

廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

・研究課題名=コンクリート産業における環境負荷評価マテリアルフローシミュレーターの開発および最適化支援システムの構築に関する研究

・研究番号= K1701、K1829、K1943

・国庫補助金精算所要額（円）=36,975,000

・研究期間（西暦）=2005-2008

・代表研究者名=野口貴文（東京大学）

・共同研究者名=兼松学（東京理科大学）、田村雅紀（首都大学東京）、橋田浩（清水建設）、柳橋邦生（竹中工務店）、長井宏憲（東京大学）

・研究目的= 本研究課題では、コンクリート関連産業・廃棄物処理産業の商習慣、コンクリート建造物の建設・解体量の地域特性、地理的条件などに関する実態に即した情報を統計資料またはヒアリング・アンケート調査により把握してデータベース化し、プラントレベルのマルチエージェントシステムに基づくコンクリート産業を中心とした「資源循環シミュレーションシステム ecoMA」を構築することを目標とする。システムの構築に際しては、廃棄物処理の観点のみならず、生産活動や物流による二酸化炭素や有害物質の排出、生産物の性能確保など、複数の基準に基づく合理的な総合評価の方法論の提示を行うとともに、開発されたシステムを用いて、具体的な国内都市に対してアクションスタディを行い、都市毎のコンクリート関連産業の環境負荷低減のためのシナリオを提案することで、地域性を考慮した循環型社会形成に資することを最終目標とする。

・研究方法= 本研究課題の最終目標を達成するための研究方法を以下に示す。

①資源循環シミュレーションシステム ecoMA の開発

現実社会におけるコンクリート建造物に関連する資源循環は単純ではなく、図 1 に示されるように、地域的な広がりや時間的な重なりを有する非常に複雑な系において成り立っている。また、地域ごとに異なる制度・慣習があり、様々な方針を有する企業が混在しているのが実態である。したがって、ある時点の評価またはある建造物単体の評価を行って環境負荷低減に向けた技術開発・施策誘導などを実施したとしても、それが社会全体の環境負荷低減に資するものではない。たとえば、CO₂ 排出量削減のために高炉セメントの利用が検討されることはしばしばあるが、高炉スラグの産出しない地域に高炉セメントを供給するには運搬エネルギーが必要となり、かえって CO₂ 排出量が増加するこ

とも考えられる。また、現時点のみの資源循環を考えれば、解体コンクリート塊の路盤材への利用は、廃棄物削減および天然資源の消費抑制に対する適切な方策であるかもしれないが、今後数 10~100 年間という将来の資源循環を考えた場合には、最適解ではないかもしれない。したがって、図 1 に示される地域的な広がりや時間的な重なりを有する非常に複雑な系において、コンクリート構造物の環境性能を評価し、環境負荷を可能な限り小さくできる資源循環システムを見出すためには、社会機能や産業構造の実態に即し、企業の理念と施策対応を忠実に反映したシミュレーションシステムが必要となる。

