

スマートIoT推進フォーラム技術戦略検討部会
第16回テストベッド分科会

Beyond 5Gで実現する同期型CPSコンピューティング基盤

2024年3月8日

日本電気株式会社 テクノロジーサービスソフトウェア統括部
丸橋 建一

Beyond 5Gで実現する同期型CPSコンピューティング基盤の研究開発

- ◆ NICT 革新的情報通信技術研究開発委託研究
機能実現型プログラム 一般課題 [採択番号01201]
- ◆ 実施期間： 2021-2023年度
- ◆ 受託者： 日本電気株式会社
国立大学法人東京大学 (中尾彰宏研究室)
- ◆ 目的： OTを対象とするリアルタイム処理が可能で、多彩なサービスを提供できる
コンピューティング処理基盤を特長とするCPS(=同期型CPS)の実現

CPS: Cyber Physical System

OT: Operational Technology

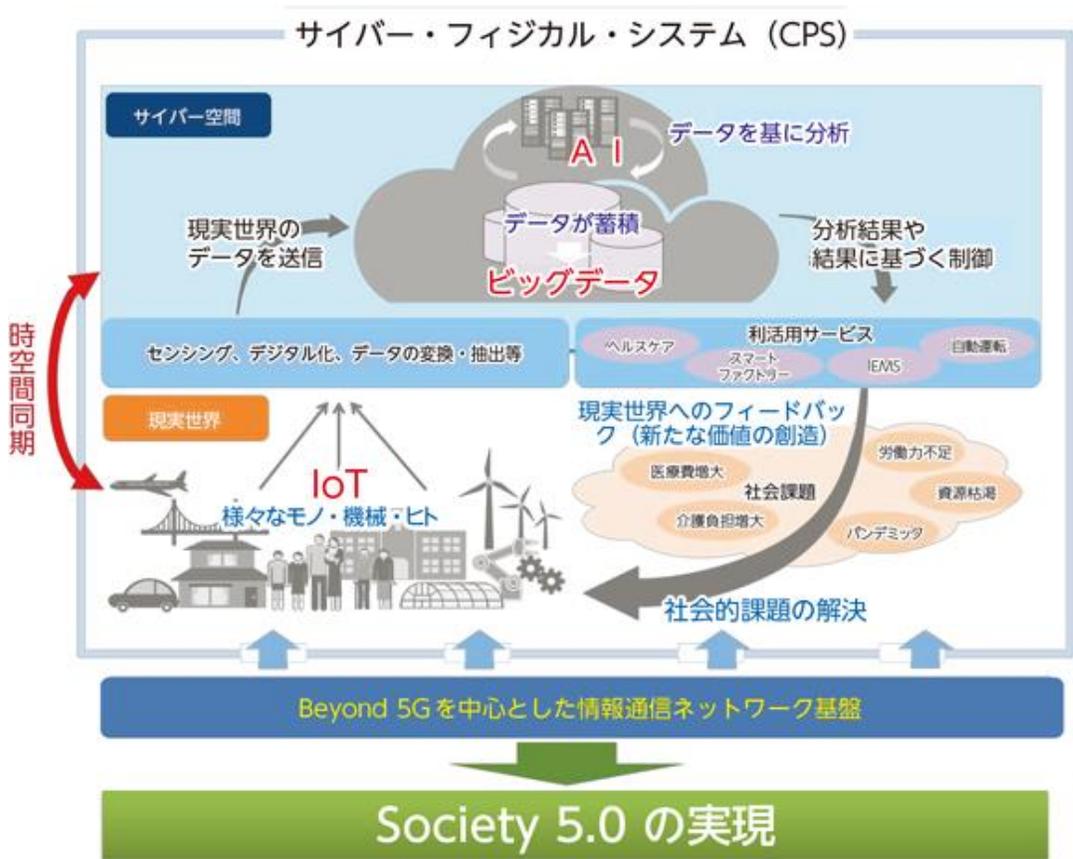
アウトライン

1. はじめに
2. 同期型CPSの狙い
3. 同期型CPSでのネットワーク技術
時空間ダイナミックフロー制御技術
4. NICTテストベッドの利用
時空間ダイナミックフロー制御技術の広域サービス適用検討
5. おわりに

1. はじめに

Society 5.0実現に向けて

現実世界の問題をサイバー空間で解く



(出典)総務省「Beyond 5G推進戦略」(2020)

