

LiFi（Light Fidelity）技術：標準化、技術進化、応用展望に関する包括的分析

エグゼクティブサマリー

本レポートは、光無線通信技術であるLiFi（Light Fidelity）について、その標準化の動向、最新の技術進化、そして現在および将来の応用分野を包括的に分析するものである。LiFiは、2023年7月のIEEE 802.11bb規格の批准により、理論的なコンセプトから標準化された技術へと移行し、重大な転換点を迎えた。この標準化は、既存の無線通信エコシステムとの相互運用性を確保し、市場普及を加速させるための戦略的な一歩として位置づけられる。

特筆すべきは、IEEE 802.11bbが**IEEE 802.11ax（Wi-Fi 6）**のフレームワークに意図的に準拠している点である。これにより、LiFiは既存の無線周波数（RF）技術を置き換えるのではなく、補完する技術としての地位を確立し、半導体メーカーやデバイスベンダーの参入障壁を大幅に低減させることが期待される。

技術面では、光源が従来のLEDから広帯域な窒化ガリウム（GaN）レーザーダイオードへと進化し、変調方式としてOFDM（直交周波数分割多重）、高速化技術として**MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）**が採用されるなど、性能はギガビット毎秒（Gbps）を超える領域に達している。

LiFiの価値提案は、電磁干渉が許容されない医療機関や航空機内、あるいは物理的なセキュリティが最優先される防衛・金融分野において特に顕著である。将来的には、5G/6G時代のヘテロジニアスネットワークや、NTTが提唱する**IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）**構想のような、すべてが光で接続される未来の通信インフラにおいて、不可欠な役割を担うことが予測される。本レポートは、これらの動向を詳細に解説し、LiFi技術の現在地と未来の可能性を明らかにする。

第1章 LiFiの基本原理と核心的特徴

本章では、LiFi技術を支える科学的基盤と運用上の特性を定義し、より広範な無線通信技術の文脈の中に位置づける。

1.1 光ベース通信の創成：VLCからLiFiへ

LiFi技術の根幹には、可視光通信（Visible Light Communication, VLC）が存在する。VLCは、光源（主にLED）の光強度変調を利用してデータを伝送する技術である¹。その基本原理は、人間の目には知覚できないほどの高速でLEDを点滅させ、そのオン・オフをバイナリデータ（「1」と「0」）に対応させることで情報を伝達する点にある¹。

LiFiは、このVLCを応用し、双方向かつ高速な完全ネットワーク型無線通信を実現する、より高度な実装として区別される¹。Wi-Fiが電波を利用するのと同様に、LiFiは光スペクトルを利用するが、その範囲は可視光に留まらず、近赤外線や紫外線スペクトルも含む³。

1.2 比較分析：LiFi vs. Wi-Fiおよびセルラー技術

LiFiは、既存のRF技術とは根本的に異なる特性を持つ。以下に主要な比較項目を示す。

- **スペクトル**：LiFiは、Wi-Fiやセルラーネットワークが利用する無線周波数スペクトル全体よりも1,000倍以上広大とされる、未認可の光スペクトル（数百THz帯）を利用する²。これにより、RF帯の周波数逼迫問題を回避できる。
- **通信速度**：実験室レベルでは最大224 Gbpsという理論値が報告されており⁴、現行のWi-Fi規格を大幅に上回る潜在能力を持つ。商用システムにおいても、すでにギガビット級の通信が提供されている²。
- **干渉耐性**：光波を利用するため、LiFiは電磁干渉（EMI）の影響を受けず、またそれ自体がRF干渉を発生させることもない。これにより、RFが混雑した環境でも安定した通信が可能となる⁴。
- **セキュリティ**：光の物理的特性が、本質的なセキュリティ上の優位性をもたらす。光は壁などの不透明な物体を透過しないため、通信範囲が物理的に限定され、室外からの盗聴や不正アクセスのリスクを根本的に排除できる⁴。
- **インフラ**：既存のLED照明設備を活用できるため、新たな通信インフラ層を構築する際のコストを削減できる可能性がある²。

特徴	LiFi (IEEE 802.11bb)	Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)
----	----------------------	-------------------------

使用スペクトル	光スペクトル（可視光、赤外線、紫外線） 数百THz	無線周波数（RF） 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz
最大データレート（理論値）	9.6 Gbps（標準規格）、実験室では224 Gbps	9.6 Gbps
セキュリティ	物理的に高い（光は壁を透過しない）	暗号化に依存（電波は壁を透過する）
電磁干渉（EMI）	発生せず、影響も受けない	発生源となり、影響も受ける
通信範囲	短い（約10 m）、見通し線（LOS）に依存	比較的長い（約30 m以上）、障害物を回り込む
モビリティ	限定的（アクセスポイント間のハンドオーバーが必要）	高い（シームレスなローミング）
標準化	IEEE 802.11bb	IEEE 802.11ax

