

2024 年度 建設コンサルタンツ協会 懸賞論文（学生論文）

「災害時の孤立集落救出に向けた空飛ぶクルマの活用」

関東学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻 佐藤慎慈
関東学院大学 理工学部土木・都市防災コース 保坂邦彦
関東学院大学 理工学部土木・都市防災コース 松田蒼生

1. はじめに

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震では、多くの被害が発生した。今回の地震後に行われた令和6年能登半島地震を踏まえた災害対応検討ワーキンググループ（第1回）¹⁾²⁾では、被災状況の把握や、被災地への進入、被災地域における消防等の活動、避難所等における生活環境を始め、多くの課題について共有された。今回の地震では、多数の集落が孤立したことを受け、同ワーキンググループでは孤立集落への意見も複数見られた。そこで、本稿ではメディアなどでも多く取り上げられ、関心が多く寄せられた孤立集落への対応に注目する。中でも、数多くの孤立集落が発生した石川県輪島市を例に、孤立集落への対応について提案をする。

2. 令和6年度能登半島地震での孤立集落への対応と課題

2.1 輪島市における孤立集落の概要

石川県が地震直後から被害状況などを取りまとめた資料³⁾によると、県内の複数市町において孤立集落が発生した。同資料のうち、孤立集落の記述がある各日14時時点の資料に基づき、輪島市における把握された孤立状況をまとめた。その推移を図1に示す。期間は孤立集落の人数が把握され始めた1月7日から、道路啓開などにより、孤立集落が実質的解消となった1月19日⁴⁾までとした。図1から、孤立集落は1月8日頃に最大14地区2817人となったことがわかる。さらに、1月10日から12日にかけて人数が大きく減少していることもわかる。

また、図2は、国土交通省 TEC-FORCE が行った調査の資料⁵⁾に基づき、地形図・地理空間情報の統合閲覧サイトQ地図を参照

し、特定した輪島市内における孤立集落の分布をGISのポリゴン機能で示したマップである。図2から孤立集落は、輪島市全般に広く分布していることがわかる。また、内陸部に限らず、沿岸部でも数多く分布していることも確認できる。

2.2 対応

今回の地震では孤立集落の解消に向け、消防や自衛隊等のヘリコプターによる空からの孤立者の救出や、くしの歯状の緊急復旧という陸・海からの啓開による孤立者の救出⁴⁾が行われた。その結果、1月7日輪島市において孤立者の人数が把握されてから、1月19日の実質的解消までおよそ12日を要した。

