

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.935

September 2016

救命期の受援に対応した空港施設の耐震評価（健全性） に関する研究

～被災県外からのDMAT動線を対象に～

小野正博・中島由貴・中村孝明・静間俊郎

A study on Evaluation of Earthquake Resistance of Airport corresponding to
Receiving Support on Life Saving Period.
:Subject to DMAT of Operation Route from
Outside Prefecture affected by Disaster.

Masahiro ONO, Yoshitaka NAKASHIMA, Takaaki NAKAMURA, Toshiro SHIZUMA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

救命期の受援に対応した空港施設の耐震評価（健全性）に関する研究 ～被災県外からの DMAT 動線を対象に～

小野 正博*, 中島 由貴**, 中村 孝明***, 静間 俊郎****

要 旨

本研究は、救命期の DMAT による受援の拠点となる空港の耐震性（健全性）の評価方法を構築した。具体的には、和歌山県南域を対象とし、DMAT の動線途上の拠点である南紀白浜空港、およびフォワードベース、陸路等をシステムとして捉えた動線全体の受援能力の評価方法を示した。そして、提案手法を用い、動線全体の受援能力を DMAT の拠点・支援病院への到着時間として定量的に示すとともに、空港施設の耐震化事業の必要性や優先順位について考察した。

キーワード： 空港, 健全度, DMAT, 受援能力

*空港研究部 前空港計画研究室長（現近畿地方整備局神戸港湾事務所長）

**空港研究部 空港新技術研究官

***株式会社 篠塚研究所, 東京都市大学 大学院工学研究科 客員教授

****株式会社 篠塚研究所

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省 国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

A study on Evaluation of Earthquake Resistance of Airport corresponding to
Receiving Support on Life Saving Period.
: Subject to DMAT of Operation Route from
Outside Prefecture affected by Disaster.

Masahiro ONO*
Yoshitaka NAKASHIMA**
Takaaki NAKAMURA***
Toshiro SHIZUMA****

Synopsis

In this research we have come up with an evaluation method to evaluate earthquake resistance of the airport which will be the accepting base of DMAT on life saving emergency period.

Specifically, our research have targeted the southern area of Wakayama prefecture and the base airport of accepting the DMAT which is Nanki-shirahama airport, furthermore laying out the evaluation method of the DMAT acceptance ability of the operation route by considering the forward base and land routes as a whole system.

We have evaluated the acceptance ability of the whole operation route quantitatively by the arrival time to the DMAT base/support hospital, and considered the necessity and priority of earthquake resistance reinforcement construction works for airport facilities and their priorities.

Key Words : airport, level of soundness, DMAT, acceptance ability of the operation route

* Predecessor Head of Airport Planning Division, Airport Department

* * Research Coordinator for advanced Airport Technology, Airport Department

* * * SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE, Tokyo City University Graduate school of engineering visiting professor

* * * * SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE

3-1-1 Nagase, Yokosuka City, Kanagawa 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに.....	1
2. 地震被害想定と受援計画.....	1
2.1 地震被害想定.....	1
2.2 航空に関する受援計画.....	3
3. 受援関数の評価方法.....	5
3.1 受援関数の評価.....	5
3.2 構成要素の確率関数.....	5
4. 受援に関するシステムモデル.....	6
4.1 DMAT の事前配置と必要数.....	6
4.2 受援に関するシステムモデル.....	7
4.3 南紀白浜空港のシステムモデル.....	11
4.4 システム構成要素の遅延要因とフラジリティ情報.....	11
5. 受援計画を踏まえた空港施設の耐震評価と対策.....	15
5.1 受援関数の評価.....	15
5.2 必要な対策と優先順位.....	16
5.3 対策の効果.....	17
6. まとめ.....	18
謝辞.....	19
参考文献.....	19
付録.....	21
付録A 用語の定義.....	21
付録B 和歌山県の被害想定結果.....	22
付録C 和歌山県における航空に関する受援計画.....	24
付録D DMAT の必要量の評価.....	26
付録E システムの機能別分解と復旧曲線.....	29
付録F 同一機能を持つシステムの復旧期間の評価.....	32
付録G 航空機燃料の不足.....	33
付録H ボトルネック指標の評価.....	38
付録I 健全・不健全確率の評価.....	40
付録J 津波の影響について.....	41

1. はじめに

東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）の教訓を踏まえ、平成 24 年 9 月の防災基本計画の修正において、「地方公共団体及び防災関係機関は、災害の規模や被災地のニーズに応じて円滑に他の地方公共団体及び防災関係機関から応援を受けることができるよう、防災業務計画や地域防災計画等に応援計画や受援計画をそれぞれ位置付けるよう努めるものとし、応援先・受援先の指定、応援・受援に関する連絡・要請の手順、災害対策本部との役割分担・連絡調整体制、応援機関の活動拠点、応援要員の集合・配置体制や資機材等の集積・輸送体制等について必要な準備を整えることとする。」と規定された。

これを踏まえ、努力目標であるが、幾つかの地方公共団体は受援計画を整えてきた。和歌山県は、「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」、「和歌山県緊急消防援助隊受援計画（平成 25 年 3 月）」及び「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」等を整えている。

人命救助に重要な 72 時間（救命期）において、陸路での到達が困難な被災地において、空路による救急救命活動は最優先で行われるべきである。その際、県外からの応援機関の活動拠点となるのが空港である。先述の防災基本計画の規定において、「応援機関の活動拠点について必要な準備を整えておくこと」とされている。受援県は、応援を受ける立場として、救命期の応援機関の活動拠点である空港施設の耐震対策（健全性確保）について取り組む必要がある。しかしながら、財政等の制約があるなか、どの施設の対策を優先すべきか、定量的な評価方法が求められる。

中島ら（2013～2015）は、国土技術政策総合研究所資料第 756 号、783 号、同研究報告第 55 号において方法の整備を進めてきた。この方法は、様々な施設で構成される空港の地震リスクを数値化することで、これまで明らかにできなかった弱点や対策の優先順位を見出すものである。さらに小野ら（2015）は、同研究所資料第 830 号において、空港を巨大システムとして捉え、システム信頼性理論を用い空港機能の復旧過程や健全度を経過時間とともに数値・視覚化できる方法を提案し、実空港を対象に緊急時機能の適用性を評価のうえ確認した。そして、中島ら（2015）は、同研究所資料 863 号において、一連の方法をガイドラインとしてとりまとめた。

本研究は、人命救助のために重要な 72 時間における応援機関の活動拠点としての空港の耐震性（健全性）の評価方法を整備する。検討にあたり救命期の県外からの

応援の一つで、「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」においてタイムラインが示されている医療（DMAT：緊急災害医療チーム）についての動線に着目する。動線途上の拠点である空港及びヘリポート等の各空港施設の耐震性（健全性）を評価したうえで、これらをシステムとする動線全体の健全性、すなわち受援能力の評価方法を提案する。

一例として、DMAT が展開する地域を和歌山県南域とし、南紀白浜空港の地震時の耐震性（健全性）及び DMAT 動線全体の健全性を評価し、施設の耐震化事業の必要性や優先順位について考察する。なお、本報は、評価方法の提案に軸足を置くもので、和歌山県南域を対象とした評価は初歩的な試算である。

本報の内容は、①現況の和歌山県の地震被害想定（南海トラフ地震）及び受援計画について示す。②復旧曲線を援用した受援に関する評価モデルの考え方について示すと共に、③対象地域について、航空拠点到陸路を加えた DMAT 動線のシステムモデルを構築し、④南海トラフの巨大地震による受援計画を支える DMAT 動線の健全性を評価する。⑤弱点の洗い出しを行い、耐震化事業による改善効果について示すものである。

2. 地震被害想定と受援計画

2.1 地震被害想定

国は、「南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）（内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ、平成 25 年 3 月）」を示している。

和歌山県は、東海・東南海・南海 3 連動地震（Mw8.7）及び南海トラフ巨大地震（Mw9.1）による地震被害想定を行い、「和歌山県地震被害想定調査報告書（概要版）（平成 26 年 3 月）」を示している。同報告書では国の想定と数値が若干違っており、その数値が異なる主な要因についても整理されている。

(1) 人的被害

「和歌山県地震被害想定調査報告書（概要版）（平成 26 年 3 月）」によれば、南海トラフ巨大地震が発生した場合では、死者数 90,978 人、重傷者数 9,908 人、軽傷者数 30,079 人、閉込者数 1,098 人と予測している。表-1 に、市町村毎の人口、死者、重傷者、閉じ込め、津波による死亡の数をまとめて示す。和歌山県は県内を 7 つの保健医療圏に区分し、保健医療圏別に災害拠点病院・災

害支援病院を指定している。同表では、市町村を保健医療圏別に整理した。表の右列の要治療者数は死者数、重傷者数、閉込者数を和した人数から津波による死者数を引いて求めたものである。救命期に災害医療を必要とする被災者数であるとする。東日本大震災に於ける死者数と負傷者数の比が 5:2 もの大きな差があったことから、津波による死者を除くこととした。表より、県全体で約 15,500 人が救命期に医療処置が必要な被災者と想定する。

また、付録図-1 に各市町村における人的被害（死者数の予測）の予測結果を示す。表-1 と併せて、特に和歌山市、田辺市、那智勝浦町、串本町で死者数が多いことがわかる。

(2) 道路施設（陸路）被害

道路の被害については、南海トラフ巨大地震が発生した場合に、県内の市町村道を含む道路約 13,000km のうち、地震による被害箇所数は全県で約 900 箇所、津波による被害箇所数は 1,200 箇所と予想されている。また、高速道路、直轄国道、補助国道、県道、主な市道（和歌山市）については、地震による被害箇所数は全県で約 230 箇所、津波による被害箇所数は約 316 箇所と予想されている。南海トラフ巨大地震による和歌山県内の道路

と震度の関係図、また、道路と津波による浸水深の関係図を付録図-2 と付録図-3 に示す。

各図を見ると、県西部や県南部の沿岸部の道路で強い揺れと深い浸水深が予測されており、救急救命活動を行うための陸路が地震時に健全である可能性は低いと思われる。他方、国土交通省（2014）より、高規格道路等にあつては、最大津波高を考慮して十分な高さを確保することにより、災害時における安全性・信頼性を確保しているものと考えられる。

(3) 孤立集落

平成 25 年 3 月、内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ「南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）」は、和歌山県において孤立可能性のある農業集落が 163～275 箇所、同漁業集落 83～87 箇所と想定している。

(4) 空港施設被害

空港施設の被害については、南海トラフ巨大地震が発生した場合に、南紀白浜空港では震度 6 強の揺れが想定されており、滑走路、航空灯火施設等の点検のため、地震直後の使用は不能となる。また、地震により滑走路等にひび割れや段差が発生する可能性があり、特に盛土部、

表-1 和歌山県の各市町村の被災者数（南海トラフ巨大地震（Mw9.1））

保健医療圏	市町村	人口	人的被害の合計				津波による死者数	要治療者数	
			死者数	重傷者数	軽症者数	閉込者数		市区町村	保健医療圏
和歌山	和歌山市	375,300	18,100	4,800	13,600	480	15,800	7,580	8,291
	海南市	54,000	4,000	420	1,500	61	3,800	681	
	紀美野町	10,200	10	14	170	6	0	30	
那賀	紀の川町	64,100	53	82	800	34	0	169	293
	岩出市	49,800	37	62	560	25	0	124	
橋本	橋本市	63,200	24	36	470	15	0	75	132
	かつらぎ町	18,100	13	18	210	8	0	39	
	九度山町	4,700	4	5	55	2	0	11	
	高野町	4,100	3	3	35	1	0	7	
有田	有田市	30,100	2,200	560	1,500	55	2,000	815	1,393
	湯浅町	13,300	2,200	230	560	16	2,100	346	
	広川町	7,500	1,200	110	280	6	1,200	116	
	有田川町	26,900	38	55	490	23	0	116	
御坊	御坊市	27,200	6,900	580	1,300	25	6,700	805	1,789
	美浜町	7,700	3,700	220	430	7	3,600	327	
	日高町	7,000	380	72	260	16	340	128	
	由良町	6,400	980	120	280	15	910	205	
	印南町	8,400	1,300	92	310	16	1,200	208	
	日高川町	9,800	39	54	330	23	0	116	
田辺	みなべ町	13,700	3,900	230	600	23	3,900	253	2,439
	田辺市	80,200	15,600	930	2,600	67	15,200	1,397	
	白浜町	22,700	5,300	390	1,000	29	5,200	519	
	上富田町	13,900	62	88	440	37	0	187	
新宮	すさみ町	4,500	1,700	73	210	10	1,700	83	1,157
	新宮町	34,600	1,100	160	770	35	940	355	
	那智勝浦町	16,100	11,700	92	250	6	11,700	98	
	太地町	2,800	2,000	10	38	2	2,000	12	
	古座川町	3,100	230	46	160	11	200	87	
	北山村	510	5	6	30	3	0	14	
	串本町	18,200	8,200	350	840	41	8,000	591	
	全県	998,110	90,978	9,908	30,078	1,098	86,490	15,494	15,494

ボックスカルバート部において段差が発生する可能性が高く、ボックスカルバート等の損壊が発生した場合は、固定翼機の離発着に支障が生じる。

ヘリポートについては、回転翼機発着予定地全 296 箇所のうち、液状化危険区域（ PL 値 15 以上）が 116 箇所、津波浸水深 30cm 以上の区域が 49 箇所あると予想されている。液状化区域では、ヘリポートのひび割れ、沈下被害の発生可能性があるが、仮復旧等により早期の使用が可能である。津波浸水箇所の 49 箇所については、瓦礫の散乱等により長期間ではないものの、使用不能となる可能性がある。

(5) 余震

平成 28 年熊本地震において、余震による救命期の活動への障害や二次的被害の影響について報告等がされているが、全体像や系統だった研究が、まだ十分とは言えない。したがって、本報では余震の影響について、検討の範囲としていない。今後の研究成果を待ちたい。

2.2 航空に関する受援計画

中央防災会議にあっては、同幹事会で、「南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画（平成 27 年 3 月）」が公表されている。

和歌山県にあっては、南海トラフ地震発生時の対応として、「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」が示されている。また、東南海・南海地震発生時の対応としてであるが、「和歌山県緊急消防援助隊受援計画（平成 25 年 3 月）」及び「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」が示されており、これら計画は、現時点では、南海トラフ地震時にも適用されることが想定されている。

これら受援計画には、救助活動、消火活動、医療活動、物資調達および輸送活動等に関し、和歌山県が迅速かつ円滑に応援を受け入れる体制を確保するため、県内に広域防災拠点を整備し、受援活動を行うための運用方法が定められている。

また、「和歌山県地域医療再生計画(平成 24 年度補正予算)（平成 25 年 8 月）」に、災害医療対策について記述されている。

(1) タイムライン

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」では、経過時間に応じたタイムラインを付録図-4 のとおり示し、国及び地方公共団体の複数の防災機関が人命救助のために重要な 72 時間を意識しつつ、緊急輸送ルートの通行

確保、救助、救急、消火活動、医療活動、物資供給、燃料供給等の活動を整合的かつ調和的に行うための目安としている。このように、いつまでに何を行うか期限の目安が示された。

(2) 広域防災拠点（航空搬送拠点：大型回転翼・固定翼・SCU）

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」では、国が定めた広域防災拠点は、国が指定している南紀白浜空港も含め、県内に 4 拠点（コスモパーク加太等、旧南紀白浜空港跡地等、新宮市民運動競技場等、橋本市運動公園等）が設けられている。災害時において、広域防災拠点には国等の要請を受け派遣された応援部隊を受け入れ、救出救助・消防活動の航空機活用拠点となる。特に、南紀白浜空港は、駐機・給油の拠点となり、また広域医療搬送対象患者を一時収容するための SCU（Staging Care Unit（航空搬送拠点臨時医療施設））を設置/運営することとしている。

(3) 航空部隊

「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」が定めている航空部隊の活動は、情報収集活動、消火活動、救助活動、罹災者搬送活動、人員輸送、物資輸送、広報活動、その他となっており、その実働部隊は、自衛隊、海上保安庁、国土交通省、緊急消防援助隊および警察等の救援部隊である。

上記した 3 つの動員計画で要所となる拠点の配置を付録図-5 に示す。

また、災害応急対策に活用する航空機については、自衛隊、国、消防、警察の各機関からの派遣が予定されており、機関別に派遣する機材及び機材数も計画されている。（表-2）

表-2 和歌山県への防災関係機関別派遣予定航空機数

区分	機関名	機材派遣数			
		固定翼	大型ヘリ	中型ヘリ	小型ヘリ
自衛隊	陸上自衛隊	-	3	5	2
	海上自衛隊	未定			
	航空自衛隊				
国	海上保安庁	2	-	16	-
	地方整備局	-	-	2	-
消防	緊急消防援助隊	-	-	13	-
	和歌山県	-	-	1	-
警察	和歌山県警察本部	-	-	1	-

注：大型ヘリの例：CH-47J
 中型ヘリの例：UH-1J,SH-60J,UH-60J,EC225,AS332,B412,B212,AS365,BK117
 小型ヘリの例：OH-6D

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」において、空路は、津波により陸路での進出が難航すると見込まれ

る地域へのアクセスとしての部隊投入の方法であり、また津波警報が解除されないことを想定し、ヘリ（回転翼機）・航空機を活用した空からの救出救助等を想定するものとしている。重視する航空機の運用として、情報空白域の情報収集、人命救助のための部隊の輸送・DMAT 参集、広域医療搬送を挙げている。

（4）航空機ベース等

県にあっては、「和歌山県緊急消防援助隊受援計画（平成 25 年 3 月）」では、緊急消防援助隊の応援を受ける場合の動員体制についての必要事項が定められており、航空機能に着目すると、学校や公園を中心に、県内 261 箇所の回転翼機離着陸可能場所が指定されている。

「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」では、主に航空機による動員計画を効果的に進めるため、航空部隊が利用する県内航空拠点（航空機ベース、フォワードベース、ランディングポイント（災害拠点病院付近の回転翼機離着陸場所を含む）の指定、ならびに各航空部隊の動員において必要な事項が定められている。

①航空機ベース

航空機ベース（ACB; Aircraft Base）とは、災害の終始を通じて、実働部隊の固定翼航空機および回転翼機の運用に関する指揮を実施し、かつ駐機、整備、給油、装備が可能な拠点および航空部隊の進出拠点である。南紀白浜空港は、国指定の広域防災拠点であり、県指定の航空機ベースでもある。

②フォワードベース

フォワードベース（FB; Forward Base）とは、被災地近傍の飛行場外離着陸場等で、離着陸、給油、人員の乗降機および装備・物資等の積み降ろしが可能な拠点をいい、その候補地は県内に 65 箇所ある。

③ランディングポイント

ランディングポイントとは、航空機ベースおよびフォワードベース以外で、災害救助活動のための離着陸を行う地点をいい、県内に 261 箇所、飛地を踏まえ三重県熊野市に 1 箇所指定されている（これは「和歌山県緊急消防援助隊受援計画（平成 25 年 3 月）」が指定する回転翼機離着陸可能場所と同じ場所である）。また、ランディングポイントの中から、災害拠点病院付近の回転翼機離着陸場所は、県内に 10 箇所が指定されている。

（5）航空機燃料

航空機燃料は、「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」によると、県対策本部が確保するものとし、不足する場合には、国の現地対策本部に調達を要請としている。

「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」にあっては、原則南紀白浜空港で給油を行うものとし、実働部隊が自ら燃料補給を行う場合を除き、航空機燃料取扱業者又は実働部隊に対し、実働部隊航空機への燃料補給に関する協力要請を行うこととしている。このことは、実働部隊間の融通も想定しているものと考えられる。また、航空機燃料取扱業者（レフューラー）については、空港内での事業者の他に、大阪市内の事業者（タンクローリー）、東京都内の事業者（ドラム缶、翌日搬送可能）の 3 事業者が登録されている。

「南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画」では、航空機用救助活動拠点に存する給油施設には、重点的かつ継続的な燃料補給をすることとしているが、南紀白浜空港における備蓄量については、特段の記述はみられない。

なお、南紀白浜空港に立地する和歌山県防災航空センターは、政府の「災害時石油供給連携計画」における重要施設に登録しており、優先供給先となっている。

（6）災害拠点病院・災害支援病院

「和歌山県地域医療再生計画（平成 24 年度補正予算）（平成 25 年 8 月）」では、県内を 7 つの保健医療圏に区分し、それぞれに災害拠点病院を 1～3 箇所及び災害支援病院を 1～3 箇所を指定している。すべての保健医療圏の災害拠点病院及び一部の災害支援病院に DMAT（災害派遣医療チーム）を配備している。