1.3 内在する課題と物理的制約

LiFi技術は多くの利点を持つ一方で、光媒体に起因する本質的な制約も存在する。

- **見通し線（LOS）への依存性**：最大の課題は、送信機と受信機間に明確な光路が必要であることだ。壁や什器、さらには利用者自身の身体でさえも信号を遮断し、通信を途絶させる可能性がある⁴。壁面などからの反射光を利用することでこの問題は一部緩和されるが、電波の回折・透過特性と比較すると大きな制約であることに変わりはない¹⁹。
- **限定的な通信範囲**：一つのLiFiアクセスポイントがカバーできる範囲は、Wi-Fiルーターよりも短く、一般的に10 m程度とされる。そのため、連続的なカバレッジを確保するには、より高密度にアクセスポイント（アトセル）を配置する必要がある¹⁷。
- **環境光による干渉**：屋外、特に直射日光下では、太陽光が強力なノイズ源となり、受信側のフォトダイオードの信号検出を妨げ、性能を低下させる可能性がある⁴。ただし、この問題に対しては、太陽光のような一定または緩やかに変化する光強度ではなく、変調された信号の高速な変化のみを検出する高度なフィルタリング技術や変調方式によって影響を軽減する研究が進められている¹⁹。

LiFiの評価において重要なのは、その運用上の最大の弱点（壁を透過できないこと）が、同時にセキュリティと安定性における最大の強みであるという二面性を理解することである。これは単なる長所と

短所のリストではなく、光という物理媒体が持つ、分かちがたく結びついた根本的な特性である。見通し線への依存性はカバレッジとモビリティに制約をもたらすが¹⁷、まさにその物理的閉鎖性こそが、外部からの盗聴を防ぎ、極めて高いセキュリティを実現する基盤となっている²。さらに、この閉鎖性は干渉しない微小な通信セル（アトセル）を自然に形成するため、高密度なWi-Fi環境を悩ませる同一チャネル干渉の問題を原理的に解消する⁴。したがって、LiFiは「通信範囲の問題を解決すべき技術」としてではなく、「特定の環境に最適化された独自のトレードオフを提供する技術」として評価されるべきである。

第2章 標準化のマイルストーン：IEEE 802.11bbとその市場への影響

本章では、LiFiの歴史において最も重要な進展である、IEEE 802.11ファミリーへの正式な組み込みについて分析する。

2.1 標準化への道：主流技術への飛躍

2023年7月、**IEEE 802.11bb**規格が正式に承認されたことは、LiFi技術にとって画期的な出来事であった²⁴。この承認により、LiFiはこれまで各社が独自に開発してきたプロプライエタリな技術群から脱却し、Wi-Fiと同じIEEE 802.11の枠組みの下で、世界的に認知された相互運用可能な標準技術へと昇華した²⁶。この標準化作業は、pureLiFi社などの先駆的企業が主導したIEEE 802.11 Light Communications Task Groupによって推進された²⁵。

2.2 IEEE 802.11bbの技術的深掘り：光のためのWi-Fi 6適応

802.11bb規格の核心は、全く新しいプロトコルをゼロから構築したのではなく、既存の802.11標準に対する**修正条項（Amendment）**として策定された点にある。特に、MAC（Medium Access Control）層においては、**802.11ax（Wi-Fi 6）**の仕様と99%以上同一となるように設計されている²⁵。

以下に、主要な技術仕様を詳述する。

- **動作スペクトル**：標準規格では、アップリンクおよびダウンリンク通信に**800 nmから1000 nm**の近赤外線帯域を使用することが規定されている²⁵。この不可視光帯域を選択することで、

データ通信に可視光を用いた場合に懸念される照明のちらつきや演色性の問題を回避している。

- **データレート**：802.11axの能力を反映し、最低**10 Mbit/s**から理論上の最大スループット**9.6 Gbit/s**まで、幅広いデータレートを定義している³⁰。
- **PHY層とMAC層**：物理層（PHY）は、RFアンテナの代わりに光トランシーバーを駆動するように変更されている。しかし、MAC層およびその機能（SSID管理、WPAなどのセキュリティプロトコル）はWi-Fiから直接継承されている³⁰。これにより、ネットワーク管理者の視点からは、LiFiアクセスポイントはWi-Fiアクセスポイントとほぼ同様に扱うことが可能となる。

パラメータ	仕様
標準規格名	IEEE 802.11bb
承認日	2023年7月
周波数帯域	近赤外線（800 nm - 1000 nm）
帯域幅チャネル	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz（802.11axベース）
最大スループット	9.6 Gbps
PHY層の基礎	802.11axのPHY層を光媒体に適応
MAC層の基礎	802.11axのMAC層をほぼそのまま継承
主要ユースケース	RFを補完する高速・高セキュリティ光無線通信

2.3 相互運用性のインパクト：LiFiエコシステムの解放

標準化がもたらす最大の恩恵は、**相互運用性**の確保である²⁷。共通の標準規格が存在することで、異なるメーカーの機器間でのシームレスな通信が可能となり、これは堅牢な市場を形成するための絶対条件である。

