超高精細デジタルシネマ

Research and Development of Super High Definition Digital Cinema

小野定康 Sadayasu ONO
藤井竜也 Tatsuya FUJII

藤井哲郎 Tetsuro FUJII

アブストラクト 本稿では、日本発の超高精細 4K デジタルシネマの開発とハリウッドをはじめとする映像専門家の間で高い評価を得るに至った歴史について述べる。それは決して平坦な道ではなかったし、これからも様々な問題に遭遇するであろうと予想している。しかしそれらがあっても、この超高精細画像を使う究極のコンテンツと呼ばれるデジタルシネマが最終段階に入ってきたことは確実に現在に至っている。

キーワード 超高精細映像, デジタルシネマ, ハリウッド, 光ファイバ, デジタル信号処理

1. はじめに

筆者らは、高品質な画質を要求される分野での映像コンテンツの流通を目的として超高精細 (SHD: Super High Definition) 画像システムの研究開発を進めてきた⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。当初は静止画像システムを開発ならびにその応用展開を進めてきたが、デジタルシネマをターゲットとして開発したものが水平方向 4,000 本、垂直方向 2,000 本の 800 万画素・超高精細デジタルシネマということになる。空間解像度は $4,096 \times 2,160$ 画素、各色 12 ビット、フレームレートは 24Hz であり、非圧縮時のビットレートは 7.6Gbps に達する。JPEG2000 符号化方式を用いて 250 ~ 500Mbit/s に圧縮している。超高精細デジタルシネマ画質は、35mm フィルムの画質と比較して同等以上と評され、高品質な画質が要求されるデジタルシネマに十分なスペックとなっている。

2002 年 11 月には、開発したシステムを用いて、ハリウッドにおけるデジタルシネマ標準評価機関である ETC (Entertainment Technology Center) において、同一の映像素材を 35mm 映画フィルム、2K ($1,920 \times 1,080$ 画素) デジタル映像とともに比較上映し、ハリウッド 7 大スタジオの映像制作関係者 100 名による上映評価実験を行った。その後、引き続き国内外で画質評価実験伝送実験を進め、超高精細デジタルシネマの画質はハリウッドをはじめとする映像専門家の間で高い評価を得る

図 1 ハリウッドの看板

に至る。2005 年 7 月には、デジタルシネマの最上位規格として 4K ($4,096 \times 2,160$ 画素) 解像度が定義され、DCI (Digital Cinema Initiative, LLC) によるデジタルシネマ仕様の最終勧告がされた。DCI は、ハリウッド七大メジャースタジオによりデジタルシネマの規格を制定する目的で 2003 年 3 月に発足した機関である。本稿では、筆者らによる超高精細デジタルシネマの開発から DCI の標準規格に寄与するまでの歴史を述べる。

2. デジタル信号処理技術の終着駅
— ハリウッドにて —

2.1 南カリフォルニア大学 ETC

ロス・アンジェルスは北と東が山に接し、南はリゾート地であるロングビーチを含む平地に開けており、西は太平洋に接した約 30 ~ 40km 四方の平地である。人口は約 380 万人でカリフォルニア州の全人口の約 11 % を占める大都会である。参考までに書けば日本人が好むサンフランシスコの人口は約 80 万人であり、ロス・アンジェルスとサンフランシスコの比較は人口で 5 倍、面積で約 10 倍の違いがある。このロス・アンジェルスの北部がハリウッドであり、あの有名な Hollywood と書かれたが看板が目印である (図 1)。このハリウッドの中心のハリウッド大

小野定康 正員：フェロー 慶應義塾大学デジタルメディア・コンテンツ統合研究機構

E-mail ono@dmc.keio.ac.jp

藤井哲郎 正員 東京都大学環境情報学部

E-mail fujii@tcu.ac.jp

藤井竜也 正員 NTT 未来ねっと研究所

E-mail fujii.tatsuya@lab.ntt.co.jp

Sadayasu ONO, Fellow (Research Institute for Digital Media and Content, Keio University, Tokyo 108-0073 Japan), Tetsuro FUJII, Member (Department of Environmental and Information Studies, Tokyo City University, Yokohama-shi, 224-8551 Japan), and Tatsuya FUJII, Member (Network Innovation Laboratories, NTT, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan).

Fundamentals Review Vol.3 No.2 pp.10-33 2009 年 10 月

図 2 南カリフォルニア大学の ETC の全景と入り口

通り (Hollywood boulevard) にある施設 ETC (図 2) が、最初の話の舞台である (ただし 2006 年に ETC は南カリフォルニア大学のメインキャンパス地区に移動している)。ETC はアメリカの名門大学である南カリフォルニア大学の施設であり、元はパシフィックシアターという名の有名な映画館である。南カリフォルニア大学はジョージ・ルーカス、ロバート・ゼメキス、ロン・ハワード監督たちを輩出した映画学部があるので、大学が映画館を持っていたとしても別に不思議ではないかもしれない。

2.2 超高精細デジタルシネマのデモ

ETC において 2002 年 10 月 31 日に私たちはここでハリウッドの技術関係者を招待して 800 万画素の超高精細 (SHD: Super High Definition) 動画像によるデジタルシネマのデモを行った。図 3 に示すのがそのときに配られたプログラムである。この超高精細動画像によるデジタルシネマのデモは当日出席した関係者から大きな賞賛を浴びる結果となった。このデモによって長かったデジタルシネマの標準規格を巡る議論は峠を越したといえる。すなわち超高精細動画像を国際標準規格とする動きが最終段階に入ってきた。こうした技術の詳細は後で述べるが、このデモでは ETC の 500 インチを超えるスクリーンを使って比較した。この比較はこの大きなスクリーンをそれぞれ田の字状に四つに分けて、様々なプロジェクトで同時に同じ作品を上映して比較した。上映した作品もハリウッドの協力を得て、35mm フィルムを原データにしたコンテンツが「The sum of all fears (トータルフィアーズ)」, アカデミー作品賞を獲得した「Unforgiven (許されざる者: 1992 年受賞)」, 「Braveheart (ブレイブハート: 1995 受賞)」, と 70mm フィルムを原データにしたコンテンツが「Far and away (遙かなる大地へ: 1992 年制作)」と画像評価テスト用作品という、これ以上は望めないといってもよい豪華な作品を使って行われた。ここで「…を原データにしたコンテンツ」といっているのは、それぞれ特別に保存されていた 35mm フィルムと 70mm フィルムからフィルムディタイザで画像データを作ったという意味であり、一般民生品としても売られているフィルムスキャナの本格版を用いたと思って頂ければよい。ここで本格版といっているのは 3,000 フィートの長さの映画フィルムを使えることと 1 こま数秒程度のスキャン速度を持っていることを指している。このときのデモ上映において特に 70mm フィルムを使った超高精細動画像は繰り返し上映を求められ賞賛され、多くの観客はスクリーンに近づいてある

DIGITAL CINEMA LABORATORY TECHNOLOGY DEMO October 31, 2002 SCHEDULE	
10:00	Introduction	Sponsors University of Southern California School of Cinema-Television Laser Pacific Media Corporate Lucastim, Ltd. Panasonic BBC Pacific Bell Sony Pictures Entertainment The Walt Disney Company TRW Inc. Twentieth Century-Fox News Technology Universal Pictures Viacom/Paramount Warner Bros.	
10:10	Section 1 - Triptych - Single, Double & Triple Stimulus (Paramount)		
10:50	Coffee Break - reset projectors		
11:15	Section 2 - Equal size and brightness (32 ft width) - A/B/C/D (Paramount)		
Noon	Lunch in Lobby		
1:00	Section 3 - NTT 4K - motion picture clips (Disney/Pixar, Universal, Warner Bros.) + other high resolution clips	Partner Organizations AFMA California Film Commission California Trade Agency Entertainment Industry Development Corporation	

図 3 南カリフォルニア大学 ETC におけるデモのプログラム

カットを静止させた画像を見ていた。これが限られた人しか参加できなかったで、知る人ぞ知るということになった歴史的瞬間であった。このときの様子の写真は URL⁽⁹⁾を参考にされたい。筆者たちはこのデモは 1895 年 12 月 28 日にフランスのリュミエール兄弟がバリの中心部にあるオペラ・ガルニエ近くのキャブシーヌ大通りに面したグラン・カフェにおける世界初の映画の一般公開に匹敵する大きな出来事だと思っている。

この賞賛されたハリウッドの超高精細画像デモはこの数か月前に準備して行えたわけではない。これは筆者たちの 1989 年ごろから約 10 数年にわたる研究開発があったからできたのである。そもそも何で研究開発に約 10 数年も必要な機器を開発していたのか、この経緯を後で詳しく述べるが、それは決して平坦な道ではなかったし、これからも様々な問題に遭遇するであろうと予想している。しかしそれらがあっても、とにかくこの超高精細画像を使う究極のコンテンツと呼ばれるデジタルシネマが先に述べたように最終段階に入ってきたことは確実になって現在に至っている。

3. 光ファイバでなければ

3.1 光ファイバ

筆者たちが前の章で述べたハリウッドのデモに使った超高精細画像機器をどのようなきっかけで開発を始めたのかを述べる。1987 年ごろの話である。この時代の通信ネットワークは市外回線、つまり電話局間をつなぐネットワークに光ファイバが本格的に使われ始めていた。これはそれまで市外回線は TV のアンテナと受像機を結ぶのに使われている同軸ケーブルと同じ構造でやや太めの同軸ケーブルを光ファイバで置き換えていたのである。置き換えを進めていた理由は光ファイバの方が細くて性能

図 4 光ファイバ(これはインテリア用である)

がよかったからである．ここで性能とはどれだけの距離をどれだけ高速なビットレートで接続できるかを指している．一般にこの距離と高速性は反比例をして、それらの積が性能の目安になる．光ファイバは釣り糸のような透明なガラスの糸であることはよく知られている．また図 4 に示すような細い束ねられた光ファイバがその端で様々な色に光るインテリアもあるし、その他似たようなものもかなりある．したがって透明なガラスの糸の中を光が伝わってゆくことは、電気が導線の中を伝わることよりも実感しやすいかもしれない．通信用の光ファイバは図 4 に示すものと異なり実は少し細工がしてある．それは図 5 に示すような中心部とそれを取り巻く外周部に分けられている．中心部をコア、外側の被覆部をクラッドといい、それらの違いは光の屈折率である．屈折率がクラッドよりもコアの方が高くなっていて、ある条件でこのコアに入った光はこのコアの中をほとんど減衰しないで伝わることになる．

光ファイバ技術の進展を背景に、筆者らはデジタルデータを送るためにネットワークに対する容量の制約がほとんどなくなったことを確信した．もちろんそれが数年先ではないが、10 年くらい先には何とかできると考えたのである．これが決して間違っていなかったことは現在の GbE (Giga bit Ether) の普及を見れば明らかである．筆者がそこで考えたことは、この光ファイバケーブルを使ったネットワークで何を送るのであるかという問題である．これに対する答えが 2. で述べたハリウッドでデモを行った品質の非常に高い動画像、超高精細動画像であった．

3.2 動画像のファイル容量

ネットワークでかなり量のデジタルデータが短時間に経済的に送れるとなると、何に利用すべきかは単純な結論しかない．文字よりも音声、音声よりも静止画像、静止画像よりも動画像という結論である．動画像は映画フィルムを思い浮かべれば分かるように、連続して撮影された静止画像の集まりであるからこの議論は非常に受け入れられやすい．これは PC で WWW (World Wide Web) を使っていれば実感できることであるから、現在では多くの人にとって自明に近いことであろう．文字コードには品質という概念がないが、音声、静止画像、動画像では品質という特性があり、品質を上げるとファイルの容量が大きくなる．大きなファイルを短い時間で送り受けするには高速のネットワークが必要である．高品質な音声、静止画像、動画

図 5 光ファイバの構造

像となる大きなファイルが使われるようになれば、時間が長くなるのを嫌って高速のネットワークが使われるようになる．これが現在 64kbit/s の ISDN より 10 ~ 30Mbit/s 程度の ADSL, 100Mbit/s 以上の光ファイバが普及しつつある原因である．

この動画像の画像品質を極限まで上げて行くことが、ネットワークで送るファイル容量の制限が緩くなるときの技術の進むべき方向となる．しかし最大の問題はこの動画像の画像品質をどこまで上げれば十分かということである．これに答えなければ、以上の議論は実際の展開を導く議論ではなく、単なる概説になってしまう．筆者が 1990 年ころ直面した問題はこの問題である．もちろんこの問題はその高品質な動画像を何に使うのかをある程度明らかにすることと、今後の技術の発展を考慮して十分な経済性を持つという条件のもとでなければならない．単に極限追求ならば、ある意味でこの問題は易しい．しかしそれでは物理学の問題となっても工学の問題とならない．この答えは次章で述べることであるが、筆者らが得た結論は簡単に 35mm フィルム映画程度であり、超高精細動画像であった．それにハリウッドは DCI 4K という名称を与えている．その答えにたどり着くまでの経緯をこれから述べる．

3.3 ブロードバンド

最近ブロードバンド (broadband) という言葉は市民権を得ていて、会社の名前に使われていたりして特に説明をする必要がないくらいになっている．多少の誤解を覚悟で言えばブロードバンドとは大容量のファイルを短時間で扱える動画像のためのネットワークの修飾語である．これは前節の説明から明らかであろう．具体的に言えば、ADSL, 光ファイバネットワークのことであり、これらは動画像をやりとりするために使われるのであり、即物的な表現を避けていることになる．

この究極のブロードバンドネットワークとされる FTTH は何を送り受けするために使われるのであろうか．実はこれはまだはっきりとしていないのである．つまり FTTH でなければ成り立たないサービスはまだ輪郭が不明りょうなのである．もちろん光ファイバの持つ高速性、つまり広帯域性から FTTH でも成り立つサービスは幾らでもある．この FTTH でなければ FTTH でもの間に大きなギャップがある．もっと簡単に言えば ADSL では不可能な 50Mbit/s 以上のネットワークで広く使われるサービス、通常キラーサービス (アプリケーション) と呼ばれるが、これが何であるかがよく分からないままに現在に至っ

ているのである。よく分からないままが言い過ぎとすれば、何かあるだろうという期待だけで FTTH の普及が進行している。しかしネットワークのビットレートに対する制約が緩くなるのに、それを利用してでしか実現できないサービスが見つからないのは明らかにおかしい。ネットワークはよく道路に例えられるが、これは高速道路を造っておいてそこを走らせる車がトラクターと軽乗用車くらいしかないことに相当する。

3.4 動画像サービス

FTTH でなければ実現できないサービスは高品質な動画像配信である。しかしその動画像が FTTH で余り使われない事態が続いている。そうになっている最大の理由は普通の画像品質の動画像が放送で使われており、FTTH でこの普通の画像品質の動画像の放送サービスを実現することのメリットが見えないことである。この事態に対応して、最も容易に思いつくネットワークでのブロードバンドサービスは、FTTH の特徴を放送では絶対に実現できないオンデマンド性に求めた VOD、DVD のネットワーク上での販売である。わざわざ AV ショップに行かなくても望むコンテンツを入手できるし、放送のように放送されるのを待つ必要もないことを特長とするサービスである。しかしこれはほとんど成功していない。その理由の詳細な分析をここでするつもりはないが、起こっている現象・事実として、安価に出回っている VTR、DVD を使うパッケージメディアの購入が借入れを出かけてでも行くことをユーザが受け入れていて、ここで述べたオンデマンドでの便利さは受け入れてないのである。

