

# 博士論文

## 多チャンネル映像符号化配信システム の研究

指導教員 藤井俊彰教授

名古屋大学大学院 工学研究科  
電子情報システム専攻  
柳原 広昌

本論文は、多様化するブロードバンド映像配信サービスにおいて問題になる以下の（１）～（３）の課題について関連研究をまとめると同時に解決策を論じる。また、該課題解決技術の一つの適用対象でもあり、放送・ネット・電話の所謂、トリプルプレイサービスの発展が期待される CATV の最新技術と将来展望について述べる。具体的には、

- （１）限られた処理能力を持つ端末上での逆 IDCT の簡略化によるスケーラブルな多チャンネル映像再生
- （２）帯域変動に追随した QoS 非保証型ネットワークにおける安定的なライブ映像伝送
- （３）種々のネットワークや端末向けに 1 : N 生成できるバッファ推移の類似性を用いた MPEG コンテンツのサイマル符号化
- （４）最新 CATV 技術と将来展望

について述べたものである。

# 目 次

第 1 章 序 論 .....	1
1.1 研究の概要.....	1
1.2 論文の構成.....	3
第 2 章 逆 DCT の簡略化による処理負荷のスケーラビリティを実現する多チャンネル 映像再生技術.....	7
2.1 まえがき .....	7
2.2 復号再生処理における処理負荷 .....	8
2.3 復号再生処理における処理負荷の低減 .....	8
2.3.1 DCT 係数のローパスフィルター処理（方式 1, 2） .....	9
2.3.2 縮小 IDCT カーネルとアップサンプリング（方式 3, 4） .....	9
2.3.3 縮小 IDCT カーネルと縮小スケール MC, 及びアップサンプリング（方式 5） .....	10
2.3.4 整数精度の MC（方式 6） .....	11
2.3.5 フレームスキップ（方式 7, 8） .....	11
2.4 各方式による処理負荷削減に関する実験およびその結果.....	12
2.5 マルチチャンネル同時復号化における処理負荷スケーラビリティ .....	16
2.5.1 実験および結果 .....	16
2.6 マルチチャンネルマルチキャストシステムへの応用.....	17
2.6.1 システム構成.....	17
2.6.2 マルチチャンネル同時再生 .....	18
2.6.3 まとめ.....	21
第 3 章 帯域変動に追従した QOS 非保証型ネットワークにおける安定的なライブ伝送 技術.....	23
3.1 まえがき .....	23
3.2 最適パラメータ決定のための予備実験 .....	26
3.3 提案アルゴリズム.....	31
3.3.1 帯域適応レート制御アルゴリズム.....	31

3.3.2	初期符号化伝送レートおよびスレッシュホールドパラメータ決定のための 初期 トレーニングアルゴリズム .....	35
3.4	実験および結果 .....	39
3.4.1	回線シミュレータを用いたダイナミックレート制御実験.....	39
3.5	IPV4/IPV6 実ネットワーク上でのダイナミックレート制御実験および結果..	47
3.6	まとめ.....	48
<b>第4章 バッファ推移の類似性を用いた MPEG コンテンツのサイマル符号化技術....</b>		<b>51</b>
4.1	まえがき .....	51
4.2	マルチビットレート生成機能の実現方法.....	52
4.3	予備実験(MPEG-2 ベース).....	55
4.4	提案方式 (MPEG-2 ベース) .....	60
4.4.1	方式の詳細.....	60
4.4.2	スケーリングパラメータ R の初期値決定法.....	61
4.5	実験及び考察 (MPEG-2 ベース) .....	62
4.6	H.264 符号化への適用方式.....	66
4.6.1	スケーリングパラメータ $\Delta QP$ の初期値決定法.....	66
4.6.2	モード判定及び MV の再探索範囲 .....	67
4.6.3	実験及び考察 (H.264) .....	68
4.7	まとめ.....	72
<b>第5章 最新 CATV 技術と将来展望 .....</b>		<b>73</b>
5.1	まえがき .....	73
5.2	ケーブルシステムと主要技術の現状 .....	74
5.2.1	映像変調方式.....	75
5.2.2	限定受信方式.....	76
5.2.3	DOCSIS .....	77
5.2.4	HFC・RFoG・PON.....	78
5.2.5	ケーブルホームネットワークと WiFi .....	79
5.2.6	STB .....	80
5.3	技術展望 .....	80
5.3.1	ケーブル伝送技術.....	80

5.3.2	CDN とホームネットワーク .....	82
5.3.3	次世代 STB “ハイブリッド Box” .....	83
5.4	サービス展望 .....	87
5.4.1	高度映像メディアサービス .....	87
5.4.2	フレキシブル視聴サービス .....	89
5.4.3	レコメンドサービス .....	91
5.4.4	ソーシャルメディア連携サービス .....	93
5.4.5	社会インフラサービス .....	94
5.5	まとめ .....	97
第 6 章 結 論 .....		99
参考文献 .....		103
謝 辞 .....		111
研究業績 .....		113
表 彰 .....		117
出願特許 .....		119



# 第1章 序 論

## 1.1 研究の概要

我が国の地上TV放送は、長年続いたアナログTVからデジタルTVへの規格化 (ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting for Terrestrial) が進み 2003 年 12 月に地上デジタル放送としてスタートし、2011 年 7 月 24 日には一部地域を除いてアナログ放送が停波され、地上放送の完全デジタル放送が始まった。モバイル端末向けには 1 セグ放送が 2006 年 4 月に開始された。UHF 帯の 470~770MHz (13~62ch) の電波を利用し、6MHz 幅の 1 チャンネルを 13 セグメントに分割し、そのうち 12 セグメントを地上デジタル放送に、1 セグメントを 1 セグ放送に割り当て、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation), 64QAM などの変調キャリアを複数束ねた OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 変調とインターリーブ及び誤り訂正符号により伝送される。13 セグ全て使用した場合の多重化ストリーム (MPEG-2 TS [1]) の TS レート (188 バイト) は、一般的に用いられる伝送パラメータである、モード 3 (432 キャリア/セグメント), ガードインターバル比 1/8, 変調方式 64QAM、内符号符号化率 3/4 の条件下で、18.255 [Mbps] (12 セグ分で 16.85 [Mbps]) の固定伝送レートとなっている [2] [3]。地上デジタル放送 1ch 当たりの圧縮映像 (MPEG-2 Video [4]) は、SDTV (480i) で最大 3 番組、ないしは、HDTV (1080i) で 1 番組を編成可能となっており、制作番組により映像の符号化ビットレートは多少異なるものの、上記の通り、伝送品質が保証された放送パイプの中で映像伝送を行っていると言える。

一方、2000 年前後から爆発的な普及を遂げているインターネット [5] の世界では、xDSL (Digital Subscriber Line), FTTH (Fiber To The Home), CATV (Common Antenna TeleVision or Community Antenna TeleVision) インターネット、モバイルインターネットなど IP をベースとしたネットワークサービスの普及が目覚ましい。特に映像配信分野においては、MPEG (Moving Picture Experts Goup) 等の圧縮符号化方式を用いたストリーミング技術 [6] [7] [8] [9] を用いた映像配信サービス (有料, 無料) [10] やブロードバンドを利用する TV 会議システムが普及しつつある。映像メディアは、視聴覚を通して直感的に伝達ができるため、音声のみやテキストなど他のメディアと

比較して、情報伝達能力が優れているとともに、人間にとって最も受容性の高いメディアであり、映画、ニュース、趣味、教育、広告など様々な分野で活用されている。その一方で、情報ビット量もかなり多く、近年の映像圧縮技術やデジタル伝送技術が進歩したとしても、それ以上に映像コンテンツの量の増大が予想され、その伝送のための広帯域ネットワークや大容量の蓄積装置が求められる。伝送品質の観点からみると、特に通信ネットワークを用いた IP ストリーミング伝送では、上述の伝送品質が保証されたデジタル放送や、帯域保証された通信パスを張る回線交換と異なり、通信するユーザが共有ネットワーク帯域の一部を占有し、同時利用者数が増えると輻輳が発生し通信品質の低下を招いてしまうという課題がある。即ち、ブロードバンドと言われる広帯域インターネットを用いたとしても帯域・遅延・ジッタなどに関する QoS (Quality of Service) は保証されないため、映像や音声のような連続メディアを低遅延で安定的に伝送する状況には達していないという課題がある(課題2)。また、映像コンテンツの再生環境も TV, STB (Set Top Box), PC, タブレット, スマートフォンなど処理能力も様々な状況であり、これらの多様化する端末においてソフトウェアの処理能力が間に合わずに再生品質劣化や再生停止などの不具合が生じるケースもある。特に、複数映像のビデオサムネイルや映像監視といった多チャンネル同時再生時の処理能力不足による再生不具合は顕著な課題である(課題1)。更にコンテンツ制作においては、多チャンネル化が進みその種類が膨大化する一方で、多様化する配信ネットワークや端末種類に応じた 1 ソースマルチユースのコンテンツ生成が必要とされる状況である。しかしながら、同一種類のネットワークおよび端末で再生する 1 コンテンツあたりの視聴者数は減少するため、映像品質を保ちつつも、これまで以上に低コストで柔軟性の高い映像コンテンツ生成のシステム構築が課題となっている(課題3)。

本研究では、上記の 3 つの課題への一解決策として、(解決策1) 処理能力の低い端末も含む様々な端末プラットフォームにおいて映像復号を可能とするための簡易 IDCT 処理を用いたソフトウェアデコーダの処理負荷のスケーラビリティ方式、(解決策2) ブロードバンドのような帯域非保証型ネットワークにおける安定的なライブ映像伝送を可能とする帯域適応型映像符号化レート制御方式、(解決策3) 様々なネットワーク帯域や端末向けに様々な符号化ビットレートのコンテンツを同時生成するためのサイマル符号化方式、を提案し、その有効性を確認する。あわせて、上記課題解決技術の一つの適用対象でもあり、ブロードバンドの中でも、放送・ネット・電話の



所謂トリプルプレイ全体で順調に普及拡大している CATV 技術の最新技術動向とその将来展望について述べる。

## 1.2 論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

第1章「序論」（本章）では本論文の概要（前節）および論文の構成（本節）を説明する。多チャンネル映像符号化配信等のデジタル映像コンテンツ・サービスの普及・促進に資するために、前節で述べた課題への一解決策として、受信端末での逆DCT処理簡略化による処理負荷のスケーラビリティ技術（第2章）、帯域変動に追従したQoS非保証型ネットワークにおける安定的なライブ伝送技術（第3章）、送信側でのマルチビットレートエンコーディングにおけるバッファ推移の類似性を用いたMPEGコンテンツのサイマル符号化技術（第4章）、および、第2章～4章の提案技術事項の適用対象の一つとなるCATV技術のサービス発展に関する考察（第5章）まで、送信側から受信側まで全系に渡る各事項について論ずる。図1.1に各章の位置づけを示す。

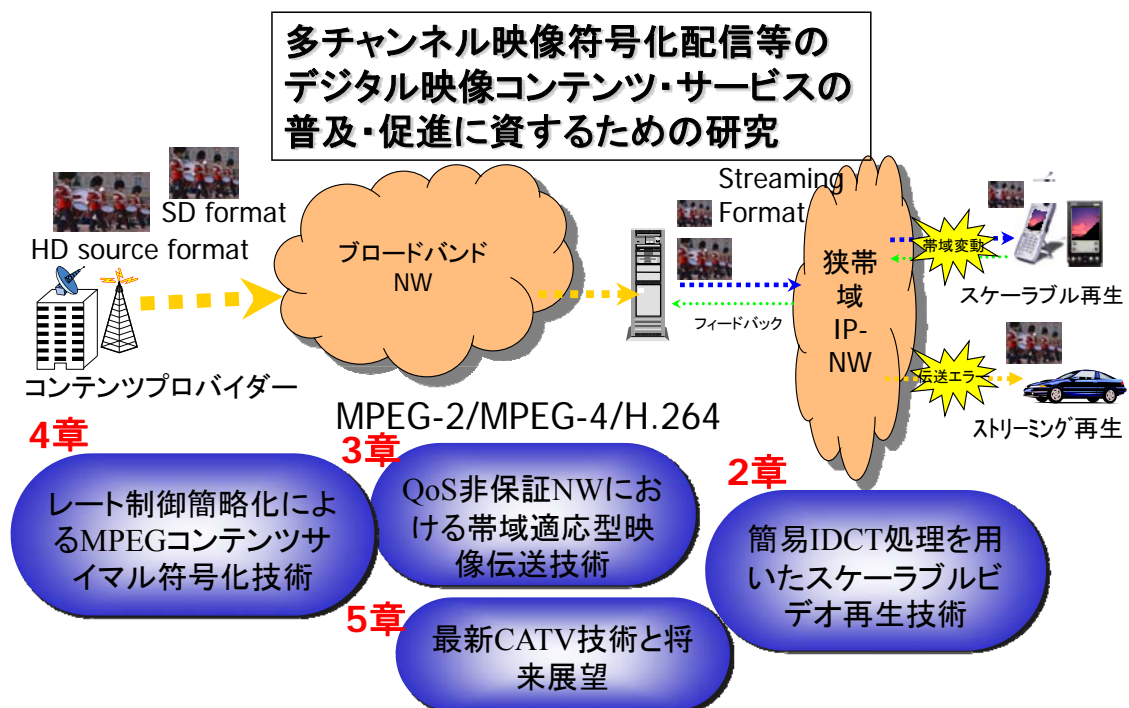


図 1.1 各章の位置づけ

第2章「逆 DCT の簡略化による処理負荷のスケーラビリティを実現する多チャンネル映像再生技術」では、処理能力の低い端末も含む様々な端末プラットフォームにおいて映像復号を可能とするためのソフトウェアデコーダの処理負荷のスケーラビリティ方式を提案する。本提案では、FTTH、CATV インターネット、モバイルインターネットなどブロードバンド上でのインターネットストリーミングを用いて、PC やタブレットなど TV 以外の端末上で、多チャンネルの映像配信ストリームを受信・再生するサービスや、法人向けの遠隔監視映像ストリームを受信・再生するサービスにおいて、送信側システムの改変を行うことなく低コストな汎用端末でも処理能力に応じた画質やチャンネル数で同時再生可能とするため、H.263 や MPEG など MC-DCT (Motion Compensation-Discrete Cosine Transform) をベースとした圧縮符号化アルゴリズムの中の DCT 処理に着目し、画質と処理負荷がトレードオフの関係になる多段階の簡易処理方式、および提案方式を実装したマルチチャンネルマルチキャストシステムについて論じる。

第3章「帯域変動に追従した QOS 非保証型ネットワークにおける安定的なライブ伝送技術」は、2 章で述べた受信端末の能力に対するスケーラビリティに対して、送信側で映像伝送する際に必要となるネットワークに対するスケーラビリティを提供するものである。即ち、近年、xDSL、FTTH、CATV、モバイル等の帯域非保証型のブロードバンドネットワークにおける有力なアプリケーションとなっている映像ストリーミングや IP ベース TV 会議システムにおいて、安定的なライブ伝送を可能とする帯域適応型映像符号化レート制御方式を提案する。本提案では、RTP/RTCP (Real-time Transport Protocol/RTP Control Protocol) 伝送プロトコルをベースとし、ネットワークスイッチなどネットワーク機器の変更なしにアプリのみで時々刻々変化する帯域を推定してアダプティブに伝送符号化レートを制御することで、映像再生品質の極端な劣化を抑制し、伝送帯域使用率も一定程度確保しつつ高画質で伝送可能な処理方式および提案方式を実装した QoS 非保証型 MPEG-4 伝送システムについて論じる。

第4章「バッファ推移の類似性を用いた MPEG コンテンツのサイマル符号化技術」は、2 章、3 章で述べた多チャンネル映像に対して、xDSL、CATV、FTTH、モバイルなどの様々なネットワーク帯域向けに様々な符号化ビットレートのコンテンツを同時生成するためのサイマル符号化方式について提案する。同じソース映像を異なるビットレートで独立にエンコードを行うと、エンコード本数に比例して符号化処理コストが増加してしまう。そこで、同時エンコード処理を行う際に各エンコード処理を連携

させ共通処理や予測可能な処理を簡略化することで複数同時エンコードの処理負荷低減を実現できる可能性がある。本章では、複数同時エンコードにより同一画像ソースから、同一画像サイズ、同一フレームレートで異なるビットレートの符号化ストリームを効率的に生成するためのセカンダリエンコーダの高速レート制御方式（MPEG-2, H.264）について論じる。

第 5 章「最新 CATV 技術と将来展望」では、ブロードバンドの中でも、放送・ネット・電話の所謂トリプルプレイ全体で順調に普及拡大している CATV 技術の最新技術動向とその将来展望について述べる。具体的には、現状のケーブルシステムと主要技術、先端サービスを支えるケーブル伝送技術、ネットワーク技術、端末技術の最新動向について解説するとともに、それらを踏まえた上で、将来サービスを担う高度映像メディア、ソーシャル、レコメンド、社会インフラなどのアプリケーションサービスの進化や展望について論じる。

最後に 6 章では、結論として本研究の成果をまとめる。



## 第2章 逆 DCT の簡略化による処理負荷のスケーラビリティを実現する多チャンネル映像再生技術

### 2.1 まえがき

第 1 章で述べた通り，インターネット上での映像コンテンツ配信が普及・拡大しつつあり，コンピュータの CPU 処理能力の著しい発展に伴い，汎用の PC 上でソフトウェアによる画像処理技術や高速ビデオデコード技術を用いたストリーミング映像再生が可能となった．例えば，インテル社の MMX (MultiMedia eXtension) インストラクションセットにより，逆直交変換 (IDCT : Inverse Discrete Cosine Transform) や動き補償 (MC : Motion Compensation) のような比較的处理量が多く繰り返し演算される処理の負荷を大幅に低減させることが可能となっている．[11] では，ソフトウェアによる MPEG-2 復号のための MMX ベースの逆直交変換と動き補償のアルゴリズムを提案している．MMX のような専用のインストラクションセットを持った CPU は現在広く普及しているものの，そのようなインストラクションセットを持たない CPU (スマートフォンやタブレット向け ARM CPU など) も数多く用いられている．そのような場合には，映像再生演算量を段階的に抑えた処理負荷のスケーラビリティ技術が必要となってくる．スケーラビリティを実現する技術として階層符号化を用いて配信する手法 [12] [13] [14] やその処理効率を上げるための手法 [15] [16] が提案がされているが，拡張レイヤも含めた階層型符号化ストリームは単一符号化ストリームよりも符号化効率が低下する点 [17] と，レイヤ数に限りがあり細やかなアダプテーションができない点，多数存在する受信端末のデコーダにおいて標準プロファイルには含まれない階層符号化処理を導入するコストがかかる点，から一般的な導入には適さない．階層符号化ではない通常のシングルレイヤの圧縮符号化を考えた場合，一般的に用いられる処理負荷低減策としては，フレームレートを落としたフレームスキップ処理が挙げられるが，時間方向の解像度が低下し再生品質の大幅劣化が伴う．また，高い処理能力を持った CPU を用いたとしても，ビデオサムネイル表示や遠隔監視のような多チャンネル同時再生には十分な処理能力とは言えない状況にある．

そこで、本章では、動き補償と DCT ベースの直交変換を用いた階層型ではない圧縮符号化アーキテクチャを対象として、再生フレームレートに優先度を持たせた処理負荷スケーラビリティ方式について論じる。同時に本方式を多チャンネル同時再生に適用して開発した多チャンネルマルチキャスト伝送システムについて述べる。以下に、初期のインターネットやイントラネットでの映像配信アプリケーションで用いられた H.263 符号化方式をベースとした再生処理負荷スケーラビリティについて述べるが、そのコンセプトは H.263 に限定されるものではなく、MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 など動き補償と DCT ベースの直交変換を用いた他の圧縮符号化方式にも容易に拡張可能である。

## 2.2 復号再生処理における処理負荷

最初に予備実験として、H.263 のレファレンスソフトウェアである TMN5 [21]を用いて、イントラフレーム間隔 3 秒、128 [kbps] の符号化モードで符号化されたテストシーケンス (Foreman) の復号処理を HP-9000/755 ワークステーション上で実施した際の各復号モジュールの処理負荷を計測した。以下にその実験結果を記載する。

- (1) YUV to RGB and display (“display process” hereafter): 44.6%,
- (2) IDCT: 26.8%,
- (3) MC: 17.9%,
- (4) VLD: 7.2%,
- (5) Header parsing: 1.8%,
- (6) Other: 1.7%.

上記に依れば、全ての復号処理の約 90%は、表示処理、逆直交変換、及び動き補償の処理で費やされていることが分かる。

## 2.3 復号再生処理における処理負荷の低減

CPU 処理負荷の約半分は表示処理が占めるが、レンダリング含めた表示処理の負荷低減については、マイクロソフト社製の DirectShow など様々なアプローチや技術が存在する。そこで筆者は、表示処理の次に処理負荷の高い逆直交変換 (IDCT) と動き補償 (MC) に着目して各種の処理低減方式を提案 [18] [19] し、それらの品質や処理負荷を評価する。提案方式の基本的な考え方としては、逆直交変換と動き補償の加算処

理と乗算処理の演算量を削減する．また，処理負荷低減に有効なフレームスキップも併用した場合の評価検証も行う．以下に，復号処理スケーラビリティを実現する提案方式について述べる．

### 2.3.1 DCT 係数のローパスフィルター処理（方式 1, 2）

MPEG コンテンツのビットレートトランスコーダにおけるレート低減方式において DCT 係数に帯域制限フィルタをかけ高周波成分をゼロとすることでビットレート削減を行う手法 [20] が提案されているが，本手法を IDCT の処理負荷削減に応用することを考えた．IDCT の処理負荷は，図 2.1 に示す通り，ローパスフィルタ（LPF）を DCT 係数に適用し 8x8 IDCT の高周波数係数の計算量をカットすることで，削減することができる．ここでは，4x4 LPF（方式 1），2x2 LPF（方式 2）をシミュレーションに用いた．Chen の LPF を使わない高速 IDCT [22] アルゴリズムと比べて，方式 1, 2 それぞれ 40%と 60%の乗算の処理量削減，30%と 54%の加算の処理量削減が可能である．

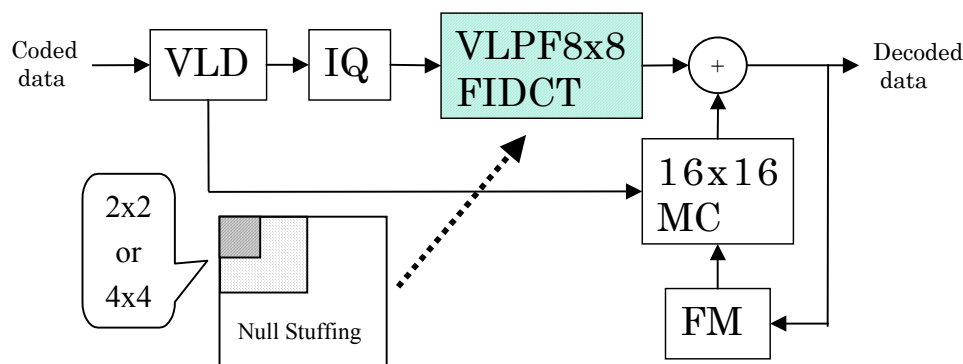


図2.1 Method1,2 (LP8x8IDCT, VLP8x8IDCT)

### 2.3.2 縮小 IDCT カーネルとアップサンプリング（方式 3, 4）

本方式では，IDCT 処理のカーネルサイズを縮小して処理量を削減し，対応するアップサンプリングを施すことで通常の MC を処理可能とする．実験では，IDCT サイズ 4x4（方式 3）と 2x2（方式 4）を用いた．アップサンプリングについては，そのフィルタリング処理に関わる処理量を削減するため，シンプルな画素複製を用いた．Chen の高速 IDCT [22] アルゴリズムと比べて，方式 3, 4 それぞれ 80%と 95%の乗算の処理量削減，85%と 98%の加算の処理量削減が可能である．

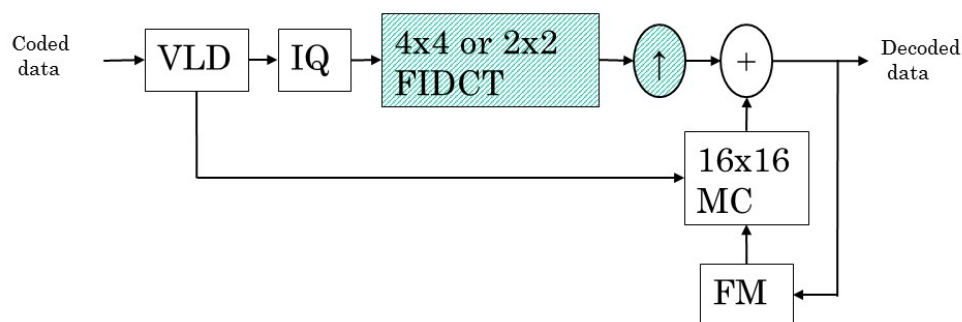


図2.2 Method3,4 (4x4IDCT+UpSample, 2x2IDCT+UpSample)

表 2.1に各方式による加算，乗算の処理回数を示す．

表2.1 Number of Addition and Multiplication of IDCT  
( ) shows percentage to 8x8IDCT

	8x8IDCT (Chen [22])	LP8x8 IDCT method1	VLP 8x8 IDCT method 2	4x4 IDCT methds3&5	2x2 IDCT methd 4
Num. of Add.	416	288 (70%)	192 (46%)	64 (15%)	8 (2%)
Num. of Multi.	320	192 (60%)	128 (40%)	64 (20%)	16 (5%)

### 2.3.3 縮小 IDCT カーネルと縮小スケール MC，及びアップサンプリング（方式 5）

一般的に DCT 成分が低周波に集まる傾向があることから，図 2.3に示す通り，縮小 IDCT カーネルと縮小スケールの MC を用いることで復号解像度を低下させることで処理負荷を削減している．実験では，8x8 IDCT と 16x16 MC の代わりに 4x4 IDCT と 8x8 MC を用いている（方式 5）．生成された縮小画像はアップサンプリングするが，高速処理を考慮して，シンプルな画素複製を行っている．縮小 MC を用いているため，方式 3 に比べて更なる処理負荷削減が期待できる．



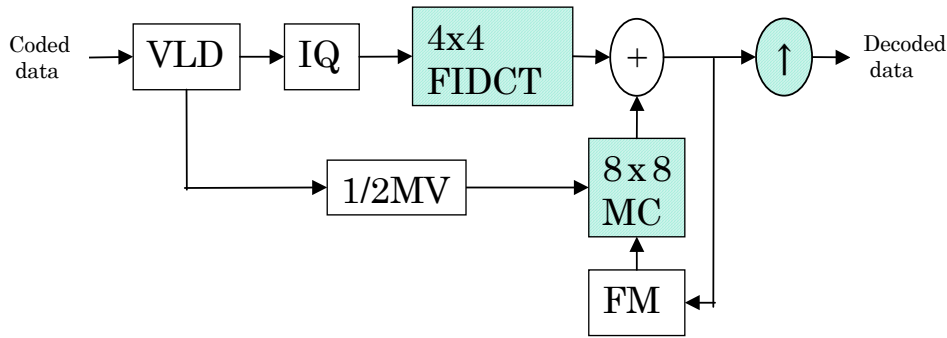


図2.3 Method5 (4x4IDCT + 8x8MC)

### 2.3.4 整数精度の MC（方式 6）

本方式では，図 2.4に示す通り，整数画素精度の MC を用いている．通常の半分画素精度の画素フィルタリング処理を除くことで処理負荷を削減している（方式 6）．

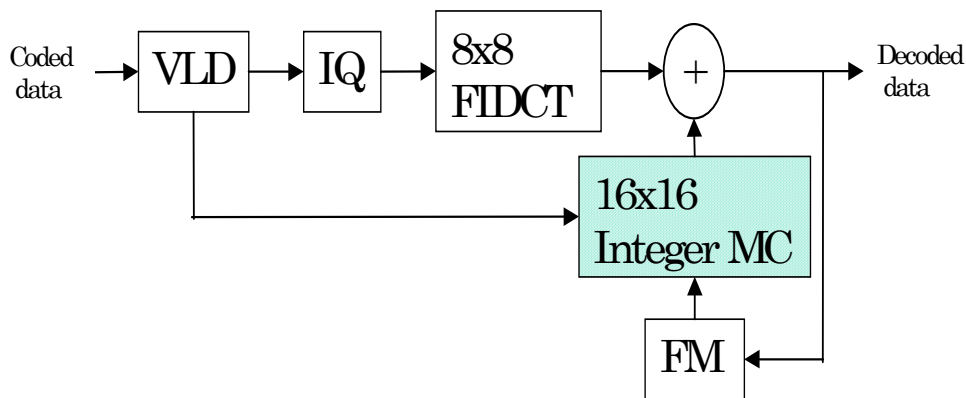


図2.4 Method6 (8x8IDCT NO HALF PEL)

### 2.3.5 フレームスキップ（方式 7， 8）

フレームレートは落ちるものの，一般的な処理負荷削減策であるフレームスキップも評価の対象とした．方式 7 では，イントラフレームのみを復号し，方式 8 では更に，そのイントラフレームの復号に 4x4 IDCT を用いた．イントラフレームのみの復号のため MC 処理を全く行わないため，大幅な処理負荷削減が期待できる．

方式 1～6 では，符号化と復号化の間のローカルループにおいて参照画像の一貫性が崩れることから所謂ドリフトノイズの発生が予想される．[23] [24] [25] [26] では新たなフィルタリング処理を行うことでドリフトノイズを低減した MC 手法が提案されているが，今回は，処理負荷の増大を回避するため，そのような処理は盛り込んでいない．

## 2.4 各方式による処理負荷削減に関する実験およびその結果

表 2.2に示す符号化等の実験条件において，各方式の復号処理負荷と Y-PSNR を測定した．図 2.5に，表示処理を除いた各方式のシングルストリームの復号処理負荷の特性を示す．

表2.2 Experimental condition

Test sequence	Foreman , 300[frames], CIF format
Coding condition	H.263 TMN5 [21], IntraFrame Insert about every 3 sec, 28-256 [kbps], 10frame/s, PB-frame off, UTMV off
Decode machine	HP9000/755, HP-UX

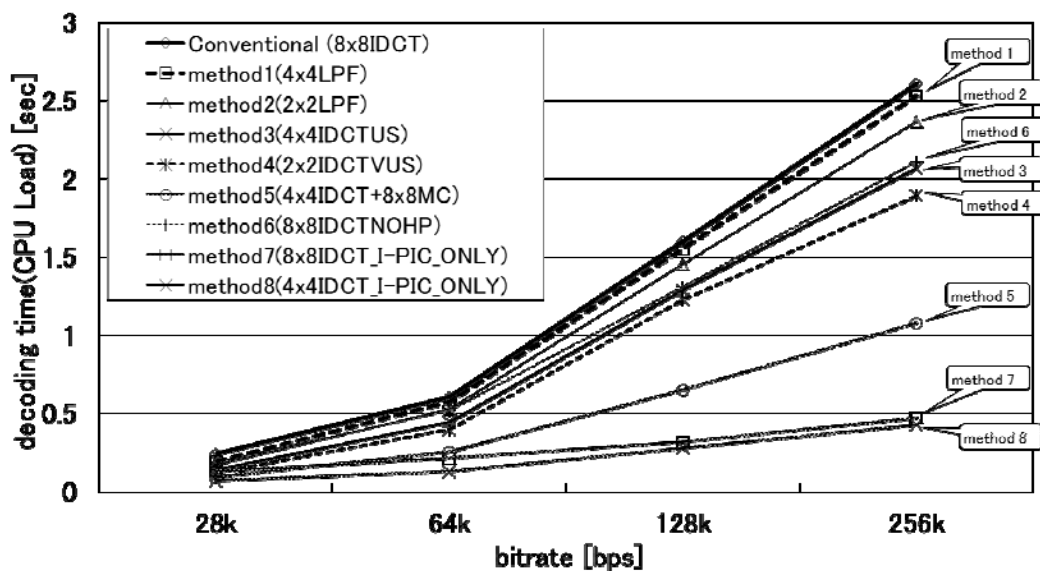


図2.5 Bitrate vs Processing Load

図 2.5より，128 [kbps]での各方式の復号処理負荷は，処理負荷の高い方から，方式 1 > 2 > 6 > 3 > 4 の順に 1～8%程度削減できている．例えば，2x2 IDCT と 16x16 MC を用

いる方式 4 の処理負荷は、8x8 IDCT を用いる通常の方式の 3/4 程度となっている。4x4 IDCT と 8x8 MC を用いる方式 5 の処理負荷は、16x16 MC の代わりに 8x8 の縮小スケールでの MC を用いていることから、方式 4 の約半分となっており、通常の復号処理に比べて約 40%となっている。方式 7 はイントラフレームのみを復号するため、MC 処理は行わず、フレームも 3 秒毎の出現、すなわち約 0.3 [fps]となる。そのため、CPU 負荷は通常復号の 20%程度まで小さくなる。方式 8 では、イントラフレームのみを復号する方式 7 の 8x8 IDCT の代わりに 4x 4 IDCT を導入することで更に約 10%の CPU 負荷削減が可能となる。

ビットレート対処理負荷の特性については、図 2.5より、中間のビットレートにおいては、符号化ビットレートに従ってほぼニアに上昇することが分かる。

Y-PSNR の特性を図 2.6に示す。図より、例えば、各方式における 70 フレーム目の Y-PSNR は、通常の復号処理と比べて、方式 1, 3, 2, 4, 5, 6 の順に、1.6 [dB], 2.8 [dB], 5.0 [dB], 6.1 [dB], 10.8 [dB]それぞれ画質低下していることが分かる。8x8 MC を用いる方式 5 の Y-PSNR は、70 フレーム目において、16x16 MC を用いる方式 2,4 のそれより画質低下が見られる。これは、シーンチェンジを除く比較的小さな動きベクトルが発生する画素領域において頻繁に MC-coded モードが使われ、縮小 MC によるドリフトノイズ発生に起因するものであると考えられる。しかしながら、91~102, 170~269 フレームにおいては、方式 5 の方が方式 2, 4 よりも Y-PSNR が高くなっていることが分かる。本フレームでは、シーンチェンジやパン・ズームによる比較的大きな動きが発生し、intra-coded MB（イントラ符号化マクロブロック）がしばしば使われることで、ドリフトノイズの影響が小さくなるためと思われる。上記の観察結果より、画質低下の順序は、シーン特性に依存して変化することが分かる。

整数画素精度の MC を用いる方式 6 については、Y-PSNR の劣化特性（画質の上昇・下降の傾向）は、4x4 IDCT, 8x8 MC と半画素精度の MC を用いる方式 5 と似てはいるが、例えば、小さな動きのある 70 番目のフレームでは、方式 5 よりも大きな画質劣化が生じている。その一方で、大きな動きのある 200 番目のようなフレームでは、方式 6 の方が方式 5 よりも画質が大きく上回っている。これにより、符号化器と異なる画素精度の MC に起因するドリフトノイズは画像の動きの特性に大きく左右され、MC-Coded モードが使われる小さな動きの領域に対してはかなりの画質劣化を生じさせるということが言える。

方式 7, 8 の Y-PSNR は、イントラ符号化フレーム（93, 172 番目のフレーム）において、各々、通常の復号方式（8x8 IDCT）と方式 5（4x4 IDCT）の Y-PSNR と同等である。

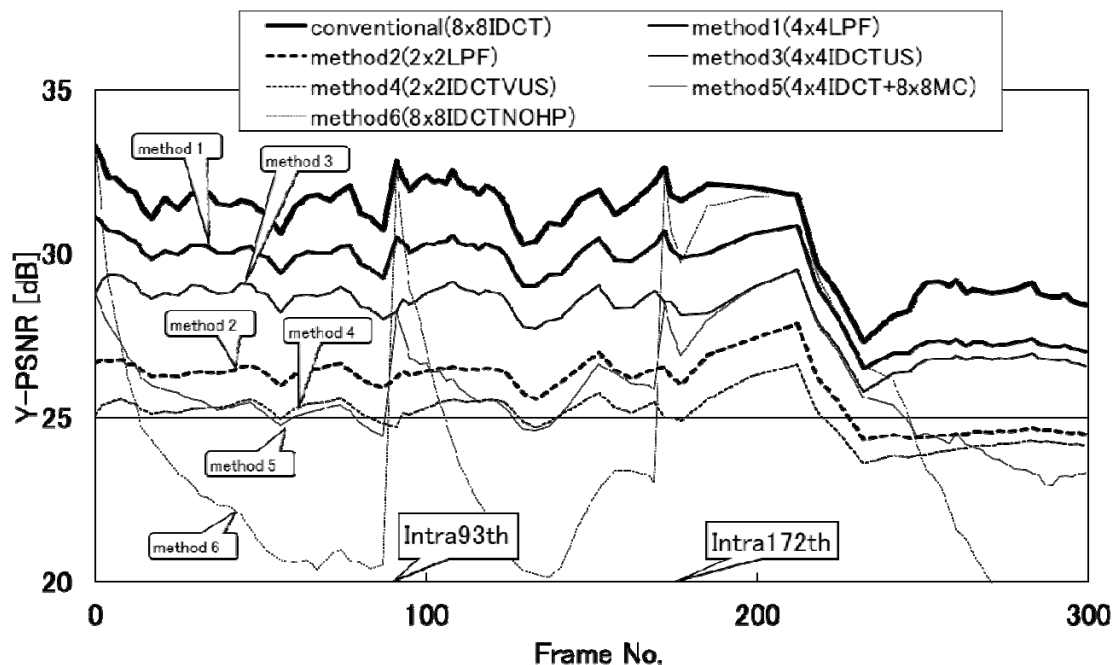


図2.6 Frame No. vs Y-PSNR (128kbps)

上記の結果から、128kbps の符号化で CPU 負荷の高い順に並べ替えた、CPU 処理負荷 対 復号画質の関係を表 2.3 に示す。ここで、各方式の Y-PSNR とその劣化度合いの順序は、画像シーケンスにおける画像性質に従って時々変化するため、300 フレームの平均の Y-PSNR を復号画質として用いた。

Y-PSNR は、方式 1, 3, 2, 5, 4, 6 の順に低下するため、CPU 処理負荷結果を反映した表 2.3 の網掛け部分に示す方式 1, 3, 5, 7, 8 の順序で、効果的かつグレースフル（徐々に変化する）な処理負荷のスケーラビリティが実現できることが分かる。図 2.7 は、符号化ビットレート 28 [kbps], 64 [kbps], 128 [kbps], 256 [kbps] における各復号方式の平均 Y-PSNR の関係を示したものである。映像再生を行うユーザは、使える CPU パワーに従い、適切な復号方式を選択することで、復号処理負荷のスケーラビリティを実現することが可能となる。

表2.3 CPU Load vs AVR. of Y-PSNR(128kbps)

	CPU Load[sec]	AVR. of Y-PSNR
Conventinal 8x8IDCT	1.60	30.6
method1 LP8x8	1.55	29.1
method2 VLP8x8	1.45	25.8
method6 IntegerPeIMC	1.31	22.1
method3 4x4IDCT+UPSample	1.29	28.0
method4 2x2IDCT+UPSample	1.23	24.9
method5 4x4IDCT	0.65	25.3
method7(8x8IDCT_I-PIC_ONLY)	0.32	32 (93th I-frame)
method8(4x4IDCT_I-PIC_ONLY)	0.28	28 (93th I-frame)

