個のセメント工場、75 個の砕石工場を配置した。東京都の生コンの総需要量は経済産業省<sup>[4]</sup>のデータより 333,050m<sup>3</sup>(平成 22 年度実績)とした。

表 5-5 シミュレーションで用いた生コンの調合

| 調合強度                 | スランプ | 空気量 | 水セメント比 | 最粗骨寸法の | 細骨材率 | 単位水量                 | 絶対容積 (l/m <sup>3</sup> ) |       |     | 質量 (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       | 混和剤                  |
|----------------------|------|-----|--------|--------|------|----------------------|--------------------------|-------|-----|-------------------------|-------|-------|----------------------|
|                      |      |     |        |        |      |                      | セメント                     | 細骨材   | 粗骨材 | セメント                    | 細骨材   | 粗骨材   |                      |
| (N/mm <sup>2</sup> ) | (cm) | (%) | (%)    | (mm)   | (%)  | (kg/m <sup>3</sup> ) | セメント                     | 細骨材   | 粗骨材 | セメント                    | 細骨材   | 粗骨材   | (cc/m <sup>3</sup> ) |
| 28.325               | 18   | 4.5 | 52.2   | 20     | 42.8 | 183.9                | 111.5                    | 282.6 | 377 | 352.3                   | 712.2 | 995.3 | 845.5                |

各工場の CO<sub>2</sub> 排出原単位は岩田ら<sup>[3]</sup>の研究を参考にした。

表 5-6 各工場の CO<sub>2</sub> 排出原単位

|           | CO <sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO <sub>2</sub> /t) |
|-----------|----------------------------------------------|
| セメント工場    | 733.98                                       |
| 生コンクリート工場 | 1.06                                         |
| 砕石工場      | 4.21                                         |

## (2) 結果と考察

最初に、テストデータにおけるシミュレーションの結果生成された製品、材料の相場変動の例を図 5-17 に示す。砕石、砂に関してはほぼ一定の良好な結果を示したが、生コン、セメントに関しては供給量が多かったためか下降傾向を示した。ここで断っておかなければならないのは、この傾向はシミュレーションによって必ずしも再現されるものではなく、例えば砕石と砂が下降傾向を示す結果が得られた場合もあるということである。

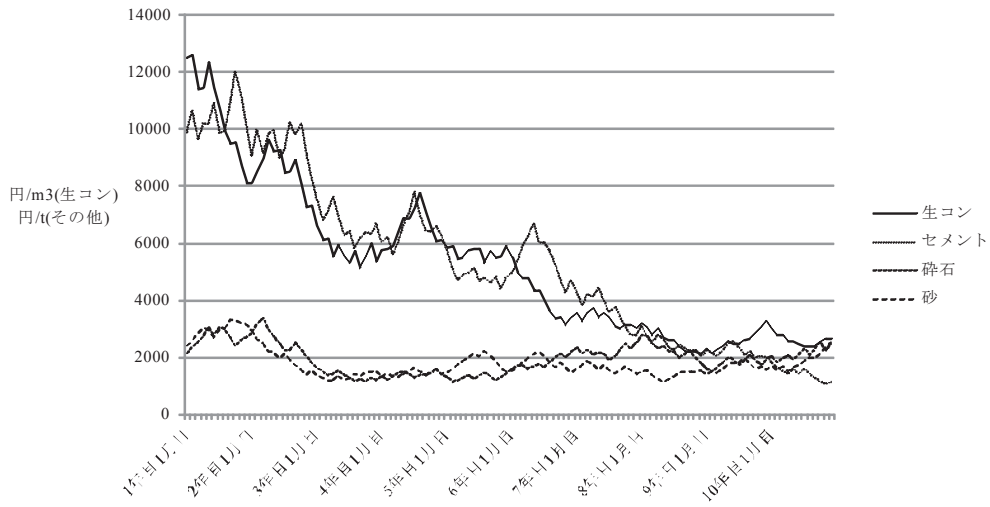
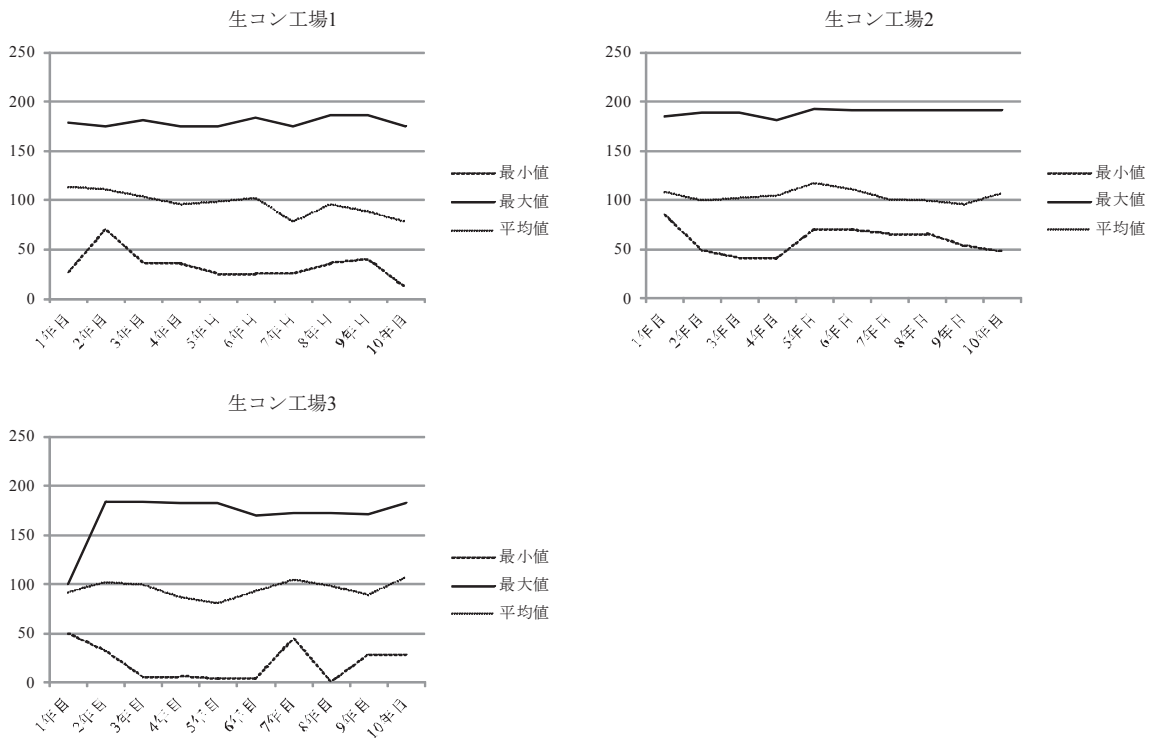


