

卒業論文 2025 年度（令和 7 年度）

sXGP-5G：次世代モバイルコア研究への参 入障壁低減のための実験環境の提案

慶應義塾大学 総合政策学部

山口 泰平

sXGP-5G：次世代モバイルコア研究への参入障壁低減のための実験環境の提案

モバイル通信の標準化において、3GPP は仕様書ベースのプロセスを採用しているため、実装・検証が後回しになり、「仕様上は規定されているが実際には動作しない機能」が多数生じている。次世代（6G）に向けては、実装ベースの標準化（implementation-driven standardization）による早期の相互運用性検証と標準化へのフィードバックサイクルの確立が不可欠である。しかし、実機 RAN を用いた検証は電波法上の制約から困難であり、標準化プロセスの検証基盤が不足している。

本研究は、免許不要帯で運用可能な sXGP（TD-LTE 互換）を eNB として活用し、4G の RAN（UE・eNB）と 5G Core（5GC）を接続するコンバータを実装することで、実装ベース標準化を支援する実機検証環境を提案する。本研究では、(1) sXGP を用いた法令遵守型 RAN の構築、(2) S1AP/NGAP/NAS の信令処理と GTP-U 中継を行うコンバータの設計・実装、(3) 相互運用性検証とフィードバックのための計測・再現手順の整備、を行った。

評価として、登録・PDU セッション確立などの基本機能を確認し、実機特有の相互運用性問題の検出能力を検証した。提案環境は、(a) 標準仕様の実装検証と相互運用性テスト、(b) 標準化へのタイムリーなフィードバック、(c) 継続的インテグレーション・回帰テスト、(d) 性能評価とボトルネック分析、(e) 教育・トレーニング用途、(f) プロトコル拡張の試作・検証、といったユースケースに適用可能である。本環境により、実装を動かしながら標準化を進めるサイクルを確立し、6G 時代のアジャイルな標準化プロセスに貢献する。

キーワード:

1. モバイルシステム 2. sXGP 3. 5G Core 4. Open5GS 5. GTP-U

慶應義塾大学 総合政策学部

山口 泰平

sXGP-5G: Proposal of flexible 5G network construction method for next-generation mobile network development

This thesis presents a practical and reproducible 5G experimentation environment by leveraging sXGP (TD-LTE compatible, license-free band in Japan) as an eNB and implementing a converter that connects a 4G RAN (UE/eNB) to a 5G Core (5GC). Traditional 5G research often requires licensed spectrum and expensive RAN equipment, which raises the barrier to entry for universities, labs, and small teams. Our contributions are threefold: (1) building an sXGP-based RAN, (2) designing and implementing a converter that handles S1AP/NGAP/NAS signaling and relays GTP-U, and (3) establishing reproducible build and experiment procedures via Docker.

We validate basic functions such as Registration and PDU session establishment and provide a measurement toolkit for latency, throughput, and resource utilization. The proposed environment benefits several use cases, including (a) education and training, (b) rapid prototyping of protocol conversion, (c) interoperability and regression testing, (d) performance evaluation and bottleneck analysis, (e) reproducible research and collaboration, and (f) operational studies and fault scenario reproduction. The environment facilitates legal, low-cost, and hands-on 5G research while keeping proximity to realistic operational settings.

Keywords :

1. Mobile Systems 2. sXGP 3. 5G Core 4. Open5GS 5. GTP-U

Keio University Bachelor of Arts in Policy Management
Taihei Yamaguchi

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	問題意識と課題	1
1.3	研究目的	2
1.4	本論文の貢献	2
1.5	論文構成	3
第2章	基礎知識と課題整理	4
2.1	sXGP と 4G/5G の概要	4
2.1.1	sXGP の位置づけ (免許不要・TD-LTE 互換)	4
2.1.2	4G RAN (UE・eNB) と EPC/5GC の要素	4
2.1.3	5GC のアーキテクチャ (AMF/SMF/UPF 等)	4
2.2	3GPP 標準化と標準-実装ギャップ	4
2.2.1	仕様の包含範囲とリファレンス実装の不足	4
2.2.2	ベンダ実装差と相互接続性の課題	4
2.2.3	研究・評価におけるギャップの影響	5
2.3	RAN コア間インターワーキングの基礎	5
2.3.1	制御面 (S1-AP vs. NG-AP)	5
2.3.2	ユーザ面 (GTP-U 互換性とパススルー/変換)	5
2.3.3	ID/コンテキスト管理 (NAS, IMSI/SUPI 等)	5
2.4	OSS と 6G に向けた開発・検証サイクル	5
2.4.1	OSS の役割 (Open5GS 等) と試作の加速	5
2.4.2	適合・相互接続・回帰テストの自動化	5
2.4.3	再現性 (Docker 等) と研究公開の促進	6
2.5	モバイルシステム全体での課題感	6
2.5.1	研究環境のコストとライセンス (免許・機器費用)	6
2.5.2	相互接続性・ベンダ依存の壁	6

