

論文

エネルギー収支分析による社会の持続性評価

鎗谷 浩明¹・松島 潤²

投稿受付：2011年6月5日 受理日：2012年4月20日 WEB公開日：2012年4月23日

要旨

本研究ではエネルギーの質を測る指標であるエネルギー収支比(EROI)を用いて、日本社会の持続性についての包括的な分析を行った。まず、エネルギーの質・量の双方から現在の日本のエネルギー事情を捉えるため、各種エネルギーの供給量とEROIを求め、グラフを作成した。その結果、日本全体におけるEROIの値は年々減少する傾向が確認され、また化石燃料に代わるエネルギーとして期待されている各種再生可能エネルギーが、供給量・EROI共に化石燃料と比べて低い値を示していることがわかった。次に、社会が持続するために必要な最小EROIを求めた。本研究では、運輸システムを維持することが社会の持続のための最低条件であると考え、原油の燃料としての使用過程まで考慮に入れたEROIが1以上であれば、運輸システムは成立し、社会の持続性は保たれるとした。以上の仮定を置いて計算を行った結果、社会の持続に必要な最小EROIは1.4と導かれた。つまり、EROIが1.4を下回ると、運輸システムが担保されないために、社会活動は確実に成り立たない。ただし、この値を超えれば現在の社会活動が維持できる十分条件を意味せず、石油を運輸システム維持だけに使い、それ以外の自国内消費には全く使わない社会を意味し、エネルギー収支の観点から社会の持続性を確保できる最低必要条件を定量的に評価する指標の一つとして考えられる。

1 序論

エネルギー収支分析とは、エネルギー生産において、生産されるエネルギー(出力エネルギー)と、そのエネルギーを得るためにシステムに投入されるエネルギー(入力エネルギー)とを定量的に求め、その値を比較・評価する分析方法である。

そして、出力エネルギーを入力エネルギーで除した指標は、エネルギー収支比(EROI: Energy Return on Investment, またはEPR: Energy Profit Ratio)と呼ばれ、一般的に式①のように定義される。なお、算出における出力エネルギー・入力エネルギーは、熱エネルギーに換算して用いるのが一般的である。

$$EROI = \frac{\text{出力エネルギー}}{\text{入力エネルギー}} \dots \textcircled{1}$$

EROIの値が高ければ高いほど、より少ない投入エネルギーで大きなエネルギー出力が得られ、エネルギー生産効率が高いことを示す。

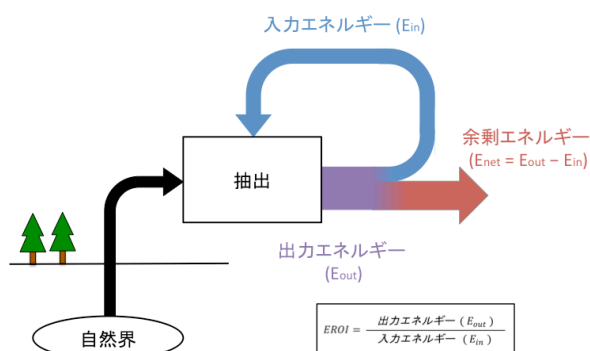
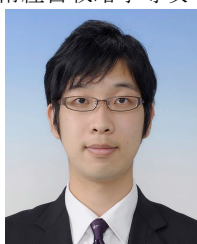


図1 エネルギー収支比の概念におけるエネルギーの流れ

¹鎗谷 浩明 (やりたに ひろあき)
東京大学大学院工学系研究科
技術経営戦略学専攻



²松島 潤 (まつしま じゅん)
東京大学大学院工学系研究科
エネルギー・資源フロンティアセンター



出力エネルギーから入力エネルギーを引いたものを余剰エネルギーと呼ぶ。余剰エネルギーの観点から EROI を捉えると、EROI ≥ 1 を満たすことで出力エネルギーが入力エネルギーを上回るため、エネルギー生産によって余剰エネルギーが得られるということになる。そして逆に EROI が 1 を下回ると、入力エネルギーが出力エネルギーを上回り余剰エネルギーが得られず、エネルギー生産システムとしては価値を持たないことを示すといえる。こういった性質から、EROI はエネルギーの「質」を測る指標とみなすことができる。

Hall et al., (2009) は、社会において余剰エネルギーが科学や芸術・文化、そして文明を発展させてきたとし、重要なのは単なる余剰エネルギーの有無だけではなく、余剰エネルギーの規模や種類、比率であると述べている^[1]。そして、この EROI を用いることで、異なるエネルギー生産システムにおいて、得られる余剰エネルギーの量とその割合を同じ指標で比較することができるため、EROI はエネルギーにおける意思決定のための重要な手段の 1 つであると言える。

特定のエネルギーについてエネルギー収支分析を行い、EROI を算出する研究は国内外を問わず多数見られる^{[2][3][4][5][6][7][8]}。また、米国においては、将来の余剰エネルギーの変化のシミュレーション(Hall et al., 2008)や^[9]、社会の持続に必要なとされる最小 EROI の算出(Hall et al., 2009)など^[1]、米国におけるエネルギー事情を鑑みた EROI を用いた包括的な分析が行われているものの、日本においては、エネルギー事情を EROI の面から包括的に分析した研究は行われていない。

よって、本研究では EROI を用いて、日本における社会の持続性についての包括的な分析を行った。

第 2 章では、日本において主に使用されている輸入燃料の EROI を算出した。また、他のエネルギーについての EROI を他の研究データから得た。そして得られたデータを元に日本における各種エネルギーの質と量の分布をグラフに表した。

第 3 章において、日本における社会の持続性の確保のために必要な最低条件について考察を加え、実際に社会の持続に必要な最小 EROI の値を算出した。

以上で得られた分析結果に対して、第 4 章で考察・議論を行った。

2 エネルギー収支比から見る日本のエネルギー

この章では、現在の日本における各種エネルギーの消費量とエネルギー収支比(EROI)を把握し、グラフに表すことで、エネルギーの質・量の双方から現在の日本のエネルギー事情を捉えることを目的とする。

2.1 輸入燃料のエネルギー収支比

2007 年における日本のエネルギー自給率は 4% と極めて低く^[10]、主要な燃料である原油・天然ガス・石炭はほとんどを他国からの輸入に頼っている。エネルギー資源の乏しい日本にとって、輸入燃料の EROI を考えることは重要である。輸入燃料における EROI の計算は式②のように定義されている^[1]。

$EROI_{import}$

$$= \frac{\text{輸入燃料のもつエネルギー}}{\text{燃料の輸入に必要な資金を得るために輸出した製品の生産に用いられたエネルギー}} \dots \textcircled{2}$$

燃料を輸入するとは、燃料の産出国から燃料を購入するということである。燃料の輸入国は燃料の購入に必要な資金を得るため、製品を作り国外に輸出を行い、外貨を得る必要がある。そして、製品の生産にはエネルギーが必要である。よって、輸入燃料の EROI は、輸入した燃料のもつエネルギー量と、燃料の輸入に必要な資金を得るために輸出する製品を生産するために必要なエネルギー量の比として考えることができる。

なおこの定義においては、国際収支のうち貿易収支のみをイメージしている。従って、経常収支の内、金融取引における利子などのような所得収支その他(サービス収支・経常移転収支)とは異なる概念であるといえる。

また、特定の輸入燃料についての EROI を考えるときは、国内のエネルギー供給をすべてその特定の輸入燃料のみで補っているという仮定を置く。本論文においてこの仮定を[仮定 1]とする。

[仮定 1]

特定の輸入燃料の EROI の算出においては、国内のエネルギー供給をすべてその特定の輸入燃料のみで補っているとする。

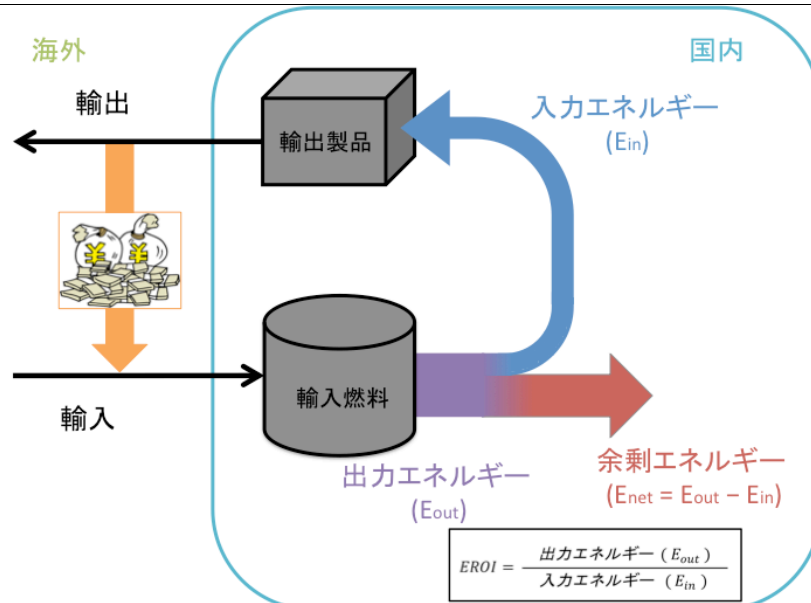


図 2 輸入燃料におけるエネルギー収支比の考え方におけるエネルギーの流れ

燃料の輸入に必要な資金を得るべく輸出する製品を生産するために必要なエネルギー量は、単位国内総生産あたりのエネルギー消費量を表すエネルギー強度と、燃料の輸入額 (=燃料の輸入のために輸出する製品の生産額) の積によって概算される。また、燃料の輸入額とは、そ

の燃料の単位エネルギー量あたりのコストと輸入燃料の出力エネルギーとの積で求められることから、以下のような式変形より、輸入燃料の EROI は、エネルギー強度と燃料コストの積の逆数をとることで求めることができる(式③)。

$$EROI_{import}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{輸入燃料のもつエネルギー}}{\text{燃料の輸入に必要な資金を得るために輸出した製品の生産に用いられたエネルギー}} \\
 &= \frac{\text{輸入燃料の出力エネルギー}}{\text{自国のエネルギー強度} \times \text{燃料の輸入に必要な金額}} \\
 &= \frac{\text{輸入燃料の出力エネルギー}}{\text{自国のエネルギー強度} \times \text{単位エネルギー量あたりの燃料コスト} \times \text{輸入燃料の出力エネルギー}} \\
 &= \frac{1}{\text{自国のエネルギー強度} \times \text{単位エネルギー量あたりの燃料コスト}} \quad \dots \text{③}
 \end{aligned}$$

今回の分析において、自国のエネルギー強度は国内における一次エネルギー総供給^[11]をその年の実質 GDP^[12]で除した値を用いた。また、単位エネルギー量あたりの燃料コストの算出には、年平均 CIF(Cost Insurance Premium and Freight: 運賃・保険料込み条件) 価格^{[1][13]}と燃料の単位発熱量から算出した。

なお、今回は輸入している燃料は全て市場の買い付けによって得られると仮定した。しかし実際は、海外の資源の自主開発も行われている。

実際に 2009 年度における輸入原油の EROI を計算する。2009 年度における国内エネルギー総供給は 20.5EJ^[11]、実質 GDP(2000 年度基準)は 531 兆円であることから^[12]、エネルギー強度は

