



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Mobility as a Serviceとマイクログリッドの運用計画の統合に関する研究
Author(s)	李, 一達
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16519号
Issue Date	2025-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16519
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95209
Type	doctoral thesis
File Information	Yida_Li.pdf



博士論文

**Mobility as a Service とマイクログリッドの運用計画の統合
に関する研究**

李一達

2025 年 2 月

北海道大学 大学院情報科学院
システム情報科学コース

本論文は北海道大学 大学院情報科学院に
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

李一達

審査委員：	主査	原 亮一	准教授
	副査	北 裕幸	教授
		五十嵐 一	教授
		林 泰弘	教授(早稲田大学)

Mobility as a Service とマイクログリッドの運用計画の統合 に関する研究*

李一達

概要

エネルギー効率の改善やレジリエンシの確保を目的とした地産地消型のエネルギーシステムとして、再生可能エネルギーを主体としたマイクログリッドに期待が高まっている。しかし、マイクログリッドは比較的狭い地域を対象としていることから再生可能エネルギーの発電出力と電力需要とをバランスさせにくい。蓄電池を活用したエネルギーの時間的シフトや上位系統との電力融通（売買電）といった対応が必要であるが、これらは MG 運用者にとって経済的な負担となることが多い。異なる地点に設置されている複数の MG を連携させることで、エネルギーの空間的シフトにより需給のバランスを図る検討もあるが、そのためには送配電線を介した自己託送が必要となり、経済的負担に加えて計画値同時同量の達成など技術的なハードルも高い。これらのことからマイクログリッドの事業性確立には、エネルギーの時間的・空間的シフトを可能とする上記以外の対策についても検討することは意義深いと考える。

排気ガスの削減や交通渋滞の改善を目的とした次世代交通システム, MaaS (Mobility as a Service) が実運用のステージに移行しつつある。MaaS ではあらゆる公共交通機関が IT 技術でシームレスに結び付けられるため、ガソリンを燃料とする自家用車主体から、電気自動車 (EV) によるカーシェアリングやライドシェアなどのシェアモビリティを主体とする交通形態へのパラダイムシフトが実現される可能性は高い。

そこで、人・物の輸送という MaaS の本来の目的に相乗りする形で、電力系統の制約に縛られないエネルギーの時間的・空間的シフトを実現できる可能性に着目した。MaaS の配車計画とマイクログリッド間のエネルギーの空間的シフトを含めたエネルギーマネジメントを協調的に計画・運用する“EV and Energy”Management System (E²MS) を提案する。さらに、MaaS の移動需要を満たしつつ、マイクログリッド間のエネルギーの時間的・空間的シフトに MaaS を活用し得ることを数値試算をもとに評価する。

キーワード: セクターカップリング, マイクログリッド, エネルギーマネジメント,
モビリティアズアサービス, 配車計画

Research on the Integration of Operational Planning for Mobility as a Service and Micro Grids[†]

Yida Li

Abstract

Microgrids are gaining attention as a solution for promoting local energy production and consumption to improve energy efficiency and resilience. However, their small scale often leads to significant supply-demand imbalances, making it difficult to align renewable energy output with electricity demand. Addressing this mismatch typically involves measures such as deploying battery storage or engaging in power trading with larger grid systems, including interconnections between multiple microgrids. These solutions, however, entail financial burdens and technical challenges, such as the high cost of self-wheeling and the complexity of achieving simultaneous supply-demand balancing. Thus, exploring innovative approaches to enhance energy storage and transfer is crucial for improving the economic viability of microgrids.

Mobility as a Service (MaaS), designed to reduce emissions and alleviate traffic congestion, is advancing towards widespread implementation. By seamlessly integrating various forms of public transportation, MaaS fosters a shift from reliance on gasoline-powered personal vehicles to shared electric vehicles (EVs) through car-sharing and ride-sharing systems.

In this research, we propose an EV and Energy Management System (E²MS) that bridges MaaS delivery scheduling with microgrid energy management. Numerical simulations validate the feasibility of this system, demonstrating that EVs can simultaneously satisfy MaaS transportation demands and act as mobile storage units to enhance energy transfer and storage between microgrids.

Key words: Sector couplings, Microgrid, Energy management, Mobility as a Service,
Vehicle routing problem

[†]Doctor's Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT46225024, February 3, 2025

目 次

第1章	序論	3
1.1	本論文の背景	3
1.1.1	再生可能エネルギーの主力化	6
1.1.2	マイクログリッドへの期待	8
1.1.3	電気自動車の普及	9
1.1.4	Mobility as a Service によるパラダイムシフト	11
1.2	電気自動車とエネルギーシステムの統合に関する先行研究	14
1.3	本論文の目的と構成	14
第2章	カーシェア型 MaaS と MG の統合	17
2.1	カーシェアに関する先行研究と本研究の目的	17
2.2	MG のエネルギーフロー	17
2.3	カーシェアを想定した E ² MS の定式化	18
2.3.1	目的関数	19
2.3.2	基本的な制約	19
2.3.3	自動運転を考慮する場合の制約式	21
2.4	EV 運用形態と MG 経済性の関係	22
2.4.1	試算条件	22
2.4.2	試算結果—ラウンド型 EV によるエネルギーの時間的シフト—	27
2.4.3	試算結果—ワンウェイ型 EV によるエネルギーの空間的シフト—	31
2.4.4	試算結果—自動運転の活用—	33
2.4.5	MG の運用コスト	36
2.5	年間試算および EV の等価蓄電池比に関する評価	37
2.5.1	試算条件	37
2.5.2	年間運用コスト	39
2.5.3	EV の等価蓄電池比に関する評価	40
第3章	BS と MG の統合	43
3.1	BS に関する先行研究と本研究の目的	43
3.2	MG のエネルギーフロー	44
3.3	BS が導入されたカーシェアを想定した E ² MS の定式化	45
3.3.1	目的関数	45
3.3.2	制約式	46
3.4	BS による経済効果および系統貢献効果	46
3.4.1	試算条件	46
3.4.2	試算結果—EV の運用形態による影響—	49

3.4.3	試算結果—移動需要量による影響—	54
第4章	カーシェア型 MaaS と統合した MG の実規模計画手法	57
4.1	実規模計画手法に関する先行研究と本研究の目的	57
4.2	想定するモデル	57
4.3	バッテリー内蔵型 EV 向け実規模計画手法	57
4.3.1	充放電計画問題 (LP)	58
4.3.2	初期解の生成	60
4.3.3	配車計画問題 (TS)	61
4.4	BS 向け実規模計画手法	64
4.5	試算条件	65
4.6	試算結果	68
第5章	ライドシェア型 MaaS と MG の統合	73
5.1	ライドシェアに関する先行研究と本研究の目的	73
5.2	想定するモデル	74
5.2.1	MG のエネルギーフロー	74
5.2.2	ライドシェアの運用	74
5.3	ライドシェアを想定した E ² MS	75
5.3.1	最適化パート 1 (OP1)	76
5.3.2	最適化パート 2 (OP2)	78
5.4	数値試算	80
5.4.1	試算条件	80
5.4.2	代表日試算	83
5.4.3	シナリオ試算	88
5.4.4	平均乗車時間と MG の運用コストの関係	90
第6章	結論	95
6.1	本論文のまとめ	95
6.2	今後の展望	96
6.3	社会的ニーズへの貢献度, 事業化への展望	96
参考文献		99
著者が発表した論文		103
謝辞		105

図目次

図 1-1	世界の一次エネルギー供給量の推移[1].....	3
図 1-2	世界のエネルギー資源確認埋蔵量[1].....	4
図 1-3	電源別発電電力量の実績[1].....	6
図 1-4	世界の太陽光発電の導入状況[5].....	7
図 1-5	世界の風力発電の導入状況[5].....	7
図 1-6	世界の電気自動車の導入状況[12].....	10
図 1-7	世界のプラグインハイブリッド車の導入状況[12]	11
図 1-8	MAAS の統合段階[15].....	12
図 1-9	MAAS(WHIM)ユーザーの移動手段の変化[16].....	12
図 1-10	日本国内におけるカーシェア用車両とステーション数の推移[18].....	13
図 2-1	MG のエネルギーフロー.....	18
図 2-2	カーシェアを想定した E ² MS のイメージ.....	18
図 2-3	試算対象のイメージ.....	24
図 2-4	各 MG の PV 出力と電力需要.....	25
図 2-5	MG の買電価格と売電価格.....	25
図 2-6	CASE1 における MG1 に設置された BAT のスケジューリング結果	28
図 2-7	CASE1 における EV-A のスケジューリング結果.....	28
図 2-8	CASE2 におけるラウンド型 EV の移動に関するスケジューリング結果.....	29
図 2-9	CASE1 における EV-D のスケジューリング結果.....	30
図 2-10	CASE2 における EV-D のスケジューリング結果	30
図 2-11	CASE2 における MG3 に設置された BAT のスケジューリング結果.....	31
図 2-12	CASE3 におけるワンウェイ型 EV の移動に関するスケジューリング結果	32
図 2-13	CASE2 における EV-C のスケジューリング結果	32
図 2-14	CASE3 における EV-C のスケジューリング結果	33
図 2-15	CASE4 におけるワンウェイ型 AEV の移動に関するスケジューリング結果	34
図 2-16	CASE4 における EV-C のスケジューリング結果	35
図 2-17	CASE3 における EV-D のスケジューリング結果	35
図 2-18	CASE4 における EV-D のスケジューリング結果	36
図 2-19	CASE4 における EV-B のスケジューリング結果	36
図 2-20	各 CASE における MG 群の運用コスト.....	37
図 2-21	BAT 容量と AOC の関係.....	40
図 2-22	ESR の計算方法	41
図 2-23	ESR.....	42
図 3-1	バッテリースワップ (BS) のイメージ.....	44
図 3-2	MG のエネルギーフロー.....	45

図 3-3 試算対象のイメージ	47
図 3-4 MG の買電価格と売電価格	47
図 3-5 各手順における MG の潮流のイメージ	49
図 3-6 CASE1 - EV 運用計画	50
図 3-7 CASE2 - EV 運用計画	51
図 3-8 MG1 の潮流	51
図 3-9 運用コスト	52
図 3-10 最大潮流	53
図 3-11 平均変動	53
図 3-12 CASE1 に対する CASE2 のコスト削減の平均値	54
図 3-13 CASE1 に対する CASE2 の最大潮流削減の平均値	55
図 3-14 CASE1 に対する CASE2 の平均変動抑制の平均値	55
図 4-1 EV の充放電を含まない MG の潮流	59
図 4-2 P_m, t_{RD} と P_m, v, t_{PS}	60
図 4-3 残存需要 ((4.2)式の右辺) と残存 PV 余剰 ((4.3)式の右辺)	60
図 4-4 一点交差のイメージ	61
図 4-5 3 台の中で EV-A がランダムで選択された場合の交叉点	62
図 4-6 タブーリストのイメージ	63
図 4-7 図 4-5 の交叉点 1 が選択された場合の走行パターン	63
図 4-8 長期メモリのイメージ	64
図 4-9 BP に関するタイムテーブル	64
図 4-10 交叉のイメージ	65
図 4-11 試算対象のイメージ	66
図 4-12 CASE2 と CASE4 の各反復における最良解の MG の運用コスト	70
図 4-13 CASE2 におけるある EV の走行と充放電の概略図	71
図 4-14 CASE4 におけるある BP の移動と充放電の概略図	72
図 5-1 MG のエネルギーフロー	74
図 5-2 ライドシェアを想定した E ² MS のフローチャート	76
図 5-3 Ev, n_{min} と Ev, n_{max} の計算のイメージ	78
図 5-4 往路の移動制約の作成	80
図 5-5 需要カーブと PV カーブ	83
図 5-6 CASE1 - EV の運用計画	84
図 5-7 CASE2 - EV の運用計画	85
図 5-8 CASE3 - EV の運用計画	85
図 5-9 CASE2 - 8~9 時付近の移動の概略図	86
図 5-10 CASE3 - 8~9 時付近の移動の概略図	86
図 5-11 累積充放電量	87
図 5-12 MG 運用コスト削減	89
図 5-13 移動コスト削減	89
図 5-14 CASE2 からの平均乗車時間の延長と MG の運用コスト削減の効果	91

図 5-15	CASE2 からの平均乗車時間の延長と移動コスト削減の効果……………	91
図 5-16	パレート解 ($\tau = 2$) - MG2 における PV 余剰と EV 群の充電……………	92
図 5-17	CASE3 - MG2 における PV 余剰と EV 群の充電……………	93

表目次

表 1-1	温室効果ガスの分野別排出量[3]	5
表 1-2	MG の導入意義[7]	9
表 2-1	3 つの MG における PV 導入量と電力需要量	24
表 2-2	各機器と MG に関するパラメータ	26
表 2-3	ラウンド型 EV の利用者の予約情報	26
表 2-4	ワンウェイ型 EV/ワンウェイ型 AEV の利用者の予約情報	27
表 2-5	代表日 d の該当日の重み付け係数 (αd)	38
表 2-6	PV 発電量	38
表 2-7	電力需要	38
表 2-8	休日のラウンド型 EV の利用者の予約情報	39
表 2-9	休日のワンウェイ型 EV/ワンウェイ型 AEV の利用者の予約情報	39
表 3-1	各機器と MG に関するパラメータ	48
表 4-1	提案手法と MG 機器に関するパラメータ	67
表 4-2	段階的に使用するモデル	68
表 4-3	CASE1 と CASE2	68
表 4-4	CASE3 と CASE4	69
表 5-1	相乗りタイプと乗合タイプの違い	73
表 5-2	VRP, EV, MG に関するパラメータ	81
表 5-3	各定期便の乗客数	83
表 5-4	MG 群運用コストと乗客の平均乗車時間	88
表 5-5	定期便における EV の使用台数	92

第1章 序論

1.1 本論文の背景

産業革命以降の急激な人口増加や経済成長に伴い、エネルギーの消費量も急激に増加している（図 1-1）[1]。エネルギー供給のうち最大の割合を占める化石燃料の構成は石油が 31.7%，石炭が 26.5%，天然ガスが 23.3%であり，これにより私たちの社会が化石燃料に大きく依存していることがわかる。しかし，化石燃料には限りがあり，世界全体の人口増加及び経済成長を踏まえると，石油は 54 年，天然ガスは 49 年，石炭は 139 年で枯渇する懸念がある（図 1-2）。

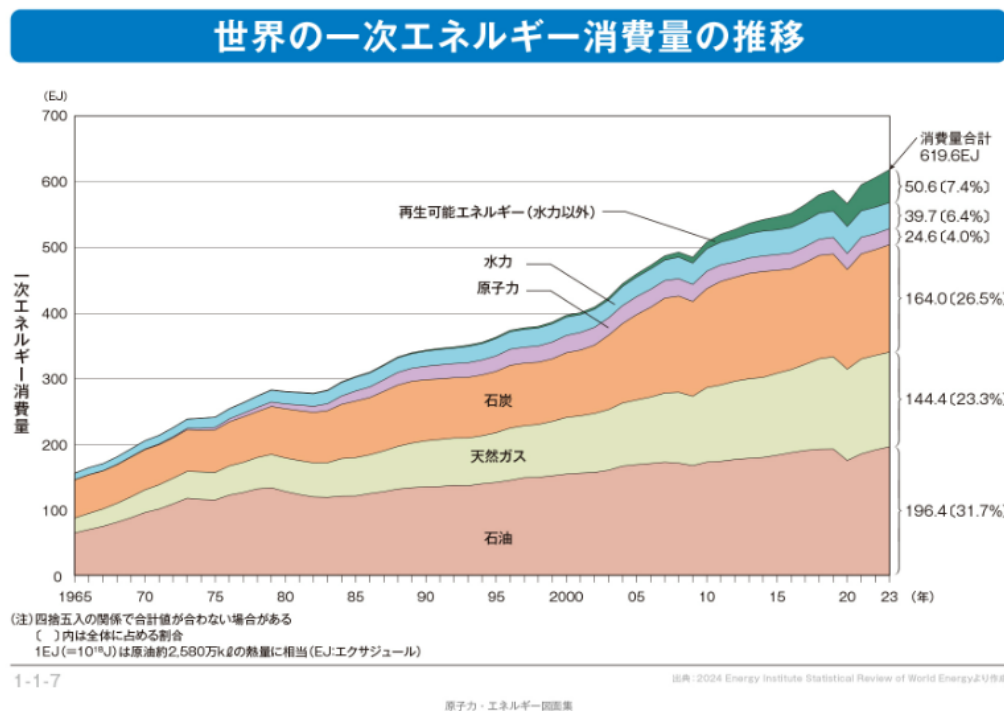


図 1-1 世界の一次エネルギー供給量の推移[1]

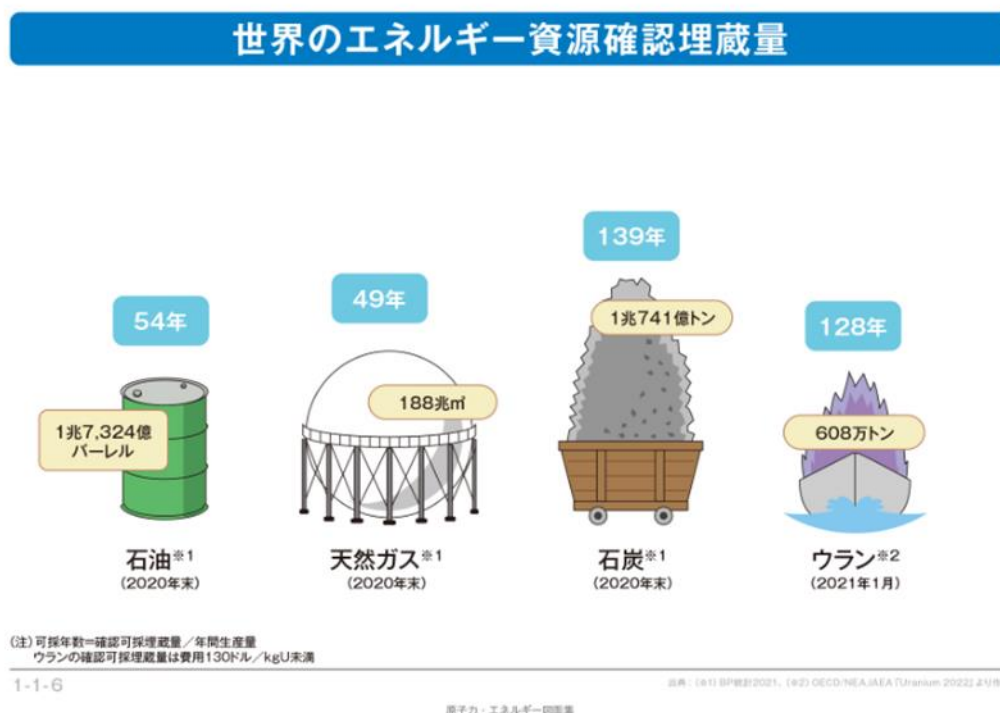


図 1-2 世界のエネルギー資源確認埋蔵量[1]

また、化石燃料の枯渇に加え、化石燃料の燃焼から排出される温室効果ガスが地球温暖化を引き起こし、異常気象や海面上昇の原因となり、生態系や社会に広範な悪影響を与えている。この問題に対応するために、2015年12月12日に国連気候変動枠組み条約締約会議（COP）では、地球温暖化に向けたパリ協定が採択され、「世界的な平均気温上昇を産業革命前に比べて 2℃より十分低く保つこと」や「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との均衡を達成すること」などの目標が設定された。120以上の国と地域がこの目標をもとに、「2050年カーボンニュートラル」の達成を目指している[2]。

環境省が公開している日本の温室効果ガス排出量[3]によると、発電所等のエネルギー変換部門の温室効果ガス排出量は全体の 40%を占めている（表 1-1）。これは発電における電源構成が主に石油・石炭・天然ガスによる火力発電を中心に依存しているためである。2000 頃年までに原子力の割合は増加し、2010 年までは全体のおよそ 4 分の 1 を占めていたが、2011 年 3 月の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響で、ほとんどの原子力発電所は稼働停止となっている（図 1-3）。そのため、温室効果ガスを排出しない原子力の代替として、天然ガス・石炭などの火力発電に加え、再生可能エネルギーによる発電が求められている。

エネルギー変換部門と産業部門に続き、自動車等の運輸部門の温室効果ガス排出量は全体の 18%を占めており（表 1-1）、電気自動車等のクリーンエネルギー車の普及が求められている。現在の税制では、自動車取得税の非課税、重量税の免税、自動車税の減税など、電気自動車の普及を支援する措置が講じられている[4]。

これらの背景を踏まえ、化石燃料への依存度を減らし、再生可能エネルギーを中心としたエネルギー利用の実現に向けた社会全体のシフトが重要視されている。そのため、再生可能エネルギーの大量導入を見据えた電力システムや交通システムの運用・構築が求められている。

表 1-1 温室効果ガスの分野別排出量（単位百万トン）[3]

	1990 年度 排出量 (シェア)	2013 年度 排出量 (シェア)	2021 年度 排出量 (シェア)	2022 年度		
				排出量 (シェア)	変化量 【変化率】	
					2013 年度比	2021 年度比
合計	1,163 (100%)	1,318 (100%)	1,064 (100%)	1,037 (100%)	-280.9 【-21.3%】	-27.0 【-2.5%】
エネルギー 起源	1,068 (91.8%)	1,235 (93.8%)	987 (92.8%)	964 (93.0%)	-271.3 【-22.0%】	-23.0 【-2.3%】
産業部門 (工場等)	378 (32.5%)	330 (25.1%)	269 (25.3%)	253 (24.4%)	-77.6 【-23.5%】	-16.2 【-6.0%】
運輸部門 (自動車自 等)	202 (17.3%)	215 (16.3%)	178 (16.7%)	185 (17.8%)	-30.0 【-14.0%】	+7.2 【+4.0%】
業務その他 部門 (商業・サ ービス・事 業所等)	81.0 (7.0%)	104 (7.9%)	60.6 (5.7%)	56.8 (5.5%)	-46.9 【-45.2%】	-3.7 【-6.2%】
家庭部門	58.2 (5.0%)	60.3 (4.6%)	51.6 (4.8%)	49.6 (4.8%)	-10.7 【-17.7%】	-1.9 【-3.7%】
エネルギー 転換部門 (発電所・ 製油所等)	348 (30.0%)	526 (39.9%)	429 (40.3%)	420 (40.5%)	-106.2 【-20.2%】	-8.4 【-2.0%】
非エネルギー 起源	95.3 (8.2%)	82.2 (6.2%)	76.6 (7.2%)	72.6 (7.0%)	-9.6 【-11.7%】	-4.0 【-5.2%】
工業プロセ ス及び製品 の使用	65.2 (5.6%)	49.3 (3.7%)	43.7 (4.1%)	40.9 (3.9%)	-8.4 【-17.0%】	-2.8 【-6.5%】
廃棄物 (焼却等)	23.7 (2.0%)	29.9 (2.3%)	30.6 (2.9%)	29.6 (2.9%)	-0.31 【-1.0%】	-1.0 【-3.4%】
その他	6.4 (0.5%)	3.1 (0.2%)	2.3 (0.2%)	2.1 (0.2%)	-0.91 【-29.8%】	-0.11 【-5.0%】

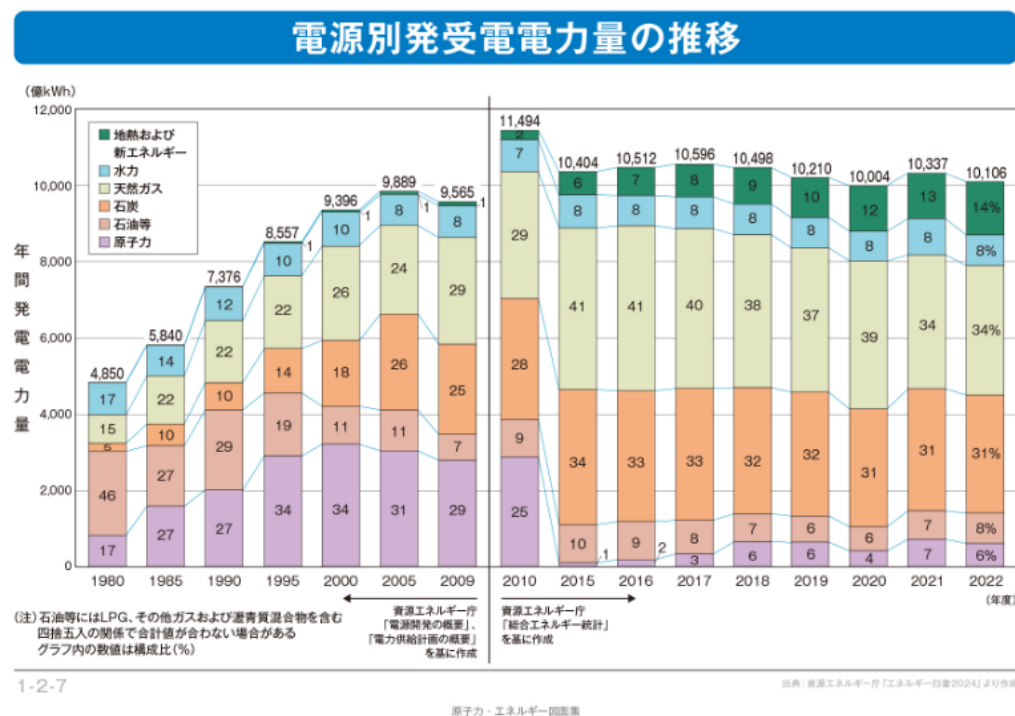


図 1-3 電源別発電電力量の実績[1]

1.1.1 再生可能エネルギーの主力化

経済産業省が公開しているエネルギー白書 2024[5]によると、世界における太陽光発電（PV）の導入量は2000年代から加速し、2022年には累積導入量が12億kWに達した。この導入拡大には、2000年前後に欧米諸国で導入された固定価格買取制度の効果が大きく、PVの買取価格が高額に設定されたことにより、導入が急速に進展した。日本でも2012年に固定価格買取制度が導入されたことにより、PVの導入が大幅に拡大し、2022年の累積導入量で見ると中国・米国に次いで世界第3位となっている。こうしたPVの普及により市場が拡大し、発電設備の導入コストが低下した結果、近年では新興諸国にも導入が広がっている。

また、風力発電は太陽光、水力、地熱などの再生可能エネルギーと比べて発電効率が高いため、各国にて導入が進められており、2022年の累積導入量は約9億kWに達した。導入量が最も多いのは中国で米国、ドイツがこれに続き、3か国で世界全体の約6割を占めている。日本では遠浅な海が少ないため、風力発電の主力である洋上風力の導入量は比較的少ないものの、着床式に代わる浮体式洋上風力が開発されており、長崎の五島市に2000kWの浮体式洋上風力が導入されている。日本における浮体式洋上風力の導入ポテンシャルは、国内総電力量の2.5倍に相当するとされており、今後の風力導入拡大が期待されている[6]。

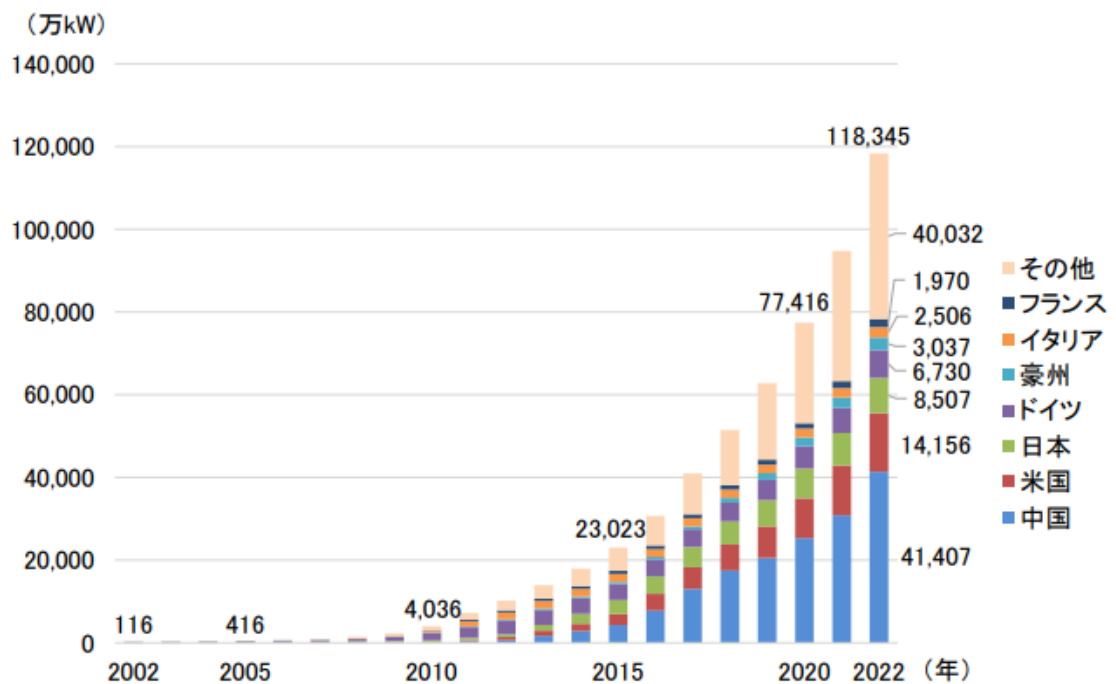


図 1-4 世界の太陽光発電の導入状況[5]

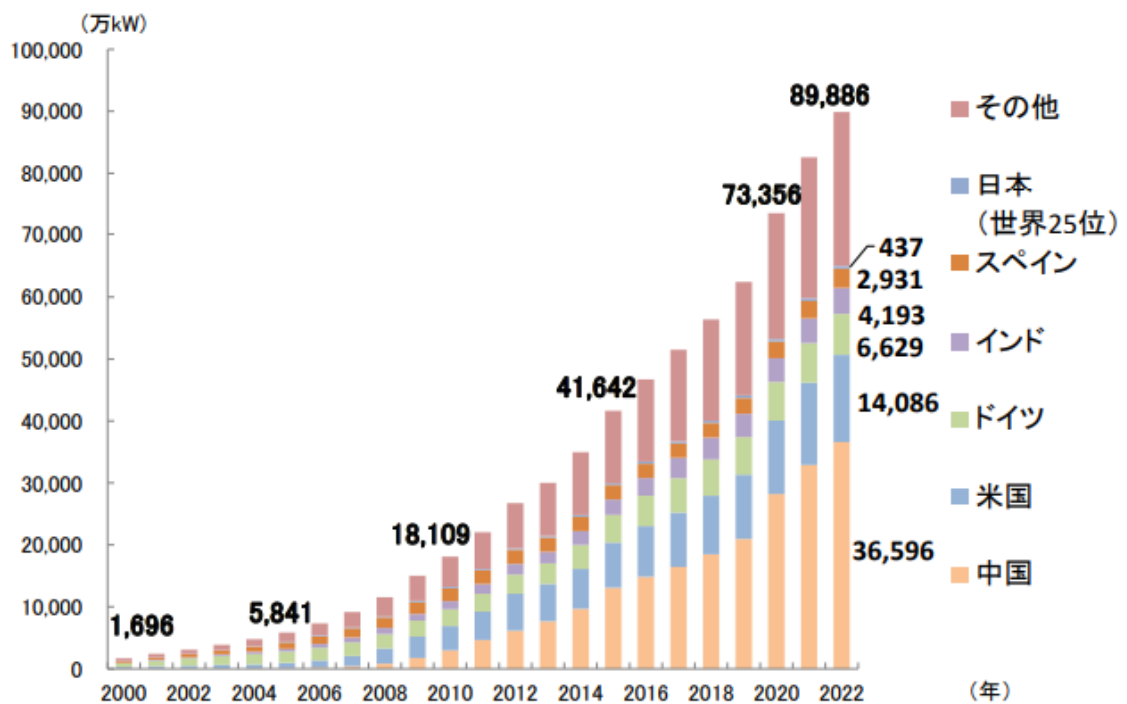


図 1-5 世界の風力発電の導入状況[5]

今後さらに再生可能エネルギーの導入拡大が予想される。しかし、再生可能エネルギーの出力は自然エネルギーに由来するため、導入を進める中でいくつかの課題が生じている。

例えば、従来の発電所の立地、再生可能エネルギーの賦存量が多い地域、電力需要が多い地域の間には生じるミスマッチである。これまでの電力系統は大規模発電を全体に構築され、大量の電力を供給する従来の発電所と電力需要が高い地域を結ぶ形で作られてきた。しかし、再生可能エ

エネルギーの賦存量が多い地域は、閑散地域や住宅街などである場合が多く、従来の発電所の立地と一致しないことが多い。このため、大規模な再生可能エネルギーの導入が進む中で、系統制約の問題が顕在化している。再生可能エネルギーの賦存量が多い地域と既存の電力系統を接続するためには、新たな送電網の建設や既存系統の増設が必要であり、これが再エネの受け入れコストを増大させる要因となっている。

さらに、再生可能エネルギーの出力は天候に左右されやすく、不安定である点が挙げられる。再生可能エネルギーは天候や気象条件に左右されるため、出力の制御が難しく、電力需要を上回る発電が発生する場合がある。需給バランスが崩れ、大規模停電を引き起こすリスクも生じる。また、逆に発電が行われない時間帯もあり、再生可能エネルギーからの安定的な電力供給が困難になる場合もある。

1.1.2 マイクログリッドへの期待

1.1.1 項で述べたように、賦存量や出力変動などの課題から、再生可能エネルギーを既存の大規模系統へ大量に導入するには困難が伴う。そこで再生可能エネルギーを含む複数の分散型電源や可制御電源を組み合わせ運用する小規模系統、マイクログリッド (MG) を活用し、地域内で再生可能エネルギーを地産地消することが期待されている。MG は CERTS (The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) によって次のように定義されている[7]。

- 複数の小さな分散型電源、電力貯蔵装置、電力負荷から構成される一つの集合体
- 集合体は系統からの独立も可能であるが、系統やその他の MG と適切に連携することも可能
- 需要家のニーズに基づき、設計、設置、制御される

MG の導入には多様な意義があり (表 1-2)、各国の電力系統の特徴やニーズに応じて異なる。たとえば、欧州では再生可能エネルギーの導入拡大や、離島における自立した地産地消型エネルギーシステムの構築が主な目的である。日本では再生可能エネルギーの導入拡大に加えて、省エネルギー、二酸化炭素排出量の削減、地域資源の活用も重視されている。地域に根ざした再生可能エネルギーを活用することで、上位系統からの購入電力を削減し、省エネルギー効果を期待する動きが進んでいる。米国では 1996 年および 2003 年の大停電を契機に電力系統の信頼性が課題となり、MG によって需要家が自給自足を実現することが、需要家自身がレジリエンスを高める手段として位置づけられている。大規系統に障害が発生した際には、MG を上位系統から切り離し、MG 内の分散型電源を活用して地域内で自立運転を行うことでレジリエンシの向上を図ることが可能である。

表 1-2 MG の導入意義[7]

意義	内容
コスト	● エネルギーコストの削減の可能性 ● 価格の不安定性への対応
信頼性・セキュリティ	● 供給信頼性と電力品質の向上 ● 電源の分散設置や自立運転によるセキュリティの向上
環境・エネルギー効率	● 自然変動電源の不安定性を低減 ● 温室効果ガス排出等の低減 ● 高効率・低環境負荷の電源(CHP 等)の導入の促進
電力システムへの貢献度	● アンシラリーサービスの提供 ● 需要家に応じた品質・価格での電力供給 ● 最適電力供給システムの構築 ● ピーク負荷の削減などによる新設費用の低減 ● 離島、未電化地域などでの電力供給
地域資源の活用	● 未利用資源の有効利用 ● 新たなビジネスの実施による地域振興効果

しかし、MG は比較的狭い地域を対象としているため、再生可能エネルギーの気象条件に依存した出力変動の影響を受けやすく、再生可能エネルギーの発電出力と電力需要のバランスを取りにくい。両者のミスマッチを解消するためには、蓄電池を活用したエネルギーの時間的シフトや上位系統との電力融通（売買電）といった対応が必要であるが、これらは MG 運用者にとって経済的な負担となることが多い。異なる地点に設置されている複数の MG を連携させることで、エネルギーの空間的シフトにより需給のバランスを図る検討もあるが[8][9]、その実現には送配電線を介した自己託送[10]の利用が必要である。

現在の日本の法律の下では、自己託送を行う際に送配電事業者が保有する系統を使用するための「託送料金」を支払う必要がある。さらに、送配電線には容量制約があるため、MG の需要と供給を 30 分単位で予測した計画値を事前に送配電事業者へ提出する義務がある。計画値と実際の需給に差異が生じて同時同量が達成できない場合、ペナルティ料金が発生する。自己託送を利用する需要家は必ずしも電気事業者ではなく、託送規模も小さいためインバランスが発生しやすい傾向にあり、自経済的負担に加えて技術的なハードルも高いものである[11]。

これらのことから、MG の事業性を確立するには、再生可能エネルギーを効率的に活用するため、エネルギーの時間的・空間的シフトを可能にする新たな対策を検討することが重要であると考えられる。

1.1.3 電気自動車の普及

国際エネルギー機関が公開している「Global EV Outlook 2024」[12]によると、世界における EV およびプラグインハイブリッド車の導入は 2016 年以降急速に進展し、2023 年にはそれぞれ 2,700 万台、1,200 万台に達している。この導入拡大の背景には、ガソリン車に比したエネルギー効率の高さ、再生可能エネルギーとの親和性の高さ、さらには新たな産業競争力の源泉となり得る点が

ある。このため、各国政府はEVの普及を促進する政策を打ち出している[13]。日本では、2035年までに乗用車の新車販売において電動車 100%を目指す目標が掲げられており、充電インフラの整備、税制優遇、研究開発支援、国際連携などの具体的な戦略が進められている。また、今後10年間で150兆円規模の投資が予定されており、再生可能エネルギーやEVの普及がさらに加速する見込みである。中国では、自動車メーカーに対し販売台数の一定割合をNew Energy Vehicle (NEV) にすることを義務付けるNEV規制が2019年から導入されている。2025年には20%、2030年には40%と規制が強化される予定で、基準を満たさないメーカーは他社から超過分のクレジットを購入する義務がある。この規制により、2024年1月から9月の累計でEVの販売台数は約498.8万台に達し、自動車販売シェアの約23.1%を占めるにいたっている。欧州では、2021年に欧州グリーンディールに基づく法案が発表され、自動車分野において厳格な目標が設定された。具体的には、二酸化炭素排出量を2021年比で2030年までに55%削減し、2035年までに100%削減する目標が設定された。これにより、2035年にはプラグインハイブリッド車やハイブリッド車を含め、すべてのガソリン車およびディーゼル車が禁止される見通しである。

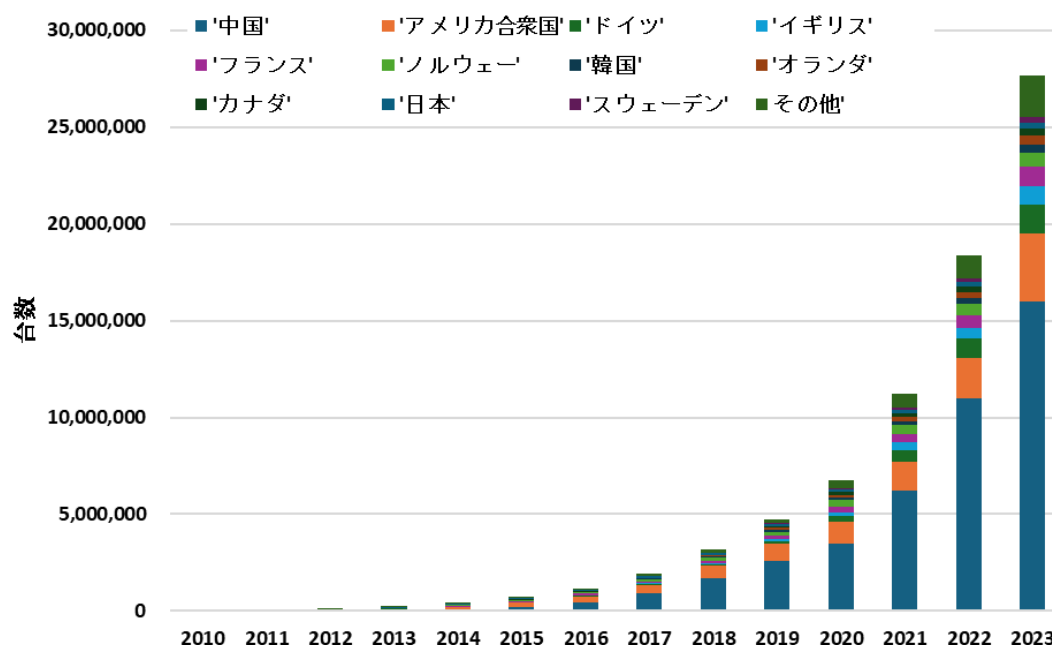


図 1-6 世界の電気自動車の導入状況[12]

