

ポピュレーションバランスモデルによる ULSAB 車とアルミボディ車の環境負荷分析

角館 慶治*・山下 勝*²・足立 芳寛*²・鈴木 俊夫*²

Environmental Impact Analysis of ULSAB Cars and Aluminum-body Cars Using a Population Balance Model

Keiji KAKUDATE, Masaru YAMASHITA, Yoshihiro ADACHI and Toshio SUZUKI

Synopsis : A macro model of Japanese passenger cars that a scrap ratio distribution is applied to a population balance model (PBM) is constructed. The validity of this model is shown by comparing calculation results with statistics of cars in use. Inventory factors of aluminum-body car and ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) car from production stage to scrapping stage are calculated, and CO₂ emission amounts under an assumption that these cars popularize are analyzed. Consequently, it turns out that CO₂ emission amount from ULSAB cars are less than that from aluminum-body cars. In order to make it equivalent to the total CO₂ emission amount from ULSAB cars, it is shown that a recycled aluminum must be used about 50% in the aluminum-body. Moreover, in consideration of the effect on the aluminum industry by the popularization of aluminum body cars, time change of the aluminum amount which should be collected from ELV (End of Life Vehicle) is predicted, and increasing rapidly from 2010 is shown.

Key words: ULSAB; aluminum-body; population balance model (PBM); scrap ratio distribution; CO₂ emission; environmental analysis.

1. 緒言

著者らは、ポピュレーションバランスモデルに廃棄率分布を応用した乗用車マクロモデルを構築し、日本の乗用車の社会規模におけるCO₂排出量の時間変化について解析を行った¹⁾。その結果、2010年に1990年レベルの6%削減を達成するためには、2010年における燃費を1995年の2.42倍にする必要があることが明らかとなった。しかし、近年のエンジン性能の向上にかかわらず乗用車全体の平均燃費はあまり改善されていない。1997年の平均車両重量は20年前の約1.4倍²⁾にまで増加しており、車両重量の増加が主原因であると考えられる。今後はエンジン性能の改善と併せて、軽量化が燃費改善の重要なファクターとなる。その対策として現在では、アルミボディ化、ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body)化が注目されている。アルミボディ化は従来鉄で作られていた車体をアルミに置き換えること、ULSABは高張力鋼板等を使用すること、で軽量化を図るのが狙いである。アルミは鉄に比べて軽量化を図りやすい一方で製造時の環境負荷が大きいことに注意しなければならない。既にULSAB車とアルミボディ車についてはLCA (Life Cycle Assessment)による解析が行われており、中西ら³⁾によるとアルミ二次地金の使用率が両者の優劣を決定するという結論が得られている。また、高松ら⁴⁾は

ULSAB車の方が優れているとの計算例を紹介している。しかし、これらの乗用車が社会に普及した場合の社会規模でのCO₂排出量の変化については解析されていない。本論文では、アルミボディ車とULSAB車が社会に普及するシナリオを想定し、社会規模のCO₂排出量の時間変化の解析と予測を行った。ただし、素材だけではなく成形、接合、溶接などを含んだ総合的なコストや安定供給については考慮していない。

両車の大きな相違点として、素材構成の変化の度合いが挙げられる。ULSAB車の場合、使用される鋼板は変わるものの、鉄という点において素材構成がほとんど変化しないのに対し、アルミボディ車の場合、鉄が大きく減少しアルミが増加する。このことから、ULSAB車の普及は鉄鋼およびアルミ産業にそれほど大きな影響を与えないことが予想される。しかし、アルミ車の普及は年産1億トン(自動車1,100万トン)⁵⁾と生産量の多い鉄鋼産業に比べて年産400万トン(輸送100万トン)⁶⁾と生産量の少ないアルミ産業に大きな影響を与えることが予測される。特に使用済み自動車(End of Life Vehicle: ELV)から回収されるアルミの量が急激に増加すると、それをリサイクルする設備の増設が間に合わなくなり、回収アルミの行き場が無くなる恐れが生じる。そこで、回収アルミ量の時間変化の予測も行った。