802.11axとの戦略的な整合性は、半導体およびデバイスメーカーの参入障壁を劇的に下げることが意図している。既存のWi-Fiチップセットを最小限の変更でLiFiに対応させることが可能となり、現在のUSB dongleへの依存から脱却し、ネイティブなLiFi搭載デバイスの開発を加速させることが期待される。

802.11bbの規格策定において、802.11axのフレームワークを色濃く継承するという決定は、純粋な技術的最適化と現実的な市場投入の加速との間の戦略的妥協を反映している。このアプローチは、巨大なWi-Fiエコシステムを活用することでLiFiの採用を早める一方、電波の特性に合わせて設計されたアーキテクチャを光という異なる媒体に適用するという側面も持つ。Wi-FiのMAC層で用いられるCSMA/CA（搬送波感知多重アクセス/衝突回避）プロトコルは、電波の放送的で干渉しやすく、見通し外通信が可能な性質を前提に設計されている³³。対照的に、指向性が高く物理的に閉じ込められた光チャネルでは、衝突の可能性は低く、通信路の状態はより決定論的である。理論的には、光媒体の特性に特化してゼロから設計されたMACプロトコルは、衝突回避のためのオーバーヘッドを削減し、より高い効率を達成できた可能性がある。しかし、802.11bbはWi-Fi MAC層を採用することで、bespokeな最適化の可能性と引き換えに、市場投入までの時間短縮とエコシステムとの即時的な互換性という、ビジネス上極めて重要な利点を選択したのである。

第3章 技術的フロンティア：LiFiの性能を駆動するイノベーション

本章では、LiFiの性能の限界を押し広げ、その中核的な課題に対処している最先端の研究開発とハードウェアの革新を探る。

3.1 光電子部品の進化：LEDからGaNレーザーダイオードへ

LiFiシステムの性能は、その光源によって根本的に制約される。一般的に使用される蛍光体ベースの白色LEDはコスト効率に優れるが、蛍光体の応答速度が遅いため、変調帯域幅が数十MHz程度に制限されてしまう³⁴。

研究の最前線は、**窒化ガリウム（GaN）ベースのレーザーダイオード（LD）に移行している。LDは、LEDよりも桁違いに広いGHz級の変調帯域幅を提供する³⁴。**GaN LDを用いた研究では、多重化技術と組み合わせることで、実験室レベルで数Gbpsから

100 Gbps超のデータレートが実証されている³⁴。この分野では、京セラなどが主要なプレーヤーとして研究開発を牽引している³⁵。一方で、LDには高コスト、目の安全性への配慮、照明用途として安全で拡散した白色光を生成する必要性といった課題も存在する³⁴。

3.2 高度な信号処理：スループットの最大化

利用可能な帯域幅から最大限の性能を引き出すため、LiFiシステムはRF通信から借用した高度な変調方式を採用している。その代表格が**OFDM（Orthogonal Frequency-Division Multiplexing）**である³⁸。OFDMは、通信チャネルを多数の狭いサブキャリアに分割することで、周波数選択性フェージング（特定の周波数帯での信号劣化）に強く、スペクトルを効率的に利用できるため、LiFiのような広帯域システムに適している。802.11bb規格が802.11axのフレームワークを採用したことにより、**OFDMA（Orthogonal Frequency-Division Multiple Access）**も自然にサポートされる。OFDMAは、これらのサブキャリアを複数のユーザーに動的に割り当てることで、マルチユーザー環境における通信効率をさらに高める³⁰。

3.3 速度の壁を超える：MIMOと多重化技術の役割

単一の光源で達成可能な速度を超えるため、研究者たちは多重化技術を実装している。

- **MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）**：複数の送信機（例：複数の照明器具）と複数の受信機（フォトダイオード）を使用し、**空間多重（Spatial Multiplexing, SMX）**と呼ばれる技術で複数の独立したデータストリームを同時に伝送する。これにより、理論的にはデータレートをストリーム数倍に増加させることが可能である⁴²。しかし、光MIMOはRFシステムにはない課題に直面する。屋内の光チャネルは見通し線が支配的で相関が高いため、RFの豊かな散乱環境と比較してデータストリームの分離が困難である⁴²。VLCに最適化されたMIMO技術の研究が活発に進められている⁴³。
- **WDM（Wavelength Division Multiplexing）**：異なる色（波長）で発光する光源を用いることで、同一の物理経路上に複数の並列データチャネルを生成する技術である。レーザーダイオードとWDMを組み合わせた研究では、100 Gbpsを超えるデータレートの達成が期待されている³⁴。

3.4 アップリンク課題の解決

天井の照明器具から強力なダウンリンク信号を送信することは比較的容易だが、モバイル端末から天井へのアップリンク通信は、端末の消費電力やサイズの制約からより困難である。この課題に対する最も一般的な解決策は、**赤外線（IR）LED**をアップリンクに利用することであり、これは802.11bb規格でも採用されている⁶。赤外線は不可視であり、電力効率が高く、ダウンリンクの可視光通信と干渉し

