

# 2011年東北地方太平洋沖地震における道路網 および上・下水道網の被害の空間相関 —茨城県神栖市における事例分析—

水野 陽介<sup>1</sup>・那波 悟志<sup>2</sup>・庄司 学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 筑波大学理工学群工学システム学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s0911271@u.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s1021001@u.tsukuba.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 筑波大学システム情報系准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震において液状化による被害の顕著であった茨城県神栖市を取り上げ、市内でのライフラインシステムの被害の特徴について分析を行った。具体的には、神栖市内の道路網、配水管網および污水管網の被害の位置情報と液状化被害の発生した家屋の位置情報を収集し、それぞれについて、地震動強さおよび地盤情報と被害率の関係について分析を行った。また、同様に神栖市内の道路網、配水管網および污水管網の被害と液状化被害の発生した家屋の間の空間的な相関関係を、地震動強さおよび地盤情報の観点から明らかにした。

**Key Words :** *The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, road network, water supply system, sewerage system, damage ratio, spatial correlation*

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東日本全域においてライフライン施設に甚大な被害が発生し、社会経済活動に大きな影響をもたらした。それらの要因としては、津波による甚大な被害に加え、地震動、液状化による被害や、ライフライン被害の相互の物理的・機能的な連関により、多様な損傷モードの被害が発生したことが挙げられる。これらの被害データを集計し、統計的に分析することは、将来の発生が予測されている東南海・南海等の巨大プレート間地震や首都直下などの大規模地震に対して、被害想定とその事前対策の立案の観点から極めて重要である。これまでに、土木学会東日本大震災被害調査団による道路<sup>1)</sup>および上水道施設<sup>2)</sup>の被害に関する調査報告がなされるとともに、東日本地域の国道および主たる県道における被害情報の分析<sup>3)</sup>や、茨城県および千葉県における上水道および下水道の管路の被害情報の分析<sup>4)</sup>などが行われている。ライフライン施設が密に敷設されている現在の都市においては、特定の領域内におけるライフライン施設の被害の相関性を解明することが重要であるといえる。これについて、君島ら<sup>5)</sup>などによる検討が行われているが、十分な数の事例の分析には至っておらず、より詳細な分析が求めら

れている。本研究では、東北地方太平洋沖地震において強震動および液状化によるライフライン施設の被害が顕著であった茨城県の神栖市を取り上げ、神栖市内における道路網、上水道網および下水道網の被害の空間的な分布の情報を収集した。その上で、それらの情報を用い、被害と地震動強さおよび地盤条件との関係を集計するとともに、異なるライフライン被害の間の空間相関について分析を行った。

## 2. 分析対象とするデータと分析方法

### (1) 対象とするデータ

図-1および図-2には、液状化被害の発生した家屋の位置、道路網、配水管網、污水管網の敷設位置およびその被害情報を地震動強さおよび微地形区分の観点から空間的に表したものを示す。道路に関しては、敷設情報については数値地図2500<sup>6)</sup>を用いた。それらの被害発生地点は、道路に亀裂や陥没などの損傷が発生し、その後復旧工事を行った範囲を表す。上水道施設に関しては、配水管を分析対象とし、それらの被害発生地点は、配水管に管体亀裂や継手抜けなどによる漏水が発生し、その後復旧工事を行った地点を表す。下水道施設に関しては、污水管を分析対象とし、それらの被害発生地点は、污水管渠にクラック、継手抜け、たるみ、人孔浮上などによる

