

## 水環境データ解析に基づく COVID-19 パンデミックの収束評価 I

# Evaluating COVID-19 Pandemic Convergence based on Water Environmental Data Analysis I

伊東 乾 Ken ITO

東京大学 The University of Tokyo

1 Aug. 2020 / 21 Sep. 2020 revised

### 梗概

水環境データ分析に基づく COVID-19 ならびにそれに後続すると思われる 2020 年代のグローバル・パンデミックの収束や地域安全性の評価を判定するシステムを提案する。機械学習等を用いた下水管ネットワークの動態分析と最適取水条件での汚水 PCR 検査、GIS を活用した統合解析から、地域住民の感染度合を疫学評価することが出来る。安全性の確認されたエリアに対しては「収束宣言」「安全宣言」など、社会に安心情報が発信でき、根拠に基づいて経済活動継続の判断を下すことも可能となる。

### キーワード

**新型コロナウイルス感染症 下水 PCR 水環境データ分析 最適取水条件 GIS**

## 1 SARS-COV-2 から COVID-19 へ

2019 年 11 月に初めて確認された新型コロナウイルス[1]は Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 : SARS-COV2 と名付けられた。

先行する SARS, MERS などのコロナウイルス性呼吸器疾患があったこと、当初に確認された症例もまた肺炎、気管支炎、さらには咽頭炎など呼吸器疾患が大半を占め、一部は重症化して高い致死率を示したことから、WHO は 2020 年 3 月、全世界に対してパンデミックの蔓延を宣言した。

病態の分析が進むにつれ、先行する SARS や MERS と比較すると、呼吸器疾患としては致死率が低く、新型コロナウイルスは「弱毒性」である、という見方がなされるようになった。だが同時に、急性の呼吸器疾患による死亡率が低い分、罹患者が血栓を発生しやすくなること[2]、新型コロナウイルスに起因する胃炎、腸炎など消化器疾患の報告[3]も数多く寄せられ、糖尿病や癌などの合併症がある場合、重篤化しやすい傾向なども確かめられるようになった。このため狭義の「肺炎」「咽頭炎」を超えた諸症状に対して「新型コロナウイルス感染症」COVID-19 の呼称が定着することとなった。

しかし、この疾病への感染の診断には、2020 年秋季に入っても、鼻腔や喉から検体を採取して PCR 法を用いる検査が一般的である。こうした検査には

- 1 鼻腔などの症状が軽快し、かつ腸炎などを罹患する症例を判定できない
- 2 PCR 検査は特定の核酸が検体中に存在するかを見るもので発症の有無は判定しない(擬陽性などの問題)

などの原理的な限界が指摘されている。

2019 年秋季から世界的に蔓延しはじめたこの疾病の背後には、20 世紀後半から長期に亘る地球環境の変化、気候変動の影響を指摘する向きもある[4]。実際、21 世紀に入ってから新型の伝染病が全世界の人類を波状に襲っているのは間違いなく、SARS、鳥インフルエンザ、MERS、ノロウイルス、ジカウイルス、エボラ出血熱などの伝染が続く延長で、新型コロナウイルス感染症のパンデミックが襲来しているとみるべきである。

国連は 2015 年にアジェンダ 2030、通称 “SDGs” を採択し、向う 15 年間の全人類社会の取り組むべき課題を 17 の「持続的発展」目標として整理したが、2017 年以降に重篤化したハリケーンや台風などの風水害、また COVID-19 パンデミックは、こうした従来の設定目標に大きな見直しを求める事態となっている。

とりわけ広域伝染病に関しては 2020-30 年にかけての 10 年間に、最低 1 回以上、COVID-19 級のパンデミックが来襲する可能性を念頭において対策を立てるべきであり (NEXT PANDEMIC, SECOND COVID) 抜本的な対策が求められる。

2020 年前半のパンデミックでは多くの国や地域で「都市封鎖」などが実施され、社会経済に大きなダメージが与えられた。NEXT PANDEMIC のリスクも念頭に置くとき、防疫と社会経済の持続と成長を両立する、打たれ強いスマート都市の防疫テクノロジー Resilient Smart City の技術を開発する、圧倒的なグローバル・ニーズがあると考えらるべきである。