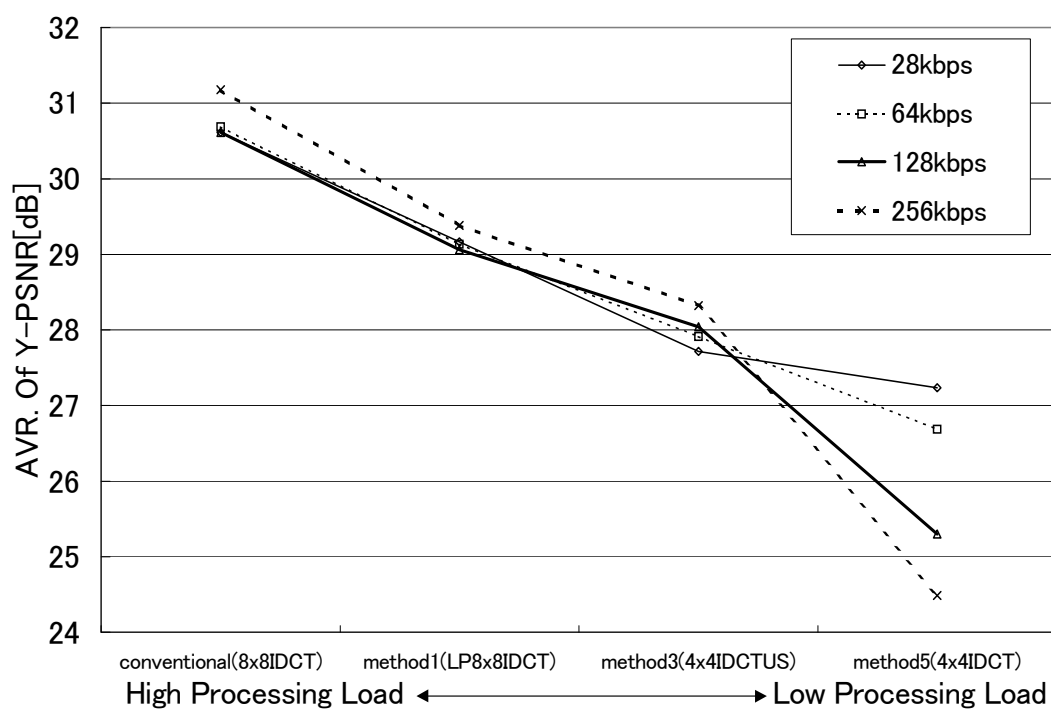


図2.7 Decoding Methods vs AVR. of Y-PSNR

## 2.5 マルチチャンネル同時復号化における処理負荷スケーラビリティ

ここでは，前節で導出された処理負荷スケーラビリティ方式 1, 3, 5, 7, 8 を用いたマルチチャンネル同時復号化の処理負荷スケーラビリティについて検証する．

### 2.5.1 実験および結果

マルチチャンネル同時復号化の処理負荷スケーラビリティを検証するため，映像 1 c h，4 c h，8 c h，12 c h，16 c h の同時復号に関わる表示処理も含めた CPU 負荷を 1 台の PC 上で測定した．マルチチャンネル復号化については，筆者らが開発した H.263 符号化方式をベースとしたマルチチャンネル・マルチキャストシステム [27] を用いた．処理負荷は，フレーム毎のデータ総量や符号化複雑度に応じてダイナミックに変化するため，PC 上での CPU 負荷が安定した後の 30 秒分の平均値を測定した．CPU 負荷の測定ツールとしては，WindowsNT OS にバンドルされたパフォーマンスモニタツールを用いた．他の実験条件を表 2.4 に示す．

表2.4 Experimental conditions

Test sequence	Foreman, 1, 4, 8, 16channel, 189 [sec], CIF format
Coding condition	H.263, Intra Frame Interval about every 3 sec, 96 [kbps], 10 [fps], PB-frame off, UTMV off
Decode condition	Method 1, 3, 5, 7, 8
Decode machine	Pentium II 550 [MHz] dual CPU, 512 [MB] memory, Windows NT 4.0

図 2.8は，マルチチャンネル同時復号化の CPU 負荷特性を示す．図より，処理負荷は復号チャンネル数に応じて殆どリニアに増加していることが分かる．本実験では表示処理負荷も含むため，スケーラビリティ方式間の処理負荷の差異は，前節でのシングルチャンネル復号化での差異ほどは大きくはなっていない．しかし，4x4 IDCT と 8x8 MC を用いる方式 5 の処理負荷は，8x8 IDCT と 16x16 MC を用いる通常の復号方

式に比べて大幅に削減されている。イントラフレームのみを復号する方式 7,8 の処理負荷については、通常の復号方式に比べて 1/4～1/8 に削減されている。

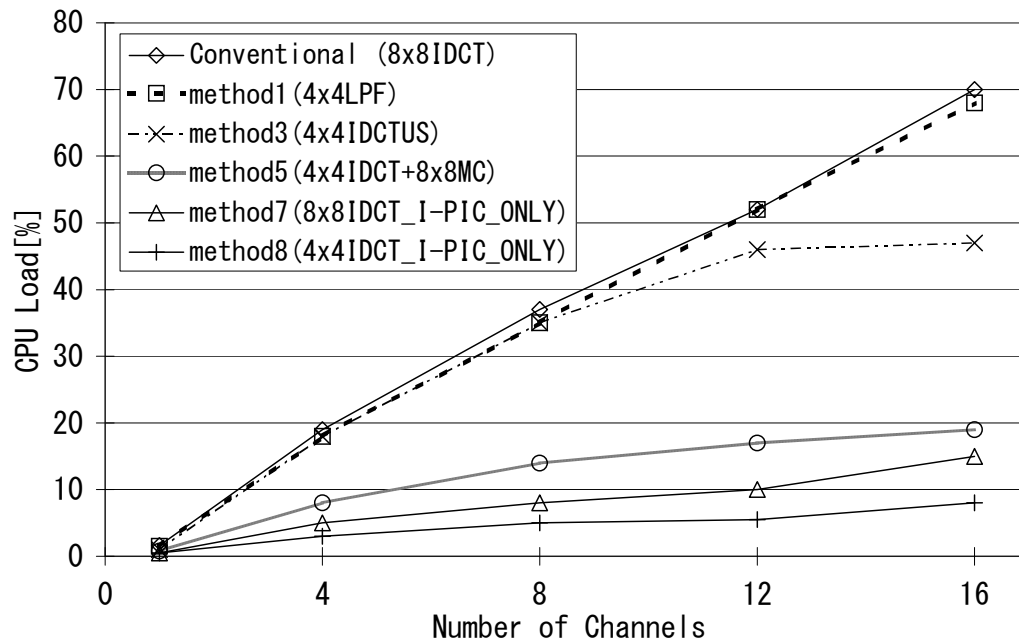


図2.8 Number of Channels vs Processing Load (96kbps)

これらのスケーラビリティ特性を用いて、要求される画質、チャンネル数、CPU リソースのうち 2 つが分かれば、マルチチャンネルデコーダをデザインできる。例えば、CPU 負荷 50%以下で 16ch 同時再生したい場合、方式 3 で実現可能である。8ch 同時再生の場合、通常デコーダで実現可能であることが分かる。

## 2.6 マルチチャンネルマルチキャストシステムへの応用

提案のスケーラビリティ方式を用いて、マルチチャンネルマルチキャストシステムを開発した [27]。

### 2.6.1 システム構成

図 2.9にシステム構成図を示す。本システムは、WindowsPC 上で動作するサーバおよびクライアントソフトウェアから成る。

サーバ側では、符号化されたビデオとオーディオのストリームが、IP マルチキャストト上の RTP [28] を用いて複数クライアントに同時配信される．図中の N 台のサーバが N チャンネルビデオの符号化とネットワークへの伝送を行う．

クライアント側では、各 UDP (User Datagram Protocol) ソケットに対応した受信スレッドを各チャンネル毎に生成し、マルチチャンネルの同時復号と再生を実現している．そして、チャンネル数と全体の CPU 負荷に従い、提案した復号スケーラビリティアルゴリズムの中から適切な復号方式が選択される．

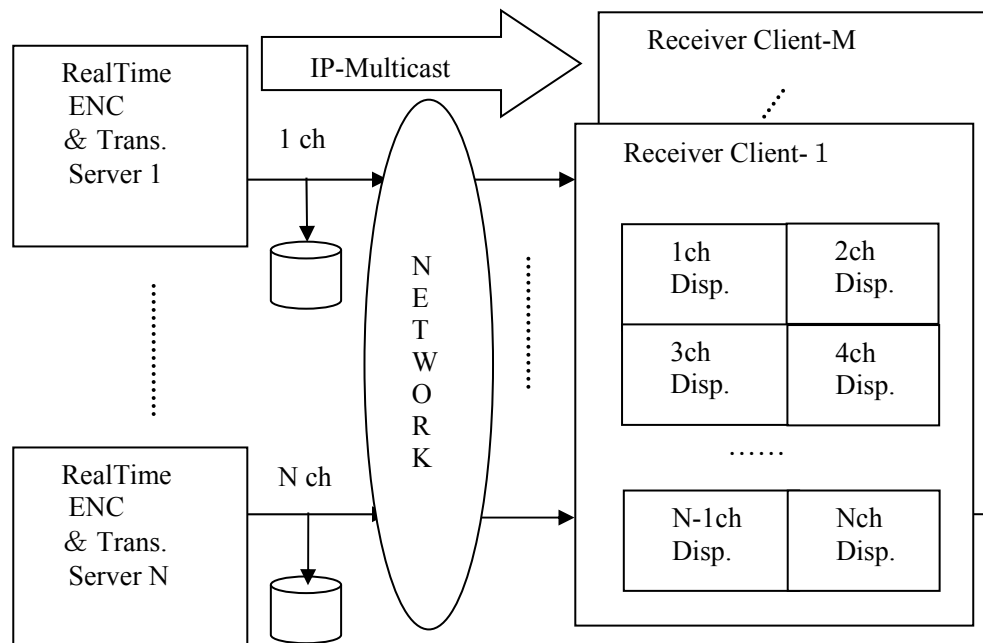


図2.9 System Configuration

## 2.6.2 マルチチャンネル同時再生

マルチチャンネル同時再生を検証するため、4x4 IDCT とイントラフレームのみの復号を行う方式 8 を用いた最大 100 チャンネル再生の性能を測定した．実験条件として、Pentium II 550 [MHz] dual CPU, 512 [MB] memory, WindowsNT4.0 の PC 上で、イントラフレーム間隔 3 秒の H.263 TMN5 [21] 20kbps で符号化されたテストシーケンス (Summer Day) を用いた．図 2.10 にマルチチャンネル同時復号時の CPU 処理負荷を示す．図 2.11 に 100 チャンネル同時再生の再生画面例を示す．

図 2.12 では、他のマルチチャンネル再生の再生画面例 (4 チャンネル同時再生と選択チャンネルの再生) を示す．図中、左の図はマルチチャンネルモードを示し、提案のスケーラブル復号方式を用いている．4 チャンネル同時再生の場合、4x4 IDCT とア



ップサンプルを用いる方式3が使われている。例えば，上記 PC 環境にて 128 [kbps] で符号化された 4 チャンネルビデオの同時復号を方式3で処理した場合，その CPU 負荷は約 35%となり，通常の復号方式を用いた場合，約 50%の負荷となった。本システムでは，図 12 の右側の図で示す通り，ユーザが要求するチャンネルが選択されると，選択されたチャンネルが通常の復号化方式で復号され再生される。このようにチャンネル数に応じたスケーラブルなマルチチャンネル再生機能を実現することが可能である。

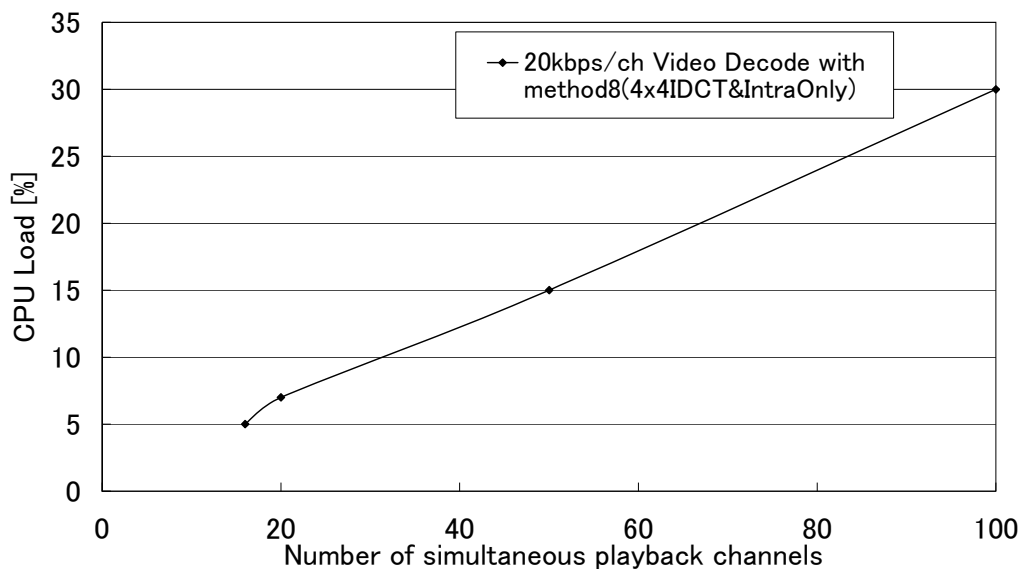


図2.10 Number of Channels vs Processing Load ( at 20kbps / ch )

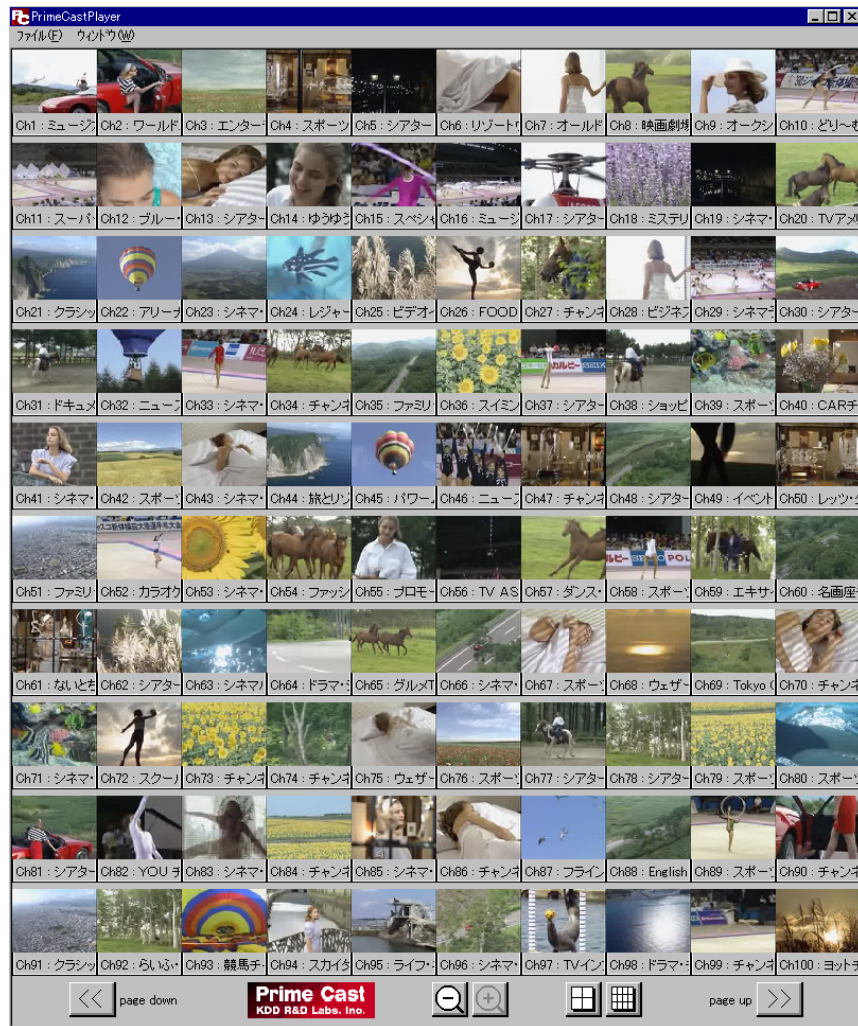
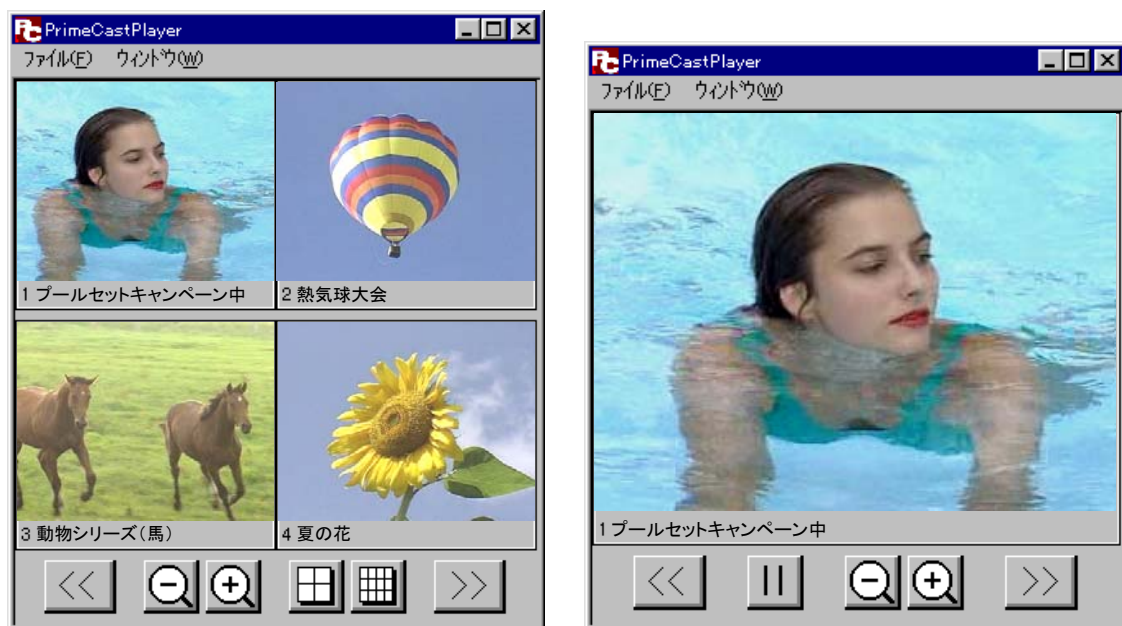


図2.11 Simultaneous 100 channel playback



(a) Multi-channel mode

(b) Single channel mode

図2.12 Multi-Single channel playback

## 2.6.3 まとめ

本章では、スケーラブルなビデオ復号アルゴリズムを提案し、マルチチャネルマルチキャストシステムへの応用について述べた。実験では、適切な復号方式を選択することで、復号映像品質と処理負荷に関するグレースフルでリーズナブルな復号スケーラビリティが実現できることを示した。また、提案のスケーラブルビデオ復号アルゴリズムをマルチチャネルマルチキャストシステムに応用し試作することで、数十チャネルの同時復号が一般的なPC上で実現可能なことを実証した。今後の課題としては、MPEG-4 AVC/H.264やH.265などDCTとは異なる直交基底を用いる最新の圧縮符号化への対応が挙げられる。

尚、本技術は、多チャネルマルチキャスト伝送システム「PrimeCast」に採用され、全国800校の小中学校やKDDI衛星伝送サービスSkycast等で利用された（現在は製品販売終了）。



## 第3章 帯域変動に追従した QoS 非保証型ネットワークにおける安定的なライブ伝送技術

### 3.1 まえがき

第 1 章で述べたように，ADSL や FTTH，CATV，モバイル等のブロードバンドネットワーク技術が急速に普及し，ブロードバンド時代における有力なアプリケーションとして，数百 kbps～数 Mbps の高画質映像ストリーミング [6] や，回線交換型の ISDN (Integrated Services Digital Network) から QoS 非保証型の IP 系へとシフトしたブロードバンド向け TV 会議システム [29] が広く用いられるようになってきた．低遅延伝送を要求されないシステム [7] [8] [9] は除き，これらのアプリケーションでは，低遅延，高画質の双方向リアルタイム映像伝送が要求されるため，通常，伝送プロトコルとしては再送等によるエラー回復を行わない UDP/IP プロトコルが用いられる．しかしながら，インターネット上では，最低保証帯域や最大ジッタなどの QoS が保証されていないため，時間とともに伝送可能帯域が変動し符号化伝送レートを下回った場合には，パケットロスや伝送ジッタの増加により映像品質の極端な低下が発生する [30]．

本問題を解決するための方策として，大まかに分けてネットワークレベルでのアプローチ [31] [32] とアプリケーションレベルでのアプローチ [33] [34] [35] [36] [12] の 2 つの対策が考えられる．前者のアプローチは，現在一般的に用いられているプロトコルやパケットスイッチングメカニズムを要求 QoS が提供可能となるように拡張することを意味し，ある一定のネットワークポリシーに基づき，RSVP (Resource Reservation Protocol) [31] や DiffServ (Differentiated Services) [32] のようなアドミッション制御や帯域予約，高度なスイッチスケジューリングメカニズムの導入が必要となる．ただし，これらのメカニズムは一部の限られたネットワーク上では実装可能なものの，ネットワークポリシーや運用管理の統一化など根本的な課題もあり現存のインターネット全てで利用することは困難と言える．

一方，後者のアプリケーションレベルでのアプローチでは，パケットロス率，伝播遅延および伝送ジッタの増大などを基に，ネットワーク輻輳をアプリケーションレベルで検知し，その程度に従って輻輳回避のため符号化伝送レートを制御することが行われる．伝送可能帯域，伝播遅延およびジッタは時間とともに変化するため，伝送符

号化レートをネットワーク状況に合わせてタイムリーに調整するためには、輻輳などのネットワーク状態の時間的な変動を送信側のレートコントローラに対して定期的にフィードバックさせる必要がある。これらのフィードバック、輻輳検知及び輻輳回避を行うための伝送レート制御メカニズムとして、様々な手法が提案されている [33] [34] [35] [36] [12]。

[33] および [34] では、パケットロス率を基にビデオの符号化送信レートを上下することによりレート制御を行っている。本方式では、伝送可能帯域が減少傾向にある場合、ネットワークノードにおけるキューバッファがオーバーフローを起こしパケットロスが発生するまで送信レートを抑制しない。このため、パケットロスを検知する前にネットワーク輻輳を検知できず、一時的な映像品質劣化が発生する。尚、送信レートの初期値に関しては、コーデックの下限に近い数十 kbps 程度の値を手動により設定している。参考文献 [35] では、ネットワークスイッチがサーバに対してキューのバッファ占有量やサービスレートに関する情報をフィードバックすることにより送出レート制御を行っている。この場合、フィードバックを実現するための独自の処理やプロトコルを実装しなければならない。また、[36] では、伝送遅延を一定に保つため、伝送ルート上にある全てのスイッチにおけるトータル仮想バッファ占有量がターゲットサイズに収束するようにレート制御を行っている。この場合、各リンクスピードに合わせてターゲットバッファサイズをマニュアルで調整する必要がある。[12] では、階層符号化を用いたレシーバ主導の階層マルチキャスト (RLM : Receiver-driven Layered Multicast) 方式が提案されている。この方式では、伝送可能帯域が既知の場合に、その帯域に従って基本レイヤと組み合わせる拡張レイヤ数を選択することにより受信側にてレート制御が行われる。しかしながら、通常用いられるレイヤ数は 2~3 階層に限定されるため、伝送可能帯域に対する伝送レートの細かな調整は困難と言える。尚、上述した各々の従来技術においては、RFC 標準であるシンプル RTCP [37] フィードバックメカニズムとの協調手法や伝送開始時における初期符号化レートおよびレート制御用パラメータの自動決定手法については言及されていない。また、送信側アプリのみの制御で送信バッファの滞留状況を監視して送出レートを制御する手法 [38] も提案されているが、ネットワーク上の仮想バッファが一杯になり送信側のバッファまで影響が及ぶまで制御を行わないため、レート制御の追従遅延の問題も予想される。

本章では、インターネット上でのリアルタイム映像伝送に適した RTCP [37] ベースのダイナミックレート制御方式について述べる。本提案方式では、受信側から定期的

に送信される RR (Receiver Report) パケットから抽出されるネットワーク輻輳パラメータを解析することによりネットワークの状態を 4 つの輻輳レベル (極度な輻輳, 中程度の輻輳, 軽微な輻輳, 輻輳なし) に分類して符号化伝送レートを制御している. また, 本方式の有効性を検証するため本アルゴリズムを MPEG-4 [39] 映像伝送システム [40] に実装し, 時間とともに伝送可能帯域が変動する QoS 保証のない実際の IPv4/v6 ブロードバンドネットワークにおいてもパケットロスを抑制しつつ伝送可能帯域を最大限利用してスムーズな映像伝送可能なことを確認した. さらに, 初期トレーニングメカニズムの実装により, 伝送開始時から伝送可能帯域への高速なレート収束と帯域適応精度の向上を確認した.

以下, 3.2において RR パケットから抽出されるネットワークパラメータのうちネットワーク輻輳を検知するのに最適なものを選択するための予備実験について述べ, 3.3において輻輳レベルに応じて符号化伝送レートを制御する提案方式について詳述し, 3.4において実験および結果を示す.

## 3.2 最適パラメータ決定のための予備実験

0										1										2										3																			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1																		
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
V=2 P										RC										PT=RR=201										length										header									
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										SSRC of packet sender																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										SSRC_1 (SSRC of first source)																				report																			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
fraction lost										cumulative number of packets lost																				1																			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										extended highest sequence number received																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										interarrival jitter																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										last SR (LSR)																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										delay since last SR (DLSR)																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										SSRC_2 (SSRC of second source)																				report																			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
:										...										:										2																			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
										profile-specific extensions																																							
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+										+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			

図3.1 RR パケットフォーマット

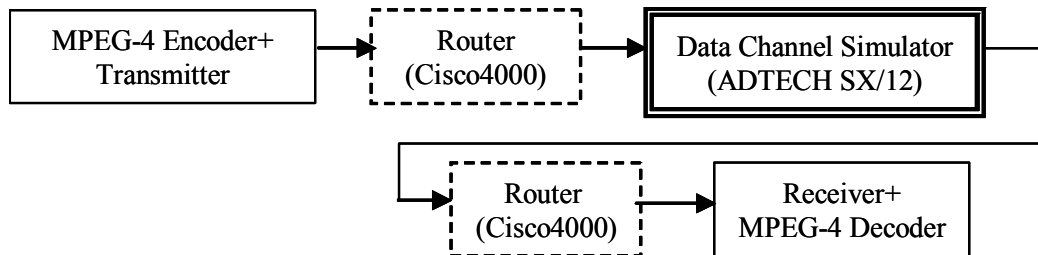


図3.2 予備実験のシステム構成



表3.1 MPEG-4 コーデック及び送信プロトコルの仕様

Video	MPEG-4 Simple-Main profile (I-, P-VOP only) Bitrate:16 [kbps] – 4096 [kbps] Picture Size:320x240 (80x60-640x480) FrameRate:10-30 [fps]
Audio	MPEG-2 LayerII Bitrate:16 [kbps] – 256 [kbps] 16 [kHz] - 48 [kHz], Stereo/Mono
Transmission	RTP/RTCP(RFC1889) over UDP/IP (A/V separate sending)

図 3.1に RFC1889 にて定義されている RTCP プロトコル [37] の RR パケットフォーマットを示す. この RR パケット情報から得られるパラメータ情報のうち, ネットワーク輻輳を検知するのに最適なパラメータを調査するため RTP/RTCP [37] ベースの MPEG-4 伝送システム [40] を用いて予備実験を行った. 図 3.2に実験用システムの構成を, 表 3.1に実験で用いた MPEG-4 コーデックおよび RTP/RTCP 伝送仕様を示す. 本実験では, 送信側から 384 [kbps], 15 [fps] の固定レートで符号化し伝送し続けている状態で, 伝送可能帯域を回線シミュレータ上で 1.0 [Mbps] から 350 [kbps] まで 200 [kbps] ~ 100 [kbps] 単位で 60 秒毎に減少させていった場合に, 次に示すパラメータの値を測定した.

- i) RTT(Round Trip Time) : RTCP の SR/RR (Sender Report/Receiver Report) から計算されるラウンドトリップタイム [ms].
- ii) Rma (Modified Average of RTTs) : 直近 5 回分の RTT 平均の値を最小値でオフセットした値 [ms], 以下 RTT 移動平均と呼ぶ.
- iii) PLR: RR パケット送信タイミングでリセットされる RTP ビデオパケットのパケットロス率 [%].
- iv)  $J_n$  : RR の送信タイミングで更新される RTP ビデオパケットの伝送ジッタ値[ms].
- v) JitterDiff: 現在のジッタ値と 1 つ前のジッタ値との差分値 [ms] .

vi) Jma (Modified average of jitters) : 直近 5 回分のジッタ平均の値を最小値でオフセットした値 [ms], 以下ジッタ移動平均と呼ぶ.

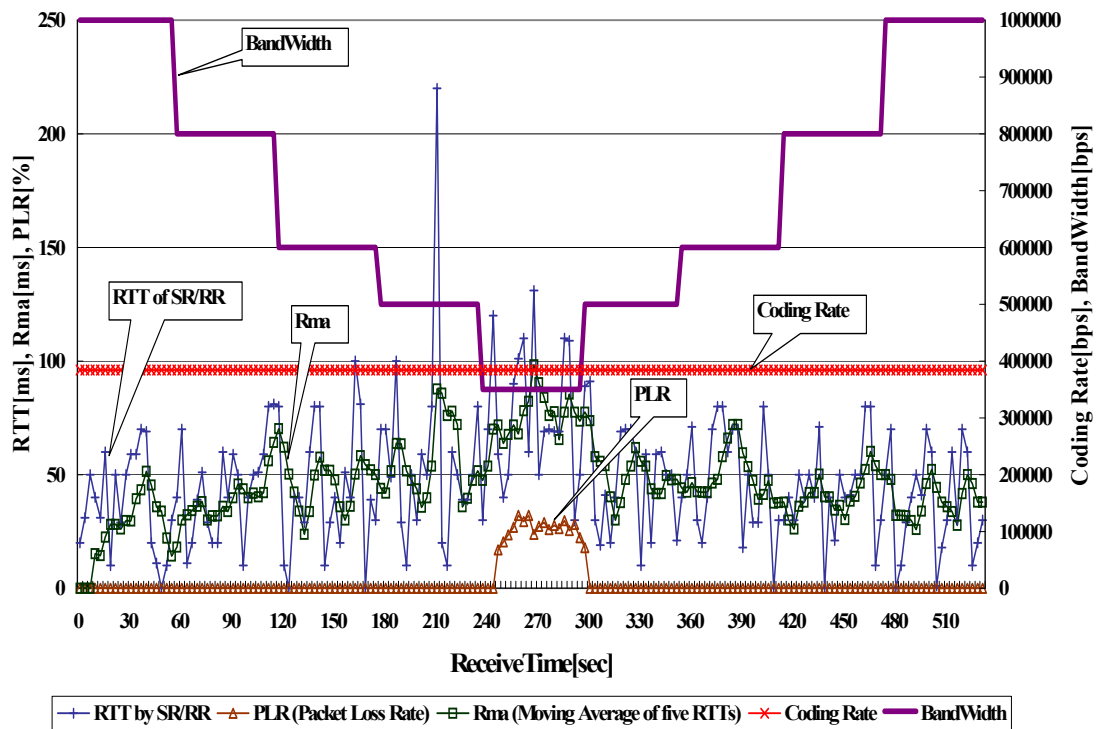
ここで, ジッタ値  $J_n$  は RFC1889 で定義されている次の計算式を用いた.

$$J_n = J_{n-1} + (|D(i, i-1)| - J_{n-1})/16 \quad (1)$$

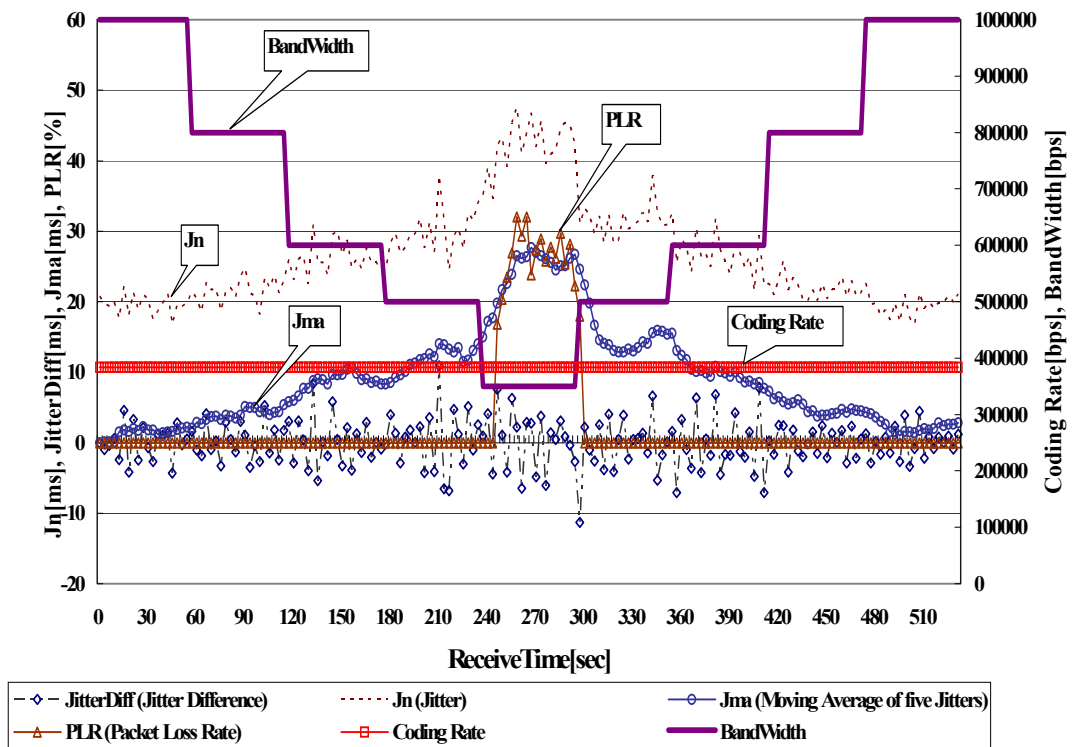
$D(i, i-1)$  は, 連続して伝送される RTP ビデオパケットの伝送遅延の差分値を,  $i$  は RTP ビデオパケットの番号を,  $n$  は RR パケット送信タイミングでカウントアップされる整数値をそれぞれ表す. 尚, 本実験では RR パケット送信間隔は 3 秒と設定した. また, 式 (1) より, 伝送遅延の差分絶対値  $|D|$  が増加すれば  $J_n$  も増加し,  $|D|$  がほぼ一定の値に収束する場合には  $J_n$  も  $n$  の増加に伴い  $|D|$  に収束することが分かる. 一般的にネットワークが輻輳してくると, ネットワークノードのキュー長が伸び, キュー長と遅延の非線形性より, 伝送遅延増大とともに伝送遅延の変動値  $|D|$  すなわち  $J_n$  および  $Jma$  が増大することが予想される.

上記 i)~vi)までのパラメータ値を測定した予備実験の結果を図 3.3(a)(b)に示す. また, これらの結果より観察される特徴を以下に示す.

- i) 符号化伝送レートよりも伝送可能帯域が小さくなるとパケットロス率 (PLR) が大幅に上昇する.
- ii) JitterDiff 値は 210 秒目および 300 秒目付近で 10 [ms] を超え, 他の箇所では 10 [ms] 以下で細かく振動する.
- iii) 帯域が減少するにつれ, Rma, RTT,  $J_n$ , Jma の全ての値が増加する.
- iv) 帯域が増加するにつれ, Rma, RTT,  $J_n$ , Jma の全ての値が減少する.
- v) Jma,  $J_n$ , PLR を除き, 他のパラメータ値は常に上下振動している.
- vi) Jma と  $J_n$  を比べた場合, ジッタの移動平均である Jma の方がスムーズに変化しており, 大まかなネットワーク特性の変化を捉えるのに適している. また, 最小値でオフセットされていることからスレッシュホールド判定に向いている.



(a) 帯域変動における  $Rma$ ,  $RTT$  及び  $PLR$  の変化



(b) 帯域変動における  $Jma$ ,  $Jn$ ,  $JitterDiff$  及び  $PLR$  の変化

図3.3 予備実験結果

帯域変化と各パラメータの相関係数を表 3.2に示す．上述の図 3.3(a)(b)から観察される特徴および表 3.2より，測定パラメータの中で Jma の振る舞いが伝送可能帯域の変動との間で最も密接な相関がみられたため，パケットロスが発生する前の中程度および軽微な輻輳状態の検出に Jma を用いることが有効と言える．RTCP の SR/RR 伝送から計算される RTT 移動平均 (Rma) も利用できなくはないが，RTP に比べパケットサイズが 1 桁以上小さく，実際の RTP ビデオ伝送における輻輳状況をダイレクトに反映していないため，また，値の上下振動が見られ Jma に比べてスレッシュホールド処理による輻輳判別が容易ではないことから，今回は利用していない．極度なネットワーク輻輳の検出に関しては，ネットワークノードにおけるキュー長が伸び続けた結果，バッファオーバーフローによるパケットロスが多発する状態であるため，パケットロス率 (PLR) を用いて検出を行うことが有効と考えられる．

次節において，予備実験結果を基にダイナミックレート制御アルゴリズムを提案する．

表3.2 帯域変化と各パラメータの相関係数（（）内は R2 決定係数）

パラメータ	RTT	RMA	JitterDiff	Jn ( Jitter )	Jma	PLR
相関係数 ( )内は R <sup>2</sup> 係数	-0.328 (0.108)	-0.678 (0.460)	-0.015 (0.000)	-0.869 (0.756)	<b>-0.893</b> <b>(0.798)</b>	-0.501 (0.251)

## 3.3 提案アルゴリズム

### 3.3.1 帯域適応レート制御アルゴリズム

最初にネットワークの輻輳状態を 4 つの輻輳レベル：レベル 4 (極度な輻輳), レベル 3 (中程度の輻輳), レベル 2 (軽微な輻輳)およびレベル 1 (輻輳なし)に分類する. 予備実験の結果からネットワークノードにおけるキューバッファがオーバーフローする手前の状態であるレベル 2 およびレベル 3 の検出にはジッタの移動平均  $Jma$  を用い, キューがオーバーフローしてパケットロスが多発する状態であるレベル 4 の検出にはパケットロス率  $PLR$  を用いる. 輻輳状態のレベル分類の後, 輻輳の程度に応じて適切な符号化伝送レートを決定する. 輻輳レベル毎のレート決定法について以下に述べる.

