

地盤沈下対策で海面上昇へのレジリエンスを高める

のスケール)に限られるとされてきた*6。ところが、最新の研究で世界全体の地盤沈下による海面上昇速度の推計*7や衛星観測と経済コスト試算*8などが行われ、その影響がより大きな地域・地球規模(100kmスケール)にも及ぶことがわかってきている*9。

地盤沈下にも海面上昇にも、河口からの塩水遡上や地下水への塩水浸入によって沿岸地域の河川表流水・地下水の利用可能な水資源が減少するという共通の悪影響がある。一方で、地盤沈下特有の問題もいくつか存在する。まず、一度沈下してしまった地盤はもとには戻らない(不可逆プロセス)。数年から数十年という長期間にわたって地下水の汲み上げを行ってしまうと、揚水(汲み上げ)規制を行ったところで地下水位は簡単には回復しない*10。また、地盤沈下は渇水年には進行が早まる。例えば1994年の渇水年には、雨水の地下への浸透量の減少と地下水の揚水量の増加が同時に起きて一時的に地下水位が低下し、愛知県濃尾平野の広範囲で地盤が沈下した*11。このような地域では、揚水規制を維持しつつ地下水の涵養量を増加させる施策をすすめて、これ以上悪化させないようにするしかない*12。しかしながら、過剰な地下水揚水規制によって地下構造物の浮き上がりや地下水の漏水、地下水の酸性化にとまらぬ腐食などの別の問題が起こる場合もある*10。

ここ最近では、液状化や大規模な地震によって引き起

こされる広範囲の地盤沈下(沈降)も注目を集めている(図1)。2011年3月の東北地方太平洋沖地震の後は、通常の地震ではほとんどみられなかった地殻変動による地盤沈下が生じた。このような地域では、地盤沈下した部分の「かさ上げ」が有効な対策となり、そのための技術開発が必要不可欠である*13。

海面上昇を引き起こすそれぞれの要因の重要性はどの程度だろうか? 図1に示すように、世界全体の平均海面水位は1901~2018年の間に地球温暖化によって1年あたり0.173cm(海洋の熱膨張・氷河の変化ともに40%程度の寄与と推定)の速度で上昇した*1。我が国では、環境省により毎年全国の地盤沈下状況が調査されており(図2)、2019年には1年あたり2.53cm沈下した千葉県が最大であった。そのほかの県でも、1cmを超える沈下速度が観測された地点が多くみられた。地震による地盤変動は突発的であり、事例や地域への依存性も非常に高いが、例えば、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の後、福島県における粘性土地盤は2010~2011年の1年間で4.4cmも沈下した*14。これらの値は空間規模・地点が異なるので単純に比較することはできないが、地域によっては「相対的海面上昇」の方が重要となる可能性はある。