平成14年3月28日受付 平成14年5月20日受理 (Received on Mar. 28, 2002; Accepted on May 20, 2002)

* 東京大学大学院生 (現: 新エネルギー・産業技術総合開発機構) (Graduate Student, The University of Tokyo, now New Energy and Industrial Technology Development Organization)

*² 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

2. 解析手法

2.1 解析モデル

日本では、乗用車はその排気量に従って3つのカテゴリー、普通車（2000cc以上）、小型車（660cc～2000cc）、軽自動車（660cc以下）に分類される。これらの乗用車は約10年でELVとなる⁷⁾。ELVの年間発生量は約500万台⁸⁾となっており、一部（約49万台⁸⁾は中古車として輸出されるものの、残りは解体後、有用な部品（エンジン、タイヤ、バッテリーなど）はリユースされる。ボディ等はシュレッダー処理を経て、鉄などの金属類はリサイクルされるが、残りのシュレッダーダストは焼却されるか埋立処理され、その発生量は年間約100万t⁹⁾となっている。

本モデルのマクロフロー模式図をFig. 1に示す。社会中に存在する乗用車は普通車、小型車、軽自動車に分類することとした。輸出車の製造、輸出は考慮せず、輸入車は日本で製造されていると仮定し、国内販売されている乗用車の生産から廃棄までを対象とし、中古車の輸出、リユース、リサイクルは考慮しないものとした。

2.2 ポピュレーションバランスモデル(PBM)による保有台数およびELV台数の計算

普通車の新規登録台数を $Q_r(t)$ 、ある時刻 t における社会の可能保有台数 V に対する単位使用年数あたりの普通車保有台数の割合を普通車保有率 $n_r(\alpha, t)$ 、と定義すると、PBM方程式は(1)式ようになる¹⁾。ただし、 α は使用年数である。

$$V \left[\frac{\partial n_r(\alpha, t)}{\partial t} + \frac{\partial n_r(\alpha, t)}{\partial \alpha} \right] = Q_r(t)\delta(0, t) - Vn_r(\alpha, t)h_r(\alpha, t-\alpha) \dots\dots\dots(1)$$

ただし r は普通車を意味する。また、 $\delta(0, t)$ はディラックのデルタ関数であり、廃棄率分布 $h(\alpha, t-\alpha)$ 、は単位年数あたりの保有台数 $V \cdot n(\alpha, t)$ に対する単位年数あたりの廃棄率と定義される。廃棄率分布は新規登録台数に対する単位年数あたりの廃棄率として定義される寿命分布 $g(\alpha, t-\alpha)$ 、か

ら以下の(2)式より求まる。

$$h(\alpha, t-\alpha) = \frac{g(\alpha, t-\alpha)}{1 - \int_0^\alpha g(\alpha, t-\alpha)d\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、寿命分布と廃棄率分布は乗用車の新規登録時に決定され、 $g(\alpha, t-\alpha)$ および $h(\alpha, t-\alpha)$ として与えられる。しかし、乗用車の寿命分布と廃棄率分布は大きく時間変化しないため、新規登録時ではなく使用時にその寿命が決定されると仮定できる。そのため、これら2つの分布は簡略化できるため $g(\alpha, t)$ および $h(\alpha, t)$ とする。よって、(1)式は(3)式のように書き直すことができる。

$$V \left[\frac{\partial n_r(\alpha, t)}{\partial t} + \frac{\partial n_r(\alpha, t)}{\partial \alpha} \right] = Q_r(t)\delta(0, t) - Vn_r(\alpha, t)h_r(\alpha, t) \dots\dots\dots(3)$$

初期条件 $n_r(\alpha, 0)$ および $n_r(0, t) = Q_r(t)/V$ を与え、(3)式を解くことにより保有台数およびELV台数が求まる。小型車、軽自動車についても普通車と同様に保有台数とELVを求めた。

