

○森崎省吾（東工大社会理工学），大村 昭（日本ガイシ），渡辺千仞（東工大社会理工学）

## 1. 序

技術革新は経済の成長に必須の要件、駆動力である。技術革新の成長事例として、ファインセラミックス産業の成長軌道について実証分析した。

国がナショプロとして、ファインセラミックスの研究開発をはじめて以来、20年を越えた。1980年代以降、ファインセラミックスは広い分野で急速な発展と伝播を示してきた。ファインセラミックスの総生産額は、1988年の1兆円から1995年に1.5兆円と安定して増加してきたが、ファインセラミックスを構成する機能材料と構造材料の成長軌道は対照的である。

本研究は、機能材料としてのファインセラミックスの応用が注目すべき発展を示しているのに対して、構造材料としてのファインセラミックスの応用は発展の徴候が大きいことが、両材料の機能性(Functionality)の相違に起因しているとの仮説の実証を試みるものである。さらに、構造材料として利用されるファインセラミックスの機能性の開発(Functionality development)が重要であることについても言及する。

## 2. ファインセラミックス技術と産業の成長経緯

セラミックスは、古来、種々の応用に供されてきた。電気絶縁性や化学的耐久性といった特性は19世紀に認められるようになったが、期待される特性を有する実用製品は簡単には製造できなかった。天然原料を使用し、従来の方法で製造した製品の品質と出来映えは実用品として不満足であった。

1930年代、セラミックスの電磁氣的特性が明らかになるにつれ、特有の電磁氣的特性を有した機能性ファインセラミックス（機能材料）の研究開発が行われるようになり、日本では1940年代以降、実用化を目指した研究開発が行われてきた。1950年代後半と1960年代の間、電気・磁気用の部品やデバイスを使用した多くの新しい電子製品が実用化された。1970年代後半以降、電子技術及び情報技術の急速な進展により、機能材料によりつくられた部品やデバイスを実装した電子製品及び装置の生産は注目すべき増加を示した。

一方、構造用ファインセラミックス（構造材料）の研究開発は、冷戦下の米国で、自国が資源を持たないレアアースを含有する特殊鋼の代替材料の要請に刺激されて、サーメットの開発が行われた。1973年の第1次石油ショックを契機に、タービンシステムの熱効率向上の重要性が米国政府を駆りたて、我が国においても1970年代後半から高温ガスタービンシステム用部品に構造材料としての先進セラミックスを応用する研究開発がファインセラミックスの研究開発のナショプロとして活発に行われた。

その後、ファインセラミックスは利用分野の広がりとともに発展し、我が国のファインセラミックスの総生産量は、1988

年に1兆円、1995年に1.5兆円と安定して増加してきた。しかし、機能材料としてのファインセラミックスは、注目すべき発展をしているのに対して、構造材料としてのファインセラミックスは飽和の傾向を呈している。

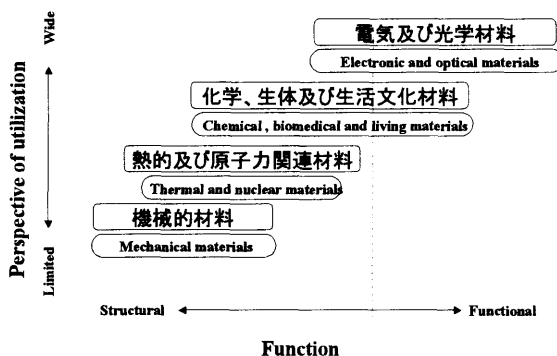


図1 ファインセラミックスのイノベーションの分類

ファインセラミックスは種々の機能性の可能性と広範な応用の可能性を有している。図1はファインセラミックスを大きく、1) 電気及び光学材料、2) 化学、生体及び生活文化材料、3) 熱的及び原子力関連材料、及び4) 機械的材料に分類し、各材料が、「機能的」であるか、「構造的」であるかを横軸に、利用の可能性の広がり度合を縦軸にプロットしたものである。電気及び光学材料は機能材料に、その他の材料は大きく構造材料に分類される。