2.5.3	運用・再現性とオープンテストベッドの不足	6
2.5.4	セキュリティ・計測基盤の一般化の難しさ	6
2.6	法規制と sXGP の位置づけ	6
2.6.1	電波法の制約と実機検証の困難	6
2.6.2	免許不要帯を用いた代替アプローチとしての sXGP の意義	7
2.7	シミュレータの対象範囲と限界	7
2.7.1	シミュレーションで十分な領域	7
2.7.2	シミュレーションの限界	7
2.8	実機が必要となる検証項目	7
2.9	本環境がもたらす価値（ユースケース）	8
2.9.1	教育・トレーニング	8
2.9.2	プロトタイピングと検証の高速化	8
2.9.3	相互接続・回帰テスト	8
2.9.4	性能評価とボトルネック分析	8
2.9.5	再現性の高い研究公開と共同研究	8
2.9.6	運用研究・障害シナリオの再現	9
2.10	本研究が対象とする課題の定義	9
2.10.1	研究者・学生が手軽に再現できる環境の要件	9
2.10.2	sXGP × 5GC 接続の技術的論点の範囲	9
2.10.3	評価指標と成功基準の設定	9
第 3 章	関連研究と事例	10
3.1	オープンソース 5GC とテストベッド	10
3.1.1	Open5GS / free5GC / srsRAN 5G	10
3.1.2	商用テストベッド・教育用環境	10
3.2	OSS エコシステムと適合/相互接続テスト	10
3.2.1	仕様準拠テスト、相互接続試験の枠組み	10
3.2.2	回帰テストと CI/CD 連携の事例	10
3.3	LTE eNB と 5GC の相互接続に関する標準化	10
3.3.1	ng-eNB の位置づけ（3GPP 23.501 等）	10
3.3.2	EPS/5GS 間インターワーキング（N26, 移動性）	10
3.4	プロトコル変換・ゲートウェイの先行事例	10
3.4.1	S1AP NGAP 変換のアプローチ	10
3.4.2	GTP-U の TEID 管理とパススルー	10

3.5	sXGP の研究利用事例	10
3.5.1	学術・企業での実験報告	10
3.5.2	運用制約と利点	10
第 4 章	提案手法：sXGP-5G コンバータ	11
4.1	要求仕様と設計方針	11
4.1.1	ユースケース	11
4.1.2	非機能要件（再現性・法令遵守・安全性）	11
4.1.3	対象範囲（制御/ユーザ面、認証、セッション管理）	12
4.2	アーキテクチャ設計	12
4.2.1	制御面：S1AP NGAP 変換の設計案	12
4.2.2	ユーザ面：GTP-U 転送・TEID 管理	12
4.2.3	認証・登録（NAS メッセージ処理の方針）	12
4.2.4	コンテキスト管理とタイムアウト	12
4.3	sXGP 採用の根拠と想定限界	12
4.3.1	採用の根拠：実装ベース標準化への貢献	12
4.3.2	想定限界・外延	13
4.4	実装方針と部品選定	13
4.4.1	ソフトウェア構成（言語・ライブラリ・依存）	13
4.4.2	ネットワーク構成（VLAN/VRF/NAT の要否）	13
4.4.3	監視・計測（メトリクス、トレース）	13
4.5	制約と想定される限界	13
4.5.1	規格差分による制限	13
4.5.2	性能上のボトルネックと回避策	13
第 5 章	実験環境と方法	14
5.1	実験環境	14
5.1.1	ハードウェア構成（UE/eNB/sXGP 基地局/サーバ）	14
5.1.2	ソフトウェア構成（5GC, コンバータ, OS）	14
5.1.3	ネットワークトポロジと IP アドレッシング	14
5.2	実験シナリオ	14
5.2.1	基本接続（登録・PDU セッション確立）	14
5.2.2	データ転送（スループット・遅延）	14
5.2.3	ハンドオーバー相当の扱い（必要に応じて）	14

5.2.4	Android エミュレータの限界と実 UE 検証の必要性	14
5.3	計測方法と指標	16
5.3.1	A/B 比較 (シミュレータ vs 実機)	16
5.3.2	成功基準	16
5.3.3	成功判定基準と再現手順	16
5.3.4	メトリクス (接続成功率、遅延、スループット、CPU/メモリ)	16
5.3.5	ロギング・パケットキャプチャの取得方法	16
第 6 章	評価	17
6.1	結果	17
6.1.1	機能検証の結果 (登録・PDU セッション)	17
6.1.2	性能測定の結果 (遅延・スループット)	17
6.1.3	リソース使用率・スケーラビリティ	17
6.1.4	標準はあるが未実装・未相互運用の検証ケース	17
6.2	考察	20
6.2.1	提案手法の有効性と限界	20
6.2.2	関連研究との比較と位置づけ	20
6.2.3	実運用への適用可能性	20
6.3	ケーススタディと妥当性の脅威	20
6.3.1	実 UE 固有の事象 (例: NAS 再送シーケンスのズレ)	20
6.3.2	測定系の制約 (時刻同期、NIC オフロードの影響)	20
6.3.3	内的/外的妥当性の脅威と緩和策	20
第 7 章	結論と展望	21
7.1	本研究のまとめ	21
7.2	今後の課題	21
付録		24