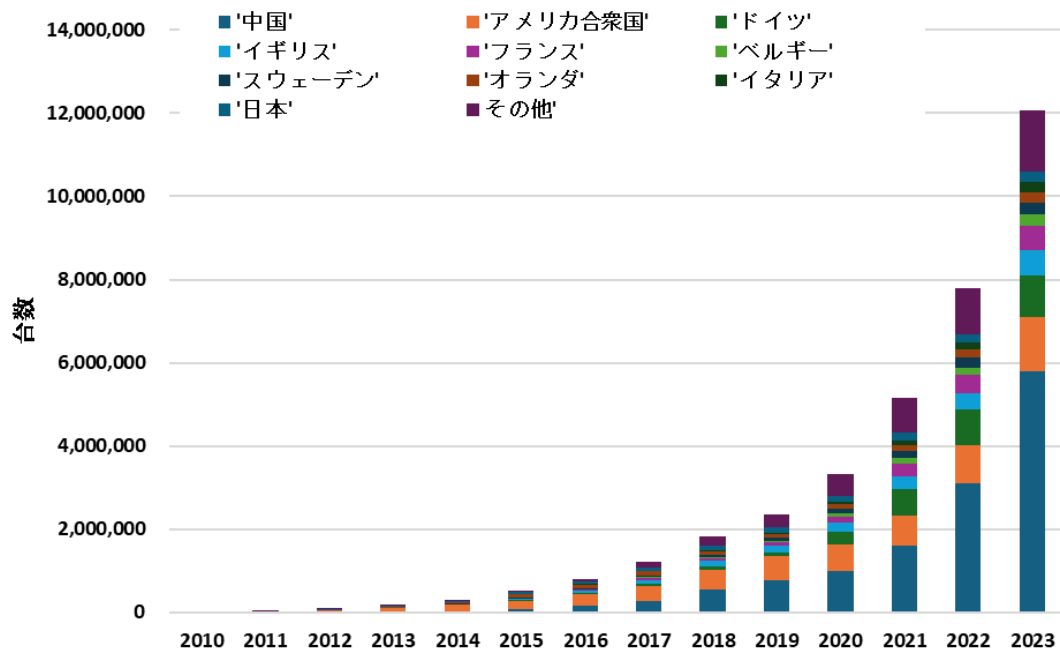


図 1-7 世界のプラグインハイブリッド車の導入状況[12]

EV の普及が進む中、EV を「動く蓄電池」として捉え、再生可能エネルギーと組み合わせて電力システムで活用する可能性が期待されている。具体的には、V2G (Vehicle to Grid) や V2H (Vehicle to Home) といった技術の活用である。これにより、停車している EV を蓄電池として効率的に利用し、再生可能エネルギーの時間的シフトを可能にするほか、災害時のバックアップ電源としても機能することが見込まれる[14]。

1.1.4 Mobility as a Service によるパラダイムシフト

Mobility as a Service (MaaS) とは、カーシェア、ライドシェア、バス、シェアサイクリングなどの様々な公共交通手段を統合し、いつでも利用、計画、予約、決済が可能になることで、自家用車を保有せずともスムーズに移動できるようにする構想である[15]。MaaS の統合レベルは 0～4 の 5 段階に分けられており (図 1-8)、2016 年にはフィンランドの企業 Global 社が MaaS アプリ「Whim」を通してレベル 3 の MaaS を実用化した。Whim では、ヘルシンキ市周辺エリアを対象に 3 つの料金プラン (うち 2 つは定額制) が提供され、ユーザーが自身に合ったプランを選べるようになっている。利用データによると、Whim のサービス導入後にユーザーの公共交通利用は 26%増加し、自家用車の利用は 20%減少したとされている[16]。このように、MaaS は自家用車の保有削減効果があり、排気ガスの削減や交通渋滞の改善に大きく寄与することが期待される。

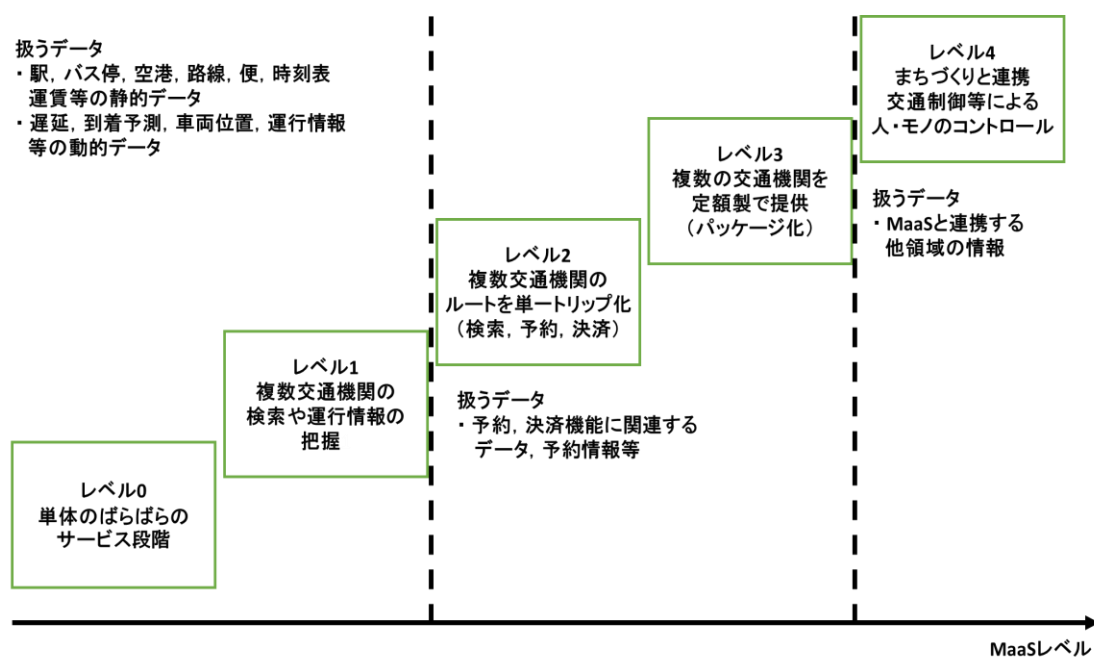


図 1-8 MaaS の統合段階[15]

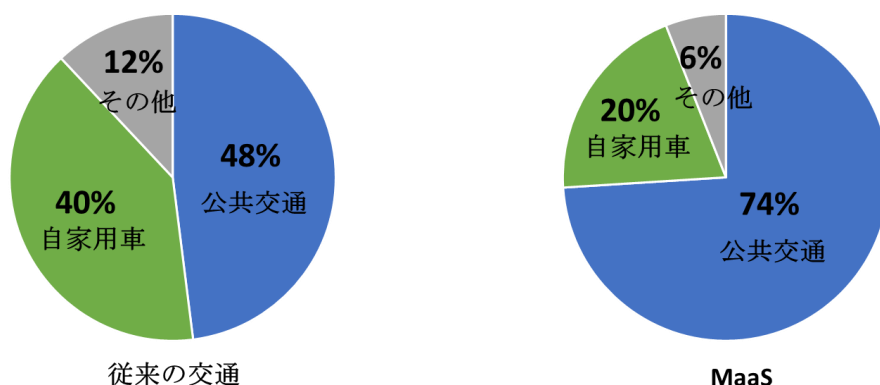


図 1-9 MaaS(Whim)ユーザーの移動手段の変化[16]

ダイムラーは2016年のパリ・モーターショーで中長期戦略としてCASE(Connected, Autonomous, Shared, Electric)を発表した。現在ではトヨタを含めた世界中の主要自動車メーカーがCASEを重視した戦略を掲げ、自動車産業の大変革期を象徴するキーワードとなっている。CASEが影響を及ぼす範囲は自動車の製造だけにとどまらず、販売、整備、保険などの自動車関連バリューチェーンに加え、エネルギー、IOT、公共交通、観光、金融業界にまでも及ぶと考えられている。しかし、CASEが進展するに伴い、生産コストも比例して上昇し、車両販売価格に転嫁するには限界がある。そのため、自動車産業では従来の売り切りのビジネスモデルから、カーシェアリングやライドシェアリングのようなMaaSによる持続的な収益確保へとシフトする動きが検討されている[17]。

こうした環境改善への取り組みと産業構造の変化の両面が合わさりMaaSは今後もさらなる進展が期待される。日本国内でもMaaS化が推進している。タイムズカーシェアをはじめとするカ

ーシェア事業は、2011 年以降急速に拡大しており、2020 年と 2021 年のパンデミック期間を除き、2023 年にかけて車両台数とステーション数が増加傾向にある（図 1-10）。アプリを通じた予約が可能なることもあり、カーシェアは利便性の高い移動手段として広く普及しつつある[18]。また近年ではカーシェアに加えて、Uber や Lyft を筆頭に、複数組の乗客でのライドシェアや貨客混載型のサービスなどが急成長を遂げている。国内では法律に適応したライドシェアとして、Smart Access Vehicle Service の開発が産学連携で進められており[19]、今後もライドシェアは MaaS 市場で一定のシェアを確立すると予想される[20]。

こうした背景から MaaS 社会では、現在のガソリンを燃料とする自家用車主体から、EV によるカーシェア、ライドシェアやバスなどのシェアモビリティを主体とする交通形態へのパラダイムシフトが実現される可能性は高い。

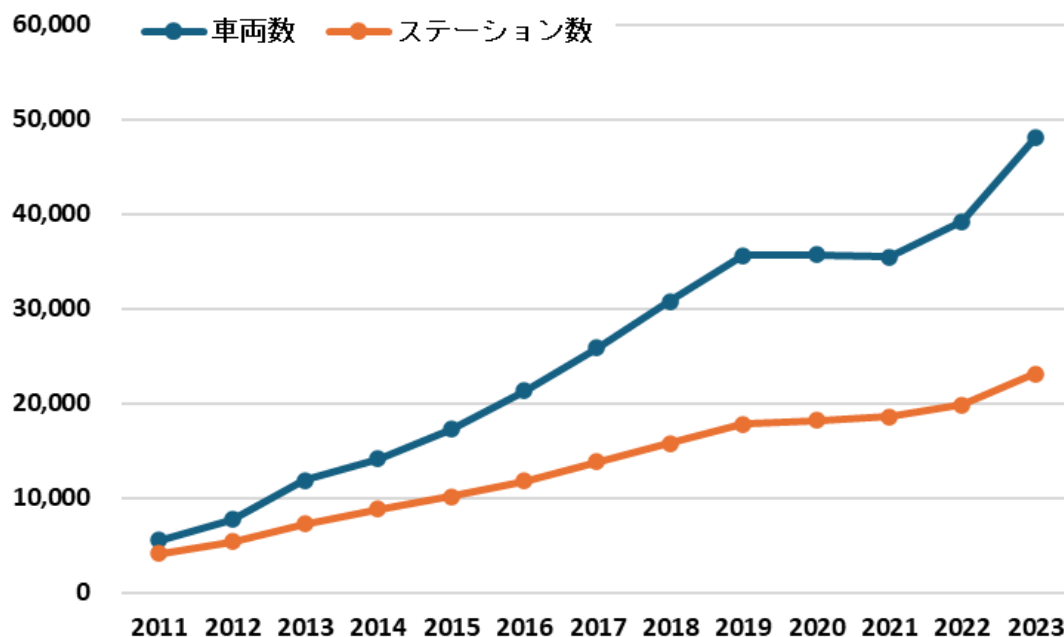


図 1-10 日本国内におけるカーシェア用車両とステーション数の推移[18]

MaaS を前提とした新しい概念や技術が提案されている。例えば、MaaS の効率的なエネルギー利用の観点から、MaaS で利用される EV 群の充電量管理には、バッテリー内蔵型の EV 代わりに、着脱可能なバッテリーパック (BP) を自動交換可能なバッテリースワップ (BS) 技術を活用することが提案されている[21]。また、MaaS を前提としたまちづくりとして、駐車場のない、あるいは駐車場を極力抑制した新しい住宅開発が進んでいる。集合住宅に付帯する駐車場を削減することで、不動産会社は住居面積や共有スペースを拡充でき、MaaS 事業者にとってはあらたな需要の開拓につながる。このような新たな概念は Car - Free Living と呼ばれている。Car - Free Living の具体例として、スウェーデンの Brf Viva では、EC2B の MaaS アプリを通じてカーシェアリングを含む様々なモビリティサービスをパッケージ化し、住民に提供する新たな住宅街が 2019 年に誕生した[22]。サンフランシスコでも配車サービス付きの賃貸住宅が誕生している[23]。こうした取り組みを踏まえると、MG が設置される可能性がある住宅街地域、閑散地域、繁華街地域には MaaS の拠点となる駐車場が設置されることが考えられる。MaaS に V2G の概念を適応することで、MaaS を MG のエネルギー供給の手段として活用し得る可能性が期待される。

1.2 電気自動車とエネルギーシステムの統合に関する先行研究

EV をエネルギー設備として活用する試みが活発化している。Aznavi ら[24]は、EV を一般需要家と事業施設の間を移動する蓄電池と見なし、EV と事業施設間の P2P エネルギー取引に関する戦略を提案した。この戦略により、住宅地で発電された再生可能エネルギーを地理的に離れた事業施設に供給できる可能性が示されている。富沢ら[25]は、General Transit Feed Specification[26]を基に電動バスの運行スケジュールを作成し、走行時間や停車位置に応じた充電管理によって、PV の逆潮流を抑制できることを示している。太田ら[27]は、家庭用充電器に接続された EV を利用した系統周波数安定化のための V2G を提案し、数値試算により、計画的な充電に影響を与えることなく、火力発電のガバナンスフリー制御よりも速く周波数を安定化できることを報告している。金井ら[28]は、大規模な EV の集約により、周波数変動とピーク負荷の抑制を多様な走行シナリオの下で達成できることを示した。Guo ら[29]は、PV を備えた EV の充電ステーションを一つの MG と見なし、EV を間欠的な定置型蓄電池として活用するリアルタイム制御手法を提案している。この手法は 2 段階構成で、1 段階目では MG の収益を最大化する前日計画、2 段階目では EV の不確実性に対応しながら収益最大化を行う。数値試算により、提案手法が MG の収益を改善することが確認されている。Liu ら[30]は、EV を単一の MG で活用する経済メリットを評価しており、分散型電源、風力発電、PV、蓄電池、燃料電池、50 台の EV を備えた MG を想定して EV の充放電や BS を考慮したシミュレーションを行った。結果、EV の運用コストに影響を与えることなく MG の運用コスト削減に寄与することが示されている。

このように、間欠的な蓄電池として EV の効果は十分に評価されているものの、既存の研究の多くは自家用車を対象としており、パラダイムシフト後の MaaS 社会におけるシェアモビリティを対象としたものは少ない。シェアモビリティの配車計画を含め、エネルギー運用の視点から計画することで、MaaS とエネルギー供給のカップリングによる新たな効果に関する議論が可能となる。

なお、ここでは電気自動車とエネルギーシステムの統合に着目した先行研究について述べている。MaaS におけるカーシェアやライドシェアの高度化に着目した先行研究は、後の各章で述べる。

1.3 本論文の目的と構成

エネルギー効率の改善やレジリエンスの確保を目的とした地産地消型のエネルギーシステムとして、再生可能エネルギーを主体とする MG への期待が高まっている。しかし、MG は比較的狭い地域を対象としていることから再生可能エネルギーの発電出力と電力需要とをバランスさせるににくい。両者のミスマッチを解消するには、蓄電池を活用したエネルギーの時間的シフト、あるいは上位系統との電力融通などの対策が必要だが、これには経済的負担が伴うことが多い。また、異なる地点に設置されている複数の MG を連携させることで、エネルギーの空間的シフトにより需給のバランスを図る検討もあるが、自己託送による送配電線利用が必要であり、経済的・技術的な課題も存在する。こうした背景から、MG の事業性確立に向け、エネルギーの時間的・空間的シフトを可能とする新たな対策が求められている。

同時に、排気ガス削減や交通渋滞の緩和を目指した次世代交通システム、MaaS が実用化段階

に移行しつつある。MaaS は、カーシェアやライドシェア、バスなどの公共交通機関を IT でシェアリングに結びつけ、ガソリン車主体から EV によるシェアモビリティ主体の交通形態へのパラダイムシフトをもたらす可能性が高い。

本論文では、人・物の輸送という MaaS の本来の目的に相乗りする形で、電力系統の制約に縛られないエネルギーの時間的・空間的シフトを実現できる可能性に着目した。MaaS の配車計画と MG 間のエネルギーの空間的シフトを含めたエネルギーマネジメント (EMS) を協調的に計画・運用する“EV and Energy”Management System (E²MS) を提案する。さらに、MaaS の移動需要を満たしつつ、MG 間のエネルギーの時間的・空間的シフトに MaaS を活用し得ることを数値試算をもとに評価する。具体的な検討方法と内容は次のとおりである。

第 2 章では、カーシェア型 MaaS と MG の統合について議論する。現行のカーシェアリングは貸出・返却が同一ステーションのラウンド型が主流だが、車両偏在問題への対策としてリバランス手法が多く提案されており、加えて自動運転技術の進展により乗り捨て型のワンウェイ型カーシェアが普及していくと考えられる。本研究では、ラウンド型、ワンウェイ型、自動運転ワンウェイ型のすべてに適用可能な E²MS を提案する。MG の運用コスト最小化を目指し、カーシェアの移動需要を満たす配車計画と、EV を MG のエネルギー供給に活用する運用計画を同時に決定する。提案手法を用いて、カーシェア型 MaaS と MG の統合による経済効果を評価する。

第 3 章では、BS と MG の統合について議論する。MaaS 社会では EV 群の充電管理が必要となり、バッテリー内蔵型 EV の代わりに着脱式 BP を自動交換する BS 技術の導入が期待されている。本研究では、MG のエネルギーマネジメントシステムに BS 対応のカーシェア運用を統合した計画手法を提案し、MG の移動型蓄電池として BS を活用する経済効果と系統への貢献を評価する。

第 4 章では、カーシェアと統合した MG の実規模計画手法を提案する。大規模な配車計画は NP 困難であり、特に E²MS では配車計画と MG 群へのエネルギー供給計画の組み合わせが複雑な問題となる。本章では、EV の充放電と配車計画を MG の運用コスト最小化に合わせて修正する繰り返し計算手法を提案する。この手法は BS にも対応できるよう設計されている。具体的にはタブーサーチを基に配車計画を修正し、MG での EV 充放電は線形計画問題として扱う。まず小規模の試算モデルで混合整数線形計画法の最適解と比較した後、札幌市のカーシェアステーション分布を基にした実規模モデルで提案手法の妥当性を検証する。

第 5 章では、ライドシェア型 MaaS と MG の統合について議論する。複数の乗客が同乗するライドシェアは急成長しており、本研究ではライドシェアを対象とした E²MS を提案する。乗客の乗車時間を重視する運用と、MG の運用コストを重視する運用の二通りの計画を作成し、ライドシェアの走行ルートを考慮した配車計画を行いつつ、EV を MG のエネルギー供給に活用する運用計画を決定する。提案手法を用いてライドシェア型 MaaS と MG の統合の経済効果を評価する。

第 6 章では、全体を通して得られた知見と結論、ならびに今後の展望を述べる。

第2章 カーシェア型 MaaS と MG の統合

2.1 カーシェアに関する先行研究と本研究の目的

現在のカーシェアリングは車両の利用状況による車両偏在問題[31]があるため貸出・返却が同一ステーションのラウンド型が主流であるが、MaaS 社会では IT 技術と自動運転の進展が相まって、乗捨て型が普及していくものと考えられている。車両偏在問題に対する研究として、千住ら[32]や Angela ら[33]はインセンティブベース、Alvina ら[34]や Diana ら[35]はオペレーターベースの再配置手法を提案している。また、Florian ら[36]は、将来的に大きな市場を有するとされている自動運転車を活用したカーシェアリング(Autonomous Mobility on Demand)と従来の非自動運転車を活用したカーシェアリングを比較することで、1 台の自動運転車は従来の非自動運転車の 2.8 ～3.7 台分の移動需要を受け持つポテンシャルがあると報告している。このようにカーシェアリング形態の高度化に着目した研究から MaaS 社会ではワンウェイ型や自動運転が一般化されることで、より柔軟な交通サービスが実現されることは明白である。しかし、これらの研究の着目点は交通面に限定されており、カーシェアリング形態の変化に関連する効果をエネルギー供給の観点からまとめた検討は知る限りでは見当たらない。そこで、ラウンド型、ワンウェイ型、自動運転ワンウェイ型のすべてに適用可能な E²MS を提案する。MG の運用コスト最小化を目指し、カーシェアの移動需要を満たす配車計画と、EV を MG のエネルギー供給に活用する運用計画を同時に決定する。提案手法を用いて、カーシェア型 MaaS と MG の統合による経済効果を評価する。

2.2 MG のエネルギーフロー

複数の MG を想定し（図 2-1），各 MG 内には複数充電器と駐車スペースを有する EV ステーション，定置型蓄電池（Bat），PV が設置されている状況を想定する。各 MG は配電系統とも接続されており，PV による発電が需要や EV への充電電力よりも小さい場合には買電が，反対に余剰電力が生じている場合には売電が可能であるとする。EV は MaaS が進展する過程で考えられるラウンド型 EV，ワンウェイ型 EV，ワンウェイ型自動運転機能搭載 EV（AEV）の 3 通りについて考える。EV の予約情報には出発時刻，到着時刻，出発場所，到着場所，走行距離が含まれているものとする。

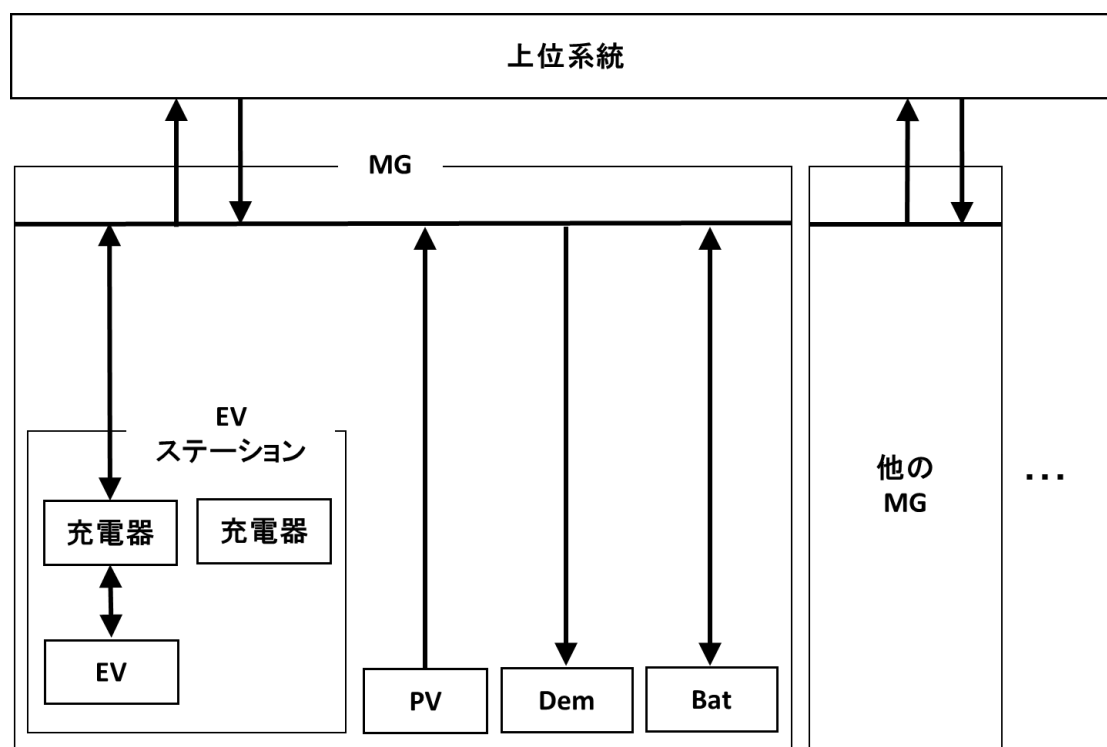
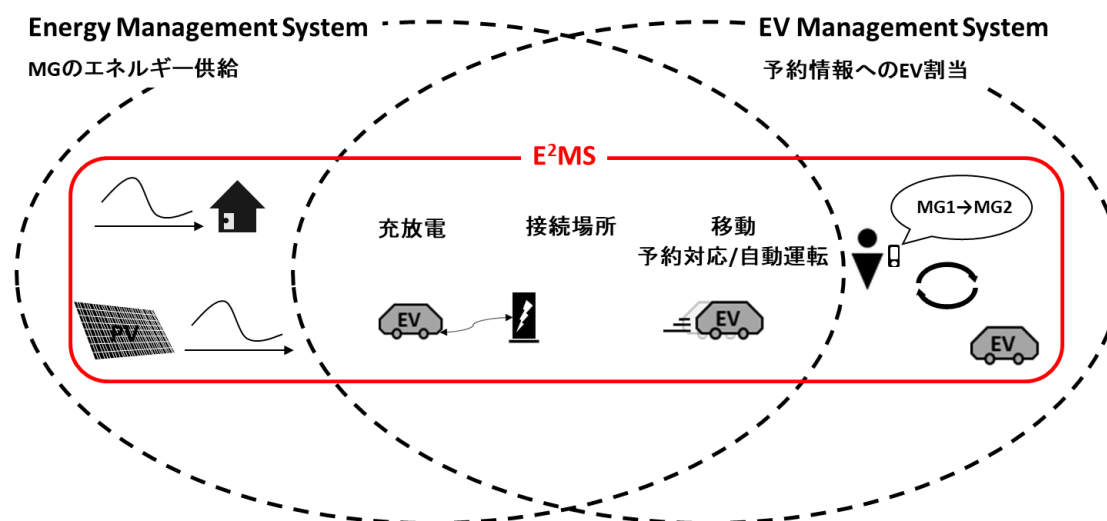


図 2-1 MG のエネルギーフロー

2.3 カーシェアを想定した E²MS の定式化

本章で提案するカーシェアを想定した E²MS は、MG のエネルギー供給の管理と、カーシェアの移動予約情報への EV の割振りや移動の配車計画を一つの最適化問題として統合した協調計画手法である。電力と交通を同時に考慮することで、各時刻における EV の予約対応、自動運転に伴う移動、EV および定置型蓄電池の充放電、さらに MG の電力取引計画を出力する (図 2-2)。

図 2-2 カーシェアを想定した E²MS のイメージ

2.3.1 目的関数

目的関数は(2.1)式に示す通り、全 MG の運用コストを最小化とする。

$$F^C = \sum_t^T \sum_m^M (C_t^{buy} \cdot P_{m,t}^{buy} - C_t^{sell} \cdot P_{m,t}^{sell}) \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

ここで F^C は全 MG の運用コスト[円]、 t は時刻、 T は最終時刻、 ΔT は時間幅、 C_t^{buy} は系統からの買電電力価格[円/kWh]、 m は MG 番号、 M は MG の総数、 $P_{m,t}^{buy}$ は MG # m の系統からの買電電力[kW]、 C_t^{sell} は系統への売電価格[円/kWh]、 $P_{m,t}^{sell}$ は MG # m の系統への売電電力[kW]である。

2.3.2 基本的な制約

制約条件に付いて述べる。基本的な制約式として次に示す通り、MG に関する制約、Bat に関する制約、EV の移動に関する制約、EV の充放電に関する制約を考える。

【MG に関する制約】

$$P_{m,t}^{dem} = P_{m,t}^{buy} - P_{m,t}^{sell} + P_{m,t}^{PV} + P_{m,t}^{Batd} - P_{m,t}^{Batc} + \sum_v^V (P_{m,v,t}^{EVd} - P_{m,v,t}^{EVc}) \quad (2.2)$$

$$E_{m,t=0}^{Bat} + \sum_v^V U_{m,v,t=0}^{plug} \cdot E_{v,t=0}^{EV} = E_{m,t=T}^{Bat} + \sum_v^V U_{m,v,t=T}^{plug} \cdot E_{v,t=T}^{EV} \quad (2.3)$$

ここで、 $P_{m,t}^{dem}$ は MG # m の電力需要[kW]、 $P_{m,t}^{PV}$ は MG # m の PV 出力[kW]、 $P_{m,t}^{Batd}$ と $P_{m,t}^{Batc}$ はそれぞれ MG # m における Bat の放電電力[kW]と充電電力[kW]、 v と V はそれぞれ EV の番号と総数、 $P_{m,v,t}^{EVd}$ と $P_{m,v,t}^{EVc}$ はそれぞれ EV # v の MG # m における放電電力[kW]と充電電力[kW]、 $E_{m,t}^{Bat}$ は MG # m の Bat の充電残量[kWh]、 $E_{v,t}^{EV}$ は EV # v の充電残量[kWh]、 $U_{m,v,t}^{plug}$ は EV の接続場所を表すバイナリ変数 (1 : EV # v が時刻 t において MG # m に接続している時、それ以外 : 0) である。(2.2)式は各 MG の需給バランス制約、(2.3)式は計画の初期時刻 $t = 0$ と最終時刻 $t = T$ において、各 MG に駐車している EV と Bat の合計エネルギー量が変わらないようにする制約である。

【Bat に関する制約】

$$E_{m,t}^{Bat} = E_{m,t-1}^{Bat} + \left(\eta^{Bat} \cdot P_{m,t}^{Batc} - \frac{P_{m,t}^{Batd}}{\eta^{Bat}} \right) \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{Batd} \leq C_{rate}^{Bat} \cdot E_m^{BatMAX} \cdot U_{m,t}^{Bat} \quad (2.5)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{Batc} \leq C_{rate}^{Bat} \cdot E_m^{BatMAX} \cdot (1 - U_{m,t}^{Bat}) \quad (2.6)$$

$$0 \leq E_{m,t}^{Bat} \leq E_m^{BatMAX} \quad (2.7)$$

ここで、 η^{Bat} は Bat の充放電効率 (片道分)、 C_{rate}^{Bat} は Bat の C レート[kW/kWh]、 E_m^{BatMAX} は MG # m における Bat の容量[kWh]、 $U_{m,t}^{Bat}$ は MG # m における Bat の充放電状態 (1 : 放電, 0 : 充電) を表すバイナリ変数である。(2.4)式は Bat の充電残量の推移、(2.5)式と(2.6)式は Bat の充放電速度

の制約, (2.7)式は Bat の充電残量の上下限制約である。

【EV の移動に関する制約】

EV の予約情報に含まれる出発時刻を t_r^{de} , 到着時刻を t_r^{ar} , 出発場所を m_r^{de} , 到着場所を m_r^{ar} , 走行距離を d_r [km]で表現する。 r と R はそれぞれ EV の予約情報の番号とその総数を表す。なお, 走行中の状態を表現するためにダミーMGを設定しており $MG\#M+1$ としている。

$$\sum_v U_{r,v}^{assign} = 1 \quad (2.8)$$

$$U_{r,v}^{assign} \leq \sum_m^M (U_{m,v,t-1}^{plug} \cdot x_{r,m,t}) \quad (2.9)$$

$$U_{r,v}^{assign} \cdot y_{r,m,t} \leq U_{m,v,t}^{plug} \quad (2.10)$$

$$\sum_r^R (U_{r,v}^{assign} \cdot \sum_m^M x_{r,m,t}) \leq 1 \quad (2.11)$$

$$U_{m,v,t-1}^{plug} - U_{m,v,t}^{plug} \leq \sum_r^R U_{r,v}^{assign} \cdot x_{r,m,t} \quad (2.12)$$

$$\sum_m^M U_{m,v,t}^{plug} + U_{r,v}^{assign} \cdot y_{r,M+1,t} = 1 \quad (2.13)$$

ここで, $U_{r,v}^{assign}$ は予約# r へEV# v を割当る場合に1となるバイナリ変数, $x_{r,m,t}$ は予約# r の出発情報を表す外生的な補助変数 (1: 予約# r が $t = t_r^{de}$ において $MG\#m_r^{de}$ から出発, 0: それ以外), $U_{m,v,t}^{plug}$ はEVの接続場所を表すバイナリ変数 (1: EV# v が時刻 t において $MG\#m$ に接続している時, それ以外: 0), $y_{r,m,t}$ は予約# r の出発, 走行, 到着のトリップ情報を表す外生的な補助変数 (1: 予約# r が $t = t_r^{de}$ において $MG\#m_r^{de}$ から出発, 予約# r が t において走行状態を示すダミー $MG\#M+1$ で走行, $t = t_r^{ar}$ において $MG\#m_r^{ar}$ へ到着, 0: それ以外) である。(2.8)式は各予約へ必ず1台のEVを割当てするための制約, (2.9)式はEV# v が予約# r に割当てられる場合(左辺), そのEVは出発直前の時間帯に出発地点にいないといけない制約, (2.10)式はEV# v が予約# r に割当てられる場合(左辺), そのEVは到着時刻に到着地点にいないといけない制約, (2.11)式はEVに割当てられる予約情報数の制約, (2.12)式は予約対応以外の移動を禁止する制約, (2.13)式はEVがダミーMGを含む一つのMGに常に接続されている状態を保つ制約である。

【EVの充放電に関する制約】

$$E_{v,t}^{EV} = E_{v,t-1}^{EV} + \sum_m^M (\eta^{EV} \cdot P_{m,v,t}^{EVC} - \frac{P_{m,v,t}^{EVd}}{\eta^{EV}}) \cdot \Delta T - \sum_r^R (\frac{d_r}{\eta^{run}} \cdot U_{r,v}^{assign} \cdot \sum_m^M x_{r,m,t}) \quad (2.14)$$

$$0 \leq P_{m,v,t}^{EVd} \leq Cap_m^{EV} \cdot U_{v,t}^{EV} \quad (2.15)$$

$$0 \leq P_{m,v,t}^{EVC} \leq Cap_m^{EV} \cdot (1 - U_{v,t}^{EV}) \quad (2.16)$$

$$P_{m,v,t}^{EVd} \leq Cap_m^{EV} \cdot U_{m,v,t}^{plug} - \sum_r^R U_{r,v}^{assign} \cdot y_{r,m,t} \quad (2.17)$$

$$P_{m,v,t}^{EVc} \leq Cap_m^{EV} \cdot U_{m,v,t}^{plug} - \sum_r^R U_{r,v}^{assign} \cdot y_{r,m,t} \quad (2.18)$$

$$P_{m,v,t}^{EVd} \leq Cap_m^{EV} \cdot U_{m,v,t}^{sp} \quad (2.19)$$

$$P_{m,v,t}^{EVc} \leq Cap_m^{EV} \cdot U_{m,v,t}^{sp} \quad (2.20)$$

$$\sum_v^V U_{m,v,t}^{sp} \leq SP_m \quad (2.21)$$

$$0 \leq E_{m,v,t}^{EV} \leq E_v^{EVMAX} \quad (2.22)$$

ここで、 η^{EV} は EV の充放電効率（片道分）、 η^{run} は EV の電費[km/kWh]、 Cap_m^{EV} は MG# m の EV の充電器定格[kW]、 $U_{v,t}^{EV}$ は EV# v の充放電状態（1：放電，0：充電）を表すバイナリ変数、 $U_{m,v,t}^{sp}$ は EV の充電器の使用状況を表すバイナリ変数、 SP_m は MG# m に設置されている充電器の個数、 E_v^{EVMAX} は EV# v の最大容量[kWh]である。(2.14)式は EV の充電残量の推移、(2.15)式と(2.16)式は EV の充放電速度の制約、(2.17)式と(2.18)式は EV の充放電場所の制約、(2.19)式と(2.20)式と(2.21)式は MG# m の充電器数の制約、(2.22)式は EV の充電残量の上下限制約である。

2.3.3 自動運転を考慮する場合の制約式

AEV を前提とし、その自動運転計画をも配車計画に含める場合は 2.3.2 項で示した制約条件に加えて次の制約式を考える。

【EV の充電残量に関する制約】

$$E_{v,t}^{EV} = E_{v,t-1}^{EV} + \sum_m^M \left(\eta^{EV} \cdot P_{m,v,t}^{EVc} - \frac{P_{m,v,t}^{EVd}}{\eta^{EV}} \right) \cdot \Delta T - \sum_r^R \left(\frac{d_r}{\eta^{run}} \cdot U_{r,v}^{assign} \cdot \sum_m^M x_{r,m,t} \right) - \sum_m^M \sum_{m'}^M \left[\frac{d_{m,m'} \cdot U_{m,m',v,t}^{auto}}{T_{m,m'}^{auto} \cdot \eta^{run}} \right] \quad (2.23)$$

ここで、 m' は MG の番号、 $d_{m,m'}$ は MG 間の距離[km]、 $T_{m,m'}^{auto}$ は EV の自動運転による MG 間の移動に必要な時間幅、 $U_{m,m',v,t}^{auto}$ は時刻 t において EV# v が MG# m から MG# m' へ自動運転で移動するときに 1 となるバイナリ変数である。(2.23)式は(2.14)式の代わりとなる EV の充電残量の推移である。

【EV の自動運転による移動に関する制約】

$$U_{m,m',v,t}^{auto} - U_{m,m',v,t-1}^{auto} \leq U_{m,v,t-1}^{plug} \quad (2.24)$$

$$U_{m,m',v,t-1}^{auto} - U_{m,m',v,t}^{auto} \leq U_{m',v,t}^{plug} + \sum_r^R U_{r,v}^{assign} \cdot x_{r,m,t} \quad (2.25)$$

$$\left(U_{m,m',v,t-1}^{auto} - U_{m,m',v,t-T_{m,m'}^{auto}}^{auto} \right) \leq U_{m,m',v,t}^{auto} \quad (2.26)$$

$$\sum_{\tau=0}^{T_{m,m'}^{auto}} (U_{m,m',v,t-\tau}^{auto}) \leq T_{m,m'}^{auto} \quad (2.27)$$

$$U_{m,v,t-1}^{plug} - U_{m,v,t}^{plug} \leq \sum_r^R U_{r,v}^{assign} \cdot x_{r,m,t} + \sum_{m'}^M (U_{m,m',v,t}^{auto}) \quad (2.28)$$

$$\sum_m^M U_{m,v,t}^{plug} + \sum_m^M \sum_{m'}^M U_{m,m',v,t}^{auto} + U_{r,v}^{assign} \cdot y_{r,m+1,t} = 1 \quad (2.29)$$

(2.24)式は EV# v が時刻 t において MG# m から自動運転を開始する場合（左辺），その EV は出発直前の時間帯には出発地点である MG# m にいなければならない（右辺）制約，(2.25)式は EV# v が時刻 t において MG# m' へ自動運転で到着する場合（左辺），その EV は到着時刻の時間帯には到着地点である MG# m' にいる（右辺第一項）もしくは到着地点 MG# m' を出発場所とする予約# r に割当てなければならない制約，(2.26)式は EV# v が MG# m から MG# m' へ自動運転を開始する場合，その EV は $T_{m,m'}^{auto}$ で定められた期間は自動運転で移動している状態でなければならない制約，(2.27)式は $T_{m,m'}^{auto}$ で定められた期間内に自動運転を終えなければならない制約，(2.28)式は(2.12)式の代わりとなる予約対応と自動運転以外の EV の移動を禁止する制約，(2.29)式は(2.13)式の代わりとなる EV の状態に関する制約である。

2.4 EV 運用形態と MG 経済性の関係

代表日試算を通じて，ラウンド型 EV，ワンウェイ型 EV，およびワンウェイ型 AEV の運用の違いを比較し，それぞれのシェアリング形態が MG 群にもたらす経済効果を評価する。

2.4.1 試算条件

ここでは図 2-3 のように，合計 4 台の EV を有する 3 つの MG（MG1～MG3）を想定して一日分の試算を行った。PV 発電量，需要家の電力需要，EV の予約情報は既知としている。PV 発電量と需要家の電力需要は，群馬県太田市で実測された NEDO 実証データ[37]を使用している。バランス型の MG1 には 12 軒分の PV 発電量と電力需要を割当てることで電力需要と同程度の PV 発電量となるような住宅街をモデルした。PV 余剰型の MG2 には 24 軒分の PV 発電量と 4 軒分の電力需要を割当てることで，人口が少なく電力需要よりも PV 発電量のほうが多い閑散地域をモデルした。電力需要型の MG3 には 4 軒分の電力需要と 24 軒分の PV 発電量を割当てることで，

