解説論文

画質評価技術の変遷

Historical Change of Image Quality Assessment Technology

堀田裕弘 Yuukou HORITA

アブストラクト　東京オリンピック・パラリンピック競技大会を直前に控え 8KTV や 5G 通信などの放送・通信インフラは，ますます重要性を増している．特に，8KTV は，高精細化・高臨場感化・多視点化など，究極の像メディアとして発展していくと考えられる．一方，1939 年からテレビ実験放送が開始されてから 80 年，1953 年から地上波テレビが開始されてから 66 年ほど経過した今だからこそ，改めて，TV 放送技術開発の創成期を振り返り，先駆者の苦労を知り，今後の画質評価技術について考えてみたいと思う．

キーワード　画質評価，TV 放送

Abstract　The infrastructure of broadcasting and communication, such as 8KTV and 5G communication, is becoming more and more important just before the Tokyo Games of the XXXII Olympiad and Tokyo 2020 Paralympic Games. In particular, 8KTV is expected to develop as ultimate-quality image media with high definition, high presence, and multiple viewpoints. On the other hand, 80 years have passed since the start of experimental television broadcasting in 1939, and 66 years have passed since terrestrial television was started in 1953. Thus, I would like to look back on the development of TV broadcasting technology and think about image quality assessment technology.

Key words　Image quality assessment, TV broadcasting

1. はじめに

東京オリンピック・パラリンピック競技大会を直前に控えている現在，8KTV や 5G 通信などの放送・通信インフラの更なる整備はますます重要性を増しており，世界から日本に集まるアスリートたちの活躍を，是非，高画質・高音質なメディア空間で体感したいと思う人は多いと思う．このように，我々の身近にある TV は，生活にとって欠かせない必需品であるが，正直，その創生過程を知っている人は少ないと思う．今回，画質評価の変遷を考える機会を得たので，TV 放送技術開発の創成期を振り返り，改めて画質評価とは何か？　について考えたいと思う．本来ならば，画質評価の最新動向を解説するのがよいと思われるが，その稿は別の方に譲るとして，過去に遡って思いをはせてみたいと思う．

2. TV 放送の超創成期

1873 年イギリスのスミス Willoughby Smith（1828-1891）らは，窓から入る光によってセレンの光導電現象（セレンの抵抗が光によって変わること）を見いだし，明暗を電気の強弱に変えて遠方に伝えるテレビジョンの開発はこのときに始まった．その後，1884 年ドイツのパウル・ニプコーは，周辺に 24 個の穴を空けた円板を一つの光電変換素子の前で回転し，画面の各部の明るさを次々に順序良く取り出す順次伝送方式のテレビジョンを試みた．受像側では再生画像をのぞき見したことから，この実験を電気望遠鏡と呼んだとも言われている．このような機械式走査と光電変換素子を用いる撮像方法は，その後長らくテレビジョンの基本的手法として使われることになる．図 1 は，パウル・ニプコウが発明した機械式画像走査器具である．この走査円板は 1920 年代の機械式テレビジョンの基本構成部品であった[(1)]

一方，日本では，1925（大正 14）年に高柳健次郎（現在の浜松市出身）が当時の浜松高等工業学校（現在の静岡大学工学部）でテレビジョン開発を始めた．高柳は，撮像・受像とも電子式のテレビジョンを開発しようと，セレン膜を光電変換に利用する撮像管の試作を進めたが成功に至らず，撮像はニプコーの円板を用いた機械式走査，受像にはブラウン管を用いる方式により，1926（大正 15）年 12 月 25 日に初めて「イ」の字の伝送に成功した（図 2）．（この実験が行われた浜松市には，「イ」の字を刻んだテレビ発祥の地の記念碑がある[(2)]）．また 1928（昭和 3）年には人の顔を写し出した．このときの走査線数は 40 本であり，現在のテレビジョンに比べてかなり粗い画面だったことがうかがえる．

堀田裕弘　正員：シニア会員　富山大学学術研究部都市デザイン学系
E-mail　horita@sus.u-toyama.ac.jp
Yuukou HORITA, Senior Member (Faculty of Sustainable Design, University of Toyama, Toyama-shi, 930-8555 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ
Fundamentals Review Vol.13 No.4 pp.321-330 2020 年 4 月
©電子情報通信学会 2020

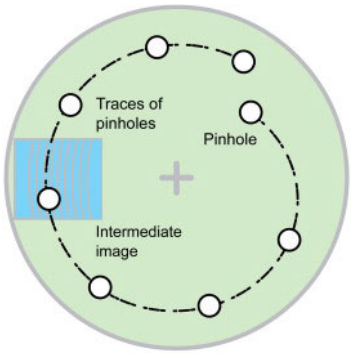

図１　The Nipkow Disk

図２　ブラウン管テレビ映像世界初

テレビ放送は 1928 年，アメリカの WGY 局が実験放送したのが最初とされている．以後，ドイツ，イギリス，ソ連，フランスなどが機械式走査によるテレビジョンの実験放送を始めている．1935 年ドイツが本放送を開始，翌 1936 年ベルリンで開かれたオリンピック大会の実況中継をテレビ放送した．このとき撮像にアイコノスコープカメラも用いたが，機械式走査基準の走査線数 180 本で放送した．走査線数が 400 本を超える全電子的テレビ放送は，1935 年イギリスで始まった．機械式走査によるテレビジョンと 1 日交替の実用化試験だったが，1937 年には機械式は取りやめとなり，全電子式が正式放送となっている．これが現在のテレビ放送の始まりと言われている．

日本のテレビ放送は，1939 年 5 月 13 日の実験電波発射に始まる．ドイツがベルリン・オリンピック大会をテレビ中継したことに刺激を受け，1940 年に予定されていた東京オリンピックをテレビ中継しようと，NHK 放送技術研究所が高柳健次郎を迎えて本格的に進めていた研究・開発の成果が，実験放送として実った．テレビジョンの実験放送は 1941 年 6 月まで続けられた．戦後 1946 年（昭和 21）研究は再開されたものの，テレビ放送の再開は 1950 年 2 月 25 日まで遅れた．東京での実験放送開始に引き続き，1951 年には大阪，1952 年には名古屋でも実験放送が始まり，この 3 局を結ぶテレビ中継回線も 1953 年に NHK の手で完成した．本放送は 1953 年 2 月 1 日に NHK が，同年 8 月 28 日に初の民放テレビ局の日本テレビ放送網（NTV）が開始した．