## 3. 成長軌道の分析モデルとデータの構築

### 3.1 分析モデル

ファインセラミックスのイノベーションの成長軌道の分析に疫学モデルの発展モデルである動的シーリングロジスティック成長モデル(Logistic growth function within a dynamic carrying capacity、以下LFDCCという)を用いた。

疫学モデルは次の微分方程式で表される。

$$\frac{df(t)}{dt} = bf(t) \left( 1 - \frac{f(t)}{K} \right) \quad (1)$$

$f(t)$  : 時間  $t$  における製品の採用数 (ファインセラミックスの累積消費量)  
 $K$  : 普及天井 (Carrying capacity) (ファインセラミックスの潜在的市場規模)  
 $b$  : 内的自然増加率 (採用数が無限に成長する場合の増加率)

式 (1) を積分して、式 (2) を得る (単純ロジスティック成長モデル、Simple logistic growth function、以下 SLF という)。

$$f(t) = \frac{K}{1 + a \exp(-bt)} \quad (2)$$

イノベーションの伝播の進展とともに、 $K$  が高まる場合、式 (1) を次式とし、

$$\frac{df(t)}{dt} = bf(t) \left( 1 - \frac{f(t)}{K(t)} \right) \quad (3)$$

ここで、 $K(t)$  がロジスティックの曲線に従うとすれば (潜在的市場規模は時間とともに拡大するが、次第に増加率は減少し一定値に近づく)、

$$K(t) = \frac{K_K}{1 + a_K \exp(-b_K t)} \quad (4)$$

$K_K$  : 潜在的市場規模の上限値  
 $a_K$  : 潜在的市場規模が上昇し始める点を表すパラメータ  
 $b_K$  : 潜在的市場規模の内的自然増加率

式 (4) の条件下、式 (3) の解は、式 (5) である。これが LFDCC の一般式である。

$$f(t) = \frac{K_K}{1 + a \exp(-bt) + \frac{b \cdot a_K}{b - b_K} \exp(-b_K t)} \quad (5)$$

### 3.2 データの構築

ファインセラミックス部材の生産額、輸出額及び輸入額データから国内消費額、累積国内消費額を算出した。

ファインセラミックスの生産から実用化までの懐妊期間が十分に短く、陳腐化率はライフタイムの逆数と見なされるので、累積消費額は次式で求められる。

$$S_t = C_t + (1 - \rho) S_{t-1} \quad (6)$$

$$S_0 = \frac{C_1}{g + \rho} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{1}{LT} \quad (8)$$

ここで、 $S_t$  は  $t$  年における累積国内消費額 (1995 年価格)、 $C_t$  は  $t$  年における国内消費額 (1995 年価格)、 $g$  は初年度の国内消費額の増加率、 $\rho$  は陳腐化率、 $LT$  はライフタイム (平均使用年数) である。

$$C_t = C_n / WPI \quad (9)$$

$$C_n = P_n - Ex_t + Im_t \quad (10)$$

ここで  $C_n$  は、 $t$  年における国内消費額 (現在価格)、 $P_n$  は  $t$  年における国内生産額 (現在価格)、 $Ex_t$  は  $t$  年における輸出額 (現在価格)、 $Im_t$  は  $t$  年における輸入額 (現在価格)、 $WPI$  は窯業の国内卸売物価指数である。

