IoT 通信性能解析

博士(工学)　蜷川　忠三　著

コ ロ ナ 社

ま　え　が　き

これまで，IoT（Internet of Things）と題する本がたくさん出版されてきた。しかし，そのほとんどがIoTビジネス本あるいは実装ハウツー本であり，制御通信とインターネットという異種統合されたシステムの通信性能解析を扱った工学書は見当たらない。5Gをはじめとした近年のクラウド側通信の高性能化は目を見張るものがあり，通信性能解析する必要もないという考えからかもしれない。

しかし，IoTのThings側となる機器やセンサのエッジ側通信は必ずしも高性能ではない。組込み制御ネットワークやセンサネットワークなどリソースが乏しい場合や，建物や設備にすでに内蔵装備されており最新の通信システムに置き換えられない場合も少なくない。そうした低速なエッジ側通信と高速なクラウド側通信を統合した，いわば「ヘテロ接合通信」がIoTのデータ伝送性能の決定的特徴である。

クラウド側インターネット通信を代表するTCP通信性能解析はすでに確立された感があり，専門書も過去に多く出版されている。しかし，エッジ側の低速な組込み制御ネットワークやセンサネットワークにおけるデータ伝送性能解析に関する書籍はあまり出版されていない。さらに，高速なクラウド側通信から低速なエッジ側通信へのエッジゲートウェイ性能解析に関する書籍はまったく出版されていない。

ギガビットレートのクラウド側からキロビットレートのエッジ側通信へのゲートウェイに通信負荷が集中したときは，数千倍から数万倍のデータ伝送速度を吸収する必要がある。かつ，このような集中的通信負荷に対しては，定常状態解析でなく過渡解析でないと意味がない。この過渡的通信性能解析こそが，IoT全体システムにおけるデータ伝送性能を計画設計する上の肝となると

思われる。

本書は，IoT クラウド側 TCP，UDP，Web，SOAP データ伝送性能，および，IoT エッジ側 CSMA 型，マルチホップ型データ伝送性能，さらに，エッジゲートウェイにおける受信バッファおよび送信バッファの伝送性能に関する解析技術を扱う。

その通信性能解析の数理的ツールとしては，確率過程，待ち行列，マルコフ過程，通信トラフィックシミュレータといった普遍的な解析手法を実際の例に当てはめて詳述した。もって，本書は，IoT が今後進化したとしても，その基礎となる一生モノの通信性能解析手法を示すことをめざす。

本書をまとめるにあたり多くの方々のご協力があった。特に，東京大学大学院情報理工学研究科の江崎浩教授，岐阜大学工学部電子情報工学科の原山美智子准教授，IIJ 基盤エンジニアリング本部長の山井美和氏，NTT データデジタルプラットフォーム課長の小山雅人氏には具体的な記述への助言やご指摘をいただいた。また，コロナ社には著者の熱意を汲んで出版への道を開いていただいた。ここに，皆様に御礼申し上げる次第である。

最後に，長時間にわたる自宅での執筆を許してくれた妻に感謝する。

2021 年 2 月 25 日

蜷川 忠三

目　　次

1. IoT 通信性能解析

1.1 IoT の概要 …… 1
1.1.1 IoT とは …… 1
1.1.2 IoT 応用サービス …… 4
1.2 IoT 通信の特徴 …… 7
1.2.1 IoT 通信アーキテクチャ …… 7
1.2.2 IoT 通信プロトコル …… 12
1.3 IoT の通信性能解析 …… 14
1.3.1 通信性能解析は必要か …… 14
1.3.2 通信トラフィック過渡状態 …… 15
1.4 通信性能解析法 …… 17
1.4.1 通信性能シミュレーション …… 17
1.4.2 性能理論解析 …… 20
引用・参考文献 …… 23

2. エッジ側制御ネットワーク通信性能解析

2.1 IoT におけるエッジ側制御ネットワーク通信 …… 26
2.1.1 エッジ側制御ネットワーク …… 26
2.1.2 CSMA メディアアクセス方式 …… 28
2.2 組込み制御ネットワークの定常性能理論解析 …… 29
2.2.1 組込みシステムのシリアルデータ伝送 …… 29
2.2.2 データ伝送性能解析モデル …… 32
2.2.3 データ伝送スループットの解析式 …… 34
2.2.4 データ伝送遅延の解析式 …… 37
2.2.5 データ伝送遅延解析式の検証 …… 39