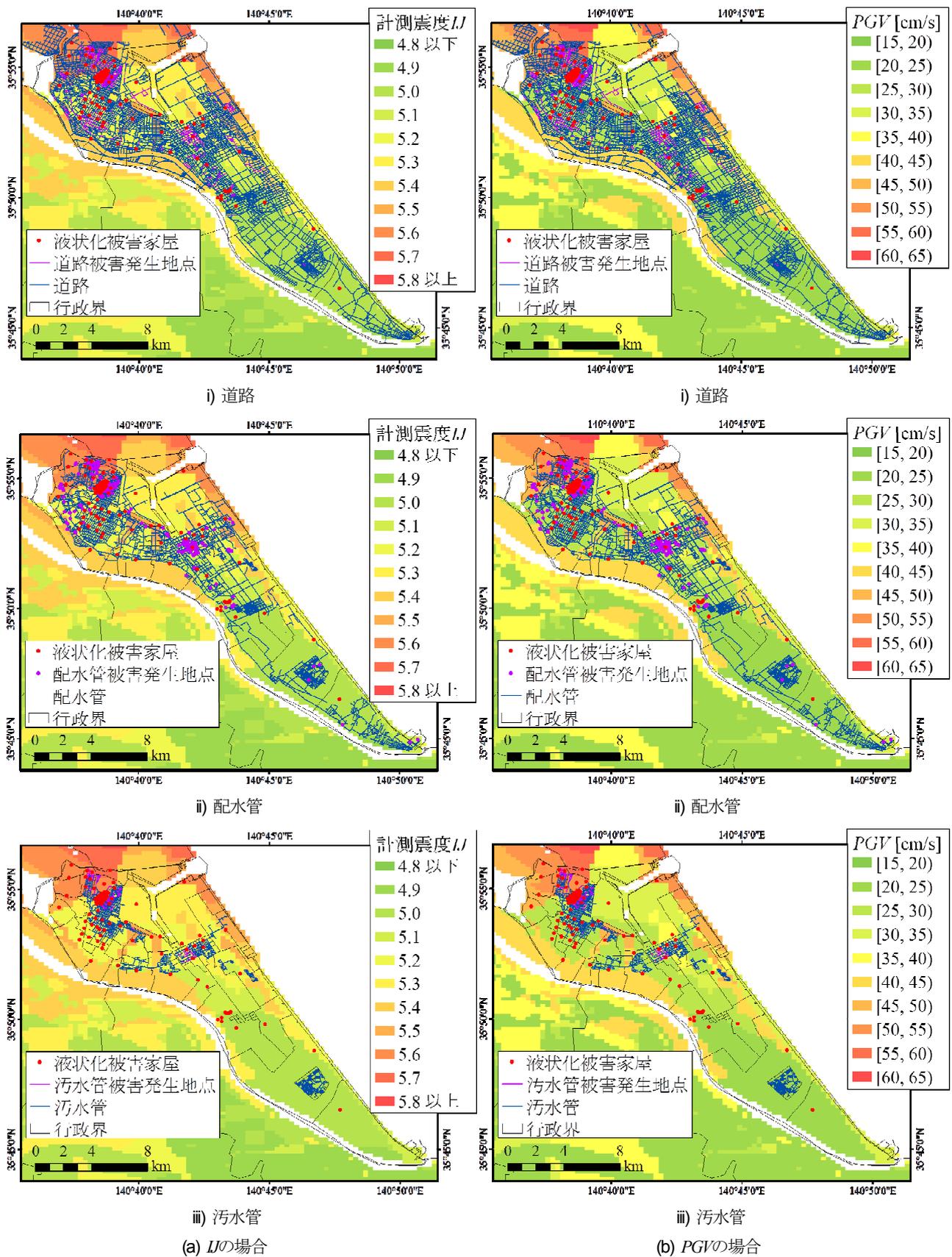


図-1 地震動強さと施設の敷設および被害の空間的な関係

滞水が発生し、その後復旧工事を行った範囲を表す。液状化被害の情報に関しては、液状化被害の発生した家屋の位置を用いた。なお、家屋の位置の同定の際には、住

所からアドレスマッチング<sup>7)</sup>により座標を求めたため、その精度は地番レベルまでとなっている。

分析に用いる地震動強さの指標としては、計測震度I

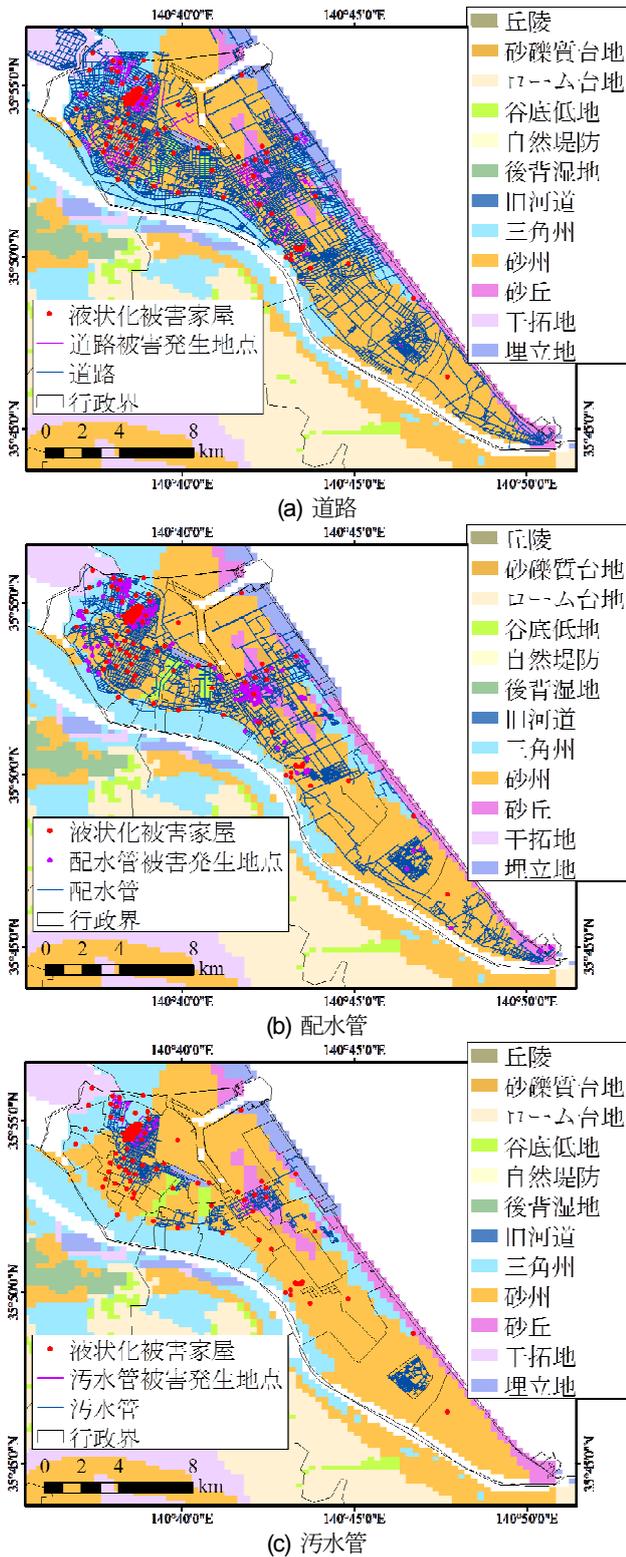


図-2 微地形区分と施設の敷設および被害の空間的な関係

および地表最大速度 $PGV$ を用いた。その際には、K-NET, KiK-net<sup>8)</sup>により公開されている強震観測波形および気象庁<sup>9)</sup>により公開されている強震観測波形ならびに震源データに基づき、櫻井ら<sup>10)</sup>がSimple Kriging法による空間補間を適用し、 $IJ$ および $PGV$ を250mメッシュ単位で推定したものをを用いている。櫻井ら<sup>10)</sup>は、各強震観測点における $IJ$ に末富ら<sup>11)</sup>が構築した地盤増幅度を適用し、工学的基盤面における $IJ_{600}$ を求めている。これより得られた

$IJ_{600}$ から、Simple Kriging法により各メッシュにおける $IJ_{600}$ を推定している。Simple Kriging法に適用するトレンド成分には司・翠川<sup>12)</sup>の距離減衰式の形式を用いている。

一方、 $PGV$ については、まず加速度波形にフィルタ処理をした後に積分値を求め、その上で、EW, NSの水平2方向の速度波形を時刻歴の中で合成し、その中で最大となる速度を当該観測点における $PGV$ として定義している。K-NET, KiK-netの加速度波形の処理に関しては、それらの平均値を引いて基線補正し、通過領域周波数0.1Hz, 阻止領域周波数0.05Hzのバターースハイパスフィルタ<sup>13)</sup>を通して $PGV$ を求めている。気象庁のデータの処理に際しては、周期5秒以上をカットする積分漸化式<sup>13)</sup>に基づき $PGV$ を求めている。以上より求めた各強震観測点における $PGV$ に $IJ$ と同様の方法により、藤本・翠川<sup>14)</sup>が構築した地盤増幅度 $ARV$ を適用し、工学的基盤面における $PGV_{600}$ を求めている。これより得られた $PGV_{600}$ から、上述したSimple Kriging法により各メッシュにおける $PGV_{600}$ を推定している。Simple Kriging法に適用するトレンド成分には $IJ$ と同様に司・翠川<sup>12)</sup>の距離減衰式の形式を適用している。

地盤条件としては、防災科学技術研究所<sup>15)</sup>による250mメッシュ単位の微地形区分を用いた。

## (2) 分析方法

上述の情報をもとに、道路の敷設延長 $L_r$ および被害延長 $L_{dr}$ 、配水管の敷設延長 $L_w$ および被害箇所数 $N_{dw}$ 、污水管の敷設延長 $L_s$ および被害延長 $L_{ds}$ 、液状化被害家屋数 $N_l$ をそれぞれ、地震動強さおよび微地形区分を指標として集計した。

道路被害率 $R_r$ 、配水管被害率 $R_w$ および污水管被害率 $R_s$ はそれぞれ以下のように定義し、道路に関しては、被害延長 $L_{dr}$ を敷設延長 $L_r$ で除し、次式のように定めた。

$$R_r = \frac{L_{dr}}{L_r} \quad (1)$$

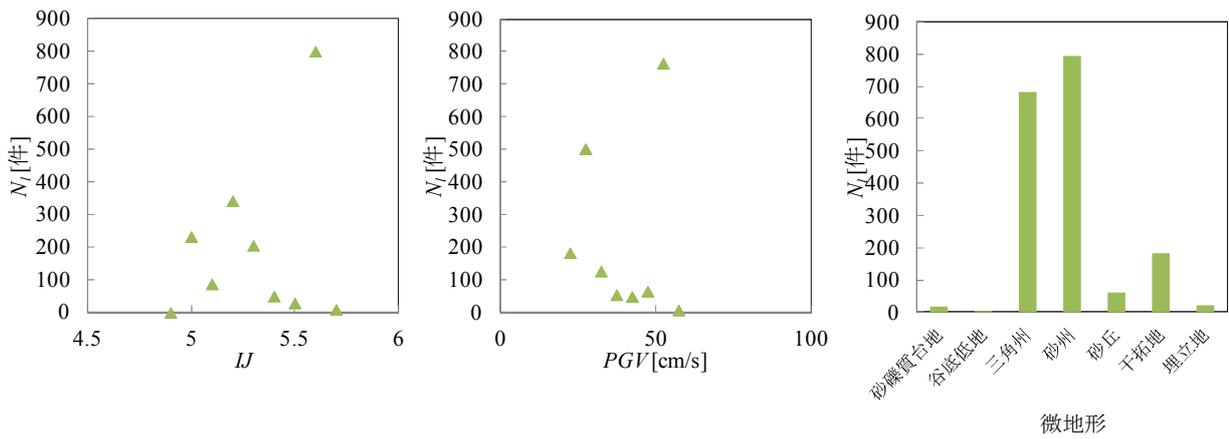
配水管に関しては、被害箇所数 $N_{dw}$ を敷設延長 $L_w$ で除し、次式のように定めた。