課題として、「和歌山県地震被害想定調査報告書（概要版）（平成 26 年 3 月）」を踏まえ、災害拠点病院・災害支援病院の津波浸水想定を示した（付録図-6）。新宮保健医療圏の災害支援病院の那智勝浦町立温泉病院については移転を予定としている。

（7）道路

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」では、津波浸水により陸路到達が難航すると見込まれる市町村として、串本町、古座川町、太地町、那智勝浦町を挙げており、周辺の航空機用活動拠点として、串本町及び古座川町については旧南紀白浜空港跡地、太地町及び那智勝浦町については新宮市民運動競技場を抽出している。

3. 受援関数の評価方法

3.1 受援関数の評価

県外からの応援部隊が被災地（拠点病院や支援病院）に入るまでの所要時間は、航空機ベースや陸路等が被災することで確実に増加する。そこで、航空機ベースや陸路等を有機的に連結したシステムとして捉え、増加を含めたシステムの所要時間を確率論的に評価する。これは地震リスクマネジメント分野では一般的には復旧曲線と呼ばれるが、本報では受援関数と同じものとして扱う。システムの構成要素となりうるのは、航空機ベース、フォワードベース、ランディングポイント等であり、また、陸路は道路斜面、橋梁、トンネル等、被災対象となる施設である。以下、システムの受援関数の評価方法を、小野ら(2015)を参照し、示す。

応援部隊の勢力の一定量（例えば、当初計画の半分（=50%））が目的地に到達する所要時間を考える。地震動強さ、津波の有無及び応援部隊が通過する空港・陸路の損傷等は、一定のばらつきを伴う確率事象として捉える。このため、一定量の勢力の到達の所要時間はこれら確率事象の影響を受けるので、想定より早く着いたり遅く着いたり、ばらつくことになる。このばらつきを表す確率密度関数を用いて受援関数を考える。

受援関数は、地震発生後の応援部隊による受援量の経時的な推移を示すものである。ここでは、図-1 に示すように対象地域で必要となる受援量で基準化した受援率 r を条件としたシステムの所要時間 t の確率密度関数 $f_T(t|r)$ の平均値をステップ状に結んだ曲線を便宜上 $T(r)$ と定義する。受援率 r を条件とした平均値は以下のように求められる。

$$T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t|r) dt \quad (1)$$

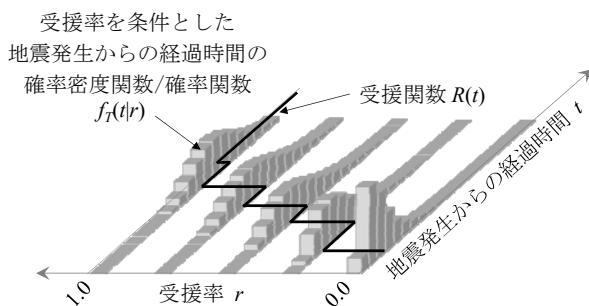


図-1 受援関数の概念図

$T(r)$ を単調増加関数と考えれば、この逆関数（ r と t

の変換）より、受援関数 $R(t)$ は以下のようになる。

$$R(t) = T^{-1}(r) \quad (2)$$

以下、システムの所要時間の確率密度関数 $f_T(t|r)$ の計算方法を示す。まず、 n 個の構成要素で形成される並列システムの場合、 n 個の要素の中で最短の経路を選択することになる。この場合、各要素の所要時間の最小値を取ることで、確率変数の関数で表すと以下のようになる。

$$T_{sys} = \min_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

ここに、 T_{sys} はシステムの所要時間の確率密度関数 $f_T(t|r)$ の確率変数、 T_i は同じく要素 i の所要時間の確率変数である。

直列システムでは、 n 個の要素の中で最長の経路を選択する。この場合、各要素の所要時間の最大値をとり、 T_{sys} は以下のようになる。

$$T_{sys} = \max_{i=1}^n T_i \quad (4)$$

一方、経路 A を通過し、その後経路 B を通過する等、各要素の所要時間を累積する場合、各要素の所要時間は和算となり、

$$T_{sys} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

後述するシステムモデルでは、並列部では(3)式を、直列部は(4)式あるいは(5)式を適宜用いる。なお、具体的な計算方法の詳細は、小野ら（2015）の文献を参照されたい。

3.2 構成要素の確率関数

構成要素の所要時間の確率関数は、構成要素が健全であった場合は、そこを通過する所要時間となるが、構成要素が軽微や大破等の損傷状態に至ると、所要時間に健全時の通過時間と復旧時間が加わる。図-2 は構成要素の損傷確率と所要時間、超過確率関数をイベントツリーの帰結として示した概念図である。

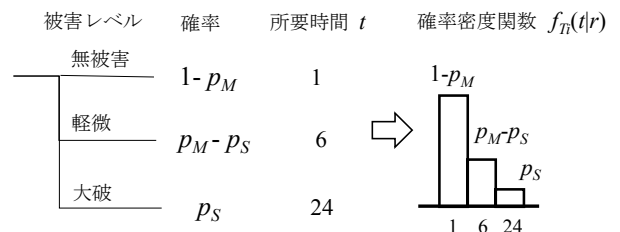


図-2 構成要素のイベントツリーと損傷確率、所要時間および確率密度関数

例えば、図-2 より、無被害では通常の通過時間が 1 時間のところ、軽微被害が発生すると復旧時間を加え 6 時間を要し、大破になると 24 時間要することになる。

損傷確率 p_M , p_S については、作用地震動の中央値 r_m の条件付き確率として以下のように求める。

$$p_M(r_m) = \int_0^{r_m} f_c(\ln c; c_m, \zeta) dc \quad (6)$$

(6)式は Fragility Curve（フラジリティカーブ）と呼ばれるものである。ここに、 $f_c()$ は正規確率密度関数であり、 c_m は軽微被害に対応した耐力中央値、 ζ は対数標準偏差である。 p_S についても同様に求められる。

4. 受援に関するシステムモデル

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」に示されているタイムラインのイメージ（付録図-4）では、救助・救急関係の消防等の応援部隊の出動・救助活動に並行して、医療関係の DMAT にあつては、空路の被災地参集、災害拠点病院・SCU での活動開始、広域医療搬送開始までの一連の活動を、概ね 12 時間以内をイメー

ジしているものと考えられる。

これらの応援に対し、受援計画で考慮されている航空関係施設の耐震性（健全性）を検討するにあたり、県外からの DMAT が災害拠点病院まで進出する動線の健全性を評価することとする。DMAT の進出動線の逆動線は、病傷者の広域医療搬送に概ね重なると考えられる。

4.1 DMAT の事前配置と必要数

和歌山県では、図-3 に示す様に県内を 7 つの保健医療圏に分けている。本報で対象とする県南域の保健医療圏は有田、御坊、田辺、新宮の計 4 医療圏であり、図-3 には、南海トラフ巨大地震（Mw9.1）における各保健医療圏の予想要治療者数（表-1 参照）を記している。県南域での要治療者数の合計は 6,778 人である。同図には災害拠点病院（総合）、災害拠点病院（地域）、災害支援病院の位置をそれぞれ示している。御坊保健医療圏については災害拠点病院（地域）と災害支援病院が近接しており、一の拠点とみなせる。また、表-3 に、災害拠点病院に予め駐在している DMAT チーム数を示す（和歌山県地域医療再生計画（2013）参照）。これらの DMAT は、発災後速やかに被災者の治療活動に従事できるもの

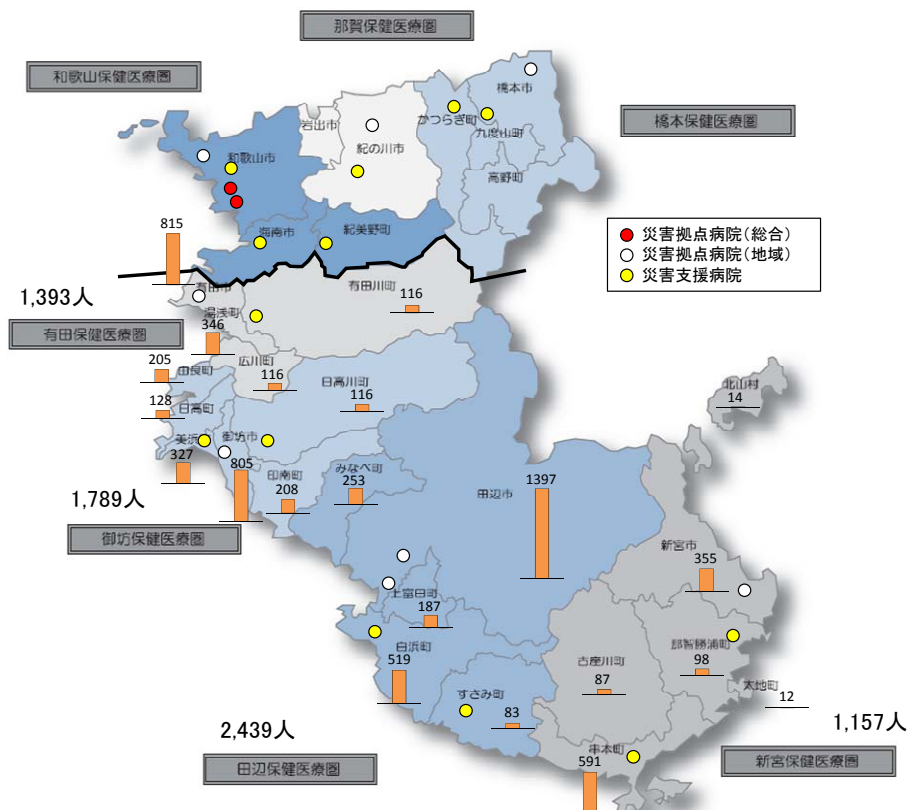


図-3 和歌山県地震被害想定（平成 26 年 3 月）より作成した各保健医療圏と市町村別の要治療者数
（図は和歌山県 HP より作成）

と考えられるが、交替要員も含め処理能力は必ずしも十分ではなく、被災地外（県外）からの応援が必要になる。各保健医療圏で応援を必要とする DMAT チーム数は、救命期（地震発生～72 時間程度）における各保健医療圏の累積死者数に基づいて評価する。救命期における各保健医療圏の累積死者数は、地震発生後の未治療者数を評価した小谷（2015）を参照して求める。算出方法は、「付録 D DMAT の必要量の評価」を参照されたい。

表-3 和歌山県南域の既存の DMAT チーム数
(和歌山県地域医療再生計画（平成 24 年度補正予算）)

保健医療圏	災害拠点病院等	既存のDMAT チーム数
有田	有田市立病院	1
御坊	国保日高総合病院	2
田辺	紀南病院	2
	南和歌山医療センター	2
	白浜はまゆう病院	1
新宮	新宮市立医療センター	1
合計		9

図-4 に DMAT チーム数と死者数（救命期以降の死者数）の関係を示す。ここで、DMAT は被災地に遅延することなく急行でき、即時に救命活動ができる理想的な状況を仮定している。横軸は DMAT チーム数、縦軸は死者数であり、医療圏毎に示している。同図の横軸の 0 チームに対応した最悪の死者数は、DMAT による救命活動がない場合の死者数である。この場合、全ての要治療者の救命が不可能であると仮定すると、図-3 に示す各医療圏の要治療者数と図-4 の 0 チーム時の死者数は、同数となる。また、図-4 より、救命活動する DMAT チーム数が増えると、死者数も減少していくが、その減少傾向は DMAT チーム数と比例するものではなく、一定値に漸近していることが分かる。これは、必要以上の DMAT チームが応援に参集しても、要治療者の処理能力に余剰が生じ、待機するチームが出てくることを示している。

死者数が概ね頭打ちとなる DMAT チーム数を図-4 から読み取り、各保健医療圏で必要とする DMAT チーム数とする。これらを表-4 に示す。なお、各保健医療圏の死者数の算出の際、DMAT 1 チームが救命治療できる人数について、1 時間当たり 5 名（付録 D）としている。

表-4 には、各保健医療圏で必要とする DMAT チーム数に加え、県外からの必要な DMAT チーム数も示している。県外からの必要チーム数は、各保健医療圏で必要とする DMAT チームから、表-3 に示す既存の DMAT チーム数を差引くことにより求めた。表-4 より、南海ト

ラフ巨大地震（Mw9.1）では、和歌山県南域で必要とされる DMAT は 46 チーム、その内、既存の 9 チームを除き、県外からの 37 チームの応援が必要となる。

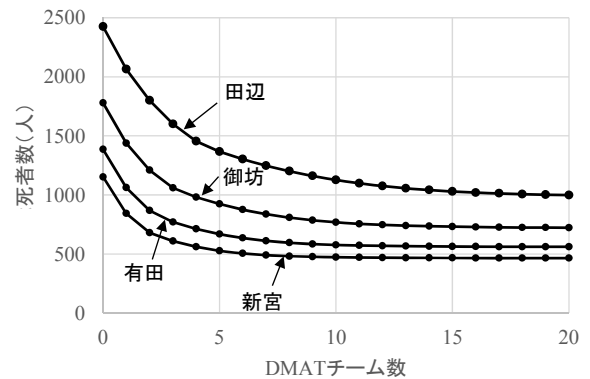


図-4 各保健医療圏の DMAT チーム数と死者数

表-4 和歌山県南域の DMAT の必要チーム数と
県外からのチーム数

保健医療圏	要治療者数	DMATチーム数		
		必要 チーム数	既存 チーム数	県外からの 必要チーム数
有田	1,393	10	1	9
御坊	1,789	12	2	10
田辺	2,439	15	5	10
新宮	1,157	9	1	8
合計	6,778	46	9	37

4.2 受援に関するシステムモデル

「和歌山県広域受援計画（平成 28 年 4 月）」では、県航空搬送拠点として南紀白浜空港を指定しており、被災地外から航空機により広域参集する DMAT は、南紀白浜空港に到着することになる。

また空港に到着した DMAT の移動は、各保健医療圏ともに南紀白浜空港から空路フォワードベースに向かい病院に至る経路と、陸路病院へ向かう経路を想定する。概念図を図-5 に示す。

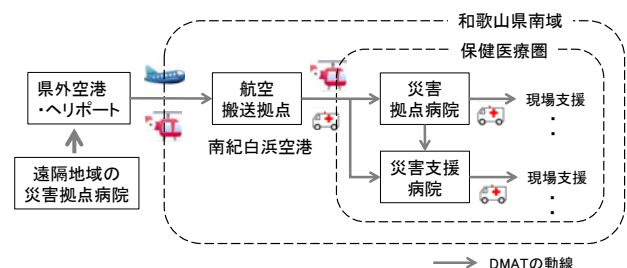


図-5 DMAT 受援に関する動線のモデル

ここで、モデルの条件として、DMAT の移動は拠

点・支援病院までとし、病院から被災現場への移動は考えない。また、医療圏内での傷病者の病院搬送は、傷病者の広域搬送を除き、保健医療圏を超えて搬送されないものとする（県内被災地から三重県熊野市を経由する病傷者は、隣接する新宮保健医療圏の病院に搬送と想定）。図-5 のモデルに基づいた各医療圏の DMAT 受援に関するシステムモデルを図-6 に示す。フォワードベースは、病院への徒歩移動が可能な約 2km 圏内のものを採用した。御坊保健医療圏は、国保日高総合病院と北出病院が隣接し、さらに和歌山病院は、2 病院から約 1.5km に位置する。また、田辺保健医療圏の南和歌山医療センターと紀南病院も 2km の近距離にある。このため、域内空路ならびに陸路は、システム上は同一経路とした。また、南紀白浜空港から各フォワードベースの空路を経由する回転翼機には往復分の燃料の補給が必要となる。そこで、本システムモデルでは、南紀白浜空港での燃料供給の要素（図-6 では「航空機燃料施設（南紀白浜空港）」）を設け、域内空路を経由する経路にこの要素を直列状に加えている。

これらのシステムモデルから各医療圏の受援関数を評価するが、各医療圏の拠点・支援病院への DMAT チームの移動経路はほぼ決まっている。このような場合は、システムを経路（機能）別に分解することで、受援関数を評価する。

有田保健医療圏を取り上げ、受援関数 $R(t)$ の評価のためのシステムの機能別分解の方法を以下に示す。表-3

より、有田保健医療圏の必要な DMAT チーム数は 10 である。その内 1 チームは有田市立病院に駐在しているため、県外からの 9 チームが遅延の対象となる。また、有田保健医療圏各市町の要治療者数（表-1、図-3）と有田市立病院と済生会有田病院の所在地（図-3）を考慮し、県外からの必要チーム数は有田市立病院に 5、済生会有田病院に 4 と設定する。そして有田市立病院へ向かう 5 チームと済生会有田病院へ向かう 4 チームは、それぞれ別の経路を辿ると仮定すると、図-6(a)のシステムモデルは、図-7(a)のように 2 つの経路に分解することができる。なお、この機能別分解は、「付録 E システムの機能別分解と復旧曲線」、「付録 F 同一機能を持つシステムの復旧期間の評価」（復旧曲線と受援関数は同義）に具体例を示している。分解した図-7(a)に示す各経路の末端部分に記したチーム数（5, 4）は、それぞれ有田市立病院、済生会有田病院への受援量を表し、当該医療圏で必要となる受援量（DMAT チーム数、有田保健医療圏では 9 チーム）で基準化した受援率 r で表すと、有田市立病院は 0.444 ($4 \div 9$)、済生会有田病院は 0.556 ($5 \div 9$) となる。

