

E-0807 社会資本整備における環境政策導入によるCO₂削減効果の評価と実証に関する研究

(1) 環境政策検討シミュレーターの開発

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻

野口 貴文

〈研究協力者〉

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 北垣 亮馬

平成20～22年度累計予算額： 5,928千円（うち、平成22年度予算額 1,951千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 従来のLCAの手法では、輸送距離を求める方法として、地域間の平均的な輸送距離を用いる方法や、工場間の直線距離に係数をかける方法などの簡易計算を行う場合が多かった。しかし、コンクリート産業界では輸送距離が及ぼす影響が大きい。ある現場で生コンクリート需要が発生し、周辺にある工場に発注をかける場合は、通常の製品工場と異なり原材料の調達極めて流動的であるため、もっとも条件のよい（距離の近い）工場が選択される可能性が高い。例えば、CO₂排出量が小さくなるように原材料を調達する場合、従来の方法を用いる場合、県庁所在地間の距離算定方法では工場間の差異が生まれない、直線距離×係数では異なる工場が選択されるなど、選択の優劣を正しく評価できない現状があった。

そこで、本研究では、輸送距離を求める方法として、道路距離のみならず船舶、鉄道を輸送機関として考慮できる計算モジュールをecoMAに組み込むことを目的とし、具体的な計算方法について示す。さらに、適用事例として、日本の関東一都三県の建設現場での生コンクリート需要を満たすマテリアルフローを対象としたシミュレーションを実行し、生産と輸送に関するCO₂排出量を算出する。特に、輸送CO₂排出量については、移動時の道路距離とその排出原単位からCO₂排出量を算出し、簡易な方法である直線距離を用いた輸送CO₂排出量および工場間の直線距離に係数をかける方法を用いた輸送CO₂排出量との比較を行い、CO₂排出量の差異がどの程度あるのかを評価した。

[キーワード] マルチモーダルシフト、道路ネットワーク、船舶ネットワーク、鉄道ネットワーク、CO₂排出量

1. はじめに

近年、コンクリート産業界では、環境負荷削減の機運が高まっており、さまざまな工場が、自身の製品のカーボンフットプリントを評価し、データを比較検討しようとする流れが強まっている。さらに、個別のカーボンフットプリントだけでなく、コンクリート産業全体の現況を再現し、また将来のCO₂排出量や廃棄物量のフローを推定する手法として、広域資源循環・LCA計算シミュレータecoMAなどが提案されている。

従来のライフサイクルアセスメント(LCA)の手法では、輸送距離を求める方法として、地域間の平均的な輸送距離を用いる方法や、工場間の直線距離に係数をかける方法などの簡易計算を行う

場合が多かった。しかし、コンクリート産業界では輸送距離が及ぼす影響が大きい。ある現場で生コン需要が発生し、周辺にある工場に発注をかける場合は、通常の製品工場と異なり原材料の調達に極めて流動的であるため、もっとも条件のよい（距離の近い）工場が選択される可能性が高い。例えば、CO₂排出量が小さくなるように原材料を調達する場合、従来の方法を用いる場合、県庁所在地間の距離算定方法では工場間の差異が生まれない、直線距離×係数では異なる工場が選択されるなど、選択の優劣を正しく評価できない現状があった。

この発注先に選択性が生まれること、輸送距離格差を適正化することによって、CO₂排出量を削減できる可能性がある。特に、首都圏の都心を対象としたコンクリート産業界全体でのCO₂排出量は年間440万トン以上と推定されており¹²⁾、輸送重量の影響も大きく無視できないと考えられる。さらに、近年のPC演算速度の向上により、道路ネットワークさえ準備可能であれば、道路距離による計算が容易となってきた。

一方、輸送距離を求める方法として、実測値により求める方法もある。しかし、この方法では、現況再現のための道路距離を求めることは可能であるが、ecoMAのような将来予測を行う場合、実測することはできないといった問題がある。

輸送距離を求める方法として、道路距離のみならず船舶、鉄道を輸送機関として考慮できる計算モジュールをecoMAに組み込むことを目的とし、具体的な計算方法について示す。

2. 研究目的

以上を踏まえ、本研究では、輸送距離を求める方法として、道路距離のみならず船舶、鉄道を輸送機関として考慮できる計算モジュールをecoMAに組み込むことを目的とし、具体的なモデル化について示す。さらに、適用事例として、日本の関東一都三県の建設現場での生コンクリート需要を満たすマテリアルフローを対象としたシミュレーションを実行し、生産と輸送に関するCO₂排出量を算出する。特に、輸送CO₂排出量については、移動時の道路距離とその排出原単位からCO₂排出量を算出し、簡易な方法である直線距離を用いた輸送CO₂排出量および工場間の直線距離に係数をかける方法を用いた輸送CO₂排出量との比較を行い、CO₂排出量の差異がどの程度あるのか評価した。

3. 研究方法

(1) ecoMAについて

ecoMAはコンクリート産業に関連する企業、団体にヒアリング調査、アンケート調査を実施することでデータを収集するとともに、これらの情報を行政、ゼネコン、生産工場、中間処理場、最終処分場といった関係団体にそれぞれエージェントとして実装する。これによって、各エージェントが実態に即した活動、意思決定を行うことができ、地域特性を考慮したマテリアルフローを再現することができる。このマテリアルフローをシミュレーション上で再現させることで、CO₂排出量や廃棄物量の定量的な評価結果を知ることができ、環境負荷の低いマテリアルフローの構築や政策決定に役立てることが可能となっている。

