

Title	先端大規模技術開発における継続的イノベーション創 発の必要条件 ―スーパーコンピュータ開発のケース スタディー
Author(s)	西田, 政人
Citation	
Issue Date	2012-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/10485
Rights	
Description	Supervisor:井川康夫教授, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

先端大規模技術開発における継続的イノベーション創発の必要条件 ースーパーコンピュータ開発のケーススタディー

指導教員 井川 康夫 教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科 知識科学専攻

1050507 西田 政人

審査委員： 知識 井川 康夫 教授（主査）
知識 小坂 満隆 教授
知識 梅本 勝博 教授
知識 神田 陽治 教授

2012 年 2 月

目次

第1章 序章	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 日本のスーパーコンピュータ開発の現状	1
1.1.2 先端大規模技術開発	4
1.1.3 スーパーコンピュータ開発の特徴	5
1.2 研究目的とリサーチクエスチョン	9
1.2.1 研究の目的	9
1.2.2 リサーチクエスチョン	9
1.3 研究の意義と特長	10
1.3.1 研究の学術的意味	10
1.3.2 研究の実務的意義	10
1.3.3 研究の社会的意義	10
1.3.4 研究の特長	11
1.4 研究の方法	11
1.5 論文の構成	12
第2章 先行文献レビュー	13
2.1 はじめに	13
2.2 イノベーションモデル	13
2.2.1 ラディカルイノベーション	13
2.2.2 アーキテクチャル・イノベーション	14
2.2.3 ドミナントデザイン	15
2.3 オープンイノベーション	17
2.3.1 オープンイノベーション	17
2.4 ユーザイノベーション	18
2.4.1 リードユーザ	18

2.4.2	イノベーションのジレンマ	19
2.5	イノベーションマネジメント	20
2.5.1	テクノロジマッピング	20
2.5.2	イノベーションアーキテクチャ	20
2.6	ナショナルイノベーションシステム	21
2.6.1	日本の先端技術開発推進政策	21
2.6.2	米国の先端技術開発推進政策	22
2.7	まとめ	22
第3章	スーパーコンピュータとイノベーション	23
3.1	はじめに	23
3.2	スーパーコンピュータ開発の歴史	23
3.2.1	スーパーコンピュータ開発の黎明期	23
3.2.2	日本のスーパーコンピュータ開発	24
3.2.3	米国のスーパーコンピュータ開発	24
3.3	スーパーコンピュータ市場	25
3.4	スパコン開発における、イノベーションの形態	26
3.4.1	ドミナントデザイン	27
3.4.2	イノベーションマネジメント	29
3.4.3	オープンイノベーション	30
3.4.4	ユーザイノベーション	32
3.4.5	ナショナルイノベーションシステム	33
3.5	まとめ	37
第4章	Top500 によるデータ分析	38
4.1	はじめに	38
4.2	TOP500 Supercomputer Site	38
4.2.1	Top500 Project	38
4.2.2	Top500 のデータ分析の意義	39
4.3	対象企業の選定	39

4.3.1	スーパーコンピュータメーカー	39
4.3.2	調査対象企業	42
4.3.3	PC クラスタを除く理由	43
4.4	データの分析方法	46
4.4.1	データ整理方法	46
4.4.2	システム数推移	47
4.4.3	合計性能推移	48
4.5	各社データ分析結果	49
4.5.1	6社の全体的傾向	49
4.5.2	IBM	52
4.5.3	CRAY	55
4.5.4	SGI	58
4.5.5	富士通	60
4.5.6	日立	62
4.5.7	NEC	64
4.6	まとめ	66
第5章	イノベーション発生状況分析	68
5.1	はじめに	68
5.2	各社開発状況分析	69
5.2.1	IBM	69
5.2.2	CRAY	74
5.2.3	SGI	78
5.2.4	富士通	80
5.2.5	日立	83
5.2.6	NEC	85
5.3	まとめ	87
5.3.1	米国メーカーまとめ	87
5.3.2	日本メーカーまとめ	89
5.3.3	日米メーカー比較	91

第6章 継続的イノベーション創発要因	92
6.1 はじめに	92
6.2 ラディカルイノベーションの創発要因	92
6.2.1 3つのイノベーションとイノベーションマネジメント	92
6.2.2 製品ラインとラディカルイノベーション	95
6.2.3 オープンイノベーションとラディカルイノベーション	96
6.2.4 クローズドイノベーションとラディカルイノベーション	97
6.2.5 ユーザイノベーションとラディカルイノベーション	97
6.2.6 国のプログラムとラディカルリードユーザ	99
6.2.7 ユーザ・コミュニティとユーザイノベーション	98
6.3 イノベーションの継続性	101
6.3.1 継続性とオープンイノベーション	101
6.3.2 継続性とクローズドイノベーション	102
6.3.3 継続性とユーザイノベーション	102
6.3.4 継続性とイノベーションマネジメント	103
6.3.5 継続性とナショナルイノベーションシステム	103
6.4 まとめ	105
第7章 結論	106
7.1 はじめに	106
7.2 発見事項	106
7.3 理論モデル	109
7.4 研究の含意	110
7.4.1 理論的含意	110
7.4.2 実務的含意	110
7.5 将来研究への示唆	111
参考文献	112
謝辞	115

目 次

1-1	スーパーコンピュータ Top500 にみる製造国別性能シェア	2
1-2	スーパーコンピュータ Top500 にみる製造国別エントリーシステム数	3
1-3	TOP サイトの性能向上実績	6
1-4	マイクロプロセッサのトランジスタ集積度	7
1-5	マイクロプロセッサのクロック周波数と浮動小数点演算性能	7
2-1	技術進歩の S 字曲線	14
2-2	Henderson&Clark モデル	15
2-3	イノベーションの動的モデル	17
2-4	オープンイノベーション	18
3-1	日本の国のスーパーコンピュータ開発プロジェクト	35
3-2	米国の連邦政府によるスーパーコンピュータ関連プログラム	37
4-1	日米スーパーコンピュータメーカー	41
4-2	Top500 における各メーカーのシェア	43
4-3	Top500 に占める PC クラスタのシステム数シェア	44
4-4	Top500 に占める PC クラスタの性能シェア	45
4-5	システム数推移グラフ	47
4-6	合計性能推移グラフ	49
4-7	6 社の合計システム数の推移	50
4-8	6 社の合計性能の推移	51
4-9	IBM システム数推移	53
4-10	IBM 合計性能推移	54
4-11	CRAY システム数推移	56
4-12	CRAY 合計性能推移	56
4-13	SGI システム数推移	59

4-14	SGI	合計性能推移	59
4-15	富士通	システム数推移	61
4-16	富士通	合計性能推移	61
4-17	日立	システム数推移	63
4-18	日立	合計性能推移	63
4-19	NEC	システム数推移	65
4-20	NEC	合計性能推移	65
4-21	Top50 にしめるメーカー推移		67
5-1	イノベーション発生状況分析の視点		68
5-2	IBM	の開発状況分析	73
5-3	CRAY	の開発状況分析	78
5-4	SGI	の開発状況分析	80
5-5	富士通	の開発状況分析	83
5-6	日立	の開発状況分析	85
5-7	NEC	の開発状況分析	87
7-1	理論モデル		109

表 目 次

4-1	IBM 製品のうち評価対象の製品ライン	52
4-2	CRAY の対象製品	55
4-3	SGI の対象製品	58
4-4	富士通の対象製品	60
4-4	日立の対象製品	62
4-6	NEC の対象製品	64
6-1	ラディカルイノベーション発生プロセス（日本メーカー）	93
6-2	ラディカルイノベーション発生プロセス（米国メーカー）	94
6-3	各社のスーパーコンピュータ・ユーザコミュニティ	101

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 日本のスーパーコンピュータ開発の現状

2006年から文科省主導で理化学研究所が開発推進し、富士通株式会社が製造した、“京”が、2011年6月にスーパーコンピュータのランキングサイト Top500 Supercomputer sites で世界一を達成した。2011年11月には、その名が示す通りの10の16乗（京）回の浮動小数点演算を1秒間で実行した事を示す10ペタ・フロップス（PFLOPS）を越える性能を達成し、みごと2期連続世界一になった。このことは、東日本大震災以降、落胆していた日本の社会に取って朗報であった。また、長期の低迷に喘ぐ日本の製造業にとっては今回の世界一の達成は日本の技術力やものづくり力を改めて実感させ、勇気を与えてくれる出来事であったといえる。

この実現に先立つ2010年11月に実施された事業仕分けで、1000億円以上の開発投資が行われたこの京コンピュータが世界 No.1 になる事の意味が問われ、大きな議論を巻き起こした。1位を狙わずして上位に入ることは難しく、高い目標設定が必要であるとの意見が多く聴かれた。しかしながら、その後多くの議論がなされたが、その高い性能実現の真の目的が何かと言う事に対して、明解な回答や、コンセンサスが得られたかと考えてみると甚だ心許なく感じられる。

科学技術立国と称し、高い技術力で高い国際競争力を持っていた日本であるが、失われた20年を経て、急速にその国際競争力を失っている。特に、製造業の低迷は深刻であり、日本の将来に大きな不安な影を落としている状況である。近年益々、イノ

ベーションの重要性が盛んに訴えられているが、それに反して実際の日本はイノベーションを生み出せなくなっているのではないかという自信喪失と、危機感を強くしているように思われる。このような状況のなか、“京”コンピュータは世界一位を達成したが、このことが、日本が科学技術の分野で未だ優位を保っていると言える証拠になるのであろうかと考えると確認を持てない。

“京”がナンバーワンを獲得したのは、毎年2回、スーパーコンピュータの性能をランキングしトップの 500 位までを公表しているサイト、Top500 Supercomputer Sites である。ここで 1993 年から過去 19 年間の Top500 位までの性能測定実績が集計され公開されている。図 1-1 に過去 19 年間の Top500 にエントリーしたスーパーコンピュータの性能値を製造国別に集計したものである。日本は京以前にも 3 つのシステムで世界一位を達成している。1993 年の航空技術研究所の数値風洞 (NWT)、1996 年の筑波大学の CP-PACS、2002 年の地球シミュレータである。

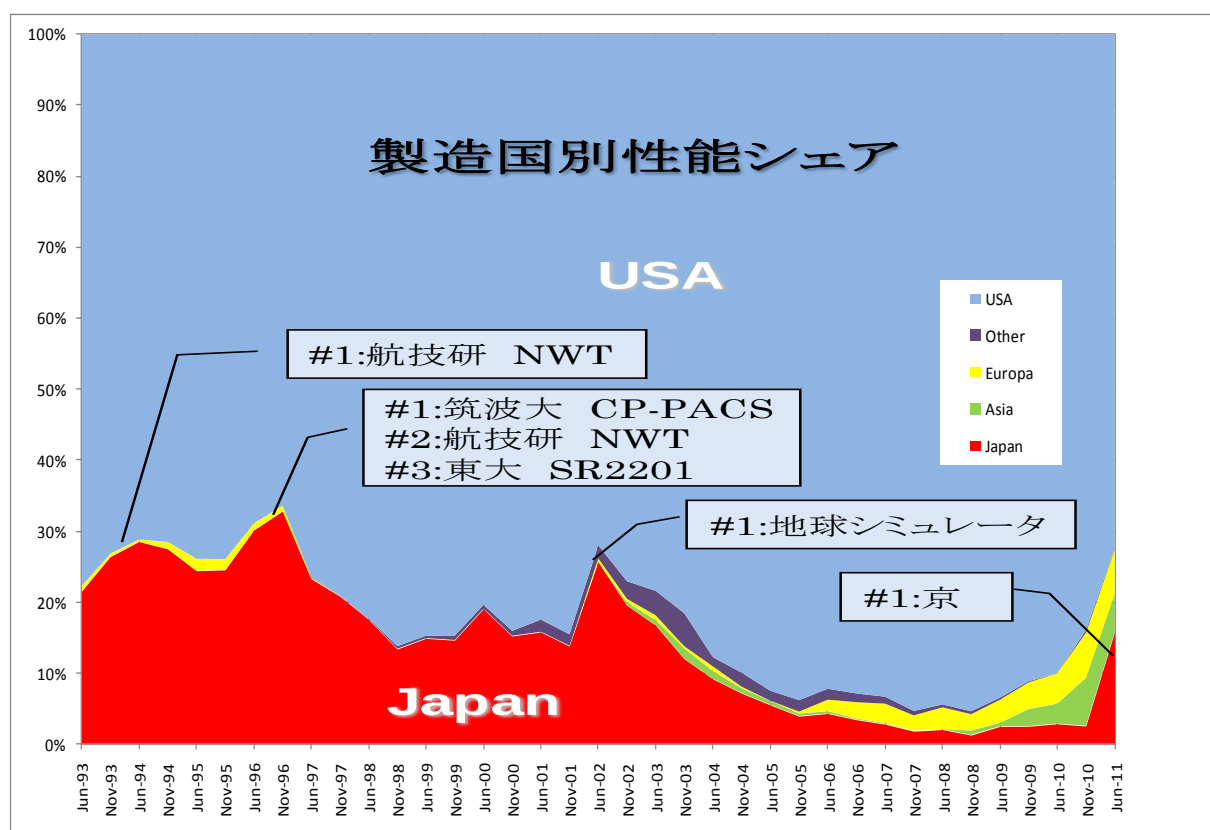


図 1-1 スーパーコンピュータ Top500 にみる製造国別性能シェア

1990年代には日本は性能シェアで30%近くをしめていたが、地球シミュレータ以降大きくシェアを失っていた。図1-1で見る限り、それを今回の“京”で再びシェアを戻したように見える。一方、図1-2に、同様に製造国別に集計したものを示した。ここで、米国は過去19年間に渡って圧倒的に多く、80%以上を常に占めている。これに対して、日本は1990年代には2割近く、1993年6月に107台がエントリーしていたが、2011年時点で15台まで減少している、さらにそのうち訳も、1993年当時は独自開発製品のみであったが、現在は大半が海外で設計製造される汎用部品を使用したPCクラスタやOEM製品に変わってきており、日本メーカの独自開発の製品は、ほんの数台というレベルにまで激減している。

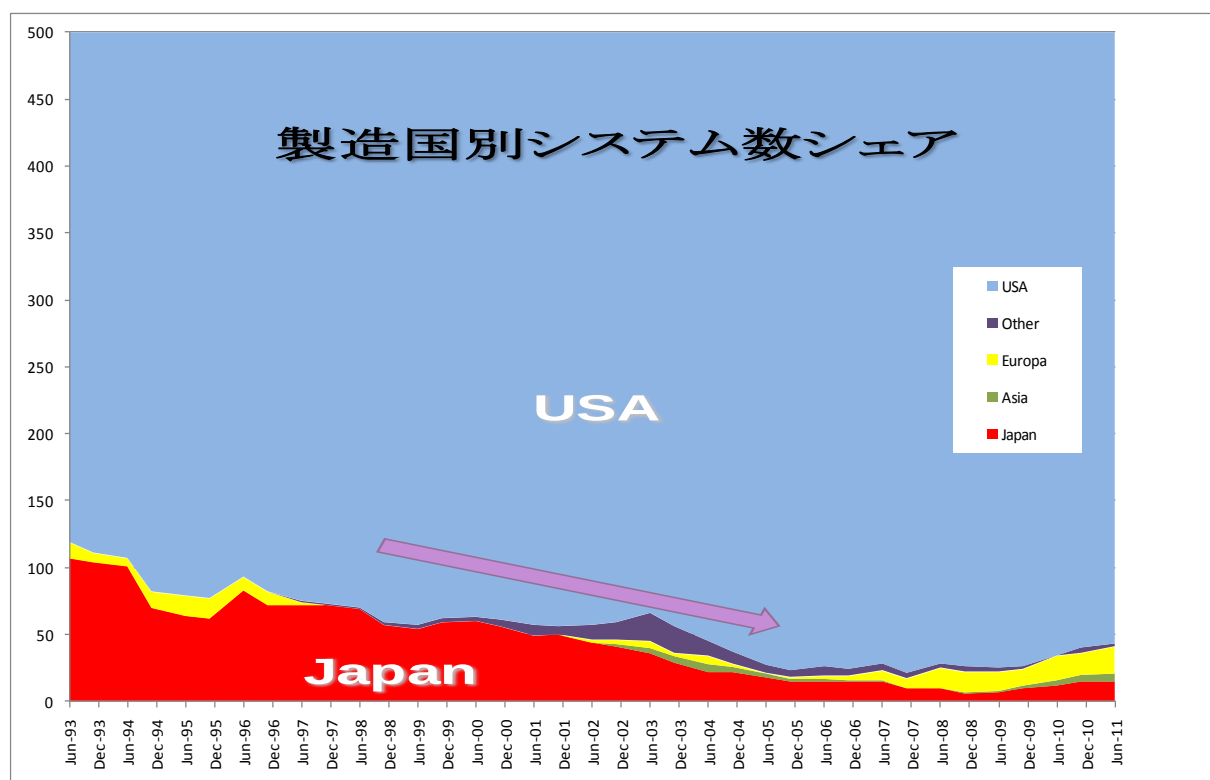


図1-2 スーパーコンピュータ Top500 にみる製造国別エントリーシステム数

また、スーパーコンピュータの市場において、日本は1990年代には欧州を中心にグローバル市場で高いシェアを持ち、米国企業を脅かす存在で有ったが、今日、日本メーカーの海外事業はほとんど海外市場から撤退しており、国際的な競争力を失ってきている。特に、皮肉にも2002年に地球シミュレータで世界一を達成してから以降の低迷が顕著で在ることも、今回の世界一が手放しで喜べない理由の一つである。

1.1.2 先端大規模技術開発

日本の産業が高度成長のキャッチアップの時代を過ぎ、1990年代以降フロントランナーのフェーズに入ったと言えるが、バブル経済の崩壊以降、日本の産業は失われた10年、20年とも言われる長期低迷時代に入っている。日本が科学技術立国と叫ばれて久しいが、新たな社会経済的な成長を生み出すためには、イノベーションが不可欠であり、そのイノベーションを生み出す要素として、科学技術は非常に重要な要素である。特に先進国と認められてから以降は、フロントランナーとして先端技術の開発を牽引していくことが世界から求められている。

まず、先端大規模技術開発とはなにかを定義しておきたい。

文字通りに解釈すれば、先端技術を利用する大規模な技術開発であり、新規の要素技術の研究開発、新規の製品開発を行い、大規模なシステムを構築する開発である。

先端大規模技術開発には、以下のような特徴があるといえる。

まず第一に、大規模なシステムを開発するために多種多様な技術が必要であり、その技術を総合した総合技術開発であるといえる。また、先端的な技術であるため、成果を生み出すまでの大きな開発投資が必要になる一方、期待した成果が得られない事があり、開発リスクが高い。そして、それを実現するためには大きな組織、すなわち多量の人物金が必要になる。また、その開発負担とリスクの大きさから、一企業の事業としてリスクを取りきれない場合もあり、国の支援が必要になる場合もある。

一方で、この先端大規模技術開発は波及効果が大きく、以下の3つのイノベーションを生み出す可能性がある。

まず第一に、先端技術開発自身が生み出すイノベーションである。先端的な技術開発が市場に投入され、市場でそれを用いた新たな製品・サービスが生み出されることによってイノベーションが生み出され可能性である。例えば、“京”を例にすれば、京コンピュータ自身とそれを商用展開した製品がそのイノベーションの直接的なアウトプットといえる。第二に、先端技術開発の波及効果によって生み出される異なる製品サービスでのイノベーションである。先端技術から派生した技術がより多くの製品に適用されることでイノベーションを生み出す可能性である。スパコン用に開発されたテクノロジーがサーバやPC等に適用されるようなケースなどが想定される。最後に、先端技術開発成果の利用活用によるイノベーションである。先端技術開発で生み出された製品やサービスを利用して新たなイノベーションが生み出されるケース

である。スーパーコンピュータの例であれば、スーパーコンピュータを利用した科学技術計算シミュレーションによって、新材料や新製品が生み出されるケースが相当する。以上のように先端大規模技術開発による社会経済的波及効果を生み出す可能性が高く、広く波及効果を生み出す可能性を持っているといえる。

先端大規模技術開発の例としては、衛星やロケットといった宇宙開発や大型旅客機の開発、軍事関連技術開発や、先端インフラ開発が挙げられる。原子力発電システムや、新幹線システムといった社会インフラは、運用システムや供給システム等を含む複雑で高度な大規模な技術開発である。スーパーコンピュータも、ハードウェア、ソフトウェア、ミドルウェア、アプリケーションやそれを使いこなすためのチューニング技術、保守運用の技術があり、さらに、それを利用することで計算シミュレーションによって新たな科学・技術の成果が生み出される。

1.1.3 スーパーコンピュータ開発の特徴

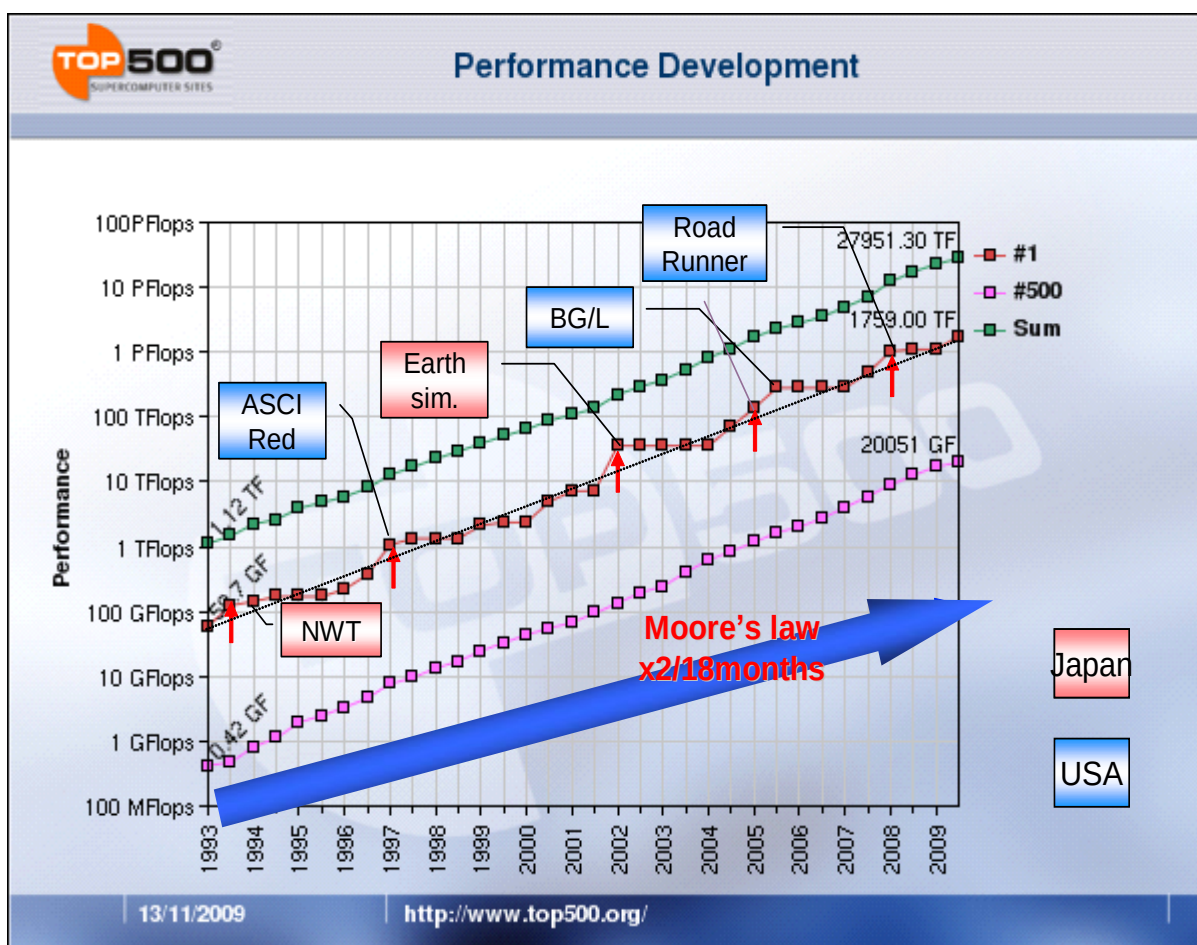
本論文では、先端大規模技術開発の一例として、スーパーコンピュータ開発を取り上げて分析を行う。

日本のスーパーコンピュータ開発は相対的に低迷しているが、世界的市場規模で見した場合、スーパーコンピュータの技術開発は着実に成長を続けている。

図 1-3 に Top500Supercomputer sites の過去の性能トレンドを示す。Top1 の性能は、非連続に成長しているものの、長期的にみれば、一定の傾きで向上している。またこの傾きは、500 位のシステムの性能トレンド（図中、ピンクのプロット）とも、500 位までの合計性能（図中、緑のプロット）とも一致する。すなわち、スーパーコンピュータの性能は Top500 が含まれるハイエンドコンピューティング市場全体で、同じ傾きで性能向上していると考えてよい。この性能向上の傾きは、平均で 4 年で 10 倍以上（年率 1.8 倍）を達成し続けている。この性能トレンドは半導体・IT 分野でよく引き合いに出される、“Moore の法則”（変形型として、「性能は 18 ヶ月で 2 倍」）で知られる性能トレンドをも大きく上回る性能向上である。Moore 則自身も個々にきわめて厳しい競争のもと、飛躍的な技術革新を積み重ねてようやく実現されるものである。このことから、半導体等の個々技術革新による性能向上だけでは実現出来ない、よりラディカルなイノベーションが発生していることを示しているといえる。

図 1-4 に実際のマイクロプロセッサのトランジスタ集積度を示す。このデータから

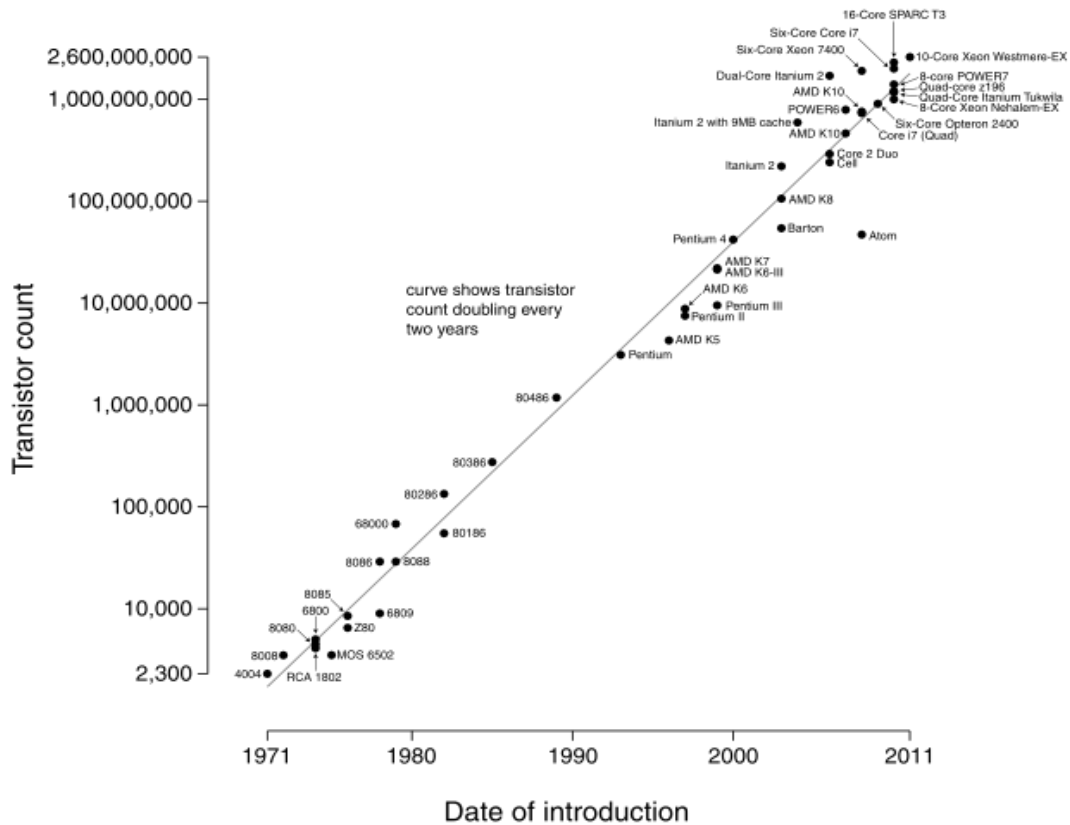
は2年で2倍（年率1.4倍）にしかっていない。また、図1-5にマイクロプロセッサのクロック周波数と、浮動小数点演算ベンチマークプログラム（SPECfp2000）の性能実績を示す。2004年まではクロックが年率1.3～1.4倍、浮動小数点演算性能が、年率1.5～1.6倍となっており、2004年以降は半導体のスケーリング則の限界から向上率が大幅に低下している。また、いずれも Moore 則以下の成長に留まっており、Top500 の性能トレンドには届いていない。



(出典：Top500 supercomputer sites)

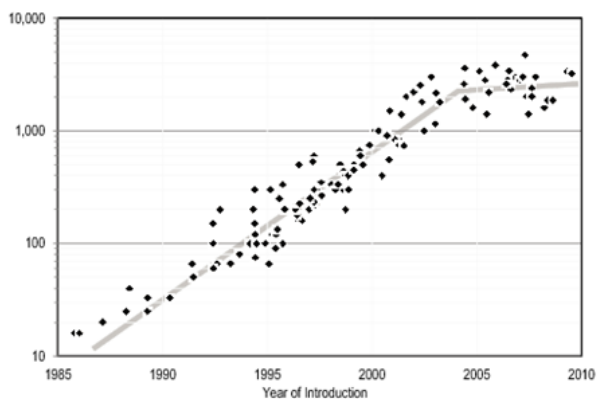
図 1-3 TOP サイトの性能向上実績（1 位、500 位、1～500 位合計）

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

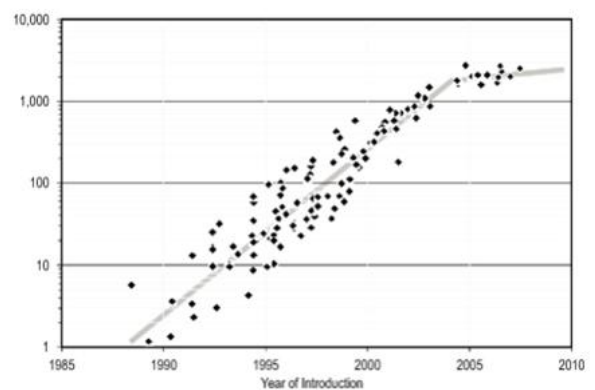


(出典 : http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law)

図 1-4 マイクロプロセッサのトランジスタ集積度 2年で2倍



Microprocessor clock frequency (MHz)
over time(1985-2010)



Floating-point application performance
(SPECfp2000) over time(1985-2010)

(出典: The future of computing performance)

図 1-5 マイクロプロセッサのクロック周波数と浮動小数点演算性能

トップ性能のシステムは、頻繁に入れ代わり、そのメーカーも Top が入れ替わる度
に変わっており、メーカー間の激しい競争が発生していることもわかる。その状態が、
過去 19 年間、衰えることなく続いてきた事になる。

一般的な、製品開発においては、Utterback と Abernathy (Utterback &
Abernathy, 1978) らによれば、初期の市場形成時期の流動期の過当競争の時期を過ぎ
ると、ドミナントなデザインが市場に形成され、固定期に入り、性能向上は緩やかにな
ると考えられているが、この Top500 の結果からは、一時的なドミナントデザイン
はあるかもしれないが、この 19 年間でみれば、スーパーコンピュータ市場全体が継
続的に、きわめて高い性能向上を続けていると言う、スーパーコンピュータ特有の現
象が観察されていると言える。

次に、スーパーコンピュータ開発の特徴を整理すると以下のような点が挙げられる。
まず第一に、「ターゲットが Given」であること。図 1-2 でわかるように、性能向上ト
レンドは過去 19 年間に渡って、ラディカルなレベルを維持しており、これから先も
この傾斜が続くものとして、市場に期待されている。“京”の次は 2020 年ごろに
は”Exa” (10 の 19 乗)を越えるということがコンセンサスとなっている。また、この
トレンドがコストパフォーマンスに対する期待値にもなっており、より安く、より高性能
が求められ続けている。第二に、「インクリメンタルイノベーションで実現不可」
で有ること。技術トレンドを遙かに上回る性能向上を実現し続けるためには、ラディ
カルなイノベーションが発生していると考えerべきと思われる。第三に、「多様な先
端技術が必要」であり、例えばスーパーコンピュータであれば、半導体、LSI、回路、
実装といったハードウェア、ソフト、ミドル、アプリと言ったソフトウェア関連を含
む、複合的総合技術で有ると言える。第四に、「長い開発期間と短い製品寿命」が
挙げられる。大規模開発であるがゆえに 3～4 年の開発期間を要するが、製品の性能
向上が著しいために、短期間のうちに陳腐化し、市場での競争力を維持できる期間は
わずかである (3～4 年程度) このため、事業としては採算確保が難しいと言う問題が
ある。また、ハイパフォーマンスコンピューティング市場は、あまり大きくない市場
の中での競争になる。最後に、スーパーコンピュータの大規模ユーザーは、大学や
国内外の国立研究所といった国の影響力が大きい。

1.2 研究目的とリサーチクエスション

1.2.1 研究の目的

スーパーコンピュータ開発における、前述のような高い性能向上を実現するために、どのようなイノベーションが創発されているのか。また、いかにして、そのラディカルなイノベーションが創発されているのか。そして、何によって継続的に発生し続けているのかと言う点について疑問がわいてくる。

本論文では、その継続的に発生するイノベーション創発状況の可視化を試み、それを起こすための要因を分析したうえで、イノベーションを自ら生み出し続けるための方法について分析をおこなうものである。また、分析する視点として、企業内におけるイノベーションマネジメントの働き方、および、企業外のイノベーション創発につながる環境要因について検討を行い、継続的にイノベーションを生み出すための必要条件を見出すことを目的としている。

1.2.2 リサーチクエスション

マスター・リサーチクエスション

MRQ： 先端大規模技術開発において継続的にイノベーションを創出させるための必要条件はなにか？

先端技術を用い、大規模な技術開発を行う、スーパーコンピュータのような開発においては、不確実な要素や、大きな開発リスクを伴う開発である。そのような開発において、継続的にイノベーションを創発し続けるためには、継続的にイノベーション発生するように働きかけるものの存在が想定される。それらのイノベーションを生み出す。それらの要因についての分析を行う。

サブシディアリ・リサーチクエスション

SRQ1： スーパーコンピュータ開発において、どのようにイノベーションが発生してきたのか？

イノベーションの要因分析を行う前に、いつ、どのようにイノベーションが発生しているのかをとらえることが重要である。イノベーションの発生を客観的にとらえる事は一般に難しく、主観的評価になるかまたは、時間が経ってからの評価による場合が多い。さらに、イノベーションの発生の瞬間をとらえる事はさらに難問である。今

回、公開情報を再分析する事でイノベーションの発生状況を客観的に捉える方法を見出す。

SRQ2：スーパーコンピュータ開発において、どのような要因でイノベーションが創発したのか？

イノベーションの発生状況が捉えられたとして、そのイノベーションが、どのような要因によって発生したものかを分析する必要がある。また、この要因は、かなり時間を遡って分析する必要が出てくる可能性がある。