#### (1) レベル 4: 極度な輻輳

“極度な輻輳”をネットワークノードにおけるキューのオーバーフローによりパケットロスが頻繁に発生するネットワーク状態と定義し, 式 (2) に示すパケットロス率  $PLR$  のシンプルな閾値判定により検出する. また, 検出後のレート制御処理については, パケットロス率が増加するにつれてレスポンス良く符号化伝送レートを下げることにより, 輻輳回避およびパケットロス率の低減を図り, 画質劣化を抑制する必要があるため, 式 (3) に示すように  $PLR$  の大きさに反比例してレートを下降させることとした.

$$\text{If } PLR > TH_{loss4} \quad (2)$$

$$\text{Then level 4 and } coding\_rate = coding\_rate / (1+PLR)$$

$$(\text{where } 0 \leq PLR \leq 1) \quad (3)$$

#### (2) レベル 3, レベル 2: 中程度および軽微な輻輳

“中程度の輻輳”および“軽微な輻輳”では, ネットワークノードにおけるキューのオーバーフローが起こる手前もしくは僅かに発生し, パケットロス率  $PLR$  は 0 もしくはそれほど大きくない状態であるが, キューバッファ占有率は高くなるため, 予備実験の結果からも明らかなように, 輻輳なしの状態と比べると伝播遅延やジッタが増大する. 従って, これら 2 つの輻輳レベルの検出および識別には式 (4) および式 (6) に示すようにジッタ移動平均  $Jma$  を用いる. また, 検出後のレート制御に関しては, 式

(5) および式 (7) に示すように各々のレベルに応じた重み付け係数  $W_{l3}$  および  $W_{l2}$  を用いてレートを下降させている．ここで，レベル 3 では，レベル 2 に比べて輻輳度合いが高いため， $TH_{ja3} > TH_{ja2}$ ,  $1.0 > W_{l2} > W_{l3}$  とし，レートの上昇度合いを高く設定している．

$$\text{If } PLR \leq Th_{loss4} \text{ and } Jma \geq Th_{ja3} \quad (4)$$

$$\text{Then level 3 and coding\_rate} = \text{coding\_rate} * W_{l3} \quad (5)$$

$$\text{Else If } PLR \leq Th_{loss4} \text{ and } Jma \geq Th_{ja2} \quad (6)$$

$$\text{Then level 2 and coding\_rate} = \text{coding\_rate} * W_{l2} \quad (7)$$

### (3) レベル 1: 輻輳なし

上記輻輳レベルのいずれにも当てはまらない場合を“輻輳なし”の状態と判断する．本レベルでは，パケットロス率が小さく，映像伝送経路上の全てのネットワークノードにおいてリンクスピードに対するパケットフローにゆとりがありキューバッファ占有率も高くないため，伝送遅延およびジッタは他の輻輳レベルに比べて小さくなる．また，“輻輳なし”の場合のレート制御としては，次の 2 つのケースが考えられる．

- i) 送出レートよりも伝送可能帯域にかなり余裕があり符号化伝送レートを上昇させることができる状態．
- ii) 伝送可能帯域が符号化伝送レートより僅かに上回り帯域使用率が 100% に近く送出レートを変化させる必要のない理想平衡状態．

上記 i) のケースは現在の符号化伝送レートと前ピークレート  $previous\_peak\_rate$  との差が式 (9) に示すように大きな場合に適用される．ここで， $previous\_peak\_rate$  は輻輳レベル 1 または 2 から輻輳レベル 3 または 4 に遷移した直後の符号化レートと定義する．この場合，符号化伝送レートは式 (10) に従って  $previous\_peak\_rate$  に向かって徐々に上昇させる．また，符号化伝送レートが  $previous\_peak\_rate$  に達した場合には，擬似的に理想平衡状態であると判断して上記 ii) のケースを適用し，レートを一定期間 ( $obs\_period$ ) 固定する．ただし，この期間においても  $PLR$  と  $Jma$  の値がレベル 2, 3 および 4 のいずれかのスレッシュホールド値を超えた場合には，該当輻輳レベルに遷移する．仮に  $obs\_period$  の期間に渡ってこれらの値がスレッシュホールド値よりも下回り続けた場合 (式 (11))，伝送可能帯域増加の可能性を探るため符号化伝送レートを式

(12) に従って上昇させる。尚、*obs\_period* の値については、レベル 1 に遷移する前のレベル 1, 2 以外の輻輳レベルが 4 の場合には、輻輳状態に戻ってしまう可能性を考慮して、例えば、RR 送信間隔の 10 倍程度に、輻輳レベルが 3 の場合には同 5 倍程度に設定する。

```
coding_rate = INITIAL_RATE; obs_period = 0; peak_set_flag = false;
for () {
    if (PLR > THloss4) { // level4 Severe congestion
        coding_rate = coding_rate / (1 + PLR);
        if (peak_set_flag == false) {
            previous_peak_rate = coding_rate;
            obs_period = 10 * RR_interval;
            peak_set_flag = true;
        }
    }
    else if (Jma >= THja3) { // level3 Moderate congestion
        coding_rate = coding_rate * W13;
        if (peak_set_flag == false) {
            previous_peak_rate = coding_rate;
            obs_period = 5 * RR_interval;
            peak_set_flag = true;
        }
    }
    else if (Jma >= THja2) // level2 Slight congestion
        coding_rate = coding_rate * W12;
        peak_set_flag = false;
    else { // level1 No congestion
        if (obs_period > 0) {
            if (previous_peak_rate - coding_rate >
                previous_peak_rate * 0.05)
                coding_rate = (coding_rate + previous_peak_rate * 4) / 5;
            else {
                coding_rate = previous_peak_rate;
                obs_period = obs_period - RR_interval;
            }
        }
        else
            coding_rate = coding_rate * W11;
            peak_set_flag = false;
    }
    coding_rate = MIN(MAX_RATE, coding_rate);
    coding_rate = MAX(MIN_RATE, coding_rate);
}
```

図3.4 符号化伝送レート決定のための擬似コード

#### Parameters

*coding\_rate*: encoding bit rate.

*previous\_peak\_rate*: the *coding\_rate* just after the transition to the level 4 or level 3

*obs\_period*: the count to keep the bit rate at *previous\_peak\_rate*, when the bit rate reaches to the *previous\_peak\_rate*.

*MAX\_RATE* and *MIN\_RATE*: maximum and minimum values of coding bit rate.

*INITIAL\_RATE*: initial coding bit rate

*TH<sub>loss4</sub>*, *TH<sub>ja3</sub>*, and *TH<sub>ja2</sub>*: the threshold of *PLR* or *Jma*, for categorizing into four congestion levels.

*W<sub>l1</sub>*, *W<sub>l2</sub>*, and *W<sub>l3</sub>*: the weighting factors for decreasing or increasing the *coding\_rate* as congestion occurring and congestion avoided.

*RR\_interval*: the interval of every RR (receiver report) sent

図3.5 擬似コードで用いられるパラメータの説明

If (*previous\_peak\_rate* - *coding\_rate*) >

$$\text{previous\_peak\_rate} * 0.05 \quad (9)$$

Then *coding\_rate* =

$$(\text{coding\_rate} + \text{previous\_peak\_rate} * 4) / 5 \quad (10)$$

If *PLR* ≤ *TH<sub>loss4</sub>* and *Jma* <

$$\text{TH}_{ja2} \text{ for } \text{obs\_period} \quad (11)$$

Then *coding\_rate* = *coding\_rate* \* *W<sub>l1</sub>*

$$(\text{where } W_{l1} > 1.0) \quad (12)$$

*previous\_peak\_rate* がセットされるのは輻輳レベルが 4 または 3 に 1 度以上遷移したことがある場合のみであるため、*previous\_peak\_rate* がセットされていない時には式 (9) (10) (11) は使われず式 (12) に従って伝送符号化レートを上昇させる。

図 3.4 および

図 3.5 に送信側にて符号化伝送レートを決定するための擬似コードを示す。また、図 3.6 に *PLR* および *Jma* による輻輳レベルの遷移マップを示す。通常、ネットワーク



が“輻輳なし”の状態から徐々に輻輳の方向に向かう場合には、輻輳レベルはレベル 1, 2, 3 および 4 の順序で遷移し、輻輳回避の方向に向かう場合には、その逆順で遷移する。

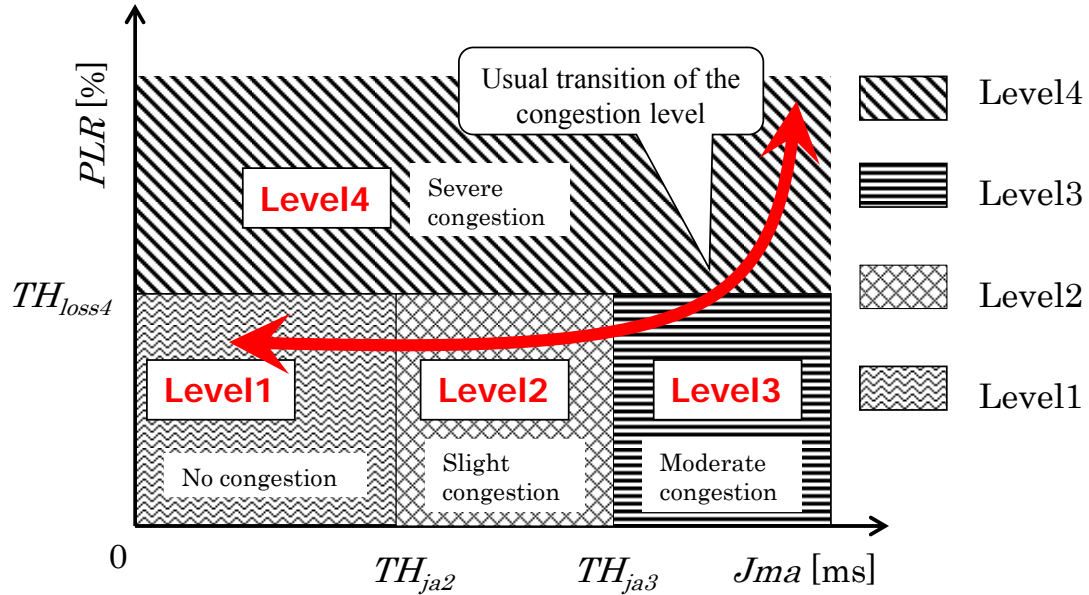


図3.6 輻輳レベルの遷移マップ

### 3.3.2 初期符号化伝送レートおよびスレッシュホールドパラメータ決定のための初期トレーニングアルゴリズム

初期符号化伝送レートは、伝送可能帯域へのレート収束速度に影響を与えるため、初期トレーニングにおいてネットワーク帯域推定による初期レート決定を行う。また、セッション毎に異なる伝送ルートが選択された場合、帯域不足以外の要因で定常的に発生する伝送エラーやネットワークキューのバッファサイズなどのネットワーク特性が異なる可能性があるため、3.3.1項で述べたスレッシュホールドパラメータ ( $TH_{loss4}$ ,  $TH_{ja2}$ ,  $TH_{ja3}$ ) についても初期トレーニング時に初期値の調整を行う。さらにこれらパラメータは後述の通り伝送可能帯域にある程度依存するため、同一セッション中で時間とともにダイナミックな微調整を行う。

続いて提案の初期トレーニングアルゴリズムの処理手順について詳述する。

- (1) まず、符号化伝送レートを数十 kbps などのコーデック最小値に設定して伝送を開始する。

- (2) 次に、レートを逡倍していった場合の packet loss 率を測定し、packet loss が大幅に増加するまでレートを上げ続ける。
- (3) packet loss が急増した時点で、符号化レートを前レートまで減少させ、ある一定期間 packet loss が多発しないかどうかを観察する。もしも多発した場合は、さらに前レートまで減少させて同様の観察を繰り返す。

これによりマクロレベルでの大まかな伝送可能帯域が推定される。続いて、ミクロレベルでの細かな帯域推定を行うため、次の処理を行う。

- (4) packet loss が抑制された現在のレートと前回 packet loss が多発したレートとの中間レートにて packet loss が急増するかどうかを観察する。
- (5) もしも、packet loss が多発しない場合には、現在のレートと最後に packet loss が多発したレートの中間値までレートを上昇させ、多発した場合には現在のレートと最後に packet loss が抑制されたレートとの中間値までレートを下降させる。
- (6) 上記(4)、(5)の処理を繰り返し、現在のレートと前レートとの差が 50kbps などの小さな値になった時点（収束処理終了条件）で現在のレートを推定帯域  $BW_{est}$  として、ミクロレベルの推定処理を終了する。

上記により求められた推定帯域  $BW_{est}$  の 70% を初期符号化伝送レートとし、初期符号化レートで送出した際の packet loss 率をスレッシュホールド値  $TH_{loss4}$  に設定する。

また、他のスレッシュホールドパラメータについては、符号化伝送レートが推定帯域  $BW_{est}$  の 80% および 90% に設定された際に測定された各  $J_{ma}$  値を  $TH_{ja2}$  および  $TH_{ja3}$  とした。しかしながら、図 3.2 に示した映像伝送システムを用いたシミュレーション実験により、 $TH_{ja2}$  および  $TH_{ja3}$  の最適値はネットワークの伝送可能帯域によって変化する傾向が見られた。図 3.7 に符号化伝送レート（推定帯域  $BW_{est}$  の 70%）に対するスレッシュホールド値  $TH_{ja2}$  および  $TH_{ja3}$  の変化をプロットした実験結果を示す。図より、符号化伝送レートとスレッシュホールド値（ $TH_{ja2}$ ,  $TH_{ja3}$ ）の間には、式 (13) および式 (14) に示す指数カーブで近似される関係があることが分かる。これは、平均 packet サイズが変化しない（同一 packet 粒度）にもかかわらず、伝送可能帯域および符号化伝送レートが減少した場合、1 つの packet がネットワークスイッチの出力リンクを占有す

る時間が長くなり、輻輳状況でなかったとしても、他のパケット出力への影響度、すなわちジッタが増大するためと思われる。

$$TH_{ja2} = S_{ja2} * coding\_rate^{-P_{ja2}} \quad (13)$$

$$TH_{ja3} = S_{ja3} * coding\_rate^{-P_{ja3}} \quad (14)$$

ここで、 $S_{ja2}$  と  $S_{ja3}$  はスケールファクタを、 $P_{ja2}$  と  $P_{ja3}$  は指数ファクタを示す。

これらのファクタは、伝送可能帯域が時間とともに変化した 2 つ以上のネットワーク状態から測定算出できるものであるが、初期トレーニング時では 1 つのネットワーク状態しか観察することができないため、指数ファクタ  $P_{ja2}$ 、 $P_{ja3}$  については図 3.7 の近似カーブから求められた固定値 0.8 を近似値として用いた。

従って、最終的に式 (15) および式 (16) を用いてスレッシュホールド値  $TH_{ja2}$ 、 $TH_{ja3}$  を決定することとした。

$$TH_{ja2} = S_{ja2} * coding\_rate^{-0.8} \quad (15)$$

$$TH_{ja3} = S_{ja3} * coding\_rate^{-0.8} \quad (16)$$

スケールファクタ  $S_{ja2}$ 、 $S_{ja3}$  は初期トレーニング時に測定された符号化伝送レート（推定帯域  $BW_{est}$  の 70%）とスレッシュホールド値  $TH_{ja2}$ 、 $TH_{ja3}$  を用いて逆算により求めた。

図 3.8 に動的スレッシュホールド調整機能を持った初期トレーニングの振る舞いを例示する。

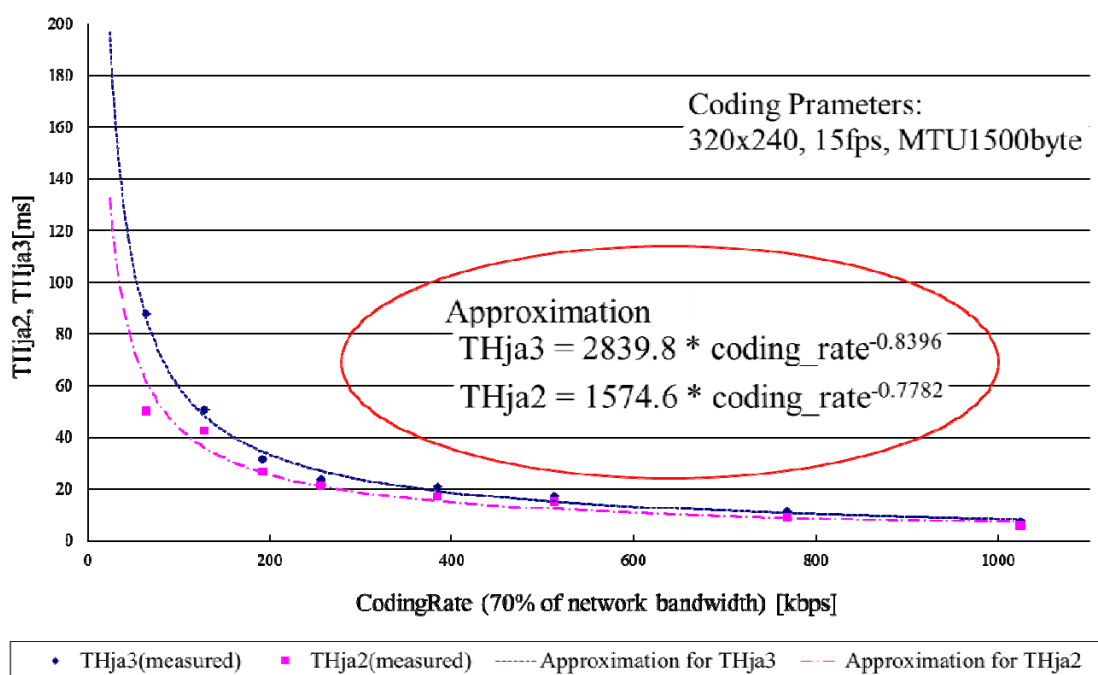


図3.7 符号化レート（推定帯域の70%）と THja2, THja3 との関係

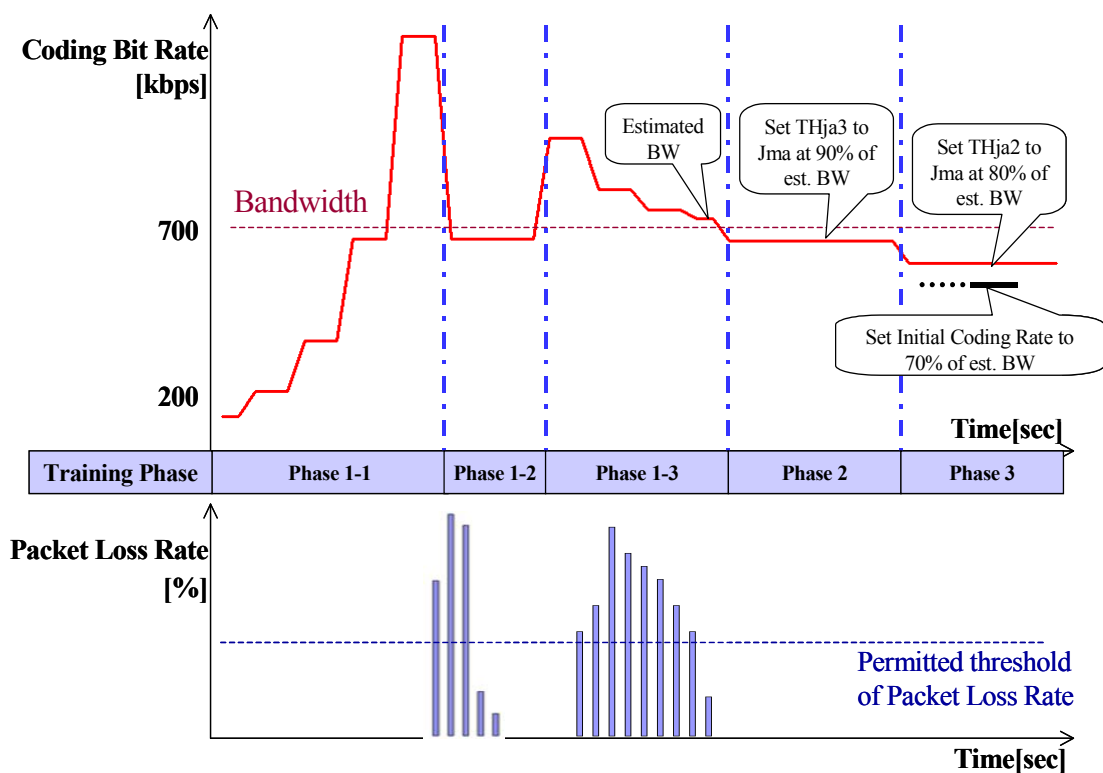


図3.8 初期トレーニングの振る舞い(例)

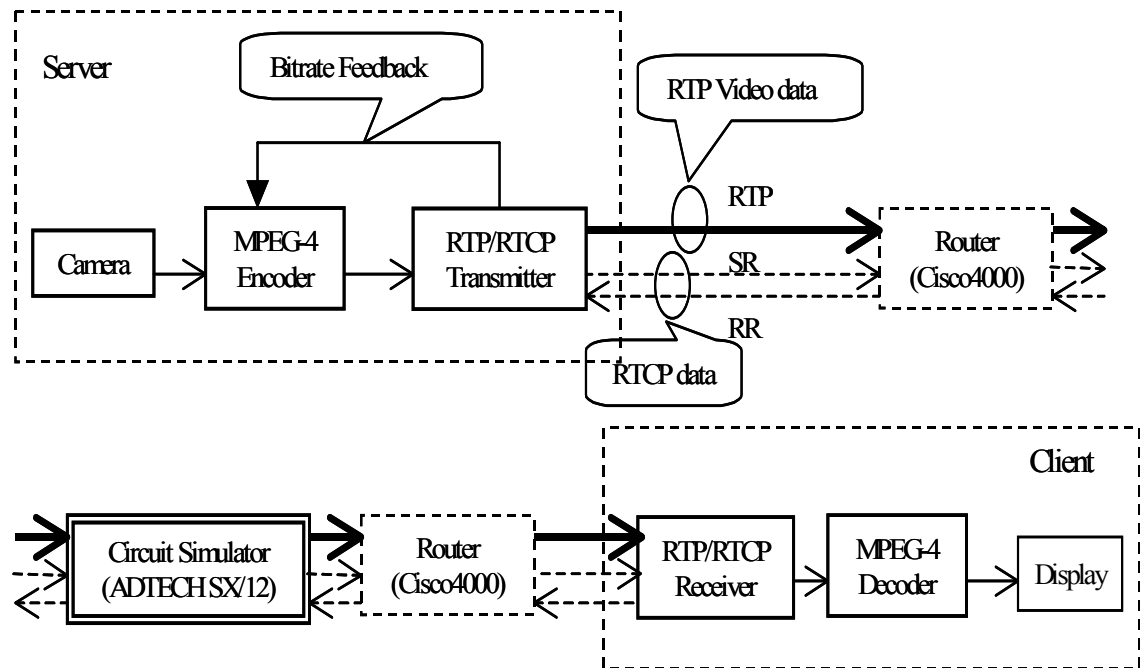


図3.9 実験システムの構成

## 3.4 実験および結果

### 3.4.1 回線シミュレータを用いたダイナミックレート制御実験

提案の帯域適応レート制御方式を検証するため、本方式 [41], [42], [43], [44] を実装した MPEG-4 伝送システム [45], [46] と回線シミュレータを用いた図 3.9に示すシステム構成で伝送実験を行った。本実験構成は、提案のレート制御アルゴリズムが実装されている以外は上述の予備実験システムのそれと同じである。

図 3.10に最低符号化伝送レート 80 [kbps]，収束処理終了条件 50 [kbps]で初期トレーニングした際の結果を示す。本トレーニングでは、ルータ間のシリアルリンクスピードを回線シミュレータ上で想定初期帯域 1.0 [Mbps]の固定値に制限した状態で行った。ここで、シリアルリンクスピードはイーサネット，IP，UDP，RTP 等の各プロトコルレイヤにおけるヘッダオーバーヘッドを含んだ値である。図よりプロトコルオーバーヘッドを除く推定帯域  $BW_{est}$  は 876 [kbps]であるが、平均パケットサイズにおけるオーバーヘッドが 5%程度とすると、プロトコルオーバーヘッドを含んだ推定帯域は 920 [kbps]となり、実際のリンクスピードに近い値となる。また、シリアルリンクスピードを 2 [Mbps]など他の値に制限した場合においても、概ね帯域の 90%以上の推定値を示した。従って、提案の初期トレーニング方式においてある程度正確な伝送可能帯域の推定が

可能であると言える．しかしながら，現在，伝送可能帯域を推定するのに約 90 秒，スレッシュホールドパラメータの決定に約 60 秒のトータル約 2 分 30 秒を要しており，映像伝送開始前の初期トレーニング時間の短縮化が望まれる．帯域推定時間の短縮化については，推定処理の開始レートをコーデックの最低符号化レートの代わりに，最大符号化レートと最低符号化レートとの中間値や過去のトレーニング値に設定するなどの方策が考えられる．また，スレッシュホールドパラメータ  $TH_{ja3}$  および  $TH_{ja2}$  の決定に要する処理時間の短縮化に関しては，図 3.7において  $TH_{ja3}$  と  $TH_{ja2}$  の間にある程度の相関が見られるためどちらかの決定値を用いて他方を推定するなどの方策が考えられる．

初期符号化伝送レートについては，推定帯域  $BW_{est}$  を基にその 70%である 613 [kbps] に設定され，スレッシュホールドパラメータ  $TH_{ja2}$  および  $TH_{ja3}$  の初期値に関しては， $BW_{est}$  の 80%および 90%の送出レートにおける各  $Jma$  値に相当する 8.7 [ms] および 10.3 [ms] にそれぞれ設定された．また，スケールファクタ  $S_{ja2}$  および  $S_{ja3}$  については，式 (15) および式 (16) を用いた計算によりそれぞれ 1644 [ms/(kbps<sup>-0.8</sup>)] および 2139 [ms/(kbps<sup>-0.8</sup>)] が得られた．

$TH_{loss4}$  については，初期伝送可能帯域 1.0 [Mbps] の状態で初期符号化レート 613 [kbps] で伝送した際にパケットロスが発生しなかったため，0 に設定した．

初期トレーニング後の伝送では，スレッシュホールドパラメータ  $TH_{ja2}$  および  $TH_{ja3}$  は，あらかじめ算出されたスケールファクタ  $S_{ja2}$  および  $S_{ja3}$  を代入した式 (15) および (16) を用いて符号化伝送レートに従い自動的に最適な値に調整される．一方，レート操作のための重み係数  $W_{l3}$ ,  $W_{l2}$ ,  $W_{l1}$  およびレート固定期間  $obs\_period$  については，予備実験から得られた固定値を割り当て次の値に設定した．

$$W_{l3} = 0.77, W_{l2} = 0.91, W_{l1} = 1.05$$

レベル 4 の後の  $obs\_period$  = RR 送信間隔の 10 倍

レベル 3 の後  $obs\_period$  = RR 送信間隔の 5 倍

また，MPEG-4 エンコーダの最大・最小ビットレートは，それぞれ  $MIN\_RATE = 128$  [kbps] および  $MAX\_RATE = 1.0$  [Mbps] とした．RR の送信間隔については 3 秒に設定し，送信側が本 RR を受信するタイミングにおいて帯域適応レート制御処理が実行される．

初期トレーニングあり・なしの場合の伝送実験結果をそれぞれ図 3.11 および図 3.12 に示す．尚，初期トレーニングが適用されないケースでは，初期符号化伝送レートを 384 [kbps] に手動設定した．両実験において，回線シミュレータのリンク速度を 1.0

[Mbps] から 400 [kbps] まで 200 [kbps] ～ 100 [kbps] 単位で 60 秒毎に減少させ、その後 1.0 [Mbps] まで逆の手順で増加させた。

図 3.11から分かるように、符号化伝送レートは伝送可能帯域に近いレートから開始され、帯域の変動に合わせて適切に制御されている。一方、図 3.12では、初期符号化伝送レートが伝送可能帯域よりもかなり低いところから開始されているため、伝送可能帯域近くまで到達するのに 90 秒程度かかっていることが分かる。

図 3.11より、130, 200, 480 秒目付近において数%のパケットロスが発生し輻輳レベルが 1 または 3 から 4 に遷移しているが、最初の 2 件の発生理由については、符号化伝送レートが上昇している間に帯域が大幅かつ瞬時に減少したため、一時的に符号化伝送レートが帯域を超え、レート減少のフィードバックがかかる前にルータ上のキューバッファがオーバーフローしたためと思われる。本現象への対策としては、RR 送信間隔の短縮によるレスポンスの向上が挙げられるが、コントロールパケットの頻度増加によるネットワークおよび端末への負荷上昇とのトレードオフの関係にあるため慎重なチューニングが必要と言える。一方、最後の 1 件のパケットロス発生理由については、符号化伝送レートが上昇し続けた後、伝送可能帯域を上回った時点でさえも  $J_{ma}$  値の上昇度合いが鈍くスレッシュホールド値よりも小さな値をとったことが原因である。これについての対策としては、レート上昇用の重み付け係数の調整や RR 送信間隔の短縮のほか、帯域減少時と増加時におけるスレッシュホールド値決定アルゴリズムの細分化などが挙げられる。

図 3.11から観察される他の特徴としては、240～300 秒目付近での  $TH_{ja2}$  に対応する  $J_{ma}$  値が、60～90 秒目付近でのそれに対して高い値を取っており、符号化伝送レートは各々のレンジにおいて伝送可能帯域に近い値が選択されていることが分かる。これは、 $TH_{ja2}$  と  $TH_{ja3}$  の適応的なスレッシュホールド決定アルゴリズムが効果的に働いていることを意味する。一方、常に固定値が設定されている場合の結果を示す図 3.12では、符号化伝送レートが伝送可能帯域に対してかなり下回るとともに大きく上下している箇所がいくつか見られる。また、帯域使用率という観点からみると、ダイナミックスレッシュホールド決定方式の併用により、平均使用率が 66% (標準偏差 10.5%) から 85% (標準偏差 5.6%) まで上昇している。符号化伝送レートの安定性という観点から見ると、図 3.11の 240～300 秒目付近と 480～540 秒目付近において、輻輳レベル 2 と 1 の間で状態遷移が繰り返され同一帯域にも拘わらずレートの上下変動がみられる。従っ

