

地震発生時の復旧シミュレーション最適化

倉都 翔平, 新田 利博

大規模地震などの災害時においては、被害拡大を防ぐためガスの供給停止を行った後、早急な復旧作業が求められる。そのためには、早急に被災状況を把握することと有効な復旧計画を策定することが重要である。本研究では復旧プロセスをモデル化した。すなわち、種々の制約条件のもと、復旧戦力のエリア割り当てを最適化し最短な復旧日数の算出を目指す数理計画問題へ帰着させた。モデル化に基づいたシミュレーションにより復旧日数短縮におけるボトルネックが確認されたほか、最適化による効果も確認された。

キーワード：ライフライン、ガス、復旧、地震、シミュレーション、訓練、スケジュール、最適化、数理計画

1. はじめに

ガス、電力、水道などのライフライン事業者においては、自然災害など供給体制に影響を与える緊急事態が発生した際、被害拡大の阻止とともに需要家への安全で迅速な供給再開が求められている。

地震発生時において、当社の超高密度リアルタイム地震防災システム SUPREME は約 1km 四方に 1 基ずつ設置された地震センサーにより揺れを計測し、一定の強い揺れを検知すると自動でガスを遮断し安全の確保を行う [1]。被害の大きい地区等は追加でガスを遠隔遮断することもできる。供給停止による影響を最小限に抑えるために、中圧・低圧導管網をいくつかのブロックに分け、ブロックごとに供給停止を行うことで被害が大きい地域を切り離してほかへの影響を最小限に抑える (図 1)。

また SUPREME には収集した地震データを基に被害推定を行い、迅速かつ的確に二次災害防止を支援する機能も備えている。そして全エリアの地域被害状況や供給停止情報を集約し、復旧方法の判断を行う。2011 年 3 月に発生した東日本大震災においても、約 4,000 カ所の地震データをおよそ 5 分間で収集することで、供給停止するか否かの意思決定が迅速に行われた (図 2)。

以上の情報を当社の地震復旧支援システム HURRY に入力することで、復旧を効率よく進めるための情報 (作業リストの出力、進捗の共有等) が出力される。こ



図 1 ブロックのイメージ (東京ガス HP より)

れらを基に復旧計画が策定され、復旧作業が開始される。計画策定時には復旧を行う隊の編成も行われる。被害状況に応じて地域ごとに復旧隊を割り当てることで効率的な復旧作業が行われる。

したがって、発災後における計画策定の高速化・精緻化が迅速な復旧に欠かせないことは明らかである。

以上の背景から、復旧プロセスをモデル化し、数理計画問題として定量的に解くことで復旧日数を最小にする現実的な復旧計画を短時間で作成するシミュレーションツールを開発した。

2. 復旧計画の概要

被害が確認された地域において、遠隔操作によりガス供給は一度停止し、策定した復旧計画を基に順次復旧と供給再開をする。復旧計画は以下のプロセスに示

くらつ しょうへい

東京ガス株式会社技術戦略部

〒 105-8527 東京都港区海岸 1-5-20

にった としひろ

株式会社 NTT データ数理システム数理計画部

〒 160-0016 東京都新宿区信濃町 35

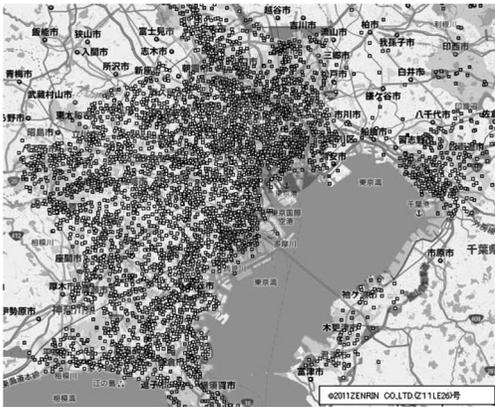


図2 東日本大震災時のSUPREME観測図(東京ガスHPより)