$$R_w = \frac{N_{dw}}{L_w} \quad (2)$$

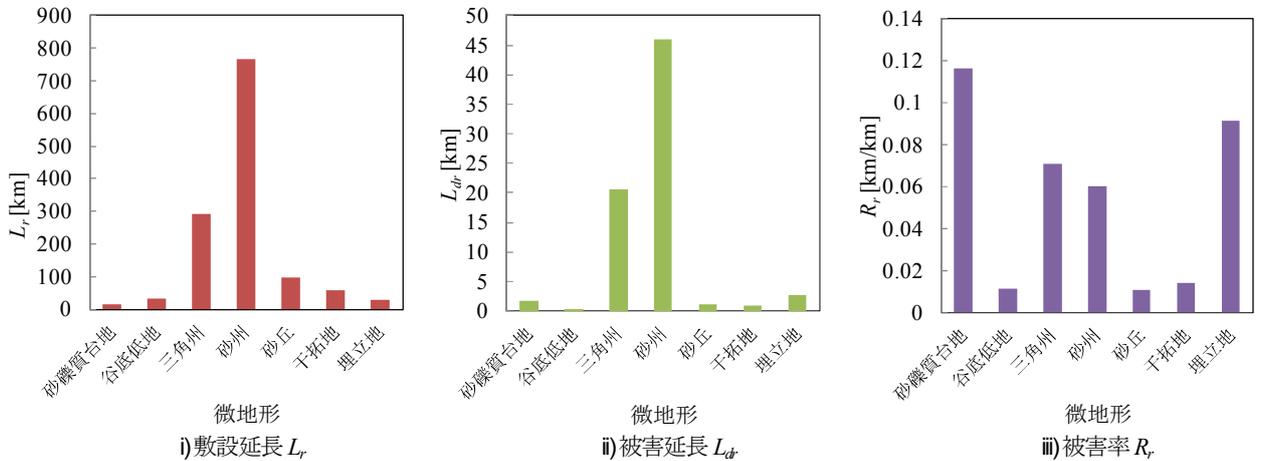
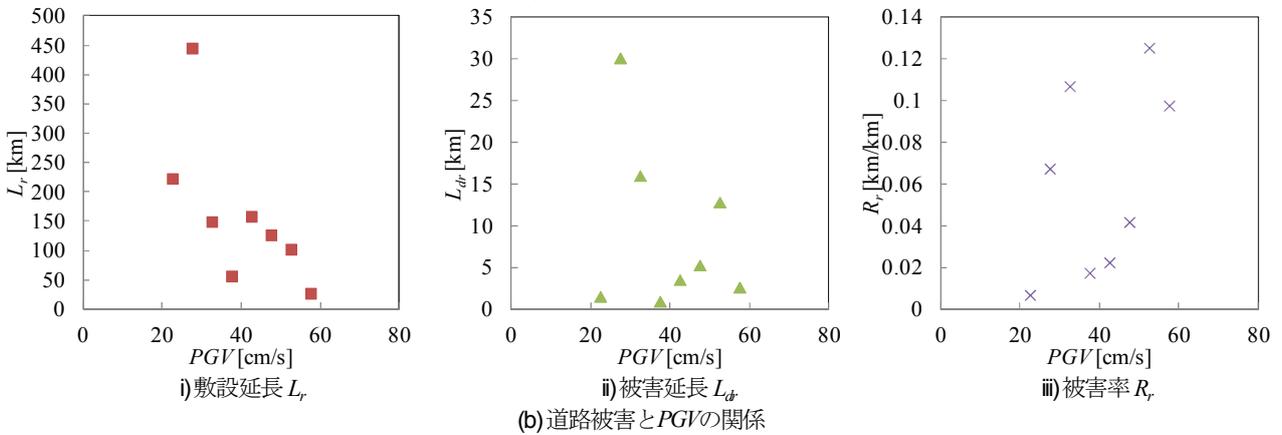
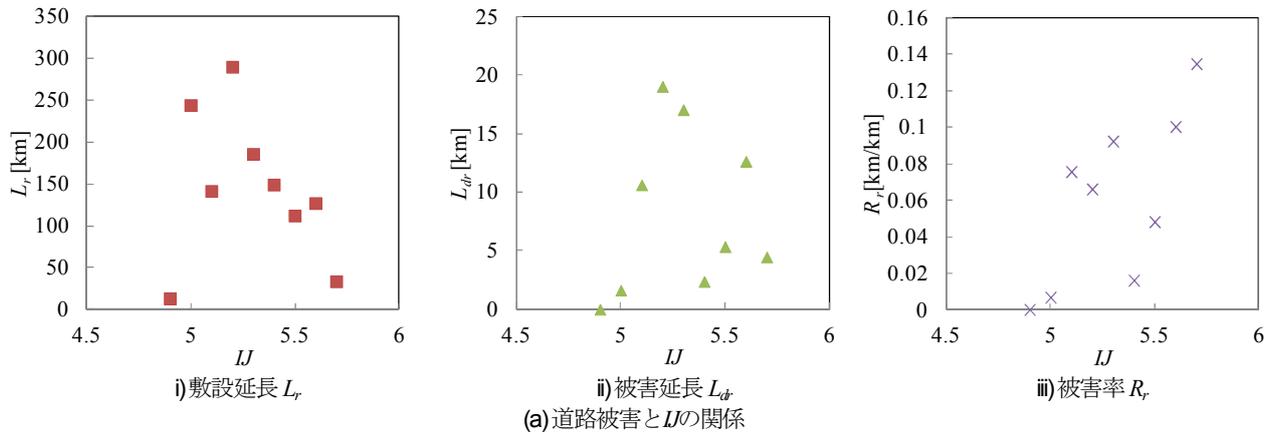
污水管に関しては、被害延長 $L_{ds}$ を敷設延長 $L_s$ で除し、次式のように定めた。

$$R_s = \frac{L_{ds}}{L_s} \quad (3)$$

なお、污水管は、敷設延長 $L_s$ には人孔の分の延長が含まれていないのに対し、被害延長 $L_{ds}$ には人孔の分の延長が含まれているため、被害率 $R_s$ がわずかに1.0を超える場合がある。液状化被害家屋数に関しては、震災前の家屋の空間分布データが入手できなかったため、被害率は算出



(a) 液状化被害家屋数  $N_l$  と  $L_I$  の関係 (b) 液状化被害家屋数  $N_l$  と  $PGV$  の関係 (c) 液状化被害家屋数  $N_l$  と微地形区分の関係  
 図-3 液状化被害家屋数  $N_l$  と  $L_I$ ,  $PGV$  および微地形区分の関係



(a) 道路被害と  $L_I$  の関係 (b) 道路被害と  $PGV$  の関係 (c) 道路被害と微地形区分の関係  
 図-4 道路被害と  $L_I$ ,  $PGV$  および微地形区分の関係

