

Nd磁石のフロー推定と ハイブリッド自動車用駆動モーターリサイクルの ライフサイクルアセスメント

Substance Flow Analysis on Neodymium Magnets and
Life Cycle Assessment for Recycling of Driving Motors
in Hybrid Electric Vehicles

京都大学環境保全センター
平井康宏


研究の背景

- レアメタルやレアアースを含む非鉄金属資源に対する関心が高まってきており、製品からの回収が検討されている。

(∵ 中国の資源消費国化、最新技術の普及に伴う需要拡大、価格高騰等)

◆ネオジム(以下Ndとする)

- レアアースの一つ
- Nd磁石の原料
 - モータ等にも使用され携帯電話やハイブリッド自動車、エアコンといった製品の小型化、省エネルギー化に大きく貢献

 日本の製品・産業競争力を支えている重要な資源

- 一方、Ndの原料鉱石については産出・供給のほぼ全量を中国のみに依存しているおり、供給不安の問題を抱えている。
- レアアースは統計等の中でまとめて扱われることが多く、Nd単体のフローの情報が少ないため、Ndの資源循環の現状を俯瞰することが困難となっている。

研究の目的と内容

- Ndの現状と資源循環上の課題点を明らかにすることを目的にNdのマテリアルフロー推定とNdリサイクルのLCA解析による評価を行った。

<Ndのマテリアルフロー推定>

Nd磁石量から磁石中に含まれるNd量を試算し、Ndの鉱石輸入から廃棄までのわが国での一連のフロー推定を試みた。

<NdリサイクルのLCA解析による評価>

Ndが供給不安要因をもった資源であることを考慮して、Ndの供給がなくなった場合における代替製品とNdリサイクルを比較した。
対象製品としては、将来の普及増加が見込まれるハイブリッド自動車用駆動モータとした。

Ndのマテリアルフロー推定

NdリサイクルのLCA解析による評価

Nd磁石について

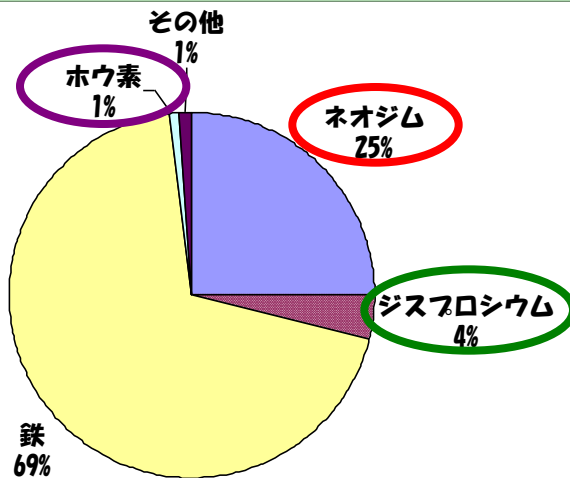


図1 Nd磁石の代表組成¹⁾

最高性能を示す永久磁石

＜Nd磁石組成＞

ネオジウム：重量割合で**25%**（本研究の設定値）

ジスプロシウム：磁石に添加して磁石の耐熱性、保持力の向上

ホウ素：Ndと共に鉄の磁力を引き出す

健康項目環境基準「1mg/L」がある（大量摂取すると健康影響）

＜本研究で対象としたNd磁石使用製品＞

- ・HDD（ハードディスク）〔VCM（ボイスコイルモータ）〕
- ・MRI（Magnetic Resonance Imaging）装置（磁気共鳴画像装置）
- ・自動車（ハイブリッド自動車用駆動モータ：HEVモータ）
（電動パワーステアリング：EPS, Electric power steering）

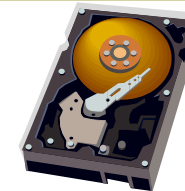


図2 MRI装置²⁾

- ・家電製品（エアコン、洗濯機、冷蔵庫、携帯電話、デジカメ・ビデオカメラ）
- ・光ディスク装置（光ピックアップ）

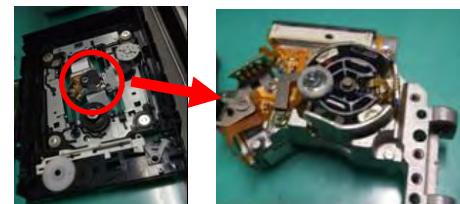


図3 DVDドライブ中の光ピックアップ

参考文献

1) 美濃輪武久：希土類磁石とその資源問題、金属、Vol.77、No.6、pp.4-9 2007

2) 日立メディコHP <http://www.hitachi-medical.co.jp/open-mri/>

フロー推定方法

- 鉱石輸入

中国海関統計より

- 磁石製造及び工程くず

磁石生産量: 石垣らの文献¹⁾より

工程くず量:

$$[\text{工程くず量}] = [\text{鉱石輸入量}] - [\text{磁石生産量}]$$

- 製品出荷(輸出入)*

$$[\text{磁石量}] = [\text{出荷量(輸出入量)}] \times [1\text{台あたりの使用磁石量}]$$

- 廃棄*

$$W_t(y) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{y}{y_t} \right)^b \cdot \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) \right\}^b \right]$$