3. TV 放送の技術開発の超創成期（主に 1960 年代）

TV 放送とそれに関する画質評価の技術開発の創成期については，他学会誌ではあるが掲載論文や解説記事等からレビュー（おおむね 1969 年まで）してみたいと思う．ここで紹介する話題は，テレビジョン創生時期からであるので主にアナログ TV 系であることを御容赦頂きたい．

○「テレビジョン雑音の視覚測定」1957 年[3]

概要として以下が示されている．テレビジョン雑音をはめこみ増幅器を利用して，一つの受像画面で対比較法による視覚測定を行い，これを物理量と比較し，目の周波数に対するウェイティング関数と，マスキング効果のために生じる物理量との差を求め，上限周波数を低下しても視覚量は減少しないこと，及び，高域のピーキングを行っても物理量の増加ほどに雑音は目に感じないことを示した．また，この測定法は実用的な測定器として使用することができ，画像の各部の実効的な SN 比を測定することができることを示した．

受像面の雑音の視覚特性を初めて論じており，視覚の雑音感度に関する周波数特性は 1950 年頃には測定済みであったことは驚きである．また，帯域の白色雑音によって視覚の重み付けを求めており，各周波数成分間にマスキング現象があると，分割した各々の帯域の雑音刺激の和が総合の雑音刺激に等しいという仮定は成り立たないことを示しており，雑音加算が視覚系を通すと通用しないことを示している．このときの評価実験として，視距離を変えて，ちょうど雑音が雑音であると認められなく距離を求める Blending distance 法を用いている．

○「NTSC 方式カラー TV の両立性」1959 年[4]

白黒 TV でカラー TV 信号を受信した場合，白黒 TV 信号を受信した場合には見られないドット妨害やビート妨害と呼ばれる現象が生じるので，これらの妨害の程度を低域フィルタを用いて模擬し，4 段階レベル評価語を用いて主観評価試験を行っている．また，評価の等級に境界線を設け，「気にならない」や「気になる」などのしきい値の設定を行い，許容できる妨害の限度を議論している．

NTSC 方式で，白黒 TV とカラー TV が市場に混在しても問題とならないように両立性を考えた，周波数という資源を最大限有効に利用した究極の放送方式であったように思える．

○「カラー TV の帯域幅と画質」1959 年[5]

NTSC 方式では 2.1 MHz から 4.2 MHz まで輝度信号と色信号が重畳しており，搬送波ドットが見えるので受信機の輝度チャネルにトラップを挿入して除去したり，輝度信号が色信号に影響し画質が低下するので送信側で輝度信号の帯域制限をして除去したりしている．これらの雑音軽減処理により画質が低下するので，その程度について 9 種類のスライドを用いて 4 段階評価の視覚実験を行っている．白黒画像とカラー画像とでは，色が着いたことで帯域制限の分解能が向上

したように見えることが確認されている．

○「妨害波のカラー TV 信号に対する影響」1959 年[6]

NTSC 方式でカラー TV 放送を行った場合，これに混入する妨害波の種類とその影響について白黒 TV の場合と比較し，東京都区内におけるカラー TV 受像画質の推定を行っている．ここでいう妨害波は，TV 放送に起因するものでなはく，伝搬途中で受ける妨害を意味している．同一・隣接チャネル，色副搬送波付近の正弦波など，2 多重伝搬の影響の評価などを室内実験で 4 段階の評価で行っている．また，東京都内，前橋や水戸で受像実験を行っている．実際の放送電波を用いた初の伝搬試験と言える．

○「テレビの動的情報に必要なフレーム数に関する一考察」1959 年[7]

テレビジョンのフレーム数は 30 c/s に定められているが，これは動的情報を伝送するために必要なフレーム数ということではなく，フレーム数を低下していくと眼にフリッカを感じ画像印象が損なわれる．そこで，このフリッカ効果を除いた場合，どの程度までフレーム数を低下させても動的情報が伝送し得るかについて検討している．毎秒 24 こまの 16 mm テレビニュース用ネガフィルムを，1/1，1/2，1/4，1/8，1/16，1/32 のこま落し比にして，視覚的な印象実験を行った．被験者は，24 名で，動的画像の自然性（評価点 2）からフレーム低下限を求めると，これは図柄により異なり 10～15 c/s が限度であることが示された．また，自然性を犠牲にして，動きの連続性を伝える限界（評価点 4）よりフレーム低下限を求めると，ほぼ 3 c/s を限度としてよいことも示された．TV 信号の占有帯域幅を減らすことを目途にフレーム数の削減に注目したこと，主観評価実験を 5 段階評価されていること，動画像としての動きについて注目したことが新しい．

○「テレビジョンの画質」1960 年[8]

TV の被写体は，立体的配置（不完全に表現），輝度分布，色彩分布，運動的内容を持っている．また，画質を左右する因子は，被写体そのものの構造，・配置とその照明方法，走査の方法，光電変換部の特性，伝送系の特性，電光変換部の特性，眼の光学的及び知覚的特性に区分することができる．走査の方法や伝送系の特性などを決定すると，解像度・ちらつきの程度・運動体の表現能力は大体決まり，この限度以上に画質を良くすることはできないとしている．主に，白黒 TV の画質を支配する要因を考察し，画質とは何か？　画質をいかにして客観的に表現できるかなどを紹介した重要な記事と言える．

○「イメージオルシコンの画質評価」1961 年[9]

TV 画質を決める要因の一つに撮像系は重要な役割を担っている．当時の撮像管の良さを議論するために，1 回目の実験では，一対比較法により，階調の良さ，鮮鋭度，SN 比，偽信号に分けて主観評価を行っている．評価実験は，評定者 5 名を前 3 名と後 2 名に配置し，3 か所で同時に行っている．次に，2 回目の実験として，評定尺度法と対比尺度を併用して行っており，評定尺度法では，7 段階尺度（非常に悪い～非常に良い）が初めて用いられた．

○「テレビジョン信号帯域圧縮に関する諸問題」1963 年[10]