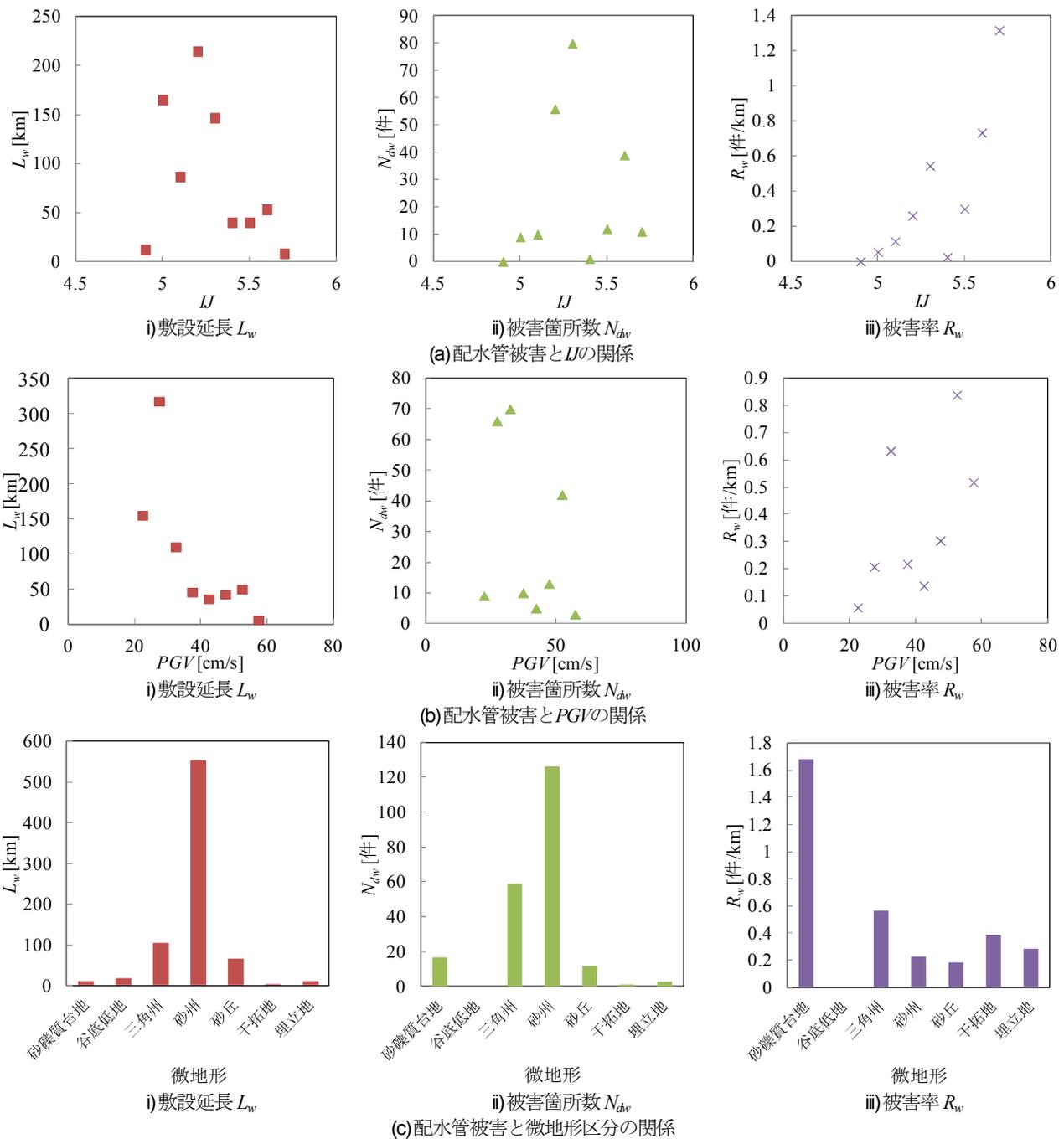


図-5 配水管被害と $L_j$ , PGVおよび微地形区分の関係

していない。

さらに、道路被害、配水管被害、汚水管被害および液状化被害家屋の空間的な相関関係を計量化するため、同じ $L_j$ , PGVおよび微地形区分にさらされる地域における $R_r$ ,  $R_w$ ,  $R_s$ および $N_l$ の関係を分析した。

### 3. 分析結果

#### (1) 被害の全体的な傾向

図-3には、液状化被害家屋数 $N_l$ と $L_j$ , PGVおよび微地形区分との関係を示す。前述したように、液状化被害家

屋数 $N_l$ に関しては、震災前の家屋の空間分布データが入手できなかったため、被害率は求めずに被害の絶対値について分析する。

$N_l$ と $L_j$ の関係に関しては、 $L_j$ が5.6の場合に $N_l$ が最大値802件を示している。これに次いで、 $L_j$ が5.2の場合、 $N_l$ は343件を示している。 $N_l$ とPGVの関係に関しては、PGVが50cm/sから55cm/sの場合、 $N_l$ は766件を示している。これに次いで、PGVが20cm/sから25cm/sの場合、 $N_l$ は503件を示している。 $N_l$ と微地形区分の関係に関しては、砂州における $N_l$ が最大値793件を示している。これに次いで、三角州において684件を示している。