$W_t(y)$: t年度末において使用年数y年(yは0以上の数)
までに使用済みになる割合

- 廃棄後の流れ

製品ごとに設定

* 使用磁石量を推計したのち
Nd磁石中のNd組成割合(25%)よりNd
量を計算した。

$W_t(y)$ をワイブル分布を
用いて推定

フロー推定結果

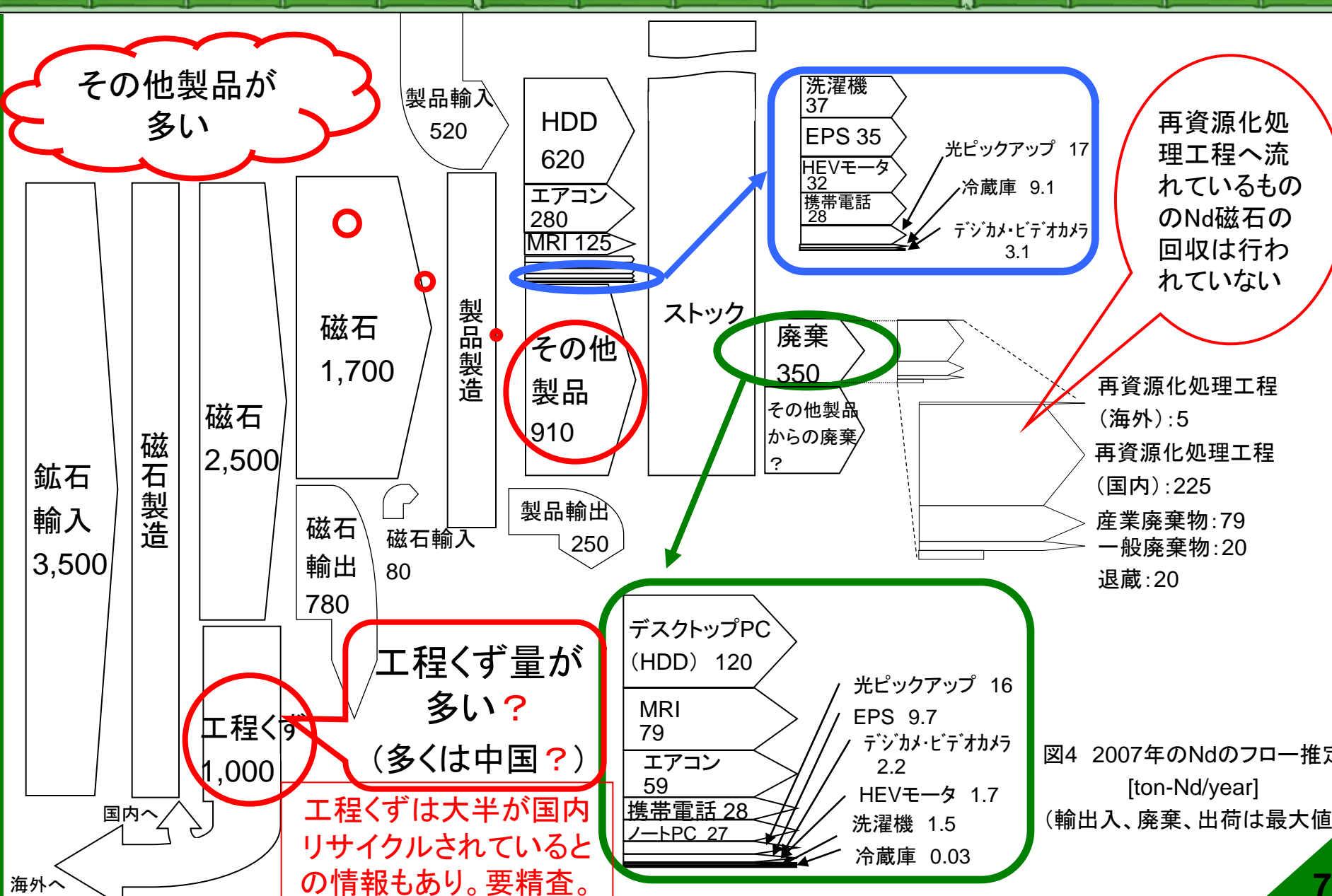


図4 2007年のNdのフロー推定 [ton-Nd/year] (輸出入、廃棄、出荷は最大値)

Ndのマテリアルフロー推定

NdリサイクルのLCA解析による評価

Nd磁石リサイクルのLCA

- 供給不安問題をもつ資源として評価を行うことが重要
(従来の新規鉱石からの製造といった対立シナリオではNdがもつ供給不安問題を無視することになるのではないか?)

<対立シナリオ>

- ◆ 新規鉱石からの製造ではなく、供給がなくなった場合の代替品での製造を考慮
- ◆ これからの需要増加が予測されるハイブリッド自動車に焦点をあてた

(次世代自動車普及戦略によれば2020年の販売台数目標: 150万台)

➡ Nd使用量375~750 [ton-Nd]

(磁石使用量1~2kg/台 計算)

現時点ではNd磁石リサイクルの具体的なプロセスの情報が十分でないため、どの程度の環境負荷までであれば、リサイクルが代替製品(非リサイクル)に比べて有利になるかを明らかにすることにした。

評価シナリオ

- シナリオとしては以下の3つ

機能単位: 10万kmの走行(10・15モード)