現実世界の様々な機器と大規模クラウドが
低遅延・高信頼ネットワークで繋がる



現場で個別に動かしていたOT機器・システムで

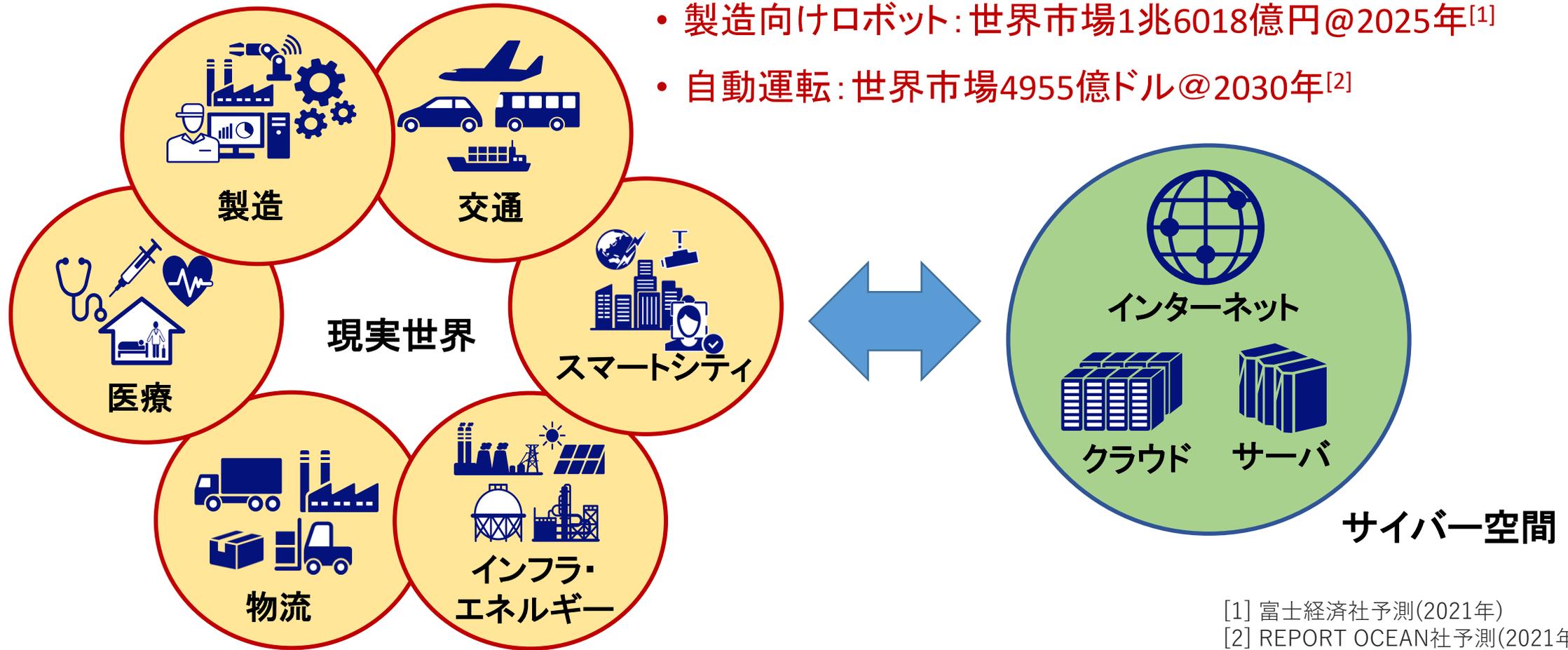
1. 機能配置が変わる (変えられる)
2. ソフトウェア化が進む



1. クラウドの知識(大規模データ)と計算能力が利用できる
2. ソフトウェア化により柔軟性が増し、システム構築、運用管理、保守、更新が効率良く実行できる

CPSによる価値創造

大量データをサイバー空間で知識化し、現実世界の様々な産業で新たな価値を創出

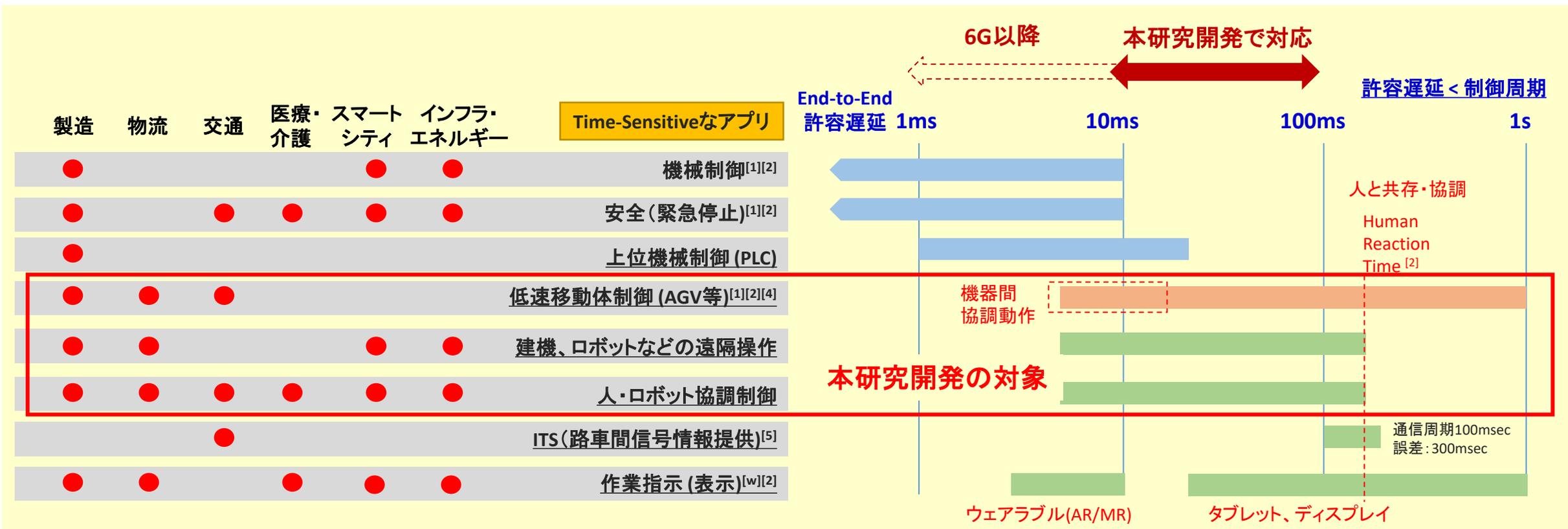


[1] 富士経済社予測(2021年)

[2] REPORT OCEAN社予測(2021年)

ターゲットとなるアプリケーション

End-to-Endで許容遅延10-100msecが要求されるアプリケーションでの無線制御を実現



PLC: Programmable Logic Controller
 AGV: Automated Guided Vehicle
 AR: Augmented Reality
 MR: Mixed Reality

[1] NICTホワイトペーパー「製造現場における無線ユースケースと通信要件(要約版)」, 2017年、<https://www2.nict.go.jp/wireless/ffpj-wp.html>

[2] IEEE 802 Nendica Report: Flexible Factory IoT—Use Cases and Communication Requirements for Wired and Wireless Bridged Networks, 2020

[3] A. Jain et al., Int. J Appl Basic Med Res. May-Aug; 5(2), pp.124–127, 2015.

[4] 東芝プレスリリース、<https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/21/2109-03.html>

[5] 一般社団法人UTMS協会、住友電気工業株式会社、<https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd04/204s.pdf>

