

南関東地域における都市ガス供給網の地震リスク評価のための地震ハザード解析 SEISMIC HAZARD ANALYSIS FOR RISK EVALUATION OF CITY GAS NETWORKS IN THE SOUTHERN KANTO REGION

福岡淳也¹，磯山龍二²，清水善久³，中山渉⁴，石田栄介⁵，山崎文雄⁶

¹ 日本技術開発(株)防災・リニューアル部

Junya Fukuoka, Natural Disaster Mitigation Engineering Dept., Japan Engineering Consultants Co., Ltd., fukuokajy@jecc.co.jp

² 日本技術開発(株)国土保全技術センター，工博

Ryoji Isoyama, Land Management Technology Center, Japan Engineering Consultants Co., Ltd., isoyama@jecc.co.jp

³ 東京ガス(株)防災供給センター，博(工)

Yoshihisa Shimizu, The Center for Supply Control and Disaster Management, Tokyo Gas Co., Ltd., yshimizu@tokyo-gas.co.jp

⁴ 東京ガス(株)防災供給センター

Wataru Nakayama, The Center for Supply Control and Disaster Management, Tokyo Gas Co., Ltd., wataru@tokyo-gas.co.jp

⁵ 日本技術開発(株)国土保全技術センター，博(工)

Eisuke Ishida, Natural Disaster Mitigation Engineering Dept., Japan Engineering Consultants Co., Ltd., isidae@jecc.co.jp

⁶ 東京大学 生産技術研究所，工博

Fumio Yamazaki, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, yamazaki@iis.u-tokyo.ac.jp

SUMMARY

A procedure for seismic risk evaluation for a large-scale city gas system is established. Seismic hazard for the supply area is evaluated by types of four source models: 1) area source models established by historical and instrumental earthquakes and seismotectonic structure, 2) active faults in consideration of time-dependence of an earthquake occurrence, 3) plate boundary zone earthquakes, 4) an area source models in consideration of recent (200years) seismic activity in the southern kanto region. In order to consider the local ground structure characteristics, amplification ratio of SI-value based on about 60,000 boring data in area is used for evaluating the surface seismic hazard. Seismic risks of gas pipes are evaluated based on the seismic hazard analyses.

キーワード: 地震リスク，地震ハザード，都市ガス供給システム，南関東地域，SUPREME

Key words: Seismic Risk, Seismic Hazard, City Gas Supply System, the Southern Kanto Region, SUPREME

1 はじめに

大規模なライフライン、たとえば都市ガス供給システムの地震対策を合理的に進めていくためには、そのシステムが持つ地震リスクを適切に評価し、費用対効果に配慮しながら、対策の要否、あるいは対策の優先順位などを決定していく必要がある。このような研究は1980年代から行われてきたが、大規模なライフラインシステムを対象に、実質的な意味で地震リスクが評価されたことはほとんどなかったと言ってよい。

本論文では、都市ガスシステムを想定した地震リスク評価全体の流れを示すとともに、南関東地域の地震活動の特性を考慮した地震ハザードの評価手法を提案する。また、この地震ハザード解析結果に基づき、施設の地震リスクを

評価した例を示す。

2 地震リスク評価の流れ

我々が想定している地震リスク評価と対策への反映の流れを概念的に Fig.1 に示す。地震リスクは基本的にシステムが持つ損失期待値で表し、直接損失と間接損失の和とする。

$$TL_j = \sum_i (DL_j(i) + IL_j(i)) * P_j(i) \quad (1)$$

ここで TL_j は j 地点の損失期待値、 $DL_j(i)$ 、 $IL_j(i)$ は各々、 j 地点における i という地震動が発生した場合の直接損失(額)および間接損失額である。 $P_j(i)$ は j 地点における地表面の地震ハザード(地震動 i の超過確率)である。直接

損失とは、ガス導管の地震被害の修理・復旧費用および、供給停止・供給減少による収入減等であり、間接損失とは、ガス導管の被害に起因する出火・延焼等による被害を指す。本論文では、主に上記地震リスク算出の基本となる地震ハザード、 $P_j(i)$ の評価方法について報告する。