図2 / 2019年度における日本全国の1年あたりの地盤沈下量 (cm/年)*5

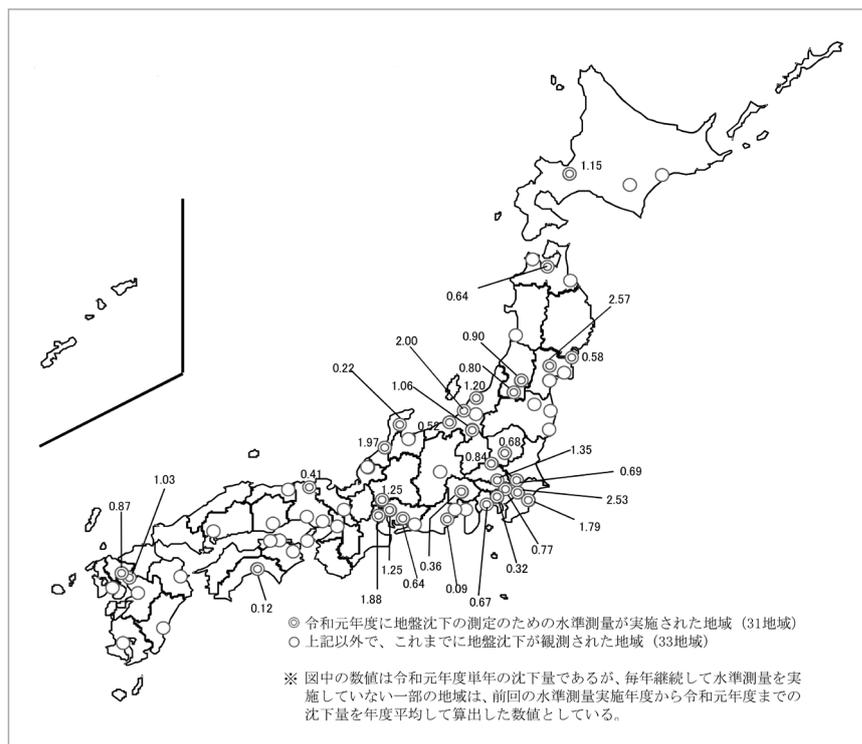
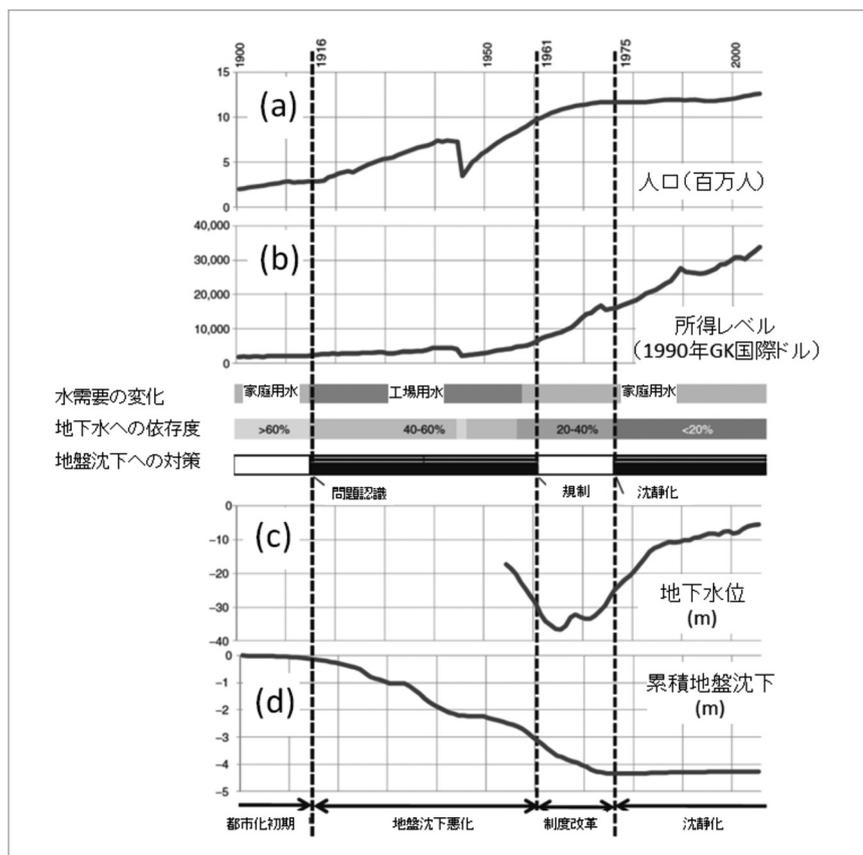


図3 / 東京における人口、所得、地下水位、累積地盤沈下の長期変動*19



1. 大都市における地盤沈下問題の歴史

我が国の都市域は、1930年代の第2次世界大戦後から高度経済成長期にかけての大規模な地下水揚水とこれにともなう地盤沈下や海水侵入などの地下水障害の発生、その後の揚水規制による地下水位の上昇という一連の歴史を有している。当時の被害状況や経済損失は、東京都環境局の地下水対策検討委員会が報告している*15,16。

地盤沈下は、高度経済成長期の急激な都市化・人口増加・水需要の増加・高潮などによる水害などが複雑にリンクした公害である。日本でも有数の地盤沈下地帯である東京の社会的要因と累積地盤沈下量の長期変化をみてみよう(図3)。累積地盤沈下量を見ると、1916～1960年の間に大きく地盤沈下が進んでいたことがわかり(図3d)、その主な原因は人口増加と産業の発展にともなう工業用水確保のための地下水の汲み上げである(図3a, c)。さらに1960年頃からは、民間会社による南関東ガス田(埼玉・東京・神奈川・茨城・千葉)のメタンガス(CH₄)採取が目的に加わり、地下水の汲み上げも進んだ。地下水に溶けたCH₄は大気圧の下では水にほとんど溶けないので、汲み上げと同時に分離・発生し採取できる。南関東ガス田の深さ500m程度の砂層・砂礫層(上総層群)には高濃度のCH₄が多く地下水に溶存していることから、