図 5-17 テストデータにおける製品、材料の相場変動の例

また、この時の各工場の適合度の推移を次に示す。適合度は前章の Ant のような上昇傾向を示すことはなく、初期適合度の 100 からほぼ横這いで推移した。



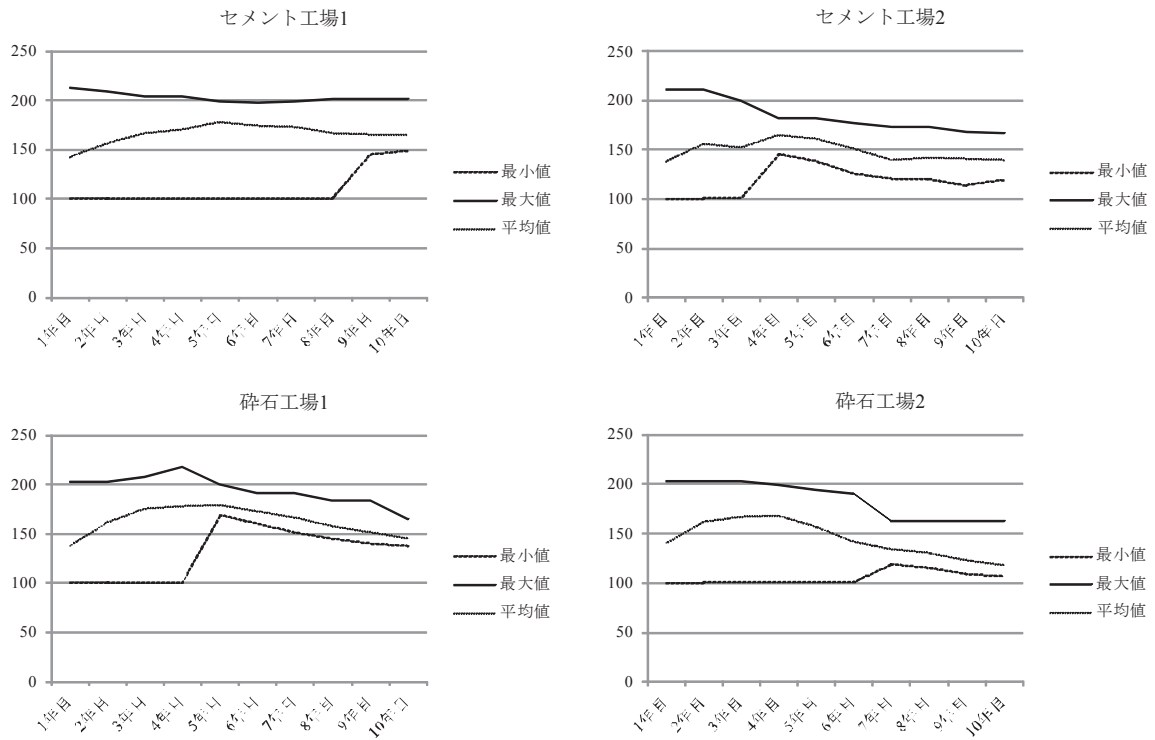


図 5-18 テストデータにおける各工場の適合度の推移

この時の全体での CO2 排出量の推移を次に示す。生産 CO2 排出量は輸送 CO2 排出量と比較して大きな変動を見せた。

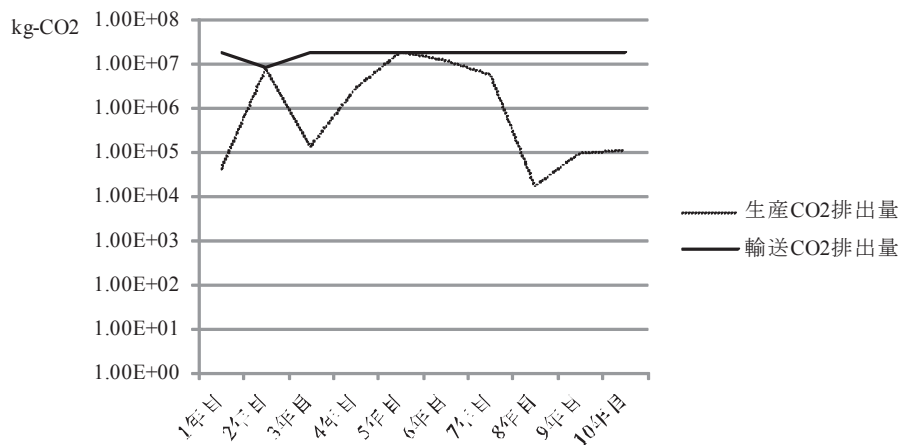


図 5-19 テストデータにおける全体の CO2 排出量の推移

次に、東京都周辺の実データでシミュレーションした結果生成された相場変動の例を示す。砕石、砂に関してはテストデータの場合と同様ほぼ横這いの良好な結果を示した