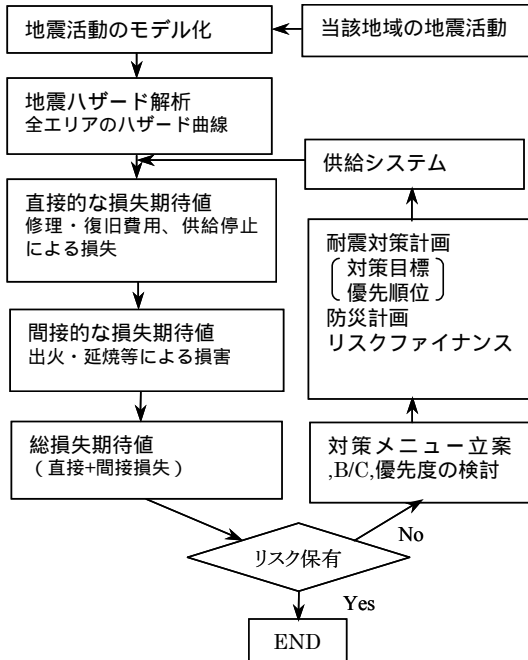


Fig. 1 Flow chart of the seismic risk assessment

3 地震ハザード解析の枠組み

Fig. 2.に本論文における地震ハザード算出の全体フローを示す。

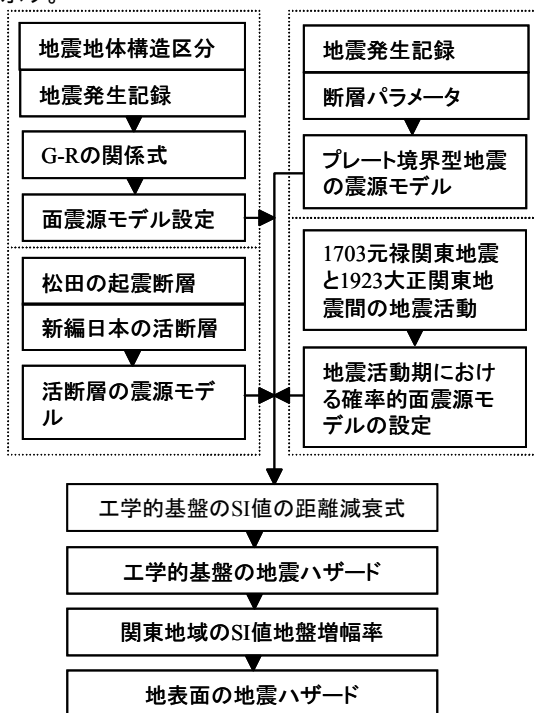


Fig. 2 Flow chart of the seismic hazard analysis

地震ハザード算出のための震源モデルとして、以下の4つの震源モデルを仮定した。地震発生記録と地震地体構造区分から Gutenberg-Richter の関係式を用いて地震発生特性を設定した面震源、最新活動時期や平均活動間隔等のパラメータから地震発生の切迫性を考慮して地震発生確率を算出した活断層の震源モデル、プレート境界型地震の断層モデル、関東地域の地震活動の周期性を考慮した震源モデル。

地震動強さの指標としては、都市ガス施設の防災で一般的に用いられる SI 値とした。Vs=600(m/s)程度の工学的基盤において、被害と相関が高いと考えられる SI 値の距離減衰式を用い、各震源モデルでのハザード評価を行った。

次に、各震源が互いに独立であるものとして合成して工学的基盤上の包括的なハザードを算出した。

最後に、SUPREME¹⁾で整備された、約6万本のボーリングデータに基づく関東地域の50mメッシュのSI値地盤増幅率分布を用い²⁾、地表面での地震ハザードマップ・ハザードカーブを算出し、地震リスク評価に用いた。

4 震源モデル

4.1 地震発生記録に基づく面震源モデル

ハザード算出のための地震発生記録として、概ね定期的な記録の累積が見られる、1926年～1996年7月の気象庁月報の地震発生記録(Mj 5.0, 震源深さ 100km)を用いた。1926年以前の記録は、被害地震を対象とした記録であることから、地震発生記録としては信頼性に乏しく、解析には用いなかった。Fig.3 に地震発生記録の分布を示す。

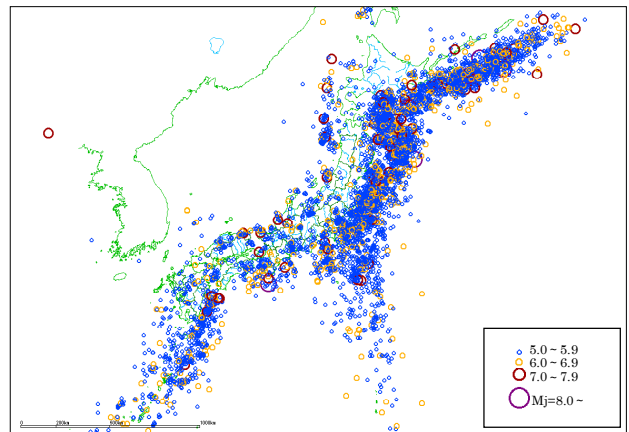


Fig. 3 Distribution of instrumental earthquakes (1926-1996)

