

治水と土地の利活用におけるブロックチェーン技術の適用可能性

早稲田大学大学院 経営管理研究科 教授 齊藤 賢爾
さいとう けんじ

1 はじめに

我が国に住む人々にとって、災害は生活と切り離せない現実の一部である。特に水害・土砂災害は、地震と並んで著しい被害をこの国の土地にもたらしてきた。

2019年10月、令和元年台風15号・19号やそれらに続く豪雨による河川の氾濫は、関東・中部・東北地方を含む広範囲において、多くの死者や行方不明者を出すという甚大な被害を生んだ。今後、気候変動はその激しさを増していくと予想でき、台風や豪雨の規模は拡大し、同程度やそれを上回る規模の水害・土砂災害が毎年数回、我が国の各地で起きていくという事態にも備える必要があると言える。

このことは明らかに、居住を含む土地の活用にも課題をもたらす。現に米国アラスカ州では、気候変動を理由とする住民の移住が始まっているという¹。我が国においても同様な手段を採らなければならなくなる恐れもあるが、そもそも都市部に人口が集中し、特に低地部において人口密度が高いこの社会では、移住という手段はハードルが高い上に、被害を受けるポテンシャルまでもが高いという脆弱性がある。

強大な台風・豪雨と言えども、それら単体では自然現象であり、「自然災害」というものは実際に

は存在しない。荒々しい自然現象に社会の脆弱性が影響を受けるとき、初めて災害が生まれるのであって、その脆弱性に対して、ハードウェア的・ソフトウェア的な手当てが必要とされている。

筆者は計算機科学を専門とし、その社会との関わりを焦点として、デジタル通貨やブロックチェーンを技術の面から研究してきた。本稿では、仲間らと「治水×ブロックチェーン」というテーマでアイデア出しを試みた結果を基に、主としてソフトウェアの面から社会の脆弱性に手当てする方法として、ブロックチェーン技術の適用の可能性を探る。

我々にできることは大きく分けて以下の4種類だと考えており、背景と技術の解説の後、それぞれについて詳しく述べる。

- (1) 政策決定・実行のプロセスの透明化
- (2) (歴史的な劣化に抗う) 情報の維持と伝播
- (3) (物理的な破壊的事象に抗う) 情報の維持と伝播
- (4) 補償や改造のためのファンディング

2 水害・土砂災害と治水政策

水害は高潮、津波、洪水等、水による被害であり、治水は水害や土砂災害から人の命と財産、および生活を守るために行われる事業を指す。

日本の国土は約73%を山地が占めており、土地の勾配が急で、もともと河川の流れが速いことに

¹ <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/19/102500616/>

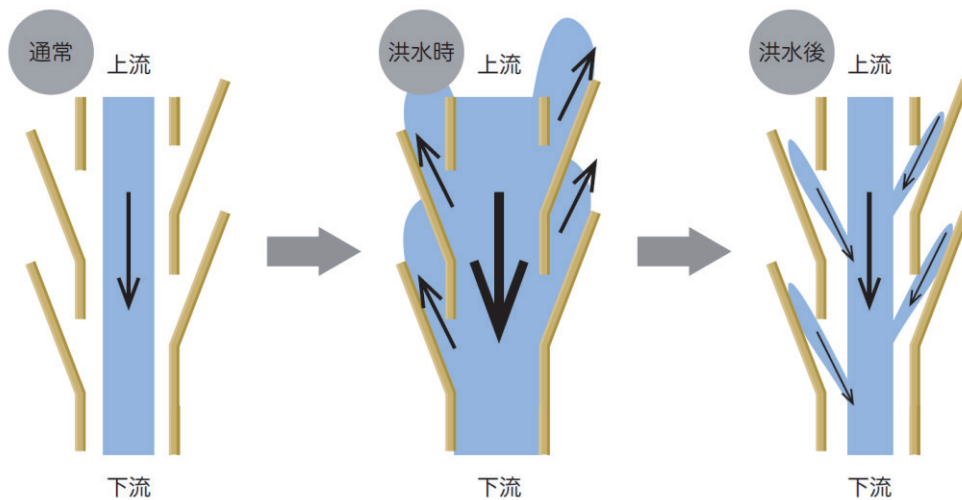


図1: 霞堤の働き

加え、多雨地帯にある。また、地震による津波のリスクも抱えている。水害・土砂災害を引き起こす外力が非常に強い国土であり、河川や遊水池の流下能力・収容能力を示す「治水容量」が諸外国に比べ低いレベルに留まっていると言われる²。さらに低地に人口が密集していることから被害を受けるポテンシャルが高く、治水は困難を極める。