(2) 道路距離の計算モジュールの組込について

本章では、輸送距離を求める方法について整理し、具体的な道路距離の計算モジュールの内容

について示す。

製品化されているLCAソフトには、建築物を対象とするものとして、1997年に米国で開発されたBEESの他、同じく1997年にカナダで開発されたATHENAなどがある。これらのLCA手法では輸送に関するCO₂排出量については考慮されていない。産業全体を対象とするものとしては、産業環境管理協会のJEMAI-LCAがある。JEMAI-LCAでは、地域間の平均的な輸送距離を用いる方法や、実測値を用いる方法が適用されている。筑井ら³⁾は廃棄物処理に輸送手段を考慮したCO₂排出量の算出を行っている。彼らは自動車による輸送距離には、都道府県間の代表的な移動距離を適用している。

つぎに、直線距離による簡易計算を行えるように道路距離と直線距離の関係性を示した研究がいくつかみられる。腰塚ら⁴⁾は直線距離と道路距離が比例関係にあることを理論的に示している。田村ら⁵⁾はその比を迂回率と定義し、迂回率を用いて道路網を評価している。Richard C. L.ら⁶⁾はネットワークを固定しない場合、道路距離が直線距離のおよそ1.273倍になり、その値のばらつきが、標準偏差で0.0155になるということを示している。

しかしながら、こうした直線距離による簡易計算や地域間の平均的な輸送距離を用いる方法は、適用する道路ネットワークが粗である場合や、地理的特性によっては、直線距離と道路距離の関係が必ずしも一定でないことが言われている。地域毎の計算を志向しているecoMAでは、この影響は大きいと考えられる。また、実測値を用いる方法では、現況再現のための道路距離を求めることは可能であるが、ecoMAのような将来予測を行う場合、実測することはできないといった問題がある。さらに近年、PCの演算速度の向上により、道路ネットワークさえ準備可能であれば、道路距離による計算が容易となってきている。

そこで、本研究では現実の道路ネットワークを用い、個別の取引先同士の供給元から需要地への輸送について、道路距離を用いることで算出することとした。直線距離 D_{direct} と道路距離 D_{road} の計算方法を図 1 に示す。まず、道路ネットワークは、ノードは交差点、リンクは交差点間を結ぶ道路リンクによって構成されている。そして、直線距離は、供給元および需要地となる各工場および建設現場の緯度経度座標からHubenyの距離計算式により算出する。つぎに、道路距離は道路ネットワークを用いて求める。供給元と供給元に最も近い道路ネットワーク上のノード（起点ノード）を直線距離 D_{origin} で求め、同様に需要地と需要地から最も近い道路ネットワーク上のノード（終点ノード）を直線距離 $D_{destination}$ で求める。さらに、起点ノード、終点ノード間の移動距離については、Dijkstra法を用いた最短経路探索によりネットワーク距離 $D_{network}$ を算出する。これらの和より道路距離は $D_{road} = D_{origin} + D_{network} + D_{destination}$ とした。ただし、供給元と起点ノードの直線距離、終点ノードと需要地の直線距離が長い場合、過大推計になることが考えられる。そこで、供給元と起点ノードの直線距離、終点ノードと需要地の直線距離の合計が供給元と需要地の直線距離より長い場合（ $D_{direct} \leq D_{origin} + D_{destination}$ ）は単純な供給元と需要地の直線距離 D_{direct} を用いることとした。

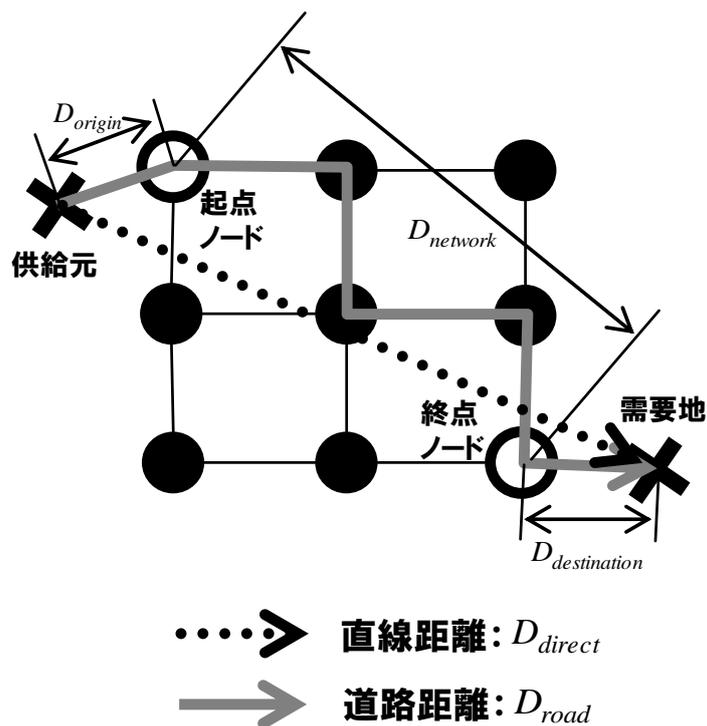


図 1 道路距離と直線距離の計算方法

4. 結果・考察

(1) 道路ネットワークを組み込んだケーススタディ

日本の関東地方の一都三県の建設現場の生コンクリート需要を対象にして、道路距離の計算モジュールを組み込んだecoMAのシミュレーションを実行し、検証を行った。

1) シミュレーションの概要

シミュレーションの概要について説明を行うため、今回検証に使用したマテリアルフローを図2に示す。

まず、建設現場に納品される生コンクリートは生コンクリート工場で生産され、生コンクリート工場から建設現場に輸送される。ここで生コンクリートの需要は、全国生コンクリート工業組合連合会の関東一都三県の生産量を利用し、これが人口密度（三次メッシュ人口）に比例して、各地の建設現場に納品されると仮定する。つぎに、生コンクリートの生産に必要なセメント、砕石、砂は、それぞれセメント工場、砕石工場、砂利採取場で生産され、生コンクリート工場まで輸送される。セメントについては、セメント工場で生産されたのちセメントサービスステーションを経由して、生コンクリート工場に輸送される。各製品の輸送は道路ネットワークを経由している。各工場および建設現場との取引先は、需要地に最も近く、かつ最大生産量に達していない供給元となる工場が選定されるとする。需要地に最も近い工場が最大生産量に達していた場合には、次点の（2番目に近い）供給元となる工場と取引を行うとする。

