

東日本大震災合同調査報告
 Report of the Great East Japan Earthquake Disaster
機械編
 Mechanical Engineering Volume

目 次
 Contents

巻 頭

序 東日本大震災合同調査報告書編修委員会委員長 和田 章	i
東日本大震災合同調査報告書編修委員会委員名簿	iii
まえがき 東日本大震災調査・提言分科会主査 白鳥正樹	v
東日本大震災調査・提言分科会委員名簿・執筆者・協力者名簿	ix

第一部 提言

大震災に学ぶ機械工学のあり方に関する提言	1
提言Ⅰ 大規模システムのシステム・インテグレーション	1
提言Ⅱ デザインベースの考え方，“Beyond”への対応	3
提言Ⅲ リスクコミュニケーションの課題	5
提言Ⅳ 継続的調査と規格・基準への展開	7

第二部 報告

第1章 はじめに

1.1 「日本機械学会東日本大震災調査・提言分科会」の立ち上げと活動の経緯	9
1.2 各WGの活動の報告と提言の作成	11
1.3 大規模システムのシステム・インテグレーション	12
1.4 デザインベースの考え方，“Beyond”への対応	14
1.5 リスクコミュニケーションの課題	17
1.6 継続的調査と規格・基準への展開	21
1.7 報告書をまとめるにあたって，謝辞	23
〔付録〕活動の記録	24

第2章 地震と津波の特徴

2.1 はじめに	28
2.2 東北地方太平洋沖地震の概要	28
2.2.1 何が起こったか	28
2.2.2 東北地方太平洋沖地震発生前に到達していた科学的知見	29
2.3 大災害をもたらした津波	33
2.3.1 東北地方太平洋沖地震による津波	33
2.3.2 明らかになった課題とその解決へ向けての動き	36
2.4 強震動の特徴	40
2.4.1 震源近傍域で観測された強震動	40
2.4.2 強震動データを用いた短周期震源モデル	41

2.4.3	周期依存の震源モデル	42
2.4.4	海溝型巨大地震の強震動予測	43
2.5	将来の大規模地震に対する備え	45
2.5.1	東北地方太平洋沖地震以前の取り組み	45
2.5.2	東北大震災以後の、大規模地震・津波に対する備えの取り組み	46

第3章 機械設備の被害状況と耐震対策技術の有効性

3.1	はじめに	49
3.2	アンケート調査結果	51
3.3	機械設備・機器等の被害状況	56
3.3.1	基礎・支持部・地盤変形	56
3.3.2	配管およびタンク	60
3.3.3	クレーン	64
3.3.4	昇降機	71
3.3.5	輸送・鉄道関連設備	86
3.3.6	発電・送電・変電設備	87
3.3.7	免震・制振・防振装置	91
3.3.8	半導体製造工場	99
3.3.9	その他の機械設備	108
3.3.10	津波による被害	111
3.4	事前対策の奏功事例	112
3.5	各原子力発電所の状況	113
3.5.1	女川原子力発電所および東海第二原子力発電所の被害と対策	113
3.5.2	浜岡原子力発電所の対策	118
3.6	機械設備の耐震対策に対する提言	120
3.7	まとめ	122
	〔付録〕活動の記録	124

第4章 力学体系に基づく津波被害メカニズムの理解

4.1	はじめに	126
4.1.1	力学体系に基づく分析科学的視点に期待される役割	126
4.1.2	力学体系に基づく設計科学的視点に果たすシミュレーションの役割	126
4.2	津波メカニズムの分析と俯瞰的理解	128
4.3	津波による構造物の破壊と機械設備の機能喪失	129
4.3.1	津波による被害の特徴と類型	129
4.3.2	定量的議論のための分析手法（シミュレーション）	130
4.4	力学体系に基づく分析と津波被害の予測および減災手法	131
4.4.1	海洋津波伝播解析と3次元流体解析との連結	131
4.4.1.1	本項のねらい	131
4.4.1.2	東日本大震災の海洋津波伝播解析	131
4.4.1.3	3次元流体解析による相馬港の津波と波圧評価	132
4.4.1.4	まとめと今後の課題	133
4.4.2	近海津波の伝播と到達時刻評価	133
4.4.2.1	本項のねらい	133
4.4.2.2	基礎方程式における水平粘性項の考慮	134
4.4.2.3	対象解析領域と開境界条件の設定	134
4.4.3	広域津波伝搬予報における課題	134
4.4.4	津波の衝撃力評価とその課題	135

