

博士論文 2017 年度（平成 29 年度）

認証基盤のオープン化が移動通信事業のスケール
ラブル化に与える影響の分析

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

梅嶋真樹

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲 乙 第 号	氏 名	梅嶋真樹
<p>主論文題目： 認証基盤のオープン化が移動通信事業のスケーラブル化に与える影響の分析</p>			
<p>(内容の要旨)</p> <p>2008年、総務省は、地域が独自に広帯域移動無線アクセス(Broadband Wireless Access、BWA)事業の立ち上げを可能とする電波割り当て政策を実行した。具体的には、2.5GHz無線周波数帯におけるBWA事業において、サービスを全国で行う全国キャリアだけではなく、サービスエリアを市町村に限定した地域BWA事業へ事業免許を与えた。</p> <p>本研究は、2008年の新たな電波政策を受けて、総合政策学が論じる特定の社会問題を解決する一般適用性ある新たな仕組みの開発を目的として、BWA事業のスケーラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模BWA事業の相互接続による広域運用)の成立要件について検証を行ったものである。</p> <p>第一に、理論研究と先行してスケーラブル化が実現しているWi-Fiにおける予備調査を行い、「インターフェースのオープン化、接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、認証基盤のオープン化、低コストの相互接続ネットワークという要件がBWA事業をスケーラブル化する」との研究仮説を導出した。依拠した理論の一つは、通信業界において長く用いられてきた産業組織論を出自としたものである。ここではエッセンシャル・ファシリティと呼ばれる通信サービスを行う上で必須の資源が独占、あるいは寡占から開放されていることが参入の条件となる(依田、2001)(Armstrong et al, 1994)。いま一つの議論の系譜はシステム論としての自律分散協調モデルである。モジュール化により全体システムが複数の半自律的なサブシステムに分割可能である(青木、1995)(國領、1999)。しかし、システム全体での品質保証は困難とされた(黒須、1997)(Brewer, 2000)。</p> <p>第二に、研究仮説が導出した要件を満たす小規模BWAの実証実験を行い、(1)外部接続以外については外部資源に依存しない運営が可能となる自律的な技術を実際に動かした(2)利用者が汎用的なデバイスで利用することを可能とした、(3)年額100万円程度の収入で事業継続が可能であることを実証した、(4)小規模BWA事業の相互接続による広域運用を実証した、という結果を得た。その結果、理論的に検討した要件を満たせば、BWA事業はスケーラブル化するとの結論を得た。</p> <p>しかし、2000年代後半からの新展開であるセキュリティ強化の動きは、認証基盤オープン化を失わせ、BWA事業のスケーラブル化は頓挫した。セキュリティを実現するシステム設計いかんによって、新しいボトルネック独占・寡占が生まれる認識を得たことは、通信業界の業界構造論に新しい断面を加えた。(994字/1000字)</p> <p>キーワード：スケーラビリティ、自律分散協調、BWA、認証、地域分権</p>			

Thesis Abstract

No. 1

Registration Number:	<input type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. *Office use only	Name:	Masaki Umejima
Title of Thesis: Analysis of the impact on open authentication: enabler of a scalable mobile operator			
Summary of Thesis: <p>In 2008, Japanese Government has implemented a new spectrum licensing policy on Broadband Wireless Access (BWA) business. For a 2.5 GHz radio frequency band, the business license was granted not only for nationwide BWA business, but also regional BWA business with service area limited to the municipality.</p> <p>This research was conducted with aiming at developing a general applicable mechanism to resolve a social problem on policy innovation research. A preliminary survey was conducted to identify the effects of Wi-Fi access with business scalability. The research proposed a research hypothesis: "Opening the system interface, no connection guarantee of communication (best effort), opening the authentication function, and low cost interconnection network will result in scalable BWA business".</p> <p>The theoretical framework is based on the system theory to explain an autonomous distributed cooperative model by modularization (Aoki, 1995; Kokuryo, 1999). However, quality assurance of the whole system is difficult. (Kurosu, 1997) (Brewer, 2000). In contrast, industrial organization theory explains the requirement for new entry that resources essential for conducting communication services, called essential facilities, are released from monopoly or oligopoly. (Ida, 2001)(Armstrong, et al, 1994)</p> <p>This research concluded that the collected results have empirically supported the hypothesis with the following evidences: (i) business operation has been enabled by autonomous technologies except for networking with the other BWAs; (ii) service to the versatile and user owned device; (iii) through BWA, business sustainability was ensured with approximately one million yen as annual income; and (iv) wide area operation has been archived by networking with the other autonomous BWA.</p> <p>However, in the new BWA system, the closing of the scalable model was created by an authentication system. The fact that the system design of security function created the new bottleneck could build a new section in the industry structure theory of the telecommunications industry.</p> <p>[298/300words]</p> <p>Keyword : Scalability, Autonomous distributed cooperative model, BWA, Authentication, Regional decentralization</p>			

認証基盤のオープン化が
移動通信事業のスケーラブル化に与える影響の分析

梅嶋真樹

論文要旨

2008年、総務省は、地域が独自に広帯域移動無線アクセス(Broadband Wireless Access、BWA)事業の立ち上げを可能とする電波割り当て政策を実行に移した。具体的には、国は、2.5GHz無線周波数帯におけるBWA事業において、サービスエリアを全国とした全国BWA事業だけでなく、サービスエリアを市町村に限定した地域BWA事業へ事業免許を与えた。BWA事業は、1つの通信基地局を用いて数キロ四方に散在する通信端末と通信できる点は携帯電話事業と同等であるが、エンドツーエンドでの通信接続を保証した電話サービスではなく、TCP/IPを通信プロトコルに採用した通信接続を不保証(ベストエフォート)としたデータ通信に特化した通信サービスという技術的特性を持つ移動通信事業の一類型である。

本研究は、2008年に実施されたサービスエリアを地域に限定するという移動通信事業における新たな電波政策を受け、理論研究を踏まえて研究仮説を導出し、(1)自ら事業免許を取得して小規模BWA事業を立ち上げて8年に及ぶ実証実験を行う、(2)全国の類似の取り組みを取材する、という2つの取り組みを通じて得られたデータを元に、総合政策学が論じる特定の社会問題を解決する一般適用性ある新たな仕組みの開発を目的として、移動通信事業の一類型であるBWA事業におけるスケーラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模BWA事業の相互接続による広域運用)の成立要件について検証を行ったものである。

第一に、本研究が論じる移動通信事業のスケーラブル化は、技術的にも経済的にも自律した小規模移動通信事業の相互接続による広域運用であると定義した。

第二に、移動通信事業の一類型であるBWA事業をスケーラブル化する要件の導出を目的とした理論研究を行った。依拠した理論の一つは、通信業界において長く用いられてきた、技術的な特性から生まれる経済特性を、規模の経済性やネットワーク外部性などの概念によって説明し、それを参入可能性と結びつける、産業組織論を出自としたものである。ここではエッセンシャル・ファシリティと呼ばれる通信サービスを行う

上で必須の資源が独占、あるいは寡占から開放されていることが参入条件となる (Armstrong et al., 1994 [1]) (依田, 2001 [2])。

いま一つの議論の系譜はシステム論としての自律分散協調モデルである。すなわち、モジュール化により全体システムが複数の半自律的なサブシステムに分割可能であるとするものである (青木, 1995 [3]) (國領, 1999 [4])。ただし、自律分散協調モデルによるスケール化では、システム全体での品質保証が困難とされる (黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。

第三に、理論研究を念頭に置きつつ、先行してスケーラブル化が実現している Wi-Fi においてその成功要因を導出することを目的とした予備調査を行った。予備調査は、Wi-Fi がスケーラブル化を実現した要因に関して、インターフェースのオープン化、接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質、認証基盤のオープン化、低コストの相互接続ネットワークにあると導出した。

第四に、理論研究と Wi-Fi の予備調査を受け、「インターフェースのオープン化、接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質、認証基盤のオープン化、低コストの相互接続ネットワークという要件が BWA 事業をスケーラブル化する」との研究仮説を導出した。

第五に、研究仮説が導出した「BWA 事業をスケーラブル化させる要件」を満たす BWA 事業を設計した。具体的には、インターフェースのオープン化、接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質、認証基盤のオープン化を実現した小規模 BWA 事業を設計し、それらの小規模 BWA 事業を低コストの相互接続ネットワークを用いて相互接続した。

第六に、理論研究が導出した BWA 事業をスケーラブル化する要件を満たした小規模 BWA の実証実験を行い、2016 年 12 月時点で (1) 外部接続以外については外部資源に依存しない運営が可能となる自律的な技術を実際に動かし得た、(2) 利用者が汎用的なデバイスで利用することを可能とし得た、(3) 年額 100 万円程度の収入で事業継続が可能であることを実証し得た、(4) 小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用を可能とし得た、という実証結果を得た。その結果、理論的に検討した要件が満たされれば、BWA 事業はスケーラブル化するとの結論を得た。

しかし、2000 年代後半からの新展開としてのテロ対策等に伴うネットワークセキュリティ強化の動きは、BWA 事業において、本研究が認証と定義する通信端末と利用者の紐づけを携帯電話と同じくネットワーク側で行う方向へシフトさせた。2012 年に WiMAX Release 2.1 として発表された WiMAX 第二世代の端末認証は、SIM やそれに連携した加入者認証

システムなど大規模 BWA 事業者のみが提供できる大規模ハードウェアに依存するようになった。その結果、BWA 事業をスケーラブル化する要件の一つである認証基盤のオープン化が失われ、スケーラブル化は頓挫した。

第七に、本研究の結果を踏まえた考察を行った。通信事業においては、技術革新に加えて標準化という制度革新が同時進行して産業構造が変わる同時進化モデル (co-evolution model) が論じられる (Funk, 2008 [7])。本研究では、移動通信事業において、セキュリティ機能の実装が標準化され、産業構造に大きな影響を与えたことが観察された。移動通信事業の一類型である BWA 事業においては、スケーラブル化がいったんは可能となったものの、認証機能という新たなエッセンシャル・ファシリティが登場し、開放されなかったことによって、スケーラブル化の要件の一つである認証基盤のオープン化が失われ、BWA 事業におけるスケーラブル化の普及は、限定的なものにとどまった。

BWA 事業のスケーラブル化は、理論的には想定された通りの結果となったが、事業的には行き詰まりを迎えてしまったと評価することができた。2015 年時点で地域 BWA として事業開始できたのは全国で 50 地域程度であり、95% の市区町村で通信基地局が開設されていない (総務省, 2015 [8])。

例えば、筆者が自ら取り組んだ沖縄県伊江島における BWA 事業、取材した愛媛県愛南町における BWA 事業は、費用的に十分に競争力あるサービスを作ることができたことを実証した一方、認証基盤の閉鎖性ゆえに認証オープン化が適用される通信端末は限定され、利便性の面で普及が妨げられるという課題に直面した。

想定していなかったのは、認証基盤のオープン性がセキュリティへの要請から失われてしまったことであった。この点については、ネットワーク側は、セキュリティを守るために認証機能をクローズド化することが必ずしも必要ではなく、オープンなソリューションも選択可能であったことを考えると、この 8 年間の BWA 事業のスケーラブル化を実証する取り組みは、技術の設計が、産業における費用構造、ひいては競争の構造にまで大きく影響を与えるものであることを如実に実証するものとなっている。特に、セキュリティを実現するためのシステムの設計が新しい形態のボトルネック独占・寡占を生むという認識を得たことは、これまでの通信業界の業界構造論に新しい断面を加えるし、政策的に大きな含意を持つと考える。

Analysis of the impact on open authentication: enabler of a
scalable mobile operator

Masaki Umejima

Abstract

In 2008, the Ministry of Internal Affairs and Communication in Japanese Government, has implemented a new spectrum licensing policy that allowed regional areas in Japan to independently launch a Broadband Wireless Access (BWA) business. For a 2.5 GHz radio frequency band, the business license was granted not only for nationwide BWA business, but also regional BWA business with service area limited to the municipality.

BWA is a type of mobile communication technology which enables mobile devices to communicate with one another within the area of several kilometers square by using one communication base station.

This research was conducted with aiming at developing a general applicable mechanism to resolve a social problem on policy innovation research. A preliminary survey was conducted to identify the effects of Wi-Fi access technology with business scalability. The research proposed a research hypothesis: "Opening the system interface, no connection guarantee of communication (best effort), opening the authentication function, and low cost interconnection network will result in scalable BWA business".

The theoretical framework is based on the system theory to explain an autonomous distributed cooperative model. The proposed system is divided into multiple autonomous sub-systems by modularization (Aoki, 1995; Kokuryo, 1999). However, scaling by autonomous distributed cooperative model is difficult to obtain quality assurance of the whole system (Kurosu, 1997; Brewer, 2000). In contrast, industrial organization theory has been applied to explain the possibility of new entry by using the economic characteristics born from the technical characteristics that are relevant and applicable for the telecommunications industry. The theory explains the requirement for new entry that resources essential for conducting communication services, called essential facilities are released from

monopoly or oligopoly. (Ida, 2001; Armstrong, et al., 1994)

This research concluded that the collected results have empirically supported the hypothesis with the following evidences: (i) business operation has been enabled by autonomous technologies except for networking with the other BWAs; (ii) service to the versatile and user owned device; (iii) through BWA, business sustainability was ensured with approximately one million yen as annual income; and (iv) wide area operation has been archived by networking with the other autonomous BWA businesses.

Past literature discussed a co-evolution model to explain about industrial structure change with simultaneous institutional innovation, and addition of technological innovation (Funk, 2008).

This study has contributed to the industry structure theory of mobile communication business by supporting the factor that security function can be a major influence on industrial structure. In the new BWA system, developed in 2012, the closing of the scalable model was created by an authentication system. The system ensured the security function but also built the essential facility. As a result, the diffusion of the scalable model of the BWA business discussed on this research was limited. The fact that the system design of security function created the new form of bottleneck by bringing new essential facility could build a new section in the industry structure theory of the telecommunications industry.

目次

第 1 章	問題意識	8
第 1 節	移動通信事業である広帯域移動無線アクセス (BWA) 事業の制度と技術の革新	8
第 2 節	2008 年規制改革による小規模な地域 BWA 事業への事業免許付与とその後	15
第 3 節	本研究が論じる BWA 事業のスケラブル化	18
第 2 章	理論研究	21
第 1 節	システム理論に依拠した通信事業のスケラブル化	21
第 1 項	モジュール化とインターフェースのオープン化による自律分散協調モデル	21
第 2 項	自律分散協調モデルの通信事業での応用事例：インターネット	25
第 3 項	自律分散協調システムの制約：全体品質	26
第 4 項	本研究で論ずるスケラブル化と自律分散協調モデルの議論	27
第 2 節	通信事業でのエッセンシャル・ファシリティと産業構造の理論	28
第 1 項	エッセンシャル・ファシリティの独占・寡占による産業支配	28
第 2 項	電話網におけるエッセンシャル・ファシリティとその開放	31
第 3 項	市内電話網におけるエッセンシャル・ファシリティのオープン化とその影響	33
第 3 節	理論研究が導出する移動通信事業のスケラブル化要件	35
第 3 章	予備調査：Wi-Fi アクセスでのスケラブル化成功の要因	38
第 1 節	インターフェースのオープン化	38
第 2 節	接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質	40
第 3 節	認証基盤のオープン化	41
第 4 節	低コストの相互接続ネットワーク	43
第 4 章	研究仮説の導出：BWA 事業をスケラブル化させる要件の導出	45
第 1 節	インターフェースのオープン化	45
第 2 節	認証基盤のオープン化	47
第 3 節	接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質	51
第 4 節	低コストの相互接続ネットワーク	51
第 5 章	導出した研究仮説に基づく BWA 事業モデルの設計	53
第 1 節	インターフェースのオープン化	53
第 2 節	接続不保証 (ベストエフォート) な通信品質	61
第 3 節	認証基盤のオープン化	61
第 4 節	低コストの相互接続ネットワーク	64

第 6 章	研究仮説の検証：BWA 事業のスケラブル化の検証	67
第 1 節	本研究の仮説に基づく BWA 事業のスケラブル化の実証	67
第 1 項	実証実験の構図	67
第 2 項	自律的な技術で動かしえた小規模 BWA の実現	72
第 3 項	利用者が持つ汎用的な BWA 通信端末の利用実現	75
第 4 項	基地局 1 局あたり年額 100 万円程度の収入で事業継続可能な小規模 BWA の実現	76
第 5 項	小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用の実現	80
第 2 節	研究仮説の検証：BWA 事業スケラブル化の検証	81
第 1 項	研究仮説通りの BWA 事業のスケラブル化の実現	81
第 2 項	セキュリティ問題顕在化と BWA 第二世代における認証基盤のクローズド化	83
第 3 項	認証基盤のクローズド化による BWA 事業におけるスケラブル化の頓挫	84
第 7 章	考察：セキュリティ機能の設計が移動通信業界の業界構造に与える影響	86
第 1 節	2008 年規制改革による小規模地域 BWA 事業への事業免許付与の成否	86
第 2 節	本研究で実現する一方、その普及が限定された BWA 事業のスケラブル化	88
第 3 節	移動通信事業における認証設備という新たなエッセンシャル・ファシリティの誕生	90
第 4 節	グローバルプラットフォーマーによる認証設備提供の可能性と想定される産業構造	93
第 5 節	小規模 BWA 事業者による協働による認証設備の共有	102
第 8 章	参考文献・図表目録	105
第 1 節	参考文献	105
第 2 節	図表目録	111

第1章 問題意識

第1節 移動通信事業である広帯域移動無線アクセス(BWA)事業の制度と技術の革新

2002年に慶應義塾大学総合政策学部で始動した文部科学省 21世紀COEプログラム「日本・アジアにおける総合政策学先導拠点 -ヒューマンセキュリティの基盤的研究を通じて-(以下、政策COE)」は、総合政策学を「情報技術革新の広範かつ深い影響やヒューマンセキュリティ(人間安全保障)という視点の必要性などによって特徴づけられる現代社会を対象とし、そこにおける様々な問題を把握、分析するだけではなく、そうした問題を解決してゆくことを基本的動機とする実践知の学問である」と定義した。同時に、総合政策学が重視する内容として、第一に、社会的問題の発見、その性質の解析・問題解決方法の提案、その試行と結果の評価、その解決方法の普及という一連の循環が強く意識されていること、第二に、従来の学問領域を柔軟に活用するものの、それにとらわれない発想をすること、第三に、問題の解決手法ないしプロセスに関して従来にない知見を実証実験や先駆的事例への関与を通して開発することを論じた。

これら総合政策学の定義とその重点項目の議論は、政策COEにおける博士論文審査指針に反映された。その指針は、標準タイプの博士論文として学問分野横断、仕組開発や実践の論理化、研究手法の開発という3点を例示した。

第一に、学問分野横断は、斬新な視点を基にした社会的問題の認識・定式化・解決方法の提示である。既存の学問分野の成果を横断的・独創的に活用することによって解決が求められる重要な社会的問題を新しい視点から体系的に認識し、その解決にとって新しい知見を提示した論文である。

第二に、仕組開発や実践の論理化は、特定の社会的問題の解決に対する斬新な対応方法の開発である。社会的問題を解決する場合、単に公共政策を援用するだけでなく、多様なアクターが関与する効果的かつ一般適用性のある仕組みをフィールドワークや実証実験を通して開発した、あるいはそうした実践から得られる知見を論理化した論文である。

第三に、研究手法の開発とは、現代人間社会の認識ないし解釈の方法に関する斬新な研究手法の開発である。とりわけ情報通信技術革新の成

果およびインターネットを効果的に活用しつつ、独創的な研究手法を開発するとともにその有用性を示した論文である(國領, 2008 [9])。

筆者は、これら総合政策学に関する議論を踏まえ、本論文を特定の社会的問題の解決に対する効果的かつ一般適用性ある仕組みを実証実験によって開発した論文と位置づけた。

本論文の研究対象である通信事業では、技術革新に加え、標準化制度が産業構造へ強い影響を与えている。Funk(2008 [7])は、通信事業においては、技術革新に加えて標準化という制度革新が同時進行して産業構造が変わることを示し、通信事業における同時進化モデル(co-evolution model)を論じた。

通信事業には、伝送路回線に有線を用いる固定通信事業と無線を用いる移動通信事業がある。

1970年代後半までは、先進国の固定通信事業は、垂直統合の産業構造であった。規制された独占企業は、認証されていない無許可の通信機器からネットワークへアクセスされることによる障害発生の可能性を除去することを目的として、回線交換機から通信端末までのすべての通信規格を決定する責任を担うことを欲した。先進国における固定通信事業では、通信事業者が回線交換機から電話機までの設備を特定の単一の通信機器事業者へ発注し、少ない種類の電話機が多くの利用者により利用されることが普通の光景であった(Brock, 1981 [10])(Brock, 1994 [11])(David, 1987 [12])。

一方、1970年代後半の固定通信事業における回線交換機と通信機器に関する技術革新は、インテグラル型ではなく、モジュラー型へのアーキテクチャ変更を可能にした(Brock, 2003 [13])。

モジュラーアーキテクチャは、それぞれ独立に設計可能で、かつ、全体として統一的に機能する小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスを構築する。例えば、コンピューター産業は、安価で高速な情報処理能力の導入によってマーケットを広範囲に変化させただけでなく、独立に設計可能で、かつ、全体として統一的に機能するより小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスが構築されるというモジュラーアーキテクチャを広範囲に採用することで、イノベーションのスピードを劇的に速めた(Baldwin et al., 1997 [14])。

固定通信事業では、電子交換機技術は、モジュラーアーキテクチャを採用する、ネットワークと電話機の間にはオープンなインターフェースを採用するという標準化制度と同時に普及した(Funk, 2002 [15])。そうした状況は、技術と制度の同時進化モデル(co-evolution model)と論じ

られた(Funk, 2008 [7])。

携帯電話事業では、無線を伝送路回線に用いる技術革新は、モジュラーアーキテクチャとインターフェースのオープン化という2つの標準化制度と共に普及した。標準化を先導した欧州の携帯電話事業者は、多くの通信機器事業者からの提案に基づき、Global System for Mobile communications (GSM) 標準を制度化した(Garrard, 1998 [16]) (Haug, 2002 [17])。1980年代まで各国で異なるアナログ方式で通信サービスが行われていた欧州は、1982年に Conference of European Postal and Telecommunications administration(欧州郵便電気通信主管庁会議、CEPT)においてデジタル方式携帯電話の標準化規格の策定を開始し、1987年に GSM 標準を制定した。1988年には標準化管理団体として European Telecommunications Standards Institute(欧州電気通信標準化機構、ETSI)が設立され、1992年に初の GSM サービスがドイツで開始された。

ETSIによる GSM 標準の重要決定は、Subscriber Information Module(加入者情報管理モジュール、SIM)カードを通信サービスに必須機能として使用することであった。1台の携帯電話機は、SIMカードを交換することによって GSM に準拠しているあらゆる通信事業者の通信サービスを使用できるようになった(Hawkins, 1993 [18]) (Garrard, 1998 [16])。

SIM カードは、3つの識別番号を持つ。International Mobile Subscriber Identity(IMSI)、電話番号に相当する Mobile Subscriber Integrated Service Digital Network Number(MSISDN)、SIMカード自体を識別する Integrated Circuit Card ID (ICCID)である。IMSI は、電気通信の国際標準機関である International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector(国際電気通信連合電気通信標準化部門、ITU-T)が発行する Mobile Country code (MCC)、国が発行する Mobile Network code (MNC)、携帯電話事業者が発行する Mobile Subscriber Identification Number (MSIN)で構成され、ネットワーク加入者の識別を実現した。

移動通信事業においては、モジュール化とインターフェースオープン化を規定した GSM 標準は、通信機器とネットワークをアンバンドル化した。しかし、GSM システムでは、加入者側がネットワーク接続時に正当なネットワークかを認証することを目的として、ネットワーク側が接続を試みる電話機が正当な加入者の電話機かを認証することを目的として電話機とネットワーク間で電話機内の SIM に格納された IMSI を送受信した(Labordère et al., 2004 [19])。

一方、通信事業においては、GSM 標準という制度面での革新以外に大きな技術革新があった。通信サービスを行う上で伝送路回線の占有を行うことを必須としない IP 通信プロトコルの登場であった。

旧来の回線交換機に依存した Public Switched Telecommunication Network (PSTN) による電話サービスであれば、伝送路回線の占有を必須とし、規模の経済性に依拠した大規模システムが必要とされる。しかし、IP パケット交換のデータ通信システムは、PSTN と比して大規模システムを必要としなかった。

通信事業における通信プロトコルへの IP 採用は移動通信事業へ普及した。2005 年には移動通信事業の一類型である Broadband Wireless Access (広帯域移動無線アクセス、BWA) 事業の通信プロトコルに IP が採用された。BWA 技術の一類型である World Interoperability for Microwave Access (WiMAX) は、通信プロトコルを IP と規定し、通信端末と通信基地局間のインターフェースを IEEE 802.16e-2005 規格として、アクセスネットワークを構築するサブシステムの仕様やサブシステム間接続のインターフェースの仕様を WiMAX Release1.0 として標準化した。

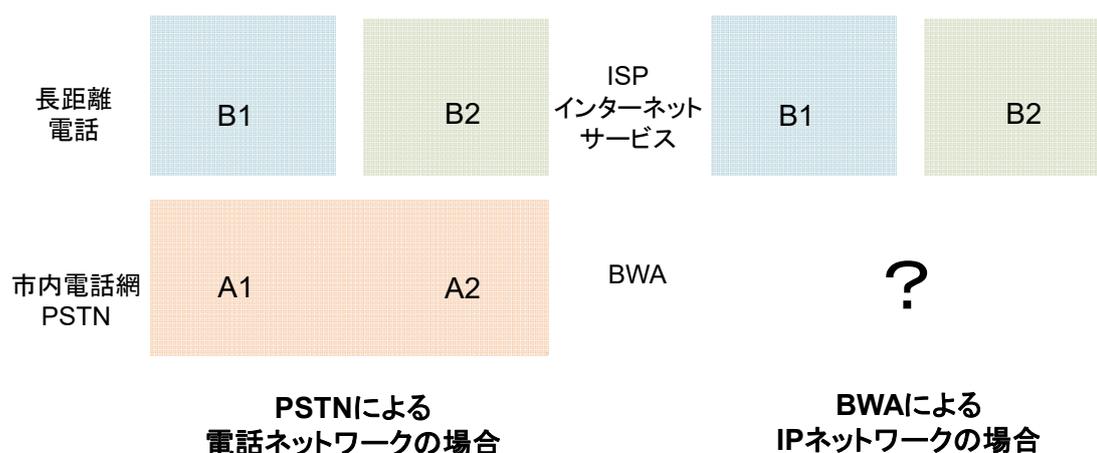


図 1 PSTN と BWA の比較

WiMAX では、国際機関である The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) は、OSI 層で物理層とデータリンク層に相当する部分を IEEE802.16 規格として標準化した。IEEE802.16 規格を用いた機器やシステムを開発して販売する企業や BWA 事業を運営する通信事業者などは民間団体として WiMAX Forum を組織した。WiMAX Forum は IEEE802.16 規格を参照しつつ、WiMAX Air Interface Specifications と WiMAX Network Specifications として WiMAX の技術

仕様を標準化した。

2005年にWiMAXアクセスの標準化完了が発表された時には、WiMAXは、IP通信を採用した無線通信技術として家庭内やビルなど建物内といった比較的狭いエリアでの無線アクセスネットワークとして急速に普及したIEEE 802.11規格(Wi-Fi)の延長上の技術とされ、Wi-Fiと同様な普及を期待された。

IEEEは、IP通信において狭域な無線アクセスをWi-Fi、広域な無線アクセスをWiMAXと位置づけた(IEEE 802.21 Five Criteria for Standards Development, 2004 [20])。また、多くのWi-Fi及びWiMAX対応通信機器の生産拠点となっていた台湾は、WiMAXの研究開発を先導し、国内を6地域に分けたWiMAXによるアクセスネットワーク構築を推進した(Ministry of Economic Affairs of Taiwan, 2009 [21])。

また、技術的には、オープンインターフェースであるIP通信プロトコルは、IEEE802.11やW-CDMAやIEEE802.16など様々な技術形式によって提供されるインターネットインフラストラクチャを融合させ、Unwired Internetを構築すると論じられた(村井, 2007 [22])。

例えば、インドネシアのWajan Bolicプロジェクトは、RT/RW-netと呼ばれる町内会単位をサービスエリアとした無線アクセスネットワークであった。通信プロトコルにIP、無線アクセスにオープンインターフェースな通信端末が普及したWi-Fiを採用し、通信基地局にはフライパンを用いた低コストアンテナを用いて1台の通信基地局で4キロ四方の無線通信サービスエリアを構築した。無線アクセスにおけるオープン化の波は、狭域だけではなく、広域アクセスに普及した¹。

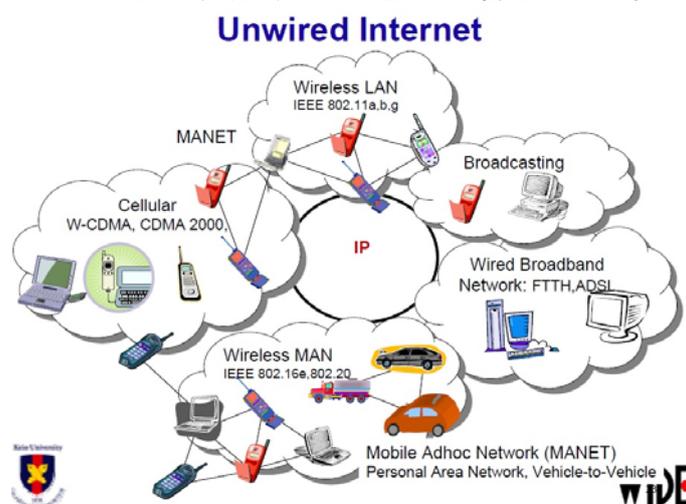


図 2 Unwired Internet 【1】 (村井, 2007 [22])

¹ http://opensource.telkomspeedy.com/wiki/index.php/Wajanbolic_e-goen

しかし、制度的には、Wi-Fiのような狭域な無線アクセスとは異なり、WiMAXのような広域な無線アクセスは、事業開始に国から無線利用事業用免許を必要とした。しかし、2008年に日本は、その免許制度に関して新たな試みを行った。

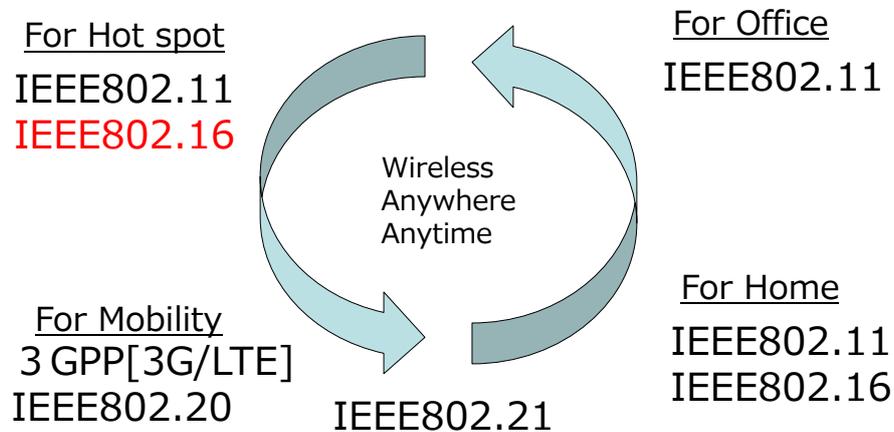


図 3 無線技術の整理(IEEE,2004 [20])

2008年、日本の総務省は、広帯域移動無線アクセス事業(BWA²事業)における免許制度における新たな試みを開始した。具体的には、国は、BWA事業において、携帯電話と同じように全国単位で大規模に事業を行うことを必須とする全国BWA免許に加えて、市町村単位で小規模に事業を行うことを可能にする地域BWA免許制度を立ち上げた。地域BWA免許制度は、地方自治体や地域のケーブルテレビ会社がサービスエリアを区市町村に限定して移動通信事業を行うことを可能にし、地域のデジタル・ディバイド(条件不利地域)の解消、公共サービスの向上、地域の公共の福祉の増進を目的とした電気通信業務を可能にした。

地域BWA無線局免許の認可基準である電波法関係審査基準は、「地域BWAは、地域BWA免許の対象区域における地域の公共の福祉の増進に寄与するために実施しようとしている次のいずれかに該当するサービスの計画及び当該計画を確実に実施する根拠を有すること」と規定した。

地域BWAの通信サービス事例は、第一に、地域の防災情報、気象情報、交通情報、防犯情報その他の情報を広く住民に提供するためのサービス、第二に、地域の商工組織、教育機関、学術研究機関、医療機関等が提供

² 電気通信事業法施行規則は、音声伝送役務である電話とデータ伝送役務であるBWAアクセスなどを明確に分離している。第二条において音声伝送役務は、おおむね四キロヘルツ帯域の音声その他の音響を伝送交換する機能を有する電気通信設備を他人の通信の用に供する電気通信役務であってデータ伝送役務以外のものと定義され、データ伝送役務は、専ら符号又は影像を伝送交換するための電気通信設備を他人の通信の用に供する電気通信役務と定義される

するサービスであって広く住民に提供されるサービス、第三に、他の電気通信事業者のサービス提供エリア外でのインターネット接続サービス、第四に、地域の公共の福祉の増進に寄与するサービスであって広く住民に提供されるサービス、と論じられた。

特に、他の電気通信事業者のサービス提供エリア外の地域におけるインターネット接続サービス確保は、地方自治体の課題であった。

2008年6月、総務省は、2010年をターゲットとしたブロードバンド・ゼロ地域の解消や携帯電話不感地帯の解消を実現するための具体的施策を「デジタル・ディバイド解消戦略」として取りまとめた。同戦略は、2007年度末の時点で約30万人とされた携帯電話のサービスエリア外居住人口の解消に向けた政策方向性を示した。具体的には、財政的支援(国庫補助事業等)は、2010年度末までに約20万人のエリア外人口を解消し、技術的開発(簡易型基地局・中継局等の新技術開発を推進)は、残りの約10万人のエリア外問題を解消することを目指した(総務省総合通信基盤局, 2008 [23])。

移動通信事業の一類型である携帯電話のエリア整備は、人口カバー率では99.9%という高い数値となっているが、面積カバー率では約63.8%に留まっている。具体的には、日本国内の陸地を1km²のメッシュに区切ると、日本の陸地に係る総メッシュ数は379,148メッシュと算出され、携帯電話のエリア内メッシュ数は242,031メッシュ(2008年度末時点)であった。メッシュベースでは、居住人口が少ないメッシュがエリア外メッシュである割合が高くなる傾向があり、メッシュ内居住人口が少ないほど、利用者一人当たりの整備費用が高くなり、費用対効果の面で整備条件が厳しくなることが論じられた(総務省携帯電話エリア整備推進検討会, 2010 [24])。

携帯電話のエリア整備に関する国の補助は、携帯電話の人口カバー率解消に寄与し、携帯電話サービスエリア外人口は、2006年度末で約41.6万人(11,309メッシュ)、2007年度末で約29.7万人(9,265メッシュ)、2008年度末で約15.4万人(6,020メッシュ)と徐々に減少した。2009年度には更に5万人程度が解消され、携帯電話サービスエリア外人口は、約10.2万人(4,327メッシュ)になると論じられた(総務省携帯電話エリア整備推進検討会, 2010 [24])。