つぎに、生産および輸送のCO₂排出量の計算方法について説明する。生産によるCO₂排出量は、各工場の生産量と生産CO₂排出原単位の積によって行う。各工場の生産によるCO₂排出原単位について

は、表1に示すように、岩田らの論文によった。同様に、輸送によるCO₂排出量は、各工場および需要地間の輸送量と輸送距離、輸送CO₂排出原単位の積によって行う。輸送CO₂排出原単位は、2001年の日本の統計データに基づく輸送機関別CO₂排出原単位から営業用普通トラックの0.174kg-CO₂/t・km を採用⁸⁾した。

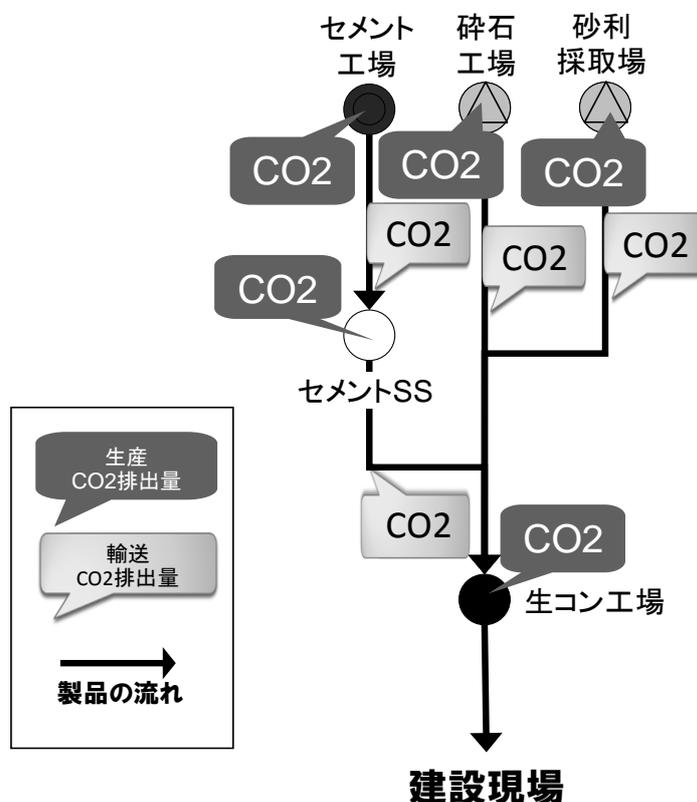


図 2 適用したマテリアルフロー

2) 道路ネットワークの特徴

関東地方の道路ネットワークとコンクリート関連産業の工場分布を図 3に示す。道路ネットワークは、みんなの地球プロジェクトver. 1.1 transl.zipから関東地方の道路ネットワークを抽出した。対象となる道路ネットワークはノード数12,643、リンク数30,170であった。関東地方の地理的特性としては東京湾に面しており、東京湾を通行できるリンクは東京湾アクアライン1つしかないため、東京湾岸を移動する際は、場合によっては大きな迂回が必要となることがわかる。

表1 各工場の生産CO₂排出原単位¹⁾

工場種別	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
セメント工場	733.98
生コンクリート工場	1.06
採石工場	4.21
砂利採取場	3.56

