

メディアサーバ開発物語

長坂 篤

現在、従来の低ビットレートのストリーミングサービスに代わってより高画質な商用映像コンテンツサービスが開始されようとしている。ADSL加入者が2003年末で1000万を超え、今後VODや放送等のコンテンツ配信をはじめ、TV電話等のブロードバンドサービスが急速に普及することが期待される。今後のブロードバンドサービスの主要なアプリケーションとして、VOD (Video on Demand)、インターネット放送等のコンテンツ配信やTV電話、TV会議等の映像コミュニケーション等が考えられる。

我々は、このような映像アプリケーションのためのプラットフォームとしてOKI MediaServerを開発・製品化してきたが、NHKアーカイブス、ぷららネットワークス等大規模システムで採用され、VODシステムとして実績を築きつつある。

本稿では、OKI MediaServerの開発の歴史について述べる。

はじめに

VODシステムは、1990年台初期より、ブロードバンドネットワークのアプリケーションとして多くの期待を持たれたがなかなか実用には至らなかったが、ブロードバンドネットワークの普及により、現在実を結びつつある。OKI MediaServerはこのVODシステムの変遷におけるさまざまな環境のもとで開発されてきた。

ここでは、OKI MediaServerの開発について述べる前にVODの歴史について簡単に説明する。

VOD (Video on Demand) システムは、画像符号化規格であるMPEGの成功を受けて、1990年代初期に研究が始まった。VODシステムの技術背景には画像符号化技術MPEGの他に、RAID技術などコンピュータ技術や、ATM等の広帯域ネットワーク技術があった。現在一般的に普及しているxDSL技術も既存のメタル回線でVODサービスを実現するための変調技術としてこの頃開発された。

1994年から始まる数年は、VODブームといえる状況にあり、ほとんど全てのコンピュータメーカー、キャリアが

VODシステムの開発、商品化に取り組んだ。世界各地でVODトライアルが行われた。1994年からは映像アプリケーションの統一規格を開発するための業界団体DAVIC (Digital Audio-Visual Council) が発足し、相互接続に向けた規格開発が行われ、ISO規格として制定された。

しかしながらVODブームは、広帯域アクセスネットワークが整備されていない、コスト、コンテンツ供給等の問題があり、1996年頃をピークに急速に衰えていった。

一方、Windows95の発表、WWWにより、世の中のインターネット人口は1997年頃から急激に増加し、1998年のMP3配信、1998年頃からのRealMedia、WindowsMediaによるストリーミングサービスが開始された。ストリーミングは、DAVICが目指したMPEG-2 over ATMによる高画質サービスではなく、より低ビットレートでかつインターネット上での遅延やジッタを端末側のバッファで吸収するという技術であった。ストリーミングサービスでは、しかし、画質やコンテンツの制約により有償サービスとして成功するまでには至っていない。

2000年からADSLの急速な普及より、VODシステム等のブロードバンドサービスが事業として成立するのに必要な加入者数が臨界値に達しつつあり、現在本格的な商用サービスが始まろうとしている。

独自開発の時代

OKI MediaServerは筆者等が当時属していた研究開発本部総合システム研究所で開始された。筆者らは1980年代は主に人工知能の研究に携わり、日英機械翻訳システムRosetta (後に関西総合研究所に技術移管し、PENSEEとして商品化)、その後LispマシンELIS (NTTとの共同開発)、Common Lisp処理系等の技術・製品開発を行ってきた。Common Lisp処理系は当時最も高速であったLucid Common Lispよりもインタープリタで6倍、コンパイラで2倍の高速性を誇る処理系であり、一部のベンチマークでは最適化されたCコードよりも同一マシン上で高速であったため、C (物理の光速) よりも高速という意味を込めてTachyon Common Lispと名づけた。

マルチメディア研究

Lispに関しては非常に高い技術を開発したが、残念ながらAI市場は急速に収束し、研究所内においても新しい研究テーマへの移行を要求されていた。次のテーマとして、マルチメディア、ネットワーク、エージェント指向からなる高速ネットワーク上のマルチメディアアプリケーションとターゲットを定め、「分散マルチメディアエージェント環境」開発計画を策定した。この計画に沿って、メディア処理技術、ハイパーメディア、マルチメディアオーサリング技術等の開発から始め、将来的にメディアサーバを開発する計画であった。研究の初期にはハイパーメディアとして文書処理システムInterleaf上に動画、音声、ハイパーリンク等の機能を組み込んだハイパーメディアシステムを試作した。またマルチメディアオーサリングシステム Extemporeでは、種々のメディア処理の他に自律的なオブジェクトの振り舞いを取り入れることを目標に、Apple社のオブジェクト指向言語 Dylan をエージェント指向拡張した言語を開発した。

