論説

リサイクルからリサーキュレーションへ^{*} —土の水熱固化体・ソイルセラミックス^{a)}の開発—

石 田 秀 輝¹

Transition from the Recycle to the Recirculation Based Society

— Development of hydrothermally solidified soil · Earth Ceramics —

by Hideki E. ISHIDA¹

1. General Manager, Dr. Eng., Human Design Research Center, INAX Corp., Tokoname-shi 479-8588

The global environment is now exerting great influence on our life. It is not an overstatement to say that there would be no meaning in developing new materials unless due consideration is given to the load they exert on the global environment.

We have been studying a new manufacturing system which is based on both mankind and earth in the coming unavoidable recirculation based society.

One of the solutions is to develop the closed manufacturing system which creates the material where input (fossil energy and natural materials) and output (exhaust gases and waste materials) will be reduced to their utmost limits.

In this report, as one of the examples of developing the material considered for both mankind and earth, details of the development and its actual results on the application of hydrothermally solidified soil (Earth Ceramics) to a house floor are discussed. This was developed from the research on the closed manufacturing system.

Originally, soil has high abilities such as controlling humidity, preserving heat and so on. It is possible to solidify soil by adding slight amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mixing, forming and then processing under saturated steam pressure at lower than 200 °C where the original ability of soil is maintained. The solidified material has similar strength to that of ordinary cement and its energy consumption for solidification is almost 1/5 to 1/7 of ceramic manufacturing in general.

This solidified material has high humidity controlling ability and relatively high heat capacity and it is possible to control a room climate in a sophisticated way without using fossil energy. After one year application to a house, it was clarified that the application of Earth Ceramics can reduce energy in everyday life almost by 25 %.

KEY WORDS : Global Environment, Recirculation Based Society, Closed Manufacturing System, Soil, Hydrothermal Processing

1. 地球環境と「もの」造り

地球環境はいま、我々の生活に大きな影響を及ぼし始めた。地球温暖化、砂漠化、オゾン層の破壊、酸性雨…これら多くの環境問題は、その根底に「工業先進国の地球規模での経済活動の拡大」と「開発途上国における人口増加」という2つの問題を抱え、社

会構造の大幅な見直しを迫っているように思える。

1972年に発表された“The Limit to Growth” (Meadows et al., 1972) (邦訳：成長の限界—ダイヤモンド社)は、地球の有限性を指摘し、世界を震撼させはしたが、結果的には多くの人たちにとってベストセラーの一冊にとどまった。それから、20年、1992年2月、同じくMeadowsらは“Beyond the limits” (Meadows et al., 1992) (邦訳：限界を超えて—ダイヤモンド社)を発表した。それは、もし我々がこのまま何も対策をとらない場合、現在の経済は2020年頃まで成長できるかもしれないが、その後、様々な限界のために成長は止まり、2100年には完全に崩壊することを示し、同時にこれを補完するに余りある多くの結果が発表された (例えば、Brown and Kane, 1994; ワイツゼッ

* 1998年4月30日受付 6月2日受理

1. 工博 (株)INAX 空間デザイン研究所 所長

〔著者連絡先〕FAX 0569-43-4886 (INAX・空間デザイン研究所)

キーワード：地球環境、循環型社会、クローズド生産システム、土、水熱処理

a) (株)INAXはセラミックスを中心とする建材や水周り商品を提供している会社です。また、ソイルセラミックスは(株)INAXの土の水熱固化体の商品名です。

図1 循環型社会

カー、1994 など)。これらの報告は、材料を研究する我々に、少なくとも筆者らには強烈なカルチャーショックを与えた。

同じく、1992年6月、ブラジルで開催された「環境と開発に関する国連会議」(UNCED) (地球サミット) では、「リオ宣言」とそれに基づく行動計画としての「アジェンダ21」が採択された。この行動計画は「持続可能な21世紀を目指した人類の行動計画」を副題に、第3章には根本的な経済行動変革の必要性が示されている(通産省資料調査会、1994)。人間活動の中で、最も環境に負荷が掛かっているのは経済活動や産業活動である。これらの活動は物質やエネルギーの流れであり、持続可能な社会構築のためには「循環型社会」(環境庁リサイクル研究会、1991)の構築が不可欠であるらしい。これは、先進国の基本構造である消費型経済の否定であり、かつて経験したことのない社会の構築を意味する。地球環境問題が21世紀最大の社会構造変化を引き起こすといわれるゆえんであり、生活や企業活動の大きな変化にとどまらず、もの造りの基本概念に大きな変革を迫られることになる。

