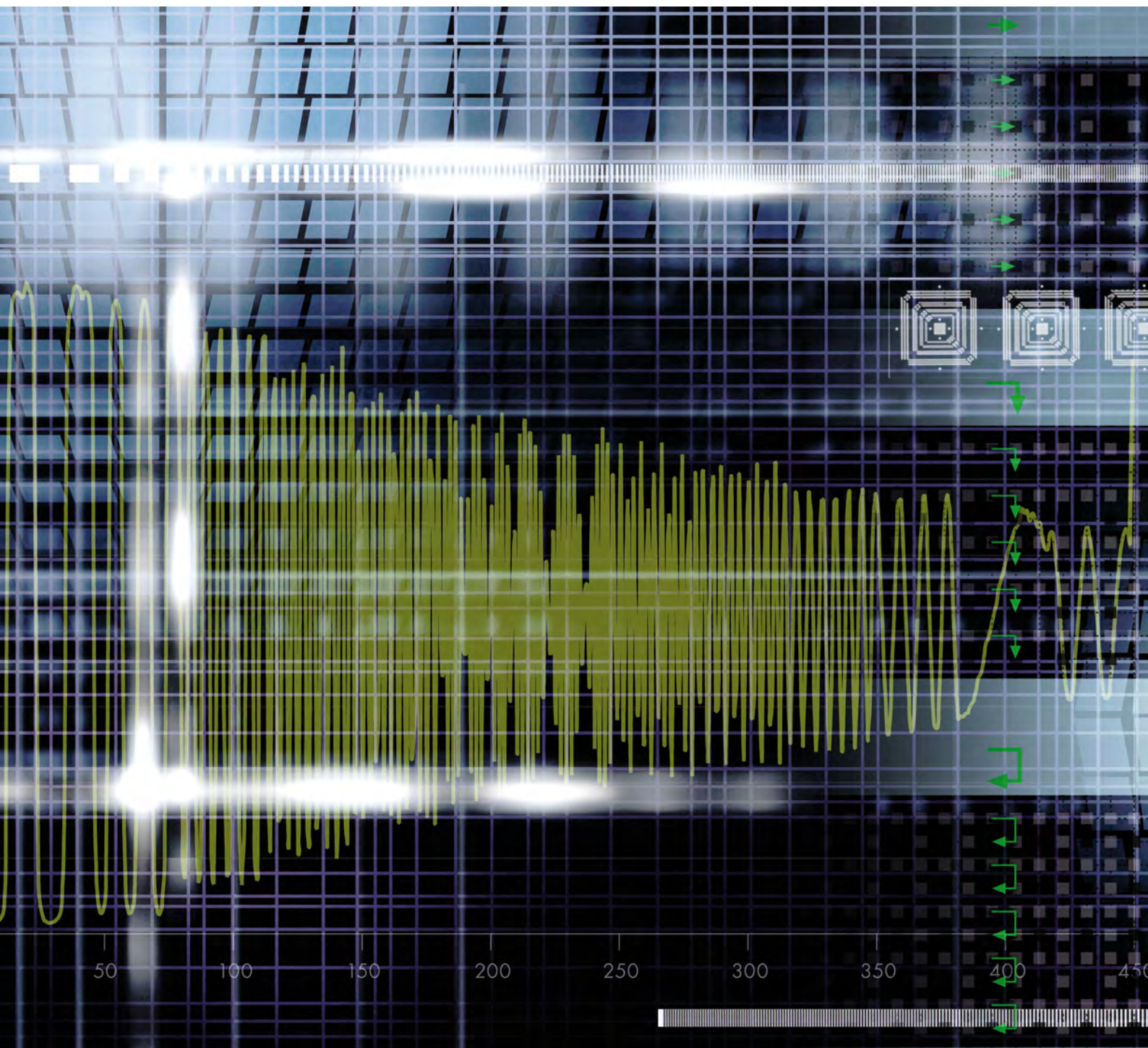


4K+ Systems

映画映像の基礎理論



著者について：

ハンス・キーニング博士

1996年からARRIのR&D部門に勤務。画像解析が専門。

2004年から2006年にかけてアリスキャンのR&Dプロジェクト・マネージャーを勤め、現在は4Kプロジェクトの主幹。

4K+ システム

映画映像の基礎理論

序説	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	4
第一部	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	5
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	8
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	9
第二部	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	11
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	12
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	14
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	15
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	16
第三部	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	18
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	19
第四部	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	20
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	22
	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	23
参考文献	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	23

序説

5年前はデジカメとケータイが家電製品の中では最大のものだったが、今ではHDが一番「ビッグ」なようだ。HDの「H」はhype（ゴマカシ）のHだと考えることもできる。

プロフェッショナルには、HD(1920x1080ピクセル、24フルフレーム以上、色分解能4:4:4)については明確な定義があるが、電気店で見かける「HD対応」ステッカー付きの製品はかなり低い仕様である（1280x720、4:2:2、圧縮、等々）。

ショーウィンドウのモニターが表示しているのは、普通は補完されたSD(720x570<PALの場合>)画像である。HDというキャッチフレーズの家庭にとっての意味は、画質の差はあるが、プロフェッショナルのポストプロダクションにおける2K/4K論争と同様、期待以上のものではなく、基本的情報さえこれ以上矛盾だらけには成り得ない、というほどである。主な映画作品が4Kで制作され、成功している例が増えている。

今こそ2K、4Kの本当の意味を技術ベースで評価するには最良の時期である。この記事は、そのスタートとするものである。

解像度（レゾリューション）とシャープネス（鮮鋭度）

解像度の決定には通常、徐々に密度の高くなる縦縞のラスタ画像を用いる。実際の映像における一般的な例として、遠近を付けて撮った垣根を見てみよう。

図1の垣根の画像中、距離が遠くなるに連れて板の間隔がぼんやりしてくるのが分かる。この効果は、あらゆる光学像の問題である。映像の手前側では板と隙間がまだパースペクティブによってくっつき合っていないので、両者の明るさの差は明瞭である。板と隙間の間隔が奥の方で小さくなるに連れ、輝度の差が無くなっている。

この効果をよりよく理解するため、黄色の矢印に沿って明るさの値を採り、X、Yのグラフ（図2）に示す。Y軸に見られる輝度の差を「コントラスト」という。この曲線は「正弦波発振」と同様である。輝度が時間的にではなく左から右へと空間的に変化しているため、X軸を「空間周波数」という。

例えば35mmで撮影した画像上で板の間隔（図1オレンジ矢印）を計測する。この距離が輝度変化グラフ（図2）の一周期である。もしフィルム画像上でこの期間が連続しており、例えば0.1mmにわたって続いていたとすれば、それは10ラインペア/ミリ(10Lp/mm、10サイクル/mm、10期間/mmともいう)の空間周波数、ということである。これを視覚的に言うと、ラインペア一組は常に板1枚と隙間一つのペアである。

これは図1の画像中に簡単に見つかり、再現された構造が密であればあるほど、画像中のその点におけるコントラストはより不明瞭になる。この構造をはっきり識別できなくなった時、解像度の限界に達したのであり、それは解像度限界（図2赤丸）が板と隙間をハッキリ区別できるギリギリのコントラストしかない空間周波数のところにある、ということである

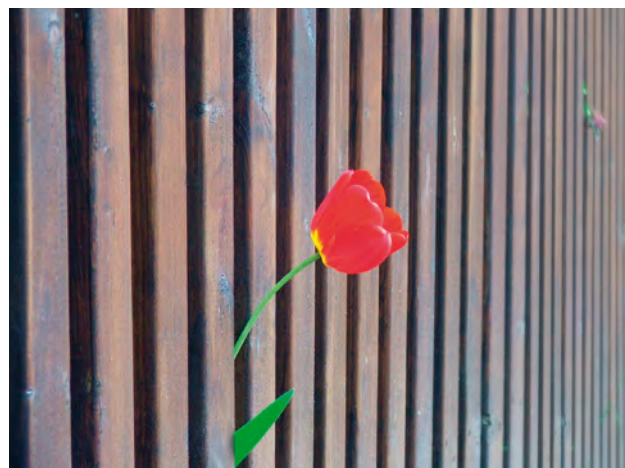


図1. 解像度テストパタンの実世界における例

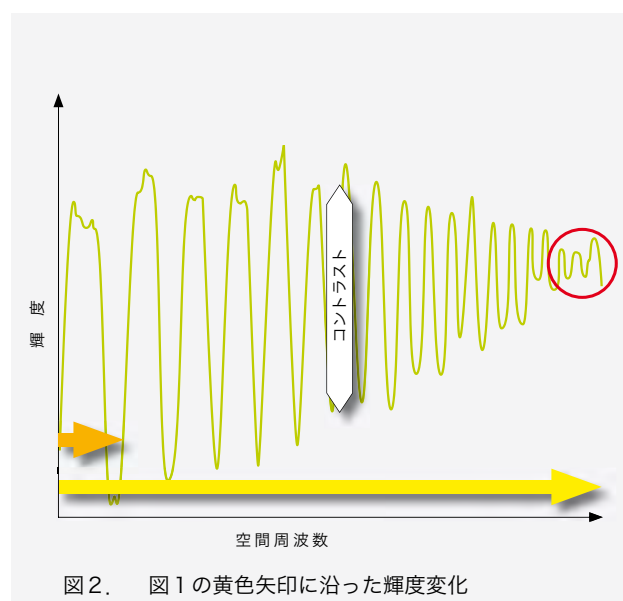


図2. 図1の黄色矢印に沿った輝度変化

第一部：解像度とシャープネス

テスト

図1の垣根を例に取ると、一方向の解像度しか説明できない。標準テスト画像とラインペア・ラスタ画像によって解像度を決定・解析するシステムについては、国際的にも科学的にも諒解されている。それに基づき、水平と垂直のラスタが全面に分布したチャートを使用する。