尚、2000 年における各材料のライフタイムは、次の様に推定した。

電気及び光学材料	3 年
化学、生体及び生活文化材料	3.5 年
熱的及び原子力関連材料	4 年
機械的材料	4.5 年

陳腐化率  $\rho$  は窯業技術の陳腐化率に比例するので  $t$  年における  $\rho$  は次式で求められる。

$$\rho_t = \frac{1}{LT_{2000}} \frac{\rho cr_t}{\rho cr_{2000}} \quad (11)$$

ここで、 $\rho cr$  は窯業技術の陳腐化率である。

図 2 は、1981~2000 年における日本のファインセラミックスの国内消費額の推移を示す。

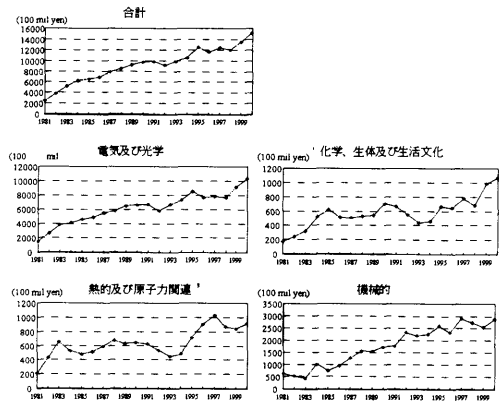


図 2 ファインセラミックスの国内消費額の推移 (1981-2000) : 1995 年価格基準

図 2 から電気及び光学材料の国内消費額が日本のファインセラミックスの全消費額の半分以上を占めていること、このシェアは安定的に増加していること (1981 年に 59.1%、2000 年に 68.1%)、そして他の 3 材料の国内消費額は続けて減少していること (化学、生体及び生活文化材料は、1981 年 7.1% から、2000 年に 7.0% へ、熱的及び原子力関連材料は 8.3% から 6.0% へ、機械的材料は 25.6% から 18.9% へ) が分かる。これらの傾向は、日本におけるファインセラミックス製品の年間国内消費額のシェアが構造用途のイノベーションから機能用途のイノベーションにシフトしてきたことを表している。国内消費額のデータを使い、1981~2000 年における日本のファインセラミックスの累積国内消費額を算出した。

図 3 は累積国内消費額の傾向を示す。

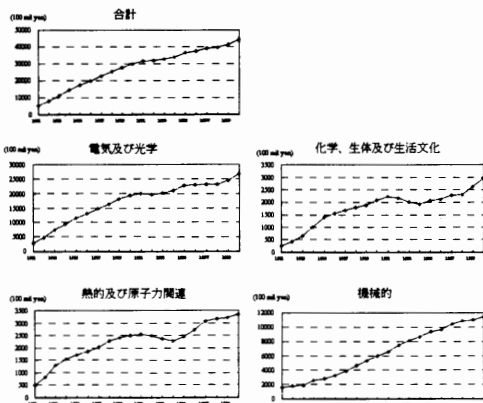


図3 ファインセラミックスの累積国内消費額の推移 (1981-2000) : 1995年価格基準

図3から電気及び光学材料の累積国内消費額は、全累積国内消費額の半分以上を示し、このシェアは1981年の55%から2000年の60.2%と安定的に増加していることが分かる。同様の増加が化学、生体及び生活文化材料でみられる(1981年に4.8%、2000年に6.6%)。これらの増加に対して、熱的及び原子力関連材料と機械的材料は、9.4%から7.5%と30.8%から25.7%と減少している。この傾向は日本におけるファインセラミックスの伝播がより機能的なそして広い応用分野の材料に向かってシフトしていること、ファインセラミックスのイノベーションに機能性の開発が重要であることを示している。

