

博士論文

スマートホームにおける
IoT 機器の相互接続性向上の研究

吉田 望絵

神奈川工科大学大学院
工学研究科 電気電子専攻

2021 年 3 月

概要

スマートホームは複数ベンダの IoT 機器で構成されており，異なるベンダ間の相互接続性の確保が IoT サービスの普及拡大に必要不可欠である．スマートホームに用いられるホームネットワークにおいて，異なるベンダ間で相互接続するための標準規格が多数策定されており，規格適合を示すために Wi-Fi, UPnP, DLNA, ECHONET Lite などさまざまな認証制度が運用されている．しかし機器単体としては認証試験に合格しているにも関わらず，市場では相互接続性の問題が数多く発生しているのが実状である．機器のソフトウェア構成は OSI 参照モデルの Layer 1~Layer 7 の各層の標準規格の組み合わせとなるが，各標準規格は実装に自由度を持たせるため未定義仕様が多々あり，開発者の解釈により実装仕様に差異が出ることで相互接続性問題を生み出す原因となることに著者は着目した．そのような問題がロゴ認証試験で見えない原因は，ロゴ認証は試験機関が指定するネットワーク機器（ルータや中継機など）を用いた限られた構成での確認に留まるためであり，試験環境で問題がなかった場合でも市場の多種多様なネットワーク機器との組み合わせによっては下位レイヤ（Layer1~4）における相互接続性問題が発生することは当然考えられる．ゆえに著者は市場の多種多様なホームネットワークにおける，下位レイヤを含む相互接続性の確保が重要だと考えた．

そこで，市場における相互接続性問題の発生を未然防止し，IoT 機器・サービスの普及・発展，それを通じて Society5.0 の実現に貢献することを研究の目的とし，それを実現するための方針として，相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化し多種多様なホームネットワークの差異を吸収する手法を確立して，下位レイヤを含む相互接続性の向上をめざすこととした．

詳細は，以下の章立てにて記載した．

第 1 章にて，ホームネットワークの発展の経緯や，IoT 機器の普及とともに相互接続性確保が重要視され取り組まれてきた経緯をまとめ，スマートホームにおける下位レイヤを含む相互接続性の研究が必要な背景を述べた．また本論文における研究の目的や方針を説明した．

第 2 章では，本研究が対象とする技術，分野，構成を分類・整理し，本研究の対象範囲を明確化

した。多数報告されている市場問題のなかでも、相互接続手順の第 1 段階である機器発見フェーズにおける相互接続性問題が重要であることに着目した。機器発見のためにマルチキャスト通信を利用するが、この「マルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題」を「CFM (Combination Failure in Multicast communication) 問題」と定義し、世の中に雑然と存在する相互接続性問題を分類し定式化した。さらに、相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化するための「スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順 (SHIPs : Smart Home Interconnectable Procedures)」を定義した。SHIPs は「手順 1. 相互接続性問題の解析と課題の設定」、「手順 2. 市場シェア集計」、「手順 3. 調査対象ルータの選定と整備」、「手順 4. 調査項目と調査方法の策定」、「手順 5. ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化」の 5 つの手順から成り、この手順によって、スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性を定量的に判断可能とした。

第 3 章では、ECHONET Lite の CFM 問題に対して SHIPs を適用し、解決する取り組みをまとめた。具体的には、まず市場問題を解析・分類し、マルチキャスト通信を実現する標準規格 IGMP で規定されたルータの状態遷移をもとに CFM 問題の発生要因を網羅的に整理した。そして市場シェア上位 150 機種 (計 81.6%, 累計販売台数 1,351 万台相当) のルータを選定および整備、調査項目と調査方法を策定し、それに基づき調査を行った。その結果 ECHONET Lite のマルチキャスト通信を阻害するルータの IGMP 実装仕様を明確化した。CFM 問題の主な原因は、ルータが機器の存在確認無しにマルチキャスト管理テーブルからエントリ (転送ルール) を削除することであり、この管理テーブルの実装差異が CFM 問題を引き起こす未定義仕様であることを究明した。そしてエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを解明した。この知見から、既存市場にスムーズに適用できるよう、機器から 120 秒間隔で ECHONET Lite のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージの定期送信によりルータの管理テーブルを確実に維持できる「ルータの実装仕様に起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法 [手法 1]」を考案した。その結果、不具合を持つルータ 1 台を除いた評価対象全 149 機種 (市場シェア 81.55%) のルータにおける ECHONET Lite 機器の相互接続性を向上させた。

第 4 章では、UPnP/DLNA の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みを記述した。具体的には、ECHONET Lite と同様にルータの IGMP 実装仕様の差異により CFM 問題が生じると

考えた。ECHONET Lite と UPnP/DLNA ではマルチキャストグループが異なるため、ルータの実装仕様は異なる可能性がある。そのため市場シェア上位 150 機種（計 81.6%，累計販売台数 1,351 万台相当）のルータの実装仕様を調査し、ECHONET Lite と UPnP/DLNA で CFM 問題を引き起こすルータの実装仕様に差異があることを明確化した。また ECHONET Lite の提案手法を応用し、機器から 120 秒間隔で UPnP/DLNA のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージを定期送信する「ルータの実装仕様に起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法 [手法 2]」によりルータの管理テーブルを確実に維持できることを確認した。その結果、評価対象全 150 機種(市場シェア 81.57%)のルータにおける UPnP/DLNA 機器の相互接続性を向上させた。また市場シェアの推移を調査した結果、2019 年 6 月時点で CFM 問題が存在するルータが約 17.82%（約 235 万台相当）存在していることが判明した。このことにより第 3 章および第 4 章における提案手法を端末に適用することの意義を示すことができた。

第 5 章では、近年シェアが増加傾向である中継機がスマートホームに設置された場合に発生する、中継機配下の IoT 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みをまとめた。具体的には、市場シェア上位 90 機種（計 79.1%，累計販売台数 1,202 万台相当）のルータのうち、中継機能を有する 57 機種（シェア合計 53.9%，累計販売台数 710 万台相当）の調査により、IEEE 802.11i における GTK の仕様が曖昧であるため中継機の実装仕様に差異が出ることが CFM 問題を生じていることを明確化した。そして未定義仕様である中継機の管理テーブルの有効期限が切れた後に端末が無線再接続をすると中継機が GTK 更新すること、また未定義仕様である GTK 更新通知を中継機が行わないことが、機器間の GTK 不一致を発生させ CFM 問題を引き起こすことを究明した。既存市場へスムーズに適用できるよう、ホームネットワークには必ず存在するルータに対して、ルータが必ず搭載している DHCP を利用して定期的に GTK で暗号化されたパケットを受信できる仕組みを検討、その復号可否により機器単体で中継機の GTK 更新を検知可能とする「中継機の実装仕様に起因する IoT 機器の相互接続性向上手法 [手法 3]」を考案した。その結果、市場シェア約 6.1%（販売累計台数 91 万台相当）の中継機における CFM 問題を解決できた。

第 6 章では、本論文の結果として、CFM 問題に SHIPs を適用して考案した 3 つの解決手法により、市場において相互接続性向上効果がえられることを整理した。具体的にはこれらの考案手法を

特許出願（2 件）し、パナソニックの製品 150 万台に搭載、市場問題の未然防止に貢献した。またこれらの手法をエコーネットコンソーシアムに提案し、ECHONET Lite の規格書へ採択され、コンソーシアム会員約 250 社が活用可能となり、約 3,300 万台の市場機器の相互接続性向上へ貢献した。

本稿では、ホームネットワークにおける相互接続手順の第 1 ステップである機器発見フェーズにおける CFM 問題の発生要因を網羅的に分類・整理し解決できた。今後の展開として、情報取得フェーズやコントロールフェーズにおける相互接続性問題に取り組む。またその他さまざまな分野の相互接続性問題の解決にも SHIPs を適用して取り組んでいく。また、ルータメーカーと連携して相互接続性問題を生み出さない環境づくりを推進する。

目次

用語と定義	vii
第 1 章 序論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 相互接続性確保の取り組みと課題	7
1.3 研究の目的	9
1.4 研究の方針.....	14
1.5 本論文の構成	14
第 2 章 CFM 問題の定式化と SHIPs の提案	17
2.1 CFM 問題の定式化.....	17
2.2 研究対象の構成	20
2.3 SHIPs の提案.....	23
第 3 章 ECHONET Lite 機器の CFM 問題への SHIPs の適用と解決.....	27
3.1 はじめに	27
3.2 CFM 問題の解析と課題.....	28
3.2.1 マルチキャスト通信の仕組みと課題	29
3.2.2 IGMP の仕組み.....	30
3.2.3 課題の設定.....	32
3.2.4 IGMP 機能実装の違いが生じた経緯と要因.....	39
3.3 関連研究.....	39
3.4 ルータの実装調査	40
3.4.1 調査環境.....	40
3.4.2 調査対象の家庭用ルータ	42
3.4.3 調査項目および調査方法	43
3.4.4 調査結果.....	44
3.5 課題を解決する提案手法	47
3.6 実験	48
3.6.1 実験項目	49
3.6.2 実験結果.....	50
3.7 まとめ	51
第 4 章 UPnP/DLNA 機器の CFM 問題への SHIPs の適用と解決	53
4.1 はじめに	53
4.2 CFM 問題の解析と課題.....	54
4.3 ルータの実装調査	54
4.3.1 調査環境.....	55

4.3.2	調査対象の家庭用ルータ	57
4.3.3	調査項目および調査方法	57
4.3.4	調査結果.....	59
4.4	課題を解決する提案手法	62
4.5	実験	63
4.5.1	実験項目	64
4.5.2	実験結果.....	65
4.6	継続調査	66
4.7	まとめ	67
第 5 章	中継機配下の IoT 機器の CFM 問題への SHIPs の適用と解決	69
5.1	はじめに	69
5.2	CFM 問題の解析と課題	72
5.2.1	CFM 問題の解析と課題の発生要因の特定	72
5.2.2	課題が発生する中継機の実装仕様解析.....	76
5.3	中継機の実装調査	82
5.4	課題を解決する提案手法	85
5.4.1	GTK 更新発生検知のロジック	86
5.4.2	実環境における実装案検討	87
5.4.3	提案手法.....	89
5.5	実験	94
5.5.1	実験環境.....	94
5.5.2	実験方法.....	96
5.5.3	実験結果.....	97
5.6	考察	100
5.7	関連研究	101
5.8	まとめ	101
第 6 章	結論と今後の展開	103
6.1	本研究の成果	103
6.2	社会への貢献	106
6.3	今後の展開	106
謝辞	.....	108
参考文献	.....	110
図目次	.....	117
表目次	.....	119
付録	.....	120

用語と定義

用語	定義	参照
4-way handshake	無線アクセスポイントと無線端末間で暗号鍵を交換する手順	5.1 節
ACK	端末から T2 Request を受信した際に DHCP サーバが返す肯定応答	5.4.3 項
CFM 問題	Combination Failure in Multicast communication の略 本論文にて定義したマルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題のこと	2.1 節
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol の略 ネットワーク接続するのに必要な IP アドレスなどの情報を自動的に割り当てるアプリケーション層プロトコル	5.4.2 項
DLNA	Digital Living Network Alliance の略 デジタルコンテンツをネットワーク上で共有するため公開された業界標準をベースとしたガイドライン	1.1 節
DNS	Domain Name System の略 インターネット上で ドメイン名 を管理・運用するために開発されたシステム	1.2 節
ECHONET	エコーネットコンソーシアムが策定したスマートハウス向け制御プロトコルおよびセンサーネットプロトコル	1.1 節
ECHONET Lite	同上 従来の ECHONET 規格の通信ミドルウェア部分を作り直し、ソフトウェアの実装量を軽くしたことが特徴	1.1 節
GfK	Growth from Knowledge の略 世界トップクラスのマーケティングリサーチの企業	3.4.2 項
GTK	Group Temporal Key の略 マルチキャストおよびブロードキャスト暗号・復号用の鍵で、無線 AP 配下の無線端末すべてで共通のものが 1 つ生成されるグループ鍵とも呼ぶ	5.1 節
GTK 不一致	無線端末間で異なる GTK を保有している状態	5.1 節
GTK 更新	無線アクセスポイントが GTK を新しく生成しなおすこと	5.1 節
HBS	家庭内の各種信号線や動力線を一括して効率よく分配集信するホームバスシステム	1.1 節

HEMS	Home Energy Management System の略 家庭で使うエネルギーを節約するための管理システム	1.1 節
HomePNA	Home Phoneline Networking Alliance 家庭内の電話線もしくは同軸ケーブル（テレビ線）を用い、インターネット接続を行うための規格	1.1 節
ICMP	Internet Control Message Protocol の略 IP プロトコルの「エラー通知」や「制御メッセージ」を転送するためのプロトコル	5.4.3 項
IEEE802.11i	無線 LAN におけるセキュリティ標準を定める規格	5.1 節
IETF	Internet Engineering Task Force の略 インターネットで利用される技術の標準化を推進する任意団体	3.1 節
IGD	Internet Gateway Device の略 UPnP におけるゲートウェイの規定	5.4.2 項
IGMP	Internet Group Management Protocol の略 IP ネットワーク上でマルチキャスト（特定の対多または多対多通信）を行うために、マルチキャストに参加するホストのグループを設定し、ネットワークに通知するための通信プロトコル	3.1 節
ISP	Internet Service Provider の略 公衆通信回線などを經由して契約者にインターネットへの接続を提供する事業者	3.1 節
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector の略	1.1 節
JEMA	The Japan Electrical Manufacturers' Association の略 一般社団法人 日本電機工業会	1.2 節
Join メッセージ	マルチキャストグループへ参加する際に、端末がルータに対して送信するメッセージ	3.2 節
Layer	OSI 参照モデルの層 Layer1 の物理層、Layer2 のデータリンク層、Layer3 のネットワーク層、Layer4 のトランスポート層、Layer5 のセッション層、Layer6 のプレゼンテーション層、Layer7 のアプリケーション層からなる	1.3 節
Leave メッセージ	マルチキャストグループからの離脱の際に、端末がルータに対して送信するメッセージ	3.2.2 項
NAHB	National Association of Home Builders の略 全米ホームビルダー協会	1.1 節
NGN	Next Generation Network の略 次世代ネットワーク	1.1 節

POS	Point of sale system の略 物品販売の売上実績を単品単位で集計すること	2.3 節
PTK	Pairwise Transient Key の略 ユニキャスト暗号・復号用の鍵で、無線 アクセスポイントと無線 端末 1 つに対して共通のものが 1 つ生成される	5.1 節
Querier	Query メッセージを定期的送信するルータのこと	3.2.2 項
Query メッセージ	グループの参加状況を把握し、グループの維持を行うために、ル ータが送信するメッセージ	3.2.2 項
SHIPs	Smart Home Interconnectable Procedures の略 本論文にて定義した「スマートホームにおける IoT 機器の相互接 続性向上手順」	2.3 節
SIP	Session Initiation Protocol の略 2 つ以上のクライアント間でセッションを確立するための IETF 標準の通信プロトコルで IP 電話の呼制御などに利用	1.1 節
Society5.0	内閣府が提唱した、IoT, ロボット, 人工知能 (AI), ビッグデー タなどのあらたな技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れてイ ノベーションを創出し、一人一人のニーズにあわせる形で社会的 課題を解決するあらたな社会	1.1 節
ssdp: alive	デバイス利用可能通知 UPnP において、デバイスが起動した際にコントローラ機器に自 身が利用可能である旨を通知するためのメッセージ	5.4.2 項
T2 Request	DHCP において、端末が最初に IP アドレスを取得した後、その IP アドレスのリース延長を要求するメッセージ	5.4.3 項
TCP/IP	インターネットを含む多くのコンピュータネットワークにおい て、標準的に利用されている通信プロトコルのセットで TCP 「Transmission Control Protocol」と IP「Internet Protocol」を 組み合わせたもの	1.1 節 図 1-4
UPnP	Universal Plug and Play の略 購入した機器を接続しただけでネットワーク参加を可能にするプ ロトコル	1.1 節
WPA, WPA2	Wi-Fi Protected Access の略 無線 LAN 機器が Wi-Fi Alliance が策定したセキュリティプロトコ ルに準拠していることを示す認証プログラム、あるいはセキュリ ティプロトコルを指す	5.1 節
wpa_supplicant	各種 Linux, Windows, その他 OS 向けにフリーで提供されてい る WPA/WPA2 対応無線クライアント機能のパッケージ	5.4.3 項
インタフェース	本論文ではネットワークインタフェースを指す	3.2.3 項
エントリ	「マルチキャストグループ」と「インタフェース」を対にしたマ	3.2 節

	マルチキャスト転送ルール	
下位レイヤ	OSI 参照モデルの第 1 層～第 4 層を指す	1.3 節
片側 Join 状態	片方のインタフェースでのみ Join メッセージの送信が行われた状態	3.2.3 項
機器発見	マルチキャスト通信を利用して、コントローラ機器がデバイスを検索し、発見すること	2.1 節
上位レイヤ	OSI 参照モデルの第 5 層～第 7 層を指す	1.3 節
シングルセグメント	ホームネットワーク内にルータが 1 台設置され、セグメント（ネットワークの単位）が 1 つのみとなる構成	2.2 節
スマートハウス	家電製品・住宅設備機器をネットワークに接続した住居	1.1 節
スマートホーム	さまざまなライフスタイル／ニーズにあったサービスを IoT により実現する新しい暮らし	1.1 節
トラフィック	通信回線やネットワーク上で送受信される信号やデータのことや、その量や密度のこと	3.6.2 項
ネットワーク（NW）機器	ルータ、中継機、ハブ、ゲートウェイなどのネットワーク装置	1.3 節
ブロードキャスト	1 対全員の通信（同じネットワーク上の全端末に向けた通信）	5.1 節
マルチキャスト	1 対特定多数の通信（同じグループに所属するメンバ全員宛の通信）	2.1 節 3.2.1 項 5.1 節
マルチキャスト管理テーブル	ルータがマルチキャストの転送ルールを管理するためのテーブル「マルチキャストグループ」と「インタフェース」を対にしたエントリ（転送ルール）を格納	3.2.2 項
マルチセグメント	ホームネットワーク内にルータが 2 台以上設置され、セグメント（ネットワークの単位）が 2 つ以上となる構成	2.2 節
ユニキャスト	1 対 1 の通信	5.1 節
両側 Join 状態	両方のインタフェース上の端末の Join メッセージ送信により、双方向でマルチキャストパケットの転送が可能となる状態	3.2.3 項
初期状態	いずれのインタフェース上でも Join メッセージが送信されず、ルータのマルチキャスト管理テーブルにエントリがない状態	3.2.3 項
無線 LAN	無線通信を利用してデータの送受信を行う LAN システム 代表的な無線 LAN の規格は IEEE 802.11 シリーズで登録商標が Wi-Fi	1.1 節

第1章 序論

1.1 背景

スマートホームとは、さまざまなライフスタイル／ニーズにあったサービスを IoT (Internet of Things) により実現する新しい暮らしであり、図 1-1 に示すように住宅設備機器やさまざまなスマート家電、エネルギー機器、生活支援ロボットなどがネットワークで結びつくことで、暮らしが「安心・安全・健康・快適・便利」となることを目的としている[1]。ほぼ同義語としてスマートハウスという言い方もされているが、経済産業省の資料[2]では、「スマートハウスからスマートホームへ」として、スマートホームを上位概念と捉えている。このスマートホームの重要な構成要素として、ルータやそれにつながるこれらの IoT 機器で構成されるホームネットワークがあり、本研究はこのホームネットワークを研究対象分野としている。

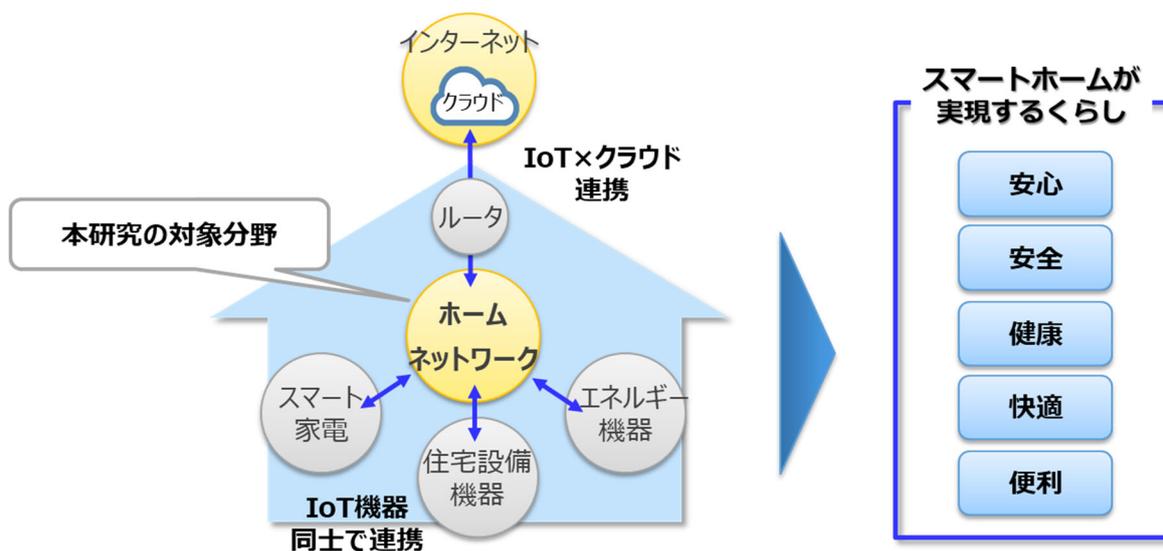


図 1-1 スマートホームとは

スマートホームの歴史を紐解くと、そのはじまりは 1980 年代にまで遡る。

1980 年代初頭、アメリカではホームオートメーション技術を駆使して家電や設備機器の最適制御を行うことで、生活者のニーズに応じた快適なサービスを提供するというスマートハウスの概念が提唱され、NAHB（全米ホームビルダー協会）の実証プロジェクトが開始された[3]。この頃の日本は、8 ビットパソコンが普及し始め、ホームオートメーションに対する関心が高まった時期であり、照明や空調の一括管理、風呂の遠隔自動給湯、セキュリティの確認など、住環境の利便性や快適性の向上のためにエレクトロニクス機器を用いて各設備が制御される技術が検討され始めた[4][5][6]。ホームオートメーション技術を利用してスマートハウスを実現するには、制御機器と被制御機器の間にネットワークが必要となる。日本においては、家庭内の各種信号線や動力線を一括して効率よく分配集信するホームバスシステム（HBS）の国内標準化が進められ、1988 年に業界標準として制定された[7][8]。

1990 年代に入ると、日本においてダイヤルアップでのインターネットサービスが開始[9]されたことを契機に、デジタル・双方向・インタラクティブをキーワードとしてマルチメディアブームが始まり、ホームバスはホームネットワークに名前を代え、住宅内での基本的ニーズを実現するための技術が盛んに検討され始めた[10]。ホームネットワークで実現しなければならないアプリケーションは多岐にわたり、オフィスのシステム同様パソコンやタブレット端末で実現されるもの、HDD (Hard Disk Drive) レコーダとテレビの間の接続のようにオーディオビジュアル (AV : Audio Visual) データをあつかうもの、エアコンや照明などの家電機器を制御するコマンドをやり取りするものなど、技術的な要求要件としてきわめて異なる性質を持つものが含まれ、用途に応じて適切な技術を用いたネットワークが構成された。具体的には、オフィスなどのネットワークでは Ethernet (イーサネット, IEEE802.3[11]) や電話線を利用した HomePNA[12]などの IP 情報の高速伝送系ネットワーク、AV 向けには IEEE1394[13]などの高速映像デジタル伝送系ネットワーク、家電制御向けには ECHONET[14][15]などの低速制御系ネットワークなどがある[12][16]。このように 1990 年後半から 2000 年代にかけては、ホームネットワークは多種多様な機器、サービスが混在し混沌とした状況であった。これらを整理し、ホームネットワーク全体を統合するアーキテクチャがまとめられ、2002 年に ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)

勧告 J.190 「Architecture of MediaHomeNet that supports cable-based services」 [17]として国際規格に採用された[18][19]のが図 1-2 である。ドメインを束ねるところで IP プロトコルを採用しているが、各ドメインでは固有のプロトコルを活用するモデルである。

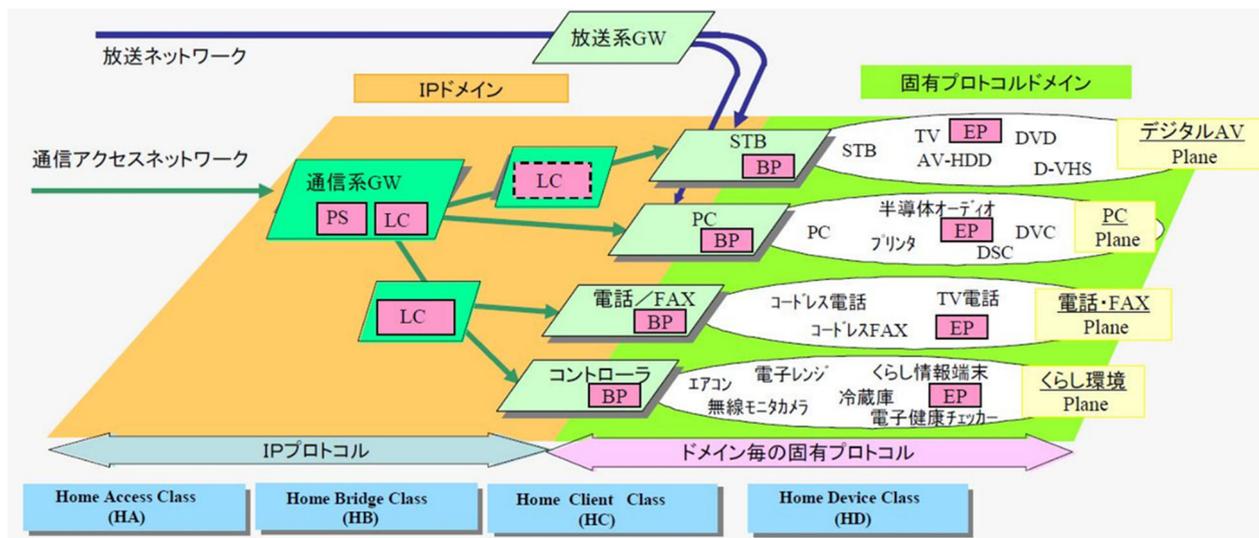


図 1-2 ホームネットワークアーキテクチャ ([19]より抜粋)

2000 年代以降は、ネットワーク技術が急速に発展した。

まず図 1-3 を参照しながら、伝送メディア (図 1-4 に示す OSI 参照モデル[20]の Layer 1~2 相当) の観点で変遷を辿ると、2000 年に ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) のサービスが提供開始[9]されたことを契機に、安価にブロードバンド接続が可能となったことでインターネットが一気に社会インフラとなった。さらに 2003 年頃から FTTH (Fiber To The Home : 光回線) や高速 CATV (ケーブルテレビ) の登場によって、より高速な常時接続サービスが一般向けに開始された。宅外の伝送メディアにおいては電話網をオール IP 化する NGN (Next Generation Network : 次世代ネットワーク) が ITU-T で標準化され[21]、電話・データ通信・ストリーミング放送が融合したマルチメディアサービスを実現する取り組みが活発化した。一方、宅内の伝送メディアにおいては Ethernet が主流となり、ホームネットワークの IP 化も進んだ。さらに無線 LAN (IEEE 802.11a/b/g) [22]搭載の市販ルータが普及し始めたことで、ホームネットワークの無線化も加速した。2000 年代末には、VOD (Video On Demand) サービスが普及し始め、家庭用 TV にアクティブ

ラ[23]などのインターネット TV 機能が搭載された。この頃に最大通信速度 600Mbps を達成する IEEE 802.11n が標準化され、無線 LAN の通信速度が大幅に向上した。その後無線 LAN は、伝送するコンテンツのリッチ化とともに、IEEE 802.11ac (最大通信速度 6.93Gbps), IEEE 802.11ax (最大通信速度 9.6Gbps) と高速化していく。

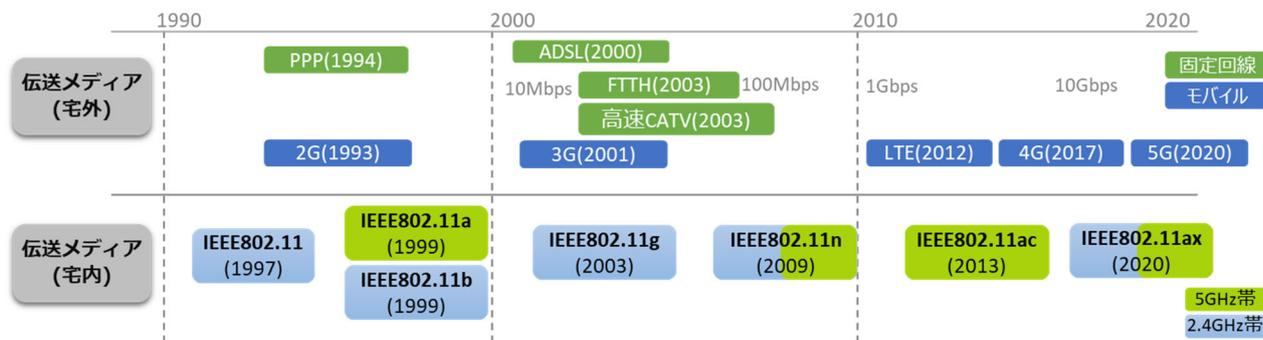


図 1-3 伝送メディアの変遷

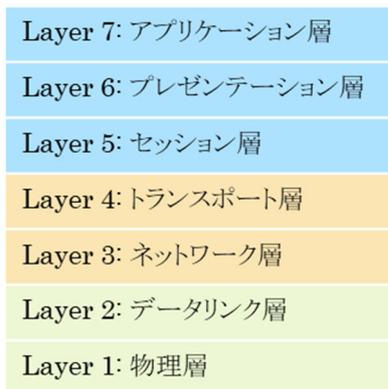


図 1-4 OSI 参照モデル

次はホームネットワークの技術動向の観点で振り返る。

2003 年頃から、機器を接続しただけでネットワーク参加を可能にするプロトコルである UPnP (Universal Plug and Play) [24]や、デジタルコンテンツをネットワーク上で共有するため公開された業界標準をベースとした DLNA (Digital Living Network Alliance) [25]ガイドラインなど、IP ベースの標準規格の策定が進み、複数機器が相互接続するサービスが急速に普及し始めた。これらは図 1-5 に示すように下位レイヤ (OSI 参照モデルの Layer 1~Layer 4) を特に規定せずに開発自

由度を持たせていることで普及につながった。一方で、家電製品や設備機器間の通信制御を目的とした ECHONET は、仕様策定時点での規格を前提に下位レイヤまで規定[26]したことが普及を妨げる要因の1つとなった。そこで ECHONET をベースとして、下位レイヤを規定せずプロトコルを軽量化して改良された ECHONET Lite[27]が 2011 年に規格化された。パナソニック株式会社においても HEMS につながる製品の拡充を目指して、エアコンを始めとする多数の ECHONET Lite 製品を開発している。特にエアコンに関しては他の白物家電よりも早く ECHONET Lite のロゴ認証の取得を開始しており、2014 年から 2020 年 4 月における累計 1,725 機種において ECHONET Lite 規格の認証を取得している[28][29]。また DLNA 製品に関しては 2009 年からロゴ認証取得を開始しており、テレビ 3,940 機種、レコーダ 509 機種など、多数の黒物機器において認証を取得している[30]。

2020 年 8 月現在、DLNA 対応製品はグローバルで約 40 億台[30]、ECHONET Lite 対応製品は国内で約 1 億台[31]出荷されており、今後ますます対応製品は増えていくことが予想される[32]。

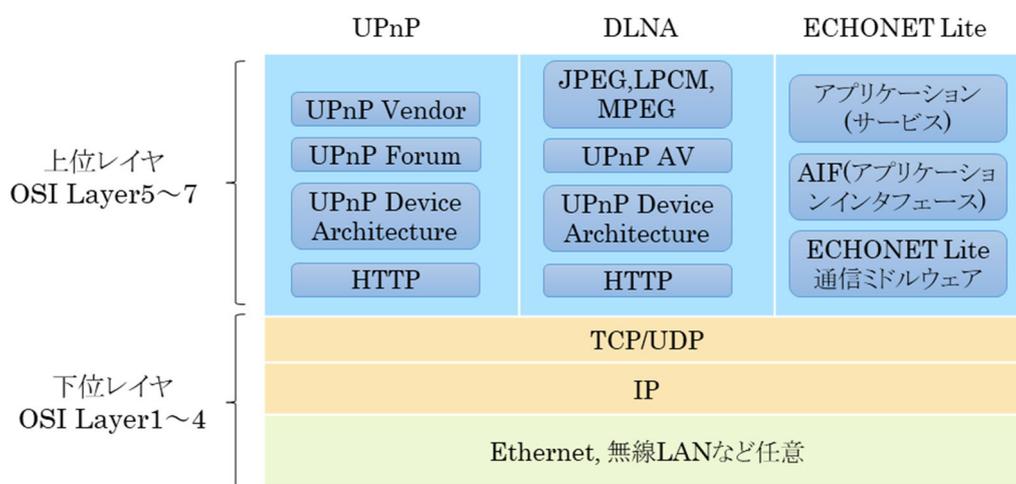


図 1-5 ホームネットワークの標準規格のプロトコルスタック

このようにホームネットワークは基本的に IP ベースとなり、加えて SIP プロトコル[33]を用いた IP 電話 (VoIP) サービスなどの宅外接続も普及し始め、国内においてホームネットワークの課題解決の取り組みが活発に行われていた[34][35][36]。このような活動の中で、2007 年に ITU-T 勧告 J.190 のホームアーキテクチャは、図 1-6 に示すように IP 接続の家電への対応、各種の宅外接続への対応、応用分野の広がりなどの観点から改訂された。

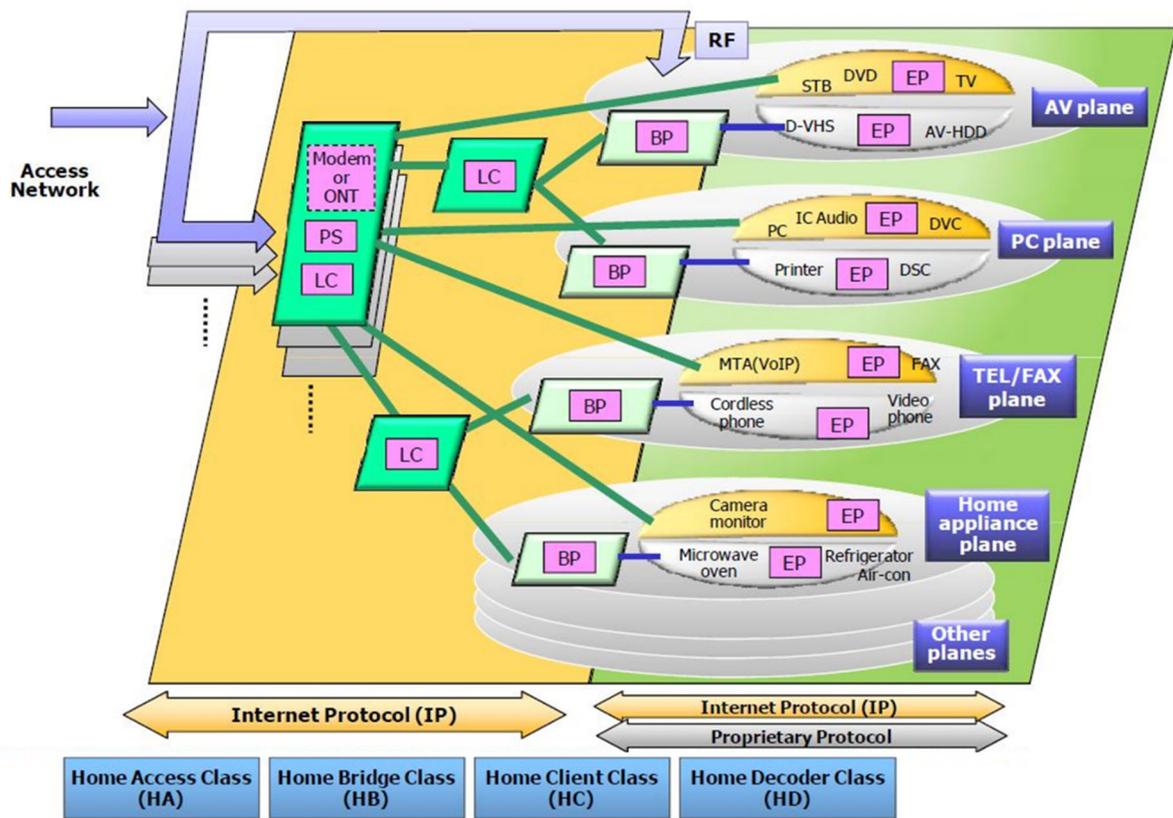


図 1-6 改訂されたホームネットワークアーキテクチャ ([19]より抜粋)

2010年代に入ると、スマートフォンの爆発的普及[37]や、センサー単価の急速な下降により IoT が急速に普及し始め[38], IoT を活用して家庭で使うエネルギーを見える化し、節電・省エネができるスマートハウスという言葉も一般化してきた。折しも 2011 年の東日本大震災後、原子力発電が停止し電力の供給力が低下したことを機に節電・省エネの必要性がますます高まり、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーによる発電に注目が集まるようになった。一般家庭向けのエネルギー管理システムである HEMS (Home Energy Management System) の導入推進に向け[39], 産官民一体となって行われた取り組みもあり[40][41], 日本全体でスマートハウス分野のホームネットワーク課題の対応や標準化検討が進められた[42][43][44][45][46][47]. 2012 年には HEMS の標準インターフェースとして ECHONET Lite の利用が推奨されることとなった。

その後、2016 年に政府が Society5.0 を発表し、IoT・ビッグデータ (BD)・人工知能 (AI) などの技術を活用して超スマート社会を目指す動きが始まった[48]. 各種フォーラム[49][50]で、宅内外

の機器やセンサー，通信機器，関連サービスを繋ぎ人々の暮らしをカスタマイズ可能にする「スマートホーム」の検討や，普及・啓発・市場拡大を図るさまざまな取り組みが行われている[2][51][52]。

1.2 相互接続性確保の取り組みと課題

複数のIoT機器が連携する便利なサービスが普及すると同時に，各種フォーラムや団体が連携し，相互接続性を確保するためのさまざまな取り組みが行われてきた。宅外接続に関しては，HATS フォーラム[53]や各種フォーラム[35][36][49][50]が連携し，「標準仕様のみでは相互接続性の担保は困難」との考え方で，たとえばIP電話やFAXなどのIP網を介した宅外の機器との相互接続性観点に焦点を当てた取り組み[54][55]など，長年に渡り行われてきた。

一方宅内においては，IoT機器単体としては，標準規格を規格通りに実装できているかどうかを確認して相互接続性を向上させる取り組みは従来からあった。たとえばWi-Fi Certification[56][57]，UPnP Certification[58]，DLNA Certification[59]，ECHONET Lite 認証制度[60]などのロゴ認証制度も一つの例である。また，DLNA Plug fest[61]やECHONET Lite プラグフェスト[62]のような，さまざまなベンダが集まって相互接続試験を行い，規格書解釈の相違や実装の誤りなどの問題を発見する取り組みもある。

また近年，特にHEMSの分野において，異なるメーカーのHEMSコントローラや機器が混在した場合でも容易にシステム構築を可能とする情報公開が重要と考えられ，JEMA[63]より相互接続における情報公開のためのガイドライン[64]が発行された。図1-7はこのガイドラインにおいて相互接続を行うための一般的なシステム構成を示しており，BBR（ブロードバンドルータ）配下に全機器が接続された構成となっている。その他，システムを設計する際の指針や，トラブル対応に活用できる事例集[65][66]なども発行され，HEMS機器の相互接続性問題の未然防止に向けた取り組みがされている。