図-4には、 $L_r$ ,  $L_d$ およびそれらから求められる被害率

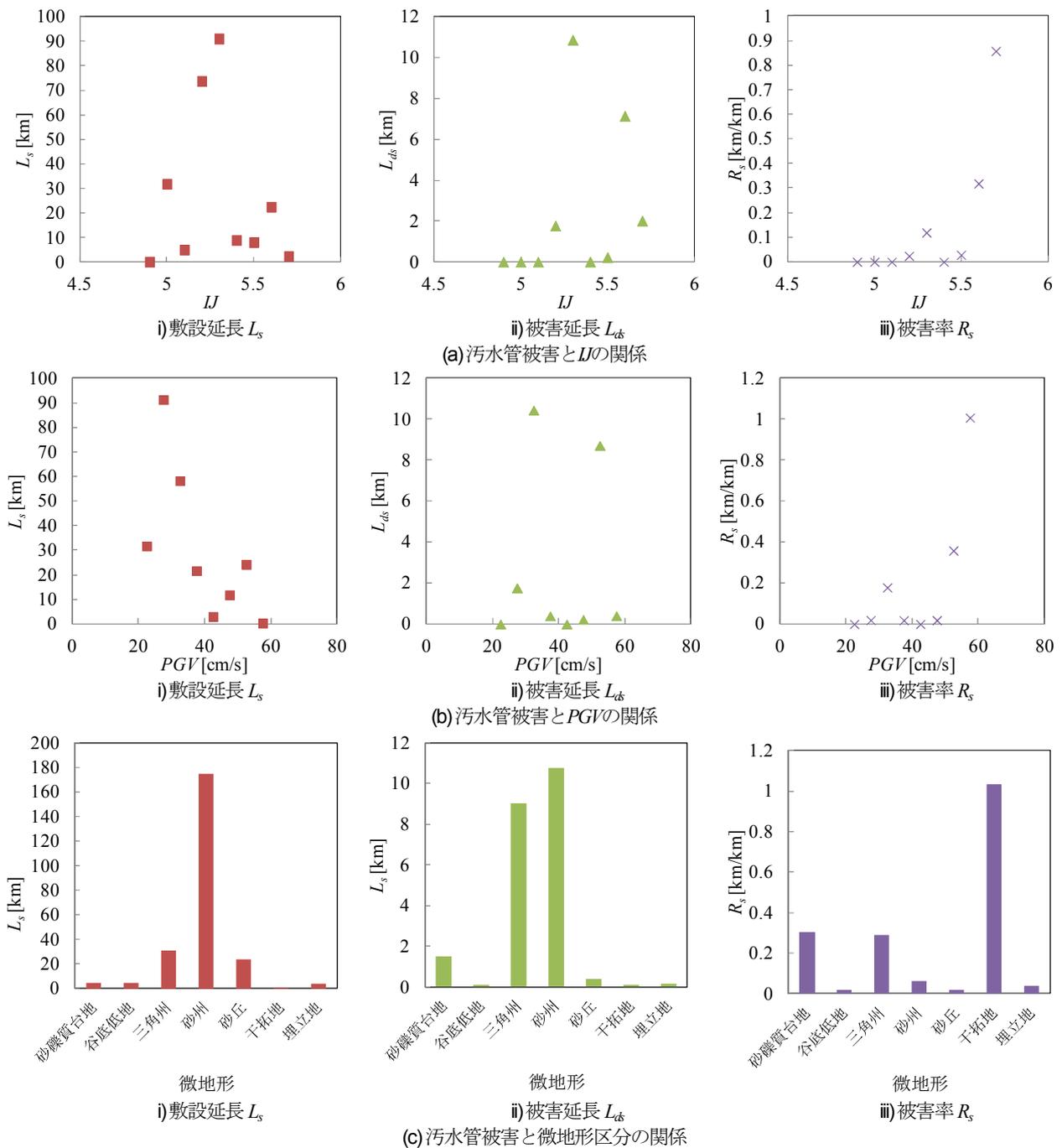


図6 汚水管被害とIJ, PGVおよび微地形区分の関係

$R_r$ を,  $IJ$ ,  $PGV$ , 微地形区分の観点から分析した結果を示す。

$R_r$ と $IJ$ の関係に関しては,  $IJ$ が5.7の場合,  $L_r$ は33.34 km,  $L_{da}$ は4.49 kmを示し,  $R_r$ は最大値0.13を示している。これに次いで,  $IJ$ が5.6の場合,  $L_r$ は126.46 km,  $L_{da}$ は12.68 kmを示し,  $R_r$ は0.10を示している。 $R_r$ と $PGV$ の関係に関しては,  $PGV$ が50cm/sから55cm/sの場合,  $L_r$ は102.71 km,  $L_{da}$ は12.91 kmを示し,  $R_r$ は最大値0.13を示している。これに次いで,  $PGV$ が30cm/sから35cm/sの場合,  $L_r$ は149.89 km,  $L_{da}$ は16.07 kmを示し,  $R_r$ は0.11を示している。 $R_r$ と微地形区分の関係に関しては, 砂礫質台地において,  $L_r$ は14.94 km,  $L_{da}$ は1.74 kmを示し,  $R_r$ は最大値0.12を示している。砂礫質

台地においては,  $L_r$ の値に比べ,  $L_{da}$ の値が相対的に大きいため,  $R_r$ は大きい値を示している。これに対して,  $L_r$ そのものが最大となるのは砂州であり, この場合 $L_r$ は767.30 km,  $L_{da}$ は46.07 kmを示し,  $R_r$ は0.06を示している。

図-5には,  $L_w$ ,  $N_{dw}$ およびそれらから求められる被害率 $R_w$ を,  $IJ$ ,  $PGV$ , 微地形区分の観点から分析した結果を示す。

$R_w$ と $IJ$ の関係に関しては,  $IJ$ が5.7の場合,  $L_w$ は8.34 km,  $N_{dw}$ は11件を示し,  $R_w$ は最大値1.32を示している。これに次いで,  $IJ$ が5.6の場合,  $L_w$ は53.10 km,  $N_{dw}$ は11件を示し,  $R_w$ は0.73を示している。 $R_w$ と $PGV$ の関係に関しては,  $PGV$ が50cm/sから55cm/sの場合,  $L_w$ は50.14 km,  $N_{dw}$ は42件

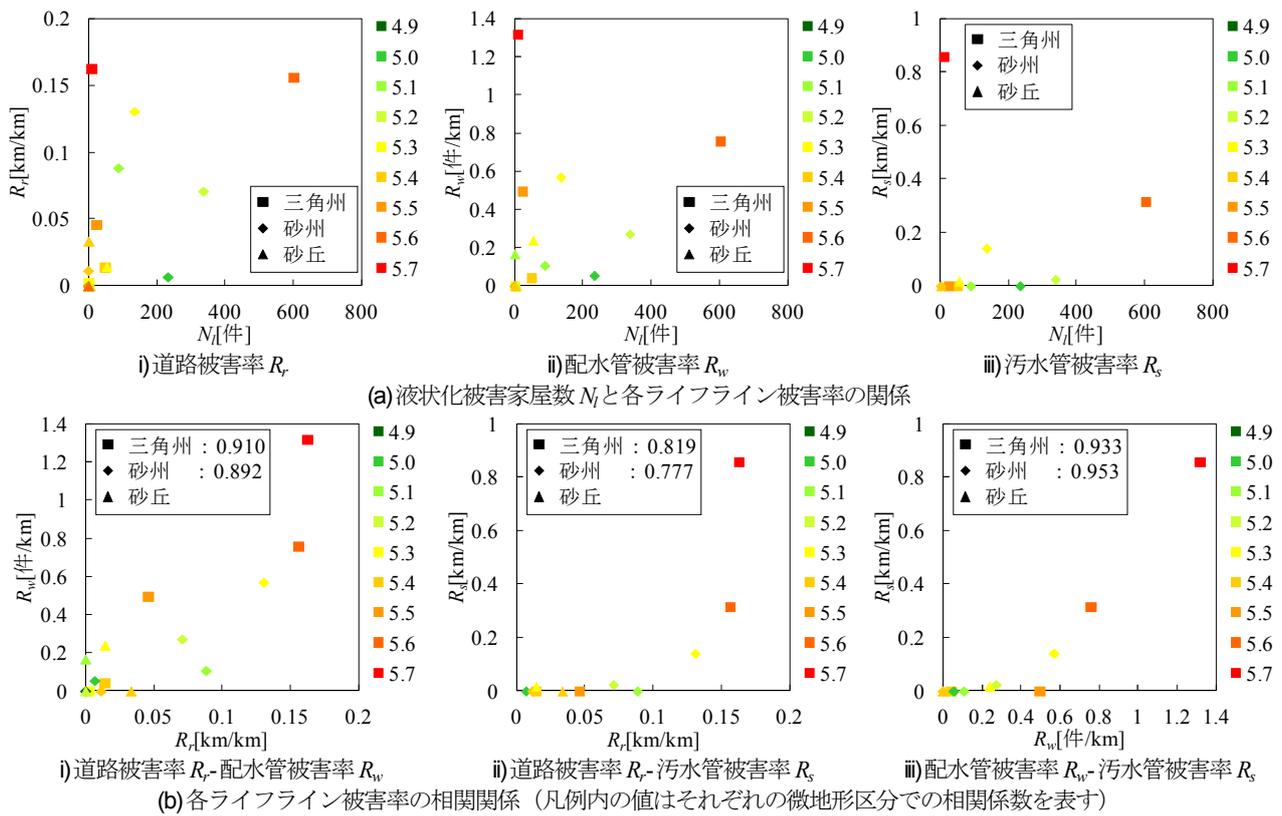


図-7  $IJ$  を指標とした場合の被害の関係

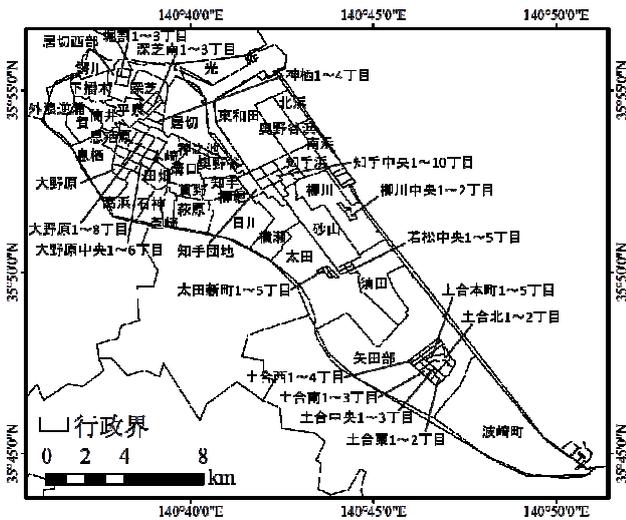


図-8 神栖市内の字界と丁目

を示し、 $R_w$ は最大値0.84を示している。これに次いで  $PGV$ が30cm/sから35cm/sの場合、 $L_w$ は110.55 km、 $N_{dw}$ は70件を示し、 $R_w$ は0.63を示している。 $R_w$ と微地形区分の関係に関しては、砂礫質台地において、 $L_w$ は10.12 km、 $N_{dw}$ は17件を示し、 $R_w$ は最大値1.68を示している。道路被害と同様に、砂礫質台地においては、 $L_w$ の値に比べ、 $N_{dw}$ が相対的に大きいため、 $R_w$ は大きい値を示している。これに対して、 $L_w$ が最大となるのは砂州であり、この場合の  $L_w$ は553.17 km、 $N_{dw}$ は6件を示し、 $R_w$ は0.23を示している。