ここでは、循環型社会を前提に筆者らが1992年から、企業技術者の立場で取り組んでいる、人と地球を考えた「もの」造りの一例として、土の水熱固化体の開発とその基本的な考え方についてまとめてみたい。

2. リサイクルからリサーキュレーションへ

人間は、文明を持ったときから自然生態系との間に境界を造ってしまった。人は自然からの搾取無くしては生活を維持できない。搾取とその結果としての放出は、産業革命以後急激に増加し、それは自然の循環レベルを遥かに超えるものとなり、結果として、人類維持に深刻な影響を与え始めた。「自然にやさしく」、「環境との共生」これらの言葉は、自然生態系との関わりを正しく認識しているとはいえない。人は自然を制御できないし、自然に生かされていることを、新しい社会の中では、まず認識する必要がある。

循環型社会とは、自然生態系からの搾取(インプット:化石エネルギー、原材料)と自然生態系への投棄(アウトプット:排ガス、廃棄物)を可能な限り減じ、投入されたインプットを人間生態系で循環再生させようとする社会である(図1)。

実際には、報告されている環境施策を見る限り、多くのものが廃棄物(アウトプット)削減のためのリサイクルにのみ目が向けられている。無論、第1ステップとして廃棄物を出さないという思想を否定するものではないが、リサイクルのために大量のエネルギー(インプット)が投入されているのが現実である。結果と

図2 人と地球を考えた新しい材料・商品開発

表1 材料合成に必要なエネルギー(Tan et al., 1987をもとに筆者らにより一部加筆修正した)

工業材料	製造エネルギー 比率単位容積	CO ₂ 排出量比率	
		単位重量	単位製品価格
陶磁器	1.0	1.0	1.0
セメント	0.5	1.4	15.8
ガラス	1.6	1.7	1.6
樹脂 (ポリスチレン)	3.3	3.2	3.2
鉄鋼	10.4	3.1	4.3
アルミニウム	17.2	8.9	2.1

して、リサイクルはコストが掛かると誤解されている旨が多い。循環型社会の中での生産活動の設計にはトータルのマテリアルバランスを考えなければならない。アウトプットを低下させるために大量のエネルギーを投入するのではなく、インプットを下げることによってアウトプットを下げ、さらにアウトプットとなる可能性のある材料やエネルギーから新たな材料を合成してゆく必要がある。特に、自然生態系の循環(バクテリアによるアウトプットの分解促進など)を利用し難い無機材料の場合、リサイクルからリサーキュレーション(再循環)へ発想を変える必要がある。

では、リサーキュレーションを考えた人工物は商品となるのだろうか。過去に多くの例があるように、いかに地球のこと(環境)を考えた人工物であっても、その人工物がそれを使う人にとって有用な性能を持たなければ、少なくとも現在のところ商品価値は無い。逆に、従来型の商品開発手法である、地球のことを何も考えない「人にやさしい材料開発」のみでは無論商品とは認められない。

今後、企業が循環型社会の中で存在し、その中で尊敬される企業(コーポレートシチズン)となるためには、(そのバランスは環境の変化とともに変化してゆくとは考えられるものの)「人」と「地球」を考えた材料開発(図2)が必要となる。

無論、開発された材料・商品が、従来にない新しい性能を有していることはさらに強い武器となる。無機材料は、石油を原料とする樹脂材料や金属材料に比べインプット、アウトプットともに

図3 住宅内気候制御のための新しい材料価値の開発

比較的可利(表1)であり、無機材料で他材料を置き換えることができればさらに大きなメリットが生まれる可能性もある。

3. 土を活かす

日本はモンスーン地帯に位置し、その気候は先進諸国の中では比較的特殊な条件にある。この高温多湿を特徴とする独特の気候の中で、多くの湿度による被害を発生させている。湿度の高さだけを取り上げれば、日本はロンドン、パリさらにはサンフランシスコよりむしろ低い(理科年表, 1997)ものの、住宅の湿害という点では世界のトップである。これは、湿度による被害を発生させる真菌や細菌が高温多湿条件下で急激に繁殖し、人体や住宅そのものに大きな被害を与えることによる。

