論　　文

# 大規模自然災害と石油コンビナートの防災

大阪大学名誉教授・特定非営利活動法人産業防災研究所　理事長　加藤直三

要　　旨：低リスク社会の実現に向けて、大都市の臨海部に立地する石油コンビナートの大規模自然災害発生時の安全対策について、危険物の流出やガス爆発からの人命・財産の保護、物流や災害復旧活動の安全確保および種々の減災対策技術を統合したリスクアセスメントに基づく、認証制度を伴う包括的な安全基準の導入および産業防災と地域防災の連携を提案する。

キーワード：自然災害起因の産業事故、革新的減災技術、包括的リスクアセスメント、包括的安全基準

## 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。

このNatechに関して、European Commission Joint Research Centreが中心となって、2003年、2007年にNatechに関するワークショップを開催している。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[1)]。日本では、2015年３月と2016年１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[2)]。

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、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、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。本論では、次の三点について、議論する。

1) 革新的減災技術の開発

リスクを低減させると同時にコストを抑えることが可能な革新的減災技術として、以下の３つの手法を挙げる。

a) 盛土の石油タンク前面の護岸への設置
b) 非常時のみ海底から立ち上がるフレキシブルパイプ群の護岸前面海底への設置
c) 石油タンクのまわりに配置した生分解性の油処理剤の津波来襲時の自動散布システムの設置

a)とb)は津波の流れの減勢、c)は津波火災による被害低減を目的とするものである。

2) 包括的リスクアセスメント手法の構築

発災メカニズムの検討とシミュレーションモデルの開発、流出油拡散、熱や物質放出、海上船舶の避航、住民の避難、陸上や海上の物流、陸上や海上からの災害復旧活動を含んだ影響伝播過程の解明と統合型ハザードモデルの開発を行う。その統合型ハザードモデルと[1)]の革新的減災技術を取り込んだ包括的リスクアセスメント手法を議論する。

3) 認証制度を含む包括的な国際安全基準の策定及び産業防災と地域防災の連携

石油コンビナート施設の安全ばかりでなく、地域住民の安心・安全、陸上や海上の物流や災害復旧活動の安全を確保するため、Natechに関する第三者機関による認証制度を含む国際的な包括安全基準の導入の必要性、産業防災と地域防災の連携の方策について議論する。

## 2. 石油コンビナートの津波被害に対する革新的減災技術

東日本大震災以降、内閣府の中央防災会議は、数

十年～百数十年に１回の発生頻度のレベル１津波と、数百年～千年に１回発生頻度のレベル２津波に分け、レベル１津波では、人命を守る、財産を守る、経済活動の継続を防護目標とし、レベル２津波では、人命を守る、経済的損失の軽減、大きな二次災害の防止、早期復旧を防護目標とした。津波被害のあった地域では、これに基づいて、新たな防潮堤や湾口防波堤の建設、住宅地域の高台への移転など対策が取られている。一方、石油コンビナートの津波被害を考える場合、レベル２津波では、大量の油流出が起きることが想定され、これが大きな二次災害や早期復旧の阻害になると考えられ、石油コンビナートの津波対策については、レベル１津波の防護目標に設定する必要がある。

2.1　盛土

常田と谷本は、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-1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-2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）の影響を調べている[3]。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。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。

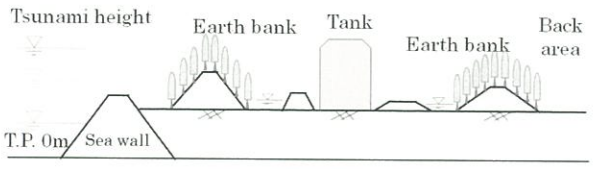


図-1　盛土の配置図

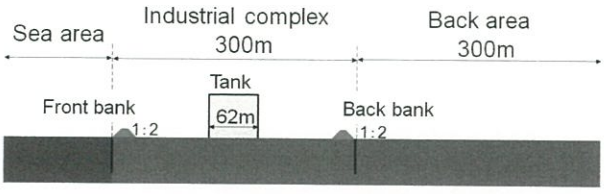


図-2　数値解析用配置

2.2　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[4]から、マングローブ群、特にフタバナヒルギが、海中から気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-3参照）。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-4参照）。図-5に、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、ウレタン、ABSの各材質、高さ10cmと20cm）と球状タンク模型の設置位置を示す。図-6に、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の素材の違いと高さの違いによる変化

を示している。硬い素材ほど、また10cmの高さのほうが減少率は大きく、最大36%に達している[4]。

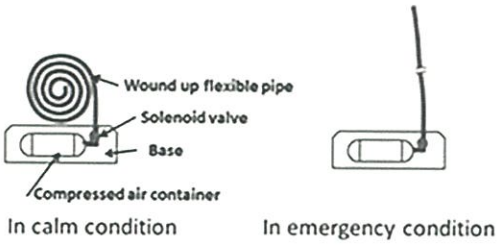


図-3　フレキシブルパイプの運用

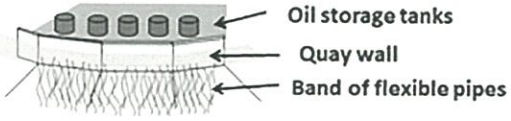


図-4　フレキシブルパイプ群の設置

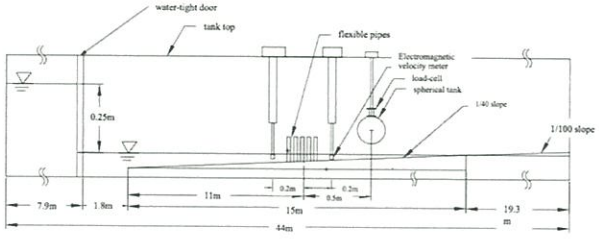


図-5　実験装置

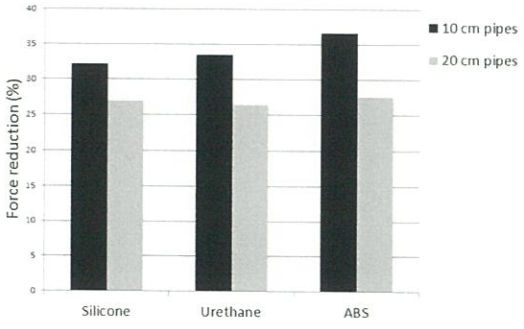


図-6　球形タンクに加わる水平流体力の減少率

### 2.3　油処理剤の津波来襲時の自動散布システム

東日本大震災では、大規模かつ広範囲の火災被害が発生した。特に気仙沼では海面上に流出した油とガレキが混在し、津波火災を拡大させた。今後想定される大地震によって、大規模石油コンビナートからの大量の流出油が人口密集地域に到達するばかりでなく、海上にも広範囲に広がり、津波火災を拡大させ、陸域と海域に甚大な被害をもたらすことが予想される。このような災害に対して、(1)流出油を伴った津波火災のメカニズムの解明と、(2)油タンク周りに配置した油分散剤の自動散布システムを用いた減災手法の開発を行う。そのためには、1)津波起因火災への流出油がもたらす影響に関するデータ分析とモデル化、2)ガレキと油類を用いた発火実験とモデルの検証、3)分散剤と重油の混合した状態の火災に関するモデル化、4)津波水槽でのガレキ、油類、油分散剤を用いた発火実験を実施する必要がある。これによって、これまで対策がないと言われてきた大規模石油コンビナートからの油流出に起因する津波火災の減災手法を獲得することが期待できる。図-7は、燃えるガレキのまわりに重油がある場合、予め油分散剤を重油と撹拌させておくと、重油への引火が防げることを示したものである。左側の写真は、燃えているガレキを取り囲むC重油が、ガレキの輻射熱で引火点に達し、燃え出し、炎の最高点に達した状態を示す。右側の写真は、油分散剤と重油と撹拌させた場合での炎の最高点に達した状態を示す。

