The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	連続メディアデータ放送におけるスケジューリング方式に関する研究
Author(s)	義久, 智樹
Citation	大阪大学, 2005, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/290
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

連続メディアデータ放送における
スケジューリング方式に関する研究

平成１６年１２月

義　久　智　樹

内容梗概

本論文は，筆者が 2001 年から現在までに，大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科・大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻在学中に行った研究をまとめたものである．

近年，地上波放送や衛星放送のデジタル化による広帯域の放送型配信の普及に伴い，映像や音声といった連続メディアデータを放送型で配信する連続メディアデータ放送に対する注目が高まっている．連続メディアデータ放送では，一般に，サーバは同じデータを繰り返し放送して，複数のクライアントにまとめてデータを配信する．個々のクライアントの受信要求に応えてデータを配信する手法と比べて，各クライアントに対して発生するオーバヘッドを削減できるため，クライアント数が多い場合に有効だが，クライアントは所望のデータが放送されるまで待つ必要がある．一方，ユーザにとって，連続メディアデータを最初から途切れずに再生できることが重要になる．そこで，連続メディアデータ放送において，データを最初から最後まで途切れずに再生することを考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮するさまざまな手法が提案されている．これらの手法のほとんどは，データを幾つかの部分に分割し，データの初めの方を頻繁に放送するように分割したデータをスケジューリングして放送している．データの初めの方を頻繁に放送することで，クライアントがデータの再生を開始できる機会が多くなり，待ち時間を短縮できる．しかし，待ち時間を効率的に短縮するスケジュールは，再生の最小単位や使用可能なチャネル数といったシステム構成に依存するにもかかわらず，これらを考慮したスケジューリング手法が存在せず，システム構成に応じて効率的に待ち時間を短縮できるスケジューリング手法がなかった．

本論文では，幾つかのシステム構成要素を考慮したうえで，効率的に待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．特に，再生の単位，使用可能なチャネル数，プリフェッチの割合，早送りの有無の 4 種類の要素に焦点を当てたスケジューリング手法を提案し，提案手法についての評価，議論を行う．本研究で提案するスケジューリング手法により，システム構成に応じて待ち時間を効率的に短縮でき，よりユーザの要求を満たす連続メディアデータ放送が可能となる．

本論文は全 6 章で構成され，その内容は以下の通りである．まず，第 1 章において序論を述べ，第 2 章では，再生の単位を考慮したスケジューリング手法を提案する．連続メディアデータは，一般に，再生の単位となるある程度のデータを受信完了してからでなければ再生できない．このため，受信したデータを即座に再生できると想定している既存の

手法を適用しても，効率的に待ち時間を短縮できない．そこで，提案手法では，データを再生の単位ごとに分割して，分割したデータを再生開始時刻までに受信完了できるようにスケジューリングする．再生の単位を考慮する場合，再生の単位となるデータサイズが待ち時間に影響を及ぼすため，実際に符号化したデータの再生の単位を評価に用い，提案手法の有効性を示す．

次に，第 3 章では，使用チャネル数を考慮したスケジューリング手法を提案する．放送システムでは，ハードウェア構成や処理の簡単化，処理速度の問題といった理由から，使用可能なチャネル数に制限がある．既存手法では，使用チャネル数は帯域幅から算出されるため，導入するためにはハードウェア構成を変更する必要がある．そこで，提案手法では，使用チャネル数に応じて分割したデータをスケジューリングし，効率的に待ち時間を短縮する．使用チャネル数が単一チャネルのみである場合には，分割したデータを単一チャネルでスケジューリングして放送する必要があり，複数チャネル使用できる場合とは異なったアプローチで待ち時間を短縮する必要がある．このため，単一チャネルの場合と複数チャネルの場合に分けて，スケジューリング手法を提案する．評価では，既存手法で使用チャネル数を変更できるように拡張した手法と提案手法を比較し，提案手法の有効性を示す．

第 4 章では，データのプリフェッチを考慮したスケジューリング手法を提案する．幾つかの既存手法では，クライアントは，所望のデータが放送されるまで待つことなく再生を開始できるように，データの初めの部分をプリフェッチしている．そこで，第 3 章で提案した手法を拡張し，プリフェッチを導入して，待ち時間のない再生を可能にする．評価では，プリフェッチを行う既存手法と比べて，途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅を削減できることを示す．

さらに第 5 章では，早送りを考慮したスケジューリング手法を提案する．連続メディアデータを再生する場合，ユーザは，巻き戻しや早送りといったビデオ操作を行うことで，好みの場面をすぐに視聴できる．巻き戻しなどの過去に再生したデータを再び再生する操作については，再生したデータをバッファに保存しておくことで可能だが，早送りは一度も再生していないデータを再生する．このため，早送りを考慮していない手法を適用すると，再生が途切れる可能性がある．提案手法では，データを早送り用とそれ以外の残りのデータに分割し，早送りしても再生が途切れないようにスケジューリングして，待ち時間を短縮する．評価では，早送りしても再生が途切れないように既存手法を改良した手法と比較し，提案手法の平均待ち時間が短くなることを示す．さらに，第 4 章で提案した手法と組み合わせて，プリフェッチを導入する．

最後に，第 6 章では，本論文全体のまとめを行ったうえで，連続メディアデータ放送のスケジューリング方式に関する今後の研究課題について述べる．

関連発表論文

1．学会論文誌発表論文

1. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: データの分割に関する制約を考慮した連続メディアデータ放送におけるスケジューリング手法, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol. 44, No. SIG 3(TOD 17), pp. 33–42 (Mar. 2003).

2. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 連続メディアデータ放送における待ち時間短縮のための分割放送方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 6, pp. 1558–1569 (June 2003).

3. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 連続メディアデータ放送における複数データの分割放送型スケジューリング手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 2, pp. 487–497 (Feb. 2004).

4. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 早送りを考慮した連続メディアデータ放送におけるスケジューリング手法, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol. 45, No. SIG 7(TOD 22), pp. 179–188 (June 2004).

5. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 連続メディアデータ放送におけるデータの細分割による効率的なスケジューリング手法, 電子情報通信学会和文論文誌 D-I, Vol. J87-D-I, No. 12, pp. 1079–1088 (Dec. 2004).

2．研究会等発表論文（査読付）

1. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 放送時間と再生時間を考慮した連続メディア放送のスケジューリング手法, 電子情報通信学会第 13 回データ工学ワークショップ (DEWS 2002) 論文集 (Web 出版, http://www.ieice.org/iss/de/DEWS/proc/2002/index.html), B3-4 (Mar. 2002).

2. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 連続メディアデータ放送における単一チャネルを用いた複数データのスケジューリング手法, 情報処理学会シンポジウムシリーズ マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2002) 論文集, Vol. 2002, No. 9, pp. 511–514 (July 2002).

3. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 再生単位となるデータサイズを考慮したスケジューリング手法, 電子情報通信学会第14回データ工学ワークショップ (DEWS 2003) 論文集 (Web 出版, http://www.ieice.org/iss/de/DEWS/proc/2003/index.html), 2-A-03 (Mar. 2003).

4. Tomoki Yoshihisa, Masahiko Tsukamoto, and Shojiro Nishio: Scheduling Methods Based on Data Division for Continuous Media Data Broadcast, In *Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing* (PACRIM 2003), pp. 927–930 (Aug. 2003).

5. Tomoki Yoshihisa, Masahiko Tsukamoto, and Shojiro Nishio: Scheduling Methods for Broadcasting Multiple Continuous Media Data, In *Proc. of ACM International Workshop on Multimedia Databases* (MMDB 2003), pp. 40–47 (Nov. 2003).

6. Tomoki Yoshihisa, Masahiko Tsukamoto, and Shojiro Nishio: A Scheduling Scheme to Enable Fast-Forward for Continuous Media Data Broadcasting, In *Proc. of IEEE International Conference on Multimedia Expo* (ICME 2004), in CD-ROM (June 2004).

7. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 放送型配信における連続メディアデータのプリフェッチを考慮したスケジューリング手法, 情報処理学会シンポジウムシリーズ マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2004) 論文集, Vol. 2004, No. 7, pp. 543–546 (July 2004).

8. Tomoki Yoshihisa, Masahiko Tsukamoto, and Shojiro Nishio: An Effective Scheduling Method with Finer Data Division for Continuous Media Data Broadcasting, In *Proc. of IEEE International Conference on Computer Communications and Networks* (ICCCN 2004), pp. 415–420 (Oct. 2004).

3. その他の研究会等発表論文

1. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 単一チャネルを用いた連続メディア放送のスケジューリング手法, 情報処理学会研究報告 (放送コンピューティング研究グループ 2002-BCCgr-1), Vol. 2002, No. BCCgr-1, pp. 74–81 (Feb. 2002).

2. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 早送りを考慮した放送型配信における待ち時間短縮のためのスケジューリング手法, 情報処理学会研究報告 (データベースシステム

研究会 2002-DBS-129・放送コンピューティング研究グループ 2003-BCCgr-4 合同研究会), Vol. 2003, No. 5, pp. 57–64 (Jan. 2003).

3. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: 使用可能なチャネル数を考慮した放送型配信におけるスケジューリング手法, 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2003-DBS-131(I)), Vol. 2003, No. 71, pp. 375–381 (July 2003).

4. 義久 智樹, 塚本 昌彦, 西尾 章治郎: データの細分割による効率的な放送スケジュールの作成手法, 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2004-DBS-132・放送コンピューティング研究グループ 2004-BCCgr-7 合同研究会), Vol. 2004, No. 3, pp. 25–32 (Jan. 2004).

以上

目 次

1 序章 **1**

1.1 研究の背景 1

1.2 提案方式の基本的なアイデア 3

1.3 研究の目的 5

1.4 本論文の構成 7

2 再生の単位を考慮した手法 **9**

2.1 まえがき 9

2.2 関連研究 9

2.3 提案手法 11

2.3.1 想定環境 11

2.3.2 スケジューリング手順 12

2.3.3 導入方法 14

2.4 解析 14

2.4.1 帯域幅 14

2.4.2 待ち時間 15

2.4.3 途切れのない再生 15

2.5 評価 16

2.5.1 帯域幅 17

2.5.2 平均待ち時間 18

2.5.3 HB 法や CHB 法との比較 18

2.6 考察 20

2.6.1 既存手法との相違 20

2.6.2 再生に必要なデータサイズと平均待ち時間 21

2.6.3 VBR への応用 25

2.7 むすび 26

3 使用チャネル数を考慮した手法 29

3.1 まえがき 29
3.2 関連研究 30
3.3 想定環境 31
3.4 単一チャネルの場合の手法 31
3.4.1 分割配送方式 32
3.4.2 2 等分の場合 35
3.4.3 3 等分以上の場合 43
3.4.4 評価 49
3.4.5 考察 51
3.5 複数チャネルの場合の手法 54
3.5.1 分割方法 55
3.5.2 評価 57
3.5.3 考察 59
3.6 むすび 61

4 プリフェッチを考慮した手法 63

4.1 まえがき 63
4.2 関連研究 63
4.3 提案手法 65
4.3.1 想定環境 66
4.3.2 スケジューリング手順 66
4.3.3 導入方法 67
4.4 評価 68
4.4.1 帯域幅 68
4.4.2 チャネル数 68
4.5 考察 69
4.5.1 比較 69
4.5.2 プリフェッチするデータの配信手法 72
4.5.3 途切れのない再生 73
4.6 むすび 73

5 早送りを考慮した手法 75
5.1 まえがき 75
5.2 関連研究 76
5.3 提案手法 78
5.3.1 想定環境 78
5.3.2 スケジューリング手順 79
5.3.3 導入方法 81
5.4 解析 83
5.4.1 帯域幅 83
5.4.2 待ち時間 84
5.4.3 途切れのない再生 84
5.5 評価 85
5.5.1 帯域幅 85
5.5.2 平均待ち時間 85
5.5.3 比較 86
5.6 考察 90
5.6.1 平均待ち時間の変化 90
5.6.2 帯域幅の変化 91
5.6.3 スケジューリング手順について 91
5.6.4 プリフェッチの導入 91
5.7 むすび 92

6 結論 95
6.1 本論文のまとめ 95
6.2 今後の研究課題 97

謝辞 99

第1章

序章

1.1 研究の背景

近年，地上波放送や衛星放送のデジタル化が進んでいる [59, 60, 61]．国内における放送のデジタル化は，1996 年 6 月の通信衛星（CS，Communication Satellite）を用いた CS デジタル放送の開始に始まり，1998 年 7 月にはケーブルテレビでデジタル放送，2000 年 12 月には放送衛星（BS，Broadcasting Satellite）を用いた BS デジタル放送，2002 年 3 月には東経 110 度 CS デジタル放送が開始された．2003 年 10 月には地上波デジタルラジオ放送が首都圏および近畿圏で開始され，2003 年 12 月には東京，名古屋，大阪で地上波デジタルテレビ放送が開始された．2011 年には地上波ラジオ放送を除いた全ての放送のデジタル化が予定されている．受信契約件数は，年々増加しており，2004 年 6 月末で BS デジタル放送が約 602 万件，CS デジタル放送が約 368 万件である [49, 62]．諸外国においても，1998 年 9 月にイギリスで世界初の地上波デジタル放送が開始されて以来，2002 年度末までに米国，カナダ，韓国など世界 10 ヶ国でデジタル放送が開始されている．

デジタル放送は，アナログ放送に比べて高速に情報を配信できるため，高画質，高音質な番組を提供できるといった特長がある [38]．この特長を活かし，デジタル放送において，映像や音声といった連続メディアデータを放送型で配信する連続メディアデータ放送が普及している．CS デジタル放送においては，SKY PerfecTV! が，テレビ，ラジオ，データ放送を含めて約 300 種の番組を提供している [62]．JC-HITS では，ケーブルテレビ事業者が CS デジタル放送を行っている [35]．BS デジタル放送においても，NHK や BS Japan[12], WOWOW[71] といった委託放送事業者が番組を提供している．110 度 CS デジタル放送を用いた SKY PerfecTV!110 では，約 70 種の番組を提供している [63]．ep では，110 度 CS デジタル放送で，あらかじめ番組を蓄積しておくサービスを行っている [19]．他にも，

独自の放送衛星を用いて，モバイル端末向けに番組を提供するモバイル放送 [46] や，さまざまなジャンルの音楽を提供する SOUND PLANET[94] がある．地上波デジタル放送では，現在，地上波アナログ放送を提供している各テレビ局がアナログ放送と同じ番組を提供している．また，ブロードバンドネットワークの発展により，デジタル放送だけでなく，Windows Media や Real System，QuickTime といったインターネット上での連続メディアデータ放送も普及している．

連続メディアデータ放送では，ユーザが放送されている番組の中から視聴したい番組を選択して視聴するといった視聴形態が主流である．このため，ユーザは，視聴したい番組が放送されるまで待つ必要があり，すぐに視聴したい番組を見られない．そこで，視聴したいときに視聴したい番組を見られる視聴形態に対する要求が高まっている．この視聴形態はオンデマンド型とニアオンデマンド型とに分類できる．

- オンデマンド型

  オンデマンド型では，ユーザが番組を視聴したいときに，視聴したい番組の受信要求をサーバに送信する．サーバは，受信要求を受信すると，要求された番組の放送を開始する．放送されるデータを受信することで，ユーザは番組を視聴できる．サーバは，個々の受信要求に応えてデータの放送を開始するため，ユーザはすぐに視聴したい番組を見られる．しかし，クライアント数が増加し，受信要求が頻繁に送信されるほどサーバの負荷が大きくなる．このため，受信要求を幾つか受信してから番組の放送を開始することで，サーバの負荷を軽減する研究が行われている [8, 13, 14, 15, 20, 21, 30, 45, 53, 58]．また，クライアントからサーバへのアップリンクが必要になる．

- ニアオンデマンド型

  ニアオンデマンド型では，クライアントがアップリンクを用いて受信要求を送信する必要はなく，サーバは同じデータを周期的に繰り返して放送する（図 1.1）．クライアントは，所望のデータが放送されてから再生を開始することで，少ない待ち時間で視聴したい番組を見られる．繰り返して放送することにより，各クライアントの同じ番組に対する受信要求をまとめて満たせるため，クライアント数が増加しても，サーバの負荷が変化しない．

ユビキタス環境 [23, 24, 25, 26, 27, 40, 41, 42, 44, 65, 66, 67, 68, 74, 92] やウェアラブル環境 [39, 43, 48] の浸透にともない，連続メディアデータ放送では，クライアント数が非常に多いことが考えられる．このため，連続メディアデータ放送では，クライアント数が増加してもサーバの負荷が変化しないニアオンデマンド型が適している．

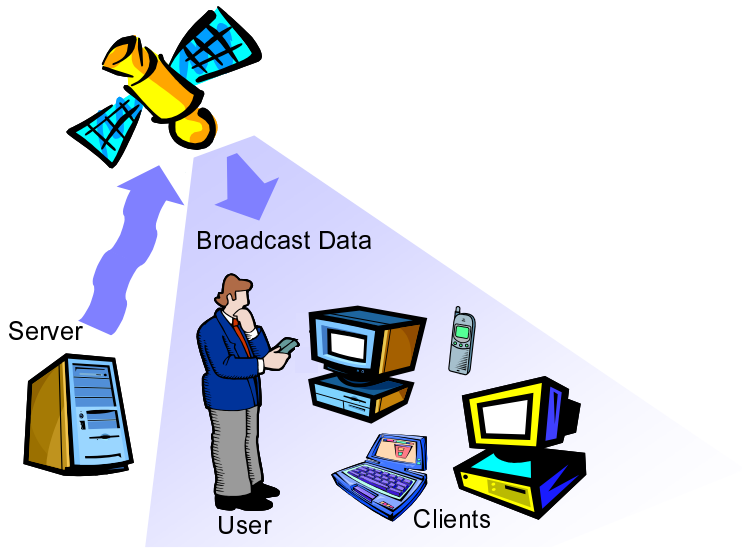

図 1.1: ニアオンデマンド型放送システム

ニアオンデマンド型は，クライアント数が多い場合に有効だが，クライアントは所望のデータが放送されるまで待つ必要がある．一方，ユーザにとって，連続メディアデータを最初から最後まで途切れずに再生できることが重要になる．そこで，連続メディアデータ放送において，最初から最後まで途切れずに再生することを考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮する技術に対する需要が高まっている．

1.2 提案方式の基本的なアイデア

連続メディアデータ放送では，一般に，データを幾つかの部分に分割して，データの初めの方を頻繁に放送して待ち時間を短縮する．データの初めの方を頻繁に放送することで，クライアントがデータの再生を開始できる機会が多くなり，待ち時間を短縮できる．以下，初めに，連続メディアデータを単純に繰り返して放送する場合の平均待ち時間を求め，次に，提案する待ち時間短縮法の基本的なアイデアを簡単な例を用いて説明する．

30 分の動画データの放送に 391 秒かかる場合を考える．これは MPEG2（Moving Picture Experts Group phase 2） で符号化された 5 Mbps の動画データを 23 Mbps の地上波デジタル放送で配信する場合に相当する．このデータを単純に繰り返して放送する場合，サーバは図 1.2 に示すように 391 秒ごとにデータを放送する．ユーザがランダムに受信要求を出すと，ユーザは要求を出してから動画の再生が開始されるまで平均して 196 秒（最大 391

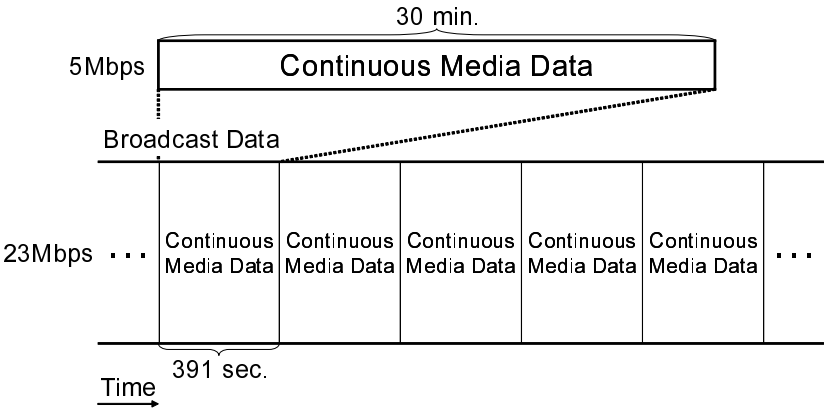

図 1.2: 単純繰り返し手法

秒，最小 0 秒）待つことになる．ただし，ここでは受信しながら再生するストリーミング型の再生を仮定する．

待ち時間短縮法の基本的なアイデアを説明するために，簡単な例を示す．この動画データを 15 分ずつに 2 等分し，図 1.3 のように前半を S_1，後半を S_2 とし，$S_1S_1S_2$ の順にスケジューリングして繰り返し放送する．S_1，S_2 の放送にはそれぞれ 196 秒かかり，放送の周期は 587 秒となる．放送周期中で，最初の S_1 の放送区間を T_1，次の S_1 の放送区間を T_2，最後の S_2 の放送区間を T_3 と順に呼ぶ．ここで，平均待ち時間は以下のように場合分けして求めることができる．

- ユーザが T_1 内でデータの受信要求を出す場合

  T_2 で S_1 が放送される．そのため，クライアントは T_2 の開始と同時にデータを再生できる．S_1 を再生し終える時刻は T_3 の開始時刻より遅くなり，クライアントは S_1 を再生している間に，T_3 で放送される S_2 を受信し，バッファに保存できる．S_1 を再生し終えた後，クライアントはバッファから S_2 を読み込むことで，S_2 を再生できる．すなわち，クライアントは T_2 の開始と同時にデータの再生を開始し，データを最後まで途切れずに再生できる．この場合，平均待ち時間は 98 秒になる．

- ユーザが T_2 内でデータの受信要求を出す場合

  T_3 で S_2 が放送される．そのため，クライアントは S_1 が放送されるまで待っている間に，S_2 を受信し，バッファに保存できる．クライアントは T_4 で初めて S_1 を受信できる．よって，クライアントは T_4 の開始と同時にデータの再生を開始し，データを最後まで途切れずに再生できる．この場合，平均待ち時間は 294 秒になる．

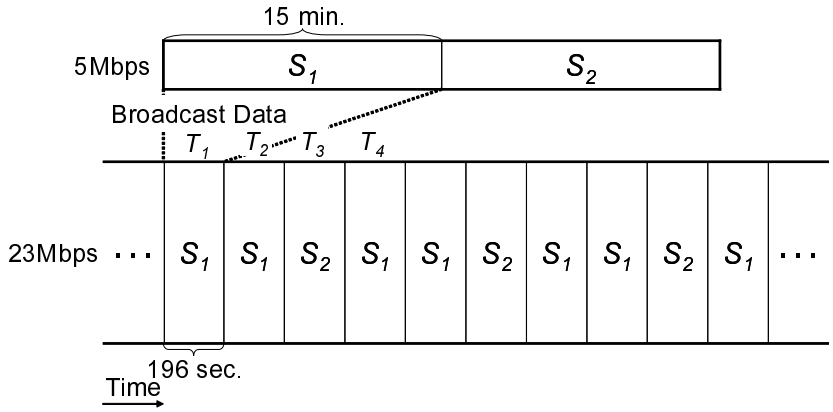

図 1.3: 基本となる考え方の例

- ユーザが T_3 内でデータの受信要求を出す場合

  クライアントは T_4 の開始と同時にデータを再生し，最後まで途切れずに再生できる．この場合，平均待ち時間は 98 秒になる．

結局，平均待ち時間は 163 秒となり，単純繰り返し手法と比べて約 17% 平均待ち時間を短くできる．以上のように，データを幾つかに等分割して，データの初めの部分を頻繁に放送することでクライアントの待ち時間を短縮できることが分かる．さらにこの場合，$S_1S_1S_1S_1S_2$ の順に繰り返し放送すれば，平均待ち時間が 137 秒 となり，単純繰り返し手法より約 30% 待ち時間を短縮できる．動画データを用いて基本的なアイデアを説明したが，音楽データ等その他の連続メディアデータにも適用できる．

前述の例では，データを 2 等分して待ち時間を短縮したが，データを幾つかの部分に等分割したり，異なるデータサイズに分割しても待ち時間を短縮できる．

1.3 研究の目的

連続メディアデータ放送において，データを最初から最後まで途切れずに再生することを考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮するさまざまな手法が提案されている [6, 7, 9, 10, 16, 17, 28, 29, 31, 34, 36, 37, 51, 52, 54, 55, 56, 70]．これらの手法のほとんどは，データを幾つかの部分に分割し，データの初めの方を頻繁に放送するように分割したデータをスケジューリングして放送している．前節で述べたように，データの初めの方を頻繁に放送することで，クライアントがデータの再生を開始できる機会が多くなり，待ち

時間を短縮できる．しかし，待ち時間を効率的に短縮するスケジュールは，再生の最小単位や使用可能なチャネル数といったシステム構成に依存するにもかかわらず，これらを考慮したスケジューリング手法が存在しなかった．待ち時間に影響を及ぼすシステム構成要素は次のものが挙げられる．

- 再生の単位

  MPEG（Moving Picture Experts Group）や MP3（MPEG Audio Layer-3）といった符号化方式では，GOP（Group of Pictures）やフレームと呼ばれる再生の単位を受信完了してからでなければ再生できない [32]．このため，受信したデータを即座に再生できると想定している既存の手法を適用しても，再生の単位の受信完了を待つ必要があり，効率的に待ち時間を短縮できない．再生の単位を考慮したうえで，スケジューリングすることで，効率的に待ち時間を短縮できる．

- 使用チャネル数

  地上波デジタル放送や無線 LAN（Local Area Network），Bluetooth[11] では，ハードウェア構成や処理の簡単化，処理速度の問題といった理由から，使用可能なチャネル数に制限がある [18, 50]．このため，使用チャネル数に制限を設けていない既存の手法を導入するためにはハードウェア構成を変更する必要がある．使用チャネル数に応じてスケジューリングすることで，効率的に待ち時間を短縮できる．

- プリフェッチ

  クライアントは，データの初めの部分をあらかじめ受信しておくことで，データの放送を待つ必要がなくなる．このため，ユーザが受信要求を出すとすぐに再生を開始できる．

- 早送り

  連続メディアデータを再生する場合，ユーザは，巻き戻しや早送りといったビデオ操作を行うことで，好みの場面をすぐに視聴できる [10]．特に，早送りは一度も再生していないデータを再生するため，早送りを考慮していない手法を適用すると，再生が途切れる可能性がある．早送りしても待つ必要がないようにスケジューリングして放送することで，途切れることなく早送りが可能になる．

そこで本論文では，再生の単位，使用可能なチャネル数，プリフェッチの割合，早送りの有無の 4 種類の要素に焦点を当て，既存手法の問題点を明確にし，その問題点を解決して効率的に待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．本研究で提案するスケ

ジューリング手法により，システム構成に応じて待ち時間を効率的に短縮でき，よりユーザの要求を満たす連続メディアデータ放送が可能となる．

1.4 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成され，その内容は以下の通りである．第 2 章では，文献 [79, 80] で公表した内容に基づき，再生の単位を考慮したスケジューリング手法を提案する．連続メディアデータは，一般に，再生の単位となるある程度のデータを受信完了してからでなければ再生できない．このため，受信したデータを即座に再生できると想定している既存の手法を適用しても，効率的に待ち時間を短縮できない．そこで，提案手法では，データを再生の単位ごとに分割して，分割したデータを再生開始時刻までに受信完了できるようにスケジューリングする．再生の単位を考慮する場合，再生の単位となるデータサイズが待ち時間に影響を及ぼすため，実際に符号化したデータの再生の単位を評価に用い，提案手法の有効性を示す．

次に，第 3 章では，使用チャネル数を考慮したスケジューリング手法を提案する．放送システムでは，ハードウェア構成や処理の簡単化，処理速度の問題といった理由から，使用可能なチャネル数に制限がある．既存手法では，使用チャネル数は帯域幅から算出されるため，導入するためにはハードウェア構成を変更する必要がある．そこで，提案手法では，使用チャネル数に応じて分割したデータをスケジューリングし，効率的に待ち時間を短縮する．使用チャネル数が単一チャネルのみである場合には，分割したデータを単一チャネルでスケジューリングして放送する必要があり，複数チャネル使用できる場合とは異なったアプローチで待ち時間を短縮する必要がある．このため，まず，文献 [75, 76, 77, 81, 83, 84, 85, 86, 90, 91] で公表した内容に基づいて，単一チャネルで待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．また，文献 [82] で公表した内容に基づき，使用チャネル数を考慮したうえで，複数チャネルで待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．評価では，既存手法で使用チャネル数を変更できるように拡張した手法と提案手法を比較し，提案手法の有効性を示す．

第 4 章では，文献 [89] で公表した内容に基づき，データのプリフェッチを考慮したスケジューリング手法を提案する．幾つかの既存手法では，クライアントは，所望のデータが放送されるまで待つことなく再生を開始できるように，データの初めの部分をプリフェッチしている．そこで，第 3 章で提案した手法を拡張し，プリフェッチを導入して，待ち時間のない再生を可能にする．評価では，プリフェッチを行う既存手法と比べて，途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅を削減できることを示す．

さらに第 5 章では，文献 [78, 87, 88] で公表した内容に基づき，早送りを考慮したスケジューリング手法を提案する．連続メディアデータを再生する場合，ユーザは，巻き戻しや早送りといったビデオ操作を行うことで，好みの場面をすぐに視聴できる．巻き戻しなどの過去に再生したデータを再び再生する操作については，再生したデータをバッファに保存しておくことで可能だが，早送りは一度も再生していないデータを再生する．このため，早送りを考慮していない手法を適用すると，再生が途切れる可能性がある．提案手法では，データを早送り用とそれ以外の残りのデータに分割し，早送りしても再生が途切れないようにスケジューリングして，待ち時間を短縮する．既存手法を改良した手法と比較し，提案手法の平均待ち時間が短くなることを示す．さらに，第 4 章で提案した手法と組み合わせて，プリフェッチを導入する．

最後に，第 6 章では，本研究全体のまとめを行ったうえで，連続メディアデータ放送のスケジューリング方式に関する今後の研究課題について述べる．

第2章

再生の単位を考慮した手法

2.1 まえがき

従来の研究では，受信したデータを即座に再生できると想定し，データを等分割するといったように連続メディアデータを既定のデータサイズに分割して，初めの方を頻繁に放送することで平均待ち時間を短縮している．しかし，連続メディアデータは，一般に，再生の単位となるある程度のデータを受信完了してからでなければ再生できない．たとえば，MPEG や MP3 では，GOP やフレームと呼ばれる再生の単位を受信完了してからでなければ再生できない [32]．このため，既存手法を適用しても，再生の単位の受信完了を待つ必要があり，効率的に待ち時間を短縮できない．

そこで，本章では，再生の単位を考慮してクライアントの平均待ち時間を短縮する手法を提案する．提案手法では，再生に必要なデータサイズがあらかじめ定められ，そのデータサイズごとにデータを分割し，分割したデータを再生開始時刻までに受信完了できるようにスケジューリングして待ち時間を短縮する．

以下，第 2.2 節では，関連研究について述べ，第 2.3 節では提案手法を説明する．第 2.4 節では，提案手法の解析を行い，第 2.5 節で評価を行う．第 2.6 節で提案手法の考察を行い，最後に第 2.7 節で本章のまとめを行う．

2.2 関連研究

連続メディアデータ放送で，ユーザがクライアントにデータの受信要求を出してから，クライアントがデータの再生を開始するまでの平均待ち時間を短縮する様々な手法が提案されている．これらの研究では，データの受信開始と同時にデータを再生できると想定して

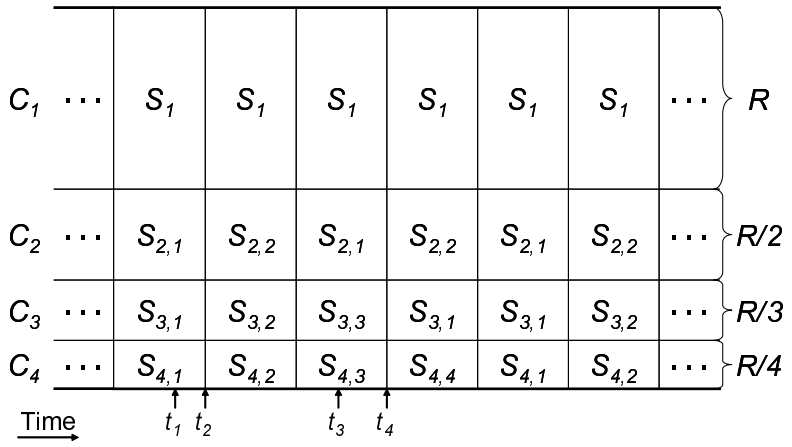

図 2.1: HB 法の放送スケジュール（$N = 4$）

いる．

HB（Harmonic Broadcasting）法 [36] では，連続メディアデータを N 個のセグメントに等分割する．分割したセグメントを $S_1, \cdots, S_N$ で表す．添え字は時間軸に沿って増加する．さらに S_i（$i = 1, \cdots, N$）を i 個のサブセグメントに分割し，サブセグメントを $S_{i,1}, \cdots, S_{i,i}$ で表す．セグメントやサブセグメントは受信開始と同時に再生でき，また，途中から受信できず初めから受信しなければならない．N 個のチャネル $C_1, \cdots, C_N$ を用い，C_i の帯域幅を R/i とする．ここで，R は連続メディアデータの再生レートであり，たとえば，MPEG2 で符号化された 5 Mbps の連続メディアデータを放送する場合，$R = 5$ Mbps となる．C_i で $S_{i,1}, \cdots, S_{i,i}$ を繰り返し放送すると，C_1 で S_1 が頻繁に放送されるため，クライアントの平均待ち時間を短縮できる．たとえば，$N = 4$ の HB 法の放送スケジュールは図 2.1 のようになる．

HB 法では，S_1 の受信開始と同時に再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できないという問題がある．たとえば，図 2.1 の時刻 t_1 で受信要求を出し，t_2 で S_1 の受信と同時に再生を開始すると，$S_{2,1}$ の再生終了時刻は t_3 となるが，$S_{2,1}$ の受信完了時刻は t_4 となるため，$S_{2,1}$ が再生までに受信できないことが分かる．この問題を考慮して CHB（Cautious Harmonic Broadcasting）法 [54] が提案されている．

CHB 法は，S_j（$j = 4, \cdots, N$）を $j - 1$ 個のサブセグメント $S_{j,1}, \cdots, S_{j,j-1}$ に分割し，$N - 1$ 個のチャネルを用いる．C_1 および C_2 の帯域幅を R とし，C_k（$k = 3, \cdots, N - 1$）の帯域幅を R/k とする．C_1 で S_1，C_2 で S_2 と S_3，C_k で $S_{k+1,1}, \cdots, S_{k+1,k}$ を順番に繰り返し放送する．こうすることで，S_k の再生開始時刻までに S_k を受信完了できるため，S_1