帯水層に接する難透水層で激しい圧密が生じた。その結果、1968年には1年あたり23.89cmという東京における最大の沈下速度が観測された*17。そして、累積地盤沈下量は4.57mにも達した*18。

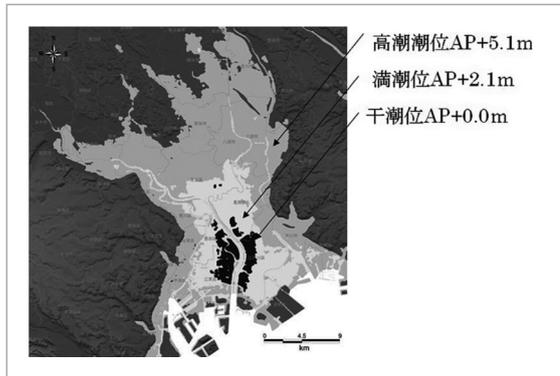
地盤沈下の対策としては、1961年に「工業用水法」、1963年には「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」が定められた。東京都は1972年には天然ガスの採取を全面禁止、1975年からは工業用水の地下水汲み上げも全面禁止した。これらが功を奏して、東京の地盤沈下の沈静化が進んだ。

国土の10%に過ぎない沖積平野に日本の全人口の約半分が集中しており、今も地盤沈下の脅威に晒されている。特に、日本3大湾(東京湾・伊勢湾・大阪湾)には「ゼロメートル地帯(大潮の満潮位よりも低い土地)」が広がり、居住者は404万人にのぼる*20。アジアモンスーンや台風などの影響を受けやすい日本のゼロメートル地帯は、洪水や高潮災害などの脅威にさらされる*17。例えば東京湾周辺では、東京の広範囲のエリアがゼロメートル地帯に属することがわかる(図4)。このような地帯の地下水位は上昇・回復傾向から微増・横ばい傾向に移行しつつあるが、地域によっては都内の湧水量が減少したり枯渇したりするものも見受けられ、地下水をめぐる環境は依然として厳しい*10。