放送を対象とする標準テレビジョン信号に対して，当時から，その帯域幅が広く，情報理論的にも圧縮の可能性が指摘されていた．テレビ信号の水平方向の画素間，ライン間やフレーム間の相関，視覚心理を利用する方法などが提案されており，具体的な実験方法についても説明されている．テレビ信号の帯域圧縮方式として，統計的性質の利用と視覚心理の利用の両面から表として明快にまとめて掲載されていることは非常に感動する．現代の画像符号化につながる創成期の解説と言える．

○「テレビ受像画像の主観評価と基準写真」1963 年[11]

TV 画質評価における判断の誤差を軽減するために評価基準写真の利用を考え，写真と実際の受像画面とを対応させることで，評価の判定基準を著しく安定化し，標準偏差も小さくなった．セット雑音とパルス雑音について実際に写真を作成し評価に用いた．評価実験としては，モニタ画像の 5 段階評価，多数の写真サンプルに対しての 5 段階評価（セット雑音の評価のみ），モニタ画像と写真サンプルの対応評価を行っている．主観評価の問題である，個人間誤差，個人内誤差を指摘している．また，評価に用いた画像は，放送用テストパターン，SMPTE の標準カラースライドなどを用いている．

○「画像研究における電子計算機の応用」1963 年[12]

テレビジョンの帯域圧縮方式の研究を主目的に，電電公社通信研究所との共同研究の下に，画像シミュレーション装置を試作した．画像シミュレーション実験としては，一次元補間や二次元補間を行っていた．同様な時期に，外国では Bell 研（1961）や MIT（1959）でも画像シミュレーションが行われていた．コンピュータを利用した画像シミュレーションの創生段階と言えるが，計算時間は想像を絶する．

○「テレビ画像の注視点」1964 年[13]

注視点を知ることで画面上の興味の中心点が分かり，重点的な画面構成やカメラワークの参考となる．また，時間的な注視点の移動状態を知れば，画面の転換や，アナウンスと画面上の文字との適切な関係が見いだせるとしている．アイマーカを用いて実際の TV 画面上の注視点分布の測定や，停留時間の頻度分布を計算している．画像における注視点という概念を初めて計測した事例と言える．

○「テレビジョンの画質とその評価」1965 年[14]

テレビジョンの画質について，個々の装置単独に考えずに系全体について統一的に画質を考えることが必要であるとしている．更に，被写体そのものの研究及び視覚の研究が系の研究と同等に重要であることを指摘しており，視聴者目線から画質を体系的に考えることの重要性を指摘している重要な解説記事と言える．また，シャノンの通信系を TV 系に置き換えて解説し，画質の主観評価における目的や諸条件，測定法について解説している．客観的評価（Objective Evaluation）は被写体に対する再現画像の物理的対応，主観的評価（Subjective Evaluation）は更に視覚心理的要素を加えたものと称

している．画質を，被写体，伝送系，視覚と 3 大別し，画質決定の基礎的要因を体系的に示している．また，TV 画像の主観評価実験法についても解説しており，感覚尺度構成法や TV 画質評価スケールについてもまとめている．昭和 40 年代にこれだけ画質について整理されていることは驚くべきである．

○「視覚の空間周波数特性」1966 年[15]

空間周波数特性の概念は，元来，光学や写真の分野で議論され始め，通信工学での伝達関数の概念からレスポンス関数や MTF と称されている．画像では主観的鮮鋭度や粒状性を数式によって推定するために必要な概念である．眼球光学的，コントラスト弁別しきい，コントラストしきい上値としての測定や，色・雑音に関する空間周波数特性が紹介されている．

○「網膜における視覚情報の伝送と処理」1968 年[16]

生体の持つ優れた情報処理機能を学び，そこからヒントを得て工学に応用しようとする学問を，生体工学，バイオニクスと呼び，網膜内の視覚情報の伝送と処理方式について説明している．白黒のエッジパターンでは，エッジ部分に空間的にも時間的にもオーバシュートが生じ，空間的にはマッハ効果，時間的には Broca-Sulzer 効果と呼ばれている．このステップ波の代わりに正弦波を取り扱うと，視覚の空間周波数特性や時間周波数特性となる．これらの関係を 1 ページで体系的にまとめており，空間・時間とその周波数との関係性を理解するのには良い資料である．また，網膜の神経回路モデルと時空間特性，色覚のモデル，図形知覚のモデルについても説明されている．

○「テレビジョン画像の観視条件」1968 年[17]

TV 画質の主観評価が客観的な普遍性を持つためには，観視条件の国内のみならず国際的な統一が必要である．そのため国際無線通信諮問委員会 CCIR（ITU-R の前身）の動向と，当時の各国の提案の紹介や日本からの提案が説明されている．当時，画像コントラストの重要性を述べたのは日本だけだったそうである．

CCIR Study Group XI（テレビジョンに関する部会）で，画質評価は Study Program 152（XI）: Assessment of the Quality of Television Pictures で取り扱われていた．第 5 回総会，Stockholm 1948 年に，Recommendation 29 から派生した問題の一つ Question（Q）65 として登録されていた．その後，第 6 回総会，Geneva 1951 年に，観視条件を含めた評価法に重点を置く Q. 152（XI）が提出された．いずれにせよ，1950 年代前半に画質が世界レベルで議論され始めたことも驚きである．

○「視覚特集_眼の制御系と視覚」1969 年[18]

当時の生体工学的な目の制御系の動作特性を含めて，人間の目の機構について概説している．ここで言う制御系とは，水晶体の焦点調節，瞳孔の伸縮，眼球運動を一括して称している．眼球運動として，断続的運動（非常に高速の跳躍的運動で，読書時や静止している対象を見ているとき），随従運動（運動物体を視線が追うとき），ふくそう開放運動（両眼視線を遠近方向に動かすとき），個視微動（一点を注視していても常に雑音状の微小運動をしているとき）を紹介している．

○「視覚特集_伝送系末端器としての視覚特性」1969 年[19]

伝送系末端器としての視覚系モデルとして，結像系，感覚，知覚，知性，感性，記憶との関係性を示している．網膜から大脳視覚領に至る情報処理機能の直列方向の処理を single channel model と称し，並列方向の情報処理機能を加えたものを multi-channel model と呼んでいる．single channel model は明暗しか感じないが，multi-channel model は白黒の知覚ができると述べている．Broca-Sulzer 現象，明暗順応，ちらつき臨界周波数 CFF，色の知覚について説明している．更に，画像のトーン再現と感情，鮮鋭さと感情，記憶色（Memory color）と色記憶，視覚認識（可視性・明視性・可読性）についても興味深い解説がなされている．