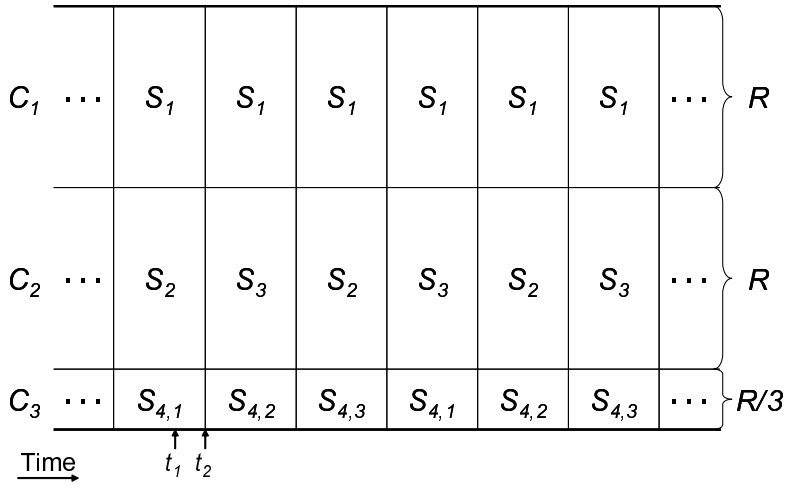

図 2.2: CHB 法の放送スケジュール（$N = 4$）

の受信開始と同時に再生を開始しても，最後まで途切れずに再生できる．ただし，同じ分割数では HB 法よりも必要な帯域幅は大きくなる．たとえば，$N = 4$ の CHB 法の放送スケジュールは図 2.2 のようになる．

本章では，データの受信開始と同時にデータを再生できるとは想定せず，再生に必要なデータサイズがあらかじめ定められていると考え，以下の議論を進める．

2.3 提案手法

再生に必要なデータサイズがあらかじめ定められている場合にクライアントの平均待ち時間を短縮するスケジューリング手法として AHB（Asynchronous Harmonic Broadcasting）法を提案する．AHB 法は HB 法を拡張した手法であり，分割したデータを再生開始時刻までに配信できるように各チャネルの帯域幅を調整するという HB 法のアイデアを利用している．再生に必要なデータサイズごとにデータをセグメントに分割し，セグメントをスケジューリングする．

2.3.1 想定環境

本章で提案する手法の想定環境を以下に挙げる．初めの二項目は，連続メディアデータに関する制限であり，以降は通信に関する項目である．セグメントとは分割されたデータを指す．

- クライアントが連続メディアデータの再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できる．
- クライアントはデータを受信開始と同時に再生できず，ある程度受信しなければ再生を開始できない．
- クライアントは複数のチャネルから同時にデータを受信できる．
- クライアントは十分な容量のバッファを持ち，受信したデータを再生している間も放送されているデータを受信し，バッファに保存できる．
- クライアントは放送されているデータをつねに受信せず，ユーザが受信要求を出してから受信を開始する．
- サーバはニアオンデマンド型の放送を行う．
- サーバはデータ更新しない．
- セグメントのヘッダサイズはセグメントのデータサイズに比べて非常に小さいため，ヘッダの放送にかかる時間は無視する．

このような環境として，たとえば，MPEG2 で符号化された動画データを衛星デジタル放送で配信する場合が考えられる．第 2.1 節で述べたように，衛星デジタル放送では複数のチャネルを同時に扱え，また，MPEG2 では受信と同時に再生できず，GOP を受信完了しなければその GOP を再生できない．

以上のような環境では，セグメントの放送スケジュールによって待ち時間が変化するため，スケジューリング手順が重要になる．提案手法では，クイアントがセグメントを再生開始時刻まで受信完了できるように，サーバがセグメントをスケジューリングすることで，待ち時間を効率的に短縮する．次項にスケジューリングの手順を示す．

2.3.2 スケジューリング手順

連続メディアデータの再生時間を D，再生中の再生レートは一定（CBR）で R とする．連続メディアデータの再生に必要なデータサイズを初めから順に $a_1, \cdots, a_N$ とし，このサイズの N 個のセグメント $S_1, \cdots, S_N$ に分割する．N は再生に必要なデータサイズの個数であり，連続メディアデータによって一意に決まる．例えば，MPEG2 では，GOP の個数が N になる．このとき，S_i（$i = 1, \cdots, N$）の再生時間 p_i は a_i/R となり，$D = p_1 + \cdots + p_N = (a_1 + \cdots + a_N)/R$ となる．以下の手順に従って放送スケジュールを作成する．

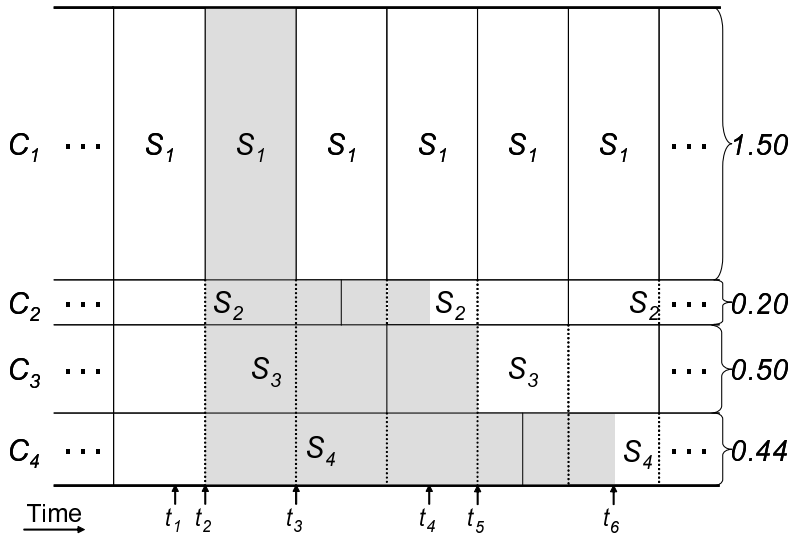

図 2.3: AHB 法の放送スケジュール

1. 連続メディアデータをデータサイズが $a_1, \cdots, a_N$ の N 個のセグメント $S_1, \cdots, S_N$ に分割する．

2. N 個のチャネル $C_1, \cdots, C_N$ を用い，C_1 の帯域幅を b_1，C_j（$j = 2, \cdots, N$）の帯域幅 b_j を以下の式で与える．

$$b_j = \frac{a_j}{\frac{a_1}{b_1} + p_1 + \cdots + p_{j-1}} \tag{2.1}$$

3. C_i で S_i を繰り返し放送する．ただし，セグメントは途中から受信できないため，S_1 と同期して受信できるように S_j を S_1 の放送間隔と同じ間隔で放送できるいくつかのサブセグメントに分割して放送する．

b_1 の値は，使用できる帯域幅に合わせて調整する．すなわち，与えられた使用できる帯域幅と，放送に必要となる帯域幅 $b_1 + \cdots + b_N$ を等しくなるようにする．帯域幅を式 (2.1) で与えることで，S_j の再生開始時刻までに S_j を受信完了できる．たとえば $R = 1$，$b_1 = 1.5$，$a_1 = 3$，$a_2 = 1$，$a_3 = 3$，$a_4 = 4$ の AHB 法の放送スケジュールは図 2.3 のようになる．点線がサブセグメントの区切りを示し，灰色の部分は t_1 で受信要求を出す場合に受信するデータを示す．

2.3.3 導入方法

連続メディアデータ配信者は再生に必要なデータサイズごとに連続メディアデータを分割し，使用できる帯域幅に合わせて b_1 を調整して，AHB 法で作成した放送スケジュールに従ってデータを繰り返し放送する．セグメントを放送する際，そのセグメントが含まれる連続メディアデータの識別子とセグメントの番号が分かるように，これらの情報をヘッダとしてデータの初めに付加する．こうすることで，複数の連続メディアデータも同時に放送できる．

ユーザがクライアントに連続メディアデータの受信要求を出すと，クライアントは放送されている連続メディアデータの中から，指定された連続メディアデータの受信を開始し，その連続メディアデータの S_1 の受信完了と同時に再生を開始する．再生中にも放送されているデータを受信し，バッファに保存する．S_i（$i = 2, \cdots, N$）のサブセグメントをすべて受信すると，それらを結合して S_i を再生できるようにする．データをつなげるだけのため，非常に短い時間で結合できる．S_{i-1} の再生終了後，バッファにある結合された S_i を即座に続けて再生する．こうすることで，クライアントは連続メディアデータを最後まで途切れずに再生できる．たとえば，図 2.3 において，時刻 t_1 で受信要求を出し，クライアントが t_2 で S_1 の受信を開始し，t_3 で S_1 の受信完了と同時に再生を開始する場合を考える．$b_1 = 1.5$ のため，S_1 の再生時間は放送にかかる時間より長く，t_4 で S_1 の再生を終了する．t_4 に S_2 を受信完了するため，S_1 の再生終了後，続けて S_2 を再生できる．S_2 の再生終了時刻 t_5 には S_3 を受信完了しており，S_3 再生終了時刻 t_6 においても，S_4 を受信完了しているため，途切れずに最後まで再生できる．

2.4 解析

提案手法の解析を行う．

2.4.1 帯域幅

連続メディアデータの放送に必要となる帯域幅 B は

$$
\begin{aligned}
B &= \sum_{i=1}^{N} b_i \\
&= b_1 + \sum_{i=2}^{N} \frac{a_i}{\frac{a_1}{b_1} + p_1 + \cdots + p_{i-1}}
\end{aligned}
$$

$$= \quad b_1 + \sum_{i=2}^{N} \frac{a_i b_1 R}{a_1 R + (a_1 + \cdots + a_{i-1})\, b_1} \tag{2.2}$$

となる．

2.4.2 待ち時間

S_1 が a_1/b_1 間隔で放送されているため，クライアントが連続メディアデータの再生を開始するまでの最大の待ち時間 W_{max} は S_1 の放送開始直後にユーザがクライアントに受信要求を出してから S_1 を受信完了するまでの時間に等しく，

$$W_{max} = \frac{2a_1}{b_1} \tag{2.3}$$

で与えられる．最小の待ち時間 W_{min} は S_1 の放送開始直前にユーザがクライアントに受信要求を出す場合であり，

$$W_{min} = \frac{a_1}{b_1} \tag{2.4}$$

となる．待ち時間は一様に分布しているため，平均待ち時間 W_{ave} は

$$W_{ave} = \frac{3a_1}{2b_1} \tag{2.5}$$

となる．

2.4.3 途切れのない再生

AHB 法で作成した放送スケジュールでは，クライアントは S_1 の受信完了と同時に S_1 の再生を開始しても最後まで途切れずに再生できる．この理由を以下に示す．

クライアントは S_1 の受信開始から a_1/b_1 後に S_1 を受信完了し，再生を開始する．S_1 の再生開始から $p_1 + \cdots + p_{i-1}$ 後に S_i（$i = 2, \cdots, N$）の再生を開始する．すなわち，受信開始から S_i の再生開始まで $a_1/b_1 + p_1 + \cdots + p_{i-1}$ かかる．一方，S_i を放送する C_i の帯域幅を式 (2.1) で与えると，S_i は $a_1/b_1 + p_1 + \cdots + p_{i-1}$ 間隔で放送され，クライアントは S_1 の受信開始と同時に S_i のサブセグメントの受信を開始できるため，S_i の受信に $a_1/b_1 + p_1 + \cdots + p_{i-1}$ だけかかる．よって，S_i の再生開始時刻に S_i を受信完了できるため，クライアントは連続メディアデータを最後まで途切れずに再生できる．

このように，S_i の放送間隔が S_1 の放送間隔の整数倍になっておらず，S_1 と S_i の放送間隔に同期がとれていないことが，AHB 法と名づけた理由である．

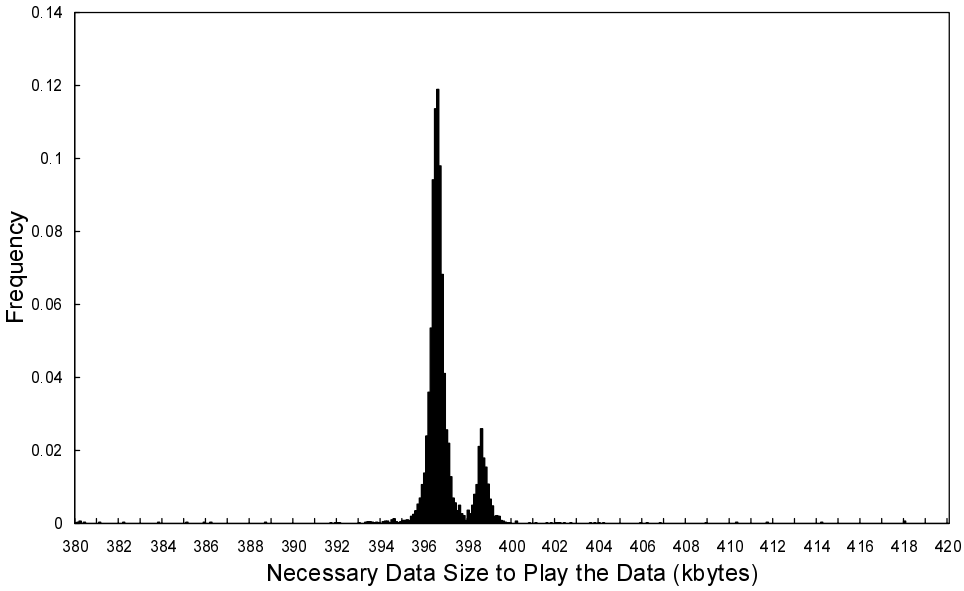

図 2.4: 再生単位のデータサイズの分布

表 2.1: 評価に用いたデータの統計値

最小値（k バイト）	70
最大値（k バイト）	458
平均値（k バイト）	392
分散（k バイト)^2	1,163
総和（M バイト）	2,349
セグメントの数（個）	5,994

2.5 評価

提案手法のパラメータ b_1 が，必要となる帯域幅や平均待ち時間に与える影響の評価や，HB 法や CHB 法で再生が途切れない時刻まで待ってから再生する場合との比較を行う．評価には 60 分の連続メディアデータを MPEG2 で符号化したデータを用い，GOP ごとに再生できるため，$a_1, \cdots, a_N$ を GOP のデータサイズとした．衛星デジタル放送の動画配信で一般的な 5 Mbps の再生レート [22]（$R = 5$Mbps）で符号化した場合の，再生に必要なデータサイズのヒストグラムを図 2.4 に示し，統計値を表 2.1 に示す．再生単位のデータサイズの分布が必ずしもこのような分布になるとは限らないが，再生に必要なデータサ

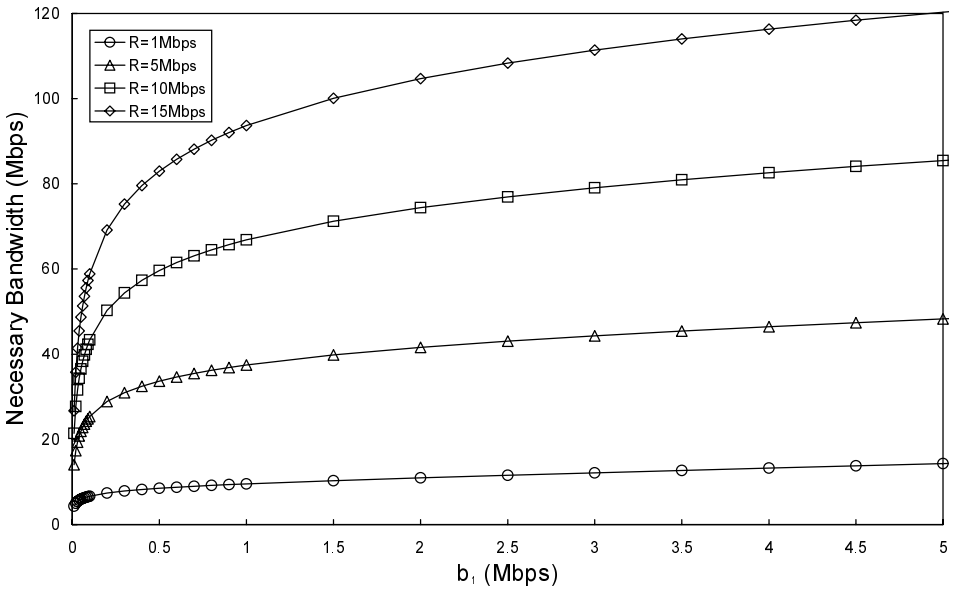

図 2.5: AHB 法で必要となる帯域幅

イズは一定でないことが分かる．

2.5.1 帯域幅

AHB 法で連続メディアデータを放送する際に必要となる帯域幅を図 2.5 に示す．横軸は C_1 の帯域幅 b_1 とし，縦軸は必要となる帯域幅とした．このグラフより，b_1 の値が大きいほど必要となる帯域幅は大きくなるが，b_1 が比較的小さい場合には，増加量が大きいことが分かる．たとえば，$R = 5$ Mbps の場合，$b_1 = 0.1$ Mbps では 25 Mbps の帯域幅が必要になり，0.2 Mbps では 28 Mbps の帯域幅が必要になるが，$b_1 = 0.9$ Mbps では 36 Mbps，1.0 Mbps では 37 Mbps となっている．これは，b_1 に反比例して S_1 の放送間隔（a_1/b_1）が短くなるためで，b_1 が比較的小さい場合には S_1 の放送間隔の減少量が大きく，式 (2.1) で与えられる他のチャネルの帯域幅の増加量が大きくなるためである．C_1 以外のチャネルの帯域幅も b_1 に依存するため，必要な帯域幅は b_1 に正比例しない．

たとえば，$R = 5$ Mbps，$b_1 = 80$ kbps の場合，24 Mbps の帯域幅が必要なことが分かる．衛星デジタル放送における動画配信の帯域幅が 24 Mbps であり，現在でも再生レートの数倍の帯域幅を用いて放送開始時刻をずらして放送する場合があるため，$R = 5$ Mbps の動画を 24 Mbps の帯域幅を用いて放送することは現実的といえる [22]．

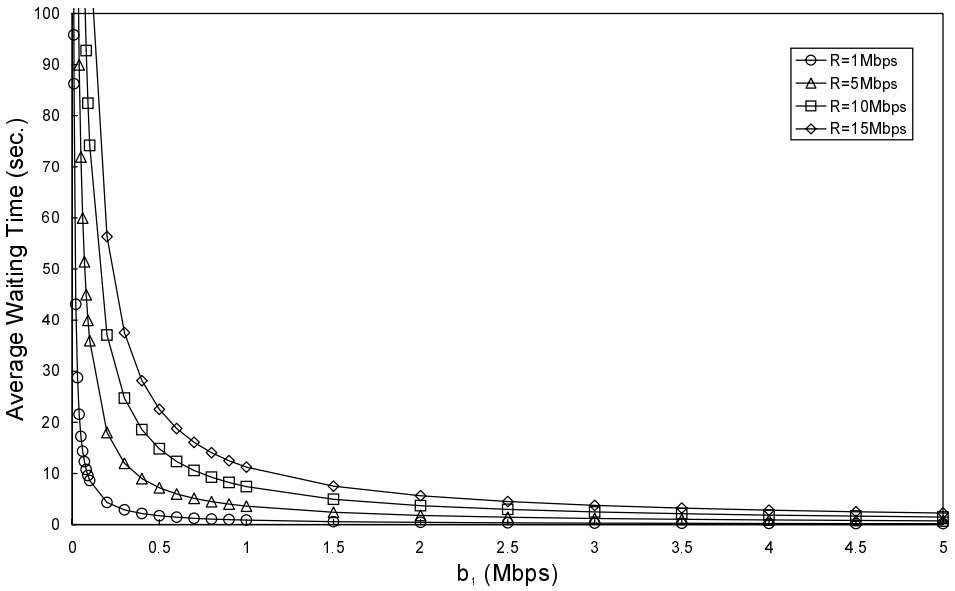

図 2.6: AHB 法の平均待ち時間

2.5.2 平均待ち時間

AHB 法の平均待ち時間を図 2.6 に示す．横軸は b_1 とし，縦軸は平均待ち時間とした．このグラフより，b_1 が大きいほど平均待ち時間が短くなることが分かる．これは，b_1 が大きいほど S_1 の放送間隔が短くなり，クライアントの S_1 を受信完了するまでの時間が短くなるためである．

図 2.5 と図 2.6 から導出した AHB 法の帯域幅と平均待ち時間の関係を図 2.7 に示す．横軸は使用する帯域幅とし，縦軸は平均待ち時間とした．たとえば，MPEG2 で符号化された再生レートが 5 Mbps の連続メディアデータを 24 Mbps の衛星デジタル網で放送する場合，平均待ち時間は 47.3 秒になる．

2.5.3 HB 法や CHB 法との比較

HB 法や CHB 法は，データの受信開始と同時にデータを再生できると想定しているため，ある程度受信しなければ再生できない場合には，再生に必要なデータをそのデータの再生開始時刻までに受信完了できない可能性がある．このため，S_1 を受信完了しても，再生開始時刻までに必要なデータを受信完了できるように待つ必要があり，データの受信開始と同時にデータを再生できると想定した場合とは異なる待ち時間となる．たとえば，$a_1 = 3$,

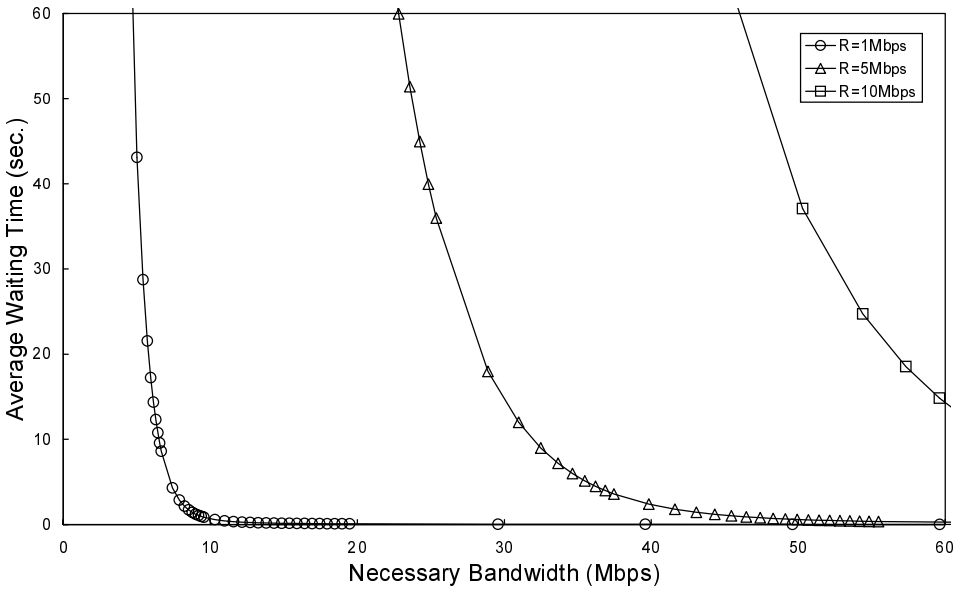

図 2.7: AHB 法の帯域幅と平均待ち時間

$a_2 = 1$，$a_3 = 3$，$a_4 = 4$ の場合，AHB 法では再生に必要なデータサイズ $a_1, \cdots, a_4$ と合わせて $S_1, \cdots, S_4$ に分割するが，HB 法では，$a_1, \cdots, a_4$ とは関係なく $S'_1, \cdots, S'_4$ に分割し，図 2.8 に示すように放送する．時刻 t_1 で受信を開始したクライアントが t_2 で S_1 の受信完了（S'_2 に含まれる S_1 の後の部分は，C_2 で受信済み）と同時に再生を開始する場合，再生が途切れないためには S_4 を t_3 までに受信する必要があるが，t_4 で S'_4 を受信完了するため，S_4 の再生開始時刻までに S_4 を受信完了できない．この場合，S'_1 を受信完了してから $t_4 - t_3$ 後に再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できる．そこで，HB 法や CHB 法で最後まで途切れずに再生できるまで待ってから再生を開始する場合の平均待ち時間と比較を行った．結果を 図 2.9 に示す．横軸は使用する帯域幅，縦軸は平均待ち時間を示す．AHB 法のパラメータ b_1 と，HB 法や CHB 法の連続メディアデータの分割数は，使用できる帯域幅に合わせて調整した．このグラフより，HB 法や CHB 法では，再生に必要なデータサイズを考慮しないため，AHB 法に比べて平均待ち時間が長くなることが分かる．また，HB 法の平均待ち時間が CHB 法の平均待ち時間より短い．これは，同じ帯域幅では HB 法の分割数が CHB 法の分割数より大きく，S_1 の放送間隔が短くなり，頻繁に放送されるためと考えられる．ただし，平均待ち時間は，再生に必要なデータサイズと，再生に必要なデータを含むセグメントの放送間隔に依存するため，必ずしも CHB 法より HB 法の平均待ち時間が短くならない．たとえば，$R = 1$，$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$ で，再生レー

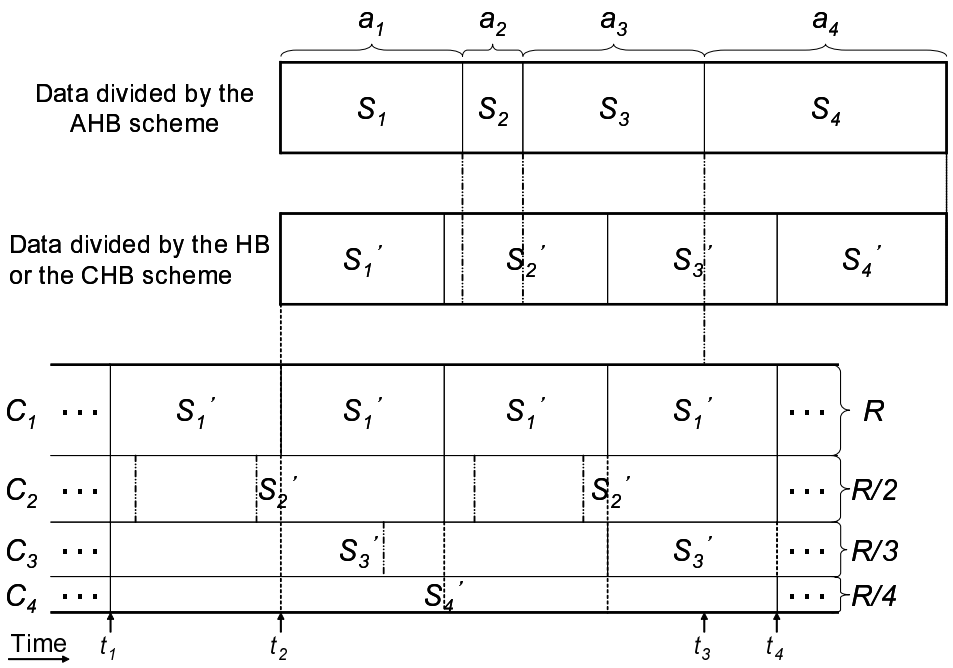

図 2.8: AHB 法と HB 法，CHB 法のデータの分割例

トの 2.34 倍の帯域幅を使用できる場合，HB 法よりも CHB 法の平均待ち時間が短い．

MPEG2 で符号化された再生レートが 5 Mbps の連続メディアデータを 24 Mbps の衛星デジタル網で放送する場合，AHB 法では平均待ち時間は 47.3 秒だが，HB 法では 78.3 秒，CHB 法では 123 秒になることが分かる．

2.6 考察

2.6.1 既存手法との相違

既存の HB 法や CHB 法と比較した結果，AHB 法の平均待ち時間が短いことが分かる．このように，再生に必要なデータサイズを考慮せず，受信したデータはすぐに再生できると想定している手法では，平均待ち時間が AHB 法よりも長くなると考えられる．

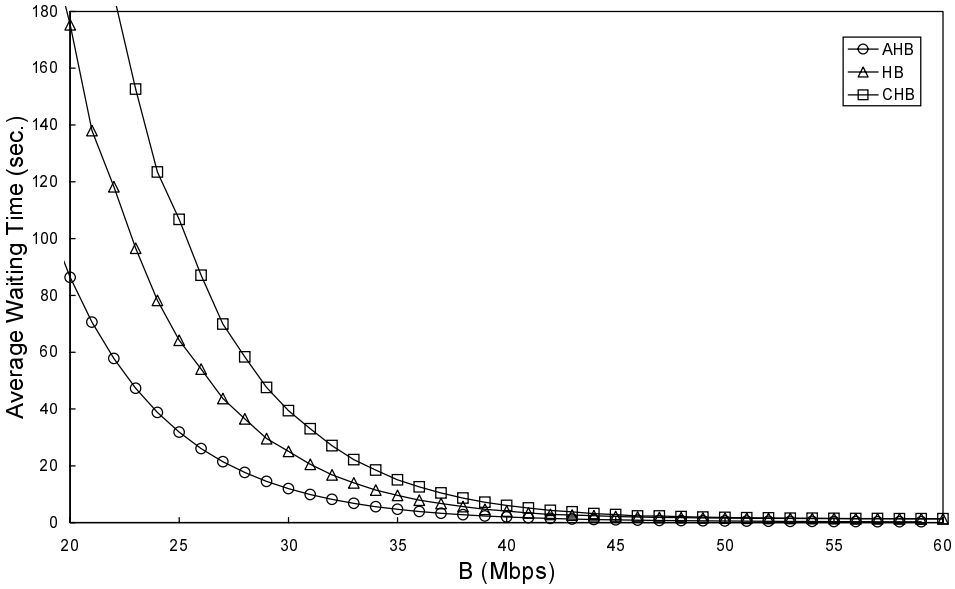

図 2.9: AHB 法と HB 法，CHB 法の平均待ち時間

2.6.2 再生に必要なデータサイズと平均待ち時間

第 2.5 節では，実際に MPEG2 で符号化したデータを用いて a_1，$\cdots$，a_N の値を決定して評価を行ったが，AHB 法の平均待ち時間はこれらの値に依存するため，再生に必要なデータサイズの分布が与える平均待ち時間への影響について考察を行う．

セグメントの数の平均待ち時間への影響

セグメントの数 N が与える平均待ち時間への影響について考察を行う．

$R = 5$ Mbps の 60 分の連続メディアデータを 24 Mbps の帯域幅を用いて放送する場合を想定し，再生に必要なデータサイズは一定値 a として（$a_1 = \cdots = a_N = a$）平均待ち時間を算出した．この一定値は a_1，$\cdots$，a_N の総和が $5\text{M}\times 60 \times 60/8 = 2250$ M バイトになるように調整した．また，AHB 法で 30 分の連続メディアデータを放送する場合（総和は 1125 M バイト）の平均待ち時間も算出した．セグメントの数の平均待ち時間への影響を図 2.10 に示す．横軸は N，縦軸は平均待ち時間とした．このグラフより，AHB 法では N が大きいほど平均待ち時間は短くなるが，N が比較的大きい場合には，減少量が小さいことが分かる．これは，N に反比例して各セグメントのデータサイズが小さくなるためで，N が比較的大きい場合には，このデータサイズの減少量が小さいために，各チャネルの帯域幅

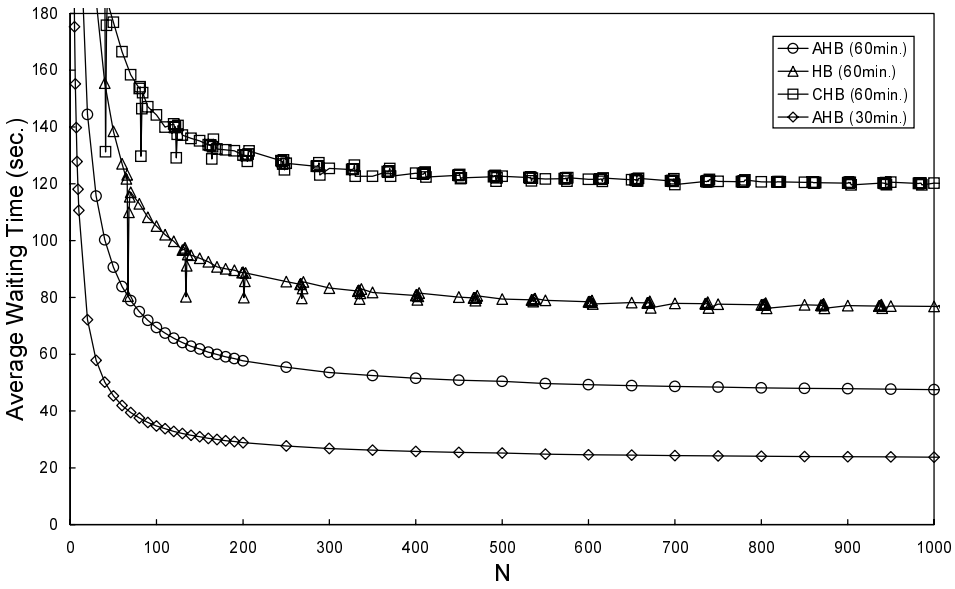

図 2.10: セグメントの数と平均待ち時間

の減少量も少なく S_1 の放送間隔が大きく減少しないため，平均待ち時間も大きく減少しない．たとえば，60 分のデータを放送する場合，$N = 50$ では，$a = 45$ M バイト，$b_1 = 5.96$ Mbps とすることで必要な帯域幅は 24 Mbps となり，平待ち時間は $(3 \times 45\text{M}\times 8)/(2 \times 5.96\text{M})$ =90.6 秒になり，$N = 100$ では，$a = 22.5$ M バイト，$b_1 = 3.89$ Mbps，平均待ち時間は $(3 \times 22.5\text{M}\times 8)/(2 \times 3.89\text{M})$ =69.4 秒になるが，$N = 950$ では，$a = 2.37$ M バイト，$b_1 = 596$ kbps，平均待ち時間は $(3 \times 2.37\text{M}\times 8)/(2 \times 596)$ =47.7 秒になり，$N = 1000$ では，$a = 2.25$ M バイト，$b_1 = 568$ kbps，平均待ち時間は $(3 \times 2.25\text{M}\times 8)/(2 \times 568)$ =47.5 秒になる．このように N の変化量が 50 でも，a_1 や b_1 の減少量が異なるため，平均待ち時間の減少量に差が出る．

データを等分割する手法である HB 法や CHB 法では，周期的に平均待ち時間が急激に短くなることが分かる．これは，等分割の分割位置と再生の単位となるデータの分割位置が一致し，待ち時間が最長の場合でも，分割したデータの最初の部分（図 2.8 における S'_1）の受信完了と同時に再生を開始できるためである．24 Mbps の帯域幅を使用するために，HB 法ではデータを 67 等分，CHB 法では 41 等分しており，N がこの分割数の整数倍の場合に，平均待ち時間が急激に短くなっている．特に，$N = 67$ の場合のように，N が HB 法の分割数と等しく，再生に必要なデータサイズが一定の場合には AHB 法と HB 法の放送スケジュールは同じになり，平均待ち時間も等しくなる．

