

日立製作所創業100周年記念シリーズ

開拓者たちの系譜

- 15 -

世界一のコンピュータ製品をめざして

日立製作所 情報・通信グループ
エンタープライズサーバ事業部 主管技師長

二宮 和彦

1 はじめに

忘れられない言葉がある。「世界一のコンピュータ製品をめざそう」だ。神奈川工場（現 エンタープライズサーバ事業部）^[1]が1976年から1996年までの20年間にわたって掲げていた工場憲章の第一条だ。

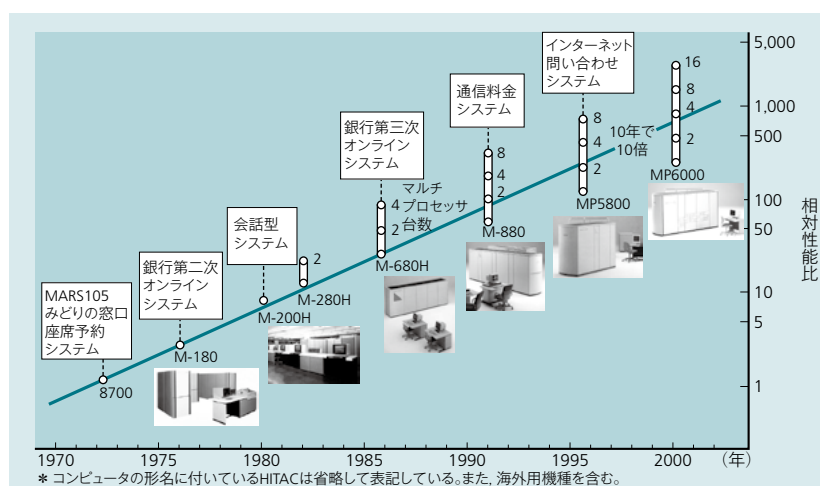
コンピュータは人と似ている。人は考え方と知識という情報を大脳に記憶する。その情報を左脳で活用し、加工して、意思決定したり、新しい考え方を創造したりする。コンピュータは、考え方をプログラム、知識をデータとしてMM（Main Memory：主記憶）に記憶する。プロセッサは、プログラムを読み出し、その指示に従って必要なデータも読み出して、加工する。人は成長とともに、必要な情報も増加するが、そのすべてを大脳に記憶できなくなるので、書籍やみずから作成したノートのような形式で机の引き出しや本棚に収納する。その情報が必要になると、手足を使って書籍やノートを取り出し、目や耳などの五官を使って、情報を大脳に取り込む。コンピュータもMMに記憶できない情報は、ディスクサブシステムやテープサブシステム等のI/O（Input/Output：入出力）装置に収納する。コンピュータはI/O装置への読み書きが必要になると、

I/Oチャンネルを起動し、I/Oインタフェースを介して接続されているI/O装置とデータ転送する。

コンピュータはプロセッサとMMとI/Oチャンネルの集合体だ。プログラムは命令の意図された意味のある連なりであって、プロセッサ性能は単位時間あたりに処理される命令の数である。プロセッサが速ければ速いほど、より多くの命令を実行でき、より多くの情報を加工でき、より多くの新しい情報を創出できる。MMの容量が大きければ大きいほど、頻繁に使用される情報のより多くを迅速に読み書きできる。I/Oチャンネルとそれに接続されるI/O装置が速ければ速いほど、そして、I/Oチャンネルの数が多ければ多いほど、必要な情報をより多く、より速く記憶装置に準備できる。プロセッサの処理性能、MMの容量と帯域、I/Oチャンネルの転送速度と本数、がコンピュータの性能を決める。IBM社のSystem/360シリーズが1964年に発表された。これは種々の多くのアプリケーションを1台で集中実行可能な汎用コンピュータで、現在のメインフレームの原型と言える。この時点から2000年までに、メインフレームはアーキテクチャの進歩とテクノロジーの進歩を両輪にして、そのプロセッサ性能は3,000倍以上^[2]、I/Oチャンネルの転送速度は100倍以上に向上した。



[1] 神奈川工場（現 エンタープライズサーバ事業部）



[2] 大形コンピュータの性能変遷

二宮 和彦（にのみや かずひこ）
1975年早稲田大学理工学部電子通信
学科卒業，日立製作所入社，神奈川工
場配属。以降，メインフレームコンピュ
ータの入出力チャンネルの設計に従事。
1999年よりオープンサーバの設計に従
事。2006年より現職。



