

濃尾平野における想定東南海地震の長周期地震動評価

—領域縮小法による地震波動伝播解析—

吉村 智昭*¹

Keywords : domain reduction method, 3-D finite element method, wavenumber integration method, sedimentary basin, surface wave

領域縮小法, 3次元有限要素法, 波数積分法, 堆積盆地, 表面波

1. はじめに

中央防災会議により、近い将来における M8 級の東南海地震の発生が指摘されており、名古屋を含む濃尾平野では、巨大地震で卓越する長周期地震動が、超高層ビル、長大橋、石油タンク等の長周期構造物に与える被害が懸念されている。濃尾平野は、堆積層が最大約 2300m に達する大規模堆積盆地であり、地震波が複雑に増幅・伝播することが予想される。本研究では、3次元有限要素法と波数積分法を組み合わせた領域縮小法¹⁾により、濃尾平野の堆積盆地構造および、中央防災会議で提案されている想定東南海地震の震源モデルを考慮して地震波動伝播のシミュレーションを行い、長周期地震動の地震動強さ、周期特性、継続時間等の把握を行う。

2. 領域縮小法と解析領域

図-1 に想定東南海地震の断層モデルと有限要素法の解析領域を示す。有限要素法 (FEM) 領域は、濃尾平野を囲む 130km×170km の領域 (外側の緑色の線) で、モデル深さは 11km である。図中の青色の線は、岩盤露頭線を示し、この内側が堆積層からなる濃尾平野である。震源断層は北西に傾き下る 1 枚の断層面で近似し、赤色の部分が地震波を多く放出するアスペリティーである。

図-2 に領域縮小法¹⁾による解法の概要を示す。堆積盆地 (濃尾平野) の外側は水平成層地盤で近似し、震源断層は FEM 領域の外側にある。まず波数積分法²⁾により、堆積盆地を除いた水平成層構造と震源断層を考慮した地震波の計算を行い、次にこれを有限要素モデルに設けた入射境界に入射する。

通常、震源が遠くにある場合、解析領域に震源を含む

解法では、解析モデルが膨大となるが、領域縮小法では FEM 領域を小さな領域に「縮小」できる利点がある。

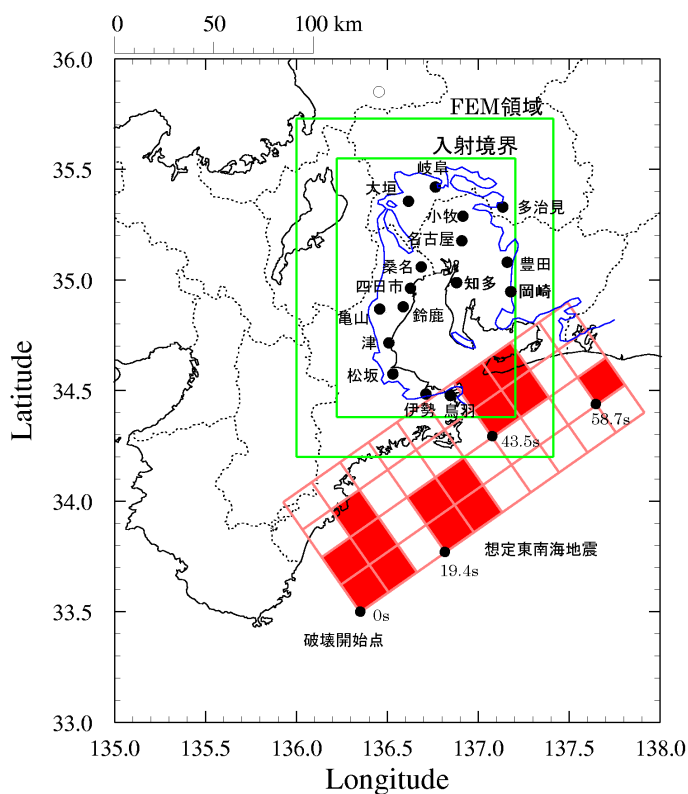


図-1 解析領域と震源モデル
Model domain and fault model

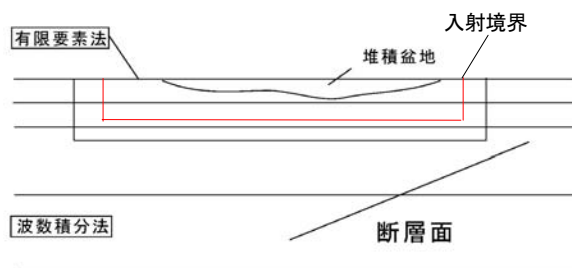


図-2 領域縮小法
Domain Reduction Method

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

3. 想定東南海地震の震源モデル

中央防災会議³⁾により、想定東南海地震の震源モデルが提案されている。本解析では、これを前述の図-1のように1枚断層面に近似した。表-1に断層面のパラメーターを示す。中央防災会議の断層モデルでは4つのアスペリティーが設定されており、これを図-1のように近似した。表-2にこれらのアスペリティーおよび背景領域のパラメーターを示す。一枚断層面への近似に伴ってアスペリティーの面積が中央防災会議のものと多少異なるため、すべり量を調節して地震モーメントの大きさが中央防災会議のものと同じ値になるようにしてある。

断層破壊は、南西の角から開始し、破壊伝播速度2.7km/sで同心円状に伝播するとした。断層破壊が北東端に達するのに約1分かかる。

すべり速度関数の設定により地震波の計算結果はかなり異なる。本研究では、(1)三角形または台形、(2)1944年東南海地震のインバージョン結果、(3)指数関数型の3通りで計算を行って比較する(5章参照)。

4. 濃尾平野の地盤モデル

図-3にモデル化した基盤深度を示す。これは三重県⁴⁾が地盤調査より作成した基盤深度をベースにしている。伊勢湾の出口から渥美半島にかけては、なめらかに露頭基盤を連続させ、濃尾平野を閉じた堆積盆地としてモデル化した。これは領域縮小法の定式化において、波数積分法の結果を入射する入射境界の位置で、地盤構造が波数積分法で想定している地盤構造と同じでなければならないという制約があるからである。

