

# 5G SA 環境における IoT システムの通信性能調査

伊藤 千紗<sup>†</sup> 竹房あつ子<sup>††</sup> 中田 秀基<sup>†††</sup> 小口 正人<sup>†</sup>

<sup>†</sup> お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

<sup>††</sup> 国立情報学研究所 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

<sup>†††</sup> 産業総合研究所 〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup>{chisa,oguchi}@ogl.is.ocha.ac.jp, <sup>††</sup>takefusa@nii.ac.jp, <sup>†††</sup>hide-nakada@aist.go.jp

**あらまし** IoT 機器から収集された様々なセンサデータをクラウドで収集、解析し、活用することが期待されている。しかし、モバイル環境にある IoT データの収集では、各種サービスで要求される通信スループットや通信遅延を維持することができるかが課題となる。高性能なモバイル通信技術として、5G の活用が期待されているが、IoT 通信における性能は明らかでない。本研究では、5G SA (Standalone) 環境における IoT データ通信性能を調査する。5G SA とは、4G 用のコア装置を流用する NSA (Non-SA) に対して、5G 専用のコア装置を導入して 5G 専用の基地局装置を使用するものである。5G SA 環境で、IoT 用通信ライブラリを提供する SINETSStream を用いて基本性能を調査する。

**キーワード** 5G SA, IoT, 性能評価

## 1 はじめに

様々なモノに通信デバイスを組み込み、インターネットに接続しようとする試みを IoT (Internet of Things) と呼ぶ。これらの IoT 機器を利用してさまざまなセンサデータを収集することができ、これらのセンサデータをクラウドで蓄積、解析し、活用することが期待されている。しかし、モバイル環境にある IoT データの収集では、自動運転車や倉庫内自走ロボットなどの各種サービスで要求される通信スループットや通信遅延を維持する必要がある。これらの通信スループットや通信遅延の性能要求を満たすには、現在のモバイル通信技術である LTE では難しく、性能向上が課題となっている。そこで高性能なモバイル通信技術として、5G の活用が期待されている。しかし、小規模データが大量に送信されるような、IoT 通信で利用する際の性能特性がまだ明らかではない。

本研究では、国立情報学研究所内に設置された 5G SA 環境での IoT データ通信性能を調査する。その際 IoT 用通信ライブラリを提供する SINETSStream を用いて基本性能を評価する。実験では暗号化の有無、データサイズ、スレッド数の条件を変え、5G SA と LTE のそれぞれで比較を行う。その結果、モバイル通信における 5G SA のスループットが従来の LTE よりも高くなること、通信スループットを高めるにはマルチスレッド通信が有効であることを確認した。一方で、IoT 通信のように小規模のメッセージを大量にクラウドに送信するような通信パターンではアップロード帯域で律速され、広いダウンロード帯域を持つ 5G モバイル通信を有効利用するのが難しいことも示唆された。

## 2 関連技術

### 2.1 5G

LTE (Long Term Evolution) は 3G の次の世代のモバイルデバイス専用通信規格で、最大通信速度は 37.5~150Mbps とされている。3G をさらに高速化させたもので第 3.9 世代移動通信規格とも呼ばれている。これに対して 5G は第 5 世代移動通信システムの略で LTE で提供してきた高速・大容量をさらに進化させた通信規格である。最高伝送速度は 10Gbps とされており、LTE の帯域幅よりもさらに広い帯域幅である。5G のメリットは高速大容量で、これによって大容量のデータを迅速に収集・転送が可能になる。また、超低遅延であることから遠隔でのリアルタイム制御の可能性が広がるうえに、多数同時接続が可能のためセンサ数を格段に増やすこともでき、IoT 機器との接続など社会発展の基盤としても大きく期待されている。5G の利用例としてローカル 5G がある。これは地域・産業のニーズに応じて地域の企業や自治体等が個別に利用できる 5G ネットワークで、利用するには国で指定された無線局免許の取得が必要である。特徴としては他のエリアで通信トラブルが起きた場合やネットワークが混雑した場合に影響を受けにくいことや、外部のネットワークから遮断された環境でデータを送受信できるため、セキュリティ面が高いことが挙げられる [1]。