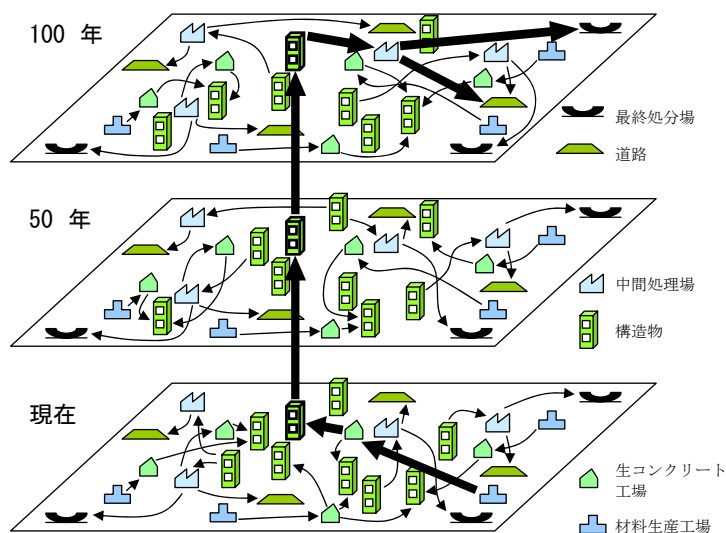


図 1 現実社会におけるコンクリートに関連する資源循環

ecoMA は、マルチエージェントシステムを利用した資源循環シミュレーションシステムであり、上に述べた複雑系における個々の企業活動および社会全体挙動に伴う環境負荷が仮想現実的な形で予測できるシステムとなっている。マルチエージェントシステムとは、エージェントと呼ばれる自律的な判断主体の集合によって形成される系であり、図 2 に示すように、各エージェントが独立にそれぞれの条件下で合理的な判断を下して行動できるように設定されるため、複雑な現実社会を的確にモデル化できるシステムとして有望視されている。ecoMA には、PL エージェント、TR エージェントおよび GV エージェントという 3 種類のエージェントが組み込まれている。PL エージェントは、材料・製品の受入・出荷を行う材料生産工場、生コンクリート工場、建設現場、中間処理場、最終処分場などを模擬したもの、TR エージェントは、材料の運搬を行うトラック運送業者、鉄道機関、海運業者などを模擬したもの、GV エージェントは、地方自治体や政府を模擬したものとなっている。ecoMA では、先に述べた時間的要因、地理的要因および社会的要因が考慮されるように表 1 の条件設定がなされており、各エージェントは、条件に基づいて表 2 の行動をとるように設定されている。時間的要因に関しては、各エージェントの行動を誘発する社会

現象をイベントと呼び、各イベントを統計情報に基づいて順次実行することで時間の流れを表現している。図 3 に示すように、構造物の建設・解体、施策の実施などがイベントとなる。

表 1 ecoMA の設定条件

時間的要因	
A-1	構造物の着工統計・寿命を考慮する
A-2	資源・最終処分場の枯渇を考慮する
A-3	社会情勢・経済情勢の時間的な変動を考慮する
地理的要因	
B-1	構造物の新設・解体等の地理的分布を統計情報と対応付ける
B-2	工場の立地を考慮する
B-3	立地に応じて運搬手法の違いを考慮する
B-4	材料の種類に応じて運搬手法の違いを考慮する
社会的要因	
C-1	各企業独自の意思決定戦略を考慮する
C-2	企業戦略は時間や情勢の変化に応じて変更する
C-3	企業間で価格や環境負荷に対する交渉や情報交換を行う

表 2 各エージェントの行動

PL エージェント	
原材料の選択	原料の組み合わせと量の選択・生産する工場と運搬機関の選択
自身の情報更新	価格決定、工場の規模決定
問合せへの返答	推奨製品・環境情報の開示
注文時の要求	原料注文時の要求仕様・方針
TR エージェント	
自身の情報更新	価格決定、運搬の規模決定
問合せへの返答	推奨運搬法・環境情報の開示
GV エージェント	
自身の情報更新	外成的な施策・経済条件の変更
政策通知	税制の施行など
情報収集	各エージェントの方針調査

