

コネクティッドカーとエッジコンピューティングによる グリーンモビリティへの挑戦

2023/11/10

阿部 博

トヨタ自動車株式会社

情報システム本部 情報通信企画室

InfoTech-IS E2Eコンピューティンググループ グループ長

はじめに

■ 氏名

- 阿部 博
- 博士（情報科学）

■ 所属

- トヨタ自動車株式会社 情報システム本部 情報通信企画部 InfoTech-IS
- E2Eコンピューティンググループグループ長
- 元IIJ技術研究所の研究員、元IIJのエンジニア

■ 研究領域

- 大規模ネットワークにおけるモニタリング機構
- エッジコンピューティングを使った分散処理
- データ処理効率化

トヨタで何をやっているの？

TOYOTA

- E2Eコンピューティンググループ
 - 車（車載器）からオンプレ・クラウドまでのすべての領域をEnd to Endでカバー
 - Edge/キャリア網/衛星/CPE/クラウド/オンプレ機材/ネットワークすべてが研究領域

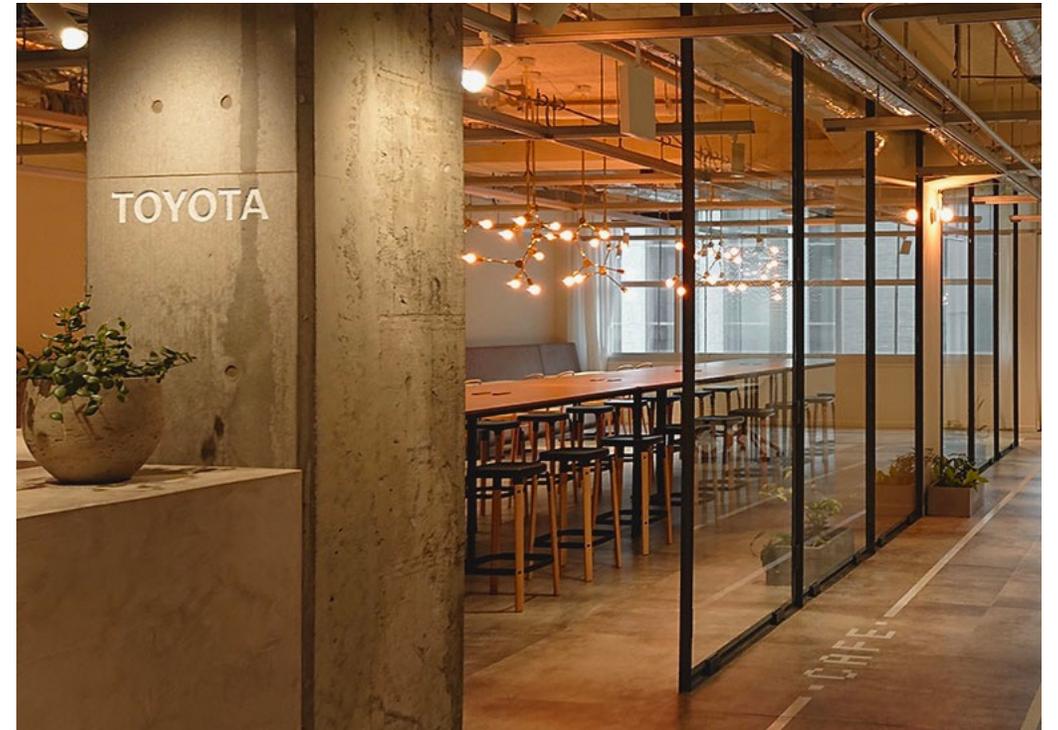
トヨタ大手町について

いま、東京・大手町は、日本のICTの重要拠点であり、人、情報の結節点でもあります。

ここ大手町をハブとして、新しい未来を志す仲間とオープンに連携し、

それぞれの強みを活かしながら、スピーディーに挑戦を続け、

「移動」に関わるあらゆるサービスを提供していく「モビリティカンパニー」への変革を目指します。

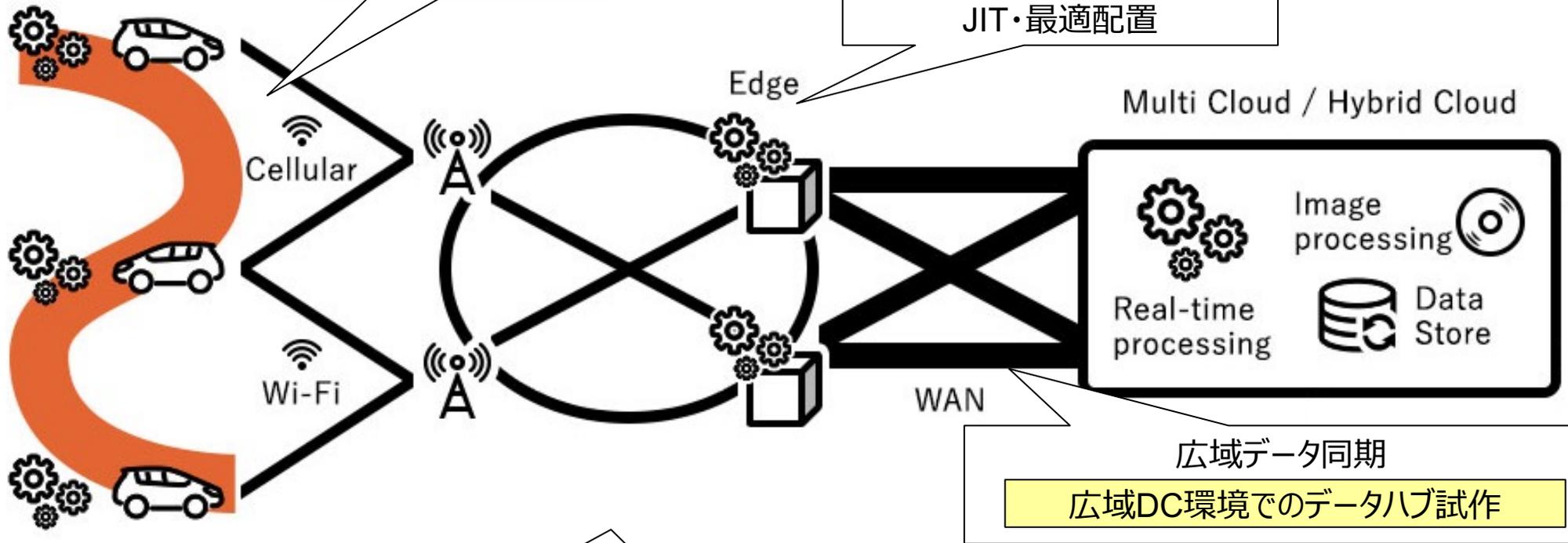


①複数無線回線併用

コグニティブ通信
複数回線併用

②JITエッジオフローディング

ロードバランシング
リクエストルーティング
JIT・最適配置



③④E2Eモニタリング・セキュリティ・レジリエンスに関する原理検証

E2Eモニタリング・セキュリティ・MLOps

遅延計測・広域分散監視 E2E通信向けハニーポット

パッシブ方式のE2E通信計測

⑤分散協調型カーボンニュートラルDCの試作検証

「切れない通信」に向けた研究開発

目標

- 課題：多様な通信要件や変化する無線環境に効果的に対応できていない
- 解決の仮説：様々な無線通信を動的に利用して、接続性を改善
 - 無線通信（セルラー・Wi-Fi・衛星など）の通信品質を常に把握
 - サービス毎の通信要件を理解し、最適な無線通信を提供

2022年度の成果

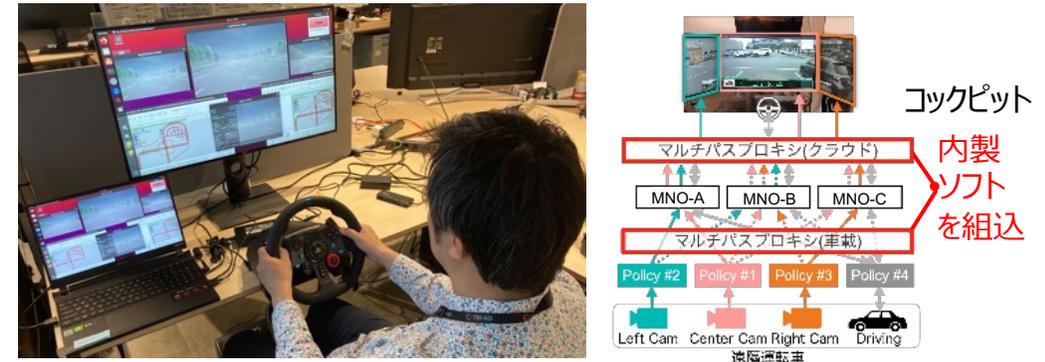
- 遠隔運転プロジェクトへ応用実装・検証
 - 東富士実験コースでの実地検証
- 通信品質(輻輳)推測、複数回線併用との連携の原理試作
 - コト品質の向上に必要な通信制御技術の目処付け
- 2023年度の予定：
 - 精度向上および予測に基づく通信制御・アプリ連携の高度化

出口イメージ

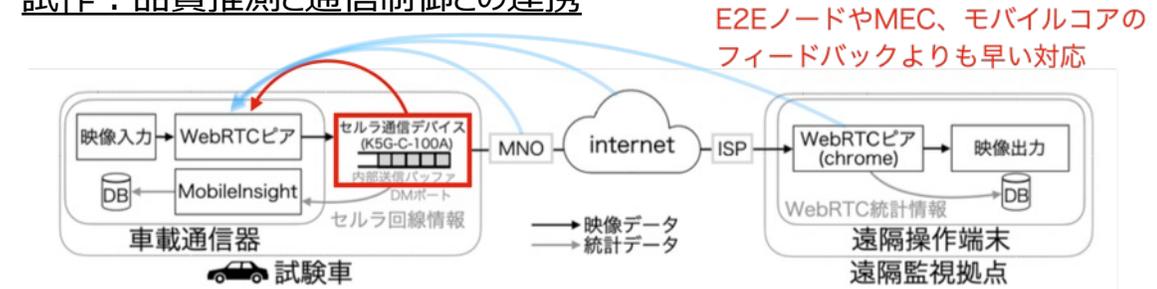
- 遠隔運転支援システムなど
 - 複数のカメラ映像の要求に応じた通信リソースの割当
- セルラー・Wi-Fi・衛星を併用して、サービスの求める通信要件を実現

参照：複数回線を冗長併用する通信技術のWebRTC映像伝送への適用と評価
<https://www.ipsj.or.jp/dp/contents/publication/51/TR0303-03.html>