とはいえ、歴史的に数多くの水害・土砂災害を経験してきた我が国には、実績が積み重ねられてきた治水の施策も当然のことながら存在する。例えば、武田信玄によって1560年前後に整備されたという信玄堤（しんげんつつみ）[4]は、現在もお甲府盆地の治水に用いられ、越水を前提とする堤防である「霞堤」と呼ばれる構造を含む、多様で合理的な治水対策の集合である。

霞堤は河川の氾濫を完全には遮断せず、上流に向かって開かれた堤防の連なりとなっている（図1）。これにより、むしろ増量した水をわざと堤内に浸水させ、下流の洪水の流量を減らすとともに、増水分を高い土地に向かって逆流させることで越水した流れの運動エネルギーを位置エネルギーに変える。洪水が終わると、堤内地に逆流して浸水していた水がその位置エネルギーを用いて自然と河川に戻ることで排水される。

信玄堤は、一時的に限定的な浸水を起こすこと

で、甲府盆地への壊滅的な洪水氾濫を防止するものである。この様な方式は、特に急流河川に対する治水の方式として合理的とされるが、遊水地に水を逃がす考え方であり、平野部に浸水を前提とする大きな面積を必要とする。

一方、今後の災害対策を考えると、気候変動の激化により外力が増していく中で、治水容量の拡大には地道な土木作業を要するため、迅速には対応できないという問題がある。したがって、脆弱性そのものを軽減していくことが何よりも重要となる。このことは、災害の発生を前提とした、すなわちこの場合は洪水あるいは津波に対する防護策としてのハードウェアの仕組みからの越水を前提とした、ソフトウェア的な土地の活用計画、そして避難計画が必要であることを示している。

近年では、自治体によるハザードマップ（被害予測地図）の提供が一般化している。こうした地図による被害予測の可視化は、不動産価格に影響するのではないかと懸念もあったが、そもそも災害のリスクは土地の価格に反映済であるとの議論や、目先の金銭的な利益よりも人の命と財産、および生活を守ることが優先されるという理解が優勢である。不動産業界も認識を新たにする必要があり、国土交通省は2019年7月、不動産関連団体に対して、不動産取引時に、宅建業者が買主等に洪水ハザードマップの配布・説明等を行うよう、

² <https://ja.wikipedia.org/wiki/治水>

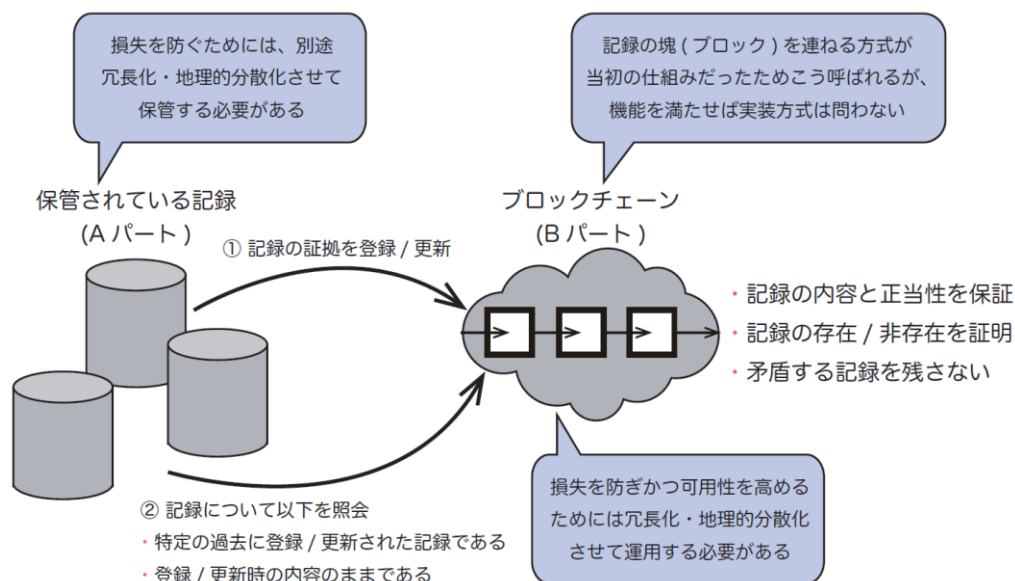


図2: ブロックチェーンによる記録の真正性の証明

協力を依頼した[5]。

ハザードマップの登場を待つまでもなく、我が国では歴史的に災害の情報を防災に活用してきた。そのために依拠できる情報は、伝承や石碑³や地名などに残されてきた。すなわち、我が国における治水は災害の記録の方法と関係が深い。一方で、こうした記録は、目先の利益を追う勢力による隠蔽や改ざんのリスクにも晒されてきた。