地盤沈下②

地盤沈下対策で海面上昇へのレジリエンスを高める

図4 / 2012年時点の東京都荒川と江戸川に挟まれたゼロメートル地帯^{*17}



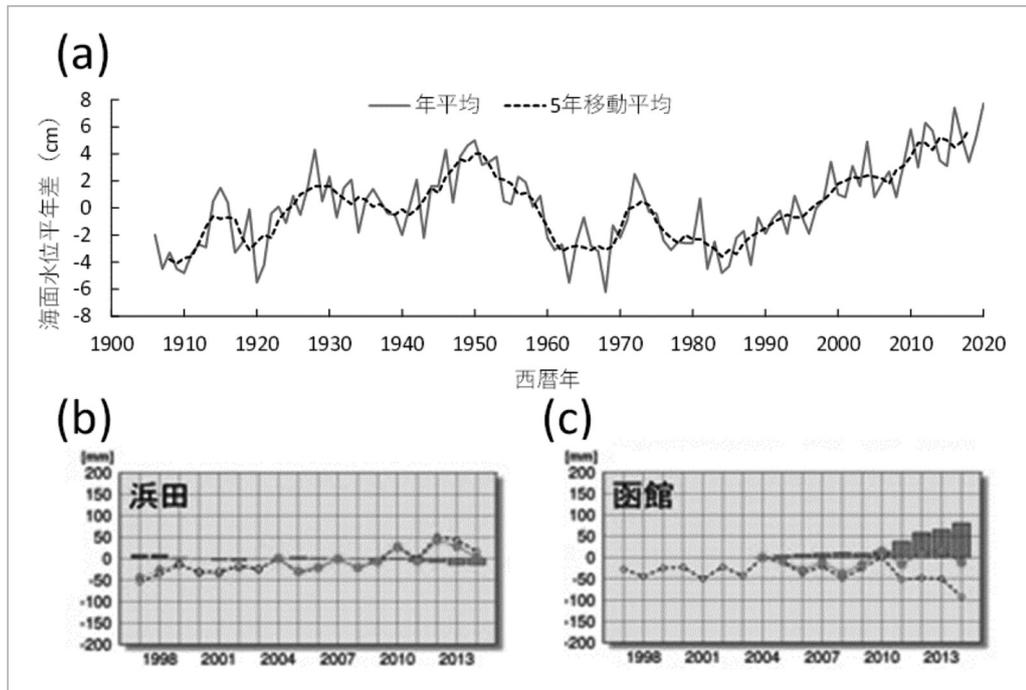
2. 我が国の海面水位の長期変動傾向

各地の検潮所において検潮儀（潮位変化を自動記録する機器）で記録された海面水位のデータは、過去100年規模の長期変動を解析可能な唯一の観測データである。気象庁では、地盤変動の影響が小さい検潮所を選定し、日本全国の平均海面水位を算出している（図5a）。5年移動平均値で見ると、海面水位は十年程度の周期とともに-4～6cmの幅で大きく変動している。このため、現時点で気象庁は、地球温暖化が我が国の沿岸地域における海面水位変動にどの程度影響しているのかは明らかではないとしている^{*21}。

検潮儀による海面水位のデータには、地球温暖化と地盤沈下の両方の影響も含まれており、これを除去しない限り地球温暖化のみによる海面水位の変動量を見積もることはできない。最近の研究^{*22}では、検潮所に取り付けられた国土地理院のGPS連続観測データを利用して地盤の上下変動を評価し、これによる海面水位データの補正が行われている（図5a）。最も長期のデータが利用可能であり、2011年の東北地方太平洋沖地震の影響を受けていない浜田（図5b）・稚内・串本検潮所の地盤変動率を見積もると、1997～2014年で1年あたり-0.44（沈下）～+0.08cm（隆起）であった^{*22}。この地盤変動率で実際の海面水位データを補正すると、地球温暖化による海面水位の上昇率は1年あたり0.27-0.36cmと算出された。このように、地震の影響を受けていないという検潮所であっても最大で1年あたり0.4cmの速度で地盤が沈下しており、海面水位の変化に対して無視することはできない。

なお、函館では2011年以降、地盤の隆起速度が増加している（図5c）。函館を含む東北地方太平洋沖地震の影響を受けた二つの検潮所（函館・布良）における2004～2014年の地盤変動率は1年あたり+0.21～+0.78cm（隆起）であり、図1の福島県の沈下傾向とは異なっている。地震が及ぼす海面上昇への影響を評価するためには、沿岸域の同一地点におけるさらなる海面水位と地盤沈下の観測データが必要と思われる。

図5 / 日本沿岸4検潮所の平均海面水位偏差^{*21}と浜田・函館の地盤変動補正前と補正後の海面水位偏差^{*22}



地盤沈下対策で海面上昇へのレジリエンスを高める

だ」という考えに基づいていると思われるが、これを推進すると地下水位が下がり地盤沈下が再発するおそれがあるので、注意が必要である*11。

4. 地盤沈下対策の最近の事例と課題

地盤沈下の本質が水利用管理にあること自体は、古くから認識されている。しかしながら、かつて問題となった地下水の過剰採取に加えて、大都市での地下水位の回復傾向、地中熱利用のような地下水利用の要望など、地盤沈下をめぐる環境は変化してきている*32。地域によっても異なる複雑な地盤沈下をめぐる問題に対して、事業者は対策に乗り出している。

地下水並びに水の使用量の管理において先進的な取り組みを行っているのは、熊本県である。富士フィルム九州株式会社やソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社は、熊本県の水資源保全を強く意識し、工業用水の使用削減や使用した水の回収・精製・再利用、雨水のトイレ用水への活用などに努めている。さらには、水保全を地場産業振興や観光に活かすことで水資源保全と地域活性化の同時達成を狙う*33。本稿で述べた海面上昇への適応策も兼ねているので「一石三鳥」である。

鉄道業界では、逆に地下水位の回復への対応に迫られている。揚水の規制が働いて地下水位が建設当時よりも上昇したために、地下の構造物の浮上や水圧による構造物の床の損壊が懸念されているのである。過去には、1991年にJR東日本武蔵野線・新小平駅を台風が通過した際、地下水位の上昇で駅舎が持ち上がり、線路が分断されて冠水した*34。最近でも、JR横須賀線・東京駅では排水ポンプの機能不全で地下水の流入が増えて漏水し、線路がレール面から約10cm冠水した*35。JR東日本は地下水調査を行い、東京駅や上野駅のホーム下に鉄塊を積み上げたり、地下に向かってグラウンドアンカー（強い引張力で構造物を支えるワイヤー）を打ち込んで係留することで地下構造物の浮上を抑えている*36。

