河川技術論文集，第26巻，2020年6月

洪水氾濫流が都市ガス供給システムに及ぼす影響の試算手法を用いた被害想定の考察

DISCUSSION OF INTEGRATED ESITIMATION OF DAMAGES FOR URBAN UTILITY GAS SYSTEMS DUE TO RIVER FLOOD INUNDATIONS

田代　喬[1]・八木　健太郎[2]・菅沼　淳[3]・戸田　祐嗣[4]
Takashi TASHIRO, Kentaro YAGI, Atsushi SUGANUMA and Yuji TODA

[1] 正会員　名古屋大学　特任教授　減災連携研究センター ライフライン地盤防災産学協同研究部門
（〒464-8601　名古屋市千種区不老町 1　名古屋大学減災館 401 室）
[2]　中部電力株式会社　再生可能エネルギーカンパニー 岐阜水力センター 技術課
（〒505-0033　岐阜県美濃加茂市中富町 2-2179-2）
（元名古屋大学　博士課程前期課程　大学院工学研究科 土木工学専攻）
[3] 正会員　名古屋大学　特任准教授　減災連携研究センター ライフライン地盤防災産学協同研究部門
[4] 正会員　名古屋大学　教授　大学院工学研究科 土木工学専攻
（〒464-8603　名古屋市千種区不老町1　名古屋大学工学部・工学研究科9号館201号室）

Urban utility gas systems composed of ground facilities such as microcomputer gas meters and gas governors, and buried pipeline networks, which have been widely installed in urban lowland areas. Although these gas systems often have been suffered from river flood inundations, there have been a few conventional works which describe causes and effects of the utility gas outages due to the inundations. The present study proposes the methods to estimate and to integrate such of the utility gas damages as ground facility submersions due to the river floods with levee breaches. We quantitatively evaluate the outage durations in utility gas distribution systems by considering the post-flooding restoration works such as drainage of the inundation water with pumping stations and repairing and exchanging the facilities of gas utility systems. Moreover, we characterize some typical patterns of the utility gas damages by comparing different styles of the river flood inundations.

Key Words: *Urban utility gas system, inundation, damage and recovery processes, outage duration, preparedness arrangements, response options*

１．はじめに

都市ガスは，製造基地や貯蔵施設から高圧で送り出された後，整圧器（ガバナー）で減圧され導管網を介して供給されるライフラインである．導管の大部分は地下に埋設されるが，整圧器は家庭用物置大の建屋（整圧所，地区ガバナー）に格納され，末端の供給先には計量器（マイコンメーター）が配置される．地上にある整圧器や計量器は外部電源を必要としないが，浸水すると機能に支障をきたして供給が停止するうえ，排水した後に各施設の交換や修繕を行うため，供給復旧までに長時間を要する場合がある．電気や水道など他のライフライン・システムと比べ，洪水氾濫に対する耐性は高いとされるが，現在も尚，ハード・ソフト両面で効果的対策を講じる余地は残されていると言えよう．

大都市の多くが沖積平野に立地している中，近年，広域に及ぶ浸水が頻発していることから，ライフライン施設の浸水対策は喫緊の課題となっており，系統的，かつ，定量的な被害想定が求められている．関連分野では，水道施設に関する災害調査が行われ[1, 2]，電力・ガス施設の機能停止[3, 4]や他のインフラ施設の被害[4]の算出方法が報告されてきた．しかしながら，システム全体に及ぶ影響に関しては内閣府中央防災会議による検討に限られ[5]，洪水氾濫を研究対象としてきた水工学分野の検討事例は少ない[6, 7]．著者らはこれまで，氾濫シミュレーションをもとに都市ガス供給停止被害を推算したうえで[6]，その後の排水，機器の交換・修繕を含めた復旧過程も試算してきた[7]．本研究は，この取組みの延長に位置づけられるもので，異なる氾濫シナリオに応じた都市ガスの供給停止に関する被害想定を試算し，それらを相互に対比することにより，洪水氾濫が都市ガスに及ぼす影響について系統的に考察することを目指す．

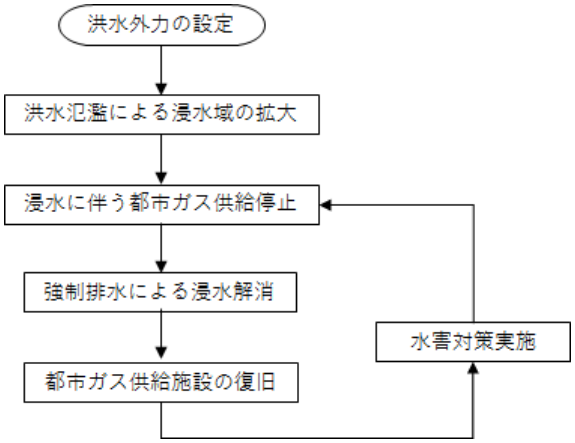

図-1　都市ガス供給システムに対する洪水氾濫影響の統合的把握に向けた検討フロー[8].

