訂正紙（第53回安全工学研究発表会 講演予稿集）

講演予稿集に掲載した下記講演の表やテキスト等が正しく印刷されておりませんでした。

ここに、正しいページを掲載いたします。

発表者様ならびに関係者の皆様にご迷惑をおかけしましたことを深くお詫び申し上げます。

P23～P24　講演番号9

「エピクロロヒドリンの加水分解反応の速度論的解析」

三井化学株式会社

〇中村 幸恵、後藤 慎一郎、小瀧 泰、中野 隆志

P25～P26　講演番号10

「固体物質の熱安定性評価手法に関する検討」

　住友化学株式会社 生産安全基盤センター

　〇伊藤 遼太朗，森 繁樹

P87～P90　講演番号31

「下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法の検討」

労働安全衛生総合研究所

〇高橋弘樹，高梨成次，堀智仁

P117～P120　講演番号41　特別招待講演Ⅱ

「石油精製プロセスにおける確率推論を用いた事故予知システム」

大和大学 理工学部 情報科学専攻

〇北村 章

P129～P130　講演番号45 オーガナイズドセッション

「出光における地震災害に対する取り組みについて」

出光興産株式会社 生産技術センター エンジニアリング室

〇竹内紘基

P153～P156　講演番号52

「化学物質の危険性に対するリスクアセスメント実施のための簡易シナリオ同定法 ―塗装作業への適用例―」

労働安全衛生総合研究所

〇島田行恭，佐藤嘉彦，高橋明子

P171～P174　講演番号58

「せき損を対象とした自立歩行支援ロボットによる歩行訓練時の介助者への安全対策に関する検討」

労働安全衛生総合研究所

〇北條理恵子，小山秀紀，菅知絵美，池田博康，高木元也

エピクロロヒドリンの加水分解反応の速度論的解析

三井化学株式会社
○中村 幸恵、後藤 慎一郎、小瀧 泰、中野 隆志

Kinetic analysis of the hydrolysis reaction of epichlorohydrin

Yukie Nakamura, Shinichiro Goto, Yasushi Kotaki, Takashi Nakano
Mitsui Chemicals, Inc.

キーワード：エピクロロヒドリン、エポキシ樹脂、加水分解、速度論的解析
Keywords：Epichlorohydrin, Epoxy resin, Hydrolysis, Kinetic analysis

1. はじめに

エピクロロヒドリン(ECH)は、エポキシ基とクロル基を有することから、高い反応性を有し、様々な化学物質の原料として使用されている。他原料との共重合により得られるエポキシ樹脂は接着剤や塗料として活用されている。また、アルカリ存在下での加水分解反応によりグリセリンを生成する方法もよく知られている。

ECH はエポキシ基の開環重合や分解反応が進行し、潜在危険性の高い物質であるが、発熱開始温度は高く、比較的熱安定性は高い。しかし、既報の加水分解反応を経るグリセリン生成は、100℃前後で実施されていることから[1)]、アルカリの混入により発熱反応が進行し温度が上昇した結果、ECH の重合・分解や生成物であるエポキシ樹脂の分解に至る危険性が想定される。この危険性を把握し、事故防止に繋げるため、ECH の加水分解反応に着目し、熱分析評価及びその結果に基づく速度論敵解析を実施した。

2. 実験

2-1. ECH の DSC 測定条件

ECH に 10%苛性水を添加し、示差走査熱量測定 DSC(NETZSCH 社製 DSC 3500Sirius)を行った。条件は、セル材質：SUS316L 耐圧セル(Swissi 製)、試料量：2[mg] 、試料封入雰囲気：窒素、温度範囲：30~500[℃]、昇温速度：10[℃/min]とした。

2-2. ECH の加水分解反応熱量測定条件と解析手法

温度を変え、1%苛性水に ECH を添加した際の反応熱量測定を Super-CRC(Omnical 社製)を用いて実施した。条件は、容器材質：ガラス、圧力：常圧 、試料封入雰囲気：窒素、温度範囲：40~60[℃](5℃間隔で設定)等温測定とした。解析は、AKTS 社製 Thermokinetics を用い、モデルフリーFriedman 法にて実施した。

3. 結果および考察

3-1. ECH の DSC 測定

得られた DSC 測定結果を Fig.1 および Table.2 に示した。苛性水添加により大きく発熱開始温度が低下し、複数の発熱ピークが重なって見られた。低温で複数の反応を含む加水分解反応が進行していることが示唆される結果であった。

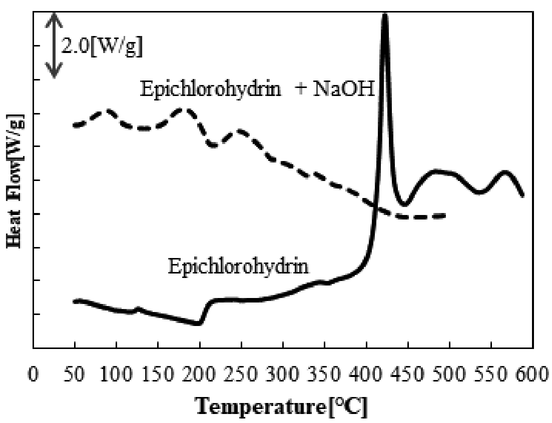


Fig.1 ECH と苛性水混合物の DSC 測定結果

Table.2 ECH と苛性水混合物の DSC 測定結果

サンプル	T_{DSC} [℃]	Q[J/g-ECH]
ECH	413	1,700
ECH＋10%NaOH	54	846

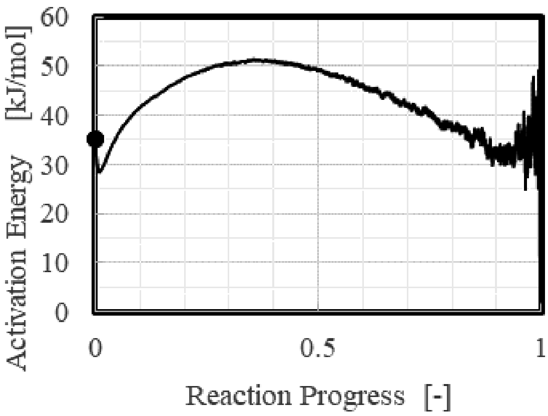


Fig.2 モデルフリー解析結果

3-2. ECH の加水分解反応熱量測定と速度論的解析

3-2-1. 活性化エネルギーの解析

CRC で得られた温度と HeatFlow のデータから AKTS を用いて速度論的解析を実施した結果を Fig.2 に示した。

反応率により活性化エネルギーは変化し、30～50[kJ/mol]の範囲であった。ECH と苛性水の加水分解反応は 3 種類の反応が逐次・併発すると報告されている [1)]。今回は、初段の開環反応の発熱に着目し、反応初期の 35[kJ/mol]の数値を採用し、モデル組成での温度シミュレーションを実施した。

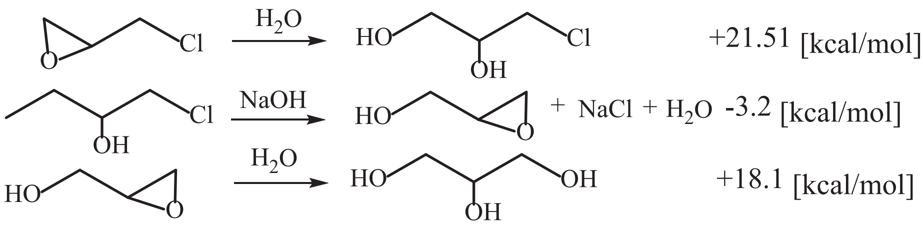
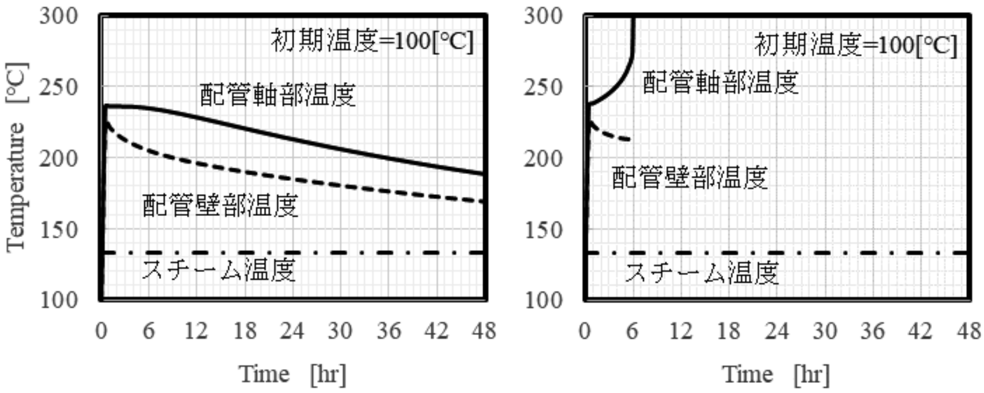


Fig.3 既報記載の ECH の加水分解反応機構

3-2-2. モデル組成での温度シミュレーション

ECH と苛性水およびエポキシ樹脂を含むモデル液について、配管を想定し、初期温度を 100[℃](130℃スチームでの外部加熱)、熱伝導率を 0.100[W/m/K]として温度挙動の推算を実施した。結果を Fig.4 に示した。軸部でも壁部でも短時間で温度が上昇し、エポキシ樹脂がある場合にはその分解が進行することでさらに温度が上昇する危険性が示された。



エポキシ樹脂分解考慮無し　　エポキシ樹脂分解考慮有り

Fig.4 モデル組成液の温度シミュレーション結果

4. まとめ

ECH と苛性水による加水分解反応の速度論的解析を実施した結果、その発熱により高温で進行するエポキシ樹脂の分解や ECH の重合・分解反応が引き起こされ熱暴走に至る可能性が示唆された。潜在的エネルギーは高いが発熱開始温度は高温である物質であっても、低温での発熱危険性を十分に評価する必要がある。その為、プロセス内で起こり得るシナリオを想定した、非定常時を含めたリスクアセスメントの実施が重要である。

参考文献

1) 吉野道夫 他著：エピクロルヒドリン誘導体に関する研究(第 1 報), 油化学, 1964, Vol.13, No.11, P.582-585

固体物質の熱安定性評価手法に関する検討

住友化学株式会社　生産安全基盤センター
○伊藤　遼太朗，森　繁樹

Thermal stability evaluation of solid material

Ryotaro Itoh and Shigeki Mori
Production & Safety Fundamental Technology Center, Sumitomo Chemical Co.,Ltd.