SRQ3：スーパーコンピュータ開発において、継続的にイノベーションを創発させるための要素はなにか？

個々のイノベーションの発生には不確定要因があるため、偶発的に発生している可能性は有るが、偶然に発生するイノベーションに依存した開発では、事業の継続は難しい。さらに、専業メーカーであれば、継続的にイノベーションを続けていかないと会社の存亡がかかってくる問題である。イノベーションを継続的に発生させている要因をイノベーション・マネジメント・サイクル取り込む事を検討すべきである。

1.3 研究の意義と特長

1.3.1 研究の学術的意味

スーパーコンピュータ開発における、イノベーション創発の状況の可視化を試みる。また、そのイノベーションの発生要因についても詳細に分析を行い、イノベーション創発プロセスに必要な条件を分析、整理し、理論的モデルの構築を行う。

1.3.2 研究の実務的意義

スーパーコンピュータ開発において、イノベーション創発の要因分析を行い、継続的にイノベーションを発生し続けるために必要な条件を洗い出し、その結果をもとに、企業内におけるイノベーションマネジメントに対する提言を示す。さらにはナショナルイノベーションシステムに対しても同様に提言を行う。

1.3.3 研究の社会的意義

スーパーコンピュータ開発における継続的なイノベーションを生み出す必要条件

を明確にすることによって、他の先端大規模技術開発やその他の技術開発に展開できる可能性がある。これを可能な限り広範な技術開発へ展開することで、より大きな社会・経済的な波及効果を上げるイノベーションを生み出す可能性を示す。

1.3.4 研究の特長

イノベーション発生状況を公開の定量的データを元に客観的なデータを元に分析し、イノベーションの発生状況を可視化する。また、文献やインタビュー、自身の経験等を元に技術的背景を含めて可能な限り詳細な技術開発プロセスの調査を行うことで、より具体的なイノベーション創発要因とそのプロセスについての分析を行う。

1.4 研究の方法

本研究は、事例研究（文献調査）を中心に実施する。

まず第一に、公開データである Top500 Supercomputer Sites のデータを使用した分析を行う。具体的には、Top500 Supercomputer Sites に蓄積された、過去 19 年間の詳細なデータの中から、日米 6 社に着目して分析を行った。抽出したデータを独自の方法でデータを整理分析し、そのイノベーション創発状況の可視化を行う。

次に、各社のスーパーコンピュータの開発状況について文献を中心に調査を実施した。具体的には、日米メーカー（日米それぞれ 3 社）のスパコン開発状況分析を実施する。方法としては、国内メーカーについては、各種文献および、部分的に実施したインタビュー等を元に、分析を行った。また、米国のスーパーコンピュータメーカーの開発状況については、ネット上に公開されている情報および書籍から分析を行った。また政府系組織が発行した以下の文章についても分析を行った。

NITDR Supplement to the President's Budget 1992～2010

CSTB, National Research Council 発行書籍など

開発プロセスや、技術的なバックグラウンドの調査に関しては、筆者の 25 年に渡るスーパーコンピュータ設計者としての経験や業界関係者へのインタビューと、過去の各社の技術的分析データなどを元に、技術面、事業面を含めて可能な限り詳細な分析を行うよう努めた。

1.5 論文の構成

本論文は7章から構成される。

第1章では、序論として、本研究を実施するに至った問題意識と、その背景にある社会的状況について述べた。また、先端大規模技術開発の定義および、スーパーコンピュータ開発の特徴について述べた。

第2章では、先行文献レビューとして、イノベーション論に関する先行研究について述べる。

第3章では、スーパーコンピュータ開発における、定性的なイノベーションの発生状況を外観し、先行研究との関係を確認する。

第4章では、文献調査として、**Top500 Supercomputer Sites** のデータを詳細に分析。定量的かつ客観的にイノベーションの発生状況を可視化する。また、ラディカルなイノベーションの結果生まれたと考えられるラディアカル製品を抽出する。

第5章では、文献調査として、4章で抽出した、各ラディカル製品を中心にして、各社の開発の内容を詳細に分析し、ラディカルなイノベーションが創発するための要因の分析を行う。

第6章では、4章および5章で分析した結果をもとに、共通的なラディカルイノベーション創発要因の抽出を行うと共に、継続的なイノベーションの創発要素を抽出する。

最後に、第7章では、結論として、発見した結果をもとに、理論モデルを提示し、研究の含意を述べる。

第2章 先行研究レビュー

2.1 はじめに

本章では、先端大規模技術開発におけるイノベーション創発要因の分析にあたり、イノベーションに関する、共通的なモデル、創発要因および、イノベーション創発プロセスやイノベーションマネジメントに関する先行研究レビューを行う。

2.2 イノベーションモデル

2.2.1 ラディカルイノベーション

Shumpeter は著書の『経済発展の理論』（Shumpeter, 1934）の中で、イノベーションは「単に古いものにとって代わるのではなく、一応これと並んで現れるのである。なぜなら、古いものは概して自分自身のなかから新しい大躍進を行う力を持たないからである。このことは新結合が軌道の変更という第一種の非連続性のほかに、発展担当者の変更という第二種の非連続性を作り出すばかりではなくさらにその付随現象の経過も支配する」と述べ、技術的な非連続性ととも、発展担当者の非連続性が発生する場合があることを指摘している。また、イノベーションの担い手を「企業者」と呼び、起業家や大企業がイノベーションの担い手になる事を述べた。

イノベーションを大きく2つに分類すると、従来技術の延長での斬新的進歩をなすインクリメンタル・イノベーションと、従来技術から飛躍をし、非連続的かつ急進的進歩をなすラディカルイノベーションに分けられる。

Foster は、技術進歩は S 字カーブで表現され、いずれ技術進歩は限界に達するた

め、限界に達する前に新たな投資を行う必要がある、と指摘している。(Foster, 1986) 技術進歩は、初期段階では、知識の蓄積段階であり発展は緩やかであるが、やがて急速な進歩を遂げる中期に入る、その後、技術限界に近づき進歩は緩やかなものに戻り停滞する。この技術進歩の停滞を打ち破るために、S字曲線の変化を感知し、非連続な技術変化による新たなS字曲線を生み出す必要があるとしている。このS字曲線上での技術進歩は、既存の技術の延長上に想定される技術進歩であり、インクリメンタル・イノベーションと考えられる。これに対して、S字を乗り換える技術進歩は、非連続な、ラディカルイノベーションととらえられるものである。

Tushman & Anderson は、非連続性には既存企業が担い手となる能力増強型の非連続性と、新参入企業が担い手となる能力破壊型の非連続性がある (Tushman & Anderson, 1986) とし、これらの非連続性は、環境の状態に影響を与えると述べている。このように、能力破壊型で非連続な技術進歩を起こすラディカルイノベーションを既存企業内で生み出す事の難しさと、その対応に備える事を示唆している。

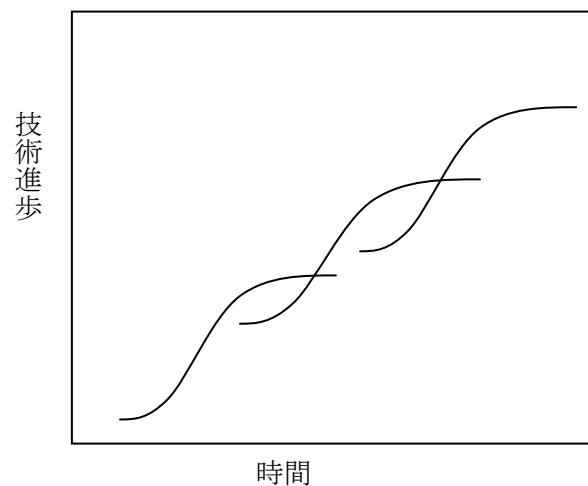


図 2-1 技術進歩の S 字曲線

2.2.2 アーキテクチャル・イノベーション

Henderson と Clark は、従来、インクリメンタルとラディカルの2区分で議論されていたイノベーションにおける技術の非連続性を、構成要素自身の変化と、構成要素間の結合関係の変化に着目し、結合関係をそのままに、構成要素を強化するインク

リメンタル・イノベーションに対して、構成要素のみを新しくするモジュラー・イノベーションと結合関係のみを新しくするアーキテクチャル・イノベーションと定義し、ラディカルイノベーションは構成要素も、その結合関係も共に新たに作る者であるとしており、既存企業において他社がアーキテクチャル・イノベーションを起こしていても、その接続関係の差を正しく認知出来ずに見逃してしまう可能性があることを指摘している。(Henderson&Clark,1990)。

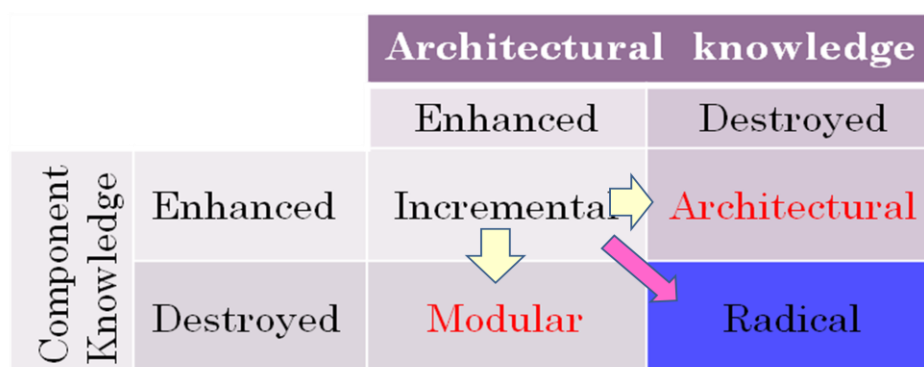


図 2-2 Henderson&Clark モデル

また、本モデルから、ラディカルイノベーションはモジュラー・イノベーションおよび、アーキテクチャル・イノベーションに分解して再構成することが可能であると示唆しているとも考えられる。ラディカルイノベーションをモジュラーとアーキテクチャルなイノベーションに分解し段階的に実現することで、特に既存企業において既存事業に対する影響を抑えながらラディカルイノベーションにつなげられる可能性を示唆しているとも考えられる。

2.2.3 ドミナントデザイン

では非連続で破壊的な技術進歩は継続するのであるか。Abernathy と Utterback や、Tushman と Rosenkopf らはイノベーションの進化過程には、技術的不連続の発生から流動期を経て、市場で安定的に指示されるドミナントデザインが生まれ、その後漸進的なインクリメンタルでプロセスイノベーションが中心のフェーズに移行するイノベーションの動的モデルを示している。

Abernathy と Utterback は、自動車産業や、パーソナルコンピュータなどを例にして、産業におけるイノベーションのダイナミックモデルを示している。産業の初期では「流動期」(Fluid Phase)であり技術の優劣がはっきりせず、多数の技術が乱立し多様性を持つ時期である。この時期は規模の経済が働かないので小回りのきく企業に優位であり、多数の企業が競合して生み出すプロダクトイノベーションが中心になる。その後、「移行期」(Transitional Phase)では市場において優劣の評価が行われ淘汰が進む一方で、生産性の改善に向けた製造プロセスのイノベーションが主になっていく。最終的には「固定期」(Specific Phase)においてドミナントデザインが確定しプロダクトイノベーションもプロセスイノベーションも小幅で漸進的なものとなり、産業構造が生産性のより高い企業に絞り込まれてくる。

(Utterback&Abernathy,1978) また、Utterback らは、この動的モデルを大型並列スーパーコンピュータ開発に適用し、1980 年代後半から 1990 年代に急速に拡大した Massive-Parallel-Computer (MPC) を例に、技術的不連続の発生とドミナントデザインの生成の過渡的状态の例として取り上げている。

(Afuah&Utterback,1990)(Utterback&Suarez,1993)(Utterback,1994)。当時、コンピュータ市場は、ダウンサイジングのトレンドが拡大しており。同時に RISC (縮小命令セットコンピュータ) プロセッサの発展や並列処理の流れの中、安価なプロセッサを多数つなげて計算を行わせる MPC が注目をあつめ、ベンチャーや、スピンアウト企業等、多数の企業が市場に参入した。(1983 年の 6 社から 1988 年に 12 社) Utterback らはこの後、ドミナントデザインが確定されるに従い複数の企業が退出することを予測した。しかし、その後 2000 年頃までには MPC メーカーのほとんどは市場から姿を消し、MPC 自身は安定したドミナントデザインにはならなかった。また、IBM が研究では先行していたにもかかわらず RISC プロセッサを採用した製品市場への参入が遅れた事を指摘し、既存市場でドミナントデザインを確立した企業が、技術的非連続による流動期への参入に遅れる可能性を指摘している。(Utterback,1994)

同様に Tushman と Rosenkopf は、イノベーションのダイナミックモデルとして、「技術的非連続」発生から「発酵期間」を経て「ドミナントデザイン」が生み出され、「インクリメンタル期間」に移行する事を指摘している。彼らはまた、技術変化は

技術の内的要因だけではなく、非技術的要素（組織間の関係や組織の選択肢）によっても規定される事を指摘している(Tushman&Rosenkopf,1992)

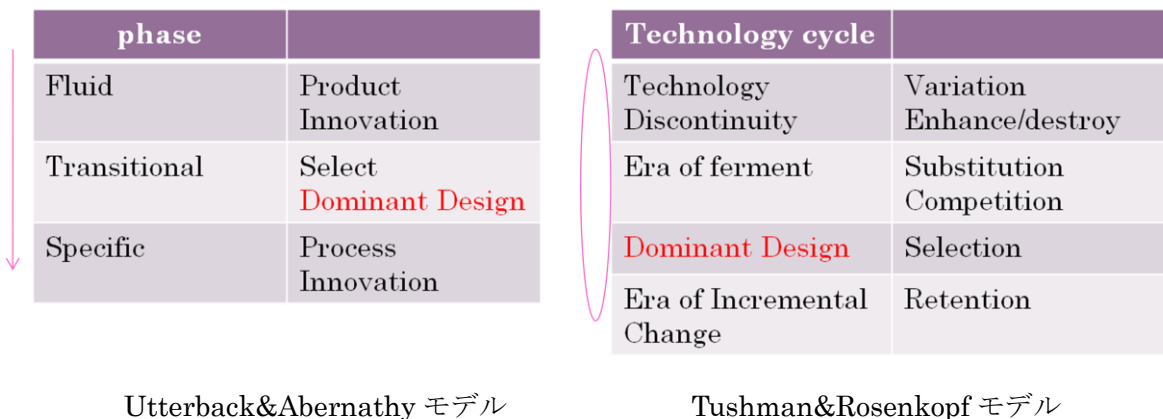


図 2-3 イノベーションの動的モデル

2.3 オープン・イノベーション

2.3.1 オープンイノベーション

Chesbrough は、従来、社内で研究開発を行ったテクノロジーを製品に適用し市場に提供してきた技術的進歩をクローズドイノベーションとし、これに対して、社内だけではなく社外の技術を M&A や協業、ライセンス供与などの取り込みを積極的に推進するオープンイノベーションを提唱した。また社内の技術についても、スピンオフベンチャを立ち上げたり、ライセンス提供することで、社内で有効活用が難しいテクノロジーの有効な活用が可能となるとしている。特に昨今のオープンソースソフトウェアの普及はオープンイノベーションの有効性を実証する例として挙げている。

(Chesbrough,1999)

von Hippel(1988) は社外の知的資源として、①サプライヤと顧客 ②大学・政府・私設研究所 ③ライバル企業 ④外国の 4 種類を挙げている。

クローズド・イノベーションは、他社に対して、秘密保持等の面では有効であるが、グローバル化、多様化しよりスピードが求められる現在のテクノロジー進展のなかオー

オープンイノベーションが必須になりつつあることを述べている。

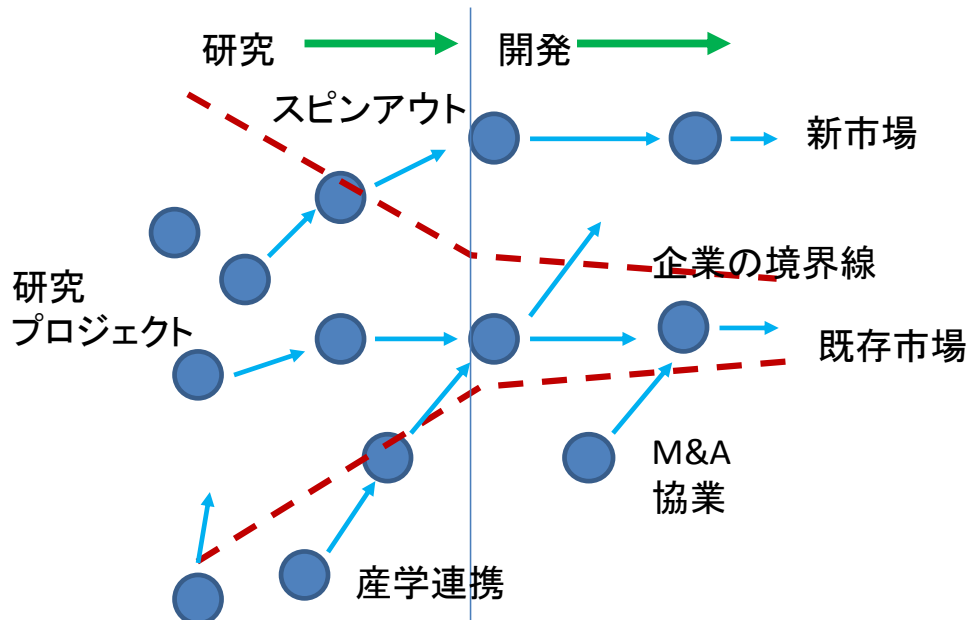


図 2-4 オープンイノベーション

2.4 ユーザー・イノベーション

2.4.1 リードユーザー

von Hippel は、イノベーションの担い手がメーカーだけではなく、イノベーションの源泉が多様化し、ユーザー、メーカー、サプライヤがイノベータユーザーが重要な役割を担う可能性を指摘している。イノベータとしてユーザーがイノベーションを担い、ユーザー自身がイノベーションの源泉となり得るケースとして

- ・メーカーに先行して試作したり、ユーザー自身が大規模な改良を行う場合
- ・ユーザーからメーカーへ知識の移転があるケース

のような場合を挙げている。

また、市場で今後一般的になると思われる問題に直面しているユーザーや、それを解決することによって大きな利益を得られる状況にあるユーザーを「リードユーザー」としてイノベーション創発に重要な役割を果たしている事を指摘している。特に先端

技術分野においては解決したい問題をユーザーが持っており、どう解決したいかもユーザーが知っている場合があり、このユーザーの特異な能力を利用することでメーカーのイノベーション成功率の向上に貢献できる可能性があるとしている。(von Hippel, 1988) また、3M で実践されたリードユーザーを活用する LU 手法を用いることでイノベーションを加速できることを示している。さらにユーザー間で知識共有を行うイノベーション・コミュニティの存在がイノベーションに貢献していることを指摘している(von Hippel, 2005)

ユーザーイノベータが知識を公開し共有する場の存在としては、オープンソース・ソフトウェアが例として取り上げられる。また、ユーザーコミュニティをより一般化した情報コミュニティの発生条件として下記を示した。

- ・一般には知られていない情報を持った人々の存在
- ・自分の情報を無料で公開しても良いと考える人々の存在
- ・公開された情報を利用する人々の存在

このように高い知識を持つユーザーの間に広範に分散化した知識からユーザーイノベーションが生まれる場合がある。

スーパーコンピュータにおいても各メーカー対応にユーザーが主催するユーザー会が存在する。この場は、後述するように、メーカーからの情報共有よりもユーザー間の情報共有に重きが置かれている。(von Hippel, 2005)

2.4.2 イノベーションのジレンマ

一方で、「顧客の要求に細心の注意を払う企業ほど、急進的で破壊的なイノベーションを見逃しやすい」という Christensen の指摘（イノベーションのジレンマ）があり、既存顧客への注力がラディカルイノベーションを阻む可能性を指摘している。

(Christensen,1997)

しかし、von Hippel のユーザー・イノベーションの指摘は、どのようなユーザー（ラディカルユーザー）の声を聴くべきかを指摘しており、既存市場のユーザーの声を聴くジレンマとは異なるとも考えることが出来る。

2.5 イノベーションマネジメント

次に実際にイノベーションの担い手となる企業内において多様なテクノロジーを駆使して、イノベーションを生み出していくためのマネジメント手法としてテクノロジー・ロードマッピングとイノベーション・アーキテクチャを取り上げる。

2.5.1 テクノロジーロードマッピング

Phaal らは、将来の市場のトレンドに対して、テクノロジー・研究開発を製品開発に結びつけるための時間軸を意識したロードマップを作成し推進する「T-Plan」と呼ばれる戦略ロードマッピングのアプローチを提案している。個々のテクノロジーのロードマップを作成する事は、一部の企業や、公的機関で行われているが、製品開発にきちんと結びつけ、それをもとに戦略策定をおこなうことは、先端企業においても部分的にしか行われておらず、全体最適化は十分とは言えない。市場を意識した製品開発を明確にし、それにつながるテクノロジー研究開発の推進が重要といえる。

特にスーパーコンピュータ開発のような先端テクノジを多用した製品開発においてはテクノロジーロードマップを意識した開発が重要である。いつどのようなテクノロジーが利用可能かを明確にし、いつまでにどのテクノロジーを製品適用出来るようにする必要があるか、市場および技術トレンドと、競合他社の動向を見ながら戦略策定が重要になる。(Phaal,2004)

2.5.2 イノベーションアーキテクチャ

Tschirky らは、企業内の知識を対象知識、方法論的知識、メタ知識の3に分類し、これらの知識のうちテクノロジーに関する知識（テクノロジープッシュ）と市場ニーズに対する知識（マーケットプル）を、基本機能を中心に関連付けを行い、知識の強み弱みの分析を行って製品開発のために必要な戦略策定を行うためのイノベーションアーキテクチャを構築する手法を提案している。

企業内に存在する知識を中心に、必要があれば外から入手することも考慮し、イノベーション創発に必要な戦略をとるためのアプローチで通常の企業内の事業における戦略策定の有用なイノベーションマネジメント手法である。

スーパーコンピュータ開発は様々なテクノロジーを利用し開発されており、社内外の技

術を総合した開発戦略の策定が重要といえる。(Tschirky,2006)

2.6 ナショナルイノベーションシステム

2.6.1 日本の先端技術開発推進政策

スーパーコンピュータをはじめとする、先端大規模技術開発においては、国の関与による影響は少なくない。特に大規模なプロジェクトには国が推進するものが多い。

日本の国のプロジェクトに関し、過去の日本のスパコン開発プロジェクトについて分析・評価したものとして、1981-1989に通産省主導で共同研究の形で実施されたスーパーコンピュータ開発プロジェクトに対するマネジメントと効果について分析されている(中村,2000)、スーパーコンピュータ開発としてのスピルオーバーが十分ではなく有効性については必ずしも評価は高くない。

また、同様に先端技術開発を目的とした共同研究開発に対して、宮田らが行っている評価でも、超 LSI プロジェクト以外は企業を招き入れることに成功しておらず、市場に近すぎも遠過ぎもしないテーマのプロジェクトにすべきであるとの指摘がある。(宮田,1997)

また、過去の日本の産官連携の日本型政府モデルによるイノベーション政策の有効性に対して、Poter&竹内ら(ポーター&竹内,2000)は疑問を投げかけ、「日本の共同研究開発プロジェクトは、直接の競争企業同士を参加企業に含む場合には成果を上げてこなかった」として競争を避け協調をとる政策に批判的である。また同様に Callon (Callon,1995) は日本のコンピュータ関連の 1975~1993 に通産省主導で実施された 4 つのコンピュータ関連の共同開発プロジェクトについて詳細に分析を行い、いずれのプロジェクトも成功しているとは言えず、見直しが必要であるとの指摘を行っている。

その後の国のプロジェクトに関係するスーパーコンピュータ開発はシステム開発を目的とせず、利用を目的としたものに変質している。

2.6.2 米国の先端技術開発推進政策

米国のコンピュータ&ネットワーク関連のイノベーション政策に対する分析評価に関して、National Research Council 配下の Computer Science and Telecommunications Board が継続的に評価を行い、分析した結果に基づく提言を行っている。(CSTB,1995,1999,2005,2010)

その中で、科学技術開発の推進に対する基本的な考え方として以下のような視点が重要であると、提言がなされている。

US のコンピュータ産業振興における政府の役割 (CSTB, 1999)

1. 政府による中長期研究の実施
2. 大規模システムの構築とリードユーザー
3. 企業研究加速の支援
4. 多様な政府支援ファンドの提供
5. 強力なプログラムマネージャと柔軟なマネジメント構造
6. 商用化を加速する産学官連携の推進
7. 支援組織のイノベーションと最適化

米国は、軍事等のナショナルセキュリティや市場における国際競争で、常に世界のリーダーシップを取り続ける必要があり、そのために必要な科学技術研究開発においてもリーダーであることが社会的コンセンサスとして形成されていると考えられる。そして、それを実現する方法として適切な競争を基本とした政策が推進されるべきとの意図が存在すると考えられる。

2.7 まとめ

以上のように、技術的非連続性を生み出す、イノベーションの創発形態、その要因およびプロセスに関連する先行研究を取り上げた。それぞれのイノベーションに関する要素間の境界は明確ではなく排他的ではない。視点の置き方によっても異なる見え方をする場合もあり、実際には複雑に組み合わさった形でイノベーションが創発しているものと考えられる。

最後には、日米のナショナルイノベーションシステムとして先端技術開発の推進策の考え方の差について触れた文献について取り上げた。

第3章 スーパーコンピュータとイノベーション

3.1 はじめに

スーパーコンピュータ開発におけるイノベーションを詳細に分析するまえに、スーパーコンピュータ開発におけるイノベーションの歴史を振り返り、スーパーコンピュータのイノベーションに創発に関係する要因を俯瞰するとともに、定性的にどのようにイノベーションが創発されて来たかを概観する。

3.2 スーパーコンピュータ開発の歴史

3.2.1 スーパーコンピュータ開発の黎明期

20 世紀半ばに電子計算機が開発されて以来、より高性能なコンピュータが求め続けられてきた。スーパーコンピュータはそのイノベーションを代表するものといえる。スーパーコンピュータの定義は、必ずしも明確ではないが、その時代におけるハイエンドのコンピュータであって、主に第三の科学とも言われる、科学技術計算によるシミュレーションを行うことを目的とした計算機である。応用例としては、数値風洞のような流体シミュレーション、地球シミュレータでの、気象や地震のシミュレーション、自動車の衝突破壊試験シミュレーションや、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーでの物質材料系のシミュレーション等、様々な先端科学技術研究に利用されている。

ENIAC に代表される初期の電子計算機開発も弾道計算などの計算シミュレーションを目的として開発された。その後、商用計算機へと市場が拡大し汎用計算機としては1964年にIBM System/360を代表とするアーキテクチャへと収斂されていった。

科学技術計算用の計算機としては、同時期に CDC 社が CDC6600 を開発し、1MFLOPS (Mega Floating Operation per Second : 1 秒間に浮動小数点演算を 10^6 回実行) を実現。1970 年代前半には米イリノイ大の ILLIAC IV等の新たなアーキテクチャのシステムが開発された。その後、CDC 社で CDC6600 等の科学技術向け計算機の開発を行っていたセイモア・クレイが CDC 社をスピンアウトして設立した CRAY 社が、1976 年に出荷した CRAY-1 がベクトル方式により従来計算機を大きく凌駕する 160MFLOPS の性能を実現したことによって、本格的なスーパーコンピュータ時代を迎えた。

3.2.2 日本のスーパーコンピュータ開発

この CRAY 社の成功に刺激を受け、日本においても複数のメーカーでスーパーコンピュータの開発がスタート。1981 年から 1989 年までの間に、通産省 (当時) の主導で、スーパーコンピュータプロジェクト (大型工業技術研究開発プロジェクトとして「科学技術用高速計算システムプロジェクト」が実施された。これと並行して 1980 年代には、富士通、日立、日本電気の各社がベクトル方式のスーパーコンピュータの製造販売を開始。NEC が 1985 年に開発した SX-2 は 1.3GFLOPS (1.3×10^9) と 1GFLOPS の壁を打ち破った。その後、日本製スパコンは海外を含めたスーパーコンピュータ市場でのシェアを拡大していった。その後も国内では、世界最速を目指した、国が関係するスパコンプロジェクトが実施され、航空宇宙研究所 (現 JAXA) における数値風洞 NWT (1993 年、富士通製)、筑波大学による CP-PACS (1996 年、日立製) 2002 年の海洋研究開発機構による地球シミュレータ (2002 年 NEC 製) が開発され、Top500 で 1 位を達成している。1990 年代には、海外においても日本製スーパーコンピュータの評価は高く、欧州を中心に市場を拡大していた。これに対して米国内で日本製スパコンへの警戒感が強まり、1996 年には日米貿易摩擦の結果、スーパー 301 条を日本製スパコンに適用、事実上米国への日本製スパコンの輸入を禁じた。21 世紀に入ってから、日本製スパコンは市場シェアを落とし海外市場も大幅に縮小した。

その後、2006 年から文科省主導で、「次世代スーパーコンピュータ・システム」開発プロジェクトが開始され、1 章で述べたように 2011 年に「京」コンピュータとして稼働を開始し、2011 年 6 月より 2 回連続で Top500 の No.1 を達成した。

3.2.3 米国のスーパーコンピュータ開発

米国は、スーパーコンピュータの開発の歴史のなかで常にリーダーシップを取ってきた。CRAY-1 の成功以降もハイエンドコンピューティング市場は拡大し、CRAY 互換機やミニスーパーコンピュータを作る企業も発生してきた。

1980 年代後半から RISC プロセッサの普及や分散並列処理と言った新たな技術イノベーションのトレンドから、超並列計算機のマシンの開発ブームとなり、新たなアーキテクチャの高並列処理マシンの開発を行うベンチャー企業が多数起業した。しかし、並列プログラミングの難しさや多数のアーキテクチャの乱立により、アプリケーションプログラムが追いつかずユーザーの心が離れた結果、1990 年代終わりには、ほとんどの超並列計算機専門メーカーは市場から撤退している。

1980 年代後半以降の急成長する日本製スパコンに対する危機感もあり、1991 に連邦政府において、ハイパーフォーマンスコンピューティングにおいて米国の優位製を確保するため、高性能コンピューティング法 (HPCC Act.) が成立した。これにより、省庁横断型で、産学官の各研究組織の連携を行い、ナショナルセキュリティおよび、科学技術におけるリーダーシップを取るためのスパコン開発推進が決定された。その後 2000 年に成立した NTRID 法 (Network and Information Technology Research and Development Act.) による NTRID Program に引き継がれている。これらのプログラムのもと、1995 年からは米国エネルギー省 (DOE) が備蓄核兵器保全管理のための評価を目的に実施された ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) プログラムでは、IBM、CRAY、SGI 他が世界最速級のスパコン開発を行っている。現在このプログラムは Advanced Simulation and Computing (ASC) に引き継がれている。この開発プログラム以外にも、NSF 配下の大学のスーパーコンピュータセンターの増強や、軍の研究所のスパコンの更新プログラムなどが主要な調達ユーザーとなって米国内のハイエンドコンピューティング市場を形成している。

また、2002 年に登場した日本の地球シミュレータは米国においてコンピュータニクスショック (コンピュータにおけるスプトニクスの脅威) と呼ばれ大きく取り上げられた。それ以降はハイエンド・コンピューティング領域に対してさらに国家予算の増額等の強力な推進策がとられ、DoD/DOE をはじめとした国家機関の研究開発への重点的な予算配分が実施され、その結果として IBM の Blue Gene/L 等の開発が推進されている。

3.3 スーパーコンピュータ市場

スーパーコンピュータの市場は、ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）市場とも呼ばれ、顧客は、大規模な計算シミュレーションを行う、大学、国立研究所、および一部企業の研究所が中心である。量産商用製品の市場とは異なり、顧客数はあまり多くなく固定的で受注生産ベースの製品である。HPC 市場規模は、ミドル／ローエンドまで含めれば全世界で年間 1 兆円規模だが、1 システム 1 億円を超えるような大規模システムを導入するユーザーで構成されるハイエンド市場の規模は年間 1000 億円程度であり、この市場に、IBM や CRAY、HP 等の大手コンピュータ企業を中心としたメーカーが存在している。HPC 領域は、技術的な宣伝や波及効果もあり、一部のメーカーや部品サプライヤーは挑戦的な価格競争を行う場合がある。

一方、顧客について見ると、大規模システム導入ユーザーは大学や国立研究所などであり、ここでシステムの購入を決定するのは、実際にそのシステムを利用するエンドユーザーではなく、システムを導入、運用管理する計算機センター部門である。また、大学や国立研究所の運用部門の代表者は計算機科学または計算科学の研究者などである場合が多く、コンピュータ自身や、利用方法に関して、メーカー側よりも詳しい知識を持っている場合もある。これらの購入決定者は、知識があり要求水準が高く、自センターの高性能をアピールするため、より高い演算性能を求める。しかし、一般的に導入予算は国の予算等に縛られるため予算は固定的であるため、システム導入時には、プライス・パフォーマンスが非常に重要な判断ポイントになる。また、開発費やコスト構造が異なる専用設計のスーパーコンピュータと安価な汎用部品で構成される PC クラスタとのあいだで、機能や実行効率が異なるにもかかわらず、場合によっては、プライス・パフォーマンスの尺度だけで評価され競争させられる事もある。過去からのイメージではスーパーコンピュータは自動車という F1 的な高級品のイメージを持たれる事もあるが、現時点では、ハイエンド市場においてもモジュラー製品との厳しい価格競争が繰り広げられている。このため、HPC 事業は採算性が厳しい事業であり、米国のスパコン専門メーカーは安定した事業継続が出来ず、頻繁に資本が入れ替わったり、国によるてこ入れが行われたりしている。また、大手メーカーにおいても、他事業とのシナジーが無いと HPC 事業の継続は難しい状況である。国産メーカー 3 社ではいずれにおいても、HPC 事業は社内において金食い虫のお荷

物事業と見られており常に存続の危機の元にある。

また、購入者の多くが、大学や国立研究所であり、国との関係が非常に大きい。国が主導する開発プロジェクトに伴う開発も多く、**Top500** の上位システムの多くが、国のプログラムまたはプロジェクトに伴って開発されたシステムである。

調達国別の市場シェアは、米国が約半分と圧倒的に大きい、欧州は欧州全体で約 2 割を占めており、日本はかつて 2 割近くあったが、現在は 1 割以下に減少している。市場の半分を占める米国市場は、日本製スパコンに対するスーパー 301 条の発行等によって、実質外国製品から保護され、米国製で独占されている状況が続いている。

3.4 スパコン開発におけるイノベーションの形態

3.4.1 ドミナントデザイン

スーパーコンピュータ開発におけるイノベーションの形態について、いくつかの点について整理を行う。

過去のスーパーコンピュータ開発の歴史において、いくつかの大きな技術的なブレークスルーが発生しており、一時的にドミナントデザインを形成された時期もあるが長続きせず、頻繁に世代交代が続いている。いくつかの時代に分けてドミナントデザインを定義してみると以下のようなものがあると考えられる。

①ベクトルの支配 1976～1980 年代末期

1976 年にベクトル型スーパーコンピュータとしての **CRAY-1** の出現から、国産 3 社によるベクトル機の開発が行われ、ベクトル機＝スーパーコンピュータの時代がしばらく続いた。**CRAY** 互換機も出現するなど、一時的には安定したドミナントデザインとなっていた。バイポーラトランジスタを使用した、高周波数クロックで強力なベクトルプロセッサのアーキテクチャを持つ製品が市場を独占した。