この状態を変えるためにはただ一つの方法しかない。ADSL 等では到底サービスできないまでに動画像の品質を上げたコンテンツを、ユーザにオンデマンドで供給することである。こうして研究開発されたのが超高精細動画像である。35mm 映画フィルムの画像に相当する超高精細動画像は約 100～300Mbit/s のネットワークが必要であり、これは光ファイバを使うならば対応できるが、ADSL を含めた他の方式では絶対に対応できない速度である。

4. 超高精細画像研究の黎明期 — 35mm フィルムの画像品質を明らかに —

4.1 映画フィルムの歴史

光ファイバネットワークつまり FTTH でなければ提供できないサービスとして、非常に高品質な動画像があり得る。そのような動画像は 35mm フィルム映画クラスの画像品質を持つフィルムを使わない動画像システムという結論が得られるのである。これは今でも同じである。以下にこれを簡単に説明する。動画像の記録・再生ということを確実に実現しているのは化学光学技術による映画とエレクトロニクス技術によるテレビしかない。テレビは SDTV と HDTV の 2 種類しかなく、映画は 8mm、16mm、35mm、70mm（撮影は 65mm）の 4 種類のフィルムサイズ規格があり、画像品質の範囲はテレビよりも非常に

広い。したがって映画を動画像の画像品質の基準尺度に取るとは非常に分かりやすい。映画の規格はフィルムサイズから見ればこの 4 種類しかないし、それらはほぼ倍の大きさのかなり大きなステップで区切られている。経験的に 8mm、16mm の画像品質は概ね SDTV と HDTV に対応し、70mm 映画はそのフィルムサイズから考えれば、非常に高品質であることは明らかである。しかもただしこの 70mm 映画は様々な事情からハリウッドでも 1992 年以降ほとんど作られていない。ハリウッドでも 35mm フィルム映画の画像品質を持つフィルムを使わない映画システムをターゲットにした研究はそれなりに進められていた。結論からいえばそのターゲットに到達するのは筆者らの方がかかるに早かったし、これはハリウッドも認めていることである。それが先に述べた ETC におけるデモにつながっている。

今日その 35mm フィルム映画の画像品質を持つフィルムを使わない映画システムがデジタルシネマ、もしくは D シネマと呼ばれるものとなった。ただしフィルム映画にはいろいろな規格があり、ここで述べたことはあくまでも非常に簡略化した概論である。この映画システムは

(1) 35mm フィルムを使わないこれと同等以上の画像品質の映画

(2) HDTV 以上の画像品質のテレビ

(3) 非常に画像品質の高い動画像のための PC

という言い方もできる。FTTH でなければ提供できないサービスとしての動画像システムを開発するにあたり、筆者たちが最初に考えるべき問題はこの画像品質がどのような規格となるかを定めることであった。映画フィルムは現在の 35mm、1秒 24 こま になってから約 70 年の歳月が過ぎており、これは相当に寿命の長い規格である。映画が 1秒 24 こまになったのはワーナーブラザーズ社が 1927 年に開発したトーキーシステム以後のことである。それ以前は 1秒 16 こまが標準であったが、多少の例外もあった。何しろ手回しで撮影していた時代もあったのであるから、きちんと 1秒 16 こまにすること自体が難しくもあった。1927 年以前のかかなり古いサイレントの記録映画等を今日のシステムで見れば、少しアップテンポの速い動きとなってしまう。これらは 1秒 16 こまを 1秒 24 こまとして表示するからこうした速い動きになる。意図的でないこま落とし撮影と同じことになる。もちろん 1秒 16 こままで表示すればどこちない速い動きはなくなるが、今度はちらつき（フリッカ）がひどくなるので通常は 1秒 24 こまとして表示している。

4.2 35mm フィルム

映画と普通のカメラに 35mm フィルムが共通して使われていることはよく知られているが、映画の一こまと普通のカメラの一こまは画像のサイズが 2 倍違うことは余り知られていない。図 6 を見て頂きたい。上が映画のフィルムであり、下が普通のカメラで撮影したフィルムである。ただしこれは普通のカメラで普通に使われるネガフィルムではなく、余り普通とはいえないポジフィルムを使っている。ポジフィルムを使った理由は映画の上映用ポジフィルムに合わせたからで、それ以上の意味はない。

図 6 映画フィルム画像とスチルカメラ画像

フィルムの両脇に空いているフィルム送りのためのパーフォレーションと呼ばれる穴に注目すると、映画は一つの画像が4パーフォレーション（パーフォレーション四つ）となっているが、普通のカメラでは一つの画像が8パーフォレーションとなっている。サイズが2倍違うことは明らかであろう。厳密に言えば、これらのフィルムの幅は同じ35mmであるが、パーフォレーションの形は微妙に異なる。しかしパーフォレーションの中央部間の間隔は同じである。DSC（Digital Still Camera）で200万画素を超える製品はプロ用として位置付けられているが、一般用では500～600万画素で普通のカメラの画像品質は得られるとされている。仮にこれらを信じるとすると、画素数は画像面積に比例するから

8パーフォレーション 500～1,000万画素

4パーフォレーション 250～500万画素

ということが成り立つ。したがって映画は250～500万画素のデジタル動画像システムで実現できるということになる。これでよいのか。もしこれでよいとすれば、HDTVを基にしたデジタルシネマの規格である1080P（1,080 × 1,920画素）の約200万画素は十分に根拠のある数字となる。この議論の結果は後で詳しく説明するが、1080Pの約200万画素で十分という決着にはならなかった。その理由は幾つかあるが、技術的観点から言えば普通のカメラとDSCの画像品質比較は最大でもB5程度の大きさの印画紙で行われるが、映画館で使われる大形スクリーンでの画像品質比較は全く異なるからであった。3～5インチの小さな液晶画面、例えばソニーのバイオ type U や携帯電話のディスプレイではSDTVとHDTVの差はほとんど分からないのと同様に、B5程度の大きさの印画紙での結論を大形スクリーンへ拡張解釈してはいけないのである。画像品質比較はどのような環境で行われるかで大きく異なることは当然であり、この結論は不思議ではない。

このテリトリ争いは映画という大きな経済活動分野の覇権をどちらが手中に収めるかということである。かつてテレビにより映画が押されまくった事態の再現を予感させることになり、フィルムピープルには絶対に負けられない争いであった。フィルムピープルの持っているこうした背景をこの議論では考慮しなければならないが、ビデオピープルはかなり独善的な態度でこの議論に望んだように思われる。今になって振り返るとビデオピープルと呼ばれるほとんどの人がきちんと300インチクラスの大形スクリーンに映写できるビデオプロジェクタで画像評

価をしていなかったのである。なぜならば1080Pのシステムと35mmフィルムの画像比較を正確に行うことは容易ではなかったからである。試作品レベルでも1080Pの1,080 × 1,920画素を大きなスクリーンに十分な明るさで映せるビデオプロジェクタはこの議論がなされている時期にほとんど存在しなかったのである。完全に1080Pを上映できて十分な光量を持つビデオプロジェクタは2001年3月にJVCが発表したD-ILAを使ったQXGA規格の製品（現在の製品名はDLA-QX1）まで存在しなかったのである。これでフィルムピープルに1080Pを受け入れるように迫ったのであるから、フィルムピープルが納得しなかったのは当然である。

4.3 規格の決定

筆者たちが直接会ったフィルムピープルの多くは縦方向に2,000画素必要だと言っていたし、筆者たちがNTTの研究所で1990年代初期に行った様々な実験でもこれが次第に裏付けられていた。2002年10月にロス・アンジェルス近くのパサディナで開かれた画像関係の最も中心的存在の学会SMPTE（Society of Motion Picture and Television Engineers）の会合でもフィルムピープル（ASC：American Society of Cinematographersに属する人たちは縦方向に最低2000画素以上必要だと言っていて、筆者たちの方針は決してオーバスペックでなかったことが確かめられて大変にうれしかった。なお脱線になるが、筆者を含めたエレクトロニクス系の画像関係者は画像の画素数を縦方向の画素で言う傾向がある。これはテレビのブラウン管の走査線から生じたものである。一方フィルム関係者は画像の画素数を横方向の画素で言う傾向がある。これはフィルムスキャナでの慣習から生じたものであろう。したがって超高精細画像2K × 4Kをエレクトロニクス系の画像関係者は2K画像と呼び、フィルム関係者は4K画像と呼ぶ。筆者がこのパサディナの学会に出席したときにこのことを知らず、フィルム関係者が4K画像と呼んでいるものを縦方向4Kの画像であると思っていた。もし縦だとすると横方向は8K近くの画素数となり総画素数は32M画素となる。1990年代はじめに35mmフィルムをこのくらいの画素数でデジタル化した経験があり、その結果はフィルム粒子のざらつきが非常に目立つ画像であった。このためにこの会合におけるこの4K画像が必要という議論を聞いたときに非常に当惑した。会合後に友人のアメリカ人に縦と横の使い方の違いを説明されて安心した。

様々な経緯があったが、とにかく縦方向2,048画素、横方向2,560画素の動画像を表示するシステムを1980年代の終わりごろに作ってみることにした。それは「ないない尽くし」の出発であった。要するに当時はHDTVの規格を上回るような機材はほとんどなかったのである。唯一の例外はCRTディスプレイであった。CRT（Cathod Ray Tube）ディスプレイだけはソニーと日立とBarco社がこうした製品を発表していた。ただし日立の製品はいろいろ手を尽くしたが入手できなかった。製造中止であったのか、他の理由であったのか余り詳しいことは覚えていない。とにかく入手できなかった。ソニーの製品とBarco社の

製品を入手したが、画像品質は格段に違いがあり、ソニーの製品（製品名 DDM: Data Display Monitor）をその後 10 年近く全部で 10 数台購入し使うことになった。ただし重さは約 100kg もあり、設置に十分な重さに耐えられる台が常に必要であった。1995 年にこのシステムをブリュッセルの EU 本部で開かれた G7 の会議で超高精細画像システムのデモ展示したときに、この CRT ディスプレイを使った。その会場でこの CRT ディスプレイを人の肩よりも高い位置に置くことになり数人で担ぎ上げたが、このときに設置を行っていた筆者の当時の部下の一人はこの 100kg の重さのお陰で危うく指をつぶしかねない事態が生じた。今考えても冷や汗ものであった。もう少し慎重に設置を進めるべきであったのだが、当時はこの EU 本部の建物が工事中で、設置準備時間も非常に短く、あのようなことになってしまった。このデモにおいてベルギーのフィリップ皇太子殿下（1960- ）が筆者らの画像を見られて、日本の HDTV は非常に綺麗だと感想を述べられた。実は厳密な意味での HDTV ではなかったのであるが、とにかくこのデモは筆者にとって非常に印象が深く、このときに息抜きに通った滞したホテルに近いベルギー王立美術館は今でも機会があれば度々訪れている。このソニーの製品は一応 2,048 × 2,048 画素の表示能力がカタログに示されていたが、実際の能力はこの 70～80% 程度であった。Barco 社の製品に至っては 50% 程度であり、だれの目にもこの違いは明らかであった。この CRT の能力について幅のある書き方をしたのは理由がある。それはこのくらいの高品質な CRT になると地磁気の影響を非常に受けるようになり、それをどのくらいまで補正するかが大問題になるからである。元々高品質な CRT には完全に解決できない問題がある。それは高精細にすれば CRT の画面を描いている電子ビームを細くしなければならない。電子ビームを細くすれば地磁気の影響を受けやすくなり画面が暗くなる。

なおこの DDM は当時から「最後の真空管」と筆者たちは呼んでいた。ただしこれは多少正確さを欠いていて、現在でも人工衛星に使われる進行波管が「最後の真空管」として居残っている。御存知のようにかつてのエレクトロニクスの主役であった真空管はトランジスタにだんだんと置き換えられて、超高周波領域とディスプレイが最後の牙城であった。超高周波領域も当初はガリウムヒ素に最近ではシリコンに取って代わられた。ディスプレイも液晶とプラズマディスプレイに取って代われ続けた。その最後として 1990 年代まで精細度と大きさで生き残ったので、「最後の真空管」であった。この最後の真空管を文字どおりに最後にしたのも筆者たちであった。この DDM に代わる液晶ディスプレイをシャープと開発して、現在航空管制の分野で使われつつある。これは液晶を得意としているシャープの辻相談役が DDM で表示された画像を横須賀の研究所で見学されて、直ちに開発を指示されて進められたのであった。この流れがシャープの 4 K 液晶ディスプレイの開発につながって、現在に至っている。動画像を表示しようとするれば、デジタル動画像データとディスプレイとこのディスプレイにデジタル動画像データを供給する装置、普通フレームメモリと呼ばれる装置が必要である。ディスプレイは既製品のこの DDM を使うこと

図 7 第 1 世代の超高精細画像フレームメモリ

にしたので、開発が必要となったのはデジタル動画像データとデジタル動画像データであった。そこでこれらの開発が始まった。

4.4 フレームメモリの開発

当時筆者たちの属していた NTT の研究所は製造部門を持っていないし、現在も変わっていない。このためにここで必要となったフレームメモリの製造は無論のこと、それ以前に設計すらできない。できるのは仕様を確定させること程度であり、なぜならばこれはプリント基板と LSI の設計を含むからである。まずこの装置、2,048 × 2,560 画素で毎秒 60 こま（フレーム）、最低でも 10 秒間動画像を表示をできるフレームメモリの開発を請け負ってくれるメーカー探しに筆者は明け暮れた。1 年近くいろいろなメーカーに頼んだが全部断られた。この当時の DRAM の容量は 64Mbit であり、256 M のサンプル出荷が予告されようとしていた時期であり、それらを使うことを当てにはできなかった。いろいろなメーカーに断られ続けて 1987 年に準備した億単位の予算が危うく余ってしまいそうな時期になっていた。そのころ富士山の近くの研修所で開かれた画像関連の学会（PCSJ: Picture Coding Symposium of Japan）に筆者が参加していた。この時期のこの学会の最大の話は後に H.261 としてまとまった 64kbit/s 程度のテレビ電話システムであり、画像品質に関しては SDTV の下であり、ある程度までということが前提である。筆者の目指す可能な限りの高品質化の方向とは対極にあった。

ここで三菱電機の研究所でベクトル量子化の研究で名を上げていた村上篤道氏（現三菱電機・役員技監）と会った。それまで余り彼と筆者は面識がなかったが、この超高精細動画像用フレームメモリの開発をそこで頼んでみた。彼はしばらく時間を置いてやりましようと言った。後でどうしてこれを引き受けたかを聞いたら、「低品質の画像ばかりをやってきて、少し嫌気がさし

てきたから」と答えた。それからの1年は村上篤道氏の率いる研究グループにとって苦難の連続であった。64kbit の DRAM を約 4,000 個用いて当時の最高速の D-A 変換器を使う基板設計は困難を極めたそうである。当時使えるできる限り大形のプリント基板を用いたが、余りの配線本数の多さに CAD システムがダウンしてしまうアクシデントも頻繁に起こったとのことであった。大形のプリント基板を用いたのは配線長を少しでも短くするためであり、大形のプリント基板を収容するバックボードもそれなりの配慮がされた標準品を使った。またもう一つのキーコンポーネントである最高速の D-A 変換器の周辺回路には当時最も高速な ECL (Emitter Coupled Logic) カスタム LSI が使われた。

いろいろあったが約1年後、この世界最初の動画を DDM モニターに表示できるフレームメモリは完成し納入された(図7)。大きさは小形の業務用冷蔵庫程度であり、非常に堅ろうなでき上がりでほとんど故障せず、かなり過酷な使用に耐えた。そこで見た画像の印象は今でも覚えているくらい強烈な印象があった。高品質な画像研究の価値はこの画像を見れば済むことであるとの確信を得た。これは今でも変わっていない。ただしこれには副作用があり、それは今でもつきまとっている。それは見ていない人にはどのように説明しても分かってもらえないのである。当然と言えば当然である。このために2001年からは海外でもデモを積極的に行い現在に至って、結果としてデジタルシネマの標準規格への道が開けた。ただしこのデモのために大きな費用と労力が必要であったことは言うまでもない。

