

建設鉱物のマテリアルバランス ～ 失われるマテリアルストックと再生碎石の需給に関する検討

Material balances of construction minerals: missing material stocks and supply and demand of recovered aggregates

橋本征二¹

谷川寛樹²

森口祐一¹

Seiji HASHIMOTO¹

Hiroki TANIKAWA²

Yuichi MORIGUCHI¹

ABSTRACT: Time-series material balances of construction minerals whose shares in weight are large in construction materials in Japan were estimated including asphalt, cement, sand, crushed stone, and other aggregates. On the basis of this estimation, the mechanism of generation of construction minerals as waste and supply and demand of recovered aggregates in the future were discussed. Our conclusions are as follows: 1) The amount of output of construction minerals is at low level, compared with the amount of input. This difference has been interpreted as net additions to stock (NAS); however, in reality, NAS includes flows similar to 'hidden flows', 'dissipative flows' or flows to landfills. These flows could be called 'missing material stock': 2) Construction minerals that are "recognized as waste" are estimated to increase in the future, although they are a very small part of input. Reduction in road construction hereafter in Japan suggests the discrepancy of supply and demand of recovered aggregates in the future.

KEYWORDS: material flow analysis, net addition to stock, construction minerals, construction waste, aggregates

1. はじめに

日本の資源・廃棄物管理において建設業の占める位置は大きい。日本の投入資源の約5割は建設資材であり^{1), 2)}、産業廃棄物の約2割は建設業から発生³⁾、不法投棄の多くも建設廃棄物とされる⁴⁾。こうしたことから、建設廃棄物のリサイクルに関わる対策も進展し、アスファルト・コンクリート塊、コンクリート塊のリサイクル率にいたっては、すでに2010年の目標である95%を上回る状況にある⁵⁾。しかしながら、中長期的な視野に立つと、現状の高いリサイクル率がいつまで維持できるかは疑問である。高度成長期に建設され国内に蓄積されてきた建築物・土木構造物の解体・更新に伴う廃棄物の増加が予想される一方、現状ではアスファルト・コンクリート塊、コンクリート塊の再利用先のほとんどが道路関係工事である。今後、道路関係工事の需要が現状レベルで推移するとしても、再生碎石の需給がバランスしなくなる可能性は高い。

本稿は、建設資材の中でもその重量で大きな割合を占める建設鉱物（アスファルト、セメント、砂利、碎石、その他骨材）を対象として、それらのマテリアルバランスを時系列で推計し、この推計に基づいて、建設鉱物の廃棄物としての発生メカニズムと再生碎石の将来的な需給について検討したものである。このような建設鉱物を対象としたマテリアルバランスに関する分析は、ドイツ⁶⁾、米国⁷⁾、スウェーデン⁸⁾などでも行われているが、将来に渡る分析をしたものは見られない。また、国内でも、単年度の概略的なマテリアルバランスに関する分析⁹⁾が行われ、建築物への主要資材投入量の推計¹⁰⁾、地域ブロックレベルでの主要資材蓄積量の推計¹¹⁾、将来の建設廃棄物発生量の予測¹²⁾⁻¹⁴⁾などの分析が個別に行われているものの、資源の投入から廃棄物の排出までのマテリアルバランスを過去から将来にわたって総合的に検討したものは見られない。なお、都市を対象とした分析¹⁵⁾⁻¹⁷⁾はいくつか報告されている。また、このように建設鉱物を対象としたマテリアルバランスを推計すると、通常、投入される物質と排出される物質との差が、純蓄積（net additions to stock: NAS）¹⁸⁾、¹⁹⁾となるが、既存研究⁶⁾⁻⁹⁾でも見られるように、建設鉱物の投入と排出の差は極めて大きい。しかし、これら