このことは、同じく記録を扱う方法であると理解できるブロックチェーン技術を、治水の問題領域に適用できる可能性があることを示唆する。

3 ブロックチェーン技術

端的に言って、ブロックチェーン技術とは、インターネットの上で記録の内容と存在を証明するための技術である。記録され特定の過去に位置づけられた（日付・時刻が刻まれた）任意の項目に対して、その内容が改変されていないこと、記録が抹消されていないこと、また、その時点では存在していなかった記録があたかも存在していたかのように捏造されていないことを証明できるように設計される。

³ 例えば「ここから下には家を作ってはならない」と警告する大津浪記念碑等。

図2は、記録の真正性の証明システムとしての全体をモデル化したものである。ブロックチェーンに記録の内容そのものを保管する方式も考えられるが、後述するように、特定の権威に依らず証明を行うために多数の参加者を要することから、多くの機能を求めるとシステムが肥大化してしまい、社会の多様な記録ニーズに応えるようにはスケールを拡大できない恐れがある。そのため、図では、記録自体を保管する仕組みであるAパートと、記録の証明を行う仕組みであるBパートを分けて記述している。

同様に記録（書面）に対して証明を行う仕組みに内容証明郵便がある。郵便における内容証明は、日本郵便が証明するものであり、当該事業者への信用・信頼の上に成り立っている。他方、ブロックチェーンによる証明は数学的・統計的な意味での証明であり、特定の権威に依存しない⁴。

この技術の詳細、およびこの技術を応用した、いわゆるスマートコントラクトによる不動産売買

⁴ 実際には事業者への信用無しには成立できない技術であるにも関わらずブロックチェーンを名乗っている製品も巷には非常に多く、それらについては郵便における内容証明と違わないと認識するのが重要だと筆者は考える。

へのインパクトについては、2017年に寄稿した拙稿[6]を参照されたい。

よく誤解されているが、ブロックチェーンには、人の意思表示を合致させるような機能（人間のレベルでのコンセンサスを得る機能）は無い。しかし、合致した意思表示の証拠を残すことは可能である。また、特定の権威に依存せずに証明を提供し続けるためには、少なくとも証明が必要とされる間は機能を継続させる必要があり、機能を担うコンピュータシステムの冗長化⁵と、冗長に動いているコンピュータ間で記録の状態を一致させるためのコンセンサスの機能を有する（それが図2の「矛盾する記録を残さない」の意味である）。

以上の説明を十分に満たす実装が現状で果たしてできているかどうかは議論的であるが、できると仮定するならば、文書を損失・隠蔽⁶や捏造、改ざんから守って安全に保全できる。このことを利用して、例えば公文書が存在することや、開示された公文書が捏造・改ざんされていないことを市民が検証できるようなシステムを構成できるが、それについては拙稿[7]を参照されたい。

文書を安全に保全できるとすれば、プログラムコードも文書の一種であるので、同様の技術によりコンピュータソフトウェアの内容と存在を証明でき、かつ実行結果についてもそのようにできる。それが現状におけるいわゆるスマートコントラクトの意味である（語感が示すような「契約の自動執行」を必ずしも意味しない）。

4 ブロックチェーン技術によってできること

4.1 政策決定・実行のプロセスの透明化

以上のような技術を前提にすれば、まず、政策決定・実行のプロセスを透明化できる。

⁵ 特に、参入が自由な多数のコンピュータの参加による冗長化が取り沙汰されることが多いが、そのことは必須ではない。

⁶ ブロックチェーン技術の真価はあくまで証明可能性（図2のB部分）にあり、文書の損失・隠蔽を防ぐためには別途、安全でアクセシブルな保管方法（図2のA部分）を考える必要があるが、ひとたび失われていた・隠されていた文書が出てきた際にはその真正性を検証できる。

現代においても有効な治水手段である信玄堤が示しているように、巨大化する外力に対抗するためには、越水を前提とし、水を逃がすための遊水地を用意することが有効だと考えられる。その場合、浸水を許す土地と許さない土地を分け、許す土地については日頃から浸水を前提とした利用をすることになる。過去からの例では農地や駐車場、公園、テニスコート等であり、今後は居住地としての利用を考えるのであればトレーラーハウスのような移動可能な家屋のための土地として利用できるし、あるいは移動可能な太陽光発電・蓄電システム用の土地といった用途も考え得る（浸水は原因となる台風の接近や地震の発生後すぐには起きないので、浸水の発生と規模を予測し、自動運転技術等を用いて速やかに待避させる設計ができる）。

既に住居や事務所、工場といった用途で使われている土地について、新たに遊水地化する政策判断をする場合があるとすれば、そこには不公平感が伴わざるを得ない。そうした判断や、その他、堤防の拡充やダム建設などの治水政策を住民が納得するかたちで実施するためには、プロセスの透明化が必須である。