2 プロセッサ性能3,000倍への歩み

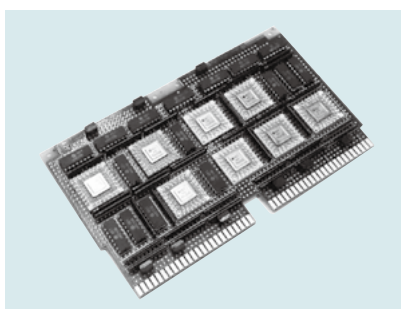
1975年のコンピュータ自由化に備えて，1971年，通産省（現 経済産業省）の指導により，日本のコンピュータメーカー6社は新シリーズの高性能コンピュータの開発に取り組むことになった。日立はその第一弾を1974年11月に超大形機HITAC M-180として発表した。1970年代から1980年代にかけては，オンライン処理が大きな社会的ニーズになっていた。例えば，鉄道の座席予約システムや銀行のオンラインシステムである。オンライン処理は，オンラインでの問い合わせ要求に限られた時間内で応答することが求められ，さらに，その問い合わせの数も増大していくので，コンピュータの高性能化への要求は留まることがなかった。そこで，神奈川工場では工場憲章の第一条に「世界一のコンピュータ製品をめざそう」を掲げ，社会のニーズに対応すべく最高性能のコンピュータの開発に邁（まい）進することになった。

M-180ではSSI（Small-scale Integration：小規模集積回路）を多用し，一部に200ゲートのLSI（Large-scale Integration：大規模集積回路）を用いた^[3]。1978年に発表したM-200Hは550ゲートのLSIとこれを多数搭載可能な

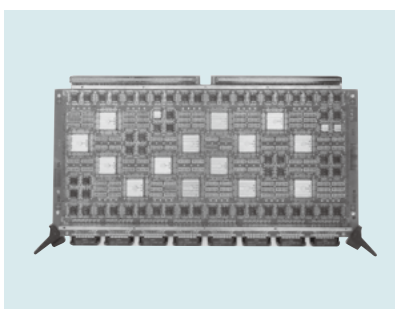
高密度プリント基板^[4]を開発し，世界最高性能を実現した。続いて，1981年に発表したM-280Hは，M-200Hのテクノロジーを発展させてさらなる高密度化を図り，M-200Hの1.5倍以上の高性能を実現した。

1980年代に入ると，コンピュータの利用分野は，従来の定型処理，バッチ処理の分野から，企業意思決定の中核となる解析，計画，あるいは，予測といった非定型な分野へ拡大し，さらなる性能が要求された。1985年に発表したM-680Hは，すべてをLSI化し^[5]，競合他社が水冷技術を採用したのに対して空冷技術で世界最高性能を実現した。このため，顧客設備の改造を強いることがないので導入が容易で，国内外の市場で多くの支持を集めた。

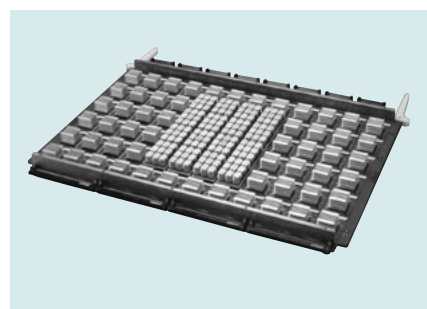
コンピュータの高速化は信号配線長の縮減であって，高集積化のテクノロジーがこれを実現する。まず，スルーホールめっきによる多層プリント基板の技術が配線長の縮減に貢献した。続いて，LSIのさらなる高集積化が，プリント基板上の論理回路と配線のLSI内への取り込みを可能にし，配線長のさらなる縮減を牽（けん）引した。プロセッサに採用したテクノロジーをM-180からM-680Hまでの10年間で見ると，LSIのゲート数は25倍，プリント基板の層数は5.5倍，格子密度は2倍，プリント基板上のゲー



[3] M-180のSSIおよびLSI搭載プリント基板



[4] M-200H/M-280HのSSIおよびLSI搭載プリント基板



[5] M-680HのLSI搭載プリント基板

ト数は500倍、メモリのビット数は6,000倍へと至った。高密度実装に伴って発熱密度も高くなる。プリント基板の発熱量は20倍へと至ったが、熱伝導性に優れたLSIパッケージと放熱性に優れたフィンを開発して解決した。プロセッサ性能は100倍を超えた。