このようなテストをフィルムカメラで行うには、図4のような設定をして使用する。透過式テストパターンを25fpsで撮影・現像する。図5に画像中心部の顕微鏡像を示す（図3のオレンジ枠内）。

35mmの解像度限界

カメラ☒ Arricam ST
フィルム コダック5245カラーネガ E.I. 50
レンズ☒ HS 85mm F2.8
距離☒ 1.65m

アリのサイトから35_micro.tif画像をダウンロードしてモニターにズーム100%で表示すると、ようやく弁別可能な空間周波数の上限は、80~100 Lp/mmの間にあることが分かる。ここで上限を80Lp/mmと仮定して計算すると、最小弁別距離が求められる。

$$1\text{mm}/80\text{Lp}=0.012\text{mm}/\text{Lp}$$

ラインと隙間は同じ幅であるから、

$$0.012\text{mm}/2=0.006\text{mm}$$

が再現可能な最小ディテールである

16mmの解像度限界

カメラ☒ Arricam 416
フィルム コダック5245カラーネガ E.I. 50
レンズ☒ HS 85mm F2.8
距離☒ 1.65m

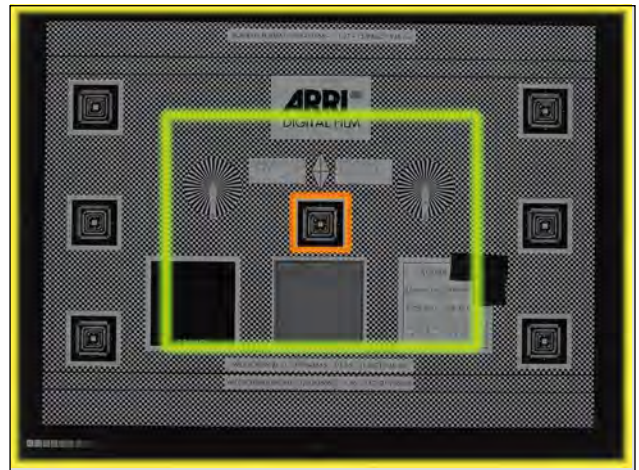


図3 ☒
35mm（黄色枠）と16mm（緑色枠）ネガで撮影したエリアと、顕微鏡で観察したエリア（オレンジ枠）



図4 ☒
透過式テストパターンを使ったカメラ解像度テストの現場

カメラだけを16mmに入れ替えて、距離やレンズなど他のパラメータはそのままにすると、結果は35mmと同じ画像で大きさだけが半分になるが、ネガ上ではディテールを全く同様に解像している。

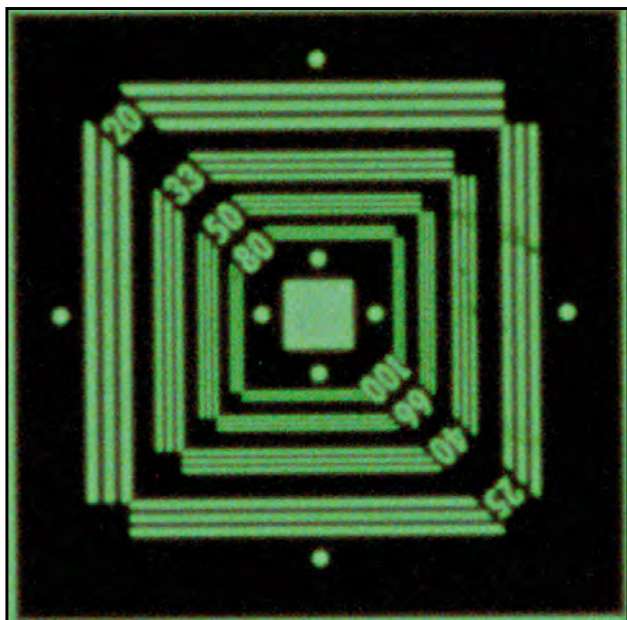


図5 a. 35mmネガの顕微鏡像

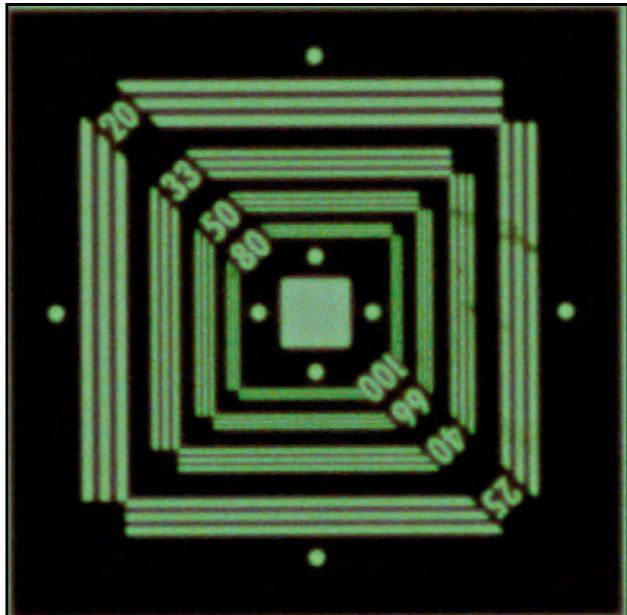


図5 b. 16mmネガの顕微鏡像

テスト結果

このテストは確かに理想的ケースではあるが、フィルムの画像格納限界をテストするためには、理想こそが最終目標である。アリのテストでは、35mmでも16mmでも最小分解可能ディテールは0.006mmの大きさである。フィルムの幅一杯だと35mmでは $24.576\text{mm}/0.006\text{mm} = 4096$ ディテール（ポイント）、16mmでは $12.35\text{mm}/0.006\text{mm} = 2048$ ディテール（ポイント）が存在することになる。ここでわざわざ「画素」でなく「ポイント」と言ったのは、アナログ世界の話しだからである。

この結果は、以下の条件付きである。

- a) 像中心を見ている
- b) フィルム感度はASA250以下
- c) 露光と現像は適正である
- d) フォーカスが適正
- e) レンズもフィルムも露光中互いに静止している
- f) 50fps以下

デジタル

もちろん今日、真に4K解像度のカメラが市場にあったとすれば、それについても、ネガ現像を除いて同じ前提条件が存在する。原理的には、このテストはデジタルカメラのテストにも適当である。しかしその場合、テスト画像は水平・垂直方向だけでなく斜め方向にも存在しなくてはならず、回転方向にもあれば理想的である。デジタルカメラ・センサーのピクセル配列（ベイヤーパターン）は、縦横正方格子状である。これによってピクセル配列と全く同一方向にあるディテールの再現は良好だが、斜めに交わる方向の構造や、水平・垂直から外れる方向のディテールについてはそうではない。この問題は、フィルムでは起こらない。「センサー素子」つまり粒子がランダムに配列されており、どの方向にも同じように反応するからである。



図6 ☒ 解像度＝シャープネス？

シャープネス（鮮鋭度）

解像度とシャープネスは同じか？ 図6の二画像を見てどちらがシャープか即断できる。左側が右側の2倍の画素数で構成されているのに、粗いディテール部分のコントラストをフィルターで増加してある右側の方が、一見際だってシャープに見える。

解像度限界は画像を構成する情報の量を言い、それを人がどう評価するかを言っているのではない。遠くにある垣根のような細部は、シャープネスの知覚には関係がない、という誤解されやすい言い方だが、人間の眼は実際に非常に細かい細部を充分解像できる。この能力は非常に遠距離にある物体に対しても有効である。しかし厳密に生理的には、精細部はシャープネスの主観的知覚には貢献しない。従って、解像度とシャープネスははっきり区別すべきである。

やや粗い映像の輪郭を決めるディテールが、シャープネスの知覚決定を左右する。映像のシャープネスは、粗めのディテールが高いコントラストで提示されたときに強く評価されるのである。

進化論の中にもっともらしい理由がある。「樹のてっぺんで飛び回っているが距離感と枝の強度という概念を持たぬサルは、死ぬのであり、従って我々の祖先ではない」と、古生物学者兼動物学者ジョージ・ガイロード・シンプソンが言っている。(http://de.wikipedia.org/wiki/George_Gaylord_simpson) 生存に必要なのは細い小枝ではなく、祖先を支えるに足る強度の枝であった、というわけだ。

MTF

Modulation Transfer Function変調度変換関数は、解像度と鮮鋭度の関係について述べており、前述の現象を科学的に確かめる基礎となる。MTFの変調成分とは、コントラストとほぼ同義である。もしコントラスト（変調度）の評価を、解像度限界近くだけでなく可能な限り多くの空間周波数に亘って行い、各測定点を線で結ぶと、MTFカーブなるものができる（図7）。

図7でX軸にはご存じの空間周波数(Lp/mm)、Y軸には輝度ではなく変調度を示す。変調度1(または100%)は完全白と完全黒の明るさの比率である。空間周波数が高くなるに連れ、つまり映像内の構造が細くなるに連れ、変換変調度は低くなる。ここに示すカーブは、図5の35mmフィルム画像のMTFを表す。このフィルムの解像度限界80Lp/mm（最小ディテールサイズ0.006mm）の変調度は、約20%である