地震地体構造区分は安中ら³⁾の面震源モデルを基本として、フィリピン海プレート(Fig.4)、太平洋プレート(Fig.5)、大陸プレート(Fig.6)を、プレートの沈込み方向を考慮して3次元的にモデル化した。この面震源モデルと地震発生記録を GIS 上で重ね合わせ、各面震源で Gutenberg-Richter の関係式を用い、マグニチュード分布、平均発生率等の地震発生特性を評価した。時間軸上はポアソン過程に従うものとした。

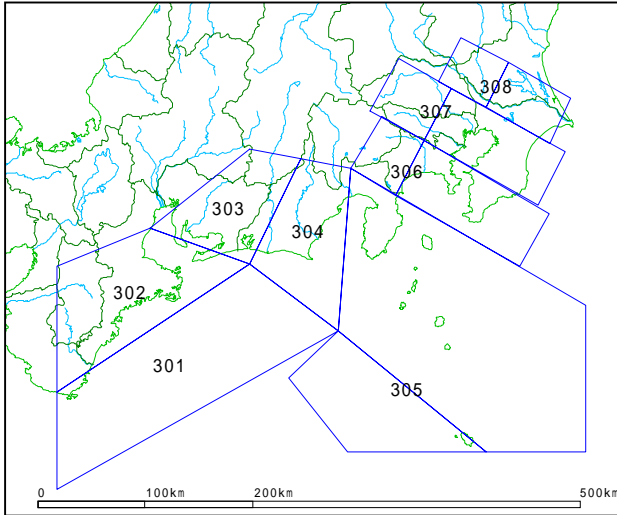


Fig. 4 Area source model for the Philippine Sea plate

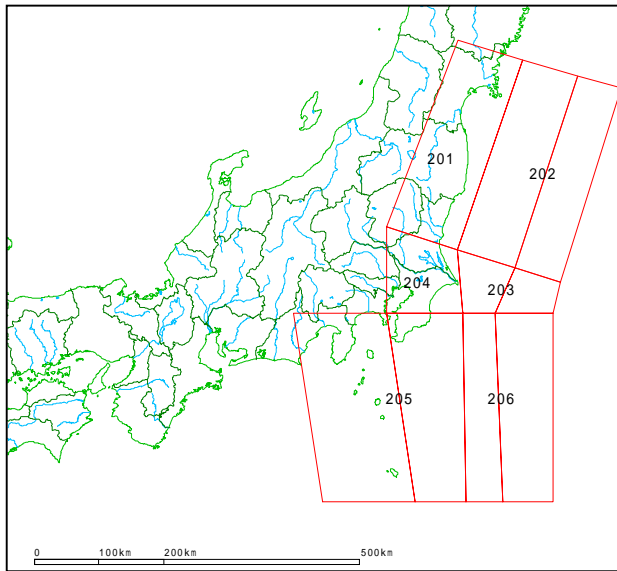


Fig. 5 Area source model for the Pacific plate

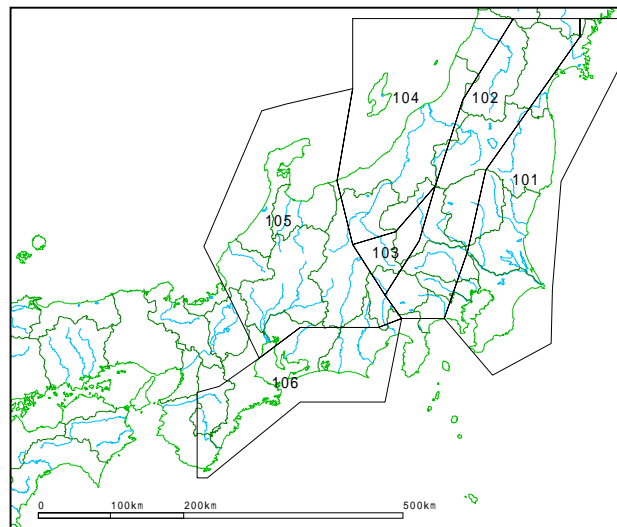


Fig. 6 Area source model for the North America Plate and Eurasia Plate

4.2 活断層

活断層を震源とする地震ハザードでは、固有地震説に基づく最大マグニチュードモデルを用いた。これは、個々の活断層は起こりうる最大規模の地震をほぼ同様の間隔で繰り返し発生するとしたモデルである。最新活動時期が未知の場合、地震の発生はポアソン過程に従うと仮定した。最新活動時期が既知な活断層については、地震発生周期性を考慮するものとし、発生周期のばらつきは対数正規分布に従うものとした。また、対数正規分布の標準偏差は地震調査推進本部の検討結果に基づき 0.23⁴⁾を用いた。地震発生確率の非正常性を考慮する場合の計算期間は、2001年以降 100年間としている。

断層の位置情報は[新編]日本の活断層⁵⁾をモデル化し、諸元データについては松田ら⁶⁾による起震断層を基本とし、最新の知見に基づくパラメータを設定した。Fig.7 は本論文で用いた活断層の分布である。活断層の諸元は Table1 に示した。

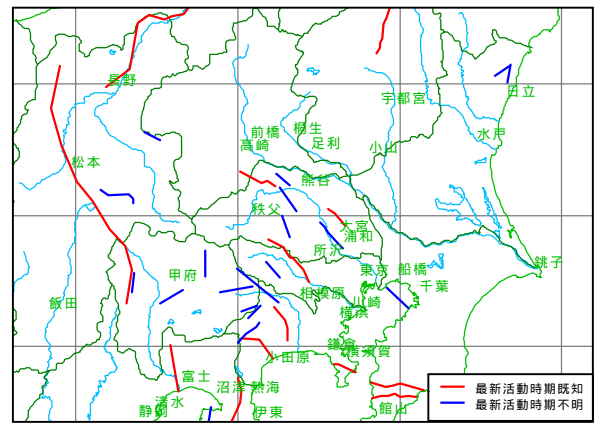


Fig. 7 Distribution of active faults in the kanto region