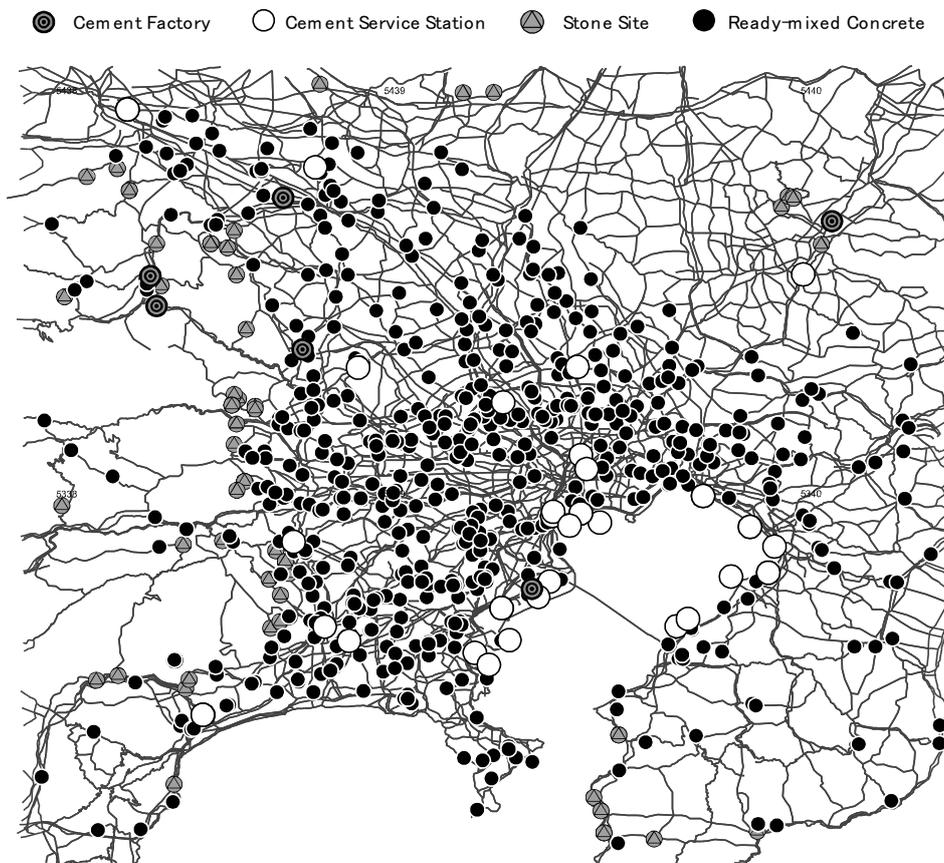


図 3 関東地方の道路ネットワークとコンクリート関連産業の工場分布

3) シミュレーション試算

シミュレーションの実行時間は、CPU3.3GHz、使用言語VBAで計算した結果、2時間33分であった。大規模ネットワークに対してシミュレータとして十分に機能することが可能な計算時間であると考えられる。このシミュレーションの実行結果を用いて、道路距離と直線距離、直線距離に係数をかける方法でのCO₂排出量や移動距離の比較を行い、その考察を以下に示す。なお、直線距離に係数をかける方法の係数は、Richard C. L.らが示した1.273倍とした。

生産と輸送のプロセス別総CO₂排出量の比較について図4に示す。全体に占める輸送CO₂排出量の割合は、道路距離では5.7%で、直線距離に係数をかけた場合より0.1%増加、直線距離を用いた場合よりも1.2%増加した。輸送CO₂排出量の総量は道路距離では、直線距離に係数をかけた場合より2%（8,000トン）増加、直線距離を用いた場合よりも30%（9万トン）増加した。道路ネットワークを利用することで精度の高いCO₂排出量を算出したことにより、CO₂排出量が直線距離の場合と比較してどの程度大きくなるか定量的に把握できた。

つぎに、輸送資材別CO₂排出量の比較について図5に示す。

砕石、砂、セメント（セメントサービスステーション—生コンクリート工場）、セメント（セメント工場—セメントサービスステーション）の輸送では、直線距離に係数をかけた場合の0.80

～1.12倍（-4,800～4,500トン）、道路距離が直線距離の1.30～1.43倍（8,000トン）になっていた。生コンクリート以外の輸送では、道路距離が直線距離によるCO₂排出量を上回っていることがわかった。また、郊外から都心部への長距離輸送が多い砕石や砂に比べ、セメント（セメント工場－セメントサービスステーション）では、直線距離と道路距離のCO₂排出量の比が大きくなっており、輸送資材により利用される道路や地理的特性が異なることから道路距離を利用することによる影響が異なることがわかった。しかし、生コンクリートの輸送では、道路距離が直線距離の1.02倍、直線距離の0.80倍となっていた。これは、供給元、需要地から起終点ノードまでの距離よりも供給元から需要地までの直線距離が短い地点では、供給元から需要地までの直線距離を利用することとしているためである。輸送距離が最大でも12kmと短い生コンクリートの輸送では、最も近いノードでもある程度遠いため、このような結果となったと考えられる。このような結果の改善方法としては、より詳細な道路ネットワークデータを用いるか、もしくは D_{origin} や $D_{destination}$ を最寄りノードとの距離ではなく最寄りリンクとの距離を用いることなどが必要である。

最後に、道路距離と直線距離を利用した場合の輸送品別個別輸送距離の比較について図6に示す。砕石と砂とセメント（セメントサービスステーション－生コンクリート工場）の輸送では個別取引先ごとの道路距離と直線距離の比にそれほど大きなばらつきはみられなかった。それと比較して、セメント（セメント工場－セメントサービスステーション）の輸送では、直線距離が30km以上の部分で、道路距離と直線距離の比にばらつきがみられた。これは、関東地方には東京湾があり、セメントの輸送にはこの東京湾を迂回するルートが多く含まれているためと考えられる。このような例は東京湾だけでなく、地域によって必ず存在すると考えられることから、道路距離を用いる有効性を示す一例であるといえる。