この間、高性能化は多層プリント基板とLSIの高密度化に負うところが大きかった。一方で、将来のさらなる高密度化と高速化を予見し、複数のLSIを直接セラミック基板に搭載して、これをモジュール化する技術の開発も1977年から並行して進めた。1979年の小形メインフレームM-140H^[6]への適用から始めて、そして、スーパーコンピュータS-810^[7]、M-680H^[8]等の製品において、主にメモリ部分をモジュール化しながら、その技術を蓄積し、進化させてきた。この後もLSIの高密度化が進展して、LSI内部の信号は高速化していくが、LSI間をわたる信号の遅延時間が相対的に大きくなり、装置全体の性能がLSI間をわたる信号の遅延時間で決定されてしまうことになる。セラミック基板と複数LSIとをモジュール化する技術は、モジュール内に実装されたLSI間の距離を縮小する。その結果、LSI間をわたる信号の遅延時間を、LSIの高速化に見合った遅延時間へ低減することになる。

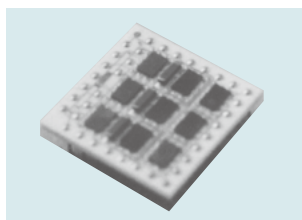
その後も、コンピュータの性能需要は20～30%/年の伸長が継続すると予測した。1990年に発表したM-880は、多層セラミック基板に複数の高速・高集積LSIを実装してモジュール化^[9]、このモジュールを大形プリント基板に18個搭載して、1ボードプロセッサ^[10]を実現、M-680Hの2倍の性能を達成した。その高密度実装により、発熱密度はM-680の20倍となった。複数の高速・高集積LSIとこれらを搭載した多層セラミック基板のモジュール内に冷却水を循環させて、LSIを直接水冷する方式を開発した。

1990年代になると、インターネットが急速に拡大し、

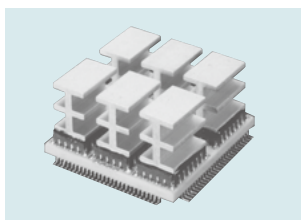
UNIX^{※)}システムを中心にオープン化とダウンサイジングが注目され、コンピュータのシステムモデルが変わり始めた。メインフレーム各社はプロセッサに用いる回路技術の高速なバイポーラから、低速ではあるが高集積で安価なCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) への転換を表明していた。このような状況において、米国HDS (Hitachi Data Systems) 社は市場調査を実施、金融や通信の事業分野では高性能・大規模メインフレームが多数存在し、その更改需要も含めて、今後も高性能メインフレームの需要は存在する、と報告してきた。この調査結果を踏まえて、次機種としてMP5800の開発を開始し、1995年に発表した。MP5800は、M-880で開発した技術を進化させ、また、新たな技術を積み重ねて、1モジュールプロセッサ^[11]、^[12]を実現、M-880の2倍の性能を達成した。M-880の1ボードプロセッサを1モジュールプロセッサへスケールアップすると、LSIへの要求事項は集積度が20倍、性能が2倍となったが、高速なバイポーラECL (Emitter-coupled Logic) 回路と比較的低速だが高集積のCMOS回路とをLSIの中で融合して、高速動作とさらなる高集積とを両立した。これがACE (Advanced CMOS-ECL) テクノロジーであって、半導体の設計と生産、論理設計と設計ツールの開発など、神奈川工場とデバイス開発センタ (現 マイクロデバイス事業部) が共同した。

他社がCMOSメインフレームであったこともあって、MP5800は当初5倍以上の圧倒的な性能差をもって市場を席巻した。その後、他社はCMOSの性能を毎年改善してMP5800との性能差を縮めてきた。1999年、MP5800の技術を発展させてMP6000を発表した。

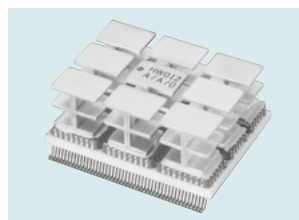
※) UNIXは、X/Open Company Ltd.がライセンスしている米国ならびに他の国における登録商標である。