### 2.2 5G SA

5G SA と 5G NSA の仕組みを図 1 に示す。現在商用で利用されている 5G NSA は 4G 用のコア装置である EPC (Evolved Packet Core) を流用し、4G 基地局と連動し 4G と 5G の電波を併せて使用している。そのため 4G に一度接続した後に 5G 接続となり、4G と 5G の両方の電波を利用しないと 5G 通信できない仕組みとなっていた。これに対して 5G SA とは、5G 専用のコア装置と基地局装置を使用するものである。4G 接続を

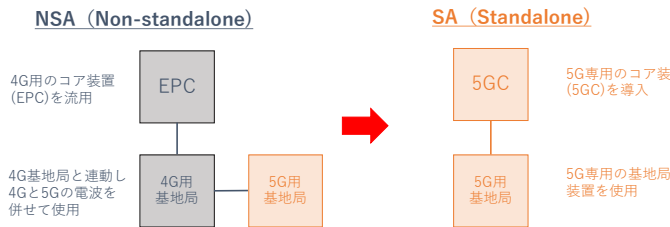


図 1: 5G SA と 5G NSA

せずにはじめから 5G 接続となるため、5G 通信開始までの時間が短くなるだけでなく、5G の電波のみを利用して 5G 通信ができるようになるため、広帯域な周波数帯を組み合わせた通信も可能となる [2].

### 2.3 SINETStream

SINETStream [3] [4] とは、国立情報学研究所で開発された広域ネットワークを介してデータを欠損なく確実に収集・解析するための機能を提供しているソフトウェアパッケージである。SINETStream は、IoT 通信に適した Publisher/Subscriber 型の通信モデルを採用している。MQTT [5] 準拠のブローカや Apache Kafka [6] のような標準的なメッセージブローカに対応した共通 API を提供しており、具体的には、(1) センサ等から収集されるデータをクラウド や大学などに設置されたサーバへ書き込む (2) サーバに収集されたデータを解析プログラムに読み込むといった機能を提供している。また、通信やデータの暗号化、センサ等のデバイスの認証を行う機能も含んでいるため、安全な広域データ収集を実現できる。本研究では SINETStream を用いた MQTT および Kafka の通信の性能調査を行う。

### 2.4 perftool

perftool [7] とは SINETStream を介してデータの送受信を行い、そのメトリクス情報を出力するプログラムである。クライアント端末で Publisher と Subscriber のプログラムを実行し、サーバで起動しているブローカにメッセージを送信し、ブローカで収集されたメッセージをクライアント端末の Subscriber で取得するまでの時間を測定する。表 1 に perftool パラメータを示す。メトリクス情報の例としては、1 秒あたりに受信したメッセージ数、1 秒あたりに受信したメッセージ量、1 秒あたりのエラー数であるエラーレートがある。

## 3 関連研究

5G SA の性能評価に関する先行研究には [8], [9], [10], [11] がある。文献 [8] では、デュアルモード 5G 基地局において、5G SA, 5G NSA, LTE でスループットを測定する実験を行った。デュアルモード 5G 基地局とは、NSA および SA の両方にアクセスできる基地局のことである。基地局の固定電力送信の下で測定を行った結果、5G SA, 5G NSA, LTE の順に性能が優れていることが確認できた。文献 [9] では、TCP と QUIC で 5G SA, 5G NSA, LTE でスループットを測定する実験を行った。この実験結果では、5G SA は TCP のスループットを 11 倍以

上向上させることが明らかになった。

文献 [10] では、中国の KuaiShou というライブストリーミングアプリを使用して 5G SA と 4G の遅延、帯域幅、信頼性に関する実験を行った。まず、遅延については、アプリの全ユーザーと 5G デバイスユーザーを対象に 5G SA, 5G NSA, 4G, Wi-Fi で平均接続確率遅延を測定した。その結果 4G と Wi-Fi では全ユーザーの遅延が 5G ユーザーの遅延よりも大きいことがわかった。このときユーザーとサーバ間の平均距離は各ネットワークでほぼ同じである。従って 4G と Wi-Fi における全ユーザーと 5G ユーザーの遅延の違いは、端末の計算能力の違いに起因すると考えられる。また、中国の 3 大 ISP である Mobile, Unicom, Telecom における接続確立遅延の比較を行った。その結果いずれの ISP においても 5G SA の遅延は 4G や 5G NSA の遅延よりも遙かに小さいことが確認できた。次に、帯域幅については、異なる映像ビットレートにおける平均ダウンロード速度を測定し、5G SA と 4G で比較を行った。5G SA のダウンロード速度は、全ての映像ビットレートで 4G のダウンロード速度よりはるかに高いことが確認できたが、理論値よりはるかに低くなった。また、4G と 5G SA の両方でビットレートの増加に応じてダウンロード速度が向上し、その度合いは 5G SA の方が 2 倍以上高くなった。最後に信頼性については、5G SA と 4G においてリバッファの割合を比較したところ、5G SA はリバッファの割合が非常に低く、4G の半分近くであることがわかった。なお、これらの実験において 5G SA のユーザー数が増えるにつれて 5G SA の速度と 4G に対する優位性が劣化することも示されている。