ない利点がある。端末の向きや遮蔽による通信の不安定性を克服するため、端末に複数の送信機を搭載する、あるいはアクセスポイント側で複数の角度からの信号を受信できる**角度ダイバーシティ受信機（ADR）**を用いるといった研究も進められている⁹。

LiFiの技術進化は、RF通信の世界で長年かけて成熟してきた技術（OFDM、MIMO、セルラーネットワークアーキテクチャなど）を光の領域に体系的に適応・再利用するパターンをたどっている。この戦略は、4G/5GやWi-Fiで実績のあるOFDM/OFDMAを変調方式として採用し³⁸、MIMOによる空間多重で容量を増大させ⁴³、セルラー網と同様の「アトセル」概念で空間的な再利用を図る⁸という形で現れている。このアプローチは、RF分野における数十年の研究成果を活用することでLiFi自身の開発を加速させるという利点がある。しかし同時に、この適応だけでは不十分な領域も浮き彫りにする。例えば、前述の通り、光MIMOはRF MIMOとは根本的に異なるチャネル特性を持つため⁴²、RFのような散乱に依存しない、光に特化した新たなビームフォーミングやチャネル分離技術の開発こそが、LiFiの真のポテンシャルを解放する鍵となるだろう。

第4章 実践におけるLiFi：現在および未来の応用領域

本章では、理論と技術から実世界での実装へと焦点を移し、LiFiが現在どのような分野で導入され、将来的にどのような新市場を切り開く可能性があるかを探る。

4.1 RFに敏感・制限のある環境

- **医療・ヘルスケア**：LiFiは電磁干渉（EMI）を発生させないため、MRIスキャナや患者監視装置などの精密医療機器に影響を与えることなく、安全に利用できる²。これにより、治療の現場で電子カルテや高解像度の医療画像へ高速かつ安全にアクセスすることが可能になる。
- **航空宇宙**：機内でのインターネット接続はLiFiの主要なユースケースの一つである。航空機の重要な航法・通信システムに干渉するリスクなしに、乗客に高速インターネットを提供できる²。
2019年に
エールフランス航空が実施した実証実験は、この分野における重要な概念実証として挙げられる¹¹。
- **産業・製造（IIoT）**：重機などから発生する強力なRFノイズが存在する工場や、引火性物質を扱うためRFの使用が制限される石油化学プラントや鉱山などにおいて、LiFiは堅牢で安全な通信手段を提供する⁴。

4.2 高セキュリティ・高密度な環境

- **防衛・政府機関**：LiFi信号は壁を透過しないため、外部への情報漏洩を物理的に防止することが可能であり、機密性の維持が最優先される施設にとって極めて魅力的なソリューションとなる²。
- **金融・企業**：防衛分野と同様に、金融機関や企業のオフィスでは、LiFiを用いて物理的にセキュアなネットワークゾーンを構築し、機密データを安全に取り扱うことができる¹⁰。
- **高密度な会場**：スタジアムや国際会議場など、数千のデバイスが同時に接続することでWi-Fiネットワークが輻輳するような場所では、LiFiのアトセル構造が真価を発揮する。各照明が独立した大容量チャンネルを提供するため、極めて高いデータ密度を実現できる⁴。

4.3 新たなフロンティア

- **水中通信**：電波は水中で著しく減衰するのに対し、光（特に青色・緑色光）は比較的遠くまで到達する。LiFiは、潜水艇、ダイバー、水中センサー間的高速通信を可能にし、科学調査、資源探査、防衛などの分野での応用が期待されている³。
京セラによる2 Gbpsの水中光無線通信の実証は、この分野の可能性を示す好例である⁵⁵。
- **自動車通信（V2X）**：車両のLEDヘッドライトやテールランプにLiFiを統合することで、高速・低遅延な車車間（V2V）および路車間（V2I）通信が実現可能になる。これにより、交通安全の向上や自動運転機能の高度化に貢献することが期待される¹⁶。
- **拡張現実／仮想現実（AR/VR）**：LiFiが提供する低遅延かつ広帯域な通信は、VR酔いを防ぐために大量のデータを遅延なく伝送する必要がある、テザーレス（無線）の高性能AR/VRヘッドセットに最適である¹⁰。Microsoft HoloLens向けに開発された**pureLiFi HALO™**アクセサリは、その具体的な製品例である¹⁰。

応用分野	活用されるLiFiの主要な強み
医療・ヘルスケア	EMI（電磁干渉）の不在、高セキュリティ
航空宇宙	RF干渉の不在、高密度接続
防衛・政府機関	物理的な高セキュリティ（情報漏洩防止）
産業IoT	EMI耐性、本質安全防爆環境での利用