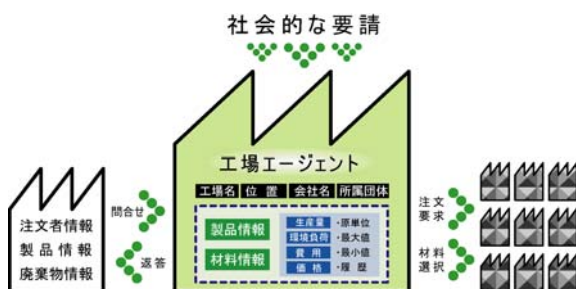


図 2 エージェントの挙動（社会的要因の考慮）

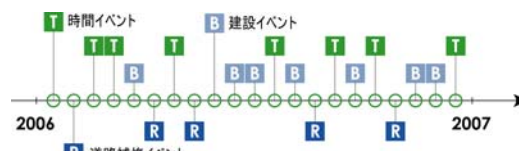


図 3 イベントの発生（時間的要因の考慮）

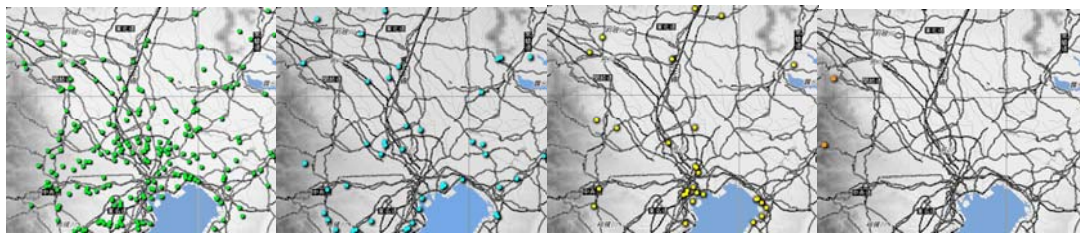


図4 工場等の位置設定（地理的要因の考慮）

左より生コンクリート工場、アスファルト合材工場、セメントSS、砕石工場

また、土木構造物・建築物の位置・規模・建設年や各種工場の位置・生産規模・処理能力などのデータをもとに、図4に示すように、構造物・工場などが地図上の実際の場所に位置づけられ、それぞれの構造物・工場などの所有者・管理者には、社会情勢・法規制などに応じて行動を決定するに際して様々な選択肢が与えられている。さらに道路距離などの地域性を考慮した、輸送に起因する環境負荷の適切な評価が可能なシステム構築のためにGISとの連携を行うことで、工場間の実輸送距離によるCO₂排出量を考慮することが可能となる。こうすることで、各構造物・工場はまるで現実社会のように条件・施策に応じて自己判断しながら活動を行うことになり、その活動を様々な観点・角度から評価することで、複雑系においても実態に即した環境性能評価を行うことができる。

②アクションスタディ対象地域における実態調査

ecoMAを用いてコンクリート関連産業の資源循環における環境負荷を評価するためには、各エージェントの生産活動に起因するマテリアルフロー、消費エネルギー、環境負荷などの詳細なデータ収集が必要不可欠である。さらに、環境負荷低減に向けた具体的な施策効果を検証するための将来予測シナリオを設定するためには、各エージェントの意思決定方法、地域特性による物流・生産活動の違い、商習慣なども考慮する必要がある。そこで、本研究課題では資源循環の評価対象地域として、地域差による比較が容易な関東圏と北海道を選定し、各産業における統計情報や組合名簿などからは収集することができない詳細な生産活動に関するデータと地域特性を実地でのヒアリング調査、アンケート調査によって得ることとした。表3に組合加盟工場数およびデータ回収工場数を示す。

表3 アンケート調査対象工場数

工場種	首都圏		北海道		組織率(%)
	データ回収工場数	組合加盟工場数	データ回収工場数	組合加盟工場数	
生コンクリート工場	37	919	22	345	73.9
砕石工場	7	185	29	201	87.8
砂利工場	0	214	23	65	—
アスファルト合材工場	12	190	18	189	—
中間処理場	115	767	27	220	—
最終処分場	4	60	8	187	—
セメント工場	0	—	0	—	100

・結果と考察= 本研究課題における結果と考察を以下に示す。

資源循環における環境負荷低減効果を評価可能なシステムを目指した ecoMA を完成させた。ecoMA は図 5 に示すようなインターフェイスをもつ汎用的なソフトウェアとして開発され、マテリアルフローの解析対象地域におけるエージェントのデータベース登録、シナリオの設定を行うことで、実社会を模擬した行動主体間の取引、建設・解体などのイベントを発生させ、将来予測を可能とする。