て、符号化レートの上下振動による画像品質のフリッカを避けるために固定帯域における符号化レートの安定化手法の検討が今後の重要課題である。

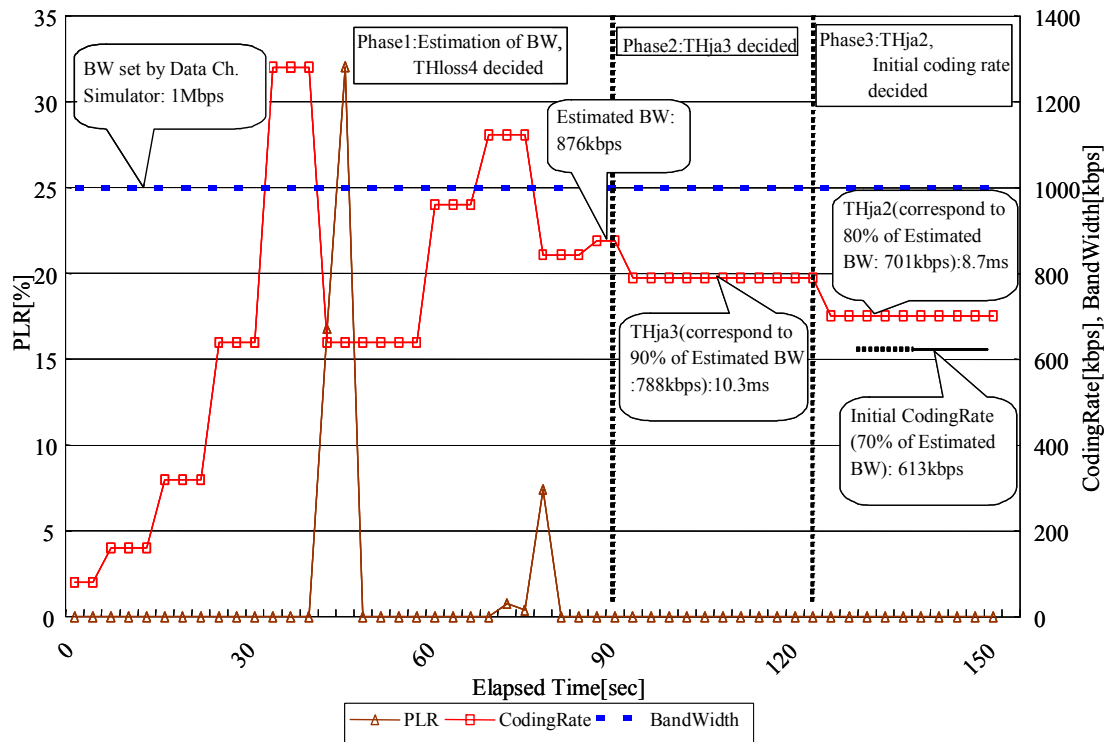


図3.10 初期トレーニング結果



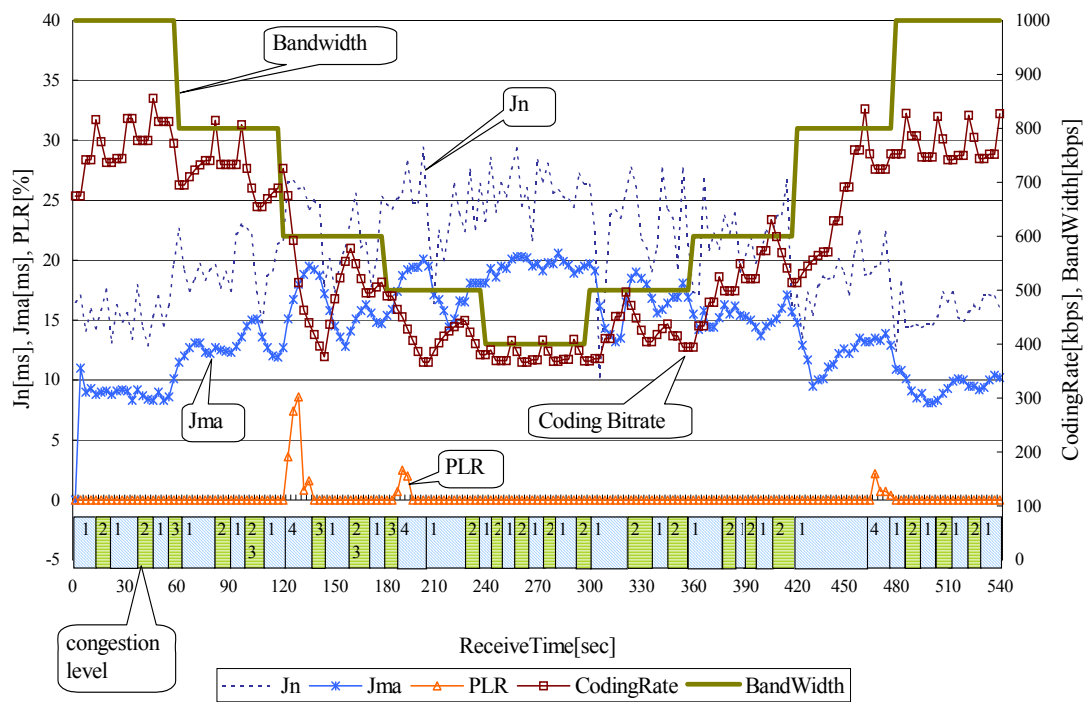


図3.11 初期トレーニングを用いたダイナミックレート制御の実験結果

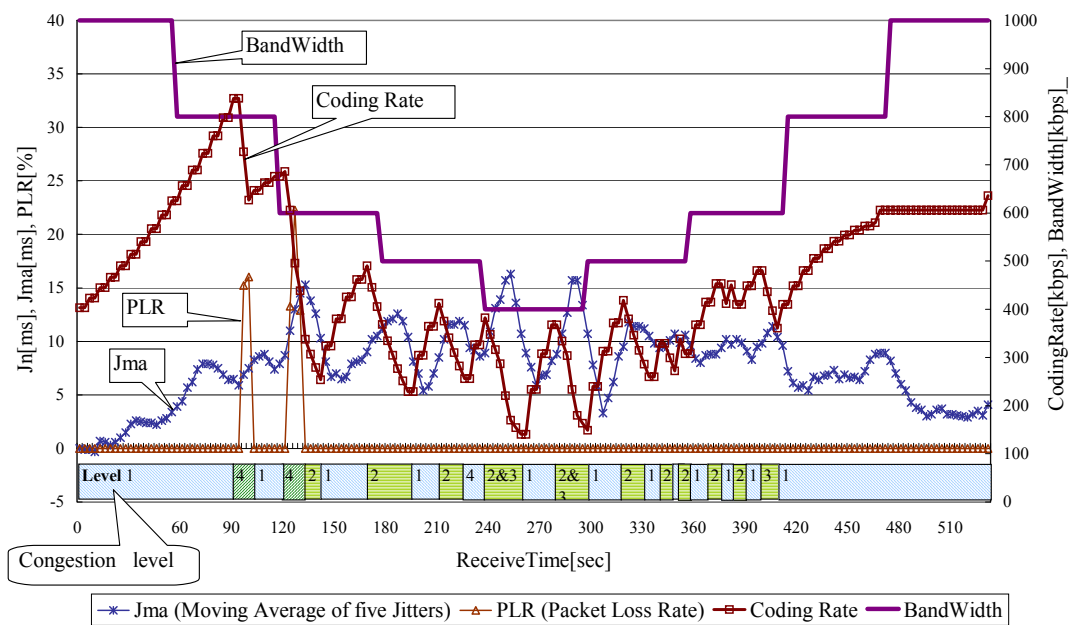


図3.12 初期トレーニングを用いないダイナミックレート制御の実験結果

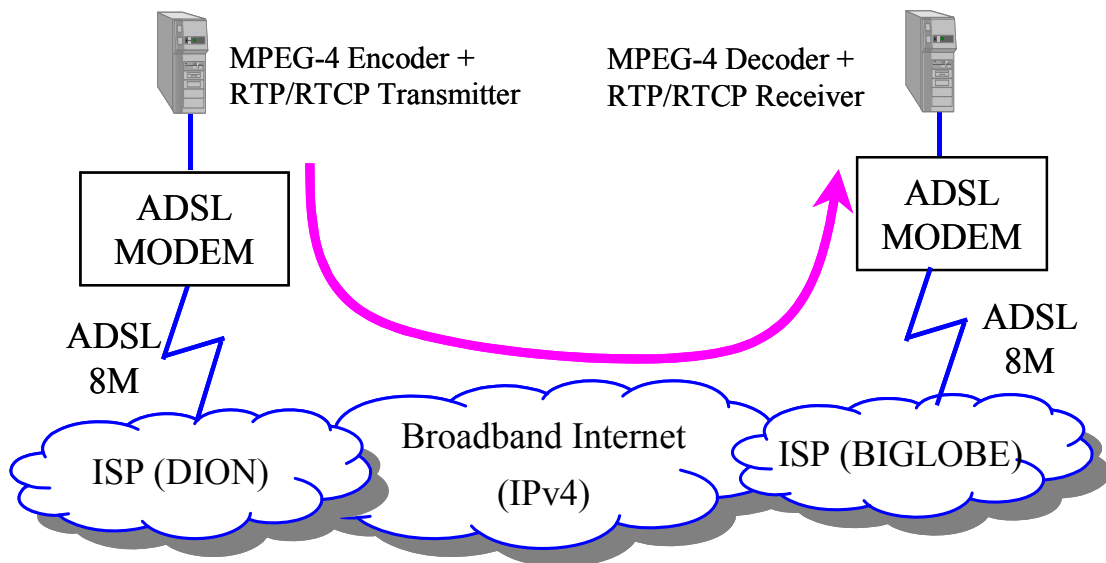


図3.13 IPv4 伝送実験で用いた ADSL ブロードバンドネットワークの構成

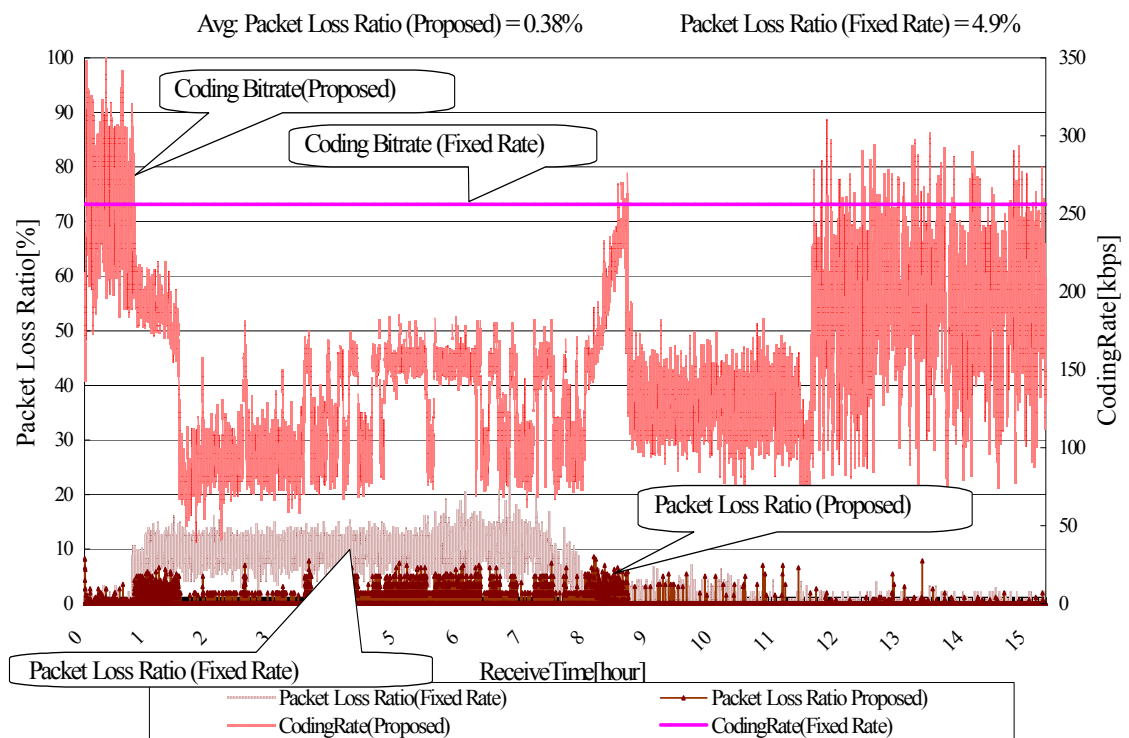


図3.14 ADSL ブロードバンドネットワークにおける伝送実験結果

## Japan (Kamifukuoka)

## USA (Palo Alto)

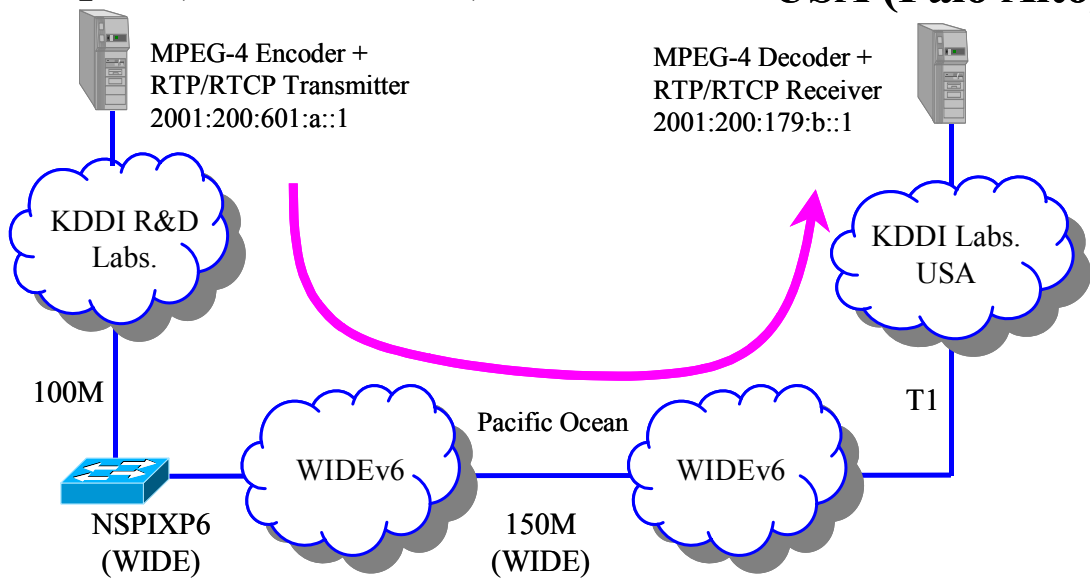


図3.15 日米間 IPv6 伝送実験におけるネットワーク構成

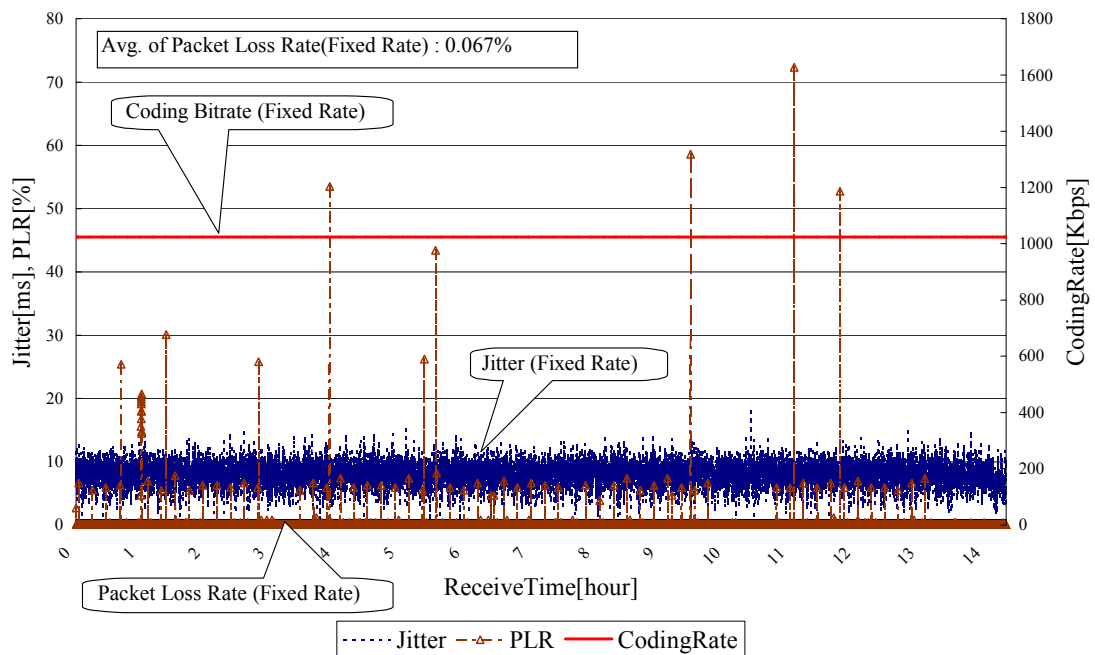


図3.16 固定レート 1Mbps での日米間 IPv6 伝送実験結果

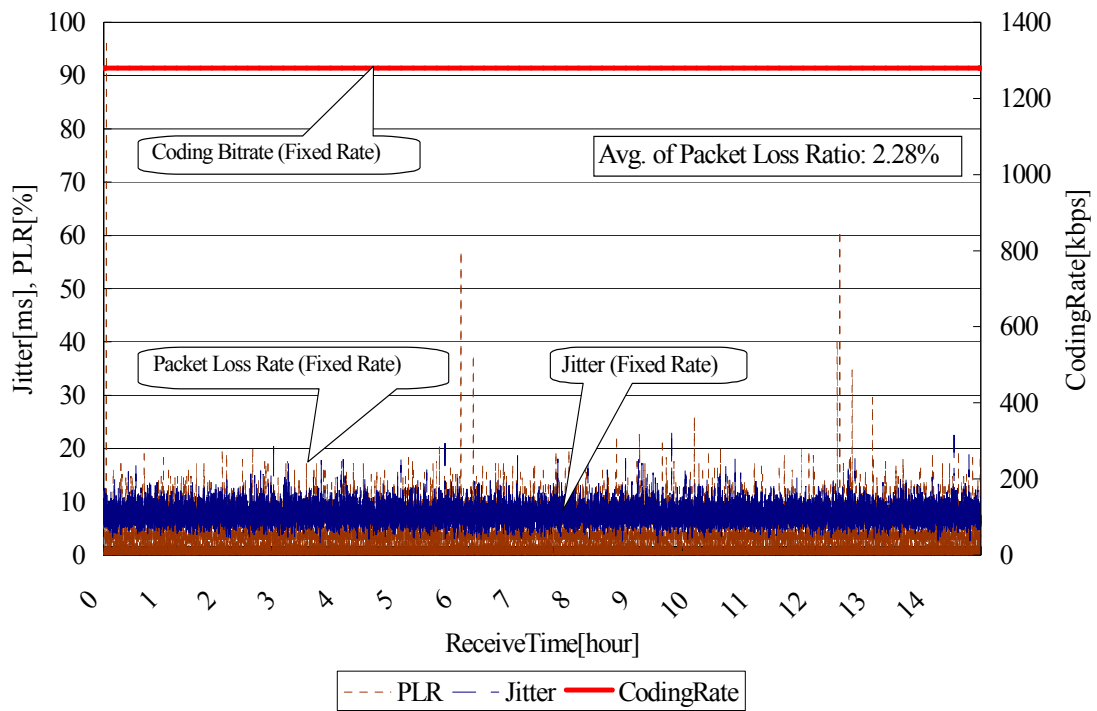


図3.17 固定レート 1.28Mbps での日米間 IPv6 伝送実験結果

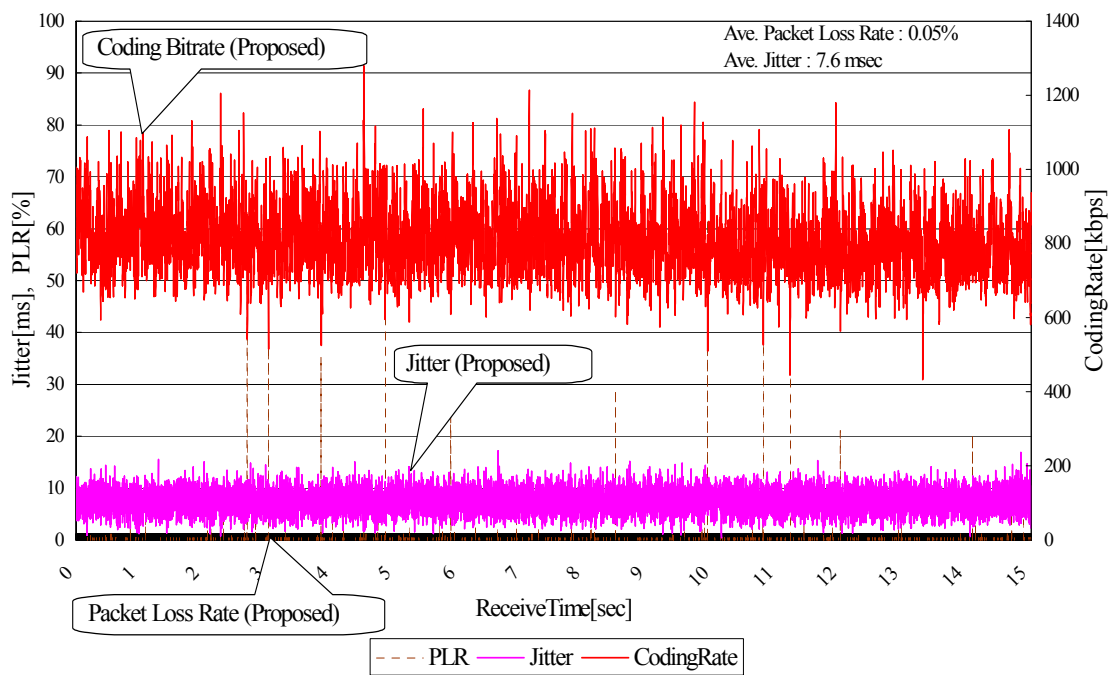


図3.18 提案方式による日米間 IPv6 伝送実験結果

### 3.5 IPV4/IPV6 実ネットワーク上でのダイナミックレート制御実験および結果

実際のブロードバンド IPv4 ネットワーク上で提案方式の有効性を確認するため、図 3.13に示す異なる ISP 間を跨ぐ ADSL ネットワーク構成（DION ADSL 8Mbps 上福岡 – BIGLOBE ADSL 8Mbps 上福岡）を用いて 13 時間の連続ライブ伝送実験を行った。実験結果を図 3.14に示す。図より、270kbps の固定レートで伝送した場合には、コアネットワークの輻輳により 1 時間経過後あたりから 8 時間目付近までパケットロスが 10%～20%程度発生しているが、提案方式の帯域適応レート制御の場合、100[kbps]～170[kbps]までレートを自動調整することによりパケットロス率を数%程度まで低減し、輻輳が和らいだ 12 時間目付近からパケットロス発生を抑えながらレートを上昇させていることが分かる。また、15 時間トータルの平均パケットロス率は、固定レートの場合約 4.9%、提案方式の場合約 0.38%となっており、パケットロス発生を大幅に抑制できていると言える。これにより映像品質の極端な劣化を防ぎ、スムーズかつ安定した映像伝送が実現できることを確認した。

また、図 3.15に示す日本と米国間を WIDEv6 [47] を通して接続する IPv6 実験ネットワークを構築し、IPv6 ネットワークにおける提案方式の有効性確認のため、15 時間（平日 23:00～14:00JST）の連続ライブ伝送実験を行った。比較のため、1.0 [Mbps] 及び 1.2 [Mbps] の固定レートで伝送した場合の実験結果をそれぞれ図 3.16および図 3.17に示し、提案方式のダイナミックレート制御を用いた場合の実験結果を図 3.18に示す。尚、本実験ネットワークにおける物理的なボトルネックは WIDEv6 と KDDI Labs. USA 間の T1 回線にあり、ラウンドトリップタイムを測定したところ 143 [ms] であった。

図 3.16より、1.0 [Mbps] で伝送した場合には、多少突発的なパケットロスは発生しているものの、15 時間全体を通して、定常的なパケットロスは発生していない（平均パケットロス率 0.067%）。一方、図 3.17より、1.28 [Mbps] で伝送した場合には、定常的にパケットロスが発生しており、平均パケットロス率は 2.28%であった。これにより、全体を通して WIDEv6 における背景トラフィックに大きな変化はなく、実際の伝送可能帯域は 1.1 [Mbps] 程度と予測される。次に図 3.18より、15 時間の伝送時間に渡って伝送可能帯域の変動が少ない状態においても、提案方式のダイナミックレート制御によりパケットロスおよびジッタが抑制されつつ、符号化伝送レートもフィードバック制御による極端な振動もなく、伝送可能帯域以下付近のほぼ 650 [kbps] ～ 1.0 [Mbps]

の範囲で安定保持していることが分かる（平均パケットロス率：0.05%，平均ジッタ：7.6 [ms]）。

本伝送実験において、IPv4 ブロードバンド映像伝送に加え、IPv6 長距離ネットワークにおける映像伝送においても提案方式によるダイナミックレート制御が有効に働き、伝送可能帯域の変動に応じて適切にレート制御されていることを確認した。

### 3.6 まとめ

本章では、インターネットにおける映像伝送のための RTCP ベースの帯域適応レート制御方式を提案した。符号化伝送レートは定期的に受信する RR パケットのネットワーク輻輳パラメータから解析される 4 つの輻輳レベルに従って決定される。また、伝送可能帯域へのレート収束スピードの向上およびスレッシュホールドパラメータのダイナミックな決定を行うための初期トレーニング処理を適用した。スレッシュホールドパラメータのダイナミックな決定に関しては、伝送可能帯域の 70% に符号化伝送レートを設定し輻輳が起こらない状況になったとしても、帯域が狭い場合には、1 パケットの滞留時間が長くなることからジッタが増大する傾向を実験から見つけ、スレッシュホールドパラメータを符号化伝送レートの上昇に伴い指数関数的に減少させることで、追従性を高めた。本方式 [41], [42], [43], [44] を実装した MPEG-4 伝送システム [45], [46] を用いた伝送シミュレーション実験の結果から、提案方式により QoS 制御がなく時間とともに帯域が変動するネットワークにおいてもパケットロスやジッタを抑制して画質の極端な劣化を防ぎつつ 80% 以上の帯域使用率で効率的に映像伝送可能なことを確認した。また、伝送開始時における伝送可能帯域への収束スピードの向上や各帯域レンジでの収束精度の向上を実現した。さらに、実際の IPv4/IPv6 ブロードバンドネットワーク環境における映像伝送実験において、商用実ネットワークにおける提案方式の有効性を確認した。

今回の提案では、有線系の比較的シンプルなネットワークを基本構成として提案したアルゴリズムであり、ネットワーク全体を大きな仮想バッファとして扱う方式であるため、有線系でも GW が複雑に多重接続した場合や、瞬断やハンドオフが発生しレイヤ 2 の再送制御を行う WiFi や 3G などの無線アクセスネットワークへの最適化までは達成できておらず、これらも含めた様々なネットワークにおける提案方式の評価や

制御の最適化が今後の課題として挙げられる。また、固定伝送可能帯域における符号化レートの変動回避策など主観画質を考慮した方式の検討も課題として挙げられる。

尚、本技術は、双方向ビデオ伝送システム「QualityMeeting」に採用され、企業における遠隔地間映像伝送や、サザンクロスプロジェクト（鹿児島離島間通信）[48]で利用された（現在は製品販売終了）。また、携帯型映像伝送システム「VistaFinderMx」[49]にも採用され、インターネット上での緊急映像伝送（事故や火災現場、救急医療現場、建設・プラント監視、イベント・報道）向けに利用されている。





## 第4章 バッファ推移の類似性を用いた MPEG コンテンツのサイマル符号化技術

### 4.1 まえがき

第 1 章で述べたように，ブロードバンドやモバイルネットワークの進展と多様化により，xDSL，CATV，FTTH，モバイルなどの様々な IP ネットワーク上での映像ストリーミングサービスやダウンロードサービスが普及している．しかしながら，これらの帯域の異なる配信ネットワークや再生能力の異なる端末向けに様々なビットレートの映像ストリームを届ける必要があり，そのための様々な手法が提案されており [50] [51] [51] [52]，大きく分けて，（１）マルチビットレートで各々符号化された複数コンテンツから帯域・端末能力に合わせて選択肢しユニキャストで伝送する手法，（２）マルチビットレートで各々符号化されたコンテンツから同一レートのグループ毎にマルチキャスト伝送する手法，（３）階層符号化で符号化されたコンテンツをマルチキャスト伝送する手法 [51]，（４）ネットワークノードにおいて下位ネットワーク帯域に合わせたトランスコードを行う手法 [52]，の４種類に分けられる．

上記（３）については，階層マルチキャストによるネットワーク伝送の効率化の利点もあるが，エンハンスレイヤも含めた階層型符号化ストリームは単一符号化ストリームよりも符号化効率が低下する点 [17] と，レイヤ数に限りがあり細やかなアダプテーションができない点，多数存在する受信端末のデコーダにおいて標準プロファイルには含まれない階層符号化処理を導入するコストがかかる点から一般的な導入には適さない．また，（４）については，サーバ，端末以外にトランスコード処理を行うネットワークノードを設ける必要があるため，コスト，拡張性の点でデメリットとなる．従って本章では（１）（２）で必要となるマルチビットレートコンテンツの生成について論じる．

マルチビットレートのコンテンツ生成の方法としては，大きく分けて，オリジナルの非圧縮映像から高ビットレートコンテンツに符号化を行い生成された高レートコンテンツから中，低ビットレートのコンテンツにトランスコードを行う手法と，最初から高，中，低レートのマルチビットレートコンテンツをサイマル符号化する手法の 2 種類が挙げられる．前者については，MPEG 符号化ビットレート変換手法としてこれ

まで多くの提案がなされている [53] - [62] . それらは、入力の動きベクトルを用いて再探索処理を軽減しつつも基本的にはベースバンドに戻してから再符号化する手法 [53] - [55] , フルデコード・フルエンコードをせずにアウトループ型の再量子化（ドリフトノイズ発生）を行う手法 [56] , それに IDCT/DCT 処理を付加して予測誤差をフィードバックするインループ型の再量子化を行う手法 [57] - [61] , エッジを含む MB の画質劣化を低減することに着目した手法 [62] , などである．処理負荷の観点からは再量子化を行う手法にメリットがあるが、処理負荷の高いベースバンド型トランスコードよりも画質が劣化するデメリットがある．また、トランスコード全体で見ると、再量子化パラメータ ( $q$ ) が入力ストリームの量子化パラメータ ( $Q$ ) の 2 倍未満の際には再量子化誤差が増大し符号化効率が大きく劣化するという欠点もある [63] [64] . そのため、本章では、前者のサイマル符号化方式について検討する．

同じソース映像を異なるビットレートで独立にエンコードを行うと、エンコード本数に比例して符号化処理コストが増加してしまうため、同時エンコード処理を行う際に各エンコード処理を連携させ共通処理や予測可能な処理を簡略化することで複数同時エンコードの処理負荷低減を実現できる可能性がある．動き探索処理を共通化した方式 [65] [66] は既に提案されているため、それら効率化処理と共存可能で、更に処理負荷を低減する方式として、複数同時エンコードにより同一画像ソースから、同一画像サイズ、同一フレームレートで異なるビットレートの符号化ストリームを効率的に生成するためのセカンダリエンコーダの高速レート制御方式について検討を行った．

## 4.2 マルチビットレート生成機能の実現方法

マルチビットレート生成機能の最も簡単な実現方法として、上述の出力本数と同数のエンコーダを独立して並列動作させる方法がある．この場合、既存のエンコーダをそのまま利用可能であるが、生成に必要な処理コストが出力数に比例して増大してしまうという問題がある．その対策として動き探索処理を共通化した方式 [65], [66]や量子化演算処理低減に着目した方式 [67] 等が提案されている．これら方式はエンコード処理低減に有効な手段であるが、同時エンコード数の増大を考慮すると更なる低減策が求められる．そのため、これら技術に加え、さらに処理低減が可能な方策を検討した結果、これまでレート制御処理の負荷低減については取り組まれていないことが分かった．

そこで本章では、VLC 処理に次いで処理負荷の高いレート制御処理（MPEG-2 で符号化全体の 4～6%程度）に着目し、複数ストリームの各レート制御における VBV（Video Buffering Verifier）バッファ推移の相関性を利用して動き検出処理共通化と併用可能な高速レート制御方式を検討した．本方式では、最高ビットレート（プライマリレート）での符号化には通常のエンコード処理を行い、それ以外の派生レート（セカンダリレート）コンテンツについては、上記エンコード結果の VBV バッファ推移を参照し、これに追随させることにより量子化パラメータ（以下 QP）を制御した．尚、VBV バッファ推移はエンコーダの特性を表すものであるため、本制御により、各ビットレートのコンテンツ間でエンコーダの特性を継承し揃える効果がある．図 4.1，図 4.2にマルチビットレートエンコーダのシステム構成図およびブロック図を示す．

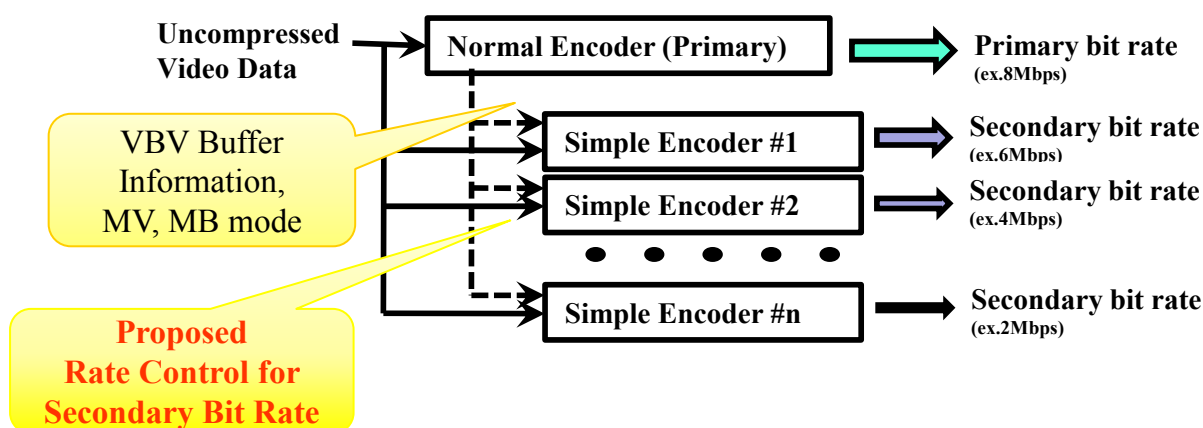


図4.1 System Configuration of multi-bitrate video encoder

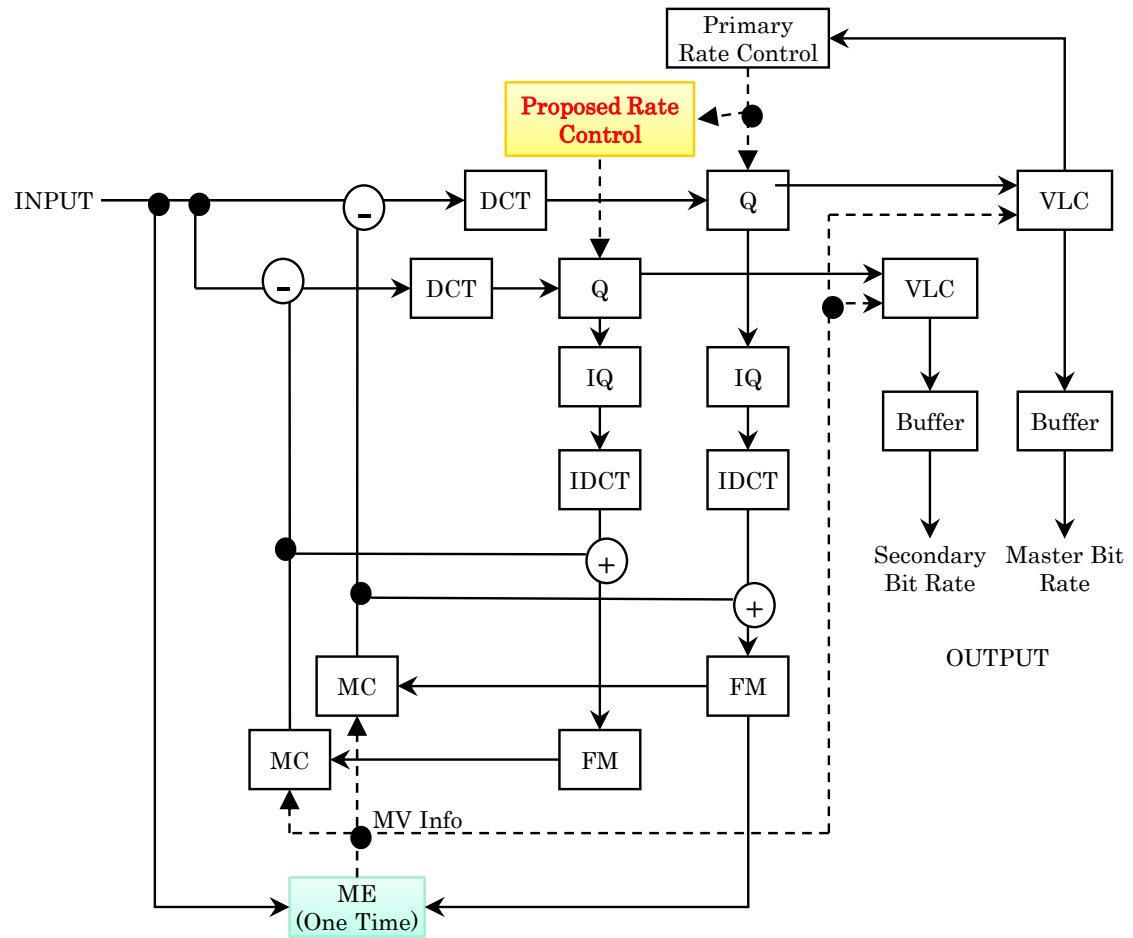


Fig 4.2 Block diagram of multi-bitrate Encoder

### 4.3 予備実験(MPEG-2 ベース)

異なるビットレート間での VBV バッファ遷移の推定を目的として、各種ビットレートでエンコードされたストリーム間の VBV バッファ占有量の推移の相互相関関係を検証するための予備実験を行った。表 4.1に示すエンコード条件を元に、各エンコードビットレートにおける、VBV バッファ占有量の遷移（初期 `vbv_delay` 値は各ビットレート共通で 0.16 秒）、VBV バッファ占有率（バッファ占有量を初期バッファサイズで正規化した値）の推移、量子化ステップ（以下 QS と呼ぶ。通常 MPEG-2 では QP $\times$ 2）の推移、QP 依存ビット量（DCT 係数のビット量）対 QP 非依存ビット量（MV などオーバーヘッドのビット量）、および QP 依存ビット量（DCT 係数のビット量）の比とフレーム平均 QP の比の関係を測定した。結果を図 4.3, 図 4.4, 図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 にそれぞれ示す。実験結果を検証し得られた特徴を以下に示す。

- （1）図 4.3より、VBV バッファ遷移は 8 [Mbps] と 4 [Mbps]のどちらも GOP 単位でマクロ的な増減周期を繰り返しており、フレーム毎のミクロ的な増減レンジ（フレーム単位のビット消費量）は 4 [Mbps]よりも 8 [Mbps] の方が大きくなっている。
- （2）8 [Mbps] および 4 [Mbps] のバッファ占有量の遷移をなるべく近い増減レンジおよび同一始点で比較するため、各々の初期バッファ占有量で正規化した値である VBV バッファ占有率（BOR: Buffer Occupation Ratio）という尺度を新たに定義・導入してグラフ化したものが図 4.4である。図 4.4から、GOP 単位の同一増減周期とほぼ同一の増減レンジになっており、I フレーム直後の 4 [Mbps] と 8 [Mbps]のバッファ占有率の差分は大きく I フレームから遠ざかるにつれて小さくなっていることが分かる。
- （3）図 4.5より、8, 6, 4 [Mbps] の各 QS の絶対値は異なるもののほぼ同じ増減パターンで推移している。
- （4）図 4.6より、同一コンテンツを 8, 6, 4, 3 [Mbps] でエンコードしたストリームの I フレームの QP 依存量（DCT 係数のビット量）はビットレートに比例して増減するものの、MV などの QP 非依存のオーバーヘッド部分のビット量は殆んど変化しない。P フレームについても同様である。
- （5）図 4.7より、QP 依存ビット量の比とフレーム平均 QP 比の間には、コンテンツの種類に大きく依存せずほぼリニアに近い関係がある。

上記の特徴からセカンダリレートコンテンツのエンコードにおける QP 制御はプライマリレートコンテンツの VBV バッファ占有率の推移と QP から予測近似計算で求めることができる。具体的には、上記（２）および（３）より、既知であるプライマリレートの VBV バッファ遷移に近づけるためのセカンダリレートの QP 推移のフィードバック制御を行い、（４）および（５）により QP 初期値のスケーリングファクタを予測計算する方式を検討した。提案方式の詳細については第４節で述べる。

表4.1 MPEG-2 ENCODING CONDITION

Test Sequence	Mobile&Calendar, Football
Image Size	720x480
Frame number	150
Rate Control	TM5 [68] Based
Frame Rate [fps]	29.97
GOP Structure	M=1, N=15
Profile & Level	MP@ML

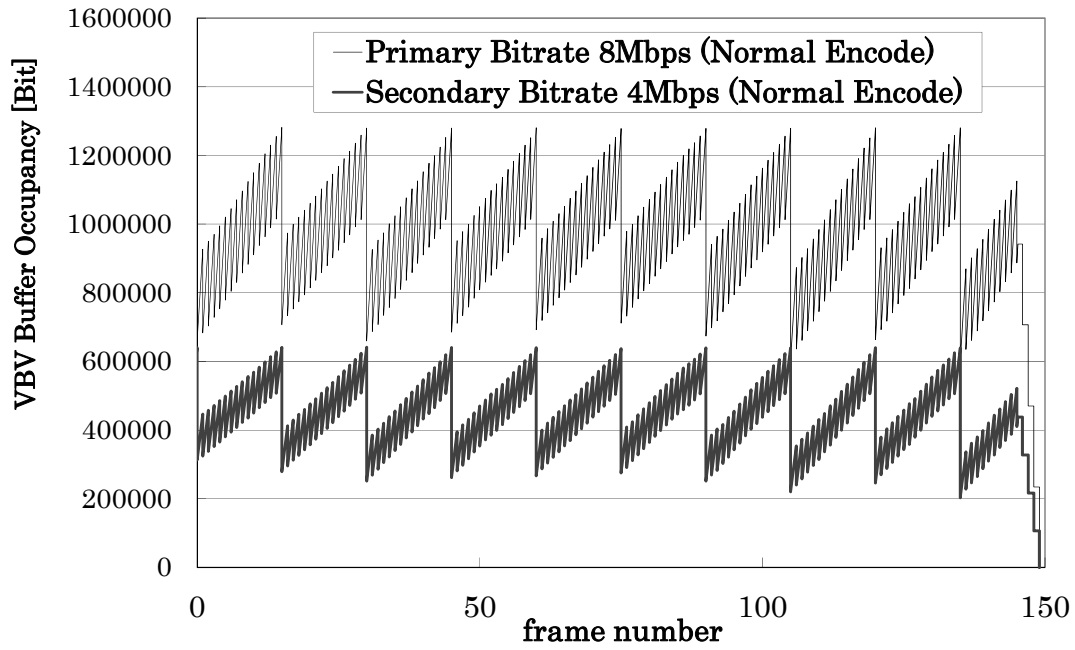


图4.3 Transition of VBV Buffer Occupancy ( 4 / 8 [Mbps] )

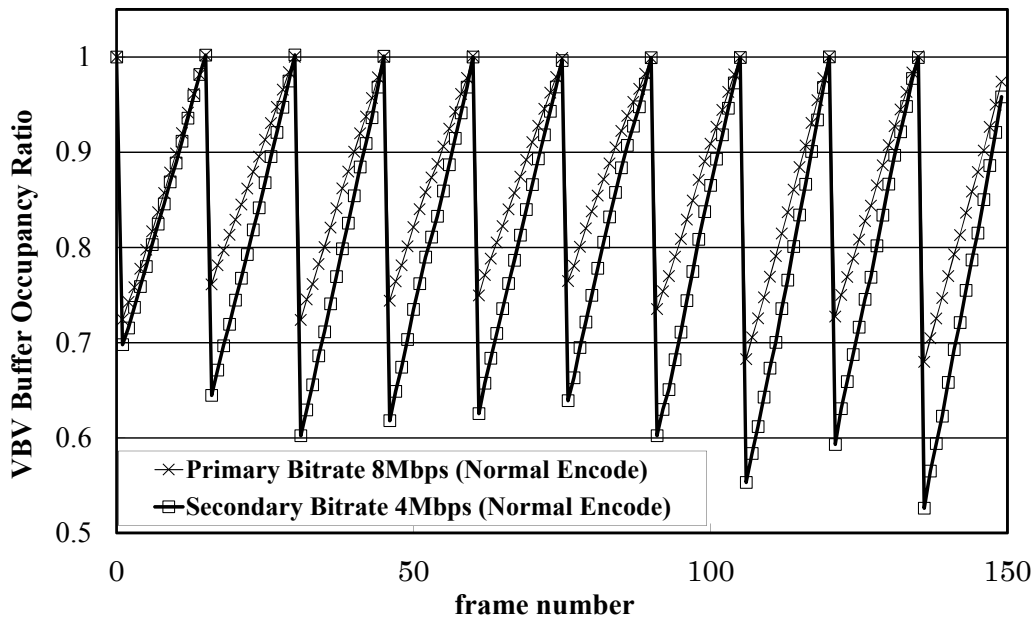


图4.4 Transition of VBV Buffer Occupancy Ratio ( 4 / 8 [Mbps] )

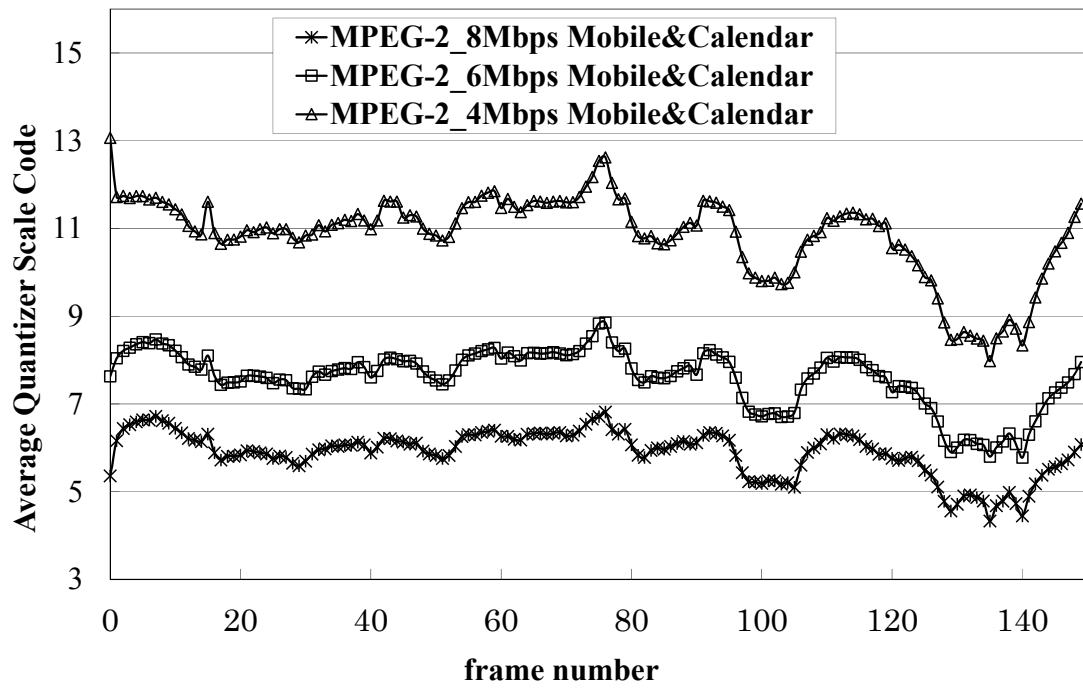


Fig. 4.5 Transition of Quantizer Scale Code (4/6/8Mbps)

