

## 津波火災と石油コンビナート



技術解説

加藤直三\*

Tsunami-Induced Fire and Petrochemical Industrial Complexes

Key Words : Natech, Oil Spills, Risk Management, Disaster Prevention, Mitigation

### 1. はじめに

東日本大震災では、石油コンビナートの施設が大きな被害を受けた。特に、大規模な津波によって油貯蔵施設から大量の油が流出し、津波火災を拡大し、気仙沼市街地は全焼した。自然災害起因の産業事故を一般に Natech (natural-hazard triggered technological accidents) と呼んでいる。2015年3月、仙台で開催された世界防災会議のフォーラムの中で初めて、Natech が議論され、技術や環境に起因する危機のリスク低減の項目が「2015-2030 災害リスク低減」フレームワークの中に取り入れられた。重要な点は、災害管理から災害リスクの管理への、グローバルレベルでの政策転換を表明したところにある。予防と準備の重要性を重要視し、新たなリスクを回避し、既存の災害リスクを軽減するために、事後対応から事前対応へ移行することを求めている。この Natech に関して、OECD (経済協力開発機構) の化学事故作業部会 (WGCA) では2012年に Natech ワークショップを開催した<sup>1)</sup>。日本では、2015年3月、2016年1月、2017年3月に大阪大学大学院工学研究科「石油コンビナート防災研究イニシアティブ」が Natech に関する国際シンポジウムを開催している<sup>2)</sup>。

石油コンビナートに係る防災に関して、現在、石油コンビナート等災害防止法、消防法、高圧ガス保

安法、労働安全衛生法、災害対策基本法、並びにその他災害の防止に関する法律が制定されている。しかし、潜在的な化学事故のリスク評価を具体的に実施することは要求していない。過去の地震によって石油精製所が被った被害から、広範な地震リスク低減の導入を促した対策が消防法で取られるようになった<sup>3)</sup>。一方、高圧ガス保安法は、地震や津波による産業施設での事故リスクを軽減するための措置を講ずることを要求する Natech のリスクに明確に対処する唯一の規制となっている<sup>4)</sup>。さらに、2011年の東日本大震災以来、高圧ガス貯蔵施設のための地震のコードは、液体貯留槽のスロッシング (液面が地震動によって振動する現象) への地震動に起因する長期間の影響を考慮するように改訂された。また新しいコードは、ブレースの交差を補強してパイプブレースの支持フレームの耐震能力を向上させている。また2013年には、持続可能な国土設計を通じて長期的な社会的強靱性を促進させることや、改善された土地条件と設計によって土地の強靱性を確保することを目標に定めた新たな国土強靱化基本法が導入された。具体的には、(1) 工業地帯の破壊、火災、爆発、(2) 石油とLPGの供給不足や混乱、(3) 工業用設備の損傷による人口密度の高い湾岸地域 (例えば、東京湾、伊勢湾、大阪湾) での拡大され複雑化した被害に対して、包括的対策をとることを要求している。しかし、石油コンビナートの災害は、社会への影響が大きいにもかかわらず、分野が多岐に渡ることや分野間の考え方の違いから、住民の生命財産の保全、陸上や海上物流や陸上や海上からの災害復旧活動に大きな影響をもたらす臨海部の油や危険物の流出による災害対策を含んだ包括的なリスク管理が未整備となっている。

本稿は、東日本大震災で大きな被害をもたらした津波火災に着目し、予想される南海トラフ巨大地震



\* Naomi KATO

1950年7月生  
東京大学 工学系研究科船舶工学専攻  
博士課程修了(1980年) 博士(工学)  
大阪大学名誉教授  
現在、NPO法人 産業防災研究所  
理事長 海洋工学、海洋防災工学  
TEL : 06-6170-5450  
FAX : 06-6170-5450  
E-mail : kato@idplab.org

の発生によって、人口密度の高い湾岸地域にある大規模石油コンビナートがもたらす津波火災への影響を議論し、その減災対策技術を説明する。

## 2. 大規模自然災害時の津波火災の恐ろしさ

### 2.1 津波火災の発生過程

西野ら<sup>5)</sup>は、東日本大震災時の津波浸水域での津波火災を解析し、津波火災が次のような過程では発生することを明らかにした。

- (1) 津波によって流された家屋からの木材ガレキが内陸の津波到達付近に集積する。
- (2) 家庭用プロパンガスや自動車からのガソリンなどから発生した可燃性ガスに自動車のバッテリーのショートやガレキ同志の衝突による火花などが引火して、集積した木材ガレキが燃焼する。
- (3) 燃焼する木材ガレキが地域全体の木材ガレキに延焼する。