携帯電話の面積カバー率の向上は、地方自治体のニーズであった。地方自治体には、「観光地(景勝地、温泉地、スーパー林道、スキー場、登山道、魚釣り場、旧跡、キャンプ場等)」、「交通アクセスや物流や観光等のための主要道路周辺」、「主要農産物の農場や林業地帯、公共施設(水

道施設やダム管理事務所など)」のような場所での面積カバー率向上への具体的ニーズが存在した（総務省携帯電話エリア整備推進検討会, 2010 [24]）。

日本における地域 BWA 免許制度は、制度的には地域が主体となってサービスエリアを決定できた。例えば、人口カバー率ではなく面積カバー率でサービスエリアを確定させるような新たな移動通信事業の構築を可能にする制度であった。

第 2 節 2008 年規制改革による小規模な地域 BWA 事業への事業免許付与とその後

全国 BWA 事業と地域 BWA 事業を比較したとき、2 つのネットワーク規模は、大きく異なる。

全国 BWA 事業は、主としてインターネットアクセスを通信サービスとし、主に需要密集地域を中心に全国にサービス提供を行うネットワークであり、通信基地局の規模で 20,000 局を超える（2012 年 9 月末時点）大規模ネットワークである。全国 BWA 事業は、規模の経済性に依拠したモデルでのアクセスネットワークの事業構築が可能であった。

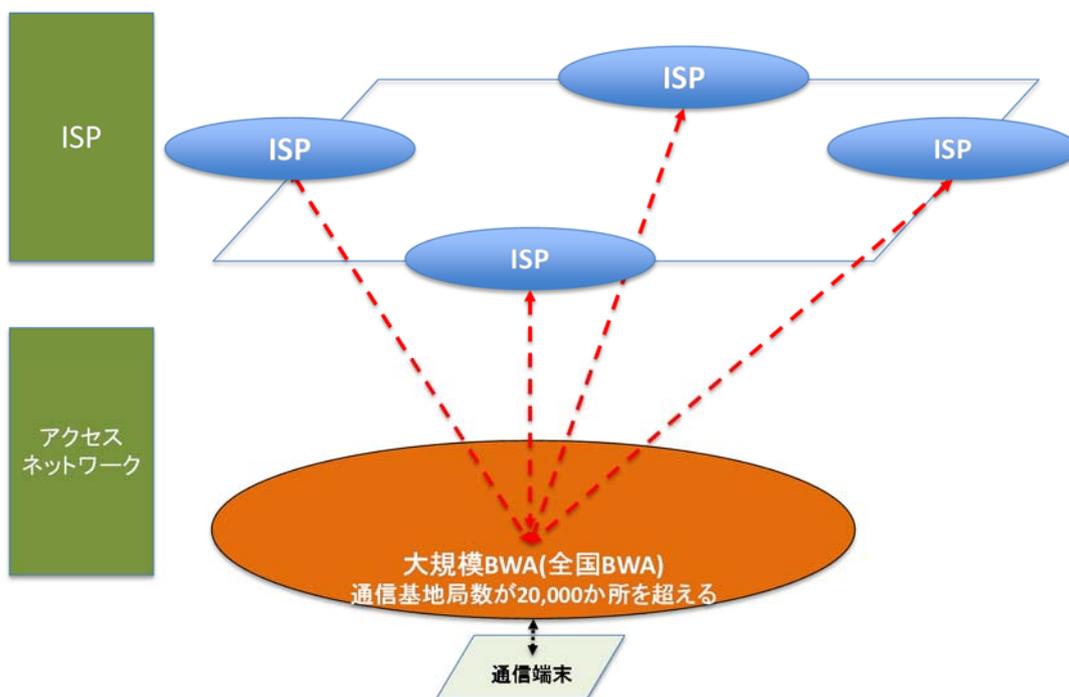


図 4 大規模ネットワークである全国 BWA 事業の構図

一方、地域 BWA 事業は、2.5GHz 帯の周波数の電波を使用する点は全国 BWA 事業と同じであるが、地域 BWA 事業のサービス区域を制限した。具体的には、地域 BWA 無線局免許の認可基準である電波法関係審査基準³は、1 つの地域 BWA のサービス区域を 1 つの市町村の行政区域の全部又は一部、都道府県の行政区域の一部などに限定した。

その結果、地域 BWA 事業は、概ね 1 つの事業者の通信基地局の規模は、3 局から 10 局程度であり、(全国 BWA 事業と比して)規模の経済性に依拠したビジネスモデルによる事業構築は困難であった。



図 5 地域 BWA のみが BWA サービスの担い手という状況

しかし、利用者視点で見た場合、注目される状況変化が観察された。

第一に、移動通信サービス利用者の多くは、電話サービスではなくデータ通信サービスを通信利用目的にしており、IP によるデータ通信サービスのみでの通信事業の構築が可能となった。実際、BWA 事業と同じく移動通信事業に位置づけられ、国の事業免許が電話サービスとデータ通信サービスの両方を行うことを義務付ける携帯電話事業においては、インターネットアクセスを中心としたデータ通信がサービス収入全体に占める割合が年々高まっていた。

日本の携帯電話事業者 3 社 (NTT ドコモ、KDDI、ソフトバンクモバイル) の利用者一人毎の収入 (Average Revenue Per User、ARPU) は、2010 年を境にデータ通信が電話を上回り始めた。2013 年においては、平均 ARPU が 4,470 円に対して電話が 1,284 円、データ通信が 3,186 円であり、ARPU の 71% がデータ通信であった (総務省情報通信審議会, 2014 [25])

第二に、通信品質、特に通信速度 (スループット) に対する利用者選好

³ 電波法関係審査基準 (2001 年 1 月 6 日総務省訓令第 67 号) 別紙 2 (第 5 条関係) 無線局の目的別審査基準第 2 陸上関係 1 電気通信業務用 (19) 地域広帯域移動無線アクセスシステムの無線局。

の変化である。BWA 事業を含む移動通信事業においては、理論上は、国により与えられた事業免許が規定する周波数幅が、通信サービスの通信速度を規定する。

表 1 移動通信におけるデータ通信比率

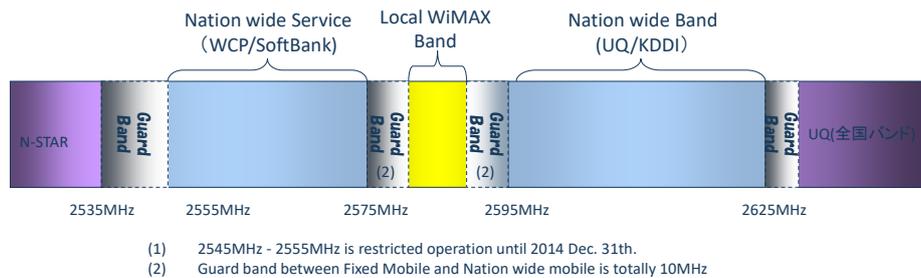
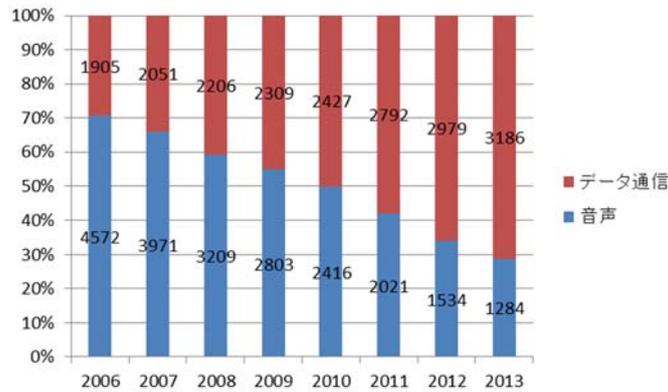


図 6 地域 BWA 事業と全国 BWA 事業へ付与された周波数帯幅

例えば、同じ地域で全国 BWA 事業と地域 BWA 事業のサービスが存在した場合、全国 BWA 事業は、同じハードウェアを用いて設備を構築した場合でも、理論上は地域 BWA 事業をはるかに上回る通信速度を通信利用者へ提供できる。つまり、日本の BWA 事業の制度的枠組みでは、地域 BWA 事業は全国 BWA 事業に対して通信品質において比較優位を構築することはできない。国は、小規模 BWA 事業ではなく、中央集権的な大規模 BWA 事業である全国 BWA 事業へ多くの周波数帯域幅を割り当てた。2008 年の BWA 制度開始時には、2 つの全国 BWA 事業には各々 30MHz 幅が与えられたのに対して、地域 BWA 事業には 10MHz 幅が与えられた。地域 BWA 事業と全国 BWA 事業を比較した時の周波数帯域幅の差は、2008 年には 3 倍であったのが、2013 年に 5 倍に拡大した⁴。

⁴ 2014 年 10 月に制度化された高度化システム仕様、具体的には、WiMAX R2.1AE 及び AXGP では上下の周波数帯を利用する全国 BWA とのシステム同期を行うことで地域 BWA が 20MHz 幅を利用することを可能にさせた。

この地域 BWA 事業が抱える劣位は、地域 BWA の事業運営上の最大リスクとなる。例えば、地域 BWA が先行して進出した市町村へ全国 BWA が後発で進出してきた場合、両者のシステムは技術的に同じであり、経済的に同等の費用が掛かるが、地域 BWA 事業の通信速度(理論値)が劣った。

しかし、筆者が愛媛県松山市や愛南町などを通信サービスエリアとする地域メディア事業者である愛媛 CATV で行った予備調査は、低品質でも低価格サービスを提供できれば、通信サービスが存立する可能性を示唆した。具体的には、愛媛 CATV では、CATV 網を活用して通信速度が異なる 3 種類のインターネットアクセスサービスを提供しているが、同社のサービス利用者(23 万人)の 95%は、高速の高品質サービスが入手できるにも関わらず、通信速度が制約された低速の低品質サービスを選好している状況が観察された⁵。

BWAアクセスネットワーク名	帯域幅(MHz)	対地域BWA保有帯域幅	3GPP LTEで規定された(Band41:2496MHz-2690MHz)比率
2008年段階			
Wireless City Planning社	20	200%	10.3%
地域別事業者(地域BWA)	10	-	5.2%
UQコミュニケーション	30	300%	15.5%
2015年段階			
Wireless City Planning社	20	200%	10.3%
地域別事業者(地域BWA)	10	-	5.2%
UQコミュニケーション	50	500%	25.8%

図 7 BWA 事業のスループット比較(理論値比較)

サービス名	サービス品質	価格(月額)	ユーザ数
①光ハイブリッド120	下り120M,上り1.5Mbps	5460円	638
②光ハイブリッド30	下り30M,上り1.5Mbps	4095円	7262
③光ハイブリッド10	下り10Mbps、上り250Kbps	1995円	222571

図 8 インターネットサービスに見る通信サービスの利用者選好

第 3 節 本研究が論じる BWA 事業のスケラブル化

地域 BWA は、その制度がサービスエリアを市町村に限定した結果、全国 BWA のように規模の経済性に依拠したビジネスモデルを構築できない。地域 BWA が、その存立に新しいビジネスモデルが必要になる所以である。そこで、本研究が着目するのがネットワークのスケラブル化

⁵ 筆者による愛媛 CATV 役員へのインタビュー結果。

(Scalable)、スケーラビリティ (Scalability) という概念である。

ウェブスター辞書は、スケーラブルは、需要に応じて容易に拡大や機能向上を行うことができる (capable of being easily expanded or upgraded on demand) と論じた。IT システムへ引用されたスケーラブル概念は、「規模の拡大に対応できる、拡大の余地が大きいシステム。LAN などのコンピュータネットワーク、あるいはコンピュータシステムは、使っているうちにどんどん大規模になっていく傾向がある。例えば、クライアントとして接続されるパソコンが増えていく。そして、それに伴ってサーバの数も増えていく。あるいは、サーバが扱うデータ量が増えていく。そうするとサーバのハードディスクを増やさないといけない。あるいは、処理能力を落とさないために CPU やメモリーを増やす必要が出てくることもある」と論じられた(日経パソコン, 2012 [26])。

クラウドコンピューティングにおいてもスケーラブル化が論じられた。クラウドコンピューティングは、サービスプロバイダと利用者との議論によって確立されたサービスレベル契約に基づいて、統合されたコンピューティングリソースとして動的に提供されることを実現する相互接続されたコンピューターと仮想化されたコンピューターの集合で構成される並列分散システムであると定義され、高い信頼性とスケーラビリティ、更にどこからのアクセスへも自動対応することを求められた (Buyyaa et al., 2009 [27])。

そうした中で、分散化されたサブシステムをノードと呼び、その自律性を踏まえたスケーラビリティが、ピアツーピアシステムにおいて論じられた。Napster や Pastry のようなアプリケーションに代表されるピアツーピアシステムは、すべてのノードが同じ能力と責任を持つ分散システムであり、ノード間のすべての通信は対称的である。そのピアツーピアシステムの特色は、分散制御、自己組織化、適応性、スケーラビリティという性質を持つとされた (Rowstron et al., 2001 [28])。

また、ソーシャルネットワークサービスにおいても分散化されたサブシステムの自律性を踏まえたスケーラブル化が論じられた。

eXo と言うソーシャルネットワークは、コンテンツおよび関連するメタデータを担当する中央組織が存在しないシステムであった。第一に、自律性が尊重され、コンテンツは遠隔保管された。第二に、コンテンツの共有を容易にすることを目的に利用者が検索して検索できるようにコンテンツに適切なインデックス(索引付けの結果)が作成された。第三に、インデックスがシステムのスケーラビリティ実現のために配布され

た⁶(Loupasakis et al., 2011 [29])。

スケーラブル化概念は、地域特性に合ったインフラストラクチャ構築に期待を持たせた。國領(2004 [30])は、機能を分散させ、各通信端末レベルでは低いコストで機能を発揮できるという分散型の技術特性に着目し、各々が構築した仕組みを相互に接続すれば、小さく始められて、大きく成長させられる構造をスケーラブルであると表現した。スケーラブルであるがゆえに、小さな会社でも学校でも自主的な取り組みとして、特性に合ったインフラストラクチャを構築できると論じた。

これらの議論を踏まえ、本研究は、移動通信事業のスケーラブル化とは、技術的にも経済的にも自律した小規模移動通信事業の相互接続による広域運用であると定義し、移動通信事業の一類型である BWA 事業のスケーラブル化とは、技術的にも経済的にも自律した小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用であると定義した。

⁶ eXoにおいて特色的なのは、適切なインデックスを意味するタグは、コンテンツの所有者ではなく利用者によって付けられたソーシャルタグが配布され、その仕組みがスケーラブルであった。

第2章 理論研究

第1節 システム理論に依拠した通信事業のスケラブル化

第1項 モジュール化とインターフェースのオープン化による自律分散 協調モデル

資本主義の発展と教育の普及によってヒエラルキーの下層の部分で情報処理能力が増大してくると、より複雑な機械を導入し、現場の労働者の知識能力を利用することによって、より効率的な組織運営を実現できる可能性が開けてくる(青木, 1995 [3])。

システムとしての協働の体系やその結果として生み出される製品の設計思想を記述するうえで有用となるのがアーキテクチャ概念である。アーキテクチャとは、どのモジュールがシステムの構成要素となり、どのように機能するかを特定するもの(Baldwin et al., 1997 [14])、製品を構成部品や工程に分割し、そこに製品機能を配分し、それによって必要となる部品・工程間のインターフェース【情報やエネルギーを交換する「継ぎ手」の部分】をいかに設計・調整するかに関する基本的な設計思想(藤本, 2001 [31])、大きなシステムを複数の下位システムを連結させて構築する際の各下位システム間の役割分担とインターフェース【下位システム間の連携方式】の設計(國領, 1999 [4]) (國領, 2008 [32])と論じられた。

さらにアーキテクチャは、インテグラル型とモジュラー型に分類される。インテグラル型のアーキテクチャは、機能群と部品群との関係が錯綜しているものである。自動車を例にとると、ノイズやバイブレーションなど乗り心地の機能の作り込みにはタイヤやサスペンションなどのすべての部品が相互に微妙に調整し合うことが必要であり、各モジュールの設計者は、互いに設計の微修正(すり合わせ)を行い、相互に緊密な連携を取る必要がある(藤本, 2001 [31])。

一方、モジュラーアーキテクチャは、それぞれ独立に設計可能で、かつ、全体として統一的に機能する小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスを構築する。例えば、コンピューター産業は、安価で高速な情報処理能力の導入によってマーケットを広範囲に変化させただけでなく、独立に設計可能で、かつ、全体として統一的に機能するより小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスが構築されるというモジュラーアーキテクチャを広範囲に採用することで、イノ

バージョンのスピードを劇的に速めてきた(Baldwin et al., 1997 [14])。

- **アーキテクチャ=役割分担と下位システム間の連携方式の設計思想**

- 下位システム=モジュール
- インターフェース=連携方式

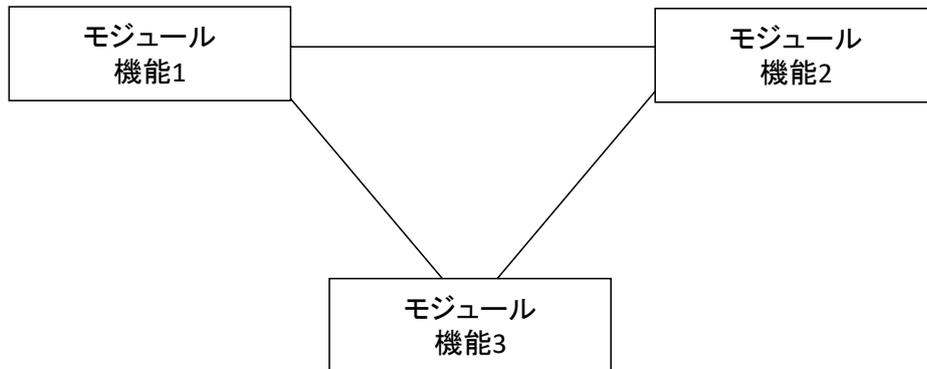


図 9 デザイン記述としてのアーキテクチャ(國領,2008 [32])

國領(1999 [4])は、人間の認知能力の限界が人工物の構造の決定要因であること(Simon, 1981 [33])を踏まえ、機械による情報伝達やプログラム化された処理能力が飛躍的に大きくなり続けている反面、人間の情報処理能力が経済全体の中で希少価値となる状況が強まる結果として、それぞれのユニット(モジュール)の設計が他のユニットの設計にどれほど影響されるかの複合と定義されるユニット間の相互依存性が重要な設計変数となると論じた。更に、相互依存性が各ユニット間で高い場合には、各ユニットを設計する担当者間で調整(すり合わせ)を行わなければならないが、それが低い場合は、すり合わせをする必要がなくなり、相互依存性が高いユニットを集めてユニット化することが全体システムの設計の煩雑さを抑えられると論じた。

モジュラーアーキテクチャでは、モジュール内の設計を変更しても同一インターフェース規格に合わせてモジュール間のやり取りを行うというデザインルールを守れば、他のモジュール内の機能部品との相互依存性を考えずに全体システムの設計を行うことが可能とされた(Baldwin et al., 1997 [14])。

Baldwin et al (2000 [34])は、モジュラーアーキテクチャにおいては、デザインルールに基づいて全体システムが完成し、いったんモジュール間の連結ルール、ないしは目に見える設計ルールが定まると、個々のモジュールの設計やその改善は、他のモジュールの設計やその改善から自立して行われると指摘し、システム全体の改善や革新は、中央集権的・

事前的に指揮されなくても、個々のモジュールの自律的な改善を事後的に結合することによって、進化的に形成される可能性が生まれると論じた。青木 et al (2002 [35])は、この状況を個別モジュールの革新競争に基づく下からのシステム革新と論じ、國領(2008 [32])は、大きな力の小さな装置の時代と論じた。

情報システムの分野では、コンピューターが登場した当初は、より大規模な記憶容量と演算装置を持つシステムが、性能的に優れる構造であり、高価な大型コンピューターに多くの端末が繋がれ、順番待ちをしながら中央演算装置の空きを待つといった状況にあった。マイクロプロセッサの発達はこの構造を大きく変え、安価で高速な演算装置は、個人が手のひらに載るコンピューターで情報処理を行いうる段階に発展した。小型化された装置は相互にネットワークで接続され、それぞれの装置は大きな装置にかなわなくても、ネットワーク全体では大きな力を発揮するにまでになった(國領, 2008 [32])。

一方、モジュラーアーキテクチャは、インターフェースの利用が排他的に制限されているクローズド型のもものとインターフェースが社会的に公開され誰でも有償あるいは無償で使えるオープン型のものに分類される(國領, 1999 [4]) (藤本, 2001 [31])。

クローズドアーキテクチャの製品とは、モジュール間のインターフェース設計ルールが基本的に1社内で閉じているものを指す。例えば、自動車の場合、各製品の詳細設計は外部のサプライヤーに任せることもあるが、インターフェース設計や機能設計などの基本設計部分は1社で完結している(藤本, 2001 [31])。

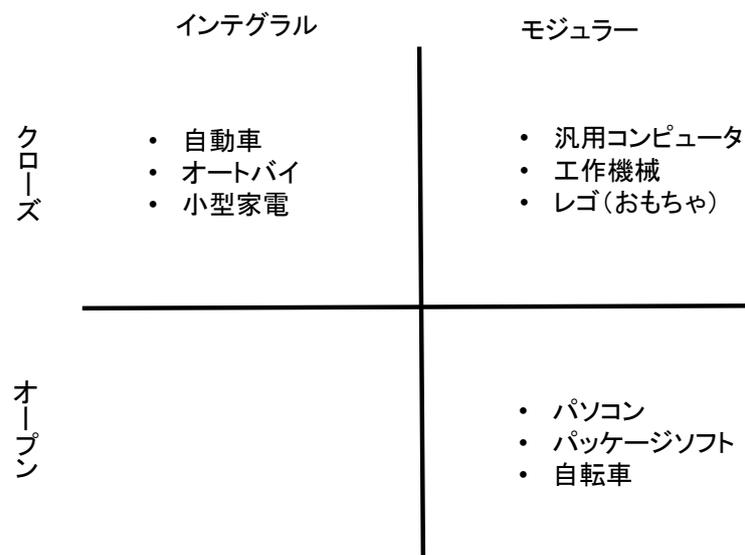


図 10 アーキテクチャの分類(藤本,2001 [31])

オープンアーキテクチャの製品とは、モジュール間を結ぶインターフェースが社会的に公開され、広く共有されたシステムである本来複雑な機能を持つ製品やビジネスプロセスを、ある設計思想(アーキテクチャ)に基づいて独立性の高い単位(モジュール)に分解し、モジュール間を社会的に共有されたオープンなインターフェースで繋ぐことにより汎用性を持たせ、多様な主体が発信する情報を結合させて価値の増大を図る企業戦略を採用した製品である(國領, 1999 [4])。

実際、インターフェースが独自仕様でシステム全体がクローズドである間は、モジュール化された独立的な設計といってもインターフェースを共有している同一企業内や企業グループ内の役割分担の中でしかシステムの統合は行いえないが、インターフェースがオープン化すると、小さな企業が開発したモジュールを自由な組み合わせで統合させて行くことが出来、優秀なエンジニアが自分の得意領域に投資を絞って開発し、できあがった技術をその時点で存在する最良の補完技術を組み合わせ世の中に送り出すことが出来る(國領, 1999 [4])。

青木 et al (2002 [35])は、ネットワークにおいては、規模の経済性だけではなく、ネットワーク効果(Network Effects)、ネットワークの外部性(Network Externality)⁷が観察されることに焦点をあて、インターフェースのオープン化は、規模の経済性というよりもネットワーク経済性が重要な意味を持つ多様な主体が協働して生み出す全体ネットワーク構築を可能にしたと論じた。

篠崎(2003 [36])は、規模の経済性とネットワークの経済性は別概念であり、市場構造に対して逆の効果をもたらす可能性があるとして論じた。具体的には、ネットワーク効果を得ることを目的とする需要面でのスケールメリット追求は、生産場面で必ずしも巨大企業による独寡占の形成を促すことにはつながらないとし、ネットワーク効果を楽しむ消費者からみて、購入する財・サービスの仕様が標準化され、互換性が確保されていれば、どの企業によって供給されているかは問題にならないと論じた。

通信ネットワークについて言えば、あるネットワークに加入している利用者にとって、別のネットワークに加入している利用者と通信できるか否かは、利便性の面でも重要なポイントとなる。しかし、それは、利

⁷ ネットワークの外部性は、ネットワークの利用者にとっては、ある財・サービスの自分以外の購入者が増えればそれだけ自らの効用が高まる状態(Kartz et al., 1985 [89])、通信サービスで他社の利用によって効用が増す消費における外部経済性(Rofls, 1974 [90])と定義される。

用者が同一企業により提供される同一のネットワークに属さなければならぬ事を規定しない。一つの企業による巨大ネットワークではなく、異なった小規模な企業によって運営されるネットワークであったとしても、それが相互に連携して問題なく利用できるならば、利用者視点に立てば、実態的にはひとつの巨大なネットワークを形成しているのと同じである（篠崎, 2003 [36]）。

モジュラーアーキテクチャが構築する全体ネットワークは、ネットワークの外部性に強く依拠することで自律性が高い主体が独自性を発揮しつつも、分散的に運用され、さらには協調関係をつくることで、全体システムを動かす。特にモジュラーアーキテクチャの一類型であるサブシステムのインターフェースがオープン化されたオープンアーキテクチャは、強くネットワーク外部性に依拠した全体ネットワークを構築することが出来ると言える。

國領(2008 [32])は、このような全体ネットワークのガバナンスを階層的な権力関係による統制的な調整と対比して自律分散協調モデルと指摘し、ネットワーク化してスケーラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性(Interoperability)については、皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動が生まれると論じた。飯盛(2007 [37])が言う「もやい」と呼ばれるガバナンスに基づくモデルとも言える。

第2項 自律分散協調モデルの通信事業での応用事例：インターネット

ネットワーク化してスケーラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性については、皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動が生まれるという自律分散協調モデルの概念(國領, 2008 [32])が全体ネットワーク設計に導入された事例にインターネットがある。

石田(2000 [38] [39])は、インターネットにおいて各々が自律したネットワークが相互接続を繰り返す、スケーラブルに拡大していくメカニズムを以下のように論じた。

インターネットにおける相互接続は、インターフェースがオープン化されており、無償なピアリング型が存在するのがその特色である。

ピアリング型は、ティア1と呼ばれる大規模なバックボーン事業者が対等の関係で相互接続するモデルであり、対等関係にあるので相互接続

は無料である。一方、トランジット型は、非対称な規模のネットワーク間の相互接続で用いられる手法であり、小規模ネットワーク事業者が、大規模ネットワーク事業者へ接続料金を支払い相互接続するモデルである。実際の相互接続において、ピアリング型が採用されるか、トランジット型が採用されるかの決定要因となるのは、相互接続することによってネットワーク外部性から生まれる利得である。得られる利得が双方で同一であるならばピアリング型が採用される。

しかし、自分より小規模なバックボーン事業者との相互接続においては、ネットワークの外部性の利得を片務的に与えることは出来るが、自らにとっての利得は小さい。そこで、その差分を埋める費用は受益者たる小規模事業者が負担するべきという判断になり、トランジット型の接続が採用される。

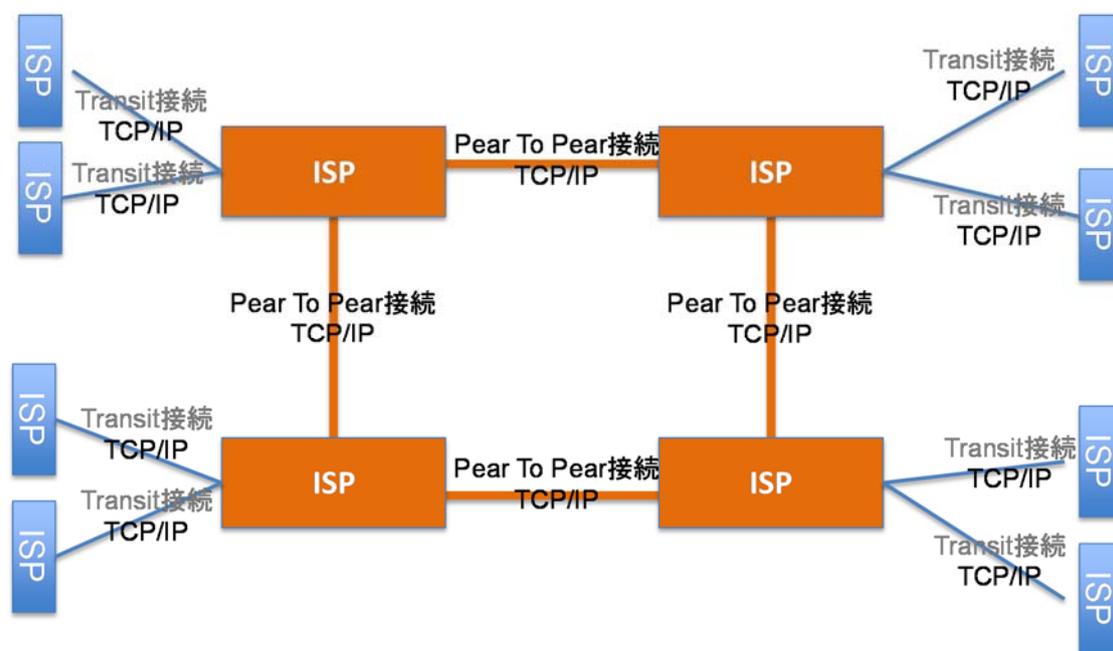


図 11 インターネットにおけるスケーラブル構造

第 3 項 自律分散協調システムの制約：全体品質

インターネットは、ネットワーク化してスケーラブルに出来るという共通利益を得ることをインセンティブに自律したネットワークが相互接続することで拡大した。しかし、その一方で全体品質統制に関しては課題が存在する。

インターネットの通信品質は、ネットワークが輻輳していない時は、

ほとんど待つことなく瞬時にすべての IP パケットが送受信される一方で、ネットワークが輻輳するときには、すべての利用者が同程度の遅延やサービス品質における損失を経験する。特に利用者を区別しない定額料金制の場合には、遅延やパケットの欠損という通信品質の欠損が大きな問題となる (Wiseman, 2001 [40])。

インターネットで観察されるこのような品質統制問題は、自律分散協調モデルに依拠した問題である。

黒須(1997 [5])は、自律分散協調システムをシステムを構成する要素が、時と場合に応じて他の要素を制御したり、制御されたり、あるいは独立に行動することによって、このシステムの外部の共通目的⁸を達成しようとするシステムであると定義し、自律分散協調システムにおいては、全体品質の統制が課題となると論じた。小規模化は、各小規模生産工場自体の管理は単純化するが、全体の観点からみた最適化は、かなり複雑になり、業務重複の無駄が発生し、自律性を強力に保とうとするあまり、各種の業務をそれぞれの小規模自律分散工場が持とうとする傾向が生まれ、業務や機械・設備の重複という無駄が発生すると論じた。

自律分散協調モデルにおいては全体品質統制が課題となるとする議論は、分散化システムにおける品質設計の議論とも通じるものがある。Brewer (2000 [6])は、分散化システムと品質の関係を CAP 定理 (CAP Theorem) として論じた。CAP 定理は、システム構築においては、一貫性 (Consistency)、可用性 (Availability)、分割耐性 (Partition Tolerance) のうち、その2つしか同時成立しないと論じた。

自律分散協調モデルでは、ネットワーク化してスケーラブルにしたいという共通利益のもとに相互接続に向けた協調行動が生まれる (國領, 2008 [32])。しかし、全体品質の統制の点では、課題が存在する (黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。

第4項 本研究で論ずるスケーラブル化と自律分散協調モデルの議論

モジュラーアーキテクチャは、それぞれのユニット(モジュール)は小さくても、接続することで段階的に大きくできる構造をするスケーラブル

⁸ 國領 et al (2011 [88])は、プラットフォーム概念を自律分散協調のモデルと位置付け、プラットフォームが共通目的を持つことを必須としていない。黒須(1997 [5])は、自律分散協調システムの共通目的には、危機分散、負荷分散、変動環境適応などが存在すると論じた。

ル(Scalable)なネットワークを設計可能にした。

更に、モジュラーアーキテクチャにおけるインターフェースのオープン化は、規模の経済性というよりもネットワーク外部性に重要な意味を持つシステムを構築する(青木 et al., 2002 [35])。その結果、自主的に管理している多様な主体がシステムを相互に接続することによって共同でシステムを大きくするスケーラブルなネットワークを設計可能にした。ネットワーク化してスケーラブルにしたいと言う共通利益のもとに相互接続に向けた協調行動が生まれ、自律分散協調モデルに基づくスケーラブルなネットワーク(國領, 2008 [32])が成立する。その代表事例がインターネットである。

自律分散協調モデルに依拠した高機能化した小さなユニット(モジュール)の相互接続は、分散的に運営されながらも協調関係を創ることで全体システムを動かすスケーラブルなネットワークが設計可能となり、電話のような中央集権システムと対比されるまでになった。

一方、自律分散協調モデルにおける課題は全体品質統制の難しさである。全体の観点からみた最適化は、かなり複雑になり、業務重複の無駄が発生し、各ユニットの自律性を担保しての全体品質の統制は難しいと論じられる(黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。

モジュラーアーキテクチャとは、ユニット(モジュール)間の相互依存性の削減であり、モジュラーアーキテクチャのメリットが、相互依存性が高いユニットを集めてユニット化することによる全体設計の煩雑さの削減にあることを考えると、ユニットを越えた調整は、ユニット間の相互依存性を高めることになり、モジュラーアーキテクチャのメリットを減ずることになる。自律分散協調モデルに関して言えば、各ユニットの自律性を減ずる結果となる。

第2節 通信事業でのエッセンシャル・ファシリティと産業構造の理論

第1項 エッセンシャル・ファシリティの独占・寡占による産業支配

ネットワーク事業においては、長らく供給特性、特に規模の経済性を起因とした自然独占性(Natural Monopoly)に着目し、自然独占性を持つ設備であるエッセンシャル・ファシリティ(Essential Facility)を開放するという産業組織論に依拠した議論が行われた。

電気や通信のようなインフラストラクチャ(Infrastructure)は、エッセンシャル・ファシリティを持ち、その設備構築に多額の固定費が必要

となり規模の経済性が大きく働くためにボトルネック独占という供給側の特色が発生する。ネットワーク事業では、エッセンシャル・ファシリティが1社により独占される状況であるボトルネック独占(Bottleneck Monopoly)が規制下で認められてきた(依田, 2001 [2])。

規模の経済性は、資本設備をその他の生産要素(労働力や原材料)とともに同時にN倍に拡大した時に総コストがN倍以下にしかならない状況(南部, 1982 [41])と定義され、規模の経済性を有するエッセンシャル・ファシリティを必要とするシステムに市内電話網がある。

鈴木 et al (1993 [42])は、市内電話網における規模の経済性を以下に論じた。第一に、市内電話網は、PSTN(Public Switched Telephone Network)として構築され、サービス提供に必要な主要費用は、長らく、通信端末、市内電話回線、電話交換機の費用であり、この3つはトラフィック量とは無関係なNTSコスト(Non Traffic Sensitive Cost)に相当するのでトラフィック1単位当たりの平均費用はトラフィックの増加にともなって逓減する。第二に、今後、市内電話網では、技術進歩によって伝送路が銅線から光ファイバー、電話交換機から電子交換機へと進化する場合でも市内電話回線と電話交換機の費用がNTSコストであるという状況は変わらず、固定回線を用いた市内電話網は、単一の企業による一元的な供給が、複数企業による多元的な供給よりも費用が低くなるという意味で自然独占性が継続すると論じた。