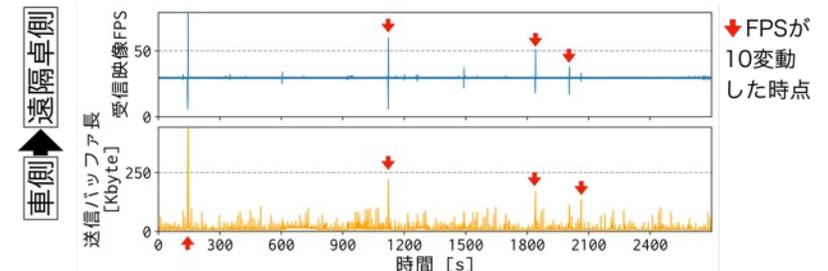
検証環境：複数キャリアSIMのマルチパス通信による遠隔運転エミュレーション



試作：品質推測と通信制御との連携



検証: アプリのコト品質の推測可能性ををフィールド検証

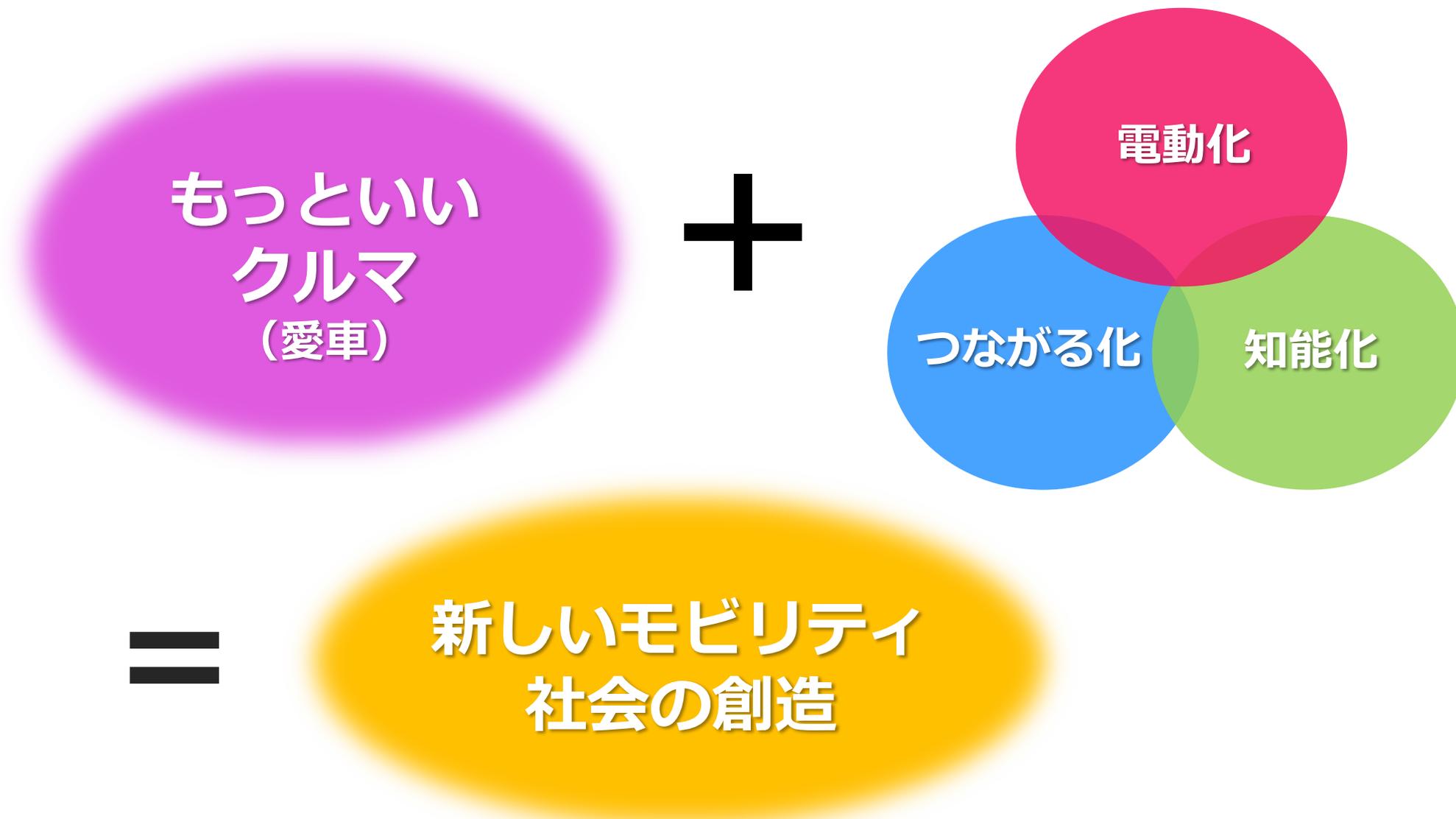


推測によるJust-in-Timeな制御で、コト品質向上とコスト抑制の両立へ 6

モビリティというキーワード

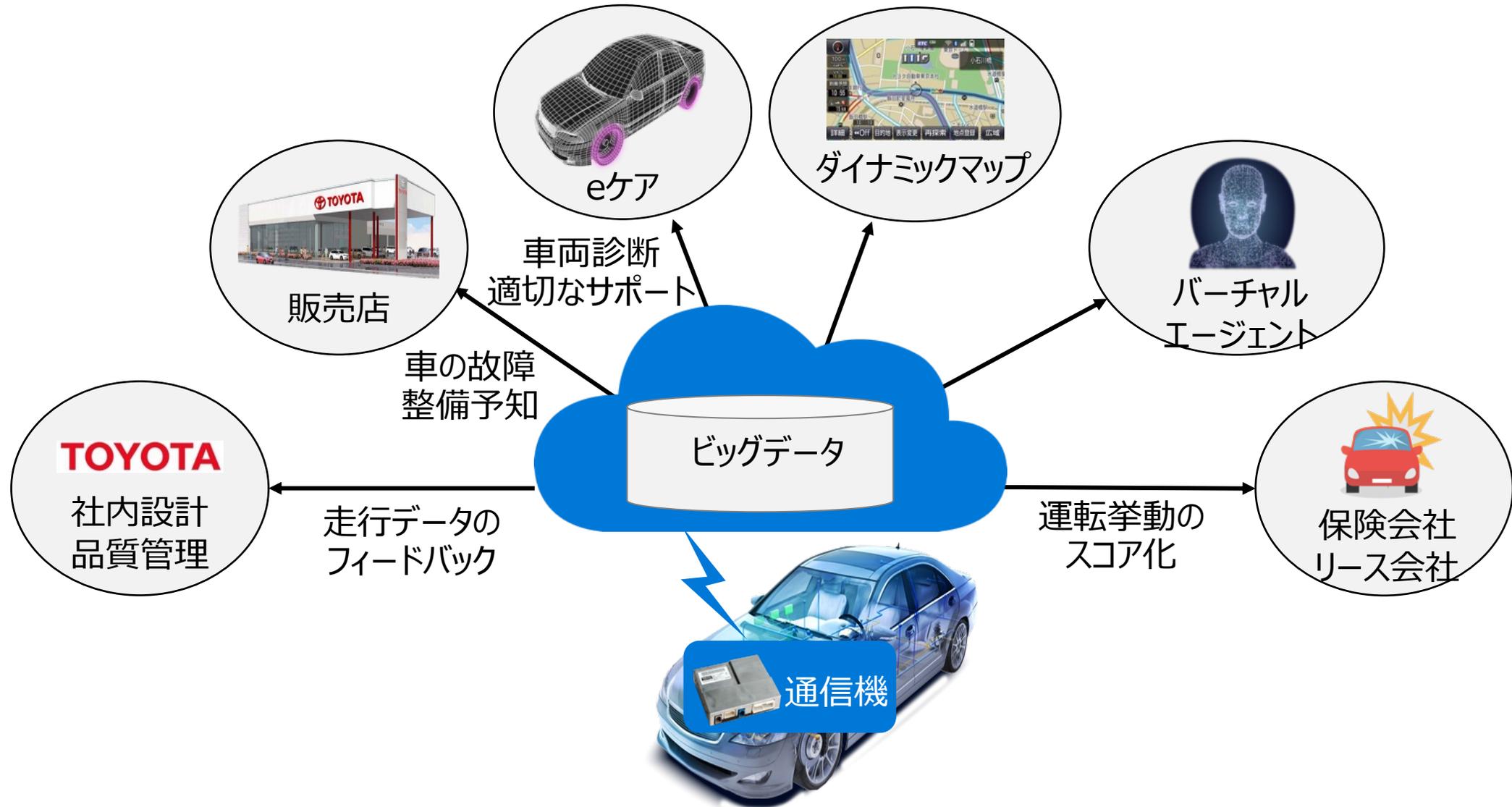
自動車がお客様や社会から求められるもの

TOYOTA



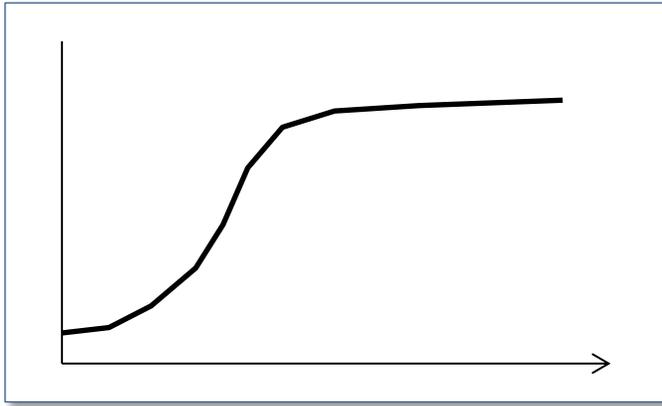
ビッグデータを活用して新たな付加価値を向上

TOYOTA



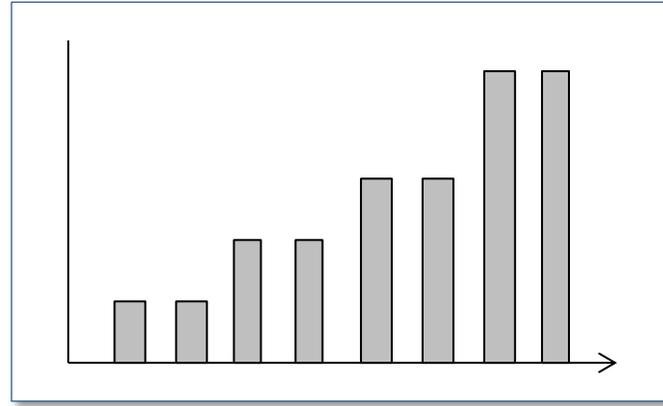
クルマから収集されるデータ量はますます膨大に

TOYOTA

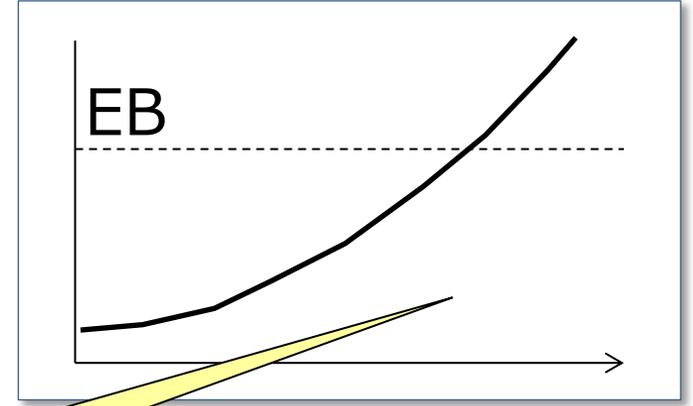


コネクティッドカー総台数の遷移

×



台あたりデータ転送量の遷移

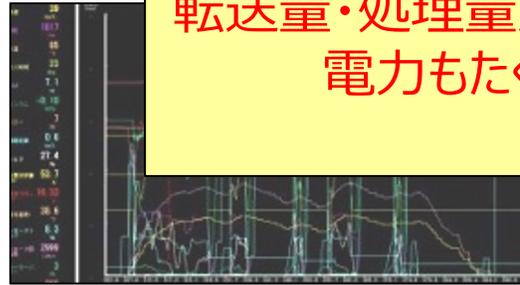


コネクティッドカー総データ転送量

転送量・処理量が増えれば当然
電力もたくさん使う



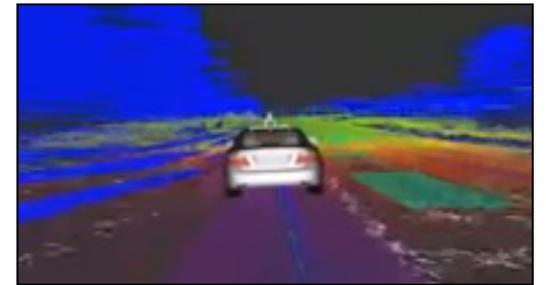
ナビプローブデータ



車両状態データ



高精度地図生成

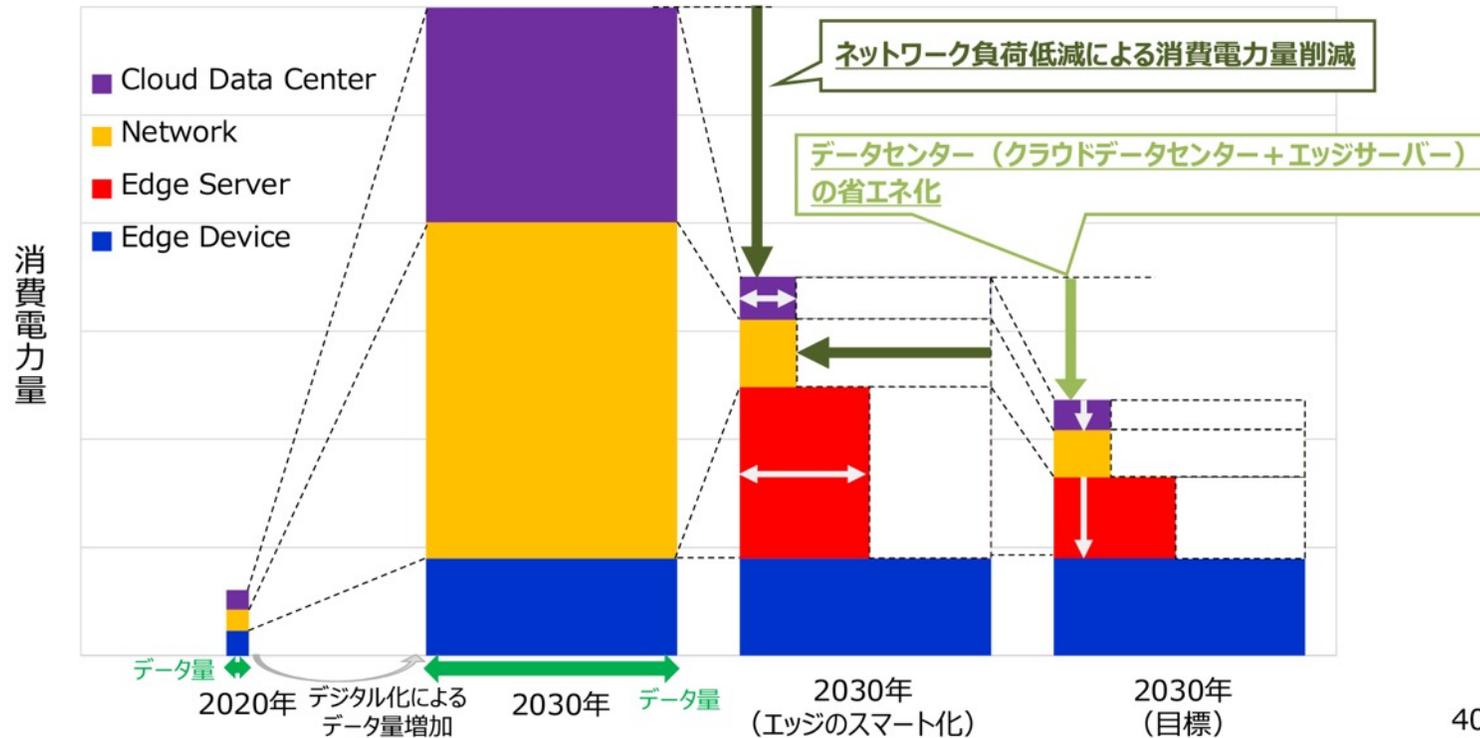


周辺センシングデータ

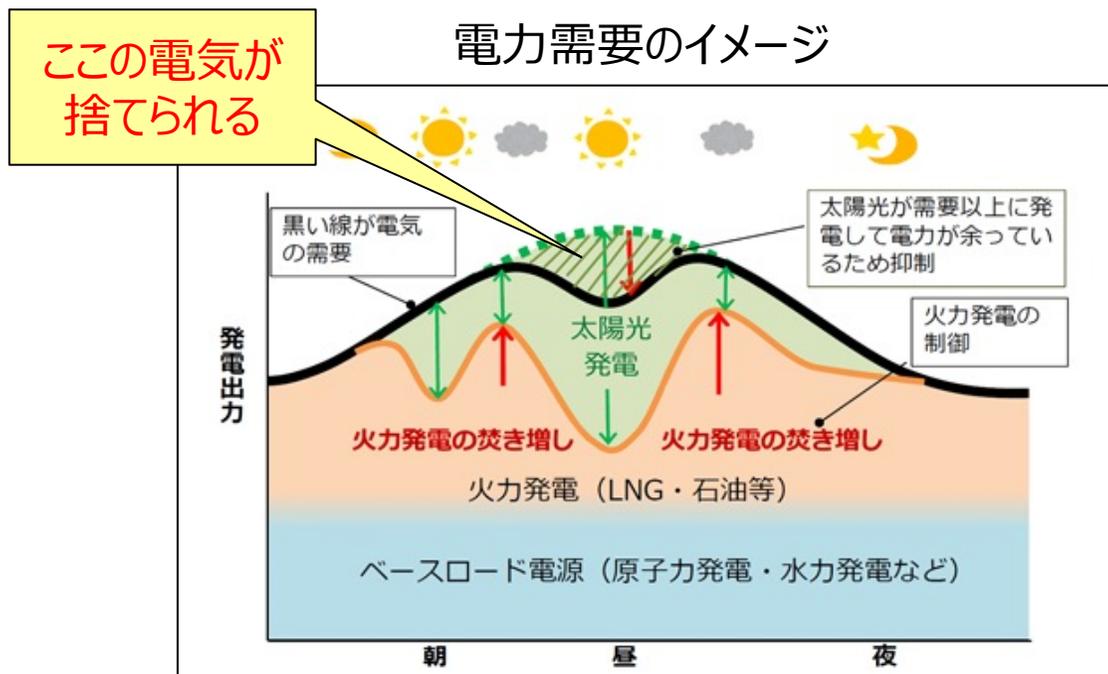
グリーンデジタルコンピューティング

(主な取組) グリーンデジタルコンピューティング (イメージ)

- データ処理量の大幅な増加に伴い、電力消費量も大幅に増加。
- 現存する技術では、2030年時点で国内において情報処理のために多くの電力が使用される見込み。