4. TV 放送の技術開発の成長期（主に 1970 年代）

1970 年代以降になっても，TV 系の研究開発はより盛んに行われており，特に画質評価に関連するものを以下列挙させて頂く．（紙面の都合上，タイトル・著者とさせて頂く．）色彩心理学の研究，動画像の動きにより着目した研究，多変量解析を用いた画質評価の考え方や主観評価実験のデータ整理の仕方，伝送系を考慮した画質評価の考え方，画像符号化の考え方などである．画像情報の圧縮技術も，アナログ的な帯域圧縮から，ディジタル的な高能率符号化へと変遷していく時期で，特に，直交変換の有用性が議論され始めた時期と言える．また，特に，この時期は，「視覚と画質」という特集記事がほぼ毎年企画されており，画質評価の応用が期待された時代である．

テレビジョンから抜粋

- 「直交変換によるテレビジョン信号の PCM 方式」榎本肇，芝田好章（Vol. 24, No. 2, 1970）
- 「色彩心理と測色_色知覚の時空間効果」長谷川　敬（Vol. 24, No. 3, 1970）
- 「色彩心理と測色_色彩の心理効果」納谷嘉信（Vol. 24, No. 5, 1970）
- 「視覚と画質」渡部　叡，（Vol. 24, No. 7, 1970）
- 「カラーテレビジョン画像の観視条件」大谷禧雄（Vol. 24, No. 10, 1970）
- 「色彩に関する心理的実験」印東太郎（Vol. 24, No. 11, 1970）
- 「色票とカラー受像管による記憶色の実験」西村　武，浅山隆男（No. 3, Vol. 25, 1971）
- 「画像工学」樋渡涓二（Vol. 25, No. 9, 1971）
- 「視覚系における CFF の実験的考察」吉川友三，岩根和郎（Vol. 25, No. 12, 1971）
- 「視覚と画質」坂田晴夫（Vol. 26, No. 7, 1972）
- 「動画像の画質―動き物体のぼけによるテレビジョン画

質劣化—」宮原　誠（Vol. 26, No. 9, 1972）
・「視覚と画質」渡部　叡（Vol. 26, No. 11, 1972）
・「動きの知覚特性—フィールドくり返しに起因する滑らかさの劣化—」宮原　誠（Vol. 27, No. 1, 1973）
・「雑音と画質評価」藤尾　孝（Vol. 27, No. 6, 1973）
・「テレビジョン画像における鮮鋭度の尺度化」長岡良富，古橋道夫，佐々木玲一（Vol. 27, No. 7, 1973）
・「画像信号の符号化」吹抜敬彦（Vol. 28, No. 6, 1974）
・「視覚と画質」渡部　叡（Vol. 28, No. 7, 1974）
・「カラーテレビ画像の好ましい色再現」西村　武，太田益富（Vol. 28, No. 8, 1974）
・「画像品質の評価法」中山　剛（Vol. 28, No. 10, 1974）
・「標準テレビ信号に対する各種符号化方式の特性と画質比較　アダマール変換符号化，DPCM およびΔM」大平隆夫，早川元章，松本邦男，伊藤裕一，古川雅俊，村上芳広，（Vol. 28, No. 12, 1974）
・「画像の品質」坂田晴夫（Vol. 29, No. 1, 1975）
・「膚色再現の好ましさの定量的評価」西村　武，河口範夫（Vol. 29, No. 1, 1975）
・「画像品質」小林幸雄（Vol. 29, No. 4, 1975）
・「画像とシミュレーション—画像符号化と画像処理シミュレータ—」天野橘太郎，山本英雄（Vol. 11, No. 29, 1975）
・「視覚における色度の空間周波数特性（色差弁別閾）」坂田晴夫，磯野春雄（Vol. 31, No. 1, 1977）
・「視覚心理とディスプレイ」畑田豊彦，坂田晴夫（Vol. 31, No. 4, 1977）
・「主観評価の理論と実際」西村　武（Vol. 31, No. 5, 1977）
・「視覚の奥行距離情報とその奥行感度」長田昌次郎（Vol. 31, No. 8, 1977）
・「テレビジョン信号に対するパルス性雑音の視覚特性と評価」江尻正義，小野寺正，高橋寿男，榎並洋一郎（Vol. 31, No. 11, 1977）

5. 総合画質の考え方

画質評価の考え方も，色々な雑音に対する単独画質ではなく，複数の雑音要因を考慮した総合画質としての考え方が示されてきた．その創生期を解説した「画像品質の評価法」[20]について内容を一部紹介する．

図3で被写体Sは伝送系Tを介して観視者Vに視覚刺激として与えられる．観視者Vの内部における画質評価過程は広義の感覚系と総合系で構成されると考える．感覚系では視覚刺激によって視感覚が生ずる．この感覚は独立なπ次元の多次元感覚量D_i，（$i=1, 2, \cdots n$）で記述されると仮定する．D_iは被写体の光学的特性s_iと画像伝送系（カメラ，伝送路，表示端末並びに観視空間の光学的特性を含む）の物理特性t_jの関数であると考える．

一方，総合系のレスポンスである画質の良さの測度Qは，

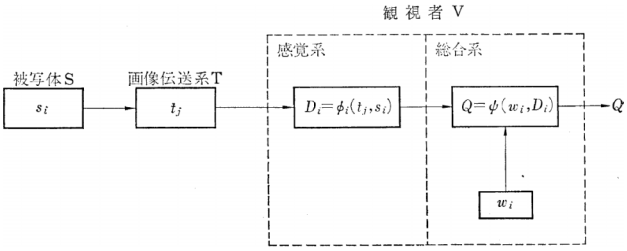

図3　画質評価過程のモデル

多次元感覚量D_iで表される画質要因と，これに対して個人の価値体系で決まる重みw_iとの関数であると仮定する．重みw_iは同一被験者についても被写体や時代によって変動すると考えられる．すなわち被写体が絵であるか文字であるかによって個々の画質要因の重みは当然変化するし，カラーテレビの普及した今日と，白黒テレビしか見られなかった時代とでは，白黒テレビの画質に対する評価も変化する．カラー画像を見慣れた者にとって白黒画像では満足できなくなるためである．