図-6には、 $L_s$ 、 $L_{db}$ およびそれらから求められる被害率  $R_s$ を、 $IJ$ 、 $PGV$ 、微地形区分の観点から分析した結果を示す。

被害率  $R_s$ と  $IJ$ の関係に関しては、 $IJ$ が5.7の場合、 $L_s$ は2.33 km、 $L_{db}$ は2.00 kmを示し、 $R_s$ は最大値0.86を示している。これに次いで  $IJ$ が5.6の場合、 $L_s$ は22.36 km、 $L_{db}$ は7.13 kmを示し、 $R_s$ は0.32を示している。 $R_s$ と  $PGV$ の関係に関しては、 $PGV$ が55cm/sから60cm/sの場合、 $L_s$ は0.40 km、 $L_{db}$ は0.41 kmを示し、 $R_s$ は最大値1.01を示している。これに次いで  $PGV$ が50cm/sから55 cm/sの場合、 $L_s$ は24.29 km、 $L_{db}$ は8.72 kmを示し、 $R_s$ は0.36を示している。 $R_s$ と微地形区分の関係に関しては、干拓地において、 $L_s$ は0.09 km、 $L_{db}$ は0.10 kmを示し、 $R_s$ が最大値1.04を示している。干拓地においては、 $L_s$ の値に比べ、 $L_{db}$ が相対的に大きいため、 $R_s$ は大きい値を示している。これに対して、 $L_s$ が最大となるのは砂州であり、この場合  $L_s$ は174.93 km、 $L_{db}$ は10.74 kmを示し、 $R_s$ は0.06を示している。

道路被害、配水管被害、汚水管被害に関して、被害率  $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ と  $IJ$ 、 $PGV$ の関係は、 $IJ$ が4.9から5.7、 $PGV$ が20から60と値が大きくなるにつれて、 $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ の値も大きくなるという対応関係がみられる。

## (2) 液状化被害家屋数と各ライフライン被害の関係およびライフライン間の被害の相関

図-7には、前節で顕著な被害が明らかになった三角州、

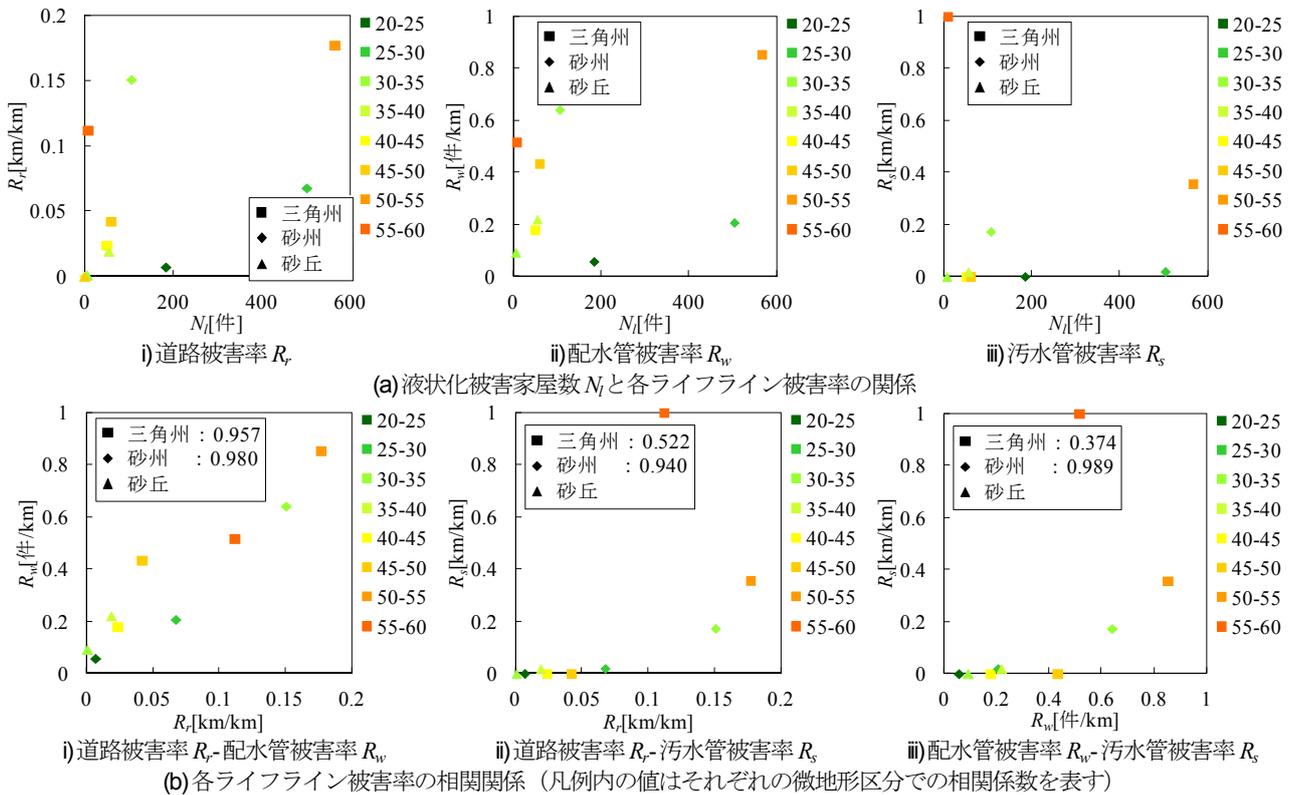


図-9 PGIを指標とした場合の被害の関係

砂州および砂丘において、同一の $LI$ にさらされた液状化被害家屋数 $N_i$ と道路被害率 $R_r$ 、 $N_i$ と配水管被害率 $R_w$ 、 $N_i$ と污水管被害率 $R_s$ の関係を示すとともに、 $R_r$ と $R_w$ 、 $R_r$ と $R_s$ および $R_w$ と $R_s$ の関係をそれぞれ示す。また、図-8には、地理的な位置の関係を把握するため、神栖市内の字界および丁目の分布を示す。