- 省エネ技術の開発により、2030年に向けたシステム全体での省エネを目指す。



■ 余っているグリーンエネルギーは捨てられます



優先給電ルールに基づく対応

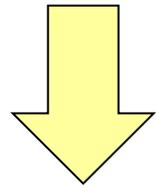
- ①火力(石油、ガス、石炭)の出力制御、揚水・蓄電池の活用
- ②他地域への送電 (連系線)
- ③バイオマスの出力制御
- ④太陽光、風力の出力制御
- ⑤長期固定電源※ (水力、原子力、地熱) の出力制御

※出力制御が技術的に困難

経産省資料 : https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/grid/08_syuturyokuseigyō.html

エッジ利用の加速とデータの地産地消 & グリーン電力 TOYOTA

- データ転送の少ないエッジ利用とデータの地産地消を加速させられるか？
- データ地産地消の観点でのエッジの利点
 - レスポンスタイムの高速化
 - データをクラウドまで運ばなくて良い（電力消費が減る）
- グリーン電力利用観点
 - グリーン電力（太陽光、風力など）の発電量と連携して処理を増減



- エッジの利用効率化の必要性
- システムと電力の分散監視の必要性

エッジコンピューティングに関する研究

■ エッジオフローディングへの期待

- 端末処理をエッジで実行するエッジオフローディングは、端末実装軽量化や処理の高速化が可能となるはず

■ 課題：最適なエッジを選択してデータ処理できるか？

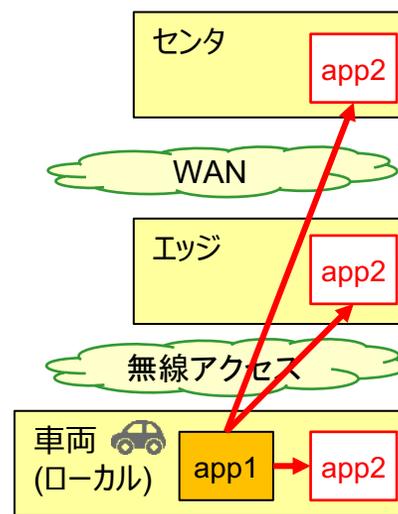
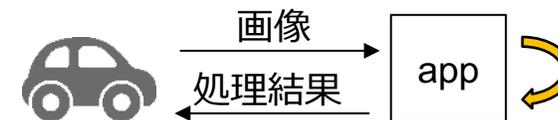
- エッジはリソースが限られるため、クラウド、エッジ、車両の計算リソースの効率的な選択・割り当てが必要

■ 解決に向けたアプローチ

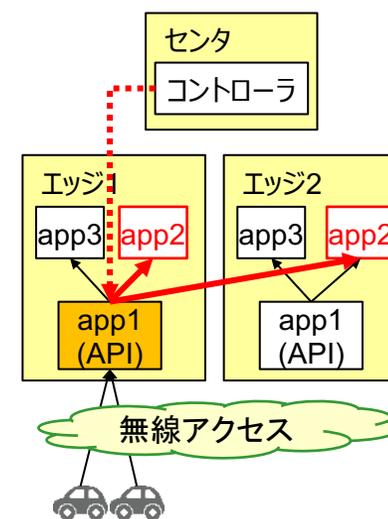
- 様々な振り分けポイントが考えられる
→3つのアプローチでエッジ選択技術を試作し、それぞれ期待動作を確認

1. 車載アプリが振り分け
2. エッジアプリが振り分け
3. ルータが振り分け

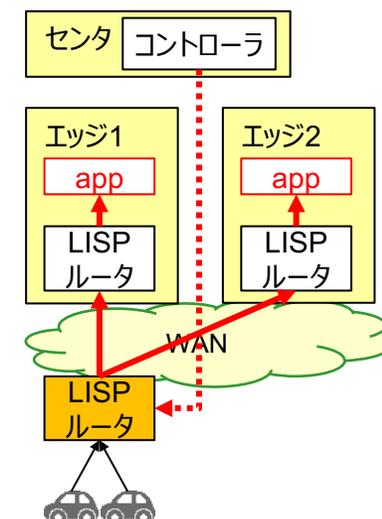
エッジオフローディングサービスの例：画像のアノテーション処理



アプローチ(1)：
車載アプリが振り分け



アプローチ(2)：
エッジアプリが振り分け



アプローチ(3)：
ルータが振り分け

通信品質に基づくエッジリソース動的配置

①車載アプリが振り分け

TOYOTA

目標

- 課題：
 - エッジリソースの過剰利用を避けるため、クラウド、エッジ、車両の計算リソースの効率的な割当が必要
- 解決策（仮説）：
 - クラウドの応答品質劣化時のみ、エッジと車両のリソースを最小限利用するコンテナリソース動的配置技術の開発

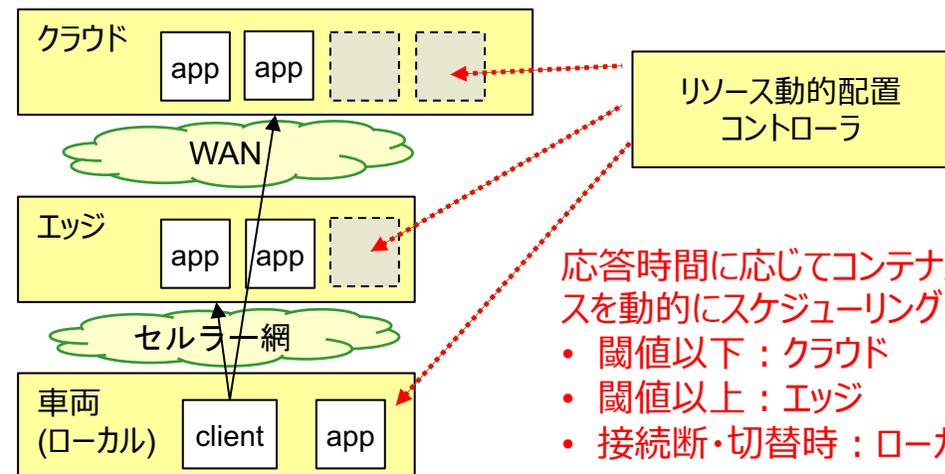
2022年度の成果

- プロトタイプを商用MEC環境へデプロイし評価
- NW側でのエッジ・クラウドのシームレスな接続先切替手法の考案
- 2022年度下期の予定：
 - 走行車両と商用MEC環境を使った実環境評価
 - NW側での接続先切替手法の実装と評価

出口イメージ

- エッジ・クラウドのリソース利用平準化、スケールアウト性確保

提案手法

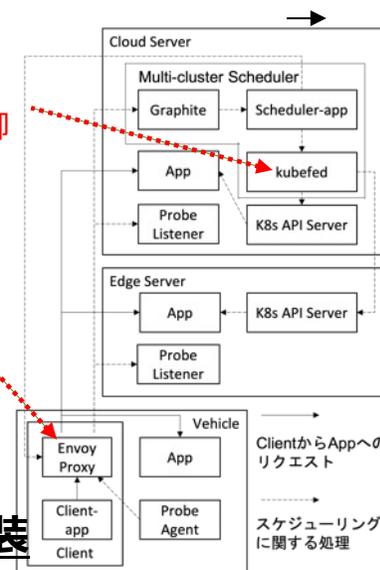


- 応答時間に応じてコンテナリソースを動的にスケジューリング
- 閾値以下：クラウド
 - 閾値以上：エッジ
 - 接続断・切替時：ローカル

KubeFedによるマルチクラスタ制御

Envoyによる応答遅延測定と接続先制御 (サービスメッシュ)

マルチクラスタ制御技術の実装



実行場所の割合



クラウド応答遅延増加時のみエッジ・車両にリソース割当を行うことで、平均応答遅延を大幅に削減しつつエッジ・車両リソースを節約

過負荷リクエストの近接エッジ負荷分散

目標

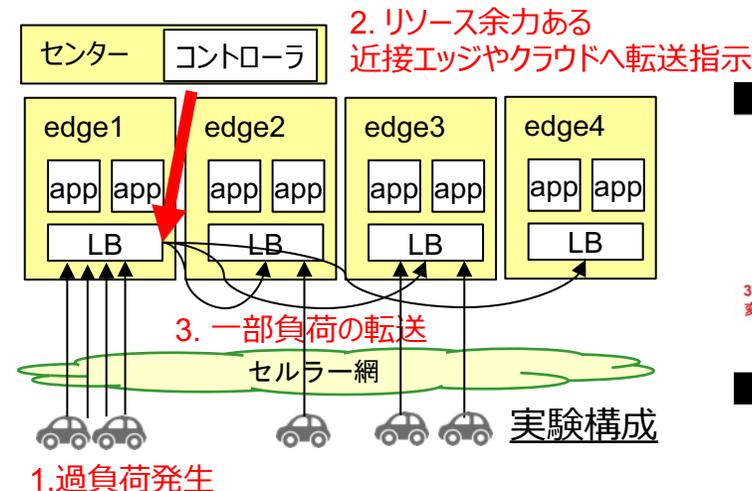
- 課題：
 - 個々のエッジはリソースが限られるため、リクエスト過負荷による性能劣化を避ける負荷分散が必要
- 解決策（仮説）：
 - 余力ある近接エッジorクラウドへ過負荷リクエストの一部を一時的に転送する負荷分散技術の開発

2022年度の成果

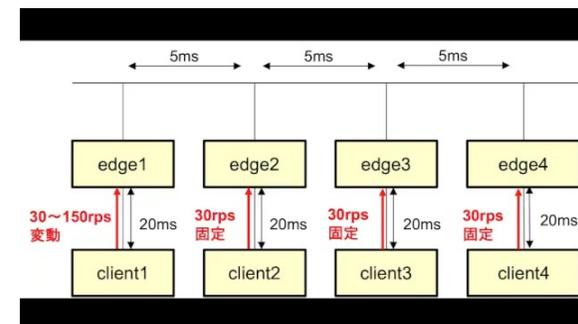
- プロトタイプを商用MEC環境へデプロイし評価
- 2023年度の予定：
 - 走行車両と商用MEC環境を使った実環境評価

出口イメージ

- エッジ・クラウドのリソース利用平準化、スケールアウト性確保

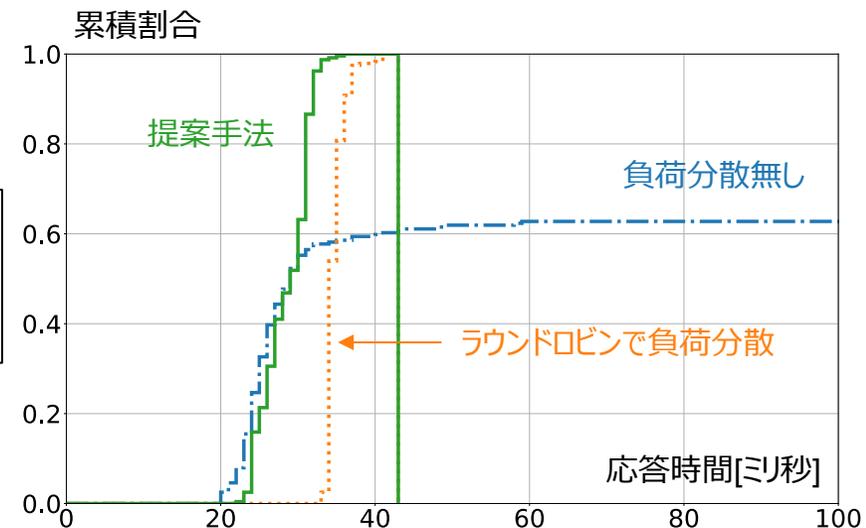


負荷分散デモ



応答時間の累積分布

過負荷による応答時間バースト発生を防ぎつつラウンドロビン負荷分散に比べて平均19%低減



LISPを用いたルーティングによるエッジ負荷分散

③ルータが振り分け

TOYOTA

目標

- 課題：
 - 端末側での接続先切替は突発的な過負荷発生時の速やかな負荷分散が困難
 - エッジでの接続先切替は通信負荷の分散が困難
- 解決策（仮説）：
 - LISPを用いたルーティング制御で近接エッジへリクエスト一部を負荷分散させる技術の開発

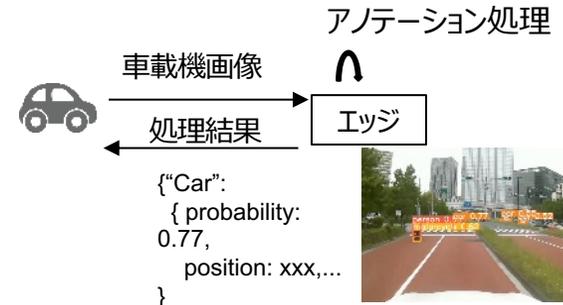
2022年度の成果

- LISPとKubernetesを用いた動的なルーティング分散手法を考案、プロトタイプ実装、ラボ環境で評価
- 2023年度の予定：
 - エッジリソース動的配置技術との統合、評価

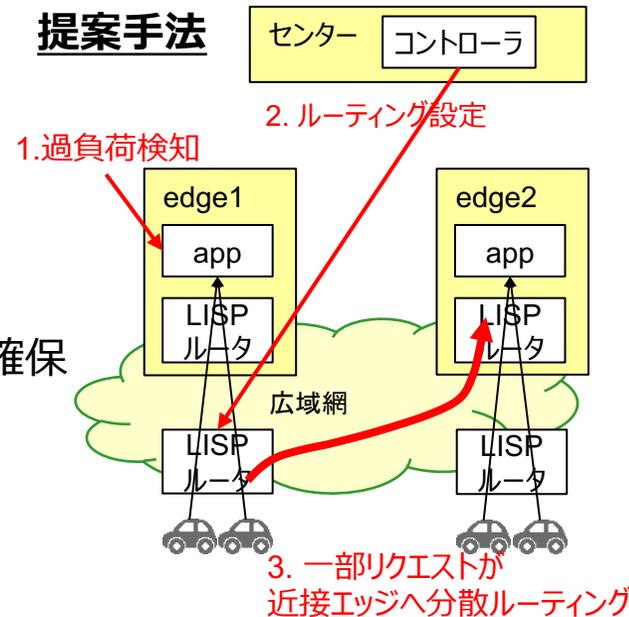
出口イメージ

- エッジ・クラウドのリソース利用平準化、スケールアウト性確保

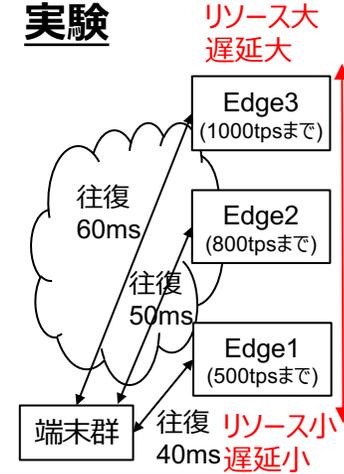
エッジオフローディングの例



提案手法



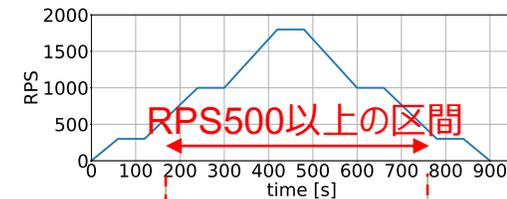
実験



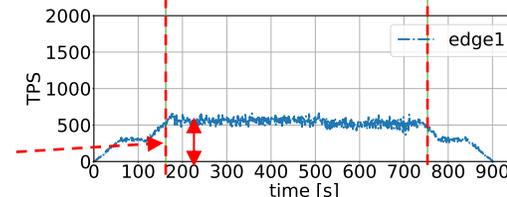
500TPSで頭打ち

各エッジのTPS合計値が端末RPSと一致

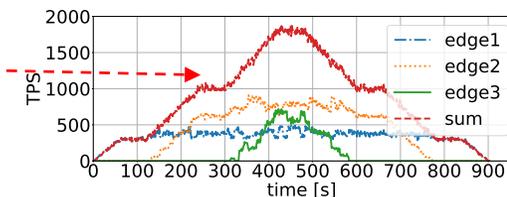
リクエスト負荷を0RPS~1800RPSで時系列変化させた時のスループット(TPS)を測定



端末からのリクエスト負荷



(a) 分散無し的手法 (Edge1固定)



(b) 提案手法

■ 研究会

- 古澤徹(トヨタ自動車株式会社), 中尾彰宏(東京大学), "LISPを用いた近接エッジクラウド協調型負荷分散手法", 電子情報通信学会. NS研究会(mar 2023)
- 古澤徹(トヨタ自動車株式会社), 阿部博(トヨタ自動車株式会社), 岡田和也(トヨタ自動車株式会社), 中章宏(東京大学), "近接エッジサーバ協調型負荷分散を実現するサービスメッシュコントローラの提案", 電子情報通信学会NS研究会, mar 2022.
- 古澤徹(トヨタ自動車株式会社), 阿部博(トヨタ自動車株式会社), 中尾彰宏, "遅延値に基づき車両向けテナ型アプリケーションのエッジオフローディングを実現するフレームワークの開発", 電子情報通信学会 NS研究会, mar 2021.

■ 国際会議

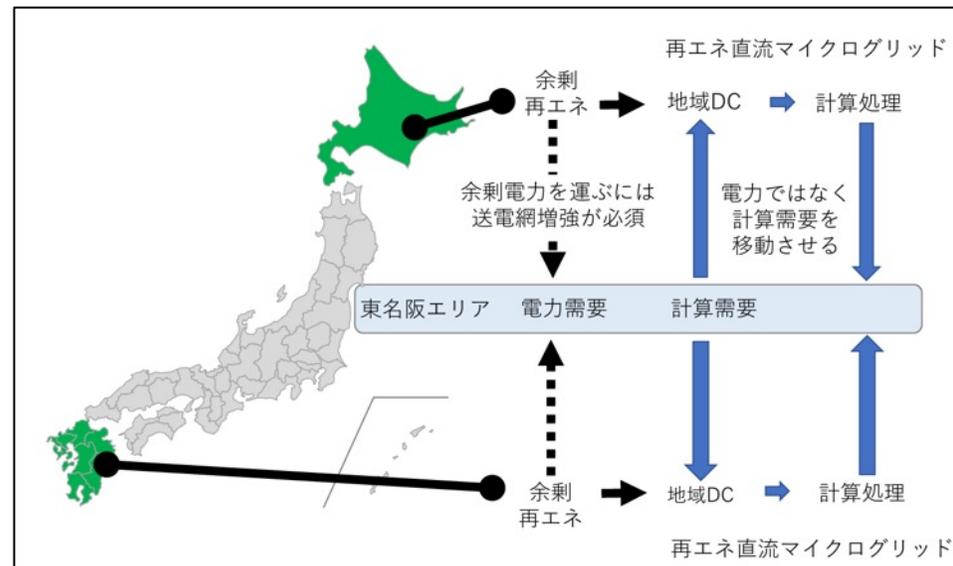
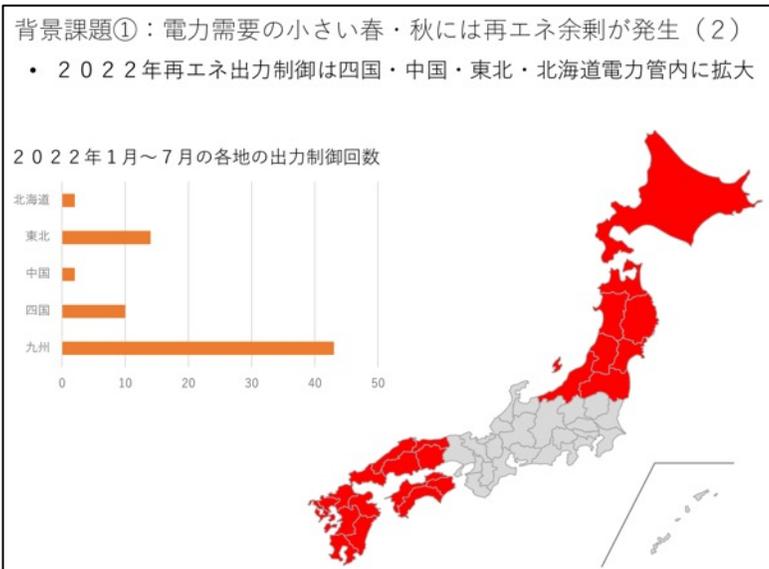
- Toru Furusawa (The University of Tokyo & Toyota Motor Corporation, Japan); Hiroshi Abe and Kazuya Okada (Toyota Motor Corporation, Japan); Akihiro Nakao (The University of Tokyo, Japan), "Service Mesh Controller for Cooperative Load Balancing among Neighboring Edge Servers", 2022 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), July, 2022.

■ 論文誌

- 古澤徹(トヨタ自動車/東京大学), 阿部博(トヨタ自動車), 中尾彰宏(東京大学), "遅延値に基づく車両向けテナ型アプリケーションの動的エッジオフローディングの実装と評価", 情報処理学会 デジタルプラクティス (TDP) 3(3), 32-43, 2022-07-15

適産適消のための広域データ同期

■ 電気を送るよりもデータを送る方が、たぶん楽



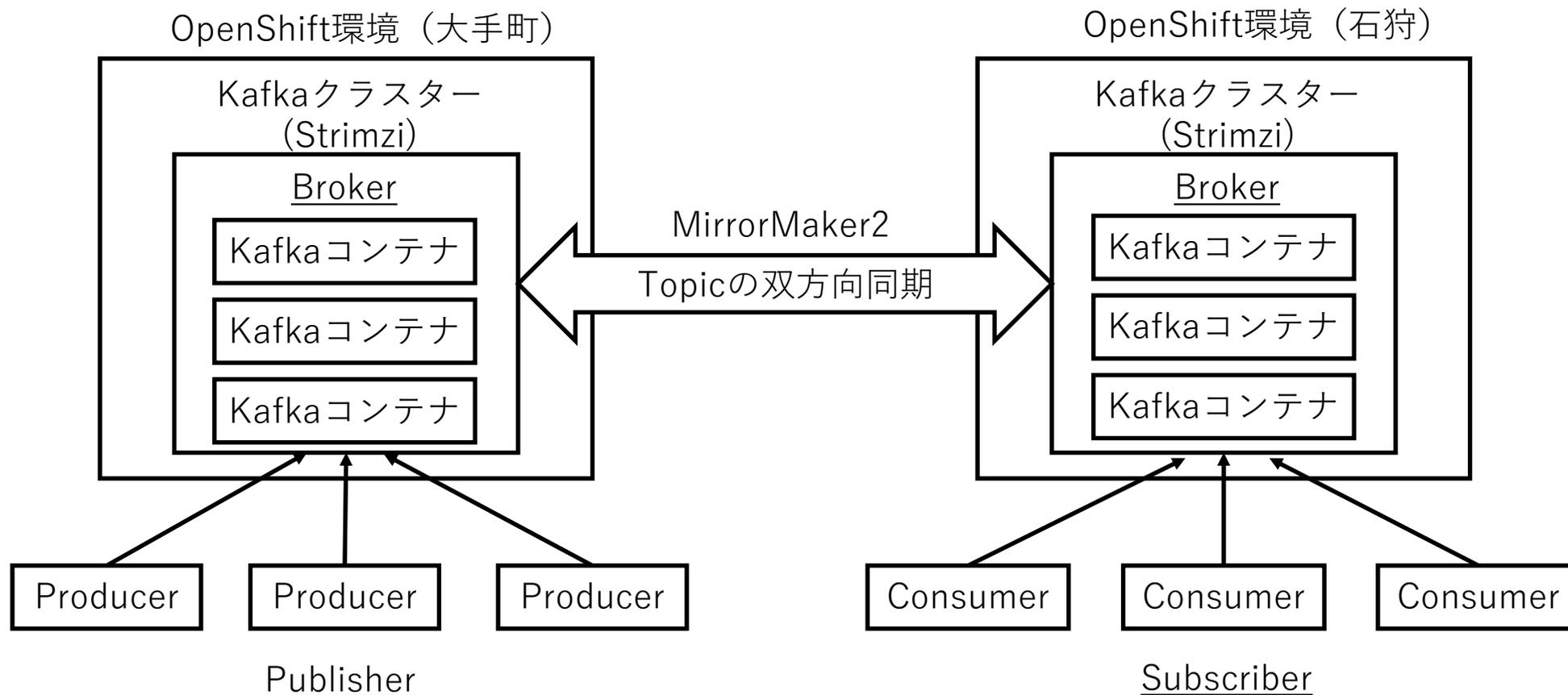
Transfer cost
= Energy Productivity...

Electricity >> Digital bits

x00 : 1

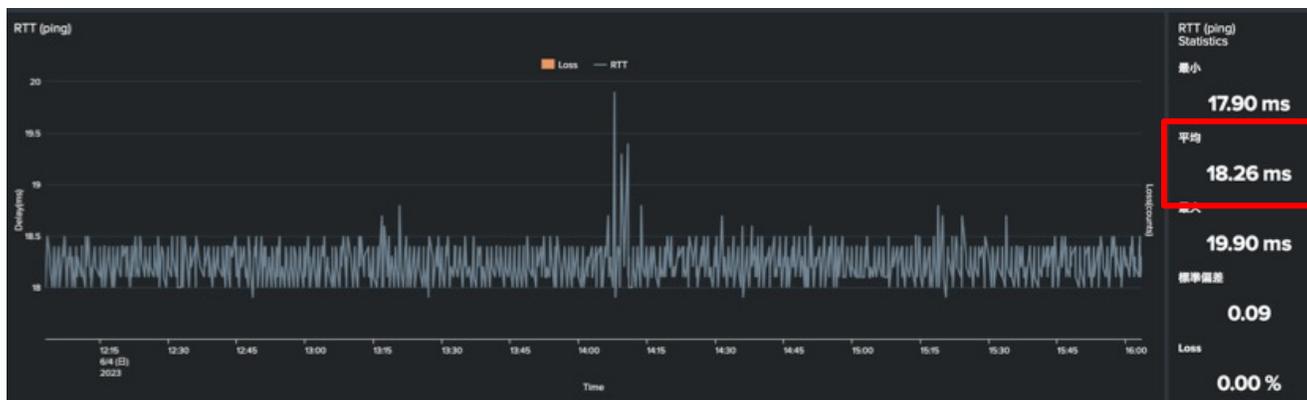
広域にデータ同期してみる実験

- Apache KafkaのMirrorMaker2を使って実験
 - 大手町と石狩の間で広域データ同期を実施



ネットワークの遅延 (石狩DC~大手町)

■ ラウンドトリップタイム



■ 片道遅延(OWAMP)



Stratum1のNTP/PTPサーバを
大手町、石狩で自前運用



セイコーソリューションズ : TS-2950



大手町側GPS

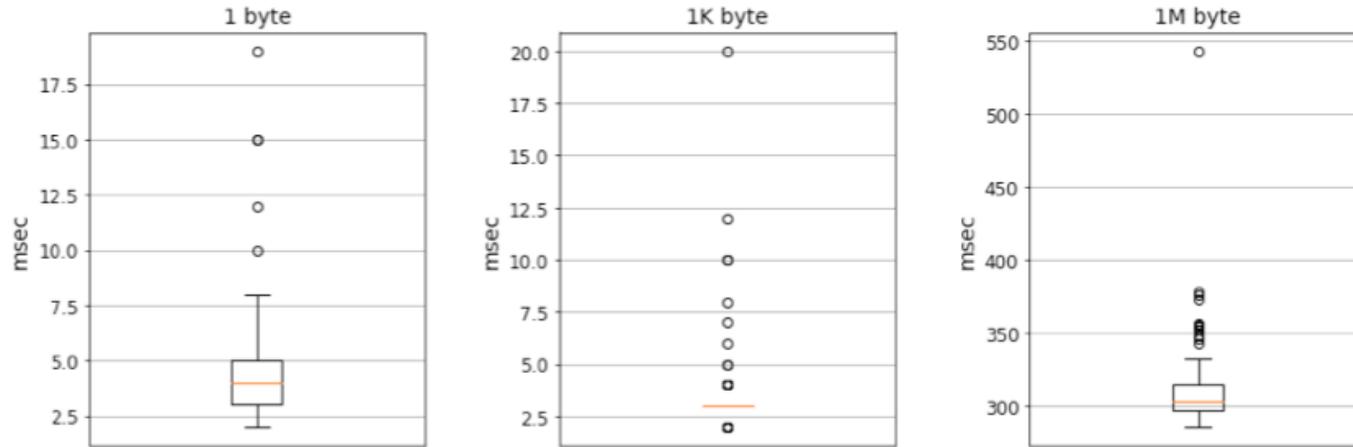


石狩側GPS



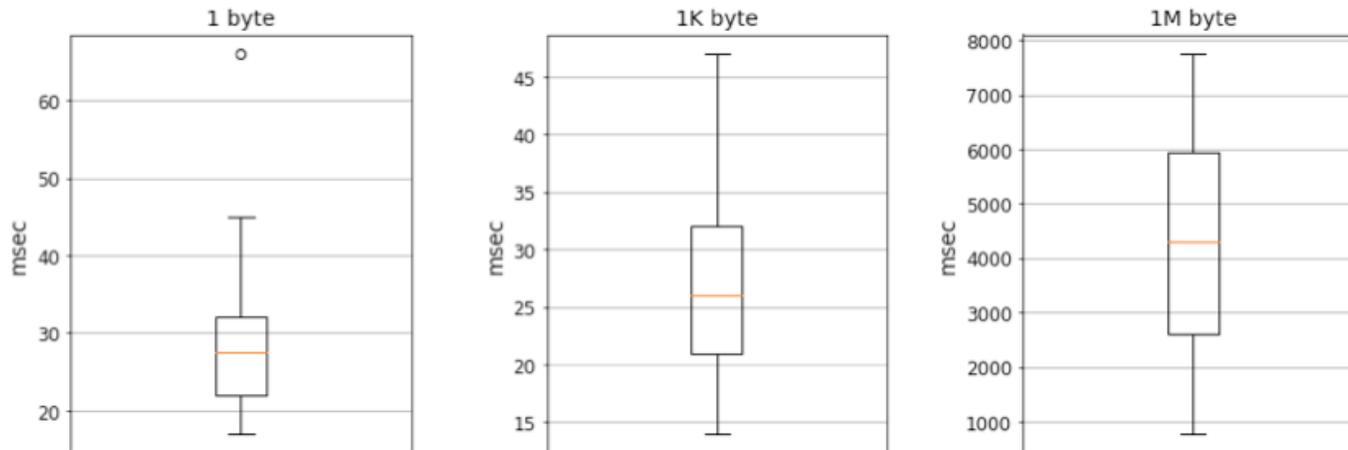
Consume時間 - Produce時間 = 処理時間

■ 同じDC内の場合



データが大きくても
300ミリ秒以内で
処理が終わる

■ 広域データ同期の場合 (石狩 -> 大手町、同期時間が加算される)



同期時間以上が
加算されていそう。
特に1Mバイトの
データ同期に時間
がかかる。

- データの同期（移動）はデータのサイズが小さければどうにかなりそう
- あとはデータ生成(Produce)と処理(Consume)のタイミング
- リアルタイム性が必要であれば広域同期はするべきではない
- 逆に非同期処理・バッチ処理などリアルタイム性が必要なければあり
- 処理を好きなところで動かせる
 - 電力が余っているところへ処理を寄せることも可能

■ IOT62

- 情報処理学会インターネットと運用技術研究会での発表（7/4）
- 研究会論文：「広域データ同期を用いた分散処理の実現」

広域データ同期を用いた分散処理の実現

阿部 博^{1,a)}

概要：エッジコンピューティングの普及により、データを生み出す場所の側でデータ処理を行う機会が増えてきた。これによりデータ処理の地産地消が実現でき、クラウド環境で実施するデータ処理と比較してエッジを利用した処理の場合では、通信の応答時間が短くなり高速な応答を実現することができる。エッジの仕組みとして通信キャリアやクラウドベンダが提供する Multi-access Edge Computing(MEC) を利用し基地局の近くで処理を行うシステムが利用される事例が増えてきた。Contents Delivery Network (CDN) などまさにエッジ利用の一例でユーザに近い場所でコンテンツを提供することで、ネットワーク的に近い場所からのコンテンツ配信を実現している。しかしながら、高速な応答とは違う需要として、処理を任意の場所で実行したい場合がある。例えば、グリーン電力を積極利用するために、グリーン電力の発電量が増加した時にその場所での処理量を増加させる方法や低価格な夜間電力を戦略的に利用する方法などが考えられる。本研究ではグリーン電力の積極利用を視野に入れ、広域にデータを同期するためのデータ同期機構を準備し、データ処理を行いたい場所で同期されたデータを取り出し処理を行うシステムを実現する。広域データ同期の仕組みとして Apache Kafka に実装される MirrorMaker2 を用い、広域の二拠点でのデータ同期を実施する。また、Kafka を利用する場合に使われる非同期通信手法の Producer/Consumer 方式を用いて広域での分散処理を提案する。

適産適消のための広域分散監視

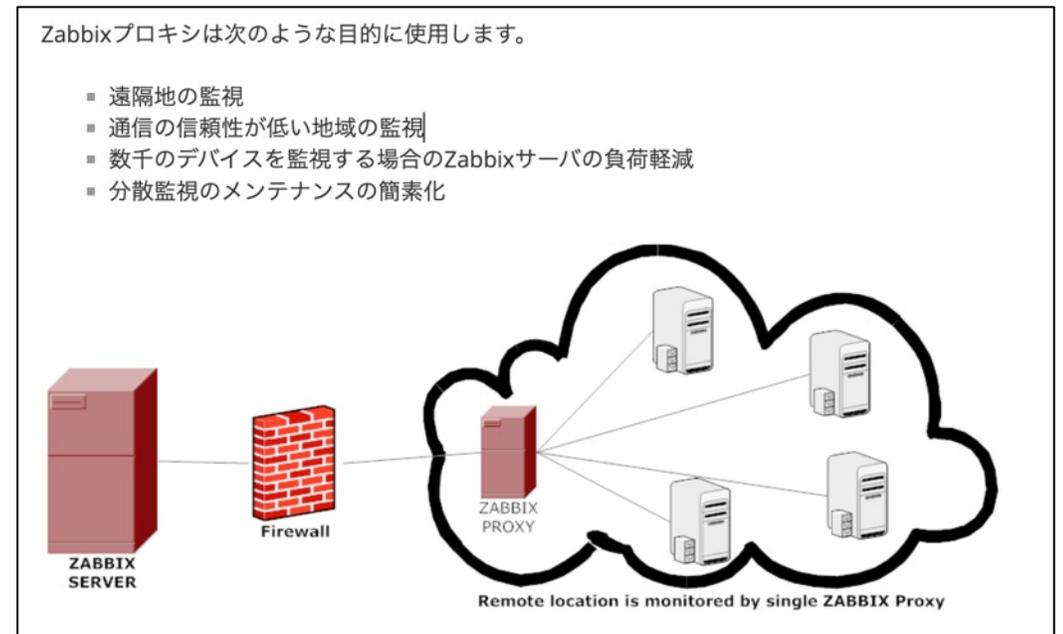
どこで処理をするか？どこに処理を寄せるか？

■ 監視が必要な項目

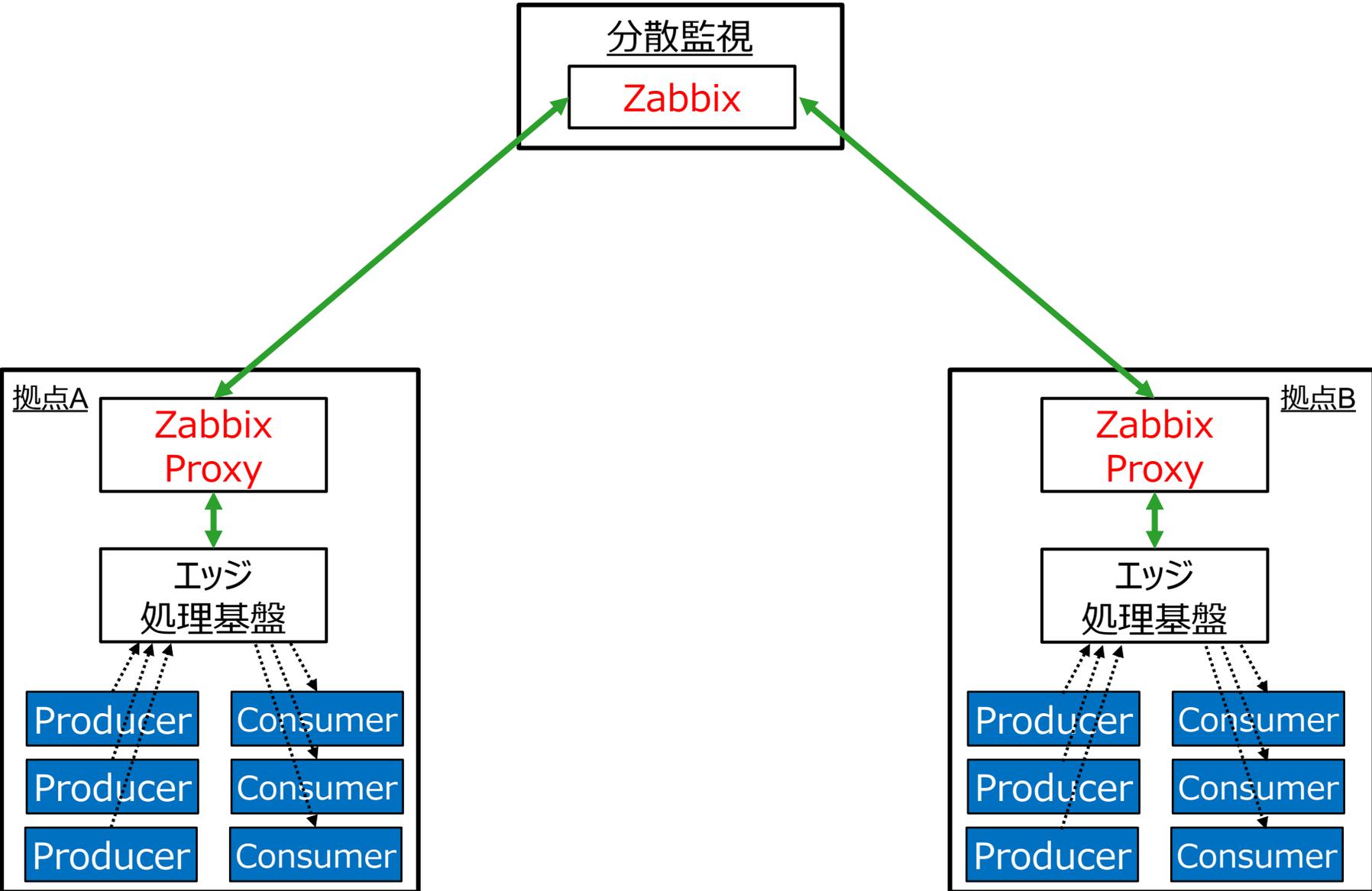
- エッジ・システム全体の監視（処理量、処理負荷、レスポンスタイムなど）
- 電力量の監視（消費量、グリーン電力発電量）

■ 広域に監視を分散させる

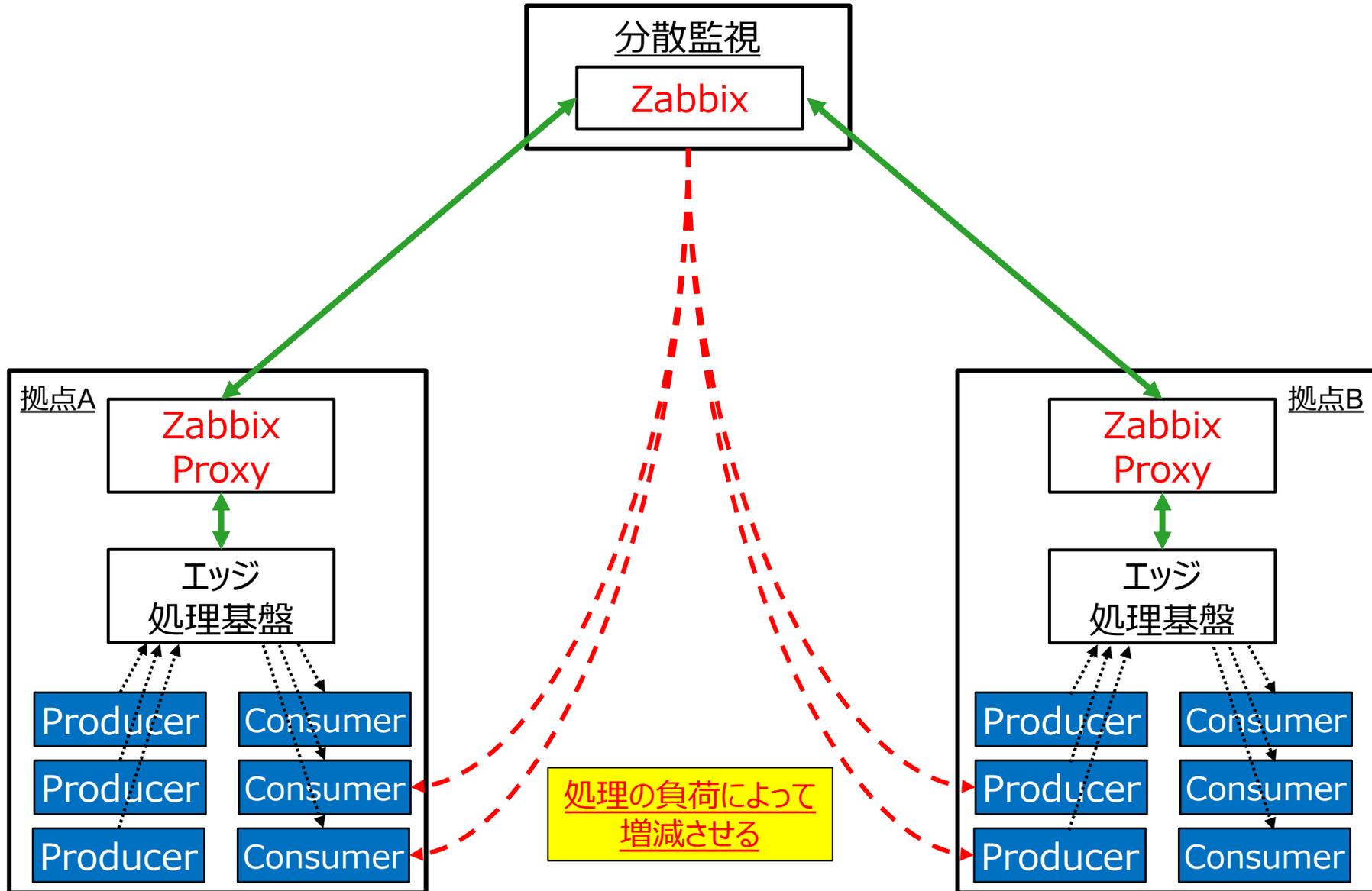
- OSSの監視システムといえば？ =Zabbix
- Zabbixって分散監視できるの？
- Zabbix Proxyという仕組みがある