②RISC プロセッサの普及 1980 年代

RISC プロセッサの出現や並列分散処理への流れから、**CMOS** トランジスタを使用した **LSI** で構成される中速のプロセッサを複数接続するミニスーパーコンピュータや、**RISC** ワークステーションをベースとし、これを元にしたハイエンドサーバーが使い勝手の良さなどから拡大した。

③超並列コンピュータ (Massive Parallel Computer) 1980 後半～1990 年代前半

中低速プロセッサを多量に接続する超並列分散コンピューティングの研究がブームとなり、その研究成果を利用し、欧米において **Thinking machine** 社等、多数のベンチャー企業が起業した。日本国内でも大学および企業の研究所で盛んに研究された。しかし、超並列計算機上でのプログラミングの難しさや、互換性のないアーキテクチャが多数乱立したことなどにより、実運用に耐えるシステムが現れなかったため、1990 年代後半にはほとんどの MPC メーカーは市場から退場した。

④PC クラスタの拡大 2000 年代

PC 用プロセッサの性能向上し、このコモディティで安価なプロセッサを多数並べたクラスタシステムが普及。ノード間ネットワークとしては、**Ether** ネットよりも高速でクラスタ接続に向く **Infiniband** 等が利用されるが、プロセッサ、ネットワーク他、汎用品であり、OS も **Linux** を利用するなど、オープンソフトが多用されている。モジュラー型の製品であるため参入が容易であり、多くのサーバーメーカーが参入した。

⑤メニーコア・低消費電力化 2000 年代後半

半導体のスケーリング則が限界に達し単体プロセッサの高性能化が難しくなってきた。一方で、地球温暖化等の問題意識から、エコが重要な社会的テーマになり低消費電力化が重要な技術的要素となっている。これを実現するため CPU クロックを上げずにプロセッサの多コア化や低消費電力の組み込みプロセッサやモバイルプロセッサを超並列接続して性能向上を図るアプローチや、Cell のようなゲーム機のプロセッサやグラフィックス用のプロセッサを汎用的に使う **GPGPU** (**General Purpose Graphic Processor Unit**) などのアプローチが模索されている。

IBM の **Blue Gene/L** は 3 次元トラスネットワーク接続による超並列システムと組み込みプロセッサを利用した低消費電力のアーキテクチャで注目を集めた。

以上のようなドミナントデザイン変遷に関して技術的非連続性の発生要因として以下のようなものが考えられる。

①テクノロジー・ブレークスルー

新たな飛躍的なテクノロジーを取り込む事によって非連続な進化を達成するものである。また、インクリメンタルにイノベーションしていく過程において、複数のテク

ノロジの結合によって、ブレークスルーが発生する場合もある。

例えば、半導体テクノロジーとしてバイポーラトランジスタから CMOS トランジスタへの切り替わりのようなものがある。

②アーキテクチャ・イノベーション

構成要素の接続関係であるアーキテクチャの変化によって生まれるイノベーションである。例えば、ベクトル型スーパーコンピュータからスカラ型アーキテクチャが主流の時代と変わって来たことや、超並列コンピューティング（MPC）のブームなどの研究開発の進展に伴いアーキテクチャの大きな変化を生み出している。テクのロジの進展と共にアーキテクチャとの最適設計ポイントにはまった時にイノベーションが生まれる場合がある。IBM の Blue Gene/L は、組込みプロセッサのテクノロジーと超並列アーキテクチャの組み合わせの結果生まれたものと言える。

③インテグラルからモジュラー型へ

専用設計のスーパーコンピュータは、多様な技術を統合したインテグラル型の製品で、システム全体での最適設計を行うことで高い性能を実現してきた。一方で、PC クラスタは安い PC 用の汎用部品を使用することで安価で高いコストパフォーマンスを持つ製品でありモジュラー型製品であるといえる。これが既存市場を破壊する、破壊的イノベーションにつながっている。ゲーム用プロセッサや、汎用グラフィックスプロセッサ（GPGPU）の利用などもモジュラー型製品の例として位置づけられる。

④社会ニーズの変化

社会的ニーズの変化が、あらたなイノベーションを生み出す要因になっている場合がある。地球温暖化等の影響からエコで低消費電力指向が製品のアーキテクチャやテクノロジーの選択に対して影響をおよぼしている。

3.4.2 イノベーション・マネジメント

スーパーコンピュータの開発は多種多様なテクノロジーの総合的な技術開発である。

例えば、以下のような技術を統合する能力がスーパーコンピュータメーカーに求められる

- | | |
|-----------|-----------------------|
| ①半導体プロセス | LSI の製造技術および半導体利用技術 |
| ②LSI 設計技術 | 論理設計、LSI 物理設計、設計環境構築 |
| ③回路技術 | 高速インタフェース、シグナルインテグリティ |

④実装・冷却技術	高密度実装、高効率電源、冷却設計
⑤製造技術・品質管理	生産技術、検査、品質管理・保証
⑥保守・運用技術	カスタマエンジニア、システムエンジニア
⑦基本ソフト	OS、コンパイラ
⑧ミドルウェア	運用管理、開発支援
⑨アプリケーション	計算シミュレーション・アプリケーション
⑩ユーザー支援	チューニング技術

一部は、社外のリソースを利用すると言ったことも可能であるが、これらのテクノロジーを統合し、製品化する能力が求められる。

これらの技術を垂直統合的に実施してきたメーカーは、米国では IBM、日本では総合電機メーカーの日立、富士通、NEC が挙げられる。

また、他社の技術を活用して水平統合で実施しているメーカーとしては、CRAY 等の米国のスパコン専門メーカーや PC クラスタベンダーが対応するものと考えられる。

また、これらの技術は、スーパーコンピュータ専用開発されるのでは、高コストになってしまう可能性が高く、多くのメーカーでは、社内の開発リソースを他の製品開発と共有することで、シナジー効果を生み出すことを期待している。

社内テクノロジーの共有の例として、スーパーコンピュータのテクノロジーは、汎用計算機、サーバ、PC 等と共有されるか、または、開発したテクノロジーを汎用化してよりコモディティな製品に適用するなどによりシナジー効果を生み出している。

これらの、複数のテクノロジーと複数の製品ラインの開発を、時間軸を考慮したテクノロジー・ロードマップやイノベーションアーキテクチャを描きながら、社内におけるイノベーションマネジメントを行う事が重要である。また、社外からの先端技術の取り込み（オープンイノベーション）も重要な要素になる。

3.4.3 オープンイノベーション

自社内の研究開発の枠を越え、社外の技術の取り込みや、社外への技術提供を行うオープンイノベーションとしては以下のようなものが想定される。

①産学官連携

大学の計算機科学の研究成果を取り込む、または研究者と共同研究を行う事によっ

て新たなイノベーションにつながる、新規性のある技術を入手することが考えられる。例えば、大学や企業等で専用のアプリケーションを実行するために研究開発されていた専用計算機が商用スーパーコンピュータとして製品化されたケースがいくつかある。具体的には、筑波大と日立が共同開発した物理学専用計算機 **CP-PACS** がその一例といえる。**CP-PACS** はほぼそのまま、**SR2201** という名の商用計算機として市場展開された。また、米国製品では **IBM** が開発した **Blue Gene/L** がその一つといえる。**Blue Gene/L** の前身は、米国コロンビア大が開発した **QCD**（量子色力学）の専用計算機がベースとなっている。**IBM** は 2 世代目からの開発に参画し、ノウハウを蓄積し、汎用のスパコンとして、**Blue Gene/L** を開発した。

研究目的の専用計算機の特徴は、利用範囲にある程度制限があったり、アプリケーションをプログラミングすることが難しかったりする反面、必要な機能に集中して機能実装することで、よりコンパクトかつ低コストで研究対象のアプリケーションを実行することが可能な場合がある。**Blue Gene/L** では **CPU** に組み込みマイクロプロセッサの技術を流用することで、汎用性と低コストをある程度両立して実現することが可能となっている。

②協業

複数の企業が共同で開発を行う事によって、知識共有の結果新たな製品を生み出すケースが想定される。その例として、ゲーム用プロセッサとして開発された **Cell B.E.** がある。ソニーコンピュータエンターテインメント(**SCE**)、東芝、**IBM** が開発した **Cell B.E.** プロセッサは、**SCE** のゲーム機である **PlayStation3** 用に開発されたプロセッサであったが、その高い性能をスーパーコンピュータに適用したものが、米国、ロスアラモス研究所に設置された **Road Runner** である。2008 年 6 月に **1PFLOPS** を超える性能で、世界 1 位を達成している。

③M&A

自社にない技術をもつ会社を買収することによって、知識や設備を取り込むことが考えられる。HPC 産業では、資本を持たないベンチャー企業が長期間生き残ることは難しく、大手に買収するなどして技術を残す余地はある。大きな初期投資が必要な国内ベンチャーが国内に育ちにくいことも要因となっていると考えられる。

④スピナウト

CDC で **CDC6600/7600** 等の開発を行っていた、セイモア・クレイがスピナウト

し CRAY 社を設立し、CRAY-1 の開発を行った。これによってスーパーコンピュータの市場が大きく拡大するキッカケを作ったといえる。その後も新しいアーキテクチャの発生時期には、スピンアウトやベンチャーにより生み出されるケースが多数見られる。現在は、米国メーカーにおいても、メーカーの淘汰が進んでおり IBM や CRAY といった大手メーカーのみになっている状況である。日本では、大手 3 社以外にベンチャー企業等はほとんど見られないが、これは、大きな初期投資が必要なスーパーコンピュータメーカーが国内でベンチャーとして育ちにくい状況であることも要因となっていると考えられる。

今後、市場が淘汰された先に、また新たな多様性が発生する時期が訪れるものと考えられるが、そのときにもシリコンバレー等でスピンアウト型ベンチャーが生まれてくる可能性がある。また大企業においても、生き残りのためには、社内の“イノベーションのジレンマ”の影響を受けないベンチャー型の組織をスピンアウトさせるなど、自らイノベーションを起こすための環境構築が重要であると思われる。

3.4.4 ユーザーイノベーション

スーパーコンピュータの主要なユーザーは、大学や国立研究所などであるが、これらのユーザーはスーパーコンピュータおよびその利用技術に対して深い知識を持っている事が多い。これらのユーザーによって引き起こされるユーザーイノベーションとして、以下のようなものが考えられる。

①ユーザーが自ら先行してイノベーションを生み出すもの

筑波大の CP-PACS のように計算機科学の研究者を中心に企業と共に開発し、製品化したスーパーコンピュータ。産学間の共同研究開発であり、メーカーも一定の開発負担を行い、その成果を商用展開している。研究成果物が特殊で市場で受け入れられない場合、メーカー側の投資回収ができないリスクも存在する。CP-PACS の場合は世界一を達成し、市場においてもある程度評価されたケースといえる。

②ユーザーからメーカーへ知識移転があるケース

航技研 NWT や地球シミュレータ、京のように、導入するユーザー側がメーカーを指導し開発推進したもの。リードユーザーによる調達のなものとなるが、プロジェクト実施者が将来の市場を先取りしているリードユーザーであれば、市場に展開に成功する可能性は高い。また調達として製造費用分は開発時点に予算確保されるため、メー

カーにおいてはその部分の投資リスクは低減できる。この形態の3つのプロジェクトで世界一の性能を達成している。

③先行ユーザーとして投資

開発段階または初期の上市段階で購入を確約してくれるユーザーの存在である。開発初期に導入を確約されていることは、開発完遂の強いモチベーションになる。

スーパーコンピュータでは、確約ではないが、増強や更新を含めた複数の製品世代にまたがる5年以上の長期導入計画を入札条件に含め調達されるケースがある。

3.4.5 ナショナルイノベーションシステム

3.4.5.1 日本のイノベーション政策に対する分析

スーパーコンピュータをはじめとする、先端大規模技術開発においては、国の関与の影響が少なくない。日本の国によるプロジェクトとして以下のようなものがある。

①通産省スーパーコンピュータプロジェクト

同時期の1981年に通産省は通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発（通称通産大プロ）の一環として「科学技術用高速計算システムプロジェクト」（通称スーパーコンピュータプロジェクト）を開始した。科技庁がスパコンの必要性を主張し、米国Cray社のスーパーコンピュータに対抗し、10GFLOPS級の世界一のスパコンを作ることで通産省と連携した。システム開発としては、高速演算用並列処理装置、分散処理用並列処理装置、衛星画像処理システムを国内6社と電子技術総合研究所と共同で開発。また、IBMのワトソン研究所で開発されていたジョセフソン（JJ）素子に刺激され、デバイス開発としてジョセフソン素子、HEMT素子、ガリウムヒ素（GaAs）FET素子の研究開発が含まれた。1989年にプロジェクトは終了したが、テクノロジーのハードルは高く、参加企業間での連携も十分には取れなかったため、当初目標のシステムは実現されなかった。また、成果が直接または、短期間のうちに市場に展開される事も無かったため、通産省スーパーコンピュータプロジェクトによる、社会経済的スピルオーバーは有ったかどうかを含めて不明と言う状況である。

②航技研 数値風洞（NWT）

当時航空技術研究所故三好甫計算機センター室長のリーダーシップに基づき、1988年頃より富士通が開発した数値風洞シミュレーション用の計算システム。

1993 年 11 月から 1995 年 11 月までの 2 年間 Top500 で No.1 を達成。

③筑波大 CP-PACS (Computational Physics by Parallel Computer System)

当時筑波大教授の岩崎洋一をプロジェクトリーダーに開発し日立製作所が製造。1992 年プロジェクト開始。1996 年稼働開始。1996 年に Top500 で No.1 を獲得。

④地球シミュレータ

上記の故三好甫を中心に、1996 年にスタート。2002 年に 40TFLOPS のシステムが完成。2002 年 6 月から 2 年半 Top1 を維持。米国からコンピュータニクスと呼ばれ脅威とされた。

⑤京コンピュータ

2006 年には、10Peta (京) Flops を目指す開発が理研を開発主体とするプロジェクトがスタートした。2011 年 6 月に Linpack 性能で世界 No.1 を達成した。

以上のように、日本の国によるスパコン開発プロジェクトの状況をみると、いくつかのケースが存在する。まず一つめは、通産省（現経産省）スーパーコンピュータプロジェクトのような国が主導し、コンソーシアムを形成して、複数のメーカーおよび大学、国立研究機関が参加する共同研究型のもの。二つめのケースは、筑波大の CP-PACS のように計算機科学の研究者を中心に企業と共に開発し製品化したもの。三つめは、航技研 NWT や地球シミュレータ、京のように、導入するユーザー側がメーカーを指導し開発推進したものである。

各プロジェクト形態の有効性としては、初めの国が主導して行ったコンソーシアム型のプロジェクトは結果的には要素技術的な研究開発に留まり、他関連分野の 2.7 の例も含めほとんど直接的な製品といった形として、明確なスピルオーバーを生み出していないように見える。二つめのものは産学の共同研究開発的なものになっており、メーカーも一定の開発負担を行い、その成果を商用展開しているが、研究成果物が市場で受け入れられない場合、メーカー側の投資回収ができないリスクも存在する。この点に関し CP-PACS の場合は世界一を達成し、市場においてもある程度成功したケースといえる。三つめは、リードユーザーによる調達的なものとなるが、プロジェクト実施者が将来の市場を先取りしているリードユーザーであれば、市場に展開に成功する可能性は高い。また調達として製造費用分は開発時点に予算確保されるため、メーカーにおいてはその部分の投資リスクは低減できる。この形態の 3 つのプロジェクトで世界一の性能を達成している。

図 3-1 に日本の国による、スーパーコンピュータ開発プロジェクトを示している。

コンピュータ関連の国のプロジェクトとして、第五世代コンピュータや、リアルワールドコンピュータ等の産学官連携のコンソーシアム型のプロジェクトが存在するが、研究指向が強く、製品としてのスーパーコンピュータを生み出していない。また、スパコン製品を開発プロジェクトとしては、90 年代の 3～4 年の感覚での開発から、地球シミュレータ・京間の 10 年に間隔が拡大している。

				年度																															
主催	プロジェクト	参加組織	国費負担	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	
通産省 (電総研)	科学技術用高速計算システムの研究開発 コンソーシアム	FTNHO	187億円	ベクトル:10GFLOPS グラフィックス:0.1GF デバイス:10pS/16Kb																															
航技研 (科技厅)	数値風洞:NWT	富士通													280GF																				
筑波大 (文部省)	CP-PACS	日立	22億円 (研究費のみ)												614GF																				
海洋研 (科技厅)	地球シミュレータ	NEC	600億円 (建屋他を含む)																			40TF													
理研 (文科省)	京	富士通 (NH撤退)	1000億円 (建屋他を含む)																														10PF		
通産省 経産省	その他関連国プロ		570億円	第五世代コンピュータ												Real World Computing Project												NAREGI (Grid)							
			480億円																																
	スパコン各社の商用機出荷時期	富士通							VP-200				VP-2000					VPP500				AP3000					HPC2500								
		日立							S810			S820							SR200		SR220		SR8000				SR11000								
		NEC							SX-2				SX-3						SX-4				SX-5			SX-6		SX-8		SX-9					

図 3-1 日本の国のスーパーコンピュータ開発プロジェクト

3.4.5.2 米国の連邦政府によるスーパーコンピュータ関連プログラム

1991 年にクリントン政権において当時上院議員のゴアが提案した高性能コンピューティング法 (HPCC Act. of 1991) が成立し同時に HPCC Program が立案され総合的な推進体制がスタートした。また、ペタフロップスイニシアティブが発足した。

1995 年に DOE を中心のスパコン開発プロジェクトである ASCI (Accelerated Strategic Computer Initiative) 計画がスタートした。1996 年に CIC (Computing, Information and Communications Act.) 法に引き継がれた。1998 年には、HPCC Program にインターネット関連が追加される形で Next Generation Internet Research Act. of 1998 が成立し、その後 2000 年に NITRD 法 (Network and Information Technology Research and Development Act.) が成立し、2001 より NITRD Program に改名された。

スパコン開発プログラムとしては、DOE (Department of Energy : エネルギー省) の ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) プログラムが有名である。DOE では核兵器の製造と管理、原子力技術の開発を推進するための先端シミュレーションインフラの構築を目的に、1995 年より 2005 年まで ASCI プログラムが実施された。個々のプラットフォーム開発に入札が行われ、それぞれ独立に各メーカーが受注し、最先端システムの開発導入が行われている。(形式的には調達だが実質的には開発) 対応する DOE 配下の組織は、ロスアラモスおよびローレンスリバモア研究所などである。ASCI プログラムは 2004 以降も ASC (Advanced Simulation and Computing) プログラムとして継続されている。

NSF (National Science Foundation : 米国国立科学財団) 配下の大学の情報基盤センターを中心とした、HPC 基盤の強化プログラムが存在する。

DoD (Department of Defense : 国防総省) 配下の、軍の研究所を中心とした、HPC リソースの強化プログラムである HPC Modernization Program (HPCMP) がある。

DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency : 国防高等研究計画局) 先端技術開発を目的とした研究中心の要素技術開発が実施されている。

NASA (National Aeronautics and Space : 米国航空宇宙局) 配下の NAS Ames、Caltec/JPL、NCCS Goddard SFC の 3 研究所を中心に NASA の計算リソースを確保。大規模 HPC システムとしてはスペースシャトル Columbia の事故後の製造品質検証シミュレーションとして NASA Ames 研究所に導入された SGI 製の Columbia がある。

第4章 Top500 によるデータ分析

4.1 はじめに

本章では、スーパーコンピュー開発におけるイノベーション発生状況を、公開データである TOP500 Supercomputing Sites の情報を元に定量的に分析し、イノベーションの発生状況の可視化を試みる。

4.2 Top500 Supercomputer Site

4.2.1 Top500 Project

Top500 Supercomputer Sites は1章でも記したように、世界で最も高性能なスーパーコンピュータシステムの上位 500 位までを定期的にランキングしており、最新のスーパーコンピュータの性能動向や HPC (High Performance Computing) 市場動向を知るうえで非常に広く認知された指標となっている。

この Top500 Project はハイパフォーマンスコンピューティングのトレンドを的確に追跡・分析することを目的として 1993 年にハイエンドコンピューティングの研究者を中心に発足し、毎年 2 回、6 月の欧州で開催される International Supercomputing Conference および、11 月に米国で開催される Supercomputing Conference の開催タイミングに合わせて発表が行われている。

Top500 ではスーパーコンピュータシステムの性能評価を行う方法として、Linpack という線形代数計算を行う汎用ライブラリを用いたベンチマークプログラムを利用し、実際にプログラムを実行して性能測定した結果を、各スーパーコンピュータシステムのユーザー（運用管理者）に申告してもらい比較を行っている。Linpack は実際のライブラリプログラムとして利用されているコードでもあり、ある程度、実運用のプログラム性能に近い傾向を表していると考えられている。また、大規模なシステムに

においても単一の処理として実行できるようなコードになっているため、システム全体での実効性能を測定することが出来る。ただし、Linpack プログラムは、コンピュータのシステム最大性能に近い性能を引き出しやすいプログラムであるため、本当の意味での実運用時の性能を評価出来ないのではないかと言う批判もあり、2005 年より HPC Challenge といういくつかのプログラムで構成されるベンチマークが Linpack ベンチマークを始めた Jack Dongarra らを中心に提案されたが、現時点においても Linpack が測定しやすく単純でわかりやすいこともあり広く支持されている。

4.2.2 Top500 のデータ分析の意義

Linpack ベンチマークプログラムの測定の容易さもあり、大規模なスーパーコンピュータシステムを導入したサイトでは、特殊な軍事関連設備や非公開の民間の研究施設等を除けば、多くのサイトが Top500 に登録しているため、ある程度、実際のスーパーコンピュータシステムの上位にあるシステムの動向を表していると考えられる。

1 章の図 1-3 の Top500 の性能トレンドのグラフで示すように、1 位のシステムと 500 位のシステムでは、ほぼ 100 倍性能差ある。また同様、価格差も数百億から数億円規模のシステムを含んでおり、Top500 内に数千億円規模のシステムが含まれていることになる。一方、ハイエンドコンピュータ市場も規模としてはさほど大きくなく年間ではあるが数千億円規模と言われており、Top500 の動向を見ることは、ある程度ハイパフォーマンスコンピューティング市場の動向を読み取ることが出来るものと考えられる。

また、上位での性能競争は、スーパーコンピュータのテクノロジーノベーションと競争の場であり、新たなテクノロジトレンドを読み取るものとしても非常に有用な情報となり得るものと考えられる。

4.3 対象企業の選定

4.3.1 スーパーコンピュータ・メーカー

Top500 のデータから、どのようなイノベーションが発生してきたかを抽出する事を考え、これにあたってハイエンド製品を開発しているいくつかの企業に着目して分

析を行うこととした。

現時点において世界で独自のスーパーコンピュータを開発している国は米国と、日本に限られている。1990年代頃までは欧州でも **Massive Parallel Computer (MPC)** 型のスーパーコンピュータ等の開発が行われていたが、その後は、PC 用汎用プロセッサを利用した PC クラスタメーカーのみとなっており、独自の製品開発を行う企業が存在しなくなった。一方で近年、中国がスーパーコンピュータ開発に力を入れており、大規模な PC クラスタシステムの構築を行っており、**Top500** の上位に姿を現している。最近、独自プロセッサの開発に着手している模様であるが、現時点では商業ベースの独自開発システムはまだ無い。このようなことから、日米のメーカーに限定して分析を行う。

図 4-1 に日米のスパコンメーカーの勃興を表した図である。

日本は、1980 年前後に富士通株式会社（以降富士通）、株式会社日立製作所（以降日立）、日本電気株式会社（以降 NEC）の 3 社がスパコンの開発をスタートして以来、一貫してこの 3 社が国内でのスーパーコンピュータの開発を担ってきた。

一方、米国では、多数のスパコンメーカーが勃興しているが、長期に安定して存続している企業は少ない、**CRAY** はスーパーコンピュータ市場拡大の先駆けとなる **CRAY-1** を 1976 に開発した老舗（設立当初 **CRAY Research Inc.**）であるが、1989 年に創業者のセイモア・クレイ氏自身がスピンアウトし **Cray Computer** を設立したが **Cray-3** 完成の後 1995 年に倒産した。一方の **Cray Research Inc.** は 1996 年に **Silicon Graphics Inc.**（以降 **SGI**）に買収された。1990 年には再び **SGI** から **Tera Computer** に売却され、**Cray Inc.** として、**Cray** の名を復活させてはいるがブランド以外は変遷を遂げてきた。1980 年代には、ダウンサイジングや **RISC** プロセッサの勃興により、**SUN** や **SGI** といった **RISC** ワークステーションメーカー、**Convex** 等のミニスーパーコンピュータメーカーや、**Thinking Machine** 社等の **MPC** システムの開発を行うメーカーが多数創業した。その後、米国において **MPC** 市場は縮小し 1990 年代のうちにはほとんどの **MPC** メーカーが市場から撤退している。**SGI** は **HPC** 市場に参入後 **Cray** を買収し本格的にスーパーコンピュータ開発に着手。1991 に経営悪化から **Cray** 事業を **Tera Computer** に売却後も、**HPC** 製品の開発は継続しているが、2009 年に PC クラスタベンダーの **Rackable Systems** 社に買収され社名の「**Silicon Graphics International (SGI)**」への変更が発表された。**IBM** はコンピュータメー

カーとしては老舗ではあるが、HPC 市場への参入は遅い。実質的には 1990 年代に入ってから参入であるが、現在は HPC 市場でメインプレイヤーとなっている。

2000 年以降には、性能が向上してきた PC をネットワークで多数接続して構成する PC クラスタが HPC 分野でも普及してきた。PC クラスタは、Intel や AMD が製造する x86 プロセッサのノードを、汎用のネットワーク（Ether や Infiniband 等）を使って構成される、モジュラー型のプロダクトであり、HP 等の大企業から中小のメーカーまで多数のメーカーが市場に参入しており、IBM や日本のスパコンメーカーも、製品系列として保有している。

本研究では、PC クラスタを除く独自開発のスーパーコンピュータに着目して分析を行うこととした。理由については、後ほど改めて触れる。

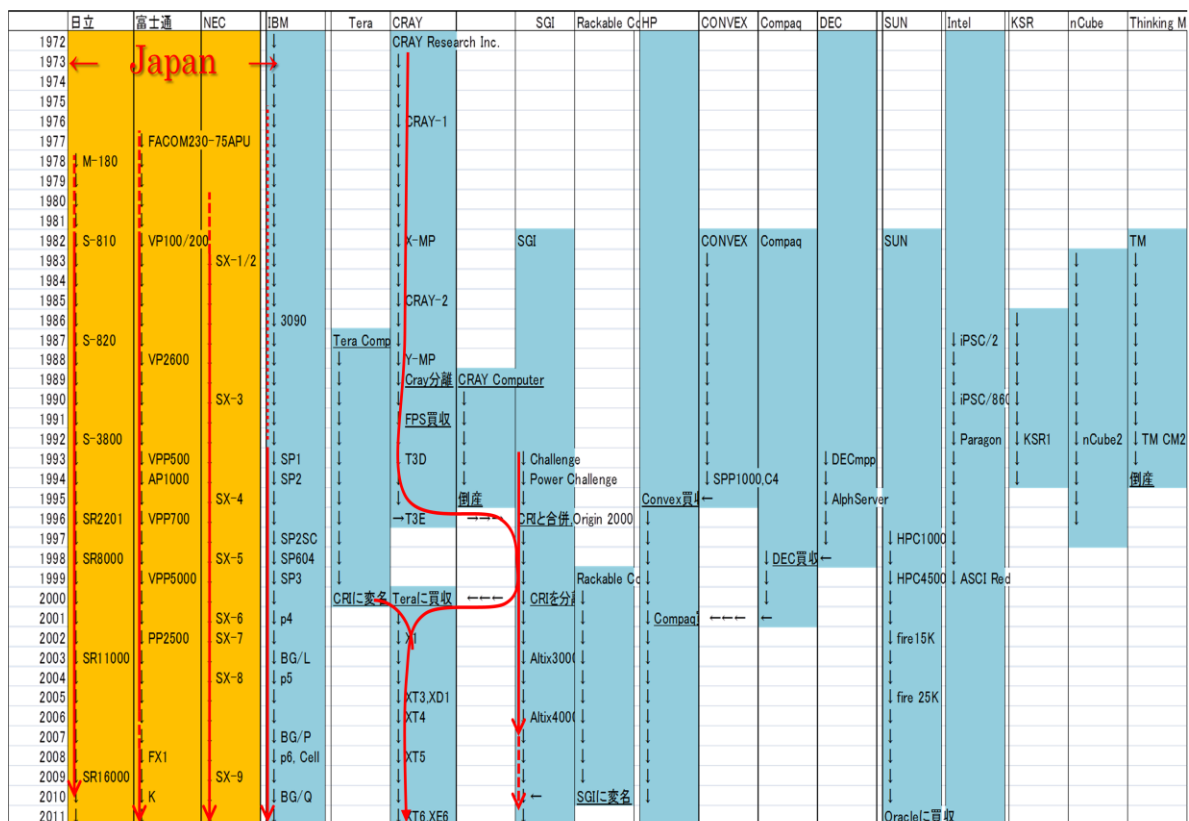


図 4-1 日米スーパーコンピュータメーカー

4.3.2 調査対象企業

今回調査の対象とした企業（ブランド）の条件を以下のように設定した

- ① 過去10年以上、今日に至るまでスーパーコンピュータを提供している
- ② 独自にスーパーコンピュータシステムの開発を行っている。
- ③ ハイエンド市場に製品を継続して提供している
- ④ 過去に Top500 で3位以上を達成している

以上のような条件は、スーパーコンピュータ開発において Top500 のトップを狙い、先進的技術開発でイノベーションを起こす意思がある企業という捕らえ方が出来るものと考えた。

ここで、独自開発のスーパーコンピュータとは

- ① プロセッサまたはノード間ネットワークのハードウェアを専用設計している。
- ② 基本ソフト（OS、コンパイラ等）およびシステムソフトウェアを専用設計している。

日本国内で上記条件を満たすものは富士通、日立、NEC の3社のみである。

米国メーカーとしては、IBM、CRAY、SGI（CRAY,SGI はブランドが維持されており、事業として継続されているとみなす）の3社以外には Hewlett-Packard 社（以降 HP）も候補に挙げられるが、現時点では独自プロセッサやネットワークの開発を行っておらず、PC クラスタ以外の HPC 製品は提供していない。

以上の理由により、日本国内、富士通、日立、NEC、米国内、IBM、CRAY、SGI の日米各3社を調査対象メーカーとした。

選定した3社の Top500 のシステム数に占める各社の割合を図 4-2 に示す。

ここで除いた HP はシェア2位を占めてはいるが上記理由により対象外としている。Oracle（旧 Sun）および Dell は Top3 以上を達成しておらず、また Dell は PC クラスタのみの提供メーカーである。Intel は現在プロセッサのみでシステム製造を行っておらず、Thinking Machine Corporation(TMC)は現在存続していない。

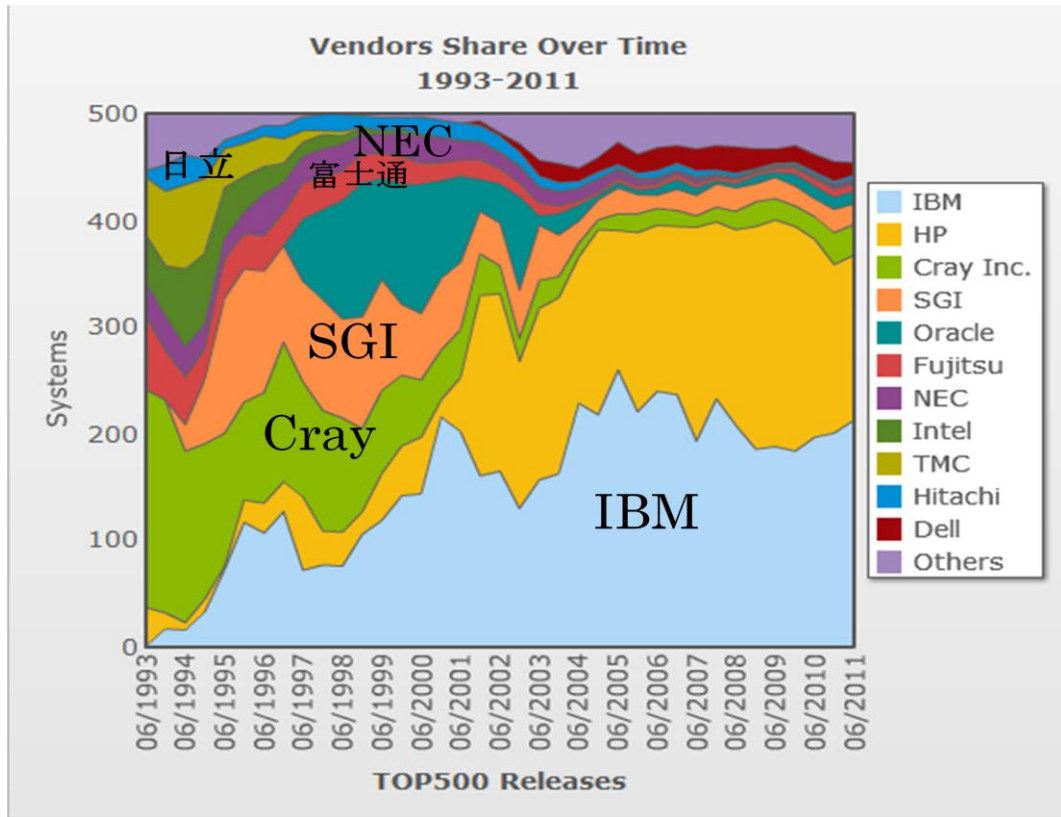


図 4-2 Top500 における各メーカーのシェア (出典：Top500)

4.3.3 PC クラスタを除く理由

パーソナルコンピュータの高性能化に伴い、特に 21 世紀に入ってから、ハイエンドコンピューティング領域においても安価な市販の PC 用のプロセッサを多数並列接続する PC クラスタシステムが市場シェアを拡大させている。当初は、大規模システムの実現や安定性などの点において課題が大きかったが、急速な PC 用プロセッサの性能向上に伴い、汎用部品を組み合わせたモジュラー型製品によるイノベーションとして、既存スパコンの市場を脅かしている。

PC クラスタは、ハードウェアは Intel 社や AMD 等の PC 用をベースにしたプロセッサとプロセッサボードと Ether や Infiniband といった汎用のネットワークカードを組み合わせ、OS としては主に Linux が採用され、その他ミドルウェア、ソフトウェアはオープンソースのものを組み合わせるなどして構成されたシステムである。モジュラー型製品であるためシステムを構築する事自身には技術的難度はあまり高

くないため、多くの PC クラスタ・提供ベンダーが市場に参画している。専用設計のスーパーコンピュータ開発は、現在、日本と米国でのみであるが、PC クラスタは、導入先の各国で製造されている場合が多い。現在 Top500 で 2 位に位置する中国も PC クラスタである（汎用のグラフィックプロセッサを付加して性能強化）

また、PC クラスタは、接続台数を増やす事で最大性能を積み上げているが、大規模システムでは実行効率が低下し、最適設計された専用設計機に対して低くなる傾向にある。このため、主に、あまり規模が大きいミドル規模以下のシステムとして導入される傾向にある。

今回の調査対象から、PC クラスタ製品および PC クラスタのみを提供しているベンダーを除いている。しかしながら、Top500 に占める PC クラスタの比率は、2000 年以降増え続けており、図 4-3 に示すように現時点ではシステム数で 8 割近く（一部 PC クラスタ以外のクラスタ製品を含む）を占める状況に至っている。ただし、図 4-4 の性能シェアでは、7 割以下となっており、このことは、PC クラスタ製品がどちらかというと低位のシステムを中心に分布している事を示している。