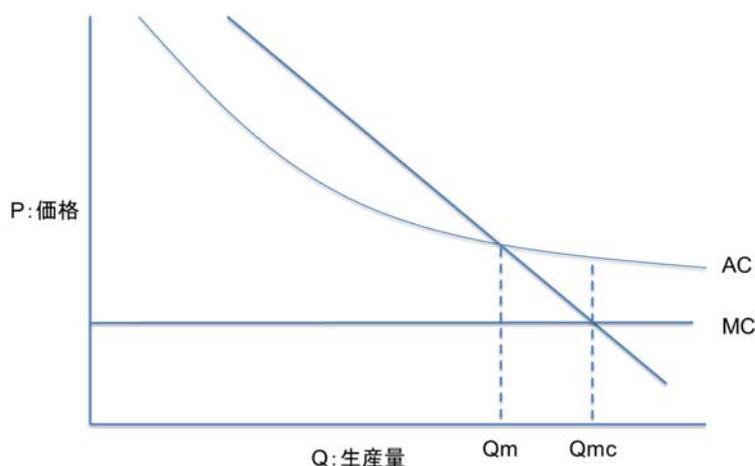


図 12 自然独占の状況(鈴木 et al., 1993 [42])

そこで、市内電話網においては、エッセンシャル・ファシリティ独占を前提とするネットワークの所有形態として、統合型ボトルネック型と分離型ボトルネック型という2つのモデルが論じられた(依田, 2001 [2])。



図 13 エッセンシャル・ファシリティの独占モデル

このようなボトルネック独占という供給側の特性を持つエッセンシャル・ファシリティは、米国における AT&T と 同社の地域通信網への接続を拒絶された MCI との間で争われた 1983 年の MCI 事件審決において以下のように定義された (OECD Policy Roundtables, 1996 [43])。第一に、独占事業者がコントロールする設備、第二に、競業者が、現実的に合理的に複製することができない設備、第三に、競業者が利用することが (独占事業者により) 否定されている設備、第四に、競業者が継続的に使うことができない設備である。

また、醍醐 (2000 [44]) は、エッセンシャル・ファシリティを以下のように定義した。第一に、独占的事業者、または独占力を有する集団が他の事業者と競争を行う上で必要不可欠な施設の支配である。第二に、当該施設の複製あるいはその経済的機能の複製は、接続を排除された事業者にとって、現実的に、または合理的に不可能である。第三に、事実上独占された市場において、結果的に競争を阻害するファシリティの使用拒否及び制限が存在する。第四に、ファシリティへの接続拒否に対してそれを行うべき正当な経営上の理由がない、と論じた。

このように定義されるエッセンシャル・ファシリティは、産業組織論においては、競争政策の観点からエッセンシャル・ファシリティを有する企業への規制、エッセンシャル・ファシリティの開放が論じられた。

しかし、1980 年代には、潜在的参入企業の圧力が自動的に社会厚生上望ましい資源配分を実現させ、エッセンシャル・ファシリティを有する事業者への公的事業規制は不要であるとするコンテスタブル市場理論 (Baumol, 1982 [45]) が論じられた。

完全コンテスタブル市場の条件としては、第一に、全企業は同質的な費用関数・需要関数を持つこと、第二に、埋没費用が存在しない、全企業は参入退出が自由、第三に、既存企業は時間ラグをもってしか価格を

変更できない、第四に、消費者は価格際に対して時間ラグなく反応できることが論じられた(Dixit, 1982 [46])。コンテストブル理論は、1980年代の米国での航空インフラストラクチャ自由化における理論的支柱とも論じられた(Peterson et al., 1994 [47])。

しかし、コンテストブル理論は批判される帰結となった。

Weitzman(1983 [48])は、参入退出の完全性が規模の経済性の概念と矛盾し、埋没費用が存在しない状態では、すべての費用は可変的となり、規模の経済性は一定になると論じ、Spence(1983 [49])は、規模の経済性が存在する条件は、第一に、事業退出時に回収できないコストである埋没費用が存在すること、第二に、保存が利かないサービスの品質を持つこと、第三に、生産に時間が掛かる、の3点にあると言えるが、コンテストブル市場の仮定は、規模の経済性が発生する第一の条件「事業退出時に回収できないコストである埋没費用が存在すること」を排除するので、第二と第三の条件を満たす時に限られると論じた。

競争政策上、エッセンシャル・ファシリティが重要な位置を占めるのは、新規参入企業が自社サービスを提供する時には必ず既存事業者が持つエッセンシャル・ファシリティにアクセスしなければならない点にある。したがって、産業組織論の観点では、エッセンシャル・ファシリティを独占する企業は、大きな市場支配力を有し、逆に競争阻害効果排除を目的にエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化された(依田, 2001 [2])。エッセンシャル・ファシリティの独占問題は、ボトルネック独占企業の競争的市場への参入を認めるべきか否か、もしくは、ボトルネック設備の開放に帰結すると論じられた(Armstrong et al., 1994 [1])。

第2項 電話網におけるエッセンシャル・ファシリティとその開放

エッセンシャル・ファシリティを有すると論じられる市内電話網では、市内電話網に存在する3つのコンポーネント、具体的には、通信端末(電話機)、伝送路回線、電話交換機がエッセンシャル・ファシリティと位置付けられた(鈴村 et al., 1993 [42])。そこで、産業組織論の論点では、エッセンシャル・ファシリティを独占する企業は大きな市場支配力を有し、逆に競争阻害効果排除を目的としたエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化され、独占資源であるエッセンシャル・ファシリティの開放が議論された(依田, 2001 [2])。

通信事業では、米国では 1976 年から 1977 年にかけて、日本では 1985 年にエッセンシャル・ファシリティと位置付けられるコンポーネントの一部である通信端末がアンバンドル化、即ち開放された。

林(1994 [50])は、通信端末というコンポーネントが長らくエッセンシャル・ファシリティからアンバンドルされてこなかった背景として 2 つの項目を論じた。

第一に、ビジネス慣習である。例えば、1970 年代の米国の市内電話網の事例では、エッセンシャル・ファシリティを保有し、ローカルアクセスネットワークを独占していたベル系地域電話各社は、電話機を販売するのではなく賃貸しており、各月の通話料とともにそのレンタル料を徴収する仕組みを長らく採用しており、電話機など加入者宅内に置かれる通信端末は、エンドツーエンドの一要素を成すものという考えが定着していた。

第二に、相互接続に関する技術的課題である。市内電話網では、技術的に見ると、通話が送信側と受信側で支障なく行われるためには、ダイヤル・パルス(プッシュホンなら複合周波数)の送り方、全体の減衰許容量、区間別割り振りなどが事細かに決まっていて、これを厳格に守らないと自然な音声を伝えることが出来ない。この調整は、1 社がエンドツーエンドで責任を持っている場合でも容易ではなく、複数社が責任を分担することは相当な難題であった。

1980年代のPSTNにおけるエッセンシャルファシリティ

市外電話を競争領域とすると市内回線交換機、端末、交換機と端末を繋ぐ市内電話回線がエッセンシャルファシリティと定義される(鈴村、南部、1993)
 米国では 1976 年から 1977 年にかけて、日本においては 1985 年に、エッセンシャル・ファシリティの一部でもある通信端末が完全開放される

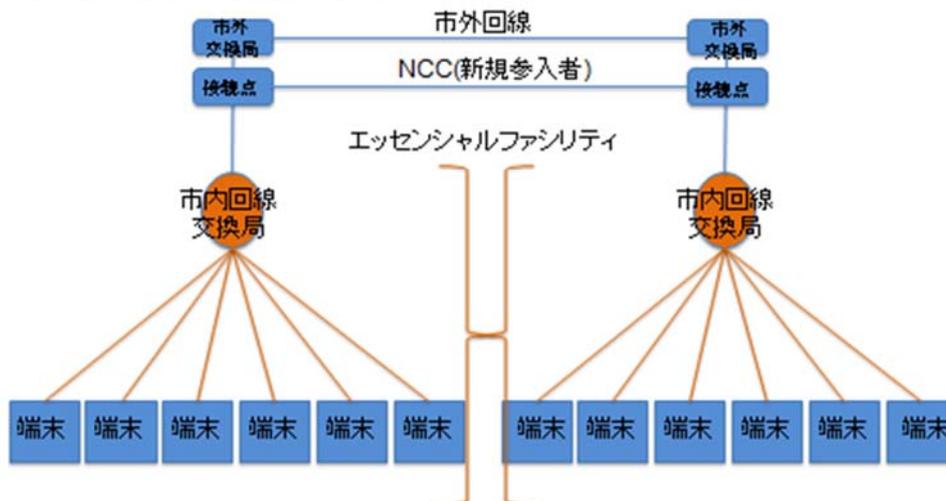


図 14 市内電話網における通信端末のアンバンドル

一方、技術革新は、ネットワーク事業の各々のコンポーネントのアンバンドル化を可能にさせた。その結果、エッセンシャル・ファシリティが自然独占であり、加えて、自然独占部分とほかのコンポーネントとの補完・調整が必要となるので垂直統合型独占が望ましいとされてきた産業構造は、すべてのネットワーク事業に適用できない状況となった。

具体的には、設備の大部分が埋没費用となって大きな固定費用を伴い、転用した際に最小の価値しか持たないとされてきたネットワーク部分は、電力分野における送電網、通信分野における伝送媒体や交換局、鉄道分野における軌道や駅舎、水セクターにおける上水網や下水管などにおいて複数のコンポーネントにアンバンドル化された。その結果、ネットワーク事業の多くの部分は、競争導入に適した費用条件を有する形となった(The World Bank, 2004 [51])。

通信事業では、市内電話網は自然独占性を有するが、携帯電話は競争的活動に位置づけられた(Gonetic et al., 2001 [52])。さらに、通信事業では、ネットワークの一部(通信セクターにおける長距離通信サービス)も競争導入に適した条件を満たすと論じられた(Gray et al., 1997 [53])。

	非競争的活動	競争的活動
電力インフラ	高圧送電 ローカル配電	発電 最終消費者への販売
通信インフラ	住宅用電話 Local Loop(市内回線網)	長距離通信 携帯電話 付加価値サービス(VAN)

図 15 Gonetic et al(2001 [52])による整理

第3項 市内電話網におけるエッセンシャル・ファシリティのオープン化とその影響

市内電話網においては、通信端末(電話機)、伝送路回線、電話交換機が長らくエッセンシャル・ファシリティと論じられてきた(鈴木 et al., 1993 [42])。

しかし、日本では1985年にエッセンシャル・ファシリティの一部である通信端末がアンバンドル化された結果、技術標準を満たす全ての通信端末は、既存事業者が保有する市内電話網に接続可能となった。その後の技術革新は、エッセンシャル・ファシリティの更なるアンバンドル

化と開放を促した。そこで本項では、林(1998 [54])の整理に従い、日本の市内電話網におけるエッセンシャル・ファシリティのアンバンドル化とオープン化の動きを論じる。

日本においては、1972年の第一次伝送路回線開放におけるコンピューター専用/公衆サービス創設、1981年の第二次伝送路回線開放におけるコンピューター専用サービスの利用制限緩和と Value Added Network(付加価値通信サービス、VAN)の一部解禁を経て段階的な市内電話網のオープン化が行われた。

1985年の第三次伝送路回線開放は、VANの全面解禁と同時に、技術標準を満たせば全ての通信端末を自由に市内電話網へ接続することを可能にさせた。同時に、電話ではなく、コンピューター通信に限定した形ではあるが、中継区間の料金の高いところは定額制の専用線を活用し、支線の通信料の安いところは従量制の公衆電話網を使うという公専公接続ができるようになった。

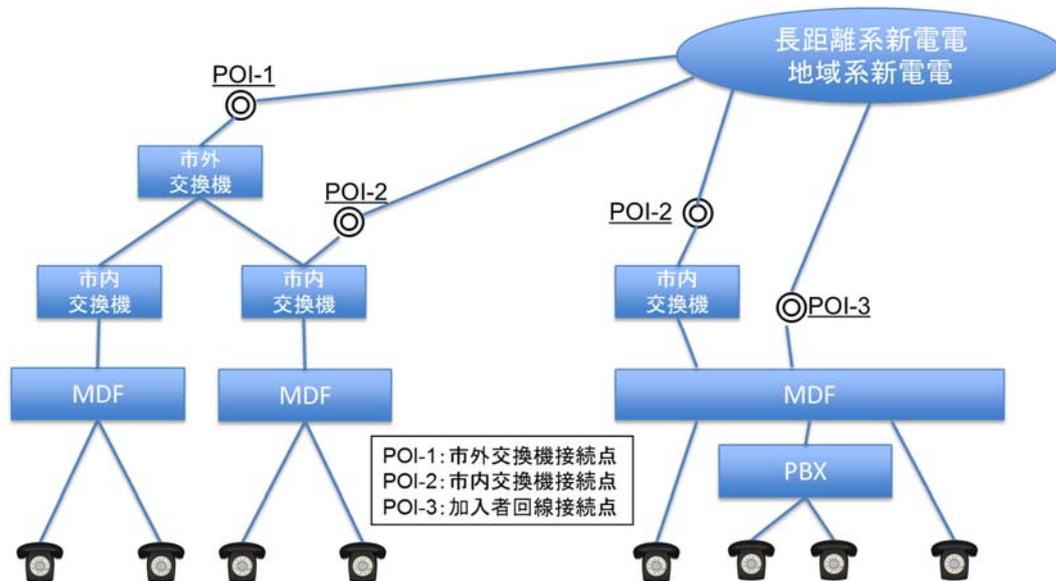
1995年の第四次伝送路回線開放は、ネットワークのオープン化を実現させ、公専公接続の全面開放に加えてNTTによる「ネットワークのオープン化宣言」に従った固定通信市場のすべてのレベルでの相互接続を認めた。市外通信では、設備コストが相対的に安くて新技術の採用も容易である一方、既存事業者によるサービス料金は高かったことから、新規参入者が現れた。実際、長距離系新電電3社のうち2社は高い利益をあげた。

しかし、エッセンシャル・ファシリティ性を有する市内電話網は、個々の加入者まで電話線を引かなければならないなど設備費用が高い一方、既存事業者によるサービス料金は20年あまりの間3分10円のままで低額であったため、新規参入者には厳しい事業環境であった。

そのような事業環境においてNTTによるネットワークのオープン化宣言が行われ、市内電話網におけるエッセンシャル・ファシリティのオープン化は、新規参入者が市内電話網において自ら加入者線を設置しなくても既存事業者であるNTTと対等な競争が可能な環境を構築した。

具体的には、従来はPOI-1(市外交換機接続点)が唯一の外部ネットワークとの相互接続点であったが、POI-2(市内交換機接続点)やPOI-3(加入者回線接続点)においても外部ネットワークとの相互接続が可能となり、エッセンシャル・ファシリティを有しない新規事業者が新しいサービスを開発することが可能となった。その後、1997年6月には電気通信事業法が改正され、PSTN網との相互接続ルールが策定された。相互接続料金は、ネットワークの機能を加入者回線、市内交換機などアンバンド

ルされた個々の機能ごとに設定され、新規参入者が相互接続する際の接続箇所を技術的にも費用的にも自由に選べるように制度化された。



引用: 林(1998)ネットワークインテグレーションと情報社会の経済学

図 16 日本の市内電話網のエッセンシャル・ファシリティ開放

第 3 節 理論研究が導出する移動通信事業のスケラブル化要件

本章においては、広帯域移動無線アクセス事業 (BWA 事業) をスケラブル化する要件の導出を目的とした理論研究を行った。

依拠した理論の一つは、システム論としての自律分散協調モデルであった。モジュール化により全体システムが複数の半自律的なサブシステムに分割可能であった (青木, 1995 [3]) (國領, 1999 [4])。モジュラーアーキテクチャでは、そのスケラブル化において全体品質保証が困難であるという制約がありつつもシステムのスケラブル化という共通の利益をインセンティブにした自律分散協調モデルを構築した (青木 et al., 2002 [35])。

モジュラーアーキテクチャの中でもインターフェースをオープン化したオープンアーキテクチャは、インターフェースクロード化したモデルと比較して自前の設備を中核事業に集中させ、それ以外は、外部資源を活用したネットワークの外部性に強く依拠した全体システムのスケラブル化を実現した。

ただし、自律分散協調モデルに依拠したスケラブル化では、システ

ム全体での品質保証が困難とされた(黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。その結果、スケーラブル化したネットワーク事例であるインターネットにおいては、通信品質が接続不保証(ベストエフォート)であった。

インターネットにおいては、ネットワーク化してスケーラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性については、皆が自発的に協調行動を取るモデルが観察された。ピアリング型は、ティア1と呼ばれる大規模なバックボーン事業者が対等の関係で相互接続するモデルであり、無償での相互接続が行われる(石田, 2000 [38] [39])。

いま一つの議論の系譜は、通信業界において長く用いられてきた、技術的な特性から生まれる経済特性を、規模の経済性やネットワーク外部性などの概念によって説明し、それを参入可能性と結びつける、産業組織論を出自としたものであった。ここではエッセンシャル・ファシリティと呼ばれる通信サービスを行う上で必須の資源が独占あるいは寡占から開放されていることが参入の条件となった(Armstrong et al, 1994 [1]) (依田, 2001 [2])。エッセンシャル・ファシリティは、第一に、独占事業者がコントロールする設備、第二に、競業者が、現実的に合理的に複製することができない設備、第三に、競業者が利用することが(独占者事業者により)否定されている設備、第四に、競業者が継続的に使うことができない設備と定義された(OECD Policy Roundtables, 1996 [43])。

エッセンシャル・ファシリティを有すると論じられてきた市内電話網では、市内電話網に存在する3つのコンポーネント、具体的には、通信端末(電話機)、伝送路、電話交換機が長らくエッセンシャル・ファシリティと位置付けられた(鈴木 et al., 1993 [42])。産業組織論では、エッセンシャル・ファシリティを独占する企業は大きな市場支配力を有した。そこで、競争阻害効果排除を目的にエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化され(依田, 2001 [2])、エッセンシャル・ファシリティの開放が議論された。

通信端末というコンポーネントが長らくエッセンシャル・ファシリティからアンバンドルされてこなかった背景としては、ビジネス慣習、相互接続に関する技術的課題があった(林, 1998 [54])。

しかし、モジュラーアーキテクチャを採用した通信システムでは、各々のモジュールは自律しており、特にオープンインターフェースを有するモジュラーシステムにおいては、相互接続に関する技術的課題がエッセンシャル・ファシリティを開放できない理由にはならない。

そこで、本章における理論研究は、アクセスネットワークをスケーラ

ブル化する要因として、第一に、エッセンシャル・ファシリティが存在する場合はそれが開放されること、第二に、(モジュラーアーキテクチャにおける)オープンオープンアーキテクチャなシステムであること、第三に、モジュラーアーキテクチャにおける全体品質統制課題を解消するベストエフォート(接続不保証)通信品質であること、第四に、スケーラブル化が先行するインターネットにおけるピアリング型の相互接続に観察されるように無償もしくは低コストな相互接続ネットワークの存在すること、から構成される4点を研究仮説として導出した。

第3章 予備調査: Wi-Fi アクセスでのスケーラブル化成功の要因

第1節 インターフェースのオープン化

第2章における理論研究は、アクセスネットワークをスケーラブル化する4つの要件を導出した。第一にエッセンシャル・ファシリティが存在する場合はそれが開放される、第二にモジュラーアーキテクチャにおけるオープンオープンアーキテクチャなシステムである、第三にモジュラーアーキテクチャにおける全体品質統制課題を解消するベストエフォート(接続不保証)通信品質である、第四に外部接続に関してスケーラブル化が先行するインターネットのピアリング型相互接続に観察されるように無償もしくは低コストな相互接続ネットワークが存在する、という4つの要件である。

そこで、本章においては、理論研究により導出したこれらの要件をアクセスネットワークのスケーラブル化が先行して実現しているWi-Fiアクセスと比較する予備調査を行った。

理論研究では、モジュラーアーキテクチャは、それぞれ独立に設計可能で、かつ、全体として統一的に機能する小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスを構築でき(Baldwin et al., 1997 [14])、ネットワーク化してスケーラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性(Interoperability)については、皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動が生まれる(國領, 2008 [32])ことを議論した。

Wi-Fi アクセスは、アクセスネットワークと通信端末が各々独立な設計であった。自律化したサブシステム間のインターフェースはオープン化され、インターフェースクロード化したモデルと比較してネットワークの外部性に依拠したシステムが構築されていた。

日本におけるWi-Fi アクセスは、無線LANと呼ばれ、技術的には、IEEE802.11規格で標準化された伝送規格を用いて2.4GHz帯又は5GHz帯の周波数帯の電波を使用する無線ネットワークを指し、制度的には、小電力データ通信システムとして定義された技術基準に適合(技術基準適合証明を有する等の一定の条件を満たす)すれば、無線事業免許が不要な無線ネットワークであった(総務省情報通信審議会, 2013 [55])。

無線LANは、普及するIEEE802.11規格の技術名称を引用して一般的にはWi-Fiアクセスと呼ばれ、具体的には、通信端末、アクセスポイン

トと呼ばれる通信基地局、アクセスポイントが複数存在する場合にそれを一元的に管理する Wi-Fi アクセスポイントコントローラ、IP アドレスを割り振る DHCP、AAA (Authentication【認証】、Authorization【認可】、Accounting【課金】) のモジュールに分解されるモジュラーアーキテクチャを採用したシステムであった。

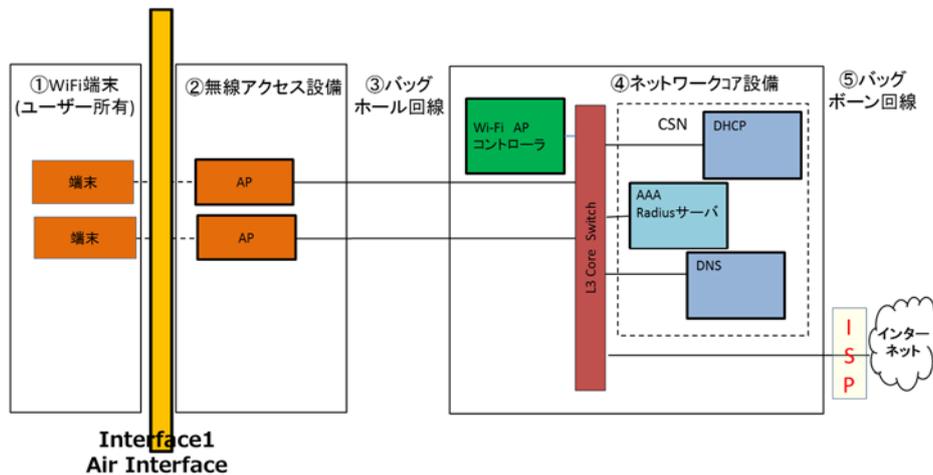


図 17 Wi-Fi アクセスのアーキテクチャ

Wi-Fi アクセスの各モジュール間接続のインターフェースは、通信プロトコルにインターネットプロトコル (IP) や Ethernet (IEEE 802.3)、IEEE802.11 などのオープン化されたインターフェースを採用していた。通信端末とアクセスポイント間のインターフェースは、IEEE802.11 規格としてオープン化されることに加えて、IEEE802.11 規格を採用するシステム間の相互接続強化を目的に機器開発メーカー各社により設立された Wi-Fi Alliance がその相互接続を確認した。その結果、技術的に相互接続が確認された多くの汎用通信端末が Wi-Fi アクセスの利用者に流通した。

数多くの Wi-Fi アクセス利用者は、接続できる無線 LAN アクセス事業者を限定しない IEEE802.11 として標準化された汎用通信端末を保有していた。その結果、通信サービスを供給する無線 LAN アクセス事業者は、利用者側に幅広く普及した汎用的な Wi-Fi 通信端末の利用無しに Wi-Fi アクセスのサービスを提供できない状況にあった。

その結果、Wi-Fi アクセスでは、需要側のネットワークの外部性に依拠したエッセンシャル・ファシリティ (経済産業省, 2001 [56]) が構築された状態とも言えた。しかし、Wi-Fi アクセスの通信端末というエッセンシャル・ファシリティは開放されていた。その結果、ネットワークサービスの供給側は、アクセスポイント (通信基地局) を設置し、利用者が

持つ汎用的な通信端末へ主にインターネットアクセスを目的とした無線通信事業を有償もしくは無償で行っていた。

第2節 接続不保証(ベストエフォート)な通信品質

理論研究では、システム論的には、モジュラーアーキテクチャにおけるオープンアーキテクチャは、システムのスケラブル化を共通利益とした自律した協働を成立させ、自律分散協調モデルを構築させた(國領, 2008 [32])。しかし、自律分散協調モデルでは、全体システムの品質保証は困難と論じられた(黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。

Wi-Fi アクセスでは、通信プロトコルに TCP/IP を採用し、通信品質をベストエフォートと規定していた。具体的には、Wi-Fi アクセスの通信プロトコルは、TCP/IP プロトコルであり、TCP/IP プロトコルはその通信品質がベストエフォートであった。

通信品質をベストエフォートと規定した TCP/IP を通信プロトコルに採用するネットワーク事例にインターネットがある。自律分散協調型ネットワークとして構想されたインターネットは、ネットワーク側では市内電話網の PSTN のようなトラフィック管理機能を持たず、TCP/IP によるルーティングと伝送を行うのみである(石田, 2000 [38] [39])。

Wi-Fi アクセスの無線技術は、3G や LTE といった携帯電話事業が使用するライセンスバンドと異なり、電波を送出するための無線事業免許が不要であるアンライセンスバンドを使用した。特に、Wi-Fi アクセスが利用する 2.4 GHz 周波数帯は、Bluetooth での通信や電子レンジ、産業機械等においても使用されており、通信が輻輳した結果としての通信障害が発生した。第一に、ある範囲内に供給側の多くのアクセスポイントと需要側の無線通信端末が存在するという輻輳状況は、多くの機器が帯域を奪い合う状況が発生させ、無線区間でのパケット損失は、エンドツーエンドの通信に支障をきたす障害が発生させた。第二に、Wi-Fi アクセスでは、アクセスポイントは通信に必要な SSID(Service Set Identifier)を定期的(100ms 間隔)なビーコン創出を通じて通信端末へ通知することを必須とするが、多くの主体により設立された数多くのアクセスポイントがビーコンを同時発信する際に無線通信帯域の圧迫問題が発生した(北條, 2014 [57])。

Wi-Fi アクセスでは、全体品質の統制は行われず、IP パケットが通信相手に届かないことが起こったときには再送する TCP 仕様が普及した。

その結果、ネットワークにおける輻輳が単位時間に特定ユーザーのために運ばれるパケット数を減少させ、通信速度(スループット)を低下させる(石田, 2000 [38] [39])というインターネットと同じ通信状況が観察された。

第3節 認証基盤のオープン化

理論研究では、通信業界において長く用いられてきた、技術的な特性から生まれる経済特性を、規模の経済性やネットワーク外部性などの概念によって説明し、それを参入可能性と結びつける、産業組織論を出自としたことを論じた。ここではエッセンシャル・ファシリティと呼ばれる通信サービスを行う上で必須の資源が独占あるいは寡占から開放されることが参入条件となった(Armstrong et al, 1994 [1]) (依田, 2001 [2])。

しかし、通信事業においては、セキュリティ設計への社会的要求が高まっている。例えば、日本においては、政府は、2005年の第1次計画、2009年の第2次計画に続き、2014年に「重要インフラの情報セキュリティ対策に係る第3次行動計画」を発表した。この計画は、他に代替することが著しく困難なサービスを提供する事業が形成する国民生活及び社会経済活動の基盤であり、その機能が停止・低下又は利用不可能な状態に陥った場合に国民生活又は社会経済活動に多大なる影響を及ぼす恐れが生じるものを「重要インフラ」として定義し、具体的には、「情報通信」、「金融」、「航空」、「鉄道」、「電力」、「ガス」、「政府・行政サービス(地方公共団体を含む)」、「医療」、「水道」、「物流」、「化学」、「クレジット」及び「石油」の13分野を指定した(内閣情報セキュリティ政策会議, 2014 [58])。

通信事業におけるセキュリティでは、コンピューターシステムにおいて情報にアクセスすることができる正当な権限を持つことや情報の内容が正当であることを検証する技術とされる認証機能が重要とされた(情報セキュリティ標準テキスト編集委員会, 2006 [59])。

移動通信事業の一類型である携帯電話事業では、国の法制度が利用者の本人認証を必須化とした。2006年に日本で施行された携帯電話不正利用防止法は、携帯電話事業者が携帯電話サービスの契約時及び譲渡時等に加入者の本人確認を行うことを義務付けた。具体的には、携帯電話等事業者や販売店会社は、利用者との契約締結時及び譲渡時等に本人確認

を行うこと、本人確認記録を作成し保存することを義務付けられた。また、携帯電話利用者は、本人特定事項(氏名、生年月日、住所)について虚偽申告してはならないこと、携帯電話事業者の事前の承諾を得ずに通話可能な携帯電話を譲渡しないことを義務付けられた。

一方、携帯電話システムの標準化制度は、通信サービス利用者と携帯電話端末がSIM基盤と呼ばれる認証基盤を用いて紐づけられることを義務化した。欧州の通信事業者は、多くの通信機器事業者からの提案に基づき、1987年に携帯電話事業におけるGSM標準を設定した(Garrard, 1998 [16]) (Haug, 2002 [17])。

欧州では、1988年の欧州の電気通信標準化を担うETSIの設立とともに、通信機器事業者が技術仕様決定の支配的なプレーヤーになり始めており、GSM標準は、通信サービスにSIMカードを使用することを規定した。一台の携帯電話機は、SIMカードを交換することによって、GSMに準拠しているあらゆる通信事業者の通信サービスを使用できるようになった(Garrard, 1998 [16]) (Hawkins, 1993 [18])。

携帯電話事業は、法制度制度と標準化制度の両面において、認証プロセスを通過しない限り通信サービスが実行されない特性を有した。

SIM認証基盤は、技術的にはネットワーク側には大規模なハードウェア、通信端末側にはICカードチップという特殊ハードウェアを必要とした。また、SIM認証基盤は、日本の国内通信制度的には2008年の規制緩和までは携帯電話事業者しか運用することが出来なかった。

標準制度、法制度、技術的特性、かつ通信政策が相互に関連し、携帯電話事業者は、認証シーケンスを行う上で必須となる設備である認証基盤を独占・寡占化した(総務省情報通信審議会, 2014 [25])。携帯電話事業においては、認証というセキュリティ機能を担うSIM認証基盤が産業組織論におけるエッセンシャル・ファシリテータ的な性格を持つに至った。

一方、Wi-Fiアクセスは、認証基盤をオープン化していた。Wi-Fiアクセスにおける認証シーケンスは、IEEE802.1xとしてオープン化されており、IEEE802.11規格との互換性が担保されていた。具体的には、Wi-Fiアクセスでは、認証シーケンス(IEEE802.1x認証)はオープン化され、供給側の通信業者に独占・寡占されてはいない。IEEE802.1x認証シーケンスは、公開鍵認証基盤を用いることでネットワークと通信端末の相互の真正性を第三者確認できるシーケンスを支援していた。

公開鍵認証基盤は、Wi-Fiアクセスにおいて多用されており、秘密鍵と公開鍵の2つの鍵を用いる「公開鍵暗号」により行われた。公開鍵認証の利用者は、秘密鍵と公開鍵のペアを用意し、認証を受けたい先に事

前に公開鍵を渡しておき、秘密鍵で暗号化したデータをそのペアの公開鍵で復号した。公開鍵認証は、復号化に使用する公開鍵は送信者のものであることが前提となった。しかし、公開鍵認証には、送信者の公開鍵の正当性を検証する手段や受信者が正しい送信者の公開鍵を入手する仕組みまではもたない。そこで、その脆弱性を解決するために、送信者の公開鍵の正当性を第三者が保障するという第三者認証の仕組みが存在、その役割を受け持つ機関が認証局であった。

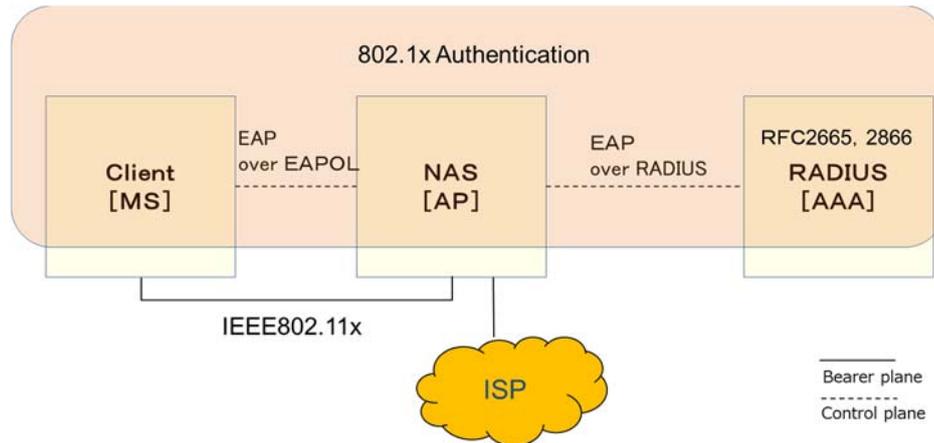


図 18 802.11 規格と IEEE802.1x 認証シーケンスの関係

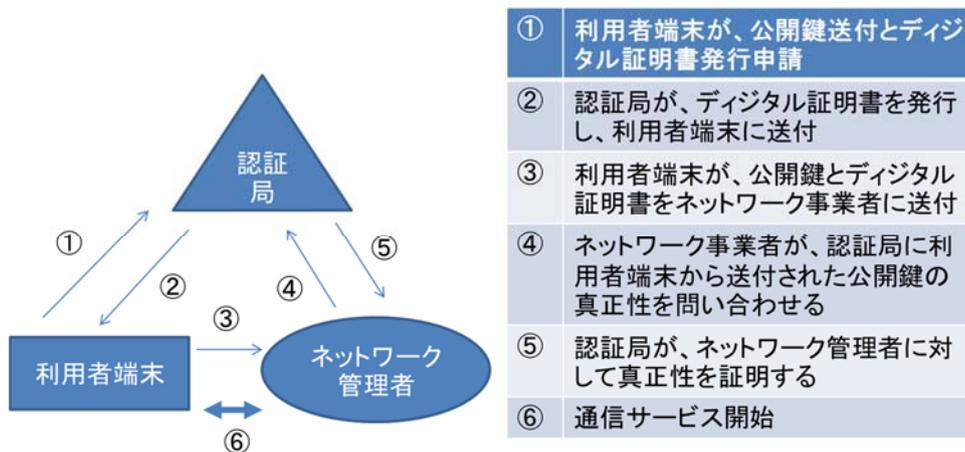


図 19 公開鍵基盤による認証シーケンス

第 4 節 低コストの相互接続ネットワーク

理論研究では、スケーラブル化が先行するインターネットにおいてピアリング型の相互接続が観察され(石田, 2000 [38] [39])、無償もしくは低コストな相互接続ネットワークの存在がネットワークのスケーラ

ブル化に有効に機能した様子を議論した。

Wi-Fi アクセスでは、技術的に自律したシステムがインターネットという低コストな相互接続ネットワークを介して広域運用され、インターネットアクセスという通信サービスが広域運用された。TCP/IP を通信プロトコルとした通信品質のベストエフォート化は、伝送路回線の占有を必須としなく、相乗りでの伝送路利用を実現した。Wi-Fi アクセスでは、伝送路回線に公衆回線やインターネットなど低コストな相互接続ネットワークの選択が行われた。