他の保健医療圏のシステムモデルについても、同様の分解を行い（図-7(b),(c),(d)）、保健医療圏毎に受援関数を求める。

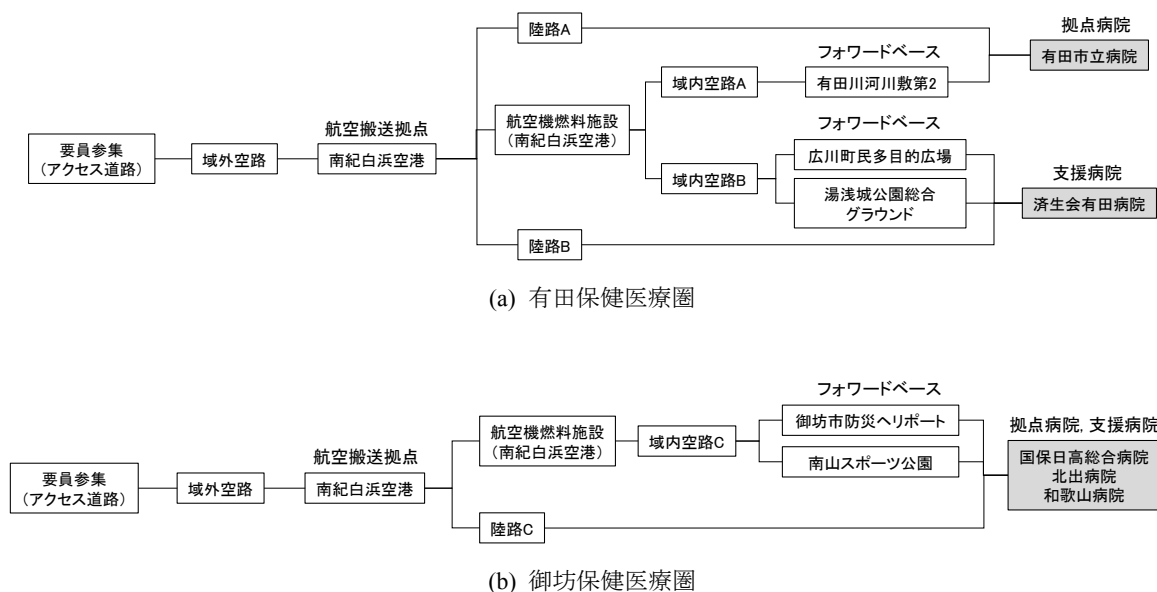
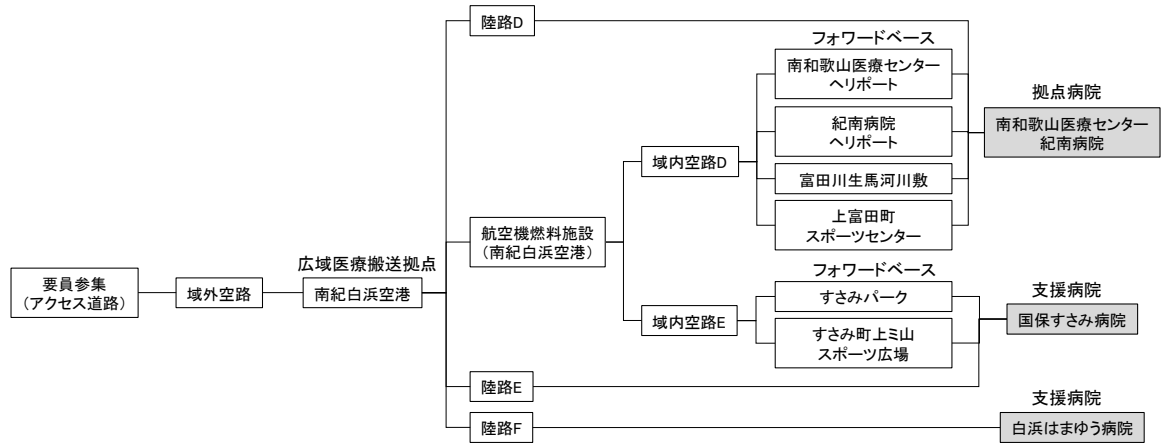
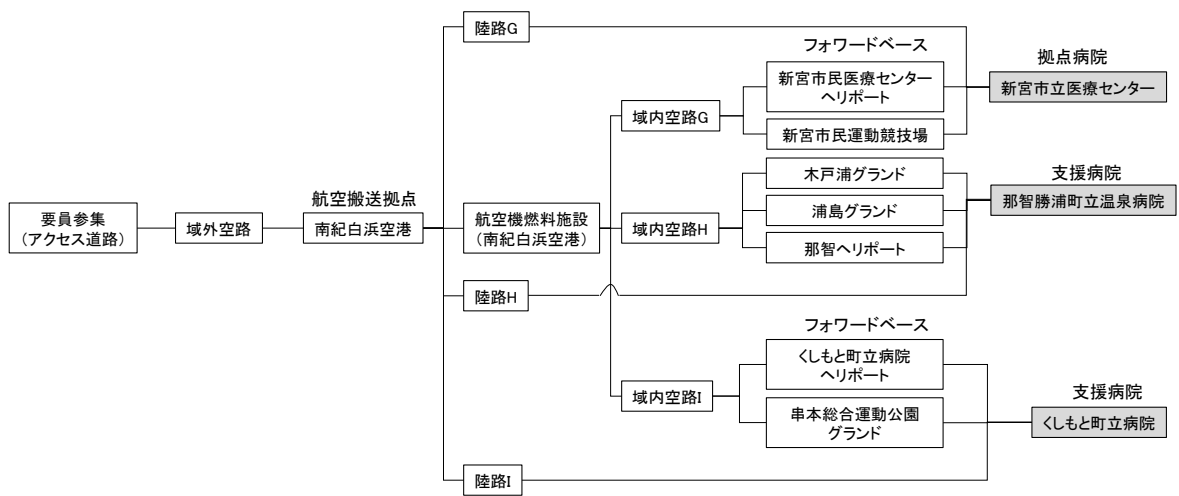


図-6 DMAT 受援関数の評価に関するシステムモデル（その 1）

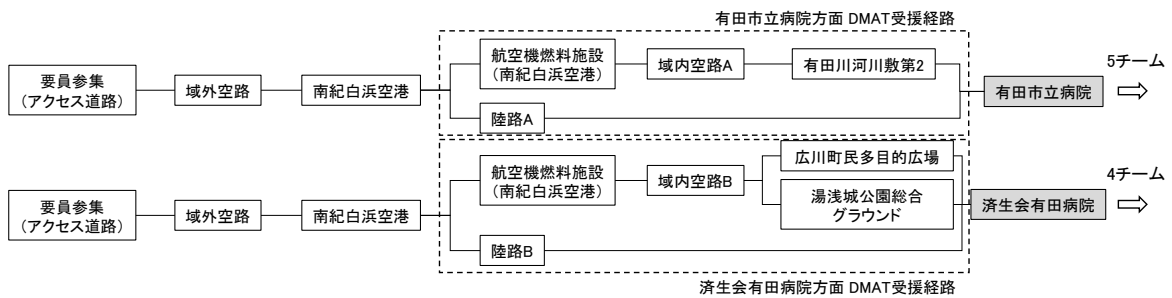


(c) 田辺保健医療圏

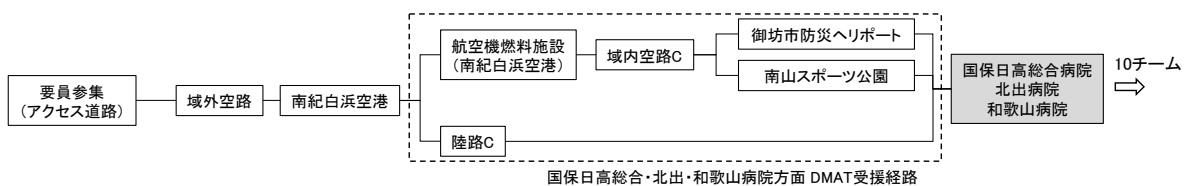


(d) 新宮保健医療圏

図-6 DMAT 受援関数の評価に関するシステムモデル (その 2)

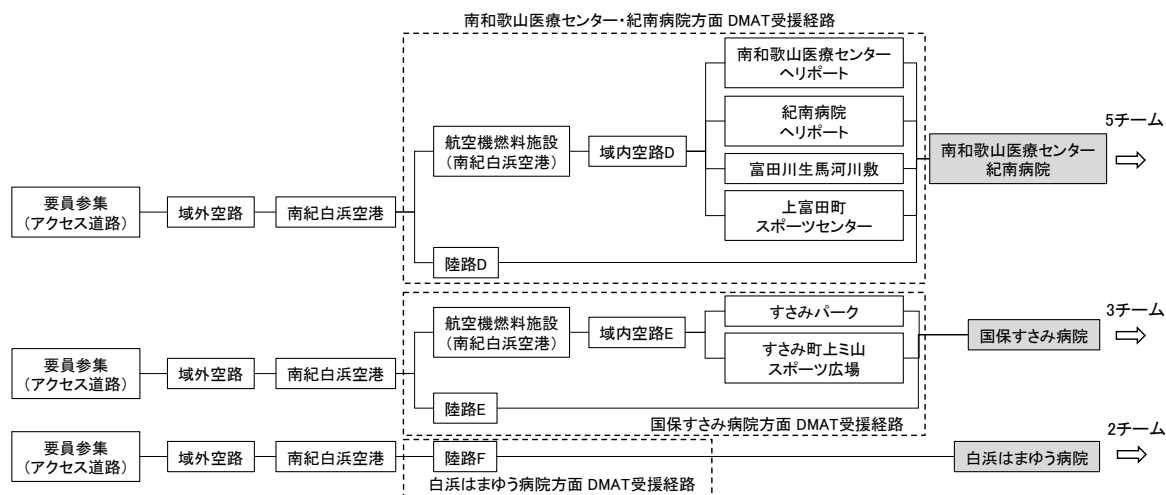


(a) 有田保健医療圏

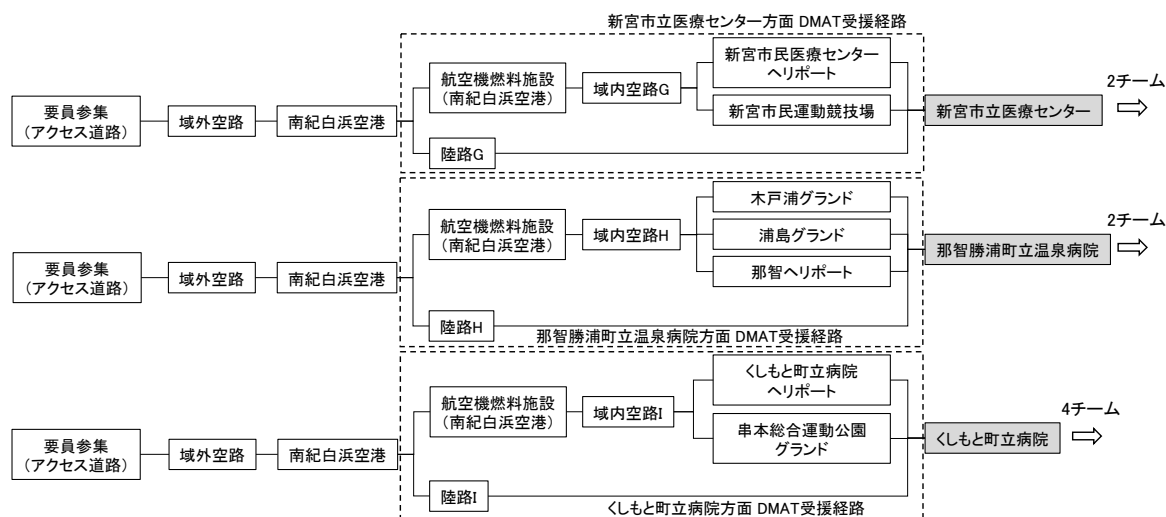


(b) 御坊保健医療圏

図-7 システムモデルの DMAT 受援経路への分解 (その 1)



(c) 田辺保健医療圏



(d) 新宮保健医療圏

図-7 システムモデルの DMAT 受援経路への分解 (その 2)

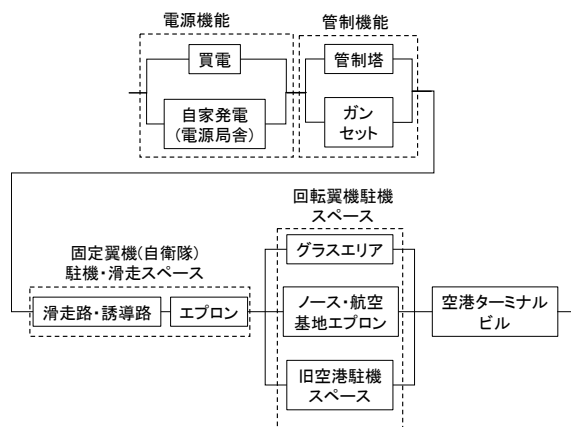


図-8 南紀白浜空港の DMAT 受援に関するシステムモデル

4.3 南紀白浜空港のシステムモデル

図-8 に南紀白浜空港の DMAT 受援に関するシステムモデルを示す。同図のシステムモデルは、図-6 において各保健医療圏のシステムモデルの1要素として示されている南紀白浜空港の部分に組み入れられる。南紀白浜空港の DMAT 受援に関して必要とされる機能は、固定翼機、回転翼機による遠地（県外）からの DMAT チームの搬送、これを受入れるための管制機能、電源機能、固定翼機の駐機・滑走スペース、回転翼機の駐機スペース、さらに緊急時の指揮命令や情報収集、点検を行う要員の参集等である。図の並列部はどれか一つでも機能していれば、その機能は満たされる代替性を示している。

4.4 システム構成要素の遅延要因と脆弱性情報

図-6、図-7、図-8 に示したシステムモデルの各構成要素（□）に対する遅延要因や被害レベル・状態（軽微、大破等）を定義する。これを表-5～表-9 に示す。各表は、左から遅延要因、遅延要因となる物理的被害のレベルや状態、被害レベルの地震動（地表面最大加速度）に換算した耐力中央値（(6)式の c_m ）、および所要時間である。（6)式の対数標準偏差 σ は一律 0.54 とした（小野ら（2015））。なお、表中の耐力中央値の欄の一部に耐力中央値ではなく、確率を示している箇所がある。この確率は、南海トラフ巨大地震の発生を条件とした被害レベル・状態の発生確率であり、本報では便宜的に設定している。また、所要時間の欄に「最短 0.25 時間」等と記されているのは、被害や遅延等が発生しない場合の通常時の所要時間を表している。各表の情報を本報では脆弱性情報と呼ぶ。

表-5 は南紀白浜空港の各構成要素と域外空路、要員参集（アクセス道路）について示し、表-6～表-9 は、有田、御坊、田辺、新宮の各保健医療圏のそれを示している。また、本報では、人命救助のための重要な 72 時間（救命期）に焦点においては範囲外を意味している。

表-5 の南紀白浜空港について、ガンセット、ノース・航空基地エプロン、旧空港駐機スペースについては被害なし（－）としている。これより、図-8 の南紀白浜空港のシステムモデルの回転翼機駐機スペース、ならびに管制機能は確実に確保できることとしている。

以下、システムモデルの各構成要素、必要機能の脆弱性情報について詳述する。

表-5 全保健医療圏共通の脆弱性情報

システム 構成要素		遅延要因	被害レベル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	所要時間	
南紀 白浜 空港	買電	送電停止	短期	350	12時間	
			長期	600	80時間以上	
	自家発 (電源局舎)	燃料タンク被害	建屋被害	中破	920	80時間以上
			大破	1380	80時間以上	
	管制塔	設備被害	建屋被害	中破	970	80時間以上
			大破	820	80時間以上	
	ガンセット	-	-	-	-	
	滑走路・誘導 路	ボックスカル バート被害	軽微	600	48時間	
			倒壊	1200	80時間以上	
	エプロン	斜面被害	軽微	600	48時間	
			崩壊	1200	80時間以上	
	グラスエリア	地盤悪条件 (ぬかるみ等)	あり	確率を 0.01と設定	6時間	
ノース・航空 基地エプロン	-	-	-	-		
旧空港駐機ス ペース	-	-	-	-		
旅客ターミナ ルビル	建屋被害	-	-	-		
		設備被害	-	-	-	
域外空路	要員 (DMAT) 参集	遅延	確率を 0.1と設定	12時間 (最短5時間)		
			確率を 0.1と設定	12時間 (最短2時間)		
要員参集 (アクセス道路) (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を0.15 と設定	12時間 (最短1時間)		
		大破	確率を0.05 と設定	12時間 (最短1時間)		

表-6 有田保健医療圏の脆弱性情報

システム構成要素	遅延要因	被害レベル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	所要時間
航空機燃料施設 (南紀白浜空港)	燃料供給停止	あり	確率を 1.0と設定	80時間以上
	給油タンク被害	大破	1770	80時間以上
域内空路A	要員移動	-	-	(最短0.25時間)
	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路A (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短1.5時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短1.5時間)
	津波被害	-	-	-
域内空路B	要員移動	-	-	(最短0.25時間)
	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	24時間
陸路B (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短1.5時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短1.5時間)
	津波被害	-	-	-
有田川河川敷第2	地盤被害	-	-	-
	津波被害	あり	確率を 0.5と設定	24時間
広川町民多目的広場	地盤被害	あり	400	24時間
	津波被害	あり	確率を 0.5と設定	24時間
湯浅城公園総合グラウンド	地盤被害	-	-	-
	津波被害	-	-	-

救命期の受援に対応した空港施設の耐震評価（健全性）に関する研究 ～被災県外からの DMAT 動線を対象に～
／小野正博・中島由貴・中村孝明・静間俊郎

表-7 御坊保健医療圏のフラジリティ情報

システム 構成要素	遅延要因	被害レベ ル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	所要時間
航空機燃料 施設（南紀白 浜空港）	燃料供給停止	あり	確率を 1.0と設定	80時間以上
	給油タンク 被害	大破	1770	80時間以上
域内空路C	要員移動	-	-	(最短0.15時間)
	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路C (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短1時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短1時間)
	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
御坊市防災ヘ リポート	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
南山スポーツ 公園	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-

表-8 田辺保健医療圏のフラジリティ情報

システム 構成要素	遅延要因	被害レベ ル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	所要時間
航空機燃料 施設（南紀白 浜空港）	燃料供給停止	あり	確率を 1.0と設定	80時間以上
	給油タンク 被害	大破	1770	80時間以上
域内空路D	要員移動	-	-	(最短0.05時間)
	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路D (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短0.2時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短0.2時間)
	津波被害	-	-	-
	要員移動	-	-	(最短0.1時間)
域内空路E	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路E (高規格道路)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短0.5時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短0.5時間)
	津波被害	-	-	-
	要員移動	-	-	-
陸路F (高規格道路以 外)	施設被害	軽微	確率を 0.15※と設定	12時間 (最短0.15時間)
		大破	確率を 0.05※と設定	80時間以上 (最短0.15時間)
	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
南和歌山医療 センターヘリ ポート	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
紀南病院ヘリ ポート	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
富田川生馬河 川敷	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
上富田町ス ポーツセン ター	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
すさみパーク	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
すさみ町上山 ススポーツ広場	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-

※南紀白浜空港から拠点・支援病院（白浜はまゆう病院）までの距離が近いので、施設被害の確率は高規格道路の値を使用した。

表-9 新宮保健医療圏のフラジリティ情報

システム 構成要素	遅延要因	被害レベ ル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	所要時間
航空機燃料 施設（南紀白 浜空港）	燃料供給停止	あり	確率を 1.0と設定	80時間以上
	給油タンク 被害	大破	1770	80時間以上
域内空路G	要員移動	-	-	(最短0.3時間)
	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路G (高規格道路以 外)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短2時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短2時間)
	津波被害	あり	確率を 1.0と設定	48時間
	要員移動	-	-	(最短0.25時間)
域内空路H	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路H (高規格道路以 外)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短1.8時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短1.8時間)
	津波被害	あり	確率を 1.0と設定	48時間
	要員移動	-	-	(最短0.2時間)
域内空路I	天候不良	あり	確率を 0.2と設定	8時間
陸路I (高規格道路以 外)	施設被害	軽微	確率を 0.15と設定	12時間 (最短1時間)
		大破	確率を 0.05と設定	80時間以上 (最短1時間)
	津波被害	あり	確率を 1.0と設定	48時間
	要員移動	-	-	-
新宮市立 医療センター ヘリポート	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
新宮市民 運動競技場	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
木戸浦グラウンド	津波被害	あり	400	24時間
	地盤被害	あり	確率を 0.5と設定	24時間
浦島グラウンド	津波被害	あり	400	24時間
	地盤被害	あり	確率を 0.5と設定	24時間
那智ヘリポート	津波被害	あり	確率を 0.5と設定	24時間
	地盤被害	-	-	-
くしもと町立 病院ヘリポート	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-
串本総合 運動公園	津波被害	-	-	-
	地盤被害	-	-	-

(1) 要員参集・燃料調達（南紀白浜空港）

南海トラフ巨大地震をはじめとする大地震が発生した際は、航空搬送拠点となる空港について使用可能か否かを判定する必要がある（中島ら（2013））。そのための要員が当該空港に到着し、自衛隊との機材等の調整といった情報収集、滑走路等の空港施設の点検を行い、使用可能と判定しない限り、行政は県外の DMAT の派遣を決定することができない。

指揮命令や情報収集、空港の滑走路等の点検を行う要員の参集については、空港近郊の市街に在住する県職員を対象とし、南紀白浜空港へのアクセス道路の施設被害に着目する。アクセス道路の施設被害が発生した場合に要員の参集が遅れるものとする。

空港近郊の市街から南紀白浜空港へのアクセス道路は、

高規格道路（阪和自動車道、紀勢自動車道等）を想定した。アクセス道路の遅延要因は、斜面崩壊、橋梁やトンネル等の被害が考えられるが、対象が広範となるため、ここでは、便宜的に施設被害の確率を 0.20、そのうち軽微 0.15、大破 0.05 とした。また、被害レベルに応じた所要時間（被害を受けた施設の復旧作業や情報収集、滑走路等の点検を含めた所要時間）は、軽微被害の場合 12 時間、大破被害の場合は 80 時間以上とし、施設被害がない場合でも要員が空港へ到着し、情報収集、点検を行い、空港使用の可否を判定するまでには 1 時間要するものとした。なお、要員そのものの被災、広域的な渋滞等による遅延については、本報では考慮しないこととする。

(2) 域外空路（南紀白浜空港）

航空搬送拠点となる空港が使用可能と判定されると、DMAT の派遣が決定され、県外の各空港から DMAT 要員が空路で航空搬送拠点空港に参集することになっている（中島ら（2013））。