## 4. 分析

### 4.1 成長軌道の比較

上述の観察から、伝播過程における各用途のファインセラミックスの機能性開発の認識を目的に、4材料の伝播軌道を比較分析した。

図4は、式(5)を利用した1981~2000年におけるファインセラミックスの4種のイノベーションの伝播過程の推移の結果を示す。

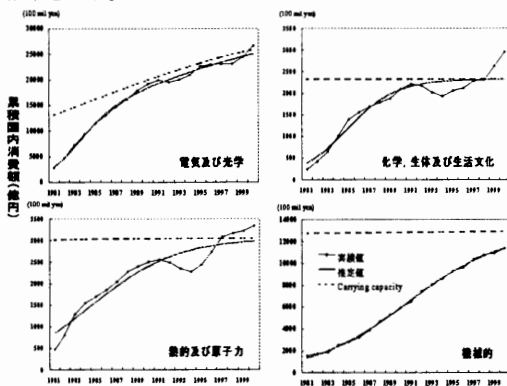


図4 ファインセラミックスの成長軌道の推移 (1981-2000) : 1995年価格基準

図4より得られた伝播過程と Carrying capacity の傾向を次にまとめた。

#### (1) 電気及び光学材料

累積国内消費額は1980年代に急速に増加、その後緩やかになるも持続的に成長。Carrying capacity の増加は累積消費額と並行。

#### (2) 化学、生体及び生活文化材料

電気及び光学材料の1980年代の増加傾向と類似。1990年代は飽和の傾向に変化。Carrying capacity は検証期間を通して同レベル。

#### (3) 熱的及び原子力関連材料

累積消費額は1980年代急速に増加、1990年代のはじめから減少。高エネルギー効率、原子力の電力需要の減少が理由。しかし地球温暖化の意識増による熱効率向上の要求増加を反映、又半導体製造装置用セラミック部品の需要により増加。Carrying capacity は検証期間を通して同レベル。

#### (4) 機械的材料

先の3材料と逆に、累積消費額はわずかに非凸面と同じペースで増加。Carrying capacity の天井に接近。増加のペースのわずかな飽和が1990年代後半に観察。累積消費額と Carrying capacity の間の差は、先の2材料のそれよりも大。

以上の観察は、電気及び光学材料のみが動的シーリング (Dynamic carrying capacity; DCC) を示し、他の3材料は固定シーリング (Fixed carrying capacity; FCC) を示したままであることを示している。

### 4.2 成長の機能性要因

表1は、ファインセラミックスの各イノベーションの伝播過程のパラメータの推定結果を比較するものである。各イノベーションの伝播過程と Carrying capacity に関して次のことがいえる。

(1) 化学的、生体的及び生活文化材料の  $a$  及び  $a_R$ 、熱的及び原子力関連材料の  $a$  及び  $a_R$ 、そして機械的材料の  $b_R$  を除いて、殆どの指標が統計的に有意である。

(2) 修正済み決定係数  $R^2$  は LFDCC が市場での4つのイノベーションの伝播の振舞いを表していることを示している。

(3) 定数  $a_R$  は、電気及び光学材料の値と比較して、他の3材料は極端に小さい。この3材料の疫学的な振舞いは、電気及び光学材料のそれが全てのパラメータはフィットし、LFDCC に類似しているのに対して、SLF に類似している。

(4) 統計値は、機能性ファインセラミックスの疫学的な振舞いが、LFDCC を表していることを示している。一方構造用ファインセラミックスの疫学的な振舞いは、SLF にフィットしていることを示している。

(5) LFDCC は伝播過程において、機能性の発展を有する伝播過程を示しているため、機能性ファインセラミックスはその成長と伝播過程の中に機能性の発展を、従って自己増殖軌道を構成していることを示している。

表1 イノベーションの伝播過程のパラメータ推定結果  
(1981-2000)

Electronic and optical materials						
$K_K$	$a$	$b$	$a_K$	$b_K$	adj. $R^2$	DW
31450	14.927	0.637	1.543	0.099	0.993	1.16
(19.53)	(4.28)	(7.09)	(7.72)	(5.43)		
Chemical, biomedical and living materials						
$K_K$	$a$	$b$	$a_K$	$b_K$	adj. $R^2$	DW
2320	7.686	0.424	1.220E-05	0.422	0.910	0.43
(29.64)	(0.23)	(5.13)	(1.33E-04)	(1.98)		
Thermal and nuclear materials						
$K_K$	$a$	$b$	$a_K$	$b_K$	adj. $R^2$	DW
3041	1.614	0.254	0.014	0.252	0.899	0.37
(16.49)	(0.13)	(3.78)	(0.10)	(4.16)		
Mechanical materials						
$K_K$	$a$	$b$	$a_K$	$b_K$	adj. $R^2$	DW
13974	11.176	0.219	0.097	0.008	0.999	2.25
(183.35)	(24.98)	(33.39)	(1.54)	(0.26)		

## 5. 結論

機能的用途と構造的用途のファインセラミックスの成長と伝播の軌道が対照的であることが明らかであることから、ファインセラミックスの機能性開発の重要性に着目し、過去20年をこえる日本における4種の主要なファインセラミックスの伝播軌道を分析した。