図-4に東西方向の断面の例を示す。養老断層(Y=

105km)、鈴鹿東縁断層帯(Y=90km)、布引山地東縁断層帯(Y=70km)と交差する断面を示している。鉛直方向は誇張して描いている。濃尾平野の西縁ではこれらの断層構造により基盤が急激に落ち込んでいる。

図-5に有限要素モデルの鉛直断面(Y=105km)を示す。図で青色の部分の部分が堆積盆地である。

表-3に堆積盆地の地盤物性を示す。第三紀層($V_s=0.7\text{km/s}$)が地表面に露出しているとし、第三紀層の速度値は深さとともに大きくした。早川他⁵⁾を参考にして次式のように深さに依存した第三紀層の V_p 値、 V_s 値を設定した。ただし、 V_p 、 V_s の最小値の条件を加えた。

$$V_p = 0.143 * Z^{1/6} \Psi + 0.771 * Z^{1/6}$$

$$V_s = 0.745 * V_p - 0.8733$$

$$V_p \geq 2.1$$

$$V_s \geq 0.7$$

$V_p(\text{km/s})$: 粗密波速度

$V_s(\text{km/s})$: 剪断波速度

$Z(\text{m})$: 第三紀層上面からの深度

Ψ : 第三紀層の層厚で基準化した第三紀層上面からの深度

表-4に深い地盤の地盤物性を示す。佐藤他⁶⁾を参照した。 Q 値は振動数 f の1乗に比例する $Q=Q_0f$ の形式とした。周期5秒(0.2Hz)で佐藤他と一致するように Q_0 を定めた。この構造は波数積分法で入射波を作成するときにも用いた。

有限要素は四面体要素(最大幅が基盤で1km、堆積層で0.25km)を用い、S波の波長に対して要素を10個確保し、解析有効最小周期は約3.6秒である。

表-1 断層面パラメーター
Fault parameter

断層面の原点			長さ	幅	strike	dip	rake
東経	北緯	深さ(km)	km	km	度	度	度
137.913	34.4	12.5	175	70	235	15	107

表-2 アスペリティーおよび背景領域の設定
Parameters of asperities and background area

	地震モーメント	深さ	地盤剛性	滑り量
	Nm	km	N/m^2	m
アスペリティー1	4.26×10^{20}	12.5~26.1	$3.64 \sim 4.14 \times 10^{10}$	7.06
アスペリティー2	3.31×10^{20}	12.5~21.5	$3.64 \sim 4.14 \times 10^{10}$	6.59
アスペリティー3	3.31×10^{20}	21.5~30.6	4.14×10^{10}	6.53
アスペリティー4	7.27×10^{19}	17.0~21.5	4.14×10^{10}	5.73
背景領域	9.89×10^{20}	12.5~30.6	$3.64 \sim 4.14 \times 10^{10}$	3.21