文献 [11] では、5G SA と 5G NSA の性能比較を行うため、ネットワークのアップリンクレート、ダウンリンクレート、遅延を測定する実験を行った。実験は iperf を使用して基地局と端末の間で UDP パケットを送信する。結果から 5G SA と 5G NSA のどちらもアップリンクレートとダウンリンクレートは帯域幅に伴って単調に増加したことが確認できた。これは帯域幅が広いほどデータ転送の最大レートが高くなるためだと考えられる。アップリンクレートについては 5G SA が 5G NSA をわずかに上回っていた。また、帯域幅が大きくなるほど遅延はわずかに減少し、5G NSA と比べて 5G SA の方がこの減少度は大きかった。5G SA と 5G NSA の遅延にはあまり差がないことも確認できた。

いずれの先行研究も 5G SA の性能評価を行っているが、本研究は IoT データ通信を行う点、ブローカとして Kafka と MQTT を用いる点で異なる。

Kafka, MQTT の性能評価を行う先行研究もある。文献 [12] では、有線環境で Kafka と MQTT の Write スループットを測定する実験を行った。Kafka と MQTT の結果を比較すると Kafka のほうが高性能であることが確認できた。従ってこの実験では、大量のデータを確実に収集する場合、Kafka のほうが有望であることが示された。

表 1: perftool パラメータ

SERVICE_NAME	SINETStream API で使用するサービス名
FORMAT	出力形式
OUTPUT_COUNT	メトリクス情報を計測して出力する回数
NUM_SAMPLES	1 回のメトリクス情報を出力するまでに送信するメッセージ数
PAYLOAD_SIZE	送信するメッセージのデータサイズ
NUM_THREADS	並列実行するスレッド数

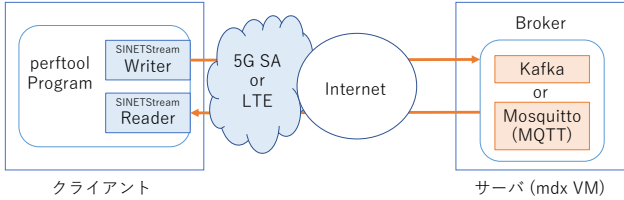


図 2: 実験の構成図

表 2: 実験条件

ブローカ	Kafka / Mosquitto
暗号化	有 (AES) / 無
データサイズ (byte)	1024 / 10240 / 102400
スレッド数	1 / 2 / 4 / 8

表 3: 実験環境

クライアント : Raspberry Pi	
機種名	Raspberry Pi 4 Computer Model B 4GB RAM
OS	Raspbian GNU / Linux 11
CPU	ARMv7 Processor rev 3 (v7l)
Main Memory	4GB
クライアント : MacBook Air (予備実験のみ)	
機種名	MacBook Air (Retina, 13-inch, 2018)
OS	macOS Big Sur バージョン 11.1
CPU	1.6 GHz デュアルコア Intel Core i5
Main Memory	8 GB 2133 MHz LPDDR3
サーバ : mdx VM	
OS	Ubuntu 20.04.5 LTS
仮想 CPU コア数	16
メモリ	24.19GB
仮想ディスクサイズ	100GB

## 4 実 験

### 4.1 実験概要

国立情報学研究所に設置されている NTT docomo の 5G SA 環境と、LTE 環境でそれぞれスループットを測定する。実験の構成図を図 2 に示す。SINETStream では Publisher は Writer, Subscriber は Reader とする。ブローカは Kafka と MQTT ブローカの Eclipse Mosquitto [13] を用いる。実験では、クライアントからメッセージを送信し、ブローカを介してクライアントがメッセージを受信するまでの往復通信のスループットを計測する。ブローカのソフトウェアは、Kafka v. 3.1.0 と Mosquitto v. 1.6.9 を用いた。