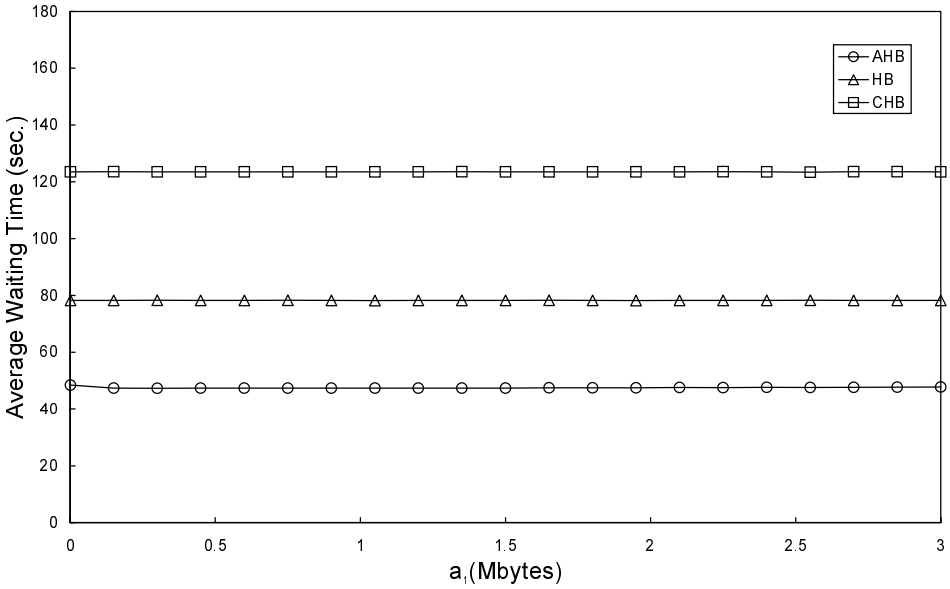

図 2.11: a_1 のデータサイズと平均待ち時間

a_1 の平均待ち時間への影響

AHB 法の平均待ち時間を与える式 (2.5) に a_1 が直接現れているため，a_1 が平均待ち時間に大きな影響を及ぼす可能性がある．そこで，a_1 のみを変化させた場合の平均待ち時間の変化について考察する．

第 2.5 節で用いたデータと合わせて $N = 5994$，$R = 5$ Mbps とし，a_1 のみを変化させ，a_2，$\cdots$，a_N を一定として平均待ち時間を算出した．この一定値は，a_1，$\cdots$，a_N の総和が 2349 M バイトになるように調整した．この場合の平均待ち時間を図 2.11 に示す．a_1 の値が 3M バイトの場合，S_1 は 4.8 秒のデータに相当する．1 個の GOP の再生時間は通常 0.5 秒であり，再生の単位がこれほど長くなることは一般的ではないが，評価を行ううえで十分大きくした [32]．このグラフより，a_1 が変化しても平均待ち時間が大きく変わらないことが分かる．a_1 が大きくなると a_2，$\cdots$，a_N が小さくなるが，その減少量は a_1 の増加量に比べて小さいため，式 (2.1) で与えられる C_2，$\cdots$，C_N の帯域幅が減少する．結局，b_1 を大きくできるため，S_1 の放送にかかる時間は大きく変わらず，平均待ち時間も大きく変わらない．たとえば，$a_1 = 100$k バイトの場合，$b_1 = 25.4$kbps とすることで必要な帯域幅は 24Mbps，平均待ち時間は 47.3 秒になり，また，a_1 が 1M バイトの場合，$b_1 = 253$k バイトとすることで必要な帯域幅は 24Mbps，平均待ち時間は 47.4 秒になる．a_1 が 10 倍になると，b_1 もほぼ 10 倍になり，平均待ち時間が大きく変わらないことが分かる．ただ

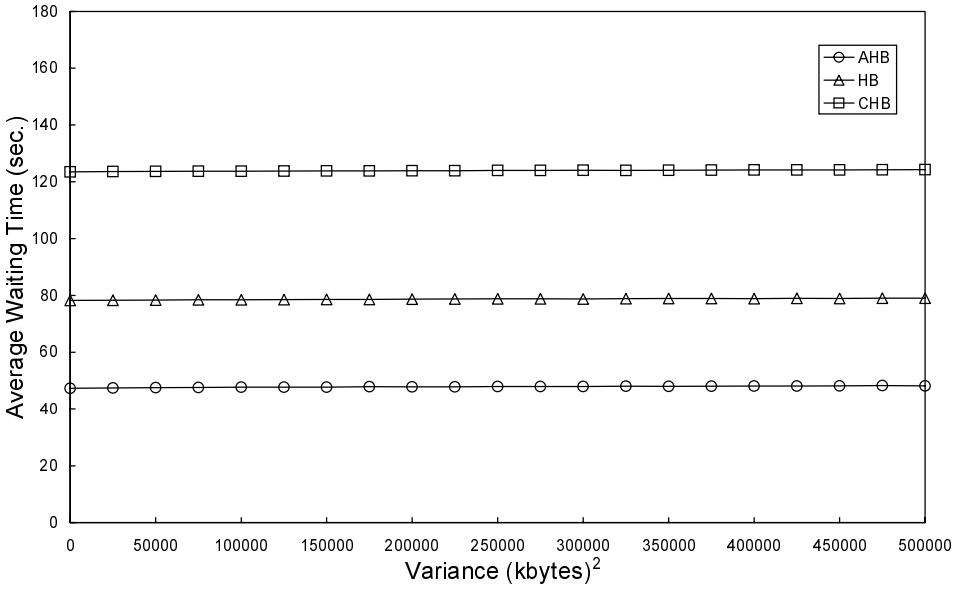

図 2.12: a_1，$\cdots$，a_N の分散と平均待ち時間

し，a_1 がさらに大きい場合には，a_1 の増加率に比べて b_1 の増加率が小さくなり，平均待ち時間が大きく変化する．たとえば，$a_1 = 100$ M バイト（再生時間は 2 分 40 秒）の場合，$b_1 = 10.1$Mbps とすることで必要な帯域幅は 24Mbps，平均待ち時間は 119 秒になり，$a_1 = 1000$M バイトの場合，$b_1 = 20.3$Mbps とすることで必要な帯域幅は 24Mbps，平均待ち時間は 591 秒になる．a_1 を 10 倍しても，b_1 が 2 倍程度しか増えず，平均待ち時間が大きく増加していることが分かる．

HB 法や CHB 法において平均待ち時間が大きく変わらない点については，総和が等しく N が大きいために，等分割の分割位置と再生の単位となるデータの分割位置の差（図 2.8 における $t_4 - t_3$）が各セグメントについて平均するとそれほど変わらないためである．

分散の平均待ち時間への影響

a_1，$\cdots$，a_N の分散が与える平均待ち時間への影響について考察を行う．

第 2.5 節で用いたデータと合わせて $R = 5$Mbps とし，a_1，$\cdots$，a_N を平均値が 392k バイトの正規分布で発生させ，N は a_1，$\cdots$，a_N の総和が 2349M バイト程度になるように調整した．負の値が発生した場合には，その値を無効にした．このようにして発生させたデータを 24Mbps の帯域幅を用いて放送する場合の平均待ち時間を図 2.12 に示し，発生させたデータの分散が 0 (k バイト)^2 と 5×10^5 (k バイト)^2 の場合の統計値を表 2.2 に示す．

表 2.2: 図 2.12 で用いた a_1，$\cdots$，a_N の統計値

分散（k バイト）^{2}	0	5×10^5
最小値（k バイト）	392	1.1
最大値（k バイト）	392	3,065
平均値（k バイト）	392	733
総和（M バイト）	2,349	2,349
セグメントの数（個）	5,994	3,202

横軸は分散，縦軸は平均待ち時間とした．このグラフより，AHB 法では，分散が変化しても平均待ち時間は大きく変わらないことが分かる．これは，セグメントのデータサイズにばらつきがある場合でも，総和がほぼ等しく，セグメントの数 N が大きいため，S_1 の放送にかかる時間がそれほど変わらないためである．セグメントのデータサイズが変化すると，そのセグメントを放送するチャネルの帯域幅も変化する．この変化量を全チャネルについて足し合わせると，必要となる全体の帯域幅が大きく変わらず，S_1 の放送にかかる時間も大きく変わらない．たとえば，分散が 0 (k バイト)^2 の場合，$a_1 = \cdots = a_N = 392$k バイトとなり，$b_1 = 99$kbps，平均待ち時間は 47.5 秒となる．また，分散が 5×10^5 (k バイト)^2 の場合，$a_1 = 724$k バイトになっており，$b_1 = 180$kbps，平均待ち時間は 48.3 秒となる．このように，a_1 が大きくなると b_1 も大きくなり，平均待ち時間は大きく変わらない．

以上より，N が比較的大きく，1 個の GOP の再生時間が 0.5 秒のように，再生に必要なデータサイズが一般的な場合には，a_1，$\cdots$，a_N の分布は AHB 法の平均待ち時間に大きく影響しないことが分かる．たとえば，図 2.10 より再生レートが 5 Mbps の 60 分の連続メディアデータを 24 Mbps の帯域幅を用いて放送する場合には，N が 500 程度以上であれば，a_1，$\cdots$，a_N の分布は平均待ち時間に大きく影響しない．

2.6.3 VBR への応用

MPEG にはデータを再生している間，再生レートが一定の CBR（Constant Bit Rate）と再生中に再生レートが変化する VBR（Variable Bit Rate）がある [47, 57]．本章では，CBR を想定して議論を進めてきたが，ここでは VBR で符号化されたデータを AHB 法で放送する手法について説明する．VBR では再生に必要なデータごとに再生レートが異なるため，S_i（$i = 1, \cdots, N$）の再生レートを R_i とする．VBR の場合にも第 2.4.3 項で述べた議論が成立するため，C_j（$j = 2, \cdots, N$） の帯域幅 b_j を式 (2.1) で与えることで，クライアントは S_1 の受信完了と同時に再生を開始しても，連続メディアデータを最後まで途

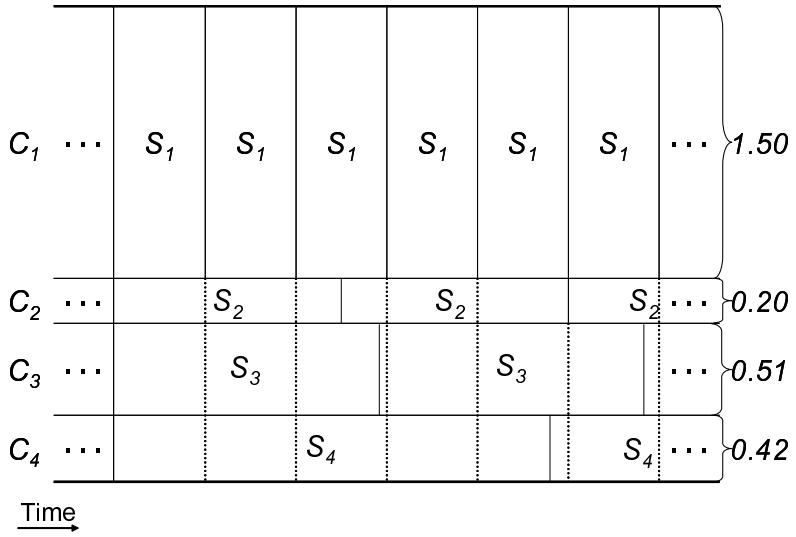

図 2.13: VBR を考慮した AHB 法の放送スケジュール

切れずに再生できる．ただし，この場合 $p_i = a_i/R_i$ となる．このため，必要となる帯域幅は，式 (2.2) では与えられず，

$$B = b_1 + \sum_{i=2}^{N} \frac{a_i b_1}{a_1 + \left(\frac{a_1}{R_1} + \cdots + \frac{a_{i-1}}{R_{i-1}}\right) b_1} \tag{2.6}$$

で与えられる．たとえば，b_1，$a_1, \cdots, a_4$ の値は図 2.3 の例と等しく，各セグメントの再生レートが $R_1 = 1.0$，$R_2 = 1.2$，$R_3 = 0.8$，$R_4 = 1.0$ の場合の放送スケジュールは図 2.13 のようになる．

2.7 むすび

連続メディアデータは，一般に，再生の単位となるある程度のデータを受信完了してからでなければ再生できない．このため，受信したデータを即座に再生できると想定している既存の手法を適用しても，再生の単位の受信完了を待つ必要があり，効率的に待ち時間を短縮できない．本章では，再生の単位を考慮して，クライアントの平均待ち時間を短縮する手法を提案した．

提案手法 AHB 法は，分割できるデータサイズがあらかじめ定まっている場合に，そのデータサイズごとにデータを分割し，分割したデータの再生開始時刻までに受信完了できるようにスケジューリングして放送することで，クライアントが最後まで途切れずに再生

できるという条件を満たしたうえで平均待ち時間を短縮する．

再生の単位を考慮する場合，再生の単位となるデータサイズが待ち時間に影響を及ぼすため，実際に符号化したデータの再生の単位を使用して，既存の HB 法や CHB 法と比較した．その結果，AHB 法の方が平均待ち時間を短くすることが明らかになった．

今後の課題として，通信エラー対策として，同じセグメントを数回放送することや，使用するチャネルの数を少なくして導入を容易にすることが挙げられる．

第3章

使用チャネル数を考慮した手法

3.1 まえがき

連続メディアデータ放送のスケジューリングにおいて，待ち時間を短縮する様々な手法が提案されている．これらの手法では，第 2 章の想定環境とは異なり，クライアントは連続メディアデータを受信開始と同時に再生できるとしたうえで，データを途切れずに再生できるように考慮している．このような条件のもとで，既存手法では，データをいくつかの部分に分割し，複数のチャネルを用いたサーバ側のスケジューリング戦略によって待ち時間を短縮している．しかし，使用可能なチャネルの数に制限がある以下の状況が考えられる．

- ハードウェアの仕様上，多くの物理チャネルから同時にデータを受信できない．
- 処理の簡単化のため，使用する論理チャネルの数を少なくする．
- 処理速度の都合上，多くのチャネルから同時にデータを受信できない．

たとえば，地上波デジタル放送や無線 LAN（Local Area Network），Bluetooth では，クライアントが同時に受信できるチャネル数が制限される [18, 50]．このような場合，すべてのチャネルから同時にデータを受信できると想定している既存の手法を適用できない問題がある．特に，使用チャネル数が単一チャネルのみである場合には，分割したデータを単一チャネルでスケジューリングして放送する必要があり，複数チャネル使用できる場合とは異なったアプローチで待ち時間を短縮する必要がある．そこで本章では，単一チャネルの場合と複数チャネルの場合に分けて，使用チャネル数を考慮した待ち時間短縮のためのスケジューリング手法を提案する．

以下，第 3.2 節で関連研究について説明し，第 3.3 節で想定環境を説明する．第 3.4 節で使用チャネル数が単一チャネルの場合のスケジューリング手法を提案し，第 3.5 節で複数チャネルの場合のスケジューリング手法を提案する．最後に第 3.6 節で本章をまとめる．

3.2 関連研究

近年，放送型配信に対する注目が高まっている [1, 2, 3, 4, 5, 72, 73]．放送型配信は，クライアント数が多い場合に有効だが，待ち時間が発生する．特に，連続メディアデータ放送では，データを途切れずに再生できることが重要になるため，データを途切れずに再生することを考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮する研究が多数行われている．

Pyramid Broadcasting（PB）法 [70] では M 個のデータを K 個のセグメントに分割し，K 個のチャネルを用いて放送する．i 番目のセグメントの再生時間 D_i は $D_1 \times \alpha(i-1)$ となるように分割する．α は $\alpha \geq 1$ となる数である．このように分割し，i 番目のチャネルでは M 個のデータの i 番目のセグメントを連続して放送する．初めのセグメントの再生時間は短く，頻繁に放送されるため，クライアントの待ち時間を短縮できる．しかし，この手法を用いると，分割数が多いほど後のセグメントの再生時間が長くなるため，クライアントに必要なバッファの容量が大きくなる．

Skyscraper Broadcasting（SB）法 [31] では，この問題を考慮し，分割すると再生時間が $D_1 \times W$ より長くなるセグメントは再生時間が W になるように分割する．W を変更することで，必要なバッファの容量や，待ち時間を任意に与えられる．

SB 法において，放送するデータを動的に変更する Dynamic Skyscraper Broadcasting（DSB）法 [17] も提案されている．

Permutation-based pyramid broadcasting（PPB）法 [7] では，K 個のチャネルをさらに p 個のサブチャネルに分ける．i 番目のセグメントを p 個のサブチャネルで放送する．p 個のサブチャネルの 1 周期が始まる時刻をずらすことで，PB 法より待ち時間を短縮できる．PPB 法では，単一のチャネルで連続メディアデータを配信する時分割多重について言及しているが，単一チャネルでクライアントの待ち時間を短縮する手法について詳しく述べていない．

Fast Broadcasting（FB）法 [37] では，バッファがある場合より長く待つことで，バッファがなくてもデータを再生できる．FB 法は，データを $2^K - 1$ 個に等分割し，K 個のチャネルで放送する．FB 法において，使用するチャネル数を動的に変更する手法も提案されている [69]．

このようにすべてのチャネルから同時にデータを受信できると想定して，クライアント

の待ち時間を短縮する研究はあるが，ハードウェア構成や処理の簡単化，処理速度の問題といった理由から，使用するチャネル数に制限がある場合が考えられる．

3.3 想定環境

提案手法の想定環境を以下に挙げる．初めの一項目は，連続メディアデータに関する制限であり，以降は通信に関する項目である．

- クライアントが連続メディアデータの再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できる．
- サーバやクライアントの使用チャネル数はあらかじめ制限されている．
- クライアントは十分な容量のバッファを持ち，受信したデータを再生している間も放送されているデータを受信し，バッファに保存できる．
- クライアントは放送されているデータをつねに受信せず，ユーザが受信要求を出してから受信を開始する．
- サーバはニアオンデマンド型の放送を行う．
- サーバはデータ更新しない．

3.4 単一チャネルの場合の手法

複数チャネルを用いてデータを配信すると，クライアントは複数のチャネルからデータを同時に受信し，サーバは複数のチャネルを管理する必要がある．したがって，単一チャネルの場合と比べて処理が複雑になる．システムを構築する観点から考えると，無線 LAN システムは同時に複数のチャネルからデータを受信できない．ある特定の場所に特化したコンテンツを放送するホットスポットサービスが可能な bluetooth も，同時に複数のデータチャネルから受信できない．

そこで，本節では，単一チャネルを用いてクライアントの待ち時間を短縮できるスケジューリング手法を提案する．第 3.3 節の想定環境に加えて，解析の簡単化のため，クライアントは連続メディアデータを受信開始と同時に再生できるとする．また，クライアントは 1 つのチャネルからしかデータを受信できないとする．複数チャネルの場合に関しては，第 3.5 節で説明する．提案手法では，連続メディアデータの放送に要する時間が再生時間より

短くなることに注目し，データを幾つかに等分割して，データの初めの部分を頻繁に放送することでクライアントの待ち時間を短縮する．この場合，データの分割数および分割したデータのスケジューリングが待ち時間に影響を与える．本節では，2 等分する場合については解析を行い，平均待ち時間を最短にするスケジュールを示す．3 等分以上の場合については，ヒューリスティックな手法を提案し，評価を行う．

3.4.1 分割配送方式

単一チャネルを用いて平均待ち時間を短縮する手法，分割放送方式を提案する．連続メディアデータの再生時間を D，そのデータの放送に要する時間を放送時間と呼び D' であらわす．データの放送時間が再生時間より短くなることを考慮し，再生倍率 a を次のように定義する．

$$a = \frac{D}{D'} \tag{3.1}$$

たとえば，MPEG-1 Audio Layer 3（MP3） 規格を使用して音声ファイルを符号化する場合，ビットレートは標準で 128 kbps となり，1 分の音声を約 1 M バイトのファイルにできる．5 分の音声データであれば，5 M バイトとなる．このデータを 1 Mbps の帯域を用いて配信すると，40 秒で配信できる．この場合，再生倍率 $a = 300/40 = 7.5$ となる．音声だけでなく，動画の場合も圧縮することができる．MPEG-1 規格は 1 〜 1.5 Mbps 程度のデータ転送レートに対応しており，10 Mbps の帯域を用いて配信すると，再生倍率は 6.7 〜 10 となる．MPEG-2 規格は 4 〜 70 Mbps のデータ転送レートに対応しており，10 Mbps の帯域を用いて配信すると，再生倍率は 0.14 〜 2.5 となる．100 Mbps の帯域を持を用いて配信すると，再生倍率は 1.4 〜25 となる．さらに，MPEG-4 規格は 384kbps 以下の転送レートにも対応しており，1 Mbps の帯域をで配信すると，再生倍率は 2.6 以上になる．[64, 93].

再生倍率は，データのビットレートに依存するが，サーバはデータを放送する前にそのビットレートを算出し，a の値を算出できる．MPEG 規格には，固定ビットレートと，可変ビットレートと呼ばれる 2 種類のビットレートがある [47, 57]．固定ビットレートでは，帯域幅に変化がない場合，クライアントがデータを再生している間 a は一定の値をとる．可変ビットレートでは，クライアントがデータを再生している間 a の値は変わる．本研究では，a の値はサーバがデータを放送している間，一定とみなすが，可変ビットレートの場合でも再生倍率の最大値を a とみなし，固定ビットレートを想定した提案手法と同じ放送スケジュールを用いることで，待ち時間を短縮できる．さらに，a の値は使用する帯域幅にも依存する．本研究では，衛星放送のように，帯域幅が一定で，サーバはその通信速

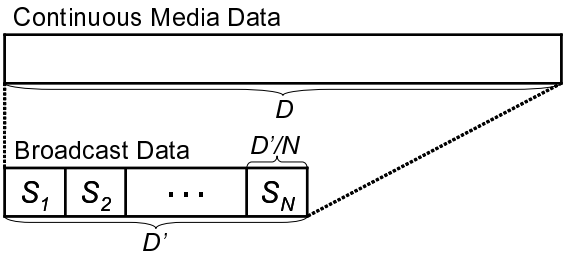

図 3.1: データの分割

表 3.1: データを 2 等分し，1 周期で 6 個のセグメントを放送するスケジュール

スケジュール	平均待ち時間（秒）
$S_1S_1S_1S_1S_1S_2$	20.0
$S_1S_1S_1S_1S_2S_2$	30.0
$S_1S_1S_1S_2S_1S_2$	25.0
$S_1S_1S_1S_2S_2S_2$	45.0
$S_1S_1S_2S_1S_2S_2$	35.0
$S_1S_2S_1S_1S_2S_2$	35.0
$S_1S_1S_2S_2S_2S_2$	65.0
$S_1S_2S_1S_2S_2S_2$	50.0
$S_1S_2S_2S_2S_2S_2$	90.0

度を分かっているとする．

分割配送方式では，図 3.1 に示すように，放送時間が再生時間より短いデータを N 個の部分に等分割する．分割したデータをセグメントと呼び，S_i（$i = 1, \cdots, N$）であらわす．1 つのセグメントの放送時間は D'/N となる．クライアントはセグメントを受信し始めると，そのセグメントの番号を知ることができる．たとえば，セグメント S_i の番号 i をセグメントの初めに付加し，すぐに i の値をアプリケーションに通知することで実現できる．サーバは 1 周期で c 個のセグメントを放送するが，1 周期中に，同じセグメントを数回放送する場合がある．

分割配送方式では，データの分割数や，分割したデータのスケジューリングが平均待ち時間に影響を及ぼすため，分割数の選択の仕方や，スケジューリング手法が問題となる．たとえば，5 分の MP3 データ（$D = 5$）を 1 分で放送できる（$a = 5$）場合に，連続メディアデータを 2 等分し（$N = 2$），1 周期で 6 個のセグメントを放送する（$c = 6$）と，表 3.1 に示す 9 通りのスケジュールが考えられる．$S_1S_2S_1S_2S_1S_2$ は $c = 2$ となり，$S_1S_1S_2S_1S_1S_2$

表 3.2: データを 2 等分し，1 周期で 7 個のセグメントを放送するスケジュール

スケジュール	平均待ち時間（秒）
$S_1S_1S_1S_1S_1S_1S_2$	27.9
$S_1S_1S_1S_1S_1S_2S_2$	27.9
$S_1S_1S_1S_1S_2S_1S_2$	23.6
$S_1S_1S_1S_2S_1S_1S_2$	23.6
$S_1S_1S_1S_1S_2S_2S_2$	49.7
$S_1S_1S_1S_2S_1S_2S_2$	32.1
$S_1S_1S_2S_1S_1S_2S_2$	32.1
$S_1S_2S_1S_1S_1S_2S_2$	32.1
$S_1S_2S_1S_2S_1S_1S_2$	27.9
$S_1S_1S_1S_2S_2S_2S_2$	57.9
$S_1S_1S_2S_1S_2S_2S_2$	45.0
$S_1S_2S_1S_1S_2S_2S_2$	45.0
$S_1S_2S_2S_1S_1S_2S_2$	40.7
$S_1S_2S_1S_2S_1S_2S_2$	40.7
$S_1S_1S_2S_2S_2S_2S_2$	79.3
$S_1S_2S_1S_2S_2S_2S_2$	62.1
$S_1S_2S_2S_1S_2S_2S_2$	53.6
$S_1S_2S_2S_2S_2S_2S_2$	105.0

や $S_1S_2S_2S_1S_2S_2$ は $c = 3$ となるため，表 3.1 には示していない．この場合，最短の平均待ち時間は 12 秒となり，そのスケジュールは $S_1S_1S_1S_1S_1S_2$ となる．ここで，$c = 7$ とすると，表 3.2 に示す 18 通りのスケジュールが考えられる．この場合，最短の平均待ち時間は 23.6 秒となり，そのスケジュールは $S_1S_1S_1S_1S_2S_1S_2$ となる．ここで，平均待ち時間を計算する際，クライアントが S_1 の受信と同時に再生する場合，最後まで途切れずに再生できない場合があることに注意しなければならない．たとえば，$a = 5$ で，サーバが $S_1S_1S_1S_1S_1S_1S_2$ の順に放送すると，S_2 が放送されているタイムスロットでユーザが受信要求を出す場合，次の周期の初めのタイムスロットで放送される S_1 の受信と同時に再生すると，S_1 の再生終了時，S_2 を受信していないため続けて S_2 を再生できない．この場合，S_1 を受信しても，$D/(2a)$ だけ待たなければいけない．また，$N = 3$，$c = 4$ とすると，表 3.3 に示す 6 通りのスケジュールが考えられる．この場合，最短の平均待ち時間は 19.8 秒となり，そのスケジュールは $S_1S_2S_1S_3$ となる．

このように，分割数 N や 1 周期中に放送するセグメントの数 c を任意に選択でき，セグメントのスケジューリングが無数にあるため，最短の待ち時間を与えるスケジュールを求めることは現実的でない．そこで，第 3.4.2 項で分割数 2 の場合の解析を行い，平均待

表 3.3: データを 3 等分し，1 周期で 4 個のセグメントを放送するスケジュール

スケジュール	平均待ち時間（秒）
$S_1S_1S_2S_3$	25.2
$S_1S_2S_1S_3$	19.8
$S_2S_1S_1S_3$	25.2
$S_1S_2S_2S_3$	40.2
$S_2S_1S_2S_3$	40.2
$S_2S_2S_1S_3$	40.2
$S_1S_2S_3S_3$	40.2
$S_2S_1S_3S_3$	40.2
$S_1S_3S_2S_3$	40.2

ち時間を最短にするスケジュールを示す．3 等分以上の場合については，セグメントのスケジューリングの組み合わせが多く解析が困難なため，ヒューリスティックなスケジューリング手法を提案する．

3.4.2 2 等分の場合

本項では，分割配送方式において，連続メディアデータを 2 等分する場合について解析を行い，データを 2 等分して放送するあらゆるスケジュールの中で，平均待ち時間を最短にするスケジュールを導出する．

平均待ち時間の分類

一つのセグメントの放送時間を Δ（$= D'/2$）で表す．1 周期中に S_1 や S_2 が少なくとも一度は放送されなければならないため，$c = 2, 3, \cdots$ となる．セグメントが放送されている時間をタイムスロットと呼び，T_i（$i = 1, 2, \cdots$）であらわす．T_i の開始時刻を t_i であらわし，T_i で放送されるセグメントを $S(T_i)$ であらわす．たとえば，図 3.2 の場合，$S(T_1) = S_1$, $S(T_2) = S_2$, $S(T_3) = S_1$ となる．サーバは周期的にデータを放送するため，$S(T_i) = S(T_{i+c})$ となる．図 3.2 にこれらの定義を示す．

平均待ち時間を求めるに当たって，ユーザがデータの受信要求をクライアントに出してから，クライアントが S_1 または S_2 を初めて受信するまでの時間が重要となる．受信要求を出した時刻が含まれるタイムスロットを T_1 とし，その後，S_1 が初めて放送されるタイムスロットを T_m，S_2 が初めて放送されるタイムスロットを T_n とする．m と n の大小関係によって，図 3.3 に示す 2 通りに分けられる．受信要求を出した時刻に放送されている

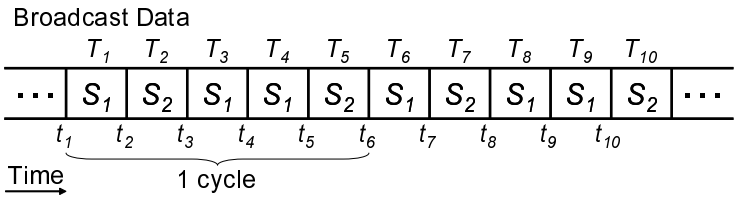

図 3.2: 変数の定義

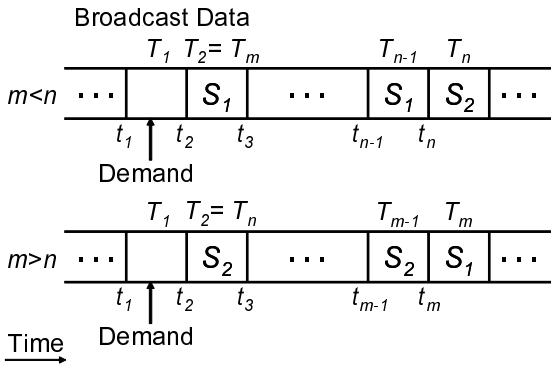

図 3.3: m，n の値

セグメントは初めから受信できないため，それが S_1，S_2 のどちらであるかは待ち時間に影響しない．そのため図 3.3 には示してない．m と n が同じ値になることはなく，セグメントが S_1 と S_2 の 2 個しかないため，m，n のどちらか一方は 2 となり，もう一方は 3 以上となる．ここで，時刻 t_r でデータの受信要求を受信したクライアントが，S_1 を受信するとすぐにデータの再生を開始する場合を考える．

クライアントが S_1 を再生し終える時刻を τ とする．$\tau = t_m + a\Delta$ となる．$t_n \leq \tau$ の場合，S_1 を再生している間に S_2 を受信でき，$t_n > \tau$ の場合，S_1 を再生している間に S_2 を受信できない．以下に，それぞれの場合の平均待ち時間を求める．

1. $t_n \leq \tau$ の場合

   この場合，クライアントが S_1 を再生している間，または再生終了直後に S_2 が放送されるので，クライアントは S_1 の再生終了後，続けて S_2 を再生できる．すなわち，クライアントは S_1 を受信し始めるとすぐに再生を開始し，最後まで途切れずに再生できる．この条件は $t_n \leq \tau$ より $n \leq m + a$ と書ける．この場合の平均待ち時間

$W^{\mathrm{I}}(m)$ は

$$W^{\mathrm{I}}(m) = \frac{1}{\Delta}\int_{t_1}^{t_2}(t_m - t_r)d\,t_r = \frac{\Delta}{2} + (m-2)\Delta \tag{3.2}$$

で与えられる．

2. $t_n > \tau$ の場合

この条件は $t_n \leq \tau$ の場合と同様の議論により $n > m + a$ と書ける．この場合，クライアントは t_1 から再生を始めると，S_1 の再生終了後，S_2 を再生できないため，S_1 の再生開始時刻を遅らせる必要がある．そこで，時刻 t_w から S_1 を再生する．S_1 を再生し終える時刻 τ_w は，$t_w + a\Delta$ となる．時刻 τ_w までに S_2 が放送されるか，τ_w から S_2 が放送されると，クライアントはデータを最後まで途切れずに再生できるので，$t_n \leq \tau_w$ となればよい．これより $w \geq n - a$ で与えられる．待ち時間は $w = n - a$ の場合に最短となり，この場合の平均待ち時間 $W^{\mathrm{II}}(n)$ は，

$$W^{\mathrm{II}}(n) = \frac{\Delta}{2} + (n-a-2)\Delta \tag{3.3}$$

となる．

以上より，次のようにまとめられる．

- $n \leq m + a$ の場合

$$W^{\mathrm{I}}(m) = \frac{\Delta}{2} + (m-2)\Delta \tag{3.4}$$

- $n > m + a$ の場合

$$W^{\mathrm{II}}(n) = \frac{\Delta}{2} + (n-a-2)\Delta \tag{3.5}$$

平均待ち時間を最短にするスケジュールを求めるために，分類した平均待ち時間の大小関係を調べる．α を $1/a$ の整数部分，すなわち $\alpha = \lfloor 1/a \rfloor$ とすると，$\alpha + 1 > 1/a \geq \alpha$ より次の式が成り立つ．

$$W^{\mathrm{I}}(2) < W^{\mathrm{II}}(\alpha+3) \leq W^{\mathrm{I}}(3) < W^{\mathrm{II}}(\alpha+4) \leq W^{\mathrm{I}}(4) < W^{\mathrm{II}}(\alpha+5) \leq W^{\mathrm{I}}(5) < \cdots \tag{3.6}$$

この式は後に表 3.5 で用いる．

表 3.4: セグメント列の例

放送スケジュール	セグメント列
S_1S_2	$U_1 = \{S_1S_2\}$
$S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_1S_2\}$
$S_1S_2S_2$	$U_1 = \{S_1S_2S_2\}$
$S_1S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_1S_1S_2\}$
$S_1S_1S_1S_2S_2S_2$	$U_1 = \{S_1S_1S_1S_2S_2S_2\}$
$S_1S_2S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_2\}, U_2 = \{S_1S_1S_2\}$
$S_1S_2S_2S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_2S_2\}, U_2 = \{S_1S_2\}$
$S_1S_2S_1S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_2\}, U_2 = \{S_1S_1S_1S_2\}$
$S_1S_2S_2S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_2S_2\}, U_2 = \{S_1S_1S_2\}$
$S_1S_2S_1S_2S_1S_1S_2$	$U_1 = \{S_1S_2\}, U_2 = \{S_1S_2\}$
	$U_3 = \{S_1S_1S_2\}$

セグメント列

スケジュールは一般に S_1 と S_2 の繰り返しで構成されるため，パターン S_2S_1 が出現する箇所で，S_2 と S_1 の間でセグメント列に分ける．すなわち，スケジュールを $U_1U_2\cdots U_l$ とし，各セグメント列 $U_i = S_1\cdots S_1S_2\cdots S_2$（$i = 1,\cdots,l$）とあらわす．初めの S_1 が放送されるタイムスロットを T_{p_i}，初めの S_2 が放送されるタイムスロットを T_{q_i}，最後の S_2 が放送されるタイムスロットを T_{r_i} とする．ここで，$i = 1,\cdots,l-1$ に対し，$r_i + 1 = p_{i+1}$ が成立することになる．セグメント列の例を表 3.4 に示す．この表のように，すべてのスケジュールはいくつかのセグメント列に分けることができる．セグメント列の初めのセグメントが S_1 であり，最後のセグメントが S_2 であるため，スケジュールのセグメント列への分け方は一意に定まる．

