

2011年東日本大震災における火力発電所の被害分析

湯山 安由美¹・梶谷 義雄²

¹正会員 電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
E-mail:yuyama@criepi.denken.or.jp

²正会員 電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
E-mail:y-kaji@criepi.denken.or.jp

2011年東日本大震災では、地震動、津波、また液状化や地盤沈下等の複合的な要因により、太平洋岸を中心として19の火力発電所で計40ユニットが停止又は被災した。本研究では、発電所立地地点での外力の強さ、発電所の被害モード、停止日数を整理したデータベースを構築し、それらの関係を統計的に考察することで、大規模地震災害時における火力発電所の被害の傾向を分析した。その結果、発電ユニットの停止期間とPGA・浸水深との間には高い相関があること、津波被害のあった発電所の停止日数は他の大型プラントの停止日数を包絡するような関係にあること等が示された。

Key Words : *thermal power plant, complex hazards, the 2011 Tohoku Earthquake, recovery duration, power shortage risk*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、地震動、津波、また液状化や地盤沈下等の複合的な要因により、太平洋岸を中心として19の火力発電所で計40ユニットが停止した。火力発電所の同時被災は、福島第一原子力発電所の事故による影響と併せて震災後の電力危機を引き起こす一因となり、電気事業者は「被災した発電所の早期復旧」に加えて、「長期計画停止中発電所の運転再開」や「緊急電源の設置」により供給力の確保に取り組んだ[1][2]。このような教訓を踏まえ、今後発生し得る大規模地震災害に対して適切な事前・事後対策を進めていくためには、個々の火力発電所で発生し得る被害や被害が発生した場合の停止期間を想定する必要がある。特に震災以降供給力に占める火力発電の割合は増加しており、火力発電所の地震・津波対策は重要な課題となっている。

東日本大震災以前の国内の主要な地震による火力発電所の被害に関しては、『高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト（2003～2007年）[3]』の中でレビューがなされており、地震動・液状化・津波等の被害要因と被害を受け得る設備形態との関係や、設備被害と発電機能との関係等、火力発電所において想定される地震被害の

抽出と影響度の定性的な分類が行われている。ただし津波被害に関しては被害事例が少ないため詳細な検討は行われていない。また、東日本大震災による火力発電所の被害については、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会[4]や火力原子力発電技術協会 震災復旧調査委員会による調査[5]の他、土木構造物の観点からは土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会[6]で、機械設備の観点からは日本機械学会 東日本大震災調査・提言分科会 WG5[7]において情報の収集と分析が行われている。これらの取り組みでは、被害要因ごとに機器・設備の被害・復旧状況が詳細に整理されているが、いずれも特に甚大な被害を受けた発電所を中心としており、地震動の小さかった発電所の実態に関しては網羅されていない。また被害想定に有用な外力の大きさと被害発生の有無や停止期間との関係についてはほとんど分析がなされていない。

そこで本研究では、関東・東北地方に立地する火力発電所を対象に、東日本大震災時の外力の大きさと設備被害や停止期間との関係を統計的に分析し、大規模地震災害時における火力発電所の被害や停止期間の傾向を明らかにする。本論文の構成は以下の通りである。まず2では対象とする発電所や使用した地震動・津波観測記録、また発電所の被害モードの定義等、本研究で用いるデー

データベースについて述べる。3.では2で構築したデータベースを基に、外力の大きさと(1) 発電機能への影響、(2) 設備被害の発生状況、そして(3) 停止期間との関係を分析する。4.では本研究で得られた知見と今後の課題を整理する。

2. 火力発電所被害データベースの構築

(1) 対象とする発電所

本研究では、一般電気事業者及び卸電力事業者が所有する火力発電所（共同火力も含む）のうち、関東・東北地方に立地する29発電所125ユニット（発電能力5,758万kW）を対象とする。なお、2011年3月11日時点で営業運転開始前の施設及び自家用電機工作物扱いの施設は上記に含んでいない。発電所の地理的分布を図-1に、各発電所の発電能力と使用燃料を表-1に示す。発電能力と使用燃料については電気事業便覧[8]を参照した。図より、発電所の立地エリアは太平洋側、日本海側、東京湾の3つに分けられ、それぞれ10発電所(27ユニット、1,752万kW)、5発電所(16ユニット、811万kW)、14発電所(82ユニット、3,196万kW)が立地している。

(2) 地震動強さ・浸水深・液状化の発生状況

発電所の被害と外力の大きさとの関係を分析するために、発電所立地地点での地震動強さ、浸水深、液状化の程度を整理し、表-1に示す。地震動強さを表す指標としてはPGVやSI値、計測震度等々あるが、本研究では後述する各種文献において、各発電所の観測値をほぼ入手することができたPGAを用いた。PGAは対象に働く力の大きさを表す指標としては有用であるが、設備の被害には地震動の周期特性や継続時間等も影響する。そのため、これらを反映した他の指標による検討も必要であり、今後の課題とする。主として参考とした文献は、土木学会エネルギー委員会の調査報告書[6]であり、文献[6]に記載のない場合、事業者による報告[9][10]または最寄りのK-NET観測点の値[11]を用いた。なお、地震計の設置場所が発電所ごとに異なるため、表-1に示すPGAには地表面での値や架台上での値が混在している。同様に浸水深に関しても文献[6]の報告値を用いた。津波の挙動には背面の地形や建物の配置等が影響し、同一敷地内でも地点によって浸水深が大きく異なったことが報告されているが[12]、本研究では各発電所における津波の大きさを表す代表値として、敷地内観測値の最大値を用いた。液状化の発生状況に関しては、その程度に応じて「発生なし」、「一部で発生」、「各所で発生」の3段階を設定し、経済産業省 総合資源エネルギー調査会[4]、火力原子力発電技術協会[5]及び事業者の報告[13][14]に基づいて定義した。一部の発電所については、津波による浸