## 2 下水 PCR によるウイルス・ディテクション

全世界が新型コロナウイルス感染症によって社会経済を閉塞させていた 2020 年 6 月、イタリアで興味深い事例が発表された。イタリア国立衛生研究所 The National Institute of Health (ISS) がミラノやトリノなどの都市で肺炎が爆発的に蔓延した 2020 年よりも 3 か月早く取水された下水サンプル中から、新型コロナウイルスが確認されたと報じられた[5]。

イタリアで最初の新型コロナウイルス「肺炎」患者が報告されたのは 2020 年 2 月 21 日であったが、Giuseppina La Rosa ら ISS のチームは、別の目的で採取していた 40 ほどの冷凍下水サンプルを PCR 検査してみたところ、ミラノ、トリノの 2019 年 12 月 19 日取水のサンプルから SARS-COV-2 を確認したのである[6]。

この報告は 3 つの異なる意味で本質的に興味深い。第一に、実際に患者が市中にあふれ出すよりも 3 か月も早く、下水中からウイルスが確認されたことから、**パンデミックの兆候を早期に発見でき、疫病の拡大を未然に防ぐ可能性**が指摘できる。

第二に、下水中からのウイルス RNA の検出には、個人情報をめぐるさまざまな問題が存在しない。新型コロナウイルス感染症が蔓延し始めた当初、スマートフォンなどを用いた Contact Tracing が試みられ、それが成功した国や地域もあったが、少なくとも日本においては、まったく意味を成すことはなかった。自由主義体制の社会では、こうした対策には倫理的、法的、社会的な観点 (ELSI) から、大きな制約が課されている。**下水 PCR は個人情報保護の制約を一切受けない**ので、十分な検出精度が確立されれば、大きな力を発揮することが期待される。

第三に、**適切な汚水サンプルのアーカイブが存在したことで、このようなトレースが可能となり、再発防止の対策が取れること**の重要性を指摘せねばならない。2020 年から 30 年に向けて、10 年のタイムスパンで NEXT PANDEMIC への対策を考えると、適切な**情報粒度**で、信頼性の高い汚水サンプルのアーカイブを保存しておくことで、**地域内に伝染性感染症の患者や、そのクラスターが発見されたとき**、「感染経路不明」といった状況に陥らず、**汚水アーカイブ・ライブラリを系統だって遡行することで、方法的な対策を講じることが可能**である。

ここから**地域の汚水をコンスタントにモニタリング**してアーカイブ化、系統だって検査することで、病源体検出の精度限界範囲内で、エリアの**安全性を評価**することが可能である。また蔓延状況が発生したとき、その**収束**も下水 PCR などの方法で、根拠をもって、定量的に示すことが出来る。機械学習などの方法を用い、下水管ネットワークの汚水流量動態解析から最適なサンプリング条件を得ることで、その精度はさらに高める事が期待される。

### 3 世田谷・ミラノモデル ST-Milan Model

日本の東京都世田谷区は極めて興味深い下水道ネットワークのアーキテクチャを持つ。

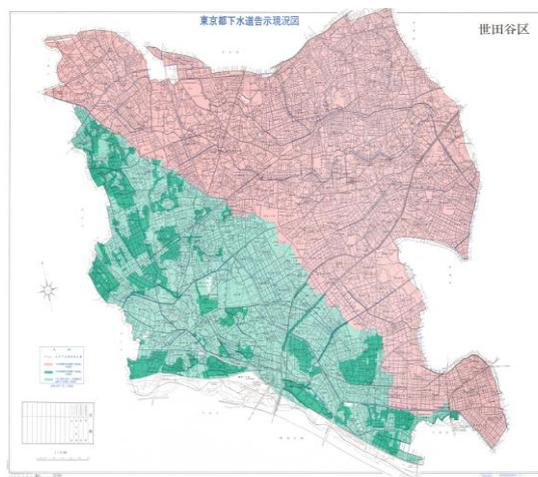


Fig.1 世田谷区の下水道(東京都下水道局 HP より)

