

オンデマンド型動画配信システムの配信性能の検証

清水 健一^{†,††} 檜垣 泰彦^{†††,††††} 藤本 茂雄^{†††} 須貝 康雄^{††††}

††† 千葉大学アカデミック・リンク・センター 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

† 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

†††† 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

†† 株式会社ブルーリンクシステムズ 〒102-0071 東京都千代田区富士見 1-5-5 第二大新京ビル 3 階

E-mail: ††higaki.yasuhiko@faculty.chiba-u.jp

あらまし 筆者らが開発したオンデマンド型授業動画配信システムについて COVID-19 パンデミックにより環境が急変したこの 1 年においてシステム上の大きなトラブルがなく安定した稼働を実現した。学部学生約 10000 人、開講科目数約 7000 の規模で過去に経験が無い状況での、この一年の稼働実績に基づきシステムの動画配信性能に関するデータをまとめシステムの有効性について検証した。

キーワード 遠隔授業, ムードル, HTTP ライブストリーミング (HLS), マルチビットレート, データダイエット, オンデマンドビデオ配信

Verification of delivery performance of the on-demand video delivery system

Kenichi SHIMIZU^{†,††}, Yasuhiko HIGAKI^{†††,††††}, Shigeo FUJIMOTO^{†††}, and Yasuo SUGAI^{††††}

††† Academic Link Center, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

†, Chiba Universityhskip1em 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

††††, Chiba Universityhskip1em 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

†† Blue Link Systems Co.,Ltd. Daini Shinkyo 3F, 1-5-5 Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0071 Japan

E-mail: ††higaki.yasuhiko@faculty.chiba-u.jp

Abstract The on-demand class video delivery system developed by the authors has achieved stable operation without any major system trouble during the past year, when the environment changed rapidly due to the COVID-19 pandemic. The effectiveness of the system was verified by compiling data on the system's video delivery performance based on the results of its operation over the past year under the unprecedented scale of approximately 10,000 undergraduate students and 7,000 courses offered.

Key words distance learning, Moodle, HTTP Live Streaming (HLS), multi bit rate, data traffic reduction, on-demand video distribution

1. はじめに

筆者らが開発したオンデマンド型授業動画配信システム [1], [2] は COVID-19 パンデミック下の千葉大学の 2020 年度の授業を支え非常事態宣言による外出禁止下において在宅での授業継続に活用された [3]。実際に運用を行なった実績を元にアクセスログ等から運用上の最大のポイントとなる大量同時アクセス時のサーバの安定性や通信の効率化に関して考察し、システムの実用性を評価する。

2. システムの概要

オンデマンド型授業動画配信システム (以後本システムという) は、Moodle と連携し認証された履修登録済の学生に授業動画を配信するシステムである。図 1 に概要図を示す。図に示すとおり Moodle が稼働するサーバと動画配信サーバは分割されており、動画配信のトラフィックのみ動画配信サーバにアクセスする。なお、授業で利用する動画は予め動画管理サーバ上で HLS 形式にトランスコードされると同時に暗号化され、各配信サーバに rsync でデータが配備される。