Extemporeは、後にメディアサーバのオーサリングシステムとして使われた。

VODシステムの開発

VODシステムの開発はこれらのベースの先に位置付けられていたが、その頃から国内においてもNTTのVODトライアルが計画され、開発計画を前倒しすることになり、1994年上期から開発が開始された。

VODシステム開発にあたっては、社内においても意見が分かれた。ソリューション部門は自主開発よりも当時市販されていたStarWorksを採用する方針であり、また他の技術部門からは全く技術的ベースがないのに自主開発ができるはずがないと否定的であった。当時マルチメディア全般を統括していた本社マルチメディア開発本部の判断により、自主開発が認められた。

VODシステムは従来専用ハードとして開発されることが多く、汎用コンピュータシステム上での開発例は少なかった。汎用コンピュータシステム上でVODシステムの開発が可能か否かは不明な点もあり、特に以下の2つが技術的課題であった。

- ①映像配信は等時性 (Isochronous) が要求される
- ②ストレージ読み出し性能

VODシステムの実現可能性を評価するために、各I/Oの性能測定ツールを作成しI/O性能の測定から開発は始まった。ストレージ性能については、汎用OSのファイルI/O性能、RAIDのI/O性能、独自開発のソフトRAIDの性能測定を行った。これらの評価から、以下が判明した。

- 汎用OSのファイルシステムの性能は非常に低く、専用のファイルシステムが必要である (当時のHD性能 5MB/秒に対してファイルシステムの性能は1MB/秒程度であり、MPEG-2の場合、同時に1~2本しか配信できない)
- ソフトRAIDは方式により、ハードRAIDよりも高い性能を実現することが可能である

これらの測定結果から、専用高速ファイルシステムを持つVODサーバの存在意義があることが明らかになった。汎用OSを前提とする必要性から、RAWデバイス上に独自の高速ファイルシステムVFS (Video File System) を開発することになった。

等時性については、映像や音声では指定されたビットレートでの配信が必要であり、一般にはリアルタイムOSが採用されていた。我々は一般の情報システムとの共存を優先し、汎用OS上で必要とされる時間制御を行うことが必要となった。この問題を解決するために、独自に「予測的配信制御」と呼ぶ配信制御方式を開発し、異なるビットレートのストリームが混在しても正しいビットレートで配信可能にした。

このようにして基本的な方式が定まった段階で具体的な開発が始まった。当初は、長坂、新谷 義弘の2名で方式設計と実装を行った。こうして、短期間で基本的なVODサーバ機能が 1994年の秋にはでき上がり、11月の研究開発本部の研究発表会に出展した。

開発を始めるにあたって、上期途中から立ち上げたため設備予算もなく、かつ通常ルートでは最低一ヶ月はかかるため、二人で土曜日の秋葉原に行き、COMPAQのIntel 486/66MHz PCサーバを購入して端末ソフトの開発マシンにすることにした (このマシンはそのまま開発マシンとして使われ、一度も自宅に来ることなくパーツを抜かれて消えてしまった)。このマシンで運が良かったのはLANボードの性能が非常に良かったことである。開発が進んだ時点で、種々のLANボードの性能評価を行って分かるのだが、当時は映像を配信するアプリケーションはなかったため、LANボードはメーカー、製品によって同じ規格とはいえないほどの性能差があった (10Mbit/sも出ないFDDIボードなど)。Intel LANボードは最も性能が高く、このボードを性能測定段階で使ったことでVODサーバ開発の可能性ありとの結論がでたが、もし性能の低いLANボードであったらメディアサーバは存在しなかったかもしれない。

DAVIC規格

基本的なVODシステムはできたが、商用化にはまだやるべきことが多くあった。1つには商用システムとして必

要な、種々の機能整備であり、コンテンツ管理、コンテンツ作成、運用管理等の上位機能の開発が必要であった。また、性能向上のためにVFSにも機能拡張が行われた。特定コンテンツにアクセスが集中した場合、ストレージ帯域が限界に近づいた時、そのコンテンツのコピーを他のRAIDグループに動的に作成して配信性能を上げる動的コピー機能、ハードRAIDとソフトRAIDを二次元に使うことによってトータルの配信性能を上げる二次元RAID機能等の独自技術が開発された。この二次元RAID機能は後にNHKアーカイブスを受注する上での技術ポイントとなった。また、コンテンツ管理では単純なトリー型の階層ファイルシステムではなく、より一般的な有向グラフを許し、コンテンツの共有、サービス、コンテンツの概念の整理など、一面では現在のコンテンツ管理よりも進んだ機能を実装した。