システム境界
原材料調達
製造(材料、車両)
走行

評価項目
二酸化炭素

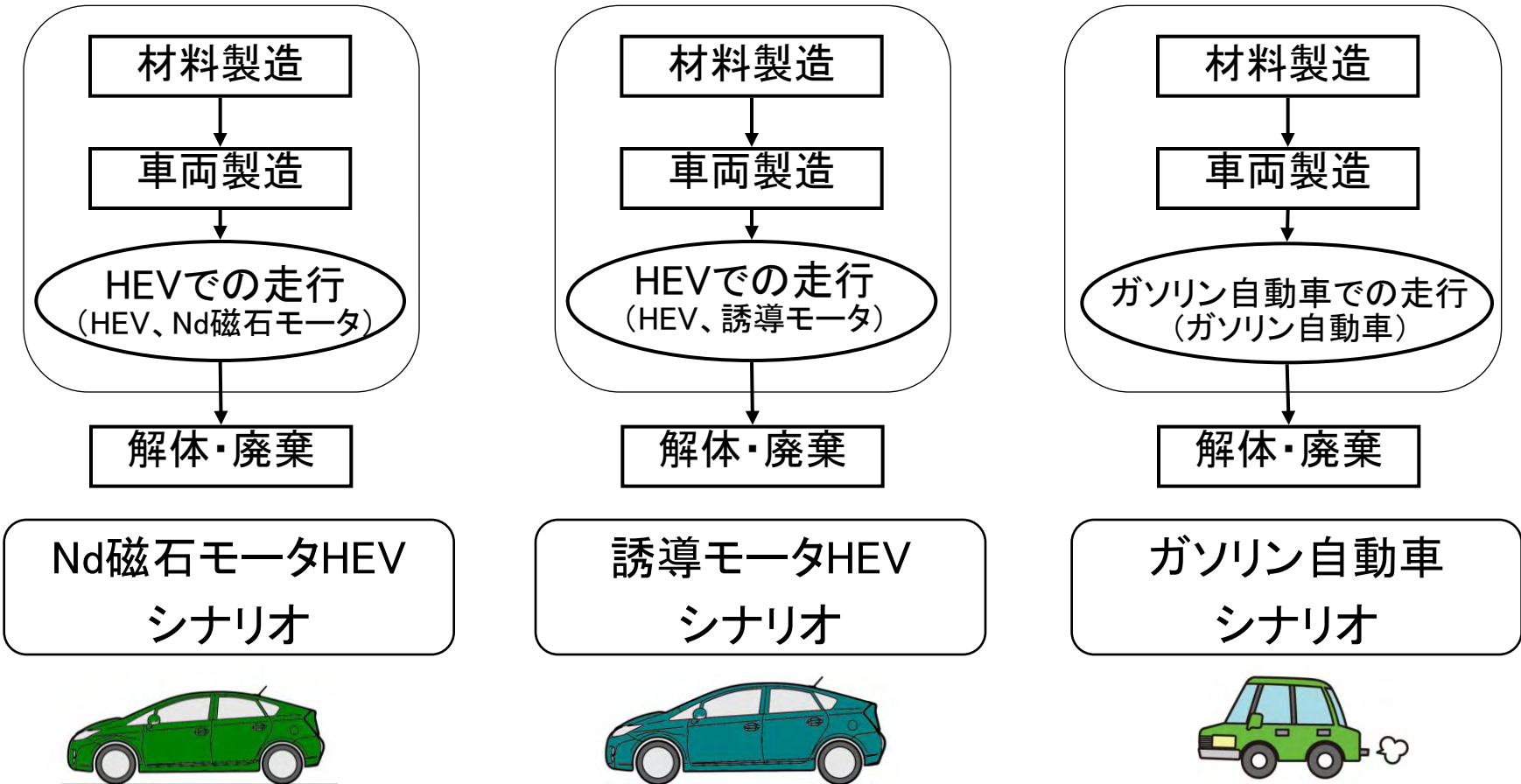
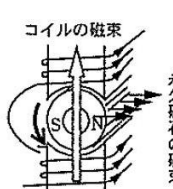
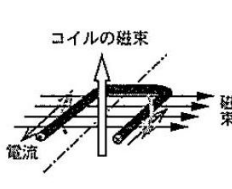
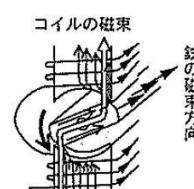


図5 評価シナリオ

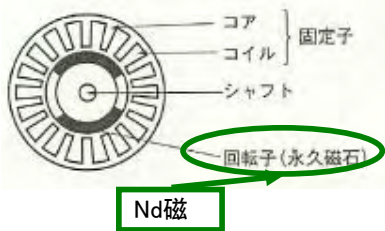
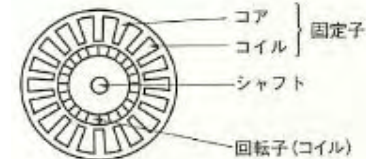
Nd磁石モータと誘導モータの違い

表1 電気自動車用の候補モータ

	Nd磁石モータ (同期モータ)	誘導モータ	SRM (スイッチドリラクタンスモータ)
回転の仕組み ¹⁾	 <p>コイルの磁束 永久磁石の磁束</p>	 <p>コイルの磁束 磁束 電流</p>	 <p>コイルの磁束 鉄の磁束方向</p>
	磁石が回転	コイルが回転	鉄が回転
磁束発生源	磁石	電磁コイル	電磁コイル
現在の動向	プリウス(トヨタ)、 インサイト(ホンダ) で使用	欧米で検討	研究開発段階