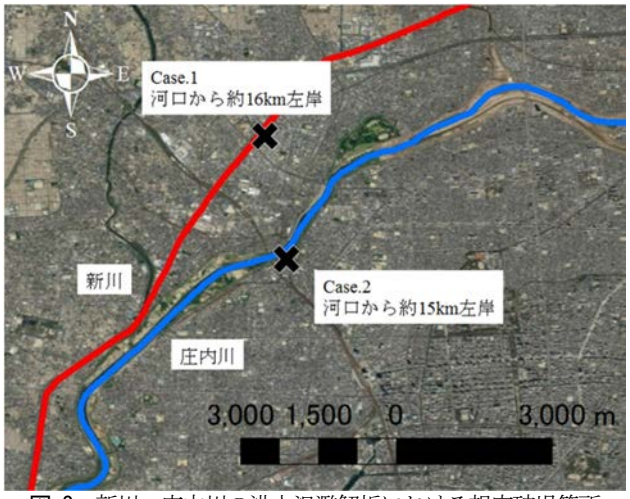

図-2　新川，庄内川の洪水氾濫解析における想定破堤箇所（背景地図：Google Earth）.

2．材料と方法

本研究では，都市ガス供給システムに対し，浸水事象による統合的影響を試算した著者ら[7]の手法を適用する（**図-1**）．その具体的な手順は次の通りである．すなわち，調査地，および，想定洪水外力を定め，氾濫解析を行って浸水域を得たうえで，浸水による都市ガス供給停止範囲を記述する一方，強制排水による浸水解消時間を試算した後，浸水解消後に施設の修繕に要する時間を推算するものである．本手法により，上記の諸過程を通じ，それぞれの所要時間と影響人口による定量評価が可能になる．本章では，調査地と対象洪水，浸水に伴う都市ガス供給停止，浸水後の排水・復旧過程のモデル化についてその要諦を記す.

洪水氾濫流の解析にはiRIC Nays2D Floodソルバー（iRIC Project，http://i-ric.org/ja/software/?c=7）を用いた．この氾濫解析の準備として「5 mメッシュ標高」から地形を作成し，一般曲線座標系（格子サイズ：25 m以下）で計算格子を生成した．地表粗度については，一様に与えた後（n = 0.03），「道路縁ライン」で囲まれる街区（格子群）ごとに「建築物ポリゴン」の総面積から建物占有率を得て補正した[6]．ここで括弧書きした数値地図データは，いずれも基盤地図情報（国土交通省国土地理院，https://www.gsi.go.jp/kiban/）から取得した.

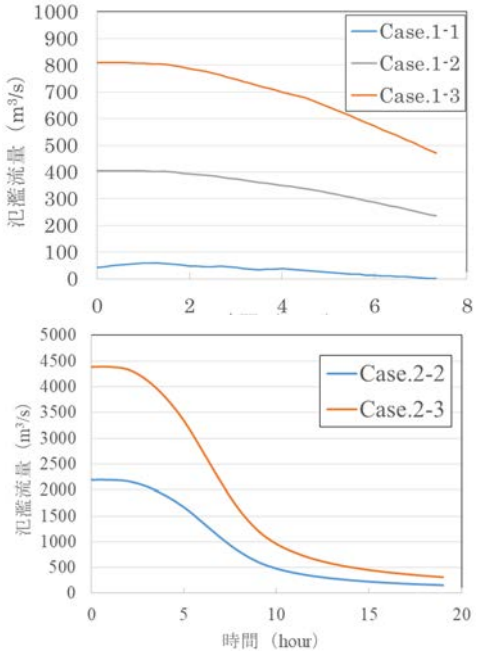

図-3　解析対象とした氾濫流量ハイドログラフ（上：新川Case. 1，下：庄内川Case. 2）.