2.3 課題

国土交通省が、行政や農業・漁業団体などに行ったヒアリング調査によると、能登半

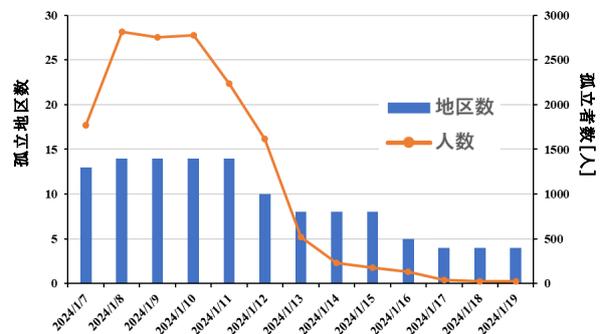


図1 輪島市孤立人数推移

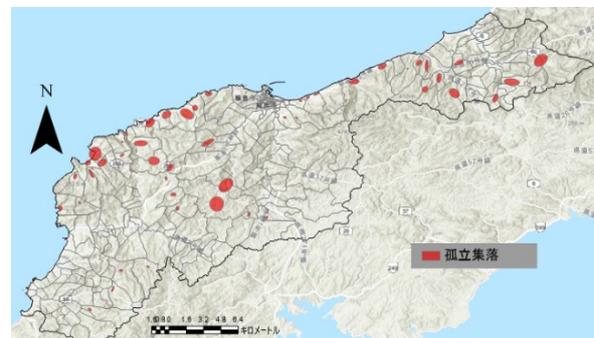


図2 輪島市孤立集落の分布

島の外浦を中心に大規模崩落が多発したことによって、多くの集落が長期間孤立した⁶⁾という問題が挙げられた。このほかに、自動車専用道など規格が高い道路が少ないことで効率的な支援が困難であったことや、限られた道路に支援車両が集中したことによる渋滞が発生した⁸⁾ということも挙げられた。これらは、能登半島における道路ネットワークの大きな課題であるといえる。また、孤立集落についてまとめられた国土交通省 TEC-FORCE が行った調査の資料⁴⁾によると、輪島市内では孤立集落が 53 か所発生していた。そのうち 6 割近くの 30 か所が、道路啓開完了による孤立解消であった。これらのことから、陸路での対応では孤立解消に長い時間を要することがわかる。

以上より、空路での孤立集落へ対応することが望ましいと考える。今回の地震ではヘリコプターによる空路からの対応も行われたが、結果として、孤立が長期間となってしまった。その原因の一つとして、能登半島は山がちで平地が少ない地形であり、孤立集落やその周辺においてヘリコプターが着陸するのに十分な場所が少なかったと考えられる。ゆえに着陸場所が少ないという問題であり、これを解決することで、孤立の長期化を防げるのではないかと考える。

3. 提案

3.1 提案内容

この課題を受け図 3 のような、以下の 2 点を提案する。

- ① 避難ポートの設置
- ② 避難ドックの設置

具体的には災害時、孤立の把握が出来次第、避難ポートにある空飛ぶクルマによる救出を行うというものである。

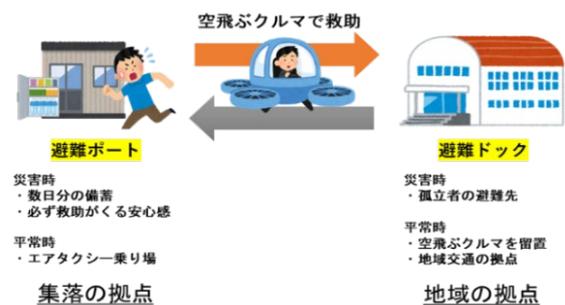


図 3 提案概要図

3.2 避難ポートの概要

避難ポートは空飛ぶクルマの離着陸スペースと、備蓄を備えた一次避難所の機能を持つものとする。なお、本稿の検証における離発着のスペースは、空飛ぶクルマに関する基準の方向性の整理⁷⁾に基づき、およそ 20m 四方のスペースとする。選定の条件は、集落内に空飛ぶクルマが離着陸可能なスペースを持つ指定避難所や指定緊急避難場所がある場合は、そこを避難ポートとする。ない場合は、集落の中で空飛ぶクルマが離着陸可能と考えられる土地を新たに避難ポートとする。平常時には、エアタクシー乗り場にもなり、災害時には住民に「救助が必ず来る」という安心感を与え、避難の拠点になることから、集落の拠点の役割を担う。

3.3 避難ドックの概要

空飛ぶクルマを留置し、孤立が発生した際には発進させる役割を担い、災害時の孤立者救出の拠点とする。避難ドックは各市町村の指定避難所の中から数か所を選定する。選定条件として、収容人数が多いこと、および各ドックから半径 10km の範囲が市町村のほぼ全域をカバーすることを条件とする。また、平常時には地域交通の拠点として機能し、

地域の中心的役割を果たす。

3.4 空飛ぶクルマの概要

空飛ぶクルマとは、「電動化、自動化といった航空技術や垂直離着陸などの運航形態によって実現される、利用しやすく持続可能な次世代の空の移動手段」⁸⁾をいう。本稿では、2025年日本国際博覧会にて運航予定である、Joby Aviation社の空飛ぶクルマを用いて検証する。同社の空飛ぶ車の概要を表1に示す。同社は国土交通省に開発中の機体について航空法に基づく型式証明申請をし、2022年10月18日、国土交通省に受理されている⁹⁾。

