3. デジタルシネマの規格化の動向

小野 定康[†]

キーワード ● 映画, 35mmフィルム, デジタルシネマ, JPEG2000, 画像品質, プロジェクタ

1. ま え が き

ある人はCDが普及し始めた時期に、またそれからかなり経ってからではあるが、はるかに多くの人達がデジタル静止画像カメラ(DSC)が普及し始めた時期に、いつかは映画からフィルムが消えるであろうと予想(予感)した。前者は、ある程度情報理論等を知っている人であろうし、後者は、直感的に普通の静止画像カメラも映画カメラも同じ35mmフィルムを使っているのだからということである。この予想は正しく、現在はその映画のデジタル化(=フィルムレス)が進行している。

この映画のデジタル化は映画にとって、1920年代末期のトーキー化、1940～1950年のカラー化に続く、第3の大革命^{*1}である。トーキー化はフィルム内にサウンドトラックを入れるという形で決着し、その結果としてリュミエール以来の毎秒コマ数16コマが音響再生信号帯域確保の観点から24コマとなり、この技術確立したワーナーブラザーズ社を大映画会社の一つにした。カラー化は多少の競合時期があったが、ドイツのアグファ社が第2次世界大戦のドイツ敗北の影響で一時期勢力を失い、アメリカのコダック社の規格に世界統一された。

規格の統一はさまざまな会社にとって大きなビジネスチャンスであり、それは35mmフィルムのように世界中唯一の規格であることが望ましい。それならば映画のデジタル化の規格はどうであったか。それは世界の映画市場を握るハリウッドの規格で統一されつつあり、乱立、混乱がなかったわけではないが、もはや収束段階にある。本稿はこうした動向を著者の経験・体験を含めて解説する。

2. 映画のデジタル化(1)

映画は35mmロールフィルムなしには考えられない。映画のデジタル規格の議論は要するに35mmフィルムの特性評価に帰結する。これが解れば済むのであるが、それは

^{*1} 70mm, IMAX等の1960年代のテレビ対策の大画面化を第3の革命として、デジタル化を第4とする見方もある。しかし著者は、この大画面化はほとんど定着しなかったもので、この見方をとらない。

[†] 慶応義塾大学/デジタルメディア・コンテンツ統合研究機構(DMC)
"The Movement of Digital Cinema Standard" by Sadayasu Ono (Institute for Digital Media and Contents Keio University, Tokyo)

決して簡単でない。最も簡明な事実、35mm映画カメラの一コマは4Pであり、普通の静止画像フィルムカメラの一コマ8Pの半分しかないことである。ここでPとはパーフォレーション(Perforation)を指し、35mmフィルムの両側に開けられている等間隔のフィルム送り穴のことである。

画像に限らず、音声でも同じであるが、アナログ記録をデジタル記録に置き換える場合に、高品質システムの実現を前提にした場合の、その標本化周波数と量子化ステップサイズ(=ダイナミックレンジ)の決定は、非常に難しい問題となる。何故ならばこの場合、一般に雑音と信号の区別が容易につかず、また、ダイナミックレンジはかなり大きいからである。

もちろん、高品質を追求しない場合は、これはある程度の割り切りで対応できる。PCM電話通信システムの8kHzサンプル、8bA/ μ low圧縮^{*2}はこうして決まった。しかし、高品質となるとこの割り切りが飛躍的に難しくなる。それは、結果として、人間の聴覚・視覚の限界を求めることになり、それはひどく個人差がある。CDの場合にも、結局は名指揮者のカラヤンの関与があって44.1kHz・16ビットとなったと伝えられているが、画像の場合は、カラヤンに対応する人は、結果的に出てこなかった。

35mmフィルム映画をデジタル化する場合、毎秒コマ数は伝統的な24コマを採用することが最も自然である。自然であると述べたのは、それを変えるとしたらいくつにすべきかについて、明確な数値を出しにくいという意味である。

現在DSCはその全盛期を迎え、フィルム静止画カメラの出荷量を数年前に超えている。この事実は多くのカメラ店、AV機器販売店でそのショーウィンドウの幅の比較から確かめられる。

これらDSCの画素数は400～600万画素を主軸にして、1,000～1,400万画素程度の最高級機がある。この事実と先に述べた4Pと8Pを考慮すれば、つまり、8Pが500～600万画素程度とすれば、4Pの映画フィルムはその半分の200～300万画素で充分ではないかという議論が生じる。この200万画素は、HDTVから派生した1080P(1,920×1,080=2,073,600画素)と呼ばれる規格にほぼ等しいから、これをデジタルシネマの標準規格にしようとする動きは古くか