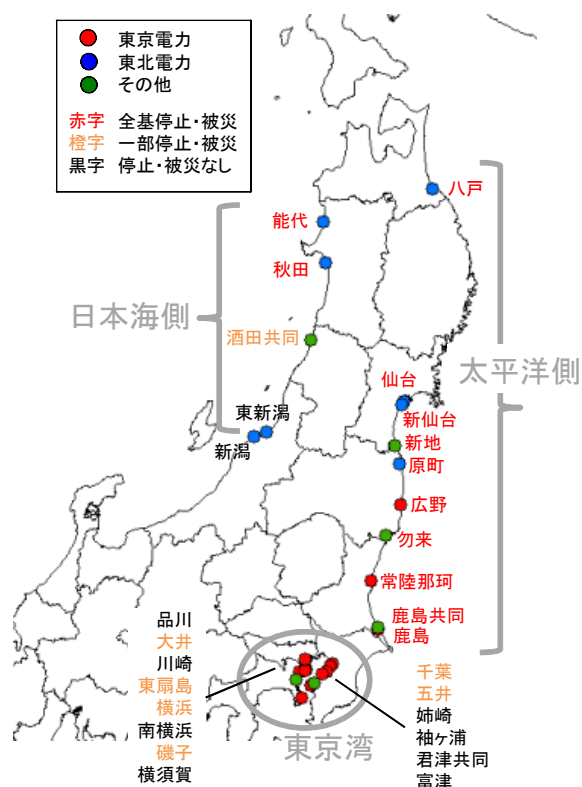


図-1 対象とする発電所の分布(N=29)

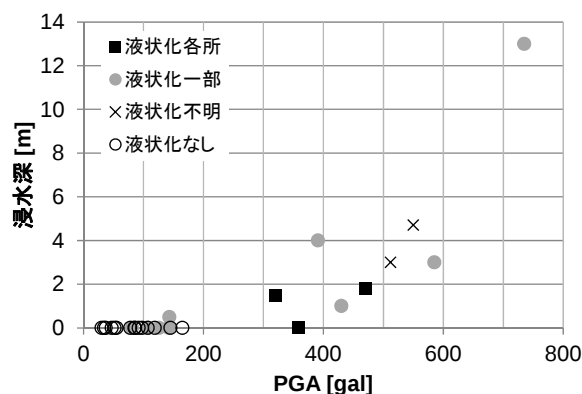


図-2 発電所におけるPGA・浸水深・液状化発生状況(N=29)

水のため詳細の把握が困難であり、その場合「不明」と記している。

図-2にはPGAと浸水深、そして液状化発生程度との関係を示す。火力発電所で観測されたPGAは30～735galであるが、150～300gal及び600～700galの区間に関しては該当する発電所がなかった。太平洋側の発電所では八戸発電所を除いて300galを越える値が観測され、日本海側及び東京湾の発電所に関しては、それぞれ30～55gal、37～165galだった。また津波による浸水があった発電所は、鹿島共同火力発電所を除く太平洋側の9発電所で、浸水深は0.5～13mだった。ただし5～12mの区間に関しては該当する発電所がなかった。液状化は太平洋側、東京湾の計12発電所で発生しており、部分的な液状化は80gal程度でも発生している。

表-1 各発電所のPGA、浸水深、液状化の有無及びユニット停止・被災状況

事業者	発電所	発電能力 [万 kW]	燃料	PGA [gal] 注1)	浸水深 [GL+m]	液状化 の発生 状況	ユニット数 (停止・被災／総数)	停止日数 (1基目)	停止日数 (全基)
東京電力	千葉	288	LNG	126 * ^[6]	—	一部	1/8	当日中再開	—
	五井	188.6	LNG	107 * ^[9]	—	—	1/6	1	—
	姉崎	360	LNG・石油	86 * ^[9]	—	—	0/6	—	—
	袖ヶ浦	360	LNG	119 * ^[9]	—	—	0/4	—	—
	富津	535.1	LNG	98 * ^[9]	—	—	0/21	—	—
	横須賀	227.4	石油	37 * ^[9]	—	—	0/8	—	—
	川崎	150	LNG	108 * ^[6]	—	一部	0/3	—	—
	横浜	332.5	LNG・石油	85 * ^[9]	—	—	1/10	当日中再開	—
	南横浜	115	LNG	81 * ^[6]	—	一部	0/3	—	—
	東扇島	200	LNG	142 * ^[6]	—	一部	1/2	13	—
	鹿島	440	石油	430 * ^[6]	1	一部	6/6	21	66
	大井	105	石油	145 * ^[9]	—	—	2/3	2	6
	広野	380	石油・石炭	391 ** ^[6]	4	一部	5/5	96	127
	品川	114	都市ガス	78 * ^[9]	—	—	0/3	—	—
	常陸那珂	100	石炭	321 * ^[6]	1.5	各所	1/1	65	—
東北電力	八戸	25	石油	143 * ^[6]	0.5	一部	1/1 注2)	9	—
	能代	120	石炭	47 [10]	—	—	2/2 注2)	2	3
	秋田	130	石油	52 [10]	—	—	3/3 注2)	1	1
	仙台	44.6	LNG	550 * ^[6]	4.7	不明	1/1	334	—
	新仙台	95	石油	512 * ^[6]	3	不明	2/2	291	(廃止)
	原町	200	石炭	735 [6]	13	一部	2/2	749	777
	東新潟	465.6	LNG・石油	30 [10]	—	—	0/8	—	—
	新潟	25	LNG・石油	34 [10]	—	—	0/1	—	—
電源開発	磯子	120	石炭	165 [11]	—	—	1/2	1	—
酒田共同	酒田共同	70	石炭	55 [11]	—	—	1/2	1	—
相馬共同	新地	200	石炭	585 ** ^[6]	3	一部	2/2	283	291
常磐共同	勿来	162.5	石油・石炭	471 ** ^[6]	1.8	各所	4/4	111	407
鹿島共同	鹿島共同	105	石油	359 ** ^[6]	—	各所	3/3	36	131
君津共同	君津共同	100	石油	92 [11]	—	—	0/3 注3)	—	—