PV 発電量が少ない繁華街をモデルした。これまで述べた 3 つの MG における PV 導入量と電力需要量を表 2-1 にまとめる。また、各 MG の各時間帯の PV 出力と電力需要を図 2-4 に示す。3 つの MG の地理的条件は、住宅街から繁華街の間を移動するには、最低でも 20km を 0.5h で走行する必要がある、住宅街から簡素地域の間と繁華街から過疎地域の間を移動するには、最低でも 40km を 1h で走行する必要があるとした。EV は日産リーフ[38]、EV の充電器は Chademo Association[39]、Bat は CONNEXX SYSTEMS の産業用蓄電システム[40]を参考にして仕様を想定した。また、前述のように本研究においては各 MG の PV 導入量と電力需要量にミスマッチが生じていることから、MG ごとに運用コストを最小化するために必要な Bat 容量が異なる。このことから Bat のみを EMS として活用することを条件としたうえで、Bat 分配のための予備シミュレーションを行い、求めた最適な Bat 容量の比率をもとに、Bat を配置する。この 2.4 節では約 EV4 台分に相当する合計 250kWh の定置型蓄電池を、Bat 分配のための予備シミュレーションで求めた最適な Bat 容量の比率から、MG1 には 59kWh、MG2 には 145kWh、MG3 には 46kWh の容量で分配した。各機器と MG に関するパラメータを表 2-2 にまとめる。

また、MaaS が本格的に社会に導入されている将来においては再生可能エネルギーが多く導入されていることが考えられるため、MG の売買電価格は夜間よりも太陽光発電出力が旺盛な昼間（8:30~18:30）の方を安価に設定した（図 2-4）。

以上の条件下で 4 つのケースについて試算し、その結果を比較する。

Case1：従来 MG，すなわち EV は走行に必要なエネルギーを最小コストで充電するものとし、MG のエネルギー供給のために充放電を調整したりはしないケース。

Case2：ラウンド型 EV に対して E²MS を導入したケース。

Case3：ワンウェイ型 EV に対して E²MS を導入したケース。

Case4：ワンウェイ型 AEV に対して E²MS を導入したケース。

各ケースを同一条件下で比較するため、ラウンド型とワンウェイ型は等価な利用者の移動となるように、ラウンド型の予約情報を分解する形でワンウェイ型の予約情報を設定した。実際に使用した予約情報を表に示す。なお、予約情報はカナダのトロントで展開されている Auto Share を調査した文献[41]を参考に、午前に利用量のピークがあるような状況を想定した。

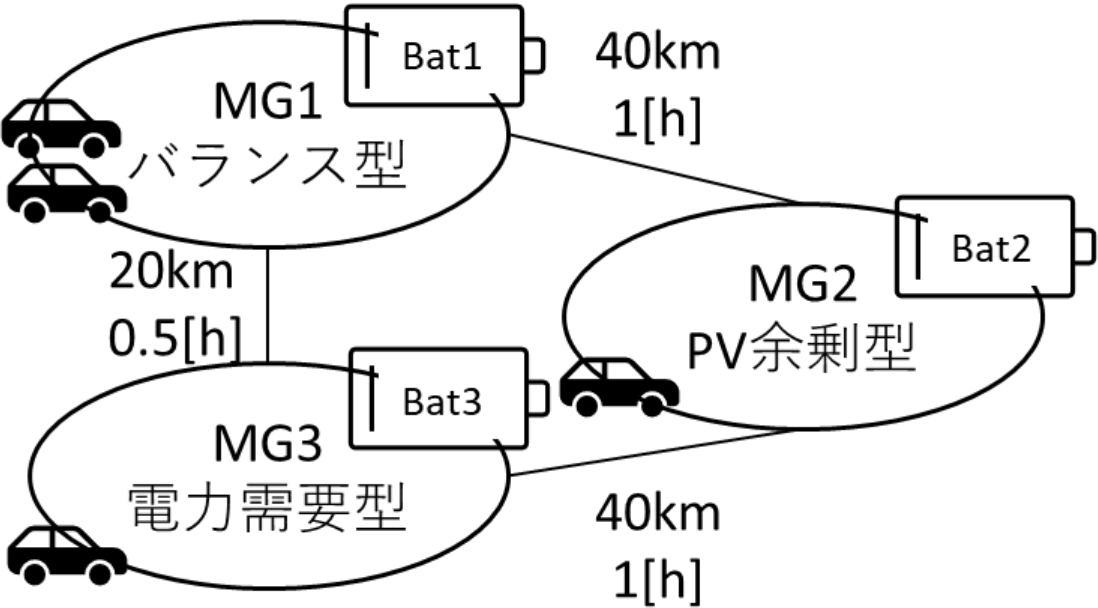


図 2-3 試算対象のイメージ

表 2-1 3つの MG における PV 導入量と電力需要量

	PV 導入量[軒]	電力需要量[軒]
MG1	12	12
MG2	24	4
MG3	4	24

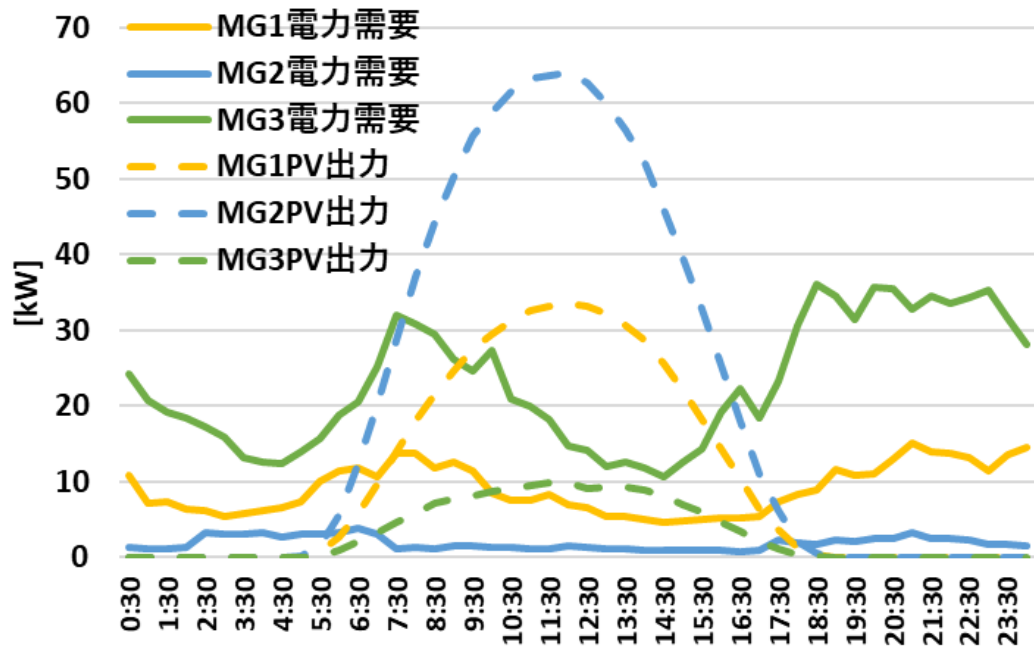


図 2-4 各 MG の PV 出力と電力需要

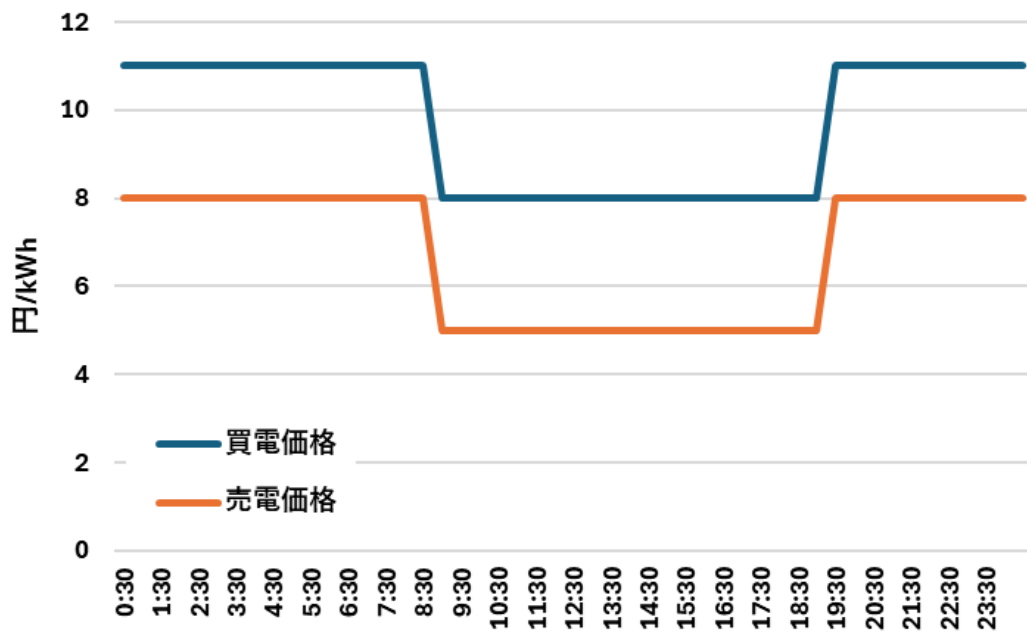


図 2-5 MG の買電価格と売電価格

表 2-2 各機器と MG に関するパラメータ

	変数名	値
時間幅	ΔT	0.5
定置型蓄電池の充放電効率 (片道分)	η^{Bat}	0.94
定置型蓄電池の C レート [kW/kWh]	$Crate^{Bat}$	0.4
EV の充放電効率 (片道分)	η^{EV}	0.94
EV の走行効率[km/kWh]	η^{run}	6
EV の最大容量[kWh]	E_v^{EVMAX}	62
EV 充電器の定格[kW]	Cap_m^{EV}	50
MG1 と MG2 の距離[km]	$d_{1,2}, d_{2,1}$	40
MG1 と MG3 の距離[km]	$d_{1,3}, d_{3,1}$	20
MG2 と MG3 の距離[km]	$d_{2,3}, d_{3,2}$	40
MG1 と MG2 を移動するのに 必要な時間幅	$T_{1,2}^{auto}, T_{2,1}^{auto}$	2 (1h)
MG1 と MG3 を移動するのに 必要な時間幅	$T_{1,3}^{auto}, T_{3,1}^{auto}$	1 (0.5h)
MG2 と MG3 を移動するのに 必要な時間幅	$T_{2,3}^{auto}, T_{3,2}^{auto}$	2 (1h)
各 MG に設置されている充電 器数	SP	4
MG1 における EV の初期台数		2
MG2 における EV の初期台数		1
MG3 における EV の初期台数		1
MG1 の適切な Bat 容量比率		0.24
MG2 の適切な Bat 容量比率		0.58
MG3 の適切な Bat 容量比率		0.18

表 2-3 ラウンド型 EV の利用者の予約情報

予約番号	出発時刻	到着時刻	出発場所	到着場所	走行距離 [km]
r1	9:00	16:00	MG1	MG1	80
r2	10:00	15:30	MG1	MG1	40
r3	9:30	12:00	MG3	MG3	40

表 2-4 ワンウェイ型 EV/ワンウェイ型 AEV の利用者の予約情報

予約情報	出発時間	到着時間	到着場所	出発場所	走行距離 [km]
r4	9:00	11:00	MG1	MG2	40
r5	15:00	16:00	MG2	MG1	40
r6	10:00	11:00	MG1	MG3	20
r7	15:00	15:30	MG3	MG1	20
r8	9:30	12:30	MG3	MG3	40

2.4.2 試算結果—ラウンド型 EV によるエネルギーの時間的シフト—

以下の結果のグラフに共通することを先に述べる。本研究では MG 単位で「色」を割当てている。MG1 は「黄色」、MG2 は「緑」、MG3 は「青」としている。以降のスケジューリング結果において、電力量や移動はすべてこのルールに基づいてグラフに表記される。EV の移動に関するタイムテーブルでは、EV が停車している期間を MG ごとに色付けした上で MG#*m* の番号を表記、予約対応で移動している期間を灰色で色付けした上で予約#*r* の番号を表記、自動運転で移動している期間は赤で色付けした上で A (Auto の略) と表記している。このタイムチャートから、E²MS によるカーシェアリングの運用を EV の移動の観点から捉えることができる。また、EV の移動にリンクした EV の充放電を各 EV のスケジューリング結果としている。この図中の棒グラフは各 MG における充放電電力、黒の折れ線グラフは充電残量、灰色の折れ線グラフは走行消費を表している。グラフに重ねる形で、両矢印で EV が滞在している MG (両矢印の上に MG#*m* の番号) を、片矢印で予約対応のための移動 (灰色片矢印の上に予約#*r* の番号) と自動運転を用いた移動 (赤片矢印の上に A) を示している。Bat も同様にこのルールに従うが、移動はできないので、移動に関する情報の記載はない。

EV に関しては、便宜上のため初期位置が MG1 である EV を EV-a と EV-b、初期位置が MG2 である EV を EV-c、初期位置が MG3 である EV を EV-d と定義する

・ Case1 従来の MG

MG1 に設置されている Bat と EV-a をピックアップしてそれぞれ図 2-6 と図 2-7 に示す。図 2-6 から MG1 おいて PV の出力が豊富な昼間に Bat は最大の 59kWh まで充電され、電気料金が低い時間帯に放電していることから、MG1 のエネルギーの時間的シフトに活用されていることがわかる。一方で図 2-7 から EV への充電は、予約への対応に必要な分のみを、昼間に最小コストで充電していることから、EV は MaaS としての役割のみを果たしており、MG1 のエネルギー供給のために積極的に活用されていないことがわかる。MG 構成機器として EV を積極的に活用していくべきである。

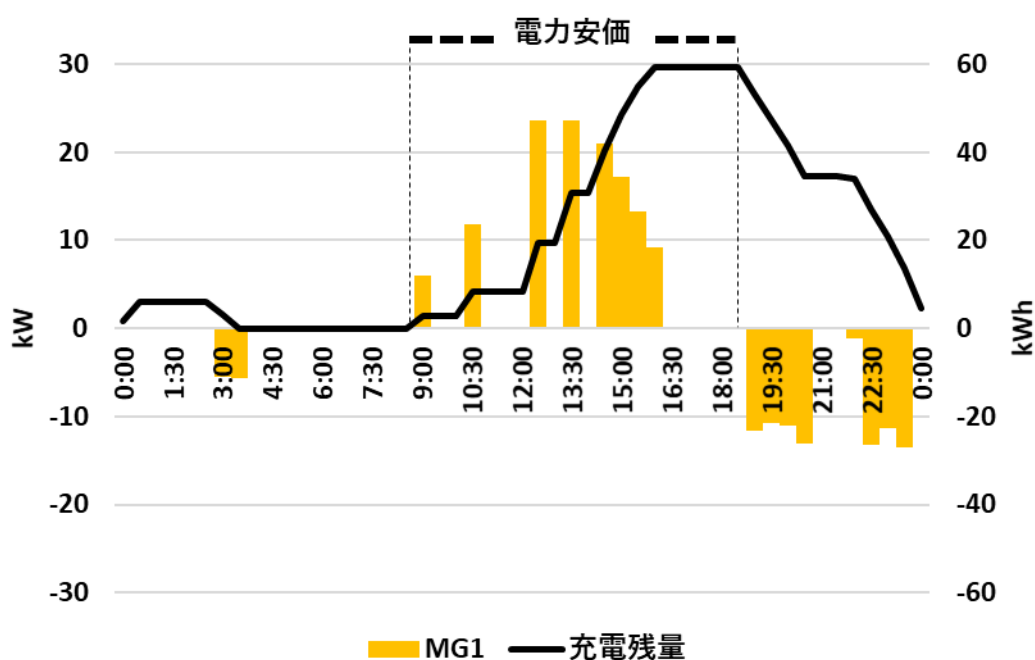


図 2-6 Case1 における MG1 に設置された Bat のスケジューリング結果

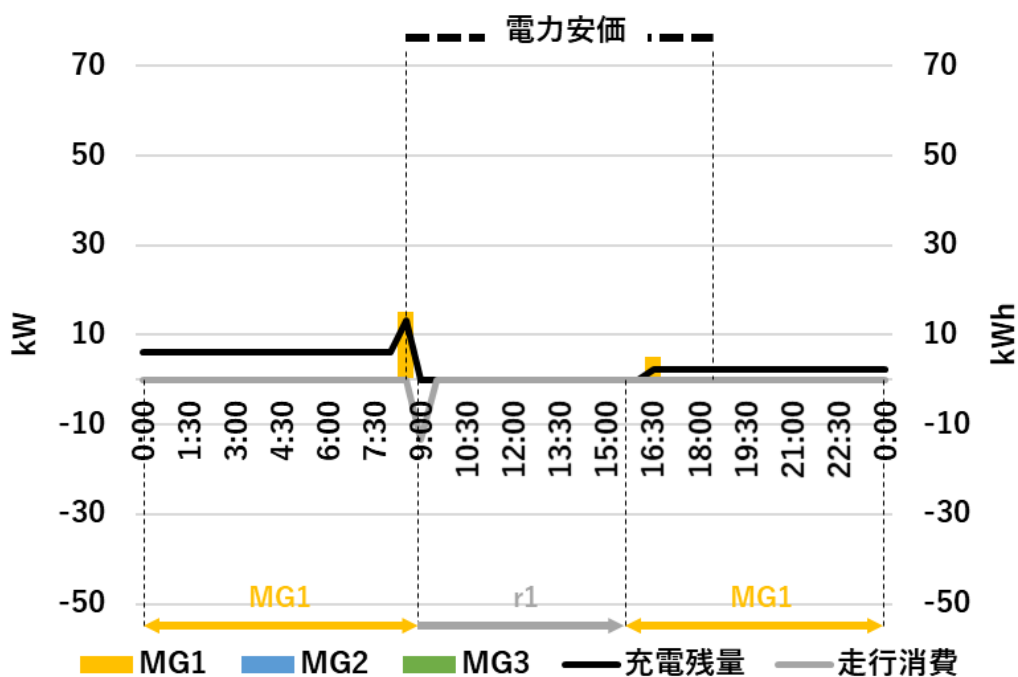


図 2-7 Case1 における EV-a のスケジューリング結果

• Case2

ラウンド型 EV の移動に関するスケジューリング結果をタイムチャートとして図 2-8 に示す。Case1 と Case2 の違いが分かりやすい、EV-d のスケジューリング結果をピックアップしてそれぞれ図 2-9 と図 2-10 に、MG3 に設置されている Bat のスケジューリング結果を図 2-11 に示す。図 2-8 より、ラウンド型 EV の予約情報はすべて EV に割り振られていることから、本来求められて

いる MaaS としてのラウンド型 EV の役割を果たしていることがわかる。次に EV-d のスケジューリング結果に着目すると、Case1 での充電量は予約対応に必要な最低限の量に留まっている（図 2-9）。これに対して、Case2 では予約対応後の電力価格が安い時間帯に、MG3 において最大の 62kWh まで充電されたのち、電力価格が高い夜間に放電している（図 2-10）ことがわかる。これは、MG3 に設置された Bat（図 2-11）と同じ役割を果たしており、ラウンド型 EV は間欠的な定置蓄電池として活用されていることになる。

以上のことから、E²MS によって、ラウンド型 EV は、MaaS としての役割を果たしたうえで、間欠的な定置型蓄電池として、単一 MG のエネルギーの時間的シフトに活用されることが示された。

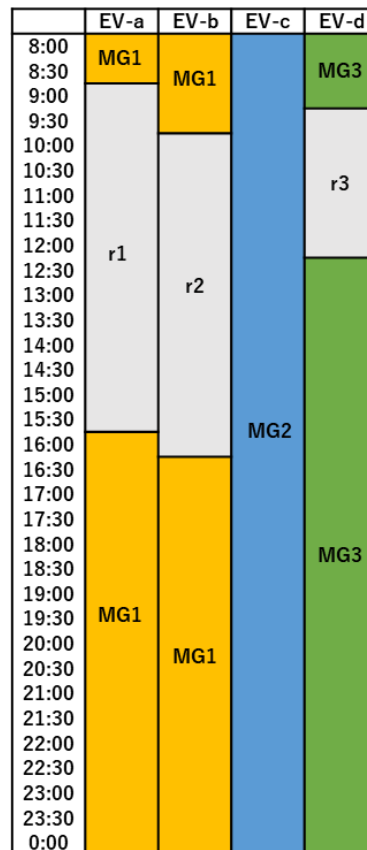


図 2-8 Case2 におけるラウンド型 EV の移動に関するスケジューリング結果

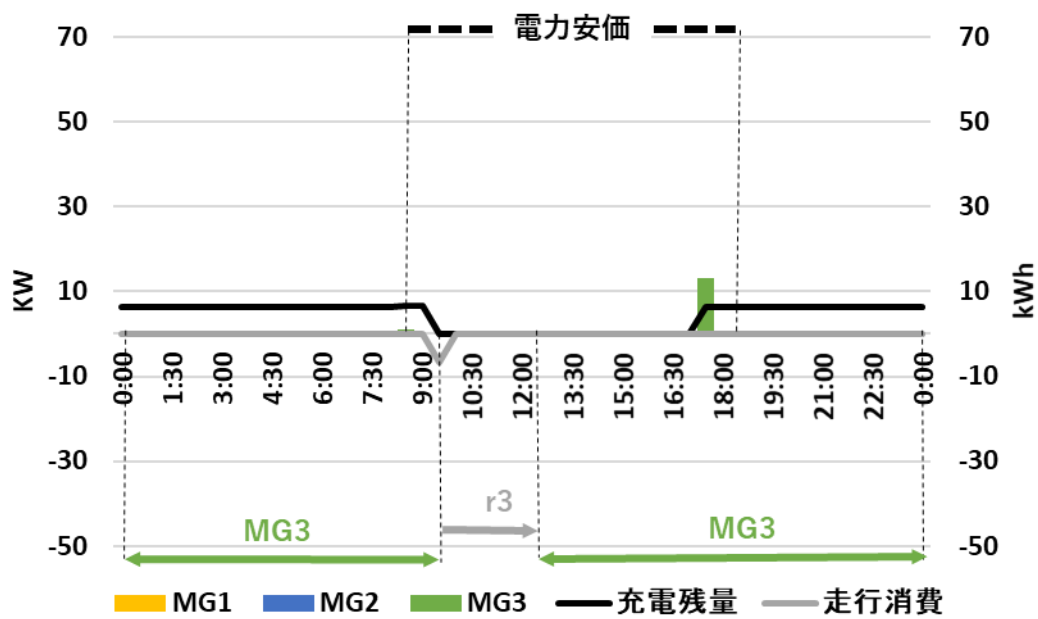


図 2-9 Case1 における EV-d のスケジューリング結果

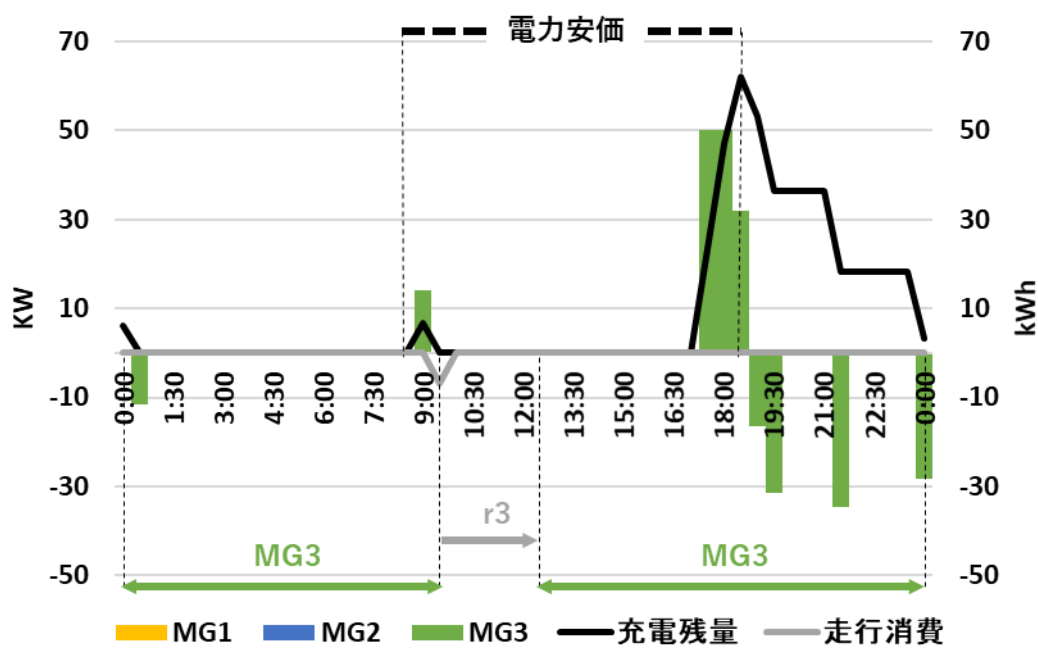


図 2-10 Case2 における EV-d のスケジューリング結果

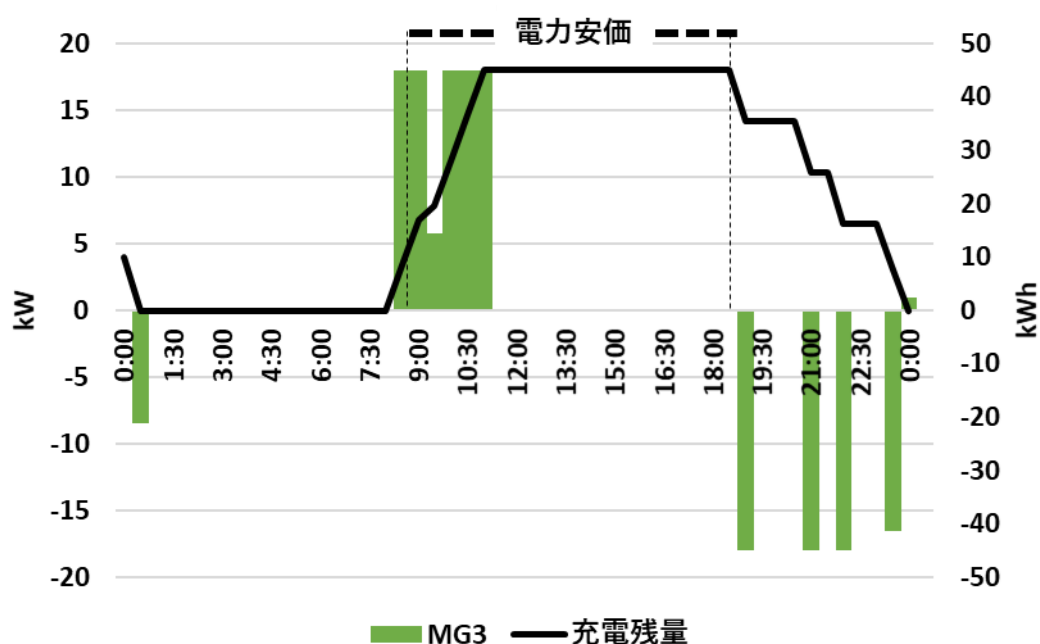


図 2-11 Case2 における MG3 に設置された Bat のスケジューリング結果

2.4.3 試算結果—ワンウェイ型 EV によるエネルギーの空間的シフト—

ワンウェイ型 EV の移動に関するスケジューリング結果をタイムテーブルとして図 2-12 に示す。Case2 と Case3 の違いが分かりやすい EV-c のスケジューリング結果をピックアップして、それぞれ図 2-13 と図 2-14 に示す。図 2-12 より、ワンウェイ型 EV の予約情報はすべて EV に割り振られていることから、本来求められている MaaS としてのワンウェイ型 EV の役割を果たしていることがわかる。次に EV-c のスケジューリング結果に着目すると、Case2 では MG2 内のエネルギーの時間的シフトを実施している（図 2-13）。これに対して、Case3 では PV 余剰電力が利用できる MG2 で EV-c を最大の 62kWh まで充電し、その後、ワンウェイ型 EV の予約情報 r5 を対応した後に、その移動先である MG1 で電気料金の高い夜間に放電を行っている。

また、ワンウェイ型 EV の予約情報の r4 と r5 は、ラウンド型 EV の予約情報の r1 を分解したものを想定している。ワンウェイ型 EV の利用者の目線から考えると、EV-a を用いて MG1 から MG2 へ予約 r4 で移動したのち、MG1 から MG2 へ戻る予約 r5 では EV-c への乗換えが E²MS によって提案されることになる。そうすることで、E²MS はあらかじめ PV 余剰で充電しておいた EV-c を MG1 へ移動することができ、MG2 の PV 余剰を MG1 へ空間的シフトしている。これは E²MS がエネルギーと交通の制約を協調的に計画するシステムであるため、エネルギーの観点から予約対応を調整した事例である。

以上のことから、E²MS によって、ワンウェイ型 EV は、MaaS としての役割を果たしたうえで、移動型蓄電池として MG 群全体のエネルギーの時間的シフトを行うと同時に、地点間のエネルギーの空間的シフトにも活用されている。すなわち、Case3 では予約情報を活用した MG 間の広域連携が実現されていることが示された。

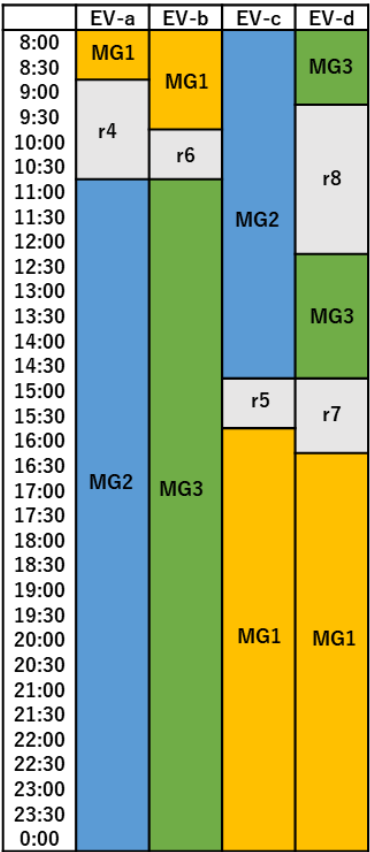


図 2-12 Case3 におけるワンウェイ型 EV の移動に関するスケジューリング結果

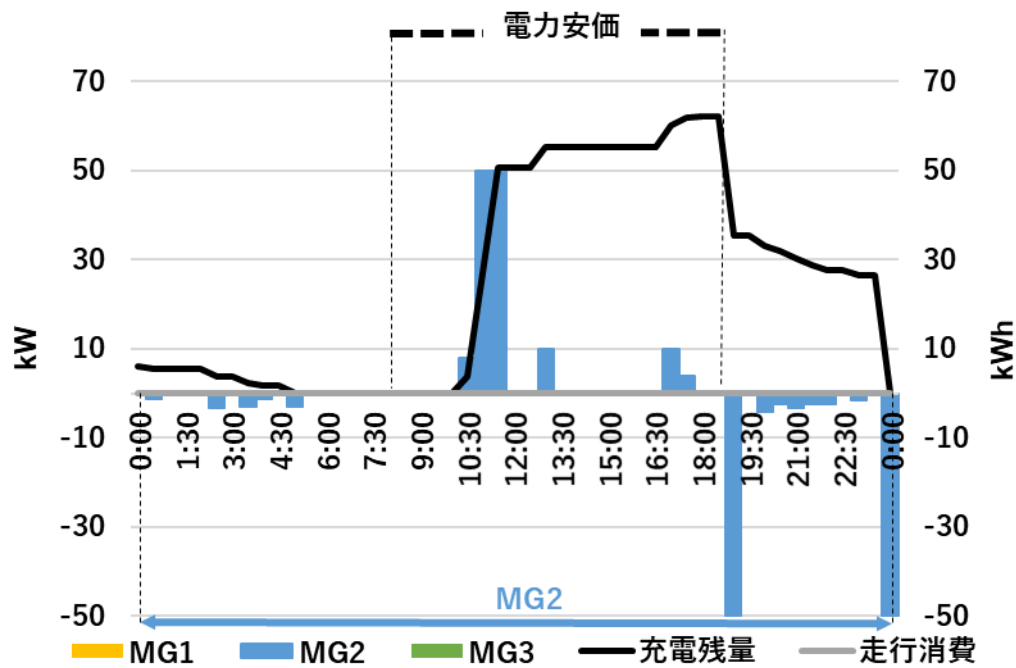


図 2-13 Case2 における EV-c のスケジューリング結果

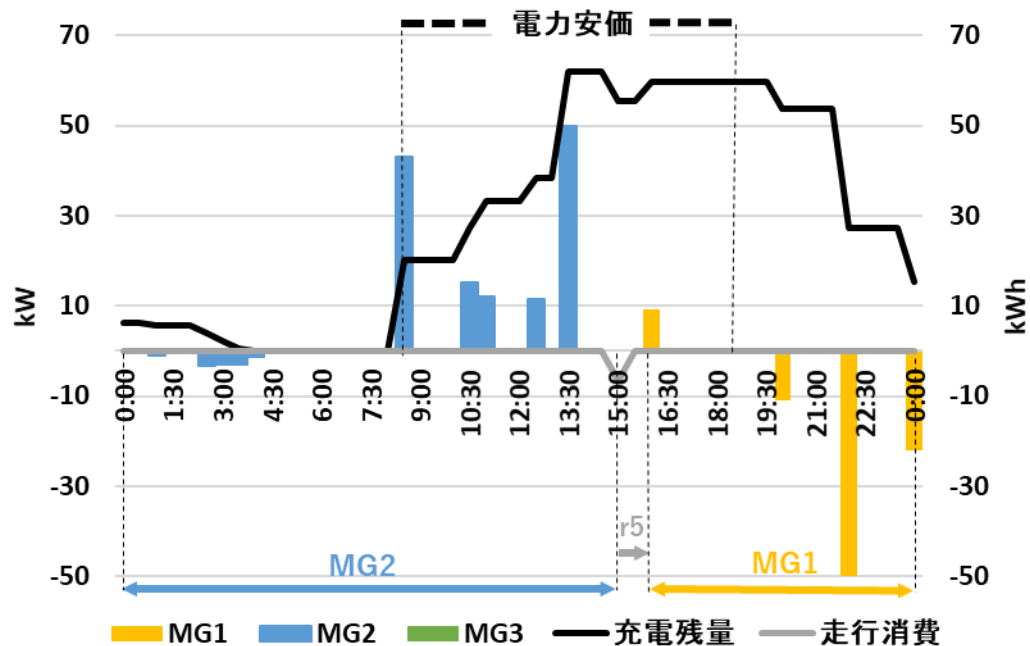


図 2-14 Case3 における EV-c のスケジューリング結果

2.4.4 試算結果—自動運転の活用—

ワンウェイ型 AEV の移動に関するスケジューリング結果をタイムテーブルとして図 2-15 に示す。Case4 において、Case3 との違いが分かりやすい EV-c のスケジューリング結果をピックアップして図 2-16 に示す。また、Case3 と比較しながら、E²MS によるワンウェイ型 AEV の運用を確認するために、Case3 から EV-d をピックアップして図 2-17 に、Case4 から EV-d と EV-b をピックアップしてそれぞれ図 2-18 と図 2-19 に示す。図 2-15 からワンウェイ型 AEV の予約情報はすべて EV へ割り振られていることから、本来求められている MaaS としてのワンウェイ型 AEV の役割を果たしていることがわかる。そのうえで、4 台の EV に対して合計 8 回の自動運転による移動がスケジューリングされていることがわかる。これは予約対応外の空き時間や予約対応の調整を行うことで、エネルギーの時間的シフトと空間的シフトを上手く行おうとする試みであり、各 EV のスケジューリング結果をもとに確認する。Case3 における EV-c (図 2-14) と Case4 における EV-c を比較 (図 2-16) する。Case4 ではワンウェイ型 AEV の自動運転を活用して、予約対応時だけでなく、その合間も活用して、MG2 の潤沢な PV 余剰電力を電力需要の割合が多い MG3 に空間的シフトしている。すなわち予約対応外の空き時間を活用することで、Case3 よりも積極的にエネルギーの空間的シフトを実施しているといえる。

また、図 2-17 から Case3 における EV-d は車載蓄電池の kWh 容量 (62kWh) を活用しきれていないことが確認できる。これは、EV-d は予約情報の r8 を対応したのち、予約情報の r7 で MG3 (PV 余剰なし) から MG1 へ移動するため、エネルギーの空間的シフトを実施できていない。これに対して、Case4 における EV-d は、予約情報の r8 を対応したのち、自動運転により MG2 へ移動することで PV 余剰を MG3 へ空間的シフトしている (図 2-18)。後に MG3 を出発地点として

いる予約情報の r_7 はあらかじめ MG2 において充電しておいた EV-b が自動運転を活用して対応している（図 2-19）。すなわち、自動運転を用いた予約対応の調整を行うことで、Case3 よりも EV の車載蓄電池の容量を効率よく活用したエネルギーの時間的シフトと空間的シフトを実現しているといえる。

なお、MG 単位の EV 台数が時刻 $t=0$ と時刻 $t=T$ において一致していないが、本研究では MG 単位のエネルギー量にたいして時刻 $t=0$ と時刻 $t=T$ において一致する制約（(2.3)式）を設定しているため、エネルギー量の不一致は起きていない。これは電力需要を多く有する MG3 の夜の電力需要に EV を用いて対応しようとしている事例である。

以上のことから、ワンウェイ型 AEV は予約対応とエネルギーの空間的シフトに柔軟に活用できることから、MG 間のより効率的な広域連携を実現するポテンシャルを有しているといえる。