38.6kJ/円である。

次に、輸入原油における燃料コストについて考える。2009 年度の日本における輸入原油 CIF 価格は、6073.8 円/bbl である^[1]。原油の単位発熱量は 6.12 GJ/bbl であることから、単位エネルギー量あたりの燃料コストは 992 円/GJ とする。

以上より、2009 年度の輸入原油の EROI は 26.1 となる。

同様の計算を原油・LNG・石炭それぞれについて行い、求められた EROI の経年推移と、その時代における主な出来事をまとめたグラフを図 3 に示す。なお、石炭の計算においては一般炭のデータを用いた。

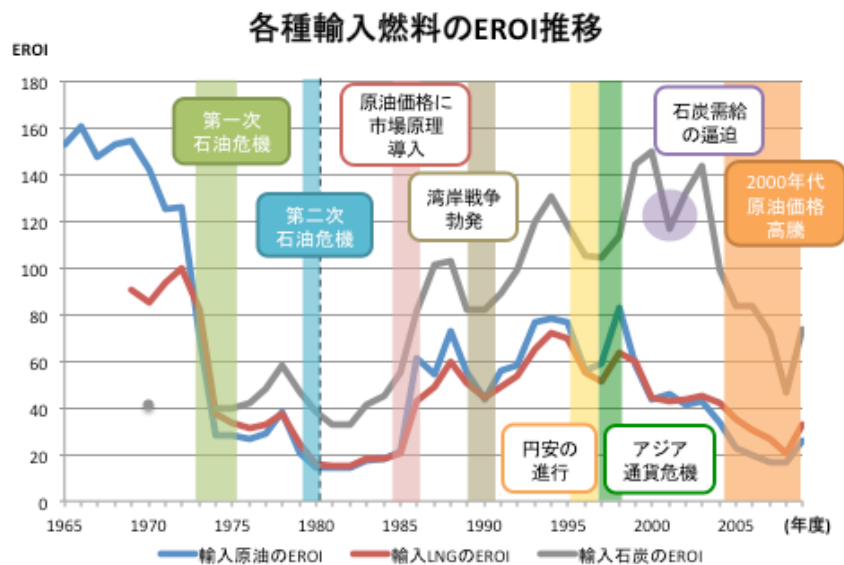


図3 各種輸入燃料の EROI 推移

表1 各種エネルギーの EROI まとめ

エネルギー	項目	EROI	出典	
原子力		5.87~19.7	[2]	
中小水力		15.3	[14][15]	
地熱		6.8		
太陽光発電		5.1~8.49		
風力		3.9		
バイオマス	日本、鳥取県北条砂丘風力発電所	11.6	[4]	
	日本 (1991~2001)	2.2~30.3	[5]	
	稲作からのバイオエタノール生産システム	1.08~3.46	[6]	
	廃食油からのバイオディーゼル		4.9~6.5	[7]
			6.25	
	菜種油からのバイオディーゼル	2.32	[4]	
	糖質エタノール (サトウキビ)	0.54~1.04		
	木質エタノール (間伐材)	1.85~4.63		
木質ペレット燃料		2.32	[8]	
		3.9~6.3		
RDF (北海道富良野市)	7.8			
マイクロ水力		0.8~12.4	[3]	

同時期の EROI の値を比較すると、輸入石炭が極めて高い値を示しており、輸入原油と輸入 LNG は近い値で推移しているが、最近では LNG の方が高い値を示している。この違いは単位エネルギーあたりの燃料コストによるものであり、コスト

が最も安い輸入石炭の EROI が高くなるということになる。ちなみに、EROI は出力エネルギーと入力エネルギーの比で求められる指標のため、値が高いものの方が変数の変化に対応する変動幅が大きくなる。輸入石炭の EROI の変動が比較

的大きいのはそのためであると思われる。

また、値の違いはあるものの、比較的3種におけるEROIの増減の動きは似通っている。2度の石油危機や湾岸戦争、2000年代の原油価格高騰時など、原油価格が上昇した時期においてはLNG・石炭価格にも上昇がみられ、EROIもともに減少している。逆に1986年や1998年のように原油価格が下落し輸入原油のEROIが上昇している時には、LNG・石炭においても価格の下落が起こりEROIの上昇がみられる。輸入燃料のEROIの推移は互いに密接に関わっているといえる。

2.2 各種エネルギーにおけるエネルギー収支比

次に、他のエネルギーのEROIについて述べる。その他のEROIは他の研究のデータを引用・利用した。

全てのEROIを表1にまとめる。

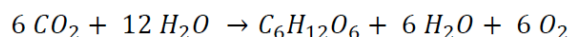
2.3 バイオマスの利用可能エネルギー

本節では、バイオマスエネルギーの利用によって得ることのできるエネルギー量についての考察を行う。再生可能エネルギーの一つであるバイオマスエネルギーはカーボン・ニュートラルの性質を持つことから、化石燃料に取って代わるエネルギーとして将来が期待されており、そのバイオマスエネルギーの利用によって得られるエネルギー量は、日本のエネルギー事情をみる上で、ひとつの指標となる。

バイオマスエネルギーは生物起源のエネルギーであることから、その元をたどれば太陽エネルギーが植物の光合成によって固定されたものと考えることができる。そのため、光合成によりどれだけエネルギーが実際に固定されているのかを考えることは、石油ピーク後のエネルギー代替を考える上で重要である。

2.3.1 光合成について

光合成とは、葉緑体を持つ植物が光エネルギーを用いて、二酸化炭素(CO₂)と水(H₂O)からグルコース(C₆H₁₂O₆)を合成し、酸素(O₂)を放出する生化学反応である。その反応式は次式のように与えられる。



この反応は呼吸の反応式の逆反応として考えることができる。呼吸はエネルギーを用いて、酸素を吸収し二酸化炭素と水を放出する生化学反応である。

この反応によって生成されたグルコースは、植物自体の活動のエネルギーとして使われるほか、多糖類に合成して根や種子に貯蔵される。また、植物を土台とした食物連鎖の捕食関係によって、動物の活動エネルギーが賄われる。そのため、動物が活動するエネルギーの大元は植物の光合成によるものであるといえる。また、石油や石炭などの化石燃料も数百万年前の生物

の遺骸が長時間堆積されることでできたとする有機起源説が広く知られており、あらゆるエネルギーの大元は植物の光合成にあると考えることができる。

光合成による有機物生産を細かく見ると、次の3段階に分けることができる。

(1) GPP(総一次生産)

植物の光合成によって生産される総有機物量

(2) NPP(純一次生産)

GPPから植物の呼吸(独立栄養呼吸)に使われるものを引いた有機物量
葉や幹など、新しい植物組織(植物バイオマス)となる有機物量

(3) NEP(純生態系生産)

NPPからさらに微生物や動物などの呼吸(従属栄養呼吸)を引いた有機物量

光合成をエネルギー生産システムと捉えたとき、GPPのエネルギー量はその最大出力エネルギーを示すといえる。しかし、光合成で得られたエネルギーは植物の活動などにも使われることから、光合成によって作られたエネルギーの全てを持続的にバイオマスエネルギーとして利用することはできない。植物の活動を考慮し、支障を与えない範囲において持続的にバイオマスエネルギーを利用できる最大値は、NPPのエネルギー量と考えることができる。よって今回の分析では、日本全域におけるGPPとNPPのエネルギー量について、その値を計算する。

2.3.2 光合成の総一次生産(GPP)のエネルギー量の算出

日本におけるGPPのエネルギー量を求める。日本の森林面積は約2500万haである。これは、日本の国土面積の約3分の2であり、世界でも有数の森林国だといえる。この森林における光合成量を算出することで日本のGPPとする。

まず、森林の植生区分ごとの面積を林野庁のデータから算出した^[16]。このとき、日本の気候帯を考慮し、針葉樹はカラマツを除き全て常緑針葉樹、広葉樹は全て落葉広葉樹と仮定した。次に、植生区分ごとの光合成による二酸化炭素吸収量の原単位データを用いて^[17]、日本国内における光合成による二酸化炭素の総吸収量を求めた。

二酸化炭素の吸収量から生成されたグルコースのエネルギー量を求める方法として、次の計算を行った。光合成により1molの二酸化炭素を固定するために必要な光エネルギーは475kJである^[18]。光合成によって、この光エネルギーと同量の化学エネルギーをもつグルコースが生成され貯蔵されると考え、GPPのエネルギー量を概算する。計算過程を表2に示す。GPPのエネルギー量は9.2EJ/年と求められた。

表 2 光合成による GPP のエネルギー量

	出典など	落葉 広葉樹林	常緑 針葉樹林	落葉 針葉樹林	草地 (竹林)	計	(単位)
① 森林面積	[16]	1.12E+07	1.15E+07	1.02E+06	1.59E+05	2.38E+07	ha
② 年間 CO2 総吸収量原単位	[17]	22	51	18	22		t-CO2/ha/年
③ CO2 総吸収量	(=①×②)	2.5E+08	5.8E+08	1.8E+07	3.5E+06	8.5E+08	t-CO2/年
④ CO2 総吸収量 を mol に換算	(=③/44)	5.6E+12	1.3E+13	4.2E+11	8.0E+10	1.9E+13	mol-CO2/年
⑤ CO2 固定に 必要なエネルギー	[18]	475	475	475	475		kJ/mol-CO2
⑥ グルコースの 生成エネルギー	(=④×⑤)	2.6	6.3	0.20	0.038	9.2	EJ/年

2.3.3 光合成の純一次生産(NPP)のエネルギー量の算出

NPP のエネルギー量の算出には、国立環境研究所が発表している温室効果ガスの土地利用別の純排出・吸収量のデータを用いた^[19]。森林にお

ける 2008 年度の二酸化炭素純吸収量は 79,911 千 t-CO2 である。前小節と同様の方法で光合成による生成エネルギーを算出すると、NPP のエネルギー量は 0.86 EJ/年であった。計算の過程を表 3 に示す。

表 3 光合成による NPP のエネルギー量

	出典など	計	(単位)
① CO2 純吸収量	[19]	8.0E+07	t-CO2/年
② CO2 純吸収量を mol に換算	(=①/44)	1.8E+12	mol-CO2/年
③ CO2 固定に必要なエネルギー	[18]	475	kJ/mol-CO2
④ グルコースの生成エネルギー	(=②×③)	0.86	EJ/年

2.4 各種エネルギーの質・量を表すグラフの作成

以上の EROI データと、各種エネルギーの供給量を元に^[11]、エネルギーの量と質を表すグラフを作成する。各種データは測定する年によってデータにばらつきがあることを考慮し、年度別の推移データがある場合には基準年とその前後 2 年の計 5 年間のデータを採用した。各種エネルギーにおけるデータを次に示す。

グラフの横軸にエネルギーの供給量、縦軸にエネルギーの EROI をとると、図 4 のようになる。

研究によって EROI の値に差があることも考慮し、各種エネルギーの座標は幅を持った楕円状で表した。この形状からこのグラフは Balloon Graph と呼ばれている^[9]。図 5 に、エネルギー供給量の低い風力・太陽光・地熱・バイオマス・マイクロ水力について、拡大したグラフを作成した。また、図 6 に日本の主要 5 種エネルギーの 1970～2007 年の質・量の推移についても同様のグラフに表した。