2.3 CO₂排出量

普通車の使用中のCO₂排出量 $C_{user}(t)$ 、は使用年数 α の保有台数と新規登録時の燃費 $f_r(t-\alpha)$ 、の逆数と年間平均走行距離 $d_r(t)$ 、およびガソリン1リットルあたりのインベントリ係数 I_{gasr} 、の積を使用年数に関して積分することで求められる((4)式)。

$$C_{user}(t) = \int_0^\infty Vn_r(\alpha, t) \frac{1}{f_r(t-\alpha)} d_r(t) I_{gasr} d\alpha \dots\dots\dots(4)$$

生産時および廃棄時のCO₂排出量は、それぞれの台数と生産時および廃棄時のインベントリ係数の積で求める。PBM方程式同様、普通車、小型車および軽自動車の燃費および年間平均走行距離が異なるため、方程式をそれぞれについて導出することにより総CO₂排出量を求めることができる。

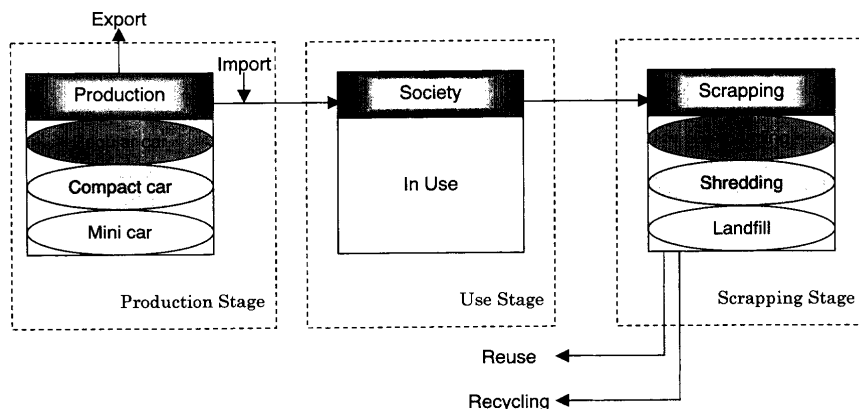


Fig. 1. Schematic mass flow diagram of Japanese passenger cars.

3. 計算条件

3.1 各種入力データ

計算に必要な統計入力データは新規登録台数、使用年数別保有台数、燃費、および年間平均走行距離である。各車種の新規登録台数は統計値^{7,10)}を用い、普通車と小型車に関しては1998年以降、軽自動車に関しては1999年以降一定と仮定した¹⁾。使用年数別保有台数は普通車、小型車は統計値⁷⁾を用い、軽自動車は適当な統計が存在しないため小型車より小型車の分布と同形と仮定して総台数が軽自動車のものとなるように推測した¹⁾。1980年から2000年までの燃費は統計値¹¹⁾を直線により近似し、2001年以降は2010年に1995年比21.4%改善されるように変化するとした¹⁾。なお、この値は日本政府が定めた目標値である¹²⁾。また、普通車および小型車の年間平均走行距離¹³⁾は1998年以降10,000 km/年一定、軽自動車¹³⁾は7,500 km/年と仮定し、それ以前は統計値を用いた¹⁾。

3.2 寿命分布

普通車の場合、統計⁷⁾から得られたデータを2つのガンマ分布 $g_{reg1}(\alpha)$ および $g_{reg2}(\alpha)$ により近似を行った。ガンマ分布 $g_{reg1}(\alpha)$ および $g_{reg2}(\alpha)$ の期待値はそれぞれ4.39年および12.5年、分散はそれぞれ2.23および5.73となった¹⁾。以下の(5)式により、2つのガンマ分布の全積分に対する規格化を行った。

$$g_{reg}(\alpha) = 0.052g_{reg1}(\alpha) + 0.948g_{reg2}(\alpha) \dots \dots \dots (5)$$