2番目の課題が相互接続性である。最初のOKI MediaServer V1は全くの独自規格であったが、1994年に設立された業界団体DAVICでは相互接続のための種々の規格が開発されていた。沖電気は1995年4月のロンドン会合から参加し、全体をDAVIC規格に沿った形で整備していくことになる。

DAVIC規格はMPEG-2TS over ATM/AAL5をベースとする高画質配信サービスをターゲットにしている。規格はA0~A11の12の参照点におけるインタフェース仕様として規定される(図1参照)。

規格上の大きな特徴の1つは相互接続性とスケラビリティを意識し、サブシステム間RPCインタフェースはCORBAを採用したことである。サーバ-端末間インタフェースはDSM-CC UUである。我々は、配信プロトコルについては、DAVICが採用したMPEG-2 over ATMと共に、これと並行してIPベースのプロトコルも残した。これは厳格にMPEG-2 TS over ATMでは、汎用OSでは性能が出ないこと、コストが非常に高くなることからである。実際にNTT主催の相互接続実験に参加し、MPEG-2 TS over ATMを実装するために、PC用EISA ATMボードを強引にHP9000/700のI/Oバスに接続し(途中からプロジェクトに参加した畠中 啓が開発)したが、当時最も高速なHPマシンでMPEG-2 1本の配信が性能限界であった(規格に厳密に実装すれば、1本の6Mbit/s MPEG-2 TSストリームで1秒当たり2000回のI/O割り込みが発生し、サーバとしては使い物にならない)。

DAVICは参加各社が自社技術を規格に入れるために厳しい競争を行う場であるが、一方同じ技術者同士で種々の情報交換もでき、技術を急速に立ち上がる局面では非

S5: Network Mgmt		S4: Connection		S3: Session		S2: Control		S1: Video stream			
Q3 CMIP	SNMP MIB	Q.2931	Application Specific Layer								
			DSM-CC User-Network	DSM-CC User-User		MPEG2 Private Data	MPEG2 Private Data	MPEG2 Private Data	MPEG2 Elem		
Other RPC	OMG IDL			MPEG2 Elem	MPEG2 PES						
	OMG UNO		MPEG2 Tunnel Table								
TP4	TCP		TCP								
CLNP	IP		IP		MPEG2 TS						
AAL5			AAL5(SAAL)		AAL5						
ATM											
SDH, SONET, DS3(45Mbit/s)/E3(34Mbit/s)											

図1 DAVIC プロトコルスタック (参照点A5)

常に有益な場でもあった。

米国HPとのアライアンス

1995年に入り、当時米国HP社と沖電気との間のアライアンスプロジェクトの1つとして、沖電気からOKI MediaServerを米国HP社に提案した。当時HP社でも計測器部門がVODサーバを開発しており、既に放送部門に入りつつあった。技術のリーダーはAI Kovalickであり、DAVICの有力メンバーでもあった。

沖はHP社のコンピュータ部門にソリューションパッケージの1つとして提案し採用された。この提案には篠塚社長(当時常務、CS開発本部長)、坂巻エンタープライズソリューションカンパニープレジデント(当時マーケティングセンター長)に随行して提案を行った。これを受けて、1996年春からシリコンバレーのSunny ValeのSilicon Dynamics社内にOKI MediaServerの販売のための拠点を設置し、松山 憲治他2名が駐在した。

OKI MediaServer V2/V3における主要なシステムには、愛知学院大学教育センター向けシステム、Telecom95出展システム(VODとVRを組み合わせた京都観光案内システム)、岡崎市視聴覚ライブラリ、NTT朝日新聞ビデオクリップ配信システム等がある。

インターネットへの移行

DAVICは国際規格として採択され、各社のVODシステムの開発も進んでいたが、本格的な商用サービスには至らないままにVODシステムへの関心は1997年頃から急速に薄れていく。

この理由としては、ネットワークインフラの未整備、コスト高、コンテンツ供給、またバブルの崩壊による景気の低迷等が上げられるが、基本的にはコンシューマ向けサービスでありながら、家庭までの広帯域アクセスネッ

トワークが普及していなかったことが第一の理由であろう。

また、先に述べたATMネットワークにおける非効率性、高コスト等の問題が認識され、当時一般社会に急速に普及しつつあったインターネットに対応してATMからIPに移行することになる。DAVICもDAVIC1.5においてIPプロトコルを採用し、ISO規格制定後、TV Anytime Forumへ発展的解消する。

コンピュータメーカ各社もVOD事業から撤退し始め、HPはVOD部門を映像専門企業のPinnacle社に1999年7月に売却した。Pinnacle社にCTOとして移ったAl Kovalickからのメールには次の一文があった。“VOD will return but only as related to the Internet.”

