

## 災害対応に関する作業能率の推定モデル

筑波大学大学院生命環境科学研究科 ○照沼利浩  
 国立研究開発法人 土木研究所 水野秀明  
 筑波大学大学院生命環境科学研究科 西本晴男

### 1. はじめに

深層崩壊の発生に伴う天然ダム形成時等、被害が甚大かつ広範囲に及ぶ恐れがある災害発生時には、防災組織は可能な限り迅速に災害対応に当たる必要がある。災害対応を短時間かつ正確に実施するために、防災組織では定期的に訓練を実施しているが、その効果が漠然としているのが課題となっており、作業の進捗状況（作業にかかった時間）をもとに、訓練の効果を定量的に評価する手法の開発が求められている<sup>1)</sup>。

しかし、災害対応に関する作業には次のような特徴がある。一つ目として、作業ネットワークの各作業にかかる作業時間は確定的な一つの値ではなく、幅広く分布する。二つ目として、災害の発生情報が同時または断続的に防災組織に届き、その到着時間間隔は非定常である。このような特徴を考慮して定量的に評価した研究事例はこれまで存在しない。そこで、本研究では、前述の特徴を考慮した、災害対応における作業能率を推定する数理モデルを開発するとともに、国土交通省が実施する緊急調査の中の「土砂災害緊急情報の作成」を対象として作業能率の値を明らかにすることを目的とする。さらに、開発した数理モデルを実際の訓練で得られたデータに適用して、数理モデルの精度を検証する。

### 2. 作業能率を推定するモデル

#### 2.1 モデルの基本理論

本研究で提案する数理モデルは、コルモゴロフの前進方程式に基づいた確率過程の簡易式により、作業が完了する時間を求めることで作業能率を推定するものである。既報<sup>2)</sup>では一つのパスで行う作業の進捗を推定する数理モデルを示したが、例えば河道閉塞に関する土砂災害緊急情報の作成のように、実際には幾つかの異なる作業を行う場合が多いため、複数のパスで構成される作業ネットワークに対応した数理モデルが必要となる。

そこで、本研究では、作業ネットワークにおける各パスは互いに独立な作業要素によって構成されていると考え、それらの作業要素に対して直交空間である $x_i$ 軸 ( $i=1,2,\dots$ ) を設定する。また、各パスは $x_i$ 軸の合成で構成されていると考えることができ、その方向を $m_i$ 軸 ( $i=1,2,\dots,n$ ) とする。 $m_i$ 軸上の数値は、 $i$ 番目のパス上で対応している災害の数とする。ここで、時刻 $T$ において、 $i$ 番目のパス上で“ある状態”（対応して

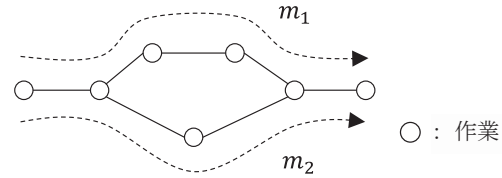


図1 作業ネットワークにおけるパスの考え方

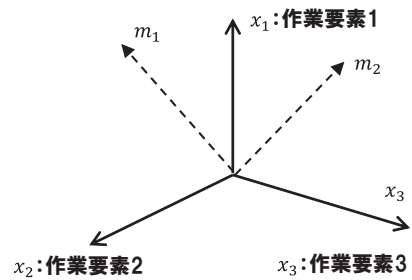


図2  $x_i$  軸と $m_i$  軸の模式図

いる災害数) となる確率 $P$ が、マルコフ過程およびパラメータ $\mu_m$ および $\lambda_m$ によって変化する確率過程を仮定した。なお、パラメータ $\mu_m$ を災害対応に関わる作業を処理する割合「処理率」、 $\lambda_m$ を処理した結果が何らかの誤りを含んでいた場合の手戻りの割合「手戻り率」とした。

#### 2.2 確率過程の定式化

2.1 で示した仮定に基づき確率の変化量を定式化すると、コルモゴロフの前進方程式が得られ、さらに差分法を用いれば $n$ 次元のマスター方程式に近似することができる。なお、 $\mu_m$ と $\lambda_m$ は時刻 $T$ に独立と仮定する。

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \sum_k \left[ (\lambda_{m_k} + \mu_{m_k}) \frac{(\Delta m_k)^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial m_k^2} - (\lambda_{m_k} - \mu_{m_k}) \Delta m_k \cdot \frac{\partial P}{\partial m_k} \right] \dots \dots (1)$$

$k$ は $1,2,\dots,n$ である。ここで、

$$a_{mk} \equiv (\lambda_{m_k} - \mu_{m_k}) \Delta m_k \dots \dots (2)$$

$$b_{mk} \equiv (\lambda_{m_k} + \mu_{m_k}) \frac{(\Delta m_k)^2}{2} \dots \dots (3)$$

とおけば、式(1)は以下のように変形できる。

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \sum_k \left[ b_{mk} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial m_k^2} - a_{mk} \cdot \frac{\partial P}{\partial m_k} \right] \dots \dots (4)$$

式(4)は、作業を実施している確率が、 $b_{mk}$ の速度で拡散するとともに、 $-a_{mk}$ の速度で移流することを意味する。作業能率は作業の処理速度と考えることができるため、パラメータ $-a_{mk}$ （移流項の係数）の値を、作業能率と定義した。