ものの、生コン、セメントは最初の1年上がったのち急激に下がった。これは最初の1年で工場の生産戦略が安定し十分な供給力を発揮するようになると製品が過剰に市場へ供給されるためであると考えられる。つまり、現実社会において生産能力いっぱいまで生産している生コン工場、セメント工場が極めて少なく、協同組合などを通じた生産調整を行うことで安定な価格を保っているということを表している。ただ、テストデータの場合と同様、この結果は必ずしもシミュレーションの度に再現されるものではなく、例えば生コンとセメントの価格が上昇傾向を示すこともしばしば起こりうることをここで断っておかねばなるまい。

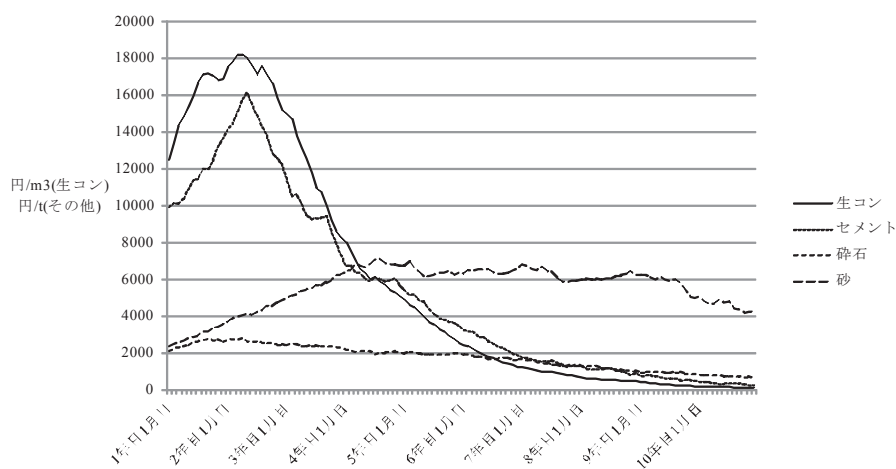
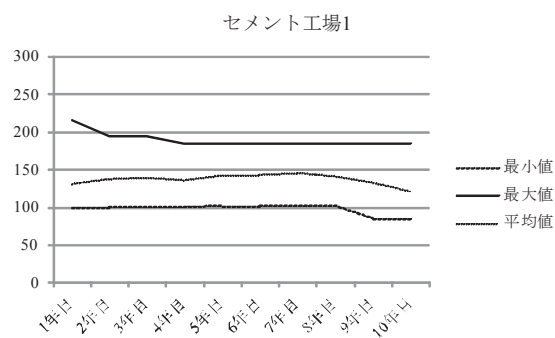
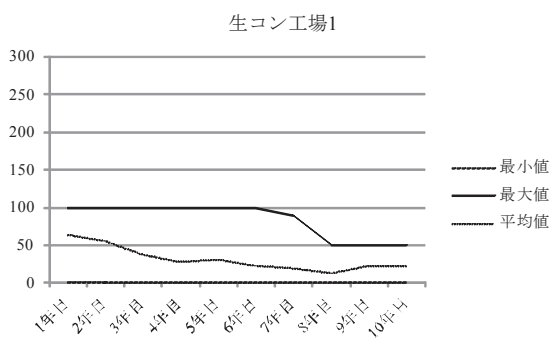