小型車についても統計⁷⁾から得られたデータを2つのガンマ分布 $g_{com1}(\alpha)$ および $g_{com2}(\alpha)$ にて近似を行った。ガンマ分布 $g_{com1}(\alpha)$ の期待値は3.45年、分散は0.727とした¹⁾。ガンマ分布 $g_{com2}(\alpha)$ の期待値は1989年に10年、2000年に11年となる様に変化し、2001年以降は11年一定と仮定した。また、分散は1989年に5.47とし、その後は変動係数を一定に保つ様に変化するとした¹⁾。普通車と同様に規格化を行って解析した。軽自動車に関しては統計値が得られなかったため、寿命分布を1つのガンマ分布 $g_{min}(\alpha)$ により推測した。期待値は1989年に9年、2000年に10年となる様に変化し、2001年以降は10年一定と仮定した。また、分散は1989年に4.44とし、その後は変動係数一定で変化すると仮定した¹⁾。なお、1989年は計算の開始年数である。

3.3 車体の軽量化とインベントリー係数

最初に、従来のスチール車の普通車、小型車および軽自動車の生産段階と廃棄段階のインベントリー係数を求めた。これらはサンプル車(1800cc, 1140 kg)のデータ¹⁴⁾を使用して各車種の平均車両重量から重量配分にて推算した¹⁾。各車種の平均車両重量および各インベントリー係数をTable 1にまとめた。生産段階では材料製造、部品製造、乗用車製造が、廃棄段階はシュレッダー、埋立、ボディおよび残渣の輸送、金属類のリサイクルが考慮されている¹⁴⁾。

Table 1. Car weight and inventory factors of sample car, regular car, compact car and mini car.

	Weight (kg)	Production (C·t/unit)	Waste (C·t/unit)
Sample	1140	1.32	0.0676
Regular car	1570	1.82	0.0931
Compact car	1080	1.25	0.0640
Mini car	747	0.865	0.0443

Table 2. Parts, material composition and their weight of sample car.

	Total (kg)	Ferrous (kg)	Alumi. (kg)	Non-Fe (kg)	Plastic (kg)	Rubber (kg)	Glass (kg)	Others (kg)
Engine System	121.5	66.3	43.6	4.1	4.5	2.1	0.9	0.0
Battery	12.0	0.0	0.0	6.6	1.8	0.0	0.0	3.6
Tire, Wheel & Tool	80.0	50.2	0.0	0.0	0.0	17.3	0.0	12.5
Oil & Liquid	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.0
Fuel Tank	10.0	9.8	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Drive, Sus. & Brake	222.6	207.3	10.6	0.2	1.6	2.9	0.0	0.0
Electric System	86.7	26.6	8.4	15.0	32.8	0.4	1.9	1.6
Interior & Exterior	202.2	70.4	0.0	2.2	55.8	13.8	32.5	27.5
Body	383.0	371.2	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	8.0
Total	1140.0	801.8	62.6	32.1	96.5	36.5	35.3	75.2

Non-Fe : Non-Ferrous metals excluding aluminum.

ただし、廃棄時のフロン類の処理は考慮していない。燃料(ガソリン)のインベントリー係数は $7.36 \times 10^{-4} (C-t/L)$ ¹⁾ とした。

次に、車体の軽量化について検討した。サンプル車の部品とその素材重量をTable 2¹⁴⁾に示す。車体のほとんどが鉄で構成されることから、軽量化により重量が変化する素材は鉄のみと仮定した。車体重量はアルミボディ化により35%、ULSAB化により25%軽量化されるとした³⁾。アルミ化により、車体に用いられる鉄371.2 kgはアルミ241.3 kgに置換され、車両重量は1,010.1 kgとなった。一方、ULSAB化により車体に用いられる鉄は278.4 kgとなり、車両重量は1047.2 kgとなった。これらの結果を元に軽量化を行った時の普通車、小型車、および軽自動車の車両重量をTable 3にまとめた。実際には車種により異なるが、ここではすべて同じ比率で軽量化されると仮定した。