Fig.1 の左半分、多摩川沿いのエリアは「分流式」下水道であるのに対し、右半分のエリアは「合流式」下水道となっている[6]。

高度成長期に敷設された下水管は基本的にすべて合流式であり、分流式下水道が整備され始めたのは20世紀末年以降のことである。このため世界の主要都市の下水も、伝統的な都市では合流式が多いのに対し、近年になって水道が整備された地域では分流式が採用されており、双方が約半分を占める世田谷区の下水道は極めてユニークなものと言える。

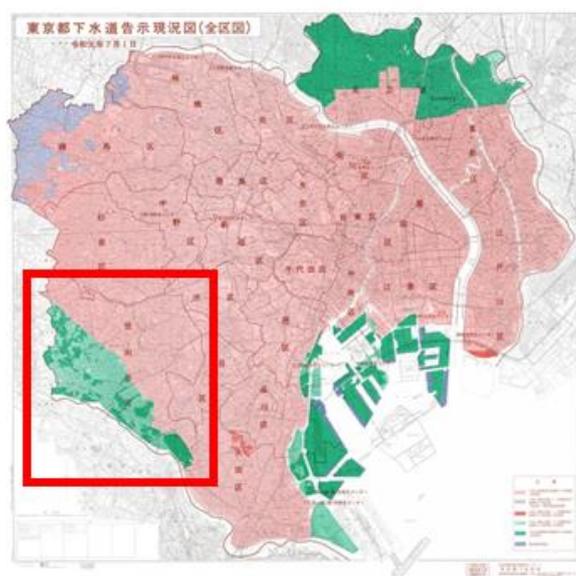


Fig.2 東京都の下水道、大半が合流式、赤枠は世田谷区(東京都下水道局 HP より)

日本の下水道は「下水道台帳」に詳細な情報が公開されているので、この情報をもとに地域(例えば「世田谷区」)を下水道のグリッドを用いて分割し、エリアごとに下水PCR検査を実施することで、地域住民の排出する汚水の実測を通じて、区画割りの内部に存在する、新型コロナウイルス感染症罹患者の数を評価することが可能である。

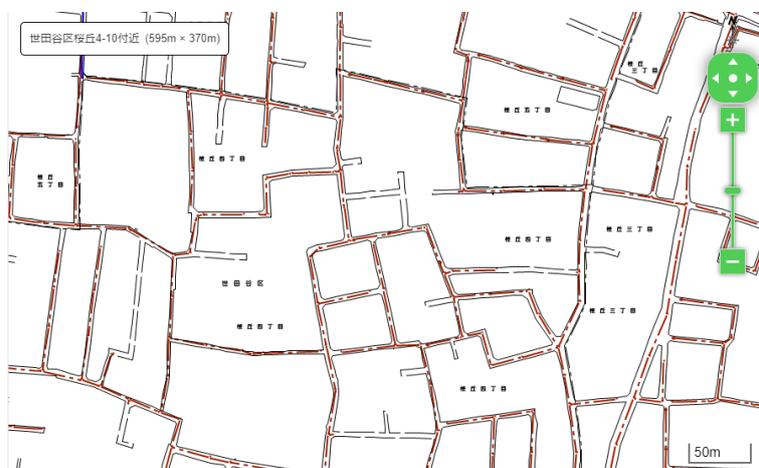


Fig.3 東京都の下水道台帳例、世田谷区桜丘付近。(東京都下水道局 HP より)



Fig.4 世田谷区の幹線下水道に設けた取水点例、株式会社 NJS による  
(世田谷区 HP 情報に書き足し)

このように取水点を設け、定点観測的に汚水をサンプリングすることでアーカイブ・ライブラリを構築することが可能だが、以下の二点を考慮する必要がある。本プロジェクトのグリッドモデルを以下、世田谷・ミラノモデル (ST-Milan model) と称する事とする。

#### 4 「最適取水時間帯」と降雨などに伴う「最適取水日シフト」

全世界に敷設された下水道の大半は重力を原動力とし、勾配をつけて地中に埋設された下水管により汚水を流下している。例外的に、汚水処理場の直前で地中深くに流下した汚水を地上の最初沈殿池まで揚水するような場合、ポンプが利用される場合もある。

前述のように取水点を設定しても時刻によっては殆ど下水が流れない可能性もある。下水 PCR によって新型コロナウイルスを検出しようとする場合、し尿とりわけ大便中に大量のウイルスが排出されるため、それを的確にサンプリングし、評価する必要がある。