これらの影響を緩和するため、日本の住宅は高床式の形態をとってきたが、近年になって欧米の密閉型建築様式が輸入され、また、生活様式の変化による室内気候制御の容易さから、高气密・高断熱型住宅が一般化した。この結果、室内温度制御は格段に精度が上がったものの、湿度に関しては冬場一超低湿、夏場一超高湿の悪循環となり、また、換気回数も減り、結果として、シックハウス症候群に代表される新たな問題も起こっている。一方、問題解決手段として、加湿器・除湿器・空気清浄機の導入が進んでいるものの、調湿に関しては十分な解決手段となっておらず、逆に多くの機器の持ち込みで住宅における化石エネルギーの大量消費を助長させているともいえる。

これらの問題を緩和するには、室内気候を生活に最も重要な湿度範囲(40~70% RH)(上村ら, 1995a)にコントロールできるよう、エネルギーを使わず敏感に自己検知し、自己制御する材料の開発が必要である。このためには気孔直径をおよそ6~16 nm (Kelvin式で求めた毛細管凝縮に関わる細孔半径を新井ら(1983)の式で補正)に制御された多孔質材料が必要となる。さ

図4 土の利用と水熱処理技術の導入

らに、室温安定のため、この材料は比較的热容量の大きいものが望ましい。内装建材としてこのような材料を利用することで室内気候制御は高气密高断熱型住宅においても有効に作用するはずである(図3)。さらに、このような材料を可能な限り低次のエネルギー消費で造ることができれば、人(生活者)と地球(環境)の両方を考えた材料として、さらに高い価値を持つことになる。このような性能を有する材料として「土」がある。

土は今から4億年前に生まれた。大気に十分な酸素が供給され、オゾン層が形成され、地上へ降り注ぐ強烈な紫外線が弱められることにより海から陸上への動植物の移動が開始された。これら有機物の助けを借りて岩石の風化物から初めて土が生まれた(カーター・デール, 1995)。土がなければ現在の自然生態系の完璧な循環はあり得ないし、その恩恵を無視して人類の存在を語ることにはできない。食に関しては無論、氷河期に種を絶やすことなく乗り越えられたのも土の住居のお陰である。水を吸い、水をはき、空気を溜め、浄化機能をも有する土、その土も一度失えば再生には気の遠くなるような時間が必要で、未だに人工的に合成できない材料である。

建築材料としての土の利用は、それを在るがままに使用する横穴式住居、竪穴式住居に始まる。さらに土を使いこなす技術として練る、叩く技術が確立し、日干しレンガに始まり、国内では三和土(たたき)、土壁としてその技術は芸術的なレベルにまで高められた。これらの材料は、人間生態系で使用された後、その役目を終えれば自然生態系に本来の土として戻すことができる。システム境界を自由に行き来できる極めてまれな材料の一つといえるが、残念ながら、現在の建築には一般的とはいえない。強度・耐候性・施工性(特に施工時間)に問題がある。これら材料の問題を解決するものとしてレンガ、ブロック、タイルに代表されるセラミックスが登場したが、セラミックスは石の文化の産物ともいえ、高温処理により、土本来の性能を維持しているとはいえない。土の性能を維持するためには、少なくとも500℃以下、有機物の性能維持を考慮すれば処理温度はさらに低温であることが望ましい。この土とセラミックスの中間的材料として土の水熱固化体がある(図4)。水熱処理技術を用いて、200℃以下で土を固化させた土の水熱固化体(ソイルセラミックス)は土本来の性

図5 クローズド生産システム

能を維持しながらセメント並の強度を有し、施工が容易で使用後は自然生態系に戻すことが可能である。

土の固化法として開発されたこの水熱処理技術は、循環型社会を意識したもの造りの一つであるクローズド生産システムの研究から生まれた。

4. 土を固める

4・1 クローズド生産システム

筆者らは、1992年から環境に関する施策に取り組んできた。(株)INAXの生産部門では徹底した分別回収と新しいリサイクルシステムの導入で、インプットを上げることなくアウトプットである廃棄物を現在までに80%削減(1992年比)、CO₂排出量の12%削減(1990年比)を達成した。しかしながら、従来法の延長では必ず限界が来るはずであり、2000年目標としている廃棄物ゼロ、CO₂排出量20%削減(1990年比)、原材料使用量10%削減(1996年比)のためには、新しい生産システムの開発が必要である。このシステムを「クローズド生産システム」(図5)(石田, 1997a, b)と呼び、構築のための要素技術の開発を進めている。

