

マテリアルフロー分析を用いたセメント・コンクリート産業の環境負荷評価

Application of Material Flow Analysis on Environmental Impact related to Cement and Concrete Industry

天野耕二* 村田真樹**

Koji AMANO* , Masaki MURATA**

ABSTRACT : In this study, we assessed environmental impact related to cement industry, concrete industry and several industries using limestone by Material Flow Analysis. Especially, cement industry and concrete industry were assessed by Material Flow Accounting, and calcium was assessed which is principal ingredient of limestone by Material Balance Analysis. The obtained results are : Firstly, environmental impact index(DMI,HMF,TMR) related to cement industry and concrete industry was calculated from 1990 to 1994 by Material Flow Accounting. From these index, direct inputs of natural resources to each industry were found and potential of environmental impact that was caused by producing action of each industries could be assessed. Secondly, limestone flow both direct input and indirect input to cement industry and concrete industry was obtained in 1994. From this flow, utilization and consumption of limestone was found, and total evaluation of effective use of limestone was possible. Furthermore, we verified material flow analysis from the obtained result.

KEYWORDS: Material Flow Accounting, Direct Material Input(DMI), Hidden Material Flow(HMF), Total Material Requirement(TMR), Material Balance Analysis

1 はじめに

大量の物資に特徴づけられた今日の経済社会と環境問題との関係を分析する上で、自然環境と経済活動の間、及び様々な経済主体間の物資やエネルギーの流れを定量的に把握することが不可欠であり、そのための新しい環境評価手法としてマテリアルフロー分析が挙げられる。マテリアルフロー分析は、対象とする物資の流れを定量的に分析し、その値より環境への潜在的なリスクを間接的に評価するものである。そこで本研究では大量生産・大量消費型産業として挙げられ、社会資本形成において最も重要な素材を産出しているセメント・コンクリート産業を対象として、マテリアルフロー分析を用いた評価を試みた。また、セメント・コンクリートの原料の中で、石灰石はその生産のために年間総消費量約 2 億トンのうち、約 1 億 6 千万トン消費されており、消費に伴う環境への様々な負荷も二酸化炭素排出源となるなど大きいと考えられる。そこで、セメント・コンクリート産業全体についての分析を行うだけでなく、石灰石についても着目して分析を行った。

分析においては、マテリアルフロー分析の考え方に基づく 2 つの評価手法を用いてセメント・コンクリート産業、石灰石の評価を行った。まず、1 つめにはマテリアルフロー勘定を用いてセメント産業と、コンクリート産業、その中でも特にセメントの需要の約 7 割を占める生コンクリート産業における、経済活動に表れない物資の

* 立命館大学理工学部 Department of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

**京都大学環境保全センター Environmental Preservation Center, Kyoto University

流れを含んだ自然界から直接投入される資源の消費量の算出を行った。2つめとしてはマテリアルバランス分析を用いて、セメント・コンクリート産業に関連した石灰石の資源の流れを詳細に把握を行った。石灰石の投入は直接投入と他の産業から投入される間接投入とがあり、直接・間接投入の把握より、石灰石の資源の流れ、収支についての把握を行った。しかし、石灰石は様々な産業に投入されており、各産業から出される間接投入が複雑なフローを形成していることから、石灰石の投入量のみからフローの作成は困難である。そのため、石灰石の主成分であるカルシウムに着目して分析を行い、それを用いてセメント・コンクリート産業を中心とした各産業間の石灰石の収支フローを作成した。

以上のようなことから、セメント産業とコンクリート産業に関するマテリアルフロー勘定、セメント・コンクリート産業に関連した石灰石のマテリアルバランス分析を行い、あわせて結果より分析手法の検証を試みた。

2 手法について¹⁾²⁾³⁾

マテリアルフロー分析とは、ある着目した系に投入される資源やエネルギーと、系から産出される製品、副産物、廃棄物、汚染物質などについて、その総量や特定の物質の量、これらの収支バランスを、体系的・定量的に把握する手法の総称である。

マテリアルフロー分析の中でもマテリアルフロー勘定では自然環境から人間活動圏への物質の投入フロー量に目を向けている。これは、資源の枯渇や分配といった問題に目を向けるとともに、投入されたものは全て潜在的に廃棄物になりうるということ、一般に物質フローに付随して様々な環境負荷が発生するという点について考慮したためである。