県外から南紀白浜空港に至る空路については、主に自衛隊の固定翼機による輸送とし、遅延要因として、DMAT 要員の参集と機材搬入を考慮する。本報では、DMAT 参集と機材搬入の遅延の確率をそれぞれ 0.10 とし、遅延時には空港への到着まで 12 時間要するものとした。遅延がない場合でも、DMAT 参集については、中央防災会議幹事会（2007）の東南海・南海地震における捜索・救助、救急・救命に関する運用の目標時間から、5 時間は要するものとした。機材搬入については、東日本大震災での霞目飛行場における発災以降の飛行状況（中島ら（2013））を参照し、2 時間とした。また、発災時当日の天候の良否について、自衛隊機は悪天候でも着陸可能であると考え、考慮しないこととした。

(3) 電源機能（南紀白浜空港）

南紀白浜空港の電源機能は、外部供給（買電）の停止に加え、バックアップとしての自家発電設備が被害を受けた場合に喪失する。自家発電機は、空港内の電源局舎建屋内に設置されており、電源局舎の建屋、発電機に付帯する燃料タンクの被害を考慮した。発電機自体の耐震性は非常に高いと考えられるため、健全を仮定し、買電停止、電源局舎の建屋、燃料タンクの耐力中央値、復旧の所要時間は、小野ら（2015）を参照した。

(4) 管制機能（南紀白浜空港）

南紀白浜空港の管制機能は、管制塔の被災に加え、ガ

ンセットが使用できない場合に喪失する。管制塔の耐力中央値、復旧の所要時間は、小野ら（2015）を参照した。ここで、ガンセットは、非常時を想定した携行の機器であるので、被害はないものと仮定した。よって、管制機能は、地震時でも確実に確保できる。

(5) 滑走路・誘導路・エプロン・回転翼機駐機スペース（南紀白浜空港）

南紀白浜空港の滑走路・誘導路が使用不能となる要因として、滑走路・誘導路の地下を横断するアクセス道路のボックスカルバートの被害（滑走路・誘導路に段差が発生）と滑走路の高盛土部分の斜面崩壊被害を考慮した。高盛土部分の斜面被害の耐力中央値は、同部分の耐震性の検討結果（小阪ら（2002））を参照して設定した。ボックスカルバートの被害の耐力中央値については、斜面被害と同値とした。復旧の所要時間は、ともに軽微被害の場合は 24 時間、崩壊・倒壊被害の場合は 80 時間以上とした。回転翼機の駐機スペースは、エプロン、旧空港駐機スペース、グラスエリアの内、1 箇所でも使用可能であるならば、確保できるものとした。グラスエリアは、回転翼機の重量に耐えられる強度が求められることを踏まえ、大規模な降雨等により回転翼機が駐機する地盤の状況が極端に悪い場合（ぬかるみ等）に使用できないものとし、この確率を 0.01 とした。なお、ターミナルビル前面エプロン、ノース・航空基地エプロン及び旧空港駐機スペース（旧空港滑走路・誘導路・エプロン）は、南紀白浜空港の立地より、液状化等の大規模な地盤変状の可能性は殆どないと考えられ、本報では、被害がないものとした。よって、回転翼機駐機スペースは地震時でも確実に確保できる。

(6) 空港ターミナルビル（南紀白浜空港）

地震時、空港ターミナルビルは、SCU および現地対策本部となる可能性があるため、図-8 に示すシステムモデルには、同ビルを構成要素として組み込んでいる。しかしながら、SCU については、南紀白浜空港内の消防車庫や車庫が使用できない場合は、野外テントの設営で対応し、対策本部についても臨機応変に被害のない建物の設置で対応するものと考えられる。よって、本報では、SCU および現地対策本部の機能は確実に確保できるものとし、空港ターミナルビルの耐震性能は考慮しないこととする。表-5 では、空港ターミナルビルの建屋被害、設備被害は被害なし（一）としている。

(7) 航空機燃料施設（南紀白浜空港）

南紀白浜空港に参集した回転翼機は、空港とフォワードベースを行き来するための燃料の補給が必要となる。同空港には、ある程度の回転翼機燃料の備蓄があるが、現状では救命期の間、参集した回転翼機の多くを稼働させ続けることは難しい。

一方、南紀白浜空港は「南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画」において航空機用救助活動拠点に指定されており、国の緊急対策本部から要請を受けた資源エネルギー庁により燃料の重点供給が行われることとなっている。また、政府による「災害時石油供給連携計画」において重点施設に登録されており、優先的に燃料の供給が行われることとなっている。「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」では、地震後に大阪府からタンクローリーで運ぶこととなっている（和歌山県，2014）。

ただし、本報では、絶対はないことから最悪の事態を想定し、空港に参集した多数の回転翼機に十分な燃料を滞りなく供給し続けるためには、石油取扱事業者のタンクローリーからの定期的な供給が必要となり、石油取扱事業者の施設被害および県外の道路渋滞により救命期には定期的な供給が困難になると仮定した（付録 G）。また、県外からの航空機燃料の供給は考慮しないこととし、空港内の燃料備蓄量等も不明な部分が多いため、現状の条件として、備蓄量は 0 と仮定する。よって、地震時には救命期を含む 80 時間以上、南紀白浜空港内での回転翼機への燃料供給は行われない（燃料供給停止確率 1.0）ものと仮定する。また、回転翼機の救助活動を救命期の間維持できる程度の燃料備蓄があった場合（5.2 必要な対策と優先順位にて後述）は、給油タンクの被害を考慮する。給油タンクの耐力中央値、復旧の所要時間は、小野ら（2015）を参照した。

(8) 域内空路

域内空路 A~I は、回転翼機による南紀白浜空港から各拠点・支援病院（フォワードベースおよび拠点・支援病院近隣のヘリポート）への DMAT 要員の移動である。回転翼機は有視界飛行を原則としており、遅延要因として、回転翼機発着時の天候の良否を考慮し、視界不良及び強風等の天候不良の場合、DMAT 要員の各拠点・支援病院への到着が遅れるものとした。天候不良の確率は、ドクターヘリの運航実績（川崎医科大学付属病院（2015）、島根県健康福祉部医療政策課（2012）、聖隷三方原病院（2014）等）を参照して 0.20 とし、天候が好転するまでの時間も含めたフォワードベースおよび拠

点・支援病院近隣のヘリポートまでの所要時間を 8 時間とした。通常の DMAT 要員移動の所要時間は、回転翼機の巡航速度（約 200km/h と想定）を踏まえ、各域内空路別（域内空路 A~I）に設定している。なお、南紀白浜空港からフォワードベースおよび拠点・支援病院近隣のヘリポートまでの要員移動は、同空港に指揮命令、情報収集、および点検を行う要員が到着し、空港が使用可能と判定され（最短 1 時間）、機材および DMAT が到着した後（最短で 1+5=6 時間後）に開始される。

(9) 陸路

（域内）陸路 A~I は、緊急車両等による南紀白浜空港から各拠点・支援病院への DMAT 要員の道路を使用した移動である。有田、御坊、田辺保健医療圏（陸路 F（白浜はまゆう病院方面）を除く）の移動は、高規格道路（阪和自動車道、紀勢自動車道等）を想定した。田辺保健医療圏の陸路 F および新宮保健医療圏の移動は、高規格道路以外の道路の使用を想定した。遅延要因は、斜面崩壊、橋梁やトンネル等の被害が考えられるが、対象が広範となるため、(1)要員参集（アクセス道路）と同様、便宜的に設定した。道路施設被害の確率を 0.20、そのうち軽微被害 0.15、大破被害 0.05 とした。

被害レベルに応じた所要時間（被害を受けた施設の復旧作業を含めた所要時間）は、全保健医療圏について、軽微被害の場合 12 時間、大破被害の場合は 80 時間以上とした。通常の DMAT 要員移動の所要時間は、当該陸路の距離、法定速度等から、各域内陸路別（陸路 A~I）に設定している。また、陸路の津波による冠水被害（津波被害）は、国土交通省（2014）の資料を参照し、新宮保健医療圏の陸路 G,H,I について考慮した。なお、那智勝浦町立温泉病院については高台への移転が計画され、同病院までの陸路の津波被害の可能性も将来的にほぼ 0 となると考えられるが、本評価では考慮していない。津波被害の発生は、対象施設の標高と襲来する津波の高さにより判断でき、津波高さのばらつきを考慮する必要があるが、ここでは、陸路 G,H,I は津波による冠水が確実に発生する沿岸部を通ることから、津波の被害確率を 1.0 と設定した。瓦礫等の漂着物の撤去等、復旧に要する時間を含めた要員移動の所要時間は、南海トラフ地震に伴う津波浸水に関する和歌山県道路啓開協議会資料（2016）での主要拠点（市役所等）までの進出ルート啓開目標を参考に、48 時間と設定した（付録 J）。要員移動は、域内空路と同様、空港に要員が到着し、空港が使用可能と判定され（最短 1 時間）、機材および DMAT が到着した後（最短で 1+5=6 時間後）に開始される。

なお、本報は空路の評価に傾注しており、これら陸路のどの場所において被害を生じるかまで具体的に検討していない。道路の被害及び啓開の検討の進捗を踏まえた検討が必要である。

(10) 航空拠点（航空機ベース・フォワードベース）

回転翼機の離発着場である拠点・支援病院近隣のヘリポートやフォワードベースは、遅延要因として地盤被害（液状化に伴う大規模な地盤変状）と津波被害（津波による冠水）を考慮している。地盤被害については、グラウンドを除き十分な対策がとられているものとした。「和歌山県地震被害想定調査報告書（概要版）（平成 26 年 3 月）」等の液状化危険度分布図を参照し、広川町民多目的広場、木戸浦グランド、浦島グランドについては地盤被害を考慮した。各グランドの地盤被害の耐力中央値は 400cm/s^2 とし、被害時の復旧の所要時間は、24 時間とした。津波被害は、各拠点の立地や標高等を参照し、有田川河川敷第 2、広川町民多目的広場、木戸浦グランド、浦島グランド、那智ヘリポートの 5 か所について考慮した。被害の発生確率は、(9)陸路と同様に 0.5 とし、復旧の所要時間は、津波警報の解除までの時間を考慮し、24 時間と設定した。

5. 受援計画を踏まえた空港施設の耐震評価と対策

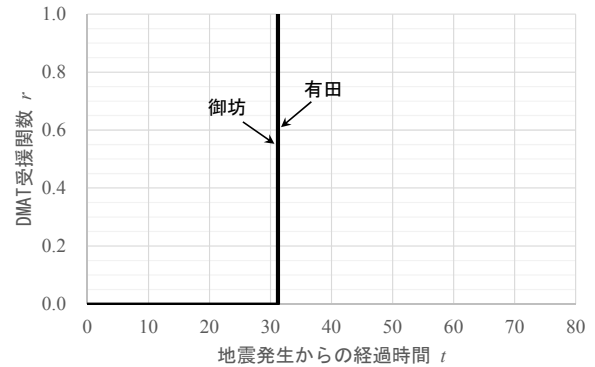
5.1 受援関数の評価

図-9 に南海トラフ全域の地震（ $M_w9.1$ ）時の各保健医療圏の受援関数を示す。(a)は有田、御坊保健医療圏、(b)は田辺、新宮保健医療圏の受援関数である。同図に示す関数の横軸は地震発生からの経過時間（平均値）、縦軸は受援率である。受援率は、県外から参集する DMAT の総チーム数（有田 9、御坊 10、田辺 10、新宮 8）に対する拠点・支援病院に到着する DMAT チーム数の比としている。現状 DMAT は、南紀白浜空港の回転翼機の燃料不足のため（4.4 システム構成要素の遅延要因とフラジリティ情報 (7)航空機燃料施設を参照）、空路により各保健医療圏の拠点・支援病院へと移動することができない。よって、受援経路は陸路のみである。

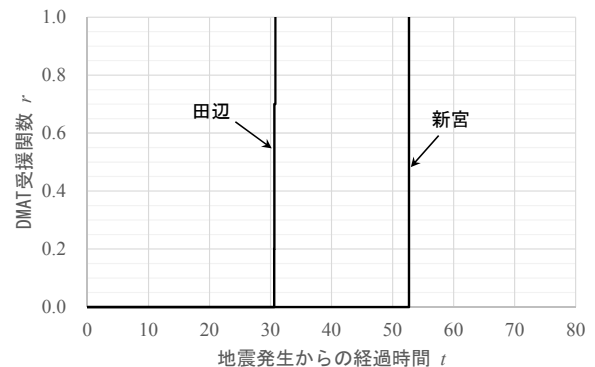
受援関数は、DMAT の各拠点・支援病院への経路が別であれば、ステップ状となる（付録 E）。ただし、各経路の耐震性（健全性）に差がない場合、各拠点・支援病院への到着時間（地震発生からの経過時間）の平均値も同じような値となり、関数は一直線に近くなる。

図-9(a),(b)より、各保健医療圏の受援関数は一直線に近い、もしくは一直線となっている。これは、各経路に

ついて、DMAT の受援に共通する空港施設の要素が多く、これら要素の耐震性の影響が、経路の耐震性に対して大きいことが理由である。



(a) 有田と御坊保健医療圏



(b) 田辺と新宮保健医療圏

図-9 各保健医療圏の DMAT 受援関数

有田保健医療圏には、県外から DMAT が 9 チーム参集する。図-9(a)より、地震発生から 31 時間後に受援率が 0 から 1.0 となっている。このことから、31 時間後に 5 チーム（受援率 $0.556 (5 \div 9)$ ）が有田市立病院に、4 チーム（受援率 $0.444 (4 \div 9)$ ）が済生会有田病院に到着することが分かる。

御坊保健医療圏は、参集する DMAT チーム総数は 10 チームである。近接する日高総合、北出、和歌山の 3 病院への DMAT の受援経路は同じであり、受援関数は 3 病院に到着するかしないかの一直線となる。図-9(a)より、DMAT 10 チーム（受援率 $1.0 (10 \div 10)$ ）は、地震発生から 31 時間後に各病院に到着する。

田辺保健医療圏に参集する DMAT チームの総数は 10 チームである。図-9(b)より、地震発生から 31 時間後に全 10 チームが同医療圏の各拠点・支援病院に到着する。

なお、南紀白浜空港より比較的遠方に位置する国保ささみ病院への 3 チーム（受援率 0.3 (3÷10)）は、南和歌山医療センターおよび紀南病院、白浜はまゆう病院への 7 チーム（受援率 0.7 (7÷10)）と比べ、到着が若干遅れる。

新宮保健医療圏については、参集する DMAT チーム数は 8 チームである。南紀白浜空港からの空路が使えないことに加え、津波による冠水が広範囲で発生する沿岸部を通らなければならない陸路も 48 時間は不通となり（表-9 参照）、DMAT の受援経路は、長時間遮断される。よって、同医療圏における拠点病院への DMAT の到着時間は、他の 3 医療圏（有田、御坊、田辺）と比べ、大幅に遅れる。図-9(b)より、地震発生から 53 時間後にくしもと町立病院に 4 チーム（受援率 0.5 (4÷8)）、那智勝浦町立温泉病院に 2 チーム（受援率 0.25 (2÷8)）、新宮市立医療センターに 2 チーム（受援率 0.25 (2÷8)）到着する。

5.2 必要な対策と優先順位

図-6、図-7、図-8 に示したシステムモデルにおいて、ボトルネックとなる遅延要因を把握するため、南海トラフ全域（Mw9.1）地震発生から 24 時間後時点の構成要素の不健全確率、影響度、ボトルネック指標（BIP；Bottleneck Index Probability）を表-10 に示す。

24 時間後時点の構成要素の不健全確率は、防災後 24 時間後時点で、まだ復旧過程の段階にあり、元の状態に至っていない確率であり、システムモデルにおいて脆弱な構成要素（施設等）を表す。

影響度は、各要素を移動または活動する DMAT チーム数を、県外から動員される DMAT チーム総数（37 チーム）で基準化した係数であり、受援量への影響度といえる。例えば、南紀白浜空港では 37 チームが移動することから 1.0 となる。その他は、図-7 に記されたチーム数から求められる。

BIP は、24 時間後時点の構成要素の不健全確率と影響度を乗じた指標であり、脆弱性と影響度の 2 つの視点、すなわちリスクの視点から、対策の優先順位を把握することができる。なお、ボトルネック指標（BIP）、不健全確率については、付録 H、付録 I にて詳述する。

表-10 の BIP より、南紀白浜空港の滑走路・誘導路のボックスカルバートの被害、ならびに斜面被害の値が最も高い。不健全確率はともに 0.290 であるが、参集への影響度が 1.0 となっており、被災した場合、DMAT 全 39 チームが各保健医療圏の拠点・支援病院に参集することができない。次いで、上位 3 番目は、くしもと町立

病院方面の DMAT 受援経路被害である。受援経路には冗長性があるが、空路は回転翼機の燃料不足、陸路は津波被害のため少なくとも 48 時間は使用できないことから、病院方面の受援経路の不健全確率は 1.0 となっている。この不健全確率が大きいと、0.108 (4÷37) と影響度が低いにもかかわらず、BIP は上位となる。BIP 上位 4 番目は、南紀白浜空港の電源機能被害の値となっている。滑走路・誘導路と同様に DMAT 参集への影響度は 1.0 であるが、電源機能（買電、自家発電）は、図-8 のシステムモデルを見ても分かる通り、滑走路・誘導路（斜面、ボックスカルバート）と比べて冗長性がある。よって、不健全確率（買電、自家発電がともに喪失する確率）が 0.094 に留まっており、BIP は、滑走路・誘導路のボックスカルバートの被害、斜面被害の値より小さい。BIP 上位 5 番目は、那智勝浦町立温泉病院、新宮市立医療センター方面の DMAT 受援経路被害である。くしもと町立病院方面の DMAT 受援経路と同様、48 時間は空路、陸路とも遮断されるため、影響度の違いにより、くしもと町立病院方面の DMAT 受援経路被害の値よりは低いものの全体としては上位である。BIP 上位 7 番目の南紀白浜空港の要員参集アクセス道路施設被害については、不健全確率は 0.05 と高くはないが、被災した場合には DMAT 参集不能（影響度 1.0）となるため、各要因の中でも上位となっている。

表-10 24 時間後システム要素不健全確率と BIP

施設/機能	影響度	24時間後 不健全 確率	BIP
南紀白浜空港 滑走路・誘導路 ボックスカルバート被害	1.000	0.290	0.290
南紀白浜空港 滑走路・誘導路 斜面被害	1.000	0.290	0.290
くしもと町立病院方面 DMAT受援経路被害	0.108	1.000	0.108
南紀白浜空港 電源機能被害	1.000	0.094	0.094
那智勝浦町立温泉病院方面 DMAT受援経路被害	0.054	1.000	0.054
新宮市立医療センター方面 DMAT受援経路被害	0.054	1.000	0.054
南紀白浜空港 要員参集アクセス道路施設被害	1.000	0.050	0.050
国保日高総合・北出・和歌山病院方面 DMAT受援経路被害	0.270	0.050	0.014
有田市立病院方面 DMAT受援経路被害	0.135	0.050	0.007
南和歌山医療センター・紀南病院方面 DMAT受援経路被害	0.135	0.050	0.007
済生会有田病院方面 DMAT受援経路被害	0.108	0.050	0.005
国保ささみ病院方面 DMAT受援経路被害	0.081	0.050	0.004
白浜はまゆう病院方面 DMAT受援経路被害	0.054	0.050	0.003

ここで、南紀白浜空港関係に限って検討する場合、対策を要する施設は、滑走路・誘導路のボックスカルバー

トならびに斜面の耐震化、さらに南紀白浜空港の電源機能の維持策、回転翼機の燃料備蓄量の増強等が考えられる。

対策は、24 時間後における BIP が上位の遅延要因である、南紀白浜空港の滑走路・誘導路および電源機能、くしもと町立病院を含めた新宮保健医療圏の拠点・支援病院方面の DMAT 受援経路に関して行うことを仮定する。耐震化策として、滑走路・誘導路については、ボックスカルバートおよび滑走路盛土部分の斜面、電源機能については、電源局舎建屋の耐震補強を考える。新宮保健医療圏の拠点・支援病院方面の DMAT 受援経路については、回転翼機の救助活動を 3 日間維持できる程度の燃料備蓄を行うものとする。耐震補強に関する耐力中央値は、表-11 に示すように現状の値の約 50%増とする。燃料備蓄については、燃料供給停止の確率を 1.0 から 0 とする。