マスター方程式は、 $m_i$ 軸上の初期地点 $m_{k0}$ （災害数）から、作業終了地点（ $m=0$ ）に向かって確率密度が拡散する動きを示し、作業終了地点を通過した確率密度の積分値が、時刻 $T$ において作業が完了する確率 $P_{Compl.}(T)$ を意味する。 $P_{Compl.}(T)$ は Williams・山内の式<sup>3)</sup>を用いれば、その時間変化を以下の式で求めることが可能である。

$P_{Compl.}(T)$

$$= \prod_k \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - e^{-\frac{(a_k t + m_{k0})^2}{\pi t b_k}}} \right) \quad (- (a_k t + m_{k0}) < 0) \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{(a_k t + m_{k0})^2}{\pi t b_k}}} \right) \quad (0 \leq - (a_k t + m_{k0})) \end{array} \right] \dots (5)$$

### 3. 作業能率の推定

作業能率の推定対象は国土交通省が実施する緊急調査中の「土砂災害緊急情報の作成」とした。ただし、実災害での緊急調査の事例は少ないため、直轄事務所で実施しているロールプレイング型防災訓練での行動記録を利用した。収集事例は 9 事例であり、緊急調査の「 $m_1$ :天然ダムによる湛水区域の推定」および「 $m_2$ :天然ダムの決壊時期の推定」作業を対象とした。

各作業についてモデルによって求めた作業時間の確率分布の計算値と、訓練データから算出した確率分布の実測値との残差二乗和が最少となるパラメータ $a_{m1}, a_{m2}, b_{m1}, b_{m2}$ を求めた。表 1 は求めたパラメータの値である。

図 3 は訓練で計測した値と表 1 に示した数値を式(5)に代入して求めた曲線を示したものである。訓練では「 $m_1$ :天然ダムによる湛水区域の推定」作業および「 $m_2$ :天然ダムの決壊時期の推定」作業のそれぞれの開始時刻と終了時刻を記録した。作業ネットワークの開始時刻は 2 つの開始時刻のうち早い時刻とし、作業ネットワークの終了時刻は 2 つの終了時刻のうち遅い時刻とした。作業を完了させるのに要する時間は作業ネットワークの終了時刻から開始時刻を差し引いた時間とした。作業を開始させるのに要する時間は図に示したように滑らかな曲線状に並んでいるわけではなく、2,500 秒から 3,700 秒の間で段が生じていた。式(5)で求めた曲線は計測した値と比べて 0 秒から 2,500 秒までの区間で低く、3,700 秒より長い区間で高くなった。

### 4. 考察

既報<sup>1)</sup>で報告したように 2 つの作業ネットワークを別々に求めた際にはよい精度で再現できたが、多次元の数理モデル（式(5)）の曲線は計測値とずれることが分かった。収集した資料からは 2 つの作業が必ずしも同時に始まったわけではなく、また、作業の担当者が 2 つの作業以外の作業を行った可能性もある。そのため、2 つの作業を完了させるのに要した時間を同じ品質で

表 1 作業 $m_1 \cdot m_2$ のパラメータ

作業	$a$	$b$	残差二乗和
$m_1$	-0.00041010	0.00000823	0.0253
$m_2$	-0.00048700	0.00001100	0.1609

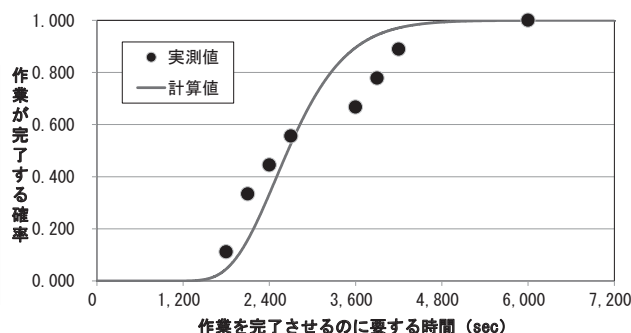


図 3 作業時間の確率分布（二次元）

計算できなかった可能性がある。本報告を執筆している時点では、計測した値と式(5)の間の乖離の原因を解明できていないが、今後、前述のような視点で計測値を再度精査したいと考えている。

### 5. 結論

本研究では、災害対応に関する作業の進捗状況をもとに、その作業能率を評価する数理モデルを開発した。また、国土交通省が実施する「土砂災害緊急情報の作成」に関する訓練をもとに、作業能率の値（数理モデルのパラメータの値）を以下の通りに算定した。

[作業 $m_1$ ] 作業能率：-0.00041010

処理率 $\lambda = 0.5505$ 、手戻り率 $\mu = 0.4495$

[作業 $m_2$ ] 作業能率：-0.00048700

処理率 $\lambda = 0.5519$ 、手戻り率 $\mu = 0.4481$

複数パス（2 パス）での数理モデルの適用性を検証した結果、実測値との乖離が見られる結果となった。その原因については、今後解明する予定である。

### 6. 謝辞

防災訓練の行動記録に関するデータは、国土交通省の地方整備局からご提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 永吉修平、杉本宏之、國友優、水野秀明(2015): 大規模火山噴火に対応した実践的な緊急減災対策砂防に関する研究.
- 2) 照沼利浩、水野秀明、西本晴男(2015): 災害対応に要する時間の推定モデル, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, p.A246-A247.
- 3) 山内次郎(1972): 統計数値表 JSA-1972. 財団法人日本規格協会, 参考 p.6.