キーワード　：熱安定性, DSC, C80, AKTS
Keywords：Thermal stability, DSC, C80, AKTS

1. はじめに

化学プロセスにおける潜在危険性を事前予測、評価することは保安防災面で重要である。一部の固体物質では、融解に起因する吸熱挙動と分解による発熱挙動が同じ温度領域で進行し、SC-DSC による昇温測定では、正確な反応速度パラメータを得ることが困難である。そこで、融点未満の温度領域で実施した C80（Setaram 社）による等温測定で得られたデータを AKTS 社の反応速度解析ソフトウェア（以下、AKTS）で解析することによって、固体状態での分解反応の速度パラメータを入手する方法を検討した。本発表では、固体状態での反応速度パラメータの入手方法を示すと共に、その有用性について報告する。

2. 固体状態での熱分解性の確認手法

既往の検討にて、分解前や分解中に融解が起こる物質の固体状態の発熱挙動を予測するために、液体状態で得られた分解反応速度パラメータを適用するのは正しくない場合があることが言われている[1)]。そこで、固体状態での熱分解の有無を確認する手法を検討した。

2.1. 測定方法

試料には Diaminomaleonitrile と Clothianidin を用いた。昇温測定には密封セル DSC(以下、SC-DSC)を用い、金メッキ容器を使用し、N_2 雰囲気、昇温速度は 0.5, 1, 2, 4 K/min と 8K/min または 10 K/min の 5 条件で測定した。等温測定には、C80 を用い、耐圧容器、N_2 雰囲気で実施した。

2.2. 検討結果

SC-DSC の結果を図 1、2 および表 1 に示す。昇温速度を変化させることによって、Diaminomaleonitrile は融点(180℃)以下で発熱する挙動が見られた。したがって、SC-DSC の昇温速度を変化させることにより、固体状態で発熱することを確認することができた。一方で、Clothianidin は昇温速度を変化させても、融点(170℃)より低温側に発熱は見られず、融解熱にも大きな変化は見られなかった。したがって、SC-DSC の昇温測定では、固体状態で発熱することを確認で

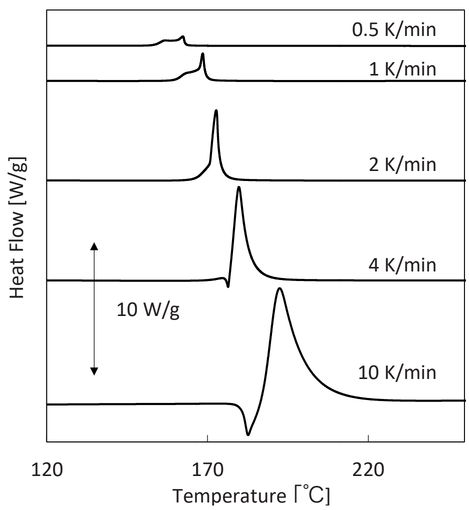


図 1. Diaminomaleonitrile の SC-DSC 結果

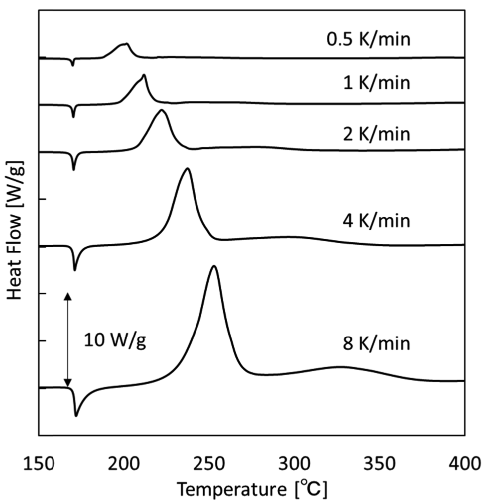


図 2. Clothianidin の SC-DSC 結果

きなかった。

そこで、Clothianidinの融点(170℃)よりも低い温度である150℃にてC80の等温測定を実施した。その結果、一定の誘導時間を経てから発熱が見られた(図3)ため、C80の等温測定で固体状態の発熱挙動を確認できた。

3. 固体状態での反応速度パラメータの有用性

Clothianidinの SC-DSC昇温測定から得られた液体状態での発熱挙動から推算される固体温度領域での発熱挙動と、C80の融点以下での等温測定から固体状態での発熱挙動を比較した。

3.1. 測定

C80 は耐圧容器を使用し、N_2 雰囲気にて 145, 150, 155℃にて等温測定を実施し、反応速度解析には AKTS を用いた。

3.2. 結果

固体状態（C80）と液体状態（SC-DSC）の反応速度解析をそれぞれ実施し、得られた反応速度パラメータから150-165℃等温時の発熱挙動を予測した(図 4)。仮に液体状態で得られた反応速度パラメータを融点以下まで外挿した場合、融点(170℃)以下の温度では、固体状態の方が発熱検出までの誘導期間が短くなったことから、固体状態の熱安定性の方が低くなることが分かった。したがって、融点以下の領域では固体状態の反応速度パラメータを適用しないと熱分解の危険性を過小評価する可能性があることが示唆された。

表 1. Clothianidin の SC-DSC 結果

昇温速度 [K/min]	融解熱 [J/g]	発熱量 [J/g]
0.5	-153	2807
1	-143	2560
2	-144	2608
4	-149	2538
8	-156	2501

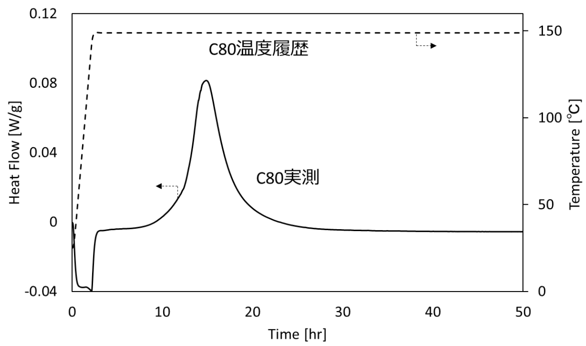


図 3. Clothianidin の C80 結果(150℃等温)

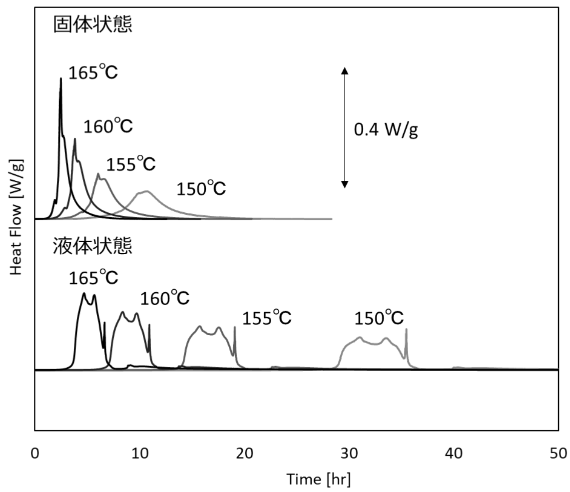


図 4. 各状態の反応速度解析結果の比較

4. まとめ

本検討によって、以下の知見が得られた。

・固体状態での分解性の確認には C80 等温測定が有効であること

・融点以下での C80 等温測定データから AKTS による解析によって、固体状態での分解反応の速度パラメータを入手できること

・融点以下の領域では固体状態の分解反応の速度パラメータを適用しないと熱分解の危険性を過小評価する可能性があること

引用文献

1) B. Roduit et al., Thermal decomposition of AIBN, Part B: Simulation of SADT value based on DSC results and large scale tests according to conventional and new kinetic merging approach, Thermochimica Acta, 621, 6-24, (2015)

下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法の検討

労働安全衛生総合研究所
○高橋弘樹，高梨成次，堀智仁

Examination on analysis method of fall down strength of reinforced concrete column with lower part cutting

Hiroki Takahashi, Seiji Takanashi and Hori Tomohito
National Institute of Occupational Safety and Health

キーワード　：建築解体工事，鉄筋コンクリート柱，縁切り，転倒，強度，計算
Keywords：Demolition work, Reinforced concrete column, Cut, Fall down, Strength, Analysis

1. はじめに

建築物の解体工事において、重機を用いずに外壁を解体する場合、ワイヤーロープ等により外壁を転倒させる工法を用いることが多い。この工法は転倒工法と呼ばれており [1)]、外壁を転倒させる際は、柱壁の下端の一部を切削して、倒しやすくしてから外壁を引き倒す。柱壁の下端の一部を切削することを縁切りと呼んでいるが [1)]、安全に作業を行うための柱の縁切り量等の具体的な基準はなく、解体工事に関する指針等 [1)] には､外壁転倒の作業手順や留意事項の概要が示されているだけである｡解体工事現場では縁切り作業中に、削りすぎて外壁が倒壊し、作業員が下敷きになるという災害も発生している。このような災害を減らすためには、転倒工法における縁切り量と柱の力学的な安定性を定量的に評価する必要があると考えられる。そこで筆者らは、外壁の基本部材である柱を対象として、下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法を提案した [2)]。この計算方法は、柱が転倒するときの曲げ強度を計算する方法であるが、図 1 に示すように、柱が転倒するときの主筋の座屈を考慮した計算はできない。実際の解体工事現場では、縁切りした鉄筋コンクリート柱が転倒するとき、図 1 に示すように、柱転倒の前方に位置する主筋に座屈が発生し、柱の転倒強度はこの主筋の座屈により決まることがある。

本報では、柱が転倒するときの主筋の座屈を考慮して、下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法を検討した。

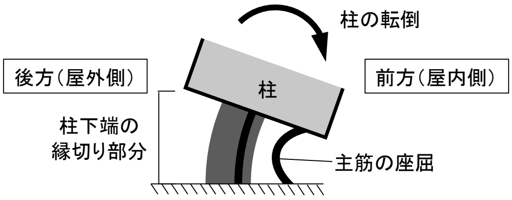


図 1 柱の転倒と縁切り部分の主筋の座屈

2. 計算方法

主筋の座屈を考慮した鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法を以下に示す。

① 筆者らが提案した計算方法 [2)] より、下端部を縁切りした鉄筋コンクリート柱の曲げモーメントと部材角関係を計算する。柱の曲げモーメントと部材角関係を計算する際、図 2 に示すように、高さ方向（y 方向）に柱部材を微小要素に分割する。この微小要素に、柱材料の応力 σ とひずみ ε 関係から計算した柱断面の曲げモーメント M と曲率 φ の関係を与え、図 3 に示すように、柱に軸力 N が作用している状態で、柱下端に曲げモーメント M を作用させ、各微小要素の部材角 $\theta(y)$を計算する。

② $\theta(y)$より、縁切り部分の各微小要素の中立軸より前方にある主筋の圧縮ひずみ $\varepsilon(y)$を計算する。以後、本計算における主筋については、縁切り部分の中立軸より前方にある主筋を指すこととする。

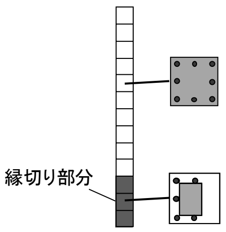


図 2 柱の要素分割

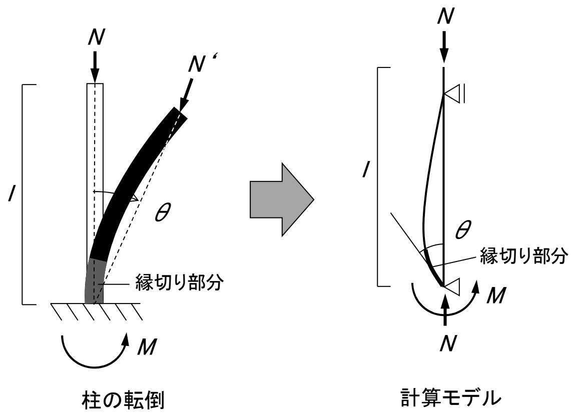


図 3 柱転倒のモデル化

③ 図 4(a)に示す圧縮曲げを受ける各微小要素の主筋の長さ $h_{\mathrm{b}}(y)$を，以下により計算する．

$$h_{\mathrm{b}}(y) = \bigl(1-\varepsilon(y)\bigr)h(y) \tag{1}$$

$h(y)$: 微小要素の主筋の元長さ、$\varepsilon(y)$: 圧縮曲げ変形による微小要素の主筋のひずみ

④ 図 4(a)に示す圧縮曲げ変形による主筋の部材角 θ_0 と主筋上端 O_2 の位置を計算する。

⑤ 図 4(a)に示す主筋の下端 O_1 と上端 O_2 の直線距離 l と、線分 O_1 O_2 に対する各微小要素の角度 $\theta_{\mathrm{b}}(y)$を計算する。