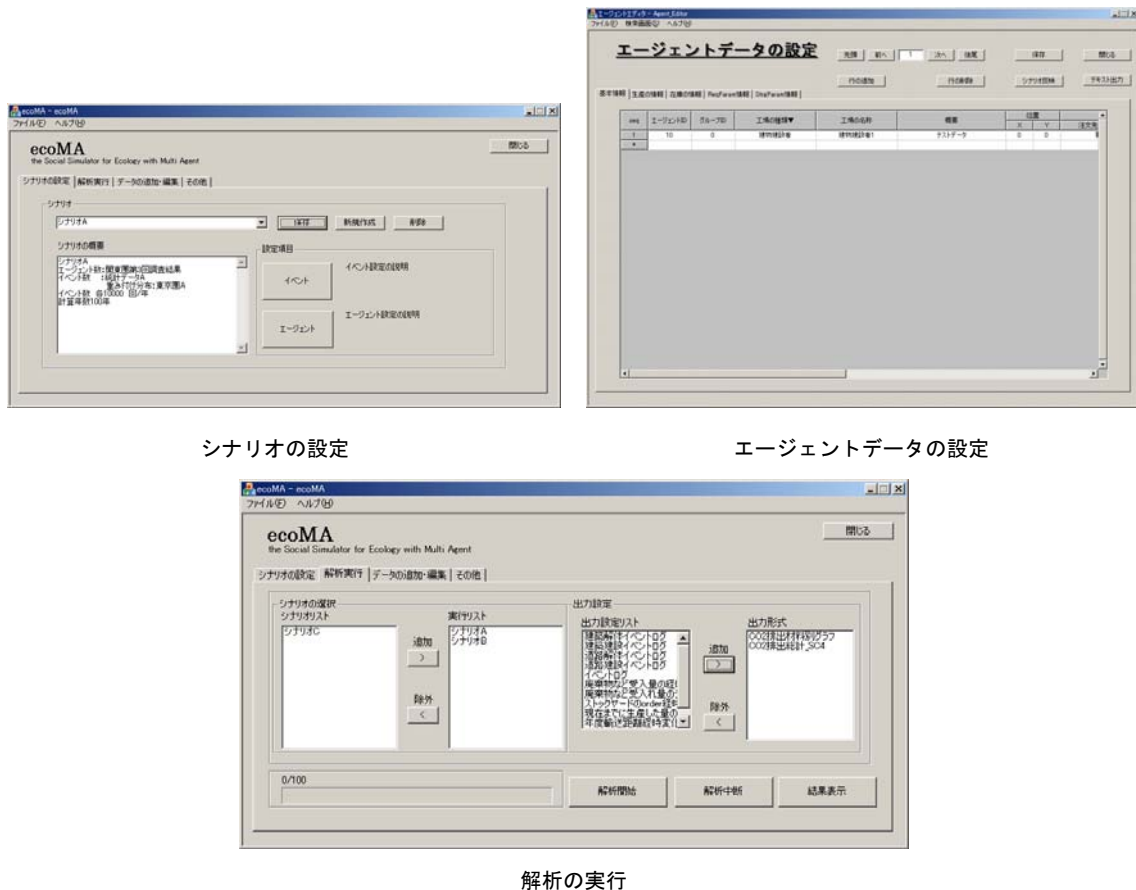


図 5 ecoMA ソフトウェアの操作画面

また、この ecoMA では GIS との連携により全ての対象工場間の輸送距離として GIS から出力された実距離によって環境負荷を評価可能なシステムを構築した。図 6 および図 7 に生コンクリート工場-砕石工場間の直線距離と、既往の算出方法による道路距離、GIS を用いた道路距離の比較を示す。道路網に違いがみられる関東圏と北海道において、生コンクリート工場および砕石工場間の道路距離比較を行い工場間の道路距離に地域的な違いがあることを確認し、地域特性の強いコンクリート産業の環境負荷評価の際には、地域で異なる道路距離を考慮することにより輸送に関わる環境負荷をより精緻に求められることが示された。

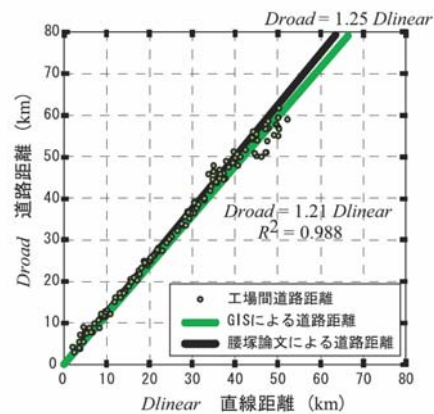
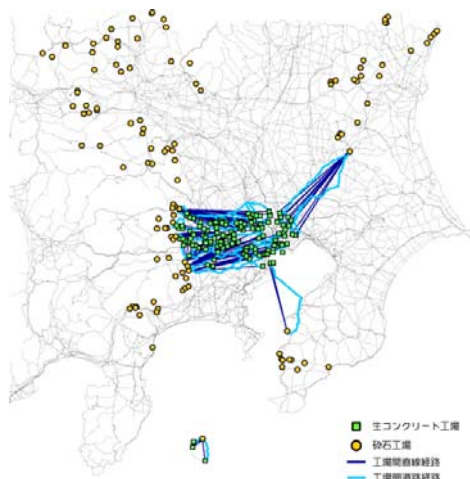


