2050 年の金属使用量予測

原 田 幸 明 島 田 正 典 井 島 清

独立行政法人物質・材料研究機構材料ラボ

J. Japan Inst. Metals, Vol. 71, No. 10 (2007), pp. 831-839
Special Issue on Emergent Researches for Substitution to and Effective Usage of Rare and Scarce Metals
© 2007 The Japan Institute of Metals

Forecasting the Consumption of Metals up to 2050

Kohmei Halada, Masanori Shimada and Kiyoshi Ijima

Innovative Materials Engineering Laboratory, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047

Forecasting are made regarding the consumption up to 2050 of following metals: Fe, Al, Cu, Mn, Zn, Cr, Pb, Ni, Si, Sn, rare earths, Mo, Li, Sb, W, Ag, Co, In, Au, Ga, Pt and Pd. The forecasts are based on the linier decoupling model of the relation between per capita metal consumption and per capita GDP. The models of each metal are applied to the economic development model of BRICs and G6 countries. According these forecasts, the overall consumption of metals in 2050 will be five times greater than the current levels, and demand for metals, such as Au, Ag, Cu, Ni, Sn, Zn, Pb, and Sb, is expected to be several times greater than the amount of their respective reserves. Demand for iron and platinum, which is considered to be optimistic about the resource exhaustion, will also exceed the current reserves. Urgent measures are needed to find alternatives from common resources and to shift into materials circulation society.

(Received February 15, 2007; Accepted August 14, 2007)

Keywords: resource exhaustion, material consumption, economic development, reserve, reserve base

1. 緒 言

国際的な資源需要の急速な増大に伴い、資源利用の望ましい在り方を考えるためにバックキャストिंग的な資源利用技術の開発シナリオの設定などが求められている他方で、現状の技術シナリオに乗っ取った資源消費量をより正確に予測することが求められている。1970 年代の急成長期には「西暦 2000 年の地球」¹⁾、安定成長期に入った 1990 年には Tilton²⁾、や Cox ら³⁾による予測などがなされてきた。開発途上国の急速な資源要求が顕著になった現在においては、資源開発機構が中期予測として 2010 および 2015 年のベースメタルに関し、2015 年で銅は 1900 万トンから 3700 万トン、鉛は 840 万トンから 955 万トン、亜鉛 1160 万トンから 1400 万トン、ニッケル 180 万トンから 270 万トンという幅で需要予測を行っている⁴⁾。本稿では、さらに長期的に 2050 年までを見渡し概略的な資源需要のレベルを把握することを目的として、金属の使用量の予測を試みた。

1970 年にローマクラブが「成長の限界」を提唱して以来、永遠の右肩上がりの成長は経済活動の前提ではなくなり資源の制約を圧力とした資源低消費型の成長に移行してきたように見られてきた。この低消費型の成長は、経済とのデカップリングと呼ばれ、著者もこのデカップリングの状態が個々の金属消費においてどのように現れているかを分析し、多くの金属消費が弱いデカップリング状態に達していることを明らかにしている⁵⁾。しかし、そのデカップリング状態が「成長

の限界」の中でのサステナブルな発展の必要条件ではあるものの十分条件になっているかという点については別途検討をすすめる必要があり、その結果如何では、シリコンのような経済発展と物質消費がカップリング状態のものをデカップリングするだけでなく、鉄や銅のような現在デカップリング状態に至っているものも、より深いデカップリングに至らしめる技術基盤を構築することも求められる。

特に、1960 年台の経済成長が全人口の二割程度の限られた数カ国で進展したのに対し、現在進行している世界規模での成長は多数の人口を有する国で進行しており、現状のデカップリングの程度でこの爆発的消費の増大に対応できるかは疑わしいところである。本稿では、現在から近未来において著しい発展を遂げると目されている BRICs 諸国(ブラジル、ロシア、インド、中国)および日本、アメリカ、英国、フランス、ドイツ、イタリアの G6 諸国の経済発展予測に、拙稿の各金属のデカップリング状況の人当相関表記モデルを当てはめ、2050 年までの各金属の消費量の予測を行う。また、その消費量の累積が、現有の埋蔵量の何倍の資源量を要求しているかを見ることによって、新たな時点での「成長の限界」に対する考察への素材を与えるものである。