従来は慣習的に、汚水処理場直前の取水地で、午前 10 時にスポットサンプリングするが多かった。だが、上記のような事情を勘案し、一定時間ごとに汚水をサンプリングするオートサンプラーを設置する取水も行われている。

ただしオートサンプラーを用いることで精度は上昇するが、コストがかさむため、世田谷区のような規模のエリア全体でオートサンプラーを継続的に利用するのは、現実的ではない。この問題に対処するうえで、流量データなどに機械学習を適用し、地点ごとに最適取水時間帯を推定することが有効と思われる。

区角割の中の住民が用便時刻などには統計的なばらつきが考えられるが、生活時間調査の結果などから、モデル的な確率分布関数を導くことが出来る。最終処理場における毎日のポンプ稼働データから流下した総水量は見積る事が出来るので、逆問題を設定し、エリア内住民の用便時刻の分布と併せて、地点ごとの最適取水時間帯を求めるとともに、同じ日の作業で複数地点での取水を行う業務の最適化も、合わせて行う事が出来る。

合流式下水道の場合、降雨があると下水は希釈されるため、ウイルスの検出精度が下がってしまう懸念がある。2020 年 9 月段階で、人口 10 万人程度のなかに数人～10 人程度の感染者が存在すれば、汚水 PCR での検出が可能であると考えられるが、10 ミリリットル以上の降雨があると、下水は希釈され、2－3 日は影響が残る。

分流式の水道の場合も地中にしみ込んだ雨水はコンクリート製の下水管内に浸入するので（浸透水）汚水は希釈される。降雨による汚水の希釈を適切なデータを用いて機械学習によって推定し、降雨などがあった場合、同じ週の中で取水日をシフトするなどの条件をあたえ、最適解を得ることが出来る。下水管ネットワークの構造から決まる各取水点に対して、地域住民の生活時間や、降雨などの天候の変化に応じた最適な取水日のシフトと、取水そのものの最適時間帯を、データ駆動科学の手法を用いて求める事が可能である。

## 5 “NEXT PANDEMIC” を射程に入れたスマート都市の下水グリッド化

鼻や喉から検体を採る PCR 検査は、いまや広範な病状をもつことが判明しつつある新型コロナウイルス感染症のうち、咽頭炎や肺炎など一部の疾病の可能性が検討可能になるだけにとどまり、新型コロナウイルス胃炎、腸炎などの罹患者を特定することはできない。

他方、呼吸器疾患を含む新型コロナウイルス感染症罹患者の、とりわけ大便に、大量のウイルスが排出されることが確認されている。これは今回の SARS-COV-2 に限らず、今後予想される NEXT-PANDEMIC の蔓延状況の早期把握に、汚水 PCR と並行して「検便 PCR 検査」の有効性が考えられる。

とりわけ年少者の病状が重篤化するウイルスが流行した場合、「学校区」を単位とする検便 PCR 検査、ならびにそれとの整合性をもって測定、評価が可能な下水 PCR のグリッドがあらかじめ設定されていることが望ましいと思われる。

ここから取水点の設定も、下水道管ネットワークのアーキテクチャによるのみならず、学校区等と対応する、エリアの安全性評価、ないし「パンデミックの収束評価」に有効であるよう、あらかじめ設定しておくことが望ましいと思われる。

ここまでの議論は、エリアに居住、ないしコンスタントに通学する人口を対象とするものであるが、現実には、厳しいロックダウンなどの規制を掛けない限り、昼間と夜間で人口は移動し、特定のエリアに定期的、あるいは不定期に外部からの来訪者が考えられる。

このようなリスクを評価するうえでは、下水 PCR や検便 PCR 以外の、別の評価を併用し、GIS を用いて情報を統合評価して、エリアの安心・安全、あるいはパンデミックの収束／未集束、社会経済の封鎖／再開などの判断を下すことが有効と思われる。

具体的な議論については続報に記すものとし、本稿はこのようなフレームワークで、東京都世田谷区におけるプロジェクトを開始するメルクマールとして公刊するものである。

多くのご教示を頂いた、大垣眞一郎教授、古米弘明教授、株式会社 NJS の谷戸善彦開発本部長、川崎達開発副本部長、亀田由紀子氏、東京都世田谷区の保坂展人区長、竹内環境政策部長に深く感謝申し上げます。

