

高強度ファインセラミックスの高性能発現への スピルオーバーダイナミズムの実証分析 —情報化社会における新機能創出型成長軌道への示唆

○大村 昭, 渡辺千仞 (東工大社会理工学)

1. 序

工業化社会から情報化社会へのパラダイムシフトに対応し、製造技術中心の成長軌道から情報技術主導の成長軌道への転換が求められている。この転換を促進するメカニズムの解明に、両技術を代表するワープロと PC や、固定電話と携帯電話の普及軌道の比較分析等が行われているが、未解明部分が少なくない。

ファインセラミックスは 1980 年代の初頭、革新的材料として世に出たが、高度な特殊性能を内包する材料を除き、セラミックスに本来的に備わる高強度な性能に留まる材料の成長は期待に反して停滞している。

両セラミックスの成長の好対照は、固定電話と携帯電話との対比に見られるような製造技術と情報技術の成長軌道の好対照に酷似しており、その普及プロセスの比較実証分析は、製造技術中心の成長軌道から情報技術主導の成長軌道への転換を促進するためのメカニズム解明への示唆に富むものと考えられる。

そこで、高強度な性能に留まる材料の中で例外的に成長しているファインセラミックスにおける新機能付加メカニズム及び自己増殖ダイナミズムについて実証分析し、これらセラミックスが技術の機能間・製品間のスピルオーバーによる、①技術の移転に伴う新機能の付加、②利用分野の連鎖的拡大が自己増殖のダイナミズムを生み出しているとの結論を得た。

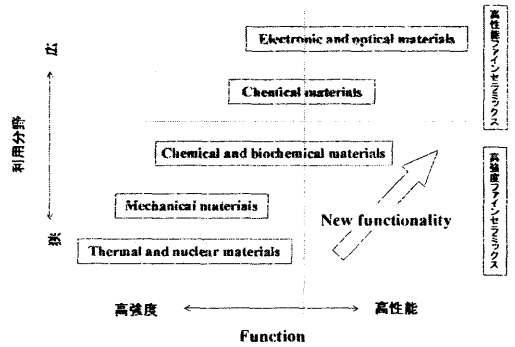
分析の焦点は次の 3 項であり、得られた結果は情報技術主導の新機能創出型成長軌道への転換促進メカニズムの解明に示唆を与えるものである。

- 1) 高性能ファインセラミックスの自己増殖的普及軌道
機能別ファインセラミックスの普及軌道の分析及び高性能ファインセラミックスにおける自己増殖的普及軌道の検証
- 2) 高強度ファインセラミックスへの新機能付加メカニズム
高強度ファインセラミックスへの新機能の注入によって例外的に顕著な生産の増大を牽引するメカニズムの検証
- 3) 高性能ファインセラミックスの自己増殖ダイナミズム
研究者の相互作用による広範な利用分野の増大の追跡による高性能ファインセラミックスの自己増殖ダイナミズムの分析

2. 高性能ファインセラミックスの自己増殖的普及軌道

ファインセラミックスの普及軌道をその特性に即して 5 種類に分け、軌道を分析した。図 1 はファインセラミックスのカテゴリー分類、表 1 はファインセラミックスの機能と利用分野を示す。

5 種類に分けたファインセラミックスの普及軌道を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



注) 高性能ファインセラミックス: High-performance fine ceramics (Functional fine ceramics)
高強度ファインセラミックス: Structural fine ceramics

図 1. ファインセラミックスのカテゴリー分類。

表 1 ファインセラミックスの機能と利用分野

分類	機能	利用分野(主要例)
高性能	電気・光学的	絶縁性 ICパッケージ基板(PAS)
		半導電性 センサー
		導電性 電極、発熱素子、サーミスタ
		磁性 フェライトコア、フェライト磁気ヘッド
		誘電率特性 キャパシタ、アクチュエータ、SAWフィルタ
化学的	光学的	光素子、電気光学素子、フェルル
	触媒性	触媒/触媒担体(SAC)
化学・生化学的	化学・生体性	セラミックフィルタ、耐酸性部材・器具、生体材料
機械的	切削・研削・成型性	機械工具
	精密性	精密治具、軸受
	耐摩耗性	メカニカルシール、バルブ
高強度	熱的・原子力	耐熱性 スパークプラグ、エンジン部品
		高温耐食性 IC製造用部品(PIM)、熱処理部品
		耐酸性 高薬材、核燃料

capacity, LFDCC) を用いて分析した。式 (1) はこの軌道を示す。 a_k と a の比 (a_k/a) は自己増殖性の割合 (機能性開発の度合) を示す。

$$f(t) = \frac{K_k}{1 + a \exp(-bt) + \frac{b \cdot a_k}{b - b_k} \exp(-b_k t)} \quad (1)$$