水中通信	水中での伝搬特性
自動車通信（V2X）	低遅延、高速通信
高密度会場	RF混雑の回避、高いデータ密度
AR/VR	低遅延、広帯域

4.4 国内の動向と事例

日本国内におけるLiFiの普及はまだ限定的だが、重要な動きが見られる。

- **製品展開**：2019年には**シグニファイジャパン**がLiFi対応の照明器具を発表し、国内市場への導入を開始した¹⁶。
- **企業の研究開発**：**パナソニック**は、有線、無線、海中でのハイブリッド通信を目指す「**Nessum**」技術（IEEE 1901c）で光無線通信分野に積極的に関与している⁵⁸。
京セラは、GaNレーザーなどの高性能な光部品開発で技術の進化を支えている³⁵。
- **政府構想との連携**：「デジタル田園都市国家構想」などの政府主導の取り組みにおいて、光無線通信が自動運転車両の制御などに活用される可能性が示唆されている⁶⁰。

LiFiの市場参入戦略は、家庭やカフェといったWi-Fiの牙城に正面から挑むものではない。現在の応用事例は、Wi-Fiが電波の物理的性質（EMI、セキュリティ漏洩、混雑）により根本的に不利なニッチ市場を標的とする、明確な戦略的パターンを示している。これは、Wi-Fiが禁止されているか、性能が著しく低下するか、あるいはセキュリティ上のリスクをもたらす「RF不適合環境」に焦点を当てることで、LiFi独自の価値提案を明確に示している。この「側面攻撃」戦略により、LiFi業界は収益を確保し、技術を洗練させ、初期の生産を通じてコストを削減し、より広範な市場への統合に向けた基盤を築くことができる。これは、Wi-Fiという巨大な既存勢力との直接対決を避けつつ、現実的かつ実行可能な成長経路をたどるための賢明なアプローチである。

第5章 市場展望、戦略的課題、および将来ビジョン

本章では、これまでの技術的および応用的議論を統合し、LiFiの将来に関する展望を示す。

5.1 グローバル市場分析：成長予測と主要プレイヤー

LiFi市場は、今後数年間で急成長が見込まれている。市場調査会社によって予測値に幅はあるものの（2030/2032年の市場規模予測は**81億ドル**から**356億ドル**まで様々）、年平均成長率（CAGR）が****50-60%****という高い水準にあるという点では見解が一致している²⁰。この予測値のばらつきは、市場の大きな潜在能力と同時に、普及に向けた不確実性の存在を示唆している。

市場を牽引する主要な企業および研究機関は以下の通りである。

- **pureLiFi（英国）**：エディンバラ大学発のスタートアップであり、LiFi技術のパイオニアとしてIEEE 802.11bb標準化を主導した⁴。
- **Signify（オランダ）**：旧フィリップスライティング。世界的な照明企業としての地位を活かし、既存の照明製品を通じてLiFiを市場に投入している¹⁶。
- **Oledcomm（フランス）**：欧州におけるもう一つの主要企業であり、商用展開に注力している²。
- **日本企業群**：高性能なレーザー部品を開発する**京セラ**³⁵、ハイブリッド光通信技術を推進する**パナソニック**⁶⁴、そしてIOWN構想の中で光無線技術を位置づける**NTT**⁶⁶などが挙げられる。

5.2 大規模普及への障壁

LiFiが広範に普及するためには、いくつかの重要な障壁を克服する必要がある。

- **ネイティブなデバイス統合の欠如**：最大の障害は、現在市販されているスマートフォン、ノートPC、タブレットなどの主要なデバイスにLiFiトランシーバーが標準搭載されていないことである。利用者は外付けのUSB dongleに依存せざるを得ず、これが利便性を著しく損ない、普及を妨げている²⁵。
- **コストパフォーマンス**：LiFi関連部品やLiFi対応照明器具のコストは低下傾向にあるものの、依然として従来のWi-Fi機器や照明器具よりも高価である。大規模な普及には、同等の性能を持つWi-Fiとの価格競争力を確保することが不可欠である⁵¹。
- **インフラの整備と双方向通信**：LiFiは既存の照明ソケットを電源として利用できるが、照明器具自体をLiFi対応のものに交換し、イーサネットなどのネットワークバックボーンに接続する必要がある。また、安定したアップリンク通信の確保も、依然として重要な設計課題である⁹。

この「ドングルのパラドックス」—すなわち、デバイスへの統合が進まない限り市場は形成されず、市場が形成されない限りデバイスへの統合は進まない—は、LiFi普及における中心的な課題である。しかし、IEEE 802.11bb標準の批准は、このジレンマを解消するための最も重要なメカニズムとなる。Wi-Fiとの整合性を取ることで、半導体ベンダーは既存のWi-FiコンボチップにLiFi機能を追加するという、低リスクかつ段階的な開発パスを描くことが可能になる。これは、ゼロから全く新しいチップを開発するよりもはるかに投資対効果が高く、デバイスメーカーがネイティブ統合に踏み切るための強力なインセンティブとなる。したがって、標準化は単に相互運用性を保証するだけでなく、デバイス統合を妨げてきたビジネス上および技術上のリスクを直接的に低減させ、パラドックスを打破する触媒として機能するのである。