4.4.5	津波による洗掘シミュレーション	136
4.4.6	津波による漂流物運搬解析	139
4.4.6.1	本項のねらい	139
4.4.6.2	粒子法大規模高速解析技術	139
4.4.6.3	流体-剛体連成解析技術	140
4.4.6.4	衝撃荷重解析技術およびその妥当性確認	141
4.4.7	津波と構造物の双方向連成解析：水侵入解析	141
4.4.7.1	本項のねらい	141
4.4.7.2	連成解析手法	142
4.4.7.3	手法の検証	142
4.4.7.4	水侵入解析	143
4.4.7.5	今後の課題	143
4.4.8	津波漂流物衝突時のS造建物の挙動	143
4.4.8.1	本項のねらい	143
4.4.8.2	解析モデルと解析条件	144
4.4.8.3	解析結果	145
4.4.8.4	まとめと今後の課題	145
4.4.9	設計工学的手法による評価	146
4.5.	力学体系に基づき津波破壊メカニズムを理解する取り組みの推進に関する提言	148
	〔付録〕活動の記録	149

第5章 被災地で活動できるロボット課題の整理

5.1	はじめに	150
5.2	津波被災地におけるロボット利用	151
5.2.1	水中探査ロボット	151
5.2.1.1	日米共同水中探査活動	151
5.2.1.2	遠隔操縦型水中探査ロボット Anchor Diver III の開発とその利用	158
5.2.1.3	水中ロボットと自律ボートによる港湾の被害状況調査 (大槌および南三陸町1次調査)	162
5.2.1.4	海中ロボットによる津波被災地養殖場の被害調査	167
5.2.1.5	海水の放射能を計測する無人調査船の開発と稼働	174
5.2.2	瓦礫撤去	176
5.2.2.1	双腕マニピュレータ	176
5.2.2.2	スマートスーツ・ライト	178
5.2.3	倒壊危険家屋内調査とロボットのニーズ調査	181
5.2.3.1	青森県八戸市の体育館での調査活動	181
5.2.3.2	岩手県久慈市と野田村での調査活動	183
5.2.3.3	青森県でのロボットのニーズ調査	185
5.2.3.3	Quince, Kenaf, Pelican による建物被害調査	186
5.2.4	自治体での受け入れ事例	188
5.2.4.1	宮城県南三陸町と南三陸町自然環境活用センター	188
5.2.4.2	南三陸町における水中ロボットの活用例	189
5.2.4.3	水中ロボット活用のための検討事項	191
5.3	被災者のケアへのロボット利用	196
5.3.1	セラピー用アザラシ型ロボット・パロによる東日本震災被災者等の心のケア	196
5.3.1.1	はじめに	196
5.3.1.2	パロのセラピー効果	197
5.3.1.3	避難所でのパロによる心のケアのための訪問活動	197