このように、水利用管理については経験や技術がある程度浸透しつつあるが、大規模地震による地盤沈下（沈降）への対策はこれからである。効果的な対応策としては、ソフト面とハード面の2種類が考えられる。ソフト面の対策は、地下水位の広範囲のモニタリングである。地下水位は下がっても上がっても社会インフラに重要な影響を及ぼすので、広域に渡る地下水位監視システムを構築することが肝要である*37。例えば、株式会社福

山コンサルタント（<https://www.fukuyamaconsul.co.jp>）が開発した「侵食（洗掘）モニタリングセンサー」は橋梁で多くの使用実績があるが、地下水位変動の遠隔・面的なモニタリングにも応用可能である。また、ハード面では地盤のかさ上げが有効であり*11、これを実施するために「軽量土技術」の普及が望まれる。軽量土技術とは、柔らかい地盤をかさ上げするために土ではなく発泡スチロールなどの超軽量材を用いる技術のことである。発泡スチロール土木工法開発機構（<http://www.cpcinc.co.jp/edo/>）の技術提携会社であるJSP株式会社やアキレス株式会社などが開発を進めており、地盤沈下対策としても有望と思われる。

海面上昇というと、「脱炭素」や「カーボンニュートラル」を背景とした事業者のCO₂排出削減への取り組みに注目が集まりがちである。しかし、地球温暖化と同等もしくは上回る影響をもつ地盤沈下への対策も忘れてはならない。そしてその対策にはさらなる技術開発とその普及が必要不可欠であり、関係する事業者への期待は大きい。

謝辞

本稿の執筆に際しては、茨城大学・安原一哉名誉教授並びに大学院理工学研究科（工学野）・榎本忠夫准教授に助言頂いた。また、匿名査読者1名に有意義な意見を頂いた。日本沿岸の海面水位偏差のデータは、気象庁ホームページから取得した。

【参考文献】

- *1 IPCC (2021) Special Report: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- *2 環境省 (2019) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC)「海洋・雪氷圏特別報告書 (*)」の公表 (第 51 回総会の結果) について
<https://www.env.go.jp/press/107242.html>
- *3 国土交通省 (2002) 地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土保全研究会
https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/05/050502/050502_02.pdf
- *4 三村信男、横本裕宗 (2005)「海面上昇が沿岸域の環境と生態系に及ぼす影響の予測と対策」沿岸海洋研究、42、pp. 119-124
- *5 環境省 (2021) 令和元年度全国の地盤沈下地域の概況
https://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo_r01.pdf
- *6 Wong, P.P. and Losada, I.J. (2014) Coastal Systems and Low-Lying Areas
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap5_FINAL.pdf
- *7 Nicholls, R., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A., Meysignac, B., Hanson, S., Merkens, J. and Fang, J. (2021)