OKI MediaServerは既にMPEG over ATMの性能的な限界を感じており、製品化システムではIPプロトコルを採用していたため、この移行自体には自然な成り行きと感じていたが、一方でインターネット上のビデオストリーミングという強敵が現れた。Real Networks、Microsoft Windows Mediaに代表されるビデオストリーミング技術では、MPEG over ATMのような高画質は諦め、数百Kbit/s程度の帯域で、端末側のバッファにより、ネットワーク上の遅延や揺らぎを吸収する。したがって、画質やトリックプレイ等の応答性には限界があった。サービス品質には限界があったが、当時インターネットの急激な普及に対応してネットワークの広帯域化が進んでおり、またキャッシュサーバ等により、ストリーミングサービスは急速に普及した。

苦難の時代

プロジェクトの中断

97年頃を境にVODへの期待は急速に失われ、社内においても、折から研究テーマの選択と集中により、VODプロジェクトは研究テーマとして認められなくなった。予算は一切つかず、また組織変更により、VOD技術者は他のテーマにアサインされ、筆者も、OKI MediaServerの開発から、他事業部からの要請により、NTT GMN-CLのネットワーク管理システム、金融向けH.323TV会議システムの開発に移行することになった。

H.323開発

金融事業では消費者金融向けの無人契約端末が既に製品化されていたが、非常に多量のハードから構成されるシステムであった。また独自プロトコルであり、標準規格であるH.323への変更が要求されていた。

H.323規格準拠のTV会議システムの開発は、大きくH.323における制御プロトコル部分(MC)と、メディア

処理部(MP)の2つに分かれ、MCはDataBeam社のプロトコルスタックを導入し開発が進んだ。一方、MPについては、当時一般のネットワーク環境としてはISDNであり、その帯域制限から多地点間会議では集中型のMCU構成を採用し、MPが各地点から送信されてくる映像を縮小合成する必要があった。これを実現するためには非常に高速なCODECが必要になる。

当時のOKI MediaServer開発グループは、CODEC技術は研究所のCODECグループにまかせ、サーバおよびブレイヤの開発に注力していた。その時点で研究所内にはそのような高速ソフトCODECはないために、自ら高速なH.263CODECを開発する必要に迫られた。CODEC開発は、高橋 順一(当時OTSL)が担当し、約半年で非常に高速なH.263CODECを開発し、Pentium III 566MHz CPUで、QCIF画像に対してエンコード性能400fps、デコード性能3000fpsに達した。当時研開発内のCODEC部隊が開発していたH.263の30倍程度高速なCODECとなり、同時24人までの会議参加者の画像の重畳処理を全てソフトで処理でき、かつ高画質であった。CODECの素人が専門家よりも格段に高速なCODECを開発したことは研開発内でも議論を呼び、後日CODEC部隊とサーバ部隊が統合されるきっかけとなった。

H.323 MCUは、その後MPEG-4をサポートし、PC会議のエンジンとして、OKI MediaServerのコンポーネントとなった。また、VODエンジンとの連携など独自の機能を提供することになる。

総務省補正予算獲得とプロジェクト再開

H.263の開発は大きな成果であったが、NMS開発、JINI関連プロジェクト、超流通技術開発を並行して行っていたため、OKI MediaServerの開発は停滞していた。社内で研究資金がとれなければ、社外から獲得するしかないと考え、当時出ていた補正予算に応募することにし、総務省の学校インターネットその他に映像、QoS関連で提案し、幸い複数案件が採択され、必要な研究資金は確保できた。この提案は担当業務外であり、定時には作業ができないので、常に総務省への提案は定時後となった。また、提案書の作成も品川近辺のホテルに泊り込んで行った。

1999年夏に、これらを背景に、今後のブロードバンドネットワーク時代に向けて、OKI MediaServerの開発を継続すべきであるとの計画書を関連役員(前田常務、能勢研究開発本部長他)へ説明して廻り、了解を得た。