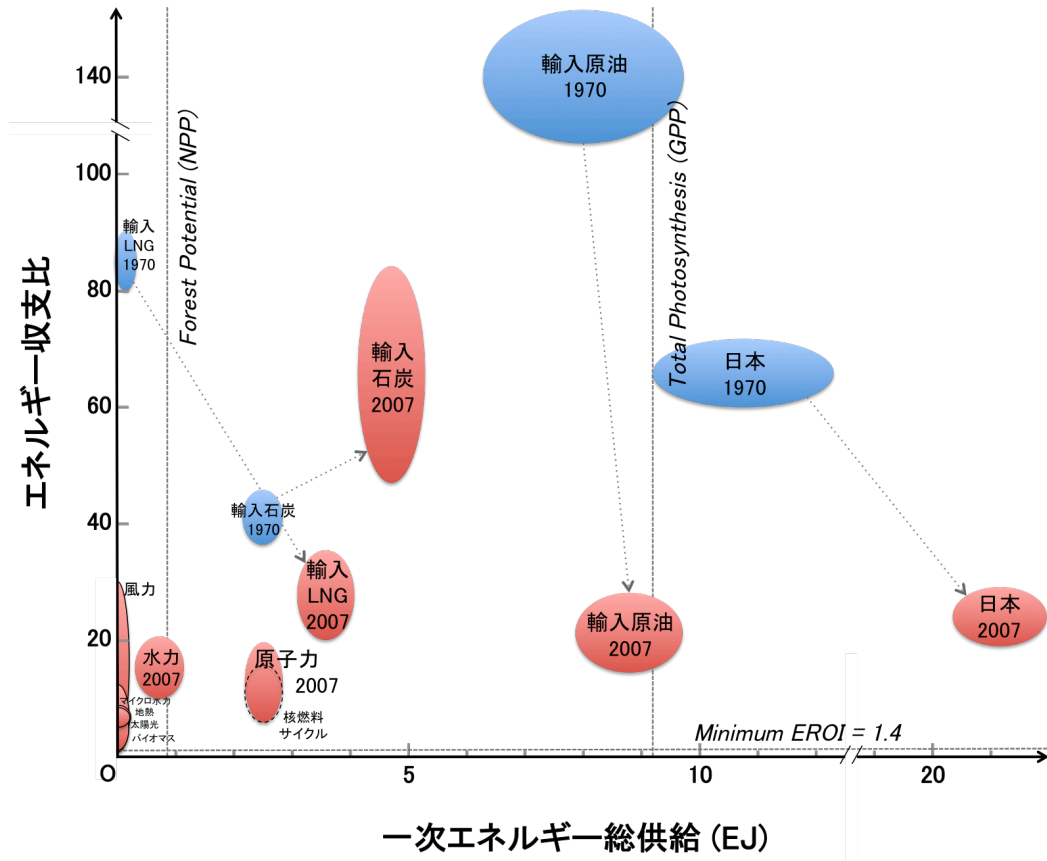


図 4 Balloon Graph

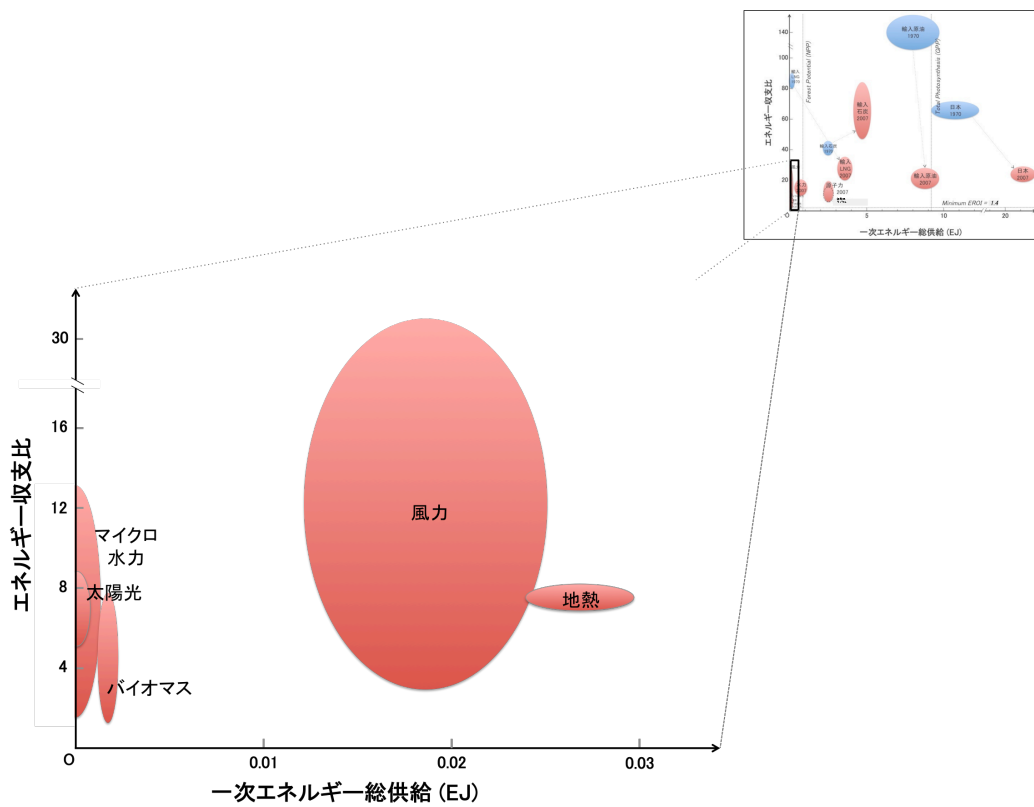


図 5 Balloon Graph(拡大)

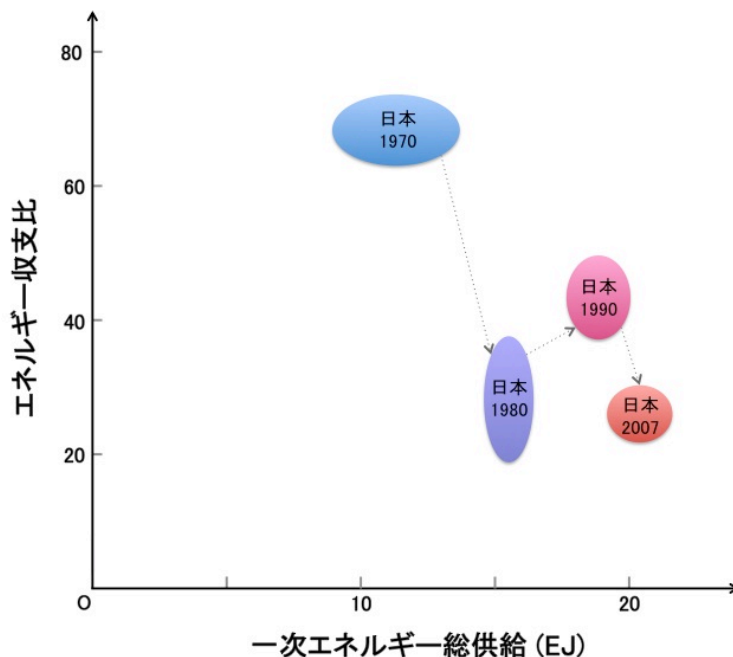


図 6 日本の主要 5 燃料における Balloon Graph

3 社会の持続に必要な最小エネルギー収支比

3.1 社会の持続に必要な最小エネルギー収支比についての考察

3.1.1 本研究の社会の持続性における考え方

この章では、社会が持続するために必要な最小エネルギー収支比を求める。本研究では、運輸システムを維持することが社会の持続のための最低条件であると考えた。

現在、社会活動によって生産されるあらゆる生産物は、自動車などによる運輸を通じて消費者の元に運ばれることではじめて消費される。この運輸システムが成り立たなければ、生産者は自らが生産した製品を消費者の元に届けることができないため、社会活動が立ち行かなくなる。よって、社会の持続性は運輸システムによって担保されていると言え、その維持が社会の

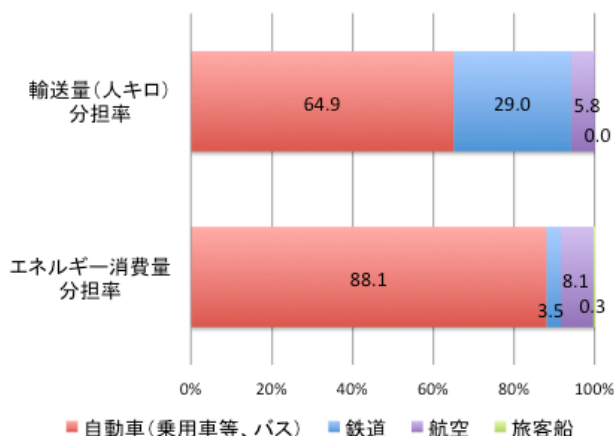
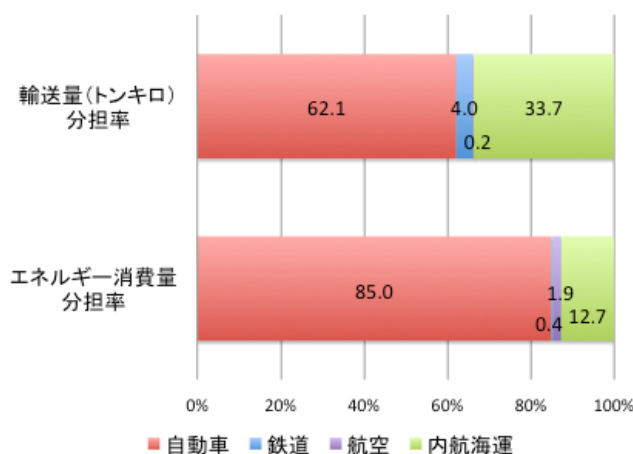
持続に最低限必要であるといえる。この仮定を本論文内で[仮定 2-1]とする。

【仮定 2-1】

運輸システムの維持が実現されることが社会の持続のための最低条件である。

次に運輸システムを支える要素について詳しく分析することにする。

旅客輸送・貨物輸送を合わせた運輸部門全体におけるエネルギー消費量は 3.47EJ(2008 年度)である^[20]。運輸部門の輸送機関別の輸送量・エネルギー消費量構成比を図 7・図 8 に示した^{[1][21]}。全体に占める自動車のエネルギー消費量の割合は、旅客輸送で 88%、貨物輸送では 85%であり、国内運輸の中心は自動車であるといえる。自動車なしには現在の運輸システムが成り立たないと言えるだろう。

**国内旅客輸送機関の輸送量と
エネルギー消費量構成(2008年度)**

**図 7 国内旅客輸送機関の輸送量と
エネルギー消費量構成(2008年度)^[21]**
**国内貨物輸送機関の輸送量と
エネルギー消費量構成(2008年度)**

**図 8 国内貨物輸送機関の輸送量と
エネルギー消費量構成(2008年度)^[21]**

自動車における動力源は石油系燃料である。最近では、電気自動車などの新しい動力源を持つ自動車の開発も進められてはいるがその生産シェアは非常に低く、内燃機関を持ち石油系燃料を動力源とする自動車が主流である(表 4)。