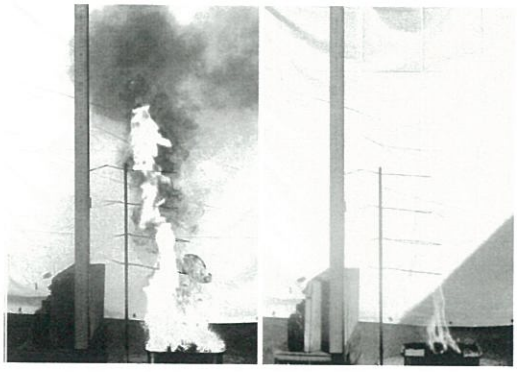

図-7　燃焼するガレキからの重油への引火と油分散剤の効果

## 3. 包括的リスクアセスメント手法の構築

### 3.1　スロッシングによる油の溢流[6]

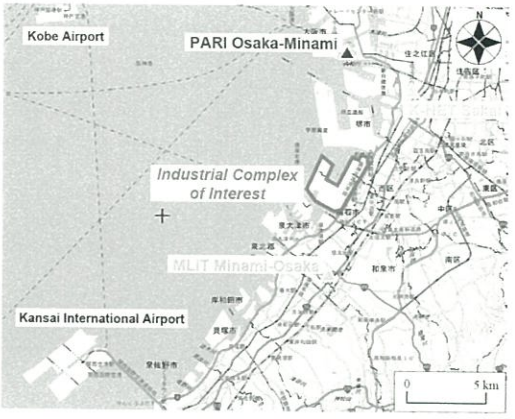


図-8　堺泉北地区石油コンビナート周辺の地震計

対象地域での地震動の想定時系列データを用い、スロッシングによる油の溢流シミュレーション法による溢流量の算定を行う。図-8に示す３か所での微小振動計による水平方向と鉛直方向の比のスペクトル解析から、PARI Osaka-Minamiでの特性が堺泉北地区石油コンビナートのものに近いことから、南海トラフ大地震に対する堺泉北地区石油コンビナートでの地震動を、PARI Osaka-Minamiの地震動のスペクトルに定数をかけて求めている（図-9）。図-10に、計算による105秒後のスロッシングの状態を示す。浮屋根上への油の乗り上げと石油タンクからの溢流が捉えられている。このシミュレーションによれば、堺泉北地区で27,665klの溢流量が予想される。

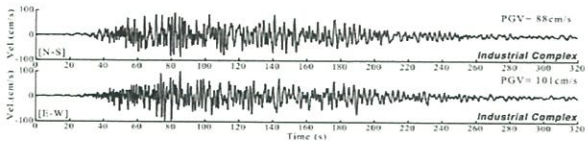


図-9　スロッシングの計算に用いた地震動

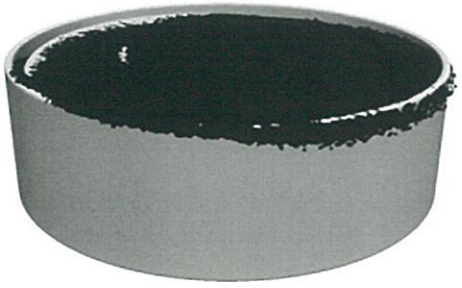

図-10　105秒後のスロッシングの状態

3.2 石油タンクに及ぼす流体力の算定とタンク転倒の算定[7)]

石油タンクに及ぼす津波流体力の算定について、図-11に示す津波水槽において、図-12に示す石油タンク群の模型を用いて、石油タンクに加わる流体力を計測した。図-13に、第一波の津波に対する鉛直力に関する消防庁の算定値と実験との比較を示す。今後、石油タンクからの油流出につながる石油タンクの転倒条件について、詳細に調べる必要がある。

3.3 津波による石油タンク群からの流出重油の拡散シミュレーション[8)]

南海トラフ大地震（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、大阪湾大阪北港にある石油コンビナートの石油