2. 方 法

人口、GDP 等の将来予測は国連人口予測⁶⁾等さまざまなところで行われているが BRICs の各国および G6 諸国の GDP と人口の予測データが一括してそろったものとして、

ゴールドマン・サックス社の 2003 年 10 月のレポートである「Dreaming with BRICs: The Path to 2050」⁷⁾を使用した。なお、このレポートが「BRICs」を最初に用いた例といわれている。Fig. 1 に、2050 年までの各国の一人当たりの GDP 予測、Fig. 2 に各国の人口予測を示した。各金属消費量の人当り関係表は、人当り GDP と人当りの金属消費の関係を、急速成長期と安定期の単純な 2 直線近似で表した拙著⁵⁾より Table 1 に示す係数を、

$$y_M = a_{M,0}x \quad (x < c_{M,1}) \quad (1)$$

$$y_M = a_{M,1}x + b_{M,1} \quad (c_{M,1} < x) \quad (2)$$

式に対して用いた。このとき、 x がそれぞれの国の当該年での一人当たり GDP、 y_M が一人当たりの金属 M の消費量となる。なお、Table 1 の右欄には、米国鉱山局のデータに基づくそれぞれの金属の 2005 年の時点での埋蔵量および埋蔵量ベースを金属成分含有量(トン)の単位で記しておいた。なお、埋蔵量は、技術的にも経済的にも採掘可能な鉱物量として見積もられている量であり、埋蔵量ベースは技術的には可能だが経済的、政治的等の理由で採掘対象とされていない鉱物量である。また、既消費量は、2004 年までの消費量の累積であり、「地球資源戦略ノート」⁸⁾に整理されている 1989 年までの累積値の推定をもとに 1990 年以降の消費データを鉱物資源データブックより得て計算した。また、1989 までの累積値のないものについては、鉱物資源データブックに記載されている年次以降の累積を用いた。

これらのデータをもとに、それぞれの金属に対して、まず

Fig. 1 GDP per capita at each country predicted by Goldman Sachs.

Fig. 2 Population growth predicted by Goldman Sachs.

Table 1 Factors of models and reserves of each metal.