1970年、ツァイスのエーリッヒ・ヘイナッハが証明したところによると、人間の視覚は画像を評価する時、輪郭を決定する粗いディテールの方を高精細のディテールよりも重視する。

ヘイナッハは、MTFカーブの下の部分の面積が人間の知覚する鮮鋭度の印象と一致する（いわゆるヘイナッハ積分）ことを発見した。単純化して言えば、この面積が大きくなればなるほど、鮮鋭度感は高くなる。粗い空間周波数がMTFの最も面積の大きい部分を構成していることは、一目瞭然である。右へ行くに連れ、ディテールもより細くなり、MTFの面積も小さくなる。図6のカメラの画像を再び例としてMTFを見てみると、図8の赤のMTFカーブの方が、解像度が2倍ある青のMTFカーブより明らかに面積が大きい。

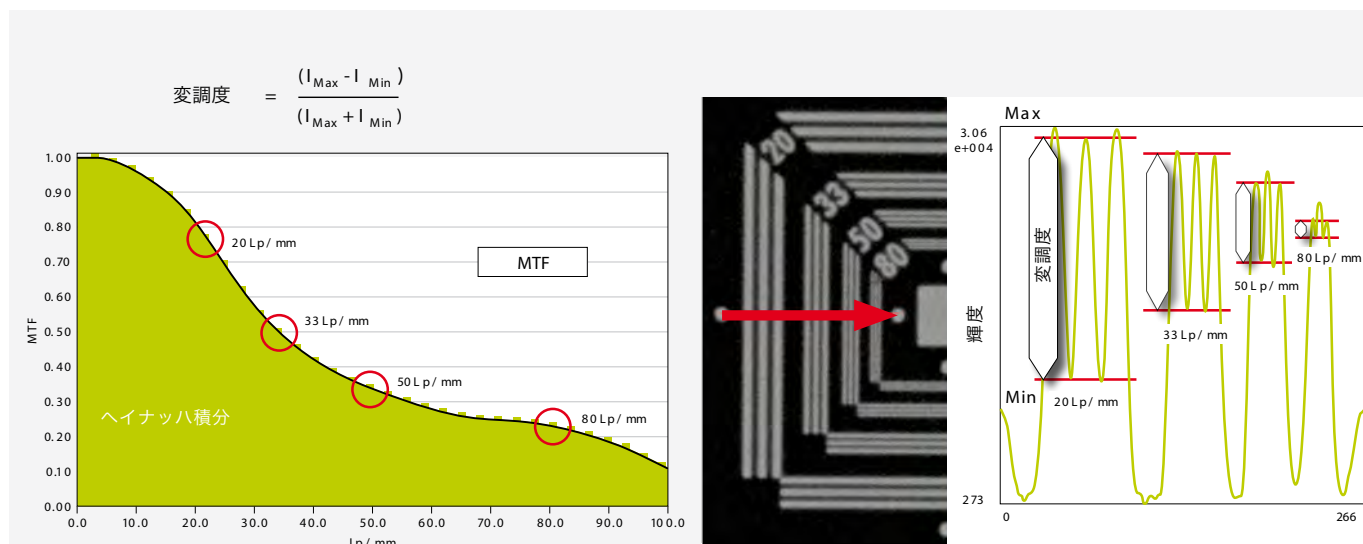


図7. 変調度とヘイナッハ積分

第一部： 解像度とシャープネス

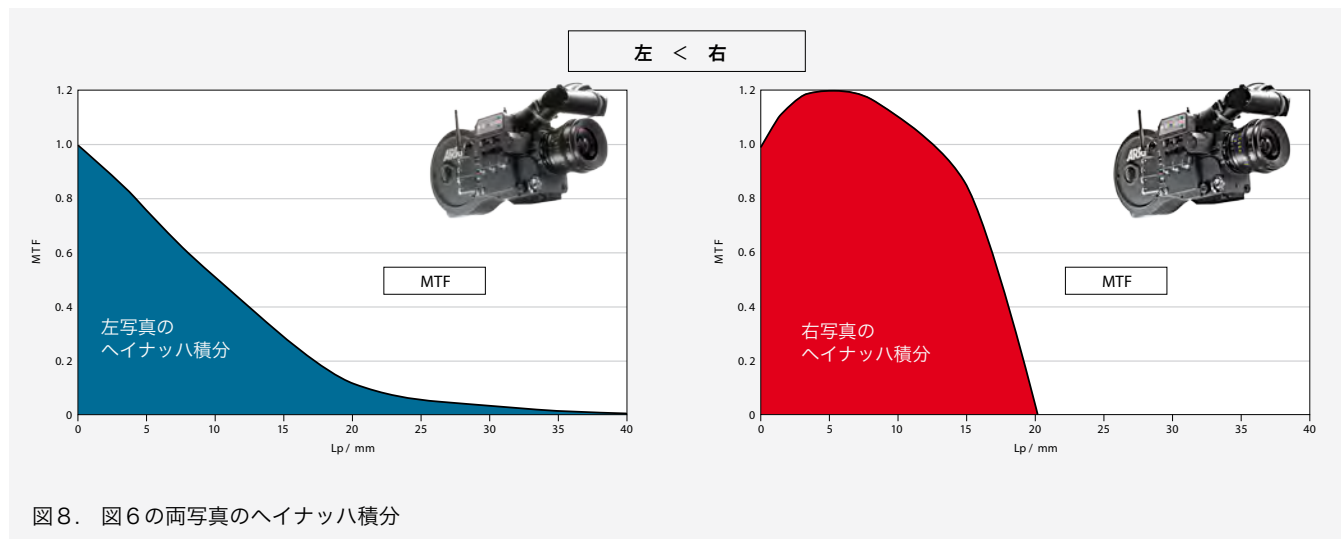


図8. 図6の両写真のヘイナツハ積分

専門家の方々へ

簡単にするため、このようなテストパターンのサイン波形のMTFと長方形CTFの輝度分布の差について説明は差し控える。しかし、関連するMTFカーブはみなISOのフーリエ変換規格（斜めエッジのFFT）に従って計測した。

第一部まとめ

シャープネスは解像度だけに依存しない。低めの空間周波数帯域の変調度が決定的に重要である。即ち、シャープネスを感じるには、粗いディテール部のコントラストが限界解像度部でのコントラストよりも遙かに重要である。16mmと35mmフィルムで十分な変調度（20%）をもたらす解像度はが0.006mmのディテールであり、空間周波数80Lp/mmに相当する。

第二部 デジタルの領域へ

ネガフィルムの情報容量はどのくらい大きいのか？
この空間情報を最大限デジタルの世界に変換するためには、どのくらいの画素数が必要なのだろうか？
また4K製作のシステムに必要な前提条件は？ これらはこの回で回答しようとする問題の一部である。

ここでの解析では、議論の範囲を解像度、シャープネス、局所的情報内容に意図的に制限している。これだけが画質を決定するパラメータではもちろんないが、4Kという概念に通常関係深いのはこれらである。

16mm、35mm、65mm ー情報の媒体としてのフィルム

どのように裁断してもフィルム素材は常に同じ性能を持っている。EI 200までの撮影用ネガフィルム上での最小の再現可能ディテール（変調度20%）は、第一部で解析結果のとおり、約0.006mmである。これがフィルムの「画素」（電子的処理では周知の概念）の大きさであると考えられる。16mm、35mm、65mmフィルムに拘わらず、乳剤の結晶構造はフィルムフォーマットとは関係がない。また、撮影レンズの伝送能力は、どのフィルムフォーマットについてもこの空間周波数（0.006mm=80lp/mm）の伝送に十分なものである。

しかし、表面に記録するこのような細かいディテールの数量ということになると、フィルムフォーマットが関係してくる。それが利用可能な記録容量の問題である。表1に「画素」の数がフレームの縦横寸法ごとに示してある。最小再現可能ディテール0.006mmに基づき、フィルムフォーマットの違いによる記録容量の差の概要を示している。

	Format	巾 x 高さ (SMPTE/ ISO カメラゲート)	Pixels
①	S 16 mm	12.35 mm x 7.42 mm	2058 x 1237 p pixels
②	S 35 mm	24.92 mm x 18.67 mm	4153 x 3112 p pixels
③	65 mm	52.48 mm x 23.01 mm	8746 x 3835 p pixels

① Super 16 mm



② Super 35 mm



③ 65 mm (70 mmプリント)



第二部 デジタルの領域へ

スキヤニング

アナログの画素は、デジタルに変換しなければならない。スーパー35mm画像を例に取ろう。条件は次のとおり：
情報の最大深度は線格子80lp/mmとして達成される。フィルム画像中の最大空間周波数は、従って1/0.012mm（線0.006mmと間隙0.006mm）である。

