

物質フロー・ストックモデルによる 近未来における耐久消費財の資源循環の推計

藤井 崇¹・吉川 実¹・田崎 智宏²・小口 正弘²・中島 謙一²
・大迫 政浩²・橋本 征二^{2,3}

¹非会員 みずほ情報総研(株) 環境エネルギー第1部 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3)
E-mail:takashi.fujii@mizuho-ir.co.jp

²正会員(独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail:tasaki.tomohiro@nies.go.jp

³正会員 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:shashimo@fc.ritsumeai.ac.jp

近未来の社会条件の変化や想定される対策から、耐久消費財に用いられる主要な資源および発生する廃棄物についての物質フローとストックを推計するモデルを開発した。このモデルは、耐久消費財(乗用車、家電等)の需要を満たすための素材利用を、バージン材、リサイクル材、輸出入等の影響を考慮した資源収支から推計するとともに、CO₂排出量推計も組み入れ温暖化対策の効果も一定の精度で評価できる。

事例計算では、乗用車を取り上げ、2030年までの社会変化として対照的な2つの社会シナリオを設定し、それぞれの素材需要および廃棄物・リサイクル状況の推計を行った。さらに、軽量化、カーシェアリングといった各種対策が実施された場合を想定した対策シナリオを設定し、近未来における資源利用量等の推計を行った。

Key Words : *sound material-cycle society, material flow, cohort analysis, durable goods, car*

1. はじめに

耐久消費財のようにある程度長期にわたり使用される製品は、毎年のフロー量(出荷台数、使用済み台数)に比べて多くのストック台数が社会に存在する。また、出荷と使用済みでは製品の製造年に10年程度のタイムラグが発生しているため、製品の製造に使用する素材の構成と使用済み製品の素材構成とに差がでてくる。例えば、現在は、使用済みテレビはブラウン管式が大部分であるのに対して出荷される製品は液晶式・プラズマ式が大部分であり、使用済みテレビのブラウン管由来のガラスの用途にミスマッチが生ずるという状況が発生している。使用期間が長い耐久消費財のマテリアルフローを定量的に把握することは、製品システムにおける上流側の資源・材料選択や製品設計と下流側の収集、リサイクル・適正処理対策を連関させるもので、3Rの各対策の効果や副次的な影響を検討する上で必要となる。また、耐久消費財、特に自動車や家電では中長期的な省エネ性能の向上も進められており、製品使用段階における温室効果ガス

の排出等の影響についても考慮することが重要となっている。

さらに、近未来(2030年)に向けては社会構造の変化やライフスタイルの変化に伴う耐久消費財の需要変化も想定される。社会変化の方向性を考慮し、諸対策の導入による枯渇性天然資源採取量の変化や資源循環・廃棄などの各断面における物質フローの変化を算出することができるようになれば、相乗効果の得られる効果的な対策の組み合わせや今後予想される廃棄物排出量の経年変動に予め対応した政策立案を行うなどの中長期的な視点での検討に資すると考えられる。

そこで、このような社会シナリオの変化要因による製品システムの変化や、3Rの各種対策の効果の評価することを目的として物質フロー・ストックモデルの開発を行うこととし、本稿では耐久消費財を対象としたモデル開発の結果を報告する。本物質フロー・ストックモデルは、耐久消費財の現在の物質フロー及び、過去からのストックの蓄積を出発点とし、将来に渡って経年的に物質フローとストックを算出するモデルである。

2. 物質フロー・ストックモデル

(1) モデル全体構成

物質フロー・ストックモデルは、図-1に示すように耐久消費財だけでなく耐久財（土木・建築物）や消費財（食料、容器包装）を含めたモデルと、各種資材の生産バランスを推計する生産プロセスモデル、廃棄物処理を評価する廃棄物処理プロセスモデルから構成される。

モデルでは、まずフロー・ストックモデルにおいて、後述する社会シナリオ及び対策シナリオを設定し、対象製品の需要量と各種中間製品（資材）の需要及び老廃屑、加工屑の発生量を推計する。推計された中間製品（資材）と屑の発生量と、フロー・ストックモデルで考慮されていない各種資材の需要量、輸出入量等を入力データとし、需要を満たす製造量やリサイクル量を推計する。モデルの全体像については、橋本ら¹⁾などに記載している。

