



石油タンク等危険物施設の 安全性向上に関する研究紹介

消防庁消防研究センター施設等災害研究室

1 はじめに

消防研究センターでは、長年にわたって、石油タンクをはじめとする危険物施設の安全性向上に関する研究・開発に取り組んできている。今日、南海トラフ巨大地震、首都直下地震等の大地震が切迫している中で、東日本大震災の経験から、地震発生後の早期復旧・復興の実現に向けて、大型の石油タンクなどエネルギー産業施設の被害の未然防止、火災等災害発生時の早期鎮圧と徹底した拡大抑止が極めて重要視されている。加えて、危険物施設については、近年、高経年化が進行し、その健全性（このまま使用してよいかどうか、あとどの程度の期間継続使用可能なのか等）を的確に診断することは、施設の安全性向上のために欠かせない。

これらのことから、現在、消防研究センターでは、次の研究テーマに取り組んでいる。

- (1) 石油タンクの地震防災に関する研究
- (2) 石油タンク底板内面に施工されるコーティングの健全性診断に関する研究

2 本研究のスタッフ

本研究は、火災災害調査部長の西、施設等災害研究室の畑山、徳武が担当している。

3 石油タンクの地震防災に関する研究

ここでは、過去約10年間に消防研究センターにおいて石油タンクの地震防災に関して実施した研究のうち主なものを紹介する。

3.1 平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震の際の石油タンクの被害等調査

平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、各地において石油タンクをはじめとする危険物施設も甚大な被害を受けた。この地震による2万2,000人余りという夥しい数の死者・行方不明者は、主として最大遡上高40mにも達した津波によるものであったが、石油タンクにも津波による甚大な被害が数多く発生した。また、このような大地震に特有の大振幅の長周期地震動によって、各地の大型石油タンクにはスロッシング被害も生じた。消防研究センターでは、このような石油タンクの被害について、地震発生直後から現地調査を数次にわたって行った。以下、被害原因別に被害調査結果を記す。

3.1.1 津波による被害

消防庁及び消防研究センターが平成23年6月から7月にかけて、北海道、東北地方、関東地方及び中部地方の一部地域を対象として実施したアンケート被害調査結果を再集計したところ、この津波によりタンク本体、配管、防油堤、基礎・地盤等のいずれかに何らかの被害（浸水による設備等の故障を含む）が生じた危険物屋外タンク貯蔵所は、北海道及び青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸の道県で418基あった。このうちタンク本体が流失、移動、転倒するなどの被害、すなわちタンク本体の移動被害は、青森県から福島県にかけての太平洋沿岸の各県にある合計157基で発生したことが分かった（図1）。このような大規模な石油タンクの津波被害は、我が国ではこれが初めてのことであり、世界的にも初めてのことと思われる。

これらの被害状況と津波浸水深の関係を整理した結果、浸水深が5m以上の場合は、タンク本体が移動するなどタンク本体及び附属配管に被害が生じるおそれが大であること、浸水深が2.5~5mの場合は、空に近い小さなタンクを除きタンク本体は移動しないものの附属配管には被害が生じるおそれが大であることなどの経験則が見出された。また、今回の被害事例により、消防庁が平成21(2009)年に提案した石油タンク津波移動被害予測式（津波を受けた円筒形縦置き型タンクに滑動、浮き上がりなどの被害が発生する虞の有無を簡便に評価できる方法）の精度検証を行った。その結果、実際の被害発生

状況と予測結果が照合できたタンク197基のうち、移動被害の有無について予測結果と実際の被害が合致したものが147基あり、的中率は約76%と高いことが分かった。本予測式は水理模型実験に基づいて提案されたものであって、その予測精度は未検証であったが、この検討により、予測式の有効性が確認された。

消防庁では、平成24(2012)年に本予測式を用いたソフトウェア「屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール」を消防庁HPで公開した(平成24年8月21日消防危第197号)。これは、全国の消防本部や事業者等で広く利用されている。

また、再集計した被害データに基づいて、石油タンクの配管の被害率(津波最大浸水深の1m間隔の階級毎の[配管に被害が生じたタンク基数] / [当該階級に含まれるタンク基数])と津波最大浸水深の関係を求め、これを対数正規分布関数でモデル化して、津波による配管の被害率曲線を作成・提案した。この曲線によれば、最大浸水深2mでは被害率は約25%であるが、これが4mになると被害率は約80%に急増する。仮に津波浸水深を低く抑えることによって、配管被害を軽減するという対策を考える場合には、目標として浸水深2m程度以下というのが一つの目安となるといえる。