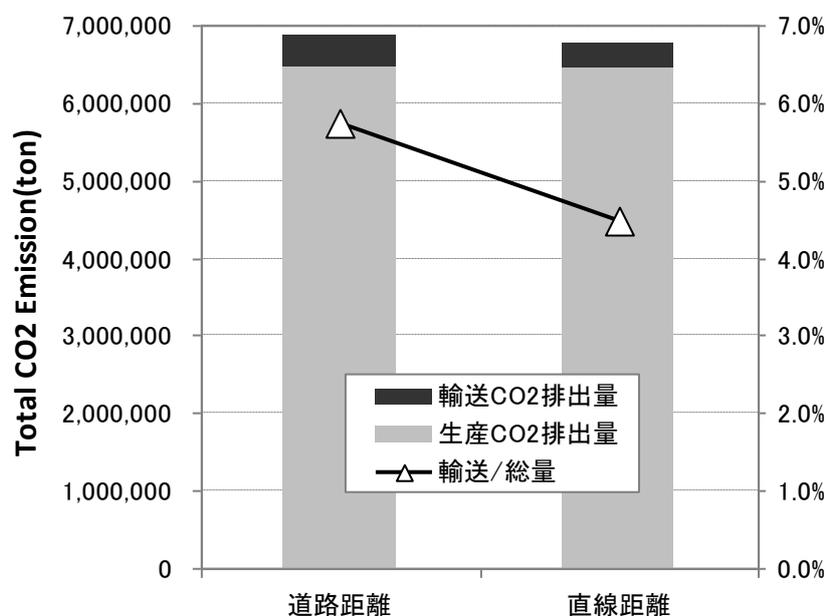


図4 プロセス別総CO₂排出量

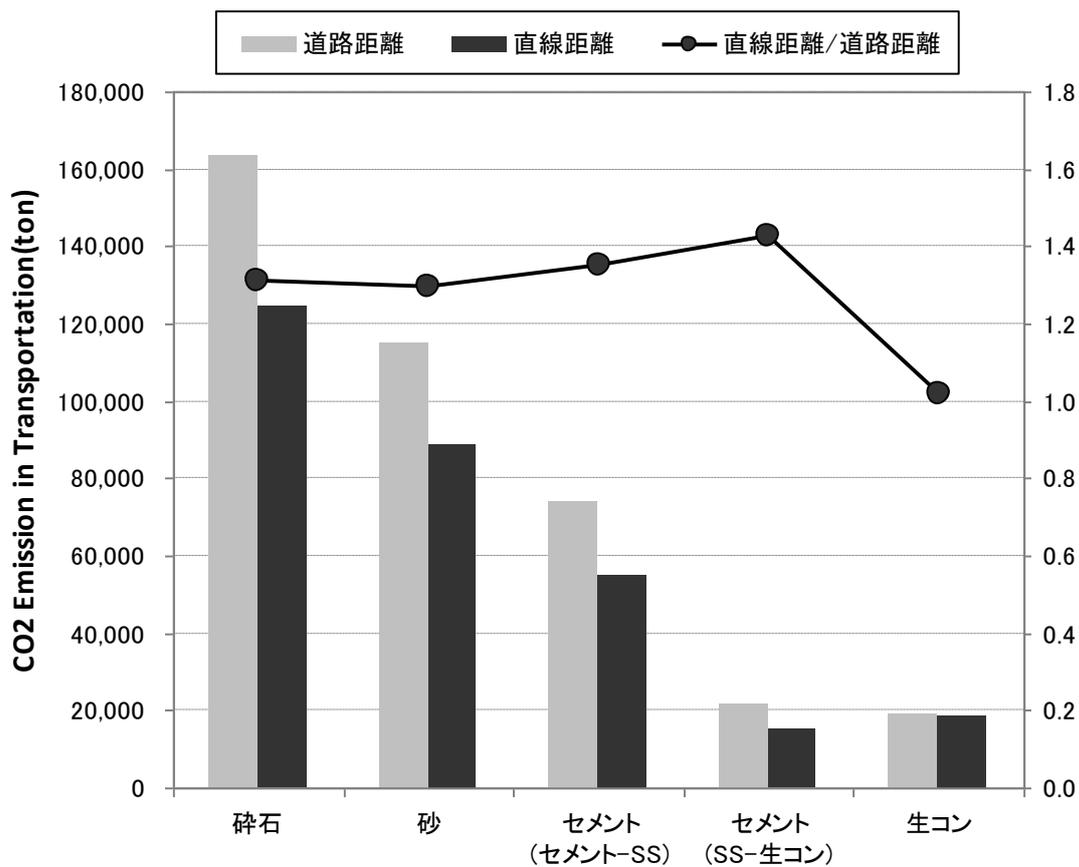
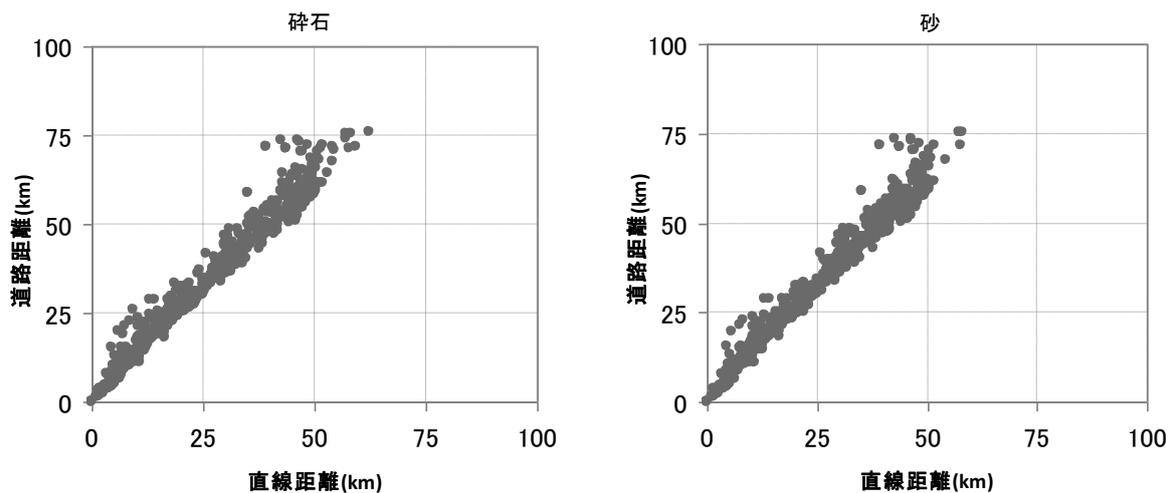