一方、関澤<sup>6)</sup>は、東日本大震災時の津波によって23個の油タンクの内、22個が漂流し、総流出量11,523kL(重油:7,530kL, ケロシン498kL, 軽油:1,958kL, ガソリン:1,537kL)に達した気仙沼市の津波火災に言及した。このような油流出がある場合、上記の津波火災の過程に加え、燃焼する木材ガレキから漂流油に引火し、漂流油が拡散した陸域のみならず海域にも津波火災が拡大することを明らかにした。

### 2.2 石油コンビナートの影響

人口密度の高い湾岸地域(例えば、東京湾、伊勢湾、大阪湾)での石油コンビナートの津波火災への影響について、大阪湾を対象に議論する。

大阪府においては、石油コンビナート等災害防止法に基づき特別防災区域に指定された大阪北港地区(約360万 $m^3$ )、堺泉北臨海地区(約1,801万 $m^3$ )、関西国際空港地区(約803万 $m^3$ )、岬地区(約56万 $m^3$ )の4地区がある。大阪府石油コンビナート等防災本部により、コンビナート防災計画の見直しに向け、地震・津波被害想定等検討部会が設置され、被害想定と防災・減災対策について報告書が作成された<sup>7)</sup>。その報告書では、予想される南海トラフ巨大地震時に、地震動によって、堺泉北臨海地区では大型石油タンクのスロッシングによる溢流量が最大12,088kLに達する。また津波によって、大阪北港地区では最大27,227kL、堺泉北臨海地区では最大

4,838kLの油が流出することが予測されている。スロッシングによって溢流した油は、一旦、防油堤(外側に油が漏れないように石油タンクのまわりに設置された堤)に溜まるが、そこに浸水する津波によって油は津波に乗って拡散する。

南海トラフ巨大地震(M9.1)による津波による石油タンク群からの流出重油の拡散状況を調べるために、大阪北港地区と堺泉北臨海地区にある石油コンビナートの石油タンク群からの流出重油の拡散シミュレーションが行われた<sup>8)</sup>。シミュレーションは、3つの過程から成り立つ。

#### 1) 南海トラフ海底断層モデル

内閣府公表の南海トラフ海底断層モデルを用い、635枚の海底パネルの変位に基づく海面の初期変位を与えた。

#### 2) 津波伝搬計算モデル

津波伝搬計算モデルに、三次元静水圧流動モデルであるSTOC-ML(港湾空港技術研究所)を用いた。

#### 3) 流出油拡散計算モデル

流出油拡散計算モデルに、STOC-OIL(港湾空港技術研究所)を用い、流出油を一定体積とみなし、多数の小さな球に置き換え、それぞれの球の位置の拡散状態を解く。STOCにより得られた流速を用いて油の移動速度を求めた。

大阪北港地区では、粒子一つあたりの体積5.420kL、全粒子数5,023個として、7か所に集中的に配置した。地震発生後240分後(第2波の津波高さが最小になる時点)での流出油の拡散範囲を示す。陸側、海側とも広い範囲にわたって、油が拡散している様子が見て取れる(図1)。特に、陸域では、JR大阪駅、JR難波駅、住吉公園のラインまで油が拡散する様子が見てとれる。2.1で述べたように、この範囲に津波火災が拡がるのが想定される。海域には、油の流出量の約32%が流れ出すことが想定される。