^{*2} アメリカ、日本、カナダ等は μ low、ヨーロッパはA lowを採用している。

らあり、かなり強かった。もしこれが実現すれば、まったくライバルであった映画とテレビとが、共通の技術で展開されるはずであった。事実、ジョージ・ルーカス監督が「スター・ウォーズシリーズ」をもって、こうした動きの推進役を果たしてきた。CDにおけるカラヤンのような位置を占める可能性があった。

3. 映画のデジタル化 (2)

一見、論理的な先の結論に対し懐疑的な見方をしていた人達もいた。一つは35mmフィルム映画の画像品質にこだわりを持つフィルムプロパーの人達で、もう一つは著者が率いたNTTを中心とした超高精細 (SHD: Super High Definition) 画像の研究者達である。ここで超高精細とは、総画素数約800万 (縦: 2,000画素, 横: 40,000画素) のシステムを指している。私が2002年頃ハリウッドのフィルムプロパーの人達と話した結果では、彼らは厳密な評価テストを行っていたわけではないが、とにかく1080Pの画像が35mmフィルムには達していないという感触を持っていた。彼らの確信は、CG作成の体験から来ているように思われた。

先の結論は何が問題なのか。それはDSCは最大でもA4サイズ程度の大きさの印画紙で画像を評価するが、映画は300インチ (3.7×6.6m) 程度の画面で画像を評価することによる。大きさも違い、紙とスクリーンでは画像の質感もまったく異なってくる。この状況の違いを考えれば、簡単に一方の結論から他方への結論にできないのである。

1990年の末期に1080Pを推していた人達から私達は「映画監督が、映画関係者がこれで (1080P) で充分だと言っている」との言明を繰り返し聞かされた。ただし「それは誰ですか」という問いにはほとんど答えてもらえなかった。確かに1990年代の末期には1080Pの機材はあるレベルに達していて、これに具体的な画像で反論することはできなかった。そのために1080P推進派の勢いは十分に強かった。

4Pの35mm映画フィルムの1コマを、どの位の画素数で何ビットでデジタル化すれば良いかの議論は、フィルムの特性を調べれば解りそうに思える。しかし、この問題はそう単純に解ける問題ではなく、非常に難しい問題である。

まずフィルムの銀塩粒子の大きさからの議論がある。これは、物理的に測定される値であるから、DSCの普及以前に商業技術誌でもたびたび取り上げられた議論である。これをやるととんでもなく大きな数値になる。フィルムの銀塩粒子の大きさは0.1~1μm程度であるが、フィルムの感度と反比例する。つまり、高感度のフィルムは粒子が粗く、低感度のフィルムは粒子が細かい。映画はさまざまなシーンでさまざまなフィルムが使われるので、これをどう評価するかの問題も生じる。

単純にこの粒子の大きさを解像度にはできない。CCD/CMOSセンサの場合と異なりこの粒子一つ一つ規則正しく並んでいるわけではなく、多少の粗密を持って不規則に並んである。そのためにRMS (Root Mean Square) 粒状度が使われるが、これは物理的な粒子の大きさの数倍に

なる。次に、この粒子一つ一つを選んで感光させることは非現実的である。できないことはない*3というが、普通のカメラの交換レンズを用いた場合は絶対に無理である。

とにかく現実的であろうがなかろうが一つの目安として、35mmフィルムの1コマのサイズである36×24mmに、0.1~1μmの銀塩粒子がいくつあるかを計算し、それを画素換算すれば、(36,000×24,000~360,000×240,000) 画素という、とんでもない数の画素数が計算される。これをRMSで計算し直しても巨大すぎることに変わりはない。これが非常識な数値であることを直ちに見抜いたのは、早くからフィルムのデジタル化をドラムスキャナで行っていた印刷関係の人達であった。

言うまでもなく、フィルムの画像品質にはフィルムだけでなく、さらに撮影対象、ライティング、レンズの種類、絞り、ピント、シャッタ速度、現像、コピー条件等が深く関わってくる。これだけいろいろな要素を考慮して、フィルム粒子の物理的の大きさから画素数の結論を出すことは事実上不可能になる。