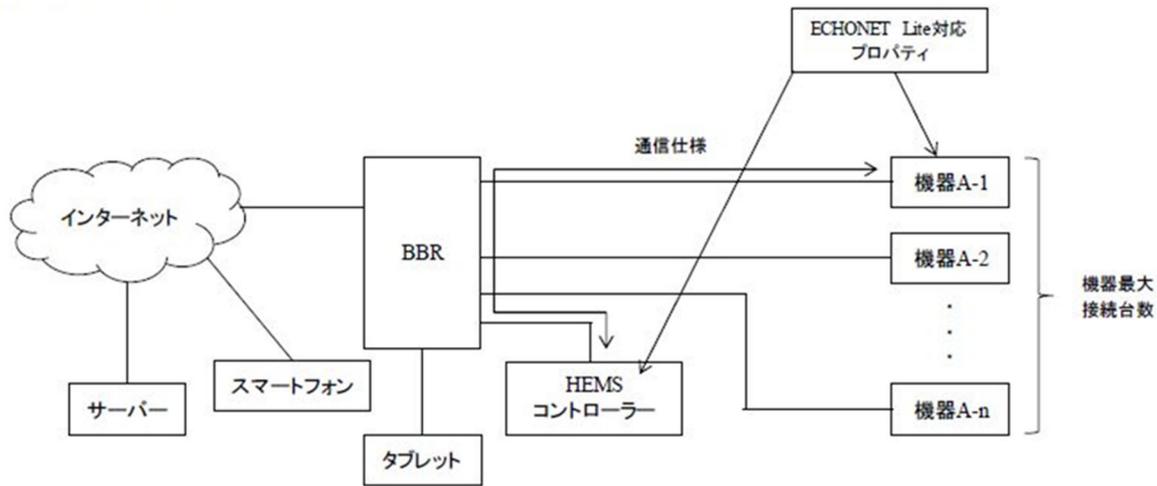


図 1-7 システム構成

しかし、図 1-8 に示すように、IoT 機器単体では規格通りに実装しロゴも取得しているにも関わらず、実際の市場の環境に持っていくと「なぜかつながらない」相互接続性の問題が数多く報告されている。

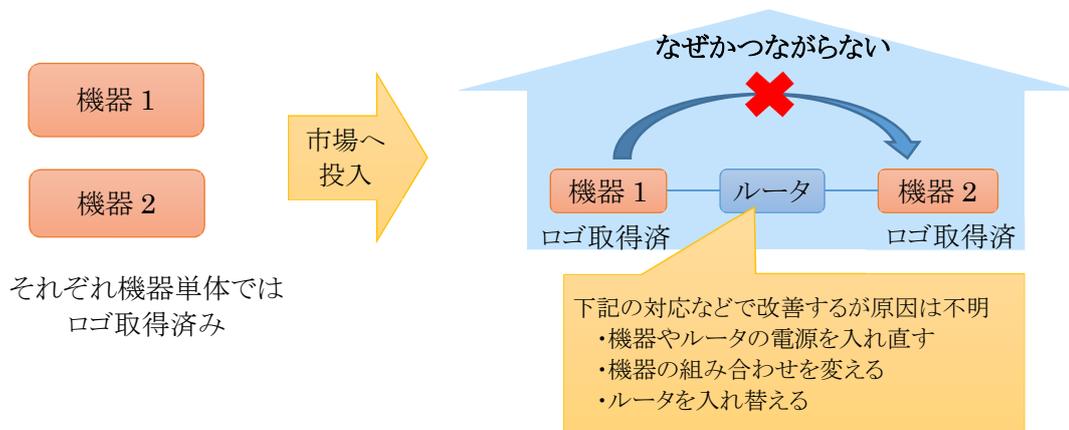


図 1-8 市場からの接続問題の報告例

パナソニック株式会社は、市場に製品を出荷する前にネットワーク機能の相互接続性を確保する取り組みを 2003 年から行っている。2007 年 2 月から 2017 年 6 月までの約 10 年間において、パナソニック製品累計 283 機種が発売前の接続検証で発見した相互接続性問題の合計件数は 5,612 件であった。

図 1-9 は、プロトコル別の機種あたりの問題数（プロトコルごとの総問題数を接続検証機種数で除した値）の割合を示したものである。

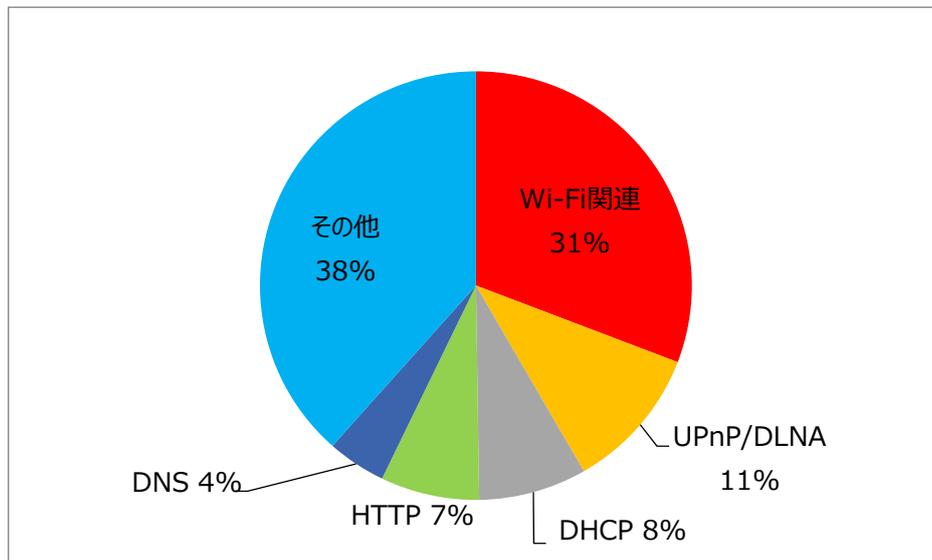


図 1-9 過去 10 年間の接続問題数の統計

この統計結果より、Wi-Fi や UPnP、DLNA などのロゴ認証を取得している製品が全体の 4 割以上を占めていることが判明した。また、既に多くの製品に搭載済みで長い年月をかけて仕様の不備などが改善され、枯れたプロトコルであるはずの DHCP[95]、HTTP[66]、DNS[67][68]などの標準規格でも、市場のルータやサーバとの接続性問題が多々発生し、それが全体の約 2 割を占めていることが判明した。

以上より、標準規格を仕様通りに実装しロゴ取得済みの製品でも、相互接続性問題を引き起こす要因を内包している可能性があり、システム全体としての問題発生要因を潰す取り組みが必要と考えられる。

1.3 研究の目的

市場において相互接続性問題が発生した場合、ユーザから見ると障害の原因の切り分けがつかず、問題を解決できない。その場合ユーザは、購入した IoT 機器メーカーにまず問合せを行うと思われるが、メーカーのカスタマ窓口では責任分界点を見きわめるためにルータや機器の電源を入れ直す対応

や、ルータを入れ替えるなどの対応をユーザに対して示唆し、現象が改善される場合には特に原因も特定しないまま対応完了となることが多い。また現象が改善しない場合にはルータメーカーへの問合せを促すこととなり、これらは企業としてユーザに対してとても不誠実な対応であると著者は考える。また根本原因が解決されずに問題発生を繰り返した場合、2度と機器やサービスを使ってもらえなくなる場合も多く、新しいIoT機器やサービスの利用機会損失につながるとも考える。

さらに相互接続性問題が市場クレームとして報告されると、サービス全体として推奨ルータの検討など、信頼性を維持するための工数増大が予想される。また、無線のチップセット（あるいはSoCなど）を買い入れて開発を行っている場合、下回りの通信部分（無線やミドルウェア）がブラックボックス化されているため簡単には自社で改修できない場合が多い。市場クレームに対応するためにはチップセットベンダーに改修を依頼しなければならず、開発コストが増大するため、結果的にIoT機器の高額化につながると予想される。いずれにおいてもIoT機器やサービス普及を阻害する要因となるため、製品の開発段階で解決手法を取り入れ市場での相互接続性問題の発生を未然に防ぐ取り組みが不可欠と考える。そこで、スマートホームにおけるIoT機器の相互接続性問題を解決するため、まず原因を可視化する取り組みを行った。

図 1-10はECHONET Lite対応機器およびルータのソフトウェア構成を示し相互接続性問題を可視化した図である。ECHONET Lite対応機器は、OSI参照モデルのLayer1～2の標準規格である無線LANや、Layer3のIP、Layer4のUDP、そしてLayer5～7の上位レイヤにECHONET Liteと各Layerに標準規格があり、それらが組み合わされて機器のソフトウェアが構成されている。そして各標準規格には、実装に自由度を持たせるために未定義部分やオプションなど意図して曖昧に規定された「未定義仕様」がある。これは規格単体としては個別最適されており問題があるわけではない。しかし異なる標準規格を組み合わせた場合にその自由度が災いして全体最適に問題が生じる場合があると考えられる。たとえば、状態遷移やタイムアウト値、パケットの再送回数、再送間隔などが規格では細かく定められない項目であるが、これは各メーカー/各開発者の解釈の違いにより実装仕様に差異が出る部分となる。この未定義仕様に関する実装仕様の差異が原因でルータとの下位レイヤの通信に問題が出ることにより、他機器との上位レイヤの相互接続性に問題が出ると著者は考えた。

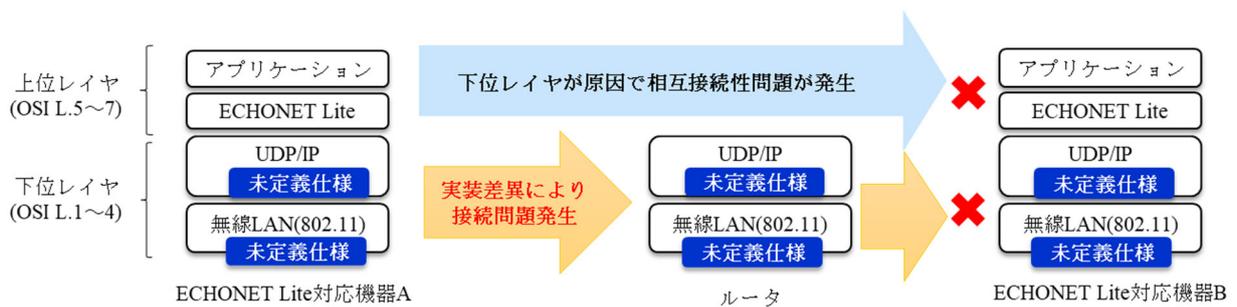


図 1-10 相互接続性問題の可視化

次に、下位レイヤで相互接続性問題が生じる原因を考察した。

まず、無線機器の開発スタイルに注目した。無線機器の開発スタイルには主に下記 2 つのパターンがあり、難しい無線特性のチューニング不要、無線ソフトウェア・評価ツールの開発不要、技適の取得が不要という 3 つのメリットから、近年では②のスタイルが一般的となっている [66]。

- ① 無線チップを搭載し、周辺回路を含めて自社で設計する手法
- ② 無線モジュールを部品として利用する方法

(無線モジュール：無線チップと周辺回路を小型基板に実装し、さらにソフトウェアまで搭載してメーカーから提供されている電子部品のこと)

たとえば図 1-11 を用いて説明すると、無線 LAN 対応の ECHONET Lite 対応機器を開発する場合、機器メーカーは下位レイヤにあたる無線モジュールを買い入れ、上位レイヤの ECHONET Lite のアプリケーションを開発する。買入れたモジュールはブラックボックスであり、モジュールメーカーによって実装仕様は異なる。機器メーカーは下位レイヤの相互接続性はモジュールメーカーで担保されていると考え、自社開発部分の上位レイヤの相互接続性確保の取り組みに注力する。上位レイヤの ECHONET Lite の規格では下位レイヤは規格範囲外であるため、結果的に機器全体での下位レイヤの接続性確認が不十分になり相互接続性問題が生じると考えた。

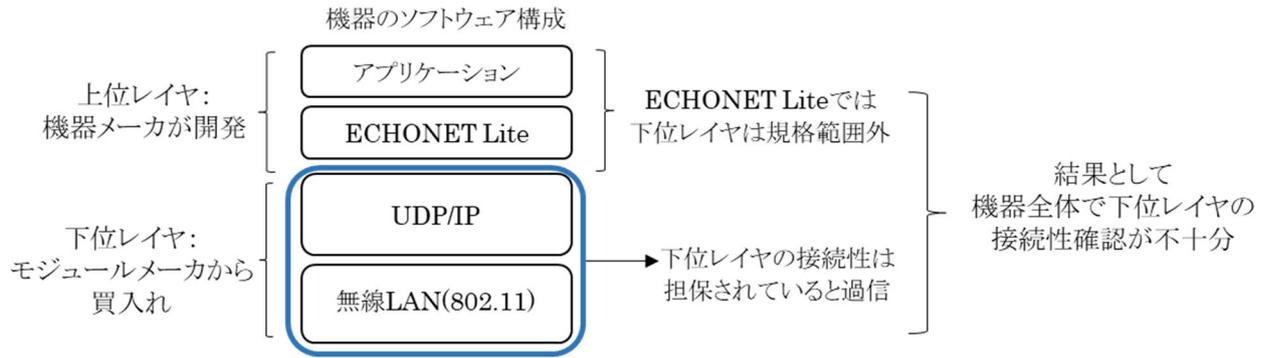


図 1-11 下位レイヤで相互接続性問題の生じる背景の考察

実際に、無線チップ/モジュールを変えたタイミングで下位レイヤの相互接続性問題が多く出る傾向があると統計から明らかとなっている。

図 1-12 は 2009 年に無線 LAN を初搭載したパナソニック製品における、無線 LAN に関する相互接続性問題数の推移である。無線 LAN 初搭載の開発時（2009 年）にもっとも多く問題が見つかり、その後は無線のチップ変更時（2011 年）や、新規に無線モジュールを買入れた際（2012 年）に問題が多く出ていることがわかる。

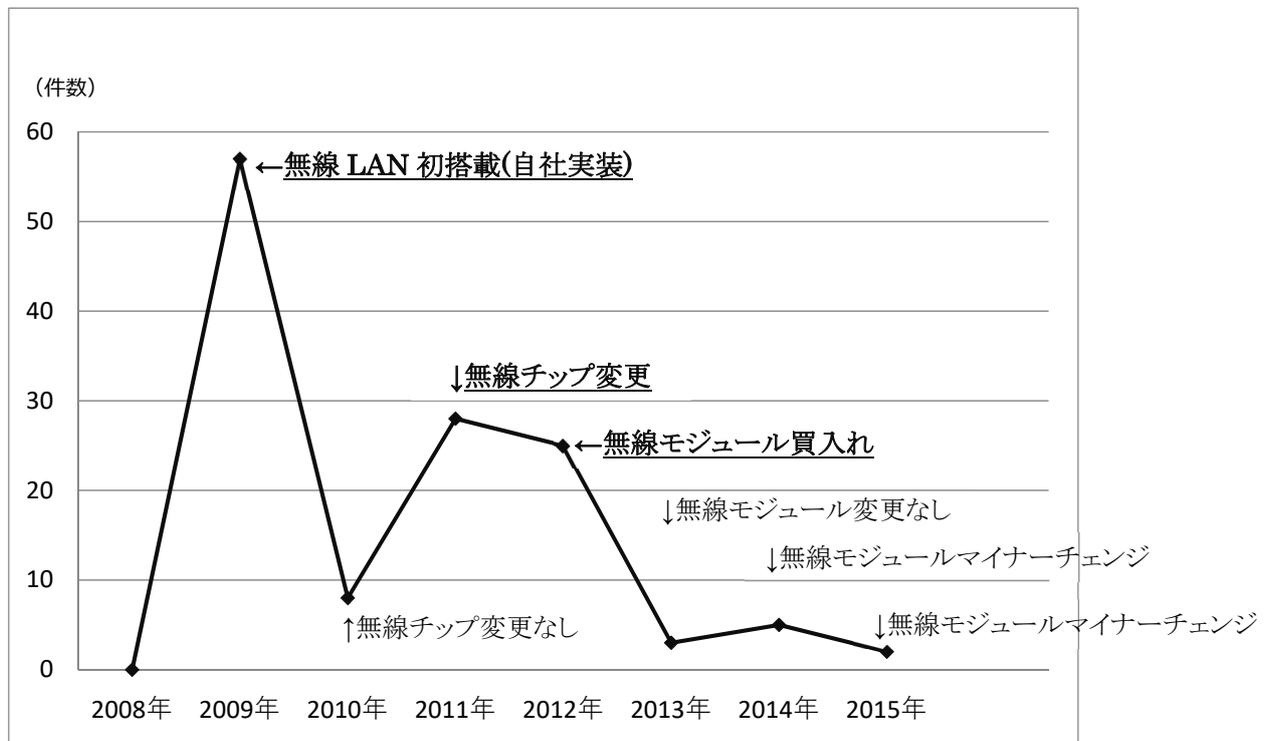


図 1-12 無線 LAN に関する相互接続性問題数の推移（パナソニックでの統計）

このような相互接続性問題がロゴ認証試験時に発見できない理由に関して考察する。要因としては、試験機関では定められたルータや中継機などのネットワーク機器を使用して試験環境が構成されており[70]，限られた条件下での相互接続性確認に留まることにあると考える。図 1-13 に上位標準規格のロゴ認証試験の確認範囲を示しているが，定められた試験構成を用いて下位レイヤは正常に通信できることを前提とした環境で行われるため，図 1-14 に示すように実市場の無数にあるネットワーク機器と接続した場合に，想定外の下位レイヤの相互接続性問題が発生する可能性は大いに考えられる。

そのため，実市場のスマートホームにおける多種多様なホームネットワーク構成において，接続元から接続先機器までの下位レイヤを含む相互接続性の確保が重要となることに着目した。そして，多種多様なホームネットワークの差異を吸収する解決手法を確立し，市場における相互接続性問題の発生未然防止を実現することが社会的貢献につながると考えた。

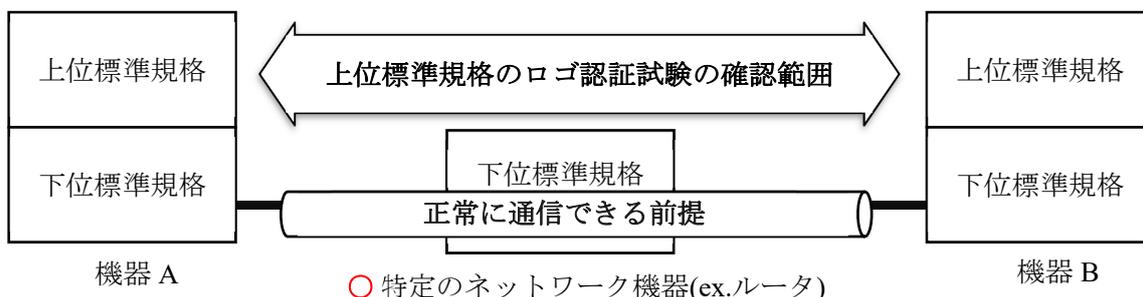


図 1-13 上位標準規格のロゴ認証試験の確認範囲



図 1-14 実市場の多種多様なホームネットワーク

1.4 研究の方針

下位レイヤを含む相互接続性問題の解決のためには、ネットワーク機器側の問題（ルータや中継機の実装不備）の改善が重要であるが、既に市場に存在するものや今後も出回るものがあるため、まずは IoT 機器側で対策可能な手法を考案し、それを機器側に実装した場合の効果を検証する。

本稿では「スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順」として「SHIPs (Smart Home Interconnectable Procedures)」を定義し、さまざまな相互接続性問題の発生要因の究明や市場における影響度を数値化し、相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化する。そして下位レイヤの問題を上位レイヤで吸収してスマートホーム全体の相互接続性を向上させる手法を考案する。その手法を上位レイヤの標準規格に入れ込み、機器開発者に下位レイヤを含む相互接続性問題の存在を認識させ、それを回避可能な実装に促すことで業界全体での IoT 機器の相互接続性向上を目指す。本研究を通じて、IoT 機器を購入したユーザーが相互接続性問題で困ることのない世界を目指し、IoT 機器やサービスの発展とともに Society 5.0 の実現に貢献する。

1.5 本論文の構成

以下、第 2 章では、本研究が対象とする技術、分野、構成を分類・整理し、本研究の対象範囲を明確化した。相互接続手順の第 1 段階である機器発見フェーズにおける「マルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題」を「CFM (Combination Failure in Multicast communication) 問題」と定義し、世の中に雑然と存在する相互接続性問題を分類し定式化した。さらに、相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化するための「スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順」である「SHIPs」を定義し、IoT 機器の相互接続性を定量的に判断するための汎用的な手順をまとめた。

第 3 章では、ECHONET Lite の CFM 問題に対して SHIPs を適用し、解決する取り組みをまとめた。具体的には、まず市場問題を解析・分類し、マルチキャスト通信を実現する標準規格 IGMP で規定されたルータの状態遷移をもとに CFM 問題の発生要因を網羅的に整理した。そして市場シェア上位 150 機種（計 81.6%、累計販売台数 1,351 万台相当）のルータを選定および整備、調査項

目と調査方法を策定，それに基づき調査を行った．その結果 ECHONET Lite のマルチキャスト通信を阻害するルータの IGMP 実装仕様を明確化した．CFM 問題の主な原因は，ルータが機器の存在確認無しにマルチキャスト管理テーブルからエントリ（転送ルール）を削除することであり，この管理テーブルの実装差異が CFM 問題を引き起こす未定義仕様であることを究明した．そしてエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを解明した．この知見から，既存市場にスムーズに適用できるよう，機器から 120 秒間隔で ECHONET Lite のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージの定期送信によりルータの管理テーブルを確実に維持できる「ルータの実装仕様起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法 [手法 1]」を考案した．その結果，不具合を持つルータ 1 台を除いた評価対象全 149 機種(市場シェア 81.55%)のルータにおける ECHONET Lite 機器の相互接続性を向上させた．

第 4 章では，UPnP/DLNA の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みをまとめた．具体的には，ECHONET Lite と同様にルータの IGMP 実装仕様の差異により CFM 問題が生じると考えた．ECHONET Lite と UPnP/DLNA ではマルチキャストグループが異なるため，ルータの実装仕様は異なる可能性がある．そのため市場シェア上位 150 機種（計 81.6%，累計販売台数 1,351 万台相当）のルータの実装仕様を調査し，ECHONET Lite と UPnP/DLNA で CFM 問題を引き起こすルータの実装仕様に差異があることを明確化した．また ECHONET Lite の提案手法を応用し，機器から 120 秒間隔で UPnP/DLNA のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージを定期送信する「ルータの実装仕様起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法 [手法 2]」によりルータの管理テーブルを確実に維持できることを確認した．その結果，評価対象全 150 機種(市場シェア 81.57%)のルータにおける UPnP/DLNA 機器の相互接続性を向上させた．また市場シェアの推移を調査した結果，2019 年 6 月時点で CFM 問題が存在するルータが約 17.82%（約 235 万台相当）存在していることが判明した．このことにより第 3 章および第 4 章における提案手法を端末に適用することの意義を示すことができた．

第 5 章では，近年シェアが増加傾向である中継機がスマートホームに設置された場合に発生する，中継機配下の IoT 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みをまとめた．具体的には，市場シェア上位 90 機種（計 79.1%，累計販売台数 1,202 万台相当）のルータのうち，中継機

能を有する 57 機種（シェア合計 53.9%，累計販売台数 710 万台相当）の調査により，IEEE 802.11i における GTK の仕様が曖昧であるため中継機の実装仕様に差異が出るのが CFM 問題を生じていることを明確化した．そして未定義仕様である中継機の管理テーブルの有効期限が切れた後に端末が無線再接続をすると中継機が GTK 更新すること，また未定義仕様である GTK 更新通知を中継機が行わないことが，機器間の GTK 不一致を発生させ CFM 問題を引き起こすことを究明した．既存市場にスムーズに適用できるよう，ホームネットワークには必ず存在するルータに対して，ルータが必ず搭載している DHCP を利用して定期的に GTK で暗号化されたパケットを受信できる仕組みを検討，その復号可否により機器単体で中継機の GTK 更新を検知可能とする「中継機の実装仕様に起因する IoT 機器の相互接続性向上手法 [手法 3]」を考案した．その結果，市場シェア約 6.1%（販売累計台数 91 万台相当）の中継機における CFM 問題を解決できた．

第 6 章では，本論文の結果として，CFM 問題に SHIPs を適用して考案した 3 つの解決手法により，市場において相互接続性向上効果がえられることを整理した．具体的にはこれらの考案手法を特許出願（2 件）し，パナソニックの製品 150 万台に搭載，市場問題の未然防止に貢献した．またこれらの手法をエコーネットコンソーシアムに提案し，ECHONET Lite の規格書へ採択され，コンソーシアム会員約 250 社が活用可能となり，約 3,300 万台の市場機器の相互接続性向上へ貢献した．今後の展開として，SHIPs を適用して相互接続性問題を解決していく取り組みを，スマートホームのインフラ技術の一つとして展開していく観点で全体のまとめを提示した．

第2章 CFM 問題の定式化と SHIPs の提案

第2章では、本研究が対象とする技術、分野、構成を分類・整理し、本研究の範囲を明確化する。多数報告されている市場問題のなかでも、相互接続手順の第1段階である機器発見フェーズにおける下位レイヤを含む相互接続性問題が重要であることに着目した。機器発見のためにマルチキャスト通信を利用するが、この「マルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題」を「CFM 問題」と定義し、世の中に雑然と存在する相互接続性問題を分類して定式化した。さらに、相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化するため「スマートホームにおけるIoT機器の相互接続性向上手順」である「SHIPs」を定義した。この手順によって、相互接続性問題の発生要因の究明や、相互接続性問題の市場における影響度を数値化でき、スマートホームにおけるIoT機器の相互接続性を定量的に判断可能とした。

2.1 CFM 問題の定式化

ホームネットワーク上で機器同士が連携するための相互接続手順を示したのが図 2-1 である。ホームネットワークにおける代表的な相互接続プロトコルに黒物家電向けの UPnP/DLNA と白物家電向けの ECHONET Lite (以降 ENL とも表記する) があるが、いずれもまず「機器発見フェーズ」で通信技術としてマルチキャスト通信を用いて機器発見を行う。ネットワークに接続されたばかりのコントローラは、そのネットワーク上にどのような機器が存在するかを把握できていない。そこでコントローラがネットワーク上の機器を検索するための機器検索要求パケットをマルチキャスト通信で送信し、それを受信した機器から機器検索応答を返信してもらうことにより、コントローラが機器を発見可能となる。その後「情報取得フェーズ」で発見した機器から情報を取得し、「コントロールフェーズ」で機器に対する操作を行う。ここでマルチキャスト通信とは、1つのパケットを特定グループの複数端末宛に同時送信可能な通信方式であり、送信元端末から送出したパケットは、

ルータで複製され転送されることで複数の受信端末に届く。マルチキャスト通信の宛先アドレスは、マルチキャストグループアドレスを用いる。ゆえに図 2-2 に示すように、コントローラ（端末 0）は、グループ A のマルチキャストアドレス宛に機器検索要求を送信すれば、ルータがそれをグループ A に属する機器（端末 1，端末 2）のインタフェースに転送して応答を受信できるようになるため、コントローラが機器の存在（アドレス情報）を知らなくてもネットワーク上の機器を発見することができるという仕組みとなっている。

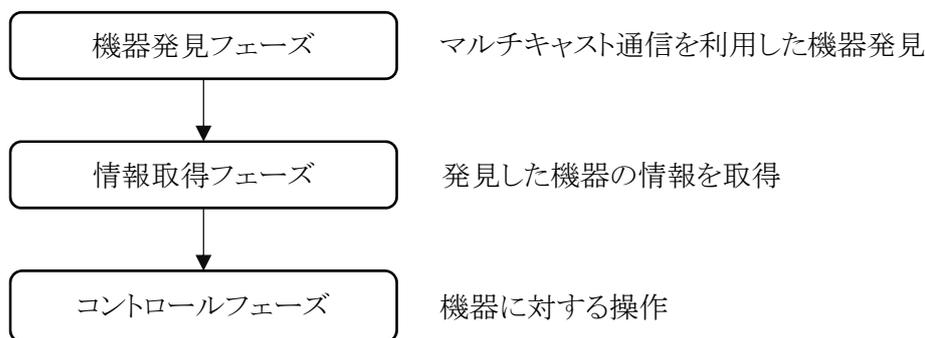


図 2-1 相互接続手順

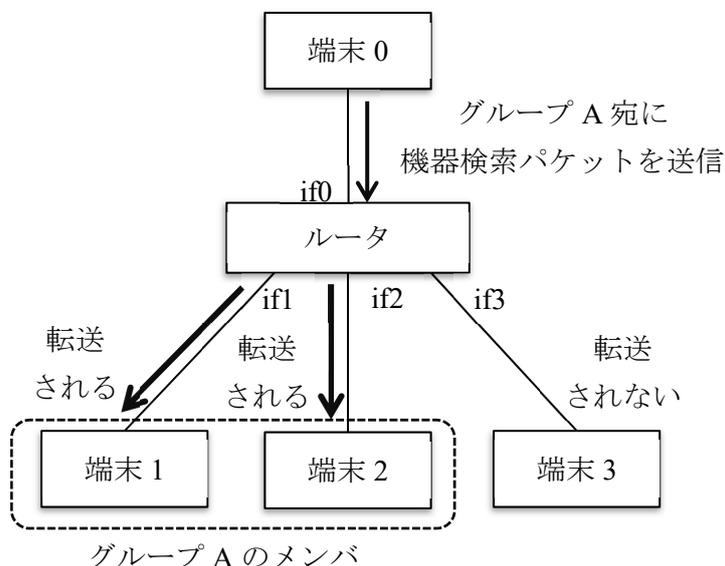


図 2-2 マルチキャストを利用した機器発見

図 2-3 は、2007 年 2 月から 2017 年 6 月までの約 10 年間における相互接続性問題の統計において、相互接続プロトコルの各フェーズの内訳を示したものである。このうち、機器発見フェーズに

関するものは 24%，情報取得フェーズに関するものが 5%，コントロールフェーズ（一覧表示，動画再生，静止画再生，音楽再生など）に関するものが 64%であった。なお，この統計は各フェーズの問題発生数の傾向を見るためのものであり，市場問題の内訳をあらわすものではない。

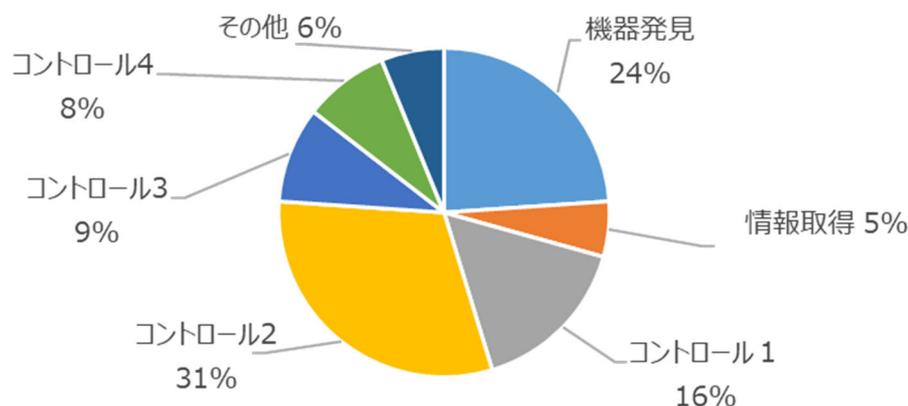


図 2-3 相互接続プロトコルの相互接続性問題の内訳 (パナソニックでの統計)

表 2-1 相互接続手順の各フェーズで利用する技術

相互接続手順	相互接続技術	
	UPnP/DLNA	ECHONET Lite (ENL)
① 機器発見フェーズ	マルチキャスト(UDP)	マルチキャスト(UDP)
② 情報取得フェーズ	HTTP GET 要求(TCP)	Get コマンド(UDP)
③ コントロールフェーズ	HTTP POST 要求(TCP)	SetI/SetC コマンド(UDP)

共通

情報取得フェーズ，コントロールフェーズは基本的に各プロトコル／各サービスで規定が異なる。表 2-1 に示すように，たとえば UPnP/DLNA の情報取得フェーズでは TCP 上で HTTP GET 要求，コントロールフェーズでは TCP 上で HTTP POST 要求を使用するが，ECHONET Lite は UDP 上で独自規定の Get コマンド，SetI/SetC コマンドを使用する。一方，機器発見フェーズは，どの相互接続プロトコルも共通してマルチキャスト通信の枠組みを用いる。加えて機器発見フェーズは，相互接続手順の第 1 ステップで，IoT サービスを実現するための最重要ステップである。これらを鑑みて，多数報告されている市場問題のなかでも，まずはマルチキャスト通信を阻害する相互接続

性問題の研究に最優先で取り組むことにし、複数の相互接続プロトコル共通でえられる効果を高めることとした。なお、この「マルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題」を、ルータや中継機などのネットワーク機器や IoT 機器の組合せによる不具合の問題という意味で「CFM(Combination Failure in Multicast communication) 問題」と定義した。すなわち本研究においては、図 2-4 に示すように、スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順 (SHIPs) で解決すべき範囲のうち、機器発見フェーズの CFM 問題の解決から着手した。

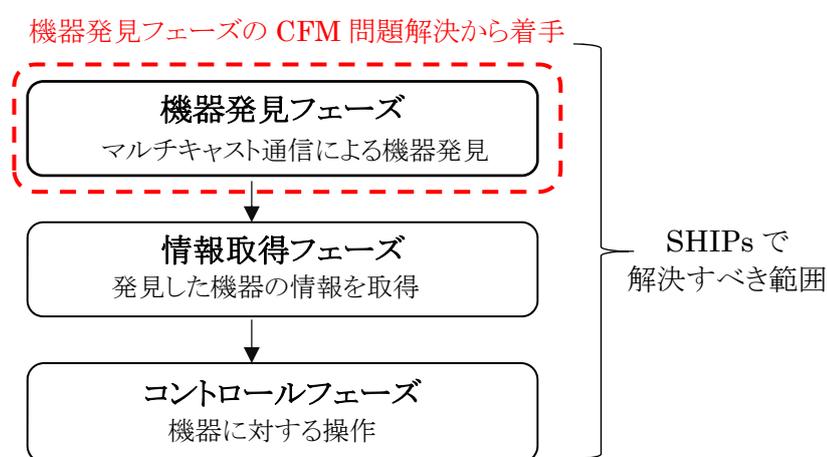


図 2-4 本研究の対象

2.2 研究対象の構成

本研究においては、ネットワーク化が先行している AV 機器 (UPnP/DLNA 対応機器) に加えて、近年ネットワーク化が進む白物・設備機器 (ECHONET Lite 機器) を研究対象とする。UPnP/DLNA 対象機器は、ECHONET Lite 対象の白物・設備機器と比べて、ネットワーク化が 10 年以上先行している。加えて DLNA は既に規格策定の段階を終えており、現在はロゴ認証制度のみ継続して行われている状態である[71]。そのため AV 機器と比べてネットワーク化の普及が始まって日が浅く現在も規格策定が活発に行われている白物・設備機器の方が効果は大きいと判断し、先行的に研究を実施した。

また、本研究の対象とするホームネットワークは IP ネットワークを前提としている。そのため伝

送メディアの観点では、有線では Ethernet (IEEE 802.3)、無線では Wi-Fi (IEEE 802.11 シリーズ) が本研究の対象である。Bluetooth (IEEE 802.15.1[72]) や ZigBee (IEEE 802.15.4[73]) などの近距離無線ネットワークはルータ配下の IP ネットワークに通常接続しないため対象外とする。

ホームネットワークの構成はルータや中継機の設置の組み合わせによってさまざまであるが、本論文では、マルチキャスト通信に着目するため、図 2-5 に示すようなマルチキャスト通信の到達範囲であるシングルセグメント (ルータ配下の単一の IP ネットワーク) を対象とし、図 2-6 に示すルータが 2 つ以上多段に配置されたマルチセグメントはシングルセグメントの研究結果を応用可能と考え対象外とする。

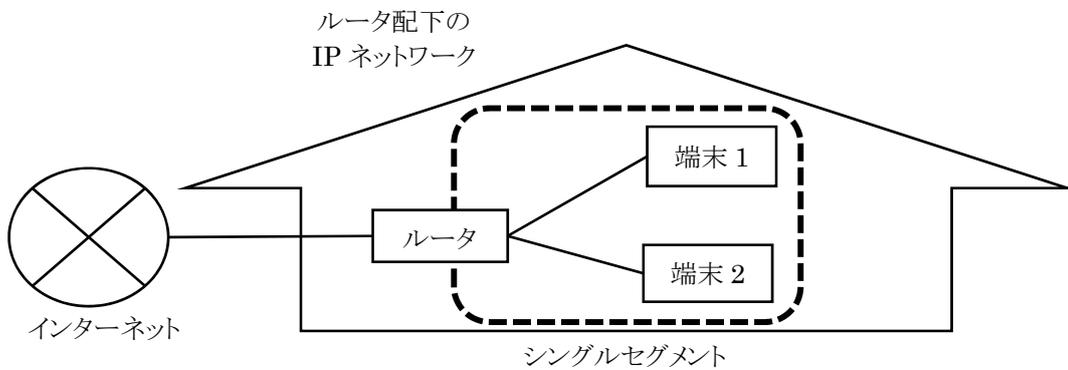


図 2-5 ルータ 1 台構成 (シングルセグメント) 【研究対象】

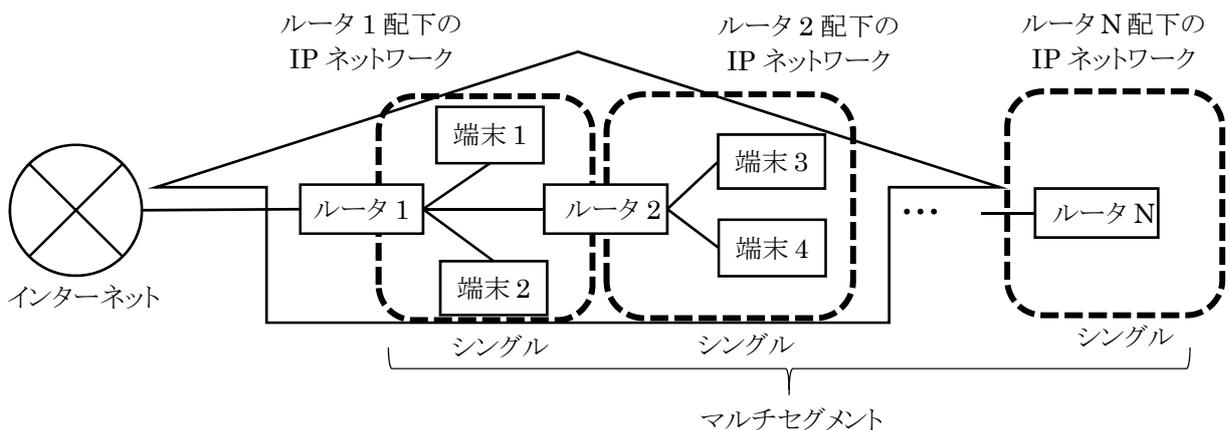


図 2-6 ルータ多段構成 (マルチセグメント) 【研究対象外】

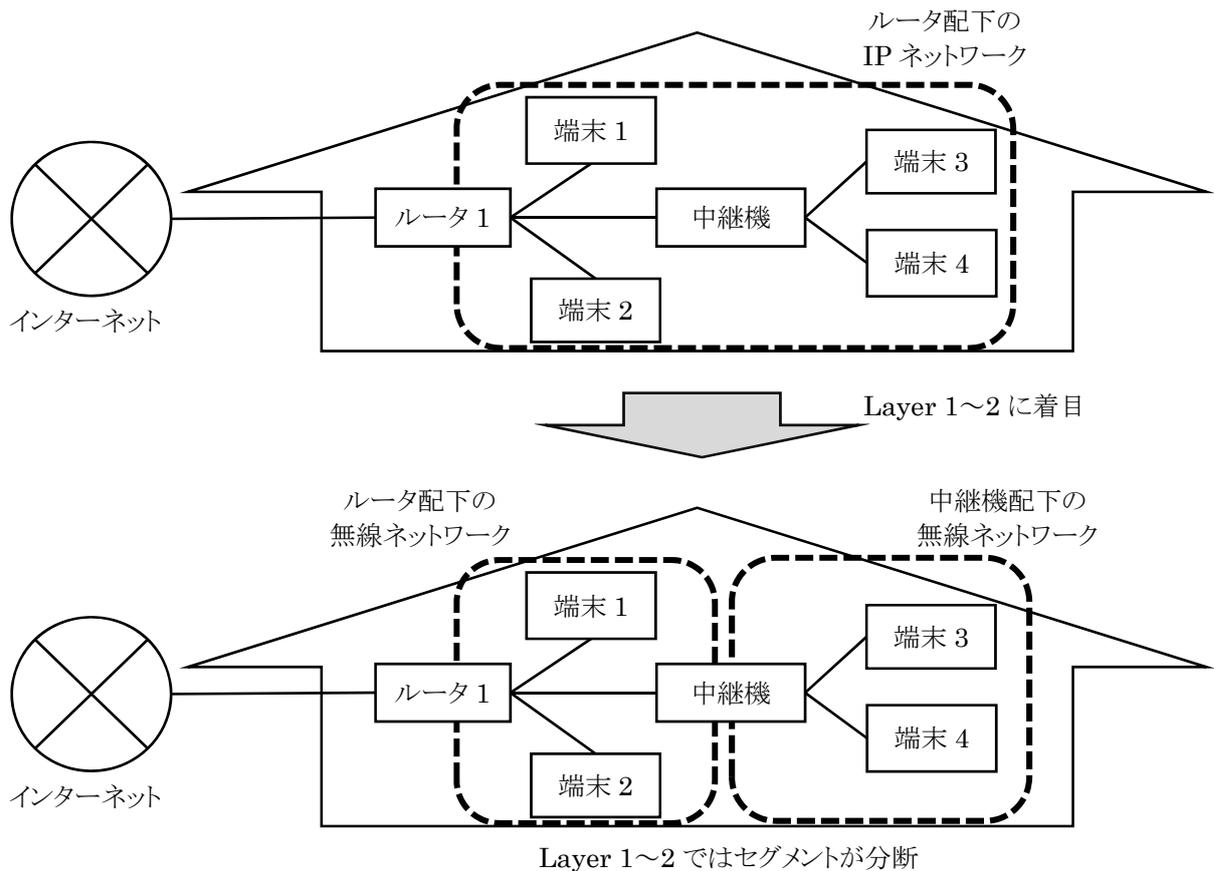


図 2-7 ルータ+中継機 1 台構成 (シングルセグメント) 【研究対象】

また、図 2-7 に示すような、ルータ配下に中継機が設置される場合も IP レイヤで見るとシングルセグメントとなるが、下位の Layer 1~2 レベルで見た場合、ルータ配下と中継機配下でセグメントが分断される。そのため、図 2-5 とは異なる CFM 問題がホームネットワーク上に潜む可能性があるため研究対象とする。なお、ルータ配下に中継機が 2 台以上設置される場合もあるが、これはルータ+中継機 1 台構成の研究結果を応用可能と考え対象外とする。