注: 出展がされていないアプリの許容遅延は独自ヒアリングの結果に基づく

アプリケーション例（低速移動体制御）

通信(Wi-Fi x 2)を仮想化し、無線通信による安定したAMR制御を実現

走行の様子

無線通信安定化デバイス
搭載のAMR

通常のAMR



無線通信安定化デバイス
搭載のAMR



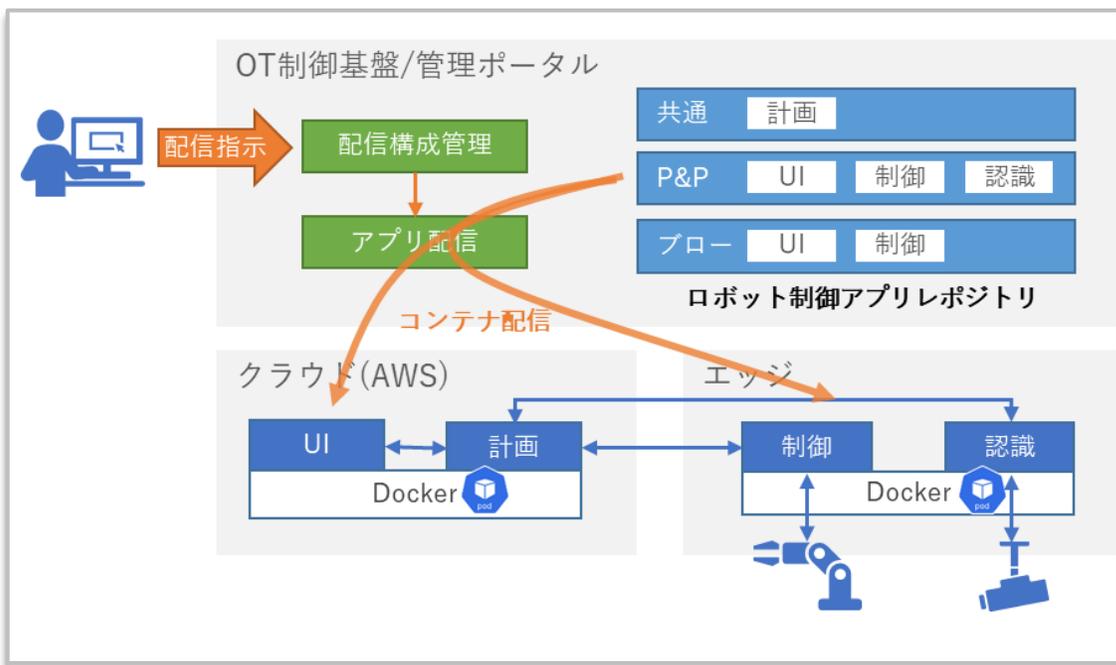
標準のAMR



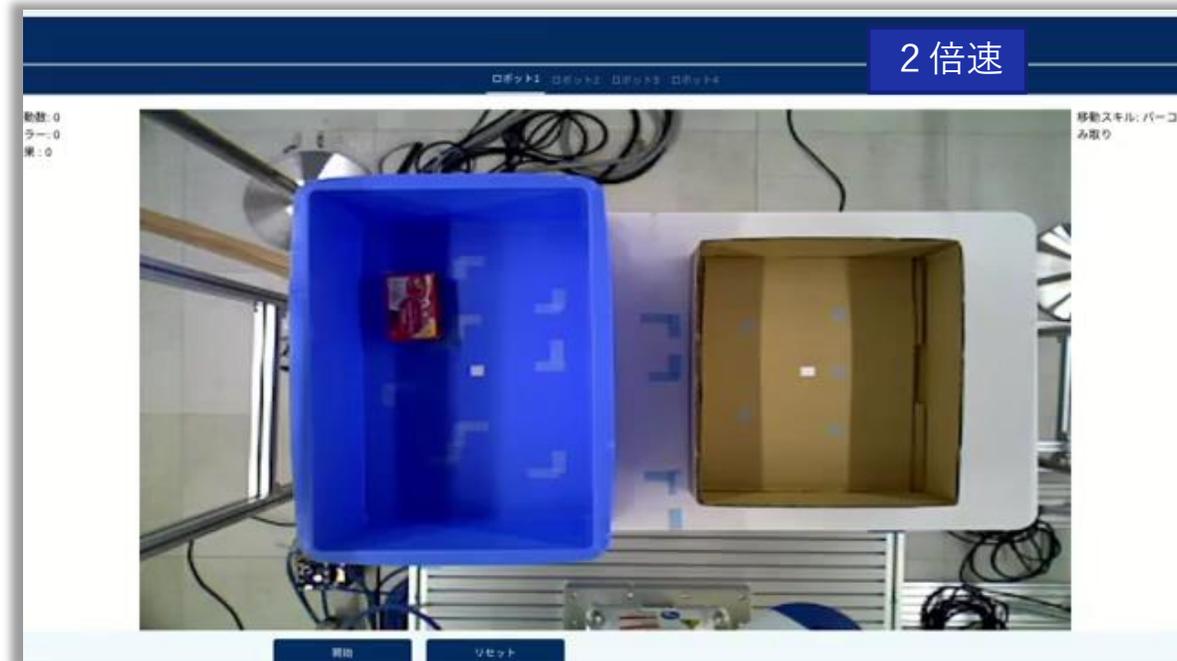
低速移動体制御のデモ

アプリケーション例（ロボットの遠隔操作）

様々な工程に対応するソフトウェアをレポジトリから配信、クラウドとエッジで制御



OT制御共通基盤でのロボット制御アプリの配信



ポインティングによる遠隔指示：プランニングエンジンAI

2. 同期型CPSの狙い

本研究開発の目的：同期型CPSの実現

コンピューティング処理基盤上のアプリの動作に、現実世界のOTデバイスが同期

同期型CPSとは：OTを対象とするリアルタイム処理が可能で、多彩なサービスを提供できるコンピューティング処理基盤を特長とするCPS。ITの「スケーラブル、アジャイル」の特長を活かし、OTデバイスを「リアルタイム」かつ「セキュア」に收容する。

IT+OT (Operational Technology)

- ・ リアルタイム (Beyond 5Gによるコンピューティングとネットワークの密連携)
- ・ セキュア (多種・多数デバイスに適応)

OTへ拡張

IT (Information Technology)

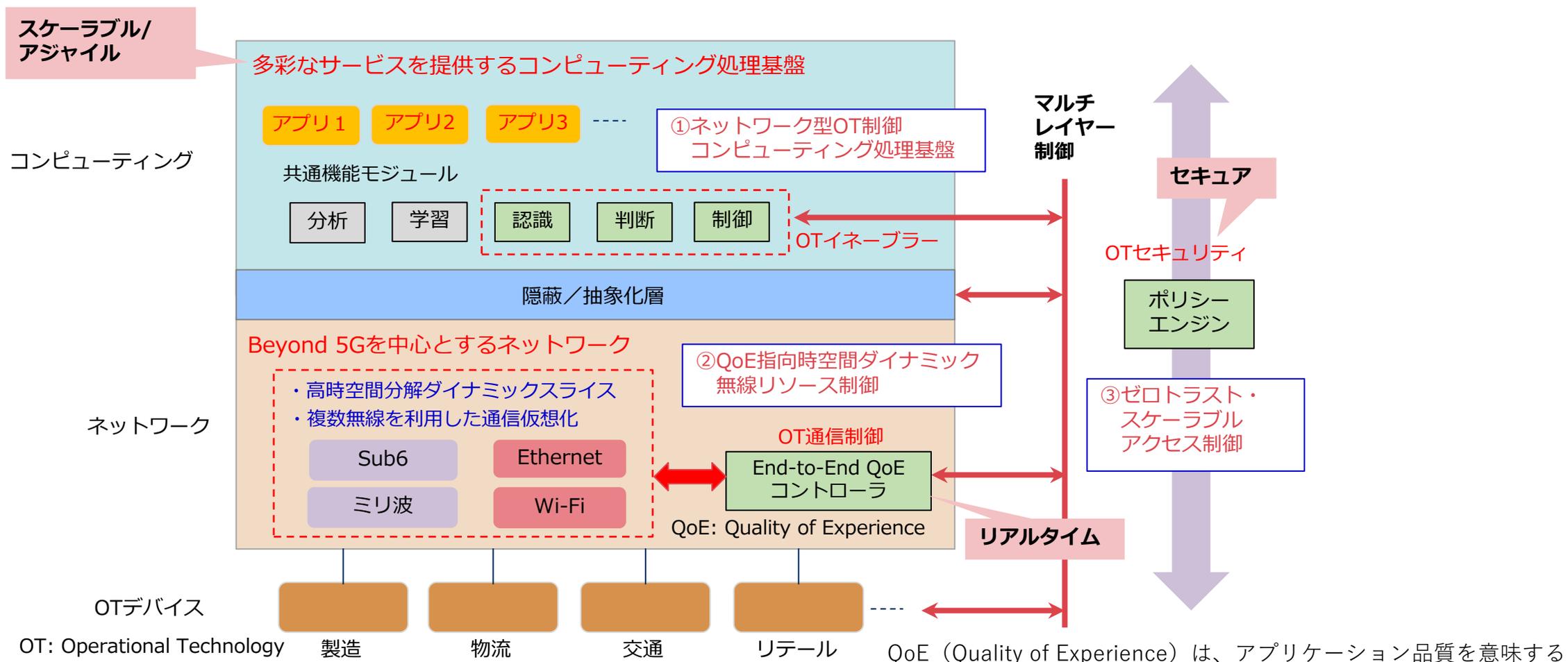
- ・ スケーラブル (クラウド活用、規模に制約なし)
- ・ アジャイル (迅速なシステム構築・運用)