セラミックス商品の性能、例えば形状はガラスのように冷却固化によって形成されるのではなく、高温固相反応(焼結反応)によって決定され、焼成温度を大幅に下げることが難しい。しかし、強度は理論強度よりはるかに低いと考えられており、例えば、インプットを大きく変えずに強度を現在の4倍にできれば(実際には靱性や疲労特性など、多くの性能に関しても検討が必要である)強度は材料の厚さの2乗に比例するので商品厚さを1/2にすることが可能である。厚さが1/2になれば重さも1/2、結果としてインプットである使用原料は1/2に、焼成に必要な化石エネルギー、搬送・運搬エネルギーも大幅に削減することが可能となる(石田, 1998)。

インプットが下がるので、これと連動してアウトプットも下がるが、さらにアウトプットを下げるため、生産時に発生するケイ酸塩廃棄物や排ガスを新たなエネルギーを投入することなく利用可能な商品・材料として再生する必要がある。これには、200℃程度の廃熱を利用できる水熱処理がもっとも効果的である。ケイ酸塩廃棄物は少量の消石灰を添加して水熱固化させる(Yamamoto and Ishida, 1994; Maenami et al., 1996)。排ガス中のCO₂は他産業廃棄物であるフライアッシュやスラグから

図6 土の水熱固化体の強度変化
Ca(OH)₂ (20 mass %)とカオリン/石英 (80 mass %)混合物を成形後、200℃飽和蒸気圧下で養生した。K = 0~1は石英/(石英 + カオリン)重量比率を示す。

抽出したアルカリ土類と反応させ炭酸塩として固定、水熱固化させることが考えられる(樹神ら, 1997)。

このように、従来の生産形態をマテリアルバランスという視点で見直し、インプットを可能な限り減じ、商品以外のものを可能な限り生産系から外へ出さないクローズド生産システムの構築は多くの新しい材料開発の可能性を含んでいるように思える。

4・2 土の水熱固化

建材の水熱処理技術(Hydrothermal Processing)はヨーロッパで開発され、サンドライムブリック(ケイ灰レンガ)に代表される100年の歴史を持つ技術であり、国内では、ALCやケイカル板の製造に用いられている。一般的には約10%程度のライム(Ca(OH)₂)と約90%の石英(SiO₂)を混合して200℃程度で水熱処理(飽和水蒸気圧下で処理)することにより、針状のケイ酸カルシウム水和物(Calcium Silicate Hydrates)を生成させ、この生成物の絡み合いで強度を発現させる。ただし、この場合、不純物の混入がケイ酸カルシウム水和物の生成を阻害するため、使用できる出発原料の純度は90%以上でなくてはならず、不純物としてのアルミナ成分は1%以下、アルカリ成分も可能な限

り少ない方がよいとされている (Boynton, 1967; Diamond et al., 1966)。

一般に、土の構成鉱物は石英とカオリン (Kaolinite $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$) などの粘土鉱物を主とし、相当量のアルカリ (～5%)、アルミナ成分 (～30%) を含み、ケイ酸カルシウム水和物生成原料としては不適當である。しかしながら、石英と粘土鉱物の一部を利用し、少量のケイ酸カルシウム水和物とハイドロガーネット (アルミニウムやアルカリ土類を主成分とする水和生成物) を共生させ、強度発現させることが可能となった。図6に石英-カオリン-水酸化カルシウム系で石英をカオリンで置換した場合のカオリンが強度に及ぼす影響を示す (Maenami and Ishida, 1998)。多量の石英を含む場合に比べ、50% 以上のカオリン添加で強度は低下するが、その程度は主に石英を使用したものに比べ最大強度では80% 程度を維持している。また、カオリン添加量50% 程度以上では、多少のカオリン量の変化によっても強度は大きく影響を受けないことを示している。これは、土の品質のばらつきが処理体に大きな影響を与えないことを示すだけ

表2 ソイルセラミックスの性能

曲げ強度 MPa	圧縮強度 Mpa	比熱 KJ/Kg・K	熱伝導率 KJ/m・h・K	熱容量 KJ/m ³ ・K	透湿係数 g/m ² ・h・Pa
6.6	55.2	0.92	5.02	1,780	1.31×10^{-6}