図 5-20 実データにおける製品、材料の相場変動の例

この時の工場エージェントの適合度の推移、全体の CO2 排出量の推移を次に示す。



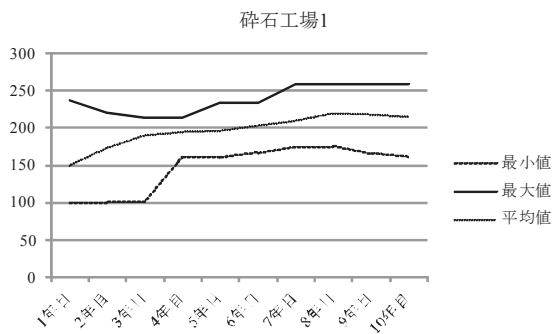


図 5-21 実データにおける各工場の適合度の推移

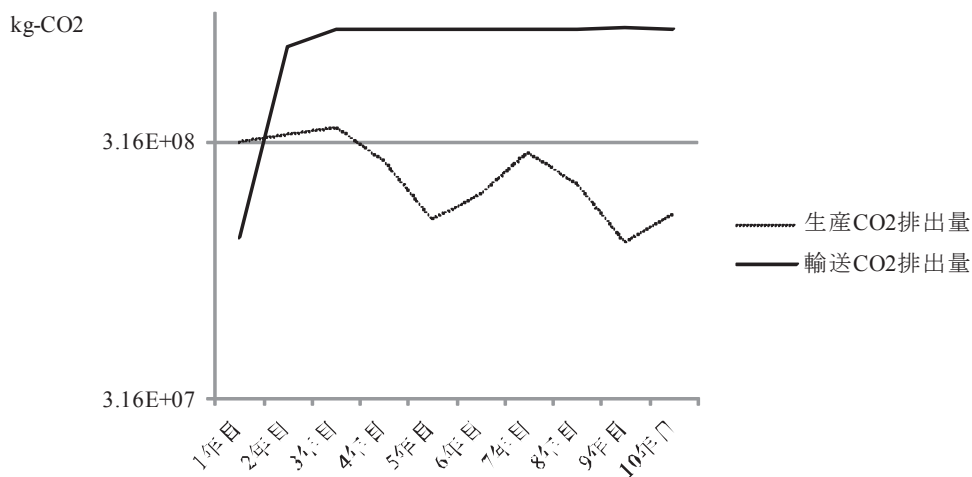


図 5-22 実データにおける全体のCO2排出量の推移

以上の結果、特に製品、材料の相場変動の結果を見るに、GP、GAを用いたエージェントの行動によって需給バランスの影響を受けた建材相場の値動きは再現可能であると考えられる。しかし、その全体的な傾向はインプットデータの需要と供給のバランスに支配され過ぎており、本来市場が持つべき自己調整機能、いわゆるアダム・スミスの「見えざる手」の働きは再現されていない。そのためシミュレーション対象の境界条件の設定等の影響を大きく受ける結果となってしまう。本研究で実現することはできなかったが、ここで以下のような改良案を提案して考察のまとめとしたい。

- 1) 相場が上がるとそれを生産する工場が設備増強を行い最大生産量を増やし、逆に相場下がると最大生産量を減らすような機構を組み込む
- 2) 相場が上がるとそれを生産する工場が増える。その位置は基本的にはランダムであるが、適合度の高い既存の工場の周辺が望ましい。逆に相場下がるとそれを生産する工場のうち、適合度の低い工場が生産を停止する。

こういった仕組みを導入することで、エージェントが自発的に市場を調整し、より現実に近い相場変動が模擬できるものとする。がれき撤去についてもこの GPGA を組み込み試算を行うものとする。