次に、アルミボディ車およびULSAB車の製造時のインベントリー係数を求めた。スチール車に比したULSAB車のボディ製造に係るエネルギー投入量の減少量は車体重量の減少量に比例する³⁾。そのためパーツの組み立て等に係るインベントリー係数はスチール車と等しいとし、素材使用量の変化のみを考慮した。アルミボディー化の場合、1台あたりの鉄によるCO₂発生量は2.80 (t-CO₂/台)¹⁴⁾となっており、鉄使用量の減少に伴うCO₂削減量を1.30 (t-CO₂/台)と算出した。アルミ1 kgあたりのCO₂発生量には新地金で8.42 (kg-CO₂/kg)、二次地金で0.31 (kg-CO₂/kg)というデータを使用した¹⁴⁾。製造時の歩留まり85.4%¹⁴⁾を考慮し、ボディに使用されるアルミはすべて新地金であると仮定す

Table 3. Inventory factors of production stage, and the ratio of fuel economy improvement of regular car, compact car and mini car by aluminum-body and ULSAB.

		Regular car	Compact car	Mini car
Steel car	Average weight (kg)	1570	1080	747
	Inventory factor of manufacturing (C-ton/unit)	1.82	1.25	0.865
Aluminum car	Average weight (kg)	1391	957	662
	Inventory factor of manufacturing (C-ton/unit)	2.22	1.53	1.19
	Improvement ratio of fuel economy	1.12	1.12	1.12
ULSAB car	Average weight (kg)	1443	993	686
	Inventory factor of manufacturing (C-ton/unit)	1.70	1.17	0.81
	Improvement ratio of fuel economy	1.09	1.08	1.09

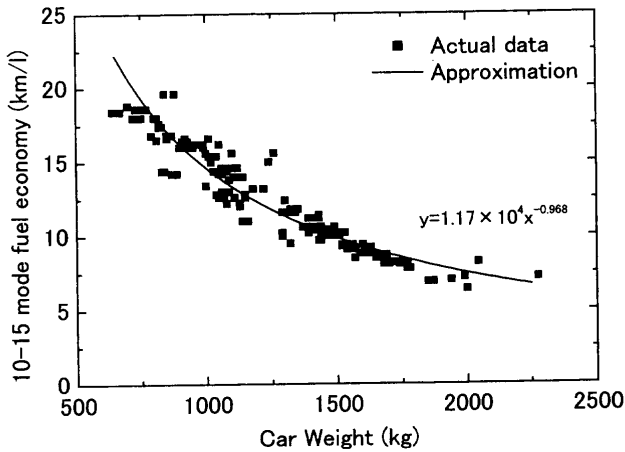


Fig. 2. Relation between car weight and 10-15 mode fuel economy.

ると、アルミ使用量の増加に伴うCO₂発生量は2.38 (t-CO₂/台)となった。スチールサンプル車1台あたりの製造時のインベントリー係数には4.84 (t-CO₂/台)¹⁴⁾を用い、アルミボディ化サンプル車を5.92 (t-CO₂/台)と算出した。一方、ULSAB化の場合、鉄使用量の減少に伴うCO₂削減量は0.324 (t-CO₂/台)となるため、ULSAB化サンプル車のインベントリー係数を4.52 (t-CO₂/台)と算出した。これらの結果を元に重量配分により得られるアルミボディ車、およびULSAB車の普通車、小型車、軽自動車の製造時インベントリー係数を求めた(Table 3)。なお、廃棄時のCO₂排出量は生産時、および使用時に比べ非常に少ない¹⁾ので、簡略化のためスチール車と同じ数値を用いた。

最後に、軽量化による燃費改善度を求めるため、乗用車の車両重量と燃費の関係¹¹⁾を求めた(Fig. 2)。図中の近似曲線を用いて軽量化後の車両重量から燃費を求め、軽量化前の燃費に対する比率を燃費改善度として求めた(Table 3)。ただし、車体の大きさの変化による空気抵抗その他の影響