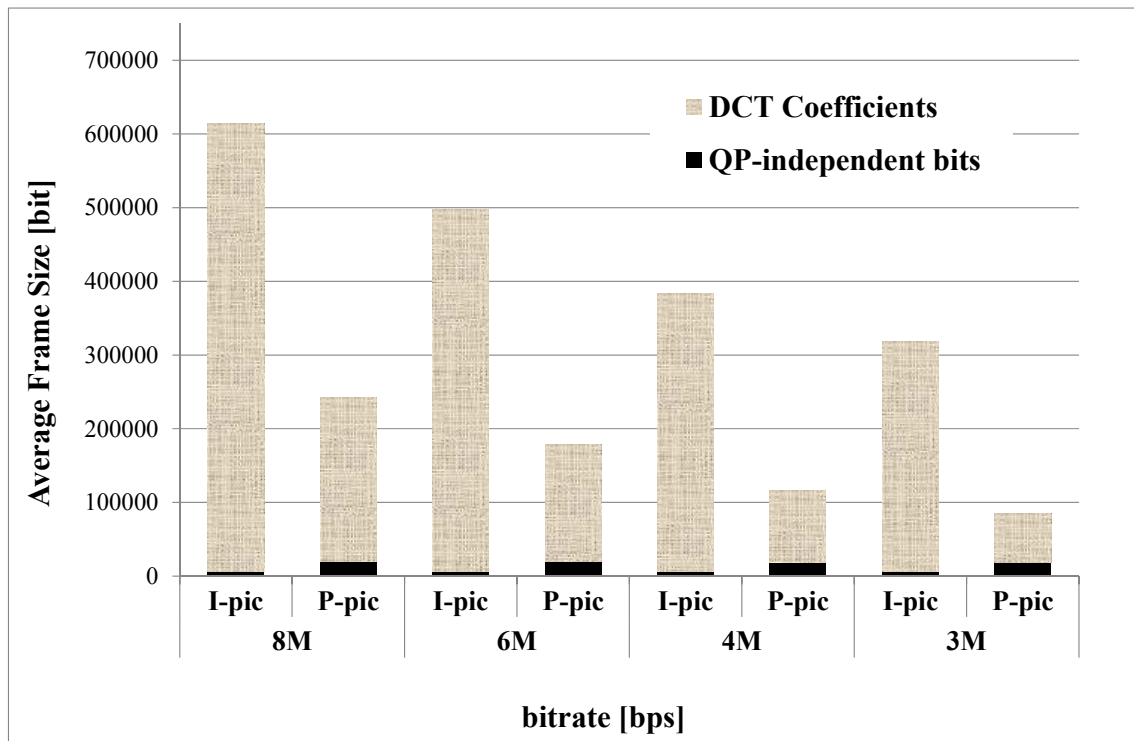
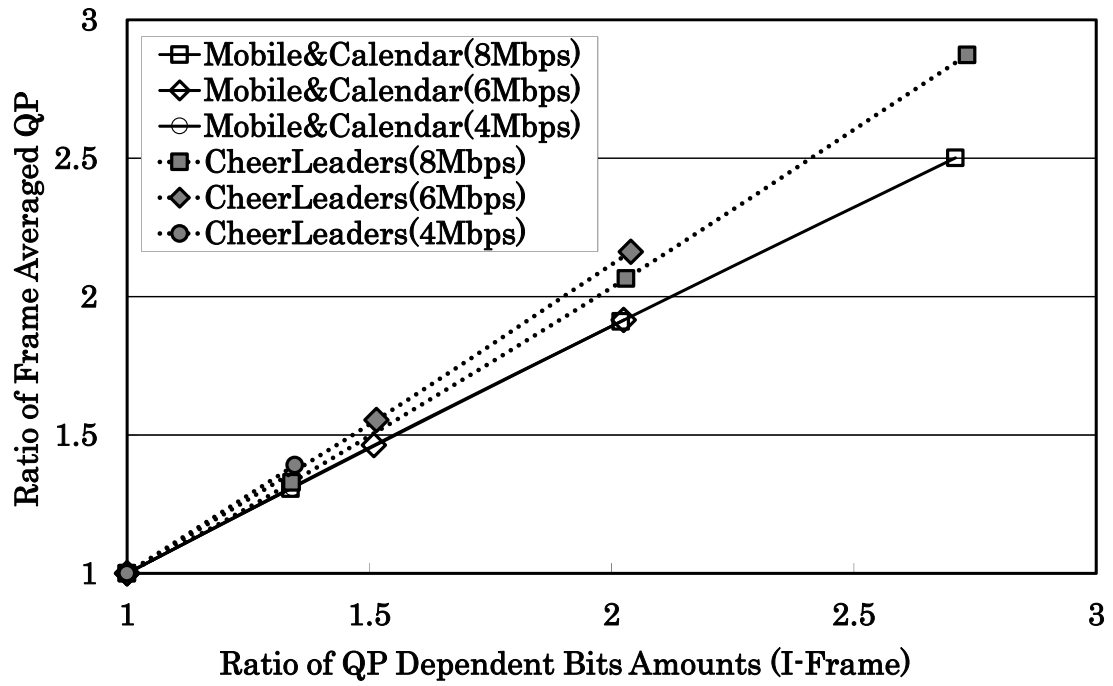
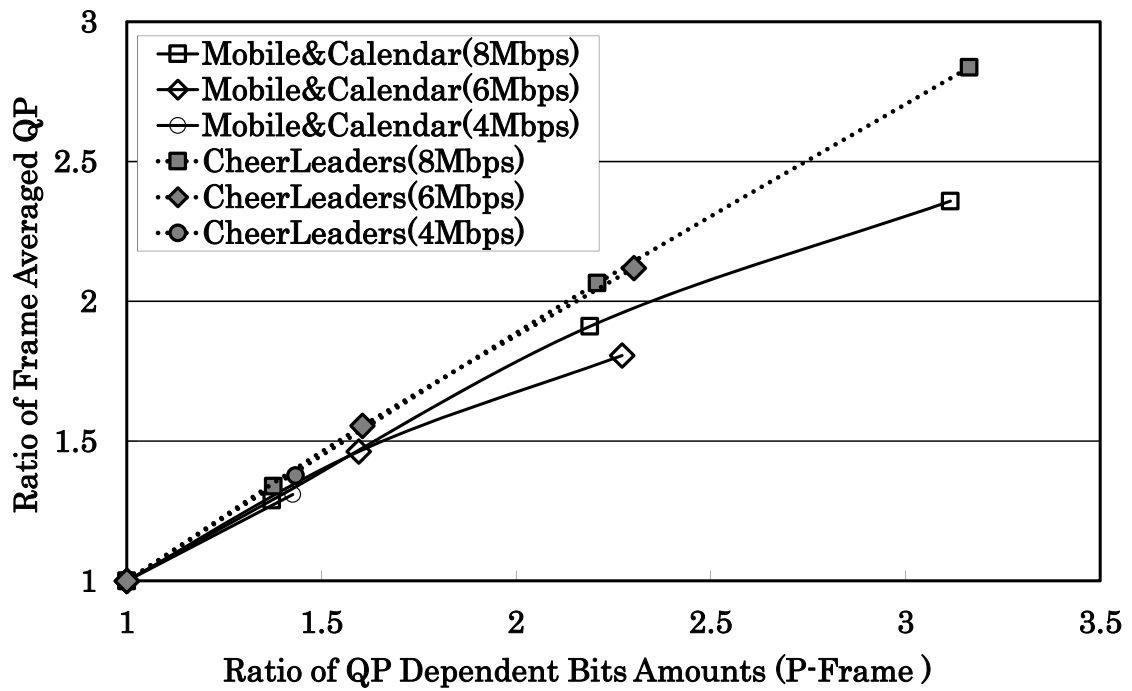


Fig. 4.6 Bits Amounts of QP Dependent Bits (DCT\_bits) and Overhead (3 / 4 / 6 / 8 [Mbps])





(a) I-frame



(b) P-frame

图4.7 Ratio of QP Dependent Bits Amounts (Primary/Secondary) v.s. Ratio of Frame Averaged QP (Secondary/Primary)

## 4.4 提案方式（MPEG-2 ベース）

### 4.4.1 方式の詳細

ビデオエンコーダのレート制御メカニズムについては様々な方式 [68] - [70] が提案されているが、その中でも RD（Rate-Distortion）-最適化ベースの方式 [69] やヒューマンビジュアルシステムを用いた方式 [70] では高い処理負荷が要求される。一番シンプルな TM5 [68] ベースの場合でも全エンコードプロセスの 4-6%程度の処理負荷を要する。このように処理コストをかけてエンコードされたストリームの VBV バッファ占有量の推移は、各フレームの画像特徴や符号化難易度を考慮して画質と符号量の点で最適化されたビットアロケーションの特徴を反映したものであるため、なるべく踏襲することが望ましい。従って、予備実験の結果を活用しつつ、レート制御処理の主目的であり各フレームのビット消費量を制御する QP の算出処理に、通常のエンコードを行ったプライマリレートコンテンツの VBV バッファ占有量の推移にセカンダリレートのそれを追従させることによるフィードバック計算を用いた [71] [72] [73] . セカンダリレートの QP 算出式を式（1），式（2），式（3）に示す。基本的にセカンダリレートの各マクロブロックの量子化パラメータ  $QPs(fn, mb)$  はプライマリレートの量子化パラメータ  $QPp(fn, mb)$  をスケーリング係数  $R(fn)$  でスケーリングして求める。 $R(fn)$  は式 2 に従い、セカンダリレートのバッファ占有率（後述）がプライマリレートのそれに近づくようにフレーム単位で更新される。ここで、プライマリレートとセカンダリレートで VBV バッファの変動レンジが全体的に異なるため、初期バッファ占有量で正規化したバッファ占有率（ $BORp$ ,  $BORs$ ）をフィードバック制御で用いた。さらに、予備実験結果の特徴（2）より、GOP 先頭フレームから遠ざかるにつれてプライマリレートとセカンダリレートのバッファ占有量の差分が小さくなる特徴を反映して、式 3 の通り、セカンダリレートのバッファ占有率のターゲットとして  $BORp$  を修正した  $BORp'$  を用いることとした。また、マクロブロックモードや動きベクトルについてはプライマリレートの情報をそのまま引き継ぐこととした。プライマリレートからセカンダリレートの QP 値を推定する際に、低いビットレートから高いビットレート方向に推定する方法も考えられるが、スキップモードのマクロブロックについては高レートになってもスキップモードのままになってしまい QP 制御ができない点で不利になるため、高いビットレートから低いビットレートの方向に推定することとした。

$$QPs(fn, mb) = R(fn) \times QPp(fn, mb) \quad (1)$$

$$R(fn) = R(fn-1) \times [1 + \{(BORp(fn-1) - BORs(fn-1)) / BORs(fn-1)\} \times P_1] \quad (fn \geq 3) \quad (2)$$

$$BORp'(fn-1) = BORp(fn-1) + (BORs\_I - BORp\_I) \times (n\_GOP - Fn\_in\_GOP) / n\_GOP \quad (3)$$

$fn, mb$  : フレーム番号, マクロブロック番号

$QPs(fn, mb)$  : 算出されるセカンダリレートの QP

$QPp(fn, mb)$  : プライマリレートの QP

$R(fn)$  :  $n$  番目のフレームにおける QP のスケーリングパラメータ

$BORs(fn)$  : セカンダリレートの VBV バッファ占有率

$BORp(fn)$  : プライマリレートの VBV バッファ占有率

$BORp'(fn)$  : BORs のターゲットとなる修正 BORp

$P_1$  : フィードバックパラメータ

$BORs\_I$  : セカンダリレートで符号化しているフレームの直前の I フレーム符号化直後のバッファ占有率

$BORp\_I$  : プライマリレートにおいて対応するフレームの直前の I フレーム符号化直後のバッファ占有率

$n\_GOP$  : GOP を構成するフレーム数 (通常 15)

$Fn\_in\_GOP$  : GOP 内のフレーム位置 (0~14)

#### 4.4.2 スケーリングパラメータ R の初期値決定法

式 (1), 式 (2), 式 (3) に示したフィードバック制御における QP スケーリングパラメータ  $R(fn, mb)$  の更新には前フレームのバッファ占有率などの情報を用いる必要があり, ストリームの先頭フレームには適用できないため, 初期値を別途決定する必要がある. そこで, 4.3 節の予備実験結果の特徴 (5) より, QP に依存するビット量の比とフレーム平均 QP 比との間には, コンテンツの種類に大きく依存せず, ほぼニアに近い関係があることから, プライマリレートとセカンダリレートの QP 依存ビット量の比をパラメータとする近似式 (4) および (5) を用いて先頭の I フレーム及び P フレームにおけるスケーリングパラメータの初期値  $R(1, mb)$ ,  $R(2, mb)$  を決定した. 尚, セカンダリレートの QP 依存ビット量の算出は, 特徴 (4) より, QP 非依存のビット量はビットレートに依らずほぼ一定であることから, プライマリレート

の QP 非依存ビット量をセカンダリレートのそれと見做して行った．近似式のパラメータ  $\alpha_i, \beta_i, \alpha_p, \beta_p$  は，図 4.7 を用いて経験的に求めた．

$$R(1) = \alpha_i \times QPDBR\_I + \beta_i \quad (fn=1, I\_Frame) \quad (4)$$

$$R(2) = \alpha_p \times QPDBR\_P + \beta_p \quad (fn=2, P\_Frame) \quad (5)$$

QPDBR\_I：プライマリレートの QP 依存ビット量とセカンダリレートの QP 依存ビット量の比 (I フレーム)

QPDBR\_P：プライマリレートの QP 依存ビット量とセカンダリレートの QP 依存ビット量の比 (P フレーム)

## 4.5 実験及び考察（MPEG-2 ベース）

提案方式の効果を検証するため，4 [Mbps] のセカンダリレートのエンコードに関して，表 4.2 に示す条件のもとで TM5 ベースの通常エンコード（動きベクトル再利用）との比較実験を行った．幾つかのパラメータについては経験的に求めた  $P_I = 2.0$ ,  $\alpha_I = 0.956$ ,  $\beta_I = 0.044$ ,  $\alpha_p = 0.779$ ,  $\beta_p = 0.221$  を用いた．実験結果を図 4.8～図 4.10，及び表 4.3～表 4.4 に示す．

図 4.8 および図 4.9 より，提案方式によるセカンダリレート（4 [Mbps]）のレート制御が働き，VBV バッファ占有率が TM5 ベースの通常エンコードの占有率に適切に追従できていることが分かる．また，表 4.3 より，TM5 ベースとほぼ同等の PSNR を保持しつつレート制御の処理負荷を 68.1% 削減できていることが分かる．エンコード処理全体の処理負荷については -2.3% の削減となっている．さらに，表 4.4 から，生成されたファイルサイズの精度については，TM5 ベースと比べて -0.1% 以内の誤差に留まっていることが分かる．ここで，トータルファイルサイズは VBV バッファの各フレームの消費量の積算であり，VBV バッファ遷移における最終フレーム位置（図 4.9）に依存するため，4 [Mbps] の通常エンコードの VBV バッファ推移を推定して追従する提案方式では，ファイルサイズも追従させる機能を持ち合わせていると言える．

表4.2 MPEG-2 SECONDARY ENCODING CONDITION

	Normal encode	Proposed
Test Sequence	Mobile&Calendar	
Image Size	720x480	
Frame number	150	
Rate Control	TM5 [68] Based	Proposed
Motion Vector	Reuse	Reuse
Primary bit rate	8 [Mbps]	
Secondary bit rate	4 [Mbps]	
Frame Rate[fps]	29.97	
GOP Structure	M=1, N=15	
Profile & Level	<u>MP@ML</u>	

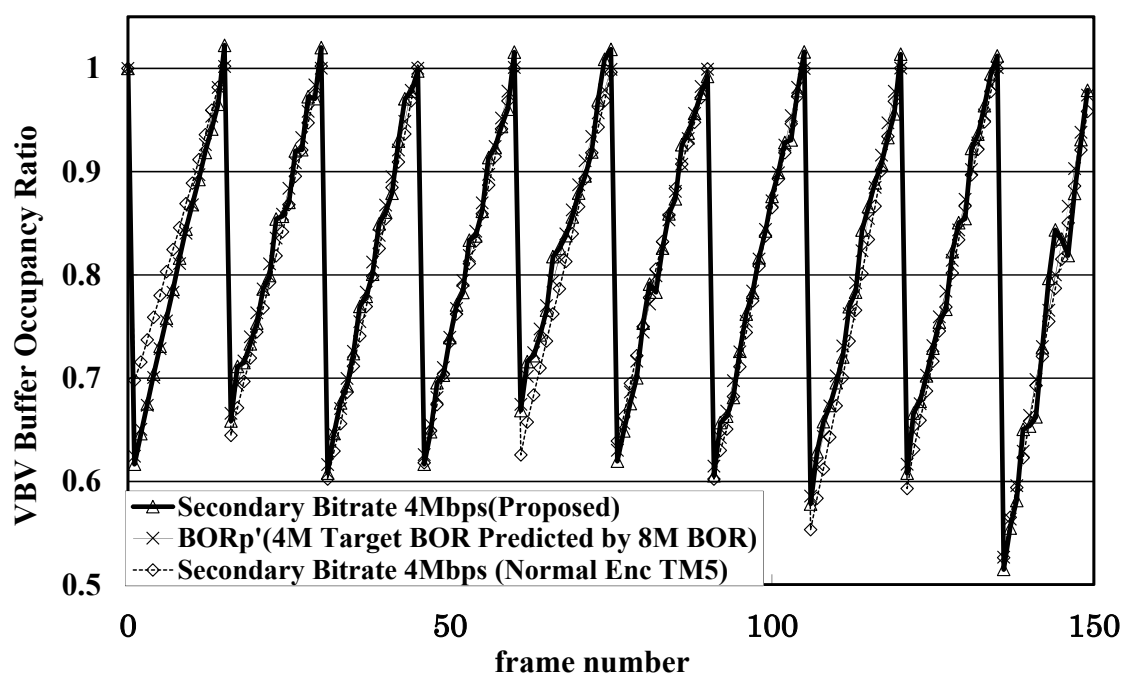


图4.8 Transition of the VBV Buffer Occupancy Ratio ( 8 [Mbps] => 4 [Mbps] )

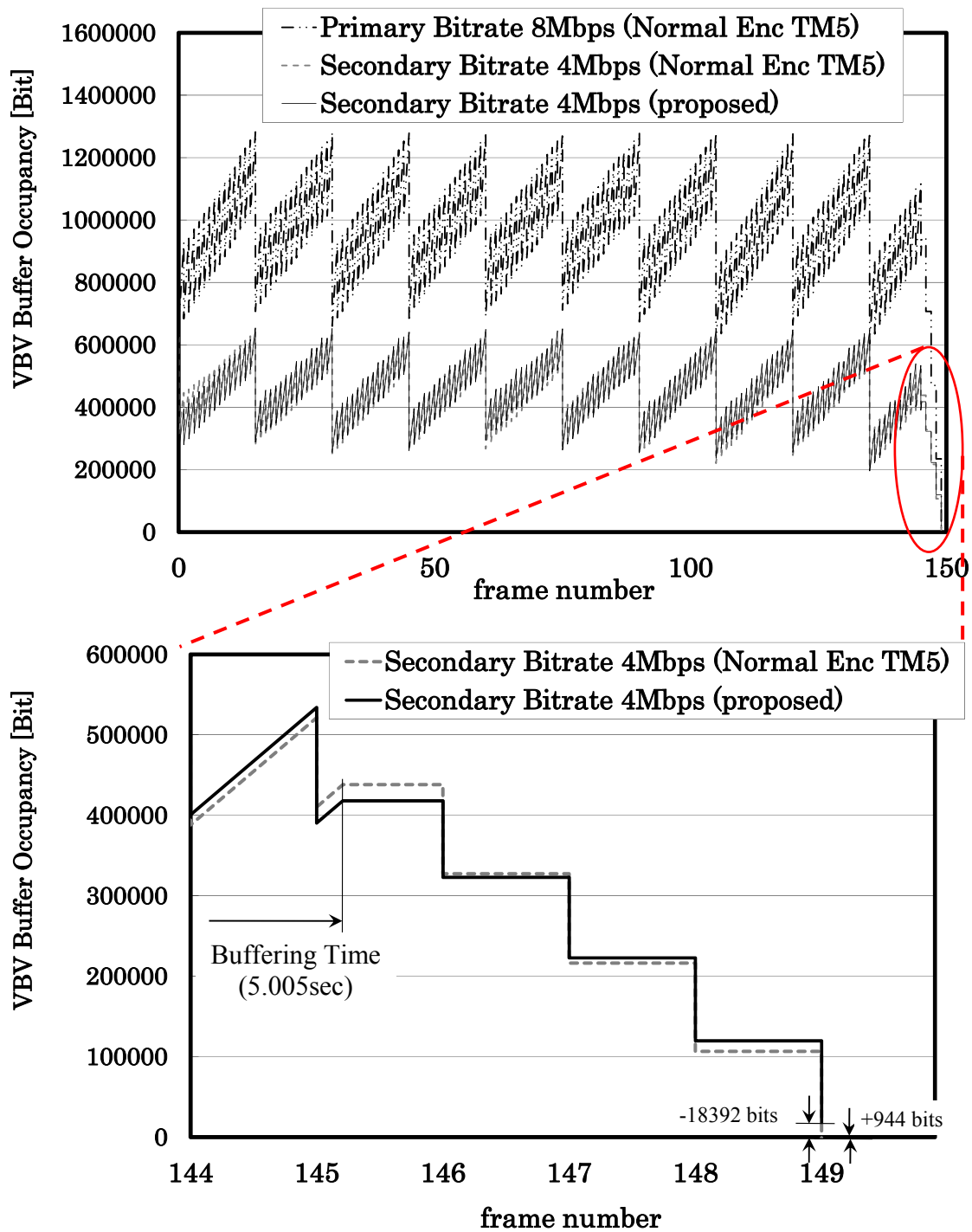


图4.9 Transition of the VBV Buffer Occupancy (8Mbps=>4Mbps)

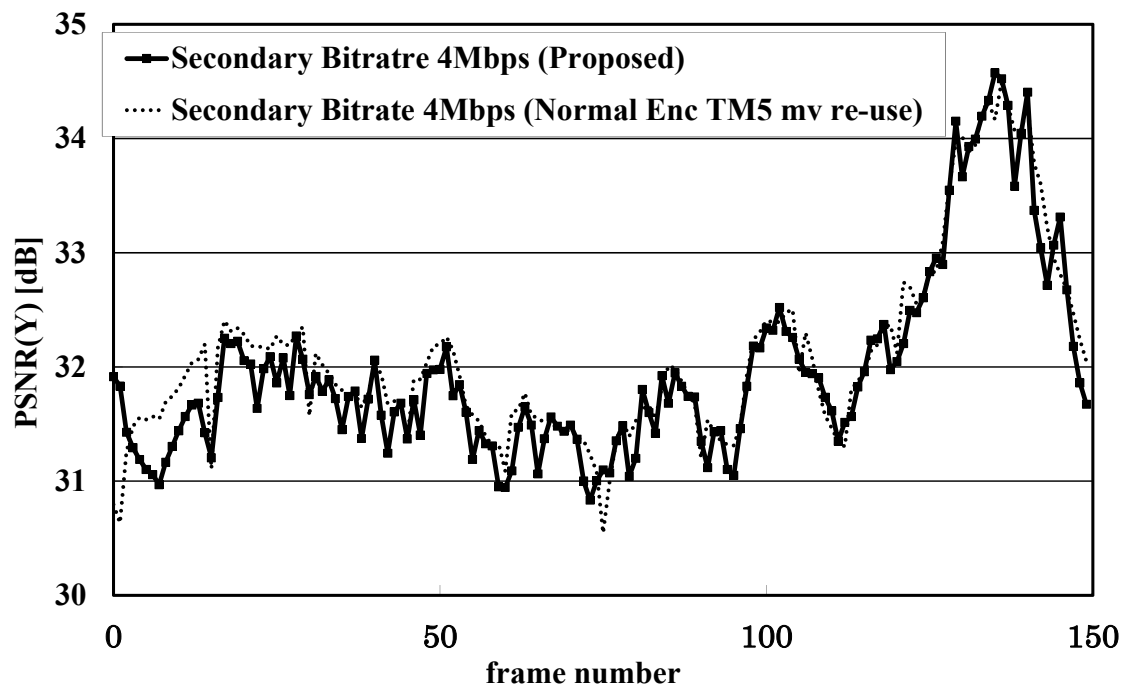


图4.10 Transition of PSNR ( 4 [Mbps] )

表4.3 PROCESS TIME and PSNR for Secondary Encoding

	Process Time [sec] (Rate Control) *2	Proc.Time[sec] (Whole Encode) *2	PSNR [dB]
TM5(*1)	0.082	2.44	32.08
Proposed(*1)	0.026 (-68.1%)	2.38 (-2.3%)	31.96 (-0.3%)

\*1 MV re-used

\*2 OS: WindowsXP Professional (SP2), CPU: Pentium4 3.6GHz, RAM: 1.0GB

表4.4 File Size for Secondary Encoding

	File Size [Bits]
TM5(*3)	20020944 (+944bits to *4)
Proposed (*3)	20001608 (-18392bits to *4) (-0.1% to TM5)

\*3 MV re-used

\*4 Ideal File Size of 150frames in 4Mbps:  
20020000[bit] (=1001/30000x150\*4000000)

## 4.6 H.264 符号化への適用方式

本節では、提案方式の H.264 マルチビットレートエンコーダへの適用手法について述べる．H.264 では、QP と PSNR の関係をリニアに近づけるために、QS（量子化ステップ）と QP の関係を式（6）のように設定している．（MPEG-2 では、 $QS=QP \times 2$ ）

$$QP \propto 6 \log_2 QS \propto 6 \log_2 (NumberOfBits) \quad (6)$$

従って、MPEG-2 で用いたセカンダリーレートの QP の推定式は、式（7）～式（10）のようになる．

ここで、 $\Delta QP(fn)$  は、フレーム番号  $fn$  におけるプライマリレートからセカンダリーレートへの QP の増分値を表すスケーリングパラメータである．また、MPEG-2 で QP スケーリングパラメータとして用いていた  $R(fn)$  はバッファ（ビット量）ドメイン上での増分値を表し、 $6 \log_2(R(fn))$  とすることで、QP ドメイン上での  $\Delta QP(fn)$  の増分値を表すスケーリングパラメータとなっている．

$$QPs(fn, mb) = QPp(fn, mb) + \Delta QP(fn) \quad (7)$$

$$\Delta QP(fn) = \Delta QP(fn-1) + 6 \log_2(R(fn)) \quad (fn \geq 3) \quad (8)$$

$$R(fn) = 1 + \{ (BORp'(fn-1) - BORs(fn-1)) / BORs(fn-1) \} \times P_1 \quad (9)$$

$$BORp'(fn-1) = BORp(fn-1) + (BORs\_I - BORp\_I) \times (n\_GOP - Fn\_in\_GOP) / n\_GOP \quad (10)$$

### 4.6.1 スケーリングパラメータ $\Delta QP$ の初期値決定法

H.264 では、DCT のビット量のみならず、ヘッダ情報のビット量も含めて QP に依存するため、MPEG-2 での方式を用いることはできない．各種ビットレートでのエンコード予備実験から、Primary レートと Secondary レートの I-Frame の平均 QS の比とビットレート比が正比例に近い関係にあったため、近似的に式（11）を用いて、先頭 I-Frame に相当する  $\Delta QP(1)$  を求めることとした．

$$\Delta QP(1) = 6 \times \log_2 \left( \frac{PrimaryRate}{SecondaryRate} \right) \quad (fn=1) \quad (11)$$

一方、先頭から 2 フレーム目の P-Frame に相当する  $\Delta QP(2)$  については、先頭の I-Frame を符号化した残りの GOP 割り当て符号量（Primary および Secondary）の比から式（12）を用いて算出した．



$$\Delta QP(2) = 6 \times \log_2 \left( \frac{RestOfGOPBits_p}{RestOfGOPBits_s} \right) (fn = 2) \quad (12)$$

RestOfGOPBits<sub>p</sub>: プライマリーレートの GOP 割り当て符号量から先頭の I-Frame の符号化されたビット量を差し引いた残りのビット量

RestOfGOPBits<sub>s</sub>: セカンダリーレートの GOP 割り当て符号量から先頭の I-Frame の符号化されたビット量を差し引いた残りのビット量

#### 4.6.2 モード判定及び MV の再探索範囲

H.264 の IntraFrame 予測では、9 種類の 4x4Intra 予測モード、4 種類の 16x16Intra 予測モードがあり、InterFrame 予測では、16x16, 16x8, 8x16, 8x8, 8x4, 4x8, 4x4 の 7 種類の動き補償・ブロックモードが存在する。また、モード判定などを行う際の R-D コストファンクションは QP 値に依存している。従って、プライマリビットレートからセカンダリーレートの QP 値のみ推定してモード情報や動きベクトルをそのまま引き継いでエンコードした場合、QP の変化に伴いモードや動きベクトルも変化するため、セカンダリーレートで通常エンコードした場合に比べて最適状態から大きくかけ離れてしまい大幅な画質劣化が予想される。そこで、モード判定と動きベクトルの探索をある程度絞り込んで再度行うことで処理負荷を抑えつつ画質劣化を防げないかを検討するため、表 4.5 に示す符号化条件でビットレートの異なるストリームのエンコードを行い、同一フレーム内で同一 MB 位置のモード情報がどのように変化しているかを分析した（表 4.6, 表 4.7）。I-Frame の結果を示した表 4.6 より、5Mbps で選択されていたモードは 1.5Mbps でも同じものが選択されるケースが多く、特に 4x4Intra 予測モードについては、5Mbps で 90% 以上選択されていた MB のうち 95% が 4x4Intra 予測モードとなっていることが分かる。従って、I-Frame の場合、Primary レートと同一のモードに絞り込んで処理を行うことが有効であると言える。一方、P-Frame については、図 4.7 より、Primary レートと同一モードに加えて、16x16Intra 予測モードと Skip モード、および、Inter 予測モードについては Primary レートより大きなブロックサイズの予測モードを候補とすることが有効であると言える。また、Primary レートで Skip モードであった場合には、Secondary レートで隣接 MB の符号化モードと動きベクトルが変化しているため、Skip モード決定の際に使われる動きベクトルも変化する。従って、単純に

Skip モードのみを継承させるのではなく、16x16Inter 予測モードも選択肢に入れることとした。

**表4.5 H.264 Coding Condition**

Test Sequence	Mobile&Calendar
Image Size	720x480
Bit Rate	5Mbps/1.5Mbps
Frame number	150
Rate Control	JM14.2 [74]
Frame Rate [fps]	29.97
GOP Structure	M=1, N=15
Profile & Level	BP@L3.0

**表4.6 The Corresponding MB Mode in 5Mbps/1.5Mbps H.264 Encoding (I-Frame)**

5Mbps		1.5Mbps				
Mode	ratio	Vertical	Horizontal	DC	Plane	4x4
Vertical	2.70%	82.97%	4.95%	7.69%	1.65%	2.75%
Horizontal	2.19%	4.73%	81.76%	6.08%	3.38%	4.05%
DC	2.40%	5.56%	7.41%	80.25%	1.85%	4.94%
Plane	0.93%	7.94%	12.70%	6.35%	66.67%	6.35%
4x4	91.78%	0.32%	0.55%	0.84%	0.27%	98.01%

**表4.7 The Corresponding MB Mode in 5Mbps/1.5Mbps H.264 Encoding (P-Frame)**

5Mbps		1.5Mbps									
Mode	選択率	Vertical	Horizontal	DC	Plane	4x4	Skip	16x16	16x8	8x16	8x8
Vertical	0.12%	17.99%	0.42%	2.51%	0.42%	0.84%	65.27%	8.37%	0.00%	3.77%	0.42%
Horizontal	0.06%	1.69%	15.25%	3.39%	2.54%	0.00%	66.95%	8.47%	0.85%	0.85%	0.00%
DC	0.07%	2.13%	2.13%	17.02%	0.71%	0.00%	75.18%	2.13%	0.71%	0.00%	0.00%
Plane	0.03%	0.00%	1.82%	3.64%	14.55%	0.00%	60.00%	14.55%	3.64%	1.82%	0.00%
4x4	0.98%	0.47%	0.99%	1.56%	0.62%	65.07%	4.95%	7.03%	6.14%	8.38%	4.79%
Skip	36.17%	0.09%	0.08%	0.08%	0.03%	0.01%	83.22%	10.95%	2.39%	2.86%	0.30%
16x16	31.14%	0.08%	0.06%	0.05%	0.02%	0.06%	50.65%	32.22%	7.43%	7.71%	1.71%
16x8	11.57%	0.04%	0.05%	0.04%	0.03%	0.21%	39.05%	24.84%	24.33%	8.16%	3.25%
8x16	13.23%	0.15%	0.03%	0.05%	0.02%	0.24%	33.70%	21.42%	6.47%	34.12%	3.79%
8x8	6.63%	0.02%	0.00%	0.02%	0.01%	0.59%	24.82%	19.36%	14.25%	20.37%	20.56%

#### 4.6.3 実験及び考察 (H.264)

H.264 への適応方式の効果を検証するため、1.5 [Mbps]のセカンダリレートのエンコードに関して、表 4.8に示す条件のもとで JM14.2 ベースの通常エンコードとの比較実験を行った。パラメータは経験的に求めた  $P_I=1.0$  を用いた。また、モード判定については、表 4.6および表 4.7においてシェードされたモードのみに絞りで実施した。実験結果を図 4.11～図 4.14、及び表 4.9～表 4.10に示す。

図 4.11および図 4.12より，提案方式によるセカンダリレート（1.5 [Mbps]）のレート制御が働き，先頭の GOP を除いて，CPB ( Coded Picture Buffer ) 占有率が JM14.2 ベースの通常エンコードの占有率にある程度適切に追従できていることが分かる．先頭の GOP 区間での乖離については， $\Delta QP$  の初期値決定法やフィードバックパラメータのチューニングにより改善が期待できる．また，表 4.9より，JM14.2 ベースとほぼ同等の平均 PSNR を保持しつつレート制御の処理負荷を-82.0%削減できていることが分かる．エンコード処理全体の処理負荷についてはモード判定処理の削減効果も加わり，-64.1%の削減となっている（-64.1%の処理負荷低減値については，ログ出力等レファレンスプログラムの作りこみに依存する可能性は否定できない）．さらに，表 4.10から，生成されたファイルサイズの精度については，JM14.2 ベースと比べて-0.4%以内の誤差に留まっていることが分かる．

表4.8 H.264 SECONDARY ENCODING CONDITION

	Normal Encode	Proposed
Test Sequence	Mobile&Calendar	
Image Size	720x480	
Frame number	150	
Rate Control	JM14.2 [74] Based	Proposed
Primary bit rate	5Mbps	
Secondary bit rate	1.5Mbps	
Frame Rate[fps]	29.97	
GOP Structure	M=1, N=15	
Profile & Level	BP@L3.0	

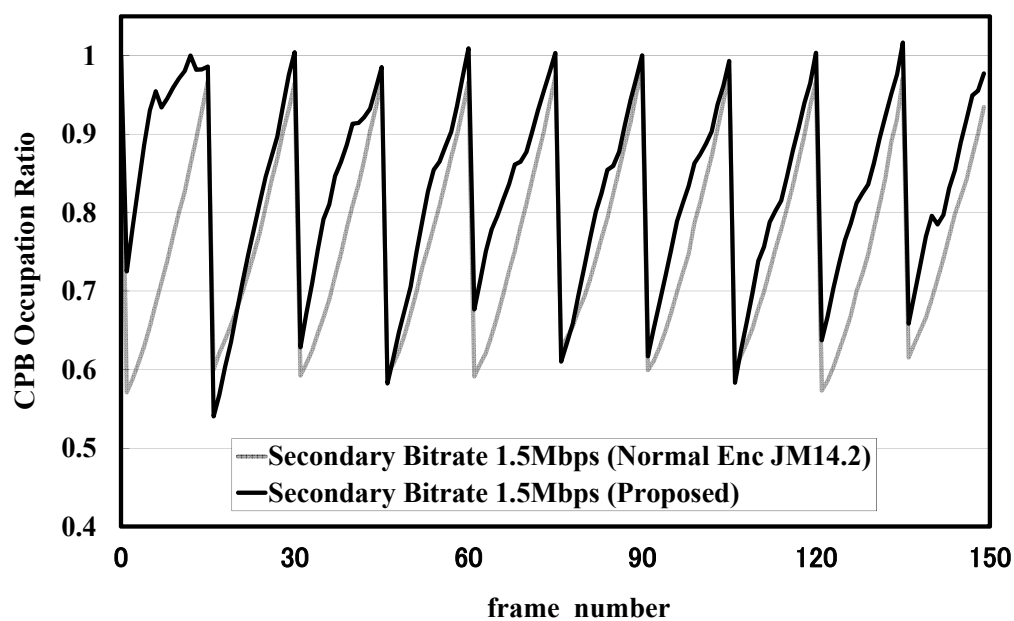


図4.11 Transition of the CPB(Coded Picture Buffer) Occupancy Ratio (Secondary Encode at 1.5 [Mbps] )

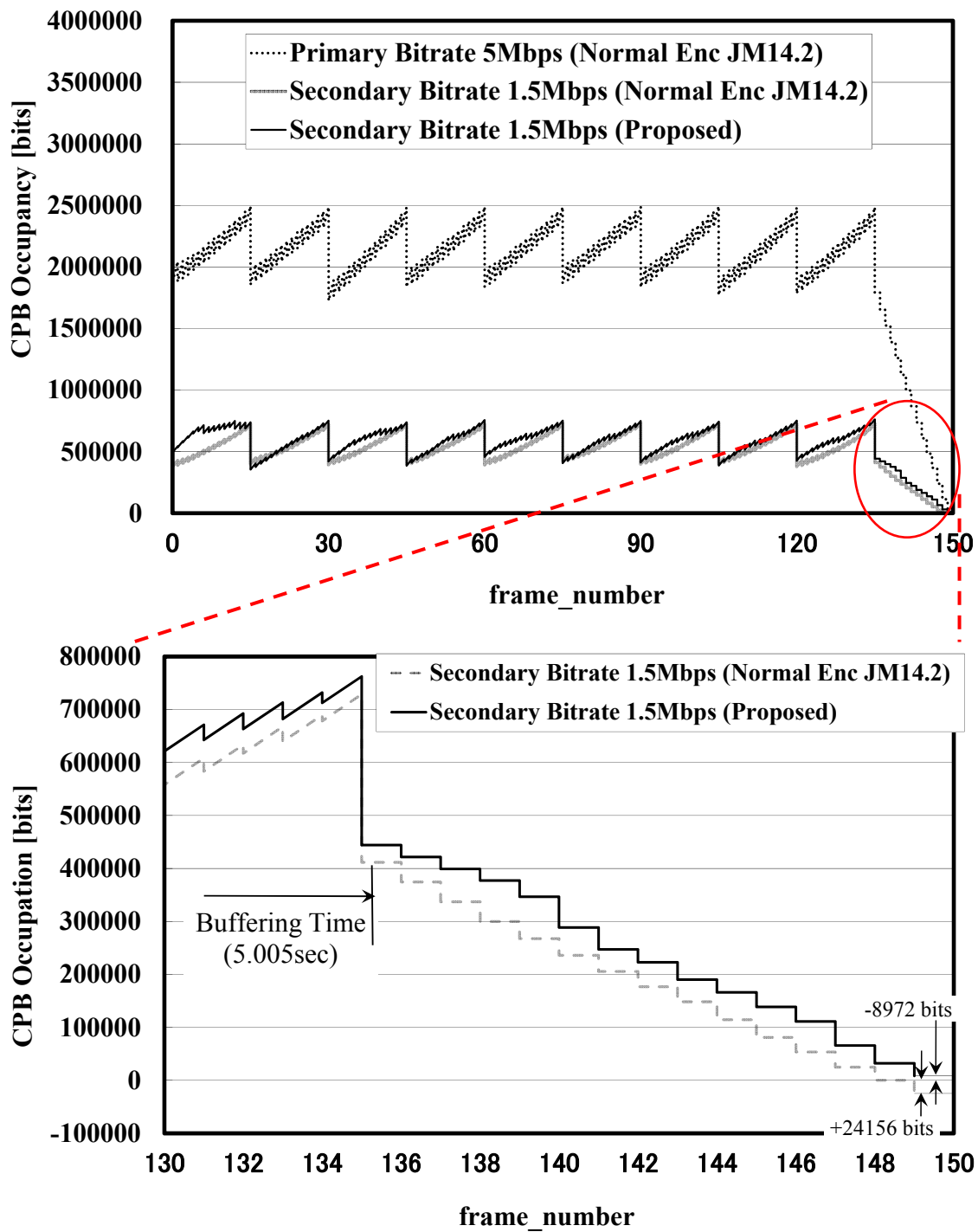


图4.12 Transition of the CPB Occupancy (Secondary Encode at 1.5 [Mbps] )