以上より明確化した本研究の範囲を図 2-8 に示す。具体的には、まずシングルセグメントのルータ 1 台構成において、白物家電向けの ECHONET Lite の CFM 問題に関する研究、次に黒物家電向けの UPnP/DLNA の CFM 問題に関する研究を行う。その後シングルセグメントのルータ+中継機 1 台の構成における CFM 問題に関する研究を行う。

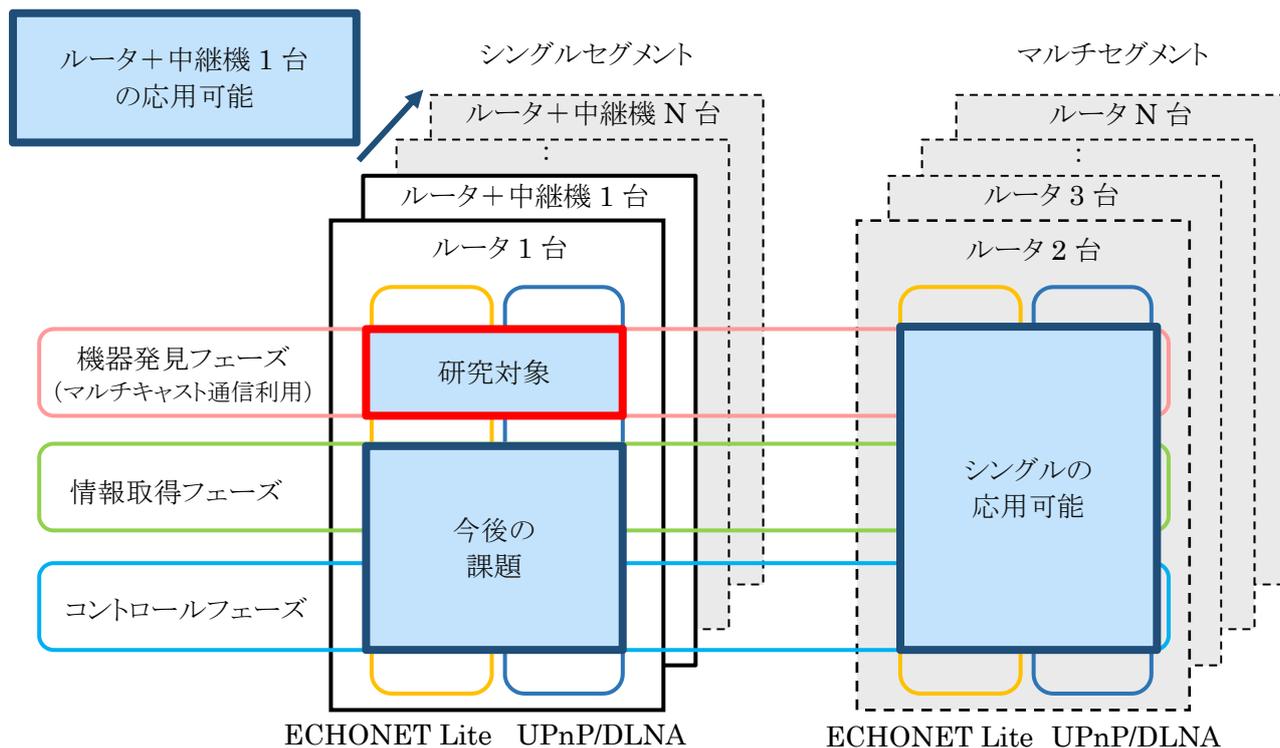


図 2-8 本研究の範囲

2.3 SHIPs の提案

相互接続性問題を引き起こす未定義仕様の明確化，および相互接続性問題の市場における影響度を数値化し，スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性を定量的に判断可能とするための「スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順」である「SHIPs」を下記のように定義した。

【SHIPs の定義】

- 手順 1. 相互接続性問題の解析と課題の設定
- 手順 2. 市場シェア集計
- 手順 3. 調査対象ルータの選定と整備
- 手順 4. 調査項目と調査方法の策定
- 手順 5. ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化

手順 1 においては、相互接続性問題を解析し、解決すべき課題を設定する。

手順 2 においては、相互接続性問題の市場における影響度を数値化するための指標として用いる家庭用ルータの市場シェアを、累計販売台数をベースに集計する。

たとえばパナソニック株式会社では、GfK による POS トラッキング調査結果[74]を利用して、個々のルータの販売台数を入手し、累計販売台数を計算する。また全ルータの累計販売台数を求め、下記算出式により対象ルータの市場シェアを求める。

$$\text{対象ルータの市場シェア(\%)} = \frac{\text{対象ルータの販売累計台数}}{\text{全ルータの販売累計台数}}$$

パナソニック株式会社においては上記の市場シェアの集計を 3 ヶ月に 1 回行い、常に最新の市場シェアを把握可能としている。

手順 3 においては、まず IoT 機器メーカーとしてどの程度の相互接続性を保証するかをあらわすため、目標とする市場カバー率（シェア合計）を決定する。次に上位ランクのルータからシェアを合計し目標のカバー率に達したランクまでのルータを調査対象として選定する。そして調査対象のルータをすべて整備する。ここで目標とする市場カバー率は、商品仕様やターゲットユーザ、ユースケースなどにより考え方が異なるため一律の値を定めない。

たとえばパナソニック株式会社では、2020 年 8 月時点で約 98%の市場シェアカバー率に相当する日本国内向けルータを 752 機種整備した（2015 年 1 月から 2020 年 8 月の期間の販売累計台数 1,219 万台相当）。3 ヶ月ごとのシェア集計時に新しくランキングが上位となったルータや新しく発売されたルータなどを購入し、常に最新の市場を再現できる環境を整備している。本研究においては上位ランクのものから約 80%にあたるルータを調査対象として選定した。

手順 4 においては、課題に応じて調査すべき項目および調査方法を策定する。

手順 5 においては、手順 4 にて定めた調査項目および調査方法に沿って、手順 3 で整備した調査対象ルータすべての実装仕様調査を行う。調査結果より、相互接続性問題の市場における影響度を数値化し、また課題を引き起こす未定義仕様（状態遷移、パラメータなど）を明確化する。

SHIPsにより相互接続性問題の市場における影響度を数値化できることのメリットとしては、費用対効果を求められる企業活動において、限られた開発費の中でもっとも効果の高い対応をするために市場影響度の高い課題に取り組み、影響度が低い課題は割り切るなどの判断が可能となることであると著者は考える。

なお、本手順はルータの調査を行うことを前提に記載しているが、特にルータだけに限らず中継機を対象としてもよいし、スマートフォンやタブレット、IoT 機器など、実装仕様を調査したいターゲットを柔軟に設定可能である。すなわち、SHIPs はさまざまな分野の技術（機器、サービス）に適用可能であり、SHIPs をさまざまな分野の相互接続性問題の解決に応用し展開していくことを提案する。

本研究では、図 2-9 に示すように 3 つの CFM 問題に対して SHIPs を適用し、課題を引き起こす未定義仕様を明確化し、解決手法考案の取り組みを行った。以降、第 3 章から第 5 章において、これらの取り組みに関して詳細を説明する。



図 2-9 CFM 問題への SHIPs の適用

第3章 ECHONET Lite 機器の CFM 問題への SHIPs の適用と解決

第 3 章では、ECHONET Lite の CFM 問題に対して SHIPs を適用して CFM 問題を解決し、ECHONET Lite 機器の相互接続性を向上させる取り組みをまとめた。具体的には、まず市場問題を解析・分類し、標準規格で規定されたルータの状態遷移をもとに CFM 問題の発生要因を網羅的に整理した。そして、異なるインタフェース間でマルチキャスト通信不能となること、およびルータの管理テーブルを維持できずマルチキャストパケット転送不能となることを課題と置いた。これはマルチキャスト通信を実現する標準規格 IGMP の規格の曖昧さによりルータの IGMP 実装仕様に差異が出ているためであり、課題解決のためには市場のルータの実装仕様の調査が必要と考え、市場シェア上位 150 機種（計 81.6%、累計販売台数 1,351 万台相当）のルータの実装仕様を明確化し、それによる CFM 問題の影響度を数値化した。また、課題の主な原因として、ルータが機器の存在確認無しに管理テーブルからエントリ（転送ルール）を削除すること、未定義仕様であるエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを解明した。そして課題を解決する「ルータの実装仕様に起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法」を考案した。詳細な説明については、次節以降に記載する。なお、本章の内容は著者論文[75]に該当する。

3.1 はじめに

ECHONET Lite では、機器発見や状態通知の用途でマルチキャスト通信を行うことを規定している。IPv4 でマルチキャスト通信のグループ管理を行うための標準規格として、IETF (Internet Engineering Task Force) [76]が RFC (Request for Comments) として公開している IGMP (Internet Group Management Protocol)[77][78][79]があるが、IGMP 機能の実装方法については ECHONET Lite の規格の範囲外であるため、開発者の IGMP に関する規格解釈の違いにより、端末ごとに IGMP

の動作に違いが生じることがある。

また、ホームネットワークを構成する上で中心となる構成要素に家庭用ルータがある。インターネットサービスプロバイダから提供されるもの、ユーザが量販店などで独自に購入するものなど、各家庭で使用されるルータは多種多様である。ホームネットワークで送受信されるマルチキャストパケットは通常家庭用ルータを経由するが、家庭用ルータの中にも IGMP の実装仕様の違いがあるため、端末と家庭用ルータの組み合わせによって CFM 問題が発生し相互接続ができない場合がある。そのため ECHONET Lite 規格準拠にも関わらず HEMS サービスが利用できない場合がある。この課題が市場で発生すると HEMS 普及を阻害する要因となるため、製品の開発段階で解決手法を取り入れ市場での課題発生を未然に防ぐ取り組みが不可欠である。市場で販売されている家庭用ルータや、ISP (Internet Service Provider) から提供されるルータをある程度網羅的に調査し、相互接続性問題の発生要因を特定する必要がある。

以下、ECHONET Lite 規格の相互接続性を阻害する家庭用ルータの IGMP に関する実装状況を調査し、端末側の実装で相互接続性を向上させる手法の提案を行うとともに提案手法の評価と考察を述べる。

3.2 CFM 問題の解析と課題

まず、SHIPs の「手順 1. 相互接続性問題の解析と課題の設定」を行う。

表 3-1 は ECHONET Lite の CFM 問題の一部を示したものであるが、さまざまなメーカーの多数の型番のルータで無数に発生している。

表 3-1 CFM 問題の例

No.	CFM 問題の概要
1	T 社製 xxx のルータで、無線 2.4GHz のコントローラから有線 LAN のデバイスを発見できない
2	B 社製 xxx のルータで、無線 5GHz のコントローラで発見できていた無線 2.4GHz のデバイスが 5 分後に消える
3	I 社製 xxx のルータで、無線 5GHz のコントローラから無線 2.4GHz のデバイスを発見できない
4	L 社製 xxx のルータで、無線 5GHz のコントローラから無線 2.4GHz のデバイスを発見できない
5	I 社製 xxx のルータで、無線 5GHz のコントローラで発見できていた無線 2.4GHz のデバイスが 4 分後に消える
:	:

これらを個別に対応することは非常に非効率であるため、SHIPs を適用して CFM 問題の要因を解析し、効率よく解決策を講じることが必要である。CFM 問題を解析したところ、たとえば No.1, 3, 4 のような「異なるインタフェース上の機器を発見できない問題 (CFM 問題の分類 1)」と No.2, 5 のような「発見していた機器が消える問題 (CFM 問題の分類 2)」の 2 つに分類できると推測した。以降、マルチキャストを実現するための標準規格に焦点を当ててこれらの CFM 問題の発生要因を探り、課題を設定する。

3.2.1 マルチキャスト通信の仕組みと課題

2.1 節でも述べたとおり、機器発見ではマルチキャスト通信を利用して 1 つの機器検索要求を特定グループの複数端末宛に同時送信する。図 3-1 はマルチキャストを利用した ECHONET Lite の機器発見を示したものであるが、マルチキャスト通信の宛先アドレスは、ECHONET Lite のマルチキャストグループアドレス 224.0.23.0 を用いる。コントローラから ECHONET Lite のマルチキャストアドレス宛に機器検索要求を 1 つ送信すると、ルータがそれを複製し、ECHONET Lite グループに属するデバイスが存在するインタフェースに転送する。それに対してデバイスが機器検索応答を返すことで、コントローラがネットワーク上の ECHONET Lite デバイスを発見することができる。

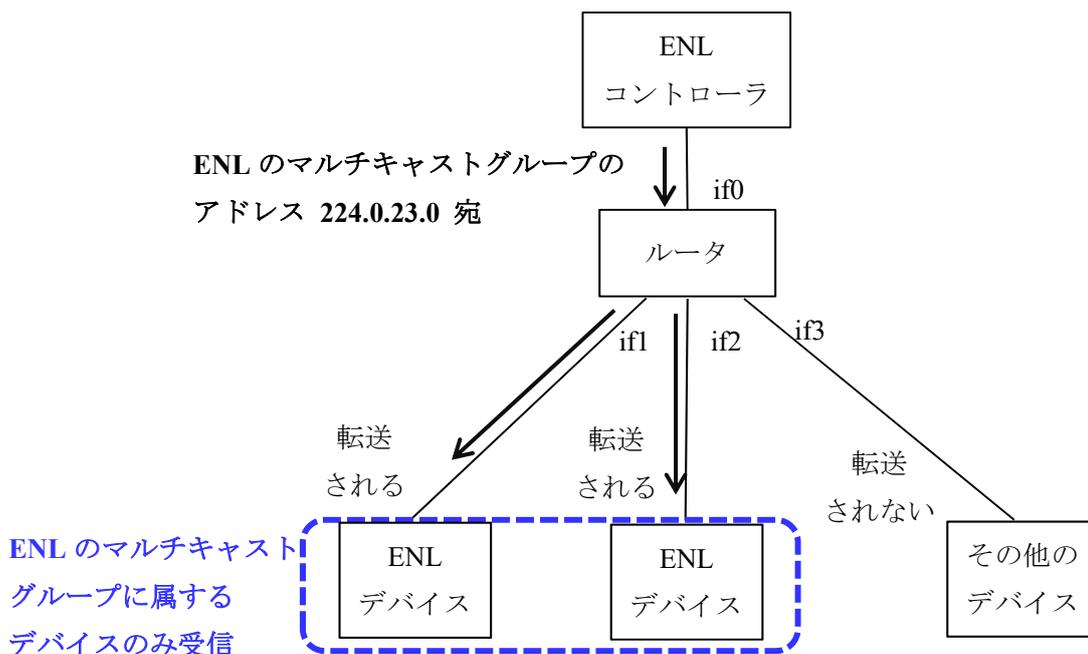


図 3-1 マルチキャストを利用した ECHONET Lite の機器発見

3.2.2 IGMP の仕組み

IPv4 でマルチキャスト通信のグループ管理を行うための標準規格である IGMP には v1/v2/v3 の 3 つバージョンがあり，上位のバージョンは下位バージョンに対し互換性を持つ．市販されている家庭用ルータでは v1 のみサポートするものは無く，v2 あるいは v3 がサポートされている．

IGMP に対応したホストがマルチキャストグループへの参加・離脱を報告し，ルータはそれを認識してマルチキャストパケットの中継・遮断を行う．IGMP によるマルチキャストグループ管理の基本的な概念を以下に説明する．

(1) グループへの参加

図 3-2 を用いて端末がグループへ参加する際のメカニズムを説明する．マルチキャストグループへ参加する際に，端末がルータに対して Membership Report (Join メッセージ) を送信する．ルータは Join メッセージを受信すると，受け取ったインタフェース上にメンバがいることを認識して該当グループのパケットを転送可能にする．このときルータは「マルチキャストグループ」と「インタフェース」を対にしたエントリ (転送ルール) をマルチキャスト管理テーブルに追加する．

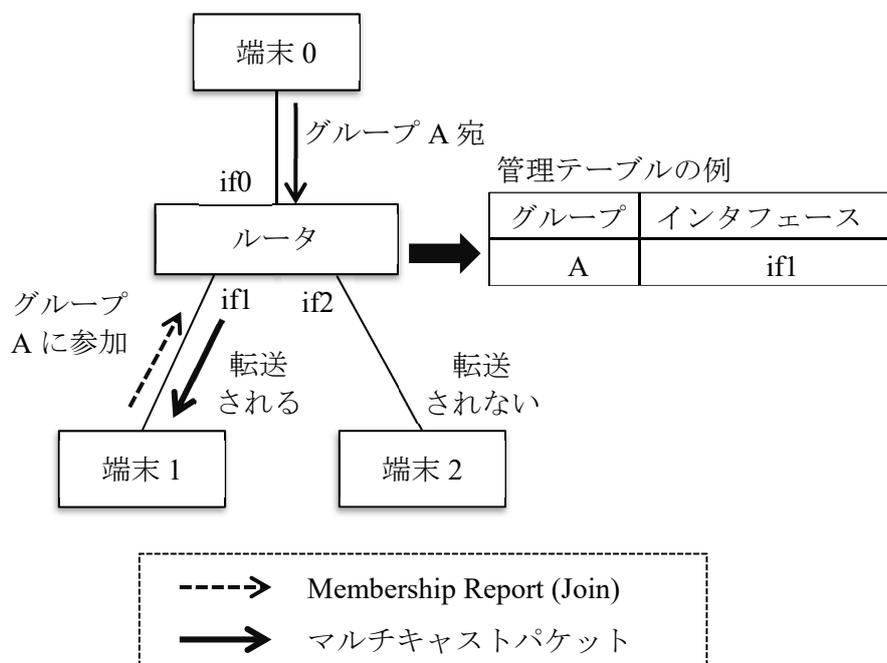


図 3-2 グループへの参加

(2) グループの維持

図 3-3 を用いてルータがグループを維持する際のメカニズムを説明する。ルータは定期的に Membership Query (Query メッセージ) を送信してグループの参加状況を把握し、グループの維持を行う。ここで、Query メッセージを定期的に送信するルータのことを Querier と呼ぶ。Query に対して Membership Report (Join メッセージ) の応答がない場合には、(1)で作成したマルチキャスト管理テーブルに登録された該当エントリを削除する。

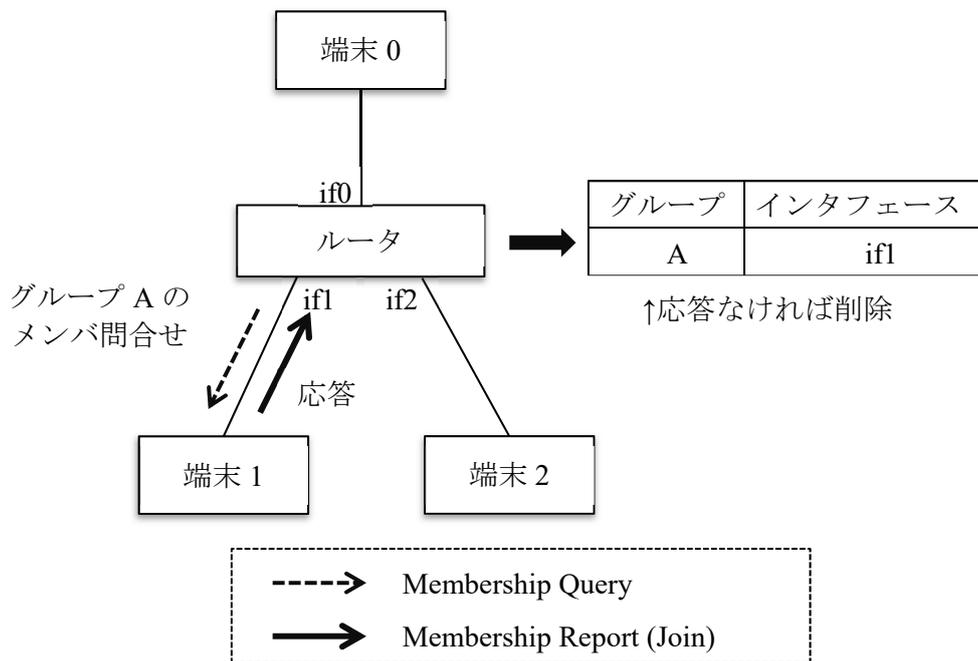


図 3-3 グループの維持

(3) グループからの離脱

図 3-4 を用いて端末がグループから離脱する際のメカニズムを説明する。マルチキャストグループからの離脱の際に、端末がルータに対して Leave Group (Leave メッセージ) を送信する。ルータは Leave メッセージを受信すると、Query メッセージを送信して他にグループのメンバがないことを確認し、マルチキャスト管理テーブルから該当エントリを削除する。そして、以降そのインタフェースに対してマルチキャストパケットの転送を行わない。

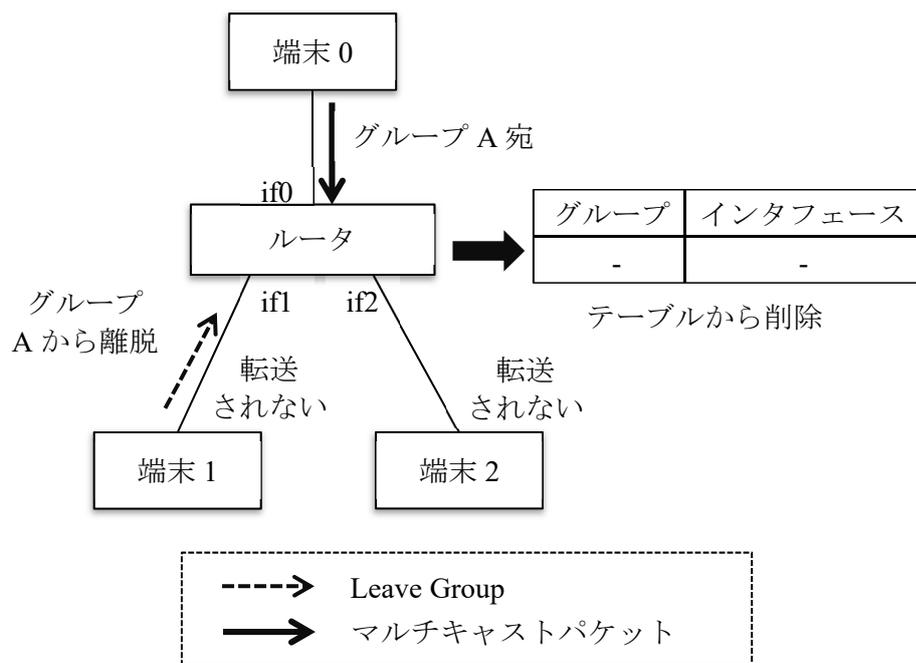


図 3-4 グループの離脱

3.2.3 課題の設定

IGMP v2[78]において規定されたルータの状態遷移図をもとに作成した状態遷移表を表 3-2 に示す。このルータの状態遷移表をもとに課題を設定する。

表 3-2 よりルータがとりうる状態はマルチキャストパケットを転送しない①の状態と、マルチキャストパケットを転送する②および③の状態の合計 3 つあり、5 つのイベント発生によって【M1】～【M7】の 7 つの動作を行い、各状態を遷移する。このうち CFM 問題が発生しうるのはマルチキャストパケットを転送しない状態①であり、状態①になる条件である「【M1】で②に遷移しないパターン」、「【M5】で①に遷移するパターン」、「【M7】で①に遷移するパターン」の 3 つ（表中の太枠）が CFM 問題の発生要因、すなわち課題であると考えた。

まず「【M1】で②に遷移しないパターン」は、端末が Join を送信せずルータの管理テーブルにエントリを作成しないために異なるインタフェースにマルチキャストパケットが転送されない問題を引き起こす。つまり、これが CFM 問題の分類 1 の発生要因であると考えた。ゆえに「異なるインタフェース間でマルチキャストパケット転送に失敗する」ことを課題 1 と置いた。

次に「【M5】で①に遷移するパターン」、「【M7】で①に遷移するパターン」の 2 つは、元々管理テーブルにエントリがある状態②において、そのエントリの有効期限のタイマがタイムアウトして

エントリが削除され、①の状態に遷移するためマルチキャストパケットが転送されなくなる問題を引き起こす。つまり、これが CFM 問題の分類 2 の発生要因であると考えた。そこで「ルータの管理テーブルを維持できずマルチキャストパケット転送不能となる」ことを課題 2 とおいた。

その他の動作【M2】【M3】【M4】【M6】は①に遷移しないため CFM 問題は発生しない。

以上より、CFM 問題は上記の 2 つの課題に分類でき、理論上これら 2 つの課題を解決すれば、網羅的に CFM 問題を解決可能であるといえる。

表 3-2 RFC 2236 で規定されたルータの状態遷移表

状態 イベント	マルチキャストパケット転送しない	マルチキャストパケット転送する	
	①グループメンバー非存在	②グループメンバー存在	③メンバーシップ確認中
IGMP Join受信	【M1】 エントリ追加, タイマA設定 ⇒②へ	【M2】 エントリ削除しない, タイマA設定 ⇒②へ	【M3】 エントリ削除しない, タイマA設定 ⇒②へ
IGMP Leave受信	-	【M4】 エントリ削除しない, タイマB, C設定, Query送信 ⇒③へ	-
タイマAの タイムアウト	-	【M5】 エントリ削除する タイマA削除 ⇒①へ	-
タイマBの タイムアウト	-	-	【M6】 エントリ削除しない, タイマB設定, Query送信 ⇒③へ
タイマCの タイムアウト	-	-	【M7】 エントリ削除する, タイマB, C削除 ⇒①へ

タイマA：エントリ有効期限

タイマB：Query間隔

タイマC：エントリ削除猶予期限

以降、2 つの課題を詳細に解析し、課題を引き起こす未定義仕様を特定する。

【課題 1】異なるインタフェース間でのマルチキャストパケット転送に失敗する

IGMP 機能を搭載しているルータは前述のとおり管理テーブルを保有するため、端末が Join メッセージを送信しない場合、管理テーブルにエントリが作成されずマルチキャストパケットを受信できない。このような Join メッセージを送信しない端末が家庭用ルータのどのインタフェースに存在

するかによりマルチキャストパケット転送に失敗するパターンが異なる。

具体的にはまず、図 3-5 に示すように家庭用ルータの IGMP 機能が初期状態から有効であり、かつ、有線 LAN 上および無線 LAN 上のいずれのインタフェース上でも端末が Join メッセージを送信しない場合、有線 LAN および無線 LAN いずれも表 3-2 の「【M1】で②に遷移しないパターン」となる。つまり家庭用ルータのマルチキャスト管理テーブルにエントリが全く存在しないため、双方向ともにマルチキャストパケットの転送が行われず相互接続できない。本論文ではいずれのインタフェース上でも Join メッセージが送信されず、マルチキャスト管理テーブルにエントリがない状態を「初期状態」と定義する。

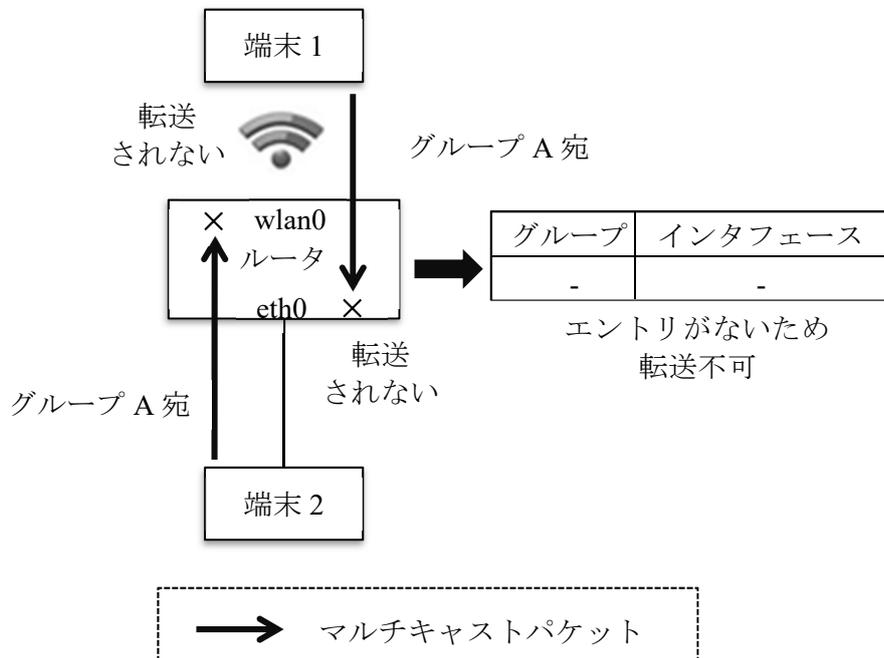


図 3-5 初期状態

次に、図 3-6 に示すように、IGMP 機能を実装している端末と、実装していない端末が異なるインタフェース上にいる場合、Join メッセージを送信する端末側のインタフェースでは、表 3-2 の【M1】で②に遷移し、マルチキャスト管理テーブルにエントリが作成されるため、異なるインタフェースからのマルチキャストパケットが転送され受信可能となる。しかし、Join メッセージを送信しない端末側のインタフェースでは、表 3-2 の「【M1】で②に遷移しないパターン」となりマルチキャスト管理テーブルにエントリがない状態で、異なるインタフェースからのマルチキャストパケットが

転送されないため、マルチキャスト通信が片方向となり、正常な相互接続は行えない。本論文ではこのように、片方のインタフェースでのみ Join メッセージの送信が行われた状態を「片側 Join 状態」と定義する。

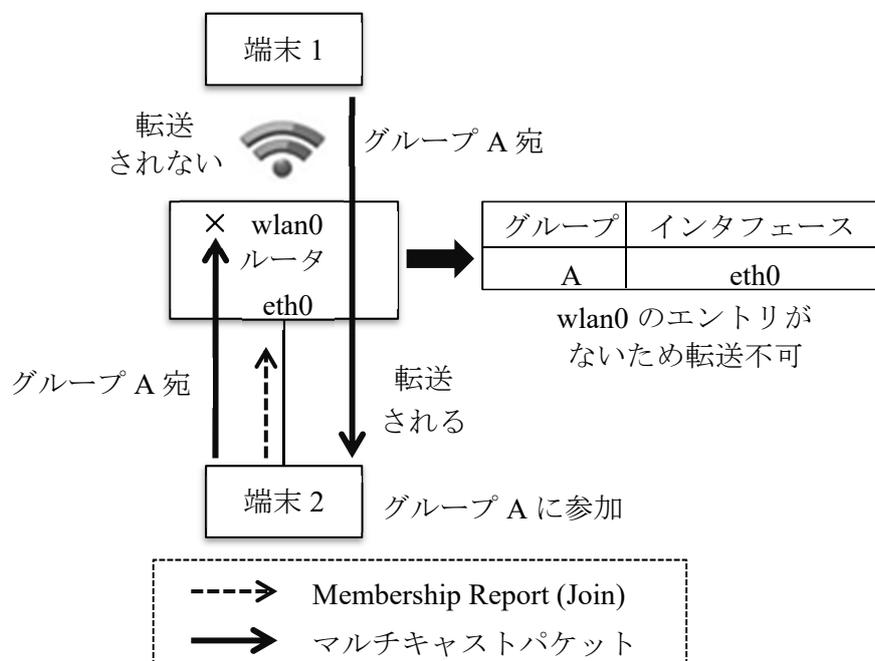


図 3-6 片側 Join 状態

さらに家庭用ルータの中には、初期状態では IGMP 機能が無効でマルチキャストパケットをすべて転送するにも関わらず、有線 LAN・無線 LAN のいずれかのインタフェースで Join メッセージを受信すると IGMP 機能が有効となるものがある。この場合、図 3-7 に示すように、Join メッセージを送信しない端末でも最初はマルチキャストパケットを受信できるが、他の端末の Join メッセージの送信が影響して、運用途中で片方のインタフェースが表 3-2 の「【M1】で②に遷移しないパターン」となり、片側 Join 状態となるためマルチキャストパケットが転送されなくなる。

なお本論文では、図 3-8 に示すように、両方のインタフェース上の端末による Join メッセージ送信によって、両インタフェースにおいて表 3-2 の【M1】で②に遷移し、双方向でマルチキャストパケットの転送が可能となる状態を「両側 Join 状態」と定義する。

以上より、Join メッセージを送信しない端末と IGMP 対応ルータの組み合わせの場合、Join メッセージを送信しない端末はマルチキャストパケットを受信不能となる。Join メッセージを送信しない端末が存在している経緯に関しては 3.2.4 項で詳細を後述するが、具体的にはマルチキャスト通信するためには IGMP 機能を実装しなければならないという規定はないためである。実際に、IGMP 機能を搭載していないルータや端末は市場には数多く存在している。ゆえに、課題 1 を引き起こす未定義仕様は「IGMP 機能実装の有無」である。したがって、SHIPs の手順 2～5 において Join を送信しない端末がマルチキャスト通信できない問題の影響度を数値化し、課題 1 を引き起こす未定義仕様である「IGMP 機能実装の有無」に関して明確化する。

【課題 2】ルータの管理テーブルを維持できずマルチキャストパケット転送不能となる

ルータの管理テーブルのエントリが維持できなくなる場合には 2 つのパターンがある。

表 3-3 は Querier 機能およびマルチキャスト管理テーブルにおけるエントリの有効期限の有無を分類し、それぞれマルチキャストパケット転送の問題の有無を示したものであるが、まず 1 つ目のパターンは、Querier 機能非対応かつエントリに有効期限があるルータの場合であり、下記(1)で説明する。2 つ目のパターンは、Querier 機能非対応かつエントリに有効期限があるルータの場合であり、下記(2)で説明する。

表 3-3 Querier 機能およびエントリ有効期限の有無と課題

Querier 機能	エントリ有効期限	マルチキャストパケット転送
非対応	無し	問題無し
	有り	問題有り 下記(1)で説明
対応	無し	問題無し
	有り	問題有り 下記(2)で説明

(1) Querier 機能非対応かつエントリの有効期限があるルータ

IGMP 機能を実装した家庭用ルータの中には、定期的な Query メッセージの送信によりグループのメンバの存在確認をしないものがある。このような Querier 機能非対応ルータにおける状態遷移表は、表 3-2 の③の状態がない。つまり表 3-2 の「【M7】で①に遷移するパターン」はない。ゆえに課題が発生するのは、マルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限がタイムアウトした場合である表 3-2 の「【M5】で①に遷移するパターン」となり、マルチキャスト管理テーブルのエントリを削除するためマルチキャストパケットが転送されなくなる。これは IGMP の規格としては仕様動作であるが、運用途中でマルチキャスト通信が不能となるため問題である。

(2) Querier 機能対応かつエントリの有効期限があるルータ

Querier 機能に対応したルータにおいては、マルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限がタイムアウトした場合である表 3-2 の「【M5】で①に遷移するパターン」と、Query メッセージに対して端末から応答 (Join メッセージ) を受信せずタイムアウトした場合、表 3-2 の「【M7】で①に遷移するパターン」となり、エントリを削除して①に戻るため、マルチキャストパケットが転送されなくなる。

以上より、IGMP 機能を実装しているルータにおいて、グループ維持機能である Querier 機能や、マルチキャスト管理テーブルのあつかい方などの実装仕様には差異がある。これは IGMP 規格に Querier 機能を実装しなければならないという規定やエントリ有効期限の値に関する規定がないためであり、その仕様の差異を考慮せずに実装された端末は、ルータによってマルチキャスト管理テーブルからエントリを削除されてマルチキャストパケットの転送不能となる問題が発生する場合がある。ゆえに、課題 2 を引き起こす未定義仕様は「Querier 機能の有無」と「エントリ有効期限」である。したがって、SHIPs の手順 2~5 において管理テーブルのエントリを維持できない端末がマルチキャスト通信できない問題の影響度を数値化し、課題 2 を引き起こす未定義仕様である「Querier 機能の有無」と「エントリ有効期限」に関して明確化する。

3.2.4 IGMP 機能実装の違いが生じた経緯と要因

有線 LAN によって構成されるホームネットが主流であった時代は、インタフェースをまたがるマルチキャストパケットの転送は必要なかったため、家庭用ルータとしては IGMP 機能を実装していなかった。そのため端末が Join メッセージの送信によりグループへの参加をしなくてもマルチキャストパケットはすべて転送されていた。このような背景から IGMP 機能を実装しない端末も多く存在していた。

その後家庭用ルータが無線 LAN 機能に対応してきたことにより、ホームネットワークの構成が有線 LAN と無線 LAN の複数インタフェースで構成されるようになってきた。このような構成でマルチキャスト通信を行う場合、全マルチキャストパケットを全インタフェースへ転送すると、不要なトラフィックにより無線 LAN の帯域を圧迫する可能性がある。そこで IGMP 機能でグループ管理を行い、メンバが存在するインタフェースにのみのパケット転送により無駄なトラフィックの発生を防ぐ家庭用ルータが増えてきた。それとともに、端末側でも IGMP 機能を実装するものが増えてきたが、IGMP を実装しなければマルチキャスト通信できないルータの存在に、開発の段階で開発者が気付かない場合や、無線のチップセットを買い入れ下回りの通信部分（無線やミドルウェア）がブラックボックス化された状態で端末の開発を行う場合、IGMP 機能が未実装である端末が現在でも存在する。