Table 1 Parameters of active faults in the kanto region

起震断層名	断層長さ km	マグニチュード	活動度	平均変位速度 μ/1000年	活動間隔 x/1000年	最新活動時期 からの経過年
閉谷断層	40	7.5	A	5.00	0.6	300
鶴川地溝帯 北断層	29	7.3	AB	1.00	2.3	10000
鶴川地溝帯 南断層	26	7.2	AB	1.00	2.1	6000
平井・柳抜断層帯	20	7.0	B	0.25	7.9	10000
元荒川断層帯	16	6.8	B	0.30	6.9	5000
荒川断層	20	7.0	B	0.20	8.0	-
立川断層帯	25	7.1	B	0.50	5.0	1400
北武断層群	15.2	6.8	A	0.40	1.0	1400
伊勢原断層	13	7.0	B	0.50	3.3	1100
神橋・国府津・松田断層帯	25	8.0	A	3.00	3.0	3000
丹那断層帯	30	7.3	A	2.00	1.2	70
富士川河口断層帯	20	8.0	A	7.00	1.1	2100
信濃川断層帯	106	8.0	A	5.00	1.0	150
糸静線中部断層帯	100	8.0	A	14.00	1.0	1200
白馬断層	-	-	-	-	-	-
霧ヶ峰断層帯	20	7.0	A	5.00	0.3	-
浅間西断層群	10	6.5	AB	1	0.8	-
深谷断層	10	6.5	B	0.3	2.6	-
江南・今市・菅谷断層帯	16	6.8	C	0.1	12.7	-
越生断層	13	6.7	C	0.05	20.7	-
鶴川断層	30	7.3	C	0.05	47.7	-
崩山断層	18	6.9	BC	0.1	14.3	-
長者倉断層	10	6.5	B	0.5	1.6	-
通志川断層	10	6.5	BC	0.1	7.9	-
玄倉断層	10	6.5	B	0.5	1.6	-
大吾藤嶺西側断層	14	6.7	C	0.05	22.2	-
曾根丘陵断層帯	15	6.8	B	0.5	2.4	-
達磨山断層帯	12	6.6	B	0.5	1.9	-
関口 奥碓	10	6.5	D	0.005	158.9	-
関口 米平	10	6.5	D	0.005	158.9	-
東京湾北部断層	25	7.2	B	0.1	19.9	-
五日市断層	10	6.5	C	0.05	15.9	-
大ナジカ峠断層	10	6.5	B	0.5	1.6	-