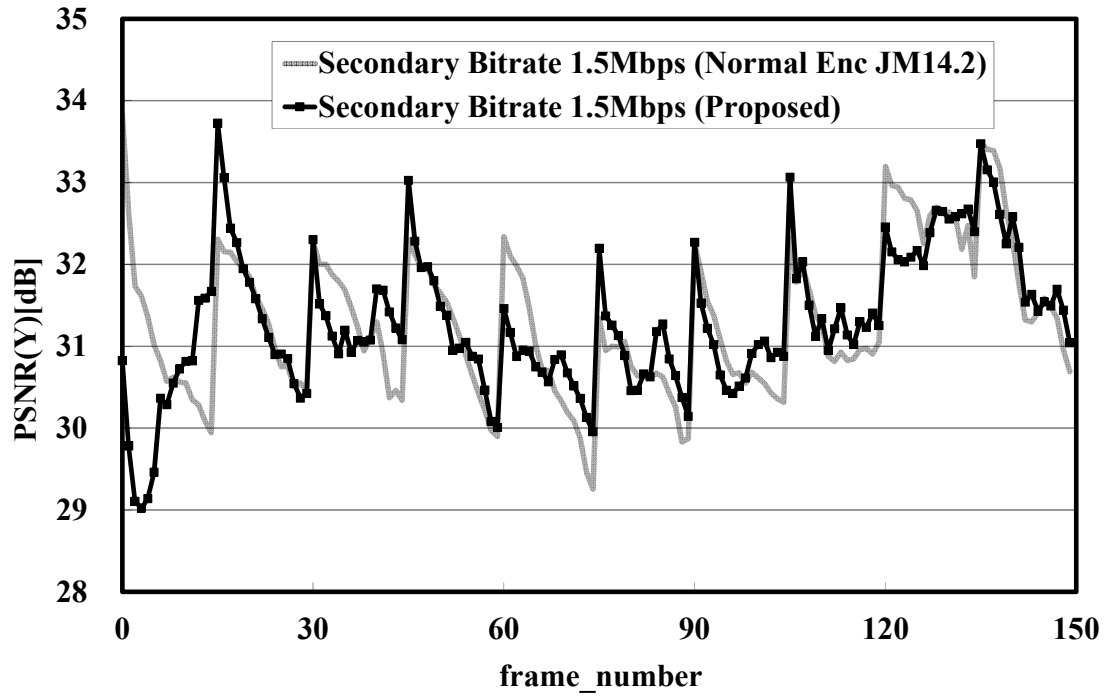


Figure 4.13 Transition of PSNR (1.5 [Mbps], Mobile&Calendar)

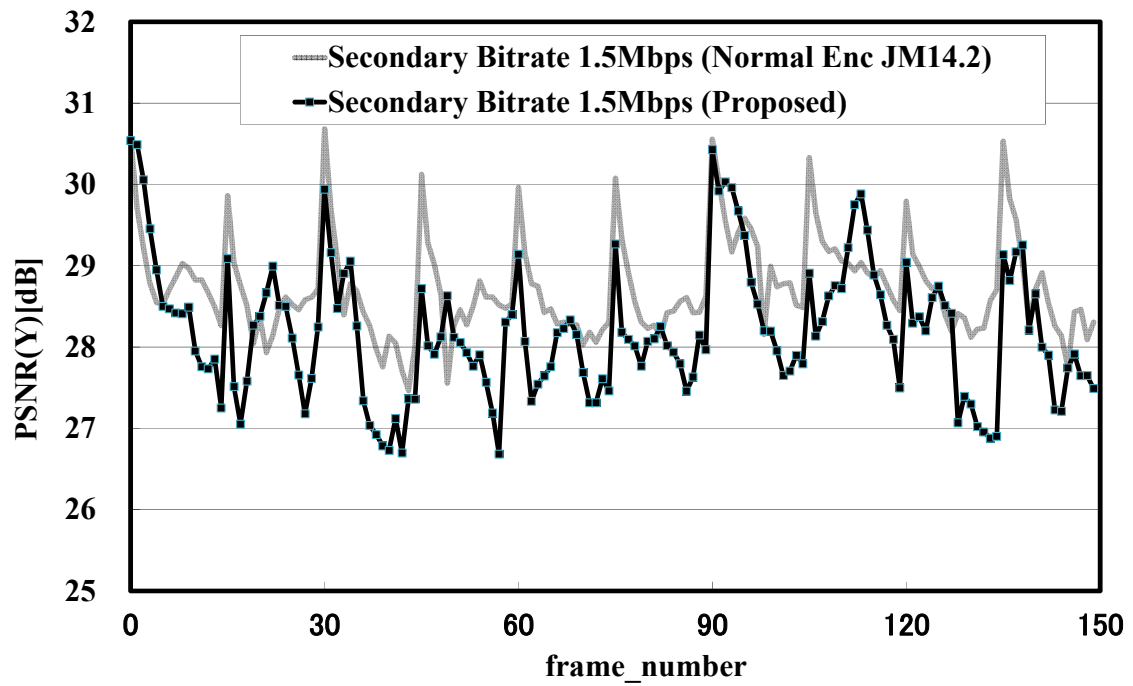


Figure 4.14 Transition of PSNR (1.5 [Mbps], CheerLeaders)

**表4.9 PROCESS TIME and PSNR for Secondary Encoding (Mobile&Calendar)**

	Process Time [sec] (Rate Control) *5	Proc. Time [sec] (Whole Encode) *5	PSNR [dB]
JM14.2	0.111	167.43	31.23
Proposed	0.020 (-82.0%)	60.04 (-64.1%)	31.22 (-0.03%)

\*5 OS: WindowsXP Professional (SP2), CPU: Pentium4 3.2GHz, RAM: 1.0GB

**表4.10 File Size for Secondary Encoding (Mobile&Calendar)**

	File Size [Bits]
JM14.2	7531656(+24156bits to *6)
Proposed	7498528 (-8972bits to *6) (-0.4% to JM14.2)

\*6 Ideal File Size of 150frames in 1.5Mbps:  
7507500[bit] (=1001/30000x150\*1500000)

## 4.7 まとめ

本章では、複数同時エンコードにより同一画像ソースから、同一画像サイズ、同一フレームレートで異なるビットレートの符号化ストリームを効率的かつプライマリエンコーダのレート制御特性を生かしつつ生成するための高速レート制御方式について検討した。MPEG-2 ベースの提案方式では、各ビットレートエンコードにおける VBV バッファ遷移の類似性に着目して処理を行うことにより、画質劣化を殆ど伴うことなく通常のレート制御に比べて-68.1%の処理負荷削減を達成した。一方、H.264 への適用方式では、-82.0%のレート制御処理を削減し、エンコード処理全体では、モード判定処理の削減効果も加わり、-64.1%の処理負荷削減を達成した（-64.1%の処理負荷低減値については、ログ出力等レファレンスプログラムの作りこみに依存する可能性は否定できない）。ただし、H.264 符号化処理全体に占めるレート制御処理の割合は 0.06% と小さいため、レート制御処理の簡略化自体の貢献度は低いと言える。H.264 適用方式における初期値決定手法の高度化や、マルチビットレートのみならずマルチ解像度への変換手法の検討が今後の課題として挙げられる。

## 第5章 最新 CATV 技術と将来展望

### 5.1 まえがき

CATV は Common Antenna TeleVision および Community Antenna TeleVision（共同受信）の略であり，世界で最初の CATV は 1949 年アメリカ・オレゴン州のアストリア町で誕生したといわれている．この場合の CATV は，1つの町や村が共同で山頂などにアンテナをたて，有線でそれぞれの家庭に映像を分配する共同受信の形態であった [75]．一方，国土の 75%が山間部を占める日本における CATV 事業も，アメリカのそれと同様に，地上テレビ放送の難視聴対策から始まった．日本で最初の CATV は，テレビ放送の始まった翌年の 1955 年に，群馬県伊香保で共聴施設として設置されたものといわれている [76]．初期の CATV の多くが NHK の共聴施設として設置されたものであったが，1960 年代には，空きチャンネルを利用した自主制作番組を放送する施設が登場するようになった．その後，1960 年代後半の第一次 CATV ブーム，1973 年の「有線テレビジョン放送法」の制定，70 年代後半の第二次 CATV ブーム等を経て，80 年代になると，都市型 CATV の登場が更に活発化するとともに，1989 年に民間通信衛星が打ち上げられ，通信衛星を利用した番組供給サービスが開始され，これにより本格的な都市型 CATV 事業がスタートした．さらに，1993 年の大幅な規制緩和を契機に，大手商社を中心とした MSO（Multiple System Operator：複数地域の有線テレビジョン放送施設を所有・運営する統括運営会社）化が進み，都市型 CATV が確実に高成長を続けた．

2011 年には，放送の完全デジタル化の追い風も受け，ケーブルテレビ業界は，放送・ネット・電話の所謂，トリプルプレイ全体で順調に普及拡大し，総接続世帯数は 2,481 万世帯となり，日本の総世帯数に占める割合は 46.3%にまで成長している．その内，多チャンネルサービス，インターネット接続サービス，電話サービスの総接続世帯普及率は，各々，30.8%，20.3%，14.6%となっている [77]．ほぼ同時期には，地域 WiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）やエリアワンセグ，ケーブル WiFi（Wireless Fidelity）など無線サービスへの取り組みも開始している．このように，ケーブルサービスは，今や，単なる放送再送信サービスではなく，TV，電話，

インターネット，無線を絡めたクアドラップルサービスというリッチなメディアに成長してきたと言える．図 5.1にケーブルサービスの発展・高度化の流れを示す．

上記のように，50 年以上に渡りサービスの拡大による成長を遂げてきた CATV 業界であるが，光系サービスを中心に放送と通信の融合がますます加速し競争が激化する中で，CATV 業界が成長を持続させるためには，リッチメディアに加え，多様化するニーズに対応し地域性を生かした競争力のある高度なサービスを付加していく必要がある [77]．こうした課題認識のもと，本章では，2 節において，現状のケーブルシステムと主要技術，3 節において，先端サービスを支えるケーブル伝送技術，ネットワーク技術，端末技術の最新動向について解説するとともに，それらを踏まえた上で，4 節において，将来サービスを担う高度映像メディア，ソーシャル，レコメンド，社会インフラなどのアプリケーションサービスの進化や展望について述べる．最後に 5 節においてこれら技術，サービスのまとめを行う．

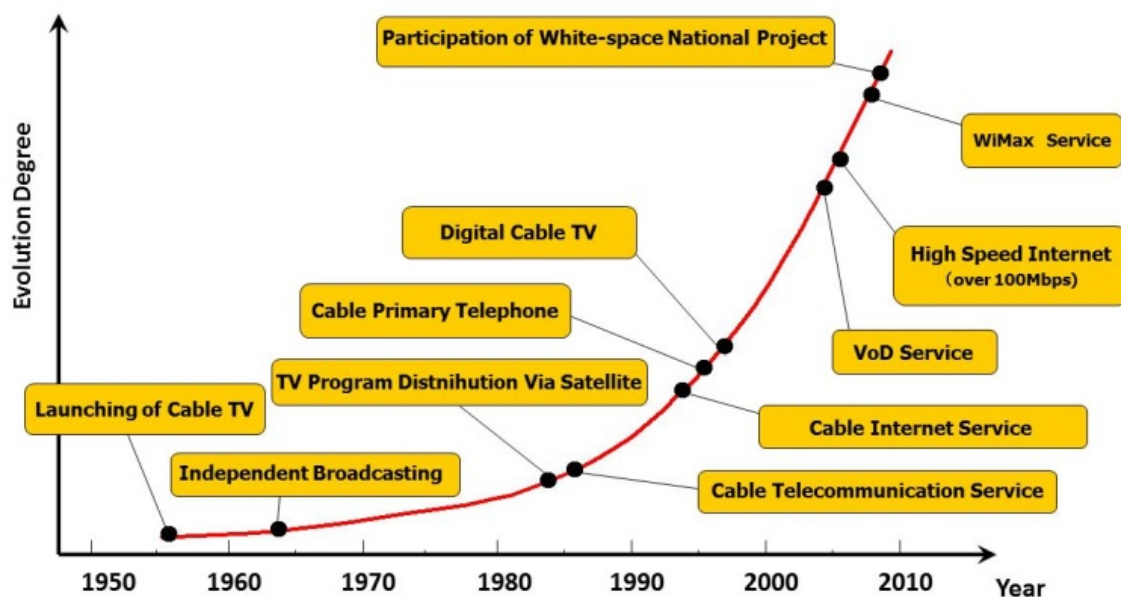


図 5.1 Evolution of cable service and technology

## 5.2 ケーブルシステムと主要技術の現状

これまで進化・発展を遂げてきたケーブルサービスを支えるシステム全体の構成図を図 5.2に示し，主要要素技術について現状を考察する．



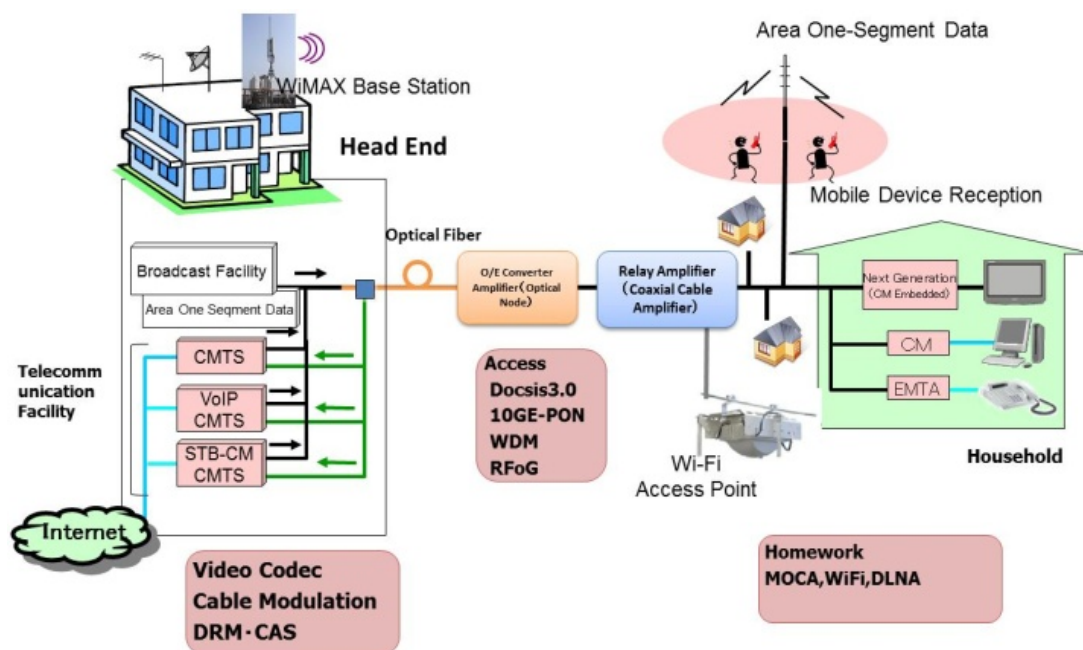


図 5.2 Current Cable TV Configuration and principal technology

### 5.2.1 映像変調方式

まず、ヘッドエンドに関して、映像用変調方式について、ケーブル特有のデジタルテレビ再送信方式であるシングルキャリア 64 / 256 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式 (通称トランスモジュレーション方式) と地上デジタル放送方式である 64 QAM マルチキャリア OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 方式 (通称パススルー方式) があり、両方式による同時再送信が、我が国特有のケーブルテレビサービスとなっている。パススルー方式は、その目的がもともととは難視聴対策用で、ケーブル用の STB がなくても地上波 TV 放送の視聴が可能となる。その一方で、帯域使用効率の点では、トランスモジュレーション方式に劣り、また、BS 放送の 1.2GHz の IF (Intermediate Frequency) 帯が HFC (Hybrid Fiber and Coax) の同軸 Coax 区間では通らないため、BS 視聴が困難な問題を抱えている。ちなみに、放送波を直接光強度変調により光ファイバーで各家庭まで配信する RF (Radio Frequency) 光伝送方式では、この BS 放送の IF 帯信号がファイバー上を通過できるので、HFC に対する一つの差別化要素となっている。一方、トランスモジュレーション方式は、ケーブル環境下では技術的にパススルー方式に対してすぐれているものの、宅内に STB を設置する必要があり、加入者の負担も大きくなる。このような映像伝送方式で提供されるケーブルの映像サービスとして、前述した地上波放送、BS 放送、多チャンネル有料放送、

ケーブル自主放送（通称コミュニティチャンネル）があり、さらに VoD（Video On Demand）サービスも IP ではなくトランスモジュレーション方式による RF で主に提供されているのが現状である。

このような状況の一方で、映像メディアの高度化は、ハイビジョンから 3D、多視点テレビ、デジタルシネマ（4K）、スーパーハイビジョン（8K）へと飛躍的に進化し続けており、後節で考察する C2 とよばれる高能率ケーブル変調方式とポスト H.264 の高能率符号化方式により 6MHz ケーブル 1 チャンネルでスーパーハイビジョン中継の見通しを得ている。

### 5.2.2 限定受信方式

ところで、これら映像サービスに対して、過去の経緯から B-CAS（BS Conditional Access System）と C-CAS（Cable Conditional Access System）という 2 種類の限定受信方式がケーブルでは同時運用されている。すなわち、地上と BS 放送に対しては、B-CAS スクランブルが、多チャンネルとコミュニティチャンネルに対しては、C-CAS スクランブルが適用されており、ケーブル STB には 2 種類のカードを挿入する必要がある。しなしながら、わが国の IP 再送信（通称 IPTV）では、B-CAS から Marlin と呼ばれる DRM（Digital Rights Management）に局側で変換を施し、暗号鍵は IP で送ることにより、CAS カードなしでのテレビ受信を可能としている。同様に、タブレットやスマートフォンでの CAS カードなしによる地上波放送の受信を可能とするため、CAS のソフト化が新 RMP という名の下で始まった。これらの動きに呼応して、ケーブルも従来の 2 枚 CAS 対応から一本化する動きがある。すなわち、従来の STB との後方互換を確保しつつ、C-CAS 一本化対応の新 STB での受信を可能とするサイマルクリプトとよばれる複数ワーク鍵配信方式が検討されている。図 5.3 に示す様に、サイマルクリプトではスクランブル鍵を B-CAS 用と C-CAS 用の 2 種類のワーク鍵で暗号化し、STB 側では B-CAS カードで復号したワーク鍵と C-CAS カードからのそれと、いずれでも、スクランブル鍵が生成できるもので、既存 STB と C-CAS 専用 STB を両立させることが可能となる。なお、著作権保護の将来視点からは、片方向対応の放送が双方向化に展開しつつある現状では、もはや CAS の使命は終わりであり、より柔軟かつ堅牢で信頼性も高い DRM 技術に完全移行すべきである。ちなみに、ケーブル DRM の視点で、マルチ OS・マルチデバイス対応、アダプティブストリーミング、ドメイン機能が必須であるとともに、マルチ DRM の概念が重要であると認識される。

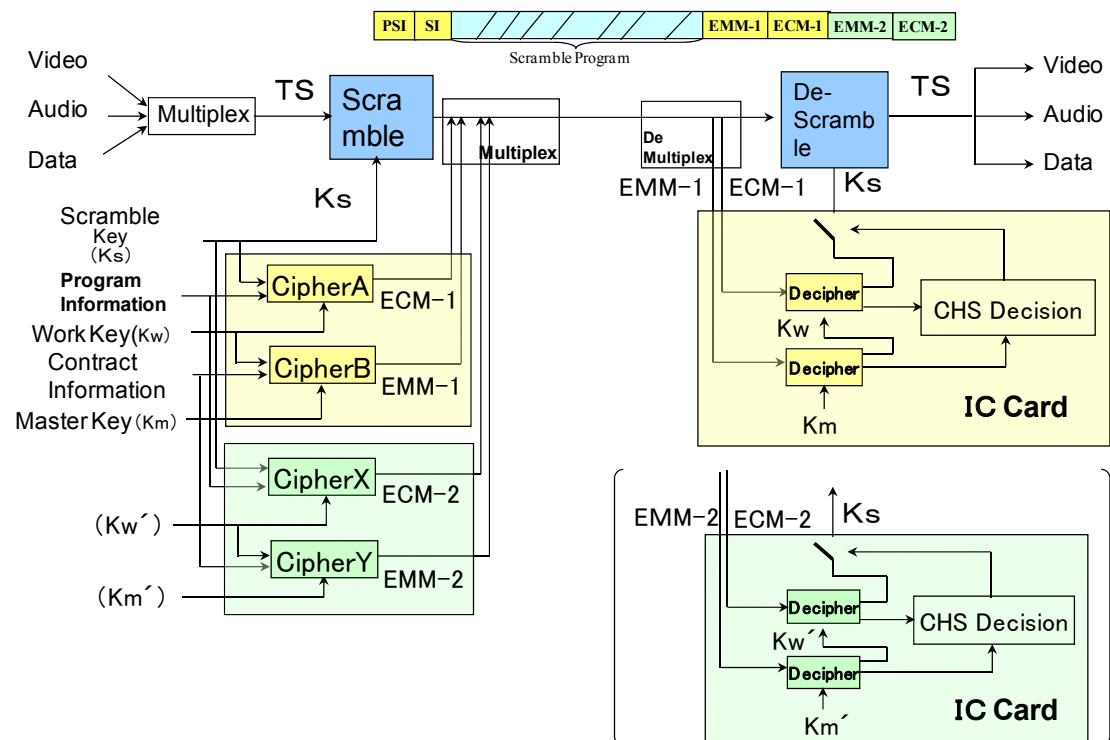


図 5.3 Simulcrypt for Multi-CAS

### 5.2.3 DOCSIS

一方、ケーブルインターネットサービスは、ヘッドエンドでの CMTS (Cable Modem Terminal System) と宅内ケーブルモデムにより提供され、データ伝送方式には DOCSIS (Data Over Cable System) と呼ばれる前述のトランスモジュレーション方式と同様な変調方式に基づいている。DOCSIS 1.0 は、下り回線は、70-770 [MHz] の映像チャンネルの中で、空いている 6 [MHz]ごとに 256 QAM 変調を行い、データレートとして 40 [Mbps]を、上り回線は、10-55 [MHz] の帯域を利用して、同じく 6 [MHz] ごとに 16 QAM 変調を行い 10 [Mbps] を実現している。その後 DOCSIS 2.0 により上り回線に多値変調などを導入することで高速化し、最大 30 [Mbps] まで増速している。さらに、DOCSIS 3.0 においては、複数の 6 [MHz] チャンネルを統合（ボンディング）して、下り回線最大 8 チャンネル、上り回線最大 4 チャンネルのボンディングで 320 [Mbps], 120 [Mbps] を実現している。ケーブル上り回線では、ケーブル特有の流合雑音の影響により、回線品質が低くなるため、多値化には限界があり、さらに利用帯域が狭いため、下り回線と比較して、データレートは低くなり、FTTH に対して大きなハンディキャップとなる。P2P (Peer to Peer) , クラウド, ウェブアプリケーション, WiFi デ

ータオフロードなどにより今後増大が予想される上りトラフィックに対応するための何らかの手立てが必要と認識される。

#### 5.2.4 HFC・RFoG・PON

HFC 環境での現状のデータ速度は、ノード分割により数百程度の各家庭に時分割されるため、一家庭あたりのデータ伝送速度は平均的に言えば大きく低下する。次節では、ケーブルアクセスの高速化を図る次世代のケーブル伝送方式を考察するが、この方式や Fiber Deep と呼ばれる小セル化（少ノード化）をもってしても、通信の主流となっている FTTH による PON（Passive Optical Network）システムには遠く及ばないのが現状と言える。今後予想される通信トラフィックの増大を考えた場合、HFC に変わるオール光化は、ケーブルでは必須の施策と判断される。しかしながら、この場合、ヘッドエンドの現行設備である CMTS ならびに家庭に設置されているケーブルモデムをはじめとする DOCSIS 関連システムをすべて PON システムに置換する必要がある、ケーブル事業者の大きな経済的負担となる。そこで、現状の DOCSIS システムを保持しつつ、ネットワークのみ光ファイバー化し、上に DOCSIS 変調波を流す、RFoG(RF over Glass)と呼ばれる方式が、GE-PON（Gigabit Ethernet-Passive Optical Network）へのマイグレーション技術として実用化されている。図 5.4には、この RFoG と PON へのマイグレーション構成を提案する。すなわち、ヘッドエンドにおいて、光送信機と RFoG 受信機ならびに EPON（Ethernet Passive Optical Network）を設置し、RFoG 用と EPON 用の各上下回線用光波長 4 波を用意し、ケーブルモデム既設置宅には RFoG ONU（Optical Network Unit）を、新規 EPON 設置宅には、V-ONU と EPON ONU を設置することにより、DOCSIS と PON の共存が可能となる。なお、RFoG では、利用可能な周波数が、同軸より拡大されるため、DOCSIS 3.0 によるチャネルボンディングがしやすく、IF 帯まで利用可能周波数が伸びるため BS 放送のパススルーも可能となるメリットがある。なお、ヘッドエンドで IP 電話用とインターネット用とで複数 CMTS が導入されている場合には、CMTS が独立に制御されているため、上り回線で R-ONU の同時光送信が発生し、この光ビート障害が CN 比を大きく低下させる。これに対して、光受信電力を 4 dB 以内とすることで、実質的に問題回避が図れるという実証実験報告がなされている。

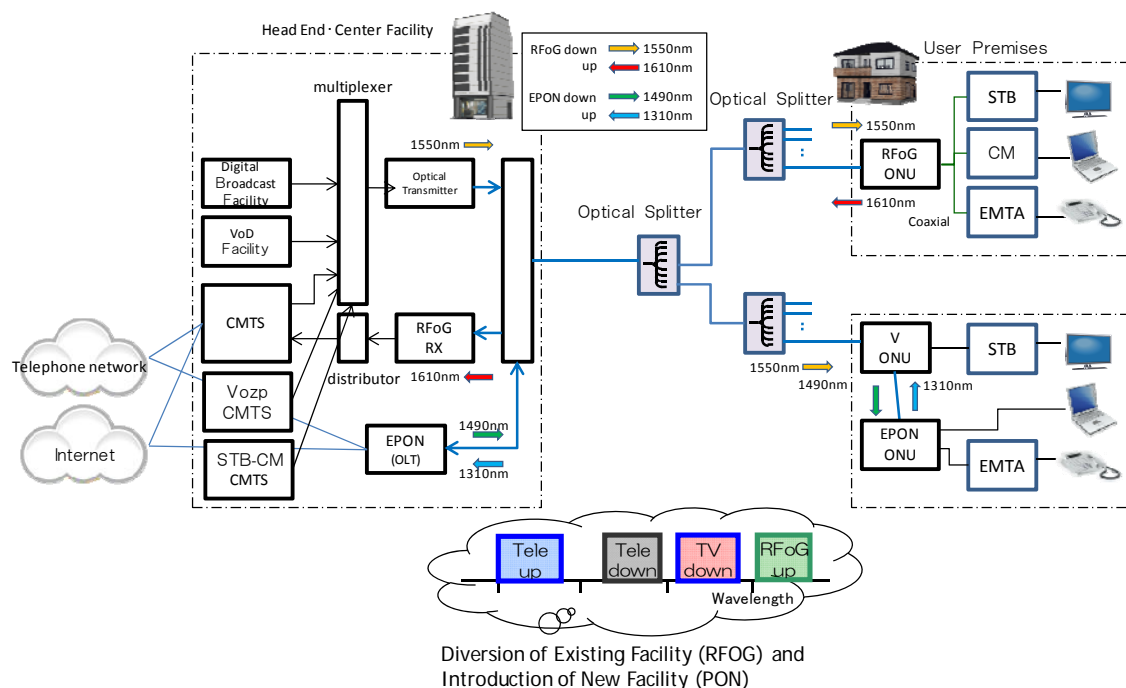


図 5.4 Infrastructure Migration of CATV and FTTH

### 5.2.5 ケーブルホームネットワークと WiFi

ホームネットワークに関しては，825 [MHz] – 975 [MHz] のうちの 50 [MHz] 帯域を使った MOCA (Multimedia over Coax Alliance) と呼ばれる業界団体標準の同軸ケーブル用の伝送方式により，最大 400 [Mbps] の伝送レートが実現可能との報告がある (MOCA 2.0)．しかしながら，MOCA 仕様の詳細統一化がメーカー間でうまく行えなかったため，異なるメーカー機器との相互接続性に大きな問題を生じた．このため，近年その普及が著しい WiFi がケーブルホームネットワークの主流となりつつある．実用化されている最新 WiFi 仕様である IEEE802.11n では，帯域 20 [MHz] の 2 チャンネルボンディングと 4x4 MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) により 600 [Mbps] のレートを実現しており，FTTH による高速アクセスにも十分対応可能となっている．さらに，2013 年承認予定の IEEE802.11ac では，MIMO の 8x8 への拡大，OFDM の多値化 (64 QAM から 256 QAM)，チャンネルボンディング数の拡大 (8 チャンネル) などにより，最大 7 [Gbps] のレートが実現されることになる．このようなケーブルホームネットワーク環境を使ったアプリケーションとして，センサー系デバイスと STB との情報通信を行うことにより，電力の見える化，ヘルスケア，ホームセキュリティなどスマートホームサービスがある．特に，情報家電間の映像音声の情報交換を目的とした規格である DLNA (Digital Living Network Alliance) による，ケーブルコンテンツのコ

ピーやムーブあるいは、別室での STB によるリモート視聴が、ケーブルの世界では、最も期待されている。

### 5.2.6 STB

通信事業者による IPTV サービスや ASP 事業者による Over The Top と呼ばれるネット動画配信にケーブル事業者として対抗するうえで、従来の放送受信を主目的とした、いわば片方向受信専用のケーブル STB に変わり、通信機能も搭載した、放送 (RF) と通信(IP)のハイブリッドタイプの STB が主流となりつつある。また、ハードウェアオリエンテッドのタイプからソフトウェアダウンロード指向に STB のインプリメンテーションも変わりつつある。このソフトウェア指向型では、STB に内蔵するアプリケーションプラットフォームは 2 つに大別される。すなわち、Java アプリを実行する手続き型環境と Web アプリを実行する宣言型環境となる。次節では、ケーブル業界の次代のサービスを担うために、日本ケーブルラボで開発された次世代 STB を紹介する。なお、STB と対抗するネットワーク側プラットフォームは、番組・広告レコメンドサービス、高速番組検索サービス、ネットスーパー、リモート診断など各種ケーブルサービスの高度化を図るうえで必要不可欠となり、NTT の NGN (Next Generation Network) , NHK のハイブリッドキャストに類する、ケーブル版のプラットフォームが現状のインフラビジネスからの脱却上も必要不可欠と言える。

## 5.3 技術展望

2 節で述べたケーブルシステムの構成や現状に対して、今後のサービス多様化に対応するために必要な技術や方式に関して紹介するとともに、これらを実現するプラットフォームの提案を行う。

### 5.3.1 ケーブル伝送技術

わが国のケーブルテレビの伝送方式であるトランスモジュレーション方式は、ITU-T 勧告 J.83 の AnnexC で欧州方式 DVB-C (Digital Video Broadcasting - Cable) の AnnexA とほぼ同一仕様となっている。すなわち、変調方式は最大 256QAM、誤り訂正は RS(204,188)であり、伝送帯域のみが 6 [MHz]と 8 [MHz] で異なっている。この DVB-C の次世代版として、2011 年 4 月に DVB-C2 が規定された。表 5.1にその比較表を示す。おもな相違点として、誤り訂正に LDPC (Low Density Parity Check Code) を、搬送波に

マルチキャリア (COFDM) を導入し、変調多値化も 4096 シンボルに拡大している。さらに、チャンネル間ボンディング時のキャリアの追加と電力の最大変位 (Peak to Average Power Ratio) を抑圧するダミーキャリアの追加なども施されている。この方式を、我が国のケーブル伝送方式に適用した場合の性能改善を示す結果を図 5.5 に示す。現行方式に比べて所要 CN 比でおよそ 6 [dB] のゲインがあり、ビットレート換算で 15Mbps の高速化が図れ、256 QAM で 42 [Mbps] が同一 CN で 1024 QAM で 52 [Mbps] を実現可能となることが分かった。前節で説明した我が国特有の事情であるパススルーとトランスモジュレーションの両方式併存は、OFDM の高度化の視点で、欧州次世代地上デジタル DVB-T2 とケーブル C2 が統合の流れにあることから、OFDM 単一方式に統合すべきであり、チャンネルボンディングには、我が国特有のセグメント方式を利用するのが得策と判断される。

表 5.1 Comparison of DVB-C and C2

	DVB-C	DVB-C2
Input Interface	Single Transport Stream (TS)	Multiple Transport Stream and Generic Stream Encapsulation (GSE)
Modes	Constant Coding & Modulation	Variable Coding & Modulation and Adaptive Coding & Modulation
FEC	Reed Solomon (RS)	LDPC + BCH
Interleaving	Bit-Interleaving	Bit- Time- and Frequency-Interleaving
Modulation	Single Carrier QAM	COFDM
Pilots	Not Applicable	Scattered and Continual Pilots
Guard Interval	Not Applicable	1/64 or 1/128
Modulation Schemes	16- to 256-QAM	16- to 4096-QAM



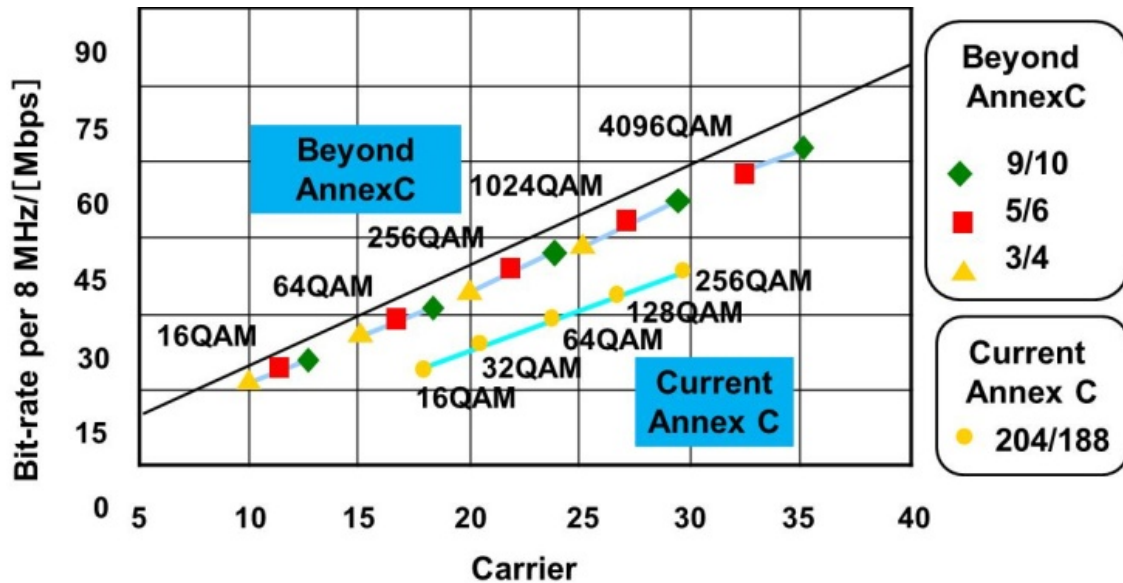


図 5.5 Performance comparison of Beyond and Current Annex C

### 5.3.2 CDN とホームネットワーク

最近の映像サービスに関する環境変化に伴い、従来を大きく超える多チャンネルサービスが重要な競争要素となっている。しかし、一方で、チャンネル数の増加とともに、放送型の同報サービスの通信帯域利用効率が低減する傾向となる。そのため、オンデマンドによるストリーミング配信が必要となる。

ストリーミング配信では、ユーザ端末からのリクエストに応じて映像サーバから個別に映像データの配信を行う必要があるが、中央にある単一のサーバから配信すると、サーバの負荷およびサーバから受信 STB に至る経路のネットワーク帯域負荷が問題となる。また、他社ネットワークを中継に用いる場合、トランジットコストも負担となる。このため、配信サーバを複数配置する大域的負荷分散に加えて、ヘッドエンド等にキャッシュサーバを設けることで、上記の課題を解決すると共に、利用者にとっても待ち時間が短縮されることによるユーザ体験向上を図る。

キャッシュそのものは従来からある概念であるが、最近のキャッシュ技術には、CMTS 等のユーザに近い地点でビデオストリーミングのセッションを監視し、キャッシュにヒットした場合は同地点から配信するようにセッションを引き継ぐことで、ビデオストリーミングサーバや表示クライアントに変更を要しない”transparent caching”が実現されている。これにより、コアネットワークおよび配信サーバに求められる容



量を大幅に削減できると共に、待ち時間を短縮することでユーザ体験の向上に貢献できる。

一方、ホームネットワークの代表的な構成は、アンテナで受信した放送電波を宅内の各部屋に分配する同軸ケーブルに基づくものである。アンテナへの接続を切り離し、CATV 網と接続することにより、各部屋で番組視聴を可能としている。最近では、サービスの高度化に伴い、パススルーやトランスモジュレーションによる映像番組伝送だけでなく、高速なデータ通信も宅内で必要となっている。ITU-T において、同軸だけでなく電力線や通信線を用いた通信も含む総合的な伝送規格 G.hn (G.9960, G.9961, G.9972) を規格化している。G.hn は、データ伝送速度が高く、雑音に対する耐性が高いことも特徴である。G.hn 規格では、データのやりとりに使う周波数帯域幅として、25 [MHz]幅、50 [MHz] 幅、100 [MHz] 幅の3つを規定しており、100 [MHz] の周波数幅を使ったときの物理層におけるデータ伝送速度は、最大 1G ビット/秒に達する。実効データ伝送速度は媒体によって異なり、同軸ケーブルのとき 800 [Mbps]、電話線のとき 400～500 [Mbps]、電力線のとき 300～350 [Mbps] 程度である（いずれも、UDP 層における値）雑音耐性が高い理由は、変調に直交周波数分割多重方式（OFDM）を採用していることや、誤り訂正符号に「LDPC（Low Density Parity Check）」を使っていることによる。

### 5.3.3 次世代 STB “ハイブリッド Box”

放送信号を受信再生するための従来のケーブル STB とは異なり、放送受信の高度化やインターネット技術を利用した様々な付加価値サービスを提供可能とするための次世代 STB が、2011 年 4 月、日本ケーブルラボ J Labs SPEC-023 「ハイブリッド Box」として規格化された。2012 年 5 月には、ITU-T SG 9 において ITU-T 勧告 J.296 として国際標準化された。

本ハイブリッド Box は、従来のケーブル STB に対し以下に示すコンポーネント及び機能を備えることを特徴とする。

2 つ以上の RF チューナー

DOCSIS ケーブルモデム

WiFi アクセスポイント及びクライアント

ホームネットワーク通信 I/F (Ethernet LAN)

番組予約録画機能

トランスコーダー

CPU, RAM 及び Flash メモリ, 及び, GPU

アプリケーション実行環境 (OS, 及び, API)

リモート管理機能 (TR-069 による)

オーディエンスメジャメント機能

表 5.2に, 想定される技術スペック (例) を示す. また, 図 5.6にハイブリッド Box の機能構成図を示す.