- SRMは詳細情報不明のため、本研究ではNd磁石モータの代替モータとして**誘導モータ**を採用

表2 Nd磁石モータと誘導モータの違い

	Nd磁石モータ (同期モータ)	誘導モータ
構造原理 ⁴⁾	 <p>コア } 固定子 コイル } シャフト } 回転子(永久磁石) Nd磁</p>	 <p>コア } 固定子 コイル } シャフト } 回転子(コイル)</p>
質量・出力比 (相対比)	浜田ら ²⁾ 鷲巣ら ³⁾ 1	1.76~2

- 原理の違いとしては回転子にコイルを用いるか磁石を用いるかの違い。
- Nd磁石モータではコイルを用いた電磁石と比べて大きな磁束密度が得られるため、小型で高出力のモータができる。

参考文献

- 株式会社日立製作所総合教育センター技術研修所 編集:小型モータの技術, 1.1各種モータとトルク式, 株式会社オーム社, 2002年出版
- 浜田 晴喜, 吉原 重之, 濱野 宏:低燃費で地球に優しく力強いHEVシステムの開発、日立評論、Vol.8、No.65、pp.343-346、2004
- 鷲巣允美、伊藤将仁、秋山勇治:電気自動車駆動モータに最適なモータの検討、電気学会研究会資料 回転機研究会、RM-04-161~178、pp39-44、2004
- 磁石は地球を救う 一省エネ時代のエースー 著者 篠原肇、徳永雅亮、発売 化学同人、第一版 2005年11月1日発行



製造段階の負荷量推定



- ガソリン車製造に伴う二酸化炭素排出量を導出
(1500cc 重量1037kg)
- トヨタ自動車公表しているハイブリッド自動車(プリウス)のガソリン車に対する二酸化炭素排出量比から製造段階の二酸化炭素排出量を推定
- Nd磁石モータ製造分の負荷量を引き、誘導モータ分の負荷量を足したものを「誘導モータHEV」の製造段階での負荷量とした。

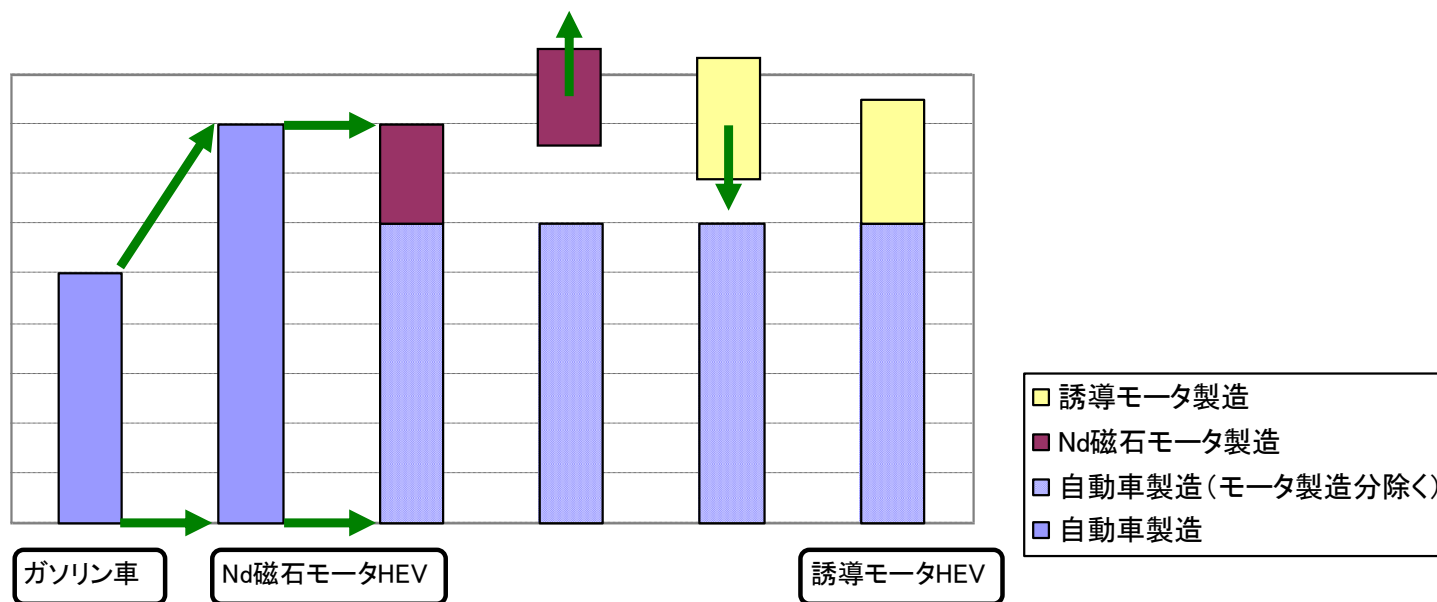


図6 負荷量導出イメージ

Nd磁石モータの組成

- プリウス(初代)の解体を行った報告書¹⁾よりモータの組成重量を利用。ただし、固定子中の固定子コアとコイルの組成割合はオークリッジ国立研究所の報告書²⁾³⁾より求めた。