#### 5-6. 参考文献

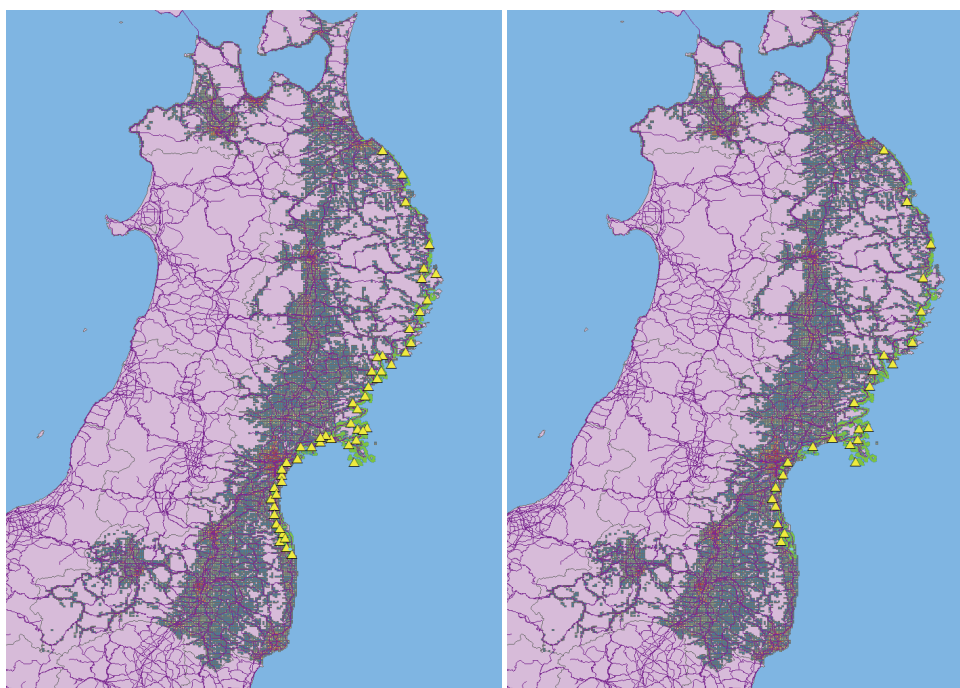
- [1]積算資料：財団法人経済調査会，2011年10月
- [2] 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，コンクリートの調合設計指針・同解説、2009
- [3] 岩田彩子、兼松学、野口貴文、長井宏憲、北垣亮馬、藤本郷史：実態調査に基づくコンクリート関連産業の CO2 排出原単位に及ぼす，地域特性・工場規模の影響，日本建築学会技術報告集 Vol.16、No.32、pp.43-48、2010
- [4]経済産業省 生コンクリート流通統計調査(平成 22 年度実績)[2012 年 1 月 22 日閲覧]  
<http://www.meti.go.jp/statistics/sei/namakon/index.html>
- [5]陳曉榮、時永祥三：共進化 GP を用いたマルチエージェントシステムの構成とその人口市場分析への応用，電気情報通信学会論文誌 A Vol.J86-A No.10 pp.1038-1048、2003

## 6. 東北大震災の復興試算と今後の復興のボトルネックなどの検討

### 6-1. シナリオ設定

前章までのシミュレータ開発に基づいて、実際に東北大震災の再現を行い、復旧にどれくらいの時間がかかるのかを検証する。東北大震災の再現シナリオとして次のように設定する。

- 大地震＋津波の両方の被害によって建築物が損壊
- 津波被害地域に、仮置き場を作る(図 6-1)
  - ・津波被害地域に5, 10, 20, 50キロ間隔で
  - ・大規模(年間 90,000トン受入)or 中規模(年間 18,000トン)の仮置き場を設置する



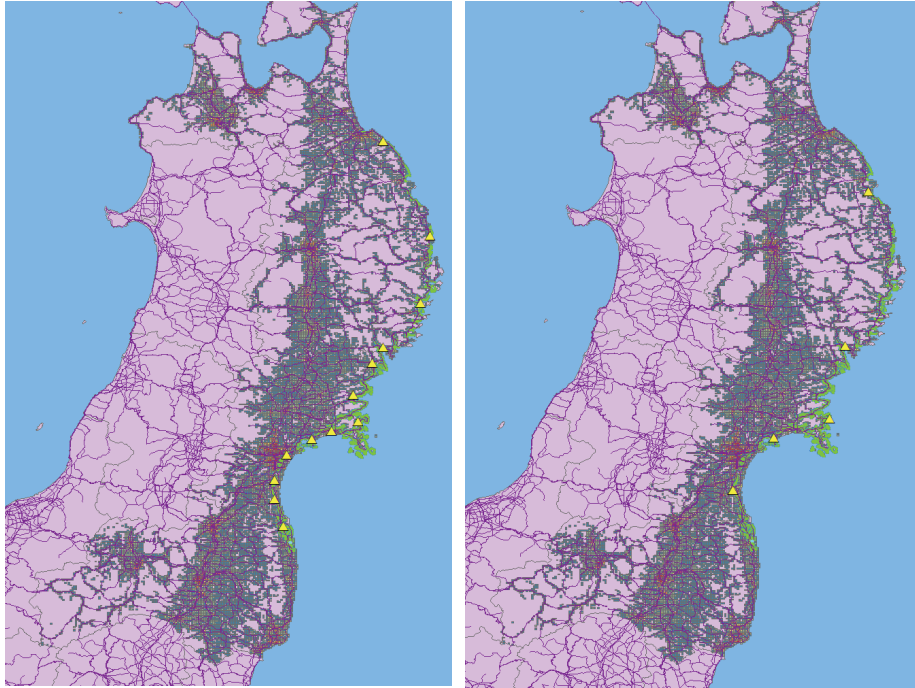


図 6-1 仮置き場の設置シナリオ

- 被災県(青森, 岩手, 宮城, 福島)に
  - 新設焼却炉を設置, ないしは既存焼却炉の稼働
  - 新設稼働の場合, 20 キロ, 50 キロ, 100 キロ間隔で設置(図 6-2)