セグメント列には少なくとも 1 つの S_1 または S_2 が含まれているため，U_i の p_i，q_i や r_i の値は T_{p_i-1}，$\cdots$，T_{r_i-1} 内でユーザがデータの受信要求をクライアントに出す場合の平均待ち時間にのみ影響を与える．たとえば，T_{p_i-1} 内でユーザが受信要求を出す場合，クライアントは T_{p_i} で放送される S_1 を受信し，T_{q_i} で放送される S_2 を受信する．この場合の平均待ち時間は U_i の p_i や q_i の値によって決まる．T_{p_i}（この場合，$p_i + 1 < q_i$ とする.）内でユーザが受信要求を出す場合，クライアントは T_{p_i+1} で放送される S_1 を受信し，T_{q_i} で放送される S_2 を受信する．したがって，この場合の平均待ち時間も U_i の p_i や q_i の値によって決まる．さらに，T_{q_i-1} 内でユーザが受信要求を出す場合，クライアントは S_1 が放送されるのを待っている間に，T_{q_i} で放送される S_2 を受信できる．次のセグメント列の初めのセグメントは S_1 であるため，T_{r_i+1} でクライアントは次のセグメント列に含まれる

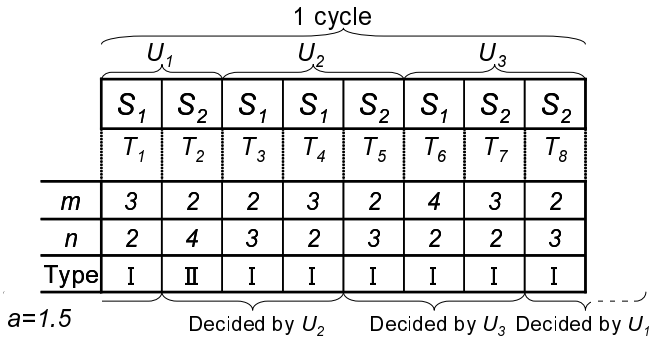

図 3.4: セグメント列

S_1 を受信する．この場合，クライアントの待ち時間は U_i の r_i の値によって決まる．T_{r_i} 内でユーがが受信要求を出す場合，クライアントはセグメント列 U_i に含まれるセグメントを受信できない．したがって，クライアントの待ち時間は U_i に依存しない．

以上の理由から，あるスケジュールの平均待ち時間はそれぞれのセグメント列の平均待ち時間の平均で与えられる．たとえば，$a = 1.5$ の場合，$U_1 = S_1S_2$ によって決まる平均待ち時間 W_1 は次式で与えられる．

$$W_1 = \frac{1}{2}\left(W^{\mathrm{I}}(2) + W^{\mathrm{I}}(3)\right) = \Delta \tag{3.7}$$

ここで，W_1 は U_1 によって決まる平均待ち時間を示す. $U_2 = S_1S_1S_2$ によって決まる平均待ち時間 W_2 は

$$W_2 = \frac{1}{3}\left(W^{\mathrm{II}}(4) + W^{\mathrm{I}}(2) + W^{\mathrm{I}}(3)\right) = \Delta \tag{3.8}$$

となる．さらに，$U_3 = S_1S_2S_2$ によって決まる平均待ち時間は

$$W_3 = \frac{1}{3}\left(W^{\mathrm{I}}(2) + W^{\mathrm{I}}(4) + W^{\mathrm{I}}(3)\right) = \frac{3}{2}\Delta. \tag{3.9}$$

となる．図 3.4 に示すようにスケジュールが $S_1S_2S_1S_1S_2S_1S_2S_2$ の場合を考える．スケジュールは $U_1U_2U_3$ とあらわせる（U_1,U_2, や U_3 は上記のものを示す）．この場合の平均待ち時間は，それぞれのセグメント列の平均待ち時間の平均をとることで，次のように求めることができる．

$$W = \frac{1}{8}\left\{2W_1 + 3W_2 + 3W_3\right\} = \frac{19}{16}\Delta. \tag{3.10}$$

一方，セグメント列の平均待ち時間を用いずに平均待ち時間を求めると，

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{8}(W^{\mathrm{I}}(3)+W^{\mathrm{II}}(4)+W^{\mathrm{I}}(2)+W^{\mathrm{I}}(3)+W^{\mathrm{I}}(2)+W^{\mathrm{I}}(4)+W^{\mathrm{I}}(3)+W^{\mathrm{I}}(2)) \\ &= \frac{19}{16}\Delta. \end{aligned} \tag{3.11}$$

となる．式 (3.11) と式 (3.10) の結果は等しく，あるスケジュールの平均待ち時間は，それぞれのセグメント列の平均待ち時間の平均に等しいことが分かる．したがって，それぞれの $U_i = S_1 \cdots S_1 S_2 \cdots S_2$ は $T_{p_i-1}, \cdots, T_{r_i-1}$ 内で受信要求を出したユーザの平均待ち時間にのみ影響を与える．

1 つのセグメント列をスケジュールとして放送した場合に，あらゆるセグメント列の中で平均待ち時間を最短にするセグメント列を U_{min} とする．平均待ち時間を最短にするスケジュールは U_{min} を繰り返して放送するスケジュールであることを証明する．スケジュールをセグメント列 $U_1 \cdots U_l$ で構成する．$U_{min} \neq U_i (i = 1, \cdots, l)$ とする．それぞれの U_i の平均待ち時間は U_{min} より長いことから，これらのセグメント列の中でどれか 1 つを U_{min} に変更すると，そのスケジュールの平均待ち時間は短くなる．同様の議論を繰り返すことにより，平均待ち時間を最短にするスケジュールは U_{min} を繰り返すスケジュールであると分かる．したがって，U_{min} を求めることにより平均待ち時間を最短にするスケジュールを決定できる．

U_{min} の決定

セグメント列 U に含まれるそれぞれのセグメントで受信要求を出す場合の平均待ち時間を考える．平均待ち時間の分類から，表 3.5 のように $W^{\mathrm{I}}(m), W^{\mathrm{II}}(n)$ の個数が決定される．U はセグメント列であるため，U の前半は S_1 となり，後半は S_2 となる．すなわち，U は $S_1 \cdots S_1 S_2 \cdots S_2$ のようにセグメントを放送する．初めに，$U = S_1 S_2$ の場合を考える．これは表 3.5 の 1 行目に示されている．このスケジュールは単純繰り返し手法と等しい．この場合，$W^{\mathrm{I}}(2)$ の数は 1 個であり，$W^{\mathrm{I}}(3)$ の数は 1 個である．U に含まれる S_2 の数を増やすと，U は 2 行目のようになる．S_2 が増えたことによって，$W^{\mathrm{I}}(4)$ の数が 1 となる．式 (3.6) より，$W^{\mathrm{I}}(3) < W^{\mathrm{I}}(4)$ であるため，U の平均待ち時間は長くなる．さらに，S_2 の数を増やすと，$W^{\mathrm{I}}(5)$ の数が 1 つになる．そのため，S_2 の数が増えるほど，平均待ち時間が長くなる．すなわち，U に含まれる S_2 の数が 1 個の場合が平均待ち時間をより短くする．次に，U に含まれる S_1 の数を増やす．U は 3 行目のようになる．この場合，$W^{\mathrm{I}}(2)$ の数が 2 となる．式 (3.6) に示すように，$W^{\mathrm{I}}(2)$ の待ち時間は最も短いため，U の平均待ち時間も短くなる．S_1 の数が α より小さい限り，S_1 の数を増やすほど平均待ち時間は短くなる．S_1 の数が α の場合，U は表 3.5 に示す (a) となる．S_1 の数をさらに増や

表 3.5: セグメント列の平均待ち時間

	U	$W^{\mathrm{I}}(2)$	$<$	$W^{\mathrm{II}}(\alpha+3)$	$\leq$	$W^{\mathrm{I}}(3)$	$<$	$W^{\mathrm{II}}(\alpha+4)$	$\leq$	$W^{\mathrm{I}}(4)$	$<\cdots$
	S_1S_2	1		0		1		0		0	
	$S_1S_2S_2$	1		0		1		0		1	
	$S_1S_1S_2$	2		0		1		0		0	
(a)	$\overbrace{S_1\cdots S_1}^{\alpha\text{個}}S_2$	α		0		1		0		0	
(b)	$\overbrace{S_1\cdots S_1S_1}^{\alpha+1\text{ 個}}S_2$	α		1		1		0		0	
	$\overbrace{S_1\cdots S_1}^{\alpha\text{個}}S_1S_1S_2$	α		1		1		1		0	

すことで，$W^{\mathrm{II}}(\alpha+3)$ の数が 1 となり，表に示す (b) になる．この場合，(a) の平均待ち時間が $W^{\mathrm{II}}(\alpha+3)$ より小さい場合，(a) の平均待ち時間は (b) より短くなり，そうでない場合には，(b) の待ち時間が (a) より短くなる．さらに (b) に含まれる S_1 の数を 4 増やすと，$W^{\mathrm{II}}(\alpha+4)$ の数が 1 となる．式 (3.6) から $W^{\mathrm{I}}(\alpha+3) < W^{\mathrm{I}}(\alpha+4)$ であるため，U の平均待ち時間は長くなる．すなわち，最短の平均待ち時間を与えるスケジュール（U_{min}）は表 3.5 の (a) または (b) となる．(a) の場合の平均待ち時間 W_a は

$$W_a = \frac{1}{\alpha+1}\left(\alpha W^{\mathrm{I}}(2) + W^{\mathrm{I}}(3)\right) = \frac{\alpha+3}{2\alpha+2}\Delta \tag{3.12}$$

と求まり，(b) の場合の平均待ち時間 W_b は

$$W_b = \frac{1}{\alpha+2}\left(\alpha W^{\mathrm{I}}(2) + W^{\mathrm{II}}(\alpha+3) + W^{\mathrm{I}}(3)\right) = \frac{3\alpha-2a+6}{2\alpha+4}\Delta \tag{3.13}$$

と求まる．式 (3.12)，(3.13) から (a) の場合と，(b) の場合の平均待ち時間の大小関係を調べると，

$$W_a - W_b = \frac{\alpha+3}{2\alpha+2}\Delta - \frac{3\alpha-2a+6}{2\alpha+4}\Delta = \frac{(\alpha+1)(a-\alpha)-\alpha}{(\alpha+1)(\alpha+2)}\Delta \tag{3.14}$$

となる．式 (3.14) の分子を A とする．すなわち，

$$A = (a\text{ より大きい最小の整数}) \times (a\text{ の小数部分}) - (a\text{ の整数部分}) \tag{3.15}$$

とすると，平均待ち時間を最短にするスケジュールは次のように求まる．

- $A < 0$ の場合

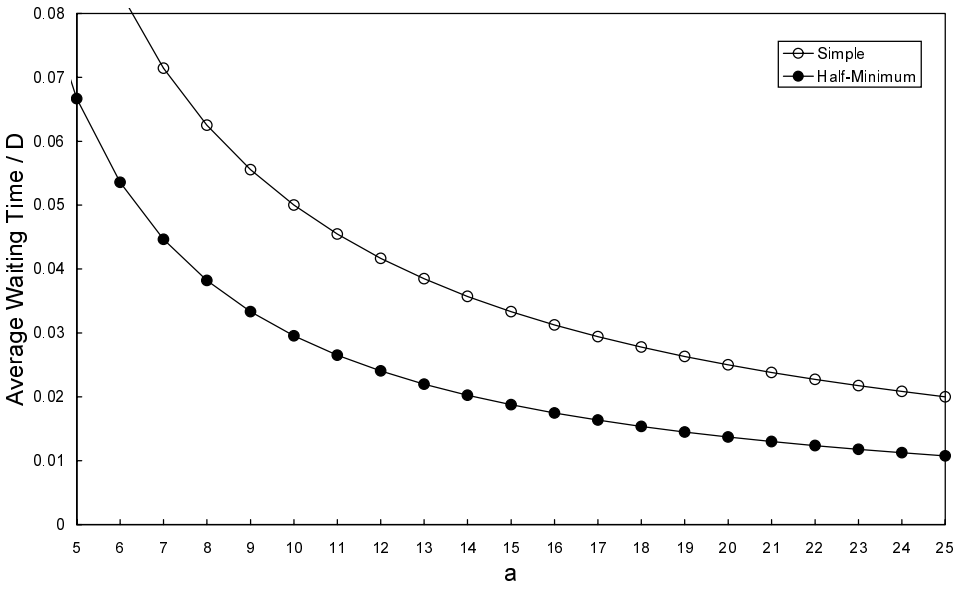

図 3.5: 2 等分の最短の平均待ち時間

平均待ち時間を最短にするスケジュールは

$$\overbrace{S_1 \cdots S_1}^{\alpha\text{個}} S_2 \tag{3.16}$$

で与えられ，その時の平均待ち時間は式 (3.12) で与えられる．

- $A > 0$ の場合

  平均待ち時間を最短にするスケジュールは

$$\overbrace{S_1 S_1 \cdots S_1}^{\alpha+1\text{ 個}} S_2 \tag{3.17}$$

  で与えられ，その時の平均待ち時間は式 (3.13) で与えられる．

- $A = 0$ の場合

  上記 2 つのスケジュールの平均待ち時間は等しく，平均待ち時間を最短にする．

図 3.5 に平均待ち時間の計算結果を示す．平均待ち時間の最小値は再生時間に比例するため，平均待ち時間の最小値を再生時間で除した値を縦軸にとった．横軸は再生倍率とした．グラフを見やすくするため，$5 \leq a \leq 25$ の範囲の平均待ち時間を求めたが，a はデータの

表 3.6: 最短の平均待ち時間を求めるまでの計算時間（秒）

分割数 N	$c=3$	$c=4$	$c=5$	$c=6$	$c=7$	$c=8$	$c=9$	$c=10$	$c=11$
3	0	0	0	0	1	2	8	32	114
4	0	0	0	0	2	17	93	531	2817
5	0	0	0	1	6	56	503	3691	25753

c：1 周期中のセグメントの数

再生レートや帯域に依存するため，これら以外の値になり得る．グラフ中で ‘Simple’ とは，第 1.2 節で初めに述べた単純繰り返し手法を意味し，‘Half-Minimum’ とは本項で解析した分割数 2 の場合の平均待ち時間の最小値を意味する．第 1.2 節で述べたように，MP3 で符号化した 5M バイトの 5 分のデータを 1 Mbps の衛星データ放送や bluetooth で放送する場合，$a = 7.5$ となる．単純繰り返し手法では，平均待ち時間は 20 秒となるが，データを 2 等分して放送することで，$0.042 \times 300 = 12.5$ 秒となり，38% 短縮できることが分かる．このように，データを 2 分割するだけで，待ち時間の大幅な短縮が期待できるため，十分現実的である．

以上で，クライアントがデータを最後まで途切れずに再生することを前提として，データを 2 等分して配送する場合に，平均待ち時間を最短にするスケジュールが求まった．

3.4.3 3 等分以上の場合

データを 3 個以上の部分に分割する場合，解析が困難になる．そのため，プログラムによってあらゆるスケジュールを考え，平均待ち時間を最短にするスケジュールを求めることが考えられる．そこで，データを 3 個以上の部分に等分割して放送する場合に，1 周期中に c 個のセグメントを放送するあらゆるスケジュールを考え，平均待ち時間の最小値を算出するプログラムを作成した．このプログラムを用いて，再生倍率 13 の場合の平均待ち時間の最小値を測定した．その計算時間を表 3.6 に示す（CPU：Pentium III 1.2GHz, Memory：512 M バイト）．計算時間が $O(N^c)$ であるため，表 3.6 の結果から概算すると，データを 4 等分して 1 週期中に 24 個のセグメントを放送するあらゆるスケジュールの平均待ち時間の最小値を求めるために，3000 年以上費やすことになる．このことから実用レベルのパラメタであってもプログラムで最適スケジュールを求めるのは困難であるといえる．そこで，本項では，ヒューリスティックなスケジューリング手法を幾つか提案する．

飛び越し挿入法では，データを数 100 個に分割して放送する．非常に多くの部分に分割するため，導入が複雑になるが，大幅な待ち時間短縮が期待できる．セグメント挿入法で

は，導入を容易にするため，データを数個に分割して放送する．以上の提案手法は，単一のデータを放送する場合の手法であり，複数のデータを単一チャネルで放送する場合には適用できない．そこで，交替放送法では，複数データを放送する場合のスケジューリング手法を提案する．

1）飛び越し挿入法

複数のチャネルを用いて放送する場合，S_i（$i = 1$，$\cdots$，N）を S_1 の $1/i$ の頻度で放送すれば待ち時間を短縮できる[51, 55]．しかし，単一チャネルで放送する場合，同時に複数のセグメントを放送できないため，S_i を $1/i$ の頻度で放送しても頻度の偏りが局所的に発生し，効率的に待ち時間を短縮できない．そこで，飛び越し挿入法では基本セグメント数（L）を導入し，L 個のセグメントを単位として $1/i$ の頻度で放送する．すなわち，$S_{(j-1)L+1}$，$\cdots$，$S_{(j-1)L+L}$（$j = 1$，$\cdots$，$(N-L)/L+1$）をグループ G_j とし，G_j を G_1 の $1/j$ の頻度で放送する．こうするとこで，分割数が多い場合に，S_i を S_1 の $1/i$ の頻度で放送する場合（$L = 1$ に相当）よりも待ち時間を短縮できる．平均待ち時間を効率的に短縮できるように L は次式で与える．B は使用する帯域幅，R は連続メディアデータの再生レートである．

$$L = \left\lceil \frac{N}{\exp\left(0.57 \times (\frac{B}{R} - 1)\right)} \right\rceil \tag{3.18}$$

ただし，$N \geq 2$ で $L = 1$ となる場合，$L = 2$ とする．論拠は第 3.4.3 項に示す．以下にスケジューリング手順を示す．

1. 再生時間が D の連続メディアデータを N 個のセグメント S_1，$\cdots$，S_N に等分割する．各セグメントの再生時間は D/N になる．
2. $G_1 = \{S_1, \cdots, S_L\}$ を $\lceil N/L \rceil$ 回並べる．
3. $j = 2$ とする．j はグループ G_j を示す．
4. $k = 1$ とする．k はグループ内で k 番目のセグメントを示す放送スケジュール作成用の正整数変数である．
5. 左端のセグメントの右側に $S_{(j-1)L+k}$ を挿入する．
6. k を 1 つ増やす．ただし，$k = L + 1$ となった場合には $k = 1$ とする．
7. 挿入したセグメントから，G_1 に属するセグメントを右向きへ数えて j 番目のセグメントの右側に $S_{(j-1)L+k}$ を挿入する．G_1 に属するセグメントを j 個飛び越して挿入

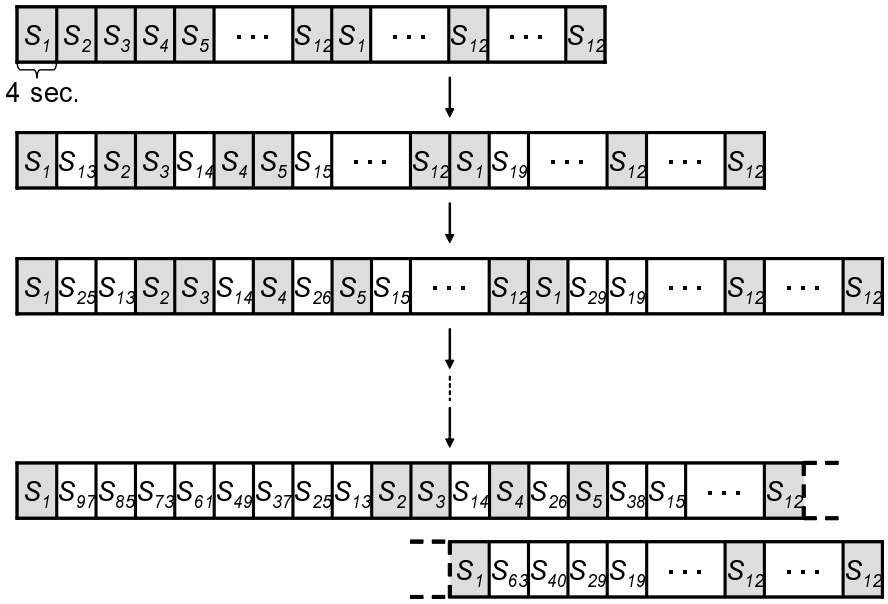

図 3.6: 飛び越し挿入法のスケジューリング手順

するため，G_j を G_1 の $1/j$ の頻度で放送することになる．最後のセグメント S_N を挿入した時点で放送スケジュールが完成する．

8. 右端のセグメントにたどり着くまで（6）,（7）を繰り返す．

9. j を 1 つ増やし,（4）へ．

サーバは作成された放送スケジュールにしたがって，左側から順に繰り返し放送する．たとえば，MPEG2 で符号化された 5 Mbps の 30 分の動画データ（$D = 30$ 分，$R = 5$Mbps）を 100 等分（$N = 100$）して 24 Mbps の衛星デジタル放送（$B = 24$ Mbps）で配信する場合のスケジューリング手順を図 3.6 に示す．灰色の部分は G_1 に属するセグメントを示す．

計算式の論拠　基本セグメント数 L をパラメタとして平均待ち時間を算出し，平均待ち時間の最小値を与える L（L_{min}） を求めたところ，L_{min} は N にほぼ比例することを確認した．さらに，この比例定数 N/L_{min} の平均値の対数値と B が比例することを確認した．この比例定数を最小二乗近似することで，比例定数 0.57 を得た．図 3.7 に，5Mbps のデータを放送する場合の N/L_{min} の平均値と，傾きが 0.57 の近似値を示す．横軸は B とし，縦軸は N/L_{min} とした．縦軸は対数軸である．‘Average’ が平均値を示し，‘Approximation’ が最小二乗近似の値を示す．比例定数 0.57 を用い，L が整数であることを考え，次式から

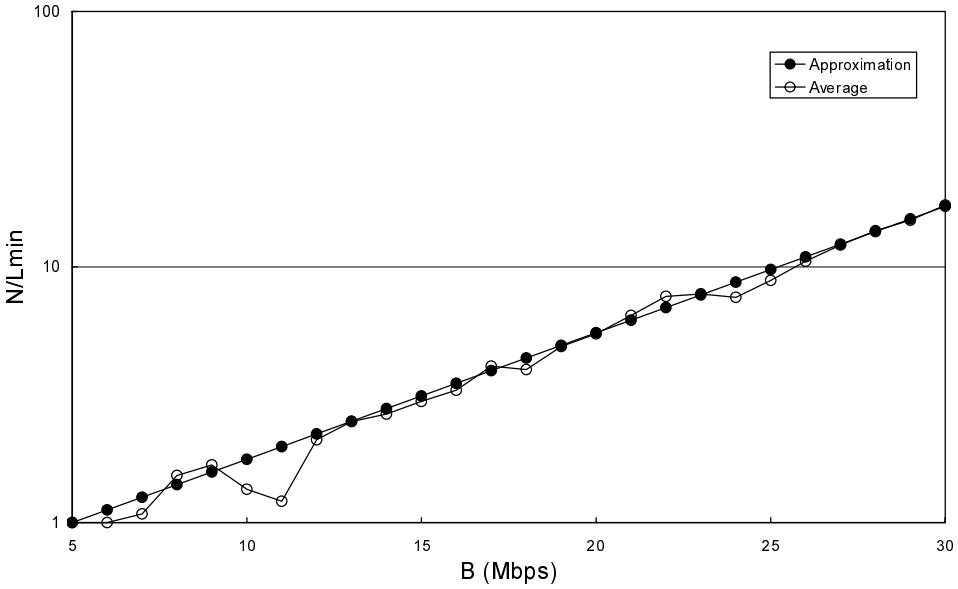

図 3.7: 帯域幅と比例定数 N/L_{min}

式 (3.18) を導出した．

$$\frac{\ln \frac{N}{L}}{\frac{B}{R} - 1} = 0.57 \tag{3.19}$$

2）セグメント挿入法

飛び越し挿入法では，データを数 100 個に分割して放送する．大幅な待ち時間短縮が期待できるが，非常に多くの部分に分割するため，導入が複雑になる．そこで，セグメント挿入法では，導入を容易にするため，データを数個に分割して放送する．初期状態では，スケジュール A は空であり，最終的に A がスケジュールとなる．以下の手順でスケジュールを作成する．

1. 再生倍率 a，放送時間 D' の連続メディアデータを，セグメント $S_1, \cdots, S_N$ に N $(= 1, 2, \cdots)$ 等分する．

2. $i = N$ から $i = 1$ まで降順にセグメント S_i をスケジュール A に加える．ここで，

   - スケジュール A が空の場合
     スケジュール A に n_i 個のセグメント S_i を加える．

- スケジュール A が空でない場合
  スケジュール A に含まれているセグメントの間，およびスケジュール A の左端に S_i を各々 n_i 個ずつ挿入する．

とする．

3. $i = 1$ になるまで手順（2）を繰り返す．

セグメント挿入法ではセグメントを挿入する数 n_i（$i = 1, \cdots, N$）を次のように与える．

- $i = 1$, $N = 2$ の場合

$$n_1 = \lfloor a \rfloor \tag{3.20}$$

- $i = 1$, $N = 3, 4, \cdots$ の場合

$$n_1 = \left\lfloor \frac{(N-2)a+1}{2^{N-2}} - 1 \right\rfloor \tag{3.21}$$

- $i = 2, \cdots, N$ の場合

$$n_i = 1 \tag{3.22}$$

$a = 5$，$N = 4$ の場合のセグメント挿入法を用いたスケジュール作成手順を図 3.8 に示す．

スケジュール A にセグメントを挿入していくことがこの手法の名前の由縁である．セグメント挿入法では，再生倍率 a，分割数 N を与えればスケジュールが一意に決定される．

3）交替放送法

飛び越し挿入法やセグメント挿入法は，単一のデータを放送する場合の手法であり，複数のデータを単一チャネルで放送する場合には適用できない．そこで，交替放送法では，複数データを放送する場合のスケジューリング手法を提案する．M 個の各データの再生時間を D_m（$m = 1, \cdots, M$），放送にかかる時間を D'_m で示す．各データを N（$= 2, 3, \cdots$）個の部分に等分割し，データ m の分割したデータを初めから順にセグメント S_n^m（$n = 1, \cdots, N$）と呼ぶ．1 個のセグメントの放送時間は D'_m/N になる．

サーバは S_n^m を以下に示すタイムスロットで放送する．

- $n = 1$ の場合
  （$N-1$）個のタイムスロット $T_{2m+2M(j-1)-1}$（$j = 1, \cdots, N-1$）で放送する．

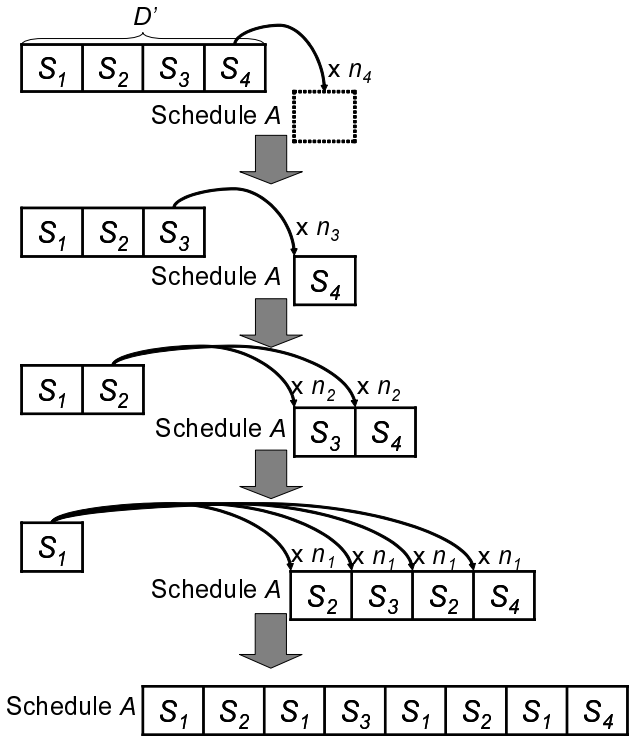

図 3.8: セグメント挿入法のスケジューリング手順

- $n \neq 1$ の場合

  $T_{2m+2M(n-2)}$ で放送する．

交替放送法では，各データの初めのセグメントとそれ以外のセグメントが交替に放送され，初めのセグメントの次に放送されるセグメントが昇順で遷移する．一周期で放送するセグメントの数は $2M(N-1)$ となる．さらに，分割数の決定法を 2 個提案する．ここで，

$$SD = \sum_{m=1}^{M} D_m \tag{3.23}$$

$$SD' = \sum_{m=1}^{M} D'_m = \sum_{m=1}^{M} \frac{D_m}{a_m} \tag{3.24}$$

$$A = \frac{SD}{SD'} \tag{3.25}$$

とする．

- 処理重視分割数決定法

$$N = \left\lfloor \frac{\min_m (D_m - D'_m)}{2SD'} + 2 \right\rfloor \tag{3.26}$$

とする．処理重視分割数決定法では，クライアントが S_1^m（$m = 1, \cdots, M$）の受信と同時に再生を開始しても最後まで途切れずにデータを再生できる．そのため，クライアントはスケジュールを知らなくても，S_1^m の受信と同時に再生を開始すればよいという利点がある．ただし，待ち時間重視分割数決定法より平均待ち時間が長くなる場合がある．

- 待ち時間重視分割数決定法
  - 次式が成立する場合，$N = 2$ とする．

$$1 \leq A < \frac{6M^2 - 2}{6M - 3} \tag{3.27}$$

  - 次式が成立する場合，$N = 3$ とする．

$$\frac{6M^2 - 2}{6M - 3} \leq A < \frac{6M^2 - 2M - 1}{2M - 1} \tag{3.28}$$

  - 以降，N を以下の式で与える．

$$N = \left\lceil \frac{6M^2 + 2M(A-2) - A + 1}{2M(2M-1)} \right\rceil \tag{3.29}$$

とする．待ち時間重視分割数決定法では，処理重視分割数決定法より平均待ち時間が短くなる場合がある．ただし，クライアントが S_1^m の受信と同時に再生を開始する場合，最後まで途切れずにデータを再生できないことがある．このため，クライアントはデータを最後まで途切れずに再生できるように，S_1^m の受信後すぐに再生を開始せず，待つ必要があり，この待ち時間をクライアントは知る必要がある．これは，必要となる待ち時間をセグメントの初めに付加し，すぐにこの待ち時間をアプリケーションに通知することで実現できる．

交替放送法で作成したスケジュールの例を図 3.9 に示す．'Mechanism Dominance Method' は処理重視分割数決定法，'Waiting Time Dominance' は待ち時間重視分割数決定法を示す．

3.4.4 評価

平均待ち時間の比較

5Mbps の 30 分のデータを放送する場合の平均待ち時間を比較した．結果を図 3.10 に示す．横軸は B，縦軸は平均待ち時間とした．ヘッダには，データの番号，セグメントの番号，データの受信開始から再生開始までの待ち時間が含まれるとし，各 4 バイトで合計

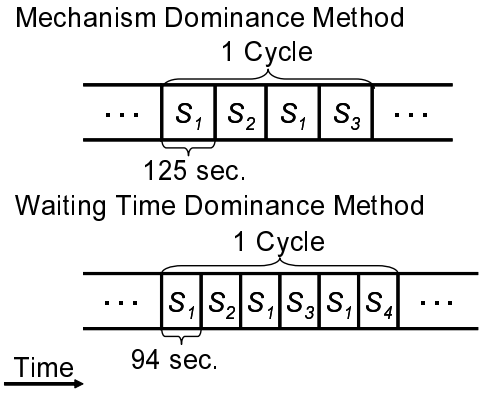

図 3.9: 交替放送法の例

12 バイトのヘッダサイズとした．'Hopping Insertion (N=100)' は $N = 100$ の飛び越し挿入法の平均待ち時間を示し，'Simple' は単純繰り返し手法，'Half-Minimum' はデータを二等分して放送する場合の最小値を示す．また，'Segment Insertion' はセグメント挿入法，'MD-AB' は処理重視分割数決定法を用いた交替放送法，'WD-AB' は待ち時間重視分割数決定法を用いた交替放送法の平均待ち時間を示す．セグメント挿入法では，平均待ち時間が最小になるように分割数を決定した．交替放送法では分割数は計算式で与えられる．このグラフより，飛び越し挿入法の平均待ち時間がこれらの手法の中で最も短いことが分かる．これは，データを細分割して分割数を多くすることで，セグメントのデータサイズが小さくなるためである．放送スケジュールを構成するセグメントのデータサイズが小さいために，放送スケジュールを繊細に作成でき，効率的な放送スケジュールの作成が可能になる．たとえば，24Mbps の帯域幅を用いて放送する場合，セグメント挿入法では，データを 4 等分するためセグメントのデータサイズは 281 M バイトになるが，データを 100 等分する飛び越し挿入法では，11 M バイトになる．データサイズが 25 分の 1 になり，より細かく放送スケジュールを作成できる．

待ち時間の最大値の比較

スケジューリング手法によって待ち時間の分散が異なるため，待ち時間の平均値だけでなく，最大値も評価の指標となりうる．そこで，5Mbps の 30 分のデータを放送する場合の待ち時間の最大値について，既存手法と比較した．結果を図 3.11 に示す．横軸は B，縦軸は最大待ち時間とし，ヘッダサイズは 12 バイトとした．このグラフより，帯域幅が比較的大きい場合には，飛び越し挿入法の最大待ち時間がこれらの手法の中で最も短いが，帯

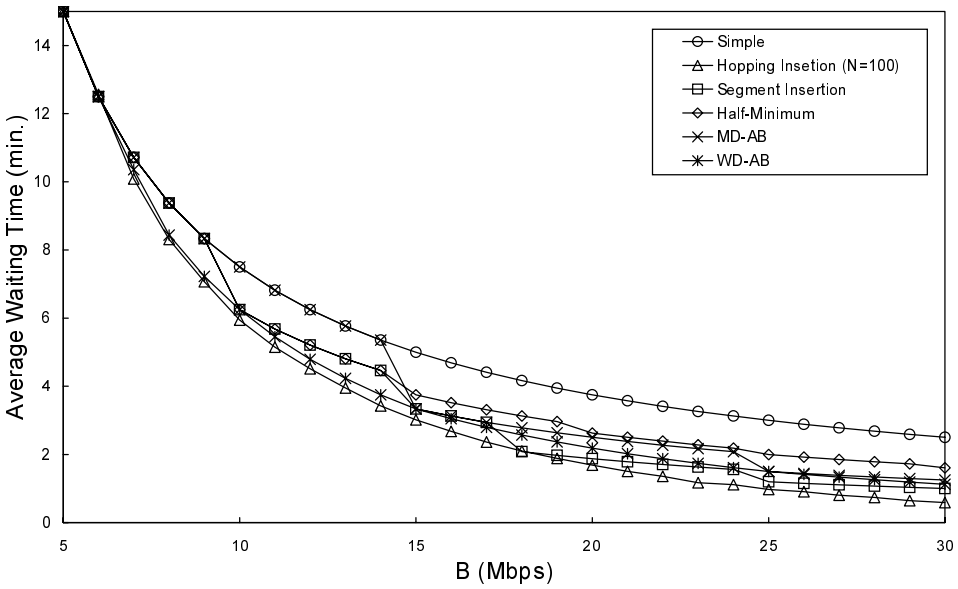

図 3.10: 平均待ち時間の比較

域幅が比較的小さい場合には，待ち時間重視分割数決定法を用いた交替放送法が最も短いことが分かる．この場合では，$B \geq 14$ のときに最大待ち時間を小さくするためには飛び越し挿入方が有効であり，飛び越し挿入法が常に最短の最大待ち時間を与えるとは限らない．