图 目 次

表 目 次

第1章 序論

1.1 背景

モバイル通信の標準化において、3GPP は仕様書を先に策定し、実装・相互運用性検証は後工程となる「仕様先行型」のプロセスを採用している。これは大規模な通信インフラの標準化として必要な側面もあるが、実装が追いつかず、「仕様上は存在するが実際には動作しない機能」や「異なる実装間での相互運用性問題」が多数生じている。一方、IETF などインターネット技術の標準化では”rough consensus and running code”の原則に基づき、実装を動かしながら標準化を進める「実装ベース標準化」が実践されており、標準と実装の乖離が少ない。

6G 時代に向けては、標準化サイクルの高速化と実装・検証の早期化が不可欠である。しかし、モバイル通信では実機 RAN を用いた検証が電波法上の制約から困難であり、実装ベース標準化を支援する検証基盤が不足している。本研究は、免許不要帯で運用可能な sXGP (TD-LTE 互換) を eNB として活用し、4G RAN (UE・eNB) と 5G Core (5GC) を接続するコンバータを提案することで、法令遵守の範囲で実機検証を可能にする。5GC の基本的なアーキテクチャと手順は 3GPP TS [1, 2] に規定されており、OSS 実装としては Open5GS [3] が広く用いられている。

1.2 問題意識と課題

本研究の背景には、以下の三点に関する強い問題意識がある。

- 実装ベース標準化の不在: 3GPP の標準化プロセスは仕様書ベースであり、実装・相互運用性検証が後回しになる。結果として「仕様上は存在するが実際には動作しない機能」「実装間での非互換性」が多数生じ、標準化へのフィードバックループが極めて遅い。IETF の”running code”原則とは対照的に、実装を動かしながら標準化を進める文化が欠如している。6G 時代のアジャイルな開発・標準化サイクルを確立するには、実装ベースの検証基盤が不可欠である。

- 実装検証環境の不足: モバイルコアはソフトウェア化が進み、Open Source Software (OSS) も充実してきた。しかし、実機 RAN を用いた検証環境は電波法上の制約から構築困難であり、OSS の相互運用性や実機特有の問題を検証する手段が限られている。シミュレータでは発見できない実装レベルの問題 (タイミング、リソース競合、NIC/ドライバ依存の挙動など) を早期に検出できないことが、標準化と実装のギャップを拡大させている。
- 標準化フィードバックサイクルの遅延: 現状では、仕様策定 実装 商用展開 問題発覚 次期仕様での修正、というサイクルに数年を要する。この遅延により、不具合のある仕様が長期間放置され、互換性問題が蓄積する。実機検証環境を用いた早期の相互運用性テストと標準化団体へのタイムリーなフィードバックが可能になれば、このサイクルを大幅に短縮できる。免許不要帯で運用可能な sXGP は、この課題に対する実践的な解決策となる。

これらに加えて、相互接続性、運用・再現性、計測基盤の不足といったモバイルシステム全体の横断的課題を踏まえ、とりわけ RAN とコア間のインターワーキングが標準化・実装検証のボトルネックである点を指摘する。

1.3 研究目的

- 実装ベース標準化を支援する実機検証環境の構築方法を示す。
- sXGP ベースの 4G RAN と 5GC を接続するコンバータの設計・実装を通じて、標準仕様の相互運用性検証を実現する。
- 実機特有の問題を早期検出し、標準化へのフィードバックサイクルを短縮する手法を提案する。
- 再現可能な検証環境により、継続的インテグレーション・回帰テストを可能にする。

1.4 本論文の貢献

- 実装ベース標準化を可能にする実機検証環境 (sXGP + 5GC) の実証。標準仕様と実装の乖離を早期発見し、標準化団体へタイムリーにフィードバックする基盤を提供。

- 4G RAN と 5GC の信令・ユーザ面の相互接続に関する設計指針と、実装レベルでの相互運用性問題の分類・解決手法の整理。
- 再現性の高い検証プロファイル(トポロジ、計測項目、実験手順)の提示により、継続的な相互運用性テストと回帰テストを支援。
- 免許不要帯を活用した法令遵守型の実機検証手法の確立。電波法制約下でも実装を動かしながら標準化を進めるアプローチの実現可能性を示す。

1.5 論文構成

本論文は以下の構成である。第 2 章で基礎知識と課題整理、第 3 章で関連研究と事例、第 4 章で提案手法、第 5 章で実験環境と方法、第 6 章で評価、第 7 章で結論と今後の課題を述べる。

第2章 基礎知識と課題整理

2.1 sXGP と 4G/5G の概要

2.1.1 sXGP の位置づけ（免許不要・TD-LTE 互換）

本節では、sXGP の制度的位置づけ（免許不要帯・チャネル幅・出力制限など）と TD-LTE 互換性、利用可能な端末・eNB 機器、研究/教育用途における利点と限界を概説する。