5.3 コネクティビティの未来：6GおよびIOWNエコシステムにおけるLiFiの役割

LiFiの将来は、Wi-Fiを完全に置き換えることではなく、未来の**ヘテロジニアスネットワーク（HetNets）**の不可欠な構成要素となることにある¹³。

6G時代において、コネクティビティは複数の技術がシームレスに連携する複合的なものとなる。ユーザーは屋外で広域をカバーするセルラー網を利用し、屋内では高速なWi-Fiに接続し、そして特定の部屋や作業エリアに入ると、超高セキュリティ・超高密度なLiFiネットワークに自動的にハンドオーバーされる、といったシナリオが想定される。このような連携を実現するためには、SDN（Software-Defined Networking）などのインテリジェントなネットワーク管理技術が鍵となる²¹。

さらに、LiFiは**NTTのIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想**とも深く関連する。IOWNは、ネットワークのコアからチップレベルに至るまで、通信をフォトニクス（光技術）ベースに移行させることで、通信速度とエネルギー効率を飛躍的に向上させることを目指す壮大なビジョンである⁶⁶。この「オールフォトニクス」の未来において、LiFiはフォトニックネットワークをエンドユーザーデバイスまで届ける、論理的かつ究極的な「ラストワンメーター」の光無線接続技術として位置づけられる。

結論

LiFi技術は、IEEE 802.11bbという新たな国際標準を得て、もはや未来の奇抜なアイデアではなく、商業的な実用化に向けた明確な道を歩み始めた成熟しつつある技術である。

その比類なきセキュリティ、RF干渉からの完全な解放、そして広大な未認可スペクトルへのアクセスと

いった独自の強みは、LiFiをWi-Fiや6Gを補完する理想的な技術として位置づけている。特に、従来のRF技術では対応が困難であったり、不十分であったりする重要なユースケースにおいて、その価値を最大限に発揮するだろう。

今後の課題は、標準化を基盤としたエコシステムの構築、さらなるコスト削減、そして未来のヘテロジニアスネットワークへのシームレスな統合にある。これらの課題を克服した先で、LiFiはより安全で確実な接続性が求められる社会において、不可欠な通信手段の一つとなることは間違いない。

引用文献

1. LiFi (Light Fidelity) & its Applications - Telecommunication Engineering Centre, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://tec.gov.in/pdf/Studypaper/lifi%20study%20paper%20-%20approved.pdf>
2. What is Light Fidelity | Light Fidelity (LiFi) Technology Meaning ..., 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.oledcomm.net/blog/what-light-fidelity-technology-applications/>
3. Li-Fi - Wikipedia, 8月 4, 2025にアクセス、<https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>
4. Li-Fiとは？ Wi-Fiとの違いは？ ～光波による無線通信がIEEE802.11bb規格として承認, 8月 4, 2025にアクセス、<https://tech.broadmedia.co.jp/blog/wifi/what-is-lifi/>
5. How LiFi works | LiFi Group, 8月 4, 2025にアクセス、<https://lifi.co/how-lifi-works/>
6. 次世代無線デバイス向け LiFi 光無線通信技術が世界を繋げる! - 太平貿易株式会社, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.taiheiboeki.co.jp/files/libs/4081/2021121118295621.pdf>
7. Li-Fi - Wikipedia, 8月 4, 2025にアクセス、<https://ja.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>
8. A Review on LiFi Network Research: Open Issues, Applications and Future Directions, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11118>
9. Wireless infrared-based LiFi uplink transmission with link blockage and random device orientation - University of Strathclyde, 8月 4, 2025にアクセス、
https://pureportal.strath.ac.uk/files/142816052/Chen_etal_IEEE_TOC_2021_Wireless_infrared_based_LiFi_uplink_transmission_with_link.pdf
10. pureLiFi | 太平貿易株式会社（公式ホームページ）, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.taiheiboeki.co.jp/optical-wireless-communication/lifi/purelifi/>
11. Wi-Fiよりも圧倒的に速い「Li-Fi」—LEDの光で超高速通信ができる時代に - 野村證券, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.nomura.co.jp/wealthstyle/view/0034/>
12. LiFi Technology Overview: taxonomy, and future directions - arXiv, 8月 4, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/pdf/2303.09690>
13. What is LiFi?, 8月 4, 2025にアクセス、<https://lifi.co/what-is-lifi/>
14. 【話題のITトレンド】Li-Fi徹底解説！LEDライトの光で実現するデータ通信の未来とは？ - Vol.20ー, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://psc-smartwork.com/topics/2021/12/184.html>
15. Li-Fiの規格化と光を用いた無線通信技術の特徴について解説 - Rentec Insight, 8月 4, 2025にアクセス、<https://go.orixrentec.jp/rentecinsight/it/article-445>
16. Wi-Fiの100倍速い！LED照明の光で無線通信できるLi-Fiとは - パーソルクロステクノロジー, 8月 4, 2025にアクセス、