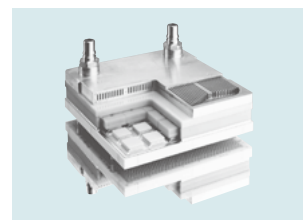
[6] M-140Hのセラミックモジュール



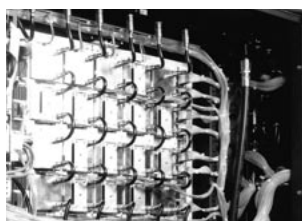
[7] S-810のセラミックモジュール



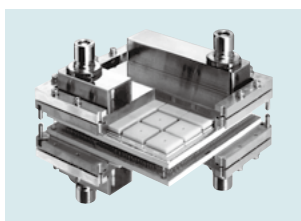
[8] M-680Hのセラミックモジュール



[9] M-880のモジュールプロセッサ



[10] M-880の筐体



[11] MP5800モジュールプロセッサ



[12] MP5800の筐体

3 設計の品質確保と効率化を支援するツール

複雑かつ大規模な論理回路の設計は人手による作業可能な範囲をはるかに超えるものがある。設計不良が発生すると、設計のやり直しと、場合によっては、装置の作り直しに多くの工数と時間を費やすことになる。神奈川工場はインハウスのDA (Design Automation) システム^[13]を開発、その機能と性能を拡張して、これを設計支援ツールとして継続的に発展させながら活用してきた。DAシステムは、論理設計データをコンピュータ入力して一つの設計データベースを作成する。設計フェーズの進捗(ちよく)に連動して、新たな設計データを生成し、データベースに蓄積する。論理シミュレーションは、データベースに蓄積された論理回路が仕様どおりに論理動作するかを検証し、結果を表示する。設計不良は論理回路を修正し、論理シミュレーションを繰り返す。次に、論理回路を構成する論理ゲートをLSIの中に自動配置し、それらのゲートを結ぶ信号を自動配線する。ディレイチェックは、配置情報、配線情報からすべての配線の遅延時間を計算して出力し、同時に、規定値を超える信号をスクリーニングする。規定値を超えた信号は、配置や配線の固定、必要に応じて論理ゲート段数を改善し、論理シミュレーションとディレイチェックを再度実行する。試作機の製造前に設計不良の99%以上の摘出を目標にDAシステムを運用し、LSI、セラミックモジュール、プリント基板の作り直しの回数を低減、その結果、開発期間の短縮と設計品質の確保とを両立した。

実機の動作を高効率、かつ、網羅的に検証するために、TMP (Test and Maintenance Program) も開発した。TMPは、過去の設計不良を蓄積し、その不良が顕在化した条件を発生させて、同様の不良が実機に潜在していないかも検証する。命令セットの動作を検証するテスト、モデル固有

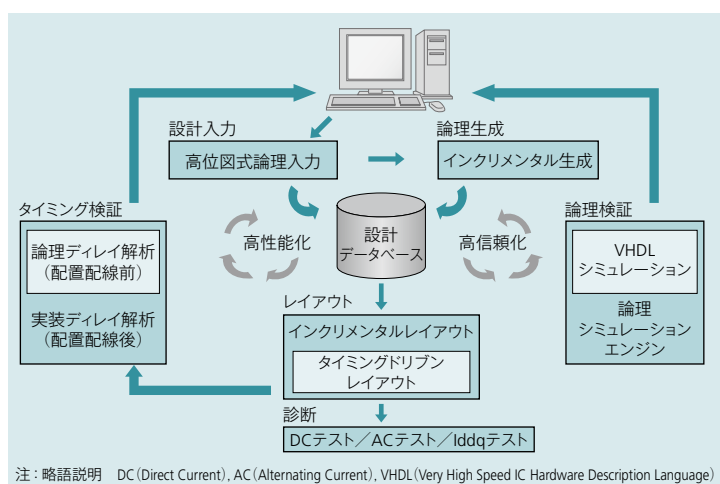
の論理構造に着目したテスト、性能を確認するテスト、命令実行パイプラインの乱れや入出力の転送バイト数をランダム化したテスト、疑似故障を自動注入して障害回復機能を検証するテスト、プロセッサや入出力のテストをマルチタスクで動作させて高負荷状態での正常性を検証するテスト、を組み込んだ。プロセッサを対象に60万件、I/O動作を対象に10万件のテストを蓄積し、設計不良の99.99%を製品出荷前に摘出することを目標に運用している。TMPなくして、出荷品質の確保は考えられないほど、テスト項目が充実している。