2.1.2 4G RAN（UE・eNB）と EPC/5GC の要素

UE/eNB/EPC の基本構成と主要インタフェース（Uu, S1-MME, S1-U）、RRC と NAS の役割、Attach/認証/セッション確立の要点を整理する。

2.1.3 5GC のアーキテクチャ（AMF/SMF/UPF 等）

AMF/SMF/UPF/UDM/AUSF/NRF などの機能分担と N インタフェース、登録・セッション管理・ポリシー適用の流れを俯瞰し、本研究で利用する機能範囲を明確化する。

2.2 3GPP 標準化と標準-実装ギャップ

2.2.1 仕様の包含範囲とリファレンス実装の不足

3GPP 仕様の階層（SA/CT/RAN）と各 TS の対象範囲、必須/任意要件や相互参照の構造、実装上の曖昧点（未規定項目）の例を挙げ、研究への影響を指摘する。

2.2.2 ベンダ実装差と相互接続性の課題

ベンダ実装差の典型（IE の扱い、タイマ既定値、再送・フォールバック、ベンダ拡張 IE）と IOT で顕在化する問題、既知の回避策/ベストプラクティスを述べる。

2.2.3 研究・評価におけるギャップの影響

仕様 実装ギャップが再現性・比較可能性に与える影響、論文実験の内的/外的妥当性への波及、OSS でギャップを埋める方針を示す。

2.3 RAN コア間インターワーキングの基礎

2.3.1 制御面 (S1-AP vs. NG-AP)

S1-AP と NG-AP のメッセージ対応関係、登録/セッション確立に関わる必須 IE、エラー/例外時の取り扱い、コンバータにおける変換ポイントを列挙する。

2.3.2 ユーザ面 (GTP-U 互換性とパススルー/変換)

GTP-U のトンネル管理 (TEID 割当・再利用)、MTU/フラグメント、順序/再送の扱い、QoS/5QI 対応、UPF 経由時のパスを整理する。

2.3.3 ID/コンテキスト管理 (NAS, IMSI/SUPI 等)

IMSI/SUPI, GUTI/5G-GUTI などの識別子、NAS セキュリティコンテキスト (KDF, KAMF/KNASint/KNASenc) の概要と、コンバータ内でのマッピング/生存期間管理方針を述べる。

2.4 OSS と 6G に向けた開発・検証サイクル

2.4.1 OSS の役割 (Open5GS 等) と試作の加速

Open5GS 等 OSS コアの構成と拡張性、コミュニティ/CI の活用、研究プロトタイプの実装速度や学習コスト低減の利点をまとめる。

2.4.2 適合・相互接続・回帰テストの自動化

自動試験の枠組み (シナリオ駆動、pcap/ログ照合、差分検出) と既存テスト資産の参考例 (TTCN-3 等)、回帰の最小セット設計を記す。

2.4.3 再現性（ Docker 等 ）と研究公開の促進

コンテナ化・固定バージョン・seed/設定共有、データ/成果物の保存と再実行手順、公開時の留意点（鍵や個人情報の除去）を簡潔に示す。

2.5 モバイルシステム全体での課題感

2.5.1 研究環境のコストとライセンス（免許・機器費用）

端末/モデム/eNB/SDR/アンテナ/測定機器の費用感、免許や試験局の手続き、sXGP 採用によるコスト/手続き削減効果を見積もる。

2.5.2 相互接続性・ベンダ依存の壁

UE/モデム/OS/カーネル/NIC 差や RAN/コアのベンダ差が及ぼす影響例を列挙し、評価設計での緩和策（多端末/多実装での検証）を書く。

2.5.3 運用・再現性とオープンテストベッドの不足

共有可能なテストベッドの不足と再現性の課題、提供したいアーティファクト（構成・スクリプト・パケットトレース）を述べる。

2.5.4 セキュリティ・計測基盤の一般化の難しさ

鍵/認証情報の取り扱い、プライバシー/PII、攻撃面の考慮、計測オーバーヘッドと観測者効果の抑制を整理する。

2.6 法規制と sXGP の位置づけ

2.6.1 電波法の制約と実機検証の困難

屋内外・出力・使用帯域・電波暗室等の制約、干渉リスク、学術機関での典型的な許認可フローを概説する。

2.6.2 免許不要帯を用いた代替アプローチとしての sXGP の意義

sXGP により合法かつ安全に実機相当の RAN 検証を行う意義と限界（周波数・設備可用性・スループット等）を要約する。

2.7 シミュレータの対象範囲と限界

2.7.1 シミュレーションで十分な領域

新 NF のアルゴリズム検討、プロトコル状態機械の基本遷移の正当性確認、ラフなスケール試験、CI での高速回帰などはシミュレータで効率的に実施できる。

2.7.2 シミュレーションの限界

実 UE 固有の実装差（RRC/NAS のタイマ・再送・Capability 差）、RRC/PHY/MAC の時間ゆらぎ由来の境界条件、OS/NIC のオフロードやキューイング、パケット順序入替・フラグメンテーション、S1AP↔NGAP 変換や TEID 管理の例外パスなどは、シミュレータでは再現が難しい。