表1 Joby Aviation社
空飛ぶクルマ概要¹⁰⁾

機体概要		eVTOL機
機体寸法	胴体長	7.3m
	翼幅	10.7m
最大搭乗者数	パイロット	1名
	乗客	4名
航続距離		約240km

国土交通省資料より引用

4. 輪島市を例にした検証

4.1 検証概要

輪島市の孤立者数が最大を記録した1月8日の14時を基準に、提案によって孤立の早期解消が可能か検証する。避難ポートは、2023年に告示された輪島市の指定緊急避難場所¹¹⁾の中から、3.2の条件のもと選定した。避難ドックは、2023年に告示された輪島市の指定避難所¹²⁾の中から、3.3の条件のもと選定した。

国土交通省 TEC-FORCE が行った調査の資料⁴⁾では、大半の孤立集落における孤立者が集計されていなかった。そのため、まず、各孤立集落の孤立者数を推定する。次に、推定された孤立者数に基づき、空飛ぶクルマによる救出にかかる時間を算出する。このような手順によって、この提案内容で孤立の早期解消が可能かを検証する。

今回は以下2つのパターンを検証し、孤立者の性別や年齢は考慮しないものとする。

パターン a：孤立者数の減少を優先

パターン b：孤立集落数の減少を優先

なお、検証は石原ら¹³⁾が兵庫県消防防災課へのヒアリングで把握した、ヘリコプター活動時間6時から18時の12時間の中で行う。

4.2 孤立者数の推定

図2の孤立集落の分布に、統計地理情報システムの令和2年度国勢調査500mメッシュ人口データを重ね、集落の領域と重なった人口メッシュを抽出した。抽出したメッシュの総人口を、人口データに基づく孤立集落の総人口とする。さらに、各集落の領域に重なったメッシュの人口を合計することで、人口データに基づく各孤立集落の人口とした。この際、複数領域と重なったメッシュは、重なった面積が大きい領域に含めて孤立集落人口を算出した。

次に、人口データに基づく孤立集落の総人口に対する、各孤立集落の人口の割合を算出した。まず、その割合を実際の最大孤立者数2817人にかけて、人口データに基づく各集落の推定孤立者数を算出した。なお、実際の孤立者数に割合をかけ合わせた際、小数点以下は切り捨てとした。これによって求めた孤立者数の総数と、実際の孤立者数の総数を比較すると、算出した孤立者数が実際に比べて23人少なかった。推定孤立者数の合計を実際の2817人にそろえるため、差分となる23人に対しても再度同様に、人口データに基

づく孤立集落の総人口に対する、各集落の人口の割合をかけた。2段階の計算結果を合計することで、最終的な各集落における推定孤立者数とした。各集落の推定孤立者数を付録1に示す。

4.3 空飛ぶクルマによる救出の検証

4.2で求めた各集落の推定孤立者数を、各集落の避難ポートにおける孤立者数として考える。なお、同一集落に避難ポートが複数ある場合は、緊急避難場所の収容人数の割合で孤立者を配分、または避難ポートの数で等分することで、避難ポートにおける孤立者数を確定させる。この状態を、輪島市において孤立者数が最大となった1月8日14時とする。空飛ぶクルマの飛行条件を表2に示す。

表2 飛行条件

航続距離	200km
充電時間	7時間
乗車人数	1名(ドライバー) +4名(救助者)
1kmあたりの所要時間	0.35分/km
乗降時間	10分

Joby Aviation社のサイト上に、ダウントウンヘリポートからJFK空港(直線距離約20km)を約7分で飛行した¹⁴⁾。とあるため、ここから1kmあたり飛行時間0.35分とした。また、詳細な充電時間が把握できなかったため、Sky Drive社の空飛ぶクルマ(現時点航続距離15km)向けに開発された急速充電器(充電時間30~60分)¹⁵⁾を例に、200km飛行するための充電時間を約7時間とした。この条件のもと検証を行う。