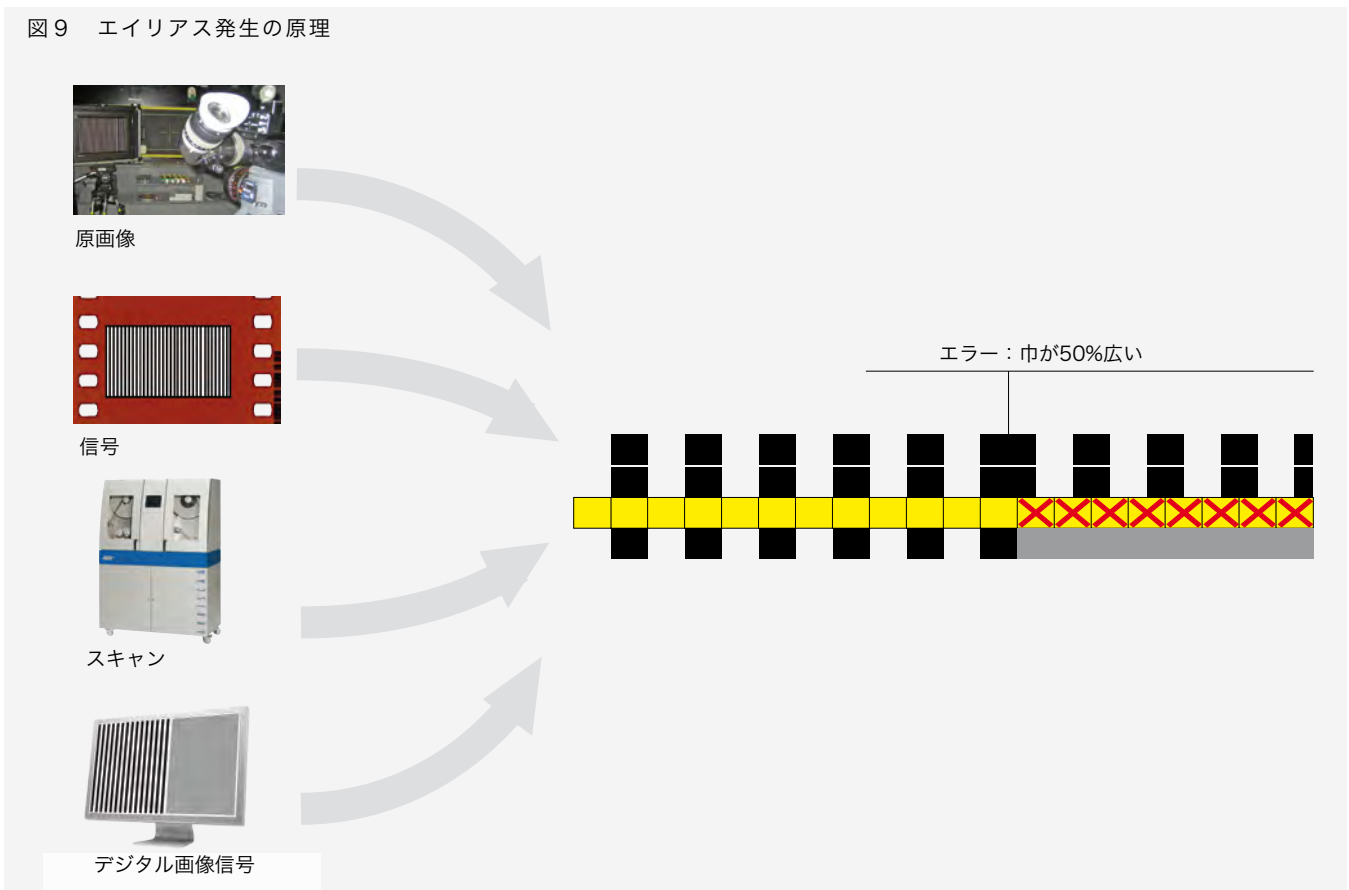
ナイキストとシャノンのスキャン理論からすると、スキャンするデジタル格子のピッチは「少なくとも」2倍以上、即ち $0.012\text{mm}/2=0.006\text{mm}$ でなければならない。スーパー35mmネガの横幅を考慮すると、 $24.92\text{mm}/0.006\text{mm}=4153$ 画素にデジタル化される。

エイリアス障害

テスト画像として線格子にこだわって、小さなエラーが忍び込んでいたと仮定してみよう。線の1本が他の線より50%太かったとする。ネガフィルムは安定してオリジナルに忠実にテスト格子を再現できるが、等間隔のデジタル格子では、均一なグレーの領域がエラーラインの端から始まっている。Xで示した画素が半分は黒線、半分は白い隙間で構成されるため、格子は単純ミックス -つまりグレーとして知覚するからである。

したがって、変換するサンプルが徐々に増加して行く空間周波数で構成される図10のようだとすると、デジタル画像は急に線と間隙の間隔と幅が正しくなくなる。これは音響と印刷業界でも出現することが知られる物理現象である。その場合「ビート波」と「モアレ」、と表現されている。デジタル化技術では、これをすべて包括する言葉は「エイリアシング」である。

図9 エイリアス発生の原理



スキャン格子と同様に並んだ同一サイズの等間隔の構造が画像中にあると、エイリアシングが現れる。違う現れ方をした例を図11に示す。「フィルム画素」の利点は、統計的に分布しており、等間隔格子には並んでおらず、フレームごとにも異なっている点である。

閾値周波数を超えるディテールのコントラストを示しており、デジタル画像中では、正しくない位置に現れ（違相）、サイズも正しくない。ところで、これは格子にだけ当てはまる現象ではない。アカデミー受賞者の上着もエイリアシングの犠牲となる。

図11は、弱め合う干渉の出始め(❶*)の部分と、疑似変調❷を示している。

* 個々の光の和よりも、合成された強度が小さくなるような位相関係にあるときの、重ね合わされた光の相互作用

ご覧の通り、エイリアスはスチル写真にとっては厄介な障害であるが、フレーム毎に変化するので動画ではもっと大幅に悪くなる。

図10. スイープ図形を6K スキャン

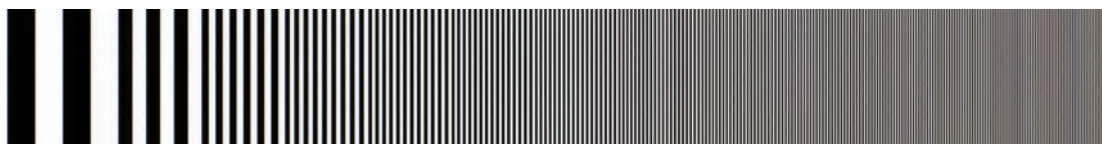


図11. 3K スキャン エイリアスが発生 ❶



図12A. 2メガピクセルのデジカメで撮影



図12B. 1メガピクセルのデジカメで撮影



第二部：デジタル領域へ

MTFへの影響

エイリアス現象の影響がMTFにも及ぶ事は明らか。疑似変調は、スキャニング限界(2)を超えた部分で新しい上昇(コブ)として現れている。

「疑似」であるのは、空間周波数(線と隙間)が実際とは無関係であるからで、実際の被写体と違って間隔が細かくならずに再び広がっている(図13、14)。

図13 矢印は輝度方向

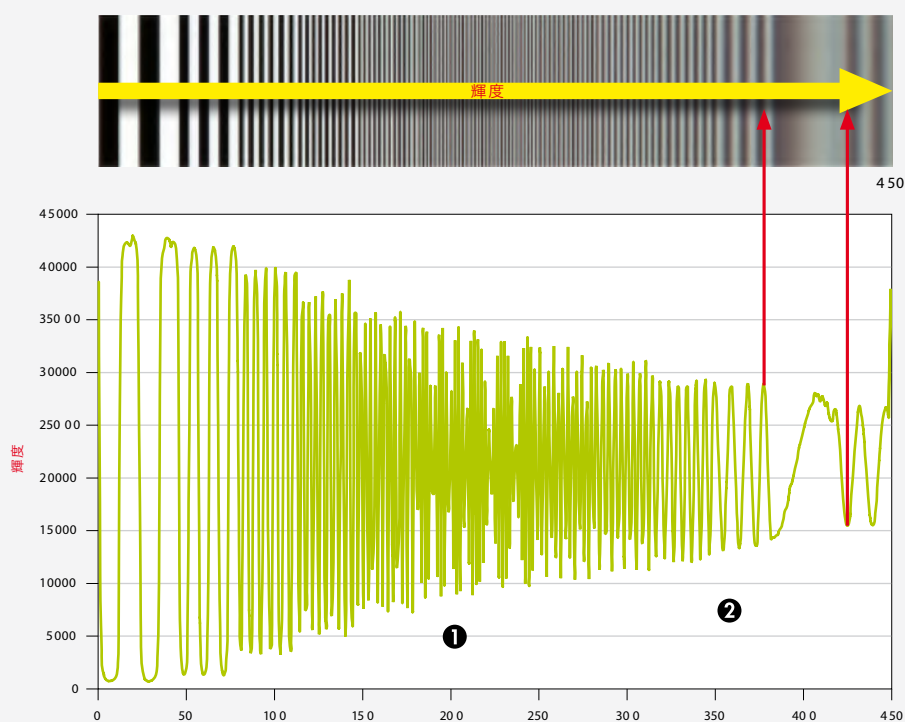
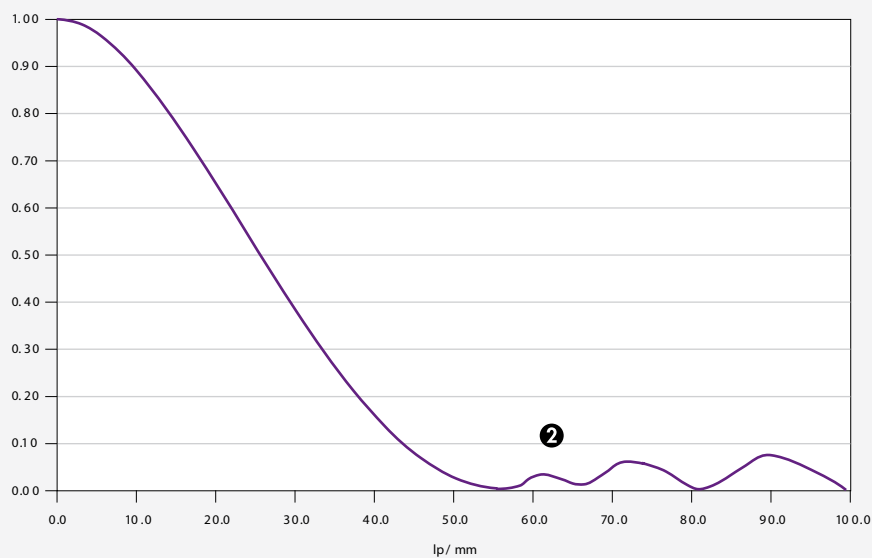