すシミュレーションによって策定される。

2.1 復旧計画シミュレーションの入力

システムSUPREMEとHURRYの連携により以下の情報が得られる。

●被害状況

防災ブロックと復旧ブロック

送圧レベルおよびガス供給制御装置の供給エリアごとに区分された区画を防災ブロック(以下Lブロック)と呼ぶ。通常、Lブロック間は独立している。

Lブロック内で被害を受け供給停止された地域の配管網の安全確認をするためには、ほかの地域との接続を遮断する必要がある。このようにして被災状況等に応じて独立させたブロックを復旧ブロックと呼ぶ。システムより、復旧ブロックごとの需要家被害件数データが出力される。

復旧手法の判定

供給停止されたブロックの被災状況に応じて復旧手法(レベルA~Dの4種類)がSUPREMEシステムにより判定される。復旧レベルによって作業項目は異なる。

●復旧要員(隊の構成)

発災後に復旧を行う復旧隊の構成は以下のとおりである。一つの地域修繕中隊(以下、中隊)の下に小隊が複数あり、小隊は担当ごとの班で構成される(本支管班、供給管班、内管班など、表1)。他社の応援隊についても、同様の隊編成となる。

●作業の歩掛り

各々の作業内容においては、投入する要員戦力によって復旧スピードを決定する作業歩掛り(パラメータ)が設定されている(表2)。作業歩掛りはこれまでの実績や訓練等を基にして算出している。

表1 復旧隊の構成イメージ

地域修繕中隊	所属小隊	本支管班数	供給管班数	内管班数	...
中隊1	小隊1	9	6	10	...
中隊1	小隊2	9	6	10	...
中隊1	小隊3	9	6	10	...
中隊2	小隊1	8	5	7	...
中隊2	小隊2	8	5	7	...
...

表2 作業歩掛りのイメージ

担当	作業名	歩掛り	単位
本支管班	作業1	10	*/*
	作業2	8	*/*
供給管班	作業3	9	*/*
...

2.2 復旧計画の策定方法

シミュレーションに復旧ブロックごとの被災状況データと復旧要員を入力した後、以下に示す流れで計画を策定する。

●隊の割り当て

まず、Lブロックに中隊を割り当て、その中の復旧ブロックを指定中隊内の各小隊が担当する。計画策定においては、あるLブロックを2つ以上の中隊が担当することはないが、実際には復旧状況に応じて効率化のために他隊による応援が行われる場合もある。

●復旧日数の算出

小隊を復旧ブロックに割り当てることで、作業歩掛りを基に復旧日数が算出される。これを全ブロックに対し繰り返し、最後のブロックの復旧が完了するまでに要する日数を全体の復旧日数とする。

●計画の策定結果

小隊の班単位までのスケジュールを記載したチャート図を作成する。隊は策定された計画を基に復旧を行う。以上が復旧計画策定の基本的な流れである。

3. 問題設定

本章では復旧計画を数理計画という観点で問題設定および定式化を行う。

上述の復旧計画の策定方法から、復旧計画は階層構造を持っていることがわかる。Lブロックに中隊を割り当てるというLブロック-中隊の階層と、割り当てられたLブロックと中隊に対して復旧ブロックと小隊を割り当てると復旧ブロック-小隊の階層である。

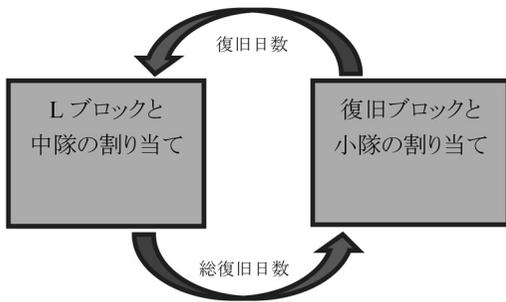


図3 階層構造の概念図

ここで注目すべき点は復旧日数は復旧ブロック-小隊の階層でなければ算出することができないという点である。つまり、あるLブロックにある中隊を割り当てた場合の当該Lブロックの復旧に要する日数はその内訳である復旧ブロックの需要家数・被害状況と小隊の班構成を考慮して初めて算出されるのである。

これは総復旧日数を最小化するような割り当ては復旧ブロック-小隊の階層を鑑みながら、Lブロック-中隊の階層の割り当てを決めなければならないことを意味している。

数理計画問題としてこの階層構造を持った対象を定式化する必要がある。一般的には図3のようにLブロック-中隊の階層と復旧ブロック-小隊の階層を繰り返し考慮することで総復旧日数を最小とするような割り当てを見つけるという方法が考えられるが、今回は生真面目な方法を採用した。つまり、次のような2段階の方法である。

①復旧ブロック-小隊の階層の考慮

すべてのLブロックと中隊の組み合わせに対して復旧ブロック-小隊の割り当て問題を解くことで、すべてのLブロックと中隊の組み合わせの復旧日数を列挙する。

②Lブロック-中隊の階層の考慮

①の結果を使用して総復旧日数最小化となるようにLブロックに中隊を割り当てる。

3.1 復旧モデル定式化

本節において定式化についてまとめる。上述したように2段階アプローチを採用しているが、その各々について定式化を行う。

● 1段階目 (復旧ブロック-小隊の階層の考慮)

1段階目はあるLブロック、中隊の組み合わせに対して、その復旧日数が最小となるように復旧ブロックへ小隊を割り当てる問題が骨子である。注目しているLブロックを*l*、中隊を*i*で表し、そのLブロック*l*に

含まれる復旧ブロックを*b*、中隊*i*に属している小隊を*j*と表記する。

まず、復旧ブロック*b*に小隊*j*を割り当てたときに1、割り当てなかったときに0となる0-1整数変数*p_{b,j}*を導入する。割り当て規則として各復旧ブロックは必ず1つの小隊に割り当てられるため、次式が成り立つ。

$$\sum_j p_{b,j} = 1$$

ここで復旧ブロック*b*に小隊*j*が割り当てられた場合に必要の復旧日数を*d_{b,j}*とする。*d_{b,j}*は上述したように作業歩掛りからあらかじめ計算しておくことができるため定数である。*p_{b,j}*と*d_{b,j}*を使うと小隊*j*が担当となる復旧ブロックすべての作業に要する日数は

$$\sum_b d_{b,j} p_{b,j}$$

と表すことができる。

Lブロック*l*に中隊*i*を割り当てたときの最小の復旧日数を*x_{l,i}* (≥ 0) とすると、以上より、復旧日数が最小となるように復旧ブロックへ小隊を割り当てる問題は次のように記述できる。

復旧ブロック-小隊割り当て問題 (*l, i*)

$$\begin{aligned} \text{最小化:} & \quad x_{l,i} \\ \text{制約式:} & \quad \sum_j p_{b,j} = 1 \quad \text{for each } b \\ & \quad \sum_b d_{b,j} p_{b,j} \leq x_{l,i} \quad \text{for each } j \end{aligned}$$

本復旧ブロック-小隊割り当て問題をすべてのLブロック、中隊に対して求解すると、表3のような復旧日数のマトリックスが得られる。

表3 一段階目の解のイメージ

復旧日数 (<i>x_{l,i}</i>)	中隊 1	中隊 2	...	中隊 <i>m</i>
L ブロック 1	3	5		4
L ブロック 2	7	6		7
...				
L ブロック <i>n</i>	4	4		5

● 2段階目 (Lブロック-中隊の階層の考慮)

2段階目は1段階目で算出したLブロックと中隊の組み合わせに対する復旧日数 (*x_{l,i}*) を使用して総復旧日数が最小となるようにLブロックに中隊を割り当て