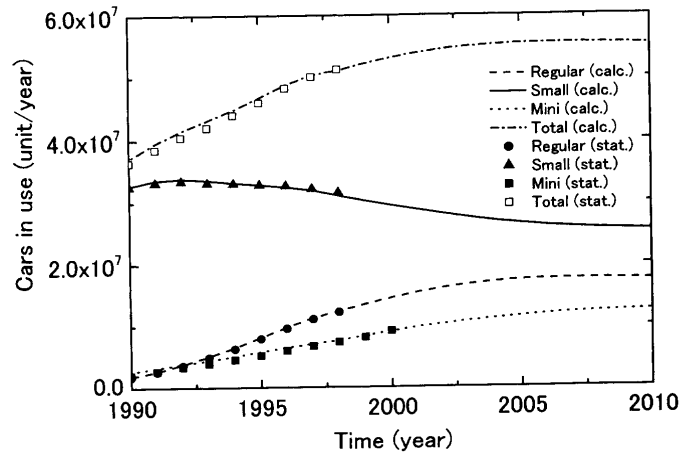


Fig. 3. Time change of calculation results and statistics of the number of cars in use.

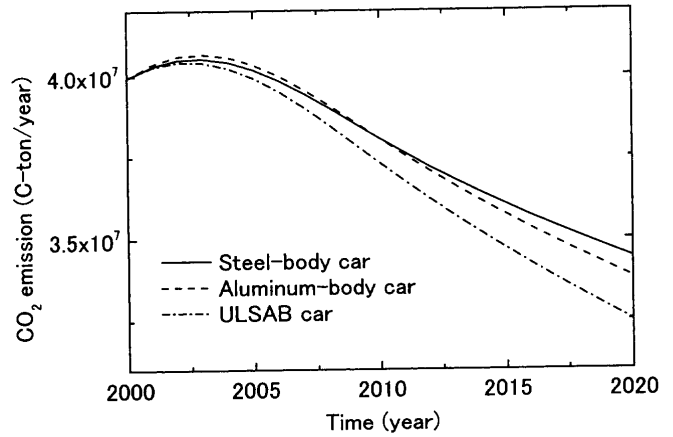


Fig. 4. Time change of total CO₂ emission amounts for aluminum-body cars and ULSAB cars.

による燃費の変化を考慮していないため、燃費改善度は大きく見積もられている可能性がある。

4. 結果と考察

4.1 CO₂排出量

保有台数の統計値⁷⁾および将来動向予測のシミュレーション結果をFig. 3に示す。シミュレーション結果と統計値は良く一致しており、本モデルが妥当であると言える。2000年以降、シミュレーションの予測によれば総保有台数は増加傾向にあり、2005年で5500万台程度でほぼ一定となることが明らかとなった。

ULSAB車とアルミボディ車はそれぞれ、新規登録台数に占める割合が2000年には0%、2020年には100%まで普及すると仮定した。アルミボディ車、ULSAB車、スチール車の総CO₂排出量の計算結果をFig. 4に示す。アルミボディ車はスチール車と同程度の総CO₂排出量であるのに対し、ULSAB車は減少することが明らかとなった。さらに

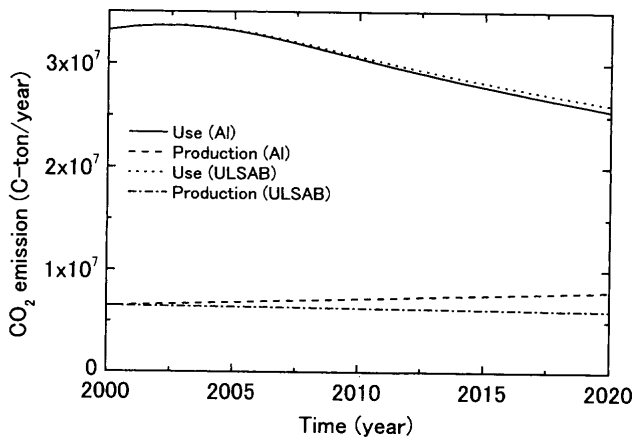


Fig. 5. Time change of CO₂ emission amounts of use stage and production stage ULSAB cars and aluminum-body cars.