- https://staff.persol-xtech.co.jp/hatalabo/mono_engineer/503.html
17. Li-Fiについて(3) 本当の使い道は？ | 三技協 LED通信ブログ, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.sangikyo.co.jp/article_service/led/blog/blog2021-8.html
 18. 【次世代の光無線技術】Li-Fi（ライファイ）とは？ 圧倒的な通信速度！？ Li-Fiの特徴と課題... LED照明がWi-Fiになっちゃう！？ No.141 - YouTube, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.youtube.com/watch?v=g0TsDKJgLPm>
 19. LiFi Misconceptions, 8月 4, 2025にアクセス、<https://lifi.co/lifi-misconceptions/>
 20. Light Fidelity Market Size & Trends Analysis Report, 2030 - Grand View Research, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/light-fidelity-market-report>
 21. Evolution of Hybrid LiFi-WiFi Networks: A Survey - MDPI, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4252>
 22. pure LiFi（ピュアライファイ）新しい可視光通信技術 | 太平貿易株式会社, 8月 4, 2025にアクセス、<https://evort.jp/taiheiboeki/purelifi>
 23. LiFiの仕組み, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://lifi.co/ja/lifi%E3%81%AE%E4%BB%95%E7%B5%84%E3%81%BF/>
 24. 2024年5月17日 藤岡雅宣, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.jaipa.or.jp/event/isp_mtg/kagoshima_240516-17/240517-10.pdf
 25. LiFiは第2のWi-Fiになれるか 光無線「802.11bb」の特徴と普及への課題, 8月 4, 2025にアクセス、<https://businessnetwork.jp/article/16760/>
 26. グローバルな光通信規格 IEEE802.11bb リリース pureLiFi社ニュース - 太平貿易株式会社, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.taiheiboeki.co.jp/pages/120/detail=1/b_id=3176/r_id=58/
 27. Wi-Fiの次に来る？ 光無線通信「Li-Fi」通信速度とセキュリティ面に強み - TECHBLITZ, 8月 4, 2025にアクセス、<https://techblitz.com/startup-interview/purelifi/>
 28. Exploring the Impact of 802.11bb on Li-Fi Network | Oledcomm, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.oledcomm.net/blog/impact-of-ieee-802-11bb-on-lifi-network/>
 29. IEEE P802.11 - LIGHT COMMUNICATION TASK GROUP, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm
 30. LiFiのIEEE802.11bbの承認について | 三技協 LED通信ブログ, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.sangikyo.co.jp/article_service/led/blog/blog2023-14.html
 31. IEEE 802.11bb - Wikipedia, 8月 4, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11bb
 32. IEEE 802.11bb-2023 - IEEE SA, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10823/>
 33. IEEE 802.11 - Wikipedia, 8月 4, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
 34. 100 Gbps Indoor Access and 4.8 Gbps Outdoor Point-to-Point LiFi Transmission Systems using Laser-based Light Sources - arXiv, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2402.16144v1>
 35. 超高速かつ大容量。光の通信「Li-Fi」は、GaNレーザー技術で進化する - 京セラ, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.kyocera.co.jp/be_innovation/information-and-communications/interview2/

36. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications - MDPI, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2073-4352/11/9/1098>
37. Li-Fiについて(4) Li-Fiはスマホに搭載されるのか？(前編), 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.sangikyo.co.jp/article_service/led/blog/blog2021-10.html
38. 電波を使わない最先端の通信システム LED Backhaul - 株式会社 三技協 | The Optimization Company, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.sangikyo.co.jp/article_service/led/
39. どうしてLi-FiはOFDMを使っているのか？ | 三技協 LED通信ブログ, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.sangikyo.co.jp/article_service/led/blog/blog2022-11.html
40. 変調のはなし(2) | Wireless・のおと - サイレックス・テクノロジー, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.silex.jp/library/blog/20130422-1>
41. LED通信技術白書 3 | 可視光通信研究倶楽部(カシケン), 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.kashikou.jp/kashikou/post-5059/>
42. (PDF) All-Optical Distributed MIMO for LiFi: Spatial Diversity versus Spatial Multiplexing, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/363630464_All-Optical_Distributed_MIMO_for_LiFi_Spatial_Diversity_versus_Spatial_Multiplexing
43. A Comprehensive Survey on MIMO Visible Light Communication: Current Research, Machine Learning and Future Trends - MDPI, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/739>
44. Multiuser MIMO Indoor Visible Light Communication System Using Spatial Multiplexing | Request PDF - ResearchGate, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/320604260_Multiuser_MIMO_Indoor_Visible_Light_Communication_System_Using_Spatial_Multiplexing
45. A Review of Advanced Transceiver Technologies in Visible Light Communications - MDPI, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2304-6732/10/6/648>
46. Using Spatial Light Modulators in MIMO Visible Light Communication Receivers to Dynamically Control the Optical Channel - EWSN, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.ewsn.org/file-repository/ewsn2016/347_352_chau.pdf
47. A Comprehensive Survey on MIMO Visible Light Communication: Current Research, Machine Learning and Future Trends - PubMed Central, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9861693/>
48. (PDF) A Comprehensive Survey on MIMO Visible Light Communication: Current Research, Machine Learning and Future Trends - ResearchGate, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/366982942_A_Comprehensive_Survey_on_MIMO_Visible_Light_Communication_Current_Research_Machine_Learning_and_Future_Trends
49. (PDF) Advanced LiFi technology: Laser light - ResearchGate, 8月 4, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/339494713_Advanced_LiFi_technology_Laser_light
50. 【Li-Fi】照明の光でインターネットに接続？ Wi-Fiと何が違うのか？ | システム投資の本質, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.ocean-ap.co.jp/column/?p=4079>

