

協力復旧を考慮した送配電設備復旧計画に関する研究

中黒 亮介 (沼田 一道 教授, 松浦 隆文 助教)

1. はじめに

1.1 研究背景

電力は我々の日常生活のみならず産業基盤としても無くてはならないものである。近年では電子機器の発達に伴い、社会全体の電力に対する依存度は益々高くなっている。電力を運ぶ送電網は広範囲の様々な条件の地域に展開されているので、地震や台風などの自然災害による停電の発生を避けられない。実際に停電が発生した時、停電による社会的損失を最小限に抑えるために、地理的に分散した多数の被災設備を、能率よく巡回して復旧にあたる必要がある。被害状況（所要復旧時間、停電電力）に応じて複数の復旧作業班が出動して復旧に当たる。各作業班は、営業所を出発し、複数の被害箇所を巡回して並行的に順次復旧作業を行った後、再び出発点（営業所）に戻る。この問題は、基本的に、配送計画問題（Vehicle Routing Problem ;VRP）におけるデポと顧客を、営業所と被害箇所に置き換えたものと考えられる。ただし、一般的なVRPは、デポに待機する配送車が品物等を配送（または収集）し、再びデポに戻る最短の配送ルート（顧客訪問順序）を求める問題であるが、復旧作業の場合は、被害箇所の復旧が遅れると停電被害が大きくなるので、所要復旧時間、停電電力、移動時間との兼ね合いで各班の復旧ルートが決まる。このような点で復旧作業ルート計画問題は、一般的なVRPとは異なる問題である。

1.2 研究目的

本研究では、先行研究 [1] で扱われた問題を拡張し、作業班の協力復旧を考慮したモデルを提起する。具体的には文献 [1] では1 被害箇所に対し1つの作業班が復旧を行っているが、被害規模によっては2班で復旧作業を行う必要が考えられる。そこで、2班が協力して復旧を行う被害箇所を含んだモデルを提起する。このモデルに対して、供給エリア全体の停電電力量（被害箇所の停電電力×停電時間の和）を最小化する復旧計画（復旧順序と作業班の割り当て）を求める解法を提案する。

2. 提起する問題

1 営業所が担当するエリア内に発生した被災設備地点を対象とする。複数の復旧作業班が営業所から出発し、地理的に分散した全ての被害箇所の復旧を行い、営業所に戻ってくる。被害箇所は2種類に分けられ、1つの作業班で復旧できる箇所を単独点、2班で協力して復旧作業を行わなくてはならない点を協力点と呼ぶ。協力点の復旧作業は、遅れてくる作業班が到着してから開始される。各作業班の移動距離の総和を最小化する場合、これはVRPになるが、本問題の目的は停電電力量（総停電電力量）を最小化することである。停電電力量とは被害箇所が原因で電力が供給できていない電力量のことで、単位はWh（ワット時）である。この問題の前提条件を以下に示す。

- ・ 自然災害による被害箇所数、被害地点（単独点、協力点）、停電電力、所要復旧作業時間は把握している。

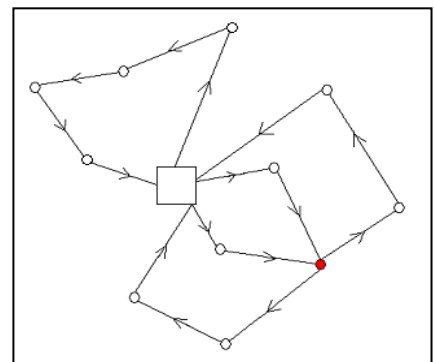


図 1：提案経路のイメージ図

- 全ての復旧作業班は営業所から出発し、作業制限時間内に営業所へ戻ってくる。
- 作業中に復旧資材が不足することはなく、営業所を出発し、各作業班は全ての割当てられた全被害箇所を復旧してから営業所に戻ってくる。
- 復旧作業班の移動速度は等しく一定である。
- 協力点に先に着いた作業班は遅れて到着する作業班を待つから作業を行う。