図14. MTF



エイリアスの防止

エイリアス発生を防ぐ唯一の方法は、空間周波数の高周波部分がスキャンングラスタに近付くのを物理的に避ける、即ちフォーカスをぼかすか、同じことをより制御可能な方法で行ういわゆる光学ローパスフィルターだけである。残念ながら、これは高周波域を抑えるだけではない。シャープネス知覚にとって重要な粗いディテールのコントラストにも影響してしまう。

もう一つの方法は、画素を増やしてスキャン周波数を上げることであろうが、これには弱点もある。センサーの面積は無制限に大きくできないので、解像度を上げるためには個々のセンサーエレメントはより小さくしなければならない。しかし、エレメントの面積が小さくなるに連れ、感度は下がって行くのである。従って得られた信号は増幅せねばならず、ノイズが増え、画質が劣化する。最良の解決法は二つの中間にある。3 Kセンサーの大面积（画素大、ノイズ少）と、解像度増大のためのマイクロスキャン（倍加して6 K）の採用が、この問題に対する最良の解決となったのである。

ポストプロダクションにおける最大解像度は現在4 Kである。マイクロスキャンで得られた6 Kデータはフィルターも使用してダウンサンプリングする。その過程でMTFが変り、

- ① 4Kスキャン周波数の半分におけるレスポンスがゼロになり
- ② スキャン周波数を超える空間周波数は抑制され
- ③ 低空間周波の変調度は増大する

(1)と(2)により画像のエイリアス障害は避けられるが、(3)はMTFカーブ以下の面積比を増加するように作用する。

第一部で見たように、これによってシャープネスの見た目の印象は改善される。ネガフィルムに存在する情報を、エイリアスなし、且つできる限り最小のノイズで、最大限にデジタルの世界に変換するためには、スーパー35 mmネガの横幅を6 Kでスキャンする必要がある。この結論は、他のフォーマットにもそれぞれサイズに比例して応分に当てはまる。

フォーマット	巾	画素数	スキャン解像度 / デジタル撮影	最終画像サイズ
S16 mm	12.35 mm	2058 p ixels	3K	2K
S35 mm	24.92 mm	4153 p ixels	6K	4K

図16. 6K/4KスキャナーのMTF

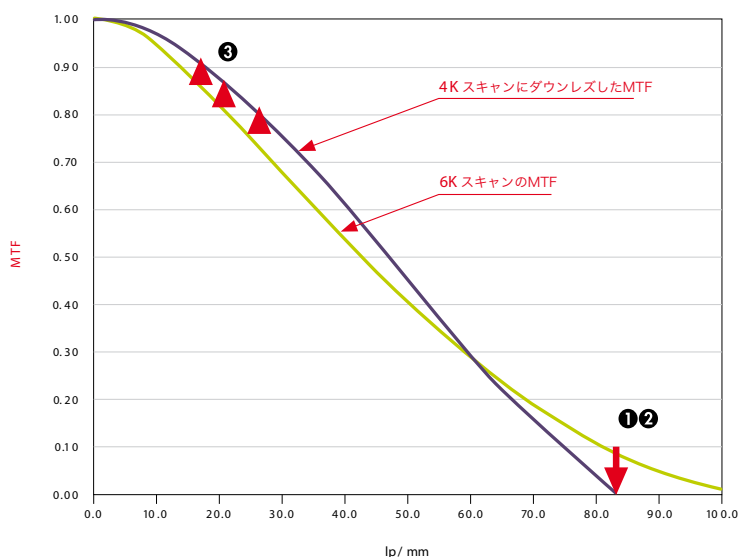
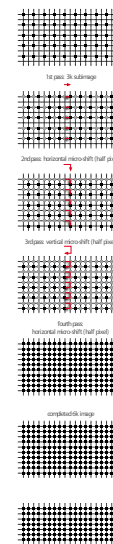


図15. マイクロスキャン



第二部：デジタル領域へ

MTFカスケード理論

デジタル＝アナログ・ハイブリッドのポストプロダクションチェーンを通じて、実際に生じる損失は何か？ プロダクション・チェーンの各要素固有のMTFを掛け合わせると、システムMTFが得られる。いくつかのMTFカーブの簡単な掛け算によって、主観に影響された評価を排除して、比較することができる。また、いったんチェーン内の個々の要素のMTFが決まると、カーブの掛け算によって、チェーン内のどこの期待値でも計算可能となる。

MTFカメラ(レンズ) x MTFフィルム x MTF スキャナー = ?

最初の予測を出す絶対許容される方法は、メーカーのMTFデータを掛けることである。しかし、こういうデータの背後には非常に楽観的な数字があることが常で、この方法による計算はベストケースしか示さないことを言うておかななくてはならない。ここでは、実測値を使用している。生フィルムのMTFをレンズのMTFに掛けることはせずに、露光された画像のMTFを直接計測し、4KスキャンのMTFを掛ける。

図17.MTFカスケード理論

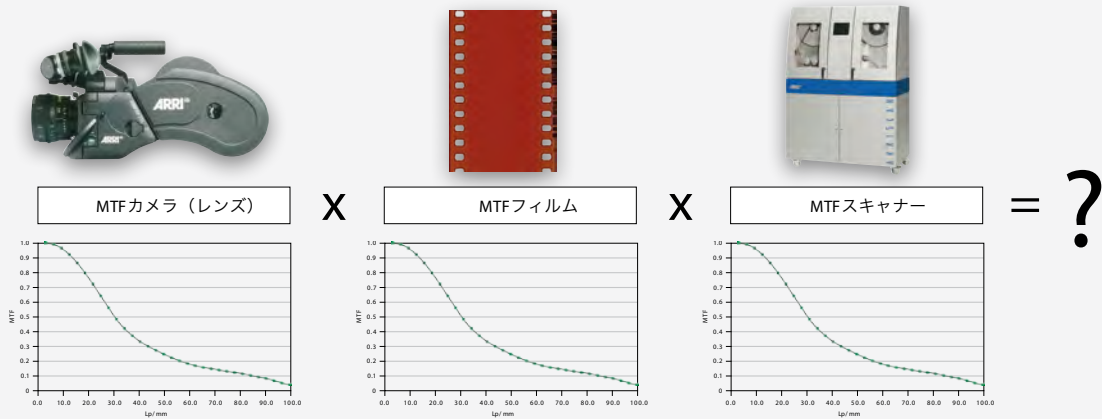


図18. 4Kスキャン結果のMTF

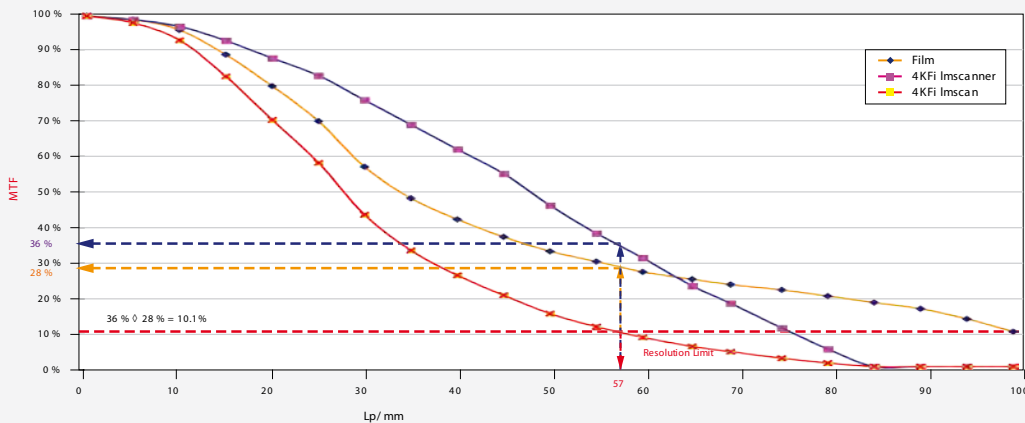


図19. 真の4K制作チェーン



結果は何を示しているか？

4Kスキャンした35mmネガのMTFは、56lp/mm強の使用可能な変調度しかなかった。（スーパー35mmの横幅を3Kスキャンしたのと同様）解像度限界は10%変調度で伝送できる空間周波数によって定義する。この結果は、スキャナーとフィルム素材の57lp/mmに於ける変調度を掛け合わせて算出して求められた。

$$\text{MTF}_{4K_scanner}(57\text{lp/mm}) \diamond \text{MTF}_{exposed_lm}(57\text{lp/mm}) = \text{MTF}_{in_4K_scan}(57\text{lp/mm})$$

$$36\% \quad \diamond \quad 28\% \quad = \quad 10.08\%$$

ところで、4Kチップ装備のデジタルカメラも同じである。その場合、エイリアシングが出るので、ローパスフィルター（実際にはわざとフォーカスをボカしたのだが）を使用して、1/2サンプル周波数(80lp/mm)の変調度をゼロに抑え、エイリアスの発生を防いだ。