図 5 道路距離と直線距離を利用した場合の輸送資材別CO₂排出量の比較



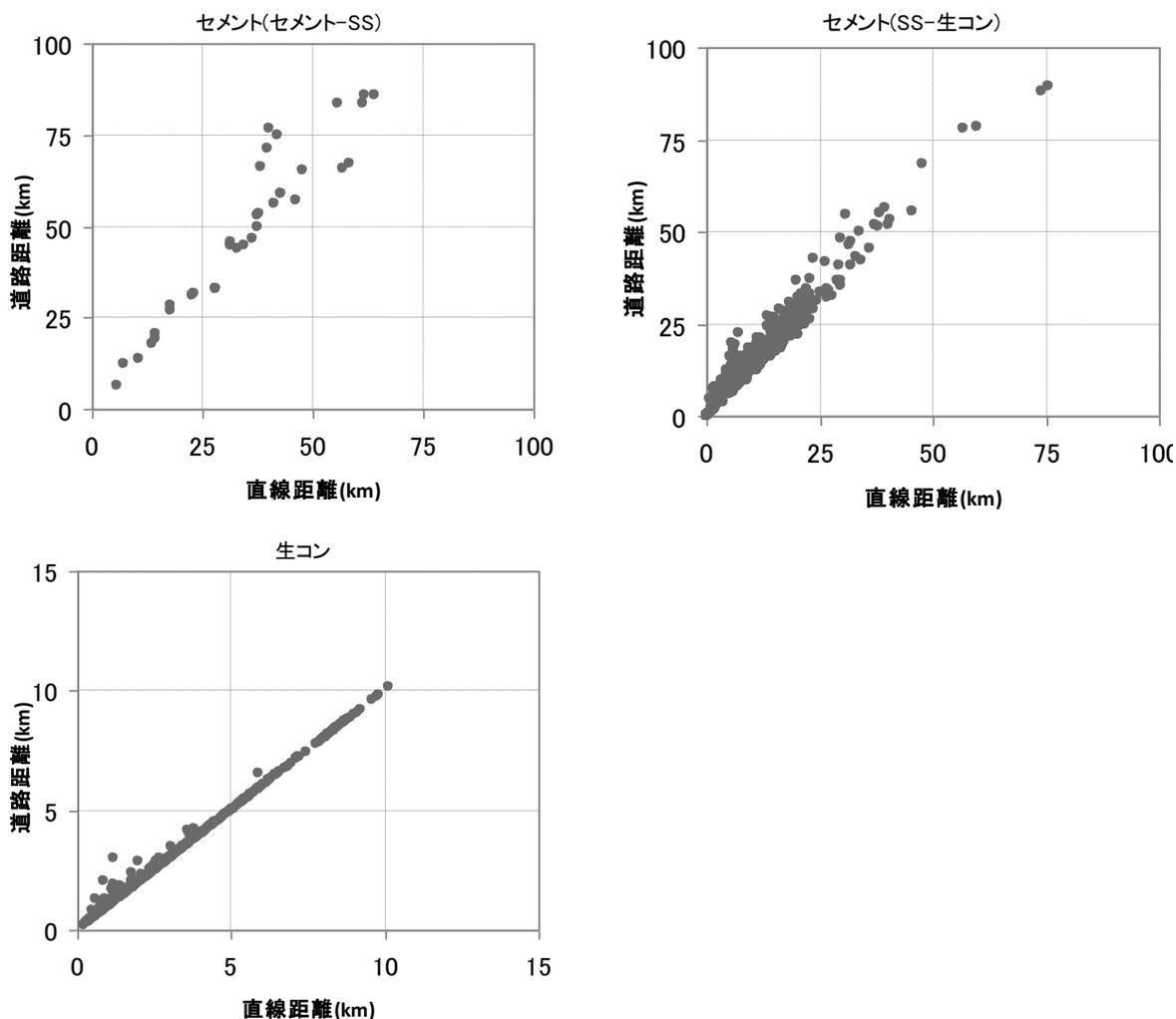


図 6 道路距離と直線距離を利用した場合の輸送品別個別輸送距離の比較

(2) マルチモーダルネットワークと輸送排出原単位

1) マルチモーダルネットワークの導入

次に道路ネットワークをecoMAに導入したモデルをさらに拡張して、船舶ネットワーク、鉄道ネットワークを導入する。まず、図 7にマルチモーダルネットワークの作成例を示す。道路および鉄道ネットワークは、みんなの地球プロジェクトver.1.1 transl.zipから全国のネットワークを抽出する。航路ネットワークは、内航距離表を用いる。トラック輸送ではどこからでも道路が利用可能であるが、船舶および鉄道は港および鉄道駅からしか利用できない。そこで、代表的な港および鉄道駅をそれぞれ抽出することとする。港は、平成19年度のセメント、砂、石灰石移出移入上位10港と内国貿易上位30港をあわせた43港とする。鉄道駅は、JR貨物のコンテナ取扱駅一覧からORS(Off Rail Station)を除いた93鉄道駅とする。船舶および鉄道を利用する場合は、需要地から港及び鉄道駅までは道路ネットワークを利用することとし、港および鉄道駅と最寄りの道路ネットワークを結ぶ接続リンクを作成する。以上の要素から構成されるマルチモーダルネットワークの属性別ノード数及びリンク数を表 1にまとめる。

輸送CO₂排出原単位は、2001年の統計データに基づく輸送機関別CO₂排出量単位から営業用普通トラック0.174kg-CO₂/t・km、鉄道0.021kg-CO₂/t・kmを採用する。船舶については、大量長距離輸送を想定し、バルク船の排出原単位0.007kg-CO₂/t・kmを採用する。