映画は大きなスクリーンで観るものであり、この大きなスクリーンに画像を投射するにはプロジェクタが必要なる。このプロジェクタとスクリーンの特性も当然のこととして画像品質に大きく関係する。もちろんこれにスクリーンの大きさ、評価者とスクリーンの位置関係も加わる。

4. 映画のデジタル化 (3)

現在実際に機材として存在していて、G・ルーカス監督も用いた1080Pをデジタルシネマの標準とするか、それ以上の画素数を必要とするかどうかの議論は大激論となった。しかしそれは非常に奇妙な議論であった。何故ならば両者に決定的なデータを持たないままに議論をしていて、ある意味では宗教論争的色彩を持っていた。

1080P陣営は既存システム (ビデオカメラ、プロジェクタを含む) があり、実際に作品があり、その作品をスクリーンで観れば、「これが次世代の映画となるデジタルシネマ規格として充分であることは解るではないか」と迫った。しかしフィルムプロパー側は部分的にこれが成り立つとしても全面的に納得しなかった。

フィルムプロパー側の制作者、配給者の言い分は「人工的・空想的なSFXでない自然描写画像の極みをつくした作品で見せて欲しい」というものであった。著者が2003年にハリウッドで会ったある大手映画配給会社の社長もこれと言っていた。自然描写の極みは、実際の雄大な風景の中で撮影した映画と言った人もいた。著者のような技術者・研究者からみれば、1080P陣営の既存システムには少々問題があった。それは本当の1080P画像を上映できるプロジェクタがなく、SXGA (1,280×1,024画素) 用のDLP素子でプロジェクタを作っていたことである。1999年6月にロスアンゼルスとニューヨークで「スター・ウォーズ」を上映し

*3 レーザ、電子ビームを用いれば可能であるが、実用的意味はまったくない。

たプロジェクトもこれであった。いくら何でも横方向の1,920画素を1,280画素で間に合わせるのは非常に無理があった。

画像品質の不十分さを指摘すると、「SXGA用素子を用いてもこれ位の画像品質が実現できるので、将来できる1080P用素子を用いれば、より十分な画像品質が実現できる」と1080P陣営は答えた。1080P用素子を用いたプロジェクトが出荷されたのは、それから4年後のことであった。その間に技術は大きく進歩し、1080Pの約4倍の画素数を持つプロジェクトが、2004年に民生品として販売されつつある。

一方、フィルムプロパー側は、この議論に置いてフィルムの画像品質を言う際にどのフィルムに対して言っているのかについて明確さを欠いていた。フィルムはアナログであり、コピーの度毎に劣化は免れない。一般の映画館で上映される上映プリント（フィルム）は、マスターであるアンサープリント*4から大抵4～6世代目である。アンサープリントと上映プリントの差はスクリーンで観れば誰にでも解る位の差がある。デジタルシネマの議論に35mmフィルムの基準はアンサープリントであることが明記されたのは最近のことである。要するに、双方ともそれなりの曖昧さを持ったまま議論をしていたことになる。

5. 衝撃のデビュー

こうしたどちらも決め手を欠いて議論していた2001年8月、ロスアンゼルスで開かれたSIG-GRAPH2001において、1080Pの約4倍の画素数を持つデジタルシネマのデモ上映をNTTの研究所が行った。このダウンタウンとハリウッドは数kmしか離れていない。このデモは大きな反響を呼び、ハリウッドから予想以上に多くの人がおしかけて来た。思えばこれが分水嶺であった。フィルムプロパー側は、今までは1080P陣営から「そんなことを言ったって、実際のシステムがないではない」と言われてきたが、これ以後は「あれがある」と言えるようになった。

その後ハリウッドからの要請に応じて、このデモは2002年に2回（6月、10月）行った。また、2003年6月にはヨーロッパ（ロンドン、ローマ）でも同様のデモが行われた。回数を重ねることにハードウェアも改良を加え、かつ色補正も精密になった。ローマにおけるデモでは、著名な「光で描く（Wrighting with Light）」撮影監督であるV. ストラーロ氏*5が参加し、有名な映画制作総合施設チネチッタ内の上映施設で氏の作品を上映して、V. ストラーロ氏と観客から絶賛を浴びた。

こうした動きに触発されて、ハリウッドのメジャースタジオが2002年3月に作ったデジタルシネマの推進組織DCI（Digital Cinema Initiative）は、著者達の超高精細画像シス