(1) 調査地と対象洪水のモデル化

本研究では，名古屋市周辺を流れる庄内川水系の新川と庄内川を対象とし，各河川における破堤氾濫を想定する．破堤箇所については，過去の実績と河川管理者により作成された浸水想定区域図データ（国土交通省庄内川河川事務所提供）を参照し，新川は河口から16 km地点の左岸（2000年9月東海豪雨時の破堤箇所），庄内川は15 km地点左岸（水害被害試算額の最高箇所）を選定した．**図-2**にはその位置図を示す.

a) 庄内川水系新川（Case. 1）の計算領域と洪水氾濫

計算領域は新川左岸，庄内川右岸に囲まれた地域（約11 km^2）であり，幅100 mの破堤口から流入させ，新川堤防以外の境界は自由流出条件で与えた．**図-3**には，氾濫流量ハイドログラフを示す．ここで，Case. 1-1は東海豪雨時の氾濫流量の再現値[6]，Case. 1-2とCase. 1-3は当時流下した河川流量のそれぞれ50%，100%を与えた[6]．これらの条件は，Case. 1-1では既往最大クラスを想定する一方，Case. 1-2，1-3では想定最大クラスの洪水氾濫となるように設定した[6].

b) 庄内川水系庄内川（Case. 2）の計算領域と洪水氾濫

計算領域は庄内川左岸堤防から伊勢湾に至る低平地（約74 km^2）であり，幅100 mの破堤口から流入させ，庄内川堤防以外の縁端部は自由流出条件で与えた（潮位

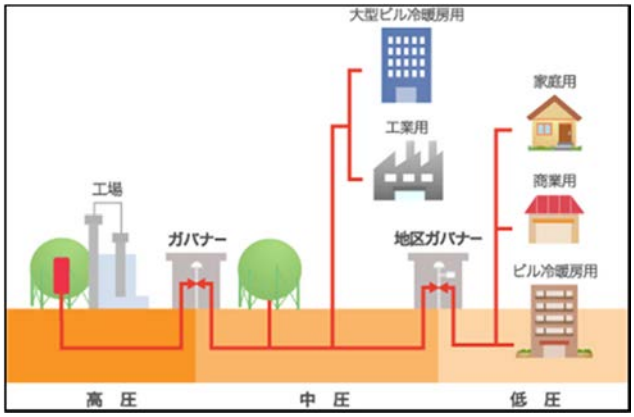

図-4　都市ガス供給システムの概念図[8].

は無視した）．また，氾濫流量は東海豪雨時の実測流量を流して河道～堤内を一体に計算して浸水分布を得る一方（Case. 2-1），計画規模の河川流量を基準に50，100%（Case. 2-2, 2-3）として与えた（**図-3**）．これらの条件は，庄内川では東海豪雨時の実績流量よりも計画流量が大きいことを踏まえ，Case. 1と対応するように，Case. 2-1は既往最大クラス，Case. 2-2，2-3は想定最大クラスの洪水氾濫を想定して設定した．ここで，東海豪雨時の実測流量，計画規模の想定流量，河道地形の各種データは庄内川河川事務所から提供を受けたものである．

(2) 浸水に伴う都市ガス供給停止のモデル化

図-4には，都市ガス供給システムの概念図を示すが，本研究では，末端に位置する地区ガバナーとマイコンメーターを対象とした．この際，浸水に伴う都市ガス供給停止をより詳細に把握するため，影響人口を(α) マイコンメーターのみ停止，(β) 地区ガバナーのみ停止，(γ) マイコンメーターと地区ガバナー停止の3つに分類し，算定した．なお，影響人口の算出に必要な，当該地域の人口分布と一世帯当たりの平均人口（2.52人）は，平成27年度国勢調査（総務省統計局，https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html）を参照した．

a) マイコンメーター機能停止による影響人口

マイコンメーターは住居ごとに備え付けられており，戸建て住宅及び集合住宅の 1 階では地上から 1.0m の高さに設置されている．既往研究 [3), 4)]では，マイコンメーター停止による影響人口について，浸水深 1.0 m を閾値とした次式を提案しており，ここでもこれを採用した．

$$I = \sum P_M \times \{\alpha + (1-\alpha) \times 1/f\} \qquad (1)$$

ここで，I は影響を受ける居住人口，P_M は浸水深 1.0 m 以上に居住する計算メッシュ人口，αは全住宅に対する戸建て住宅（長屋含む）の棟数割合（0.34），f は当該メッシュにおける集合住宅の平均階数（2.89 階）である（データ引用：総務省統計局，平成 25 年度住宅・土地統計調査，https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/tyousake.html）．