⑥ 主筋は圧縮されているので、図 4(b)に示すように、各微小要素の角度 $\theta_{\mathrm{b}}(y)$はそのままで、各微小要素の長さを元の長さの $h(y)$にした場合の主筋の下端 O_1 と上端 O'_2 の直線距離 l' を計算する。

⑦ l と l' の差$\varDelta l$を計算する。

⑧ 図 4(b)に示すように、線分 O_1 O'_2 に対する各微小要素の角度 $\theta'_{\mathrm{b}}(y)$を、次式により計算する。

$$\theta'_{\mathrm{b}}(y) = \theta_{\mathrm{b}}(y) + \theta' \tag{2}$$

θ': 線分 O_1 O'_2 と線分 O_1 O_2 との角度

⑨ 次式により、⊿l の値を $\theta'_{\mathrm{b}}(y)$の割合で、各微小要素に割り当てる。

$$\theta'_{\mathrm{a}} = \sum|\theta'_{\mathrm{b}}(y)| \tag{3}$$

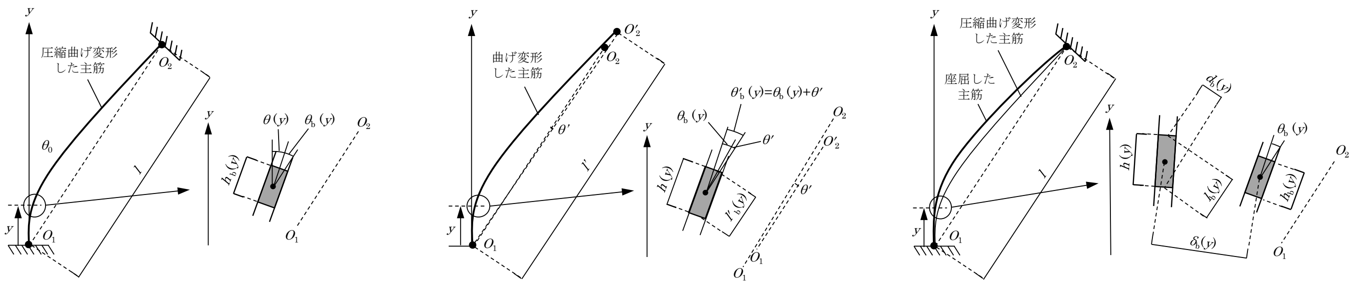
$$\varDelta l'_{\mathrm{b}}(y) = \frac{|\theta'_{\mathrm{b}}(y)|}{\theta'_{\mathrm{a}}}\cdot \varDelta l \tag{4}$$

θ'_{a}: 縁切り部分における線分 O_1 O'_2 に対する各微小要素の角度 $\theta'_{\mathrm{b}}(y)$の合計

$\varDelta l'_{\mathrm{b}}(y)$: $\varDelta l$ の値を $\theta'_{\mathrm{b}}(y)$の割合で各微小要素に割り当てた値

⑩ 図 4(b)に示す各微小要素の線分 O_1 O'_2 に射影する長さ $l'_{\mathrm{b}}(y)$を、以下のように計算する。

$$l'_{\mathrm{b}}(y) = h(y)\cdot\cos\theta'_{\mathrm{b}}(y) \tag{5}$$



(a) 圧縮曲げ変形　　(b) 主筋を元長さとした場合の曲げ変形　　(c) 座屈による変形

図 4 縁切り部分の主筋の変形

⑪ 図 4(c)に示すように、主筋が圧縮せずに座屈すると、各微小要素の線分 $O_1\,O'_2$ に射影する長さ $l_\mathrm{b}(y)$と，線分 $O_1\,O'_2$ の直角方向に射影する長さ $d_\mathrm{b}(y)$は以下のようになる.

$$l_\mathrm{b}(y) = l'_\mathrm{b}(y) - \Delta l'_\mathrm{b}(y) \tag{6}$$

$$d_\mathrm{b}(y) = \sqrt{h(y)^2 - l_\mathrm{b}(y)^2} \tag{7}$$

⑫ 式(6)と式(7)より、図 4(c)に示すような座屈による主筋の変形を計算する。

⑬ 図 4(c)に示すように、各微小要素において、圧縮曲げによる変形の位置と座屈による変形の位置の差 $\delta_\mathrm{b}(y)$を計算する。

⑭ 柱断面の応力 σ とひずみ ε の関係を用いて、各微小要素の主筋の圧縮ひずみ $\varepsilon(y)$に対応する応力 $\sigma(y)$を計算する。

⑮ 圧縮曲げ変形により各微小要素の主筋に作用する軸力 $N_\mathrm{b}(y)$と、座屈により各微小要素の主筋に作用する曲げモーメント $M_\mathrm{b}(y)$を以下により計算する。

$$N_\mathrm{b}(y) = \sigma(y) \cdot A_\mathrm{s} \tag{8}$$

$$M_\mathrm{b}(y) = N_\mathrm{b}(y) \cdot \delta_\mathrm{b}(y) \tag{9}$$

A_s: 主筋の断面積

⑯ 座屈により各微小要素の主筋に作用する応力 $\sigma_\mathrm{b}(y)$は以下のようになる。

$$\sigma_\mathrm{b}(y) = \frac{N_\mathrm{b}(y)}{A_\mathrm{s}} + \frac{M_\mathrm{b}(y)}{Z_\mathrm{ps}} \tag{10}$$

Z_ps: 主筋の塑性断面係数

⑰ 座屈により主筋の強度が決まるときの判定を、次のようにする。

$$\sigma_\mathrm{bm} = \max\left(\sigma_\mathrm{b}(y)\right) \tag{11}$$

$$\sigma_\mathrm{bm} \geq \sigma_\mathrm{ts} \tag{12}$$

σ_bm: 座屈により主筋に作用する応力の最大値，σ_ts: 主筋中央の引張強度

⑱ 座屈により主筋の強度が決まらなかった場合は、新たに ΔM を与え、①以下の計算を行う。座屈により主筋の強度が決まった場合は計算を終了する。

3. 計算例

本報で検討した計算方法を用いて、下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度を計算した。計算に用いた鉄筋コンクリート柱を図 5 に、材料特性を表 1 に示す。筆者らが行った下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒実験に用いた試験体 3)を参考にして、計算に用いた鉄筋コンクリート柱の寸法と材料特性を決定した。図 5(b)に示すように計算モデルは、柱下端の縁切り型の異なる 3 タイプである。3 タイプのコンクリートの縁切り量は同じであり、モデルごとに主筋本数を調整した（主筋本数は 3 本、5 本、8 本の 3 タイプ）。

計算結果を図 6 に示す。図の縦軸は柱下端の曲げモーメント M であり、横軸は柱下端の部材角 θ である。図 6 より、主筋本数が多いほど最大曲げモーメントの値が大きい値となった。計算の精度については、今後、実験結果と比較するなどして検討する予定である。

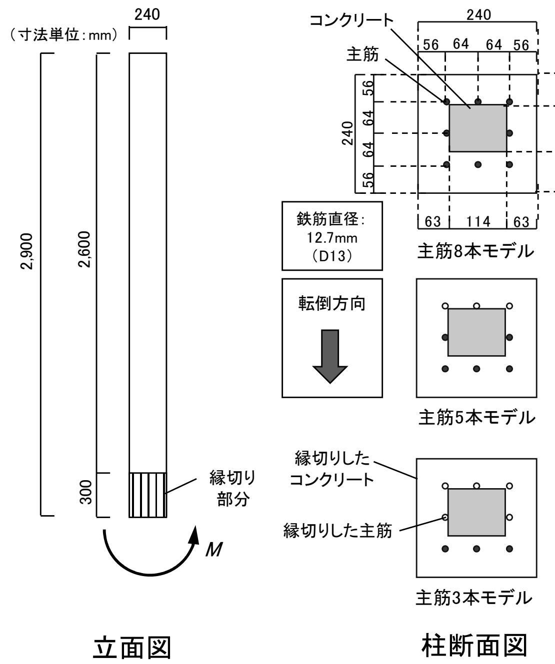


図 5 計算に用いた鉄筋コンクリート柱

表 1 計算に用いた柱モデルの材料特性

コンクリート		主筋			
圧縮強度 σ_b (N/mm²)	ヤング係数 E_c (N/mm²)	降伏点 σ_y(N/mm²)	引張強さ σ_u (N/mm²)	ヤング係数 E_s (N/mm²)	2次勾配 E_{st} (N/mm²)
30.7	15,100	353	525	205,000	4,100

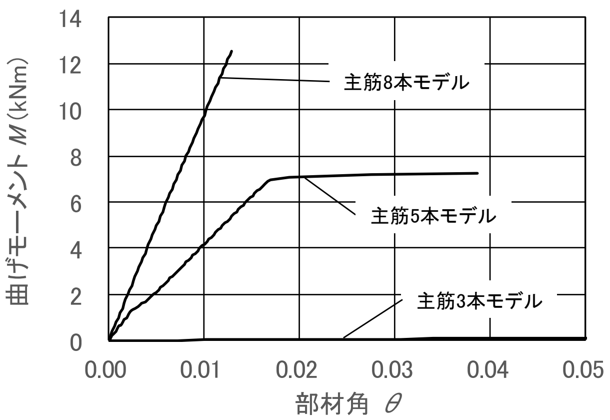


図 6 曲げモーメントと部材角の関係

4. まとめ

本報では、主筋の座屈を考慮して、下端を縁切りした鉄筋コンクリート柱の転倒強度の計算方法を検討した。計算精度については今後検討する予定である。また、本研究で検討したのは、外壁の基本部材と考えられる柱である。今後は、柱と壁より構成される外壁の計算について検討したいと考えている。

参考文献

1) 建設業労働災害防止協会編：コンクリート工作物解体工事の作業指針，建設業労働災害防止協会，2009.
2) 高橋弘樹ら: 下端部を切削した鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力の計算方法の検討, 第 52 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 229-232, 2019.11.
3) 高梨成次ら: 建築物の解体工事における災害防止対策の検討　その 5 柱の転倒工法の安全性に関する実験的検討の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1549 材料施工, pp.1097-1098, 2020.9.

石油精製プロセスにおける確率推論を用いた事故予知システム

大和大学　理工学部 情報科学専攻
○北村　章

Risk Prediction System Using Stochastic Inference in Petroleum Refinery Process

Akira Kitamura
Faculty of Science and Engineering, Yamato University

キーワード：ヒヤリハット報告，リスクアセスメント，ベイジアンネットワーク，オントロジー
Keywords：Incident Report, Risk Assessment, Bayesian Network, Ontology

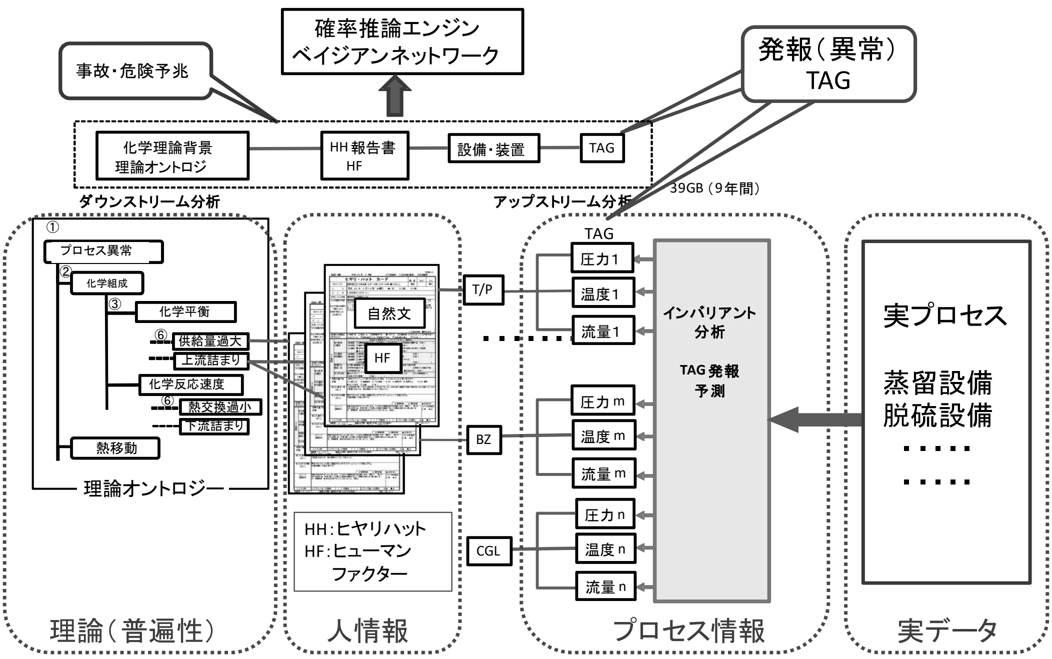
１．はじめに

経済産業省（NEDO）では，平成 29 年度～平成 30 年度 IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業（IoT 技術を活用した新たな産業保安システムの開発）が公募された．筆者らはこれを受け，インバリアント分析[1]によるオンライン異常予兆検知と確率推論に基づくリアルタイム事故予知システム，発生頻度の低い事故の予知，および未発生事故リスクの評価技術の開発を行った[2].

ここでは，確率推論（AI 技術）によって，プロセス異常検知情報とヒヤリハット情報を用いて，時々刻々，高い頻度で発生する不具合からインシデントや事故を想像するための事故予知システム[3]について述べる．

２．事故予知システムの概要

事故予知システムの特徴は，モデル事業所で採取されたプロセスデータに基づく異常検知情報，ヒヤリハット報告，およびヒヤリハット情報に内在する事象の理論的背景を表現した理論オントロジーを紐付けしたデータベースを構築し，ベイジアンネットワーク[4] による確率推論によって事故やインシデントに繋がる事象を抽出して運転員に「気付き」として提示することである．本システムを継続的に運用することで，リアルタイムリスクアセスメントを実現する．システムの概要を**第 1 図**に示す．

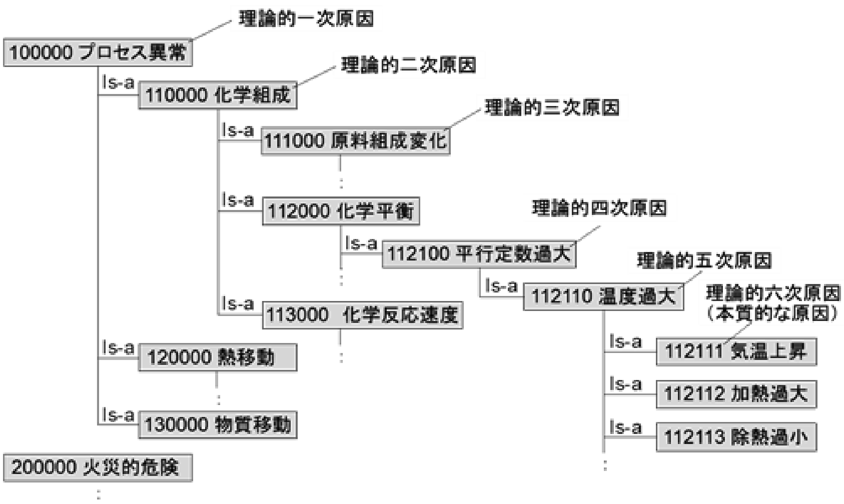


第 1 図　事故予知システムの概要

具体的には，DCS やセンサから得られるプロセスデータを用いて，インバリアント分析システムによってプロセスの異常を検知する．インバリアント分析では，センサ間の関係性から，通常とは異なる異常を検知する．つぎに，この異常発生を事前確率とし，ベイジアンネットワークによって確率推論を行う．ここでは，ヒヤリハット情報を中核として化学理論の知識からプロセスの変動（TAG 発報）の展開を分析するダウンストリーム分析とプロセス変動から理論的原因を分析するアップストリーム分析で構成される．

2. 理論オントロジーとヒヤリハットの紐付け

ヒヤリハット報告に含まれる現場で発生する事象の原因を化学理論的に分類し，木構造に体系化した理論オントロジーを構築した．オントロジーの概要を**第 2 図**に示す．本オントロジーでは事象の原因が化学理論知識として抽象-具体の関係を表す「is-a」関係に基づき，ルート（親ノード）から順に 6 桁の数字とともに階層的に体系化されている．現場で発生する事象の原因は，プロセス異常，火災的危険，有害物危険，測定装置異常などに分類できる．また，これらは，機械学習によってヒヤリハットや関連 TAG と紐付いている．



第 2 図　理論オントロジーの構成

3. データベースの概要

推論用データベースにおける各ヒヤリハットに関連する TAG 情報の紐付けを行った．データベースの概要を**第 3 図**に示す．ここで，1 件（1 行）のデータは，理論オントロジー（全六次原因），ヒヤリハット報告に従った人的要因，「結果の重大性」および自然文の類別で構成されている．また，T000X は各種の TAG であり,「1」は紐付けあり，「0」は紐付けなしを表している．

報告書No.	理論的一次原因	理論的二次原因	…	心理面	技術面	…	思い込み	経験不足	…	結果の重大性	T0001	T0002	…
1	火災的危険	危険物漏洩	…	1	0	…	1	0	…	火傷・けが	1	0	…
2	火災的危険	危険物漏洩	…	1	0	…	1	0	…	品質低下	0	1	…
3	有害物危険	有害液体噴出	…	0	1	…	0	1	…	火傷・けが	0	0	…
4	火災的危険	危険物漏洩	…	0	0	…	0	0	…	公害	1	0	…

HH番号　理論オントロジー（全六次）　人的要因（HHより）　HHより　紐付けTAG情報

T0001	T0002	…	不具合第一	不具合第二	…	対策第一	対策第二	…
1	0	…	材料の異常	噴出・吹き出し	…	作業	調整・変更	…
0	1	…	機器の不具合	欠陥・欠損	…	作業	補修・修復	…
0	0	…	材料の異常	噴出・吹き出し	…			…
1	0	…	機器の不具合	ずれ・緩み	…	確認・連絡	異常ないか確認	…

自然文の類別

第 3 図　データベースの構成

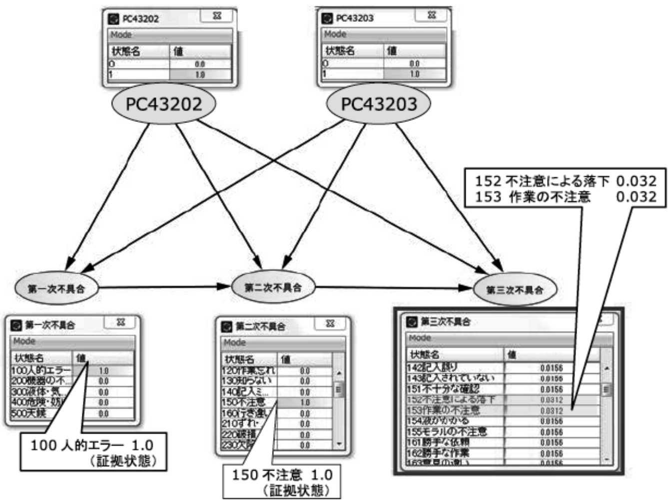
4. 確率推論による事故予知

4. 1 自然文の確率推論

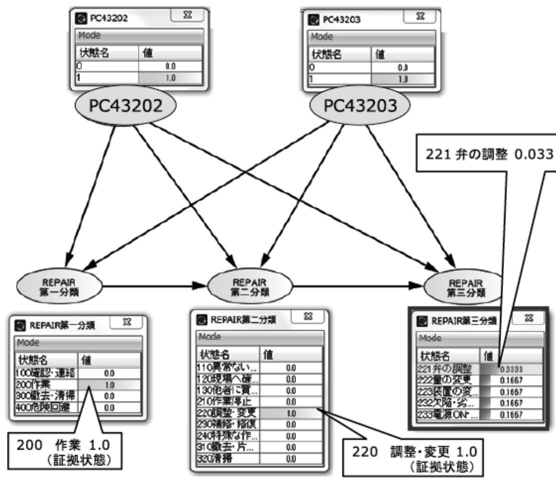
分析用データベースに基づいて確率推論を行った．アップストリーム分析の事例を**第 4 図**に示す．ここでは，TAG「PC43202」と「PC43203」を発報させ，自然文のうち不具合の分析を行った．これらの TAG は，接触改質装置の水素ガスの圧力調節計を表している．アップおよびダウンストリーム分析では，ベイジアン

ネットワークにおいて，各ノードで最も高い事後確率を示すイベントを順に証拠状態（事前確率を 1 と仮定）として推論を連続的に行い，各階層で最も関係性の強い事象を自動的に抽出する．この例では，それぞれが最大値となる確率値を証拠状態とした推論の連鎖として，「人的エラー」→「不注意」→「不注意による落下」→「作業の不注意」を得る．

つぎに，自然文のうち対策の分析事例を**第 5 図**に示す．それぞれが最大値となる確率値を証拠状態とした推論の連鎖として，「作業」→「調整・変更」→「弁の調整」となる．



第 4 図　自然文（不具合）の推論例



第 5 図　自然文（対策）の推論例

5.　シナリオ作成とリスクアセスメントシステム

5.1　シナリオ作成

リスクアセスメント構築の一環として TAG の発報による確率推論結果を「気付き」として，モデル事業所の技術者によるシナリオ作成実験を行っている．**第 1 表**に推論結果の例として「気付き」を示し，それによるシナリオ作成例を示す．**第 1 表**は，モデル事業所における実証システムの表示画面である．P32014 と LC32006 が発報しており，不具合は「精製装置の異常」であり，対策・行動が「清掃」などとなる．「発報 TAG 群」が設定（証拠状態）されると，確率的に関係性の高い「理論オントロジー」「自然文」および「ヒューマンファクター」が推論される．モデル事業所の技術者や運転員がこれらの結果を見て，各自の経験知に基づいて「シナリオ」を想像する．これによって，事故やインシデントに関わる予兆の分析とリスクアセスメントを行う．

この事例について，モデル事業所の熟練技術スタッフによって作成されたシナリオの一例を以下に示す．

「当該タワーは内部で閉塞が起こる可能性がある．その影響で塔底部に液が下りず液面が下がることにより，塔底の圧力に影響が出る．この結果，当該装置を停止し，タワー清掃の必要性が懸念される．（不具合，対策・行動，結果の重大性より想像）」

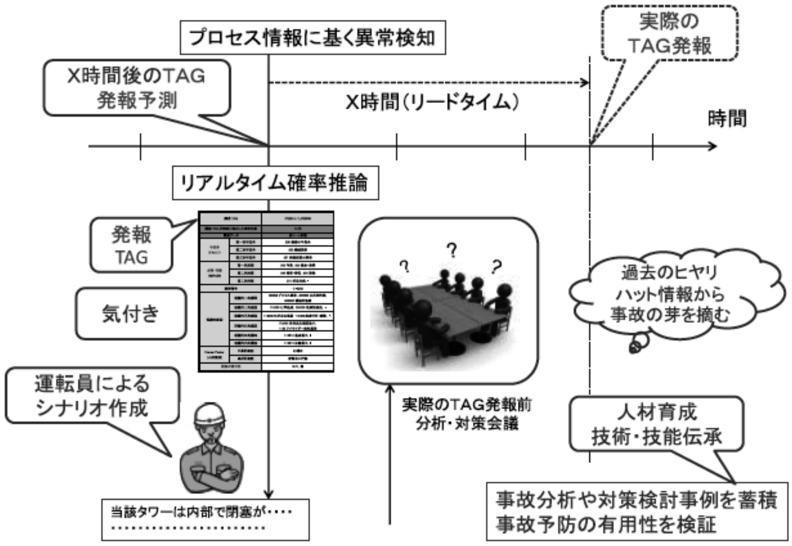
ここで，シナリオとは，確率推論結果に基づいて自己の経験に照らして実際に起こり得るであろう事故やインシデントの予兆の想像である．確率推論の結果は複数個のヒヤリハット報告を統計処理した情報であることから，シナリオ作成者のもつ個々のヒヤリハットの記憶量よりも，保有する経験知の広さや深さによって，その内容が異なる．この例では，「不具合」の欄の「精製装置」を自己の経験知から「タワー」と想像し，「清掃」については想像することなく，直接的にシナリオに記載されている．

5.2 リアルタイムリスクアセスメント

　上記の事故予兆分析システムを実時間で連続的に稼働させることで，リアルタイムリスクアセスメントの実現を目指している．概念図を**第 6 図**に示す．X 時間後に発報する TAG 群を予測し，その情報で確率推論を行うと「気付き」を得る．さらに，「気付き」からシナリオの想像を繰り返すことで，重大インシデントについては事前に対策を準備できる．すなわち，過去のヒヤリハットから近い将来に起こるであろう「事故の芽」を摘むことが期待される．これにより，ヒヤリハット報告の重要性が認識されることも期待できる．

第 1 表　確率推論結果の事例

関連 TAG		P32014 / LC32006
関連 TAG が同時に発火した事例件数		10 件
関連データ		別シート参照
不具合（FAULT）	第一次不具合	200 機器の不具合
	第二次不具合	250 機械異常
	第三次不具合	251 精製装置の異常
対策・行動（REPAIR）	第一次対策	200 作業，300 撤去・清掃
	第二次対策	230 補修・修復，320 清掃
	第三次対策	231 部品交換，−
装置番号		C−3202
理論的原因	理論的一次原因	100000 プロセス異常，200000 火災的危険，500000 機械的危険
	理論的二次原因	110000 化学組成，230000 危険物漏洩，−
	理論的三次原因	113000 化学反応速度 114000 組成分析・調整，−，
	理論的四次原因	113200 目的反応速度過小，1143 アナライザー条件異常
	理論的五次原因	113210 温度過小，−
	理論的六次原因	113212 加熱過小，−
Human Factor（人的要因）	大局的要因	心理面
	局所的要因	習慣的に行動
結果の重大性		S/D，他



第 6 図リアルタイムリスクアセスメント

6. おわりに

　ヒヤリハット報告の分析と事象の原因に関わる化学理論をオントロジーで表現したデータベースによる確率推論を行うことを特徴とする事故の事故予知技術を開発した．また，発報 TAG 群を用いた確率推論を行い, その結果から技術者によってシナリオを作成し, その妥当性からシステムの有用性を検証した. 今後は, リアルタイムリスクアセスメントシステムの実現を目指す. また, 事故や重大インシデントに関わる対策は, 研究者・技術者，設備運転員，管理者，あるいは安全有識者によって行われることが望ましい．そこで，各要員を，その役割や権限を属性として付与されるエージェントとして設定し，多様な構成員による意思決定を支援するシステムを検討する．（本報告は「平成 29 年度～平成 30 年度 IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業（IoT 技術を活用した新たな産業保安システムの開発）」の成果として発表する）

参考文献

[1] http://jpn.nec.com/rd/research/DataAnalytics/invariantanalysis.html
[2] 平成 29 年度～平成 30 年度成果報告:IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業研究開発項目〔2〕IoT 技術を活用した新たな産業保安システムの開発各種データの活用により保安を高度化するシステムの構築－運転データ等による異常検知・事故予測システム－ NEDO 平成 31 年 2 月
[3] 北村章,片田直伸: 確率推論を用いた石油精製プロセスにおける事故の予兆分析とリスクアセスメントシステム,システム/制御/情報,Vol. 62, No. 8, pp. 305‑310(2018)
[4] http://www.msi.co.jp/bayolink/

出光における地震災害に対する取り組みについて

出光興産株式会社　生産技術センター　エンジニアリング室
○竹内紘基

Efforts to protect the earthquake hazard in Idemitsu

Hiroki Takeuchi
Engineering Design & Technical Office, Technology & Engineering Center,
Idemitsu Kosan Co.,Ltd

キーワード：地震リスク、耐震評価、FEM 解析
Keywords：Earthquake risk, Earthquake-resistant evaluation, FEM analysis

1. はじめに

出光興産北海道製油所では、2003 年十勝沖地震によりタンク火災が発生した。北海道製油所の地表面最大加速度は 86gal(合成値)であるにもかかわらず被害が発生した理由は、タンクのスロッシングに影響を与える速度応答スペクトルが消防法の規定値をはるかに超えスロッシング高さが想定以上になったことが、一つの原因とされている。その後の調査研究から、北海道製油所が位置する苫小牧は長周期地震動が卓越しやすい地殻構造であることがわかり、苫小牧のように長周期地震動の発生の可能性がある地域に関しては消防法告示において長周期地震動の地域特性に応じた補正係数が導入された。

この事例の通り、設備の耐震強度に関しては、法対応のみでは十分ではない可能性があることが分かったため、出光独自で考え方を構築するとともに、関連事業所の地盤特性も踏まえたうえで、地震動を想定し、自主的な耐震評価および各設備の対策を推進してきた。

さらに、近年は経済産業省資源エネルギー庁が推進する石油供給インフラ強靭化事業の対応等で多くの地盤情報が得られたことや地震調査研究推進本部等による地震に関する評価も年々見直しされており、これらの情報を取り込んだ地震動や地震リスクに対する考え方の再検討を進めるとともに、3 次元 FEM モデルによる動的評価を適用して各種設備の安全性を解析によって担保するケースも増加している。それらの概要や一例について報告する。

2. 耐震評価に関する取り組みの概要

2003 年十勝沖地震を契機に構築した出光独自の地震対応に関する考え方は、表-1 のとおりである。これは、当時国内外の地震リスクに対する考え方を調査した結果、選定したもので、当時の米国の UBC(米国建築基準)の考え方をもとに設定した。この確率的な地震動算定においては、当時の各所地盤情報も最大限に考慮し、地盤特性が地震動に

表-1　地震リスクに対する考え

発生頻度	再現期間（発生確率）	要求性能
時々	72年（50年で50%）	■ 連続運転可能
稀	475年（50年で10%）	■ 製油所全体の長期停止防止 ■ 環境汚染防止
非常に稀	970年（50年で5%）	■ 人身災害防止 ■ 大規模災害防止

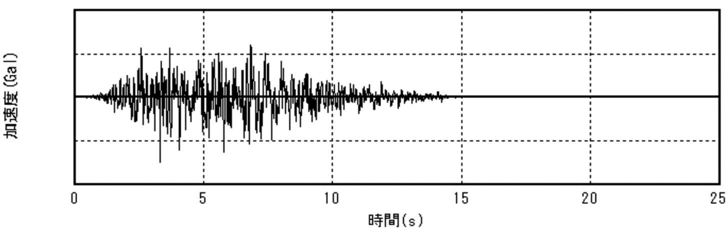


図-1　地表面地震動時刻暦

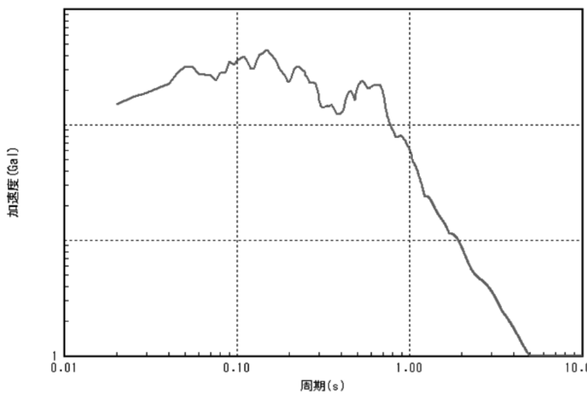


図-2　地表面加速度応答スペクトル

与える影響を考慮できるものとして図-1 および 2 に示すような地震動時刻歴や応答スペクトルを算定し、各設備の振動特性に応じた対応がとれるようにした。

一方で、上記考え方を設定後、20 年近く経過しており、その間に経済産業省資源エネルギー庁が主導する石油供給インフラ強靭化事業に基づいた準備調査により各所の地盤情報がより詳細に得られただけでなく、地震に関する評価も地震調査研究推進本部等により年々アップデートされ、それらの影響を正しく把握することが必要になった。そのような最新の情報を適用することで地震動がどの程度変わるか確認するとともに、その結果に基づき表-1 の考え方の見直し検討を行っている。

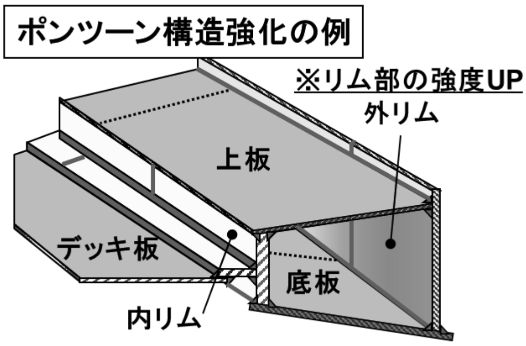


図-3　ポンツーン構造強化例


図-4　電気集塵機補強例

3. 耐震評価および補強事例

出光では、十勝沖地震時のタンク火災を契機に、保安強化対策の一環として、タンクの耐震性強化策を検討する目的で社内の専門家から構成されるタスクチームを立ち上げ十勝沖地震の特徴である「やや長周期地震動」に対してシミュレーション等の技術を適用し、浮屋根の損傷原因究明やタンク各部の構造改善・強化検討を実施し、計画的に設備改造を推進してきた。その結果の一例であるタンク浮き屋根補強例を図-3 に示す。さらに、表-1 に示した出光独自の考え方と地盤特性を考慮した地震動に基づき加速度型地震動に対する評価、対策も実施している。その対策の一例を図-4 に示す。

4. 3 次元 FEM 評価事例

耐震評価や補強検討を進める中で、通常の評価では対応が物理的に困難であったり、非現実的な対応しか選択肢がないことが発生する。そのような場合を中心に 3 次元 FEM 評価を適用している。

例えば、通常の高圧ガス耐震評価において杭の許容値を大幅に超過する高圧ガス冷凍タンクに関して、図-5 に示すように地盤/タンク基礎/内液も連成した 3 次元詳細モデルを作成し、想定される地震動を付与した動的解析を実施した。その結果、杭は終局強度以下になることを確認した。地盤の剛性低下により系全体の固有周期が約 3sec にもなることで杭への入力がさほど大きくならないというメカニズムも明確になった。最近では、護岸の側方流動解析についても実験結果との整合性等を検証しながら、より精度の良い評価とそれを適用した対策検討についても取り組んでいるところである。

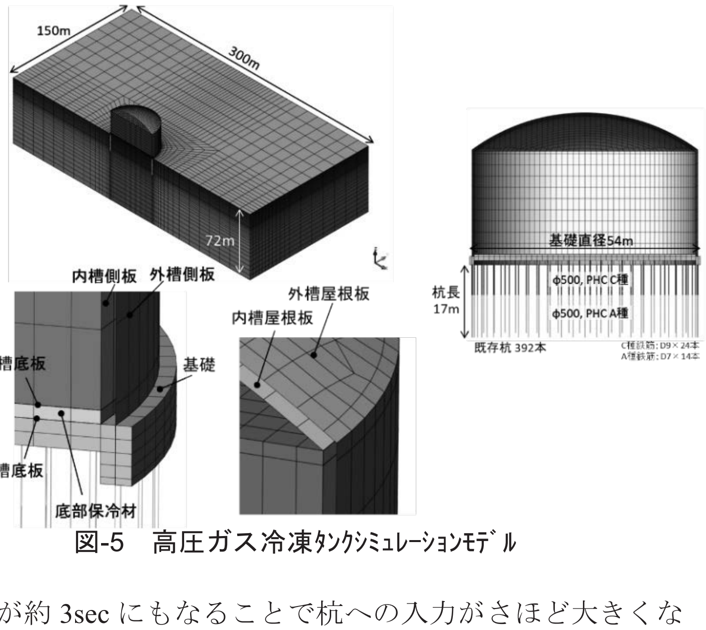


図-5　高圧ガス冷凍ﾀﾝｸｼﾐｭﾚｰｼｮﾝﾓﾃﾞﾙ

5. おわりに

今後も地震含めた自然災害の最新情報を把握し、一方で、自然災害による影響評価や対策検討においても、3 次元 FEM 解析等の最新の技術を取り入れ、自然災害に対する取り組みを継続的に推進していく。

化学物質の危険性に対するリスクアセスメント実施のための簡易シナリオ同定法　—塗装作業への適用例—

労働安全衛生総合研究所
○島田行恭，佐藤嘉彦，高橋明子

Simplified identification method of accident scenarios with fire and explosion in chemical risk assessment - example of application to painting operation

○Yukiyasu Shimada, Yoshihiko Sato, and Akiko Takahashi
National Institute of Occupational Safety and Health, Japan

キーワード：化学物質リスクアセスメント，シナリオ同定，火災・爆発防止，塗装作業
Keywords：Chemical risk assessment, Scenario identification, Fire and explosion prevention, painting operation

1. はじめに

化学物質の危険性に対するリスクアセスメント（RA）では，危険源を網羅的に想定し，火災・爆発発生に至る様々なシナリオを同定した上で，リスク低減措置を検討・実施することが求められる[1)]．一方，小規模・零細事業場などからは, より簡単に RA を実施することができる方法や知識･情報の提供が求められている．安衛研では，常に空気（酸素）が存在している状態で化学物質を取り扱う作業を対象とした火災・爆発防止のための RA 実施において，燃焼の 3 要素（酸素，着火源，可燃物）の有無を確認するだけでシナリオを同定する簡易的な方法を提案している[2)]．本発表では，この方法を塗装作業に適用した例を紹介し，考察する．

2. 燃焼の3要素に着目した火災・爆発発生シナリオの同定

化学物質を用いた作業実施時に火災･爆発が発生する基本条件は燃焼の 3 要素が揃うことである．つまり，可燃性や引火性を有する化学物質（可燃物）が酸素（空気）と接触または混合することで爆発性雰囲気が形成され，この状態で着火源が発現することにより火災・爆発が発生する．表 1 に「爆発性雰囲気形成防止対策」及び「着火源発現防止対策」の有無を考慮した火災・爆発発生パターン（a~d）を示す．

表 1　爆発性雰囲気形成防止対策と着火源発現防止対策の有無を考慮した火災・爆発発生パターン

可燃性の化学物質を使用		爆発性雰囲気	
		①　爆発性雰囲気形成防止対策が実施されていない	②　爆発性雰囲気形成防止対策が実施されている
着火源	③　着火源発現防止対策が実施されていない	パターン(a) 常に燃焼の 3 要素が揃っているおそれ 爆発性雰囲気　着火源	パターン(c) 燃焼の 3 要素が揃うおそれ 爆発性雰囲気　着火源 容器の蓋の閉め忘れなど(引き金事象 A)により爆発性雰囲気を形成する可能性
着火源	④　着火源発現防止対策が実施されている	パターン(b) 燃焼の 3 要素が揃うおそれ 爆発性雰囲気　着火源 劣化によるアース接続不良など(引き金事象B)により着火源が発現する可能性	パターン(d) 燃焼の 3 要素が揃うおそれ 爆発性雰囲気　着火源 引き金事象 A と引き金事象 B が同時に発生することにより, 爆発性雰囲気を形成した状態で，着火源が発現する可能性

※　表中の実線枠囲みは常に発生するおそれがあること，点線枠囲みは引き金事象発生をきっかけとして発生することを示す．

パターン(a)の場合

いつ火災・爆発等が発生してもおかしくない状態となっている．RA を実施する前に，何らかの対策を実施する必要がある．

パターン(b)の場合

① 常に「爆発性雰囲気が形成されている」おそれがある．

④ 引き金事象 B 発生により「着火源が発現する」可能性がある．

パターン(c)の場合

② 引き金事象 A 発生により「爆発性雰囲気が形成される」可能性がある．

③ 常に「着火源が発現する」おそれがある．

パターン(d)の場合

② 引き金事象 A 発生により「爆発性雰囲気が形成される」可能性がある．

④ 引き金事象 B 発生により「着火源が発現する」可能性がある．

図 1 に提案しているシナリオ同定の進め方（概要）を示す [2]．3 種類のシートの作成を通じて引き金事象を想定し，火災・爆発発生に至るシナリオを同定する．

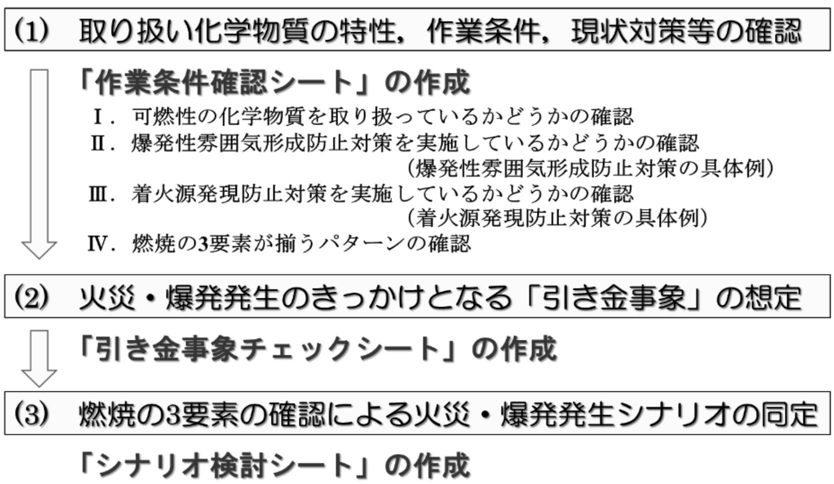


図 1 燃焼の 3 要素の有無に着目した火災・爆発発生シナリオ同定の進め方

(1) 取り扱い化学物質の特性，作業条件，現状対策等の確認

作業毎に次の Ⅰ ～Ⅳについて確認し，表1に示す(a)～(d)のいずれのパターンとなっているかを把握する．Q2及び Q3の質問に回答するために，それぞれの対策の具体例一覧を作成し，参照できるようにしている．

I. 可燃性の化学物質を取り扱っているかどうかの確認（Q1）

II. 爆発性雰囲気形成防止対策を実施しているかどうかの確認（Q2）

III. 着火源発現防止対策を実施しているかどうかの確認（Q3）

IV. I～IIIの結果に基づく燃焼の3要素が揃うパターンの確認

(2) 火災・爆発発生のきっかけとなる「引き金事象」の想定

作業毎に火災・爆発発生のきっかけとなりうる（i）設備・装置・道具の不具合及び（ii）不適切な作業や操作（表2に示す7種類のヒューマンエラーの分類を適用）を「引き金事象」として網羅的に想定する．

(3) 燃焼の3要素の確認による火災・爆発発生シナリオの同定

引き金事象が発生した場合に爆発性雰囲気が形成されるかどうか，着火源が発現されるかどうかを調べ，両者が揃う場合，つまり燃焼の3要素が揃う場合は火災・爆発発生に至るシナリオとして同定される．さらに，労働災害や周辺地域への被害の拡大も検討する．

表 2 ヒューマンエラーの分類

種類		意味
①	Omission Error	やり飛ばし，やり忘れ
Commission Error		やり間違い
②	Selection Error	選択エラー
③	Sequential Error	手順エラー
④	Time Error	タイミングエラー
⑤	Qualitative Error	質的エラー
⑥	Quantitative Error	量的エラー
⑦	Other Error	その他のエラー

3. 塗装作業への適用例

提案する簡易シナリオ同定法を塗装作業に適用した．「2.調合塗料濾過・充填」作業に対して作成されたシートを表3に示す．

3.1 作業条件確認シートの作成【表3(a)の A 欄，B 欄，C 欄】

「2.調合塗料濾過・充填」作業は，室内（冷房無し）で，調合塗料 A（危険物第4類）を用いて行われる．作業にはスプレーガン，廃液缶，メッシュフィルターなどが用いられる．これらの情報を基に「爆発性雰囲気形成防止対策」及び「着火源発現防止対策」の具体例（別途，用意）を参考にしてQ1~Q3の質問に回答した．その結果，爆発性雰囲気の形成防止対策は実施されていないが，いくつかの着火源防止対策を実施していることが確認された．これより表1に示す火災・爆発発生パターン(b)となっていることが把握された．

3.2 引き金事象チェックシートの作成【表3(b)の D 欄，E 欄】

作業条件確認シートの作成により獲得した情報を基に引き金事象チェックシートを作成した.【B 欄】に記載された設備・装置・道具と【C 欄】に記載された着火源発現防止対策の不具合を考えることで，【D 欄】に示す7件（D21～D27）の設備・装置・道具に関する引き金事象が想定された．また作業内容・方法と【C 欄】に記載された着火源発現防止対策（作業者に求められる対応事項）に対して表2に示す7種類のヒューマンエラーを考えることで，【E 欄】に示す13件（E21～E213）の作業・操作に関する引き金事象が想定された．

3.3 シナリオ検討シートの作成【表3(c)の F 欄，G 欄】

引き金事象チェックシートにより想定された引き金事象が発生することにより，爆発性雰囲気が形成されるかどうか，着火源が発現するかどうかを確認した．引き金事象D21～D23については着火源発現の条件は満たさないため，燃焼の3要素は揃わず【F欄】，火災・爆発発生には至らない【G欄】．一方，引き金事象D24～D27については着火源発現の可能性があり，これより燃焼の3要素が揃うことから【F欄】，火災・爆発発生に至るシナリオとして同定される[1]【G欄】．さらに，火災・爆発発生によるその他の影響として，他の作業場への延焼や作業服への延焼などにつながる可能性もあり，記載している．

3.4 考察

3つのシートの作成を通じてシナリオ同定の流れを確認した結果，次のような有用性が確認された．1)火災・爆発を発生させる一つの典型的な条件（燃焼の3要素が揃う）を確認するだけでシナリオを同定することができる．2)爆発性雰囲気形成防止対策，着火源発現防止対策の具体例一覧を参考にすることで容易に対策実施の有無を確認することができる．

4. おわりに

取り扱い化学物質の特性や作業条件を予め確認し，燃焼の3要素が揃うかどうかを確認することにより火災・爆発発生に至るシナリオを同定する方法について,塗装作業への適用例を示すことで有用性を確認した．今後は，燃焼の3要素が揃わなくても火災・爆発が発生する場合のシナリオ同定法についてもまとめていく．

参考文献

1) 労働安全衛生総合研究所技術資料，プロセスプラントのプロセス災害防止のためのリスクアセスメント等の進め方，JNIOSH-TD-No.5 (2016)

2) 島田，佐藤，高橋，化学物質の危険性に対するリスクアセスメント実施のための簡易シナリオ同定法，化学工学会第 51 回秋季大会，K120 (2020)

---

[1] 実際には爆発性雰囲気の濃度の上下限界などの条件も考察する必要があるが，ここでは火災・爆発発生の可能性があるとし，シナリオを同定している．

表 3(a)　作業条件確認シート

【A】作業手順・内容		【B】取扱い化学物質及び作業に用いられる設備・装置等 取扱物質名	当該化学物質の危険性に関する情報	取扱状況	作業に用いられる設備・装置・道具	【C】火災・爆発等が発生する燃焼の3要素のパターンの確認 Q-1　取り扱っている化学物質は可燃性の物ですか？	Q-2　爆発性雰囲気の形成防止対策を実施していますか？	Q-3　着火源の発現防止対策を実施していますか？ （1~8は別資料の具体的な対策を確認するための項目番号）	パターン (a)〜(d)
2	調合塗料濾過・充填	・調合塗料 A	・危険物第4類 （引火性液体） （第1石油類） （引火点 1℃） （爆発限界 1〜15%）	・室温 （冷房無し）	・スプレーガン（ホース） ・廃液缶 ・置き台 ・メッシュフィルター ・吉野紙（濾紙） ・重力式カップ	はい（調合塗料 A）	対策無し	1) 防爆構造照明の使用，携帯電話の持ち込み不可 2) 帯電防止作業服・帯電防止靴の着用，導電性床の利用 3) 高温物は使用していない 4) 高温物は周りにない 5) スプレーガンに稼働部はない．軽金属合金は使用しない 6) 高圧ガスは使用しない 7) 火器持ち込み厳禁 8) 発熱するものはない	(b)

表 3(b)　引き金事象チェックシート　（表中▲は該当する引き金事象が想定されないことを示す）

【A】作業手順・内容		【B】取扱い化学物質及び作業に用いられる設備・装置等 取扱物質名	化学物質の危険性に関する情報	取扱状況	設備・装置・道具	【C】火災・爆発等が発生する燃焼の3要素のパターンの確認 爆発性雰囲気形成防止対策	着火源発現防止対策	パターン (a)〜(d)	【D】設備・装置・道具に関する引き金事象 設備・装置・道具の不具合（故障モード）	【E】作業・操作に関する引き金事象（ヒューマンエラー） やり飛ばし，やり忘れ	（やり間違い） 選択エラー	手順エラー	タイミングエラー	質的エラー	量的エラー	その他のエラー
2	調合塗料濾過・充填	・調合塗料 A	・危険物第4類 （引火性液体） （第1石油類） （引火点 1℃） （爆発限界 1〜15%）	・室温 （冷房無し）	・スプレーガン（ホース） ・廃液缶 ・置き台 ・メッシュフィルター ・吉野紙（濾紙） ・重力式カップ	対策無し	・防爆構造照明の使用 ・携帯電話の持ち込み不可 ・帯電防止作業服・帯電防止靴の着用 ・導電性床の利用 ・火気持ち込み厳禁	(b)	(D21) 廃液缶の損傷 (D22) メッシュフィルターの破れ (D23) 吉野紙の破れ (D24) 防爆構造照明の故障 (D25) 帯電防止作業服の劣化 (D26) 静電安全靴底の汚れ (D27) 導電性床のアース線劣化	(E21) 塗料濾過作業を行わない (E22) 充填作業を行わない (E23) 帯電防止作業服・静電安全靴を着用しない	(E24) 濾紙の選択を間違える (E25) 素材の異なる作業服・作業靴を着用する	▲	▲	(E26) 塗料濾過作業が不十分である	(E27) 充填量が不十分である (E28) 廃液缶からオーバーフローする	(E29) 調合塗料をこぼす (E210) 非防爆構造の照明を持ち込む (E211) 携帯電話を持ち込む (E212) 床の上に汚れ防止にビニールシートを敷く (E213) 火気を持ち込む

表 3(c)　シナリオ検討シート（設備・装置・道具に関する引き金事象）

【A】作業手順・内容		【C】火災・爆発等が発生する燃焼の3要素のパターンの確認 爆発性雰囲気形成防止対策	着火源発現防止対策	パターン (a)〜(d)	【D】設備・装置・道具に関する引き金事象	【F】中間事象（プロセス異常） 爆発性雰囲気の形成（条件）	着火源の発現（条件）	【G】結果事象（プロセス災害） 火災・爆発？	その他の影響？
2	調合塗料濾過・充填	対策無し	・防爆構造照明の使用 ・携帯電話の持ち込み不可 ・帯電防止作業服・帯電防止靴の着用 ・導電性床の利用 ・火気持ち込み厳禁	(b)	(D21) 廃液缶の損傷	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	なし	影響なし	影響なし
					(D22) メッシュフィルターの破れ	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	なし	影響なし	影響なし
					(D23) 吉野紙の破れ	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	なし	影響なし	影響なし
					(D24) 防爆構造照明の故障	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	照明の絶縁不良のため，電気火花が発生する可能性あり	塗料を取り扱っている周りの蒸気に着火し，フラッシュ火災	周りの塗料，廃液缶中の塗料への延焼，作業服への延焼など
					(D25) 帯電防止作業服の劣化	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	作業者に帯電し，静電気火花が発生する可能性あり	塗料を取り扱っている周りの蒸気に着火し，フラッシュ火災	周りの塗料，廃液缶中の塗料への延焼，作業服への延焼など
					(D26) 静電安全靴底の汚れ	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	作業者に帯電し，静電気火花が発生する可能性あり	塗料を取り扱っている周りの蒸気に着火し，フラッシュ火災	周りの塗料，廃液缶中の塗料への延焼，作業服への延焼など
					(D27) 導電性床のアース線劣化	開放状態での作業のため，塗料存在部周りに爆発性雰囲気を形成する可能性あり	作業者に帯電し，静電気火花が発生する可能性あり	塗料を取り扱っている周りの蒸気に着火し，フラッシュ火災	周りの塗料，廃液缶中の塗料への延焼，作業服への延焼など

せき損を対象とした自立歩行支援ロボットによる歩行訓練時の介助者への安全対策に関する検討

労働安全衛生総合研究所
○北條理恵子，小山秀紀，菅知絵美，池田博康，高木元也

Safety checklist for physical therapist in walking training using a powered exoskeleton - task analysis procedure based on behavior analysis

Rieko Hojo, Hideki Oyama, Chiemi Kan, Hiroyasu Ikeda, Motoya Takagi
National institute of occupational safety and health, Japan

キーワード：動力付き外骨格，労働安全，理学療法士，安全チェックリスト，産業安全行動分析学
Keywords : Powered exoskeleton, Occupational safety, Physical therapist, Safety checklist, Behavior-based safety

1. はじめに

近年,「動力付き外骨格（Powered exoskeleton)」の実用化が始まっている．動力付き外骨格（以下，外骨格と称す）とは，広義には，サービスロボットや生活支援ロボットも含めた呼称であり，その安全については，ISO 13482 において「サービスロボットや生活支援ロボットの安全規格」が規定されている．国内では，JIS B8445「生活支援ロボットの安全要求事項」，B8446-1「マニピュレータを備えない静的安定移動作業型ロボット（例：掃除用ロボットなど)」，B8446-2「低出力装着型身体アシストロボット（パワードスーツにあたるが，あくまでもリハビリや介護支援用である（例：HAL)」及び B8446-3「倒立振子制御式搭乗型ロボット（例：セグウェイ)」などの工業規格に生活支援ロボットに関する事項を定めている．医療・介護機器としての利用を念頭に置いたものは,「人の力や仕事を補助する（助ける)」という意味でパワーアシスト（power assist）機器ないし装置等とも呼ばれる．医療・介護用の動力付き外骨格も実用化が進められている．

日本にはすでに 10 万人以上のせき髄損傷（Spinal cord injury，以下 SCI と称す）が存在し，発症頻度は 100 万人あたり約 40 人と推定される[1]．また，毎年約 5,000 人の新しい患者が生まれると報告されている[1]．頸部と胸腰部のせき髄損傷で，それぞれ 3/4 と 1/4 を占める．日本のせき髄損傷の疫学調査によると，発生頻度は欧米とほぼ同じとされる[2]．現在の医療においては，投薬等ではせき髄損傷による麻痺や痛み等の異常な感覚の治癒は望めない．また，対麻痺，特に完全な麻痺では下肢機能を回復することが困難である．そのため，移動には装具または車いすの使用が必須となる.その結果として,完全麻痺の移動不能状態は改善されるものの，当然ではあるが動作や活動，移動にかなりの制限が加えられることとなる．