表-11 対策後のフラジリティ情報

システム 構成要素		遅延要因	被害レベ ル・状態	耐力中央値 (cm/s^2)	
				現状	対策後
南紀白 浜空港	自家発 (電源局舎) 滑走路・誘 導路	建屋被害	中破	920	1380
		ボックスカル バート被害	軽微	600	900
			倒壊	1200	1800
			斜面被害	軽微	600
		崩壊	1200	1800	
航空機燃料施設 (南紀白浜空港)		燃料供給停止	あり	確率を 1.0と設定	確率を 0と設定

5.3 対策の効果

対策後の各保健医療圏の DMAT 受援関数を図-10(a)～(d)に破線で示す。同図では、比較のため、現状の動員関数を実線で併記している。

図-10(a)より、有田保健医療圏では、DMAT の有田市立病院 (5 チーム) および済生会有田病院 (4 チーム) への到着は、地震発生から 20 時間後と、現状より 11 時間程度短縮されている。

図-10(b)より、御坊保健医療圏では、DMAT の日高総合、北出、和歌山の 3 病院 (10 チーム) への到着は、現状より 12 時間程度短縮され、地震発生から 19 時間後である。

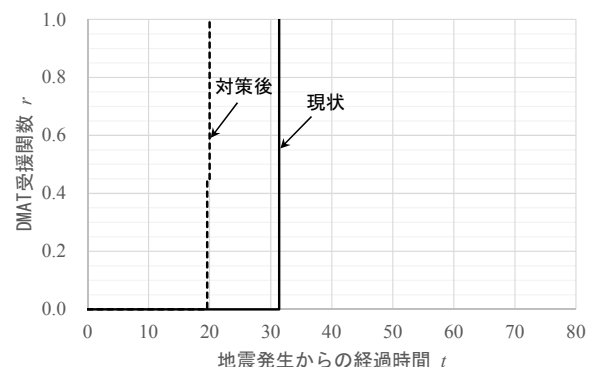
図-10(c)より、田辺保健医療圏では、DMAT の白浜はまゆう病院 (2 チーム)、南和歌山医療センターおよび紀南病院 (5 チーム)、国保すさみ病院 (3 チーム) への到着は、現状より 12 時間程度短縮され、地震発生から 19 時間後である。

図-10(d)より、新宮保健医療圏では、DMAT のくしもと町立病院 (4 チーム)、那智勝浦町立温泉病院 (2 チーム)

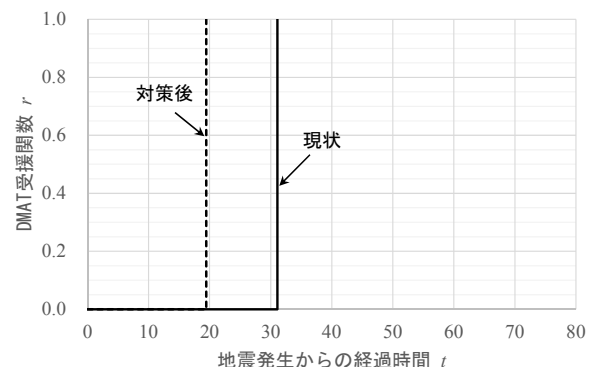
ム)、新宮市立医療センター (2 チーム) への到着が 25 時間後となっている。同医療圏では、地震発生から 48 時間は、DMAT の受援経路が遮断される。対策によって空路が使用可能となり、代替経路ができるため、DMAT の到着時間は、現状の 53 時間から大幅に短縮される。

南紀白浜空港の滑走路・誘導路および電源機能 (関連施設) の耐震性、DMAT の受援経路の冗長性が大きく向上したことにより、各拠点病院に DMAT が参集する時間は大幅に短縮されることが分かった。特に DMAT の受援経路が陸路、空路ともに遮断され孤立する可能性の高い新宮保健医療圏では顕著である。

このように、対策による改善効果を DMAT の拠点・支援病院への到着時間の短縮という具体的な数値で示すことは、空港施設の耐震化事業の必要性、優先順位の判断に合理的な根拠を与え、説明性を高めるのに大きく貢献すると考えられ、本提案手法の有用性を示すものである。

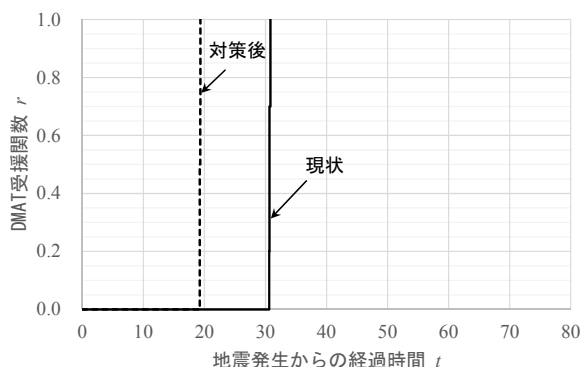


(a) 有田保健医療圏

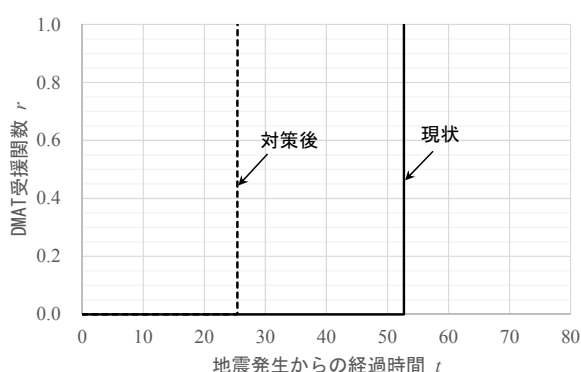


(b) 御坊保健医療圏

図-10 各保健医療圏の DMAT 受援関数から見た対策の効果 (その 1)



(c) 田辺保健医療圏



(d) 新宮保健医療圏

図-10 各保健医療圏の DMAT 受援関数から見た対策の効果（その2）

6. まとめ

本報は、救命期における応援機関の活動拠点としての空港の耐震性（健全性）の評価方法の整備を目的としている。成果としては、①復旧曲線を援用した受援能力の評価方法を整備するとともに、②和歌山県を対象として、航空拠点に陸路を加えた DMAT 動線のシステムモデルを構築し、③南海トラフの巨大地震による同県の受援計画を支える DMAT 動線の健全性を評価した。そして、④対策の優先順位を把握するための指標から弱点の洗い出しを行い、耐震化事業による改善効果について示した。

①については以下のようにまとめられる。

- ・ 県外からの応援の 1 つである DMAT の動線に着目し、動線途上の拠点である空港（航空機ベース）及びフォワードベース、陸路等を有機的に連結したシステムと捉えた動線全体の耐震性（健全性）、すなわち受援能力の評価方法を示した。

②については以下のようにまとめられる。

- ・ 和歌山県南域を対象とし、有田、御坊、田辺、新宮の 4 保健医療圏毎に、県外からの DMAT が拠点・支援病院に進出する動線の受援に関するシステムモデルを構築した。
- ・ システムモデル構築にあたり、各保健医療圏について、DMAT の必要チーム数を算出した。各保健医療圏で応援を必要とする DMAT チーム数は、救命期における累積死者数に基づき評価し、県外からは有田 9、御坊 10、田辺 10、新宮 8 チームが必要となる。

③については以下のようにまとめられる。

- ・ 各保健医療圏（有田、御坊、田辺、新宮）について、南海トラフ巨大地震（Mw9.1）時の地震発生からの経過時間（平均値）に対する受援率（県外から参集する DMAT 総チーム数に対する拠点・支援病院に到着する DMAT チーム数の比）を示す受援関数を求め、同地震発生から救命期を含む 80 時間後までの DMAT による受援量の推移を評価した。
- ・ 現状、DMAT は有田、御坊、田辺の医療圏では 31 時間程度（平均）で拠点・支援病院に到着する。新宮保健医療圏は、陸路および空路が 48 時間は不通となるため、拠点・支援病院への到着は、地震発生から約 53 時間（平均）後とかなり遅くなる。

④については以下のようにまとめられる。

- ・ 発災から 24 時間後時点のシステム構成要素の不健全確率と各要素を移動または活動する DMAT チーム数を動員される DMAT チーム総数で基準化した影響度の積で表される BIP（Bottleneck Index Probability）を指標として対策の優先度を比較した。
- ・ BIP より南紀白浜空港の滑走路・誘導路のボックスカルバート、斜面の被害、電源機能（買電あるいは電源局舎自家発電）、要員参集アクセス道路の被害、新宮医療圏の DMAT 受援経路（南紀白浜空港での燃料供給とフォワードベースあるいは拠点・支援病院までの陸路）が DMAT の受援に関してボトルネックとなっていることが分かった。
- ・ 対策により南紀白浜空港の滑走路・誘導路および電源機能（関連施設）の耐震性、DMAT の受援経路の冗長性が大きく向上し、各拠点病院に DMAT が参集する時間は大幅に短縮される。特

に DMAT の受援経路が陸路，空路ともに遮断され孤立する新宮保健医療圏では顕著である。

本報では，救命期における DMAT の動線に関連する空港施設群をシステムとして捉え，これらの受援能力を評価する手法の提案に軸足を置いており，得られた結果は，様々な仮定を含んだ初歩的な試算である。しかしながら，救命期の受援という視点から，空港施設の耐震化事業の必要性や優先順位を検討する際に，本報で提案する評価手法は，有用であると考ええる。

なお，本報告書は，国土交通省国土技術政策総合研究所，株式会社篠塚研究所の２者で実施した共同研究の成果を取りまとめたものである。

謝辞

本研究を進めるに当たり，和歌山県県土整備部港湾空港局港湾空港課，総務部危機管理局災害対策課，福祉保健部健康局医務課，南紀白浜空港管理事務所，和歌山県防災航空隊，関西大学羽原敬二教授，神戸大学飯塚敦教授，学校法人ヒラタ学園航空事業本部の関係各位には，貴重な資料の提供とご助言をいただきました。ご協力いただきました関係各位に対しここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 鶴飼卓（1995）：阪神・淡路大震災の経験から新たな災害医療システムの構築へ，救急医療ジャーナル 14
- 小野正博，中島由貴，中村孝明，静間俊郎（2015）：空港の性能維持/早期復旧に関する地震リスクマネジメント，国土技術政策総合研究所資料第 830 号，P.41.
- 川崎医科大学（2015）：平成 26 年度ドクターヘリ運航実績報告書
https://www.kawasaki-m.ac.jp/hospital/koudokyuumei/document/doctorheri_h26.pdf
- 厚生労働省：平成 27 年度行政事業レビューシート（厚生労働省）事業番号 0008（平成 26 年度で 1426 チーム）
- 厚生労働省医政局指導課（2013）：日本 DMAT 活動要領，医政指発 0904 第 1 号，P.19
- 小井土雄一，近藤久禎，市原正行，小早川義貴，辺見弘（2011）：東日本大震災における DMAT 活動と今後の研究の方向性，保健医療科学 Vol.60, No.6, pp.495－501.
- 国土交通省（2014）：近畿自動車道紀勢線津波浸水予想

区域，平成 26 年 8 月

国立病院機構（2011）：東日本大震災における活動記録，P.259

www.nho-dmc.jp/disaster/pdf/higasinihon-2.pdf

小阪陽克，高橋正昭，吉田渉，下村幸男，坂本隆広（2002）：南紀白浜空港高盛大土対策工の概要と対策効果について，こうえいフォーラム第 10 号，pp.97－104.

小谷稔，飯塚敦，河井克之（2015）：急性期災害医療における DMAT 配置モデルに関する考察，土木学会論文集 F6（安全問題），Vol.71, No.1, pp.32-45.

近藤伸也（2008）：東南海・南海地震における孤立集落支援プログラムの検討，

http://www.dri.ne.jp/wordpress/wp-content/uploads/ppt_06syuuraku.pdf, P.29.

静間俊郎，中村孝明（2009）：復旧曲線の理論的考察と BCP への適用，土木学会第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム論文報告集，pp.231-236

島根県健康福祉部医療政策課（2012）：平成 23 年度ドクターヘリ運航実績報告書（平成 23 年 6 月～平成 24 年 3 月）

http://www.pref.shimane.lg.jp/medical/kenko/iryo/shimano_iryoshimane_doctor_heli.data/23houkokusyo.pdf

聖隷三方原病院（2016）：平成 25 年度ヘリ運航報告
<http://www.seirei.or.jp/mikatahara/outline/upimg/2016060617331217220.pdf>

中央防災会議（2006）：東南海・南海地震応急対策活動要領，P.47，平成 18 年 4 月。

中央防災会議幹事会（2007）：「東南海・南海地震応急対策活動要領」に基づく具体的な活動内容に係る計画，P.128，平成 19 年 3 月 20 日。

中央防災会議幹事会（2015）：南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画，P.113，平成 27 年 3 月 20 日

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：津波被害の初期段階における代替空港に関する検討，国土技術政策総合研究所資料第 718 号，P.23.

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：空港の災害リスクの定量的評価手法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 756 号，P.50

中島由貴，中村孝明，中神啓介，西崎英治（2014）：空港の確率論的リスク評価における財務影響分析に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 783 号，P.37

中島由貴，中村孝明，望月智也（2015）：公共施設運営権

設定下の地震リスクマネジメントに関する研究，－
空港を例として－，国土技術政策総合研究所研究報
告，第 55 号，P.34

南海トラフ地震に伴う津波浸水に関する和歌山県道路啓
開協議会（2016）：救命・救助を支えるネットワー
ク計画の策定，pp.8－9.

日本集団災害医学会（2015）：DMAT 標準テキスト，
P.368

松坂市民病院（2012）：DMAT 出動記，

[http://www.city.matsusaka.mie.jp/www/contents/1000500
164000/index.html](http://www.city.matsusaka.mie.jp/www/contents/1000500164000/index.html)

和歌山県（2013）：和歌山県緊急消防援助隊動員計画，
P.92，平成 25 年 3 月．

和歌山県（2013）：和歌山県地域医療再生計画(平成 24
年度補正予算)，P.32，平成 25 年 8 月．

和歌山県（2013）：県民の友 12 月号 No.904 県政最前
線 繋がる広がる災害医療，

[http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/000200/kenmin/we
b/201312/index.html](http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/000200/kenmin/web/201312/index.html)

和歌山県（2014）：和歌山県実動部隊航空部隊受援計画，
P.54.

和歌山県（2014）：平成 26 年 和歌山県の地震被害想定
について，

[http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/H26zishin
higaisoutei.html](http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/H26zishin_higaisoutei.html)

和歌山県防災企画課（2014）

[http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/documents/
higai.pdf](http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/documents/higai.pdf)

和歌山県（2016）：和歌山県広域受援計画，P.4.，P.17－
19.，P.21－28.

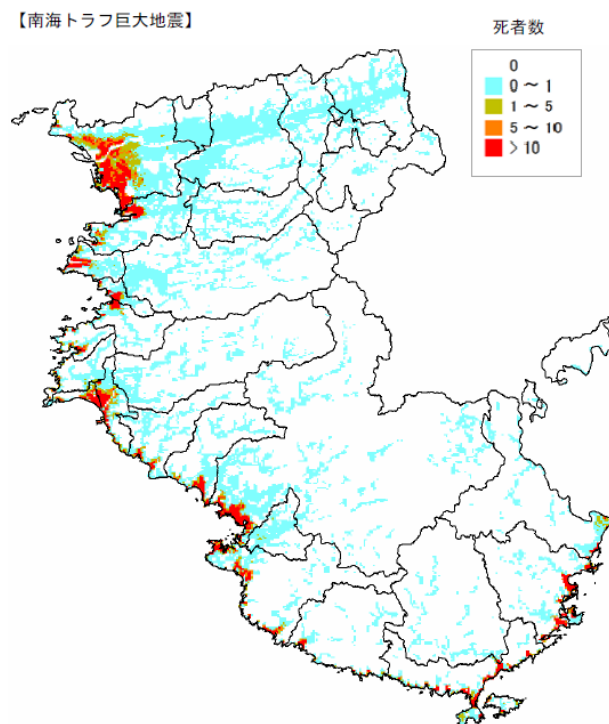
付録

付録 A 用語の定義

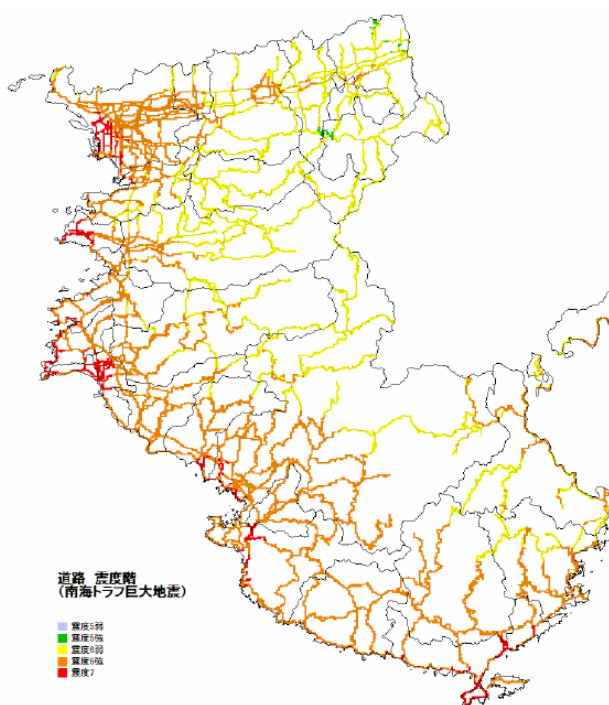
付録表-1 用語の定義

用語	内容
保険医療圏	地域の医療需要に応じて包括的に医療を提供するために、医療資源の適正な配置を図ることを目的とした地域単位。
災害拠点病院（総合）	県内全域を対象に災害時の医療活動を統括する役割を担う病院。
災害拠点病院（地域）	主に保健医療圏内における災害時の医療活動の中心的な役割を担う病院。
災害支援病院	保険医療圏内において、災害拠点病院を支援し補完する機能を担う病院。
航空搬送拠点	広域医療搬送を行う大型回転翼機又は固定翼機が離発着可能な拠点であり、広域搬送拠点臨時医療施設（SCU：Staging Care Unit）が設置可能なもの。
航空機ベース （ACB; Aircraft Base）	災害の終始を通じて、実働部隊の固定翼航空機および回転翼機の運用に関する指揮を実施し、かつ駐機、整備、給油、装備が可能な拠点および航空部隊の進出拠点で、基本的には国が指定する広域防災拠点の南紀白浜空港である。
フォワードベース （FB; Forward Base）	被災地近傍の飛行場外離着陸場等で、離着陸、給油、人員の乗降機および装備/物資等の積み降ろしが可能な拠点をいい、その候補地は和歌山県内で 65 箇所ある。
ランディングポイント	航空機ベースおよびフォワードベース以外で、災害救助活動のための離着陸を行う地点をいい、和歌山県内で 261 箇所が指定されている。
災害医療コーディネーター	災害時の医療活動の総括・調整する役割を担う医師。

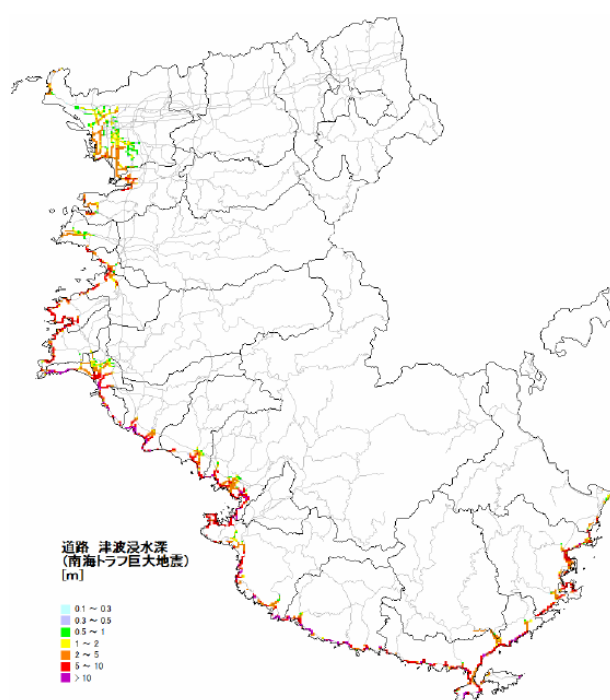
付録 B 和歌山県の被害想定結果



付録図-1 南海トラフ巨大地震による死者数の予測図
(条件：冬の18時，風速8m/秒，津波での避難が最も遅いケース)



付録図-2 和歌山県内の道路と震度の関係
(南海トラフ巨大地震)