4 I/Oインタフェース、I/Oチャネルの発展

1975年、私は日立製作所に入社、神奈川工場へ配属された。1999年まで、メインフレーム、特にその中のI/Oチャネルの設計を担当してきた。世界のコンピュータが著しく性能を向上させてきた期間と重なっている。また、神奈川工場が世界一をめざして、そして、時として世界一になった時期とも重なっている。

プロセッサ性能の向上に伴い、プロセッサの処理能力と外部データへのアクセス時間とのギャップが拡大していった。また、プロセッサは高集積化技術を手段にして高速化してきたが、その結果、コンピュータシステムは大規模化して、設置面積は拡大していった。プロセッサの高性能化とともに取り扱うデータ量が急速に増加するが、I/O動作は、機械的動作を伴うために、それほど高速化できず、I/Oチャネルの数を増やして補完せざるを得なくなってきた。I/Oチャネルの数を増やすと、それを収納する筐(きょう)体の容積が無視できないほど大きくなるという問題も予測された。

I/Oチャネルも当初はプロセッサと同じバイポーラ素子



[13] DA処理フロー

やLSIを使用していたが、プロセッサほどの高性能は相対的に必要なくなってきた。神奈川工場では、1970年代後半から、その高集積と低消費電力の特長を活用すべくCMOS-LSIを小形メインフレームに適用してきた。M-680Hの開発にあたっては、この頃からCMOS-LSIの集積度と性能が大形メインフレームのI/Oチャンネルに適用可能になったと判断し、CMOS-LSIを用いて、I/Oチャンネルを一挙に高集積化することを狙った。4万ゲートのCMOS-LSIをデバイス開発センタと共同開発し、I/OチャンネルをCMOS-LSIで実現、一世代前のM-280に比して8倍の高密度実装^[14]を実現した。

I/Oチャンネルと、それに接続されるI/O装置の数が増加すると、コンピュータシステム全体の設置面積が拡大する。実際に、フロアをわたって構築されたシステムも出現してきたし、建屋をわたって構築せざるを得ないとの議論も現実味を帯びてきた。I/Oインタフェースの接続距離の伸長とデータ転送速度の高速化が必要になってきた。

1970年代から1980年代まで、I/Oインタフェースは電気信号で、その伝送媒体として、1チャンネル当たり銅線を24芯（しん）束ねたケーブルを2本使用していた。幾度かの改良を重ねて、接続距離を120 mまで伸長し、データ転送速度を9 Mバイト/sへ高速化した。

1980年代後半になると、データ転送速度のさらなる高速化と接続距離の伸長のために、I/Oインタフェースを光伝送にする必要を予測した。システムの大規模化に伴うI/Oインタフェースケーブルの長大化と本数の増加は、コンピュータールームにおける床下空調の効率低下を誘発するとも予測した。200 Mバイト/sで数百メートルの光伝送の可能性が見えてきた。光伝送が今後のI/Oインタフェースの主流になると確信し、開発に踏み出した。

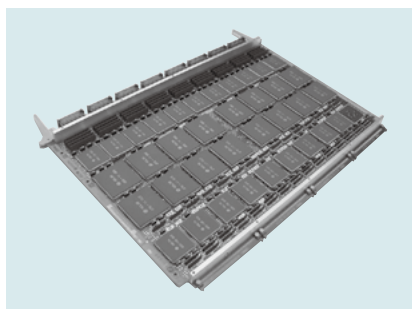
光送受信部はアナログ回路であること、高速・長距離伝

送であることから多くの物理的トラブルが発生した。コンピュータというデジタル環境の中に微弱な電圧で動作するアナログ部品を持ち込み、バイトをビット列に変換して200 Mバイト/sの高速でシリアル伝送する、ビットエラーを許容する通信用に開発された技術をビットエラーを許容しないコンピュータに取り込むための伝送損失の配分、などの多くの技術課題に直面した。光送受信部の開発元である日立電線株式会社の技術者と神奈川工場の技術者がこれらの課題を共同して解決し、光伝送技術をコンピュータに取り込むにあたってのノウハウを蓄積した。開発した光チャンネルサブシステムは18 Mバイト/sのデータ転送速度と最大2,000 mの接続距離を実現、これをM-880/M-860に適用した。従来のI/Oケーブルは、媒体が銅線で24芯、直径が23.0 mmを2本用いて、1チャンネル当たり1,200 g/mの重量であった。光チャンネルサブシステムのI/Oケーブルは、媒体が光ファイバで2チャンネル分を収納した4芯、直径が10.5 mmで、1チャンネル当たり60 g/mで、軽量、細径を実現した^[15]。