ITの活用

CPSを実現するITとOT融合

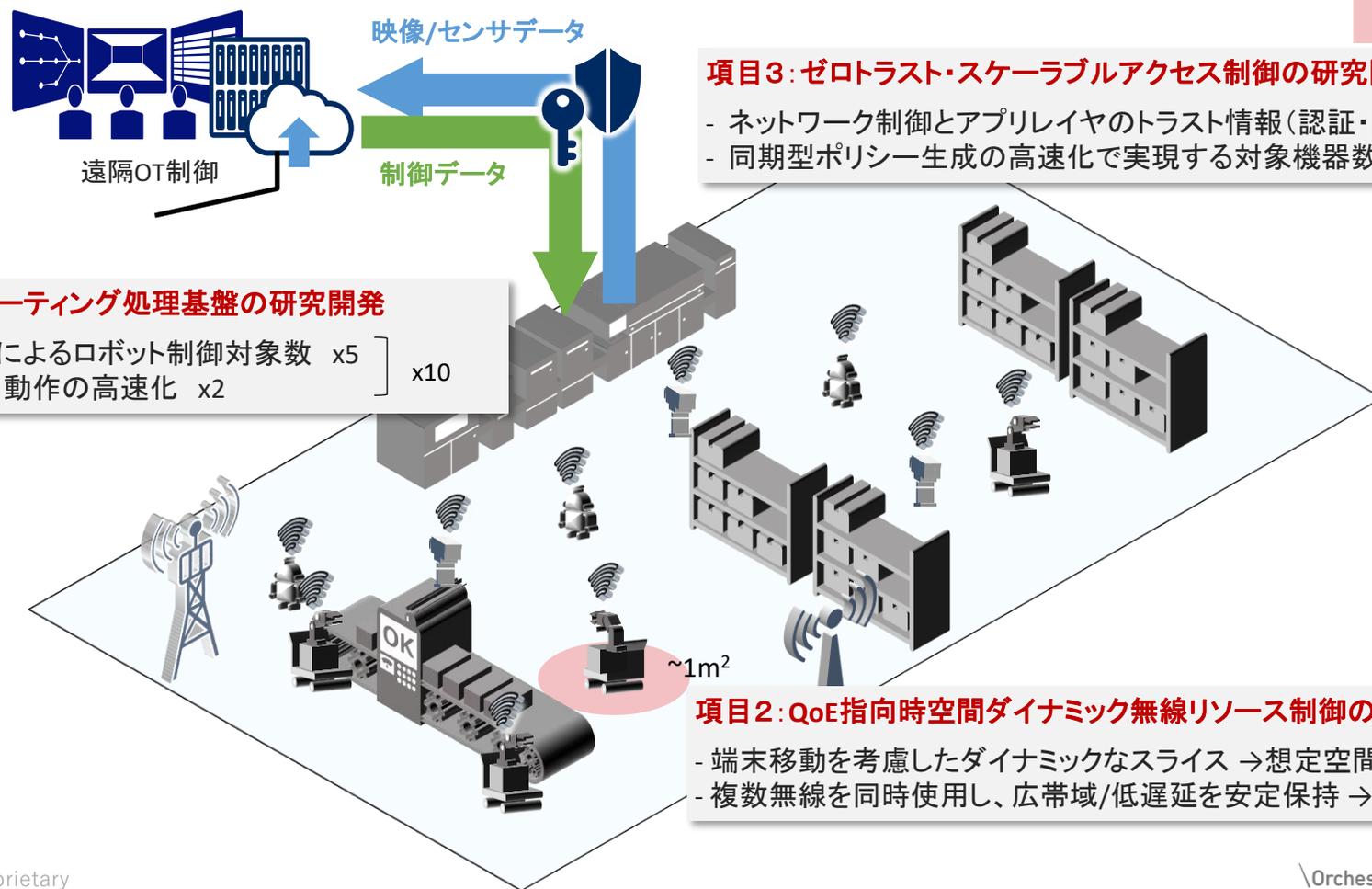
同期型CPSのシステム構成

「スケーラブル/アジャイル」、「リアルタイム」、「セキュア」を同時達成



同期型CPSの適用シナリオの一例

工場／倉庫へ適用するOTデバイス(ロボット等)の遠隔制御で、生産効率を10倍



スケーラブル/アジャイル

項目1: ネットワーク型OT制御コンピューティング処理基盤の研究開発

- 認識/判断/制御の柔軟なモジュールによるロボット制御対象数 x5
 - ネットワーク性能(制御周期)を考慮。動作の高速化 x2
- x10

項目3: ゼロトラスト・スケーラブルアクセス制御の研究開発

- ネットワーク制御とアプリレイヤのトラスト情報(認証・認可)の連携
- 同期型ポリシー生成の高速化で実現する対象機器数 10,000台

項目2: QoE指向時空間ダイナミック無線リソース制御の研究開発

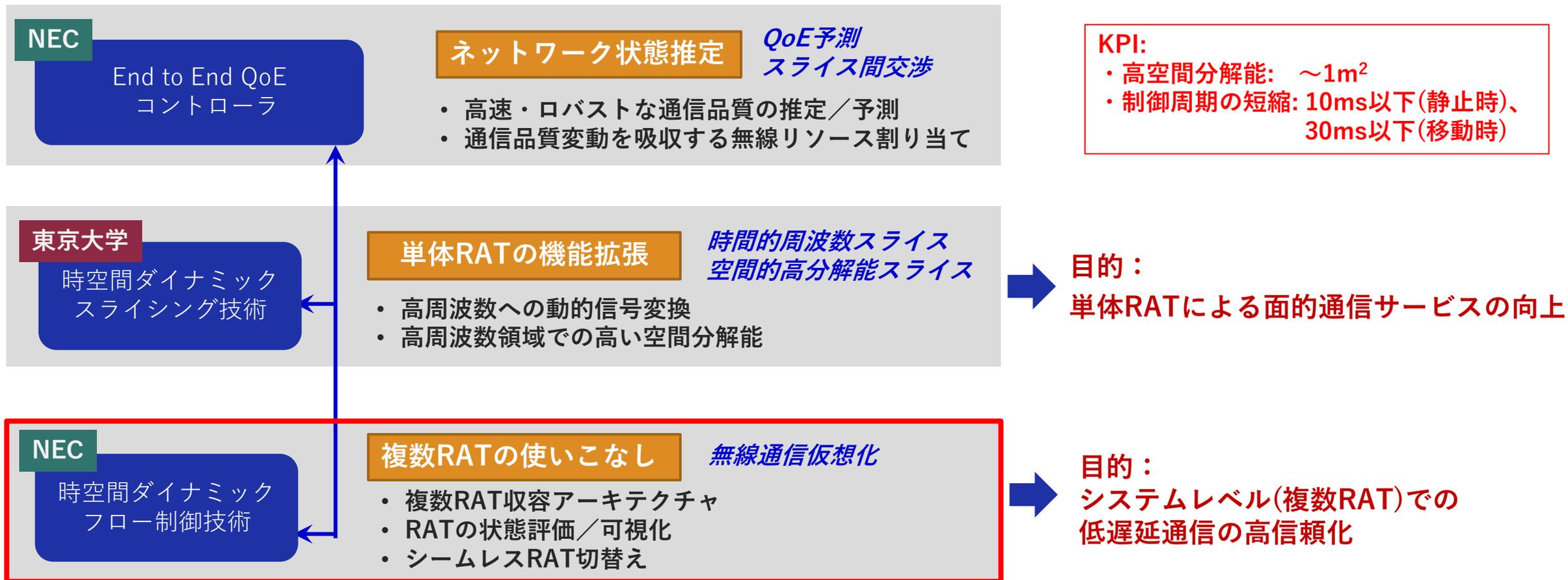
- 端末移動を考慮したダイナミックなスライス → 想定空間分解能 $\sim 1\text{m}^2$
- 複数無線を同時使用し、広帯域/低遅延を安定保持 → 制御周期 $\leq 10\text{msec}$

3. 同期型CPSでのネットワーク技術

時空間ダイナミックフロー制御技術

QoE指向時空間ダイナミック無線リソース制御

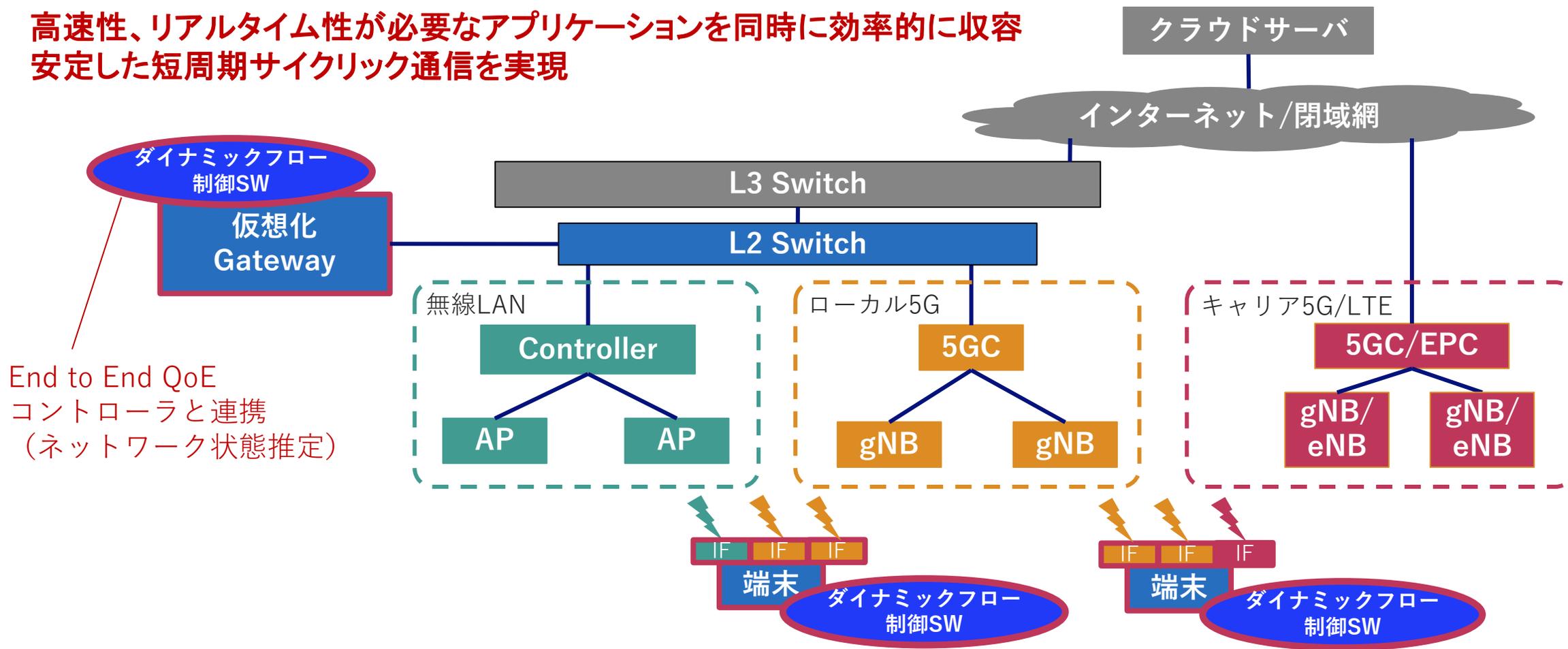
End to End QoEコントローラと連携する時空間ダイナミックスライシング／フロー制御技術



時空間ダイナミックフロー制御

End to End QoEコントローラと連携し、ユーザーが意識せず、自動で最適経路を選定

- 高速性、リアルタイム性が必要なアプリケーションを同時に効率的に收容
- 安定した短周期サイクリック通信を実現



制御通信と映像伝送の動的経路分離

性能要件が異なるアプリケーション毎に無線経路を動的に変更

制御通信(Ethernet IP)と映像伝送が混在する環境

評価条件(移動時):

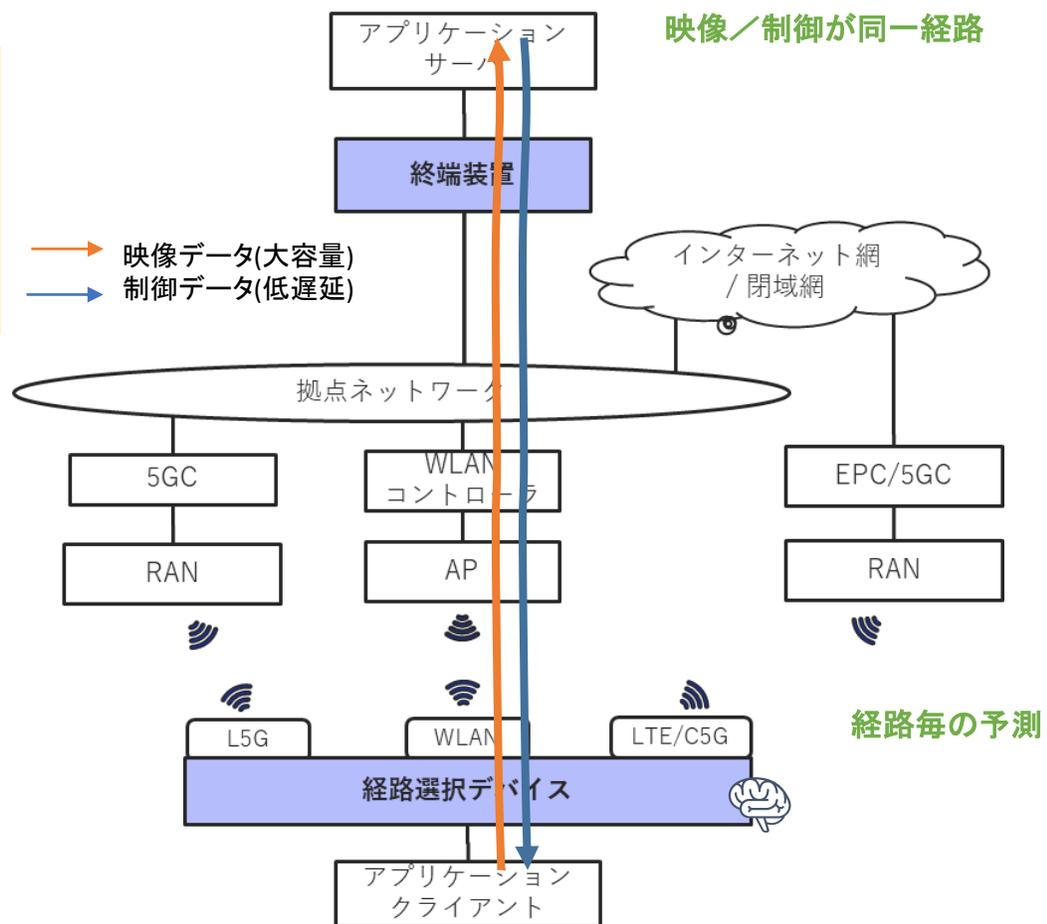
デバイスのNW IF: WiFi x 2 + ローカル5G(L5G)

映像データ(上り): UDP、HD 1280x720 30fps、Motion JPAG、スループット約10Mbps

制御データ(下り): Ethernet IP(UDP)、周期30ms、4回連続失敗(120ms)でエラー



アプリケーション(PLC制御、ネットワークカメラ)を使用した評価環境



制御通信と映像伝送の動的経路分離

性能要件が異なるアプリケーション毎に無線経路を動的に変更

制御通信(Ethernet IP)と映像伝送が混在する環境

評価条件(移動時):

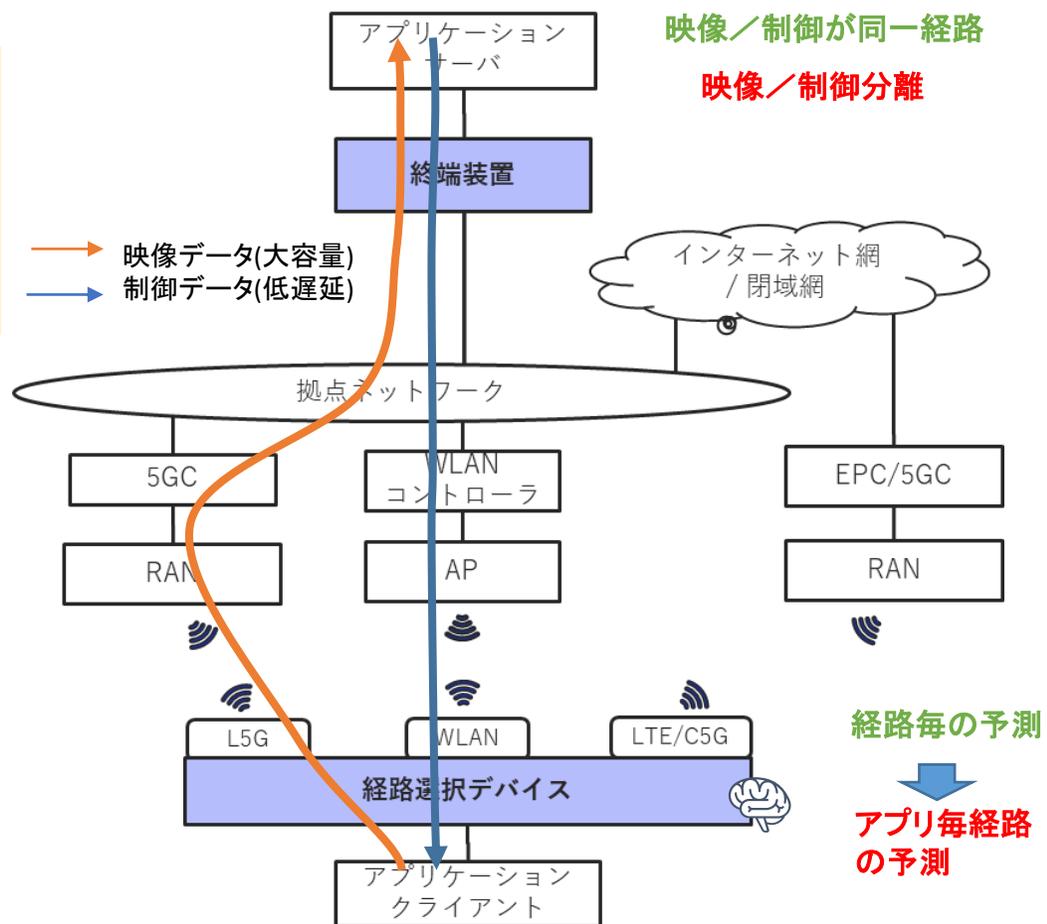
デバイスのNW IF: WiFi x 2 + ローカル5G(L5G)

映像データ(上り): UDP、HD 1280x720 30fps、Motion JPAG、スループット約10Mbps

制御データ(下り): Ethernet IP(UDP)、周期30ms、4回連続失敗(120ms)でエラー



アプリケーション(PLC制御、ネットワークカメラ)を使用した評価環境



時空間ダイナミックフロー制御の評価結果

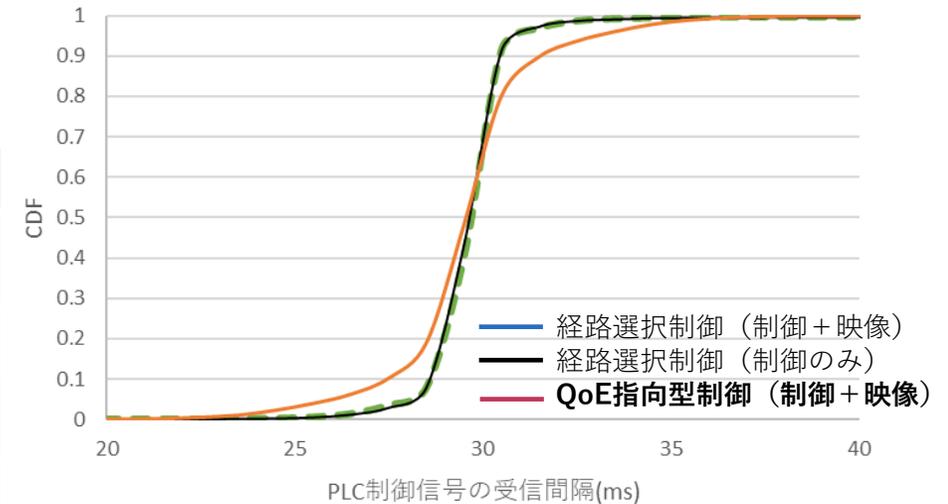
制御通信(Ethernet IP)と映像伝送が混在する環境で安定な通信を実現

- **QoE指向型制御**：映像データ(干渉源)とPLC制御信号の経路を自動分離
 - PLC制御信号単独の場合と同等の遅延性能（標準偏差）まで改善
 - 制御データのエラー頻度45%減、受信間隔の標準偏差59%減(制御周期30ms)

移動時のデータ

評価中は、映像データにより帯域占有率が最大20%程度(Wi-Fi)

評価方式		制御 + 映像データ		制御データのみ(参考)
		経路選択制御 (経路毎の予測)	QoE指向型制御 (アプリ毎経路の予測)	経路選択制御
制御データのエラー頻度		0.29回/分	0.16回/分	0回/分
PLC制御信号 の受信間隔	最大値	593ms	170ms	122ms
	標準偏差	5.6ms	2.2ms	2.3ms



