

I-534

カルマンフィルターによる都市ガス供給システムの震災復旧戦略

住友金属工業 正 員 平山 克己
 専攻大学工学部 正 員 野田 茂

1. まえがき

本研究では、震災時に機能低下したガス供給システムを早急かつ合理的に復旧するために、カルマンフィルターによる施設被害の推定、および人員・資機材の配分アルゴリズムを開発し、その有効性を検討する。さらに、被害推定によって関係者の意志決定過程や復旧戦略をどのように変化させればよいか、復旧過程が時々刻々どのように変化するか、などを考察する。

2. カルマンフィルターを用いた被害推定

発震後の混乱した状況の下で、時々刻々変化する被害状態を的確に判定することは、非常に困難である。そのため、各復旧時点における人員・資機材の最適配分は決して容易なものではなく、意思決定者が被害予測を誤ったり、観測器のノイズやヒューマンエラーが介在することも考えられる。そこで、本研究では、推定誤差をできるだけ少なくするために、カルマンフィルターアルゴリズムを用いて、観測量に基づき、リアルタイムに被害の推定を行う。

都市ガスブロック(n ブロック)の推定被害量は、時刻 t_k において、 X_{t_k} で示す。この被害量は、調査によって増加し、修理によって減少する。このとき、 X_{t_k} は式(1)のように表わせる。

$$X_{t_{k+1}} = X_{t_k} + \lambda C_{t_k} \Delta t - \mu D_{t_k} \Delta t \quad (1)$$

上式は、単位時間当たりの被害量の変化で表わせば、

$$\frac{dX_t}{dt} = \lambda C_t - \mu D_t \quad (2)$$

となる。ここで、各変数の意味は次の通りである。

X_{t_k} : 時刻 t_k におけるブロック i の被害状態 $x_i(t_k)$ からなる n 次元ベクトル

C_{t_k} : 時刻 t_k におけるブロック i の調査班数 $c_i(t_k)$ からなる n 次元ベクトル

D_{t_k} : 時刻 t_k におけるブロック i の修理班数 $d_i(t_k)$ からなる n 次元ベクトル

λ : 単位時間・単位班数当たりの調査率

μ : 単位時間・単位班数当たりの修理率

t_k : 時刻 k (Δt = 単位ステップ時間)

被害の観測量には、計器の誤動作やヒューマンエラーなどに見られるような観測誤差が含まれていると考える。そこで、時刻 t_k における観測量 y_{t_k} は、ノイズ V を含めて、次式で表わす。

$$y_{t_k} = h(X_{t_k}, t_k) + V_{t_k} \quad (3)$$

ただし、 y_{t_k} は、時刻 t_k における各ブロックの被害観測量(m 次元ベクトル)である。

本研究では、式(2)の状態方程式と式(3)の観測方程式に拡張カルマンフィルターの予測アルゴリズムを適用し、逐次的に被害推定量を求めた。ただし、式(1)には、人員・資機材の配分という、意思決定過程を含むことに留意しなければならない。

3. 復旧戦略の考え方

ここでは、2.で示したカルマンフィルターによる推定被害量に基づいた意思決定を考え、実際の復旧戦略を設定した。次に示す復旧戦略では、2.のアルゴリズムに従って、時々刻々、調査班数 C_t と修理班数 D_t を決定する。以下、最適推定量 $\hat{x}(t_k | t_k)$ は $\hat{x}$ と記す。

復旧戦略1～4では、作業班数によらず、同時に1ブロックしか復旧できないとする。この場合、被害観測量 y_{t_k} は1次元ベクトルとなる。一方、復旧戦略5と6は、作業班数に応じて、同時に複数ブロック(m)の復旧を容認した戦略である。従って、被害観測量 y_{t_k} は m 次元ベクトルとなる。なお、ここでは、総復旧人員数によって、 m を変化させる。

復旧戦略1 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{x}$ の最も小さいブロックには、全復旧人員の半分を調査のために配分する。残りの半分は、被害観測量 y の最も小さいブロックに、修理のために配分する。

復旧戦略2 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{x}$ の最も大きいブロックには、全復旧人員の半分を調査のために配分する。残りの半分は、 y の最も大きいブロックに、修理のために配分する。

復旧戦略3 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{x}$ の最も小さいブロックには、全復旧人員の $1/3$ を調査のために配分する。残りの $2/3$ は、 y の最も小さいブロックに、修理のために配分する。

復旧戦略4 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{x}$ の最も小さいブロックには、全復旧人員の $2/3$ を調査のため