5.3.1.4	医療福祉施設, 学校, 仮設住宅等での長期的なパロによる心のケア	200
5.3.1.5	まとめ	203
5.3.2	スマートコミュニティ技術に基づく被災者のサポート	203
5.3.2.1	仮設住宅における課題	203
5.3.2.2	技術の導入に向けた活動	204
5.3.2.3	被災地において必要とされる社会サービス	204
5.3.2.4	各サービスの情報共有によるサービス効率化	205
5.3.2.5	気仙沼五右衛門が原仮設住宅支援パッケージ	206
5.4	福島第一原子力発電所事故対応としての無人化機器の利用	208
5.4.1	福島第一の災害現場の初期の特徴	208
5.4.1.1	原子炉建屋周辺および周囲の状況	208
5.4.1.2	原子炉建屋内の状況について	208
5.4.2	リモートコントロール (リモコン) 化の当初計画	209
5.4.2.1	リモコン化チームの発足と活動内容	209
5.4.2.2	リモコン技術の導入目標と方針	209
5.4.2.3	リモコン化チームと関連組織	209
5.4.2.4	ロボットの現場投入準備	209
5.4.3	事故発生当時から半年後まで活躍した無人化機器導入の経緯	210
5.4.3.1	無人化重機ヤード瓦礫撤去	210
5.4.3.2	PackBot 原子炉建屋線量測定	213
5.4.3.3	ロボット操作車と TALON および JAEA-3 号	215
5.4.3.4	コンクリートポンプ車	218
5.4.3.5	Talon, Bobcat, Brokk による建屋内瓦礫撤去	221
5.4.3.6	Quince	222
5.4.3.7	iRobot 710 Warrior	229
5.4.4	ロボットの操作, 搬入, 保守	230
5.4.4.1	ロボットの運用 (ミッションに向けた事前準備)	230
5.4.4.2	ロボットの運用 (ミッション当日)	231
5.4.4.3	ロボットの保守	231
5.4.5	廃炉に向けたロボット開発	231
5.4.5.1	政府・東京電力中長期対策会議	232
5.4.5.2	遠隔技術タスクフォース	232
5.4.5.3	NEDO 災害対応無人化システム	232
5.4.5.4	東京電力株式会社や各プラントメーカー独自による開発	232
5.4.5.5	今後の開発について	233
5.5	耐災害ロボットの実用化に向けた提言	235
5.5.1	実用化すべきロボット作業	235
5.5.2	耐災害ロボットに必要な事項	235
5.5.2.1	ロボットの機能と能力に関する事項	235
5.5.2.2	ロボットの仕様と性能に関する事項	235
5.5.2.3	ロボットの運用に関する事項	235
5.5.3	重点的に推進すべき3つの事項	236
5.5.3.1	本格実用化研究と基盤技術研究の両方を, 大学等を活用して, 全国にいくつかの拠点を設置して推進すべきである	236
5.5.3.2	現在存在する重要な災害の課題ニーズに対して, ロボット技術を積極的に活用すべきである	237
5.5.3.3	政府が防災ロボットフィールド試験センターを設置すべきである	237
【付録】	活動の記録	239

第6章 被災地周辺の交通・物流分析

6.1	はじめに	240
6.2	鉄道における被害と復旧	242
6.2.1	東北新幹線での被害	243
6.2.2	在来線およびその他の鉄道での被害	245
6.2.3	既存の地震対策の効果	250
6.3	自動車交通における被害と復旧	252
6.3.1	道路被害と復旧	252
6.3.2	くしの歯作戦	255
6.3.3	通行実績情報公開システム	256
6.4	サプライチェーンにおける被害	257
6.5	まとめと提言	259
6.5.1	まとめ	259
6.5.2	提言	259

第7章 エネルギーインフラの諸問題

7.1	はじめに	262
7.2	原子力施設の被害	263
7.2.1	調査対象・方法	263
7.2.2	福島第一原子力発電所の被害状況	263
(1)	設備概要	264
(2)	地震時の状況	265
(3)	津波到達時の状況	266
(4)	津波による電気設備の被害とその影響	266
(5)	炉心損傷と格納容器からの漏洩	270
(6)	多号機同時進行の事故	270
(7)	1～6号機の状況のまとめ	275
(8)	負傷者の状況	279
(9)	避難誘導など	279
(10)	発電所設備の被害状況	279
(11)	海外の対策事例	279
(12)	事故原因のまとめと技術的安全対策の基本方針	282
(13)	福島第一原発事故から見るその他の問題点	291
7.2.3	原子力施設個別の被害状況	292
(1)	東通原子力発電所	292
(2)	女川原子力発電所	293
(3)	福島第二原子力発電所	297
(4)	東海第二原子力発電所	299
(5)	東京大学弥生炉	300
(6)	日本原子力研究開発機構施設	301
7.2.4	調査結果の分析	302
(1)	地震および津波の規模	302
(2)	地震による被害	304
(3)	津波による被害	305
(4)	アンケート調査のまとめ	305
7.2.5	まとめ	306
7.3	火力発電所の被害	310
7.3.1	調査対象と震災前の状況	310

7.3.2	現地被害調査	310
(1)	東北電力 新仙台火力発電所	310
(2)	東北電力 原町火力発電所	315
(3)	東京電力 常陸那珂火力発電所	320
7.3.3	被害状況の分析	322
7.3.4	被災後の運転再開、供給力増の取り組み	325
7.3.5	まとめ	325
7.4	エネルギーシステムの被害	328
7.4.1	はじめに	328
7.4.2	個別施設における災害対策及び被害の状況	328
(1)	東北電力の無人設備の被害	328
(2)	東京電力の無人設備の被害	332
(3)	有人設備の被害の状況	333
7.4.3	被害状況の分析	333
(1)	無人設備の地震被害	333
(2)	無人設備の津波被害	334
(3)	有人設備の分析	335
(4)	仙台市ガス局の被災状況	336
(5)	コスモ石油千葉製油所での事故状況	337
7.4.4	被災後の復旧状況	339
(1)	東北電力の復旧の概要	339
(2)	岩手県北部の復旧調査	340
(3)	東日本ガス事業の復旧調査	340
7.4.5	まとめ	342
7.5	エネルギー政策	344
7.5.1	はじめに	344
7.5.2	アンケート調査の実施概要	344
7.5.3	アンケート調査の結果	344
7.5.4	アンケート結果のまとめ	354
7.5.5	エネルギーと社会	354
7.5.6	今後のエネルギー社会の方向性	356
7.5.7	まとめ	362
7.6	まとめ	363
	[付録] 活動の記録	365