この結果、分散していたVODサーバ開発部隊を集め、さらに八王子のCODEC部隊を統合して、1999年10月に

マルチメディアネットワークラボラトリが発足し、VODシステムの開発に注力する体制ができた。

ビデオストリーミングフォーラム

総務省受注案件の1つでは、コンテンツ配信実験を行ったが、総務省からはコンテンツホルダを集めてコンテンツ配信実験をするようにとの指示があり、コンテンツホルダ、キャリアその他を廻って実験への参加をお願いした。実験対応だけではもったいないと、コンテンツ配信事業に関心を持つ企業への参加を呼びかけ、コンテンツ配信ビジネスのプロモーションのためのコンソーシアムとし、TBS、ぴあ、ムービーネットインターナショナル、東京めたりっく通信、東急CATV、日本テレコム等約40社の参加を得て、2000年夏にビデオストリーミングフォーラムが発足した。フォーラムの運営をはじめメディアサーバの事業展開では清水 豊明（当時 社会情報システム本部）の協力を得た。フォーラムでは、事業開拓に向けたさまざまなビジネスモデルの検討を行うと共に、MPEG-4のプロモーションを目的として、参加企業の協力を得て、ADSL、CATVおよび一般のインターネットへの分散型での配信を2000年12月より開始した。2000年大晦日には、TBSと共同で世紀越えイベントとして富士山六合目からのライブ配信を行った。この他にインターネット試写会、劇場中継「甞れ、松蔭」等を行った（写真1）。

本格的商用システムへ

アーキテクチャ変更

本格的な商用システムに向けて、従来のアーキテクチャをV4において大幅に変更することになった。

V3までのハードプラットフォームは、HP9000/HP-UXであり、アーキテクチャとしてはSMP（Shared Memory Multi-Processor）であったが、4-way システムで最大同時配信200ストリームとスケラビリティに限界が出ていた。配信性能の向上を求めて、超並列マシンCONVEX上に実装したが、I/Oサブシステムの性能限界がボトルネックになった。

初期のVODサーバは同時多数アクセス端末への対応という観点から SGI, nCube, Intel Paragon等米国並列コンピュータメーカーの製品が多く出ていた。しかし、SMPアーキテクチャあるいはNUMAアーキテクチャではプロセッサ間を接続する高速バスが必要であり、非常に高価なシステムとなってしまう。VOD



写真1 OKI MediaServer

システムは計算処理ではなく、単にストレージから読み込んだビデオデータをネットワークに配信するだけのシステムであり、プロセッサ間の相互インターフェースは負荷分散等を除いて不要であった。

このような観点からV4では、従来のアーキテクチャの大幅な見直しを行い、PCサーバをベースにした疎結合クラスタによる並列VODシステムを採用することにした。

また、コアネットワークのコストを考えると分散VODのサポートは必須であった。分散VODシステムでは、配信経路の動的選択、センターからの集中運用管理等、実用システムとして必要な機能を実装している。

また、ぶららネットワークにおける配信システムの構築、各キャリア、ISPの実験システムの要求仕様を反映し、商用コンテンツ配信システムとして必要な機能を盛り込んだ。さらに、メタデータのサポート、電子透かし等コンテンツ管理系の機能強化を行った。これらの機能の開発は山本 秀樹が行った。

サーバ-端末間インターフェースは、DSM-CC/CORBAから、RTSP等のIETF RFCに準拠し、業界規格になりつつあったISMA規格に移行した。

OKI MediaServerのバージョンを整理すると図2のようになる。

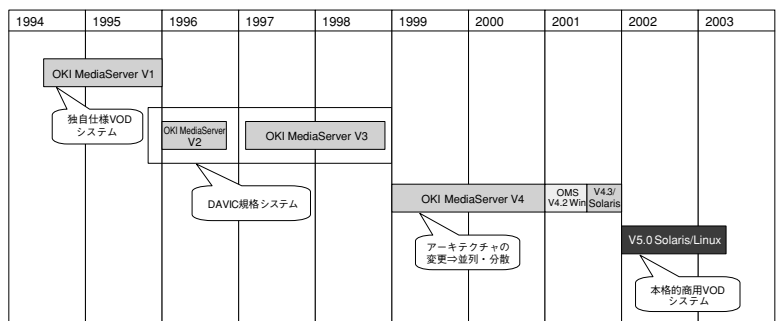


図2 OKI MediaServerの歴史

MPEG-4 ASPの開発

CODEC部隊が参加し、MPEG-4 ASP (Advanced Simple Profile) の開発が加速された。OKI MediaServerはMPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 を配信可能であるが、MPEG-4 ASP は独自開発のCODECであるという他に、MPEG-1/2に対して圧縮効率が高く、帯域の制限のあるインターネットでの配信にはMPEG-1/2に比較して非常に有利である。特に、急速に普及しつつあったADSLネットワークでは実効帯域が1~3Mbit/s程度であり、この帯域で有償サービス可能な画質の提供可能な現時点でコンテンツ配信事業を立ち上げるには有力な技術である。