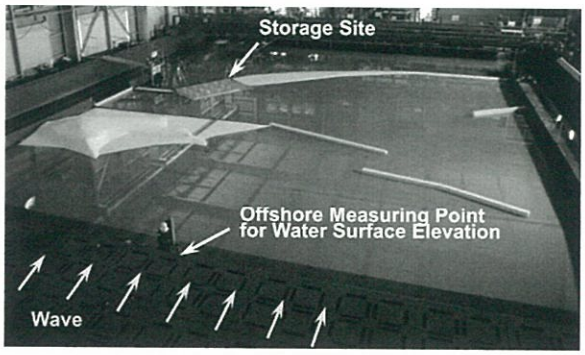


図-11　津波水槽と模型の配置

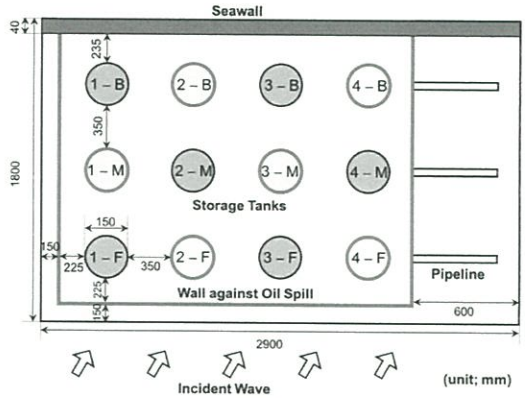


図-12　石油タンク模型の配置

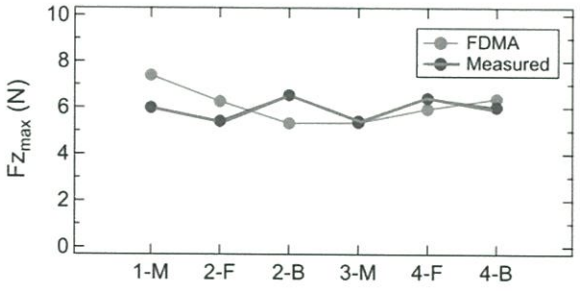


図-13　第一波の津波に対する鉛直力に関する消防庁の算定値と実験との比較

タンク群からの流出重油の拡散シミュレーションを行った。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。大阪湾大阪北港にある石油コンビナートの石油タンク群からの油の最大流出量として、大阪府石油コンビナート等防災計画（平成28年３月修正）のデータを用いた。粒子一つあたりの体積V=5.42kl、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239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-14）。今後、海上に流出した重油の拡散について、大阪湾の流況計算を通して、明石海峡や友ヶ島水道から大阪湾の外側に広がらないかどうか調べる必要がある。

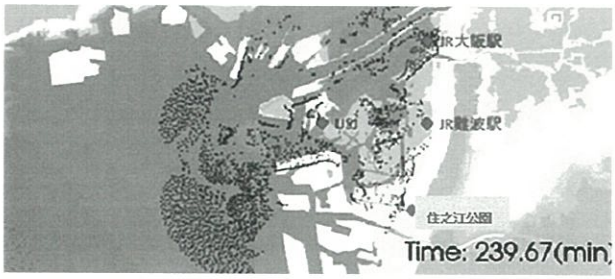


図-14　大阪湾大阪北港にある石油コンビナートの石油タンク群からの流出重油の拡散シミュレーション

### 3.4 石油タンクからの熱放射とガス拡散シミュレーション[9)]

Fire Dynamics Simulatorを用いた石油タンクからの熱放射とANSYS-CFXを用いたガス拡散シミュレーションを行った。図-15に石油タンクからの熱放射の計算領域と計算条件を示す。図-16に石油タンク壁から放射熱限界（2.3kW/m$^2$）までの距離について、満水位、半分の水位に対する時間変化を示す。この放射熱限界は、人体が単位時間に受ける放射熱の許容限界値を表し、概ね数10秒間受けることにより痛みを感じる程度の熱量である。半分の水位の場合が、満水位の場合より、放射熱限界距離が大きく、放射熱の影響が遠くまで及ぶことを表している。