b) 地区ガバナー機能停止による影響人口

地区ガバナーには，大気圧検知装置が平均的に地上から約 2.0 m の位置に備え付けられ [9)]，これが浸水することでカバーエリア一帯において都市ガス供給が停止する．ここでは既往研究 [3), 4)]に倣ってこの基準を採用し，影響人口は次式によって計算した．

$$I = \sum P_G \qquad (2)$$

ここで，P_Gは停止地区ガバナーのカバーエリア内に居住する人口である．

本研究では，地区ガバナーのカバーエリアをティーセン分割法によって一意的に定めた．つまり，地区ガバナーが機能停止となった場合の影響人口は，ティーセン分割によって定められたエリアの居住人口である．

(3) 浸水後の排水・復旧過程のモデル化

浸水によって供給停止した地域の復旧作業は，前日に浸水が解消した範囲について取り掛かるものと想定した．なお，浸水解消の判定は，自動車が通行可能な浸水深 0.1 m以下を閾値とした．この基準にしたがって排水所要時間を以下のa)により日単位で求めた後，マイコンメーター，地区ガバナーの復旧作業について，以下のb), c)のようなモデル化を行った．

a) 強制排水による浸水解消過程

破堤氾濫が発生したときの排水は，堤防決壊箇所の仮締め切りにより堤内地と堤外地を分断した後に，既存の排水機場と災害対策用車両である排水ポンプ車による強制排水と自然排水によってなされる．本研究では，自然排水が困難な低平地を想定し，既設の排水機場による強制排水のみを考慮した．なお，排水計算を正確に行うためには，下水道網，ならびに，排水中の氾濫域における水の流れを考慮する必要があるが，ここでは簡単のため，周囲の施設の配置を考慮したティーセン分割により排水域を設定したうえで，排水機場の総排水量[m^3/s]を排水域内の浸水面積[m^2]で除した値を排水速度[m/s]とし，各メッシュの浸水深から差し引くことにより代替させた．

各排水機場の稼働については，周辺の浸水エリアにおける最も標高が低い地点の水深が0.0 mとなった時点で当該施設の排水域からのは排水完了とみなし停止させた．また，下水道事業者からの聞き取りより，建物の2階程度の高さに設置された電気設備が浸水すると機能停止となることから，排水機場における浸水深が3.0 m以上で機能停止と見なした．排水が進むごとに浸水域は縮小することになるが，排水機場が1箇所稼働停止するたびに，条件を見直し再設定して計算を継続させた．**図-5**には，各調査地・計算領域と排水機場の位置関係を示す．なお，それぞれの排水能力は次の通り：Case. 1 ~ A. 14.2 m^3/s, B. 5.4 m^3/s, C. 20.2 m^3/s, D. 1.2 m^3/s, E. 6.2 m^3/s, F. 1.2 m^3/s, G. 5.2 m^3/s, H. 5.1 m^3/s（総排水能力 58.7 m^3/s）; Case. 2 ~ a.

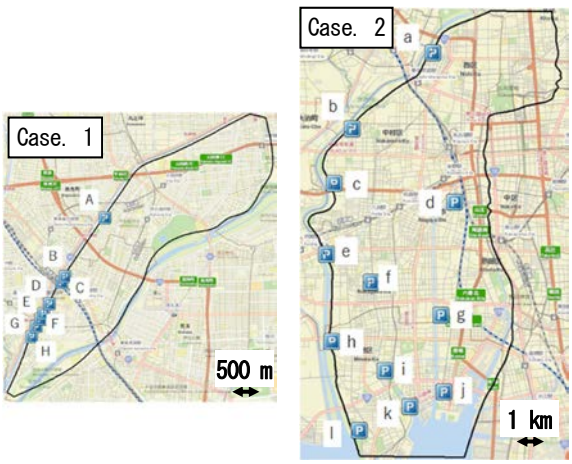

図-5 各調査地・計算領域における排水機場（英字）の配置（ESRI Japan社ArcGIS 9.2にてOnline mapを背景に作成）.

表-1 都市ガス停止要因ごとの復旧想定.