(2) 耐久消費財モデルの構成

耐久消費財フロー・ストックモデルは、耐久消費財の需要量の推計と需要に伴う使用済製品、廃棄物等の発生量を推計するモデルである。

耐久消費財モデルの推計手順は、図-2に示すように、まず世帯数と世帯当たりの保有台数からストックとしての保有台数を全対象期間について推計する。次に、過去から現在までの国内販売台数の時系列値と、ワイブル分布関数に当てはめた製品の使用年数分布を用いて、現在から現在+1年までの使用済み台数を推計する。そして、将来の保有台数と使用済み台数との差分を取ることで将来の国内販売台数を推計し、将来の使用済み台数を同様に推計する（1年ずつ実施して繰り返す）。

将来の国内生産台数は、国内販売台数に輸出台数加え、輸出台数を引いた台数として推計する。この際に、輸出台数は外部から条件として与えている。この国内生産台数に、耐久消費財1台あたりの資材使用量と生産時の資材ロス率を乗ずることで、国内生産に必要な資材量を推計する。

使用済み耐久消費財からは、設定された中古輸出台数、廃棄・リサイクル率等を用いて部品リユース量、リサイクル量、最終処分量等の推計を行う。

また、耐久消費財のストックは、出荷年次別の保有台数としてデータを推計しており、出荷年次別の平均エネルギー使用性能データを用いて、耐久消費財使用時のエネルギー消費量やCO₂排出量を推計できるようになっている。

乗用車を対象とした耐久消費財モデルの場合は、平均的な車両として、電気自動車とその他の自動車（ハイブリッド含む）の2種類を設定し、それぞれの種類ごとに上述の計算を行なった。乗用車に関する3Rの対策の影響を評価するために、図-2右側の網掛け部分が入力パラメータとして設定できるようになっている。

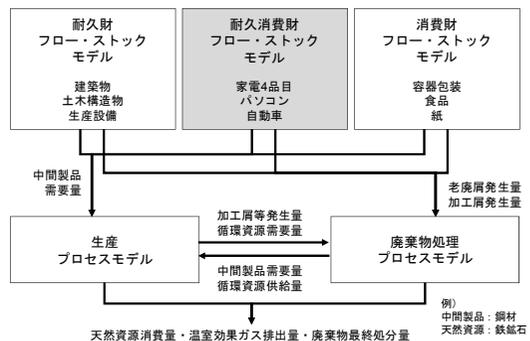


図-1 物質フロー・ストックモデルの構成

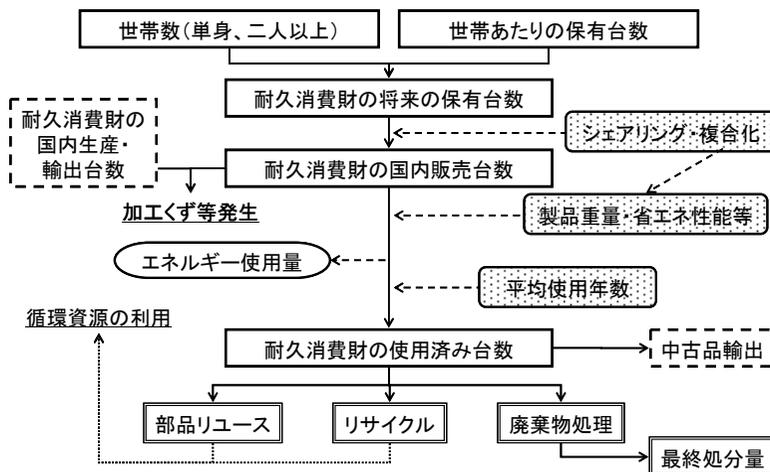


図-2 耐久消費財モデルの概要

3. 社会シナリオ及び対策シナリオの設定

(1) 2つの社会シナリオ

本研究では、低炭素社会ビジョンのシナリオ³⁾を参考に、社会シナリオとして2030年までの社会変化として対照的な2つの「社会シナリオ」を設定し、それぞれのシナリオでの素材需要および廃棄物・リサイクル状況の推計を行った。1つ目の社会シナリオAは、「活力、成長志向」を基調とし、技術開発の積極化と新製品の普及などを想定することとした。もう一方の社会シナリオBでは、「ゆとり、足るを知る」を基調とし、技術に依存せず、長期使用や共有化などのライフスタイルの変化を中心とした社会を想定することとした。設定にあたっては、橋本ら³⁾による資源循環・廃棄物分野の将来シナリオも定性的に参考にした。ただし、国際市場・貿易、資源価格などの製品システムの外部環境の変化で不確実性の高いものについては、今回の計算においては考慮せず、耐久消費財の製品システムに直接的に影響する要因を考慮して、シナリオ設定を行うこととした。