3.3 関連研究

IGMP を拡張してマルチキャスト通信のアクセス制御やユーザ認証機能を向上させる従来研究 [80][81]は、Join メッセージに認証用パラメータを追加し、ルータが端末からの Join メッセージ受信時に認証を行い、認証に成功するとマルチキャストパケットを転送する手法である。その際に管理テーブルにおいて認証の有効期限を設け、有効期限が切れるとパケット転送を行わなくなる。有効期限が切れる前に Query メッセージを端末に送信し、応答があればテーブルから削除せずマルチキャストパケットの転送を継続する。これらの従来手法はルータによる Query 送信が前提であるため、本章で示す家庭用ルータに当てはめた場合、Query を送信しないルータのテーブルを維持でき

ない。またホームネットワーク技術の観点で見た場合、同一ベンダによるシステム構築の従来研究が多く [82][83][84]、本章でテーマにしているような実環境下におけるルータ含め、マルチベンダでのシステム構築時の課題解決を図るものは少ない。

第 3 章では、家庭用ルータの IGMP に関する実装状況を明らかにし、実環境において相互接続性を向上させる手法を検討する。

3.4 ルータの実装調査

3.4 節では、SHIPs の手順 2～5 を実施して課題を引き起こす未定義仕様を明確化する。

手順 2. 市場シェア集計

手順 3. 調査対象ルータの選定と整備

手順 4. 調査項目と調査方法の策定

手順 5. ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化

3.2.3 項にて設定した 2 つの課題に関する下記の項目について、家庭用ルータの実装仕様を調査する。

- (1) 異なるインタフェース間のマルチキャストパケット転送調査
- (2) Querier 機能の有無およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査

3.4.1 調査環境

家庭用ルータを中心に構成されるホームネットワーク上の端末同士がマルチキャスト通信を行う形態について、端末が接続されるインタフェースに着目したパターンを表 3-4 に示す。これらのうち、異なるインタフェース間の通信のため、マルチキャスト転送で問題が発生しうるのは構成 2、構成 3、構成 5 の 3 パターンであるが、構成 2 と構成 3 は有線 LAN と無線 LAN の組合せとしては同じであるため、代表して無線 LAN 対応ルータには必ず搭載されている 2.4GHz 帯を対象とし、構成

2 および構成 5 に対して、IGMP 機能の実装調査を行う。

表 3-4 ホームネットワークの構成の種類

構成	端末 1 が接続する インタフェース	端末 2 が接続する インタフェース
構成 1	有線 LAN	有線 LAN
構成 2	有線 LAN	無線 LAN (2.4GHz 帯)
構成 3	有線 LAN	無線 LAN (5GHz 帯)
構成 4	無線 LAN (2.4GHz 帯)	無線 LAN (2.4GHz 帯)
構成 5	無線 LAN (2.4GHz 帯)	無線 LAN (5GHz 帯)
構成 6	無線 LAN (5GHz 帯)	無線 LAN (5GHz 帯)

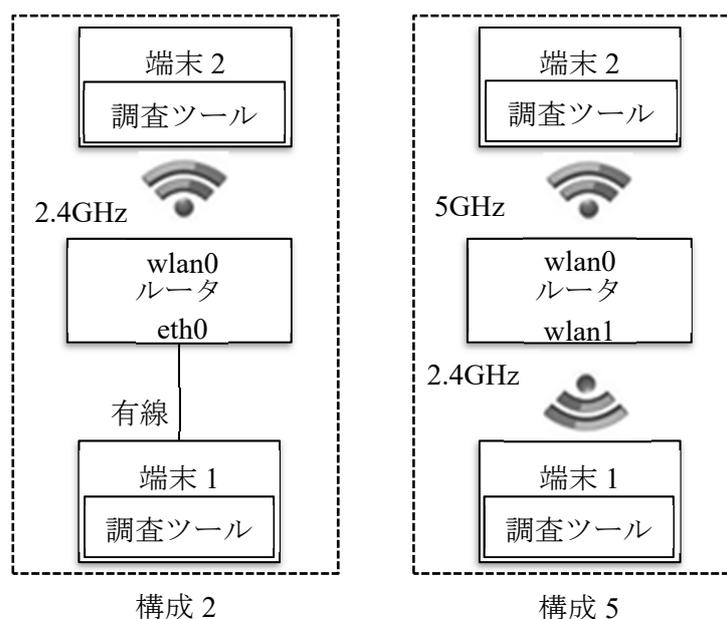


図 3-9 調査環境

構成 2 および構成 5 の試験環境を図 3-9 に示す。各構成の形態になるよう、家庭用ルータ、端末 1、端末 2 を接続する。端末 1、端末 2 は、それぞれ 3.4.3 項に示す項目内容を実行する調査ツールをインストールした Windows 10 の PC を使用する。Windows 10 の PC は調査に影響がないよう事前に IGMP の機能を無効にする。端末 1 および端末 2 は同じ性能の PC で、そのスペックを表 3-5 に示す。また端末 1 および端末 2 には指定したインタフェース上を通過するパケットをキャプチャして分析するツール「Wireshark[85]」をインストールする。

表 3-5 端末 1 および端末 2 のスペック

OS	Windows 10 Pro 64 ビット
CPU	2.5 GHz
無線対応規格	802.11n/g/b (2.4GHz 帯)
伝送速度 (規格値)	MCS 0~MCS 07 (20MHz)

3.4.2 調査対象の家庭用ルータ

3.4.2 項では、SHIPs の「手順 2. 市場シェア集計」および「手順 3. 調査対象ルータの選定と整備」を行う。

まず市場シェアとして、GfK による POS トラッキング調査結果[74]を利用して、2012 年 1 月から 2017 年 9 月の期間の販売累計台数を求め、それをベースに下記算出式により家庭用ルータの市場シェアを独自に集計した。

$$\text{対象ルータの市場シェア(\%)} = \frac{\text{対象ルータの販売累計台数}}{\text{全ルータの販売累計台数}}$$

パナソニック株式会社 製品セキュリティセンターでは上記で算出した市場シェアをもとに、日本国内における市場シェア合計約 98.16%を占めるルータ 729 機種 (累計販売台数 1,628 万台相当) を整備した。そしてそれらのうち、市場シェア合計約 81.57%に相当する下記の合計 150 機種 (累計販売台数 1,351 万台相当) を抽出し、前述の構成 2 の調査対象とした。

- 無線 LAN (2.4GHz) 規格をサポートする市場シェア上位 131 機種の家庭用ルータ
- 主要回線事業者 4 社およびケーブルテレビ会社 2 社からのレンタルルータ 19 機種

また、上記 150 機種のうち無線 LAN (5GHz 帯) をサポートしている下記の合計 94 機種の家庭用ルータ (シェア合計約 49.18%, 累計販売台数 814 万台相当) を構成 5 の調査対象とした。

- 無線 LAN (5GHz) 規格をサポートする 84 機種の家庭用ルータ
- 主要回線事業者 4 社およびケーブルテレビ会社 2 社からのレンタルルータ 10 機種

なお、主要回線事業者 4 社の ISP およびケーブルテレビ会社 2 社からのレンタルルータは、FTTH

契約数シェア[86]で見た場合に約 81.4%に相当するものである。

3.4.3 調査項目および調査方法

3.4.3 項では、SHIPs の「手順 4：調査項目と調査方法の策定」を行う。

(1) 異なるインタフェース間のマルチキャストパケット転送調査

端末 1, 端末 2 のそれぞれから定期的 (10 秒ごと) にマルチキャストパケットの送信を開始する。

まず「初期状態」でそれぞれルータを介した相手側で受信できるかどうかを確認する。ここで受信できたかどうかは、端末 1 および端末 2 にインストールされた「Wireshark」上にマルチキャストパケットが表示されているか否かで判断する。

次に、いずれかの端末から Join メッセージを送信し、「片側 Join 状態」に遷移させる。これにより他方のインタフェースにマルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、ルータのマルチキャスト管理テーブルにエントリが作成されたことがわかる。ここで「片側 Join 状態」は、構成 2 の場合は、「有線 LAN 側のみ Join 状態」と「無線 LAN (2.4GHz 帯) 側のみ Join 状態」の 2 とおり、また構成 5 の場合、「無線 LAN (2.4GHz 帯) のみ Join 状態」と「無線 LAN (5GHz 帯) 側のみ Join 状態」の 2 とおりであり、全パターンを確認する。

その後、端末 1 および端末 2 ともに Join メッセージを送信し、「両側 Join 状態」に遷移せ、マルチキャストパケットを転送するかどうかを確認する。

ここで、調査するマルチキャストグループは、ECHONET Lite で規定されている下記マルチキャストアドレスとポート番号を使用する。

IP アドレス : 224.0.23.0, ポート番号 : 3610

また、端末 1 および端末 2 が送信するマルチキャストパケットは ECHONET Lite の「インスタンスリスト通知」を使用する。

加えて、調査する IGMP バージョンは、当社のシステムテストにおいてマルチキャストパケット転送に問題のあったケースに倣って、端末 1 は IGMPv2, 端末 2 は IGMPv3 を使用する。

(2) Querier 機能の有無およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査

(1) の各状態において、マルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、その変化までの継続時間をエントリの有効期限と定義する。たとえば、初期状態ではマルチキャストパケットが転送されており、片側 Join 状態への遷移でマルチキャストパケットが転送されなくなる場合には、そのまま観測を継続し、再度転送されるようになるまでの時間を計測する。ただし、計測時間は 7 分間とするため、状態変化が見られない場合は「エントリ有効期限 7 分以上」あるいは「エントリ有効期限なし」の区別までは行えない。

また、ルータが定期的に Query メッセージを送信するかどうかを確認する。ルータが Querier 機能を有する場合、Query メッセージに対して応答 (Join メッセージ) を返さないようにし、それによりマルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、その変化までの継続時間をエントリ有効期限として計測する。

3.4.4 調査結果

3.4.4 項では、SHIPs の「手順 5:ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化」を行う。

(1) 異なるインターフェース間のマルチキャストパケット転送調査結果

構成 2, 構成 5 それぞれでマルチキャストパケット転送を調査した結果を表 3-6～表 3-9 に示す。

表 3-6 および表 3-7 は、マルチキャストパケット転送調査結果から、全状態でマルチキャストパケットを双方向で転送可能なルータを「IGMP 機能：無し」、いずれかの状態でマルチキャストパケットの転送が不可のルータを「IGMP 機能：有り」として、調査対象ルータの IGMP 機能実装の有無を機種数および市場シェアで示したものである。

表 3-6 構成 2 における IGMP 機能の有無に関する調査結果

内訳	機種数	シェア合計
IGMP 機能：無し (全状態で転送される)	107 機種	51.19%
IGMP 機能：有り (いずれかの状態で転送不可)	43 機種	30.38%
合計	150 機種	81.57%

表 3-7 構成 5 における IGMP 機能の有無に関する調査結果

内訳	機種数	シェア合計
IGMP 機能：無し (全状態で転送される)	72 機種	33.68%
IGMP 機能：有り (いずれかの状態で転送不可)	22 機種	15.50%
合計	94 機種	49.18%

表 3-8 構成 2 におけるマルチキャストパケット転送結果

状態	マルチキャスト パケットの方向	転送可		転送不可	
		機種数	割合	機種数	割合
初期状態	有線→無線	129 機種	72.691%	21 機種	8.883%
	無線→有線	141 機種	78.687%	9 機種	2.887%
片側 Join 状態 (有線のみ Join)	有線→無線	116 機種	55.280%	34 機種	26.294%
	無線→有線	148 機種	77.752%	2 機種	3.822%
片側 Join 状態 (無線のみ Join)	有線→無線	147 機種	81.376%	3 機種	0.198%
	無線→有線	129 機種	64.808%	21 機種	16.766%
両側 Join 状態	有線→無線	149 機種	81.556%	1 機種	0.018%
	無線→有線	150 機種	81.574%	0 機種	0.000%

表 3-9 構成 5 におけるマルチキャストパケット転送結果

状態	マルチキャスト パケットの方向	転送可		転送不可	
		機種数	割合	機種数	割合
初期状態	5G→2.4G	88 機種	44.922%	6 機種	4.261%
	2.4G→5G	87 機種	47.119%	7 機種	2.064%
片側 Join 状態 (2.4GHz 帯のみ)	5G→2.4G	93 機種	49.165%	1 機種	0.018%
	2.4G→5G	74 機種	37.835%	20 機種	11.348%
片側 Join 状態 (5GHz 帯のみ)	5G→2.4G	79 機種	35.778%	15 機種	13.405%
	2.4G→5G	93 機種	49.165%	1 機種	0.018%
両側 Join 状態	5G→2.4G	93 機種	49.165%	1 機種	0.018%
	2.4G→5G	93 機種	49.165%	1 機種	0.018%

また、表 3-8 および表 3-9 は、IGMP 機能を有するルータに関して、各状態におけるマルチキャストパケット転送結果を示しており、マルチキャストパケットの送信方向について、有線 LAN 側の端末から無線 LAN 側の端末宛を「有線→無線」、逆向きを「無線→有線」、また無線 LAN (2.4GHz 帯) 側の端末から無線 LAN (5GHz 帯) 側の端末宛を「2.4G→5G」、逆向きを「5G→2.4G」と示し、ECHONET Lite のマルチキャストパケットの転送可否を示したものである。

上記の結果より、課題 1 の市場における影響度の数値化と、課題 1 を引き起こす未定義仕様を明確化できた。具体的には、Join メッセージを送信しない端末 (IGMP 機能無し) は、表 3-6 より市場シェア 30.38% の IGMP 機能有りのルータにおける有線 LAN—無線 LAN (2.4GHz 帯) 間のマルチキャスト通信に失敗し、表 3-7 より市場シェア 15.5% の IGMP 機能有りルータにおける無線 LAN (2.4GHz 帯) —無線 LAN (5GHz 帯) 間のマルチキャスト通信に失敗することが判明した。しかしながら、表 3-8 および表 3-9 における両側 Join 状態 (両方の端末が IGMP 機能有りの場合) の結果より、初期状態や片側 Join 状態でマルチキャスト通信ができない場合でも、両側 Join 状態となればほぼ確実にマルチキャスト通信が可能となることがわかった。

表 3-8 および表 3-9 における、両側 Join 状態でもマルチキャストパケットを転送しない 1 機種 of ルータ (表中の太枠セルに該当) に関しては、ルータの実装不具合であると考ええる。

以上より、端末は IGMP を実装し、起動時に必ず Join メッセージを送信すれば課題 1 を解決することができると考えた。

(2) マルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査結果

調査対象ルータ 150 機種のうち、Querier 機能対応の有無、およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限の有無に関する調査結果を表 3-10 に示す。

表 3-10 の結果より、課題 2 の市場における影響度の数値化と、課題 2 を引き起こす未定義仕様を明確化できた。具体的には、市場シェア 0.81% のルータが Querier 機能に対応し、かつエントリの有効期限があるルータであり、応答 (Join メッセージ) を返さない場合は比較的短時間でマルチキャスト管理テーブルからエントリが削除されることが判明した。また、市場シェア 20.43% のルータが Querier 機能非対応かつテーブルに有効期限があり、比較的短時間でマルチキャスト管理テーブルからエントリが削除されることが判明した。そしてエントリ有効期限の最小値が 120 秒である

ことを解明できた。

表 3-10 Querier 機能対応の有無およびエントリ有効期限調査結果

内訳	機種数	シェア合計	
Querier 機能対応	29 機種	9.09%	
有効期限 7 分以上 または有効期限なし	23 機種	8.28%	
有効期限 250 秒 (送信間隔 125 秒×2 回)	4 機種	0.51%	合計 0.81%
有効期限 260 秒 (送信間隔 60 秒×4 回)	1 機種	0.02%	
有効期限 360 秒 (送信間隔 30 秒×12 回)	1 機種	0.28%	
Querier 機能非対応	121 機種	72.48%	
有効期限 7 分以上 または有効期限なし	104 機種	52.05%	
有効期限 120 秒	1 機種	1.48%	合計 20.43%
有効期限 260 秒	3 機種	4.14%	
有効期限 300 秒	13 機種	14.81%	

以上より，端末はルータからの Query には必ず応答 (Join) を送信すれば，そして 120 秒おきに Join メッセージを送信してエントリを維持すれば課題 2 を解決することができると思った。

3.5 課題を解決する提案手法

3.5 項では，3.4.4 項の調査結果を踏まえて，課題を解決する「ルータの実装仕様に起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法」を考案した。

課題を解決するためには，ルータ側の実装改善が重要であるが，既に市場に出回っているルータも多数あるためそれだけでは不十分と考える。端末側において家庭用ルータの仕様の差異を吸収しない限り，現在の市場での相互接続性の向上は実現できない。家庭用ルータの仕様の差異を端末側で吸収して課題を解決するため，以下の提案手法(1)～(3)を端末側で実装することを提案する。

(1) 起動時に必ず Join メッセージを送信

端末は、ネットワークに接続時に必ず Join メッセージを送信してエントリを作成する。そうすれば必ず両側 Join 状態となり相互接続が可能となる。

(2) 定期的に Join メッセージを送信

ルータが Querier 機能に非対応である場合の対策として、マルチキャスト管理テーブルからエントリが削除される前に端末からテーブル更新を行う。ここで、送信間隔が短すぎるとネットワーク上に不要なトラフィックが生じ、特に無線のように帯域に制限がある場合、他の端末にも負荷をかけてしまう。そのため、表 3-10 の結果よりエントリ有効期限の最小値である 120 秒間隔で、定期的に Membership Report (Join メッセージ) を送信する。

(3) ルータからの Query には必ず応答 (Join) を送信

ルータが Querier 機能に対応している場合の対策として、ルータからの Query に対して必ず応答 (Join メッセージ) を返してテーブル更新を依頼する。

上記提案手法(1)により課題 1 を解決可能、提案手法(2)(3)により課題 2 を解決可能である。

ここで、(1)~(3)における Join メッセージの宛先としては、ECHONET Lite のマルチキャストアドレス (224.0.23.0) を使用する。

3.6 実験

実験環境を図 3-10 に示す。3.4.1 項の調査環境における調査ツール (端末 1 および端末 2) を、提案手法を実装した ECHONET Lite 対応デバイス (ENL デバイス)、および ECHONET Lite 対応コントローラ (ENL コントローラ) に置き換えた。また構成 2 においては、3.4.2 項の調査対象ルータ 150 機種のうち不具合のある 1 機種を除く 149 機種のルータ (シェア合計 81.55%) を実験対象とし、構成 5 においては、3.4.2 項の調査対象ルータ 94 機種のうち不具合のある 1 機種を除く 93 機種のルータ (シェア合計 49.16%) を実験対象とし、本提案手法の実機器における効果を評価した。

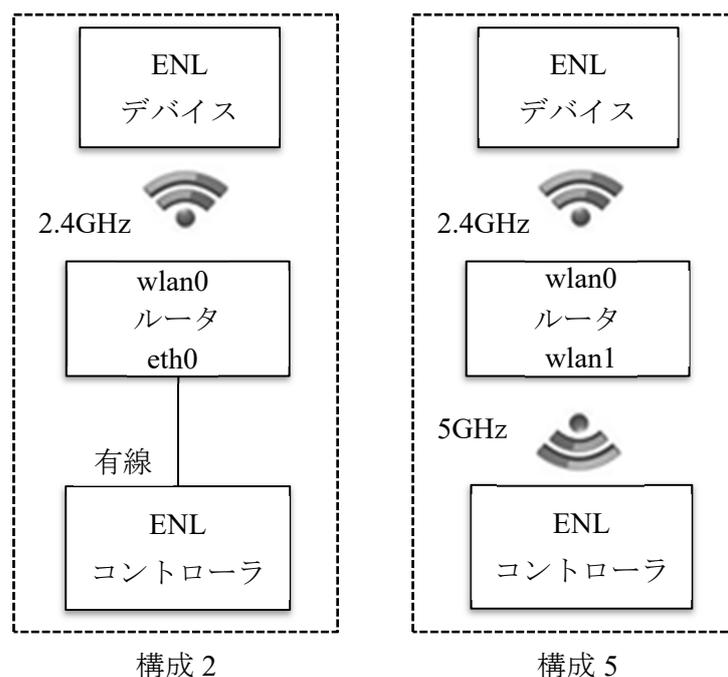


図 3-10 実験環境

ここで、ENL デバイスが送信するマルチキャストパケットは「インスタンスリスト通知」、ENL コントローラが送信するマルチキャストパケットは「自ノードインスタンスリスト S のプロパティ値読み出し要求」である。3.4.3 項の調査方法では「自ノードインスタンスリスト S のプロパティ値読み出し要求」は使用していないが、同じマルチキャストアドレス (224.0.23.0) とポート番号 (3610) を使用するため評価上で問題はない。加えて、ENL デバイスは IGMPv2、ENL コントローラは IGMPv3 を実装しており、3.4.1 項の調査環境と同等の実験環境となる。

3.6.1 実験項目

(1) 起動直後の機器発見

まず ENL デバイスからのマルチキャスト通信による通知 (インスタンスリスト通知) を受信して ENL コントローラが ENL デバイスを発見できるかどうかを確認した。次に ENL コントローラからマルチキャスト通信による検索要求 (自ノードインスタンスリスト S のプロパティ値読み出し要求) を送信し ENL デバイスからの応答受信により、ENL コントローラが ENL デバイスを発見できるかどうかを確認した。

これにより、提案手法(1)の効果、すなわち双方の端末が起動時に Join メッセージを送信して、ルータのマルチキャスト管理テーブルへの確実なエントリ作成により両側 Join 状態となり、ECHONET Lite のマルチキャストパケットを双方向に転送可能となる効果を検証した。

(2) 6分超経過後の機器発見

(1)から6分以上経過後に、再度(1)の手順により ENL コントローラから ENL デバイスが発見できることを確認した。ここで、今回の調査結果から明確に有効期限が確認できたルータの中で一番長いものは、表 3-10 より 360 秒(6分)であったため6分の経過時間を置くこととした。また表 3-10 より、最短の有効期限が 120 秒であったため、6分経過後の機器発見ができることを確認した。このことにより、表 3-10 の全ルータのテーブルを維持するために、提案手法(2)(3)の有効性、すなわち端末からの Join メッセージの定期送信(120秒間隔)と、ルータからの Query メッセージに対する端末の Join メッセージ応答の有効性を検証した。

3.6.2 実験結果

起動直後の機器発見の実験結果を表 3-11 に、また6分超経過後の機器発見の実験結果を表 3-12 に示す。

表 3-11 起動直後の機器発見の実験結果

構成	課題の有無	提案手法搭載前		提案手法搭載後		実験結果
		機種数	シェア合計	機種数	シェア合計	
構成 2	課題無し	107 機種	51.19%	149 機種	81.55%	149 機種すべてで発見可能
	課題有り	42 機種	30.36%	0 機種	0%	
構成 5	課題無し	72 機種	33.68%	93 機種	49.16%	93 機種すべてで発見可能
	課題有り	21 機種	15.48%	0 機種	0%	

表 3-12 6分超経過後の機器発見の実験結果

Querier 機能	エントリ有効期限	機種数	シェア合計	提案手法搭載前	提案手法搭載後
対応	7分以上または有効期限なし	22 機種	8.26%	課題無し	6分後も発見可能 課題なし
	250 秒	4 機種	0.51%	課題有り	6分後も発見可能 課題なし
	260 秒	1 機種	0.02%		
	360 秒	1 機種	0.28%		
非対応	7分以上または有効期限なし	104 機種	52.05%	課題無し	6分後も発見可能 課題なし
	120 秒	1 機種	1.48%	課題有り	6分後も発見可能 課題なし
	260 秒	3 機種	4.14%		
	300 秒	13 機種	14.81%		

実験の結果から、今回提案の手法を端末側で実装すれば、実験対象ルータ全 149 機種（シェア合計 81.55%）において、マルチキャスト管理テーブルへのエントリ作成、維持を可能とし、2つの課題が解決できることがわかった。また、今回の研究の結果から Join メッセージの定期送信間隔を 120 秒と定めたことは、トラフィックの増加を最小限に抑え、かつ全ルータのテーブルの維持など、有効な改善であることがわかった。

3.7 まとめ

第 3 章では、ECHONET Lite 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用して未定義仕様を明確化し、課題を解決する手法を考案し、ECHONET Lite 機器の相互接続性を向上させた。具体的には、マルチキャスト通信を実現する標準規格 IGMP の未定義仕様に対する開発者の解釈の違いにより、ルータの IGMP 実装仕様に差が出るのが CFM 問題を生み出していること、また IGMP の実装差異によって引き起こされる問題を明確化した。CFM 問題の主な原因が、市場シェア 20.43%（販売累計台数 338 万台）のルータが機器の存在確認無しに管理テーブルからエントリを削除すること、

未定義仕様であるエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを解明し、端末側の実装でルータのマルチキャスト管理テーブルを維持し相互接続性を確保する手法の提案を行った。その結果、市場シェア 20.43%（販売累計台数 338 万台）のルータにおける CFM 問題を解決できた。本提案手法が搭載された製品は既に販売されており、今後も白物家電を中心に搭載製品を拡大する予定である。また、本章の提案手法をエコーネットコンソーシアムに提案した。その結果 ECHONET Lite 製品の相互接続性を向上させる手法であると認められ、“ECHONET Lite システム設計指針[88]”に採択された。

今回の調査対象ルータ 150 機種（シェア合計 81.57%，累計販売台数 1,351 万台相当）において、両側 Join 状態でもマルチキャストパケットを転送しない 1 機種（シェア 0.02%）のルータに関しては、ルータの実装不具合によるものであり端末側の実装では確実に対応できない。このようなルータが今後増加しないためにも、ルータメーカーに対して実装品質の向上を提案していくことは重要であり、今後取り組みを行う予定である。

端末側が提案手法を実装しない場合 ECHONET Lite のマルチキャスト通信が可能なルータは 107 機種（シェア合計 51.19%）であるのに対し、提案手法を実装した端末同士の場合、上記の不具合のあるルータ以外の全 149 機種（シェア合計 81.55%）で問題なくマルチキャスト通信による相互接続可能であることを確認した（構成 2 における結果）。

第4章 UPnP/DLNA 機器の CFM 問題への SHIPs の適用と解決

第4章では、UPnP/DLNA の CFM 問題に対して SHIPs を適用して課題を解決し、相互接続性を向上させる取り組みをまとめた。具体的には、第3章の ECHONET Lite 同様、ルータの IGMP 実装仕様の差異が CFM 問題を生み出していると考え、第3章と同じく異なるインタフェース間でマルチキャスト通信不能となること、およびルータの管理テーブルを維持できずマルチキャストパケット転送不能となることを課題と置いた。また IGMP に関しては ECHONET Lite と UPnP/DLNA ではマルチキャストアドレスが異なるため、ルータの実装仕様が異なる可能性がある。そのため市場のルータの実装仕様の調査が必要と考え、市場シェア上位 150 機種（計 81.6%）のルータの実装仕様を明確化し、未定義仕様であるエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを確認した。そして ECHONET Lite の提案手法を応用した「ルータの実装仕様に起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法」により、UPnP/DLNA の CFM 問題を解決できることを確認した。詳細な説明については、次節以降に記載する。なお、本章の内容は著者論文[89][90]に該当する。

4.1 はじめに

UPnP/DLNA では、ECHONET Lite 同様、機器発見や状態通知の用途でマルチキャスト通信を行うことを規定しており、さまざまなメーカーの多数の型番のルータで CFM 問題が無数に発生している。ECHONET Lite で問題が出たルータと同じものもあれば異なるものもあり必ずしも一致しないため、どのような実装差異があるかも含めて、第3章の ECHONET Lite の解決策を参考にしながら SHIPs を適用して効率よく解決しようと考えた。

以下、UPnP/DLNA の相互接続性を阻害する家庭用ルータの IGMP に関する実装状況を調査し、端末側の実装で相互接続性を向上させる手法の提案を行うとともに提案手法の評価と考察を述べる。

4.2 CFM 問題の解析と課題

4.2 節では、SHIPs の「手順 1. 相互接続性問題の解析と課題の設定」を行う。発売前のシステムテストや市場から報告された CFM 問題を解析しすると、問題の傾向は ECHONET Lite と同様であり、未定義仕様である「IGMP 機能実装の有無」、「Querier 機能の有無」、「エントリ有効期限」によって CFM 問題が引き起こされていると推測できたため、ECHONET Lite と同様の課題を設定した。

【課題 1】異なるインタフェース間でのマルチキャストパケット転送に失敗する

【課題 2】ルータの管理テーブルを維持できずマルチキャストパケット転送不能となる

ただし、IGMP に関しては ECHONET Lite と UPnP/DLNA では下記のようにマルチキャストアドレスおよびポート番号が異なるため、ルータの実装仕様は異なる可能性がある。

- ECHONET Lite のマルチキャストアドレスとポート番号

IP アドレス : 224.0.23.0, ポート番号 : 3610

- UPnP/DLNA のマルチキャストアドレスとポート番号

IP アドレス : 239.255.255.250, ポート番号 : 1900

そこで、UPnP/DLNA 機器を使ってルータの IGMP の実装仕様を調査し、ECHONET Lite における実装仕様調査の結果と差異があるか調査が必要と考えた。

4.3 ルータの実装調査

4.3 節では、SHIPs の手順 2~5 を実施した。

手順 2. 市場シェア集計

手順 3. 調査対象ルータの選定と整備

手順 4. 調査項目と調査方法の策定

手順 5. ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化

4.2 節にて設定した 2 つの課題に関する下記の項目について、家庭用ルータの実装仕様を調査す

る.

- (1) 異なるインタフェース間のマルチキャストパケット転送調査
- (2) Querier 機能の有無およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査

4.3.1 調査環境

家庭用ルータを中心に構成されるホームネットワーク上の端末同士がマルチキャストパケット通信を行う形態について、端末が接続されるインタフェースに着目したパターンを表 4-1 に示す。

これらのうち、3.4.1 項にて検討した同様の観点で、構成 2 および構成 5 に対して、IGMP 機能の実装調査を行うこととする。

表 4-1 ホームネットワークの構成の種類

構成	端末 1 が接続する インタフェース	端末 2 が接続する インタフェース
構成 1	有線 LAN	有線 LAN
構成 2	有線 LAN	無線 LAN (2.4GHz 帯)
構成 3	有線 LAN	無線 LAN (5GHz 帯)
構成 4	無線 LAN (2.4GHz 帯)	無線 LAN (2.4GHz 帯)
構成 5	無線 LAN (2.4GHz 帯)	無線 LAN (5GHz 帯)
構成 6	無線 LAN (5GHz 帯)	無線 LAN (5GHz 帯)

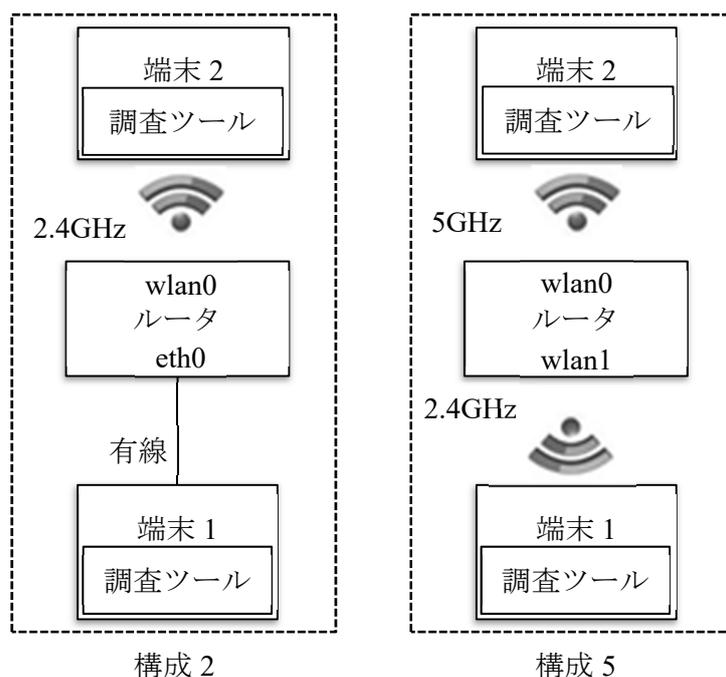


図 4-1 調査環境

構成 2 および構成 5 の試験環境を図 4-1 に示す。各構成の形態になるよう、家庭用ルータ、端末 1、端末 2 を接続する。端末 1、端末 2 は、それぞれ 4.3.3 項に示す項目内容を実行する調査ツールをインストールした Windows 10 の PC を使用する。Windows 10 の PC は調査に影響がないよう事前に IGMP の機能を無効にする。端末 1 および端末 2 は同じ性能の PC で、そのスペックを表 4-2 に示す。また端末 1 および端末 2 には指定したインタフェース上を通過するパケットをキャプチャして分析するツール「Wireshark[85]」をインストールする。

表 4-2 端末 1 および端末 2 のスペック

OS	Windows 10 Pro 64 ビット
CPU	2.5 GHz
無線対応規格	802.11n/g/b (2.4GHz 帯)
伝送速度 (規格値)	MCS 0~MCS 07 (20MHz)

4.3.2 調査対象の家庭用ルータ

4.3.2 項では、SHIPsの「手順2. 市場シェア集計」および「手順3. 調査対象ルータの選定と整備」を行う。まず市場シェアとして、GfKによるPOSトラッキング調査結果[74]を利用して、2012年1月から2017年9月の期間の販売累計台数を求め、それをベースに下記算出式により家庭用ルータの市場シェアを独自に集計した。

$$\text{対象ルータの市場シェア(\%)} = \frac{\text{対象ルータの販売累計台数}}{\text{全ルータの販売累計台数}}$$

パナソニック株式会社 製品セキュリティセンターでは上記で算出した市場シェアをもとに、日本国内における市場シェア合計約98.16%を占めるルータ729機種（累計販売台数1,628万台相当）を整備した。そしてそれらのうち、市場シェア合計約81.57%に相当する下記の合計150機種（累計販売台数1,351万台相当）を抽出し、前述の構成2の調査対象とした。

- 無線LAN（2.4GHz）規格をサポートする市場シェア上位131機種の家庭用ルータ
- 主要回線事業者4社およびケーブルテレビ会社2社からのレンタルルータ19機種

また、上記150機種のうち無線LAN（5GHz帯）をサポートしている下記の合計94機種の家庭用ルータ（シェア合計約49.18%、累計販売台数814万台相当）を構成5の調査対象とした。

- 無線LAN（5GHz）規格をサポートする84機種の家庭用ルータ
- 主要回線事業者4社およびケーブルテレビ会社2社からのレンタルルータ10機種

なお、主要回線事業者4社のISPおよびケーブルテレビ会社2社からのレンタルルータは、FTTH契約数シェア[86]で見た場合に約81.4%に相当するものである。

4.3.3 調査項目および調査方法

4.3.3 項では、SHIPsの「手順4. 調査項目と調査方法の策定」を行う。

(1) 異なるインターフェース間のマルチキャストパケット転送調査

端末1、端末2のそれぞれから定期的（10秒ごと）にマルチキャストパケットの送信を開始する。

まず「初期状態」でそれぞれルータを介した相手側で受信できるかどうかを確認する。ここで受信できたかどうかは、端末 1 および端末 2 にインストールされた「Wireshark」上にマルチキャストパケットが表示されているか否かで判断する。

次に、いずれかの端末から Join メッセージを送信し、「片側 Join 状態」に遷移させる。これにより他方のインタフェースにマルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、ルータにおいてマルチキャスト管理テーブルが作成されたことがわかる。ここで「片側 Join 状態」は、構成 2 の場合は、「有線 LAN 側のみ Join 状態」と「無線 LAN (2.4GHz 帯) 側のみ Join 状態」の 2 とおり、また構成 5 の場合、「無線 LAN (2.4GHz 帯) のみ Join 状態」と「無線 LAN (5GHz 帯) 側のみ Join 状態」の 2 とおりであり、全パターンを確認する。

その後、端末 1 および端末 2 ともに Join メッセージを送信し、「両側 Join 状態」に遷移させ、マルチキャストパケットを転送するかどうかを確認する。

ここで、調査するマルチキャストグループは、UPnP/DLNA で規定されている下記マルチキャストアドレスとポート番号を使用する。

IP アドレス : 239.255.255.250, ポート番号 : 1900

また、端末 1 および端末 2 が送信するマルチキャストパケットは UPnP/DLNA の「M-SEARCH 要求[87]」を使用する。

加えて、調査する IGMP バージョンは、3.4.3 項の調査とあわせて、端末 1 は IGMPv2, 端末 2 は IGMPv3 を使用する。

(2) Querier 機能の有無およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査

(1) の各状態において、マルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、その変化までの継続時間をエントリ有効期限と定義する。たとえば、初期状態ではマルチキャストパケットが転送されており、片側 Join 状態への遷移でマルチキャストパケットが転送されなくなる場合には、そのまま観測を継続し、再度転送されるようになるまでの時間を計測する。ただし、計測時間は 7 分間とするため、状態変化が見られない場合は「エントリ有効期限 7 分以上」あるいは「エントリ有効期限なし」の区別までは行えない。

また、ルータが定期的に Query メッセージを送信するかどうかを確認する。ルータが Querier 機能を有する場合、Query メッセージに対して応答 (Join メッセージ) を返さないようにし、それによりマルチキャストパケットの転送の有無に変化が生じる場合、その変化までの継続時間をエントリ有効期限として計測する。

4.3.4 調査結果

4.3.4 項では、SHIPs の「手順 5. ルータの実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化」を行う。

(1) 異なるインタフェース間のマルチキャストパケット転送調査結果

構成 2, 構成 5 それぞれでマルチキャストパケット転送を調査した結果を表 4-3～表 4-6 に示す。

表 4-3 および表 4-4 は、マルチキャストパケット転送調査結果から、全状態でマルチキャストパケットを双方向で転送可能なルータを「IGMP 機能：無し」、いずれかの状態でマルチキャストパケットの転送が不可のルータを「IGMP 機能：有り」として、調査対象ルータの IGMP 機能実装の有無を機種数および市場シェアで示したものである。

また、表 4-5 および表 4-6 は、IGMP 機能を有するルータに関して、各状態におけるマルチキャストパケット転送結果を示しており、マルチキャストパケットの送信方向について、有線 LAN 側の端末から無線 LAN 側の端末宛を「有線→無線」、逆向きを「無線→有線」、また無線 LAN (2.4GHz 帯) 側の端末から無線 LAN (5GHz 帯) 側の端末宛を「2.4G→5G」、逆向きを「5G→2.4G」と示し、ECHONET Lite のマルチキャストパケットの転送可否を示したものである。

表 4-3 構成 2 における IGMP 機能の有無に関する調査結果

内訳	機種数	シェア合計
IGMP 機能：無し (全状態で転送される)	107 機種	51.19%
IGMP 機能：有り (いずれかの状態で転送不可)	43 機種	30.38%
合計	150 機種	81.57%

表 4-4 構成 5 における IGMP 機能の有無に関する調査結果

内訳	機種数	シェア合計
IGMP 機能：無し (全状態で転送される)	72 機種	33.68%
IGMP 機能：有り (いずれかの状態で転送不可)	22 機種	15.50%
合計	94 機種	49.18%

表 4-5 構成 2 におけるマルチキャストパケット転送結果

状態	マルチキャスト パケットの方向	転送可		転送不可	
		機種数	割合	機種数	割合
初期状態	有線→無線	138 機種	78.960%	12 機種	2.614%
	無線→有線	145 機種	80.894%	5 機種	0.680%
片側 Join 状態 (有線のみ Join)	有線→無線	138 機種	76.972%	12 機種	4.602%
	無線→有線	150 機種	81.574%	0 機種	0.000%
片側 Join 状態 (無線のみ Join)	有線→無線	148 機種	81.394%	2 機種	0.180%
	無線→有線	144 機種	79.940%	6 機種	1.634%
両側 Join 状態	有線→無線	150 機種	81.574%	0 機種	0.000%
	無線→有線	150 機種	81.574%	0 機種	0.000%

表 4-6 構成 5 におけるマルチキャストパケット転送結果

状態	マルチキャスト パケットの方向	転送可		転送不可	
		機種数	割合	機種数	割合
初期状態	5G→2.4G	92 機種	46.547%	2 機種	2.636%
	2.4G→5G	92 機種	48.937%	2 機種	0.246%
片側 Join 状態 (2.4GHz 帯のみ)	5G→2.4G	94 機種	49.183%	0 機種	0.000%
	2.4G→5G	91 機種	48.767%	3 機種	0.416%
片側 Join 状態 (5GHz 帯のみ)	5G→2.4G	91 機種	46.185%	3 機種	2.998%
	2.4G→5G	94 機種	49.183%	0 機種	0.000%
両側 Join 状態	5G→2.4G	94 機種	49.183%	0 機種	0.000%
	2.4G→5G	94 機種	49.183%	0 機種	0.000%

上記の結果より、課題 1 の市場における影響度の数値化と、課題 1 を引き起こす未定義仕様を明確化できた。具体的には、Join メッセージを送信しない端末（IGMP 機能無し）は、表 4-3 より市場シェア 30.38%の IGMP 機能有りのルータにおける有線 LAN－無線 LAN（2.4GHz 帯）間のマルチキャスト通信に失敗し、表 4-4 より市場シェア 15.5%の IGMP 機能有りルータにおける無線 LAN（2.4GHz 帯）－無線 LAN（5GHz 帯）間のマルチキャスト通信に失敗することが判明した。しかしながら、表 4-5 および表 4-6 における両側 Join 状態（両方の端末が IGMP 機能有りの場合）の結果より、初期状態や片側 Join 状態でマルチキャスト通信ができない場合でも、両側 Join 状態となれば確実にマルチキャスト通信が可能となることがわかった。

また、第 3 章の調査結果である表 3-8 および表 3-9 における、両側 Join 状態でも ECHONET Lite のマルチキャストパケットを転送しない不具合を持つ 1 機種種のルータに関して、今回の調査では正常に UPnP/DLNA のマルチキャストパケットを転送することを確認した。つまりマルチキャストグループが異なることによりルータの実装仕様に差異があるということがわかった。

以上より、第 3 章と同様、端末は IGMP を実装し、起動時に必ず Join メッセージを送信すれば課題 1 を解決することができると考えた。

(2) マルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限調査結果

調査対象ルータ 150 機種のうち、Querier 機能対応の有無、およびマルチキャスト管理テーブルのエントリ有効期限の有無に関する調査結果を表 4-7 に示す。

表 4-7 の結果より、課題 2 の市場における影響度の数値化と、課題 2 を引き起こす未定義仕様を明確化できた。具体的には、3.4.4 項における ECHONET Lite の調査結果と同じく市場シェア 0.81%のルータが Querier 機能に対応し、かつエントリ有効期限があるルータであり、応答（Join メッセージ）を返さない場合は比較的短時間でマルチキャスト管理テーブルからエントリが削除されることが判明した。また、市場シェア 20.43%のルータが Querier 機能非対応かつテーブルに有効期限があり、比較的短時間でマルチキャスト管理テーブルからエントリが削除されることが判明した。そしてエントリ有効期限の最小値は ECHONET Lite の調査結果と同じく 120 秒であることがわかった。

た.