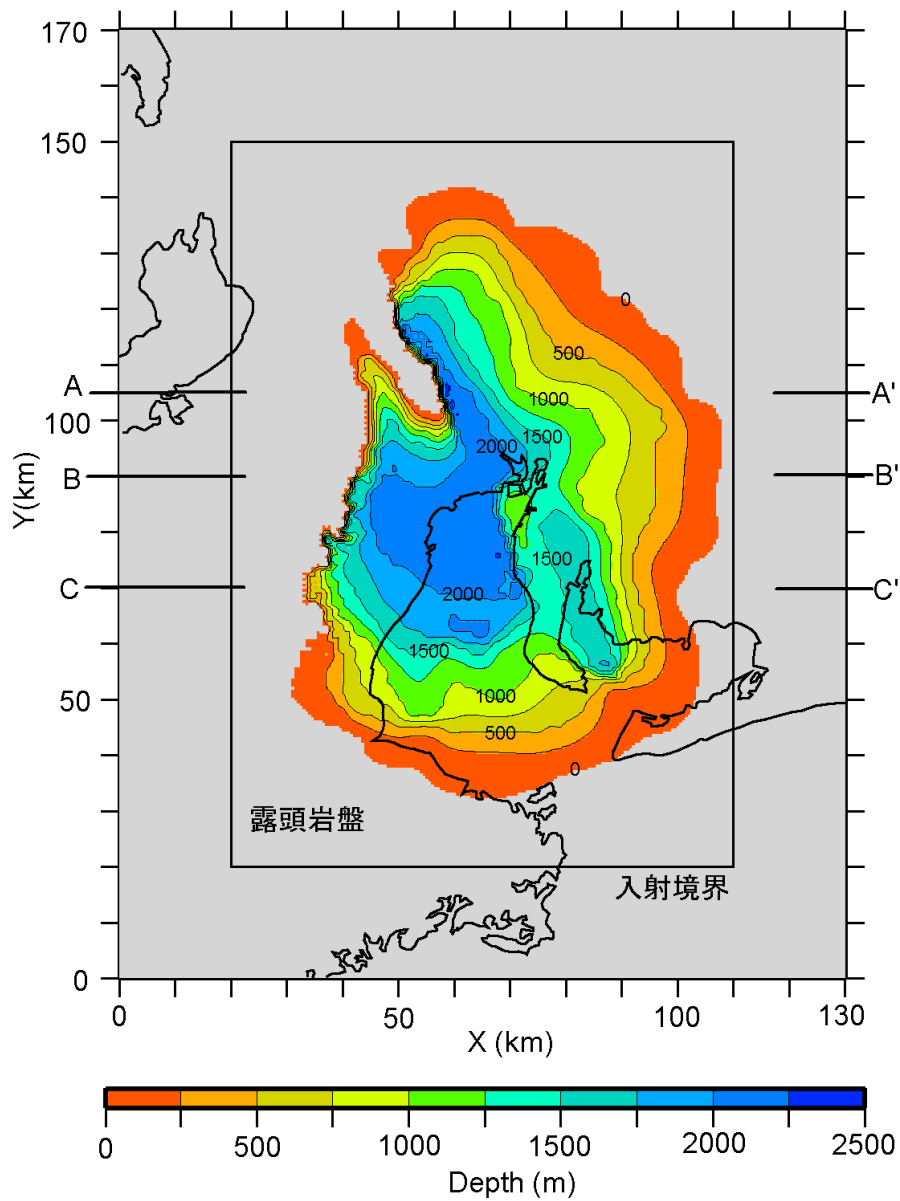


図-3 モデル化した基盤深度
Depth of bedrock

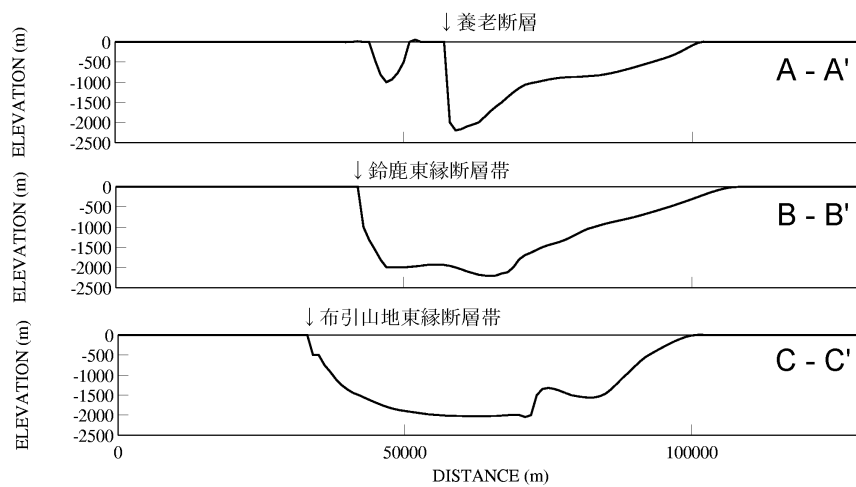


図-4 鉛直断面の例
Examples of vertical sections

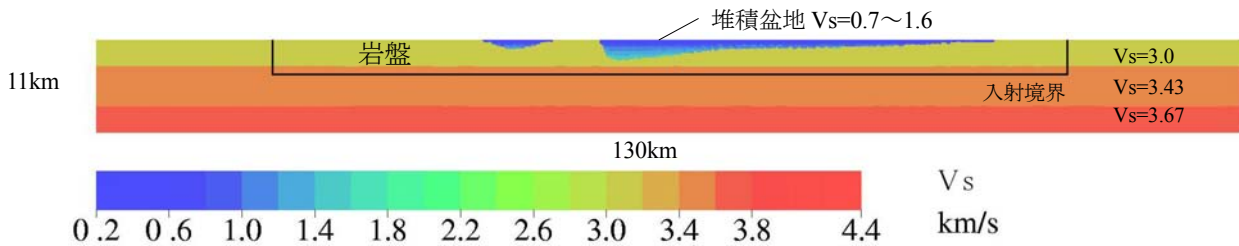


図-5 3次元有限要素モデルの鉛直断面（Y=105km 断面）
Vertical section of the finite element model (Y=105km vertical section)

表-3 堆積盆地の地盤物性
Soil parameters of sedimentary basin

上端深度 km	層厚 km	Vs km/s	Vp km/s	密度 g/cm ³	Q値 =1/(2h)
0	0~2.5	0.7~1.64	2.1~3.37	2.35	250f ^{1.0}

表-4 水平成層構造の地盤物性
Soil parameter of layered structure

上端深度 km	層厚 km	Vs km/s	Vp km/s	密度 g/cm ³	Q値 =1/(2h)
0	3	3.0	5.5	2.68	500f ^{1.0}
3	4.5	3.43	5.8	2.7	750f ^{1.0}
7.5	9.5	3.67	6.2	2.7	1000f ^{1.0}
17	18	3.78	6.7	2.9	1750f ^{1.0}
35	-	4.41	7.8	3.2	2500f ^{1.0}

5. 計算結果

5.1 すべり速度関数

インバージョン解析により、実地震のすべり速度関数の形状や分布はかなり不均質であることが明らかにされており、これらを単純な関数でモデル化するのは難しいが、将来の地震のシミュレーションのために仮定する必要がある。そこで、すべり速度関数の違いの影響を見るために、すべり速度関数を図-6 に示す3通りのケースを考慮して計算した。それぞれのケースで、 4×10 個のすべり関数のグラフは、図-1 に示した 4×10 個の小断層に対応しており、左下隅が断層の南西端、右上隅が断層の北東端に該当する。各グラフの中の左の数字は破壊開始時刻 (s)、右の数字はすべり量 (m) を表す。

中央防災会議の断層モデルでは、ライズタイムは 3.70 ~ 5.56 秒となっている。ケース 1 では、西側の 3 つのアスペリティーにおいて、底辺 3.7 秒の二等辺三角形を 1.85 秒ずらして 2 つ重ねた台形（底辺 5.55 秒）を用い、東端のアスペリティーおよび背景領域では底辺 3.7 秒の三角形一つで表現した。小要素内の積分点の数は、低振