停止状況	(α) マイコンメーターのみ	(β) 地区ガバナーのみ	(γ) マイコンメーターと地区ガバナー
復旧想定	復旧作業終了と同時に復旧	復旧作業終了と同時に復旧	地区ガバナー復旧後，カバーエリア内のマイコンメーターを復旧

20.0 m^3/s, b. 37.7 m^3/s, c. 22.3 m^3/s, d. 10.2 m^3/s, e. 65.8 m^3/s, f. 16.5 m^3/s, g. 12.0 m^3/s, h. 12.7 m^3/s, i. 20.7 m^3/s, j. 16.2 m^3/s, k. 59.0 m^3/s, l. 43.0 m^3/s（総排水能力 336.1 m^3/s）.

以上に鑑み，排水中のある時点tにおける当該排水域における浸水深の減少については次式で表される.

$$h_{t_{n+1}} = h_{t_n} - \frac{Q_{t_n}}{A_{t_n}} \times (t_{n+1} - t_n) \qquad (3)$$

ここで，t_nは排水開始からnステップ目に排水機場が稼働停止となる時間[s]，t_{n+1}は排水開始からn+1ステップ目に排水機場が稼働停止となる時間[s]，h_{t_n}はt_n時間後の水深[m]，$h_{t_{n+1}}$はt_{n+1}時間後の水深[m]，Q_{t_n}はt_n時間後の排水機場総排水量[m^3/s]，A_{t_n}はt_n時間後の浸水範囲[m^2]を表す.

b) **マイコンメーターの復旧作業時間**

「水害の被害指標分析の手引き」（H25試行版）[4]によると，マイコンメーターが浸水により故障した場合，交換が必要となり，1戸あたり数十分程度かかる．そこで本研究では，復旧作業を行うにあたって作業員の移動時間は考慮せず，修理時間は1戸あたり1人で30分と仮定した．また，対象領域におけるマイコンメーターの復旧作業に当たる作業員数をケースごとに設定し，次式で作業時間を算出する.

$$t_M = \frac{Q_M \times T}{X} \qquad (4)$$

ここで，t_Mはマイコンメーターの復旧作業時間，Q_Mはマイコンメーター停止の影響戸数，Tは1戸あたり1人で復旧作業にかかる時間，Xは作業員数を表す.

c) **地区ガバナーの復旧作業時間**

ガス事業者への聞き取り調査によると，地区ガバナーが浸水により機能停止した場合，復旧作業時間は当該地区ガバナーのカバーエリア内の戸数におおよそ比例する．そこでここでは，2000年9月東海豪雨の際の実績データ（最長4 日間，最大5,000 戸以上停止）をもとに，復旧作業時間と当該ガバナーのカバーエリアにおける供給戸数との間に見られる比例定数を求め，次式に示す単純な一次関数により試算するものとした.

$$t_G = \alpha \times B_G \qquad (5)$$

ここで，t_Gは地区ガバナーの復旧作業時間，αは比例定数（ここでは，0.018 時間/戸），B_Gは当該地区ガバナーのカバーエリア内戸数を表す.

ところで，前記したように浸水によってマイコンメーターが故障した場合，メーター交換後に作業員が試点火を行うケースがあることから，ここでのモデル化においては停止した全てのマイコンメーターにおいてこれを適用する．すなわち，マイコンメーター復旧には当該カバーエリアを担う地区ガバナーが機能している必要があり，マイコンメーターと地区ガバナーが停止しているケース(β)においては地区ガバナー復旧後にマイコンメーターの復旧作業に取り掛かることとする．**表-1**には，ケース(α)，(β)，(γ)における復旧想定をまとめる.

3．結果と考察

新川における破堤氾濫を事例に，都市ガス供給停止範囲とそれに伴う影響人口，および，その後の排水・復旧過程とそれに伴う影響人口の変化について示すことにより，洪水氾濫してから排水が完了して都市ガス供給が復旧するまでに至る一連の影響評価を確認する．さらに，新川と庄内川の結果を対比しながら考察を行う.

(1) 都市ガス供給停止とそれに伴う影響人口

洪水氾濫流による都市ガスの供給停止とそれに伴う影響人口について，新川の洪水流量の半量が氾濫したCase. 1-2における試算結果を例に示す．**図-6**には，新川破堤位置（×で表示）と最大浸水深の分布，都市ガス供給停止域を機能停止した施設ごとに示す．この図に示される，マイコンメーター停止域と地区ガバナー浸水により供給停止するカバーエリア（地区ガバナー停止域と呼ぶ）から影響人口を試算したところ，マイコンメーターのみ停止は6,532人，地区ガバナーのみ停止は9,801人に対し，両施設とも停止は10,874人と推定された．これらは，計算対象地域内のそれぞれ10，15，17 %の人口に相当するもので，大規模出水による洪水氾濫が広域にわたる都市ガス供給停止（合計27,207人，約10,800世帯）を引き起こす可能性を示唆している．**表-2**には，他の洪水規模の氾濫（Case. 1-1，1-3）に対して同様の試算を行った結果

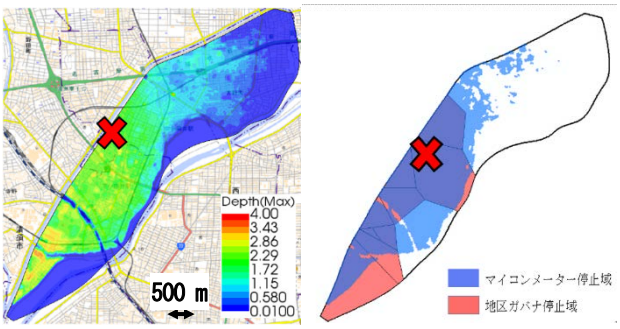

図-6　新川氾濫（Case. 1-2）に対する最大浸水深（左）と都市ガス停止域（右）（左はiRICによりGoogle mapで作成）.

表-2　氾濫流量ごとの影響人口と内訳.

Case	影響人口（計算領域内人口：65,032人中）			
	マイコンメーターのみ停止	地区ガバナーのみ停止	両方停止	合計
1-1	114	0	0	114
1-2	6,532	9,801	10,874	27,207
1-3	13,230	17,470	20,824	51,524

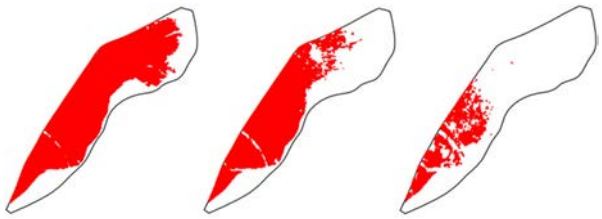

図-7　排水過程（左：開始前，中：1日後，右：2日後）（着色域は，湛水深0.1 m以上の範囲を示す）.

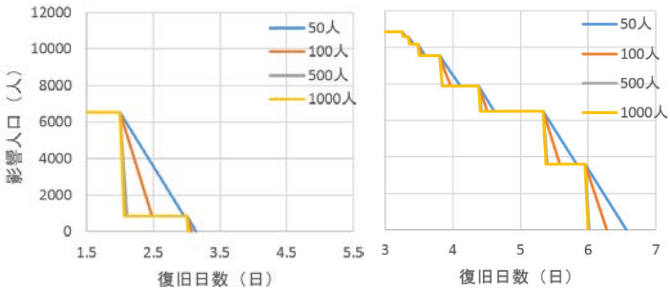

図-8　復旧作業人員数による都市ガス施設の復旧過程（左：マイコンメーターのみ停止，右：両施設停止）.

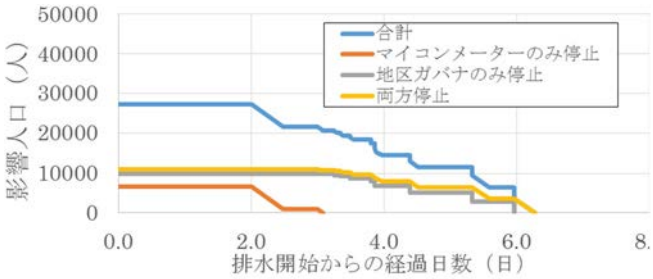

図-9　排水開始からの都市ガス供給システムの復旧過程（ここでの作業人員数は100人とした）.

を示す．Case. 1-1は，東海豪雨の実績の再現を試みたケースであるが，氾濫規模は最小であることから，地区ガバナーの設置位置の浸水深は機能停止を引き起こすまでに至らず，マイコンメーターの停止による影響に留まっていたのに対し，河川流量が全量氾濫するCase. 1-3は，それぞれの要因による影響人口は，20～32 %にも上るなど，甚大な影響が生じることが確認できる.