平成26(2014)年には、津波で動いた石油タンクの諸元や津波時の原位置及び移動先を把握することを目的として、改めて現地調査を実施した。その結果、福島県内において容量9,800kLタンク(1万kLクラス)2基が移動したという事例については、貯油量はそれぞれ6,000kLと7,400kLもあったこと、最も遠くまで動いたタンクは女川にあった980kLタンクで、移動距離約5kmであったことなどが分かった。また、貯油量が多かったゆえに移動被害を免れたと思われる事例(ほぼ同じ場所で貯油量が多かったタンクは動かず、少なかったタンクは動いたという事例)や、容量数十kLクラスの小規模なタンクではあるが、アンカーボルトで留められていたがゆえに移動被害を免れたと思われる事例(ほぼ同じ場所でアンカーボルトが設置されていたタンクは動かず、設置されていなかったタンクは動いたという事例)を数例把握した。



図1 平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震の際の石油タンクの津波被害(気仙沼市)

3.1.2 長周期地震動によるスロッシング被害

長周期地震動による石油タンクのスロッシング被害発生地区の確認と、被害の内容・程度を知るために、アンケート調査を実施した(調査主体は消防庁)。その結果によれば、スロッシング被害は、北海道、秋田、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の10都道県の64基で生じている。消防研究センターでは、平成15(2003)年の十勝沖地震を受けて実施された設計地震動の見直し、浮き屋根の補強等の対策の検証という観点も併せ、石油タンクのスロッシング被害に関する現地調査を行った。

それによると、酒田地区では、アルミニウム製内部浮き蓋のデッキスキン、フロートチューブの破断が認められた。また、当該事業所に設置された消防研究センター強震観測点での地震動の速度応答スペクトルは、このタンクのスロッシング固有周

期4.17秒付近では約200cm/sと大きな値となっていること等から、フロートチューブに対して許容を超える歪みとなり、破断に至ったものと推定された。新潟・新発田地区では、最大2mのスロッシングが発生し、ポンツーン内の滞油、アルミニウム製内部浮き蓋の破損、ゲージポールの変形、浮き屋根上への油の流出などが認められた。川崎地区では、ポンツーンの破損に起因する浮き屋根の沈没(図2)、ガイドポール固定ボルトの破損、内部浮き蓋上への滞油、ポンツーンでの滞油等が認められた。浮き屋根が沈没したタンクサイト近傍にある消防研究センター強震観測点での地震記録を入力とするスロッシング応答を解析すると、最大波高は1.3mで側板の油痕から測定された値(1.0~1.5m)と整合することから、この強震動データを用いた浮き屋根損傷評価を行ったところ、発生応力は許容応力の約1/3程度であり、ポンツーンは破損しない結果となった。これに対し、その後の調査で、破損ポンツーンの前補強リングが下部デッキから外れていたこと、および初期浮力の影響を考慮すると被害を説明できることを指摘した。



図2 平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震の際の重油タンク浮き屋根沈没事故(川崎市)

3.1.3 短周期地震動による被害

石油コンビナート最寄りの強震記録から、設計震度と相関すると考えられる減衰10%加速度応答値を求めてみると、仙台、広野、いわき、鹿島臨海地区で設計震度相当値を上回っており、何らかの被害があってもおかしくないことになるものの、短周期(約0.1~1秒)の地震動そのものによる石油タンク本体の被害は認められなかった。

一方、千葉県のLPG球形タンク群で、水張り中のタンクの倒壊を機に、火災・爆発(BLEVE)が発生し、負傷者6人(重傷者1人、軽傷者5人)、隣接するアスファルトタンクの損傷、漏洩、飛散物・爆風等の影響による隣接事業所での火災、一般住宅地区等での爆風による窓ガラス、シャッター、スレート等の破損及び保温材等の軽量飛散物による車両の汚損を生じた。BLEVEに伴って発生したファイヤーボールの直径は、映像の解析から約600mと推定された。なお、この火災・爆発は、消防法第35条の3の2に基づく火災原因調査の対象となった。

いわき地区では、強震動による液状化などの地盤の変状によるタンク本体の被害が認められた。タンクサイトは河口付近の埋立て地にあり、地盤の固さを表すN値には相当のばらつきがある。被害としては、タンクたらい回り付近下での側方流動と思われる地盤変状に伴い、タンク底板が傘型に変形し(最大不等沈下率1/61)、底板溶接部に亀裂が発生して、若干の油のしみ出しがあったものである。また鹿島地区では、極めて大きな地盤変状の発生に伴い、防油堤の目地部分が大きく開口するといった被害が認められた。

消防庁が行ったアンケート調査結果によれば、鹿島地区では、200~950kLのタンク11基に、アンカーボルトの破断、伸び、変形、浮き上がり等が発生した。これらは、タンク本体が浮き上がったことを示唆するものであるが、これらのうちの9基は地震が原因であるとの回答があり、2基は地震によるものか津波によるものか判別不明との回答であった。消防研究センターでは、後日、鹿島地区においてこれらタンクの浮き上がりに関する調査・データ収集も行った。