表 4-7 Querier 機能対応の有無およびエントリ有効期限調査結果

内訳	機種数	シェア合計	
Querier 機能対応	29 機種	9.09%	
有効期限 7 分以上 または有効期限なし	23 機種	8.28%	
有効期限 250 秒 (送信間隔 125 秒×2 回)	4 機種	0.51%	合計 0.81%
有効期限 260 秒 (送信間隔 60 秒×4 回)	1 機種	0.02%	
有効期限 360 秒 (送信間隔 30 秒×12 回)	1 機種	0.28%	
Querier 機能非対応	121 機種	72.48%	
有効期限 7 分以上 または有効期限なし	104 機種	52.05%	
有効期限 120 秒	1 機種	1.48%	合計 20.43%
有効期限 260 秒	3 機種	4.14%	
有効期限 300 秒	13 機種	14.81%	

以上より、第 3 章と同様、端末はルータからの Query には必ず応答 (Join) を送信すれば、そして 120 秒おきに Join メッセージを送信してエントリを維持すれば課題 2 を解決することができると思った。

4.4 課題を解決する提案手法

4.4 項では、4.3.4 項の調査結果を踏まえて、第 3 章で提案したルータの IGMP 仕様の差異を ECHONET Lite の端末側で吸収して相互接続性を確保する手法を UPnP/DLNA にも適用した「ルータの実装仕様に起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法」を提案する。

具体的には以下の提案手法(1)～(3)を端末側で実装することを提案する。

(1) 起動時に必ず Join メッセージを送信

端末は、ネットワークに接続時に必ず Join メッセージを送信する。そうすれば必ず両側 Join 状態となり相互接続が可能となる。

(2) 定期的に Join メッセージを送信

ルータが Querier 機能に非対応である場合の対策として、マルチキャスト管理テーブルからエントリが削除される前に端末からテーブル更新を行う。ここで、送信間隔が短すぎるとネットワーク上に不要なトラフィックが生じ、特に無線のように帯域に制限がある場合、他の端末にも負荷をかけてしまう。そのため、表 4-7 の結果よりエントリ有効期限の最小値である 120 秒間隔で、定期的に Membership Report (Join メッセージ) を送信する。

(3) ルータからの Query には必ず応答 (Join) を送信

ルータが Querier 機能に対応している場合の対策として、ルータからの Query に対して必ず応答 (Join メッセージ) を返してテーブル更新を依頼する。

上記提案手法(1)により課題 1 を解決可能、提案手法(2)(3)により課題 2 を解決可能である。

ここで、(1)~(3)における Join メッセージの宛先としては、UPnP/DLNA のマルチキャストアドレス (239.255.255.250) を使用する。

4.5 実験

実験環境を図 4-2 に示す。4.3.1 項の調査環境における調査ツール (端末 1 および端末 2) を、提案手法を実装した DLNA デバイス側エミュレータ (DLNA デバイス)、および DLNA コントローラ側エミュレータ (DLNA コントローラ) に置き換えた。また構成 2 においては、4.3.2 項の調査対象ルータ 150 機種 of ルータ (シェア合計 81.57%) を実験対象とし、構成 5 においては、4.3.2 項の調査対象ルータ 94 機種 of ルータ (シェア合計 49.18%) を実験対象とし、本提案手法の効果を評価した。

ここで、DLNA デバイスが送信するマルチキャストパケットは「ssdp:alive 通知[87]」、DLNA コ

ントローラが送信するマルチキャストパケットは「M-SEARCH 要求」である。4.3.3 項の調査方法では「ssdp:alive 通知」は使用していないが、同じマルチキャストアドレス (239.255.255.250) とポート番号 (1900) を使用するため評価上で問題はない。

加えて、DLNA デバイスは IGMPv2、DLNA コントローラは IGMPv3 を実装しており、4.3.1 項の調査環境と同等の実験環境となる。

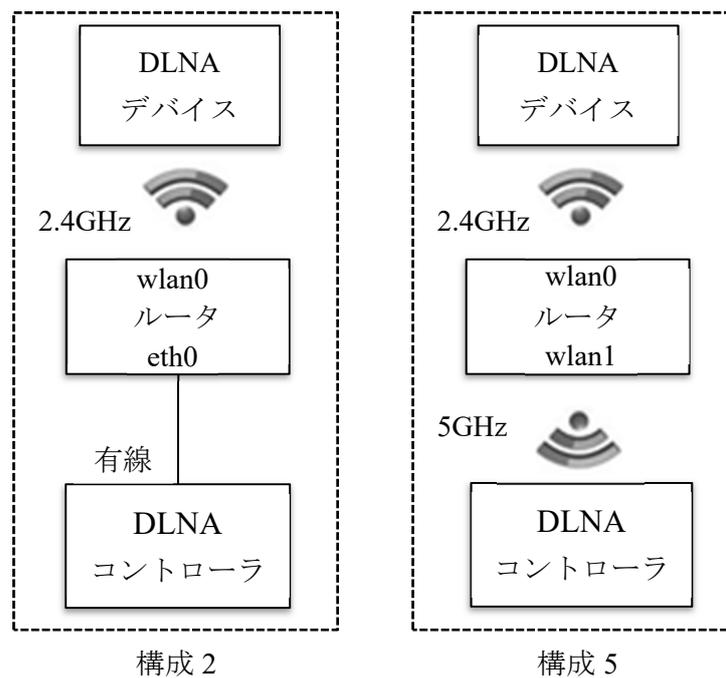


図 4-2 実験環境

4.5.1 実験項目

(1) 起動直後の機器発見

まず DLNA デバイスからのマルチキャスト通信による通知 (ssdp:alive 通知) を受信して ENL コントローラが ENL デバイスを発見できるかどうかを確認した。次に DLNA コントローラからマルチキャスト通信による検索要求 (M-SEARCH 要求) を送信し DLNA デバイスからの応答受信により、DLNA コントローラが DLNA デバイスを発見できるかどうかを確認した。

これにより、提案手法(1)の効果、すなわち双方の端末が起動時に Join メッセージを送信し、ルータのマルチキャスト管理テーブルに確実にエントリを作成することで両側 Join 状態となり、DLNA

のマルチキャストパケットを双方向に転送可能となる効果を検証した。

(2) 6分超経過後の機器発見

(1)から6分以上経過後に、再度(1)の手順により ENL コントローラから ENL デバイスが発見できることを確認した。ここで、今回の調査結果から明確に有効期限が確認できたルータの中で一番長いものは、表 4-7 より 360 秒 (6 分) であったため 6 分の経過時間を置くこととした。また表 4-7 より、最短の有効期限が 120 秒であったため、6 分経過後の機器発見ができることを確認することで、表 4-7 の全ルータのテーブルを維持するために、提案手法(2)(3)の有効性、すなわち端末からの Join メッセージの定期送信 (120 秒間隔) と、ルータからの Query メッセージに対する端末の Join メッセージ応答の有効性を検証した。

4.5.2 実験結果

起動直後の機器発見の実験結果を表 4-8 に、また 6 分超経過後の機器発見の実験結果を表 4-9 に示す。

実験の結果から、今回提案の手法を端末側で実装すれば、UPnP/DLNA に関しても全調査対象ルータ (シェア合計 81.57%) において、マルチキャスト管理テーブルへのエントリ作成、維持を可能とし、課題解決可能であることがわかった。

表 4-8 起動直後の機器発見の実験結果

構成	課題の有無	提案手法搭載前		提案手法搭載後		実験結果
		機種数	シェア合計	機種数	シェア合計	
構成 2	課題無し	107 機種	51.19%	150 機種	81.57%	150 機種すべてで発見可能
	課題有り	43 機種	30.38%	0 機種	0%	
構成 5	課題無し	72 機種	33.68%	94 機種	49.18%	94 機種すべてで発見可能
	課題有り	22 機種	15.50%	0 機種	0%	

表 4-9 6分超経過後の機器発見の実験結果

Querier 機能	エントリ有効期限	機種数	シェア合計	提案手法搭載前	提案手法搭載後
対応	7分以上または有効期限なし	22機種	8.26%	課題無し	6分後も発見可能 課題なし
	250秒	4機種	0.51%	課題有り	6分後も発見可能 課題なし
	260秒	1機種	0.02%		
	360秒	1機種	0.28%		
非対応	7分以上または有効期限なし	104機種	52.05%	課題無し	6分後も発見可能 課題なし
	120秒	1機種	1.48%	課題有り	6分後も発見可能 課題なし
	260秒	3機種	4.14%		
	300秒	13機種	14.81%		

4.6 継続調査

第3章における ECHONET Lite のマルチキャスト通信の実装調査を行ったときの調査対象ルータ（3.4.2 項）も、第4章における UPnP/DLNA のマルチキャスト通信の実装調査を行ったときの調査対象ルータ（4.3.2 項）も、2017年9月時点の市場シェアをベースにしたものである。

ゆえに2017年9月以降、課題が存在するルータの市場シェアがどのように推移しているかを調査した。および表 4-7 の、マルチキャスト管理テーブルに有効期限を持つルータに関して、2017年9月、2018年9月、2019年7月の2年間の市場シェア合計を表 4-10 に示す。

表 4-10 管理テーブルに有効期限があるルータの市場シェア合計の推移

分類		2017.9 時点の シェア合計	2018.9 時点の シェア合計	2019.6 時点の シェア合計
調査 対象	課題あり（有効期限あり）	21.24%	19.80%	17.82%
	課題なし（有効期限なし）	60.34%	57.96%	55.01%
未調査		16.58%	20.81%	23.35%
パナソニックが保有するルータのシェア		98.16%	98.57%	96.18%

表 4-10 より、管理テーブルのエントリに有効期限がある、すなわち課題のあるルータの過去 2 年間のシェア合計は減少傾向である。しかし、2019 年 6 月時点で課題が存在するルータが 17.82% (約 235 万台相当) 存在していることが判明した。つまり、第 3 章および第 4 章における提案手法の端末適用の意義は大いに存在すると考えられる。ただし、有効期間が 120 秒であるルータに注目した場合、そのシェアは 1.48% (約 25 万 4,000 台) から 0.03% (約 3,400 台相当) に低下している。このルータは 2012 年製の製品であり、今後シェアが上昇するとは考えにくい。つまり、提案手法の IGMP Join の送信間隔である「120 秒」は必須ではないと考えられる。メーカーや開発者の考え方、あるいは商品仕様などによって、有効期限 120 秒のルータを割り切るという考え方もできるという意味である。そのような場合、および表 4-7 より、次に有効期間の短い 250 秒のルータを対象として定期送信間隔を検討することも可能と考える。第 3 章および第 4 章における実験において、IGMP Join の定期送信間隔を最短 120 秒でテーブル維持の効果を確認しているため、送信間隔を 250 秒に設定した場合でも、提案手法は有効と考えられる。

4.7 まとめ

第 4 章では、UPnP/DLNA 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用して未定義仕様を明確化し、課題を解決する手法を考案し、UPnP/DLNA 機器の相互接続性を向上させた。具体的には、ECHONET Lite のときと同様、マルチキャスト通信を実現する標準規格 IGMP の未定義仕様に対する解釈の違いから生じたルータの実装仕様の差異が CFM 問題を生み出していることを明確化した。ECHONET Lite と同手法の端末実装により相互接続性を確保できることも確認した。その結果、市場シェア 20.43% (販売累計台数 338 万台) のルータにおける CFM 問題を解決できた。

今回の調査対象ルータ 150 機種 (シェア合計 81.57%, 累計販売台数 1,351 万台相当) において、端末側が提案手法を実装しない場合 UPnP のマルチキャスト通信が可能なルータは 107 機種 (シェア合計 51.19%) であるのに対し、提案手法を実装した端末同士の場合、150 機種すべて (シェア合計 81.57%) で問題なくマルチキャスト通信による相互接続可能であることを確認した (構成 2 における結果)。

また今回の調査で、提案手法を実装しない機器をネットワークに接続した場合、UPnP/DLNA マルチキャスト転送結果（表 4-5 および表 4-6）における「転送不可」の機種数よりも、ECHONET Lite のマルチキャスト転送結果（表 3-8 および表 3-9）の機種数の方が多いことから、ECHONET Lite のマルチキャストパケットよりも、UPnP/DLNA のマルチキャストパケットの方が転送される割合が多いことがわかった。これは、市場において発売期間の長い UPnP/DLNA 対応製品で相互接続性問題が多数報告されたことに対するルータメーカーの対応により、Join メッセージの有無関係なく UPnP/DLNA のマルチキャストパケットを転送する対応が取られているためと推測できる。今後市場において ECHONET Lite 対応製品が増加していくことを鑑みると、ECHONET Lite 製品同士での相互接続性問題が発生する可能性が高い。ゆえに、ルータメーカーに ECHONET Lite のマルチキャストパケットも転送するように提案していくことは重要であると再認識した。

また、第 3 章および第 4 章の調査において判明した課題が存在するルータに関し、市場シェアの推移を調査した結果、2019 年 6 月時点で CFM 問題が存在するルータが 17.82%（約 235 万台相当）存在していることが判明した。つまり、第 3 章および第 4 章における提案手法の端末適用の意義を示すことができた。

第5章 中継機配下の IoT 機器の CFM 問題 への SHIPs の適用と解決

第5章では、近年シェアが増加傾向である中継機がスマートホームに設置された場合に発生する、中継機配下の IoT 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用し、CFM 問題を解決し相互接続性を向上させる取り組みをまとめた。具体的には、まず市場問題を解析し、中継機が GTK 更新時に機器に通知しないため機器間で GTK 不一致が発生することを突き止め課題と置いた。これは IEEE 802.11i における GTK の仕様が曖昧さにより中継機の実装仕様に差異が出ているためであり、未定義仕様である中継機の管理テーブルのエントリ有効期限が切れた後に端末が無線再接続をすると中継機が GTK 更新すること、また未定義仕様である GTK 更新通知を中継機が行わない場合に機器間での GTK 不一致が発生し、通信不能を引き起こすことを解明した。課題解決のためには市場の中継機の実装仕様の調査が必要と考え、市場シェア上位 90 機種（計 79.1%、累計販売台数 1,202 万台相当）のルータのうち、中継機能を保有する 57 機種（シェア合計 53.9%、累計販売台数 710 万台相当）を調査して実装仕様を明確化し、それによる CFM 問題の影響度を数値化した。そして課題を解決する「中継機の実装仕様に起因する IoT 機器の相互接続性向上手法」を考案した。詳細な説明については、次節以降に記載する。なお、本章の内容は著者論文[91]に該当する。

5.1 はじめに

1.1 項の背景でも触れたとおり、家庭では各端末の接続は無線が主流となってきた。家庭によってはリビングに設置された家庭用無線ルータ（以降ルータと呼ぶ）の電波が弱い場所や届かない場所も少なからずあり、家中どこにいても端末からインターネットにアクセスしたいというユーザーの要望を満たせないケースが発生している。このような問題を解決するため中継機を導入する家庭が

増加している。図 5-1 は日本国内向けルータのうち、GfK による POS トラッキング調査結果[74] を利用して算出した 2014 年 12 月時点のシェアランク上位 90 機種、2016 年 9 月時点のシェアランク上位 90 機種、2018 年 3 月時点のシェアランク上位 90 機種のルータに対してそれぞれ中継機能を保有するか否かを調査し、保有する機種のシェア合計の推移を示したものである。

図 5-1 より 2014 年 12 月時点から 2016 年 9 月時点では市場シェアがわずかに 1%しか増加していないにも関わらず、2016 年 9 月時点から 2018 年 3 月時点においては 17%もシェアを伸ばしていることから、中継機はここ数年で急速に普及していることがわかる。

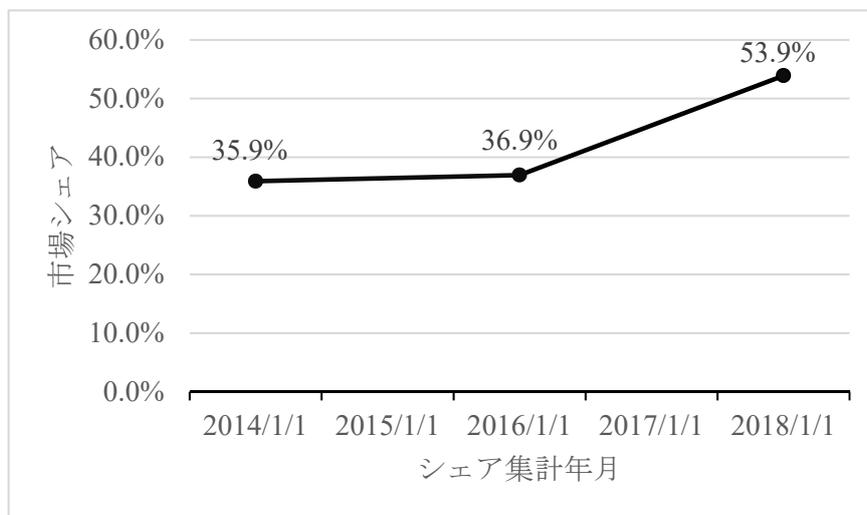


図 5-1 無線中継機能のシェア推移

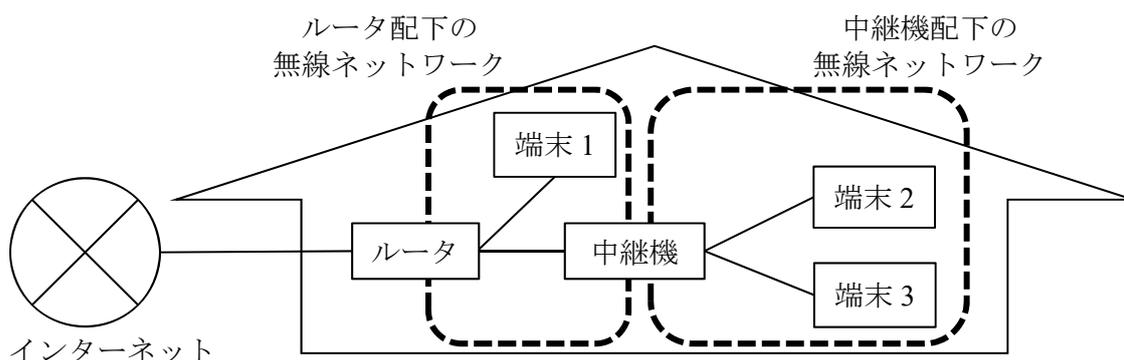


図 5-2 無線 LAN ネットワークの例

図 5-2 に示すように家庭内のネットワークに中継機を設置した場合、ルータ配下の無線ネットワークと中継機配下の無線ネットワークに切り分けられる。通常、ルータや中継機などの無線アクセスポイント機能を持つ製品は、Wi-Fi Alliance の WPA (Wi-Fi Protected Access) および WPA2 の

認証プログラムを取得している[92]. WPA2はIEEE 802.11i[93]で規格化された無線LANセキュリティ仕様である. 各端末は, それぞれが接続するルータあるいは中継機から 4-way handshake と呼ばれる鍵交換シーケンスを通じて取得する暗号鍵を用いて通信の暗号化/復号を行う. ルータと中継機間の通信においてはルータが配布する暗号鍵を使用する. ここで暗号鍵には, ユニキャスト通信する際に使用する PTK (Pairwise Transient Key) と, ブロードキャスト通信およびマルチキャスト通信する際に使用する GTK (Group Temporal Key) の 2 種類の鍵がある. ここで端末が GTK を使用するの, ブロードキャスト通信あるいはマルチキャスト通信で受信したパケットを復号するときのみである. それは, 端末がブロードキャスト/マルチキャスト通信でパケットを送信する場合, Layer 2 では端末から中継機へのユニキャスト通信となるため, PTK で暗号化して送信するが, それを受け取ったルータ・中継機が GTK で暗号化してネットワーク内の全端末あるいは特定端末に転送し, 受信した端末が GTK で復号するという仕組みによるためである. また, PTK は端末ごとに異なるが, GTK はルータ配下の全端末, あるいは中継機配下の全端末でそれぞれ共通である. ルータ・中継機の中には, この GTK を一定時間ごとに更新することにより通信の安全性を高めるものもある. GTK が更新された場合, 通常であればルータ・中継機は自身に接続された全端末に対して GTK 更新通知を行う必要がある. そうしなければ, ネットワーク上の端末間において GTK の不一致が発生し, GTK を利用した通信が行えなくなるためである. しかし, 市場では実際に中継機配下の端末間で GTK が不一致となりブロードキャスト/マルチキャスト通信ができなくなるという問題が発生している. この問題はマルチキャスト通信を利用することを前提とした UPnP/DLNA 対応製品や ECHONET Lite 対応製品はサービスが利用できなくなるため深刻な問題である. 原因として, Layer 2 における無線セキュリティの標準規格である IEEE 802.11i では GTK 更新通知のタイミングは明記されていないことや, そもそも中継機の実装仕様に関しては特に標準規格がないため, 各ルータメーカ, あるいは無線のチップベンダの開発者の仕様解釈により中継機の実装仕様の違いが生じ相互接続性を阻害していると考えられる. 先述のとおり, 中継機の市場への普及は進んでおり今後も市場におけるトラブルの増加は避けられないため早急な解決が必要である.

第 5 章では, このような Layer 2 における標準規格の仕様解釈の違いが引き起こすと考えられる CFM 問題に関し, 課題を引き起こす未定義仕様を明確化し, 端末側で CFM 問題を解決するための

手法の提案を行うとともに提案手法の評価と考察を述べる。

5.2 CFM 問題の解析と課題

5.2 節では、SHIPs の「手順 1. 相互接続性問題の解析と課題の設定」を実施した。

5.2.1 CFM 問題の解析と課題の発生要因の特定

市場から報告された CFM 問題の内容は、「最初は相互接続可能だった端末同士のいずれかが一時的に無線を切断し再接続すると相互接続できなくなる」というものであった。

この CFM 問題の再現環境および再現手順を確立すべく、報告されたルータ、中継機を用いて無線 LAN ネットワークを構築した。また市販されている無線製品である端末 A、端末 B を図 5-3 の構成となるよう接続した。上位のルータの GTK 更新間隔はデフォルトの「30 分」のままとした。

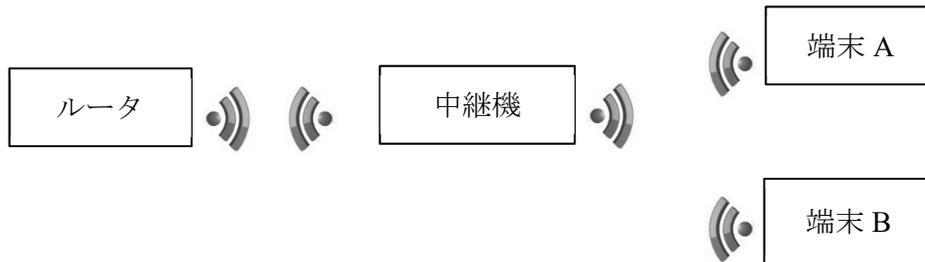


図 5-3 再現環境

この再現環境において、端末 A および端末 B を中継機に無線接続すると、いずれも中継機から同じ GTK を配布され、端末 B からマルチキャストで送信される機器検索要求に対して端末 A が応答を返し、相互接続可能であった (図 5-4 の①)。その後端末 B の無線を切断し、すぐ再接続させると、端末 B が 4-way handshake を通じて中継機から配布される GTK は切断前の GTK と同じであり、相互接続可能であった。端末 B の切断時間が短い場合には再現しないと考え、端末 B を切断してから 12 時間経過後に端末 B を再度無線接続させたところ、4-way handshake を通じて中継機から配布される GTK が更新された (図 5-4 の②)。このとき中継機から端末 A への GTK 更新通知は送信されず、端末 A と端末 B の GTK が不一致となる状態となった。その後端末 B から端末 A を検索させると、端末 B から端末 A 宛に機器検索要求がマルチキャストで送信されるが、中継機が新しい GTK で暗号化するため、古い GTK を持つ端末 A がそれを復号できなかった (図 5-4 の③)。

その結果端末 B は機器検索応答をえられず端末 A を発見できなかった (図 5-4 の④). つまり, GTK の不一致が発生したことにより, 端末間でマルチキャスト通信が不能になり相互接続できないという CFM 問題が引き起こされていることが判明した. このように CFM 問題を引き起こす要因となる「ネットワーク上の端末間で GTK の不一致が発生すること」を課題と設定した.

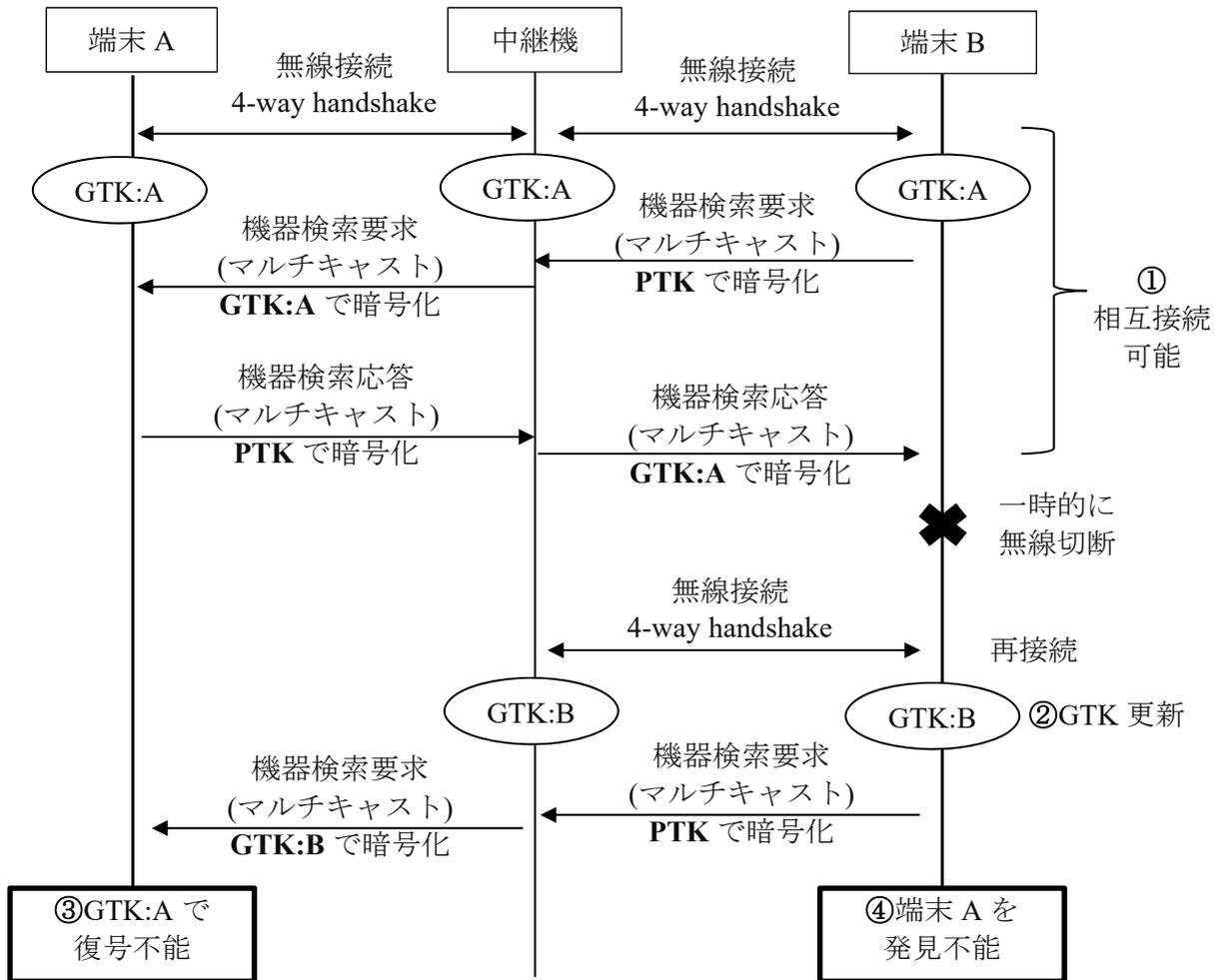


図 5-4 市場問題の解析

ここで, 中継機の GTK 更新条件についてより明確化を図るため, どのくらい端末 B を切断すれば中継機の GTK 更新が発生するのかを調査した. 先述の再現環境では上位のルータの GTK 更新間隔はデフォルトの「30 分」で実施したため, このパラメータも変化させながら調査を行った結果が表 5-1 である. 表 5-1 によると, ルータの GTK 更新間隔が 5 分および 10 分の場合には端末の切断期間が何分であろうと発生しなかった. また端末の切断時間が 5 分および 10 分の場合にはルータの GTK 更新間隔が何分であろうと発生しなかった. このことによりルータの GTK 更新間隔あるいは

端末の切断期間のいずれか一方が 10 分以内であれば、中継機の GTK 更新は発生しないことがわかった。

表 5-1 ルータの GTK 更新間隔と端末切断期間の調査結果

ルータの GTK 更新間隔	端末の 切断期間	中継機の GTK 更新発生の有無
5 分	5 分	発生しない
	10 分	発生しない
	30 分	発生しない
	1 時間	発生しない
10 分	5 分	発生しない
	10 分	発生しない
	30 分	発生しない
	1 時間	発生しない
15 分	5 分	発生しない
	10 分	発生しない
	30 分	発生する
	1 時間	発生する
30 分	5 分	発生しない
	10 分	発生しない
	30 分	発生する
	1 時間	発生する

また、表 5-1 の結果から、ルータの GTK 更新間隔が 15 分以上の場合に、端末の切断期間中にルータの GTK 更新が行われると、中継機の GTK 更新が発生するのではないかと考えた。そこで上記ルータの GTK 更新間隔を 30 分に固定した環境で、端末の切断期間中にルータの GTK 更新が行われる場合の中継機の GTK 更新調査を行った。まず端末を一時的に切断した後（図 5-5 の①）、ルータの GTK 更新が行われたタイミング（図 5-5 の②）で端末を再接続させ（図 5-5 の③）、中継機の

GTK 更新が発生するかどうかを確認した (図 5-5 の④). 対比のため, 切断期間中に上位ルータの GTK 更新が行われない場合 (図 5-5 の②がない場合) も確認した. そのときの端末の切断期間 (図 5-5 の⑤) と中継機の GTK 更新発生の有無をまとめたものが表 5-2 である.

表 5-2 より, 端末の切断期間中にルータの GTK 更新が発生することは, 中継機の GTK 更新発生条件とは無関係であることがわかった. そして, GTK 更新発生の条件は「端末の切断期間が 12 分以上」であることがわかった.

以上より, 「ネットワーク上の端末間で GTK の不一致が発生する」という課題の発生要因は下記の 2 つであると判明した.