(2) 排水・復旧過程とそれに伴う影響人口の変化

図-7には，**図-6**で示した新川のCase. 1-2における浸水域を対象に，上記した方法により試算した浸水解消過程を示す．本ケースでは，51時間で排水が完了することとなった．当該地域には，新川左岸の沿川に8つの排水機場（総排水能力58.7 m^3/s）が設置されているが，ここでの浸水状況から全て機能するものとした.

続いて，本ケースにおける浸水解消後の都市ガス施設の復旧過程について試算した結果を**図-8**に示す．図中で影響人口に変化がない期間について，マイコンメーターのみ停止のグラフでは排水完了を待っている期間，マイコンメーター・地区ガバナーとも停止したケースでは，排水完了とともに地区ガバナー復旧を待っている期間を表す．ここで，マイコンメーターの復旧に必要な作業人員数を50人，100人，500人，1000人と変化させたが，地区ガバナーのカバーエリア内のマイコンメーター数量との兼ね合いもあって，最大半日程度の短縮程度の効果に留まった．さらに，作業人員100人としたときの都市ガス供給システムの復旧過程についての試算結果を**図-9**に示す．本ケースでの復旧日数は約6日と試算されたが，これはこれまでの大規模浸水（2000年東海豪雨など）による都市ガス供給停止後の復旧日数と同等であることから，本モデルの実用上の妥当性が確認された.

(3) 新川と庄内川の氾濫特性の違いによる被害の特徴

図-10には，新川（Case. 1），庄内川（Case. 2）の洪水規模に応じた最大浸水深分布を示す．計算領域の面積はそれぞれ約11km^2と約74 km^2と大きくスケールは異なるが，窪地状の閉鎖的な領域に氾濫水が滞留する新川左岸からの洪水氾濫と沖積平野に氾濫水が広く行き渡る庄内川左岸からの洪水氾濫の特性の違いが明らかになった．この特徴の違いは，氾濫流量が大きくなるにつれて色濃く表れ，浸水深の大きさに反映されている．そこで，**図-11**には，Case. 1-3とCase. 2-3について，浸水によりマイコンメーターのみ停止した後の復旧過程を示す．新川のCase. 1-3は，多くの排水機場が操業できないほどの大きな浸水深に見舞われ，排水が進まないうえ，復旧人員を投入してもその効果がほとんど見えないのに対し，庄内川のCase. 2-3では，浅い浸水深の広がるエリアが広いため，排水機場も効果的に作用して排水が解消でき，作業人員の増員によって復旧日数が劇的に早まる様子が確認できた．洪水氾濫による浸水特性の違いが一時的なライフラインの供給停止のみならず，その復旧にも影響を及ぼしうることが示されたと言えよう.