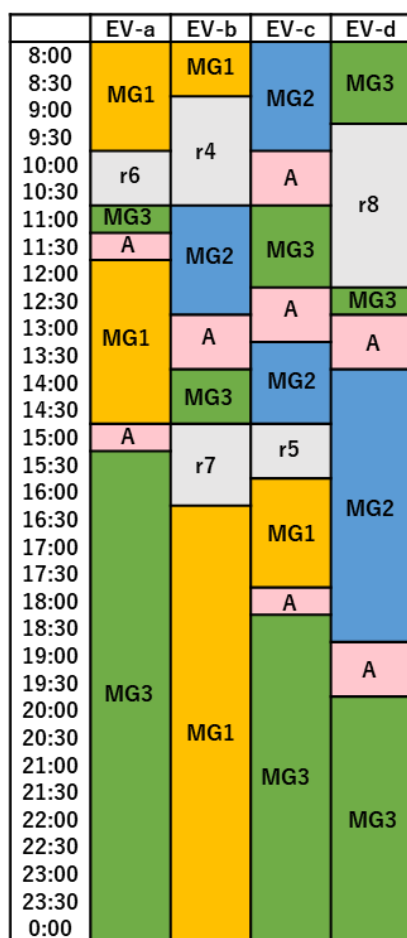


図 2-15 Case4 におけるワンウェイ型 AEV の移動に関するスケジューリング結果

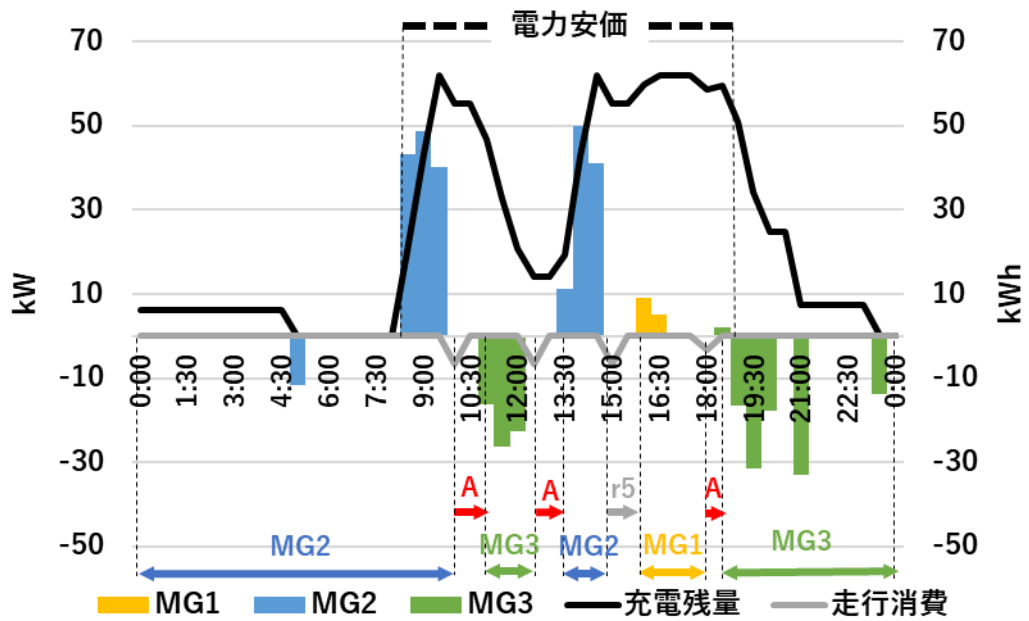


図 2-16 Case4 における EV-c のスケジューリング結果

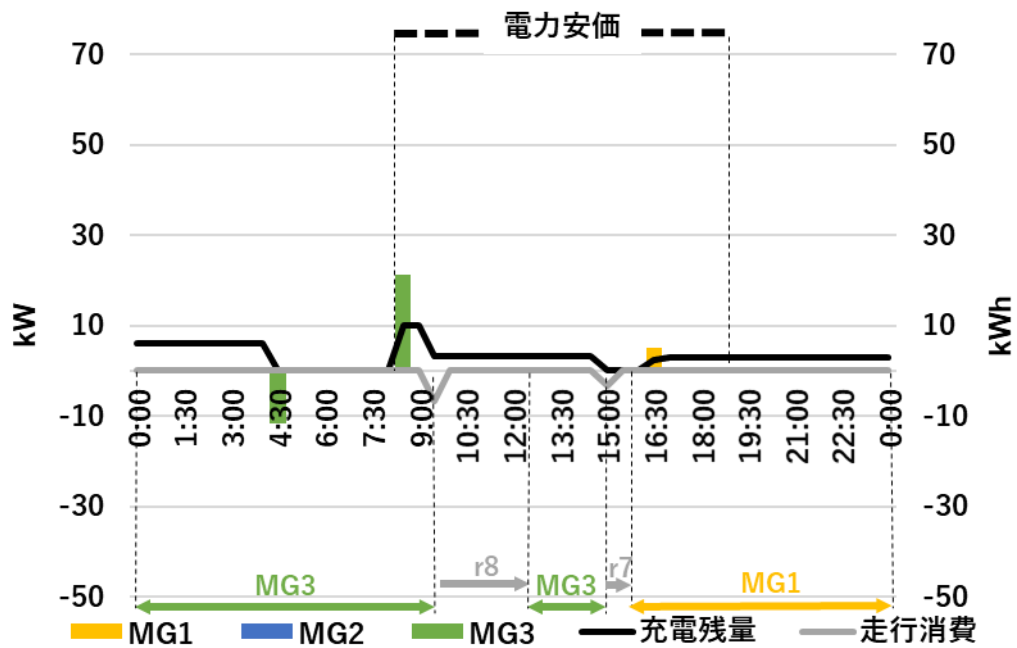


図 2-17 Case3 における EV-d のスケジューリング結果

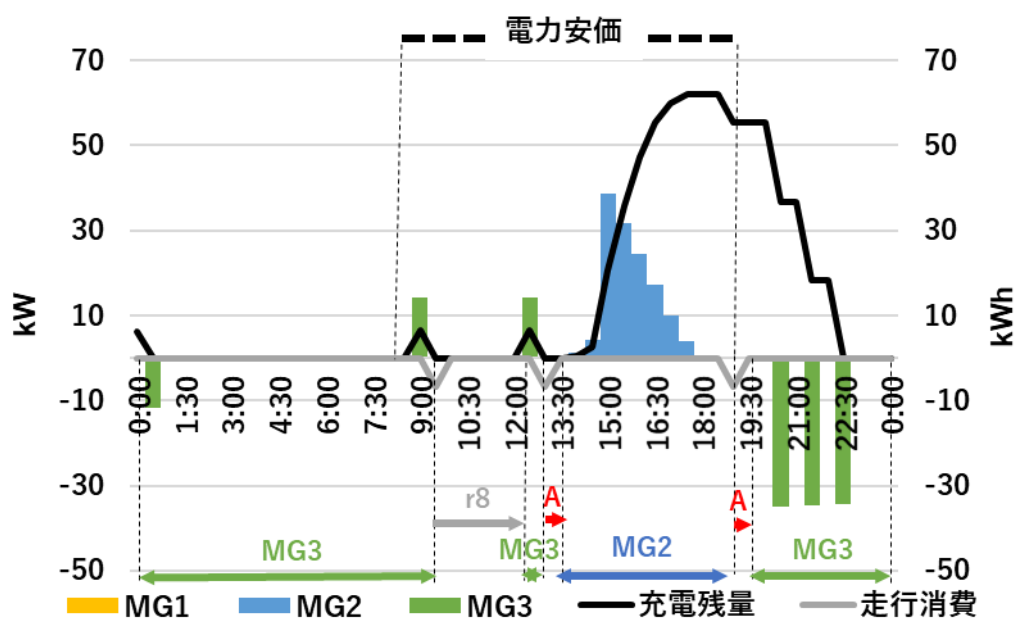


図 2-18 Case4 における EV-d のスケジューリング結果

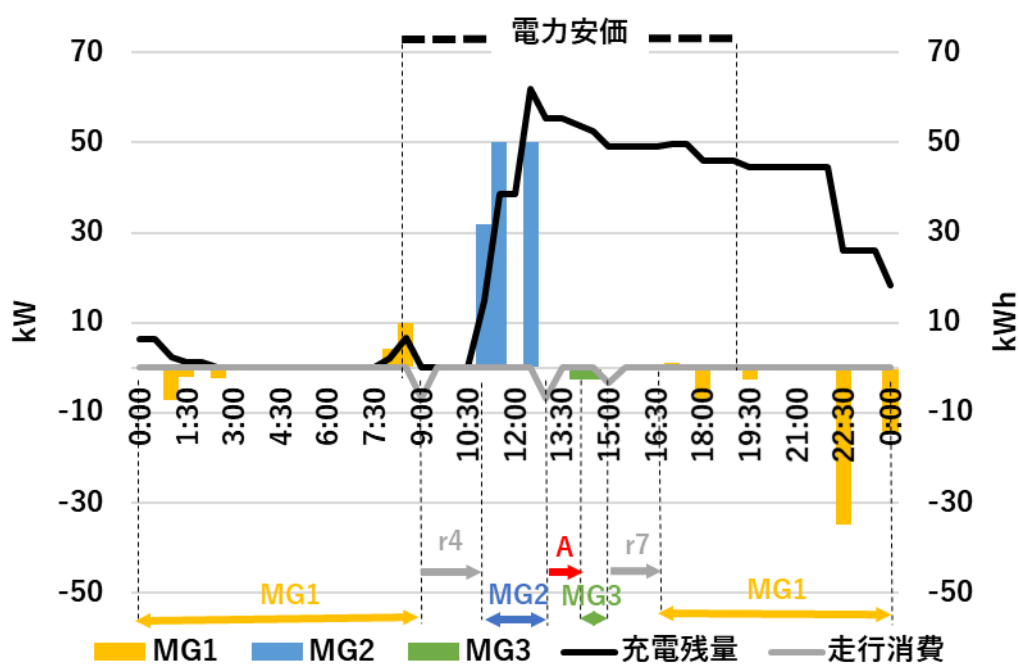


図 2-19 Case4 における EV-b のスケジューリング結果

2.4.5 MG の運用コスト

MG 群の運用コストを図 2-20 に示す。各 Case の横に EMS に関与する機器を示しており、Bat は定置型蓄電池、REV はラウンド型 EV、OEV はワンウェイ型 EV、OAEV はワンウェイ型 AEV

を表している。Case2 のラウンド型、Case3 のワンウェイ型 EV、Case4 のワンウェイ型 AEV が MG 群にもたらす経済メリットについて、代表日の MG 群の運用コストに着目して考察する。Case2 では Case1 に対して約 13.6% のコスト改善が現れている。これは 2.4.2 項で示したように、ラウンド型 EV が間欠的な定置型蓄電池として活用されることで、単一 MG 内においてエネルギーの時間的シフトが実現された結果である。Case3 では Case2 に対して約 7.9% のコスト改善が現れている。これは 2.4.3 項で示したように、ワンウェイ型 EV を予約情報の移動に合わせて移動型蓄電池として活用することで、エネルギーの時間的シフトだけでなく、空間的なシフトで MG 間の広域連携を実現した結果である。Case4 では Case3 に対して 19.9% のコスト改善が現れている。Case4 では 2.4.4 項で示したように、自動運転により EV の移動型蓄電池としての有用性が増した結果である。

以上のことから MaaS と自動運転の発展に伴う段階的な経済メリットが現れていることが言える。

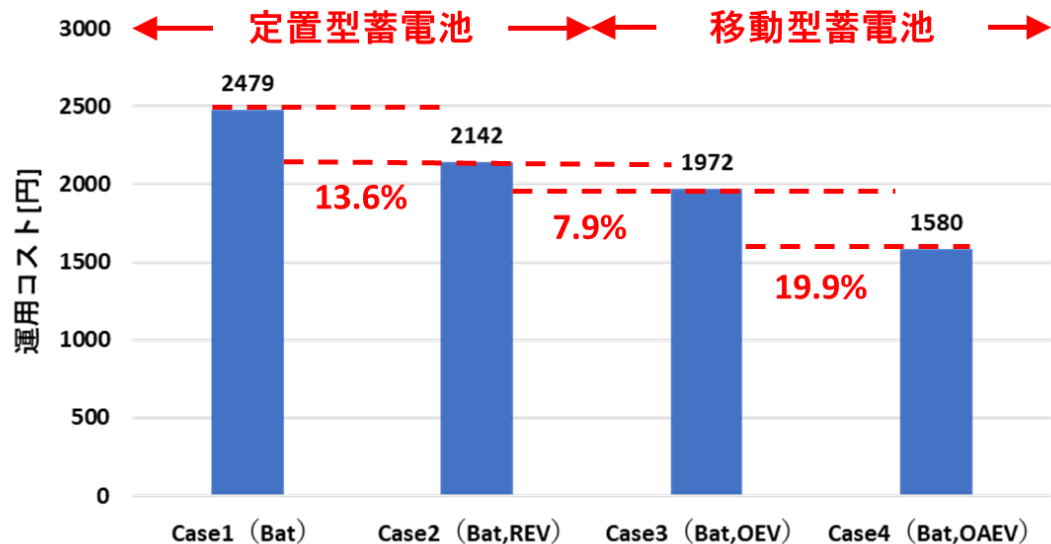


図 2-20 各 Case における MG 群の運用コスト

2.5 年間試算および EV の等価蓄電池比に関する評価

年間試算をもとに、PV 出力、電力需要、EV の予約情報の変動を考慮した経済メリットの評価を行う。また、EV が E²MS によってどの程度の蓄電容量に相当する蓄電装置として活用されているかを、EV の等価蓄電池比として評価する。具体的には、年間試算ではさまざまな条件を想定した組み合わせ年間試算であり、EV の等価蓄電池比の評価は MG 群に設置される Bat の総容量を 50kWh から 700kWh まで 50kWh 刻みで変化させることで評価する。

2.5.1 試算条件

ここでは、MG 群に設置される Bat の総容量を 50kWh から 700kWh まで、50kWh 刻みで変化さ

せて、MG の年間の運用コスト（Annual Operating Cost : 以下、AOC）を評価する。AOC の評価は本来であれば 365 日分のデータに基づいて試算すべきであるが、計算時間の都合上、今回は夏期（6～8 月）・冬期（12～2 月）・中間期（3～5・9～11 月）の 3 季節、平日・休日の 2 種類の曜日、晴・曇り・雨の 3 パターンの天候の組み合わせで、合計 18 通りの代表日を想定し、(2.30)式に示す通り、代表日の運用コストに対して、該当日数での重み付け和をとることで AOC を求めた。

$$AOC = \sum_d^D \alpha_d \cdot F_d^C \quad (2.30)$$

ここで、 α_d は代表日 d の該当日の重み付け係数、 F_d^C は(2.1)式から算出された代表日 d の運用コスト、 D は代表日の総数（=18）である。なお、 α_d は気象庁が公開している群馬県の実測データ[42]に基づいて設定した。同様に、条件に対応する電力需要と PV 出力を NEDO 実証データ（太田データ）から選出した。 α_d の値を表 2-5 に、実際に選出した PV 発電量と電力需要の日付をそれぞれ表 2-6 と表 2-7 に示す。平日のラウンド型 EV とワンウェイ型 EV の予約情報はそれぞれ表 2-3 と表 2-4 のものを使用し、休日のラウンド型 EV とワンウェイ型 EV の予約情報をそれぞれ表 2-8 と表 2-9 に示す。MG の各機器と MG に関するパラメータは表 2-2 と同様である。

表 2-5 代表日 d の該当日の重み付け係数（ α_d ）

	夏季（6～8 月）			冬季（12～2 月）			中間期（3～5・9～11 月）		
	晴	曇	雨・雪	晴	曇	雨・雪	晴	曇	雨・雪
平日	22	16	28	45	2	13	69	19	35
休日	9	6	11	22	1	7	34	9	17

表 2-6 PV 発電量

晴	5 月 8 日
雨	5 月 25 日
曇り	7 月 7 日

表 2-7 電力需要

	夏季	冬季	中間期
平日	7 月 6 日	1 月 5 日	4 月 6 日
休日	7 月 7 日	1 月 6 日	4 月 7 日

表 2-8 休日のラウンド型 EV の利用者の予約情報

予約番号	出発時刻	到着時刻	出発場所	到着場所	走行距離 [km]
r9	8:30	16:00	MG1	MG1	80
r10	9:30	16:30	MG1	MG1	45
r11	9:00	15:30	MG3	MG3	50

表 2-9 休日のワンウェイ型 EV/ワンウェイ型 AEV の利用者の予約情報

予約情報	出発時間	到着時間	到着場所	出発場所	走行距離 [km]
r12	8:30	12:00	MG1	MG2	40
r13	15:00	16:00	MG2	MG1	40
r14	9:30	11:00	MG1	MG3	22
r15	15:00	16:30	MG3	MG1	23
r16	9:00	15:30	MG3	MG3	50

2.5.2 年間運用コスト

Bat 容量と AOC の関係を、Case1～4 についてそれぞれ図 2-21 に示す。図 2-21 の各線・プロットを縦方向に比較すると、Bat 容量によらず、Case1 から Case4 にかけて AOC が減少していることがわかる。PV 出力が低下する冬期や雨天では余剰電力が生じにくく、MaaS の高度化によるエネルギーの時間的・空間的シフトのメリットは夏期や晴天時と比較して相対的には薄くなるものの、年平均的には、経済メリットが生じることがわかる。

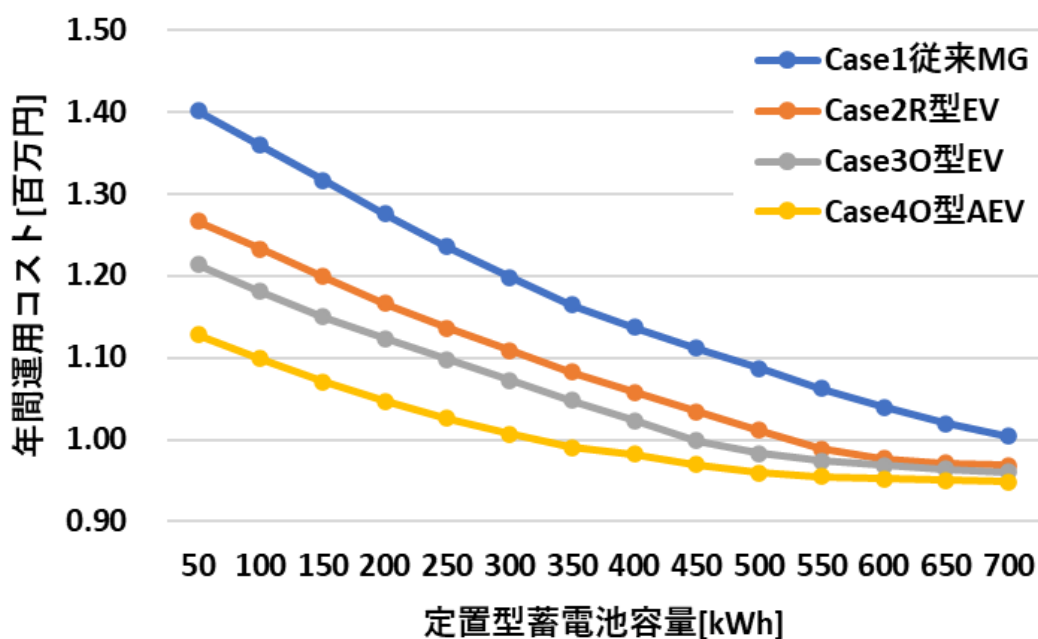


図 2-21 Bat 容量と AOC の関係

2.5.3 EV の等価蓄電池比に関する評価

図 2-21 の各線・プロットを横方向に比較すると、同じ AOC を達成するために必要な Bat 容量は、Case1 が一番大きく、Case2, 3, 4 と進むにつれて少なくなっているとも解釈することができる。Case2～4 において、Case1 と同じ AOC となる Bat 容量の削減分を ΔE [kWh] とすると、Case2～3 においてエネルギーシフト等に利用した EV は、まさに ΔE [kWh] の Bat とコスト的には等価の価値を持っていると考えることができる。そこで本論文では、試算で想定した EV の車載蓄電池の kWh 容量を E^{EVT} [kWh] とするときの、 E^{EVT} に対する比を、EV の等価蓄電池比 (Equivalent Storages Ratio : 以下 ESR) として定義する ((2.31) 式)。例えば図 2-22 に示すように 1.1 百万円の Case2 場合は $\Delta E = 450 - 300$ 、 $E^{EVT} = 248$ であるため、ESR が 0.6 となる。

$$ESR = \frac{\Delta E}{E^{EVT}} \quad (2.31)$$

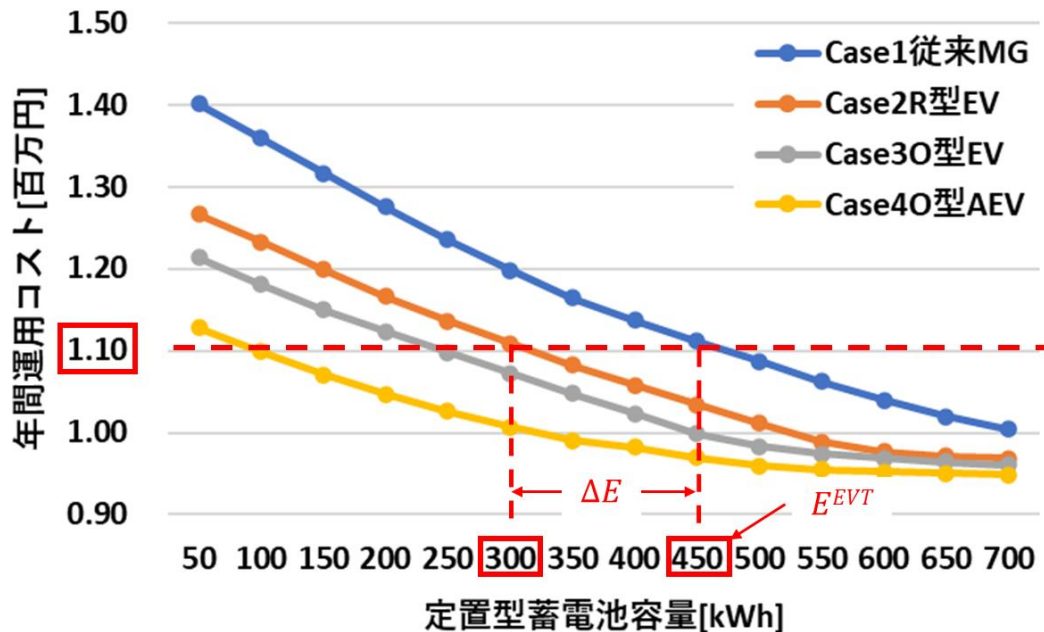


図 2-22 ESR の計算方法

図 2-23 は図 2-21 に基づいて ESR を評価した結果である。Case2 の ESR は 0.6 と 1 を下回っており、 E^{EVT} を十分にエネルギー効率改善に利用しきれていないことがわかる。これは、EV は予約対応の移動のためにエネルギーを一定量確保する必要があり、さらに移動中はエネルギー効率改善に貢献できないためである。一方、Case3 では ESR が 0.9 に改善しており、ワンウェイ型 EV の予約移動に付随したエネルギー空間的シフトの能力は ESR に大きく影響することがわかる。最も顕著な結果は Case4 であり、ESR は約 1.5 と、本来の kWh 容量以上の働きをしていることがわかる。EV のもつ移動型蓄電池としての機能が十分に発揮され、定置型の Bat よりも有用性が高まっていることの証左といえる。このように、EV を定置型蓄電池として利用するだけでなく、移動型蓄電池として活用することはエネルギー効率・経済性の改善に大きく寄与できる可能性が示されたといえよう。

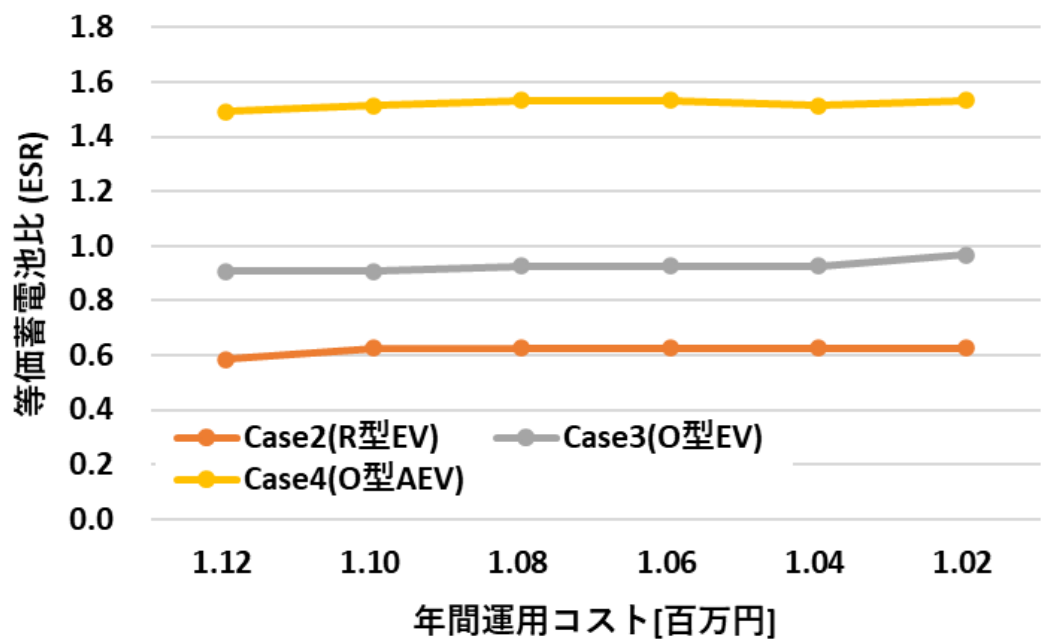


図 2-23 ESR

第3章 BS と MG の統合

3.1 BS に関する先行研究と本研究の目的

MaaS 社会におけるライドシェア、カーシェア、自動運転車といった EV 群の充電残量を効率的に管理する手段として、バッテリー内蔵型の EV ではなく、着脱可能な BP を自動交換可能な BS 技術が開発されている（図 3-1）。日本では ENEOS と Ample[21]が京都市南区において国内初となる EV 向け全自動バッテリー交換ステーションの実証実験を開始している。以下に BS を推進している Ample 社の技術について簡単に紹介する。

- 数分で BP を交換可能であり、特に駐車スペースが不足しやすい人口密集地域における充電の混雑緩和が期待される。
- 使用するバッテリーサイズ (kWh 容量) を自由に選択できる。
- EV のバッテリーを BP として統一することで、二次利用が容易になる。
- 自動車メーカーとの連携により、多くの車両との互換性を確保している。

近年では BS に着目した検討が活発化している。Ban ら[43]はウィンドファームと BS を統合した集中充電ステーションの運用計画手法を提案し、BP を活用することで風力発電抑制を 12%削減できる可能性を示している。Ma ら[44]は BS を含む EV の充電計画を短時間で立案可能な計画手法を提案している。しかし、シェアモビリティの BS 運用を EMS と統合した場合のエネルギー供給面への影響を議論した研究は少ない。そこで、本研究では BS を導入したカーシェアに適用可能な E²MS を提案する。提案手法は MG の経済性と系統貢献の観点から、カーシェアの移動需要を満たす BS を含む配車計画と、BP を MG のエネルギー供給に活用する運用計画を同時に決定する。この手法を用いて、BS と MG の統合による経済効果と系統貢献効果を評価する。

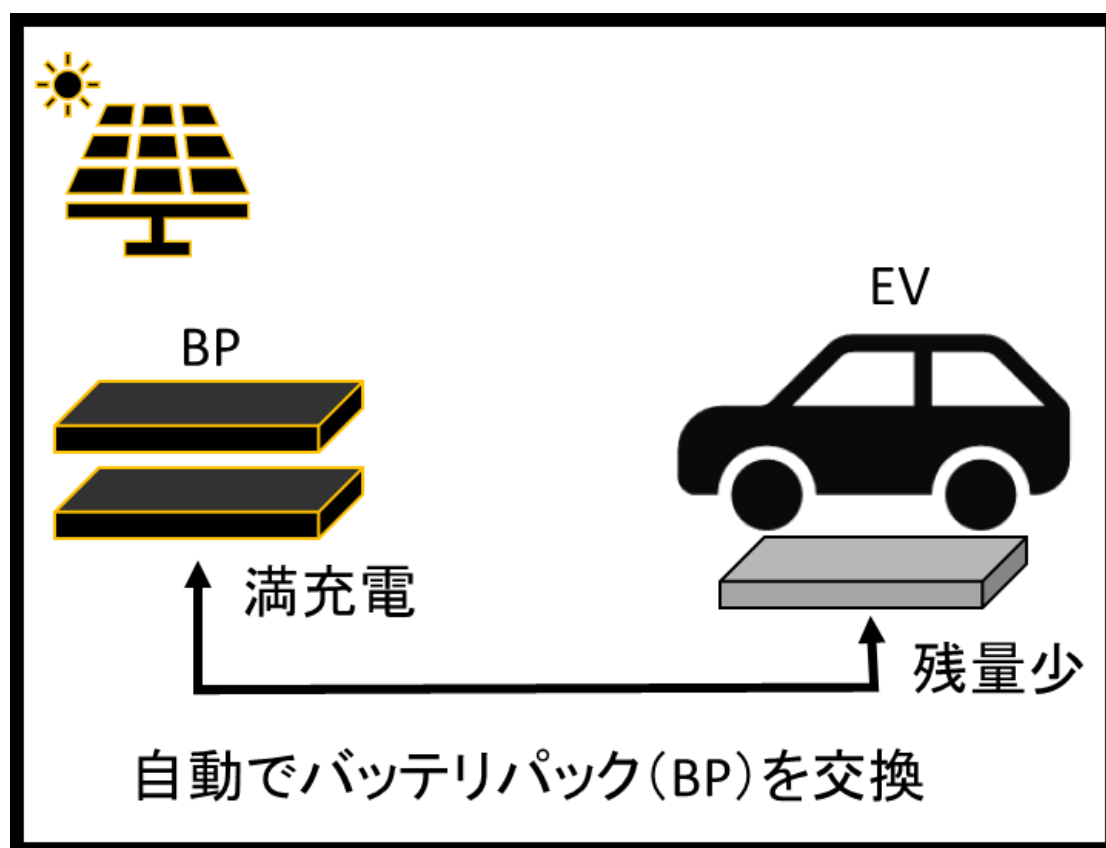


図 3-1 バッテリスワップ (BS) のイメージ

3.2 MG のエネルギーフロー

本研究では、複数の MG が近隣エリアに分散して導入されている状況を想定している。各 MG には PV が設置されており、系統からの購入電力と合わせて MG 内の電力需要へ供給する。各 MG で余剰電力が発生した場合は系統への売電も可能である。また、各 MG には EV への BS の装填を自動で行う BS ステーションが併設されており、BP を移動型蓄電池としても利用することで MG へのエネルギー供給の効率化をはかる状況を想定している。

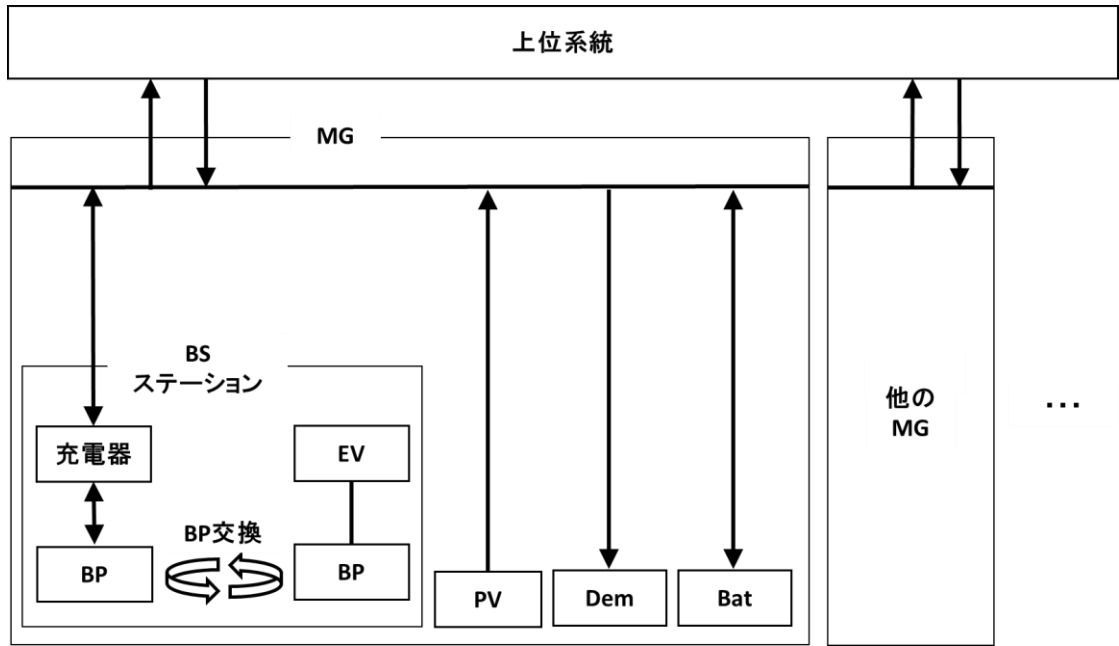


図 3-2 MG のエネルギーフロー

3.3 BS が導入されたカーシェアを想定した E²MS の定式化

本研究で提案する BS が導入されたカーシェアを想定した E²MS は、2.3 節で提案した E²MS にカーシェアの EV の貸出対応・各 EV に搭載する BP の割当てと充電計画を加えた最適化問題である。

3.3.1 目的関数

本研究では BS と MG の統合による経済効果および系統貢献効果を評価するため、多段階最適化を実施する。目的関数として、次の 3 つを使用する。多段階最適化の詳細と段階的な制約条件の追加については試算条件で述べる。

1. 全 MG の運用コストを最小化する(2.1)式。
2. 上位系統との関係線容量を削減するための最大潮流の総和を最小化する(3.1)式。
3. 上位系統との関係点潮流を安定化するための潮流の平均変動を最小化する(3.2)式である。

$$F^M = \sum_m^M (P_m^{Max}) \quad (3.1)$$

$$F^A = \frac{\sum_m^M [|P_{m,t+1}^{buy} - P_{m,t+1}^{sell} - (P_{m,t}^{buy} - P_{m,t}^{sell})|]}{M \cdot (T - 1)} \quad (3.2)$$

ここで、 F^M は全 MG の最大潮流の総和、 P_m^{Max} は MG# m と上位系統の関係点最大潮流[kW]、 F^A は全 MG の潮流の平均変動、 t は時刻、 T は最終時刻、 M は MG の総数、 $P_{m,t}^{buy}$ は MG # m の系統からの買電電力[kW]、 $P_{m,t}^{sell}$ は MG# m の系統への売電電力[kW]である。

3.3.2 制約式

2.3.2 項で示した制約式において, EV に関連する変数を全て BP に変更した制約条を設定する。ただし, EV の移動と BP の移動の整合性を確保するため, EV に関する次の制約条件が必要である。予約対応の出発地点に関する(2.9)式, 予約対応の到着地点に関する(2.10)式, EV に割当て可能な予約数に関する(2.11)式, 予約対応以外の移動を禁止する(2.12)式, EV の接続状態と走行の状態に関する(2.13)式と同等の制約条件を EV の移動を考慮するために追加で設定している。また, BS を考慮した予約対応を実施するため(2.8)式を(3.3)式へ変更している。

$$\sum_v^V \sum_b^B U_{r,v,b}^{assign} = 1 \quad (3.3)$$

ここで, v と V は EV の番号と総数, b と B は BP の番号と総数, r と R は EV の予約情報の識別番号と総数, $U_{r,v,b}^{assign}$ は EV# v に予約# r と使用する BP# b を割当てる場合に 1 となるバイナリ変数, $E_{v,t}^{EV}$ は EV# v の充電残量[kWh]である。(3.3)式は各予約について, 予約の出発地点に配置されているいずれかの EV と BP で対応することを保証する制約である。

3.4 BS による経済効果および系統貢献効果

3.4.1 試算条件

図 3-3 のように, 各 MG に EV が 1 台, BP が二つ配置されている 3 つの MG (MG1~MG3) を想定する。また, 各 MG には 10kWh, C レート 1 の Bat を EMS で使用する機器として設置している。PV 発電量と需要家の電力需要には, 群馬県太田市で実測された NEDO 実証データ[37]を使用した。日立北大ラボが北海道岩見沢市で実施した自立型ナノグリッド[45]の需要規模を参考に, バランス型の MG1, 電力需要型の MG2, PV 余剰型の MG3 をモデルし, 30 日分の電力シナリオを作成した。予約情報は名古屋市のカーシェア利用特性に基づいて作成された確率密度関数[46]から 1 日に 12 人の利用者を想定して, 30 日分の交通シナリオを生成した。EV の性能は日産リーフを参考にした。MG の買電価格は北海道電力の時間帯別電灯[47], 売電価格は METI が調査を行った小売り電気事業者の買取価格の中央値[48]を参考にした。各機器と MG に関するパラメータを表 3-1 にまとめる。

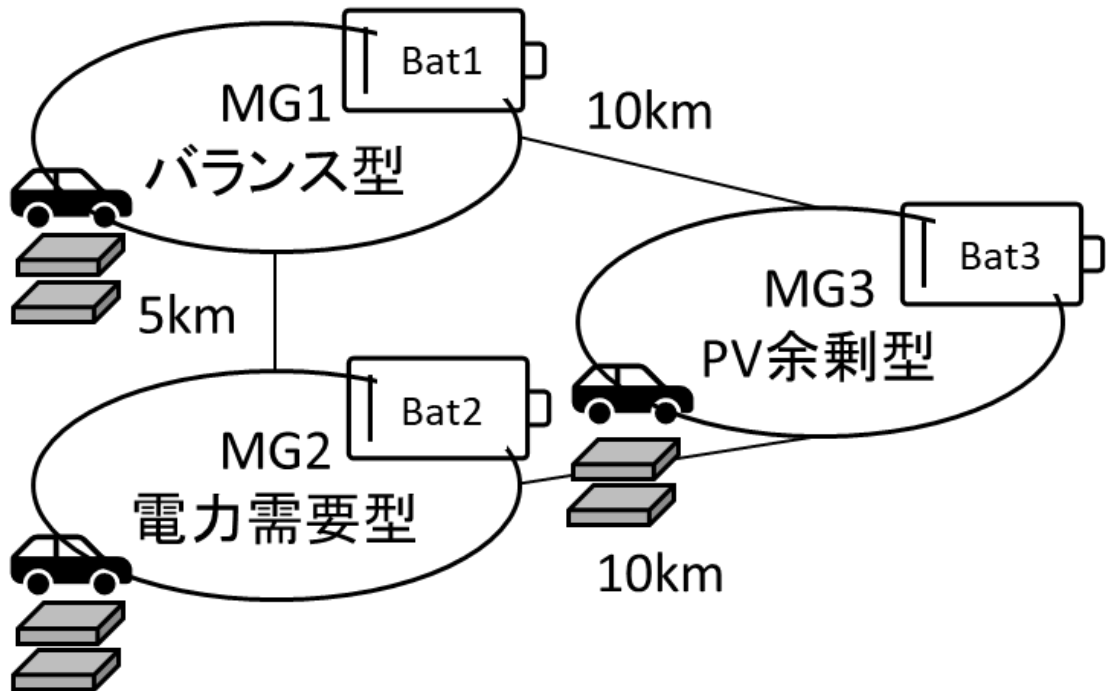


図 3-3 試算対象のイメージ

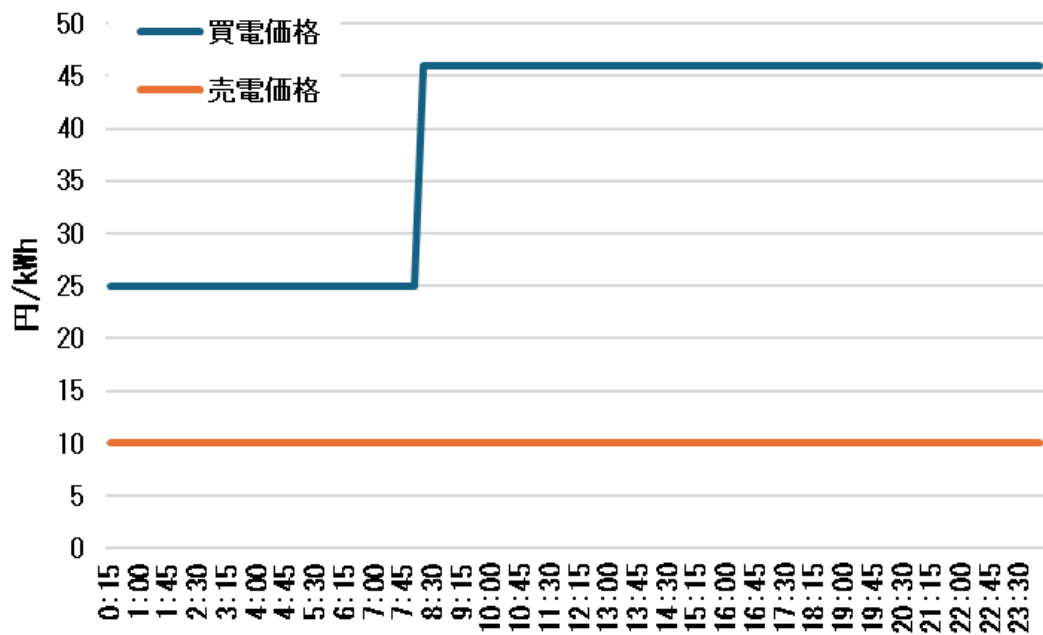


図 3-4 MGの買電価格と売電価格

表 3-1 各機器と MG に関するパラメータ

	変数名	値
時間幅	ΔT	0.25
定置型蓄電池の充放電効率 (片道分)	η^{Bat}	0.94
定置型蓄電池の C レート [kW/kWh]	$Crate^{Bat}$	1
EV の充放電効率 (片道分)	η^{EV}	0.94
BP の充放電効率 (片道分)	η^{BP}	0.94
EV の走行効率[km/kWh]	η^{run}	8
EV の最大容量[kWh]	E_v^{EVMAX}	40
BP の最大容量[kWh]	E_b^{BPMAX}	20
EV 充電器の定格[kW]	Cap_m^{EV}	40
BP 充電の定格[kW]	Cap_m^{BP}	20
MG1 と MG2 の距離[km]	$d_{1,2}, d_{2,1}$	10
MG1 と MG3 の距離[km]	$d_{1,3}, d_{3,1}$	5
MG2 と MG3 の距離[km]	$d_{2,3}, d_{3,2}$	10
各 MG に設置されている充電 器数	SP	4
MG1 における EV の初期台数		1
MG2 における EV の初期台数		1
MG3 における EV の初期台数		1
MG1 における BP の初期個数		2
MG2 における BP の初期個数		2
MG3 における BP の初期個数		2

以上の条件下で 2 つのケースについて試算し、その結果を比較した。

Case1: 各 MG にバッテリー内蔵ワンウェイ型 EV (最大容量 40kWh) 1 台が配置されているケース。

Case2: 各 MG に BS 対応ワンウェイ型 EV1 台と最大容量 20kWh の BP2 組が配置されているケース。

なお、BP と EV 内臓バッテリーの C レートはともに 1.0 としている。各 MG の充電器はパワーシェアリング機能(充電器に接続された複数の BP 間で電力を最適に配分する機能)を有しており、MG 内の充放電で使用できる最大電力は 40kW とした。

次の手順で 30 シナリオにおいて多段階最適化を実施し、運用計画を作成する。各手順における MG の潮流のイメージを図 3-5 に示す。正の値は上位系統から MG への順潮流、負の値は PV 余剰による MG から上位系統への逆潮流を表している。