3.2 平成28(2016)年熊本地震の際の大分地区の石油コンビナート等特別防災区域におけるスロッシング被害調査

平成28(2016)年4月16日に発生した熊本地震本震(M7.3)の地震の際、大分地区の特防区域を擁する大分県中部地域では「長周期地震動階級3」の大振幅の長周期地震動が観測され、同特防区域内では浮き屋根式石油タンクにおいてスロッシングによるものとみられる被害が発生したとの一報がもたらされた。

このため、消防研究センターでは、同年中に三度にわたって現地調査を行った。その結果、同特防区域では、消防法令により同特防区域に対して定められている「液面揺動の設計水平震度(Kh2)」相当の速度応答を一部の周期で上回る大振幅の長周期地震動が観測されたことがわかり、浮き屋根式石油タンクでは、液面上昇量0.3~1.9mのスロッシングの痕跡が確認された。

これらのスロッシング高さの実測値と、同特防区域内の強震観測記録に基づいて推計したスロッシング高さを比較したところ、推計値は実測値とおおむねよく合っているが、実測値が推計値を若干上回る傾向が見られた。これは、地震計設置位置よりも、タンクサイトのほうが長周期地震動が大きかった可能性を示唆しているかもしれない。

被害については、同特防区域内では、2基のタンクの浮き屋根のポンツーンが損傷して油が室内に滞留したり、25基のタンクで液面計に故障・不具合が生じたりするなどの被害が発生したことが分かった。浮き屋根のポンツーンが損傷したタンクは、容量10万kL原油タンク1基(1室破損)と容量2万kLガソリンタンク1基(2室破損)であった。損傷はいずれも外リムとポンツーン下板の接続部に開口が生じたものであった。

浮き屋根のポンツーンが損傷したタンク2基について、同特防区域内の強震観測記録に基づいて、平成17年1月14日消防危第14号及び平成18年6月30日消防危第157号で示されている浮き屋根外周部ポンツーン発生応力算定式の基になっている方法により、浮き屋根外周部ポンツーンに発生した応力を推計したところ、発生応力は降伏応力を上回らなかった。この原因としてさまざまなことが考えられるが(例えば、タンク固有の問題、地震動の問題、当該浮き屋根がローデッキタイプであることによる応力集中等)、解明に至っておらず、今後の課題とすべきものである。

3.3 石油コンビナート等特別防災区域等における強震観測

消防研究センターでは、平成15(2003)年十勝沖地震後の取組として、特防区域で強震観測を行ってきている。平成15(2003)年十勝沖地震において浮き屋根式石油タンクに基大なスロッシング被害が発生したことを受けて行われた平成17(2005)年の消防法令及び技術基準改正では、将来の大地震でとくに大きな長周期地震動が予測される地域に存する20の特防区域に対して「液面揺動の設計水平震度(Kh2)」が引き上げられた。この引き上げは、これらの特防区域には強震観測点が無かったことから、主として特防区域直近の気象官署等にある既存の強震観測点における過去の地震記録の分析から、将来の地震による長周期地震動を予測した結果(3.4.1参照)に基づいて行われた。しかしながら、波長の長い地震波からなる長周期地震動といえども、短い距離でその特性が大きく異なることがありえる(3.4.2参照)ことから、特防区域内における詳細な長周期地震動特性の把握が必要であるとされ、Kh2が引き上げられた20の特防区域を対象として消防庁が速度型強震計を設置し、地震観測が開始された。また、これとは別に、消防研究センターでは、近い将来における発生確率が高いと評価された大地震の震源域近くに立地する特防区域の強震動予測を目的として、数ヶ所の特防区域において速度型強震計による強震観測を開始していた。

これらの2つの異なる経緯からの特防区域における強震観測点を合わせると、現在、全国に83ある特防区域のうちの20の区域に23地点ある。他に特防区域以外の場所にも2地点ある。1地点は消防研究センターにあり、もう1地点は、設置当初は特防区域だったものの現在は特防区域の指定が解除された石油タンクサイトにある。現在、これら25の強震観測点(図3)は、消防研究センターにより、一体的に管理・運用されている。

この強震観測によるデータは、平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震(M9.0)のものを含めて蓄積が進んでおり、近年では、新たに特防区域に指定される可能性のある地域に対して、定めるべきKh2の検討に活用されたり、特防区域を抱える都道府県の防災本部による特防区域の防災アセスメントにおける長周期地震動の想定のための参考データとして活用されたりしている。また、地震時の石油タンクの被害等を予測・推定するシステムの入力データとしても利用されており(3.7参照)、地震発生時には、消防庁の応急対応の支援にも役立てられている。