結局、4Kスキャンでも3板式4Kカメラでも、実際に4K解像度を伝送することはできないということだ。簡単に納得できる話ではない。基本的には、4Kデータは事前に光学像を作ることなくコンピュータ上で1画素ずつ作れば、4K情報を持ち得る、ということである。もちろんこれは解決にはならない。将来アニメーション映画しか作れなくなってしまうからである。俳優もアクションもコンピュータ上でしか作れないなんて。ゴシップジャーナリズムにとってだけでなく、悲劇的な損失ではないか！

第二部のまとめ

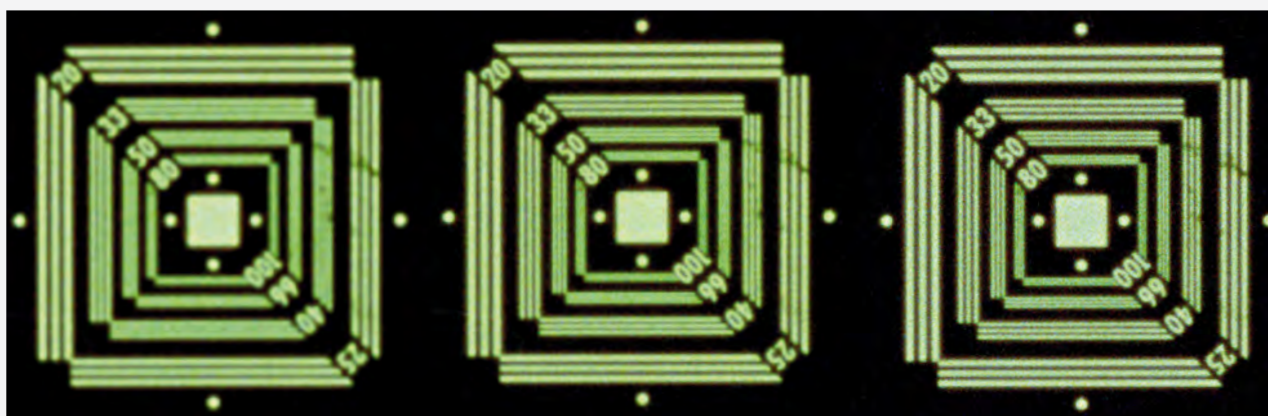
4Kプロジェクターは近い将来入手可能になるが、入力されるデータが損失なしに4K解像度を持っている場合にしか、本来のフル画質を達成できない。今のところ、適正に露光され、6K/4Kでスキャンした35mmネガフィルムが唯一、この条件に近づく動画用の撮影メディアとして現実的な存在である。

別の角度から見てみると、4K映写技術によって、35mmネガの画質をラボのアナログプロセスの過程で生じる損失なしに見ることができるようになるであろう。DIワークフローの制限条件は、(理想的に露光した)35mmフィルムではなく、4Kデジタル変換である。図17に示すとおり、解像度を上げればシャープネスは更に改善される。35mmの2.6倍もの情報量を持つ65mmだったら、どんなに高画質が得られるか想像が付くというものである。

これらの説明は、フィルム技術の現状に基づいて述べている。フィルム技術の将来の可能性についての見通しは、フジフィルムの谷忠昭氏の論文（注）を参照されたい。

少なくとも、35mmフィルムは4K以上でデジタルに変換するに十分な情報を持っている、ということである。

図20. 同一のカメラネガからの（左から）2K、4K、10Kスキャン



2K

4K

10K

第三部 制作工程： 4Kは2Kより良く見えるか？☒

このテーマで一番よく訊かれる質問は:

- ❶ アナログプロセスとDIではどのくらい画質が失われるのか？
- ❷ デジタル・インターミディエイト・ワークフローには、2K解像度で充分なのか？

アナログプロセス

「アナログコピーは常にオリジナルより悪い」。
これはよく繰り返し断言される。これはしかし、古典的ポストプロプロセスでのみ、ある程度までは正しい。たしかに画質を決定するパラメータがあり、これを充分注意深く制御すれば、確実に画質のレベルを維持できる。撮影、インターミディエイト作成、プリントまでの全過程を一貫してフォトメトリー条件を維持できれば、望みの輝度と色の情報がすべての意図と目的のために保存可能である。

しかし、構造、即ち「空間画像情報」が伝送される時には、明らかな画質の損失が生じ得ることは確かである。つまり、解像度とシャープネスが減じる。これは掛け算のルールの結果として起こる。図21これは、オリジナルで33%ある50lp/mmの変調度が、全過程を通じてどのように伝送されるかを示している。

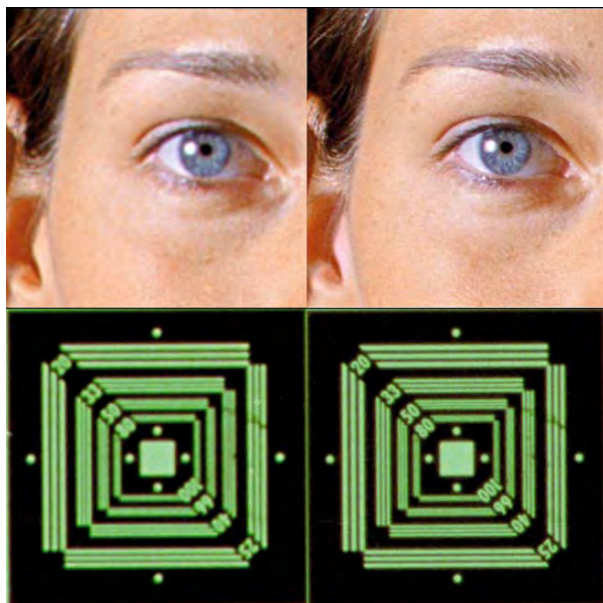
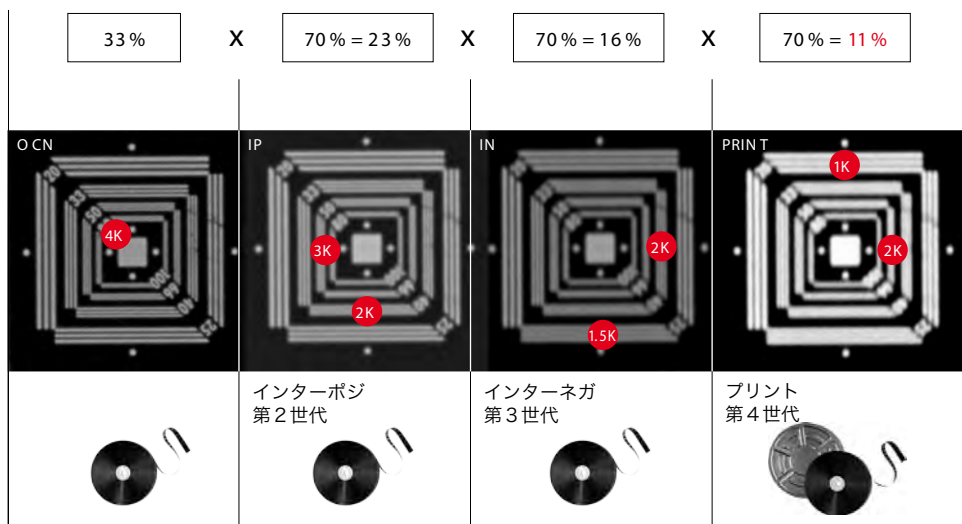


図21. 2K、4K各DIから切り出した2K(左)と4Kの画像

しかし、これはフィルム素材のMTFとコンタクトプリントが画質劣化を生じないものとしているので、理想化した公式である。現実にはそうでないことは、水平と垂直の解像度に違いがあることにも表れている。

	50lp/mmに於る MTF
露光フィルムの画像 Kodak 5205(カメラ+フィルム)	33%
Kodak 5242 インターミディエイト (IPへのコピー)	70%
Kodak 5242 インターミディエイト (INへのコピー)	70%
Kodak 2393 プリント	70%

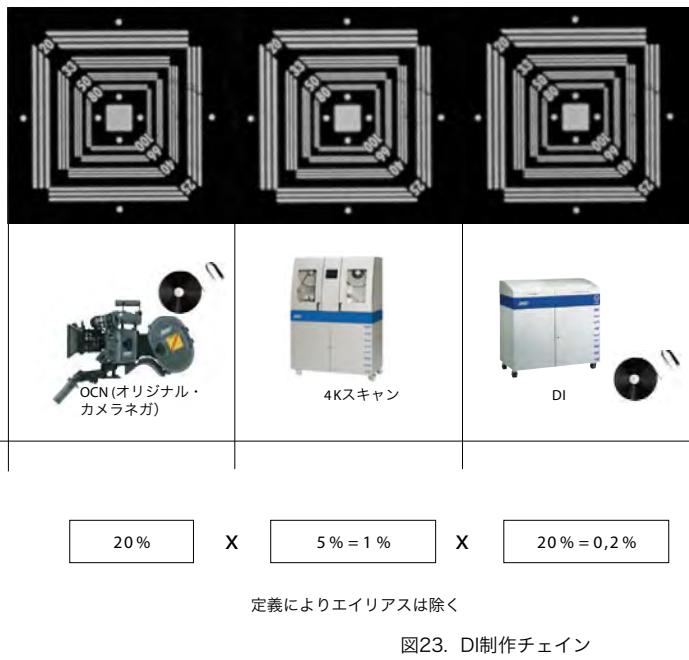
図22. 緑画像中心部の10Kスキャン画像 (Gch)
カメラネガから映写までのケミカルプロセスによる