1. (2.1)式を用いて全 MG の運用コストを最小化し、得られた運用コストを F^C_{lim} として保存する。
2. 手順 1 の運用コストを遵守するための(3.4)式を制約条件として追加し、(3.1)式を用いて上位系統との関係点の最大潮流を最小化する。得られた各 MG の最大潮流を $P_m^{Max,lim}$ として保存

する。ここで添え字 m は MG の番号を表している。

$$F^C = F^{C_lim} \quad (3.4)$$

3. さらに手順 2 の最大潮流を遵守するための(3.5)式を制約条件として追加し、(3.2)式を用いて上位系統との連係点潮流の平均変動を最小化する。

$$P_m^{Max} \leq P_m^{Max_lim} \quad (3.5)$$

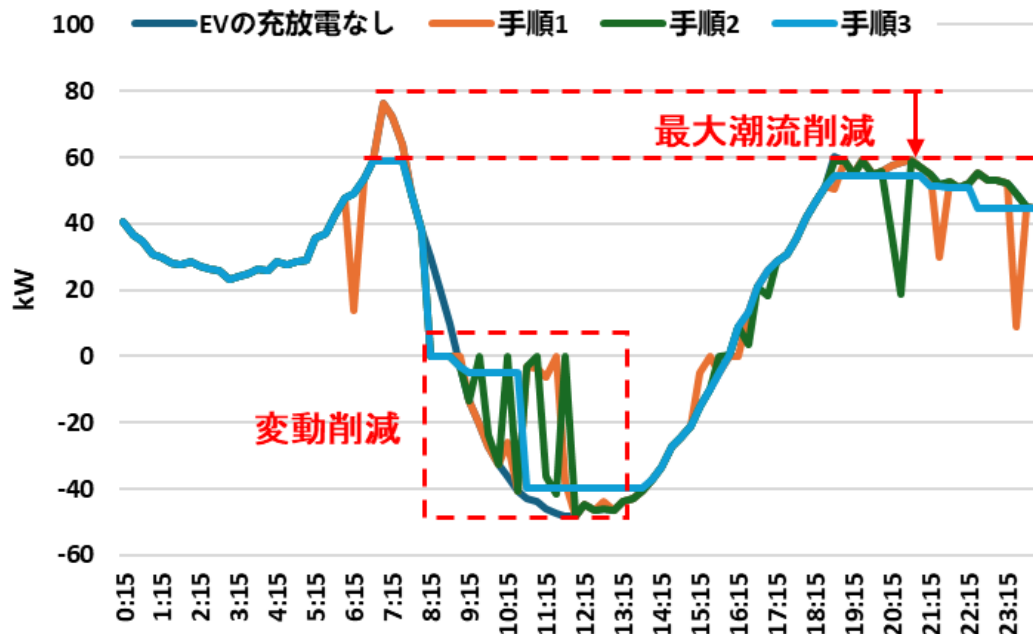


図 3-5 各手順における MG の潮流のイメージ

3.4.2 試算結果—EV の運用形態による影響—

あるシナリオの EV 運用計画を図に示す。Case1 の EV 運用計画を図 3-6 に示す。同図では EV が MG に滞在している時間帯を EV ごとに色別の長方形で表し、その中で MG から充電している時間帯を紫色の横線、MG へ放電している時間帯を橙色の横線で示している。予約情報への貸出対応を実線で示している。Case2 の EV 運用計画を図 3-7 に示す。同図では BP が MG に配置されている時間帯を水色の長方形で表し、その中で MG から充電している時間帯を紫色の横線、MG へ放電している時間帯を橙色の横線で示している。BP が EV に搭載され、MG 間を移動している時間帯は搭載されている EV ごとに色別の実線で示している。MG1 の潮流 (MG 機器の充放電を含まない場合、各 Case の場合) を図 3-8 に示す。なお、試算条件において予約情報の詳細は割愛したが、Case1 と Case2 とともに予約対応を満たしている。Case1 の MG1 の滞在時間に着目する。図 3-6 より 12:45 は EV が不在の時間帯であるため、PV 余剰のピークに対応できていないことが図 3-8 から確認できる。Case1 の EV-a に着目する。図 3-6 より 11:00 から 12:30 に MG2 へ放電した後、3 回目の予約対応として MG1 へ移動し、PV 余剰を利用して再充電を行っている。再充電に利用できる時間は 13:00 から 13:30 のわずか 30 分であり、この突発的な EV 充電が潮流変動

を引き起こしていることが図 3-8 から確認できる。一方、Case2 の EV-a では、図 3-7 の通り、12:15 まで MG2 へ放電した BP を搭載して 3 回目の予約対応として MG1 へ移動している。MG1 では事前に 11:30 から 13:00 にかけて PV 余剰で充電された BP に交換し、次の予約対応を行っている。MG1 に残された BP は 14:00 から 15:30 にかけて PV 余剰で充電される。このように、12:45 の PV 余剰のピークに対応しつつ、突発的な充電を回避していることが図 3-8 から確認できる。

BS の導入により、MG における移動型蓄電池を連続的に利用できる機会が増え、予約が多い昼間であっても PV 余剰をより効率的に充電できている。その結果、MG 群の運用コスト (F^C) は Case1 では 37,553 円、Case2 では 37,305 円、最大潮流 (F^M) は Case1 では 116kW、Case2 では 85kW、潮流の平均値変動 (F^A) は Case1 では 1.8kW/15min、Case2 では 0.8kW/15min となった。

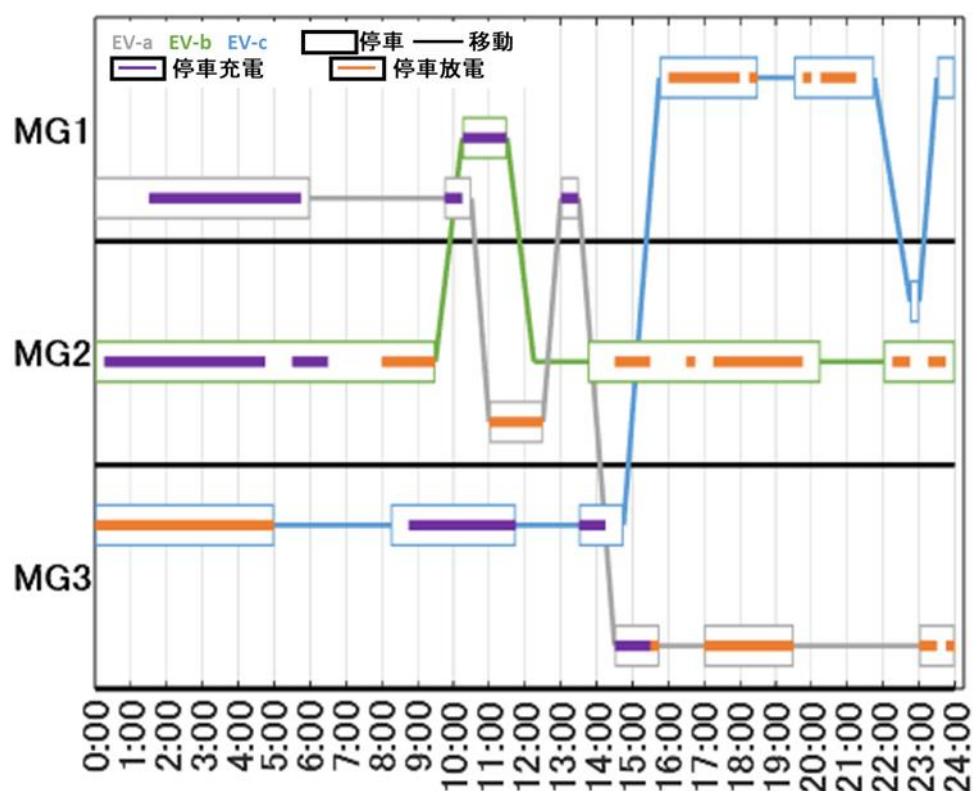


図 3-6 Case1 - EV 運用計画

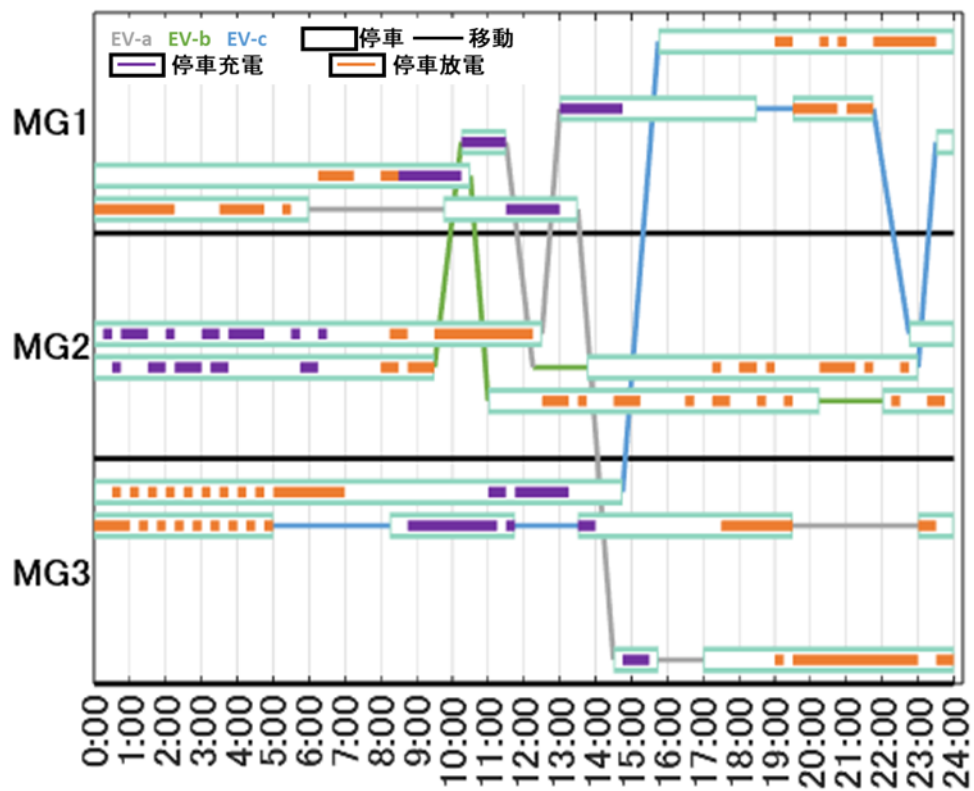


図 3-7 Case2 - EV 運用計画

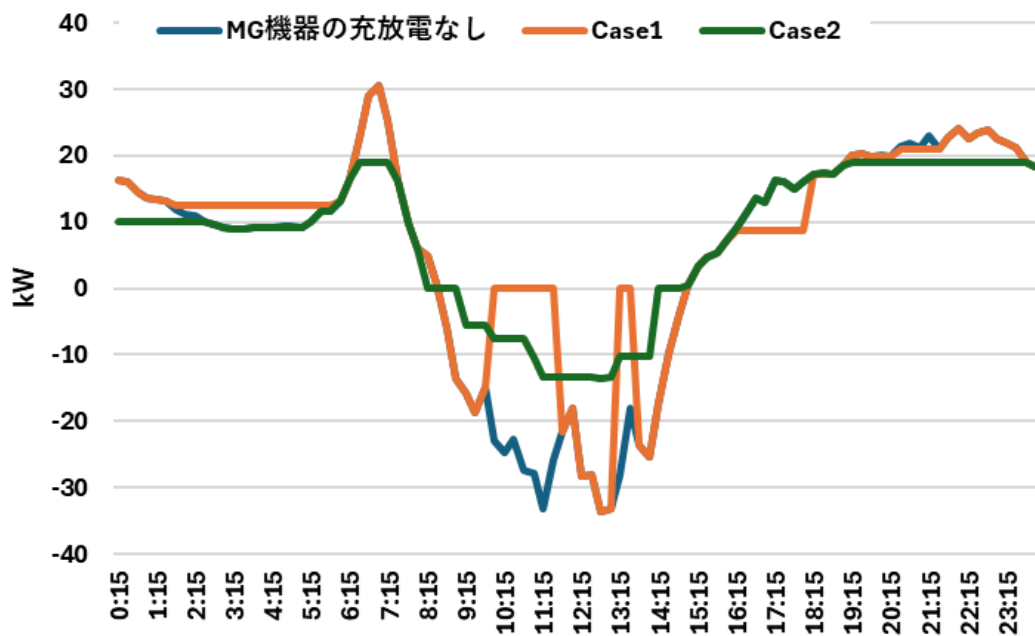


図 3-8 MG1 の潮流

各シナリオの運用コストを図 3-9, 最大潮流を図 3-10, 平均変動を図 3-11 に示す。図 3-9 から BS が導入されたカーシェアはバッテリー内蔵型 EV によるカーシェアと同等の経済効果を発揮していることが確認できる。さらに、前述したように BS による連続的な移動型蓄電池の活用は、

PV 余剰による逆潮流のピークへの対応や突発的な充電の回避に寄与していることから、図 3-10 からは最大潮流が比較的大きいシナリオでは BS によって最大潮流が削減されており、図 3-11 からは BS によって潮流の変動平均変動が抑制されていることも確認できる。このことから BS は MG への経済効果に加えて MG と上位系統の連係線容量の削減や平均変動抑制といった系統貢献に関するポテンシャルを有しているといえる。

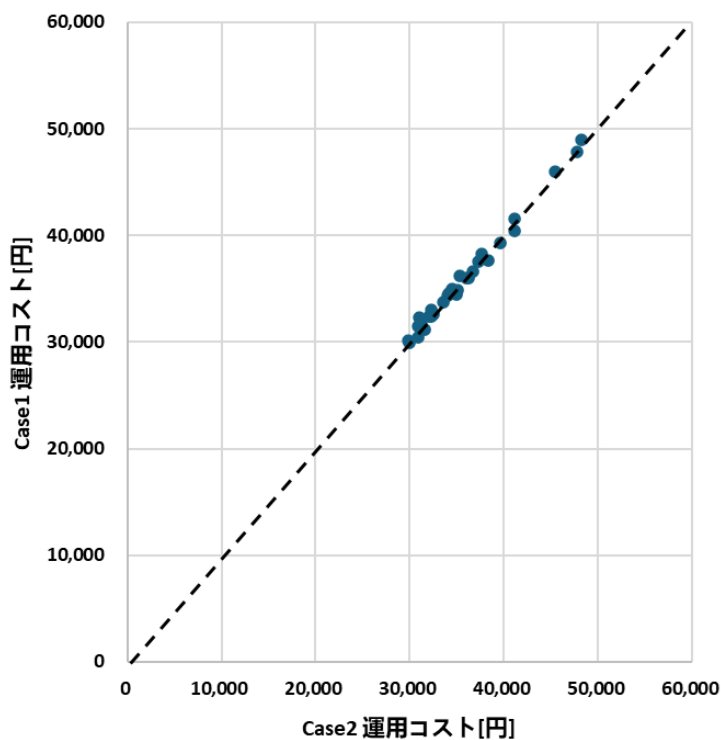


図 3-9 運用コスト

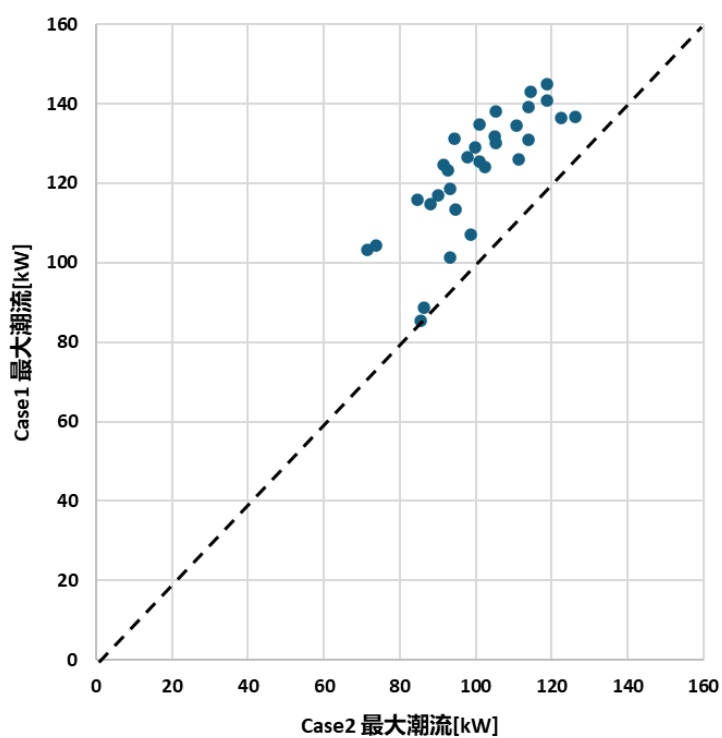


図 3-10 最大潮流

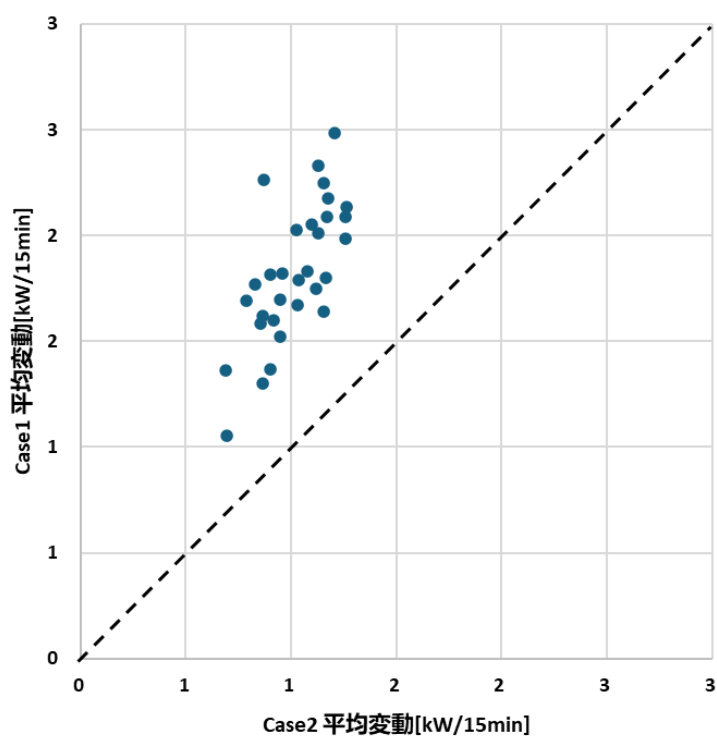


図 3-11 平均変動

3.4.3 試算結果—移動需要量による影響—

一日の利用者を3人、6人、9人と変更して30日分のシナリオを作成し、数値試算を実施した。Case1 と Case2 の運用コスト、最大潮流、平均変動の差分を算出し、それぞれの平均値を求めた。運用コストを図 3-12、最大潮流を図 3-13、平均変動を図 3-14 に示す。図 3-12 より、利用者数が少ない場合は、予約対応に伴うエネルギーの空間的移動の機会が限られるため、一度に大量のエネルギーを運搬できるバッテリー内蔵型 EV が有利となる。一方、利用者数が増加すると、移動型蓄電池として連続的に活用可能な BS の方が相対的に優位性を示すことが確認できる。最大潮流削減と平均変動抑制は利用者数によらず、移動型蓄電池として連続的に活用可能な BS の方が優位にあることが図 3-13 と図 3-14 から確認できる。このことからシェアモビリティを主力とする MaaS 社会では、BS は効率的な EV の充電量の管理だけでなく、MG の経済効果や上位システムへの系統交換の観点からエネルギー供給に貢献する可能性があると考えられる。

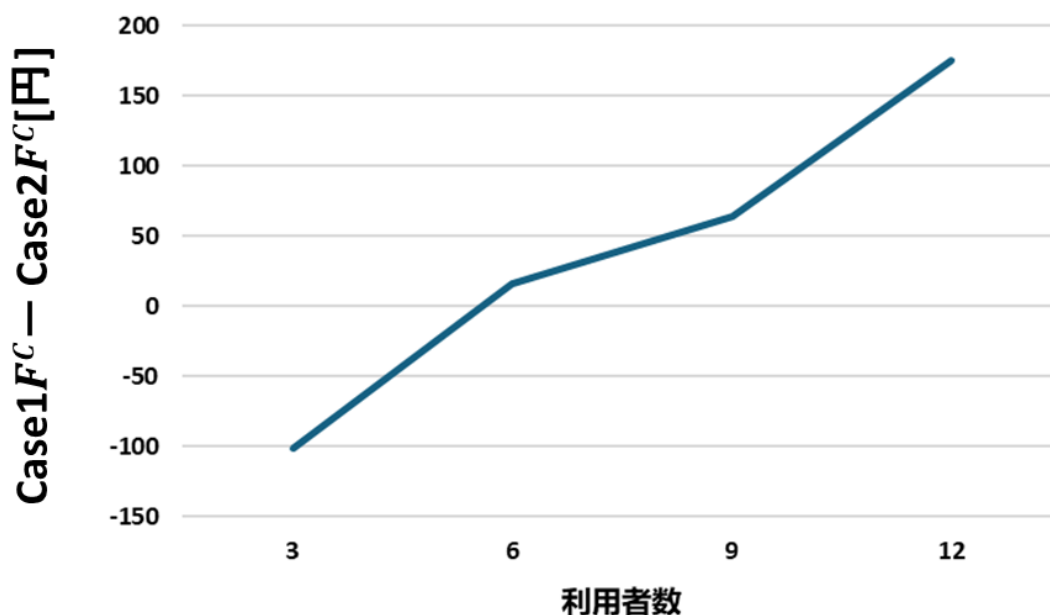


図 3-12 Case1 に対する Case2 のコスト削減の平均値

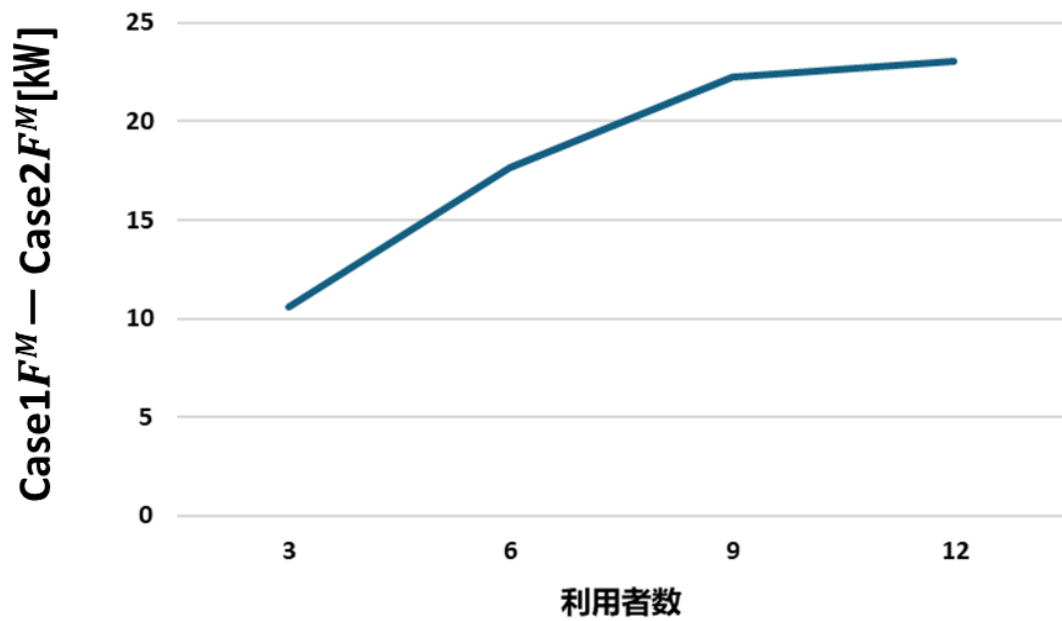


図 3-13 Case1 に対する Case2 の最大潮流削減の平均値

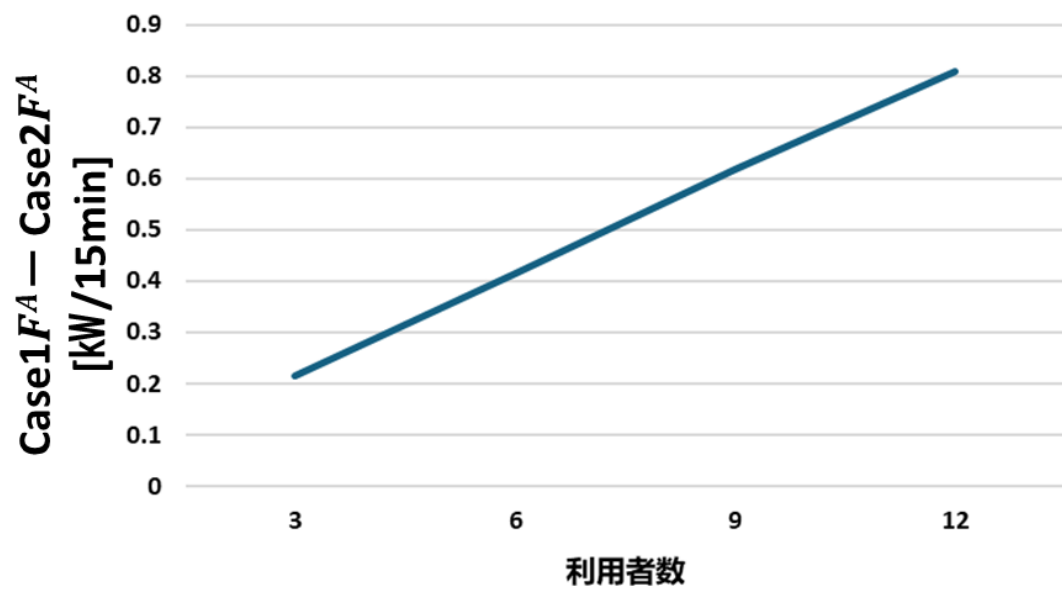


図 3-14 Case1 に対する Case2 の平均変動抑制の平均値

第4章 カーシェア型 MaaS と統合した MG の 実規模計画手法

4.1 実規模計画手法に関する先行研究と本研究の目的

実規模の配車計画は大規模な組み合わせ問題であり、Mixed Integer Linear Programming (MILP) のソルバーを使用して厳密解を導出することは困難である。このため、短時間で良質な解を探索する計画手法が数多く提案されている。例えば Ropke ら[49]は Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) を提案し、大規模な配車計画の計算効率を向上させるとともに、短時間で高品質な解を得ることに成功した。Bingshan ら[44]は EV のバッテリースワップを含む配車計画を行うための ALNS を開発した。Simen ら[50]は EV の充電を考慮したカーシェアの再配置問題を Large Neighborhood Search と Tabu Search (TS) を組み合わせて解決している。これらの研究は、いずれも交通運用に限定した計画手法であり、EV から MG へのエネルギー供給など EMS を含む協調計画手法については十分に議論されていない。そこで、本論文ではワンウェイ型カーシェアと統合した MG の E²MS を実規模レベルで計画する手法を提案する。また、提案手法は BS への容易な拡張性を持っている。

4.2 想定するモデル

複数の MG を想定し、各 MG 内には PV、バッテリー内蔵型 EV の場合は充電器と駐車スペースを備えた EV ステーション、BS の場合は BS ステーションを配置する状況を想定する。系統からの購入電力と合わせて MG 内の電力需要へ供給する。各 MG で余剰電力が発生した場合は系統への売電も可能である。EV の予約情報には出発時刻、到着時刻、出発場所、到着場所、走行距離が含まれているものとする。

4.3 バッテリー内蔵型 EV 向け実規模計画手法

本研究では MILP の商用ソルバーよりも効率的に E²MS を計画する手法を提案する。提案手法は予約情報に対する車両の割当てを EMS の観点から決定する手法であり、再配置による予約対応の可否判断は対象外とする。具体的には本研究で扱う予約情報は従来の EMS を考慮しない配車計画などによって既に EV へ一度割当てられたものであり、全ての予約情報に対応可能な状況を想定している。

提案手法と比較するために使用した MILP の定式化の詳細については、EV を対象とする場合は 2.3 節、BS を対象とする場合は 3.3 節を参照されたい。

提案手法は E²MS における EV の走行パターンの組合せを TS によって決定し、その組み合わせに基づいて一台ごとに EV の充放電を Linear Programming (LP) として解く反復計算として設計されている。

4.3.1 充放電計画問題 (LP)

(4.1)式を最小化するように EV# v の充電と放電を決定する。

$$F_v^{LP} = \sum_t \left[C_t^{buy} \cdot \sum_m (P_{m,v,t}^{EB} - P_{m,v,t}^{ED}) + C_t^{sell} \cdot \sum_m P_{m,v,t}^{EPV} \right] \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

ここで、 F_v^{LP} はEV# v による MG 運用コストへの影響[円]、 t は時刻、 T は最終時刻、 ΔT は時間幅、 m は MG 番号、 M は MG の総数、 C_t^{buy} は系統からの購入電力価格[円/kWh]、 $P_{m,v,t}^{EB}$ は MG# m で買電を利用して EV# v を充電する電力[kW]、 $P_{m,v,t}^{ED}$ は MG# m の残存需要への EV# v の放電電力[kW]、 C_t^{sell} は系統への売電価格[円/kWh]、 $P_{m,v,t}^{EPV}$ は MG# m の残存 PV 余剰を利用して EV# v を充電する電力[kW]である。(4.1)式を最小化することで、EV# v は MG の運用コストを削減することになる。

制約条件は次の通りである。

$$P_{m,v,t}^{ED} \leq P_{m,t}^{RD} - \sum_{v' \neq v} P_{m,v',t}^{ED} \quad (4.2)$$

$$P_{m,v,t}^{EPV} \leq P_{m,v,t}^{PS} - \sum_{v' \neq v} P_{m,v',t}^{EPV} \quad (4.3)$$

$$P_{m,v,t}^{EPV} + P_{m,v,t}^{EB} + P_{m,v,t}^D \leq Cap_m \cdot U_{m,v,t}^{plug} \quad (4.4)$$

$$if \ 0 \leq \sum_{v' \neq v} P_{m,v',t}^{ED}, \quad P_{m,v,t}^{EB} \leq 0 \quad (4.5)$$

$$if \ \sum_{v' \neq v} U_{m,v',t}^{sp} = SP_m, \quad P_{m,v,t}^{EB} + P_{m,v,t}^{ED} + P_{m,v,t}^{EPV} \leq 0 \quad (4.6)$$

$$E_{v,t} = E_{v,t-1} + \sum_m \left[\eta^{EV} \cdot (P_{m,v,t}^{EB} + P_{m,v,t}^{EPV}) - \frac{P_{m,v,t}^{ED}}{\eta^{EV}} \right] \cdot \Delta T - E_{v,t}^{tra} \quad (4.7)$$

$$E_{v,t=0} = E_{v,t=T} \quad (4.8)$$

ここで、 $P_{m,t}^{RD}$ は EV の充放電を含まない MG# m の正味需要[kW]、 v' は EV の番号、 $P_{m,v,t}^{PS}$ は EV の充放電を含まない MG# m の PV 余剰[kW]、 Cap_m は MG# m の充電器定格[kW]、 $U_{m,v,t}^{plug}$ は TS によって決定された EV# v の走行ルートに基づく接続場所を表す外生変数的なバイナリ変数、 $U_{m,v,t}^{sp}$ は EV の充電器の使用状況を表す外生的なバイナリ変数 (1: 充電器使用, 0: 充電器未使用)、 SP_m は MG# m の充電器数、 $E_{v,t}$ は EV# v の充電残量[kWh]、 η^{EV} は EV の充放電効率 (片道分)、 $E_{v,t}^{tra}$ は

TS によって決定された走行ルートに基づく走行消費[kWh]を表す外生的な変数である。EV の充放電を含まないある MG の潮流を図 4-1 に示す。正の値は上位系統から MG への順潮流を、負の値は PV 余剰による MG から上位系統への逆潮流を表している。この潮流を基に算出された $P_{m,t}^{RD}$ と $P_{m,v,t}^{PS}$ を図 4-2 に示す。次に、EV# v 以外の EV が $P_{m,t}^{RD}$ へ放電し、 $P_{m,v,t}^{PS}$ から充電していると仮定する。この場合、 $P_{m,t}^{RD}$ から EV# v 以外の EV の放電電力を差し引いた残存需要（(4.2)式の右边）、および $P_{m,v,t}^{PS}$ から EV# v 以外の EV の充電電力を差し引いた残存 PV 余剰（(4.3)式の右边）を図 4-3 に示す。このように、(4.2)式は EV# v 以外の EV の放電を考慮した残存需要に対する EV# v の放電電力、(4.3)式は EV# v 以外の EV の充電を考慮した残存 PV 余剰からの EV# v の充電電力に関する制約である。(4.4)式は EV の充放電速度、(4.5)式は買電による充電のタイミング、(4.6)式は充電器の使用状況、(4.7)式は充電残量の推移、(4.8)式は EV の終始の充電残量が変わらないようにする制約である。

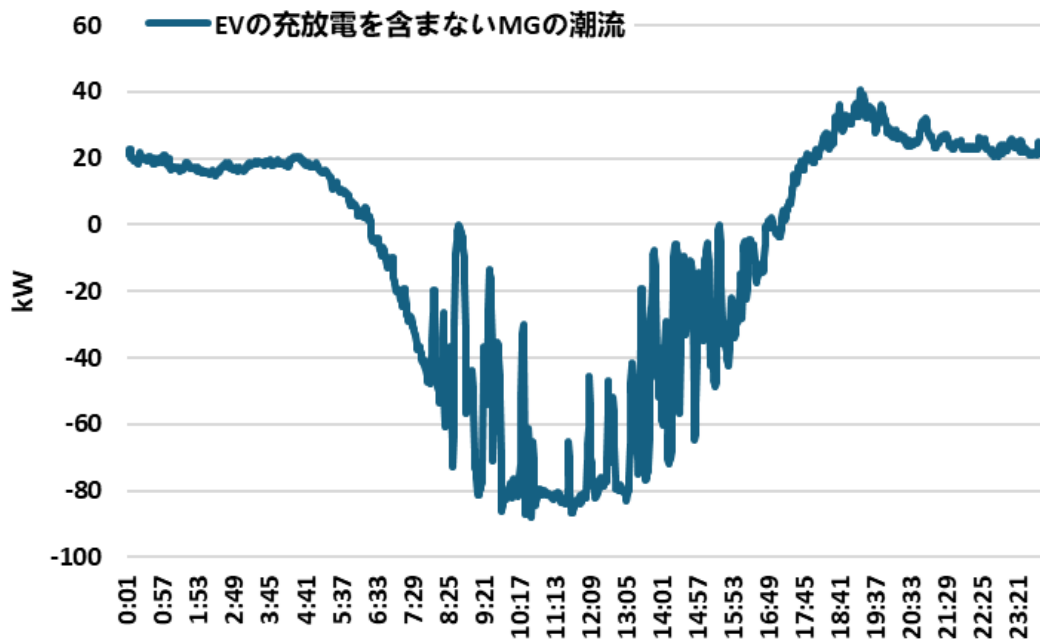


図 4-1 EV の充放電を含まない MG の潮流

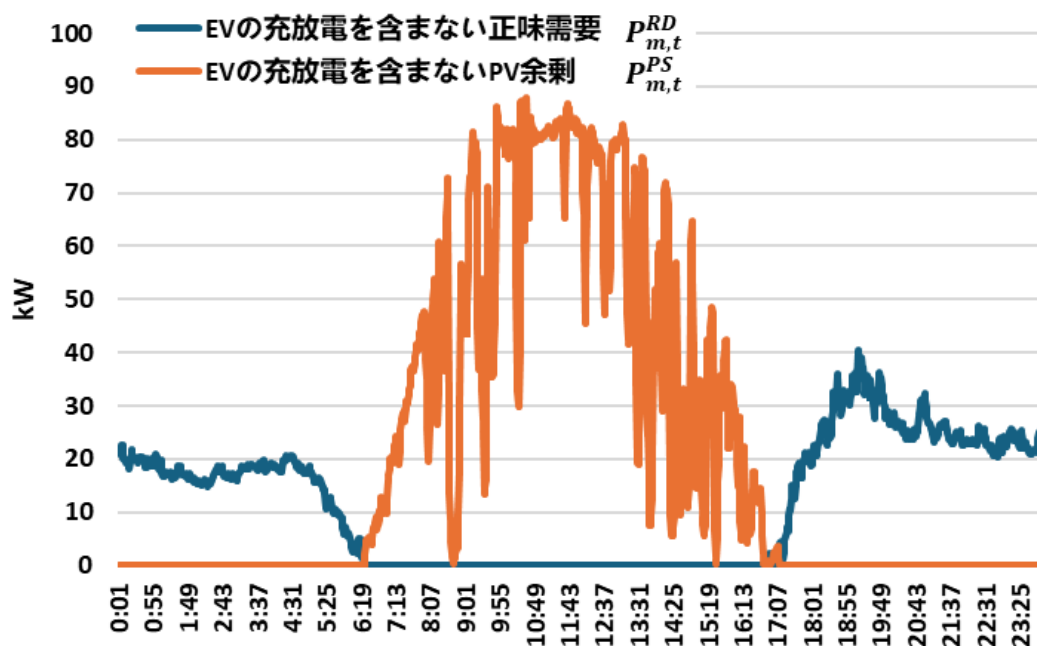
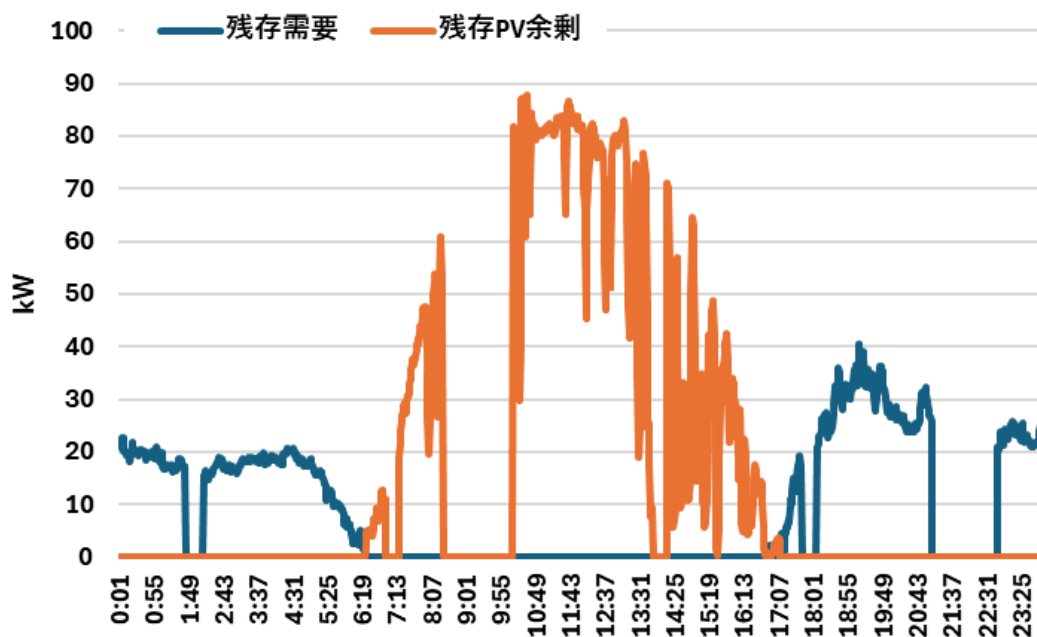
図 4-2 $P_{m,t}^{RD}$ と $P_{m,t}^{PS}$ 

図 4-3 残存需要 ((4.2)式の右辺) と残存 PV 余剰 ((4.3)式の右辺)

4.3.2 初期解の生成

まず EMS を考慮せずに EV に全ての予約情報を割当てて。この走行パターンの作成には、従来の配車計画を使用することも可能である。本研究で採用する具体的な割当て方法については試算条件において述べる。次に各 EV の走行パターンに基づき、4.3.1 項の充放電計画問題を解き、 F_v^{LP}

が最小である EV の充放電を制約条件として固定する。その後、他の EV の充放電計画を初期化し、再度 4.3.1 項の充放電計画問題を解いて同様の操作を行う。全ての EV の充放電が決定されるまでこの操作を繰り返す。

4.3.3 配車計画問題 (TS)

TS では Fig.3 のように停車位置が重複している MG で 2 台の EV の走行パターンを一点交叉させ、EV の走行パターンと充放電計画を変更する操作を行う。これに加えて走行パターンを変更せずに、2 台の EV の充放電計画のみをリスケジュールする操作も実施する。具体的には以下の a~f の処理をいずれかの条件が満たされるまで繰り返す。

- S^T 秒間処理を繰り返した場合。
- S^B 反復を実施しても最良解の更新が行われない場合。

EV のタイムテーブル MG へ停車: MG1 予約情報: T1

	~ 8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30~
EV-a	MG1	T1		MG3		T2	MG2
EV-b	MG1	T5	MG2	T6	MG3	T7	
EV-...	...						