¹ 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

² 和歌山大学 Wakayama University

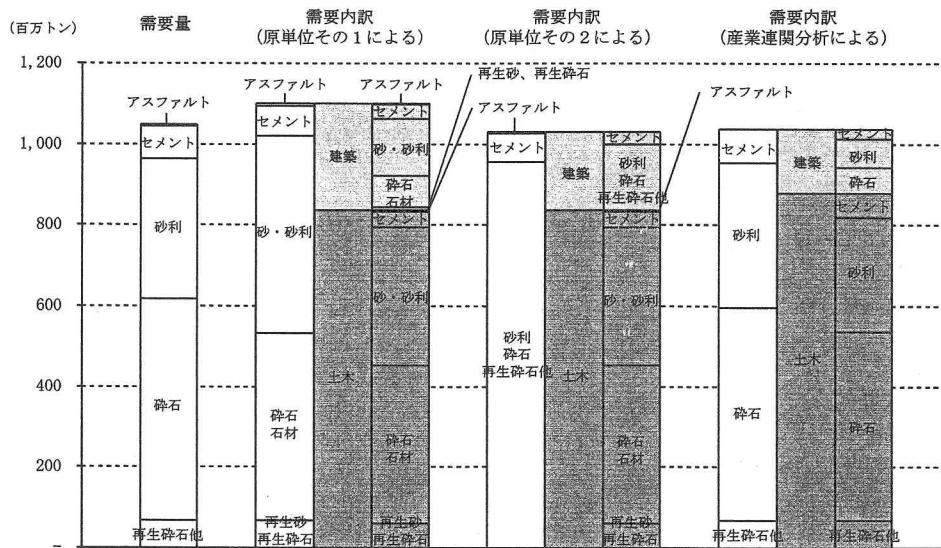


図1 建設鉱物の需要量とその内訳（1995年）

は本当に社会への純蓄積、言い換えれば将来の廃棄物予備軍と考えて良いのだろうか。本稿では、建設鉱物の廃棄物としての発生メカニズムの検討を通じて、この点についての考察も行う。

2. 建設鉱物の生産量・需要量

2.1 生産量・需要量の統計データ

建設鉱物の生産量・需要量についてはいくつかの統計データがある^{20)~28)}。これらの統計データをもとに、需要量を積み上げたものが図1の左端の棒である。

2.2 需要内訳の推計方法

これらの建設鉱物が最終的にどのような用途で使用されたかについて、本稿では2通りの方法で推計した。

1つ目の方法は、建設活動量に建設活動量あたりの資材投入原単位を乗じる方法である。

$$MI_{ai}(t) = C_a(t) \times \alpha_{ai}(t) \quad (1)$$

ここで、 $MI_{ai}(t)$ はt年の建設活動aに投入される資材iの量、 $C_a(t)$ はt年の建設活動aの活動量（建築物は着工床面積²⁹⁾、土木構造物は着工工事金額（1995年価格）³⁰⁾）、 $\alpha_{ai}(t)$ はt年の建設活動aの活動量あたりの資材iの投入原単位（建築物は床面積あたり^{31),32),10),17)}、土木構造物は工事金額（1995年価格）あたり^{31),32)}）である。建築物については2種類の原単位（建設資材・労働力需要実態調査^{31),32)}による原単位その1、建築業協会¹⁰⁾および谷川・井村¹⁷⁾による原単位その2）を用いたが、両者の値は大きく異なっている。

2つめの方法は、産業連関表取引基本表（基本部門分類）²³⁾、建設部門分析用産業連関表³³⁾を用いて、各建設活動が引き起こす波及的な建設鉱物の生産量を計算する方法である。

$$P_a = a \times (I - A)^{-1} \times F_a \quad (2)$$

ここで、 P_a は、建設活動aによって誘発される各産業部門における建設鉱物の生産量のベクトル、 a は各産業部門における生産金額あたりの建設鉱物生産量のベクトル、 A は投入係数行列、 F_a は建設活動aの需要額のベクトルである。ここで対象とした建設鉱物は、セメント、砂利、砕石である。これらの建設鉱物の生産量をそれらの部門の生産額²³⁾で除したものがベクトル a である。また、 A は基本部門分類²³⁾の一部を統合して399部門の正方行列としたものである。さらに、 F_a は建設部門の需要額のベクトル³³⁾である。

2.3 需要内訳の推計結果

以上の結果を比較したものが図1である。原単位を用いても産業連関分析を用いても、推計された需要内

訳の合計値は需要量の統計値と大きく違わない。しかしながら、その内訳は若干異なっている。例えば、原単位その1による推計では、需要量の統計値と比べて、砕石が少なく、砂利が多くなっている。また、原単位その1による推計では産業連関分析による推計と比べて、建築用途が多く、土木用途が少なくなっている。