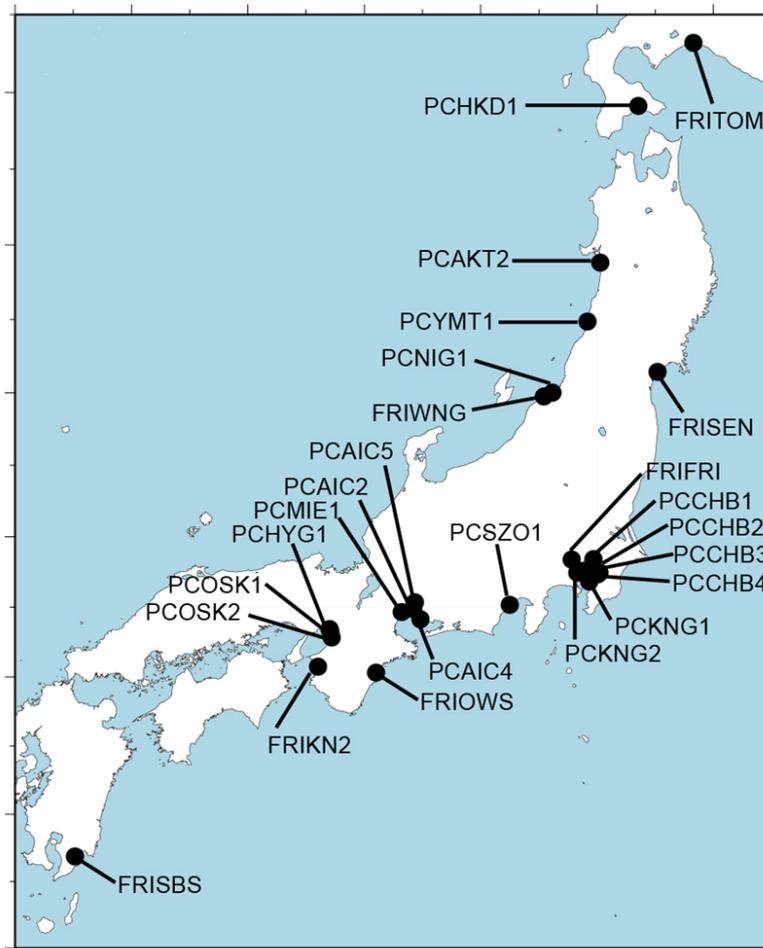


図3 石油コンビナート等特別防災区域等における消防研究センターの強震観測点

3.4 長周期地震動の予測

3.4.1 長周期地震動スペクトルの経験的手法による予測

石油タンクのスロッシングによる貯液の溢流や浮き屋根ポンツーンの損傷などの被害は、石油タンクの直径と液高から求まるスロッシング固有周期（概ね3秒から10秒程度の長周期帯域）での地震動強さ（擬似速度応答スペクトル）によってほぼ推定できる。上述のKh2の見直しに用いられた経験的予測手法（座間、2000）の適用性について、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震を対象として検証したところ、遠方近似で点震源を仮定している手法であるにも拘わらず、気象官署での観測スペクトルのレベルや形状を比較的よく表すことが分かった。ただし、周期10秒以上での予測値は観測値を大きく下回ったことから、原因と考えられる震源スペクトルのスケージング則について、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震の震源域とその周辺で発生した地震規模マグニチュード（M）の異なる3つの大きな地震（昭和8（1933）年三陸地震、昭和53（1978）年宮城県沖地震、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震）を東京大手町での観測記録により検討した。その結果、特にこれら3地震のスペクトルから求まる、見かけのカットオフ周期とMとの関係は、従来提案している手法（座間、2000）よりカットオフ周期がかなり長周期側になること、また、それにより前述した周期10秒以上の予測値を改善できる可能性があることを示した。

3.4.2 長周期地震動振幅の短距離間空間較差の発生要因の理解と簡易的予測

石油タンクのスロッシングの原因ともなる、堆積盆地で観測される周期数秒から十数秒の長周期地震動の主成分を表面波であるとした場合、その波長は水平方向におおむね数kmから20ないし30kmと見積られる。しかし、この波長に比べて1波長にも満たないような短い距離で、長周期地震動のスペクトル振幅が大きく異なる（例えば1.5倍とか）事例、またはそれを示唆するような事例が観測され得ることは、例えば、平成15（2003）年十勝沖地震（M8.0）の際に、石油タンクに甚大なスロッシング被害が生じた苫小牧周辺及び同地域を擁する勇払平野での地震動の観測事例や、苫小牧東部の石油備蓄基地

内の石油タンクにおけるスロッシング高さの計測事例（約2km四方の基地内において、スロッシング1次固有周期が約11秒のタンクに発生したスロッシングの高さが、南側の地区のほうが北側の地区よりも系統的に1.5倍程度大きかった）などにより、以前から認識・指摘されていた。