マテリアルフロー勘定では、対象として取り扱うフローの中に、鉱業活動や建設活動による土壌の掘削や、農業生産による土壌の浸食などの、『土の移動』を加えている。これは土の移動が、生態系や景観の破壊と結びついているという理由からである。また、輸入されている鉱物などの原材料について、相手国でそれらを自然環境から取り出して輸出されるまでに発生する、間接的なマテリアルフローを輸入している国の勘定に加えている。特に石炭や金属鉱物の露天掘りで掘削される覆土や採鉱、選鉱、精練による廃棄物などを重要な要素として取り上げている。

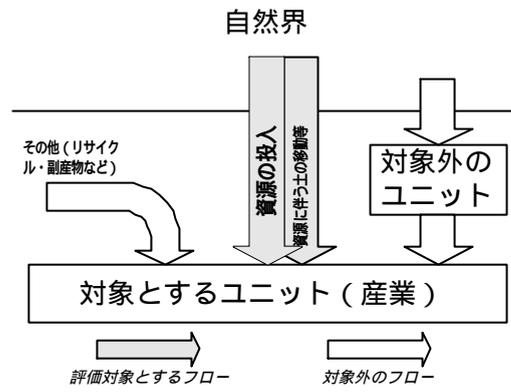


図1 マテリアルフロー勘定の概念図

このようにして計算される人間活動への資源の総投入量は TMR(Total Material Requirement: 総資源必要量)と名付け、その中でも原材料などの直接投入されるフロー量を DMI(Direct Material Input: 直接資源投入量)、土の移動や輸入に伴う間接的なフロー量を HMF(Hidden Material Flow: 経済活動に表れないDMIに付随したフロー量)と区別している。(図1参照)

マテリアルバランス分析とは、日本語により表現すると物質収支分析を表わすことができる。この分析の手法としては、対象とする物質のある系におけるインプットとアウトプットの収支を計り、そのフローの把握を行うというものである。分析により得られたフローは様々な目的に活用することができる。本研究においては、先述したように対象としているセメント・コンクリート産業に関連した石灰石のフローをカルシウムのフローを追うことから把握することを目的としてマテリアルバランス分析を行った。

3 分析対象

研究の対象とするのはセメント産業と生コンクリート産業に投入される資源である。具体的にはセメント産業では、石灰石、粘土質原料(頁岩、カオリン等)、シリカ質原料(ケイ石、白土等)、石膏などであり、生コンクリート産業では骨材(碎石、砂利、砂等)である。対象年度は、セメント産業と生コンクリート産業のマテリアルフロー

勘定については1990年度から1994年度、石灰石のマテリアルバランス分析については1994年度である。

表1 セメント産業におけるマテリアルフロー勘定結果(単位:千t)

		1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度
石灰石	DMI	91,570	95,180	100,969	99,433	100,694
	HMF	5,023	5,221	5,538	5,454	5,523
粘土	DMI	13,502	12,190	13,357	12,732	13,843
	HMF	2,383	2,151	2,357	2,247	2,443
ケイ石	DMI	4,580	4,615	5,098	5,115	5,429
	HMF	241	243	268	269	286
天然石膏	DMI	965	1,037	977	1,023	1,024
石炭	DMI	9,270	9,553	10,024	9,288	9,509
	HMF	68,945	71,834	75,682	70,415	72,382
重油	DMI	0.268	0.260	0.265	0.323	0.328
DMI合計		119,824	122,575	130,425	127,591	130,500
HMF合計		76,591	79,499	83,846	78,386	80,634
TMR		196,415	202,024	214,271	205,977	211,133
セメント生産実数		89,431	92,046	96,212	94,886	97,641
DMI/生産実数(t/t)		1.340	1.332	1.356	1.345	1.337
TMR/生産実数(t/t)		2.196	2.195	2.227	2.171	2.162

4 分析結果

分析結果は表1、表2、表3及び図2に示す通りである。

生コンクリート産業のHMFについては、骨材として投入される砕石や砂利、砂などはすべて表土や表層のものを用いられていることから発生しないものとし、ゼロとして勘定している。

表4-3に示しているDMI(セメント)とTMR(セメント)は表4-1において求めた、セメント1t当たりの各原単位を用いて、生コンクリート産業に投入されたセメントが潜在的に持っていたDMIとTMRを算出した値である。

表2 生コンクリート産業におけるマテリアルフロー勘定結果 (単位:千t)

		1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度
骨材	DMI	322,781	309,755	274,770	257,519	260,678
TMR		322,781	309,755	274,770	257,519	260,678
生コンクリート出荷量(千m ³)		172,088	165,087	146,698	138,211	140,347
TMR/出荷量(t/m ³)		1.876	1.876	1.873	1.863	1.857

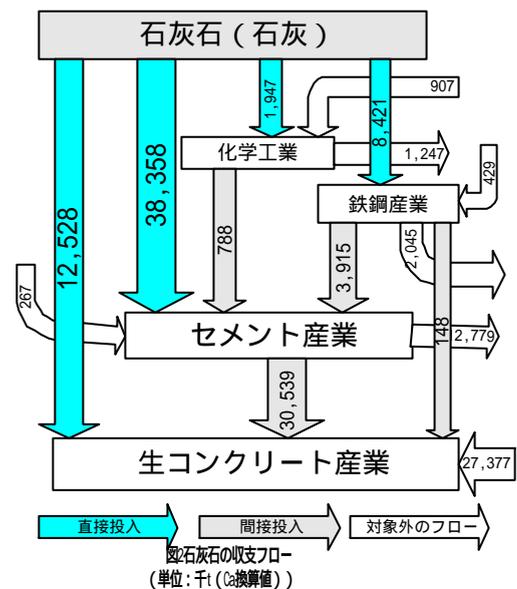
5 考察

5.1 セメント産業について

DMI、HMF、TMRの各指標の値が、5年の間大きな変動を示していないことから、セメント産業において少なくとも対象とした期間に省資源化の動きが少なかったことがわかる。また、セメント産業は静脈産業と呼ばれる産業であるが、各指標の値としてみると大量の自然資源が消費されていることが分かる。しかし、セメントはインフラ整備の上でその中心となる物資であり、今後その生産が減少していく可能性も低く安定した生産を続けていくと考えられる。また、生産工程においてかなり画期的な技術革新が起こらない限り生産に必要な単位生産当たりの原料(DMI)要求量も減少することはないと考えられる。よって、この産業においてDMI、TMRを減少させ自然資源消費を減少させるには、今以上に他の産業から多くの副産物を受け入れることが省資源化への対策だと現状では考えられる。ただ、これに関しても副産物を生成している産業の生産状況に左右されるため、安定した供給が得られるかどうかということに関しては疑問が残る。従って、セメント産業に関しては、現在DMI、HMF、TMRの各指標の値を減少させることは困難と考えられる。これより、自然資源の消費に付随して起こっているであろう環境負荷についても削減されることは難しいといえる。

表3 生コンクリート産業におけるマテリアルロー勘定結果 (単位:千t)

	1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度
生コンクリート出荷量(千m ³)	172,088	165,087	146,698	138,211	140,347
DMI(生コンクリート)	322,781	309,755	274,770	257,519	260,678
DMI(セメント)	67,363	64,187	58,012	54,169	54,852
DMI計	390,144	373,942	332,782	311,688	315,530
DMI計/出荷量(t/m ³)	2.267	2.265	2.268	2.255	2.248
TMR(生コンクリート)	322,781	309,755	274,770	257,519	260,678
TMR(セメント)	110,395	105,773	95,274	87,435	88,698
TMR計	433,176	415,528	370,044	344,954	349,376
TMR計/出荷量(t/m ³)	2.517	2.517	2.522	2.496	2.489



5.2 コンクリート産業について

本研究で得られたDMI、TMRの値より生コンクリート産業においては大量に自然資源(骨材)が投入されていることが分かる。その値をセメント産業と比べてみると、DMIで2.0倍から2.7倍、TMRで1.2倍から1.6倍となっている。また、得られたDMI、TMRの値は1990年度から1994年度までの間に顕著な減少を示しているが、これは主として生コンクリート自体の生産量の減少に起因するものである。しかし、最近の砂利の採取可能地域減少、山林減少などの状況を考慮しても、生コンクリート産業においては廃コンクリートがら使用等の省資源化の動きを現状以上に促進させることにより、潜在的な環境負荷の発生を低減できるものと考えられる。また、生コンクリート産業には大量のセメントがセメント産業から投入されている。そこで本研究では従来のマテリアルフロー勘定から拡張したものとして生産量当たりの原単位の作成を行い、生コンクリート産業の評価を行う際に、セメントが潜在的どれだけの自然資源消費を持つか、つまり、生コンクリート産業に投入されるためにどれだけの自然資源が消費されているかを原単位より算出し結果の中に示した。これにより、生コンクリート産業だけで算出したDMI、TMRと比べ原単位にして約0.5tから0.6tほど増加した値を得た。これは本来のマテリアルフロー勘定を用いた環境負荷評価を少し拡張するものであるが、原単位を用いて産業としての全TMRを明らかにすることにより、生コンクリート産業がもつ環境負荷発生への可能性をより明らかに表すことができるものとする。

5.3 石灰石の収支フローについて

カルシウムのフローをもとにして作成した石灰石の重量に換算した石灰石の理論収支フローを図3に示す。

まずセメント産業に注目すると、セメント産業に対して投入されたカルシウムのうち石灰石を起源とすると考えられるものは 4.31×10^7 tであり、これを石灰石の重量として換算し直すと 11.30×10^7 t(石灰石を起源とする石灰石必要量)となる。すなわち、他の産業からの副産物等無しに石灰質をセメント産業が受け取るためには 11.30×10^7 t必要ということになる。また、セメント産業に投入されているカルシウムの総量は 4.33×10^7 tであり、これを石灰石に換算すると 11.37×10^7 t(セメント産業全体としての石灰石必要量)となる。これに対し、実際に投入された石灰石の量は 10.07×10^7 tであり、石灰石を起源とする石灰質必要量、セメント産業全体としての石灰質必要量、どちらの値にとっても約9割を直接投入が占めることになる。また、

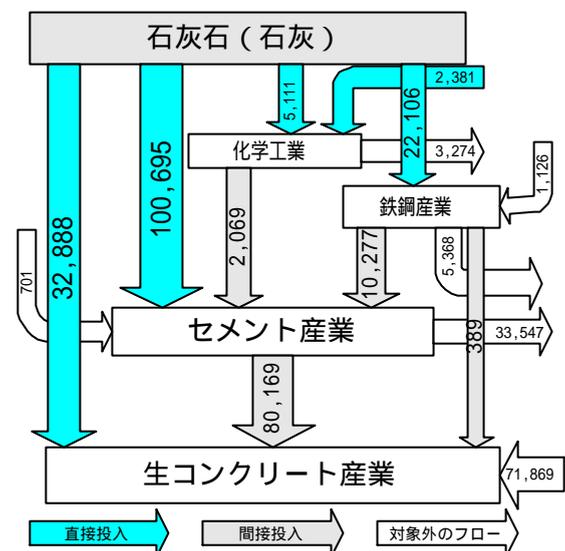


図3石灰石の理論収支フロー
(単位:千(石灰石換算値))

1994年度の石灰石出荷量の総量は 19.85×10^7 tであり、この総量のうち直接投入は約5割、石灰石を起源とする石灰石必要量、セメント産業全体としての石灰石必要量はともに総量の約6割を占めることになる。さらに、1994年度のセメント産業全体のDMI中で石灰石のDMIが占める割合は約8割であり、セメント生産において石灰石(石灰質)は主要な原料であるといえる。これより、セメント産業について副産物投入量の多い静脈産業であるとい一般的にはみられているが、石灰質(カルシウム)に限ってみると全必要量の約9割は石灰石の直接投入であり、他の産業を通じた間接投入は全体の約1割程度しかないことがわかる。従って、セメント産業は石灰石については自然資源消費型の産業であるといえる。また、これらの結果を用いるとセメント産業のみが産業として生産を行っていた場合の石灰石使用に付随したHMFを求めることも可能となる。分析結果の中で用いた石灰石に関するHMFの算出方法を用いると、石灰石を起源とする石灰石必要量 11.30×10^7 tの場合のHMFは 6.20×10^6 t、セメント産業全体としての石灰石必要量 11.37×10^7 tの場合は 6.24×10^6 tとなる。これらの値はセメント産業に関するマテリアルフロー勘定結果において求めた石灰石のHMFと比べて約 7.00×10^6 tあまり大きな値になっている。これが示すことはセメント産業が、もし他の産業や他の物質からカルシウムを受け取らず、石灰石のみでカルシウムを賄っていった場合、現状と比べて約 7.00×10^6 tも多くHMFを起こすということである。言い換える

と他の産業を介して投入されているためセメント産業の背負うべき量としては計上されていなかったが、実際にセメント産業が生産を行っていく上ではマテリアルフロー勘定で求められた HMF よりも少なくとも 7.00×10^6 t 多いということになる。つまり、LCA(ライフサイクルアセスメント)的な評価になるが、厳密にセメント生産に伴うマテリアルフロー勘定の考え方に基づいた環境負荷はこの 7.00×10^6 t も含むということになり、5.1で述べた環境負荷発生の可能性についても実際はより大きくなるといえる。

次に生コンクリート産業について見ると、生コンクリート産業に投入されたカルシウムのうち石灰石を起源とすると考えられるものは 4.32×10^7 t であり、石灰石に換算し直すと 11.34×10^7 t (石灰石を起源とする石灰石必要量)となる。また、生コンクリート産業に投入されたカルシウムの総量は 8.31×10^7 t であり、石灰石に換算すると 21.82×10^7 t (生コンクリート産業全体としての石灰石必要量)となる。これに対し、直接投入された石灰石は 3.29×10^7 t であり、石灰石を起源とする石灰石必要量に占める直接投入の割合は約3割、生コンクリート産業全体としての石灰石必要量に占める直接投入の割合は1割5分程度となった。また、1994年度の石灰石出荷量の総量 19.85×10^7 t 中に占める生コンクリート産業への直接投入の割合は約2割、石灰石を起源とする石灰石必要量の割合は約6割となっており、生コンクリート産業全体としての石灰石必要量については石灰石出荷総量より約 2.00×10^7 t ほど多い。しかし、次のようなことも考慮する必要がある。まず、ひとつめとしては、セメントと比べて生コンクリート産業全体としての石灰石必要量はかなり膨大であるが、生コンクリート生産全体のDMI中を石灰石のDMIが占める割合は約1割と少ないということである。また、生コンクリート産業における原料としての石灰石の位置づけ(砕石として使用)も考慮すると生コンクリートの原料の中において石灰質は主たるものではないことが分かる。ふたつめとしては、セメントが生コンクリート産業に運ぶカルシウムの量は 3.05×10^7 t であり、石灰石に換算すると 8.02×10^7 t となるということである。これが、生コンクリート産業全体としての石灰石必要量の中に占める割合は約4割である。従って、産業全体としての石灰必要量が多い理由としては生コンクリート産業に投入されるセメント中のカルシウムが多いと考えられる。このようなことより生コンクリート産業は石灰質(石灰石)に関しては自然資源消費の少ない産業であるといえると評価することができる。

6 まとめ

6.1 マテリアルフロー勘定について

5.1及び5.2において実際に対象を設定してマテリアルフロー勘定を用いて環境負荷評価のための指標を求めたわけであるが、今回の分析を通して次のようなことが明らかになった。

ひとつめとしては、産業への資源の投入のみを対象とするため、LCAと比べてデータの収集が容易になっており、さらに収集したデータから指標を作成する段階ではLCAのような重み付け等を行わないので、指標の算出にもあまり時間を要しないということである。これより、マテリアルフロー勘定を用いることにより、LCA等の環境評価手法と比べ短時間で容易に指標を得られることになる。従って、迅速に評価を行うためには適した手法であると考えられる。また、マテリアルフロー勘定で得られる指標は、詳細な環境負荷に関する評価を実施することは不可能であるが、環境負荷発生の可能性の大きさを評価することは可能であることから、何らかの環境負荷の発生を探る前の事前分析としても有用であると考えられる。さらに、マテリアルフロー勘定で得られた指標やデータをもとにして後から重み付けを行うことも可能であり、LCAのような総合的な環境評価を行うことも可能となる。また、資源の投入以後のデータを補完すれば、そのままLCAへと拡張して行く事も可能である。

ふたつめに、本研究における試みとして、ある産業が製品を生産するために必要とされるTMRなどの各指標の原単位を作成した。この指標を用いることによって、製品が潜在的に持つTMRなどの各指標を明らかにすることが可能となった。すなわち、他の産業でその製品を使用する場合、製品が投入されるだけでは現れない環境負荷に関する評価が原単位を用いることによって可能となるということである。この原単位を様々な製品について作成すれば、関連する多くの産業や地域等の環境負荷評価をかなり掘り下げて行うことが可能となる。

マテリアルフロー勘定の問題点としては、マテリアルフロー勘定による環境負荷評価の特徴であるHMFの扱

いがあげられる。特に、HMF 中の覆土に関しては現在の日本のさまざまなデータベースではどの程度の移動が起こっているかを把握することは困難であることがわかった。そのため、本研究で対象としているセメント産業、生コンクリート産業両方の産業について覆土については不十分な評価になっている。しかし、HMF において覆土は大きな割合を占めることが予想されているため、何らかの方法で算出することができなければ正当な評価を行うことが極めて困難となる。従って、毎年の覆土を算出することは不可能でも、5年に一度くらいの頻度で覆土に関する原単位の作成を行うことがマテリアルフロー勘定等を用いて、幅広く環境負荷を評価していく上では重要である。また、マテリアルフロー勘定で算出する各指標が直接環境負荷を評価するものではなく、環境負荷発生の可能性の大きさを示すものであるということから、様々な産業に関する分析結果を組み合わせなければ、どの程度環境負荷発生の可能性のある産業プロセスであるかということが判断できない。このような問題を解決していくためには、より多くの産業プロセスについて分析結果が作成されていくことを期待する以外にない。

6.2 マテリアルバランス分析について

本研究では石灰石の主成分であるカルシウムに着目して収支分析を行ったのであるが、それにより、以下のようなことが明らかとなった。

特定の物質に関して様々な産業にわたって分析を行うため、対象とするものの流れにあわせてその使用形態の把握も可能となり、また、別のものに変えられていても主成分を追うことにより、知りたいところまで分析して行くことが可能であるということがわかった。従って、マテリアルバランス分析を行うことにより、対象とする物質がどの程度有効利用されているのかどうかということや再利用・再使用の可能性の検討などに有用であると考えられる。また、5.3において行ったようにマテリアルフロー勘定で算出したある単一のもの(原料)に関するDMI、HMF、TMRを用いてそのものについての各指標の原単位を作成すれば、マテリアルバランス分析で把握できたフローに関して対象とする物質のフローだけではなく環境負荷に関してもある程度の評価を与えることが可能になる。つまり、マテリアルフロー勘定とオーバーラップさせてマテリアルバランス分析を行えば、幅のある評価を行うことが可能となる。

マテリアルバランス分析の問題点としては、マテリアルフロー勘定と同様にどこまで詳細なデータに基づいた分析を行えるかどうかということである。対象とする物質について多岐にわたって分析を行うに際しては、データの不足や開示されているデータが作成元によりかわってくることやデータの表示の仕方(暦年または年度、出荷先の表現方法など)などの様々な問題が生じる。これらの問題点を解決することができればマテリアルバランス分析は、特定の物質に関する環境面での評価手法としては極めて有効であると考えられる。

最後に本研究を行うにあたり、マテリアルフロー分析について丁寧にご教示くださった国立環境研究所 森口祐一氏に厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 森口祐一、吉田雅哉；マテリアルフロー勘定と資源輸入の環境負荷分析，第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集、37 - 42 (1997)
- 2) ALBERT ADRIAANSE ,STEFAN BRINGEZU ,ALLEN HAMMOND ,YUICHI MORIGUCHI ,ERIDC RODENBURG , DONALD ROGICH ,HELMUT SCUTZ ;RESOUCE FLOW : THE MATERIAL BASIS OF INDUSTRIAL ECONOMIES , WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI) (1997)
- 3) 森口祐一；マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷，環境システム研究論文発表会誌、Vol 25 , 557 - 568 (1997)
- 4) 社団法人セメント協会編；セメントの常識 (1994)
- 5) 社団法人日本セラミックス協会編；セラミック工学ハンドブック 819 - 825 ,836 - 837 ,894 - 895 ,901 - 969 技報堂 (1989)