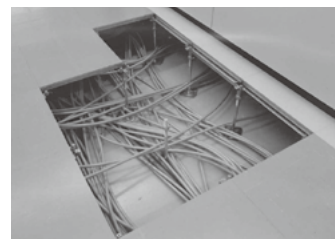
その後、I/Oチャンネルは、CMOS-LSIと光伝送の技術進歩に同期しながら、その応用技術を発展させて、新しいプロトコルに対応しつつ、データ転送速度を高速化していった。

1990年、IBM社も200 Mバイト/sの光伝送技術を採用した光入出力システムESCON（Enterprise Systems Connection）を発表した。光チャンネルサブシステムで培った技術・ノウハウを活用し、また、先に開発したI/Oチャンネルの論理回路の流用可能な部位をマクロセル化して予め埋め込むASIC（Application Specific Integrated Circuit）の手法を採用して、ESCON同等品を短期に開発、輸出市場での競合力を維持した。

この後、I/Oインタフェースの光化は急速に進み、シス



[14] M-680の8チャンネルパッケージ



[15] メタルケーブル（上）と光ケーブル（下）

テム構成にあたって、メタルチャネルと光チャネルの配分の仕方が重要な要素となった。MP5800ではチャネルパッケージのサイズを半減した4チャネルパッケージ^[16]を開発して、システム構成の柔軟性を確保した。

光伝送技術は、Fibre Channelという世界標準仕様をもって、I/O インタフェースの主流となった。独自のプロトコルで200 Mビット/sから挑戦したが、この技術と経験を蓄積して、Gビット/sクラスの製品設計に活用している。

5 おわりに

神奈川工場は20年以上の長期にわたって、世界最高性能のメインフレームを開発し続けてきた。新機種の開発の度に、何が重要な特性かを定義し、技術・手法として達成すべき目標を掲げて、コスト、消費電力、可用性の制約の範囲で性能を最大化するコンピュータを開発してきた。アーキテクトの役割は、何ができるかというテクノロジーの状態について精通すること、歴史的洞察と現状認識を通じて将来を展望していること、全体を調和させる感覚をもって、これらの知識を活用して可能な資源の中から何かを創出すること、と言われている。神奈川工場はコンピュータアーキテクトとしての自覚を持ち、その役割を果たしてきた。製品差別化技術はこのような態度と活動から創り出される。神奈川工場は多くの差別化技術を開発し、製品競合力を高めてきた。特に、M-680Hは空冷技術で、MP5800はACEテクノロジーで市場を席巻した。正に製品差別化の重要性がここに現れている。

メインフレームは、単一イメージのプロセッサ上で多数のアプリケーションを実行させるために、プロセッサを高速化してきた。また、メインフレームが取り扱うデータの多くはシステム内のI/O装置にあって、I/Oインタフェー

スを通じてアクセスされた。1990年代の中頃から、アプリケーション毎に物理サーバを割り当て、多数のサーバを運用する形態にシステムモデルが変わってきた。ビジネスの発展に伴って、こうした単一サーバ・単一アプリケーションが増加し、その運用が人間系の限界を超えてきたとの指摘もあって、ブレードサーバに代表される統合化への取り組みがなされてきた。昨今は、サーバが扱うデータはネットワークを介してシステム外のデータにアクセスする頻度が増加、データ量も増加している。ネットワークのデータ転送速度も現在は10 Gビット/sであって、数年先の40 Gビット/s、100 Gビット/sも議論されている。サーバに使用されているプロセッサ性能とネットワーク性能の不整合を解決するソフトウェア手段、あるいは専用プロセッサ、不特定なクライアントと接続する危険性を排除するセキュリティ技術、サーバの仮想化技術とネットワークの仮想化技術および両者を活用した高効率なシステムマネジメントなど、統合化の完成度をさらに高度化し得る技術要素が議論され、そして実現しつつあり、ブレードサーバを超えたシステムモデルへ大きく「新化」する予兆がある。アーキテクトがその力量を発揮すべき領域は広がっている。

参考文献

- 1) 小高：「ユビキタス」への歩み—大形コンピュータ開発小史—、日立評論、87、5、428～433 (2005.5)
- 2) ヘネシー、パターソン：コンピュータアーキテクチャ 定量的アプローチ、翔泳社 (2008)



[16] MP5800の4チャネルパッケージ