3. 定式化

前節までを踏まえ、定式化を行う。単独点集合を $N = \{1, \dots, n\}$ ，協力点集合を $M = \{n+1, \dots, n+m\}$ ，復旧点集合を $V = \{1, \dots, n, n+1, \dots, n+m\}$ と表し、点 0 を営業所とする。点 i, j 間の移動時間を τ_{ij} ，点 i の復旧所要時間を f_i ，停電電力を e_i ，協力点へ先に到着した復旧作業班の待ち時間を w_i と表す。復旧作業班数集合を $K = \{1, \dots, l\}$ ，作業制限時間を T で表す。決定変数は点 i への到着時刻を表す t_i ，復旧作業班 k が点 i から j へ移動する (1) か否 (0) を表す x_{ijk} である。配送計画における定式化 [2] を基に以上の記号を用いると、本論文で提起した問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && \sum_{i=1}^n e_i (t_i + f_i) && (1) \\
 & \text{subject to} && \sum_{j=1}^{n+m} x_{0jk} = \sum_{j=1}^{n+m} x_{j0k} = 1 && k \in K && (2) \\
 & && \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^{n+m} x_{ijk} = 1 && i \in N && (3) \\
 & && \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^{n+m} x_{ijk} = 1 && j \in N && (4) \\
 & && \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^{n+m} x_{ijk} = 2 && i \in M && (5) \\
 & && \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^{n+m} x_{ijk} = 2 && j \in V && (6) \\
 & && t_0 = 0 && (7) \\
 & && f_0 = 0 && (8) \\
 & && t_j = \max_{i \in V, k \in K} (t_i + \tau_{ij} + f_i) x_{ijk} && j \in V && (9) \\
 & && \max_{i \in V, j \in V \cup \{0\}} (t_i + \tau_{ij} + f_i) x_{ijk} \leq T && k \in K && (10)
 \end{aligned}$$

(1) 式は、総停電電力量を最小化する目的関数である。(2) 式は、営業所から出発し、営業所へ戻ってくることを表す。(3)(4) 式は、単独点を 1 班が復旧にあたることを表す。(5)(6) 式は、協力点を 2 班が復旧に当たることを表す。(7) 式は、出発時刻の初期化を表す。(8) 式は、営業所における所要復旧時間は 0 であることを表す。(9) 式は、復旧箇所への到着時刻を表す。(10) 式は、作業制限時刻内に営業所へ戻ってくることを表す。

4. 解法

本研究で対象とする問題は VRP の要素も含むため、現実的な時間内に厳密解を求めることは困難である。そこで、挿入法により初期巡回路を作成し、局所探索法を用いて解の改善を行う発見的解法を提案する。

4.1. 挿入法 [4]

巡回路に含まれない点を順々に巡回路中の枝の間に挿入し、全ての点を通る巡回路を求める方法である。点を巡回路中の枝の間に挿入する際、点挿入後の停電電力量の増加量をもとめ、時間制約を満たし増加量が最小になる枝間に点を挿入する。

4.2. 巡回路間での局所探索法

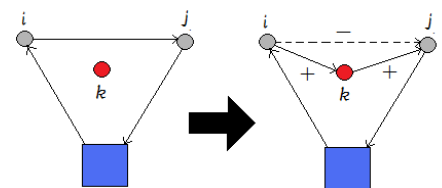


図 2 : 挿入法

巡回路間での局所探索法として **exchange** 近傍操作と **relocate** 近傍操作を用いる。 **exchange** 近傍操作とは、異なる2つの巡回路から、それぞれ1点を選び、それらを交換することで解の改善を行う方法である。 **exchange** 近傍操作の実行例を図3の(a)に示す。 **relocate** 近傍操作とは、ある巡回路中から1点を選び、異なる巡回路の枝の間にその点を挿入することで解の改善を行う方法である。 **relocate** 近傍操作の実行例を図3の(b)に示す。

4.3. 巡回路内での局所探索法

巡回路内で訪問順序を入れ替えることで解の改善を行う局所探索法として、交換近傍操作と挿入近傍操作を用いる。交換近傍操作とは、巡回路内の2点を選び、選んだ2点の訪問順序を入れ替えることで解の改善を行う方法である。交換近傍操作の実行例を図3の(c)に示す。挿入近傍操作とは、巡回路中の1点を選び、その点を巡回路内の枝の間に挿入することで解の改善を行う方法である [5]。挿入近傍操作の実行例を図3の(d)に示す。