図6 生コンクリート工場—砕石工場間の直線・道路距離（関東圏）

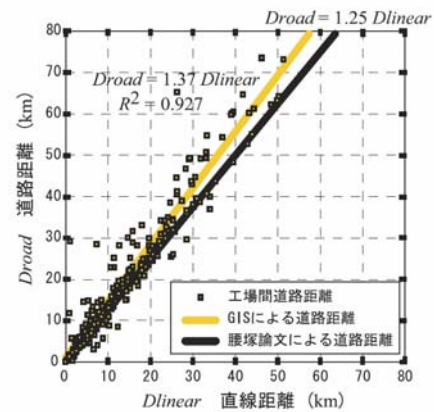


図7 生コンクリート工場—砕石工場間の直線・道路距離（北海道）

以下に ecoMA で検討したシナリオ解析例を挙げる。

① 東京圏における高品質再生骨材の製造

東京圏では、将来、道路建設工事量の低下と高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の解体工事量の増加に伴って、路盤材としてリサイクルしきれない膨大なコンクリート塊が発生することが危惧されている。そこで、図8に示す東京近郊100km四方における2000～2050年の50年間を対象として、

- (1) コンクリート構造物の長寿命化・延命化による解体コンクリート塊の発生抑制効果
- (2) 路盤材としての継続利用に加えて、加熱擦り揉み法による高品質再生骨材の製造による解体コンクリート塊の最終処分抑制効果

に対する評価を行った。

ecoMA の評価条件を表4に示す。また、上記(1)に関するシナリオとしては、鉄筋コンクリート造建築物の寿命を60年から200年まで変化させることとし、(2)に関しては、表5に示す2つのシナリオを設定した。



図 8 東京圏の評価対象領域

表 4 ecoMA による評価条件（東京圏）

建築物密度	人口密度に比例して設定
建築物の新築量	2002 年の実績のまま一定に設定
道路の建設量	2002 年より年 1%減少に設定
建築物の解体量	東京都着工統計と建築物の寿命予測式 ⁵⁾ に基づき設定
各工場の物質の投入量・排出量	文献およびヒアリング調査に基づき設定
環境負荷原単位	JEMAI-LCA に基づき設定
材料・製品価格	積算資料に基づき設定（一律 20%引き）
高品質再生骨材の価格	ヒアリング調査に基づき、天然骨材の 3 倍に設定

表 5 高品質再生骨材の製造に関するシナリオ

シナリオ名	内 容
コスト最小化 シナリオ	全ての企業が原料調達費・運搬費を最小化するように工場・原料選定を行う
廃棄物最小化 シナリオ	全ての企業がコストを無視して環境配慮型材料を使用した上で運搬費のみを最小化

(1)および(2)における地域全体の評価結果をそれぞれ図 9 に示す。建築物の寿命を 200 年に延ばすことで、有効利用されない解体コンクリート塊はかなり削減されるものの、それでも 2020 年には現在よりも 500 万 t 近く増大することが示されている。また、全ての企業が非現実的に協力して廃棄物削減に努め、高品質再生骨材の増産に対して十分な投資を行った場合でさえ、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造建築物の解体によるコンクリート塊の排出量増加を抑制するには至らないことも示されており、別の排出抑制策を検討する必要があることが伺える。

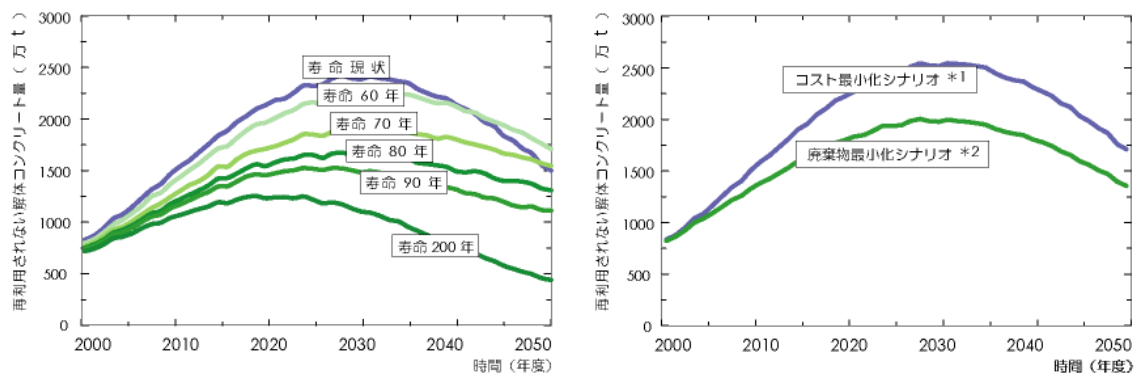


図9 構造物の長寿命化・延命化に関する評価結果（左）と高品質再生骨材の積極利用に関する評価結果（右）

② 北海道における生コンクリート工場の集約化

近年における新規構造物建設に対する投資額の継続的な減少に伴い、多くの生コンクリート工場の稼働率は低下の一途をたどっており、各方面で工場の集約化が叫ばれている⁷⁾。そこで、交通事情が比較的良好で広域的な運搬が可能であると考えられる北海道・道央100km四方（図10）の1年間を対象として、

- (1) 生コンクリート工場の集約化に伴う製造エネルギーの削減効果
- (2) 生コンクリート工場の集約化に伴う運搬エネルギーの変化

に対する評価を行った。ちなみに、この地域の生コンクリート工場の最近の稼働率は10～40%程度である。

ecoMAの評価条件を表6に示す。また、上記(1)および(2)に関するシナリオとしては、評価対象地域における生コンクリートの年間総生産量は一定に保ったまま、工場をランダムに選定して稼働を停止させることにより、工場数を10%ずつ減らしていくこととした。

表6 ecoMAによる評価条件（道央圏）

構造物の新設	建築物の新築のみを対象とし、人口分布に比例して工事を発生
生コンクリートの種類	調査に基づき、最も生産実績の多い1種類に限定
生コンクリート工場の電力使用量	調査に基づき、稼働率(x)と単位生産量当たりの電力消費量(y)の関係式($y=6.393-0.1421x$)を設定
運搬車の積載量	調査に基づき、1車5.91tと設定
環境負荷原単位	JEMAI-LCAに基づき設定



図 10 道央圏の評価対象領域

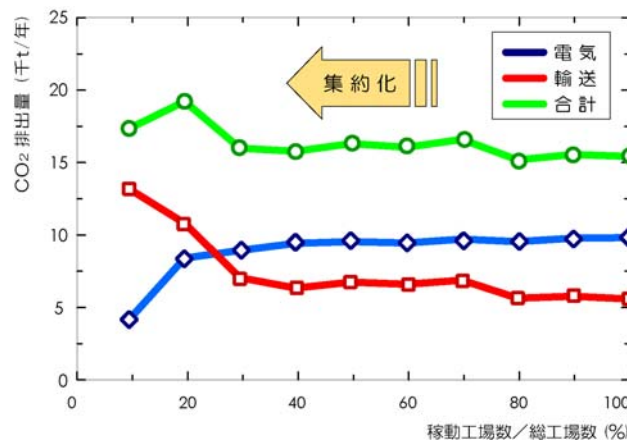


図 11 生コンクリート工場の集約化に関する評価結果

地域全体の評価結果を図 11 に示す。工場の集約化が進むと、一工場あたりの運搬範囲が拡大するものの、集約率 30%までの範囲では、地域全体での年間総運搬距離は増大せず、集約率が 30%以下になると運搬に伴う CO₂ 排出量の増大が生じる。一方、工場の集約化が進むと一工場の生産効率が高まるため、電力消費効率が高まり地域全体の年間総電力消費量も減少することが予想されるが、集約率 20%までの範囲ではその影響は顕著ではないことが示されている。CO₂ 排出量の削減を目的として生コンクリート工場の集約化を行う場合、集約率 30%までに抑える必要があるという評価結果が得られる。

③ 関東圏・北海道におけるコンクリート系廃棄物中間処理工場の集約化

コンクリートがらの発生から中間処理場を経て路盤材となって道路需要地に達する、もしくは最終処分場で処分されるまでのマテリアルフローを再現し、シミュレーションを行うことで、環境負荷が低減できる処理場配置・集約化シナリオとその効果を検証した。図 12、図 13 に調査結果に基づき、関東圏、北海道における中間処理場の分布を示した。円の

中心が工場の位置を表し、円の大きさは工場の規模を表す。この調査解析結果をふまえ、中間処理場の配置に関して CO₂ 排出量の効率化が図られるシナリオを検討するため、関東（1都3県）及び北海道を対象として、現状を再現するシミュレーションを行った。その結果、人口密集地域は過疎地域に比べ、稼働率の高い工場の割合が多いことがわかった。このことは、人口密集地域では工場数が不足し、それによって輸送距離も長くなっている可能性があることが明らかになった。そこで、関東、北海道において、表 7 の中間処理場集約化シナリオを設定し、それらを実行したことによる環境負荷削減の効果を検証、比較した。結果を図 14 に示す。

なお、集約率 = (集約後の工場数) / (現時点の工場個数) と定義している。

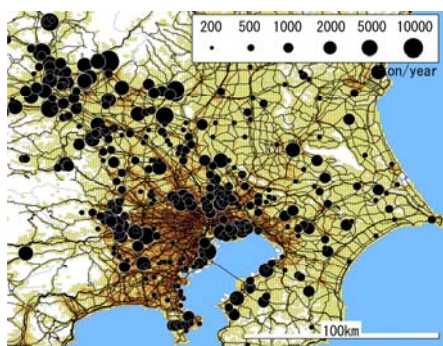


図 12 関東における中間処理場の分布

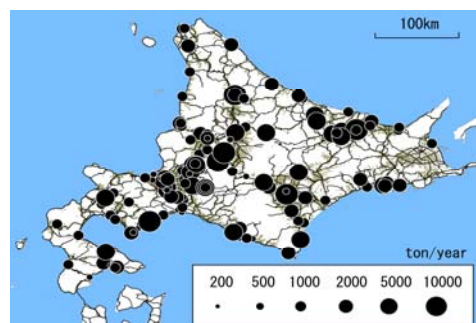


図 13 北海道における中間処理場の分布

表 7 各シナリオの概要

以下のシナリオにおいて、集約率を 10% から 100% まで 10% 刻みで変化させてシミュレーションを行う	
シナリオ 1 都心型中間処理場重視型	人口密度の低い土地に立地の工場から順に集約化していき、集約化した工場の受入可能量を、残りの工場に分配する
シナリオ 2 経済競争重視型	稼働率の低い工場から順に集約化していき、集約化した工場の受入可能量を、稼働率が 0.8 以上であった工場に分配する
シナリオ 3 都心型中間処理場・経済競争折衷型	人口密度の低い土地に立地する工場から順に集約化していき、集約化した工場の受入可能量を、稼働率が 0.8 以上であった工場に分配する
シナリオ 4 生活環境重視型	人口密度の高い土地に立地する工場から順に集約化していき、集約化した工場の受入可能量を、残りの工場に分配する

この解析結果より、関東はシナリオ 3・集約率 0.2、北海道は、シナリオ 3・集約率 0.8 のときに CO₂ 排出量が最小となり、関東で 18.0%、北海道で 17.1% の削減効果となった。また、北海道、関東ともに都心・高稼働率工場への集約化は有効だが、過剰な集約化は逆効果となることが確認された。さらに、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、北海道は同じシナリオでも全く異なる挙動となり、環境負荷削減には地域にあった政策の導入が不可欠と考えられる。