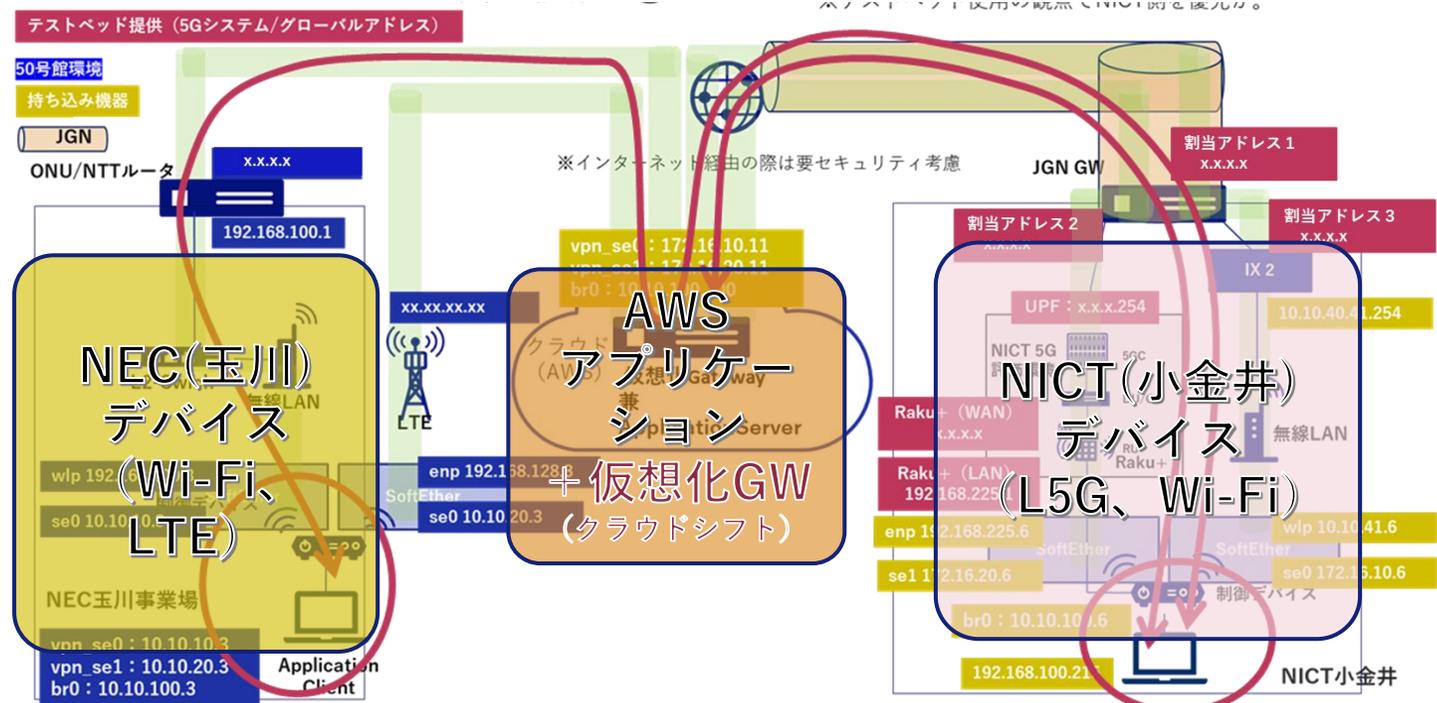
移動時のPLC制御信号の受信間隔のCDF

4. NICTテストベッドの利用

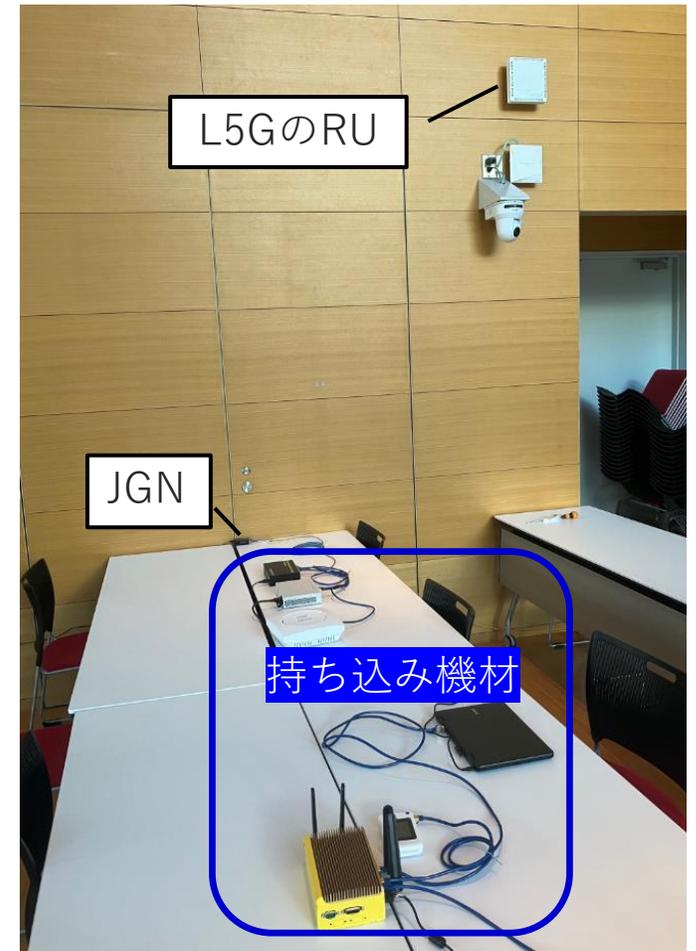
時空間ダイナミックフロー制御技術の広域サービス適用検討

NICTテストベッド検証(時空間ダイナミックフロー制御)

- 目的：時空間ダイナミックフロー制御技術の広域サービス適用検討
- 検証：構築コスト削減が可能なエッジ機器（仮想化GW）のクラウドシフトの実現性
- 実施日：12/1(金)、12/6(水)
- 実施場所：NICT本部(小金井) 5号館、3号館（セミナールーム）



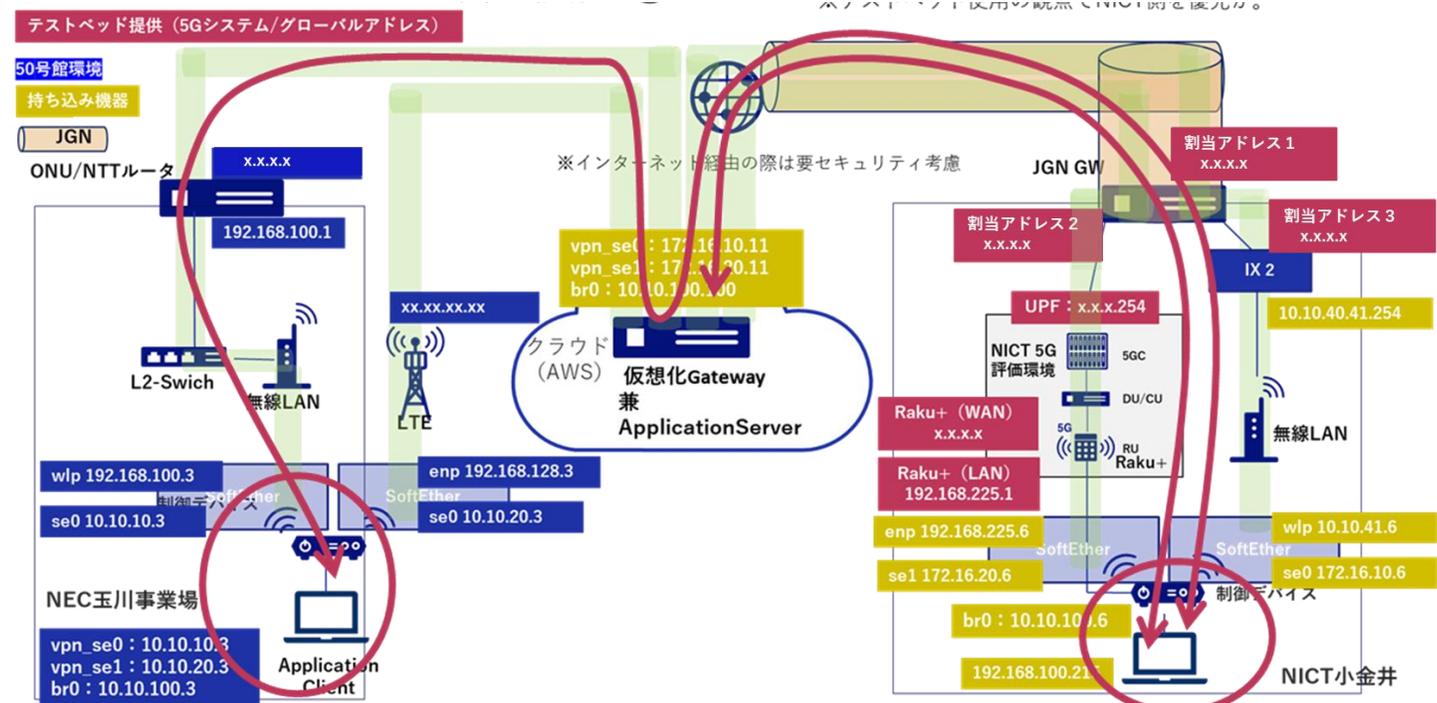
NEC玉川：武蔵小杉にある玉川事業場
AWS：アマゾンウェブサービス（クラウド）



実証時の様子(3号館セミナールーム)

NICTテストベッド検証(時空間ダイナミックフロー制御)

- 目的：時空間ダイナミックフロー制御技術の広域サービス適用検討
- 検証：構築コスト削減が可能なエッジ機器（仮想化GW）のクラウドシフトの実現性
- 実施日：12/1(金)、12/6(水)
- 実施場所：NICT本部(小金井) 5号館、3号館（セミナールーム）



NEC玉川：武蔵小杉にある玉川事業場
AWS：アマゾンウェブサービス（クラウド）



実証時の様子(3号館セミナールーム)

クラウドから2拠点への同時接続のデモ動画

AWSからNEC玉川事業場に接続
(無線LAN経由)

AWSからNICT小金井に接続
(L5G経由)