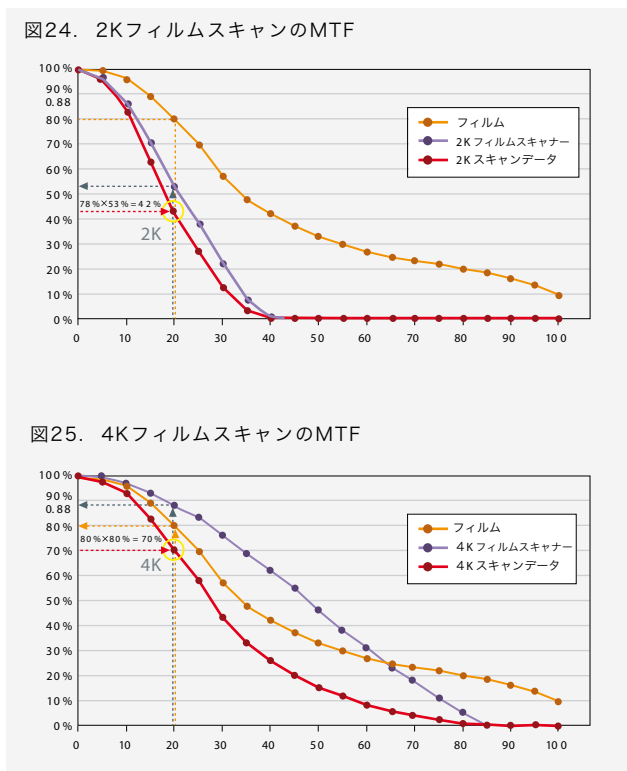
DIワークフローには2Kで充分か？

「デジタル」という言葉はデジタルによる再現は品質劣化が皆無であることを示しているが、DIプロセスはアナログプロセスに適用されるのと同じルールに縛られている。スキャナーやレコーダーの光学系などのアナログ構成要素が含まれているからである。このことをもっと明確にするために、また4K (=80lp/mm)のMTF限界解像度を掛け算を試みよう。MTFデータは、現在達成できる最高のフィルム撮影とDIの部分を示している。

80lp/mmに於るMTF	
露光フィルム画像 5205 (Arricam, VP, OCN)	20%
フィルムスキャナー@4K (Arriscan)	5%
録画インターメディアイトフィルムRDI (フィルム+Arrilaser)	20%



MTFの掛け算が証明しているように、4K DIチェーンに固有な80lp/mmには変調度はありません。デジタル露光されたインターネガが、従来のアナログチェーンを通して保存されるよりもかなり多くの画像情報を示しているのにも拘わらず、である。



では4Kの画像情報をすべて再現することはできないのに、いったい4Kでデジタルプロセスすることは正解なのだろうか？ 答えは簡単。ヘイナッヒャー積分 (MTFカーブの下の領域) によれば、シャープネスの知覚は粗い局所的周波数に依存するからである。この領域がより高い変調度で変換されるならば、映像はシャープであると知覚される。図21は、2Kと4Kスキャンの結果を示す。

4Kスキャナーは解像度が高いばかりでなく、より低い局所的周波数の変調度も高いので、4K出力画像はよりシャープであると感じられるのである。例えばこのデータを、フジRDIでアリレーザー4K録画すると、図22の結果が得られる。

第三部まとめ

4Kワークフローは、DIとフィルムアーカイブにとって有利である。4Kスキャンで見られるMTF特性は、シャープネス知覚を左右する粗いディテールを2Kスキャンよりもずっと高いコントラストで変換する。ソース素材の解像度限界が解像されているかどうかは無関係である。最も重要なことは、取得可能な周波数スペクトル全域が如何に少ない損失で変換されているかである。

第四部 大型スクリーンでの視知覚限界

ここでは、製作工程の中で最も重要な段階である、人間の視覚について述べる。ここでも、解像度、シャープネスとエイリアスを主に扱う。今回は、スクリーン上の大きい映像を見るときの人間の視覚系の限界における一般的知覚に、特に注目してみよう。まさにこの限界のために、ディテールのデジタル化にいかにか多大な努力を傾けなくてはならないかが分かる。

スクリーン上では誰にも判りっこないから、4Kにする努力なんてやることはないという根拠のない噂が、今でも行きわたっている。ほんとうかどうか、よく見てみようではないか！

基本パラメータ

自然でシャープに見える画像にとって重要なのは何かを示す3つの論題を選び、重要な順に挙げてみよう。

- ① 画像情報はエイリアス障害とは相容れない
- ② 低い空間周波数は高い変調度を示す
- ③ 高い空間周波数は依然として見える

この原則は、解像度のある画像よりも、エイリアス障害のある画像の方がはるかに不快なものである、ということである。更に言えば、自然でシャープな映像を低解像度とフィルターで強調することによって生成できると結論することは、完全に間違いである。エイリアスがなくシャープな画像は、オーバーサンプリングと、最終フォーマットにダウンスケールする際に適正なフィルターを使用した場合にのみ、実現可能である。

人間の眼の解像度

人間の眼の黄斑（網膜の一部にあり、人間のシャープな中心視覚を受け持つ）には、一平方ミリあたり約14万個の「センサー細胞」がある。これは、もし網膜上に二つの物体が4ミクロン以上離れて写れば、正常な視力(20/20)の人ならば弁別できることを意味する。物体の側では、1mの距離で0.2mm離れている（角度1分）ことに等しい。

実際の場面ではもちろん、これには下記の条件がある。
一視野の中心だけに集中している
一物体の移動は非常にゆっくりか、または全く静止している、
一物体は背景から十分なコントラストを以て分離している。

前述の通り、今後の議論で実際の解像度限界を使うことはなく、よく見えるディテールのサイズを使用する。ある程度の許容を見て、1mの距離で約0.3mm(角度にして1.03分)としよう。一定の範囲内では、距離とディテールサイズには直線の関係が成り立つ。

距離1mでは0.3mm ~ 距離10mでは3mm

この仮説の証明は簡単である。このページのテストパターンを照明のよく当たっている壁に貼って、約10m離れる。図26(3mm)の線と隙間がはっきり識別できるはずである。図27(2mm)では、かろうじて見える、ということか。もちろん理想的視力であることが必要だが。とにかく、図26のパターンが識別できなかつたら、一度眼科に行くことを考えた方がいいだろう。

35mmでは6K、 16mmでは3K

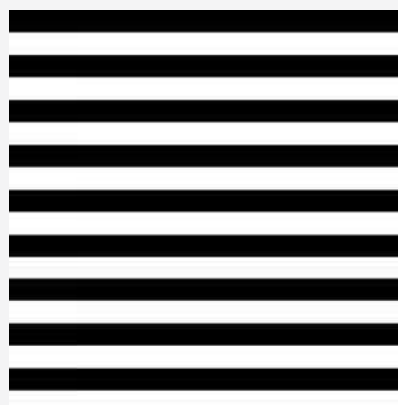
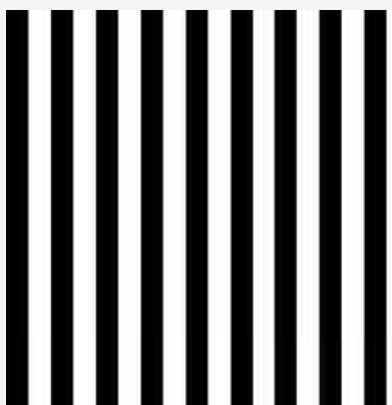


図26. 3mm

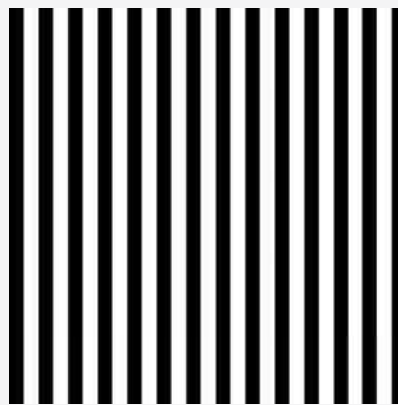
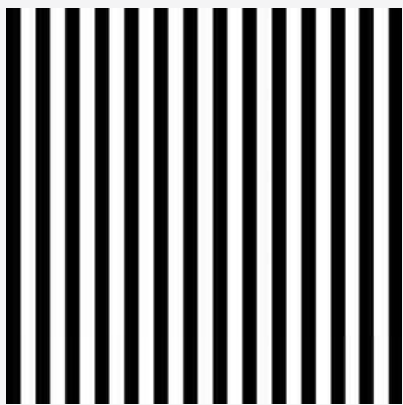