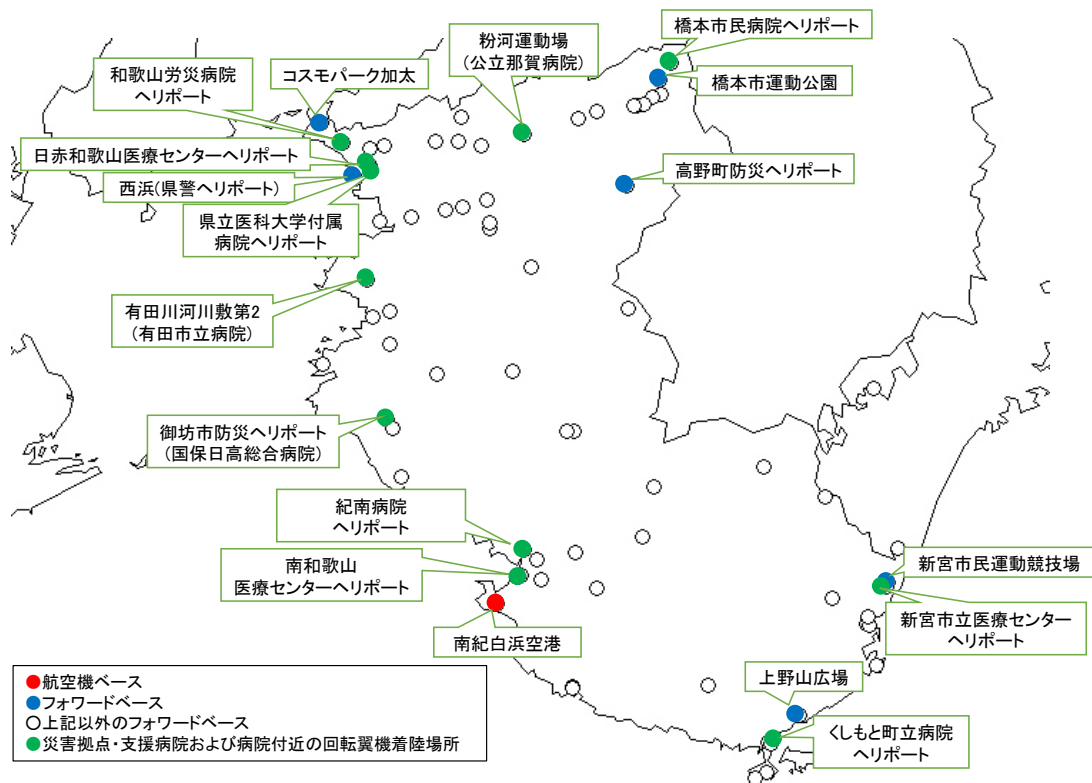


付録図-3 道路と津波による浸水深の関係
(南海トラフ巨大地震)

付録C 和歌山県における航空に関する受援計画

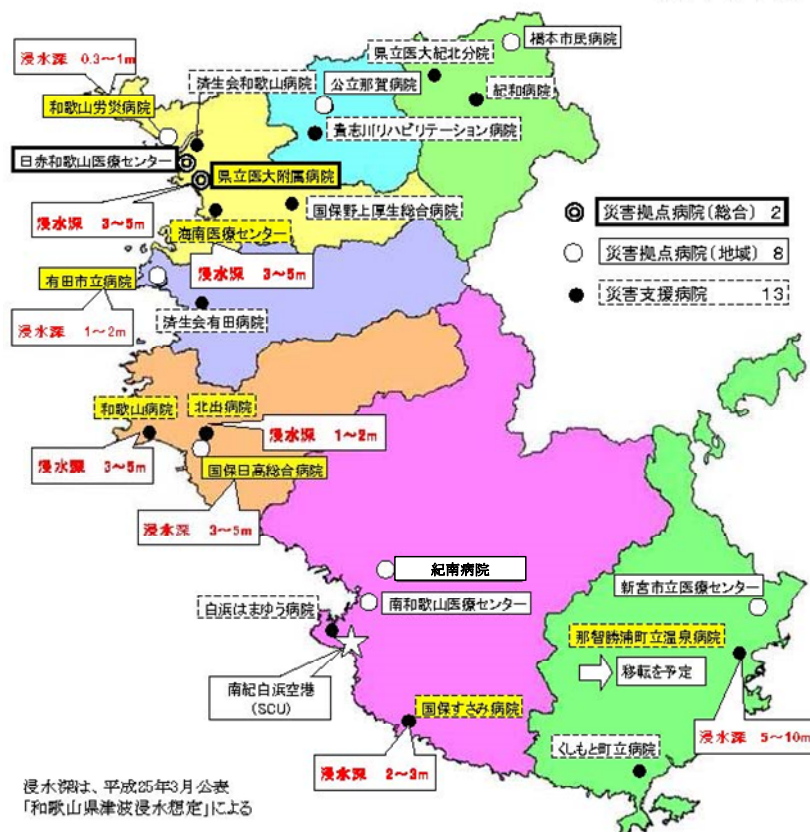


付録図-4 国の応援活動及び広域防災拠点における受援体制・支援活動に関するタイムライン（イメージ）
（和歌山県広域受援計画）



付録図-5 災害時の動員活動において要所となる拠点の位置図

平成25年3月19日現在



付録図-6 災害拠点病院・災害支援病院の位置図及び津波浸水想定結果（和歌山県地域医療再生計画）

付録 D DMAT の必要量の評価

D.1 DMAT による救命者数の評価

災害拠点病院を中心とした任意の医療圏を想起する。医療圏では、傷病者は指定された災害拠点病院等に運び込まれるが、被災現場等で発見される傷病者もいる。これら傷病者は医療スタッフによって何らかの処置を受けるが、医療スタッフの不足により処置を受けられない傷病者が発生する。ここでは災害拠点病院等に運び込まれるか、あるいは被災現場等で発見される傷病者を要治療者、処置を受けられない傷病者を未治療者と呼ぶ。発災から t 時間後の未治療者の累積数 u_t は小谷ら(2015)を参照し、以下のように表すことができる。

$$u_t = (u_{t-\Delta t} + a_t) \cdot h(t) - m_t \quad (D.1)$$

ここに、 Δt は微小時間、 $u_{t-\Delta t}$ は発災から時間 $t - \Delta t$ までの累積未治療者数、 a_t は時刻 $t - \Delta t$ から t の間に、新たに発見または災害拠点病院等に運び込まれる要治療者数である。 $h(t)$ は発災から t 時間後の生存率、 m_t は時刻 $t - \Delta t$ から t の間に病院の医療スタッフを含めた DMAT によって処置される要治療者数である。なお、 u_t が負の場合は要治療者の数より処置能力が勝った状態であるため、この場合は $u=0$ とする。

(D.1)式第1項は、時刻 t での生存者を表すことになり、これより時刻 $t - \Delta t$ から t の間の死者数 d_t は以下となる。

$$d_t = (u_{t-\Delta t} + a_t) \cdot (1 - h(t)) \quad (D.2)$$

生存率は、鶴飼(1995)による発災からの生存率の推移を小野ら（2015）が回帰した以下の式を用いる。

$$h(t) = \exp(-0.00044t^2) \quad (D.3)$$

一方、要治療者は発災からの時間と共に増加する。この時間的推移を、小谷ら(2015)は以下のような直線回帰式によって表記している。

$$g(t) = 0.0104t + 0.1624 \quad (D.4)$$

(D.4)式は、発災から 80.5 時間後には大半の要治療者が運び込まれるか、あるいは発見されるとし、その総数を 1.0 に基準化している。従って、要治療者の総数を U と置くと、発災直後に運び込まれるか、あるいは発見される要治療者 ($t=0$ での未治療者と同意) は以下となる。

$$u_0 = 0.1624 \cdot U \quad (D.5)$$

なお、 $t=0$ は発災時間ではなく、要治療者数の第一報を入手した時点とする。また、微小時間 Δt の間に新たに発見または災害拠点病院等に運び込まれる要治療者数 a_t は時間によらず一定で、以下のようになる。

$$a_t = 0.0104 \cdot U \cdot \Delta t \quad (D.6)$$

(D.5),(D.6)式ならびに(D.3)式を(D.1)式に適用し、逐次計算を行うことで、発災からの時間 t における未治療者を評価できる。また(D.2)式を同時に計算すれば、時間 t での死者数が逐次求められる。死者の総数 D は以下のように求められる。

$$D = \sum_{i=0}^{T/\Delta t} d_i \quad (D.7)$$

ここに、 T は DMAT の活動時間であるが、発災急性期の救命救急を目的とする DMAT の活動時間は、発災から概ね 3 日前後である。また、鶴飼(1995)によれば、この時間は被災した生存者が生きられる限界の時間でもある。言い換えれば、これ以降は救命救急を目的とした DMAT の活動範囲外となる。

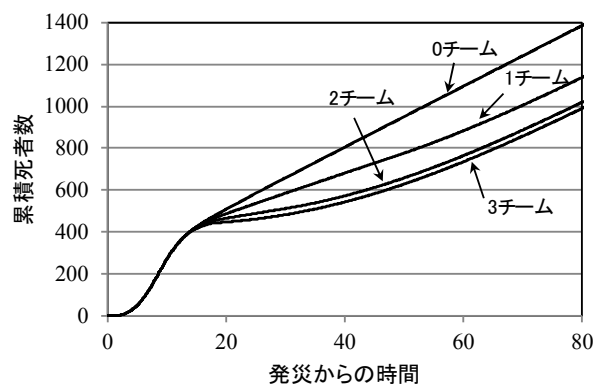
D.2 必要 DMAT チーム数の評価

本報で対象とする和歌山県南部の 4 保健医療圏（有田、御坊、田辺、新宮）に必要な DMAT チーム数の評価方法を具体的に説明する。各医療圏における要治療者の総数を表-1 より、 $U=1,393$ （有田）、 $1,789$ （御坊）、 $2,439$ （田辺）、 $1,157$ （新宮）、微小時間 Δt を 0.1 時間、DMAT 1 チームが救命治療できる人数を 1 時間当たり 5 名とする。また、DMAT は被災地に遅延することなく急行でき、即時に救命活動ができる理想的な状況を仮定する。なお、DMAT 1 チームが救命治療できる人数について、小谷（2015）らは 1 時間あたり 10 名としているが、これは、DMAT が携帯する資機材で対応でき

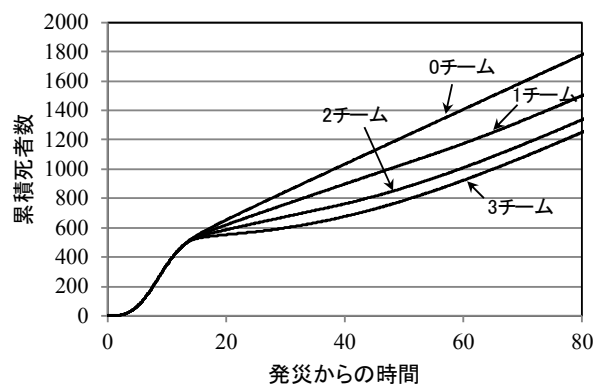
る人数を参照したものであり、救命治療を行う DMAT の交代を考慮していない。国立病院機構災害医療センター（2011）の東日本大震災時、DMAT 標準テキスト（日本集団災害医学会（2015））の新潟県中越沖地震時の DMAT 活動記録、松坂市民病院から出動した DMAT 1 隊の 3 月 11 日の出発から 13 日の帰路までの実記録（松坂市民病院（2012））等から、拠点病院における DMAT の救命活動は 1 日 2～3 交代で行われていたと推察される。また、DMAT 活動要領には、DMAT 1 隊あたりの活動期間は概ね 48 時間以内（移動時間を除く）を基本とするとの記述もある。そこで、本報では、DMAT の実際の稼働可能な時間を考慮し、DMAT 1 チームが救命治療できる人数は、1 時間あたり 5 人という設定としている。

発災直後に運び込まれるか、あるいは発見される要治療者数は、(D.5)式より有田保健医療圏は $u_0=226.2$ 名、御坊保健医療圏は $u_0=290.5$ 名、田辺保健医療圏は $u_0=396.1$ 名、新宮保健医療圏は $u_0=187.9$ 名、1 時間当りに発見または災害拠点病院等に運び込まれる要治療者数は、(D.6)式より有田保健医療圏は $a_t=14.5$ 名、御坊保健医療圏は $a_t=18.6$ 名、田辺保健医療圏は $a_t=25.4$ 名、新宮保健医療圏は $a_t=12.0$ 名である。これらを(D.1)式に適用し、併せて(D.2)式による死者数を求める。

付録図-7(a)～(d)に各保健医療圏の DMAT 動員数による累積死者数の推移を示す。横軸は発災からの時間、縦軸は累積死者数である。0 チーム（派遣なし）では全ての傷病者は未治療となり、全てが死亡に至る。動員数が増せば未治療者は減り、死者数は減少する。しかし、減少傾向は、動員するチーム数と比例するものではなく一定値に漸近する。付録図-8 は各保健医療圏の DMAT 動員数と最悪の死者数の関係を示している。横軸はチーム数、縦軸は死者数である。

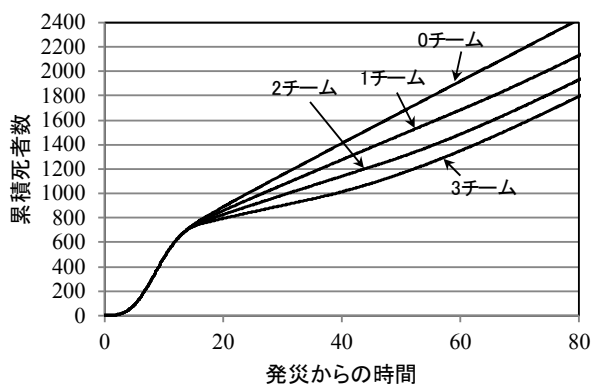


(a) 有田保健医療圏

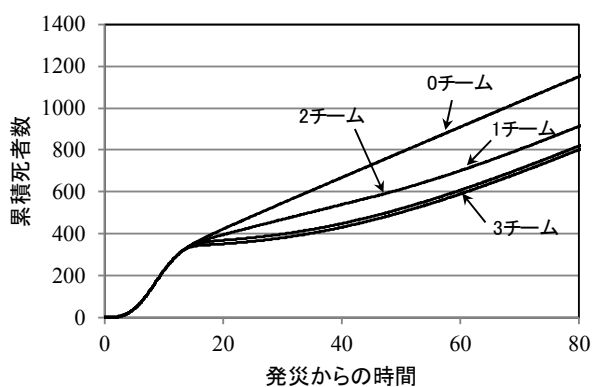


(b) 御坊保健医療圏

付録図-7 DMAT チーム数による累積死者数の推移（その 1）

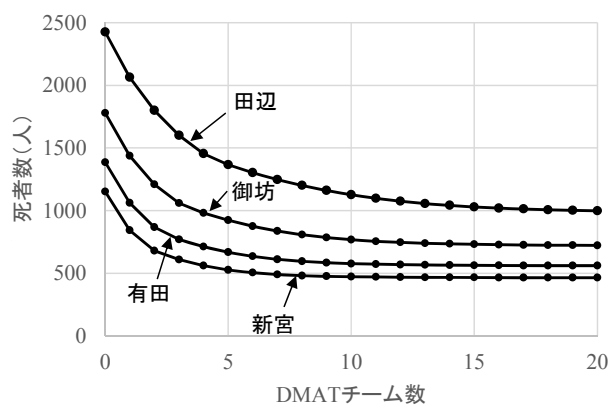


(c) 田辺保健医療圏



(d) 新宮保健医療圏

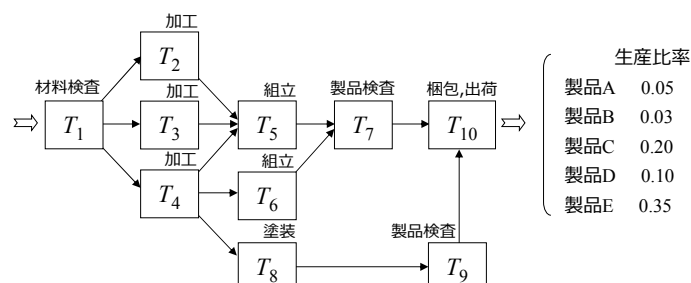
付録図-7 DMAT チーム数による累積死者数の推移（その2）



付録図-8 DMAT チーム数と死者数

付録 E システムの機能別分解と復旧曲線

システムを機能別に分解し、復旧曲線を評価する方法について、製造業の生産工程を例に説明する。付録図-9 は生産工程をシステムとしてモデル化した例である。この工場は 5 種（A～E）の製品を生産しており、それぞれの生産比率（売り上げ比率）は 0.05～0.35 である。この生産システムの始点が入荷した材料の検査であり、要素 T_1 、終点は梱包出荷であり要素 T_{10} である。



付録図-9 製品製造のシステムモデルの例

各要素の復旧期間の確率関数を付録表-2 にまとめて示す。この表は要素の損傷確率と損傷した場合の復旧期間を表している。例えば 1 列目（要素 T_1 ）は、健全な確率は 0.8、復旧に 10 日程度要する損傷の発生確率は 0.15、復旧に 20 日程度要する損傷の発生確率は 0.05 等である。損傷確率は地震動を条件とした fragility カープ（Fragility Curve）によって求められ、復旧期間については設備等を再調達するのに要する期間や修復を行うのに要する期間として設定する。また、付録表-3 は各要素の復旧期間の非超過確率関数を示している。

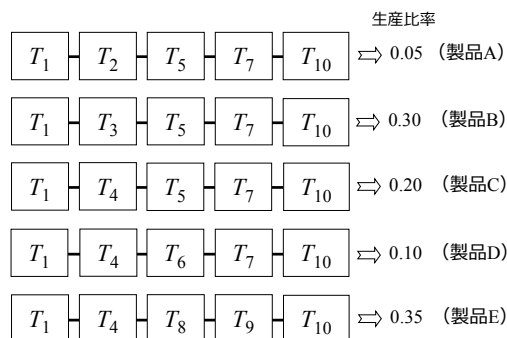
付録表-2 各要素の復旧期間の確率関数

復旧日数	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
0	0.80	0.70	0.60	0.60	0.90	0.80	0.90	0.50	0.95	0.90
5	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10
10	0.15	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.20	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.08	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
30	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00

付録表-3 各要素の復旧期間の非超過確率関数 ($F_{Ti}(t)$, $i=1\sim10$)

復旧日数	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
0	0.80	0.70	0.60	0.60	0.90	0.80	0.90	0.50	0.95	0.90
5	0.80	0.70	0.90	0.60	0.90	0.80	0.90	0.50	1.00	1.00
10	0.95	0.70	0.90	0.80	0.90	0.80	0.90	0.50	1.00	1.00
15	0.95	0.90	1.00	0.80	1.00	0.80	0.90	0.50	1.00	1.00
20	1.00	0.90	1.00	0.80	1.00	1.00	0.98	0.50	1.00	1.00
25	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.90	1.00	1.00
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.90	1.00	1.00
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

付録図-9 のシステムモデルより、5 製品の生産工程は付録図-10 に示すように 5 通りに分解できる。これをシステムの直列分解と呼ぶ。直列分解は、分解した各工程が異なる機能、あるいはそれぞれが特有の役割を持つ場合に利用できるもので、後述する最小パス集合（MPS ; Minimum Pass Set）とは異なるので注意する。



付録図-10 システムの直列分解と各製品の生産工程

製品 A に着目すると、本文(8)式より、製品 A の復旧期間の非超過確率関数 $F_{TA}(t)$ は以下のように計算できる。

$$F_{TA}(t) = F_{T1}(t) \cdot F_{T2}(t) \cdot F_{T5}(t) \cdot F_{T7}(t) \cdot F_{T10}(t) \quad (E.1)$$

(E.1)式の計算を具体的に行うと、付録表-4 のようになる。まず、 $T_1, T_2, T_5, T_7, T_{10}$ の非超過確率関数を付録表-3 から転記する。復旧期間に対応した確率を乗じることで、直列システムの非超過確率関数 $F_{TA}(t)$ を求めることができる。これを確率関数に変換し、対応する復旧期間を乗じると期待復旧日数が求められる。期待復旧日数を総和すると 10.43 日と計算でき、これが製品 A の復旧期間（期待値）である。