- 「A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure nature research」
Nature Climate Change, 11, pp. 338-342
- * 8 Herrera, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Bejar, M., Vinielles, L.J., Rossi, M., Mateos, R., Carreon, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, Wei-Chia & Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wan, H. and Ye, S. (2021)「Mapping the global threat of land subsidence」Science, 371, pp.34-36
- * 9 堅田元喜 (2021) 地盤沈下を対策すれば海面上昇への適応につながる
<https://agora-web.jp/archives/2051883.html>
- * 10 林武司、宮越昭暢、安原正也 (2007)「大都市圏の発達に伴う地下水環境の変化と課題」日本水文科学会誌、37、pp.271-285
- * 11 大東憲二、佐伯茂雄 (2005)「広域地盤沈下調査における地盤環境情報の利用に関する研究」応用地質、46、pp.79-88
- * 12 中嶋博、金子紘士、土田 稔 (2010)「東京都における地盤沈下対策と地下水保全対策」地下水学会誌、52、pp. 35-47
- * 13 安原一哉、薄井隆義 (2012)「東日本大震災時に地盤沈下を受けた沿岸域復旧のためのジオシンセティックス適用の可能性」ジオシンセティックス論文集、27、pp.69-76
- * 14 仙頭紀明 (2020)「福島県いわき市で観測された地震後の粘土地盤の沈下とその発生メカニズム」地盤工学ジャーナル、15、pp.697-704
- * 15 東京都環境局 (2006)「東京都の地盤沈下と地下水の現況検証について—地下水対策検討委員会検討のまとめ—」
<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/conference/water/chikasuitaisakukentouiinkai.files/H18.pdf>
- * 16 東京都環境局 (2010)「東京都の地盤沈下と地下水の再検証について—平成 22 年度地下水対策検討委員会のまとめ—」
<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/conference/water/chikasuitaisakukentouiinkai.files/H22.pdf>
- * 17 土屋信行 (2012)「東京東部低地 (ゼロメートル地帯) の形成と洪水発生の不確実性に関する研究」水利科学、56、pp.11-36
- * 18 一般財団法人 東京都地質調査業協会 (2011)「技術ノート (No.21) 特集: 東京の低地」https://www.tokyo-geo.or.jp/technical_note/pdf/No21.pdf
- * 19 Kaneko S. and Toyota T. (2011)「Long-Term Urbanization and Land Subsidence in Asian Megacities: An Indicators System Approach」Groundwater and Subsurface Environments, pp 249-270
- * 20 国土交通省河川局 (2006)「ゼロメートル地帯の今後の高潮対策のあり方について」https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/takashio/060117/gaiyou.pdf
- * 21 気象庁 (2021)「日本沿岸の海面水位の長期変化傾向」
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html
- * 22 奥中裕佳、平原隆寿 (2016)「日本沿岸の海面水位の長期変化傾向について—最近の研究レビュー及びGPS 観測による地盤変動量を用いた補正—」測候時報、83、pp.S21-S31 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou-kaiyou/83/vol83s021.pdf>
- * 23 環境庁水質保全局企画課 (1990)「地盤沈下とその対策」白亜書房
- * 24 望月崇、島正之、篠田裕 (1998)「隅田川における防潮堤の建設史」
- * 25 堅田元喜 (2021)「極値統計学の考え方—異常気象は、それほど異常ではない?—」
<https://ieei.or.jp/2021/05/exp1210507/>
- * 26 東京都江戸川区ホームページ 「スーパー堤防とは、何ですか?」
<https://www.city.edogawa.tokyo.jp/e062/qa/toshikeikaku/saigainitsuyoi/superteibo02.html>
- * 27 一般社団法人 日本ダム協会 (2011)「ダムインタビュー (32) 土屋信行さんに聞く「きちんとやるべきことと、そうでないことの本当の仕分けが今こそ必要ではないか」」
<http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranB/TPage.cgi?id=508>
- * 28 一般社団法人 日本ダム協会 (2015)「土屋信行さん特別インタビュー—「首都水没」を出版—」
- * 29 Area記事 (2019)「隅田川も荒川も薄っぺらなカミソリ堤防…東京水没は「ゼロメートル地帯」の整備がカギ」<https://dot.asahi.com/aera/2019071000056.html?page=1>
- * 30 国土交通省 (2020)「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方」
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/index.html
- * 31 環境省水・大気環境局 (2015)「地中熱利用にあたってのガイドライン」<https://www.env.go.jp/press/files/jp/108674.pdf?fbclid=IwAR3QYrzbGwAmSsj8Jh8Qlqpl3dTUEymZnJbK5F5JmqDCrID86jdw1TgXZb0>
- * 32 林里香 (2017)「健全な水環境の維持・回復に向けた地下水マネジメント」地下水学会誌、59、pp.319-324
- * 33 橋本淳司 (2014)「地下水保全は「守り」から「攻め」へ」事業構想
<https://www.projectdesign.jp/201408/water/001518.php>
- * 34 一般財団法人 東京都地質調査業協会 (2020)「技術ノート (No.30) 技術トピックス: 首都圏を支える鉄道網」
- * 35 産経新聞 (2015)「東京の地下駅に迫る「危険水位」 JR横須賀線 12 時間半運休の背景に大量地下水」
<https://www.sankei.com/article/20151208-P4V70FN6GJJ7VFR5B5DUVWVIXE/2/>
- * 36 一般財団法人 東京都地質調査業協会 (2020)「技術ノート (No.52) 特集: 東京の地下水」https://www.tokyo-geo.or.jp/technical_note/pdf/No52.pdf
- * 37 安原一哉 (2010)「気候変動と冠水害: 坂上潤一ほか編著「湿地環境と作物」」養賢堂、pp.173-186