実験条件を表 2 に示す。データを暗号化しないものと AES アルゴリズムで暗号化したものの 2 通り、データサイズは 1024byte, 10240byte, 102400byte の 3 通り、スレッド数は 1, 2, 4, 8 の 4 通りで比較する。測定には perftool を使用し、メトリクス情報のひとつである reader\_msg\_bytes\_rate に着目する。OUTPUT\_COUNT は 10, NUM\_SAMPLES は 100 を指定する。データサイズは PAYLOAD\_SIZE, スレッド数は NUM\_THREADS で指定する。ブローカ、暗号化の有無は SINETStream の設定ファイルで指定する。

### 4.2 予備実験

5G SA の性能について予備実験を行った。実験環境を表 3 に示す。クライアントは Raspberry Pi と MacBook Air, サーバはデータ活用社会創成プラットフォーム mdx VM [14] を用いる。クライアント端末は一ツ橋の NII に設置し、モバイルル

表 4: Google Internet speed test の測定結果 (Mbps)

	LTE		5G SA	
	Download	Upload	Download	Upload
Raspberry Pi	43.2	15.0	97.7	87.7
MacBook Air	13.2	4.82	175.4	75.6

とクライアント端末は USB で接続する。また、本研究では商用の 5G, LTE を用い、モバイルルータは Wi-Fi STATION SH-52B を用いる。

まず、Google のインターネット速度テストで測定を行った。10 回の測定結果の平均値を表 4 に示す。Raspberry Pi と MacBook Air のどちらの端末においても LTE と比べて 5G SA の方が性能が良く、Upload 性能に比べて Download 性能の方が良いことが確認できた。また、端末性能の差により 5G SA の Download 性能が顕著に異なることも確認できた。

次に、ネットワーク測定ツール iperf3 [15] を用いてクライアントとサーバ間のスループットを測定した。測定結果を表 5 に示す。結果から、Raspberry Pi と MacBook Air のどちらの端末においても LTE と比べて 5G SA の方が性能が大幅に良いことが確認できた。

最後にそれぞれの端末で mdx VM サーバに対して ping を測定した。50 回の測定結果を表 6 に示す。結果から Raspberry Pi と MacBook Air のどちらの端末においても LTE と 5G SA では通信遅延の差異が少なく、本研究の観測点では 5G 通信の特徴である低遅延性は確認できなかった。

表 5: クライアントと mdx VM サーバ間の iperf3 測定結果 (Mbps)

	LTE		5G SA	
	sender	receiver	sender	receiver
Raspberry Pi	12.1	10.8	89.3	86.6
MacBook Air	8.24	7.11	84.9	82.0

表 6: クライアントと mdx VM サーバ間の ping 測定結果

	Raspberry Pi		MacBook Air	
	LTE	5G SA	LTE	5G SA
packer loss	0	0	0	0
min(ms)	31.5	42.1	26.3	24.0
avg(ms)	46.4	56.4	43.2	48.1
max(ms)	268.9	75.1	59.3	64.3
mdev(ms)	30.6	8.01	7.69	9.79

表 7: 5G SA と LTE で Kafka と MQTT 通信のデータサイズの違いによる通信スループットの比較 (byte)

		1024	10240	102400
Kafka	5G SA	26711	251811	1302009
	LTE	22599	172535	1066235
MQTT	5G SA	25624	222714	1298800
	LTE	22541	159239	826904

表 8: 5G SA と LTE で Kafka と MQTT 通信におけるスレッド数毎の測定時間 (sec.)

スレッド数	Kafka	MQTT
1	70.440	74.787
2	68.904	73.395
4	129.312	140.089
8	194.427	207.198

### 4.3 実験結果

クライアントに Raspberry Pi, サーバに mdx VM を利用し, IoT 通信の性能を調査する. 実験では, 暗号化の有無, データサイズの違いによる通信スループットの比較と, Writer, Reader のスレッド数を増やしたときの通信スループットを測定する. まず, 5G SA と LTE 環境でデータ暗号化の有無で比較した結果を図 3 に示す. 横軸は output\_count で計測回数を表し, 縦軸は reader\_msg\_count\_rate で受信メッセージレートを表している. 実験では, 100 メッセージの送受信における平均通信スループットを 10 回計測している. 暗号化無しが赤色で plain, 有りが緑色で aes, サイズは 1024byte の結果を表している. また, 実線が 5G SA, 破線が LTE である. 左側が Kafka ブローカを経由したもの, 右側が MQTT ブローカを経由したものである. 5G SA と LTE で比較すると, どちらも 5G SA の方が性能が良いことが確認できる. 暗号化の有無での比較では, どちらのブローカを経由した場合も暗号化による性能の差は見られなかったことが確認できた. データサイズで比較したものを図 4 に示す. 縦軸横軸は図 3 と同様で暗号化は無しの結果を示す. 赤色が 1024byte, 緑色が