このフレームメモリはその後容量を増やす増強が行われ(図8左は第2世代の超高精細画像フレームメモリ)、最終的に10数秒の動画表示までできるようになり約7年間使われた。これを用いて筆者たちの研究グループは超高精細画像の基本的な性質と動画圧縮の研究を大きく進めた。この時期ほど LSI 微細加工技術の進歩を実感したことはなかった。なぜならばこのシステムに使われる大量のメモリの大容量化と低価格化を実感したからである。言うまでもなくこれは LSI 微細加工技術のもたらす結果であるが、同時にこれが日本の LSI 産業の繁栄の最期であった。実感したというのは今の磁気ディスクに対する感じ方と同じである。ただし同じきょう体を使って2~3年で超高精細画像をこのフレームメモリに記録できる時間が数倍になるのは、磁気ディスクよりもはるかに強い印象を持った。恐らくそれは筆者にとって増設が容易な磁気ディスクシステムの容量の限界まで使い尽くすことは滅多にないが、フレームメモリを使う実験ではいつでもその容量の限界まで使い尽くし続けていて、いつもあと数秒、あと数秒記録できればと思っていたからであろう。またこのフレームメモリをその後の大容量メモリを使って小形化したものは商品化されそれなりの台数が売られ、様々な高品質画像の研究に使われた。その中にはスイス(チューリッヒの ETH: Eidgenoessische Technische Hochschule)に輸出したものもあり、輸出許可書や仕様書やマニュアルの英語化にかなり手間取ったこともあった。

しかし客観的に見てこれらの研究は余り注目されなかった。なぜならばこの時期は H.261 関係と HDTV の研究の全盛期であ

図8 第2世代の超高精細画像フレームメモリ(左)。
右はソニー DDM モニタ

り、ほとんどの人の注意はこれらに向けられていた。1993年にイタリアのトリノで開かれた画像の国際学会でこの研究内容の発表を行ったことがあった。私の講演に対する質問は「このシステムの実用化の時期は何十年後と考えているか」というものであった。確か放送関係の人の質問であった。この時代は画像研究者のほとんどは放送関係者であり、彼らからみれば、これから HDTV の時代を迎えようとしている時期にその先のシステムとは何だと思ったのであろう。もちろんこの時期にデジタルシネマという概念も言葉もなかった。

4.5 画像データの開発(1)

フレームメモリには画像データが必要となる。もちろんこの時期に超高精細のビデオカメラは片りんもなかったから、この超高精細画像データはフィルムを基に製作するしかなかった。どうすればよいかを十分に考えたが、これといった良い方法は見つからなかった。とりあえず、フレームメモリのテストには CG で作った画像データを使うことにして、これは外部の CG スタジオに発注した。この CG で作った画像データはそれなりのでき栄えであったが、完全なアンチエイリアス処理はしていなかったもので、よく見るとかなり雑音がのっていた。当時のコンピュータの能力にとってこのくらいの画像に対する完全なアンチエイリアス処理は大変な演算処理量であり、勘弁して欲しいといってきた。筆者は何が何でも CG でなく実写の超高精細画像データが欲しかった。それは超高精細画像データの画像信号としての特性が従来の HDTV の性質を単に延長した程度の特性になるのかどうかを知りたかったからである。もう少し詳しくいえば次のようなことである。HDTV は今でもインタレース(飛び越し走査)画像であるが、これには独特の性質があり、筆者たちは求めていた順次走査(Progressive Scan)の高品質動画画像とはどの程度の違いがあるのかを知りたかったのである。

画像圧縮をしたときにどのくらいまで圧縮しても、圧縮による画像劣化がほとんど分からないかを知りたかったのである。これは現在 $1 / (20 \sim 30)$ 程度と判明している。幅があるのは画像の種類に依存するためである。つまり圧縮の目立ちやすい画像とそうでない画像があるという当然の結果が得られている。

いろいろと考えたが結果として最もオーソドックスな方法で実写の超高精細画像データを作成した。何の工夫もなかったといわれればそのとおりであるが、今でもこれ以外の信頼できる方法は思いつかない。つまり 70mm の毎秒 60 こまを撮影できる映画カメラを購入し、これで自然映像を撮影して、それを特別に開発したディジタイザで一こま一こまデジタルデータにしたのである。ここで撮影こま数を毎秒 60 こまとしたことは自然な結論であり、これ以外の数値にする理由は全くない。それは DDM モニタが順次走査の垂直同期周波数が 60Hz だった、つまり毎秒 60 こまだったからである。これだけのこま数があれば十分に滑らかな動きが表示できると考えたからである。SDTV でも HDTV でもインタレースの 60 フィールドであるから、これをより密集にした順次走査の 60 フレーム(こま)は十分な動きを表示できるはずである。

では、なぜコストのかかる 70mm フィルム映画カメラを使ったのかの理由を説明する必要がある。それは簡単にいえば十分なマージン(余裕)を持った信頼性のある画像データが欲しかったからである。70mm フィルムの一こまはほぼ静止画像カメラのブローニーフィルムに等しく、このサイズならば $2K \times 4K$ 画素程度のデジタル画像データを得るのに十分であることを確認してあったからである。この時点で 35mm フィルムの解像度はどの範囲であるか余り検討がつかなかったの、信頼性を確保するために十分にマージンを取ったのである。今になってみればこれはマージンの取りすぎであったといわれれば半分同意するが、あくまで半分である。このときの経験は 2. で述べたハリウッドでのデモで 70mm 映画の「Far and away」を試して見ようとする判断に反映できた。つまり 800 万画素の超高精細動画システムは 35mm 以上の画像品質を持ち得ることを確かめてあったので、この「Far and away」をデモに使う意味があると自信を持てた。これが 35mm フィルムを使っていたのであったならば、自信は持てなかったであろう。これが ETC におけるデモの成功の伏線になるとは当時は考えもしなかった。70mm の毎秒 60 こまを撮影できる映画カメラというものがまた大変なものであった。このカメラは確が最大で毎秒 120 こままでの撮影ができたが、この場合時間は数分しか撮影できなかった。当然である。120 こまというのは通常の 24 こまの約 6 倍であり、それだけフィルムの消費量は大きいのである。

筆者たちがこのカメラを購入した当時はこれがアメリカから輸入された日本で 2 台目のカメラであった。1 台目は当時の NASDA (宇宙開発事業団) がロケットの発射時の記録に使っていたということであった。つまり普通の 35mm 映画カメラで撮影したのでは解像度が足りないので 70mm を使っていたのである。これを輸入してほしいと業者に言ったら、お決まりの煩わしい書類を作成することになった。それはそれで何とか作ったら、一度このカメラを見てみませんかということになった。興

図 9 70mm フィルムカメラとデジタルスキャナ

味はあったが見に行く場所を聞いてやめた。種子島の宇宙センターだということで、筆者は飛行機は慣れたせいか特に酔うことはないのであるが、船は苦手なのである。今でも船に乗ってられるのは 30 分が限度であり、それも 30 分も乗れば 1 日中大地が揺れているように感じるのである。このカメラの消費電力も数 kW オーダであり、照明用のライトを使うとすると、とても普通の電源では間に合わない。このために外でこのカメラを使って撮影したときは電源車を借りてきて使った。こうして苦労して撮影したフィルムには逗子・葉山のヨットハーバーの画像があり、これは後々まで超高精細画像圧縮の研究に非常に役立った。興味のある方は筆者たちの MPEG2 の著書⁽¹⁰⁾を参考にされたい。このカメラで撮影したフィルムは日本で現像ができず、アメリカに送って現像してもらった。もうこの当時は 70mm 映画はアメリカですら作られていなかったのであるから、映画製作が完全に衰退していた当時の日本ではこうしたコストのかかる映画製作などは皆無であった。70mm フィルムの現像などは日本に顧客が全くなかったのである。したがって現像所もそのための準備などはしておけなかった。

4.6 画像データの開発(2)

撮影した 70mm フィルムをデジタル画像データ化するディジタイザは今も当時も製品はなかった。ただしこれを作り上げるために使える部品といってもよい機器はあった。具体的に言えば 70mm フィルムを精密にフィルム送りする装置と、70mm フィルムに使えるラインスキャナである。もちろんそれぞれは別な目的に使われる製品であり、それらを用いてディジタイザに組み上げることが必要であった。こうしたディジタイザを組み上げて使うには幾つかの留意すべき点があった。それらは ① ほこりの除去、② 振動対策、③ 安全対策であった。フィルムをディジタイザでスキャンすると、空気中の小さなほこりがフィルムに付いて、思わぬ画像雑音となることはしばしば経験することである。数枚の 35mm フィルムならば、フィルムを取り出してエアガンなどで空気を吹き付けてほこりを飛ばして、再スキャンすることも十分に可能である。しかし映画フィルムはこま数が多いから、これがいたちごとになる可能性がある。つ

まり何度空気を吹き付けてほこりを飛ばしても、どこかのこまに必ずほこりが付いてしまう可能性がある。

これに対する対策は一つしかない。つまりほこりの少ない部屋、通常クリーンルームと呼ばれる部屋で機器を稼働させることである。当時の研究所にはハイブリッド IC 等を開発する部屋があったので、そこで機器を稼働させることでこの問題は解決した。通常クリーンルームは LSI 等の製造工場で知られている施設である。当然ここに入るには専用の衣類を着て専用の帽子をかぶることはよく知られているとおりである。筆者たちもそのようにしてこの機器を組み立てて動かした。このほこりと同じように非常にやっかいな現象として、機器に伝わる微小な振動がある。35mm フィルムを 2 K × 4 K でデジタル化すると 1 画素のピッチは

$$24\text{mm} / 4,000 = 6 \mu\text{m}$$

となる。ここで 24mm は 35mm フィルムの最大画像幅サイズであり、映画の場合はサウンドトラックにフィルムの一部が使われるので、これよりも小さな値にある。通常の建物ではこのくらいの微小な振動は常に何らかの原因で起こっているの、何も対策を取らないと画素ずれを起こす可能性がある。この対策は機器を全部をエアクッション装置に載せることで解決した。つまり電車・バス・トラック等のエアサスペンションと同じ原理である。こうした装置は市販品があるので、基本的には組合せで解決する問題である。しかしどのような振動に対処するか等はこの機材の選択にかかわり、専門家に相談することになった。幸いに光通信システムの研究者にはこうした機材の知識を持つ人がいて筆者たちはかなり助けてもらった。様々な機器を組み合わせ 70mm フィルムからデジタル画像データが得られる装置を完成させた。これは一コマ数分のオーダでしか動作しないので、動画像で 1 ~ 2 分でも

$$(1 \sim 2) \times 60 \times \text{数分}$$

ということになり、1 日かかって 1 時間分のデジタル化しかできなかった。このために一日中クリーンルームにいてもあったが、そうもいかないこともあり、安全のために遠隔監視システムで遠隔制御するシステムを使うことがあった。

こうして得られた画像データを先に述べたフレームメモリで表示できたのはフレームメモリが納入されてから数か月後（1988 年）のことであった。先に述べた DDM で見たこの動きのある自然画像は映画とは違って全くフリッカのない独特の画像であった。CG 画像とは異なり、普通の風景を撮影した画像であるために、全く自然に見えて一見窓から外を見ているような違和感のない画像であった。静止画像用に開発された DDM を使うことで心配した残像もそれほど目立たなかった。これにはほっとしたことを覚えている。1989 年になり幾つかの画像を 70mm フィルムからデジタル画像にして、それらを DDM で見る時期がしばらく続いた。特別に秘密にすることもないので、もちろん研究としてはそれなりに進展し、論文発表なども活発に行った。しかしほとんど注目を集めなかった。例外はアメリカから日本に来ていたヘアー氏であった。ヘアー氏が冒頭に述べたハリウッドのデモをアレンジしてくれて、彼との付き合いは既に約 20 年近くになり現在に至っている。

ここまで来れば、次の研究目標は明らかであった。いよいよ最初に目指したターゲットの映画である。最低でも 200 インチ、できれば 300 インチ（3.7 × 6.6m）以上の大形画像と 2 時間の連続表示ができる必要があった。それにビデオカメラもできれば必要であった。これらを実現するにはここまでの機材とは全く異なったシステムを開発する必要があった。そのための研究は明らかに CRT とフレームメモリの延長ではこれらは実現できない。それはだれにでも分かるくらい明白なことであった。200 インチの CRT 等は考えようもないし、幾ら LSI 技術が進んでも 2 時間の画像データを供給できる LSI メモリを使ったフレームメモリも同様であった。ここまで来たとき、すなわち新しい映画システムの基礎を確認したときに既に 20 世紀は終わりに近づいていた。映画は 19 世紀の末に誕生して約 100 年を過ぎていた。

5. 超高精細画像研究の発展期 — デジタルシネマへの展開 —

5.1 リアルタイムデコーダ

フレームメモリはその後 256Mbit の DRAM 製品が出荷されて、更になんかなり小さくなった。動画像と静止画像の研究用にかなりの台数が売られた。静止画像の研究用としては主に美術・医療用が主たる用途であった。もちろん画像データのやり取りのためにネットワークとの接続が前提であり、これには主にイーサネットが使われた。しかし超高精細動画を映画に必要な 2 時間分表示するためには画像圧縮が絶対に必要であった。それはこの超高精細動画のファイル容量を計算してみれば直ちに理解できる。

$$2K \times 4K \times 24\text{frame} \times 30 \text{ (RGB:各 10 bit)} \\ = 5.76 \text{ Gbit}$$

であるから、これが 1 秒間のビット数となる。1 時間では 5.76Gbit × 3,600 秒 / 8bit = 2.592TByte という巨大なファイル容量となる。もちろんこれは巨大ではあるが、ハードディスクの利用を前提にすれば扱えない容量ではない。現在 7TByte の RAID ディスクが標準的なサイズのデスクトップの製品として販売されている。仮にこれを DRAM で実現しても、CF (Compact Flash) 等の不揮発性メモリで実現しても大きさとしては同じくらいである。技術的には DRAM でも不揮発性メモリでも実現できるが、問題はこれらの価格が 3 ~ 4 けた上がってしまうことである。

しかしファイル容量を 1 / 10 ~ 1 / 30 程度に圧縮できれば、経済性が飛躍的に向上する。ネットワークでの利用も容易になる。もちろんこの議論は現在市販されている HD レコーダ若しくは同じ機能を持つ PC と同じ目的であり、違いは SDTV・HDTV が超高精細かの画像品質だけである。画像データをそのまま記録しておくフレームメモリの大容量化を画像圧縮技術により実現するには、圧縮した画像を瞬時に復元する機能が必ず必要になる。つまり画像データを外部に接続されたディスプレイ・プロジェクトに途切れることなく供給するという点ではフ

フレームメモリと全く同じであるが、全体として必要な記憶容量を小さくするために、画像データを圧縮して記録しておく方法を採用すると、小さくした画像を瞬時（リアルタイム）に復元する機能が必要になる。圧縮された画像を小出しにして瞬時に元の大きさに復元するからである。こうすれば外から見れば非常に大きな画像データを記録しているのと区別はつかない。この機能をリアルタイム画像復号と呼び、そのハードウェアをリアルタイムデコーダ（復号器）という。当然 HD レコーダもしくは同じ機能を持つ PC にもこのリアルタイムデコーダが必ず搭載されている。