EV のタイムテーブル MG へ停車: MG1 予約情報: T1

	~ 8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30~
EV-a	MG1	T1		MG3		T7	
EV-b	MG1	T5	MG2	T6	MG3	T2	MG2
EV-...	...						

図 4-4 一点交叉のイメージ

a. 交叉点の検出

探索の集中化を避けるために図 4-5 のように EV を 1 台ランダムに選択し、その他 EV と停車位置が重複しており交叉可能な交叉点を全て検出し保存する。交叉点の数が S^{CP} 個を上回るまでこの操作を繰り返す。なお、検出された交叉点が既に保存されている場合は、重複を避けるため保存しない。

EVのタイムテーブル MGへ停車:MG1 予約情報:T1

	～8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30～
EV-a	MG1	交叉点1 T1		MG3		T2	MG2
EV-b	MG1	T5	MG2	T6	MG3	交叉点2 T7	
EV-c	MG2		T8	MG3		T9	MG2

交叉点3

図 4-5 3 台の中で EV-a がランダムで選択された場合の交叉点

b. 交叉点のコスト改善

各交叉点において 2 台の EV の走行パターンと充放電の変更に基づく F_v^{LP} の改善値をすべて計算する。例えば図 4-5 の交叉点 1 では、まず交叉後の走行パターンに基づいて EV-a の 4.3.1 項の充放電計画問題を解き、その結果を制約条件として固定した後に EV-b の 4.3.1 項の充放電計画問題を解く。この手順により、EV-a を最初に計画した場合の F_v^{LP} の改善値が得られる。次に交叉後の走行パターンに基づいて EV-b の 4.3.1 項の充放電計画問題を解き、制約条件として固定した後に EV-a の 4.3.1 項の充放電計画問題を解く。この手順により、EV-b を最初に計画した場合の F_v^{LP} の改善値が得られる。両者の改善値を比較し、より大きな改善値を交叉点 1 のコスト改善 $F_{c=1}^{LP-C}$ [円] として保存する。ここで、添え字 c は交叉点を識別するためのインデックスである。

c. 充放電計画の再計画によるコスト改善

走行パターンを変更せずに充放電の再計画に基づく F_v^{LP} の改善値をすべて計算する。例えば図 4-5 の三つの交叉点が検出されている場合、EV-a と EV-b、また EV-a と EV-c の走行パターンを変更せずに交叉点のコスト改善と同様にして充放電を再計画し、それぞれの F_v^{LP} の改善値を算出する。充放電の再計画によるコスト改善を F_b^{LP-R} [円] として保存する。ここで添え字 b は EV の組合せを識別するためのインデックスである。

d. 暫定解に変更を加える

以下の条件 i から iii を考慮して交差点のコスト改善 F_c^{LP-C} [円] と充放電の再計画によるコスト改善 F_b^{LP-R} [円] を比較し、最も大きな改善をもたらす操作を暫定解に反映する。

i. タブーリストによる判別

タブーリストによって禁止されている操作は選択できない。

ii. 特別選択による判別

タブーリストによって禁止されている操作であっても、最良解を更新する場合、すなわち全 EV の MG 運用コスト削減 $\sum_v F_v^{LP}$ が現状で最小となる場合は例外的に選択できる。

iii. 長期メモリの活用

改善値が同じ複数の操作が候補となる場合、長期メモリによって計算されるスコアを基準に選択を行う。

新たな暫定解が最良解を更新する場合、その暫定解を最良解として保存する。

e. タブーリストの更新

タブーリストには各 EV に割当てられていた予約情報を記録する。例えば図 4-5 に示され

ている交叉点 1 が選択された場合、図 4-6 のように元々割当てられていた予約情報がタブーリストに保存される。（充放電の再計画が選択された場合でも割り当てられている予約情報がタブーリストに保存される。）以降のタブーリストによる判別では、タブーリストに記録された予約情報と S^c 個以上重複する操作を禁止する。図 4-5 の交叉点 1 が選択された場合に生成される新しい走行パターンを図 4-7 に示す。例えば $S^c = 2$ とした場合、交叉点 4 での交叉によって EV-a に T#2, EV-b に T#7 が割当てられる。この割り当てはタブーリストに記録された予約情報と 2 件重複するため、この操作は禁止される。このように解の類似性を基準に禁止操作を設定することで、大規模な組み合わせ問題を効率的に解くことが可能となる [51]。

タブーリストは S^L 反復ごとに初期化される。

	割当てられていた予約情報			
EV-a	T1	T2		
EV-b	T5	T6	T7	
EV-c				

図 4-6 タブーリストのイメージ

EVのタイムテーブル MGへ停車: MG1 予約情報: T1

	～8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30～
EV-a	MG1	T5	MG2	T6	MG3	交叉点4 T7	
EV-b	MG1	T1		MG3		T2	MG2
EV-c	MG2		T8	MG3 交叉点5		T9	MG2

図 4-7 図 4-5 の交叉点 1 が選択された場合の走行パターン

f. 長期メモリの更新

長期メモリは反復計算全体を通じて各予約情報が各 EV に割当てられた回数を記録する。長期メモリのイメージを図 4-8 に示す。例えば図 4-5 に示されている交叉点 1 が選択された場合、(EV-a, T#1), (EV-a, T#2), (EV-b, T#5), (EV-b, T#6), (EV-b, T#7) にそれぞれ 1 回分が加算され、図 4-8 のような長期メモリが作成される。また、図 4-7 に示されている交叉点 4 と交叉点 5 のコスト改善値が等しく、両方とも最有力候補となった場合、図 4-8 の長期メモリを用いて判別を行う。交叉点 4 では、長期メモリの (EV-a, T#2), (EV-a, T#5), (EV-a, T#6), (EV-b, T#1), (EV-b, T#7) の合計値が 2 となり、交叉点 5 では (EV-a, T#5), (EV-a, T#6), (EV-a, T#9), (EV-c, T#7), (EV-c, T#8) の合計値が 0 となる。この場合、合計値が小さい交叉点 5 が選択される。

このように、改善値が同じ複数の操作が候補となる場合、長期メモリを活用して判別を行い、探索が浅い領域に向うように調整する。

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
EV-a	1	1	0	0	0	0	0	0	0
EV-b	0	0	0	0	1	1	1	0	0
EV-c	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図 4-8 長期メモリのイメージ

4.4 BS 向け実規模計画手法

4.3 節で示したバッテリー内蔵型 EV 向け実規模計画手法を、EV を BP に置き換えることで、同様のアルゴリズムを用いて BP の移動および MG へのエネルギー供給を計画する。BP は図 4-9 に示すタイムテーブルのように、BP が配置されている MG および BP を搭載している EV の情報を管理する。一方、EV は 4.3 節で示した図 4-4 のように、EV が停車している MG および EV に割当てられた予約情報を管理する。

BPのタイムテーブル MGに配置:MG1 EVに搭載:EV-a

	～8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30～
BP-a	MG1	EV-a		MG3		EV-a	MG2
BP-b	MG1	EV-b	MG2	EV-b	MG3	EV-b	
BP-c	MG1						
BP-...	...						

図 4-9 BP に関するタイムテーブル

4.3 節と同様に、BP のタイムテーブルに基づいて BP 間の交叉点を検出する。例えば、図 4-10 の交叉点 1 では、交叉する BP がいずれも EV に搭載されているため、EV の走行ルートも連動して変更する必要がある。一方、交叉点 2 では BP の交換に該当するため、EV の走行ルートを変更する必要はない。このようにして、BS の BP 交換に対応する運用計画を実施している。

BPのタイムテーブル MGに配置:MG1 EVに搭載:EV-a

	~8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30~
BP-a	MG1	EV-a		MG3		EV-a	MG2
BP-b	MG1	EV-b	MG2	EV-b	MG3	交叉点1 EV-b	
BP-c	交叉点2 MG1						
BP-...	...						

BPのタイムテーブル MGへ停車:MG1 予約情報:T1

	～8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30～
EV-a	MG1	T1		MG3		T2	MG2
EV-b	MG1	T5	MG2	T6	MG3	交叉点1 T7	
EV-...	...						

図 4-10 交叉のイメージ

4.5 試算条件

札幌のカーシェアステーションの分布[52]および地理的条件[53]を参考に、図 4-11 に示す実規模モデルを作成した。図 4-11 は OpenStreetMap[53]を編集して作成している。青色で示された MG は住宅街を想定したバランス型 MG であり、群馬県太田市で実測された NEDO 実証データ[37]から 35 軒分の PV 出力および電力需要をランダムに抽出してモデルした。鉄道駅付近日に配置された赤色の MG は繁華街を想定した電力需要型 MG であり、EMS オープンデータ[54]から中規模娯楽施設の電力需要をランダムに抽出し、群馬県太田市で実測された NEDO 実証データ[37]から 5 軒分の PV 出力をランダムに抽出してモデルした。各 MG には 1 台の EV を配置している。BS の場合、各 MG に EV が使用可能な BP を 2 つ配置し、充電器はパワーシェアリング機能を有し、接続された複数の BP 間で電力を最適に配分できるとしている。1 日に「EV の台数×5 人」の利用者を想定し、名古屋市のカーシェア利用特性に基づいて作成された確率密度関数[46]から予約情報を生成した。本研究は再配置手法の提案を目的としていないため、生成された予約情報を順次 EV に割り当て、対応できない予約情報が生成された場合は受け付けないものとした。提案手法の初期解としては、この割り当てられた走行パターンをそのまま使用している。EV の性能は日産リーフ[38]を参考にした。買電価格は北海道電力の従量電灯 C[55]、売電価格は METI が調査を行った小売り電気事業者の買取価格の中央値[48]を参考にした。提案手法のパラメータは試行錯誤的に決定した。提案手法と MG の機器に関するパラメータを表 4-1 にまとめる。

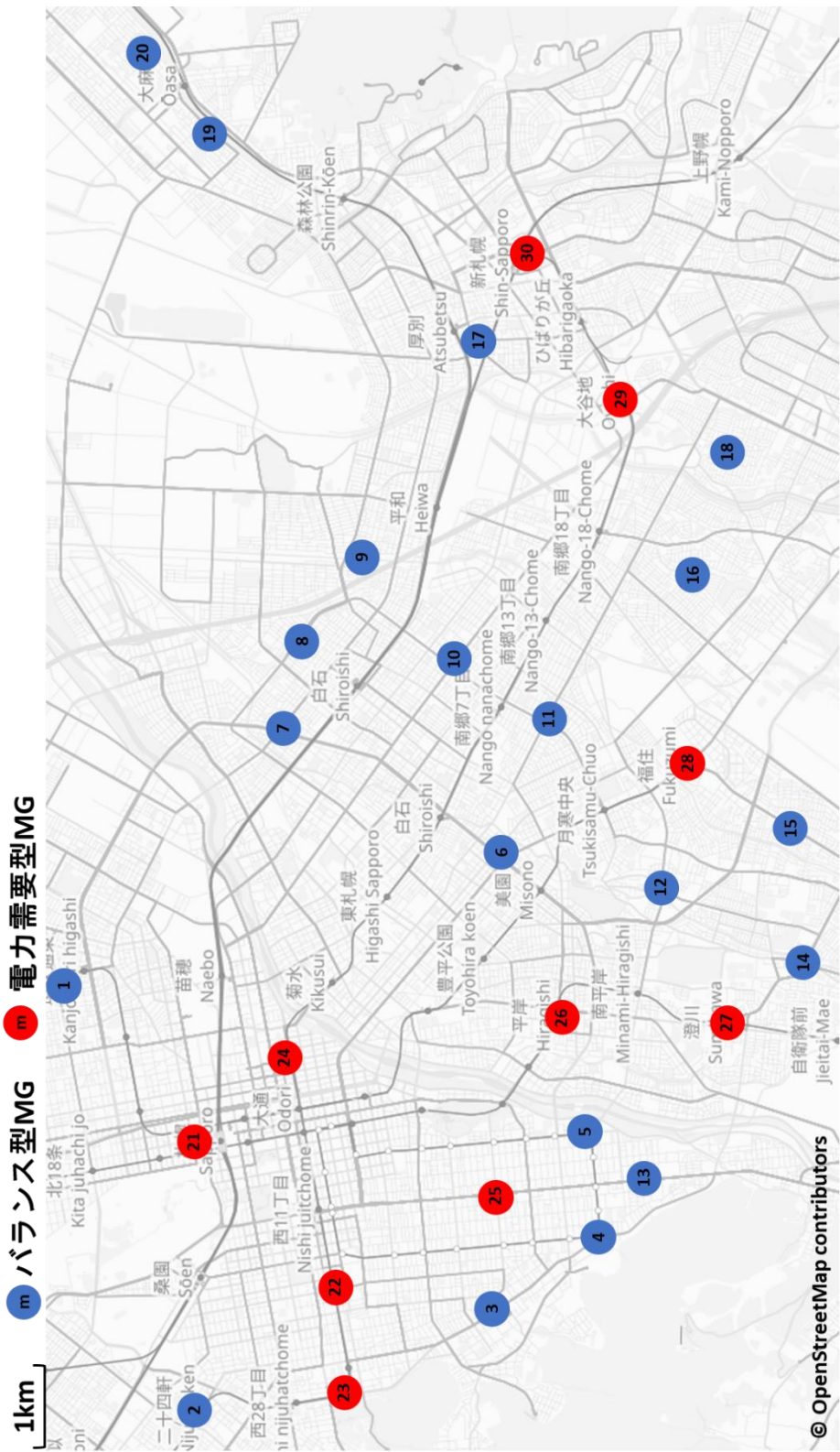


図 4-11 試算対象のイメージ

表 4-1 提案手法と MG 機器に関するパラメータ

	変数名	値
時間幅	ΔT	1/60
計算時間に関する停止条件 [sec]	S^T	7200
最良解の更新に関する停止条件[反復]	S^B	63
1 反復で調べる交差点の数	S^{CP}	14
禁止する予約情報の重複数	S^C	3
タブーリストの初期化頻度 [反復]	S^L	21
EV の充放電効率 (片道分)	η^{EV}	0.94
BP の充放電効率 (片道分)	η^{BP}	0.94
EV の走行効率[km/kWh]	η^{run}	8
EV の最大容量[kWh]	E_v^{EMAX}	40
BP の最大容量[kWh]	E_b^{BPMAX}	20
EV の最大充放電電力[kW]	Cap_m^{EV}	40
BP の最大充放電電力[kW]	Cap_m^{BP}	20
各 MG に設置されている充電器数	SP	1 (BS の場合は一つの充電器で 2 つまで BP を充電可能)
EV の充放電効率 (片道分)	η^{EV}	0.94
BP の充放電効率 (片道分)	η^{BP}	0.94
EV の走行効率[km/kWh]	η^{run}	8
MG の購入電力価格[円/kWh]	C_t^{buy}	40
MG の売電電力価格[円/kWh]	C_t^{sell}	10

以上の条件下で 4 つのケースについて試算し、その結果を比較した。

Case1 : MILP ソルバー (CPLEX) を用いてバッテリー内蔵型 EV の運用計画を作成する。

Case2 : 提案手法を用いてバッテリー内蔵型 EV の運用計画を作成する。

Case3 : MILP ソルバー (CPLEX) を用いて BS の運用計画を作成する。

Case4 : 提案手法を用いての BS の運用計画を作成する。

各試算ケースでは MG の数を段階的に増やし、小規模モデルから始めて計算負荷を分析した。段階的に使用するモデルの構成を表 4-2 に示す。表 4-2 に記載されている MG の番号は 図 4-11 で示した実規模モデルと対応している。また、CPLEX の計算時間の上限は 7200 秒とした。

表 4-2 段階的に使用するモデル

MG 総数	バランス型 MG の番号	電力需要型 MG の番号
3	1,2	21
12	1,2,3,4,5,6,7,8	21,22,23,24
21	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	21,22,23,24,25,26,27
30	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14 ,15,16,17,18,19,20	21,22,23,24,25,26,27,28,29,30

4.6 試算結果

各試算ケースの MG の運用コストと計算時間等を表 4-3 と表 4-4 に示す。なお、MILP ソルバーが制限時間内に実行可能解を発見できなかった場合は「解なし」と記載している。まず、MG 総数が 3 の場合に着目する。バッテリー内蔵型 EV の運用計画では、MILP ソルバーで導出された最適解（MG の運用コスト：56,541[円]）と同等の結果を達成している。さらに最適解の発見に要する計算時間は 1[sec]であり、MILP ソルバーの 10[sec]よりも短縮されている。一方、BS を活用した運用計画では、MILP ソルバーが制限時間内に発見した実行可能解（運用コスト：57,189[円]）と同等の結果を達成している。さらに最良解の発見に要する計算時間は 3[sec]であり、MILP ソルバーの 620[sec]と比較して大幅に短縮されている。次に、MG 総数が増加した場合に着目する。MILP ソルバーでは、組み合わせ数の増加に伴い制限時間内に実行可能解を発見できなくなる。一方で、提案手法では計算時間は増加するものの、比較的許容可能な範囲内で運用計画を作成できていることが示されている。

表 4-3 Case1 と Case2

MG 総数	Case	MG の運用 コスト[円]	最良解の 発見時間[sec]	計算時間 [sec]	双対 ギャップ[%]
3	Case1	56,541	10	13	0
	Case2	56,541	1	18	
12	Case1	231,089	6000	7200	2.5
	Case2	230,880	44	116	
21	Case1	解なし	解なし	解なし	解なし
	Case2	435,389	61	200	
30	Case1	解なし	解なし	解なし	解なし
	Case2	588,992	341	585	

表 4-4 Case3 と Case4

MG 総数	Case	MG の運用 コスト[円]	最良解の 発見時間[sec]	計算時間 [sec]	双対 ギャップ[%]
3	Case3	57,189	620	7200	5.3
	Case4	57,189	3	29	
12	Case3	解なし	解なし	解なし	解なし
	Case4	232,991	75	170	
21	Case3	解なし	解なし	解なし	解なし
	Case4	435,261	252	461	
30	Case3	解なし	解なし	解なし	解なし
	Case4	589,332	698	1000	

MG 総数が 30 の場合に着目する。Case2 と Case4 における各反復での最良解の MG の運用コストを図 4-12 に示す。実規模レベルの問題において、MG の運用コストを削減するために EV (Case2) および BP (Case4) の運用計画が反復計算を通じて継続的に更新されていることが分かる。Case2 におけるある EV の走行および充放電の概略図を図 4-13 に示す。同図では EV の走行経路を矢印で表しており、矢印の始点には出発時刻、矢印の終点には到着時刻を記載している。また、MG において EV が充電を行っている場合は黄色、放電を行っている場合は緑でハイライトしている。カーシェアの予約対応に便乗して、住宅街に設置されたバランス型 MG の PV 余剰を街中や鉄道駅周辺の電力需要型 MG に空間的シフトしている様子が見て取れる。次に Case4 におけるある BP の運用計画に着目する。便宜上、この BP を BP-a と呼ぶ。BP-a の移動には 2 台の EV が関与しており、それぞれ EV-a および EV-b と呼ぶ。EV-a および EV-b の移動ならびに BP-a の充放電の概略図を図 4-14 に示す。図 4-14 の表現ルールは図 4-13 と同様であるが、EV の走行経路については、BP-a を装填している場合は実線、その他の BP を装填している場合は点線で表現している。EV-a は 2 回目の予約対応において、あらかじめ MG8 の PV 余剰で充電しておいた BP-a を装填し、MG8 から MG23 へ PV 余剰を空間的シフトしている。さらに、EV-a は 3 回目の予約対応を実施した後、直ちに 4 回目の予約対応を行うが、その際に装填している BP を交換することで、MG17 の PV 余剰で BP-a を再充電している。その後 MG17 に到着する EV-b が BP-a を装填して MG29 へ移動することで MG29 の夜間需要に MG17 の PV 余剰を活用することとなる。

これらの結果から、提案手法は小規模モデルにおいて MILP ソルバーより短時間で最適解を導出することが可能であり、さらに MILP ソルバーでは対応困難な実規模レベルの運用計画を実現できることが数値試算を通じて示された。

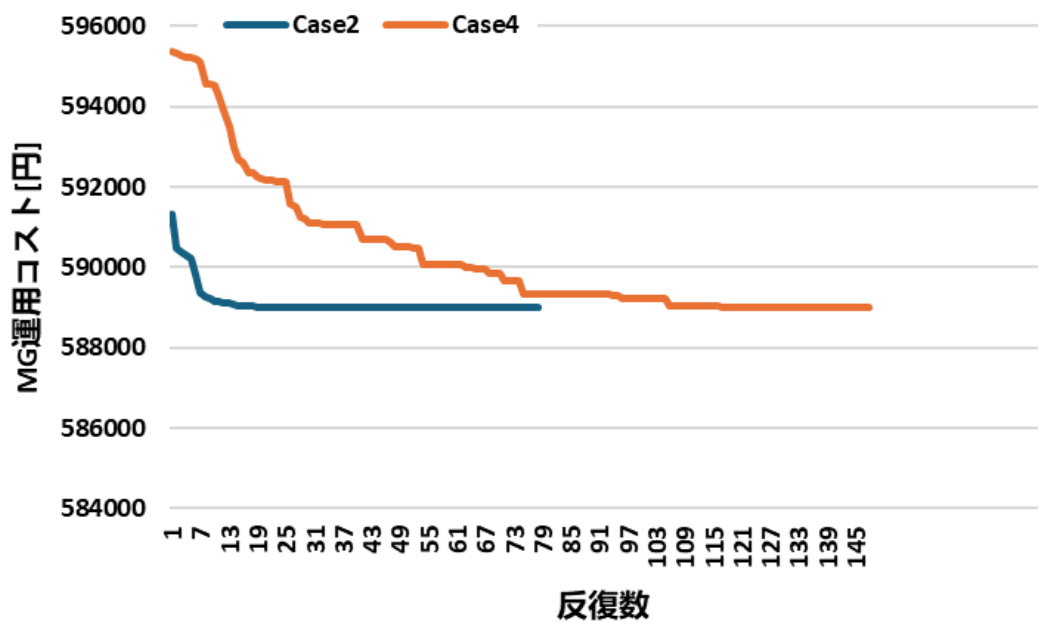


図 4-12 Case2 と Case4 の各反復における最良解の MG の運用コスト

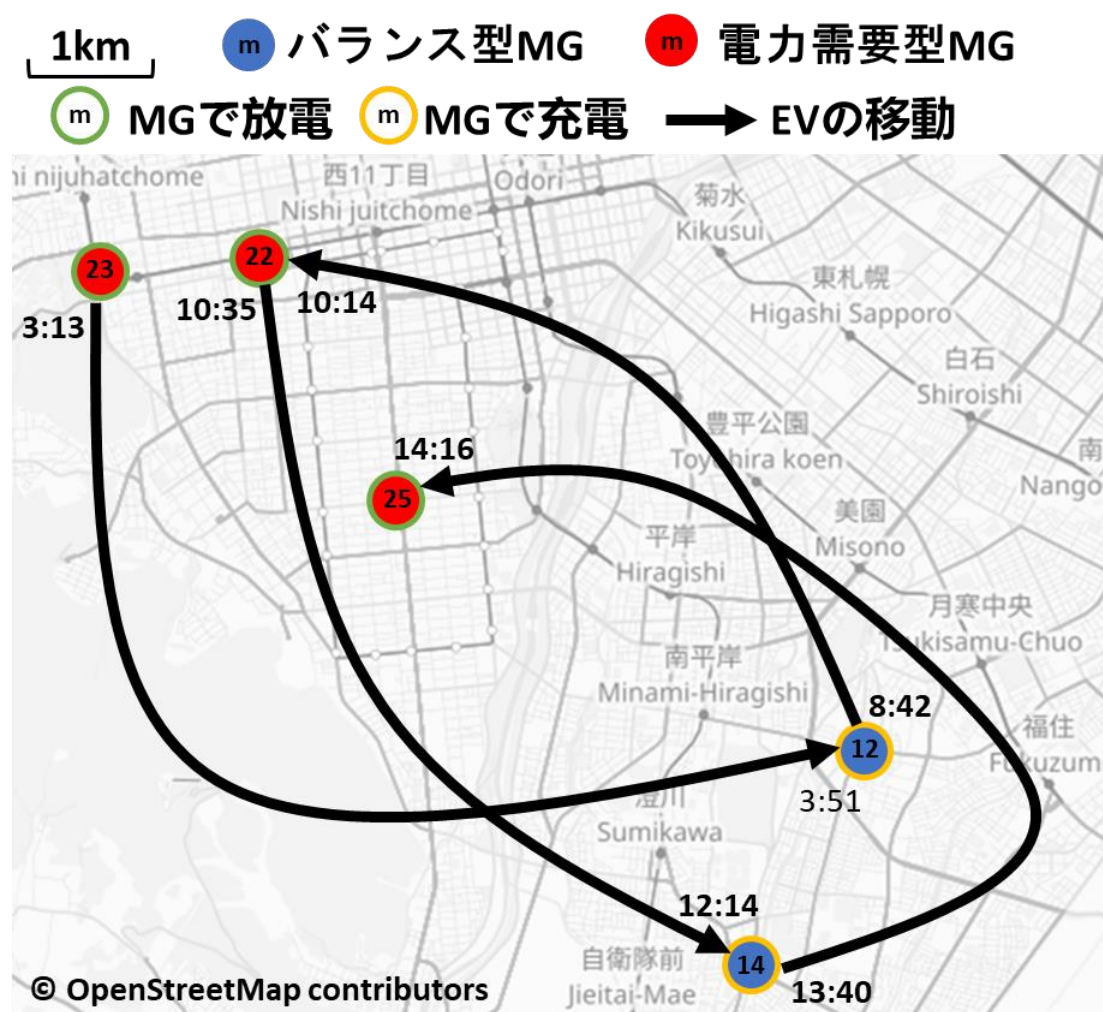


図 4-13 Case2 におけるある EV の走行と充放電の概略図

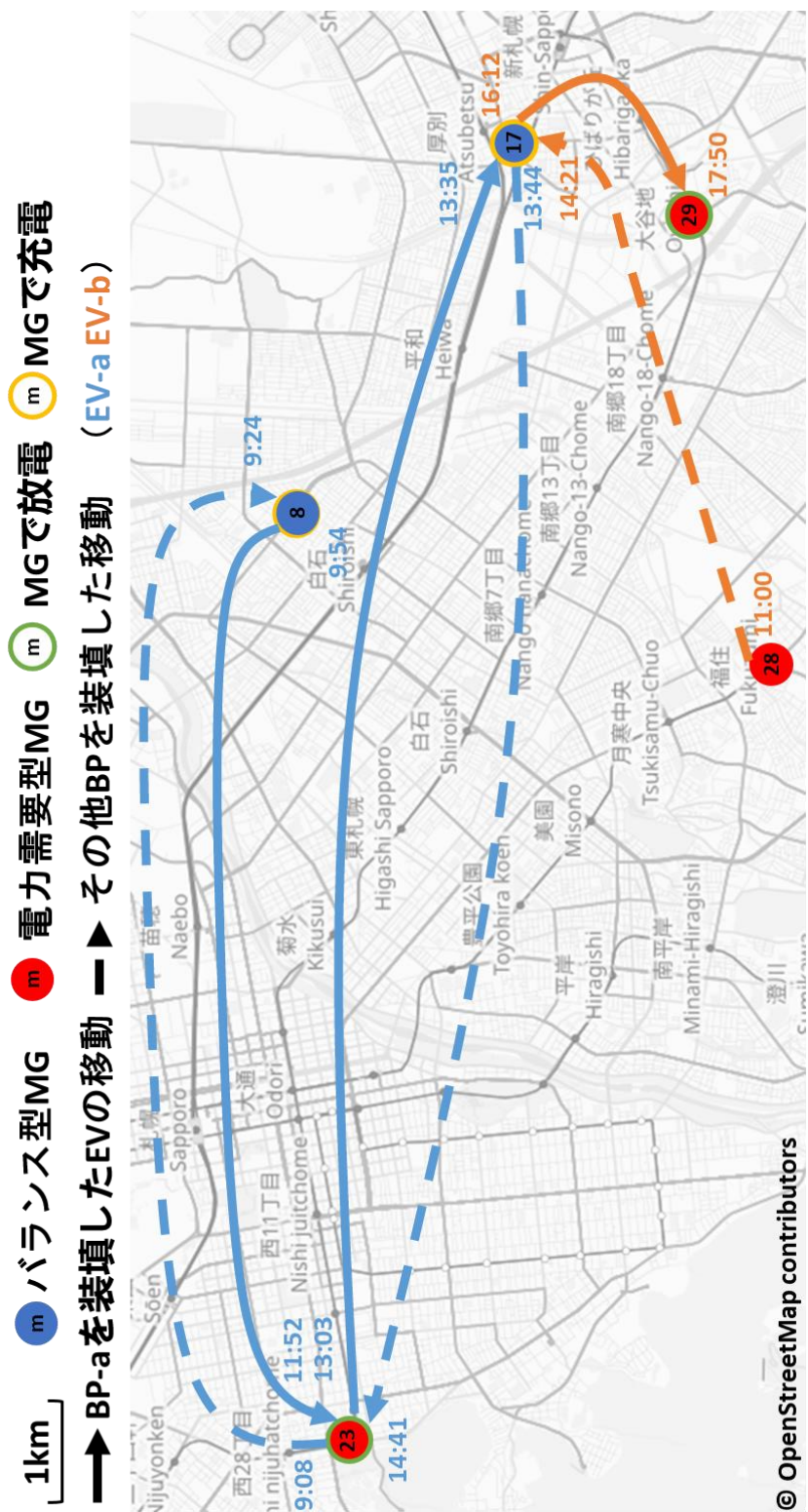


図 4-14 Case4 におけるある BP の移動と充放電の概略図

第5章 ライドシェア型 MaaS と MG の統合

5.1 ライドシェアに関する先行研究と本研究の目的

ライドシェアは大まかに相乗りタイプと乗合タイプに分けることができる[56]。両者の主な違いを表 5-1 に示す。相乗りタイプは任意の個人同士が相互の都合を交渉・調整の上に同乗する形式である。2024 年 4 月にタクシー不足の解消を目的として、東京・横浜・名古屋・京都の大都市圏で規制が緩和され、相乗りタイプのライドシェアが地域限定で解禁された[57]。さらなる普及のために、タクシー事業者以外のものがライドシェア事業を行うことを位置づける法律制度に関する議論が進められているところである。一方、乗合タイプは不特定多数の乗客を相手に営む事業が中心となり乗客を同乗させる形式である。特にオンデマンドの乗合交通サービスは地域交通の効率化の観点から注目されており、コミュニティバスや乗合タクシーなど様々な名称のもとで様々な地域で運営されている[58]。本研究では、すでに多くの地域で実運用の段階にある乗合タイプのライドシェアとして運用されている EV 群を移動型蓄電池として MG 群のエネルギーマネジメントに活用することを検討する。

表 5-1 相乗りタイプと乗合タイプの違い

	乗合タイプ	相乗りタイプ
車両	商用車 (バン、シャトルバス)	自家用車
運転手	サービス提供者が 業務として行う	利用者が運転手となる 場合もあり
費用	定額または低価格	運転手と乗客で費用分担

ライドシェアの運用計画に関連した研究は数多く行われている。例えば、Yu ら[59]はサービス品質の観点から相乗りタイプを利用するにあたって生じる乗客の待ち時間を削減するための手法を提案している。Zhu ら[60]は乗合タイプの走行消費を削減する手法を提案し、自家用車と比較して走行消費を 24%~39%削減する効果があることを示している。山本ら[61]は貨物輸送と同時にライドシェアを提供する貨客混載車両の運用計画手法を提案し、従来の貨客分離型の運用と比較して輸送コストを削減する効果があることを示している。このようにライドシェアの運用計画は、サービス品質や輸送コストの改善に関連する運用計画の議論が主軸であり、エネルギー設備として活用することを議論する事例は少ない。

そこで本研究では、乗合タイプのライドシェア（以下単にライドシェアと呼ぶ）を想定した E²MS を提案する。提案手法はライドシェアの移動需要と MG 群の電力需要の双方を考慮して、自動運転技術を搭載した EV をエネルギー供給の効率化の手段として MG 群のエネルギーマネジメントで活用することを目的としている。ライドシェアの乗客の輸送に加えて MG 群のエネルギーの時間的・空間的シフトを行うための走行経路も含めて計画することで、MaaS で運用

されているライドシェアを移動型蓄電池として活用する経済的効果を明らかにする。

5.2 想定するモデル

5.2.1 MG のエネルギーフロー

本研究では、日立北大ラボが北海道岩見沢市で実施した自立型ナノグリッドを参考に、複数の MG が近隣エリアに分散して導入されている状況を想定している。各 MG には図 5-1 のように PV が設置されており、系統からの購入電力と合わせて MG 内の電力需要へ供給する。各 MG で余剰電力が発生した場合は系統への売電も可能である。また、各 MG には EV 用の充電器を備えている駐車場が併設されており、MaaS の拠点として機能しつつ、EV を蓄電池としても利用することで MG へのエネルギー供給の効率化をはかる状況を想定している。

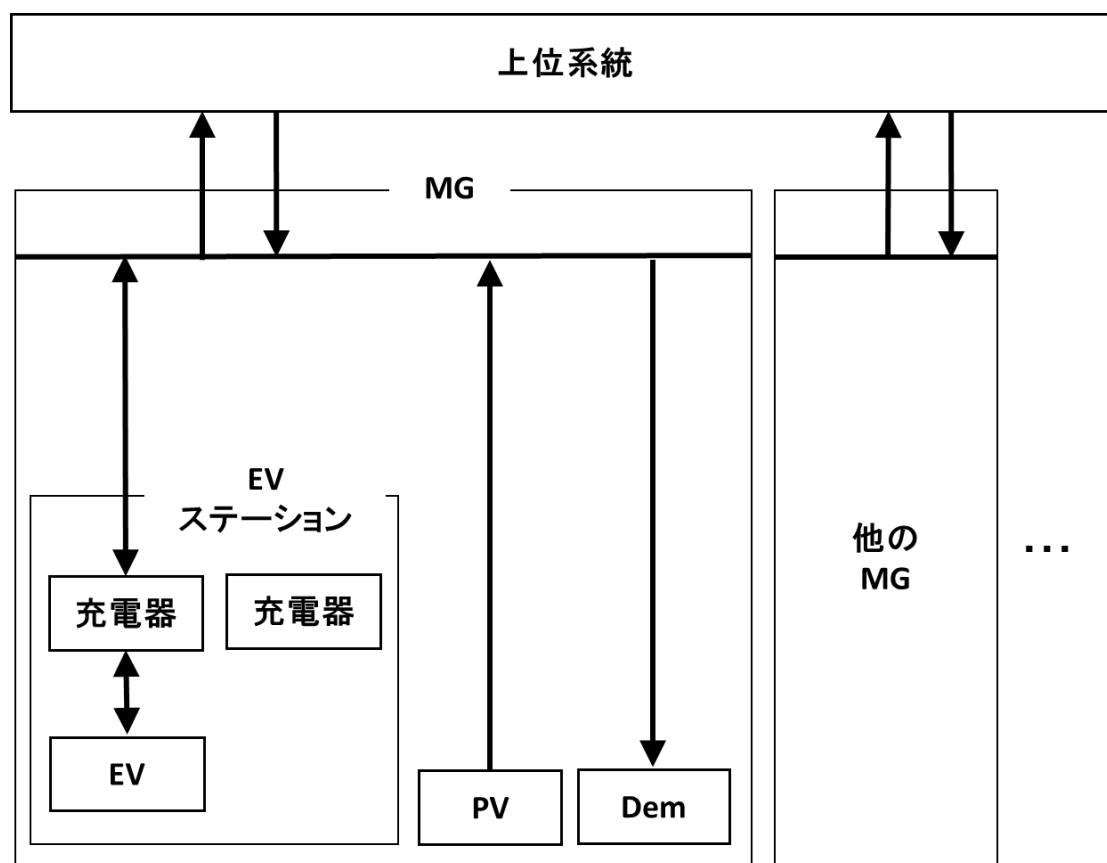


図 5-1 MG のエネルギーフロー

5.2.2 ライドシェアの運用

本研究では北海道岩見沢市で運用されているオンデマンド乗合タクシーを参考に、次のようなライドシェアサービスを想定する。

- 定期便運航を前提とし、往路（Pickup Service）では乗客宅まで迎えに行き、乗客を順次乗車

させながらあらかじめ決められた目的地である MG 内の駐車場へ、決められた到着時刻までに送る。復路 (Dropoff Service) ではあらかじめ決められた時刻・出発地 (MG 内の駐車場) において乗客を乗車させ、乗客宅まで順次送る。

- 乗客は前日までに電話等で乗車する定期便を伝える。ライドシェアを運営するオペレータは、乗客からの連絡を受けたその場で配車計画を立て、往路の場合は乗車させる時刻を X 時 XX 分から Y 時 YY 分までといった幅を持った時間窓 (Time Window, 以下 TW) として返答する。復路の場合も同様に、乗客宅へ到着する時刻を X 時 XX 分までといった TW として返答する。
- 運用当日は TW 内の時間に乗客の送迎を行う。

5.3 ライドシェアを想定した E²MS

前述の通り、本研究で想定するライドシェアサービスは乗客からのリクエストに対して迅速に配車計画を作成し、その場で TW を返答する状況を想定している。この配車計画は、他の乗客に回答済みの TW と整合をとり、かつ効率的なルートを決める必要があるが、このような VRP は NP 困難であり、厳密解を迅速に求めることは難しい。さらに本研究では、VRP と MG 群に対するエネルギー供給計画とを組み合わせた E²MS の開発を目指しており、乗客からのリクエスト対応に加え、エネルギーマネジメントのための移動も考慮する必要があることから、一般的な VRP よりも大規模で複雑な組合せ問題となり、厳密解の工学的時間での求解はますます困難である。そこで本研究では図 5-2 のように、乗客からのリクエストの受付時に短時間で VRP の近似解を求める最適化パート (以下、OP1) と、ライドシェアの利用予約受付終了後に OP1 の結果を制約条件としつつ EV を移動型蓄電池として活用することを含めて MG 群のエネルギー供給を最適化するパート (以下、OP2) の二段階で対応する手法を提案する。

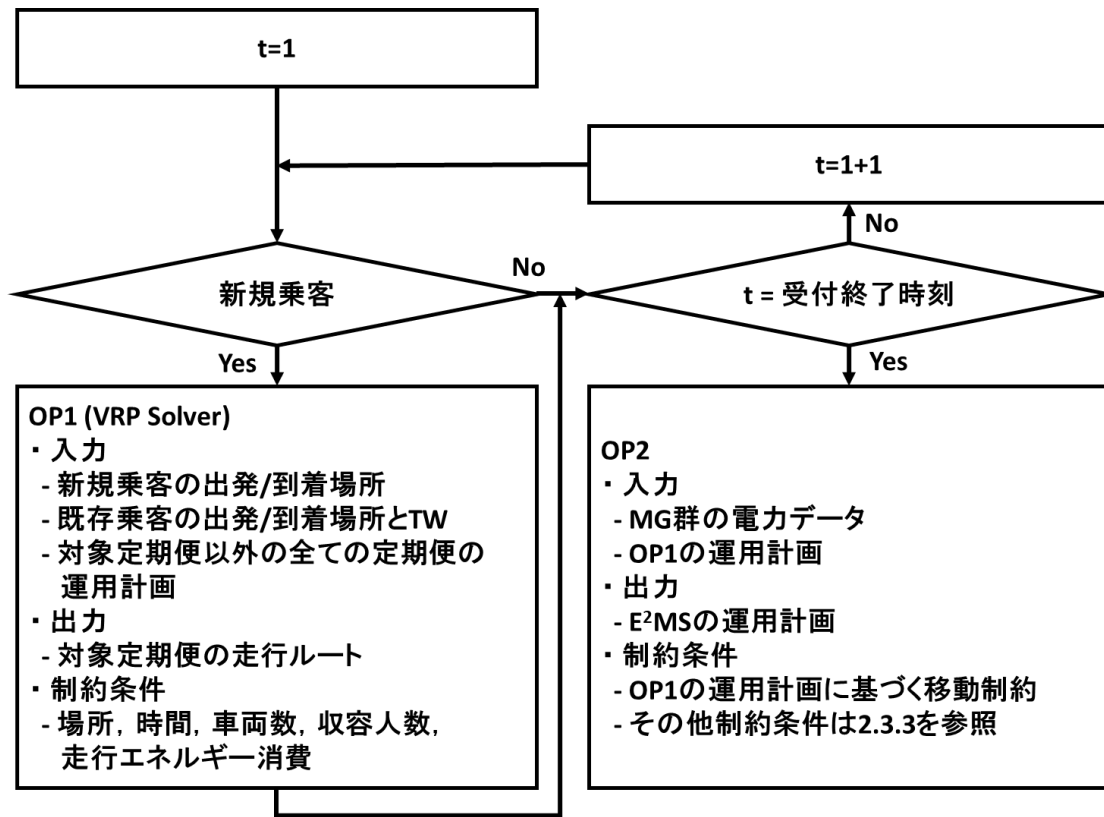


図 5-2 ライドシェアを想定した E²MS のフローチャート

5.3.1 最適化パート 1 (OP1)