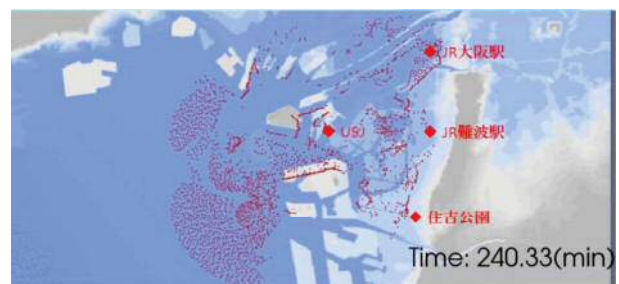


図1 大阪北港地区からの流出油の津波による拡散

この海域にも津波火災が広がるものと予想される。

堺泉北臨海地区では、粒子一つあたりの体積3.515kL、全粒子数4,815個として、3か所に集中的に配置した。地震発生後230分後（第2波の津波高さが最小になる時点）での流出油の拡散範囲を示す（図2）。陸域では、堺市役所、高石市役所、大津市役所のラインまで油が拡散することが見てとれる。この範囲に津波火災が広がることが想定される。海域には、油の流出量の約30%が流れ出すことが想定される。

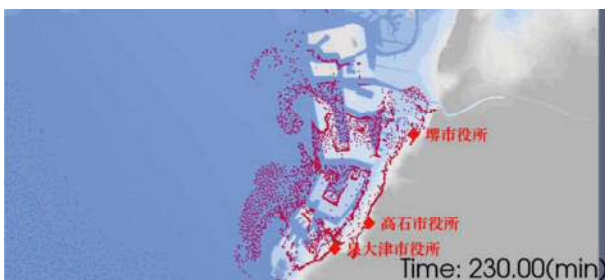


図2 堺泉北臨海地区からの流出油の津波による拡散

### 2.3 津波火災の経済損失額の推定

南海トラフ巨大地震時における大阪湾の流出油に起因した津波火災による陸側および海側の被害について、対策の方向性を探ることを目的として、経済損失額の推定が行われた<sup>9)</sup>。流出重油の拡散する海域を瀬戸内海（CASE1）、大阪湾と播磨灘（CASE2）の2ケースとし、対象項目を漁業、海上貿易、観光業、発電業として設定し、対象陸域は大阪府、対象項目は木造建物、家財、償却資産（土地、家屋を除いた事業に供することのできる資産）額、棚卸資産（将来販売などを行うために保有している資産）額、製品出荷額として設定した。操業停止期間を、海上物流、観光業（クルーズ船、観光船）では、CASE1で6か月、CASE2で3か月として、漁業では、CASE1で2年、CASE2で1年として、発電業では、CASE1、CASE2共、1か月としている。木造建物、家財、償却資産額、棚卸資産額の被害について、最大被害として浸水域にある建物すべてが津波火災によって被害を受けた場合とし、最小被害として浸水域の建物が、津波火災の発生する前に液状化などによって倒壊し、津波火災の直接的な被害を受けていないものを除いた場合としている。最小被害額では、法人の建築物が倒壊しないと設定して、製品出荷額や償却資産などといった企業に関する被害がないと

している。製品出荷額の被害については、営業停止期間は5年間とした。ただし、陸上物流の被害推定、復旧・復興費用の見積もり、人的被害の補償、経済波及効果は含まれていない。

その結果、海域における被害推定額は18兆円から8兆円、陸域における被害推定額も8兆円から2兆円に及ぶことが示された。海域における被害推定額では、その95%から97%を海上物流が占めており、海域に流れ出す最大13,780kLの油の迅速な回収作業の手順や被害を受けた海上物流の代替策を予め策定しておく必要がある。陸域における最大被害推定額の内訳は、製品出荷額が46%、木造建物が32%、家財が19%、償却資産額と棚卸資産額の和が3%となっている。最小被害推定額の内訳は、木造建物が56%、家財が44%となっている。陸域における被害推定額では、木造建物と家財の和が51%から100%を占めており、個人財産への影響が大きいことがわかる。

### 3. 津波火災被害の減災対策技術

大阪大学大学院工学研究科「石油コンビナート防災研究イニシアティブ」で提案されている津波火災被害の減災対策技術を述べる。

#### 3.1 盛土

常田と谷本<sup>10)</sup>は、2011年の東日本大震災のあと、津波被害の現地調査を行い、盛土が津波の越流を減らすのに効果的であることを見つけた。そして図3に示すような岸壁、盛土とその上の植生、石油タンク、盛土とその上の植生の構造の組み合わせを提案した。この効果を示すために、図4に示すような2次元の数値解析用の盛土と石油タンクの配置として、4mの津波があった場合の盛土の高さ（1m、2m、3m）、盛土間隔（100m、200m、300m）の影響を調べた<sup>11)</sup>。盛土間隔を300mに固定した場合、盛土の高さが、2m、0m（盛土なし）、1m、3mの順に、石油タンクに加わる流体力が小さくなることが明らかにされた。

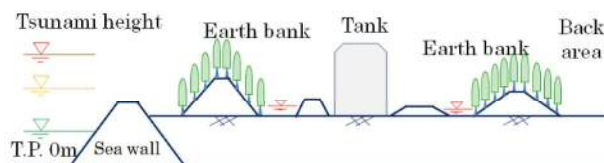


図3 盛土の配置図



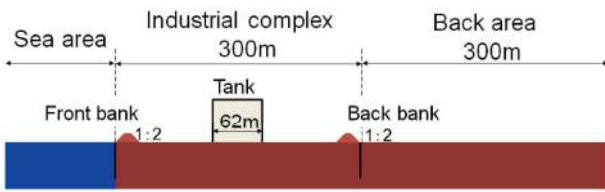


図4 数値解析用配置

2mの高さの盛土の場合が、盛土なしの場合よりも流体力が大きい理由は、石油タンクの流入流速が、2mの高さの盛土のほうが大きいことによる。

### 3.2 フレキシブルパイプ群

これまでの防波堤とは異なったシステムが幾つか提案されている。港湾内で平時は海上交通の障害にならず、津波来襲時のみ作動する可動式の津波防波堤として、これまで、フラップゲート式、直立浮上式防波堤、展張型幕式防波堤などが提案されている。これらの防波堤の建設には莫大な費用が必要となる。

一方、2004年12月26日に発生したインド洋大津波による南タイの沿岸の被害調査<sup>12)</sup>から、マングローブ群、特にフタバナヒルギが、海中から空中にまで伸びる根の複雑な構造のため、津波被害を低減させるばかりでなく、流木、漂流物をトラップする効果が大きいことが明らかにされた。

石油コンビナートへの津波被害を低減させる防波堤の必要条件として以下の項目が挙げられる。

- 1) 石油コンビナート地帯に侵入する津波のエネルギーを低くすること
- 2) 平時には海上交通の妨げにならないこと
- 3) 津波来襲時に確実に作動すること
- 4) ガレキをトラップすること
- 5) 費用対効果が大きいこと

フラップゲート式、直立浮上式防波堤は、5番目の項目について弱点がある。直立浮上式、展張型幕式防波堤は、3番目、4番目の項目について弱点がある。マングローブ群は、2番目の項目に弱点がある。

一方、アメリカ・カリフォルニア州中部からメキシコ北部の太平洋岸に生息する褐藻類の海藻のジャイアントケルプの機能を模倣したフレキシブルパイプ群を考えると、平時には海底に丸く巻き取られ、津波来襲時にのみ圧縮空気によって海面まで展張する方式を取るならば、上記5項目を満足することが可能となる(図5参照)。フレキシブルパイプ群を

石油コンビナート前面の海底に設置することで津波減殺に効果的であると期待できる(図6参照)。図7に、実寸比を1/100として、ダムブレイク式津波水槽でのフレキシブルパイプ群(シリコンゴムの材質、高さ15cm)と円筒タンク模型(直径15cm、高さ10cm)の設置位置を示す(図7参照)。フレキシブルパイプ群を設置しない場合にタンク模型に加わる水平流体力に対するフレキシブルパイプ群を設置した場合のタンク模型に加わる水平流体力の減少率は、40%に達することを示した<sup>13)</sup>。

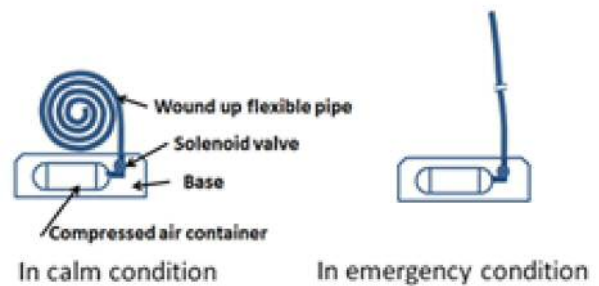


図5 フレキシブルパイプの運用

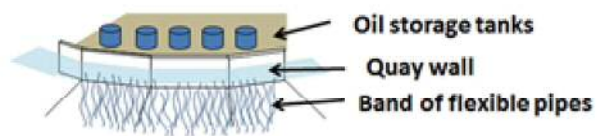


図6 フレキシブルパイプ群の設置

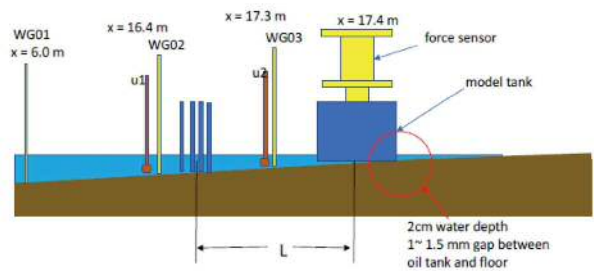


図7 実験装置

### 3.3 油吸着剤

2.2で説明したように、南海トラフ巨大地震時における大阪湾での石油タンクから域外への油流出の過程は二種類ある。一つは、地震動によって、大型石油タンクのスロッシングによる溢流が発生し、防波堤に油がたまり、そこに津波が押し寄せ、域外へ油が拡散する。二つ目は、津波によって石油タンクが滑動、転倒し、流出油が域外に拡散する。2.1で

説明したように、燃焼する木材ガレキから漂流油に引火し、漂流油が拡散した陸域のみならず海域にも津波火災が拡大することから、燃焼する木材ガレキから漂流油に引火しないような油吸着剤によって、津波火災の拡大を防ぐことが可能となる。

本稿では、油吸着剤を用いた津波火災被害低減の効果の基礎実験を通して、油吸着剤の有効性の把握を行った研究<sup>14)</sup>を説明する。図8に基礎実験用の容器内の木材ガレキ模型と油の配置を示す。油吸着材として有機系（天然セルロース）で生分解性のものを用いている。図9に、C重油に対する油吸着剤の火炎高さと輻射熱量への影響を示す。輻射熱量は、高さH[m]、幅r[m]の円筒状の火炎を仮定して、火炎中心線から水平距離L[m]の位置にある受熱面の輻射熱量として求めた。C重油と同体積の油吸着剤を予め油と混合させた場合、最大火炎高さが44%に減少し、水面からの高さ0.2mの地点の輻射熱量が37%に減少していることがわかる。

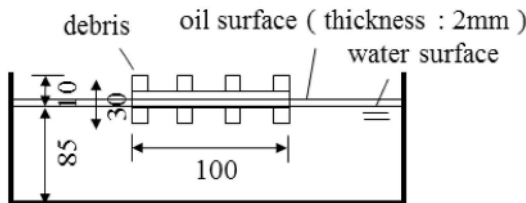


図8 容器内の木材ガレキ模型と油の配置

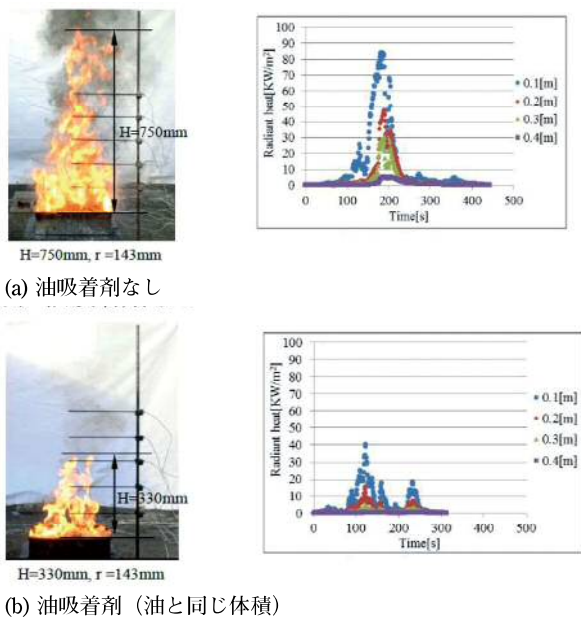


図9 C重油に対する油吸着剤の火炎高さと輻射熱量への影響

#### 4. 今後の課題

本稿では、津波火災への石油コンビナートの影響の要素として、スロッシングによる石油タンクからの油の溢流と津波による石油タンクの滑動と転倒による油の流出を扱ったが、その他、湾内に錨泊している船舶が津波によって漂流し石油タンクに衝突し、石油タンクからの油の流出を起す場合についても、検討が必要である。

前述のOECD作業部会は、2003年にNatechのリスクに関する国際的ガイドラインを策定した。2015年に、OECDのWGCAは、2009～2012年間の第一期のプロジェクトに引き続き、2017年～2020年の間、第二期のNatechのプロジェクトを実施することを決めた。筆者は、今年より、この運営委員会に日本側の委員として参画している。OECDのNatechでは、リスク管理方式を採用している。ここでは、住民に対する産業災害のリスクの周知、リスクへの準備、リスクの軽減を行うために、企業側は住民に対するリスクの開示を行うことが盛り込まれている。日本では、安全基準の体制と関係して、このリスク開示のしくみがほとんどない状況にある。石油コンビナート施設の安全に関する産業防災と地域住民の安全確保に関する地域防災がかい離していると看做されるを得ない。第二期のNatechのプロジェクトでは、Natechのリスク管理に関連する勧告事項の実際とのギャップを特定し、そのギャップを埋めることを求めている。この問題を解決するには、石油コンビナートの安全基準について、産業防災と地域防災の両者を考慮し、OECDのNatechのリスクに関する国際的ガイドラインに基づいて、第三者機関による認証制度を含む国際的な包括的安全基準の導入が望まれる。それと同時に、リスク開示を前提とする上記の安全基準の考え方を普及させるため、遅れている産業、住民、行政の間のリスクコミュニケーションについて、NPOや大学が仲介し、三者が共通の場で、リスクコミュニケーションが行える環境作りを行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) Report of the workshop on Natech risk management (23-25 May 2012, Dresden, Germany), OECD Environment, Health and

- Safety Publications Series on Chemical Accidents No. 25, 2013
- 2) <http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/isub3.htm>
  - 3) <http://idplab.org/link/> 自然災害と石油タンク損害.xlsx
  - 4) 高圧ガス保安協会：リスクアセスメント・ガイドライン（概要版）  
[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2015fy/000063.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000063.pdf)
  - 5) T. Nishino and Y. Imazu: Modelling of the Drift and Accumulation Tsunami-Driven Combustible Objects: Towards Tsunami-Induced Fire Spread Simulation, Fire Technology, Vol.52, No.4, 1159-1178, 2016
  - 6) 関澤愛：東日本大震災における火災の全体像と津波起因火災の考察、消防科学と情報 (108), 6-11, 2012
  - 7) <http://www.pref.osaka.lg.jp/hoantaisaku/bousaikeikaku/higaisotei-bukai.html>
  - 8) W. P. Kyaw, et al : Numerical studies on multiphase flow in tsunami with oil spill in Osaka bay, Proc. of Natech2016, 2016
  - 9) 竹内昂平：石油コンビナートからの油流出に伴う津波火災による経済損失の推定、平成28年度大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学コース修士論文、2016
  - 10) K. Tokida and R. Tanimoto: Lessons and views on hardware countermeasures with earth banks against tsunamis estimated in 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan
  - 11) J. Shimakawa, et al : Analytical study on multiple defense with use of earth bank against tsunami at industrial complex, Proc. of Int. Symp. on Natural and Technological Risk Reduction at Large Industrial Parks (Natech 2016), 2016
  - 12) Y. Sasaki, N. Tanaka, K. Yutani and S. Homchuen: Investigation on Effect for Vegetation by Tsunami in that Case of Sumatra Earthquake, Southern Part of Thailand, The science and engineering reports of Saitama University, No.38, 2005, pp.49-57
  - 13) Thaw Tar: Experimental study on the effect of flexible pipes for reducing tsunami-induced damage of oil tanks located in industrial complexes in Osaka Bay area, Proc. of The 3rd International Symposium on Natural and Technological Risk Reduction at Large Industrial Parks, 2017
  - 14) T. Okubayashi : A study on a method to mitigate tsunami induced fires caused by oil spill, Proc. of The 3rd International Symposium on Natural and Technological Risk Reduction at Large Industrial Parks, 2017