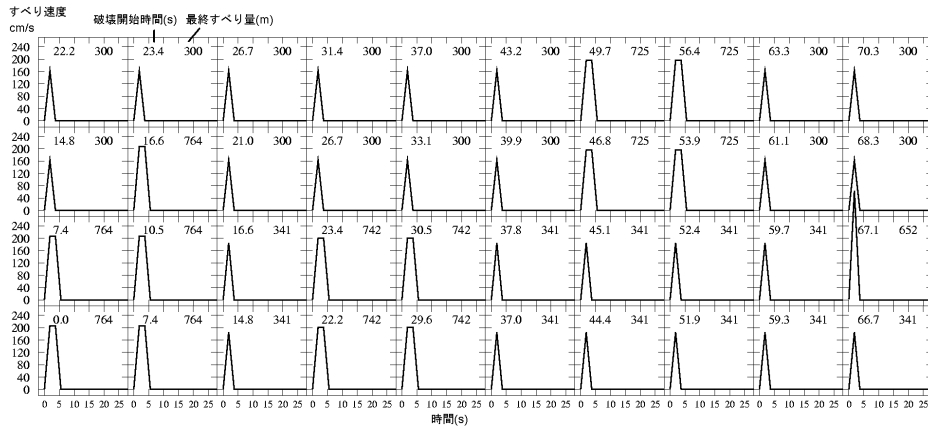
動数で 1 点、高振動数で $2 \times 2 = 4$ 点である。図-6(a)は低振動数の場合に相当する。積分点が増えると破壊伝播の影響が加味されて形状がもうすこし複雑になり、継続時間も伸びる。

ケース 2 では、Kikuchi et al. (2003)⁷⁾ が 1944 年の東南海地震のインバージョン解析から得たすべり関数を用いた。彼らの得たすべり関数を図-7 に示す。80km × 140km の領域を 4×7 個の小断層に分割して、それぞれの小断層ですべり関数が求められている。1944 年東南海地震の断層域は、図-1 の想定東南海地震の南側 4×7 ブロックの部分にほぼ相当している。そこで、インバージョン結果のすべりの大きい部分（太線）を取り出して、ケース 2（図-6(b)）のアスペリティー部分のすべり関数とした。背景領域のすべり関数は、インバージョン結果のすべりの少ない部分のものをを用いた。

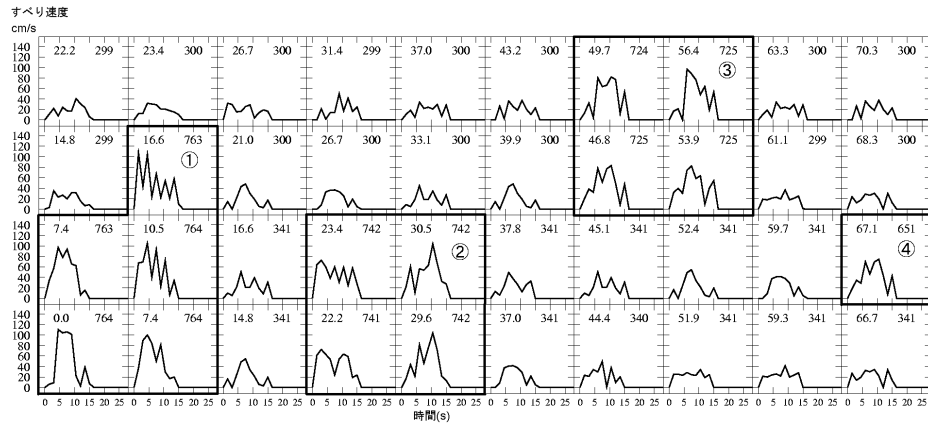
図-6(c)のケース 3 は、(1)式の指数関数型を用いた。

$$V(t) = V_0 \exp(-t/\tau_0) \quad (1)$$

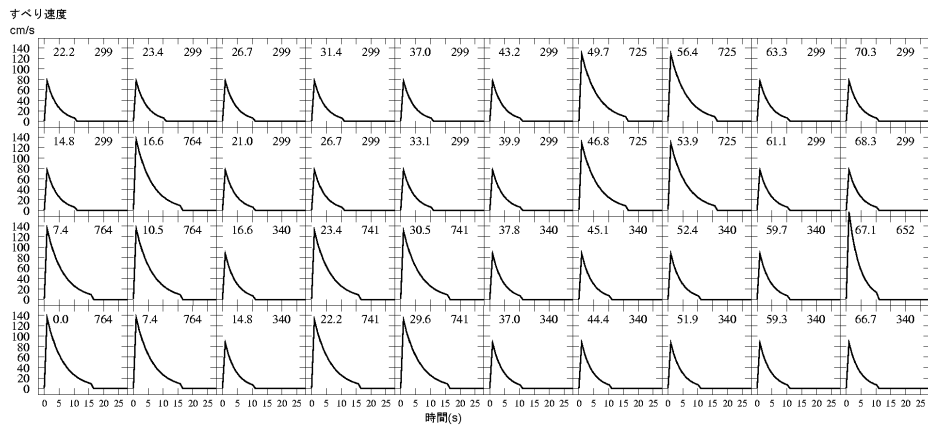
ここで、 $V(t)$ はすべり速度関数、 t は時間(s)、 V_0 は最大すべり速度(cm/s)、 τ_0 はライズタイム(s)である。この



(a) ケース 1
(三角形および台形)



(b) ケース 2
(1944 年東南海地震のインバージョン結果を利用)



(c) ケース 3
(指数関数型)

図-6 すべり速度関数
Slip velocity function

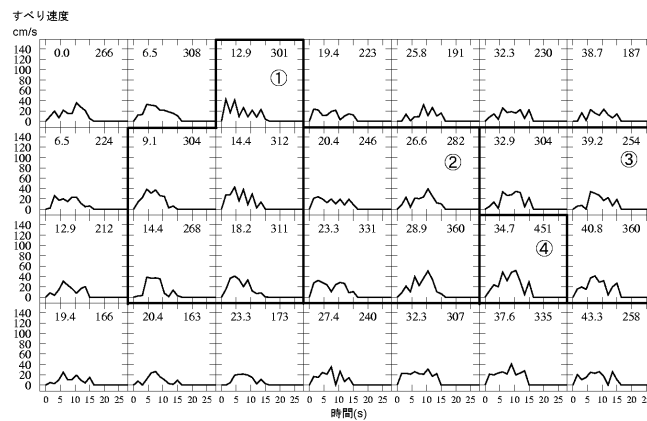


図-7 1944 年東南海地震のインバージョン解析から得られたすべり速度関数
Slip velocity function obtained from inversion analysis of the 1944 Tonankai earthquake