(2) 乗用車の社会シナリオ・パラメータ

上記の社会シナリオA、Bに沿って設定した乗用車に係る具体的な社会シナリオを表-1に示す。人口・世帯数については「日本の世帯数の将来推計（全国推進）」⁴⁾の推計値を使用した。乗用車に直接的に関するパラメータは、世帯当たりの保有台数、平均使用年数、平均車両

重量、自動車の資材利用量、乗用車燃費、電気自動車普及率などである。乗用車の世帯当たり保有台数は、単身世帯と二人以上世帯の2区分で条件設定を行っており、社会シナリオAでは現状の97%、社会シナリオBでは、くるま離れが一層進み現状の85%まで低下する想定をした。シナリオ想定に沿って推計した2030年での乗用車国内出荷台数は、社会シナリオAでは約470万台と現状よりも微減程度であるが、社会シナリオBでは約280万台と大きく減少することとなる（図-3）。

また、社会シナリオAは技術の発展を中心とした社会想定のため、技術開発による車両の軽量化や平均燃費の改善がより進み、また、電気自動車の普及台数も増える想定である。一方、社会シナリオBは、自然志向や生活志向という点でライフスタイルの見直が進むという社会想定であるため、長期使用やリユース、カーシェアリングなどの使い方の面での変化が顕著な想定となっている。

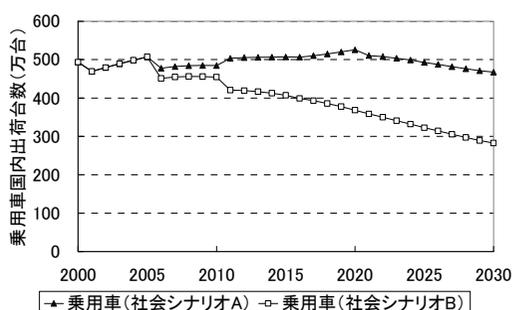


図-3 乗用車の出荷台数推移

表-1 乗用車の社会シナリオ設定

パラメーター	現状 (2005)	社会シナリオA (2030)	社会シナリオB (2030)
人口 (百万人)	128	115	
世帯数	二人以上世帯 4906万 単身世帯 1446万	二人以上世帯 4880万、単身世帯 1824万 (単身世帯と二人以上世帯を区別)	
世帯変化	-	単身世帯の増加、高齢化、所得の二極化	
社会の方向性	-	個人主義、技術志向、効率性・利便性、社会変化速い	共生主義、自然志向、生活志向、社会変化遅い
くるまの変化	-	平均使用年数は現状維持 燃費改善の軽量化が大きく進展	くるま離れが著しく進展 平均使用年数は長期化 (長期使用+リユース) 燃費改善の軽量化が幾分進展 部品リユースの進展
世帯あたりの保有台数	二人以上世帯 1.41 単身世帯 0.44	車離れにより、過去のトレンドの 97% 。	車離れにより、過去のトレンドの 85% 。
平均使用年数	11.4年	10.3年 0.9倍に短縮	13.1年、 1.15倍に増加 (長寿命化製品の普及で1.05倍、長期使用・リユースで1.1倍)
平均製品重量	統計値	高張力鋼板の導入他により、過去のトレンドの 80% 。	高張力鋼板の導入他により、過去のトレンドの 93% 。
自動車の資材利用量	統計値	-	部品リユースの推進のため、資材利用量が 0.8倍
輸出入 (新品)	統計値	現状	現状
乗用車燃費※1	統計値	ガソリン車 20% 改善 (ハイブリッド車の寄与分を含む)	ガソリン車 5% 改善 (ハイブリッド車の寄与分を含む)
電気自動車	ゼロ	販売台数の 15% ※2	販売台数の 7% (シナリオAの半分)
電気自動車のCO2排出原単位	統計値	0.31kg-CO2/kWh※3	
電気自動車の消費電力量※1	0.1※4 (kWh/km)	10% 改善	5% 改善

※1 現状と2030年間の期間は線形補間。

※2 「次世代自動車普及戦略検討会(2009) 次世代自動車普及戦略(H21.5)」⁵⁾における2030年でのEV販売シェアから社会シナリオAを設定。

※3 環境省「2050年の中長期ロードマップ自動車WG資料」の電力排出係数(0.19kg-CO2/kWh(2050年)と現状の線形補間により2030年の値を設定。