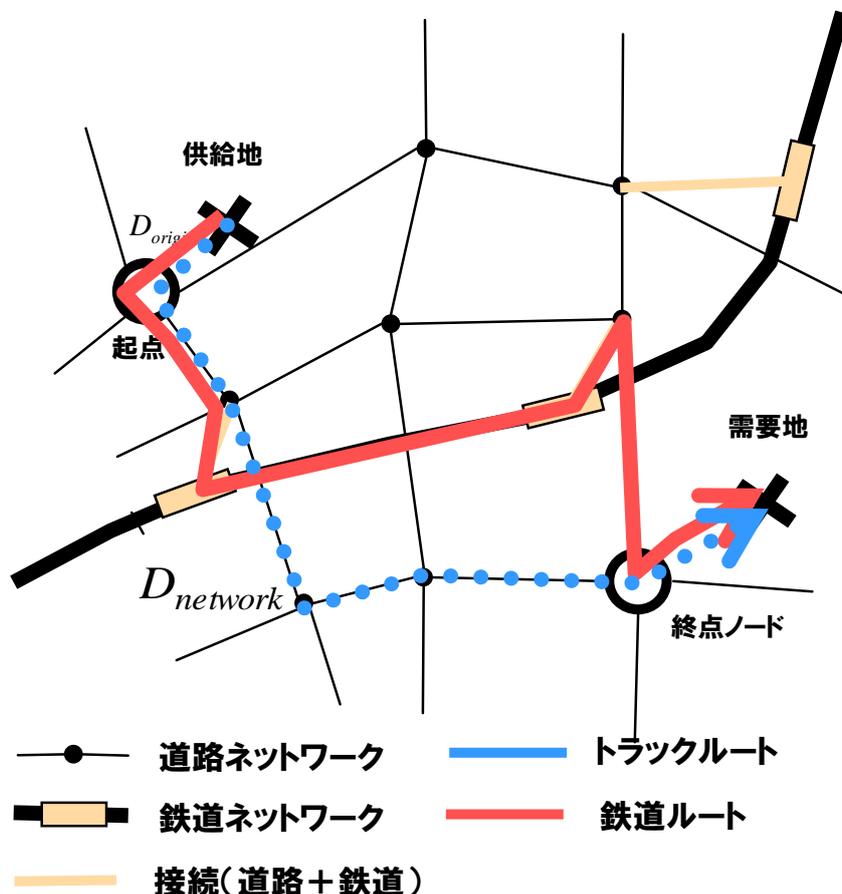


図 7 マルチモーダルネットワークの作成例

2) マルチモーダルでのシミュレーション試算

関東地方の一都三県の建設現場の生コンクリート需要を対象にして、複数輸送手段を考慮したecoMAのシミュレーションを実行する。シナリオ別で比較を行い、その考察を以下に示す。なお、セメント工場、セメントサービスステーションは全国を、砕石工場、砂利採取場、生コンクリート工場は関東の工場を対象としている。シミュレーションの実行時間は、CPU3.3GHz、使用言語VBAで、最大3時間47分であった。つぎに、シナリオ別交通手段別の輸送トンキロCO₂排出量を図8に示す。総移動距離をみるとCO₂排出量最小の場合、距離最小と比較して鉄道の割合が半分以上にまで増加することがわかる。CO₂排出量に対して、鉄道の分担率が高まり、削減のポテンシャルが高いことがわかる。最後に、シナリオ別交通手段別の輸送CO₂排出量を図9に示す。総CO₂排出量を比較するとCO₂排出量最小の場合、距離最小と比較して約20%減少することがわかる。このことから、どの程度CO₂削減のポテンシャルがあるか定量的に把握することができる。

表 1 マルチモーダルネットワークの構成

	Link	Node
船舶(航路)Network	1495	224
うち港	-	43
鉄道Network	49549	24072
うち鉄道駅	-	93
トラック(道路)Network	145338	62297
接続(道路-航路)	86	-
接続(道路-鉄道)	186	-
計	196654	86593

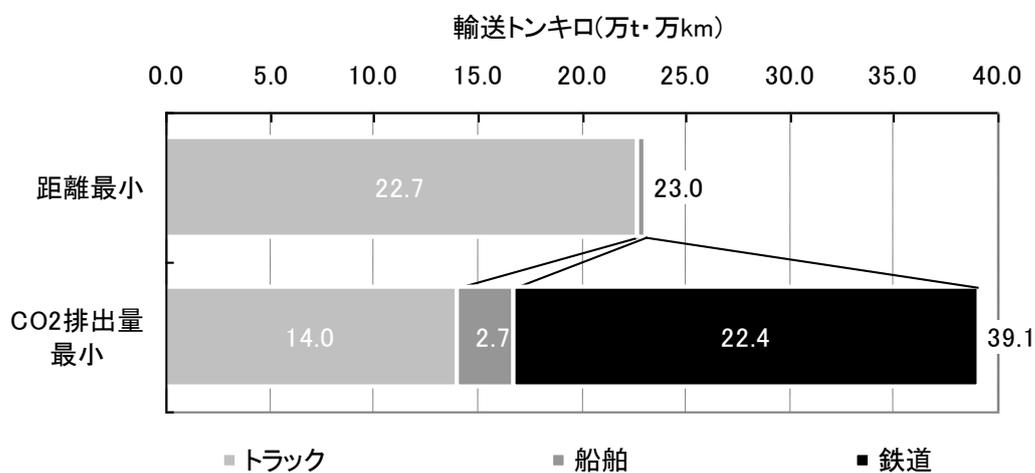
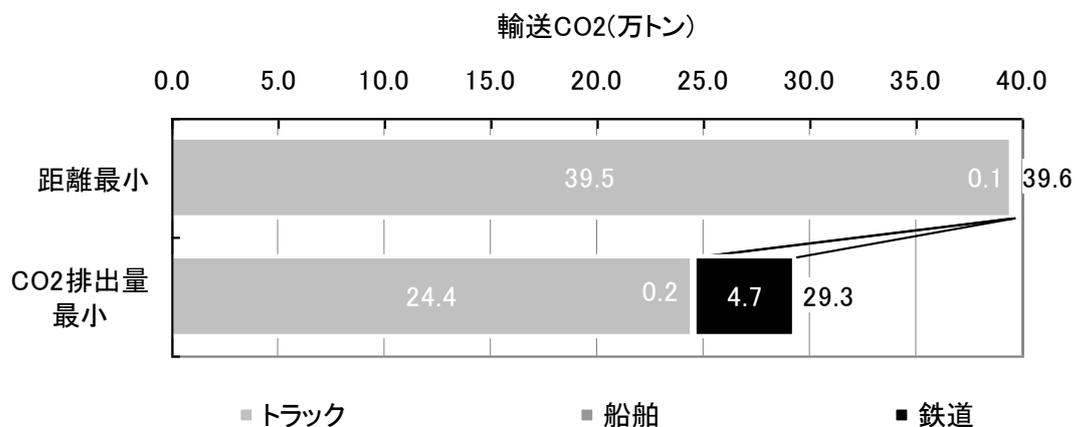