建築物については、原単位その1、2による推計で大きな差が見られた。また、産業連関分析による推計は原単位その2による推計よりさらに小さな値となった。産業連関分析を用いて建築物の資材投入原単位を計算すると、セメントについては一般に言われているより若干小さく、砂利・採石については1995年の値が著しく小さいとの報告がある³⁴⁾。産業連関分析では、価格で波及計算が行われるため、実際には同じ重量の資材を用いていても、単価が異なれば計算される原単位が異なるという問題が生ずる。一方、原単位その1は、それぞれの工事分類で数100のサンプルをもとにしていることから、比較的信頼性が高い原単位と考えられる。本稿では、原単位その1を用いて推計を行うこととした。

また、土木需要の内訳を見たものが図2である。産業連関分析による推計の合計値が原単位による推計の合計値より若干大きい、その内訳を見ると、それより大きな差が見られる建設活動がある。原単位による推計では道路などが少なく、治山治水、農林水産、港湾・空港、土地造成などが多い。建築物と同様に、原単位の方が比較的信頼性が高いと考えられることから、本稿では、原単位を用いて推計を行うこととした。

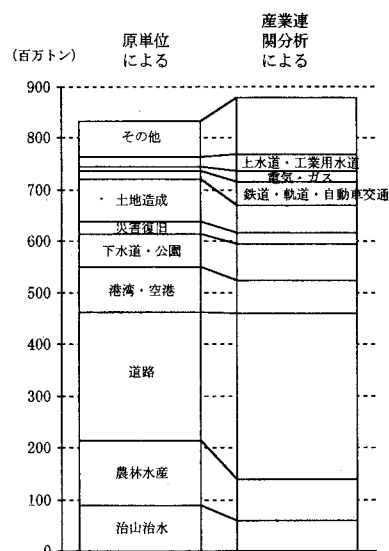


図2 土木需要の内訳 (1995年)

3. 建設鉱物の蓄積量

3.1 蓄積量の統計データ

建設鉱物の蓄積量に関する直接の統計データはないが、建築物の蓄積量については、その物理量（床面積）のデータがあることから、これを用いて建設鉱物の蓄積量を推計することは可能である。一方、土木構造物については、その物理量をどのように計測するかも難しく、適当な統計はない。道路については道路統計年報³⁵⁾があり、道路延長などの物理量が記載されているが、この物理量からだけでは建設鉱物の蓄積量を推計することは困難と考えられる。本稿では、以下のように建築物、土木構造物に分けて、蓄積量の推計を行った。

3.2 建築物に関する推計方法

建築物の蓄積量については、その物理量（床面積）のデータがあることから、過去については次式によった。

$$MS_{ai}(t) = S_a(t) \times \beta_{ai}(t) \quad (3)$$

ここで、 $MS_{ai}(t)$ はt年の建築物aとして蓄積されている資材iの量、 $S_a(t)$ はt年の建築物aの蓄積量（床面積³⁶⁾）、 $\beta_{ai}(t)$ は建築物aの蓄積量あたりの資材iの蓄積原単位（ $\alpha_{ai}(t)$ に同じとした）である。また、将来の蓄積量は次式¹⁴⁾によった。

$$MS_{ai}(t) = S_a(t) \times \beta_{ai}(t) = \sum_{\tau} \left(S_a(t-l, \tau) \times \frac{R_a(t-\tau)}{R_a(t-l-\tau)} \right) \times \beta_{ai}(t) \quad (4)$$

ここで、 $S_a(t, \tau)$ はτ年に建設された建築物aのt年における蓄積量、 $R_a(t-\tau)$ はτ年に建設された建築物aがt-τ年経過した際に残存している確率^{37,38)}（木造については、文献³⁷⁾の対数正規分布では過去の蓄積量をうまく再現しないため、寿命の中央値を20%長くしたものを用いた¹⁴⁾）である。また、(4)式の計算を開始する基準年は、これらの関数を推定する元となったデータの年（1987年もしくは1990年^{37,38)}）とした。さらに、基準年以降に新築される建築物は $S_a(t, t)$ として蓄積に加わっていくが、基準年から2001年までは統計値、それ以降は1992年から2001年の10年平均値で2030年まで推移するものとした。なお、除却確率

