

セメント・コンクリートに関わる総資源消費について

Gross Resources Consumption in relation to Cement and Concrete

天野耕二^{*}・伊藤昌隆^{**}・池田康太郎^{***}・柳沢幸雄^{****}

Koji AMANO^{*}, Masataka ITO^{**}, Kotaro IKEDA^{***} and Yukio YANAGISAWA^{****}

ABSTRACT: Gross Resources Consumption and CO₂ emission in relation to cement and concrete industrial systems were investigated in this study. The reuse of waste by-product in the cement production and recycling process of concrete lump were also considered. Gross CO₂ emission related to the Japanese cement and concrete industrial systems in 1990 indicated 8.72 Mt-C (45 %) based on the fossil fuel origin and 10.69 Mt-C (55 %) based on the limestone origin. Most of those CO₂ emission were caused in the process of cement production. Many kinds of waste by-products of approximately 2.3 Mt were committed into the cement production, and those shared 19 % of all committed materials. As for an estimation of the Gross Resources Consumption related to an industrial system with much reuse of waste by-product, the Process Analysis Method was more effective than the Input-Output Analysis Method in which it was difficult to treat many kinds of by-product.

KEYWORDS: Gross Resources Consumption, CO₂ emission, cement and concrete, waste by-product

1. はじめに

温暖化に代表される地球環境問題は、環境負荷排出源の特定難などの問題により、対応が難航する傾向にある。このような問題に合理的に対応する事ができる「総資源消費(Gross Resources Consumption:GRC)」という概念が提唱されている¹⁾。総資源消費とは、自然界より資源として採取された物質が経済財としての有用性を失い再び自然界に排出されたとき、その物質が本質的に消費されるという定義に基づいている。このような本質的な資源の消費全体を表す「総資源消費」は質量単位で表され、一年間に環境中に排出された物質を対象としている。また、排出物質の質的な違いを反映するため、その構成素材の性質から「エネルギー・化石資源」「水」「バイオマス」「金属」「非金属」の5つの体系に分類している。

本研究では、上記の「非金属」系を代表するセメント・コンクリートに着目し、地球環境負荷である二酸化炭素の排出を中心とした物的消費実態の分析を試みた。セメント・コンクリートに関わる資源消費の背景としては、セメント生産は国内で約 8,500 (万 t/year)、世界中では約 110,000 (万 t/year) も行われている、建設用骨材は 80,000 (万 t/year)、うちコンクリート用骨材は約 50,000 (万 t/year) の需要があり、セメント原料である石灰石などを含めると国内採取資源において非常に大きなウェイトをしめている、セメント生産による石灰石起源の二酸化炭素排出量が多い、多くの廃棄物副産物利用が取り入れられている、などが挙げられる。本研究では特に、セメント生産を中心とした積み上げ法、産業連関分析法による廃棄物副産物利用の評価の差、コンクリート塊の廃棄・再利用についての考察を加えた。

評価対象年は 1990 年とし、データは通商産業省をはじめ各省庁発行の資料およびセメント協会をはじめ関連各種業界団体発行の資料などを用いた。また、本論にデータを記載する際、断りが無い限り 1990 年のものである。

^{*} 立命館大学理工学部 Department of Civill and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

^{**} 立命館大学大学院理工学研究科 Department of Civill and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

^{***} 大成ロテック(株) Taisei Rotech Co., Ltd.

^{****} 地球環境産業技術研究機構 Research Institute of Innovative Technology for the Earth

2. 分析方法

分析は次の二つの方法を用いて行った²⁾。一つは積み上げ法で、評価対象のライフサイクルを構成するプロセスに分解し、それぞれのプロセスごとに環境負荷を定量化したうえで加算する方法である。もう一つは産業連関分析法で、産業を 400 程度に分類し取引過程を表した産業連関表を用いて、部門間の金額ベースのやりとりから環境負荷を算定する方法である。

二酸化炭素排出源は化石燃料起源のものと石灰石起源のものとした。(表 - 1) に排出源別二酸化炭素排出原単位を示す。

(1) 積み上げ法による分析について

(図 - 1) に示すセメント・コンクリートにおけるプロセスフローを設定し分析を行った。セメント原料生産に関しては石灰石と珪石を、生コン原料生産に関しては砕石骨材を取り扱った。建設工事およびコンクリート塊の廃棄・再利用に関しては、データの未整備などにより、今回の分析には加えていない。