2.8 実機が必要となる検証項目

- 厳密なタイマ境界・再送・例外遷移（登録/PDU 確立、NAS/RRC の異常系）
- セキュリティと鍵管理（AKA/EAP-AKA'、KDF、再同期、アルゴ協定の実装差）
- ユーザ面の実性能（GTP-U オフロード、カーネル/DPDK、NUMA/CPU スケジューリング）
- 相互接続・回帰（複数 UE/モデム/OS での互換性検証）
- フェイルシナリオ（部分ロス、遅延、再順序化、NIC ドロップ、CPU スタベーション）

2.9 本環境がもたらす価値（ユースケース）

2.9.1 教育・トレーニング

免許不要帯で運用可能な sXGP を eNB として活用し、4G RAN と 5GC を接続できるため、学部・大学院・企業研修において、法令遵守のもとで実機に近い無線・コア連携の学習が可能となる。設定の再現手順を公開することで、実験レポートの客観性と再現性も高められる。

2.9.2 プロトタイピングと検証の高速化

コントロールプレーン (S1AP/NGAP/NAS) およびユーザプレーン (GTP-U) の変換・中継部を差し替え可能にすることで、新しいアルゴリズムやポリシー（例：識別子管理、TEID 割当、タイムアウト制御）の試作・検証を低コストで繰り返し実施できる。

2.9.3 相互接続・回帰テスト

Open5GS などの 5GC 実装や各種 eNB/UE に対して、信令互換性や基本機能（登録、PDU セッション確立）の回帰テストを自動化できる。コンバータを介した差分吸収により、ベンダ差や仕様差を可視化しつつ評価できる。

2.9.4 性能評価とボトルネック分析

遅延・スループット・リソース使用率 (CPU/メモリ) の計測基盤を同梱することで、コンバータの処理遅延やカプセル化オーバーヘッド、TEID 管理戦略の影響を定量化でき、設計改善に資する。

2.9.5 再現性の高い研究公開と共同研究

Docker を用いた構成管理とビルド手順の統一により、第三者が同一環境で追試できる。研究成果の普及や共同研究の立ち上げコストを下げる。

2.9.6 運用研究・障害シナリオの再現

認証失敗やセキュリティモードエラー、ハンドオーバー相当の遷移など、現場で発生する事象の再現とトラブルシュート手順の確立に役立つ。

2.10 本研究が対象とする課題の定義

2.10.1 研究者・学生が手軽に再現できる環境の要件

必要構成要素・費用・所要時間・依存関係・再現手順の粒度を定義し、到達すべきユーザ体験（セットアップから成功確認まで）を示す。

2.10.2 sXGP × 5GC 接続の技術的論点の範囲

本研究で扱う範囲（制御/ユーザ面の変換、識別子/セキュリティ/状態管理）と扱わない範囲（RRC/PHY 最適化、商用品質の最適化など）を明確化する。

2.10.3 評価指標と成功基準の設定

機能（登録/セッション確立率）、性能（遅延/スループット/CPU 等）、堅牢性（異常時の復帰）、再現性（環境差耐性）の指標と合格基準を定める。

第3章 関連研究と事例

3.1 オープンソース 5GC とテストベッド

3.1.1 Open5GS / free5GC / srsRAN 5G

3.1.2 商用テストベッド・教育用環境

3.2 OSS エコシステムと適合/相互接続テスト

3.2.1 仕様準拠テスト、相互接続試験の枠組み

3.2.2 回帰テストと CI/CD 連携の事例

3.3 LTE eNB と 5GC の相互接続に関する標準化

3.3.1 ng-eNB の位置づけ (3GPP 23.501 等)

3.3.2 EPS/5GS 間インターワーキング (N26, 移動性)

3.4 プロトコル変換・ゲートウェイの先行事例

3.4.1 S1AP NGAP 変換のアプローチ

3.4.2 GTP-U の TEID 管理とパススルー

3.5 sXGP の研究利用事例

3.5.1 学術・企業での実験報告

3.5.2 運用制約と利点

第4章 提案手法：sXGP-5G コンバータ

4.1 要求仕様と設計方針

4.1.1 ユースケース

提案環境は、実装ベース標準化を支援する以下のユースケースを想定する。

1. 標準仕様の実装検証と相互運用性テスト: 3GPP 仕様に基づく OSS 実装を実機 RAN で動作させ、仕様書上の記述と実装の乖離、異なる実装間の相互運用性問題を早期に発見する。
2. 標準化へのタイムリーなフィードバック: 検出した問題を再現手順・パケットキャプチャとともにドキュメント化し、標準化団体 (3GPP 等) や関連 OSS プロジェクトへ報告・改善提案を行う。
3. 継続的インテグレーション・回帰テスト: 再現性の高い実験環境により、コード変更やプロトコル拡張が既存機能を破壊していないかを自動的に検証する。
4. 性能評価とボトルネック分析: 実機環境での遅延・スループット測定により、プロトコル設計や実装の性能ボトルネックを特定し、標準化・実装の両面から改善を図る。
5. プロトコル拡張の試作・検証: 新機能や実験的プロトコルを実装し、実機環境で動作検証を行うことで、標準化前の技術検証を加速する。
6. 教育・トレーニング用途: 実機相当の環境で 5G/6G プロトコルスタックの動作を学習し、標準化・実装の実践的スキルを習得する。