まず、図4のように各ドックの空飛ぶクルマの担当集落を決める。その後、図5のような手順で孤立解消がされるまで計算を続ける。求められた各日の救助者数を、前日の孤立者数から引くことで、各日23時59分の孤立者数を算出した。なお、1月8日23時59分の孤立者数は、同日14時00分の値から引くこととした。これらから求められたパターンaとパターンbそれぞれの孤立者数の結果について表3、表4に示す。例として、東陽中学校ドックの検証に用いた計算の一例を付録2に示す。また、



図4 各ドックと担当集落

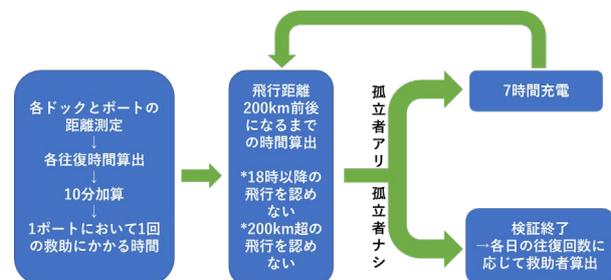


図5 計算手順

表3 パターンa(孤立者数優先)の結果

日時	救出者数				救助者数 合計	孤立者数
	門前高校	東陽中学	三井小学	輪島中学		
2024/1/8 14:00	0	0	0	0	0	2817
2024/1/8 23:59	52	74	52	80	258	2559
2024/1/9 23:59	73	86	72	184	415	2144
2024/1/10 23:59	73	74	72	127	346	1798
2024/1/11 23:59	76	85	68	68	297	1501
2024/1/12 23:59	84	116	68	68	336	1165
2024/1/13 23:59	69	89	94	78	330	835
2024/1/14 23:59	76	27	65	93	261	574
2024/1/15 23:59	73	0	84	91	248	326
2024/1/16 23:59	75	0	76	79	230	96
2024/1/17 10:18	61	0	35	0	96	0
2024/1/17 23:59	0	0	0	0	0	0

表4 パターンb(孤立集落優先)の結果

日時	救出者数				救助者数 合計	孤立者数
	門前高校	東陽中学	三井小学	輪島中学		
2024/1/8 14:00	0	0	0	0	0	2817
2024/1/8 23:59	56	63	51	66	236	2581
2024/1/9 23:59	75	93	77	85	330	2251
2024/1/10 23:59	70	112	79	103	364	1887
2024/1/11 23:59	76	77	76	77	306	1581
2024/1/12 23:59	72	78	77	68	295	1286
2024/1/13 23:59	81	128	66	68	343	943
2024/1/14 23:59	80	0	68	98	246	697
2024/1/15 23:59	72	0	72	184	328	369
2024/1/16 23:59	73	0	72	119	264	105
2024/1/17 16:45	57	0	48	0	105	0
2024/1/17 23:59	0	0	0	0	0	0

その推移を図 6 に示す。図 6 中の下線は、各ドックにおいて早く孤立が解消したパターンを表している。

これらからまず、パターンの違いによる孤立解消までの時間に大きな差はなく、両者とも減少傾向が似ていることがわかる。しかし、どちらの結果も今

回の地震による実質的に孤立が解消された 1 月

19 日より 2 日ほど早い結果となった。各ドックの孤立解消時間に注目すると、門前高校、三井小学校のドックではパターン a、東陽中学校、輪島

中学校のドックではパターン b が、それぞれ孤立解消までの時間が短かった。このようになった理由として、救助を行う 6 時から 18 時の間における充電時間の長さが関係していると考えられる。各ドックにおけるパターン別の充電時間を表 5 に示す。この表から、パターン別の充電時間の差が小さい三井小学校を除き、充電時間が短いパターンの方が、早く孤立の解消を迎えている。このことから、今回の検証では救出する順番の条件より、救出をする 6 時から 18 時の間における充電時間を短くすることが、早期の孤立解消に向けたカギになると考えられる。