同一の石油備蓄基地内の石油タンクにおけるスロッシング発生高さが系統的に異なるという事例は、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震（M9.0）の際に大きな長周期地震動に見舞われた新潟東港地域（容量6～11万kLの大型石油タンクが17基ある）の石油備蓄基地でも観測された。新潟東港地域の石油備蓄基地は、港をはさんで東地区と西地区に分かれており、両地区は2km程度離れている。両地区では、立地している石油タンクの大きさがほぼ同じ、すなわちスロッシング固有周期がほぼ同じ（地震発生時の液面高さでのスロッシング1次固有周期は10.8秒程度）であるにも拘わらず、西地区で発生したスロッシングの高さ（実測値）は2m程度であるのに対し、東地区では1.5m程度と系統的な差違が見られた。これは、東西両地区の石油タンクのスロッシング1次固有周期である周期11秒程度の長周期地震動のレベルが、2kmというその波長に比して、かなり短い距離しか離れていない場所どうして、1.3倍程度異なっていた可能性を示唆している。

平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震の際、東地区では消防研究センターの強震計により地震記録が得られたが、西地区には強震計はなかったため、この地震の際の実際の揺れを実記録から比較することはできない。しかし、この地震の後、西地区に隣接する事業所が強震計を設置したため、両地区で得られた平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震の余震等の記録を比較できるようになった。Mw5.8～7.3の5つの余震について比較を行った結果、問題となる周期11秒付近の疑似速度応答（減衰0.5%）は、西地区のほうが大きく、平均して東地区の1.1倍程度、+ σ で1.2倍程度のものが観測されることが分かった。地震動の観測結果は、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震の際に発生したスロッシングの高さの東西両地区間の相違と調和的である。

この東西両地区の長周期地震動特性の相違を、地下構造の観点から解釈することを目論んで、新潟東港地域の石油備蓄基地の東西両地区において、微動アレイ観測による1次元地震波速度構造の推定を行った。東地区では西地区に比べて、全体的に堆積層が薄く、とくにS波速度1.2km/s程度の堆積層が200m程度薄いことが分かった。これは、平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震の余震記録に見られた東西両地区の長周期地震動特性の相違と、定性的には調和的である。実際に、この地下構造の違いが、両地区での長周期地震動レベル及びスロッシング高さの差異をもたらした要因となり得るものであるかは、定量的な検討を行いながら考察していく必要があるが、仮にそうであるとすると、周期10秒程度という長周期の地震動といえども、その高精度な予測には、堆積盆地の全体的な堆積層の厚さにとどまらず、より詳細な地下構造情報が必要であることを意味するものとして銘記すべき事例といえる。

以上のような短距離間での大きな振幅較差が生じる仕組み・要因を理解することを目的として、2次元面内地震波動場を検討対象とした簡単な数値実験により、横方向に不規則な地下構造の中を伝播する表面波について、短距離でそのスペクトル振幅がどの程度変化するかを調べるとともに、不規則な地下構造の中でどのような波動場が形成されているかを調べた。その結果、観測されるような短距離間での大きな振幅較差が生じうことは理論的な計算から確認された。また、短距離間での大きな振幅較差は、地表近くの低速度の媒質が形成する細かな構造の違いが原因である可能性があることが分かった。横方向に不規則な地下構造において形成される長周期地震動の波動場の深さ方向のフーリエスペクトル振幅分布は、入射波の条件や周期によっては、その地点直下の1次元地下構造から計算される表面波基本モードの固有関数の形状と概ね一致する場合があることも分かった。この性質をうまく利用すれば、対象地点直下の1次元地下構造モデルから、長周期地震動の増幅特性を粗くではあるかもしれないが簡易な方法で推定することが可能かもしれない。

3.5 地震時における石油タンクからの溢流量推定の高精度化

発生が懸念されている大地震に対して、適切な消防力を算定するために、防油堤内火災の規模に関する漏洩危険物の量の把握が重要となる。溢流量の算定に関して、直径4mや直径7.6mの模型タンクを用いた実験を行い、タンク近傍で記録された水平2成分の地震記録があれば、高精度で溢流量を推定できることが分かった。

3.6 石油タンクの内部浮き蓋に関する検討

長周期地震動を受けた石油タンクの内部浮き蓋上に、どの程度の量の危険物が溢流するかという点について、大規模振動台を用いて実験的検討を行った（図4）。スロッシングに伴い、浮き蓋が最も下降したところから上昇に転ずるときに溢流が

発生することが確認できた。浮き蓋上への溢流量は換算速度応答と比例関係にあり、代表的な石油タンクの浮き蓋を想定した場合、消防法令で想定されている地震動では浮き蓋は沈没しないという結果になった。