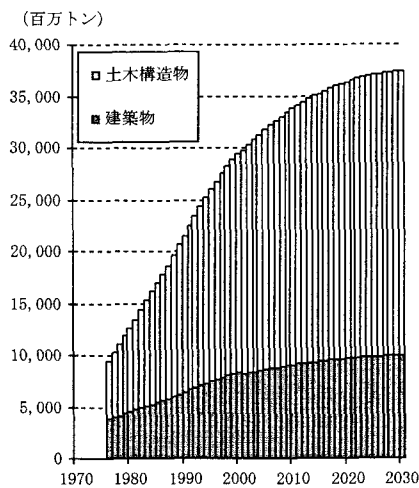


図3 建設鉱物蓄積量の推計値（工事別）

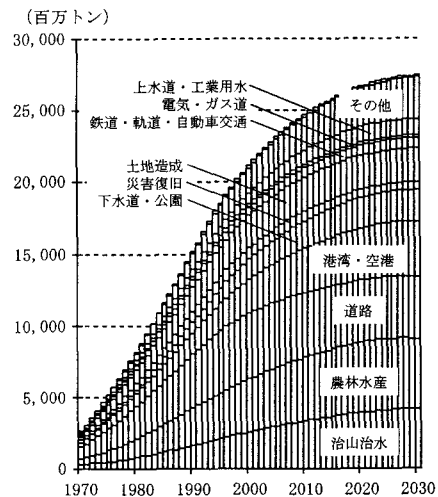


図4 建設鉱物蓄積量の土木構造物の内訳

$(1 - R_a(x))$ を微分したものが、次式で表される建築物aの寿命確率密度関数である。

$$\Pi_a(x) = \frac{d(1 - R_a(x))}{dx} \quad (5)$$

3.3 土木構造物に関する推計方法

土木構造物については建築物のようなデータがないため、次式によった。

$$MS_{ai}(t) = \sum_{\tau} (MI_{ai}(\tau) \times R_a(t - \tau)) = \sum_{\tau} \left\{ (C_a(t) \times \beta_{ai}(t)) \times R_a(t - \tau) \right\} \quad (6)$$

1954年から2000年までの $C_a(t)$ は統計値³⁰⁾、2001年以降は1991年から2000年までの10年平均値で2030年まで推移するものとした。また、 $\beta_{ai}(t)$ は $\alpha_{ai}(t)$ に同じとした。 $R_a(t - \tau)$ については、平均寿命での確率密度を10%とする正規分布¹³⁾を用いた。

3.4 蓄積量の推計結果

建設鉱物の蓄積量を推計した結果が図3である。1976年から2000年にかけて、建設鉱物の蓄積量は約100億トンから約300億トンへと約3倍に増加している。また、今後も現状レベルで建築物・土木構造物が建設・更新されれば、2030年には約370億トンに達するものと推計された。ただし、4で検討するように廃棄量の統計値は推計値より大幅に小さいため、ここで述べた量より多くの建設鉱物が蓄積されているとも考えられる。

土木構造物の内訳について見たものが図4である。治山治水、農林水産、道路、港湾・空港などの工事で投入された建設鉱物の蓄積量が多い。ただし、治山治水、農林水産、港湾・空港、土地造成等で用いられる建設鉱物については、それによって建設された土木構造物が仮にその耐用年数を過ぎていたとしても、いわゆる廃棄物として発生しない可能性が高いと考えられるため、(6)式で推計されるような蓄積量が、蓄積物としての意味があるかどうかについては慎重に判断する必要がある。このような点について4で詳しく考察する。

4. 建設鉱物の廃棄量

4.1 廃棄量の統計データ

建設鉱物の廃棄量については、建設副産物実態調査^{5), 28)}があるが、実際の廃棄物の発生量はもっと多い可能性のあることが指摘されている¹⁴⁾。本稿では、建築物、土木構造物に分けて廃棄量の推計を行った。