5. 結論と展望

今回の能登半島地震では、孤立解消までに長時間を要した。この問題点として、ヘリコプターの着陸場所の確保が難しかったことが挙げられ、離発着に十分なスペースの確保が課題となった。この課題に対して、本稿では、避難ポートと避難ドックによる離発着場所の確保と、新しい技術である空飛ぶクルマを活用した救出を提案した。孤立集落に避難ポートを設置し、複数の指定避難所を避難ドックとして利用することで、空飛ぶクルマによる空路のみで孤立を解消する方法を検討した。その結果、陸路、海路、空路を組み合わせた今回の能登半島地震よりも、約 2 日早く孤立解消が可能であることがわかった。

今後の課題として、本稿の提案は年齢やハンディキャップの有無などを考慮せずに行われており、集落ごとの人口特性を考慮した検証が必要である。また、現時点では空飛ぶクルマに関する未確定な要素が多いため、従来のヘリコプターや道路啓開と併用するパターン、夜間飛行を考慮した 24 時間体制でのパターンなどの検証も必要である。

なお、空飛ぶクルマはエアタクシーとしての利用が可能であり、避難ポートや避難ドック、空飛ぶクルマの投資に対して、エアタクシーの運賃収入による資金回収が見込まれる。空飛ぶクルマは、防災だけでなく、地域交通や観光振興といった面で、地域活性化にも寄与すると考えられる。

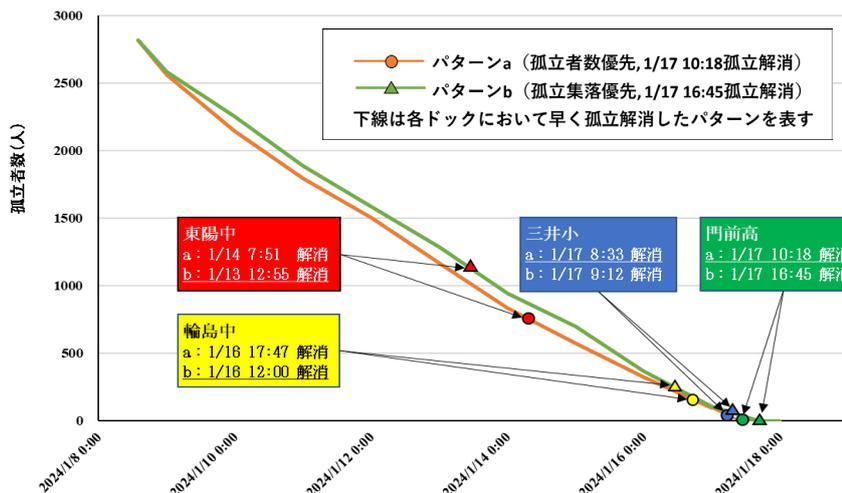


図 6 孤立者数推移とドック毎の解消時期の違い

表 5 パターン別充電時間(分)

	門前高	東陽中	三井小	輪島中
パターン a	3392	2014	3392	2993
パターン b	3792	1588	3387	2637
差	400	426	5	356