MPEG-4 ASPは2001年12月にCODECができ上がり、デモ可能になった。既に年末であったが、開発者の呉と長坂はデモシステムを持って各社を廻った。あるユーザーは事前に比較のためのWMT8 1.5Mbit/s のコンテンツを用意し会議室のスクリーンに投影されていたが (WMTよりも良くはないだろうとの考えか?)、MPEG-4 ASPのデモの効果は大きく、「沖さん、やるね！」と画質を賞賛された。

大型商用システムの受注

2000年からADSLネットワークが急速に普及しはじめ、キャリア、電力会社がこれまでのストリーミングサービスよりもより高画質な本格的なサービスを目指して実験を開始した。この頃から本格的な大型案件が受注できるようになり、その代表的なシステムが、(株)ぷららネットワークス PlalaTVシステムとNHKアーカイブス「番組公開ライブラリ」である。

社内カンパニーへ

VOD市場の拡大が期待できるとの判断から、2002年4月より社内ベンチャーカンパニーとしてスタートすることになった。研究所の技術者と他カンパニのSE, 営業, 経理等の人材が協力して事業化を推進することになった。

本格商用システムに向けた開発

高画質な本格的コンテンツ配信サービスに対応してさまざまな機能拡張が必要となった。V4ではサーバアーキテクチャの大幅な変更が行われたのに対して、V5では商用に必要となる機能の整備が行われた。これらには、STB (SetTop Box), DRM (コンテンツ保護機能), アクセス制御, 課金インタフェース等がある。特にSTBは今後の商用サービスでは必須になりつつあるが、社内に製品がなく、また低価格なSTBへの要求、MPEG-4 ASP

をサポートする製品がないことから独自に開発することになった。ハード開発の経験がないため開発にはさまざまなトラブルが発生したが、現在商用に向けて出荷が始まっている。

また、サーバに関しても複数サービスプロバイダを同時にサポート可能な管理機能、QoS機能の強化等の開発が現在行われている。

おわりに

OKI MediaServerの開発を始めて、10年が経とうとしている。事業的にはまだまだであるが、現在大手キャリア商用サービス等への採用が決定しつつあり、2004年度から本格的な立ち上がり期待できる。VODシステムとしては他社に負けないシステムになったと言ってよいだろう。

OKI MediaServerがもし成功したと言えるなら、その要因には以下が考えられる。

- (1) 独自技術開発に拘った
- (2) 映像系技術者と情報系技術者が共同で開発

映像系技術者だけでは、一般に配信エンジン主体のシステムになる危険性があるが、情報系技術者が最初から開発することにより、サーバのアーキテクチャやコンテンツ管理等の上位機能を本格的な商用システムに耐え得るシステムとして構築できた。

- (3) 継続的に開発を行った

VODブームが去った後も継続して開発を行い、技術蓄積と製品開発を行った。

- (4) 良い顧客に出会えた

VODシステムは、長い低迷の期間を経て、現在実用化が始まりつつある。OKI MediaServerは現在非常に豊富な機能を持ったVODシステムとなったが、技術やユーザーニーズの変化を反映して今後も発展していくことを期待したい。 ◆◆

参考文献

- 1) 長坂：ブロードバンドにおけるマルチメディアストリーミングの展望と沖の研究開発，沖テクニカルレビュー192号，Vol.69 No.4, pp.6-9, 2002年10月
- 2) 新谷，長坂：ブロードバンドにおけるマルチメディアストリーミング技術その1，沖テクニカルレビュー192号，Vol.69 No.4, pp.46-49, 2002年10月
- 3) 呉：ブロードバンドにおけるマルチメディアストリーミング技術その4，沖テクニカルレビュー192号，Vol.69 No.4, pp.60-63, 2002年10月

筆者紹介

長坂篤：ブロードバンドメディアカンパニー プレジデント