図 8 シナリオ別交通手段別の輸送トンキロの比較

図 9 シナリオ別交通手段別の輸送CO₂排出量の比較

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

道路距離を考慮できる計算モジュールをecoMAに組み込んだ適用事例を示すことで、道路距離を考慮したCO₂排出量を計算することが可能であることを示した。その結果、道路距離では直線距離と比較して、どの程度CO₂排出量が大きい値となるかを定量的に算出することが可能になった。利用される道路や地理的特性が異なることから、輸送資材によってCO₂排出量の道路距離と直線距離の比に変動があることがわかった。このことから道路距離を考慮してCO₂排出量を算出することにより、従来に比べ、精度の高い値を算出できることが可能である。

これに続いて、複数輸送手段を考慮した輸送CO₂排出量の算出方法をecoMAに組み込み、その適用事例によって計算可能であることを示した。

その結果、トラック輸送のみの場合と比較して、各工場が輸送CO₂排出量を削減するような行動をとった場合、どのような影響を及ぼす可能性があるかについて定量的に把握することが可能になった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究により、社会資本整備にかかわる資材の調達において、マルチモーダル化を図ることでCO₂排出量が削減できることが明らかにされ、再現できるようになった。我が国のコンクリート業界は、実にさまざまな、製造部門からバージン材や廃棄物を受け入れている現状があり、それによって、他産業の廃棄物処分にともなうCO₂排出量増大リスクや最終処分量増大リスクを負担してきた経緯がある。この一方で、多岐に渡る資材輸送のほとんどが、ダンプによる個別輸送を中心としており、大口化によるモーダルシフトによる効果については検討の必要性が指摘されていた。本研究では、ecoMAのマルチモーダル化と、これまでの車主体の輸送実態との比較によって、効果の検証が定量的に実現し、実際に関東一都三県をケーススタディとしてその効果を実証した。

6. 引用文献

- 1) 北垣亮馬, 岩田彩子, 兼松学, 長井宏憲, 藤本郷史, 野口貴文 (2008): 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 1233-1234
- 2) 藤本郷史, 北垣亮馬, 兼松学, 野口貴文, 間宮尚, 鈴木宏一 (2005): 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 1021-1022
- 3) 筑井麻紀子, 中村圭佑 (2009): 日本LCA学会誌, 5 (4), 462-472
- 4) 腰塚 武志, 小林純一 (1983): 日本都市計画学会学術研究発表会論文集, 18, 43-48
- 5) 田村一軌, 腰塚武志, 大澤義明 (2001): 日本都市計画学会学術研究論文集, 36, 877- 882
- 6) Richard C. L., Amadeo R. O. (1981): "Functions of Random Variables and Geometrical Probability", URBAN OPERATIONS RESEARCH, Prentice Hall, 77-100
- 7) 岩田彩子, 兼松学, 野口貴文, 長井宏憲, 北垣亮馬, 藤本郷史 (2010): 日本建築学会技術報告集, 16 (32), 43-48
- 8) 国土交通省、環境負荷の小さい物流体系の構築を目指す実証実験補助制度におけるCO₂排出削減量の算出方法について (CO₂排出削減量の計算要領, 国土交通省 地球温暖化問題への国内対策に関する関係審議会合同会議資料), 国土交通省ホームページ、入手先

<<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/H16youryouCO2.pdf>> (参照2009-10-21)

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

三谷卓磨、北垣亮馬、長井宏憲、野口貴文：道路ネットワークを実装した資源循環シミュレータ ecoMA によるコンクリート産業のCO₂ 排出量の空間的特性評価、日本LCA学会論文集、2011年3月(掲載決定)

なし

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

(2) 口頭発表(学会等)

三谷卓磨、北垣亮馬、長井宏憲、野口貴文：実道路ネットワークを考慮したシミュレーションシステム ecoMA の拡張、日本建築学会大会学術講演梗概集、1323-1324, F-1, 2010. 9

岩本直大、北垣亮馬、三谷卓磨、長井宏憲、野口貴文：コンクリート混和材料の使用によるコンクリート産業界のCO₂ 排出量低減に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1093-1094, A-1, 2010. 9

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし