

製品の出荷機能の信頼性評価に関する研究 ―事例解析による適用性―

株式会社篠塚研究所 正会員 ○静間 俊郎
 横浜国立大学工学研究院 非会員 高田 一
 株式会社篠塚研究所 正会員 中村 孝明

1. はじめに

東日本大震災（2011年3月）では、被災地域内外を問わず石油製品や各種エネルギー製品の供給不足が発生し、経済活動の停滞とともに被災者の生活不安を助長する結果となった。これを教訓として、資源エネルギー庁は、発災後24時間以内に平常時の50%の石油製品を市場に供給するよう指導するとともに、コンビナート施設の耐震化を促進する「石油供給インフラ強靱化事業」を2014年度より開始した。これを受け、各事業所は、石油製品の出荷機能の維持を強靱化事業の優先課題と位置付けるとともに、非常時の出荷機能の冗長性を改善する対策として、非常用発電機の設置等の検討を進めている。これに伴い、非常時に稼働する待機冗長要素を組み入れたシステムの信頼性評価が必要とされ、文献1)でその方法を提案した。本報は、非常時の石油製品の出荷機能に着目し、待機冗長要素によるシステムの信頼性の向上効果を示す。

2. 非常時における出荷機能のシステムモデル

石油精製事業所の多くは、大地震発生時には石油精製プロセスは長期間停止すると考えており、製品出荷の維持のため、貯蔵タンクにあるストックによる出荷を想定している。ストックによる出荷は、貯蔵タンク、陸上（ローリー）出荷設備、出荷ポンプ、移送配管に加え、製品の品質管理、消防火設備が健全でなければならない。また、出荷ポンプ、陸上出荷設備、品質管理（建屋）等への電力も必要となる。各所への電力については、外部からの電力供給（買電）および自家発電の系統が双方送電停止となった場合の対策として、非常用発電機を設けている。図1は、製品の貯蔵タンク

から出荷までを待機冗長システムとしてモデル化した例である。図中の矩形（□, ■）は構成要素であり、破線で示したものは、非常時に稼働する待機冗長要素（出荷ポンプ用、陸上出荷設備・品質管理用の非常用発電機）である。各構成要素には番号（A1～C13）を併記している。着色した矩形（■）は同一要素であり、この部分に待機冗長要素を併設すると、システムは、直並システムに分解できないネットワーク状となる。

3. 出荷機能の信頼性確率の評価と対策の効果

図1のシステムを対象とし、大地震時の同機能の信頼性曲線を文献1)に示す手法を用いて評価する。信頼性曲線とは、出荷機能の信頼性確率（製品を出荷できる確率）を地震発生から経時的に示したものである。

なお、製品の出荷に関わる全要素が健全であっても貯蔵タンクのストックが尽きれば出荷停止となる。ストックの累積消費量の期待値を $q(\tau)$ とすると、地震発生からの経過時間 τ との関係は下式で示される。

$$q(\tau) = \int_0^{\tau} P_s(t) \cdot Q(t) dt \quad (1)$$

ここに、 $P_s(t)$ は時間 t の出荷機能の信頼性確率、 $Q(t)$ は時間当たりのストックの消費量である。

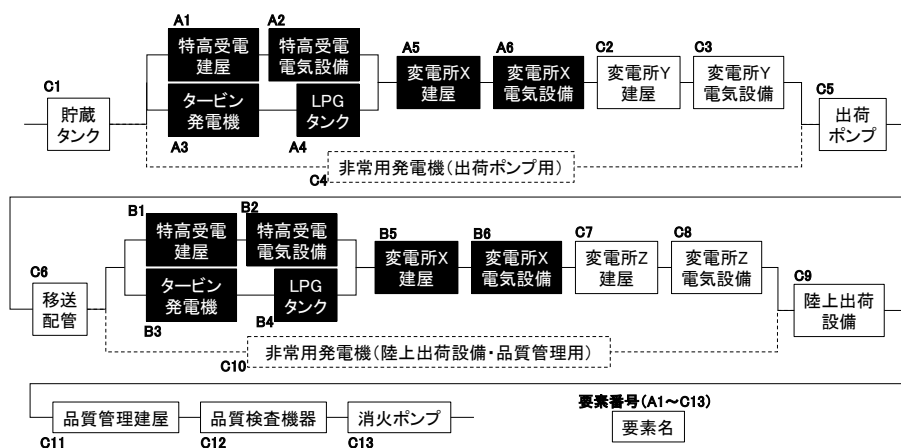


図1 非常時における出荷機能のシステムモデル（待機冗長システム）

キーワード 出荷機能の維持、石油供給インフラ強靱化事業、待機冗長システム、信頼性確率、ストック

連絡先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿4丁目5-1 幸伸ビル3F 株式会社篠塚研究所 TEL: 03-5351-3781

表 1 各要素の耐震性能の諸元

要素番号	要素名	損傷レベル	耐力中央値 (cm/s^2)	復旧期間
C1	貯蔵タンク	軽微	1200	30日
A1, B1	特高受電建屋	大破	1900	60日以上
A2, B2	特高受電電気設備	中破	750	10日
A3, B3	タービン発電機	大破・倒壊	1100	60日以上
A4, B4	LPGタンク	軽微	600	5日
A5, B5	変電所X建屋	大破	900	60日以上
A6, B6	変電所X電気設備	中破	600	10日
C2, C7	変電所Y, Z建屋	大破・倒壊	900	60日以上
C3, C8	変電所Y, Z電気設備	軽微	700	5日
C4, C9	非常用発電機 (出荷ポンプ、陸上出荷設備・品質管理用)	大破	1100	60日以上
C5, C13	出荷ポンプ、消火ポンプ	軽微	800	3日
C6	移送配管	大破	1200	7日
C10	陸上出荷設備	軽微	750	3日
C11	品質管理建屋	大破	1050	7日
C12	品質検査機器	軽微	1000	10日
		大破	2850	60日以上
		中破	1100	10日
		大破	1500	60日以上
		中破	1050	10日
		大破・倒壊	1650	60日以上
		大破	900	3日

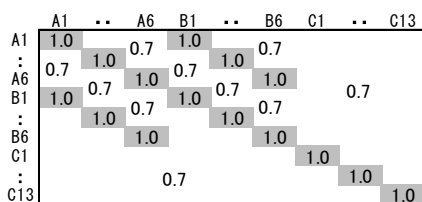


図 2 各要素の性能の相関係数行列

システム構成要素の損傷レベルに応じた耐震性能（耐力中央値）と復旧期間を表 1 に示す。耐力中央値は工学的基盤面の最大加速度に換算した値である。復旧期間は修復や再調達に要する期間であり、東日本大震災における工場・発電所の被災事例等（例えば、2）を参照した。作用地震動は（工学的基盤面の最大加速度）その中央値を 300 cm/s^2 とし、複合偏差は一律 0.54 とした。

図 1 のシステムの同一要素間（A1 と B1, A2 と B2, ..., A6 と B6）の性能を完全相関、同一要素以外の要素間（A1 と A2, A1 と B3, B6 と C13, ...等）の相関係数を 0.7 とし、これを相関係数行列として示すと図 2 のようになる。

表 1 および図 2 の条件に基づき評価した信頼性曲線（実線）をストックの累積消費量 $q(\tau)$ （破線）とともに図 3 に示す。(a)は待機冗長要素なしの場合、(b)は待機冗長要素として非常用発電機（出荷ポンプ、陸上出荷設備・品質管理用）2 機を設置した場合である。なお、貯蔵タンクのストック総量は地震発生時を 100 とする。これは、システムが健全であれば 14 日で消費する量に相当する。

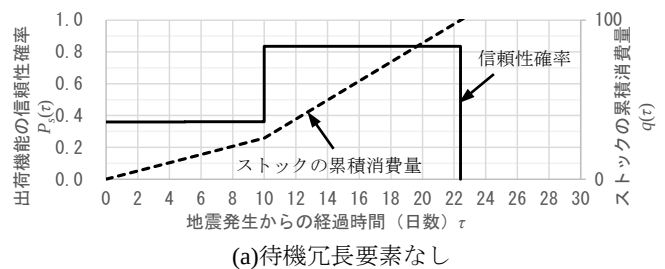
図 3(a)の待機冗長要素がない場合は、地震発生直後から 10 日まで信頼性確率が 0.35 程度と低い値で推移している。10 日以降、確率は 0.8 以上と高くなるものの、

ストックが尽きる（ストックの累積消費量が 100 となる）22.4 日後には 0 となっている。これに対し、非常用発電機を設置した場合の図 3(b)は、信頼性確率が地震発生直後から 0.9 以上と高くなっており、待機冗長要素を設けることでシステムの信頼性が大幅に向上していることが分かる。ストックは 14.6 日後に尽きている。システムの信頼性が高いため、ストックの消費は健全な場合（14 日で消費）とほぼ変わらない。

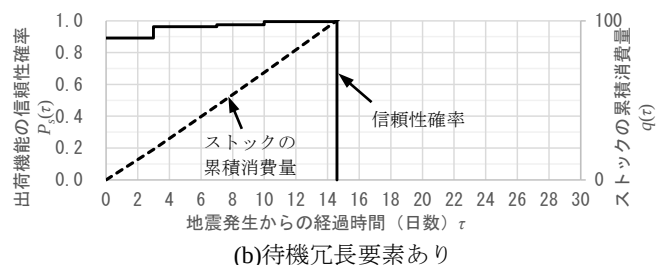
なお、ストックが尽きた後も出荷機能を維持するためには、栈橋から製品を受け入れる必要がある。本報では評価対象としてはいないものの、実際の対策立案に際しては栈橋からの製品受入を含めた信頼性評価が必要であり、その評価手法の整備は今後の課題である。

4. 結語

地震対策の必要性や優先順位を検討する際、本報で採用した評価手法¹⁾は、対策の効果を定量的に示すことができ、有用である。また、同手法は同一要素が互いに完全相関となる複数の要素に分解することで、ネットワークシステムの信頼性評価を、相関を考慮した直並システムの確率演算に帰着させ、煩雑な作業を必要としないことが利点である。非常時の石油製品の出荷をはじめ、信頼性評価の対象となるシステムはネットワーク状となることが多く、汎用性は高いと考える。



(a)待機冗長要素なし



(b)待機冗長要素あり

図 3 信頼性曲線から見た待機冗長要素の効果

参考文献

- 1) 望月智也, 静間俊郎, 中村孝明: 製品の出荷機能の信頼性評価に関する研究 —待機冗長システムを対象に—, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演集 (投稿中), 2017.
- 2) JX 日鉱日石エネルギー (株) 仙台製油所: 東日本大震災における製油所の被害と復旧, 2013.2.20
www.jsr.gr.jp/activity/JSER_report/nagai_130220.pdf (2017.3.31 現在)