Type	metal	unit	Line A	Line B		Transition GDP\$/capita	accumulate consumption unit 2004	Reserve	Reserve base
			$a_{M,0}$	$a_{M,1}$	$b_{M,1}$				
I	Au	g/capita	0.00015	-0.000069	5.16	23,900	2.82×10^{10}	7.90×10^{10}	1.80×10^{11}
I	Sn	Kg/capita	0.000048	-0.0000023	0.3	8,300	9.50×10^4	4.20×10^4	9.00×10^4
I	Zn	Kg/capita	0.0009	-0.000031	6.7	7,200	4.19×10^8	4.70×10^8	9.40×10^8
I	W	g/capita	0.008	-0.0001	48.2	5,400	7.19×10^8	1.32×10^{10}	1.69×10^{10}
I	Cr	Kg/capita	0.0006	-0.00014	9.0	12,200	1.33×10^7	6.10×10^6	1.10×10^7
I	Mn	Kg/capita	0.0012	-0.00012	13.6	10,300	3.77×10^7	6.20×10^7	1.40×10^8
I'	Cu	Kg/capita	0.00084	0	11.0	13,200		3.55×10^4	4.00×10^4
I'	Pb	Kg/capita	0.00062	0	2.8	4,600	1.02×10^4	3.55×10^4	4.00×10^4
II	Fe	Kg/capita	0.070	0.0066	336	10,700	8.25×10^6		
II	Al	Kg/capita	0.0013	0.00054	10.6	13,800	2.29×10^3	1.50×10^4	1.00×10^6
II	Ni	Kg/capita	0.00012	0.000021	0.69	7,100		2800	6000
II	Mo	g/capita	0.0105	0.0023	61.4	10,700	1.51×10^7	7.00×10^6	1.30×10^7
II	Sb	g/capita	0.0094	0.00069	52.0	9,800	4.65×10^6	8.60×10^6	1.90×10^7
II	Ag	g/capita	0.0023	0.00045	10.6	5,600	4.57×10^6	1.80×10^6	3.90×10^6
II	Pd	g/capita	0.000025	0.0000082	0.19	11,300	9.83×10^8	8.10×10^8	1.80×10^9
III	Pt	g/capita		0.000013	0	—	4.42×10^6	4.10×10^6	1.10×10^7
III	Si	Kg/capita		0.000039	0	—	5.92×10^8	4.30×10^8	5.20×10^9
III'	Co	g/capita	0.0018	0.0028	0	—	1.52×10^6	8.80×10^7	1.50×10^8
III'	RE	g/capita	0.0022	0.0057	0	—	2.51×10^6	2.90×10^6	6.20×10^6
III'	Ga	g/capita	0.000016	0.000031	0	—	3.22×10^8	2.20×10^8	4.60×10^8
III'	Li	g/capita	0.0016	0.0030	0	—	1.70×10^8	6.70×10^7	1.40×10^8
III'	In	g/capita	0.000016	0.0007	0	—	6.43×10^5	2.70×10^5	5.70×10^5

2005 年以降の各年度での消費量を計算し、各国の計算値を積み上げて 5 年毎の年次の消費量とした。さらに、それぞれの金属の各年次の消費量を 5 年の間隔データから内挿し、累積することでその年次に至るまでの累積消費量を得た。

3. 結 果

Fig. 3-1 から 3-22 に予測計算の結果をグラフで示す。A)

はそれぞれの金属に対しての 5 年毎の各年での消費量の計算値であり、対象とした各国の消費量が積み上げ棒グラフとして表されている。鉄の場合、着実に消費量は増大し 2050 年には年間消費量が 25 億トン/年近くと現在のほぼ 5 倍の規模に迫ることが予測される。また、国間の構成をみると、G6 諸国は量的な増加が鈍るものの 2030 年までの中国、およびそれ以降のインドの消費割合が大きく鉄の消費全体を支配するようになることが予想される。B) のグラフは累積消費量を示している棒の下部の濃い部分が 2005 年時点での既

Fig. 3-1 estimated consumption; A) annual, B) accumulated: Fe.

Fig. 3-3 Cu

Fig. 3-2 Al

Fig. 3-4 Mn

存累積消費量であり、棒グラフの明るい部分が今後その年までに予想される累積消費を示している。実線の位置は既存累積消費量と現在の埋蔵量の和を表し、上方の破線の位置は既存累積消費量と埋蔵量ベースの和を表している。鉄の場合では、2050 年で累積消費量が現有の埋蔵量に匹敵するレベルに達し、現在の経済的制約などを脱した新たな資源の開発が求められることになる。

以下、2050 年の予想消費の順に、アルミ、銅、マンガン、亜鉛、クロム、鉛、ニッケル、シリコン、錫、希土類、モリブデン、リチウム、アンチモン、タングステン、銀、コバルト、インジウム、金、ガリウム、白金、パラジウムについての計算結果を同様の表記で Fig. 3-1 から Fig. 3-22 に示す。なお、シリコンについては埋蔵量のデータが整備されていないため、埋蔵量のラインは記していない。

Fig. 3-5 Zn

Fig. 3-7 Pb

Fig. 3-6 Cr

Fig. 3-8 Ni

金属消費量予測の推移は、2040 年まではいずれも増加傾向にある。しかし、マンガン、亜鉛、クロム、鉛、錫においては世界規模でもデカップリングの効果があらわれ年間消費量は減少に転じる。これらの金属の場合消費の主体は G6 諸国から BRICs 諸国にシフトしている。一方で、シリコン、リチウム、インジウム、ガリウム、白金、パラジウムは 2050 年になっても G6 諸国のシェアが比較的大きく残っている。しかしそれでもすべてにわたって BRICs 諸国の占め