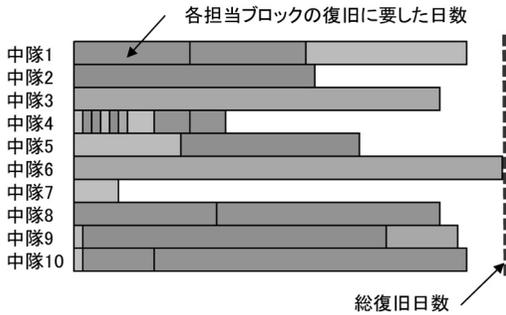


図4 解の一例（復旧日数）

る問題である。

以下に2段階目の定式化を記述しているが、1段階目と全く同じ構造の問題であることが容易にわかる。そのため詳しい説明は省略することとする。

Lブロック-中隊割り当て問題

最小化： y

$$\text{制約式： } \sum_i q_{l,i} = 1 \quad \text{for each } l$$

$$\sum_l x_{l,i} q_{l,i} \leq y \quad \text{for each } i$$

なお、各記号は次に従っている。

y : 総復旧日数を表す0以上の変数

$q_{l,i}$: Lブロック l に中隊 i が割り当てられたときに1、割り当てられなかったときに0となる0-1 整数変数

$x_{l,i}$: 1段階目の解（定数）

このような階層構造を持った問題は一般には求解が困難なものが多いが、本復旧問題は下位の階層について考えられるすべてのパターンを、あらかじめ計算しておくことで容易に解を得ることができる良い例である。

3.2 問題点

実際に上記の2段階で解いた結果の一例が図4になる。各中隊が担当するブロックを復旧するのに要した日数を示している。あるブロックの復旧が完了すれば、次の担当ブロックの復旧に取りかかり、復旧ブロックがなくなるまで続ける。

図4を見ると中隊6に割り当てられているLブロックは1つだけである。この結果から中隊6がボトルネックになっていることは明白である。仮にこのLブロックを他の中隊に担当させた場合にどうなるのかを第1

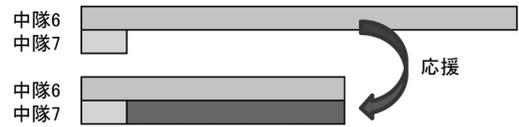


図5 支援の例

段階目の解から調べて見たところ、さらに日数が増加することがわかった。これにより、このLブロックを中隊6に割り当てることは確かに正しいことがわかる。このようにボトルネックとなる中隊がある一方で中隊7のように極端に早くに終わってしまう中隊もある。

図4の結果は早く終わった中隊のリソースを使用していない。このリソースを効率よく使うことで総復旧日数を短縮できるはずである。本シミュレーションツールではこの観点から早く終わった中隊は他の中隊に応援しに行くことができるという応援ロジックを導入することで効率化を図った。次節ではこの応援のロジックについてまとめている。

3.3 隊の応援

応援ロジックの考え方は単純な規則とした。つまり、「最も早く作業が終わる中隊が、最も遅く作業が終わる中隊へ応援をしに行く」という処理を応援の効果がなくなるまで繰り返すという規則である。

例えば、図4に対して応援を考える。「最も早く作業が終わる中隊」は中隊7であるため、中隊7がボトルネックである中隊6へ応援しに行くこととなる。

ただし、中隊6と中隊7では班構成が異なるため、同じLブロックに対して作業をする場合でも、中隊7のほうがより多くの日数が復旧に必要となる。これは応援時にも言えることである。中隊6が単独で復旧作業にあたる場合の当該Lブロックのべ復旧日数と中隊7が応援した場合のべ復旧日数では後者の方が多くの日数が必要となり、単純な計算では算出できない。これを計算させるために応援も数理計画問題として定式化することで実現した(図5)。

応援は復旧ブロックに小隊を割り当てる問題であるため「復旧ブロック-小隊割り当て問題(l, i)」の拡張となる。応援される中隊を i 、応援に行く中隊を i' 、それぞれの中隊に属している小隊を j, j' で表す。また、0-1 整数変数 $p_{b,j}$ は小隊 j' にも拡張し、定数 d は中隊 i' が中隊 i より遅れて作業を開始する日数を表している。これらを使い応援問題は次のように定式化することができる。