動力付き外骨格においては，SCI 患者の歩行再建に役立つ可能性が示されており，SCI 患者の独立した歩行を支援するために使用され始めている．

現在までに，医療向けの動力付き外骨格としては，ReWalk，Indigo，Exso，WPAL などの外骨格が販売され，それぞれ SCI 患者に使用されている[3-7]．その結果によれば，すべてのモデルが SCI 患者の独立した歩行に大きく貢献していると報告されている（表 1)．歩行支援の実践法や使い勝手などについての研究が推進される一方で，外骨格を装着しての歩行の際の不安定さ，転倒，皮膚トラブル等のリスクも報告されている．このようなリスクをできる限り低減するためには，一定の研修や実施研修を受けた介助者を配置する必要がある．依然として，人の

注意力や努力により，外骨格装着歩行時の安全が維持されている現状が垣間見える．しかしながら，リハビリも兼ねた患者の自主的な歩行支援の介助者として，主に理学療法士が担当している

Table 1. Reconstruction of walking by exosleletons

Exoskeleton	Neurological level	AIS*	Number of patients	Prognosis	Number of patients	Authour(s)
Rewalk	C8-T11	A-C	12	Independent walking	5	Yang et al.[3]
				Walking monitoring	3	
				Minimum contact assistance	3	
				Medium contact assistance	1	
Indego		A or B	11	Walking monitoring	7	Hartigan et al.[4]
Esko		A or B	4	Walking monitoring	1	Kozlowski et al.[5]
WPAL	Th6-12	A or B	12	Independent walking	12	Hirano et al[6]
WPAL	C6-7	A or B	5	Independent walking	3	Fuse et al. [7]

*: American Spinal Injury Association Impairment Scale

いるが，介助者自身の労働安全対策が十分に検討されているとは言えない．外骨格を使った歩行補助は，今後ますます拡大することが期待されるため，肉体的・精神的負担が大きいと予想される介助者に対しては，安全な支援のための対策を講じる必要がある．しかしながら，実際には，介護者のサポートを前提とした安全ガイドラインはなく，標準化は進んでいない．

そこで本研究では，ReWalk と FreeWalk をターゲットの外骨格として，外骨格を用いた歩行訓練を行う SCI 患者をケアする理学療法士向けの安全チェックシートの確立を目指す．最初のステップとして，行動に基づく安全（BBS）の手順に基づくタスク分析テーブルを使用して，SCI 患者と理学療法士のインタラクティブな行動を分析した．本稿では，現在作成中のタスク分析テーブルの作成の原理とタスク分析からの今後の方向性を紹介する．

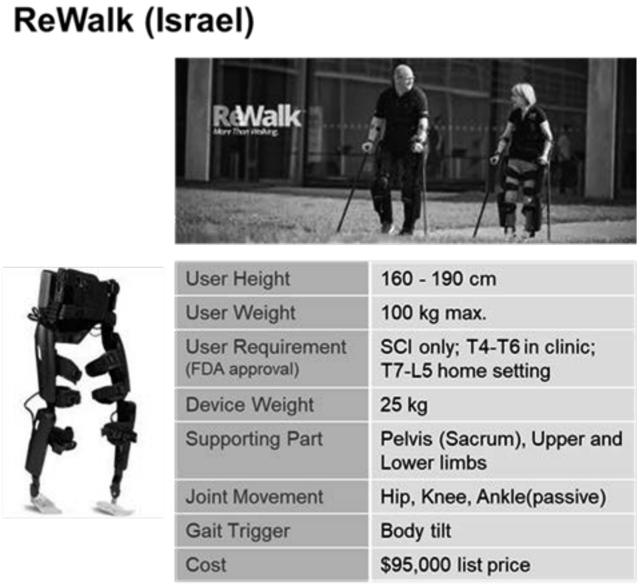
2．課題分析

分析対象

SCI に特化したリハビリテーションセンターでのリハビリテーションの一環としての歩行訓練の様子をビデオ撮影し，産業安全行動分析学（Behavior-based safety, BBS）の理論に基づくタスク分析を行った．このトレーニングでは，ReWalk（図 1）を使用した．ReWalk は，パワードヒップと膝の動きを提供するウェアラブルな外骨格であり，装着することで SCI 患者の直立，歩行，回転，階段の上り下りを可能にする（現在，米国と日本では階段機能は利用不可）．ReWalk は，米国で個人およびリハビリテーション用に FDA の認可を受けた最初の外骨格となる．

トレーニングでは，準備から除去までの行動の連鎖がみとめられ，行動を大グループに分類した（図 2）．歩行訓練にあたっては，1 人のオペレーターと，直接介助者（ヘルパーA）および間接介助者（ヘルパーB）の合計 3 人の理学療法士が必要となる．オペレーターの役割は，ReWalk の動作の操作と制御である．ReWalk を手で直接支持し，装着者（SCI 患者，ユーザー）の背後から歩行支援を行う．支援の程度は，歩行訓練の進行により変更される．ヘルパーB は，

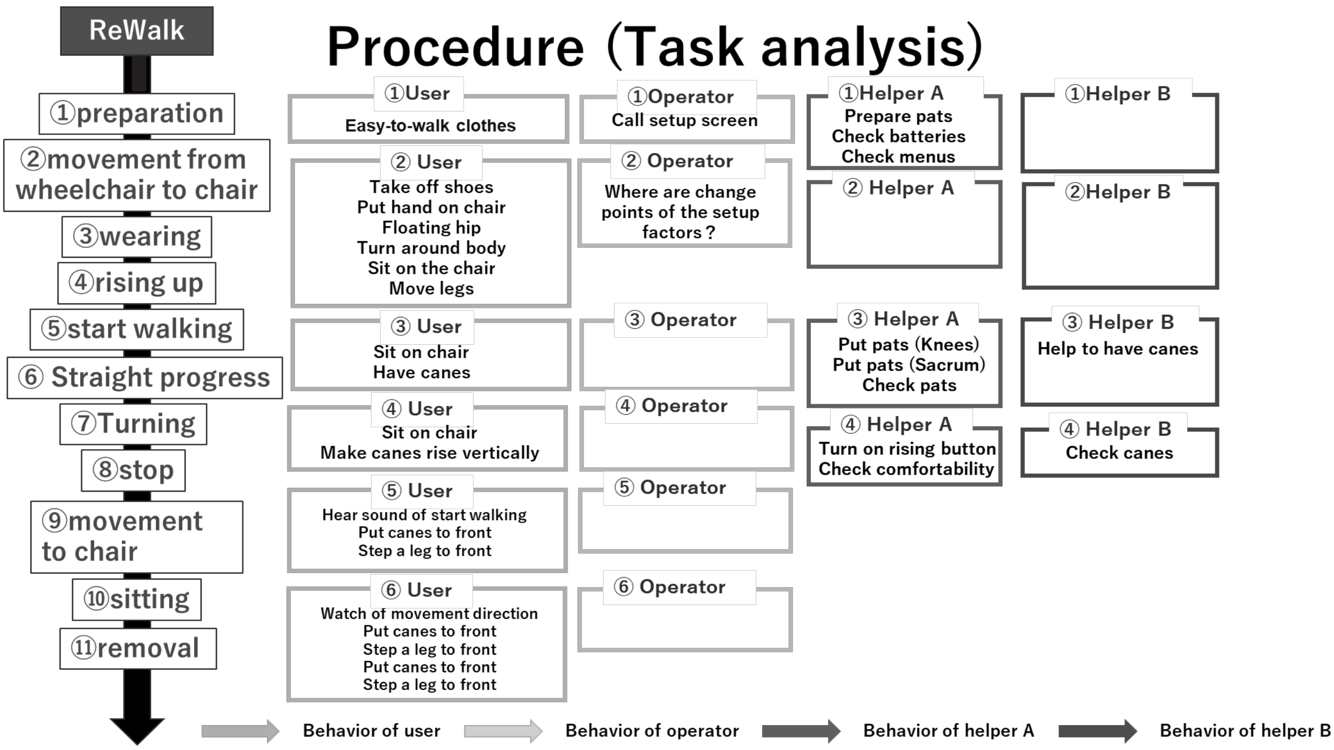
介助者のさらに後方を歩き，椅子を差し出す，リハビリ訓練室等に移乗を知らせるなど，緊急時に対応する．このタスク分析に基づき，装着者と介護者の両方に最適な歩行訓練動作を提供する．



User Height	160 - 190 cm
User Weight	100 kg max.
User Requirement (FDA approval)	SCI only; T4-T6 in clinic; T7-L5 home setting
Device Weight	25 kg
Supporting Part	Pelvis (Sacrum), Upper and Lower limbs
Joint Movement	Hip, Knee, Ankle(passive)
Gait Trigger	Body tilt
Cost	$95,000 list price

Fig. 1 Commercial indication of ReWalk

3.　結果



課題分析の結果，ReWalk における歩行訓練の一連の行動連鎖は，大きく 11 項目の行動に分類可能である．この分類ごとにさらなるタスク分析を進めていけば，装着者及び介助者のリスクと低減対策が明らかになると思われる．また，介助者の 3 人がそれぞれに必要不可欠な役割を担っているため，相補的な介助は困難であることが画像解析から明らかになったため，今後は，装着者も含めたそれぞれの安全チェックシートを作成し，個々のリスク評価のみならず全体の状況を俯瞰するリスクに対するアセスメントと評価をする必要がある．

引用文献

[1] NPO 法人　日本せきずい基金, http://www.jscf.org/jscf/SIRYOU/rihabiri/hyoukasyakudo.htm (2020 年 10 月 1 日閲覧)
[2] 坂井宏旭, 植田尊善, 芝啓一郎. わが国における脊髄損傷の現状. Journal of Spine Research, 2010 ; 1 : 41-51.
[3] Yang A, Asselin P, Knezevic S, Kornfeld S, Spungen AM. Assessment of in-hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury. Top Spinal Cord Inj Rehabil. 2015; 21: 100-109.
[4] Hartigan C, Kandilakis C, Dalley S, Clausen M, Wilson E, Morrison S, et al. Mobility outcomes following five training sessions with a powered exoskeleton. Top Spinal Cord Inj Rehabil. 2015; 21: 93-99.
[5] Kozlowski AJ, Bryce TN, Dijkers MP. Time and effort required by persons with spinal cord injury to learn to use a powered exoskeleton for assisted walking. Top Spinal Cord Inj Rehabil. 2015; 21: 110-121.
[6] Hirano S, Saitoh E, Tanabe S, Katoh M, Shimizu Y, Yatsuya K, et al. Comparison between gait-assisting robot (WPAL) and bilateral knee-ankle-foot orthoses with a medial single hip joint in gait reconstruction for patients with paraplegia. Jpn J Compr Rehabil Sci. 2015; 6: 21-26.
[7] Fuse I, Hirano S, Saitoh E, Otaka Y, Tanabe S, Katoh M, et al. Gait reconstruction using the gait assist robot WPAL in patients with cervical spinal cord injury. Jpn J Compr Rehabil Sci. 2019; 10: 88-95.
[8] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, “On certain integrals of
[9] Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].
[10]M. Young, The Technical Writer’s Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.