関数を底辺 1.85 秒の二等辺三角形を 0.925 秒ずつずらしながら重ね合わせて表現した。西側の 3 つのアスペリティーでは $\tau_0=5.55s$ 、東端のアスペリティーおよび背景領域では $\tau_0=3.7s$ とし、 $3\tau_0$ まで三角形を重ねてなだらかなスロープを表現した。

3 つのケースとも、すべり量（すべり速度関数の面積）は同じであり、従って地震モーメントは同じであり、その値は表-2 に示した中央防災会議の地震モーメントとなるようにしてある。

図-7 のインバージョン結果を見ると、すべりの最も大きいところ（太線①内）では、立ち上がりが急であり、ケース 3（図-6(c)）の指数関数型でよい近似になっているが、その他のすべりの大きい部分では三角形が多く、周辺部のすべりの小さいところでは台形型といえるものも多い。また、図-7 ですべり関数の中程でも高振動数成分が生じている点も異なる。ケース 1（図-

6(a)）の三角形または台形は図-7 と比べて継続時間が短く、形状も単純であり、小要素の分割が粗い場合はすべり関数の複雑な形状、破壊伝播による継続時間の伸びを考慮する必要があると考えられる。

5.2 スナップショットによる波動伝播の観察

図-8 にケース 1 の Y 成分(N S 成分)のスナップショットを示す。色の濃さは速度振幅の大きさを表しており、赤色が正(+北)、青色が負(+南)の符号を表している。

38 秒付近で南から濃尾平野に第 1 波の波が入射する。破壊開始点は断層面の南にあり(図-1 参照)、最初に濃尾平野に到達する波は南から到来する。48 秒の図にみるように、この波はほぼ北に伝播する。それにつづき、第 2 波以降も到来する。66 秒の図をみると、平野内に入った波は、増幅し(色が濃い)、波長が短くなり、伝播速度も遅くなる。断層面上を破壊が北東に伝播するので、

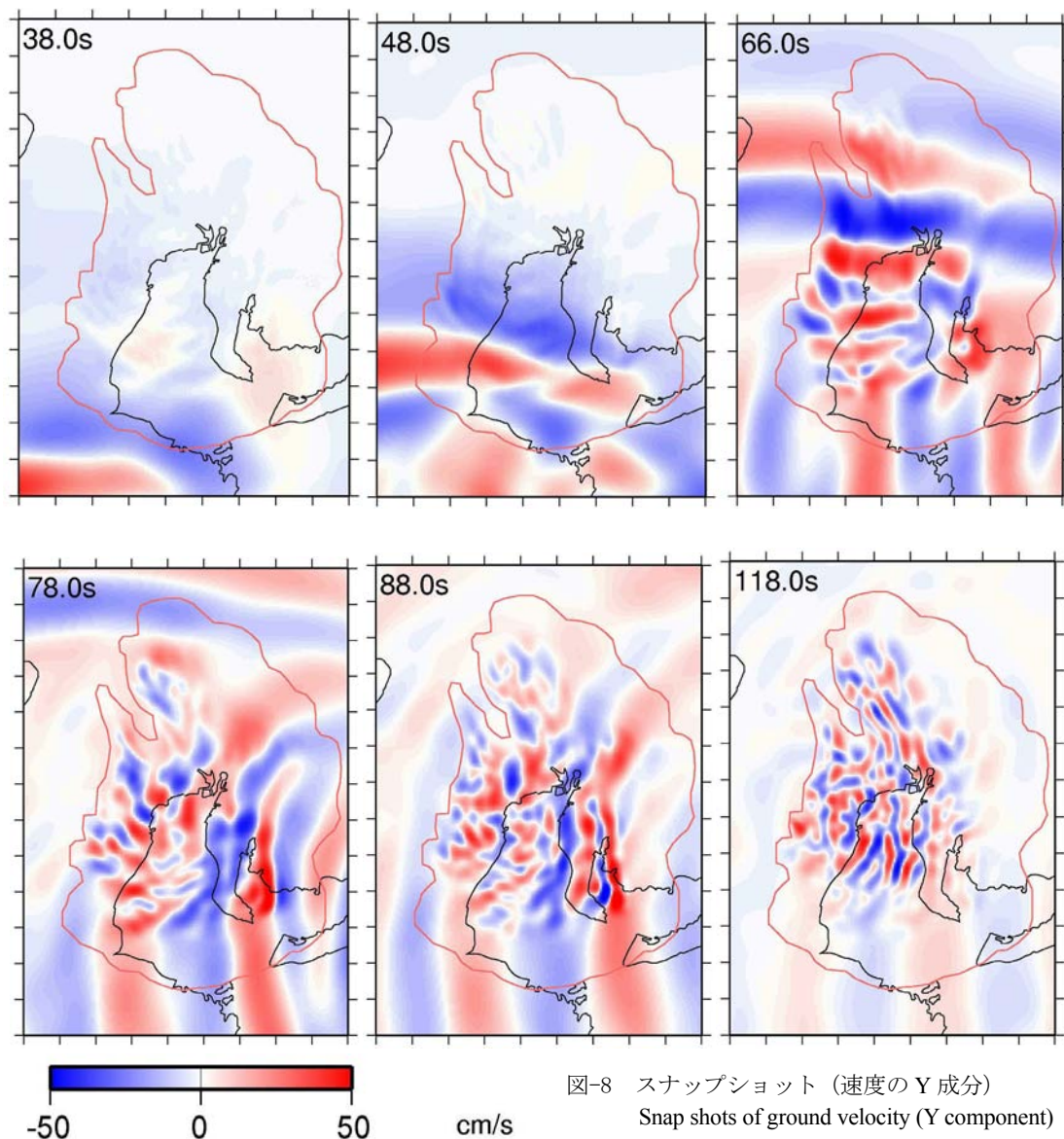


図-8 スナップショット（速度の Y 成分）
Snap shots of ground velocity (Y component)