3.4.5 考察

クライアントの再生開始時刻

セグメント挿入法や処理重視分割数決定法を用いた交替放送法では，クライアントは，S_1 の受信開始と同時に再生を開始しても最後まで途切れずに再生できる [81, 86]．このため，クライアントは再生開始のタイミングを把握する必要がなく，S_1 の受信と同時に再生開始すればよい．一方，飛び越し挿入法や待ち時間重視分割数決定法を用いた交替放送法では，クライアントは，S_1 の受信開始と同時に再生を開始すると最後まで途切れずに再生できない [91]．このため，クライアントは最後まで途切れずに再生できるために，S_1 の受信後，待ってから再生する必要がある．前者に比べて待ち時間は短くなるものの，クライアントは再生開始のタイミングを把握する必要があり，処理が複雑になる．

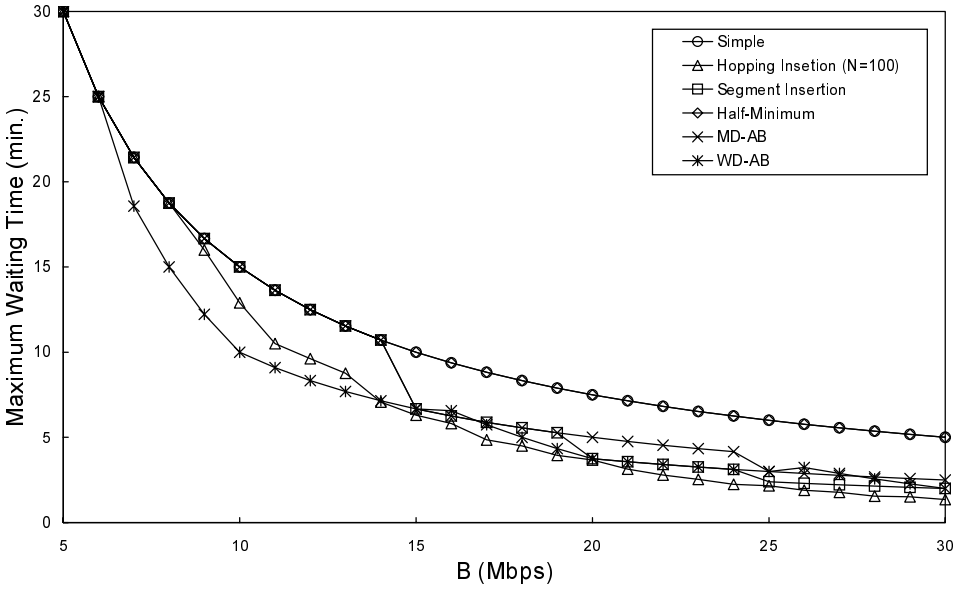

図 3.11: 平均待ち時間の最大値の比較

分割数

待ち時間を最も短縮する飛び越し挿入法において，分割数 N をパラメタとして，5Mbps の 30 分のデータを放送する場合の平均待ち時間を算出した．$B = 10$，20，24，30 Mbps の場合の平均待ち時間を図 3.12 に示す．横軸は N，縦軸は平均待ち時間とし，ヘッダサイズは 12 バイトとした．このグラフより，N に対して周期的に平均待ち時間が増加し，N が大きくなるほど平均待ち時間が収束していることが分かる．これは，N が大きくなるほどセグメントのデータサイズが小さくなり，放送スケジュールの変化に対する平均待ち時間の変化が小さくなるためである．たとえば，24 Mbps の衛星デジタル放送を用いて放送する場合，平均待ち時間は $N = 100$ では 67 秒となる．

分割数の適正値

分割数が多いほど平均待ち時間を短縮できるが，数万単位に分割するといったように，分割数が多すぎるとサーバやクライアントの処理が複雑になり，非現実的である．このため分割数は実装システムに依存し，平均待ち時間の短縮率と実装の複雑さから決定される．分割数は大きくなるほど平均待ち時間は収束するため，筆者らは N が数百であれば平均待ち時間を十分に短縮できると考える．たとえば，5 Mbps の 30 分のデータを 24Mbps の帯域幅を用いて放送する場合，$N = 104$ にすると平均待ち時間は 66 秒になり，$N = 200$ に

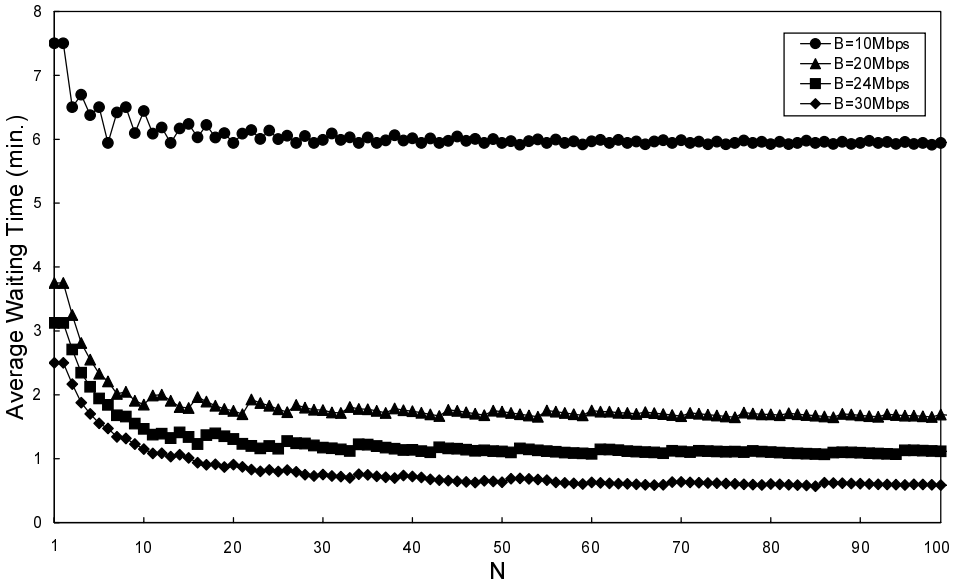

図 3.12: 飛び越し挿入法の分割数と平均待ち時間

すると平均待ち時間は 63 秒になる．たとえば，5 Mbps の 30 分のデータを 24Mbps の帯域幅を用いて放送する場合，$N = 100$ にすると平均待ち時間は 67 秒になり，$N = 200$ にすると平均待ち時間は 63 秒になる．$N = 1000$ の場合の平均待ち時間は 62 秒であり，これは，$N = 200$ の場合と比べて 2% しか短縮されていない．

オーバヘッドの影響

分割数が多いほど平均待ち時間は短くなる傾向にあるが，セグメント毎にヘッダを付加するため，分割数が多いほどヘッダの数が多くなり，オーバヘッドが増加する．そのため，オーバヘッドの増加による待ち時間の増加が考えられ，データを細分割する場合には，待ち時間の短縮とオーバヘッドの増加がトレードオフとなる．そこで，飛び越し挿入法において，ヘッダサイズをパラメタとして，5Mbps の 30 分のデータを 24Mbps の帯域幅を用いて放送する場合の平均待ち時間を算出し，トレードオフを検証した．$N = 10$，50，100 の場合の平均待ち時間を図 3.13 に示す．横軸はヘッダサイズとし，縦軸は平均待ち時間とした．

このグラフより，ヘッダサイズが 1K バイト以下であれば，オーバヘッドは大きくなく，平均待ち時間はほとんど増加しないことが分かる．しかし，ヘッダサイズが比較的大きい場合には，分割数が多いほど平均待ち時間が長くなることがある．たとえば，ヘッダサイズ

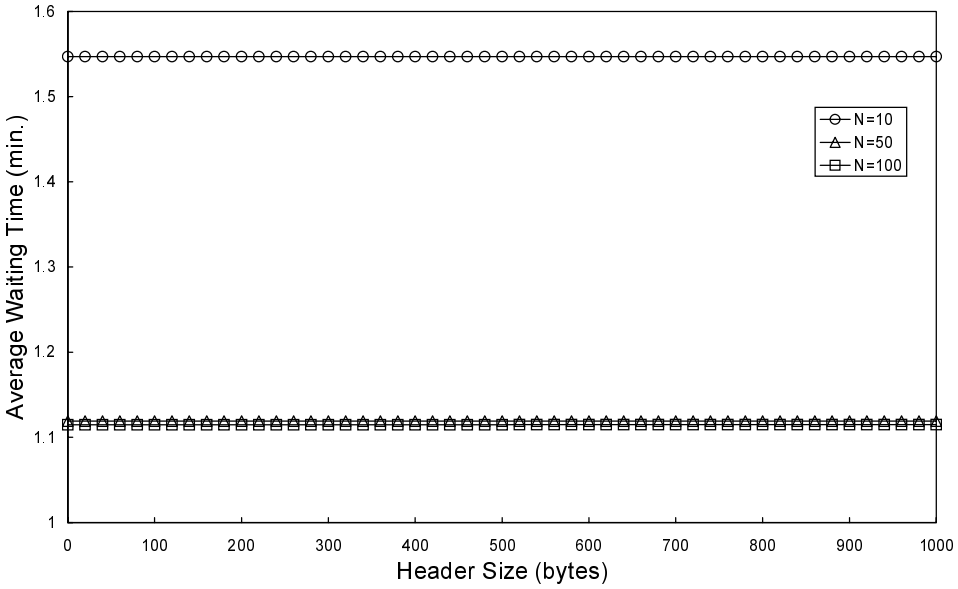

図 3.13: 飛び越し挿入法のヘッダサイズと平均待ち時間

が 5M バイトの場合，平均待ち時間は $N = 10$ では 98 秒，$N = 50$ では 117 秒，$N = 100$ では 241 秒となる．

MPEG1 のシーケンスヘッダは 144 バイト，MPEG2 では 171 バイト [32] といったように，多くの場合，ヘッダサイズは数百バイトであると考えられ，実用レベルのヘッダサイズであれば，平均待ち時間に大きな変化は見られない．

3.5 複数チャネルの場合の手法

第 2 章で提案した AHB 法では，再生の単位ごとに連続メディアデータを分割するため，非常に多くのチャネルが必要になる．しかし，使用チャネル数に制限がある状況が考えられる．そこで本節では，AHB 法の分割方法を，再生の単位を幾つかまとめたものに分割するように変更し，使用チャネル数に合わせてスケジューリングする．複数チャネル使用できる場合，AHB 法を利用でき，AHB 法は再生の単位を考慮しており現実的であるため，複数チャネルの場合の手法として AHB 法を拡張する．想定環境を第 2 章とあわせ，クライアントはデータを受信開始と同時に再生できず，ある程度受信しなければ再生を開始できないとし，また，分割数が少なく，セグメントのデータサイズがヘッダサイズに比べて非常に大きいため，ヘッダの放送にかかる時間は無視する．AHB 法の拡張手法として，分

割の方法が幾つか考えられるため，4 個の分割方法を提案し，評価を行う．評価の結果から，各手法が有効な状況について述べる．

3.5.1 分割方法

使用可能なチャネルの数を N，分割するデータサイズを初めから順に $a_1, \cdots, a_N$ とする．サーバは連続メディアデータを S_i のデータサイズが a_i になるように分割する．使用する帯域幅を B，連続メディアデータの再生時間を D，再生レートを R とする．$a_1 + \cdots + a_N = DR$ となる．以下に，4 個の a_i の決定手法を提案する．

BE-AHB（Bandwidth Equivalent-AHB）法

あるチャネルの帯域幅が他のチャネルの帯域幅に比べて小さくなると，そのチャネルのセグメントの放送に時間がかかり，待ち時間が長くなると考えられる．そのため，BE-AHB 法では，各チャネルの帯域幅が等しくなるように，a_i を以下の式で与える．

$$a_i = \frac{BD}{N} \times \frac{\left(1 + \frac{B}{NR}\right)^{i-1}}{\left(1 + \frac{B}{NR}\right)^{N} - 1} \tag{3.30}$$

IE-AHB（Interval Equivalent-AHB）法

各チャネルの放送周期が異なると，各チャネルの送受信タイミングを個別に管理する必要があり，システム導入が困難になると考えられる．そこで，IE-AHB 法では，各チャネルの放送周期が等しくなるように，a_i を以下の式で与える．

$$a_i = \begin{cases} \dfrac{DR^2}{N\left(B + R - H(N-1)R\right) - R} & (i = 1, \cdots, N-1) \\[2ex] \dfrac{DR\left(BN - H(N-1)NR\right)}{N\left(B + R - H(N-1)R\right) - R} & (i = N) \end{cases} \tag{3.31}$$

ここで，$H(n)$ は

$$H(n) = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{j} \tag{3.32}$$

で表される関数である．

SE-AHB（Segment Equivalent-AHB）法

既存手法では，解析の容易さから，各セグメントのデータサイズが等しくなるようにデータを等分割する手法が多い．SE-AHB 法では，既存手法のアプローチと比較検討するため，各セグメントのデータサイズが等しくなるように，a_i を以下の式で与える．

$$a_i = \frac{DR}{N} \tag{3.33}$$

DE-AHB（Density Equivalent-AHB）法

上記 3 個の手法の他に，クライアントが各セグメントを再生している間に受信するデータサイズを等しくすることが考えられる．DE-AHB 法では，比較のため，各セグメントの再生中に受信するデータサイズが等しくなるように，a_i を以下の式で与える．

$$a_i = \begin{cases} \dfrac{DR}{2BN}\left(B - \sqrt{B^2 - 4BR}\right) & (i = 1) \\ \dfrac{2a_{i-1}}{1 + \sqrt{1 - \dfrac{4a_{i-1}^2 N}{A(i)DR^2}}} & (i = 2, \cdots, N-1) \\ \dfrac{A(N)DR^2}{a_{N-1}N} & (i = N) \end{cases} \tag{3.34}$$

ここで，

$$A(n) = \frac{DR}{BN} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{a_j}{R} \tag{3.35}$$

である．

スケジューリング手順

第 3.5.1 項のいずれかの手法で決定した a_i の値を用いて，以下の手順に従って放送スケジュールを作成する．

1. 連続メディアデータをデータサイズが $a_1, \cdots, a_N$ の N 個のセグメント $S_1, \cdots, S_N$ に分割する．

2. N 個のチャネル $C_1, \cdots, C_N$ を用い，C_1 の帯域幅を b_1，C_j（$j = 2, \cdots, N$）の帯域幅 b_j を以下の式で与える．

$$b_j = \frac{a_j}{\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_1 + \cdots + a_{j-1}}{R}} \tag{3.36}$$

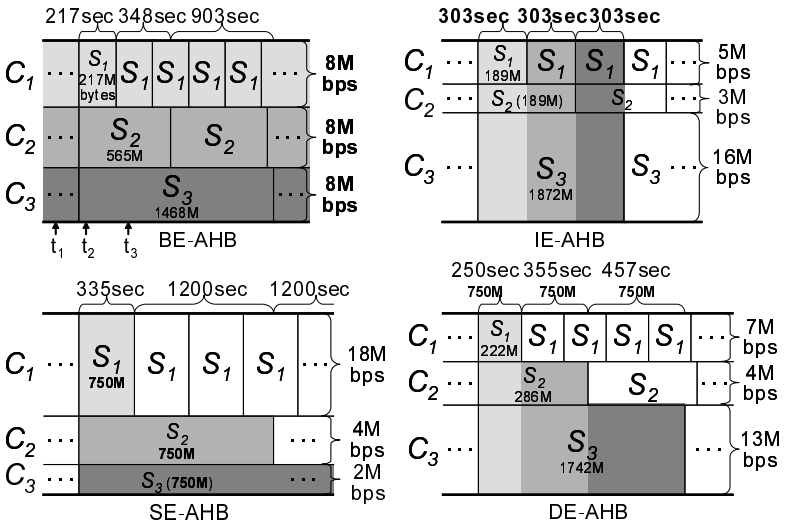

図 3.14: 放送スケジュールの例

3. C_i で S_i を繰り返し放送する．ただし，セグメントは途中から受信できないため，S_1 と同期して受信できるように S_j を S_1 の放送間隔と同じ間隔で放送できるいくつかのサブセグメントに分割して放送する．

b_1 の値は使用できる帯域幅に合わせて調整する．たとえば，MPEG2 で符号化された 5Mbps の 60 分の動画データ（$D = 60$ 分，$R = 5$Mbps）を 24 Mbps の衛星デジタル放送（$B = 24$ Mbps）で 3 チャネル用いて（$N = 3$）配信する場合の，各手法の放送スケジュールを図 3.14 に示す．値が等しくなる部分に濃淡を付けて示している．

3.5.2 評価

本節では，クライアントはデータを受信開始と同時に再生できず，ある程度受信しなければ再生を開始できないと想定している．第 2.5 節と同じく，評価には 60 分の連続メディアデータを MPEG2 で符号化した 5Mbps のデータを用い，GOP ごとに再生できるため，GOP を再生に必要なデータサイズとした．

使用するチャネル数

24 Mbps の帯域幅を用いて放送する場合の平均待ち時間を図 3.15 に示す．横軸は使用可能なチャネル数とし，縦軸は平均待ち時間とした．使用可能なチャネルの数が 7 より大

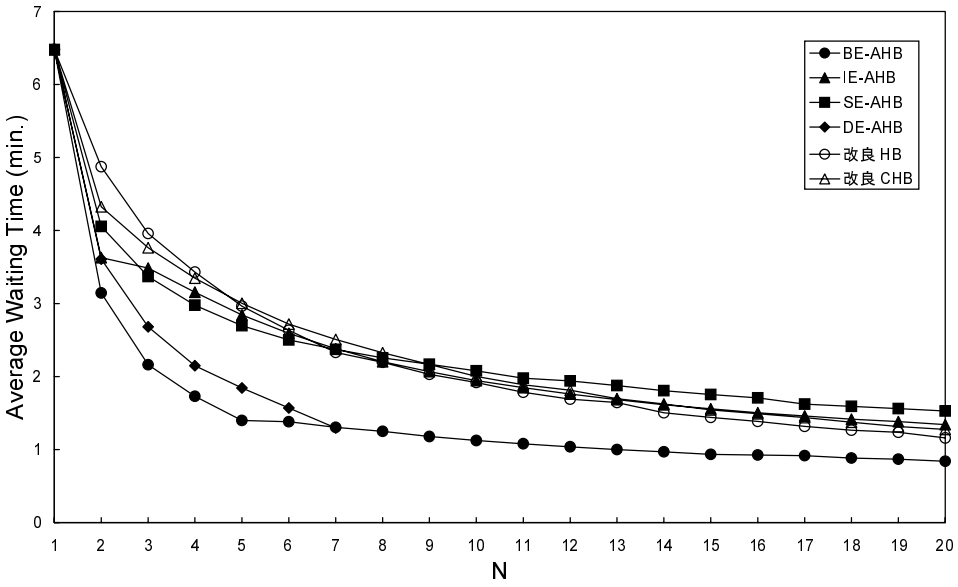

図 3.15: 使用チャネル数と平均待ち時間

きい場合には，DE-AHB 法において a_i が算出できず，放送スケジュールが作成できないため 7 までしか描かれていない．

‘改良 HB’ は，使用するチャネルの数を指定できるように改良した HB 法であり，使用する帯域幅に合わせて各チャネルの帯域幅を b 倍している．b は以下の式で与えられる．

$$b = \frac{B}{RH(N)} \tag{3.37}$$

たとえば，HB 法で 5Mbps のデータを 24Mbps で放送する場合，改良 HB 法で 3 チャネル用いて放送すると，$b_1 = 13\text{Mbps}$，$b_2 = 6.6\text{Mbps}$，$b_3 = 4.4\text{Mbps}$ となる．また，従来の HB 法とは異なり，平均待ち時間を短縮するために再生に必要なデータの区切りに合わせて分割位置を微調整している．‘改良 CHB’ も，改良 HB 法と同様に，使用するチャネルの数を指定できるように改良した手法で，CHB 法の各チャネルの帯域幅を数倍して帯域幅を調整し，再生に必要なデータの区切りに合わせて分割位置を微調整している．このグラフより，使用するチャネルの数は多いほど平均待ち時間を短縮でき，BE-AHB 法が平均待ち時間を最短にすることが分かる．

使用する帯域幅

10 個のチャネルを用いて放送する場合の平均待ち時間を図 3.16 に示す．横軸は帯域幅

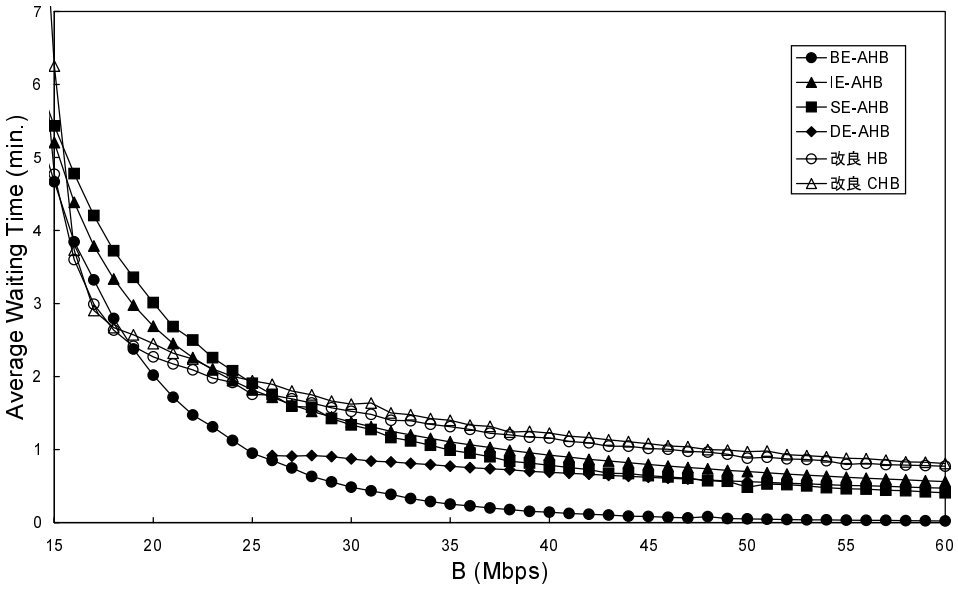

図 3.16: 帯域幅と平均待ち時間

とし，縦軸は平均待ち時間とした．帯域幅が 26 Mbps より小さい場合には，DE-AHB 法において a_i が算出できず，放送スケジュールが作成できないため 26 からしか描かれていない．このグラフより，使用する帯域幅は多いほど平均待ち時間を短縮でき，ほとんどの場合 BE-AHB 法が平均待ち時間を最短にすることが分かる．

3.5.3 考察

提案手法と AHB 法の相異点

AHB 法では再生に必要なデータサイズを a_1，$\cdots$，a_N としているが，提案手法では再生に必要なデータサイズをいくつかまとめて a_1，$\cdots$，a_N とし，使用可能なチャネル数に合わせてデータの分割数を決定している．提案手法では，クライアントが最後まで途切れずにデータを再生できるようになるまでの待ち時間を知る必要があり，AHB 法よりも平均待ち時間は長くなるが，使用するチャネル数を削減できる．使用可能なチャネル数はシステムによって異なり，複数のチャネルを論理チャネルで実現する場合には数十，物理チャネルで実現する場合には数個のチャネルを用いると考えられる．BS デジタル TV 放送では，スロットと呼ばれる論理チャネルを多くて 22 個，少なくても 6 個使用している [18].

表 3.7: 各統計値の順位（$N = 10$）

順位	平均値	最小値	最大値	分散
1	BE-AHB	SE-AHB	BE-AHB	BE-AHB
2	DE-AHB	改良 HB	DE-AHB	DE-AHB
3	SE-AHB	改良 CHB	IE-AHB	IE-AHB
4	IE-AHB	DE-AHB	SE-AHB	SE-AHB
5	改良 HB	IE-AHB	改良 HB	改良 HB
6	改良 CHB	BE-AHB	改良 CHB	改良 CHB

各手法の比較

スケジューリング手法によって待ち時間の分布が異なるため，待ち時間の平均値だけでなく，最小値や最大値も評価の指標となりうる．そこで，$N = 10$ の場合の待ち時間の各種統計値をまとめて表 3.7 に示す．値が小さいほど上位に位置している．

BE-AHB 法は最小値以外の項目については高い性能を示しているが，最小値は最長である．これは，図 3.17 に示すように，N が 5 以上の場合，BE-AHB 法の C_1 の帯域幅 b_1 が最小になっており，再生に必要なデータを受信完了するまでの時間が最長になるためである．たとえば，初めの部分の再生に必要なデータが 300 k バイトの場合，$N = 10$ の BE-AHB 法では $b_1 = 2.4$ Mbps であるため，このデータの受信に 1 秒かかるが，SE-AHB 法では $b_1 = 12.2$Mbps であるため，0.2 秒で受信できる．このため，b_1 が小さいほど待ち時間の最小値が長いといえる．

IE-AHB 法はいずれの項目においても DE-AHB 法より性能が低いが，各チャネルの放送周期が等しいため，放送する際に各チャネルの送受信タイミングが合わせやすい．

SE-AHB 法は，待ち時間の最小値を最短にしている．ただし，他の項目については BE-AHB 法や DE-AHB 法よりも性能が低い．

DE-AHB 法はいずれの項目においても平均的な性能を示している．

以上より，平均待ち時間を最短にする場合には BE-AHB 法，送受信処理を簡単化する場合には IE-AHB 法，待ち時間の最小値を BE-AHB 法よりも短くする場合には DE-AHB 法，他の性能は低くても待ち時間の最小値を最短にする場合には SE-AHB 法を用いることが有効である．

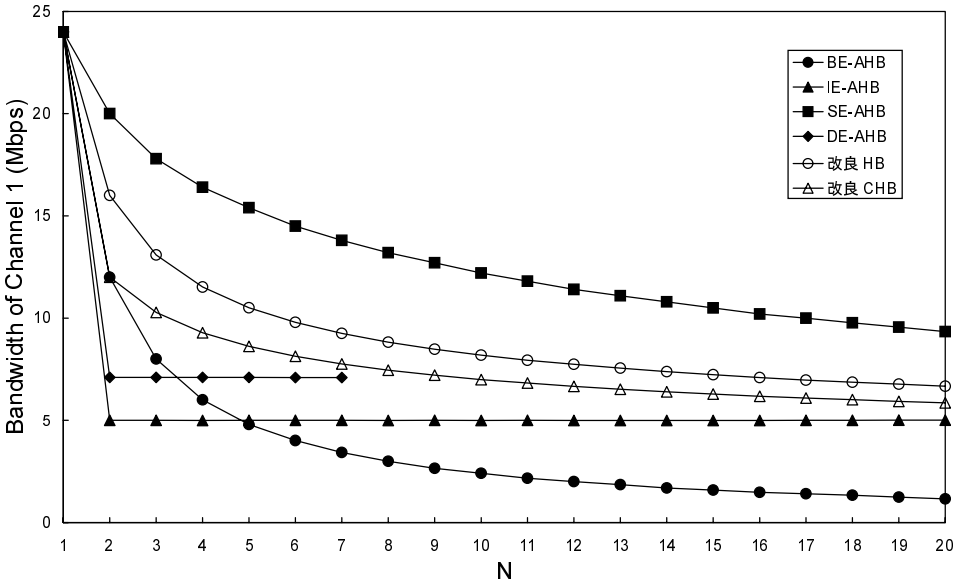

図 3.17: 使用チャネル数とチャネル 1 の帯域幅（$B = 24\mathrm{Mbps}$）

3.6 むすび

本章では，使用可能なチャネル数を考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案した．使用チャネル数が単一チャネルのみである場合には，分割したデータを単一チャネルでスケジューリングして放送する必要があり，複数チャネル使用できる場合とは異なったアプローチで待ち時間を短縮する必要がある．このため，単一チャネルの場合と複数チャネルの場合に分けて，使用可能なチャネルの数を考慮した待ち時間短縮のためのスケジューリング手法を提案した．

単一チャネルの場合に関して，2 等分する場合については解析を行い，平均待ち時間を最短にするスケジュールを示した．このスケジュールでは，1 周期中に後半のデータを一度だけ放送し，次に，前半のデータを放送に要する時間と再生時間の比によって決まる回数だけ放送する．2 等分するだけでもかなりの待ち時間を短縮できることを評価で示した．3 等分以上の場合については，ヒューリスティックなスケジューリング手法を幾つか提案し，評価を行った．飛び越し挿入法では，データを数 100 個に分割して放送する．大幅な待ち時間短縮が期待できるが，多くの部分に分割するため，導入が複雑になる．そこで，セグメント挿入法では，データを数個に分割して放送する．また，複数データを放送する場合のスケジューリング手法，交替放送法を提案した．評価の結果，データを分割せずにを繰

り返して放送する手法よりも，提案手法の平均待ち時間の方が短いことが明らかになった．

複数チャネルの場合に関して，AHB 法を拡張した手法を提案した．AHB 法は再生の単位を考慮した場合に効率的に待ち時間を短縮できる．AHB 法の分割の方法を変更することで，使用チャネル数を考慮できるため，分割の方法を幾つか提案し，評価を行い，各手法が有効な状況について述べた．

今後の予定として，複数の連続メディアデータを放送する際に，データ間の相関性を考慮して平均待ち時間を短縮することや，あらかじめデータを受信して待ち時間のない再生を可能にすることが挙げられる．

第4章

プリフェッチを考慮した手法

4.1 まえがき

クライアントの使用できるバッファ容量が多い場合，放送されているデータをあらかじめプリフェッチすることが考えられる．幾つかの既存手法では，データのプリフェッチを導入することで待ち時間のない再生が可能になるため，データの初めの部分をプリフェッチしている．これらの研究では，データを幾つかの部分に分割し，データの再生中に残りの部分を受信できるようにスケジューリングして複数のチャネルを用いて放送することで，必要な帯域幅を削減している．しかし，一般に，ハードウェアの制限や導入の複雑さといった理由から，使用チャネル数に制限がある場合が多い．たとえば，地上波デジタル放送では，変調方式の都合上，セグメントと呼ばれる 13 個のチャネルまでしか同時受信できない [50]．そこで，本章では，プリフェッチを考慮したうえで，同時受信できるチャネル数に制限がある場合に有効なスケジューリング手法を提案する．

提案手法は，BE-AHB 法 [82] を拡張した手法であり，データのプリフェッチを考慮したうえで，同時受信できるチャネル数に合わせてデータを分割して放送スケジュールを作成する．

以下，第 4.2 節で関連研究について説明し，第 4.3 節で提案手法を説明する．第 4.4 節で提案手法の評価を行い，第 4.5 節で考察を行う．最後に第 4.6 節で本章をまとめる．

4.2 関連研究

連続メディアデータ放送において，データのプリフェッチを考慮したうえで，再生が途切れないために必要な帯域幅を削減する様々な手法が提案されている．

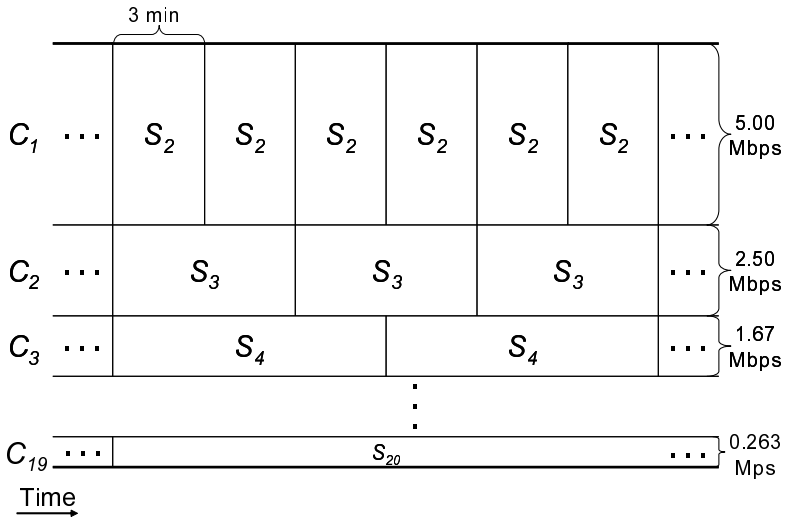

図 4.1: PHB-PP 法（$m = 1$）の放送スケジュール

手法の有効性を示すために，まず，データを分割せずに放送する場合（単純繰り返し手法）を考える．この場合，クライアントがデータを最初から最後まで途切れずに再生するためには，プリフェッチしたデータを再生している間に残りのデータを全て受信する必要がある．たとえば，クライアントが 60 分のドラマの初めの 3 分をプリフェッチすると，プリフェッチした初めの 3 分を再生している間に残りの 57 分のデータを受信する必要がある．データの再生レートが 5Mbps（MPEG2[32]）の場合には，95 Mbps の帯域幅が必要になる．PHB-PP（PolyHarmonic Broadcasting protocol with Partial Preloading）法 [56] では，データを n 個の部分に等分割して複数のチャネルを用いて放送することで，必要な帯域幅を削減している．プリフェッチするデータを m 個のセグメント S_1，$\cdots$，S_m に等分割する．残りのデータも同じデータサイズになるようにセグメント S_{m+1}，$\cdots$，S_n に等分割する．$n - m$ 個のチャネル C_1，$\cdots$，C_{n-m} を用い，C_1 で S_{m+1}，C_2 で S_{m+2} といったように 1 個のチャネルで 1 個のセグメントを繰り返して放送する．各チャネルの帯域幅は，各セグメントの再生開始までに受信できるように計算式で求められる．たとえば先ほどの例の場合，$m = 1$ とすると $n = 20$ となる．この場合の放送スケジュールを図 4.1 に示す．S_1 はプリフェッチされているため放送しない．必要な帯域は 17.7Mbps になり，単純繰り返し手法に比べて削減されていることが分かる．しかし，m の値を大きくして必要な帯域幅を削減するほど使用するチャネル数が多くなり，システムが複雑になるという問題がある．MTB（Mayan Temple Broadcasting）法 [56] では，データを，データサイズの異なる幾つかのセグメントに分割して複数のチャネルを用いて放送する．最後のチャネル以外の

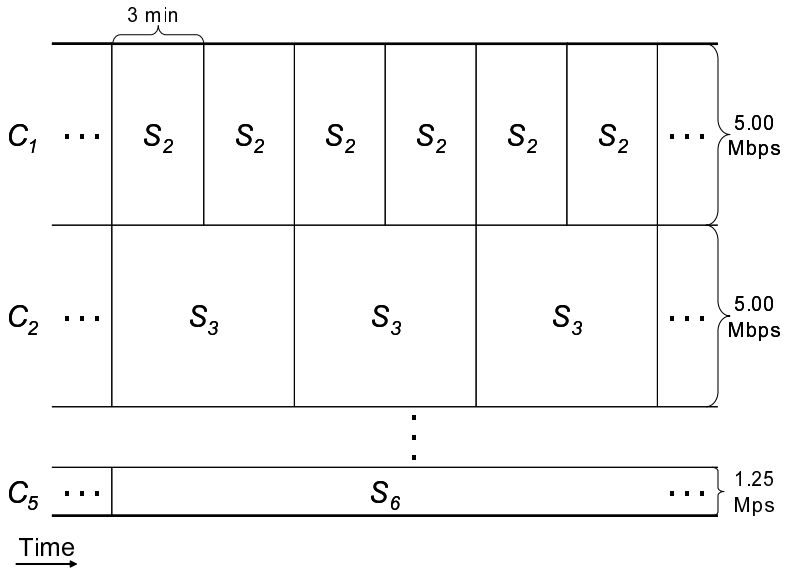

図 4.2: MTB 法の放送スケジュール

各チャネルの帯域幅を等しくし，1 個のチャネルで 1 個のセグメントを繰り返して放送する．各セグメントのデータサイズは，そのセグメントを再生開始までに受信できるように計算式で求められる．必要な帯域幅は，PHB 法より大きくなるものの，使用するチャネル数を抑えることができる．たとえば，先ほどと同じ例の場合，各チャネルの帯域幅をデータの再生レートと等しくすると，5 個のチャネルを用いることになる．この場合の放送スケジュールを図 4.2 に示す．S_1 はプリフェッチされているため放送しない．必要な帯域は 21.3Mbps になり，単純繰り返し手法に比べて削減されていることが分かる．以上のように，必要な帯域幅を削減する手法が幾つか提案されているが，同時受信するチャネル数を制限した手法はない．提案手法は，同時受信できるチャネル数に合わせて放送スケジュールを作成する点が異なる．

4.3 提案手法

提案手法 AHB-P（Asynchronous Harmonic Broadcasting with Prefetching）法は，BE-AHB 法を拡張した手法であり，データのプリフェッチを考慮したうえで，同時受信できるチャネル数に合わせてデータを分割して放送スケジュールを作成する．チャネル数に制限がある場合に，データの再生が途切れないようにするために必要な帯域幅を効率的に削減できる．BE-AHB 法は，MPEG2 の GOP（Group of Pictures）などの再生の単位を考慮

した手法であり，実用性に優れているため，BE-AHB 法を拡張した．

4.3.1 想定環境

提案手法の想定環境を以下に挙げる．初めの二項目は，連続メディアデータに関する制限であり，以降は通信に関する項目である．

- クライアントが連続メディアデータの再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できる．
- クライアントはデータを受信開始と同時に再生できず，ある程度受信しなければ再生を開始できない．
- サーバやクライアントの使用チャネル数はあらかじめ制限されている．
- クライアントは十分な容量のバッファを持ち，受信したデータを再生している間も放送されているデータを受信し，バッファに保存できる．
- クライアントはデータをプリフェッチする．
- サーバはニアオンデマンド型の放送を行う．
- サーバはデータ更新しない．
- セグメントのヘッダサイズはセグメントのデータサイズに比べて非常に小さいため，ヘッダの放送にかかる時間は無視する．

多くのコンテンツが放送されており，再生するコンテンツはユーザの嗜好によって異なると考えられる．したがって，すべてのデータをプリフェッチすると，データサイズが膨大になるため，一部のデータをプリフェッチする．プリフェッチの手法については第 4.5.2 項で説明する．

4.3.2 スケジューリング手順

連続メディアデータの再生時間を D，再生レートを R，同時受信するチャネル数を N，プリフェッチするデータの全データサイズに対する割合を d とする．たとえば，5Mbps の 60 分のデータを 13 チャネル用いて放送する場合（$D = 60$ 分，$R = 5\mathrm{Mbps}$，$N = 13$）に，

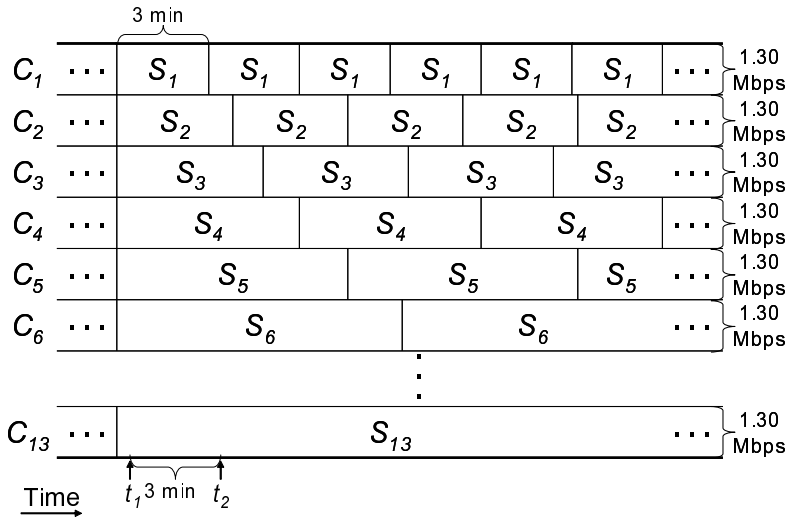

図 4.3: AHB-P 法の放送スケジュール

初めの 3 分をプリフェッチすると，$d = 3/60 = 0.05$ となる．すべてのチャネルの帯域幅を等しくし，各チャネルの帯域幅 b は次式で与える．

$$b = R\left(\sqrt{\frac{1}{d}} - 1\right) \tag{4.1}$$

放送に必要な帯域幅は bN になる．プリフェッチするデータに含まれない残りの連続メディアデータを，N 個のセグメント S_1，$\cdots$，S_N に分割する．ここで，i（$= 1$，$\cdots$，N）番目のセグメントのデータサイズが

$$bdD\left(1 + \frac{b}{R}\right)^{i-1} \tag{4.2}$$

になるように分割する．論拠は第 4.5.3 項に示す．i 番目のチャネルで i 番目のセグメントを繰り返し放送する．たとえば，先ほどの例のデータを放送する場合，$b = 1.30\mathrm{Mbps}$ となり，放送スケジュールは図 4.3 で示される．

4.3.3 導入方法

サーバ側では，同時受信するチャネル数とプリフェッチさせるデータの割合を決定し，各セグメントのデータサイズを算出してデータをセグメントに分割する．データを分割する際，分割の区切りと再生の単位の区切り位置が一致するように，分割する位置を調整する．セグメントには，プリフェッチするデータの割合や連続メディアデータの識別子，セグメ

ントの番号といった情報をクライアントが入手できるように，これらの情報をヘッダとして付加する．サーバは作成した放送スケジュールに従って繰り返してデータを放送し，プリフェッチ用のデータは残り帯域や他の時間帯で放送する．

クライアントは，ユーザがクライアントにデータの受信要求を出す前にプリフェッチを行っておき，受信要求を出すと，プリフェッチされているデータの再生を開始する．クライアントはデータの再生中に残りのデータを受信し，バッファに保存しておくことで，最後まで途切れずに再生できる．たとえば，図 4.3 の例の場合，時刻 t_1 でデータの再生を開始したクライアントは，t_2 でプリフェッチしていたデータを再生し終える．クライアントは t_2 までに S_1 を受信完了しているため，続けて S_1 を再生できる．S_2，$\cdots$，S_N についても再生開始時刻までに受信完了でき，クライアントは，最初から最後まで途切れずに再生できる．

4.4 評価

4.4.1 帯域幅

AHB-P 法で作成した放送スケジュールに従って連続メディアデータを配信する場合に必要な帯域幅を図 4.4 に示す．縦軸は必要な帯域幅をデータの再生レートで除した値，横軸はプリフェッチするデータの全データサイズに対する割合とする ‘N=i’（$i = 2$，5，10，20）は同時受信するチャネル数が i チャネルの場合の AHB-P 法で必要な帯域幅を示す．このグラフより，プリフェッチするデータが多いほど必要な帯域幅が少なくなることが分かる．これは，プリフェッチするデータが多いほど放送するデータが少なくなるためである．また，同時受信するチャネル数が多いほど必要な帯域幅が少なくなることが分かる．これは，同時受信するチャネル数が多いほどデータの分割数が多くなり，必要な帯域幅を削減できるためである．

4.4.2 チャネル数

使用できる帯域幅が既定の場合に，その帯域幅に合わせてプリフェッチするデータサイズと同時受信するチャネル数を決定することが考えられる．そこで，ある帯域幅まで使用する場合に，AHB-P 法で同時受信する必要のあるチャネル数を図 4.5 に示す．縦軸は同時受信する必要のあるチャネル数，横軸はプリフェッチするデータの全データサイズに対する割合とする．‘B/R=i’（$i = 2$，$\cdots$，5，10）は再生レートの i 倍までの帯域幅を使用する場合に同時受信する必要のあるチャネル数を示す．このグラフより，ある帯域幅のもとで

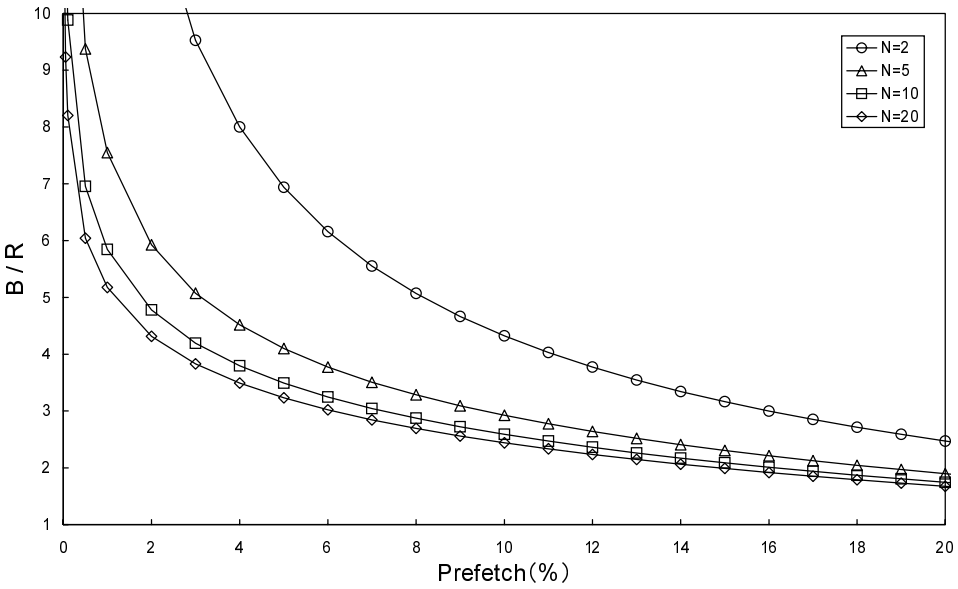

図 4.4: AHB-P 法で必要な帯域幅

同時受信するチャネル数は，プリフェッチするデータが多いほど少なくなることが分かる．これは，プリフェッチするデータが多いほど放送するデータが少なくなり，同時受信するチャネル数が少なくても，途切れずに再生できるために必要な帯域幅を既定の帯域幅内に収められるためである．

4.5 考察

まず，既存手法との比較を行い，次に提案手法に関する議論を行う．

4.5.1 比較

AHB-P 法で，クライアントがデータを最初から最後まで途切れずに再生できるために必要な帯域幅を既存手法と比較する．既存手法では，再生の単位を考慮していないため，データの分割と再生の単位が一致せず，ユーザの受信要求と同時にデータの再生を開始すると，再生中に再生が途切れる可能性がある．そこで，本項の比較では，既存手法でデータを分割する際，分割の区切りと再生の単位の区切り位置が一致するように分割する位置を調整している．

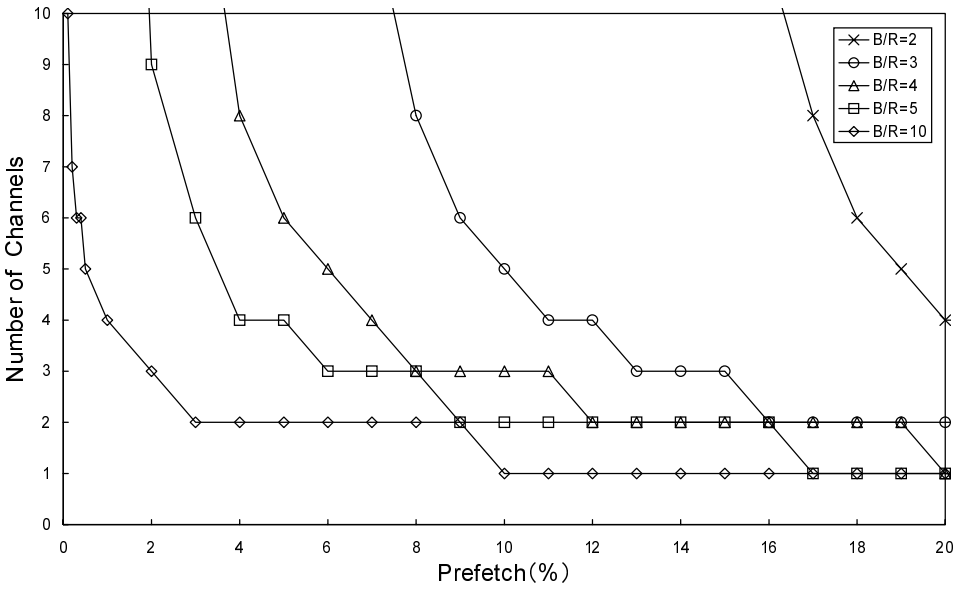

図 4.5: AHB-P 法の同時受信チャネル数

プリフェッチする割合

地上波デジタル放送を想定し，13 個のチャネルから同時にデータを受信できるとして比較を行った．結果を図 4.6 に示す．縦軸は必要な帯域幅をデータの再生レートで除した値，横軸はプリフェッチするデータの全データサイズに対する割合とする．'Simple' はデータを分割せずに放送する単純繰り返し手法を示す．PHB-PP 法のパラメタ m は，同時受信するチャネル数が 13 以下で必要な帯域幅が最小になるように決定し，MTB 法の各チャネルの帯域幅は再生レートと等しくした．PHB-PP 法でプリフェッチするデータが 7 このグラフより，AHB-P 法で必要な帯域幅が最も少ないことが分かる．たとえば，MPEG2 で符号化された 5Mbps の 60 分の動画の初めの 3 分をプリフェッチする（$d = 5\%$）場合を考える．13 個のチャネルから同時にデータを受信できる場合，途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅は，AHB-P 法では 16.9Mbps，MTB 法では 21.2Mbps になる．PHB-PP 法では 13 個のチャネルでは放送できず，少なくとも 19 個のチャネルが必要になる．地上波デジタル放送の帯域幅は 24Mbps であり，残り帯域でプリフェッチ用のデータも放送でき，実用的といえる．

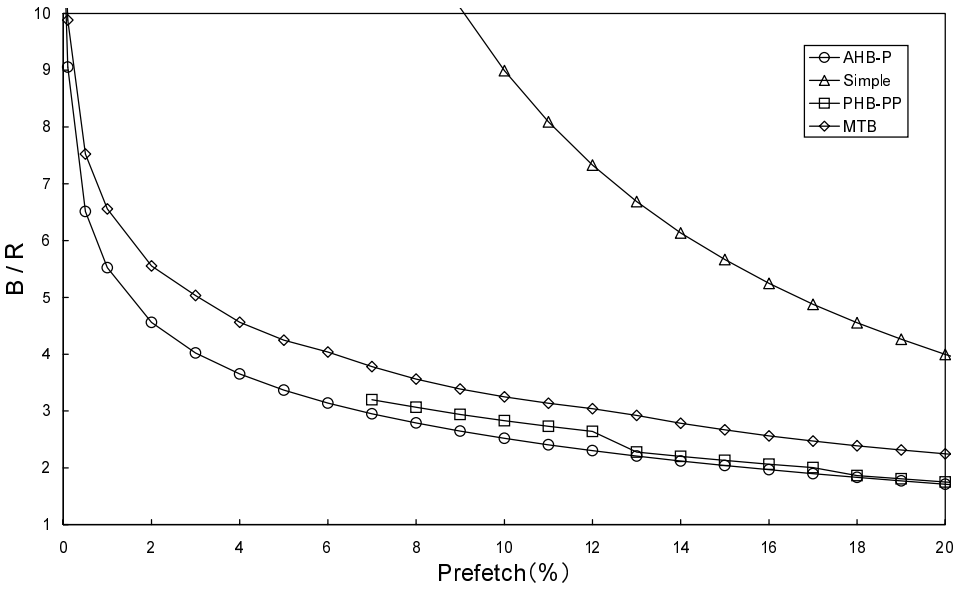

図 4.6: プリフェッチする割合と必要な帯域幅

同時受信チャネル数

全データの 20%をプリフェッチすることを想定して比較を行った．結果を図 4.7 に示す．縦軸は必要な帯域幅をデータの再生レートで除した値，横軸は同時受信できるチャネル数を示す．PHB-PP 法のパラメタ m は，同時受信するチャネル数に合わせて決定した．PHB-PP 法や MTB 法では，少なくとも幾つかのチャネルから同時にデータを受信する必要があるため，グラフが途中から描かれている．このグラフより，AHB-P 法で必要な帯域幅が最も少ないことが分かる．これは，AHB-P 法では同時受信できるチャネル数と等しいチャネル数を用いてデータを放送しているためである．一方，MTB 法で必要な帯域幅が変化していないことが分かる．これは，MTB 法で使用するチャネル数が，プリフェッチするデータサイズから決定されるため，20 個のチャネルから同時にデータを受信できる場合でも，4 個のチャネルのみ使用しているためである．また，PHB-PP 法においても，同時受信できるチャネル数が 4，$\cdots$，7 個や 8，$\cdots$，11 個などの場合で必要な帯域幅が変化していない．これは，PHB-PP 法で使用するチャネル数が，$m = 1$ の場合 4 チャネル，$m = 2$ の場合 8 チャネルといったように離散的であり，7 個のチャネルから同時にデータを受信できる場合でも，4 個のチャネルのみ使用しているためである．たとえば，MPEG2 で符号化された 5Mbps の 60 分の動画の初めの 12 分をプリフェッチする（$d = 20\%$）場合を考える．13 個のチャネルから同時にデータを受信できる場合，AHB-P 法で必要な帯域幅は

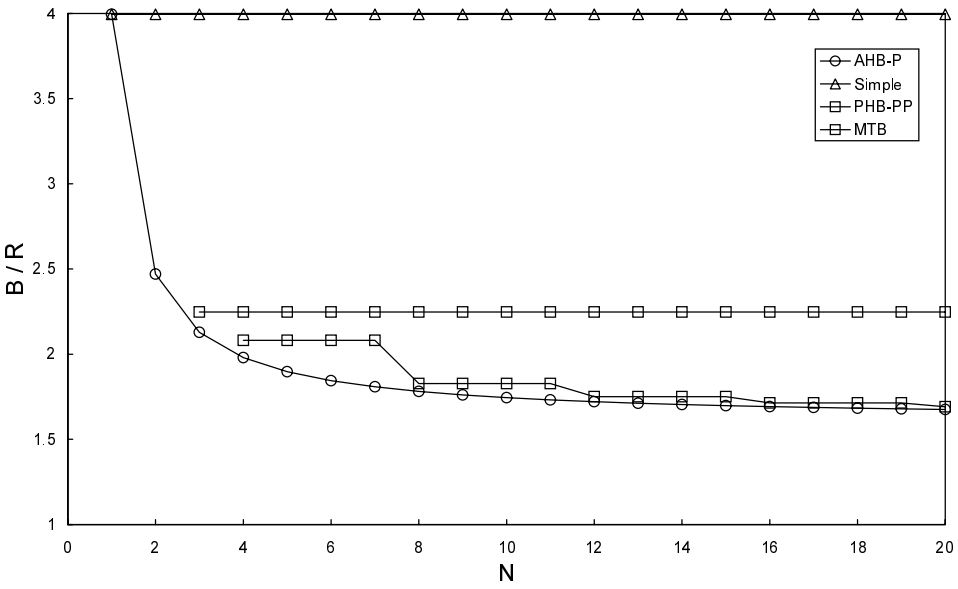

図 4.7: 同時受信チャネル数と必要な帯域幅

8.6Mbps，PHB-PP 法では 9.1Mbps，MTB 法では 11.2Mbps になる．

4.5.2 プリフェッチするデータの配信手法

提案手法では，クライアントは全データの $d\%$ のデータをあらかじめプリフェッチすると想定している．プリフェッチするデータの配信手法としてチャネル別配信手法と時間帯別配信手法の 2 種類の手法を提案する．

チャネル別配信手法

使用できる帯域幅の一部をプリフェッチするデータの配信に用いる手法である．たとえば，24Mbps の地上波デジタル放送において，7.1Mbps をプリフェッチするデータの配信に用い，残りの 16.9Mbps を AHB-P 法でスケジューリングしたデータの放送に用いることが考えられる．プリフェッチしていないクライアントも，プリフェッチを完了するまで待つことで最初から最後まで途切れずに再生できるが，プリフェッチするデータに含まれないデータの放送のために使用できる帯域幅が少なくなる．

時間帯別配信手法

ユーザがデータを再生する時間帯は，ほとんどの場合，限られている．たとえば，ユーザは起床時刻から就寝時刻までの間でデータを再生する．現在の地上波放送では，主に午前 5 時から翌日の午前 3 時の間でデータを放送し，ユーザが就寝していると考えられる時間帯ではデータを放送していない．そこで，時間帯別配信手法では，ユーザがデータを再生しないと考えられる時間帯にプリフェッチするデータを配信し，他の時間帯では残りのデータを配信する．たとえば，午前 3 時から午前 5 時までプリフェッチするデータを配信し，他の時間帯では残りのデータを AHB-P 法でスケジューリングして放送する．使用できる帯域幅をすべてプリフェッチされないデータの放送に割り当てられるが，プリフェッチしていないクライアントは，初めから再生できない．

クライアントのデータの受信方法によってどちらの手法を用いるか異なる．たとえば，クライアントが放送されているデータを常に受信しており，プリフェッチするデータを必ず受信できる場合には，時間帯別配信手法を用い，そうではない場合にはチャネル別配信手法を用いることが考えられる．

4.5.3 途切れのない再生

S_i（$i = 1$，$\cdots$，$N-1$）のデータサイズを s_i で示す．データの再生開始から S_i の再生終了まで $dD + (s1 + \cdots + si)/R$ かかることになり，帯域幅が b のチャネルで S_i の再生終了までに S_{i+1} を受信完了するためには，

$$s_{i+1} = b\left(dD + \frac{s_1 + \cdots + s_i}{R}\right) \tag{4.3}$$

である必要がある．この漸化式を解くと，式（4.2）になるため，クライアントは S_i の再生終了までに S_{i+1} を受信完了でき，最初から最後まで途切れずに再生できる．また，$s_1 + \cdots + s_N = (1-d)DR$ より式（4.1）を得る．

4.6 むすび

連続メディアデータ放送において，データのプリフェッチを考慮したうえで，再生が途切れないようにするために必要な帯域幅を削減する手法 AHB-P 法を提案した．AHB-P 法は，BE-AHB 法を拡張した手法であり，データのプリフェッチを考慮したうえで，同時受信できるチャネル数に合わせてデータを分割して放送スケジュールを作成する．ハードウェアの制限や導入の複雑さといった理由から使用するチャネル数に制限がある場合には，

途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅を既存手法より削減できることが明らかになった．今後，計算機シミュレーションではなく，実際に放送システムを作成し，評価を行うことや，プリフェッチするデータサイズがクライアントごとに異なる場合のスケジューリング手法，早送りしても途切れずに再生できるスケジューリング手法の考案が挙げられる．

第5章

早送りを考慮した手法

5.1 まえがき

連続メディアデータを再生する場合，ユーザは，巻き戻しや早送りといったビデオ操作を行うことで，好みの場面をすぐに視聴できる．一般に，連続メディアデータを再生する際のユーザの操作には，一時停止，巻き戻し，早送りの 3 種類の操作がある [10]．巻き戻しと一時停止は再生したデータを再利用する操作であるため，再生したデータをバッファに保存することで実現できるが，早送りは一度も再生していないデータを再生するため特別な配慮が必要であり，従来手法では早送りを行うと続きのデータが放送されるまで待たなければならない可能性がある．しかし，早送りはユーザにとって次のような状況で重要であるものと考えられる．

- スポーツ試合（生中継は除く）が放送されているとき，視聴者は好みのチームの活躍場面をじっくり見て，相手チームの活躍場面は早送りする．
- 音楽番組が放送されているとき，好きなアーティスト以外の場面を早送りする．
- クイズ番組が放送されているとき，視聴者は番組の解答者の解答場面を早送りして，出題から正解までの時間を短縮する．
- 人気のある映画が放送されているが，多忙でゆっくり見られない場合，ストーリに変化の少ない場面を早送りする．
- 全体をそれほど速くない速度で早送りし，短時間で映像を鑑賞する．

これらは，ユーザの嗜好に合わせてデータを飛ばし見する行為でジッピングとよばれている [33]．クライアントが放送されているデータを保存し，すべてのデータの保存完了後，再

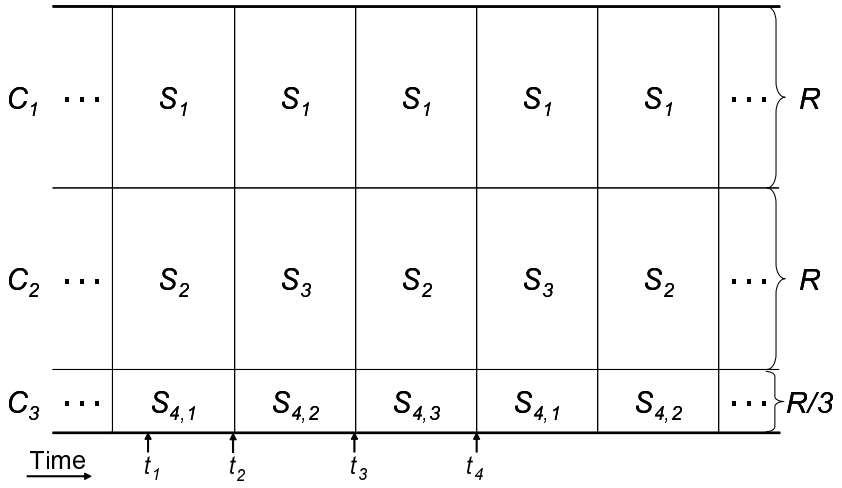

図 5.1: CHB 法の放送スケジュール（$N = 4$）

生することで早送りが可能になるが，保存することなく早送りできるようにすることで，ユーザは保存完了を待つ必要がなくなる．そこで，本章では，再生が途切れないように早送りを考慮したうえで，待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．

提案手法は，CHB 法を拡張し，ユーザがある範囲内の速度で早送りしても，データの再生が途切れないようにしたうえで，クライアントの平均待ち時間を短縮する．再生レートを大きく見積もって既存の手法を用いることで途切れのない早送りが可能になるが，提案手法では，早送り用にデータを間引くことで平均待ち時間をさらに短縮する．さらに，AHB-P 法 [89] と組み合わせて，プリフェッチを導入する．

以下，第 5.2 節では，関連研究について述べ，第 5.3 節では提案手法を説明する．第 5.4 節では，提案手法の解析を行い，第 5.5 節で評価を行う．第 5.6 節で提案手法に関して考察を行い，最後に第 5.7 節で本章のまとめを行う．

5.2 関連研究

クライアントがデータの受信を開始するまでの平均待ち時間を短縮する様々な手法が提案されている．しかし，早送りを考慮していないため，早送りするとデータの再生が途切れるという問題がある．

たとえば，CHB 法で早送りする場合を考える（図 5.1）．時刻 t_1 で受信要求を出し，クライアントが t_2 で S_1 の受信と同時に再生を開始する場合，S_1 再生終了後の t_3 から再生

レートの 2 倍の速度で $S_{4,1}$ の始まる t_4 まで早送りすると，早送り中のデータを受信していないため，早送り中の映像を再生できない．これは，S_2 の受信を t_4 で完了するが，それまでに S_2 の再生を終了しなければならないことから分かる．さらに，早送り終了後，続きのデータ（$S_{4,1}$）も途切れずに再生できない．

PB（Pagoda Broadcasting）法 [51, 55] では，1 個の連続メディアデータを N 個のセグメントに等分割し，帯域幅が R の幾つかのチャネルを用いて放送する．1 個のチャネルで幾つかのセグメントを放送することで，同時に受信するチャネルの数を CHB 法より削減でき，システムの導入が容易になるという利点がある．

PB 法で早送りする場合も，早送り中や早送り終了後のデータを再生するために待たなければならない可能性がある．そこで，早送り中のデータを再生できるように，早送りを行った場合のみオンデマンド型でデータを配信する IPB（Interactive Pagoda Broadcasting）法 [52] がある．IPB 法では，早送りする場合，早送り中のデータを再生するために必要なセグメントの受信要求をクライアントが出し，サーバはそのセグメントを放送する．しかし，ユーザが頻繁に早送りするほど，必要な帯域幅が広くなるという問題がある．

CHB 法や PB 法はニアオンデマンド型であるが，オンデマンド型の ST（Stream Tapping）法 [13, 53] がある．ST 法では，ユーザが受信要求を出す場合に，完全ストリーム（Original Stream）が配信されていないとき，サーバは完全ストリームを用いてすべてのデータを配信する．完全ストリームが配信されているとき，サーバは補間ストリーム（Tap Stream）を用いて初めから途中までのデータを配信する．補間ストリームはデータの一部のみ配信するため，各クライアントに完全ストリームを配信する場合より，必要となる帯域幅を削減できる．たとえば，図 5.2 において，時刻 t_1 で受信要求を出したクライアント 1 には完全ストリームを配信する．クライアント 1 は完全ストリームからすべてのデータを受信できるため，途切れのない再生が可能になる．t_2 で受信要求を出したクライアント 2 は，既に完全ストリームが配信されているため，クライアント 2 は完全ストリームから t_2 以降のデータを受信できる．しかし，t_1 から t_2 の間に完全ストリームから配信されたデータ（Δ_1）を受信できないため，サーバはクライアント 2 に補間ストリーム 1 を配信し，クライアント 2 が Δ_1 を受信できるようにする．クライアント 2 は完全ストリームと補間ストリーム 1 から同時にデータを受信することで，すべてのデータを受信できるため，途切れのない再生が可能になる．t_3 で受信要求を出したクライアント 3 は完全ストリームと補間ストリーム 1 から同時にデータを受信することで，Δ_2 および Δ_3 を除いたデータを受信できる．サーバはクライアント 3 が Δ_2 および Δ_3 を受信できるように補間ストリーム 2 を配信する．クライアント 3 は補間ストリーム 2 からデータを受信することで，すべてのデータを受信でき，途切れのない再生が可能になる．

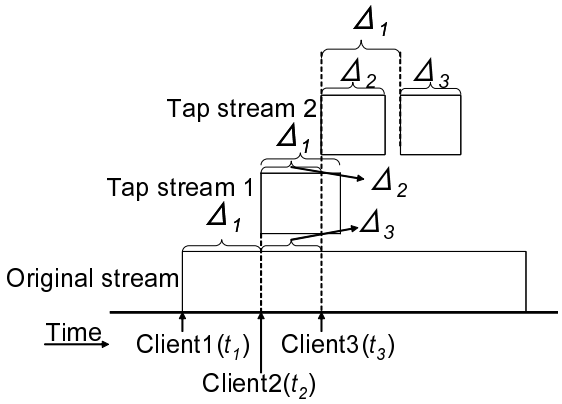

図 5.2: ST 法の放送スケジュール

ST 法において，早送りを考慮した IST（Interactive Stream Tapping）法 [14] がある．IST 法では，ユーザが早送りする場合に，早送り専用のストリーム（Interaction Stream）を用いることで，早送りを実現できる．しかし，オンデマンド型であるため，ユーザが頻繁に受信要求を出すと，必要な帯域幅が広くなる．

5.3 提案手法

早送りを考慮した擬似オンデマンド型の放送における平均待ち時間短縮のためのスケジューリング手法として DICHB（Discontinuous Interactive Cautious Harmonic Broadcasting）法を提案する．DICHB 法は CHB 法を拡張した手法であり，データを通常速度の再生用のデータと早送り用のデータに分けて放送スケジュールを作成する．早送りするユーザは，早送り用のデータを再生することで，データを最後まで途切れずに再生できる．放送型である点が，従来の早送りを考慮した手法と異なり，ユーザが受信要求を出す頻度にかかわらず必要な帯域幅が一定で，システムの負荷がほとんど変わらないという利点がある．また，オンデマンド型において必要となるクライアントからサーバへのアップリンクは不要である．

5.3.1 想定環境

提案手法の想定環境を以下に挙げる．初めの三項目は，連続メディアデータに関する制限であり，以降は通信に関する項目である．

- 連続メディアデータは，すべての場面が早送りしてもよいものとし，宣伝広告のような早送りされないことを期待する場面が混在していないものとする．
- クライアントが連続メディアデータの再生を開始すると，最後まで途切れずに再生できる．
- クライアントは，連続メディアデータを受信開始と同時に再生できる．
- クライアントは複数のチャネルから同時にデータを受信できる．
- クライアントは十分な容量のバッファを持ち，受信したデータを再生している間も放送されているデータを受信し，バッファに保存できる．
- クライアントは放送されているデータをつねに受信せず，ユーザが受信要求を出してから受信を開始する．
- サーバはニアオンデマンド型の放送を行う．
- サーバはデータ更新しない．
- セグメントのヘッダサイズはセグメントのデータサイズに比べて非常に小さいため，ヘッダの放送にかかる時間は無視する．

5.3.2 スケジューリング手順

連続メディアデータの再生時間を D，再生レートを R とする．この連続メディアデータを N 個のセグメントに等分割し，分割したセグメントを S_i（$i = 1, \cdots, N$）で表す．N は使用する帯域幅から算出される．各セグメントの再生時間は D/N となり，データサイズは DR/N となる．さらに，S_i を早送り用に間引いたデータ S_i^f とそれ以外の残りのデータ S_i^n に分ける．早送りするユーザは S_i^f のみを再生し，通常再生するユーザは S_i^f と S_i^n を組み合わせて，間引く前のセグメント S_i を復元して再生する．すなわち，S_i^f が早送り用のデータを含んでいるわけではなく，通常再生用のデータを含んでおり，ユーザが S_i^f のみ再生していくことで，早送りが可能になる．S_i^f のデータサイズは S_i の $1/r$ 倍で $DR/(Nr)$，S_i^n のデータサイズは $(r-1)DR/(Nr)$ となる．ここで，r は早送り速度の再生レートに対する倍率であり，たとえば，MPEG2 で符号化された 4 Mbps（$R = 4$）の 60 分（$D = 60$）の映画を早送りする場合，2 倍の速度で早送りできるとすると，$r = 2$ となる．図 5.3 のように，10 個の GOP（Group of Pictures，GOP は MPEG2 の再生の単位）で構成される S_i を 2 倍の早送り用に間引くと，S_i^f には 2，4，6，8，10 番目の GOP が含まれ，S_i^n には