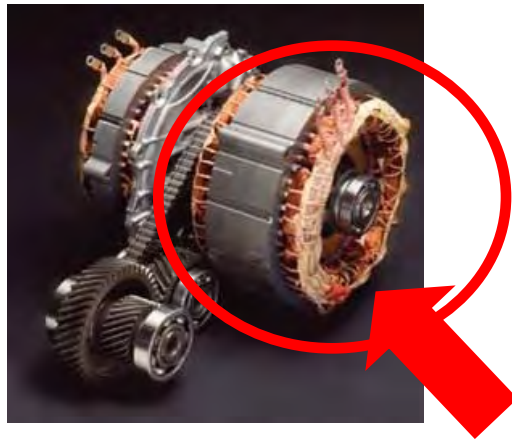


図7 プリウスモータ⁴⁾
(画像は2代目プリウスのモータ)

表3 Nd磁石モータの組成

		重量[kg]	組成割合	素材	素材割当
固定子	固定子コア	10.02	24%	鉄鋼	電磁鋼板
	コイル	3.58	9%	銅	銅板
回転子	中のもの	4.88	12%	鉄鋼	電磁鋼板
	磁石枠	5.84	14%	鉄鋼	電磁鋼板
	磁石	1.12	3%	ネオジム磁石	ネオジム磁石
その他	アルミ	1.38	3%	アルミ	アルミ板
ケース		14.82	36%	アルミ	アルミ板
合計		41.65	100%		

参考文献

- 1) 財団法人日本環境衛生センター: 使用済自動車再資源化の効率化及び合理化等推進調査 報告書, 2009
- 2) J.S.Hsu, Ph.D., C.W.Ayers, C.L.Coomer: REPORT ON TOYOTA/PRIUS MOTOR DESIGN AND MANUFACTURING ASSESSMENT, July 2004
- 3) R.H.Staunton, C.W.Ayers, L.D.Marlino, J.N.Chiasson, T.A.Burress: Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System, May 2006
- 4) プリウスの勝因 38.0km/Lのヒミツ、日経 Automotive Technology、2009年9月号、pp.64-71

誘導モータの組成推定

- ◆ 誘導モータはNd磁石モータと同出力(30kW)と仮定し、出力・質量比の関係からNd磁石モータの1.76倍の約74kgとした。
- Nd磁石モータとの構造的な違いが回転子にコイルを用いる点であるので、Nd磁石モータの磁石部分を導体(コイル)とし、Nd磁石モータの組成割合を誘導モータの重量に乗じて誘導モータの組成重量を求めた。

表4 誘導モータの組成

		重量[kg]	素材	素材割当
固定子	固定子コア	17.70	鉄鋼	電磁鋼板
	コイル	6.32	銅	銅板
回転子	中のもの	8.61	鉄鋼	電磁鋼板
	導体枠	10.31	鉄鋼	電磁鋼板
	導体	1.98	銅	銅板
その他	アルミ	2.44	アルミ	アルミ板
ケース		26.16	アルミ	アルミ板
合計		73.52		

走行

Nd磁石モータHEVの燃費:

28km/L(初代プリウスの燃費)

ガソリン車の燃費:

16km/L(同型車(車両重量:1016~1265kg)の燃費基準値²⁾)

誘導モータHEVの燃費

- 100kgの重量増加→3%の燃費悪化(日本自動車工業会¹⁾)
- 誘導モータとNd磁石モータの重量差(約32kg)→0.95%の燃費悪化

表5 燃費とガソリン消費量

	生涯走行距離	燃費(10・15)	消費燃料
	km	km/L	L
Nd磁石モータ	10万km	28.00	3,571
誘導モータ	10万km	27.65	3,616
ガソリン	10万km	16.00	6,250

参考文献

- 1) 社団法人 日本自動車工業会 http://www.jama.or.jp/user/eco_drive/
- 2) 国土交通省 <http://www.mlit.go.jp/common/000037091.pdf>