参考文献、資料

- 1) 令和 6 年度能登半島地震を踏まえた災害対応検討ワーキンググループ（第 1 回）：令和 6 年度能登半島地震を踏まえた有効な新技術及び方策について，内閣府防災情報のページ，[siryo5.pdf \(bousai.go.jp\)](#).
- 2) 令和 6 年度能登半島地震を踏まえた災害対応検討ワーキンググループ（第 1 回）：令和 6 年度能登半島地震を踏まえた災害対応検討ワーキンググループ（第 1 回）議事要旨について，内閣府防災情報のページ，[sanko_siryo2_1.pdf \(bousai.go.jp\)](#).
- 3) 石川県危機管理対策課危機管理監室：令和 6 年能登半島地震による被害等の状況について（第 9 報～第 63 報），石川県ホームページ目的別・令和 6 年（2024 年）能登半島地震に関する情報（対策本部・被災状況），[目的別・令和 6 年（2024 年）能登半島地震に関する情報（対策本部・被災状況） | 石川県 \(ishikawa.lg.jp\)](#).
- 4) 内閣府：令和 6 年版防災白書 第 2 章令和 6 年能登半島地震における対応，内閣府防災情報のページ，[r6_tokushu2_2.pdf \(bousai.go.jp\)](#).
- 5) 国土交通省：TEC-FORCE 令和 6 年能登半島地震における輪島市通行可能調査（孤立状況調査）報告書，北陸地方整備局ホームページ，[dourobuhoukokuwajimashousai.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 6) 国土交通省社会資本整備審議会道路分科会国土幹線道路部会：令和 6 年能登半島地震に関するヒアリング，国土交通省ホームページ，[001743242.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 7) 空の移動革命に向けた官民協議会：空飛ぶクルマに関する基準の方向性の整理，空の移動革命に向けた官民協議会ホームページ，[001598475.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 8) 空の移動革命に向けた官民協議会：空飛ぶ車の運用概念 Concept of Operations for Advanced Air Mobility (ConOps for AAM)，空の移動革命に向けた官民協議会ホームページ，[001739488.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 9) 航空局航空機安全課：米国 Joby Aviation からの空飛ぶクルマの型式証明の申請受理について ～外国製の空飛ぶクルマとして我が国初の型式証明申請の受理～，国土交通省ホームページ，[001517719.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 10) Joby Aviation 社：Joby Aviation，第 7 回空の移動革命に向けた官民協議会ホームページ，[001405571.pdf \(mlit.go.jp\)](#).
- 11) 輪島市総務部防災対策課：1 指定緊急避難場所，輪島市ホームページ，[siteikinnyuu.pdf \(city.wajima.ishikawa.jp\)](#).
- 12) 輪島市総務部防災対策課：2 指定避難所，輪島市ホームページ，[siteihinann.pdf \(city.wajima.ishikawa.jp\)](#).
- 13) 石原凌河・坪井塑太郎・照本清峰：南海トラフ巨大地震における孤立集落の重傷者搬送戦略の検討，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 73，No. 5（土木計画学研究・論文集第 34 巻），I_69-I_77，2017.
- 14) Joby Aviation 社ホームページ：[Joby Aviation | Joby](#).
- 15) 日本経済新聞：関西電力、「空飛ぶクルマ」の充電設備を公開，2024 年 4 月 10 日，[関西電力、「空飛ぶクルマ」の充電設備を公開 - 日本経済新聞 \(nikkei.com\)](#).

なお、1)～5)を 2024 年 7 月 12 日、6)～10)を 2024 年 8 月 6 日、11)～12)を 2024 年 7 月 30 日、13)～14)を 2024 年 8 月 7 日、15)を 2024 年 8 月 20 日にそれぞれ参照した。

付録1 推定孤立者数

集落名	令和2年国勢調査 500mメッシュ人口に 基づく各集落の推定 孤立者数
滝又町	77
空熊町	52
鶴入町	73
上黒川町・下黒川町	20
杉平町木戸谷内	152
稲舟町	28
大野町(城兼旅館)	16
大野町(鶴巣小学校、 鶴巣公民館)	379
大野町(能登の庄)	83
深見町	101
久手川町	16
町野町真喜野	2
町野町徳成谷内	64
町野町寺山	68
町野町佐野	74
白米町	70
名舟町	1