第8章 原子力規格基準の課題と今後の方向性

8.1	はじめに	368
8.2	地震・津波の原子力発電所への影響	368
8.2.1	東北地方太平洋岸に位置する原子力発電所の影響の全体像	368
8.2.2	福島第一発電所の事故進展推移	369
8.2.3	原電東海第二の事例	369
(1)	発生直後の概況	369
(2)	「止める」機能の状況	370
(3)	「冷やす」機能の状況	370
(4)	「閉じ込める」機能の状況	370
(5)	冷温停止に向けた操作	370
(6)	使用済燃料プール冷却の状況	371
(7)	津波調査結果	371

(8) 津波対策と被害の関係	371
8.2.4 東北電力女川の事例	372
(1) 事象推移の概要	372
(2) IAEA の調査	372
8.3 3つの視点からの検討	373
8.3.1 事故は何故防げなかったか	374
8.3.2 過酷事故を踏まえ規格基準はどうあるべきか	376
(1) 規格基準の現状	376
(2) 福島事故を受けた規格基準の在り方	378
(3) 整備すべき規格基準（具体論）に関する提言	382
(4) ASME との連携	384
(5) 他学協会との連携	384
8.3.4 視点3：耐震設計は機能したのか	384
(1) 耐震設計の現状	384
(2) 今回の地震の影響	386
(3) 近年の地震と原子力発電所	386
(4) 耐震設計に関する課題認識と提言	389
8.4 原子力発電に関する提言	392
〔付録〕 活動の記録	400

第9章 地震・原発事故等に対する危機管理

9.1 はじめに	403
9.2 危機管理を論ずる視点	404
9.3 福島第一原子力発電所	405
9.3.1 事実関係の整理	405
(1) 事故によって生じた事態	405
(2) 事故の進展の時系列的な整理	406
9.3.2 事故回避のシナリオ	413
(1) 事故回避の“勝利の方程式”は存在した	413
(2) 単純な判断ミスを防げれば損失は低減できたか	413
(3) 事故の原因をどう捉えるべきか	417
(4) 「冷やす」と「閉じ込める」に対する干渉設計	418
9.3.3 原子力発電所における危機管理に関する提言	419
(1) 「絶対安全」からの決別	419
(2) 「設計基準外」と「想定外」の区別	420
(3) 残存リスクに至るシナリオの必要性	420
(4) 過去に学べ	421
(5) 危機管理における法制度の役割	422
(6) 放射性物質による汚染の再生対策	422
9.4 J R 東日本における地震及び津波に対する対応	424
9.4.1 東北新幹線・首都圏在来線・三陸沿岸在来線	424
(1) 東北新幹線	424
(2) 首都圏在来線（山手線）	424
(3) 三陸沿岸在来線	424
9.4.2 鉄道における将来の大地震対応に関する提言	425
(1) 成功例に学ぶこと	425
(2) 社会的な混乱を防止する必要性	425
9.5 ペットボトル飲料不足からみた BCP の必要性	426

9.5.1	ペットボトルをめぐる事実関係	426
9.5.2	BCPに関する提言	426
(1)	分散化, 標準化によるリスク回避	426
(2)	事業継続計画の見直し	427
(3)	分散電源の導入によるサプライチェーンの電力供給停止リスクの低減	427
9.6	危機管理から見た安全対策に関する提言	430
9.6.1	安全対策と危機管理	430
(1)	機械の包括的安全基準に関する指針	430
(2)	「想定外」と設計基準	430
(3)	巨大システムの安全対策	430
9.6.2	安全の定義とリスクコミュニケーション	431
(1)	安全の定義	431
(2)	安全と安心ーリスク評価の心理的側面	431
(3)	リスクコミュニケーション	431
[付録]	活動の記録	433