10240byte, 青色が 102400byte で実線が 5G SA, 破線が LTE である. どのデータサイズにおいても 5G SA の方が性能が良く, データサイズが大きくなるほど性能の差が大きいが読み取れる. また, データサイズが小さいものが読み取りづらいため 10 回の計測の平均値を表 7 に示す. Kafka, MQTT ともに 1024byte の場合もデータサイズが大きいものと比べるとわずかではあるが LTE よりも 5G SA のほうが性能が良いことが確認できる.

図 5 は 5G SA に Writer と Reader のスレッド数を変えて測定したものを表す. 縦軸横軸は図 3 と同様で暗号化は無し, サイズは 1024byte の結果を示す. 左側が Kafka ブローカを経由したもの, 右側が MQTT ブローカを経由したものである. 10 回の計測の平均値をスレッド数ごとに積み上げグラフで表している. このグラフから reader\_msg\_bytes\_rate の合計はスレッド数にほぼ比例していることが読み取れる. つまりスレッド数を増やすと総通信スループットが向上することがわかる. また, 表 8 にはスレッド数毎の測定時間を示す. 表 8 から, スレッド数が 4 以上になると測定時間が長くなってしまい, 通信処理が飽和していることがうかがえる. 本研究で用いた Raspberry Pi は 4 コアの CPU であるため, 往復通信を行う本実験ではスレッド数を 2 として, Reader, Writer 合わせて 4 スレッドとすることが最適であることが示された.

図 3, 図 4, 図 5 で Kafka と MQTT を比較すると, 性能の差はあまりないことが確認できる. 先行研究 [12] では有線環境で MQTT と比べて Kafka のほうが良い性能が見られたが, モバイル環境で測定を行った本実験結果からは, 通信帯域の制約によりそのような特徴は見られなかった.

## 5 まとめと今後の課題

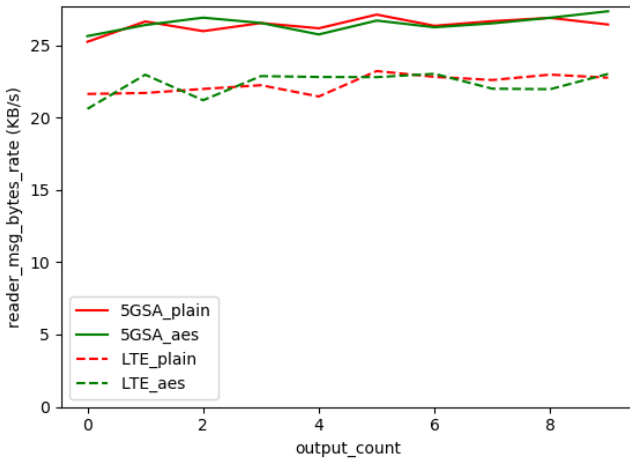
IoT 用通信ライブラリ SINETStream を用いて 5G SA 環境のスループットの測定を行い, 従来の LTE と比べて高い通信スループットを示すことを確認した. また, データ暗号化による性能の差はあまりないこと, データサイズが大きくなるほど 5G SA と LTE の性能の差は大きくなること, スレッド数を適切に設定すると総通信スループットが向上することも確認できた. 一方で, IoT 通信のように小規模のメッセージを大量にクラウドに送信するような通信パターンでは 5G モバイル通信を有効利用することが難しいことも示唆された. 今後の課題としては, より大きなデータサイズでマルチスレッドの測定を行うこと, 別のクライアント端末を用いて実験を行うことが挙げられる. また, 5G NSA と比較を行うことも考えている.

## 謝 辞

5G SA 環境の利用では, NTT コミュニケーションズ様にご協力いただきました. また, 本研究は JSPS 科研費 JP19H04089 の助成を受けたものです.

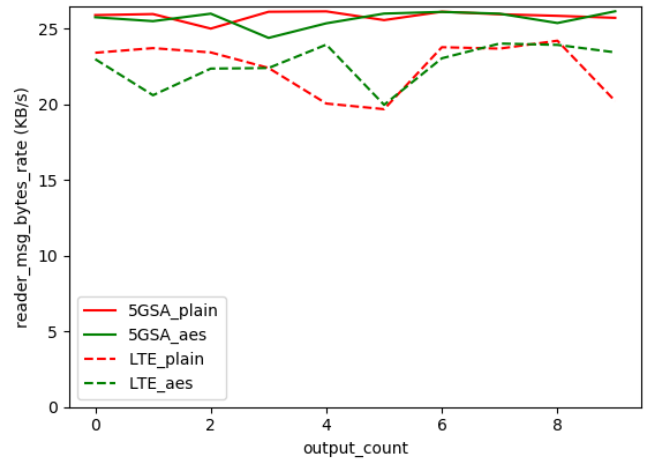
本研究成果はデータ活用社会創成プラットフォーム mdx を利用して得られたものです.

size = 1024, broker = kafka



(a) Kafka ブローカ

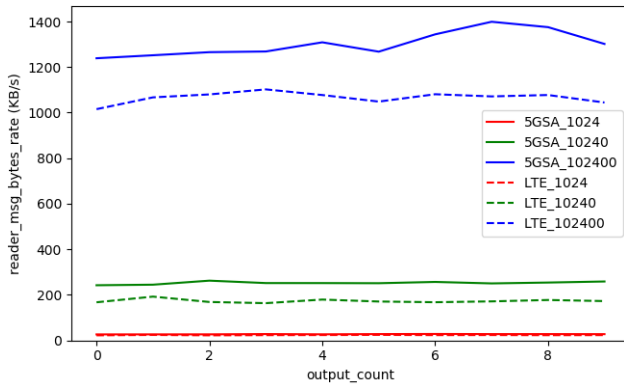
size = 1024, broker = mosquitto



(b) MQTT ブローカ

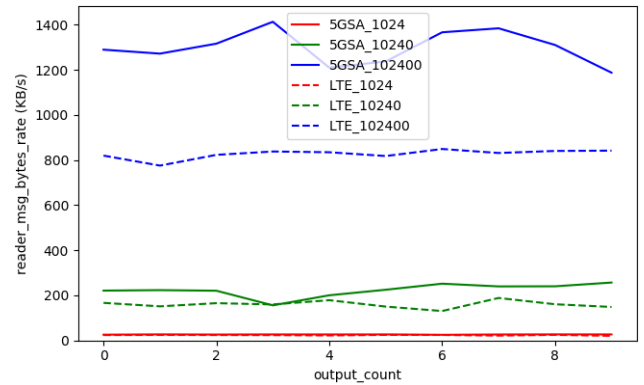
図 3: 5G SA と LTE で Kafka と MQTT 通信の暗号化の有無での通信スループットの比較

crypto = plain, broker = kafka



(a) Kafka ブローカ

crypto = plain, broker = mosquitto



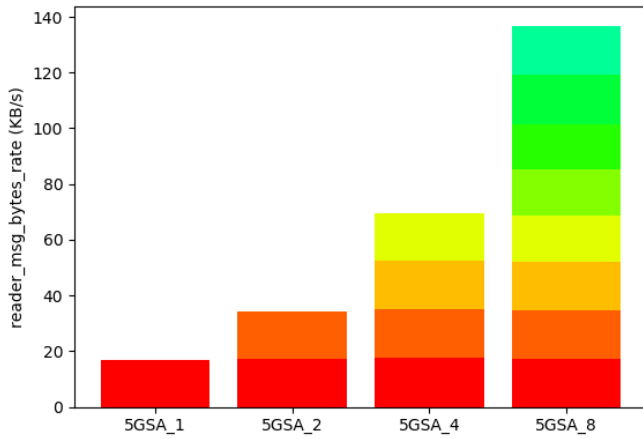
(b) MQTT ブローカ

図 4: 5G SA と LTE で Kafka と MQTT 通信のデータサイズの違いによる通信スループットの比較

## 文 献

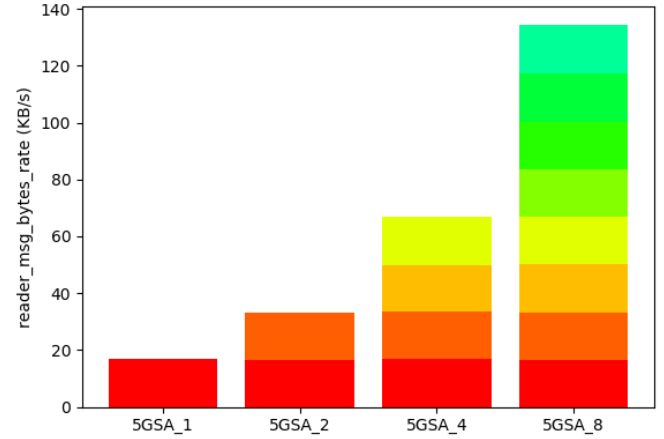
- [1] 総務省. ローカル 5G. [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000802944.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000802944.pdf).
- [2] docomo. 5G. <https://www.docomo.ne.jp/area/5g/>.
- [3] SINETStream. <https://sinetstream.net/>.
- [4] Atsuko Takafusa, Jingtao Sun, Ikki Fujiwara, Hiroshi Yoshida, Kento Aida, and Calton Pu. SINETStream: Enabling Research IoT Applications with Portability, Security and Performance Requirements. *In Proc. COMPSAC 2021*, pp. 482–492, 2021.
- [5] MQTT (Message Queue Telemetry Transport). <https://mqtt.org/>.
- [6] Apache Kafka. <https://kafka.apache.org/>.
- [7] perftool. <https://github.com/nii-gakunin-cloud/sinetstream/tree/main/python/sample/perftool>.
- [8] Bowen Cai, Hua Zhang, Han Guo, Guanghui Zhang, and Weiliang Xie. 5g network evolution and dual-mode 5g base station. *In 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 283–287, 2020.
- [9] Yueyang Pan, Ruihan Li, and Chenren Xu. The first 5g-lte comparative study in extreme mobility. *Proc. ACM Meas. Anal. Comput. Syst.*, Vol. 6, No. 1, feb 2022.
- [10] Xinjie Yuan, Mingzhou Wu, Zhi Wang, Yifei Zhu, Ming Ma, Junjian Guo, Zhi-Li Zhang, and Wenwu Zhu. Understanding 5g performance for real-world services: A content provider’s perspective. *In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference, SIGCOMM ’22*, p. 101–113, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [11] Ramy Mohamed, Sofiane Zemouri, and Christos Verikoukis. Performance evaluation and comparison between sa and nsa 5g networks in indoor environment. *In 2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*, pp. 112–116, 2021.
- [12] 竹房あつ子, 孫静涛, 藤原一毅, 長久勝, 吉田浩, 政谷好伸, 合田憲人. SINET 広域データ収集基盤を用いたオンラインビデオ処理実証実験. *情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (TDP)*, pp. 45–57, 2020.
- [13] Mosquitto. <https://mosquitto.org/>.
- [14] Toyotaro Suzumura, Akiyoshi Sugiki, Hiroyuki Takizawa, Akira Imakura, Hiroshi Nakamura, Kenjiro Taura, Tomohiro Kudoh, Toshihiro Hanawa, Yuji Sekiya, Hiroki Kobayashi, Yohei Kuga, Renhe Jiang Ryo Nakamura, Junya Kawase, Masatoshi Hanai, Hiroshi Miyazaki, Tsutomu Ishizak, Daisuke Shimotoku, Daisuke Miyamoto, Kento Aida, Atsuko Takefusa, Takashi Kurimoto, Koji Sasayama, Naoya Kitagawa, Ikki Fujiwara, Yusuke Tan-

crypto = plain, size = 1024, broker = kafka



(a) Kafka ブローカ

crypto = plain, size = 1024, broker = mosquitto



(b) MQTT ブローカ

図 5: 5G SA と LTE で Kafka と MQTT 通信のスレッド数の違いによる通信スループットの比較

imura, Takayuki Aoki, Toshio Endo, Satoshi Ohshima, Kei-ichiro Fukazawa, Susumu Date, and Toshihiro Uchibayashi. mdx: A cloud platform for supporting data science and cross-disciplinary research collaborations. *In 2022 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech)*, pp. 1–7, 2022.

[15] iperf. <https://iperf.fr/>.