モータ製造の二酸化炭素排出量

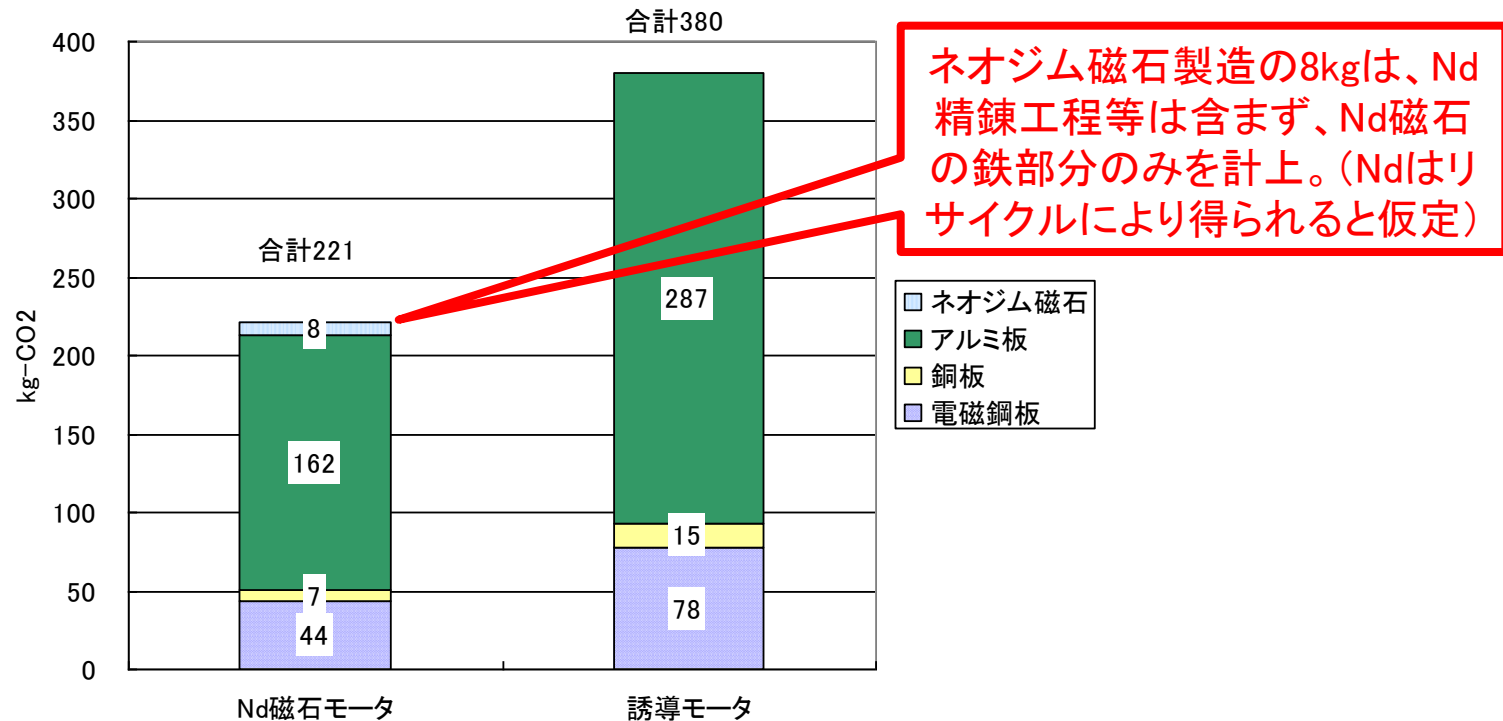


図8 モータ製造環境負荷

- 誘導モータ製造の二酸化炭素排出量がNd磁石モータより159kg-CO₂多くなっていることから、将来ネオジム磁石の供給不足が起こった場合、代替物として誘導モータを製造すると二酸化炭素排出量が増加する可能性が示唆された。
- 素材別にみるとアルミ板製造に伴う二酸化炭素排出量が多いことが明らかになった。