図 2 は 5 種類のファインセラミックスの普及軌道の推移を、表 2 は普及過程のパラメータの推定結果の比較を示す。高度な特殊性能を内包する 2 種類は普及過程で新たな機能を付加させつつ、自己増殖的に発展しているが、高強度な材料に留まる他の 3 種類は成長が頭打ちになっていること、前者は動的シーリングを示し、後者は固定シーリングを示したままであることが分る。

高度な特殊性能を内包する高性能ファインセラミックスの発展は、高強度な材料に留まるファインセラミックスの機能性開発（新たな機能の創出）へのブレークスルーに燭光を与えるものである。

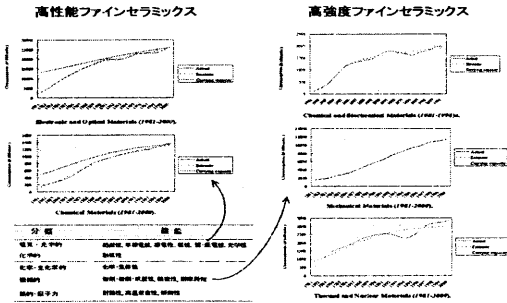


図2. ファインセラミックスの普及軌道の推移。

表2 普及過程のパラメータの推定結果

	K_f	a	b	σ_f	k_f	$\sigma_f R^2$	$\sigma_f \sigma$
Electronic and optical materials	31450 (19.53)	14.9 (4.28)	0.64 (7.09)	1.54 (7.72)	0.10 (5.43)	0.993	0.10
Chemical materials	1356 (51.02)	11.04 (0.13)	0.52 (13.80)	2.28 (4.58)	0.19 (7.13)	0.999	0.21
Chemical and biochemical materials (1981-1998)	2296 (2.35)	52.42 (2.83)	0.97 (4.83)	0.99 (4.80)	0.41 (0.67)	0.999	0.02
Mechanical materials	12836 (75.47)	14.92 (5.96)	0.73 (35.71)	0.48 (2.08)	0.25 (0.60)	0.999	0.03
Thermal and nuclear materials	3042 (14.16)	3.30 (4.19)	0.25 (3.73)	1.4E-03 (6.45)	0.06 (0.87)	0.983	0.01

以上の観点から高強度な材料の利用形態に改めて着目し、10種類のファインセラミックスの生産動向を比較した結果、図3に示すように、IC製造用部品(PIM)は同一組成(窒化アルミニウム、AIN)を内包する高性能ファインセラミックス「ICパッケージ/基板(PAS)」と同様に、生産が拡大していることが分かった(図4参照)。

3. 高強度ファインセラミックスへの新機能付加メカニズム
IC製造用部品(PIM)の突出要因を分析した結果、下記結果が得られた。

- 1) 窒化アルミニウム(AIN)は、自己増殖性を有し、高性能ファインセラミックスとしての電氣的、熱的機能を有するだけでなく、耐食性、耐熱衝撃性機能を有している。
- 2) ICパッケージ/基板(PAS)に多用されていたAINは、IC製造用部品(PIM)にスピルオーバー(機能間技術スピルオーバー)し、同化した。
- 3) この技術のスピルオーバーの経路は、研究者の研究活動の広がり(移動)に付随するものであった。

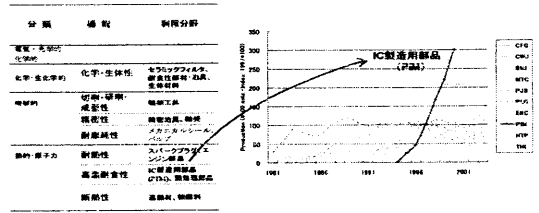


図3. IC製造用部品(PIM)の成長(1995-2000)。

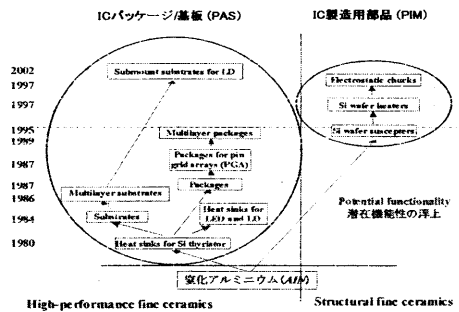


図4. 窒化アルミニウム(AIN)応用製品の实用化の系譜(1980-2002)。

PIMは高強度材料に分類されるが、高性能材料としてのファインセラミックスの基本的な要因がPIMに同化する、又、自己増殖性を有する材料が、ある高性能材料からスピルオーバーしてPIMに同化するという仮説的見解を得た。表3の分析は、AINが“ある材料”として期待される役割を果たしていることを示すものである。