(2) 産業連関分析法について

1990 年の産業連関表取引基本表⁶⁾を一部修正し、内生部門 405 部門に加工したものを用いた。分析は加工した産業連関表取引基本表を $(I - A)^{-1}$ 型の逆行列係数表に変換し、百万円あたりの二酸化炭素排出量を与え行った。百万円あたりの二酸化炭素排出量は物量表⁷⁾などから算出した。分析する際に考慮した被誘発産業部門は、一般炭・原油・天然ガス・石油製品(揮発油、灯油、軽油など)各生産部門(化石燃料起源)およびセメント生産部門(石灰石起源)である。また、誘発産業部門(評価対象部門)は、石灰石・砕石・セメント・生コンクリート各生産部門とした。

3. 分析結果および考察

化石燃料起源および石灰石起源に分けたセメント・コンクリートにおけるプロセス別二酸化炭素排出量を(表 - 2)に示す。化石燃料起源、石灰石起源による二酸化炭素排出量総計は 1,940 (万 t-c) である。排出起源別にみると、化石燃料起源によるものが 45% (872 (万 t-c))、石灰石起源

表 - 1 排出源別二酸化炭素排出原単位^{3) 4) 5)}

排出起源	unit	排出係数 (kg-c/unit)
石炭	kg	0.64
石炭コークス	kg	0.89
原油	l	0.74
NGL	l	0.62
ガソリン	l	0.64
ナフサ	l	0.61
ジェット油	l	0.67
灯油	l	0.69
軽油	l	0.72
A重油	l	0.74
B重油	l	0.77
C重油	l	0.80
石油コークス	kg	0.90
LPG	kg	0.82
天然ガス	m ³	0.55
LNG	kg	0.73
コークス炉ガス	m ³	0.22
高炉ガス	m ³	0.24
転炉ガス	m ³	0.42
電力	kwh	0.11
石灰石	kg	0.12

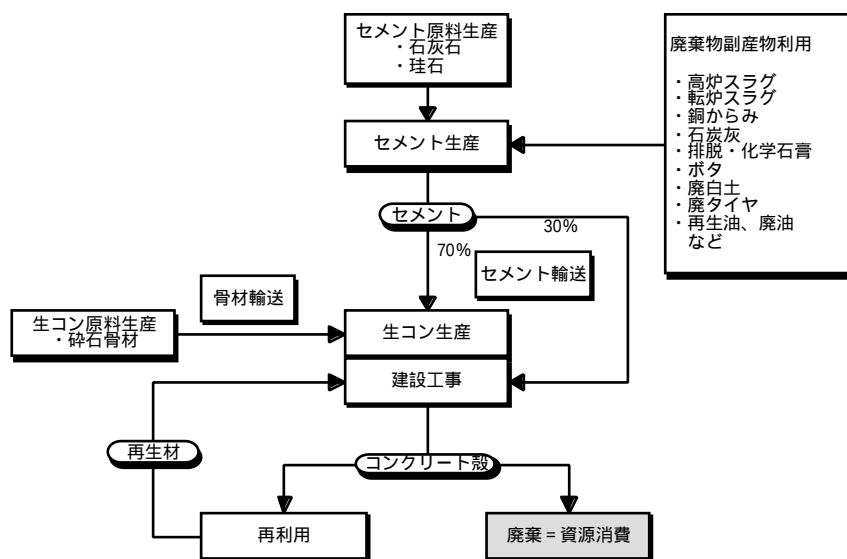


図 - 1 セメント・コンクリートにおけるプロセスフロー

表 - 2 セメント・コンクリートにおけるプロセス別二酸化炭素排出量^{8) 9) 10) 11) 12) 13) 14)}

プロセス名	化石燃料起源			石灰石起源排出量	総計
	直接排出量	間接排出量	直接間接排出量		
石灰石生産	3.50	2.82	6.32	0.00	6.32
珪石生産	0.26	0.11	0.37	0.00	0.37
セメント生産	652.68	63.20	715.88	1068.84	1784.72
セメント輸送	38.90	3.11	42.01	0.00	42.01
生コン生産	25.16	6.28	31.44	0.00	31.44
砕石骨材生産	8.97	3.86	12.83	0.00	12.83
骨材輸送	62.74	0.00	62.74	0.00	62.74
総計	792.22	79.37	871.59	1068.84	1940.43