図27. 2mm

第四部 大型スクリーンでの視知覚限界

大型スクリーン映写

この実験は実際の劇場の条件に置き換えてみる事ができよう。図28は約400席、スクリーン幅12mの映画館である。中心列の観客はスクリーンから距離10mになる。この列の観客は視野角60°でスクリーンを見る。この劇場ではデジタル映写だとすると、観客は容易に $12,000\text{mm}/3\text{mm}=4,000$ ピクセルが見える。

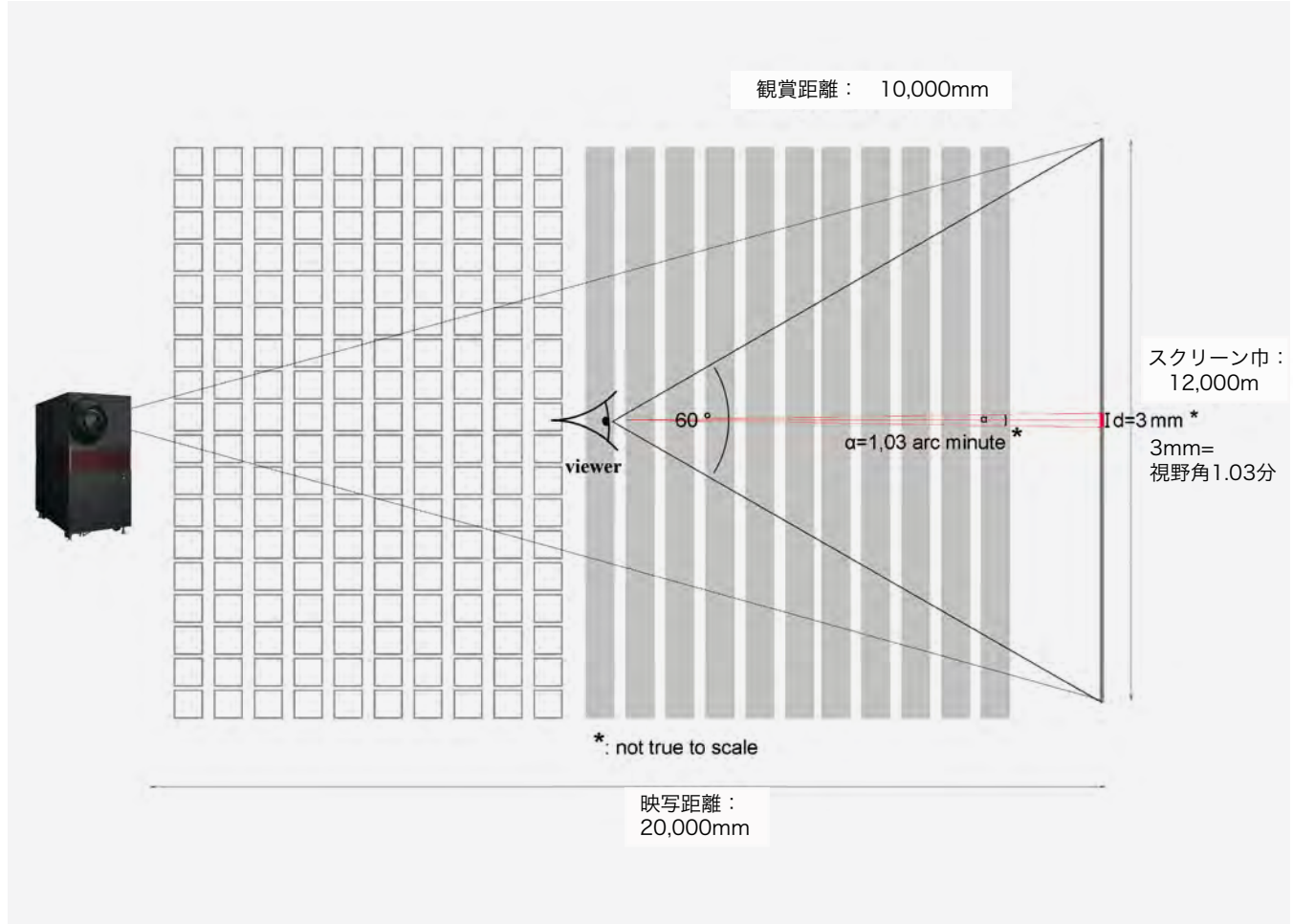
距離14m以下では解像度限界に達することはない。言い換えると、この条件では、観客の50%以上が映写機の最高空間周波数までディテールが見えることになる。

もっと大きな劇場では、スクリーンは幅25m以上にもなる。図29は、眼の限界解像度をデジタル映写の設計に決定的なパラメータとする場合、画像の横幅に対して必要なピクセル数を示している。

第四部のまとめ

噂は間違いである！ というのが結論。観客の大部分は映写機の4K解像度を十分に味わうことができる。同時に、解像度が高いと低空間周波数部の変調度も上げるので、観客の全員にとっても有益である。

図 28 劇場の解像度限界（プロジェクターに必要な画素数） ☒ 400席の劇場の場合



結論

この論文では、読者のみなさんが、単にピクセル数を問題にするのではなく、科学的な手法を取ることが問題の本質を明らかにするためには必要であることを示した。本稿は、静止画のファクターであるシャープネスと解像度についてのみ扱ってきた。序で述べたように、考えるべきパラメータはまだ多くある。

フォトメトリー（感度、コントラスト、特性曲線）や色に関する画質に興味がありなら、わが同僚ハラルド・ブレンデル著「ARRI DIハンドブック」を参照されたい。

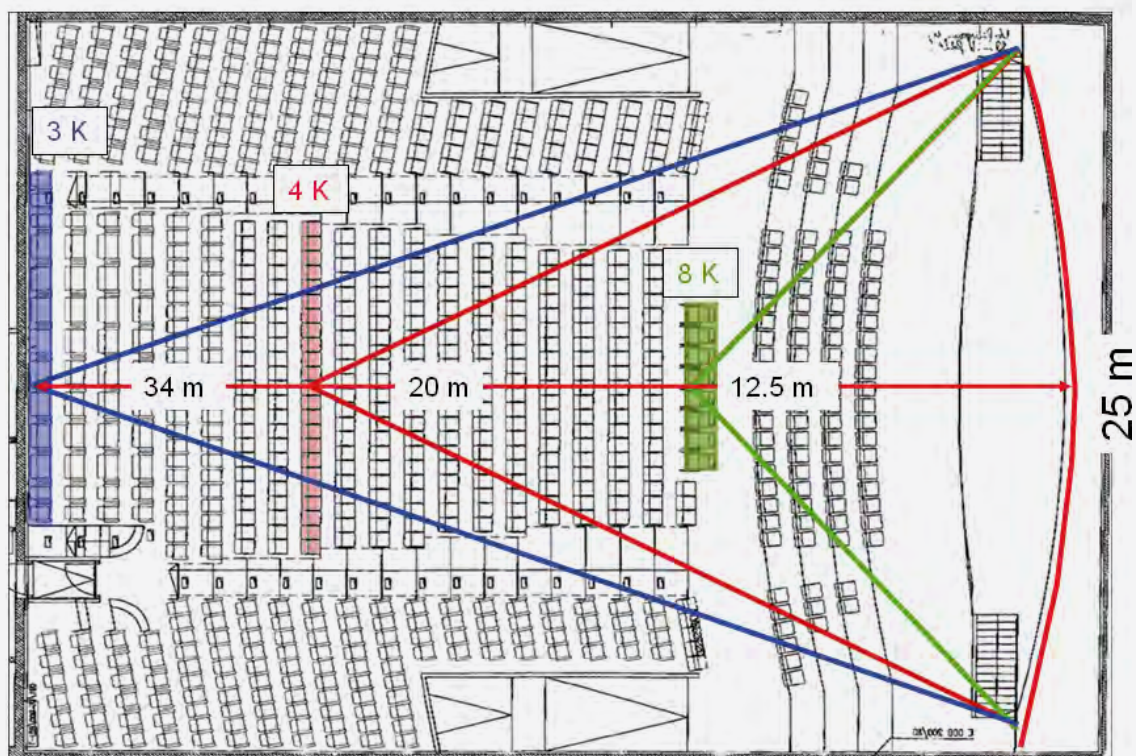
また、空間画質パラメータの動的観察に関する記事も準備中である。

参考文献：

1. Gaylord Simpson, http://de.wikipedia.org/wiki/George_Gaylord_Simpson.
2. Heynacher, Erich: objective image quality criteria, based on transformation theory with a subjective scale
Original " Ein Bildgütemaß auf der Grundlage der Übertragungstheorie mit subjektiver Bewertungskala
published in "Zeiss-Mitteilungen 3" (1963) journal 1, Oberkochen, Germany
3. Tadaaki Tani, "AgX Photography: Present and Future," J. Imag. Science and Technol. 51(2):110 -116, 2007.
(フジフィルム 谷忠昭氏論文 Tadaaki Tani, "AgX Photography: Present and Future"
2007年Imaging Science and Technology学会誌掲載)

「ARRI 4K+システム 映画映像の基礎理論」 アーノルド&リヒター・チネテヒク
 翻訳：株式会社ナックイメージテクノロジー 〒107-0061東京都港区北青山2-11-3 青山プラザビル www.nacinc.jp
 ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ TEL:03-3796-7901/FAX:03-3796-7905

図29. 大型スクリーンの解像度限界





www.arri.com

2010.8

株式会社ナックイメージテクノロジー

〒107-0061 東京都港区北青山2-11-3 青山プラザビル

TEL:03-3796-7901/FAX:03-3796-7905 www.nacinc.jp