2.3 組込み制御ネットワークの過渡性能シミュレーション……41
2.3.1 制御ネットワーク過渡的通信性能シミュレーション……41
2.3.2 過渡的バースト通信負荷のモデル化……42
2.3.3 バースト通信負荷シミュレーション……48
2.3.4 データ伝送遅延時間の評価……56
2.4 組込み制御ネットワークの過渡性能理論解析……58
2.4.1 過渡性能理論解析の負荷モデル……58
2.4.2 過渡性能理論解析モデル……58
2.4.3 漸近近似状態方程式……61
2.4.4 漸近近似法解析例とシミュレーション検証……65
2.4.5 過渡的バースト負荷の通信性能……68
2.5 センサネットワークの性能理論解析……73
2.5.1 マルチホップ無線データ伝送方式……73
2.5.2 センサ配置分布モデル……74
2.5.3 センサ配置疎密の定量化……75
2.5.4 各センサ配置モデルの最近隣距離比較……76
2.5.5 マルチホップ無線データ伝送の理論解析式……77
2.5.6 確率分布関数によるマルチホップデータ伝送時間解析……81
2.5.7 マルチホップデータ伝送時間の統計フィッティング……82
2.6 センサネットワークの性能シミュレーション……84
2.6.1 ns ネットワークシミュレータ……84
2.6.2 マルチホップデータ伝送シミュレーション……91
2.6.3 マルチホップデータ伝送時間分布……94
引用・参考文献……99

3. クラウド側ネットワーク通信性能解析

3.1 IoT におけるクラウド側インターネット通信……101
3.1.1 インターネット通信性能評価の重要性……101
3.1.2 インターネット遠隔監視における通信遅れの実例……104
3.2 インターネット通信の TCP プロトコル……106
3.2.1 TCP プロトコルの基礎……106
3.2.2 TCP プロトコルの動作……107

3.2.3　TCP プロトコルのコネクション……109
3.2.4　TCP プロトコルのウィンドウとフロー制御……111
3.2.5　TCP プロトコルの輻輳アルゴリズム……113
3.3　TCP データ伝送の理論解析モデル……114
3.3.1　TCP/IP 通信プロトコルの確率過程モデル……114
3.3.2　TCP/IP トリプル ACK パケットロス検出モデル……117
3.3.3　TCP/IP のタイムアウトパケットロス検出モデル……122
3.3.4　TCP/IP 輻輳ウィンドウ制限のモデル……128
3.3.5　TCP/IP データ伝送フローのスループット……130
3.4　TCP データ伝送性能の理論解析……132
3.4.1　TCP データ伝送性能の理論解析式……132
3.4.2　TCP データ伝送性能理論解析式の実測検証……135
引用・参考文献……139

4. エッジゲートウェイ通信性能解析

4.1　エッジゲートウェイの特徴と制約……141
4.1.1　エッジゲートウェイの待ち行列モデル……141
4.1.2　想定するエッジ側制御ネットワーク……143
4.1.3　エッジゲートウェイ送信性能解析の必要性……146
4.2　エッジゲートウェイのクラウド側性能解析……148
4.2.1　ゲートウェイ受信待ち行列モデル……148
4.2.2　ゲートウェイ受信待ち行列の過渡解析……151
4.2.3　ゲートウェイ受信バッファの過渡特性計算……155
4.2.4　ゲートウェイ受信バッファ特性計算の検証……160
4.2.5　ゲートウェイ過渡解析モデルの効果……164
4.3　エッジゲートウェイのエッジ側性能解析……167
4.3.1　エッジ側制御ネットワークの制約……167
4.3.2　エッジ側送信バッファの優先づけ……168
4.3.3　エッジ側送信性能の理論解析モデル……169
4.3.4　エッジ側送信優先バッファの遅延計算……173
引用・参考文献……176

5. IoT 通信性能解析の応用例

5.1 設備制御システムのエッジ通信解析……178
5.1.1 ビル設備監視制御システム……178
5.1.2 BACnet 設備制御エッジ通信……179
5.1.3 BACnet/IP エッジ通信プロトコル……180
5.1.4 BACnet/IP 通信トラフィックシミュレーションモデル……183
5.1.5 BACnet/IP 通信トラフィックシミュレーション実行例……191
5.2 インターネット遠隔監視のクラウド通信性能解析……195
5.2.1 インターネット遠隔電力監視制御……195
5.2.2 IEEE 1888 通信プロトコルとは……196
5.2.3 IEEE 1888 電力監視制御 Web サービス……197
5.2.4 IEEE 1888 テストベンチ通信性能実験……200
5.2.5 IEEE 1888 通信性能シミュレーション……204
5.3 スマートグリッドのクラウド Web サービス性能解析……208
5.3.1 スマートグリッド電力需要制御……208
5.3.2 FastADR Web サービス通信の通信性能要求……210
5.3.3 FastADR クラウドサーバの待ち行列モデル……212
5.3.4 FastADR クラウドサーバの過渡通信理論解析……214
5.3.5 FastADR クラウドサーバの過渡通信性能シミュレーション……216
引用・参考文献……223

付 録……226
付録 A *M*/*M*/1 待ち行列過渡解の逐次導出……226
付録 B ns–2 シミュレーションスクリプトコード……235

あ と が き……242
索 引……244

1. IoT 通信性能解析

1.1 IoT の概要

1.1.1 IoT とは

〔1〕 IoT の定義

ウィキペディア（Wikipedia）によると，IoT（Internet of Things）とは，「様々な物がインターネットに接続され，情報交換することにより相互に制御する仕組み」と定義されている[1)†]。また，総務省情報通信白書によると，IoT デバイスとは，「固有の IP アドレスを持ちインターネットに接続が可能な機器及びセンサーネットワークの末端として使われる端末等を指す」と定義されている[2)]。

これだけでは定義が形式的すぎてイメージが湧いてこない。もう少し具体的な定義を探してみると，Amazon の AWS サイトでは，IoT を「従来インターネットに接続されていなかった様々なモノ（センサー機器，駆動装置（アクチュエータ），住宅・建物，車，家電製品，電子機器など）が，ネットワークを通じてサーバやクラウドサービスに接続され，相互に情報交換をする仕組み」と定義している[3)]。これなら，多くのソフトウェア技術者にとっても，IoT とはどういうことを意味するのかイメージが湧くであろう。

さらに，専門的に IoT を定義している文献としては，米国電気電子学会

† 肩付きの数字は，各章末の引用・参考文献を表す。

（IEEE：Institute of Electrical and Electronic Engineers）から IoT を定義に専念した資料“Towards a Definition of the Internet of Things（IoT）”が 2015 年に発行されている[4]。この文書は 100 ページ近くにわたり，通信工学，ネットワーク工学専門家も納得するように多面的な定義が試みられている。このように，IoT と一言でいっても，多様な視点に基づき多様な意味づけが行われているかがわかる。

歴史的に見ると，一般的に IoT という用語が使われ始めたのは，1999 年の Kevin Ashton 氏による RFID 電子タグに関する記事であるといわれている[5]。しかし，実はそれよりかなり前から，むしろ現代の IoT の概念に近い枠組みが提唱されている。それは，1980 年代に始まったわが国の TRON プロジェクトにおける，スマートデバイスがたがいに通信接続されるユビキタスコンピューティングというコンセプトである[6]。

このような IoT という多種多様な定義に振り回されることなく，IoT に内在する本質的な特徴を理解することが必要である。IoT に内在する本質的な特徴は単なる，「あらゆるモノのインターネット通信接続」という通信接続という面だけではない。インターネットが成り立つ基本理念，すなわち自律分散，ベストエフォート，…といった面であろう。

インターネットは，元来，人間が介在する情報通信システムであった。しかし，インターネットにより「モノ」が直接的に通信接続されるような system of systems となっていく中で，インターネットの基本理念がどう活かされているのかが IoT 定義の本質ではないかと思われる。

〔2〕 IoT の 本 質

IoT が急激に注目されたのは 2016 年ごろであり，その年に IoT に関する入門書がたくさん出版されている。その後，2020 年現在，この種の IoT 紹介本の新刊出版は一段落している。それらの本には，IoT の本質があまり述べられていない。

また，同じ 2016 年には，それとは逆に，IoT あるいはインターネットに横たわる基本理念について論じたコアな書籍も出版されている。東京大学の坂村健

教授の「IoT とは何か」というそのものずばりの題名の著書が出版されている[7]。また，東京大学の江崎浩教授の「インターネット・バイ・デザイン」という，インターネット全体に内在する基本理念を丁寧に論ずる本が世に出されている[8]。

IoT の本質的思想は，本書のテーマである通信性能解析を考えるうえでも重要である。本質的な思想を間違えると，どんな応用事例にどんな通信規格を組み合わせても，本質的理解を踏まえた通信解析とはならない。

ところで，IoT とよく似た概念に M2M（Machine to Machine）というものがある[9]。M2M という用語自身は machine（コンピュータ）から machine（コンピュータ）にデータを授受する際，人間が介在しないことだけを意味する。ここでいうコンピュータとは，必ずしもパソコンのような汎用電子計算機を意味しない。センサや制御装置も“machine”に含まれる。むしろ，それらが中心的な役割を果たす状況を意味することが多いともいえよう。

この点では，IoT によく似た概念といえる。しかし，M2M という概念の場合，必ずしもコンピュータどうしの通信にインターネットが介在している必要はない。一例として，同一の部屋の中にあるセンサや制御装置が直接通信接続される方式なら M2M であるといえよう。

一方，IoT では，M2M に比べて格段に進化した概念をもっている。まず，IoT では，インターネット上にあって通信接続されるコンピュータ群が「クラウド」という概念を形成している。つぎに，クラウドと接続されるセンサや制御装置といった「モノ」はインターネットの周辺に位置づけられているという「エッジ」という概念を形成している。

つまり，IoT の本質は，センサや制御装置などあらゆる「モノ」が，インターネットのエッジに配置されてクラウドとコラボレーションすることで，高度で有益なサービスを生み出す仕組みと考えるとよい。

さらには，「モノ」の中には，スマートメータなど電力計といった定番のセンサのみならず，住宅の鍵や体温計など，将来はなにが含まれるか想像すらできない。そこで，IoT のさらなる発展形として，「モノ」でなくて「すべて」と

いう概念に拡大させてIoE（Internet of Everything）という用語まで登場している。

本書は，このような適用範囲拡大やサービス創造といった面を論ずるあまたの書物とは一線を画する。エッジに接続された「モノ」がインターネットを介して「クラウド」と通信する際のデータ伝送における時間的な振る舞いを調べること，すなわち通信性能解析に集中する。

特に，IoTがインターネットという巨大かつ急激に進歩していくサイバー空間のSystem of Systemsと具体的な「モノ」を接続する個々のセンサネットワークや制御ネットワークという，二つの両極端ともいえる通信システムを異種接合するというデータ伝送面から見た技術要件がある。

もちろん，IoTを構築する技術要件は広範であり，その人の立場により，通信性能よりもっと重要なファクタはたくさんありうる。また，時代により重要なファクタは変化あるいは追加されていくであろう。

1.1.2　IoT応用サービス

本項では，本書が想定するIoTの基本概念を読者と共有するために，IoTの応用範囲を1例示して俯瞰する。また，本書の主題である通信性能，筆者が通信性能を議論するうえで特に意義あるシステムはどんなものであるかを示す。

〔1〕 IoT応用サービスの多様さ

総務省，令和2年版情報通信白書によると，世界のIoTデバイス総数の推定は，**図1.1**に示すように，約280億台と推定されている[2)]。ここでいう，IoTデバイスとは，固有のIPアドレスをもちインターネットに接続が可能な機器およびセンサネットワークの末端として使われる機器などを指す。

また，この調査における各カテゴリーは，以下のように，「通信」は固定通信インフラ・ネットワーク機器，2G，3G，4G各種バンドのセルラー通信，およびWi-Fi，WiMAXなどの無線通信インフラおよび端末を意味する。

それらが，「コンシューマ」，「コンピュータ」，「産業用途」，「医療」，「自動車・宇宙航空」という応用サービス分野に広がっているとしている。

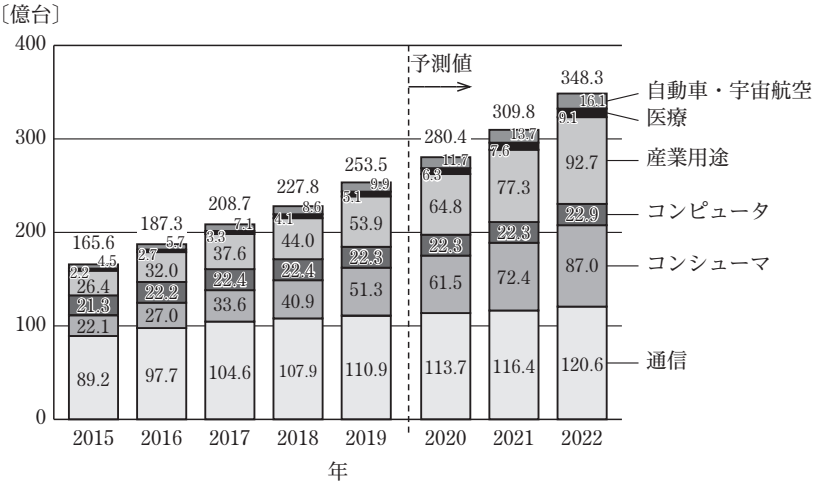

図 1.1 世界の IoT デバイス数の推移および予測（総務省，令和 2 年版情報通信白書，p. 76，図表 1–4–1–28 より作成）

「コンシューマ」は家電（白物・デジタル），プリンタなどのパソコン周辺機器，ポータブルオーディオ，スポーツ・フィットネス，その他である。

「コンピュータ」はノートパソコン，デスクトップパソコン，サーバ，ワークステーション，メインフレーム・スパコンなどコンピューティング機器が挙げられる。

「産業用途」では各種産業オートメーション（factory automation：FA，building automation：BA など），空調・照明など設備監視制御，スマートグリッド関連サービス，セキュリティ監視，検査・計測機器など工業・産業用途の機器応用などがある。

「医療」では画像診断装置ほか医療向け機器，コンシューマヘルスケア機器，「自動車・宇宙航空」は自動車の制御系および情報系において，インターネットと接続が可能な機器，および宇宙・航空向け機器（例：航空機コックピット向け電装・計装機器，旅客システム用機器，軍用監視システムなど）と分類されている[2)]。

あ と が き

多くの工業分野には普遍的な設計理論が存在する。建築構造の計画設計における構造基本梁の応力とたわみを計算する材料力学の基本的公式がある。電力機器の計画設計における電圧/電流/インピーダンスの計算をする交流回路理論の基本公式がある。

では，IoT のような通信システムではどうだろう。現状，見聞きする通信システム計画設計の世界では，荒っぽくいうと，計画段階では過渡的な通信トラフィック定量解析がなされず，問題顕在化してからサーバなどを継ぎ足すというスタイルが少なくないのではないか。

むろん，古くから，通信トラフィック理論において基本としては，確率過程，待ち行列，マルコフ過程，ペトリネットなど理論解析法が論じられてきた。また，近年，コンピュータシミュレーションによる確率的挙動の数値解析法も生まれてきた。

しかし，建築構造設計や電気機器回路設計という工学分野に比べて，「とにかく通信接続させて状況を見る」という文化が根強いように思われる。これは，通信とは本質的に確率的な事象を扱っていること，また，多くの通信規格では「再送」，つまり送ってだめなら送り直すという文化が本質的に影響しているからではないだろうか。

これが，ビル建設における計画設計だとどういうことに相当するのであろうか。極端だがわかりやすい比喩として，事務所ビルを建築後，テナントが埋まってきたらビルの屋上にフロアを増設するというような考えといえなくはない。

それは重々承知でも，「どうせ通信トラフィックを緻密に事前解析しても…」，「平常時では余裕があり解析は不要だが，集中時の過渡状態では解析モデ

ルがない…」などという悩みがある。

本書は，その悩みに少しでも突破口を開こうとするものである。確かに，現実の通信ネットワーク通信は，膨大な確率事象がからみあって起こっているきわめて複雑で不確定な事変事象であり，数理的取扱いのための単純化したモデルでは，机上計算あるいはシミュレーションでも予測と現実の性能指標数値が合うことは限られた条件だけであろう。

IoT システムを計画する場合，シミュレーションや理論解析を「役に立たない」と切り捨てるのではなく，結果の数値は必要な精度で合わないとしても，確率過程の振る舞いの大局的な理解を深めることができるはずである。

例えば，一時的にデータ伝送要求が集中した瞬間の過渡的混雑のメカニズムを理論モデル化する過程で，その過渡現象を決定づけるパラメータを定量的に検討できる。それら通信性能解析で得られる情報は，後日運用時の対処的設計変更時にも有用な知見が得られるはずである。

筆者は，メーカ技術者として永年にわたり設備制御通信の開発に携わり，その後大学教員に転身して通信性能を研究してきた。その中で，ともすれば早急な解決を迫られる開発現場の状況も知りつつ，本質的な通信特性の把握や過渡現象の予測においては通信性能解析の重要性を強く認識してきた。本書は，筆者が 30 年以上にわたる通信性能解析に没頭して蓄積してきた実務経験をまとめたものである。

多くの通信システム設計者が，実際の IoT システム開発や運用において，本書で示した通信性能解析手法を使用してみて，その有用性を評価していただければ筆者の望外の喜びである。

索　　引

【あ】

アクセスポイント　73
アグリゲータ　212
アドホックルーティング
　プロトコル　90
アドレスバインディング　144

【い】

一様乱数　44

【う】

ウィンドウ　111
ウィンドウサイズ　109, 111

【え】

エッジゲートウェイ　10, 141
エネルギー管理システム　196
エミュレーション　18, 216

【か】

カイ 2 乗適合度　165
確率過程状態方程式　61
確率過程モデル　20
確率母関数　152
隠れマルコフ点　23
ガンマ分布　78, 81

【き】

キャリアセンス状態　22
キュードロップ　47, 50

【く】

空間統計解析　75
組込み制御ネットワーク　10
組込み用マイコン　26
クラウド　4

【け】

形状パラメータ　81

【こ】

高速デマンドレスポンス　208
高速リカバリ　114
コネクションレス型　92
コマンドスクリプト　85
コンテンションウィンドウ
　79
コンテンションステージ　79

【さ】

最近隣距離法　75
最大セグメントサイズ　111
サイバー空間　7
サービス率　46

【し】

シーケンス番号
　108, 109, 111
システム状態変数　59
システム内送信要求数　70
シフトレジスタ　30
時変統計値　154
尺度パラメータ　81
ジャミング　37
終端インピーダンス　144
出生死滅過程　45
出生死滅状態方程式　22, 155
状態遷移図　171
状態方程式　45
衝突検知状態　22
衝突バックオフタイマ　37
衝突発生確率　59
シリアル通信 I/O　29

【す】

スケーラビリティ理論解析
　220
ストリーミングデータ伝送
　102
スマートグリッド　197
スマートメータ　12, 73
スリーウェイハンド
　シェイク　102, 110
スループット　28, 36, 131
スロースタート　89, 113

【せ】

遷移確率行列　35
漸近近似解法　23
漸近近似方程式　27, 62
センサネットワーク　10
全二重　86

【そ】

送信開始待ち　59
送信禁止時間　32
送信禁止状態　22
送信バッファ　48
送信予約テーブル　147

【た】

多元接続 26

【ち】

チャネル時間 64
チャネルベース 26

【つ】

ツイストペアケーブル 143
通信アーキテクチャモデル 6
通信トラフィック 20
通信負荷 34

【て】

定常スループット 22
定常伝送遅延 22
データ伝送要求発生率 78
データリンク層 57
テーブル駆動型 90
電気設備学会仕様書 179
伝送遅延期待値 64

【と】

東京大学グリーン ICT プロジェクト 13
到着率 46
トリアージランク 168
トリプル ACK 116

【は】

パケット往復時間 115
パケットスペース時間 49
パケット到着率 44
パケットベース 26
パケットロス 42, 53
パケットロス率 115, 133
バースト区間 44
バースト送信成功率 42
バースト伝送遅延 64
バーストトラフィック 17
バースト負荷 43
バースト負荷強度 72
バースト平均遅延 42
バックオフ 27
バックグラウンドトラフィック 145
パリティエラー 30
半減期 157

【ひ】

ビット検知方式 28
非定常ポアソン過程 43, 142
標本分散 83
標本平均 83
ビル管理システム 143, 178

【ふ】

フィジカル空間 7
輻　輳 113
輻輳ウィンドウ 89, 113
輻輳ウィンドウサイズ 128
輻輳回避 115
輻輳制御 89
プッシュアウト 147
フロー制御 108
分散係数 80

【へ】

平均最近隣距離 76
平均サービス時間 82
平均送信成功率 27
平均遅延時間 53
平均データ伝送時間 78
平均伝送遅延 27
平均パケット処理完了率 79
米国電気電子学会 1
ベッセル関数 153
変動係数 80