直接排出：生産工程などに伴いその場に直接排出される二酸化炭素排出を表す。

間接排出：火力発電所などでの排出を電力消費に伴って計上する間接的な二酸化炭素排出を表す。

によるものが 55% (1,069 (万 t-c)) をしめ、特に、石灰石起源によるものはセメント生産プロセスのみに依存している。また、化石燃料起源の直接間接排出量をみると、セメント生産プロセスが 716 (万 t-c) と直接間接排出量総計の 82% をしめている。さらに、化石燃料起源の間接排出量 (電力消費分) をみると、間接排出量総計は直接間接排出量総計の 9% をしめる。特徴として、石灰石・珪石・砕石骨材各生産のいわゆる原料生産において、間接排出量が直接間接排出量にしめるシェアが 30~45% と他のプロセスに比べ高いことが分かる。総合的にみると、ほとんどセメント生産プロセスによる排出だが、他のプロセス計も 156 (万 t-c) と 1990 年の国内二酸化炭素総排出量 31,800 (万 t-c)⁴⁾ の 0.5% と排出量としては無視できない量である。

積み上げ法と産業連関分析法による二酸化炭素排出量の分析結果を (表 - 3) に示す。積み上げ法による分析結果において、セメント生産部門は石灰石⁸⁾・珪石⁸⁾・セメント⁹⁾各生産を、生コン生産部門は (図 - 1) に示すようにセメント出荷量の 70% をしめることから、セメント生産部門、セメント輸送¹⁰⁾¹¹⁾ の計の 70% と生コン生産¹²⁾、砕石骨材生産¹³⁾、骨材輸送¹¹⁾¹⁴⁾ を積み上げて算出した。産業連関分析法による分析結果においては、石灰石・砕石各生産部門の計算結果に

表 - 3 積み上げ法と産業連関分析法による二酸化炭素排出量の分析結果

部門名	(万t-c)	
	積み上げ法	産業連関分析法
石灰石生産部門	6.32	11.35
砕石生産部門	12.83	17.29
セメント生産部門	1791.41	1607.91
生コン生産部門	1390.40	1251.48

各資材のセメント・生コン各生産への投入量による調整を加えた。両分析法による二酸化炭素排出量を比較すると、石灰石生産および砕石生産の二部門で積み上げ法による分析結果が産業連関分析法による分析結果を下回る値を示し、セメント生産および生コン生産の二部門では逆に上回る値を示している。一般に、積み上げ法による分析結果は産業連関分析法による分析結果より過小評価する傾向があるとされている。しかし、ここではセメント生産および生コン生産の二部門において逆の傾向を示している。これは次に示す両分析法の廃棄物副産物の取り扱いの差異が影響しているものと思われる。積み上げ法では、そのプロセスで消費される全ての物質について考慮し分析を行うため、廃棄物副産物の投入も他の資源などと同様に取り扱う。一方、産業連関分析法では、分析に用いられる産業連関表がアクティビティーベースの分類により作成されることから、原則として一部門に一つの生産物を対応させる必要がある。よって、主生産物以外に生産技術上必然的に産出される屑や副産物の取り扱いが問題となり、現在は主にマイナス投入 (ストーン方式) で扱われ、発生額はいずれの生産額にも含まれず、廃棄物副産物 (副次生産物以外) は総生産額上評価されないことになる。つまり、産業連関分析法では廃棄物副産物 (副次生産物以外) による経済活動を分析に加えることができないため、積み上げ法による分析結果を下回る値になったといえる。セメント生産における廃棄物副産物利用量を (表 - 4) に示し、セメント生産の廃棄物副産物利用による影響をみる。質量 (燃料以外) 消費をみると、セメント生産に投入された質量約 12,000 (万 t)⁹⁾ に対し廃棄物副産物利用は約 2,300 (万 t) と 19% をしめる。また熱量消費をみると、全熱量約 7,100 (10¹⁰kcal) に対し約 200 (10¹⁰kcal) と 3% をしめる。つまり、セメント生産における廃棄物副産物利用によって、これだけの質量および熱量の影響があったと考えられる。生コンクリート生産においても高炉スラグや再生骨材などの投入があり同様の影響があると思われる。