Ropke ら[49]によって提案された適応的巨近傍探索 (Adaptive Large Neighborhood Search, 以下 ALNS) は, 貨客混載のライドシェア[63], カーシェア車両の再配置[64], BS 型シェアモビリティ[44]など, 様々な VRP を短時間で効率的に近似解を求解可能な手法である。本研究でもこの ALNS を OP1 の解法として用いる。ALNS は, 車両走行ルートに割当て済みの乗客を割当てから外す破壊操作と, その乗客を再度別の車両に割当て直す修復操作とを反復することで, 解空間を探索する手法である。また, 破壊・修復操作の実装方法にも幾つかのバリエーションがあり, 各操作による解の改善度合いを次回以降の反復での操作の選択確率に反映することで, 効率的に探索を行う。本研究では破壊操作として Random 破壊の 1 種類を, 修復操作として Random 修復, Greedy 修復, Regret 修復の 3 種類を実装している。OP1 の具体的な目的関数については後述する。初期解は貪欲法を用いて生成する。ただし, 本研究はライドシェアで運用される EV を対象としていることから, 修復操作や初期解の生成に際しては次の制約条件を満たすものを考慮する。

【往路便に関する制約】

$$T_i^{start} \leq T_i^{pick} \leq T_i^{end}, i \in U \quad (5.1)$$

$$T_s^{arr} - T_{a.m} \leq T_i^{drop} \leq T_s^{arr}, i \in U \quad (5.2)$$

$$T_i^{min} \leq T_s^{arr} - T_i^{pick} \leq T^{max}, i \in U \quad (5.3)$$

【復路便に関する制約】

$$T_i^{start} \leq T_i^{drop} \leq T_i^{end}, i \in U \quad (5.4)$$

$$T_s^{dep} \leq T_i^{pick} \leq T_s^{dep} + T^{d.m}, i \in U \quad (5.5)$$

$$T_i^{min} \leq T_i^{drop} - T_s^{dep} \leq T^{max}, i \in U \quad (5.6)$$

【往路便と復路便の両方に共通する制約】

$$N_i \leq V, i \in U \quad (5.7)$$

$$S^{dep} = S^{arr} \quad (5.8)$$

$$L_{v,n} \leq L^{cap}, n \in U' \quad (5.9)$$

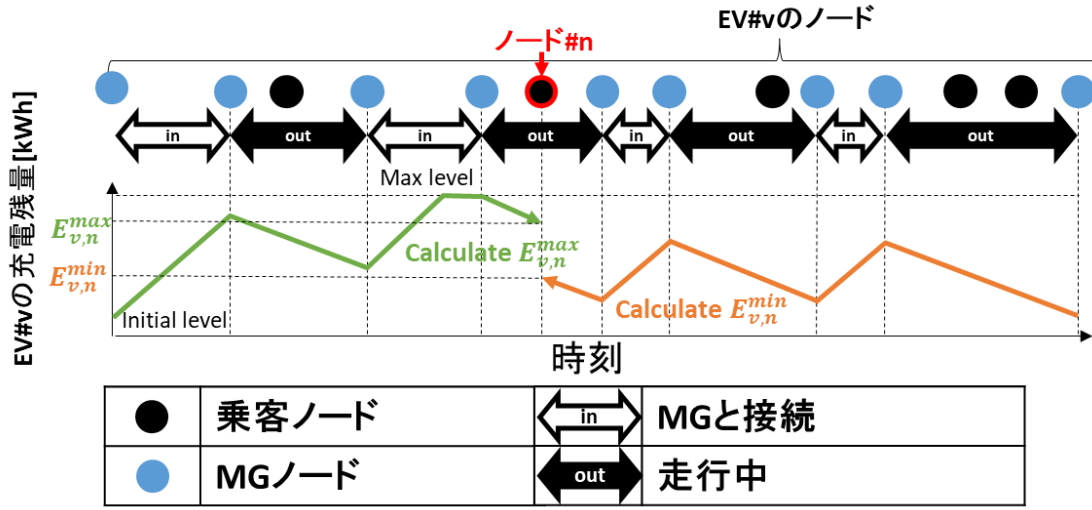
$$E_{n,n'}^{tra} = \frac{D_{n,n'}}{\eta^{tra}}, n \in U', n' \in U' \quad (5.10)$$

$$T_{n,n'}^{tra} = \frac{D_{n,n'}}{R}, n \in U', n' \in U' \quad (5.11)$$

$$E_{v,n}^{min} \leq E_{v,n}^{max}, n \in U' \quad (5.12)$$

ここで、 U は乗客の集合、 T_i^{start} 、 T_i^{end} は乗客# i に返答した TW の始まりと終わりの時刻、 T_i^{pick} (T_i^{drop}) は乗客# i の乗車時刻 (下車時刻) (OP1 の求解プログラムが内部的に持っているものであり、乗客には通知しない)、 T_s^{arr} 、 $T^{a.m}$ は運行タイムテーブルに記載している往路便# s の到着時刻とそのマージン、 T_i^{min} は乗客# i の自宅と目的地間を最短ルートで移動する際にかかる最短乗車時間、 T^{max} は許容できる乗客の最大待ち時間、 T_s^{dep} 、 $T^{d.m}$ は復路便# s の出発時刻とそのマージン、 N_i は乗客# i を乗車させるために必要となる EV の台数、 V は EV の総数、 S^{dep} と S^{arr} は定期便の出発場所と到着場所の集合、 U' は全乗客の乗降地点の集合と S^{dep} 、 S^{arr} との和集合 (U' に含まれている地点をノードと呼ぶ) であり、 $L_{v,n}$ はノード# n における EV# v の乗車人数、 L^{cap} は EV の最大乗客数、 $E_{n,n'}^{tra}$ はノード# n から# n' へ移動に必要な消費電力量[kWh]、 $D_{n,n'}$ はノード# n と# n' の移動距離[km]、 η^{tra} は EV の電費[km/kWh]、 $T_{n,n'}^{tra}$ はノード# n から# n' への移動時間[min]、 R は EV の平均走行速度[km/min]、 $E_{v,n}^{min}$ は EV# v がノード# n 以降の運行に必要とする最低エネルギー量、 $E_{v,n}^{max}$ は EV# v がノード# n の時点で保有できる最大エネルギー量である。

$E_{v,n}^{min}$ と $E_{v,n}^{max}$ のイメージを図 5-3 に示す。EV# v の計画の最終時刻 (一日の最終時間断面) から、現時点で確定している運行を含めてノード# n まで遡って求めることで最低限必要な充電量として $E_{v,n}^{min}$ を求める。反対に $E_{v,n}^{max}$ は、EV# v について計画の初期時刻から、現時点で確定している運行を含めてノード# n まで、MG に滞在しており充電可能な時間帯では最大速度で充電した場合の充電量として求める。

図 5-3 $E_{v,n}^{min}$ と $E_{v,n}^{max}$ の計算のイメージ

(5.1)式は TW に準じた往路便の乗車時刻に関する制約, (5.2)式は往路便の到着時刻に関する制約, (5.3)式は往路便の乗客の待ち時間に関する制約, (5.4)式は TW に準じた復路便の下車時刻に関する制約, (5.5)式は復路便の出発時刻に関する制約, (5.6)式は復路便の乗客の待ち時間に関する制約, (5.7)式は運用する EV の台数に関する制約, (5.8)式は定期便の出発場所と到着場所に関する制約, (5.9)式は EV の乗車人数に関する制約, (5.10)式は移動に伴うエネルギー消費に関する制約, (5.11)式は移動にかかる時間に関する制約, (5.12)式は EV の電欠に関する制約である。

図 5-2 のように, 新たな乗客*i*からリクエストがある度に, 対象定期便における全乗客の TW と地理的な条件に加えて, 他の定期便との整合性を図る目的から対象定期便以外の全定期便における全 EV の運用計画を OP1 における制約条件とした上で乗客*i*の乗車・下車時刻を決定する。往路では決定された乗車時刻を基に(5.13)式と(5.14)式を用いて新たな乗客*i*の TW を作成し, 当該乗客に返答する。復路では下車時刻を基に同様にして TW を作成し, 当該乗客に返答する。

$$T_i^{start} = T_i^{pick} - \frac{T^{tw}}{2}, i \in U \quad (5.13)$$

$$T_i^{end} = T_i^{pick} + \frac{T^{tw}}{2}, i \in U \quad (5.14)$$

ここで, T^{tw} は TW の時間幅である。このように, TW として回答することで, その後の乗車リクエストに対しても TW の範囲内で乗車・下車時刻を調整することが可能となり, 不特定多数の乗客に対応できるようになることが期待できる。

5.3.2 最適化パート 2 (OP2)

2.3 節において, カーシェア型 EV 群のマネジメントと MG 群のエネルギーマネジメントとを統合可能な配車・充放電計画手法を提案した。研究で提案する OP2 は, 2.3 節の計画手法を基本として, 次の通り修正した最適化問題である。まず, 目的関数は 2.3 節と同様, (5.15)式に示す全 MG の運用コスト F^c を最小化とする。

$$F^C = \sum_t^T \sum_m^M (C_t^{buy} \cdot P_{m,t}^{buy} - C_t^{sell} \cdot P_{m,t}^{sell}) \cdot \Delta T^{op2} \quad (5.15)$$

ここで、 t は時刻、 T は最終時刻、 m と M はそれぞれ MG の番号と総数、 ΔT^{op2} は OP2 の時間幅、 C_t^{buy} は系統からの購入電力価格[円/kWh]、 $P_{m,t}^{buy}$ は MG # m の系統からの購入電力[kW]、 C_t^{sell} は系統への売電価格[円/kWh]、 $P_{m,t}^{sell}$ は MG # m の系統からの売買電力[kW]である。

この F^C の最小化問題では、定期便をどの EV に割当ててを決定する。この割当ては、図 5-2 にある定期便の運行に関する移動制約を満たすものであり、EV の割当ての選択肢は OP1 で作成した各 EV の走行ルートを参照して作成される。例えば、図 5-4 のように OP1 で作成した一つの往路ルート(図中の灰色の線)に対して、全ての MG から最初の乗客までの距離を加味した上で、全ての MG から走行を開始する選択肢(図中の赤、橙、緑色の線)を全ての EV に与える。また、復路の場合は全ての MG に到着する選択肢を全ての EV に与えることで、移動制約を満たす範囲内でエネルギーマネジメントの観点から EV の割当てや定期便の運行に関する走行の開始場所や到着場所を OP1 から変更することが可能である。OP1 で計画した実行可能な選択肢も含まれていることから OP2 は必ず実行可能な最適化問題である。このことから、定期便の運行に関する移動制約は(5.16)式のように 2.3 節から修正されている。

$$\sum_v^V \sum_m^M U_{r,m,v}^{assign} = 1 \quad (5.16)$$

ここで、 V は EV の総数、 $U_{r,m,v}^{assign}$ は OP1 における走行ルート# r の MG # m に対応した走行ルートに EV # v を割当てての場合に 1 となるバイナリ変数である。

このようにして、OP2 では OP1 の運行スケジュールを満たす EV の移動と MG における EV の充放電に基づく MG の売電力 $P_{m,t}^{sell}$ と買電力 $P_{m,t}^{buy}$ をエネルギーマネジメントの観点から決定することで、(5.15)式を最小化する。具体的な定式化は 2.3 節を参照されたい。

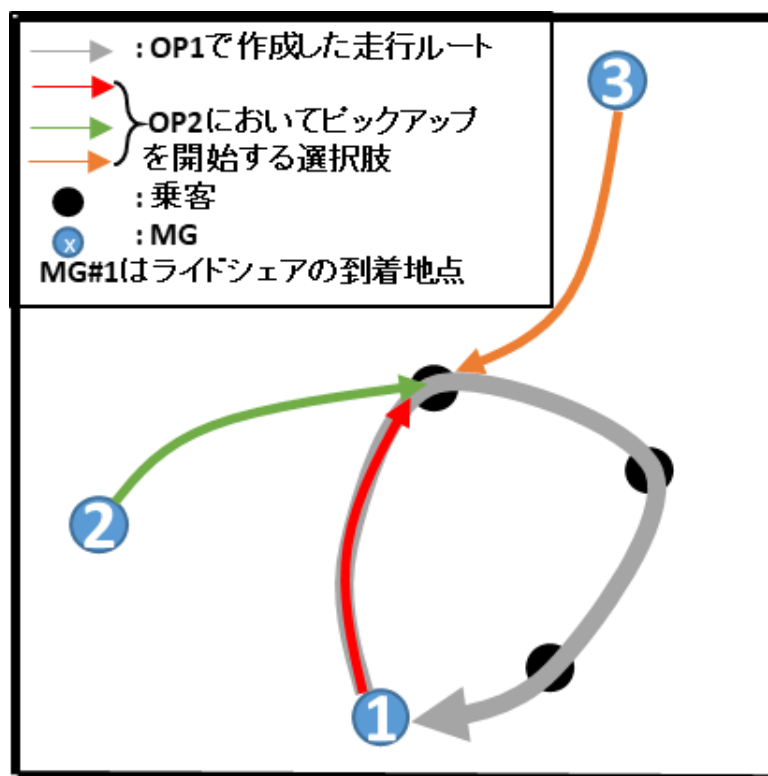


図 5-4 往路の移動制約の作成

5.4 数値試算

5.4.1 試算条件

本研究では、3つのMGを想定し、それぞれMG1：電力需要よりもPV発電量が少ない繁華街地域、MG2：電力需要と同程度のPV発電量となるような住宅街地域、MG3：電力需要よりもPV発電量が多い閑散地域とした。電力需要・PVデータはNEDOが群馬県太田市で実施した実証事業[37]の計測値に基づき作成した。また、MGの配置は北海道岩見沢市周辺の地理的条件を、MGの需要規模は日立北大ラボが開発しているナノグリッド[45]と北海道岩見沢市の人口分布[65]に基づき設定した。ライドシェアの往路便の目的地かつ復路便の出発地は繁華街地域のMG1とした。往路便の到着時刻は9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 復路便の出発時刻は13:00, 14:00, 15:00, 16:00とした。乗客宅の座標は最低でもMG1から2km以上離れていることを条件に、MG周辺でランダムに生成した。VRP, EV, MGに関するパラメータを表5-2に示す。EVの仕様は日産のe-NV200[66]を、EV充電器の仕様はChademo Association[39]を参考にした。買電価格は北海道電力の従量電灯C[55]、売電価格はMETIが調査を行った小売り電気事業者の買取価格の中央値[48]を参考にした。OP1におけるALNSの反復回数は3,000回、計算時間幅は1分とした。OP2における混合整数線形計画問題は分枝限定法による求解を実時間で30分間実施し、その後解の精度を実行可能解に基づいて改善するSolution Polishing[67]をさらに30分行うことで解いた。計算時

間幅は 5 分とした。使用した PC の CPU は Intel Xeon Gold 6250®, メモリは 64[GB]である。

表 5-2 VRP, EV, MG に関するパラメータ

	変数名	値
往路到着時刻のマージン[min]	$T^{a,m}$	20
復路出発時刻のマージン[min]	$T^{d,m}$	0
乗客の最大待ち時間[min]	T^{max}	30
TW の時間幅[min]	T^{tw}	20
EV の車両数[台]	V	4
EV の平均走行速度[km/min]	R	0.58
EV の電費[km/kWh]	η^{tra}	7.5
OP1 における定期便の 出発場所	S^{dep}	MG1
OP1 における定期便の 到着場所	S^{arr}	MG1
MG の購入電力価格[円/kWh]	C_t^{buy}	40
MG の売電電力価格[円/kWh]	C_t^{sell}	10
EV の最大収容人数[人]	L^{cap}	7
EV の最大容量[kWh]		40
EV 充電器の定格[kW]		25
EV の充放電効率 (片道分)		0.94
EV の初期エネルギー量[kWh]		5
EV の初期位置		MG1
MG1 と MG2 の距離[km]		5
MG1 と MG3 の距離[km]		10
MG2 と MG3 の距離[km]		10

次の 3 ケースについて試算し、その結果を比較した。

- Case1

OP1 では(5.17)式のように、乗客の乗車時間の総和 F^T として目的関数を定義し、 F^T 最小化するように対象定期便の全乗客の乗車 T_i^{pick} ・下車時刻 T_i^{drop} を決定し、EV の配車計画を立てる。

$$F^T = \sum_i^I (T_i^{drop} - T_i^{pick}), \quad i \in U \quad (5.17)$$

ここで、 I は乗客の総数である。また、OP2 では MaaS と MG 群の EMS が統合されていない状況を想定し、EV は MG 群のエネルギー供給の効率化のために活用しない。すなわちライドシェアの運行に必要なエネルギー量を最小コストで充電する運用を行う。

- Case2

OP1 の目的関数は Case1 と同様に(5.17)式を用いる。一方、OP2 では MaaS と MG 群の EMS が統合している状況を想定し、MG 群のエネルギー供給に EV を活用する。すなわち(5.15)式

の下で MG 群の運用コストを最小化するように EV を運用する。

- Case3

OP1 では(5.18)式のように、エネルギー供給の効率化を目的とする評価値 F^E を最小化するように対象定期便の全乗客の乗車 T_i^{pick} ・下車時刻 T_i^{drop} を決定し、EV の配車計画を立てる。具体的には EV の走行消費電力量（第 1 項）ならびに PV 余剰をできるだけ EV に充電出来るよう、余剰が発生する時間帯にできるだけ空き EV を確保する（第 2 項）ものとした。

$$F^E = \sum_v (E_v^{con} + \sum_{t=t_v^{dep}}^{t_v^{grr}} \frac{P_t^{sur} \cdot \Delta T^{op1}}{V}) \quad (5.18)$$

ここで、 V は EV の台数、 E_v^{con} は OP1 における EV# v の走行消費量[kWh]、 t_v^{dep} は EV# v の出発時刻、 t_v^{grr} は EV# v の到着時刻、 P_t^{sur} は各 MG の PV 余剰で、PV 出力から需要（EV による充電を除く）を差し引いたもの（ただし負値は 0 に丸める）を合算した値[kW]、 ΔT^{op1} は OP1 の計算幅である。一方、OP2 では Case2 と同様に MG 群の運用コスト最小化 ((5.15)式)を目的関数とする。

各ケースの比較には、次の評価指標を用いる。

- 走行消費率

EV がどの程度のエネルギー量を走行で消費したかを示す指標として(5.19)式で定義する走行消費率 $\eta^{tra}[\%]$ を用いる。

$$\eta^{tra} = \frac{E^{t-c}}{E^{t-s}} \cdot 100 \quad (5.19)$$

ここで、 E^{t-c} は EV 群が乗客輸送とエネルギーマネジメントのための走行で消費するエネルギー量[kWh]、 E^{t-s} は EV 群の蓄電池容量[kWh]である。

- 等価サイクル数

EV が何サイクル分のエネルギー量を MG に供給したかを示す指標として、(5.20)式で等価サイクル数 η^e を用いる。

$$\eta^{tra} = \frac{E^{t-c}}{E^{t-s}} \quad (5.20)$$

ここで、 E^{a-d} は EV 群の累積放電量[kWh]である。

- 移動コスト削減

Case2 と Case3 において目的地までの乗車時間を考慮した移動コストの削減を示す指標として(5.21)式で定義する移動コスト削減 $C^{tra}[\text{円} / \text{min}]$ を用いる。

$$C^{tra} = \frac{C_1 - C_x}{T_x^t} \quad (5.21)$$

ここで、 C_1 と C_x は Case1 と Case# x の MG 群の運用コスト[円]、 T_x^t は Case# x における乗客の乗車時間の総計[min]である。

5.4.2 代表日試算

各定期便の乗客数は、交通量[68]の特性を反映して表 5-3 のように設定した。各 MG の需要カーブ (MG#mDem) と PV カーブ (MG#mPV) を図 5-5 に示す。

表 5-3 各定期便の乗客数

	往路便				復路便			
到着時刻	9	10	11	12				
出発時刻					13	14	15	16
乗客数	15	13	12	11	12	13	12	14

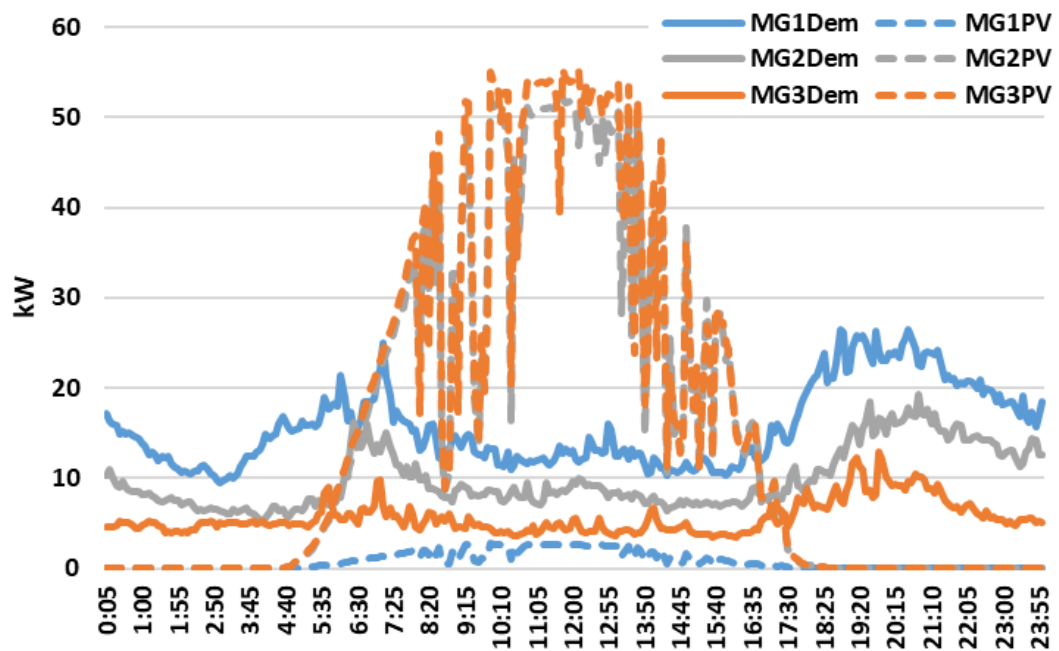


図 5-5 需要カーブと PV カーブ

各 Case の EV 毎の運用計画を図 5-6、図 5-7、図 5-8 に示す。同図では EV が MG に滞在している時間帯を長方形で表し、その中で MG から充電している時間帯を紫色の横線、MG へ放電している時間帯を橙色の横線で示している。また、乗客の乗車を含む移動を実線、それ以外の移動を点線としている。ただし、往路便の到着から他の MG への無人移動、無人移動から定期便の出発を即座に行う場合は滞在として表現していない。また、Case2 と Case3 の 8:00~9:00 付近の各 EV の走行ルートの概略図を図 5-9 と図 5-10 に示す。同図では有人走行は実線、無人走行は点線、黒丸は乗客の位置、番号付きの青丸は MG の位置、各地点における到着時刻を合わせて記載している。各時刻における EV 群の累積充電量と累積放電量を図 5-11 に示す。

図 5-6 と図 5-7 からわかるように、Case1 と Case2 では各定期便において 4 台の EV を並列に運用することで乗客の乗車時間を短くしている。Case1 では EV-a と EV-c は往路便の合間に、EV-b と EV-d は早朝にそれぞれ MG2 と MG3 において PV 余剰を活用することで、定期便の運行に必要なエネルギー量を確保している。Case2 ではライドシェアの運用に加えて、MG1 と MG3 の夜間の電力需要へのエネルギー供給に EV からの放電電力が活用されている。また、夜間の電力需

要量は EV の蓄電池容量よりも十分に大きく停車時間も長いため、EV の放電量やタイミングは自由度がある。その中で、今回の試算ではたまた断続的な放電が計画されたものであり、その放電計画に強い意味はない点に留意されたい。8:00~9:00 付近に注目すると、図 5-9 の通り EV-a と EV-c は MG3、EV-d は MG2 において PV 余剰で充電してから、それぞれの MG 付近の乗客をピックアップして MG1 へ向かっている。往路便の到着後に EV-c は MG1 で放電することで電力を供給し、その他の EV は PV 余剰が発生する MG2 および MG3 へ無人で移動した後に充電している。このように、Case1 では EV は MG の EMS に関与することなく、ライドシェアとしての観点から EV が運用されている。また、Case2 では乗客の乗車時間を短くするための EV の並列運用に協調する形で、無人移動と充放電を実施することで、EV を MG の移動型蓄電池として活用している。

Case3 では図 5-8 の通り、ライドシェアの運用に関わらない空き EV が確保されており、EV-b の 8:00~9:00 における MG3 での充電や EV-a の 13:00~14:00 における MG1 へのエネルギー供給から、定期便が予定されている時間帯においても EV を移動型蓄電池として活用している。8:00~9:00 付近に注目すると、図 5-10 の通り EV-a と EV-d は MG2、EV-c は MG3 において PV 余剰で充電してから、Case2 と同様の乗客に 3 台の EV で対応している。この間、EV-b は乗客を乗せる必要がないことから、MG1 で放電した後、EV-c と入れ替わる形で MG3 へ無人移動して PV 余剰を活用する形で充電している。このように、同じライドシェアの需要であっても、OP1 の目的関数がエネルギー重視型に変わることにより、乗客対応に利用しない EV を確保して移動型蓄電池として活用することで Case2 よりも効率的なエネルギー供給を実現している。同様の理由により、図 5-11 の累積充電量ならびに累積放電量も Case3 の方が増加している。このように、提案手法を用いることでライドシェアの制約を満たした上で、MG の移動型蓄電池としても EV を活用していることがわかる。

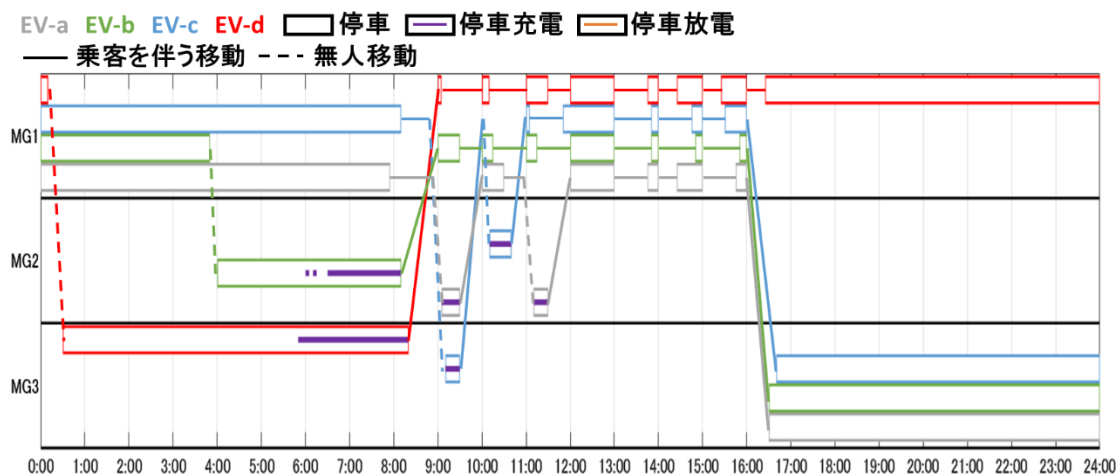


図 5-6 Case1 - EV の運用計画

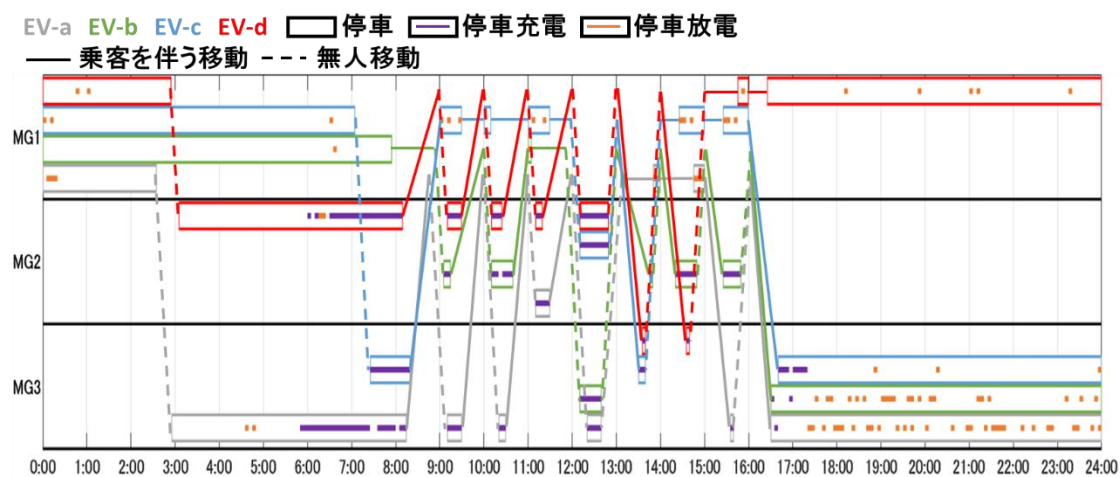


図 5-7 Case2 - EV の運用計画

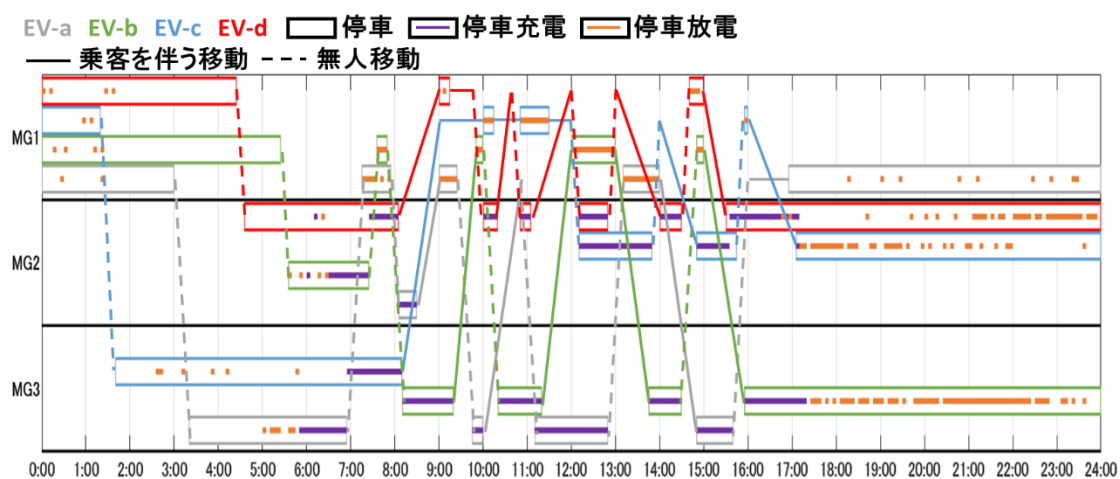


図 5-8 Case3 - EV の運用計画

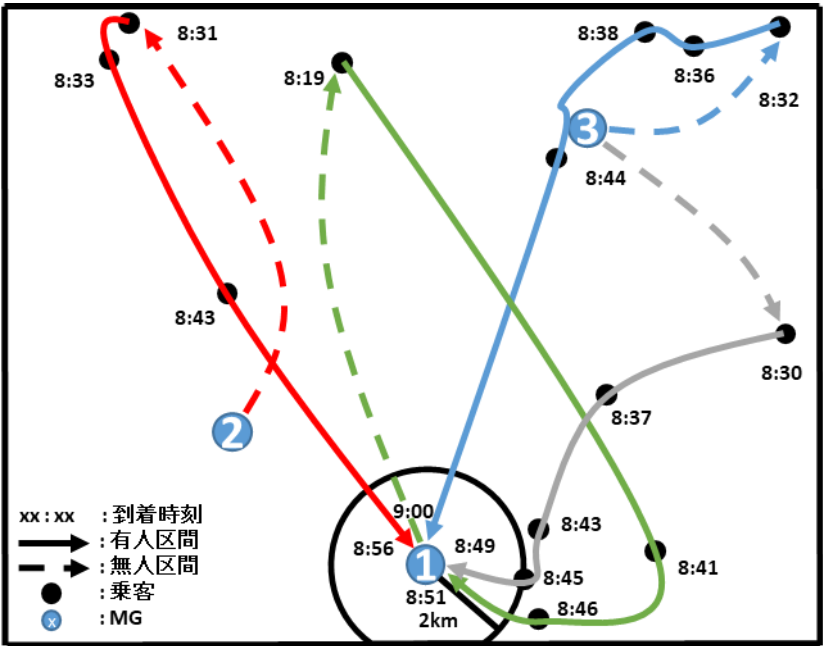


図 5-9 Case2 - 8~9 時付近の移動の概略図

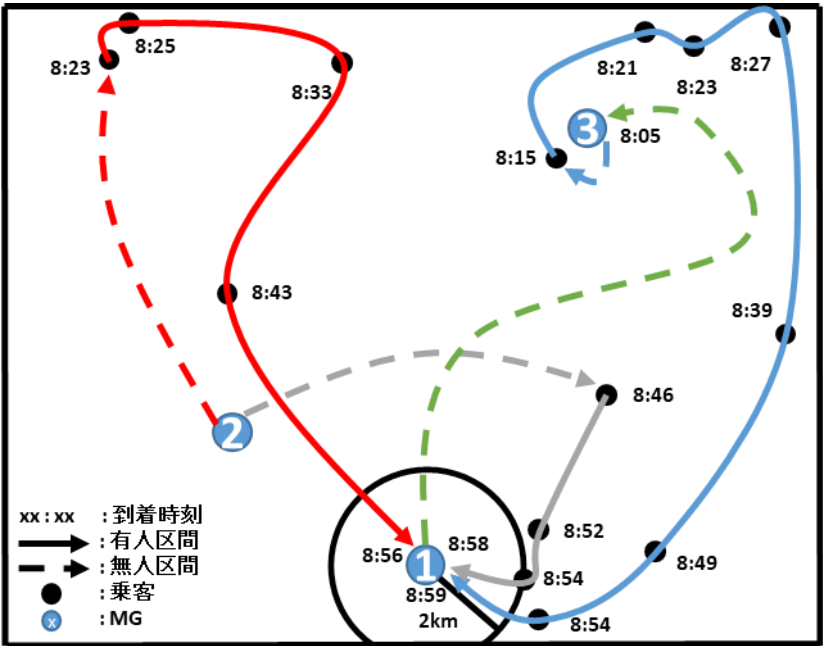


図 5-10 Case3 - 8~9 時付近の移動の概略図

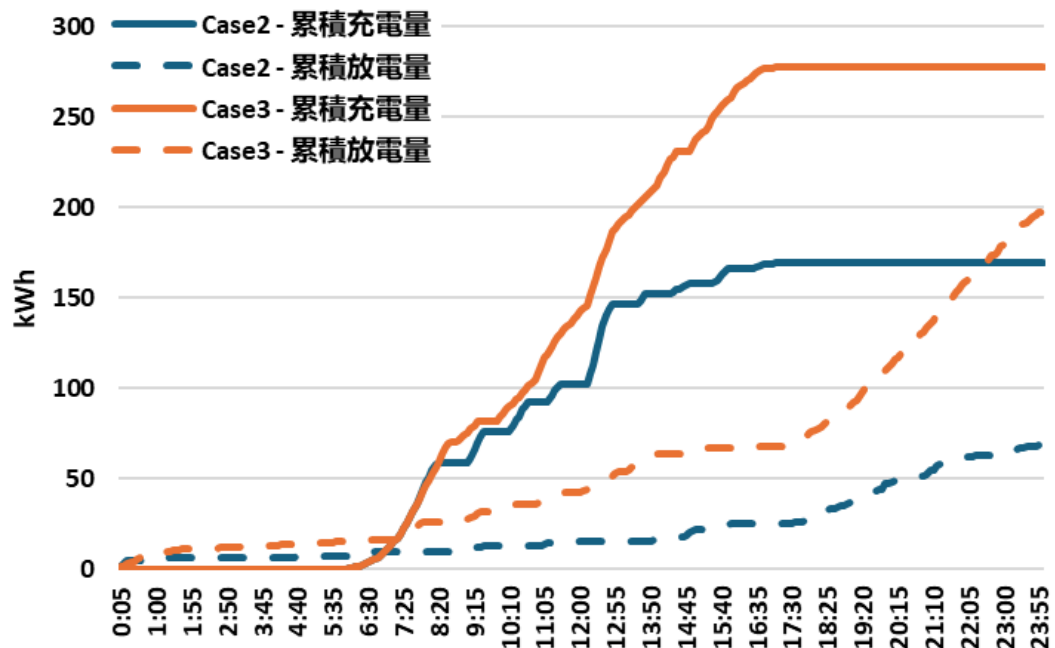


図 5-11 累積充放電量

MG 群の運用コストと Case1～Case3 における乗客の乗車時間の総和 F^T を算出し、それを乗客の総数 I で割ることで得られた平均乗車時間 A^T 等を Table3 に示す。Case1 における EV 群の走行消費率は 56%であり、エネルギー供給の効率化の目的では EV を活用しないことから等価サイクル数は 0 である。Case2 では各定期便の並列走行に加えて、エネルギーマネジメントのための走行を実施していることから走行消費率は 63%に増加している。これに伴い、等価サイクル数が 0.43 のエネルギー設備として活用されるようになり、Case1 から PV 余剰量が 18%削減されている。MG 群へのエネルギー供給の効果が走行消費の増加に伴う損失を上回ることによって MG 群の運用コストは Case1 から 9.6%削減されている。また、目的地までの平均乗車時間は 15.3 分であり、MG 群の運用コスト削減をライドシェアの運用コスト削減に充てる場合は、1.2 円/min の移動コスト削減となる。Case3 では評価値 F^E が最小化されており、乗客輸送のための走行消費が少ない上に、エネルギーマネジメントのための走行が乗客輸送による影響を受けにくいいため、EV 群の走行消費率は 51%に減少している。さらに定期便が予定されている時間帯においても EV を移動型蓄電池として活用しており、エネルギー供給率が Case2 の 3 倍程度の 123%となっている。Case1 から PV 余剰量が 43%削減されており、MG 群の運用コストが 30%削減されている。また、目的地までの平均乗車時間は 21 分であり、MG 群の運用コスト削減をライドシェアの運用コスト削減に充てる場合は、3.8 円/min の移動コスト削減となる。

表 5-4 MG 群運用コストと乗客の平均乗車時間

	Case1	Case2	Case3
MG 運用コスト F^C [円]	17,963	16,224	12,563
平均乗車時間 $A^T = F^T/I$ [min]	15.3	15.3	21.0
評価値 F^E [kWh]	1449	1449	1108
走行消費率 η^{tra} [%]	56	63	51
等価サイクル数 η^e	0	0.43	1.23
移動コスト削減 C^{tra} [円/min]		1.2	3.8

なお、乗客への返答までに要する時間、すなわち OP1 の求解時間は、(5.17)式 F^T を目的関数とした場合は最長で 16.90 秒、最短で 0.02 秒、平均で 7.88 秒、(5.18)式 F^E を目的関数とした場合は最長で 21.49 秒、最短で 0.01 秒、平均で 10.31 秒、であった。

このようにライドシェアの乗客輸送と同時に PV 余剰の時間的・空間的シフトに寄与する MG 群の移動型蓄電池として活用することは、MG 群の運用コストや MaaS の運用コストを削減し得るがわかる。さらに MaaS の運用を緩和することは効率的なエネルギー供給に繋がることがわかる。

5.4.3 シナリオ試算

一年分の乗客・電力需要・PV 出力のシナリオを作成して試算を行った。電力需要・PV 出力は実証事業[37]の一年分の計測値に基づき作成している。乗客数は 5.4.2 の表 5-3 を基準としてランダムに±1 だけ増減させた。乗客の座標は 5.4.2 項と同様に MG 周辺でランダムに生成した。Case1 に対する Case2 と Case3 のコスト削減を図 5-12、移動コスト削減を図 5-13 に示す。図 5-12 と図 5-13 の通り、プロットのバラつきから乗客・電力需要・PV 出力のシナリオに MaaS 統合の効果は強く依存していることがわかる。また、Case2 では EMS に配慮した運用を行わないため MaaS 統合の効果が得られないシナリオがある。一方で、Case3 では EMS における運用を想定した空き EV が確保されることから効率的にエネルギー供給を実施できており、全てのシナリオにおいて MG 群の運用コストと移動コストが削減されている。このように、ライドシェア型 MaaS を移動型蓄電池として効率的に運用するためには、電力と交通の条件を考慮して整合性を図るために MaaS の運用を緩和する必要があるといえる。具体的な図の記載は省略するが、Case3 の平均乗車時間は Case2 と比較して 3~7 分の範囲で延長されており、MaaS の運用が緩和された結果となっている。