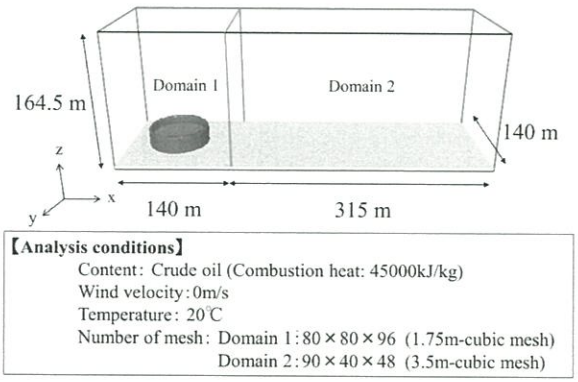


図-15　石油タンクからの熱放射の計算領域と条件

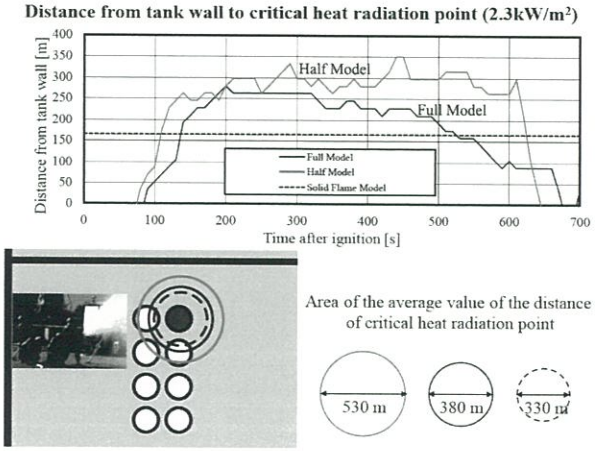


図-16　放射熱限界（2.3kW/m$^2$）までの距離

### 3.5 AISを用いた海上船舶の漂流・航行・沖待ちなどの解析[10)、11)]

図-17に、AISデータを用いた東京湾における東日本大震災時とそれ以前の船舶の位置の比較を示す。東日本大震災時に、船舶が沖合に出ようとしている様子が読み取れる。図-18には、AISデータを用いた大阪湾における低気圧来襲前後の船舶の位置の比較を示す。大阪湾においては、大津波来襲時のAISデータを用いた船舶の行動情報がないため、非常時として低気圧来襲時の船舶の行動を調べた。図-18から、低気圧来襲後に、船舶数が増えていることがわかる。また堺泉北地区石油コンビナート付近の海域に、船が集中していることがわかる。津波来襲時においても、同じような船舶の避難行動になるものと思われる。大阪湾に津波が来襲した場合、堺泉北地区石油コンビナート付近の海域に避難した船舶は、津波によって漂流し、タンクに衝突する危険性が高いことが想定される。今後、この事象に関するシミュレーション技術を構築する必要がある。

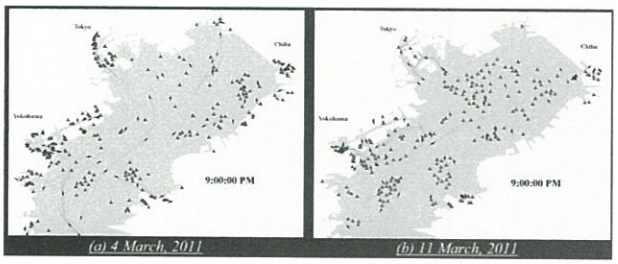


図-17 東京湾における東日本大震災時とそれ以前の船舶の位置

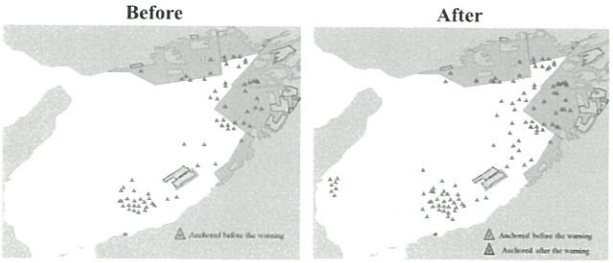


図-18 大阪湾における低気圧来襲前後の船舶の位置

上記で示したリスク評価技術を統合化し、さらに革新的減災技術の効果を組み込み、包括的リスクアセスメント手法をコンピュータのネットワーク化により構築する。これによって、種々の減災技術が、油流出や津波火災の被害を抑える効果を定量的に推定することや、地域住民の安全確保、陸上や海上の物流や陸上や海上からの災害復旧活動の安全確保についての対策の検討が可能となる。

## 4. 認証制度を含む包括的な国際安全基準の策定及び産業防災と地域防災の連携

機械の国際安全規格は、ISO/IECガイド51[12]を中心に、機械類の安全性－基本概念、一般設計原則規格を扱うISO 12100と、リスクアセスメント規格を扱うISO 14121などから、階層的に成り立っている。特徴は、製品のライフサイクル全般に渡って安全を組み込む（設計、製造、流通、使用、保守、解体、廃棄等）ところにある。また第三者機関による認証取得が前提となっている。