集落名	令和2年国勢調査 500mメッシュ人口に 基づく各集落の推定 孤立者数
尊利地町	69
小田屋町	59
東山町	32
西院内町	74
西山町	38
三井町細屋	21
三井町小泉キブタ	4
上大沢町	64
西二又町	45
上山町	72
大沢町	170
赤崎町	18
下山町	120
小池町	78
門前町浦上	6
門前町西円山	43
門前町宮古場	17

集落名	令和2年国勢調査 500mメッシュ人口に 基づく各集落の推定 孤立者数
門前町樽見	4
門前町暮坂	5
門前町餅田・皆月	254
門前町百成大角間	33
門前町鶴山	69
門前町大滝	13
門前町中谷地	30
門前町矢徳	52
門前町薄野	4
門前町切狭	8
門前町滝上	8
門前町上河内	5
門前町小石	12
門前町山是清	28
門前町深見	76
門前町六郎木	10

付録2 東陽中ドックの計算表

・パターン a (孤立者数優先)

(1) 1往復当たりの所要時間 (孤立者数降順)

避難ポート	孤立者数	往復距離(km)	往復回数	1往復あたり 所要時間(分)
町野町佐野	74	3.492	19	12
西院内町	74	7.757	19	13
千枚田ポケットパーク	70	15.746	18	16
尊利地町	69	10.772	18	14
町野町寺山	68	7.213	17	13
町野町徳成谷内	64	5.869	16	13
小田屋町	59	9.438	15	14
西山町	38	7.082	10	13
東山町	32	10.736	8	14
町野町真喜野	2	4.745	1	12
名舟町	1	12.556	1	15
合計	551		142	

・パターン b (孤立集落数優先)

(1) 1往復当たりの所要時間 (孤立者数昇順)

避難ポート	孤立者数	往復距離(km)	往復回数	1往復あたり 所要時間(分)
名舟町	1	12.556	1	15
町野町真喜野	2	4.745	1	12
東山町	32	10.736	8	14
西山町	38	7.082	10	13
小田屋町	59	9.438	15	14
町野町徳成谷内	64	5.869	16	13
町野町寺山	68	7.213	17	13
尊利地町	69	10.772	18	14
千枚田ポケットパーク	70	15.746	18	16
町野町佐野	74	3.492	19	12
西院内町	74	7.757	19	13
合計	551		142	

(2) パターン a の孤立者数推移計算

日付	使用 可能 時間 (分)	使用時間(分)				翌日持越し 時間(分)	稼働時間 (分)			救助者数	1日の合計 救助者数			
1月8日	240	228	420			408	648	74			74			
1月9日	720	221	26	48	420	-5	715	68	6	12	86			
1月10日	720	128	64	420	48	56	-4	716	32	16	10	16	74	
1月11日	720	56	140	78	420	26	0	720	16	37	24	8	85	
1月12日	720	52	65	208	56	420	81	801	16	20	64	16	116	
1月13日	720	42	112	130	28	420	12	732	12	31	38	8	89	
1月14日	720	28	56	12	15		-609	111	8	16	2	1	27	
		14日7時51分に救出完了										合計		551

(2) パターン b の孤立者数推移計算

日付	使用 可能 時間 (分)	使用時間(分)				翌日持越し 時間(分)	稼働時間 (分)			救助者数	1日の合計 救助者数			
1月8日	240	15	12	112	91		-10	230	1	2	32	28	63	
1月9日	720	39	28	182	78	420	27	747	10	8	51	24	93	
1月10日	720	91	39	221	14	420	65	785	28	12	68	4	112	
1月11日	720	56	182	16	420	32	-14	706	16	49	4	8	77	
1月12日	720	192	420	48	60		0	720	48	10	20		78	
1月13日	720	168	143	104			-305	415	54	44	30		128	
1月14日	720						-720	0					0	
		13日12時55分に救出完了										合計		551

※黄色のセルは充電時間を示す。