三角州は、主に神栖市北部の深芝、居切西部、掘割1丁目、2丁目および3丁目から筒井西側まで、利根川沿いの息栖から日川、矢田部まで、海岸部内陸の知手浜から矢田部までと、市を囲うようにして分布している。 $LI$ としては、神栖市北部で5.5から5.7、利根川沿いで5.3から5.5、沿岸部内陸で5.3から5.5にさらされている。特に液状化被害家屋数 $N_i$ が大きかったのは、神栖市北部の居切西部、深芝、掘割2丁目であり、それぞれ129件、351件、54件となり、この地区の $LI$ は5.6を示している。この地区では、液状化被害に伴い、道路被害率 $R_r$ 、配水管被害率 $R_w$ 、污水管被害率 $R_s$ のいずれも大きな値を示しており、それぞれの値は、居切西部で0.22、0.12、0.26、深芝で0.08、0.56、0.35、掘割2丁目で0.74、1.80、0.67となっている。一方で、居切は、 $LI$ が5.7とより強い地震動にさらされ、 $R_r$ 、 $R_w$ のいずれもそれぞれ0.25、0.77と大きな値を示しているが、 $N_i$ は8件と小さな値を示した。これは、 $LI$ が5.7を示した領域が狭いこと、居切地区に民家が少なかったためであると推察される。また、液状化被害を除いた、各ライフライン被害率の関係については、いずれも $LI$ の増大に伴い、各被害率が增大する傾向がみられ

ることから、これらのライフライン被害率の間には高い相関性があるといえる。

砂州は、神栖市北部の光、東深芝、深芝南1丁目、2丁目および3丁目、平泉、息栖、大野原、大野原中央1丁目から6丁目、神栖市中部の知手、知手団地、知手中央8丁目および9丁目、太田、および神栖市南部の矢田部、波崎町と、神栖市全域にわたって分布している。 $LI$ としては、神栖市北部で5.2から5.4、神栖市中部で5.0から5.3、神栖市南部で5.0にさらされている。特に $N_i$ が大きかったのは、平泉、息栖、太田の地区であり、それぞれ50件、91件、224件となっている。このうち、平泉は $LI$ が5.3、息栖は $LI$ が5.2、太田は $LI$ が5.0の地震動に晒されている。 $N_i$ の大きい地区では、 $R_r$ 、 $R_w$ は平泉で0.11、0.83、息栖で0.18、0.51と大きくなる傾向にあるが、 $LI$ が5.0の太田の場合は、 $N_i$ の大きさに対し、 $R_r$ 、 $R_w$ はそれぞれ、0.04、0.15と小さくなっている。これは、 $LI$ が5.0の区域において、太田の一部の狭い範囲に集中して液状化が起こったためであると推察される。一方で、深芝南1丁目、2丁目および3丁目、知手団地、知手中央8丁目および9丁目では、 $N_i$ はそれぞれ3件、1件、3件と小さいが、 $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ はそれぞれ、深芝南1丁目で0.40、1.28、0.16、深芝南2丁目で0.41、2.35、0.37、深芝南3丁目で0.29、1.40、0.33、知手団地で0.25、1.37、0.17、知手中央8丁目で0.20、2.25、1.04、知手中央9丁目で0.01、4.75、0.80と大きくなった。これは、いずれも $LI$ が5.2から5.3の地区であり、 $LI$ がこれを下回る地区ではこのような傾向はみられないため、強震動

による主たる被害であると推察される。また、三角州と同様に、液状化被害を除いた各ライフライン被害率の関係については、いずれも $IJ$ の増大に伴い、各被害率が増大する傾向がみられることから、これらのライフライン被害率の間には高い相関性があるといえる。

砂丘は、神栖市中心部の東和田の南側から知手中央1丁目、2丁目、5丁目、6丁目および10丁目、砂山の北側まで、海岸部の奥野谷浜および知手浜の一部、日川浜、柳川から波崎町にかけて分布している。 $IJ$ としては、神栖市中心部で5.3から5.4、海岸部で5.1から5.5に晒されている。特に $N_f$ が大きかったのは、知手中央10丁目であり、47件となっている。この地区は $IJ$ が5.3の地震動にさらされ、周辺には、他にも知手中央1丁目および9丁目などに $N_f$ が集中している。 $N_f$ が大きかった知手中央10丁目は、 $R_r$ 、 $R_w$ もそれぞれ0.23、0.14と砂丘における被害率では大きい値となったが、 $R_s$ は0と小さい値を示した。これは、知手中央10丁目には配水管被害があったものの、微地形が砂州である地区に被害が集中したためである。

ここまで、各微地形区分に対して $IJ$ の観点から考察を行ったが、同様に $PGV$ の観点から捉えると、図-9に示すような結果となる。

三角州の場合には、 $PGV$ としては、神栖市北部で45cm/sから60cm/sのレベル、利根川沿いで40cm/sから45cm/sのレベル、沿岸部内陸で40cm/sから50cm/sのレベルに晒されている。 $N_b$ 、 $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ のいずれも相対的に大きな値を示している神栖市北部の居切西部、深芝、掘割2丁目においては、 $PGV$ は50cm/sから55cm/sとなっている。一方で、居切周辺地区は、 $PGV$ が55cm/sから60cm/sとより強い地震動に晒され、 $R_r$ 、 $R_w$ は $PGV$ が50cm/sから55cm/sの場合に次いで大きく、 $R_s$ は最大の値として1.0を示しているが、 $N_f$ は小さな値を示した。 $N_f$ が小さな値となったのは、 $IJ$ の場合と同様に、 $PGV$ が55cm/sから60cm/sとなっている領域が狭いことと、居切地区に民家が少なかったためであると推察される。 $R_s$ のみ1.0を示したのは、この地区は汚水管の敷設延長が他のライフライン施設に比べて少なく、そのすべてが特に被害の大きな領域に集中していたためである。各ライフライン被害率の関係については、 $R_r$ と $R_w$ に関しては、高い相関性があるといえる。一方で、 $R_s$ に関しては、上述したように $PGV$ が55cm/sから60cm/sの場合において被害率が1.0と突出して大きな値を示していることにより、逆に $R_r$ および $R_w$ との相関性が低くなっている。

砂州の場合には、 $PGV$ としては、神栖市北部で25cm/sから35cm/s、神栖市中心部で20cm/sから35cm/s、神栖市南部で20cm/sから25cm/sにさらされている。特に $N_f$ が大きかった地区として、平泉は $PGV$ が30cm/sから35cm/s、息栖、大野原中央4丁目は $PGV$ が25cm/sから30cm/s、太田は $PGV$ が20cm/sから25cm/sの地震動に晒されている。このうち、

$PGV$ が30cm/sから35cm/sの場合は、 $N_f$ の大きさに対して各ライフラインの被害率は大きくなっている。これは、東深芝や深芝南といったライフラインが密集している地区において集中して液状化が起こったためだと推察される。各ライフライン被害率の関係については、すべてのライフライン被害率の間に高い相関性があるといえる。

砂丘の場合には、 $PGV$ としては、神栖市中心部で30cm/sから40cm/s、海岸部で30cm/sから40cm/sに晒されている。このうち、特に $N_f$ が大きかった知手中央10丁目は、 $PGV$ が35cm/sから40cm/sの地震動にさらされている。 $N_f$ および各ライフライン施設の被害率の相関については、前述した $IJ$ の場合と全く同様の傾向を示した。

#### 4. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震において、強震動および液状化によるライフライン施設の被害が顕著であった茨城県の神栖市を取り上げ、道路被害、配水管被害、汚水管被害および液状化被害の発生した家屋に関する位置情報を収集した。その上で、液状化被害家屋数 $N_f$ 、道路被害率 $R_r$ 、配水管被害率 $R_w$ および汚水管被害率 $R_s$ に関する情報と計測震度 $IJ$ 、 $PGV$ および微地形区分の分布との空間的な関係を分析した。また、被害の顕著であった三角州、砂州および砂丘における各ライフライン施設の被害率の相関関係についても検討を行った。