表3 主なファインセラミックス材料の機能と用途

機能	製品	Key materials with background functions			
		AIN	SiC	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
高性能ファインセラミックス	Electronic and optical	●			○
	Chemical				○
	Chemical and biochemical				○
高強度ファインセラミックス	Mechanical		○	○	○
	Thermal and nuclear	●	○		○

表4はファインセラミックスの応用に供される主要材料のクロスファンクショナルなスピルオーバーの可能性を吟味するものである。表4は高性能材料における電気的、光学的機能に電気絶縁性及び熱伝導性なる機能が、高強度材料における熱的、原子力関連機能に耐食性及び耐熱衝撃性なる機能が固有の機能性としてあることを、さらにPASを含む高性能材料として使われるAINがスピルオーバーして、PIMのような構造材料に同化する可能性を示すものである。

表4 窒化アルミニウム (AIN) のスピルオーバー

		Key materials with indigenous functions				
		AIN	SiC	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	
高性能ファインセラミックス	Electronic and optical	電気的・光学的機能 (PAS)	○	×	×	○
		Electrical insulating	○	×	×	○
		Thermal conductive	○	△	×	×
		Chemical	○	○	○	○
高強度ファインセラミックス	Chemical and bio-chemical	耐食性 (PIM)	○	×	×	○
		Corrosion resistant	○	×	×	○
		Wear resistant	×	○	○	○
		Corrosion resistant	○	×	×	○
		Thermal shock resistant	△~○	○	○	×
		Heat resistant	×	○	○	×

図5はPAS及びPIMの普及軌道の推移と普及過程のパラメータの推定結果を、表2の推定結果と併せて示す。

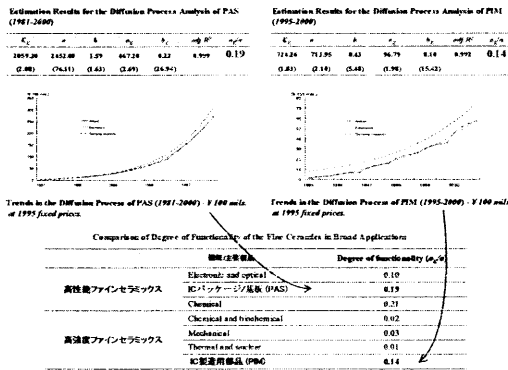


図5. PAS及びPIMの普及軌道の推移と普及過程のパラメータの推定結果及び比較。

PAS及びPIMに関する日本特許出願を調査し、PASに使われるAINがPIMにスピルオーバーし、同化した経緯を明らかにした。図6はAINの研究者が研究テーマをPASからPIMに移行し、PIM関連特許を出願したことを示している。これら研究テーマの変化は特定の研究者によって、AINがPASからPIMに機能間技術スピルオーバーしたことを示している。

4. 高性能ファインセラミックスの自己増殖ダイナミズム
研究者の移動による技術のスピルオーバーに触発されて、高強度ファインセラミックスの隣界において高性能を發揮しつつ、且つ、広範な製品群を創出しているハニカム構造セラ

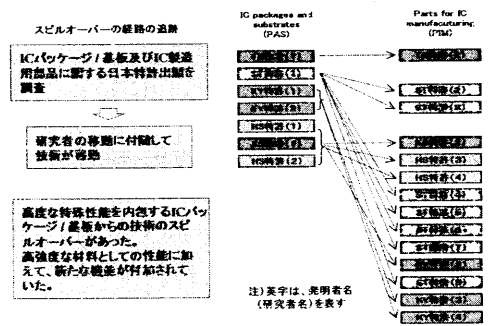


図6. 研究者によるPAS、PIM関連日本特許出願。

ミックスの技術のスピルオーバーを追求した。このセラミックスは普及の歴史が長く、その利用の広がり軌跡を分析した。この結果、研究者の研究活動の広がりが技術のスピルオーバー（製品間技術スピルオーバー）と広範な利用分野の拡大を刺激し、自己増殖の発展を牽引していることが分った。

ハニカム構造セラミックスの最初の製品—自動車排ガス浄化用触媒担体 (SAC) —の研究開発の開始以降、多くのハニカム構造セラミックスが研究開発された。関連特許出願を解析し、①ハニカム構造セラミックスの応用製品を抽出・整理し、系統図にまとめ、②研究者毎のハニカム構造セラミックス関連特許出願調査結果から、技術のスピルオーバー、自己増殖のダイナミズムについて分析した。