4.3 プレート境界型地震

プレート境界型地震として、関東地震、西相模断裂(神奈川県西部地震)、東海・東南海地震の断層モデルを用いた。最新活動時期が既知な活断層と同様に、地震発生の周期性を考慮して地震発生確率を算出し、地震規模は最大マグニチュードモデルに従うものとした。関東地震の震源モデルでは、大正関東地震(1923)に活動した領域と、元禄関東地震(1703)の震源領域の一部である千葉県沖の領域(大正関東地震時の活動領域とは重複しない)は、独自に活動するものとした。各断層モデルの位置については、断層パラメータハンドブック⁷⁾に従った。Fig.8 に解析に用いたプレート境界型地震の震源モデルを示し、Table2 に各震源モデルのパラメータを示す。

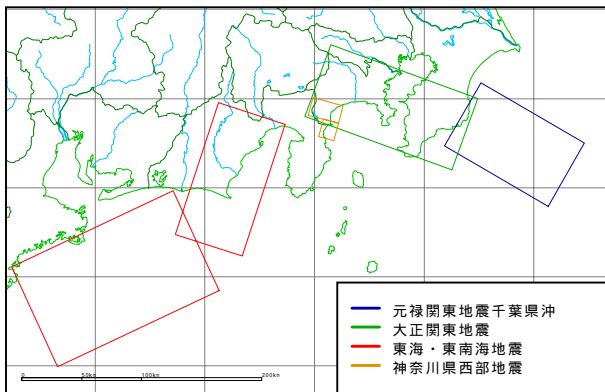


Fig. 8 Distribution of the source models for plate boundary zone earthquakes

Table 2 Parameters for the plate boundary zone earthquakes

名称	地震規模 (Mj)	最新活動時期(年)	活動間隔(年)
元禄関東地震 (千葉県沖)	7.9	1703	440
大正関東地震	7.9	1923	220
東海・東南海地震	8.1	1944	119
神奈川県西部地震	7.0	78	73

4.4 地震活動の周期性を考慮した震源モデル

関東地域における地震活動は、相模トラフ上での巨大地震の発生間隔を1周期として、巨大地震前の活動期と巨大地震後の静穏期に分けられる。前回の相模トラフ上の地震が1923年であることから、有意な地震発生記録(1926~)は静穏期のみで構成されている。このため、地震発生記録を用いた震源モデルでは、今後想定される地震活動期のハザードを算出できない。本検討では、元禄関東地震(1703)から大正関東地震(1923)に着目し、この220年間に於ける歴史地震カタログからでも推定可能な地震活動の変化から、地震活動期の震源モデルを構築した。Fig.9 は関東地域(東京ガス本社から半径40kmの円形の領域)で、SI値20kine以上と推定される記録を、距離減衰式を適用して抽出し、時間を横軸にして年ごとの累積発生回数をプ

ロットしたものである。元禄関東地震から大正関東地震の220年間で20回の地震が抽出されており、大正関東地震の直前に発生が集中している。大正関東地震以後78年経過しているが、抽出された地震は余震を除くと2回のみとなった。本検討では、この差を相模トラフ上の巨大地震を区切りとする関東地域における地震活動変化と捉え、これを定量的に評価して解析手法に取り込み、今後の地震活動期におけるハザード評価を行った。なお、余震の判定手法に関しては、建設省土木研究所資料⁸⁾に基づいた。

Fig.9の実線は、プロットの指数関数型の回帰曲線である。大正関東地震後の地震活動についてもこの回帰曲線(式(2))に従うと仮定し、活動期における関東地域の地震発生率を算出した。

$$=(0.52\exp(0.0163(x+78))-2)/x \tag{2}$$

x:地震ハザードの計算期間

:x年間で地震発生率(回/年)

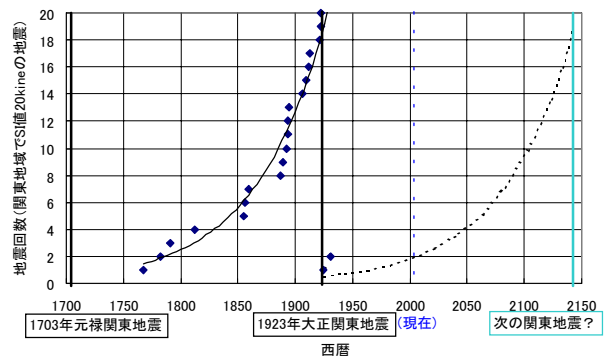


Fig. 9 Relation of the Kanto earthquake and numbers of earthquake in southern kanto region (SI > 20kine)