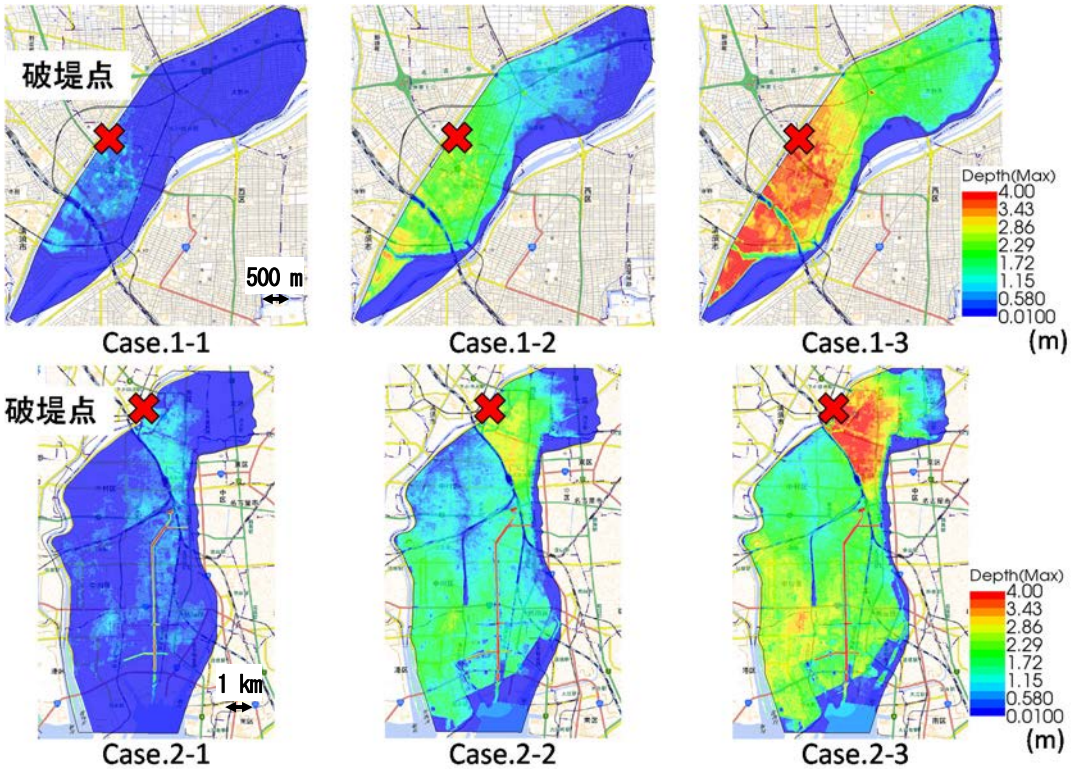

図-10　新川（Case. 1）と庄内川（Case. 2）の最大浸水深の分布（計算開始から7.3時間後，iRICによりGoogle mapで作成）.

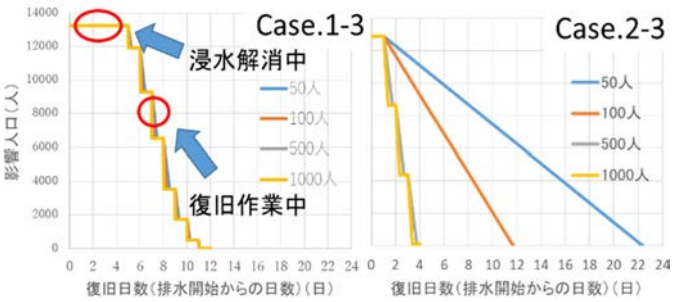

図-11　氾濫によるマイコンメーター停止後の復旧過程.

4．おわりに

本研究では，浸水による都市ガス供給停止期間を定量的に試算できる枠組みを用いて，庄内川・新川による氾濫事象が及ぼす被害想定について考察した.

洪水外力の増加に伴って影響人口・期間は増加するが，特に，地区ガバナーの停止による影響は大きくなった．排水後に地区ガバナー，マイコンメーターの順に復旧作業を行うものとして試算した結果，供給停止域が広くなると作業員数の増員効果が大きくなる一方，供給停止域が狭い場合にはその効果が限定的になることが示された.

謝辞：本研究は，一般社団法人日本ガス協会（2018～2019年度）による助成を受けて実施した（代表：田代喬）．国土交通省庄内川河川事務所には，庄内川に関する各種データを提供いただいた．東邦ガス供給防災部の諸氏には，都市ガス供給システムとそのモデル化について適切に助言いただいた．ここに記して御礼申し上げる.

参考文献

1) 宮島，岩本，北野，橋本：2015 年関東・東北豪雨災害における茨城県常総市の水道施設被害，第 6 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム論文集，pp.149-152，2016.
2) 北野，宮島，平田：2015 年関東・東北豪雨災害における常総市の水道施設の被害・応急対応と今後の備え，水道協会雑誌，第 86 巻，第 1 号，pp.11-19，2017.
3) 多田，池内，廣瀬，栗林，猿渡，伊藤，久保田，大浪，池田：洪水氾濫によるライフライン停止被害の定量的な算出手法の開発，河川技術論文集，第 19 巻，pp.265-270，2013.
4) 国交省水管理・国土保全局：「水害の被害指標分析の手引き」（H25 試行版）.
5) 中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」：大規模水害対策に関する専門調査会報告・首都圏水没～被害軽減のために取るべき対策とは～，2010.
6) 田代，八木，戸田：洪水氾濫流が都市ガス供給システムに及ぼす影響に関する一考察：供給地域の浸水過程と施設に作用する流体力に基づく被害推定，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.5，pp.I_1489-I_1494，2018.
7) 田代，八木，菅沼，戸田：浸水事象が都市ガス供給システムに及ぼす影響の統合的把握に向けた試算方法の設計，第10回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集，pp.42-46，2020.
8) 北海道ガス株式会社：都市ガスの特徴，https://www.hokkaido-gas.co.jp/home/knowledge/toshi_gas/peculiarity.html.
9) 一般社団法人日本ガス協会：都市ガス工業概要（供給編），2014.

(2020. 4. 2受付)