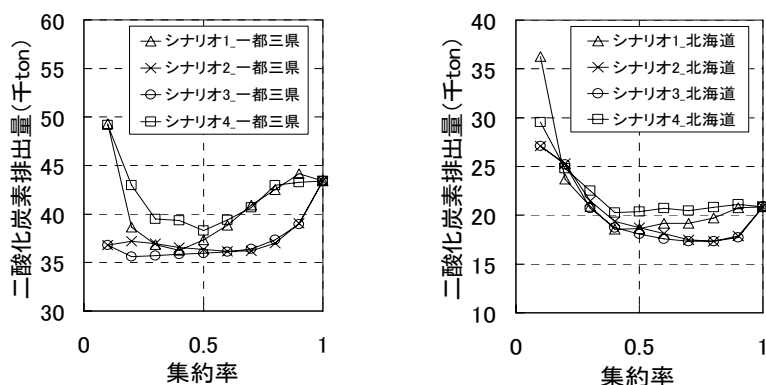


図 14 中間処理場集約化シナリオを導入した場合の輸送による二酸化炭素排出量の削減効果

・結論= 本研究課題における結論を以下に示す。

建設産業における資源循環を実社会のマテリアルフローに即して再現し、その過程で発生する環境負荷を予測・評価することで、より効果の高い施策を検討するためのシミュレーションシステム ecoMA を構築した。ecoMA は、マルチエージェントシステムを導入することで自律的な判断主体の集合が形成され実社会を模擬可能とし、各エージェントの行動を誘発する社会現象（イベント）を統計情報に基づいて順次実行することで時間の流れを表現した。具体的なシナリオ解析を行うために、大規模なフィールド調査を実施することで、現実社会を模したマテリアルフローの構築と生産活動に必要なエネルギーまたは発生する環境負荷を把握し、エージェントのデータベースを整備した。また GIS と連携した実輸送距離による環境負荷計算手法を導入し、道路網に違いがみられる関東圏と北海道において、工場間の道路距離に地域的な違いがあることを確認した。地域特性の強いコンクリート産業の環境負荷評価の際には、地域で異なる道路距離を考慮することにより輸送に関わる環境負荷をより精緻に求められる可能性が示された。

関東圏および北海道でのコンクリート関連産業での実態調査とデータ解析の結果を用いて、環境負荷低減に向けたシナリオを設定して検証を行い、ecoMA の将来予測システムとしての有用性を確認した。高品質再生骨材の製造に関するシナリオの検証では、全ての企業が非現実的に協力して廃棄物削減に努め、高品質再生骨材の増産に対して十分な投資を行った場合でさえ、将来の鉄筋コンクリート造建築物の解体によるコンクリート塊の排出量増加を抑制するには至らず、別の排出抑制策を検討する必要があることが示された。廃コンクリート塊の処理に関する処理場配置・集約化シナリオでは、高稼働率の中間処理場へ集約化されることで中間処理の CO₂ 排出量を最大 17%程度減らせるという可能性が示された。また、集約化の方法によっては排出量の増加につながる場合もあり、処理施設の立地を含む地域性に即した環境政策が重要と考えられる。

以上の研究成果より、本研究課題で開発した資源循環シミュレーションシステム ecoMA を用いることで、地域特性に応じた環境施策をシナリオとして設定することでその効果を

検証可能であることが示された。

英語概要

・研究課題名 = 「DEVELOPMENT OF MATERIAL FLOW SIMULATION SYSTEM BY USING MULTI-AGENT MODEL TO EVALUATE RECYCLING TECHNOLOGIES FOR CONCRETE RELATED MATERIALS」

・研究代表者名及び所属 = Takafumi NOGUCHI, Associate Professor, Graduate School of Eng., Dept. of Architecture, The Univ. of Tokyo, Japan

Manabu KANEMATSU, Lecturer, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Japan

Masaki TAMURA, Urban Environmental Science, Tokyo Metropolitan University

Hiroshi HASHIDA, Shimizu Corporation, Shimizu Institute of Technology

Kunio YANAGIBASHI, Takenaka Corporation, Takenaka Research & Development Institute

Hironori NAGAI, Research Associate, Graduate School of Eng., Dept. of Architecture, The Univ. of Tokyo, Japan

・要旨 (200 語以内) = Striking an optimal balance between the reduction of waste and the reduction of CO₂ emission is a controversial issue during production of cement and concrete, and construction of concrete structures to achieve the sustainable development of cement and concrete industries in Japan. They, however, usually have a trade-off relationship. In this paper, comparative case studies are made in Tokyo area to induce the best available recycling technologies, government policies and supply chain, with the scenarios on lifetime extension of buildings, continuous investment of road construction, corporation strategies as well as the supply chains of high quality recycle aggregate, recycle roadbed. Multi-agent system is used to simulate and evaluate the environmental impacts, which are caused during production and construction activities, in relation with geographical information and governmental corporation strategies. This paper consequently shows some feasible scenarios for zero-emission with compensation of high CO₂ emission.

・キーワード (5 語以内) = Multi-agent, material flow, recycle, sustainability, concrete