濃尾平野からみて南東や東の方角から到来する波が増えてくる。78 秒の図をみると、渥美半島直下のアスペリティーからの地震波により波長が長く大きな振幅の波が現れているのがわかる。これらの地震波は東から西に伝

播する。88 秒の図をみると、引き続き東から西に波長が長く大きな振幅の波が伝播し、平野の中では波長の小さい波が励起される。118 秒の図をみると、波長が長い地震波が去ったあとも、波長の短い波が平野の中の閉じ

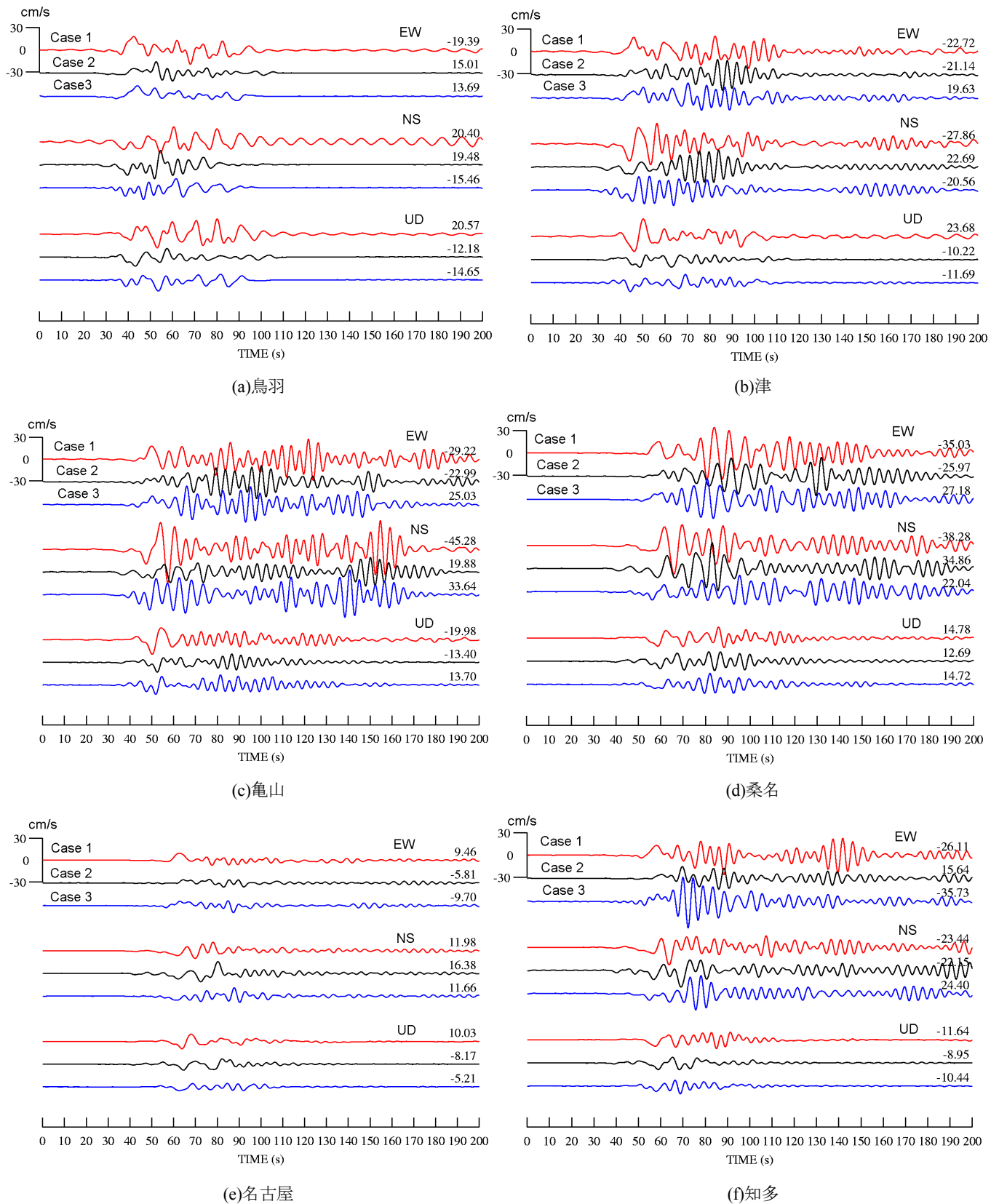


図-9 速度波形 (cm/s)
Velocity time history (cm/s)

こめられているのがわかる。平野の中に閉じこめられた地震波により、地震波の継続時間が長くなる。

5.3 時刻歴波形と応答スペクトル

図-9 に代表的な地点での速度波形を示す。3つのケースのEW、NS、UD成分を示し、いずれも周期3.57s から4.0s にスロープを有するローパスフィルターを通した結果である。

基盤に位置する鳥羽では、波長の長い地震波が卓越し、これは震源特性や伝播経路特性が現れていると考えられる。津、亀山、桑名と平野の北側に進むにつれ、盆地構造により生成された後続波が卓越してきて、地震波の継続時間が2分以上にも及ぶ。基盤がなだらかに浅くなっていく平野の北東部に位置する名古屋付近では振幅はかなり小さくなっている。

3つのケースを比較すると、ケース1が最も振幅が大きくなっている例が多く、また主要動の最初の部分の周期の長い波形の振幅が大きい。

図-10 に桑名と名古屋の速度応答スペクトルを示す。桑名では100cm/sを超える値となっている。名古屋では大きい方のNS成分で30~40cm/sの値である。ケース1は周期6~7秒以上で他より大きい傾向があり、すべ