付録表-4 製品 A の復旧期間の確率関数と期待復旧期間

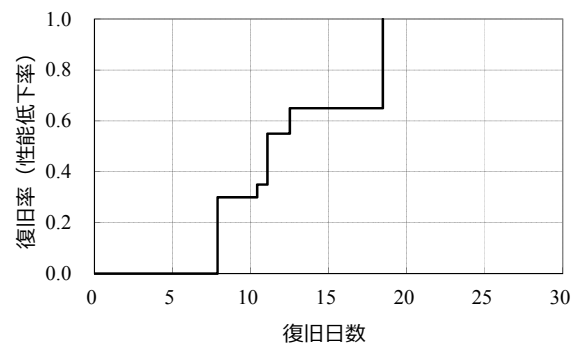
復旧日数	T1	T2	T5	T7	T10	非超過 確率	確率	期待復 旧日数
0	0.80	0.70	0.90	0.90	0.90	0.408	0.408	0.000
5	0.80	0.70	0.90	0.90	1.00	0.454	0.045	0.227
10	0.95	0.70	0.90	0.90	1.00	0.539	0.085	0.851
15	0.95	0.90	1.00	0.90	1.00	0.770	0.231	3.463
20	1.00	0.90	1.00	0.98	1.00	0.882	0.113	2.250
25	1.00	0.90	1.00	0.98	1.00	0.882	0.000	0.000
30	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	0.980	0.098	2.940
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000	0.020	0.700
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000	0.000	0.000
								10.430

このような計算を、全ての製品（A～E）について行う。計算結果を付録表-5 にまとめて示す。表は、製品毎に復旧期間の短い順に並べ替えている。この表から次の事柄を読むことができる。7.90 日までは生産機能は完全に停止しているが、7.90 日を越えると、生産比率 0.3 は回復する。また、10.43 日を越えると生産比率 0.35（0.3+0.05）まで回復する。これらの結果から復旧曲線を描くことができる。

具体的には、復旧期間の短い順に生産比率の累積を縦軸に取り、横軸に復旧期間を取る。それぞれステップ状に結んだ曲線が復旧曲線である。これを付録図-11 に示す。

付録表-5 製品毎の期待復旧期間

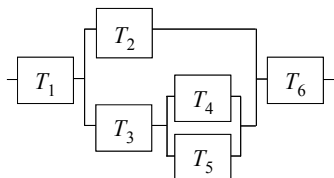
製品	生産比率	生産比率 の累積	期待復 旧日数
B	0.30	0.30	7.90
A	0.05	0.35	10.43
C	0.20	0.55	11.09
D	0.10	0.65	12.52
E	0.35	1.00	18.47



付録図-11 製品生産システムの復旧曲線

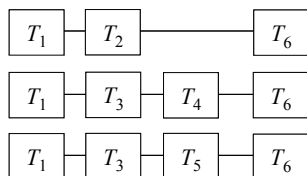
付録 F 同一機能を持つシステムの復旧期間の評価

付録図-12 に示したシステムモデルは、一つの機能を持つシステムの例である。\$T_1\$ から \$T_6\$ へ至る最短の経路は 3 つあり、例えば \$T_4\$ と \$T_5\$ に不具合があっても、\$T_2\$ が健全であれば機能は満たすことができる。つまり、3 つの経路のどれか一つでも健全であればよいことになる。このような最短経路の要素の集合を最小パス集合（MPS ; Minimum Pass Set）と呼ぶ。ここでは、MPS を使い、同一機能を持つシステムの復旧期間の評価方法を説明する。



付録図-12 一つの機能を持つシステムモデルの例

最初に、付録図-13 に示す様に、3 つの MPS に分解する。3 つの MPS は同じ機能を持つと考える。



付録図-13 最小パス集合（MPS）

それぞれの MPS の復旧期間の非超過確率関数は次式のように表すことができる。

$$F_{T126}(t) = F_{T1}(t) \cdot F_{T2}(t) \cdot F_{T6}(t)$$

$$F_{T1346}(t) = F_{T1}(t) \cdot F_{T3}(t) \cdot F_{T4}(t) \cdot F_{T6}(t) \quad (F.1)$$

$$F_{T1356}(t) = F_{T1}(t) \cdot F_{T3}(t) \cdot F_{T5}(t) \cdot F_{T6}(t)$$

次に、3 つの MPS が並列に存在すると考える。本文(7)式を参照し、システムの復旧期間の非超過確率関数は以下になる。

$$F_T(t) = 1 - (1 - F_{T126}(t))(1 - F_{T1346}(t))(1 - F_{T1356}(t)) \quad (F.2)$$

これを展開すると、

$$F_T(t) = F_{T126}(t) + F_{T1346}(t) + F_{T1356}(t) - F_{T1123466}(t) - F_{T1123566}(t) - F_{T11334566}(t) + F_{T11123345666}(t) \quad (F.3)$$

となる。さらに、同じコンポーネントの高次の項を 1 次置き換える。例えば、\$F_{T666}(t)\$ は \$F_{T6}(t)\$ とする。最終的に以下になる。

$$F_T(t) = F_{T126}(t) + F_{T1346}(t) + F_{T1356}(t) - F_{T12346}(t) - F_{T12356}(t) - F_{T13456}(t) + F_{T123456}(t) \quad (F.4)$$

(F.4)式により同一機能を持つシステムの復旧期間の非超過確率関数を求めることができる。ここで示した方法は、高次項を 1 次置き換える手間はあるものの、一定のアルゴリズムを持つことから、複雑なシステムの計算に適している。一方、最小カット集合（MCS ; Minimal Cut Set）を使うこともできる。

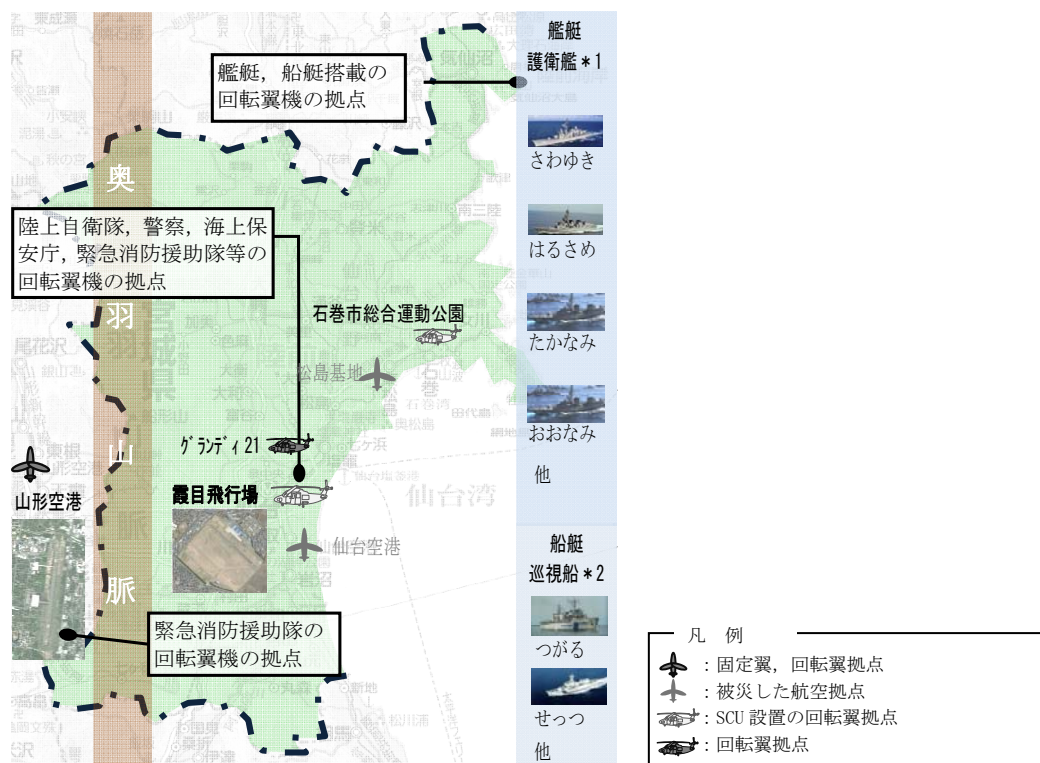
付録 G 航空機燃料の不足

G.1 東日本大震災時の霞目飛行場における航空機輸送による救急・救命活動の運用実態

国総研資料No.718 において、東日本大震災時における航空機輸送による救急・救命活動の運用実態が整理されており、ここでは、津波により被災した仙台空港の代替空港として、回転翼機の活動拠点としての役割を果たした霞目飛行場の運用実態を概略整理する。

宮城県では、当時の地域防災計画等において、仙台空港が災害時の拠点となり、救急・救命活動等においては、近隣の松島基地、霞目飛行場、仙台市消防ヘリポートと連携して災害対応にあたる事が計画されていた。しかしながら、東日本大震災では、同計画では想定していなかった津波の影響により、災害初期段階において、拠点となる仙台空港は 3 月 14 日まで回転翼機・固定翼機ともに利用できない状況となった。これに加え、松島基地、仙台市消防ヘリポートも被災し、唯一、霞目飛行場のみが使用可能な状況であった。そのため、発災直後から霞目飛行場、海上自衛隊艦艇、海上保安庁船艇、山形空港、グランディ 21 宮城県総合運動公園（以下、「グランディ 21」という）、石巻市総合運動公園が、被災地での救急・救命活動等の中心となる回転翼機の拠点として機能した。

霞目飛行場は、発災当日より利用可能で、15 時 01 分には最初の回転翼機が情報収集に離陸した。同飛行場を夜間駐機の拠点とした回転翼機は、最大で 65 機程度であり、陸上自衛隊、海上自衛隊、宮城県警察航空隊、仙台市消防航空隊、緊急消防援助隊航空部隊、海上保安庁、その他多数の回転翼機が利用した。なお、陸上自衛隊全体では 3 月 31 日までの最大で 105 機の回転翼機が宮城県内の被災地で活動した。また、同飛行場には、SCU（Staging Care Unit 航空搬送拠点臨時医療施設、以下「SCU」という）も設置された（付録図-14）。



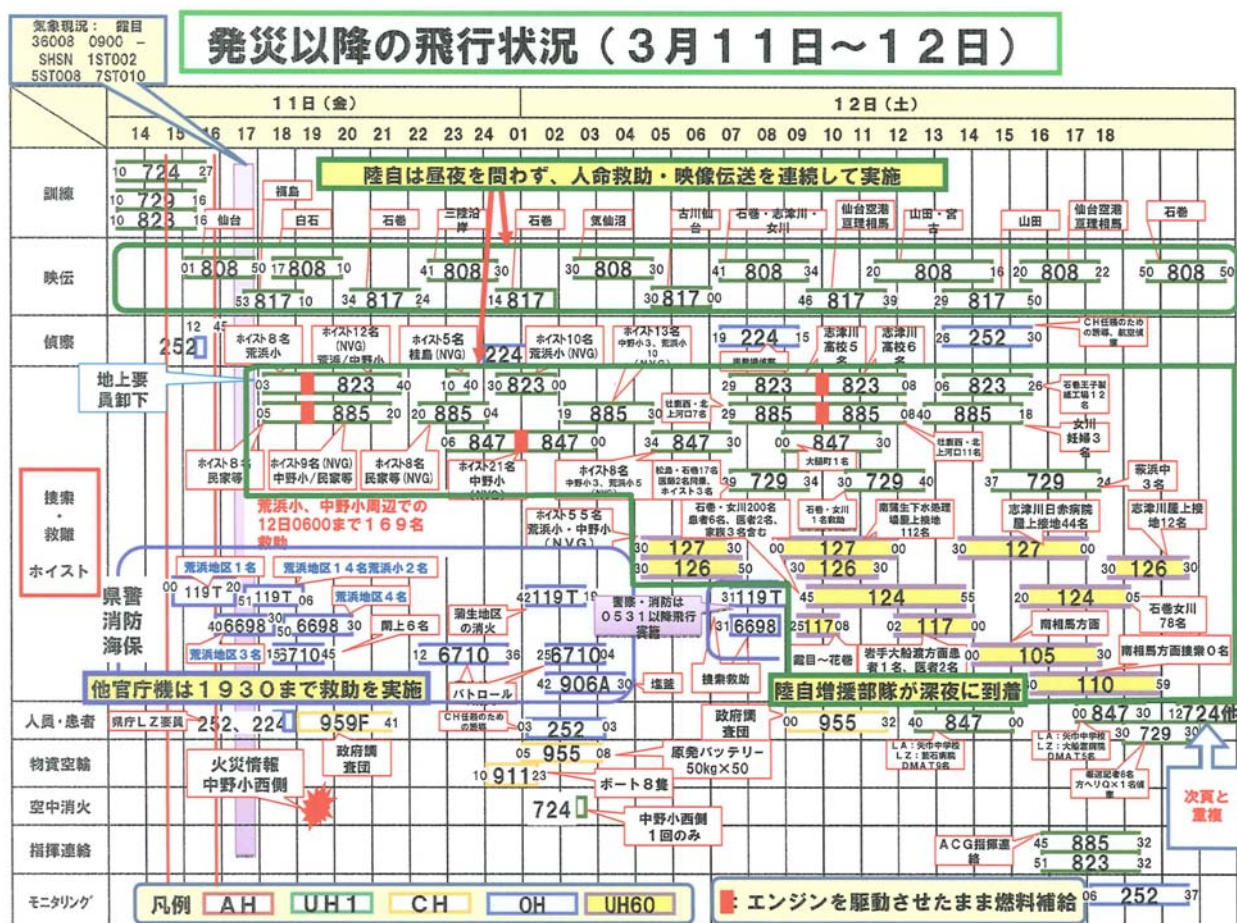
- *1：護衛艦名は「東日本大震災への対応 海上自衛隊の活動」（2011 年 3 月，防衛省・自衛隊）等より 3 月 12 日に搭載の回転翼機が城域内で救助活動をしたものを掲載した。
- *2：巡視船名は「Helicopter JAPAN2011 年 4・5 合併号」（㈱タクト・ワン），pp. 20～29，pp. 46～51 より 3 月 11～16 日に搭載の回転翼機が宮城県内で救助活動をしたものを掲載した。
- *3：船の位置は、イメージであり、実際の活動場所ではない。

付録図-14 宮城県における回転翼機の活動拠点

発災後 2 日間の捜索・救助活動についてみると、発災後しばらくして、霞目飛行場から 5km 離れた荒浜小学校屋上に避難した人たちの孤立情報（当初数十名，救助過程で，数百名規模と判明）が入った。17 時 03 分に 2 機の UH-1 が救助に向かい、津波により着陸場所がない中、ホイストによる救助を行い、霞目飛行場や病院ヘピストン輸送を行った。この

後、次々と入る孤立情報に対し、深夜に到着した陸上自衛隊の応援機（UH-60）も加わり、周辺民家から松島・石巻、志津川、牡鹿西・北上河口、南相馬方面等に活動範囲を広げ、24時間体制で捜索・救助活動を実施した。

自衛隊機以外にも、霞目飛行場を拠点とする宮城県警察航空隊の回転翼機、仙台市消防航空隊、第二管区海上保安本部 仙台航空基地の回転翼機が霞目飛行場を臨時の拠点として、捜索・救助、消火、パトロール等の活動を実施した（付録図-15）。



出典：「Helicopter Japan2011 年7・8 合併号」(株)タクト・ワン)pp2-7 掲載の霞目駐屯地広報室資料

付録図-15 東日本大震災での霞目飛行場での救急・救命等の活動

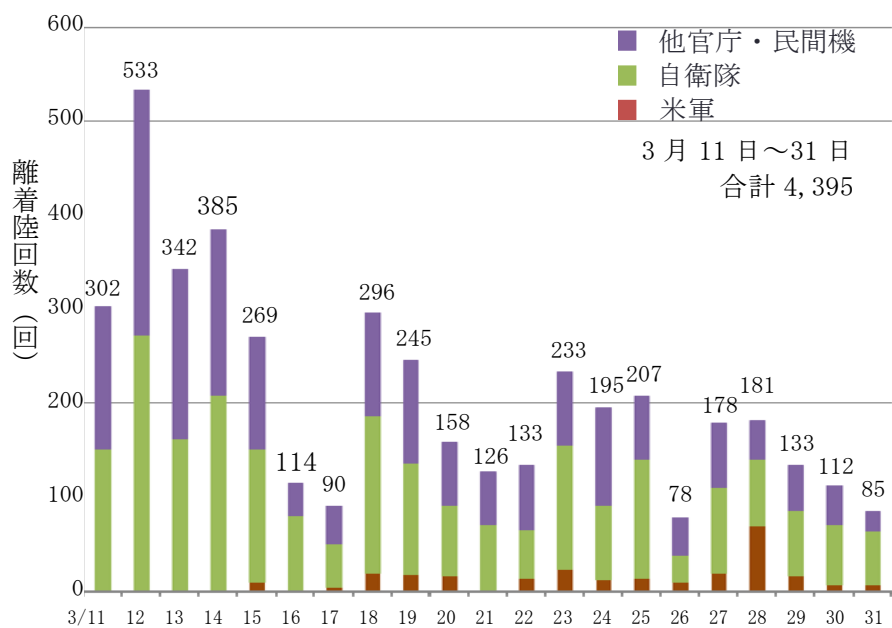
東日本大震災時の霞目飛行場における回転翼機の管制回数（離陸回数と着陸回数を合算したものと考えられる）は、発災から3月31日の間で4,394回で、一日平均約209回に達した。これは、平成21年度の同飛行場の一日の平均管制回数46回に対し約4.5倍の回数である。同じ期間中の花巻空港の回転翼機の離着陸回数は1,065回、山形空港が同633回であったことから、津波浸水地域に最も近接した位置にある霞目飛行場へ回転翼機が集中したことが読み取れる（付録図-16）。

次に、発災から3月31日までの間の管制回数の分布をみると、3月13日までの発災後3日間で1,177回、発災後5日間で1,831回に達し、発災から3月31日までの管制回数に対し3日間で約26.8%、5日間で約41.7%に達している。その後、天候の悪化で16日、17日には回転翼機の活動が停滞したものの、発災後1週間で同約46.3%となっており、回転翼機の活動が救急・救命活動等の需要の高い1週間に集中していることがわかる。なお、最大の管制回数は発災翌日の3月12日で533回であった。これを年間に換算すると約19.5万回となる。

利用機関別には、自衛隊が 2,265 回で 51.5%を占めるが、残りは自衛隊以外の他官庁、民間及び米軍であり、自衛隊に限らず、組織横断的に霞目飛行場が利用されていたことがわかる。

これら回転翼機への燃料給油についてみると、霞目飛行場はもとの燃料備蓄に加え、被災した松島基地向けの燃料も振り向けられたので、燃料が相当量に保管されていた。また、燃料供給は、陸上自衛隊の回転翼機だけではなく、海上

自衛隊，宮城県警察航空隊，仙台市消防航空隊，緊急消防援助隊航空部隊，海上保安庁等，要請に応じ機関を問わず燃料補給が実施された（付録図-17）。



付録図-16 東日本大震災時の霞目飛行場の管制回数

出典：陸上自衛隊資料より作成



付録図-17 霞目駐屯地のヘリ駐機状況，給油タンク

出典：陸上自衛隊資料より作成

G.2 大規模地震時に必要となる航空機燃料の試算

回転翼 1 機が救命・救命活動を行うのに必要な燃料について、東日本大震災時に緊急消防援助隊航空部隊の前進基地（フォワードベース）として活用された、宮城県のグランディ 21 での給油事例から試算する。

グランディ 21 では、宮城県内における前進基地及びドラム燃料を配置することによる補給基地として運用され、発災 2 日後の 3 月 13 日から 6 月 13 日までに燃料 138,000L が消費された。そこで、グランディ 21 での 3 月～6 月計での着陸 1 機あたりの必要量を計算すると、給油 1 回あたり 381L ($138,000\text{L} \div 362$ 回)、着陸 1 機あたり 234L ($138,000\text{L} \div 535$ 機) となる。

東日本大震災時の霞目飛行場での発災後 3 日間の離着陸回数は、3 日間計で 1,177 回であり（付録図-16）、延べ着陸機数をその半分 ($1,177 \div 2 = 589$) とすると、霞目飛行場と同様の救急・救命活動が行われると仮定した場合に必要な航空機燃料は、約 138KL ($234\text{L} \times 589$ 機) と試算される。また、救命期においては 1 回の運航で、燃料が可能な限り活動を行うと仮定した場合には、約 224KL ($381\text{L} \times 589$ 機) の必要量となる。