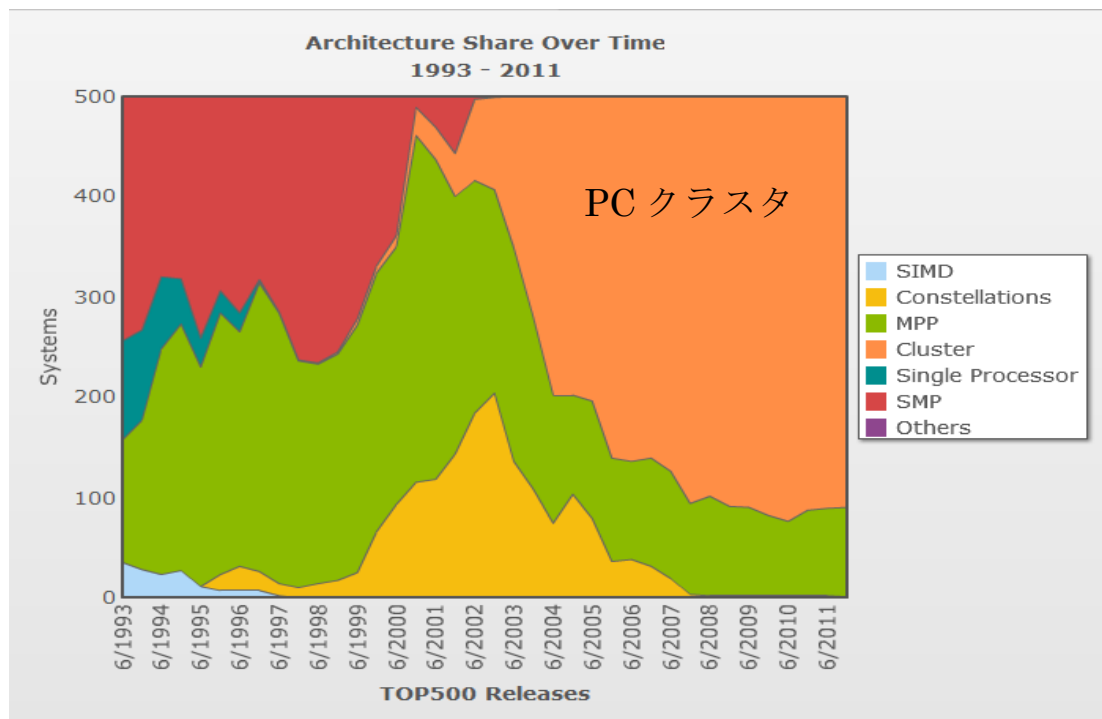


図 4-3 Top500 に占める PC クラスタのシステム数シェア （出典：Top500）

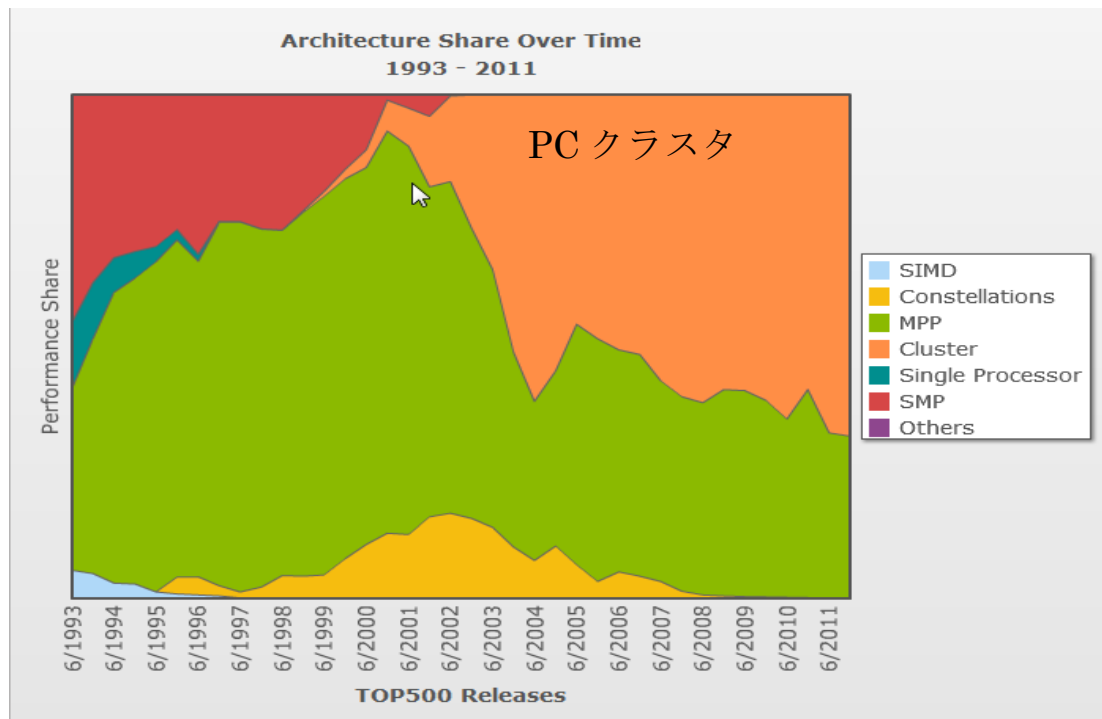


図 4-4 Top500 に占める PC クラスタの性能シェア (出典：Top500)

このように、TOP500 における PC クラスタの存在は無視できるものではないが、今回の研究に関して、以下の見地から PC クラスタを除くものと判断した。

第一に、PC クラスタはモジュラー型製品であり、イノベーションの担い手が、主にモジュール側 (CPU などの部品) にあるため、システムメーカーの寄与が小さく、今回のシステムメーカーごとの分析手法に適合しない。実際にはプロセッサを開発製造している Intel の影響が大きいですが、Intel 自身は過去に一時的にスーパーコンピュータシステムの開発を行ない ASCI プログラムに参画するなどしていたが、2000 年ごろにはシステム開発から撤退し、現在はシステムを開発・製造していない。また、PC クラスタの提供メーカーは中小メーカーを含め多数存在し Intel 以外の特定メーカーを代表して評価することも適切ではないと考えた。

第二に、PC クラスタは、現時点においては一種のドミナントデザインを形成しており、アーキテクチャとしては固定化している。台数を増やすことで Top500 の上位システムとして姿を見せる事はあるが、新たなアーキテクチャやテクノロジーの採用といった技術的非連続性を伴うイノベーションへの貢献度は現状低いと考えられる。

また、PC クラスタは、ネットワーク性能が弱く、大規模システムでの実プログラ

ムの運用において Linpack ベンチマーク以外では実行効率が低く、全体システムとして運用されることはあまりなく、システムを分割して運用される傾向がある。このため単一のシステムとしての性能として評価する有効性についても若干疑問が残る。

以上のようなことから今回の分析方法において有効な知見を得ることが難しいと判断した。

4.4 データの分析方法

4.4.1 データ整理方法

Top500 Supercomputer sites の全期間、1993 年 6 月分から 2011.6 までの 37 回分の公開データ (<http://www.top500.org/>) を分析した。

Top500 の各エントリ・データには以下の情報が記載されている

- ① サイト組織名、国名、利用分野
- ② 製造メーカー、機種/システム構成
- ③ システムアーキテクチャ、プロセッサ構成、ネットワーク構成
- ④ ピーク性能、Linpack 実行性能、効率情報

この情報を、まずメーカー毎に分類。各メーカー毎に登録されている製品を同じ製品シリーズまたは同等の製品系列で同じテクノロジー世代の製品を同一製品グループ（または製品）として分類した。例えば、プロセッサ開発を伴う製品の場合は、同じプロセッサを使用する製品は基本的には同じ製品グループとみなした。プロセッサの開発を伴わない場合は、ネットワークやプロセッサボードが同等の場合は同じ製品グループとみなしている。一部の製品は、販売上の都合から、中身が同等の製品でも異なる製品名を付ける場合があるが、その場合も、システム構成の分析を行って、同等の製品グループと見なすべきものは同じ製品グループへの分類をおこなった。個々の製品グループの分類については、各メーカーの項目の中で記載する。

4.4.2 システム数推移

前述の手順に従ってメーカー毎、製品グループ毎に分類したデータを元に、縦軸に各製品グループが登録されたシステムの数。横軸は時間（1年2回で37回）でプロットしたものを、各製品のシステム数推移とする。

図4-5に、製品毎にそのシステム数の推移をプロットしたグラフのイメージを示す。

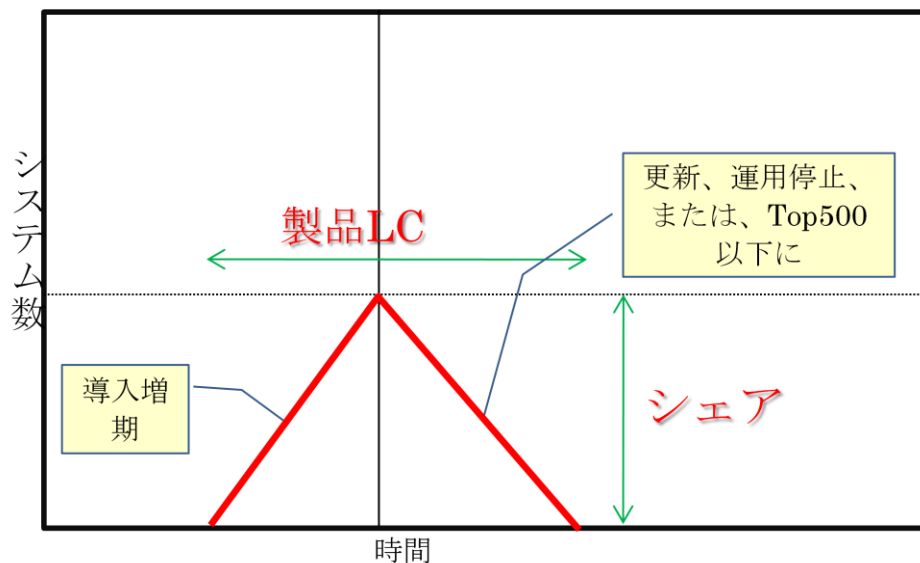


図 4-5 システム数推移グラフ

横軸は時間軸、縦軸は Top500 登録システム数を表す。製品の開発が完了し、出荷され、Top500 にランクインするシステムが出てくると当該製品がグラフ上にプロットされ始め、出荷システム数の増加に伴い、グラフは右上がりに増加していく。この時期は製品に競争力があり“売れる”期間といえる。その後、他社が高性能な製品を出荷する等によって製品の競争力が低下するとともに新規出荷が減り、これと並行して他の製品がより高い性能を達成することで、当該製品グループは Top500 のランク外に追い出される、または、他製品にリプレースされたり、運用を停止することで、リストから消えて行くことになる。このようにシステム数分析グラフは図4-5に示すように、山形の形状を示すことになる。また、Top500 が HPC 市場のうちの数割を構成していることを考慮すると、このグラフは、当該製品の市場におけるライフサイクルおよび、ハイエンド市場でのシェアの傾向をある程度示しているものと考えられること

ができる。すなわち、山型の幅は製品寿命を表し、高さは 500 システム中のシステム数の比率をシェアと置き換えて見ることができる。

4.4.3 合計性能推移

前述のように Top500 に登録される個々のシステム規模は 1 位から 500 位の間で 100 倍近い性の差があり、システムごとに性能の差がある。また、導入当初のシステム構成から、フル稼働状態を経て、システム更新までの期間の間にシステムの規模も変動するが、システム数の分析だけでは、これらの規模の変化を確認することができない。これを解決するため、製品毎に個々のシステム性能（Linpack 実行性能）を集計し、そのデータの推移を利用して分析を行う。

スーパーコンピュータ市場では、システム性能と製品のプライスには強い相関関係があり、極端な場合、システムアーキテクチャ等の機能差にかかわらず、Flops 単価いくらといった単純な指標で値付けが行われることもある。よって、時間軸方向のプライスパフォーマンス（価格性能比）は、性能トレンドにほぼ比例して向上していく傾向を示しているといえる。

システム全体の合計性能推移は、TOP500 全体システムの性能トレンドと同意であることから、個々の製品グループの合計性能推移も全体の性能トレンドと強い相関を持つと考えられるが、個々の製品グループ内では、同じ構成・テクノロジーを利用した製品のため、原価低減には限界があり、プライスパフォーマンスの向上は制限されことから、製品のライフサイクルを反映し、各製品グループの合計性能の推移は、図 4-6 に示すように、弓なりのカーブを構成する事になる。

同じメーカーの複数の製品グループ並べて表示することで、各製品グループが、市場競争力がある展開期から、市場縮小期に入り、それと並行して、後継の製品グループを市場に投入することで、売上げ規模確保し事業を継続している様子が読み取れる。

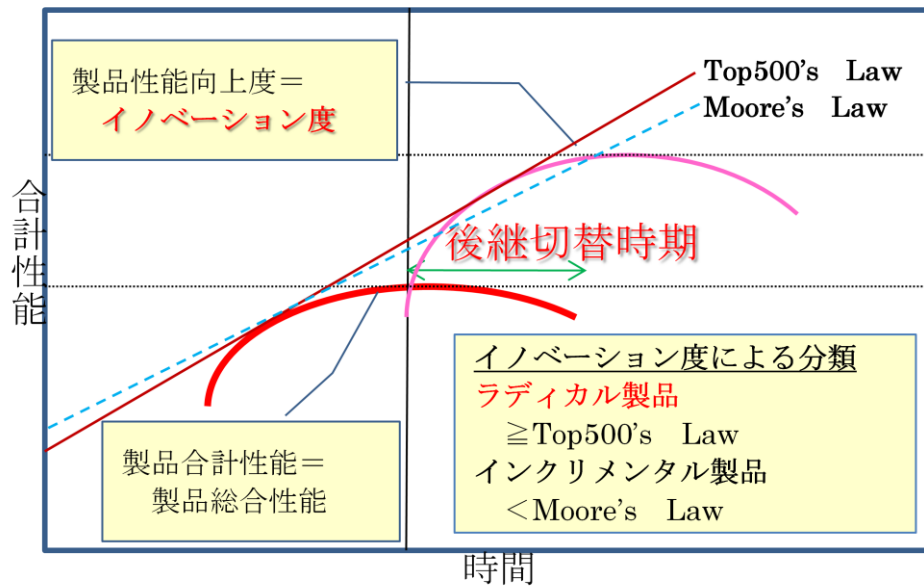


図 4-6 合計性能推移グラフ

この製品グループ間の実質的な性能向上を、各製品の合計性能グラフを外挿する直線の傾きでとらえる事ができる。この傾きが、**Top500** のトレンドを越えていれば、その製品グループは、**Top500** の性能トレンドの向上に貢献しているものと見なすことが出来ると考えた。個々の製品グループの事情を考慮すると、製品グループのシェアの拡大や、アーキテクチャの変更に伴う性能特性の変化等もあり、ミクロ的に見れば、個別事情の要素も含まれるが、シェア拡大も社会経済的波及効果を示す一つのイノベイティブな製品の特長ととらえれば、グラフの傾きがイノベーションへの貢献度と言い表されるものと考えられる。

ここで、この製品グループ間の合計性能推移のグラフを外挿する直線の傾きの傾斜によって、当該製品のイノベーションの貢献度の評価の指標となると判断する。具体的には、図 4-6 に示すように、同じメーカーの複数の製品グループ間で、グラフの傾斜が **Top500** の性能向上トレンド（4 年で 10 倍）を越えていれば、イノベイティブな製品と取らえるものとする。また、傾斜が **Moore** の法則（3 年で 4 倍）を越えないものは、標準的な性能向上に収まっている製品グループであると評価する。

ここで、先の、**Top500** の性能トレンドを越える製品グループをラディカルなイノベーションにつながった製品として「ラディカル製品」とよぶ。

これに対して、**Moore** の法則以下の性能向上しか達成できていない製品が漸進的な進

化に留まっており、これを「インクリメンタル製品」と呼ぶものとする。

4.5 各社データ分析結果

4.5.1 各社の全体的傾向

前述のデータ分析方法を各社の製品に適用して分析を実施した。

まずは、各社の全評価対象製品（PC クラスタを除く）の合計値の状況であるが、システム数推移の状況を図 4-7 に示す。

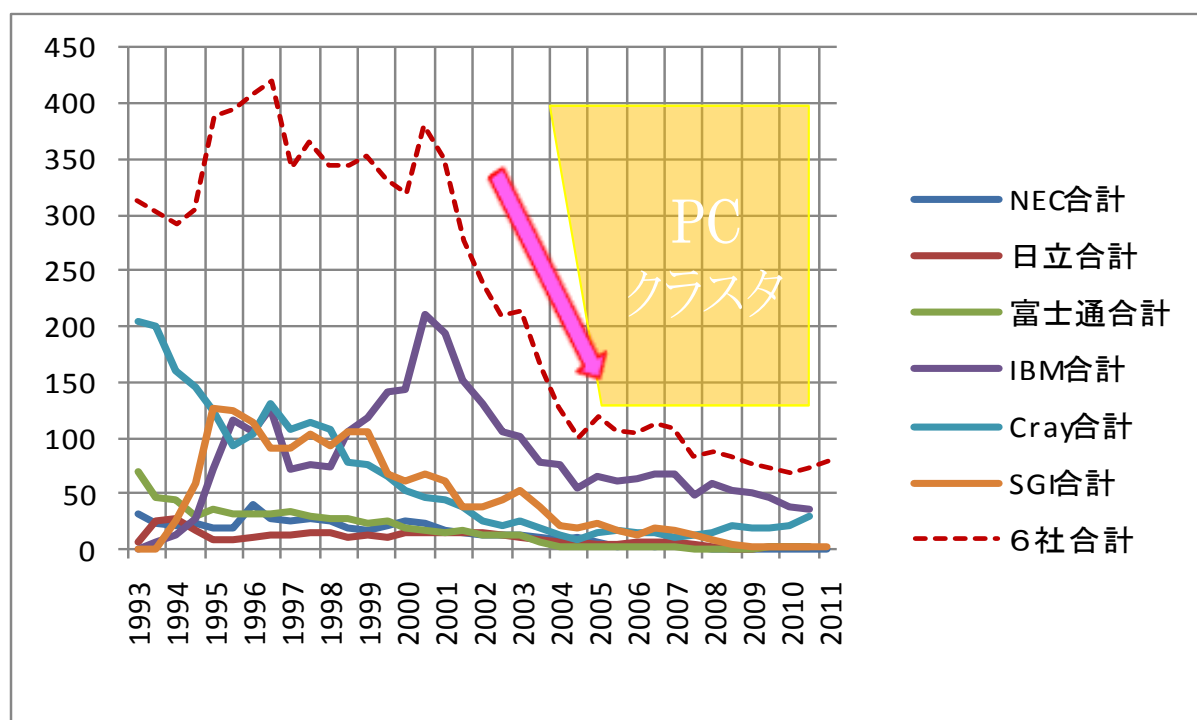


図 4-7 6 社の合計システム数の推移（PC クラスタを除く）

6 社スパコンの合計システム数は、PC クラスタの拡大に伴い、2000 年以降、システム数は大幅に減少しており、現時点では 500 社全体に占める割合は 20%を割り込んでいる。しかしながら別途集計した性能値で見た場合のシェアは 40%を占めており、6 社の独自開発製品の影響が大きい事がわかる。CRAY 以外は台数を減じており、特に日本メーカーは、各社とも 3 サイト程度と大幅にシェアを落としている。逆に

CRAY は最近になって台数シェアを挽回してきている。

図 4-8 に会社毎の全製品を集計した合計性能推移を示す。

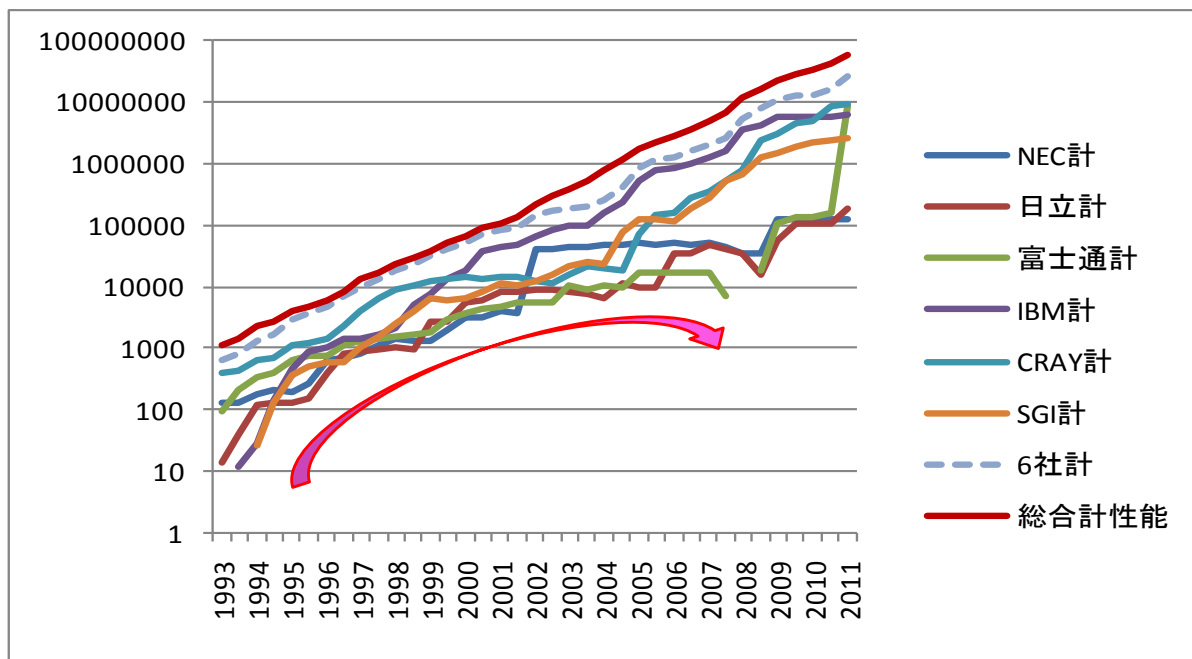


図 4-8 6 社の合計性能の推移（PC クラスタを除く）

米国 3 社については減少傾向は見られるものの総合計性能トレンドとそれほど大きな乖離はないように見受けられる。一方、日本 3 社は 1990 年代前半に立ち上がり急峻である一方、2000 年以降横ばいとなっており、総合計性能との乖離が広がっており市場でのシェア低下が読み取れる。ただし、富士通は“京”の 1 システムで急速に挽回している状況にある。

つぎに、各社の個別製品毎に分析を行う。

4.5.2 IBM

前出のように IBM はコンピュータメーカーとしては老舗的な存在であるが、本格的なスーパーコンピュータ開発への参入は早くない。

IBM が他社に先駆けて設計していた RISC プロセッサを用いて開発されていた並列サーバ(RS/6000)をベースに、超並列に拡張したシステムを科学技術計算用のハイエンド機として超並列化したものを SP シリーズとして販売を始めたのは 1993 年頃からである。

IBM の製品で評価の対象としてもものを、表 4-1 に示す。

Top500 にエントリした、科学技術計算向けに開発された製品である。 IBM も、PC クラスタの開発は行っているが、PC クラスタは対象外としている。ただ、ソニーコンピュータエンターテインメントのゲーム機 playstation3 のプロセッサである Cell Broadband Engine を IBM 単独で強化した PowerXCell 8i プロセッサを演算加速のために搭載したクラスタシステムは PC クラスタに PowerXCell8i を付加した構成ではあるが、専用プロセッサを開発しているため、評価の対象としている。

表 4-1 IBM 製品のうち評価対象の製品ライン

メーカー	製品ライン	製品		稼働年	登録時期	補足(CPU/NW等)
IBM	POWER HPC	RS6000/SP1	RS/6000 SP,9076-xxx SP1	1993	1993/11	POWER1
		RS6000/SP2	RS/6000 SP2/x	1994	1994/06	POWER2
		RS6000/SP2SC	RS/6000 SP2SC	1996	1997/06	POWER2 SC
		RS6000/SP604	RS/6000 SP PC604e, ASCI Blue-Pacific	1998	1998/06	PowerPC604e
		RS6000/SP3	RS/6000 SP Power3, ASCI White	1999	1999/06	POWE3
		pSeriese p4	pSeries 690/655	2001	2002/06	POWER4
		pSeriese p5	eServer pSeries p5 575/570	2004	2004/11	POWER5/5+
		System-p p6	Power 575 p6	2007	2008/06	POWER6
		POWER Systems p7	Power 775/750 p7, BladeCenter PS702	2010	2011/06	POWER7
	BlueGene	Blue Gene/L	Blue Gene/L, eServer Blue Gene Solution	2004	2003/11	PowerPC440/3Dtorus
		Blue Gene/P	Blue Gene/P Solution	2007	2007/06	PowerPC450/3Dtorus
		Blue Gene/Q	Blue Gene/Q	2010	2010/11	PowerBQC/3Dtorus
	PowerXCell	PowerXCell8i	BladeCenter QS22 Cluster, QPACE, Roadrun	2008	2008/06	PowerXCell8i

次に IBM の製品のシステム数推移を図 4-9 に示す。

1995 年以降、システム数を増やし 2000 年頃には、Top500 の約半数を占めるに至っている。その後、専用開発製品は台数を落としているが 50 台前後で数位している。

製品としては、SP2、SP3 が総システムの 1/4 程度のシェアを占めている。各製品のライフサイクルは、ピークまでに 2～3 年、ピークからフェードアウトするのに 4～5 年程度ということが読み取れる。次に図 4-10 の合計性能推移を分析する。グラフ中の赤い実線は Top500 の性能向上トレンド（4 年で 10 倍）を示し、青の破線は、Moore 則（3 年 4 倍）の傾きを示している。

初期の SP 1 を除き（IBM の HPC 立ち上げ時期と、Top500 が運用を開始したばかりと言う事もある、各製品の更新においても、後継機種 of 投入を途切れさせることなく続け、さらに Top500 トレンドを越える成長を維持している事がわかる。

特に、2003 年以降は、Blue Gene/L や PowerXCell など複数の製品系列を投入することにより、より密にイノベーションを起こす努力を実施しているといえる。

複数の製品アーキテクチャのラインを持つ IBM であるが、SP3 を除き同一製品アーキテクチャの製品は Moore 則のトレンドに収まる傾向があることが読み取れる。

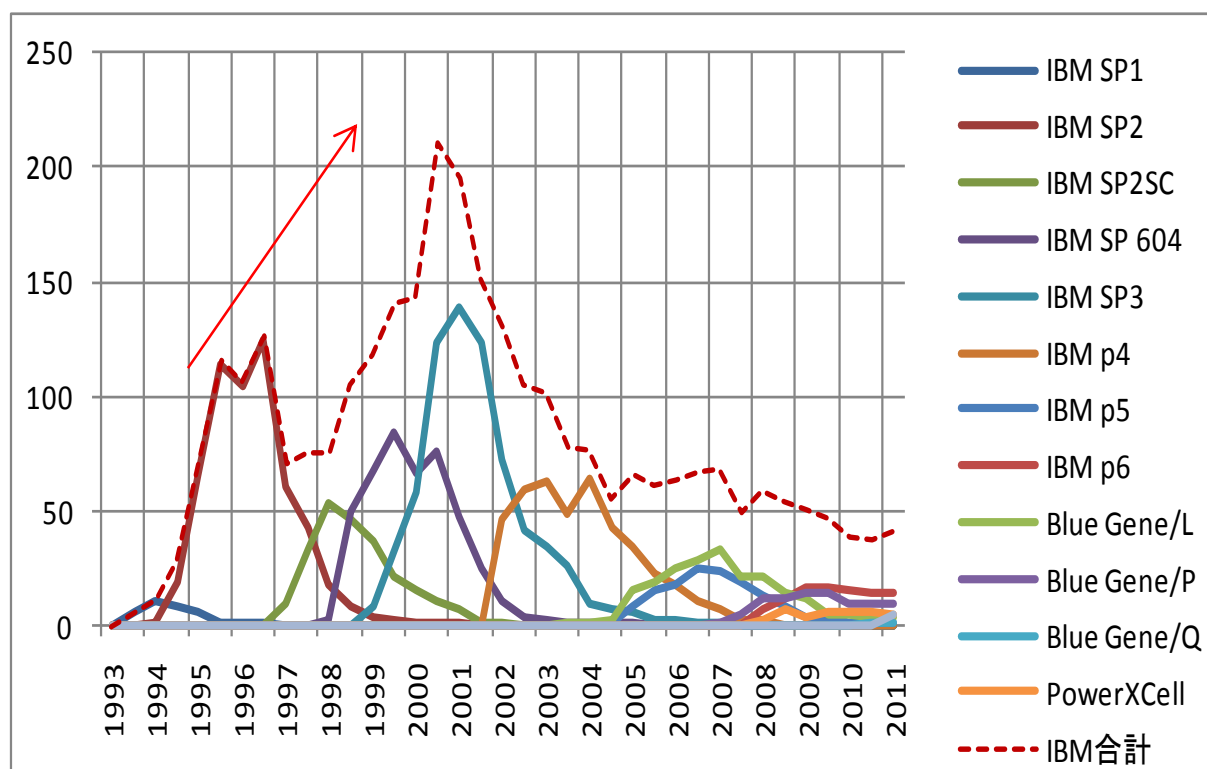


図 4-9 IBM システム数推移

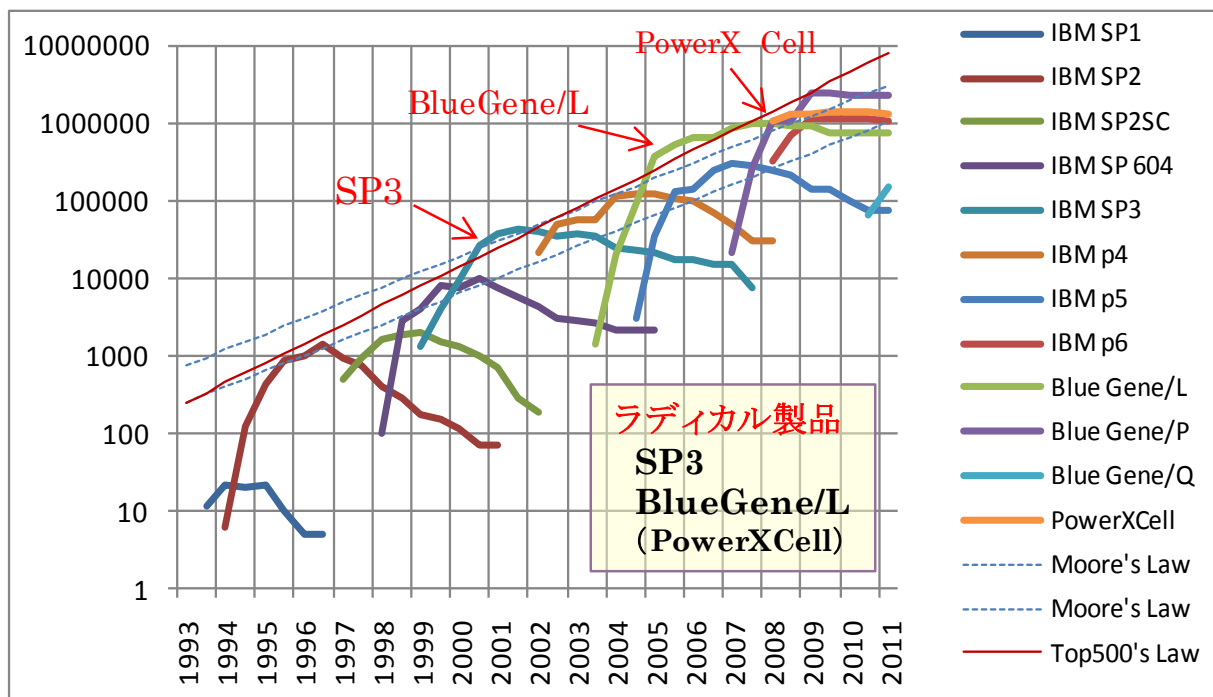


図 4-10 IBM 合計性能推移

具体的には SP シリーズは SP3 を除く 3 機種、pSeries の 3 機種、BlueGene の 3 機種は、ほぼ Moore 則のトレンドに収まっている。

ここで、前述のように先行機種に対して、Top500 の性能向上トレンドを越える合計性能を持つ製品をラディカル製品と定義する。直前の製品との比較だけで判断するとムラがあるため、数世代を見て判断するものとしてグラフより読みとると、適合する製品は、SP3、及び Blue Gene/L が相当するものと判断出来る。

PowerXCell に関しては、新規のアーキテクチャを採用した製品であるが、Moore 則のトレンドを越えていると判断されることから、Top500 トrendを越えているラディカル製品ではないが、併せて分析を行う。

4.5.3 CRAY

CRAY はスーパーコンピュータメーカーとして老舗である。ただし、前述したように事業自身は継続されているが、買収等で、資本的には難度が変わってきている。

CRAY における対象製品を表 4-2 に示す。

表 4-2 CRAY の対象製品 (括弧は、Top500 開始以前の出荷時期)

メーカー	製品ライン	製品	稼働年	登録時期	補足(CPU/NW等)	
CRAY	CRAY-Vector	CRAY-1	CRAY-1	1976		CRAY
		CRAY-2	CRA-2/2s	1985	1993/06	
		X-MP	X-MP	1982	1993/06	X-MP
		Y-MP	Y-MP, Y-MP2/4/8(E/I)/xxx, Y-MP M9x	1988	1993/06	Y-MP
		C90	Y-MP C9xx	1991	1993/06	
		J90	Y-MP J9xx	1994	1995/06	
		T90	T9xx	1994	1995/06	
		X1	Cray X1	2002	2003/06	X1
		X2	Cray XT5h	2007		X2
	FPS	S-MP	S-MP/MCPxxx, FPS Model 500	1992	1993/06	Sparc
	T3D	T3D	T3D MC/SCxxx	1993	1994/06	Alpha/3Dtorus
		T3E	T3E 750/900/1200/1200E/1350	1995	1996/11	
	XD	XD1	Cray XD, OctigaBay 12K	2005	2005/11	
	XT	XT3	Cray XT3, Red Storm	2004	2005/06	AMD/3Dtorus
		XT4	Cray XT4, Red Storm	2006	2006/11	
		XT5	Cray XT5/XT5-HE	2007	2008/06	
		XT6	Cray XT6/XT6m/XT6-HE	2009	2010/06	
		XE6	Cray XE6	2010	2010/06	
		XK6	Cray XK6	2011	2011/11	AMD+Nvidia/3Dtorus

CRAY は、1996 年から 2000 年までの間、SGI に買収され、事業部門として事業は継続されたものの CRAY ブランドでの新規製品開発が停滞した時期がある。2000 年には Tera Computer 社に事業が転売され、社名が Cray Inc.となり Cray の会社名が復活している。

CRAY は創業以来ベクトル・アーキテクチャの製品開発を行って来たが、1990 年代前半よりスカラ超並列機の開発を開始し、スカラとベクトルのヘテロジニアスな構成のシステム構築を目指していたが、最近ではスカラ超並列機を主に開発している。

図 4-11 に CRAY 製品のシステム数推移を示す。

1993 年にはシェアが 4 割もあったがその後大幅にシステム数を減らしていき、2003 年には 1/10 近くまで台数を減らしている。その後少し回復してきているが 5%程度に