地震規模は、Fig.9 に示した地震の地震モーメントの平均よりMj=6.6とした。発生位置は、地震の分布(Fig.10)より設定した矩形領域(Fig.10の実線で示した領域)内でランダムに発生するものとした。たとえば、計算期間を100年間ですれば、式(2)より、この領域内の地震発生率は約0.075(回/年)となる。

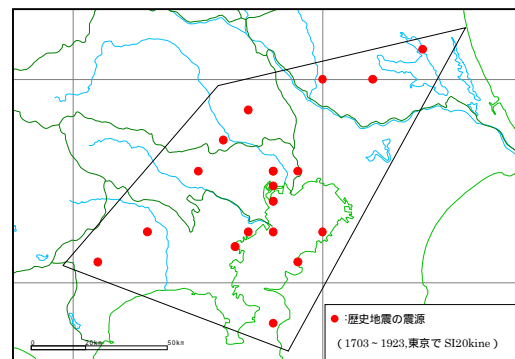


Fig.10 Area source model of the southern kanto region considering time-dependent seismicity

5 工学的基盤における地震ハザード

各震源モデルの地震ハザードを算出し、互いに独立として重ね合わせ、工学的基盤($V_s=600\text{m/s}$)での関東地域の包括的な地震ハザードを算出した。地震ハザード算出には、SI 値の距離減衰式(Fig. 11)を用いた。

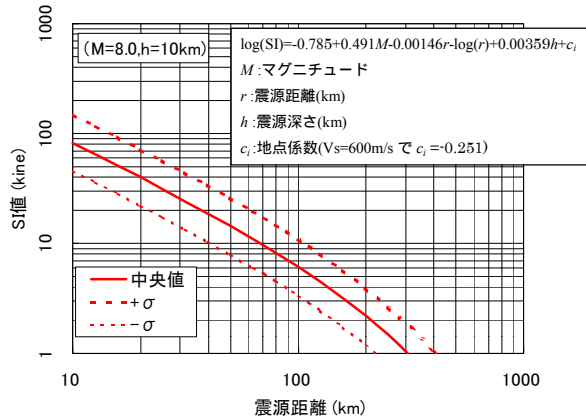


Fig.11 Attenuation function for the SI-value used in the analyses

Fig. 12 は工学的基盤での今後 100 年間の超過確率 9.5% の SI 値分布であり、これは再現期間 1000 年の地震動強度に相当する。これを見ると、総じて南部の沿岸地域において地震ハザードが高く評価されており、とくに東海地震、神奈川県西部地震、糸魚川 - 静岡構造線の震源近傍でハザードが高い。

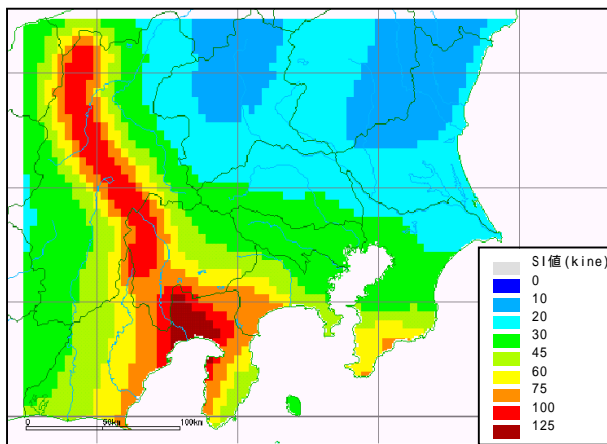


Fig.12 Seismic hazard map on the base rock level ($V_s=600\text{m/s}$) (the probability of exceedance in 100years: 9.5%)

Fig. 13 は東京ガス本社地点の工学的基盤位置での地震ハザード曲線である。100 年間で 30kine を超過する確率は約 14%、60kine を超過する確率は約 1.3%となった。低い地震動レベルでは、地震発生記録に基づく面震源や地震活動期のハザードの影響が大きいが、30kine を越えるとプレート境界型地震によるハザードの影響が支配的となることが分かる。活断層によるハザードは概して小さい。これは、関東地域近傍に切迫性の高い活断層が存在し