り速度関数が単純すぎると過大評価になる可能性がある。ケース2とケース3の大小関係は一概に決まらないようであるが、差が有ることは確かであり、ケース3の様な関数で検討する場合でも、ケース2の様な検討を行ってばらつきを把握することが必要であると考えられる。

5.4 最大速度値分布

図-11 は、ケース2の最大速度振幅値(NS、EWで大きい方)を主要な市の市役所の位置で求めた結果である。四日市(40cm/s)、桑名(35cm/s)、鈴鹿(38cm/s)付近で大きな値となっている。その理由は、これらの市は基盤深度が最も深くなっている場所(図-3 参照)に位置しているため地震波が増幅しているからだと考えられる。また図-7 で見たように南および東から到来する波が集まってくる場所にあるのも理由であると考えられる。また、亀山(45cm/s)でも大きな値となっている。これは、平野の西縁で断層地形によって急激に落ち込んでいる基盤構造が壁のように働いて地震波が反射され、平野の際で地震波が強まっているものと考えられる。津(28cm/s)、松坂(12cm/s)、伊勢(14cm/s)、鳥羽(19cm/s)では、震源断層に近い割にそれほど大きな値になっていない。これは基盤深度が浅いため、地震波が増幅されないからだと考え

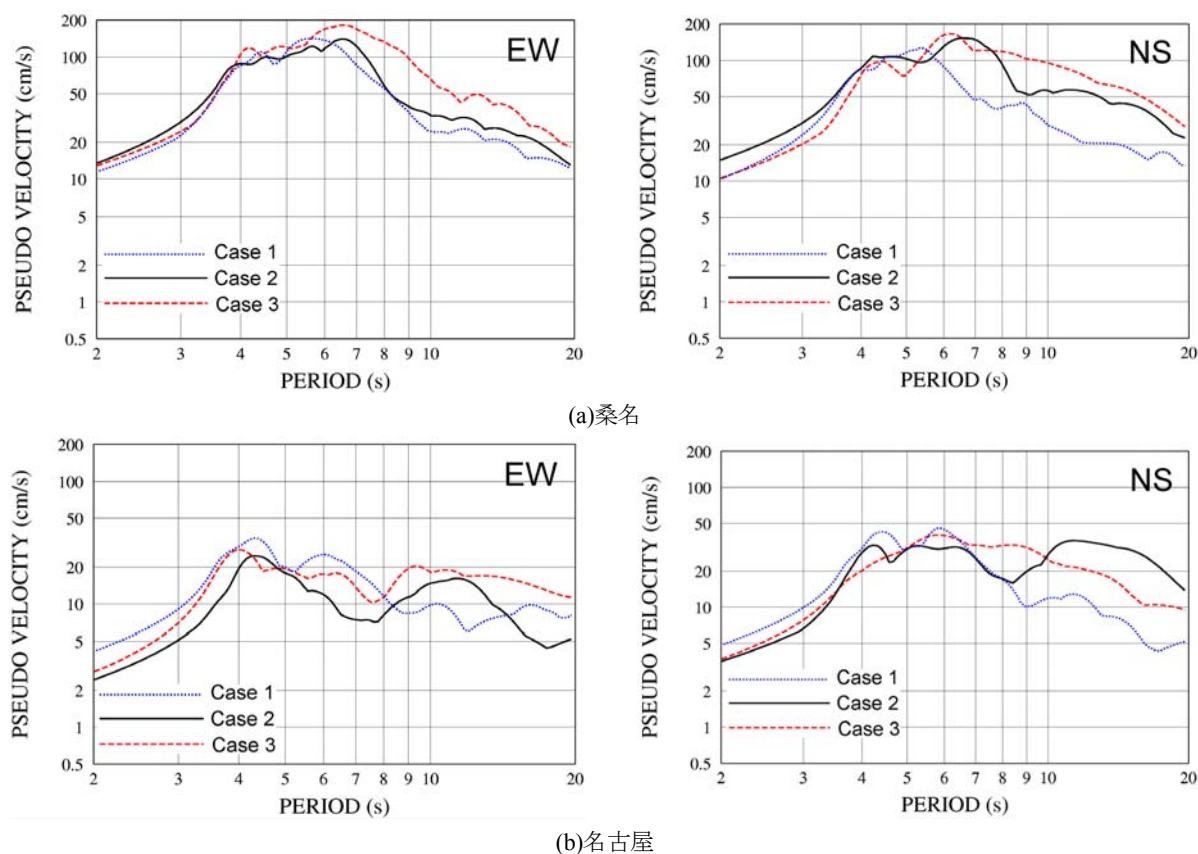


図-10 速度応答スペクトル(h=5%)
Velocity response spectra (h=5%)

られる。名古屋では 16cm/s となり、桑名等と比べてかなり小さい値となった。

図-12 は、ケース 2 の最大速度振幅値の分布をコンター表示したものである。陸地の水平成分をみると、桑名、鈴鹿、四日市などの、伊勢湾の北部と平野の東縁に挟まれた陸地で地震動が大きくなっているのがわかる。また、NS成分で顕著であるが、基盤が急激に深くなっている平野西縁に沿って地震動が大きくなる帯が生じている。

6. まとめ

断層面の破壊の進行に従って、最初は南から、最後は東から地震波が濃尾平野に到来する。平野内部では波長が短く伝播速度が遅い波が励起され、堆積地盤により振幅が増幅される。平野の中に閉じこめられた地震波により、地震波の継続時間が長くなり、2分以上に及ぶ。