表 - 4 セメント生産における廃棄物副産物利用量¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

(万t)	
廃棄物副産物名	利用量
高炉スラグ計	1,540
除冷スラグ	257
急冷スラグ	1,283
転炉スラグ	75
銅からみ	123
石炭灰	202
排脱・化学石膏	230
ボタ	160
廃白土	4
廃タイヤ	11
再生油、廃油	14

次に、コンクリート塊の廃棄・再利用について記述する¹⁸⁾¹⁹⁾。近年、最終処分場不足などから、膨大なコンクリート構造物蓄積より生じるコンクリート塊の処理問題が言われるようになってきている。また、ロンドン条約などに則り 1996 年 1 月より建設廃材の海洋投棄が原則禁止となり、それに伴い不法投棄の増加が予想される。さらに、骨材資源問題、自然破壊問題などを考えると、今後さらにコンクリート塊の再利用が進むことが望まれる。

建設発生土以外の建設副産物排出量および再利用処理量とそのシェア、コンクリート塊工事種類別排出シェア、設置主体別産業廃棄物最終処分場残余容量を（表 - 5）（表 - 6）（表 - 7）に示す。

表 - 5 建設発生土以外の建設副産物排出量および再利用処理量とシェア²⁰⁾

建設副産物の種類	排出量 (万t)	再利用		減量化		処分	
		(万t)	(%)	(万t)	(%)	(万t)	(%)
コンクリート塊	2,540	1,220	48.0	0	0.0	1,320	52.0
アスファルト・コンクリート塊	1,760	890	50.6	0	0.0	870	49.4
建設汚泥	1,440	110	7.6	180	12.5	1,150	79.9
建設混合副産物	950	130	13.7	160	16.8	660	69.5
建設発生木材	750	230	30.7	190	25.3	330	44.0
その他（廃プラスチック、紙屑、金属屑等）	150	60	40.0	0	0.0	90	60.0
全国計	7,590	2,640	34.8	530	7.0	4,420	58.2

建設発生木材の処分量には一般廃棄物の焼却施設での処分を含む。

コンクリート塊の発生量は建設発生土以外の建設副産物排出量の 3 分の 1（2,540 万 t）で、54%が建築物の解体により排出されている。うち 1,220（万 t）（48%）が再利用されており、用途としては約 3 分の 2 が再生砕石、約 3 分の 1 が再生砂として利用されている。再生砕石は建築工事および道路工事で、再生砂は埋戻材料などに主として利用されている。1993 年 4 月現在の最終処分場の残余容量は 20,065（万 m³）で年間要埋め立て処分量より試算すると残余年数は 2.3 年となっている。

近年、建設副産物対策連絡協議会において「リサイクルプラン 21（建設副産物対策行動計画）」が策定された。プランによると 2000 年においてコンクリート塊の再利用率 90%を目標にしている。これを（表 - 5）にある 1990 年の実態に当てはめると、再利用量が 2,286（万 t）、処分量が 254（万 t）となる。つまり 1,066（万 t）の処分量削減となる。これは、コンクリートの比重を 2.3 とし試算すると、約 460（万 m³）の最終処分場容積の使用削減効果となる。この削減量は、（表 - 7）の安定型最終処分場の 8%、大阪湾フェニックス処分地の産業廃棄物予定受入量約 2,340（万 t）の 20%に相当する。

コンクリート塊の発生量は、コンクリート投入量から推察すると上記の値よりはるかに多いはずであるし、建設混合副産物中にもかなりの量が含まれていると思われる。また、再利用の用途がクラッシュランの代用品としての利用に依存していることから、再生材の受け入れ先が再生プラントから長距離化するなどの問題も予想される。今後、コストがバージン材に比べて高い事、品質のばらつきがある事、供給体制が不整備である事などの問題解決、コンクリート骨材としての利用など再利用の用途多様化、現場での分別の徹底が必要となる。セメント・コンクリート系としての観点からみると、コンクリート塊の再利用が進むことによってセメント原料等として使用されている産業副産物の高炉スラグやフライアッシュなども有用性を保持し続けることにもなる。