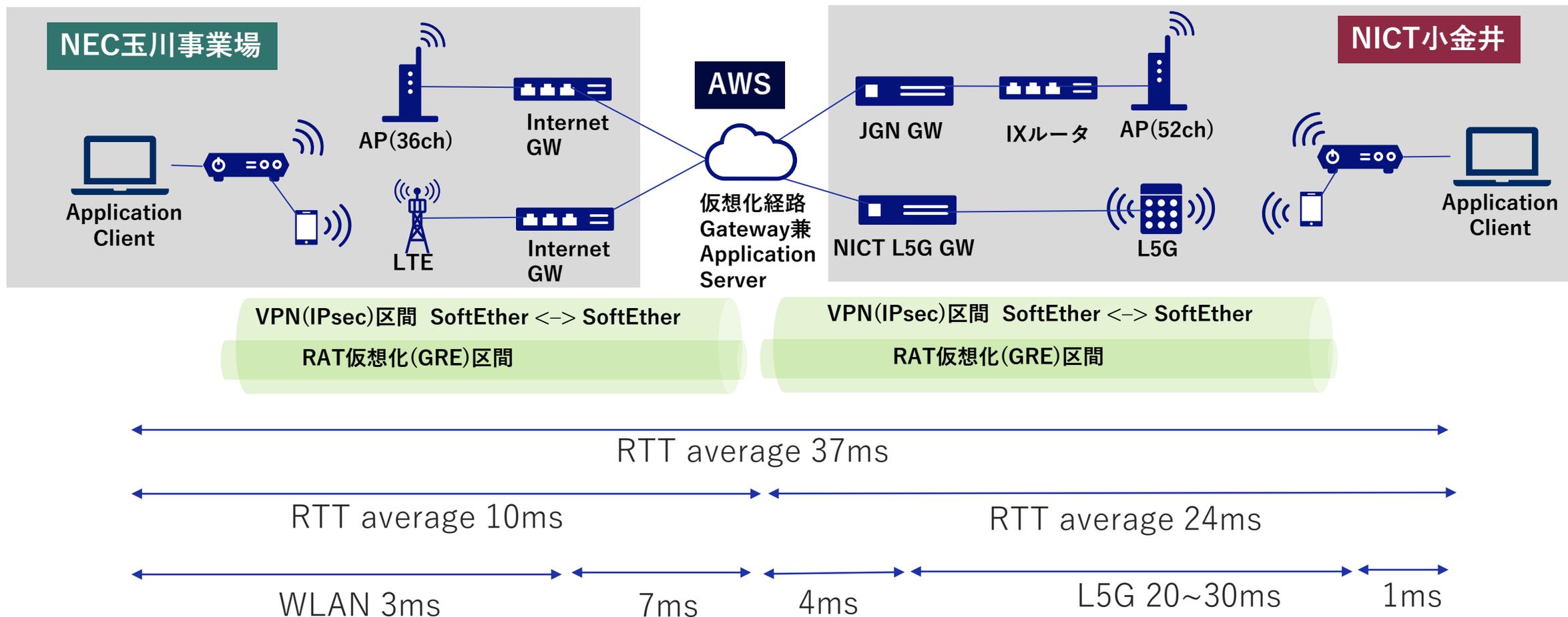
```
ec2-13-114-166-103.ap-northeast-1.compute.amazonaws.com - ubuntu@ip-10-10-0-11: ~ VT
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=47 ttl=64 time=9.60 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=48 ttl=64 time=10.2 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=49 ttl=64 time=10.4 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=50 ttl=64 time=9.72 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=51 ttl=64 time=9.98 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=52 ttl=64 time=9.60 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=53 ttl=64 time=10.2 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=54 ttl=64 time=9.50 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=55 ttl=64 time=10.1 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=56 ttl=64 time=9.58 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=57 ttl=64 time=9.58 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=58 ttl=64 time=9.93 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=59 ttl=64 time=9.55 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=60 ttl=64 time=9.38 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=61 ttl=64 time=9.83 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=62 ttl=64 time=10.7 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=63 ttl=64 time=9.68 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=64 ttl=64 time=9.78 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=65 ttl=64 time=9.48 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=66 ttl=64 time=9.74 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=67 ttl=64 time=10.1 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=68 ttl=64 time=9.91 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=69 ttl=64 time=9.53 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=70 ttl=64 time=9.83 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=71 ttl=64 time=9.50 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=72 ttl=64 time=9.42 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=73 ttl=64 time=9.58 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=74 ttl=64 time=9.77 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=75 ttl=64 time=9.22 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=76 ttl=64 time=9.78 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=77 ttl=64 time=9.47 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=78 ttl=64 time=9.58 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=79 ttl=64 time=9.38 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=80 ttl=64 time=9.61 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=81 ttl=64 time=12.1 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=82 ttl=64 time=9.36 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=83 ttl=64 time=9.97 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=84 ttl=64 time=9.29 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=85 ttl=64 time=10.7 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=86 ttl=64 time=9.53 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=87 ttl=64 time=10.0 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=88 ttl=64 time=9.30 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=89 ttl=64 time=10.6 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=90 ttl=64 time=9.68 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=91 ttl=64 time=9.46 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=92 ttl=64 time=9.29 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=93 ttl=64 time=9.54 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=94 ttl=64 time=9.29 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=95 ttl=64 time=9.99 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=96 ttl=64 time=9.99 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=97 ttl=64 time=9.69 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=98 ttl=64 time=9.87 ms
64 bytes from 10.10.100.5: icmp_seq=99 ttl=64 time=8.90 ms

ec2-13-114-166-103.ap-northeast-1.compute.amazonaws.com - ubuntu@ip-10-10-0-11: ~ VT
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=28 ttl=64 time=28.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=29 ttl=64 time=26.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=30 ttl=64 time=31.1 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=31 ttl=64 time=24.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=32 ttl=64 time=28.5 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=33 ttl=64 time=26.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=34 ttl=64 time=30.1 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=35 ttl=64 time=33.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=36 ttl=64 time=27.1 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=37 ttl=64 time=22.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=38 ttl=64 time=32.3 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=39 ttl=64 time=28.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=40 ttl=64 time=27.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=41 ttl=64 time=24.9 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=42 ttl=64 time=29.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=43 ttl=64 time=27.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=44 ttl=64 time=26.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=45 ttl=64 time=35.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=46 ttl=64 time=33.7 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=47 ttl=64 time=32.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=48 ttl=64 time=21.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=49 ttl=64 time=29.6 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=50 ttl=64 time=38.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=51 ttl=64 time=27.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=52 ttl=64 time=21.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=53 ttl=64 time=25.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=54 ttl=64 time=32.6 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=55 ttl=64 time=30.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=56 ttl=64 time=30.7 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=57 ttl=64 time=22.9 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=58 ttl=64 time=36.9 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=59 ttl=64 time=29.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=60 ttl=64 time=33.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=61 ttl=64 time=37.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=62 ttl=64 time=32.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=63 ttl=64 time=29.9 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=64 ttl=64 time=33.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=65 ttl=64 time=32.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=66 ttl=64 time=26.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=67 ttl=64 time=45.3 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=68 ttl=64 time=29.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=69 ttl=64 time=32.8 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=70 ttl=64 time=31.1 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=71 ttl=64 time=30.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=72 ttl=64 time=23.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=73 ttl=64 time=32.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=74 ttl=64 time=26.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=75 ttl=64 time=25.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=76 ttl=64 time=23.4 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=77 ttl=64 time=32.2 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=78 ttl=64 time=30.6 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=79 ttl=64 time=28.0 ms
64 bytes from 10.10.100.6: icmp_seq=80 ttl=64 time=27.1 ms
```

安定して2拠点と接続でき
ており、100ms以下の遅延
性能を維持

各区間の遅延性能

- インターネット区間も10ms弱の遅延性能が出ており、使用する無線システムによっては、全体の遅延性能への寄与率が大きくなるケースもある



テストベッドを利用して

◆ 感じたこと

- 検証に必要な機材、機能、サポートが整備されている。
 - 第三者により構築されたNAT等を含むVPN接続の動作が確認できた。
- 性能（安定性や遅延）が良い。
 - クラウドからのOT制御の可能性を把握できた。

◆ 期待

- B5G研究者/開発者への評価環境は十分整備されている。今後6Gでアプリケーションとの連携が緊密化すると考えると、ネットワークレベルでの評価のための機能の充実が望まれる。
 - 例) 評価用ネットワークのQoS制御、スライス（VPN/ポート単位での特性制御、API整備など）
ネットワーク帯域・遅延等の意図的変動・擬似障害
5G環境での基地局高負荷・多端末時の挙動の擬似、コアネットワーク障害の擬似

ご支援いただいたNICT総合テストベッド研究開発推進センターの皆様へ感謝します

4. おわりに

まとめ

◆ 同期型CPSでめざすITとOT融合

- 現場で個別に動かしていたOT機器のシステムの機能配置を変え、クラウドのデータと計算能力を活用する。
- ソフトウェア化による柔軟性で、システム構築、運用管理、保守、更新が効率良く実行する

◆ 無線通信を仮想化する時空間ダイナミックフロー制御技術

- アプリケーションを考慮して通信品質を予測し、シームレスにRATを切り替える（仮想化）
- 映像伝送との共存環境でサイクリック通信（制御通信）を安定化

◆ テストベッドの活用を利用して

- B5Gの研究者/開発者への評価環境は十分整備されている。今後6Gに向けアプリケーションとの連携が緊密化すると考えると、ネットワークレベルでの評価のための機能充実を期待

謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT（エヌアイシーティ））の委託研究（JPJ012368C01201）により得られたものです。

\Orchestrating a brighter world

NEC