注1) *は地表面, **は架台上に地震計が設置されていたことを表す。記載のないものは設置場所不明。

注2) 送電線起因による停止[14]。

注3) 安全点検のため君津製鉄所が休風したことにより、5号機（ガスタービン）は11日夕方から14日早朝まで停止[15]。

※グレーの網掛けはユニットが停止・被災した発電所を表す。

表-2 震災前後のユニット稼働状態

震災前後	稼働継続	停止継続	停止・被災	計
震災前	稼働中	停止中	長期計画停止中	計
	12発電所 60ユニット	—	19発電所 29ユニット	28発電所 89ユニット
	—	12発電所 16ユニット	7発電所 10ユニット	19発電所 26ユニット
	—	2発電所 9ユニット	1発電所 1ユニット	3発電所 10ユニット
	12発電所 60ユニット	13発電所 25ユニット	19発電所 40ユニット	29発電所 125ユニット

(3) 発電所の停止の有無・停止日数

地震・津波による発電機能への影響を分析するために、震災前後のユニットの稼働状態と、停止・被災したユニットに関しては停止日数を整理した。ユニットの稼働状態に関しては、火力原子力発電技術協会の報告書[5]を参考とし、自動停止したユニットも停止・被災ユニットに含めている。また「停止日数」は、2011年3月11日から営業運転を開始するまでの期間と定義し、運転再開日

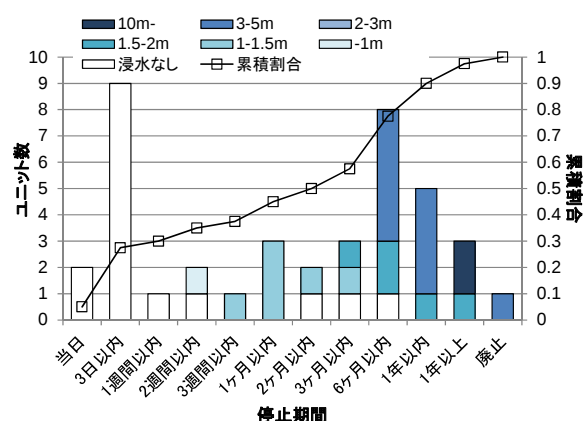


図-3 発電ユニット停止期間の分布(N=40)

は各社プレスリリースによった。

震災前後での稼働状態別にユニット数を整理した結果を表-2に示す。対象ユニット（29発電所125基）のうち震災時に運転していたユニットは28発電所89基、停止していた発電所（長期計画停止も含む）は20発電所36基で

ある。このうち震災により停止・被災したユニットは19発電所40基であり、その内訳は、運転中のユニットの停止が19発電所29基、停止中のユニットの被災が7発電所11基であった。各発電所のユニット停止・被災状況については図-1に、停止・被災ユニット数の詳細については表-1に示す。太平洋側ではすべての発電所で停止中を含む全ユニットが、日本海側では能代発電所等、3発電所で運転中の計6ユニットが、東京湾では東扇島発電所等、6発電所で運転中の計7ユニットが停止・被災した。

図-3には東日本大震災により停止・被災したユニット40基の停止日数の分布を表す。全体としては、約3割が1週間以内に、半数が2ヶ月以内に復旧し、運転再開までに半年以上要した発電ユニットは全体の2割であった。浸水のなかった発電所はほとんどが2週間以内に復旧したが、一部には復旧までに1ヶ月以上要した発電所もある。浸水のあった発電所に関しては、運転再開までに1週間から被害が大きなものでは2年以上要しており、浸水深が大きくなるほど停止期間が長期化している。各発電所のユニット停止日数の詳細は表-1に示す。その際、複数のユニットが停止・被災した発電所に関しては、「1基目が運転を再開するまでの期間」及び「全ユニットが再開するまでの期間」を併記した。なお廃止された新仙台発電所2号機は、震災前より2011年度末で廃止予定だったものである。

(4) 被害モード

火力発電所は、複数の機器やサブシステムから成る大規模なシステムであり、特定のハザードに対して被害を受けやすい設備や、被害を受けた場合に復旧スケジュールに大きく影響を与える設備等が存在する。このような

火力発電所の被害の特徴を把握するため、本研究では表-3に示す3つの観点から発電所の被害状況を整理した。

- サブシステム：「燃料貯蔵・輸送設備」や「ボイラ設備」、「タービン・発電設備」等、発電に関わる7つの設備に加え、所内作業の指示出しや資材の管理等、復旧活動の拠点となる「事務所・倉庫」、また敷地内の移動や資機材の搬出入等、復旧作業全般に関わる「構内環境」の計9のサブシステムに分類した。
- 被害要因：「①地震動」、「②津波（船舶・漂流物の衝突による被害も含む）」、「③地盤変状（液状化、地盤沈下等）」の3つを定義し、設備被害のうち原因が特定できるものに関しては、いずれかに分類した。
- 被害ランク：サブシステムの被害ランクは、構成する機器・構造物の物理的な被害の程度に基づき定義する。具体的には「A）全壊・大規模修繕が必要なレベル」、「B）一部損壊・部分補修が必要なレベル」、「C）軽微な不具合」の3段階に分類した。

東日本大震災における火力発電所設備の詳細な被害状況は、前述の経済産業省 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 電力安全小委員会[4]や火力原子力発電技術協会 震災復旧調査委員会[5]、土木学会 エネルギー委員会[6]の他、東京電力[9]や東北電力[14]によっても報告されている。本研究では、これら5つの文献の記述内容に基づき各発電所の被害モードを整理した。その結果を表-4に示す。なお同様の分析は日本機械学会 東日本大震災調査・提言分科会[16]によっても試みられており、本研究でも参考とした。

表-3 被害モード分析のフレーム

サブシステム（構成する主な機器・構造物）
1. 港湾・荷役設備（防波・防潮堤、栈橋、揚炭機）
2. 燃料貯蔵・輸送設備（タンク、サイロ、コンベア）
3. 給排水設備（取排水口、タンク、排水処理設備）
4. 受電設備（開閉所、変圧器、非常用発電機）
5. ボイラ設備（ボイラ、バーナ、配管類）
6. タービン・発電設備
7. 排煙処理設備（集塵機、脱硝脱硫設備、煙突）
8. 事務建屋・倉庫
9. 構内環境（護岸、構内道路）
被害要因
① 地震動
② 津波
③ 地盤変状
被害ランク
A) 全壊・大規模修繕が必要なレベル
B) 一部損壊・冠水・部分補修が必要なレベル
C) 軽微な不具合

3. 火力発電所の被害と外力の大きさ

(1) 発電ユニットの停止・被災の有無と外力の大きさ

本節では、発電機能と外力の大きさとの関係を分析する。なお、敷地内に浸水があった発電所ではいずれのユニットも停止・被災しているため、ここでは浸水の発生しなかった発電所のユニットを対象に、PGAとの関係を考察する。

まず図-4(a)には、震災時に運転中だった89ユニット（浸水なし：75基、浸水あり：14基）を対象に、停止の有無とPGAとの関係を示す。浸水の発生した発電所（▲）ではいずれもPGAが140gal以上であった。浸水のなかった発電所（●）において停止したユニットは、10発電所の15基である。ユニットの停止は50gal前後から発生しているが、140galまでは停止していないユニットも存在する。ただしこれらの中には系統のトラブルによる

表-4 発電所の被害モード

事業者	発電所	サブシステム									その他特記事項
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
東京電力	千葉									③-C	
	五井					①-C					
	姉崎		①-C								
	袖ヶ浦					①-C					
	富津										
	横須賀										
	川崎									③-C	
	横浜					①-C					
	南横浜									③-C	
	東扇島					①-B				③-C	
	鹿島		①-B ③-B	①-B ②-B ③-B		①-B		③-C		③-C	*軽油調達困難（関西電力から融通）、断水（北海道電力から給水車融通）、火力線停止により停電
	大井		①-C			①-B					
	広野	注1) ①-B ②-A	①-B ②-B	①-B ②-A	①-B ②-B	①-B ②-B	②-B	②-A	②-B	②-B	*工業用水供給停止 *6号基建設中のため建設会社常駐
	品川			①-C							
	常陸那珂	注1) ②-A	③-A	①-B		①-B		③-A		③-B	*工業用水供給停止、火力線停止により停電（非常用発電機起動）
東北電力	八戸	③-B			②-B	②-B	②-B		②-B	②-B	*製油所・油槽所被害により起動用軽油を能代火力から緊急輸送
	能代										
	秋田										
	仙台	②-A	②-B	②-B	②-B	①-C ②-B	①-B ②-B	①-C ②-C	②-B	②-B	*石油資源開発所有の新潟・仙台ガスパイプライン付帯設備の被災 *火力線停止により停電
	新仙台	②-B	②-B	①-C ②-A	①-C ②-B	①-B ②-B	②-B	②-B	②-B	②-B	*重油供給元（JX 仙台）の被災 *隣接製油所の火災による避難（2011/3/12～28）
	原町	注1) ②-A	②-A	②-A ③-B	②-A	①-B ②-A	②-A	②-A	②-A	②-A	*福島第一原発事故による屋内退避区域（2011/3/15～4/21） *重油タンク倒壊により構内に重油漏洩（2011/8/22 回収の目途） *工業用水供給停止
	東新潟		①-C								
電源開発	磯子										
	新潟										
酒田共同	酒田共同										*県企業局の工業用水配管損傷
相馬共同	新地	注1) ②-A	②-A	②-B	②-B	①-B ②-B	①-C ②-B		②-A	②-B ③-B	*座礁船（石炭船）より油流出
常磐共同	勿来	②-B	②-A ③-B	①-B ②-A ③-B	②-A ③-B	①-B		①-B		②-B ③-B	*揚炭設備（小名浜港）の被災
鹿島共同	鹿島共同		①-C ③-B	③-A	①-B ③-B	①-B	①-B			③-B	*他社との共用取水路閉塞 *断水、停電（非常用発電機起動） *5号基建設中のため建設会社常駐
君津共同	君津共同										

記載例：（被害要因）－（被害ランク）

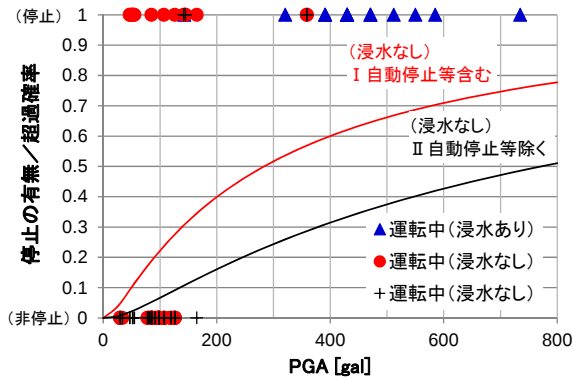
凡例：（被害要因）①地震動、②津波、③地盤変状、（被害ランク）A 全壊■、B 一部損壊■、C 軽微な不具合■

注1) 地震当時、タンカー荷役・揚炭作業中

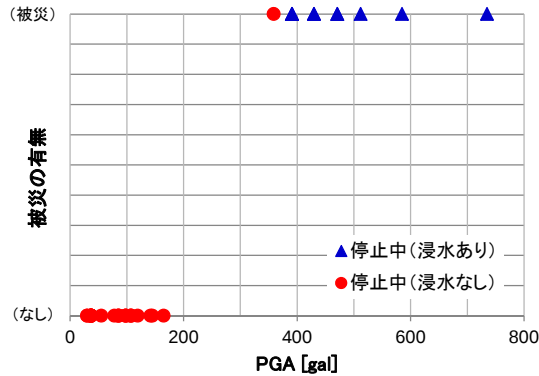
自動停止や被害回避のための予防措置としての停止等、発電所の設備被害以外の要因による停止も含まれている。そこで2で用いた各種文献に「送電線起因の停止」と明記されているユニットと停止期間が1日以内のユニット以外を「設備被害による停止」として整理し直した（+）。上記の条件の下では、停止したユニットは3発

電所の5基であり、140gal以上で発生していることがわかる。

同様に、震災時に停止中だった36ユニット（浸水なし：26基、浸水あり：10基）を対象として、ユニットの被災の有無とPGAとの関係を整理し図-4(b)に示す。敷地内が浸水した発電所（▲）におけるPGAはいずれも



(a) 運転中ユニット(N=89)



(b) 停止中ユニット(N=36)

図-4 発電ユニットの停止・被災とPGAとの関係

390gal以上であった。浸水のなかった発電所（●）に関しては、160gal以下では設備被害が発生しておらず、359galで1基被災している。

参考までに、敷地内の浸水が無く、震災時に運転中だったユニット（75基）を対象に fragility 曲線の推定を行った。モデルには、各被害モードの標準偏差を一定とする多項反応モデルを想定し、それぞれの被害モードの確率分布パラメータは、最尤法（二項尤度モデル）により推定した[17]。なお耐力の分布には、対数正規分布を仮定している。本研究では、「停止なし」をモード0、「自動停止等による運転停止」をモードⅠ、「設備被害による停止」をモードⅡとしており、PGAが x の時に被害モード k となる確率 $P_k(x)$ は以下ようになる。

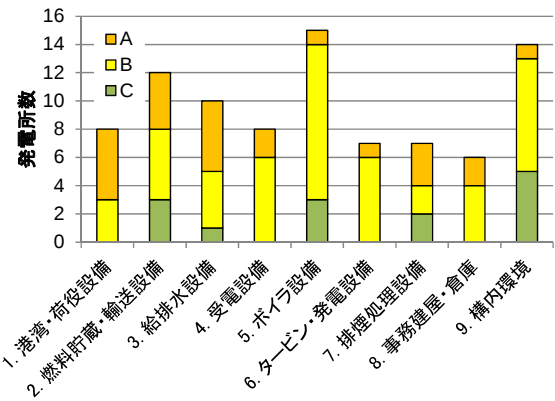
$$P_0(x) = 1 - F_I(x) \quad (1)$$

$$P_I(x) = F_I(x) - F_{II}(x) \quad (2)$$

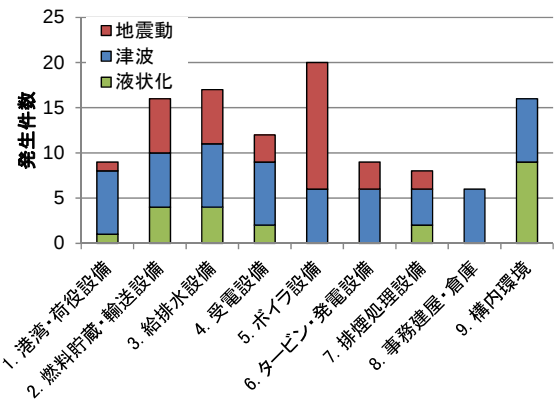
$$P_{II}(x) = F_{II}(x) \quad (3)$$

$$\text{ここで、} F_k(x) = \int_0^x f_k(x) dx \quad (4)$$

$$f_k(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_k)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$



(a) 被害発生発電所数及び被害ランクの集計結果



(b) 被害要因の集計結果

図-5 サブシステム別被害発生状況

推計した fragility 曲線を図-4(a)に示す。パラメータはそれぞれ、 μ_I が5.65, μ_{II} が6.65, σ が1.36であった。

(2) 火力発電所を構成する各設備の被災状況

2. (4)では、発電所を9つのサブシステムに分類し、それぞれの被害要因と被害ランクとを調査した。本節ではその結果（表-4）を用いてサブシステムの被害の特徴と外力との関係を分析する。

図-5(a)には、サブシステム別に被害が生じた発電所数と被害ランクの内訳を示す。1つのサブシステムに対して被害要因ごとに異なる被害ランクが定義されている発電所に関しては、最も大きい被害ランクを採用した。また図-5(b)には、要因別に被害発生件数を集計した結果を示す。複数の要因によりサブシステムが被災した発電所もあるため、サブシステムごとの件数は図-5(a)の結果とは異なる。図より、被害の発生した発電所数が最も多かった設備は「ボイラ設備」であり、29発電所中15発電所で発生している。被害要因としては地震動によるものが多く、具体的な被害実態としては、防振器や配管類の変形等である。津波による被害も一部発生しているが、そのほとんどは補機類の冠水であった。次に被害発生発電所数の多かった設備は、「構内環境」である。被害要因

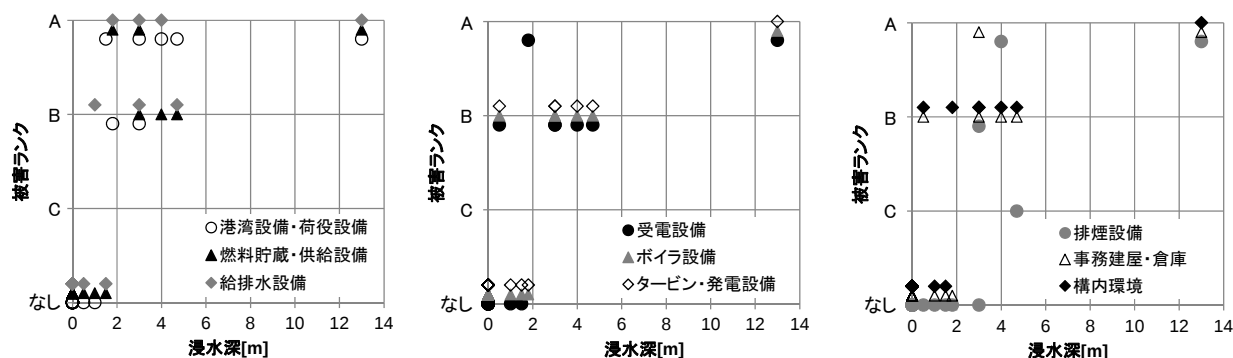


図-6 サブシステムの被害と浸水深との関係

は津波と液状化がほぼ同数であり、道路の隆起・陥没やフェンスの倒壊等が発生した。これらの設備は、被害発生件数自体は多かったが、被害ランクに関しては、一部損壊（B）や軽微な被害（C）が多かった。これに対し、甚大な被害に至った例が多かったのは、「港湾・荷役設備」、「燃料貯蔵・輸送設備」、「給排水設備」である。これらの設備は敷地内でも特に海側に設置されている場合が多く、被害要因で見ると津波による被害が多い。図-6には、津波による各設備の被害ランクと浸水深との関係を表す。前述の3設備に関しては、他の設備に比べ、全壊レベルの被害（A）発生数が多く、浸水深が2m程度から被害が発生している。具体的な被害の例としては、「港湾・荷役設備」については、防波堤・防潮堤の被害や揚炭機、ローディングアームの損壊、「燃料貯蔵・輸送設備」については、燃料タンクの倒壊、コンベアの損傷、「給排水設備」については、取放水管の沈下・流出、排水処理設備の倒壊が挙げられる。また「燃料貯蔵・輸送設備」及び「給排水設備」に関しては、液状化による被害も比較的多く発生しており、コンベヤ基礎の不陸・蛇行やタンクの傾斜が見られた。

以上、発電所の被害をサブシステムごとに分析した結果を示したが、今回の震災では他事業者や敷地外の設備の被災による発電や復旧への影響も見られた。各発電所におけるこれらの影響は、文献調査の結果判明した範囲で前掲の表-4「その他の特記事項」に記している。主なものとしては、燃料供給元の被災、工業用水の供給停止、外部電源の停止であり、発電機能の評価を行う際には、これら外部システムの信頼性も考慮する必要がある。

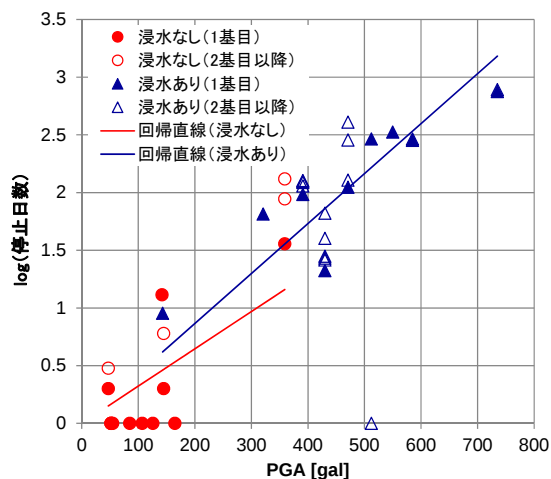
(3) 発電ユニットの停止期間と外力の強さ

本節では、停止・被災した発電ユニットの停止期間と外力の強さとの関係进行分析する。図-7(a)には、停止・被災した40ユニットについて、停止期間とPGAとの関係を、図-7(b)には、そのうち浸水した24ユニットを対象に停止日数と浸水深との関係を示す。複数のユニットが停止した発電所に関しては、1基目が運転を再開するまでの日

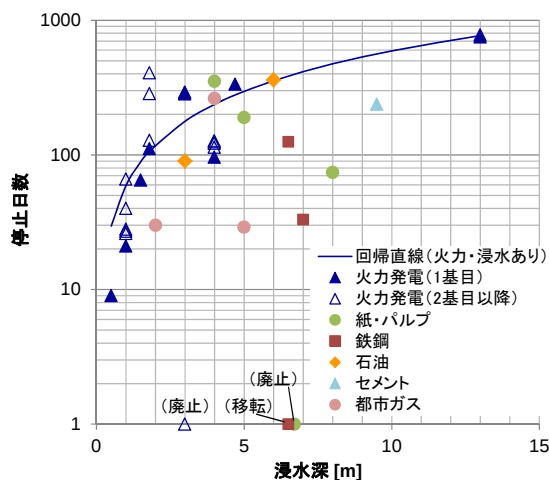
数を塗りつぶし印で、2基目以降のユニットが運転を再開するまでの日数を白抜き印で示した。今回の震災の場合、ひっ迫する需給状況に対応するために、被害の比較的軽微な発電ユニットから優先的に復旧資源が分配されたため、同一発電所でもユニットの停止日数には1週間から半年程度の開きがあることがわかる。なお当日中に運転を再開したユニットの停止日数は、一律で1日とした。

これらのデータに対し、停止日数を目的変数、PGA及び浸水深を説明変数として回帰分析を行った。なお本研究では、純粋に外力の大きさと停止日数との関係を調べるために、分析には各発電所の1基目が運転を再開するまでの日数（塗りつぶし印のデータ）のみを対象としている（浸水なし：10基、浸水あり：9基）。またPGA及び浸水深が0の時に停止日数も0となるように、回帰直線の切片は0とした。図-7及び表-5に回帰分析の結果を示す。回帰分析は、津波浸水のなかった発電所と浸水のあった発電所とに分けて行い、前者に関してはPGAを説明変数とした単回帰分析を、後者に関してはPGA、浸水深のそれぞれを説明変数とした単回帰分析と、PGA、浸水深の双方を説明変数とした重回帰分析の計3ケースを行った。浸水なしのユニットに関しては、PGAとの相関係数が0.78と比較的高いが、停止日数のバラツキが大きい。これは、今回のデータが自動停止や設備被害による停止の双方が発生し得る、比較的PGAの小さい範囲を対象としているためだと考えられる。浸水ありのユニットに関しては、PGA、浸水深ともに高い相関があったが、両者で重回帰をした結果、予測の精度はほとんど向上しなかった。標準偏回帰係数は、PGAについては0.32、浸水深は0.69であった。このように、停止日数と外力の大きさの間には高い相関があると言えるが、2(2)で述べたように、PGAが150～300gal及び600～700galの区間、浸水深が5～12mの区間に関しては、データがないため注意が必要である。

また図-7(b)には、火力発電所の復旧の特徴を調べるために、製鉄所や製紙工場等、沿岸部に立地する大型プラ



(a) 停止期間とPGA(N=40)



(b) 停止期間と浸水深(N=24)

図-7 発電ユニットの停止期間と外力の大きさとの関係

表-5 回帰分析の結果

	浸水なし (N=10)	浸水あり (N=9)
PGA (x_1)	$\log(y) = 0.0032x_1$ $R=0.78$ ($p<0.01$) $R^2=0.65$ (補正 $R^2=0.61$) $t=4.10$ ($p=0.0027$)	$\log(y) = 0.0043x_1$ $R=0.90$ ($p<0.01$) $R^2=0.98$ (補正 $R^2=0.98$) $t=19.40$ ($p=5.18 \times 10^{-8}$)
浸水深 (x_2)	—	$y = 59.25x_2$ $R=0.94$ ($p<0.01$) $R^2=0.94$ (補正 $R^2=0.94$) $t=11.43$ ($p=3.09 \times 10^{-6}$)
重回帰	—	$y = 0.09x_1 + 51.91x_2$ $R^2=0.95$ (補正 $R^2=0.93$) $t_1=0.88$ ($p=0.41$) $t_2=5.24$ ($p=0.001$) $F=63.84$ ($p=3.2 \times 10^{-5}$)

ントのデータも併せて示す。これらの施設に関しては、一部の製品の生産を再開するまでの日数を停止期間とし、運転再開日及び浸水深は各社のプレスリリースによった。図より、火力発電所の停止日数は他のプラントを包絡するような関係にあることがわかるが、この理由としては、火力発電のシステム構成の複雑さや運転開始条件等が影

響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、2011年東日本大震災による火力発電所の被害データベースを構築し、それに基づき火力発電所の被害及び停止期間と外力との関係を分析した。得られた知見と今後の課題は以下の通りである。

- 今回の地震では、津波浸水のなかった発電所に関しては、50gal程度から運転を停止するユニットが発生し、運転再開に不具合をきたすような被害は140gal程度から生じたと考えられる。また停止中のユニットでは360gal程度から被害が発生している。発電所敷地内に浸水のあったユニットはいずれも設備被害が生じている。ただし、今回火力発電所で観測されたPGAは30～735gal、浸水深は0.5～13mであり、150～300galと600～700galの区間及び5～12mの区間に関しては該当する発電所がなかったことに留意する必要がある。今後の課題としては、各発電所の停止要因（自動停止、設備被害による停止等）を明らかにすること、PGVやSI値、計測震度等、他の指標でも分析を行うことが挙げられる。
- 発電所設備の被害の特徴として、地震動による被害が多かったのは「ボイラ設備」、液状化による被害が多かったのは、「構内環境」、「燃料貯蔵・輸送設備」、「給排水設備」であった。津波による被害が多かったのは「港湾・荷役設備」、「燃料貯蔵・輸送設備」、「給排水設備」であり、浸水深が2m程度から甚大な被害が発生している。
- 発電ユニットの停止日数とPGA、浸水深の間には高い相関があり、特に、浸水した発電所の停止日数と浸水深の間には線形の関係が見られた。今後の課題としては、地震動、液状化、浸水深の複合的な影響を評価すること、サブシステムの被害との関係を考察することが挙げられる。
- 浸水被害のあった火力発電所と他の大型プラントの停止日数とを比較した結果、火力発電所の停止日数が他の施設の停止日数を包絡するような関係にあることがわかった。その理由としては、発電システムの複雑さや運転再開条件の違い等が考えられる。

参考文献

- 東京電力：電気の供給力確保に向けた取り組み，<http://www.tepco.co.jp/torikumi/thermal/index-j.html>
- 東北電力：供給力確保に向けた取り組み，<http://setsu>

- den.tohoku-epco.co.jp/setsuden/kakuho/karyoku01/
- 3) 文部科学省経済活性化のための研究開発プロジェクト「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト」, <http://www.bosai.go.jp/kenkyu/sokuji/>
 - 4) 経済産業省総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会：電気設備地震対策ワーキンググループ報告書, 2012年3月
 - 5) 一般社団法人火力原子力発電技術協会 震災復旧調査委員会：東北地方太平洋沖地震火力発電所の被害と復旧調査報告書, 2012年9月
 - 6) 土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会：東日本大震災におけるエネルギー施設(火力・水力・送変配電・ガス)の被害状況と今後の展開について 報告書(中間報告), 2013年2月
 - 7) 小泉安郎：＜臨時特集＞東日本大震災調査・提言活動中間報告 WG5: エネルギーインフラの諸問題, 日本機械学会誌, Vol.115, No.1123, pp.356-358, 2012年6月
 - 8) 電気事業連合会統計委員会：電気事業便覧 平成24年版, 2012年
 - 9) 東京電力株式会社：東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録, 2013年3月
 - 10) 青山光正, 山野辺宏, 持館靖典, 小林克夫：東日本大震災による当社火力発電所の被災状況と今後に向けた対策, 火力原子力発電, Vol.63, No.11, pp.19-24, 2012
 - 11) 防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
 - 12) 火力原子力発電技術協会震災復興チーム：[特集]『震災後の電力エネルギー技術の選択と展望』3. 東日本大震災による火力発電設備の被害と復旧からの教訓, 火力原子力発電, Vol.63, No.10, pp.25-28, 2012
 - 13) 石川哲哉, 高井力, 佐藤一也：東京電力の火力発電所が東日本大震災による津波・液状化で受けた影響と土木設備の状況, 電力土木, No.362, pp.25-29, 2011
 - 14) 東北電力株式会社：東日本大震災復旧記録, 2012年9月
 - 15) 火力原子力発電技術協会関東支部：[パネルディスカッション]東日本大震災と今後のエネルギー動向 (平成23年12月6日), 火力原子力発電, Vol. 63, No.4, pp.8-26, 2012
 - 16) 浅野等：火力発電所とエネルギープラントにおける震災被害とその影響, 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門主催 市民フォーラム「東日本大震災を契機として我が国のエネルギーインフラの諸問題を考える」, 2012年9月1日, <http://www.jsme.or.jp/pes/Event/Seminar/120901/02.pdf>
 - 17) 中野一慶, 梶谷義雄, 多々納裕一：地震災害による産業部門の操業能力の低下を対象とした機能的フラジリティ曲線の推計, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp.57-68, 2013

DAMAGE AND RECOVERY ANALYSIS OF THERMAL POWER PLANTS DUE TO THE 2011 TOHOKU EARTHQUAKE AND TSUNAMI

Ayumi YUYAMA and Yoshio KAJITANI

The 2011 Tohoku Earthquake and tsunami caused damage to 19 thermal power plants (40 units) located in Kanto and Tohoku region. In this paper, we build a database of thermal power plants including information about observed seismic ground motion, tsunami height, occurrence of liquefaction, post-earthquake operational status and damage mode of facilities. Based on its statistical analysis, we found that the recovery duration of power plants has a high correlation with PGA and inundation depth. In addition, that of damaged by tsunami envelops recovery duration of other industrial plants.