### References

- [1] Peng Zhou, Xing-Lou Yang, Zheng-Li Shi "A pneumonia outbreak associated with a new

coronavirus of probable bat origin" Nature: 1-4. (February 2020). doi:10.1038/s41586-020-2012-7. PMID 32015507. <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2012-7>

[2]F.A. Klok, M.J.H.A. Kruip, N.J.M. van der Meer, M.A.M. Stals and M.V. Huisman  
 "Incidence of thrombotic complications in critically ill ICU patients with COVID-19"  
 Thrombosis Research VOLUME 191, P145-147, JULY 01, 2020

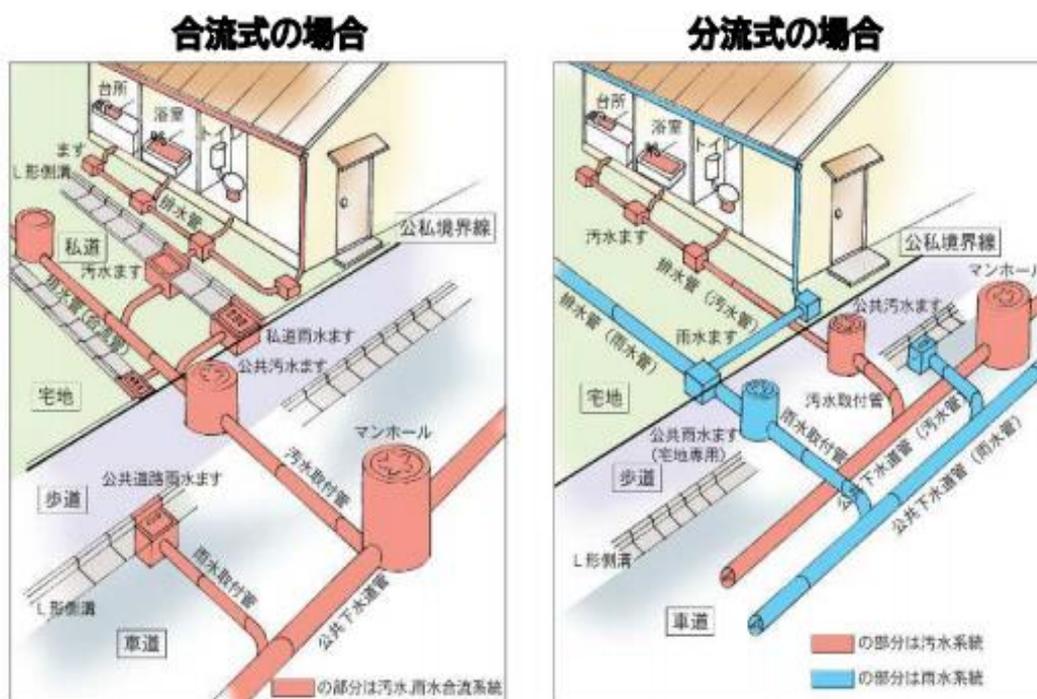
[3]A. Kecler-Pietrzyk, G. Orsi, J. Carthy, W. C. Torreggiani "Enteritis and severe abdominal pain as the first presentation of COVID-19" Irish Medical Journal, 113, 6, 1-6, 2020

[4] Matt McGrath "Climate change and coronavirus: Five charts about the biggest carbon crash" BBC Science and Environment <https://www.bbc.com/news/science-environment-52485712>

[5]" Coronavirus was already in Italy by December, waste water study finds" BBC NEWS <https://www.bbc.com/world-europe-53106444>

[6] Giuseppina La Rosa, Pamela Mancini, Giusy Bonanno Ferraro, Carolina Veneri, Marcello Iaconelli, Lucia Bonadonna, Luca Lucentini, "SARS-CoV-2 has been circulating in northern Italy since December 2019: evidence from environmental monitoring", MedRxiv doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.25.20140061>, 2020

[6] 分流式下水道は、下水柵と天水柵が分かれており、汚水と雨水は別の下水管を流れる。これに対し、合流式下水道では、雨水と汚水が合流し、同一の下水管を流れる。



世田谷区 HP より