- (1) 一定期間 (12 分以上) 切断された端末が再接続すると中継機が GTK を更新すること
- (2) GTK 更新時に中継機が接続済み端末に GTK 更新通知を行わないこと

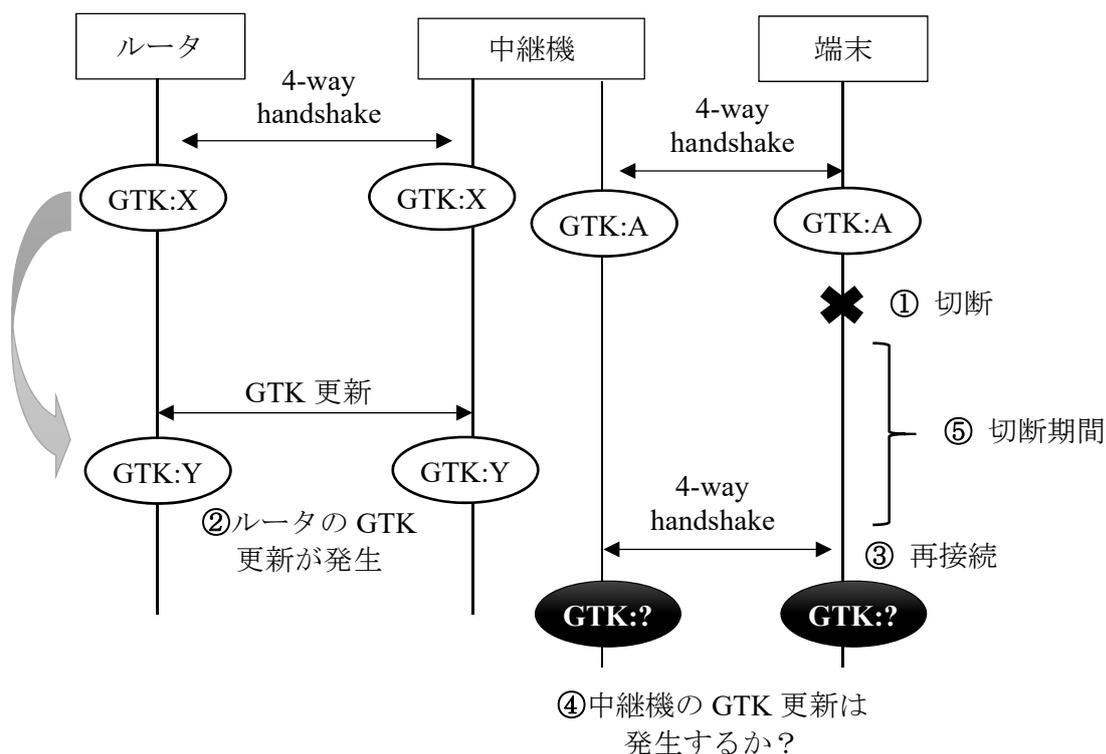


図 5-5 調査手順

表 5-2 端末切断期間中のルータの GTK 更新の関連性

端末の 切断期間	中継機の GTK 更新発生の有無	
	ルータが GTK 更新 する場合	ルータが GTK 更新 しない場合
3 分	発生しない	発生しない
6 分	発生しない	発生しない
8 分	発生しない	発生しない
10 分	発生しない	発生しない
10 分 30 秒	発生しない	発生しない
11 分	発生しない	発生しない
11 分 30 秒	発生しない	発生しない
12 分	発生する	発生する
15 分	発生する	発生する
20 分	発生する	発生する
30 分	発生する	-

5.2.2 課題が発生する中継機の実装仕様解析

5.2.1 項で課題の発生要因は 2 つあることが判明したが、それぞれどのような未定義仕様の解釈から生じる問題なのかを明らかにする必要がある。そもそも中継機の実装仕様には標準規格はないため、まず、無線中継の実装仕様を調査する。そこで、課題が発生しない中継機および課題が発生する中継機の無線 LAN 上のパケットをそれぞれ解析した。以下、図 5-6～図 5-8 を用いて説明する。

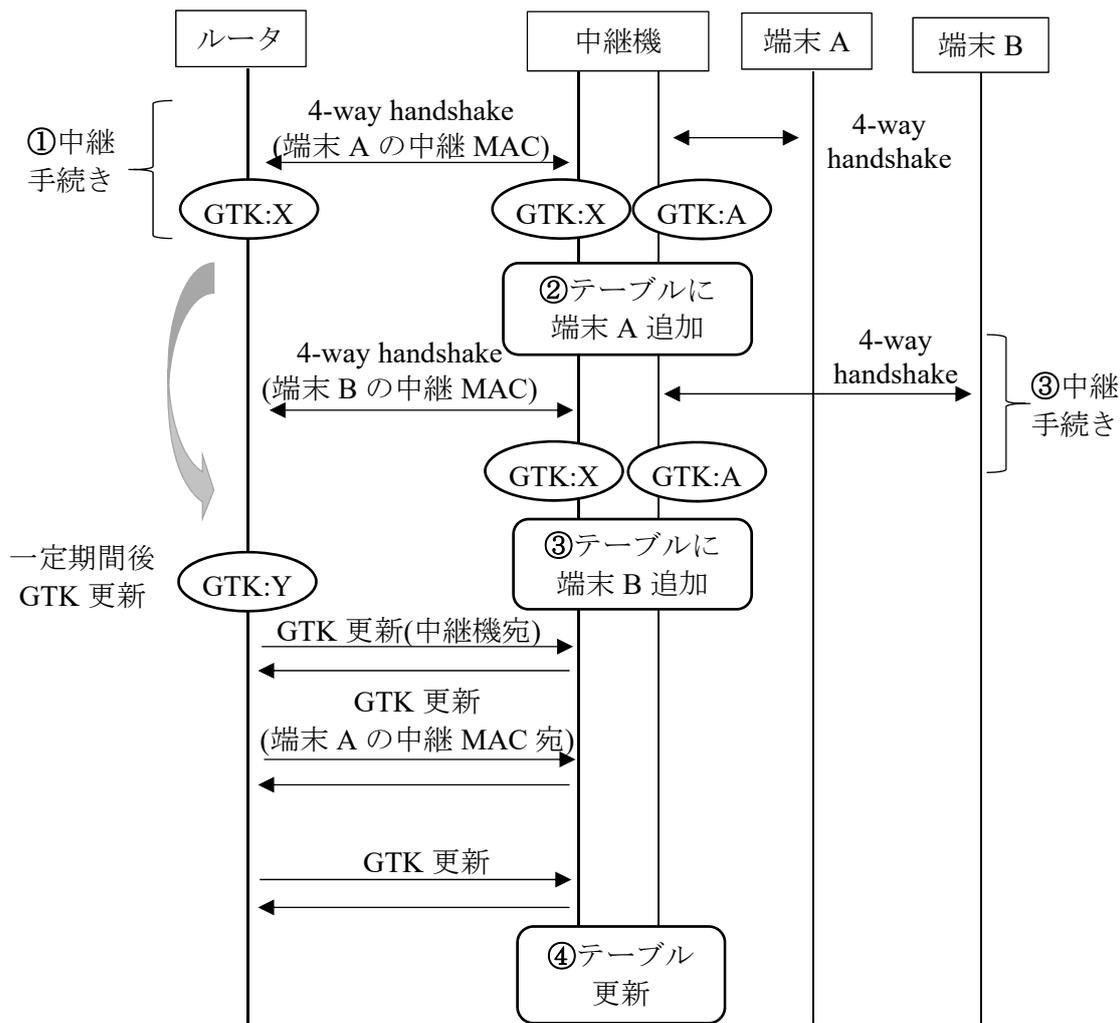


図 5-6 無線中継の仕組み

図 5-6 は、課題が発生しない中継機を用いて無線中継の実装仕様を調査した際のシーケンスである。まず端末 A が中継機に接続すると、中継機とルータ間でも無線接続が行われていた。中継機は無線ルータと端末の無線通信を中継するものであるため、端末が中継機に接続した際に、端末の代わりにルータに対して無線接続を行っていると考えられる。このとき中継機は端末 A の MAC アドレスではなく、中継機自身が管理する MAC アドレス（以降、中継 MAC アドレスと呼ぶ）に付け替えて接続を行っていた。これで端末 A とルータとの無線中継手続きが完了する（図 5-6 の①）。この挙動から、中継機はルータに対しては無線クライアントとして、また自身に接続する端末に対しては無線アクセスポイントとして振る舞うことにより、つまり、無線の標準規格（IEEE 802.11 シリーズ[22]）の無線クライアントと無線アクセスポイントの両方の規格を同時に実行することにより無線

中継を実現していると判断できる。このとき中継機では、自身に接続する端末ごとにこの無線中継情報を記憶しておくため、管理テーブルを設けていると考える。つまり、自身で実行している無線クライアントとしての情報と無線アクセスポイントとしての情報を結び付けて管理するためのテーブルである。そしてその管理テーブルに「ルータの SSID, 選択した暗号スイート, 中継 MAC アドレス, ルータから中継 MAC に配布された鍵情報」および「中継機の SSID, 選択した暗号スイート, 端末の MAC アドレス, 中継機が端末に配布する鍵情報」などの無線中継に必要な情報を対にしたエントリを追加していると考えられる (図 5-6 の②)。端末 B が中継機に接続する場合も同様である (図 5-6 の③)。その後ルータ側の GTK が更新されると、ルータは自身に接続された全端末に対して GTK 更新通知を行っていた。それらは中継機および中継 MAC アドレス宛となっており、中継機は自身と自身に接続する端末の分だけ応答を返していた。このとき中継機は管理テーブルのそれぞれのエントリに対してルータの GTK を新しく配布されたものに更新していると考えられる (図 5-6 の④)。ここまでの挙動は、課題が発生しない中継機および課題が発生する中継機で共通であり、一般的な中継機の実装仕様であると考えられる。

上記を踏まえて、課題の発生要因(1)に関して考察する。

まず課題が発生しない中継機の場合、端末 B が一定期間 (30 分) 切断し再接続すると、中継機とルータの間で中継手続きが行われる (図 5-7 の①)。端末 B が 4-way handshake で取得する GTK は以前と同じ GTK であるため、端末 A と端末 B との GTK は一致する (図 5-7 の②)。

また課題が発生する中継機に、端末 B が 12 分以内に再接続すると、中継機とルータの間で中継手続きが行われない (図 5-8 の①)。端末 B が再接続時に 4-way handshake で取得する GTK は以前と同じ GTK であり、端末 A と端末 B との GTK は一致する (図 5-8 の②)。

一方、課題の発生する中継機に対して、切断後 12 分以上経過後に端末 B を再接続させると、中継機とルータの間で中継手続きが行われる (図 5-9 の①)。このタイミングで中継機の GTK が更新され、端末 B が 4-way handshake で取得する GTK は新しい GTK であるため、端末 A と端末 B との GTK が不一致となる (図 5-9 の②)。

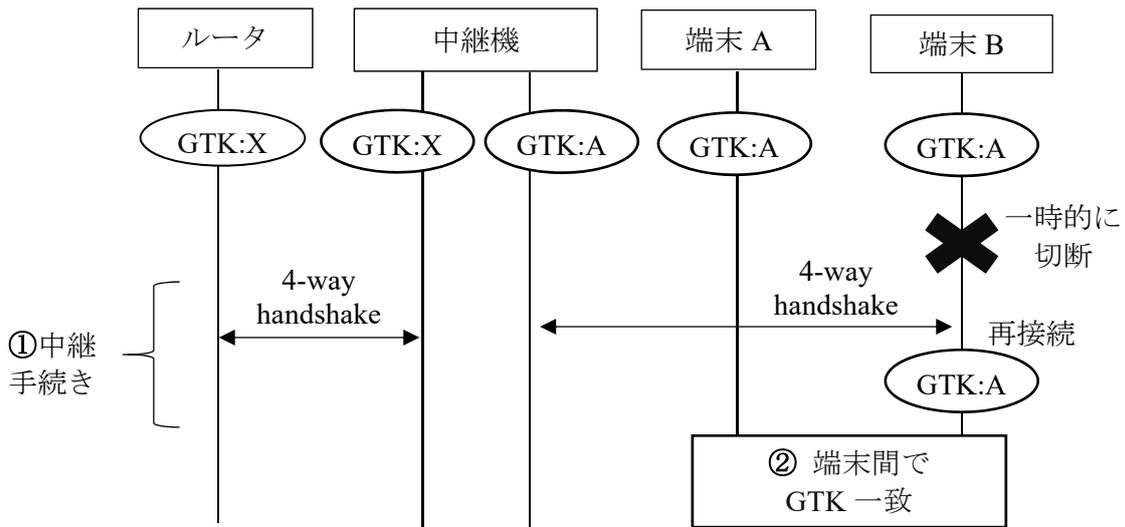


図 5-7 課題が発生しない中継機の場合

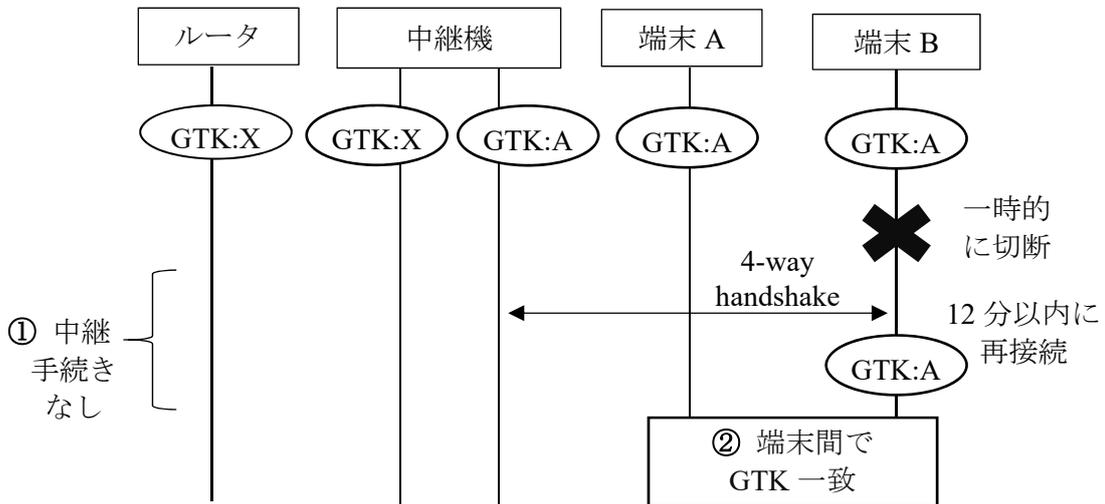


図 5-8 課題が発生する中継機に 12 分以内に再接続した場合

以上より、課題が発生する中継機において、切断した端末 B が 12 分以内に再接続した際に中継手続きを行わない理由は、図 5-10 に示すように、端末の切断後も一定期間管理テーブルに有効期限を設けており、有効期限内に管理テーブルにアクセスがある場合、ルータとの中継手続きは行うことなくテーブルの情報を使用するためと考えられる。このように管理テーブルに有効期限を設けている理由としては、無線の電波状況やアプリケーションの仕様などにより無線切断・再接続を何度か繰り返す端末も存在すること、またパケットロスにより端末から応答が返らない場合などの準正常系を考慮したものと考えることができる。

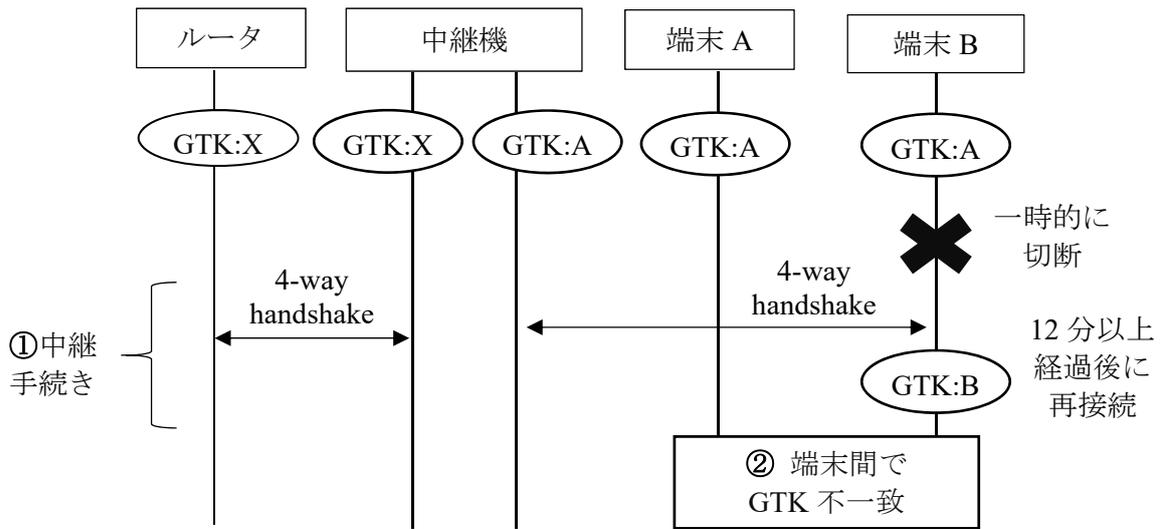


図 5-9 課題が発生する中継機に 12 分以上経過後に再接続した場合

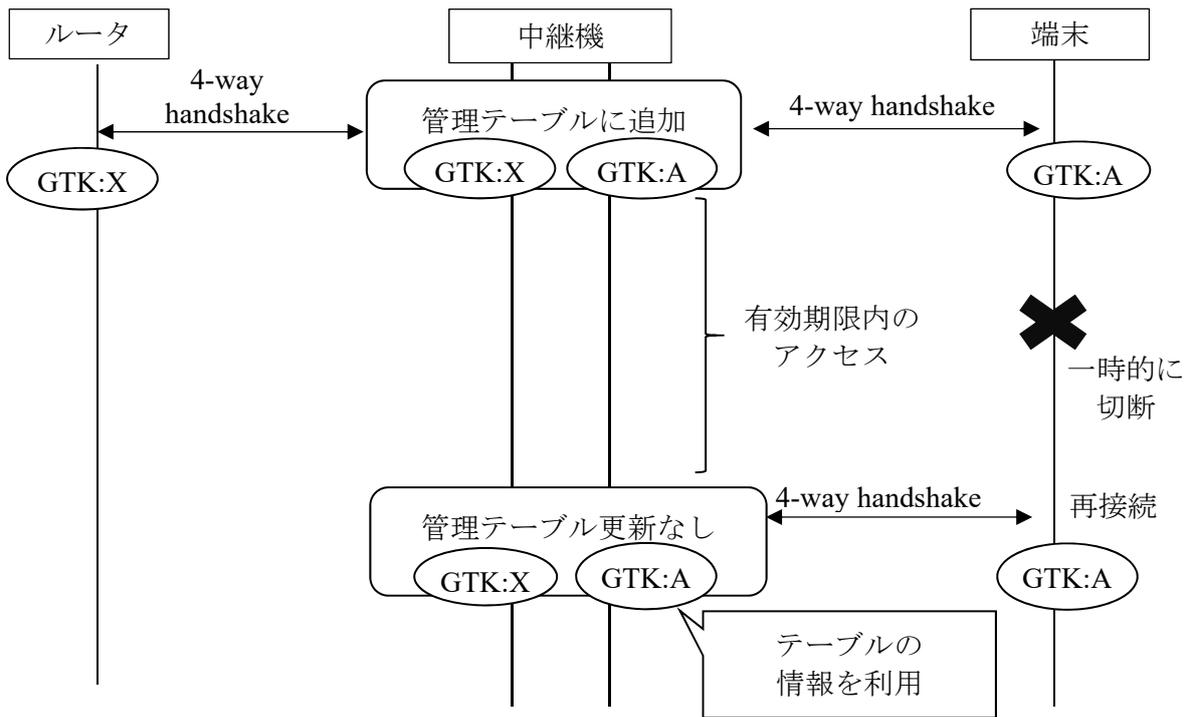


図 5-10 管理テーブルの仕様

また切断した端末 B が 12 分以上経過後に再接続した際に中継機の GTK が更新された理由は、テーブルの有効期限が切れていたためと考える。具体的には、表 5-2 より、中継機に接続していた端

末が 12 分以上切断し再接続すると、中継機の GTK 更新が発生したため、この調査対象の中継機の管理テーブルの有効期限は約 12 分弱であると考えるのが妥当である。つまり、図 5-11 に示すように、管理テーブルの有効期限内に端末からのアクセスがなければ管理テーブルからエントリが削除され、その後の端末接続時の 4-way handshake で新しい GTK が生成されるため中継機の GTK が更新される実装仕様であると考えられる。ここで表 5-1 より、ルータの GTK 更新間隔が 10 分以内であれば端末の切断期間が何分であろうと、端末の再接続時に中継機の GTK 更新は発生しなかったことから、ルータの GTK 更新も管理テーブルへのアクセスと見なされると判断できる。

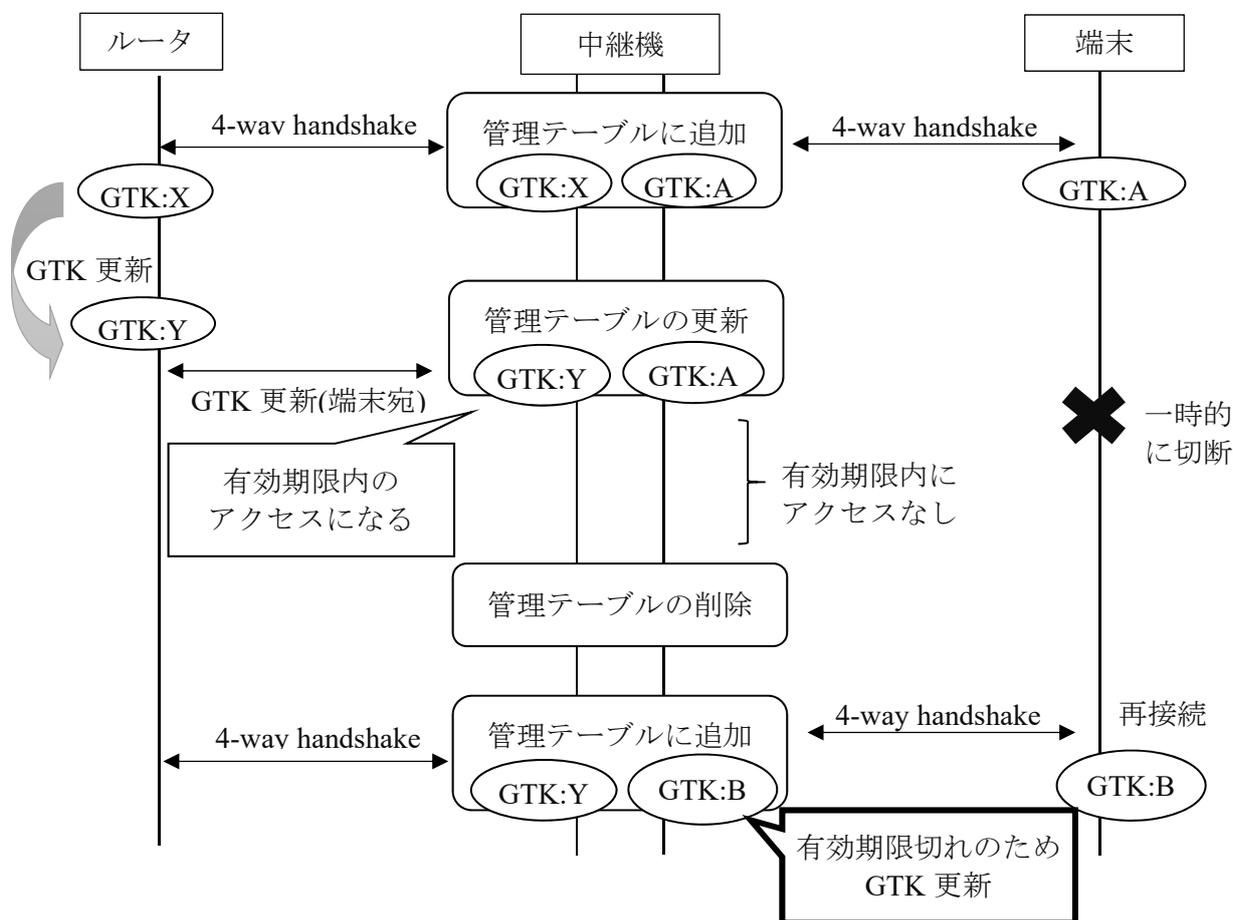


図 5-11 GTK 更新発生理由

標準規格の IEEE 802.11i においては、端末がルータや中継機などのアクセスポイントから切断した際には、端末側での GTK 情報は破棄されるという記載はあるが、アクセスポイント側の振る舞い

に関しては特に規定されていない。つまり中継機における管理テーブルの実装仕様として、中継機配下の端末が切断した場合の管理テーブルのあつかい方に関してはメーカーの実装依存部分であり、この実装仕様の違いが課題の発生要因(1)を生じさせていると考える。したがって中継機の「管理テーブルの実装差異」が課題を引き起こす未定義仕様であるといえる。

次に、課題の発生要因(2)に関して考察する。

GTK を更新した場合、通常であれば中継機に接続済みの全端末に対してすみやかに GTK 更新通知を行い、ネットワーク上の端末間で GTK の不一致が発生しないよう実装されるべきである。しかしながら、IEEE 802.11i では GTK 更新を通知する際のプロトコルは規定されているが、GTK の更新通知のタイミングに関しては明確に規定されていないため、開発者の解釈により想定外の設計となった可能性がある。すなわち中継機の「GTK 更新通知の実装差異」が課題を引き起こす未定義仕様であるといえる。

この CFM 問題は、たとえばスマートフォンなどの移動体端末が家の中と外を出たり入ったりすることが前提であるが、一定期間（12 分以上）外出すると帰宅後に必ず家の中の他端末と GTK を利用する通信ができなくなるため影響度は大きい。さらに通常のユースケースで容易に発生しうるため、早急な対応が必要であると著者は考えた。したがって、SHIPs の手順 2～5 においてこのような問題の市場における影響度を数値化し、課題を引き起こす未定義仕様である「管理テーブルの実装差異」および「GTK 更新通知の実装差異」に関して明確化する。

5.3 中継機の実装調査

5.3 節では、SHIPs の手順 2～5 を実施した。

手順 2. 市場シェア集計

手順 3. 調査対象中継機の選定と整備

手順 4. 調査項目と調査方法の策定

手順 5. 中継機の実装仕様調査と課題を引き起こす未定義仕様の明確化

まず市場シェアとして、GfK による POS トラッキング調査結果[74]を利用して、2013 年 1 月か

ら 2018 年 3 月の期間の販売累計台数を求め、それをベースに下記算出式により家庭用ルータの市場シェアを独自に集計した。

$$\text{対象ルータの市場シェア(\%)} = \frac{\text{対象ルータの販売累計台数}}{\text{全ルータの販売累計台数}}$$

パナソニック株式会社 製品セキュリティセンターでは上記で算出した市場シェアをもとに、日本国内における市場シェア合計約 98.2%を占める向けルータ 723 機種(累計販売台数 1,493 万台相当)を整備した。そしてそれらうち、シェアランク上位 90 機種(シェア合計 79.1%、累計販売台数 1,202 万台相当)を抽出した。

これらのルータの中で、無線中継機能を持つものを調査したところ、表 5-3 に示すとおり 57 機種(シェア合計 53.9%、累計販売台数 710 万台相当)となり、これらを調査対象とした。

表 5-3 無線中継機能を保有するルータ

無線中継機能	機種数	市場シェア
有り	57 機種	53.9%
無し	33 機種	25.2%
合計	90 機種	79.1%

次に、上記の合計 57 機種の中継機を、図 5-3 の構成となるよう各機器を接続し、課題である GTK 不一致が発生するかどうかを調査するため下記の方法で管理テーブルの実装仕様およびエントリ有効期限を調査する。

1. ルータ・中継機を起動し中継機をルータに無線接続
2. 端末 A・端末 B を起動し中継機に無線接続
3. 端末 B を電源オフし、X 分後 (X の初期値：30 分)、電源オンする
4. 端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できるかどうか (すなわち中継機の GTK 更新による課題が発生するかどうか) 確認

5. 手順 4 で課題が発生した場合、X を 1 分デクリメントして手順 1 に戻る
6. 手順 4 で課題が発生しない場合、エントリ有効期限は X 分とみなす

上記の調査を実施した結果、表 5-4 に示すとおり 57 機種中 7 機種（シェア合計約 6.1%）において、課題発生により端末 B から端末 A を発見できないことが判明した。ここで、本調査ではルータの端末の切断期間 30 分で調査したが、切断期間を長めに設定した場合に表 5-4 における「課題なし」の 50 機種に関しても課題が発生する可能性があると考ええる。

表 5-4 市場での影響度の調査結果

課題の発生有無	機種数	市場シェア合計
課題発生あり	7 機種	6.1%
課題発生なし	50 機種	47.8%
合計	57 機種	53.9%

表 5-5 中継機のテーブル有効期限調査の結果

中継機	チップベンダ	有効期限	シェア
1	A 社	約 12 分	2.11%
2	B 社	約 20 分	1.70%
3	B 社	約 20 分	0.38%
4	A 社	約 20 分	0.28%
5	A 社	約 22 分	0.78%
6	A 社	約 22 分	0.23%
7	A 社	約 25 分	0.60%

また、調査により判明した課題が発生する 7 機種の中継機のテーブル有効期限を表 5-5 に示す。

表 5-5 より、未定義仕様である中継機の管理テーブルの実装仕様に関して、テーブル有効期限の

最小値が約 12 分であることがわかった。これは無線接続していた端末が一度切断し 12 分以内に再接続すれば課題は発生しないことを示している。また、中継機のテーブル有効期限は無線のチップベンダの実装仕様により異なることがわかった。

課題が発生する実装仕様である中継機（シェア合計約 6.1%）は、2018 年 3 月時点における累計販売台数約 91 万 5 千台に相当するものであり、既に市場で普及していると考えられるため、端末側の実装で課題を解決する必要がある。

5.4 課題を解決する提案手法

5.4 節では、SHIPs により判明した課題を解決する「中継機の実装仕様に起因する IoT 機器の相互接続性向上手法」を考案した。

5.2.1 項で判明した課題の発生要因(1)を対処すれば課題の発生要因(2)も含めて課題を解決できると考え、その方法を検討した。

そこでまず、中継機配下のネットワーク内で定期的に GTK を使用した通信を発生させ、中継機の管理テーブルへのアクセスを行えば、エントリを維持でき、他の端末の再接続時に中継機の GTK 更新が発生しないのではないかと考えた。図 5-3 の構成において、下記手順にて課題を解決できるかどうかを確認した。

1. ルータ・中継機を起動し中継機をルータに無線接続
2. 端末 A・端末 B を起動し中継機に無線接続
3. 端末 A から 1 分おきにマルチキャスト通信（GTK 利用）を発生させる
4. 端末 B を電源オフし、30 分後電源オンする
5. 端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できるかどうか確認

この結果、手順 4 の端末 B の再接続後に中継機の GTK 更新が発生した。つまり、他端末から中継機の管理テーブルへアクセスしてもエントリを維持できず GTK 更新が発生することが判明した。ゆえに、接続済みの端末が一定期間切断し再接続すると中継機の GTK 更新が発生するのは避けられ

ないとして、端末が中継機の GTK 更新の発生をすみやかに検知し新しい GTK の入手を可能とすることで、課題を解決できる手法を検討することにした。

5.4.1 GTK 更新発生検知のロジック

端末が GTK を使用するのには暗号化されたパケット受信時の復号のときのみである。そのため、端末が GTK 更新の発生、すなわち自身の GTK が古くなっていることを検知するためには、ブロードキャスト通信あるいはマルチキャスト通信で受信した暗号化されたパケットを、自身の GTK で復号できるかどうかで判断しなければならない。復号できない場合、自身の GTK が古いと判断すればよい。しかし、暗号化されたパケットを復号できたかどうかの明確な判断は上位レイヤのアプリケーションでは困難である。なぜなら実際に暗号化／復号化を行う下位レイヤの通信ライブラリにおいては、ブロードキャスト／マルチキャスト通信で受信したパケットを自身の GTK で復号に失敗した場合、復号したデータは解読不能であるためデータを破棄し、上位レイヤのアプリケーションにそのデータを渡すことができないためである。ゆえに上位レイヤのアプリケーションにおいて、受信すべきデータを受信すべきタイミングで受信できない場合に、自身の GTK による復号に失敗したと判断すればよいと考えた。この受信すべきタイミングに関しては、定期的に GTK で暗号化されたパケットを受信させる仕組みを実装すればよいと考えた。

以上を踏まえて、端末が中継機の GTK 更新の発生をすみやかに検知し新しい GTK の入手を可能とするロジックとして下記を考案した。

(1) GTK 更新発生監視

端末が定期的に GTK で暗号化されたパケットを受信できるような仕組みを実装する（図 5-12 の①）。

(2) GTK 更新発生検知

アプリケーションで定期的に受信していた（すなわち復号できていた）パケットが受信できなくなった場合、自身の GTK により復号に失敗した（すなわち自身の保有する GTK が古くなった）と判断する（図 5-12 の②）

(3) 新しい GTK の取得

GTK が古くなったと判断した場合、無線をいったん切断後、再度中継機に無線接続して 4-way handshake により新しい GTK を取得する (図 5-12 の③)。

上記により、ネットワーク内の他の端末が一定期間切断し再接続を行った際に中継機の GTK が更新されたとしても、つまり課題の発生要因(1)が発生したとしても、課題の発生を防ぎ相互接続不能になることを回避可能である。

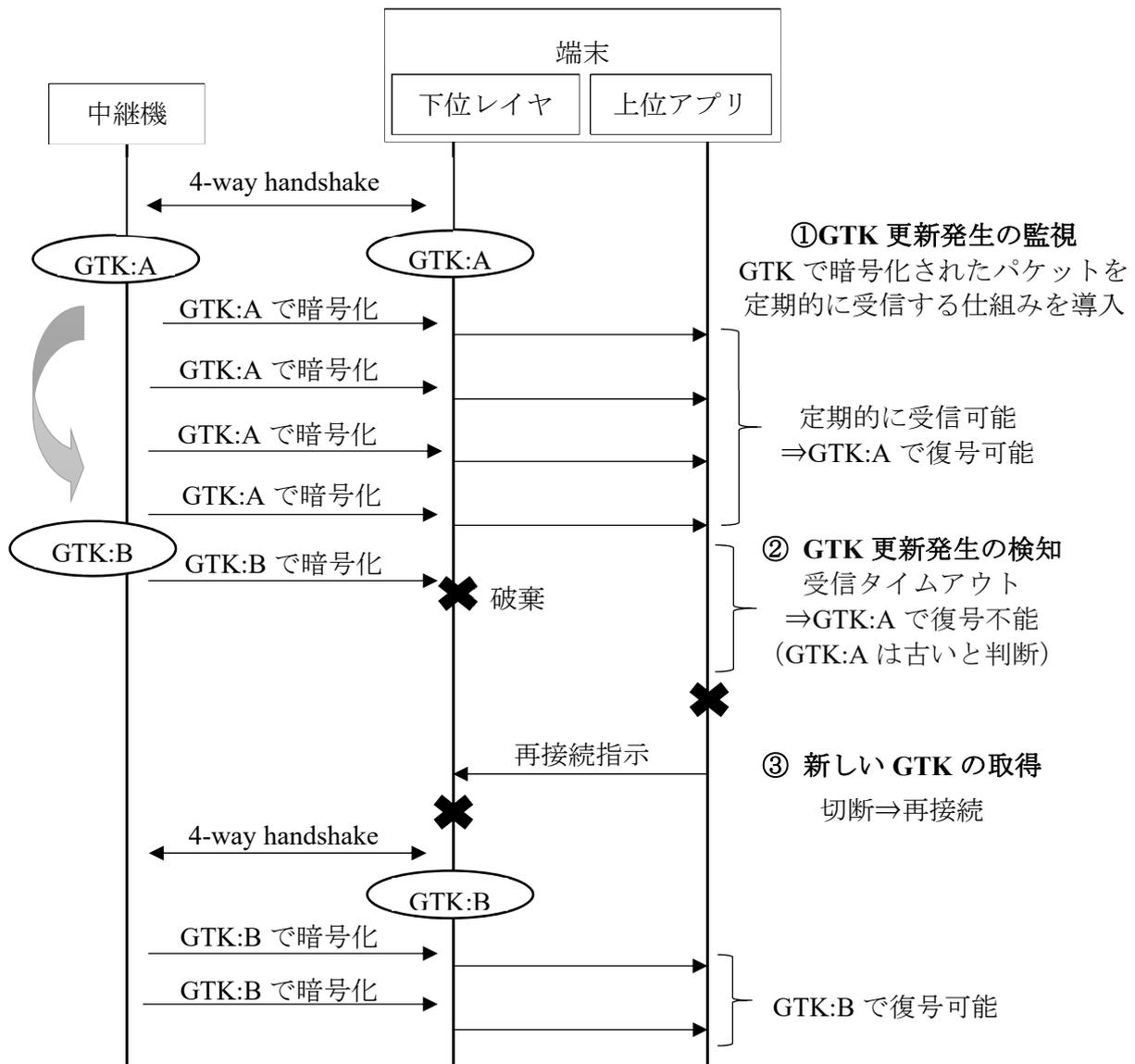


図 5-12 提案手法のロジック

5.4.2 実環境における実装案検討

実環境における提案手法の実現方法を検討する。GTK 更新発生を監視するため、端末が GTK で

暗号化されたパケットを定期的に受信する仕組みを実現する方法は、たとえばネットワーク内に存在する他端末から定期的に ARP などのブロードキャストパケットを送信してもらうことにより実現可能である。しかし、提案手法を実装した端末とのセット売りは非現実的であるため、端末単体で気付ける仕組みが必要である。そこで、自端末にネットワークインタフェース（以降 I/F と呼ぶ）を 2 つ以上搭載させれば、一方の I/F から他方の I/F 宛（たとえば、有線 LAN 側 I/F から無線 LAN 側 I/F 宛や、無線 2.4GHz 側 I/F から無線 5GHz 側 I/F 宛など）に、定期的に ARP などのブロードキャストパケットを送信することにより端末単体で検知して対処可能であると考えた。この方法は比較的容易に実装可能と考えられるが、実際にはいずれか一方の I/F しか有効にできない端末が多い。また、特に白物家電などスペックが低い端末はそもそも I/F を複数持っていないことが多く、そのような端末では実現不能である。そこで、I/F を 1 つしか持たない（または 1 つしか有効にできない）端末でも実現できる手法として、ホームネットワーク内に必ず存在すると考えられる「ルータ」を利用することに着眼した。そしてルータに搭載されている標準規格を利用してブロードキャスト通信あるいはマルチキャスト通信のパケットを受信できる方法を検討した。

(1) UPnP を利用する方法

市販のルータにはほぼ必ず UPnP の IGD (Internet Gateway Device) [94]機能が搭載されており、デバイス利用可能通知 (ssdp: alive) メッセージが定期的にマルチキャスト通信で送信されるためこれを監視すればよいと考えた。ただし、ルータによって送信間隔はさまざまであり、60 秒程度で送信するものもあれば 5 分以上の間隔が開くものもあるため、GTK が古くなったことを判断するまでに時間がかかるという問題点がある。

(2) DHCP を利用する方法

ルータに必ず搭載されている DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol[95]) サーバを利用して、DHCP のブロードキャスト通信で送信されるメッセージを定期的に受信する方法を検討した。DHCP のパケットは端末が要求を送信しそれに対してルータが応答を返すシーケンスとなるため、送信間隔を端末が自由に決めることができるという利点があり実現性が高いため、提案手法として DHCP を用いることとする。

5.4.3 提案手法

まず端末が定期送信する DHCP のメッセージを検討する。表 5-6 に DHCP (RFC2131[95]) で規定されるメッセージを示す。端末から送信できる DHCP メッセージは Discover/Request/Decline/Release/Inform の 5 種類であるが、IP アドレスを保有していない初期状態で送信する Discover メッセージと Request メッセージは IP アドレス取得後に定期的に送信すべきではないと判断した。また Decline メッセージは IP アドレスが他端末と重複している際に送信すべきメッセージであり、Release メッセージは自身が保有する IP アドレスを解放するためのメッセージであるが、いずれもルータからの応答はえられないため適さないと判断した。また Inform メッセージに関しては、ルータからの応答である ACK メッセージがユニキャストで送信されるが、それでは端末に対して GTK で暗号化されたパケットを受信させることができないため適さないと判断した。

表 5-6 DHCP (RFC2131) の規定メッセージ

送信時の状態	メッセージ/通信形態	ルータからの応答/通信形態
初期状態 (IP アドレス未取得)	Discover/ブロードキャスト	Offer/ブロードキャスト
	Request/ブロードキャスト	ACK/ブロードキャスト
IP アドレス取得済状態	Decline/ブロードキャスト	なし
	Release/ユニキャスト	なし
	Inform/ユニ or ブロードキャスト	ACK/ユニキャスト
リース延長タイミング (T1)	Request/ユニキャスト (※) T1 Request と呼ぶ	ACK/ユニキャスト
リース延長タイミング (T2)	Request/ブロードキャスト (※) T2 Request と呼ぶ	ACK/ブロードキャスト

そこで著者が注目したのは端末が IP アドレス取得後にリース期間の延長を要求するための Request メッセージである。T1 Request メッセージと T2 Request メッセージの 2 種類あり、T1 Request メッセージは端末からルータに対してユニキャストで送信され、ルータからの応答の ACK メッセージもユニキャストで送信されるため適さないと判断した。一方 T2 Request メッセージは端末からルータに対してブロードキャストで送信し、メッセージ内の「broadcast flag」を「True (broadcast)」に設定して送信することにより、ルータに対して応答の ACK メッセージを確実にブ

ロードキャスト送信させることができると考え、定期送信には T2 Request メッセージを採用することとした。このことにより、ルータ側には手を加えることなく GTK で暗号化されたパケットを端末に定期的に受信させる仕組みを導入可能とした。また定期間隔としては、5.6 節で後述する図 5-16 に示すとおり、ルータの GTK 更新間隔は 1 分単位で設定可能であり、GTK 更新を検知するタイミングもそれと思想をあわせて 1 分間隔とした。

表 5-7 さまざまなネットワークサービスの通信レート

ネットワークサービス	画質/音質	通信レート	1 分間のトラフィック
YouTube[96]	SD(360p)~HD(1080p)	0.7Mbps~5Mbps	42Mbit~300Mbits
	4k	20Mbps	1200Mbits
Hulu[97]	-	3Mbps~6Mbps	180Mbits~360Mbits
U-NEXT[98]	標準~高画質	1.5Mbps~3Mbps	90Mbits~180Mbits
	4k	15Mbps	900Mbits
Netflix[99]	SD~UHD(4k)	3Mbps~25Mbps	180Mbits~1500Mbits
Amazon Prime Video [100]	SD~HD	0.9Mbps~3.5Mbps	54Mbits~210Mbits
Amazon Prime Music [101]	低音質~高音質	-	0.9Mbits~4Mbits
DHCP T2 Request	-	-	2800bits
DHCP ACK	-	-	2642bits

ここで、1 分間隔でブロードキャスト送信する T2 Request のネットワーク全体へのトラフィック負荷を考察する。

T2 Request メッセージのサイズは約 350byte (=2800bits) である。またこの T2 Request に付随してルータから ACK が返信されるが、この ACK のメッセージサイズは約 330byte (=2640bits) である。それを 1 分間に 1 回送信するので、仮にネットワークのトラフィックを 1 分間監視した場合、トラフィックはそれぞれ 2800bits/2640bits となる。表 5-7 は一般的に普及しているネットワークサービスの通信レートと、そこから 1 分間のトラフィックを計算したものを示したものである。

表 5-7 より，1 分間隔で T2 Request メッセージをブロードキャスト送信することは，4K 動画ストリーミングサービス（Netflix）と比較すると約 53 万分の 1 程度，また低音質の音楽ストリーミングサービス（Amazon Prime Music）と比較しても約 320 分の 1 程度のトラフィックであることがわかる．よって本手法の実施によるネットワーク全体への負荷は小さいと考える．

また別の観点から，複数台の端末が提案手法を実装した場合の家庭内のネットワークトラフィックへの影響を，例として図 5-2 を用いて考察する．図 5-2 において，ネットワークの構成要素の中心であるルータの無線帯域を利用するのは，端末 1 と，中継機配下の端末 2 および端末 3 の合計 3 台とみなすことができるため，これら 3 台の端末が提案手法を実装していると想定した場合の，ルータの無線 LAN 速度に占める割合（帯域使用率）を算出する．国内ルータメーカーの製品カタログ[102]には「家族の人数×1 人あたりの想定使用端末数」に適したスループット（無線 LAN 速度）を搭載したルータ（以降，推奨ルータと呼ぶ）が掲載されているためこれを参考とする．

このカタログでは，端末が 3 台の場合の推奨ルータの無線 LAN 速度は 300Mbps である．提案手法において送信する T2 Request および ACK のメッセージサイズの合計は 5442bits であり，3 台の端末が同時に T2 Request を送信するタイミングが発生したとすると，最大 16326bits のデータを同時送信することとなる．その場合に推奨ルータの無線 LAN 速度 300Mbps に対する帯域使用率は理論値として 0.005%となる．

表 5-8 提案手法の無線 LAN 帯域使用率

家族の人数	家庭内の端末数	推奨ルータの無線 LAN 速度 (理論値)	提案手法のデータ量	提案手法の帯域使用率
1 人	3 台	300 Mbps	16326 bits	0.005%
2 人	6 台	1166 Mbps	32652 bits	0.003%
2.33 人	6.99 台	1166 Mbps	38039.6 bits	0.003%
4 人	12 台	1166 Mbps	65304 bits	0.006%
6 人	18 台	2533 Mbps	97956 bits	0.004%