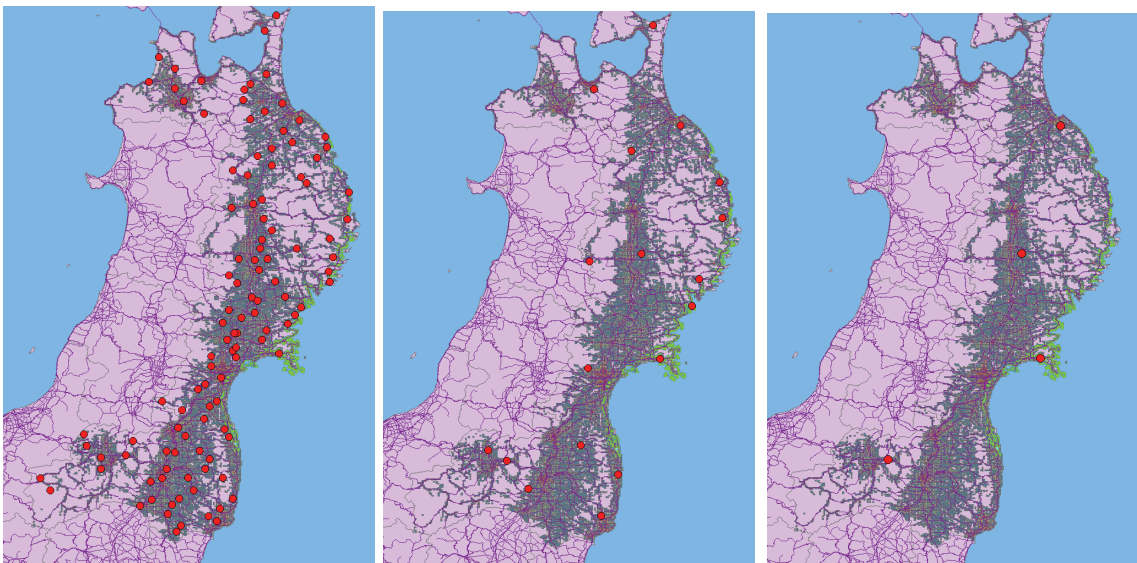


図 6-2 焼却炉の設置シナリオ

## 6-2. 結果分析

前節のシナリオによりがれき復旧シミュレーターを運用し、得られた結果を解説する。まず、図 6-3 に仮置き場の数と規模ごとの初年度処理後のがれき残存率を示す。この結果から次のことがわかる。

- そもそも、仮置き場が圧倒的に足りないため、一年で処理が不可能である。
- 震災後初年度終了の時点(つまり現時点)で、潜在的に整理されていないガレキがまだ大量に残存している。

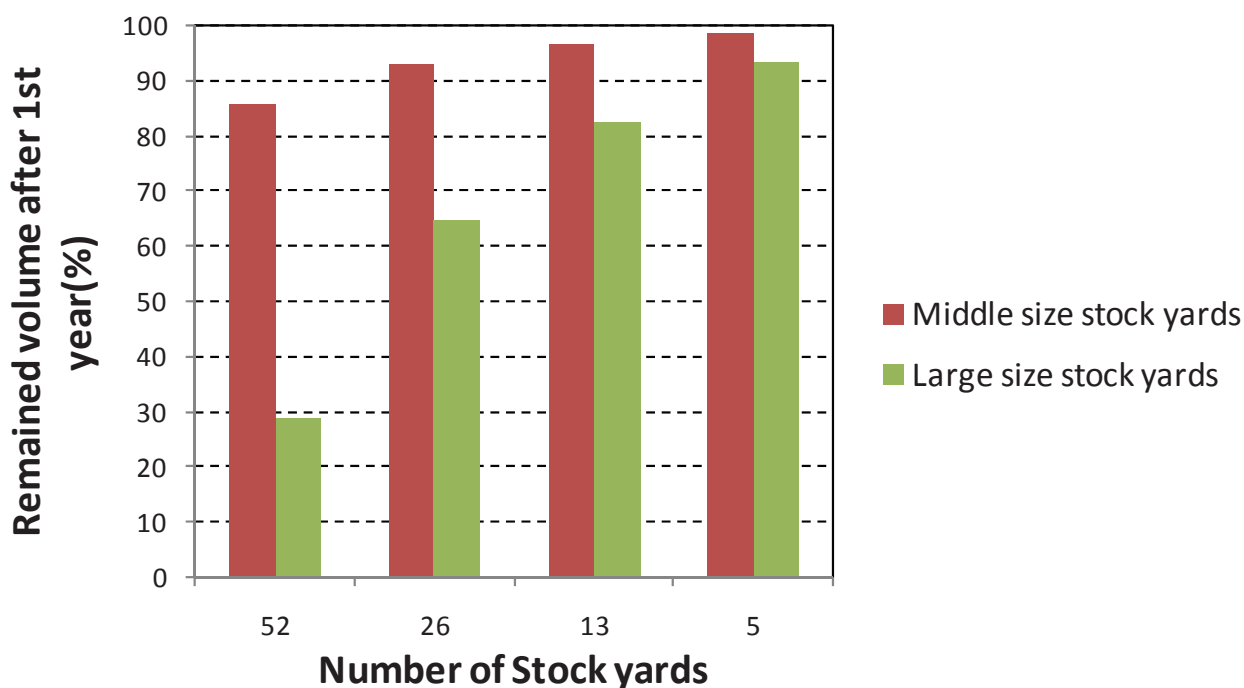


図 6-3 仮置き場の数と規模における初年度処理後のがれき残存率

次に、仮置き場の数と規模における復旧完了年の予測を図 6-4 に示し、また焼却場の数と規模における復旧完了年の予測を図 6-5 に示す。これらの結果より、排出された廃棄物量に対して