車両製造までの二酸化炭素排出量

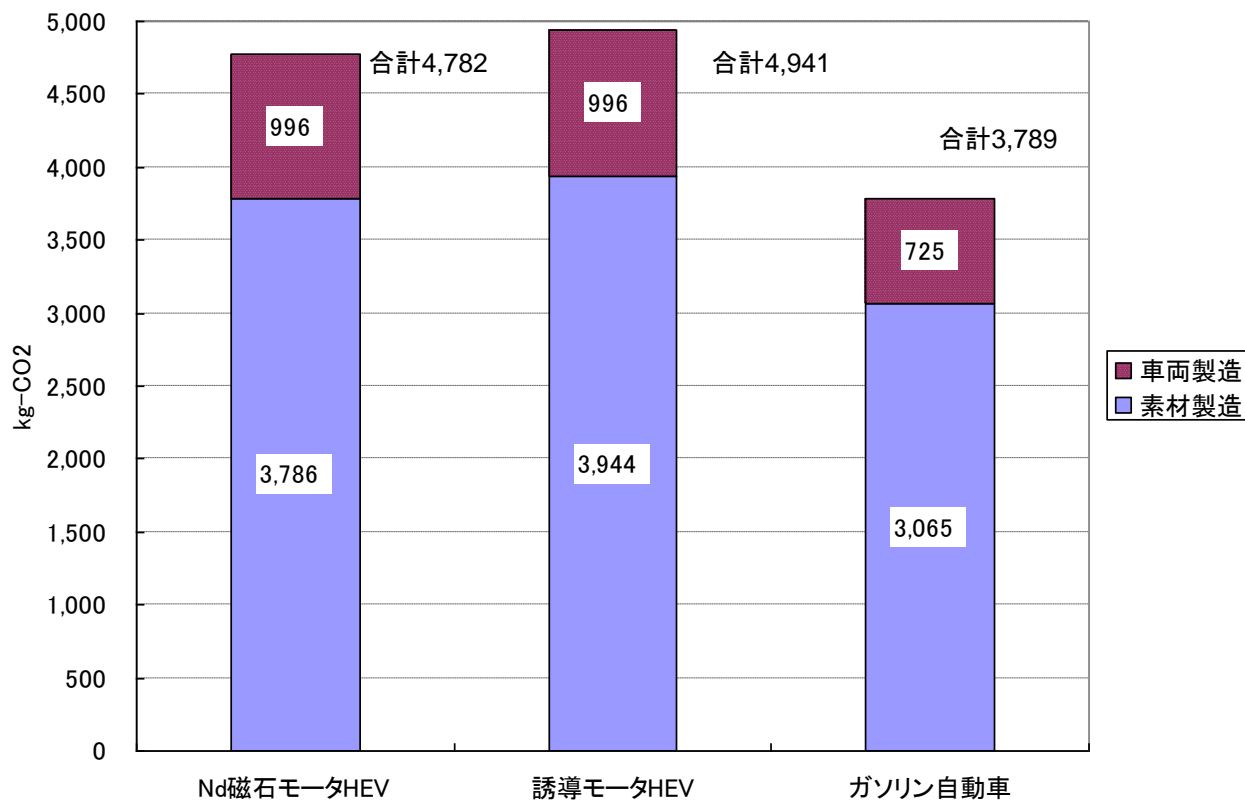
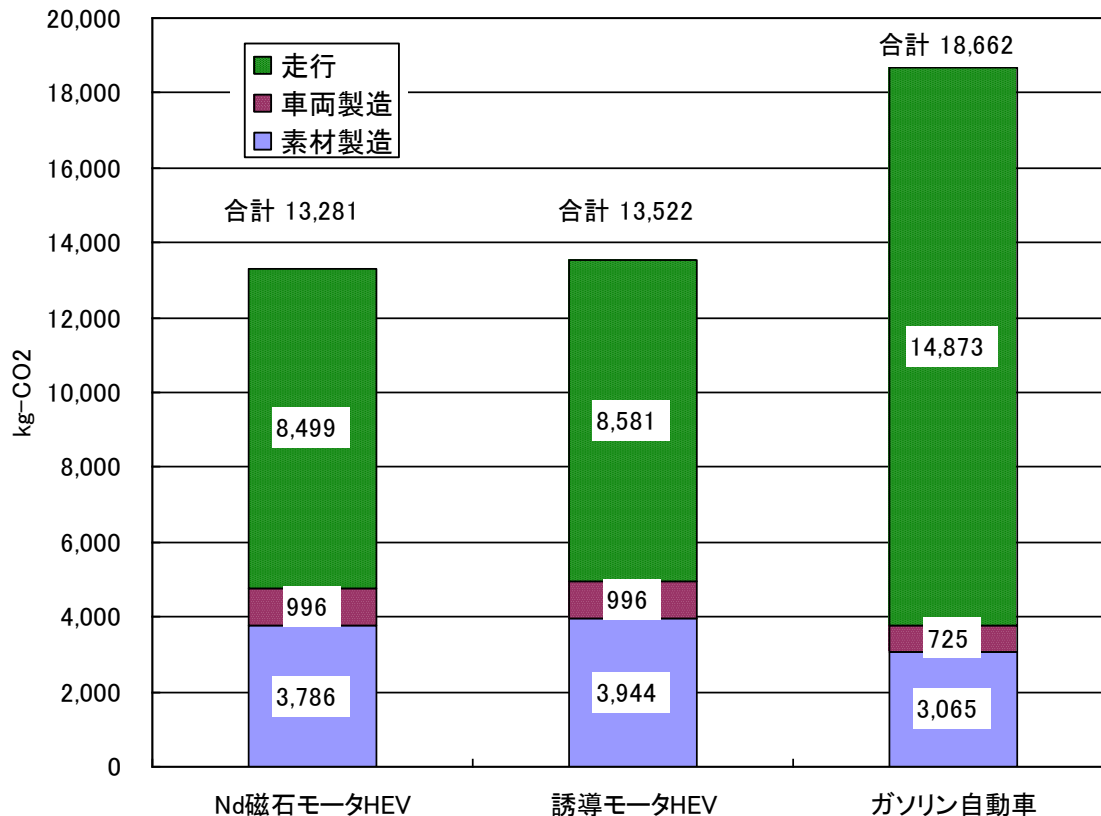


図9 素材製造および車両製造の二酸化炭素排出量

最も二酸化炭素排出量が多いのは誘導モーターHEVシナリオの4,900kg-CO₂、少なかったのはガソリン自動車シナリオの3,800kg-CO₂であり、その差は約1,100kg-CO₂であった。