- 1)  $N_b$ 、 $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ がすべて相対的に大きな値を示した地区は掘割2丁目であり、 $N_f$ は54件、 $R_r$ は0.74、 $R_w$ は1.80、 $R_s$ は0.67を示した。この地区の微地形区分は三角州であり、 $IJ$ では5.6から5.7、 $PGV$ では50cm/sから60cm/sと相対的に高い地震動に暴露されている。
- 2)  $R_r$ 、 $R_w$ 、 $R_s$ が相対的に大きな値を示し、 $N_f$ は小さな値を示した地区は、掘割3丁目、知手中央8丁目であり、 $N_f$ はすべて0件であるのに対して、 $R_r$ は0.70、0.20、 $R_w$ は5.63、2.25、 $R_s$ は0.68、1.04をそれぞれ示した。このような傾向は三角州、砂州でみられた。掘割3丁目の微地形区分は三角州であり、 $IJ$ では5.6から5.7、 $PGV$ では55cm/sから60cm/sと相対的に高い地震動に暴露されている。また、知手中央8丁目の微地形区分は砂州であり、 $IJ$ では5.2から5.3、 $PGV$ では25cm/sから35cm/sの地震動に暴露されている。
- 3)  $R_r$ 、 $R_w$ が相対的に大きな値を示し、一方で $N_b$ 、 $R_s$ が小さな値および中程度の値を示した地区は、居切、筒井、深芝南1丁目、2丁目および3丁目、太田新町4丁目および5丁目、知手団地、知手中央8丁目および10丁目であり、 $R_r$ は0.14から0.41、 $R_w$ は0.70から3.86であるのに対して、 $N_f$ は0件から8件、 $R_s$ は敷設なしを含め、0.16から0.37をそれぞれ示した。この

ような傾向は三角州，砂州，砂丘すべての微地形区分でみられた。居切，筒井の微地形区分は三角州であり， $IJ$ では5.7，5.5から5.6， $PGV$ では55cm/sから60cm/s，45cm/sから50cm/sの地震動にそれぞれ暴露されている。深芝南1丁目，2丁目および3丁目，太田新町4丁目および5丁目，知手団地，知手中央10丁目の微地形区分は砂州であり， $IJ$ は5.0から5.3， $PGV$ は20cm/sから35cm/sと相対的に低い地震動にそれぞれ暴露されている。また，知手中央8丁目の微地形区分は砂丘であり， $IJ$ では5.1から5.3， $PGV$ では35cm/sから40cm/sの地震動に暴露されている。

- 4)  $N_i$ ， $R_i$ が相対的に大きな値を示し，一方で $R_w$ ， $R_s$ が小さな値および中程度の値を示した地区は，居切西部，息栖であり， $N_i$ は129件，91件， $R_i$ は0.22，0.18であるのに対して， $R_w$ は0.12，0.51， $R_s$ は0.26，敷設なしをそれぞれ示した。このような傾向は三角州，砂州でみられた。居切西部の微地形区分は三角州であり， $IJ$ では5.6から5.7， $PGV$ では50cm/sから60cm/sの地震動に暴露されている。息栖の微地形区分は砂州であり， $IJ$ では5.2， $PGV$ では25cm/sから30cm/sと相対的に低い地震動に暴露されている。
- 5)  $N_i$ のみが相対的に大きな値を示し，一方で $R_i$ ， $R_w$ ， $R_s$ が小さな値および中程度の値を示した地区は，深芝，太田，知手，日川であり， $N_i$ は351件，224件，71件，62件であるのに対して， $R_i$ は0から0.08， $R_w$ は0から0.56， $R_s$ は敷設なしを含め，0から0.35をそれぞれ示した。このような傾向は三角州，砂州でみられた。深芝の微地形区分は三角州であり， $IJ$ では5.6から5.7， $PGV$ では50cm/sから60cm/sと相対的に高い地震動に暴露されている。太田，知手，日川の微地形区分は砂州であり， $IJ$ では5.0から5.2， $PGV$ では20cm/sから30cm/sの相対的に低い地震動に暴露されている。

**謝辞：**本研究に当たっては，神栖市都市計画課の皆様方には多大なご協力を得ました。また，本研究は筑波大学と神栖市との震災復興連携協定の締結に基づき，筑波大学プロジェクト「巨大地震による複合災害の統合的リスクマネジメント」（研究代表者：八木勇治准教授，研究分担者：庄司学）の助成を得て実施されました。

#### 参考文献

- 1) 中村晋，清田隆：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第8章 その他の地盤災害，[http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter8\\_0.pdf](http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter8_0.pdf)，2012.9.14閲覧。
- 2) 鍛田泰子，片桐信：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第10章 水道施設の被害，

[http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter10\\_0.pdf](http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter10_0.pdf)，2012.9.14閲覧。

- 3) 庄司学，高橋和慎，中村友治，櫻井俊彰：2011年東北地方太平洋沖地震において地震動が主要因と考えられる道路構造物の被害—東北6県及び関東1都6県に敷設された国道及び県道の被害—，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4，pp.I\_1186-I\_1193，2012。
- 4) 那波悟志，築地拓哉，庄司学，永田茂：2011年東北地方太平洋沖地震における上水道および下水道の被害分析—茨城県および千葉県の情報の得られた被災都市の傾向—，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4，I\_1194-I\_1209，2012。
- 5) 君島康太，丸山喜久，山崎文雄：新潟県中越沖地震におけるライフライン被害の空間相関性の分析，第30回土木学会地震工学研究発表会報告集，CD-ROM，6p，2009。
- 6) 国土地理院：数値地図2500，1997。
- 7) 東京大学空間情報科学研究センター：Geocoding Tools & Utilities - 位置参照技術を用いたツールとユーティリティ，<http://newspat.csis.u-tokyo.ac.jp/geocode/>，2012.9.10閲覧。
- 8) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET，KiK-net，<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>，<http://wwwold.k-net.bosai.go.jp/k-net/>，2012.9.10閲覧。
- 9) 気象庁：強震波形(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震)，[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311\\_tohoku\\_chiho-taiheiyuoki/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohoku_chiho-taiheiyuoki/index.html)，2012.9.10閲覧。
- 10) 櫻井俊彰，庄司学，高橋和慎，中村友治：2011年東北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物の被害分析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4(地震工学論文集第31-b巻)，I\_1315-I\_1325，2012。
- 11) 末富岩雄，石田栄介，磯山龍二：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討，第28回地震工学研究発表会，土木学会，2005。
- 12) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.63-70，1999。
- 13) 気象庁気象業務支援センター：強震観測報告2007年・2008年，CD-ROM。
- 14) 藤本一雄，翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係，日本地震学会論文集，Vol.6，No.1，pp.11-22，2006。
- 15) 防災科学技術研究所：J-SHIS，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>，2012.9.10閲覧。

ANALYSIS ON SPATIAL CORRELATION OF DAMAGES OF ROAD,  
WATER SUPPLY AND SEWERAGE NETWORKS  
AT THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE  
- CASE STUDY FOR THE DATA AT KAMISU CITY IN IBARAKI PREFECTURE -

Yosuke MIZUNO, Satoshi NABA and Gaku SHOJI

We evaluate the dependency of spatial distribution of damages of road, water supply and sewerage networks subjected to the seismic hazards in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake focusing on the damage at Kamisu city in Ibaraki prefecture. We quantify the damage ratios defined by the ratio of disrupted length  $L_{dr}$  with rail length  $L_r$  for roads, that of number of physical damage points  $N_{dw}$  with pipeline length  $L_w$  for water distribution buried pipes and that of disrupted length  $L_{ds}$  with pipeline length  $L_s$  for sewer buried pipes. Relations between the damage ratios of roads, water distribution buried pipes, sewer buried pipes and the number of houses damaged by liquefaction which are exposed to same seismic intensity level are revealed, focusing on data at delta, sand bar and sand dune.