【ほ】

ポアソン分布 19, 34, 55
ボトルネック 189
ボトルネックリンク 189

【ま】

マスタースレーブ型 144
マスタースレーブ方式 27
待ち行列 20
マルコフ状態遷移 21
マルチアクセス 12
マルチホップ 12
マルチホップ無線通信 73

【む】

無線 LAN 技術 11
無線アクセスポイント 12

【も】

モーメント法 82
モンテカルロシミュレーション 19, 148

【ゆ】

有効伝送時間 64
優先送信バッファ 169
優先度キューイング 147
有線バス 12
ユビキタスコンピューティング 2

【ら】

ラウンド 115
ランダムアクセス型ネットワーク 6
ランダムパケット損失機能 204

【わ】

ワンチップマイコン 29

【A】

ACK 108
actual model 75
ADR 197
ANSI/ASHRAE Standard 135 179
Apache 135
APDU 185
ARP 90

【B】

BA 13
BACnet 178
BACnet/IP 180
BACnet/WS 199
BACnet オブジェクト 179
Basic 方式 78
B–BC 180
Bellman–Ford アルゴリズム 90
binary exponential backoff 183
BMS 143
busy 区間 28, 33
BVLL 180

【C】

C++ 階層 85
CBR 184
client–server 13, 102
CSMA 12
CSMA/CD 26
Cygwin 85

【D】

droptail 86, 204
droptail queue 190
DSDV 90
Dummynet 217

【E】

Ethernet 28
ETSI 8

【F】

fair queueing 58
FastADR 208
FETCH 196
FIAP 198
FIFO 21, 50, 53
FIN フラグ 110

【G】

Gilbert–Elliot ロス 217
grid model 74

【H】

HIM 180, 183

【I】

i.i.d 119
ICONT 181
idle 区間 33
IEEE 2
IEEE 1888 13, 196
IEEE 802.11 規格 77
IEIEJ–P–0003：2000 179
IFS 32
inter frame gap 183
IoT 1
ISO 16484–5 179

【J】

jamming 183

【L】

LIFO 21
Linux/BSD/OS X 85
Little の式 37
LonTalk 180

【M】

$M/G/1$ 待ち行列 78
$M/M/1$ 22
$M/M/1/K$ 待ち行列 80
$M/M/1$ 待ち行列の許容性 166
M2M 8
MAC 26
MSS 111, 133
MTU 111

【N】

nam 86
NewReno 89, 114
ns 84
ns–2 20

【O】

OpenADR 13, 209
OTcl 85
OTcl 階層 85

【P】

PING 往復時間 136
priority inversion 57
proactive 型 92

【Q】

QoS 58

【R】

random model 75
rate equation 22
reactive 型 92
RED 58

Reno 114
RFID 電子ダグ 2
RPC 197
RS–485 31
RTS/CTS 78

【S】

SEQ 111
SOAP 13, 101
SYN/FIN 接続 89
system of systems 2

【T】

TCP 最大受信ウィンドウサイズ 133
TCP 送信レート 130
TCP タイムアウト値 133
TD ロス 116
TO ロス 116
TRON プロジェクト 2

【U】

UART 26, 29
UDP 86
UDP/IP 180

【V】

VEN 210
VINT プロジェクト 84
VPN 195
VTN 210

【W】

Web サービス 198
WRITE 196

【X】

XML 13, 101, 199
XML スキーマ定義言語 210
XSD 210

【数字】

1–persistent 183
1 次モーメント 82
2 次モーメント 82

―― 著 者 略 歴 ――

1976 年　名古屋大学工学部電気学科卒業
1978 年　名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了（電気工学専攻）
1978 年　三菱重工業株式会社入社
1988 年　米国ワシントン大学大学院修了（コンピュータサイエンス専攻）
2007 年　博士（工学）（名古屋大学）
2012 年　岐阜大学教授
2018 年　岐阜大学特任教授
　　現在に至る

IoT 通信性能解析

IoT Communication Performance Analysis

© Chuzo Ninagawa 2021

2021 年 4 月 30 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　者　蜷川忠三（にながわ ちゅうぞう）
発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
　　代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　美研プリンティング株式会社
製 本 所　有限会社　愛 千 製 本 所

112–0011　東京都文京区千石 4–46–10
発 行 所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140–8–14844・電話（03）3941–3131（代）
ホームページ https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978–4–339–00944–6　C3055　Printed in Japan　（大井）

JCOPY　<出版者著作権管理機構 委託出版物>
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。