

災害時の石油製品出荷機能に関する健全度曲線とその利用性

静間俊郎* 中村孝明* 高田一**

A study on applicability of soundness curve for shipment of petroleum products in earthquake disaster

by

Toshiro SHIZUMA*, Takaaki NAKAMURA* and Hajime TAKADA**

The restoration time and recovery curve for manufacturing function are being used as the information for decision making of anti-earthquake measures in the manufacturing factory. However, the restoration time and recovery curve are one of the characteristic values of probability distribution of system flow that depended on the time, and cannot understand the reliability of the required performance according to those value. In this paper, we focused the applicability of soundness curve that shows the reliability with the time as a variable. By numerical simulations of the soundness curve, it has been understood that the stock in the storage tank contribute to reliability improvement of shipment of petroleum products in earthquake disaster.

Key words: Soundness curve, Reliability, System flow, Stock, Shipment of petroleum products, Oil refinery

1 はじめに

石油精製を含めた製造工場の耐震対策の判断材料として、生産工程をシステムとしてモデル化し、生産量をフローとして捉えたシステムフローの停止期間や復旧曲線が用いられつつある。しかし、これらの指標は時間に依存したシステムフローの確率分布の特性値の1つであり、そこから必要とされるフロー（生産量）の信頼度を把握することはできない。

一方、工場はストックを保有し、製品需要に応じて出荷の調整を行っている。松本ら¹⁾は、製造工場を対象に、仕掛品の消費量を考慮した地震時の復旧曲線を提案しているが、信頼度は評価していない。

本論では、ストック量を考慮したシステムフローの信頼度の評価方法を示す。また、石油製品出荷機能を対象として、ストックを含めた経時的な信頼度を示す健全度曲線の利用性を検討する。

2 ストックを考慮したシステムフローの健全度曲線の評価方法

システムの任意の位置に一定のストックがある Fig.1 のようなケースを想起し、同ケースのシステムフロー r の確率変数 R および健全度曲線の評価方法を以下に示す。この時、ストックの消費量に着目し、ストックの上流側システムのフローが、下流側システムのフローを下回った場合、ストックから供給されると考える。ストック消費量の確率変数は、下流側システムと上流側システムのフローの差として以下のように求められる。

$$R_{con|t} = R_{lower|t} - R_{upper|t} \quad (1)$$

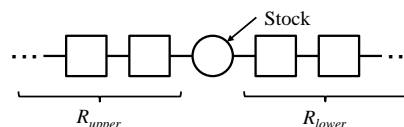


Fig.1 Example for system model with stock

ここに、 $R_{lower|t}$ は時間 t を条件とした下流側システムのフローの確率変数、 $R_{upper|t}$ は上流側システムの確率変数である。この時、 $R_{con|t}$ が正の場合、ストックから供給されるが、負の場合は上流からの供給が上回る状態であり、ストックからの供給は0となる。また、時間当たりの最大量 q 以上の供給はできない。よって、ストック消費量の確率変数 $R_{con|t}$ は、最終的に以下となる。

$$R_{con|t} = \begin{cases} R_{lower|t} - R_{upper|t} & (r=0|r<0, (r=q|r>q)) \end{cases} \quad (2)$$

なお、ストックからの供給流量に制限がない場合、上流側システムは健全な状態と同様となり、システムフローの確率変数は下流側のそれとなる。

一方、ストックがなくなれば供給は途絶する。ストック総量を z と置くと、供給時間 t_c との関係は以下となる。

$$z = \int_0^{t_c} E(R_{con|t}) dt \quad (3)$$

システムフローの確率変数は、以下のように求める。

$$R_{sys|t} = \langle R_{con|t} \rangle + \langle \min(R_{lower|t}, R_{upper|t}) \rangle \quad (4)$$

上式は、第1項と第2項の組合せ事象毎に変数を和算するもので、通常の確率変数の和算と区別し、 $\langle \rangle$ とした。

システムフローの信頼度（健全率）は、任意のフロー s 以上を確保できる確率とする。これは、システムフローの超過確率 $G_{R_{sys}}(r|t)$ から以下のように求められる。

$$P_{r \geq s}(t) = G_{R_{sys}}(r = s | t) \quad (5)$$

+ 原稿受理 2015年4月10日 Received

* (株) 篠塚研究所 〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1 Shinozuka Research Institute 4-5-1 Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo

** 横浜国立大学工学研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 Faculty of Engineering, Yokohama National University, 79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama City, Kanagawa

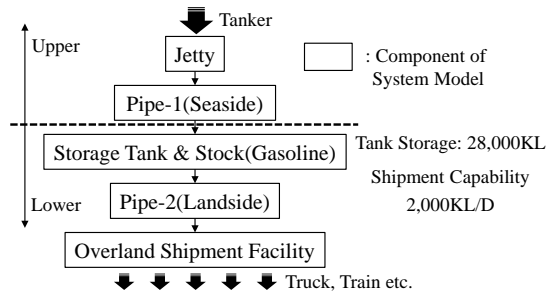


Fig.2 System model for shipment of gasoline

3 健全度曲線の評価事例

3.1 評価概要

西日本の太平洋側地域に立地する石油精製工場のガソリンの出荷機能を対象とし、大地震時における同機能の健全度曲線（信頼度）を評価する。想定する地震は、南海トラフ全域を震源域とする海溝型地震（M8.6）とし、同地震による当該サイトの工学的基盤面での最大加速度（Peak Base-rock Acceleration 以下、PBA）は、安中らの距離減衰式²⁾を用い 250cm/s^2 と推定した。

3.2 出荷機能に関するシステムモデル

大地震時におけるガソリン出荷のフローは、被災地外から海上受入したものを現存するストックとともにタンクに貯蔵し、陸上出荷施設に移送して各被災地へ供給する。Fig.2に出荷機能のシステムモデルを示す。現状でのタンク内のガソリンの貯蔵量は28,000KL、被災時の出荷量は1日当たり2,000KLとした。仮に海上受入が途絶した場合、発災後14日間までは供給が可能となる。なお、発災後の当該工場でのガソリンの製造は考慮しない。

3.3 システム構成要素の脆弱性

Fig.2に示すシステムモデルの構成要素の被害要因、ならびに被害レベル毎の耐震性能（耐力中央値）と復旧時間をTable1に示す。耐力中央値はPBA換算値である。耐震性能の対数標準偏差を0.3、作用地震動のそれを0.45とした。複合偏差は0.54であり、当該工場敷地を約3km四方として各要素間の損傷相関係数は、各要素間一律0.7程度とした³⁾。復旧時間は、東日本大震災の化学プラント工場の被災事例等を参照して設定した。

3.4 健全度曲線の評価

南海トラフ地震（M8.6）時の出荷機能の健全度曲線をストック量とともにFig.3に示す。図中の実線はストックを考慮、破線は考慮しない曲線である。ストック量と合わせて見ると、出荷機能の信頼度（健全確率）は、ストックを含めると発災直後で0.41から0.89に、10日後で0.73から0.99に改善する。また、ストックを考慮した曲線と考慮しない曲線は、発災後45日に一致し、ストックがなくなったことを示している。Fig.4にシステムの要素Pipe-1に耐震対策を行った場合の健全度曲線を示す。比較的脆弱であるタンク上流のパイプラックの耐震性能を向上させることにより、海上受入の可能性が高くなる。それに伴いストックの消費が抑制され、ストックの効果も長期にわたり持続している。

Table1 Strength and restoration time according to damage level

| Component in system | Object | Damage factor | Damage level | Strength (Median) PBA(cm/s^2) | Restoration time (Day) |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|------------------------|
| Jetty | Jetty | Structural Damage | Slightly Collapse | 1000 | 30 |
| | Loading Arm | | Major Collapse | 2000 | 360 |
| Pipe-1 (Seaside) | Pipe Rack | Structural Damage | Slightly Collapse | 500 | 10 |
| | | | Major Collapse | 1200 | 60 |
| | | Liquefaction | Slightly Collapse | 1500 | 180 |
| | | | Major Collapse | 230 | 10 |
| Storage Tank | Tank | Structural Damage | Slightly Collapse | 790 | 60 |
| | | | Major Collapse | 980 | 180 |
| | | Liquefaction | Slightly Collapse | 350 | 180 |
| | | | Major Collapse | 1200 | 30 |
| Pipe-2 (Landside) | Pipe Rack | Structural Damage | Slightly Collapse | 2000 | 120 |
| | | | Major Collapse | 2400 | 360 |
| | | Liquefaction | Slightly Collapse | 1000 | 120 |
| | | | Major Collapse | 500 | 10 |
| Shipment Facility | Shipment Facility | Structural Damage | Slightly Collapse | 1100 | 60 |
| | | | Major Collapse | 1300 | 180 |
| | | Liquefaction | Major Collapse | 1000 | 180 |
| Shipment Facility | Shipment Facility | Structural Damage | Slightly Collapse | 900 | 10 |
| | | | Major Collapse | 1300 | 90 |
| Shipment Facility | Shipment Facility | Liquefaction | Slightly Collapse | 1000 | 90 |
| | | | Major Collapse | 1000 | 90 |

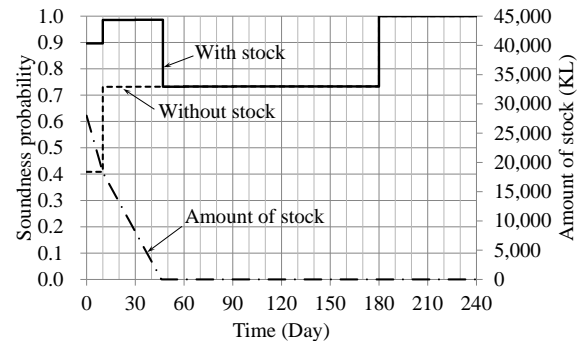


Fig.3 Soundness curves for shipment of gasoline and amount of stock in current

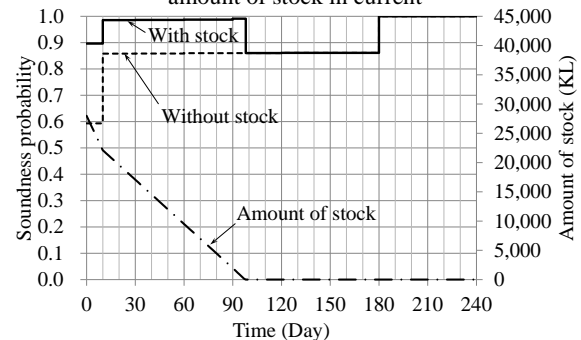


Fig.4 Soundness curves for shipment of gasoline and amount of stock in reinforcement

4 まとめ

大地震時の石油製品出荷機能の健全度曲線を評価した。ストックは、災害時の出荷機能の信頼度の改善に貢献する。健全度曲線は、必要な時期に必要な量を確保できるか否かの信頼度や対策の効果を定量的に示すことができ有用である。

参考文献

- 1) 松本俊明, 中村孝明: 損傷相関を考慮したストックモデルの地震時復旧曲線, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1434-1441, 2014.
- 2) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会公演論文集, pp.161-164, 1997.
- 3) 小野正博, 中島由貴, 中村孝明, 静間俊郎: 空港の性能維持/早期復旧に関する地震リスクマネジメント, 国土技術政策総合研究所資料第830号, P.41, 2015.