アルミニウム製の簡易フロート型内部浮き蓋は、内容液の揮発の抑制を目的として、石油タンク内に設置されるものであるが、耐震性については明確に定められていなかった。そこで、アルミニウム製の簡易内部浮き蓋のスロッシング時の挙動について、大規模振動台を用いて検討を行った。スロッシング時の減衰定数や、浮き蓋各部に発生する歪みと地震動の大きさとの関係が求められた。

これらの検討結果は、消防庁における内部浮き蓋付屋外貯蔵タンクの安全対策に関する調査検討に用いられた。



図4 石油タンクの内部浮き蓋の振動実験

3.7 地震時の石油タンクの被害等を予測・推定するシステムの開発

消防研究センターでは、石油コンビナート等特別防災区域等における強震観測（3.3参照）を活用して、特防区域等における地震時応急対応を支援するためのものとして、3.7.1～3.7.3のような石油タンクの地震時の被害等を予測・推定するシステムを開発してきている。また、3.7.4のように、緊急地震速報を利用して、揺れに見舞われる前に長周期地震動による石油タンクへの影響を予測する研究開発も行った。

3.7.1 「石油コンビナート等特別防災区域地震動観測情報システム」の開発

このシステム（図5）は、地震後、速やかに特防区域の揺れの情報を自動的に収集・処理し、どの特防区域の震度・長周期地震動レベルが大きいかをわかりやすく表示するものである。現在、全国に特防区域は84あるが、消防研究センターが強震計を設置していない64の特防区については、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網K-NET及びKiK-netの観測点のうち、特防区域直近にあるものの強震記録を利用して全国の特防区域をカバーするようにしている。

消防庁では、大地震発生時に全職員が参集して、被害情報等の収集や緊急消防援助隊の派遣に関する任務にあたる。実際に、このシステムの情報が、どの特防区域の情報を優先して収集すべきかといったことの判断の参考にされるなど、迅速・的確な情報収集活動に役立てられている。

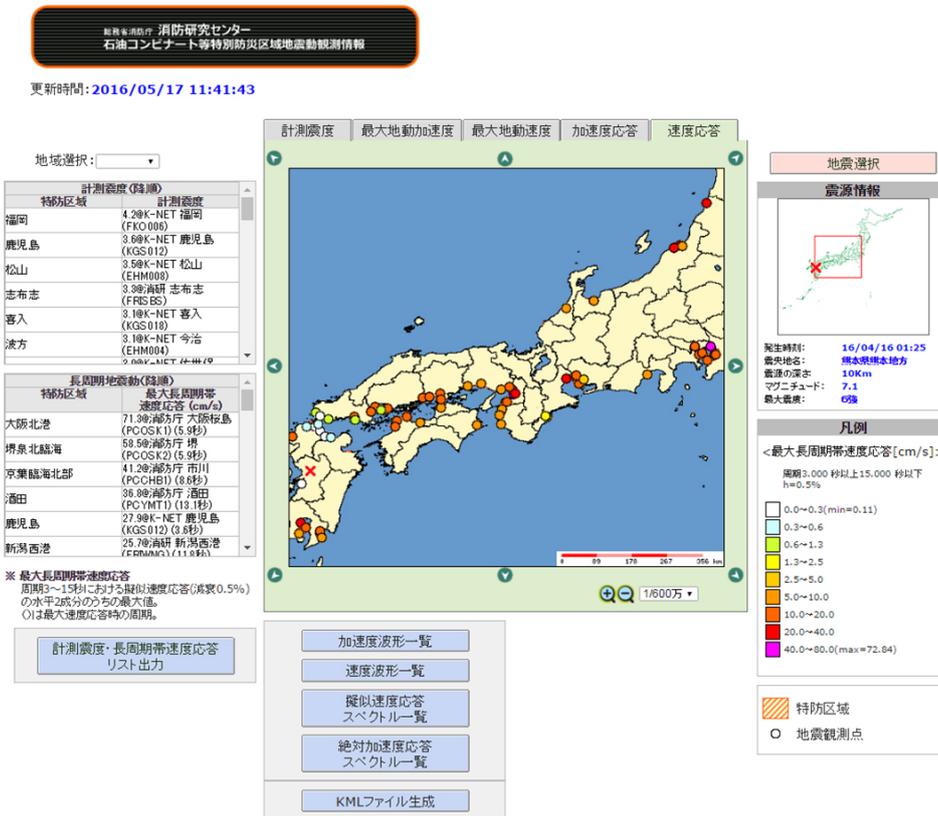


図5 「石油コンビナート等特別防災区域地震動観測情報システム」の出力画面
(平成28(2016)年熊本地震)

3.7.2 「石油コンビナート地震・液状化危険度統合シミュレータ(全国版)」の開発

このシステムは、3.7.1の「石油コンビナート等特別防災区域地震動観測情報システム」で収集された特防区域内またはその付近で取得された地震動データに基づいて、全国の特防区域について、長周期地震動の影響により各石油タンクに発生するスロッシング高さ、短周期地震動の影響により各石油タンクの側板に発生する円周方向引張応力、軸方向圧縮応力及びアニュラ部についての必要保有水平耐力を計算し、地震動によるタンクへの影響・被害を地震発生後すみやかに推定できるものである。計算・出力の仕組みの根幹についてはほぼできあがっており、全国的なタンクのデータ整備が目下の課題となっている。

また、本システムは、特防区域ごとに代表的な微地形区分をあらかじめ与えておくことにより、計測震度と微地形区分から液状化発生確率を推定する既存の簡便な式により、各特防区域の液状化危険度も地震発生後すみやかに推定できる機能を有している。

3.7.3 「石油タンク地震被害推定システム」の開発

このシステムは、主として事業所を対象として、大規模地震発生時の石油タンクの多様な被害を評価することのできるものである。タンクの経年劣化等の影響を考慮に入れることができるなど、3.7.2の「石油コンビナート地震・液状化危険度統合シミュレータ(全国版)」よりもきめ細かい評価ができることが特徴である。

3.7.4 緊急地震速報に基づくリアルタイムスロッシング予測

石油タンクのスロッシング被害の軽減を図るための方策としては、浮き屋根の耐震強度向上等の予防的方法と併せ、効率的なパトロールの実施、人員・資機材の効率的運用、引火防止、溢流危険物の拡散防止等を図るための可燃性蒸気の濃度測定、泡放射による流出油面の被覆、土嚢積み等の措置応急対応を効率的に行うことによって、被害を極小化することが考えられる。このような措置をできるだけ迅速・的確に行うためには、まず地震直後にどのタンクでどのような被害が発生し得る

のかを即時的に判断し、それに基づいた効率的な点検、対応を行うことが重要である。この目的のために、地震動観測記録に基づくリアルタイムシステムが構築されてきている。しかし、地震記録が得られた後での情報周知には通信の輻輳による遅延が考えられる。より確実な周知のためには、大地震直後に懸念される通信の輻輳が始まる前のより早い段階で、情報の受発信ができることが望ましい。そこで、平成19(2007)年から運用が開始された緊急地震速報を用いたスロッシング評価手法について検討してきた。さらに、このスロッシング評価手法とインターネット配信された緊急地震速報の震源情報に基づく種々の演算結果をメール配信できるシステムを、市販の手のひらサイズのLinuxサーバーで構築した。12基の石油タンクを対象としたシステム性能評価では、溢流危険度、浮き屋根損傷度の評価を緊急地震速報取得後0.4秒以下という短時間で行うことができることを確認した。平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震の際、六ヶ所、男鹿、大分において受信された緊急地震速報の情報を入力し、システムの有用性についての検証を行った結果、スロッシング最大波高の計算値は測定値と比較すると過小評価となつてはいるものの、地震発生後極めて早い段階でおよそのスロッシング状況を把握することができ、初動体制の確立に寄与できるものと考えられた。

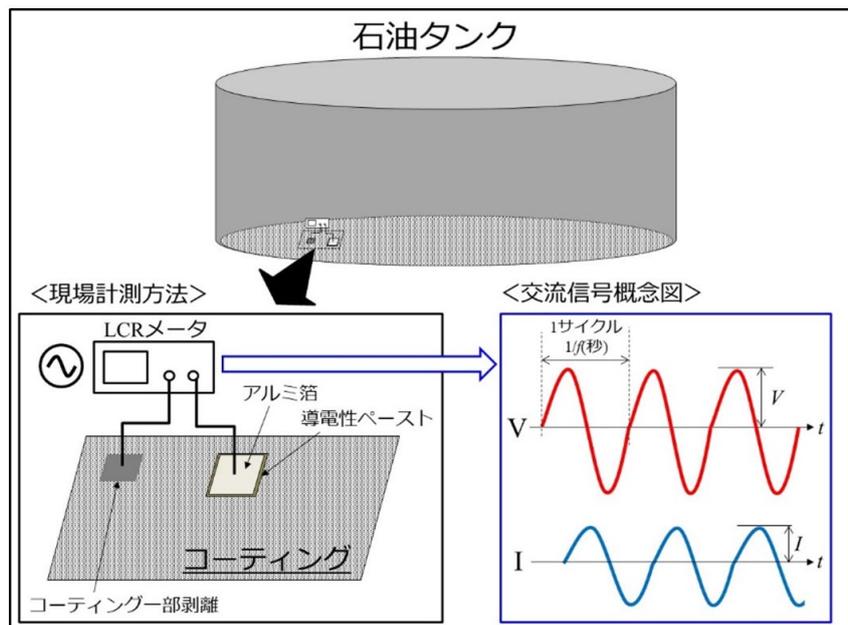


図6 石油タンク底板内面に施工されたコーティングにおけるインピーダンス測定方法の概念図

4 石油タンク底板内面に施工されるコーティングの健全性診断に関する研究

石油タンク内面の底部は、活性な腐食を引き起こすイオンを多量に含んだ水溶液に曝される厳しい環境である。そこで、腐食性水溶液と母材である鋼板の接触による金属の腐食を抑制するため、石油タンク底板内面には、耐久性の高い有機コーティングが施されるようになった。一般的に、コーティングが施工された鋼板の寿命は、未塗装のものに比べ、著しく長くなるものの、近年発生した危険物流出事故の中には、底板内面コーティングが何らかの要因で早期に劣化するとともに、鋼材の腐食開口が生じ、流出事故に至ったものも存在する。そのため、一定期間使用後に行われる開放検査において、コーティングの健全性を定量的に評価することは、事故の未然防止のために極めて重要と考えられる。

電気化学インピーダンス測定は、非破壊かつ定量的なコーティング健全性評価技術の一つである。図6に石油タンクにおけるインピーダンス測定の概念図を示す。本手法の原理は、測定対象であるコーティングにある周期(周波数 f)の交流電圧(V)を印可し、交流電流(I)を検出することで、電気の“ながれにくさ”に相当するインピーダンス($|Z|=V/I$ など)を評価するものである。アルミ箔のような電極、導電性ペースト、LCRメーターなどの可搬計測装置をタンクに持ち込めば、フィールドでの評価も可能となる。本研究ではインピーダンス法を用いて、石油タンク底板内面に施される有機コーティングのインピーダンス特性を評価するとともに、実機タンクに適用可能な健全性診断方法について検討を行った。

4.1 コーティングのインピーダンス特性評価によるタンク健全性診断手法

石油タンク底板内面用のコーティングとして主流である、ビニルエステル樹脂系ガラスフレーク塗装鋼板の模擬腐食水溶

液(食塩水)への浸漬試験および20年以上もの長期にわたって供用されたコーティングの評価を通じて、インピーダンスの基礎的特性を検証した。インピーダンス測定では、測定対象で起こる物理化学現象を回路素子に置き換えて評価する、等価回路解析という手法がよく行われる。代表的な回路素子としては、抵抗RやコンデンサCといったものが挙げられるが、一般的に有機コーティングで生ずる物理化学現象は複雑であり、これらの単純な素子だけでは十分表現できない。そこで、抵抗とコンデンサの中間の特性を表現できる、Constant-phase-element(CPE)なる特殊な回路素子を導入して解析をしたところ、劣化初期から長期供用段階に至るまで、コーティングのインピーダンスはCPEの特徴を有していることがわかった。CPEのインピーダンス式は、それを特徴付ける2つのパラメータとして、CPE定数及び乗数のTとnを有するが、これらのCPEパラメータ値によってコーティングの長期的劣化をモニタリングできる可能性を、各種実験を通じて示すことができた。

コーティングの基礎的なインピーダンス特性の検証と同時に、実機石油タンクのフィールド調査を通じて採取した数十点の定点インピーダンスデータの詳細な分析を行った。その結果、コーティングのインピーダンス特性は、2つのCPEを並列に接続する等価回路モデルによって、正確に表現できることを示した。このことは、長期使用したコーティングの物理化学現象を、正確に捉えた評価ができる可能性を示唆した結果と考えられる。さらに、CPEパラメータTとnを散布図としてプロットし、その分布傾向からタンクの健全性を把握する手法を提案した。

4.2 統計的アプローチに基づく解析による健全性診断手法の高度化

広大なタンクから採取した定点データ群の解析として有望と考えられた、極値解析なる統計的手法を多点のコーティング電気的特性値に適用し、その健全性診断への活用可能性を検討した。ここで用いる統計的手法とは、「観測された一部のデータから、全体を推定できるとされる確率・統計論的手法」のことである。比較的多くのサンプルから得た観測極限值データ群は、母集団の持つ基本的な確率分布に応じて、Gumbel分布やFrechet分布といった、いくつかの極値分布に漸近することが知られているため、この性質を利用するものである。

検討の結果、測定領域にグルーピングされた採取データ群から抽出したコーティング電気的特性の最大値データ群は、代表的な極値分布であるGumbel分布、Frechet分布に従うと考察された。この特徴を利用することで、異なる石油タンクにおける健全性の比較評価や広大な底板内面コーティングの最大劣化値を推定できることを示唆できた。