51. Light Fidelity [Li-Fi] Technology Market Size, Growth Report - SNS Insider, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.snsinsider.com/reports/light-fidelity-technology-market-2312>
52. 新しいLi-Fiアプリケーション：航空機アプリケーションのLi-Fi展開の調査 - 業界ニュース - ニュース, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://ja.opticomfiber.com/news/new-li-fi-application-exploration-of-aircraft-18140930.html>
53. エールフランス、機内で光無線通信「Li-Fi」技術試験を実施 世界初 | FlyTeam ニュース, 8月 4, 2025にアクセス、<https://flyteam.jp/news/article/117371>
54. 全海深Li-Fi水下水無線通信技術 - 科创中国, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.kczq.org.cn/article/issueDetail?id=897>
55. 2025年02月13日 京セラが世界最速レベルの水中光無線通信、青色レーザーで2Gbps, 8月 4, 2025にアクセス、<https://vlda-cons.org/topics/20250213-46012>
56. Li-Fi Market Size, Share, & Growth Analysis - Stratview Research, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.stratviewresearch.com/1913/Li-Fi-market.html>
57. シグニファイジャパン、光を利用したLi-Fi対応照明器具を発表 - PR TIMES, 8月 4, 2025にアクセス、<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000015.000021362.html>
58. パナソニック ホールディングスの開発技術がIEEEの次世代通信規格の技術ドラフトとして承認へブランド名を「Nessum」と改めグローバル展開を加速, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://news.panasonic.com/jp/press/jn230907-1>
59. 有線・無線・海中のハイブリッド通信可能な通信技術「Nessum」が国際標準規格（IEEE 1901c）として承認 - Panasonic Newsroom Global, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://news.panasonic.com/jp/press/jn240306-1>
60. 自動運転に係る 情報通信インフラの取組について - 国土交通省, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/jido-infra/pdf03/02.pdf>
61. 【市場調査レポート】世界のLi-Fi市場（～2030年）：種類別（Li-Fiドングル、Li-Fiランプ、Li-Fiアクセスポイント、Li-Fiキット）、伝送種類別、コンポーネント別、用途別、エンドユーザー別、地域別 - MarketReport.jp, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.marketreport.jp/li-fi-market-forecasts-2030-smrc24nov288>
62. リー-Fi市場レポート | 産業分析、市場規模、予測 - Mordor Intelligence, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/li-fi-market>
63. イノベーション | Signify 企業ウェブサイト, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.signify.com/ja-jp/innovation>
64. ライトファイデリティ可視光通信市場の未来の収益と成長 2025年から2032年までの年平 - Pando, 8月 4, 2025にアクセス、
https://pando.life/article/1757901?utm_campaign=183755&utm_medium=6&utm_source=Pando_Life&utm_content=ia&utm_term=&utm_id=sanitary-isolation-washing-machine
65. 可視光通信の市場規模とシェア分析 - 産業調査レポート - 成長トレンド - Mordor Intelligence, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/visible-light-communication-market>
66. IOWN | NTT R&D Website, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.rd.ntt/e/iown/>
67. What's IOWN ? The social background and purpose. - NTT R&D Website, 8月 4, 2025にアクセス、<https://www.rd.ntt/e/iown/0001.html>

- 68. Vision | IOWN - NTT Group, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://group.ntt/en/group/iown/vision.html>
- 69. IOWN - NTT, 8月 4, 2025にアクセス、 <https://www.global.ntt/innovation/iown/>
- 70. IOWN. Turning Science Fiction Into Science Fact - NTT, 8月 4, 2025にアクセス、
<https://www.global.ntt/wp-content/uploads/2024/04/IOWN-Benefits.pdf>
- 71. The IOWN Global Forum: Genesis | NTT STORY, 8月 4, 2025にアクセス、
https://group.ntt/en/magazine/blog/iown_grobal_forum_genesis/
- 72. Li-Fi(ライファイ)とは？ 速度が速いって本当？ メリット・デメリット | みんなのらくらくマガジン, 8月 4, 2025にアクセス、 <https://minnano-rakuraku.com/contents/li-fi-6186/>