制度的にも Wi-Fi アクセスの一類型である公衆無線 LAN サービスは、他事業者の電気通信回線設備を用いた通信サービスを実装可能であった。公衆無線 LAN サービスは、無線 LAN アクセスポイントのみを設置して電気通信事業としてサービスを提供する形態、具体的には、無線 LAN アクセスポイントからインターネットへの接続点までの間の通信には他事業者の電気通信回線設備を用いて利用者にインターネット通信サービスを提供することと定義された（総務省情報通信審議会, 2013 [55]）。

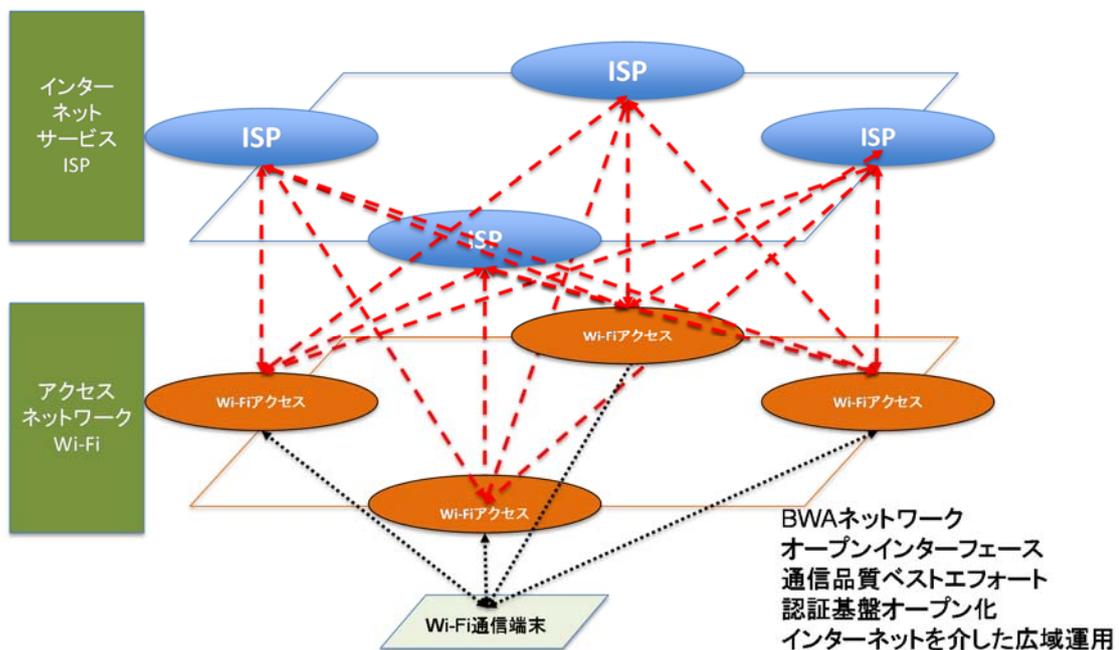


図 20 自律した Wi-Fi アクセスの広域運用

第4章 研究仮説の導出：BWA事業をスケーラブル化させる要件の導出

第1節 インターフェースのオープン化

本章では、第2章の理論研究と第3章の予備調査を用いて、広帯域移動無線アクセス事業(BWA事業)をスケーラブル化する要件を研究仮説として導出した。

先進国では、固定通信網から構成される電気通信事業は、1970年代後半までは垂直統合の状態にあった。認証されていない無許可の通信機器からネットワークへアクセスされることによる障害発生の可能性は、規制された独占企業である通信事業者が交換機から通信端末までのすべての規格を決定する責任を負うことを必要とした。

その結果、先進国の固定通信網は、インテグラルなシステムアーキテクチャを採用し、回線交換機から電話機までの設備を特定の単一の事業者へ発注し、少ない種類の電話機が多くの利用者により利用されることになった(Brock, 1981 [10]) (Brock, 1994 [11]) (David et al, 1987 [12])。インテグラルアーキテクチャは、機能群と部品群との関係が錯綜しており、全体システムは、互いに設計の微修正(すり合わせ)を行い、相互に緊密な連携を取る必要がある(藤本, 2001 [31])。

しかし、1970年代後半、固定通信事業における回線交換機と通信機器の技術革新は、インテグラル型ではなく、モジュラー型へのアーキテクチャ変更を可能にした(Brock, 2003 [13])。モジュラーアーキテクチャは、それぞれが独立に設計可能であり、加えて、全体としては統一的に機能する小さなサブシステムによって複雑な製品や業務プロセスを構築する(Baldwin et al., 1997 [14])。しかし、電子交換機の技術自体は、以前から存在しており、固定通信事業における電子交換機の普及は、モジュラーアーキテクチャを採用する、ネットワークと電話機の間にはオープンなインターフェースを採用するという標準化の制度設定を必要とした。Funk(2008 [7])は、通信事業において技術革新に加えて標準化という制度革新が同時進行して産業構造が変わる状況を同時進化モデル(co-evolution model)と論じた⁹。

⁹ 同時進化モデルが依拠する経済変化における進化論(Evolutionary theory of economic change)は、組織における規則的で予測可能な行動パターンをルーチン(routine)と定義し、組織が成功するか否かは、組織のメタスキルとしての機能を果たすルーチンに依存すると論じる(Nelson et al, 1982 [91])

移動通信事業の一類型である携帯電話事業においては、初期段階から同時進化モデルが観察された。携帯電話の第一世代技術は、アンバンドルが技術的に難しいアナログ通信であるが、モジュラーアーキテクチャを導入し、ネットワークと電話機間のインターフェースオープン化という標準化の制度設計が米国とスカンジナビア諸国主導で推進された (Funk et al., 2001 [60])。

例えば、米国では、米国の通信機器標準化機関である Federal Communication Council (連邦通信委員会、FCC) と米国司法省が重要な役割を果たした。FCC は、固定通信事業における経験において、ネットワークと電話機間のインターフェースオープン化の実現可能性とその加入者メリットが共に高いことを学び、通信機器事業者からの提案に基づいて Advanced Mobile Phone System (AMPS) と呼ばれるネットワーク側の通信基地局と電話機間の相互接続インターフェースをオープン化した (Lyytinen et al., 2002 [61])。

その後、スカンジナビアおよび米国が主導したアナログ世代携帯電話事業における通信基地局と電話機間のインターフェースオープン化は、欧州全域へ広がり、欧州の通信事業者は、1987年に GSM (Global System Mobile) 仕様という標準を設定した (Haug, 2002 [17])。

システム論のモジュラーアーキテクチャにおいては、ネットワークのスケラブル化が議論された。モジュラーアーキテクチャにおいては、ネットワーク化してスケラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性 (Interoperability) に関して皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動の結果として自律分散協調モデルが生まれると論じられた (國領, 2008 [32])。モジュラーアーキテクチャにおいてもインターフェースがオープン化したオープンアーキテクチャは、インターフェースがクロード化したモデルと比較してネットワークの外部性に依拠したシステムを構築した (國領, 1999 [4])。

欧州における GSM 標準化の成功は、1990年代末までには GSM アライアンスを International telephone Union (ITU) と連携したグローバルスタンダードを持つグローバルな組織に成長させた。その後の第三世代携帯電話技術においても、オープンインターフェース、モジュラーアーキテクチャの標準化制度は、産業構造へ大きな影響を与えた (Funk, 2002 [15])。Funk (2008 [7]) は、産業構造を研究開発において主要な役割を担う主体の差異において分類し、同時進化モデルは、移動通信事業を通信事業者主導の産業構造から通信機器事業者主導の産業構造へ変えた

と論じた。

技術	システムアーキテクチャ	制度:標準化設定	産業構造
固定通信網	インテグラル	垂直統合	通信事業者主導
第一世代:アナログ	モジュラー	オープンスタンダード (国内)	通信機器製造者主導
第二世代:デジタル	モジュラー	オープンスタンダード (2国間)	通信機器製造者主導
第三世代:デジタル	モジュラー	オープンスタンダード (国際間)	通信機器製造者主導

図 21 移動通信事業の技術と制度の同時進化(Funk,2008 [7])

第 2 節 認証基盤のオープン化

移動通信事業の一類型である携帯電話事業においては、GSM 標準は、モジュラーアーキテクチャとネットワークと電話機間のインターフェースオープン化を必須化した一方、GSM 標準は、SIM カードを通信サービスの加入者認証に使用することを規定した (Hawkins, 1993 [18]) (Garrard, 1998 [16])。標準化という制度は、本研究が通信サービス加入者と通信端末を紐づける機能と定義する認証機能が携帯電話事業者によって SIM 認証基盤を用いて行われることを規定した。

さらに、ネットワークセキュリティに対する社会要請の高まりは、携帯電話事業における加入者認証を法制度化した。2006 年に日本で施行された携帯電話不正利用防止法は、携帯電話事業者が携帯電話サービスの契約時及び譲渡時等に契約者の本人確認を行うことを義務付けた。法は、犯罪利用防止を目的に契約・譲渡時の本人確認を強化し、携帯電話等の匿名性の排除を目的とした。具体的には、携帯電話等事業者や販売店会社は、加入者との契約締結時及び譲渡時等に本人確認を行うこと、本人確認記録を作成し保存することを義務付けられた。また、携帯電話利用者は、本人特定事項(氏名、生年月日、住所)について虚偽申告してはならないこと、携帯電話事業者の事前の承諾無しに通話可能な携帯電話を譲渡しないことを義務付けられた。

制度的には、GSM という標準化とネットワークセキュリティに関する法と言う 2 つの制度は、日本の携帯電話事業者がネットワーク加入者認証を行うことを義務化することに加えて、加入者認証を SIM 認証という設備を用いて行うことを義務化した。日本の携帯電話事業では、通信事業者が通信サービス提供における必須設備としての SIM 認証基盤を保有

したうえで加入者認証を行う結果に帰結した。

GSM システムは、SIM カードに識別番号としての IMSI、電話番号に相当する MSISDN、SIM カードを物理的に識別する ICCID を搭載した。IMSI は、電話機内の加入者識別モジュールである SIM カードに格納され、加入者側がネットワーク接続時に正当なネットワークかを認証することを目的に、また、ネットワーク側が、接続を試みる電話機が正当な加入者の電話機かを認証することを目的に電話機とネットワーク間で送受信した(Labordère et al., 2004 [19])。

具体的には、IMSI は、GSM ネットワークの携帯電話加入者を識別する 15 桁番号であり、全ての携帯電話加入者が特定の国のどの携帯電話事業者の加入者なのかを識別した。前半部分は、国際機関である ITU-T や国が発番し、ネットワーク事業者を識別した。後半部分は、携帯電話事業者が発番し、加入者を識別した。日本では、国は、2008 年の規制緩和が SIM 認証基盤を携帯電話事業者以外が保有することを認める以前は、IMSI と MSISDN を携帯電話事業者のみに発番した。IMSI は、SIM 認証基盤を運用するうえで必須な識別子である。国が 2008 年まで IMSI の発番対象を携帯電話事業者に限定した制度は、SIM 認証基盤が長らく携帯電話事業者に独占・寡占させる結果に帰結した。

一方、経済的には、SIM 認証基盤は、SIM カードやそれに連携した加入者認証システムなど大規模事業者のみが提供できる大規模ハードウェアに依存する。大規模ハードウェアへの依存は、事業者の固定費負担を高める結果となる。

これまで論じてきたように、制度的・経済的観点において、移動通信事業の一類型である携帯電話事業は、SIM 認証基盤を保有しない限りは、携帯電話事業を運用出来なかった。携帯電話事業における SIM 認証基盤は、携帯電話事業者が独占・寡占することに帰結した(総務省情報通信審議会, 2014 [25])。

長らく通信事業においては、産業組織論の観点において、通信サービスを行う上で必須な設備でありながら新規参入者にとって複製が困難な設備はエッセンシャル・ファシリティとされ、その経営資源を独占する企業は、大きな市場支配力を有するとされた。

エッセンシャル・ファシリティは、第一に、独占事業者がコントロールする設備、第二に、競業者が、現実的に合理的に複製することができない設備、第三に、競業者が利用することが(独占者事業者により)否定されている設備、第四に、競業者が継続的に使うことができない設備と定義される(OECD Policy Roundtables, 1996 [43])。競争阻害効果排除

を目的にエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化される(依田, 2001 [2])。エッセンシャル・ファシリティの独占問題は、ボトルネック独占企業の競争的市場への参入を認めるべきか否か、もしくは、ボトルネック設備の開放に帰結する(Armstrong et al., 1994 [1])。

日本国内の携帯電話事業における SIM 認証基盤は、グループ化・寡占化が進展する経営環境にある携帯電話事業者(総務省情報通信審議会, 2014 [25])がコントロールする設備であり、競業者が現実的に合理的に複製することができない設備であり、競業者が利用することが(独占者事業者により)否定されている設備であり、競業者が継続的に使うことができない設備である。携帯電話事業においては、SIM 認証というネットワークセキュリティを目的とした設備においてエッセンシャル・ファシリティが存在した。

しかし、携帯電話と同じく移動通信事業の一類型である Wi-Fi アクセスは、通信事業者がセキュリティ機能としての認証を行いつつ、認証基盤をエッセンシャル・ファシリティとして占有していない。スケーラブル化が先行して実現している Wi-Fi アクセスは、公衆無線 LAN サービス事業者間で認証情報を共有し、認証基盤オープン化を実現した。

例えば、eduroam は、欧州の TERENA(Trans European Research and Education Networking Association)において開発された認証基盤であり、欧州内の教育機関に存在する各々自律した Wi-Fi アクセスを相互接続することにより、欧州内学術機関全体をサービスエリアとする大規模 Wi-Fi アクセスを構築している。欧州のみではなく、世界各国の学術機関の Wi-Fi アクセスを相互接続している eduroam は、以下のコンポーネントにより構成システムを構築した(Wierenga et al., 2008 [62])。

第一に、Net Access Server(NAS)であり、Wi-Fi 端末に対してネットワークアクセスを提供する IEEE802.11 規格に準拠するアクセスポイントである。第二に、Client/Supplicant であり、IEEE802.11 規格に準拠するネットワークへのユーザー認証を行うユーザーの端末である。第三に、Authentication Service(AS)であり、ユーザー認証と認定、ネットワークアクセスサーバの動的な確認を行う。AS は、パスワードやルート証明書など認証のために用いるユーザー秘密情報を管理し、eduroam では、radius サーバにより構築された。

eduroam は、自律した Wi-Fi アクセスが有する AS 情報を限定された Wi-Fi アクセス間で共有した。NAS には、オーセンティケータ機能を設定し、ユーザー認証が成功しなければ、利用者の端末はアクセスネット

ワークに接続することができなく、具体的には、以下の通信シーケンスを採用した。

第一に、eduroam 利用者は、ネットワークへの接続にあたって、realm 名を含むユーザー ID とパスワード（もしくは証明書）を Client/Supplicant から NAS へ提示する。ユーザー ID は、ユーザー識別子@realm 名の構図を持ち、例えば、ユーザー ID@大学名.ac.jp のようになり、@以降の realm は、所属機関とされた。

認証情報はオーセンティケータ上位の AS (Radius サーバ) に転送され、さらに上位の AS へ転送され、最終的に eduroam 利用者が所属する学術機関の AS まで届けられた。利用者所属機関の AS は、送られてきた認証情報をデータベースのエントリーと比較し、正しく認証されれば Accept の応答をする。その応答は、また同じ経路を逆に辿り Client/Supplicant へ伝達され、Client/Supplicant は、eduroam の Wi-Fi アクセスネットワークに接続可能となった。

その結果、eduroam は、モジュラーアーキテクチャでありインターフェースをオープン化した各々自律した Wi-Fi アクセスでありながら、学術機関間で認証情報をオープン化し、更に、インターネットを介して相互接続することで欧州全域を対象としたスケーラブルな大規模アクセスネットワークを構築した。

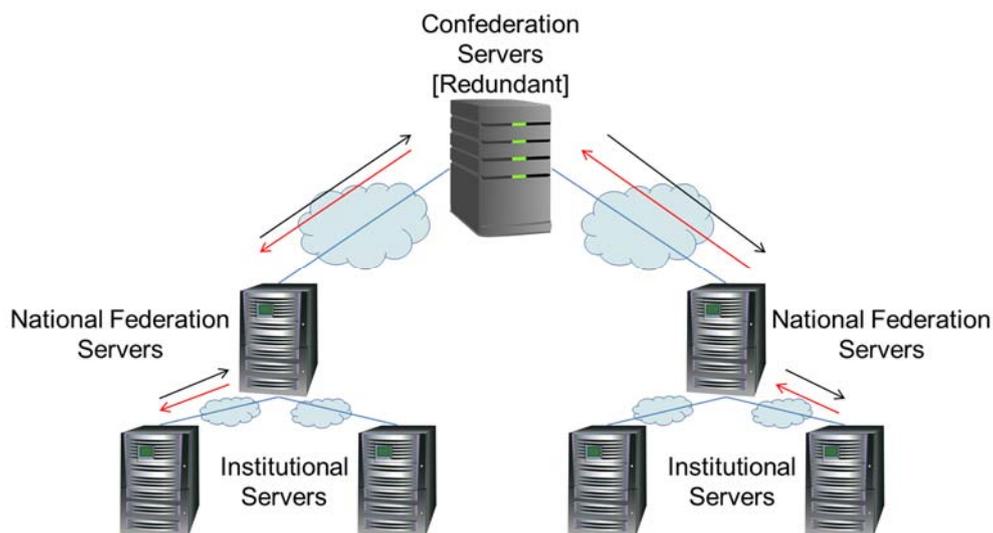


図 22 eduroam における認証情報共有の仕組み

第3節 接続不保証(ベストエフォート)な通信品質

モジュラーアーキテクチャは、スケーラブル化を実現するが、全体品質統制の難しさという課題がある。全体の観点からみた最適化は、かなり複雑になり、業務重複の無駄が発生し、各ユニットの自律性を担保しての全体品質の統制は難しいと論じられた(黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [34])。

そこでスケーラブル化が先行して実現した Wi-Fi アクセスでは、この全体品質統制の課題を TCP/IP という通信プロトコルを採用し、通信品質をベストエフォート品質とすることで全体品質統制問題を解決した。

第4節 低コストの相互接続ネットワーク

スケーラブル化が先行するインターネットでは、ピアリング型の相互接続が観察され(石田, 2000 [38] [39])、無償もしくは低コストな相互接続ネットワークの存在がネットワークのスケーラブル化に有効に機能した。通信品質のベストエフォート化は、伝送路回線の占有を必須としなく、相乗りでの伝送路回線利用を可能にし、自前設備か外部設備かを問わずに低コストな相互接続ネットワークを選択可能にした。例えば、前述の eduroam は、相互接続にインターネットを活用した。

Funk(2008 [7])は、産業構造を研究開発において主要な役割を担う主体の差異において分類し、移動通信事業においては、モジュラーアーキテクチャとオープンアーキテクチャが通信事業者主導の産業構造から通信機器事業者主導の産業構造へ変遷したと論じた。

しかし、携帯電話事業においては、セキュリティを理由に SIM 認証基盤という産業組織論で言うエッセンシャル・ファシリティが誕生した。また、携帯電話事業において GSM 標準が生まれた 1980 年代は、インターネットのようなベストエフォート品質であるが低コストな相互接続ネットワークを入手できる事業環境に無かった。

これら議論の結果、BWA 事業をスケーラブル化する要因として、エッセンシャル・ファシリティが存在する場合はそれが開放される、(モジュラーアーキテクチャにおける)オープンオープンアーキテクチャなシステムである、モジュラーアーキテクチャにおける全体品質統制課題を解消するベストエフォート(接続不保証)通信品質である、スケーラブル化が先行するインターネットにおけるピアリング型の相互接続に観察

されるように無償もしくは低コストな相互接続ネットワークの存在が有効な要因である、という研究仮説を導出した。

研究仮説：移動通信事業の一類型である広帯域移動無線アクセス事業（BWA 事業）においては、インターフェースのオープン化、接続不保証（ベストエフォート）な通信品質、認証基盤のオープン化、低コストの相互接続ネットワークが BWA 事業をスケラブル化する

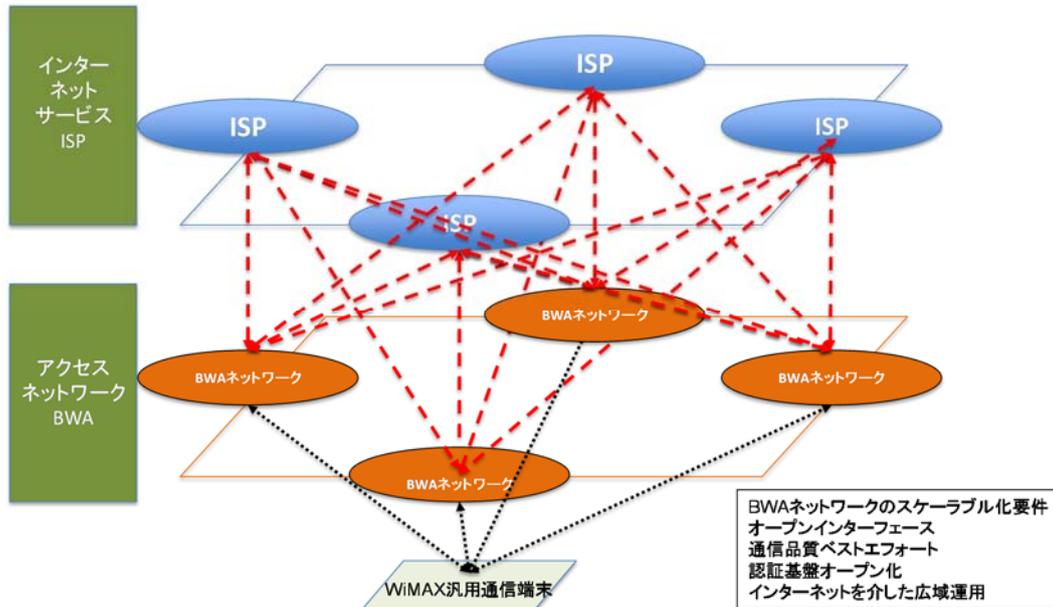


図 23 導出した仮説に基づくスケラブルな BWA モデル

なお、本研究においては、インターフェースオープン化は、通信基地局と電話機間とアクセスネットワーク間、認証は、通信端末とネットワーク加入者の紐づけを行う機能、スケラブル化は、技術的かつ経済的に自律した小規模 BWA の広域運用と定義した。システム論のモジュラーアーキテクチャにおけるネットワークのスケラブル化の議論、より具体的には、モジュラーアーキテクチャにおいては、ネットワーク化してスケラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性 (Interoperability) に関して皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動の結果として自律分散協調モデルが生まれる (國領, 2008 [32]) というスケラブル化の議論を参照した。

第5章 導出した研究仮説に基づく BWA 事業モデルの設計

第1節 インターフェースのオープン化

本章では、第4章で導出した BWA 事業をスケーラブルさせる要件、具体的には、①インターフェースのオープン化、②接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、③認証基盤のオープン化、④低コストの相互接続ネットワークを満たす広帯域移動無線アクセス(Broadband Wireless Access、略して BWA)を WiMAX(IEEE802.16e-2005 規格)技術を用いて設計した(Wimax Forum, 2009 [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69])(Wimax Forum, 2011 [70])。

	Wi-Fiアクセス	WiMAXアクセス
インターフェース規格	IEEE802.11	IEEE802.16e-2005
通信プロトコル	IP	IP
サービスエリア	自宅、オフィス、店、学校、駅、空港など屋内を中心としたスポット	屋外を中心とした広範囲
基地局(アクセスポイント)からの通信可能距離	Indoor: 10M~15M Outdoor: 300m ※5GHz利用のIEEE802.11nによる屋外利用の場合は3Km程度	2KM~3KM
利用周波数帯	2.4GHz, 5GHz	2.5GHz
利用周波数帯	Unlicensed Band ISM Band	Licensed Band

図 24 Wi-Fi アクセスと WiMAX アクセスの比較

設計結果は、神奈川県藤沢市において電気通信事業用 BWA 免許を取得して藤沢 BWA を設立し、技術検証を行った。藤沢 BWA は、2009 年秋の地域 BWA 無線局免許入手時点で通信基地局 3 局、2010 年には 1 局を追加した合計 4 局体制の小規模 BWA である。

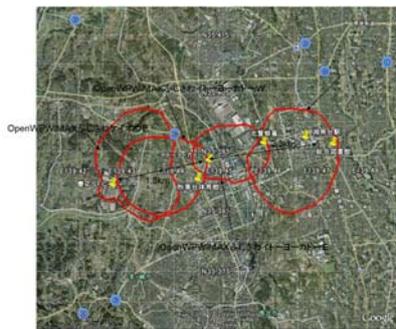


図 25 藤沢市 BWA のエリアカバレッジ

WiMAX アクセスは、通信端末、通信基地局、ASN (Access Service Network) と CSN (Connectivity Service Network) の概ね 4 つの自律したサブシステムにより全体システムが構成された。

CSN は、認証サーバを含む AAA (認証、許可、会計) 機能やその他ネットワーク要素機能 (DHCP 機能など) を担当するシステムであった。ASN は、通信端末の移動管理 (ハンドオーバー)、通信基地局を管理する ASN-GW で構成され、通信基地局 BS に対して IEEE802.16e-2005 に従った無線通信に必要な機能を提供し、CSN との接続機能を有するサブシステムであった。WiMAX アクセスのサブシステム間のインターフェースは、Rx (Reference Point。x は番号を示す) として標準化され、R1 から R5 の 5 つのインターフェースが存在するモジュラーアーキテクチャを採用したシステムであった。

WiMAX の全体システム設計のための各種インターフェースとサブシステム構成は、Wi-Fi Alliance と同じ位置づけにあり、世界中の様々な WiMAX 機器開発メーカーや WiMAX アクセスの通信事業者が参加する世界規模の民間団体である WiMAX Forum により定義された。サブシステム間、外部ネットワークとのインターフェースには、オープン化された通信プロトコルである IP パケットが採用され、Bearer Plane として定義された。具体的には、IEEE が OSI 層で物理層とデータリンク層に相当する部分を IEEE802.16 規格として標準化し、IEEE802.16 規格を用いた機器やシステムを開発して販売する企業、それを用いて BWA 事業を運営する通信事業者などが民間団体として WiMAX Forum を組織し、WiMAX Forum が IEEE802.16 規格を参照しつつ、WiMAX Air Interface Specifications と WiMAX Network Specifications として WiMAX 技術仕様を標準化した (Pareit et al., 2012 [71])。

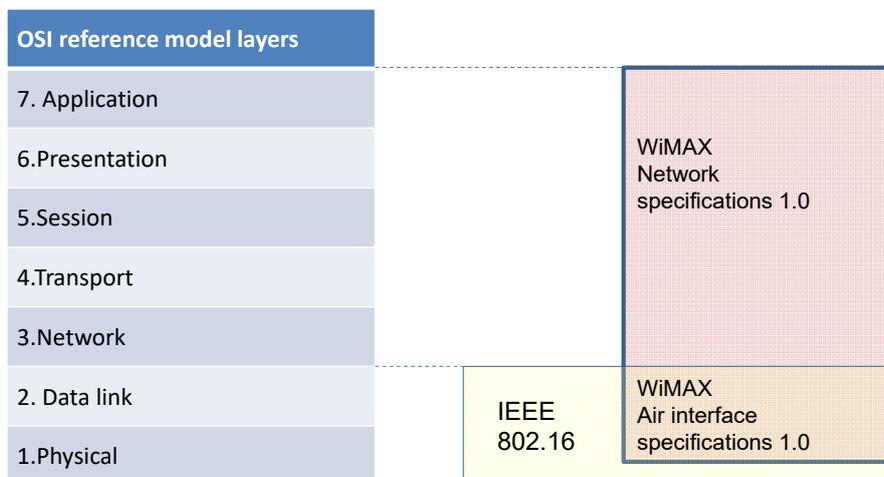


図 26 WiMAX のインターフェース (Pareit et al., 2012 [71])

第一に、R1 は、IEEE802.16e-2005 により定義される通信端末と通信基地局間のインターフェースであった。R1 は、IEEE802.16e-2005 規格としてインターフェースが標準化・オープン化しているとされた。R1 インターフェースでの相互接続に関しては第三者認証が行われ、相互接続が確認された機器に関しては相互接続確認済みのロゴが添付された。2009 年当時、パソコンなどの通信端末の多くは、IEEE802.11 規格である Wi-Fi 端末と同様に IEEE802.16e-2005 規格である WiMAX 端末を搭載していた。

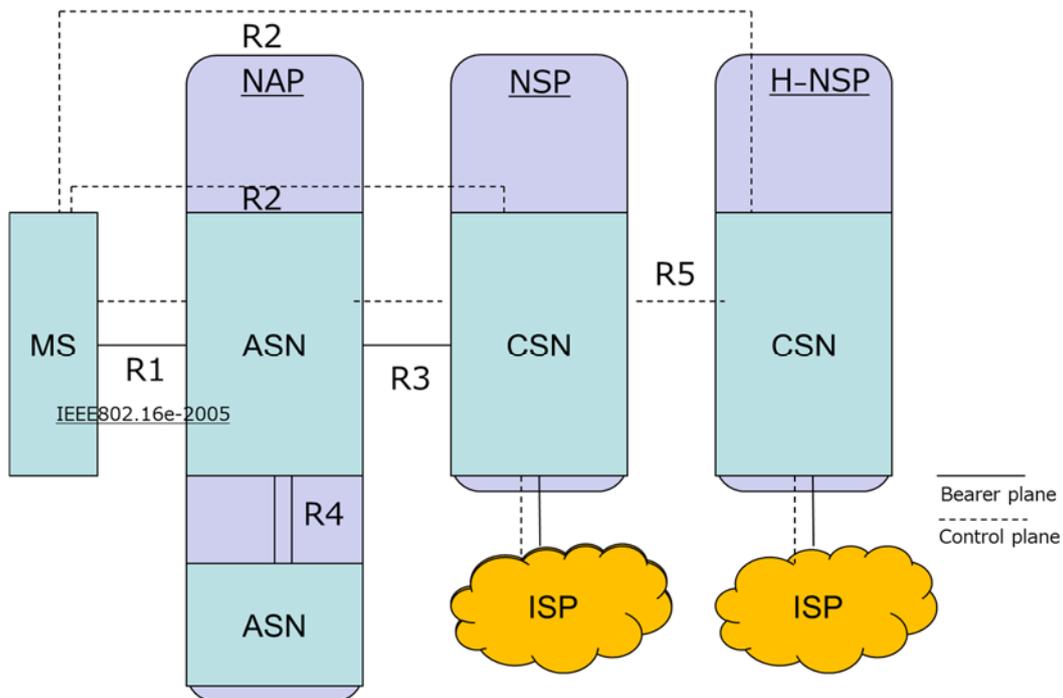


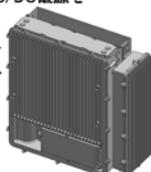
図 27 WiMAX アクセスにおけるインターフェース



図 28 Wi-Fi 及び WiMAX における相互接続第三者認証

WiMAX 16e BBU (Base Band Unit)

Item	Specification
容量	WiMAX 16e 10MHz 2T2R 3Cell (1Carrier/3Sector)
Backhaul Interface	1000Base-BX40/SX/LX 1 port 100/1000Base-T 1 port
Clock	GPS (Holdover 24h)
CPRI	3 Ports (4.9Gbps)
サイズ	27.0 liter (BBU+ACDC+ACDC設置空間含む)
重量	17 kg (w/ ACDC)
動作温度	-30°C ~ 50°C (w/o solar load)
Cooling	自然冷却方式 (Fanless)
電源	AC100V (外装型AC/DC電源モジュール, 着脱式)
防水/防塵	IP55



WiMAX 16e RRH(Remote Radio Head)

Item	Specification
Air Interface	WiMAX 16e
Operating frequency	2582 ~ 2592MHz
Carrier Configuration	2T2R@10MHz 1 Carrier
RF Power	2T2R 5W/path@10MHz
サイズ	34.6 liter (474mm x 447mm x 163.5mm)
重量	26.5 kg (w/ ACDC)
電源	AC100V (外装型AC/DC電源モジュール)
防水/防塵	IP55

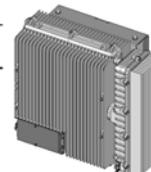


図 29 WiMAX アクセス通信基地局

dynabook R730:2010年10月発売

スリムコンパクトノートPC	
本体価格はすべて*1オープン価格	
ディスプレイ	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>13.3型ワイドHD 軽薄型 (1,366×768ドット)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>13.3型ワイドHD (1,366×768ドット)</p> </div> </div>
サウンド	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>LED液晶</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ステレオスピーカー</p> </div> </div>
通信機能	<div style="text-align: center;"> <p>有線LAN(1000Base-T/100Base-TX/10Base-T) 無線LAN(IEEE802.11a/b/g/n)</p> </div>

図 30 WiMAX アクセス通信端末(2010年当時)

第二に、R2は、IPパケットが通る Bearer Plane に対して Control Plane と呼ばれる通信端末と CSN 間の認証情報が通るインターフェースであった。

第三に、R3は、AAA や移動管理機能(ハンドオーバー)情報を転送する Control Plane と IP パケットを転送する Bearer Plane の両方からなる ASN と CSN 間のインターフェースであった。

第四に、R4は、ASN 間のインターフェースである。通信端末が ASN 間で移動するとき、その情報が交換され、移動管理(ハンドオーバー)が実現した。

第五に、R5 は、CSN 間 (Home となる CSN と訪問先の CSN) の制御プロトコルであった。

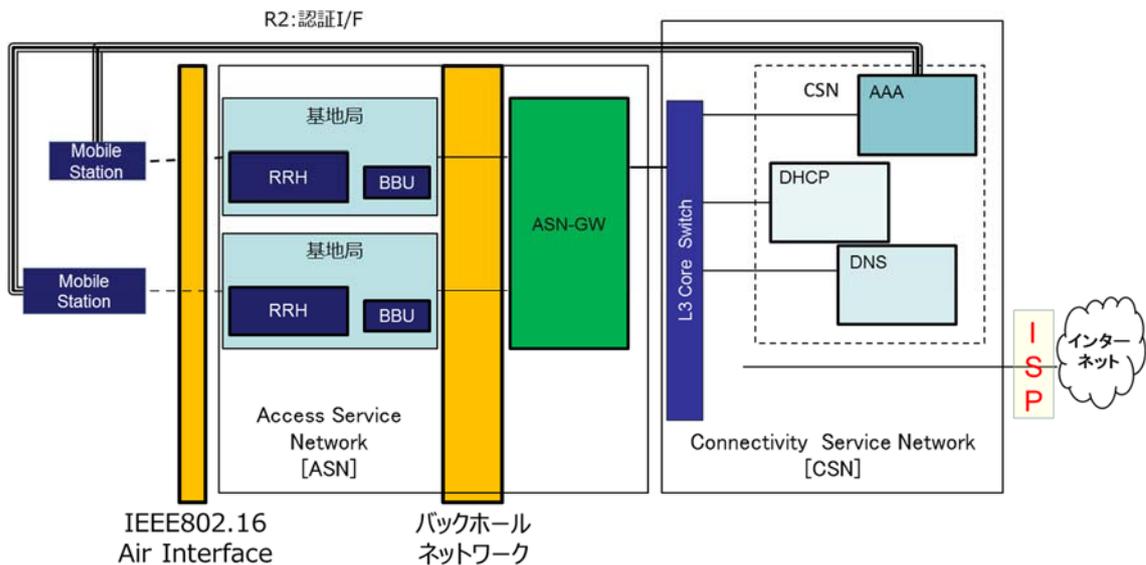


図 31 WiMAX アクセスのシステム構成

これら WiMAX アクセスにおけるサブシステム間を接続するインターフェースであるが、WiMAX Forum が定義するシステム仕様としては、オープン化されていると言われていた。しかし、藤沢 BWA における WiMAX アクセスの技術実証では、R1 インターフェースは、Bearer Plane に IP 通信プロトコルが通ることは規定されていたが、その他の部分はクローズド化していたことが確認された。

インターフェースがオープン化されている Wi-Fi アクセスでは、通信基地局が SSID (Service Set Identifier) をブロードキャストした場合には、全ての Wi-Fi 汎用通信端末は、最大 32 文字の英数字から構成される全ての通信基地局の SSID を読み取ることができ、通信端末が接続するネットワークを識別する SSID を選択して基礎通信が完了する。その後、IP パケットを用いた通信が開始される。

BWA内	本研究の実証前	本研究の実証後
R1	インターフェースがクローズド化	インターフェースがオープン化
R2	認証がクローズド化	認証がオープン化
R3	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化
R4	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化
R5	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化

図 32 WiMAX アクセスのインターフェースオープン化状況

一方、WiMAX アクセスの R1 インターフェースでは、電源投入した通信端末は、ネットワーク検出と選択 (NAP・NSP Discovery and Selection) のシーケンスを実施し、基礎通信確立を行った。

そのシーケンスは、4 段階 (NAP 検出、NSP 検出、NSP の選択、選択された NSP に基づく ASN への接続) であった。WiMAX アクセスの 2 種類のサブシステム (ASN と CSN) では、ASN には NAP-ID、CSN には NSP-ID という IEEE が発番する 24bit の識別子が割り振られ、ASN と CSN のグローバルでの識別を可能にした。WiMAX アクセスでは、これらの識別子を用いることで、Wi-Fi アクセスでは存在しない基礎通信シーケンスが行われた。

第一に、通信基地局は、BS-ID を含む DL-MAP of ASN をブロードキャストした。同時に通信端末は、通信基地局からの電波受信、帯域スキャン、NAP Discovery を行い、NAP-ID を検出する。BS-ID は、48bit あり、上位 24bit は ASN をグローバルに識別する NAP-ID であった。下位 24bit は異なる ASN に存在する通信基地局を識別するために使われる識別子であった。

第二に、通信基地局は、一つの ASN が一つの CSN のみをサポートする場合には NAP-ID と NSP-ID を同意として既述し、1 つの ASN が複数の CSN をサポートする場合には 1 つの NAP-ID がサポートする全ての NSP-ID を記述し、SII-ADV/SBC-RSP として通信端末へブロードキャストした。同時に通信端末は、SII-ADV/SBC-RSP のシーケンスにおいて NSP Discovery を行い、NSP-ID を検出した。

WiMAX アクセスにおける通信端末と通信基地局間の基礎通信確立においては、通信端末は、ASN/NSP Discovery のシーケンスに従い、どの周波数帯域をどのような順番でスキャンして DL-MAP of ASN を見つけるのかの判断、DL-MAP of ASN の中に複数の利用可能な NAP-ID を検出した場合の対応の判断、複数の利用可能な NSP-ID を検出した場合の対応の判断、自分のアクセスが許可されていない NAP-ID を検出した場合の対応の判断を行う必要があった。そこで、WiMAX アクセスでは、通信事業者が、通信端末が通信アクセスを開始する NAP-ID、NSP-ID の優先度を preference criteria として通信端末にプロビジョニングすることが規定された。

具体的には、通信基地局を保有する通信事業者等が User/Operator controlled NAP Identifier List、User/Operator controlled NSP Identifier List、NAP/NSP mapping List 等を通信端末にプロビジョニングすることを規定した。

さらに、WiMAX アクセスでは、通信事業者側が通信端末を管理すると

いう視点が追加され、CSN を通信端末が既に利用契約を有しているネットワークである Home-NSP【H-NSP】と訪問先、即ちローミング先を Visited-NSP【V-NSP】として分割管理することを規定した。

R1のシーケンス	通信基地局の反応	通信端末の反応
Wi-Fiのシーケンス	通信基地局を識別可能なSSIDをブロードキャストする	すべての通信端末がSSIDを読み取る
WiMAXのシーケンス	通信基地局を識別可能なBS-IDをブロードキャストする	アクセスネットワーク側が通信端末をプロビジョニングした後に通信端末がBSIDを読み取る

図 33 Wi-Fi と WiMAX 基礎通信シーケンスの比較

User/Operator controlled NAP Identifier List は、CAPL (Contractual Agreement Preference List)とも言われ、H-NSP とビジネス契約関係を有する ASN をリスト化し、H-NSP がサポートするすべての NAP-ID を記載し、各 NAP についての優先順位、NAP 選択ポリシーを規定した。一方、User/Operator controlled NSP Identifier List は、RAPL (Roaming Agreement Preference List)とも言われ、H-NSP とビジネス契約関係を有する CSN をリスト化し、H-NSP がサポートするすべての NSP-ID を記載し、各 NSP の優先順位、V-NSP 選択ポリシーを規定した。

これら通信端末のプロビジョニングの実装は、第一に、通信端末を出荷する時、第二に、通信端末が当該通信事業者のネットワークに初回に通信した時に OMA-DMMOs (Open Mobile Alliance Device Management Objects) 方式を用いて行われた。

これらの通信端末プロビジョニングは、通信事業者主導で行われ、WiMAX アクセスの R1 インターフェース、具体的には User/Operator controlled NAP Identifier List、「User/Operator controlled NSP Identifier List」、「NAP/NSP mapping List」がクローズド化された。その結果、通信端末は、通信基地局を有する通信事業者が事前にプロビジョニングした情報に基づき、通信基地局がブロードキャストした BS-ID を読み取ることになった。それは、WiMAX アクセスでは、R1 シーケンスがクローズド化されることに帰結した。

そこで、本研究では、WiMAX のサブシステム間や外部ネットワークとのインターフェースには、通信プロトコルである IP パケットが採用され、オープンが既に実現しており、通信基地局と電話機間のインターフ

エースのオープン化を実装した。具体的には、WiMAXにおいてR1シーケンスをオープン化する設計を行った。具体的には、R1シーケンスにおけるNAP/NSP Discoveryシーケンスをオープン化し、WiMAXアクセスにおける汎用的な通信基地局がブロードキャストするBS-IDに汎用的なWiMAX通信端末が接続可能な状態を設計した。具体的には、通信基地局と通信端末各々において以下の設計の実装を行った。

NAP/NSP Discoveryのオープン化が可能な日本国内のすべてのWiMAXアクセスのASNを識別する4つのNAP-ID(00003C、000066、00007E、0x000066)、4つのGSNを識別する4つのNSP-ID(00003C、000066、00007E、0x000066)を定義した。

通信基地局は、既述4つのNAP-IDのいずれか一つを選択してDL-MAP of ASNに記載してブロードキャストし、選択したNAP-IDがサポートするすべてのNSP-IDをSII-ADV/SBC-RSPに記載してブロードキャストする設計を実装した。

通信端末は、通信基地局からブロードキャストされるNAP/NSP Discoveryを読み取り、本研究が構築するモデルに賛同する日本国内のすべてのWiMAXアクセスのASNを定義する4つのNAP-ID(00003C、000066、00007E、0x000066)を読み取ると同時に、通信基地局からブロードキャストされるSII-ADV/SBC-RSPに基づき、GSNに接続可能な設計を実装した。その後は、Wi-Fiアクセスと同じように、IPプロトコルを用いた通信が開始された。

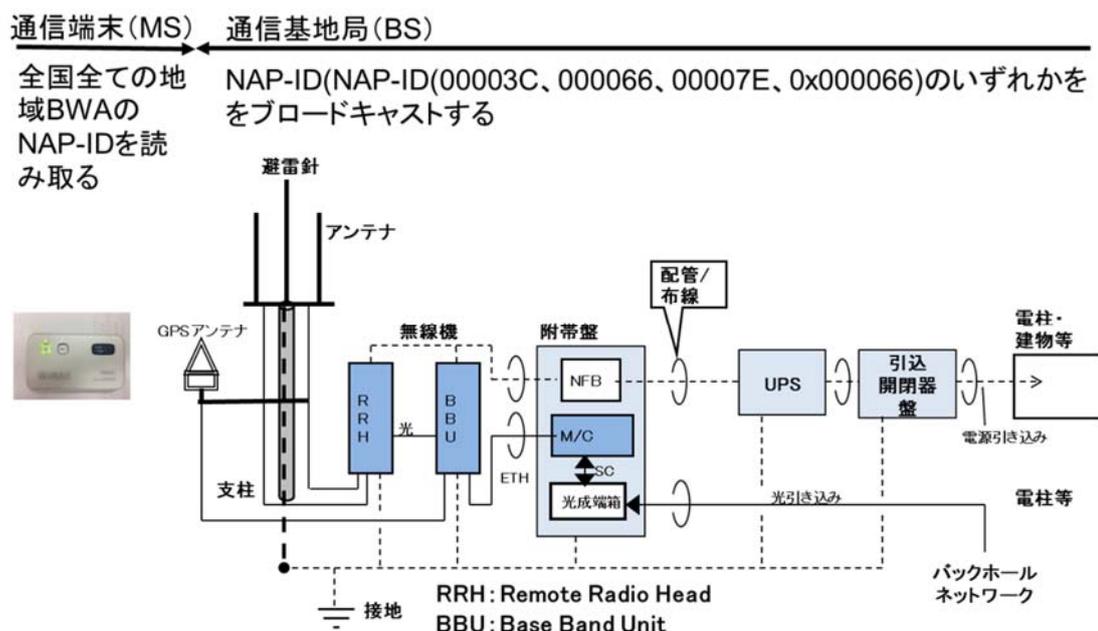


図 34 NAP/NSP Discovery のオープン化設計

第2節 接続不保証(ベストエフォート)な通信品質

WiMAX アクセスは、オープンアーキテクチャを採用するシステムであった。オープンアーキテクチャの採用は、システムのスケーラブル化を共通利益とした自律した協働を成立させ、自律分散協調モデルを構築させうる。しかし、自律分散協調モデルにおいては、全体システムの品質保証は困難と論じられた。

WiMAX アクセスは、Wi-Fi アクセスに類似したシステムアーキテクチャと論じられた(庄納, 2008 [72])(田子 et al., 2010 [73])。

WiMAX アクセスの通信プロトコルは、TCP/IP プロトコルを採用し、TCP/IP プロトコルが規定する通信品質はベストエフォートであり、インターネットと近似した通信品質を採用した。自律したTCP/IP ネットワークが相互接続したネットワーク、自律分散協調型ネットワークとして構想されたインターネットは、ネットワーク側では市内電話網のPSTNのようなトラフィック管理機能を持たず、TCP/IP によるルーティングと伝送を行うのみであった。TCP は、(UDP と比較して)信頼性のあるコネクション型のストリーム通信を提供した。コネクション型は、通信を始める際に通信路の確立をして仮想的な通信路を確保するような通信であり、TCP/IP では、送信するパケットが紛失したら TCP が自動的に再送する機能を持っていた。

第3節 認証基盤のオープン化

Wi-Fi アクセスでは、Wi-Fi Certification として Wi-Fi アライアンスにより相互接続が第三者保証された通信端末と通信基地局(AP)は相互接続でき、アクセスネットワークの認証に関しても IEEE802.1x として標準化され、本研究において、通信端末とネットワーク加入者の紐づけを行う機能と定義する認証基盤はオープン化している。

第3章においては、通信事業における供給側の規模の経済性は、エッセンシャル・ファシリティを構築し、産業組織論の観点において、独占・寡占されるエッセンシャル・ファシリティの開放問題が存在することを論じ、携帯電話事業では通信事業者が認証基盤をクローズドとする一方、Wi-Fi アクセスでは、認証基盤がオープン化され、その背景には、Wi-Fi アクセスでは、インターフェースが IEEE802.11 として標準化された汎用通信端末が需要側に多数流通し、需要側のネットワークの外部性に依

拠したエッセンシャル・ファシリティが存在することを論じた。

WiMAX アクセスは、IP パケットが通る Bearer Plane と区別し、認証など管理目的データが通るプロトコルを Control Plane と定義しており、認証基盤をクローズド化していた。認証基盤に焦点を当てると、Wi-Fi アクセスではなく携帯電話ネットワークに近似した性向を持っていた。藤沢 BWA における WiMAX アクセスの技術実証でも R2 インターフェースとして定義される認証基盤には、クローズド化が確認され、利用者が持つ WiMAX アクセスの汎用端末は利用できないことが確認された。具体的には、WiMAX アクセスにおける R2 シーケンスでは、CSN を有する通信事業者側は、EAP-TLS/TTLS 認証をクローズド化し、EAP-TLS 認証では、CSN を有する通信事業者側は特定の X.509 証明書のみを受けとり、WiMAX アクセスの汎用通信端末は、接続先の WiMAX アクセスを制限された。

BWA内	本研究の実証前	本研究の実証後
R1	インターフェースがクローズド化	インターフェースがオープン化
R2	認証がクローズド化	認証がオープン化
R3	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化
R4	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化
R5	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化

BWA間	本研究の実証前	本研究の実証後
Bearer Plane	インターフェースがオープン化	インターフェースがオープン化
Control Plane	認証がクローズド化	認証がオープン化

図 35 WiMAX アクセスにおける認証基盤のクローズド化

WiMAX アクセスの通信シーケンスでは、NAP/NSP Discovery における基礎通信が確立(接続可能な ASN と CSN が特定されて通信が開始された)後に、通信端末と CSN 間でサーバ認証と端末認証を行った。WiMAX アクセスでは、サーバ認証および端末認証は公開鍵基盤(PKI)を使用して行われた。具体的には、WiMAX アクセスにおける EAP-TLS 認証では、WiMAX Forum が認める X.509 証明書の電子証明書のフォーマットに従い、WiMax Forum が認めたサーバルート認証局(Server Root CA)およびデバイスルート認証局(Device Root CA)をトップの認証局とし、更に下位認証局を配下に置く階層構造を採用した。

EAP-TLS 認証は、AAA サーバにはサーバ証明書チェーンが、通信端末にはデバイス証明書チェーンが格納され、通信端末がサーバ認証を行う

際にはサーバ証明書が、AAA サーバがデバイス認証を行う際にはデバイス証明書が使用された。一方、EAP-TTLS では、クライアント側は証明書を発行せず、その代わりにユーザー名とパスワードを用いて認証を行う。

WiMAX Forum は、ネットワークセキュリティの観点において、WiMAX における認証基盤の EAP 認証のオープン化を推奨しなかった。

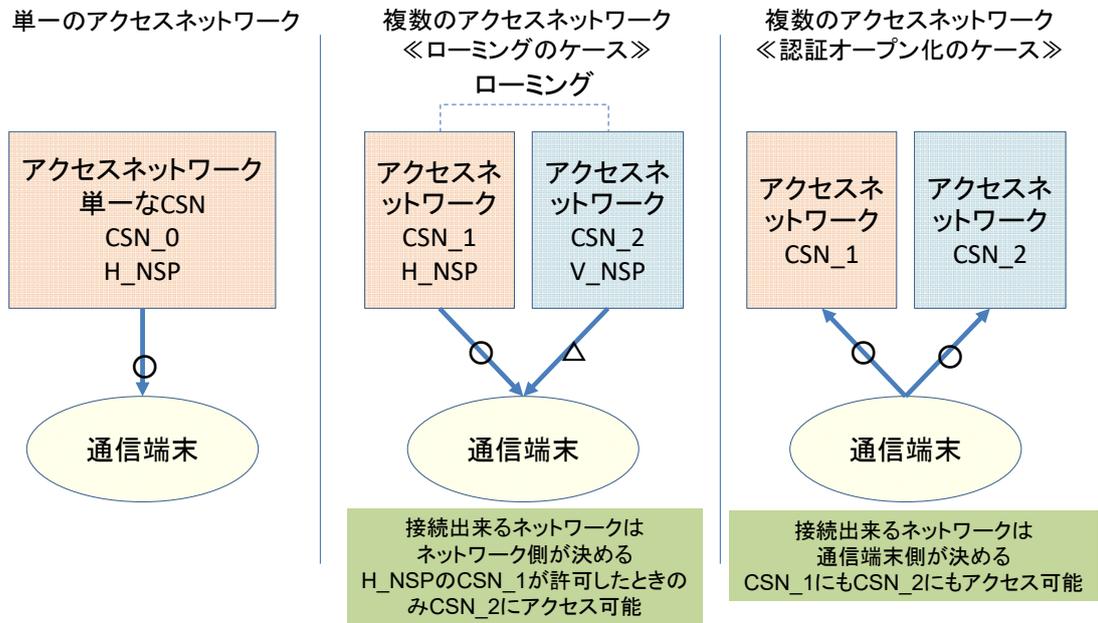


図 36 WiMAX アクセスにおける認証モデル

そこで、本研究は、WiMAX Forum が推奨する方法である EAP-TLS 認証を実施したうえで認証基盤のオープン化を実装した。

具体的には、WiMAX 汎用通信端末と WiMAX に準拠した通信基地局に接続された CSN に対して同一の NSP-ID : 0x000066 が記載された X.509 証明書を配布した。

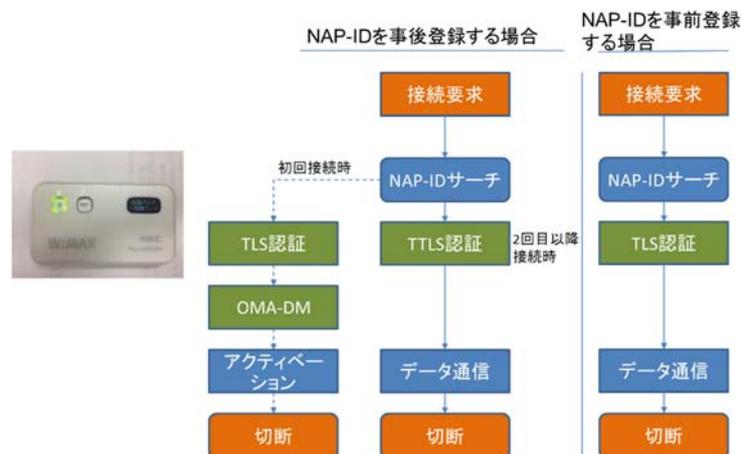


図 37 WiMAX アクセスの認証基盤のオープン化シーケンス

その結果、WiMAX アクセスにおける R1 インターフェースのオープン化と R2 シーケンスの認証基盤オープン化が実現した場合には、WiMAX 汎用通信端末は、Wi-Fi アクセスと同様にインターフェースと認証基盤をオープン化した全ての WiMAX アクセスに接続できる設計が可能となった。

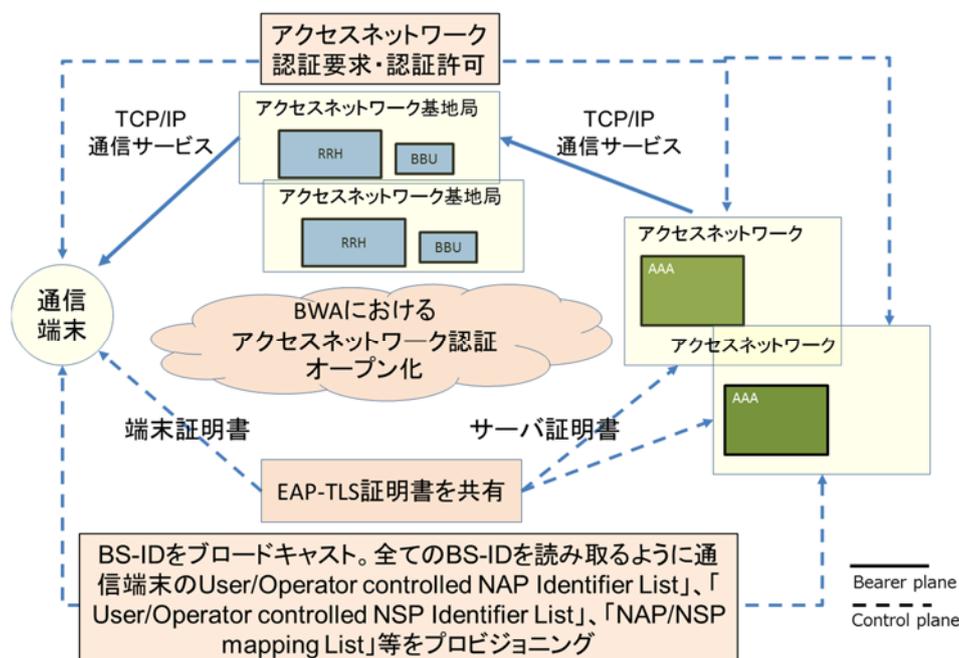


図 38 設計したアクセスネットワークの認証オープン化モデル

例えば、2013 年に慶應義塾大学 SFC 研究所、株式会社愛媛 CATV、オープンワイヤレスプラットフォーム合同会社、UQ コミュニケーションズ株式会社、NEC アクセステクニカ株式会社は、インターフェースと認証基盤をオープン化した WiMAX 汎用通信端末を発表した。WiMAX 汎用通信端末は、利用者が 1 台の通信端末で IEEE802.16e-2005 規格に準拠した 2.5GHz 周波数帯におけるすべての通信サービス、具体的には地域 WiMAX アクセスと全国 WiMAX アクセスを利用することを可能にした。

第 4 節 低コストの相互接続ネットワーク

日本においては、WiMAX アクセスの事例に全国 BWA (UQ コミュニケーション) がある。全国 BWA は、TCP/IP パケットを通信プロトコルとしているが、一つのアクセスネットワークが総数 21,395 (2012 年 3 月時点) の通信基地局を有している中央集権的なアクセスネットワークであった。全国 BWA は、通信基地局と ASN/CSN 間をつなぐバックホール伝送路

回線に、イーサネット及び IP ネットワークを活用し、その調達先は、UQ コミュニケーションに事業参加する KDDI 及び地域 NCC であった。また、主要な通信サービスとしてインターネットアクセスを提供していた (UQ コミュニケーション, 2012 [74])。

WiMAX アクセスは、技術的には TCP/IP を通信プロトコルに採用、通信品質にベストエフォート品質を採用していた。TCP/IP 通信は、通信において伝送路回線の占有を必須としなく、相乗りでの伝送路利用が技術的に可能であった。その結果、相互接続に公衆回線やインターネットなどの既設の通信サービスを活用したネットワーク構築が可能であった。

WiMAX アクセスは、Wi-Fi アクセスに類似したシステムアーキテクチャと論じられた (庄納, 2008 [72]) (田子 et al., 2010 [73])。Wi-Fi アクセスでは、自律した Wi-Fi アクセス間の相互接続にインターネットが活用された。制度的にも Wi-Fi アクセスでは、公衆無線 LAN サービスは、他事業者の電気通信回線設備を用いた通信サービスを実装可能である。公衆無線 LAN サービスでは、無線 LAN アクセスポイントのみを設置して電気通信事業としてサービスを提供する形態、具体的には、無線 LAN アクセスポイントからインターネットへの接続点までの間の通信は他事業者の電気通信回線設備を用いて利用者にインターネット通信サービスを提供することが可能と論じられた (総務省情報通信審議会, 2013 [55])。

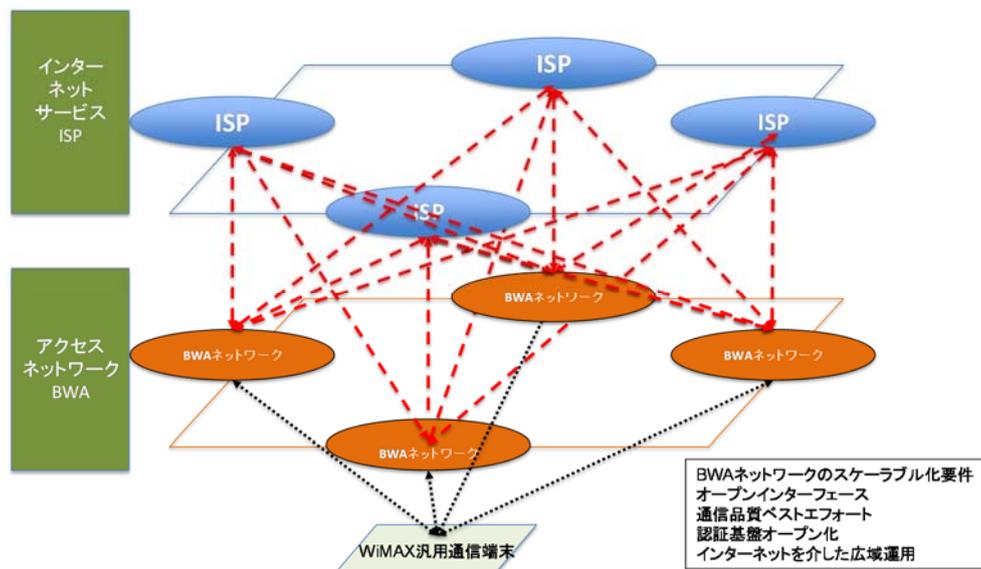


図 39 スケーラブルな BWA ネットワーク

Wi-Fi アクセスの TCP/IP プロトコルによるベストエフォート品質の採用とインターフェースのオープン化は、自律した Wi-Fi アクセスをイン

ターネットや公衆回線など低コストで外部入手できるネットワークを用いて相互接続することを実現させ、広域運用が技術的にも制度的にも行われていた。

WiMAX アクセスは、Wi-Fi アクセスと同じく技術的には通信品質をベストエフォート、TCP/IP パケットを通信プロトコルとしており、相互接続に関しては、伝送路回線を占有する必要はなく、相乗りが可能であった。そこで、本研究では、低コストな相互接続手段としてインターネットを採用した。

第6章 研究仮説の検証：BWA事業のスケラブル化の検証

第1節 本研究の仮説に基づくBWA事業のスケラブル化の実証

第1項 実証実験の構図

本章では、第4章で導出したBWA事業をスケラブルさせる4要件を満たす広帯域移動無線アクセス(Broadband Wireless Access、BWA)事業は、その技術的かつ経済的自律と相互接続による広域運用の実現、即ちスケラブル化されることを2つの地域での実証実験によって実証した。なお、BWA事業をスケラブルさせる4要件は、第一にインターフェースのオープン化、第二に接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、第三に認証基盤のオープン化、第四に低コストの相互接続ネットワークである。

伊江村BWAが設置された沖縄県伊江村は、沖縄本島の北部、本部半島の北西約9kmの洋上に浮かぶ一島一村の離島である。周囲約22.4km、南北に3km、東西に8.4kmで、村の面積は22.77km²である。伊江村は北側の海岸は約60mの断崖絶壁が連なり、対照的に南側の海岸はなだらかな砂浜が続いている。島の中央には標高172mの城山(ぐすくやま)があり、山の麓の平坦地に人口密集地域及び農地が広がっている。平成22年度の人口は4,956人。世帯数は2,211世帯であり、平成17年度比では人口が5%減少した一方、世帯数では5%増加している。

伊江村における地域BWAである伊江村BWAは、2015年4月に伊江村が国からBWA事業免許を受領して設置し、運営を開始した公設公営BWA事業である。公設公営での運用であるが、民間の力を活用することを目的に指定管理者制度を導入している。地域BWA設置検討時に最大の争点となったのは、事業運営における収益性と社会性の両立議論であった。収益性優先を考えれば、村内の人口密集地域に通信サービスエリアを限定するのが妥当な事業施策であった。伊江村内においても人口密集地域と人口過疎地域を区別することができ、人口密集、即ち需要密集エリアに限定した通信サービスを設計することは可能であった。実際、伊江村においては、地域BWA開局と同時期に全国BWAが通信サービスを開始したが、村内の人口密集地域のみをエリアカバレッジとしたBWA事業であった。しかし、伊江村BWAは、人口過疎地域と人口密集地域を差異無く、村内全域をサービスエリアとするエリアカバレッジ設計を採用した。

具体的には、伊江村BWAは、伊江村全域(22.77km²)かつ村内全世帯(2211

世帯)をエリアカバレッジとした設計となり、1つの通信基地局が2キロ四方をカバーできるとされるWiMAXアクセスの通信基地局が、伊江村内9か所に設置された。実際、伊江村において伊江村BWAと全国BWAに関して通信サービスの差異を無線強度(RSSI)の計測により比較した。通信品質が安定されるとされるRSSIで-80dBm以上のサービスエリアが村内全域に広がる伊江村BWAと村内人口密集地域にサービスエリアが限定される全国BWAの差異が観察された。



図 40 伊江村 BWA エリアカバレッジ(理論値)



図 41 伊江村 BWA におけるエリアカバレッジ



図 42 伊江島における全国 BWA におけるエリアカバレッジ

一方、愛南町 BWA が設置された愛媛県愛南町は、南宇和郡の旧 5 町村（内海村、御荘町、城辺町、一本松町、西海町）が平成 16 年 10 月に合併して誕生した愛媛県の南端に位置した町の面積にして 238.98 平方キロメートルの市町村である。愛南町は、南と西を海に囲まれ、北部には篠山支脈があり、そこから発する僧都川の流域に平野部が開け市街地が形成されている。平成 22 年度の人口は 24,061 人、世帯数は 9,837 世帯であり、平成 17 年度と比では人口でマイナス 10%、世帯数でマイナス 4% という人口も世帯数も減少傾向にある市町村である。



図 43 愛南町 BWA エリアカバレッジ(理論値)

愛南町 BWA は、2014 年 12 月に愛媛 CATV が国から BWA 事業免許を受領して設置し、運営を開始した民設民営の小規模 BWA である。愛媛 CATV は、ケーブルテレビ事業者および電気通信事業者として、テレビ自主放送、インターネットサービス、地域イントラネットなど各種公共ネットワーク基盤の運用を行っている事業者である。愛南町のみではなく、松山市を含む愛媛県内複数の市町村でケーブルテレビサービスや通信サ

ービスを行っており、2000年にはケーブルテレビのネットワークを活用したインターネットアクセスサービスを開始している。その結果、愛媛県内で39,000世帯以上が同社のインターネットサービスを利用しているという実績を持つ。

愛南町においては、全国BWAはサービスを行っていない。その結果、愛南町BWAは、全国BWAが人口過疎地域等を要因として通信サービスを提供しない市町村区域である愛南町における初めてのBWAサービスであった。そのような背景から生まれた愛南町BWAの事業政策は、第一に、地域事情に即した通信品質設計、第二に、安価なコストでの地域BWAのサービス提供であった。

民設民営として経済性を重視した愛南町BWAは、基地局設置場所の選定に関しては、需要密集地域に絞ったエリアカバレッジを構築した。同時に、社会性を考慮し、設計災害時の防災無線の補完、避難場所で地域住民の情報伝達手段としても有効利用できることを考え、まずは行政施設など公共的機関や教育機関を主体に通信基地局を設置した。

具体的には、愛南町BWAは、人口密集地域を中心に3局で構成し、1通信基地局は概して2キロ四方に通信サービスを提供できるWiMAXアクセスの通信基地局が3か所に設置された。設計上の計算では、3つの通信基地局が愛南町人口密集地域に所在する1,750世帯(愛南町全世帯の17%)をカバーする設計となった。

また、愛南町BWAは、協力関係にある愛南町との協定に基づき、地域における災害発生時のバックアップインフラとしての位置づけを有している。例えば、災害時のリカバリー通信サービスである。災害時での通信手段の確保においては、有線系ではリスクが大きく使用不可能となるケースが予想される。しかし、通信無線局であれば使用不可能となるリスクも少なく、また時間・場所を選ばず広範囲で使用できることが大きなメリットとなる。愛南町は南海地震における津波の被害想定が大きな町であり、愛南町が整備した光ファイバネットワークがメインの通信インフラであるが、愛南町BWAの存在が通信インフラの冗長性を高めた。

そこで、愛南町BWAでは、災害時に地上ネットワークが切断された時に愛南町BWAを活用して安否情報や災害情報などを配信するといった災害時での活用を検討している。

一方、平常時は、愛南町BWAは、遠隔授業実施のための通信インフラとして活用された。具体的には、2015年11月には、愛南町内の中学校と協力し、愛南町BWAを通信インフラとした遠隔授業実証が教育委員会、町内中学校の参加により開始された。

離島山間地域における BWA ネットワークには、インターネットサービス以外に、教育サービスへの活用が期待される。市町村内の特に需要過疎地域に位置する学校における授業提供に BWA ネットワークを活用するという取り組みである。実際に、本論において事例として扱っている愛南町 BWA においては、需要低密度地域を含めてエリアカバレッジを設計できる BWA を活用してビデオ会議のインターネットサービスを活用した遠隔授業の実証が行われた。

国の政策は、小規模学校の統廃合を求めている。公立小学校・中学校の適正規模・適正配置等に関する手引(文部科学省, 2015 [75])は、学校小規模化の問題点として、①クラス替えができず人間関係が固定化する、②社会性やコミュニケーション能力が身につけにくい、③切磋琢磨(せっさたくま)する環境の中で意欲や成長が引き出されにくい、④多様な物の見方や考え方に触れることが難しい、などを挙げており、小規模化を防ぐためにより遠くの学校と統合も可能とし、全校 6 学級未満の学校について統廃合の検討を求めた。

日本全国の多くの市町村は、若年層人口の減少に直面しており、それによる小・中学校や高校の統廃合問題は、大きな行政問題となっている。地方自治体の現場では、小中学校が地域の防災拠点や、地域コミュニティ・文化継承の場でもあることから、小中学校の廃校によってその地域の人口減少が加速する恐れがあるため、学校を存続させることが重要視されている。実際に、高校就学を理由に多くの子供達が町外に流出している事例も存在する。学生が、当該市町村に留まりながら質の高い教育コンテンツが受けられることは、喫緊の課題である。

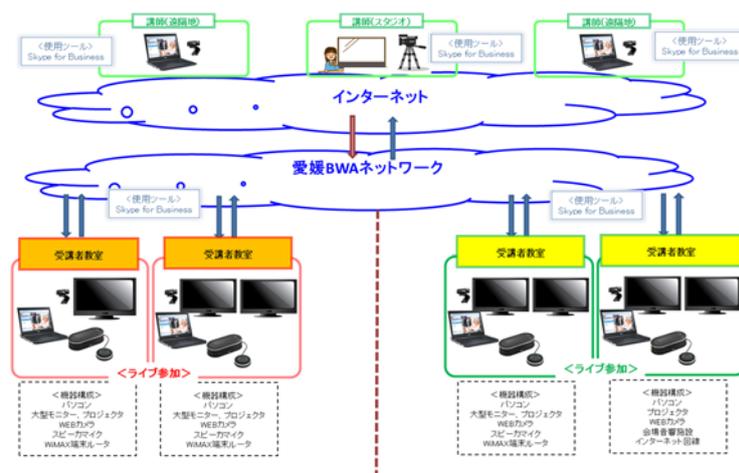


図 44 愛南町 BWA における遠隔授業の構図

第 2 項 自律的な技術で動かしえた小規模 BWA の実現

本項では、BWA 事業は、外部接続以外については外部からの制御から脱して動かし得る、つまり、外部資源に依存しない運営が可能となる自律的な技術で動かしえたことを実証した。

BWA サブシステム名	通信端末	通信 基地局	バックホー ル回線	ASN-GW	CSN	バックボーン 回線	ISP
通信品質	ベストエフォート						
保有者	BWA 利用者	BWA 事業者	既存ネット ワークに重 置して低コ スト化	BWA 事業者	BWA 事業者	既存ネット ワークに重 置して低コ スト化	外部 事業者

図 45 技術的な自律性が実証された小規模 BWA システム

モジュラーアーキテクチャにおけるインターフェースのオープン化は、外部接続以外は BWA システムを相互接続に必要なオープンインターフェースを持つ通信端末、通信基地局、ASN(Access Service Network)と CSN(Connectivity Service Network)の 4 つの自律したサブシステムの組み合わせでの全体システム構築を実現した。サブシステムは、外部資源に依存することなく、全て自前のハードウェアやソフトウェア設備であった。具体的には、通信基地局は、事業者の自前のハードウェアとソフトウェアであり、技術仕様は、伊江村 BWA と愛南町 BWA で差異は無い。通信基地局を支える躯体の施工には差異が存在するが、いずれも BWA 事業者の自前設備であった。

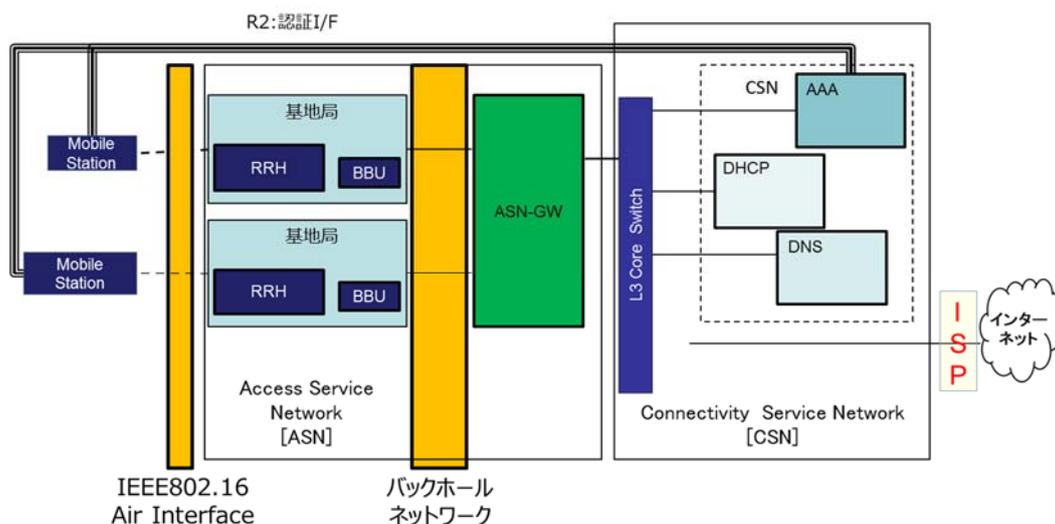


図 46 伊江村 BWA と愛南町 BWA におけるシステム構図

伊江村 BWA は、特別の自然環境(沖縄の離島は風速が大きい台風が数多く通過する)に耐性を持つ施工となった。具体的には、耐風速に関する特殊構造、台風による停電対策として各通信基地局に蓄電池が併設され、半日から1日程度は、停電しても各通信基地局が機能する施工とされた。

WiMAX基地局イメージ:

- コンクリート柱(15m未満)を建柱し、WiMAX基地局を設置する



コンクリート柱・アンテナイメージ



基地局設置イメージ

図 47 伊江村 BWA 基地局概況

一方で愛南町 BWA の通信基地局を支える躯体は、公共機関の屋上等に設置することを目的とした軽量かつ簡便な施工であった。その結果、既設の建物に大きな改良を加えることない設置が可能となり、躯体自体のコストも安く、短期間の工期での通信基地局設置が可能となった。

WiMAX基地局イメージ(2)

- 公共施設にアンテナ支持柱を取付け、WiMAX基地局を設置する



基地局・アンテナ設置イメージ



基地局設置イメージ



アンテナ設置イメージ

図 48 愛南町 BWA 基地局概況

インターフェースのオープン化と通信品質のベストエフォート化は、通信基地局から CNS までのバックホール伝送路回線、CNS からインター

ネットとの接続ポイントである ISP までのバックボーン伝送路回線に関して、各 BWA 事業者が通信品質を独自に選択可能な形態での自前設備化を可能にした。実際に検証事例で観察されたのは、既設の伝送路回線への相乗りであった。具体的には、伊江村 BWA では、通信基地局から伊江村役場に設置された ASN と CNS までのバックホール伝送路回線は、小規模 BWA 事業者である伊江村所有の公設光ファイバーを利用した。また、CNS から沖縄本島のインターネット ISP との接続ポイントまでのバックボーン伝送路回線は、伊江村が周辺市町村と共有する公設光ファイバーに相乗りした。

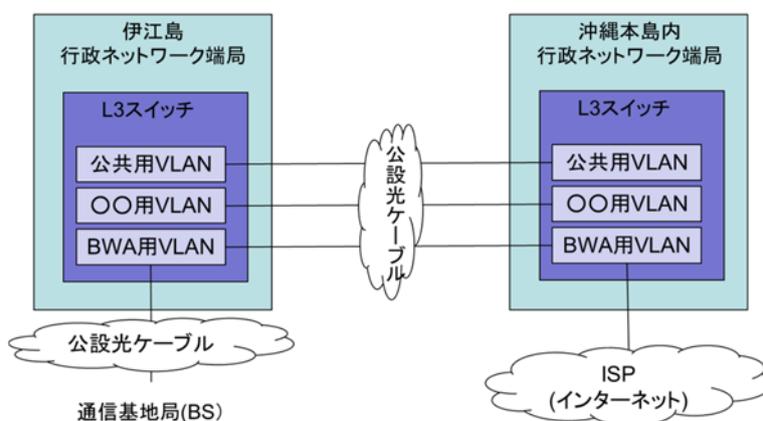


図 49 伊江村 BWA のバックホールネットワーク

愛南町 BWA では、通信基地局から愛媛 CATV に設置された ASN と CNS までのバックホール伝送路回線と CNS からインターネット ISP との接続ポイントまでのバックボーン伝送路回線は、自社が敷設済みの既設光ファイバーと IRU により光ファイバーを構築した。IRU 契約は、日本においては、使用权を有する電気通信事業者、即ち愛南町 BWA の同意なしに契約を放棄することはできない契約であり、自前の設備と同等の設備に位置づけられた。

一方、通信品質のベストエフォート化は、BWA 事業の通信サービスの品質低下に直結しなかったことが実証された。愛南町 BWA では全国 BWA が通信サービスを提供しておらず、比較検証ができなかったが、伊江村において、小規模 BWA である伊江村 BWA と全国 BWA の通信速度の実効値を測定した¹⁰。その結果は、両者がともに同じ WiMAX 技術

¹⁰ 計測方法は、総務省インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会(2015 [92])に近似した方法を採用した。具体的には、一般利用者が持つ WiMAX 方式の汎用通信端末からスマートフォンを介して、伊江村 BWA と愛南町 BWA 経由でインターネット上の通信速度測定サービス事業者の WEB サイトへ接続、伊

(IEEE802.16e-2005)を用いた場合には、伊江村 BWA の通信速度(実効値)が全国 BWA を上回っており¹¹、伊江村 BWA は、伝送路回線を占有しない相乗り型の回線利用でも十分な通信速度にあった。

表 2 伊江村における地域 BWA と全国 BWA 通信速度(実効値)比較

地点NO	場所	地域下り(Mbps)	地域上り(Mbps)	全国下り(Mbps)	全国上り(Mbps)
1	東江上・商店前	4.52	2.91	8.97	4.09
2	阿良・亀公園	2.01	1.48	0	0
3	東江前・貯水タンク付近	5.49	3.19	2.29	0.38
4	東江前・堆肥センター付近	4.17	4.37	2.24	0.09
5	真謝・真謝公民館付近	9.66	7.07	0	0
6	西崎・JA畜産センター付近	10.9	0.85	0	0
7	西江前・ファームポンド付近	3.69	0.79	2.56	0.69
8	東江上・米軍海兵隊施設付近	3.69	0.79	0	0
9	東江上・ヒルトップ付近	0.82	0.17	1.27	0.08
10	西崎・西崎漁港前	2.87	0.58	0	0
	村内平均値	4.782	2.22	1.733	0.533

本研究に先行して自律分散協調モデルに基づくスケーラブルなネットワークが実現しているインターネットの通信品質は、ネットワークが輻輳していない時は、ほとんど待つことなく瞬時にすべての IP パケットが送受信される一方で、ネットワークが輻輳するときには、すべての利用者が同程度の遅延やサービス品質における損失を経験する。特に利用者を区別しない定額料金制の場合には、遅延やパケットの欠損という通信品質が大きな問題となった(Wiseman, 2001 [40])。

伊江村 BWA の利用者は、80 世帯であり、128 通信端末が通信基地局に同時接続することが可能な BWA の技術基準を考慮してもネットワークが輻輳するとは判断しにくく、輻輳が起こらない場合には、通信品質のベストエフォートが通信品質の悪化に直結しないことが実証された。

第 3 項 利用者が持つ汎用的な BWA 通信端末の利用実現

本項では、BWA 事業がその通信端末は、利用者が持つ汎用的な通信端末を利用しえたことを実証した。

インターフェースのオープン化とエッセンシャル・ファシリティである認証基盤のオープン化は、BWA 事業者が携帯電話の SIM 認証基盤のような大規模ハードウェアを用意することなく、ネットワーク加入者が用

江村 BWA と愛南町 BWA の広域運用における通信品質(実効値)を計測した。

¹¹全国 BWA は、2014 年 11 月に WiMAX 用の 30MHz 幅のうち 20MHz 幅を 2015 年春に WiMAX 2+に切り替えて WiMAX 2+を高速化することを発表した。その結果、全国 BWA の WiMAX 利用可能周波数幅が 10MHz 幅に縮小されたことが予想される

意する汎用通信端末への通信サービスを行うことを実現した。例えば、2013年に慶應義塾大学 SFC 研究所が中心になり開発した WiMAX 汎用通信端末は、インターフェースと認証基盤をオープン化した伊江村 BWA と愛南町 BWA を含むインターフェースのオープン化とエッセンシャル・ファシリティである認証基盤のオープン化に対応した全ての BWA と通信できた。

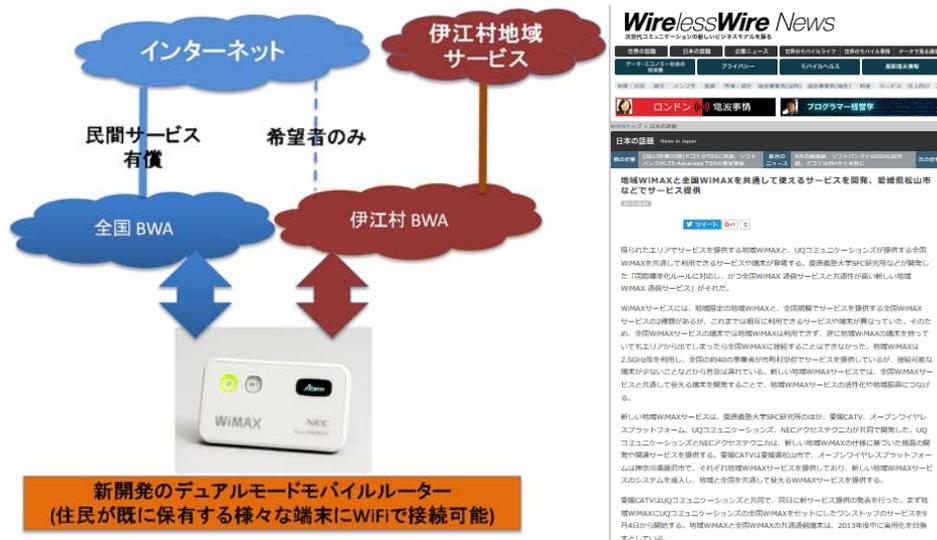


図 50 WiMAX 汎用通信端末

第 4 項 基地局 1 局あたり年額 100 万円程度の収入で事業継続可能な小規模 BWA の実現

本項では、小規模 BWA 事業は、外部からの制御から脱して自前の収入と費用負担で運用出来る条件、具体的には、基地局 1 局あたりで年額 100 万円程度の収入で事業継続が可能になることを実証した。

モジュールアーキテクチャにおけるインターフェースのオープン化は、BWA 事業を通信端末、通信基地局、ASN (Access Service Network) と GSN (Connectivity Service Network) の 4 つの自律したサブシステムで構成させた。サブシステム別の費用内訳を以下に論じる。

通信基地局費用は、1 基地局あたり 3,948 千円であった。通信基地局工事費用は、自然環境に由来し、伊江村 BWA に関しては、台風に対する耐風速という特殊要因を加味した特殊施工が必要となり高額化した。愛南町 BWA に関しては一般的な施工が可能であり、その費用は 1,803 千円であった。ASN と GSN というネットワークコア設備に関連するサブシステムは、18,368 千円であった。

インターフェースのオープン化と認証基盤のオープン化は、Wi-Fi アクセスと同じように BWA 事業者が携帯電話の SIM 認証基盤のような大規模ハードウェアを用意せずにネットワーク加入者が用意する汎用通信端末を利用した通信サービスを実現した。その結果、小規模 BWA 通信事業者による通信端末への費用負担は無かった。

表 3 本研究が導出したモデルにおける小規模 BWA の費用細分

初期設備費	値段(単位千円)
1.通信端末 ※Wi-Fiアクセスネットワーク同様に利用者が用意	0
2.通信基地局RRH/BBU	3,948
3.ASN/CSN(サブシステム)	18,368
3-1. DNS	668
3-2. DHCP ※DNSと共通化	0
3-3. Core-SW	503
3-4. ASN-GW	10,393
3-5. AAA	6,804
4. 通信基地局ほか工事費	1,803～
運用費	値段(単位千円)
5.バックホール・バックボーン回線構築費 ※伊江村BWA、愛南町BWAは既存サービスに相乗り	0 追加費用発生無
バックホール・バックボーン回線借用料 ※伊江村BWA、愛南町BWAは既存サービスに相乗り	0 追加費用発生無

インターフェースのオープン化と TCP/IP を通信プロトコルに採用したベストエフォートな通信品質設計は、バックホール伝送路回線やバックボーン伝送路回線に既設の通信サービスの相乗りによる低コスト化を可能にさせた。具体的には、伊江村 BWA は公設公営モデルであるので公共光ファイバーを活用、愛南町 BWA は、既設の光ファイバーの多重化利用や公衆網の VPN を利用し、バックホール伝送路回線費用とバックボーン伝送路回線費用は追加費用を加算する必要がなかった。

これら試算の結果、インターフェースのオープン化、接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、認証基盤のオープン化を満たす小規模 BWA 事業は、1 通信基地局あたり約 24,119 千円の初期費用での事業開始が可能であることが検証された。

例えば、愛南町 BWA は、通信基地局数 3 局という小規模 BWA であるが、1 通信基地局あたり約 11,874 千円の初期費用での事業開始が可能なこと

が実証された。この金額は、概ね1通信基地局あたりで年間100万円の売り上げがあれば事業継続が可能な水準であった。加入者負担(利用料金)は、概ね全国BWAと同程度もしくはそれより安い金額での設定が可能であった。

この小規模BWA事業の費用は、携帯電話事業の費用と比較した場合において安価であった。

総務省が1991年から行う携帯電話システムの補助事業、具体的には、過疎地域等の条件不利地域における携帯電話基地局整備への支援として行う無線システム普及支援事業(携帯電話等エリア整備事業)は、通信基地局整備の費用は、2003年以降は約60,000千円/1通信基地局、2010年以降は、約30,000千円から約40,000千円/1通信基地局と試算した(総務省, 2012 [76])。更に、総務省が1991年から過疎地域等の条件不利地域における携帯電話基地局整備への支援として行う無線システム普及支援事業(携帯電話等エリア整備事業)では、伝送路回線の費用は、通信基地局から回線交換機までをエンドツーエンドで保証する専用線で担保する際には66,000千円/1通信基地局であったが、民間事業者や公的機関が保有する既設の伝送路回線設備の多重化、IRU契約等での借用でのバックホール伝送路回線構築は、33,000千円/1通信基地局と試算された(総務省, 2012 [76])。

	通常型	簡易型	地域BWA基本型 (愛南町BWA)
			
	携帯電話等エリア整備事業における通信基地局(通常型)	携帯電話等エリア整備事業における通信基地局(簡易型)	地域BWA基本型(愛媛BWA)
高さ	概ね40~15M	概ね15M	概ね4~5メートル。自治体等公共構造物に設置
エリアカバレッジ	概ね半径2~4KM	概ね半径1KM	概ね半径2KM
概要	開けたエリアで広域的に整備する場合や携帯電話事業者複数社相乗り案件などに活用	単独の携帯電話事業者がスポット的に整備する場合などに活用	単独のBWA事業者がスポット的に整備する場合などに活用
予算(伝送路以外)	概ね3000万~4000万円	概ね1000万~2000万円	概ね832万円
予算(伝送路部分)	概ね3300万~6600万円	概ね3300万~6600万円	計上せず

図 51 携帯電話等エリア整備事業(総務省, 2012 [76])とBWA事業費比較

そこで、これらの携帯電話事業における費用試算の結果と本研究にお

ける小規模 BWA 事業の費用を比較した。携帯電話の場合は 1 通信基地局局の整備として 4,430 万円から 1 億円程度の費用が掛かった。一方、本研究の要件を満たす小規模 BWA 事業においては、1 通信基地局あたり約 11,874 千円の初期費用での事業開始が可能であった。

本検証の対象とした小規模 BWA 事業では、携帯電話事業と比較して低費用でインフラ整備できたメリットは、加入者通信費負担の低減という形で加入者還元された。

例えば、愛南町 BWA のサービス料金は、全国 BWA に比して半額以下であった。また、愛南町 BWA 運営者である愛媛 CATV は、愛南町と同じく地域 BWA を展開する愛媛県松山市では、CATV 網を用いた CATV インターネットと地域 BWA の一括サービスを実施しており、松山市の CATV インターネット利用者は、松山市 BWA を無料または月額 500 円で利用できた。

WiMAX

WiMAX

WIRELESS BROADBAND

ケーブルインターネット加入者(光ハイブリッド30以上にご加入の方)は
WiMAX(高速無線通信)が無料で利用可能に!

- ケーブルインターネット
光ハイブリッド30以上の加入者様は
月額基本利用料無料!
(光ハイブリッド10の加入者様は500円/月)
- WiMAX単独加入の場合は1,900円/月!
- 月額利用料に端末料金は含まれて
おりませんが、キャンペーン期間中は
無料で進呈いたします
※WiMAX搭載のPC端末を使用した場合は
できません。専用端末が必要となります。
※端末のご利用を2年未満で解約する場合は、
端末返送料として15,000円/台を頂戴します。

(((WiMAXとは?)))
WiMAX(ワイマックス)とは、次世代高速無線通信技術です。
従来の無線LANより広範囲で移動しながらの通信が可能。外出先や移動中(電車や車)でも
インターネットをご利用いただけます。

(((WiMAXの特長)))
つないだその時から即使える!
工事不要で、エリア内ならどこでも
インターネットが楽しめます。
高速移動通信が可能
移動中でもインターネットが利用できます。

愛媛CATV
WiMAX

<input type="checkbox"/> 単独加入	…1,900円/月
<input type="checkbox"/> 現在光ハイブリッド30以上を ご利用のお客さま	…無料
<input type="checkbox"/> 現在光ハイブリッド10を ご利用のお客さま	…500円/月

図 52 愛南町 BWA のサービス価格

伊江村 BWA のサービス費用は、伊江村内では、全国 BWA よりも広範囲で通信サービスを利用できるにも関わらず、全国 BWA と同程度である月額 4,000 円に設定された。加えて、観光振興などの目的では、公的補助を得て月額 1,000 円で伊江村 BWA を利用できた。

第5項 小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用の実現

本項では、小規模 BWA は、低コストの相互接続ネットワークにより小規模 BWA を相互接続することを論じ、その広域運用を実証した。

ネットワークのスケラブル化が先行して実現している Wi-Fi アクセスにおける TCP/IP プロトコルによるベストエフォート品質の採用とインターフェースのオープン化は、自律した Wi-Fi アクセスをインターネットや公衆回線など低コストで外部入手できるネットワークを用いて相互接続することを実現させ、インターネットアクセスと言う通信サービスにおける広域運用を実現した。

本検証においては、自律した小規模 BWA 事業を低コストに相互接続する手段としてインターネットを採用した。インターネットを用いた相互接続においては、本研究が BWA 事業をスケラブル化する要件と論じる4要件でもある TCP/IP プロトコルによるベストエフォート品質の採用とインターフェースのオープン化が有効に機能した。

検証の結果、インターネットという低コストな相互接続手段は、伊江村 BWA が 9 局、愛南町 BWA が 3 局という小規模 BWA を相互接続し、インターネットアクセスと言う通信サービスにおいて 2 地域 13 局という BWA 事業の広域運用を実現した。

2016 年 2 月には、伊江村 BWA と愛南町 BWA をインターネットで相互接続し、各地域 BWA のサービスエリア内におけるインターネットサービスの通信品質を計測した¹²。計測場所は、伊江村 BWA と愛南町 BWA のサービスエリア内で無作為に 10 か所を抽出した。計測の結果、伊江村 BWA と愛南町 BWA とをインターネットを用いて相互接続することによる広域運用では、下りで平均約 4.6Mbps、上りで平均 2.7Mbps の通信品質がベストエフォートで確保されることが実証された。全国 BWA 事業が同じ WiMAX 技術 (IEEE802.16e-2005) を用いて通信サービスを行う伊江村 BWA においては、その通信速度(実効値)は全国 BWA を上回っていた。

¹² 計測方法は、「一般利用者によるアプリ計測方式(総務省インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会, 2015 [92])」に近似した方法を採用した。具体的には、一般利用者が持つ WiMAX 方式の汎用通信端末からスマートフォンを介して、伊江村 BWA と愛南町 BWA 経由でインターネット上の通信速度測定サービス事業者の WEB サイトへ接続、伊江村 BWA と愛南町 BWA の広域運用における通信品質(実効値)を計測した。

表 4 伊江村 BWA と愛南町 BWA 間での通信品質(実測値)比較

地点NO	場所	地域下り(Mbps)	地域上り(Mbps)
1	東江上・商店前	4.52	2.91
2	阿良・亀公園	2.01	1.48
3	東江前・貯水タンク付近	5.49	3.19
4	東江前・堆肥センター付近	4.17	4.37
5	真謝・真謝公民館付近	9.66	7.07
6	西崎・JA畜産センター付近	10.9	0.85
7	西江前・ファームpond付近	3.69	0.79
8	東江上・米軍海兵隊施設付近	3.69	0.79
9	東江上・ヒルトップ付近	0.82	0.17
10	西崎・西崎漁港前	2.87	0.58
	村内平均値	4.782	2.22

地点NO	場所	地域下り(Mbps)	地域上り(Mbps)
1	御荘文化センター	5.02	2.23
2	御荘中学	6.94	4.73
3	社会福祉協議会	4.19	1.48
4	城辺中学校	4.16	3.09
5	道の駅	5.05	4.39
6	南レクプール	5.48	7.84
7	南宇和高校	2.48	1.47
8	南宇和病院	3.07	3.78
9	愛南町役場	5.99	1.79
10	愛南町郵便局	3.37	0.91
	町内平均	4.575	3.171

第 2 節 研究仮説の検証：BWA 事業スケーラブル化の検証

第 1 項 研究仮説通りの BWA 事業のスケーラブル化の実現

理論研究をもとに導出した BWA 事業をスケーラブル化させる要件は、インターフェースのオープン化、ベストエフォートな通信品質、認証基盤のオープン化、低コストな相互接続ネットワークの存在であった。

本章における実証は、既述の条件を満たす場合においては、第一に、外部接続以外は外部資源に依存しない運営が可能となる自律的な技術を実際に動かしえた、第二に、利用者が汎用的なデバイスで通信サービスを利用しえた、第三に、年額 100 万円程度の収入で事業継続が可能となりえた、第四に、小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用が可能となりえた、などの結果が得られた。

その結果、本研究は、これら実証の結果を得て、移動通信事業の一類型である広帯域移動無線アクセス事業(BWA 事業)においては、インターフェースのオープン化、接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、認証基盤のオープン化、低コストの相互接続ネットワークという 4 要件は、

BWA 事業をスケラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模 BWA の相互接続による広域運用)させたとの結論を得た。

通信事業においては、産業組織論の観点において、エッセンシャル・ファシリティを独占する企業は、大きな市場支配力を有し、逆に競争阻害効果排除を目的にエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化される(依田, 2001 [2])とされ、エッセンシャル・ファシリティの独占問題は、ボトルネック独占企業の競争的市場への参入を認めるべきか否か、もしくは、ボトルネック設備の開放に帰結すると論じられる(Armstrong et al., 1994 [1])。

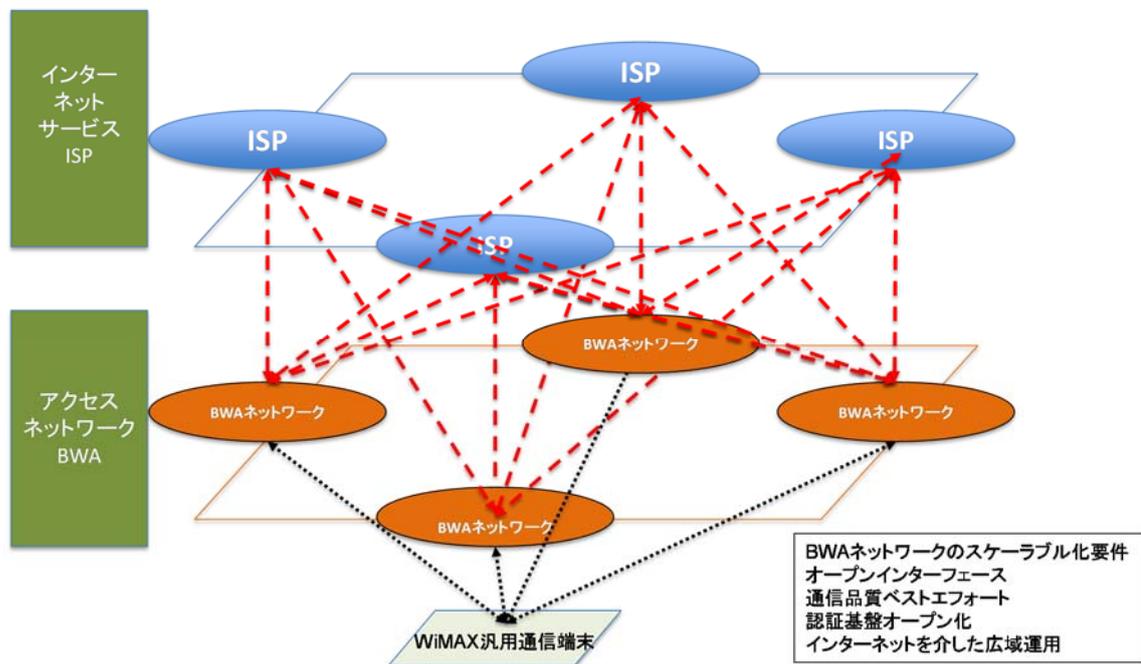


図 53 実証された BWA のスケラブル化モデル

本研究は、認証基盤というエッセンシャル・ファシリティが開放されることでネットワーク論におけるアーキテクチャ論に依拠したスケラブル化を実現した。ネットワークのスケラブル化は、モジュラーアーキテクチャにおいて議論され、各サブシステムが自律したモジュラーアーキテクチャでは、ネットワーク化してスケラブルに出来るという共通利益をインセンティブとして、相互接続性(Interoperability)に関して皆が自発的に協調行動を取ろうして多様性と共通性の均衡が保たれる行動の結果として自律分散協調モデルが生まれる(國領, 2008 [32])。

しかし、モジュラーアーキテクチャには、全体品質統制の難しさという課題がある。全体の観点からみた最適化は、かなり複雑になり、業務重複の無駄が発生し、各ユニットの自律性を担保しての全体品質の統制

は難しいと論じられる(黒須, 1997 [5]) (Brewer, 2000 [6])。そこで本研究は、全体品質統制の課題を TCP/IP という通信プロトコルを採用し、通信品質をベストエフォート品質とすることで解消した。

また、インターネットという低コストな相互接続ネットワークは、自律した小規模 BWA 事業者による相互接続性(Interoperability)に関する自発的な協調行動を支えた。

第 2 項 セキュリティ問題顕在化と BWA 第二世代における認証基盤のクローズド化

しかし、BWA 事業をスケラブル化させる 4 要件の 1 つである認証基盤のオープン化はすぐに失われた。具体的には、WiMAX 次世代技術における認証基盤のオープン化は、不可能となった。

本研究は、WiMAX Release1.0 規格を用いて BWA の設備構築を行った。しかし、本研究と同じ時期に通信の高速化を主目的とした次世代型 WiMAX 規格の検討が WiMAX 技術の世界標準化団体である WiMAX Forum を中心に行われた。2014 年に実装が可能となった次世代 WiMAX 規格である WiMAX Release2.1AE は、セキュリティ面において携帯電話事業者が独占・占有する SIM 認証基盤を利用することを必須とした。

WiMAX Forum における WiMAX 次世代規格の検討初期段階では、既存 WiMAX 規格との互換性確保と更なる高速化が中心課題であった。しかし、次世代規格の検討が進む中で、携帯電話会社とそのシステムの国際標準を規定する 3GPP 規格である LTE 方式に属する TD-LTE 方式との互換性を確保する方向性への支持が高まり、新規格が WiMAX Release 2.1 と呼ばれるようになった段階では、WiMAX Forum を組織する世界の通信機器事業者や移動通信事業者は、携帯電話事業者が独占・寡占する認証基盤である SIM 認証基盤の利用を必須とすることを標準化した。

筆者は、2012 年以降、WiMAX Forum 主催の国際会議、WiMAX 事業者の集積地である台湾やマレーシアなどアジアにおける国際会議やインターネット関連の学会において WiMAX アクセスにける認証基盤オープン化を目的とした Dual Mode WiMAX Device 構想を WiMAX 汎用通信端末のプロトタイプと共に発表し、一定の評価を得た(梅嶋, 2012 [77]) (梅嶋, 2014 [78]) (梅嶋, 2015 [79])。

技術的には、IEEE102.16 規格である WiMAX アクセスは、IEEE102.11 規格である Wi-Fi アクセスと類似のシステム構成を持つ。WiMAX アクセ

スにおける認証基盤オープン化は、Wi-Fi と同様にスケーラブルなアクセスネットワーク事業を構築可能であった。

しかし、WiMAX の次世代規格においては、認証基盤のオープン化は普及しなかった。その背景には、WiMAX Release1.0 規格が発表された前後から高まってきたネットワークへのセキュリティ強化への社会要請があった。2005 年にはロンドン同時爆破テロ事件が発生し、その後は、WiMAX 規格の普及で中心的な役割を果たしたアジア諸国やロシアでもネットワークセキュリティが論じられるようになった。

Demand Side Oriented approach by WiMAX

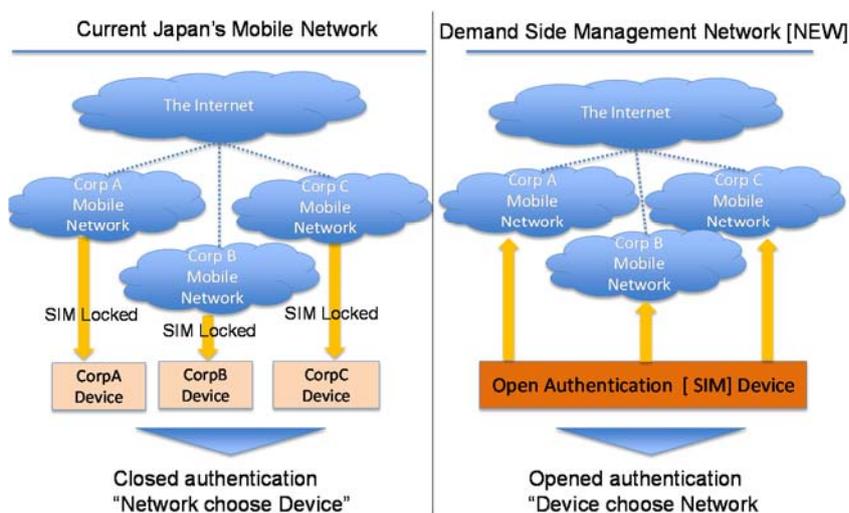


図 54 Dual Mode WiMAX 構想(梅嶋, 2014 [77])

具体的には、2005 年にはバリ島爆弾テロ事件、2008 年にはインド・ムンバイでのテロ事件、2010 年にはモスクワ地下鉄爆破テロ事件などが発生し、本研究が主張する認証基盤をオープン化するアーキテクチャは、認証基盤と言うエッセンシャル・ファシリティを寡占・独占する地位にある大手携帯電話事業者だけではなく、BWA 事業を行う上で必須となる通信事業免許を与える役割を担う政府規制当局からも支持を得られなくなった。SIM 認証基盤では、国は、加入者識別を可能とする IMSI や携帯電話番号を発番し、通信事業者を管理することができた。

第 3 項 認証基盤のクローズド化による BWA 事業におけるスケーラブル化の頓挫

本研究は、BWA 事業をスケーラブル化させる 4 要件、①インターフェースのオープン化、②接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、③認証基盤のオープン化、④低コストの相互接続ネットワークが成立した場合には、BWA 事業がスケーラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模 BWA の相互接続による広域運用)することを実証した。

しかし、直近での新展開としてテロ対策等に伴うネットワークセキュリティ強化の動きは、BWA 事業における通信端末と利用者の紐づけを携帯電話と同じく通信事業者側が行う方向、通信事業者が認証基盤をクラウド化する方向へシフトさせた。

WiMAX Release2.1AE として発表された WiMAX 第 2 世代の端末認証は、SIM やそれに連携した加入者認証システムなど大規模 BWA 事業者のみが提供できる大規模ハードウェアに依存するようになり、スケーラブル化の前提となる認証基盤のオープン化が失われた。

その結果、BWA 事業をスケーラブル化させる 4 要件は成立しなくなり、BWA 事業のスケーラブル化は頓挫した。

第7章 考察：セキュリティ機能の設計が移動通信業界の業界構造に与える影響

第1節 2008年規制改革による小規模地域 BWA 事業への事業免許付与の成否

2008年、総務省は、地域が独自に広帯域移動無線アクセス (Broadband Wireless Access、BWA) 事業の立ち上げを可能とする電波割り当て政策を実行に移した。

国は、BWA 事業において、携帯電話と同じように全国単位で大規模に事業を行うことを必須とする全国 BWA 免許に加えて、市町村単位で小規模な事業運営を可能にする地域 BWA 免許制度を開始した。地域 BWA 免許制度は、地方自治体や地域ケーブルテレビ会社を担い手としたサービスエリアを市町村に限定した移動通信事業を実現可能にした。国が新たな免許制度発足時に意図した地域 BWA サービスは、デジタル・ディバイド (条件不利地域) の解消、公共サービスの向上、公共の福祉の増進であった。

2005年の WiMAX という技術革新と 2008年の地域 BWA 免許制度は、小規模 BWA を実現するに有効な事業環境を構築した。

本研究は、そのような事業環境下にある BWA 事業において、そのスケーラブル化を可能にする要件を理論的に抽出し、その抽出した要件を満たすことでのスケーラブル化実現を実証し、中央集権的な大規模 BWA 事業が BWA 事業の唯一の選択肢ではないことを実証した。