- 仮置き場のほうが焼却炉よりずっと不足しやすい
  - 焼却炉は少なくとも処理に間に合う
- 結果として、焼却炉は各地の既存と新設に少しずつ、処理を依頼すれば、復興速度を妨げることは少ない。むしろ仮置き場は現状であっても根本的に不足している。
- ということがわかる。

現実に目を向けると、東北大震災の事実を踏まえて他の地方自治体の震災準備状況はあまりよくない。この意味でも用意に検討が可能なシミュレーターの必要性は高いが、今回の分析によって、焼却炉は仮置き場よりはずっと余地が大きく、稼働中のものをうまく活用して分散すれば復興速度を落とさないことがわかった。

むしろ、ボトルネックは仮置き場である。仮置き場のほうが焼却炉よりずっと不足しやすい。また仮置き場がないと、がれきがその場に放置されることになり結果として復興が遅れるということが明らかになった。

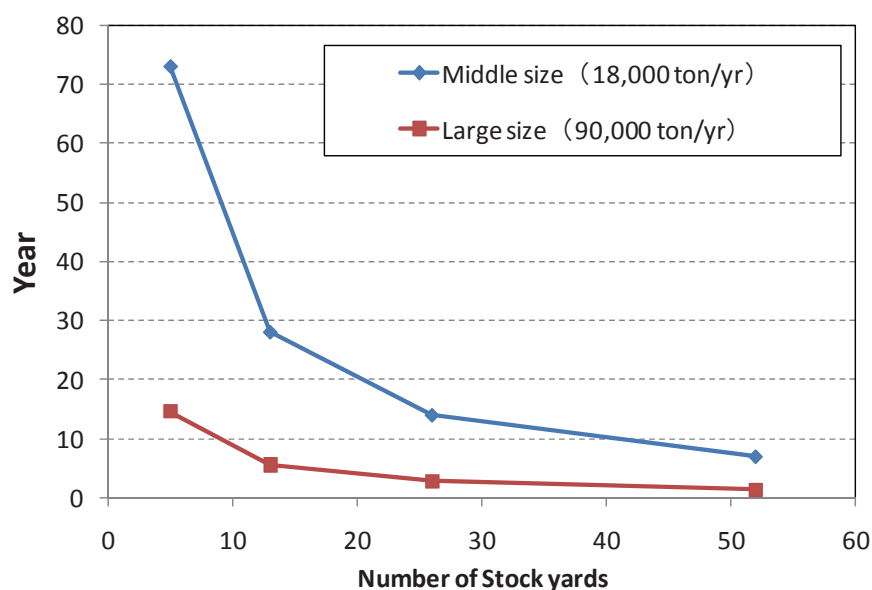


図 6-4 仮置き場の数と規模における復旧完了年の予測

ただし、現実の報告に照らし合わせると、焼却施設が足りず、広域処理を首相が各地方自治体をお願いしたり、焼却施設を仮設で増強するなどの報道がある。

この点について、精査を行ったところ、本シミュレーションで焼却施設が能力過剰と出力するのは次のことが原因と考えられる。

- 震災後、津波をかぶった焼却施設は停止させてシミュレーションを行なっているが、地震によって処理能力が低下した施設については考慮されていない。あるいはがれきの処理は、公表されている通常の都市ゴミと熱量が異なることから、スペック表示されている処理能力よりも小さい処理能力でしか動かせない可能性がある。
- 本シミュレーションでは、被災地である岩手、青森、宮城、福島の廃棄物を、相互流通させることを可としている。しかし実際には、地震後の被災地であっても行政区分はある程度明確であり、県内の処理を原則としている。こうした場合、シミュレーション上は可能であ