ないことに起因する。

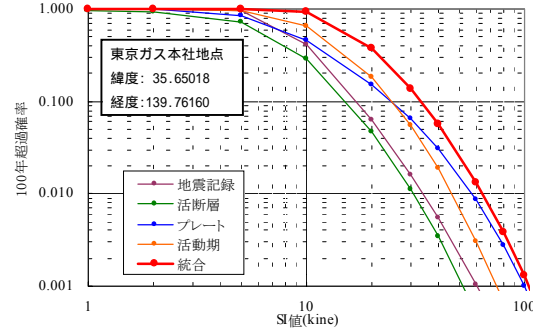


Fig.13 Seismic hazard curve on the base rock ($V_s=600\text{m/s}$)

6 地表面における地震ハザード

表層地盤のローカルな地盤特性を考慮するため、著者が提案している約 6 万本のボーリングデータに基づく SI 値の増幅率ゾーニング結果²⁾(Fig.14)を用い、マイクロな地盤条件を考慮した地表面の地震ハザードを算出した。

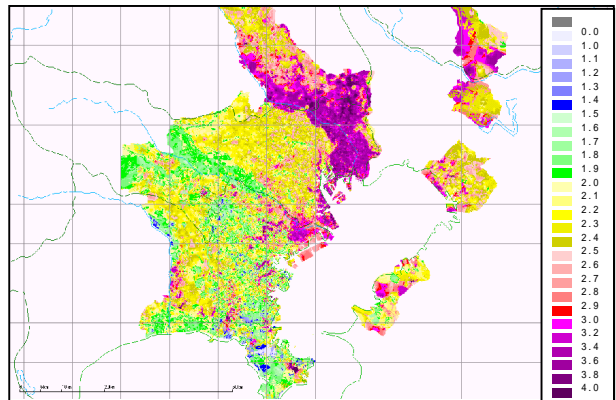


Fig.14 Distribution of the amplification ratio of SI-value²⁾

Fig. 15 は地表面での今後 100 年間の超過確率 39.5% の SI 値分布であり、これは再現期間 200 年の地震動強度に相当する。神奈川県南部でのハザードが高いことに加え、東京東部低地や川崎市沿岸地域のような軟弱地盤上での地震ハザードが高くなっている。

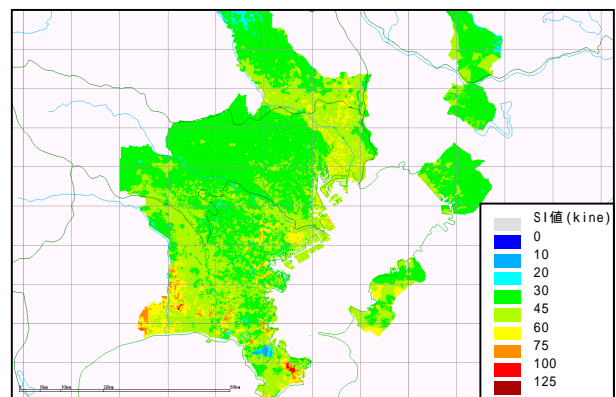


Fig.15 Seismic hazard map on the ground surface (the probability of exceedance in 100years: 39.5%)

Fig. 16 は地表面での今後 100 年間の超過確率 9.5% の SI

値分布である(Fig.12 に対応)。地震ハザードの低い地点でも 60kine、神奈川県南部や軟弱地盤上では 100kine を超過する結果となった。

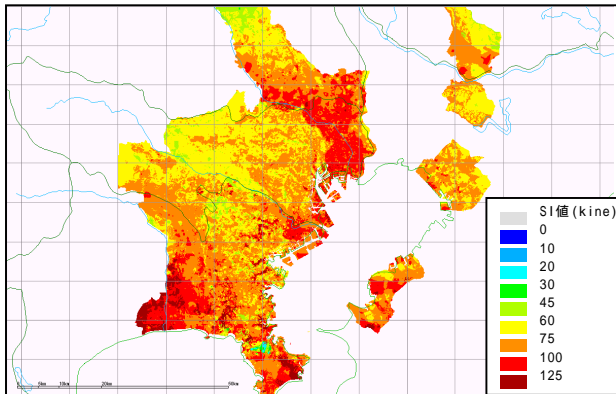


Fig.16 Seismic hazard map on the ground surface (the probability of exceedance in 100years: 9.5%)

Fig.17 は東京ガス本社地点の地表面での地震ハザード曲線である。100年間で 30kine を超過する確率は約 81%、60kine を超過する確率は約 29%という結果となった。