筆者たちは表示できる画像の時間制限を取り払うために、超高精細画像用リアルタイムデコーダの開発に着手した。フレームメモリで記録できる 10 秒～数分では実験と研究には使えても、実際のアプリケーションでは実用性がないからである。このリアルタイムデコーダの設計のかねめはどのような圧縮法（アルゴリズム）を選ぶかである。筆者たちはこのリアルタイムデコーダに動画用アルゴリズムとして HD レコーダ若しくは同じ機能を持つ PC で一般的な MPEG-2（Moving Picture Experts Group-2）を使わずに、静止画像の圧縮用の JPEG（Joint Photographic Experts Group）を用いた。この判断は一見不思議に見える。なぜならば動画用の MPEG-2 を使えば圧縮効率が良いのに、あえて静止画像用の圧縮効率の上がない JPEG を選んだからである。一般にこの静止画像用の JPEG を動画圧縮に使う方法は Motion JPEG と呼ばれている。こうした名称があるくらいだからそれほど特殊ということではないのである。これを選んだ理由は以下に述べるように幾つかある。その最大の理由は MPEG-2 の規格は入力画像データ語長がそれぞれ最大 8bit であり、これでは高品質画像としての記録と再生に限界があることである。要するにダイナミックレンジと階調（この場合は色調）が高品質画像を追求する上で完全に不足するのである。もちろん MPEG-2 は CRT で動画を表示するために開発／策定された画像符号化アルゴリズムであるから、フィルムを超える画像品質の実現に適合しない部分があることは当然である。普通の DVD 等を CRT 等で見るには特に不足はないのであるが、最近の高性能な液晶ディスプレイ等では少し不足が感じられることがある。こうした液晶ディスプレイでは RGB の画像データ語長が 10bit となっていることが多いからである。この問題は最近の民生用の DSC やフラットベッドスキャナが大体 10～16bit 程度の RGB 画像データ語長を持っていることを考えれば容易に理解できることであろう。いずれにしても高品質の動画を追求する上で 8bit で十分ということではなく、高品質の動画にはより長い語長が求められる。参考のために述べておくと JPEG の画像データ語長に関する規格はベースラインシステムで 8bit、拡張システムで 8 若しくは 12bit である。私たちが開発した最初のリアルタイムデコーダはいろいろな問題から語長は 8bit であり、10bit にできたのは JPEG2000 を採用した第 2 世代機であった。それは後で述べることになる。

MPEG-2 が動画に対して開発された圧縮アルゴリズムであり、その特長は高い圧縮効率である。Motion JPEG に比べて同じ動画ファイルに対して 3 倍程度の圧縮効率の差が生じ

る。もちろんこの数値は画像の種類によりかなり大きく変化する。MPEG-2 の高い圧縮効率は動画をそれぞれがばらばらの単なる静止画像の集まりと見ないで、この静止画像間にある相関関係に注目することにより得られている。つまり動画を時間順序にしたがって並んでいる静止画像の集まりとして、その時間順序から生じる静止画像間の様々な共通性に注目して圧縮している。しかしこの共通性は符号化された画像データにも継承されていて、この画像データをユーザの都合で勝手な長さで切ると復号された画像品質上の問題を引き起こす。なぜならば切られた場所の画像データはその前後の画像情報が拡散されており、あくまで共通性で連続しているから十分な品質で画像が復元できるのである。それを勝手に切ってしまうとこの連続性を失ってしまうから、復号に必要な情報を失うからである。針金はどこで切っても端が崩れることはないが、布のロープは切ればその端が必ず解けて端が崩れることに対応する。フレーム間相関を用いた圧縮データにおける、この布のロープが必ず解けることに対応する性質は画像編集において最大の障害になる。編集は 1 こま 1 こま単位で画像のカットを切り出して、切り出したカットをつないでゆく作業である。これはフィルム編集でも最近のビデオの非線形編集でも同じであり、1 こま 1 こま単位で画像のカットを切り出せなければ、十分な編集ができない。ところがフレーム間相関を用いた圧縮を用いると、圧縮されたデータをこの編集の基本である 1 こま 1 こま単位で画像のカットを切り出しができなくなる。無理してこれを行えば切り出されたカットの画像が劣化してしまう。このために編集機器では絶対にフレーム間相関を用いた圧縮は使わない。Motion JPEG はほとんどが編集機器に用いられている。

筆者たちが超高精細画像のリアルタイムデコーダに JPEG を採用した理由は、編集を考慮したことに加えてもう一つある。それは MPEG-2 は画像サイズが固定されていて、勝手に大きくすることができないためである。これに対して JPEG には固有の画像サイズという概念がなく、画像サイズは処理時間とトレードオフになるのでユーザが決める。画像サイズを大きくすれば符号化（圧縮）と復号（伸長）により多くの処理量が必要になり、それはハードウェアの処理能力は一般に一定なので処理時間が長くなる。この処理能力が長くなることを避けたいならばハードウェアを増やしてやればよい。こうした柔軟性が JPEG の規格にある。MPEG-2 は画像サイズが固定されているために、この固定されたサイズ以上の画像をタイル状に張り合わせて作ろうとすると、できないわけではないが相当に厄介な処理をしなくてはならない。張り合わせた継ぎ目が滑らかにつながるようにするには、それなりの処理が必要になることがある。

圧縮アルゴリズムと画像サイズを確定させてしまえば、リアルタイムデコーダの設計製作は一本道になる。もちろん使用する JPEG チップの仕様、インタフェースなどそれなりのスキルは必要であるが、とにかく製作できないものではない。こうして超高精細動画のリアルタイムデコーダが 2000 年に完成した。このリアルタイムデコーダにはイーサネットワークが接続できるので、表示できる画像の時間制限はなくなった。ネットワークを経由して圧縮された画像データが途切れない限り画像を

表示できることになった。ネットワークに大きなファイルサーバをつなげておけば圧縮された画像データは幾らでも途切れずに供給できる。時間制限の厳しかったフレームメモリの時代が終わったのである。なお JPEG は現在そのその後継バージョンである JPEG2000 に移行しつつある。標準化は 2000 年 12 月に行われ、この JPEG2000 という名称にふさわしい結果とぎりぎりに間に合った。JPEG と JPEG2000 は圧縮アルゴリズムとして周波数領域の基本変換に前者は DCT (Discrete Cosine Transform)、後者はウェーブレット (Wavelet) 変換を採用するなどかなり違いがあり、相互に互換性はない。その代わりに JPEG2000 は圧縮効率と機能について JPEG よりもかなりの改善がなされている。

こうした経過を踏まえて筆者たちはハリウッドにおける第 1 回目のデモ (2002 年 6 月) まで使った初代の超高精細動画像リアルタイムデコーダには JPEG を用いた。しかしハリウッドにおける第 2 回目のデモ (2002 年 10 月) において使った第 2 代目の超高精細動画像リアルタイムデコーダにはこの JPEG2000⁽¹¹⁾ を用いた。このときの特性上の最も大きな変化はデータ語長をそれまでの RGB8bit から、RGB10bit に伸ばしたことである。これにより色再現性の問題が大きく改善され現在に至っている。今後のデジタルシネマに使われる超高精細動画像リアルタイムデコーダにはこの JPEG2000 を用いたシステムを改良した機器が使われるであろう。ここで改良という言葉を使ったのは、JPEG2000 のチップは今後 LSI 技術の進歩を反映させてより高速・小形になり、結果としてリアルタイムデコーダは小形になり、これに著作権保護のための暗号化、認証、電子透かし等の機能がこのリアルタイムデコーダに合体するであろうからである。最終的にここで述べたすべての機能が 1 チップ化されるまでに数年の年月しかかからないであろうと予測され、恐らくリアルタイムデコーダはプロジェクタの中に組み込まれてしまうであろう。

5.2 プロジェクタの開発

映画の発明が大画面に動きのある画像を投影したリュミエールに帰せられることから分かるように、大画面に高品質 (鮮明) で十分な明るさを持つプロジェクタは映画の核である。映画において約 100 年間フィルムが使われた理由は、フィルムプロジェクタ以外に高品質で明るい大画面の動画像を投影できる装置がなかったからである。もちろん、

- (1) 高品質
- (2) 明るい
- (3) 大画面

のいずれかを欠いたシステムならば存在したし、存在しているものもある。しかしそれらは (2) と (3) を満足しても、35mm 映画フィルムプロジェクタ並みか、それ以上の画像を表示できる装置はなかった。こうした装置として LED を使った大形ディスプレイ、マルチビジョン、アイドホール等があげられる。この 3 つを同時に満足するビデオプロジェクタは最近になりようやく開発され、大変に興味深いことに鏡を使うという共通点を持つ

ている。それらは一つが DLP (Digital Light Processing) システムであり、もう一つが D-ILA (Direct-Drive Image Light Amplifier) システムである。ただしどちらも鏡を使うことと、光の利用効率 (開口率) がいずれも 90 % 程度になっていることは共通しているが、動作原理には全く共通点がない。

リアルタイムデコーダの開発を積極的に進めた時期に、JVC 社から D-ILA で 2,048 × 3,840 画素で 5,000ANSI Lumen のプロジェクタを開発できるとの連絡を受けた。D-ILA というのは要するに反射形液晶のことで、ソニーから発売された SXRD (Silicon X-tal Reflective Display) もこの形式に分類される。反射形液晶は当初バックライトのいらぬ PC 用直視形ディスプレイとして開発されたが、結局本格的に発売されることなく終わった。しかし反射形液晶はサイズを小さくしたプロジェクタ用としては本格的に利用されることになった。この JVC 社のプロジェクタの納入を発注後、筆者たちは一日千秋の思いで待ち構えていた。納入は 2001 年のことであった。納入に先立って久米浜にある JVC 社の研究所講堂で見た画像はほぼ満足すべきレベルであった。もちろん幾つかの小さな画像欠陥があったし、動作も多少不安定なこともあったが、まずまずの成果であった。このとき点で著者は本当に映画からフィルムをなくすることができると思った。すなわちフィルムピープルが満足してくれて、かつ筆者たちが画像についていろいろ言い訳をしなくて済むシステムがようやくできたと感じた。しかしそこまで行くには解決しなければならない幾つかの問題があり、それらをクリアしたのはそれからほぼ 2 年後のことであった。

なおこのとき期に筆者たちが気になっていたのは DLP の開発動向であった。フルサイズの HDTV 規格の DLP 素子、正確に言えば DMD (Digital Micromirror Device) の発売はアナウンスされたまま数年の年月がたっていた。このチップは 2003 年になり供給され、Christie 社、Barco 社からフル HDTV 規格のプロジェクタが発売されている。しかしそれらは超高精細画像の 1/4 の画素数である。フル規格の超高精細までの距離はかなりある。この点については D-ILA が一歩先を行っている。DMD はいわゆる MEMS (Micro ElectroMechanical System) に分類される電子部品と機械部品の混合デバイスである。この種のデバイスは機械部分の全くない普通の LSI と異なり、その進歩が緩やかである。DRAM の場合微細加工技術が一段階進むと、例えば現在の標準的な 65nm デザインルールから 45nm デザインルールになると、その容量は 16Gbit から 64Gbit に一挙に 4 倍になる。MEMS でもデザインルールの発展で進歩はするがこのような急激な進歩はほとんど期待できない。それに加えて、DMD はすべての特許を TI 社が抑えていて、その製造は独占的に行われている非常に珍しいデバイスである。このために製造技術が TI 社だけにあり、製造競争がないので製造技術の進歩はほかのデバイスに比べると遅いように思われる。こうした事情から TI 社が 2K × 4K 規格に対して DLP でどのように対応しようとするのか現在もよく分からない。現在予想できるのはこの規格の DLP が発売されるまでにかかなり時間がかかるであろうということだけであり、TI 社はこれについて 2009 年末の時点でほとんど何も言っていない。

5.3 デジタイザ

リアルタイムデコーダとプロジェクタに加えて、デジタル画像データがあれば、とにかくデジタルシネマは実現できる。これは超高精細画像でも、HDTV / SDTV でも共通である。このデジタル画像データを作成するには三つの方法がある。それらは

- (1) ビデオカメラを使う
- (2) CG 技術で画像を描く(レンダリングする)
- (3) フィルムデジタイザでフィルムから作成する

である。これらを混合して画像を得ることもあるが、とにかくこの三つが基本となることは将来も大きく変わることはない。超高精細画像では(1)だけが2002年までなかった。2002年にオリンパスとJVCが発表した超高精細画像ビデオカメラが世界で最初のシステムである。HDTV / SDTV ならば(1)~(3)すべてあり、既に様々な形で使われていることはよく知られている。実は(1)~(3)は相互に関係しており、(1)(2)(3)の組合せは映画製作の基本技術のDI(Digital Intermediate)として定着している。

35mm フィルム映画1本全部をデジタイザでデジタル化することは2001年には既に可能になっていた。もちろんこのデジタル化にそれなりの時間とお金がかかったが、2002年3月7日に私たちは銀座のヤマハホールで「トゥームレイダー(Lara Croft:Tomb Raider)」(130分)をネットワーク配信で上映した。このデジタル化と色補正はイマジカ社に依頼したものであり、この上映はネットワーク配信されたものであった。もちろんこれ以前にも作品全部をデジタル化したことはあったが、130分に及ぶ長編をデジタル化し上映してネットワーク配信し、全く問題のないことを確認できたのは筆者たちに大きな自信となった。もちろんこれは映画の全面的なデジタル化に致命的な問題がないということを実証してみただけであり、実際のビジネスとしての問題点も明らかになった。何よりももっと高速の35mm フィルムデジタイザがデジタルシネマには不可欠であることを痛感した。リアルタイムで動作する35mm フィルムデジタイザが必要であり、このときの35mm フィルムデジタイザはデジタル化するのに1こま数秒かった。

5.4 ファイルサーバ

超高精細動画の画像データ容量は非常に大きく既に述べたように静止画像として1枚240Mbit、動画として1秒当り5.76Gbit = 720MByteにもなる。研究を始めた当初の1990年初めころはこの問題はそれなりの対応が必要であった。しかしその後の磁気ディスク(HDD: Hard Disc Drive)の発展は急激であり、10年で100倍という容量の伸びをみせた。これは記録媒体の材料として磁性粉の代わりに特殊な金属薄膜が利用されるようになったことと、これに加えてこの記録媒体から信号を取り出す磁気ヘッドの当初は磁気抵抗(MR: Magneto-Resistance)

効果を利用したMRヘッド、その後巨大磁気抵抗効果(GMR: Giant Magneto-Resistance)を利用したGMRヘッドの採用の結果である。今後もしばらくこの勢いで容量は伸びると予想されている。それは金属薄膜とGMRヘッドの改良に多くは期待できなくても、垂直磁気記録方式の実用性が見えてきているからである。

最近では筆者たちは超高精細動画のファイルサーバに必要な磁気ディスクは3.5インチで容量が1TByteクラスの市販品を購入すれば間に合うことになった。正直に言えば筆者たちは特に何もしないで済むようになり、必要な容量と速度のファイルサーバが入手できるようになった。それも筆者たちの期待以上のペースで低価格化と小形化が進んでいる。この超高精細動画ファイルサーバの構成に関してそれなりに関心を払ったのは10年以上前に高速RAID(Redundant Array of Independent Discs)を捜していたときであり、それ以降は市販品を組み上げれば間に合うようになった。もちろんこれは磁気ディスクの継続した高性能・低価格化の結果である。恐らくこの傾向はまだまだしばらく続くと思われる。

したがって現在の超高精細動画ファイルサーバはやや大形のデスクサイド形のPCの形になっている。国外におけるデモにおいてもこのPCの形をした超高精細動画ファイルサーバ1台に圧縮した2時間程度の超高精細動画データを記録して、そこからGbEの光ファイバケーブルをつないでデモを行っている。これはPCに余り興味のない映画人には非常に興味深く見えるらしい。なぜならば2時間の映画は約6本の3,000フィートのフィルムになり、その重さはフィルムケースを含めると約40kgになり、大きさも全部を積み重ねると30インチクラスのCRTを使ったテレビくらいになる。重さと大きさにおいて既にフィルムは抜かれているからである。PCの形をした超高精細動画ファイルサーバ1台の重さは約10Kg弱でしかない。

5.5 ネットワーク

デジタルシネマは3.で述べたように光ネットワークのクリアアプリケーションとして筆者たちは開発してきた。この10年に光ネットワークで起きた特徴的なことはLANと通信会社の使う光ネットワークが融合してきて、区別がなくなったことである。具体的に言えば一般向けのGbEが通信会社の使うSDH/SONET(Synchronous Digital Hierarchy/ Synchronous Optical Network)と同じレベルの性能に達したのである。これは技術的に言えばパケットと呼ばれるデータの集まりと連続したデータストリームを同等に扱えるということであり、ビット列に空きがあるパケットと空きのないデータストリームが同じになったということである。こうした状況になれば、一般向けのGbEと通信会社向けのSDH/SONETでは出荷される量が異なるから、コストもこの出荷量に比例して下ってくる。どちらが今後有力になるかは論じるまでもない。

これは光だけでなく通信一般に起きている現象の一断面でしかない。すなわち電話でもデータ通信でも

私的ネットワーク → 高機能

公共ネットワーク → 高信頼

という形で長らく発展してきた。例えば電話では会社、若しくは家庭内で使う電話は様々な便利な機能が付いていた。このためにこうした電話機にはこの機能のために幾つものボタンがついていた。一方公共用の電話は POTS (Plain Old Telephon Service) という言葉が象徴するように相手にダイヤルして話せればよく、要求されることはいかなる状態でも安定した通話ができることであった。これは約 10 年前までの状態、正確に言えば携帯電話の驚異的普及前の状態であった。コンピュータ間通信でも LAN においては高速性を含めて多くの資源（各種入出力機器、磁気ディスク、…）の共用がなされ、それ以外では Piont to Piont の高信頼な接続が要求された。この接続ではまず遠くのコンピュータを自分が端末として使えることと自分の手元のマシンにあるファイルを遠くの通信回線をつながつたマシンに誤りなく転送できることが要求された。これが今日まで PC 間通信の基本となった Telnet と FTP である。これらは常に人間が指示する機能であって、その機能はそれほど高いものではない。Telnet は自分のマシンをキーボードとディスプレイだけのダムターミナルにエミュレーションしているだけのことであり、FTP はある PC にある指定されたファイルを指定された PC に送るだけである。これでは何かを使用とすればすべて指示が必要であり、その指示なしに目的とした処理が自動的に進むわけでない。

その後サーバクライアントシステム、エージェント、オブジェクト指向といった考え方がプログラムに導入されて、PC の高機能化が進んで、それとネットワークが堅く結びついて今日に至っている。今日ではネットワークにつながらない PC はまれであり、無線技術を含めてネットワーク接続の傾向がネットワークを急速に拡大させている。その結果としてコピキタスという言葉が使われている。ただしこの神学用語になじめない人は Mobile といっても何の問題もない。少なくとも意味を取り違えることは全くない。今日ネットワーク全般に要求されていることは、高機能で高信頼であり、これを実現してゆけば先のような区別は全く意味がなくなる。事実携帯電話の機能はもはやどの内線電話機よりも高くなり、内線電話機とはデザインの問題でしかなくなりつつある。PC ネットワークも IP-VPN (Internet Protocol-Virtual Private Network) により速度と機能の面でも信頼性の面でも LAN と距離を限定しない WAN (Wide Area Network) との区別があいまいになってきている。これは LAN に信頼性を高める保守監視機能を追加して実現されているものであり、これらは LSI 技術の進歩により実現されている。

いずれにしても超高精細画像が必要となる 300 ~ 400Mbit/s のネットワークは GbE を利用すればよいようになり、これも前節で述べた磁気ディスクと同じように今日では特別な機器を用いる形ではなくなった。事実、2002 年 10 月にアメリカで Internet2 で行われたデジタルシネマのデモでは GbE をユーザ・ネットワーク間に使って 3,000km 離れたシカゴ・ロス・アンジェルス間の 300Mbit/s の IP ストリーム伝送が成功した。つまり機器としては LAN とシカゴ・ロス・アンジェルス間に同じモノを使い、普段と違っているのはネットワークだけであっ

た。こうしたネットワーク実験は今では普通のこととして日米間で様々な実験が行われている。

5.6 画 像 品 質

人間の目がどのように機能しているか、正確に言えば人間の目と脳でどのようにものを見ているかはまだよく分からないことが非常に多い。分かっているのは全体のほんの一部だけであることだけということが分かっているにすぎない。4. で述べた 8 パーフォレーションの 35mm フィルムの画像と DSC の比較からみれば、4 パーフォレーションの映画フィルムの画像が 2M 画素でなぜ不十分という人が多いのかを、現在説明できる範囲で説明する。画像品質を左右する、影響を与える要素は非常に多く、それらを挙げ尽くすことはここでは省略するが、次のものは重要な要素である。

- (1) 画像の大きさ
- (2) 画像を見る距離
- (3) 画像を見る環境
- (4) 動画画像か静止画像かの区別

少なくともこれらを一致させないで画像品質の評価を行っても、それはほとんど決定的なことはいえない。実際にテレビや印刷を中心とする様々な目的のカラーマネージメントを行うには (1) ~ (3) が決められている。これについてここではこれ以上を詳しく述べないが、このことは日常でも普通に体験することで特に目新しいことではない。

35mm フィルムをどのくらいの印画紙に焼き付けるかで画像品質は変わってくることはよく知られている。写真屋の店頭に同じフィルムを様々なサイズに焼き付けた例が示されていることが多い。日本では手札版 (79 × 117mm) ~ L サイズ (89 × 132mm) が多く使われる。このくらいの大きさの印画紙であれば 35mm で十分であることは多くの方が体験しているとおりである。しかしこれより大形の A4 サイズ位の四切 (240 × 290mm) ~ 大四切 (260 × 340mm) には 35mm は不足であり、画像を見ればばやけていたりフィルムの粒子が見えたりして、これより大形のブローニーフィルム (幅 60mm でフィルムを送るパーフォレーションがない) が必要なこともよく知られている。この例からも分かるように画像の大きさを決めずに画像品質を述べることはナンセンスである。画像を見る距離も日常の体験することであり、画像から余り離れば細かい部分は視力の関係で区別がつかなくなる。視力に個人差はかなりあるが、それがどうであろうとも余り離れば細かい部分が見えなくなることは変わりがなく、個人差はその程度の違いにすぎない。

最近ではスポーツイベントや繁華街の交差点や競技場などの LED の表示装置は近寄って見れば画像としては評価以前という品質である。カラー印刷された画像をルーペでのぞき込んだように見える。しかし数十メートル以上離れば表示されている画像が普通のテレビの SDTV でもそれなりの画像に見える。もちろんこれを観賞用の画像として使うことはあり得ないが、動

画像としてある程度の役割を果たすことは事実である。

画像が見る環境で大きく変わることは様々に体験できるが、最も有名なものでは夕日が大きく見えることであろう。すなわち昼間頭上にある太陽をサングラスをかけてみる大きさと夕日が山の端に沈む大きさは明らかに後者が大きく見える。どちらも人間の目に入る画像の大きさ（視野角）は全く同じであるはずであるが、違って見えることは事実である。どうしてかという説明はここでは省略する。視野角ということだけで説明できないことがあることは画像品質の議論でも重要であり、映画館のスクリーンの視野角を前提にホームシアターの議論をしても、議論では詰めきれない部分が生じる。もう少し具体的にいえば、映画館でスクリーンから a メートルの距離で画像を見たとする。自宅でテレビから b メートルの距離で画像を見たとする。もちろん

$$a > b$$

である。このときにスクリーンとテレビの画面を見込む視野角が同じであったとする。この場合同じ信号から映写し表示した画像は常に同じ品質に見えるであろうか。筆者の用意した解答は「見えることもあるが、見えないこともあり、常に同じに見えるということだけではない」である。

実は先に述べた（１）～（３）を違えた場合に画像品質はどのようになるかについて一般的に答えられないというのが事実である。つまり 4. での 8 / 4 パーフォレーションの話は同じ条件で比較すればかなりことがいえるが、その条件を変えてしまえば、何ともいえず主観評価に依存するしかないのである。そこに 8 / 4 パーフォレーションを画素数を定める根拠にしようとしても、それは先に述べたように「十分である場合もあるが、不十分な場合もある」となり、十分な場合はアニメーション画像、CG 画像等であり、不十分とされる場合は普通に撮影された画像の場合であることが経験的に知られてきている。この結果がハリウッドの人たちを含むフィルムピープルのいう 35mm フィルムの画像品質を確保するには 800 万画素必要という結論につながっている。それが筆者たちの開発してきた超高精細画像に一致したことは決して偶然ではなく、正統的な技術の結論であった。なお動画像と静止画像を比較すること自体違うものを比較するのであるからナンセンスという面もあるが、一般に動画像の方が静止画像にくらべて画像品質の評価が甘くなる傾向について述べておく。これはある程度の一般論としては事実である。しかしこれは画面全体を漫然として見ている場合であり、最初からあるものだけに注目して見ている場合には当てはまらないこともある。

6. 超高精細画像研究が標準規格へ — デジタルシネマへの本格展開 —

6.1 山が動いた（１）

新約聖書に起源のあると思われる「山が動いた」という言葉は、現在解説なしでも「あり得ないと思っていたことが現実起こった」「だから努力はし続けるものだ」という意味で使われ

る。筆者たちにとって、超高精細画像研究が標準規格になりつつある現状は正にこの言葉どおりであった。蛇足ながらこの言葉は共観福音書の一つであるマルコの福音書でイエスが言ったとされる…この山に向かって、『動いて、海にはいれ』と言って、心の中で疑わず、…（11 章 23 節：日本聖書刊行会・新改訳）が与謝野晶子の詩「山が動いた」に使われて日本に定着したものと思われる。いずれにしても分かりやすい比喩である。しかし同時に私達はあの世紀の超難問、フェルマーの最終定理を解いたアンドリュー・ワイエスの証明に関して、その基礎を準備した志村五郎が述べた、「だから言っただしょう」も同時に筆者たちの偽らざる感想である。つまり宝くじのような単に運だけではなく、なすべきことを十分にしたその結果にすぎないとも感じている。以下に超高精細画像研究が標準規格になるまでの経過を簡単に述べる。筆者たちは決してこれまでの研究成果を秘密にしたことはない。むしろ積極的に公開してきた。一般の人たちへの公開は

（１）2001 年 6 月 22 日

慶応義塾大学三田キャンパス北新館ホール

（２）2001 年 7 月 19 日

慶応義塾大学三田キャンパス北新館ホール

（３）2001 年 11 月 13 日

東商ホール（トウキョウ・シネマ・ショー）

（４）2002 年 3 月 7 日

銀座ヤマハホール（デジタルシネマ国際シンポジウム）

（５）2002 年 3 月 14 日

慶応義塾大学三田キャンパス西校舎ホール（デジタルシネマワークショップ）

で行ったきた。こうした日本におけるデモの反響は残念ながら、それほど大きいものではなかった。といってもこれは東京だけのことではないかといわれるであろう。決して東京＝日本ではないはずであるとの議論が成り立つ。しかし少なくともこのデモを契機としてシステム開発、コンテンツ作成等への協力の申し出等は全くなく、その後も同様の状態が続いている。このとき期に画像品質は格段の進歩とネットワーク配信の実用性を示したにもかかわらずである。2002 年 3 月 7 日の銀座ヤマハホールのデモ以降の画像品質は十分な色調整を行っていて、35mm フィルム以上のレベルに達していて、普通の人にはフィルムを使っているのかどうかの区別が難しくなっていた。またこのときは飯田橋のファイルサーバを置いて、そこから光ネットワークで銀座のヤマハホールに画像データを流した。なおこのとき期のリアルタイムデコードは JPEG であり、RGB 各 8bit であった。

こうした日本における反響と対照的なのはハリウッドにおけるデモの反響である。2001 年 8 月のコンピュータグラフィックと関連技術に関する国際会議・展示会 SIGGRAPH2001 で筆者たちが行った超高精細画像のデモはハリウッドの人たちに衝撃的な影響を与えた。SIGGRAPH2001 の見学者たちの口コミで徐々に見学者が増えてきて、ハリウッドの映画関係者との様々な

形で議論が活発に行われた。このデモによりハリウッド関係者は 35mm フィルムと同等以上の画像品質のデジタルシネマがもう技術的に十分に可能なレベルに来ていることを実感したのである。このデモは直ちに 2002 年 6 月のハリウッド・パラマウント劇場におけるデモへとつながった。これ以降のデモにおいてハリウッドは画像品質評価にアカデミー賞受賞作品 35mm フィルム等を提供してくれて、日本における反響とは全く異なった積極的な展開となって今日に至っている。このデモはパラマウント社副社長のギャレット・スミス氏の尽力で実現したものであり、彼と筆者たちの親密な交友は現在まで様々な形で続いている。パラマウント劇場はハリウッドの中心部にあるパラマウントスタジオの中にあり、一般公開用の映画館ではなく、パラマウント社が公開のための最終判断をするための映画館である(図 11)。この映画館のスクリーンは約 600 インチと巨大であり、座席数もゆったりとしたスペースを持つ座席が 500 以上あるという大きなホールであった。この巨大なスクリーンを利用して、同じ作品を片方は 35mm フィルム、もう片方は超高精細画像システムの画像を同期させて同時に上映するサイドバイサイドの比較が行われた(図 12)。この比較は最もシンプルであり最も結果が明確に分かる。この結果を要約して述べれば、プロジェクタとリアルタイムデコーダの性能が向上すれば、確実に 35mm フィルムシステムを上回る画像システムが実現できるであった。より詳しく述べれば、光量の十分な 35mm フィルムプロジェクタと光量の十分とはいえない超高精細画像のビデオプロジェクタの比較ということになり、それぞれの特長がよく理解できた結果となった。多少の誤解を覚悟でいえば、CD と LP の比較のような結果となった。相互に優れた部分があり、比較してみる価値は十分にあったというものである。しかしこのデモを見た人たちは確実にデジタルシネマが 35mm フィルムを抜こうとしている現場に立ち会ったことは実感していた。それまでの 1080P とは違う十分な品質のデジタルシネマが実用レベルに来ていることを感じていた。これは筆者たちが感じたのではなく、パラマウント社の最高幹部がデモ終了後のパーティーの席で筆者たちの複数の述べたことである。

図 10 超高精細デジタルシネマシステムの外観

(a) PC ビデオサーバ, (b) JPEG2000 リアルタイムデコーダ,
(c) D-ILA プロジェクタ)

(a) 外観

(b) 内部

図 11 パラマウント劇場

6.2 山が動いた(2)

ハリウッドにおいて最も美しいと思われる南欧調の建物が並びパラマウントスタジオのパラマウント劇場におけるデモは更なるハリウッドデモへと発展した。パラマウント劇場におけるデモはかなりの人が招待されて実際の画像を見たが、ある意味ではパラマウント劇場がパラマウント社の施設であることから生じる限界もあった。そこでハリウッドにおける公的な施設で希望するハリウッド関係者を集めて行うデモが企画された。筆者たちはこれがある意味で公式な最終テストという風に捕らえていて、この時点で技術的にできることは全部やってみることにした。具体的には

- (1) プロジェクタの改良
- (2) JPEG2000 リアルタイムデコーダ
- (3) 色の再補正
- (4) 70mm フィルムの利用

であり、これにより画像信号は RGB 各 10bit になった。理論的にはこれにより色の再現性は十分になったはずである。このハリウッドの第 2 回目のデモは 2 回に分けて行われた。筆者たちはネットワークでこの画像を実際に配信して見たかった。2002 年 3 月 7 日の銀座ヤマハホールのデモでは飯田橋と銀座の約 5 km を GbE で通常の IP パケットを通したのであるが、この程度の距離では LAN と同じといえなくもなかった。そこでこのデモの前半にあたる 2002 年 10 月 29 日は Internet2 のイベントとして実験を行った。上映会場を南カリフォルニア大学の

図 12 サイドバイサイドの比較（左：超高精細画像システム、右：35mm フィルム）

ロバート・ゼメキス・センター にして、ファイルサーバをそこから約 3,000km 離れたイリノイ大学シカゴキャンパスの EVL (Electronic Visualization Laboratory) にいた。この両方の装置は研究用のインターネットである Internet2 により接続されて、通常の IP パケットで画像データを流したのである。もちろん Internet2 自体は 10Gbit の通信回線を使っているから、相当に高速の IP パケットが流せるように思われるかもしれない。実際にはこうした長距離に IP パケットを通すことはそれほど簡単なことではない。その詳しい理由は省略するが、大きな遅延が生じることが最も大きい。南カリフォルニア大学とイリノイ大学シカゴキャンパス間で生じる遅延は往復約 60ms にもなる。この大きな遅延を何とかして 300Mbit/s の速度で画像データを流すことに成功した。この Internet2 のイベントとしてのデモは二つの意味で大成功であった。一つはこの 3,000km を 300Mbit/s の IP パケットを通してみたということであり、もう一つはこの流れた IP パケットが超高精細動画画像であり、これがビデオプロジェクタで約 200 インチの大スクリーン上のデジタルシネマ画像として実際に見えたということである。単に IP パケットの量を示す PC 上の数値、若しくはグラフではなく高品質動画画像としてだれもが実感できる形で見たことの反響は圧倒的な説得力があった。この Internet2 のイベントは広いロス・アンジェルス圏の幾つかの分散された会場で開催された。結果としてこのデジタルシネマのデモに Internet2 のイベント参加者の大半が訪れることになったほど好評であった。なお余談であったが、この 3,000km・300Mbit/s のデジタルシネマのデモはデモ前日によく間に合ったくらい、様々な試行錯誤を突貫工事（準備期間は約 1 週間）で重ねて行った実験であった。このために少々安定性に欠けることもあった。このためにわずかであるが画像が乱れることもあった。しかしこれが逆に本当に 3,000km も離れた場所から送ってきているという実感を観客に与えることとなったのは筆者たちにとって「塞翁が馬」であった。全く安定した画像では広い南カリフォルニア大学キャンパスのどこかのファイルサーバを使っているのかもしれないという疑惑が拭いきれない可能性が十分にあった。この Internet2 のイベントにおけるデモにおいて、デジタルシネマは 35mm フィルム以上の高品質とネットワーク配信を含めた実

用性を完全に立証してみせた。筆者たちは既に述べたようにこの日時がリュミエールが 1895 年 12 月 28 日にグランカフェで行ったデモに匹敵する意味があったと思っている。すなわちデジタルシネマの商業的な価値はこの遠隔配信の延長にあることを分ける人は完全に理解したからである。

この南カリフォルニア大学におけるデモを終えた 10 月 31 日に、今度はロバート・ゼメキス・センターから北西に約 10km 離れたハリウッドにある南カリフォルニア大学の ETC において長距離ネットワークを使わない形でデモを行った。このデモに参加したのはハリウッドの画像の専門家たちである。図 3 にこのときのプログラムを示した。このデモには幾つかの 70mm フィルムがハリウッド側から提供されて、それらも使われた。またプロジェクタも 35mm フィルムプロジェクタと 1080P のデジタルシネマプロジェクタも使われた。このデモのハイライトはこの 70mm フィルムからデジタル化した画像データを筆者たちの持ち込んだビデオプロジェクタで上映したときであった。それまで 35mm フィルムからデジタル化した画像データの上映はまあ評判どおりかということで淡々として行われた。70mm フィルムからデジタル化した画像データを上映した段階で「ちょっと待って」という声が会場のハリウッドの画像の専門家たちから突如上がり、デモは何回も中断された。画像を止めてくれと言われ、画像を止めると彼らはスクリーンに近づいて画像をのぞき込んでまじまじと画像を眺めていた。この会場となった ETC のスクリーンは客席とスクリーンに段差がなく、なだらかにスクリーンに向けて緩いスロープになっている構造なので、だれでもスクリーンに近づけたのである。何人かの人たちは確実にこの超高精細デジタルシステムは 35mm フィルムの画像品質を越えたと認め、これが次世代のデジタルシネマとして十分な資格を持つと明言していた。

デモは予定時間を大幅にオーバーして終わった。しかし会場では様々な人たちが小さなグループを作って議論を続けていた。筆者たちはこのデモをアレンジしたパラマウント社のギャレット・スミス氏とホワイエで大成功と乱暴な握手をして騒いだ。正直に言えば筆者たちもこのデモに呼んだ人が専門家として最高の人たちであるから、100%の自信があったわけではなかった。画像品質についてどのように評価されるか不安もあった。デモ

が始まる前にこの画像データの色補正を担当した遠藤氏と筆者の二人だけは絶対に十分に評価されると多くの人から離れた席に座っていて「この時点でできることはすべてやった」と半分開き直り、半分自信の混ぜ合わせをつぶやいていたのである。デモが一応終わって大好評となった段階で、遠藤氏と筆者は「やった」と会場の席で握手をした。そしてホワイエで二人でいろいろなことを話していたら、ギャレット・スミス氏が会場から出てきて、先のような喜びの大騒ぎとなったのである。本当はここにシャンパンでもあればと思ったが会場で準備してあったのは缶コーラであった。それを飲み干したときに、この劇場入口の向こう側のハリウッド大通りの明るさが異常にまぶしく見えた。ギャレット・スミス氏にとってもこの成功は大きな喜びであった。それは彼の面子が立ったというようなことではなく、映画人としてトーキー化、カラー化に続く映画の大きな節目となる技術革新に直接関与したという喜びであった。このデモの後片付けをした後、ホテルの日本料理屋においてパーティーが開かれた。これが大変ににぎやかなパーティーとなったことはいまでもない。筆者が超高精細画像の研究を始めて既に12年の歳月がたった。少し酔った頭にフレームメモリとDDMモニターで始めて見たわずか数秒の3カットが思い浮かんだ。このデモ・チームの代表を務めた青山氏（現慶應義塾大学教授）と「ついにハリウッド」「ついにハリウッド」、…「いつかハリウッドとは言っていたけれどね」と言い合った。

6.3 ヨーロッパへ（1）

2002年にはこのヨーロッパのデジタルシネマの積極策はEU政府の支援を受けたEDCFの動きに現れてきた。ハリウッドが規格に対して余り明確な指針を示さない時期に、EDCFはデジタルシネマの規格に階層構造を打ち出してきた。すなわち画像品質を

- （1）SHD（縦2K画素）
- （2）HD（縦1K画素）
- （3）EDTV
- （4）SDTV

の4階層に分けて、できるところからできるだけ早く始めようというのである。もちろんこれらの規格はサブセットの入れ子構造を前提にしている。この構想は青山氏と筆者たちにとっては「正にそのとおり」とひざをたたく思いであった。というのは5.で述べたリアルタイムデコーダに筆者たちが、動画像圧縮のMPEG-2を用いしないで、JPEG、JPEG2000と静止画像圧縮用のアルゴリズムを使い続けてきた理由の一つが、画像品質に対する多様な対応を考慮したからであった。もちろんこれだけがその理由のすべてではなかったが、JPEG2000ではこうした階層構造に対する多重解像度機能が強化されていたことに多くの期待を持っていた。もしこの期待がなかったならば筆者たちは初代のJPEGリアルタイムデコーダの次に開発をしていた第2代目のリアルタイムデコーダをMPEG-2にしていたかも

しれなかった。なぜならばこのとき期に筆者たちが入手できたJPEG2000のデコーダチップはバグが多く、様々な問題を引き起こしていたからである。青山氏はヨーロッパ各国を巡り主に光ネットワーク研究者と様々に議論してきて、特に北欧諸国政府がデジタルシネマの普及に熱心だとも伝えてきた。これには筆者も最初戸惑いを覚えた。確かにスウェーデンには名監督のイングマル・ベルイマンがいて「第7の封印」「野いちご」「沈黙」等の名作があるが、それとデジタルシネマの普及に熱心なことが素直に結び付かなかった。しかしこの熱心さの理由は明快であった。冬の厳しい気候の北欧諸国では人を各家庭で個人にしておくとか飲酒、麻薬などに走る傾向が強く、様々な社会問題を引き起こしている。これらの人が集まるコミュニティーセンターなどでだれもが楽しめる娯楽が欲しいのであり、そのためにデジタルシネマが最適と考えられるからとのことであった。

EU政府はかねがね映画振興を重要視しており、デジタルシネマに非常に期待していることはいろいろな人たちから聞いていた。EU政府自体としてデジタルシネマ振興策を取ることに何らの反対はなかった。しかしブリュッセルのEU政府は決定はしても、具体的な行動は各国政府にボタンタッチされる。映画といえばリュミエールを生んだフランスが何かにつけて正面に出てくる。このときもフランスはそれなりの主張をしたそうである。とにかくデジタルシネマ振興の本拠地として、世界に誇る映画施設シネマテークを持つフランスに設置すべきところ。ところがいろいろと理屈を述べるフランスの行動の遅さは定評がある。その理由は様々であろうがとにかくフランスのこの行動の遅さを逆手に取って、イギリスはEDCFのデジタルシネマのセンターをロンドンに設置する行動をあっという間にしたのである。しかも早急に施設を作るためにNFT（National Film Theater）（図13）というイギリス文部省の既存施設にイギリス通産省の施設であるDigital Cinema Test Bedを1年くらいで作ってしまったのである。幾らイギリスでも官庁間の壁はある。それを押しのけて映画におけるフランスの誇りを後目に、ウルトラCを連発したのである。こうしてできたNFT内のDigital Cinema Test Bedの開設記念行事の一つが、2003年6月27日のNFTのデモとなった。

6.4 ヨーロッパへ（2）

NFTはヨーロッパ各国から英仏海峡トンネルを経由するユーロスターが到着するウオータールー（Waterloo）駅の近くのテムズ川にかかるウオータールー橋脚の下にある。ウオータールー橋はハンガーフォード橋とブラックファイアー橋の間にかかる大きな橋であり、その橋脚の下にあるといっても決して小さな施設ではない。なおこのハンガーフォード橋の上流がウエストミンスター寺院とビッグベンと国会議事堂の近くのウエストミンスター橋であり、ブラックファイアー橋の下流の橋はサザーク橋（鉄道専用橋）、ロンドン橋、タワーブリッジとなっている。テムズ川の南側のこの付近一帯はサウスバンクと総称されるが、特に川岸は公園として整備されていて、イギリスを代表する音楽ホールであるクイーン・エリザベスホール（Queen Eliz-

図 13 National Film Theater

図 14 チネチッタ

abeth Hall), 同様の演劇場のロイヤルナショナル劇場 (Royal National Theatre), 少し離れると発電所であった建物を利用したテイト現代美術館 (Tate Modern) がある文化施設地域である。この付近で最も目立つのは 2000 年を記念して作られた大きな観覧車であろう。

ここで行われた 2003 年 6 月 27 日のデモの反応は一口でいえば、ロス・アンジェルス・ハリウッドにおける既に 4 回行われたデモを一回に凝縮した形であった。画像品質に関して賞賛されたが、同じくらい様々な広い範囲にわたる質問が出てきた。それらは決して否定的でもなく冷笑的にでもなく、ここまでのシステムの詳細を知りたいという好奇心が基になっているようであった。これは当然といえば当然な反応に思えた。なぜならばフィルム好きの人たちがまだデジタルシネマは 35mm フィルムまでのレベルに達するには少し時間がかかるであろうと考えていたところに、いきなり既に 35mm フィルムのレベル画像を見せたことになったからである。ロス・アンジェルス・ハリウッドの人たちは 1 年 3 か月かけて、徐々に知れ渡ったことを一挙に体験したことになったからである。このデモについては BFI のホームページ に示されているが、この中でも“... and answered several detailed questions raised by both sets of audiences. The audience was overall impressed with the demonstration, though some admitted that they may have been sitting too far back to fully appreciate the level of detail, which is perhaps why almost all took the opportunity to walk up to the screen to look for pixels up close.”と書かれており、detailed questions という単語が示すとおりかなり詳しいことが議論されたことが分かる。

6.5 ヨーロッパへ (3)

この NFT のデモの後、筆者たちはイタリアのチネチッタ (図 14) で 2003 年 7 月 3, 4 日にデモを行った。このチネチッタはイタリア映画製作の中心地であり、イタリアのハリウッドといってよい。ミニ・ハリウッドといっても良いが、ロス・アンジェルスに広がるハリウッドの規模を知らないとミニという言葉が誤解を生む可能性がある。場所はイタリアの首都、永遠の都、ローマの東南にあり、総面積約 40 万平方メートルも

ある。ローマの地理的な中心であるベネツィア宮殿・ベネツィア広場から約 15 ~ 16km 離れた地点であり、車で行く場合に旧ローマ市街を囲んでいた城壁がかなり残っている地域にあるサン・ジョバンニ・ラテラノ教会のあるサン・ジョバンニ門をくぐり旧市街を出て、新アッピア街道を通ってトスコーラナ街道に入り、この街道に面している。

チネチッタでのデモは一言でいえばロンドンと同じく画像品質等で絶賛を博したが、あえて違いを述べれば技術的な点の詳細よりも、この超高精細デジタルシステムを用いると何が表現できるかの議論に重きが置かれていた。ルネッサンス以来多くの芸術家を生み出し世界をリードしたイタリアならではの議論であった。イタリア語ができる方はチネチッタのホームページを参照されたい。デモに関してこのときの講演のビデオ画像を含む多くの情報が公開されている。なおこのデモで絶賛を博したのは画像品質だけでなく、ピットリオ・ストラーロ氏の提供してくれた小品であった。これは 10 分くらいの作品 (題名はあるのだがイタリア語でよく分からない) で、リアプロのスクリーンを壁に使った簡単なセットと 50 インチのプラズマディスプレイしか使っておらず、そこでイタリアの男性歌手 (美声とはいえないが歌はうまく、有名な歌手とのこと) がいすに座った彼の母親の前で歌を歌うだけのものである。巧妙なカメラワーク等、著作権の都合で画像が示せないのが残念であるが、現在最高の撮影監督と呼ばれる彼の才能を十分に発揮させた作品であった。リアプロのスクリーンに変化してゆく色彩の美しさが、撮影監督の役割は物語を『光で書く (Wrighting with light)』ことだという彼の主張を十分に示して余りある作品であった。最高の技術を最高の作品に組み合わせられたこのデモは圧倒的な印象を参加者に与えた。筆者はピットリオ・ストラーロ氏にこの超高精細システムで傑作を作ってほしいと伝えたら、考えてみたいと答えてくれた。今後は是非期待したいものである。

このデモの会場となったチネチッタのフェデリコ・フェリーニ館は二つの上映室があり、機械室は共通になっていて非常に広かった。あのハリウッドの巨大な 600 インチのスクリーンのパラマウント劇場よりも機械室ははるかに広かった。デモの終わった後は様々な人が実際の機械を見たいということで、そこに多くの人が案内されたが、そこが結果として 1 時間以上も続く熱心な立ち話の議論の場になってしまった。そこで交わされ