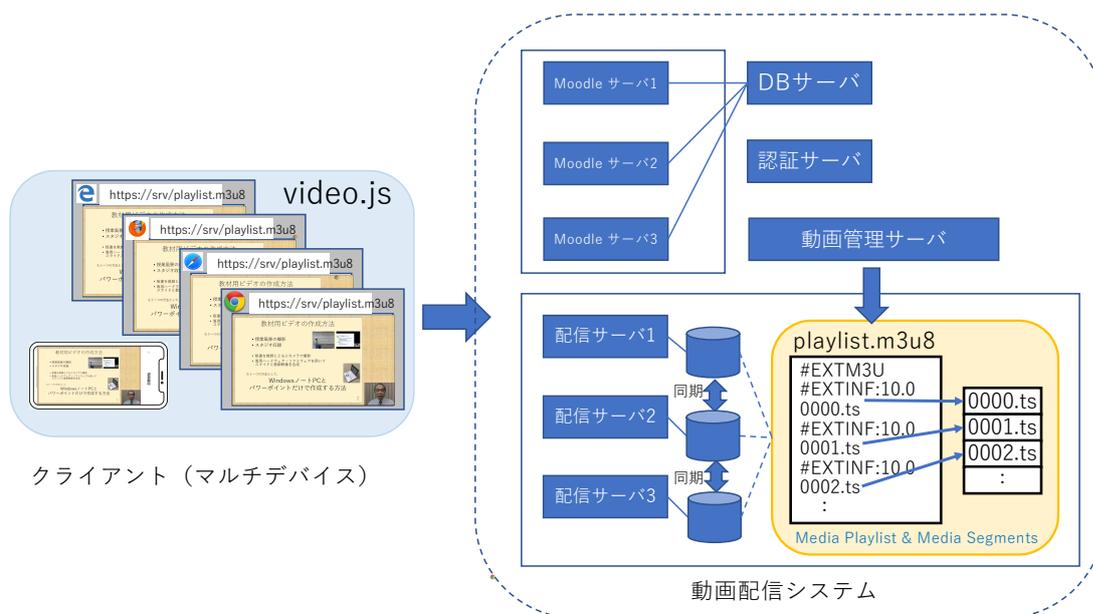


図 1 動画配信システムの概要

```

<IfModule mpm_prefork_module>
StartServers      5
MinSpareServers   5
MaxSpareServers   10
ServerLimit       512
MaxRequestWorkers 512
MaxConnectionsPerChild 0
</IfModule>

KeepAlive Off
MaxKeepAliveRequests 10
KeepAliveTimeout 1

```

図 2 同時アクセスに関するウェブサーバの設定 (抜粋)

配信サーバは一般的なウェブサーバであり、Apache Httpd Server を利用している。配信サーバで同時アクセスに関する設定を図 2 に示す。特筆すべき点としては KeepAlive Off の設定である。図 3 左に示すように KeepAlive を利用した場合、その都度セッション確立を行わず一定期間セッションを再利用することにより複数ファイルを効率的に転送できる。一般的なウェブサーバでは一つのページに複数の画像や CSS などの比較的容量の小さなファイルが多く存在することが多いため KeepAlive によって表示を早くすることができる。しかしながら、本システムでは 90 分の授業動画など比較的容量の大きいファイルを同時に多くの学生に提供する必要があるため、大量アクセス時にサーバ側のリソースが不足することにより、次第に処理時間が長くなってしまふことが懸念される。従って、KeepAlive を Off に設定することにより、図 3 右に示すようにできる限りサーバ側に処理を停滞させず、比較的短時間でレスポンスを返すことでトータル処理時間を短くすることを期待した。また、サーバ 1 台あたりの最大接続数はサーバのメモリサイズや過去の運用経験をもとに 512 を設定した。

表 1 負荷試験実施時の配信サーバの主要諸元

OS	RHEL 7.6
CPU	2 CPU (Xeon E5-2697v2)
メモリ	8GB
HDD	500GB

3. 負荷試験の実施

2020 年度のメディア授業が開始されたのは、非常事態宣言が発出された後の 2020 年 5 月 7 日からであったが、それより前に学生の協力を得て 2020 年 4 月 21 日に動画再生の負荷試験を行った。負荷試験では Moodle サーバ上に本システムのテスト環境を用意し、ここから同時刻に動画再生を行なってもらうという試験方法とした。負荷試験に参加する学生は自宅の回線やスマートフォン端末などのメディア授業で利用する個人の環境からアクセスを行った。負荷試験時のサーバ構成は moodle 3 台に加えて動画配信サーバ 1 台とし、moodle 側の負荷分散はロードバランサを利用した。配信サーバの主要諸元を表 1 に示す。なお配信サーバは仮想環境 (VMware ESXi 6.5.0) 上に構築した。