画質評価の問題点は，この感覚系と総合系の式にほぼ集約されている．以下に両式に基づいて画質評価実行上で考慮しなければならない諸点を列挙する．

(a)　画質要因の分析と尺度化：感覚系の式における多次元感覚量D_iの次元数の決定と，対象画像がこの要因を含む度合い，すなわち感覚量D_iの大きさの推定手法が問題となる．
(b)　物理的要因の分析：感覚系の式の伝送特性としてどのような測度を選択すべきかが問題である．
(c)　物理的要因と画質要因の対応付け：感覚系の式における関数ϕ_iの決定．
(e)　評価パネルの問題：個人差が評価結果にどのような影響を与えるかの問題であり，基本的には総合系の式の個人による重みw_iに関連する問題である．
(f)　絵柄の効果：感覚系の式における被写体特性S_iの問題であり，被写体が評価結果にいかなる影響を与えるか把握しておかなければならない．

これらの解釈について，SD法，因子分析，多次元尺度構成法など現在で用いられる統計解析的アプローチを用いて実践し，画質評価の考え方に多変量解析を導入した最初の試みと言える．この考え方は，現代での総合画質予測モデルにも利用されている考え方である．

この予測モデルの概念を考慮した総合画質の予測モデルが提案されているので簡単に触れる[21]．JPEGなどのブロック符号化に特化したひずみを5種類数量化して総合品質としている．ランダム雑音評価用荷重平均自乗誤差，視覚の弁別しきいを考慮した平均自乗誤差，ブロック間の誤差の変化量，誤差の相関性，輪郭部分における誤差のマスキング効果を考慮した重み付け誤差の5種類であり，画像の統計的性質や視覚特性が考慮され，主成分分析や回帰分析が利用されてい

る．

6. 像メディア評価学について

2013 年 4 月の本会会誌に，「映像，画像メディアの評価——像メディア評価学の勧め——」と題した記事を小特集号の冒頭に寄稿させて頂いた[22]．あれから 7 年も経過したが，改めてこの記事を振り返ってみたい．

6.1 像メディア評価学とは

像メディア評価とは，画像と映像を扱う装置，及びシステムであるメディアの画質を評価する技術，あるいは学術体系を表す造語である．像メディアには，ディジタルカメラ，プリンタ，スキャナ，印刷プロセスなど既存の機器以外に，今後普及が期待されるスーパーハイビジョン，立体映像など様々なイメージング機器とその像情報を伝達する手段としての放送・通信システムなどが含まれる．これら像システムは，最近の目覚ましいディジタル技術の発展の恩恵に預かって，ほとんど全てディジタル化されてきており，これらの機器，システムを直接，あるいはネットワーク経由でつなぐことで，相互に像データを交換でき，どのようなメディアにおいても高精細な像を見ることができるようになってきた．これら像メディアの画質は，液晶 TV やディジタルカメラのような装置固有の特性だけでなく，これを鑑賞する人間の視覚系の複雑な特性が絡んで，評価を難しくしている．

例えば解像度について考えてみる．ディジタルカメラの CMOS イメージセンサの持つ画素数は，A–D 変換後にディジタル画像データとして様々な処理がなされる単位となっており，解像度の重要なファクターであることには違いないが，ディスプレイ表示やプリンタで印刷した場合の像の鮮鋭度とは，必ずしも一致しない．イメージセンサでキャプチャした画像の最終品質として評価したいのは，その解像度というより，それによって増加する画像の感覚量としての鮮鋭度である．鮮鋭度の評価に結び付けるためには，開口率，CMOS 上の画素間の電荷の漏れであるクロストーク，その後の回路の熱雑音やディジタル画像処理アルゴリズムによる周波数特性の低下，つまり MTF（Modulation Transfer Function）特性を把握しなければならず，更に，ディスプレイ装置の同様の物理的特性や印刷時の発色メカニズムによるトータルな MTF の劣化を考慮した評価が必要となる．また，この像メディアを観察する人間の視覚系の解像度特性により鮮鋭度は影響を受ける．更には，シーン依存の主観的な評価も伴う．このようにトータルシステムとしての検討が必要となり，場合によっては審美的価値判断を含めた像評価が必要となる場面もある．このように，像システムの物理評価と視覚系の生理学的メカニズム，更には，心理学的要素を考慮する必要があり，長い研究の歴史があるにもかかわらず，未解決の課題が山積しているのもうなずける．

一方，ディスプレイ機器も上記の例で述べたディジタルカメラと同様高解像度化してきており，4K2K，スーパーハイビジョン（8K4K）と構成画素数は増加の一途をたどっている．ディスプレイの解像度を語るとき忘れがちなのは，1 画素のサイズであろう．同じ 3,840 画素でも現行ハイビジョンディスプレイと同じ画素サイズであれば 4 倍の面積を必要とし，ディスプレイのサイズが 4 倍になるのみで観察距離を調整しなければ同じ解像度であるということになる．一方，最近はスマートフォン（以下スマホ）やタブレット端末（以下タブレット）の普及が急であるが，印刷物のように観察距離 30 cm 程度に固定して観察すると仮定すると，視野角一定の下，どのくらいの画素数が必要かという問いが湧いてくる．このように，解像度一つを取ってみても様々な物理量・心理量から成るパラメータの一部を固定してその断面での説明を試みているのが現状で，画質の全体像を把握あるいはユーザに提示するのは非常に難しい．

像メディア共通の評価項目は様々あり，まだ統一的にまとめた例はないが，鮮鋭度（解像度），色域，階調性，ダイナミックレンジなどが，従来のメディアである動画像，静止画像のメディアで共通の項目となろう．また，動画像では，フリッカ知覚や，動きぼやけが特有の評価項目で，これらの評価値を数値として高めていくことで，とりあえず，良い画質にすることができる．更には，鮮鋭度，質感，立体感など感覚的な心理物理的評価尺度が無視できない．

6.2 像メディア評価学の枠組み

像評価の新たな枠組みも 1986 年には提出されており，画像システムから発する像を評価するにあたって物理要因と心理要因に分割して数え上げ，それらの量の相互関係を解明することで総合画質を評価しようというものである．基本的にはこの枠組みは今でも変わらないが，視覚生理学的知見の増大，物理要因の多様化・精密化などから，総合画質評価値の算出に寄与する要因が増え，定量化の難しい心理要因を徐々に凌駕して，曖昧量を減らしていく流れとなっており，それに合わせた新しい枠組みを示す（図 4）．この中で，視覚研究枠組みを構成する要因も進化しており，下記のような細分化が可能となっている．