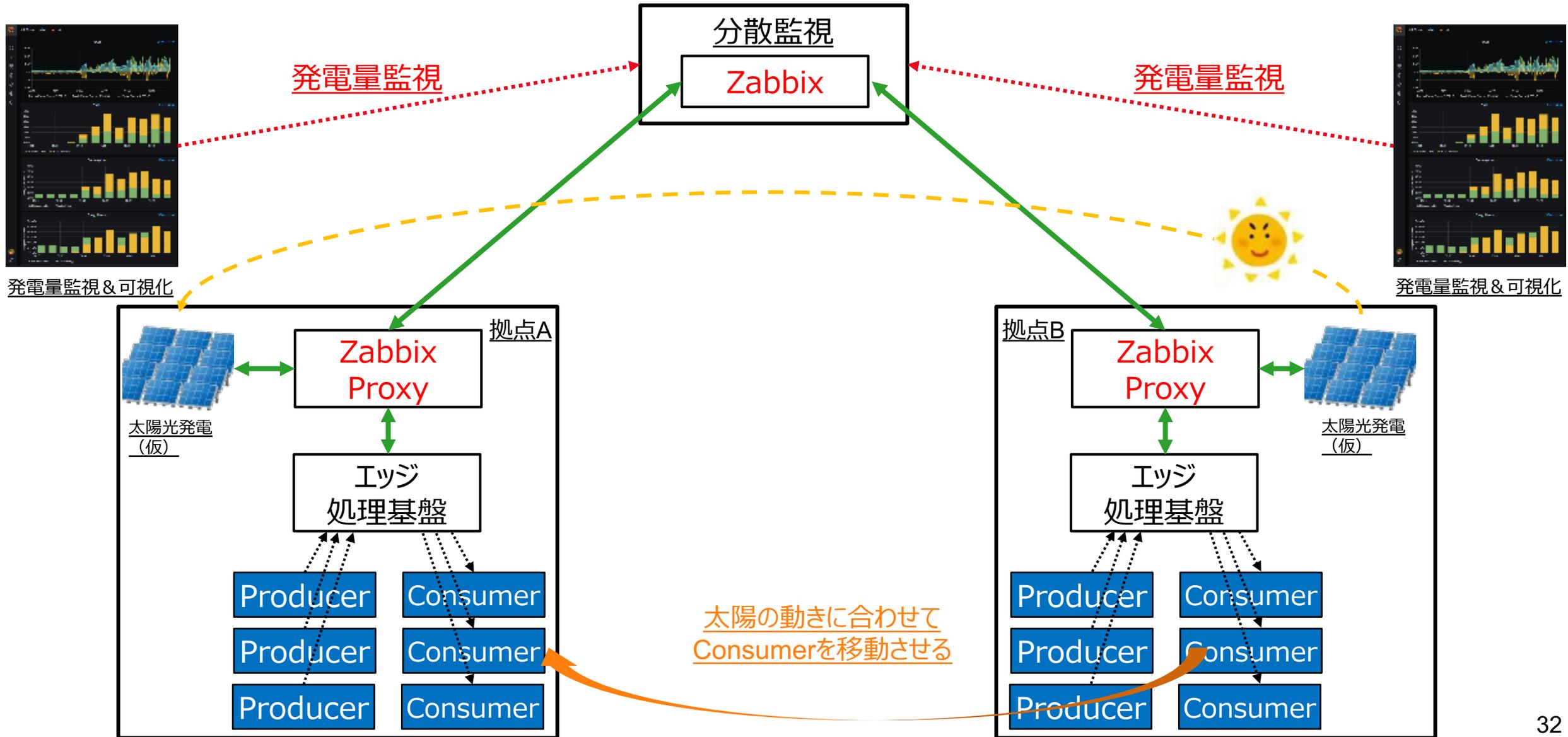
Zabbixを使ったエッジ基盤の分散監視



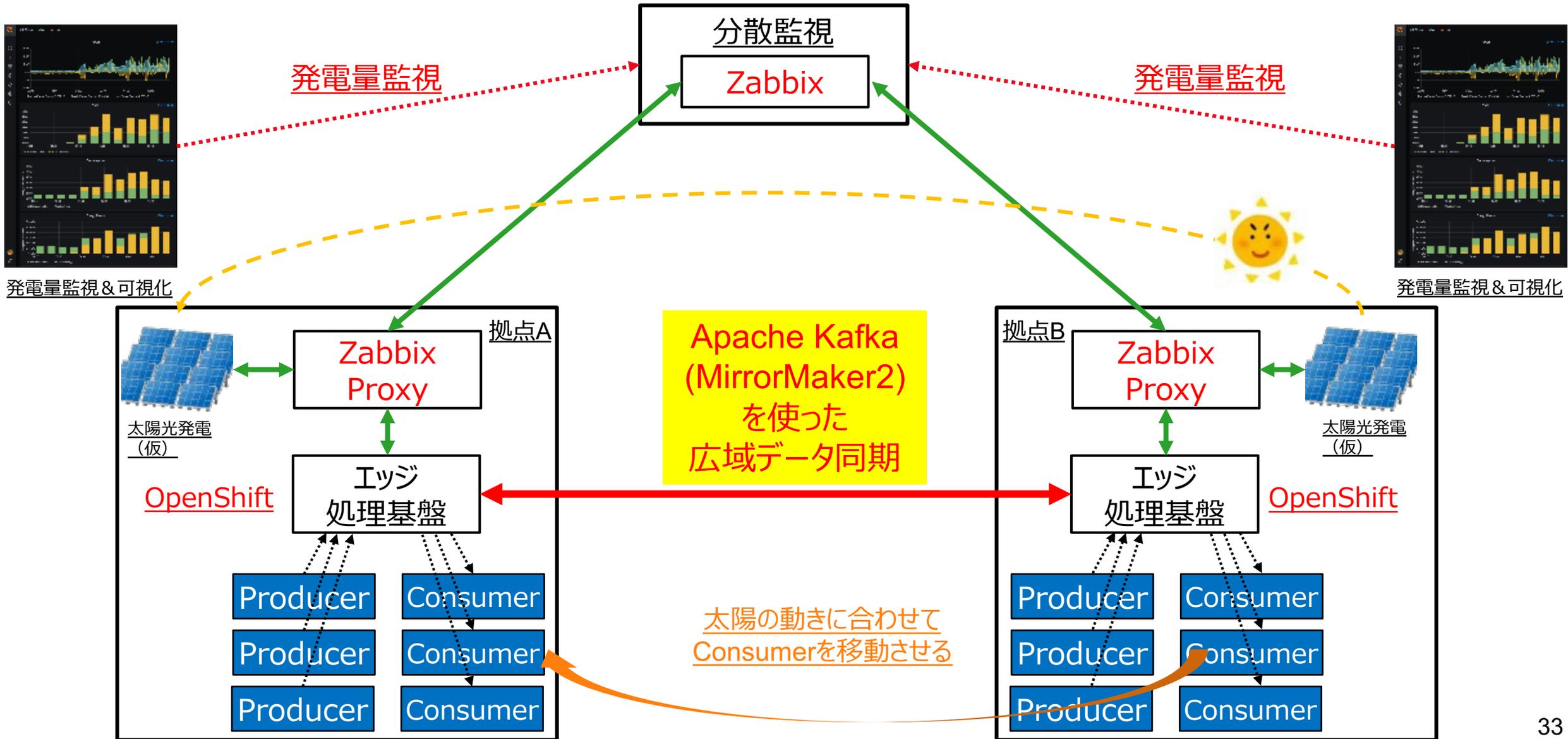
Zabbixを使ったエッジ基盤の分散監視



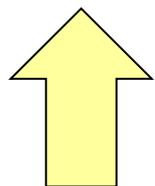
Zabbixを使ったエッジ基盤の分散監視（グリーン電力利用） TOYOTA



Zabbixを使ったエッジ基盤の分散監視（広域データ同期）



- グリーン電力と連動した処理の増減
 - グリーン電力の変化にリアルタイム性は少ない
 - 天気予報データと連動し動作させることが可能
 - プロキシからのリモートコマンドアクションでできそう
- 知恵をどこに持たせるか？
 - Zabbixの監視に特化させる
 - 監視トリガーをコントローラへ
 - Producer/Consumer処理の増減



- このあたりはシステムデザインの柔軟性

グリーンモビリティへの挑戦

■ 広域データ同期

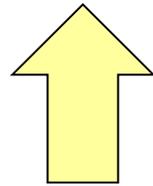
- 世界中でどこでもデータが利用できるようなデータの土管をKafkaで作る
- ユーザはProducer/Consumerを使って非同期にデータ処理を行える
- 非同期ゆえに処理の実装が簡単

■ 広域監視

- 世界規模の分散監視の実現へ
- 発電量監視によるグリーン電力の需要の見極め
- Zabbix + Zabbix Proxyを利用したスケーラビリティを考慮した分散監視設計

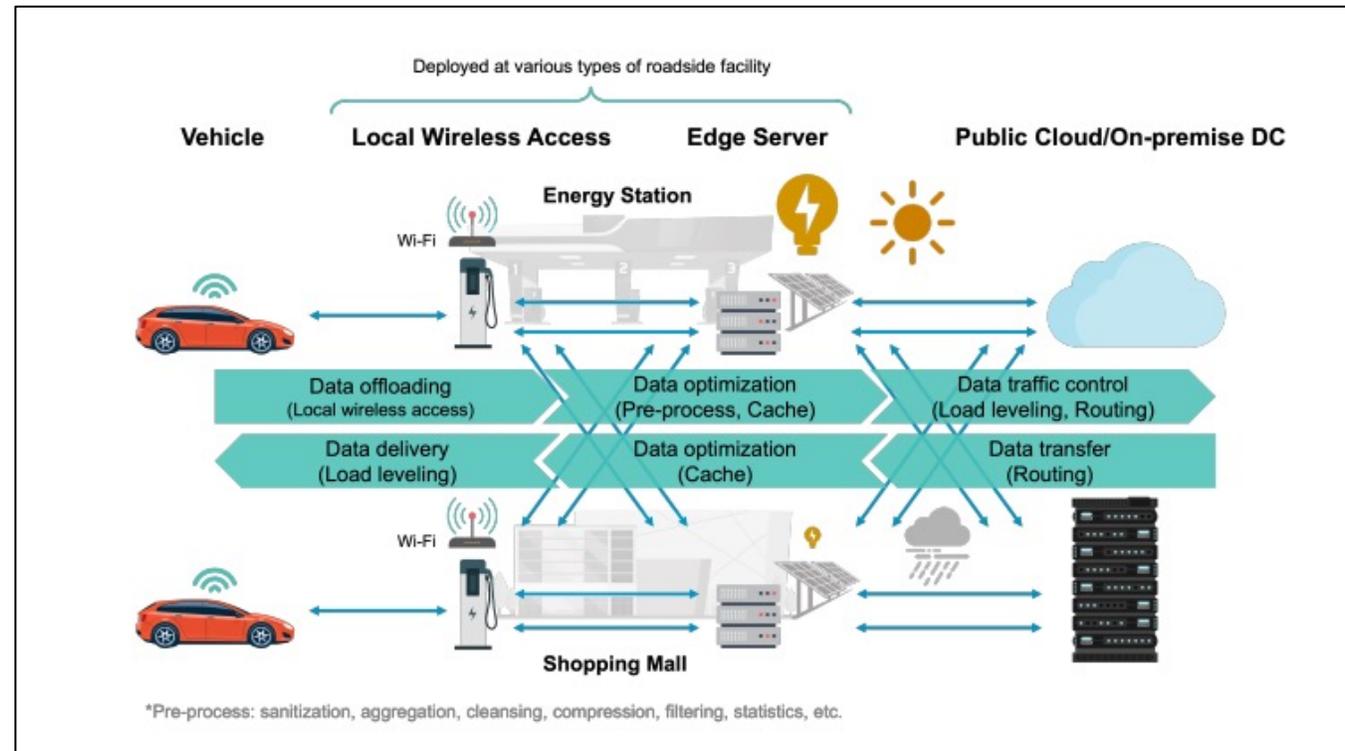
実現できると何が嬉しいのか？

- Follow The Sun（太陽を追いかける）
 - 太陽を追いかけることにより太陽光発電の余剰電力を効率利用
 - グリーンエネルギーの積極利用による分散システムの実現
- Follow The Moon（月を追いかける）
 - Googleが提唱していた、夜間電力コストの安い場所での処理集中化
 - 原子力・水力発電による安価な電力を使ったコストの低減



- 自動車会社にとって環境問題は大きな課題の一つ
 - IT・通信の観点で何ができるかを継続して考える

- AECC= Automotive Edge Computing Consortium
 - Wi-Fi Data Offloading and Edge Computing for Greener Mobility Services
 - KDDI/Ciscoとの共同実験
 - <https://aecc.org/proof-of-concepts/entry/936/>



- 地産地消を目指すエッジの効率利用に関する研究について
- Kafkaのデータ同期機能を使った広域データ同期の実現
- 広域に分散したエッジ基盤の分散監視をZabbixを用いて実現
- これらを組み合わせ、グリーン電力を積極利用する適産適消のための広域分散システムを構築中

わたしたちは、幸せを量産する。

だから、ひとの幸せについて深く考える。

だから、より良いものをより安くつくる。

だから、1秒1円にこだわる。

だから、くふうと努力を惜しまない。

だから、常識と過去にとらわれない。

だから、この仕事は限りなくひろがっていく。

モビリティ

可動性を社会の可能性に変える。

不確実で多様化する世界において、

トヨタは人とモノの「可動性」=移動の量と質を上げ、

人、企業、自治体、コミュニティができることをふやす。

そして、人類と地球の持続可能な共生を実現する。

トヨタウェイ

ソフトとハードを融合し、パートナーとともに
トヨタウェイという唯一無二の価値を生み出す。

【ソフト】

よりよい社会を描くイマジネーションと
人起点の設計思想。
現地現物で本質を見極める

【ハード】

人とモノの可動性を高める装置。
パートナーと共につくるプラットフォーム。
これらをソフトによって柔軟に、
迅速に変化させていく。

【パートナー】

ともに幸せをつくる仲間（顧客、社会、
コミュニティ、社員、ステークホルダー）
を尊重し、それぞれの力を結集する。

TOYOTA