表5は抽出されたハニカム構造セラミックス製品17種をまとめたもの、図7はこれら17製品の機能と特徴を示す。図8は研究者毎のハニカム構造セラミックス関連日本特許出願の推移を示す。

図9は研究者毎の特許出願調査結果を基に、応用製品の系統図上に同一研究者による特許出願を矢印を利用して示したものである。

表5 ハニカム構造セラミックス製品

No.	Structure	FISC products	Patent number	Year of the start of R&D
1	A	Support for automotive exhaust gas purification catalyst (SAC)	A1	71
2	A	FTC heater (FTC)	A2	72
3	A	NO _x catalyst and support for NO _x catalyst (NOX)	A3	72
4	A	Heat exchanger (HEX)	A4	73
5	A	The rammed ceramic converter (TCC)	A5	78
6	B	Diesel particulate filter (DPF)	B1	79
7	B	High temperature dust collector (HDC)	B2	84
8	A	Catalytic combustion burner (CCB)	A6	84
9	A	Surface combustion burner (SCB)	A7	85
10	B, C	Filter for industrial use (FIU)	B3/C3	85
11	A	Catalytic for ammonia-oxidation catalyst (BIO)	A8	86
12	B	Gas separation membrane (GSA)	B4	86
13	C	Water purification filter (WPF)	C2	88
14	A	Hydrocarbon oxidizer (HCO)	A9	92
15	A	Heat storage unit (HSU)	A10	94
16	A	Fuel cell (FC)	A11	97
17	A	Transparent honeycomb (TH)	A12	99

* Index of structure variation as follows:
A: Honeycomb structure that many cells (hexes) are distributed uniformly (Basic structure of FISC);
B: Filtration structure which both end faces of cells are closed alternately; and
C: Structure which the form of the lotus root type is used for as a filter.

以上から、技術のスピルオーバーによるハニカム構造セラミックス応用製品の軌跡・広がりは連鎖的であり、自己増殖ダイナミズムを創出していること、研究者の研究活動の広がり（交流）は、製品間技術スピルオーバーと広範な利用分野の連鎖的拡大を刺激し、自己増殖的な発展を牽引していることが判明した。

Function of IBC		
Materials origin	Structure origin	
Physical	Light weight	Large surface area Light weight ← ハニカム構造セラミックス
Mechanical	High strength	High strength ← 本来の機能
Thermal	High heat resistance	High strength Low pressure loss
Chemical	High corrosion resistance, High durability	Low heat capacity

No.	Product Code	Added new functions	Characteristics of IBC products
1	A1	Thermal shock resistance	High thermal shock resistance required for automobile parts
2	A2	PTC effect	Safety as overheat → 自動車用部品として必要とされる過熱防止機能
3	A3	NO _x catalyst	High DeNO _x efficiency, High chemical durability
4	A4	Heat exchange	High heat recovery efficiency
5	A5	Thermally stable compression	Solid as mc generator
6	B1	Filtration	High particle collection efficiency, High thermal shock resistance required for automobile parts
7	B2	Filtration: High temp. operation	High dust collection efficiency, High thermal shock resistance
8	A6	Catalysis	High combustion efficiency
9	A7	Surface combustion	High combustion efficiency
10	B3C1	Filtration	High filtration efficiency, High chemical durability
11	A8	Catalyst support	High productivity of low products
12	B4	Filtration	High gas separation efficiency
13	C2	Filtration	High filtration efficiency, High chemical durability
14	A9	Hydrocarbon adsorbing	High HC adsorbing efficiency
15	A10	Heat storage	High heat storage efficiency
16	A11	Power generating	High power generating efficiency
17	A12	Translucent	Translucent