物理量は，放射輝度など物理的実体について客観的に測定可能であり測定器等による測定方法が定められた量，心理物理量は物理量としての刺激の強さを感覚量の強さで評価した

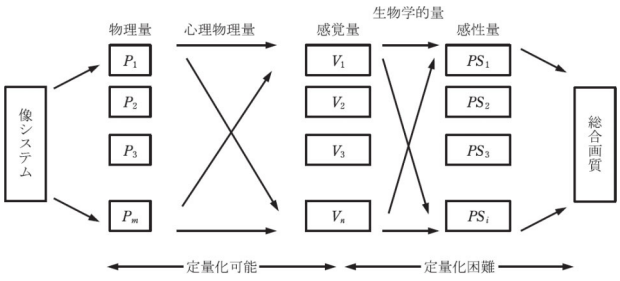

図 4　像メディア評価の枠組み

表１　像メディア評価学の研究分野

	研究分野	細分類
共通分野	視覚モデル	色視覚，動き知覚，奥行知覚，質感知覚，フリッカ知覚，没入感知覚
	測度論	統計解析，多変量解析，数量化理論，評定尺度法
	計測	物理計測（MTF など），生体計測（眼球運動，視線，重心動揺，脳波）
	主観評価法	動画像提示方式（RR/NR），n 対比較法，MOS 値法
	像情報解析	階調再現理論，色再現理論，ダイナミックレンジ，量子化誤差
	評価環境	光源，観察環境
メディア個別分野	撮像	光学系ひずみ解析，光電変換特性，Q 値，雑音特性解析
	通信	伝送方式，QoS
	放送	超多画素 TV 方式，伝送色，ディジタル素材伝送
	蓄積	パッケージメディア，ディジタルシネマ，色再現
	処理	画像符号化，補間処理，エッジ強調
	表示	表示デバイス物理特性，動画像解像度特性，没入感，臨場感
	印刷	像形成モデル，色再現，階調再現
	生成	仮想・複合現実感，光線追跡精度，Photorearistic

量，刺激を表す物理量と 1 対 1 に対応する量として定義している．また，感性量は感覚量よりも更に内面的に人の心が評価するような量であり，例えば「快適さ」や「爽快感」などである．これらの枠組みと扱う量から，必要な研究分野を整理すると表 1 のようなものになろう．

6.3　像メディア評価学の学問体系[23]

像メディア評価学が対象としている応用分野は，撮像・通信・放送・蓄積・表示・印刷・コンテンツなど多岐にわたる．これらに関連する分野を，外部資金申請時に利用する系・分野・分科・細目表に照らし合わせてみると，図 5 のような学問が関連する．総合領域から人文社会学系・理工学系・生物系など多岐にわたることが明らかである．そこで，これらを総合して「像メディア評価学」と呼んでいる．多様化した像メディア（映像・静止画像などを含んだ全て）における「技と質」にこだわると，これらの評価に関する学問体系は，図 5 に示すように既存の研究分野の枠に収まらない，総合・新領域，人文社会学，理工学，生物学などの異分野との連携にこだわった「像メディア評価学」としてまとめ上げ，像メディアに関する革新的・挑戦的な学術研究の発展を促進することがこれからの目的の一つとなるであろう．

また，「像メディア評価学」に関連する研究内容は，図 6 に示すような 2 軸で構成される二次元空間を考え，この空間を全て網羅するように研究内容が分類できる．2 軸の意味合いを以下に示す．

・人（主観）―機械（物理）の軸

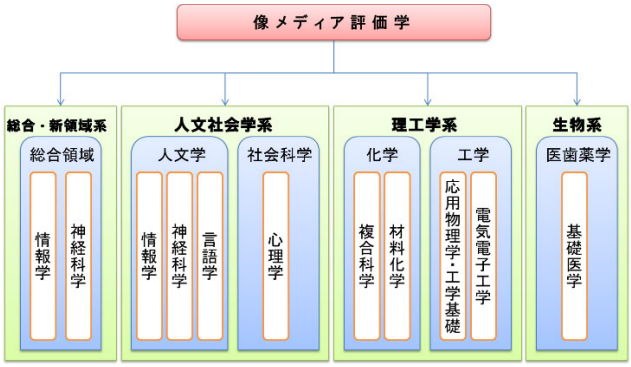

図５「像メディア評価学」の学問体系

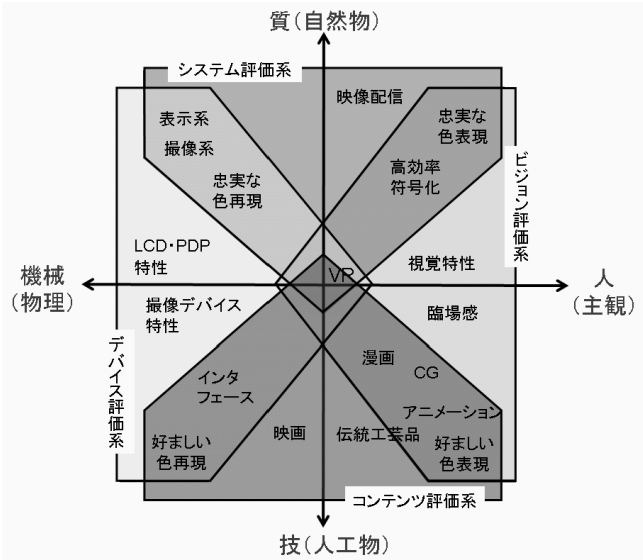

図６「像メディア評価学」に関連する二次元空間

「人（主観）」側は，像メディアを観察した場合に，人が感じる主観的印象や感性的な側面を意味する．このような像メディアから人が受け取る情報を数値化する評価技術，それに関連する人間の視覚・認識・理解・感性に関する特性や性質の研究開発である．

「機械（物理）」側は，人が像メディアを通して感じ取る主観的印象や感性的情報を数値化できたと仮定して，これらの情報を物理情報から何らかの手段やモデルを用いて予測・推定する技術の研究開発で，撮像・処理・表示の各デバイスの品質評価も該当する．