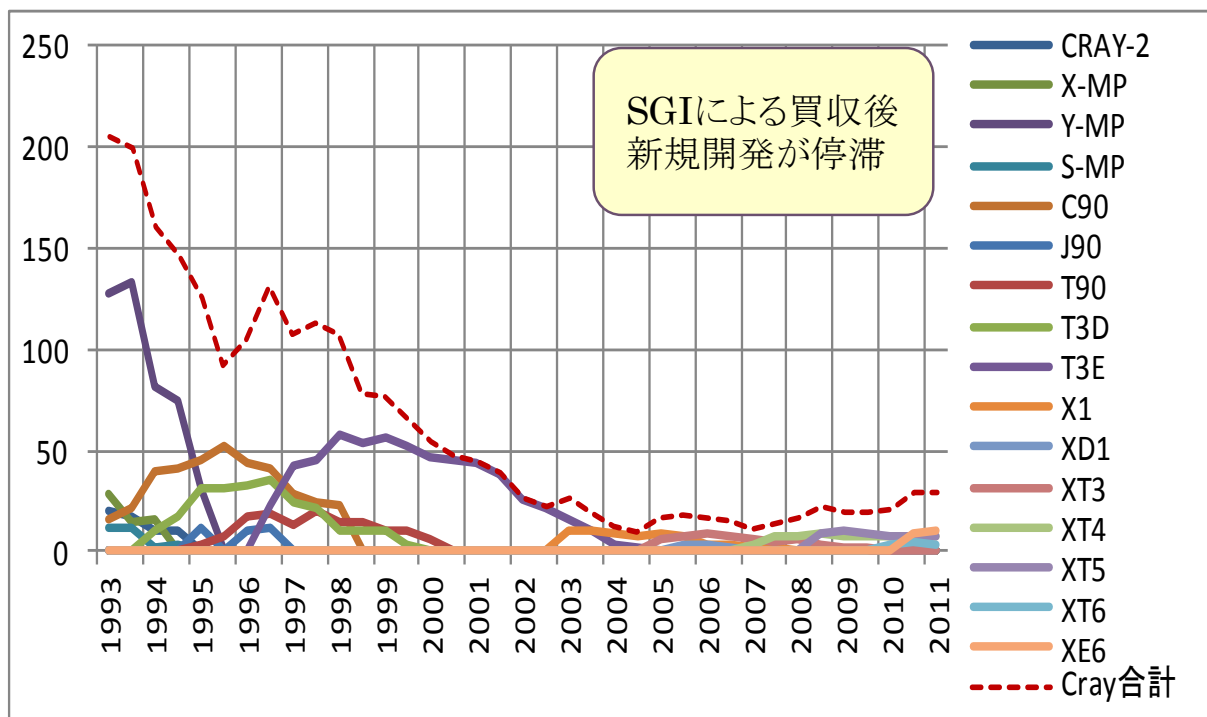


図 4-11 CRAY システム数推移

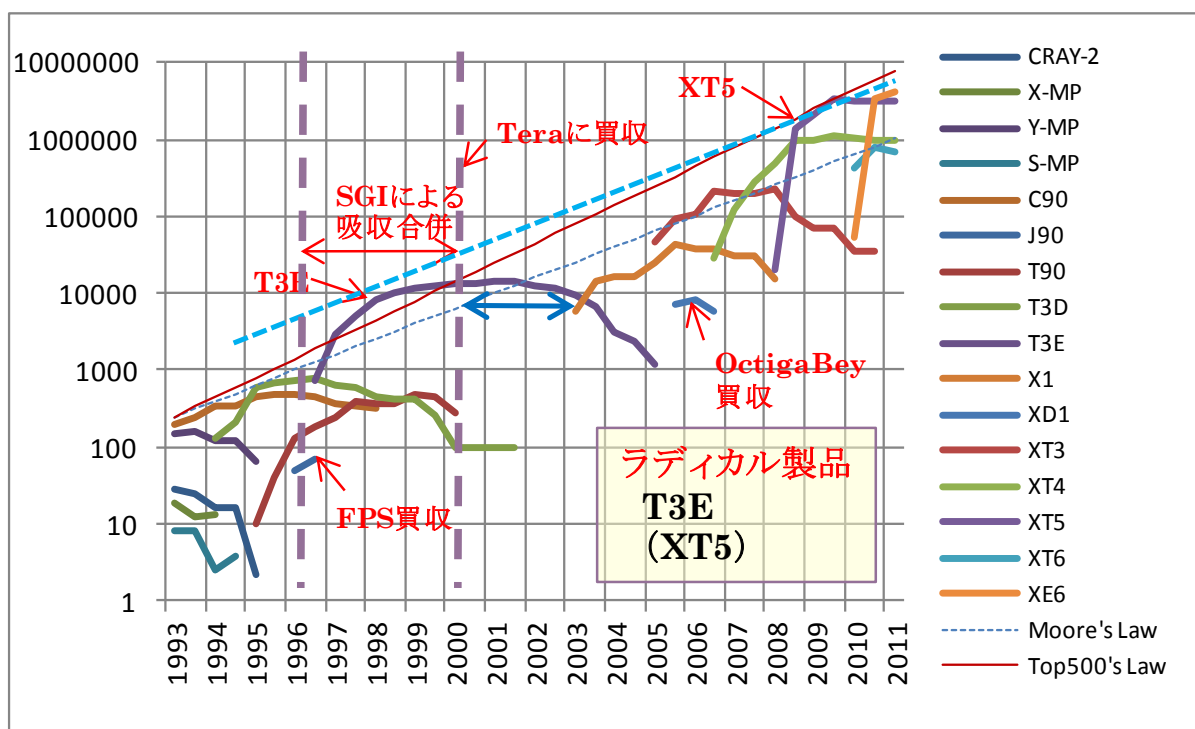


図 4-12 CRAY 合計性能推移

留まる状況である、特に、1996年から2002年までの間に、新製品が投入されておらず（SGIの事業部門としてSGIブランドの製品開発には参画）シェアを落とす要因になっているといえる。

次に、合計性能推移を図4-12に示す。

この図では1996年から2000年までは、SGIの買収前に開発したT3Eが合計性能値を伸ばしているが、その間に新規製品開発が滞ったため、2000年から2003年までの3年間の空白期間が性能シェアも大きく失っている状況が見て取れる。2003年にX1を出荷するまで、市場をつなぎ止めておく製品がなく、NEC製のSX-6をOEM提供している。これによりNEC側は、日米貿易摩擦以降、スーパー301条の発動で高額な関税がかけられていたスーパーコンピュータの制限が解除されるという成果を得たが、保守体制を含めてCray側へ提供した事などから、その後も米国内での実質的な販売が行われる事は無かった。

Crayはまた、M&Aによって、製品ラインを増強することも行っている。グラフから読み取れる例としては、1996年のFPS社買収によるS-MP、および、2005年のカナダOctigaBey社買収によるXD1などがある、ただし、買収した製品はミドルクラスの製品であるため、合計性能での寄与度は小さい。

2005年以降はCPUにAMDのOpteronプロセッサを使用したスカラ超並列機のXTシリーズが順調に売上げを拡大している。

このような状況で、ラディカル製品としては、T3Eが挙げられる。またXT5も対象として挙げておく。

4.5.4 SGI

SGI(Silicon Graphics Inc.)は1983年に創業。グラフィック・ワークステーションメーカーとして一世を風靡したが、PCのグラフィックスカードの性能向上にともない、専用グラフィックスワークステーション市場は縮小したため、SGIは1990年代には、ハイエンドサーバ市場へ事業をシフトしていった。1992年には、RISCプロセッサ設計のMIPS社を子会社化し、サーバ事業を強化。Challengeおよび、POWER CHALLENGEシリーズを開発。1996年にはCRAY社を買収し、CRAYの技術を利用したスカラ並列機(NUMA-link型)のORIGIN2000シリーズを開発し本格的にスーパーコンピュータの開発に参入した。

その後、2000年には経営悪化に伴い、CRAY部門をTera computerに売却したが、その後も、プロセッサをIntel製に変えるなどしながら、開発を継続していたが、2009年に破産申請を行い、PCサーバメーカーのRackable Systemsに買収された。

社名はSilicon Graphics InternationalになりSGIを継承している。現在はPCクラスタ製品を中心に提供している。表4-3にSGIの評価対象機種を示す。

表 4-3 SGI の対象製品

メーカー	製品ライン	製品		稼働年	登録時期	補足(CPU/NW等)
SGI	Challenge	Challenge	Challenge	1993	1994/06	
		PowerChallenge	POWER CHALLENGE(array), POWER Onyx	1994	1994/11	
	ccNUMA	Origine2000	ORIGIN 2000, Onix2, ASCI Blue Mountain	1996	1996/11	MIPS/ccNUMA
		Origine3000	ORIGIN 3000	2000	2000/11	
		Altix3000	Altix 3700, SGI Altix	2003	2006/06	IA64/ccNUMA
		Altix4000	Altix 4700	2006	2006/11	

SGIのシステム数推移を図4-13に示す。

Power Challenge 及び ORIGIN2000 でシステム数を稼いだが、2000年以降の経営悪化でシェアを大幅に落としている。

合計性能推移を図4-14に示す。

CRAYの技術を取り込んだORIGIN2000は、ASCIプロジェクトのBlue Mountainとして導入されたこともあり、性能シェアを拡大した。CRAY売却後ORIGIN3000ではシェアを落としたが、Altix3000がNASAのスペースシャトルColumbia号の事

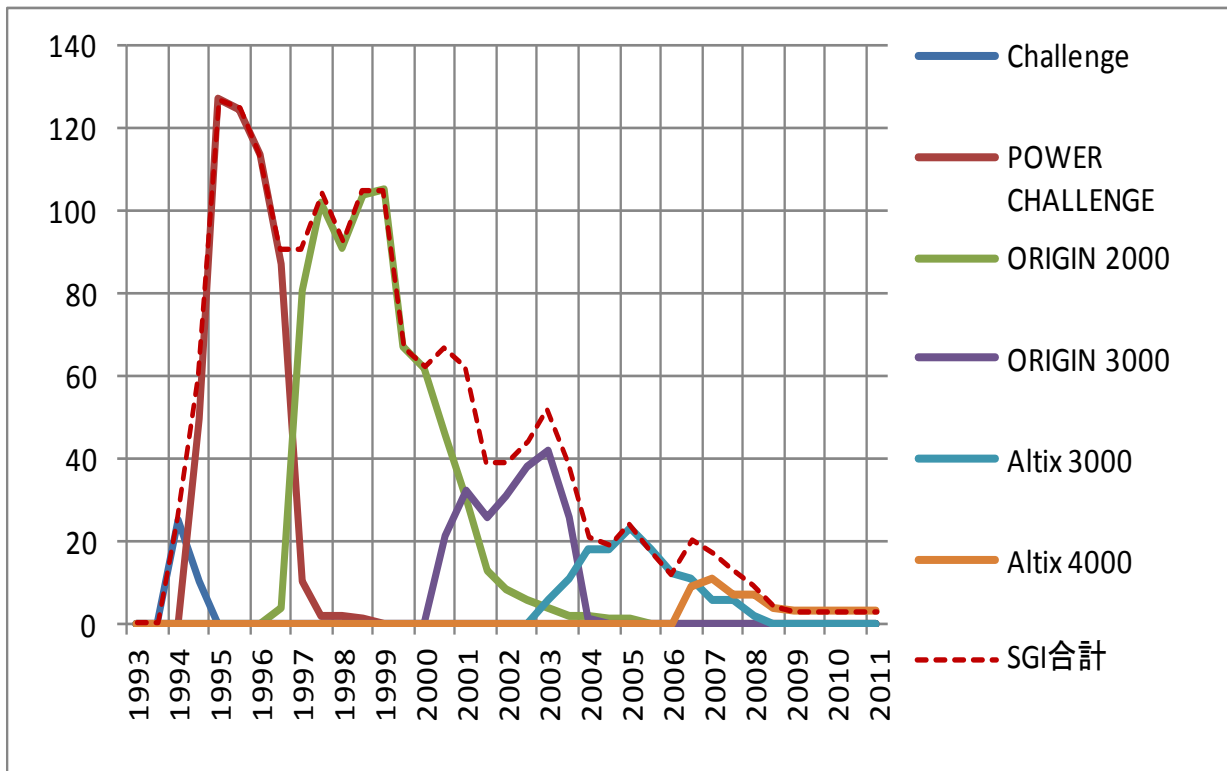


図 4-13 SGI システム数推移

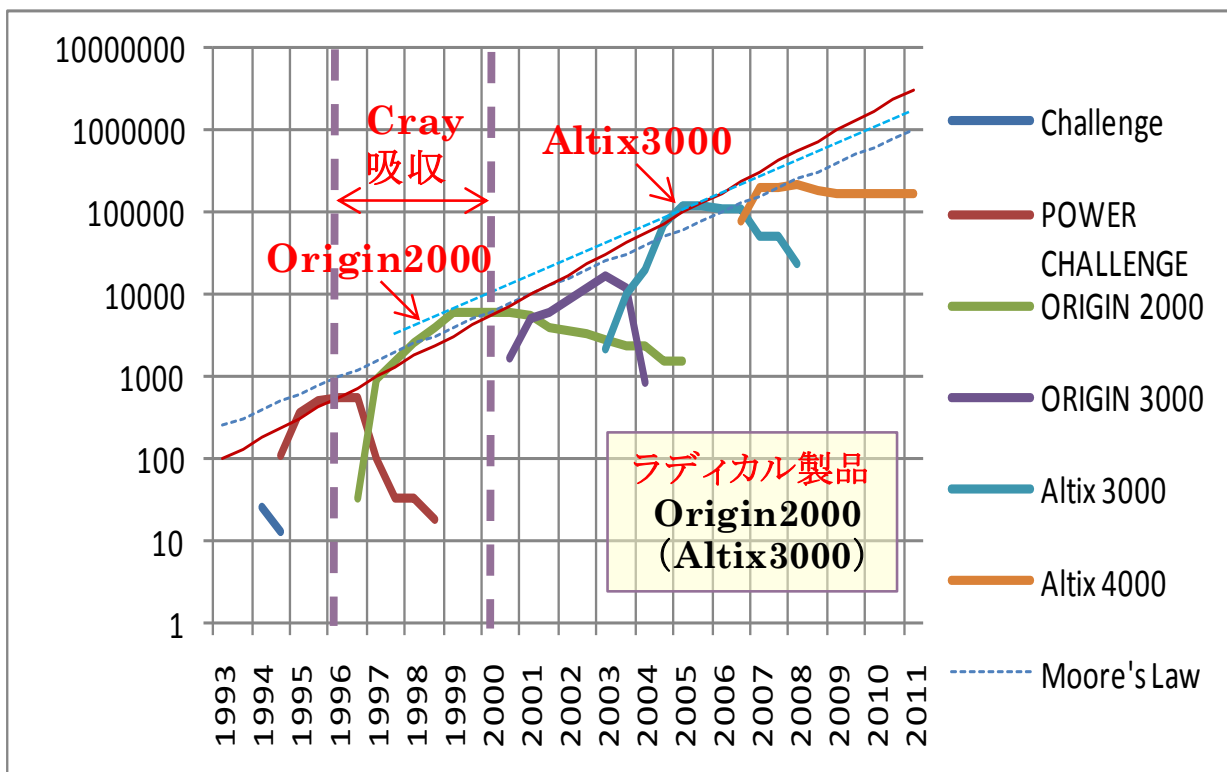


図 4-14 SGI 合計性能推移

故後の設計品質改善システムとして導入され、シェアを戻している。よってラジカル製品は Origin2000 であり、Altix3000 は一応ラディカル製品相当とする。

4.5.5 富士通

富士通は、1977 年に FACOM230-75APU という名の日本発のベクトル型スーパーコンピュータを開発した。その後 1990 年代まではベクトル型のスーパーコンピュータの開発を行っていたが、その後、自社のサーバ用に専用設計の SPARC プロセッサの開発が進められ、その後、スーパーコンピュータも相乗効果が得られる Sparc プロセッサベースのスーパーコンピュータ開発にシフトした。2011 年に稼働を開始した、“京” も富士通製 Sparc プロセッサベースのシステムである。

表 4-4 富士通の対象製品

メーカー	製品ライン	製品		稼働年		補足 (CPU/NW等)
富士通	VP/VPP ベクトル	VP-100/200/400	VP-100/200/400, VP200E	1983	1993/06	Vector
		VP2000	VP2100/2200/2600, S2/4/600, VPX2x0	1989	1993/06	
		VPP500/NWT	VPP500, Numerical Wind Tunnel	1993	1993/11	Vector+VLIW
		VPP700	VPP700,300, VX/4,3	1996	1996/11	
		VPP5000	VPP5000, VPP800	1999	1999/11	
	SPARC HPC	PrimePower 2500HPC	PRIMEPOWER HPC2500	2002	2001/11	SPARC64
		FX1	Fujitsu FX1	2008	2008/11	SPARC64/6Dtorus
		京	K computer	2011	2010/11	
		FX10		2011		SPARC64

富士通の対象製品を表 4-4 に示す。

図 4-15 のシステム数推移は、Top500 開始以降、大幅にシステム数を減らしている状況である。

合計性能推移で見ると、航空宇宙技術研究所と開発した数値風洞（NWT）は世界一を達成し、またそれを商用化した VPP500 シリーズと併せて Top500 性能トレンドを越えたが、その後はムーア則以下の伸びになっている。さらに 2007 年から 2008 年頃は製品が Top500 に 1 台もエントリされない時期も存在する。

2011 年に京が完成し、2011 年 11 月には 10Petaflops を達成。（グラフは 2011 年 6 月まで）再び世界一を達成したことで性能を大きく増加させた。

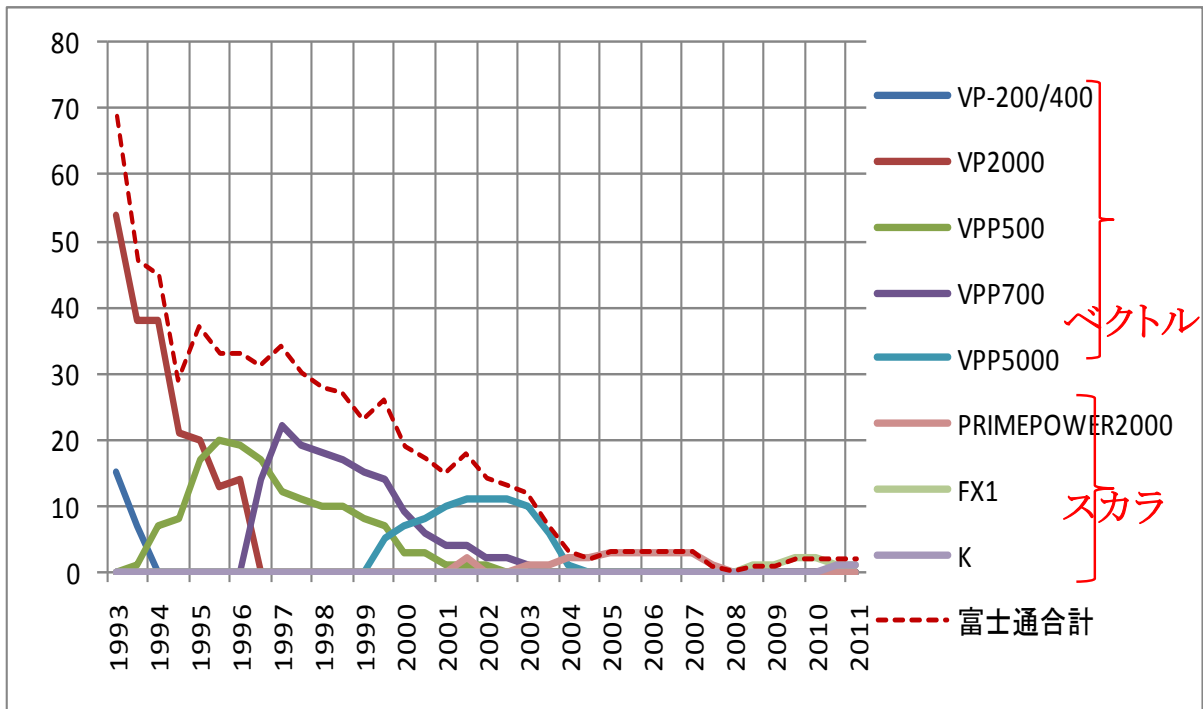


図 4-15 富士通 システム数推移

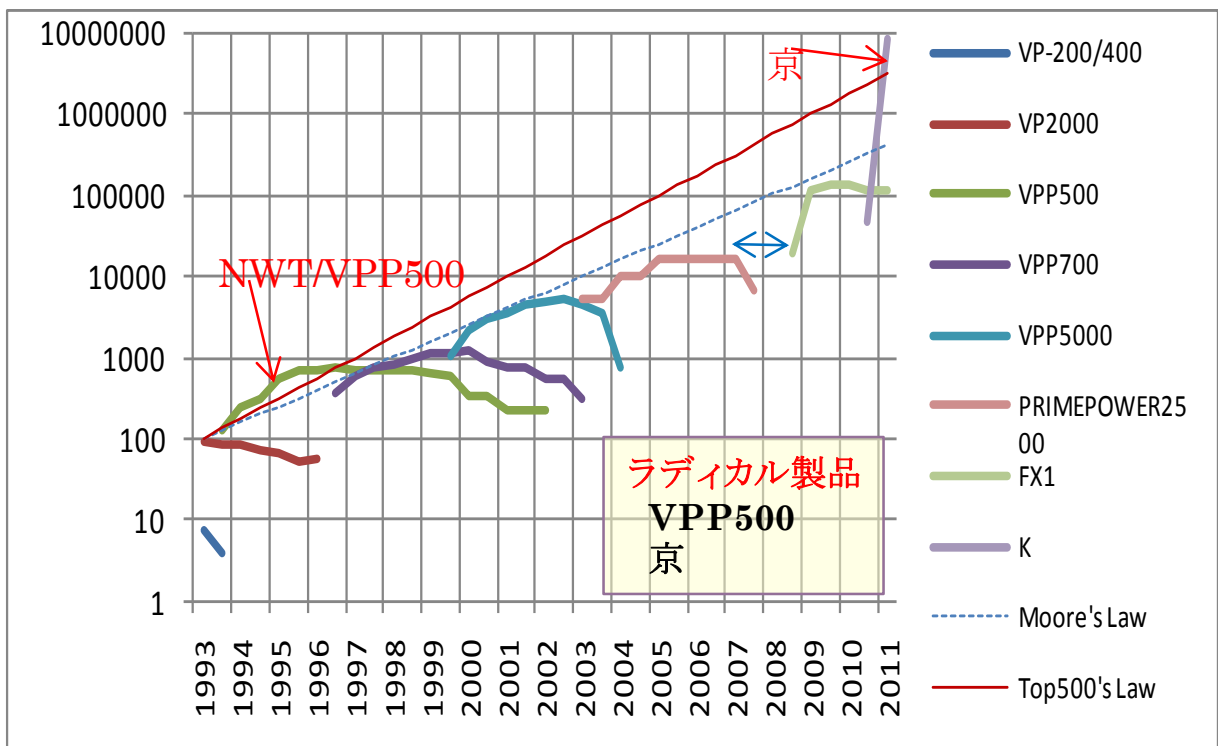


図 4-16 富士通 合計性能推移

4.5.6 日立

日立は1984年にスーパーコンピュータを開発して以来、スーパーコンピュータの販売を継続している。日立は1990年代まではベクトル型の開発を行っていたが、その後プロセッサ開発に関してはスカラプロセッサをベースに疑似ベクトル機構と呼ばれる機構を追加するアプローチを採用しており、筑波大と共同開発した CP-PACS の時に PA-RISC ベースのアーキテクチャに変更、CP-PACS と同じテクノロジーの商用機である SR2201 に適用された。CP-PACS は Top500 で1位を達成している。さらに後継機の SR8000 ではその当時協業していた IBM の PowerPC ベースのアーキテクチャに変更してプロセッサの開発を行っている。現在は IBM の POWER System をベースに日立側で実装やソフトウェアに変更を加えて販売を行っているが、独自開発とは言いにくい状況になっている。

表 4-5 日立の対象製品

メーカー	製品ライン	製品		稼働年	登録時期	補足(CPU/NW等)
日立	S ベクトル	S-810		1983	1993/06	Vector
		S-820	S-820	1987	1993/06	
		S-3800	S-3600/3800	1992	1993/06	
	SR 疑似ベクトル	SR2000/CP-PACS	SR2201, CP-PACS	1995	1996/06	PA-RISC+疑似V/3DXbar
		SR8000	SR8000	1998	1999/06	PowerPC+疑似V/nDXbar
	IBM互換	SR11000	SR11000-xn	2003	2004/11	IBM 互換
		SR16000	Hitachi SR16000	2008	2009/06	

システム数推移のグラフを図 4-17 示す。システム数では、S-820 から S-3000 シリーズへ切り替え時に減少しているが、SR2201 と SR8000 ではシステム数を戻しているがその後は減少傾向となっている。

同じく図 4-18 の合計性能推移に関しても同様な傾向が読み取れる。

SR2201 および SR8000 は Top500 性能トレンドを達成しているが、それ以降の機種は Moore 則トレンド以下となっている。また、各機種間の出荷時期に関して、製品のライフサイクル内に後継製品が間に合っていない状況が発生している。

ラディカル製品としては Top500 性能トレンドを達成している SR2201 および SR8000 と判断した。

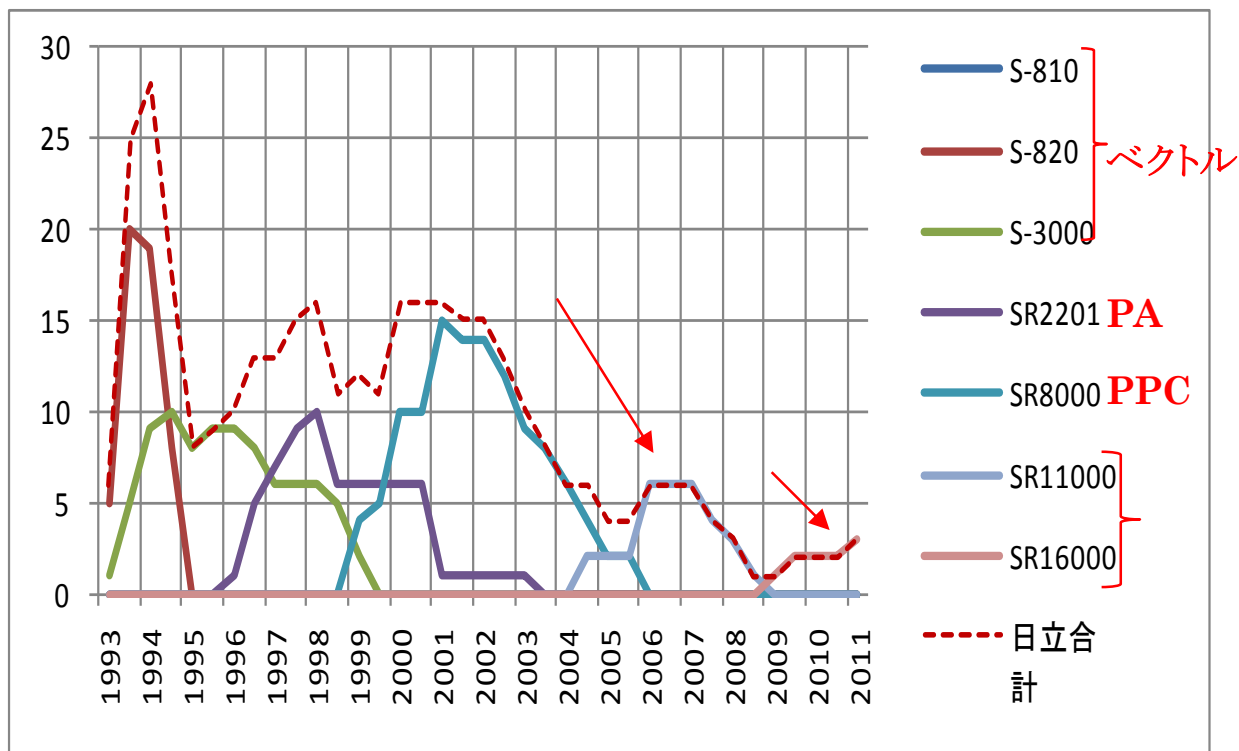


図 4-17 日立 システム数推移

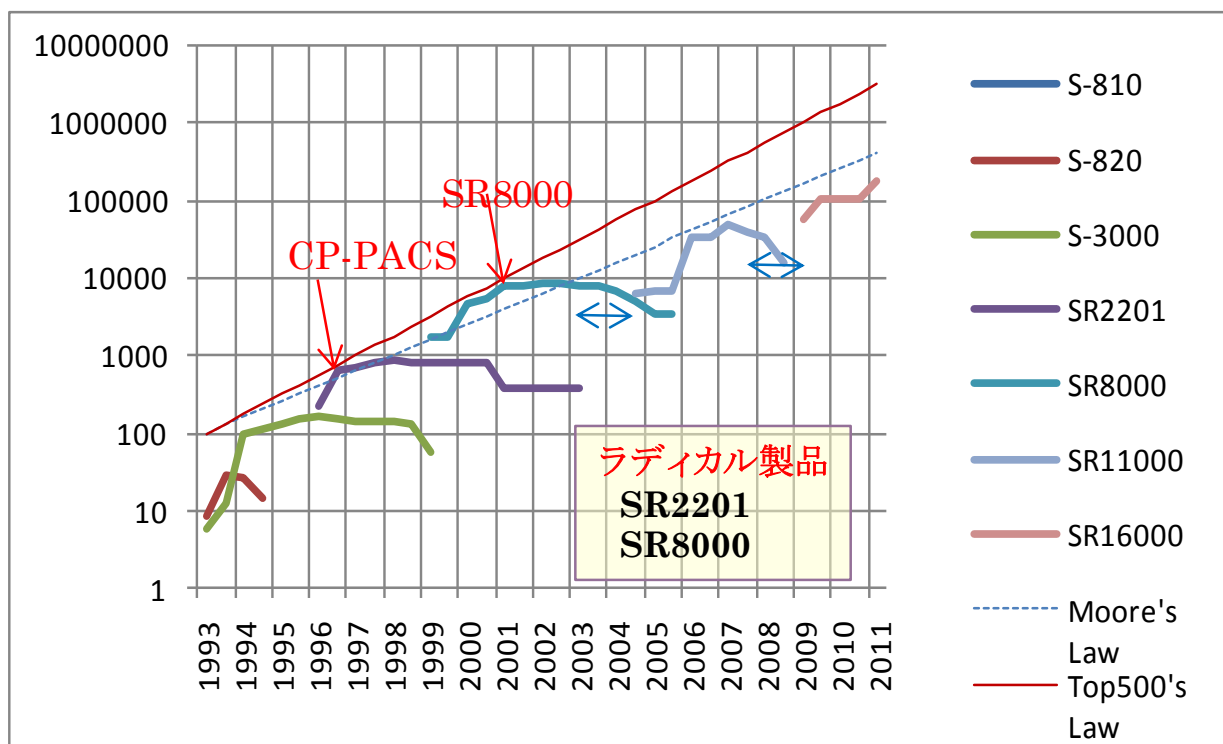


図 4-18 日立 合計性能推移

4.5.7 NEC

NEC は、1985 に SX-1/2 シリーズで 1GFLOPS を超えるスーパーコンピュータを開発して以来、一貫してベクトル型のアーキテクチャを採用した開発を続けている。

プロセッサの基本アーキテクチャは大きく変わってはいないが、プロセッサ内、プロセッサ間接続アーキテクチャを変えることでシステム性能の向上を実現している。また、テクノロジーとしても、半導体プロセスを SX-4 でバイポーラから CMOS へ変更。SX-6 (地球シミュレータ) でベクトルプロセッサの 1 チップ化を実現するなどを行って、強化を続けている。

表 4-6 に NEC の対象製品を示す。すべて、NEC 独自のベクトルアーキテクチャである SX シリーズの製品である。

表 4-6 NEC の対象製品

メーカー	製品ライン	製品		稼働年	登録時期	補足(CPU/NW等)
NEC	SX ベクトル	SX-1/2	SX-1/2, SX-2A	1985	1993/06	Vector
		SX-3	SX-3, SX-3R	1990	1993/06	
		SX-4	SX-4, SX-4B	1995	1995/11	
		SX-5	SX-5, SX-5S	1998	1999/11	
		SX-6/7/ES	SX-6/7, Earth Simulator	2001	2002/06	
		SX-8	SX-8, SX-8R	2004	2005/06	
		SX-9	SX-9	2007	2009/06	

システム数推移を図 4-19 に示す。

SX-4 では CMOS 化に伴い、プロセッサ単体性能は、前機種 of SX-3 から低下したが、プロセッサを多数接続してシステムを構成することで性能向上を図っている。SX-4 ではシステム構成のバリエーションも拡大し、登録システム数は増大したが、その後システム数は減少傾向にあり、現時点でエントリーしているのは、地球シミュレータ後継機の SX-9 のみとなっている。

合計性能推移を図 4-20 に示す。

各製品は、SX-6/7 を除いてみると、SX-4 が Moore 則トレンドをわずかに超えているものの、それ以外は Moore 則以下の性能向上にとどまっている。

SX-6/7 以降の機種は、グラフ上で、山なりのカーブではなく、水平な直線状の形状になっているが、これは、システム数が少なく、一部のシステム (地球シミュレータ)