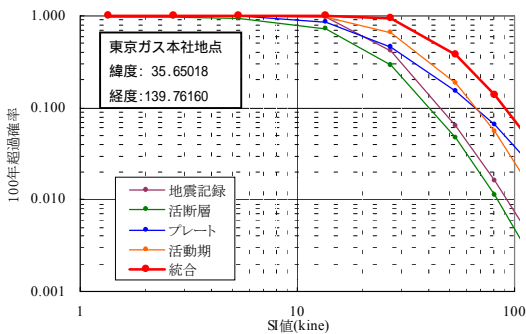


Fig.17 Seismic hazard curve on the ground surface

7 低圧導管の地震リスク評価

地震ハザード結果と、SUPREME¹⁾に実装された被害想定システムを用い、低圧管の被害箇所数の期待値を算出した。Fig.18 は 15 年間での、Fig.19 は 100 年間での被害箇所数の期待値を都市ガス供給ブロック(L ブロック)ごとに示したものである。供給エリア全体では今後 15 年で約 1,050 箇所、100 年で約 8,800 箇所の期待被害箇所数となった。

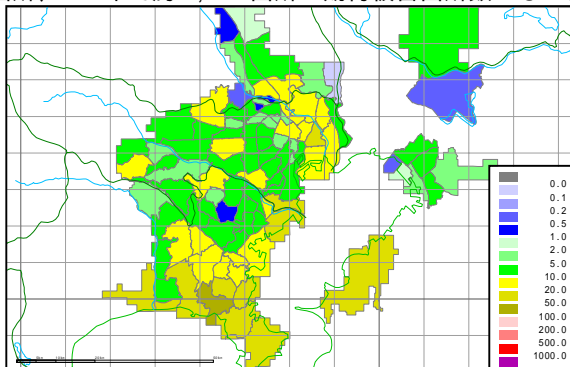


Fig.18 Expected value of breaks for low-pressure pipes in 15 year period

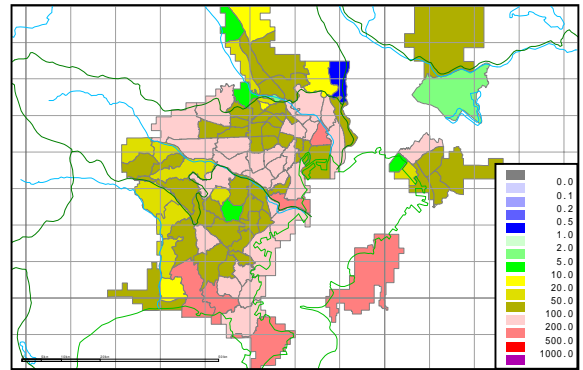


Fig.19 Expected value of breaks for low-pressure pipes in 100 year period

8 まとめ

地震発生記録、活断層、プレート境界型地震、地震活動期の震源モデルを取り込み、SI 値増幅率を考慮した地表面での包括的な地震ハザードを算出した。

さらに、低圧ガス導管の被害期待値を算出することにより、直接被害の地震リスクを評価した。

神奈川県南部および、川崎市南部や東京東部低地等の軟弱地盤上で高い地震ハザードとなった。

低圧管の被害箇所数の期待値は、15 年間で 1,050 箇所、100 年間で約 8,800 箇所となった。

本論文で示した地震リスク評価に加え、今後、出火・延焼等の間接被害の地震リスクおよび、直接・間接被害の総損失額を算出し、投資効果を明確にした戦略的防災投資等の地震リスクマネジメントを実施していく予定である。

参考文献

- 1) 清水善久:東京ガスにおけるリアルタイム地震防災システム,第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集,pp.127-134,2000.5
- 2) 石田栄介,磯山龍二,山崎文雄,清水善久,中山渉:防災 GIS を用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面的分布推定に関する検討,第 26 回地震工学研究会講演論文集,pp.421-424,2001.8
- 3) 安中正,嶋田昌義,弘重智彦:モンテカルロ手法に基づく関東および周辺地域に対する地震ハザード曲線の不確定性評価モデル,第 26 回地震工学研究会講演論文集,pp.133-136,2001.8
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:改訂試案「長期的な地震発生確率の評価手法について」,1999.1
- 5) 活断層研究会:[新編]日本の活断層 - 分布図と資料,東京大学出版会,1991
- 6) 松田時彦,塚崎明美,萩谷まり:日本陸域の主な活断層と地震の表-断層と地震の地域別分布関係-,活断層研究 19,pp.33-54,2000
- 7) 佐藤良輔編著:日本の地震断層パラメータハンドブック,鹿島出版会,1989
- 8) 建設省土木研究所:前・余震の頻度および規模に関する調査,土木研究所資料第 1995 号,1983.3