4.1.2 非機能要件 (再現性・法令遵守・安全性)

- 再現性: Docker 等のコンテナ技術により、環境構築手順を標準化し、異なる環境でも同一の実験を再現可能にする。

- 法令遵守: 免許不要帯 (sXGP) を用いることで、電波法に抵触せず実機検証を実施できる。
- 安全性: 実験環境を隔離されたネットワークで構築し、商用ネットワークへの影響を排除する。

4.1.3 対象範囲 (制御/ユーザ面、認証、セッション管理)

4.2 アーキテクチャ設計

4.2.1 制御面：S1AP NGAP 変換の設計案

4.2.2 ユーザ面：GTP-U 転送・TEID 管理

4.2.3 認証・登録 (NAS メッセージ処理の方針)

4.2.4 コンテキスト管理とタイムアウト

4.3 sXGP 採用の根拠と想定限界

4.3.1 採用の根拠：実装ベース標準化への貢献

sXGP を採用する最大の理由は、免許不要帯での法令遵守により「実装を実際に動かせる」ことにある。これは、実装ベース標準化の実現において極めて重要である。

- 実機による全スタック検証: 実 UE・実 NIC・実時間のプロトコルスタックを動作させることで、シミュレータでは検出できない実装レベルの問題 (タイミング、リソース競合、ハードウェア依存の挙動など) を発見できる。これは標準仕様と実装の乖離を早期に検出するために不可欠である。
- 相互運用性問題の早期発見: 異なるベンダの実装 (UE、eNB、コア) を組み合わせた際の相互運用性問題を、実機環境で検証できる。3GPP 標準の曖昧な記述や解釈の違いによる非互換性を、標準化プロセスの早い段階でフィードバック可能にする。
- 標準化へのタイムリーなフィードバック: 実機で問題を再現できることで、再現手順・パケットキャプチャ・ログを含む具体的な報告を標準化団体や OSS プロジェク

トに提供できる。これにより、仕様策定 実装 問題発覚 修正のサイクルを数年単位から数ヶ月単位に短縮できる。

- 継続的検証の実現：免許不要帯であるため、継続的インテグレーション（CI）環境に組み込んで自動テストを実施できる。コード変更のたびに実機検証を行うことで、回帰テストと品質保証を強化できる。
- （副次的効果）低コスト・再現性：専用周波数ライセンスが不要であり、比較的低コストで実験環境を構築できる。また、Docker などの技術と組み合わせることで、再現性の高い検証環境を複数の研究者・組織で共有できる。

4.3.2 想定限界・外延

本環境はLTE互換のsXGPをRANとして用いるため、5G NR特有のPHY機能やスケジューリング最適化は対象外となる。しかし、制御面（S1AP/NGAP/NAS）およびユーザ面（GTP-U）のプロトコルレベルでの相互運用性検証は十分に可能であり、標準化フィードバックの主要な価値はこのレイヤーにある。NR固有の無線レイヤーの課題は、今後の拡張として分離して扱う。

4.4 実装方針と部品選定

4.4.1 ソフトウェア構成（言語・ライブラリ・依存）

4.4.2 ネットワーク構成（VLAN/VRF/NATの要否）

4.4.3 監視・計測（メトリクス、トレース）

4.5 制約と想定される限界

4.5.1 規格差分による制限

4.5.2 性能上のボトルネックと回避策

第5章 実験環境と方法

5.1 実験環境

5.1.1 ハードウェア構成 (UE/eNB/sXGP 基地局/サーバ)

5.1.2 ソフトウェア構成 (5GC, コンバータ, OS)

5.1.3 ネットワークトポロジとIPアドレッシング

5.2 実験シナリオ

5.2.1 基本接続 (登録・PDUセッション確立)

5.2.2 データ転送 (スループット・遅延)

5.2.3 ハンドオーバー相当の扱い (必要に応じて)

5.2.4 Android エミュレータの限界と実 UE 検証の必要性

通信機能を有する Android アプリケーションの検証において、PC 上のエミュレータのみでは再現困難な事象が多い。特に、セルラースタックや事業者設定、端末 OS の省電力・バックグラウンド制御など、実機依存の挙動がアプリの通信体験を大きく左右する。本研究では、sXGP+実 UE+5GC 構成により、以下の観点で実機ならではの検証を行う。

エミュレータで不足しがちな項目

- セルラー制御プレーンの実挙動: 実エミュレータはベースバンドを持たず、Registration/TAU、NAS 再送、タイマ境界での挙動差 (T3xx/Back-off 等) の忠実再現が困難。
- IMS/音声・SMS 連携: VoLTE/VoNR や SMS over NAS などでは端末・キャリア・IMS の三者連携が必要で、エミュレータでは未実装/限定的であることが多い。