テムの規格を組込んだその仕様書案（Digital Cinema Specification）を次々に公表してきた。すなわち、2003年5月にv.2.0を、2003年11月にv.3.0を、2004年6月にv.3.5を、2004年7月にv.4.0を、2004年8月にv.4.2を発表して現在に至っている。

これらの仕様書案には多少の差異があるが、一貫して仕様の中心に4Kシステムを置いている。彼らは4Kという言い方をするが、これはフィルムプロパーの人達が映画フィルムのデジタル化において、画面横方向の画素数を言う習慣から来ている。何れにしても4Kとは超高精細画像である。

ハリウッド・ヨーロッパにおけるデモとこのDCIの仕様書案の公表時期を比較して見ていただければ、この<超高精細画像システムの規格を組込んだその仕様書案>という言い方が決して過大評価でないことはご理解頂けるであろう。もちろんDCIは今まで一度も超高精細画像ということを仕様書の中でも記者発表でも言っていない。これは著者にとって少々残念なことであるが、彼らの立場からすればやむを得ない事情も理解できる。

少なくとも2004年前期迄にDCIは彼らの言う4Kシステムを持っていなかった。それでも4Kシステムの規格案を推進し、著者達との良好な連携、例えば著者達の要請に基づいて、2003年、2004年に二度にわたりDCIの主要メンバーを日本での講演会に派遣し、また、DCIが作ったテスト画像（StEM）の利用に便宜を図ってくれたことなどから、超高精細画像がDCI規格になったということを立証していると言えるであろう。なお、DCIは2005年中に解散し、その仕事はSMPTEに引き継がれる予定である。

6. 規格の概要解説

DCIの作った仕様書案の詳細は実際の仕様書案を見ていただくことにして、ここではその概要を述べる。なお、この仕様書案は、DCIのホームページ（<http://www.dci-movies.com/>）からPDFファイルで関係者に入手できる。ただし、DCIへの自分のプロフィールの登録が必要である。

この仕様書で示されている規格の概要を表1に示す。

ここで表1の*の部分に注意されたい。HDTVの規格（1,920×1,080）はそのまま取り入れられていない。128画素（=2048-1920）の違いは画像品質から見れば大きな差は生じない。またHDTVのフレーム数30/25は採用されていない。

これ以上の詳細な事項、例えば色特性等は仕様書案を参照されたい。著者の意見では、それらは概ね妥当な値にな

表1 超高精細画像システムの規格の概要

画像について	画素数:4,096×2,160, 2,048*×1,080
	1画素ビット数:12ビット×3
音について	毎秒フレーム数:24(4,096×2,160, 2,048×1,080), 48(2,048×1,080)
	圧縮アルゴリズム:JPEG2000
音について	ビット長:24ビット
	標準化周波数:48KHz, 96KHz
	チャンネル数:16チャンネル(ただし予備も含む)

*4 アンサープリント（Anser Print）とは、上映用マスターフィルムである。この奇妙な名前の由来は、制作側からの返事がなければこれ以上のプロセスが進めないことから生じた。一種のJargonである。
*5 『暗殺の森』、『ラストタンゴ・イン・パリ』、『地獄の黙示録』、『ラスト・エンペラー』等数々の作品の撮影監督を務め、3度のオスカーを受賞した。

っている。また、仕様書の約1/4はセキュリティについてであり、これは著作権に関してナップスター事件のようなことを引き起こさないような配慮（対策）である。ただし、このセキュリティの記述は要求ベースの外部仕様記述であり、仕様に相互矛盾がないか、セキュリティホールがないか等の検証は今後の課題である。また、このセキュリティスキームについてコンテンツ配信を受ける映画館主組合のNATO (National Association of Theater Owners) との間に、ビジネスモデルの違いがかなり大きいという問題があり、これを完全に解決するには多少の時間が必要である。

7. 今後の動向

ここで述べたDCIの規格は、今後とも小さな変更はあっても大きな変更はなく、SMPTEから世界標準として定着するであろう。SMPTEがこれを世界標準としてITU, IECに委ねるかどうかはまだ不明である。世界の映画市場におけるハリウッドの影響力を考えれば、ハリウッドがSMPTEまでで標準化の活動は終わったと考えるのが自然である。著者もこうした立場に立つ。つまりDCIの仕様がSMPTEの仕様になってしまえば、ITU, IECが何を決めてもそれは大勢に大きな影響はないであろうという見方である。