負荷試験は 2020 年 4 月 21 日 (火) 11:00am~11:30am に実施した。負荷試験では総再生時間 15 分 35 秒の試験用動画を予め作成した。この動画を動画管理サーバ上で HLS 形式にトランスコード処理を行い動画配信サーバに配備した。動画は HLS トランスコードによって 10 秒毎に 92 分割される。本システムで作成されるビットレートの構成は表 2 に示すとおりであり、動画の分割秒数はそれぞれ 10 秒で共通だが、動画の品質の違いによりファイルサイズは、各ビットレート毎に変化する。負荷試験で利用する動画のメディアセグメントファイルのファイルサイズを表 3 に示す。



図 3 KeepAlive 設定による違い

表 2 ビットレート構成 [3]

ラベル	H	L	ビデオ			オーディオ			合計 ビットレート
			ピクセル	ビットレート	フレームレート	サンプリングレート	チャンネル数	ビットレート	
b900k	○	-	1280 × 720	772kbps	30fps	44.1kHz / 48kHz *	2 (stereo) *	128kbps	900kbps
b300k	○	-	800 × 450	236kbps	30fps	44.1kHz / 48kHz *	2 (stereo) *	64kbps	300kbps
b150k	○	○	640 × 360	102kbps	15fps	8kHz	1 (mono)	48kbps	150kbps
b100k	○	○	480 × 270	72kbps	10fps	8kHz	1 (mono)	28kbps	100kbps

H: 「高品質」, L: 「パケット節約」, * 入力と同じ

表 3 負荷試験に利用した動画のファイルサイズ

ビットレート	総再生秒数	分割秒数	分割数	平均ファイルサイズ	合計ファイルサイズ
b900k	935s	10s	92	491 KB	46186 KB
b300k	935s	10s	92	300 KB	28276 KB
b150k	935s	10s	92	201 KB	13484 KB
b100k	935s	10s	92	160 KB	8183 KB

この時の moodle サーバへのアクセス件数は、IP アドレスを元に算出すると

- (1) moodle サーバ 1: 4250 件
- (2) moodle サーバ 2: 4177 件
- (3) moodle サーバ 3: 4214 件

であったが、3 台のサーバのログをまとめて IP アドレスによる重複を除去してアクセスを集計すると 4649 件であった。一方、動画配信サーバへの総アクセス数は 360568 件、ユニークユーザー数は 3856 件であった。ユニークユーザー数は、図 4 に示すスクリプトにより、IP アドレスと UserAgent との組み合わせによる重複除去から算出した。

負荷試験においては、Apache の httpd-status 機能により、サーバへの同時アクセス数およびサーバの処理状態の観測を行った。それによると 11:11:58 にピークとなる同時アクセス数 432 リクエストを観測した。この時の httpd-status の様子を

```
#!/usr/bin/perl

while(<>) {
    my @line = split('%s');
    my @log = split("");
    my $ipaddr = $line[0];
    my $user_agent = $log[5];
    my $datetime = $line[3];

    $datetime =~ s/%[0-9]{2}:[0-9]{2}:[0-9]{2} //;
    if ($user_agent eq '-') {
        next;
    }
    my $uu = $ipaddr . " " . $user_agent;
    $count{$uu}++;
}

foreach my $key (keys %count) {
    print $count{$key} . " " . $key . "%n";
}
```

図 4 ユニークユーザー集計用スクリプト

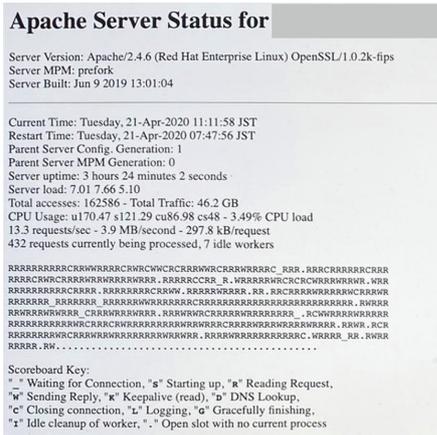


図 5 最大同時アクセス観測時の状態 (httpd-status)