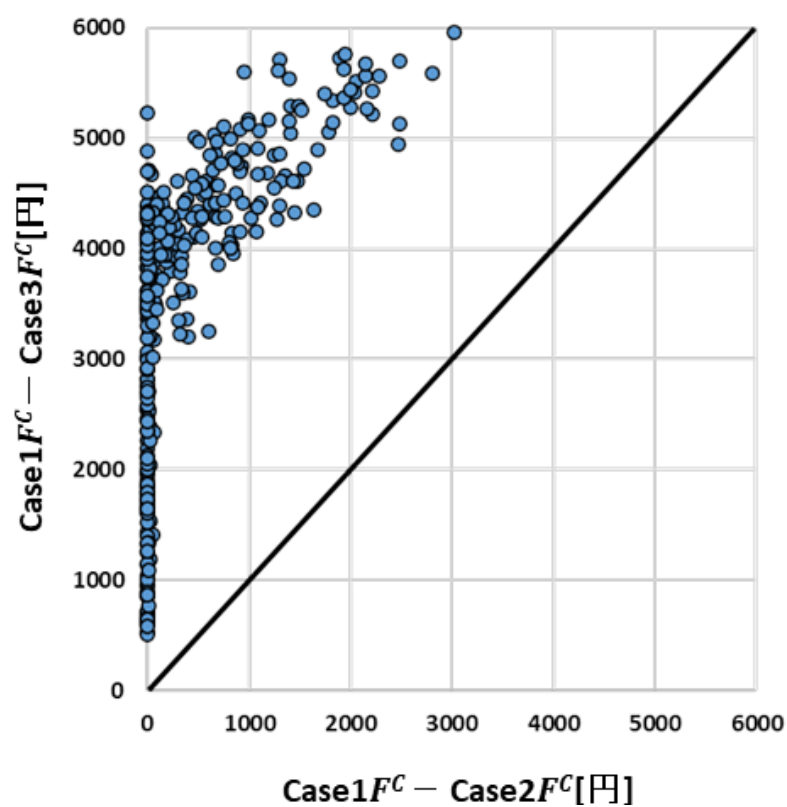


図 5-12 MG 運用コスト削減

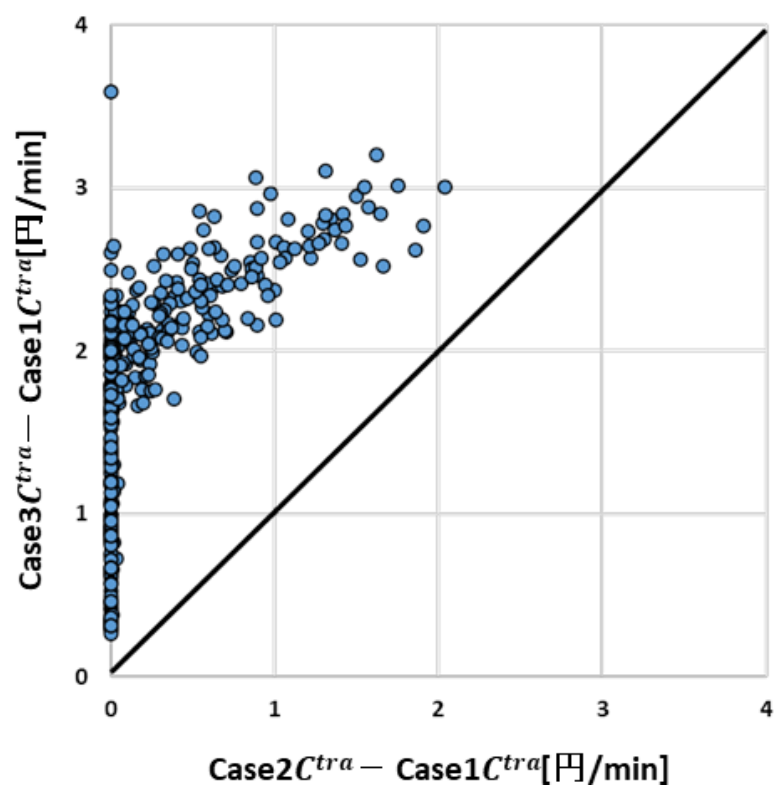


図 5-13 移動コスト削減

5.4.4 平均乗車時間と MG の運用コストの関係

平均乗車時間の延長が MG の運用コスト削減に与える影響を分析するために、 ε 制約法[69]により両者のパレート解を導出した。具体的には、(5.22)式に基づき全乗客の乗車時間を Case2 に対して $I \cdot \tau$ [min] (I は一日の乗客数、 τ は延長する平均乗車時間) だけ緩和したかたちで制約し、 τ を増加させながらその制約を徐々に緩和しながら Case3 の最適化問題を繰返し解くことでパレート解 $\# \tau$ を導出した。

$$F_{\tau,s}^T \leq F_{Case2,s}^T + \left(\frac{F_{Case3,s}^T - F_{Case2,s}^T}{\Delta F^T} \right) \cdot I \cdot \tau \quad (5.22)$$

ここで、 $F_{\tau,s}^T$ はパレート解 $\# \tau$ における定期便 $\# s$ の総乗車時間 [min]、 $F_{Case2,s}^T$ と $F_{Case3,s}^T$ はそれぞれ Case2 と Case3 における定期便 $\# s$ の総乗車時間 [min]、 ΔF^T は Case3 の運用によって増加した一日の総乗車時間 [min]、 I は一日の乗客数、 τ は Case2 の平均乗車時間から追加で延長する平均乗車時間 [min] である。すなわち、右辺の第二項では、 I と τ の積により一日の総延長乗車時間をもとめ、それに丸括弧で求める各定期便における総乗車時間の増加割合に基づく配分を求め、これを $F_{Case2,s}^T$ に加えることでパレート解導出で設定する乗車時間の上限を求めている。

上記のパレート解として求めた Case2 からの平均乗車時間の延長時間とコスト削減の関係を図に示す。図 5-14 はパレート解における(5.15)式の MG 群運用コスト F^C の削減を、図 5-15 は(5.21)式の移動コスト削減 C^{tra} の増分を示している。PV 余剰が発生しないシナリオでは、平均乗車時間を延長しても EV による PV 余剰吸収への寄与は増加せず、したがってコスト削減効果が比較的小さいため、図 5-14 と図 5-15 ではこのようなシナリオに対するプロットは省略している。図中の折れ線は、横軸を 1 分単位で区切り、各区間に対して求めたコストの平均値を繋いだものである。図 5-14 の通り、平均乗車時間を延長することで MG 群の運用コスト削減も大きくなり、両者の間にトレードオフの関係がある。また図 5-15 においても平均乗車時間の延長と移動コスト削減効果の間にトレードオフの関係があることが分かる。ただし、平均乗車時間の延長に対する各コスト削減効果の傾きは、延長時間が長くなるにつれて徐々に緩やかになる傾向にある。

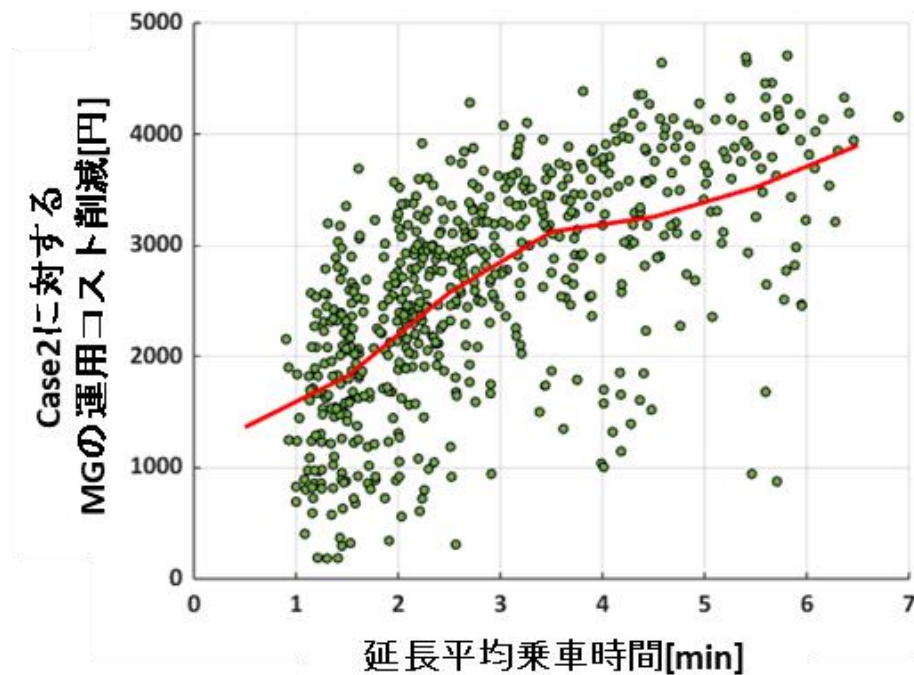


図 5-14 Case2 からの平均乗車時間の延長と MG の運用コスト削減の効果

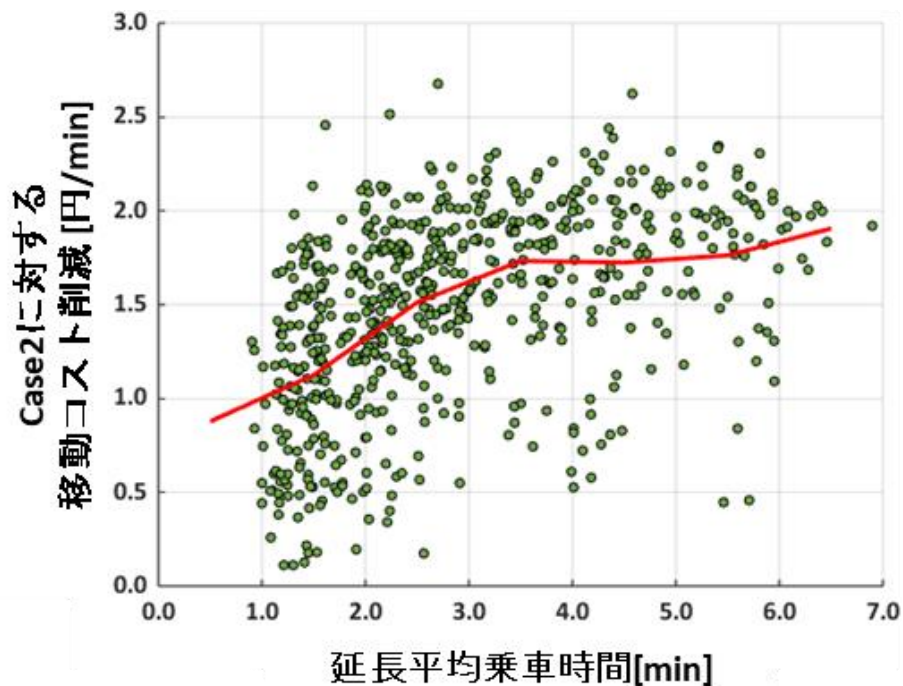


図 5-15 Case2 からの平均乗車時間の延長と移動コスト削減の効果

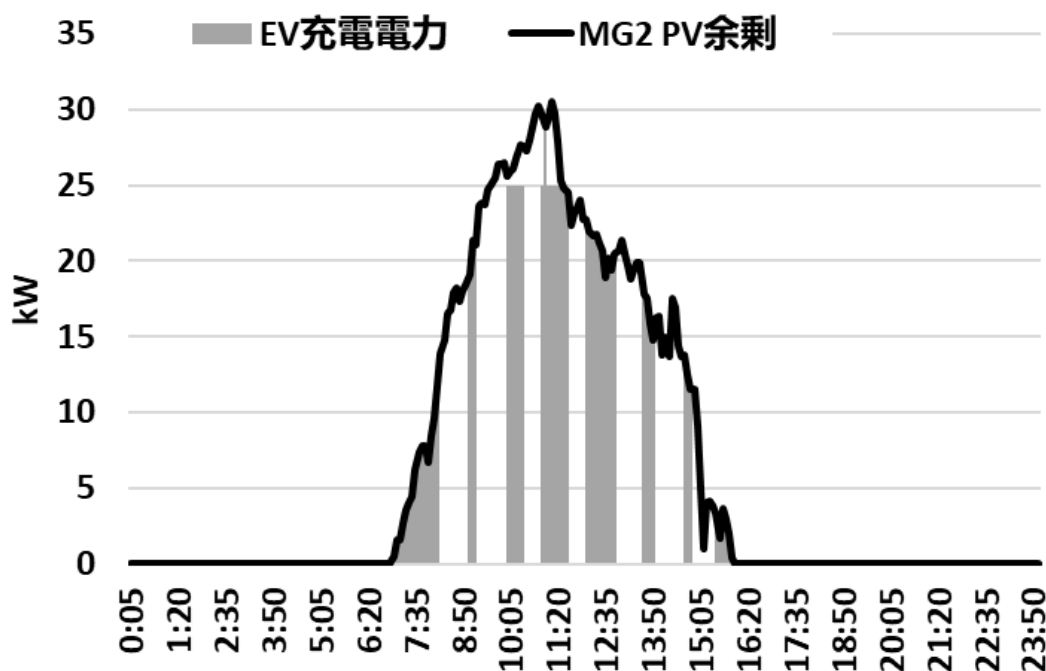
あるシナリオにおいて、 $\tau = 2$ としたパレート解と、Case3 の各定期便における EV の使用台数を表 5-5 に示す。また、MG2 における PV 余剰と EV の充電電力を図 5-16 と図 5-17 に示す。表 5-5 の通り、 $\tau = 2$ としたパレート解では 3 台の EV が使用され、1 台を空き EV として確保することで PV 余剰が多い時間帯に余剰吸収に活用している。一方、Case3 ではさらに多くの EV を充電用に確保している。これにより、図 5-16 と図 5-17 の通り $\tau = 2$ としたパレート解と比較して Case3

の EV 充電電力は増加している。ただし、PV 余剰が充電器の定格（25kW）を下回るような時間帯にも充電するような計画となっており、結果的に、EV を充電に回すことによるコスト削減効果が低下することが示唆される。乗客の乗車時間を犠牲にする点を考慮すると、図 5-15 のように、平均乗車時間の延長に対する移動コスト削減効果の傾きが大きい 1~3 分程度の延長が、コストパフォーマンスの観点から最も効果的であるといえる。

このように、乗車時間の延長と MG の運用コストは密接な関係にあり、MG の運用コストは乗客の利用料金に反映される。そのため実運用の段階では電力・交通の予測を正確に行い、乗車時間の延長に対するコスト改善の度合いを乗客に開示した上で、乗客の交通利用の意識事前調査を行い、MaaS 運用の緩和範囲を決定する必要があると考えられる。さらに、リアルタイムの予測誤差に対応するための運用手法も必要となる。実運用を想定した検討開発は今後の検討とする。

表 5-5 定期便における EV の使用台数

	往路便				復路便			
到着時刻	9	10	11	12				
出発時刻					13	14	15	16
パート解 ($\tau = 2$) 使用台数	4	4	3	3	3	3	4	4
Case3 使用台数	4	3	2	2	3	3	3	4

図 5-16 パレート解 ($\tau = 2$) - MG2 における PV 余剰と EV 群の充電

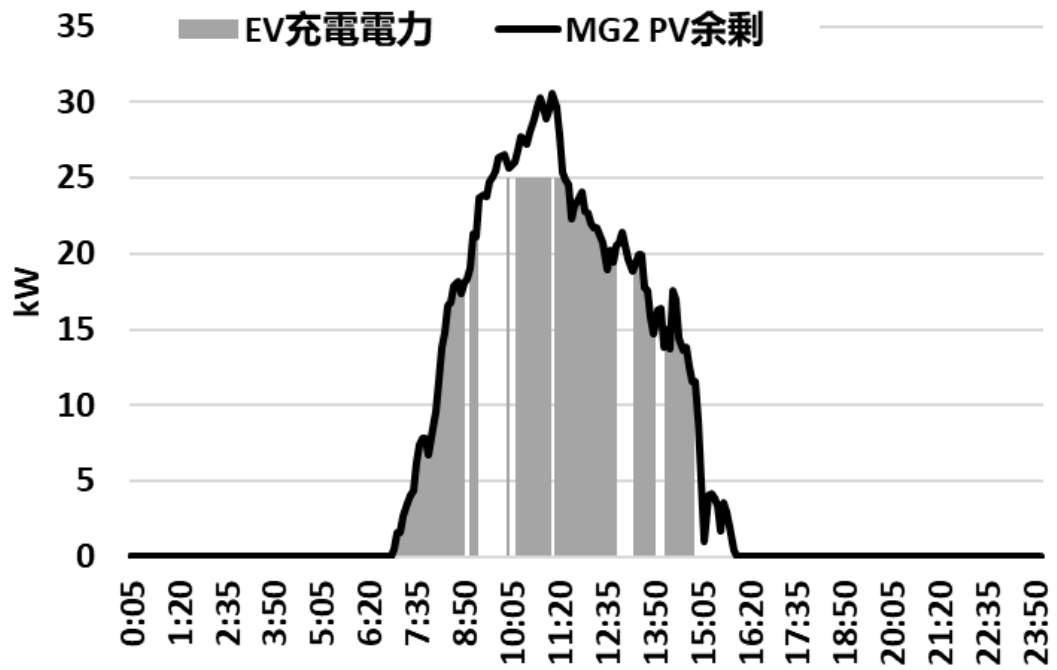


図 5-17 Case3 - MG2 における PV 余剰と EV 群の充電

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、脱炭素社会の実現を目指した電力と交通の社会的動向を見据えた MG と MaaS の運用計画の統合に関する研究を行った。MaaS の配車計画と MG 間のエネルギーの空間的シフトを含めた EMS を協調的に計画・運用する E²MS を提案し、MaaS の移動需要を満たしつつ、MG 間のエネルギーの時間的・空間的シフトに MaaS を活用し得ることを数値試算をもとに評価した。

第1章では、本論文の背景として、地球温暖化や化石燃料の枯渇問題について述べた。これらの問題に対し、電力では次世代電力ネットワークとして再生可能エネルギーを主力とした MG、交通では次世代交通システムとして EV によるシェアモビリティを主力とする MaaS が期待されていることを述べた。MaaS でシェアリングされている EV を MG の蓄電設備としても利用することで、MG のエネルギーの時間的・空間的シフトに活用する目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、カーシェア型 MaaS と MG を統合する経済効果を評価した。ラウンド型のシェアリング形態に加えて今後普及するであろうワンウェイ型と自動運転可能なワンウェイ型にも導入可能な E²MS を提案した。数値試算を通じて EV のシェアリングサービス形態ならびに自動運転の可否より EV の有用性は大きく変わるが、カーシェアリング利用者にとって有用なサービスであるほど、またそれを支える自動運転技術が利用可能になることで、エネルギー利用の観点からもメリットが増すことが示された。MG によるエネルギー供給と、カーシェアリングとを Win-Win の関係で連携させられる可能性が示された。

第3章では、BS と MG を統合する経済効果と系統貢献効果を評価した。BS がカーシェアに導入され、MG の蓄電設備として連続的に活用できるようになることで、バッテリー内蔵型 EV と同等の経済効果を発揮しつつ、MG と上位系統の連係線容量の削減や平均変動抑制といった上位系統への系統貢献に関する可能性が示された。

第4章では、カーシェア型 MaaS と統合した MG の実規模計画手法を提案した。E²MS は配車計画とマイクログリッド群に対するエネルギー供給計画を組み合わせしており、一般的な配車計画よりも複雑な組み合わせ問題となる。提案手法は小規模モデルにおいて MILP ソルバーよりも短時間で最適解を導出することが可能であり、さらに MILP ソルバーでは対応困難な実規模レベルの運用計画を実現できることが数値試算を通じて示された。

第5章では、ライドシェア型 MaaS と MG を統合する経済効果を評価した。MaaS で運用されている乗合タイプのライドシェアの EV を活用するための運用計画手法を提案した。EMS と統合することで EV は MG のエネルギーの時間的・空間的シフトに寄与するエネルギー設備になり得ることを示した。また、MaaS の運用を緩和することは EV の走行消費を削減すると同時に移動型蓄電池としてのエネルギー供給量を増加させることから、効率的なエネルギー利用につながるこ

とを示した。

本論文を通して、電力部門と交通部門における次世代システム・技術を統合し、MaaS でシェアリングされる EV を移動型蓄電池としても活用することで、MG や MaaS における再生可能エネルギーの効率的な利用と両者の経済性向上を実現し、結果として両部門の共通目標である脱炭素化に貢献しうる可能性が示唆された。

6.2 今後の展望

- 不確実性について

PV 出力と電力需要の予測誤差や MaaS における飛び込み利用への対応が挙げられる。具体的には、不確実性を考慮した確率最適化による前日計画の導入、飛び込み利用に対応するルールベース手法の開発が挙げられる。カーシェアの場合は飛び込み利用によって影響を受けるエリアを限定して第 4 章で示した実規模計画手法を活用して再計画を行うといった取り組みが考えられる。これらの検討を通じてより実運用に即した開発が可能になると期待される。

- 実規模モデルにおける系統貢献効果の効果

第 4 章で提案した手法により、実規模レベルの運用計画を作成できるようになった。目的関数の変更や多段階最適を導入することにより、MG と上位系統の連係線容量の削減や平均変動抑制といった上位系統への系統貢献に関する評価も行える可能性がある。

- MaaS の運用緩和に関する検討

第 5 章で示した通り、乗車時間の延長と MG の運用コストは密接な関係にあり、MG の運用コストは乗客の利用料金に反映される。そのため実運用の段階では電力・交通の予測を正確に行い、乗車時間の延長に対するコスト改善の度合いを乗客に開示した上で、乗客の交通利用の意識事前調査を行い、MaaS 運用の緩和範囲を決定する必要があると考えられる。

- 自動運転可能なワンウェイ型カーシェアと統合した MG の実規模計画手法について

第 4 章で提案した手法において、移動のフラグとなっている予約情報に加えて自動運転による移動を組み込む必要がある。しかし、全時間帯で各 MG 間に自動運転による移動を設定すると組み合わせが膨大になってしまう。そこで、エネルギー供給に大きく影響する時間帯を特定し、ある程度選択肢を限定することによって、自動運転対応のワンウェイ型カーシェアと統合した MG の実規模計画手法を開発できる可能性がある。

6.3 社会的ニーズへの貢献度、事業化への展望

- 社会的ニーズへの貢献

環境省が公開している日本の温室効果ガス排出量によると、発電所等による温室効果ガス排出量は全体の 40% を占めている。自動車等による温室効果ガス排出量は全体の 18% を占めており、電力と交通分野での脱炭素化が特に重要視されている。電力供給の効率化という観点からは、地

産地消型の電力システムとして再生可能エネルギーを主力とする MG への期待が高まっているが、多くの MG は補助金なしでは経済的に成り立たないとされている。一方、クリーンなモビリティ利用として EV や MaaS が注目されているが、シェアモビリティを主力としたサービスは、初期投資が高額であり、経済的なハードルが存在する。そこで、本研究では MG と MaaS を統合することで、新たな経済的シナジー効果を生み出し、両分野の脱炭素化に向けた事業開発を促進する可能性がある。

● 事業化への展望

自動車業界は CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric) の進展により、100 年に 1 度の大変革期を迎えている。その影響は自動車製造だけにとどまらず、販売、整備、保険といった自動車に関連するバリューチェーンのみならず、エネルギー、IOT、公共交通、観光、金融までも巻き込む広大な規模と考えられている。しかし、CASE が進展するに伴い、生産コストも比例して上昇し、車両販売価格に転嫁するには限界がある。そのため、自動車産業では従来の売り切りのビジネスモデルから、カーシェアリングやライドシェアリングのような MaaS による持続的な収益確保へとシフトする動きが検討されている。そこで本研究では、MaaS による収益に加え、エネルギー分野との統合による追加収益の可能性を示しており、自動車産業における「MaaS×エネルギー」の事業展開に新たな方向性を提示している。

第 4 章で提案した手法は、カーシェアと統合した MG の運用計画を実規模レベルで作成することが可能であり、小規模モデルでは数秒で最適解を導出できる。このことから、実規模レベルで運用計画を作成し、当日の飛び込み利用に対しては修正範囲を限定した小規模な運用計画の再計画を行うことで、実運用への対応が可能であると考えられる。また、第 5 章で提案した手法は、ライドシェアの利用予約状況を考慮し、要請を受けてから平均約 10 秒で乗車または下車時刻を返答可能な設計となっており、実運用性を有していると考えられる。

参考文献

- [1] 日本原子力文化財団：「原子力・エネルギー図面集」，
<https://www.ene100.jp/zumen/1-1-6>
- [2] 外務省：「2020 年以降の枠組み：パリ協定」
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html（アクセス日 2022/02）
- [3] 環境省：「2022 年度の我が国の温室効果ガス排出・吸収量について」
<https://www.env.go.jp/content/000215754.pdf>
- [4] 国土交通省：「EV/PHV 普及の現状について」
<https://www.mlit.go.jp/common/001283224.pdf>
- [5] 令和 5 年度エネルギーに関する年次報告：「エネルギー白書 2024」
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf
- [6] NEDOO：「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」
https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku_guidebook.html
- [7] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「新エネルギー等地域集中導入技術ガイドブック」
<https://www.nedo.go.jp/content/100083461.pdf>
- [8] Yajuan Guan, Baoze Wei, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Yonghao Gui, “An overview of the operation architectures and energy management system for multiple microgrid clusters”, iEnergy, Vol.1, pp. 306-314 (2022)
- [9] Mohammad Fathi, Hassan Bevrani, “Statistical Cooperative Power Dispatching in Interconnected Microgrids”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.4, No.3, pp.586-593 (2013)BCG : 「2020/01/10 PRESS RELEASES」
- [10] 経済産業省：「自己託送に関する Q&A」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/regulations/zikotakusou/zikotakusou.html
- [11] 経済産業省：「再エネ導入の拡大に向けた 今後の自己託送制度の在り方について」
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/068_03_00.pdf
- [12] 国際エネルギー機関：「Global EV Outlook 2024」
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- [13] TEPCO：「EV の普及率はどのくらい？日本と世界の EV 事情を解説」
<https://evdays.tepco.co.jp/entry/2021/09/28/000020>
- [14] 経済産業省：「EV 等の電力システムにおける活用に関して」
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/002_05_00.pdf
- [15] 国土交通省：「国土交通省の MaaS 推進に関する取り組みについて」
<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001320589.pdf>

- [16] 総務省：「次世代交通 MaaS」
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02tsushin02_04000045.html
- [17] 日経 BP：「Beyond MaaS」
- [18] カーシェアリング比較 360 度
<https://www.carsharing360.com/>
- [19] 未来シェア：「SAVS」
<https://www.carsharing360.com/>
- [20] 国土交通省：「ライドシェアとは何か？」
<https://www.mlit.go.jp/pri/kikanshi/pdf/2017/65-1.pdf>
- [21] Ample
<https://ample.com/carmakers/>
- [22] SMART CITY SWEDEN
<https://smartcitysweden.com/residents-using-a-mobility-service-app-travel-more-sustainably/>
- [23] 計測計画研究所：「MaaS 時代のスマートシティ～新潮流と政策課題～」
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/sankankyougikai/mobility/dai2/siryou3.pdf>
- [24] S. Aznavi, P. Fajri, M. Shadmand, A. Khoshkbar-Sadigh, “Peer-to-Peer Operation Strategy of PV Equipped Office Buildings and Charging Stations Considering Electric Vehicle Energy Pricing”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 56, No. 5, pp. 5848-5857 (2020)
- [25] 富澤勇輝, 井原雄人, 児玉安広, 飯野穰, 林泰弘, 池田欧世, 吉永淳：「バスの段階的な電動化を考慮した充電ステーション最適化による PV 地産地消能力の評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 142, No. 2, pp. 67-76 (2022)
- [26] GTFS-JP：「標準的なバス情報フォーマット」
<https://www.gtfs.jp/>
- [27] Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. M. Liyanage, J. Baba, A. Yokoyama, “Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging”, IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, pp. 559-564, (2012)
- [28] 金井翔平, 田村滋, 「太陽光発電出力抑制緩和のための V2G を用いた翌日計画の検討」, IEEJ, PE-20-95/PSE-20-100, (2020)
- [29] Y. Guo, J. Xiong, S. Xu, W. Su, “Two-stage economic operation of microgrid-like electric vehicle parking deck”, IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 7, No. 3, pp. 1703–1712, (2016)
- [30] Ch. Liu, X. Wang, X. Wu, Y. Zou, H. Zhang, L. Yao, Y. Zhang: “Economic dispatch for microgrid with electric vehicles in plug-in charging and battery swapping modes”, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference - Xi'an – China, (2016)
- [31] 溝上章志, 中村謙太, 橋本淳也, 「ワンウェイ型 ME シェアリングシステムの導入可能性に関するシミュレーション分析」, 土木学会論文 D3, Vol.71, No.5, pp.I_805-I816, (2015)
- [32] 千住琴音, 諏訪博彦, 水本旭洋, 荒川豊, 安本慶一, 「ワンウェイカーシェアリング実現にむけた潜在的利用者による車両偏在問題の解決」 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, pp.1818-1828, (2019)
- [33] A. D. Febbraro, N. Sacco, M. Saeednia “One-Way Carsharing Solving the Relocation Problem”,

- Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, (2012)
- [34] A. G. H. Kek, R. Cheu b, Q. Meng, C. H. Fung, “A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems”, *Transportation Research Part E* 45, pp. 149–158, (2009)
 - [35] D. Jorgea, G. Correia b, C. Barnhart c, “Testing the validity of the MIP approach for locating carsharing stations in one-way systems”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54, pp. 138 – 148, (2012)
 - [36] F. Dandl, K. Bogenberger, “Comparing Future Autonomous Electric Taxis With an Existing Free-Floating Carsharing System”, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, Vol20, No.6, pp. 2037-2047, (2019)
 - [37] NEDO : 「Concentrated Photovoltaic Generation System Demonstration Experiment (Ohta Project)」
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00229.html
 - [38] NISSAN
<https://ev.nissan.co.jp/LEAF/>
 - [39] Chademo Association
<https://www.chademo.com/>
 - [40] CONNEXX SYSTEMS
<http://www.connexsys.com/>
 - [41] Cindy Costain, Carolyn Ardron, Khandker Nurul Habib, “Synopsis of users’ behaviour of a carsharing program, A case study in Toronto”, *Transportation Research Part A* 46, pp. 421-434, (2012)
 - [42] 気象庁
www.jma.go.jp/jma/index.html
 - [43] M. Ban, J. Yu, Y. Yao, “Joint optimal scheduling for electric vehicle battery swapping-charging systems based on wind farms”, *IEEE Transaction on Power and Energy Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 555-566, (2021)
 - [44] B. Ma, D. Hu, Y. Wang, Q. Sun, L. He, X. Chen, “Time-dependent Vehicle Routing Problem with Departure Time and Speed Optimization for Shared Autonomous Electric Vehicle Service”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 113, pp. 333-357, (2023)
 - [45] 日立北大ラボ：「ナノグリッド」
<https://social-innovation.hitachi/ja-jp/article/nanogrid/>
 - [46] 河尻陽子, 金森亮, 山本俊行, 森川高行, 「運営管理データを用いたカーシェアリングの利用実態分析」, *土木学会論文集 D3*, I_487-I_500, (2014)
 - [47] 北海道電力：「料金メニュー 時間別電灯」
https://www.hepco.co.jp/home/price/ratemenu/pdf/jyuuryou_b_c_dream8.pdf
 - [48] METI：「令和5年度以降の調達価格等に関する意見」
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/20230208_1.pdf
 - [49] S. Ropke, D. Pisinger, “An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows” , *Transportation Science*, Vol. 40, Issue 4, pp. 393-546 (2006)
 - [50] S. Hellem, C. Julsvoll, M. Moan, H. Andersson, K. Fagerholt, G.Pantuso, “The Dynamic Electric Carsharing Relocation Problem”, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Vol. 10, pp. 1-14(2021)
 - [51] 野々部宏司, 柳浦睦憲, 「局所探索法とその拡張－タブー探索法を中心として」, *計測と*

- 制御, Vol.47, No.6, pp.493-499, (2008)
- [52] タイムズカーシェア
<https://share.timescar.jp/place/>
- [53] (C) OpenStreetMap contributors
<https://www.openstreetmap.org/#map=13/43.05434/141.44588&layers=T>
- [54] エネマネオープンデータ
<https://www.ems-opendata.jp/>
- [55] 北海道電力 : 「電気料金メニュー」
https://www.hepco.co.jp/home/price/ratemenu/pdf/jyuuryou_b_c_dream8.pdf
- [56] 中島秀之, 平田圭二, 田柳恵美子, 鈴木恵二, 金森亮, 野田五十樹, 岩村龍一, 松舘渉,
「乗合と相乗りはどう違うかモビリティシェアリング方式の整理と将来展開」, 人工知能
学会第 34 回全国大会, pp.1-4, (2020)
- [57] 日本自動車会議所 : 「日本版ライドシェア, 東京都内など 4 区域で導入」
<https://www.aba-j.or.jp/info/industry/21568/>
- [58] 国土交通省 : 「デマンド型交通の手引き」
https://www.tb.mlit.go.jp/hokushin/hrt54/com_policy/pdf/5-1demand.pdf
- [59] X. Yu, S. Shen, “An Integrated Decomposition and Approximate Dynamic Programming Approach
for On-Demand Ride Pooling”, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 21,
No. 9, pp. 3811-3820, (2020)
- [60] M. Zhu, X. Lin, X. Wang, “An Online Ride-Sharing Path-Planning Strategy for Public Vehicle
Systems”, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 616-627
(2019)
- [61] 山本英里, 滑川徹, 「安定マッチングに基づく貨客混合車両のキャリア間提携経路最適化」,
計測自動制御学会論文集, Vol. 58, No. 2, pp. 81-91 (2022)
- [62] 岩見沢市 : 「デマンド型相乗りタクシー」
<https://www.city.iwamizawa.hokkaido.jp/soshiki/kikakushitsu/kotsu/2/1/3472.html>,
- [63] B. Li, D. Krushinsky, T. Woensel, H. Reijers, “An adaptive large neighborhood search heuristic for
the share-a-ride problem”, Computers & Operations Research, Vol. 66, pp. 170-180 (2016)
- [64] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, “An Adaptive Large Neighborhood Search for relocating
vehicles in electric carsharing services”, Discrete Applied Mathematics, Vol. 253, pp. 185-200 (2019)
- [65] 岩見沢市 : 「市の人口」,
https://www.city.iwamizawa.hokkaido.jp/soshiki/shiminsabisuka/iwamizawashi_shokai/1/4024.html
- [66] 日産 : 「e-EV200」
<https://history.nissan.co.jp/ENV200/ME0/1406/index.html>
- [67] E. Rothberg, “An Evolutionary Algorithm for Polishing Mixed Integer Programming Solutions”,
INFORMS Journal on Computing, Vol. 19, No. 4, pp. 485-664
- [68] MLIT : 「基本方針に関するデータ集」
<https://www.mlit.go.jp/common/001067075.pdf>
- [69] 青木洋一, 「多目的最適化手法」, オペレーションズリサーチ, Vol. 23, No. 8, pp. 511-518
(1978)

著者が発表した論文

本論文に関して著者が公表した論文

- [1] 李一達, 原亮一, 北裕幸「MaaS と融合したマイクログリッド間の広域連携マネジメントと経済メリット」, 電気学会論文誌 B, Vol.142, No.11, 2022/11
- [2] 李一達, 原亮一, 北裕幸 (北海道大学), 内垣内洋, 安ヶ平裕介, 平松道晶, KRASIENAPIBAL THANTIP, 竹本享史 (日立製作所)「乗合タイプの MaaS と融合したマイクログリッド群の運用と経済的効果」電気学会論文誌 B, Vol.145, No.2, 2025/2

本論文に関して著者が行った講演発表等

- [1] 李一達, 原亮一, 大澤拓門, 北裕幸「MaaS を活用したマイクログリッド間の広域連携-提案手法の定式化-」令和 3 年電気学会全国大会, 6 - 191, 2021
- [2] 李一達, 原亮一, 北裕幸「MaaS を活用したマイクログリッド間の広域連携-経済メリットのポテンシャル評価-」令和 3 年電気学会電力エネルギー部門大会, 244, 2021
- [3] 李一達, 原亮一, 北裕幸「MaaS を活用したマイクログリッド間の広域連携マネジメントとその経済メリット評価」令和 3 年電力技術/電力系統技術合同研究会, PE-21 - 083, PSE-21-096, 2021
- [4] 李一達, 原亮一, 北裕幸「MaaS と融合したマイクログリッド間の広域連携マネジメントと経済メリット—MG 群の年間試算および EV の等価蓄電池比—」令和 4 年電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-22-023-044, PSE-22-043-064, SPC-22-071-092, 2022
- [5] 李一達, 原亮一, 北裕幸, 岡本守, 内垣内洋, 竹本享史,「カーシェア型 MaaS と融合した MG 運用の協調最適化 —EV によるエネルギー輸送の自己託送代替性—」, 令和 5 年電気学会全国大会, 6-199, 2023
- [6] 李一達, 原亮一, 北裕幸 (北海道大学), 岡本守, 安ヶ平裕介, 竹本享史 (日立北大ラボ)「ライドシェア型 MaaS とマイクログリッドの協調運用—実運用を想定した計画手法の提案—」, 令和 5 年電力・エネルギー部門大会, 178, 2023
- [7] 李一達, 原亮一, 北裕幸 (北海道大学), 安ヶ平裕介, 内垣内洋, 竹本享史 (日立製作所)「ライドシェア型 MaaS とマイクログリッドの協調運用」, 令和 5 年電力技術/電力系統技術合同研究会, PE-23-136, PSE-23-128, 2023
- [8] 李一達, 原亮一, 北裕幸, 内垣内洋, 安ヶ平裕介, 平松道晶, THANTIP KRASIENAPIBAL, 竹本享史,「乗合タイプの MaaS と融合したマイクログリッド群の運用と経済的効果」, 令和 6 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 47, 2024
- [9] 李一達, 原亮一, 川島伸明, 北裕幸, (北海道大学), 内垣内洋, 安ヶ平裕介, KRASIEPIBAL THANTIP, 平松道晶, 竹本享史 (日立製作所)「バッテリースワップ型カーシェアと融合した複数 MG の運用計画」, 令和 6 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 81, 2024

謝辞

本論文は、筆者が北海道大学 大学院情報科学院 情報科学専攻 システム情報科学コース システム融合学分野 電力システム研究室に在籍中の研究成果をまとめたものです。本論文の執筆にあたり、多くの方々から多大なるご指導・ご支援をいただきました。

北海道大学大学院情報科学研究科電力システム研究室の原亮一准教授には、指導教官として、研究室ゼミ、論文執筆ならびに学会発表等、多岐にわたって、貴重なご指導頂きました。ここに心からお礼申し上げます。

北海道大学大学院情報科学研究科電力システム研究室の北裕幸教授には、日ごろの研究打合せ、論文執筆、学会発表練習等の研究活動等、様々な場面で貴重なご指導を頂きました。ここに心からお礼申し上げます。

北海道大学大学院情報科学研究科の五十嵐一教授には、ご多忙な中本論文の副査を務めて頂きました。深く御礼申し上げます。

北海道大学大学院情報科学研究科電力システム研究室の川島伸明特任教授には、研究打合せや日常生活において、貴重な助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

秘書の尾崎ちえみ様、村上永恵様、千葉知江様には、研究活動に専念できる環境を整えていただき、日々多大なお世話になりました。心より感謝申し上げます。

技術職員の李家康様には、5 年間にわたり友人としても支えていただきました。深く感謝申し上げます。

研究室の先輩・後輩の皆様からも日頃より有益なご討論・ご助言をいただき、普段の研究室での生活面におきましても多大なご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

日立北大ラボの岡本守様、内垣内洋様、安ヶ平裕介様、KRASIEPIBAL THANTIP 様、平松道晶様、竹本享史様、橋本貴之様には定例の打ち合わせなどにおきまして、多くの貴重なご意見をいただきましたことを感謝申し上げます。

最後に、大学院進学まで生活や経済的な支援をして頂いた両親に深く感謝いたします。ありがとうございました。

2025 年 2 月

北海道大学 大学院情報科学院
システム情報科学コース 電力システム研究室
李一達