4.4. 求解手順

以下に求解手順を示す。

- 1) 協力点を2班で同時に訪問する巡回路を構築するために、作業班のペアを作る。(作業班数 l が偶数の場合ペア数は $l/2$ 個、奇数の場合は $(l-1)/2$ 個となる)
- 2) 協力点のみを用いて、挿入法により2班がペアで同時に巡回する巡回路を構築する。
- 3) **relocate** 近傍操作, **exchange** 近傍操作を停電電力量の改善が行えなくなるまで実行する。このとき、挿入近傍操作と交換近傍操作も行う。
- 4) 単独点を巡回路に追加するために、ペアを解消する。
- 5) 挿入法を用いて、単独点を各復旧作業班へ割り当てる。
- 6) 改善が行えなくなるまで、**relocate** 近傍操作, **exchange** 近傍操作, 挿入近傍操作, 交換近傍操作を実行する。

5. 実験

本研究で提案した手法を Borland 社の delphi6 によって実装し、数値実験を行った。1辺が 20km の正方領域内に41個の点(営業所1個, 被害箇所40個)をランダムに発生させる。被害箇所のデータ例を表1に示す。停電電力は平均 3MW (メガワット), 標準偏差 1 の正規分布とし, 所要復旧時間は平均60分, 標準偏差20の正規分布で与える。協力点はランダムに 3 ~ 5 箇所設定する。復旧作業班数は 5 班, 移動速度は 30km/h, 作業制限時刻は12時間 (720 分) とする。

表2に各班の復旧順序を示す。表2より, 単純に停電電力が大きい箇所から順に復旧しているのではなく, 単位復旧時間あたりの停電電力が大きい被害箇所を早く復旧開始していることが確認できる。停電電力が大きいとはいえ, 当該被害箇所の復旧時間が長い場合, その他の被害箇所の復旧開始

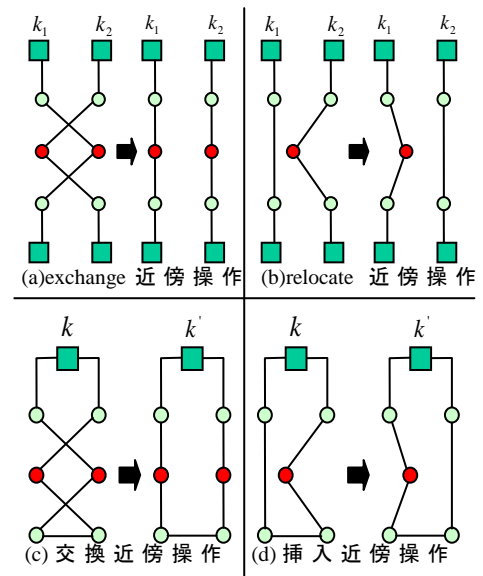


図3：使用した局所探索法

表 1 : 被害箇所データ

	x座標	y座標	e_i	f_i	e_i / f_i	21	10141	18006	1.6	89	0.02
1	10000	10000	0	0	0	22	2818	10688	3.6	29	0.12
2	8409	7911	4.1	56	0.07	23	7569	3223	2.6	72	0.04
3	3522	3660	3.4	55	0.06	24	4074	7948	2.2	61	0.04
4	4351	2895	2.2	47	0.05	25	17432	14516	4.4	49	0.09
5	3608	7859	3.6	64	0.06	26	10086	2625	3.3	51	0.06
6	19677	9292	4.8	59	0.08	27	18111	9803	1.7	50	0.03
7	18905	3705	4.5	36	0.13	28	17925	1022	3	48	0.06
8	11349	3402	3.2	23	0.14	29	8160	11003	3.2	63	0.05
9	8917	17457	4.2	111	0.04	30	19070	6988	2.8	37	0.08
10	16269	17504	3.9	78	0.05	31	11161	11994	3.2	76	0.04
11	17878	3223	2.2	43	0.05	32	8029	18571	2.5	60	0.04
12	1685	11114	1.2	22	0.05	33	18260	13488	3.5	45	0.08
13	13458	9330	2.6	69	0.04	34	10215	6889	1.6	106	0.02
14	18612	13224	1.9	75	0.03	35	4028	17949	2.2	72	0.03
15	12552	3461	3.9	52	0.08	36	9694	15375	4.1	48	0.09
16	18887	13649	3	67	0.04	37	1275	7666	5.7	50	0.11
17	19758	19728	3.6	51	0.07	38	7458	7471	2.2	68	0.03
18	6478	11584	2.6	41	0.06	39	10420	19125	2.4	55	0.04
19	14172	766	2.3	74	0.03	40	10817	946	2.8	94	0.03
20	3681	19531	4.3	71	0.06	41	2490	7801	4	60	0.07