長周期成分の最大速度振幅値は、四日市、桑名、鈴鹿の付近で大きな値となり、これはこの付近で基盤深度が最も深くなっているため地震波が増幅されること、及び、これらが南および東から到来する波が集まってくる場所に位置することが理由であると考えられる。また、亀山でも大きな値となり、これは断層地形によって急激に落ち込んでいる基盤構造が壁のように働いて地震波が反射され、平野の際で地震波が強まっているものと考えられる。津、松坂、伊勢、鳥羽では、震源断層に近い割にそれほど大きな値になっておらず、これは基盤深度が浅い

ため、地震波が増幅されないからだと考えられる。名古屋では桑名等と比べかなり地震動強さは小さくなった。

謝辞

工学院大学の久田嘉章教授より波数積分法プログラム用に整理した 1944 年南海地震のすべり速度関数のデータ⁸⁾を頂きました。記して感謝致します。

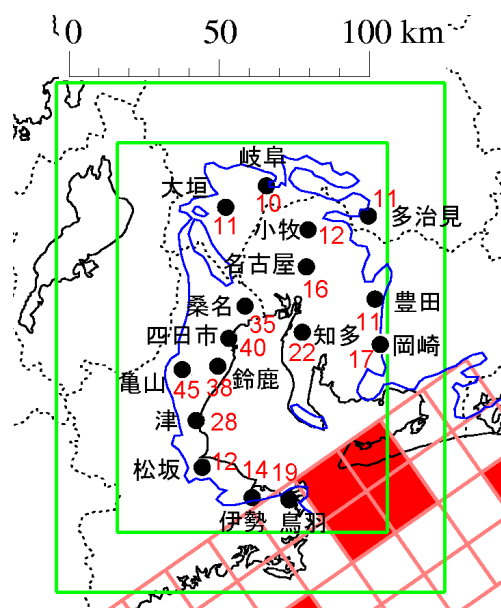


図-11 主要な都市における最大速度値 (cm/s)
Peak ground velocity at major cities (cm/s)

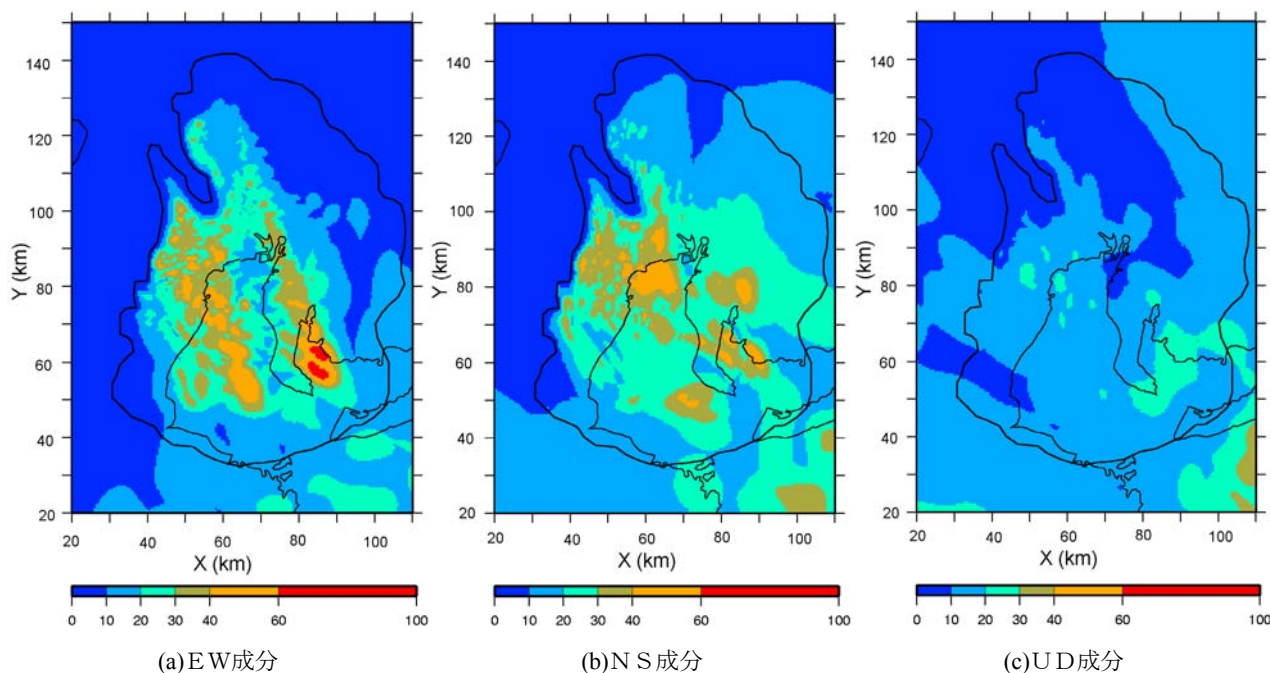


図-12 最大速度値の分布 (cm/s)
Distribution of peak ground velocity (cm/s)

参考文献

- 1) 吉村智昭, 前田寿朗: 領域縮小法による3次元丘地形の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第564号, pp.55-62, 2003.
- 2) 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.48-57, 1997.
- 3) 中央防災会議「東南海, 南海地震等に関する専門調査会」(第7回), 平成14年12月24日 資料
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/7/index.html>
- 4) 三重県: 伊勢平野に関する地下構造調査, 2003年活断層調査成果及び堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 85-95, 2003.
- 5) 早川他: 愛知県名古屋を対象とした設計用地震動策定のための地下構造のモデル化, 日本建築学会大会, B-2, 131-132, 2002.
- 6) 佐藤他: 愛知県名古屋を対象とした設計用地震動策定のための地下構造のモデル化 その1 全体方針および伝播経路のモデル化, 日本建築学会大会, B-2, 129-130, 2002.
- 7) Masayuki Kikuchi, Misao Nakamura and Kazumitsu Yoshikawa: Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, *Earth Planets Space*, Vol. 55 (No. 4), pp.159-172, 2003.
- 8) 高圧ガス保安協会, 石油精製業保安対策に関する報告書 平成15年3月, 2003.