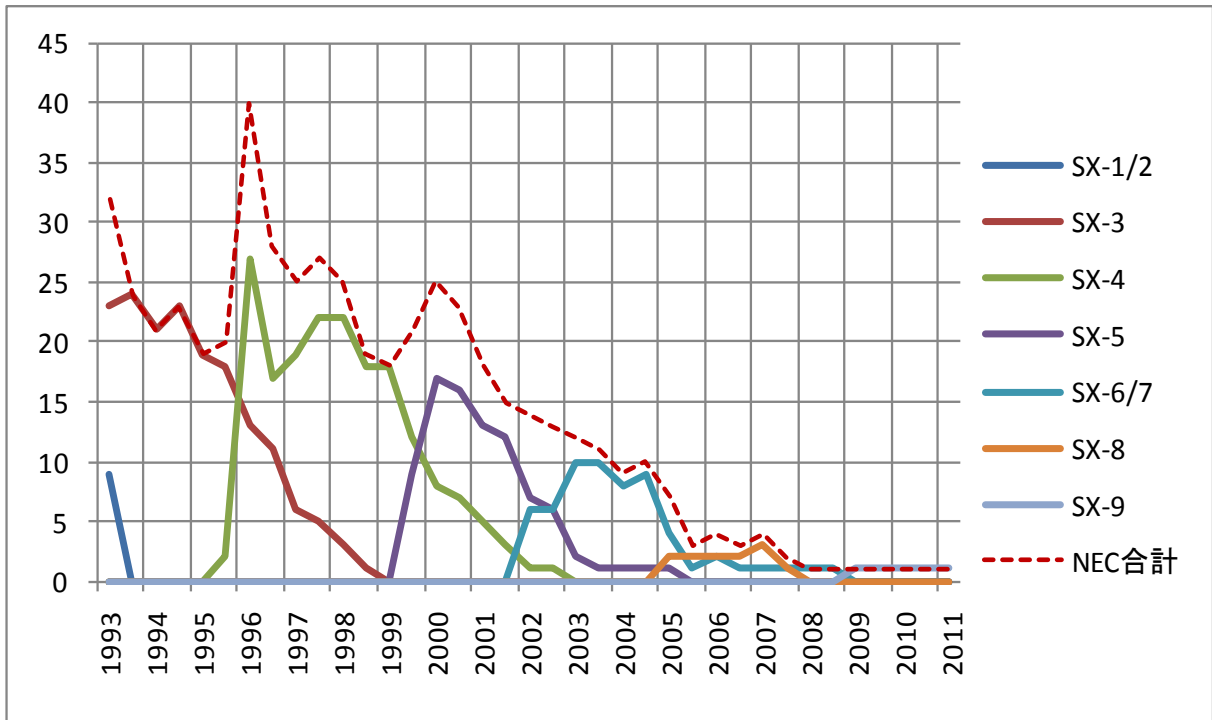


図 4-19 NEC システム数推移

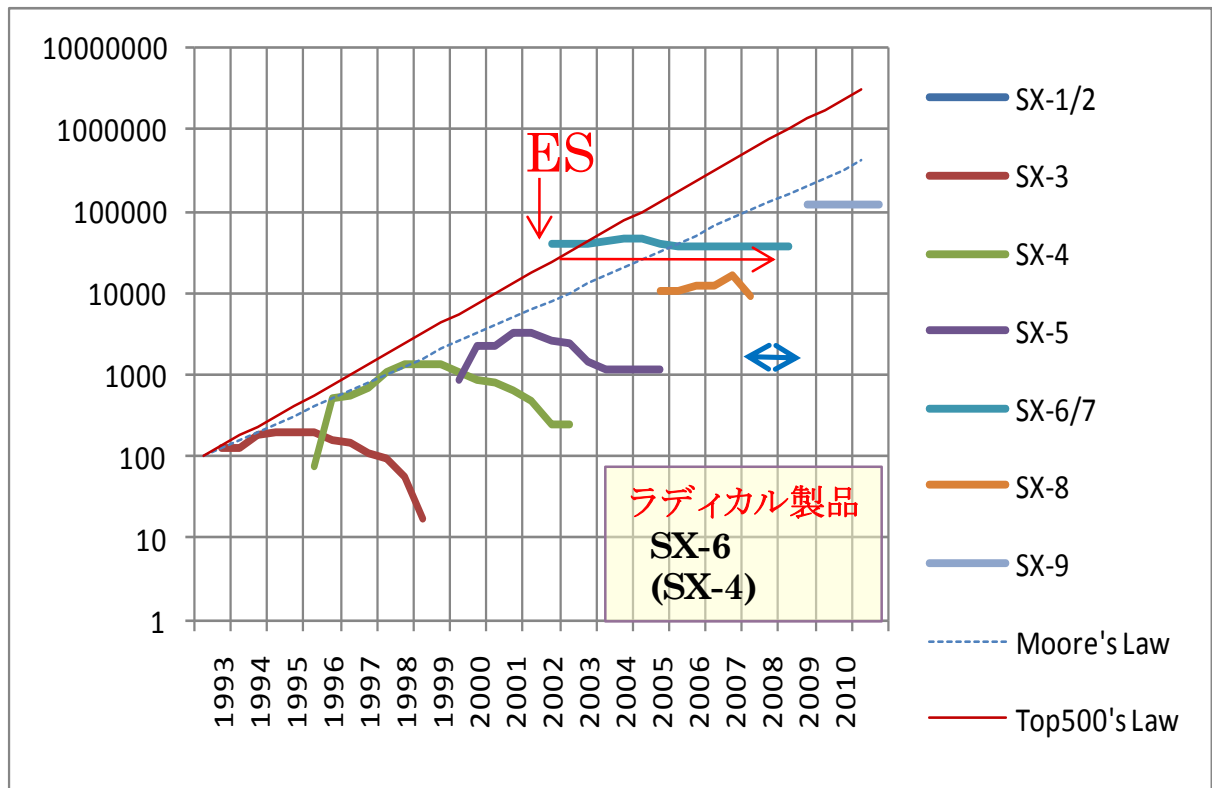


図 4-20 NEC 合計性能推移

のみが高い性能を示すことに伴って発生している現象と考えられる。

また、SX-8 の合計性能は後継機として地球シミュレータを超えられず、その後継機の SX-9 の開発は遅れ SX-8 と SX-9 の間に開発ギャップが生じている。

以上のことから、ラディカル製品としては、地球シミュレータを含む SX-6/7 と、Moore 則トレンドをうわまわっている SX-4 を対象とする。

4.6 まとめ

以上のように、日米それぞれ 3 社ずつのスーパーコンピュータメーカーの TOP500 における推移データを分析したが、このデータからいくつかのことが読み取れる。

共通する特徴として、以下のような点があげられる

① 製品寿命は約 3 年

合計性能推移の山なり曲線より、製品寿命は 3 年程度。後継機の開発が遅れるとシェア低下の要因になる傾向がある。

② 同じアーキテクチャの製品はインクリメンタル製品になる傾向

日本メーカーや IBM の合計性能推移から、同一アーキテクチャの製品は Moore 則の性能トレンドに収まる傾向にあることが確認できる

③ ラディカル製品は新規アーキテクチャで創出

ラディカル製品が創出されるのは、新規アーキテクチャ採用タイミングが一番多く (BlueGene/L, SR2201 等)、2 から 3 代目あたりで発生もの (T3E) もある。

日本メーカーの特徴としては、

① 国プロで No.1 システムを開発した場合を除きインクリメンタル製品

② ラディカル製品は、国プロで No.1 をとった製品がほとんど

特に地球シミュレータ以降、No.1 システムだけの 1 点豪華主義とも言えなくもない。

米国メーカーに関しては、IBM とそれ以外の 2 社で傾向が異なる。

① IBM は 1 社で複数のアーキテクチャを並行開発

② CRAY および SGI は M&A を頻繁に行っている。

IBM 以外の米国企業は、業界内で、人物の流動性があり、M&A 等が頻繁に行われている。このことは、HPC 事業が単独では採算が厳しいといった理由にも絡んでいる可能性があると思われる。

最後に参考として、Top500 中の上位 50 位までのメーカーのランキング推移を表すデータを図 4-21 示す。赤は日本製スーパーコンピュータを示している。奇しくも地球シミュレータが Top を取った 2002 年以降、日本製の数が激減しているように見える。

[illegible]

図 4-21 Top50 にしめるメーカー推移 (赤色：日本製)

第5章 イノベーション発生状況分析

5.1 はじめに

本章では、文献調査等に基づいてスーパーコンピュータ開発におけるイノベーション発生の要因を、各メーカーごとにラディカル製品を中心に分析を行う。

ここで、分析をするにあたって以下の視点で分析を行った。

まず第一の視点として、開発に影響を与えた社外要因に着目した。産学連携や M&A 等のオープンイノベーションの影響や、ユーザーイノベーションの影響といった社外の多様性がいかに開発に対して影響を与えたかという点に着目した。次に、各メーカー社内の要因として、社内の研究開発や、様々な製品ラインの開発によって構成されるクローズドイノベーションとも言うべき社内技術基盤に着目し、そこからどのような技術開発が行われたかについて分析を行った。最後に、その結果生み出された製品がどのような先行ユーザー（リードユーザー）に出荷され、市場に拡大したかについて分析した。この分析視点に基づいて、各社のラディカル製品の開発におけるイノベーション創発要因の分析を行う。

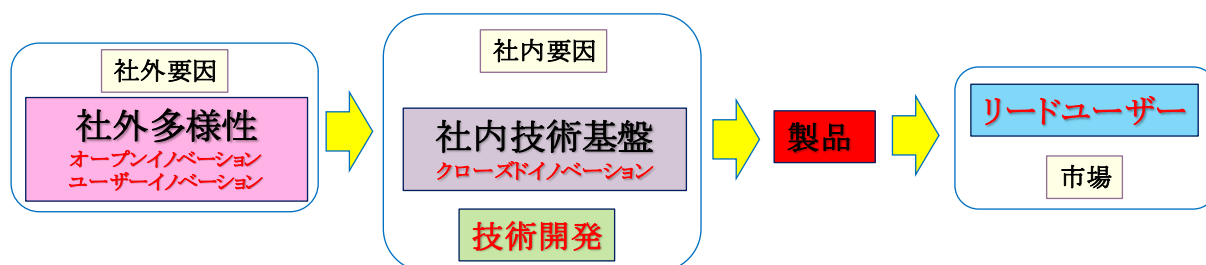


図 5-1 イノベーション発生状況分析の視点

5.2 各社開発状況分析

5.2.1 IBM

5.2.1.1 スーパーコンピュータ開発の開始

前述のように IBM は、スーパーコンピュータに本格的に参入したのは、あまり早くなく、1990 年代に入ってからである。ただし、それに使われたプロセッサのベースとなる開発は 1970 年代に遡る。1974 年に IBM 内で 801 という名の CPU (Central Processing Unit) アーキテクチャの開発がスタートしている。これは、当時の汎用計算機の構造が複雑化する中、シンプルな構造のハードウェアで実現するアーキテクチャとして後に RISC (Reduced Instruction Set Computer) と呼ばれるものにつながる。その後、このアーキテクチャは、現在も続く POWER アーキテクチャへと引き継がれる。この POWER プロセッサを利用した製品 (ワークステーションおよびサーバー) が RS/6000 (RISC System/6000) として製品化される。

この RS/6000 をベースにして専用ネットワーク接続で、高並列システムを構成した製品として、RS/6000 SP シリーズ (Scalable POWER parallel) が 1993 年に IBM が開発するスーパーコンピュータとして市場に投入された。

1990 年代初頭は、超並列コンピュータ (Massive Parallel Computer) のブームがあり多数のベンチャー企業が事業を展開していたが、同時期に IBM も並列コンピューティングの研究開発インフラとして製品展開をしている。

またこの時期の 1992 年に米国でのハーパーフォーマンスコンピューティングの推進を行うための連邦政府の政策として HPCC (High-Performance Computing and Communication) プログラムがスタートしており、そのもとでの DARPA の研究開発プロジェクト等にも IBM は積極的に参画しており (産学官連携)、オープンに技術強化が行われている。その後、RS/6000 SP シリーズは、プロセッサおよびネットワークの強化を行いながら進化を続けていく。

RS/6000 SP の、最初の CPU は POWER1 と呼ばれる複数の LSI で構成されるプロセッサであったが、サーバー・ワークステーション用 CPU として POWER2 が開発され、POWER2 Super Chip (P2SC) で 1 チップ化された。さらにその後継の POWER3 が 1998 年に発表されている。

また、これと並行して、Apple 社と Motorola 社と共同で、PC 向けの CPU アーキ

テクチャの PowerPC (PPC) が開発されている。PPC601 に始まり、PPC604e が 1996 年に発表されている。

5.2.1.2 POWER HPC : RS/6000 SP3

1995 年から HPCC プログラムのもとでスタートした ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) プログラムの 1 つとして、PowerPC604e プロセッサを使用し、IBM が開発することになった ASCI Blue Pacific (ピーク性能 3.8 テラフロップス (TFLOPS)) を 1999 年にローレンス・リバモア研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory : LLNL) に納入した。これに続き、2000 年には、POWER3 版の RS/6000 SP3 をベースにしたシステムが、ASCI WHITE (ピーク性能 12.2TFLOPS) として、同じく LLNL に導入されている。

システムアーキテクチャとしては、RS/6000 SP2SC 以降利用されている専用開発のネットワーク (SP-Switch) が実績を積んで安定していることと、相次ぐ大型の国のプロジェクトでの実績から製品の信頼度が高まってきたこと。また、2000 年前後のこの時期、CRAY 社は SGI の買収後の開発停滞があり、SGI 自身も CPU を自社の MIPS から Intel の IA64 プロセッサへの切り替えが Intel の開発遅れの影響をうけたことなどから、他社がシェアを落とす中、IBM の SP3 が大幅にシェアを拡大させている。

RS/6000 SP3 はラディカル製品と位置付けているが、技術的な非連続発生時点 (RS/6000 SP) からは、8 年程度経過しており、市場で評価を受けるまで時間がかかっていることになるが、これは、技術的非連続製品 (破壊的製品) が新規市場参入から、市場に認知してもらうためには時間がかかることがある例として受け取れる。

SP3 以降も POWER プロセッサと専用ネットワークで構成される、スーパーコンピュータの開発は、POWER4 プロセッサと Colony-Switch ネットワークを利用した pSeries (分類名 p4)、POWER5 プロセッサと Federation-Switch ネットワークを利用した SystemP (p5)、POWER6(p6)、POWER7(p7)へと引き継がれている。プロセッサはマルチコア化等が行われ技術的には大幅な強化が継続されているが、合計性能推移のグラフで見ると、POWER HPC 系の機種は、SP3 以降は Moore 則の傾きで抑えられており、インクリメンタル製品と判断される。IBM の事業としても、製品展開を技術力アピールに力点をおいたハイエンドの HPC 領域を中心にした市場から、

利益率の高いビジネスサーバ市場へのシフトしている様子がみられる。このことは、IBM の技術開発のアプローチとして、まず先端分野の HPC 市場で先行投資を行い、技術開発を行った後に、ドミナントデザインとして成熟したら、より広い市場へ波及製品を展開していくというイノベーション展開の戦略が見て取れる。

イリノイ大学との間で Blue Waters プロジェクトとして 2011 年を目標 POWER 7 ベースの 10 ペタフロプス(PFLOPS)超のシステム導入を予定していたが、開発はほぼ完了していたはずにも関わらず、2011 年秋にプロジェクトからの撤退を宣言している。(現在 CRAY がシステム開発を引き継いでいる)

5.2.1.3 Blue Gene : BleuGene/L

POWER HPC 系とは別に 2003 年に、システムアーキテクチャが異なる、新たに超並列計算機の Blue Gene/L を市場に投入した。

Blue Gene/L は、1985 年よりコロンビア大学で開発していた、量子色力学 (QCD) 計算用の専用機の開発がもとになっている。1997 年には日本の理化学研究所が米ブルックヘブン国立研究所と提携した理研ブルックヘブン国立研究所 (理研 BNL) もこのコロンビア大の研究に参加し、ここで開発される QCDSF という名の専用計算機の製造を IBM が受注して 1998 年に完成する。その後、英エジンバラ大も加わって、QCDOC という専用機が 2004 年に開発されている。

これと並行して、QCD 専用機開発におけるノウハウを活用して、自社で商用化して可能な限り汎用的に使えるように改善した Blue Gene/L を実現している。この BlueGene/L は ASC (Advanced Simulation and Computing) プログラムの 1 つとして採用され、2004 年に、ローレンス・リバモア (LLNL) に納入された。

BlueGene/L のアーキテクチャは CPU として組み込みプロセッサ改良した低消費電力の PowerPC ベースの専用プロセッサを利用、これを 3 次元トーラス型のネットワークで多数接続する超並列計算機であり、低コスト、低消費電力で高い性能を実現することを目的としたシステムである。特に消費電力が社会問題になってきている昨今の状況から非常に注目されるアーキテクチャとなった。

Blue Gene/L は合計性能推移のグラフから、ラディカル製品の条件を満たしている。POWER HPC 系と異なり、製品ラインの最初の製品でラディカル製品となっているが、これは、先行する QCD マシンに関する産学連携研究開発で、ある程度の技術的

な実績が積み重ねられていたことが影響しているものと考えられる。Blue Gene/L の後継機として Blue Gene/P が 2007 年に、さらにその後継機の Blue Gene/Q が 2010 年に開発されているが、後続の製品は Moore 則内の合計性能推移を示しており、ドミナントデザイン化し、Blue Gene の製品ラインはインクリメンタル製品のフェーズに移行したといえる。

5.2.1.4 PowerXCell : Roadrunner

1990 年代後半以降のコンピュータゲーム市場の急速な拡大に伴い、大量かつ高性能を要求する、高性能ゲーム機がテクノロジドライバの一つとして大いに注目される存在になった。2001 年ごろより Sony コンピュータエンターテインメント (SCE) を中心に、次世代ゲームコンソールとして開発が計画されていた PlayStation3 (PS3) 用の CPU 開発がスタートした。これには国内で AV 製品のプロセッサへの利用を考えた東芝に加え、IBM が設計および製造に参画し、3 社協業で米国 IBM のオースチンの研究所を中心にして開発が進められた。2005 年に Cell Broadband Engine (Cell B.E.) という名のスーパーコンピュータ並みの高速 CPU が完成し、PS3 に実装され出荷された。

IBM では、PS3 用に開発された Cell BE を HPC 領域に適用すべく製品開発を継続。Cell B.E.を利用したサーバの開発も行ったが、科学技術計算で必要とされる倍精度演算を強化した PowerXCell 8i を独自で 2008 年に完成させた。この PowerXCell8i を付加演算プロセッサとして利用する RoadRunner と呼ばれるシステムを、米ロスアラモス国立研究所 (LANL) に納入し、2008 年 6 月から 2009 年 6 月までの間、世界一を達成した。これと同様の構成のシステムを Blade Center QS22 Cluster として販売している。ただし、Cell B.E.のアーキテクチャがプログラミングが難しい構成のうえ、付加プロセッサとしての接続形態ということもあり、使いにくさを敬遠してか、十分に市場展開できず、IBM からは後継のプロセッサ開発を行わないことが宣言されている。

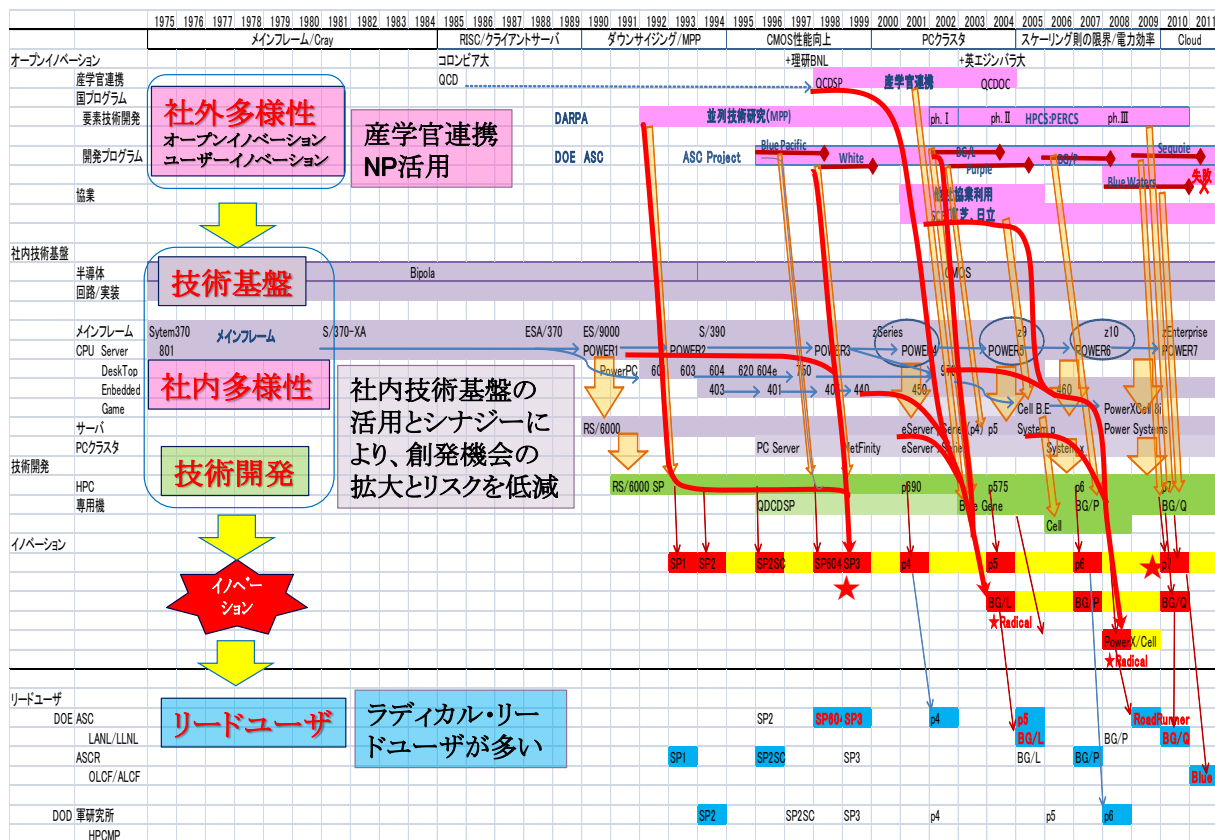


図 5-2 IBM の開発状況分析

5.2.1.5 IBM まとめ

図 5-2 に今まで述べてきた、IBM におけるラディカル製品開発の状況(プロセス)を時間軸に沿って、まとめたものを示す。

上段に、社外多様性としての、産学連携や他社との協業、国の振興プログラム等を示している。IBM は巨大な研究組織を抱え、多様な切り口で産学官連携し多くの共同研究を実施している。大学との関係も非常に密であり、共同研究や学生をインターンとして研究所に参加させるなど、人材交流についても熱心である。また、他社との協業においても成果の波及効果までをにらんだ戦略等は、Cell B.E.の開発等でも見られる。他社の製品開発力が弱まる中、多様なオープンイノベーションを積極的に取り込むことで新たなラディカルイノベーションを生み出そうという積極的な姿勢が感じられる。

中段には、社内で保有する技術的な要素を示している。テクノロジーとして、半導体や、回路実装技術。また装置開発として、メインフレーム、サーバー・ワークステーショ

ン。各種 CPU 設計（サーバー・ワークステーション、PC、ゲーム用の様々な POWER アーキテクチャをベースにしたプロセッサ開発）などがあげられる。

これらの様々な技術要素を持ち、社内技術で垂直統合型の開発を行うことができる。また、それを様々な製品に展開する事で、より多くのイノベーション創発の機会を拡大させるとともに、ラディカルイノベーションを既存技術と組み合わせるなどして開発リスクを分散・低減している様子が読み取れる。

下段には、そのシステムを先行的に導入する LLNL や LANL のようなラディカルなリードユーザーの存在がある。これらのラディカル・リードユーザーは、大きな予算を持ち、研究開発志向が強く、ユーザー自ら開発高い要仕様設計を行い、高い開発目標設定を行うと共に、場合によってはメーカーと一緒に開発を推進する役割を担っている。また、HPC 市場における先行ユーザーとして市場を牽引しているといえる。

この図から、社外の多様性を出発点として、社内の多様な技術を組み合わせるイノベーションマネジメントに基づいて製品開発を行い、それを先行導入してくれるリードユーザーとともにイノベティブな開発を加速している様子が読み取れる。

5.2.2 CRAY

5.2.2.1 1993 年以前

前章で述べたように CRAY 社はスーパーコンピュータ・メーカーの老舗的な存在である。1972 年に CDC6600 を開発した後 CDC をスピンアウトしたセイモア・クレイ氏によって創業された CRAY Research Inc. (CRI) に始まる。1976 年に販売を開始した CRAY-1 登場が、今日のスーパーコンピュータ・ビジネスの歴史の始まりと言っても過言ではない。その円筒形の本体の周りに電源を配置したデザインから世界一高価な椅子とも呼ばれた。今日においても、CRAY はスーパーコンピュータを代表するブランドではあるが、その 40 年の歴史の間には、M&A や 1996 年に SGI による吸収合併、その後 2000 年の Tera Computer Systems への売却など、平坦な道のりでは無かった。

1976 年に登場した CRAY-1 はベクトル演算型のスーパーコンピュータのお手本となるものであり、その後の 1980 年代に日本メーカー 3 社が開発したベクトル型スー

パーソナルコンピュータもこの CRAY-1 に大きな影響を受けている。

セイモア・クレイは 1985 年に CRAY-2 の開発後、CRI をスピンアウトし、Cray Computer Corporation(CCC)を立ち上げ CRAY-3 の開発にあたったが開発は遅れ 1993 年に完成したもの、結果的には 1 台出荷されただけに終わっている。その後 CCC は 1995 年に倒産、セイモア・クレイ氏も 1996 年に自動車事故で他界している。

CRAY-2 と並行して CRI で開発された、ベクトル型スーパーコンピュータ X-MP が 1982 年に出荷された、これは基本的構成としては CRAY-1 のプロセッサを複数並列動作させるマルチプロセッサシステムであり、1988 年からの Y-MP シリーズ(1991 年:C90,1994 年:T90) に引き継がれていく。

1980 年代は CRAY のベクトル型スパコンは HPC 市場でドミナントデザインといえる状況であり、1980 年代後半には、CRAY アーキテクチャ互換機メーカーを含むミニスーパーコンピュータメーカーが出現してきた。CRI はこのうちの 1 社である Super Tek 社を 1990 年に買収している。

ベクトル型スパコン市場の拡大と並行して、1980 年代後半から超並列計算機 (Massive Parallel Computer) のブームが起った。この動きに対して、CRAY は 1991 年には MPC メーカーである Floating Point Systems 社を買収している。(FPS 社からの事業は 1996 年に Sun に売却されている) また、CRI 社内においても 1980 年台末に MPC の開発をスタートし、1993 年に DEC 社製の alpha プロセッサを使用した、3D トーラスネットワーク接続構成の MPC 機である T3D をリリースした。これ以降、CRAY は、ベクトル機とスカラ機の複数ラインの開発体制を最近まで続けて来た。

5.2.2.2 T3E

T3E は 1995 年に CRAY の超並列機 T3D の後継機として出荷された。その後 1996 年に CRI は SGI に買収され、技術の一部は、SGI の Origin2000 シーズへ引き継がれる。

T3D および T3E の開発にあたっては DARPA の高並列コンピューティングに関する研究プログラムに参加するなどして、国の政策を研究開発の推進に利用している。

T3E は Top500 上における評価でラディカル製品に定義され、1997 年から 2000 年にかけて合計性能で CRAY 製品としてのトップを維持しているが、要因を分析すると以下のようなものが考えられる。 第一に、CRAY の MPC 機として 2 世代目であ

り、利用環境が整って、そこそこ使えるようになってきたと考えられること。第二に、1996年以降SGIによる吸収合併後、ベクトル機の開発が停止されたことで、CRAYのベクトル機ユーザーがT3Eに流れたこと。第三にSGIで開発したORIGINはミドル規模以下が中心でハイエンドはT3Eでカバーする必要があったこと。（システム数としてはSGIのPowerChallengeやOrigin2000のほうが多いが合計性能では下回る。）第四として、他のMPCメーカーは1990年代後半にほとんど市場から撤退していること。最後に、1996年に日米貿易摩擦により、日本製スパコンの導入が事実上不可能になったこと。以上のような状況から米国市場では他に選択肢が無いと言ったどちらかと言えばネガティブな要因が、T3Eが市場シェアを押し上げたとも考えられるが、技術的非連続製品の2世代目で評価されたと見ることも出来る。

5.2.2.3 SGIおよびTera Computerによる買収

1996年にSGIに吸収合併され、T3Eの後継機開発は、SGIブランドのOrigin2000シリーズの開発に引き継がれる。この1996年から2000年までの間、CRAYで開発され、継続して販売されていたのは実質、T3Eのみであり、ベクトル機開発は、停止している。SGIはその後、経営が悪化し、Origin2000の後継機開発を自社に残したうえで、CRAYの事業を分離し、2000年にTera Computer Systemに売却した。Teraは、社名をCray Inc.に変更し、Crayブランドを復活させている。

Crayを買収したTera Computer社は、Multi-Threaded Architecture (MTA) と呼ばれる、特殊なマルチスレッドアーキテクチャを持つ製品を開発しており、Crayブランドの製品ラインとして統合されたが、ビジネス的にはあまり成功していない。

Cray部門の開発はSGI時代の開発停止の影響で、後継機種の開発が遅れた。特に、市場から要求が強かったベクトル機の開発が遅れていたため、Cray社は一時的にNECよりNECのベクトル機であるSX-6を2002年からOEM販売することにした。NECはこれによって1996年に発動されたSuper301条による高率関税措置の解除を得たが、北米で販売保守をCRAYに委譲する事になったため北米市場のコントロール権を失った。その後北米市場にSX-6が出荷されたが、Crayのコントロールの元でビジネスにはならず、結果的には2003年のCrayのベクトル機X1の出荷までの時間つなぎに利用されただけとなっている。

Crayはこれ以降の数年間は、ベクトル、スカラ並列、MTAの3つのアーキテクチ

ャをヘテロジニアスに統合する方針での開発を行っている。

5.2.2.4 XT シリーズ XT5

21 世紀に入ってから、CRAY の新たなスカラ超並列機製品ラインとして、XT シリーズが開発され、AMD 社の Opteron を CPU とし、専用の 3 次元メッシュネットワーク接続構成の XT3 が 2004 年にリリースされる。XT3 は ASCI プログラムの “Red Storm” と呼ばれるシステムとしてサンディア国立研究所 (SNL) に納入され、2005 年に完成している。

その後、AMD 製のプロセッサの高速化・マルチコア化と、専用ネットワークの強化による新製品を投入、2006 年に XT4、2007 年に XT5 と更新されている。

XT シリーズはオークリッジ国立研究所がリードユーザーとして 2006 年から “Jaguar” という名でシステム構築が行われてきており、XT3 から現在の XT5 まで継続的に強化され続けてきている。2009 年 11 月から 2010 年 6 月までの間 Top500 の 1.76PFLOPS で一位を獲得している。

XT5 も新しい製品ラインから 3 代目でラディカル製品になった製品であり、機能やバランスが良くなって売れるシステムになるまでに時間がかかった製品といえる。

その後もベクトル後継機の開発も続けられ、X1 の後継機の X2 は、スカラ並列 XT5 とのハイブリッドシステムである XT5h の一部として販売されたが、ビジネス的にはあまり成功していない。

XT5 の後継機 XT6 のネットワークの拡張性強化した XE6 による、1 PFLOPS 超のシステムが、2010 年にロスアラモス国立研究所に納入されている。

さらに XT6/XE6 に GPGPU を付加した XK6 シリーズは、IBM が開発に失敗した 10 ペタフロップスを越えるイリノイ大の BlueWaters システムとして納入される予定になっている。

5.2.2.5 CRAY まとめ

CRAY は長年スーパーコンピュータ開発を行ってきた事業を母体としているが、専業メーカーのため IBM のような重厚な技術基盤に支えられた総合技術力があるわけではない。社内に不足する技術や、新たな技術は社外から調達する必要がある。そのため、M&A による企業の買収等が盛んに行われている。また自らが、他社 (SGI、

ーバーへ展開した PowerChallenge の投入で足場を作ったが、その後本格的に参入を果たすため、1996年には、CRAYを買収した。CRAYのHPC領域での技術としてのT3E以降のスカラ並列コンピュータ用のSN (Scalar Node) アーキテクチャを取り込んでいる。このことで、新アーキテクチャの統合を図り、HPC領域での地場を固めた。このSN アーキテクチャは、ccNUMA または NUMA-link と呼ばれ ORIGIN2000 に適用される。

この ORIGIN2000 のシステムは ASCII プログラムで採用され、“Blue Mountain” と銘々されたシステムがロスアラモス国立研究所に導入されている。その後継機として SN-MIPS アーキテクチャと呼ばれる ORIGIN3000 に引き継がれるが、ORIGIN3000 が出荷された時点においては CRAY の事業部門は Tera Computer へ売却されている。ただし、NUMA-Link アーキテクチャは SGI 内に保持され、さらに後継機の開発が続けられる。

5.2.3.2 Altix3000

2000年にCRAY事業の売却と併せて、MIPS事業もSpin-offさせており、CPUに自社開発も断念した。このため、CPUとしてIntelが当時新たにサーバ用に開発を開始した、Itanium(IA64 アーキテクチャ)を採用することとしたが、IntelによるItaniumのリリース日程の遅れ等の影響を受けている。システムアーキテクチャはNUMA-Linkを継承し、2003年にAltix3000シリーズとして出荷を開始している。このAltix3000ベースのシステムは、NASAでスペースシャトル・コロンビアの事故後の製造品質問題の検証を行うためのシミュレーションマシンとして導入され”Colombia”の名称で呼ばれた。

Altix3000 シリーズは ORIGIN3000 に対しては合計性能推移で、Moore 則を越えているが、ORIGIN2000 シリーズに対しては、Moore 則内といえる。

Altix3000 は、2006 年に CPU やネットワークが強化された Altix4000 シリーズに引き継がれている。

5.2.3.3 SGI まとめ

SGI におけるイノベーションとしては、ORIGIN2000 で CRAY の技術を取り込んだオープンイノベーションでアーキテクチャ的なイノベーションを行い、ラジカル製

品を生み出したが、その後は、インクリメンタルイノベーションに近い進展を遂げている。ORIGIN2000でのリードユーザーはASCIプログラムでのロスアラモス(LANL)。その後はリードユーザーとしてはNASAとの関係が強い。

CRAY売却以降、経営難から、新たな技術革新(アーキテクチャ、モジュラー)の取り込みが出来ておらず、2009年にRackable Systemsに買収されて以降はPCクラスタ中心のメーカーになっている。

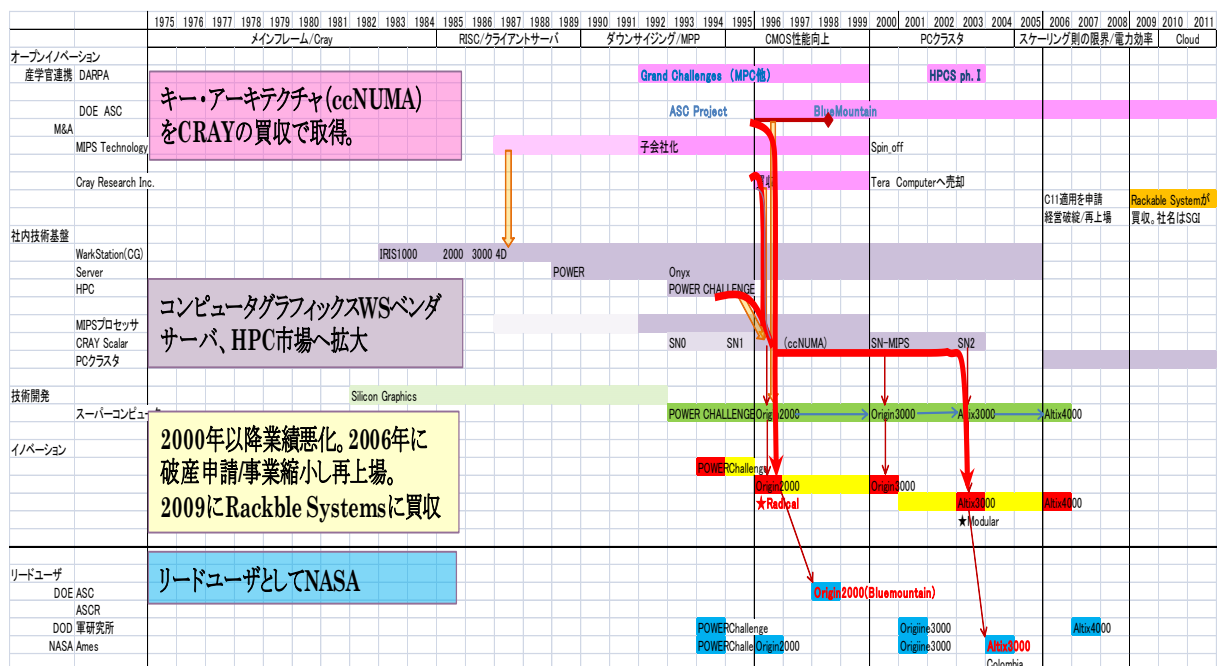


図 5-4 SGI の開発状況分析

5.2.4 富士通

5.2.4.1 スーパーコンピュータ開発の開始

富士通では、1970年頃より池田敏雄氏を中心に科学技術計算用の計算機開発がスタート。当時航空宇宙技術研究所(以下航技研)の計算センター室長であった三好甫の助言を受けながら1977年に日本初のベクトル計算機となるFACOM230-75APU(22MFLOPS)を完成させる。

1979年より、航技研の三好より富士通・日立・NECの三社に対して1GFLOPSを越え

る数値風洞シミュレーション用計算機開発の打診があり検討を開始したが2年ほどで3社共同での検討会は中断したが、その後各社が独自にベクトル型スパコンの開発をスタートさせた。その成果として1983年にVP-100/200シリーズがリリースされた。1985年に発表された同じ製品ラインのVP-400で1 GFLOPS 越えを達成している。これと並行して、1981年より通産省は通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発（通称 通産大プロ）の一環として「科学技術用高速計算システムプロジェクト」（通称 スーパーコンピュータプロジェクト）を開始した。富士通は、高速演算用並列処理装置のプロセッサ部分の開発を担当、さらにそのプロセッサにはHEMT素子やGaAs素子が利用されることになった。1989年にプロジェクトは終了したが富士通製品への直接的効果はほとんど無かった。

5.2.4.2 NWT/VPP500

1988年ごろより、再び航空技術研究所 三好甫の指導の下、富士通で数値風洞シミュレーション用の計算システムの開発が始まる。航技研では、数値シミュレータ計画として1987年からの第1期（NS-I）として富士通製VP400が導入されており、このシステムの後継機：第2期（NS-II）として開発され、1993年より航技研（調布）で稼働開始した。航技研のシステム更新としての導入であり、航技研（三好）がリードユーザーとして開発も推進している。

CPUに使用された半導体テクノロジーは、他社がこの時期、バイポーラからCMOSへ転換している時期にあって、バイポーラに加えて、社内で研究開発していたGaAs、バイCMOSの混載と複雑なテクノロジーを駆使して高性能を狙った。1993年に完成。

1993年11月から1995年11月までの2年間Top500でNo.1を達成した。

NWTは、商用機VPP500シリーズとして市場に投入されている。

その後、1999年のVPP5000シリーズまでベクトル機の開発が続くが、その後スカラ型へと開発方針が変更された。

5.2.4.3 SPARC開発から PrimePower2500HPC そして“京”へ

1980年代末からのRISCプロセッサの拡大やダウンサイジングの流れのなかで、米国のプロセッサ開発会社と協業を開始、1993年頃には、これらの子会社化し、日本から人も送り込んで米国でSPARC互換アーキテクチャのプロセッサ開発に着手した。こ

これらのプロセッサは、自社の RISC サーバやワークステーション用に利用する事を目的に開発していたが、2000 年前後に米国での開発に失敗し、日本で開発を引き継ぐ事になった、このときにダウンサイジングの流れで縮小しつつあった、汎用機開発技術者も SPARC プロセッサ開発に参画し、汎用機との共通設計も図ることになった。

完成したプロセッサ（SPARC64V）は PrimePower シリーズとして Unix サーバ・ワークステーションの製品ラインに投入された。HPC 市場向け用には、大規模構成を取れるようネットワークを専用設計し、これを PrimePower2500HPC として 2002 年から市場に投入している。

SPARC サーバは SUN との協業で市場拡大を図る想定であったが、SUN との関係が思わしくなく、その後 SPARC サーバの将来性が不透明になる。サーバとしては、SPARC 以外に Intel 製 IA64 系のラインも存在、PC クラスタと市場でのバッティングもあり、2006 年頃には製品ラインが途切れてしまう。2006 年以降、“京” コンピュータの開発が決定し、ここでの検討で SPARC プロセッサの利用が決定され、SPARC ベースの HPC サーバラインの継続が確定する。2009 年には、“京” に先行して、宇宙航空研究開発機構（以降 JAXA）向けに FX1 が開発された。また京以降の商用機として、CPU のコア数を倍増した FX10 を 2011 年に発表している。

5.2.4.3 富士通まとめ

ベクトル機開発においては、リードユーザーとしての航技研の故三好氏のリードユーザーとしての役割は大きい。リードユーザーによるイノベーションと、リードユーザーが調達することによる事業性確保により飛躍的な性能の NWT が実現できた。

SPARC ベースのスカラシステムの開発に関しては、米国のプロセッサ開発会社との協業、子会社化（M&A）によって社外からの知識を得ている。人材流出やマネジメント面での課題はあるものの、この知識導入と社内の汎用機技術開発基盤等の知識が結合することによって、今日“京”のプロセッサに利用されている技術が引き継がれ、強化されている。スカラ機に関しても、旧航技研の流れをくむ JAXA と、“京”の理化学研究所が、ユーザーイノベーションと調達を共に行うリードユーザーとして有用な役割を担っている。

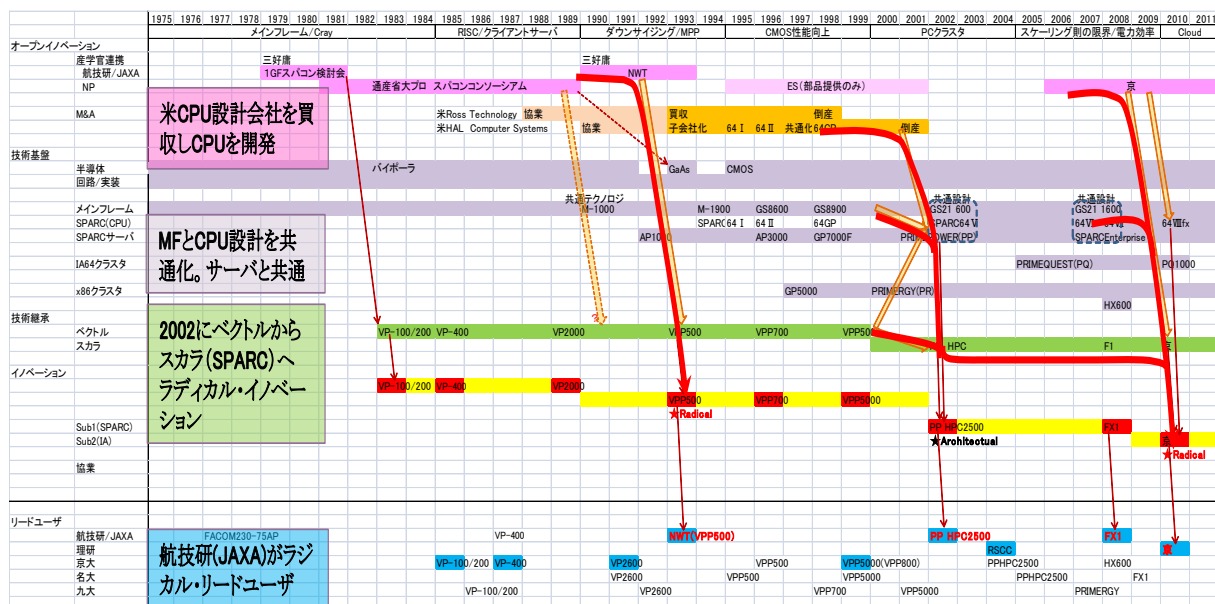


図 5-5 富士通 の開発状況分析

5.2.5 日立

5.2.4.1 ベクトル機開発

日立製作所も富士通の後を追って、1978 年に汎用計算機に演算機構を付加したシステムとして M180-IAP（実効性能 10MFLOPS）を開発した。また、1979 年からの航技研の三好計算センター長からの GFLOPS 超の数値風洞シミュレーション用計算機開発の検討に参加後、1983 年にベクトル機 S-810 の出荷を開始、スーパーコンピュータ開発に本格参入した。その後 10 年間ベクトル型スパコンの開発を続けている。通産省のスーパーコンピュータプロジェクトには主にソフト開発で参加したが、その後の開発に有効な波及効果は確認されない。

5.2.4.2 CP-PACS/SR2201

1980 年代末期に、RISC プロセッサ開発ブームの中、日立社内でも RISC プロセッサの開発をおこなうことになり、技術提携をしていた Hewlett-Packard (HP) の PA-RISC アーキテクチャ互換のプロセッサ HARP-1 の開発がスタート。

1990 年ごろより、筑波大との間で CP-PACS 計画がスタートする。これは 1977 年に当時京都大学原子力研究所助教授であった星野力に日立製作所の川合敏雄がアレイ型計算機の構築提案を行ったことから始まった物理学専用計算機 PACS (Processor

Array for Continuum Simulation) シリーズの流れのシステムである。CP-PACS は当時筑波大教授の岩崎洋一がプロジェクトリーダーとして開発し日立製作所が製造した。プロセッサとして、前述の HARP-1 に、ベクトル機の開発で培ったノウハウに基づき擬似的にベクトル動作をする機能（疑似ベクトル機能）を実装し、ネットワークとして専用の 3 次元クロスバ構成を採用した。1996 年稼働開始。1996 年の 1 年間、Top500 で Top1 を達成した。この CP-PACS を商用機として売り出したのが SR2201/SR2001 シリーズである。

5.2.5.2 SR8000

SR2201 の後継機として開発が進められるが、HP は PA-RISC の開発継続を断念し、Intel の IA64 に移行したため、新たに技術提携にあった IBM の PowerPC プロセッサをベースにして設計し直すことになった。このプロセッサにもベクトル機と同等の性能を実現するための、疑似ベクトル機能および協調型マイクロプロセッサ機能が採用されている。ネットワークは多次元クロスバスイッチを採用。1998 年に発表され、東京大学および産業総合研究所、筑波大学等に納入されている。

SR2201 からプロセッサの基本命令セットアーキテクチャ (ISA) の変更にともない、基本ソフトや開発環境を含む多くのソフトウェアの再設計が必要になり、開発費が膨らんだものと思われる。SR8000 の後継機種である SR11000 以降は、IBM との共同開発の形で OEM に近いものになり、IBM が開発する POWER プロセッサに一部の機能を取り込む形とし、IBM 製品とは、実装やソフトウェアで差別化する方向に転換している。

5.2.5.3 日立まとめ

CP-PACS では、筑波大によるユーザー自身が生み出すイノベーション（ユーザーイノベーション）を取り込む面と、産学連携によるオープンイノベーションとしての 2 つの面から、外部の多様性の取り込みを行っている。また、プロセッサ開発に対しては、SR2201 では HP と、SR8000 以降では IBM と技術提携により、他社の技術利用を積極的に実施しており、この面でも他社との協業によるオープンイノベーションの取り込みが行われているといえる。日立製作所は国内でも研究者の層が厚く、研究サイドからのオープンイノベーションの取り込みは比較的積極的である。ただし、2000 年以降は事業的に厳しく自社開発を縮小しており、SR1100 以降は、IBM の開発の影響

下にあるため、独自色を出しにくくなっており、ムーア則の性能向上トレンドを越えることが出来ていない。

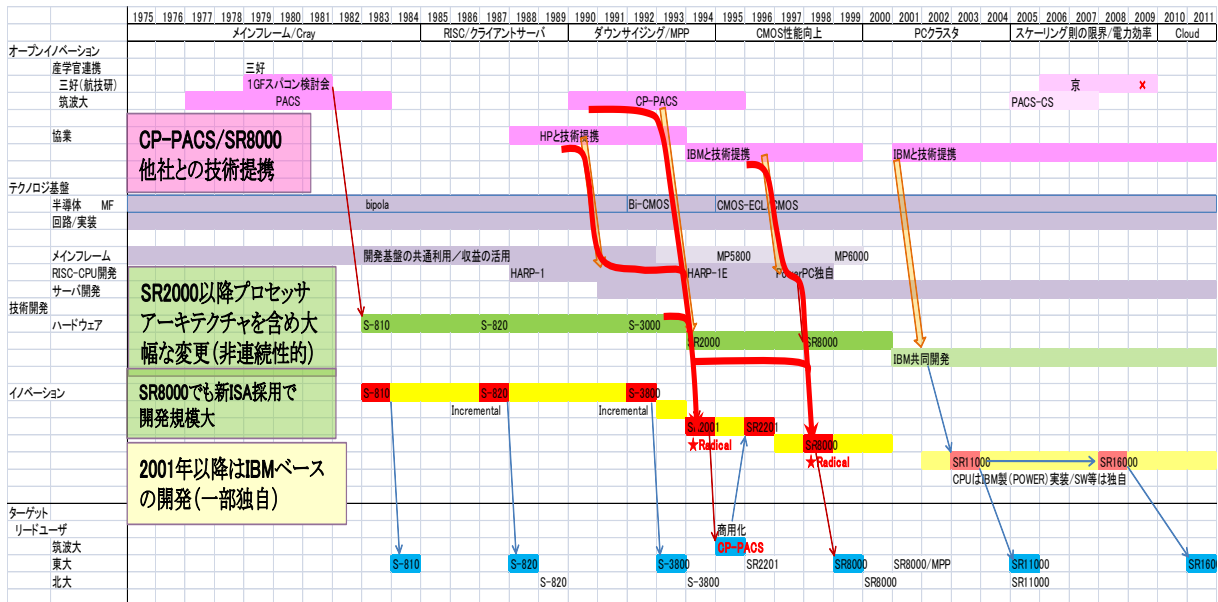


図 5-6 日立 の開発状況分析

5.2.6 NEC

5.2.6.1 SX シリーズの開発

NEC も日立と同様に、1982 年に ACOS1000-IAP (28MFLOPS) と汎用計算機に演算機構を付加したシステムを開発し、1979 年からの航技研の三好計算センター長からの GFLOPS 超の数値風洞シミュレーション用計算機開発の検討に参加後、1985 年にベクトル機 SX-1/2 の出荷を開始した。

汎用機のテクノロジ開発と連動し双方で波及効果を得ながら、スーパーコンピュータの開発を継続。1990 年代初めに半導体テクノロジを、高速だが高集積が難しく大消費電力のバイポーラから、高密度低消費電力の CMOS に切り替え、他社が大きくアーキテクチャも変更するなか、NEC は SX の基本アーキテクチャは変更せず継続的にベクトル機の開発を続けている。バイポーラ設計の SX-3 から CMOS 設計の SX-4 では、半導体の性能低下に伴いプロセッサ単体性能を 6.4GFLOPS から 2GFLOPS に低下落としている。これに対する対策として、プロセッサ数を増やす、マルチプロ

セッサ化（システム・アーキテクチャ変更）で対応している。CMOS 化によるコスト低減効果等もあり、合計性能で、ムーア則を越えている。同時期に汎用機も CMOS 化を行いその後も半導体テクノロジーは共用開発している。ただし、SX-8 以降は、汎用機がエミュレーション方式を採用して、プロセッサ開発を行わなくなったため、技術共有は無くなった。

5.2.6.2 地球シミュレータ

地球シミュレータ（以下 ES）は航技研を定年退職した三好氏を再び中心にして 1996 年に正式にスタートした。三好氏の基本設計方針に基づき、システムの構成は、前機種では 32LSI で構成されていた CPU を 1 チップ化。8 個の CPU を 1 ノードとして 640 ノードを単段のクロスバススイッチで高速接続する構成で、総システム性能 40TFLOPS を実現。Top500 において 2002 年 6 月から 2 年半の間 No. 1 を達成した。

ES を商用化した SX-6 および SX-7 を製品化し海外を含めて販売実績を上げたが、図 4-20 の TOP500 の合計性能推移グラフ上では、ES の性能が飛び抜けて高いため、グラフの形状が山形にならずフラットなグラフとなっている。SX-6 の後継機 SX-8 では合計性能でも ES を越えられず、SX-9 は ES の後継機として海洋研究開発機構に導入されたが他には Top500 にエントリーしていない。 NEC は 2006 年より開発がスタートした“京”の開発に日立と共に開発に参加したが、2009 年に製造を断念し撤退している。現在も後継ベクトル機の開発を行っている。

5.2.6.3 NEC まとめ

開発当初より一貫して、自社独自のベクトルアーキテクチャを継続している。ただし、プロセッサアーキテクチャに関しては互換性を確保しているものの、システムアーキテクチャや自社開発の新規テクノロジーで技術革新は行っており、アーキテクチャやモジュールなイノベーションを継続しているといえる。ただし、ES を除けば、合計性能推移上も、ムーア則以下である。

リードユーザーとしては、国内では ES 以外では東北大や阪大等が挙げられるが、大学の計算機センターの特質上、ラディカルなイノベーションによる利用性の悪化よりもインクリメンタルな変化を求める傾向にある。シュツツットガルト大等の欧州の大規模ユーザーが、高い性能目標と長期的な開発計画の提示を求める傾向が強く、ラデ

技術基盤としては、目社内の汎用計算機との共通開発やサーバ開発との連携等、社内の他の製品開発とのシナジー効果を活用したクローズドイノベーションを中心に推進してきたが、独自ハードウェアの汎用計算機の開発を終了してからは、社内でのシナジー効果は薄れていると考えられる。オープンイノベーションの取り込みに関しては、他社に比べると弱いように感じられるが、部品やテクノロジーに関しては関連会社や、協力会社との連携は積極的に行われていた。



5.3.1 米国メーカーまとめ

IBM は自社内で垂直統合型の開発が出来るリソースを保有しており、テクノロジー

開発、汎用機やサーバー・ワークステーション等のスーパーコンピュータと開発リソースを共用でき、市場でシナジー効果の期待できる製品を持っている。しかし、IBMにおいても、自社内のクローズドイノベーションによる同一製品ラインの強化だけでは、インクリメンタル製品に留まってしまう。そのため、社外からのイノベーションの種を積極的に取り込もうとしているように見える。Blue Gene/Lについては、大学と国立研究所が開発していた QCD 専用計算機のノウハウの取り込んだものであり、PowerXCell では、日本のゲーム機のプロセッサ開発の成果を活用したものである。このような、産学官連携や、協業等によって得られる可能性のあるオープンイノベーションの取り込みを積極的に行う事で、自社内に不足しているアイデアと新結合を取り込もうとしているように思われる。

一方、CRAY や SGI は専門スーパーコンピュータまたはサーバーメーカーであり、自社製品開発に必要なものを全て内部に持っているわけではない。不足する技術やノウハウは他社との協業や M&A によって入手することになる。また、HPC 市場での事業運営は長期的に安定しておらず、このため長期の計画的な研究開発が難しいという点も課題である。

このように考えると、IBM 以外は、知識が適切に保持出来ないのではないかと懸念を抱くが、米国内のスーパーコンピュータメーカー全体で見ると、スピンアウトや新規のベンチャー企業が成長し、既存の倒産する企業の技術を引き取って行くような状況が見受けられ、業界全体で見れば、人材やノウハウと言った知識が流通し維持されていると考える事ができるのでは無いと思われる。

ここで議論した、IBM とその他の 2 社のイノベーション創発のアプローチを 2 つのモデルとして特徴づけてみる。

第一のモデルは、IBM 型の「資源保有型」（総合力型）モデルと呼べる。社内技術基盤を活用して、クローズド・イノベーションを推進する。また社内技術開発間の相互結合の促進することによって新たな製品、新たな市場を生み出す。また、社内技術に不足する、非連続で破壊的なイノベーションの取り込みは、産学官連携といった学術的な新規性の取り込みや、協業等により（オープンイノベーション）新たな市場の取り込みを行う。また、ラディカル・イノベーションの実現にあたっては社内の技術基盤を活用しアーキテクチャル／モジュラ／インクリメンタルで再構築するなどして、ラディカルイノベーションのリスクの低減を図るモデルである。

主要な技術は社内で保持され継承されるが、大きな資本と維持のための高い費用が発生する。

第二のモデルは、CRAY や SGI タイプの「資源取得型」(M&A 型) モデルと呼べるものである。

不足する技術は M&A によって取得するなど社外から、必要に応じて事業単位（製品および開発リソース）で取り込む。逆に、コア事業以外は必要に応じて切り離しスピンアウトさせる場合もある。また自ら他社へ身売りするようなケースも考えられる。

しかし、M&A では、企業文化の違いを超え融合させる事が難しい。M&A 後に人材（知識）が流出する可能性があり、入手したリソース・ノウハウの有効性が維持できるよう適切にマネジメントを行う必要がある。

以上のように、各メーカーが技術を取得し保持するアプローチに違いが有ることはわかったが、逆にラディカルイノベーションが発生する条件に関して共通する点は、キーになるリードユーザーの存在、特に国のプログラムによる開発が関係しているリードユーザーの存在がある。例えば、多くのラディカル製品は ASCI ならびに ASC プログラムなどに採用されている。その導入先は、計算機科学の専門家ある国立研究所である。これらのリードユーザーと開発目標を設定し、設計仕様を詰めながら開発が進められている。このようなトップクラスの開発をリードするユーザーを、ラディカル・リードユーザーと呼ぶ。米国での代表的なラディカルリードユーザーは、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL)、ロスアラモス国立研究所 (LANL)、オークリッジ国立研究所 (ORNL)、サンディア国立研究所 (SNL) などが挙げられる。

5.3.2 日本メーカーまとめ

日本の 3 社の Top500 での合計性能の規模は概ね同じであり、同等の事業規模で競争してきたことがわかる。システム数も 1990 年代には各社とも数十システムがエントリしていたが、2000 年以降急速に落ち込み、現時点では 1～2 台のレベルである。合計性能推移についても、国のプロジェクトで開発した機種を除けば、ムーア則のトレンドに押さえられており、Top500 トrendをキャッチアップ出来ていない。

NWT、CP-PACS、ES の国のプロジェクトで、一時的に跳ね上がるものの、その後は停滞する傾向にあり、その国のプロジェクトは 15 年に 1 回程度しか各社に訪れてこない。

さらに、各社とも開発 TAT が伸びてきており、他社との競争におけるキャッチアップがより難しくなっている。

世界一を達成した4つの開発のうち、2つは、三好甫氏が推進したプロジェクトである。また、氏は、日本のスパコン開発の黎明期において3社のスパコン開発のきっかけを作ったとも言える存在である。

CP-PACS は筑波大と、京は理化学研究所と共同で開発し設計したものであり、それぞれ、開発システムの納入先にもなっている。すなわち、大きく飛躍した開発には、ユーザー自身によるイノベーションと、調達先としてのリードユーザーになる者が存在しており、ユーザーイノベーションの重要性を物語っている。

国内三社のスパコン開発は、汎用機開発の余力から生まれ、リソースを共有することで開発費を抑え、さらにサーバ、ワークステーションとの波及効果を考慮しながら発展してきたと言える。しかしながら、近年の事業環境の中では、汎用機は資金源にならず、サーバ・ワークステーションもモジュラー製品化して、自社内の専用開発の恩恵を受けられなくなってきたおり、それらのシナジー効果が得られなくなっている。

また、テクノロジーも、半導体を初め、自社内で保有出来なくなっており、テクノロジー一面での差別化や、必要なものは自分で作ると言ったことが出来ない状況になっている。

先に述べた米国企業の2タイプの分類で、国内3社を考えると日本の3社は、総合電機メーカーとして、多様な技術基盤を持っていると言う意味で「資源保有型」のIBMのアプローチで有ると言える。ただし、オープンイノベーションの積極的な取り組みと、ラディカルリードユーザーがほとんどいないという課題がある。日本メーカーにおけるラディカルリードユーザーは旧航技研（現 JAXA）、海洋研究開発機構、理化学研究所が対応すると考えられるが、旧航技研以外は継続性がほとんどない1代限りのプロジェクトに近い。またプロジェクトも巨艦主義との批判があるが、巨艦以外がほとんど存在しない一点豪華主義に陥る傾向にある。

旧帝大等の情報基盤センターも各社のリードユーザーではあるが、エンドユーザーの利便性を考慮してラディカルなイノベーションを避ける傾向にあるためラディカルリードユーザーにはなっていないと考えられる。

5.3.3 日米メーカー比較

日本の3社も過去、自社内で垂直統合をしたインテグラル型開発を行って来たと言う意味ではIBMに近いとも言える。しかし、IBMと日本メーカー3社を比較するとオープンイノベーションの取り込みの積極性に差があるように思われる。また、ラディカル・リードユーザーの数と継続性に差があるのではないかと考えられる。

ラディカルイノベーションは、自社内の開発においても負担である上に、既存の安定ユーザーにとっても迷惑な存在である。そのような状況では自ずと漸近的な改革にとどまろうとする傾向がある。

また、社内技術基盤において、資源保有型の課題である大きな開発資源の維持費用であるが、IBMはHPC領域をテクノロジドライバと技術アピールの場として考え、そこで開発したものをシームレスに下流のサーバー等の製品へ展開している。また、テクニカルコンピューティング分野から、利益率の高いビジネス領域へ展開を図ることによってトータル事業として、高い維持費が回収出来る事業構造を実現していると考えられる。これに対して日本メーカーは、汎用計算機が衰退し高い維持費を支えるスポンサーが無くなった今、良い解決策が見つからないように思われる。

また、日本において、CRAY、SGIのような「資源取得型」のアプローチを取ろうとしても、人材の流動性や、ベンチャー企業の生まれにくさなど、国内の業界の流動が低く、同様のアプローチは難しい。今後、国内メーカーは、どのようなビジネススキームで、スーパーコンピュータ事業を継続するのか、各社とも非常に悩ましい状況にあるといえる。

6 章 継続的イノベーション創発要因

6.1 はじめに

4章および5章の分析から、ラディカルなイノベーションの創発に、オープンイノベーションやユーザーイノベーションが大きく関係していることが見えてきた。また、社内技術基盤を強化する、クローズドイノベーションも関係し、これら3つのイノベーションを包括的にコントロールする、イノベーションマネジメントが重要と考えられる。以下、各イノベーション及びイノベーションマネジメントとラディカルイノベーション創発との関係を分析する。最後にナショナルイノベーションシステムとの関係についても示す。

6.2 ラディカルイノベーションの創発要因

6.2.1 3つのイノベーションとイノベーションマネジメント

5章で整理した、各社、各製品の開発経緯から、各製品開発に関わった、オープンイノベーション、クローズドイノベーションおよびユーザーイノベーションについて整理したものを、表 6-1（日本メーカー）および表 6-2（米国メーカー）に示す。各表は、各製品の製造メーカー、製品ライン、製品名、稼働開始年と、その開発に関係した、オープンイノベーション、クローズドイノベーション、ユーザーイノベーションとそれに関係するリードユーザー、また、その製品が国のプログラムに関係したかどうかを示し、最後にラディカル製品かどうかを示している。以降は、ラディカル製品を生み出されたことはすなわち HPC 市場にもインパクトを与えたと言え、ラディカルイノベーションが発生したとして議論を進める。

表 6-1 ラディカルイノベーション発生プロセス（日本メーカー）

	製品ライン	製品	稼働年	オープンイノベーション	クローズドイノベーション	ユーザーイノベーション	リドユーザ	NP	ラディカル
富士通	アレイプロセッサ	FACOM230-75APU	1977	米CDCと連携	汎用機→スパコン		航技研 三好甫		
	VP/VPP ベクトル	VP-100/200/400	1983	航技研三好甫検討会	ベクトル	NS- I	航技研 三好甫		
		VP2000	1989						
		VPP500/NWT	1993		GaAs/Bi-CMOS混在	航技研 NWT	航技研 三好甫	0	0
		VPP700	1996						
		VPP5000	1999				(京大)		
		Enterprise Sparc		米HAL/Rose買収					
	SPARC HPC	PrimePower 2500HPC	2002		ベクトル→スカラ		JAXA		
		FX1	2008				JAXA		
		京	2011			理研 京	理研	0	0
		FX10	2011						
日立	付加IAP	M180-IAP	1978		汎用機→スパコン				
	S ベクトル	S-810	1983	航技研三好甫検討会	ベクトル		(東大)		
		S-820	1987				(東大)		
		S-3800	1992				(東大)		
	SR 疑似ベクトル	SR2000/CP-PACS	1995	HP協業	ベクトル→スカラ(PA-RISC)	筑波大CP-PACS	筑波大	0	0
		SR8000	1998	IBM協業	→PowerPCアーキテクチャ		東大/産総研/筑波大		△
	IBM互換	SR11000	2003	IBM協業	+疑似ベクトル機能		(東大)		
		SR16000	2008	IBM協業			(東大)		
NEC	付加IAP	ACOS1000-IAP	1982		汎用機→スパコン				
	SX ベクトル	SX-1/2	1985	航技研三好甫検討会	ベクトル(RISC)		阪大レーザ研		
		SX-3	1990						
		SX-4	1995		CMOS化		(カナダ気象庁)		△
		SX-5	1998				(欧州ユーザ)		
		SX-6/7/ES	2001		iChipベクトル	地球シミュレータ	三好甫	0	0
		SX-8	2004				(独HLRS)		
		SX-9	2007				(東北大)		

表 6-2 ラディカルイノベーション発生プロセス（米国メーカー）

	製品ライン	製品	稼働年	オープンイノベーション	クローズドイノベーション	ユーザイノベーション	リードユーザ	NP	ラディカル
IBM	POWER HPC	RS6000/SP1	1993	(DARPA)	RISC:801→POWER		OakridgeNL		
		RS6000/SP2	1994						
		RS6000/SP2SC	1996		1チップ化				
		RS6000/SP604	1998			ASCI Blue Pacific	LLNL	○	
		RS6000/SP3	1999			ASCI White	LLNL	○	○
		pSeriese p4	2001		デュアルコア		OakRidgeNL		
		pSeriese p5	2004		マルチスレッディング	ASC Purple	LLNL	○	
		System-p p6	2007		5GHzコア		HPCMP		
		POWER Systems p7	2010	DARPA HPCS	8コア	Blue Waters Program	Illinoi大	○	
	BlueGene	QCDS (専用品)	1998	コロムビア大+理研BNL		←			
		QCDOC (専用品)	2004	上記+英エジンバラ大		←			
		Blue Gene/L	2004		専用機→汎用機	ASC BlueGene/L	LLNL	○	○
		Blue Gene/P	2007			ASC Dawn	LLNL	○	
		Blue Gene/Q	2010			ASC Sequoie	LLNL	○	
	PowerXCell	CellB.E.	2005	SCE&東芝との協業					
		PowerXCell8i	2008		倍精度演算機能付加	ASC RoadRunner	LANL	○	△
CRAY	CRAY-Vector	CRAY-1	1976	米CDCからスピニアウト	ベクトル・スパコン				○
		CRAY-2	1985						
		X-MP	1982		マルチプロセッサベクトル				
		Y-MP	1988						
		C90	1991						
		J90	1994						
		T90	1994						
		X1	2002		ベクトル再設計		NSAファンド+HPCMP		
		X2	2007						
	FPS	S-MP	1992	M&A:FPS買収					
	T3D	T3D	1993	(産学官連携:DARPA)	スカラMPP+3Dトラス		NSF Pittsburg SC		
		T3E	1995	(産学官連携:DARPA)			NSF Pittsburg SC		○
	XD	XD1	2005	M&A:OctigaBay買収					
	XT	XT3	2004		Network: Seastar	Jaguar/ASC Redstorm	ORNL,LANL/Sandia	○	
		XT4	2006			Jaguar/ASC Redstorm	ORNL,LANL/Sandia	○	
		XT5	2007			ASCR Jaguar	ORNL	○	△
		XT6	2009						
		XE6	2010		Network: Gemini	ASC Cielo	LANL/Sandia	○	
		XK6	2011		GPGPU付加				
SGI	Challenge	Challenge	1993		グラフィックス→HPCサーバ				
		PowerChallenge	1994						
	ccNUMA	Origine2000	1996	CRAYを吸収	ccNUMA	ASC BlueMountain	LANL	○	○
		Origine3000	2000	CRAYのSN1をベース					
		Altix3000	2003	CRAYのSN2をベース	MIPS→IA64	NASA Columbia	NASA Ames	○	△
		Altix4000	2006						

6.2.2 製品ラインとラディカルイノベーション

複数のテクノロジー世代に渡り広い意味で同一のアーキテクチャといえる製品群を製品ラインと定義している。この製品ラインは、既存ユーザーに世代交代時の非連続性に対する不安を感じさせない後継機種といえる。

この製品ラインに着目して見ると、各メーカー各製品ラインにおいて、ラディカル製品と定義されるものは1製品しか存在していない。

このことは、同一製品ライン内では、既存ユーザーを意識し技術的な非連続性を嫌うため斬新的な改良改善を中心としたインクリメンタルイノベーションに留まるためと解釈される。

ただし、ラディカルイノベーションは、技術的非連続性が発生した、製品ラインの最初の製品だけで発生するわけではない。2～3世代目の製品でラディカル製品が出現する製品ラインも多い。このことは、製品ライン間で技術的非連続性が大きいと市場にすぐには受け入れられず、技術が安定し、利用環境が整ってくる等、市場に受け入れられるまでに時間がかかる場合があるからであると解釈できる。例えば、富士通のベクトルからスカラへの転換後のラディカル製品の出現は、結局3世代目の“京”までかかっている。また **CRAY** の **XT5** も3世代目である。また、全く新たな市場(HPC)への展開時においても、同様、市場に認知されるまでに時間を要する場合がある。**IBM** の **SP** シリーズがそれにあたると言える。

スーパーコンピュータでは、アーキテクチャを大きく変えると、初期の製品では、機能不足や品質が安定し無かったり、アプリケーションが十分そろわず、利用支援環境がそろわなかったりと、十分にユーザーの期待に添えない可能性がある、このラディカルな技術的非連続性に対して企業側もユーザーへのインパクトを考慮して、段階的に技術非連続性を取り込むアプローチを取る場合がある。例えばインクリメンタルからいきなりラディカルな変化へ移行するのではなく、モジュラーやアーキテクチャ的なイノベーションを経由してラディカルに移行するといったアプローチである。**IBM** がプロセッサの命令セットアーキテクチャ (ISA) の互換性を意識して、**BlueGene** や **PowerXCell** を **Power** プロセッサ系の CPU で開発するのも、そのような配慮があるものの一つと考えられる。

また、上位ランクに入る製品ラインで長期的に安定した、ドミナントデザインは存在しない。製品ラインとして長く続いているもの (**NEC SX**、**IBM POWER**) も

あるが、市場で見ると、4～6年程度で、優位なアーキテクチャは入れ替わっている。

6.2.3 オープンイノベーションとラディカルイノベーション

オープンイノベーションが多く、ラディカルイノベーションが創発する以前、開発初期の重要な要素になっている状況が見受けられる。以下にケースに分類して述べる。

①産学官連携

IBM の BlueGene/L は、コロンビア大や理研ブルックヘブン国立研究所のユーザーイノベーションの恩恵を受け部分もあるが、専用計算機の研究成果を商用計算機に取り込んだことは産学官連携による成果と言う事が出来る。

米国メーカーは DARPA や NSF が出資する共同研究テーマに参画し産学官の間で知識の交換を行っている。

日本メーカーも、通産省スーパーコンピュータプロジェクトや、NEDO 等で産学官連携が行われている。

②他社協業

いくつかのプロセッサ開発で他社との協業が行われている。

日立の SR2201 のプロセッサは HP との協業による。また SR8000 も同様 IBM との協業による。

富士通の京のプロセッサ開発は、米国での SPARC プロセッサ開発まで遡ることが出来る。

IBM は PowerXCell の開発に先行して、SCE のゲーム機 Plkystation3 のプロセッサ設計に参画し、プロセッサを独自に改良し、スパコンとして製品をリリース。

③M&A

SGI は 1996 年に CRAY を吸収合併することで、ORIGIN2000 以降の NUMA-Link アーキテクチャを手に入れている。CRAY は数社の企業買収を行っている。

④スピンアウト

CRAY 自身が CDC からのスピンアウトである。またセイモアクレイは再度 CRI から CCC 創設して再びスピンアウトしている。今回の対象メーカー以外の、他の米国メーカー、特に中小の企業では、スピンアウトとマージが繰り返されている。

表 6-1/2 で見ると、多くの製品ラインは、開発初期においてオープンイノベーションの取り込みを行っていることがわかる。その後は、社内およびユーザーとの関係のなかで進化を遂げていくため、あまり積極的にはオープンイノベーションの取り込みは行われない（日立の SR8000 は例外）。