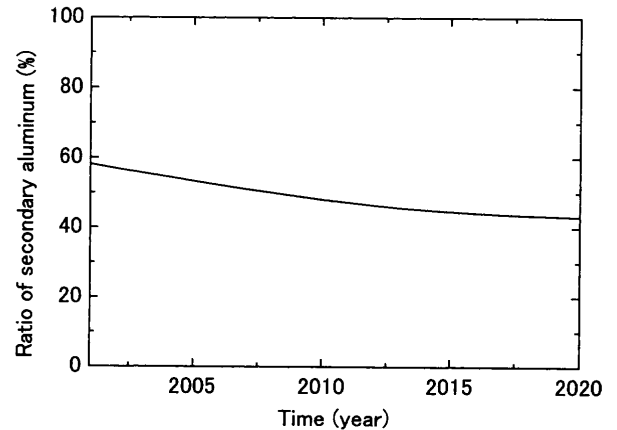


Fig. 6. Time change of the ratio of secondary aluminum used in car-body.

詳しく考察するため、ULSAB車およびアルミボディ車における使用段階および製造段階のCO₂排出量の比較結果をFig. 5に示す。より軽量化が図れるアルミボディ車の方が燃費が向上し、使用中のCO₂排出量はULSAB車に比べて小さくなった。一方、アルミ製造時のCO₂排出量が大いことから製造段階のCO₂排出量がULSAB車に比べ多くなっていることが明らかとなった。アルミボディ車の製造段階のCO₂排出増加量が使用段階の削減量を上回るため、総CO₂排出量はULSAB車の方が少なくなった。このことからアルミボディ車の軽量化によるメリットを活かすためには、製造時のCO₂排出量削減を図ることが重要であることが明らかとなった。

アルミは新地金に比べて二次地金の製造に係るエネルギーが3%程度と非常に小さいことが良く知られている⁹⁾。そこで、アルミボディ車による総CO₂排出量をULSAB車と同程度にするためには、どの程度二次地金を使う必要があるか試算した(Fig. 6)。時間の経過に伴いその値は減少していくが、約50%は二次地金を使うことが必要であることが明らかとなった。アルミボディ車の普及による使用段階のCO₂排出削減効果には時間格差があり、時間の経過に伴いその削減効果は大きくなる。そのため、製造時のCO₂排出削減を目的とした二次地金の使用率は減少していくものと考えられる。ただし、加工性に劣る二次地金は鋳物やダイキャストに用いられる場合が多く¹⁵⁾、ある程度加工性の要求されるボディにどこまで使用できるかが、大きな鍵となる。

4.2 素材構成の変化によるマスフローへの影響

ULSAB車は市販車としては存在しないものの実証試験が行われている¹⁶⁾。一方、アルミボディの市販車は高級車に限られている。両者ともに製造自体は可能と考えられるが、成形や溶接などに課題も多く、量産製造技術の確立には今後の努力が必要である。また、マスフローに関して、生産の点においては、仮に需要が急激に成長してもその供

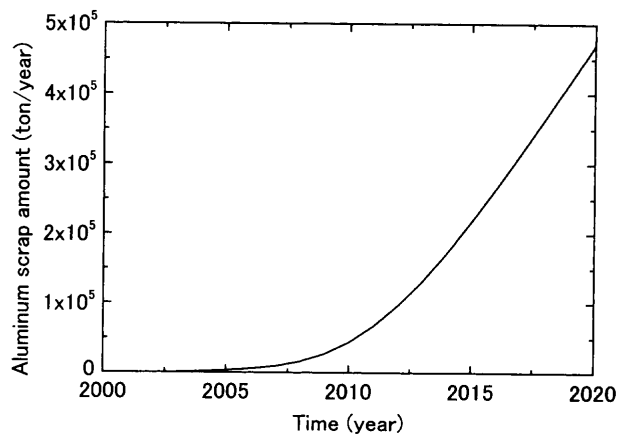


Fig. 7. Time change of aluminum scrap amount.