- ネットワーク条件とスタック差分: IPv6-only + NAT64/464XLAT、DNS64、PCO/APN パラメータ、MTU/MSS、NIC オフロード (TSO/GRO) 等の影響はエミュレータで再現しづらい。
- OS によるバックグラウンド制御: Doze/App Standby、JobScheduler/WorkManager のネットワーク可用性制御は実機の省電力・無線レイヤと結合しており、エミュレータでは挙動が異なる。
- 移動性・無線イベント: RRC Idle/Connected の遷移、電波強度・セルリセクション、ハンドオーバー相当の切替など、時間軸のイベントは実無線でなければ発現しにくい。
- ポリシ・スライス連携: URSP やスライシングは端末/OS/事業者依存が強く、汎用エミュレータでは検証対象外となることが多い(本環境では制御/ユーザ面の相互接続検証を主対象とする)。

実 UE + sXGP + 5GC での検証手順 (例)

1. 端末側ログ取得: logcat (特に radio バッファ) とネットワークログを収集し、アプリの API 呼び出しと無線/NAS イベントを時系列で突合する。
2. ネットワーク側トレース: コンバータ/5GC 側で S1AP/NGAP/NAS、GTP-U の pcap を取得し、再送、原因コード、TEID/フローの対応を解析する。
3. テストシナリオ:
 - IPv6-only + NAT64/464XLAT 下でのアプリ接続 (DNS64 解決、QUIC/TCP の挙動差)。
 - RRC Idle 復帰や電波減衰を伴う再接続でのセッション継続性 (ソケット再確立、タイムアウト)。
 - 大きなパケットや損失率注入時の再送・バックオフ挙動 (アプリ層リトライ設計の妥当性)。
4. 再現性確保: Docker 化した 5GC/コンバータ構成と固定シナリオにより、回帰テストとして継続的に実行可能にする。

本環境で得られる価値 実 UE を用いることで、シミュレータでは顕在化しにくい相互運用性問題や端末 OS 依存の振る舞い（例：NAS 再送シーケンスのズレ、IPv6-only 下での API 失敗、バックグラウンド時の接続断）を早期に発見し、パケットキャプチャと再現手順を添えて標準化・OSS 実装へフィードバックできる。

5.3 計測方法と指標

5.3.1 A/B 比較（シミュレータ vs 実機）

- A: RAN シミュレータ + 5GC (OSS) B: sXGP eNB + 実 UE + 5GC (OSS)
- 比較対象: 登録/PDU 確立成功率、タイマ境界での失敗率、再送回数、エラーコード、スループット、遅延、リソース使用率
- ログ・トレース: S1AP/NGAP/NAS、GTP-U、カーネル/DPDK 統計、pcap

5.3.2 成功基準

基本機能の安定成立 (j99

5.3.3 成功判定基準と再現手順

5.3.4 メトリクス（接続成功率、遅延、スループット、CPU/メモリ）

5.3.5 ロギング・パケットキャプチャの取得方法

第6章 評価

6.1 結果

6.1.1 機能検証の結果（登録・PDUセッション）

6.1.2 性能測定の結果（遅延・スループット）

6.1.3 リソース使用率・スケーラビリティ

6.1.4 標準はあるが未実装・未相互運用の検証ケース

本節では、仕様上は規定されているが現場実装が未成熟 / 相互運用に課題がある代表例を挙げ、本環境（sXGP eNB + 実 UE + 5GC + コンバータ）で実験可能な具体ケースを示す。いずれも「基本的な 1 コール（登録・PDU セッション）が可能」であることを前提に、実装ベース標準化の観点での達成基準を定義する。

Case A: IPv6-only PDU + DNS64/NAT64/464XLAT extit 狙い: Rel-15 以降で IPv6-only が推奨される一方、端末の CLAT やアプリの v6 対応が未成熟で不具合が出やすい。

extit 手順: DNN を IPv6-only に設定し、UPF で NAT64、DNS64 を提供。Android 実機で CLAT 有効を確認し、HTTP/2、QUIC/HTTP/3 双方で疎通。

extit 観測: logcat(radio,netd)、pcap(S1AP/NGAP/NAS, GTP-U)、アプリ疎通率。

extit 成功基準: v6-only 環境でのアプリ成功率向上、名前解決（AAAA 合成）成功、CLAT 経路でのフラグメント/MTU 不具合が無いこと。

Case B: PCO パラメータ伝搬（DNS, MTU） extit 狙い: 仕様上は PCO で DNS/MTU 等が配布可能だが、UE/コア/変換部の処理抜けが散見される。

extit 手順: 5GC/SMF 設定で PCO に DNS/MTU を設定し、コンバータで S1AP/EPS 相当とのマッピングを検証。

extit 観測: UE の実際の DNS サーバ採用状況、path MTU に起因する再送/黒穴の有無。

extit 成功基準: 端末が配布 DNS/MTU を採用し、アプリの初期ハンドシェイク失敗率が低下。

Case C: QoS 分離 (デフォルト/専用ベアラ相当 5QI/QFI) extit 狙い: LTE のデフォルト/専用ベアラを 5GC の QoS フローにマッピングする際の整合性が課題。