4.2 建築物に関する推計方法

過去の廃棄量については次式¹⁴⁾によった。

$$W_{ai}(t) = D_a(t) \times \beta_{ai}(t) = (S_a(t) + C_a(t) - S_a(t+1)) \times \beta_{ai}(t) \quad (7)$$

ここで、 $W_{ai}(t)$ はt年に建築物aから廃棄される資材iの量、 $D_a(t)$ はt年の建築物aの除却量である。 $D_a(t)$ の直接的な統計データ²⁹⁾もあるが、この統計値は実際の値よりも小さいことが一般には指摘されていることから上記の手法によった。また、将来の廃棄量は次式¹⁴⁾によった。

$$W_{ai}(t) = D_a(t) \times \beta_{ai}(t) = \sum_{\tau} (S_a(t, \tau) - S_a(t+1, \tau)) \times \beta_{ai}(t) \quad (8)$$

4.3 土木構造物に関する推計方法

土木構造物については次式^{12), 13)}によった。

$$W_{ai}(t) = \sum_{\tau} (MI_{ai}(\tau) \times \Pi_a(t - \tau)) = \sum_{\tau} \{ (C_a(t) \times \beta_{ai}(t)) \times \Pi_a(t - \tau) \} \quad (9)$$

4.4 廃棄量の推計結果

建設鉱物の廃棄量を推計した結果が図5である。1976年から2000年にかけて、建設鉱物の廃棄量は約1億トンから約4億トンへと約4倍に増加している。今後も現状レベルで建築物・土木構造物が建設・更新されれば、2030年には約10億トンに達するものと推計された。しかしながら、統計値と推計値には大きな差がある。

建築物については、統計値も本稿と同様の手法（ $D_a(t) \times \beta_{ai}(t)$ ）で推計を行っているため、解体量と原単位の違いが原因となる。このうち、解体量については、前述のように本稿が用いている計算値が統計値を上回っている。また、原単位についても、統計値で用いられているものが小さい可能性が指摘されている¹⁴⁾。

土木構造物については、統計値がその年の建設活動量 $C_a(t)$ に廃棄物の排出原単位を乗じて推計しているのに対し、本稿の推計値は過去の建設活動に投入された資材 $MI_{ai}(t)$ が一定の耐用年数を経た後に廃棄される量を推計している。しかしながら、土木構造物については、仮に耐用年数を過ぎていても廃棄物として発生しない可能性の高いものが多いと考えられる。例えば、土地造成や港湾・空港、農林水産、治山治水などで利用される砂利、碎石のうち、実際に廃棄物となって発生するものはどのくらいあるであろうか。また、道路で利用される碎石のうち、路盤材として利用されたものなどは、廃棄物として発生するだろうか。こうした碎石は、経済活動の中に投入され経済的価値も有しているが、ある土地からある土地に移動させているという意味では土砂に近く、隠れたフロー（hidden flows³⁹⁾）に近い形態である。あるいは、農薬等と同様に自然界に排出することでその機能を発揮するような製品のフロー（dissipative flows¹⁸⁾）に近いものとも言える。また、建築物や土木構造物が解体されたとき、現場で廃棄物として回収されず、土壌としてその場に置かれたままのものも相当量あると考えられる。これはある種の埋立と言えるだろう。

現状では、こうしたことについてこれ以上考察するための情報がないが、本稿では次のように考えることとした。まず、建築物の解体量については本稿の推計値がより実態に近いものとする。次に、実際に廃棄物として発生する建設鉱物は、建築物では本稿の推計値の50%程度、土木構造物では20%程度であるものと仮定する。これは、こうすることによって廃棄量が統計値とおよそ一致するからであり、それ以上の理由はない。これらについては今後の検討が必要である。

以上をもとに、廃棄量を補正した結果が図6である。建築物の解体量が多いためにその分だけ統計値より大きな値となる。また、図3、図4の蓄積量は廃棄量が減った分大きくなるはずだが、これを蓄積と考えるか、隠れたフロー（hidden flows）と考えるか、自然界への排出（dissipative flows）と考えるか、埋立と考えるかは議論の余地があるだろう。これらは失われるマテリアルストック（missing material stock）と言える。

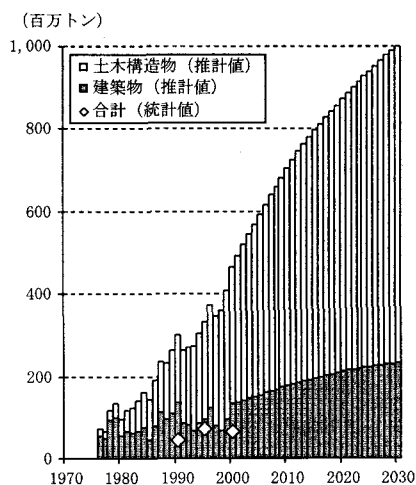


図5 建設鉱物廃棄量の推計値（工事別）

また、投入された建設鉱物のうちのわずかではあるが、「廃棄物と認識される」建設鉱物の量は今後も増加するものと推計される。図6には、道路関係工事の砂利・砕石需要量を同時に示しているが、今後道路関係工事の需要が減少しないとしても、2030年の廃棄量は需要量を上回る可能性がある。道路関係工事が縮小されるとすれば、再生砕石の需給バランスが問題となる日は遠くないであろう。今後再生砕石の需給バランスを維持していくためには、コンクリート用骨材としての利用について研究開発が必要である。

6. おわりに

本稿の結論は以下のとおりである。1) 建設鉱物廃棄量は投入量と比較して低いレベルにある。これらの差は、純蓄積 (net additions to stock) として解釈されてきたが、現実的には隠れたフロー (hidden flows) や自然界への排出 (dissipative flows)、あるいは埋立に近いものが多くあるものと考えられる。これらは失われるストック (missing stock) と言える。2) 投入された建設鉱物のうちのわずかではあるが、「廃棄物と認識される」建設鉱物の量は今後も増加するものと推計される。日本においては今後、道路関係工事の縮小が想定されることから、再生砕石の需給バランスが問題となることが示唆される。

参考文献

- 1) Moriguchi, Y.: Rapid socio-economic transition and material flows in Japan, Population and Environment, Vol.23, No.1, pp.105-115, 2001
- 2) 環境省: 平成13年度版循環型社会白書、ぎょうせい、2001
- 3) 環境省: 産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成12年度実績)、2003
- 4) 環境省: 産業廃棄物の不法投棄の状況 (平成13年度) について、2002
- 5) 国土交通省: 平成12年度建設副産物実態調査結果、2002
- 6) Bringezu, S., Schutz, H.: Material flow accounts part II - construction materials, packagings, indicators, Wuppertal Institute, 1997
- 7) Kelly, T.: Crushed cement concrete substitution for construction aggregates - a material flow analysis, U.S. Geological Survey Circular 1177, 1998 (<http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1177/>)
- 8) Bergstedt, E., Linder, I.: Material flow study of sand and gravel in Sweden, Statistics Sweden, 1999 (<http://www.scb.se/eng/publikat/miljo/eu/eu.asp>)
- 9) 酒井寛二、漆崎昇、下川泰三: 建設活動における物質循環から見た材料選択、第4回エコバランス国際会議講演集、pp.95-98、2000
- 10) 建築業協会: 建設業に係る地球環境問題の研究～中間報告、建築業協会、1994
- 11) 田頭直人、鈴木勉、内山洋司: 都市インフラストラクチャー構築の資源使用量と環境負荷、調査報告Y95011、電力中央研究所、1996
- 12) 藤井昭光: 建設系廃棄物の発生量予測とその対応策～ストックから発生するスクラップ、調査第175号、日本開発銀行、1993
- 13) 竹ヶ原啓介: 都市再生と資源リサイクル～資源循環型社会の形成に向けて、調査第33号、日本政策投資銀行、2002
- 14) 橋本征二、寺島泰: 建築物解体廃棄物の発生予測、廃棄物学会論文誌、Vol.11, No.5, pp.271-279、2000
- 15) 谷川寛樹、藤倉良、井村秀文: 都市の物質収支と環境勘定に関する研究～建設用資材の投入と建設副産物、環境システム研究、Vol.23, pp.274-278、1995
- 16) 谷川寛樹、松本亨、井村秀文: 都市構造物に関連したマテリアルストックの推計・評価に関する研究、環境システム研究、Vol.27, pp.347-354、1999
- 17) 谷川寛樹、井村秀文: 都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究～住宅地整備のケーススタディ、土木学会論文集、No.671/VII-18, pp.35-48、2001
- 18) Matthews, E., Amann, C., Bringezu, S., Fischer-Kowalski, M., Huttler, W., Kleijn, R., Moriguchi, Y., Otke, C., Rodenburg, E., Rogich, D., Schandl, H., Schutz, H.,

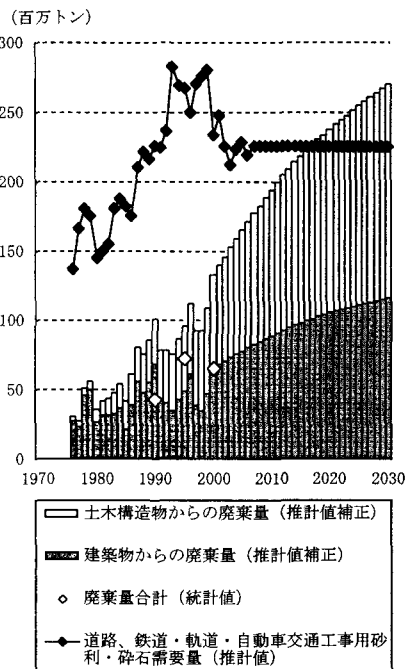


図6 建設鉱物廃棄量 (補正值) と道路関係工事用砂利・砕石の需要量

- van der Voet, E., Weisz, H.: The weight of nations: material outflows from industrial economies, World Resource Institute, Washington, D.C., 2000
- 19) Eurostat: Economy-wide material flow accounts and derived indicators: a methodological guide, Eurostat, Luxembourg, 2001
- 20) 日本アスファルト協会: 石油アスファルト需給統計、日本アスファルト協会 (<http://www.01.246.ne.jp/~askyo/jyukyutokai.html>)
- 21) 日本アスファルト合材協会: アスファルト合材統計年報、日本アスファルト合材協会
- 22) セメント協会: 2002年度版セメントハンドブック、セメント協会、2002
- 23) 総務庁: 平成七年産業連関表、全国統計協会連合会、1999
- 24) 経済産業省: 窯業・建材統計年報、経済産業調査会
- 25) 資源エネルギー庁: 鉱業便覧、通商産業調査会
- 26) 通商産業大臣官房: 砕石統計年報、通産統計協会
- 27) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグ統計 (<http://homepage2.nifty.com/SLG/tokei/japan/index.htm>)
- 28) 建設省: 平成7年度建設副産物実態調査結果、1997
- 29) 国土交通省: 建築統計年報、建設物価調査会
- 30) 国土交通省: 建設総合統計年度報、経済調査会
- 31) 建設省: 建設資材・労働力需要実態調査 (平成9年度工事実績)、1999
- 32) 国土交通省: 建設資材・労働力需要実態調査 (平成12年度工事実績)、2002
- 33) 建設調査統計研究会: 平成7年建設部門分析用産業連関表、建設物価調査会、2000
- 34) 漆崎昇、水野聡、下田吉之、酒井寛二: 産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定、日本建築学会計画系論文集、No.549, pp.75-82、2001
- 35) 国土交通省: 道路統計年報、全国道路利用研究会
- 36) 総務省: 固定資産の価格等概要調査
- 37) 小松幸夫、加藤裕久、吉田卓郎、野城智也: わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987年固定資産台帳に基づく推計、日本建築学会計画系論文集、第439号、pp.101-110、1992
- 38) 小松幸夫、加藤裕久、三橋博巳: 東京4区における事務所建築のストック調査と寿命推計、日本建築学会計画系論文集、第465号、pp.123-132、1994
- 39) Adriaanse, A., Bringezu, S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rodenburg, E., Rogich, D., Schutz, H.: Resource flows: the material basis of industrial economies, World Resource Institute, Washington, D.C., 1997