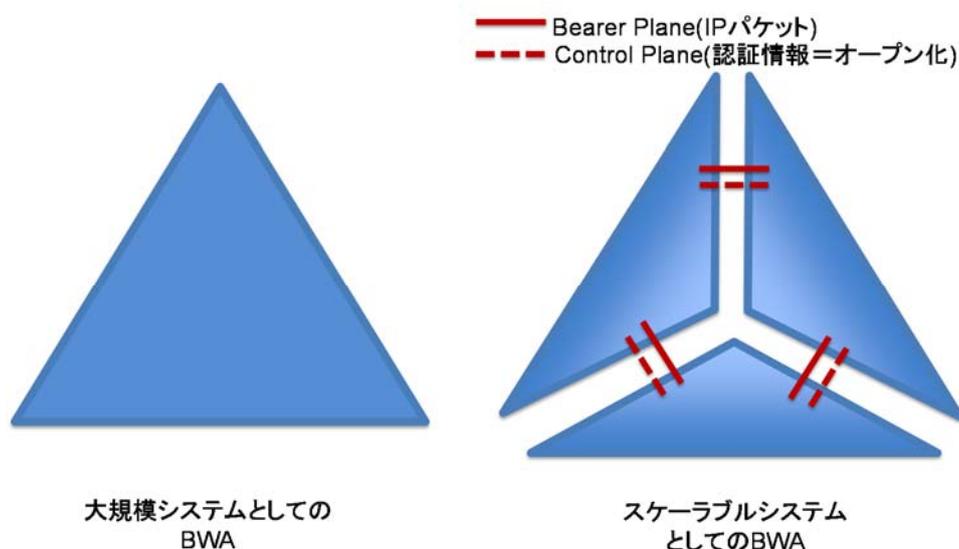


図 55 技術的・経済的に自律した小規模 BWA の広域運用

具体的には、本研究が定義する BWA 事業のスケラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模 BWA 事業の相互接続による広域運用)は、4つの要件(インターフェースのオープン化、認証基盤のオープン化、通信品質のベストエフォート、そして低コストの相互接続手段の存在)を満たした場合に実現した。

実際に、本研究における BWA 事業の実証は、他の電気通信事業者がサービス提供しないエリアでのインターネット接続サービスを構築した。伊江村 BWA は、サービスエリア設計において、伊江村全域(22.77 km²)かつ村内全世帯(2211 世帯)をエリアカバレッジとした面積カバー率 100%の BWA サービスを実現した。伊江村で地域 BWA 開局と同時に通信サービスを開始した全国 BWA は、村内の人口密集地域のみをサービスエリアとした BWA 事業であった。

また、愛南町 BWA は、2014 年に通信サービスを開始した時点では、愛南町唯一の BWA サービスであった¹³。愛南町での全国 BWA のサービス開始は、地域 BWA の事業開始に遅れた。

一方、本研究における BWA 事業の実証は、全国 BWA 事業と比較して費用的に十分に競争力ある BWA サービスを構築した。

例えば、愛南町 BWA のサービス料金は、全国 BWA に比して半額以下であった。また、伊江村 BWA のサービス料金は、伊江村内では、全国 BWA よりも広範囲で通信サービスを利用できるにも関わらず、全国 BWA と同程度の月額 4,000 円に設定された。加えて、観光振興などの目的で公的補助を得た利用料金は、月額 1,000 円であった。

國領(2004 [30])は、機能を分散させ、各通信端末レベルでは低いコストで機能を発揮できるという分散型の技術特性に着目し、各々が構築した仕組みを相互に接続すれば、小さく始められて、大きく成長させられる構造をスケラブルであると表現し、スケラブルであるがゆえに、小さな会社でも学校でも自主的な取り組みとして、特性に合ったインフラストラクチャを構築できると論じた。

本研究で論じた伊江村と愛南町という 2 つの地域 BWA 事業の実証事例は、そのスケラブル化の要件を満たした場合には、相互接続以外は自前資源を用いた地域特性にあった移動通信インフラストラクチャをローカルなイニシアティブで構築した。

しかし、セキュリティ機能である認証基盤の閉鎖性は、認証オープン

¹³ 2017 年 4 月時点では、全国 BWA の通信サービスを町の住宅密集地域を中心に利用することが可能である

化が適用される WiMAX 汎用通信端末を限定した。認証基盤をオープン化したモデルで利用できる WiMAX 汎用通信端末は 1 種類だけであった。利用できる汎用通信端末の少なさ、認証基盤オープン化モデルに対応した WiMAX アクセス事業者の少なさという利便性の面での課題は大きかった。理論的には、BWA 事業のスケラブル化は実証されたが、事業は行き詰まりを迎えた。

したがって、本研究において、BWA 事業は、そのスケラブル化がいったんは可能となったものの、認証機能というエッセンシャル・ファシリティが登場し、開放されなかったことによって、スケラブル化の要件が失われ、BWA 事業におけるスケラブル化の普及は、限定的となったと評価することができる。

実際、BWA 事業では、単一事業者が全国規模で大規模に運営する全国 BWA は電波を適切に利用している一方、市町村単位規模で小規模に運営する地域 BWA は、電波を適切に利用していないと論じられた。

種別	評価概要
全国BWA	・ 概ね適切に利用されている
地域BWA	・ 約95%の市区町村で無線局が開設されていない ・ 有償サービス提供する免許人は、約半数(平成25年1月1日当時:52免許人中28免許人)にとどまる

図 56 BWA の普及状況(総務省, 2015 [8])

具体的には、全国で 20,000 か所以上の通信基地局を運用する全国 BWA は、概ね適切に電波を利用しているが、事業開始できた地域 BWA 事業は、全国で 50 地域以下であり、約 95%の市区町村では事業開始できていなかった(総務省, 2015 [8])。2016 年末でも全国の地域 BWA 事業者の数は 50 を下回っている¹⁴。

第 2 節 本研究で実現する一方、その普及が限定された BWA 事業のスケラブル化

通信事業においては、産業組織論の観点において、エッセンシャル・

¹⁴ http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/area_bwa/

ファシリティを独占する企業は、大きな市場支配力を有し、逆に競争阻害効果排除を目的にエッセンシャル・ファシリティの扱いに関する政府関与が正当化される(依田, 2001 [2])。エッセンシャル・ファシリティの独占問題は、ボトルネック独占企業の競争的市場への参入を認めるべきか否か、もしくは、ボトルネック設備の開放に帰結すると論じられる(Armstrong et al., 1994 [1])。

本研究は、①インターフェースのオープン化、②接続不保証(ベストエフォート)な通信品質、③認証基盤のオープン化、④低コストの相互接続ネットワークという4つの要件を満たすという条件下でのBWA事業のスケラブル化(技術的にも経済的にも自律した小規模BWAの相互接続による広域運用)を実証した。認証基盤というエッセンシャル・ファシリティの開放は、BWA事業のスケラブル化における必須要件の1つであった。

しかし、BWA事業では、スケラブル化がいったんは可能となったものの、認証機能という新たなエッセンシャル・ファシリティが登場し、それが開放されなかったことによって、スケラブル化の要件が失われ、BWA事業におけるスケラブル化の普及は、限定的なものにとどまった。

直近での新展開としてのテロ対策等に伴うネットワークセキュリティ強化の動きは、BWA事業における通信端末と利用者の紐づけをWi-Fiアクセスと同じように利用者側ではなく、携帯電話と同じくネットワーク側で行う方向へシフトさせた。

WiMAX Release2.1AEとして発表されたWiMAX第二世代の認証は、SIM認証基盤やそれに連携した加入者認証システムなど大規模BWA事業者のみが提供できる大規模ハードウェアに依存するようになり、スケラブル化の前提となる認証基盤オープン化が失われた。BWA事業において認証基盤と言う新たなエッセンシャル・ファシリティが生まれたと言える。

Funk(2008 [7])は、通信事業においては、技術革新に加えて標準化という制度革新が同時進行して産業構造が変わることを示し、通信事業における同時進化モデル(co-evolution model)を論じた。本研究では、それに加えてセキュリティを実現するためのシステムの設計が産業構造に大きな影響を与え、具体的には新しい形態のボトルネック独占・寡占が生まれるという認識を得た。

この8年間のBWA事業のスケラブル化を実証する取り組みは、テクノロジーの設計が、産業における費用構造、ひいては競争の構造にまで大きく影響を与えるものであることを如実に実証するものとなった。この結果は、これまでの通信業界の業界構造論に新しい断面を加えると共

に、政策的に大きな含意を持つと考える。

第3節 移動通信事業における認証設備という新たなエッセンシャル・ファシリティの誕生

通信事業では、ネットワークが PSTN から IP へ移行することに伴い、コンポーネントのアンバンドル化が議論された。

レッシング(2002 [80])は、ネットワークを「コンテンツ層」「コード層」「物理層」という 3 層構造に分類したうえで、「物理層」の開放を論じた。池田(2002 [81])は、「物理層」における無線通信の変調方式に焦点を当て、変調方式ではなく伝送方式を IP プロトコルで統一することによる「物理層」の開放を論じた。

林敏彦(2007 [82])は、通信システムを物理網レイヤー(電気通信サービスを提供するための物理的設備で構成される機能)、通信サービスレイヤー(コンテンツ・アプリケーションなどを媒介するための伝送サービスを提供するための機能)、プラットフォームレイヤー(認証・課金・QoS 管理などコンテンツ・アプリケーションを通信サービスレイヤーで円滑に流通させるための機能)、コンテンツ・アプリケーションレイヤーの 4 つにアンバンドル化した分析フレーム¹⁵を用いて、ネットワーク中立性を論じた。ネットワーク中立性は、第一に、利用者が IP を柔軟に利用してコンテンツ・アプリケーションレイヤーに自由にアクセスできること、第二に、利用者が技術基準に合致した端末を IP ネットワークに自由に接続して通信端末間の通信を柔軟に行うことができ、第三に、利用者が通信レイヤー及びプラットフォームレイヤーを適正な対価で公平に利用できることにありと定義され、その実装では、プラットフォーム層機能(具体的には帯域制御機能、セッション制御機能、認証機能、セキュリティ機能、課金機能などの機能)をコンテンツ・アプリケーション側と物理網側のどちら側に置くかが論点となった。

これらの議論を背景に、日本の移動通信事業に関する政策議論では、インテリジェンスに位置づけられる認証機能を携帯電話事業者が寡占する物理網からアンバンドル化することが論じられた。

¹⁵ レイヤー型競争モデルを採用するのは、垂直統合型ビジネスモデルの登場に対応した分析の枠組みが必要であるからである。垂直統合型ビジネスモデルは、従来の電気通信サービスの枠を超えて、プラットフォームレイヤーやコンテンツ・アプリケーションレイヤーに至る統合的なサービス提供を行うことを意味する

具体的には、IP 時代では、技術的にはサービスが端末やネットワークに縛られなくなり、利用者は自由にサービスを選択できるようになる。その際には、利用者が、1つの汎用端末で多様な電気通信事業者のサービスを享受できることを目的として、個人認証・端末認証機能などを活用したサービス選択の自由度及び容易性を確保することが必要であると論じられた(総務省 IP 化時代の通信端末に関する研究会, 2007 [83])。

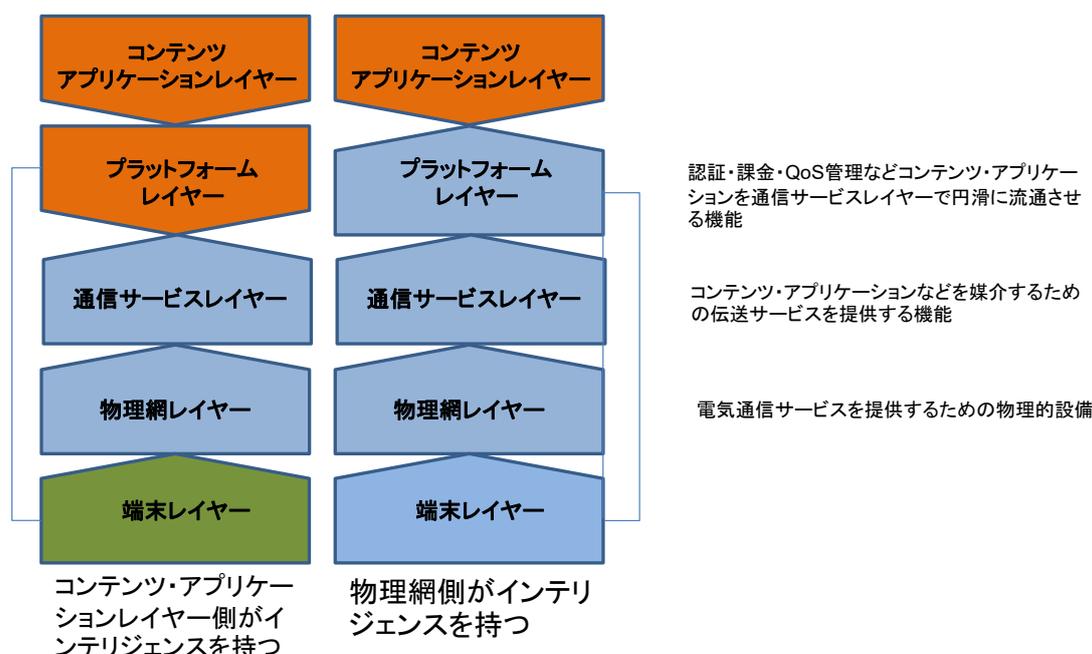


図 57 ネットワーク中立性(林敏彦, 2007 [82])

携帯電話ネットワークの認証基盤は、HLR/HSS と呼ばれ、当該ネットワークへの接続可否を決定する機能のほか、携帯端末の位置情報の把握など多様な付加価値を持つ。しかし、その所有は、携帯電話事業者に限定された。その結果、自前設備での物理網構築の免許を持たなく、既存携帯電話事業者のネットワークを借りて通信サービスを行う新規参入事業者である Mobile Virtual Network Operator (仮想移動体通信事業者、MVNO) は、1つの携帯電話事業者のネットワークのみを利用したサービスしか提供できない。

認証基盤のアンバンドル化は、MVNO が独自 SIM の発行や複数の携帯電話事業者のネットワークと接続するような新しいサービス設計、例えば、部分的には自前で無線基地局を配置し、一部地域では MVNO として既存携帯電話事業者の通信基地局を活用するサービスを可能にさせる。

しかし、日本の移動通信市場における認証基盤の物理網からのアンバンドル化は進んでいない。

エッセンシャル・ファシリティを持つ携帯電話事業者が、携帯電話ネットワークを新規参入者である MVNO へ貸し出す際の接続条件の公平性や透明性や接続の迅速化等を確保するための接続制度(二種指定設備制度)が整備されたに留まっている¹⁶(総務省情報通信審議会, 2014 [25])。

エッセンシャル・ファシリティは、第一に独占事業者がコントロールする設備、第二に競業者が現実的に合理的に複製することができない設備、第三に競業者が利用することが(独占者事業者により)否定されている設備、第四に競業者が継続的に使うことができない設備と定義される(OECD Policy Roundtables, 1996 [43])。

BWA 事業においては、本研究で取り扱った WiMAX 第一世代である WiMAX Release1.0 は、物理網である BWA ネットワークと認証基盤のアンバンドル化を実装可能である。しかし、2012 年に発表された新世代技術である WiMAX Release2.1AE は、認証基盤のアンバンドルが出来ず、その通信サービスで SIM 認証基盤を必須に必要とした。

SIM 認証基盤は、小規模 BWA 事業者が自前システムとして構築出来ない大規模ハードウェアであることを踏まえると、SIM 認証基盤は、BWA 事業におけるエッセンシャル・ファシリティと言える。

Funk(2008 [7])は、通信事業における同時進化モデル(co-evolution model)を論じ、通信事業においては、技術革新に加え、標準化が産業構造へ強い影響を与えると論じた。

本研究の結果は、セキュリティ機能に関する制度設計が、BWA 事業の産業構造を大規模事業者による大規模ネットワークモデルか小規模事業者によるスケーラブルモデルかを決定する際に大きな影響を持つことを示したと言える。

¹⁶ ドミナント規制は、基本的に設備面での市場支配能力に着目した指定電気通信設備制度として構築されている。固定通信市場を対象とする第一種指定電気通信設備と移動通信市場を中心とした第二種指定電気通信設備がある。

第一種指定通信設備は、競争事業者がサービスを提供する場合に当該指定設備を利用しなければ競争的にサービスを提供することが困難であるという設備の不可欠性があり、それをもとに市場支配力を濫用する可能性があるという認識される設備である。第一種指定通信設備事業者は、同設備のオープン化、コストを適正に反映した接続料の設定、競争事業者等に対する不当な差別的取り扱いを禁止するための行為規制等が義務として課された。

第二種指定電気通信設備は、移動通信事業において業務区域における移動端末設備の占有率(端末シェア)が10%を超える移動通信事業者が持つ移動端末設備や伝送路設備等である。第二種指定設備事業者は、接続約款の作成・公表・届出、接続会計の整理等接続約款の作成・公表・届出、接続会計の整理等が義務として課された。

第4節 グローバルプラットフォーマーによる認証設備提供の可能性と想定される産業構造

一方、エッセンシャル・ファシリティに位置づけられる認証基盤がアクセスネットワークである物理網からアンバンドル化され、林敏彦(2007 [82])のネットワーク中立性の整理に従えば、コンテンツ・アプリケーションレイヤー主導によってネットワークセキュリティを設計する動きが観察される。

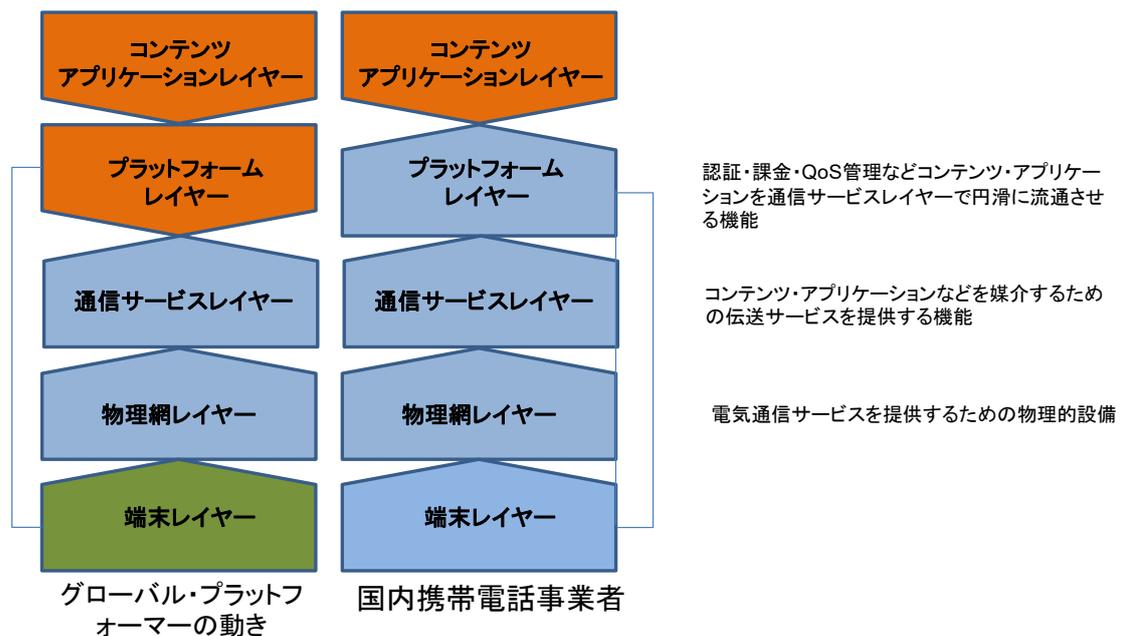


図 58 グローバルプラットフォーマーの動き

機能を分散化させ、各通信端末レベルでは低いコストでその機能を発揮出来るという技術特性(國領, 2004 [30])は、様々な分野で観察され、技術的にネットワークにおける Unwired Internet 構想(村井, 2007 [22])を実現するまでになっている。技術革新は、認証機能においても SIM 基盤のような特定のハードウェアに依存しないソフトウェア形式を運用可能にした。

例えば、日本の放送産業においては、地上デジタル放送のコンテンツ保護専用の方式として ARIB 標準規格(STD-B25 第3部)方式をベースとしたコンテンツ権利保護専用方式が普及した。地上デジタル放送のコンテンツ保護は、特定のハードウェアに依存した B-CAS 方式を主流とした。B-CAS 方式では、放送局は、放送波にコピー制御の信号を付加して番組コンテンツを暗号化し、コピー制御機能を遵守する受信機メーカーに B-CAS カードを支給した。受信機は、支給された B-CAS カードを利用し

て放送波を復号することで放送局のコンテンツ権利保護を実現した。

一方、ソフトウェア形式であるコンテンツ権利保護専用方式では、放送局が、放送波にコピー制御の信号を付加して番組コンテンツを暗号化するまでは B-CAS 方式と同じであるが、地上放送 RMP 管理センターが、(契約を結んだ)コピー制御機能を遵守する受信機メーカーへ鍵データの発行と技術情報の開示を行った。受信機メーカーは、その鍵データを利用して放送波を復号出来るソフトウェアを搭載したサービスを開発した。その結果、コンテンツ権利保護専用方式に対応したソフトウェアは、携帯電話や多機能情報端末、カーナビ、パソコン、ゲーム機などに搭載された。

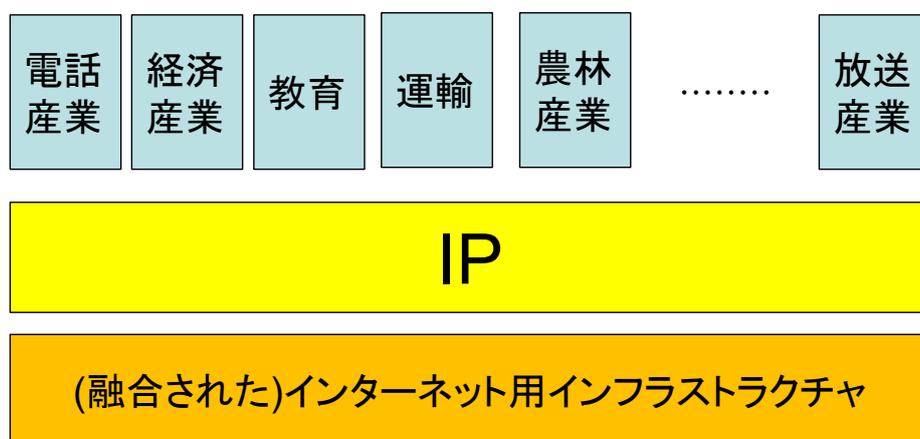


図 59 Unwired Internet 【2】 (村井,2007 [22])

認証基盤の物理網からのアンバンドル化では、グローバルなプラットフォームを運用するプラットフォーマーの動きが活発である。グローバルなプラットフォーム事業者は、セキュリティをコンテンツ・アプリケーション層主導で設計し、物理網を保有する移動通信事業者が独占・寡占する認証基盤である SIM システムへの依存を下げた多要素認証 (Multi-Factor Authentication) の仕組みを提唱する。

多要素認証は、接続する端末が正規の資格を有するか否かの認証を利用者が持つ複数の確認方法を使用することで実現する。具体的には、ユーザーのサインインとトランザクションに加えてもう1つのセキュリティを追加する認証方式である。

例えば、多要素認証を採用する Microsoft のクラウドサービスである Office 365 は、Office 365 管理センターが認証情報を一元管理し、ユーザー名とパスワードによる第1認証に加えて、第2認証要素としてモバイルアプリケーション (オンラインおよびワンタイムパスワード)、電話番号、ショートメッセージサービス (SMS) を利用した多要素認証を行

う。利用者は、Office 365 の多要素認証を使用すると、スマートフォンでユーザー名とパスワードを正しく入力した後に、モバイルアプリケーション、音声通話、テキスト メッセージの通知によって認証を受ける。

グローバルなプラットフォーム事業者である Microsoft は、インターネットクラウドサービスである Azure の利用者向けに Multi-Factor Authentication を用いた認証基盤をオープン化しており、その認証費用は、ユーザー数に応じた課金であり、低い初期費用で利用することが出来る。

これらの動きの背景は、インターネットアクセスを必要とする機器の急拡大、IoT(Internet of Things)の具体化である。

IoT は、1990 年代後半のインターネットへの接続においてリソース制約が大きな端末(具体的には IC チップなど)へインターネットアクセスを拡張するという Auto ID Center などにおける議論(Sanjay Sarma et al., 2000 [84])から発展し、2010 年代になると、無線を用いたインターネットアクセスを必要とする機器は、太陽光発電機やエアコンや冷蔵庫などの家電、自動車、電力利用量を計測する電力メーター、さらにはドローンやセンサーなどへと拡大した。

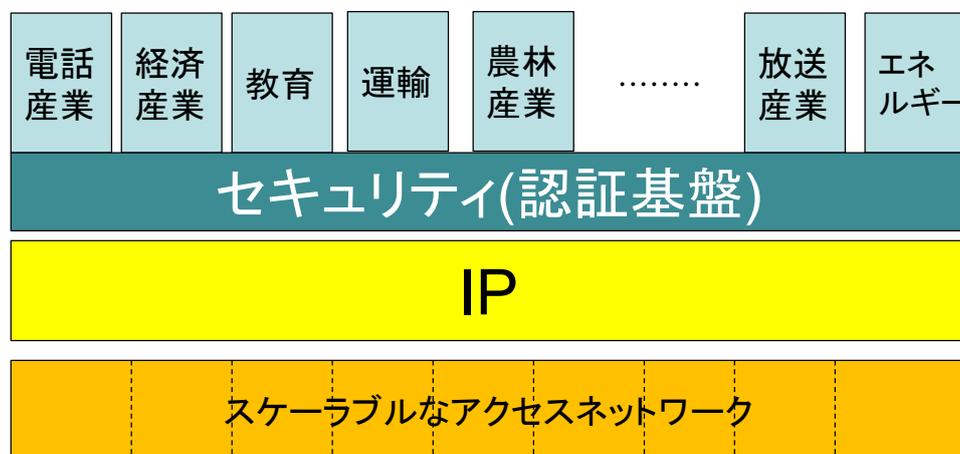


図 60 コンテンツ・アプリケーションレイヤー主導による認証基盤の運用

多様な機器と多様なサービス間で多様なアクセスネットワークを経由して IP パケットが送受信される IoT 時代においては、特定のアクセスネットワーク事業者がネットワーク加入者と通信端末の紐づけという認証機能を占有する従前の方式ではなく、セキュリティ設計の一部である認証基盤を物理網からアンバンドルすることを選択しえる。

1990 年代後半、日本においては、家庭の中のホームオートメーション

を標準化する目的で Panasonic や東芝など国内家電メーカーが中心となりエコーネットコンソーシアムが設立され、ECHONET と呼ばれる通信プロトコルが開発された。

その技術的特色は、日本製家電機器の特色である細やかな制御をデジタルに表現出来るという強みがある一方で、物理メディアからアプリケーションまでを全部定義し、ネットワーク層における IP 通信プロトコル利用の世界的な拡大という環境変化に対応できないという弱みを持っていた。ECHONET 機器を用いたシステム開発には ECHONET アドレスを使用しないといけないという設計は、ECHONET 普及の大きな障壁であった。そこで、2010 年代になり、エコーネットコンソーシアムは、ECHONET アドレスをすべて解除して、IP アドレスを通信プロトコルに使い、その上に機器制御プロトコルを載せるという新たな通信プロトコルである ECHONET Lite を発表した。

一方、米国の電力会社は、電力需要抑制を行うためのサブシステムの相互接続を推進することを目的とした SEP2.0 プロトコルを ZigBee Alliance のような通信規格団体と連携して発表した。その SEP2.0 は、IP を通信プロトコルとして利用している。ECHONET Lite プロトコルの IP 利用の動きはこうした世界の動きと同期していた。

ECHONET Lite プロトコルのもう一つの特徴は、物理層に制約を設けておらず、オープンアクセスを担保していることである。その結果、ECHONET Lite プロトコルは、他の物理層プロトコルとの連携が容易になった。具体的には、ECHONET Lite over Wi-Fi や ECHONET Lite over Bluetooth や ECHONET Lite over Ether Net が生まれた。

ECHONET Lite プロトコルは、国内標準から国際標準へと標準化が進み、ECHONET Lite 通信ミドルウェアは、ISO/IEC14543-4-3 として国際標準技術となった。

筆者は、エネルギーインフラにおける ECHONET Lite 及び IP 通信プロトコルというオープンな通信インターフェースを用いたスケーラブルなエネルギーインフラシステムの設計という機会を得た。通信機能を持つ家電・エネルギー機器の標準化団体であるエコーネットコンソーシアムの参加企業や団体は、その子会社などを含めると国内外 250 を超えるまでに拡大し、ECHONET Lite 搭載機器も着実に拡大した。

ECHONET Lite プロトコルは、一般的な家電であるエアコンや照明などエネルギーを使う家電機器に加えて、太陽光発電のコントローラやアジア地域で流通する小型の風力発電機器や燃料電池などのエネルギーを創る機器、電気自動車充放電機、停電時などに活躍する蓄電池などの次

世代のエネルギーインフラを担う戦略的機器に搭載された。

さらに、ECHONET Lite 搭載機器は、家庭と業務という境界を越えて普及している。例えば、小売店舗の業務用機器への普及の結果、これらの機器は、IP プロトコル上で ECHONET Lite を用いて制御可能となった。

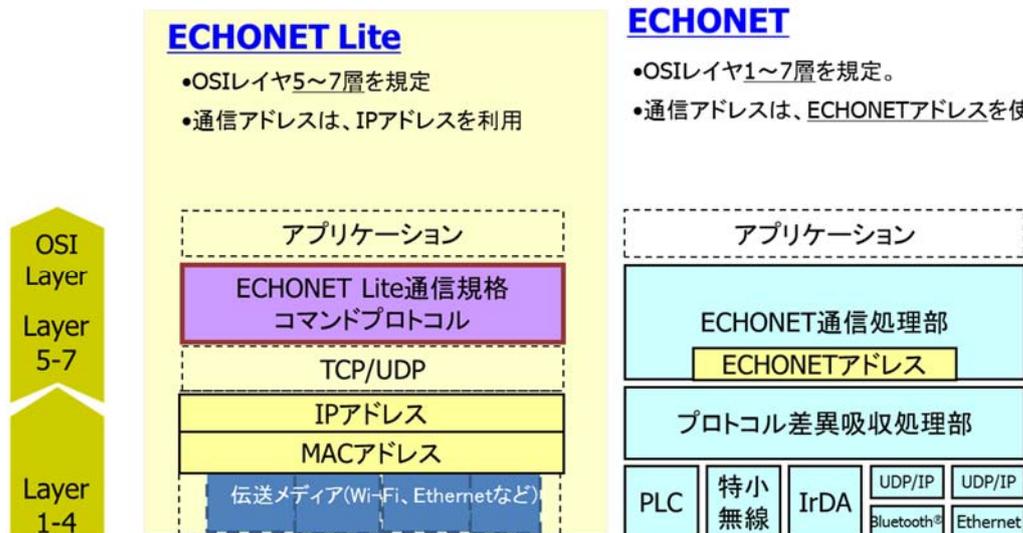


図 61 ECHONET Lite プロトコル

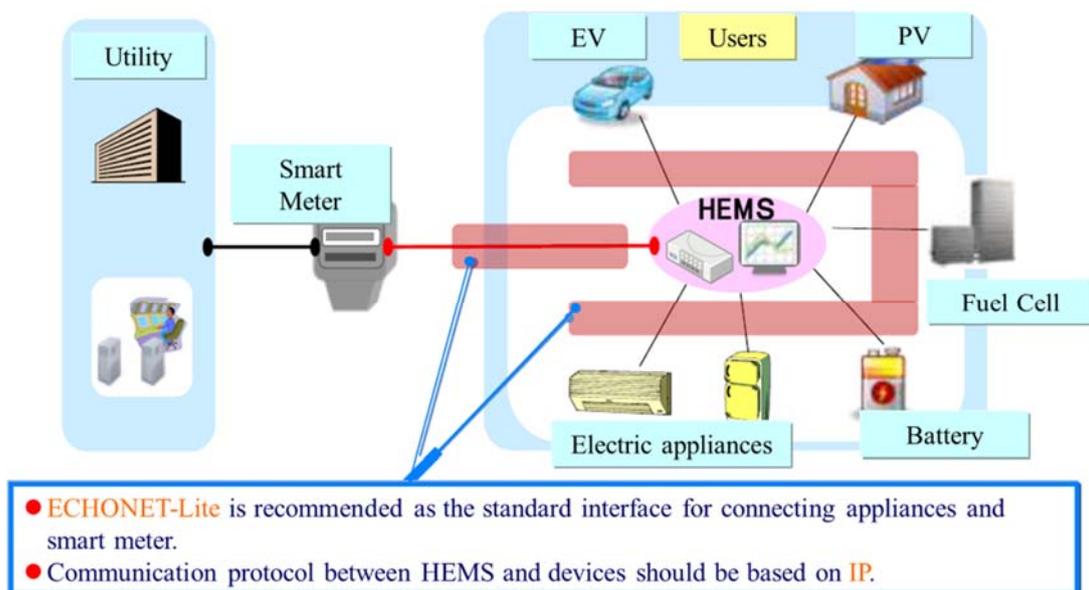


図 62 ECHONET Lite 搭載機器

2015 年に行われたエコーネットコンソーシアムの自主調査では、エアコン国内年間出荷台数の約半数が ECHONET Lite 対応し、ECHONET Lite 搭載のスマートメーターは、全国世帯の 1/4、概ね 1300 万世帯に設置が

進んでいると報告した¹⁷。

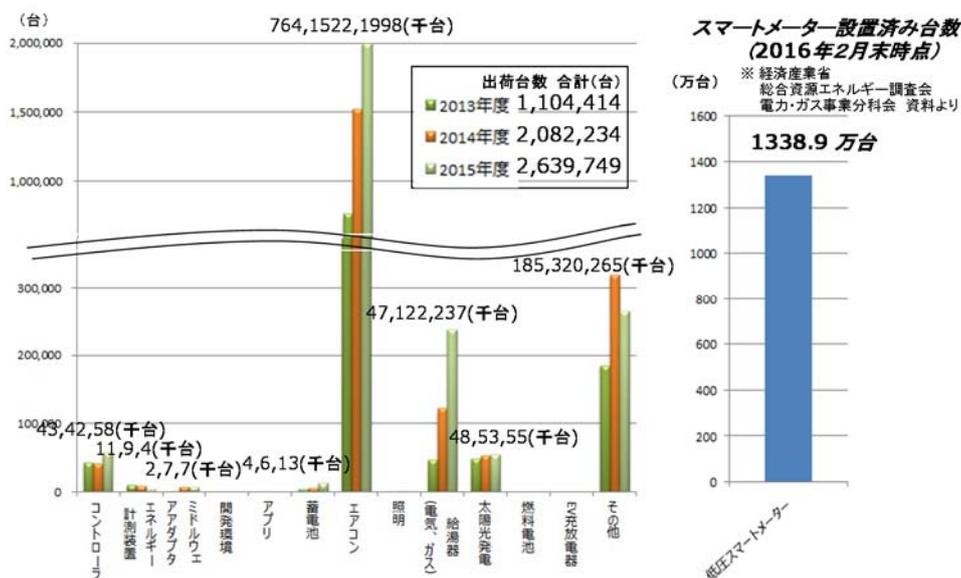


図 63 ECHONET Lite 搭載機器の普及状況

2014年には、日本は、全国すべての電力利用先、例えば家庭や小売店舗などにおいて電力の使用量を計測する電力メーターのネットワーク接続化、即ちスマートメーター化を制度決定した。その仕様は、全国すべての家庭に設置されるスマートメーターにおいて、2つの通信インターフェースを持つことを求めた。一つが電力会社の送配電ネットワークが外部接続インターフェースや認証をクローズド化する「Aルート」であり、もう一つは、無線階層がオープン化され、通信プロトコルがIPとしてオープン化され、認証もオープン化され、アプリケーション層がECHONET Liteとしてオープン化されたBルートである。Bルートでは、スマートメーターという通信機器は、電力使用量をはじめとした各種のセンシングデータを認証された通信機器に対して自由に送信できる環境が実現した(経済産業省, 2013 [85])。