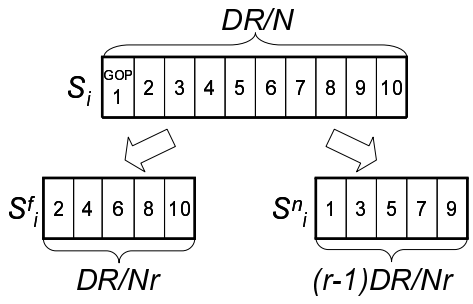

図 5.3: DICHB 法のセグメントの分割（$r = 2$）

1，3，5，7，9 番目の GOP が含まれる．S_i^f のデータサイズは S_i の $1/r$ 倍であるため，S_i^f のみを再生することで r 倍の早送りが可能になる．さらに，CHB 法と同様に S_i^f を $i-1$ 個のサブセグメント $S_{i,1}^f, \cdots, S_{i,i-1}^f$ に等分割し，S_i^n を i 個のサブセグメント $S_{i,1}^n, \cdots, S_{i,i}^n$ に等分割する．

後に第 5.6.3 項で詳述するが，使用する帯域幅 B が比較的小さい状況においても平均待ち時間を短縮できるように，B に応じて次のように放送スケジュールを作成する．

- $B \geq (3r+1)R/2$ の場合
  早送り用のデータを放送するチャネル C_i^f と，通常速度の再生用のデータを放送するチャネル C_i^n を使用する．C_i^f の帯域幅は次式で与える
  $$\frac{R}{i-1}. \tag{5.1}$$
  C_1^f の帯域幅は R とする．また，C_i^n の帯域幅は次式で与える
  $$\frac{R}{i}(r-1). \tag{5.2}$$
  以上のように帯域幅を決定し，C_1^f で S_1^f を繰り返し放送し，C_1^n で S_1^n を繰り返し放送する．C_2^f では S_2^f と S_3^f を順番に繰り返し放送し，C_2^n では S_2^n，C_3^n では S_3^n を繰り返し放送する．以降，C_j^f（$j = 4, \cdots, N$）で S_j^f，C_j^n で S_j^n を繰り返して放送する．$N = 4$，$r = 2$ の場合の放送スケジュールを図 5.4 に示す．

- $B \leq (3r+1)R/2$ の場合
  帯域幅が rR のチャネル C_1 で $S_1, \cdots, S_{N-1}$ を順番に繰り返し放送し，帯域幅が $R/(N-1)$ のチャネル C_2^f で S_N^f を，帯域幅が $(r-1)R/N$ のチャネル C_2^n で S_N^n を繰り返して放送する．$N = 4$，$r = 2$ の場合の放送スケジュールを図 5.5 に示す．

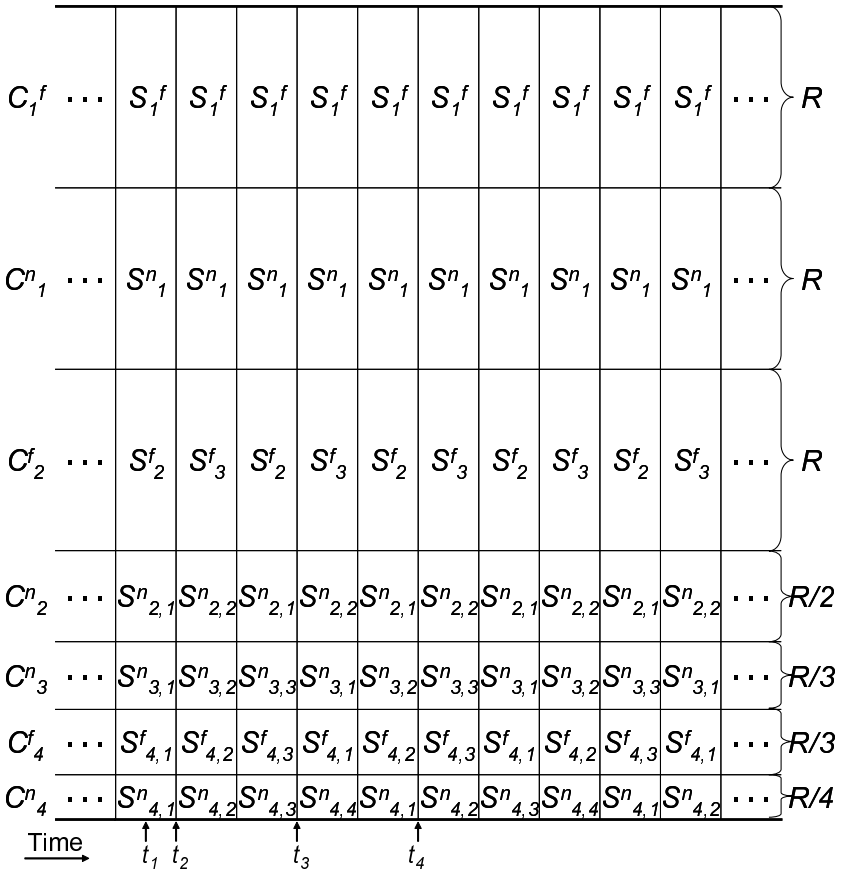

図 5.4: DICHB 法の放送スケジュール（$B \geq (3r+1)R/2$，$r=2$，$N=4$）

5.3.3 導入方法

セグメントの分割

MPEG2 のようにフレーム間圧縮を行っているデータを分割して S_i^f と S_i^n（$i=1,\cdots,N$）を作成する場合，再生の単位ごとにデータを抜き取る．たとえば，MPEG2 の再生の単位は GOP であり，GOP ごとに再生できる．このため，GOP ごとに分割しても，復号して再生できる．図 5.3 のように分割する場合，早送りするユーザは S_i^f に含まれる 2，4，6，8，10 番目の GOP を順番に復号して再生し，通常再生するユーザは S_i^f と S_i^n から GOP をもとどおりの順番に並び替えて再生する．1 個の GOP の再生時間は符号化する際に決定できるため，十分短くすることで違和感のない早送りが可能になる．一般に 1 個の GOP の再生時間は 0.5 秒であり [32]，筆者らは，GOP の再生時間が 0.5 秒の 30 fps の MPEG2 データを作成し，GOP ごとにデータを抜き出して，飛ばし見する MPEG2 データを試作

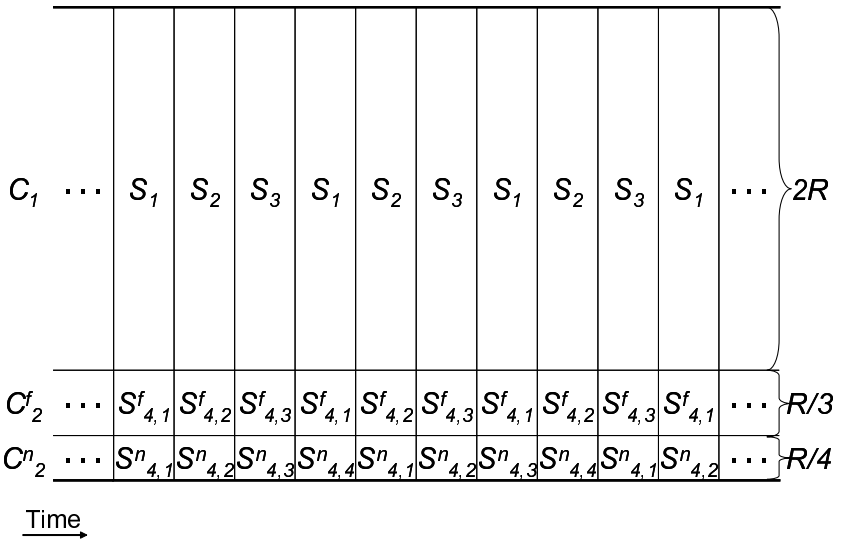

図 5.5: DICHB 法の放送スケジュール（$B \leq (3r+1)R/2$，$r=2$，$N=4$）

した．試作した映像を再生し，DVD や CD の早送りと類似した違和感のない早送りが可能なことを確認した．また，フレーム間圧縮を行う以前のデータで早送り用データを作成する場合，早送り用にフレームを間引きした後で S_i^f，S_i^n それぞれに対してフレーム間圧縮することで，データ圧縮することも可能である．

サーバの動作

連続メディアデータの配信者は r を実現したい早送りの速度に設定し，必要となる帯域幅が使用する帯域幅に近くなるように計算して N を決定する．このとき，使用する帯域幅に合わせて r の値を調整する必要がある．たとえば，52 Mbps の帯域幅を使用する場合に，$r=2$ に設定すると，$N=290$ とすることで必要となる帯域幅は 51.977 Mbps となり，52 Mbps に最も近くなる．この場合，r を調整して $r=2.001$ とすることで，必要な帯域幅は 51.999 Mbps となり，ほぼすべての帯域を使用でき，平均待ち時間の短縮につながる．決定した r，N の値を用いて，サーバは放送スケジュールを作成し，連続メディアデータを等分割し，早送り用のデータとそれ以外のデータに分けて，放送スケジュールに従ってデータを繰り返し放送する．サブセグメントを放送する際，そのサブセグメントが含まれる連続メディアデータの識別子とサブセグメントの番号が分かるように，これらの情報をヘッダとしてデータの初めに付加する．

クライアントの動作

ユーザがクライアントに連続メディアデータの受信要求を出すと，クライアントは放送されている幾つかの連続メディアデータの中から，指定された連続メディアデータの受信を開始し，その連続メディアデータの S_1^f および S_1^n の受信開始と同時に再生を開始する．早送りするユーザは S_1^f のみを再生し，通常再生するユーザは S_1^f と S_1^n を組み合わせて，間引く前のセグメント S_1 を復元して再生する．再生中にも放送されているデータを受信し，バッファに保存する．S_i^f や S_i^n（$i = 1, \cdots, N$）のサブセグメントをすべて受信すると，それらを結合して S_i^f や S_i^n を再生できるようにする．データをつなげるだけであるため，非常に短い時間で結合できる．以降同様に，早送りするユーザは S_j^f（$j = 1, \cdots, N-1$）の再生終了後，放送されているか，または，バッファにある S_{j+1}^f を即座に続けて再生する．通常再生するユーザは S_j の再生終了後，S_{j+1}^f と S_{j+1}^n を組み合わせて間引く前のセグメント S_{j+1} を復元して再生することで，通常速度の再生を見られる．データの再生開始時刻までにそのデータを受信完了することで，r 倍の速さで再生しても，クライアントは途切れずに最後まで再生できる．たとえば，図 5.4 において，時刻 t_1 で受信要求を出し，クライアントが t_2 で S_1^f の受信と同時に再生を開始して，S_1^n 再生終了後の t_3 から再生レートの 2 倍の速さで $S_{4,1}^f$ の始まる t_4 まで早送りしても，早送り中のデータ（S_2^f，$S_{3,1}^f$，$S_{3,2}^f$）を早送り以前に受信しており，早送り終了後のデータ（$S_{4,1}^f$，$S_{4,2}^f$，$S_{4,3}^f$，$S_{4,1}^n$，$S_{4,2}^n$，$S_{4,3}^n$，$S_{4,4}^n$）も早送り終了までに受信しているため，途切れずに最後まで再生できる．

5.4 解析

5.4.1 帯域幅

必要となる帯域幅 B は以下の式で求められる．

- $B \geq (3r+1)R/2$ の場合

$$\begin{aligned} B &= rR + R + \frac{R}{2}(r-1) + \frac{R}{3}(r-1) + \sum_{i=4}^{N} \frac{R}{i-1} + \sum_{i=4}^{N} \frac{R}{i}(r-1) \\ &= rRH_N + \frac{R}{2} - \frac{R}{N} \end{aligned} \tag{5.3}$$

- $B \leq (3r+1)R/2$ の場合

$$B = rR + \frac{R}{N-1} + \frac{R}{N}(r-1) \tag{5.4}$$

ここで，H_j はハーモニック数 [36] と呼ばれ，

$$H_j = \sum_{i=1}^{j} \frac{1}{i} \tag{5.5}$$

で定義される．

5.4.2 待ち時間

- $B \geq (3r+1)R/2$ の場合
  S_1^f が $D/(Nr)$ 間隔で放送されているため，最大の待ち時間 W_{max} は

  $$W_{max} = \frac{D}{Nr} \tag{5.6}$$

  で与えられ，最小の待ち時間が 0 であるため，平均待ち時間 W_{ave} は

  $$W_{ave} = \frac{D}{2Nr} \tag{5.7}$$

  となる．

- $B \leq (3r+1)R/2$ の場合
  S_1 が $(N-1)D/(Nr)$ 間隔で放送されているため，最大の待ち時間 W_{max} は

  $$W_{max} = \frac{D}{Nr}(N-1) \tag{5.8}$$

  で与えられ，最小の待ち時間が 0 であるため，平均待ち時間 W_{ave} は

  $$W_{ave} = \frac{D}{2Nr}(N-1) \tag{5.9}$$

  となる．

5.4.3 途切れのない再生

クライアントは S_1^f の再生開始後，早くて $(i-1)D/(Nr)$（$i = 2, \cdots, N$）後に S_i^f の再生を開始する．データサイズ $DR/(Nr)$ の S_i^f は $R/(i-1)$ の帯域幅を用いて放送されるため，クライアントは受信開始から $(i-1)D/(Nr)$ 後までに S_i^f を受信完了できる．S_i^f の再生開始時刻までに S_i^f を受信完了できるため，早送りしても途切れのない再生が可能になる．また，S_i^n は S_i^f と合成復元して再生されるため，S_i^f の受信完了時刻，すなわち S_1 の再生開始後，早くて $Di/(Nr)$ 後までに受信すればよい．データサイズ $(r-1)DR/(Nr)$ の S_i^n は $(r-1)R/i$ の帯域幅を用いて放送されるため，クライアントは受信開始から $Di/(Nr)$ 後までに S_i^n を受信完了できる．よって，通常速度の再生も可能である．

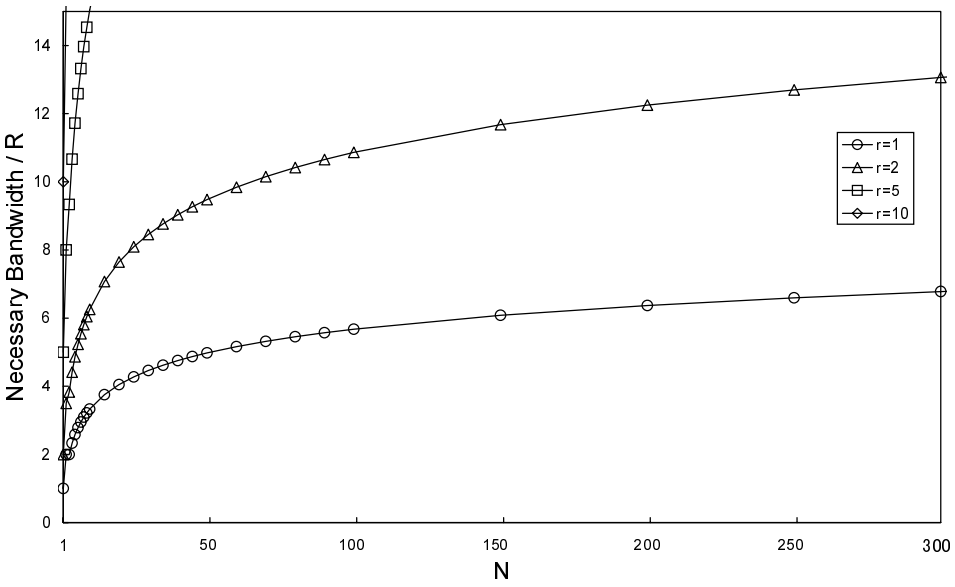

図 5.6: DICHB 法の必要となる帯域幅

5.5 評価

5.5.1 帯域幅

DICHB 法で 1 個の連続メディアデータを放送する際に必要となる帯域幅を図 5.6 に示す．横軸は N とし，縦軸は必要となる帯域幅をデータの再生レートで除した値とした．‘r=r’（$r = 1, 2, 5, 10$）は r 倍の早送りを考慮した DICHB 法で必要な帯域幅を示す．このグラフより，必要となる帯域幅は N が大きいほど小さくなることが分かる．これは，N が大きいほどデータの分割数が多くなり，使用するチャネル数も多くなるためである．たとえば，MPEG2 で符号化された 4 Mbps の動画データを $r = 2$，$N = 290$ の DICHB 法で放送すると，51.977 Mbps の帯域幅が必要になる．デジタル放送の最大帯域幅は 52 Mbps であり，実用的といえる [38].

5.5.2 平均待ち時間

DICHB 法の帯域幅と平均待ち時間を図 5.7 に示す．横軸は帯域幅を連続メディアデータの再生レートで除した値とし，縦軸は平均待ち時間を連続メディアデータの再生時間で除した値とした．r 倍の早送りを考慮した放送スケジュールでは，最低でも rR の帯域幅

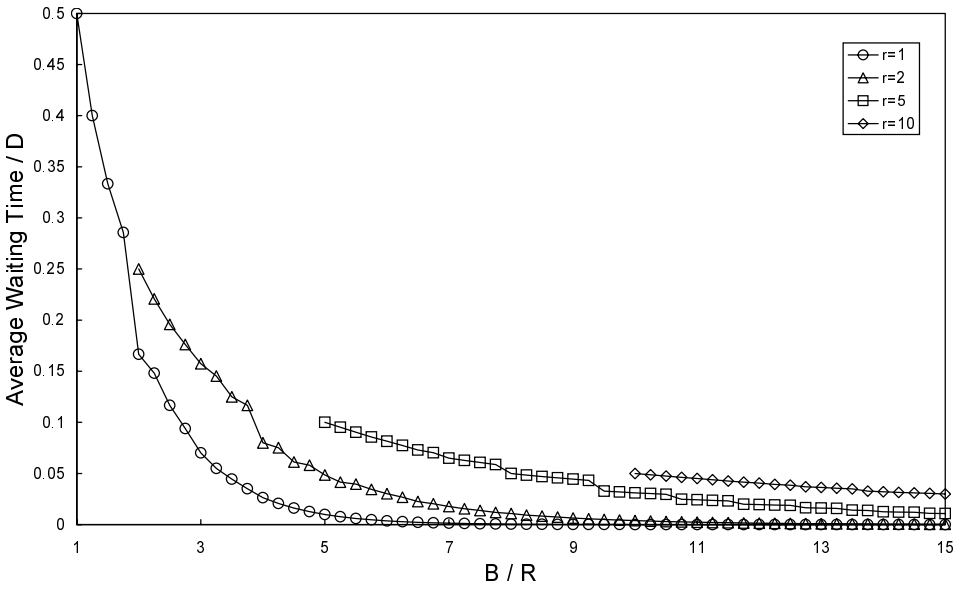

図 5.7: DICHB 法の帯域幅と平均待ち時間

が必要なため，グラフが途中から描かれている．r が大きいほど平均待ち時間が長くなることが分かる．

たとえば，MPEG2 で符号化された 4 Mbps の 60 分の動画データを 52 Mbps の帯域を用いて放送する場合，DICHB 法で 2 倍の早送りを考慮すると $N = 290$ となり，調整後の r は 2.001，平均待ち時間は 3.1 秒になる．5 倍の早送りを考慮すると $N = 6$，$r = 5.166$ で 58 秒，10 倍では $N = 4$，$r = 10.331$ で 2.2 分となる．

5.5.3 比較

CHB 法との比較

r 倍の速度で早送りして再生することは，再生レートを r 倍することに相当する．このため，既存手法においても，再生レートが rR のデータを想定した放送スケジュールで再生レートが R のデータを放送することで，途切れのない早送りが可能になる．そこで，DICHB 法の基礎となる CHB 法で rR の再生レートを想定した場合の平均待ち時間と比較する．たとえば，図 5.1 の場合，各チャネルの帯域幅を r 倍した放送スケジュールを用いることを意味する．このようにして早送りを考慮した CHB 法と，DICHB 法の平均待ち時間を図 5.8 に示す．横軸は使用できる帯域幅を連続メディアデータの再生レートで除した

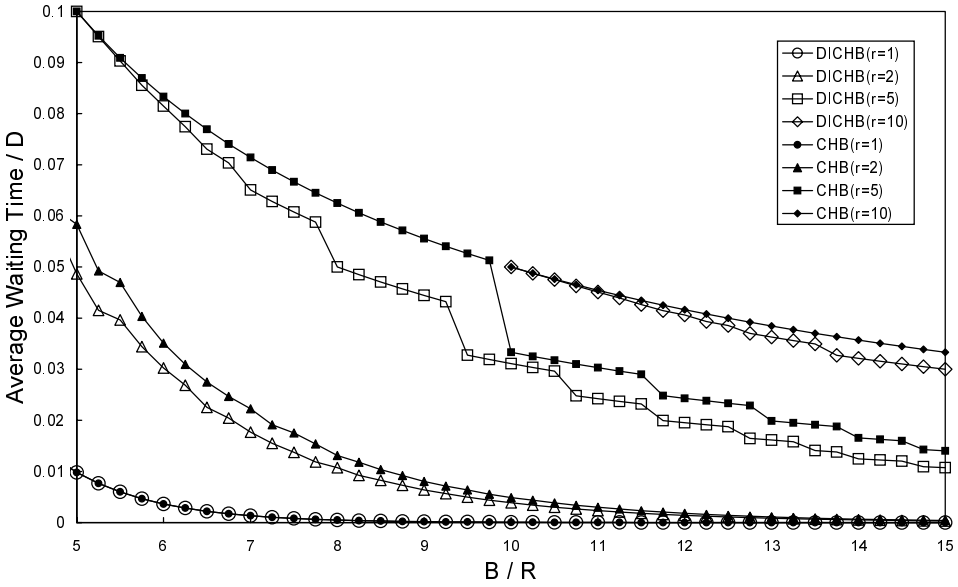

図 5.8: DICHB 法 と CHB 法の平均待ち時間

値とし，縦軸は平均待ち時間を連続メディアデータの再生時間で除した値とした．'DICHB (r=r)'（$r = 1, 2, 5, 10$）は r 倍の速度の早送りを考慮した DICHB 法の平均待ち時間を示し，'CHB (r=r)' は，r 倍の速度の早送りを考慮した CHB 法の平均待ち時間を示す．

このグラフより，$r = 1$ の場合，DICHB 法と CHB 法の平均待ち時間は等しいが，$r = 2, 5, 10$ において，早送りを考慮した CHB 法よりも DICHB 法の平均待ち時間が短いことが分かる．これは，DICHB 法では再生レートを r 倍する早送り（連続な早送り）ではなく，データを間引く早送り（不連続な早送り）を可能にしているためである [10]．たとえば，図 5.9 に示すように，連続な早送りでは早送り中の再生レートが r 倍になるが，不連続な早送りでは早送り中の再生レートは変わらず，データサイズが $1/r$ 倍になる．このため，早送りを考慮した CHB 法では，すべてのデータを通常よりも r 倍早く受信完了できるように放送スケジュールを作成している．一方，DICHB 法では，早送り用に間引いたデータのみ通常よりも r 倍早く受信完了できるように放送スケジュールを作成しているため，必要な帯域幅を，早送りを考慮した CHB 法よりも削減できる．結果，データの分割数を大きくできるため，平均待ち時間を短縮できる．よって，CHB 法よりも DICHB 法が早送りに適しているといえる．

たとえば，MPEG2 で符号化された 4 Mbps の 60 分の動画データを 52 Mbps の衛星デジタル放送で配信する場合，2 倍の早送りを考慮した CHB 法の平均待ち時間は 4 秒とな

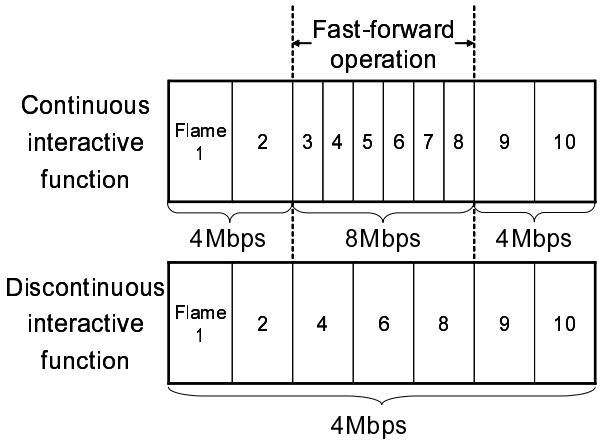

図 5.9: 連続な早送りと不連続な早送りの例

り，DICHB 法の平均待ち時間は 3.1 秒となる．

IPB，IST 法との比較

早送りを考慮した手法である IPB，IST 法を用いた場合との平均待ち時間を比較する．

まず，平均待ち時間のシミュレーションを行う．文献 4) とシミュレーション条件を合わせ，放送する連続メディアデータの再生時間は平均 102 分，標準偏差 16 分の正規分布に従い，現実性を持たせるため，70 分以下および 180 分以上のデータは削除する．ユーザはポアソン分布に従う間隔でデータの受信要求を出し，サーバは 2 個の 4 Mbps のデータを放送する．データのアクセス確率 $P(s)$（$s = 1, 2$）は $\theta = 0.271$ の Zipf 分布に従い，

$$P(s) = C\frac{1}{s^{\theta}} \tag{5.10}$$

で与える．C は正規化定数である．使用する帯域幅は 52 Mbps とする．早送りについては，平均 15 分のポアソン分布に従う間隔で，再生レートの 2 倍の速さで行う．早送りする長さは最大 3 分の一様分布とする．IPB 法は，クライアントが要求したセグメントを放送するストリーム（Contingency Video Stream）として 4 個のストリーム（16 Mbps）確保し，残りの 36 Mbps を繰り返し放送する帯域に割り当てた．2 個のデータで放送型の帯域をすべて使用するように，分割数は 31 とした．IST 法のパラメタ s_c は，IPB 法と同様に，4 とした．

平均待ち時間のシミュレーション結果を図 5.10 に示す．横軸は 1 時間あたりの平均到着率とし，縦軸は平均待ち時間とした．このグラフより，平均到着率が 20 以上の場合，

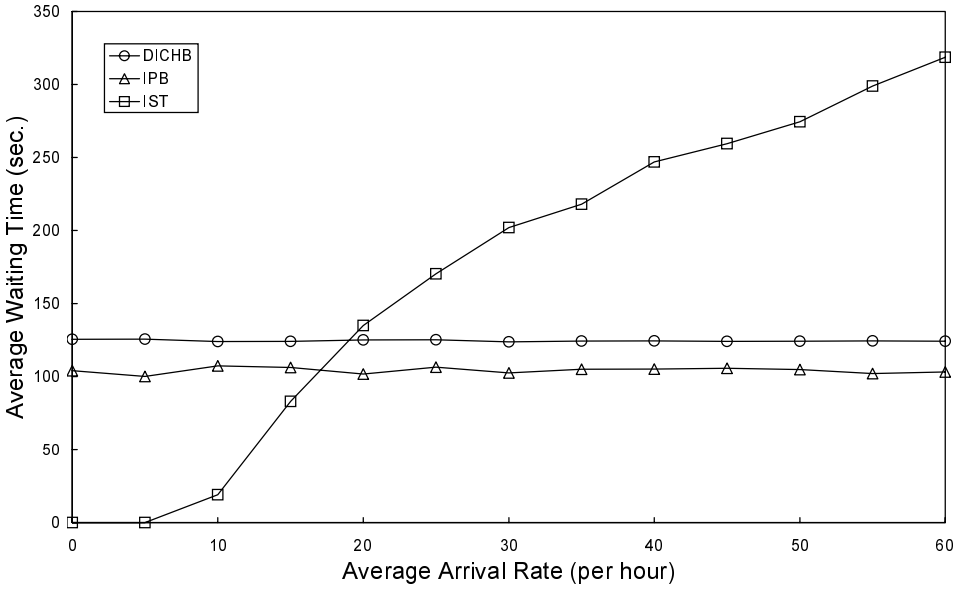

図 5.10: DICHB 法と，IPB 法，IST 法の平均待ち時間

DICHB 法の平均待ち時間が IST 法より短いことが分かる．これは，IST 法では平均到着率が大きいほどサーバは使用できる帯域幅をすぐに使い切り，クライアントはデータ配信用の帯域幅が確保できるまで待たなければならないためである．また，DICHB 法の平均待ち時間が IPB 法より長いことが分かる．これは，DICHB 法より IPB 法の方が S_1 を頻繁に放送しているためである．しかし，IPB 法では，クライアントの受信要求にこたえるためのストリームに空きがなくなると，ユーザは早送りする場合に，早送りに必要なデータが放送されるまで再生途中でも長時間待たなければならない可能性がある．そこで，ユーザが早送りする場合に，早送りできるまでの平均待ち時間を図 5.11 に示す．図 5.11 より，DICHB 法では，あらかじめ早送りできるように放送しているため，ユーザが早送りする場合に待つ必要はほとんどないが，IPB 法や IST 法では待たなければならない場合があることが分かる．IST 法より IPB 法の平均待ち時間が短いのは，IPB 法ではセグメント単位でデータを放送しており，受信済みのセグメントを再生中にそのセグメント内の場面で早送りしても待つ必要がないためと考えられる．

以上より，早送りを行う確率や，早送りする長さにも依存するが，平均到着率が比較的大きい場合には，IST 法より DICHB 法が平均待ち時間を短縮できることが分かる．また，IPB 法や IST 法では，早送りする場合に待たなければならない可能性があるが，DICHB 法では待つ必要はほとんどない．

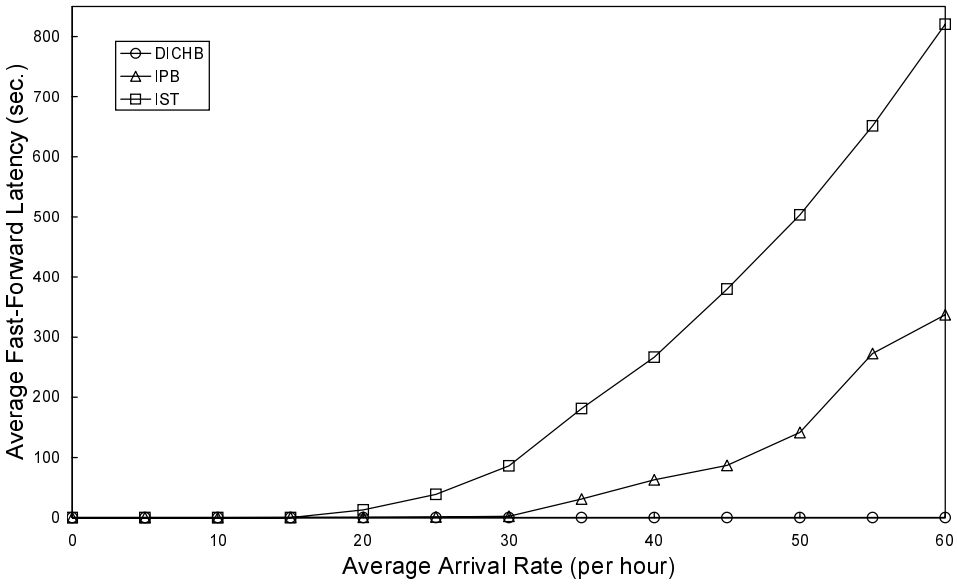

図 5.11: DICHB 法と，IPB 法，IST 法の早送りできるまでの平均待ち時間

5.6 考察

5.6.1 平均待ち時間の変化

早送りを考慮することにより平均待ち時間が増加するため，早送りと平均待ち時間がトレードオフとなる．たとえば，MPEG2 で符号化された 4 Mbps の 60 分の動画データを 52 Mbps のデジタル放送網で配信する場合，$r = 2$ の DICHB 法の平均待ち時間は，早送りを考慮しない場合（$r = 1$）より 3 秒長くなる．どちらに重点を置くかは配信者の都合や，連続メディアデータの内容によって異なる．たとえば，ニュース番組のように視聴者のほとんどが早送りをしない場合には，平均待ち時間を短縮することに重点を置き，早送りを考慮しないと考えられる．一方，スポーツ試合のように，視聴者によって鑑賞したい場面が異なる場合には，早送りできることに重点を置くことで視聴者は自分の見たい場面のみ見ることができるため，早送りを考慮した DICHB 法を用いると考えられる．また，$r = 10$ の場合，平均待ち時間は 2.2 分になる．これは，再生レートを下げることで短くできる．

5.6.2 帯域幅の変化

早送りを考慮することにより，必要となる帯域幅が増加する．しかし，DICHB 法では，早送り用にデータを間引くため，r 倍の早送りを考慮しても必要となる帯域幅が r 倍になるとは限らない．たとえば，$r = 2$，$N = 290$ の DICHB 法では，早送りを考慮しない場合（$r = 1$）より必要となる帯域幅が 1.9 倍になる．一方，途切れのない早送りを可能にするために，再生レートを大きく見積もって既存の手法を用いると，r 倍の帯域幅が必要になる．このため，早送りする場合には，既存の手法を用いるよりも DICHB 法の方が適している．

5.6.3 スケジューリング手順について

DICHB 法では，B が $(3r+1)R/2$ 以上の場合と以下の場合に分けてスケジュールを作成している．これは，使用する帯域幅が比較的小さい状況においても平均待ち時間を短縮するためである．このことについて説明するために，$B \leq (3r+1)R/2$ の場合も $B \geq (3r+1)R/2$ の場合と同じスケジューリング手順を使用し，チャネル 1 で 1 個のセグメントのみ放送する場合を考える．この場合，チャネル 2 の帯域幅を確保できなくなると，データを分割せずに放送することになる．すなわち，C_1^f，C_1^n，C_2^f，C_2^n の帯域幅は順に R，$(r-1)R$，R，$(r-1)R/2$ であるため，これらを合計した $(3r+1)R/2$ よりも B が小さくなると，$N = 1$ となる．たとえば，4 Mbps の 60 分のデータを 52 Mbps の帯域幅を用いて放送する場合，10 倍の早送りを考慮すると，$N = 1$ となる．平均待ち時間は 2.3 分になる．そこで，DICHB 法では $B \leq (3r+1)R/2$ の場合に $N = 1$ とならないように，C_1 で $S_1, \cdots, S_{N-1}$ を順番に放送し，C_2^f で S_N^f，C_2^n で S_N^n を放送する．N をチャネル 2 の帯域幅を確保できるように決定することで，平均待ち時間を短縮できる．たとえば，前述の例の場合 $N = 4$ となる．平均待ち時間は 2.2 分になり，短縮できていることが分かる．

5.6.4 プリフェッチの導入

データをプリフェッチしたうえで，早送りを考慮することが考えられる．この場合，データを早送り用とそれ以外の残りのデータに分割する DICHB 法のアイデアを導入することで，途切れのない再生に必要な帯域幅を削減できる．そこで，プリフェッチを考慮した手法 AHB-P 法を拡張し，早送りを考慮して，途切れのない再生に必要な帯域幅を削減する手法 DIAHB-P（Discontinous Interactive AHB-P）法を提案する．DIAHB-P 法では，早送りしても途切れなく再生できるように，早送り用のデータを放送する $\lceil N/2 \rceil$ 個のチャネ