4. 今後の課題

セメント・コンクリートをエネルギー消費（二酸化炭素排出）という観点からみると、セメント生産が非常に大きなシェアをしめる結果となった。しかし、水資源消費という観点からみると、資源採掘および採取の際の散水・洗浄、生コン生産の原料としての水使用、ミキサー車の洗浄などによりエネルギー消費とは違った結果が予想される。

今後の課題としては、上記の他に セメント生産後の生コン生産以外のプロセス（セメント製品生産など）

表 - 6 コンクリート塊の工事種類別排出シェア²¹⁾ (%)

工事種類	シェア
河川	4.0
道路	11.8
農林水産	2.5
下水道	3.0
土地造成	1.9
鉄道	2.0
鉄道	1.5
新築	11.9
解体	54.3
その他	7.1
計	100.0

表 - 7 設置主体別産業廃棄物最終処分場残余容量²¹⁾ 1989年4月1日現在 (万トン)

処分場の種類	事業者	処理業者	公共	合計
遮断型	0.5	1.3	0.6	2.4
安定型	403	4,723	371	5,497
管理型	3,516	3,198	4,820	11,534
合計	3,920	7,922	5,192	17,034

法第15条第1項の届出をした施設である。

産業廃棄物と一般廃棄物をあわせて埋立処分している最終処分場は、管理型処分場を含む。

公共は、地方公共団体、地方公共団体の行う上下水道・工業用水道事業および公共関与している法人である。（厚生省調べ）

および建設工事、コンクリート塊の廃棄・再利用各プロセスの分析を行う、セメント生産における廃棄物副産物利用プロセスにおいて、再利用燃料（廃タイヤなど）の利用に伴う二酸化炭素排出量および再利用資源によるバージン資源の種別（石灰石など）の削減量の算出を行い、それによる資源採取削減効果などを考慮する、コンクリート塊の再利用による処分場容積削減効果を具体的な指標（処分場建設の際のエネルギー量など）で表す、などが挙げられる。また、他の資源などからの分析による結果と複合させることによって、明確な総資源消費の概念の形成をしていきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 柳沢幸雄・外岡豊・稲葉敦：「GRCによる人間活動の環境基礎負荷量の評価」,第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集p261～266（1994）
- 2) 近藤美則・森口祐一・清水浩・石谷久：「素材生産に伴う二酸化炭素の排出原単位と自動車生産過程への適用」,第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集p309～314（1992）
- 3) 通商産業省：「平成3年電力受給の概要」
- 4) 環境庁：「二酸化炭素排出量調査報告書」（1992）
- 5) 資源エネルギー庁：「平成5年版総合エネルギー統計」
- 6) 通商産業省：「1990年産業連関表取引基本表」
- 7) 総務庁：「1990年産業連関表計数編(2)」
- 8) 通商産業省：「平成3年資源統計年報」
- 9) 通商産業省：「平成2年窯業・建材統計年報」
- 10) 運輸省：「平成3年版陸運統計要覧」
- 11) 運輸省：「平成7年版運輸関係エネルギー要覧」
- 12) 通商産業省：「平成2年生コンクリート統計年報」
- 13) 通商産業省：「平成2年砕石統計年報」
- 14) 日本建築学会・材料施工委員会・鉄筋コンクリート工事運営委員会・骨材賞委員会・実態調査ワーキンググループ：「コンクリート用骨材に関する全国調査結果」,セメント・コンクリートNO.529 p20～33（1991）
- 15) 鉄鋼スラグ協会：「鉄鋼スラグ統計年報」（1995）
- 16) 飯塚州一：「セメント工場における産業廃棄物・副産物の利用」,セラミックス27 NO.11 p1061～1065（1992）
- 17) セメント協会：「セメント製造業の概要と産業廃棄物の利用」
- 18) 友澤史紀：「コンクリートの完全リサイクル化に向けて」,セメント・コンクリートNO.578 p1～8（1995）
- 19) 木下正明：「産業廃棄物処理行政の現状と今後の課題」,環境技術vol.25 NO.1 p60～65（1996）
- 20) 建設副産物対策近畿地方連絡協議会：「建設副産物対策ハンドブック」,大成出版社（1994）
- 21) 本多淳裕・山田優：「建設副産物・廃棄物のリサイクル」,(財)省エネルギーセンター（1994）