付録表-6 東日本大震災時のフォワードベース（グランディ 21）の使用状況

	延べ着陸機数	給油回数	給油量	ドラム数
3 月	312 機	176 回	69,800L	349 本
4 月	157 機	124 回	42,000L	210 本
5 月	59 機	55 回	20,600L	103 本
6 月	7 機	7 回	5,600L	28 本
計	535 機	362 回	138,000L	690 本

出典：「東日本大震災－宮城県の 6 か月間の災害対応とその検証－」（2012 年 3 月、宮城県）

一方、南紀白浜空港では、和歌山県土木部へのヒアリング等によると、県航空センターの航空燃料用地下タンク（容量 30KL）に常時 15KL の航空機燃料が保管されており、それ以外では、民間航空機用の給油タンク（容量 100KL）の燃料の活用が考えられる。給油タンクの通常の保管量は容量の 5～6 割程度とみられることから、南紀白浜空港では 65～75KL の燃料が大規模災害時に活用可能とみることができる。ただし、民間航空機用の給油タンクの保管量は、備蓄燃料として一定量が常時確保されているわけではない。

南海トラフ地震発生時には、南紀白浜空港における航空機による救急・救命活動は、本稿で対象とした DMAT 要員の移動以外にも、霞目飛行場のように回転翼機による多様な活用が想定される。この場合に、発災後 3 日間での必要な航空機燃料は、先の試算でみるように、南紀白浜空港での備蓄分では不足し、外部からの供給が不可欠となる。

G.3 大規模災害時における航空機燃料の輸送方法の想定

航空機燃料の輸送は、「和歌山県実働部隊航空部隊受援計画（平成 26 年 2 月）」では、地震後に大阪府からタンクローリーで運ぶこととなっている。空港に参集した多数の回転翼機に十分な燃料を滞りなく供給し続けるためには、石油取扱事業者のタンクローリーからの定期的な供給が必要となるが、石油取扱事業者の施設被害および県内外の道路渋滞により救命期には困難と考えられる。

タンクローリー以外の輸送手段としては、東日本大震災時において、グランディ 21 で実施されたドラム缶の陸送が考えられる。グランディ 21 では、震災当時に備蓄燃料はなかったため、総務省消防庁が航空燃料を手配し、ドラム缶に詰められた燃料がトレーラにより陸送されている（付録図-18）。ただし、この方法についても、和歌山県においては、タンクローリーと同様の理由で救命期には困難と考えられる。

陸送以外の輸送手段として、自衛隊機による輸送も考えられる。航空機燃料の輸送ではないが、燃料（灯油）の自衛隊機による輸送は実際に実施された事例があり、平成 26 年 2 月の関東豪雪時には、陸上自衛隊の回転翼機により携行缶に積み替えられた灯油が被災地に輸送されている（付録図-19）。しかし、先の必要燃料分 138KL を 20L 携行缶で運ぶとすると 6,900 本分 ($138\text{KL} \div 20\text{L}$) となり、機材確保及び 1 機あたりの燃料の輸送可能量の制約から、救命期には困難と考えられる。また、空中給油機（KC-767、約 90KL 搭載可能）による輸送方法も考え方としてはあるが、災害用途としての空中給油機の活用の制約や、救命期における空港での空中給油機からの取り出し手段、取り出した燃料の保管手段の手配の面から、空中給油機の活用は困難と考えられる。

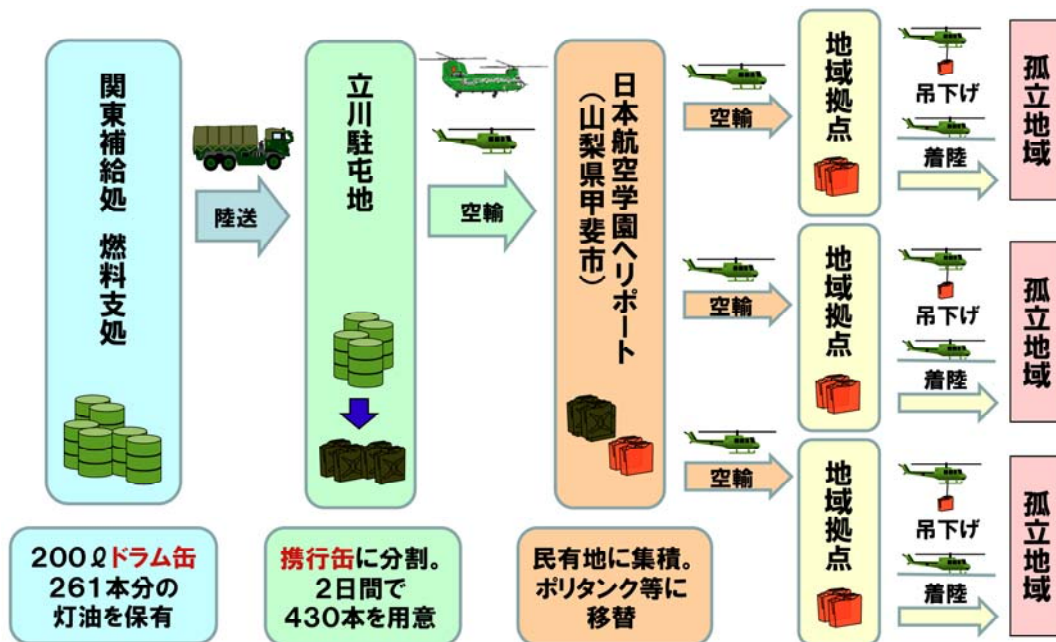
なお、陸送が困難な場合、現実的な輸送手段としては、自衛隊艦船や海上保安庁の巡視船からの給油や燃料輸送が考えられ、和歌山県では自衛隊艦船からの燃料等供給を想定した訓練を既に実施済みである。



付録図-18 グランディ 21 へのドラム缶での航空機燃料の配送状況

出典：「東日本大震災に伴う緊急消防援助隊北海道東北ブロック活動検証会議報告書」

(2012 年 2 月，東日本大震災に伴う緊急消防援助隊北海道東北ブロック活動検証会議)



付録図-19 関東豪雪（26 年 2 月）時の自衛隊機による燃料（灯油）輸送

出典：「自衛隊の災害派遣活動について」（2014 年 5 月，防衛省統合幕僚監部）

付録 H ボトルネック指標の評価

ボトルネック指標（Bottleneck Index, 以下 B.I.）は、要素（コンポーネント）毎に示され、システム全体機能への影響度（重要性）、脆弱性（耐震性）、復旧難易度（修復性）の積で表される指標である。式で表すと以下のようになる。

$$B_i = e_i \cdot E(T_i), \quad i = 1 \sim n \quad (G1)$$

ここに、 i は各要素、 n はその総数、 e_i は全体機能への影響度である。 $E(T_i)$ はシナリオ地震発生を条件とした各要素の停止期間の期待値を表し、以下のようになる。

$$E(T_i) = \sum_{all\ j} p_j \cdot t_j \quad (G2)$$

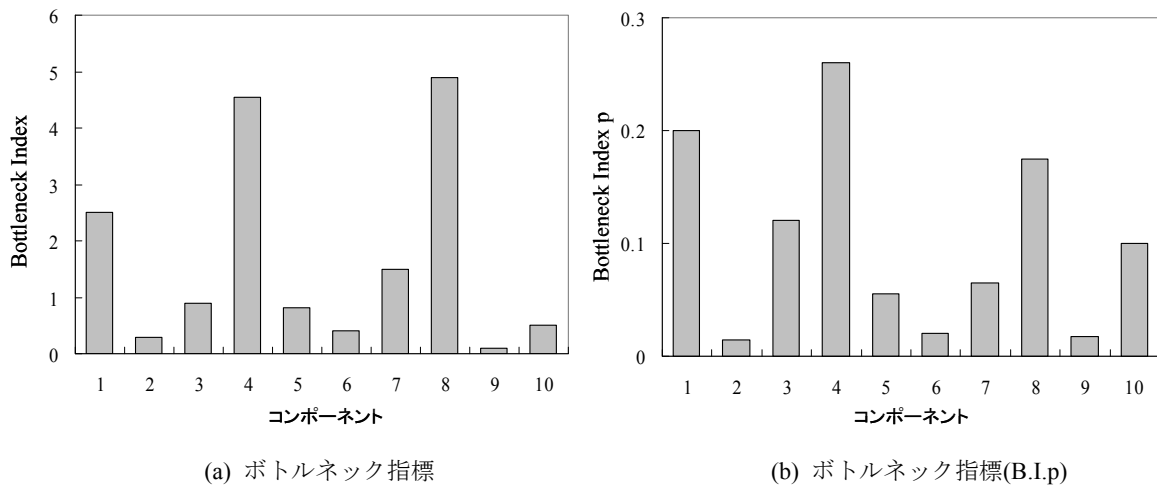
ここに、 j は被害形態、 p_j と t_j は被害形態の発生確率ならびに停止期間（復旧期間）である。 p_j は要素の脆弱性を表し、 t_j は復旧難易度を表す。(F.1)式より、B.I.は時間の単位を持つ。

付録図-9 の生産システムを例に具体的に説明する。まず、脆弱性と復旧難易度は、各要素（T1～T10）の復旧期間の期待値によって求められ、一方の影響度は、付録図-10 に示すシステムの経路と生産比率から求めることができる。例えば、要素 T1 は全ての製品に関与しており、全体の生産機能に与える影響度は 1.0 である。要素 T4 は製品 C、製品 D、製品 E に関与しており、それぞれの売上比率を和し、影響度は 0.65 となる。他の要素も同様の考え方で影響度を求めることができる。なお、影響度は生産比率や売上比率のみならず、経営戦略上の観点から適宜設定することも可能である。付録表-7 は復旧期間の期待値と影響度、ならびにこれらを乗じたボトルネック指標（B.I.(日)）を要素毎に示した表である。表には、B.I.(日)に加え B.I.p が表示されている。B.I.p は機能が停止する確率に重要度を乗じた指標であり、復旧難易度を除外している。機能が停止する確率は付録表-2 の機能停止日数 0 以外の確率を総和して求めることができる。これは要素が健全である事象の余事象確率である。つまり、復旧期間の長短より、機能停止そのものが問題となるシステムでは、復旧の難易度を除いた指標の方が問題の本質をとらえることができる。このような場合には B.I.p は有効である。

付録図-20 は、B.I.と B.I.p を要素毎に比較したグラフである。同図(a)より、要素 T1, T4, T8 が相対的に高くボトルネックとなっていることが分かる。これより耐震補強等の対策を実施する優先順位を知ることができる。また耐震補強のみならず、冗長性の確保や予め代替機能を用意しておくことも有効な手段となろう。代替機能の設置は復旧期間を大幅に改善することになり必然的に B.I.も大きく低下する。ボトルネックの解消を目標に諸策を検討することで、機能の早期回復を実現することができる。一方、システムの機能維持を目標とする場合には、B.I.p を使いボトルネックの解消を目指すことで効果的な対策を見出すことができる。

付録表-7 ボトルネック指標の計算例

コンポーネント	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
停止期間期待値(日)	2.5	6	3	7	1.5	4	2.3	14	0.25	0.5
影響度, 重要度	1	0.05	0.3	0.65	0.55	0.1	0.65	0.35	0.35	1
B.I.(日)	2.5	0.3	0.9	4.55	0.825	0.4	1.495	4.9	0.0875	0.5
B.I. p	0.2	0.015	0.12	0.26	0.055	0.02	0.065	0.175	0.0175	0.1



付録図-20 ボトルネック指標の比較

付録Ⅰ 健全・不健全確率の評価

性能 r を条件とした経過時間の確率密度関数 $f_T(t|r)$ が与えられていたとする．ここで， $f_T(t|r)$ の超過確率関数 $G_T(t|r)$ と経過時間 t における性能の確率密度関数 $f_R(r|t)$ の非超過確率関数 $F_R(r|t)$ は同じ値を取る（静間ら（2009）），（小野ら（2015））．これより以下の式が成立する．

$$\begin{aligned} G_T(t|r) &= F_R(r|t) \\ &= 1 - G_R(r|t) \end{aligned} \quad (\text{H.1})$$

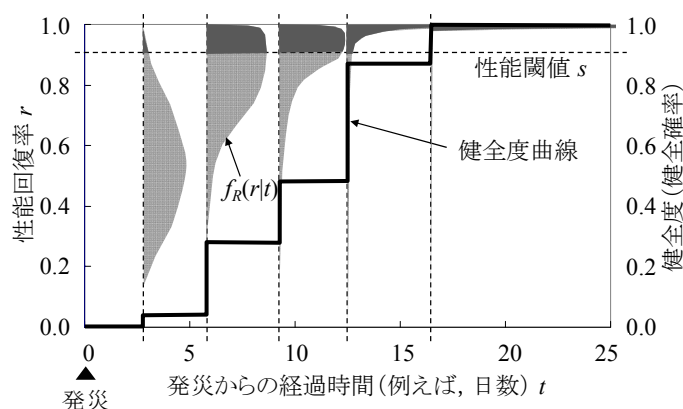
時間依存の健全確率を $p_s(t)$ とすると，経過時間 t における性能 r の超過確率関数 $G_R(r|t)$ から以下のように求めることができる．

$$p_{s, r \geq s}(t) = G_R(r = s|t) = \int_s^{1.0} f_R(r|t) dr \quad (\text{H.2})$$

ここに， s は必要とする最低限の性能である．(H.2)式で求められる関数は，健全度曲線と呼ばれ（小野ら（2015）），その概念図を付録図-21 に示す．図の右側の縦軸は健全確率を示している．

また，不健全確率 $p_f(t)$ は，経過時間 t における性能 r の非超過確率関数 $F_R(r|t)$ から下式で示される．

$$p_{f, r < s}(t) = F_R(r = s|t) = \int_0^s f_R(r|t) dr \quad (\text{H.3})$$

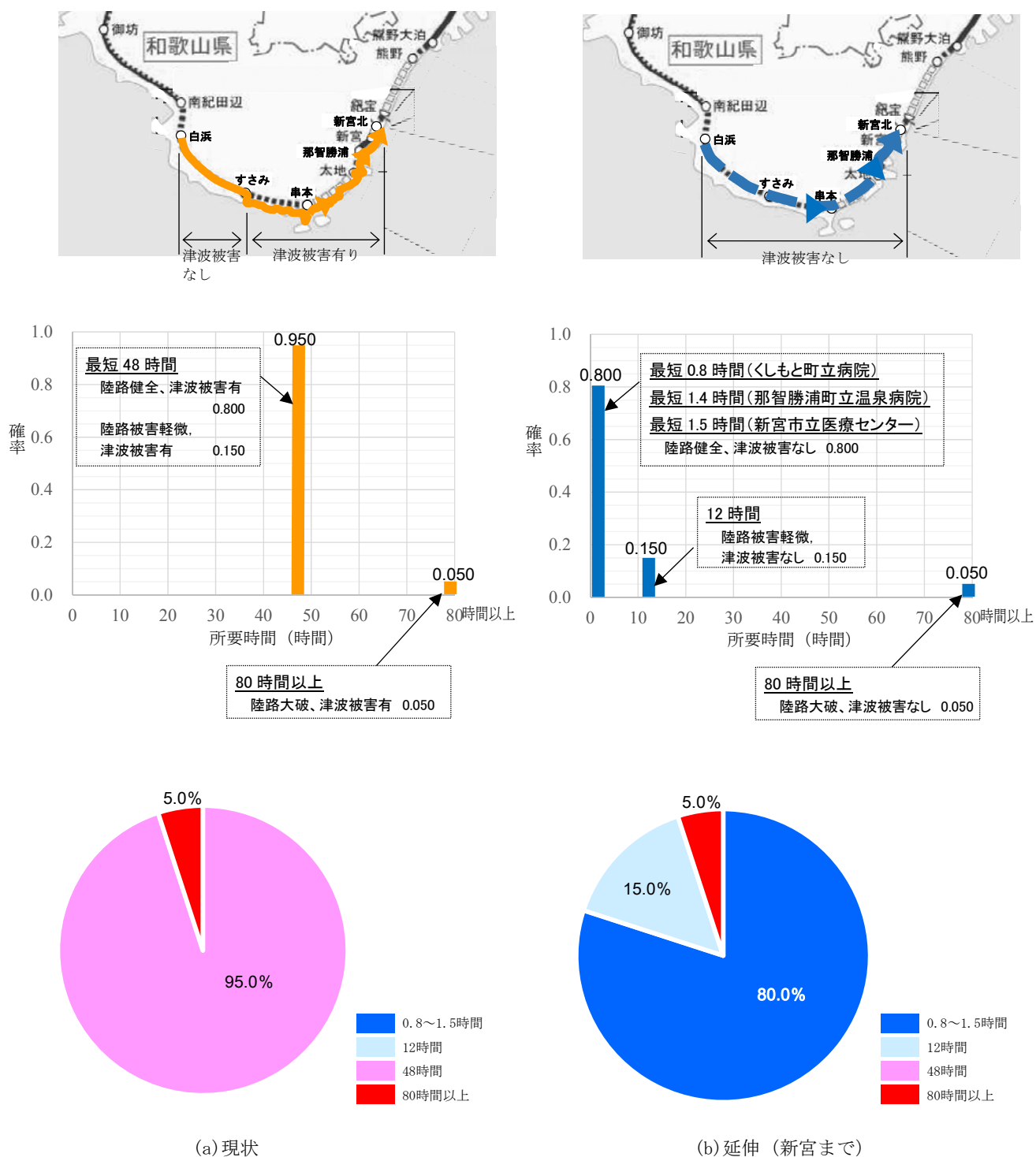


付録図-21 健全度曲線（健全確率）の概念図

付録J 津波の影響について

津波の損傷確率については、有田・田辺・御坊保健医療圏については、国土交通省（2014）より、高規格道路の利用となるため被害確率 0.0（被害なし）とし、新宮保健医療圏については、被害確率を 1.0 としている。その復旧時間は、南海トラフ地震に伴う津波浸水に関する和歌山県道路啓開協議会資料（2016）での主要拠点（市役所等）までの進出ルート啓開目標を参考に、48 時間としている。

参考までに、南紀白浜空港を起点としたときの新宮保健医療圏の陸路の受援関数の試算を付録図-22 に示す。(a)は現状の場合で、(b)高規格道路の利用（新宮まで延伸）により津波の被害なしとしている。



付録図-22 新宮保健医療圏の陸路の所要時間の確率分布

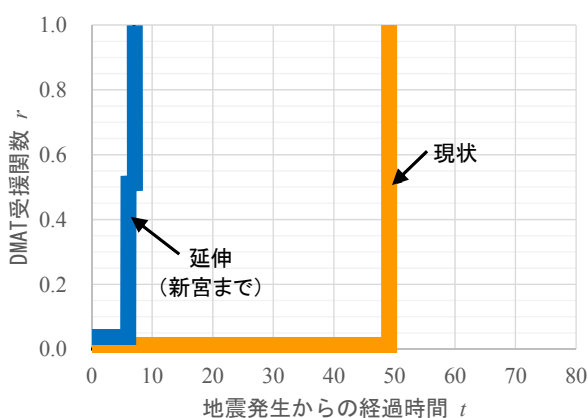
南紀白浜空港からの DMAT の進出について、現状では 95%の確率で約 48 時間要するのに対し、高規格道路の延伸により、80%の確率で 48 分～90 分で到達することが可能となる。延伸の場合に 12 時間、80 時間以上の確率が存在しているのは、陸路の脆弱性（損傷確率）によるものである。

陸路の脆弱性の仮定

健全：所要時間（通過時間のみ）0.8～1.5 時間	確率 0.80
軽微：所要時間（復旧時間＋通過時間）12 時間	確率 0.15
大破：所要時間（復旧時間＋通過時間）80 時間以上	確率 0.05

本報では、空路の地震時の輸送能力の評価に焦点を絞った研究である。津波の影響を受ける施設については、空路の適切な評価のために、どのようにシステムモデルに組み込むべきかという点にのみ主眼を置き、その脆弱性（損傷確率）は便宜的に仮定したものに過ぎない。信頼性設計技術の進展や専門家の意見により損傷確率の精度が向上することが望まれる。

なお、これらを平均した図を付録図-23 に示す。



付録図-23 新宮保健医療圏の陸路の受援関数

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 935 September 2016

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp