



世界の鉄源需要展望 —エネルギー長期需給展望との比較考察—

小澤 純夫*・米澤 公敏*²・月橋 文孝*³

World Outlook for Iron Source Demand —Comparison with Energy Outlook—

Sumio KOZAWA, Kimitoshi YONEZAWA and Fumitaka TSUKIHASHI

Synopsis : To maintain the sustainable use of iron source, there are global challenges due to mass effect such as the recent rapid growth in steel consumption, a large impact on climate change etc. Although R&D of iron and steel has been made for years, there is still significant potential of technological innovation to solve those challenges with a greater unified effort by the industry-academic-government. Therefore, it is necessary for deciding the amount of R&D's investment to share the common world-wide iron source demand outlook based on engineered researches of mathematical modeling and continual improvement, which lag behind those of energy. As it is expected to improve models of long-term forecasting of world iron source demand, priority issues are to specify the driver which governs the demand, and formulate a simple and rational hypothesis of the linkage.

Key words: iron source; demand; outlook; mass effect; energy; economy; simulation; modeling.

1. 緒言

鉄鋼業は成熟産業との見方が一般的である^{1,2)}。しかし、技術的にも量的にも成長産業であるとのパラダイムシフトを行い、マスエフェクト¹⁾の視点に立ち産学官の総力を結集して鉄鋼技術開発を加速すべき時期を迎えているのではないだろうか。

技術的に見れば、鉄鋼は社会インフラ整備の構造材の主役であるとともに製造業の競争力の源泉となっている。例えば、我が国特殊鋼メーカーは、自動車メーカーと共同で開発を行い、品質の素材への「作り込み」によって、加工コスト削減、軽量化等を実現することにより、特殊鋼メーカーが製造技術・品質を高め、その開発した特殊鋼を用いた自動車で我が国自動車産業が世界市場で繁栄する関係が機能してきている³⁾。また、米国技術ロードマップにおいても、鉄鋼は先端的材料であり、現在使用されている鋼種のほとんどは10年前には製造不可能であったと認識されている⁴⁾。ただし、外見上は、色は鉄色、形状は板、棒、線、管等のままで代わり映えせず地味である。技術開発も革新的な発見というよりは連続的な「作り込み」による改

善というものが多く、また特にプロセス面（主要工程及び主要設備）については保守的な傾向²⁾が指摘されている。また、学の鉄離れも懸念されている⁵⁾。

一方で、鉄鋼に対する地球レベルでの技術ニーズとしては、多量の地球温暖化効果ガスを排出する等大きな環境負荷課題、一部での鉄不足問題や世界的な鉄源高騰等資源エネルギー制約に対応した鉄鋼安定供給課題等への対応が今まで以上に強く求められている。(社)日本鉄鋼連盟自主行動計画フォローアップ調査によれば、我が国鉄鋼業のエネルギー消費量は1990年には2479PJ、2002年には2315PJと、1970年代に比べ約20~30%の削減を連続铸造等の工程連続化、TRT、CDQ等の排エネルギー回収等のプロセス技術開発により実現してきた。その結果、一貫製鉄所のエネルギー原単位は、(社)日本鉄鋼連盟2003年度調べにおいて、日本を100とした場合、EUは110、米国は120、中国は130~150と、我が国鉄鋼業は世界最高レベルのエネルギー効率を達成している。現在、我が国鉄鋼業は、2010年度に1990年に比べてエネルギー消費量を10%削減するという挑戦的な目標に向け努力中であり、また、ナショナルプロジェクトSCOPE21で開発した次世代コークス炉の

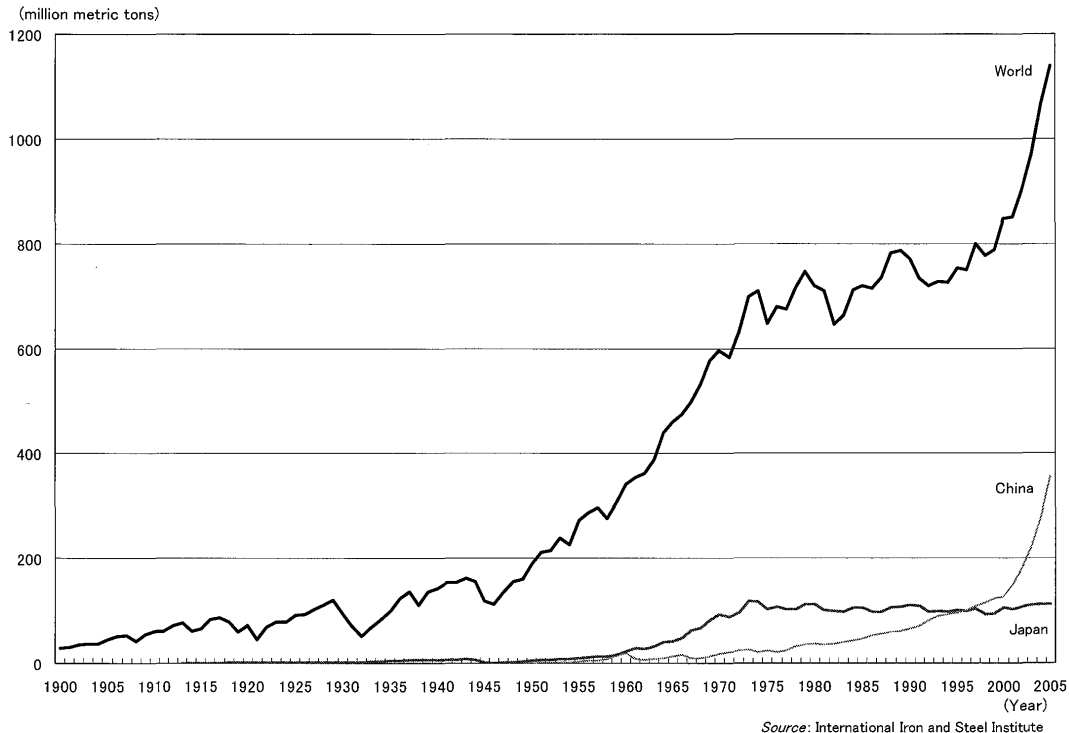
平成19年7月3日受付 平成19年8月31日受理 (Received on July 3, 2007; Accepted on Aug. 31, 2007)

* 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 新日本製鐵(株) 技術総括部 (Technical Administration & Planning Div., Nippon Steel Corp.)

*³ 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

¹⁾ 取扱量が多く、経済・社会的に影響が大きいことを意味する。マスエフェクト(質量効果)は、金属熱処理用語としては、鋼材の質量の大小によって熱処理効果の異なることを意味するが、鉄鋼技術用語としては、上記の意味で用いられる場合もあり、例えば、日本鉄鋼協会90周年記念事業国内シンポジウムの趣旨では、「国内素材生産重量の約半分を占めますので、二酸化炭素排出量削減、資源・エネルギー節減などへのマスエフェクトも極めて大きいものがあります」と記述している。



Source: International Iron and Steel Institute

Fig. 1. World crude steel production, 1900–2005.

実機化といった主要工程のイノベーションにも着手を始めている。当面はこういった努力の継続及び技術移転による国際的な鉄鋼業エネルギー効率の改善が喫緊の課題となるが、鉄鋼生産量が長期的に拡大しマスエフェクトが増加する場合には、地球環境問題・資源エネルギー制約に対応するために、炭素還元に代わる新製鉄プロセス等により挑戦的な鉄鋼技術開発を真剣に検討していく必要性が増す。

量的に見れば、国際鉄鋼協会の調査によると、鉄鋼生産は1998年を底に2005年までの7年間に世界で45%、日本でも20.3%増加し、それぞれ、11.4億t、1.1億tとなった。世界の粗鋼生産は、1973年のオイルショック時まで急拡大した後7億t前後で推移し、2000年に8億t台、2002年に9億t台、2004年に10億t台と再度拡大基調へ転じている (Fig. 1)。日本国内の粗鋼生産は、1973年の1億1932万tが過去最高だが、最近ではその水準に回復してきている。このように、鉄鋼の生産量は増加傾向にあるものの、必ずしも経済の動向とは一致していない。

本報告では、構造材の主役である鉄鋼について、同様にマスエフェクトが重要な問題であるエネルギーと比較し、そのマスエフェクト面での評価の重要性及びマスエフェクトについての工学的分析の現状と課題について述べる。

2. 鉄源及びエネルギーにおける安定供給及び地球環境問題対応の重要性

2.1 安定供給確保の重要性

鉄源のうち、高炉製鉄法の主要な原料である鉄鉱石と石炭は、共に可採年数は100年以上である⁶⁻⁹⁾。Fig. 2から分かるように、生産規模と価格の双方で他の資源と比較すると、鉄鉱石、石炭は、石油と並んで、大量生産と安価な事で相対的に抜きん出た天然資源である。

その中でも、地殻中の存在度でFeとCを比較すれば、Feは5.00%、Cは0.02%と大きな差がある^{6,10)}。Cの水素化合物である石炭や石油の賦存は、Feと比べ希少であり、たとえ製鉄法におけるC還元が他の方法に代替されたとしても素材資源としてのFeは安定的であると思われる。

鉄源及び石油資源の需給面での最近の環境変化として、供給サイドの寡占化と需要の急増が挙げられる。鉄鉱石では生産会社の世界的統合が進められ、2000年で鉄鉱石の貿易量の50%近くが、CVRD、Rio Tinto、BHP-Billitonの3社の影響下にある^{6,11,12)}。鉄鉱石や石炭の鉱床は、他の資源に比べ偏在性が小さく世界中に分布しているが^{6,13,14)}、石炭の炭化度が原料炭の範囲になるためには、石油の生成 (Oil Window) 同様に、地温勾配、深度、時間等の条件が合致する必要がある^{6,15)}、特に優良強粘結炭のソースは限定されている。世界的に原料炭供給の豪州に対する依存度を高めている一方で、BHP-Billiton社が豪州Queensland州の強粘結炭輸出の3分の2を占めてきており、Rio TintoやGlencore社の進出も目覚ましい。鉄鉱石についても、高品

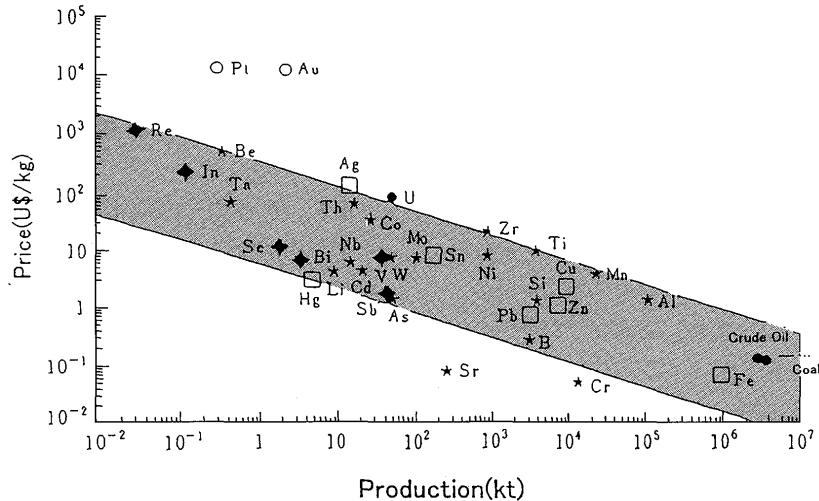


Fig. 2. Relation between production and price of resources.⁶⁾

質原料の枯渇は足下の問題として顕在化してきている。石油については、従来から寡占化する傾向にあるが、七つの巨大な石油会社（メジャー）による寡占、OPEC諸国の支配力の強化、メジャーの統合等が行われてきている。

需要側では、中国の動向が大きな影響を与え資源インフレと呼ばれる状況になっている。鉄鉱石価格は2003年から高騰し2005年度には前年度比50%上昇、原料炭は2005年度に前年度比120%値上がりしている。原油については、WTI1バレルで2003年には20ドル台であった価格が2006年には一時期80ドル台まで達し、G8等で国際協調による価格沈静化の必要性が指摘される事態となっている。

安価である事が望まれる鉄鉱石、石炭は大規模開発が求められ、鉱山開発に加え、大量輸送のための鉄道、港、あるいは労働者のための町、住居といったインフラの整備が必要となる。そのため、グリーンフィールドでの開発はインフラを含めた初期投資の大きさが新規参入の障壁となるとともに時間を要するため、グリーンフィールド開発を必要とする鉄源需要の拡大が将来的に見込まれるかを工学的に示し、中長期的に対策を講じていく必要がある。

2.2 地球環境

我が国のエネルギー起源CO₂排出量は、2001年度で約1,139百万t、内訳として産業部門で約40%の構成となっている。産業部門におけるエネルギー起源CO₂排出量は、2001年度において、鉄鋼34%、化学13%を占め、窯業土石（セメント）・パルプ・紙・板紙（製紙）を含めた素材系産業からの排出は60%を超えている¹⁶⁾。また、地球的に見ても、鉄鋼業は、2003年の産業部門におけるCO₂排出量の26%を排出している¹⁷⁾。

また、鉄鋼業の日本の総物質投入量に占める割合、総エネルギー使用量に占める割合、産業廃棄物の最終処分量に占める割合、固定発生源からのSO_x発生量の全国発生量に占める割合、NO_x発生量の全国発生量に占める割合は、それぞれ、14%（2002年度）、11%（2002年度）、8%（2001年

度）、10%（1999年度）、13%（1999年度）となっており、エネルギー・環境負荷の大きな産業であることが分かる¹⁸⁾。また、鉄スクラップ回収・処理プロセスは、単位重量あたりのCO₂排出量が、鉄鉱石を還元する製鉄・製鋼プロセスの1/3以下と小さい（転炉鋼生産、廃棄処理、電炉鋼生産にかかる総合的CO₂排出量のインベントリー係数はそれぞれ0.458、0.013、0.136 C-ton/Fe-ton¹⁹⁾）。したがって、地球環境の観点から、鉄源別（鉄鉱石、鉄スクラップ等）の需給規模を工学的に示し、中長期的な製鉄・製鋼プロセス等における省エネルギー化、地球環境対策技術開発の必要性を定量的に示していく必要がある。

2.3 マスエフェクトの重要性

2006年3月に策定された第三期科学技術基本計画においては、今後5年間で政府研究開発投資の総額の規模を約25兆円とすることが必要である旨記載されているが、国民に対してもたらされる成果に着目した目標設定と評価の仕組みを確立し、投資効果を検証することにより、研究開発の質の向上を図ることとなっている。

この観点から、筆者は、「分野nにおける社会・国民に対する研究開発の成果」をO_n、「分野nにおける社会的・経済的価値」をV_n、「経済活動量」をEとした場合、(1)式のように要因分解することを検討した（マスエフェクトの式（仮称））。

$$O_n = (O_n/V_n) \times (V_n/E) \times E \dots \dots \dots (1)$$

例えば、O_nを構造物nの二酸化炭素削減効果をもたらす研究開発成果、V_nを構造物nの二酸化炭素排出量、Eを全世界の二酸化炭素排出量とする。強度を10倍にするような革新的な価値の向上をもたらすプロダクトイノベーション（あるいは二酸化炭素排出原単位を1/10とするような新製鉄法等の革新的プロセスイノベーション）が行われた場合、研究開発原単位（O_n/V_n）を当該研究による二酸化炭素削減強度とすれば、従来の1/10の二酸化炭素排出量で構

造材として従来と同じ効用を実現できることから、 $O_n/V_n=1-1/10=0.9$ となる（研究開発前に比べ90%削減）。この時、社会的・経済的価値原単位（ V_n/E ）を二酸化炭素排出量全分野合計に対するシェアとし、構造材 n の当該シェアを1%と置けば、 $O_n=0.9 \times 0.01 \times E=0.009E$ となる。一方で、構造材 m において強度を1.1倍にするような漸進的な研究開発が行われ、その二酸化炭素排出量全分野合計に対するシェアが10%のマスエフェクトを有する場合、 $O_m=(1-1/1.1) \times 0.1 \times E=0.009E$ となり、この式に基づけばほぼ同等の成果をもたらす^{†2}。

既に述べたように、資源制約・高騰、地球環境問題といった国民生活に影響をもたらしている環境変化において、鉄源はエネルギーと同様に重要なマスエフェクトを有している。鉄鋼生産プロセスにおけるエネルギー効率上昇やCO₂排出量原単位の改善、鉄鋼製品の高強度化等の鉄鋼技術開発は、たとえ「飛躍知の発見・発明」との観点から地味に見えたとしても、年間粗鋼生産量10億t台というマスエフェクトを有する世界鉄鋼需給が今後長期的にどう見通されるかによって、「研究開発の成果をイノベーションを通じて社会・国民に還元する」との観点からの重要度が異なってくる。したがって、鉄源のマスエフェクトの今後の長期的な展望を工学的に提示し、産学官における長期的

展望の共有化によって鉄鋼技術開発を含めた対策のあり方を検討していく必要がある。

3. エネルギーの長期需給展望

まず、鉄源やその他素材資源に比べて、長期需給展望のモデルが活発に研究されているエネルギー分野でのモデルを概観する。

3.1 国際機関/政府/公的機関の世界エネルギー・モデル

世界エネルギー展望を発表している機関は多い。2030年頃までを時間範囲とした展望は、国際機関としては、IEA、EC、OPEC、各国政府レベルでは、EIA（米国エネルギー省、エネルギー情報局）、公的機関としてはIEEJ（（財）日本エネルギー経済研究所）、その他にPIRA、PEL、CGES（世界エネルギー研究センター）、シェルの予測等がある。IPCC、IIASA-WEC（国際応用システム分析研究所及び世界エネルギー会議）、IAE（（財）エネルギー総合工学研究所）は、2100年頃までの長期の時間範囲を展望している。

Table 1は、各機関による2020年までのエネルギー消費予測を比較している。世界合計での長期的なエネルギー需

Table 1. Comparison of Energy Forecasts for Consumption Growth Rates, 2002–2020.

	IEA 2002–2020	EIA 2002–2020	EC 2000–2020	IEEJ 2000–2020	PIRA 2002–2020	PEL 2002–2020
Total (World = All Fuels)	1.9	2.3	1.9	2.1	2.4	2.1
By Region						
OECD	1.1	1.1		1.1	1.1	1.0
North America	1.2	1.3		1.1	1.2	1.2
Europe	0.9	0.7		0.9	1.2	0.9
Asia	1.3	1.1		0.9	0.4	0.6
Non-OECD	2.6	3.5		3.2	3.3	3.3
Europe and Eurasia	1.5	2.1		1.6	2.1	1.3
China	2.9	5.3		4.1	5.5	4.6
Other Non-OECD Asia	2.9	3.4		3.8	2.6	3.5
Middle East	3.0	2.8		3.0	4.4	4.1
Africa	2.6	3.2		2.9	2.6	2.8
Central and South America	2.7	3.0		3.2	2.1	2.4
By Fuel						
Oil	1.8	1.6	1.9	1.9	1.8	1.7
2020 Oil Price: \$/bbl	26	25.1	33.4	27.0		
Natural Gas	2.6	2.7	2.8	2.6	2.7	3.1
Coal	1.6	2.8	2.2	2.0	2.7	1.5
Nuclear	0.6	1.2	0.9	0.7	1.6	2.2
Renewable/Other	2.7	2.8	0.2	2.6	3.2	2.1

Sources: IEA: International Energy Agency, *World Energy Outlook 2004* (Paris, France, October 2004), EIA: Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2006*, DOE/EIA-0484(2006) (Washington, DC, June 2006), EC: European Commission, *World energy, technology and climate policy outlook 2030 (WETO)* (Bruxelles, Belgium, 2003), IEEJ: Institute of Energy Economics, Japan, *Asia Energy Outlook* (Tokyo, Japan, March 2004), PIRA: PIRA Energy Group, *Retainer Client Seminar* (New York, NY, October 2005), PEL: Petroleum Economics, Ltd., *World Long Term Oil and Energy Outlook* (London, United Kingdom, May 2005)

†2 第3期科学技術基本計画においては、「飛躍知の発見・発明」、「非連続的なイノベーション」についても、知的・文化的価値の創出等の観点から、政策目標とし、戦略的重点化を図っている。

要の成長率については、2%前後になるという見解は一致する^{20,21)}。しかし、地域別、エネルギー構成別という点では、各機関によって見通しに相違がある。地域別では中国、燃料別では、石炭、原子力、再生可能エネルギーについての見通しに差がある。マズエフェクトが最大である石油（世界の一次エネルギー消費におけるエネルギー源別のウェイトが2000年時点で38.6%）については、石油価格想定においては相違があるにもかかわらず、量的見通しについての見解は類似している。

3.2 国際的認知度のある長期エネルギー・モデル

（財）地球環境産業技術研究機構は、エネルギー・地球温暖化問題を扱う世界における主要なモデルをFig. 3に示すように分類している²²⁾。

数学モデルを計算手法的に分類すると、シミュレーション型モデルと最適型モデルに大別できる。シミュレーション型（トレンド型）は、過去のトレンド等を基にした将来推計（ロジスティック曲線等で想定等）を行うことが多く、前提条件下での予測モデルと言える。これに対し、最適型モデルは、想定した条件下での合理的な将来のシステムを提示する規範的モデルであり、エネルギー・モデルの主流は最適型モデルとなっている。

モデルを技術の記述方法で分類すると、トップダウン型とボトムアップ型に大別できる。トップダウン型は、マクロ経済モデルに相当（弾性値パラメーターを用いる等）し、経済学者のモデルに多く見られる。ボトムアップ型は、個々の技術の積み上げをするタイプであり、個々の技術

（燃費の良い自動車開発等）の表現や評価に適しており、工学分野の研究者のモデルに多く見られる。

これらの研究のいくつかでは、「研究者の、主な責務の一つは、歴史（実績）データを用いてモデル計算のテストや有効性の確認を行うことである」との認識²³⁾の下、モデルによる計算値を計測された記録と比較している。

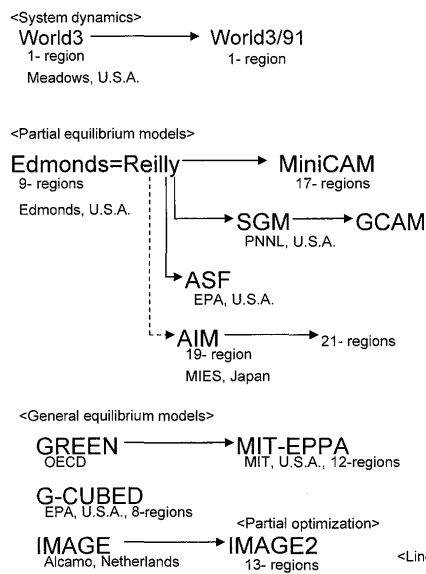
3.3 IEA需給予測

IEAによる世界エネルギー展望(WEO)は、エネルギーの統計、予測、分析に関して最も重要な資料であると世界的に認知されている²⁴⁾。

WEO-2004（世界のエネルギー展望2004年版）では、2030年までのエネルギー市場を分析するにあたっての第一の目標を、エネルギー需給に影響を与える可能性が高い重要な要因を特定し数量化することとしている。その分析の結果として、エネルギー需要を左右する要因として圧倒的に重要なのが経済成長であると指摘している¹³⁾。エネルギー総需要（世界の一次エネルギー需要）と経済産出量(GDP)とのあいだには、依然として緊密な関係がある。しかしながら、エネルギー需要の所得弾力性（GDPに対して需要がどれだけ増えるか）は、1970年代の0.7から1991~2002年の0.4へ低下しており、その理由として、北半球の冬の気候が温暖になったこと、エネルギー効率の向上を挙げている。結果として、WEOにおけるエネルギー関連予測は、GDP成長に関する想定に大きく左右されるものとなっている。

WEOでは、過去のWEOによる予測の正確さの再検討を

Simulation models



Optimization models

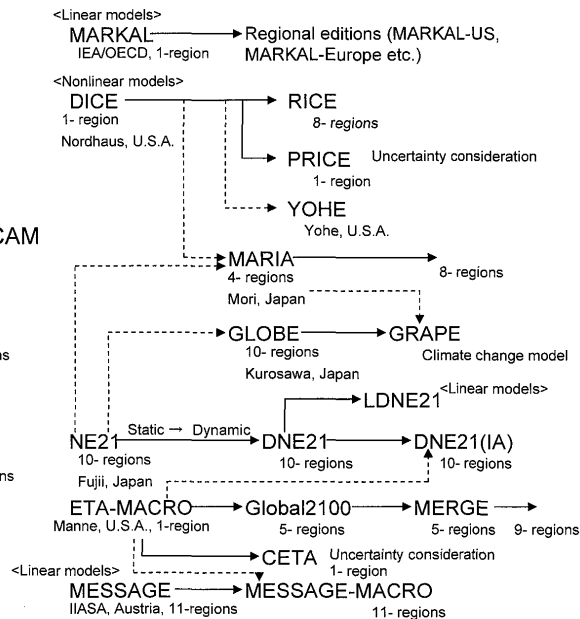


Fig. 3. Mathematical models of assessing global energy—climate change.
 Source: Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

13 EC展望(WETO2030)では、「世界のエネルギーシステムの将来について重要な要因となるのは、人口とGDPである。」としている。米国政府展望(EIA2006)では、「経済成長は、世界のエネルギー消費における変化を予測する上で考慮すべき最重要要因の一つである。」としている。

Table 2. Apparent Steel Use 2005–2007.

	million metric tons (mmt) of finished steel			Change % per year	
	2005	2006e	2007f	05 - 06	06 - 07
EU (15)	139.4	150.0	147.7	7.6	-1.5
EU (25)	158.8	171.5	169.6	8.0	-1.1
Other Europe	29.3	32.1	34.0	9.5	6.0
CIS	43.5	46.5	50.9	7.0	9.4
NAFTA	139.7	151.8	150.8	8.7	-0.7
South America	32.3	36.0	38.6	11.6	7.1
Africa	22.4	24.6	25.7	10.0	4.4
Middle East	34.0	37.3	40.6	9.6	8.9
Japan	78.0	78.6	80.8	0.8	2.8
India	38.1	41.9	45.7	10.0	9.1
Rest of Asia (excl. China)	117.8	118.5	121.8	0.6	2.8
Australia and New Zealand	7.9	7.8	7.9	-1.6	1.3
World (excl. China)	701.8	746.7	766.4	6.4	2.6
China	327.0	374.0	413.0	14.4	10.4
World	1,028.8	1,120.7	1,179.4	8.9	5.2

Source: International Iron and Steel Institute

行っている。1993年以来、IEAの世界エネルギー需要予測は、最近報告されたデータの2.2%以内の誤差に収まっており、こうした予測の正確さは、経済成長とエネルギー利用とが、密接かつ予測可能な関係にあることによるとしている。世界石油需要予測の誤差が2.3%以内である一方で、過去の石油価格想定誤差は、平均して約18%となっている。このように、エネルギー需要を左右する主な要因は経済成長であり、エネルギー価格に関する想定は需給水準に大きな影響を与えておらず、エネルギー需給予測の大きな誤差につながっていない。

4. 鉄源の長期需給展望

鉄源やその他ベースメタル等の鉱物資源についての中長期的な需給展望は、国際機関、各国政府レベル、公的機関等によるものは僅少であり、国際的にも十分な実証研究が行われているとはいえない²⁵⁾。ここでは、鉄源及びベースメタル等の鉱物資源の需給予測を概観する。

4.1 国際機関の鉄源需給展望

OECDによる鉄鋼需要展望は1年後の予測といった短期的なものに限定されている²⁶⁾。

IISI（国際鉄鋼協会）は、2015年までの世界鉄鋼需要展望を発表している。その展望結果をTable 2及びTable 3に示す²⁷⁾。IISIの中期展望は、従来は、各地域を代表するIISI会員から構成される委員会地域別及び主要産業別の見通しの積み上げにより行ってきた。今回の展望については、需要予測モデルによる計算も実施されたと言われている

Table 3. Real Steel Demand 2010–2015.

	Trend to 2010 (%/year)	2010f (mmt)	Trend 2010-15 (%/year)
EU (15)	2.0	157	1.3
EU (25)	2.5	183	1.7
CIS	5.0	57	4.0
NAFTA	1.9	160	2.4
South America	3.9	40	3.7
Japan	0.4	83	-0.1
India	7.0	54	7.7
China	8.4	489	6.2
South Korea and Taiwan, China	3.1	78	1.9
Rest of World	4.0	177	4.0
World	4.9	1,319	4.2
World excluding China	3.0	831	2.9

Source: International Iron and Steel Institute (IISI)

るが、予測方式については、伝統的に非会員に対しては非公開となっており詳細は不明である。

その他では、例えばIEAによるWEO-2004の世界エネルギー・モデルの最終エネルギー需要モジュールにおいて、産業部門を鉄鋼、化学等の6部門に細分化しているが、筆者がIEAに対し、鉄鋼部門のモデルの詳細について照会を行ったところ、残念ながらIEAからは「各産業部門別の結果については提供できない」との回答であった。

4.2 国内（通商産業省等）の鉄源需給展望

各国政府レベルの鉄鋼需給見通しとしては、日本政府

Table 4. Crude Steel Supply and Demand Assumed by MITI, 1985–1990.

	Actual value	Actual value	MITI Assumed value	Actual value
	1980FY	1985FY	1990FY	1990FY
Japan				
Domestic demand	75.87	73.61	66.00 – 68.00	100.47
(Rate of change)		(85/80 0.970)		(90/85 1.365)
Net export	31.52	30.15	19.00 – 22.00	11.24
Production	107.39	103.76	85.00 – 90.00	111.71
(Rate of change)		(85/80 0.966)		(90/85 1.134)
(Rate of real GNP change)		(85/80 1.209)		(90/85 1.253)
World total (reference)				
Production	718.63	719.51	739.00	770.50

Sources: MITI: Ministry on International Trade and Industry, *Toward a New-generation Iron and Steel Industry* (Tokyo, Japan, October 1987), JISF: Japan Iron and Steel Federation, *Iron and Steel Statistics Directory* (Tokyo, Japan), IISI: International Iron and Steel Institute, *Steel Statistical Yearbook* (Brussels, Belgium)

Table 5. Crude Steel Supply and Demand Assumed by MITI, 1972–1977.

	Actual value	Actual value	MITI Assumed value	Actual value
	1966FY	1972FY	1977FY	1977FY
Japan				
Domestic demand	39.50	73.82	110.90 – 120.90	62.30
(Rate of change)		(72/66 1.869)		(77/72 0.844)
Net export	12.40	29.15	34.10	38.35
Production	51.90	102.97	145.00 – 155.00	100.65
(Rate of change)		(72/66 1.984)		(77/72 0.977)
(Rate of real GNP change)		(72/66 1.839)		(77/72 1.231)

Sources: MITI: Ministry on International Trade and Industry, *Iron and Steel Industry of '70s* (Tokyo, Japan, December 1973), JISF: Japan Iron and Steel Federation, *Iron and Steel Statistics Directory* (Tokyo, Japan), IISI: International Iron and Steel Institute, *Steel Statistical Yearbook* (Brussels, Belgium)

(通商産業省) が過去に以下のような発表を行っている。

4・2・1 1987年見通し (「新世代の鉄鋼業に向けて」)

1987年「新世代の鉄鋼業に向けて」と題する報告では、1985年度の粗鋼生産実績を基に、需要部門別の積み上げ予測方式によって、Table 4に示すように、1990年度の粗鋼生産量等を予測している²⁸⁾。国内鉄鋼需要については、先進国では、GNP当たりの鋼材消費原単位が減少する鉄鋼寡消費型の経済構造に転じると分析している。我が国では、1979年以降対GNP鋼材消費原単位は減少に転じ、1979年の26.9t/億円のピークから1985年には20.3t/億円まで低下し、今後とも中長期的に減少が見込まれるため、GNPが年率4%以上成長しないと鋼材消費が減少すると予測した。また、需要部門別の鋼材消費動向についても、近年、各部門の活動内容が質的に変化しつつあること(産業基盤型投資から生活基盤型投資へ、大型機器から小型ハイテク機器へ、完成車からKDセットへ等)や、新素材、樹脂等の代替材の占めるウェイトが高まりつつあること等により、活動水準の推移と鋼材消費の推移との間に乖離(鋼材消費原単位の低下)が進展していると分析し、1990年度時点では、国内鋼材消費量は、1985年度の水準に比べ1割前後減少すると見込んだ。また、鉄鋼純輸出も減少し、今後、我が国の粗鋼生産は減少傾向を迎えることは避けられなく、1990年度時点で1985年度に比べ15%前後減少すると見込んだ。

この予測の正確さを1990年度の実績値を用いて検証してみる。1990年度と1985年度を実績値で比べると、粗鋼内需(粗鋼見掛消費)は36.5%(=年率6.4%)の伸びと実質GNPの伸び25.3%(=年率4.6%)を上回る成長、粗鋼生産は、13.4%の増加となり、粗鋼内需、粗鋼生産ともに減少するとした予測とは大きく異なる結果となった。誤差(=(予測値-実績値)÷予測値×100)は、粗鋼内需で-47.8~-52.2%、粗鋼生産で-24.1~-31.4%である。

4・2・2 1973年見通し (「70年代の鉄鋼業」)

通商産業省による見通しである「70年代の鉄鋼業」と題する報告書では、1972年度の粗鋼需要実績を基に、Table 5に示すように、1977年度の粗鋼需要量等を予測している²⁹⁾。粗鋼需要合計(=内需+輸出-輸入=生産合計)を、1億4500万tから1億5500万tと見込み、1972年度を基準とした年平均伸び率では、7.1~8.5%と従来の伸びを大きく下回り、対実質GNP弾性値は0.755~0.904とこれまでの長期的にみた平均値1以上から大幅に低下すると見込んだ。

この予測において、国内需要の見通しについては、需要部門別の積み上げ予測方式及びマクロ予測方式の2つの方式による予測を行っている。積み上げ予測は、普通鋼、特殊鋼、鋳鍛鋼別に分離し、普通鋼及び特殊鋼については、需要部門別積み上げによって鋼塊ベースの算出を行い、鋳鍛鋼については、鋼塊ベースのマクロ予測を採用し、これ

Table 6. Macro Forecasts for Apparent Consumption of Crude Steel in Japan by MITI, 1972–1977.

Cases	Function type	Explained variable (Y)	Explaining variable (X)	Calculated value Apparent Consumption of Crude Steel in 1977FY (mmt)
Case I	Linear	Apparent Consumption of Crude Steel	Domestic Capital Formation	123.40
Case II	Linear	Apparent Consumption of Crude Steel	Indices of Industrial Production	118.44
Case III	Single logarithm	Apparent Consumption of Crude Steel per Capita	Time series	111.32

Cases	Function	R (Correlation)	S (Standard error)	d (Durbin-Watson ratio)	Length of regression (Fiscal year)
Case I	$Y=426.13+2557.86 \times (15475)$	0.97575	4127	1.8273	1960~1972
Case II	$Y=5198.23+269625 \times (12248)$	0.96202	5148	1.6339	1960~1972
Case III	$\log Y=1.74862-0.00102922t$ $=0.0755992t^2$ (-2.1231) (7.2134) t:1953FY=1~1972FY=20	0.98047	0.0642312	2.0280	1953~1972

Sources: MITI: Ministry on International Trade and Industry, *Iron and Steel Industry of '70s* (Tokyo, Japan, December 1973)

によって3鋼種の合計を粗鋼内需として求めている。このうち、普通鋼材内需の積み上げは、1977年度の各需要産業の活動水準を予測し、この活動水準と1971年度の鋼材消費原単位から、1977年度の鋼材消費量を算出している。積み上げ予測の結果は、1977年度の粗鋼内需が1億1090万tとなった。

マクロ手法による鉄鋼内需の予測については、粗鋼見掛消費を被説明変数とし、GNPおよびその需要項目、鉱工業生産指数等のマクロ経済諸指標を説明変数とした1次関数、2次関数、対数2次関数、あるいはGNP単位当たりまたは人口1人当たりの鋼消費原単位の時系列分析を織り込んだ型等各種の関数計算を行っている。これらの関数のうち、その計算結果について統計上の有意性等の妥当性を検討し、Table 6に示すように、1977年度の粗鋼見掛消費で1億1132万tから1億2340万tの間に入る3ケースを選択している。

このように、需要部門別積み上げの結果が1億1090万tとなる一方、マクロ予測における有意性ありとみられる予測値が1億1132万~1億2340万tの範囲で選択されたことから、1977年度の国内需要はTable 5に示される1億1090万tから1億2090万tと見込み、1972年度を基準とした年平均伸び率は8.5~10.4%と従来の伸びから鈍化するが、1人当たり見掛消費量では985~1074kgと主要先進国の水準を大きく上回ると見通した。

この予測の正確さを1977年度の実績値を用いて検証してみる。1977年度の実績値は、粗鋼内需が6230万tで1972年度の7382万tより減少した。この間、実質GNPの伸びは23.1% (=年率4.2%)と、1966年度から1972年度のGNPの伸び83.9% (=年率10.7%)から大きく鈍化しているが、1980年度から1985年度のGNPの伸び(年率4.6%)

と大きな差異はない。粗鋼需要合計についても、1977年度の実績値は1億65万tと1972年度の1億297万tを下回った。誤差は、粗鋼内需で43.8~48.5%、粗鋼需要合計で30.6~35.1%である。粗鋼内需について、需要部門別に各需要産業の活動水準を予測し、需要部門別の鋼材消費原単位を用いた詳細な積み上げ予測も、統計上の有意性が高い(R値:0.96~0.98等)マクロ予測も実績値とは大きく異なる結果となっている。

4.2.3 その他の日本粗鋼生産中期見通し

2001年12月に経済産業省より発表された「鉄鋼業の競争力強化と将来展望 中間報告」では、今後10年間程度の間には、国内の粗鋼生産量の水準は、現在の1億tから概ね9000万t前後にシフトする可能性があるとしている³⁰⁾。この見通しの定量的算出方法は、報告書では明示されていないが、需要サイドの変化として、①国内製造業の生産拠点の海外移転と現地調達、②建設分野の鉄鋼需要の変化(国内経済の低迷と公共事業の縮減)、供給サイドの変化として、③鉄鋼生産拠点のグローバル化と通商摩擦、④鉄鋼原料供給者、ユーザー双方のグローバルな業界再編、⑤国内における競争環境を踏まえた見通しとしている。現時点で2010年の実績値を用いて検証することはできないが、2006年の粗鋼生産量は1億1622万tと2000年の1億644万tを上回っている。

2001年には、(社)日本鉄源協会も、各国の一人あたり粗鋼見掛け消費量を被説明変数、一人あたりGNPを説明変数とした線形回帰分析を行うことによって、2005年及び2010年の鉄鋼需要を推計している³¹⁾。

1994年9月30日発行の興銀調査「日本鉄鋼業の将来展望」では、2000年の普通鋼内需は1993年度水準である6500万t前後、特殊鋼内需は1993~1994年度水準の900万t

前後で推移すると見通した³²⁾。この論拠として、自動車産業の成長率鈍化、自動車1台当たりの鋼材消費原単位の減少、建設投資の中で鋼材消費原単位が高い民間非住宅の回復に時間を要する見通しであることを挙げている。

1984年に(財)産業研究所が産業情報研究会に委託調査した「鉄鋼産業の中長期見通し」では、1982年度の粗鋼生産実績(9630万t)を基に、1990年度の粗鋼生産見通しを1億660万t程度と見通している³³⁾。この見通しにおいては、日本経済のマクロ・フレームワークとして、1982年度～1990年度にかけて、GNPが年率3.6%成長すると前提した。鉄鋼需要の伸びとGNP成長との間の相関関係は石油危機を境に乖離してきており、また、総固定資本形成の比率も31.4%から20.6%に低下すると分析している。普通鋼鋼材の内需については需要部門別積み上げ方式とセミ・マクロ予測方式の2方式で検討し、GNP需要項目別の鋼材消費原単位を勘案している。1990年度の実績と比較して検証してみると、8年間のGNP成長実績は年率4.5%、粗鋼生産実績は1億1171万tで誤差は4.8%となっている。

4.3 ベースメタル等の鉱物資源の需給モデル

4.3.1 使用強度仮説(Intensity of Use hypothesis)

上記の鉄鋼需要見通しのいくつかにおいては、一人あたり粗鋼見掛け消費量と一人あたりGNPとの関係等に着目した線形回帰分析を用いているが、この分析手法については、線形の正相関を想定することにより誤差が生じているとの指摘がある³⁴⁾。

資源経済学における実証的研究により、「金属の使用強度(GDPあたりの金属消費)」は「一人あたりの収入(一人あたりGDP)」の関数としてしばしば表しうることが明らかにされてきている³⁵⁻³⁸⁾。この関数は、実証的に決定され、国や金属の種類により異なるが、一般的形状は、逆U字型カーブとなるとしている(Intensity of Use hypothesis)。また、過去には多くのエネルギー・モデルにおいてもこの関数が用いられてきた^{36,39)}。

例えば、Vuurenら³⁶⁾、Neelisら³⁸⁾は、使用強度仮説(Intensity of Use hypothesis)は、3つの異なる要因の重ね合わせで説明できるとしている。第1の要因として、「経済発展」に伴い、農業経済(低使用強度)→製造業・建設業経済(高使用強度)→サービス経済(低使用強度)と移行することを挙げている。更に、金属を使用した自動車等の最終製品は労働賃金の低い国々に生産が移転することにより、発展途上国における金属の使用強度を高め、先進国における使用強度を低めることになるとしている。第2の要因は、プラスチック等の「代替材」の浸透に伴い、一人あたりあるいは絶対量としての金属消費量が減少することによるとしている。第3の要因は、「技術発展」に伴い、例えば自動車の金属使用量がより効率化(省資源化)することによるとしている。

使用強度仮説の長所としては単純であること、欠点とし

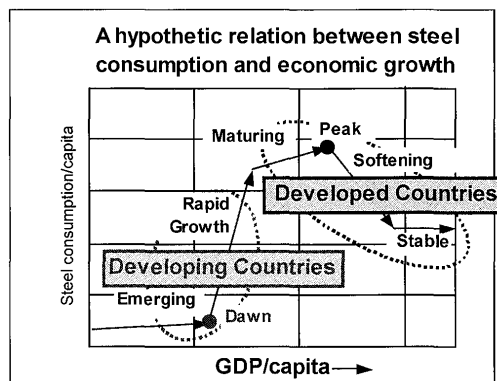


Fig. 4. Intensity of Use hypothesis for steel.

ては、第2の要因の「代替材」及び第3の要因の「技術発展」は、「一人あたりの収入」に依存せずむしろ価格や時間の影響を受けること、石油ショック等の突発事項については対応できないことを指摘している。また、地域によって逆U字型カーブの形状が異なること、発展段階によって増減の方向が異なることにより、世界の平均GDPと金属消費の間で長期的傾向を求めることは不可能であり、直近の世界平均での金属消費型傾向(「一人あたりGDP」が増加すると「金属の使用強度」が減少する傾向)は、先進国での傾向が支配力を有していることによるが、将来的には発展途上国の経済成長によってこの金属消費型傾向が転換する可能性があるとしている。ただし、先進国から発展途上国への技術移転は第4の動的要因になりうる可能性、即ち、工業エネルギー強度で見られるのと同様の傾向として、カーブの最大強度は時間的に到達するのが遅くなると低下することが指摘されている。

鉄鋼においては、使用強度仮説の「金属の使用強度」において、「GDPあたりの金属消費」の代わりに、「一人あたりの金属消費(一人あたりの粗鋼見掛け消費量)」を用いられることが多い(Fig. 4)。IISI, OECD等においても、一人あたりの見掛け粗鋼消費量とGDPの関係が認識されてきた⁴⁰⁾。Fig. 5に、2000年から2005年間の各国及び世界平均の一人あたり見掛け粗鋼消費量とGDPの関係を示す。Vuurenら³⁶⁾は、「鉄鋼の使用強度」として「GDPあたりの鉄鋼消費」を用いて分析し、米国における鉄鋼消費は使用強度仮説の好例であり、他の地域は米国の時系列逆U字型カーブを追従していると指摘している。また、各地域における計測値として、鉄鋼の飽和水準は450 kg-steel/capitaとなるとしている。

4.3.2 メタルモデル

Neelisら³⁸⁾は、短期あるいは長期の鉄鋼需要予測を含む17のメタルモデルを概観し、その全てにおいて以下の式で示される使用強度手法(Intensity of Use Technique)が用いられていると分析している。

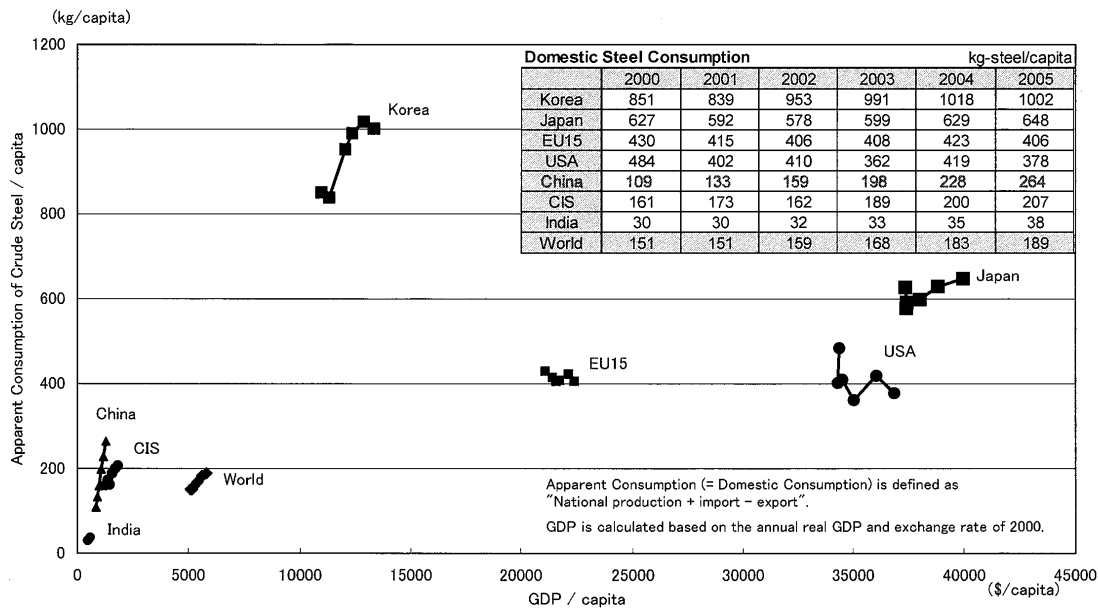


Fig. 5. Relation between GDP/capita and Apparent Consumption of Crude Steel/capita, 2000-2005.

$$IU_i = \frac{D_i}{GDP_i} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{it}}{GDP_i} \right) \left(\frac{d_{it}}{P_{it}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 D_i はある国・地域の*t*年におけるメタル（鉄鋼）総消費量、 P_{it} は第*i*番目産業部門における製品生産高、 d_{it} は第*i*番目産業部門におけるメタル（鉄鋼）消費量である。したがって、 P_{it}/GDP_i は収入の製品構成、 d_{it}/P_{it} は製品のメタル構成となる。

上記の17のメタルモデルの一つとして、Vuurenら³⁶⁾は、鉄鋼（大量金属の代表例）と中量金属(Cu, Pb, Zn, Sn, Ni)について、需要は13地域別の使用強度仮説を用い、生産は世界合計1地域として技術発展及び鉱石品位劣化、一次生産と二次生産（金属スクラップのリサイクル）を分析して構成したシステムダイナミクスモデルで、2100年までの需給をシミュレーションしている。鉱物資源の開発、リサイクル等の未来の人間行動について、3つのシナリオを検討しており、鉄鋼については、世界人口がピークに達する2060年前後に鉄鋼需要が30~50億tとなると算出している。

Neelisら³⁸⁾は、「人口」と「一人あたりの収入」のみを主要な要因として使用強度仮説を用い、これに時間とともに省資源化が進む（=時間とともに逆U字型カーブが下方に移動する）要素を加えて、2100年までの鉄鋼需要を予測している。この予測において、世界各地の将来の人口及びGDPとして、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が2000年に刊行した4つのシナリオを用いている。相対的に高い経済成長と低い人口増加とするA1, B1シナリオでは、鉄鋼消費は2060年頃にそれぞれ25.1億t, 23.42億tの最大値を示す。相対的に高い人口増加と低い経済成長とするA2シナリオ及び中庸なものとして参照されることの多い

B2シナリオでは、鉄鋼消費は2100年まで増加し続け、それぞれ25.00億t, 23.50億tとなる。4つのシナリオとも類似の鉄鋼消費予測となっている。

時松ら³⁷⁾は、使用強度仮説を利用し、銅の主要用途として電気機械産業、自動車産業及び建設産業の3つの産業を取り上げ、それぞれの産業における需要の要因をいくつかに分解し、各要因についての分析を行った上で2100年までの銅需要を推計している。例えば、ある地域の電気機械産業において、

$$\begin{aligned} & \text{銅需要量（電気機械産業）} \\ & = \left(\frac{\text{銅需要量（電気機械）}}{\text{GDP（電気機械）}} \right) \times \left(\frac{\text{GDP（電気機械）}}{\text{GDP（全産業）}} \right) \\ & \quad \times \text{GDP（全産業） 予測値} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

のように要因分解し、右辺第1項（電気機械産業における銅の使用強度）及び第2項（電気機械産業における全産業に占めるGDP割合）のそれぞれについて、一人あたりGDPとの関連を分析した。小杉³⁴⁾は、この方法を鉄鋼需要の推計に適用し、電気機械、自動車及び建設の各用途の一人あたり需要と一人あたりGDPとの関係を表す推計式を求めている。この推計において、上述のIPCCのB2と呼ばれるシナリオ（世界人口は緩やかに増加を続け2100年に1990年の2.0倍である104億人に達し、GDPは11.2倍になるとの想定）を用い、鉄鋼の世界全体需要は2100年に2000年の4.2倍の33億tになると計算した。

（独）物質・材料研究機構の原田⁴¹⁾は、一人あたりの金属消費量と一人あたりのGDPの間では、GDPの低い段階では勾配の大きい正の相関関係が得られ、ある段階から、勾配が小さくもしくは負の勾配となる関係が成立するとし、この関係を、経年の各金属の消費量とGDPから二段

階の直線で近似したモデルとして表している。この二段階の近似は、金属の種類によって4つのパターンに分類でき、鉄については、ある段階から弾性率は低下するものの勾配は正を維持するパターンの関係が成立するとしている。この関係を、BRICs及びカナダを除くG6先進諸国の2050年までの経済成長予測に当てはめて、鉄については、2050年の年間消費量が各国合計で約25億tとなると予測した。

この他にも、現在、時松らから構成されるGRAPE/LIMEモデル開発研究会メンバーによる「鉄、アルミ、銅の21世紀の世界需給シミュレーション」、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構から(株)エス・アール・シーへの調査委託事業「資源と環境を考慮した素材戦略モデル開発に関する調査」(稲葉敦委員長)、欧米では産学官によるSocial Value of Materials (SOVAMAT)というネットワーク等において議論されており、今後の研究成果が期待される。

5. 鉄源の中長期需給展望に残された課題

これまで見てきたように、鉄源あるいは鉱物資源の需給見通しは、エネルギーと比べて、国際的研究が僅少であり、いくつか示されているモデルについても、歴史(実績)データを用いた有効性の確認やそれを踏まえたモデルの継続的改善が十分に図られている状況とは言えない。また、モデル間の中長期見通しを比較しても、例えば、2030年時点での世界鉄鋼需要は、Vuurenら³⁶⁾は約20~30億t、Neelirら³⁸⁾は16.10億t(A2シナリオ)~19.34億t(A1シナリオ)、Hidalgoら⁴²⁾は13.16億t、小杉³⁴⁾は約15億t、原田⁴¹⁾(世界計ではなくBRICs+G6)は約16億tとなっており収束していない。したがって、今後、鉄源需給モデルを高度化していくことが期待されるが、その際に検討すべき課題として以下が挙げられる。

5.1 需要推計モデル

消費量は、需要と供給の双方で決定されることから、鉄源の長期需給(消費量)も理論的には供給制約により決定されうる。しかし、過去、鉄鋼業が低価格や過剰生産能力で苦しんできた経験、最終製品に占める鉄鋼等材料コストの比率の長期的な減少傾向、資源量が将来的にも豊富であること等を勘案すると、2030年頃までの中期的見通しとしては、需要が引き続き長期的な傾向における決定的な役割を果たす可能性は高いと思われる³⁵⁾。もちろん、鉱山開発の遅れや地域的な鉄鋼生産能力不足等の短期的な制約の発生や、長期的な資源品位の劣化問題、地球温暖化問題等による供給制約は看過しえないが、これらは需要モデルの高度化を図った後に検討すべきであろう。

エネルギー分野では、3.3で述べたように、IEA、EC、

米国政府展望の共通した認識として、エネルギー需要を左右する要因として圧倒的に重要なのが経済成長であり、予測の正確さはこの関係が密接かつ予測可能であることによると分析している。また、石油価格想定との誤差やモデル間の相違が、エネルギー需給見通しに大きな影響を与えていないことから、需要が決定的な役割を果たしていることが分かる。

5.2 世界モデル

4.3.1で述べた使用強度仮説は、鉄鋼を含む鉱物資源の需要と経済成長の関係を示しており、現時点で最も有力な仮説と思われる¹⁴⁾。しかしながら、Vuurenら³⁶⁾が指摘するように、世界平均(=世界1地域モデル)で、GDPと金属消費量の長期的傾向を使用強度仮説を前提に求めることは意味をなさない。また、米国の鉄鋼消費では良く当てはまるが、我が国においては、1973年以降年間粗鋼生産が1~1.1億tで推移しており、4.2.1で示した通商産業省による1987年見通しの実績のように、粗鋼内需が実質GNPの伸びを上回る場合も見られ、それ程当てはまっていない。使用強度仮説においては、経済発展に伴いやがて自動車生産等は海外移転するとの前提に立っている。しかし、実際には、日本の自動車産業が競争力を維持し続けている等の製造業競争力の国別相違が存在することから、逆U字型カーブ(使用強度仮説)が国によらず同一形状との前提に立つことは困難である。

一方、エネルギーではTable 1に示すように、各機関の見通しは地域別には差異があっても世界合計では収束している。鉱物資源の需要に関しても、金属の種類で、先進国と発展途上国の消費量構成比が異なっている、世界合計の消費量はどの金属においても、1973年までは急成長しそれ以降は頭打ちとなる類似の曲線を描いている⁴³⁾。

劉ら⁴³⁾は、アルミニウムを除く主要金属(鉄、銅、鉛、亜鉛)とエネルギーの世界消費は、1973年(第一次オイルショック)以前は比較的類似した傾向で増加(特に後半に急速な増加)したが、それ以降はエネルギー消費の成長が金属消費の成長を大きく上回ってきたことを指摘している。この原因として、1973年以降、一人あたりの所得がある水準に達し、社会基盤の建設が一段落してくるとともに、産業構造が製造業中心からサービス業中心の社会へと移行したが、エネルギーは家庭部門、サービス部門、輸送部門でも多量に消費することによると推察している。

Fig. 1で見た世界の粗鋼生産の2000年以降の再拡大基調はこの推察では説明できないが、4.3.1で述べた使用強度仮説を用いれば、中国等の発展途上国の経済成長による金属拡大消費型傾向への転換と説明できる。しかし、エネルギー消費においても、経済発展段階が進むにつれて経済成長との相関関係が弱くなる(Decouplingが進む)にもか

¹⁴⁾ Tilton³⁵⁾のように、一人あたりGDPのみを金属の使用強度の決定的な要因と前提することには無理があるとの主張も存在している。

かわらず、世界全体でのエネルギー需要と経済成長との間に緊密な関係が成立している。世界全体での鉄源需要についても、経済成長との関係をより深く分析する価値はあると思われる。

また、鉄源等の鉱物資源は最終的には自動車等の最終製品となって取引（間接輸出入）されるために、国別での正確な最終使用量を把握することは困難であるが、世界全体としての使用量は把握可能である。このことから、需要については、世界全体でのアプローチにメリットがある。

5.3 ストック効用モデル

4.2.2で見たように、需要部門別の詳細な積み上げ予測方式も、過去のデータにカーブフィットしており統計的な有意性が高いマクロ予測も実績と大きく異なる場合がある。近藤⁴⁴⁾が指摘するように、複雑多岐にわたるデータから数学モデルの事実を見出そうとする努力は多くの場合失敗するため、実証的というよりはむしろ合理的な仮説を最初に立てて、仮説→調査・検討→仮説の再建→データによる裏付けという繰り返しで問題を発展させていくプロセスが重要である。また、数学モデルを作るときの原則である、単純なモデルから逐次複雑なモデルへ、現象の平均的な関係に注目した確定的モデルを作成してから個々の変動により多くの注意を向けた確率的モデルへ、を勘案すると、まずは、世界平均すなわち世界1地域モデルで成立する合理的仮説を導き出した後、複数地域モデルに発展させていくことが望ましい。

合理的な仮説を立てるために、経済成長に伴い一人あたりの所得水準が上昇した場合に、効用（消費者が財やサービスを消費することによって得る満足の度合い）を増加させようとするとの前提に立つと、エネルギーの効用はフローであるが、鉄源を含む鉱物資源の効用はストックであることに着目すべきである（“Demand for in-use stocks generates demand for metals.”⁴⁵⁾）。先進国において、鉄鋼のフロー（見掛け消費量）が減少した場合でも、社会基盤の拡大、建物の高層化・耐震化、各家庭が保有する自動車台数の増加やRV車化等の大型化等、鉄鋼のストック総量はかつてほどの増加幅でなくとも増加し続けていると思われる。経済成長や人口増加との予測可能な関係が成立している可能性がある。

更に、効用に着目する場合には、鉄鋼の需要を、フロー量であれ、ストック量であれ、一般的に行われているような単純な重量単位、即ちトン(metric tons)で測定することが適当かは検討しておくべきであろう。一方で、経済成長を表す単位としては、実質GDPあるいは購買力平価を用いたGDP、エネルギー需要を表す単位としては、熱換算単位、即ち石油換算トンを用いることが一般的であり、効用を含意する単位となっている。

例えば、Considineは⁴⁶⁾、米国の鉄鋼消費について、各鉄鋼製品の総収入の年次変化を指標化することにより、トン単位での表示は鉄鋼消費量の減少を過大評価していると結論付けている。これに対し、Tiltonは³⁵⁾、データ入手可能性、金属がもたらす効用の多様性（強度、外観、熱伝導性等）を表すことの困難さ等を理由に、消費量を測定する上で重量単位より良い単位は存在しないとしている。

しかしながら、構造材の主役である鉄鋼（自動車用、電気機械用等としては機能材としての面を有しているが）の需要については、構造材としての効用に絞ることが考えられる。例えば、生産時としては、ハイテン等の高強度化を評価できる構造強度換算トンのような単位、ストックとしては、ステンレス等の長寿命化を評価したストック量算定を検討してみる価値はあると思われる。

6. まとめ

世界の鉄源需要は、近年、急拡大しており、2005年には、世界の粗鋼生産量は11.4億tと7年間で1.45倍となっている。そのマスエフェクトの故に、安定供給確保、気候変動等の地球規模の課題に直面している。

鉄鋼の技術開発は長年にわたり行われてきており、エネルギー消費量・CO₂排出量を大幅に削減するような鉄鋼プロセスイノベーション、強度を大幅に向上するような鉄鋼プロダクトイノベーションは容易でないが、地球規模のマスエフェクト問題を解決するイノベーションの潜在的可能性は有している⁴⁵⁾。ただし、この容易でないイノベーションを実現していくためには、産学官の総力を結集した巨額の鉄鋼技術開発投資が必要となるが、投資の是非の判断のためには、投資効果の観点から、マスエフェクトを有する世界鉄鋼需給の中長期展望を、産学官で共有していく必要がある。

しかし、鉄源は、マスエフェクトについての数学モデル、需給見通しについての継続的改善に向けた工学的研究がエネルギーと比べて十分だったとは言えない状況にある。

したがって、今後、鉄源需給モデルを高度化していくことが期待されるが、その際にまずは、世界需要に影響を与えている重要な要因の特定と、その因果関係についての単純かつ合理的な仮説の設定が検討すべき課題である。

本レビュー執筆に対してご助言をいただいた東京大学の足立芳寛教授、松野泰也准教授、安達毅准教授に謝意を表す。

文 献

- 1) 富浦 梓：日本の産業システム② 素材産業の新展開，NTT出版，東京，(2004)，330。

⁴⁵⁾ 例えば、鉄鋼の理論強度は、40,000 MPaとされており、現状の4,000 MPaの10倍。

- 2) 川澄 登：日本の産業システム② 素材産業の新展開，NTT出版，東京，(2004)，254.
- 3) 特殊鋼製造業の競争力強化と将来展望に関する研究会中間報告，経済産業省製造産業局鉄鋼課，東京，(2004)，4.
- 4) Steel Industry Technology Roadmap, American Iron and Steel Institute, Washington, (1998), 4.
- 5) 例えば平成16年度事業報告，日本鉄鋼協会，(2005).
- 6) K.Nagano: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 51.
- 7) 第4版鉄鋼便覧Ⅱ，日本鉄鋼協会編，東京，(2002)，1・1・1.
- 8) 第4版鉄鋼便覧Ⅱ，日本鉄鋼協会編，東京，(2002)，1・2・1.
- 9) BP Statistical Review of World Energy 2002, <http://www.bp.com/>, (accessed 2002-11-16).
- 10) 鹿園直建：地球システム科学入門，東京大学出版会，東京，(1996)，112.
- 11) D. Smith: Proc. Iron Ore 2002, PGC, South Australia, (2002).
- 12) The Iron Ore Market 2001–2003, UNCTAD, Switzerland, (2002), 33.
- 13) 第3版鉄鋼便覧Ⅱ，日本鉄鋼協会編，丸善，東京，(1979)，8.
- 14) 第3版鉄鋼便覧Ⅱ，日本鉄鋼協会編，丸善，東京，(1979)，36.
- 15) 西岡邦彦：太陽の化石：石炭，アグネ技術センター，東京，(1999)，13.
- 16) 各部門におけるエネルギー起源CO₂排出について，経済産業省産業技術環境局環境政策課，産業構造審議会・総合資源エネルギー調査会エネルギー・環境合同会議（第3回，2004年4月7日）資料5，東京，(2004)，2.
- 17) Energy Technology Perspectives, International Energy Agency, Paris, (2006).
- 18) 新日本製鐵環境報告書2004（2004年9月発行），新日本製鐵（株）環境部，東京，(2004)，3.
- 19) A. Toi and J. Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 536.
- 20) OECD/IEA編，(財)日本エネルギー経済研究所監訳：世界のエネルギー展望2004，エネルギーフォーラム，東京，(2005)，563.
- 21) Energy Information Administration: International Energy Outlook 2006, DOE/EIA-0484, Washington, (2006), Appendix H.
- 22) 平成5年～13年度「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業報告書，(財)地球環境産業技術研究機構，(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構委託事業，(1994–2002).
- 23) W.D.Nordhaus著，室田泰弘，山下ゆかり，高瀬香絵訳：地球温暖化の経済学，東洋経済新報社，東京，(2002)，40.
- 24) OECD/IEA編，(財)日本エネルギー経済研究所監訳：世界のエネルギー展望2004，エネルギーフォーラム，東京，(2005)，はしがき.
- 25) K.Nawata: *Shigen-to-Sozai*, **117** (2001), 245.
- 26) Organisation for Economic Co-operation and Development: The Outlook for Steel, SG/STEEL (2004), 7, Paris, (2004).
- 27) International Iron and Steel Institute: Short Range Outlook and Medium Term Forecast, 02 Oct 2006, Brussels, (2006).
- 28) 新世代の鉄鋼業に向けて，通商産業省基礎産業局監修，通産資料調査会，東京，(1987)，103.
- 29) 70年代の鉄鋼業，通商産業省基礎産業局鉄鋼業務課編集，通産資料調査会，東京，(1973)，134.
- 30) 鉄鋼業の競争力強化と将来展望研究会中間報告，経済産業省製造産業局，東京，(2001)，<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g11213bj.pdf> (accessed 2007-4-17).
- 31) 環太平洋圏における鉄源の需給・リサイクル動向調査，(社)日本鉄源協会，(社)日本機械工業連合会平成12年度委託調査報告書，東京，(2001).
- 32) Industrial Bank of Japan, Limited: Kogin-Cyosa, 265, (1994).
- 33) 鉄鋼産業の中長期見通し，産業情報研究会，(財)産業研究所委託事業，東京，(1984)，87.
- 34) T.Kosugi: *Seisakukagaku*, **13** (2006), No. 2.
- 35) J.E.Tilton (ed.): World Metal Demand, Resources for the Future, Washington, D.C., (1990), 305–325.
- 36) D.P.van Vuuren, B.J.Strengers and H.J.M.De Vries: Resour. Policy, **25** (1999), 241.
- 37) K.Tokimatsu, T.Ito, T.Shinkuma, K.Furukawa, T.Ogiwara, T.Kosugi and T.Nishiyama: *Shigen-to-Sozai*, **120** (2004), 681.
- 38) M.Neelis and M.Patel: Long-term Production, Energy Consumption and CO₂ Emission Scenarios for the Worldwide Iron and Steel Industry, Report prepared by the Department of Science, Technology and Society/Copernicus Institute at Utrecht University, Utrecht, (2006).
- 39) I.Yasui: Environmental Issues and Energy, United Nations University, <http://www.yasuienv.net/0424EnvironmentEnergyAtUNU.PPT> (accessed 2007-4-24).
- 40) Organisation for Economic Co-operation and Development: The Outlook for Steel, Outlook of Global Steel Industry and Development of China Steel Industry, Presented by CISA, Paris, (2004).
- 41) 2050年までに世界的な資源制約の壁（プレスリリース2007年2月15日），(独)物質・材料研究機構，つくば，(2007)，<http://www.nims.go.jp/jpn/news/press/press178.html> (accessed 2007-5-2).
- 42) I.Hidalgo, L.Szabo, J.C.Ciscar and A.Soria: Energy, **30** (2005), 583.
- 43) J.Liu, T.Ito and T.Nishiyama: *Energy-Shigen*, **22** (2001), 385.
- 44) 近藤次郎：数学モデル入門，日科技連出版社，東京，(1974)，15，103.
- 45) D.B.Muller, T.Wang, B.Duval and T.Graedel: Exploring the Engine of Anthropogenic Iron Cycles, PNAS Early Edition, New Haven, (2006)，<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0603375103> (accessed 2006-10-23).
- 46) T.J.Considine: Understanding Trends in Metal Demand, *Mater. Soc.*, **11** (1987), 350.