表 5.2 Hybrid Box specification (example)

Item	Description
CPU	TI OMAP 4460 for Android Custom LSI based on ARM for TV
OS	Android 4.0 (Ice Cream Sandwich)
RAM	1 GB
Flash ROM	4 GB
Cable Modem	DOCSIS 3.0 4×4
WiFi	IEEE 802.11a/b/g/n 2.4GHz and 5GHz
Ethernet	2 ports (WAN and LAN)
RF Tuner	Triple tuners
Transcoder	H264 720p
Home Networking	DLNA + HDRL (JLabs SPEC-020)

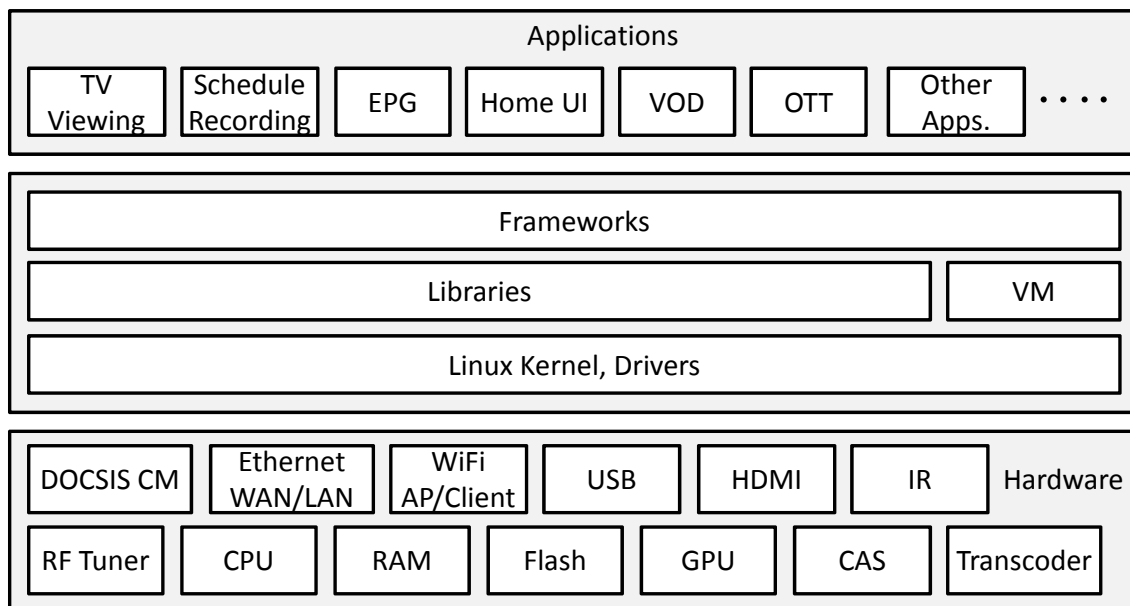


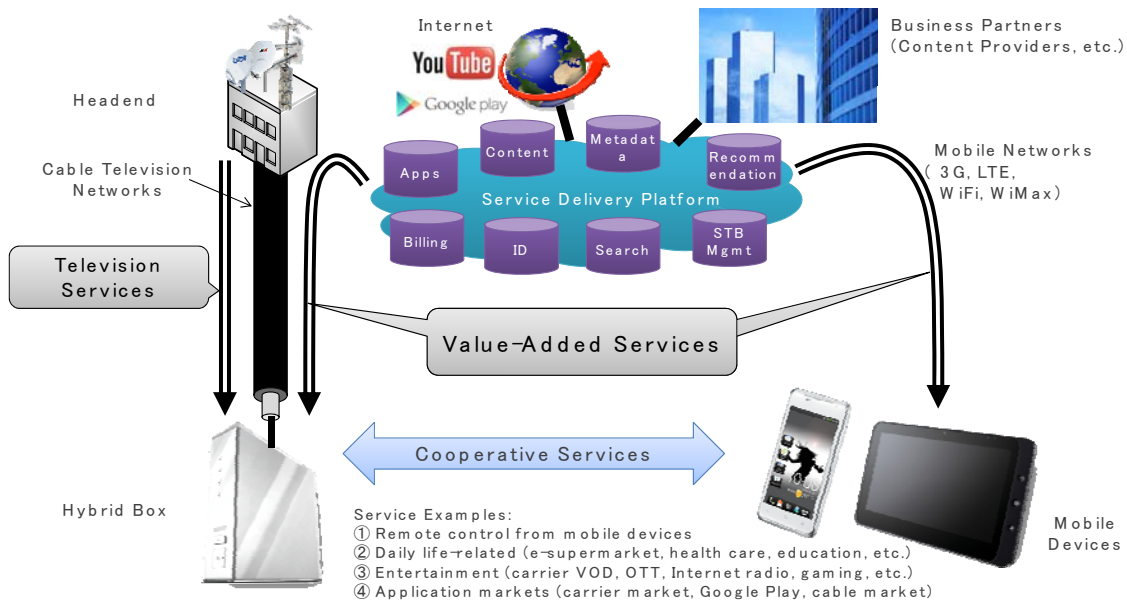
図 5.6 Functional diagram of Hybrid Box

図 5.6が示すように、様々な機能やインターフェースを実現するハードウェアの上に、ソフトウェアレイヤとして OS、ライブラリ、及び、アプリケーションフレームワークが存在する。ハイブリッド Box 技術仕様では、手続き型及び宣言型のアプリケーション環境（API）が規定されている。これらの API の上で、テレビ視聴、ホーム UI、VOD といった様々な機能やサービスが、アプリケーションとして提供される。さらに、5.4.2 項～5.4.5 項で後述されるような次世代サービスの提供も可能である。

ハイブリッド Box の最も重要な特徴の 1 つは、ハイブリッド Box 上で提供される機能やサービスが、放送番組の視聴や録画済み番組の再生といった一部のものを除き、ほとんど全てサービス提供プラットフォーム（SDP）と連携して提供されることである。表 5.3に、各機能・サービスに対するプラットフォームの役割の例を示す。このようにハイブリッド Box においては、SDP が非常に重要な役割を担う。さらに SDP は、ハイブリッド Box とその他デバイス（スマートホンやタブレット等）との紐付けを提供し、これにより、モバイルデバイスによるハイブリッド Box の操作や、セカンドスクリーンアプリケーションも可能となる。ケーブルテレビ網における SDP、ハイブリッド Box、並びに、モバイルデバイスの関係を図 5.7に示す。

**表 5.3 Relationship of applications and SDP (non-exhaustive)**

Application, functionality or service	Role of SDP
General	1: User id management 2: Billing
Home UI	1: Layout and appearance management 2: Association with a mobile device (as a remote)
Schedule recording	Remote management of schedule recoding from various devices
EPG	Supplemental and enhanced information in addition to SI
VOD	1: Content delivery 2: Viewing synchronization between Hybrid Box and a mobile device 3: Content recommendation
OTT video	1: Interconnection between Internet and cable networks 2: Content search 3: Content recommendation
Remote management	1: STB management server (auto-Configuration server) 2: Management user interface to operators
Application market	1: Interconnection with open markets 2: Proprietary application market
Health care	1: Secure storage of vital data records 2: Feedback to a user, e.g., visualization, advice, counseling.
Gaming	1: Advertising delivery 2: Score management 3: Suspend and resume
Other cloud-based application	1: Service and content delivery 2: User data storage 3: Various data processing



**图 5.7 Service provision architecture**

## 5.4 サービス展望

3 節で紹介した技術および提案するプラットフォームの上で実現可能なサービス，ならびにそれを支える個別の新技术について述べる．

### 5.4.1 高度映像メディアサービス

本節では，将来の CATV サービスとして実現が期待される高度映像メディアのうち，8K 映像，立体テレビ，自由視点テレビについて述べる．

放送の急速なデジタル展開に呼応して，全世界的にハイビジョンが普及した．さらに近年では，立体 TV 放送がサービスされているほか，より高精細な映像表示を可能にする 4K テレビが商用化されるなど，映像メディアの高度化は，目を見張る勢いで進展している．このような状況の中，次世代の究極の映像メディアとして，現行ハイビジョンに対して，水平・垂直の空間解像度が各 4 倍，つまり合計で 16 倍，4K テレビと比較しても 4 倍に相当する 7680 画素×4320 ラインのスーパーハイビジョン（以下，水平画素数を略して 8K 映像と呼ぶ）が位置づけられる．8K 映像を含む超高精細映像のパラメータは ITU-R Study Group 6 において規格化が進められており，空間解像度，フレームレート，カラリメトリを含む勧告化が予定されている [78]．

この 8K 映像をハイビジョンと同様に実用化フェーズに押し上げるためには，画像圧縮が必要である．現行最高性能を有する国際標準方式である H.264 について，映像解像度と所要ビットレートとの関係を図 5.8 に示す．H.264 の後継となる次世代映像符号化方式により到達が予想される水準についても同図に重ねて示す．同図より H.264 による 8K 映像の低ビットレート化は 150 [Mbps] が限界となっており，現行の放送インフラで扱うのは極めて困難である．一方，CATV サービスとして実現する場合，将来的には 5.3.1 項で紹介したとおり，6 [MHz] 帯域 1 チャンネルで 60 [Mbps] を確保できる見通しである．よって，8K 映像のデータ量をこのレベルに圧縮できれば，CATV サービスとしての実現性を高められる．筆者らはこの状況に鑑み，次世代映像符号化方式の研究に先行して取り組み，新規要素技術の導入によって，8K 映像では 70 [Mbps] で放送品質を満足する圧縮技術を開発した [79]．今後さらなる高画質化チューニングによって，60 [Mbps] での放送品質確保が期待できる．筆者らが開発した次世代映像符号化方式と H.264 の対比を表 5.4 に示す．8K 映像を含む大画面映像のリアルタイム伝送システムについて，画面分割を伴う並列処理により実現するためのシステムアーキテクチャが ITU-T Study Group 9 において勧告化されている [80]．筆者らは，上述の符

号化方式を，ITU-T 勧告に完全準拠した形での装置化に成功しており [81]，衛星伝送実験を通じてその安定性および実用性を検証済みである。

一方，立体テレビ放送に関して，現行の 2 眼式ディスプレイでは，3D メガネ装着による煩わしさがあるため，将来的には裸眼 3D ディスプレイへの移行が予想される．現行の民生用裸眼 3D ディスプレイは，9 視点程度の視点数をカバーし，視聴者の位置に応じた見え方の変化を再現するが，良好な立体感が得られるスイートスポットが狭いという問題がある．これは視点数の少なさに加え，ディスプレイ入力の制約上，2 眼式の 3D 映像から補間により 9 視点への変換を行っていることによる．これを改善する狙いから，将来の立体テレビの信号フォーマットは，多視点の映像および奥行きデータを包含する形に拡張されると予想される．これに対応する圧縮技術を国際標準として規格化するため，ISO/IEC SC29 WG11 (MPEG)および ITU-T SG16 の連携により JCT-3V が発足した．CATV の将来予測として，前述の 60 [Mbps]で扱える HDTV サイマルキャスト放送のチャンネル数は，図 5.8より 15 となる．つまり，ディスプレイ入力の視点数が現状の 2 視点から 15 視点に拡張でき，ディスプレイ技術の進化による表示視点数増加との相乗効果として，立体感の飛躍的改善が期待できる．15 視点はサイマルキャストの試算であるため，奥行きデータの増加分，視差補償予測による映像データの削減分をともに考慮していないが，一般に後者は前者を上回るため，チャンネル数の試算としては安全側となる．

さらに立体テレビとの併用により，奥行き感や立体感に加えて，視聴者とのインタラクティブ性の追求を狙った映像メディアとして，自由視点テレビが注目されている [82]．機能面では，人物のように複雑な被写体が複数存在する場面を全周囲から撮影した多視点映像を対象に，通常はカメラを配置不可能な 3 次元空間中に入り込み，被写体群の間を通り抜けるウォークスルーや，上空からの俯瞰映像のように，高さを自在に制御可能なフライスルーへの期待が高い．このような機能実現により，例えば，サッカー等のスポーツ中継において，特定の選手や審判の視点を再現でき，新たな視聴体験を提供可能となる [82]．自由視点映像のネットワーク配信形態として，屋内の比較的狭い空間に限定すれば，オブジェクトごとの 3 次元モデルおよびテクスチャデータを多重化し，マルチキャスト配信する形態が一般的である [83]．一方で，スタジアムなど屋外大空間を対象とする場合，あらゆる視点移動を想定した，全データの一直配信は非現実的であり，視点移動の粒度や位置に応じたスケーラビリティを有するデータフォーマットの採用が望ましい [84]．CATV は，放送波と IP 回線の併用によっ

てスケーラブル配信への適応性に優れており，自由視点テレビのサービス基盤として高いポテンシャルを有している。

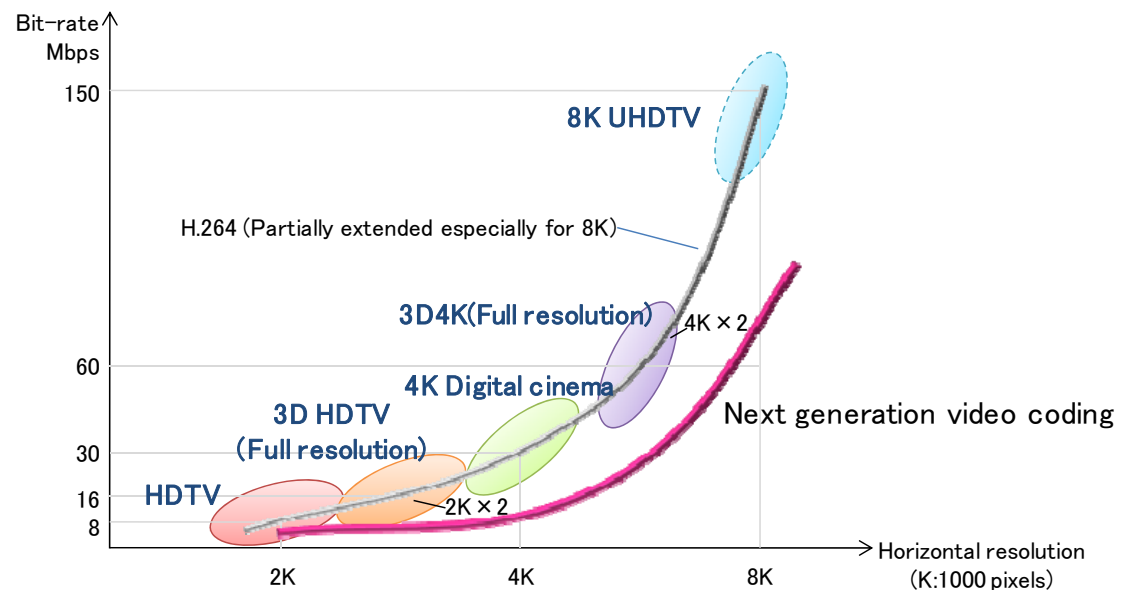


図 5.8 Comparison of coding performance

表 5.4 Comparison of compression coding technology

	Next Generation (Difference from H.264)	H.264
<b>MC+DCT</b>	Extended block size and adaptive orthogonal transformation	Uniform macroblock size and DCT block size
<b>Intra prediction</b>	Inter channel prediction among chroma components	Prediction with single chroma component
<b>In-loop filter</b>	Adaptive loop filter for image restoration on decoded picture	De-blocking filter
<b>Optimization</b>	Global optimization to minimize perceptual distortion	Local optimization based on R-D optimization
<b>Application</b>	Mobile～UHDTV	Mobile～HDTV

#### 5.4.2 フレキシブル視聴サービス

映像コンテンツ配信において，通信技術と端末性能の進化に伴い，いつでも，どこでも，どんなデバイスでもコンテンツが視聴できるフレキシブルな視聴サービスが広がると考えられる．また，一般のユーザの手によるものも含めて映像番組以外の Web コンテンツの広がりから，コンテンツ視聴において複数のデバイスを用いて，様々な

情報を組み合わせたコンテンツ視聴スタイルも一般化する。前者の例としては、映像番組を自宅で視聴中に、外出のために視聴を中止し、外出先から携帯端末により中断箇所から視聴を再開するサービスがある。更には、コンテンツのダイジェスト化も行い、すきま時間に携帯端末で見たコンテンツの本編がワンタッチで自宅テレビで見られる連携も考えられる。一方、後者に関しては、映像コンテンツをテレビで視聴中に、その映像コンテンツに関連した情報、例えば番組中で紹介された商品の口コミ情報と購買ページが表示されるものがある。

要素技術として、1) メディアトランスポートに関わる事項、2) 権利管理、3) マルチデバイス間通信がある。1)に関しては、主に利用する端末の接続ネットワーク、復号能力、表示能力の差異を吸収する目的で、映像コンテンツの符号化速度、解像度のアダプテーションが必要である。2)については、様々な場所、NW、デバイスでの視聴にあたっての視聴権管理、ならびに視聴済み区間等の視聴状況把握が必要である。その中には、コンテンツ保護のための暗号化ならびに、暗号復号鍵管理からなる DRM システムが含まれる。3)に関しては、以下で詳述するデバイス間での表示内容連動・同期メカニズムが必要となる。

図 5.9に、複数情報を連動させる視聴スタイルのためのシステム構成例を示す。オンエア中の映像番組と連動させる場合であれば、時刻に基づく同期が可能であるが、録画済みコンテンツのタイムシフト視聴などを考慮すると、コンテンツに時刻を示す電子透かしを埋め込んでおき、テレビから再生された出力(オーディオ等)から携帯端末で透かしを検出して、時刻同期を行う方法がある。あるいは、電子指紋方式により、予め番組中のシーン毎のオーディオ信号特徴を DB に登録しておき、テレビから出力されるオーディオ信号特徴を携帯端末で分析し、DB クエリを行うことによりシーン(時刻)を特定する ACR (Automatic Content Recognition) 技術を利用する。こうした ACR による同期メカニズム、より具体的にはオーディオ信号特徴と番組内経過時間の組がオープンに提供されることで、3<sup>rd</sup> party による映像コンテンツへの付随情報提供が容易に実現される。

こうした、時間と場所によらず、かつ、OTT と既存メディアの相乗効果により、より多様なユーザ体験を与えるメタコンテンツがオープン環境で制作されるようになる。



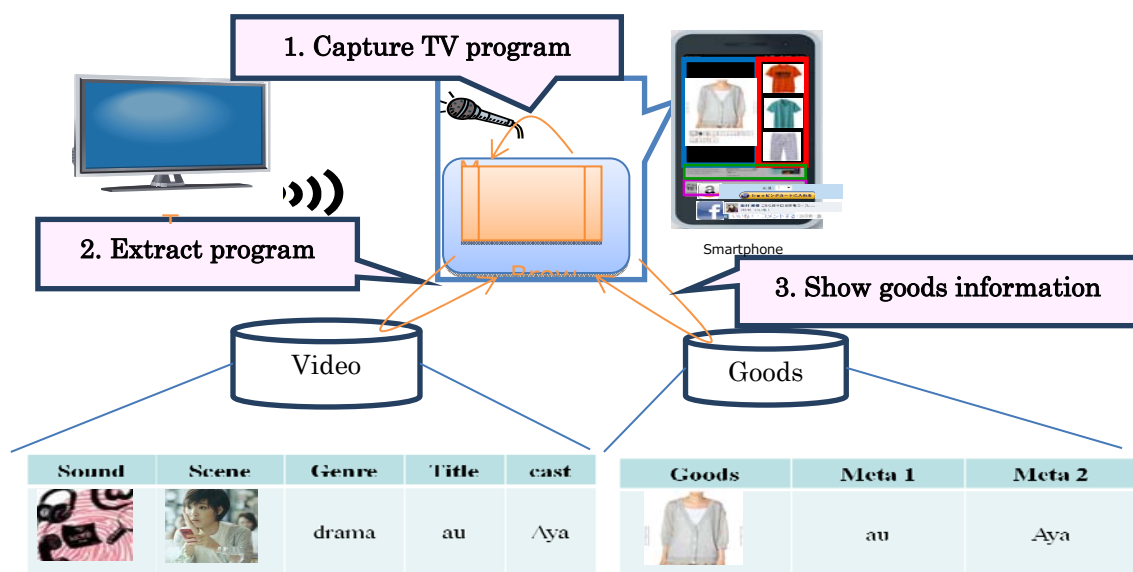


図 5.9 ACR による複数情報連携提示サービス

### 5.4.3 レコメンドサービス

TV チャンネルや番組数の飛躍的な増大は、視聴者の選択範囲を広げ、映像サービスの可能性を広げる上では重要な要素であるが、一方で視聴者にとっては視聴希望番組の選定が困難になる、番組提供者にとっては被利用機会が激減するなどの課題が顕在化している。TV 番組表の改良や効果的な番組 PR の導入による解決も図られているが、今後のさらなる選択肢の増大に対して、決定的な解決策とはならない。そこで、視聴者の嗜好に応じた番組を事業者あるいは視聴システムから提案するレコメンドサービスが大きく注目されている。

一般的な商品レコメンドなどにおいては、利用者の過去のサービス利用・購買行動から提案を作成する履歴ベースレコメンド、利用者の年代・性別等の特性を考慮する属性ベースレコメンド、推薦対象商品などの種類等に基づくコンテンツベースレコメンドが、単体あるいは組み合わせられて利用され、利用者ごとに異なる対象の推薦が行われる。

TV 番組の推薦においてもこうした手法が有効であるが、固有の課題として、家族等の複数視聴者から構成される環境での利用者識別の問題が存在する。特に、個々の利用者ごとの嗜好の相違に加えて、利用者が複数同時に番組視聴する際には、個々の嗜好の単純和や平均とは異なる行動を示すことが知られており、視聴者群の把握が高精度なレコメンドにとって重要となる。これらの課題を解決する手法として、ほぼ個人

に1つ存在するデバイスとなりつつある携帯電話やスマートホンを所在検知デバイスとして利用することで、家族構成に適応した番組レコメンドを実現する手法が有効である(図 5.10, 図 5.11) [86] .

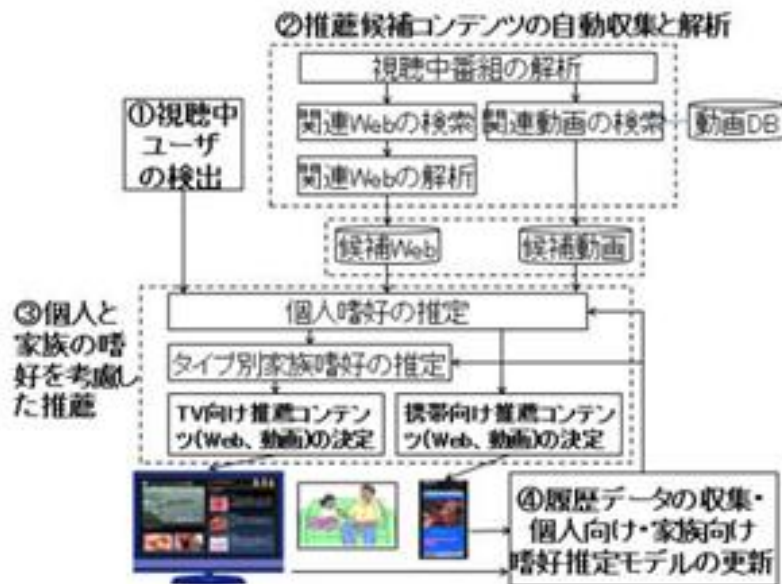


図 5.10 Processing Flow of TV-Viewing Support System

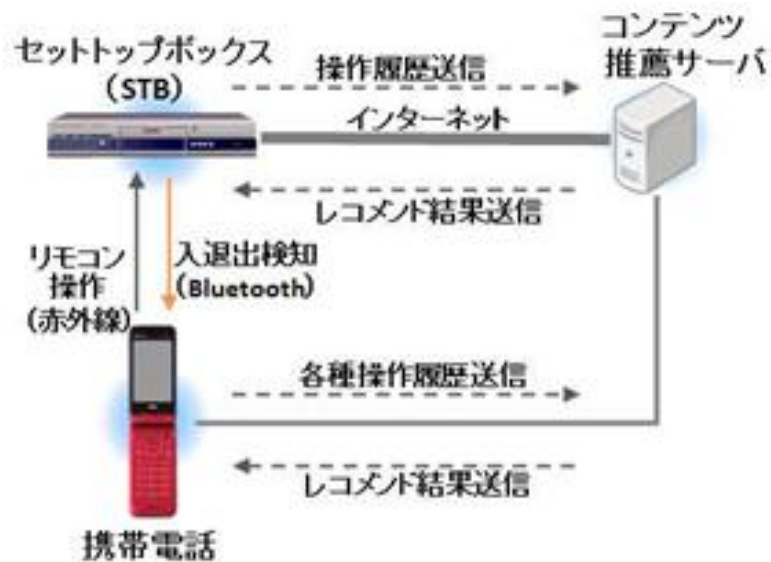


図 5.11 System Component Connection

#### 5.4.4 ソーシャルメディア連携サービス

主体コンテンツとしての TV 番組視聴時に、従属情報利用を目的としたネットサービスを利用するスタイル「新・ながら視聴」が浸透している。その1つに視聴番組に関連したソーシャルメディアを TV 番組進行と同期して活用する手法がある。従来より、書き込み掲示板等の利用は見られたが、近年、特にモバイル端末等からの投稿が容易に行えるメディア「Twitter」での情報共有が急速に進展している(図 5.12)。特に、番組進行に合わせた投稿文面を友人・知人やその他の同時視聴者と共有する基本機能に加え、より高度な機能として、多視聴者からの投稿内容を言語解析と統計処理により加工集計することで、番組への意見や感想を、リアルタイムで定量的に共有する、疑似的なパブリックビューイング体験型システムが有望視されている。

技術的には、大量な投稿文書の中から高速に、TV 番組名などのメタデータにより共通の話題の文書のみを抽出・収集し、言語解析により、意見の Positive/Negative 等の判定を行う。さらに、視聴者属性に応じて意見の分類を行うことで多様な視聴者の意見を分類するため、視聴者属性推定（年代、性別、居住地、関心事、等）を行う [85]。ここで、投稿者の属性は、同一投稿者の過去の投稿文書に出現する特徴的な単語の分布により、推定される。

属性単位での意見の推移を一覧性が高い可視化表示により、リアルタイムに確認しながら、番組視聴することにより、ソーシャルなつながりを実感できる TV 番組視聴を実現する(図 5.13)。

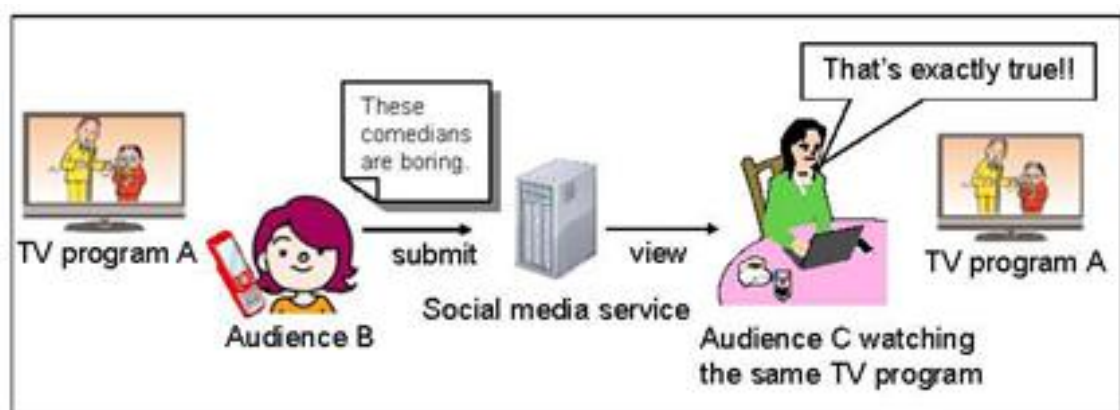


図 5.12 Social Communications Related to Broadcast TV Programs

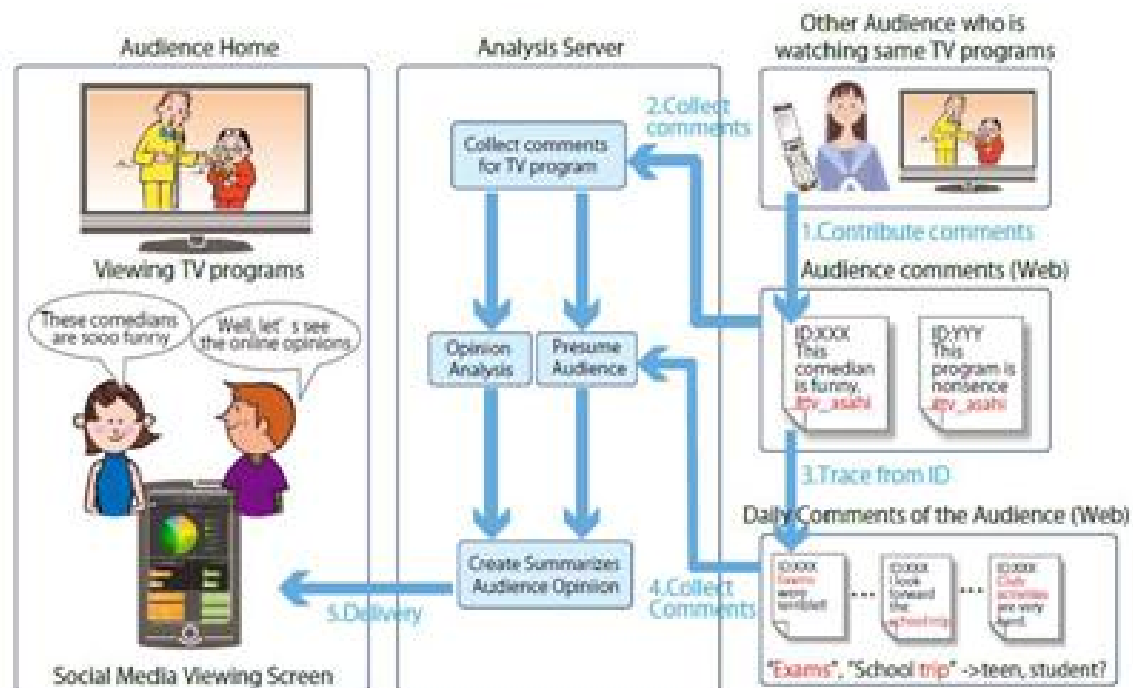


図 5.13 Configuration of Social Media Visualizing for TV Programs

#### 5.4.5 社会インフラサービス

ケーブルテレビにおける社会インフラサービスの一例として、電力見える化、ネットスーパー、ヘルスケアについて述べる。これらサービスでは、各種センサー系デバイスや IP 系クラウドとの情報通信を可能とし、高度な映像処理アプリケーションの実行環境も装備したハイブリッド型の次世代 STB を中核として構成されている。

まず、電力見える化については、東日本大震災以降の電力需給の逼迫を背景に、スマートメーター導入の機運は一層の高まりを見せており、家庭に代表される需要家側の節電意識の高まりや電力システム改革の観点から、電力使用情報を見る化することによる一層の節電促進のためのツール、及び電力使用量を元にした柔軟な電気料金メニューを実現するデマンドレスポンスのツール、としてのスマートメーターの機能に期待が集まっている [87]。筆者らが提案する電力消費の見える化システムの構成図を図 5.14 に示す。本提案システムでは、次世代 STB が家庭内の電力使用量を収集し閲覧可能とするとともに、クラウドサーバに情報を上げることで、外出時のスマートフォンやタブレット端末から遠隔で消費・発電量の閲覧やエアコン等の操作を可能としている。また、クラウドサーバから電力会社に接続することで、デマンドレスポンスに必要な情報をやり取りすることもできる。電力見える化の表示項目としては、電力の消費・発電量以外に、電気料金、蓄電池稼働状況と交換時期通知、エリア全体の需

給情報，太陽光パネルの故障有無と清掃の要否通知，目標設定値を超えた場合の注意表示，計画停電情報，契約種別，等を想定している。

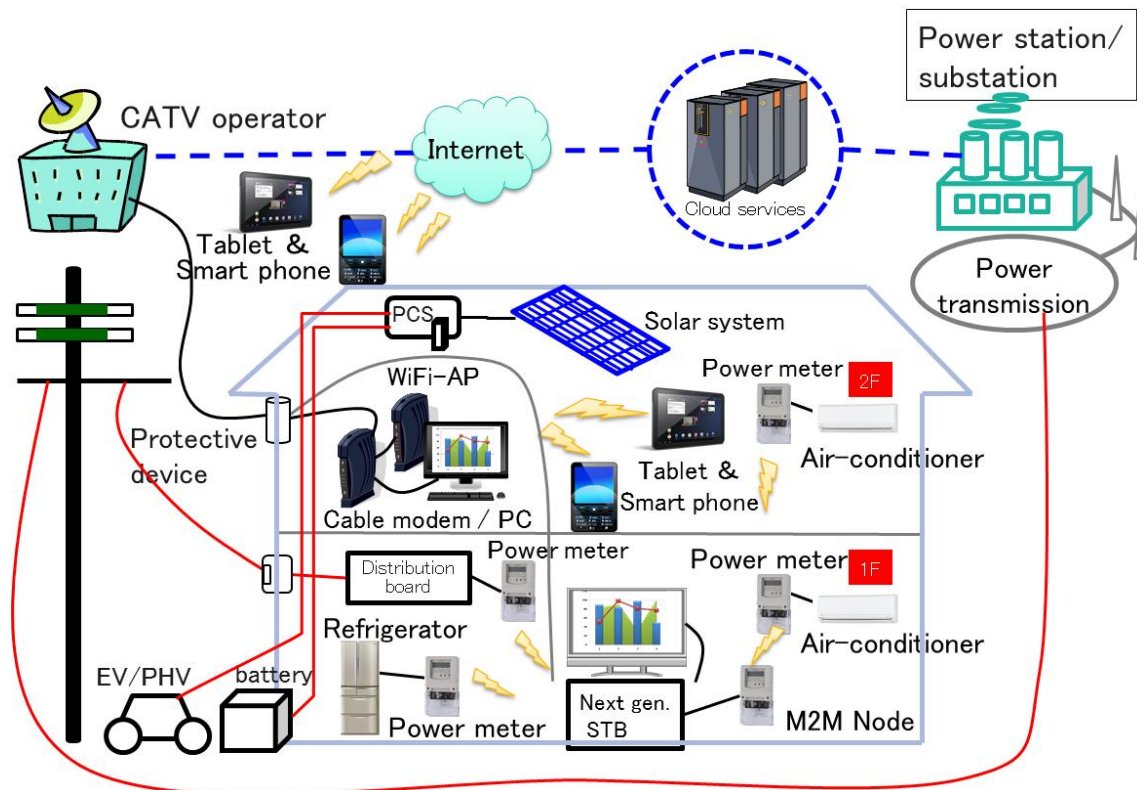


図 5.14 “Visualization system of power consumption” by Next-generation STB

次に，ネットスーパーについて述べる．各種店舗と連携し，物販に関わる商品情報の DB 蓄積，広告・宣伝，検索・推薦，閲覧，決済，配送を可能とする共通プラットフォームを構築することで，効率的かつ迅速なネットスーパー事業を展開できる．提案システムの構成を図 5.15 に示す．単なる商品の写真・映像や説明の情報配信のみならず，地域で話題になっている商品や特価・特売に関わる広告・宣伝情報を地域の小売店舗と協業して配信したり，購買・視聴履歴などからユーザの好みや要求にあわせた商品を推薦し，その CM をケーブル映像に挿入して流すターゲティング広告と，購買・決済システムへの導線も確保できるしくみとなっている [88]．購入後の配送については地域の宅配業者と連携して，迅速かつ適切なタイミングで配送を行い，定期配送や着払いも行えるしくみとなっている．さらに，STB 上では，商品をよりリアルに閲覧するための 3 次元映像閲覧や，自由視点操作による全方位からの商品映像の閲覧，並びに，服飾，家具などの身に付けたり宅内に据え付けるものについては，内蔵カメ



ラの撮影映像と商品映像を付加情報とともに合成し、インタラクティブな操作で仮想的な試着や装着が可能な AR 技術を用いた手法も取り入れられるようになっている。

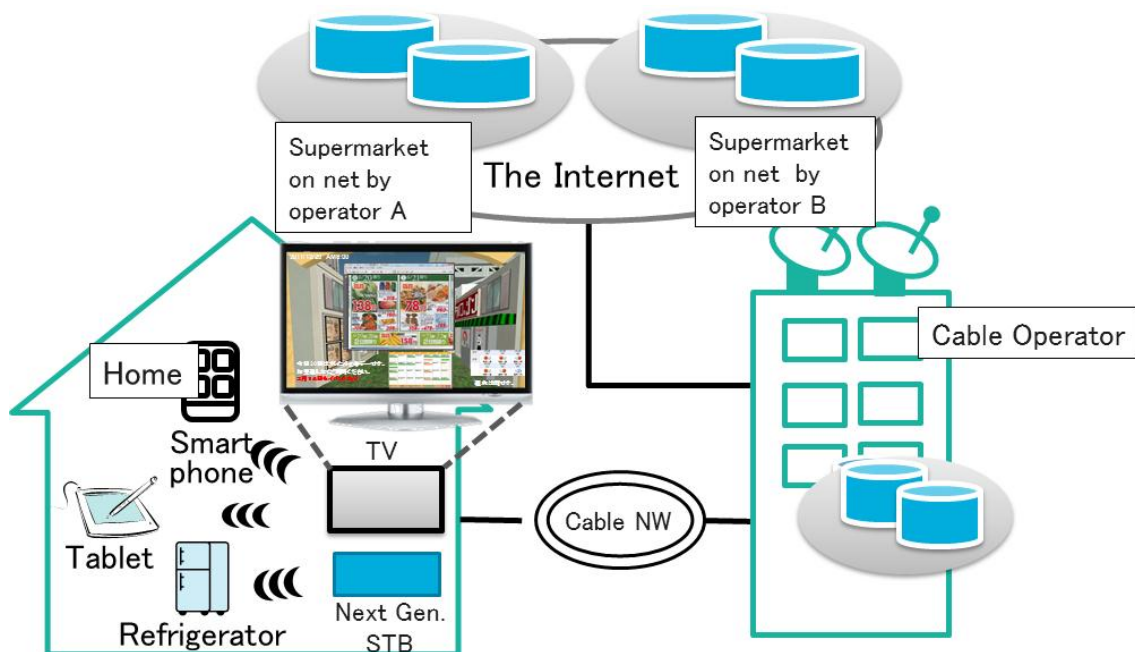


図 5.15 Supermarket on net collaborating cable operator

ヘルスケアについては、一般家庭における需要ニーズとして増加すると期待されており、通信技術との技術融合による相乗効果もあいまって、予防医療や健康増進も含めたより広義のサービスへの期待が広がっている [89]。また、近年の情報通信機器を用いた診療（遠隔診断）に関する法改正 [90] により、糖尿病、高血圧など慢性疾患に関しては、初診を除いて遠隔診療が可能となったことから、より一層、テレビ電話等情報通信機器を通して、心電図、血圧、脈拍、呼吸数、血糖値、等の観察や助言・指導を行えるようなシステムの構築が望まれる。更には、健康志向の高まりから、予防・ウェルネスといった健康増進のための取り組みにも期待が高まっている。このような背景から、筆者らは、地域の医療機関・スポーツ施設等事業者・介護事業者と CATV 事業者で連携したヘルスケアサービスを提案する（図 5.16）。ここでは日常的に用いる家電機器や健康機器から、一人ひとりの活動と健康に係る情報を取得しその活用を推進する。具体的には、カロリー収支や摂取栄養素の過不足も含めた、日々のバイタルデータを収集・加工・分析して、次世代 STB の他、携帯端末、タブレットなどのモバイルデバイスを用いてユーザがどこに居ても分かり易く提示できる見える化システムや、セキュリティの高いサーバに情報を上げ、地域の医療機関やスポーツ施設などで医療・健康増進に利活用できるしくみの構築等を行い、（１）独居の高齢者等に負