その結果、日本全国すべての家庭(契約電力 50kw 未満)や小売店舗や集合住宅や事業所(契約電力 50kw 以上 2000kw 未満)に設置されるスマートメーターは、ECHONET Lite over IPv6 プロトコルで家庭内などに設置された認証された通信機器と相互接続可能となった。

具体的には、電気を利用している全国すべての家庭は、スマートメーターを設置する電力会社から認証キーを受け取り、同じく認証された市販の通信端末と IP を通信プロトコルとした通信が可能である。

¹⁷ エコーネットコンソーシアムが CEATEC2016 において口頭発表

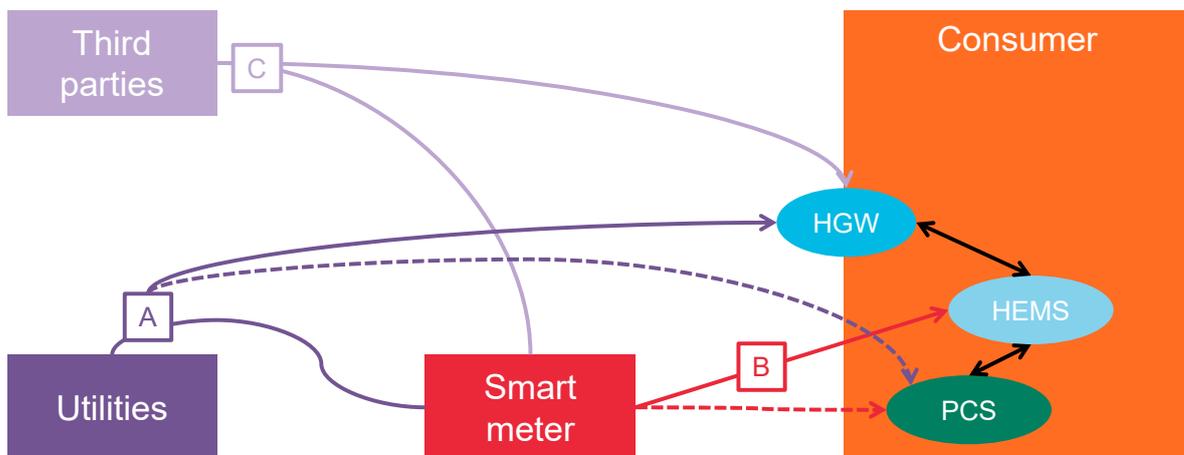


図 64 ECHONET Lite 搭載のスマートメーターの構図

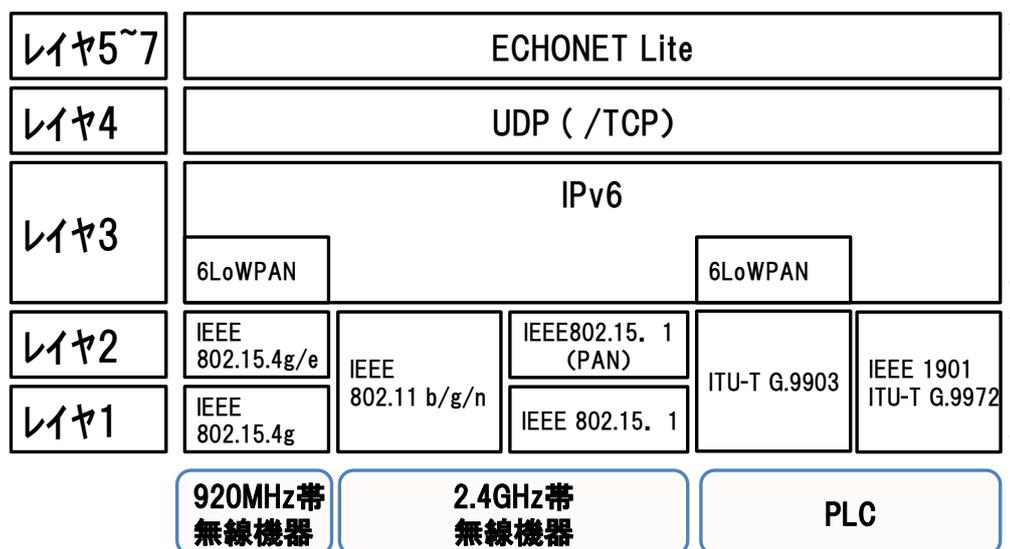


図 65 スマートメーターBルートの通信プロトコル(家庭用)

日本のスマートメーターは、設置場所に応じて適切なアクセスネットワークを選択する設計であり、電波が届きにくい場所では、PLC や Ethernet という有線を用い、近接して電波が届きやすい場所では、全ての事業者が無線事業者用免許無しで利用できるオープン化された周波数帯である 918MHz~928MHz 無線帯域を用いた IP 通信を行っている。



通信機器としての
電力メーター
(スマートメーター)

オープン化された認証
オープン化された通信プロトコルIP
多様なアクセスネットワーク
オープン化された無線周波数



通信機器

引用: <http://www.ij.ad.jp/biz/smart-meter/sa-m0/>

図 66 スマートメーターと通信機器

これら IoT や ECHONET Lite のような機器同士を接続する M2M ネットワークのネットワークアクセスにおいて主役を占めるのは、無線アクセスである。電波利用先は、従来の通信機器から M2M などのセンサーネットワークによる産業効率化、医療分野、環境分野等の様々な新分野へ広がった（総務省情報通信審議会, 2014 [25]）。

今後の更なる M2M ネットワークの普及は、移動通信事業と同様にそのセキュリティ実装への社会的要請を高める。その結果、セキュリティの実装では、認証基盤の在り方の選択が産業構造を考えるうえで重要な争点となる。

具体的には、ネットワーク側がアクセス可能な通信端末を限定（認証基盤をクローズド化）するモデルと通信端末側がアクセス可能なネットワークを選択（認証基盤をオープン化）するモデルの選択である。前者の選択では、多くの電波資源が携帯電話事業者により独占・寡占されているという現状を考えると、M2M ネットワークは、携帯電話事業者の独占・寡占になる。後者の場合には、M2M ネットワークは、Wi-Fi アクセスのようなオープンなアクセスネットワークとなる。

コンテンツ・アプリケーション層主導でのセキュリティ設計を主導するグローバルプラットフォーマーが集まる米国は、認証基盤を物理網から開放する動きを主導した。

2010 年 6 月に米国オバマ大統領は、次の情報技術革命を Wireless Broadband revolution と表明し、この先 10 年で 500MHz 幅の無線周波数

帯を携帯電話や Fixed Wireless Access (固定無線アクセスシステム、FWA) で利用可能にすると表明した。米国のみではなく、世界各国において、経済的に入手可能な信頼できる広帯域な無線通信インフラ構築は、国が保有すべき優先度の高い資産と位置付けられ、同時にインフラ構築における公的機関の関与は、民間事業者の投資環境整備から公的機関による直接投資へと拡大した。また、公的関与によるネットワーク構築は、オープンアクセスを必要要件とした (Middleton et al., 2011 [86])。

Microsoft のようなグローバルプラットフォーム主導によるコンテンツ・アプリケーション層主導でのセキュリティ設計、米・オバマ政権による無線通信におけるオープンアクセスを必要要件とした制度設計に続き、オープン化戦略の担い手となる技術革新が発表された。

2016 年 1 月、Wi-Fi Alliance は、IEEE 802.11ah 規格 (Wi-Fi HaLow) を発表した。

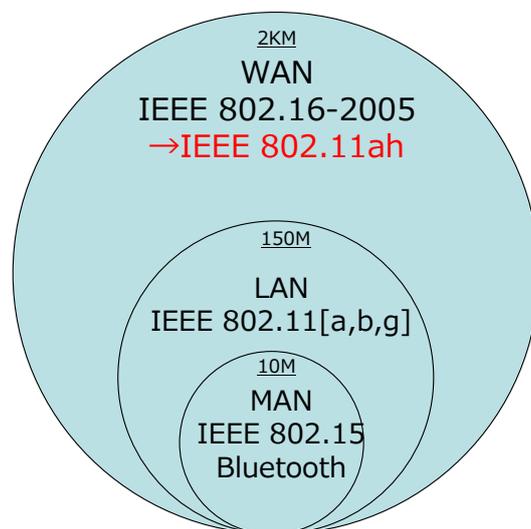


図 67 認証基盤をオープン化する Wi-Fi アクセスの拡大の構図

IEEE 802.11ah の特徴は、WiMAX と同レベルの広い通信範囲である。ワイヤレスデバイスの通信距離は、従来よりも少ない消費電力で大幅に拡大した。通信距離拡大において重要な役割を果たすのが利用可能な電波周波数帯であるが、Wi-Fi HaLow は、利用可能な周波数帯を Wi-Fi が利用可能な 2.4GHz、5GHz から 900MHz 帯への拡張を規定している。900MHz 帯の Wi-Fi アクセスポイントでは、2.4 GHz の Wi-Fi アクセスポイントよりも大きなエリアカバレッジを提供し、加えて低い周波数特性は、壁などの障害物があった場合でも回り込みによる通信端末とのベストエフォート品質型ネットワークの構築を可能にした。

第5節 小規模 BWA 事業者による協働による認証設備の共有

SIM 認証基盤による認証は、小規模な BWA 参入者にとってはエッセンシャル・ファシリティと言える設備であった。しかし、BWA 事業における認証基盤では、コンテンツ・アプリケーションレイヤー主導でセキュリティを設計する動き以外の新たな動きが存在する。

第一に、先導する小規模 BWA 事業者が SIM 認証基盤を構築、それを外部資源としてすべての小規模 BWA 事業者がオープンに利用する認証基盤の共同利用モデルである。

2008 年以前の電気通信番号規則第 8 条の規定は、SIM 認証基盤を携帯電話に係る端末設備を識別するためとしており、BWA 事業での SIM 認証基盤の使用は禁止されていた。そこで、政府は、端末設備を識別するための電気通信番号 IMSI を携帯電話以外のサービスについても使用可能とすることを目的に電気通信番号規則第 8 条の改正を 2008 年 10 月に行った。

改正の背景には、2008 年 5 月の ITU-T 勧告 E. 212 の改定がある。改正前の電気通信番号規則第 8 条は、IMSI を「携帯電話に係る端末設備を識別するための電気通信番号(移動電話端末を識別するための電気通信番号を規定する国際電気通信連合条約に基づく勧告に準拠したものに限る)」と規定していた。その結果、国から IMSI 番号付与を受けることが出来る事業者は、携帯電話事業者に限定された。しかし、2008 年 5 月の ITU-T 勧告 E. 212 の改定は、IMSI の使用条件を緩和し、移動端末や移動体サービスを限定せずに電気通信サービスを提供する公衆電気通信網における IMSI 使用を認めた。

2008 年に地域 BWA の免許制度が発表された後、国から IMSI を取得したうえで自社が構築した SIM 認証基盤をオープン化する BWA 事業者は、長らく現れなかった。しかし、2015 年 11 月に兵庫県の鉄道事業者である阪神電鉄は、兵庫県の阪神本線エリアを中心に WiMAX と異なる BWA 技術である AXGP 方式(TD-LTE 方式)を採用した地域 BWA 事業を開始すると同時に、自社が構築した SIM 認証基盤を他の小規模 BWA 事業者へオープン化することを発表した。

具体的には、阪神電鉄が SIM カード及び関連する SIM 認証基盤と WiMAX Release1.0 方式の WiMAX アクセスにおいて CSN と ASN に相当するネットワークコア設備を含む大規模ハードウェアを保有し、これら設備を自社保有することが出来ない小規模 BWA 事業者向けに有償でオープン化した。

小規模 BWA 事業者は、自前で構築できない SIM 基盤を阪神電鉄から外部調達し、外部接続以外の設備を自前で構築して技術的にも経済的にも半自律化した BWA 事業を構築、低コストなインターネットを用いて相互接続することで広域運用を実現し、本研究で論じた BWA のスケーラブル化モデルに近似したモデルが可能となった。

このモデルでは、本研究が実証した小規模 BWA 事業のスケーラブル化モデルと同様に、自律したエリアカバレッジ設計による通信基地局の自由な設置、通信基地局とネットワークコア設備を結ぶ伝送路回線において各々の小規模 BWA 事業者の自律した設計が可能である。その結果、2017 年 3 月時点においてこの取り組みは、多くの新規事業者の注目を集めるに至っている。

第二に、小規模 BWA 事業者が認証基盤を保有せずに地域社会自体を認証基盤の代用とするモデルである。技術的には、今後の Wi-Fi HaLow のような広域無線ネットワークアクセス技術であってもインターフェースも認証基盤もオープン化可能な無線技術の普及を想定した場合、WiMAX 技術ではその標準化制度が認めなかった認証基盤を持たない無線アクセスモデルが実現可能である。その際、アクセスネットワーク構築において社会的に心配されるのがセキュリティであるのは本研究で論じた通りである。

そこで、地域社会、具体的には、居住を軸として広がる一定範囲内の社会関係と空間(森岡, 2008 [87])内において、居住する住民のみが通信を行えるという制約を認証基盤の代わりに用いる地域社会無線アクセスネットワークが構想されうる。

例えば、地域社会内での住民通信は自由とし、その通信がインターネットへ出るときに、IP アドレス変換を行う DHCP サーバにおいてその記録をログとして残し、インターネット上で犯罪行為が発生した場合には、その記録をインターネットサービスプロバイダ (ISP) に開示する地域社会無線アクセスネットワークである。

インターネットアクセスでは、特定電気通信役務提供者の損害賠償責任の制限及び発信者情報の開示に関する法律 (プロバイダ責任制限法) は、ISP に利用者の本人確認を義務づけることはなく、ISP が通信利用者と通信端末の紐付けを行う認証基盤を運用することを義務づけていない¹⁸。制度的には、既述のような地域社会無線アクセスネットワー

¹⁸ 同法は、特定電気通信役務(不特定の者によって受診されることを目的とする電気通信の送信)と定義する通信役務において、ISP が有する発信者情報を開示することを求める

クと ISP との連携でのインターネットアクセス提供は可能である。

伊江村WiMAXの事例

1台の新開発のルーターで住民が保有する様々な端末にWiFiで繋がる
伊江島独自無線通信サービスにも全国無線通信サービスも利用出来る

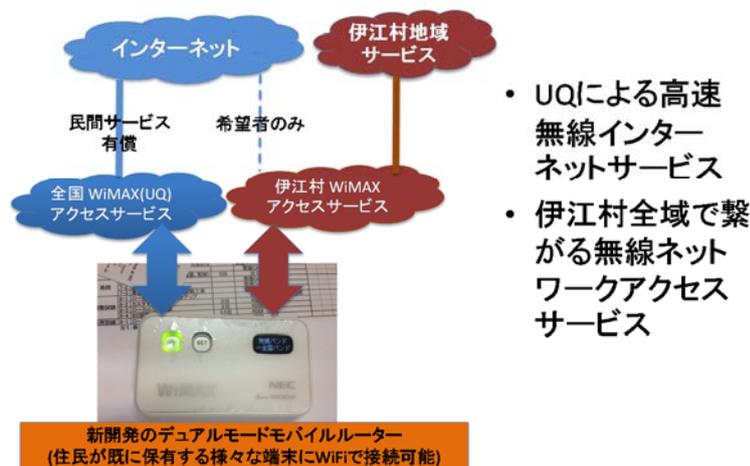


図 68 伊江村 BWA で志向した地域社会無線アクセスネットワーク

アクセスネットワークを地域に閉じたときに課題となるのは、コンテンツアプリケーションサービスの少なさである。実際、本研究で取り組んだ伊江村 BWA においても、インターネットアクセスの他に無線ネットワークアクセスを地域内に限定した利用者を募ったが、全ての利用者がインターネットアクセスを希望した。

一方でビデオ会議サービスのような人気コンテンツアプリケーションサービスを地域アクセスネットワーク内に設置するという地域社会の取り組みが存在する。厳密には居住を軸として広がる一定範囲内の社会関係と空間とされる地域社会の定義からは外れるが、熊本県教育委員会は、ビデオ会議システムとして Microsoft Lync Server 2013 をプライベートネットワーク上に設置し、県内の全公立小中高等学校で利用可能にした。その結果、熊本県内の教育機関というプライベートなアクセスネットワーク内にある県内教育機関(小学校 281 校、中学校 127 校、県立高校 55 校、特別支援学校 17 校の計 480 校)は、相互にビデオ会議や遠隔授業を実施できた。

現状では、ビデオ会議アプリケーションのシステム構築費用が高く、全ての地域社会がこのようなアプリケーションサーバーを地域社会無線アクセスネットワーク上に設置することは困難である。しかし、その課題が解決すれば、地域社会無線イントラネットの実現可能性は高まる。

スケーラブルなネットワーク設計を志向する小規模な BWA 参加者が選択できるアプローチは今後も拡大する。

第8章 参考文献・図表目録

第1節 参考文献

1. Armstrong Mark, Cowan Simon, Vickers, S. John., *Regulatory Reform: Economic Analysis and British Experience (Regulation of Economic Activity)*, MIT Press, 1994.
2. 依田高德『ネットワーク・エコノミクス』日本評論社, 2001.
3. 青木昌彦『経済システムの進化と多元性: 比較制度分析序説』東洋経済新報社, 1995.
4. 國領二郎『オープンアーキテクチャ戦略』ダイヤモンド社, 1999.
5. 黒須誠治『次世代生産システム: 自律分散協調型の生産システム』白桃書房, 1997.
6. Brewer, A. Eric., “Towards Robust Distributed Systems” PODC Keynote Speech. 19th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, Portland, July 19, 2000.
7. Funk, L. Jeffrey., “The co-evolution of technology and methods of standard setting: the case of the mobile phone industry,” *Journal of Evolutionary Economics*, 19 (1), 2008, pp. 73-93.
8. 総務省『広帯域移動無線アクセスシステムに係る 臨時の利用状況調査の評価結果』総務省, 2015.
9. 國領二郎「政策 COE の軌跡と意義: Five Years of Policy Innovation Center of Excellence. Its accomplishments and their significance」*KEIO SFC JOURNAL*, Vol.8 NO.1, 2008, pp. 7-19.
10. Brock, G., *The telecommunications industry: the dynamics of market structure*, Harvard University Press, 1981.
11. Brock, G., *Telecommunication policy for the information age: from monopoly to competition*, Harvard University Press, 1994.
12. David, P., “Some New Standards for the Economics of Standardization in the Information Age”, Dasgupta, P. and Stoneman, P., *Economic Policy and Technological Performance*, Cambridge University Press, 1987.
13. Brock, G., *The second information revolution*, Harvard University Press, 2003.
14. Baldwin, Y. C., Clark, B. K., “Managing in an Age of Modularity”, *Harvard Business review* 75, no. 5 (September–October 1997), 1997, pp.

84–93.

15. Funk, L. Jeffrey., Global competition between and within standards: the case of mobile phones. Palgrave, 2002.
16. Garrard, G. Cellular., Communications: worldwide market development, Artech House, 1998.
17. Haug, T. A., “commentary on standardization practices: lessons from the NMT and GSM mobile telephone standards histories”, Telecommunication Policy, 26(3–4), 2002, pp. 101–107.
18. Hawkins, R., “Changing expectations: voluntary standards and the regulation of European telecommunications”, Communications & Strategies, 13, September, 1993.
19. Labordère Henry, Vincent Jonack., SMS and MMS Interworking in Mobile Networks. Artech House, 2004.
20. IEEE802.21 Five Criteria for Standards Development, IEEE 802.21 Media Independent Handoff Working Group, IEEE, 2004.
21. Committee of Communications Industry Development in Ministry of Economic Affairs in Taiwan, Discover the Wimax in Taiwan, Ministry of Economic Affairs in Taiwan, 2009.
22. 村井純『インターネットが実現したこと、これから実現すること』 JANOG10 周年記念講演, Japan Network Operator Group(JANOG), 2007年7月11日.
23. 総務省総合通信基盤局『デジタル・ディバイド解消戦略会議報告書』総務省, 2008.
24. 総務省携帯電話エリア整備推進検討会 『携帯電話エリア整備推進検討会報告書』総務省, 2010.
25. 総務省情報通信審議会『2020年代に向けた情報通信政策の在り方ー世界最高レベルの情報通信基盤の更なる普及・発展に向けてー』総務省, 2014.
26. 日経パソコン編集部 『デジタル・IT用語事典』日経BP社, 2012.
27. Buyyaa Rajkumar, Yea Chee Shin, Venugopa Srikumar, Broberg James, Brandic Ivona., “Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility,” Future Computer Systems, Volume 25, Issue 6, 2009, pp. 599-616.
28. Rowstron Antony, Drusche Peter., “Pastry: Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems”, IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms and Open Distributed Processing Middleware, 2001, pp. 329-350.
29. Loupasakis Andreas, Ntarmos Nikos, Trian Peter, “eXO: Decentralized

- Autonomous Scalable Social Networking", Conference. Asilomar, Conference: CIDR 2011, Fifth Biennial Conference on Innovative Data Systems Research, January 9-12, 2011.
30. 國領二郎『オープン・ソリューション社会の構想』日本経済新社, 2004.
 31. 藤本隆宏「アーキテクチャの産業論」藤本隆宏, 青島 矢一, 武石彰編『ビジネス・アーキテクチャー製品・組織・プロセスの戦略的設計』有斐閣, 2001.
 32. 國領二郎「ネットワーク時代の政策学」中道寿一編『政策科学の挑戦』日本評論社, 2008.
 33. Simon, A. Herbert., The Sciences of the Artificial -2 nd Edition, The MIT Press, 1981.
 34. Baldwin, Y. C., Clark, B. K., Design Rules: The Power of Modularity, MIT Press, 2000.
 35. 青木昌彦, 安藤晴彦『モジュール化—新しい産業アーキテクチャの本質』東洋経済新報社, 2002.
 36. 篠崎彰彦『情報技術革新の経済効果』日本評論社, 2003.
 37. 飯盛義徳「地域情報化は新しいステージへ」國領二郎, 飯盛義徳編『元気村はこう創る』日本経済新聞社, 2007.
 38. 石田晴久『インターネット教科書【上】』IE インスティテュート, 2000.
 39. 石田晴久『インターネット教科書【下】』IE インスティテュート, 2000.
 40. Wiseman, E. Alan., The Internet economy: access, taxes, and market structure, Brookings Institution Press, 2001.
 41. 南部鶴彦『産業組織と公共政策の理論』日本経済新聞社, 1982.
 42. 鈴木興太郎, 南部鶴彦「イントロダクション・日本の電気通信の何が問題か」奥野正寛, 鈴木興太郎編『シリーズ現代経済研究 5 日本の電気通信: 競争と規制の経済学』日本経済新聞社, 1993.
 43. OECD Policy Roundtables, The Essential Facilities Concept 1996, Organization for Economic Co-operation and Development, 1996.
 44. 醍醐昌英「交通政策におけるエッセンシャル・ファシリティ理論の有効性」『慶應義塾大学三田商学研究』, 第 43 巻第 3 号, 2000 年, pp. 249-264.
 45. Baumol, W. J., “Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure”, American Economic Review, 72.1, 1982.
 46. Dixit, A. K., “Recent Development in Oligopoly Theory”, American Economic Review, 72, 1982.
 47. Peterson, S. Barbara, Glab James., Rapid descent: deregulation and the shakeout in the airlines, Simon & Schuster, 1994.
 48. Weitzman, M. L., “Contestable Markets: An Uprising in the Theory of

- Industry Structure: Comment”, *American Economic Review*, 73-3, 1983.
49. Spence, M., “Contestable Markets and the Theory of Industry Structure: A Review Article” *Journal of Economics Literature*, 21, 1983.
 50. 林紘一郎, 『インフォコミュニケーションの時代 -情報通信産業論の試み-』中公新書, 1994.
 51. The World Bank, *Reforming Infrastructure: Privatization, Regulation, and Competition*, International Bank for Reconstruction and Development, 2004.
 52. Gonetic, R., Maher, M., Nicoletti, G., “The Implementation and the Effects of Regulatory Reform: Past Experience and Current Issue”. *OECD Economic Studies*, 32-11, 2001.
 53. Gray, P., Klein, M., “Competition in Network Industries-Where and How to Introduce It”, *Public Policy for the Private Sector Note of The World Bank*, 1997.
 54. 林紘一郎 『ネットワークワーキングー情報社会の経済学』 NTT 出版, 1998.
 55. 総務省情報通信審議会 『無線 LAN ビジネスガイドライン』 総務省, 2013.
 56. 経済産業省産業政策局 『ネットワーク経済とボトルネック独占 : IT インフラ・プラットフォームプロジェクト』 経済産業研究所, 2001.
 57. 北條博史 「NTT グループの Wi-Fi プラットフォームを支える NTTBP の取り組み」 『NTT 技術ジャーナル』, 3月号, 2014, pp. 77-81.
 58. 内閣府情報セキュリティ政策会議 『重要インフラの情報セキュリティ対策に係る 第3次行動計画』 内閣サーバーセキュリティセンター, 2014.
 59. 情報セキュリティ標準テキスト編集委員会 『情報セキュリティ標準テキスト』 オーム社, 2006.
 60. Funk, J., Methe, D., “Market- and committee-based mechanisms in the creation and diffusion of global industry standards: the case of mobile communication” *Research Policy*, 30, 2001, pp. 589-610.
 61. Lyytinen, K., Fomin, W., “Achieving high momentum in the evolution of wireless infrastructures: the battle over the 1G solutions”, *Telecommunications Policy*, 26, 2002, pp. 149–190.
 62. Wierenga, K., Winter, S., Arends, R., Guido, L., Leira, J., Linden, M., Milinovic, M., Papez, R., Peddemors, A., Poortinga, R., Rauschenbach, J., Simonsen, D., Manuela Stan., Sova, M., GN2 JRA5 group members., *Inter-NREN Roaming Architecture: Description and Development Items*, GEANT research and education networking community, 2008.
 63. WiMAX Forum, *WiMAX Forum Network Architecture (Stage 2:*

- Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points) Release 1.0 Version 4, Part0, WiMAX Forum, 2009.
64. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points) Release 1.0 Version 4, Part1, WiMAX Forum, 2009.
 65. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points) Release 1.0 Version 4, Part 2, WiMAX Forum, 2009.
 66. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points) Release 1.0 Version 4, Part 3, WiMAX Forum, 2009.
 67. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points) Release 1.0 Version 4, Stage 2 and Stage 3 Abbreviations, WiMAX Forum, 2009.
 68. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 3: Detailed Protocols and Procedures) Release 1.0 Version 4, WiMAX Forum, 2009.
 69. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture (Stage 3: Detailed Protocols and Procedures) [Annex: R6/R8 ASN Anchored Mobility Scenarios] Release 1.0 Version 4, WiMAX Forum, 2009.
 70. WiMAX Forum, WiMAX Forum Network Architecture: Architecture, detailed Protocols and Procedures (Over-The-Air Provisioning & Activation Protocol based on OMA DM Specifications), WiMAX Forum, 2011.
 71. Pareit Dean, Lannoo Bart, Moerman Ingrid, Demeester Piet, “The history of WiMAX: A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX.”, IEEE Communications surveys and tutorials, Vol.14, No4, Fourth Chapter, 2012.
 72. 庄納崇『WiMAX 教科書』, インプレス, 2008.
 73. 田子晃, 小林清仁, 佐藤克彦「モバイル WiMAX 基地局装置の開発」『日本無線技報』, No57, 2010.
 74. UQ コミュニケーションズ株式会社『BWA サービスの進捗状況報告書』 UQ コミュニケーションズ株式会社, 2012.
 75. 文部科学省『公立小学校・中学校の適正規模・適正配置等に関する手引 ～少子化に対応した活力ある学校づくりに向けて～』文部科学省, 2015.
 76. 総務省『平成 24 年行政事業レビューシート. 事業番号 15』内閣官房行政改革推進本部, 2012.

77. Umejima Masaki, “WiMAX for Industrial Applications”, WiMAX Forum Asia 2012, Taipei, June 6 2012.
78. Umejima Masaki, “Japan has pursued Demand Side Oriented Approach”, 37th Conference of Asia Pacific Advanced Network, Bandung, Jan 23 2014.
79. Umejima Masaki, “The open standard technology deployment on a smart meter and a mobile network in Japan”, 39th Conference of Asia Pacific Advanced Network, Fukuoka, Mar 5 2015.
80. レッシングローレンス「創造のためのアーキテクチャ」池田信夫, 林紘一郎編『ブロードバンド時代の制度設計』東洋経済新報社, 2002.
81. 池田信夫「コモンズとしての電波」池田信夫, 林紘一郎編『ブロードバンド時代の制度設計』東洋経済新報社, 2002.
82. 林敏彦『次世代インターネットの競争政策』日本評論社, 2007.
83. 総務省 IP 化時代の通信端末に関する研究会『IP 化時代の通信端末に関する研究会報告書』総務省, 2007.
84. Sarma Sanjay, Brock, L. David., Ashton Kevin, “The Networked Physical World Proposals for Engineering the Next Generation of Computing, Commerce & Automatic-Identification”, AUTO-ID CENTER White Paper, 2000.
85. 経済産業省『JSCA スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会. HEMS-スマートメーターB ルート(低圧電力メーター)運用ガイドライン』経済産業省, 2013.
86. Middleton, A. Catherine, Given Jack, “The Next Broadband Challenge: Wireless”, Journal of Information Policy, Vol.1, Penn State University Press, 2011.
87. 森岡清志『地域の社会学』有斐閣アルマ, 2008.
88. 慶應義塾大学プラットフォームデザインラボ, 國領二郎編著『創発経営のプラットフォーム: 協働の情報基盤づくり』日本経済新聞社, 2011.
89. Kartz, M. L., Shapiro, C., “Network Externalities, Competition, and Compatibility”, American Economic Review, 75.3, 1985, pp. 424-440.
90. Rohlfs, J. A., “Theory of Interdependent Demand for a Communications Service”, Bell Journal of Economics and Management Science, 5, 1974, pp. 16-37.
91. Nelson, R., Winter, S., Evolutionary theory of economic change, Belknap, 1982.
92. 総務省インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会『イン

第2節 図表目録

図 1	PSTN と BWA の比較	11
図 2	Internet 【1】 (村井, 2007 [22])	12
図 3	無線技術の整理(IEEE,2004 [20])	13
図 4	大規模ネットワークである全国 BWA 事業の構図	15
図 5	地域 BWA のみが BWA サービスの担い手という状況	16
図 6	地域 BWA 事業と全国 BWA 事業へ付与された周波数帯幅	17
図 7	BWA 事業のスループット比較(理論値比較)	18
図 8	インターネットサービスに見る通信サービスの利用者選好	18
図 9	デザイン記述としてのアーキテクチャ(國領,2008 [32])	22
図 10	アーキテクチャの分類(藤本,2001 [31])	23
図 11	インターネットにおけるスケーラブル構造	26
図 12	自然独占の状況(鈴村 et al.,1993 [42])	29
図 13	エッセンシャル・ファシリティの独占モデル	30
図 14	市内電話網における通信端末のアンバンドル	32
図 15	Gonetic et al(2001 [52])による整理	33
図 16	日本の市内電話網のエッセンシャル・ファシリティ開放	35
図 17	Wi-Fi アクセスのアーキテクチャ	39
図 18	802.11 規格と IEEE802.1x 認証シーケンスの関係	43
図 19	公開鍵基盤による認証シーケンス	43
図 20	自律した Wi-Fi アクセスの広域運用	44
図 21	移動通信事業の技術と制度の同時進化(Funk,2008 [7])	47
図 22	eduroam における認証情報共有の仕組み	50
図 23	導出した仮説に基づくスケーラブルな BWA モデル	52
図 24	Wi-Fi アクセスと WiMAX アクセスの比較	53
図 25	藤沢市 BWA のエリアカバレッジ	53
図 26	WiMAX のインターフェース (Pareit et al., 2012 [71])	54
図 27	WiMAX アクセスにおけるインターフェース	55
図 28	Wi-Fi 及び WiMAX における相互接続第三者認証	55
図 29	WiMAX アクセス通信基地局	56
図 30	WiMAX アクセス通信端末(2010 年当時)	56

図 31	WiMAX アクセスのシステム構成	57
図 32	WiMAX アクセスのインターフェースオープン化状況	57
図 33	Wi-Fi と WiMAX 基礎通信シーケンスの比較	59
図 34	NAP/NSP Discovery のオープン化設計	60
図 35	WiMAX アクセスにおける認証基盤のクローズド化	62
図 36	WiMAX アクセスにおける認証モデル	63
図 37	WiMAX アクセスの認証基盤のオープン化シーケンス	63
図 38	設計したアクセスネットワークの認証オープン化モデル	64
図 39	スケーラブルな BWA ネットワーク	65
図 40	伊江村 BWA エリアカバレッジ(理論値)	68
図 41	伊江村 BWA におけるエリアカバレッジ	68
図 42	伊江島における全国 BWA におけるエリアカバレッジ	69
図 43	愛南町 BWA エリアカバレッジ(理論値)	69
図 44	愛南町 BWA における遠隔授業の構図	71
図 45	技術的な自律性が実証された小規模 BWA システム	72
図 46	伊江村 BWA と愛南町 BWA におけるシステム構図	72
図 47	伊江村 BWA 基地局概況	73
図 48	愛南町 BWA 基地局概況	73
図 49	伊江村 BWA のバックホールネットワーク	74
図 50	WiMAX 汎用通信端末	76
図 51	携帯電話等エリア整備事業(総務省, 2012 [76])と BWA 事業費比較	78
図 52	愛南町 BWA のサービス価格	79
図 53	実証された BWA のスケーラブル化モデル	82
図 54	Dual Mode WiMAX 構想(梅嶋, 2014 [77])	84
図 55	技術的・経済的に自律した小規模 BWA の広域運用	86
図 56	BWA の普及状況(総務省, 2015 [8])	88
図 57	ネットワーク中立性(林敏彦, 2007 [82])	91
図 58	グローバルプラットフォームの動き	93
図 59	Unwired Internet 【2】 (村井,2007 [22])	94
図 60	コンテンツ・アプリケーションレイヤー主導による認証基盤の運用	95
図 61	ECHONET Lite プロトコル	97
図 62	ECHONET Lite 搭載機器	97
図 63	ECHONET Lite 搭載機器の普及状況	98
図 64	ECHONET Lite 搭載のスマートメーターの構図	99
図 65	スマートメーターB ルートの通信プロトコル(家庭用)	99
図 66	スマートメーターと通信機器	100

図 67	認証基盤をオープン化する Wi-Fi アクセスの拡大の構図	101
図 68	伊江村 BWA で志向した地域社会無線アクセスネットワーク	104
表 1	無線通信におけるデータ通信比率	17
表 2	伊江村における地域 BWA と全国 BWA 通信速度(実効値)比較	75
表 3	本研究が導出したモデルにおける小規模 BWA の費用細分	77
表 4	伊江村 BWA と愛南町 BWA 間での通信品質(実測値)比較	81