図7 土の水熱固化体の調湿性能
閉鎖系内の温度を変化させて、系の相対湿度を変化させた場合

図8 土の水熱固化体の気孔径分布 (水銀圧入方による)
図中の数字は気孔容量を示す。

でなく、天然に存在する各種の土が、同程度の強度を発現する材料に変換できることも示している。

実際の固化では、土に少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を添加、混合し、所定の大きさに乾式プレスする。この成形体を約 150°C で水熱処理することにより、土の水熱固化体は合成可能である。低温処理のため、薬などを意匠的に添加することも可能である。固化に必要なエネルギーは、材料の低エネルギー合成法の一つであるセラミックスに比べさらに低く、例えば、陶磁器の1/5～1/7程度 (進・久留島, 1997) である。

表2に土の水熱固化体 (ソイルセラミックス) の性能を示す。水熱処理により、土はコンクリート建材 (曲げ強度 $4\sim 6\text{ MPa}$) と同等以上の強度を有する材料に変換可能となる。熱容量も、木質フローリング・畳・カーペット (各々 $1090, 430, 330\text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$) (宮野, 1981, 新建築学大系, 1978) などに比べて大きく、また、木材と同等の高い調湿性能を有するようになる (図7) (石田, 1997c)。これは、出発原料である土が本来有している気

図9 ソイルセラミックスを施工した(床)実験住宅(集合住宅)

図10 冬季(12～1月)の時間別室内温度・湿度変化
黒色: 実験住宅 (ソイルセラミックス施工), 灰色: 比較住宅 (カーペット床)

図 11 ソイルセラミックス施工前後の生活に伴う月平均エネルギー使用量の変化 (1 年間の平均)
エネルギー使用量は CO₂ 排出量に換算し、KgC で示した。

孔や水熱処理による固化過程で生成する気孔がコンクリートブロックや陶器に比べて遥かに小さく、およそ 10~20 nm の極大細孔直径を有することに起因している (図 8) (石田ら, 1998)。

5. 土の家に住む

高気密集合住宅 (マンション) のリビングルーム床 (約 35 m²) をソイルセラミックス (200 mm × 200 mm) で施工 (図 9)、実際に生活した場合の温度・湿度変化を測定した (石田, 1997 b, c)。比較には、同住宅内の同じ間取りで、同じ家族構成を有する住居を用いた。比較住宅の床は絨毯 (アクリル系) 張りである。

図 10 には 1997 年冬季 (12~1 月) の測定結果の一例を示す。比較住宅では、夜間から早朝にかけて高温/低湿 → 低温/高湿状態を繰り返していることになる。これに比べ、実験住宅では温度変化、湿度変化が極めて小さく、最低温度も 15 °C を下回らず、湿度もほぼ 40~50 % の範囲にある。実験住宅の夜間温度は比較住宅に比べて約 4~5 deg. 低い値を示すが、体感温度としてはそれほど大きな差は認められなかった。これは実験住宅の床、天井近辺およびその中間位置での空気温度差が 0.5~1.0 deg. 程度とほとんど認められないことに起因していると考えている。また、夜間の暖房停止後の変化を比べると、実験住宅の平均室温低下速度 (外気との温度差による) は 1.3 °C/h、これに伴う平均相対湿度上昇速度は 0.1 %/°C が得られ、比較住宅の 5.7 °C/h、1.6 %/°C に比べ、その変化は極めて小さく、材料の高い熱容量・高い調湿性能が効果的に働いた (石田ら, 1998) ものと考えられる。

測定は年間を通して行われているが、実験住宅は室内温度・湿度ともに年間を通じて比較住宅に比べて変化の少ない傾向を示し、特に、湿度に関しては 40~70 % RH の範囲にある。

この結果、実験住宅では加除湿機などの運転も不要で、実際の生活時のエアコン運転時間は短く、化石エネルギーの使用量も低く抑えられた。図 11 には実験住宅改装前・後 (1996 年/カーペット床, 1997 年/ソイルセラミックス床) の生活に伴うエネルギー使用量を CO₂ 発生量に換算して (WEEKLY 環境家計簿, 1997) 示した。改装後、エアコンに関わると考えられる電気使用量は 25 % 減少、季節変動は低く抑えられ、年間平均 CO₂ 発生量は約 17 % 削減された。また、実験住宅住人が慢性的に持っていたアレルギーも明らかに軽減された。生物試験として行ったアレルギー源の一つであるヤケヒョウダニの繁殖試験では、25 °C・90 % RH の増殖環境下で、200 個体が 3 週間後、ソイルセ