た議論は全く学会の議論と同じであった。これはハリウツの ETC におけるデモを筆者に思い出させた。欧米の主要な有名大学はほとんどが映画学部、若しくは映画学科がある。日本ではこうした方向の第一歩を踏み出そうとしているが、この違いは何で生じたか考えさせられた。イタリアの映画界も日本と同様に決して順調な時期ばかりでなかった。日本映画にも黄金時代といってよい時代ががたつてあった。しかし現在もチネチッタを持つイタリアとそうした施設を全く持たない日本の違いをこのときほど感じたことはなかった。

7. デジタルシネマの規格

7.1 HDTV の規格

現在のテレビがある程度以上の普及を見せた 1970 年代の初頭から、NHK において次世代のテレビとしてより画像の高品質さを追求して HDTV の研究が開始された。その規格は簡単にいえば通常のテレビの走査線数を約 2 倍にしてアナログ方式の帯域圧縮を用いる MUSE (Multiple sub-Nyquist Sampling Encoding) と呼ばれるものであった。これを世界標準規格として定着させようとして日本は官民一体で多くの努力を払った。しかしそれは余り成功せずに終わった。この一連の動きは様々な形で出版されているので、知っている方は少なくないかもしれない。ここではこの動きについてこれ以上の詳細を述べることはしない。これについて現在もある程度トラウマが日本のエレクトロニクス分野に残っているように筆者には思われる。しかし国際規格制定でこうした失敗は常にあることであり、IBM が絶対的な力を持っていた同じ 1970 年代に当時の主役であったメインフレームの幾つかの端末機器とのインタフェースも日本勢の多大な努力にもかかわらず同様の結果となった。現在の PC のインタフェースは必ずしも国際規格だけではないが、多くの標準規格が採用されて各メーカーの固有のインタフェース規格はほとんど姿を消している。技術的な先見性が通らなかったのである。こうしたものは様々な要素と歴史的経緯で結果が左右されるものであり、このトラウマを残すこと自体が心配である。

HDTV は結果として「通常のテレビの走査線数を約 2 倍にして」の部分が生き残り、アナログ方式の帯域圧縮はデジタル圧縮になった。その結果として 2003 年 12 月 1 日から地上波デジタル放送が開始され、ここでは HDTV が使われている。なぜアナログ帯域圧縮がデジタル圧縮になったかに答えることは簡単である。それは電波の使用効率がアナログよりもデジタルの方が良いからである。より正確に言えば同じ電波帯域を使ってデジタルの方が高品質な動画像を送れるということである。これはデジタル圧縮が様々な圧縮方法を採用できて、その中には本質的にデジタル信号にしか適用できないものが含まれているからである。ただしデジタルの場合にはこれを実現する LSI が大規模になり、その問題の解決のめどがついたのはこの数年のことである。このアナログからデジタルへの変化は LSI が基本的に CPU とメモリを主とするデジタル回路向きの技術であることが支えている。アナログ LSI は重要であるが LSI においてあく

まで脇役である。ただし今後もアナログ LSI が必要な回路は存在し、消えてなくなるようなことは絶対でない。現在のアナログ LSI の代表は生産量からいえばデジタルカメラ、デジタルビデオカメラに使われる CCD 撮像素子である。こうしたデジタル HDTV への規格確立に大きな役割を果たしたのはアメリカの FCC (Federal Communication Commission) と MPEG (国際組織としては ISO (International Standard Organization) と IEC (International Electrotechnical Commission) の共同運用) であった。FCC はアメリカのテレビをデジタル化する方向で様々な施策を行ってきていてその一つに段階的なデジタル化の方向を示した。この中に現在のデジタル HDTV の規格が含まれていたのである。また MPEG もこうした段階的な画像のレベルをほぼ同時期に採用した。これらはすべて 1993 年ごろのことであり、それから 10 年後の現在に至ってこのデジタル化がようやく普及したことになる。

これらテレビのデジタル化の流れに関していえることは MPEG-2 が主役になったことである。当初 MPEG は画像品質に対応して MPEG-1, MPEG-2, MPEG-3, MPEG-4 と四つに分けられて国際標準化が行われていた。画像品質から見れば

$$\text{MPEG-4} < \text{MPEG-1} < \text{MPEG-2} < \text{MPEG-3}$$

の予定であった。MPEG-2 は先行していたビットレートの上限を 1.5Mbit/s とした MPEG-1 より高品質画像の符号化として上限を 10Mbit/s 程度として標準化が議論されていたが、簡単にいえば通常の SDTV の画像品質用の符号化方式であった。そしてそれ以上の画像品質には MPEG-3 が考えられていたのである。しかしこの区別に余り意味がないことが判明してきて MPEG-2 は MPEG-3 を吸収することになったので、MPEG-3 は欠番となった。したがって HDTV は MPEG-2 の領域とされた。また MPEG-1 は MPEG-2 が広範に普及した結果、スーパーセットとしての MPEG-2 に吸収されてしまった。こうして DVD を含むほとんどすべての動画像記録システム、デジタルテレビ放送に MPEG-2 が採用されて現在に至っている。MPEG-4 も当初は移動通信を主な用途として 10~20kbit/s 程度の MPEG-1 以下の画像品質の極低ビットレート符号化方式として標準化が議論された。当初はとにかく符号化効率の向上を目指したが、それだけでは取り立てて特徴のないことからしばらく議論は低迷した。その後符号化効率の向上とオブジェクト指向符号化という PC における操作への融合性を柱として標準化がなされ、携帯電話の FOMA 等に採用されて今日に至っている。今日では MPEG-4 において極低ビットレート符号化の意味は完全に消えていて、符号化効率の向上が主になっている。また MPEG-4 の Part10 は ITU-T により H264 なる名称を与えられている。

7.2 デジタルシネマの始まり

テレビがデジタル化と高品質化の道を歩み始めていた 1990 年代初頭から映画は同じデジタル技術を基礎に新しい時代が始まっていた。それは CG 技術の映画への全面導入である。1995 年のトイ・ストーリーはその全面導入スタートを飾る作

品であり、アニメーションと実写の違いのギャップを埋めてしまい、これ以後 CG 技術は映画の基本技術になった。もちろんこれより先にジョージ・ルーカスも CG 技術を映画に導入してスター・ウォーズシリーズを製作してた。彼は 1975 年に ILM (Industrial Light & Magic) という会社を設立しこの会社が CG の総本山的役割を果たしてきたが、何よりもそれが実際に使えるためには安価で高性能なコンピュータが必要である。この要求に応えられるコンピュータは 1990 年ごろに供給され、SGI 社、Pixar 社等がこの分野で主役になった。デジタル化という共通の基盤の上で展開されたテレビの高品質化と映画の CG 技術が結び付くのは必然の流れであった。問題はそのプラットフォームとなる画像品質であった。元々 NHK の HDTV は映画を家庭で見えることを主な目標にしていたのであるから、HDTV と映画の距離は当初から意識されていたことは間違いないし、事実 HDTV システムに深い興味を示した映画監督も何人かいて、フランシス・フォード・コッポラもその一人であった。

こうした流れの中で二つの規格がこのプラットフォームとして浮かび上がった。それが 1080/24P と 720/60P でありどちらも HDTV の規格の延長にあった。簡単にいえば HDTV 用ビデオカメラを少し発展させた形の規格であった。これを 35/16mm 映画カメラの代わりに使い撮影した。こうした流れはジョージ・ルーカスからソニーにこうしたカメラの開発が依頼されそれにこたえて、1999 年に両者の共同発表が「Comdex/Fall '99」で行われた。映画はカメラと大画面に動画像を表示するビデオプロジェクタが必要である。このビデオプロジェクタとして 1998 年 11 月に TI 社が 1080/24P に対応した製品を完成させて、それは翌年 1999 年 6 月に「スター・ウォーズ・エピソード 1」でフィルムを使わないデジタル上映に使われた。この試みは成功であったが、フィルム関係者がこれでフィルムの時代が終わったと感じるほど決定的なものではなかった。しかしこの 1999 年 6 月とはとにかくフィルムを使わないデジタルシネマの始まりとすることは大方の認めるところとなった。筆者から見ればこれがその後約 4 年にわたる長いデジタルシネマ規格の論争の始まりとなった。

7.3 画像品質の議論

なぜこのデジタル上映が決定的でなかったかは二つに分けて議論すると分かりやすい。一つは 1080/24P が本当に 35mm フィルムと同等の画像品質を持つのかという問題と、この「スター・ウォーズ・エピソード 1」に使われたビデオプロジェクタがこの 1080/24P 規格を完全に満足したものかという問題である。後者の問題は既に 4.2 35mm フィルムで述べたので余り繰り返さないが、とにかく 1,920-1,280=640 画素の不足を光学的・信号処理的な補正を含めても、それで十分であるという主張は工学的に無理がある。画素数の不足、それも全体の画素数の 1/3 に近い不足はそんなに簡単に補えないのである。もちろんこうした補正に意味がないというのではないが、全体の画素数の 1/3 に近い不足を補えるほどの効果はない。画像品質にしているいろいろなことがいわれる。総画素数よりも 1 画素の語長、

つまりダイナミックレンジと階調だとか色調の調整だとか、議論の種は絶対に尽きない。

しかし優れた画像はまず総画素数を向上させることでまず得られるのであり、同じ画素数になれば語長の問題になり、同じ画素数で同じ語長であれば色調の問題になる。この順序が基本であり、この順序に従わない議論は各論になり、客観性・普遍性は余りなくなる。いずれにしても 1080/24P 規格がもし 35mm フィルムに及ばないとしたら、このプロジェクタの議論は意味がなくなってしまう。実はこの問題はプロジェクタの議論の意味をなくしてしまうほど簡単ではない。それは 35mm 映画フィルムといているが、それは何を指すのかが問題になり、それはピンからキリとはいわないが、かなりの幅があるからである。なぜ幅があるかは普通に映画館で上映に使われる上映プリントは撮影に使われたフィルムから 5～6 世代のものであるからアナログ複写を重ねてきたためにそれなりの劣化は生じているからである。議論する基礎から明確になっていないのである。最近はこの議論を明確にするためにアンサープリントと呼ばれる配給用の上映プリントのマスター版を指すようになってきている。このアンサープリントと 1080/24P フル規格のビデオプロジェクタの画像を比較してみるとやはりアンサープリントに軍配が上がるというのが大方の意見である。アンサープリント等は実際の映画館では使われないのだからこの議論は意味がないという人もいる。しかしこの議論は二つの点で無理がある。一つは今後上映用プリントを従来のアナログ複写を用いないで、デジタルマスター画像ファイルから直接作ることになったら、アンサープリントと完全に同等品質の上映プリントができてしまうことである。現にそのような装置は既に市販されている。

次は映画製作者に対するメンタリティの問題である。これは音楽でいえば、大方の人はヘッドフォン等で、しかも MP3 等のプレイヤーで聞いているのだから録音スタジオ等の設備はそこそこのもので十分というに等しいことをいっていることになる。ハリウッドのパラマウントスタジオとローマのチネチッタという撮影現場を実際に見学したことのある筆者は、とてもこのような意見をこれらの撮影スタジオでいう気にはなれない。チネチッタで見た「ギャングオブニューヨーク」のセットを見ると手を抜いてあるのは絶対に写らない建物の後であり、画面に映る部分は正に本物を使っていた。日本の町並みよりもはるかにお金をかけて作っていた。書き割り等とはほど遠い世界がそこにあり、もしデジタルシネマの規格をそのようなものにするならば、彼らはフィルムで映画を作り続けるであろう。撮影現場に今まで以上の緊張を強いる規格であることが絶対に必要であり、それがプロとして良い作品を作れるインセンティブとなる。こうした緊張感を欠けば、作品の質が下がることは明らかであり、それは同時に観客動員数に現れてくる。

7.4 デジタルシネマ規格確定

DCI は 2003 年 11 月 25 日に DCI の代表メンバー会議で最終承認された Digital Cinema System Specification v.3⁽¹²⁾を、筆者らが作った DCCJ に電子メールで送ってきた。2003 年 12

月上旬のことである。DCI は、ハリウッド七大メジャースタジオによりデジタルシネマの規格を制定する目的で 2003 年 3 月に発足した機関である。この文書には約 150 ページに及ぶものであるが、その中でデジタルシネマの画像規格を 4K (800 万画素) と 2K (200 万画素) の二階層構造としてある。また画像圧縮は JPEG2000 を採用し、暗号は AES としている。暗号を AES とすることは予想どおりであり、特に意外ではなかった。とにかく筆者たちがこの数年間に開発してきたハリウッドとヨーロッパでデモを行った機器構成がハリウッド標準になった。今のハリウッドの映画界における力から見て、これが 35mm 映画フィルムと同じように世界標準になることは間違いない。簡単にいえば筆者たちの研究開発してきたシステムがこの時点をもって世界標準になったのである。

筆者にとって何よりも期待した結果が得られたのである。この喜びはすぐには実感できなかった。DCI が送ってきたドキュメントを読み込み、大学の研究室から自宅に帰る途中で実感してきた。その日は一人で自宅のある鎌倉の行きつけの場所でビールを飲んだ。その場所でこの内容をいっても分かん人はいなかった。一人で陽気になって少し飲み過ぎるまでビールを飲んだ。この結果の経緯について、2. で書いたことを補足する。それは「筆者たちの研究開発してきたシステムがこの時点をもって世界標準になった」というのはいい過ぎであり、たまたま偶然そうだったのではないかという意見である。つまりあくまでもハリウッドの DCI が密かにこうした議論と実験を重ねていて、それが偶然に筆者たちの研究開発してきたシステムと一致しただけであり、あくまで主役はハリウッドの DCI であったのではないかという意見である。最近出版された日本語の雑誌¹³もそのようなニュアンスで書かれていて、「ハリウッドの DCI が日本の NTT 研究所で開発したシステム規格を標準に採用」とは一言も書かなかった。筆者はこう書いてほしかったし、このように書いても全く事実に反することはなかった。このように書いても日本人同士のナショナリズムに基づく身びいきではなく、事実経緯から見ればこのように書いても何の客観性を失うことはなかった。少なくともアメリカ人が執拗に映画はエディソンの発明であるといい張るほどの身びいきを要求するものではない。筆者たちが 2003 年までに得ている情報では、ハリウッドは 800 万画素を上映できる装置を持っていないはずである。何よりもこれはプロジェクタとリアルタイムデコーダの開発状況から断言できることである。つまりハリウッドの決定は 800 万画素について筆者たちが行ったデモの画像を参考に決めたということ以外に考えられないのである。

先に触れた雑誌でまた USC / ETC のチャールズ・シュルツ教授が、35mm の画像品質は 800 万画素に相当するとの根拠に、35mm フィルムからのディジタイザ「Cineon」でこの概念が生じたといっていることを伝えているが、それも不十分である。彼はそのように判断したかもしれないが、筆者たちは 70mm 映画フィルムを使って実際に撮影し、それを用いた様々な実験を行い 35mm と 800 万画素の関係にたどり着いたのである。こちら方は偶然の一致というか、自然現象だから同じ程度の結果が得られたのか解釈は分かれる。しかしデジタルシネマ画像の正

確な評価はあくまでも同じサイズのスクリーンでサイドバイサイドに行わなくてはならない。こうした実験をしていない／できない人たちがいろいろなことをいっていて、それを真に受ける記事が多いのは残念である。