動的シーリングロジスティック成長モデルを使用した実証的分析を基に電気的、光学的材料として機能的用途に使われるファインセラミックスの Carrying capacity が消費の増大とともに増大しているのに対して、構造的用途に使われるファインセラミックスの普及天井が消費の増加にも拘わらず、増大していないことを示した。この対照は、機能性ファインセラミックスの発展と構造用ファインセラミックスの停滞を予期する構造的な原因を暗示している。

動的シーリングロジスティック成長モデルが示すように電気及び光学材料の持続的成長は、機能性の発展と需要の増加との好循環に帰することができる。Carrying capacity はファインセラミックスの累積消費額のレベルの増加とともに増加している。Carrying capacity の上昇は、累積消費額の更なる上昇をもたらすが、これはITに見られる価値の増加が顧客の増加をもたらす、更なる生産が起こること、また、ITにおける機能性開発に見られるネットワークの外部性に類似の機能との相互作用を活性化させることと類似している。このダイナミズムが、究極的に自己増殖構造を構成する。電気及び光学材料の成功は、まさしくこの構造に依っている。

機能性ファインセラミックスの成功は、構造用ファインセラミックスの戦略的な方向を、機能性の発展メカニズムを取り入れることによって停滞しているサイクルを打ち破る方向に向けさせることを促している。

更なる研究は、それぞれのファインセラミックスが有する潜在的な機能性を認識することを目的とするより深い分析に焦点をあてること、そしてそれぞれの材料の自己増殖構造の構成に向かつての開発、発展戦略を探索することが期待される。

## 参考文献

- [1] Economic and Social Research Institute (ESRI) of the Cabinet Office, 2001. Consumer Confidence Survey. Cabinet Office, Government of Japan, Tokyo.
- [2] Japan Fine Ceramics Association (JFCA), 1998. Report on Research Surveys Regarding Present Status and Problems of Fine Ceramics. JFCA, Tokyo.
- [3] Japan Fine Ceramics Association (JFCA), 2000. Report on Research Surveys Regarding the Strategy of Fine Ceramics Industry. JFCA, Tokyo.
- [4] Liang Y., Dutta, S. P., 2001. Application Trend in Advanced Ceramic Technologies. Technovation 21 (1), 61-65.
- [5] Meyer, P. S., Ausubel, J. H., 1999. Carrying Capacity: A Model with Logistically Varying Limits. Technological Forecasting and Social Change 61 (3), 209-214.
- [6] Ministry of International Trade and Industry (MITI), 1984. Report on the Committee for Fundamental Problems on Fine Ceramics. MITI, Tokyo.
- [7] Ministry of International Trade and Industry (MITI), 1990. Fine Ceramics Vision. MITI, Tokyo.
- [8] Ministry of International Trade and Industry (MITI), 1998. Report on the Committee for R&D Vision of Fine Ceramic Industry. MITI, Tokyo.
- [9] Ohmura, A., Morisaki, S., Watanabe, C., 2002. Functionality Development as a Survival Strategy for Fine Ceramics, Technovation (in print).
- [10] Warren, M. P., Forrester P. L., Hassard, J. S., Cotton, J. W., 2000. Technological Innovation Antecedents in the UK Ceramics Industry. International Journal of Production Economics 65 (1), 85-98.
- [11] Watanabe, C., 1999. Systems Option for Sustainable Development. Research Policy 28 (7), 719-749.
- [12] Watanabe, C. (ed.), 2001. Numerical Analysis of Technological Innovation. JUSE Press, Tokyo.
- [13] Watanabe, C., Kondo, R., Ouchi, N., Wei, H., 2001. Formation of IT Features through Interaction with Institutional Systems - Empirical Evidence of Unique Epidemic Behavior, Technovation (in print).
- [14] Watanabe, C., Santoso, I., Widayanti, T., 1991. The Inducing Power of Japanese Technological Innovation. Pinter Publishers, London.
- [15] Watts, R. J. and Porter A. L., 1997. Innovation Forecasting. Technological Forecasting and Social Change 56 (1), 25-47.