※4 東京電力での試算値。

(3) 乗用車の3R対策シナリオ・パラメータ

次に、各社会シナリオにおいて乗用車の3R対策がとれた場合を想定するシナリオ（以下、「対策シナリオ」という。）を設定した。表-2に示したパラメータを踏まえ、以下の4種類の対策を考慮することとした。以下、それぞれについて述べる。

a) 軽量化（対策A1, B1）

社会シナリオAでは、平均車両重量が2030年で過去のトレンドの80%（20%軽量化）となる想定を置いている。対策シナリオA1では、軽量化の対策を更に進めた場合に社会シナリオの2倍の軽量化が進むという条件を設定し、トレンドの60%（40%軽量化）となる想定とした。

対策シナリオB1でも同様に、社会シナリオの2倍となる想定（7%軽量化が15%の軽量化に進む）を設定した。

b) 長寿命化と長期使用（対策A2, B2）

長寿命化と長期使用はそれぞれ事業者側と消費者側の取組であり対策として異なるものであるが、モデルでは平均使用期間として両者の効果を合わせたものとしてモデルに組み込んでいるため、平均使用年数の変化を対策シナリオのパラメータとして設定した。

社会シナリオAでは、電気自動車等への買換えが進み2030年の平均使用年数が現状の11.4年から10.3年（0.9倍）に短くなる想定であった。対策シナリオA2では、長寿命化製品の普及を想定し、逆に現状の1.1倍（12.5年）に平均使用年数が伸びる条件に設定した。

対策シナリオB2では、13.1年（現状の1.15倍）とした社会シナリオBの条件から、更に長期使用で1.2倍、長寿

命化で1.08倍となることを考慮し、2030年の平均使用年数が14.8年（現状の1.3倍）に伸びる条件に設定した。

c) カーシェアリングの普及促進（対策A3, B3）

近年サービスが始まっているカーシェアリングは、乗用車の共有化により世帯当たりの平均保有台数を削減する対策として考慮した。

社会シナリオAでは、世帯当たりの平均保有台数に影響するほどカーシェアリングが普及しないという想定であるが、対策シナリオA3ではカーシェアリングが一定程度普及して、世帯当たりの平均保有台数が社会シナリオAから更に5%削減されると想定した。

社会シナリオBでは、カーシェアリングの市場により平均保有台数が1%削減されるという想定であるが、対策シナリオB3では、カーシェアリングの普及対策により、世帯当たりの平均保有台数が10%削減される想定とした。

d) 電気自動車の普及促進（対策A4, B4）

電気自動車の普及は、温暖化対策として重要であり、循環型社会の構築と低炭素社会の構築の両方に関わる象徴的な取組であるため、対策として考慮することとした。

社会シナリオAでは、2030年時点の電気自動車の販売割合を15%としているが、対策シナリオA4ではこれが40%まで増加する想定とした。

社会シナリオBでは、2030年時点の電気自動車の販売割合を7%としているが、対策シナリオB4では対策により10%増加し17%まで増加する想定とした。

表-2 乗用者の需要面での対策シナリオ設定

対策	パラメーター	対策シナリオA（2030）	対策シナリオB（2030）
対策の方針		技術的な対策をより重視 ・軽量化のさらなる進展 ・長寿命化製品の開発・普及 ・電気自動車の大幅な普及	ライフスタイルの変更を伴う 対策をより重視 ・長期使用 （製品リユースを含む） ・シェアリング（乗用車） ・電気自動車の普及
軽量化 （高張力鋼板の導入等）	平均車両重量	【対策シナリオ-A1】 過去のトレンドの80%→60%	【対策シナリオ-B1】 過去のトレンドの93%→85%
長寿命化と 長期使用	平均使用年数	【対策シナリオ-A2】 長寿命化製品の普及により 0.9倍→1.1倍 （既製品は変化なし）	【対策シナリオ-B2】 長期使用・リユースにより 1.1倍→1.2倍 長寿命化製品の普及により 1.05倍→1.08倍 全体として、1.3倍
カーシェアリン グの普及	世帯あたりの 保有台数	【対策シナリオ-A3】 5%減少 （過去のトレンドの97%→92%）	【対策シナリオ-B3】 10%減少 （過去のトレンドの85%→75%）
電気自動車 の普及	電気自動車の 販売割合	【対策シナリオ-A4】 さらに25%増加 （15%→40%）	【対策シナリオ-B4】 さらに10%増加 （7%→17%）