**表 4 四輪車における低公害車の生産シェア
([22]より作成)**

2009 年度		台数	生産シェア
四輪車の総生産台数		7,934,516	
低 公 害 車	ハイブリッド自動車	466,631	5.88%
	燃料電池自動車	3	0.00%
	電気自動車	1,706	0.02%
	天然ガス自動車	1,197	0.02%
	小計	469,537	5.92%

以上をふまえ、運輸の要は石油系燃料をエネルギー源とする自動車であると考えられる。そして、社会の持続には、運輸システムが滞りなく起こることが最低限必要である([仮定 2-1])ことから、エネルギー収支について考えると、石油系燃料の使用において余剰エネルギーが得られることが社会の持続における最低条件であるといえる。これを[仮定 2-2]とする。

[仮定 2-2]
社会の持続のための最低条件とは、石油系燃料の使用において余剰エネルギーが得られることである。

3.1.2 使用段階におけるエネルギー収支比の必要性

一般に EROI が 1 以上あれば出力エネルギーが入力エネルギーを上回り、余剰エネルギーを生み出すために、エネルギー生産システムとして有用性を持つとされる。しかし、エネルギーの使用段階までの過程を考えたとき、これは一概に成り立つとは言えない。一般的な EROI の分析においては、採掘過程やエネルギー生産過程における投入エネルギーまでを入力エネルギーとして算出されており、実際にエネルギーを使用する段階に至るまでの投入エネルギーまでは考慮していないためである。

原油を例にとって説明を行う。一般的に原油の EROI は、採掘地点において投入されるエネルギーを入力エネルギーとして算出された値である。前章における $EROI_{import}$ においても、入力エネルギーとして考えたのは「燃料の輸入に必要な資金を得るために輸出した製品の生産に用いられた必要なエネルギー」、つまり原油を得る地点までに投入されるであったといえる。しかし、原油を実際に使用するためには精製・消費地への輸送などに更なるエネルギーが消費される。このようなエネルギー消費を考慮した上での使用段階における EROI はより実用的であり、原油の燃料としての有用性を考える上では重要であると言えるだろう。

よって、使用段階における EROI を考えることは、エネルギーにおけるひとつの指標として必要性があると思われる。しかし、使用段階における EROI は従来考えられている EROI とは性質が異なるために、この両者の分析を混同することは避けなければならない。

3.1.3 エネルギー収支比の概念の拡張

Hall et al. (2009) により、EROI の概念を拡張する新しい EROI の定義が紹介された^[1]。

まず、社会全体におけるエネルギー収支を包括的に表す EROI を、 $EROI_{soc}$ (societal EROI) と定義した。 $EROI_{soc}$ は、社会全体で消費されるエネルギー量と、そのエネルギーを得るために投入されたエネルギー量との比で求められる。

$$EROI_{soc} = \frac{\text{社会における総エネルギー供給量}}{\text{全てのエネルギーを得るために投入されるエネルギーの合計}} \quad \dots ④$$

続いて、入力エネルギーとして算出するエネルギーの分析範囲の違いによって、以下の 3 つの EROI が定義された。

$EROI_{mm}$ (mine-mouth EROI) は、自然界に眠っているエネルギー資源が燃料として取り出される地点、すなわち坑口 (mine-mouth) における EROI である。Hall et al. (2009) はこれを標準的な EROI と定めており、燃料の採掘・採掘過程までに投入されるエネルギーを入力エネルギーと

して算出する。原油の場合は、掘削基地の建設コストや採掘におけるランニングコストを投入エネルギーとして考える。計算式に表すと次の通りである。

$$EROI_{mm} = \frac{\text{燃料から得られるエネルギー}}{\text{採掘・採掘過程で投入されるエネルギー}} \quad \dots ⑤$$

$EROI_{pou}$ (point-of-use EROI) は、燃料が使用段階 (point of use)、つまり消費者の元に届いた地点における EROI である。燃料の採掘・採掘過程で投入されるエネルギーに加え、燃料の精製・輸送過程において投入されるエネルギーを入力エネルギーとして算出する。原油をガソリンとして利用する場合を考えると、原油のガソリンへの精製や消費地への輸送時に投入されるエネルギーも入力エネルギーとして考えることになる。

$$EROI_{pou} = \frac{\text{燃料から得られるエネルギー}}{\text{採掘・採掘過程に加え、精製・輸送過程で投入されるエネルギー}} \quad \dots ⑥$$

そして $EROI_{ext}$ (extended EROI) は、さらに分析の範囲を拡張 (extend) させ、燃料の使用において直接・間接的に投入されたエネルギーも入力エネルギーとして算出する EROI である。原油から精製されたガソリンを自動車の燃料として利用する場合を例に挙げる。消費者の元に届けられたガソリンを燃料として使用するためには、自動車が必要である。自動車を継続して使用するためには定期的な整備が必要となる。また自動車が走行する道路も必要であるといえる。自動車や道路はガソリンの使用に必要なものであり、自動車や道路を作り維持するために投入されたエネルギーは、ガソリンを使用するために間接的に投入されたとみなすことができる。このように燃料の使用において生じる間接的な投入エネルギーも EROI の入力エネルギーとして算出するのが $EROI_{ext}$ である。

$$EROI_{ext} = \frac{\text{燃料から得られるエネルギー}}{\text{採掘・採掘過程から使用過程で投入されるエネルギー}} \quad \dots ⑦$$

分析範囲の違いから、同一の燃料においては、 $EROI_{mm} > EROI_{pou} > EROI_{ext}$ が成り立つ。

燃料の使用における間接的な投入エネルギーも考慮することから、 $EROI_{ext}$ は、分析対象の燃料の使用により社会に余剰エネルギーがもたらされるために必要な最低限のエネルギー収支比であるといえる。使用段階まで考えた場合は、

燃料は $EROI_{ext} >=1$ を満たすことで、必ず社会に余剰エネルギーをもたらすことができる。

石油系燃料の使用において余剰エネルギーが得られるためには、その石油系燃料における $EROI_{ext}$ が 1 以上である必要がある。つまり仮定 2-2] より、社会の持続に必要な最小エネルギー収支比とは、 $EROI_{ext} >=1$ を満たすような原油の最小 $EROI$ であると考えることができる。これを本論文における [仮定 2-3] とする。

【仮定 2-3】

社会の持続に必要な最小エネルギー収支比とは、 $EROI_{ext} >=1$ を満たす原油の最小 $EROI$ である。

よって今回は、原油を石油系燃料の中でも最も使われているガソリンとして使用する際の $EROI_{pou}$ 、 $EROI_{ext}$ についての計算を行い、最終的に $EROI_{ext} >=1$ を満たすような原油の最小 $EROI$ を社会の持続に必要な最小 $EROI$ として導出した。なお、日本において原油はほぼ輸入でまかなっていることから、日本における mine-mouth(坑口)は燃料が日本の港に到着した地点として捉えることができる。よって日本における $EROI_{mine}$ は 2.1 節で定義し計算した $EROI_{import}$ であるとし、この $EROI_{import}$ を元に $EROI_{pou}$ 、 $EROI_{ext}$ についての計算を行っている。

3.2 使用地点におけるエネルギー収支比の算出

$EROI_{pou}$ とは、燃料が消費者の元に届くまでに消費されたエネルギーを入力エネルギーとして算出する $EROI$ である。つまり、探鉱・採掘過程に加え、燃料の精製や消費地までの輸送過程における消費エネルギーを入力エネルギーとして考える。今回は、原油をガソリンとして使用する場合について考えるため、原油の精製にかかるエネルギーと、ガソリンを含めた石油製品の消費地までの輸送にかかるエネルギーについて考察を加える。

原油を石油製品に精製する過程で消費されるエネルギーは、(1) 製油所で消費されるエネルギーと、(2) 精製によって生じる非燃料生成物のもつエネルギー量に分けることができる。

(2) をエネルギーの消費とする理由について詳しく述べる。 $EROI$ の算出はエネルギーを全て熱量換算することで行われるが、原油は全てがエネルギーとして利用されるわけではない。原油の精製によって得られる石油製品には、ナフサやアスファルトなど石油化学製品の原料や道路の舗装材として使われるものも含まれる。しかし、 $EROI_{mine}$ や $EROI_{import}$ の地点では原油のもつ化学エネルギーの全てがエネルギーになるとして計算されており、使用地点まで考慮した分析を行う上では、実際にエネルギーとして使われない非燃料生成物をコストとして考える必要が生じる。そのため、非燃料生成物のもつエネルギー量を精製過程におけるエネルギーの消費として考えることにする。

製油所におけるエネルギー消費量は、石油連盟の発表したデータを使用し^[23]、原油・石油製品の国内供給エネルギー量全体における割合を 6.56% と算出した。

また、精製によって生じる非燃料の石油製品のもつエネルギー量のデータは、資源エネルギー庁の統計データから得られ^[11]、原油・石油製品の国内供給エネルギー量全体における割合は 17.7% と算出された。

石油製品が消費者の元へ輸送される過程で消費されるエネルギーは、製油所からガソリンスタンドまでの輸送に使われるタンクローリーや内航タンカーのエネルギー消費量について考える。

このエネルギー消費量の算出には、国内の石油元売会社大手である出光興産、JX 日鉱日石エネルギー(旧新日本石油と旧ジャパンエナジーが 2010 年 4 月経営統合)、エクソンモービル・ジャパングループ、昭和シェル石油、コスモ石油の 5 社の公表データを用い^{[24][25][26][27][28][29]}、原油・石油製品の国内供給エネルギー量における割合は 0.44% と算出された。

以上の算出を元に 2009 年度におけるガソリンの $EROI_{pou}$ を算出した。その結果を表 5 に記す。2009 年度の日本における $EROI_{import}$ の値は 2.1 節で 26.1 と求められた。輸出品の製造に必要なエネルギーは、 $EROI_{import}$ をもとに算出しており、また各段階における消費エネルギーは、これまでに算出された国内供給における各段階の消費エネルギーの割合から算出した。

表 5 2009 年度のガソリンにおける $EROI_{pou}$ の算出

ガソリン (2009 年度)			エネルギー (PJ)	比率 (%)
国内供給 (原油+石油製品) ^[11]			8,408	100
$EROI_{import}$			26.1	
コスト	使用地点まで	輸出品の製造に必要なエネルギー	322	3.83
		製油所での消費エネルギー	552	6.56
		精製によって生じた非燃料生成物のもつエネルギー	1,488	17.7
		輸送に用いられるエネルギー	37	0.44
		使用地点までの投入エネルギー合計	2,077	24.7
余剰エネルギー			6,010	71.5
$EROI_{import}$			3.5	

よって、2009 年度のガソリンの $EROI_{pou}$ は 3.5 となる。

次に、消費者の元に届く時点でガソリンが余剰エネルギーを持ちうる最小の $EROI_{import}$ を求める。

原油と石油製品の国内供給を E (PJ) とおく。また $x = EROI_{import}$ とおく。

このとき、輸出品の製造に必要なエネルギーは、 $1/x \times E$ (PJ) である。

また、精製・輸送過程における消費エネルギーは、 $24.7/100 \times E$ (PJ) である。

消費者の元に届く時点でガソリンが余剰エネルギーを持つためには、 $EROI_{pou} \geq 1$ を満たせばよいことから、下の不等式を満たす x を求める。

$$EROI_{pou} = \frac{E}{\frac{1}{x} \times E + \frac{24.7}{100} \times E} \geq 1$$

これを解くと、 $x \geq 100/75.3 \cong 1.3$

よって、輸入原油の $EROI_{import}$ が 1.3 以上あればガソリンの $EROI_{pou}$ は 1 以上となり、消費者の元に届いた時点で余剰エネルギーをもたらすことができる。

3.3 使用段階におけるエネルギー収支比の算出

$EROI_{ext}$ (extended EROI) は、燃料が消費者の元に届けられるまでに消費されたエネルギーに加え、燃料の使用において直接・間接的に入力されたエネルギーも入力エネルギーとして算出

するとしている。ガソリンの使用において間接的に入力されるエネルギーには、次のようなものが挙げられる。

(1) 自動車の製造にかかるエネルギー

ガソリンを使用するためには自動車は不可欠であることから、その製造にかかるエネルギーはガソリン使用のために間接的に入力されたエネルギーとみなすことができる。

(2) 自動車の維持にかかるエネルギー

自動車の継続的な使用には、整備などのメンテナンスが必要である。その消費エネルギーもガソリン使用のために間接的に入力されたエネルギーとみなすことができる。

(3) 道路工事(建設・維持)にかかるエネルギー

道路がなければ自動車を使用することはできない。そのため、道路の新規建設や環境維持のために消費されたエネルギーも、ガソリン使用のために間接的に入力されたエネルギーとしてみなすことができる。

よって、これら 3 つのエネルギー消費について分析を行う。

3.3.1 自動車の製造にかかるエネルギー

自動車の製造行程は、素材製造段階と部品・組立段階に分けることができる。乗用車のライフサイクルにおけるエネルギー消費量の段階別内訳を図 9 に示す。

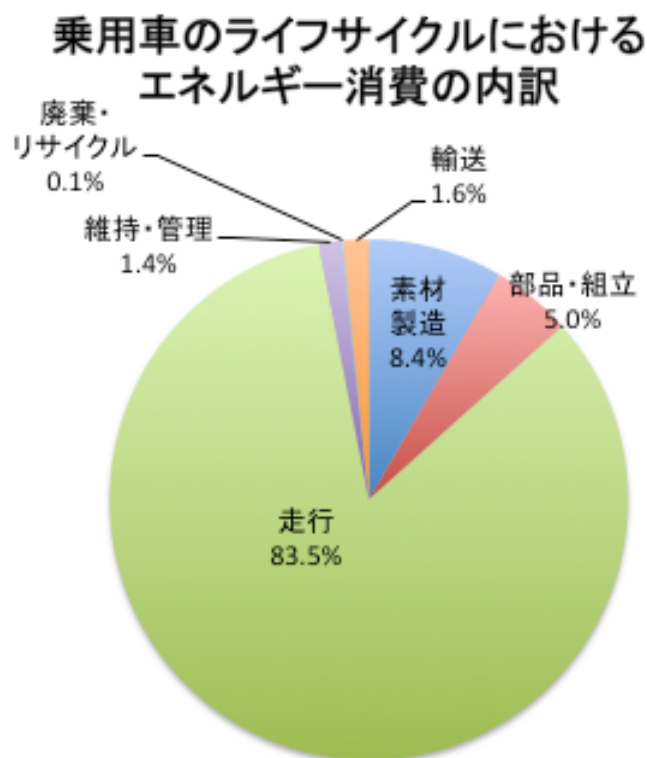


図 9 乗用車のライフサイクルにおけるエネルギー消費の内訳^[30]

まず、自動車の部品・組立段階におけるエネルギー消費量を算出する。

自動車の車体の製造・自動車部品の製造・自動車用タイヤの製造の3つの業界におけるエネルギー消費を考えた。それぞれの業界団体（日本自動車工業会・日本自動車車体工業会、日本自動車部品工業会、日本ゴム工業会）が業界全体におけるエネルギー消費量のデータを公表しており、そのデータを用いた^{[31][32][33]}。しかし、

日本ゴム工業会によるゴム製品製造業におけるエネルギー消費量のデータは、自動車用タイヤの製造に特化したものではないので、まずゴム製品製造業界全体における自動車用タイヤの生産シェアを調べた^[34]。その結果を表 6 に記す。

また、素材製造過程におけるエネルギー消費量は、部品・組立段階におけるエネルギー消費量を元に、図 9 で示されている比率から算出した。日本国内における自動車の製造にかかるエネルギーは表 7 のようになる。

表 6 ゴム製品製造業界全体における自動車用タイヤの生産量シェア^[34]

	単位	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	平均
自動車タイヤ	新ゴム量トン	1,335,701	1,344,387	1,330,338	966,922	/
ゴム製品合計	新ゴム量トン	1,640,676	1,660,424	1,637,659	1,186,289	
自動車タイヤの生産シェア	[%]	81.4	81.0	81.2	81.5	81.3

表 7 日本国内における自動車の製造にかかるエネルギー

項目	単位	2004 年度	2005 年度	2006 年度	2007 年度	2008 年度	5年 平均	
自動車製造業 エネルギー消費量 ^[31]	[原油換算千k]	3,372	3,430	3,376	3,370	2,890		
	[TJ]に換算	130,567	132,813	130,722	130,490	111,904		
自動車部品工業会エ ネルギー消費量 ^[32]	[原油換算千k]	3,483	3,620	3,661	3,736	3,079		
	[TJ]に換算	134,865	140,170	141,758	144,662	119,222		
日本ゴム 工業会エ ネルギー 消費量 ^[33]	全体	[原油換算千k]	1,041	1,067	1,059	1,063		995
		[TJ]に換算	40,309	41,315	41,006	41,160		38,527
自動車産業 寄与分 ^[34] (81.3%)	[TJ]	32,771	33,589	33,338	33,463	31,323		
部品・組立過程の エネルギー消費量	[TJ]	298,203	306,572	305,817	308,615	262,448		
素材製造過程の エネルギー消費量	[TJ]	500,982	515,042	513,773	518,473	440,913		
自動車製造における 消費エネルギー合計	[TJ]	799,185	821,614	819,590	827,088	703,362		794,168

国内で生産される自動車には、国内で使用される自動車の他に諸外国に輸出される自動車も含まれている。しかし、輸出される自動車の消費エネルギーは $EROI_{import}$ の算出の時に考えられており重複するので、ここでの算出からは差し引いて考える必要がある。今回は2008年の国内における四輪車の生産台数と輸出台数の比から、国内で使用される自動車を製造するために消費

されたエネルギー量のみを算出する。

国内向け自動車の製造にかかるエネルギーの消費量と原油・石油製品の国内供給のエネルギー量との関係を表 8 に記す。

以上のようにして求めた自動車の製造にかかるエネルギー消費量の原油・石油製品の国内供給エネルギー量における割合は 3.31%であった。

表 8 国内向け自動車の製造にかかるエネルギー

項目	単位	
自動車製造における消費エネルギー合計 (2004~2008年度の平均)	[TJ]	794,168
国内四輪車生産台数(2008年) ^[22]	[台]	11,575,644
四輪車輸出台数(2008年) ^[22]	[台]	6,727,091
国内製造した自動車の国内での使用率	[%]	41.9
国内向け自動車製造のエネルギー消費分 (2004~2008年度の平均)	[TJ]	332,644
原油+石油製品のエネルギー国内供給 (2004~2008年度の平均) ^[11]	[TJ]	10,043,596
自動車製造のエネルギーコストの割合	[%]	3.31

3.3.2 自動車の維持にかかるエネルギー

自動車の維持にかかるエネルギーとして、今回は自動車整備業と自動車に関する保険業におけるエネルギー消費量を考える。自動車整備業におけるエネルギー消費量は経済産業省が出している統計データから値を得た^[35]。

自動車保険業におけるエネルギー消費量の算出について、まず保険業全体におけるエネルギー消費原単位の値を統計データから得た。次に、自動車に関する保険である自動車保険と自動車損害賠償責任保険における元受正味保険料の業界全体総額を保険業の業界団体である日本損害

保険協会の HP から得た。得られた保険業のエネルギー消費原単位と保険料総額との積をとることによって、自動車保険業におけるエネルギー消費量を概算した。

以上のようにして求められた 2007・2008 年度における自動車の維持にかかるエネルギーの消費量と、原油・石油製品の国内供給のエネルギー量との関係を表 9 に記した。この 2 年の平均をとり、原油・石油製品の国内供給エネルギー量における自動車の維持にかかるエネルギー消費量の割合を 0.060% と定める。

表 9 自動車の維持にかかるエネルギー

項目		単位	2007 年度	2008 年度	平均
自動車整備業 エネルギー消費量 ^[35]		[TJ]	7,409	3,830	
保険業 エネルギー消費原単位 ^[35]		[GJ/100 万円]	0.022	0.066	
元受 正味 保険料 ^[36]	自動車保険	[100 万円]	3,495,243	3,447,541	
	自動車損害 賠償責任保険	[100 万円]	1,041,570	868,362	
	合計	[100 万円]	4,536,813	4,315,903	
自動車保険業 エネルギー消費量		[TJ]	102	284	
自動車の維持における エネルギー消費量		[TJ]	7,511	4,113	
国内 供給 ^[11]	原油	[TJ]	9,167,400	8,559,866	
	石油製品	[TJ]	833,173	481,678	
	原油+石油製品	[TJ]	10,000,573	9,041,544	
自動車の維持にかかる エネルギー消費量の割合		[%]	0.075	0.045	0.060

3.3.3 道路工事にかかるエネルギー

道路工事にかかるエネルギー量を算出するために、今回は、国立環境研究所 地球環境研究センターが発行している「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)」を用いた。これは、総務局統計局が 5 年おきに発表している産業連関表を元にして、環境負荷原単位を算出したものであり、あらゆる産業部門ごとの発生環境負荷量が掲載されている。各部門におけるエネルギー消費量も掲載されており、「道路関係

公共事業」部門におけるエネルギー消費量についてデータを抽出し、道路工事にかかるエネルギー消費量を算出した。

以上のようにして求められた 1990・1995・2000・2005 年度における道路工事にかかるエネルギー消費量と、原油・石油製品の国内供給のエネルギー量との関係を表 10 に記す。4 年の平均をとり、原油・石油製品の国内供給エネルギー量における道路工事にかかるエネルギー消費量の割合を 0.44% と定める。

表 10 道路工事にかかるエネルギー

項目	単位	1990 年度	1995 年度	2000 年度	2005 年度	平均	
道路関係公共事業 エネルギー消費量 ^[37]	[TJ]	38,290	57,963	49,225	50,241		
国内供給 ^[11]	原油	[TJ]	8,973,862	10,173,804	9,645,079		9,410,128
	石油製品	[TJ]	2,029,203	1,625,939	1,512,049		1,164,381
	原油 +石油製品	[TJ]	11,003,065	11,799,743	11,157,128		10,574,509
道路工事にかかる エネルギー消費量の割合	[%]	0.35	0.49	0.44	0.48	0.44	

3.3.4 使用段階におけるエネルギー収支比の算出

以上の結果を元に 2009 年度におけるガソリンの $EROI_{ext}$ を算出した。2009 年度のガソリンの $EROI_{ext}$ は 2.7 となる。

各段階におけるエネルギー消費の内訳を表 11

に記す。2009 年度の日本における $EROI_{import}$ の値は 26.1 であった。輸出品の製造に必要なエネルギーは、 $EROI_{import}$ をもとに算出しており、また各段階における消費エネルギーは、これまでに算出された国内供給における各段階の消費エネルギーの割合から算出した。

 表 11 2009 年度におけるガソリンの $EROI_{ext}$ の算出

ガソリン (2009 年度)			エネルギー (PJ)	比率 (%)
国内供給 (原油+石油製品) ^[11]			8,408	100
$EROI_{import}$			26.1	
コスト	使用地点まで	輸出品の製造に必要なエネルギー	322	3.8
		製油所での消費エネルギー	551	6.56
		精製によって生じた非燃料生成物のもつエネルギー	1,486	17.7
		輸送に用いられるエネルギー	37	0.44
		使用地点までの投入エネルギー合計	2,074	24.7
	使用過程	自動車(国内使用分)の製造に必要なエネルギー	278	3.31
		自動車の維持に必要なエネルギー	5	0.060
		道路工事に必要なエネルギー	37	0.44
		使用過程での投入エネルギー合計	320	3.8
	余剰エネルギー			5,692
投入エネルギーの合計			2,716	32.3
$EROI_{ext}$			3.1	

3.4 社会の持続に必要な最小エネルギー収支比の算出

$EROI_{ext}$ とは、燃料を使用するために直接的・間接的に必要なエネルギーコストを考慮した EROI であった。そのため、 $EROI_{ext}$ が 1 以上であれば燃料の使用により社会に余剰エネルギーがもたらされることになる。この条件を満たす最小の $EROI_{import}$ が社会の持続に必要な最小 EROI (minimum EROI) と考えられる。ガソリンの使用における輸入原油の最小 EROI を算出する。

原油と石油製品の国内供給を E (PJ) とおく。また $x = EROI_{import}$ とおく。

このとき、輸出品の製造に必要なエネルギーは、 $1/x \times E$ (PJ) である。

精製・輸送過程における消費エネルギーは、 $24.7/100 \times E$ (PJ) である。

燃料の使用に関して間接的に投入されるエネルギーは、 $3.8/100 \times E$ (PJ) である。

ガソリンの使用が社会に余剰エネルギーをもたらすためには、 $EROI_{ext} > 1$ を満たせばよいことから、下の不等式を満たす x を求めればよい。

$$EROI_{ext} = \frac{E}{\frac{1}{x} \times E + \frac{24.7}{100} \times E + \frac{3.8}{100} \times E} \geq 1$$

これを解くと、 $x \geq 100/71.5 \approx 1.4$

よって、輸入原油の $EROI_{import}$ が 1.4 以上あればガソリンの $EROI_{ext}$ は 1 以上となり、燃料の使用によって社会に余剰エネルギーがもたらされるといえる。

よって、[仮定 2-3] より、社会の持続に必要な最小 EROI は 1.4 といえる。

$EROI_{import}$ の値の変化によって $EROI_{pou}$ 、 $EROI_{ext}$ は図 10 のように変化する。図 10 から、 $EROI_{import}$ の値が低くなるにつれて $EROI_{pou}$ 、 $EROI_{ext}$ が急激に低下することが読み取れる。

EROI_{import}の値の変化に対する
EROI_{pou}, EROI_{ext}の値の推移

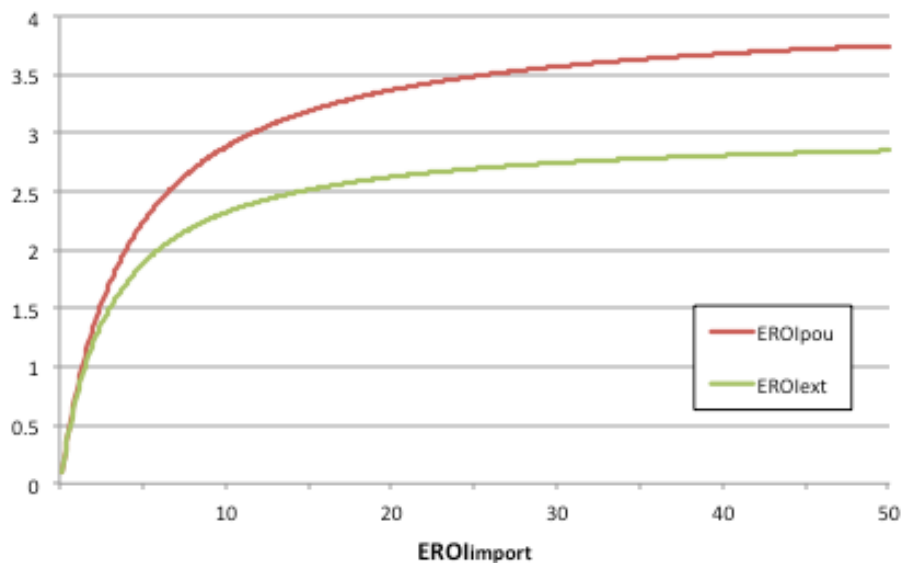


図 10 $EROI_{import}$ の値の変化に対する $EROI_{pou}$ 、 $EROI_{ext}$ の値の推移

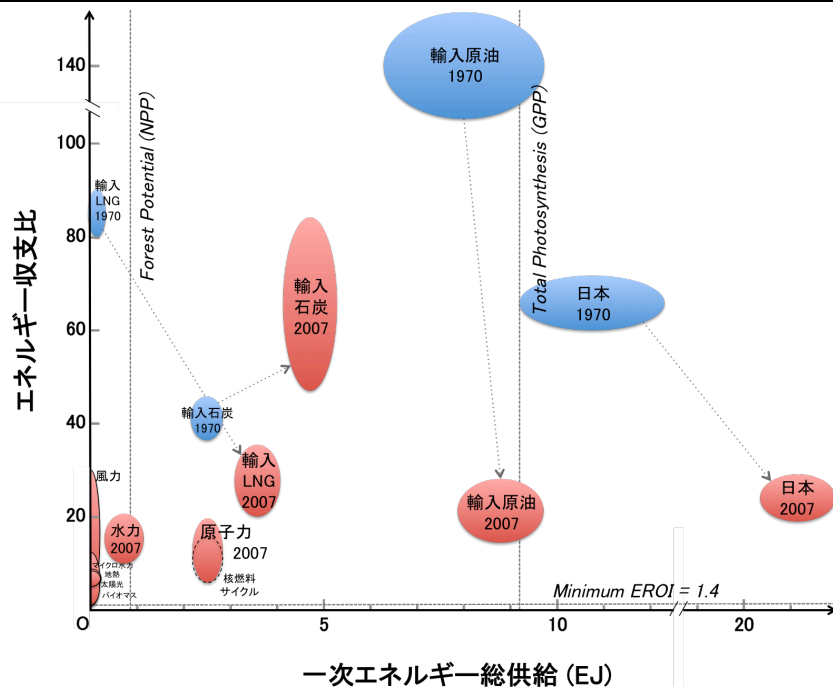


図 11 Balloon Graph(再掲)

4 議論

4.1 日本における各種エネルギーの質と量を表したグラフの考察

第2章において、日本における各種エネルギー源の供給量と EROI をグラフに表した。

1970年と2007年における EROI の変化をみると、輸入石炭を除いた輸入原油・輸入LNG・日本全体の EROI においては、2007年においてその値が大きく減少しているといえる。輸入石炭に関しては EROI の減少の傾向が見られないが、その理由として一般炭の供給は1981年まで国内炭が主であったことが挙げられる^[20]。シェアが少な

かったため、輸入一般炭の1970年におけるコストは大きく、その結果1970年における輸入石炭の EROI は小さい値を示したと推測される。

また、輸入原油・輸入LNG・輸入石炭・原子力・水力の主要な5つのエネルギーの EROI 推移を見ると、第二次石油危機における輸入燃料の高騰の影響を受けたと見られる1980年においては EROI の落ち込みがみられるが、全体としては年々供給量が増加し、EROI が減少するという傾向がみてとれる(図12)。

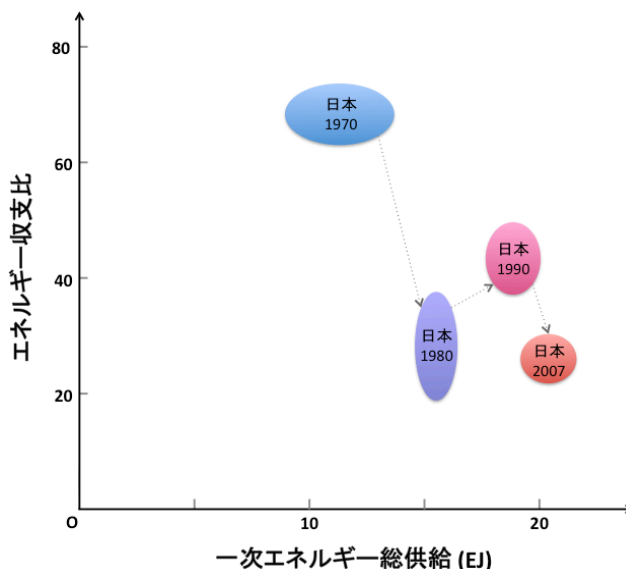


図 12 日本の主要5燃料における Balloon Graph(再掲)

こうした EROI の低下傾向の要因について、石油ピークで紹介された考えから推測できる。人間は、採りやすく安価な資源から消費してきた。後に残されるのは採掘にコストのかかる資源であり、投入されるエネルギーが増えるために、エネルギーの使用によって得られる余剰エネルギーも小さくなる。そのため全体としての EROI は年々減少が起こる。

しかし、実際には技術革新によって得られる余剰エネルギーの割合が増え、EROI が改善する場合も考えられる。よって将来の EROI の推移については更なる分析が必要であると言える。

また、再生可能エネルギーと呼ばれる風力や太陽光、バイオマスなどのエネルギーは、輸入原油や輸入 LNG、輸入石炭といった化石燃料と比較して、質・量ともに軒並み低い値を示していることがわかる。

4.2 社会全体のエネルギー収支比の低下に伴う影響

社会活動は余剰エネルギーの消費によって支えられている。その余剰エネルギーの値は、エネルギー供給量と EROI の値から下の式で算出することができる。2005～2009 年における余剰エネルギーの量は表 12 の通りである。

E_{in} = 入力エネルギー, E_{out} = 出力エネルギー,

E_{net} = 余剰エネルギー = $E_{out} - E_{in}$

$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{out}}{E_{out} - E_{net}}$

$\therefore E_{net} = \frac{EROI - 1}{EROI} \times E_{out} \dots \textcircled{8}$

表 12 日本における余剰エネルギー

	2005 年度	2006 年度	2007 年度	2008 年度	2009 年度	5年平均
日本全体の EROI	27.4	24.5	21.3	19.7	28.5	24.3
一次エネルギー総供給 ^[11] (EJ)	21.8	21.8	21.8	21.2	20.5	21.4
余剰エネルギー (EJ)	21.0	20.9	20.8	20.1	19.8	20.5

2005～2009 年における社会にもたらされた余剰エネルギーの平均は 20.5EJ であるといえる。ここで、今後の社会においても現在と同等の社会活動を続けていくと仮定する。技術の進歩による省エネルギーを考えないとすると、現在と同等の社会生活を送るためには現在と同量の余剰エネルギーが必要である。しかし、今後も EROI

の減少が見込まれるため、20.5EJ の余剰エネルギーの確保にはさらなるエネルギー供給が必要となる。20.5EJ の余剰エネルギーの確保のために必要となる一次エネルギー総供給の、社会全体の EROI による変化は図 13 のようになる。

余剰エネルギーを確保するために必要となる一次エネルギー総供給

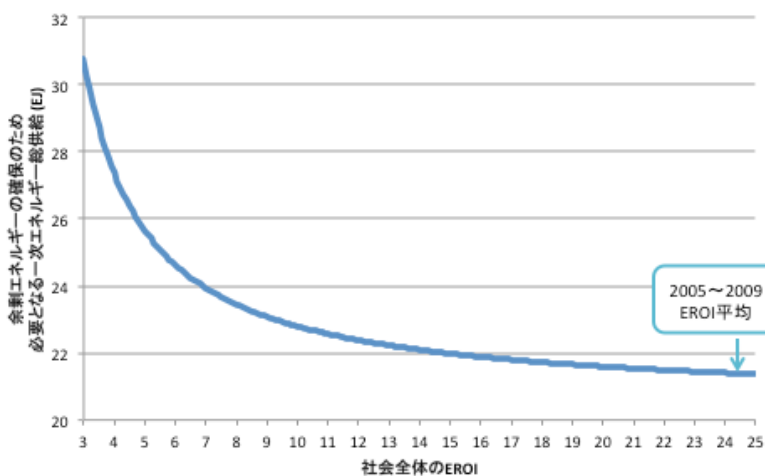


図 13 余剰エネルギーを確保するために必要となる一次エネルギー総供給

石油の代替として今後の発展が期待されている原子力やバイオマスなどのエネルギーは、現在においてはどれも石油より EROI が低いため、代替によって社会全体の EROI の更なる低下が予想される。よって、現在と同量の余剰エネルギーの確保のために必要となるエネルギー供給量も図 13 で示したように増加する。そのため、石油の代替のためには今まで石油の消費によってまかなってきたエネルギーを補うのとは別に、EROI の減少による余剰エネルギー確保のために必要なエネルギー供給量の増加をも補わなければならないということになる。

4.3 エネルギー収支比から見たバイオマスエネルギーの持続的利用に関する考察

第 4 章で、日本の国土面積の約 3 分の 2 を占める森林全体において、光合成により 1 年間に作り出される有機物の NPP (純一次生産) のエネルギーを 0.86EJ と算出した。この値がバイオマスエネルギーの持続的利用に与える意味について考える。

NPP (純一次生産) とは、光合成によって作り出される有機物量のうち、葉や幹などの新しい植物組織 (植物バイオマス) となる有機物量を指した。つまり、NPP のもつエネルギー量が 1 年間に植物が光合成により作り出すことのできる最大出力エネルギーであるといえる。

バイオマスエネルギーは植物組織をエネルギー源としているため、持続可能なバイオマスエネルギーの利用によって得られる最大出力エネルギーは NPP のもつエネルギー量であるといえ

る。そして、それ以上の出力エネルギーをバイオマスによって得る場合は、バイオマス資源を切り崩しているとみなすことができる。実際は、NPP から微生物や動物の活動エネルギーもまかなわれるため、バイオマスの持続的な利用によって得られる最大出力エネルギーはさらに小さくなる。

この値はあくまで目安であり、本研究における光合成量の算出には不確実性があることを考慮する必要がある。また、主に若い木ほど光合成が盛んであることから、森林に人の手を加え管理することで光合成量の増加を見込める。また土地の緑化によって、得ることのできる最大余剰エネルギーの値も向上する。

また、今回は日本の森林のみを取り上げてその NPP の算出を行った。そのため、農作物や藻類を原料とするバイオマスエネルギーの使用によって得られるエネルギーについては含まれていない。これらバイオマスエネルギーの持続的な利用についての考察にはさらなる分析が必要であるといえる。

4.4 社会の持続に必要な最小エネルギー収支比の日米比較

[仮定 2-3] の下、日本における社会の持続に必要な最小 EROI は、第 3 章にて 1.4 と示された。米国における最小エネルギー収支比の算出は Hall et al. (2009) によって行われている^[1]。それによると、米国における社会持続のために必要な最小の EROI は 3 とされており、日本より高い値を示した。最小 EROI の算出に用いられた各投入エネルギーの内訳を表 13 に示す。

表 13 日米における各項目投入エネルギー比率の違い

ガソリン		日本 (2009 年度)	米国 ^[1] (2009 年)	
		比率 (%)	比率 (%)	
$EROI_{import}$ (日本) / $EROI_{nm}$ (米国)		26.1	10	
コスト	エネルギーを得るために投入されるエネルギー		3.8	10
	消費地点まで	製油所での消費エネルギー	6.56	10
		精製によって生じた非燃料生成物のもつエネルギー	17.7	17
		輸送に用いられるエネルギー	0.44	3
		使用地点までの投入エネルギー合計	24.7	30
	使用過程	自動車の製造に必要なエネルギー	3.31	14
		自動車の維持に必要なエネルギー	0.06	7
		道路工事に必要なエネルギー	0.44	3
		使用過程での投入エネルギー合計	8.4	24
	社会の持続に必要な最小 EROI		1.4	3

両者の値の間に大きな開きが見られるのは、輸送に用いられるエネルギー・自動車の製造に必要なエネルギー・自動車の維持に必要なエネルギー・道路工事に必要なエネルギーである。

これらの違いが最小 EROI の値の差を生んでいると考えられるため、これら各段階において考察を加える。日米の自動車環境の違いを表 14 に示した。

表 14 日米の自動車環境の違い

	日本	米国	米国/日本
石油の国内供給量 (EJ)	8.4 ^[11]	46 ^[1]	5.5 倍
燃料の輸送距離(km)	194 ^[38]	965.6 ([1]における仮定)	4.98 倍
エネルギー消費の GDP 原単位 (エネルギー強度) ^[1]			2.07 倍
自動車の生産台数 ^[21] (2008 年)	11,575,644	8,693,541	0.75 倍
自動車整備業におけるエネルギー消費原単位(MJ/\$)	0.33 ^[34]	14 ([1]における仮定)	42 倍
自動車保険業におけるエネルギー消費原単位(MJ/\$)	0.0066 ^[34]	7 ([1]における仮定)	1060 倍
道路延長(km) ^[39]	1,196,999 (2006 年)	6,544,257 (2005 年)	5.47 倍
1,000 人当たりの自動車数(台) ^[39]	595	820	1.38 倍

輸送に用いられるエネルギーにおいて、米国における値は日本の値の約 6.9 倍となっている。この理由として、国土の面積の違いとそれによる燃料輸送距離の違いが挙げられる。Hall et al. は、燃料の輸送距離を 600 マイル(約 965.6km)と仮定しているのに対し、日本における平均輸送距離は 194km であり^[38]、米国の輸送距離の約 5 分の 1 である。輸送距離が長ければ長いほど輸送に用いられるエネルギーは大きくなるので、両国の値の間に差が生まれたと考えられる。

また、自動車の製造・維持に必要なエネルギーにおける両国間の顕著な値の差には、両国のエネルギー効率の違いが関係すると思われる。エネルギー消費の GDP 原単位、つまり国全体のエネルギー強度の値は日米の間で 2 倍以上の差がみられる。日本の方が生産におけるエネルギ

ー消費が少なくすむということである。

また、実際に算出に用いられたエネルギー消費原単位の値にも、両国の間に大きな差が見られる。自動車製造におけるエネルギー消費の算定において、Hall et al.(2009)は、自動車産業のエネルギー消費原単位を重工業と同じ 14MJ/\$ であるとし、自動車産業における生産高との積をとることでエネルギーの算出を行っている。しかし、日本の自動車産業のエネルギー消費原単位はもっと小さい。自動車の維持に必要なエネルギーの算出においても、今回の分析で用いた資料^[34]によるエネルギー消費原単位と Hall et al.(2009)が用いたエネルギー消費原単位の仮定との間に大きな開きが見られる(表 14)。そのため、両者ともに、結果として算出されるエネルギーの比率に差がみられたといえる。

表 15 日米のエネルギー消費原単位比較

	日本(2008 年度)			米国
	車体組立 ^[31]	部品製造 ^[32]	部品・組立 合計	Hall et al.(2009) ^[1]
生産金額 (兆円)	20.52	15.23	35.75	
エネルギー消費量 (TJ)	111,904	119,222	231,126	
エネルギー消費原単位 (MJ/1000 円)			6.46	
通関レート(2008 年度) ^[1] (円/\$)			100.51	
エネルギー消費原単位 (MJ/\$)			0.650	
素材製造過程を考慮に入れた 自動車産業における エネルギー消費原単位(MJ/\$)			1.74	14

道路工事に必要なエネルギーの違いにおいては、前述の通り日本のエネルギー強度が優れていることの他に、道路延長の違いが考えられる(表 14)。国土の広い米国ではその分道路延長も長く、道路の建設や維持にかかるエネルギーコストも大きくなるとみられる。そのため、米国での道路工事におけるエネルギー消費は大きくなる。

以上をふまえると、日本は米国に比べてエネルギー効率がよく、また国土が小さいために各段階におけるエネルギー消費が米国より抑えられたため、社会持続のために必要な最小 EROI が米国より小さくなったといえる。

4.5 エネルギー収支比から持続性を評価することについて

本研究では、エネルギー収支の面において社会活動が維持するために最低限必要な条件を運輸システムの維持と仮定した ([仮定 2-1])。また、運輸システムで消費されるエネルギーの約 90%弱を自動車輸送が担っており(図 7, 図 8)、自動車の動力源のほとんどが石油系燃料であることから(表 4)、石油系燃料のひとつであるガソリンの使用において運輸システムが成立するために必要な余剰エネルギーを得られる最低限の輸入原油の EROI を算出し、その値を社会の持続に必要な最小 EROI とした([仮定 2-3])。この結果得られた最小 EROI は 1.4 であった。このとき、[仮定 1]より国内のエネルギー供給は全て原油で賄われていると想定されている。

社会全体のエネルギー消費を EROI 1.4 の輸

入原油のみで賄う国の社会構造について考える。エネルギーの使用によって得られる余剰エネルギーを全て運輸システムに投入することで現状の国内の運輸システムは確保される。しかし、家庭や農業、オフィスなどの輸出品生産に直接関係のないエネルギー消費や、輸入燃料の購入に必要な資金を得る以外の目的の製品の生産におけるエネルギー消費などといった、他の余剰エネルギーを必要とする活動は国内では行えないということを示している。

EROI が 1.4 を下回ると、運輸システムが担保されないために、社会活動は確実に成り立たない。EROI が 1.4 を超えると運輸システムを維持した上で更に余剰エネルギーを得ることができ、国内において製造業などの産業に使うことができる。そしてその値によって、余剰エネルギーによってまかなえる社会活動の水準が変わる。

現在(2009 年度)の原油の EROI は 26.1 であり、石油による恩恵によって私たちの現在の生活は成り立っている。一方、図 11・図 12 に示されるような EROI の減少傾向を考慮すると、今後も原油の EROI は減少すると考えられる。そして今回の研究で、EROI が 1.4 を切る時、運輸システムが担保されないがために社会活動は確実に成り立たないことが示された。この両者の値の間に、運輸システムだけでなくその他の社会活動にかかるエネルギー投入を考慮に入れた上で、持続可能な社会の実現が達成される均衡点の EROI が存在する。その値の算出には更なる分析が必要である。

一般的な社会の持続性の評価にはあらゆる

面から考慮されるべきであるが、その一つの観点として本研究のエネルギー収支からの定量的なアプローチもその評価に重要な意味を持つと言える。

4.6 評価結果の不確実性

本研究における不確実性について考える。分析では、多数の統計データを用いた。そのため、それら統計データの不確実性によって影響を受ける。

次に各分析における不確実性について述べる。

4.6.1 輸入燃料のエネルギー収支比の算出における不確実性

輸入燃料の EROI の算出には様々な仮定とデータの選択を行った。それぞれが与える不確実性について考察を加える。

輸入燃料の調達方法について、燃料資源の自主開発分については考えず、燃料供給の全てを市場における取引で購っていると仮定した。自主開発原油は世界情勢に左右されない安定供給を実現する一方、その油田の開発には巨額のリスクマネーと長いリードタイムを要する^[38]。つまり、原油の自主開発には安定した調達コストが見込める反面、開発に莫大なコストがかかると言えるため、全体として EROI の値にどう影響するかについては更なる分析が必要であると考えられる。

特定の輸入燃料の EROI を算出する際、国内全てのエネルギーをその燃料の消費のみでまかなっていると仮定が行われている ([仮定 1])。

また、取引における金利・手数料などは無視した。実際にかかる金利や手数料を考慮すると、コスト増と考えられるため輸入燃料の EROI の値は減少するものと思われる。

輸入燃料の EROI の算出に用いるエネルギー強度は、国全体におけるエネルギー強度を使用した。一方、輸出産業に特化したエネルギー強度は国全体におけるエネルギー強度より低い値を示すため、値の選択によっては EROI の値が増加する。

4.6.2 他のエネルギーのエネルギー収支比における不確実性

他のエネルギーにおける EROI の不確実性については、他の研究によるデータを用いたため、参考文献における不確実性に準じるといえる。

なお、同じエネルギーの EROI 算出においても、その分析の範囲・方法によって算出される EROI の値は変化する。そのことを考慮し、本研究において各種エネルギーをグラフに表

す際、幅を持った楕円状の座標をとることによって (Balloon Graph)、分析方法における EROI の算出結果の不確実性を表現した。

4.6.3 光合成量の算出における不確実性

光合成量の算出における不確実性について考察を加える。総一次生産 (GPP) の算出においては、日本の気候帯を考慮し、針葉樹はカラマツを除き全て常緑針葉樹、広葉樹は全て落葉広葉樹と仮定した。また、樹齢や気候により光合成量は変化する。本研究で用いた植生区分ごとの光合成による二酸化炭素吸収量の原単位データは確定値ではなく、環境再生保全機構の知見の集約によるものであることに留意する必要がある^[17]。

4.6.4 社会の持続に必要な最小エネルギー収支比の算出における不確実性

社会の持続に必要な最小 EROI の算出において考えられる不確実性について述べる。

輸送に用いられるエネルギーの算出には、国内の石油元売会社の公表データを用いた。しかし、各社におけるデータの境界設定には貯蔵過程や販売過程を含むものと含まないものといったばらつきがある。実際の石油製品の輸送・販売にはそれらの過程におけるエネルギー消費があると考えられ、実際の輸送に用いられるエネルギーコストは大きくなるため、社会の持続に必要な最小 EROI は大きくなるといえる。

また本研究では自動車の廃棄にかかるエネルギーは考慮していない。自動車の廃棄を含むライフサイクル全体で分析を行った場合、使用地点におけるエネルギーコストが大きくなるために、社会の持続に必要な最小 EROI の値は大きくなるものとみられる。

しかし、今回分析に用いた乗用車のライフサイクルにおけるエネルギー消費量のデータによると、廃棄・リサイクル過程におけるエネルギー消費量のライフサイクル全体中の割合は 0.1% であり^[30]、これを考慮しても最小 EROI の値に変化はみられなかった。

5 結論

本研究は、社会活動の持続性を確保するためのエネルギー供給についての考察を目的とした。

社会活動の持続性を確保するためのエネルギー供給についての考察として、まず現在における各種エネルギー源の供給量と EROI を同時に表したグラフ (Balloon Graph) を作成した。Balloon Graph から、日本全体における EROI の値は大きな傾向として年を追って

減少していることが確認された。また、化石燃料に代わるエネルギーとして期待されている風力や太陽光、バイオマスエネルギーなどの再生可能エネルギーは、現状では供給量・EROI の双方において化石燃料よりも軒並み低い値を示していることがわかった。そして日本における光合成量から、バイオマスエネルギーが生み出すことのできるエネルギーの限界についての考察を行った。

そして、社会の持続に必要な最小 EROI を求めた。本研究では、社会が持続性を持つための最低条件を運輸システムの維持とおいた([仮定 2-1])。そして、運輸部門において最も多く使われている燃料であるガソリンについて、使用段階におけるエネルギー消費まで考慮した EROI を算出し、運輸システムが維持できる余剰エネルギーを生み出すことのできる最小の EROI を算出した。こうして得られた社会の持続に必要な最小 EROI の値は 1.4 であった(ただし、[仮定 1][仮定 2-3]とする)。EROI が 1.4 を下回ると、運輸システムが担保されないために、社会活動は確実に成り立たない。この値は、石油を運輸システム維持だけに使い、それ以外の自国内消費には全く使わない社会を意味し、エネルギー収支の面における社会の持続性を確保できる最低必要条件を定量的に評価する指標の一つとして考えることができる。

参考文献

- [1] Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R. (2009): What is the minimum EROI that a sustainable society must have?, *Energies* 2009, 2(1), 25-47
- [2] 宇野武紀 (2009): 核燃料サイクルのエネルギー収支分析
- [3] 岩崎裕, 松島潤 (2010): マイクロ水力発電のエネルギー収支分析, もったいない学会 WEB 学会誌, Volume 4, 25-44
- [4] 出崎敏雄, 橋本隆司, 小田哲也, 大澤克幸, 林農, 原豊 (2009): 自然エネルギーの EPR(Energy Profit Ratio), 日本機械学会 講演論文集, 2009(47), 379-380
- [5] Kubiszewski I., Cleveland C.J. and Endres P.K. (2010): Meta-analysis of net energy return for wind power systems, *Renewable Energy*, Volume 35, 218-225
- [6] 佐賀清崇, 横山伸也, 芋生憲司 (2008): 稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析, エネルギー・資源, 29(1)
- [7] 黒原大輔, 松島潤 (2010): 廃食油からのバイオディーゼル燃料生成のエネルギー収支分析, もったいない学会 WEB 学会誌, Volume 4, 45-61
- [8] 土屋陽子, 天野治 (2010): 木質ペレット製造のエネルギー収支分析, 電力中央研究所 研究報告書
- [9] Hall C.A.S., Powers R. and Schoenberg W. (2008): Peak oil, EROI, Investments and the Economy in an Uncertain Future, *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, Chapter5, 109-132
- [10] 経済産業省 資源エネルギー庁: 日本のエネルギー2010
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2010html/index.htm>
- [11] 経済産業省 資源エネルギー庁: 総合エネルギー統計
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/index.htm>
- [12] 内閣府: 国民経済計算
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/menu.html>
- [13] (財) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット (2010): EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2010年版), (財) 省エネルギーセンター
- [14] 天野治 (2006): 石油の代替エネルギーを EPR から考える, 日本原子力学会誌, Vol.48, No.10, 759-765
- [15] 天野治 (2008): 石油ピーク後のエネルギー, 愛智出版
- [16] 林野庁: 森林・林業統計要覧 2010
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/kankou_2010.html
- [17] (独) 環境再生保全機構: 大気浄化植樹マニュアル
<http://www.erca.go.jp/taiki/video/pdf/jyoka00index.pdf>
- [18] 園池公毅 (2008): 光合成とはなにか生命システムを支える力, 講談社
- [19] (独) 国立環境研究所: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2010年4月版
http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2010/NIR_JPN_2010_v4.0J.pdf
- [20] 経済産業省 資源エネルギー庁: 平成 21 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2010)
- [21] 国土交通省: 国土交通白書(平成 21 年度) 参考資料編
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h21/hakusho/h22/data/datindex.html>
- [22] (社) 日本自動車工業会ホームページ
<http://www.jama.or.jp/>

- [23] 石油連盟 (2009): 石油精製業における地球温暖化対策の取り組み (経済産業省 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会資源・エネルギーワーキンググループ(2009年度)-配付資料)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/data/g91124aj.html>
- [24] 出光興産 : 出光グループ CSR レポート 2010
<http://www.idemitsu.co.jp/company/management/csr/publish/2010.html>
- [25] JX 日鉱日石エネルギーホームページ
<http://www.noe.jx-group.co.jp/>
- [26] ジャパンエナジー : CSR レポート 2009
http://www.noe.jx-group.co.jp/csr/report/download_j/index.html
- [27] エクソンモービル・ジャパングループ : 「良き企業市民」としての取り組み 2009 年度版
http://www.exxonmobil.com/Japan-Japanese/PA/Files/CCR_2009_Web.pdf
- [28] 昭和シェル石油 : サステナビリティ・レポート 2009 ~The Energy Challenge ~
http://www.showa-shell.co.jp/society/csr/sr2009/report_top.html
- [29] コスモ石油グループ : サステナビリティレポート 2009
<http://www.cosmo-oil.co.jp/csr/publish/sustain/2009.html>
- [30] 小林紀 (1998): 自動車の LCA, 日本自動車工業会 JAMAGAZINE 1998 年 6 月号
<http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/199806/index.html>
- [31] (社) 日本自動車工業会, (社) 日本自動車車体工業会 : 自動車製造業における地球温暖化対策の取り組み (経済産業省 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会自動車・自動車部品・自動車車体ワーキンググループ(2009年度)-配付資料)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/data/g91130cj.html>
- [32] (社) 日本自動車部品工業会 : 自動車部品工業会における地球温暖化対策の取り組み (経済産業省 : 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会自動車・自動車部品・自動車車体ワーキンググループ(2009年度)-配付資料)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/data/g91130cj.html>
- [33] 日本ゴム工業会 : 日本ゴム工業会における地球温暖化対策の取り組み (経済産業省 産業構造審議会環境部会地球環境小委員会化学・非鉄金属ワーキンググループ(2009年度)-配付資料)
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/data/g91120aj.html>
- [34] 日本ゴム工業会 : ゴム製品の生産統計
<http://www.jrma.gr.jp/>
- [35] 経済産業省 資源エネルギー庁 : エネルギー消費統計
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/energy/index.htm>
- [36] (社) 日本損害保険協会 : 保険種目別データ
<http://www.sonpo.or.jp/archive/statistics/syumoku/>
- [37] 国立環境研究所 地球環境研究センター : 産業関連表による環境負荷原単位データブック (3EID)
- [38] JX 日鉱日石エネルギー : 石油便覧
<http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/index.html>
- [39] 総務省統計局 : 世界の統計 2010
<http://www.stat.go.jp/data/sekai/index.htm>

謝辞

大久保泰邦編集委員長には原稿改善のために有益なご指摘をいただきました。ここに謝意を表します。