ラミックス 990 個体、ビニルクロス 1,470 個体、カーペット 1,895 個体に増殖する結果が得られている。ソイルセラミックスの増殖程度が低いのは、材料の調湿性能によるものなのか、吸湿による表面 pH の変化によるもののかなど、明確にはなっていない。詳細に関しては今後検討する必要があるがソイルセラミックスがアレルギー源となる生物増殖に対しても優位であることは明らかである。

6. おわりに

自然が本来持っている高度な性能を可能な限り維持しながら、可能な限り少ないエネルギーで人間生態系で利用できる形に変換する (自然のすごさを賢く使う) ことは地球環境が重い意味を持ついま、開発すべき重要な技術の一つであると思っている。土の水熱固化体 (ソイルセラミックス) は、廃土といわれるような土も含め、ほとんどのものが利用でき、排熱程度の温度で固化処理が可能である。また、使用に当たっては温度・湿度に対して高い自己検知・自己制御能力を有し、使用後は、自然生態系へ還元できる、あるいは人間生態系で再循環させることができるそんな材料の一つである。

いまある人工物を、もっと「賢い」人工物へ、そんな技術と文化を創ること、それが次の世代のための我々の大きな責任だと思っている。

引用文献

- 新井親夫・水谷孝志・村瀬幸久・花川忠巳・左納良樹 (1983): 粉体工学会誌, 20, p. 115-121
 Boynton, R. S. (1967): Chemistry and Technology of Lime and Limestone, Interscience Pub., p. 176-181
 Brown, L. R. and Kane, H. (1994): Full House, W. W. Norton & Company, N. Y., U. S. A.
 Diamond, S., White, J. L. and Dolch, W. L. (1966): Am. Mineral., Vol. 51, p. 388-401
 石田秀輝 (1997 a): 化学装置, 1, p. 66-70
 石田秀輝 (1997 b): Inorganic Materials, 4, p. 507-514
 石田秀輝 (1997 c): セラミックデータブック '97, 工業製品技術協会, p. 63-66
 石田秀輝 (1998): セラミックス, Vol. 33, No. 2, p. 98-102
 石田秀輝・渡辺 修・進 博人 (1998): 開発工学会誌, 印刷中
 樹神 真・山本剛之・渡辺 修・石田秀輝 (1997): J. Ceram. Soc. Japan, Vol. 105, p. 660-663
 カーター, V. G., デール, T. (1995): 土と文明, (社)家の光協会, p. 10-15
 環境庁リサイクル研究会 (1991): リサイクル新時代, 中央法規出版 (株), p. 15-18
 宮野秋彦 (1981): 建物の断熱と防湿, 学芸出版社, p. 26, 33
 Meadows, D. H., Meadows, D. L. and Randers, J. (1972): The Limits to Growth, Universe Books, N. Y., U. S. A.
 Meadows, D. H., Meadows, D. L. and Randers, J. (1992): Beyond The Limits, Chelsea Green Publishing Co. Vermont, U. S. A.
 Maenami, H., Yamamoto, T., Ishida, E. H. and Mitsuda, T. (1996): Am. Ceram. Soc. Ceram. Trans., p. 375-384
 Maenami, H. and Ishida, E. H. (1998): Am. Ceram. Soc. (submitted)
 理科年表 (1997): 丸善 (株), p. 326-347
 進 博人・久留島豊一 (1997): セラミックス, Vol. 32, p. 981-984
 新建築学大系 10 (1978): 環境物理, 彰国社, p. 34
 Tan, S. R. et al., (1987): Philos Trans. R. Soc. London, A332, p. 479-491
 通産省資料調査会 (1994): 環境総覧, p. 43-62
 上村 武・小原二郎・所 莊吉 (1995 a): 壁装と調湿, 靖国社, p. 20
 上村 武・小原二郎・所 莊吉 (1995 b): 壁装と調湿, 靖国社, p. 146
 ワイツゼッカー, エルンスト・U・フォン (1994): 地球環境政策, 有斐閣
 WEEKLY 環境家計簿 (1997): (社)環境情報科学センター
 Yamamoto, T. and Ishida, H. (1994): Am. Ceram. Soc. Ceram. Trans., p. 231-237