に配分する。残りの1/3は、yの最も小さいブロックに、修理のために配分する。

復旧戦略5 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{y}$ の小さいブロックの順に、全復旧人員の半分の調査のために比例配分する。残りの半分のyの小さいブロックの順に、修理のために比例配分する。ただし、比例配分はブロックの被害量に応じて決める。

復旧戦略6 時刻 t_k において、被害推定量 $\hat{y}$ の大きいブロックの順に、全復旧人員の半分の調査のために比例配分する。残りの半分のyの大きいブロックの順に、修理のために比例配分する。

復旧戦略1と2は、被害の大きいブロック順あるいは被害の小さいブロック順のどちらの復旧戦略に従えば有効なのかを検討するために設定したものである。

復旧戦略3と4では、調査と修理班の配分率をパラメーターとして扱い、復旧戦略1・2とどのように結果が異なるかを調べる。すなわち、これらの戦略は、

$$p C_t + q D_t = \text{総復旧人員数}$$

$$p + q = 1$$

として、パラメーターpとqの変化が復旧過程に及ぼす影響を検討するために用いた戦略である。

4. 数値計算結果および考察

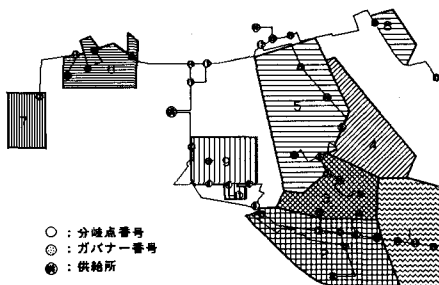


図1 対象としたガス供給網のモデル

大きな値をとる。一方、修理が先行した場合、推定被害量は全般的に小さくなる。

復旧戦略5と6の復旧過程は、他の復旧戦略の結果に比べて、早期にピーク時を迎えている。このことは、この戦略が早期に被害箇所を発見できることを示している。

復旧戦略1～4の推定被害量は、時系列的に変動している。一方、復旧戦略5と6は、時間とともに単調に増加し、その後単調減少している。このことは、戦略5と6によれば、安定した人員配分を施すことができることを意味する。

対象としたガス供給システムは、図1に示すように、9ブロックからなる中圧ラインで構成されている。ガバナより下流の低圧本支管は、ブロック単位としてモデル化している。供給所は1つしかない。ここでは、復旧作業の調査と修理に対して、どのような人員・資機材の配分が有効かを検討する。各復旧戦略における推定被害量の時系列変化は、図2と図3のようになる。

図よりわかるように、被害推定量のピーク値とその出現時刻は、各復旧戦略によって異なる。これは、式(2)に示すように、調査と修理の項を含めて、状態方程式を表現したためである。修理よりも調査が先行する復旧戦略を採用すると、推定被害量は他のどの復旧戦略よりも

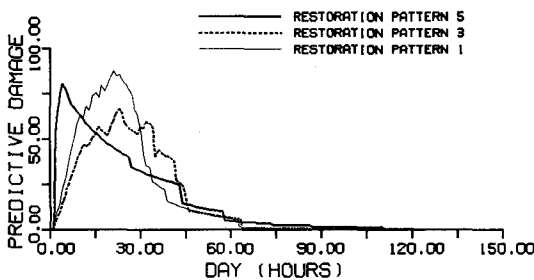


図2 復旧戦略1・3・5における推定被害量

復旧完了時間は戦略2よりも戦略1の方が早い。これは、被害の小さなブロックからの復旧戦略を採用すると、被害箇所の早期発見、早期修理が行えるからである。5つの復旧戦略の中で、復旧の完了は、戦略1を採用した場合が一番早く、戦略2が一番遅くなっている。戦略3の有効性も確認でき、現実的な結果が得られている。

5. あとがき

実際の復旧戦略は、迅速性と安全性というトレードオフから決定され、それを一意的に確定することは難しい。本研究では、カルマンフィルタによる被害推定を考慮した復旧戦略について、分析を試みた。このような試みを具体化すれば、復旧戦略の立案が容易になると考えられる。

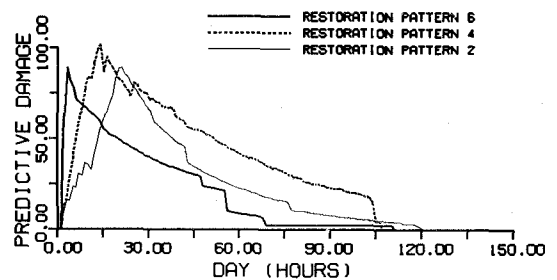


図3 復旧戦略2・4・6における推定被害量