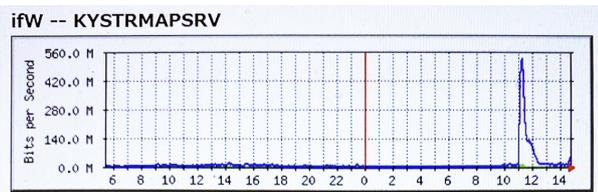


図 6 負荷試験時の通信量 (最大値 525.7Mb/s)

図 5 に示す。また、配信サーバのネットワークインターフェースでの通信量を観測したグラフを図 6 に示す。

HLS では通信状況によって適切なビットレートが選択されるが、アクセスログから 32.8% が最大の 900k で再生、55.6% が 300k、10.3% が 150k、1.3% が 100k で再生された。全ての再生が最高画質で再生できていないものの、混雑した状況でも一定の品質が確保されていると言える。

図 6 より、11:11 頃に最大転送量 525.7Mb/s に到達し、サーバの負荷もピークに達したが動画再生が途切れるような障害の発生は確認されず、この間テスト用動画の再生についても問題なく、終了後ページを抜けたところ再生情報も正常に記録された。

3856 人がほぼ同時に動画を再生した場合にも同時アクセスは最大で 432 件に留まった。これは本システムの設計が適切に実装されていることを示しており、HLS により動画ファイルがセグメント化されていること、アダプティブビットレートに対応していることや KeepAlive Off にしていることなどが影響していると考えられる。

最大 432 件は人数比で利用者の約 11% であり、予め想定していた 1 台のサーバで処理できる最大 512 同時アクセスの範囲内に収まっている。そのことから大きな滞りがなく想定範囲内で処理が行われたと考える。一方、ピーク時の通信量が 1Gbps のネットワークインターフェースに対して最大 525.7Mb/s が観測された。これはインターフェースの持つ最大転送能力の約 50% であり、実質的な限界値に達していたのではないかと考えられる。

実施した負荷試験の結果をもとに動画配信サーバを 3 台構成に増強し、5 月 7 日からのメディア授業を開始した。その

時のサーバの緒元を表 4 に示す。動画配信サーバ 1 については、その後 6 月 19 日から 6 月 24 日の間に運用を簡素化すべく FreeBSD に統一を行い、ディスク容量の増強を行った。

4. 実際の授業における稼働状況

その後、運用が始まり安定した稼働を継続しているが、最新の状況をまとめる。まず図 7 に週ごとの動画配信時のデータ転送量を示す。5 月 7 日のメディア授業開始直後はトラフィックが急増した、その後 6 月後半以降については落ち着いた状況が続いている。一方、図 8 には動画登録本数の週単位の推移を示す。こちらも同様にメディア授業開始の 5 月上旬をピークに減少傾向が続いているが、年間で 30000 本を超える動画が作成され登録されている。登録されている動画の内容に関して 2020-10-19 の週 (1 週間) についてまとめると以下のとおりである。

- (1) 登録されたビデオサイズ合計: 240 GB
- (2) 登録されたビデオ本数: 900 本
- (3) 配信バイト数: 3500 GB
- (4) 動画のファイルサイズの平均値:

$$\frac{240 \text{ GB}}{900} = 266 \text{ MB}$$

- (5) 高画質で再生した場合の転送容量:

$$266 \text{ MB} \times \frac{900 \text{ kbps}}{1450 \text{ kbps}} = 165 \text{ MB}$$

- (6) この週の再生回数:

$$\frac{3500 \text{ GB}}{165 \text{ MB}} = 21000 \text{ 回}$$

- (7) 月間再生回数: 21000 × 4 週 = 84000 回

- (8) 動画のみなしビットレート:

$$900 + 300 + 150 + 100 = 1450 \text{ kbps} = 181 \text{ kB/s}$$

- (9) 動画の平均の長さ:

$$\frac{266 \text{ MB}}{181 \text{ kB/s}} = 1500 \text{ 秒} = 25 \text{ 分}$$

- (10) 50GB の容量に相当する動画収録時間:

$$\frac{50 \text{ GB}}{181 \text{ kB/s}} = 77 \text{ 時間}$$

次に動画配信の近況について述べる。1 月 28 日が後期第 5 ターム終了間際であるがこの日の動画配信サーバへのアクセス数を図 9 に、ネットワークトラフィックを図 10 に示す。図 9 左上は、時間帯毎のユニークユーザ数を、右上はリクエスト数を示している。午後 4 時台にピークを迎えているが、0 時台や 23 時台のアクセスも比較的多く、何度も繰り返し再生できるため夜間の復習などにも活用されていることが推測される。図 9 左下のグラフは配信サーバへの同時アクセス数について負荷テストでも使用した httpd-status を利用して時間帯の推移を示したものである。12:31 と 14:40 にピークがあり、それぞれ同時アクセス数が 131 と 127 を観測している。恐らく授業

表 4 メディア授業開始時 (5 月 7 日) の各サーバの諸元 [3]

サーバ	OS	仕様諸元
動画管理サイト	RHEL 7.6	vCPU 12(4), メモリ 32(16)GB, HDD 100GB (VMware ESXi 6.5.0, Xeon E5-2697v2)
動画配信サーバ 1	RHEL 7.6	vCPU 4(2), メモリ 32(8)GB, HDD 2T(500G)B (VMware ESXi 6.5.0, Xeon E5-2697v2)
動画配信サーバ 2	FreeBSD 11.3R	NEC Express5800/T110j Xeon E-2124, メモリ 32GB, HDD 2TB mirror
動画配信サーバ 3	FreeBSD 11.3R	NEC Express5800/T110j Xeon E-2124, メモリ 32GB, HDD 2TB mirror

() 内はシステム増強前の値。動画配信サーバ 2, 動画配信サーバ 3 はシステム増強で増設。

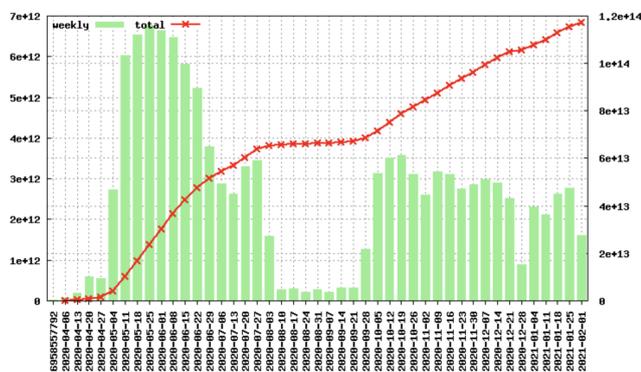


図 7 動画配信データ転送量の推移

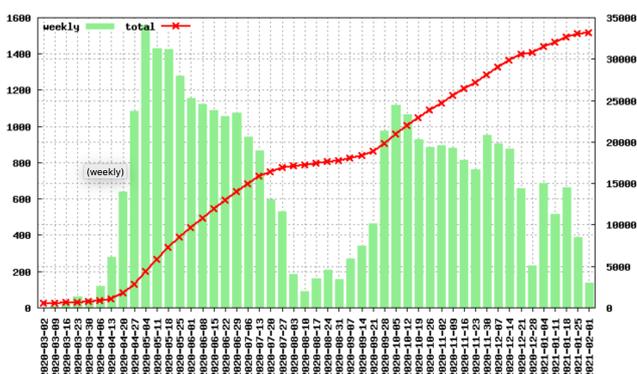


図 8 登録動画数の推移

のはじまりなどのため一斉に再生を開始するアクションがあったのではないかと考えられる。

負荷試験で観測されたトラフィックには達していない。サーバを複数台構成にしたことでラウンドロビンでリクエスト数は分散している。ピーク時の同時アクセスも負荷試験の時に比べ最大 117 リクエストであり、負荷試験のピーク時の 432 リクエストと比較して 27.1% に留まっている。ビットレートについても 98.2% が 300k 以上の品質で再生ができています。これらのことからサーバの分散による一定の効果が認められ、安定した運用ができていけると言える。サーバの処理に余裕があることで保守性の向上にも寄与している。脆弱性対応などのため、OS やミドルウェアのアップデートを行う際 3 台あるサーバのうち 1 台を停止した場合にも通常の稼働に大きな影響はなく、保守を容易にしている。加えてラウンドロビン方式であっても 1 台の httpd を停止した場合、その他のサーバにトラフィックが自動的に振り分けられることも保守性を向上する一つの要因となっている。

5. 評価

授業動画配信システムの稼働状況についてまとめた。ユニークユーザ 3856 人が同時に再生した場合、サーバの設定や HLS による動画ファイルの分割の効果により、最大 432 リクエストに留めることができました。この時のネットワークトラフィックは最大 525.7Mb/s となり、通信がボトルネックになりうるということが確認された。また、実際の運用においてはサーバを複数台構成にして DNS ラウンドロビンで分散することによりトラフィックが適切に分散され、実際の授業での約 1 年間を通じて負荷試験ほどのピークアクセスは観測されず、最大処理能力の 27.1% に収めることに成功し安定した運用が継続できている。

6. まとめ

開発した動画配信システムについて、負荷試験および実際の授業での稼働データに基づき配信性能を検証した。システムの設定が想定通り機能しており、アクセス集中に対しても十分な余裕があることが確認できた。学生数 10000 名規模の大学におけるメディア授業において、安定的に運用可能な実用性が備わっていることを確認した。

文献

- [1] 清水健一, 檜垣泰彦, 藤本茂雄, 須貝康雄 “e ラーニングを指向した Moodle 動画配信システム的设计”, 信学技報, vol. 120, no. 149, LOIS2020-7, pp. 13-18, 2020 年 9 月.
- [2] 檜垣泰彦, 池田晶子, 大木勇人, 藤本茂雄: e ラーニングを指向した Moodle 動画配信方式, MoodleMoot Japan 2020, 2020-02-28 <https://moodlejapan.org/mod/data/view.php?id=36&rid=2071> (2020 年 6 月 3 日 閲覧)
- [3] 檜垣泰彦, 藤本茂雄, 高瀬浩一, 武内八重子, 松本暢平, 池田晶子, 清水健一, 岡田聡志, “メディア授業用動画配信の実施 ~ COVID-19 への緊急対応 ~,” 信学技報, vol. 120, no. 93, LOIS2020-3, pp. 1-6, 2020 年 7 月.
- [4] 原田明成, 張徳鵬, 檜垣泰彦, “メディア授業に適した授業動画配信方式の検討,” 信学技報, vol. 119, no. 477, LOIS2019-67, pp. 63-67, 2020 年 3 月.
- [5] Moodle - Open-source learning platform, <https://moodle.org/> (2020 年 6 月 3 日 閲覧)
- [6] Advanced Distributed Learning Initiative, SCORM 1.2, <https://www.adlnet.gov/projects/scorm-1-2/> (2020 年 6 月 3 日 閲覧)
- [7] HTTP Live Streaming, IETF, rfc8216, August 2017 <https://tools.ietf.org/html/rfc8216> (2020 年 6 月 3 日 閲覧)
- [8] FFmpeg A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video., <https://ffmpeg.org/> (2020 年 6 月 3 日 閲覧)
- [9] Video.js - Make your player yours with the world's most popular open source HTML5 player framework, <https://videojs.com/> (2020 年 7 月 30 日 閲覧)

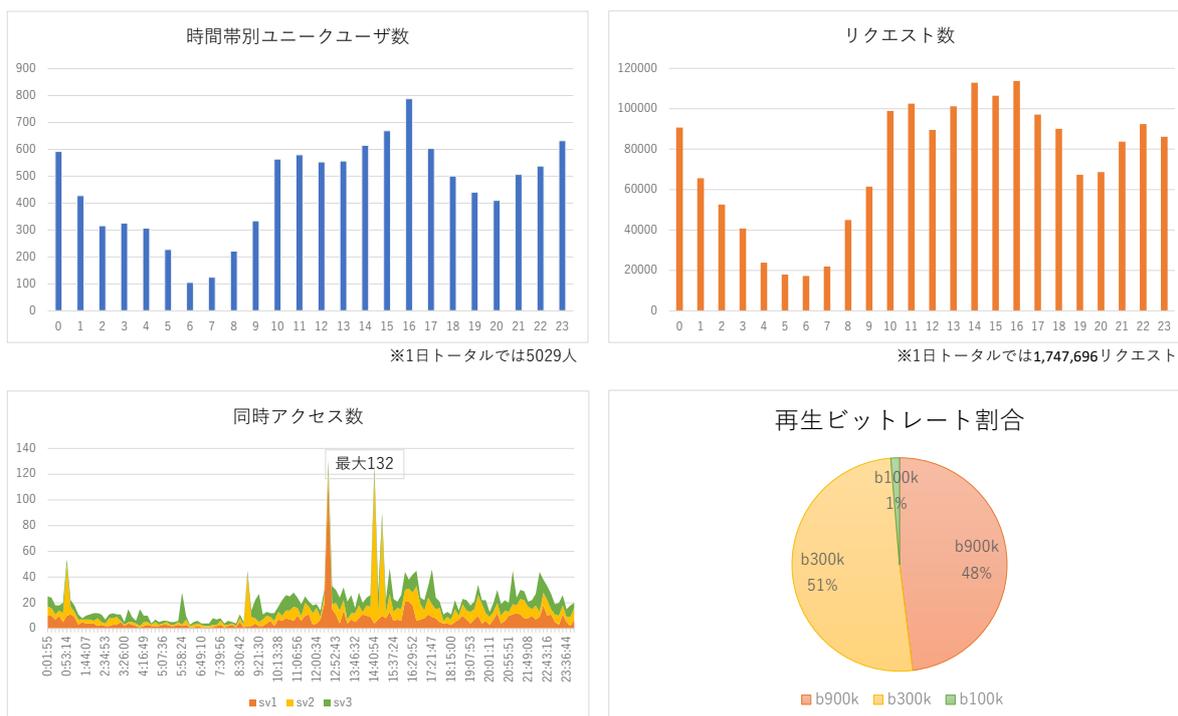


図 9 時間帯別の利用状況 (2021 年 1 月 28 日)

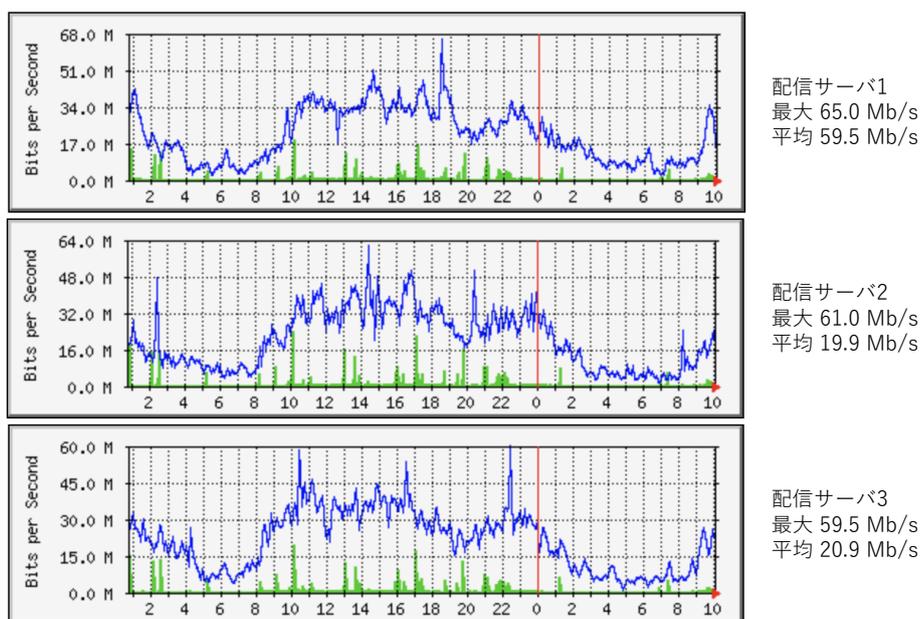


図 10 動画配信サーバにおける一日の通信量 (2021 年 1 月 28 日)