extit 手順: トラフィックフィルタ (TFT) と 5QI 差 (例: 9 vs 7) を設定し、UPF でキュー/帯域差を可視化。

extit 観測: QFI ごとのレイテンシ/スループット差、ドロップ時のプリエンプション挙動。

extit 成功基準: 指定フローのみ帯域制御が有効、誤分類が発生しない。

Case D: UL-CL (上り分類) によるローカルブレイクアウト extit 狙い: 仕様は普及しつつあるが、設定・分類の相互運用が難しい。

extit 手順: 2 段 UPF 構成で特定宛先/ポートをローカル UPF に分岐、その他は中央 UPF へ。

extit 観測: TEID/Classifier 一致、遅延短縮、誤分岐の有無。

extit 成功基準: ルール通りにトラフィックが LBO され、遅延が有意に短縮。

Case E: SSC モード 2/3 相当のセッション継続性 (アプリ視点) extit 狙い: 仕様で規定されるセッション連続性の違い (IP 変更含む) にアプリが耐えられないことが多い。

extit 手順: ネットワーク側で PDU 再確立 (IP 変更) を誘発し、アプリの再接続/セッション維持を検証。

extit 観測: ソケット再確立時間、ユーザレベル失敗率、リトライ戦略の有効性。

extit 成功基準: IP 変更下でもユーザ体験の中断が最小化される (しきい値設定)。

Case F: DSCP/ECN の保存と QoS 反映 extit 狙い: GTP-U カプセル化で DSCP/ECN の扱いが実装差で崩れやすい。

extit 手順: アプリ/端末側で DSCP/ECN を付与し、UPF ~ 外部ネットワーク間での保存・反映を確認。

extit 観測: pcap でのビット保存、UPF キューイング差、ECN マークの往復伝搬。

extit 成功基準: 端末 UPF 外部の各区間で規定通り保存/反映される。

Case G: GTP-U Path MTU Discovery/フラグメントの取り扱い extit 狙い: PM-TUD 未実装や ICMP 遮断で黒穴化しやすい。

extit 手順: 大きな MSS/DF で送出し、ICMP 応答と再送/分割の動作を観察。

extit 観測: 黒穴検出時間、再送/スループット低下、ICMP 可視。

extit 成功基準: 黒穴化せず経路 MTU に収束、アプリのスループット劣化が最小。

Case H: SMS over NAS (可能な範囲) extit 狙い: 仕様はあるが端末/IMS/コアの三者整合が難しい。

extit 手順: コアの SMSF/NAS 経路が利用可能な場合に限り、端末からの SMS 送受を検証。

extit 観測: NAS トレース上の SM メッセージ、配達成否。

extit 成功基準: 端末 5GC 端末/外部への SMS 疎通が確認できる (限定条件付き)。

Case I: Paging 到達性と省電力 (Idle 復帰) extit 狙い: 省電力や無線条件で Paging 到達が不安定になる実装差がある。

extit 手順: UE を Idle に遷移後、下りトラフィックで Paging Service Request の遷移を観測。

extit 観測: Paging 応答率、復帰時間、失敗時の原因コード。

extit 成功基準: 規定遅延内での安定復帰 (しきい値) と高到達率。

Case J: 複数 DNN (APN) 選択とフォールバック extit 狙い: 端末/ネットの DNN 選択・フォールバック挙動が規定とずれることがある。

extit 手順: 存在しない DNN 要求 規定エラー 代替 DNN 確立の流れを試験。

extit 観測: NAS 原因コード、再試行ロジック、最終確立率。

extit 成功基準: 規定に沿った原因コードと適切なフォールバックで最終成功。

以上のケースは、制御/ユーザプレーンの相互運用とアプリ体験の両面を対象とし、シミュレータでは露呈しにくい実機依存の問題を洗い出す設計である。各ケースは、pcap・logcat・メトリクスと再現手順をセットで文書化し、標準化・OSS 実装への具体的フィードバックを可能にする。

6.2 考察

6.2.1 提案手法の有効性と限界

6.2.2 関連研究との比較と位置づけ

6.2.3 実運用への適用可能性

6.3 ケーススタディと妥当性の脅威

6.3.1 実 UE 固有の事象（例：NAS 再送シーケンスのズレ）

6.3.2 測定系の制約（時刻同期、NIC オフロードの影響）

6.3.3 内的/外的妥当性の脅威と緩和策

第7章 結論と展望

7.1 本研究のまとめ

7.2 今後の課題

謝辭

参考文献

- [1] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). System architecture for the 5g system (5gs). 3GPP TS 23.501, 2024. Technical Specification 23.501.
- [2] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Procedures for the 5g system (5gs). 3GPP TS 23.502, 2024. Technical Specification 23.502.
- [3] Open5GS Project. Open5gs: Open source 5g/4g core network, 2025. <https://open5gs.org/> (accessed 2025/01/18) .

付録