6.2.4 クローズドイノベーションとラディカルイノベーション

クローズドイノベーションとラディカルイノベーションの関係としては、まずはじめに、ラディカルイノベーションを実現する技術基盤としての役割が考えられる。オープンイノベーション等で取り込んだ新たなアイデアを実現し、他社と差別化出来る製品にするためには社内の技術基盤の強化が重要である。これらは、スーパーコンピュータの技術に限らず、半導体や回路技術、インタフェース技術や基本ソフト等の要素技術は、汎用機やサーバ、PC 他異なる製品分野の技術にも関連する。次に、ラディカルイノベーションを創発させるための触媒として働く役割が考えられる、社外の新たなアイデアと“新結合”する事によってイノベーションを創発するケースが想定される。例えば CP-PACS でのベクトル技術を利用した疑似ベクトル機能、BlueGene/L での低消費電力の組込みプロセッサの採用等が挙げられる。

この社内技術基盤を強化発展させていく社内の研究開発によるクローズドイノベーションもラディカルイノベーションに不可欠な要素である。

6.2.5 ユーザイノベーションとラディカルイノベーション

リードユーザーによるユーザイノベーションはラディカルイノベーション創発の大きな要因になっていると思われる。

表 6-1 および表 6-2 のユーザイノベーションの欄は、ユーザーとの共同開発を行うことによって Top500 の上位にランキングされた開発を示している。またリードユーザーの欄はそのユーザイノベーションに関わったユーザーであり、リードユーザー自身がイノベーションを起こしたケース、先進ユーザーとして新たなニーズを発掘したケース、出資者として貢献したケースなどが存在する。ラディカル製品には、必ず、強力な（ラディカルな）リードユーザーが存在し、リードユーザーによる、ユーザイノベーションが存在する。

このラディカル製品開発に関与したリードユーザーをラディカル・リードユーザーと呼ぶ。

このラディカル・リードユーザーは、大規模システムな購入する顧客と言うだけではなく、以下のような能力を発揮する。

1) 高い目標設定

チャレンジングな目標設定をメーカーに行い実行させる

2) 強い開発仕様決定への関与

製品仕様決定にメーカーとの密なやりとりをおこなう。

3) 大きな投資能力

初期の製品に大規模な投資を行える。国の機関であれば予算を獲得出来る組織では、どのようなユーザーがラディカルリードユーザーになるのでしょうか。

具体的には以下のようなスキルや属性を持つと考えられる。

1) 高い技術知識を持っている

場合によってはメーカー以上の知識を持っている場合もある。計算機科学または計算科学の研究者で有る場合もある。

2) 市場を先導するユーザー

将来の有るべき姿を提示出来る能力をもち、市場を先導する事が出来る事が必要である。市場と無関係で有れば、専用開発の計算機になってしまう。

3) リードユーザーとしての研究開発を行っている

先導ユーザーであるために、自らシステム設計や利用方法に関する研究を行っており、ユーザーコミュニティに対しても情報発信をするユーザー

4) 目標に対するお墨付き（国プロ等）

高い目標を提示するだけでは対応の難しいユーザーでしかない。その高い目標の実現を正統化出来るユーザーで有ることを認知させるためには、国のプログラム等でオーソライズされている事は重要である。メーカー側も無用な努力は望まない。ラディカルなイノベーションを遂行するためのモチベーションが必要になる。

5) エンドユーザーがラディカルイノベーションを許容出来る

ラディカルで有る事を期待されている組織で、エンドユーザーもラディカルイノベーションを受け入れられる要素があることは重要である。大学の情報基

盤センター等のエンドユーザーは、多くは計算機科学研究者でも計算科学研究社者でもなく、計算資源の利用者であって、プログラミングさえ自分で行っていない場合が多い。この場合、計算資源の利用方法が頻繁に変わったり、利用するのに高いスキルが求められることは抵抗感がある。このような理由から、大学の情報基盤センター等は、ラディカルな変化を伴うラディカルイノベーションを嫌う傾向にある。ラディカルリードユーザー配下には、高性能を実現するにはプログラムのアルゴリズムやコード修正をいとわないエンドユーザーがいることが期待される。エンドユーザーの計算成果自身がラディカルであるような状況が期待される。また、これにより既存顧客によるイノベーションのジレンマを回避出来る可能性がある。

6.2.4 国のプログラムと、ラディカルリードユーザー

国家プロジェクトまたは連邦政府によるプログラムとラディカルイノベーションの関係を確認する。表の右端（NP）の欄がスーパーコンピュータの開発を伴った国プロを表している。開発を伴った NP とはいえども、名目上は調達ではあるものが多い。開発を伴っている NP かどうかの判断は、製品の設計が完了する前に導入する事が決定しており、設計に関してメーカーとリードユーザー間で密な検討が行われているかどうかによって判断した。例えば ASCI/ASC プログラムは対象である。

日本メーカーのラディカルイノベーションと NP の関係はほぼ 1 対 1 となっている。米国では NP の数が多いため全てがラディカルイノベーションになっているわけではないが、NP であることはラディカルイノベーションの必要条件であると言える。国の支援は、スーパーコンピュータ開発におけるイノベーションにおいて非常に重要な要素である。しかし、国による、イノベーション支援策に関し、有効に機能しているケース（スピルアウト、スピルオーバーがあるもの）とそうでないものがある。有効に機能しなかったケースとして、1981 年から通産省が推進した、スーパーコンピュータ他プロジェクトが挙げられる。Callon らによれば（Callon, 1995）このプロジェクトでは、人材育成や社会的モチベーションの醸成と言った間接的な意味での効果はあったかもしれないが、当初目標とした成果を実現出来なかったし、参加企業間での情報共有は進まず、シナジー効果はほとんど無かった。このプロジェクトから市場へ直接スピルアウトした製品も見受けられず、ばらばらの要素技術の開発に終わってい

るように思われる。

これに対たいして、国内では、三好らが中心になって進めた NWT や地球シミュレータ等は、リードユーザーを起点とするプロジェクトに国の予算を付けることによって達成されたものであり、国の役割は開発に対する直接的な支援ではなくリード・ユーザーに対する支援で有ったと言える。また、そこで開発されたシステムは、当初から商用展開を意識した開発が行われ、プロジェクトの成果のスピルオーバーによって採算性が確保される事を見込んだ開発が各メーカーで行われている。米国においても、ASCI/ASC プログラムが同様のケースといえ、プログラムの成果が、ラディカル製品の創出につながっている。これも、長期的な計画をもとに納入先であるリード・ユーザーとメーカー間の密な研究開発の成果が、システムとして導入されており、その後市場に展開される。すなわち、リードユーザーは先進ユーザーとしてニーズを掘り起こし、製品を購入することで死の谷、ダーウィンの海を越えるために貢献しているといえる。

このリード・ユーザーを国がサポートする事によって、プログラムが推進されている。

以上のように、成功するイノベーションのための国の役割としては、有効なリードユーザーを育て、そのリードユーザーに対する支援を行うことが、継続的にラディカルなイノベーションを創発するために有効な方法であると考えられる。

6.2.5 ユーザーコミュニティとユーザーイノベーション

Von Hippel の指摘のように、ユーザーイノベーションには、ユーザー間での情報共有を図るユーザーコミュニティの存在が重要である。

スーパーコンピュータの主要ユーザーの多くは、大学や国立研究所であり、ユーザー自身が計算機科学や計算科学の研究者である。メーカーの開発者よりも、計算機システムに対する知識を持っている者もいる、さらには、自ら計算機を開発した経験を持つ者もあり、ユーザー自らがイノベーションを生み出す可能性を持っている。また、彼らは、先端ユーザーであり、新たな利用方法の開拓や、新しいシステム構成に対するアイデアを持っており、ラディカルなリード・ユーザーとして貴重な知識を持っているといえる。

今回取り上げた、スパコンメーカーはこれらのユーザーイノベーションの可能性を吸い上げることを目的として、それぞれ、ユーザー自身が主催するユーザー会を持っ

ている。表 6-3 に、各メーカーに関係する、ユーザーコミュニティを示す。これらのユーザーコミュニティは、各メーカーのユーザー会をベースにしているもの、ほとんどが、メーカーとユーザーの関係強化、すなわち販売促進活動を目的にしているのではなく、ユーザー主催で定期的な会合を開催するなど、主に、ユーザー間での技術的な話題や、運用方法や利用上の課題等の情報交換や、将来の製品に対する要望を挙げる場となっており、先進的なユーザー間で情報を共有し、ユーザーイノベーションを醸成するための場としてのコミュニティが形成されていると言える。

表 6-3 各社のスーパーコンピュータ・ユーザーコミュニティ

	ユーザーコミュニティ	主催者	ユーザー会
IBM	IBM HPC Systems Scientific computing user Group (ScicomP)	HPC ユーザー主催	年 1 回開催
CRAY	Cray User Group (CUG)	ユーザー主催	年 1 回開催
SGI	SGI User Group (SGIUG)	ユーザー主催	年 1 回開催
富士通	Scientific System 研究会 (SS 研)	任意団体	適宜開催
日立	日立 IT ユーザー会	メーカー主催	適宜開催
NEC	国内：NEC HPC 研究会/SP 研究会 欧州：NEC User Group	メーカー主催 欧州ユーザー主催	適宜開催 毎年欧州で開催

6.3 イノベーションの継続性

6.3.1 継続性とオープンイノベーション

以上の分析から、同一製品ラインでは 1 度しかラディカル製品が発生していないこと。各製品ラインの初期にはオープンイノベーションが関わっていることがわかった。このことから、ラディカル・イノベーションを継続的に創発させるため、新たな製品ラインを生み出すためにオープンイノベーションも頻繁に取り入れていく必要があると言える。

IBM は産学連携、協業等、非常に熱心にオープンイノベーションの取り組みを行っており、その成果が Blue Gene/L や PowerXCell 等に反映されているといえる。他社においてもオープンイノベーションを積極的に取り入れている時期には合計性能推移グラフも高くなる傾向がある。

ただし、オープンイノベーションは他社にも取り込む機会があり、他社に先を超される可能性がある。また、取り込んでも製品化につながるまでに時間がかかったり、使えなかったりする場合もある。特に産学連携成果は、研究段階から商用製品につなげるまでには、社内で継続して研究開発を続ける必要がある場合が多く、すぐに成果につながるとは限らない。そのためにも組織的に継続的かつ計画的なオープンイノベーションを取り込みと製品化につなげる研究開発マネジメントが重要になる。

6.3.2 継続性とクローズドイノベーション

オープンイノベーションやユーザーイノベーションだけで、ラディカルでイノベティブな製品を開発することは出来ない。継続的な社内技術基盤の強化は必須である。ただし、多くのメーカーではスーパーコンピュータ単独事業としては採算性を確保する事は難しいため、専用に大規模な研究開発投資を行う事は難しい。そのため、社内の他の事業との共同開発や、汎用製品への波及効果を想定した研究開発を進める必要があると思われる。IBMではスーパーコンピュータから、ビジネスサーバへの展開お流れが読み取れ、他製品への波及がなされているように見える。国内3社でも同様の取り組みはなされているが、必ずしも十分な波及効果を生んでいない状況もある。

一方、CRAY等の専門メーカーでは、社内他製品への波及の可能性はあまり多くない、このため高額の研究開発は難しい。これに対してCRAYではネットワーク機能に集中した研究開発を行うことで、他社と差別化し特長を出せる部分に集中して投資を行っており、技術基盤の小さいメーカーは、特定領域に集中する戦略をとることが多い。

以上のように、社内の共通技術基盤として広範囲におこなうか、差別化ポイントに集中にして投資を行うかのいずれかの方法によってクローズドイノベーションを推進し社内基盤を強化することが望ましいと考える。

6.3.3 継続性とユーザーイノベーション

ここまで見てきたようにラディカルイノベーションを生み出すためにはラディカル・リードユーザーの存在が欠かせないと考えられる。そして、このラディカルリードユーザーとの関係を継続的に構築していく事が、継続的なイノベーション創発の必要条件だと考えられる。このラディカルリードユーザーは、単に高い目標要求をする

ユーザーというものではなく、メーカーとユーザー間で密な知識共有が図られ建設的な議論が行われるような状況が望まれる。そのためにも、メーカーとラディカルリードユーザー間には継続的な関係構築が存在することが望まれる。量販品ではLU (Lead User) 手法 (Von Hippel, 2005) などが存在するが、スーパーコンピュータの開発においては有用なラディカル・リードユーザーを見出し、ユーザーコミュニティ等を通じて適切な関係を構築しながら、ユーザーイノベーションの効果的な取り込みを継続的に行う事が重要と考える。また、ラディカル・リードユーザーが継続的にラディカル・リードユーザーで在ることも重要であり、これを支援する必要がある。

6.3.4 継続性とイノベーションマネジメント

高い目標設定や、厳しい要求は、メーカー内の開発部門にとって、大きな負荷とリスクが伴う開発につながる。開発現場ではこれを避けてインクリメンタルなイノベーションへ逃避する傾向があることも考慮しなければならない。このようなことにならないように、社内全体でロードマップ等を使用して継続的長期的なラディカルな目標を共有し、そのラディカルな目標を実現することの認識を共有しモチベーションを維持し続けることも重要である。

また、そのラディカルイノベーション実現に必要な、オープンイノベーションの取り込み方法や、クローズドイノベーション（社内研究開発）の目標と時期の明確化を行う事も重要である。

メーカー内で中期計画の策定等において、ロードマップの作成や、長期目標の設定は行われているが、リスクを回避しようとするすると保守的な目標設定になりがちである。ラディカルリードユーザーを活用し、「在るべき姿」を明確にして開発を行う、イノベーションマネジメントが重要であると言える。

6.3.5 継続性とナショナルイノベーションシステム

国としてラディカルイノベーションを推進するためにはどのような施策があると考えられるであろうか。現時点においても、オープンイノベーションに関しては、産学連携を含め、様々な施策がとられている。しかしながら、なかなか市場（事業）までにつながる成果は十分に生み出さされているとは言えない。一方で、ラディカルリードユーザーという視点での振興策はあまり検討されていないように思われる。こ

こまでの議論でラディカルリードユーザーの重要性を述べて来たが、継続的イノベーションの創発には、ラディカルリードユーザーを継続的に確保する事を考える必要がある。スーパーコンピュータにおいては、ラディカルリードユーザーは国立研究所などになるが、ラディカルリードユーザーがラディカルリードユーザーとして継続的に活動し、リードユーザーとしてのスキル強化もできるよう育成する施策の推進が必要であると考え。そのためには継続的にラディカルな目標設定を立てメーカーと共同で設計し、開発した製品を導入することが出来るリードユーザーの存在が重要である。米国では多数の国のプログラムによって多様なラディカルなリードユーザーが育成されているという見方も出来るかもしれない。それに対して、日本は継続的なラディカルリードユーザーは、故三好氏ぐらいで、他は連続性が弱い。

ラディカル・リードユーザーが推進するナショナル・プログラム（NP）での開発がラディカル製品につながる可能性が高い。日米を比較して、米国ではラディカルリードユーザーの数とそれを支援する NP の数が圧倒的に多い。（概ね日本は一对一、米国は必要条件）各社とも、ユーザー会等のユーザーコミュニティと深い関係をもち、リードユーザーからのフィードバックを得ている。

6.4 まとめ

以上整理すると、以下のような点が指摘できる

第一に、ドミナントデザインとしては、高い性能向上を実現するために頻繁にラディカル・イノベーションが創発されるため、長期的に安定なドミナントデザインは存在しない。

次に、ラディカルイノベーションとしては、ラディカル製品が、同一製品ライン内ではほとんどの場合1回しか発生していない。製品ラインの最初の製品の場合もあるが、数世代後に発生する場合もある。

第三に、クローズドイノベーションとしては、すべてのメーカーで先端技術を支える社内技術基盤の強化のための研究開発が行われている。

第四に、オープンイノベーションについては、社内技術基盤が不足するメーカー(SGI, CRAY)は、他社をM&Aするなどして社内の技術基盤を強化している。

多くの製品ラインで産学官連携や他社との協業やM&Aが開発初期の重要な要素になっている。

最後に、ユーザーイノベーションについては、開発に積極的に関与し、先行ユーザーとして調達を行うラディカル・リードユーザーの存在がラディカル製品の創出につながっている。特に、ラディカル・リードユーザーが推進するナショナル・プログラム(NP)での開発がラディカル製品につながる可能性が高い。

第7章 結論

7.1 はじめに

本章では、ここまでの分析結果をもとに、発見事項として各リサーチクエスションに対する回答を示す。また、分析の結果より先端大規模技術開発における継続イノベーションの創発に関する理論モデルを提示するとともに、本研究によって得られた知見について述べる。最後に継続して検討すべき課題について記す。

7.2 発見事項

7.2.1 SRQ1 への回答

SRQ1：スーパーコンピュータ開発において、どのようにイノベーションが発生してきたのか？

Top500 のデータを用いて、スーパーコンピュータ開発におけるイノベーション発生状況について定量的に分析を行った。製品種別毎に分類し、製品間での性能向上の状況を分析した結果、特定の製品で、性能向上トレンドを大幅に引き上げる特長を持った製品が存在することが確認された。このラディカルなイノベーションに関係すると考えられる製品をラディカル製品と命名した。ラディカル製品は、同一アーキテクチャを持つ製品ラインの中ではほとんど1回だけしか発生しておらず、またラディカル製品の開発には、ラディカルなリードユーザー（以降ラディカルリードユーザー）が関係する国のプログラムの存在が確認された。

7.2.2 SRQ2 への回答

SRQ2：スーパーコンピュータ開発において、どのような要因でイノベーションが創発したのか？

ラディカルなイノベーションを起こした製品ラインは、開発初期において自社内のクローズドイノベーションによるもの以外に産学官連携や M&A や協業といった社外のオープンイノベーション取り込むことが重要なイノベーション創発の要因になっていることが確認された。

また、ラディカルなリードユーザーが存在し、そのリードユーザー自身によるイノベーションや、先行ユーザーとしてのユーザーイノベーションがラディカル・イノベーション創発の要因となっていることが確認された。また、ユーザーコミュニティの存在もこのユーザーイノベーションの強化につながっていると考えられる。

7.2.3 SRQ3 への回答

SRQ3：スーパーコンピュータ開発において、イノベーションを継続するための要素はなにか？

上述のように、オープンイノベーションで起動したイノベーションが、ユーザーイノベーションで強化され、ラディカルイノベーションにつながりその後インクリメンタル・イノベーションへ移行する傾向が確認された。このことから、ラディカルイノベーションを継続的に創発させるためには、計画的かつ継続的にオープンイノベーション取り込み、社内のクローズドイノベーションとの連携を図るイノベーションマネジメントの実践が重要である事がわかった。

また、ユーザーイノベーションに関しては、継続的に高い目標を要求するラディカルリードユーザーの存在が重要であることがわかった。

7.2.4 MRQ への回答

MRQ：先端大規模技術開発において継続的にイノベーションを創発させるための必要条件はなにか？

スーパーコンピュータ開発の分析から、企業がラディカルイノベーションを継続的に創出するためには、3つのイノベーションとイノベーションマネジメントの存在が重要になると考えられる。特に、ラディカルイノベーションの創発には、ラディカル

リードユーザーが必須である。すなわち、社外の技術を取り込むオープンイノベーションを積極的に推進するとともに、社内においては技術基盤を継続的に強化するクロズドイノベーションを推進。高い目標設定を行い市場を先導するラディカルリードユーザー見出し、それが引き起こすユーザーイノベーションを活用推進することによってラディカルなイノベーションが実現できる、これら3つのイノベーションを社内のイノベーションマネジメントによって持続的・計画的に推進することによって、継続的なイノベーションが創発させることができると言える。

従来の技術の延長線にはない新たな技術的非連続性を取り込んだ開発を行わないとラディカルなイノベーション生み出す事は難しい。この未知とも言える技術的非連続性は、自社内のクロズドイノベーションの延長上だけで生み出されることは難しく、そのままではインクリメンタルなイノベーションに留まる傾向がある、このため、新たなイノベーションの種を、社外から取り入れるオープンイノベーションが重要であるといえる。また、大学や研究所がユーザーである先端技術開発においては、ユーザー自身が高い知識を持っており、自らが製品設計を実施したり、メーカーと共同開発することでユーザー自身がイノベーションを起こす能力を持っているといえる。また、このラディカルリードユーザーによって高い開発目標が設定される事で、それを実現する努力の中からラディカル製品が生まれてくる可能性が高まる。さらに、メーカーの視点から考えると、先端大規模技術開発は、開発投資が大きいうえにリスクが大きい開発であり、開発投資自身の判断も難しい。これに対して先進ユーザーが市場を先導し、先行して製品を導入することで、市場に製品投入することに対するリスクを低減してくれていると言える、このリードユーザーの存在は、メーカーの開発投資の後押しをする存在でもある。

7.3 理論モデル

これまでの分析結果から、先端大規模技術開発における継続的イノベーション創発に関する理論モデルを提案する。図 7-1 に理論モデルを示す。

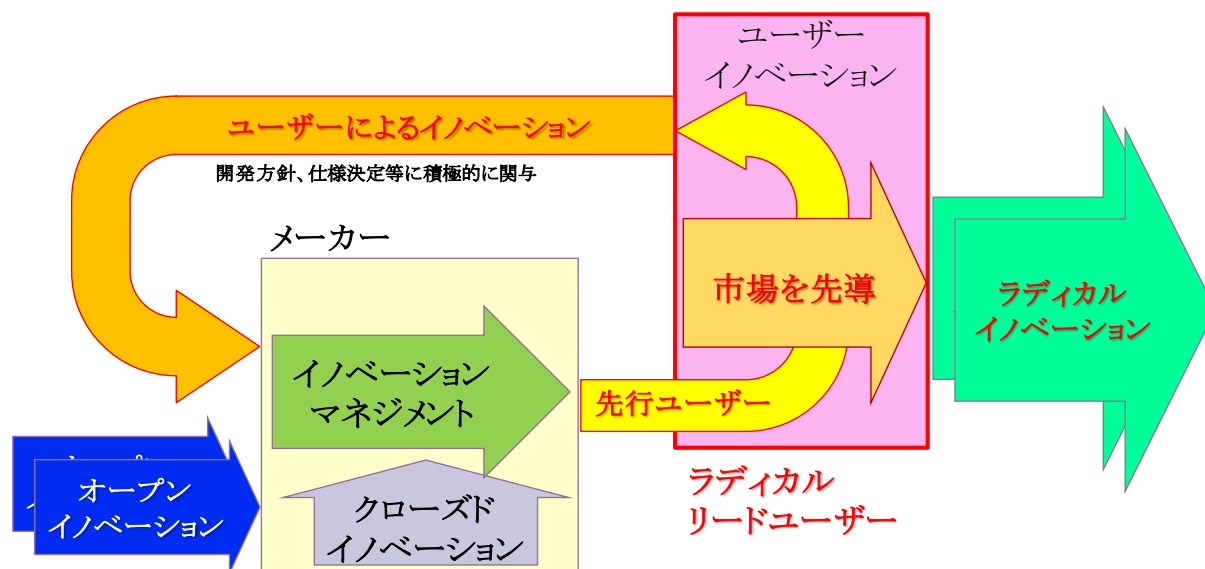


図 7-1 理論モデル

継続的イノベーション創発の要素として、3つのイノベーションとイノベーションマネジメントが存在する。

第一に、ドミナントデザインから脱却し新たな製品ラインを生み出すための開発初期の新たなアイデアを取得するための「オープンイノベーション」。第二に、社内の先端技術基盤の進化を支える「クローズドイノベーション」。第三に、ラディカルリードユーザーによる「ユーザーイノベーション」である。

ユーザーイノベーションには、ユーザーによる開発目標の設定、仕様設計等についてユーザーとの共同開発によりイノベーションを引き起こす、ユーザー自身によるイノベーションと、先進ユーザーとして市場を先導すると共に、先行ユーザーとしての調達することにより、開発した技術が死の谷、ダーウィンの海を渡れるようにする能力を持つ。これら、3つのイノベーションを社内のイノベーションマネジメントにより統合してラディカルイノベーションにつなげていく。

ここで特に、継続的にイノベーションを要求し、積極的に開発に関与する“ラディカル・リードユーザー”の存在が重要であり、このラディカルリードユーザーの存在がラディカルイノベーションの創出につながっている。

7.4 研究の含意

7.4.1 理論的含意

先端大規模技術開発（スーパーコンピュータ開発）において、オープンイノベーションがドミナントデザインから脱却してラディカルイノベーションへ切り替わる開発初期に重要な役割を果たしていることが確認された。また、ラディカルイノベーションの創発には継続的にイノベーションを要求し、積極的に開発に関与するラディカル・リードユーザーの存在が必須であることが確認された。

利用者側が高い知識を持つスーパーコンピュータのような先端大規模技術開発において、ラディカル・リードユーザーの存在は継続的イノベーション創発の必要条件と見なせるものと考えられる。

7.4.2 実務的含意

先端大規模技術開発（スーパーコンピュータ開発）においてイノベーションのジレンマを回避し、ラディカル・イノベーション創発確率を高めるためには、非連続性を持つオープンイノベーションを計画的に取り込むことができるイノベーションマネジメントが重要である。

さらに、ラディカル・リードユーザーの存在が重要であり、メーカーにおいてはラディカル・リードユーザーを見出し、有効な関係構築を行う事が重要である。また、ナショナルイノベーションシステムとしては、イノベーション施策としてオープンイノベーションの推進だけでなく、適切なラディカル・リードユーザーを育成する施策の推進が重要と考えられる。米国では多数のナショナル・プログラムによって多様なラディカル・リードユーザーの育成がなされているとの見方も出来る。一方で日本においてはラディカル・リードユーザーが少なく継続性もあまりないように感じられる。

7.5 将来研究への示唆

今後の研究に関して引き続き検討を行う必要があると考えられる点としては以下のようなものが考えられる。

本研究では、調査対象を限定して分析を行ったが今後拡張可能なものについて継続して分析を行っていききたい。具体的には、今回、調査対象は国内外の6社に限定しているが6社以外についても、本理論が適用可能かの確認を行いたい。また、今回評価の対象外としたPCクラスタに関してもシェアの大きさから何らかの評価が必要と考えられる。評価方法を変えるなどして分析を行う事で新たな知見が得られるかどうかを検証したい。

また、今回 Top500 に登録されたエントリされたもののみを評価の対象にしたが、相関関係はあるもののスーパーコンピュータ (HPC) 市場全体を分析したとは必ずしも言えない。実際の HPC 市場との差分の有無についての検証方法を検討したい。

また、今回は開発状況を技術の関連性を中心に分析したが、イノベーションは人が生み出すものであるから、イノベーションに関わる人に着目した分析も今後検討していきたい。

さらに、本研究は、スーパーコンピュータの開発に限定した議論になっている。本理論を、他の先端大規模技術開発へも適用可能か、またさらに大規模ではない先端技術開発、や技術開発全般にも拡張可能かについても検証していきたい。

参 考 文 献

- Afuah,A.N. and Bahram, N.(1995) “The hypercube of innovation.” *MIT Research Policy*, 24, pp.51-76
- Afuah,A.N.(1998,2003) *Innovation Management*, Oxford University Press
- Afuah,A.N. and J.M.Utterback (1991) ”The emergence of a new supercomputer architecture” *Technology Forecasting and Social Change* 40:315-28
- 青木昌彦、安藤晴彦(2002)『モジュール化 新しい産業アーキテクチャの本質』東洋経済新報社
- Baldwin, C.Y., and Clark, K.B.(1997) “Managing in an Age of Modularity” *Harvard Business Review*, 75(5), pp.84-93
- Branstetter, L.G. and Sakakibara,M.(2002) “When do consortia work well and why? Evidence from Japanese panel data”, *The American economic review*, 92(1), pp.143-159
- Branstetter, L.G., and Sakakibara,Mariko.(1997) ”Japanese research consortia a microeconomic analysis of industrial policy” *Nber Working paper series*
- Callon, S.(1995) *Divided Sun: Miti and the Breakdown of Japanese High-Tech Industrial Policy, 1975-1993 (Studies in International Policy)*, Stanford Univ Press
- チェスブロウ,ヘンリーほか編(2008)『オーペンイノベーション』 英治出版
(Chesbrough, H., Vanhaverbeke, W. and West, J.(eds.)(2006) *Open Innovation -Researching a New Paradigm*, Oxford University Press.)
- クリステンセン,クレイトン(2001)『イノベーションのジレンマ』 翔泳社
(Christensen, C.M.(1997) *The Innovator's Dilemma* ,Harverd Business school press)
- CSTB, National Research Council. (1995) *Evolving the High Performance Computing and Communications Initiative to Support the Nation's Information Infrastructure*, National Academy Press
- CSTB, National Research Council. (1999) *Funding a Revolution : Government*

- Support for Computing Research*, National Academy Press
- CSTB, National Research Council. (2005) *Getting Up to Speed: The Future of Supercomputing*, National Academy Press
- CSTB, National Research Council. (2011) *The Future of Computing Performance Game Over or Next Level*, National Academy Press
- ファイゲンバウム,エドワード・マコーダック,パメラ(1983)『日本の挑戦 第五世代コンピュータ』 TBS ブリタニカ
- (Feigenbaum, E.A., and McCorduck, P.(1983) *The fifth generation Artificial Intelligence and Japan 's Computer Challenge to the World*,)
- Henderson,R.M. and Clark,K.B.(1990)"Architectural Innovation: The Reconfiguration Of Existing",*Administration Science Quarterly*,35(1),pp9-30
- 畑次郎(2006),『Exaflops—米国ハイテク戦略の全貌』日本工業出版
- 後藤晃(1993),『日本の技術革新と産業組織』 東大出版会
- Katz, M.L. (1986) "An analysis of Cooperative Research and Development." *RAND Journal of Economics*, Winter 1986, 17(4),pp. 527-43.
- Meuer, H.W.(2008) "The TOP500 Project:Looking Back Over 15years of Supercomputer",*Infomatik_Spektrum*, 31_3
- 宮田 由紀夫(2002),『アメリカの産学連携 日本は何を学ぶべきか』 東洋経済
- 宮田 由紀夫(1997),『共同研究開発と産業政策』 勁草書房
- 中村吉明(2000)「通商産業省のコンピュータプロジェクトの政策効果」『年次学術大会講演要旨集 15』 pp.277-280 研究・技術計画学会
- 中村吉明・渡辺千仞(1999)「通産省の研究開発プロジェクトのマネジメントと効果：スーパーコンピュータプロジェクトのケーススタディ」『研究・技術計画学年次学術大会講演要旨集 14 』 pp.75-80
- NITRD&NCO, *Supplement to the President's Budget for Fiscal Year 1992-2010*
- 野中郁次郎、永田晃也編著(1995)『日本型イノベーション・システム 成長の軌跡と変革への挑戦』 白桃書房
- Phaal,Robert., Farrukh,C.J.P. and Probert,D.R.(2004) "Technology roadmapping —A planning framework for evolution and revolution" *Technological Forecasting and Social Change*,71(2004), pp5-26

- ポーター,マイケル.E.、竹内弘高、榊原磨理子(2000)『日本の競争戦略』ダイヤモンド社 (Porter, Michael E. ,Takeuchi,H. and Sakakibara,M.(2000)*Can Japan Compete?*, Basic Books)
- Sakakibara, M.(1997)“Evaluating government-sponsored R&D consortia in Japan: who benefits and how?”*Research Policy*, 26(4-5), pp.447-473
- ザオバー,ティム、チルキー,ヒューゴ (2009)『イノベーション・アーキテクチャ』同友館 (Sauber,Tim and Tschirky, Hugo(2006)*Structured Creativity,Formulation an Innovation Strategy*, PALGRAVE MACMILLIAN)
- シュムペーター (1977)『経済発展の理論 (上/下)』岩波文庫
(Schumpeter ,J. A. (1912) *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*)
- チルキー,ヒューゴ編 (2005)『科学技術経営のための実践的 MOT』日経 BP 社
(Tschirky, Hugo, Jung Hans-Helmuth, and Savioz, Pascal(2003) *Technology and Management on the Move*, Orell Fussli Verlag AG)
- Tushman,M.L. and Anderson,P.(1986) “Technological Discontinuities and Organizational Environments”, *Administrative Science Quaterly*, 31(3), pp.439-465
- Tushman,M.L. and Rosenkopf L.,(1992) “Organizational Determinants of Technological Change: Toward a Sociology of Technological Evolution”, *Research in Organizational Behavior*,14,pp.311-347
- Utterback, J.M., and Suarez,F.F.(1993) “Innovation, competition, and industry structure”, *Reaserch policy* , 22(1), pp.1-21
- アッターバック,J.M.(1998)『イノベーション・ダイナミクス』 有斐閣
(Utterback,J.M.(1994) *Mastering the Dynamics of Innovation*, Harverd Business School Press)
- フォンヒッペル,エリック、榊原清則訳(1991)『イノベーションの源泉 真のイノベーターは誰か』 ダイヤモンド社
(von Hippel,E.(1988) *The Source of Innovation*, Oxford University Press)
- フォンヒッペル,エリック、サイコムインターナショナル監訳(2006)『民主化するイノベーションの時代』 ファーストプレス
(von Hippel,E.(2005) *Democratizaing Innovation*, The MIT Press)

謝辞

本研究では、主指導教官の井川康夫教授をはじめ、副テーマを指導頂いた、奥和田久美客員教授、およびゼミ等でご指導を頂いた小坂満隆教授、國藤進教授、梅本勝博教授、吉田武稔教授、神田陽治教授、近藤修司客員教授、遠山亮子客員教授、永田晃也客員教授、平澤冷先生をはじめ、杉原太郎助教、白肌邦生助教ほか多くの先生方のご指導を頂きここまでたどり着くことができました。また、貴重な講義をして頂いた、野中郁次郎先生、Hugo Tschirky 先生、Robert Phaal 先生ほか多く講師の方々には、多くの刺激と新たな知識をいただきました。心より感謝申し上げます。

開発状況分析のために実施したインタビューに快く対応していただいた、理研の渡辺貞プロジェクトリーダー、横川三津夫グループディレクター、富士通の堀田耕一郎様、地球シミュレータセンターの古井利幸様には貴重なお話を聞かせていただきました。ありがとうございました。科学技術政策研究所の野村稔様には最新の海外 HPC の状況など貴重な情報をいただきました。また、次世代スーパーコンピュータシステム開発でともに仕事をさせていただいた日立製作所の皆様にも知識を共有させていただいたことに深く感謝します。

本論文執筆中(2011 年 11 月)に 26 年勤めた NEC を退社することになりました。25 年に渡るスーパーコンピュータ開発の経験のおかげで本論文を作成することができました。NEC でご指導いただいた諸先輩方、並びにともに苦楽をともにした同僚諸兄に深く感謝いたします。また新たな職場の(財)高度情報科学技術研究機構の平山俊雄神戸センター長にはご配慮をいただき論文を完成することができました。今後はよりユーザーサイドでスーパーコンピュータのイノベーションに携わっていきたいと考えております。

さらに、MOT/MOS コースの多くの仲間と年齢を超えてさまざまな熱い議論と情報共有が出来たことは忘れがたい経験になりました。またこのような貴重な場を整備していただいたサテライト・キャンパス事務の方々にお礼申し上げます。

最後にこの度の学生生活を認め、支えてくれた妻と娘たちに心から感謝します。

今回、多くのことを学び、考え、悩んだことが、今後の人生にとって真に貴重な財産になると確信しています。ここで改めてご協力を頂いた方々に心より感謝の気持ちを表わすとともに、学んできた事が少しでも社会に貢献出来るよう、今後、更なる研鑽と実践に励んでいくことを肝に銘じます。