っても、現実には、キャパシティのある被災地域の焼却施設を弾力的に利用することは困難になっているためであると考えられる。

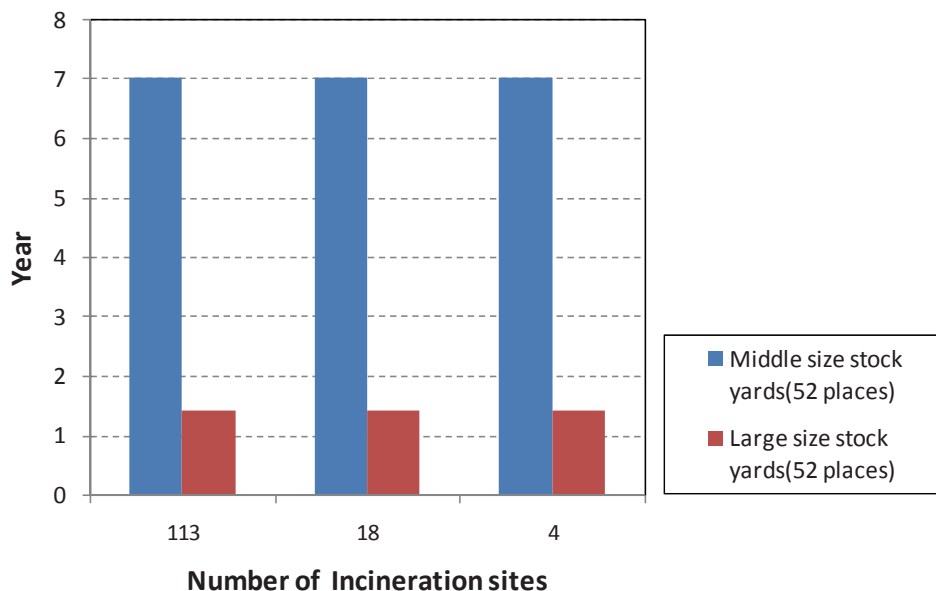


図 6-5 焼却場数と復旧完了年の予測

## 7. 関東直下型大地震に関する必要な政策のキーポイント

以上の結果を踏まえて、仮に関東直下型大地震に対して必要な政策のキーポイントは次のものであると考えられる。

### 7-1. 仮置き場の具体的な指定化

現在、中央防災会議においては、関東直下型地震が来た場合の仮置き場は具体化されていない。これが具体化されず、震災時に実際に指定するとなると、復旧速度は3年～80年と極めてばらつく。現時点では避難地域の指定はあるが、がれき保管地域の指定は無いので、これをするべきである。関東地域の公園、緑地、自衛隊駐屯地、高架下、湾岸エリアなど必要な面積の二倍程度をあらかじめ指定しておくべきである。

### 7-2. がれきの運搬コンセプトの検討

がれきはなるべく早くかつ的確な方向の仮置き場に輸送することが望ましい。特に重要だと考えられるのは、海岸から2～3キロ範囲であれば湾岸エリアに運搬。山手線内であれば、山手線内のがれき置き場に保管し、山手線外ならもよりのがれき保管場所に保管するべきである。



### 7-3. がれきの撤去優先度の検討

建物が倒壊した場合、これが道路を塞ぐため、まず倒壊現場でどこにがれきを保管するかが極めて重要になる。この点において、まず同じブロックの建物においては、なるべく幹線道路に近く、かつ角地のがれきから撤去することが望ましい。

### 7-4. 災害時広域廃棄物処理の必要性

本研究を開始した 2011 年度当初には、それほど議論がされていなかったが、2012 年 3 月になって、非常に重要視されてきたことから、本研究で得られた結論から、広域処理のあり方について述べる。

まず、廃棄物の災害時広域処理については、次の 2 つの協定が重要である。

- (1) 被災した地域の都道府県がまたがる場合、この被災地域内の広域輸送、広域処理を可能にする都道府県間協定を災害時に即時発効する仕組み
- (2) 被災地域の首長は、廃棄物の受け入れ先の機関や自治体を自分で指定できる。また、決定された受け入れ自治体を除く、すべての健全な自治体は、その受け入れ負担費用を等しく分割して補助するための協定
- (3) 上記 2 協定を容易に実現するための、災害時広域廃棄物輸送、廃棄物処理の許認可制度「災害時緊急マニフェスト」の作成する。

(1) については、本研究のケーススタディに基づくと、被災地域が都道府県をまたがる場合、被災地域内部だけでも、廃棄物の移動を許可するようにしないと、焼却場や廃棄物処理のスペース不足になり、初動対応が全くできないことに起因する。例えば、広域災害が生じ、国家が被災地域を認定した後は、その中でもっとも最適な場所に廃棄物を動かした方が被災地域の安全性や復興性はより高まるものと考えられる。

(2) については、廃棄物の広域処理をする場合に、どうしても受け入れ側の自治体が損をする立場に置かれ、その他の自治体は何もしない、という状況に陥る。この結果、どの自治体も廃棄物処理を申し出さないという状況に陥る。実際、何度かシミュレーションに失敗した試行で、廃棄物が全く動かない状況になって結果が出せないものの中にはこのような事例があった。被災地以外の自治体がすべてを被るという関係性にしておかなければ復興は急速化しない。

(3) については、シミュレーションと現実の結果の食い違いが、管轄境界によって各業者が活動を制約されるという欠点に起因する。実際には余力があるのに、法律や管轄といった社会制度が弊害となって処理が遅れるということは本来は決してあってはならない。しかし、廃棄物の排出という実務上は、ある程度業者を管理しなければ、災害時に乗じて、悪質な廃棄物を廃棄する業者が出ないようにある程度審査する必要がある。