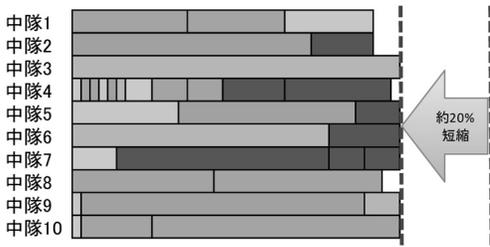


図6 応援導入後の最終的な割り当て結果

応援問題 l, i, i'

最小化: $z_{l,i,i'}$

$$\begin{aligned} \text{制約式: } & \sum_j p_{b,j} + \sum_{j'} p_{b,j'} = 1 \quad \text{for each } b \\ & \sum_b d_{b,j} p_{b,j} \leq z_{l,i,i'} \quad \text{for each } j \\ & d + \sum_b d_{b,j'} p_{b,j'} \leq z_{l,i,i'} \quad \text{for each } j' \end{aligned}$$

以上の応援ロジック（応援問題）を図4の解に対して適用すると、応援を8回繰り返した結果が図6のようになり、総復旧日数を約20%短縮させることができた。

4. 最適化の効果

最適化による復旧日数の短縮効果としては、主に以下の2点が考えられる。

①復旧ブロックと隊の大きさを揃えることによる効果

復旧規模の小さいブロックは、隊の大小に関わらず復旧日数は大きく変化しない。一方で、復旧規模の大きいブロックは小さい隊を割り当てると日数が長くなってしまうため、小さいブロックには小さい隊を割り当てることで全体の日数が短縮される。

②各隊の復旧完了日を揃えることによる効果

すべての隊の延べ作業日数が同じでも、すべての隊が一斉に復旧完了した場合と、1つの隊のみが最後まで復旧を行っていた場合では、復旧日数が異なる。後者ではマンパワーにまだ余力があるため、「他隊の応援」をロジックに組み込み、一斉に復旧完了することで日数が短縮される。

参考として、隊の割り当てについて数理計画モデルを用いず階層構造を考慮しない結果と比較した。すな

わち、すべての復旧ブロックとすべての小隊の組み合わせを、Lブロック・中隊に関わらず割り当てた階層構造のないものと比較した。首都直下型地震を想定し需要家被害規模を2ケース用いて計算した（約100万件、約200万件）ところ、復旧規模想定100万件のケースでは10%程度、200万件に関しては5%程度の日数短縮が確認された。

階層構造を考慮すれば、割り当ての組み合わせに制約を設けるため日数は増加すると考えられる。しかし、数理計画モデルを採用することにより、階層構造を考慮した日数の算出が可能となるうえに、日数増加分を上回る日数短縮効果も確認できた。

また、実際の各種復旧ルールをモデルの中に制約条件として取り入れている。例えば、中隊は各エリアの基地から出発するため、基地から遠いエリアを担当し続けることは望ましくない。すなわち、基地とエリアの距離を考慮したロジックも取り入れている。

以上より、復旧を定量化・モデル化することで計画策定の再現性・客観性が高められたうえに、数理計画問題へと帰着させることで目的に応じた最適化問題を解くことが可能となった。これにより、種々の制約条件を加味した計画を策定でき、計画策定のトライ&エラーもしやすく、効率的な復旧計画策定が可能となった。

5. まとめと今後の展望

復旧計画の数理計画問題へのモデル化により、復旧日数が短縮される計画が作成できるだけでなく、種々の制約条件を考慮した現実的な復旧計画の策定が短時間で可能になった。

一方、実際の復旧作業には定量化困難な項目が存在し、人間が判断せざるをえない状況が必ず存在する。よって、人間の判断によって容易に計画が修正可能なシミュレーションである必要があり、防災訓練等の機会を利用して実際の活用をイメージしながら、改良を検討していく。

参考文献

- [1] 猪股渉, 乗藤雄基, 石田栄介, 塚本博之, 山崎文雄, “東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度地震観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証,” 日本地震工学論文集, **13**(2), 37-44, 2013.