同様の方法で，家庭内の端末台数に応じて提案手法の帯域使用率を算出したものを表 5-8 に示す．ここで総務省統計局による 2018 年度の日本の統計[103]によると，一世帯あたりの人員は 2.33 人と

いう統計結果が出ており、この場合の推奨ルータの無線 LAN 速度は 1166Mbps と考えられるため、提案手法の帯域使用率は理論値として 0.003%となる。以上より、本手法の実施によるネットワーク全体への負荷は十分小さいと考える。

ここで、通常は無線ルータに DHCP サーバが搭載されており、T2 Request に対して ACK が返らないことはすなわち GTK 更新が発生して ACK を復号できないことと捉えて問題ないが、ホームネットワークの構成によっては、DHCP サーバが搭載されたルータに無線アクセスポイントを接続している構成も考えられる。その場合に T2 Request に応答が返らないという状況は単に ACK を復号できないという場合だけでなく、ルータが電源オフ状態となりネットワーク上に DHCP サーバが存在しなくなった場合も考えられる。この場合と切り分けるため、ルータに対する生存確認の目的としてユニキャスト通信を行うことにした。ユニキャストパケットとして Ping Request (=ICMP Echo Request[104]) を用いた。これらを踏まえて、課題を解決する手法として下記を提案する。

- (1) 端末からルータに定期的に DHCP T2 Request (ブロードキャスト) を送信する。ただしこのとき、DHCP メッセージ内の「broadcast flag」を「True (broadcast)」に設定して送信する (図 5-13 の①)。
- (2) T2 Request に対する ACK (ブロードキャスト) を受信できない場合、端末からルータに Ping Request (ユニキャスト) を送信する (図 5-13 の②)。
- (3) T2 Request に対する ACK (ブロードキャスト) を受信できず、かつ Ping 応答 (ユニキャスト) を受信できる場合 GTK が古くなったと判断し、無線切断後再接続を行い、新しい GTK を取得する (図 5-13 の③)。

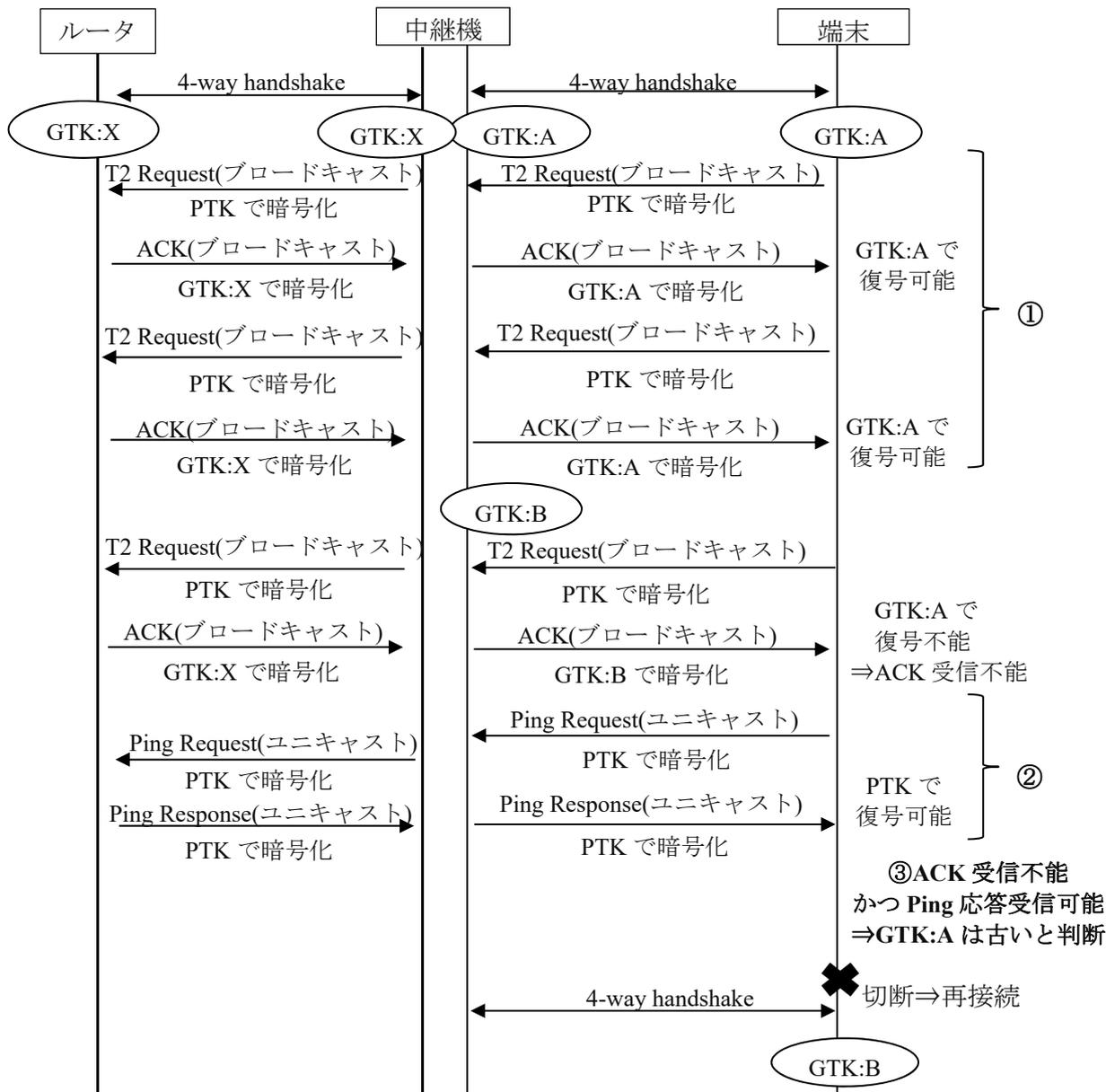


図 5-13 提案手法のシーケンス

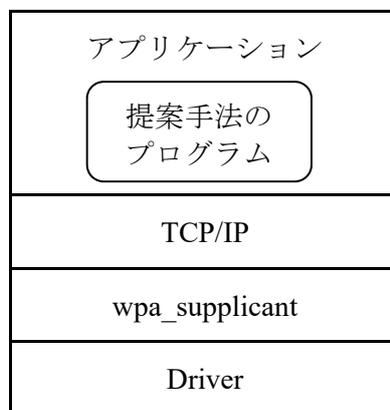


図 5-14 端末ソフトウェアスタック

ここで、実際にプログラムを実装する端末のソフトウェアスタック図を図 5-14 に示す。wpa_supplicant[105]は、各種 Linux, Windows, その他 OS 向けにフリーで提供されている WPA/WPA2 対応無線クライアント機能のパッケージである。

5.5 実験

提案手法により、中継機の GTK 更新が発生した場合に端末がそれを検知し、中継機から新しい GTK を再取得することで課題を解決でき、また相互接続性を確保できることを、実験を通じて確認した。また提案手法が、GTK 更新が発生しない中継機配下におけるブロードキャスト/マルチキャスト通信に影響を及ぼさないこともあわせて確認した。

5.5.1 実験環境

実験環境として、中継機の GTK 更新が必ず発生する環境を構築するため、表 5-4 に示した課題が発生する中継機 7 機種（シェア合計約 6.1%）を使用し、図 5-15 の構成となるよう各機器を接続した。また、GTK 更新が発生しない環境を構築するため、表 5-4 に示した課題が発生しない中継機 10 機種（シェア合計 20%）を選定し、図 5-15 の構成となるよう各機器を接続した。各機器（ルータ、端末、中継機）のスペックを表 5-9 に示す。端末 B は、市販の無線製品（スマートフォン）を使用した。上位のルータは 1 製品で固定し、GTK 更新間隔は 5.2 節の調査環境と同じ「30 分」とした。端末 A（ノート PC）には 5.4 節の提案手法を実行する実験ツールをインストールした。ここで開発した実験ツールに関して、通常は図 5-14 で実装されることが理想的であるが、今回の実装においては、DHCP の Request に対して応答をえられないことにより GTK 更新を検知する機能の確認が目的であり、実験の容易さおよび正確さを考慮し、無線の切断/接続に関しては手動にて行うこととした。また、「Wireshark[85]」をインストールしたノート PC（図示せず）を配置し、中継機配下の無線通信をキャプチャした。

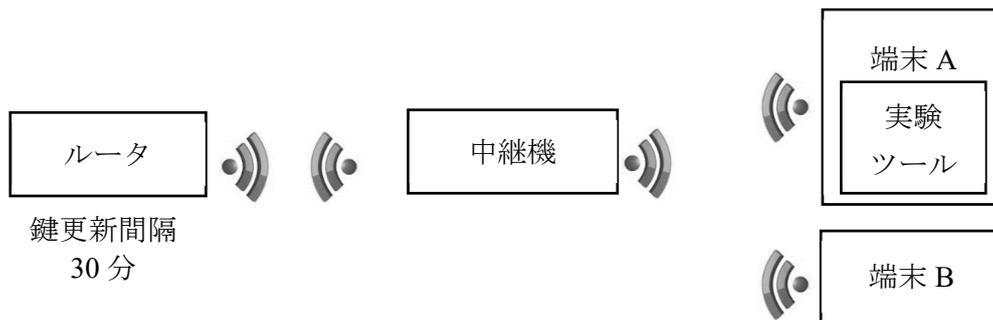


図 5-15 実験環境

表 5-9 各機器のスペック

ルータ	無線対応規格	802.11ac/n/a (5GHz 帯) 802.11n/g/b (2.4GHz 帯)
	ストリーム数	2 ストリーム
	アンテナ数	2x2 (5GHz 帯&2.4GHz 帯)
	伝送速度 (規格値)	867Mbps (11ac/5GHz 帯) + 300Mbps (11n/2.4GHz 帯)
端末 A	OS	Fedora 20
	CPU	2.40GHz
	無線対応規格	802.11ac/n/a (5GHz 帯) 802.11n/g/b (2.4GHz 帯)
	最大通信速度	受信時 450Mbps
端末 B	OS	Android9.0
	CPU	2.8GHz + 1.7GHz
	無線対応規格	802.11ac/n/a (5GHz 帯) 802.11n/g/b (2.4GHz 帯)
	最大通信速度	受信時 1083Mbps
課題あり 中継機	無線対応規格: 11ac/n/a (5GHz 帯)	最大通信速度: 1750Mbps (4 台)
	11n/g/b (2.4GHz 帯)	最大通信速度: 1900Mbps (3 台)
課題なし 中継機	無線対応規格: 11ac/n/a (5GHz 帯)	最大通信速度: 2533Mbps (1 台)
	11n/g/b (2.4GHz 帯)	最大通信速度: 1166Mbps (7 台)
		最大通信速度: 600Mbps (1 台)
	無線対応規格: 11n/g/b (2.4GHz 帯)	最大通信速度: 300Mbps (1 台)

5.5.2 実験方法

(1) 提案手法の効果確認

まず、課題が必ず発生する実験環境において、提案手法を実行する端末 A が中継機の GTK 更新を検知し新しい GTK を取得することにより、課題を解決できることを下記手順にて確認した。

1-1. ルータ・中継機・各端末を起動し無線接続し、中継機の GTK を確認

ここで GTK の確認は、キャプチャした無線パケット内の GTK パラメータを確認する

1-2. 端末 A で実験ツールの実行を開始

1-3. 端末 B を電源オフし、30 分後電源オンする

1-4. 無線パケットの GTK パラメータを見て端末 B の GTK が更新されていることを確認

1-5. 端末 A において中継機の GTK 更新を検知し、無線の再接続により新しい GTK を取得することを確認

1-6. 端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できるかどうか確認

(2) 提案手法の影響度確認

次に、課題が発生しない実験環境において、端末 A が提案手法を実行し続けてもブロードキャスト／マルチキャスト通信に影響を及ぼさないことを下記手順にて確認した。

2-1. ルータ・中継機・各端末を起動し無線接続し、中継機の GTK を確認

2-2. 端末 A で実験ツールの実行を開始

2-3. 端末 B を電源オフし、30 分後電源オンする

2-4. 無線パケットの GTK パラメータを見て端末 B の GTK が更新されていないことを確認

2-5. 端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できるかどうか確認

5.5.3 実験結果

5.5.2 項の実験(1)の実験ログを実験結果として表 5-10 に示す。表 5-10 には、手順 1-1 において起動後に端末 A、端末 B が取得した GTK、手順 1-4 において再接続時に端末 B が取得した GTK、および手順 1-5 において端末 A の再接続時に取得した GTK をまとめている。また手順 1-6 で端末 B がマルチキャスト通信の機器検索要求送信により端末 A を発見できたことを「○」で示している。表 5-10 より、表 5-4 に示した課題が発生する中継機 7 機種 (シェア合計約 6.1%) すべてにおいて、手順 1-4 で端末 B が再接続したタイミングで GTK が更新され端末 A と端末 B 間で GTK 不一致が発生したが、手順 1-5 で GTK 更新を検知した端末 A が再接続を行うことにより端末 B と同じ GTK を取得できること、すなわち課題が解決できることがわかった。さらにその後の手順 1-6 において、端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できること、すなわち市場問題を解決できることがわかった。

次に、5.5.2 項の実験(2)の実験ログを実験結果として表 5-11 に示す。表 5-11 には、手順 2-1 において起動後に端末 A、端末 B が取得した GTK と、手順 2-4 において再接続時に端末 B が取得した GTK をまとめている。また手順 2-5 で端末 B がマルチキャスト通信の機器検索要求送信により端末 A を発見できたことを「○」で示している。表 5-11 より、表 5-4 に示した課題が発生しない中継機 10 機種 (シェア合計 20%) すべてにおいて、端末 A が 30 分間提案手法を実行し続けても、その後の手順 2-5 において、端末 B からマルチキャスト通信による機器検索要求を送信し、端末 A を発見できること、すなわち提案手法がマルチキャスト通信に影響を及ぼさないことを確認できた。

表 5-10 提案手法の効果確認結果

中継機	各手順における GTK		1-6
1	1-1	6ce64f4a97dce3b0179ce53c424ec2d1	○
	1-4	a7e83b3d91fb47dcc9127574c2fe766e	
	1-5	a7e83b3d91fb47dcc9127574c2fe766e	
2	1-1	c90c6e5c8f8697b1e51cfdcffc7fb913	○
	1-4	c7a7bf76576d73109482dc2ba485a55f	
	1-5	c7a7bf76576d73109482dc2ba485a55f	
3	1-1	8f574e2e2bed4fdf76912021a4a69b9b	○
	1-4	017087deaaae751053edc65f4fa4ad94	
	1-5	017087deaaae751053edc65f4fa4ad94	
4	1-1	769062565fa4b53b3cde395dc21fa473	○
	1-4	d51d114839c18ec0d5af6de62bfdceb3	
	1-5	d51d114839c18ec0d5af6de62bfdceb3	
5	1-1	6ae11a9e6cc63882c5f6a76a853137de	○
	1-4	fbe094aba710a2d8fbcf0e7a1bc2f8db	
	1-5	fbe094aba710a2d8fbcf0e7a1bc2f8db	
6	1-1	890d227a4abf414ea06f09d2d2b31701	○
	1-4	07226f3b9c131d296621d147bf3e4386	
	1-5	07226f3b9c131d296621d147bf3e4386	
7	1-1	b5e187990e8f77ff67d18c3733d4269f	○
	1-4	34bad21415b8b6ff58edc0ebf6af8bc4	
	1-5	34bad21415b8b6ff58edc0ebf6af8bc4	

表 5-11 提案手法の影響確認結果

中継機	各手順における GTK		2-5
1	2-1	640bc271bb1f9f7cb365995511d88fe2	○
	2-4	640bc271bb1f9f7cb365995511d88fe2	
2	2-1	745b5b10c44d6124bcd689d1acccc6af	○
	2-4	745b5b10c44d6124bcd689d1acccc6af	
3	2-1	6a9557de174ae76d10adc6ba283c81ca	○
	2-4	6a9557de174ae76d10adc6ba283c81ca	
4	2-1	5644bfef9ce19f8119ddc680f9853d93	○
	2-4	5644bfef9ce19f8119ddc680f9853d93	
5	2-1	3fe6f6525db89cd89a6dbec31b42418b	○
	2-4	3fe6f6525db89cd89a6dbec31b42418b	
6	2-1	896fdd9e8a030c41b2ec01d353504ef7	○
	2-4	896fdd9e8a030c41b2ec01d353504ef7	
7	2-1	810120ac3c565dead3d9b01d96960443	○
	2-4	810120ac3c565dead3d9b01d96960443	
8	2-1	e62e520232be34fd136991f14bdcdc32	○
	2-4	e62e520232be34fd136991f14bdcdc32	
9	2-1	bf5de523dabbdd1439e580dc27597d56	○
	2-4	bf5de523dabbdd1439e580dc27597d56	
10	2-1	3891225aa3c4a263bac4934396d8df3e	○
	2-4	3891225aa3c4a263bac4934396d8df3e	

5.6 考察

ルータの設定変更による課題解決手法についても検討を行った。5.2.2 項の考察に基づき、ルータの GTK 更新間隔をテーブル有効期限内に設定することにより、中継機の管理テーブルのエントリは維持され GTK 更新が発生しないため課題は解決可能である。つまり、表 5-2 において 11 分 30 秒までは課題が発生しないことを確認できているため、11 分 30 秒以内に設定することを提案する。そこで 5.3 節の調査で用いたルータ 90 機種に対して GTK 更新の設定仕様を調査した。調査結果を図 5-16 に示す。

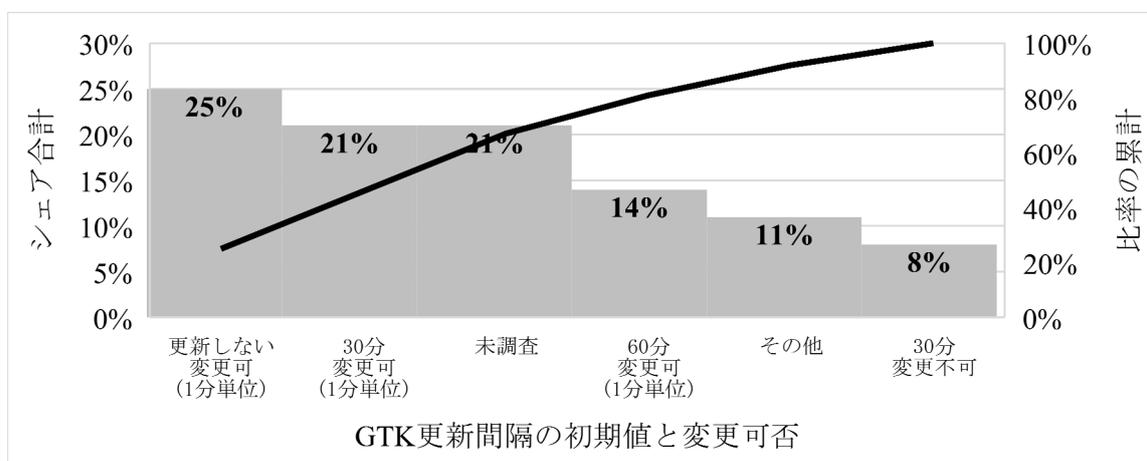


図 5-16 GTK 更新間隔の初期値と変更可否

図 5-16 より、GTK 更新間隔の初期値と設定変更の可否の組み合わせで一番多かったのは「更新なし／変更可 (1 分単位)」(シェア合計 25%) であり、続いて「30 分／変更可 (1 分単位)」(シェア合計 21%)、「60 分／変更可 (1 分単位)」(シェア合計 14%) であった。これら合計 60% は中継機の課題が発生する可能性はあるものの、ユーザが GTK 更新間隔を 11 分 30 秒以下に設定すれば課題は解決可能である。

しかしながら、残りの 40% は本課題を解決可能な GTK 更新間隔を設定変更できる保障はない。つまりルータの GTK 更新間隔を 11 分 30 秒以内に設定変更できない可能性があり、その場合課題が発生する中継機の管理テーブルのエントリを維持できない。そのため、ルータの設定変更による課題解決手法だけでは不十分であるといえる。

5.7 関連研究

グループ鍵を複数メンバに対して配布する手法やセキュリティ向上のために鍵更新を行う技術は数多く提案されている。たとえば、アクセス制御とグループ鍵管理方式により、セキュアにグループ鍵の配布を実現する手法がある[106]。しかしグループ鍵の更新やメンバの離脱に関しては考慮されていないため本章で示した構成に当てはめることができない。また、メンバの離脱などグループの動的な変化に追従してグループ鍵の更新を行える手法がある[107][108]。各ノードがサーバとの間で1対1に保持するマスタ鍵を用い、サーバがグループ鍵をグループ内のノードに個別に配布する。あるノードがグループから脱退する際にグループ鍵の更新を行うが、このとき新しいグループ鍵をそのノードのマスタ鍵で暗号化して送信する手法である。しかし、メンバ間におけるグループ鍵の不一致に関しては考慮されていないため課題は解決できない。これに対し、グループ鍵の更新をメンバ間で同期させる手法や[109]、暗号鍵を定期更新・不定期更新することにより暗号鍵の漏洩を防止する管理サーバを用いた鍵の配布・共有方式がある[110]。前者の手法では、鍵サーバの鍵更新の期間ごとに鍵を配布されるが、鍵を使用しはじめる前の期間内にそれを配布しておくことで全メンバの鍵を同期させることができる。また後者の手法を用いたシステムにおいては、全端末に更新された暗号鍵が届いていない場合においても、端末間で新しい鍵を転送することにより鍵の同期が実現可能である。しかしながら、いずれにおいても、本章で示した GTK 更新時に端末に通知を行わない中継機に対しては、これらの手法は適用できない。

5.8 まとめ

第5章では、中継機配下の IoT 機器の CFM 問題に対して SHIPs を適用して解決し、中継機配下の IoT 機器の相互接続性を向上させた。具体的には、未定義仕様である無線中継情報の管理テーブルの有効期限が切れた後に端末が無線の再接続を行うことで中継機の GTK が更新されること、また未定義仕様である GTK 更新通知を中継機が行わない場合に端末間の GTK 不一致が生じ相互接続性問題を引き起こすことを究明した。また未定義仕様である管理テーブルの有効期限の最小値が約 12 分弱であることも解明した。そして端末側の実装で端末間の GTK が不一致となる課題を解決し、相

互接続性を確保する手法の提案を行った。その結果、市場シェア約 6.1%（販売累計台数 91 万台相当）の中継機における CFM 問題を解決できた。

GTK 不一致による相互接続性問題が発生する原因は、そもそも標準規格である IEEE 802.11i において、GTK の更新条件や GTK 更新通知を行うタイミング、また端末切断時のアクセスポイント側の GTK の取りあつかい方に関して明確に規定されていないことによるものであり、メーカーの開発者の仕様の解釈の違いによって実装仕様に違いが生じるのはやむをえないことではあるが、その仕様を変更すると市場規模での混乱が想定されるため、端末側の仕様を策定しその効果を示した。もちろん中継機を実装するルータメーカーへ仕様改善の提案を行っていくことは重要であるため今後対応を検討していく。またそもそも開発者の仕様の解釈に違いが出ないように標準規格の改訂を行うことも課題解決に有効なアプローチであると考え、今後は標準規格団体にも仕様改善提案を行うよう対応を検討していきたい。またルータ側の設定変更による解決手法も検討したが、市場のルータの 60%までしか解決できないことがわかった。

以上のことから、端末側での対処が社会にもっとも影響が少なく対処できると考え、第 5 章の提案手法をエコーネットコンソーシアムに提案した。その結果 ECHONET Lite 製品の相互接続性を向上させる手法であると認められ、“ECHONET Lite システム設計指針[111]”に採択された。

第6章 結論と今後の展開

6.1 本研究の成果

スマートホームにおける多種多様な相互接続性問題のうち、相互接続手順の第 1 段階である機器発見フェーズにおける「マルチキャスト通信を阻害する相互接続性問題」を「CFM 問題」と定義し、定式化した。さらに、「スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性向上手順」である「SHIPs」を定義し、IoT 機器の相互接続性の解析、およびルータや中継機の実装調査を通じて相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化するための汎用的な手順をまとめた。そして CFM 問題に対して SHIPs を適用して「ルータの実装仕様に起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法」、「ルータの実装仕様に起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法」、「中継機の実装仕様に起因する IoT 機器の相互接続性向上手法」の 3 つの解決手法を考案し、スマートホームにおける IoT 機器の相互接続性を向上させた。そしてそれらの手法を上位レイヤの標準規格に入れ込み、機器開発者に CFM 問題の存在を認識させ、CFM 問題を回避可能な実装に促すことにより、業界全体で IoT 機器の相互接続性向上に貢献した。

各章における具体的な成果を以下に示す。

第 1 章にて、ホームネットワークの発展の経緯や、IoT 機器の普及とともに相互接続性確保が重要視され取り組まれてきた経緯をまとめ、スマートホームにおける相互接続性向上のための研究が必要な背景を述べた。また、本論文における研究の目的や方針を説明した。

第 2 章において、本研究が対象とする技術、分野、構成を分類・整理し、本研究の対象範囲を明確化した。世の中に雑然と存在する相互接続性問題を分類し CFM 問題として定式化できた。また、相互接続性問題を引き起こす未定義仕様を明確化し、IoT 機器の相互接続性を定量的に判断するための汎用的な手順である SHIPs を定義した。

第 3 章において、ECHONET Lite の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みをま

とめた。具体的には、市場シェア上位 150 機種（計 81.6%、累計販売台数 1,351 万台相当）のルータの実装仕様を調査することにより、CFM 問題の主な原因が、ルータが機器の存在確認無しに管理テーブルからエントリ（転送ルール）を削除すること、未定義仕様であるエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを解明した。そして既存市場にスムーズに適用できるよう、機器から 120 秒間隔で ECHONET Lite のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージを定期送信することによりルータの管理テーブルを確実に維持できる「ルータの実装仕様に起因する ECHONET Lite 機器の相互接続性向上手法 [手法 1]」を考案した。その結果、市場シェア約 20%（販売累計台数 338 万台）のルータにおける CFM 問題を解決できた。本提案手法はパナソニック製品 150 万台（2019 年 10 月時点）に搭載され、今後も白物家電を中心に搭載製品を拡大する予定である。また、本提案手法をエコーネットコンソーシアムに提案した結果、ECHONET Lite 製品の相互接続性を向上させる手法であると認められ、“ECHONET Lite システム設計指針[88]”に採択された。

第 4 章において、UPnP/DLNA の CFM 問題に対して SHIPs を適用し解決する取り組みをまとめた。具体的には、ECHONET Lite 同様、市場シェア上位 150 機種（計 81.6%、累計販売台数 1,351 万台相当）のルータ実装仕様調査により、CFM 問題の主な原因が、ルータが機器の存在確認無しに管理テーブルからエントリ（転送ルール）を削除すること、未定義仕様であるエントリ有効期限の最短値が 120 秒であることを確認した。そして ECHONET Lite の提案手法を応用し、機器から 120 秒間隔で UPnP/DLNA のマルチキャストグループに対する IGMP Join メッセージの定期送信によりルータの管理テーブルを確実に維持できる「ルータの実装仕様に起因する UPnP/DLNA 機器の相互接続性向上手法 [手法 2]」によりルータの管理テーブルを確実に維持できることを確認した。その結果、市場シェア約 20%（販売累計台数 338 万台）のルータにおける CFM 問題を解決できた。また第 4 章の調査において、市場のルータにおいては ECHONET Lite のマルチキャストパケットよりも、UPnP/DLNA のマルチキャストパケットの方が転送される割合が多いことを明確化した。これにより、ルータメーカーに ECHONET Lite のマルチキャストパケットも転送するように提案していくことが市場での相互接続性向上のために重要であることを明確にできた。

さらに、第 3 章、第 4 章の調査において判明した課題が存在するルータに関し、市場シェアの推

移を調査した結果、2019年6月時点で課題が存在するルータが約17.82%（約235万台相当）存在していることが判明した。つまり、第3章および第4章における提案手法の機器適用の意義を示すことができた。また、有効期間が120秒であるルータに注目した場合、そのシェアは1.48%（約24万5,000台）から0.03%（約3,950台相当）に低下しており、今後シェアが上昇するとは考えにくい。つまり、提案手法のIGMP Joinの送信間隔である「120秒」は必須ではなく、メーカーや開発者の考え方、あるいは商品仕様などによって、有効期限120秒のルータを割り切るという考え方もできる。そのような場合、次に有効期間の短い250秒のルータを対象とした定期送信間隔を検討可能であり、メーカーや開発者に柔軟な対応を採る選択肢を与えることができた。

第5章において、近年シェアが増加傾向である中継機がスマートホームに設置された場合に発生する、中継機配下のIoT機器のCFM問題に対してSHIPsを適用し解決する取り組みをまとめた。具体的には、市場シェア上位90機種（計79.1%、累計販売台数1,202万台相当）のルータのうち、中継機能を有する57機種（シェア合計53.9%、累計販売台数710万台相当）の調査により、CFM問題の影響度を数値化し、IEEE 802.11iにおけるGTKの仕様が曖昧であるため中継機の実装仕様に差異が出るのがCFM問題を生み出していることを明確化した。そして未定義仕様である中継機の管理テーブルの有効期限が切れた後に機器が無線の再接続をすると中継機がGTK更新すること、また未定義仕様であるGTK更新通知を中継機が行わないことが、機器間のGTK不一致を発生させCFM問題を引き起こすことを究明した。既存市場にスムーズに適用できるよう、ホームネットワークには必ず存在するルータに対して、ルータが必ず搭載しているDHCPを利用して定期的にGTKで暗号化されたパケットを受信できる仕組みを検討、その復号可否により機器単体で中継機のGTK更新を検知可能とする「中継機の実装仕様に起因するIoT機器の相互接続性向上手法[手法3]」を考案した。その結果、市場シェア約6.1%（販売累計台数91万台相当）の中継機におけるCFM問題を解決できた。本提案手法を特許出願し（2件）、エコーネットコンソーシアムに提案した。その結果ECHONET Lite製品の相互接続性を向上させる手法であると認められ、“ECHONET Lite システム設計指針[111]”に採択された。

6.2 社会への貢献

本研究において定義した SHIPs の適用により確立された [手法 1] および [手法 3] がエコーネットコンソーシアムの規格書へ採択されたことで、コンソーシアム会員約 250 社が活用可能となり、業界全体（約 3,300 万台の市場機器[31]）の相互接続性向上へ貢献した。SHIPs により、市場での相互接続性問題の発生を未然防止し、企業の開発出戻りなどのコスト抑制に貢献した。また本研究が目指す「IoT 製品を購入したユーザが相互接続性問題で困ることがない世界」に一步近づき、IoT 機器やサービスの発展の一助となることで Society5.0 の実現に貢献した。

6.3 今後の展開

本研究にて、ホームネットワークにおける相互接続手順の第 1 ステップである機器発見フェーズの CFM 問題を解決できた。今後の展開として、情報取得フェーズやコントロールフェーズに潜む相互接続性問題(図 6-1)や、今回の研究対象外とした IEEE 802.15.1 (Bluetooth) や IEEE 802.15.4 (ZigBee) などの近距離無線ネットワークにおける相互接続性問題などに SHIPs を適用して解決していく。また SHIPs は実装仕様を調査したいターゲットを柔軟に設定可能であり、その他の技術・機器・サービスにおける相互接続性問題においても SHIPs の汎用的な手順を適用可能であるため、今後はさまざまな分野の相互接続性問題の解決にも SHIPs を適用して取り組んでいく。2016 年に IoT 推進コンソーシアム、総務省、経済産業省により公布された「IoT セキュリティガイドライン (ver1.0) [112]」において IoT 機器に対してファームウェア更新機能を持たせることが推奨され、また 2019 年に総務省より公布された「電気通信事業法に基づく端末機器の基準認証に関するガイドライン (第 1 版) [113]」において、ルータへのファームウェア更新機能が技適の要件となるなど、今後ルータや IoT 機器はファームウェアの更新機能を有していくこととなる。ゆえに、本研究にて市場の最新技術動向をフォローしながら考案していく相互接続性問題の解決手法を、ルータや IoT 機器のファームウェア更新機能を利用して随時アップデートしていくことが有効と期待する。市場全体の相互接続性を維持・向上する仕組みを考えていきたい。

また、相互接続性問題のない世界に向けて、標準規格の曖昧さを補完し相互接続性問題を回避可能とするためのノウハウを **Best Practice** として公開し、相互接続性問題を生み出さない環境づくりを推進する。そして上位レイヤの機器開発者側にも下位レイヤに相互接続性問題が潜む危険性を理解してもらうため啓蒙活動していくことが重要である。ゆえに **SHIPs** を適用して相互接続性問題を解決していく取り組みを、スマートホームのインフラ技術の一つとして、日本国内だけでなくグローバル各国の新しい生活が始まる新興国（特に東南アジアなど）に展開し貢献したいと考える。

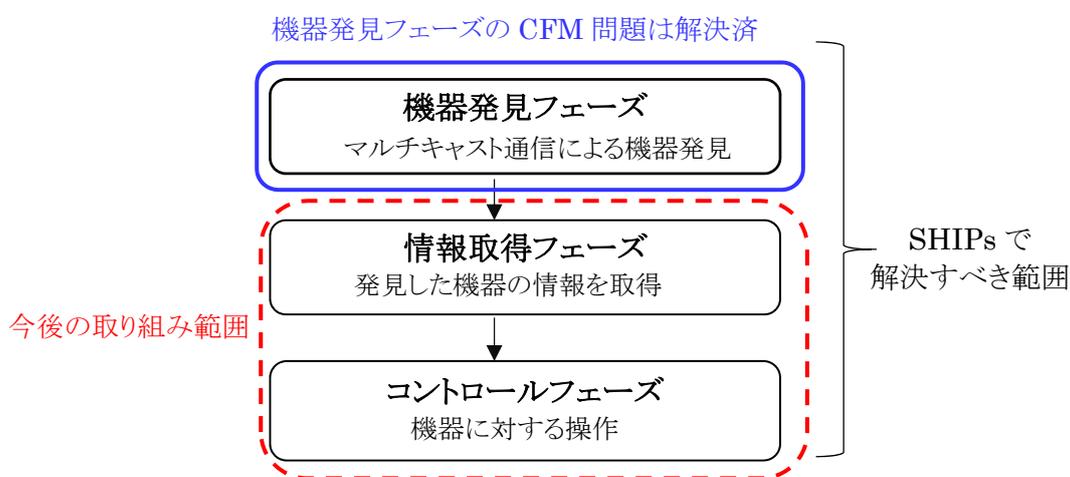


図 6-1 今後の取り組み範囲

謝辞

本研究の活動を進めるにあたり、多くの方々に大変御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

著者の活動の価値を理解・評価していただき、社会人ドクターに取り組む機会を与えてくださった神奈川工科大学創造工学部 ホームエレクトロニクス開発学科 一色正男 教授に甚大なる謝意を表します。企業での通常の業務を行いながらも社会人ドクターとして博士論文をまとめることができたのは、一色先生のご指導があつてのことと感謝いたしております。

博士論文について貴重なご教示を賜りました 神奈川工科大学 奥村万規子 教授、安部恵一 教授、松本一教 教授に心より感謝申し上げます。先生方の御助言により、課題および成果を明確なものとすることができ、論文自体の完成度を高めることができました。

北陸先端科学技術大学院大学 副学長 丹康雄 教授には、お忙しい中にも関わらず論文審査委員をお引き受けいただき大変感謝しております。アカデミックの論文に必要なポイントをご指導いただき大変勉強になりました。

千葉工業大学先進工学部知能メディア工学科 森 信一郎 教授には、論文の構成、論理展開の仕方や記載方法含めて、不慣れなアカデミックの取り組み全般に対して一からご指導いただき、成長することができました。心より感謝申し上げます。

神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科 杉村博 准教授には、学会への論文投稿や本論文の記載に関してさまざまなご助言をいただくことができ、大変感謝いたしております。

著者の勤務先である パナソニック株式会社 製品セキュリティセンター 齋藤孝弘 所長には、著者のために人事制度を新しく導入していただき社会人ドクターへの扉を開いていただきました。その後も常に暖かく社会人ドクターの活動を見守っていただき、業務と学業の両立を実現することができました。厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。また、製品セキュリティセンター 石川博一 主幹技師、ならびに接続検証課の皆様には、博士後期課程入学に際しご理解いただき感謝いたします。そして、本論文をまとめるにあたりさまざまなご助言をいただいたパナソニック株式会社 ライフソリューションズ社 村上隆史 主幹技師に感謝いたします。

最後に、著者の仕事と学業の両立を支援してくれた夫と子供達に対して、深く感謝します。

本研究を通じた経験，ならびに成果を今後よりいっそう社会に役立てるために，精進を重ねていくことを誓うとともに，重ねて厚く謝意を表し，謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] JEITA スマートホーム部会：スマートホームとは,
<https://home.jeita.or.jp/smarthome/about-smarthome/index.html>,(参照 2020-11-16).
- [2] 経済産業省：スマートホームの実現に向けた機器接続・データ利活用等の検討事項,
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000761.pdf,(参照 2020-11-16).
- [3] University of Washington：SMART HOUSE AND HOME AUTOMATION TECHNOLOGIES,
<https://depts.washington.edu/dmgftp/publications/pdfs/smarthouse98-mdg.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [4] 英国インペリアルカレッジイノベーション研究センター：スマートハウスの歴史と工務店的未来住宅を考える,
http://www.monotsukuri.net/keiei/smart_house.pdf,(参照 2020-11-16).
- [5] 富士通総研（FRI）経済研究所：期待されるネット家電 普及の鍵は何か,
<https://www.fujitsu.com/downloads/JP/archive/imgjp/group/fri/report/research/2005/report223.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [6] 国立科学博物館産業技術史資料情報センター：パーソナルコンピュータ技術の系統化調査,
<http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/086.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [7] 厚東健彦, 鮎ヶ瀬暢久, 羽鳥光俊：ホームバスシステムと標準化動向, テレビジョン学会誌, 41 巻 5 号, pp.445-452 (1987).
- [8] 杉原広威：ホームバス規格の概要とホームバス・プロトコルコントローラの効用,
テレビジョン学会誌, 14 巻 76 号, pp.19-24 (1990).
- [9] 一般社団法人日本ネットワークインフォメーションセンター（JPNIC）：インターネット歴史年表,
<https://www.nic.ad.jp/timeline/>,(参照 2020-11-16).
- [10] ホームネットワーク国際標準化の諸問題, 情報処理学会第 67 回全国大会講演論文集,
<https://www.ipsj.or.jp/10jigyo/taikai/67kai/67program/html/event/h1.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [11] IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP,
<https://grouper.ieee.org/groups/802/3/>,(参照 2020-11-16).
- [12] 森岡仁志：電灯線および電話線ホームネットワーク技術の最新動向, システム制御情報学会誌「システム／制御／情報」, 46 巻 6 号, pp. 330-333 (2002).
- [13] 1394 Trade Association,
<http://1394ta.org/>,(参照 2020-11-16).
- [14] ISO/IEC Standard ISO/IEC 14543-4-1:2008,
<https://www.iso.org/standard/44623.html>,(参照 2020-11-16).
- [15] ISO/IEC Standard ISO/IEC 14543-4-2:2008,
<https://www.iso.org/standard/44624.html>,(参照 2020-11-16).
- [16] 丹康雄：ホームネットワークの現状と標準化動向, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 6 巻 2 号, pp.90-98 (2012 年).