走行まで含めた二酸化炭素排出量

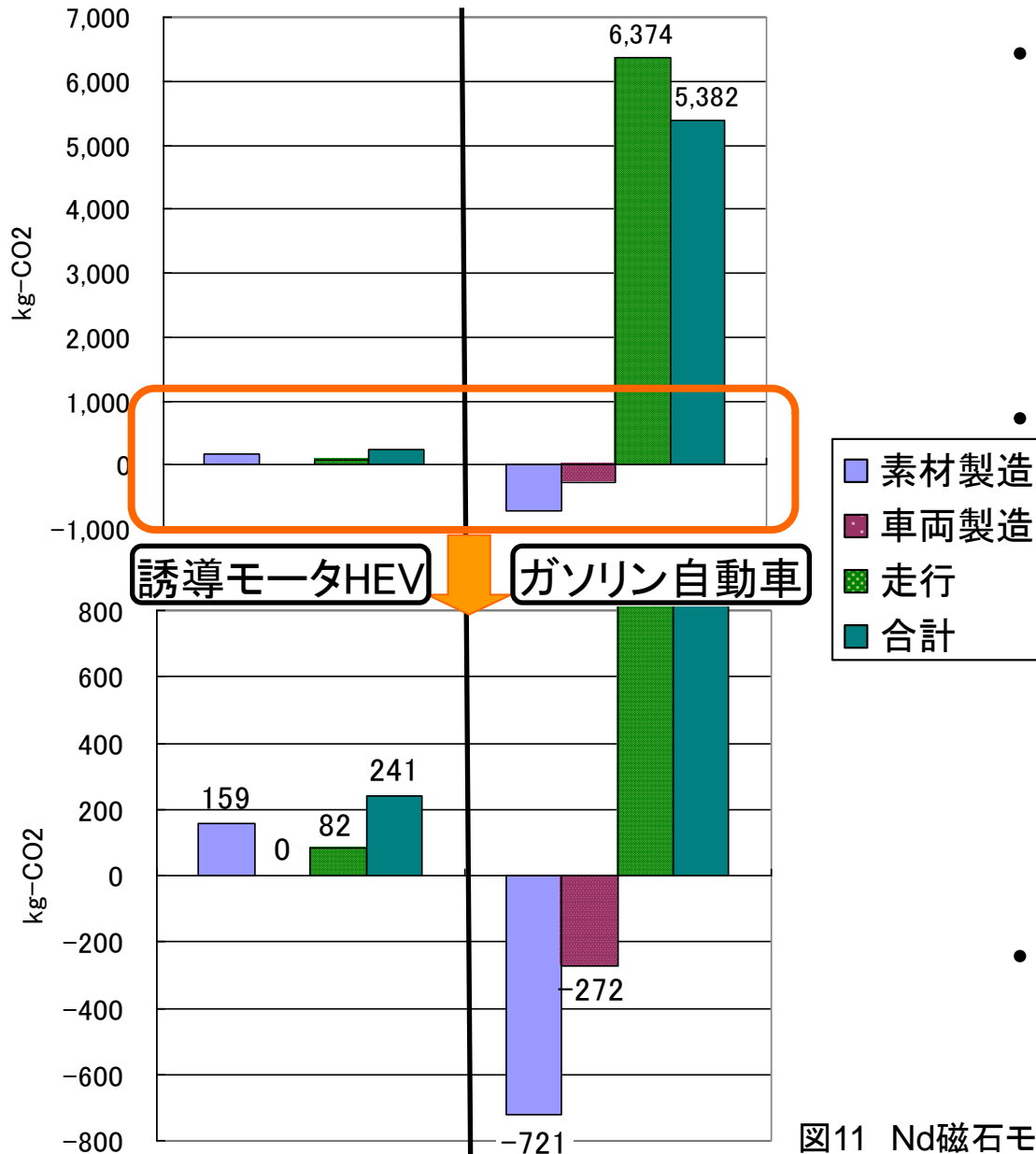
- 走行まで含めると二酸化炭素排出量は「ガソリン自動車」>「誘導モータHEV」>「Nd磁石モータHEV」の順で多くなった。
- Nd磁石HEVはガソリン自動車の57%まで二酸化炭素排出量の低減が可能であった。
- 走行におけるガソリン由来の二酸化炭素排出量の寄与が特に大きい。



- いずれの評価シナリオにおいても、走行、素材製造、車両製造の順に二酸化炭素排出量が多くなった。

図10 各シナリオの二酸化炭素排出量

Nd磁石モータHEVとの差



- 「Nd磁石モータHEV」との差について着目すると「誘導モータHEV」では素材製造での差が、「ガソリン自動車」では走行での差が一番大きく由来している。
- Nd磁石モータHEVと誘導モータHEVの差241kg-CO₂と、ネオジム磁石の製造由来8kg-CO₂より、ネオジム磁石リサイクルは249kg-CO₂までの二酸化炭素排出量であれば非リサイクル(誘導モータHEV)に比べて有利となる結果となった。
- ガソリン自動車との比較では約5,400kg-CO₂までの二酸化炭素排出量であれば有利となる。

図11 Nd磁石モータHEVとのCO₂排出量差

結果と考察

＜Ndのマテリアルフロー推定＞

- ネオジム磁石を製造する際にでの工程くずに含まれるネオジム量が約1,000tと多く、工程くずの発生抑制と国内でのリサイクルの重要性が示唆された。ただし、工程くずは大半が国内リサイクルされているとの情報もあり。要精査。
- 再資源化処理へ流れるNdが約230tあるが、現状Ndは回収されておらずプロセスの追加によるネオジム磁石の回収が望まれる。

＜NdリサイクルのLCA解析による評価＞

- プロセス間比較では、全シナリオにおいて走行、素材製造、車両製造の順に二酸化炭素排出量が多く、ガソリン消費に伴う排出や車両の素材構成が結果に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。
- シナリオ間比較では、Nd磁石モータHEVシナリオが約13,300kg-CO₂と最も優位となり、249kg-CO₂までの二酸化炭素排出量でリサイクルが可能であれば、誘導モータによる代替よりもNdリサイクルによる循環利用が望ましいことを明らかにした。ガソリン自動車との比較では、5,400kg-CO₂までとなる。

今後の課題

<Ndのマテリアルフロー推定>

- 本研究での推定ではその他製品の量が多く、まだ把握しきれていない製品が多数存在した。これらの製品の確認や使用状況といった情報の整備が精緻化には必要である。

<NdリサイクルのLCA解析による評価>

- モータ効率を加味した評価の実施
- モータ組成データの精緻化
- Ndリサイクルに伴う二酸化炭素排出量の定量化

ご静聴ありがとうございました。