・質（自然物）―技（人工物）の軸

「質（自然物）」側は，像メディアの品質そのものを広義に取り扱う．自然界の情景や自然物・伝統工芸品などを，撮像デバイス（あるいは，表示デバイス）を通じて，忠実に再現することに重点を置き，この忠実再現に必要な様々な技術の研究開発が該当する．

「技（人工物）」側は，CG・VR・CW，アニメーションや漫画など実写ではない人工物や伝統工芸品の映像表現など，

様々な像メディアの「技」に関する表現技術に関する研究開発が該当する．

この「像メディア評価学」なる分野に関連する二次元空間に対し，この空間を全て網羅し，かつ，図6に示すように複数の研究項目がオーバラップするように考えると，以下に示す4種類の研究分野に分類できる．

✓ ビジョン評価系（人文社会系，総合・新領域系，生物系）
✓ システム評価系（総合・新領域系，理工学系）
✓ デバイス評価系（総合・新領域系，理工学系）
✓ コンテンツ評価系（総合・新領域系，人文社会学系）

ここで議論している内容は，像メディアの「技と質」を評価する流れを創出することにある．従来から，像メディアの評価法を研究開発してきた大学や企業の研究者は，その評価素材を収集することに精力を使い果たしてきた．また，どれくらいの品質レベルのコンテンツが評価に耐え得るかなど，高精細で研究目的に適合した評価素材（コンテンツを含む）をいかに多く収集するかが，研究開発の成功の鍵を握っているといっても大げさではない．

また，近年，「像メディア」に関する撮像・処理・表示の全システムが，様々な高精度化への変革途上にあるために各過程でのミスマッチ（空間解像度，時間解像度，画素当りの色数，色再現範囲，視点数などの違い）により，様々なスケーラビリティが必須となっている関係上，この変換を行うためにも「像メディアの質」を真剣に議論する必要性があるだろう．

6.4 研究分野としての再考

これまでの画質評価の研究開発の方向性は，実際には研究成果を利用する応用分野を意識してきた．そこで，研究分野を考える上でキーとなりそうな考え方について，幾つか列挙してみる．

6.4.1 共通と固有

量とは，大きさを持ち，計測したり大小を比較したりできるものを一般に指すことが多い．そこで，一般的な量として，以下がある．

✓ 物理量：
物理的実体について客観的に測定可能であり測定器等による測定方法が定められた量．
✓ 感覚量：
心理量とも呼ばれ人間が主観的に感じる感覚の強さである．これは個人差や同一人でも環境や体調による差はあるが，感覚を生ずる物理化学的刺激の強さとほぼ相関していると考えられる．
✓ 心理物理量：
物理量としての刺激の強さを感覚量の強さで評価した量．刺激を表す物理量と1対1に対応する量として定義している．
✓ 感性量：
感覚量よりも更に内面的に人の心が評価するような量．「快適さ」や「爽快感」など．
✓ 生理学的量：
物理化学的刺激に対して人は様々な生理的反応を示し，その反応の量は与えられた刺激の量に相関する．この反応の量は感覚量と性質が近く，通常は物理量とは呼ばない．

このように，物理量から感性量・生理学的量まで，人にどれだけ関与するかで，量としての階層があると言える．例えば，物理量測定とは，像メディア自身のコントラスト・ヒストグラム・ダイナミックレンジ・ガンマ曲線などや，未処理の像メディアと処理後の像メディアの物理的な差異を指標とするようなRMSEやPSNRに相当すると考えられる．

一方，心理物理量測定は，人が像メディアから受け取る心理物理量を測定する方法で，光度，照度，色彩の諸量，光沢などの測定に該当する．更に，感覚量測定はITUなどで勧告されている主観的評価法に，感性量測定はSD法によるアンケートなどに該当すると考えられる．生理学的量測定としては，NIRSによる脳部位の脳血行動態の活性度やEEGによる脳波などがある．

これまでに述べてきた撮像・通信・放送・蓄積・表示・印刷・コンテンツなど多岐にわたる応用分野に関して，これの諸量のうち，どれが共通する評価技術なのか，固有の評価技術なのかを分けることが重要と考えられる．更に，各分野で取り扱われる諸量に対して洗い出しを行い，これらの関係をMap化し，空間的に配置することで，相互関係なども分かりやすくなると考えられる．

6.4.2 忠実さと好ましさ

外界の情報を様々な撮像系を通すことで像メディアとしてキャプチャした場合，通常では，撮影対象に対して忠実に撮像することに注意が注がれる．よって，撮像系では，基本的に忠実な像メディアの再現が要求される．撮像面の高解像度化によりアナログである撮像対象をいかにアナログ雑音を抑圧しながらディジタル化するかが要求される．更に，通信・放送系では，この忠実にキャプチャされた像メディア情報を，忠実さをできるだけ保ちながら，受け手へ送ることが要求される．一方，通信・放送・蓄積・表示・印刷の各分野では，その撮像とは独立に信号処理し，ユーザが好ましく思うように像メディアを再現することが多い．特に，表示・印刷系では，企業の特色・カラーを出すために，忠実再現よりも，好ましい再現に力が注がれている．このように，像メディア本来の再現性の観点から考えると，忠実な再現と好ましい再現の2種類に大別できそうである．よって，像メディ

アの様々な技術をこの二つに分類することも大事であると考えられる．

6.4.3　主観と客観

像メディアの様々な技術のうち，ユーザである人に関連する主観的な技術であるのか，あるいは，人の関連する事項を模倣する客観的な技術なのかの大別ができそうである．像メディアを視覚刺激として与えた場合の人の反応を情報センシングするためには，心理物理的に測定する必要もあるし，感性的・生理的に測定する必要もある．一方，客観的な立場となると，主観的な反応・現象を，コンピュータや専用ハードなどで，模倣することに焦点が向く．また，処理時間やコストなどの問題も生じてくる．主観的な技術には，人の情報センシングが必要になり，客観的な技術には，視覚刺激に対する人の処理反応，すなわち，視覚系から脳情報処理までのパスを解明する重要な問題がある．この意味において，視覚を含めた脳情報処理機能の解明につながる研究成果は，画質評価に直結する重要なものである．