4. 推計結果

現状（2005年）及び社会シナリオ及び対策を講じた場合の2030年の物質フロー・ストックモデルの推計結果を示す。

図-4は乗用車の国内生産台数の推計結果を示す。今回の推計条件では輸出台数、輸入台数が現状から変化しないという想定を置いたため、図-4がほぼ国内販売台数の変化を示すものとなっている。各シナリオ条件に応じて平均保有台数と平均使用年数が変化し、それらの要因に影響を受けた国内生産台数の推計値である。Bシナリオの方が平均保有台数が少なく、平均使用年数が長いため、国内生産台数はAシナリオよりも少なくなる。また、対策別に見た場合、長寿命化・長期使用（対策2）による平均使用年数の増加の影響がカーシェアリング（対策3）よりも効いていると推計された。

図-5は、図-4の国内生産台数を賄うために必要となる主要な資材の需要量の推計結果である。概ね国内生産台数に比例した変化を示しているが、軽量化対策を大幅に推進したAシナリオでの軽量化対策（A1）が資材需要量の削減に大きく寄与していることがわかる。国内生産台数は対策シナリオA2が少ないにも係わらず、軽量化対策（A1）のシナリオの方が資材需要量が少なくなっている。これは、Bシナリオにおいても同様である。

使用済み自動車に由来する廃棄物等の発生量の推計結果を図-6に示す。平均使用年数が10年～15年程度であるため、各種シナリオの変化がタイムラグを持って廃棄物等の発生量にも影響している。例えばAシナリオで廃棄物等の発生量が少ないケースは軽量化を考慮したケース（A2）では、資材需要量の削減の効果が廃棄物等発生量にも効いていることがわかる。ただし、A、Bシナリオ間の比較で見ると、国内生産台数が少なくなるBシナリオの方が廃棄物等の発生量も少なくなる。

乗用車の走行時のCO₂排出量を推計した結果を図-7に示す。条件としては乗用車の総走行距離は一定として試算したものである。A、Bシナリオ間で比較すると、平均燃費改善効果の高いAシナリオの方がCO₂排出量は少なくなっている。対策の効果で見ると電気自動車の販売比率の高いケース（A4）においてCO₂排出量が最も少なくなっている。

図-5と図-7を比較すると、資源需要の削減が進むBシナリオに対して、Aシナリオは燃費改善によるCO₂排出量が削減される結果になり、トレードオフの関係があることが示された。