もちろんこのような内情にかかわることは DCI 関係者がいはずもない。いっても自分たちの権威を落とすだけであり、彼らに利益は何もなく、いわなければならない理由もない。だからいかなかったのであろう。こう推測するしかないし、多分先に述べた 800 万画素の機器、つまりプロジェクタとリアルタイムデコーダの開発状況から断言できる。もう少し具体的にいえば、2003 年の時点で 800 万画素を映画関係者が満足できる十分な品質で上映できるプロジェクタは JVC の D-ILA 方式しかなくそれらがどこにあるかは筆者たちは知っていてアメリカにはなく一台もなく、かつ JPEG2000 を用いたリアルタイムデコーダも JPEG2000 チップの供給状況から DCI 関係者が持っているとは考えられないのである。もう少し厳密に言えば JPEG2000 チップは入手できても、それをリアルタイムデコーダとして組み上げるには時間が間に合わないはずである。筆者たちが得ていた標準規格決定に関する情報はこうであった。フィルムピープルから 200 万画素の 1080/24P だけの単一規格にすることは反対が強かった。そこでそれよりも少し多い画素数の規格を検討していた。実際には 1.5K × 3K 程度、つまり約 450 万画素の規格であった。こうした規格にはそれなりの根拠もあった。こうした状況のところに 6. で述べた 2001 年の SIGGRAPH の筆者たちの 800 万画素の規格デモが行われたのである。しかも翌年はより性能を上げてデモを繰り返したのである。こうして 450 万画素の規格は消えてしまった。残ったのは既に存在した 1080/24P の 200 万画素の規格が筆者たちの 800 万画素の規格だけである。

先に述べた Digital Cinema System Specification v.3 はこのどちらも二重構造の標準として認めたのである。いうまでもなく、800 万画素の規格は 200 万画素の規格の規格のスーパーセットになっていて、JPEG2000 圧縮はこれを矛盾なく実現できる。JPEG2000 には多重解像度対応の規格が含まれていて、というよりは JPEG2000 の特徴の一つはこの多重解像度対応であり、この規格のいう意味はマスターとしてどちらも認めるということに過ぎず、どちらを使うかは製作者が決めればよいといっているに等しい。つまり 35mm と 16mm フィルムの両方を標準とするがそのどちらにするかは製作者の決めることだといっているのと同じである。ただしこの文書を見ると 200 万画素の規格について HDTV の 1,080 × 1,920 画素ではなく、1,080 × 2,048 画素にしてある。この横方向を 1,920 から 2,048 にわずかに 128 画素だけ伸ばしたことに、ビデオピープルに対するフィルムピープルの意地を筆者は強く感じる。筆者の経験からいえばこの画素数の差は大きなスクリーンで画像品質としてほとんど感じられない程度の違いである。第 2 の規格でも映画とテレビは違うのだということをいいたいのであろう。もちろんこれをうがちすぎといわれれば証明のしようがないことである。

7.5 色再現特性

フィルムピープルは画像の色に対して半分軽べつした意味でビデオライクな色ということがある．要するにエレクトロニクスの画像表示システムにおいてフィルムのような色が出ていなくて、本来目的とした色が出ていないというのである．それは過去に置いていい得たことであるが、現在は必ずしもいえないことになりつつある．このビデオライクな色ということが成り立った原因は二つある．一つはテレビにおいて CCD 等の撮像素子から得られた RGB のカラー画像信号を輝度信号と色差信号に変換して、この色差信号のかかなりの部分を切り捨てていたことにある．この色差信号を切り捨てたのは、人間の目の感度は色に対して輝度ほど高くないからである．この現象は人間の目の光を感じる網膜にある視細胞が桿体と錐体の二つあり、桿体は感度が高いが色は識別できず、錐体は色を識別できるが感度が低いことから生じている．なおこの錐体はほぼ RGB 3 色に対応した色の感度特性を持つことが知られている．この現象を根拠に輝度信号と色差信号からなるテレビ信号の帯域は、色差信号を切り捨てて、その帯域を約 6 MHz まで狭くして電波の有効利用を図っている．問題はその狭くした程度である．狭くしすぎていなかったかである．今からみれば狭くし過ぎたといわれても致し方なかった．一般用の VTR 等には書かれることがないが、プロ用の VTR 等には 4:4:4、4:2:2 等の表示がある．これは輝度信号と二つの色差信号の帯域を表している．前者は切り捨てをしていないことを示している．

第 2 はこの議論に絡むのであるが、CRT (ブラウン管) では十分な色再現性を実現できなかったことがある．これは CRT が RGB 3 色の蛍光体により発光している．これら 3 色の蛍光体の発光特性は自由に選べるわけではなく、ある程度の制限があることから、実現できる色再現特性は比較的自由に色素 (発色剤) を選べるフィルムよりも狭くなっていた．これがビデオライクといわれる原因の一つを作っていた．つまり仮に色差信号を切り捨てていなくても、CRT では出せない色があったのである．別ないい方をすれば撮像素子で得られた全部の信号を CRT では表示できなかったのである．これでは画像の十分な再現性を追求する観点から大きな大きな問題が生じることは明らかである．音でいえばマイクロフォンから得られた信号に対して出力できない信号成分があることになる．なおこの切り捨てに関して、それでは人間はどのくらいの色を識別できるのかの問題が基本になる．音でいえば一体どの程度の高さの音まで人間は聞こえるのかという問題に対応する問題である．この問題については一応色彩心理学からの推定値で 500 ~ 1,000 万色とされている．ここで推定値となっているのはこれだけの数を実際の主観評価で行うことは、主観評価にかかる時間を考えれば絶対に不可能だからである．この数値は多くのビデオディスプレイが RGB 合計 $3 \times 8 = 24$ ビット、約 1,600 万色表示としていることにバランスが取れている．偶然の一致かもしれないが、24 ビット表示というのはかなり適正な数値なのかもしれない．

現在直視形画像表示装置でもプロジェクタでも CRT が画像表示の主役から降りつつあり、直視型ではその主役が液晶、プラズ

マに代わりつつあり、プロジェクタではその主役は液晶と DLP に代わってきている．いずれの場合でも色再現特性は CRT よりも改善されてきている．したがって撮像素子で得られた全部の信号を表示できる方向に向かっている．特にデジタルシネマにおいて重要なプロジェクタの色再現性はほとんどフィルムと同じレベルに達しつつある．それはこれらのプロジェクタで映画フィルムプロジェクタと同じキセノンランプを光源として、フィルムと同じ色再現性を持つカラーフィルタを使えるからである．極言すれば現在のこれらのプロジェクタの課題はフィルムと同じ程度の表示性能におけるダイナミックレンジを持たせることだけだといってもよい．そのダイナミックレンジの実現問題も完全実現はできないにしてもかなりの程度まで実現できつつある．実際に上映した画像ではフィルムプロジェクタとビデオプロジェクタの区別が困難な程度まで来ている．

なお最後に厄介な話を述べておく．それはこうして性能の上がってきたビデオプロジェクタの色表示特性はフィルムプロジェクタに合わせれば済むことであるかという大問題である．ビデオプロジェクタの表示性能のダイナミックレンジを拡大させることは可能であっても、抜くことは難しいかもしれない．ビデオプロジェクタにはフィルムプロジェクタではできないいろいろな可能性があり、こうした可能性を生かすことが重要ではないかという議論である．人間の色の感じ方は一定ではなく周囲の環境に大きく左右される順応性と、同時に左右されない色の恒常性もある．色の恒常性はカラーフィルムで撮った色が光源により大きく変化するが、人間の目にはそれ程の変化がない現象である．画像表示装置がこうした人間の目の特性に対応した特性を持たせることができないか、つまりビデオプロジェクタの特性をダイナミックに動かして人間の目により適した画像を表示できないかという問題である．ビデオプロジェクタの特性をダイナミックに動かすことは難しくない．従来のフィルムプロジェクタではこれは絶対に無理な課題あったから、課題としても取り上げられなかった．しかしではどうすれば良いかは現在の段階でまだ全くよく分かっていない．

映画は画面に観客の注意力を集中させるためにほとんど真っ暗の状態画像を表示する．これは音でいえば無響室で音を聴いているに等しい．音を無響室で聴くこともあるかもしれないが、通常は反響のある部屋でその反響を生かした形で聴くことが普通である．これと同様に高品質動画の用途が広がれば、こうした映画と同じ単にプロジェクタで表示される画像だけを視る視覚環境だけで画像が使われるとは限らない．例えば遠隔教育、遠隔会議等ではほとんど真っ暗の状態画像を表示することはあり得なくなる．絶対にある程度の明るさの部屋で手元の資料とスクリーンに表示されている資料の比較をすることになり、それらの色の一致を求められる．このような状況における色再現特性をある程度自動的に調整する問題等がビデオプロジェクタの特性をダイナミックに動かすことで実現できる．また現実要求される条件であり、かつ解決すべき問題であることは間違いない．遠隔教育、遠隔会議等は今までそのような高品質で大きなスクリーンを使って行われてこなかったから余り問題になっていなかった．しかし今後はこれは解決すべき問題となり、

かつ十分といえる解決法が見つかる問題であろう。

8. む す び

デジタルコンテンツの究極にある映画をデジタル化したデジタルシネマをネットワークで配信できるようになったことは、ある意味でメディアのデジタル化時代の最終段階に入ってきたことを意味している。つまりこの高品質な動画像以上の(超)大容量になるデジタルデータは存在しないし、こうしたコンテンツのコピーを遠くに、リアルタイムに、劣化なく送れることは、グーテンベルグが引き起こしたコピー制作の革命を仕上げたことになる。グーテンベルグが対象にしたコンテンツは文字だけであったが、その対象を文字から拡大して静止画像、動画像、音響までに拡げてデジタルシネマに到達した。現在のデジタル技術は、これらのコンテンツとなる対象を極限まで拡張し、既に述べたようにコピーを遠くに、リアルタイムに、劣化なく送られて、これに更に経済性の問題を解決している。これが第二グーテンベルグ革命と呼ばれる理由である。

コンテンツ保存の理想はロゼッタストーン (Resetta Stone : 紀元前 196 年ごろ製作と推定) 、死海写本 (Dead Sea Scroll : 前三世紀終わり～一世紀中ごろ) のような約二千年を経ても変わらない状態を維持できることである。最も死海写本は全く変わらないとはいえず、変色・退色が激しく読むことに苦労している部分もあり、最新の赤外線機器など読まれた部分もある。こうした恒久保存と映画フィルムはほど遠い状況にあり、このままでは永遠に失われてしまうコンテンツはかなりある。また書物の一部は同様の状態にあり、これは酸性紙問題として知られている。どちらも化学物質が原因であり、ここ 100 年の記録が失われつつある点で共通している。これらの問題は最近になりようやく恒久的解決法が見つけれつつある。それはデジタル化である。デジタル化は誤り訂正符号を付けることにより完全に復元が可能であり、記録メディアの避けられない劣化に対応することができる。石に刻まれたロゼッタストーンの情報のように適切な対応策を取れば理論的に永久に記録が保存できる。現在の時点でまだ記録メディアとして十分に安定したデバイスが開発されていないので、10 年程度ごとに読み出して書き換えることが必要である。しかし従来の保存策と異なり、完全に復元ができることが新たな特徴である。

デジタルアーカイブでは映画コンテンツが恐らく最も利用頻度の高いコンテンツになると考えられる。この結果と映画コンテンツは従来の新作の一過性の使い捨てが改められるであろう。一過性の使い捨てが改められない限り、本当に良い作品が作り続けられることはない。これは歴史が示している確実な法則である。多くの人がルーブル美術館にモナリザ、ミロのビーナスを、ウフィツィ美術館にボティチェリーの「春」「ヴィーナスの誕生」を、メトロポリタン美術館にフェルメール、ルノワールを、ナショナルギャラリーにレオナルド・ダ・ヴィンチ、ティッチアーノを、…を見に行くのと同じように、自分の住む町の様々なホールで、デジタルシネマにより「市民ケーン」「風と共に去りぬ」「ローマの休日」「7人の侍」「雨月物語」「甘い生活」「ベニスに

死す」「アラビアのロレンス」…等をコピー代程度で見たいときに見ることになるであろう。こうした作品は世代を越えて常に鑑賞されてゆくであろう。こうした優れた過去の映画作品がデジタルシネマにより 35mm フィルムの画像品質で身近に観られることにより、人々のセンスが洗練されてゆくことは、だれでもどこでもいつでも望まれてきた芸術・娯楽の生活への定着そのものである。見たい映画作品を身近な場所で自由に見られるデジタルシネマが社会にもたらすその影響を語り尽くすことは、これから 10 年程度の歳月が必要になる。その途中でデジタルシネマは単にシネマもしくは映画になり、35mm フィルム映画はフィルム映画と呼ばれるであろう。

(平成 21 年 8 月 12 日受付)

文 献

- (1) S. Ono, N. Ohta, and T. Aoyama, "All-digital super high definition images," Signal Processing: Image Communication 4, pp. 429-444, 1992.
- (2) S. Ono and J. Suzuki, "Perspective for super-high-definition image systems," IEEE Communi. Mag., pp. 114-118, June, 1996.
- (3) T. Fujii, M. Nomura, J. Suzuki, I. Furukawa, and S. Ono, "Super high definition digital movie system," SPIE VCIP'99 vol. 3653, pp. 1412-1419, Jan. 1999.
- (4) T. Fujii, M. Nomura, D. Shirai, T. Yamaguchi, T. Fujii, K. Hagimoto, and S. Ono, "IP transmission system for digital cinema using 2048 scanning line resolution," IEEE GLOBECOMM2002, pp. 1643-1647, Nov. 2002.
- (5) T. Fujii, M. Nomura, D. Shirai, T. Yamaguchi, T. Fujii, and S. Ono, "Digital cinema system using JPEG2000 movie of 8 million pixel resolution," IS&T/SPIE Electronic Imaging VCIP2003, 5022-07, Jan. 2003.
- (6) 山口, 白川, 仲地, 藤井, "JPEG2000 を用いたデジタルシネマとそのネットワーク配信," 第 18 回 DSP シンポジウム, A7-3, Nov. 2003.
- (7) T. Yamaguchi, D. Shirai, T. Fujii, M. Nomura, T. Fujii and S. Ono, "SHD digital cinema distribution over a long distance network of internet2," SPIE VCIP2003, vol.5150, pp.1760-1769, July, 2003.
- (8) T. Yamaguchi, M. Nomura, K. Shirakawa and T. Fujii, "SHD movie distribution system using image container of 4096 × 2160 pixel resolution and 36 bit color," IS-CAS2005, to be presented.
- (9) DCCJ Hollywood Demo, <http://www12.ocn.ne.jp/d-cinema/standardization/Hollywood3.htm>.
- (10) 小野・鈴木, "JPEG/MPEG2 の技術," オーム社, ISBN4-274-07917-1.
- (11) ISO/IEC 15444-1, "Information technology - JPEG2000 image coding system - Part 1: Core coding system," 2002.
- (12) Digital Cinema Initiatives, LLC Technology Committee, "Digital cinema system specification v.3," March 31 2003.
- (13) 日経エレクトロニクス, 2003.11.24 日号

小野定康 （正員：フェロー）

1976 年慶大大学院電気工学専攻博士課程修了（工博）。1976 年日本電信電話公社（現 NTT）横須賀電気通信研究所入所。1997 年 NTT 研究所小野特別研究室長。2003 年慶大デジタルメディア・コンテンツ統合研究機構教授。デジタル信号処理, デジタル画像処理, デジタルシネマの研究に従事。電気通信普及財団賞, 高柳記念奨励賞, 前島賞, 電子情報通信学会業績賞等を受賞。

藤井哲郎 （正員）

1979 東大・工・電子卒。1984 同大学大学院博士課程了（工博）。同年日本電信電話公社（現 NTT）入社。現在, 東京都市大学環境情報学部教授。主にデジタル信号処理, デジタルシネマの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 会員。

藤井竜也 （正員）

1986 東大・工・電気卒。1991 同大学院博士課程了（工博）。同年日本電信電話公社（現 NTT）入社。現在, NTT 未来ねっと研究所メディア処理システム研究グループリーダー。主にデジタル信号処理の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 会員。