図7. ハニカム構造セラミックス製品の機能と特徴。

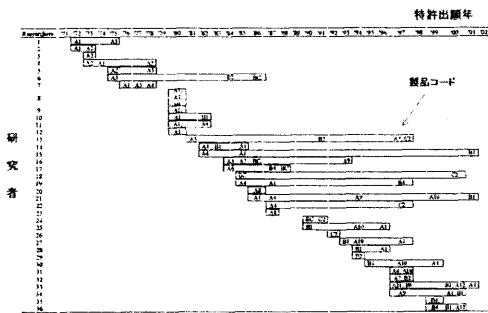


図8. ハニカム構造セラミックス関連日本特許出願の推移。

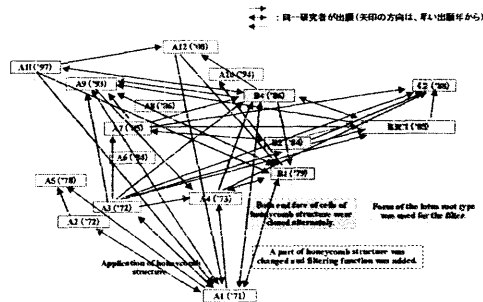


図9. ハニカム構造セラミックス製品の製品間技術スピロオーバー。

5. 結論

工業化社会から情報化社会へのパラダイムシフトに対応し、製造技術中心の成長追求型開発軌道から、情報技術主導の新機能創出型成長軌道への転換が求められている。情報技術主導の新機能創出型軌道への転換促進メカニズムの解明に、ファイナセラミックスを例に検証し、示唆を得た。

ファイナセラミックスにおける新機能付加メカニズム及び自己増殖ダイナミズムは、その高強度材料から高性能材料へのシフトに見られ、

- 1) ファイナセラミックスにおける機能間技術スピロオーバーと製品間技術スピロオーバーによる

- 2) スピロオーバーの経路は、研究者の移動、交流である
- 3) スピロオーバーによる新機能の創出、利用分野の連鎖的拡大が自己増殖的発展のダイナミズムを生み出すことが判明した。

以上の結果より、製造技術中心の成長追求型開発軌道から、情報技術主導の新機能創出型成長軌道への転換を促進し、革新的製品を創出するため、次項が肝要である。

- 1) 機能間技術スピロオーバー、製品間技術スピロオーバーを最大化・最適化し、自己増殖的軌道に乗せること
- 2) このため、技術スピロオーバーの人材量（研究資源）、研究人材の最適配置、研究開発・実用化のタイミングとペース等の具体策（研究開発戦略）の策定と遂行が求められる。その前提として、研究人材の確保、研究者の育成、コア技術の構築、研究ポテンシャルの維持他の基盤研究開発力を醸成すること

今後、引き続き、企業間、産学間の研究者の相互作用についての分析が期待される。

参考文献

- [1] Bernstein J. I. and Nadiri M. I., 1988. Interindustry R&D Spillovers, Rates of Return, and Production in High-Tech Industries, *The American Economic Review* 78 (2) 429-434.
- [2] Bernstein J. I. and Nadiri M. I., 1989. Research and Development and Intra-Industry Spillovers: An Empirical Application of Dynamic Duality, *Review of Economic Studies* 56 (2) 249-269.
- [3] Griliches Z., 1979. Issues in Assessing the Contribution of R&D to Productivity Growth, *Bell Journal of Economics* 10, 92-116.
- [4] Jaffe A. B., 1986. Technological Opportunity and Spillovers of R&D: Evidence from Firm's Patents, Profits, and Market Value, *The American Economic Review* 76 (5) 984-1001.
- [5] Meyer P. S. and Ausubel J. H., 1999. Carrying Capacity: a Model with Logistically Varying Limits, *Technological Forecasting and Social Change* 61 (3) 209-214.
- [6] Ohmura A., Ouchi N., Morisaki S. and Watanabe C., 2003. Functionality Development as a Survival Strategy for Fine Ceramics, *Technovation* 23 (10) 833-842.
- [7] Ohmura A. and Watanabe C., 2005. Inside the Black Box of Cross-Functional Spillover - A Lesson from the Functionality Development of Fine Ceramics, *Journal of Advances in Management Research* (in print).
- [8] Ohmura A. and Watanabe C., 2005. Cross-Products Technology Spillover in Inducing a Self-Propagating Dynamism for the Shift to a Service Oriented Economy: Lessons from High-Performance Fine Ceramics, *Journal of Services Research* (in print).
- [9] Watanabe C., Kondo R., Ouchi N. and Wei H., 2002. Formation of IT Features through Interaction with Institutional Systems - Empirical Evidence of Unique Epidemic Behavior, *Technovation* 23 (3) 205-219.
- [10] Watanabe C., Kondo R., Ouchi N., Wei H. and Griffy-Brown C., 2004. Institutional Elasticity as a Significant Driver of IT Functionality Development, *Technological Forecasting and Social Change* 71 (7) 723-750.
- [11] Watanabe C. and Nagamatsu A., 2003. Sources of Structural Stagnation in R&D Intensity in Japan's Electrical Machinery Industry, *Technovation* 23 (7) 571-591.
- [12] Watanabe C., Zhu B., Griffy-Brown C. and Asgari B., 2001. Global Technology Spillover and Its Impact on Industry's R&D Strategies, *Technovation* 21 (5) 281-291.