ルの帯域幅 b^f を次式で与える

$$b^f = R\left(\left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{2}{N}} - 1\right). \tag{5.11}$$

ただし，使用チャネル数が奇数の場合は，最後のチャネルで残りすべてのデータを放送しても最後まで途切れないように再生できるように算出する．通常再生用のデータを放送する $\lfloor N/2 \rfloor$ 個のチャネルの帯域幅 b^n は

$$b^n = \frac{(r-1)Rb^f}{R+b^f} \tag{5.12}$$

で与える．S_i^f（$i = 1, \cdots, N$）のデータサイズは

$$\frac{dD}{r}\left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{2(i-1)}{N}} b^f \tag{5.13}$$

となり，S_i^n のデータサイズは

$$\frac{dD}{r}\left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{2i}{N}} b^n \tag{5.14}$$

となるようにデータを分割して放送する．

評価結果を図 5.12 に示す．地上波デジタル放送を想定し，13 個のチャネルから同時にデータを受信できるとして，AHB-P 法と比較した．縦軸は必要な帯域幅をデータの再生レートで除した値，横軸はプリフェッチするデータの全データサイズに対する割合とする．たとえば，5Mbps の 60 分の動画の初めの 3 分をプリフェッチする（$d = 5\%$）場合を考える．13 個のチャネルから同時にデータを受信できる場合に 2 倍の早送りを考慮すると，提案する DIAHB-P 法では，31.3 Mbps の帯域幅が必要になり，AHB-P 法では，33.7 Mbps の帯域幅が必要になる．DIAHB-P 法は途切れのない再生に必要な帯域幅を 7% 削減していることが分かる．

5.7 むすび

本章では，早送りを考慮した放送型配信における平均待ち時間短縮のためのスケジューリング手法を提案した．

提案手法 DICHB 法では，クライアントがある範囲内の速度で早送りしても途切れずに再生できるという条件を満たしたうえで，平均待ち時間を短縮する．早送りする速度の再生レートを想定して既存手法 CHB 法を用いることで途切れのない早送りが可能になるが，

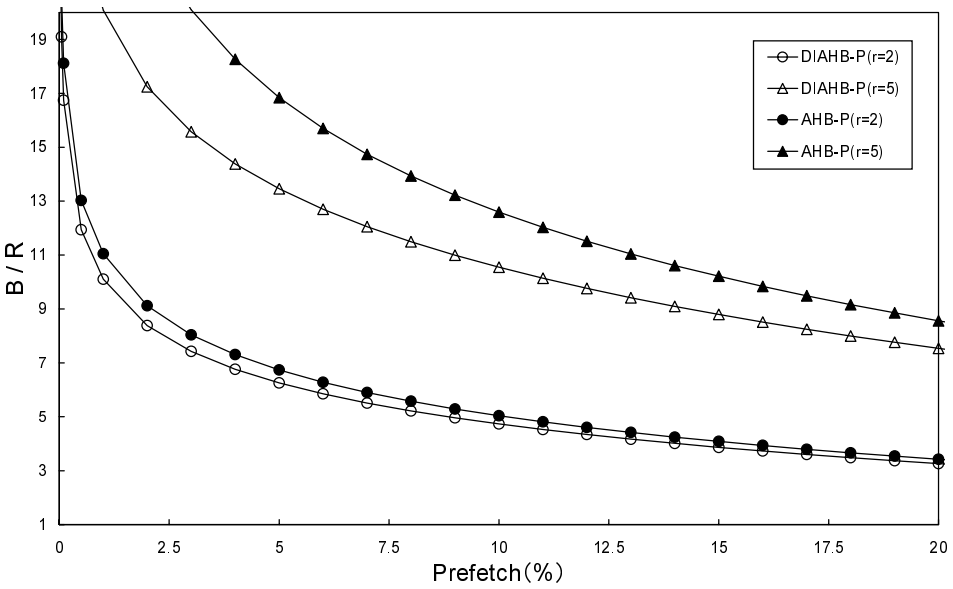

図 5.12: DIAHB-P 法で必要な帯域幅

DICHB 法は，早送りを考慮した CHB 法よりも平均待ち時間を短縮できる．このため，再生レートを大きく見積もった手法よりも DICHB 法が早送りに適している．既存の IPB 法や IST 法と比較した結果，クライアントの平均到着率が比較的大きい場合には，IST 法よりも平均待ち時間が短くなることがわかった．

今後の課題として，連続メディアデータを途中から再生する場合も含めて待ち時間を短縮することや，早送りを考慮して QHB 法 [54] 等他の手法を拡張することが挙げられる．

第6章

結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では，さまざまなシステム環境を考慮したうえで，効率的に待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案し．その性能評価，考察を行った．

まず第 1 章では，デジタル放送の普及にともない近年注目されている，連続メディアデータ放送について述べ，待ち時間を短縮する技術に対する需要が高まっていることを述べた．そして，待ち時間を短縮するための基本的なアイデアを説明した．さらに，再生の単位，使用可能なチャネル数，プリフェッチの割合，早送りの有無の 4 種類の要素を考慮したうえで待ち時間を短縮する必要があるという本研究の着眼点を明確にした．

第 2 章では，再生の単位を考慮したスケジューリング手法を提案した．連続メディアデータは，一般に，再生の単位となるある程度のデータを受信完了してからでなければ再生できない．このため，受信したデータを即座に再生できると想定している既存の手法を適用しても，効率的に待ち時間を短縮できない．そこで，データを再生の単位ごとに分割して，分割したデータを再生開始時刻までに受信完了できるようにスケジューリングする AHB 法を提案した．再生の単位を考慮する場合，再生の単位となるデータサイズが待ち時間に影響を及ぼすため，実際に符号化したデータの再生の単位を使用して，既存の HB 法や CHB 法と比較した．その結果，AHB 法の方が平均待ち時間を短くすることが明らかになり，提案手法の有効性を示せた．

第 3 章では，使用チャネル数を考慮したうえで，クライアントの待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案した．放送システムでは，ハードウェア構成や処理の簡単化，処理速度の問題といった理由から，使用可能なチャネル数に制限がある．このような場合，すべてのチャネルから同時にデータを受信できると想定している既存の手法を適用できな

いといった問題がある．特に，使用チャネル数が単一チャネルのみである場合には，分割したデータを単一チャネルでスケジューリングして放送する必要があり，複数チャネル使用できる場合とは異なったアプローチで待ち時間を短縮する必要がある．このため，単一チャネルの場合と複数チャネルの場合に分けて，使用チャネル数を考慮した待ち時間短縮のためのスケジューリング手法を提案した．単一チャネルの場合に関して，2 等分する場合については解析を行い，3 等分以上の場合については，ヒューリスティックなスケジューリング手法を幾つか提案し，評価を行った．評価の結果，データを分割せずにを繰り返して放送する手法よりも，提案手法の平均待ち時間の方が短いことが明らかになった．複数チャネルの場合に関して，AHB 法を拡張した手法を提案した．AHB 法の分割の方法を変更することで，使用チャネル数を考慮できるため，分割の方法を幾つか提案し，評価を行い，各手法が有効な状況について述べた．既存手法で使用チャネル数を変更できるように拡張した手法と比較した結果，BE-AHB 法が待ち時間を効率的に短縮できることが明らかになった．

第 4 章では，データのプリフェッチを考慮したうえで，途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅を削減する手法を提案した．幾つかの既存手法では，クライアントは，所望のデータが放送されるまで待つことなく再生を開始できるように，データの初めの部分をプリフェッチしている．そこで，プリフェッチを導入し，待ち時間のない再生が可能な AHB-P 法を提案した．AHB-P 法は，BE-AHB 法を拡張した手法であり，データのプリフェッチを考慮したうえで，同時受信できるチャネル数に合わせてデータを分割して放送スケジュールを作成する．ハードウェアの制限や導入の複雑さといった理由から使用するチャネル数に制限がある場合には，途切れのない再生を可能にするために必要な帯域幅を既存手法より削減できることが明らかになった．

第 5 章では，早送りを考慮したスケジューリング手法を提案した．連続メディアデータを再生する場合，ユーザは，巻き戻しや早送りといったビデオ操作を行うことで，好みの場面をすぐに視聴できる．巻き戻しなどの過去に再生したデータを再び再生する操作については，再生したデータをバッファに保存しておくことで可能だが，早送りは一度も再生していないデータを再生する．このため，早送りを考慮していない手法を適用すると，再生が途切れる可能性がある．そこで，再生が途切れないように早送りを考慮したうえで，待ち時間を短縮するスケジューリング手法を提案した．提案手法 DICHB 法では，データを早送り用とそれ以外の残りのデータに分割し，早送りしても再生が途切れないようにスケジューリングして，待ち時間を短縮する．早送りしても再生が途切れないように既存手法を改良した手法と比較し，提案手法の有効性を示した．既存の IPB 法や IST 法と比較した結果，クライアントの平均到着率が比較的大きい場合には，これらの手法よりも平均待

ち時間が短くなることが明らかになった．さらに，第 4 章で提案した手法と組み合わせて，プリフェッチを導入した．

以上のように，本論文では，連続メディアデータ放送において，システム構成に応じて効率的に待ち時間を短縮するため，再生の単位，使用可能なチャネル数，プリフェッチの割合，早送りの有無の 4 種類の要素を考慮したスケジューリング手法を提案した．本研究で提案するスケジューリング手法により，システム構成に応じて待ち時間を効率的に短縮でき，よりユーザの要求を満たす連続メディアデータ放送が可能となる．

6.2 今後の研究課題

本論文で提案したスケジューリング手法は，今後も発展するであろうデジタル放送において十分に意義のあるものである．しかし，実用化に向けて解決すべき問題点が幾つかあるため，今後，本論文で提案した手法をさらに拡張していかなければならない．スケジューリング手法の拡張に対する研究課題として，以下のものが挙げられる．

- 通信エラー対策

  本論文では，通信エラーは発生しないものと考えたため，通信エラー対策を講じていない．しかし，実用性を考慮すると，通信エラー対策は必要不可欠である．たとえば，電波状況が不良である場合や，受信ミスによって通信エラーが発生すると考えられる．このため，通信エラー対策を導入する必要がある．

  通信エラー対策の方法として，一放送周期中に同じデータを複数回放送することが考えられる．こうすることで，一回目の受信タイミングでエラーが発生しても，二回目で受信できる可能性がある．平均待ち時間は，通信エラーの発生頻度と同じデータの放送回数に依存するが，通信エラーが頻発する場合には，待ち時間を短縮できると考えられる．

- 複数データの放送

  本論文では，基本的に単一の連続メディアデータを放送する場合の待ち時間を短縮することを想定している．しかし，提供する番組数を多くするため，複数のデータを放送することも考えられる．複数のデータを放送する場合，データを再生する確率に相関性が生じる．たとえば，10 個の番組を放送する場合に，ドラマを 4 個，ニュース番組を 3 個，音楽番組を 3 個放送すると，あるドラマ番組を再生したユーザは他のドラマを再生するといったように，同じジャンルを続けて再生する確率が高いと考え

られる．また，スポーツ試合の前半と後半を異なる番組として放送している場合，前半を再生したユーザが，次に後半を再生するといった相関性も考えられる．このような場合，データ間の相関性を考慮することで，待ち時間を短縮できるため，今後，複数のデータを放送する場合に，相関性を考慮した待ち時間短縮のためのスケジューリング手法の提案が考えられる．

- 実システム評価

  本論文中の評価は，計算機シミュレーションによる数値的な評価であり，実際にシステムを作成したうえでの評価を行っていない．実運用する場合には，ヘッダサイズの影響による待ち時間の増加や，ネットワーク遅延が生じると考えられる．今後は，こういったオーバヘッドを考慮したうえでシミュレーション評価を行う必要がある．さらに，実際にシステムを作成し，実システム評価も必要である．

- 途中再生

  本論文で提案したスケジューリング手法では，ユーザが連続メディアデータを初めから再生する場合の待ち時間短縮を目的としている．しかし，途中から再生する場合も考えられる．たとえば，以前視聴したときは時間がなく，残り 30 分のデータを視聴できなかったため，残りの部分を視聴する場合や，番組の開始から 10 分後に好みのコーナが始まるため，10 分後から見たいといったことが考えられる．このような場合，ユーザが途中から再生を開始できるまでの待ち時間を短くすることが求められる．今回提案した手法でも，早送りすることで，途中再生するまでの待ち時間を短縮できるが，早送りする場合，初めから途中再生する部分までのデータを受信する必要がある．10 分後から再生するといったように途中再生する場面を指定することで，途中再生する部分までのデータを受信する必要がなく，さらなる待ち時間短縮を期待できる．

謝辞

本研究全般に関して，懇切なる御指導，御助言と格別なる御配慮を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾章治郎教授に謹んで深謝の意を表します.

講義や学生生活を通じて学問に取り組む姿勢を御教示頂き，さらに本論文をまとめるにあたり貴重な時間を割いて頂いて懇切なる御指導と有益な御助言を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 藤原融教授，岸野文郎教授，薦田憲久教授，下條真司教授，ならびに，大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻 滝根哲哉教授に心より感謝致します.

本研究を推進するにあたり，直接の御指導，御助言，御討論を頂きました神戸大学工学部電気電子工学科 塚本昌彦教授に衷心より感謝申し上げます.

本研究を進めるにあたって，多大なる御助言，御協力，御支援を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 原隆浩助教授，大阪大学サイバーメディアセンター 寺田努助手に深謝致します.

本研究において，有益な御指導，御討論を頂きました大阪大学大学院工学研究科 春本要助教授，大学大学サイバーメディアセンター 秋山豊和助手，小川剛史助手，静岡大学情報学部情報科学科 坂根裕助手に厚く御礼申し上げます.

本研究の初期において，研究活動を多岐にわたって御支援頂いた日本放送協会 澤井里枝博士，株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 内田渉博士，東芝ソリューション株式会社 加下雅一氏に感謝します.

研究活動を進めるにあたっての多大なる御支援を頂いた，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 福村真哉氏，宮前雅一氏，岸野泰恵氏，竹川佳成氏，相良亮平氏に深く御礼申し上げます.

本研究に関して有益な御討論を頂いた大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾研究室の諸氏に厚く御礼申し上げます.

最後に，研究生活を送るうえで，暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親を始めとする家族に心からの感謝と御礼を申し上げます.

参考文献

[1] S. Acharya, R. Alonso, M. Franklin, and S. Zdonik: "Broadcast disks: data management for asymmetric communications environments," in *Proc. of the ACM SIGMOD 1995*, pp. 199–210 (May 1995).

[2] S. Acharya, M. Franklin, and S. Zdonik: "Dissemination-based data delivery using broadcast disks," in *IEEE Personal Communications*, pp. 50–60 (Dec. 1995).

[3] S. Acharya, M. Franklin, and S. Zdonik: "Prefetching from a broadcast disk," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Data Eng.*, pp. 276–285 (Feb. 1996).

[4] S. Acharya, M. Franklin, and S. Zdonik: "Disseminating updates on broadcast disks," in *Proc. of the Int. Conf. on Very Large Data Bases* (VLDB 1996), pp. 354–365 (Sept. 1996).

[5] S. Acharya, M. Franklin, and S. Zdonik: "Balancing push and pull for data broadcast," in *Proc. of the ACM SIGMOD 1997*, pp. 183–194 (May 1997).

[6] C. C. Aggarwal, J. L. Wolf, and P. S. Yu: "On optimal piggyback merging policies for video-on-demand systems," in *Proc. of the ACM SIGMETRICS 1996*, pp. 200–209 (May 1996).

[7] C. C. Aggarwal, J. L. Wolf, and P. S. Yu: "A permutation-based pyramid broadcasting scheme for video-on-demand system," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems* (ICMCS 1996), pp. 118–126 (June 1996).

[8] C. C. Aggarwal, J. L. Wolf, and P. S. Yu: "On optimal batching policies for video-on-demand storage servers," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems* (ICMCS 1996), pp. 253–258 (June 1996).

[9] D. Aksoy and M. Franklin: "Scheduling for large-scale on-demand broadcast scheduling," in *Proc. of the IEEE INFOCOM 1998* pp. 651–659 (Mar. 1998).

[10] K. C. Almeroth and M. H. Ammar: "On the use of multicast delivery to provide a scalable and interactive video-on-demand service," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp. 1110–1122 (Aug. 1996).

[11] Bluetooth SIG: "The Official Bluetooth Wireless Info Site" (Aug. 2004). http://www.bluetooth.com/

[12] ビー・エス・ジャパン: "BS Japan ビーエスジャパン" (Aug. 2004). http://www.bs-j.co.jp/index.html

[13] S. W. Carter and D. D. E. Long: "Improving video-on-demand server efficiency through stream tapping," in *Proc. of the Int. Conf. on Computer Communications and Networks* (ICCCN 1997), pp. 200–207 (Sept. 1997).

[14] S. W. Carter, D. D. E. Long and J.-F. Paris: "An efficient implementation of interactive video-on-demand," in *Proc. of the Int. Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems* (MASCOTS 2000), pp. 172–179 (Aug. 2000).

[15] S. W. Carter, J.-F. Paris, S. Mohan, and D. D. E. Long: A dynamic heuristic broadcasting protocol for video-on-demand, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Distributed Computing Systems* (ICDCS 2001), pp. 657–664 (May 2001).

[16] A. Dan, D. Sitaram, and P. Shahabuddin: "Scheduling policies for an on-demand video server with batching," in *Proc. of the ACM Int. Multimedia Conf.* (Multimedia 1994), pp. 15–23 (Oct. 1994).

[17] D. L. Eager and M. K. Vernon: "Dynamic skyscraper broadcasts for video-on-demand," in *Proc. of the 4th Int. Workshop on Multimedia Information Systems* (MIS 1998), pp. 18–32 (Sept. 1998).

[18] 映像情報メディア学会: "デジタル放送局システムのしくみ," オーム社, 東京 (Nov. 2001).

[19] ep: "イーピーホームページ" (Aug. 2004). http://www.epep.jp/index.html

[20] L. Gao and D. Towsley: "Supplying instantaneous video-on-demand services using controlled multicast," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia Computing and Systems* (ICMCS 1996), Vol. 2, pp. 117–121 (July 1999).

[21] L. Golubchink, J. C. S. Lui, and R. R. Muntz: "Adaptive piggybacking: a novel technique for data sharing in video-on-demand storage servers," in *ACM Multimedia Systems*, Vol. 4, Issue 3, pp. 140–155 (June 1996).

[22] 橋本 和彦: "ディジタル衛星放送の技術と動向," 電子情報通信学会誌, Vol. 81, No. 1, pp. 86–88 (Jan. 1998).

[23] 早川敬介, 柏谷篤, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 西尾章治郎: "ユビキタスコンピューティングのための入出力制御デバイスのハードウェアアーキテクチャ," 情報科学技術フォーラム (FIT 2002) 論文集第 4 分冊, pp. 199–200 (Sept. 2002).

[24] 早川敬介, 柏谷篤, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 坂根裕, 西尾章治郎: "ユビキタスコンピューティングのための入出力デバイスの設計と実装," ヒューマンインタフェース学会ヒューマンインタフェースシンポジウム (HIS 2002) 論文集, pp. 335–338 (Sept. 2002).

[25] 早川敬介, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 柏谷篤, 西尾章治郎: "イベント駆動型のユビキタスシステムへのアプローチ," 情報科学技術フォーラム (FIT 2003) 論文集第 4 分冊, pp. 247–248 (Sept. 2003).

[26] 早川敬介, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 柏谷篤, 坂根裕, 西尾章治郎: "ユビキタスコンピューティングのための入出力制御デバイス," 日本ソフトウェア科学会第 10 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2002), pp. 127–132 (Dec. 2002).

[27] 早川敬介, 塚本昌彦, 寺田努, 義久智樹, 岸野泰恵, 柏谷篤, 坂根裕, 西尾章治郎: "ユビキタスコンピューティングのためのルールに基づく入出力制御デバイス," ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 341–354 (Aug. 2003).

[28] G. B. Horn and J. E. Rasmussen: "A scalable and reliable paradigm for media on demand," in *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 9, pp. 40–45 (Sept. 2001).

[29] C.-H. Hsu, G. Lee, and A. L. P. Chen: "A near optimal algorithm for generating broadcast programs on multiple channels," in *Proc. of the Int. Conf. on Information and Knowledge Management* (CIKM 2001), pp. 303–309 (Nov. 2001).

[30] K. A. Hua, Y. Cai, and S. Sheu: "Patching: a multicast technique for true video-on-demand services," in *Proc. ACM Int. Conf. on Multimedia*, pp. 191–200 (Sept. 1998).

[31] K. A. Hua and S. Sheu: "Skyscraper broadcasting: a new broadcasting scheme for metropolitan video-on-demand systems," in *Proc. of the ACM SIGCOMM 1997*, pp. 89–100 (Sept. 1997).

[32] 藤原洋: "最新 MPEG 教科書," マルチメディア通信研究会, アスキー出版局, 東京, p. 98 (July 1997).

[33] 稲増龍夫: "フリッパーズ・テレビ　TV 文化の近未来形," 筑摩書房, 東京, p. i (July 1991).

[34] R. Janakiraman and M. Waldvogel: "Fuzzycast: efficient video-on-demand over multicast," in *Proc. of the IEEE INFOCOM 2002*, pp. 920–929 (June 2002).

[35] ジャパン ケーブルキャスト: "ジャパン ケーブルキャスト株式会社 ホームページ" (Aug. 2004). http://www.cablecast.co.jp/index.html

[36] L.-S. Juhn and L. M. Tseng: "Harmonic broadcasting for video-on-demand service," in *IEEE Trans. on Broadcasting*, Vol. 43, No. 3, pp. 268–271 (Sept. 1997).

[37] L.-S. Juhn and L. M. Tseng: "Fast data broadcasting and receiving scheme for popular video service," in *IEEE Trans. on Broadcasting*, Vol. 44, No. 1, pp. 100–105 (Mar. 1998).

[38] 関東総合通信局: "BS デジタル放送の技術紹介" (2003). http://www.kanto-bt.go.jp/faq/bs_digi/bsdi_03.html

[39] 岸野泰恵, 藤原礼征, 田中敏之, 下須賀滋穂, 義久智樹, 塚本昌彦, 板生知子, 大江瑞子, 西尾章治郎: "遠隔制御可能な LED を用いたアクセサリの実現," 情報処理学会研究報告 (モバイルコンピューティングとユビキタス通信 2004-MBL-29), Vol. 2004, No. 44, pp. 65–70 (Apr. 2004).

[40] Y. Kishino, H. Fujiwara, T. Tanaka, A. Shimosuka, T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, T. Itao, M. Oe, and S. Nishio: "Bloom Accessory: Accessories Using LEDs with Remote Control," in *Proc. of IEEE International Symposium on Wearable Computers* (ISWC 2004), pp. 180–181 (Oct. 2004).

[41] 岸野泰恵, 板生知子, 義久智樹, 沼田哲史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: "モバイルエージェントから制御可能な Micro Ja-Net デバイス," 電子情報通信学会 2004 年総合大会通信講演論文集 1, p. 489 (Apr. 2004).

[42] 岸野泰恵, 寺田努, 塚本昌彦, 義久智樹, 早川敬介, 柏谷篤, 西尾章治郎: "イベント駆動型入出力制御デバイスのためのネットワークトポロジ発見手法," 情報処理学会研究報告 (ユビキタスコンピューティングシステム 2004-UBI-5), Vol. 2004, No. 66, pp. 49–56 (June 2004).

[43] 岸野泰恵, 塚本昌彦, 義久智樹, 西尾章治郎: "ファッション・コミュニケーションのための LED を用いた装着型デバイス," 情報処理学会第 65 回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 191–194 (Mar. 2003).

[44] 岸野泰恵, 義久智樹, 寺田努, 塚本昌彦, 坂根裕, 早川敬介, 柏谷篤, 西尾章治郎: "ユビキタスコンピューティングのための入出力デバイスの PC 統合環境," 情報科学技術フォーラム (FIT 2002) 論文集第 4 分冊, pp. 203–204 (Sept. 2002).

[45] W. Liao and V. O. K. Li: "The split and merge protocol for interactive video-on-demand," in *IEEE Multimedia*, Vol. 4, No. 4, pp. 51–62 (Oct. -Dec. 1997).

[46] モバイル放送: "モバイル放送" (Aug. 2004). http://www.mbco.co.jp/index.html

[47] MP3' Tech: "Frame header" (2001). http://www.mp3-tech.org/programmer_header.html

[48] 中尾太郎，寺田努，塚本昌彦，宮前雅一，庄司武，岸野泰恵，義久智樹，西尾章治郎: "ウェアラブル型ルールベースシステムを用いた農作業支援システム," 情報処理学会第 65 回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 211–214 (Mar. 2003).

[49] NHK: "nhk/digital" (Aug. 2004). http://www.nhk.or.jp/digital/index.html

[50] NHK 放送技術研究所: "研究年報 2000," p. 13 (Mar. 2001).

[51] J.-F. Paris: "A simple low-bandwidth broadcasting protocol for video-on-demand," in *Proc. of the Int. Conf. on Computer Communications and Networks* (ICCCN 1999), pp. 118–123 (Oct. 1999).

[52] J.-F. Paris: "An interactive broadcasting protocol for video-on-demand," in *Proc. of the IEEE Int. Performance, Computing, and Communications Conference* (IPCCC 2001), pp. 347–353 (Apr. 2001).

[53] J.-F. Paris: "A stream tapping protocol with partial preloading," in *Proc. of the Int. Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems* (MASCOTS 2001), pp. 423–430 (Aug. 2001).

[54] J.-F. Paris, S. W. Carter and D. D. E. Long: "Efficient broadcasting protocols for video on demand," in *Proc. of the Int. Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems* (MASCOTS 1998), pp. 127–132 (July 1998).

[55] J.-F. Paris, S. W.Carter, and D. D. E. Long: "A hybrid broadcasting protocol for video on demand," in *Proc. of the SPIE Multimedia Computing and Networking Conf.* (MMCN 1999), pp. 317–326 (Jan. 1999).

[56] J.-F. Paris, D. D. E. Long, and P. E. Mantey: "Zero-delay broadcasting protocols for video-on-demand," in *Proc. of the ACM Int. Multimedia Conf.* (Multimedia 1999), pp. 189–197 (Nov. 1999).

[57] D. Saparilla, K. W. Ross, and M. Reisslein: "Periodic broadcasting with VBR-encoded video," in *Proc. of the IEEE INFOCOM 1999*, pp. 464–471 (Mar. 1999).

[58] S. Sen, L. Gao, J. Rexford, and D. Towsley: "Optimal patching schemes for efficient multimedia streaming," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video* (NOSSDAV 1999) pp. 265–277 (June 1999).

[59] 総務省: "地上デジタル放送懇談会報告書" (Oct. 1998).
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/housou/981026d701.html

[60] 総務省: "次世代放送コンテンツの振興に関する調査研究会報告書" (July. 2000).
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/housou/000718j702.html

[61] 総務省: “情報通信白書平成 15 年版” (2003).
http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h15/pdf/index.html

[62] スカイパーフェクト・コミュニケーションズ: “SKY PerfecTV!” (Aug. 2004).
http://www.skyperfectv.co.jp/index.html

[63] スカイパーフェクト・コミュニケーションズ: “SKY PerfecTV!110 110 度 CS デジタル放送” (Aug. 2004). http://www.skyperfectv110.jp/index.html

[64] 高橋政雄: “一目で分かる MP3 の概要,” INTERFACE, CQ 出版, 東京, pp. 70–77, (Aug. 2000).

[65] T. Terada, M. Tsukamoto, K. Hayakawa, T. Yoshihisa, Y. Kishino, A. Kashitani, and S. Nishio: “Ubiquitous Chip: a Rule-based I/O Control Device for Ubiquitous Computing,” in *Proc. of International Conference on Pervasive Computing* (PERVASIVE 2004), pp. 238–253 (Apr. 2004).

[66] 寺田努, 塚本昌彦, 坂根裕, 義久智樹, 岸野泰恵, 早川敬介, 柏谷篤, 西尾章治郎: “ユビキタスコンピューティングのための入出力制御デバイスの動作記述方式,” ヒューマンインタフェース学会ヒューマンインタフェースシンポジウム (HIS 2002) 論文集, pp. 331–334 (Sept. 2002).

[67] 寺田努, 塚本昌彦, 坂根裕, 義久智樹, 岸野泰恵, 早川敬介, 柏谷篤, 西尾章治郎: “ユビキタスコンピューティングのための入出力制御デバイスの動作記述言語,” 情報科学技術フォーラム (FIT 2002) 論文集第 4 分冊, pp. 197–198 (Sept. 2002).

[68] T. Terada, M. Tsukamoto, T. Yoshihisa, Y. Kishino, S. Nishio, K. Hayakawa, and A. Kashitani: “A Rule-based I/O Control Device for Ubiquitous Computing,” in *Adjunct Proc. of International Conference on Ubiquitous Computing* (UbiComp 2003), Interactive Posters, pp. 213–214 (Oct. 2003).

[69] Y.-C Tseng, C.-M Hsieh, M.-H Yang, W.-H Liao, and J.-P Sheu: “Data broadcasting and seamless channel transition for highly-demanded videos,” in *Proc. of the IEEE INFOCOM 2000* pp. 727–736 (Mar. 2000).

[70] S. Viswanathan and T. Imilelinski: “Pyramid broadcasting for video on demand service,” in *Proc. of the SPIE Multimedia Computing and Networking Conf.* (MMCN 1995), pp. 66–77 (Feb. 1995).

[71] WOWOW: “WOWOW ONLINE” (Aug. 2004). http://www.wowow.co.jp/index.shtml

[72] 矢島悦子, 原隆浩, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “相関性を持つデータ間の放送時間間隔について,” 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 1, pp. 188–196 (Jan. 1999).

[73] 矢島悦子, 原隆浩, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “データ間の相関性を考慮した放送データのスケジューリング法およびキャッシング法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 9, pp. 3577–3585 (Sept. 1999).

[74] 義久智樹, 板生知子, 岸野泰恵, 沼田哲史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “小型センシングデバイス制御のための Micro Ja-Net プロトコル,” 電子情報通信学会 2004 年総合大会通信講演論文集 1, p. 490 (Apr. 2004).

[75] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “単一チャネルを用いた連続メディア放送のスケジューリング手法,” 情報処理学会研究報告 (放送コンピューティング研究グループ 2002-BCCgr-1), Vol. 2002, No. BCCgr-1, pp. 74–81 (Feb. 2002).

[76] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “放送時間と再生時間を考慮した連続メディア放送のスケジューリング手法,” 電子情報通信学会第 13 回データ工学ワークショップ (DEWS 2002) 論文集 (Web 出版, http://www.ieice.org/iss/de/DEWS/proc/2002/index.html), B3-4 (Mar. 2002).

[77] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “連続メディアデータ放送における単一チャネルを用いた複数データのスケジューリング手法,” 情報処理学会シンポジウムシリーズ マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2002) 論文集, Vol. 2002, No. 9, pp. 511–514 (July 2002).

[78] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “早送りを考慮した放送型配信における待ち時間短縮のためのスケジューリング手法,” 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2002-DBS-129・放送コンピューティング研究グループ 2003-BCCgr-4 合同研究会), Vol. 2003, No. 5, pp. 57–64 (Jan. 2003).

[79] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “再生単位となるデータサイズを考慮したスケジューリング手法,” 電子情報通信学会第 14 回データ工学ワークショップ (DEWS 2003) 論文集 (Web 出版, http://www.ieice.org/iss/de/DEWS/proc/2003/index.html), 2-A-03 (Mar. 2003).

[80] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “データの分割に関する制約を考慮した連続メディアデータ放送におけるスケジューリング手法,” 情報処理学会論文誌: データベース, Vol. 44, No. SIG 3(TOD 17), pp. 33–42 (Mar. 2003).

[81] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “連続メディアデータ放送における待ち時間短縮のための分割放送方式,” 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 6, pp. 1558–1569 (June 2003).

[82] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “使用可能なチャネル数を考慮した放送型配信におけるスケジューリング手法,” 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2003-DBS-131(I)), Vol. 2003, No. 71, pp. 375–381 (July 2003).

[83] T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, and S. Nishio: “Scheduling Methods Based on Data Division for Continuous Media Data Broadcast,” in *Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing* (PACRIM 2003), pp. 927–930 (Aug. 2003).

[84] T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, and S. Nishio: “Scheduling Methods for Broadcasting Multiple Continuous Media Data,” in *Proc. of ACM International Workshop on Multimedia Databases* (MMDB 2003), pp. 40–47 (Nov. 2003).

[85] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “データの細分割による効率的な放送スケジュールの作成手法,” 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2004-DBS-132・放送コンピューティング研究グループ 2004-BCCgr-7 合同研究会), Vol. 2004, No. 3, pp. 25–32 (Jan. 2004).

[86] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “連続メディアデータ放送における複数データの分割放送型スケジューリング手法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 2, pp. 487–497 (Feb. 2004).

[87] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “早送りを考慮した連続メディアデータ放送におけるスケジューリング手法,” 情報処理学会論文誌: データベース, Vol. 45, No. SIG 7(TOD 22), pp. 179–188 (June 2004).

[88] T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, and S. Nishio: “A Scheduling Scheme to Enable Fast-Forward for Continuous Media Data Broadcasting,” in *Proc. of IEEE International Conference on Multimedia Expo* (ICME 2004), in CD-ROM (June 2004).

[89] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “放送型配信における連続メディアデータのプリフェッチを考慮したスケジューリング手法,” 情報処理学会シンポジウムシリーズ マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2004) 論文集, Vol. 2004, No. 7, pp. 543–546 (July 2004).

[90] T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, and S. Nishio: “An Effective Scheduling Method with Finer Data Division for Continuous Media Data Broadcasting,” in *Proc. of IEEE International Conference on Computer Communications and Networks* (ICCCN 2004), pp. 415–420 (Oct. 2004).

[91] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎: “連続メディアデータ放送におけるデータの細分割による効率的なスケジューリング手法,” 電子情報通信学会和文論文誌D-I, Vol. J87-D-I, No. 12, pp. 1079–1088 (Dec. 2004).

[92] 義久智樹, 塚本昌彦, 坂根裕, 寺田努, 岸野泰恵, 早川敬介, 柏谷篤, 西尾章治郎: “ユビキタスコンピューティングのための入出力制御デバイスのソフトウェアアーキテクチャ,” 情報科学技術フォーラム (FIT 2002) 論文集第 4 分冊, pp. 201–202 (Sept. 2002).

[93] 郵政研究所: “高度情報通信社会に向けたデジタルコンテンツ流通のあり方 (デジタルコンテンツの著作権に関連して),”
p. 37 (Sept. 1999). http://www.iptp.go.jp/reserch/survey/telecom/1999/99402.pdf

[94] 有線ブロードネットワークス: “SOUNT PLANET” (Aug. 2004). http://www.usen-cs.com/index.html