7. おわりに

「テレビジョン雑音の視覚測定」に関する研究成果が 1957 年に発表されてから，もう 60 年以上の歳月が過ぎた．雑音の違いを一対比較することや，雑音に対する視覚の周波数特性の重み付けやマスキング効果の存在などが，当時から示されている．その後，精力的にいろいろな面から TV の研究開発が進んできたことを改めて感じた．現代では，像メディア評価に利用できるデバイスやシステムは飛躍的に成長し，人の視覚心理・生理や脳機能に関しても様々な知見が得られてきた．その成果で，様々な像メディア評価の取組みが展開されてはきたが，その基礎となる考え方は昔と同じではないだろうか？　それだけ，像メディア評価を議論するためには，「温故知新」の精神が必要で，先人・先達が取り組んでこられた研究成果を改めて勉強させて頂くことが必要であると思う．個人的ではあるが，鈴木桂二先生と宮原　誠先生には学生時代，中山　剛先生には若手教員時代に教えを頂き，大学院修了後も画質評価を細々と 35 年ほど研究できたことは非常に幸せな身分であると思う．

最近では，生体情報や脳機能情報を用いた新しい画質評価の考え方が 10 年以上前からかなり研究開発されてきており，この動向などは今後紹介されると思う．通常のレビューであれば，それぞれの研究分野の最新動向を読者に伝えるのが主であると思うが，今回は逆に過去に遡っての話題としたことを御容赦頂きたいと思う．しかし，今回の内容でも，1970 年代までであり，これ以降のスーパーハイビジョンや HDTV 開発，立体 TV の開発，通信と放送の融合による H.26x や MPEG の国際標準化の歴史など，語り尽くせないいろいろな技術開発が行われてきた．ITU-T Rec.H.261 の規格が決まる以前には，DCT（離散コサイン変換：直交変換）と VQ（ベクトル量子化）の技術的な葛藤などがあったが，若い技術者は知っているだろうか．

最後に，1970 年にこの分野のパイオニアの方々が集まって座談会が行われている記事を発見した[24]．当時から 30 年後には TV はどうなっていくかの将来展望を話されている．是非，若い研究者や学生たちに読んで頂き，何かを感じ取って頂き，我が国の画像産業を再度盛り上げて頂きたいと思います．

本会基礎・境界ソサイエティにイメージ・メディア・クオリティ（IMQ）研究専門委員会が発足して少しばかり時間が経過しました．創設段階から現在に至るまで多くの諸先輩方に御尽力頂きました，ここに改めて感謝申し上げたいと思います．

文　献

(1) https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nipkow-disk
(2) https://www.pref.shizuoka.jp/j-no1/braunkan_terebi.html
(3) 樋渡涓二，山口幸也，“テレビジョン雑音の視覚測定，”テレビ誌，vol. 11, no. 8, pp. 355-359, 1957.
(4) 石橋俊夫，渡部　叡，藤尾　孝，“NTSC 方式カラー TV の両立性，”テレビ誌，vol. 13, no. 4, pp. 30-34, 42 1959.
(5) 駒井又二，田所　康，“カラー TV の帯域幅と画質，”テレビ誌，vol. 13, no. 4, pp. 35-38, 1959.
(6) 村主行康，“妨害波のカラー TV 信号に対する影響，”テレビ誌，vol. 13, no. 4, pp. 39-42, 1959.
(7) 吉田順作，佐々昂一，“テレビの動的情報に必要なフレーム数に関する一考察，”テレビ誌，vol. 13, no. 8, pp. 6-10, 1959.
(8) 中村欽雄，“テレビジョンの画質，”テレビ誌，vol. 14, no. 1, pp. 9-14, 1960.
(9) 吉永義輝，樋渡涓二，多田新一，梅原晴雄，“イメージオルシコンの画質評価，”テレビ誌，vol. 15, no. 12, pp. 25-30, 1961.
(10) 鈴木桂二，“テレビジョン信号帯域圧縮に関する諸問題，”テレビ誌，vol. 17, no. 8, pp. 478-488, 1963
(11) 樋渡涓二，渡部　叡，長田昌次郎，“テレビ受像画像の主観評価と基準写真，”テレビ誌，vol. 17, no. 4, pp. 16-22, 1963.
(12) 安東平一郎，福島邦彦，“画像研究における電子計算機の応用，”テレビ誌，vol. 17, no. 12, pp. 43-47, 1963.
(13) 渡部　叡，“テレビ画像の注視点，”テレビ誌，vol. 18, no. 10, pp. 10-14, 1963.
(14) 樋渡涓二，“テレビジョンの画質とその評価，”テレビ誌，vol. 19, no. 10, pp. 2-10 1965.
(15) 渡部　叡，“視覚の空間周波数特性，”テレビ誌，vol. 20, no. 11, pp. 730-738, 1966.
(16) 樋渡涓二，“網膜における視覚情報の伝送と処理，”テレビ誌，vol. 22, no. 1, pp. 6-14, 1968.
(17) 長谷川　敬，“テレビジョン画像の観視条件，”テレビ誌，vol. 22, no. 5, pp. 347-356, 1968.
(18) 渡部　叡，“視覚特集_眼の制御系と視覚，”テレビ誌，vol. 23, no. 10, pp. 747-754, 1969.
(19) 樋渡涓二，“視覚特集_伝送系末端器としての視覚特性，”テレビ誌，vol. 23, no. 10, pp. 755-764, 1969.
(20) 中山　剛，“画像品質の評価法，”テレビ誌，vol. 28, no. 19, 1974.
(21) 宮原　誠，荻本浩三，堀田裕弘，藤本　強，“画像内容に相関のある妨害を含む画像の評価尺度，”テレビ学技報，ICS81-16, vol. 36, no. 10, p. 25-32, 1986.
(22) 会津昌夫，堀田裕弘，“映像，画像メディアの評価―像メディア評価学の勧め―，”信学誌，vol. 96, no. 4, pp. 222-227, April 2013.
(23) 堀田裕弘，山田光穂，“イメージメディアクオリティ研究会の現状と展望，”信学，IMQ 研資，May 2010.
(24) “座談会：21 世紀のテレビジョンはどうなるか，”テレビ

誌，vol. 24, no. 9, 1970.

（IMQ 研究会提案，2019 年 12 月 6 日受付）

堀田裕弘（正員：シニア会員）
昭 61 長岡技科大大学院工学研究科電気・電子システム工学専攻了．平 5 富山大・工・講師．現在，同大学院学術研究部都市デザイン学系教授．生体情報を利用した新しい画質評価，ITS をサポートする画像処理と情報配信の研究に従事．前 IMQ 研究専門委員会委員長．博士（工学）．