担を強いることなく健康状況を把握，（２）取得された情報の解析により異常を早期に検出し迅速な対処につなぐ，（３）遠隔検診，介護支援など他のホームネットワーク活用サービスと連携，といった効果を想定している。

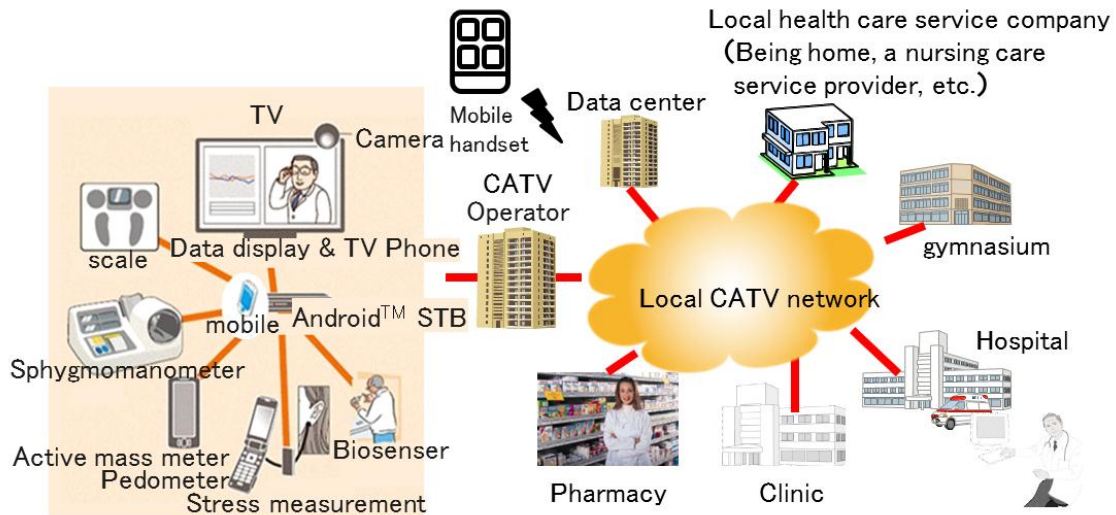


図 5.16 Architecture of health care services

## 5.5 まとめ

広大な国土の中で居住地域が点在する米国の環境に適した映像配信システムとしてスタートした CATV が，現在は山間部ならびに都市部においても，独自の特徴を生かしつつ進化を遂げている．特に，多チャンネル，双方向といった基盤的な利点に加え，事業者の地域密着性，STB をハブとした家庭内デバイス連携などの特性が，生活の多様な場面に即した多様なサービスを，先進技術のいち早い導入によって今後次々と実現していくことが大いに期待される．尚，今回，最新技術シーズから見た CATV の将来サービス展望を述べたが，ユーザのデマンドやビジネス視点でみた展望も今後の課題となる．





## 第6章 結 論

本論文では、多様化するブロードバンド映像配信サービスの高信頼化や高品質化、高効率化のための技術の確立を目的として、3つのテーマについてシステム開発を含めた研究を行った。また、放送・ネット・電話の所謂、トリプルプレイサービスの発展が期待される CATV の最新技術と将来展望について述べた。それらは、逆 IDCT の簡略化による処理負荷スケーラブルな多チャンネル映像再生技術（2 章）、帯域変動に追従した QoS 非保証型ネットワークにおける安定的なライブ伝送技術（3 章）、バッファ推移の類似性を用いた MPEG コンテンツのサイマル符号化方式（4 章）、最新 CATV 技術と将来展望（5 章）である。

第 2 章では、処理能力の低い端末も含む様々な端末プラットフォームにおいて映像復号を可能とするためのソフトウェアデコーダの処理負荷スケーラビリティ方式を提案し、マルチチャンネルマルチキャストシステムへの応用について述べた。本方式では、H.263 や MPEG など MC-DCT をベースとした圧縮符号化アルゴリズムの中で VLD の次に処理負荷の重い IDCT 処理に着目し、画質とトレードオフな簡易処理方式を幾つか提案することで処理負荷スケーラビリティをデザイン可能とした。実験では、適切な復号方式を選択することで、復号映像品質と処理負荷に関するグレースフルでリニアな復号スケーラビリティが実現できることを示した。また、提案のスケーラブルビデオ復号アルゴリズムをマルチチャンネルマルチキャストシステムに応用し試作することで、数十チャンネルの同時復号が一般的な PC 上で実現可能なことを実証した。今後の課題としては、MPEG-4 AVC/H.264 や H.265 など DCT とは異なる直交基底を用いる最新の圧縮符号化への対応が挙げられる。尚、本技術は、多チャンネルマルチキャスト伝送システム「PrimeCast」に採用され、全国 800 校の小中学校や KDDI 衛星伝送サービス Skycast 等で利用された（現在は製品販売終了）。

第 3 章では、QoS 非保証のブロードバンドにおける安定した映像伝送を実現するため、RTCP ベースの帯域適応符号化レート制御方式を提案した。符号化伝送レートは定期的に受信する RR パケットのネットワーク輻輳パラメータから解析される 4 つの輻輳レベルに従ってリアルタイム制御することで、極度の輻輳状態に陥りパケットロスによる極端な画質劣化を招く前に符号化伝送レートを制御可能となり高信頼な映像伝送を実現している。また、伝送可能帯域へのレート収束スピードの向上およびスレッシ

ヨルドパラメータのダイナミックな決定を行うための初期トレーニング処理を適用することで帯域追従のみならず、80%を超える帯域使用率も達成することができた。本方式を実装した MPEG-4 伝送システムを用いた ISP を跨ぐ実インターネット上での伝送実験においても、QoS 制御がなく時間とともに帯域が変動する状況においてパケットロスやジッタを抑制して画質の極端な劣化を防ぎつつ 80%以上の帯域使用率で効率的に映像伝送可能なことを確認し商用実ネットワークにおける提案方式の有効性を示した。

今回の提案では、有線系の比較的シンプルなネットワークを基本構成として提案したアルゴリズムであり、ネットワーク全体を大きな仮想バッファとして扱う方式であるため、有線系でも GW が複雑に多重接続した場合や、瞬断やハンドオフが発生しレイヤ 2 の再送制御を行う WiFi や 3G などの無線アクセスネットワークへの最適化までは達成できておらず、これらも含めた様々なネットワークにおける提案方式の評価や制御の最適化が今後の課題として挙げられる。また、固定伝送可能帯域における符号化レートの変動回避策など主観画質を考慮した方式の検討も課題として挙げられる。

尚、本技術は、双方向ビデオ伝送システム「QualityMeeting」（現在は製品販売終了）に採用され、企業における遠隔地間映像伝送や、サザンクロスプロジェクト（鹿児島離島間通信）[48]で利用された。また、携帯型映像伝送システム「VistaFinderMx」[49]にも採用され、インターネット上での緊急映像伝送（事故や火災現場、救急医療現場、建設・プラント監視、イベント・報道）向けに利用されている。

第4章では、xDSL、CATV、FTTH、モバイルなどの様々なネットワーク帯域や端末向けに様々な符号化ビットレートのコンテンツを同時生成するためのサイマル符号化方式を提案した。同じソース映像を異なるビットレートで独立にエンコードを行うと、エンコード本数に比例して符号化処理コストが増加してしまう課題への一解決策である。動き探索処理を共通化した方式や量子化演算処理低減に着目した既存の処理削減方式とも同時利用可能で、これまで取り組まれていなかったレート制御処理に着目した。複数同時エンコードにより同一画像ソースから、同一画像サイズ、同一フレームレートで異なるビットレートの符号化ストリームを効率的かつプライマリエンコーダのレート制御特性（画質最適化）を生かしつつ生成するための高速レート制御方式について提案した。MPEG-2 ベースの提案方式では、各ビットレートエンコードにおける VBV バッファ遷移の類似性に着目して処理を行うことにより、画質劣化を殆ど伴う

ことなく通常のレート制御に比べて-68.1%の処理負荷削減を達成した。一方、H.264 への適用方式では、-82.0%のレート制御処理を削減し、エンコード処理全体では、モード判定処理の削減効果も加わり、-64.1%の処理負荷削減を達成した。ただし、H.264 符号化処理全体に占めるレート制御処理の割合は 0.06%と小さいため、レート制御処理の簡略化自体の貢献度は低いと言える。今後はマルチビットレートのみならずマルチ解像度への変換手法の検討が課題として挙げられる。

第 5 章では、ブロードバンドの中でも、放送・ネット・電話の所謂トリプルプレイ全体で順調に普及拡大している CATV 技術の最新技術動向と将来展望について述べた。具体的には、現状のケーブルシステムと主要技術、先端サービスを支えるケーブル伝送技術、ネットワーク技術、端末技術の最新動向について解説するとともに、それらを踏まえた上で、将来サービスを担う高度映像メディア、ソーシャル、レコメンド、社会インフラなどのアプリケーションサービスの進化や展望について提案した。今後の課題としては、最新技術シーズから見た CATV の将来サービス展望を、ユーザのデマンドやビジネス視点でみた展望に多側面化することが挙げられる。

以上のように本論文では、ブロードバンド上での多チャンネル映像配信サービスを高品質、高信頼かつ高効率に提供するための伝送、再生、生成技術やシステムを提案するとともに、CATV 最新技術動向の俯瞰と将来展望について述べた。今後、ブロードバンドネットワークは伝送容量が更に拡大し、端末処理能力も向上すると思われるが、それにも増してコンテンツ自身の大容量化（4K, 8K など）や種類、連携サービスの拡大は想像に難くない。従って、本論文で提案した各研究テーマにおける研究成果は、今後の映像配信サービスの高品質化、高信頼化、高効率化に貢献し得ると考えられる。



## 参考文献

### 【第 1 章】

- [1] ISO/IEC 13818-1, "Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information - Part 1: Systems", 2000.
- [2] [http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/4-TR-B14v5\\_1-1p3-1.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/4-TR-B14v5_1-1p3-1.pdf), “ARIB TR-B14 5.1 版 地上デジタルテレビジョン放送運用規定 第一分冊) (1/2)”
- [3] [http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/2-STD-B31v1\\_9.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/2-STD-B31v1_9.pdf), “ARIB STD-B31 1.9 版 地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式”
- [4] ISO/IEC 13818-2, "Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information - Part 2: Video", 2000.
- [5] <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc243120.html>, “総務省 平成 24 年版情報通信白書 第 2 部第 3 節 インターネットの利用動向”
- [6] <http://www.iptvforum.jp/standard/about.html>, “IPTV フォーラム技術仕様概説 IPTVFJ STD-0001 1.1 版”
- [7] <https://developer.apple.com/streaming/>, “Apple's HTTP Live Streaming (HLS) Specifications”
- [8] [http://help.adobe.com/en\\_US/adobemediaserver/techoverview/index.html](http://help.adobe.com/en_US/adobemediaserver/techoverview/index.html), “Adobe's HTTP Dynamic Streaming (HDS) ”
- [9] <http://www.microsoft.com/silverlight/smoothstreaming/>, “Microsoft's IIS Smooth Streaming”
- [10] <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc123210.html>, “総務省 平成 24 年版情報通信白書 第 1 部第 3 節 (ア)インターネット動画配信の拡大 (マルチプラットフォーム展開モデル) ”

### 【第 2 章】

- [11] Y-S.Tung, C-C. Ho, and J-L Wu, “MMX-based DCT and MC Algorithms for Real-Time Pure Software MPEG Decoding”, Proc. IEEE Multimedia Computing and Systems, pp.357-362., June, 1999.
- [12] S. McCanne and V.Jacobson, "Receiver-driven Layered Multicast", *ACM Proc. Sigcomm*, pp.117-130, Stanford, CA, Aug. 1996.

- [13] H.Jia-Bin, L.Yu-Kun, C.Tian-Sheuan, "A Display Order Oriented Scalable Video Decoder," IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems 2006, pp.1976-1979, 4-7 Dec. 2006.
- [14] Y.Ruiduo, M.S.Brown, "Decoder motion vector estimation for scalable video error concealment," IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2004, Vol.3, pp.27-30, June 2004.
- [15] S.Yu-Chi, T.Sung-Fang, C.Tzu-Der, T.You-Ming, C.Liang-Gee, "Mapping Scalable Video Coding decoder on multi-core stream processors," Picture Coding Symposium 2009, pp.1-4, 6-8 May 2009.
- [16] F.Verdicchio, Y.Andreopoulos, T.Clerckx, J.Barbarien, A.Munteanu, J.Cornelis, P.Schelkens, "Scalable video coding based on motion-compensated temporal filtering: complexity and functionality analysis," International Conference on Image Processing 2004, vol.5, pp.2845-2848, 24-27 Oct. 2004.
- [17] 笠井, 児玉, 富永, "符号量配分に伴う画像階層符号化効率の一検討", 情報処理学会オーディオビジュアル複合情報処理研究会報告, pp.43-48, Mar.1997.
- [18] 柳原, 菅野, 米山, 中島, "動画像復号における処理負荷のスケーラビリティに関する一考察", 画像符号化シンポジウム'99, pp.41-42, Sep.1999.
- [19] 柳原, 菅野, 米山, 中島, "動画像復号の処理負荷スケーラビリティに関する検討", 2000年信学総大, p.29, Mar.2000.
- [20] 松本, 木村, "ビットレート変換方式の検討", テレビジョン学会年次大会, No.11-10, pp.183-184, 1994.
- [21] ITU-T SG15, "Video Codec Test Model, TMN5" (1995).
- [22] W.H.Chen, C.H.Smith, and S.C.Fralick, "A fast computational algorithm for the discrete cosine transform," IEEE Trans.Commun., vol.COM-25, pp.1004-1009, Sept.1977.
- [23] M.Iwasaki, N.Kamibayashi, H.Kiya, "A Motion Compensation of Scalable Decoder for Drift Reduction", IEICE Transactions Vol.J79-A No.1 pp.125-134, 1996(Japanese)
- [24] 岩橋, 貴家, 神林, "スケーラブル・デコーダにおけるドリフト低減のための動き補償", 信学技報(CS,通信方式), Vol.94, No.411, pp.9-16, 1994.
- [25] 岩橋, 神林, 貴家, "ハードウェア構成の簡単なスケーラブルデコーダ", 信学論-A, Vol.J79-A, No.7, pp.1324-1329, 1996.
- [26] S.Shu, L.Feng, C.Xu, "A Low Complexity MPEG Video Decoder with Arbitrary Downscaling Capability" the 2006 IEEE/ACM/IFIP Workshop on Embedded Systems for Real Time Multimedia Proceedings, pp.13-18, Oct. 2006.

- [27] H.Yanagihara, et al, “Development of Multi-channel IP multicast transmission system”,  
IEEEJ Annual Convention of Japan 99, pp.11-12, 1999(Japanese)
- [28] Schulzrinne, et al : Real-time Transport Protocol RFC 1889 “A Transport Protocol for  
Real-Time Applications” (Jan. 1996.)

### 【第3章】

- [29] 日経コミュニケーション, pp.62-78, Jun. 2003
- [30] J. M. Boyce and R. D. Gaglianella, "Packet loss effects on MPEG video sent over the  
public internet ", ACM Multimedia, pp.181-190, 1998.
- [31] R. Braden, Ed., et al, "Resource ReSerVation Protocol", RFC2205, Sep. 1997.
- [32] S. Blake, et al, "An Architecture for Differentiated Services", RFC2475, Dec. 1998.
- [33] J.C.Bolot, T.Turletti, "Scalable feedback control for multicast video distribution in the  
Internet", *ACM Proc. Sigcomm*, pp.58-67, London, UK, Sept. 1994.
- [34] I.Busse, B.Deffner, H.Schulzrinne, "Dynamic QoS Control of Multimedia Application  
based on RTP", *ACM Computer Communications*, Jun.1996.
- [35] H.Kanakia, P.Mishra, and A. Reibman, "An adaptive congestion control scheme for real-  
time packet video transport", *ACM Proc. Sigcomm*, pp.20-31, Sep. 1993.
- [36] 矢野, 佐藤, 瀬崎, “連続メディアのリアルタイム転送に適したラウンドトリップ時  
間に基づくレート制御法”, *IN98-23, CS98-23, MVE98-23*, pp.85-90, Apr. 1998.
- [37] Schulzrinne, et al, "Real-time Transport Protocol RFC 1889, A Transport Protocol for  
Real-Time Applications", Jan. 1996.
- [38] 高岡, 永吉, 花村, 富永, "ネットワーク適応型トランスコーダレート制御手法に  
関する検討", 情報処理学会 オーディオビジュアル複合情報処理研究会報告,  
pp.23-28, Jun.2004.
- [39] ISO/IEC 14496-2, "Information technology – Coding of audio-visual objects – Part  
2:Visual", Dec. 1999.
- [40] 米山, 柳原, 中島, ”奄美大島の離島遠隔医療実験における MPEG-4 ライブ伝送”,  
信学ソ大, B-7-78, Sep. 2001.
- [41] H.Yanagihara, A.Yoneyama, Y.Nakajima, and H.Furuya, “Dynamic Rate Control Method  
for Real-time Video Streaming over the Internet”, SPIE/ITCom2002, vol.4861, pp.145-152,  
Boston MA, Jul. 29-Aug.2, 2002.
- [42] 柳原, 米山, 中島, 古屋, “インターネット映像ストリーミングにおけるダイナミ  
ックレート制御方式に関する検討”, 信学総大, D-11-73, Mar.27-30, 2002.

- [43] 柳原, 米山, 中島, “インターネット映像ストリーミングにおける帯域適応レート制御方式に関する検討”, 映メディア学会年次大会, Aug.28-30, 2002.
- [44] 柳原, 清水, 米山, 中島, “MPEG-4 ベースブロードバンドライブ伝送システムの開発 ～要素技術～”, 画像符号化シンポジウム, P-2.1, Nov.11-13, 2002.
- [45] H.Yanagihara, T.Shimizu, A.Yoneyama, Y.Nakajima, Y.Hatori, “QoS Guaranteed MPEG-4 Based Live Transmission System”, International Conference on Consumer Electronics, L.A. CA, pp.168-169, Jun.17-19 2003.
- [46] 柳原, 清水, 米山, 中島, “QoS 保証型 MPEG-4 ベースライブ伝送システムの開発”, 映像情報メディア学会技術報告 コンシューマエレクトロニクス研究会, 27 巻 42 号, pp.13-16, Jul.23 2003.
- [47] <http://www.wide.ad.jp/index.html>, “Wide プロジェクト”
- [48] <http://www.akg.t.u-tokyo.ac.jp/~asami/s-cross/ps.html>, ”サザンクロスプロジェクト”
- [49] <http://www.kddilabs.jp/products/audio/vistafinder/product.html>, ” VistaFinderMx”

## 【第 4 章】

- [50] B.Li, J.Liu, "Multirate video multicast over the Internet: an overview", IEEE Network, Vol.17, pp.24-29, Jan/Feb 2003.
- [51] L.Jiang and J.Zou, "Two-stage optimization based multirate transmission for SVC streaming", International Conference on Signal Processing 2008, pp.1275-1278, Oct 2008.
- [52] X.Chenguang, X.Yinlong, Z.Cheng, W.Ruizhe, W.Qingshan, "On Network Coding Based Multirate Video Streaming in Directed Networks", International Conference on Performance, Computing, and Communications, pp.332-339, Apr 2007.
- [53] H.Sun, W. Kwok, J.W. Zdepski, "Architectures for MPEG compressed bitstream scaling", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.6, No.2, pp.191 - 199, 1996.
- [54] G.Keesmana, R.Hellinghuizen, F.Hoeksema, G.Heideman, "Transcoding of MPEG bitstreams ", Signal Processing:Image Communications, Vol.8 No6, pp.481-500, 1996.
- [55] L.Wang, A.Luthra, B.Eifrig, "Adaptive rate control for MPEG transcoder", International Conference on Image Processing '99 Proceedings. Vol.4 pp.266-270, 1999.
- [56] Y.Nakajima, H.Hori, T.Kanoh, "Rate conversion of MPEG coded video by re-quantization process", International Conference on Image Processing '95 Proceedings, Vol3, pp.408-411, 1995.
- [57] P.A.A.Assuncao, M.Ghanbari, "Post-processing of MPEG2 coded video for transmission at lower bit rates", International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing '96 Proceedings, Vol.4, pp.1998-2001, 1996.



- [58] P.A.A.Assuncao, M.Ghanbari, "A frequency-domain video transcoder for dynamic bit-rate reduction of MPEG-2 bit streams ", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.8, No.8, pp.953-967, 1998.
- [59] O.Werner, "Requantization for transcoding of MPEG-2 intraframes", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.8, No.2, pp.179-191, 1999.
- [60] Z.Guo, O.C.Au, K.B.Letaief, "Parameter estimation for image/video transcoding", International Symposium on Circuits and Systems 2000 Proceedings, Vol.2, pp.269-272, 2000.
- [61] H.Z.Sorial, W.E.Lynch, A.Vincent, "Joint transcoding of multiple MPEG video bitstreams", International Symposium on Circuits and Systems '99 Proceedings, Vol.4, pp.251-254, 1999.
- [62] H.Hwang, D.Kim “ An Efficient Requantization for Transcoding of MPEG Video” , IEICE Trans. FUNDAMENTALS , VOL.E86-A , No.6 , pp1498-1503, June, 2003.
- [63] 角野, 栄藤, 横矢, “MPEG 再符号化のためのゾーン処理付き再量子化法” , 信学論 D- II Vol.J83-D- II No.9, pp1879-1887, September, 2000.
- [64] 信太, 柳原, 米山, 中島, 半谷, "MPEG ビデオのビットレート変換トランスコーダに関する一検討", 2004 年信学総大 情報・システム(2), p.53, 2004-03-08.
- [65] P.Kunzelmann and H.Kalva, "Reduced Complexity H.264 to MPEG-2 Transcoder", International Conference on Consumer Electronics 2007, pp.1-2, Jan 2007.
- [66] D.Yao-gang and C.An-ni, "Low-complexity rate-distortion optimal transcoding from MPEG-2 to MPEG-1 in DCT-domain", IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology 2005, pp.344-347, May 2005.
- [67] I.Nagayoshi, M.Wakui, T.Hanamura, and H.Tominaga, "Transcoder system with high processing efficiency to support simultaneous multirate output", pp.250-253, International Conference on Visual Information Engineering, Jul. 2003.
- [68] "MPEG-2 Test Model 5", IEC/ISO JTC1/SC29/WG11/93-400, 1993.
- [69] H.Kim, N.Kamaci, and Y.Altunbasak, "Low-complexity rate-distortion optimal macroblock mode selection and motion estimation for MPEG-like video coders", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.15, No.7, pp.823-834, Jul. 2005.
- [70] V.V.Gohokar, and V.N.Gohokar, "Optimum Bit Allocation Using Human Visual System for Video Compression", International conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, Vol.3, pp.84-88, Dec. 2007.

- [71] 信太, 柳原, 米山, 中島, "MPEG-2 ビデオにおけるサイマルエンコード方式の一検討", PCSJ2003, P-2.11, 2003-11.
- [72] 信太, 柳原, 米山, 中島, " MPEG4 ビデオ複数同時符号化に関する一検討( I )〜マルチビットレート出力に関する検討〜" , 信学総大, D-11-6, 2003-03.
- [73] 信太, 柳原, 米山, 中島, " MPEG-4 ビデオの複数レート同時符号化方式に関する一検討" , FIT2003, LJ-015, pp.251-252, 2003-09.
- [74] Joint Video Team, "Reference Software JM14.2", <http://iphome.hhi.de/suehring/tml>.

## 【第 5 章】

- [75] <http://pc.watch.impress.co.jp/docs/article/20000531/catv2.htm>, PC Watch HP, “特別企画 CATV インターネット接続事情, CATV 小史〜インターネット接続サービスまでの道のり”
- [76] [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/yusen/pdf/071005\\_2\\_si1-3.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/yusen/pdf/071005_2_si1-3.pdf), 総務省HP 「ケーブルテレビを取り巻く現状」 (2007)
- [77] [http://www.catv-jcta.jp/pdf/catv\\_report.pdf](http://www.catv-jcta.jp/pdf/catv_report.pdf), 日本ケーブルテレビ連盟 HP, 「ケーブルテレビ業界レポート 2011」 (2011)
- [78] "Parameter values for UHD TV systems for production and international programme exchange", Draft New Recommendation ITU-R BT.IMAGE-UHD TV (May. 2012)
- [79] 吉野, 内藤, 酒澤, 松本, "超高精細映像におけるマクロブロックサイズ拡張手法に関する解析的考察", 映情学会誌 vol.64, pp.1698-1710 (Nov. 2010)
- [80] “Real-time transmission system for signals of an expanded hierarchy of large screen digital imagery using spatial image segmentation for parallel processing”, ITU-T Recommendation J.603 (Apr. 2011)
- [81] S. Naito, S. Matsumoto, "DEVELOPMENT OF REAL-TIME ENCODER FOR 8K ULTRA-HIGH DEFINITION TELEVISION", Proceedings of ISPACS 2010 TA2.2.4 (Dec. 2010)
- [82] T. Kanade, P. W. Rander, and P. J. Narayanan: Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes, IEEE Multimedia, 4, 1, pp. 34-47 (1997).
- [83] T. Horiuchi, H. Sankoh, T. Kato, S. Naito, "Interactive Music Video Application for Smartphones Based on Free-viewpoint Video and Audio Rendering", proceedings of ACM Multimedia 2012 (to be published, 2012)
- [84] “Multi-layer data structure for scalable view-range representation”, ITU-T Recommendation J.902 (Jan. 2012)

- [85] K. Ikeda, et al., “Social Media Visualization for TV”, IBC Conference 2011, September 2011.
- [86] C. Ono, et al., “TV viewing Support System Considering Both Individual and Family Preferences”, UMAP2010, June 2010.
- [87] [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment.html](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment.html), 経済産業省 スマートメーター制度検討会
- [88] "Proposal for the study regarding the detail of the service provider interface concerning the targeted content distribution", ITU-T SG9, Proposal by KDDI Corporation, 2009-10-16
- [89] [http://ngnforum.nict.go.jp/kenhyoubukai/homenetworkwg/homenetworkwg27th/HNWG2008-HNWG.P\\_v1\\_rev2.pdf](http://ngnforum.nict.go.jp/kenhyoubukai/homenetworkwg/homenetworkwg27th/HNWG2008-HNWG.P_v1_rev2.pdf), 次世代 IP ネットワーク推進フォーラム ホームネットワーク WG 普及促進 SWG (HNWG.P) 『次世代ホームネットワークが描く新たな価値進化時代へ向けた挑戦』
- [90] <http://www.mhlw.go.jp/bunya/iryoku/johoka/dl/h23.pdf>, 厚生労働省, 「情報通信機器を用いた診療（いわゆる「遠隔診療」）について」, 一部改正 平成 23 年 3 月 31 日, 健政発第 1075 号



## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり，御指導，御助言を賜りました名古屋大学大学院工学研究科 藤井俊彰教授，名古屋産業科学研究所上席研究員 谷本正幸博士（名古屋大学名誉教授）に深く感謝致します．また，本論文について貴重なご教示を頂きました名古屋大学大学院工学研究科 佐藤健一教授，高橋桂太准教授，東京工業大学大学院総合理工学研究科 羽鳥好律教授に感謝致します．

本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめの機会を与えてくださいました株式会社 KDDI 研究所会長 安田豊博士，同所長 中島康之博士，同副所長 鈴木正敏博士，同取締役 野本真一博士に謹んで感謝の意を表します．

この間，本研究の機会を与えてくださった同歴代会長 平田康夫博士（現 A T R 社長），ならびに同歴代所長 村上仁己博士（元成蹊大学教授），浅見徹博士（現東京大学教授），秋葉重幸博士（現株式会社 KDDI 研究所常務取締役，現東京工業大学連携教授）に感謝致します．

本研究を進めるにあたり，日頃より多大なる御指導御教示を賜りました一般社団法人日本ケーブルラボ専務理事 松本修一博士，株式会社 KDDI テクノロジー 特別顧問 和田正裕博士，および株式会社 KDDI 研究所執行役員 滝嶋康弘博士に深く感謝致します．

また，映像符号化および映像伝送関連技術の研究を進めるにあたり，ご助言をくださいました株式会社 KDDI 研究所 メディア・HTML5 応用グループ グループリーダー 酒澤茂之博士，同超臨場感通信グループ グループリーダー 内藤整博士，KDDI 株式会社 技術戦略部 グループリーダー 米山暁夫博士，同メディア・CATV 推進本部 グループリーダー 宮地悟史博士に感謝致します．

本研究成果のソフトウェア開発にご協力頂いた株式会社 KDDI 研究所ソフトウェアインテグレーショングループ 研究マネージャ 加藤晴久博士，同研究主査 辻智弘氏，株式会社デザインネットワーク 青柳敏明氏に感謝します．

最後に，本研究を進めるにあたり，様々なご協力を頂いた株式会社 KDDI 研究所マルチメディア部門の皆様に感謝します．



## 研究業績

### 学術論文

1. Hiromasa Yanagihara, Masaru Sugano, Akio Yoneyama, Yasuyuki Nakajima, “Scalable Video Decoder and its Application to Multi-channel Multicast System”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, pp.866-871 (Aug. 2000) 【2 章】
2. Hiromasa Yanagihara, Sei Naito, Satoshi Miyaji, Shigeyuki Sakazawa, Yasuhiro Takishima, Shuichi Matsumoto, Masayuki Tanimoto, “Latest Cable TV-Related Technologies and Services and Their Future Observation”, ITE Transactions on Media Technology and Applications, pp.53-59 (Jan. 2013) 【5 章】
3. Shigeyuki. Sakazawa, Hiromasa Yanagihara, “Multimedia Service Platform in the HTML5 Era”, IEEE Transactions on Image Electronics and Visual Computing, vol.1, No.1, pp.3-9 (Dec. 2013)

### 国際会議

1. Hiromasa Yanagihara, Masaru Sugano, Akio Yoneyama, Yasuyuki Nakajima, “Scalable Video Decoder and its Application to Multi-channel Multicast System”, International Conference on Consumer Electronics, pp.232-233, L.A. CA, Jun. 11-15, 2000. 【2 章】
2. Hiromasa Yanagihara, Akio Yoneyama, Yasuyuki Nakajima, Hiroki Furuya, “Dynamic Rate Control Method for Real-time Video Streaming over the Internet”, SPIE/ITCom2002, vol.4861, pp.145-152, Boston MA, Jul. 29-Aug.2, 2002. 【3 章】
3. Hiromasa Yanagihara, Tomoyuki Shimizu, Akio Yoneyama, Yasuyuki Nakajima, Yoshinori Hatori, “QoS Guaranteed MPEG-4 Based Live Transmission System”, International Conference on Consumer Electronics, L.A. CA, pp.168-169, Jun.17-19 2003. 【3 章】
4. Hiromasa Yanagihara, Tomohiro Tsuji, Akio Yoneyama, Masayuki Tanimoto, “A Fast Rate Control Scheme for Multi-bitrate Video Encoder”, International Conference on Consumer Electronics, L.V. NV, pp.1-2, Jan.10-14 2009. 【4 章】
5. Hiromasa Yanagihara, Shigeyuki Sakazawa, Yasuhiro Takishima, “HTML5 AS A NEW PLATFORM FOR ADVANCED USER EXPERIENCE”, IEVC2012 (The Image Electronics and Visual Computing Workshop 2012), 3B-4(invited), Kuching Malaysia, Nov. 21-24, 2012.

## 研究会／大会／会誌

1. 斎藤雅弘, 小林高宣, 柳原広昌, 中島康之, “超低レート映像伝送方式「Quality Motion」を用いた携帯映像取材伝送システム「VIDEOfrek」”, 映像情報メディア学会年次大会, pp.345-346, Jul. 29-31, 1998.
2. 柳原広昌, 中島康之, 米山昭暁夫, 菅野勝, “MPEG 画像の検索・編集・閲覧可能なビデオ管理システムの開発”, 映像情報メディア学会冬季大会, p.63, Dec.3-4, 1998.
3. 柳原広昌, 米山暁夫, 菅野勝, 中島康之, “多チャンネル IP マルチキャスト伝送システムの開発”, 画像電子学会年次大会, pp.11-12, Jun.24-25, 1999.
4. 柳原広昌, 中島康之, 米山暁夫, 菅野勝, “リアルタイム動画像符号化配信におけるパケット送出制御方式”, 情報処理学会全国大会, 3-569-570, Sep.28-30, 1999.
5. 柳原広昌, 菅野勝, 米山暁夫, 中島康之, “動画像復号における処理負荷のスケラビリティに関する一考察”, 画像符号化シンポジウム, pp.41-42, Sep.27-29, 1999.
6. 柳原広昌, 菅野勝, 米山暁夫, 中島康之, “動画像復号の処理負荷スケラビリティに関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, 情報・システム(2), p.29, Mar.28-31, 2000.
7. 柳原広昌, 中島康之, 米山暁夫, 原田康也, 寄高秀洋, “インターネットを利用した遠隔会議 ～スタンフォード大学との接続実験”, PC カンファレンス, pp. 78-79, Aug. 6-8, 2001.
8. 柳原広昌, 菅野勝, 中島康之, “WEB ベース MPEG データベースシステムの開発 (1) ～検索, 閲覧, 再生機能～”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.126, Sep.18-21, 2001.
9. 中島康之, 菅野勝, 米山暁夫, 柳原広昌, “WEB ベース MPEG データベースシステムの開発 (2) ～編集, 登録機能～”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.127, Sep.18-21, 2001.
10. 柳原広昌, 菅野勝, 米山暁夫, 中島康之, “WEB ベース MPEG データベースシステムの開発”, 第 34 回オーディオビジュアル複合情報処理研究会, pp.1-6, Dec.5, 2001.
11. 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, 古屋裕規, “インターネット映像ストリーミングにおけるダイナミックレート制御方式に関する検討”, 電子情報通信学会総合大会, D-11-73, Mar.27-30, 2002.



12. 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, “インターネット映像ストリーミングにおける帯域適応レート制御方式に関する検討”, 映像情報メディア学会年次大会, Aug.28-30, 2002.
13. 柳原広昌, 清水智行, 米山暁夫, 中島康之, “MPEG-4 ベースブロードバンドライブ伝送システムの開発 ～要素技術～”, 画像符号化シンポジウム, P-2.1, Nov.11-13, 2002.
14. 柳原広昌, “ネット映像円滑伝送 ブロードバンドライブ映像伝送システム「QualityMeeting」を開発”, 電子情報通信学会本誌 ニュース解説欄, 86(1), 69, Jan. 1, 2003.
15. 信太健司, 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, “MPEG-4 ビデオの複数同時符号化方式に関する一検討 (I) ～マルチビットレート出力に関する検討～”, 電子情報通信学会総合大会, p.6 Mar.19-22, 2003.
16. 柳原広昌, 菅野勝, “コンテンツオーサリング技術(ブロードバンドを支えるソフトウェア技術動向)(<特集>本格化したブロードバンド社会～技術からサービスまで)”, 映像情報メディア学会誌, pp. 553-554, May. 1, 2003.
17. 柳原広昌, 清水智之, 米山暁夫, 中島康之, “QoS 保証型 MPEG-4 ベースライブ伝送システムの開発”, 映像情報メディア学会技術報告 コンシューマエレクトロニクス研究会, 27 巻 42 号, pp.13-16, Jul.23 2003.
18. 信太健司, 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, “MPEG-4 ビデオの複数レート同時符号化方式に関する一検討”, 第 2 回 情報科学技術フォーラム (FIT2003), pp.251-252, Sep.10-12, 2003.
19. 信太健司, 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, “MPEG 2 ビデオにおけるサイマルエンコード方式の一検討”, 画像符号化シンポジウム, pp.33-34, Nov.12-14, 2003.
20. 信太健司, 柳原広昌, 米山暁夫, 中島康之, 半谷精一郎, “MPEG ビデオのビットレート変換トランスコーダに関する一検討”, 電子情報通信学会総合大会, p.53, Mar.22-25, 2004.
21. 柳原広昌, 中島康之, 松岡哲也, 田中清, “透かしインデキシングによるストリーミングコンテンツの高度化 (3) -透かし検出機能付きプレーヤの構築-”, 第 33 回画像電子学会年次大会, pp.77-78, Jun.16-17, 2005.
22. 柳原広昌, 辻智弘, 米山暁夫, 谷本正幸, “マルチビットレートエンコーダにおける高速レート制御方式”, 画像電子学会第 240 回研究会 in 名古屋, pp.9-13, Oct.24, 2008.



## 表 彰

1. 画像電子学会 第 27 回年次大会 研究奨励賞

平成 12 年 6 月 28 日受賞 (2000 年)

「多チャンネル I P マルチキャスト伝送システムの開発」

2. 映像情報メディア学会 コンシューマエレクトロニクス研究会 研究奨励賞

平成 15 年 12 月 16 日受賞 (2003 年)

「QoS 保証型 MPEG-4 ベースライブ伝送システムの開発」



## 出願特許

1. 柳原広昌，中島康之，米山暁夫，菅野勝，”映像情報のリアルタイム圧縮伝送装置及び方法並びに映像情報のリアルタイム圧縮伝送制御のための制御プログラムを記録した記録媒体”，特願平 11-265780，1999/9/20
2. 柳原広昌，中島康之，菅野勝，”動画像検索閲覧編集装置および記録媒体”，特願 2001-074186，2001/3/15
3. 柳原広昌，中島康之，菅野勝，”動画像検索閲覧装置および記録媒体”，特願 2001-074185，2001/3/15
4. 柳原広昌，中島康之，菅野勝，”動画像検索閲覧編集装置および記録媒体”，特願 2001-074186，2001/03/15
5. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”映像情報伝送方式およびプログラム”，特願 2002-036710，2002/2/14
6. 柳原広昌，中島康之，菅野勝，”オーディオ情報復号装置”，特願 2002-284078，2002/9/27
7. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”映像情報伝送方式、それに用いられる装置およびプログラム”，US10/351303，2003/1/27
8. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”映像情報伝送方式、それに用いられる装置およびプログラム”，GB03002504.3，2003/2/4
9. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”映像情報伝送方式、それに用いられる装置およびプログラム”，DE03002504.3，2003/2/4
10. 柳原広昌，中島康之，”ビデオ情報複数同時符号化装置”，特願 2003-049752，2003/2/26
11. 柳原広昌，中島康之，”ビデオ情報複数同時符号化装置”，特願 2003-206482，2003/8/7
12. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”ビデオ情報再符号化装置”，特願 2004-058938，2004/3/3
13. 柳原広昌，米山暁夫，中島康之，”ビデオ情報複数同時符号化装置”，特願 2004-236620，2004/8/16
14. 柳原広昌，”必要十分な受信バッファサイズを決定するパケット受信装置、方法及びプログラム”，特願 2007-083113，2007/3/27