時刻に遅れが生じるため、結果的に目的関数値が増加してしまうことが考えられるからである。これは、この問題の目的関数が停電時間と停電電力の積和であるという性質が影響している。表 3 に協力復旧点の数と総停電電力量の関係を示す。表 3 より、協力点が増えると総停電電力量が上昇していることが分かる。これは、協力点が増えると、巡回する被害箇所数が増えることに加え、待ち合わせをするという制約が効率的な巡回を妨げるためであると考えられる。また、提案手法の計算時間は協力点の数に依存せず約25秒程度であった。

6. まとめ・課題

本研究では、配電設備の復旧ルートを求める問題に対し、協力点を含むという新たな問題を提起し、その解法を与えた。復旧順序は単位復旧時間あたりの停電電力が大きい被害箇所から復旧にあたる事が確認できた。

本研究では1営業所が担当するエリア内のみだったが、複数の営業所を考え、被害が少ないエリア内の作業班による応援復旧などを考慮したモデルを考える必要がある。また、今回提案した解法は貪欲的な解法であるため、得られる解の多くは局所最適解である。今後の課題として、局所最適解を抜け出し、より良い最適解を求める解法が求められる。

参考文献

- [1] 渡邊 勇・所 健一 (2008) : 自然災害時における配電設備の最適復旧ルート計画策定手法, 電力中央研究所研究報告「<http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/leaflet/R07025.pdf>」最終閲覧日 (8/25)
- [2] 塚原 荘一 (2007) : ウイルス感染を用いた進化戦略による時間枠付き配送計画問題の解法, 筑波大学大学院博士課程 システム情報工学研究科修士論文「<http://www.cs.tsukuba.ac.jp/H18Syuron/200520981.pdf>」最終閲覧日 (5/25)
- [3] 小林 克也 (2009) : 合流巡回セールスマン問題に関する研究, 東京理科大学経営工学科学士論文
- [4] 久保 幹雄 (2001) : ロジスティクス工学, 朝倉書店
- [5] 野々部 宏司・柳浦睦憲 : 局所探索法とその拡張「<http://hirata.nuee.nagoya-u.ac.jp/~yagiura/papers/tabu-kaisetsu-2008.pdf>」最終閲覧日 (1/7)

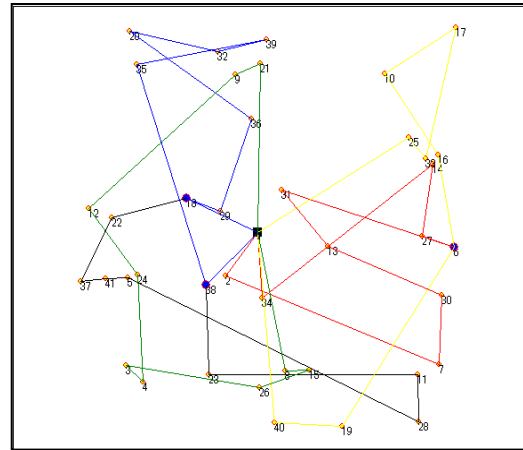


図 4 : 協力点数 3 の復旧ルート

表 2 : 復旧順序, 稼働時間 (協力点数 3)

復旧班	復旧ルート											稼働時間
1	1	18	22	37	41	5	28	11	23	38	1	574
2	1	2	7	30	13	31	6	27	14	34	1	676
3	1	18	29	36	20	32	39	35	38	1	574	
4	1	25	33	17	10	16	6	19	40	1	621	
5	1	8	15	26	3	4	24	12	9	21	1	602
総停電電力量												604.4

表 3 : 協力点数の違いによる変化

	M=3	M=4	M=5
総停電電力量(MWh)	604.4	616.7	678.1