現時点においてDCIの規格に対する異論は、4Kがホームシアター、ミニシアター等に対してオーバスペックであるというものがある。それに対してJPEG-2000の多重解像度対応と結びついた2K規格も組込んであるという立場を、DCIとそれを引継ぐSMPTEは取るであろう。HDTVとこのデジタルシネマの2K規格の関係をどのように見るかの議論は非常に予測が難しい。

また、4Kがオーバスペックという意見に対しても「はたして本当にそうか」という反論がある。直視型でもプロジェクションでも50～100インチで4Kの画面はすでに実現可能であり、こうした大型画像に対して従来のHDTVで成立した最適視距離という概念は成り立たない。このために画像品質の議論は収束せずに、オーバスペックとは画像品質の議論ではなく、経済性の議論の傾向が強い。

経済性の議論は量産体制の確立の議論になる。デジタルシネマに必要な機器はほとんどがLSIと液晶であり、これらは量産効果が最も確実に成り立つデバイスである。かつてのメインフレーム、WS (Work Station)、PCがPCに収束したような現象が、デジタルシネマに必要な機器でも起こると考えてよい。もちろんそれを誰がやるかは現時点では不明であるが、技術的には可能である。

CDでもその前のLPでもプロ用、アマチュア用という区別はなかった。高品質を追求する音楽観賞用途では、提供側は最高品質のコンテンツを提供し、それをどれだけの品質で使うかはユーザの判断に任せる形になる。もしこの形式がデジタルシネマでも成り立つとすると、ここで述べたDCIの規格はデジタルシネマの規格として、映画館からホームシアターまでの唯一の規格となる。UNIXがメインフレームからPCの時代まで、紆余曲折はあっても生き延

びたような形に近い。

今後のデジタルシネマは、200～300インチクラスの非常に大きな画面に対して、かなり多数の人達が少し距離を置いて観るか、50～150インチの大きさの画面で、数人がかなり画面に近づいて観るかの選択しかないかもしれない。この場合提供者側は一種のファイルしか提供しないことになる。

この予想に対してさまざまな意見が現時点ではある。そこまで4Kのプロジェクタ等が安くなるかの疑問が生じる。著者はなるであろうと予測する。10年前に3GHz以上のCPUが家庭用PCに使われることを確信した人は多くはないであろう。3GHz以上のCPUよりも4Kシステムは家庭において娯楽、教育を含めた幅広いさまざまな使い道がある。4Kのプロジェクタ周辺の機材、例えば、光ネットワーク、磁気ディスク、PC、リアルタイムデコーダ等は、誰もが経済性の問題はないと考えている。

8. むすび

映画のデジタル化は制作・配給（配信）・上映の三つの面に大きな影響を持つ。制作に関してはデジタル化はすでにかなり進行している。しかし、デジタル化が制作に留まる限り規格の問題はあまり顕在化しなかった。何故ならば、それは結局35mmフィルムで配給され上映されるものであり、35mmフィルムというプラットフォームにデジタル化は隠されるからである。現在のデジタルシネマは制作に限定されず、配信・上映を含むデジタル化であり、これは100年の長きにわたって映画を支えたフィルムをなくす展開となっている。

当然この結果は、従来の映画のビジネススキームがそのままであるかの保証はまったくない。その具体像を描ききすることはまだできないが、その変化の中心はいくつか見えてきている。それらは、①コンテンツ供給がフローからストックへの変化を起こす、②著作権管理がオンデマンド対応で多様かつ厳密になるの2点である。もちろんこれらに使い易さが常に求められることは言うまでもない。

これらの点とDCIの規格はまだ完全に適合していない部分があり、それらは今後の課題である。しかしこれはこの規格を基本に修正・付加する部分が生じるだけのことで、それ以上のものではない。

(2004年10月25日受付)

文献を省略するが、DCIと著者等が設立したDCCIの下記のURLが非常に参考になる。

- ・ <http://www.dcimovies.com/>
- ・ <http://www12.ocn.ne.jp/~d-cinema/index.html>

小野 定康 1976年、慶應義塾大学工学部電気工学科博士課程修了。同年、NTT研究所入所。小野特別研究室室長を経て、2003年、同大学大学院教授。2004年、同大学DMC教授となり、現在に至る。デジタル信号処理、高品質デジタル画像処理等の研究に従事。工学博士。