一方、海洋構造物の安全基準について、2010年のメキシコ湾における海底生産システムからの大量の油・ガスの流出事故（GoM spill）後、アメリカ、イギリス、ノルウェーが中心となり、見直しを行った。新たな基準作りは、米国流のコマンド・アンド・コントロール方式（あらかじめ決定された内容に基づき、政府あるいは規制機関が規制を行う）と、イギリスやノルウェーのようなリスク管理方式（事業者、労働者、政府の３者の立場からリスクを予見し、それらの低減を図る）の二つの考え方を組み合わせ、更に第三者機関による検証制度を取り入れる形で進められている[13]。

石油コンビナートの防災を考える場合、石油コンビナート施設の安全ばかりでなく、住民や工場労働者の安全、陸上・海上の物流や災害復旧活動の安全を確保する必要がある。日本の場合、石油コンビナートの安全基準は、石油コンビナート等災害防止法、高圧ガス法、消防法、労働安全衛生法で規定されており、監督官庁も異なっている。しかも、上述のリスク管理方式とは異なり、規制をベースにしたコマンド・アンド・コントロール式を採用している。ただし、高圧ガス法については、リスク管理方式に移行しつつある。EUやアメリカでは、リスク管理方式[14)、15)]を採用している。そのリスク管理方式の中では、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、産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言わざるを得ない。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、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、先ず、企業と中央および地方の行政機関、行政機関と住民の間でリスクコミュニケーションを行い、次に、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。

## 5. おわりに

東日本大震災を経験した今、大都市の臨海部に立地する石油コンビナートの安全対策について、大災

害が起きる前に、油や危険物の住宅地区や海上への流出やガス爆発に伴う住民の生命財産の保全、陸上・海上の物流や災害復旧活動の安全確保を含んだリスクアセスメントを用い、抜本的な災害対策を施しておくことが、求められている。全体の安全性を総合的に判断する第三者機関による認証制度を含む国際的な包括安全基準を導入し、幾つもの国内の法律や行政間の壁による障害を解消し、企業側の産業防災と地域住民側の地域防災との間の溝を埋める努力を行うことで、施設の安全ばかりでなく、住民や工場労働者の安全・安心、陸上・海上の物流や災害復旧活動の安全を確保する低リスク社会への構造変革をもたらすことになる。

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) 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 (Natech2016), 2016
4) Y. Sasaki, et al : 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
5) H. Suzuki, et al : A study on lattice-pattern arranged vertical flexible pipes to decrease damage of oil and gas storage tanks caused by large-scale tsunami, Proc. of Int. Symp. on Natural Disaster Impacts to Large Industrial Parks (NDIIP 2015), 2015
6) H. Hashimoto, et al : Sloshing of an oil tank in Osaka bay area caused by an estimated Nankai Trough earthquake, Proc. of Natech2016, 2016
7) W. Kunimatsu, et al : Experimental study of tsunami wave load acting on storage tank in coastal area, Proc. of Natech2016, 2016
8) W. P. Kyaw, et al : Numerical studies on multiphase flow in tsunami with oil spill in Osaka bay, Proc. of Natech2016, 2016
9) T. Tsuneyasu, et al : FDS Analysis of Pool fire in Large Scale Flat Bottom Tank of Crude Oil, Proc. of Natech2016, 2016
10) H. Makino, Analysis of a latent risk of ship evacuation during a tsunami using ship big data, Proc. of Natech2016, 2016
11) X. Gao, et al : Analysis of the Anchoring Ships around the Coastal Industrial Complex in a Stormy Weather, Proc. of Natech2016, 2016
12) 向殿政男、ISO/IECガイド51：2014改訂について、第4回SAスキルアップミーティング、2014
13) L. S. Bennear, Offshore Oil and Gas Drilling : A Review of Regulatory Regimes in the United States, United Kingdom, and Norway, Review of Environmental Economics and Policy, 9 (1) : 2-22, 2015
14) L. S. Rodriguez, et al : The Seveso III Directive and its impact on risk communication and emergencies, d+i LLORENTE & CUENCA Ideas, Analysis and Trends Centre (2014)
15) https://www.epa.gov/rmp