- [17] ITU-T Recommendation J.190 : Architecture of MediaHomeNet that supports cable-based services,
<https://www.itu.int/rec/T-REC-J.190>,(参照 2020-11-16).
- [18] 丹康雄：ホームネットワークの「今」を考える，第 93 回テレコム技術情報セミナー，
http://www.scot.or.jp/scatline/scatline96/pdf/scat96_seminar_01.pdf,(参照 2020-11-16).
- [19] 丹康雄：ホームネットワークの現状と標準化動向，
https://irc.atr.jp/ieice_nwr/pdf/NR-TG-4-04.pdf,(参照 2020-11-16).
- [20] IETF INTERNET STANDARD RFC1122, Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers,
<https://tools.ietf.org/html/rfc1122>,(参照 2020-11-16).
- [21] ITU-T Recommendation Y.2001 : General overview of NGN,
<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001-200412-I/en>,(参照 2020-11-16).
- [22] IEEE 802.11 WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS,
<https://www.ieee802.org/11/>,(参照 2020-11-16).
- [23] acTVila (アクトビラ) ,
<https://chips.actvila.jp/>,(参照 2020-11-16).
- [24] UPnP (Universal Plug and Play)
<https://openconnectivity.org/developer/specifications/upnp-resources/upnp>,(参照 2020-11-16).
- [25] DLNA (Digital Living Network Alliance) Guidelines,
<https://spirespark.com/dlna/guidelines>,(参照 2020-11-16).
- [26] ECHONET 規格 Version 3.21 第 1 部, ECHONET の概要,
https://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Standard/Echonet/Version_3_21/SpecVer321_01.pdf,(参照 2020-11-16).
- [27] エコーネットコンソーシアム：ECHONET Lite 規格 Ver.1.12 第 2 部，
https://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Standard/ECHONET_lite_V1_12_jp/ECHONET-Lite_Ver.1.12_02.pdf.
- [28] エコーネットコンソーシアム会員企業の ECHONET Lite 対応販売機器一覧 (2018 年 4 月時点) ,
https://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Download/el_hanbai_list-2018.pdf,(参照 2020-11-16).
- [29] エコーネットコンソーシアム会員企業の ECHONET Lite 対応販売機器一覧 (2020 年 4 月時点) ,
https://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Download/el_hanbai_list-2020.pdf,(参照 2020-11-16).
- [30] Spire Spark International : 4 Billion DLNA Certified,
<https://spirespark.com/dlna/products>,(参照 2020-11-16).
- [31] エコーネットコンソーシアム：出荷状況調査報告，
<https://echonet.jp/shipments/>,(参照 2020-11-16).
- [32] エコーネットコンソーシアム：ECHONET Lite 規格認証取得済み機器一覧，
<https://echonet.jp/product/echonet-lite/>,(参照 2020-11-16).
- [33] IETF PROPOSED STANDARD RFC3261, SIP: Session Initiation Protocol,
<https://tools.ietf.org/html/rfc3261>,(参照 2020-11-16).

- [34] ITU-T 部会：ITU-T 部会審議状況報告概要 (2008),
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/itu_r/pdf/t_gaiyoH19.pdf,(参照 2020-11-16).
- [35] 次世代 IP ネットワーク推進フォーラム, <http://ngnforum.nict.go.jp/>,(参照 2020-11-16).
- [36] 新世代ネットワーク推進フォーラム, <http://nwgnpf.nict.go.jp/>,(参照 2020-11-16).
- [37] 総務省：数字で見たスマホの爆発的普及（5年間の量的拡大），平成29年度版情報通信白書 (2017),
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc111110.html>,(参照 2020-11-16).
- [38] 総務省：IoT デバイスの急速な普及，令和元年版情報通信白書 (2019),
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd112120.html>,(参照 2020-11-16).
- [39] 経済産業省：平成25年度経済産業政策の重点,
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sokai/pdf/012_03_00.pdf,(参照 2020-11-16).
- [40] 国家戦略室：第4回 エネルギー・環境会議 第3回電力需給に関する検討会合 資料2,
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111101/siryo2.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [41] スマートハウス標準化検討会 中間とりまとめ，第2回スマートハウス標準化検討会 資料4-2,
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/011_04_02.pdf,(参照 2020-11-16).
- [42] 丹康雄：ホームネットワークにおける HEMS の現状と動向，日本ロボット学会誌, Vol. 32 No. 3, pp. 236–239 (2014).
- [43] 中部知久，西宏章：環境快適性と消費電力量を考慮した家電制御最適化手法，日本建築学会環境系論文誌, Vol. 77 (2012) No. 682 pp. 1011–1019 (2012).
- [44] Sreen Althaher, Pierluigi Mancarella, Joseph Mutale, “Automated Demand Response From Home Energy Management System Under Dynam”, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 6, Issue: 4, pp.1874 – 1883, July 2015.
- [45] 岡田崇，牧野義樹他：住宅におけるエネルギーマネジメントの効果を検証する実証的ホームシミュレータの提案と実装，情報処理学会論文誌 53(1), pp.365–378 (2012).
- [46] TTC Technical Report TR-1046, ホームネットワークサービスを実現するプラットフォーム，第1版 (2013),
<https://www.ttc.or.jp/application/files/1215/5435/8145/TR-1046v1.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [47] TTC Technical Report TR-1043, ホームネットワーク通信インタフェース実装ガイドライン，第5.0版 (2015),
<https://www.ttc.or.jp/application/files/7215/5321/8933/TR-1043v5.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [48] 内閣府：Society 5.0,
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/,(参照 2020-11-16).
- [49] スマート IoT 推進フォーラム,
<https://smartiots-forum.jp/tech-strategy/tech-std>,(参照 2020-11-16).
- [50] JEITA スマートホーム部会,
<https://home.jeita.or.jp/smarthome/purpose/index.html>,(参照 2020-11-16).
- [51] 経済産業省：スマートホーム検討資料 (2017),

- <https://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170523004/20170523004-1.pdf>,(参照 2020-11-16).
- [52] JEITA スマートホーム部会 : Society5.0 実現に向けたスマートライフ分野のサイバーセキュリティ対策の方向性 (2018),
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_seido/pdf/003_03_02.pdf,(参照 2020-11-16).
- [53] HATS フォーラム (高度通信システム相互接続推進会議) ,
<https://www.hats.gr.jp/>,(参照 2020-11-16).
- [54] 次世代 I P ネットワーク推進フォーラム技術基準検討 WG 報告書 (2006),
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/ipnet/pdf/061031_2_sa8-1.pdf,(参照 2020-11-16).
- [55] HATS フォーラム : 通信機器の相互接続性確保に向けて (2010),
https://www.hats.gr.jp/japanese/demonstration/2010/nt-13_koro101008.pdf,(参照 2020-11-16).
- [56] Wi-Fi Alliance, <https://www.wi-fi.org/ja>,(参照 2020-11-16).
- [57] Wi-Fi Alliance : Certification,
<https://www.wi-fi.org/ja/certification>,(参照 2020-11-16).
- [58] OCF : UPNP CERTIFICATION,
<https://openconnectivity.org/certification/upnp-certification/>,(参照 2020-11-16).
- [59] Spire Spark : DLNA CERTIFICATION AND LOGO PROGRAM,
<https://spirespark.com/dlna/certification>,(参照 2020-11-16).
- [60] エコーネットコンソーシアム : 認証制度の紹介,
https://echonet.jp/about/certification_system/,(参照 2020-11-16).
- [61] businesswire : DLNA がホームネットワーク製品認証プログラム拡大を発表 (2007),
<https://www.businesswire.com/news/home/20071001006453/ja/>,(参照 2020-11-16).
- [62] エコーネットコンソーシアム : プラグフェストとは? ,
<https://echonet.jp/auth/plugfest/>,(参照 2020-11-16).
- [63] JEMA (一般社団法人 日本電機工業会) ,<https://www.jema-net.or.jp/>,(参照 2020-11-16).
- [64] 相互接続における情報公開のためのガイドライン, 第 1.1 版, JEMA (2019),
https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/hems/data/GL_v1.1.pdf,(参照 2020-11-16).
- [65] JEMA:HEMS におけるトラブルシュートとトラブル未然防止のための事例集, 第 2.0 版 (2019),
https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/hems/data/jireishu_v2.pdf,(参照 2020-11-16).
- [66] エコーネットコンソーシアム : ECHONET Lite システム設計指針, 第 1 版 (2018).
IETF DRAFT STANDARD RFC 2616, Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1, IETF,
<https://tools.ietf.org/html/rfc2616>,(参照 2020-11-16).
- [67] IETF INTERNET STANDARD RFC 1034, DOMAIN NAMES - CONCEPTS AND FACILITIES,
<https://tools.ietf.org/html/rfc1034>,(参照 2020-11-16).
- [68] IETF INTERNET STANDARD RFC 1035, DOMAIN NAMES - IMPLEMENTATION AND SPECIFICATION,
<https://tools.ietf.org/html/rfc1035>,(参照 2020-11-16).

- [69] 沖電気工業株式会社：“無線モジュールとは：新担当者でもわかる無線モジュールの選び方”，
https://oki.com/jp/iot/doc/2016/16vol_05.html,(参照 2020-11-16).
- [70] DLNA Certification Test Plan for 2.0 v1.3 (2017),
<https://certification.dlna.org/documents.aspx>,(参照 2020-11-16).
- [71] businesswire：“DLNA Fulfills Mission, Dissolves as Non-Profit Trade Association”，
<https://www.businesswire.com/news/home/20170105005518/en/DLNA-Fulfills-Mission-Dissolves-Non-Profit-Trade-Association>,(参照 2020-11-16).
- [72] Bluetooth SIG：Bluetooth Technology, <https://www.bluetooth.com/>,(参照 2020-11-16).
- [73] Zigbee Alliance, <https://zigbeealliance.org/>,(参照 2020-11-16).
- [74] GfK：POS トラッキング, <https://www.gfk.com/ja/products/point-of-sales-tracking>,(参照 2020-11-16).
- [75] 濱本望絵, 杉本芳剛, 鷺津宗孝, 石川博一, 村上隆史, 杉村博, 森信一郎, 一色正男：“ECHONET Lite 搭載機器の相互接続性を阻害する家庭用ルータの実装状況調査, および相互接続性向上のための手法の提案”, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.9, No.1, pp.22-31(2019).
- [76] IETF (Internet Engineering Task Force) ,
<https://www.ietf.org/>,(参照 2020-11-16).
- [77] IETF INTERNET STANDARD RFC 1112, Host Extensions for IP Multicasting, IETF,
<https://www.ietf.org/rfc/rfc1112.txt>,(参照 2020-11-16).
- [78] IETF PROPOSED STANDARD RFC 2236, Internet Group Management Protocol, Version 2, IETF,
<https://www.ietf.org/rfc/rfc2236.txt>,(参照 2020-11-16).
- [79] IETF PROPOSED STANDARD RFC 3376, Internet Group Management Protocol, Version 3, IETF,
<https://www.ietf.org/rfc/rfc3376.txt>,(参照 2020-11-16).
- [80] 石川憲洋, 山内長承, 高橋修：IP マルチキャスト通信のユーザ認証機能の提案と実装,
情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 10, pp. 3728-3736 (1999).
- [81] 山内長承, 石川憲洋, 高橋修：IP マルチキャストの配送制御とそのセキュリティへの応用,
情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 1, pp. 167-176 (2000).
- [82] 佐藤弓子, 土井裕介, 寺本圭一：通信規格の異なる家電機器と家電コントローラを相互接続可能にするアダプタの実装方法, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS) , vol. 2011-CDS-1, No. 9, pp. 1-5 (2011).
- [83] 林慧, 菅原進：ビルの省電力をサポートする遠隔省電力サービス FACiTENA-i, 東芝レビューVol. 69, No. 5, pp. 45-48 (2014).
- [84] 緒方良照：省エネルギー, コスト削減, そして地球環境への貢献を目指して, UNISYS TECHNOLOGY REVIEW EXTRA EDITION 第 116 号, pp. 47-53 (2013).
- [85] Wireshark,
<https://www.wireshark.org/>,(参照 2020-11-16).
- [86] ブロードバンド回線事業者の加入件数調査 (2017 年 9 月末時点) , 株式会社 MM 総研,
<https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=273>,(参照 2020-11-16).
- [87] IETF INTERNET DRAFT, Simple Service Discovery Protocol/1.0,

- <https://tools.ietf.org/html/draft-cai-ssdp-v1-03>,(参照 2020-11-16).
- [88] エコーネットコンソーシアム : ECHONET Lite システム設計指針 第 2 版, 2.4.2 IPv4 環境下での考え方 (2019).
https://echonet.jp/el_design_guide_2nd/
- [89] Moe Hamamoto, Takashi Murakami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki: Investigation of Home Routers with Connectivity Issues and Proposal for Improving Interconnectivity, IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2019 (GCCE2019), pp.812–814(2019).
- [90] Moe Hamamoto, Takashi Murakami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki: Resolving IGMP Difference among Routers and Devices for Improving Interconnectivity in Home Networks, IEEE Ubi-Media2019, pp1–8(2019).
- [91] 濱本望絵, 土屋薫子, 石川博一, 村上隆史, 杉村博, 森信一郎, 一色正男 : 無線 LAN 中継機のグループ鍵更新問題に関する解決手法の提案, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.10, No.1, pp.26-39(2020).
- [92] Wi-Fi Alliance : Security,
<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security>,(参照 2020-11-16).
- [93] IEEE Std 802.11i,
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1318903>,(参照 2020-11-16).
- [94] OCF : Internet Gateway Device V2.0,
<https://openconnectivity.org/developer/specifications/upnp-resources/upnp/internet-gateway-device-igd-v-2-0/>,(参照 2020-11-16).
- [95] IETF DRAFT STANDARD RFC 2131, Dynamic Host Configuration Protocol,
<https://www.ietf.org/rfc/rfc2131.txt>,(参照 2020-11-16).
- [96] Google : YouTube ヘルプ-システム要件,
<https://support.google.com/youtube/answer/78358?hl=ja>,(参照 2020-11-16).
- [97] Hulu : ヘルプセンター-Hulu とは,
<https://help.hulu.jp/hc/ja/sections/360007606753-Hulu-%E3%81%A8%E3%81%AF>,(参照 2020-11-16).
- [98] U-NEXT : ヘルプセンター-推奨の回線速度を知りたい,
<https://help.unext.jp/guide/detail/recommended-line-speed>,(参照 2020-11-16).
- [99] Netflix : ヘルプセンター-推奨されるインターネット接続速度,
<https://help.netflix.com/ja/node/306>,(参照 2020-11-16).
- [100] Amazon : ヘルプ&カスタマーサービス-コンピューターでのストリーミング再生のシステム要件,
<https://www.amazon.co.jp/gp/help/customer/display.html?nodeId=201422810>,(参照 2020-11-16).
- [101] NetSetsu : AmazonMusic のデータ通信量と 1GB までの目安や節約方法,
<https://net-torisetu.jp/amazonmusic-traffic/>,(参照 2020-11-16).
- [102] BUFFALO : スマホ・テレビ・パソコン周辺機器カタログ 2020 夏 Vol.226,
https://www.buffalo.jp/support/other/_icsFiles/afieldfile/2020/07/10/vol226.pdf,(参照 2020-11-16).
- [103] 総務省統計局 : 日本の統計 2018, 2-11 都道府県, 世帯人員別一般世帯数と世帯の種類別世帯人

員（平成 27 年）,

<https://www.stat.go.jp/data/nihon/pdf/18nihon.pdf>,(参照 2020-11-16).

- [104] IETF INTERNET STANDARD RFC792, INTERNET CONTROL MESSAGE PROTOCOL, IETF,
<https://tools.ietf.org/html/rfc792>,(参照 2020-11-16).
- [105] Jouni Malinen, Linux WPA/WPA2/IEEE 802.1X Supplicant,
https://w1.fi/wpa_supplicant/
- [106] 上野英俊, 田中希世子, 原下貴志, 鈴木偉元, 石川憲洋, 高橋修: マルチキャストセキュリティアーキテクチャの提案と実装, DICOMO 2003 シンポジウム, pp.113–116, (2003).
- [107] Burmester, M.V.D. and Desmedt, Y.: A secure and efficient conference key distribution system, Advances in Cryptology EUROCRYPT, 94, pp.275–286 (1995).
- [108] Perrig, A., Szewczyk, R., Tygar, J.D., Wen, V. and Culler, D.E.: SPINS: Security protocols for sensor networks, Wireless Networks, Vol.8, No.5, pp.521–534 (2002).
- [109] 浅野歩, 岸田崇志, 前田香, 河野英太郎: 鍵の同期を考慮した鍵の配布・更新の提案と実装, 情報処理学会研究報告, 2005-DSM-39, No.9, pp.49–54 (2005).
- [110] 辻宏郷, 米田健, 水野忠則, 西垣正勝: 放送型高頻度鍵更新方式による超広域モバイル環境向けセキュアリアルタイム通信の実現, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.9, pp.2103–2117 (Sep. 2009).
- [111] エコーネットコンソーシアム: ECHONET Lite システム設計指針, 第 2 版, 2.12 無線 LAN ネットワークに関する注意事項 (2019).
- [112] IoT 推進コンソーシアム, 総務省, 経済産業省: IoT セキュリティガイドライン, ver 1.0 (2016),
https://www.soumu.go.jp/main_content/000428393.pdf,(参照 2020-11-16).
- [113] 総務省: 電気通信事業法に基づく端末機器の基準認証に関するガイドライン, 第 1 版 (2019),
https://www.soumu.go.jp/main_content/000615696.pdf,(参照 2020-11-16).

目次

図 1-1	スマートホームとは	1
図 1-2	ホームネットワークアーキテクチャ ([19]より抜粋)	3
図 1-3	伝送メディアの変遷	4
図 1-4	OSI 参照モデル	4
図 1-5	ホームネットワークの標準規格のプロトコルスタック	5
図 1-6	改訂されたホームネットワークアーキテクチャ ([19]より抜粋)	6
図 1-7	システム構成	8
図 1-8	市場からの接続問題の報告例	8
図 1-9	過去 10 年間の接続問題数の統計	9
図 1-10	相互接続性問題の可視化	11
図 1-11	下位レイヤで相互接続性問題の生じる背景の考察	12
図 1-12	無線 LAN に関する相互接続性問題数の推移 (パナソニックでの統計)	12
図 1-13	上位標準規格のロゴ認証試験の確認範囲	13
図 1-14	実市場の多種多様なホームネットワーク	13
図 2-1	相互接続手順	18
図 2-2	マルチキャストを利用した機器発見	18
図 2-3	相互接続プロトコルの相互接続性問題の内訳 (パナソニックでの統計)	19
図 2-4	本研究の対象	20
図 2-5	ルータ 1 台構成 (シングルセグメント) 【研究対象】	21
図 2-6	ルータ多段構成 (マルチセグメント) 【研究対象外】	21
図 2-7	ルータ+中継機 1 台構成 (シングルセグメント) 【研究対象】	22
図 2-8	本研究の範囲	23
図 2-9	CFM 問題への SHIPs の適用	25
図 3-1	マルチキャストを利用した ECHONET Lite の機器発見	29
図 3-2	グループへの参加	30
図 3-3	グループの維持	31
図 3-4	グループの離脱	32
図 3-5	初期状態	34
図 3-6	片側 Join 状態	35
図 3-7	途中から片側 Join 状態	36
図 3-8	両側 Join 状態	36
図 3-9	調査環境	41
図 3-10	実験環境	49
図 4-1	調査環境	56
図 4-2	実験環境	64

図 5-1	無線中継機能のシェア推移	70
図 5-2	無線 LAN ネットワークの例	70
図 5-3	再現環境	72
図 5-4	市場問題の解析	73
図 5-5	調査手順	75
図 5-6	無線中継の仕組み	77
図 5-7	課題が発生しない中継機の場合	79
図 5-8	課題が発生する中継機に 12 分以内に再接続した場合	79
図 5-9	課題が発生する中継機に 12 分以上経過後に再接続した場合	80
図 5-10	管理テーブルの仕様	80
図 5-11	GTK 更新発生理由	81
図 5-12	提案手法のロジック	87
図 5-13	提案手法のシーケンス	93
図 5-14	端末ソフトウェアスタック	93
図 5-15	実験環境	95
図 5-16	GTK 更新間隔の初期値と変更可否	100
図 6-1	今後の取り組み範囲	107

表目次

表 2-1	相互接続手順の各フェーズで利用する技術	19
表 3-1	CFM 問題の例	28
表 3-2	RFC 2236 で規定されたルータの状態遷移表	33
表 3-3	Querier 機能およびエントリ有効期限の有無と課題	37
表 3-4	ホームネットワークの構成の種類	41
表 3-5	端末 1 および端末 2 のスペック	42
表 3-6	構成 2 における IGMP 機能の有無に関する調査結果	44
表 3-7	構成 5 における IGMP 機能の有無に関する調査結果	45
表 3-8	構成 2 におけるマルチキャストパケット転送結果	45
表 3-9	構成 5 におけるマルチキャストパケット転送結果	45
表 3-10	Querier 機能対応の有無およびエントリ有効期限調査結果	47
表 3-11	起動直後の機器発見の実験結果	50
表 3-12	6 分超経過後の機器発見の実験結果	51
表 4-1	ホームネットワークの構成の種類	55
表 4-2	端末 1 および端末 2 のスペック	56
表 4-3	構成 2 における IGMP 機能の有無に関する調査結果	59
表 4-4	構成 5 における IGMP 機能の有無に関する調査結果	60
表 4-5	構成 2 におけるマルチキャストパケット転送結果	60
表 4-6	構成 5 におけるマルチキャストパケット転送結果	60
表 4-7	Querier 機能対応の有無およびエントリ有効期限調査結果	62
表 4-8	起動直後の機器発見の実験結果	65
表 4-9	6 分超経過後の機器発見の実験結果	66
表 4-10	管理テーブルに有効期限があるルータの市場シェア合計の推移	66
表 5-1	ルータの GTK 更新間隔と端末切断期間の調査結果	74
表 5-2	端末切断期間中のルータの GTK 更新の関連性	76
表 5-3	無線中継機能を保有するルータ	83
表 5-4	市場での影響度の調査結果	84
表 5-5	中継機のテーブル有効期限調査の結果	84
表 5-6	DHCP (RFC2131) の規定メッセージ	89
表 5-7	さまざまなネットワークサービスの通信レート	90
表 5-8	提案手法の無線 LAN 帯域使用率	91
表 5-9	各機器のスペック	95
表 5-10	提案手法の効果確認結果	98
表 5-11	提案手法の影響確認結果	99

付録

(ア) 3.4.2 項および 4.3.2 項で選定した調査対象ルーター一覧 (全 150 機種)

No	メーカー	型番	ファームバージョン
1	BUFFALO	WHR-300HP2	2.50
2	BUFFALO	WHR-G301N	1.86
3	NEC	Aterm WR8165N-ST	1.0.36
4	BUFFALO	WHR-1166DHP2	2.90
5	BUFFALO	WHR-1166DHP	2.90
6	BUFFALO	WHR-300	1.99
7	BUFFALO	WSR-1166DHP2	1.11
8	NEC	Aterm WF1200HP	1.0.15
9	NEC	Aterm WR9500N-HP	1.0.23
10	BUFFALO	WZR-300HP	1.99
11	BUFFALO	WHR-300HP	1.99
12	BUFFALO	WZR-1750DHP2	2.30
13	BUFFALO	WZR-450HP	1.99
14	NEC	Aterm WF800HP	1.0.19
15	NEC	Aterm WG1200HS	1.0.16
16	BUFFALO	WHR-600D	2.50
17	NEC	Aterm WG300HP	1.08
18	BUFFALO	WXR-1750DHP	2.49
19	NEC	Aterm WR8370N-HP	1.08
20	NEC	Aterm WG1800HP2	1.0.13
21	BUFFALO	WZR-HP-G302H	1.85
22	BUFFALO	WHR-HP-G300N	1.99
23	NEC	Aterm WG1200HP	1.0.26
24	BUFFALO	WZR-HP-AG300H	1.75
25	BUFFALO	WZR-HP-G450H	1.89
26	ELECOM	WRC-733GHBK	1.47
27	BUFFALO	WSR-1166DHP	1.11
28	BUFFALO	WZR-600DHP	1.99
29	BUFFALO	WSR-300HP	2.40

30	IO-DATA	WN-G300R	1.14
31	NEC	Aterm WR8175N-HP	1.0.5
32	ELECOM	WRC-733FEBK	1.06
33	BUFFALO	WHR-1166DHP3	2.90
34	NEC	Aterm WG600HP	1.0.11
35	NEC	Aterm WR8750N	1.0.9
36	ELECOM	WRC-300FEBK	1.04
37	Logitec	LAN-W300N/R	1.18
38	NEC	Aterm WR8600N-HP	1.0.15
39	NEC	Aterm WG1800HP	1.0.24
40	NEC	Aterm WF1200HP2	1.0.2
41	NEC	Aterm WF300HP	1.0.4
42	BUFFALO	WCR-1166DS	1.30
43	NEC	Aterm WR8160N-ST	1.0.9
44	BUFFALO	WZR-900DHP	1.14
45	ELECOM	WRC-1750GHBK2-I	1.20
46	ELECOM	WRC-1167GHBK2-I	1.31
47	BUFFALO	WZR-600DHP2	1.14
48	BUFFALO	WZR-900DHP2	2.18
49	ELECOM	WRC-1750GHBK	1.34
50	NEC	Aterm WR9300N-HP	1.0.8
51	BUFFALO	WZR-600DHP3	2.18
52	NEC	Aterm WR8170N-HP	1.0.4
53	NEC	Aterm WG1400HP	1.0.23
54	ELECOM	WRC-1167GHBK2	1.31
55	IO-DATA	WN-G300R3	1.04
44	BUFFALO	WZR-900DHP	1.14
57	NEC	Aterm WG2600HP	1.0.11
58	IO-DATA	WN-AC1167GR	1.05
59	Logitec	LAN-W300N/P	3.09
60	Logitec	LAN-W301NR	2.1
61	Logitec	LAN-WH300N/DR	1.14
62	NEC	Aterm WF300HP2	1.0.12
63	BUFFALO	WSR-600DHP	2.90
64	BUFFALO	WXR-1900DHP2	2.50
65	ELECOM	WRC-1167GHBK3-A	1.15
66	Logitec	LAN-WH300AN/DGR	1.39

67	BUFFALO	WZR-1750DHP	2.29
68	Logitech	LAN-WH450N/GR	1.37
69	Logitech	LAN-WH300N/DGR	1.26
70	ELECOM	WRC-1167GEBK-I	1.00
71	ELECOM	WRC-1900GHBK-A	1.10
72	Logitech	LAN-W300N/PR5B	1.00
73	ELECOM	WRC-1167FEBK-A	1.18
74	BUFFALO	WZR-S900DHP	2.19
75	BUFFALO	WZR-S600DHP	2.18
76	IO-DATA	WN-G300R2	1.14
77	ELECOM	WRC-733GHBK-I	1.56
78	BUFFALO	WZR-1166DHP2	2.16
79	Logitech	LAN-WH300N/DGP	2.02
80	BUFFALO	WXR-1900DHP	2.41
81	Logitech	LAN-WH450N/GP	2.01
82	IO-DATA	WN-AG450DGR	1.08
83	Logitech	LAN-WH300AN/DGP	2.12
84	ELECOM	WRC-1467GHBK-A	1.08
85	IO-DATA	WN-AC1600DGR3	2.06
86	任天堂	WAP-001	1.50
87	NEC	Aterm WG2200HP	1.0.2
88	Apple	ME918J/A	7.7.8
89	BUFFALO	WZR-D1100H	1.99
90	ELECOM	WRC-2533GHBK-I	1.20
91	玄人志向	CWR-GN150S-BK	1.00_0.15
92	Logitech	LAN-W150N/RSPS	1.05
93	IO-DATA	WN-AX1167GR	3.11
94	ELECOM	WRC-1167GHBK	1.39
95	BUFFALO	WSR-2533DHP	1.02
96	IO-DATA	WN-G300DR	1.14
97	IO-DATA	WN-AG300DGR	1.05
98	IO-DATA	WN-AC733GR	2.04
99	BUFFALO	WXR-2533DHP	1.31
100	Apple	MD031J/A	7.6.8
101	NEC	Aterm WR8700N-HP	1.0.17
102	Logitech	LAN-W451NGR	1.8.4
103	IO-DATA	WN-AC1167DGR	1.02

104	BUFFALO	WZR-1166DHP	2.15
105	IO-DATA	WN-G300TVGR	1.13
106	BUFFALO	WZR-S1750DHP	2.31
107	BUFFALO	WXR-2533DHP2	1.41
108	PCI	MZK-MF300N2	v1.14
109	PCI	MZK-W300NH3	b13
110	ELECOM	WRC-300GHBK	1.00.07
111	シンセイコーポレーション	Uroad-Home2+	1.2.3.1
112	NEC	WX01	1.6.0
113	NEC	Aterm MR03LE	1.0.0
114	NEC	WX02	1.4.0
115	NEC	Aterm MR03LN	2.2.0
116	NEC	Aterm MR04LN	1.3.0
117	NEC	N-01H	1.1.0
118	シンセイコーポレーション	novas Home+CA	0.99.44 5407
119	PCI	HOME SPOT CUBE	001.004.002
120	FON WIRELESS	FON2601E	FON2601E-7.0.20.0-20150430
121	BN-MUX	BCW710J2	-
122	CISCO	DPC3828D	d3828-c3100r5591-140305d-JPN
123	NETGEAR	CG3000D	GA3.0.9
124	NETGEAR	CG3200D	GA3.1.5
125	NEC	Aterm BL900HW	1.6.1
126	PCI	HOME SPOT CUBE2	V101
127	NEC	Aterm WR8166N	2.0.15
128	NEC	RT-400NE	8.04
129	沖電気	PR-400KI	08.00.0010
130	沖電気	RT-500KI	4.00.0020
131	三菱電機	RT-400MI	8.00.0007
132	三菱電機	RT-500MI	4.01.0003
133	BN-MUX	BCW710J	-
134	NET&SYS	MNG-6200	-
135	シンクレイヤ	CBW383G4J	37.556mp5.010
136	NEC	Aterm WR8150N(eo)	NB15
137	NEC	Aterm WR8300N(eo)	NC15
138	NEC	eo-RT100(N1)	JA23

139	三菱電機	RT-500MI	04.01.0002
140	BUFFALO	WSR-1166DHP3	1.11
141	Buffalo	WXR-1750DHP2	2.50
142	BUFFALO	WHR-1166DHP4	2.90
143	NEC	Aterm WG1200HP2	2.0.2
144	ELECOM	WRC-1167GHBK2-S	1.02
145	ELECOM	WRC-1167GHBK-S	1.00
146	NEC	Aterm WG2600HP2	1.0.1
147	ELECOM	WRC-1167FEBK2-E	1.04
148	IO-DATA	WN-AX2033GR	1.11.000
149	NEC	Aterm WG1200HS2	1.0.2
150	NEC	Aterm WG1900HP	1.0.0

(イ) 5.3 節で選定した調査対象ルーター一覧 (全 57 機種)

No	メーカー	型番	ファームバージョン
1	BUFFALO	WHR-300HP2	1.00
2	BUFFALO	WSR-1166DHP2	1.0.7
3	NEC	Aterm WR8165N-ST	1.0.38
4	BUFFALO	WHR-1166DHP2	1.00
5	BUFFALO	WHR-1166DHP	2.91
6	BUFFALO	WXR-1750DHP	2.52
7	NEC	Aterm WF1200HP	1.0.16
8	BUFFALO	WHR-1166DHP3	2.93
9	NEC	Aterm WG1800HP2	1.0.15
10	BUFFALO	WZR-1750DHP2	2.31
11	NEC	Aterm WG1200HP	1.0.32
12	BUFFALO	WHR-600D	1.41
13	BUFFALO	WSR-2533DHP	1.00
14	BUFFALO	WHR-300	1.85
15	BUFFALO	WZR-300HP	1.99
16	NEC	Aterm WF1200HP2	1.0.3
17	ELECOM	WRC-733GHBK	1.56
18	BUFFALO	WSR-1166DHP3	1.13
19	BUFFALO	WSR-1166DHP	1.13
20	BUFFALO	WHR-1166DHP4	2.9
21	ELECOM	WRC-733FEBK	1.06

22	ELECOM	WRC-300FEBK	1.04
23	BUFFALO	WXR-1750DHP2	2.52
24	NEC	Aterm WG1800HP	1.0.28
25	ELECOM	WRC-1750GHBK2-I	1.27
26	BUFFALO	WZR-900DHP	1.14
27	ELECOM	WRC-1167GHBK2-I	1.31
28	BUFFALO	WZR-600DHP2	1.14
29	BUFFALO	WZR-900DHP2	2.19
30	BUFFALO	WZR-600DHP3	2.19
31	BUFFALO	WXR-1900DHP2	2.53
32	ELECOM	WRC-1167GHBK2	1.31
33	NEC	Aterm WG2200HP	1.0.5
34	NEC	Aterm WF300HP2	1.0.14
35	ELECOM	WRC-1167GEBK-S	1.03
36	ELECOM	WRC-2533GHBK-I	1.20
37	BUFFALO	WSR-600DHP	1.00
38	ELECOM	WRC-1167GHBK3-A	1.24
39	ELECOM	WRC-1167GHBK2-S	1.04
40	ELECOM	WRC-1900GHBK-S	1.14
41	BUFFALO	WZR-1750DHP	2.3
42	ELECOM	WRC-1167GEBK-I	1.04
43	ELECOM	WRC-1900GHBK-A	1.10
44	ELECOM	WRC-1167FEBK-S	1.02
45	NEC	Aterm WG2600HP2	1.0.3
46	ELECOM	WRC-1167GHBK-S	1.02
47	ELECOM	WRC-1167FEBK-A	1.18
48	NEC	Aterm WG1200HP2	2.2.1
49	BUFFALO	WZR-S900DHP	2.19
50	NEC	Aterm WG1200HS2	2.2.1
51	NEC	Aterm WG1900HP	2.4.0
52	BUFFALO	WXR-1900DHP3	2.52
53	BUFFALO	WZR-S600DHP	2.19
54	BUFFALO	WXR-2533DHP2	1.2
55	ELECOM	WRC-733GHBK-I	1.56
56	BUFFALO	WZR-1166DHP2	2.16
57	BUFFALO	WXR-1900DHP	2.45

関連論文・著者履歴

1. 国内論文（査読付き）

- (1) 濱本望絵, 土屋薫子, 石川博一, 村上隆史, 杉村博, 森信一郎, 一色正男,
“無線LAN中継機のグループ鍵更新問題に関する解決手法の提案”,
情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.10, No.1, pp.26-39, Feb. 2020
- (2) 濱本望絵, 杉本芳剛, 鷺津宗孝, 石川博一, 村上隆史, 杉村博, 森信一郎, 一色正男,
“ECHONET Lite搭載機器の相互接続性を阻害する家庭用ルータの実装状況調査, および相互接続性向上のための手法の提案”, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol.9, No.1, pp.22-31, Jan. 2019 <2019年度CDSトランザクション論文賞受賞>

2. 国際会議論文（査読付き）

- (1) Moe Hamamoto, Takashi Murakami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Investigation of Home Routers with Connectivity Issues and Proposal for Improving Interconnectivity", IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2019 (GCCE2019), pp.812-814, Oct. 2019
- (2) Moe Hamamoto, Takashi Murakami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Resolving IGMP Difference among Routers and Devices for Improving Interconnectivity in Home Networks", IEEE Ubi-Media2019, pp1-8, Aug. 2019

3. 特許出願

- (1) 出願2019年, 濱本望絵
“端末, 通信方法, および, プログラム” (特開2020-108131)
- (2) 出願2019年, 濱本望絵
“端末, 通信方法, および, プログラム” (WO 2020/137084)

ほか 13 件 (内 筆頭 13 件, 登録 8 件)

4. 国内学会発表

- (1) 増田陸, 佐野芳樹, 松方直樹, 酒井貴洋, 濱本望絵, 杉村博, 一色正男, "IoTスマートハウス機器 (家電機器とスマートメーター等) による生活者行動推定技術の開発", 第82回情報処理学会全国大会論文集, 4W-07, pp.1-2, Mar. 2020
- (2) 佐野芳樹, 松方直樹, 酒井貴洋, 増田陸, 濱本望絵, 杉村博, 一色正男, "スマートメーターとHEMSを利用した実住宅での生活行動推定", DICOMO2019, pp.1-4, June, 2019
- (3) 佐野芳樹, 濱本望絵, 杉村博, 一色正男, "IoT (HEMS) 利用の高齢者高度見守りシステム", 第25回コンシューマ・デバイス&システム研究会報告(CDS), CDS25, No.1, pp.1-7, May, 2019
- (4) 濱本望絵, 土屋薫子, 石川博一, 村上隆史, 杉村博, 森信一郎, 一色正男, "無線LAN中継機の暗号鍵更新問題に関する解決手法の提案", 第24回コンシューマ・デバイス&システム研究

会報告(CDS), pp.1-14, Jan. 2019

- (5) 神林優河, 佐野芳樹, 小川壘, 高村走, 杉村博, 濱本望絵, 一色正男, "国際標準規格 (ECHONET Lite)を利用したスマートメーターと家電製品とを統合したHEMSサービスでの生活行動推定技術の研究", 第24回コンシューマ・デバイス&システム研究会報告(CDS), Jan. 2019
- (6) 藤田裕之, 杉村博, 濱本望絵, 一色正男, " エコーネットコンソーシアムが策定した ECHONET Lite Web API ガイドラインの紹介", 第24回コンシューマ・デバイス&システム研究会報告(CDS), Jan. 2019
- (7) 濱本望絵, 杉本芳剛, 鷺津宗孝, 石川博一, 村上隆史, "ホームネットワーク技術の相互接続性を阻害する家庭用ルータの実装状況調査, および相互接続性確保のための手法の提案", 第21回コンシューマ・デバイス&システム研究会報告(CDS), pp.1-8, Jan. 2018
<2017年度優秀発表賞受賞>

5. 国際学会発表

- (1) Moe Hamamoto, Takashi Murakami, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Proposal of a Method to Solve the Group Temporal Key Mismatch Between IoT Devices", IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2020 (GCCE2020), pp.312-313, Oct. 2020
<IEEE GCCE 2020 Excellent Paper Award (On-demand) Gold Prize受賞>
- (2) Yoshiki Sano, Takahiro Sakai, Moe Hamamoto, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Research on the Less Stress Acquisition Method for the Activity Information of Actual Residents Using the International Standard ECHONET Lite", IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2020 (GCCE2020), pp.1-2, Oct. 2020
- (3) Hiroyuki Fujita, Hiroshi Sugimura, Moe Hamamoto, Masao Isshiki, "Improvement of the Device Descriptions of ECHONET Lite by Adding Version Specific Information", IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2019 (GCCE2019), pp.815-817, Nov. 2019
- (4) Yoshiki Sano, Riku Masuda, Naoki Matsukata, Sakai Takahiro, Moe Hamamoto, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Proposal to Make IoT (ECHONE Lite) Devices "Human Behavior Sensors for Life Action Recognition", IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2019 (GCCE2019), pp1-2, Nov. 2019
- (5) Takashi Murakami, Moe Hamamoto, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "COMPARISON OF IOT DEVICES ARCHITECTURE IN HOME NETWORK", iadis2019, pp1-10, July 2019
- (6) Takumi Shida, Hiroshi Sugimura, Moe Hamamoto, Masao Isshiki, "Development of Interface for Assisting Energy-Saving Utilizing Information From Network Home Appliances", Human-Computer Interfaces and New Modes of Interactivity, IGI Global, pp.138-147
- (7) Yusuke Kumakura, Hiroyuki Fujita, Sayo Kaneko, Moe Hamamoto, Hiroshi Sugimura, Masao Isshiki, "Development of a curriculum and teaching materials of IoT and HEMS utilizing Node-RED", HICedu2019 Proceedings, pp.1-6, Jan. 2019

- (8) Takumi Shida, Hiroshi Sugimura, Moe Hamamoto and Masao Isshiki, "Development of Support Tool to Improve Indirectly Consciousness of Energy Saving", International Conferences Interfaces and Human Computer Interaction 2018, pp. 411–414, July, 2018

6. 受賞

- (1) Moe Hamamoto, Excellent Paper Award (On-demand) Gold Prize, IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) , 2020
- (2) 濱本望絵, 2019年度CDSトランザクション論文賞,
情報処理学会 コンシューマ・デバイス&システム (CDS) 研究会, 2019
- (3) 濱本望絵, 2017年度優秀発表賞,
情報処理学会 コンシューマ・デバイス&システム (CDS) 研究会, 2017