給は生産量次第であり、供給量は生産者側でコントロールが可能であると言える。しかし、リサイクルの点においては、回収量が急激に増加した場合、その処理設備の増設が間に合わず回収された金属が行き場を失う恐れがある。ULSAB車の場合、素材構成の変化が少ないため上述の恐れを考慮する必要はないが、アルミボディ車の場合には回収アルミがどのように時間変化するか予測する必要があるであろう。

そこで、ELVから回収されるアルミの量を予測した結果をFig. 7に示す。アルミボディ車の普及に伴い2010年あたりから回収量は急激に増加し、2020年には約50万トンとなった。これは1997年度の回収量4.2万トン¹⁷⁾の12倍にあたり、1999年度の二次地金の国内生産量120万トン⁹⁾と比較しても大きな値となった。10年という比較的短時間にこの量を処理する設備投資が行われなければならないことが明らかとなった。同時に、アルミボディ車の普及はアルミを製造する産業にも大きな影響を与えられらるので、アルミの量産製造技術の確立が必要となるであろう。

5. 結言

ポピュレーションバランスモデルに廃棄率分布を適用した乗用車のマスフローに関するマクロモデルを構築した。保有台数の統計値とシミュレーション結果により、本モデルの妥当性を示した。燃費および年間平均走行距離を求め、生産段階、使用段階、廃棄段階のインベントリー係数を適用し、CO₂排出量を予測した。そして、アルミボディ車とULSAB車が普及するシナリオにおいて両者の総CO₂排出量を比較したところ、ULSAB車の方が最大4%優れていることが明らかとなった。また、ULSAB車の総CO₂排出量と同等にするためには、アルミボディに二次地金を最低でも40%は使用しなければならないことを示した。また、アルミボディ車の普及により回収すべきアルミの量が2010年から急激に増加することを示した。これらの結果から、アルミボディ車はULSAB車と比較して、現時点において課題が多く、ULSAB車の方が軽量化に有利であるとの結論を得た。

本論文を提出するにあたり様々なご意見をいただいた新日本製鐵（株）高松信彦氏に感謝いたします。

文 献

- 1) K.Kakudate, Y.Kajikawa, Y.Adachi and T.Suzuki: *Int. J. LCA*, **7** (2002), 85.
- 2) 鉄リサイクル事業のマニュアルブック, (社)日本鉄リサイクル工業会, 東京, (1997).
- 3) 中西栄三郎, 藤原東彦: 第42・43回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (2000), 15.
- 4) N.Takamatsu and H.Ohashi: *J. Jpn. Inst. Met.*, **65** (2001), 557.
- 5) 鉄鋼統計要覧, 鉄鋼統計専門委員会編, 日本鉄鋼連盟, 東京, (1998).
- 6) Japan Aluminum Association: <http://www.aluminum.or.jp>, (accessed 2001-12-18).
- 7) わが国の自動車保有動向, (財)自動車検査登録協会, 東京, (1999).
- 8) I.Numajiri: *JARI Res. J.*, **21** (1999), 667.
- 9) Y.Kohara and K.Nakajima: *JARI Res. J.*, **21** (1999), 639.
- 10) Japan Mini Vehicles Association: <http://www.zenkeijikyo.or.jp/statistics/index.html>, (accessed 2001-10-12).
- 11) 自動車燃費一覧, 運輸省自動車交通局, 東京, (2000).
- 12) 香川 勉: 第42・43回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (2000), 1.
- 13) 自動車産業関連統計, 日本自動車工業会, 東京, (2000), 50.
- 14) A.Funazaki and K.Taneda: *Trans. Soc. Automotive Eng. Jpn.*, **32** (2001), 125.
- 15) K.Halada: Recycling of Metals, <http://www.nims.go.jp/ecomaterial/my-library/recycle/M-recycle/M-RCYCL.htm>, (accessed 2002-01-23).
- 16) Techno Scope, *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 931.
- 17) M.Okubo: *JARI Res. J.*, **23** (2001), 649.