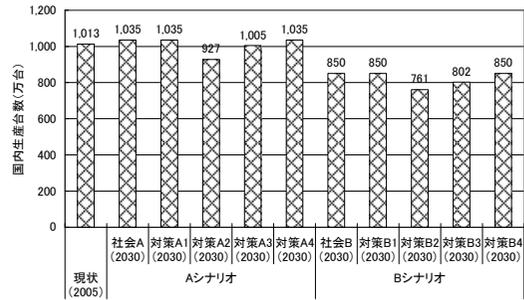


図-4 乗用車の国内生産台数の推計値

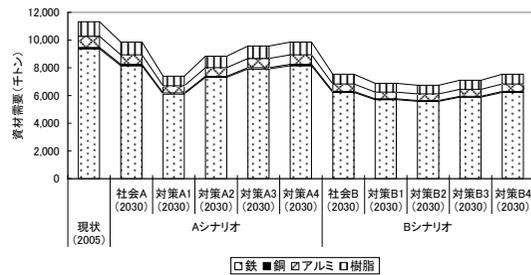


図-5 乗用車の資材需要量の推計値

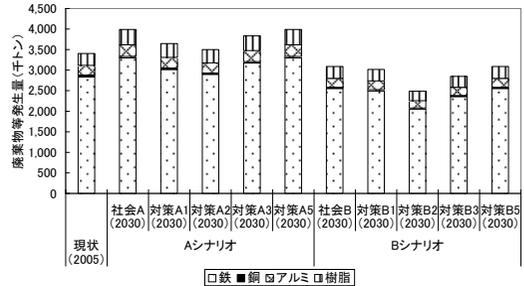


図-6 使用済み乗用車の廃棄物等発生量推計値

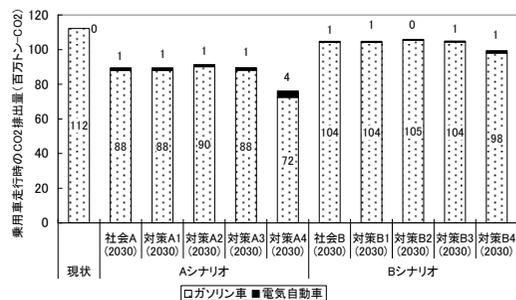


図-7 乗用車の走行時CO₂排出量の推計値

5. まとめ及び今後の課題

近未来における社会シナリオに基づく耐久消費財の利用状況と各種対策の効果を定量的に評価するモデルを開発し、乗用車と対象事例とした推計を行った。

長期間使用される耐久消費財では、様々な要因が連関して耐久消費財の生産等に伴う資源需要（資源消費）の変化を評価することが必要であり、今回の試算を通じて様々な要因や対策を考慮した評価ができることが示された。また、資源、廃棄物の側面と温暖化影響の側面を同じシナリオ設定で評価することができ、これらの影響の相互関係を考慮した対策効果として評価できるモデルとなった。また、今回は2030年時点の結果のみを提示したが、モデルでは年単位で時系列的な推移を計算できるようになっている。

2つの社会シナリオと4種類の対策の影響を評価したシナリオ分析の試算結果から、物質フロー・ストックモデルを用いて各種パラメータを設定することで各種要因の変化を反映した試算結果が得られることが確認できた。ただし、シナリオの想定とパラメータの設定値との関係性については、より詳細な検討が必要である。

推計結果の精度から見たシナリオ分析の課題としては、近未来（2030年）での社会情勢や、各種対策の効果をモデルのパラメータとして、どこまで精度高く設定できるかという点が肝要である。また、社会シナリオや対策効果について、パラメータが十分に反映できているか、また、各対策要因の影響を評価するために現状のモデルで設定されているパラメータで適切に評価できるかどうかという点も重要な課題であろう。例えば、カーシェアリングの影響を世帯あたりの平均保有台数で評価することなど、更なる検討が必要と考えられる。

このため、対策として考慮すべき要因の精査と、パラメータでの反映方法を踏まえて、モデルの改良を行なっていくことが重要である。

一方、物質フロー・ストックモデルの狙いとしては、将来の確かな予測値を推計するという点よりも、各種の対策の効果を定量的に把握した上で、どのような形で循環型社会の形成を進めていくか、すなわち、どのような施策を進めていくかについて議論を行なうためのツールとして活用する方がより重要かもしれない。ツールを利用する場面の特定・精査というマネジメント側の研究展開も求められるだろう。

謝辞：本研究は、（独）国立環境研究所の循環型社会研究プログラム「中核研究プロジェクト1：近未来の資源循環システムと政策・マネジメント手法の設計・評価」の一環として実施したものである。シナリオ設定条件等については、有識者等へのヒアリングを実施し、改善を図ったものである。ご協力を頂いた方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 橋本ら：日本の物質フロー・ストックモデルの構築とその適用、第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、2012.10（予定）。
- 2) 榎原ら：低炭素社会検討の前提となる社会経済ビジョンの構築、地球環境、pp145-151、2007.12。
- 3) 橋本ら：近未来の資源・廃棄物フロー及び資源循環・廃棄物管理システムに関するシナリオ・プランニング、土木学会論文集 G, Vol.65, No.1, pp44-56, 2009.3。
- 4) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の世帯数の将来推計（全国推進）、2008.3。
- 5) 次世代自動車普及戦略検討会：次世代自動車普及戦略、2009.5。

(2012. 7. 18 受付)

AN ESTIMATION OF MATERIAL USE/CYCLE OF CARS IN JAPAN BY USING A MATERIAL FLOW/STOCK MODEL DEVELOPED FOR DURABLE GOODS.

Takashi FUJII, Minoru YOSHIKAWA, Tomohiro TASAKI, Masahiro OGUCHI, Kenichi NAKAJIMA, Masahiro OSAKO and Seiji HASHIMOTO

We have developed a material flow/stock model for durable goods in order to estimate the major resource demand and volume of waste generation. With this model, it becomes possible to evaluate the changes in social conditions in the near future and the effectiveness of various measures. We can estimate CO₂ emissions from the use of durable goods as well by using this model.

In a case study we took up a passenger car to be evaluated, and set the two contrasting scenarios presenting social changes in Japan till 2030. We estimated the major resource demand and the amount of waste generation and recycling for each material. In addition to the two scenarios, we set scenarios of four different measures taken (long-term use, lightweight, car sharing, and the diffusion of electric vehicles), and estimated changes in the resource demand, waste volume, and CO₂ emissions.