る割合は 50%を越えている。

累積消費量と現有埋蔵量との関係で、2050 年の段階で現有埋蔵量以下に累積消費量が抑えられているものは、鉄、アルミ、クロム、コバルト、希土類でしかない。しかも鉄でさえ、2050 年には現有埋蔵量をほぼ使い切った状態に達する。他方で、埋蔵量ベースをさえも超過してしまうものは、インジウム、錫、銀、亜鉛、鉛、金、銅、ニッケル、パラジウムである。これらの多くは、2040 年以降には年間消費量

Fig. 3-9 Si

Fig. 3-11 rare earth

Fig. 3-10 Sn

Fig. 3-12 Mo

Fig. 3-13 Li

Fig. 3-15 W

Fig. 3-14 Sn

Fig. 3-16 Ag

の減少傾向が予測されるものの、そのデカップリング状態が埋蔵量ベースであらわされる資源の容量の限界に及ばないことを示している。

4. 考 察

金属消費と埋蔵量との関係をよりわかりやすく見るために、

2020 年段階での各金属の累積消費を、現有埋蔵量との比で示したものが Fig. 4 である。図の下方に伸びる棒は既存の採掘量に相当する。また、上方のバーは埋蔵量を 1 としたときの埋蔵量ベースである。上方に伸びる棒グラフが 1 のラインを超えたときに現有埋蔵量を使い切る量であり、バーを超えると埋蔵量ベースまでも使い切ることを意味する。

すでに、2020 年の段階で、インジウム、銀、鉛が現有埋

Fig. 3-17 Co

Fig. 3-19 Au

Fig. 3-18 In

Fig. 3-20 Ga

蔵量を突破し、金、銅、錫がほぼ現有埋蔵量を使い切るという予測になっている。特に銀はこの時点で既に埋蔵量ベースに迫っている。インジウムに至ってはこの時点で現有埋蔵量の20倍以上の消費が予想されるため、資源の対象の大幅な見直しや技術開発が進められねばこの需要に応えることはできない。

2050年(Fig. 5)になると、状況はより悲観的になる。ほ

とんどの金属が現有埋蔵量を使い切り、埋蔵量ベースさえも超えようとしている。先のインジウムの場合は、資源として注目された歴史が短いため、資源の対象や、採取、製錬の技術など技術的な見直しの余地が大きい。銅、金、銀など既に技術的に成熟し、鉱山開発としても探索がほぼ地球全域を覆っている金属群に関しては、20世紀までの技術を転換するような大幅な技術革新が、極めて効率的なデバイス設計・

Fig. 3-21 Pt

Fig. 3-22 Pd

材料設計をつうじた消費・利用のスタイルの徹底した革新、もしくは、アルミニウムなどまだゆとりのある資源への徹底した代替技術の開発、および、一旦利用した資源を再利用するリサイクル技術の徹底革新が求められる。

なお、この予測結果の精度を左右する要因は二つある。ひとつは金属消費量と GDP の人当相関表記の妥当性であり、他のひとつは、ゴールドマン・サックス社の予測の正確性で

Fig. 4 The relation of the accumulation demand and existing reserves by 2020.

Fig. 5 The relation of the accumulation demand and existing reserves by 2050.

ある。前者は、既の実データとして得られている 2000 年の金属消費、GDP、人口のデータと人当相関表記にもとづく予測値との相異を検討することでその程度を推定できる。また、成長予測正確性は 2004 年の実際のデータとの比較でうかがい知ることができる。Fig. 6 は、本計算結果の一部(2000 年から 2005 年)を Fe, Al, Cu, Ni, Zn, Pb, Pt に対して実線で表し、2000 年と 2004 年 (Fe は 2003 年, Al, Pt は 2005 年)のデータをプロットしたものである。現実の消費量の変化の傾きはほぼ予測ラインと同じもしくは予測ラインよりもわずかに大きくなっており、短い期間ではあるものの、消費の増加は予測レベルもしくはそれを上回っていることになる。他方で 2000 年の実績値とモデルの下方不一致が亜鉛、ニッケル、白金において見られる。亜鉛については、増加の傾きで実績が予測より大きく、2000 年の実績値とモデル値の格差も少ないため、下方格差は今後なくなるものと思われる。また白金の実績値は、2000 年 2004 年の各国のデータは工業用需要のものしかなく、消費量のモデルは宝飾も含む総需要であるために生じた格差であると思われる。ニッケルに関しては、詳細を見るとアメリカ、ヨーロッパ諸国での実績値が予測モデルと大きく食い違っていたことが原因

Fig. 6 Comparison of real annual consumptions to calculated consumptions.

であった。これは、ニッケルの主要用途がステンレスなどの耐食性の材料であり、高温多湿の日本での消費モデルと欧米の消費構造との不一致によるものと考えられる。しかし、現在は消費量の少ない BRICs 諸国のうち三カ国が、日本なもしくはより過酷な腐食環境にあることを考えると、将来においてむしろ日本モデルとの一致性は強くなるものと予測される。

このように、モデル予測の不確定因子を検討したが、現時点ではモデルが過大評価となっているという要素は少なく、Fig. 5 に表されるような 2050 年時点では現有埋蔵量、さらには埋蔵量を大きく超える金属消費需要にいかに対応していくかという問題の解決が必須になっていると予想される。本予測では、Table 1 に示したように、急成長の後に安定期にはいるという形で人当りの GDP と金属消費の関係をモデル化しているが、これは多くの金属の消費は安定期としての先進国の現状をそのまま維持した予測でしかない。この安定

期をさらに進めて、資源の使用量を削減しながら金属に求められる機能を発揮させて、経済的にも GDP を高めていく技術を作り上げていくことが、金属消費需要の増大に応じていく解決の道となる。そのためには、徹底した減量・高効率利用技術、普遍性の高い資源系の元素による機能発現への代替技術、一度掘り出し、利用した資源の徹底した循環利用技術が急速に開発されることが求められる。

5. 結 言

BRICs 諸国の発展による物質要求は極めて大きく、2050 年には現在の物質消費規模の 5 倍にも達する。これらは現有の資源埋蔵量のみでは到底まかなうことはできず、さらには埋蔵量を上回る物質消費が予想される金属もあり、資源の見直しや、資源獲得・循環利用のための飛躍的な技術革新が求められる。G6 諸国の現 GDP レベルでのデカップリングは、このような物質要求の増大と比すれば持続可能にほど遠く、大幅な技術革新でさらなるデカップリングの深化が早急に求められる。

文 献

- 1) *The Global 2000 Report to the President*, U.S.A. government Report (1977).
- 2) *World Metal Demand Trends and Prospects*, Edited by J. E. Tilton, Colorado School of Mines (1990).
- 3) A. J. Cox, B. Nagel and K. Lawson: *Factors Influencing Demand for Metals*, (Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, 1990).
- 4) *Sekaino Base-Metal Shouhi Doukou Bunseki 2005*, (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 2005).
- 5) K. Halada M. Shinada and K. Ijima: J. Japan Inst. Metals, to be submittel.
- 6) United Nations, and *World Population Prospects* (2004).
- 7) Dc. Wilson and R. Purushothaman: *Dreaming With BRICs : The Path to 2050*, Goldman Sachs Global Economic Paper No. 99 (2003)
<http://www2.goldmansachs.com/insight/research/reports/99.pdf>
- 8) A. Tada: *Chikyuu Shigen Senryaku nouto*, (Hakua Shobou, Tokyo 1994) p. 113.