政策判断を行う際の会議の議事録は、当然のことながら公文書として残す必要があるが、ブロックチェーン技術を応用すれば、前述のように開示請求に基づいて開示する際にその真正性を担保できる（文書に個人情報等の開示できない部分がある場合、いわゆる黒塗りされる場合でも当該文書の真正性を担保できる方法を[7]で解説している）。また、選挙や住民投票についても、インターネットを利用することで手続きのコストを下げ、投票率を上げて民意をより正確に反映させることも可能である。投票における匿名性等の要件が定めれば、それを満たすように技術を設計することは可能と考えられ、正しさを検証可能なかたちで開票できる。ブロックチェーン技術を応用し、文書の捏造・改ざんや投票の不正を検出可能にすることをもって、それらの行為を抑止できるのである。

4.2 (歴史的な劣化に抗う) 情報の維持と伝播

被害のポテンシャルを下げ、災害を未然に防ぐためには、過去の災害の記憶を後世に伝えていく必要がある。災害そのものの詳細な記録に加え、それに対応した際の、理由を含む政策的な決定事項やその実行過程、実行結果についても併せて記録し、伝えていく必要があるだろう。今後も永らく日本の国土に人々が住み、利活用していくのであれば、このことは、100年越しといったスパンで実現できる必要がある。

伝承や石碑は、これまでそのための機能を担ってきたが、改変や隠蔽、撤去、移転といった行為に弱い。一方、デジタル技術は今日において社会が記録を扱う標準的な手段ではあるものの、100年を超えて情報を維持する経験を我々は未だ持っていない。

記録の永続化自体については、2010年代に入り、日立製作所やマイクロソフトリサーチ等が石英ガラスへのデジタルな(数億年にも渡る)長期の記録のための技術を相次いで発表している⁷。ではそうした技術があれば、情報は正しく後世に伝えられるのだろうか。

筆者は、そこには未だ真正性についての課題があると考え。石英ガラスに記録があったとして、それがいつ記録されたものかを知る手段は無い(タイムスタンプは捏造可能であるし、無機物であるので放射性炭素年代測定法といった手法もおそらく使えない)。石英ガラスの記録板の保管方法にも依るが、何者かが自分たちにとって都合の悪い記録を書き換えた記録板で置き換えたとしても、そのことを検出するのは困難だろう。

その場合でも、ブロックチェーン技術を応用すれば、記録を特定の過去に位置づけ、その真正性を担保できる。すなわち、置き換えがあった場合に検出でき、偽のデータを忍び込ませることができないように記録システムを構成できる。また、後述するように、破壊的事象が起き、マスターとなる記録が失われた後、故障や書き込み時のエラ

一、あるいは意図的な攻撃により、仮に複数のバックアップの内容が一致しなかった場合でも、どれが真正な記録であるかを判定できる。ただしもちろん、そのためにはブロックチェーン自体が十分な地理的分散性をもって冗長な構成で運用されていなければならない。

災害およびその対応の記録を、わざわざ不釣り合いなコストをかけて損失や改変から守るよう保全する必要があるのかと反論したい向きもあるかもしれない。しかし、記録が安価になるにつれ、基本的にはそれも記録の一種である、記録の真正性を証明するための技術も同様に安価にできると考える⁸。真正性の証明が低コストで得られるならば、どんな記録であれ、それを利用しない手はない。

そのようにして、真正なことが担保された記録へのアクセスが容易になれば、例えば過去の災害を現地でAR(拡張現実)によりシミュレーションで体験できるようにもなるだろう(そのための技術は[3]等として現存する)。どのような荒々しい自然現象が現地を襲い得るかを確かめた上で、その土地の活用方法や避難計画を考えることができるようになるのである。

4.3 (物理的な破壊的事象に抗う) 情報の維持と伝播

災害自体により記録が損なわれるリスクに対しても、社会は対応しなければならない。我々には、たとえ災害に見舞われたとしても不動産登記簿や土地台帳を含む行政の資料を保全し、また、社会の記憶の損失を防ぐ義務があるだろう。

2011年の東日本大震災の津波では、東北太平洋沿いの一部の市町の庁舎が壊滅的な被害を受け、戸籍や土地台帳等の諸記録が失われた[2]。この際には、流失した書類については打つ手は無かったが、一部の書類については乾燥やクリーニングに

⁷ <https://news.microsoft.com/ja-jp/2019/11/06/191106-ignite-project-silica-superman/>

⁸ 筆者らはそうした技術をビヨンドブロックチェーン技術と呼び、非営利組織である一般社団法人ビヨンドブロックチェーンにてオープンソースで研究開発している。

より復元できたものもあった。また、電子化されていた書類については、サーバの水没等の被害もあったが、バックアップや委託先に保管されていたデータを用いる等して、多くのケースで復元が行われたという。

ここで示されているのは、記録の損失を防ぐために電子化・デジタル化は有効だということである。定期的にバックアップを保存する習慣がある他、データを利用する際には自然に利用先にコピーが作られることになるからである。しかし、再び大規模な打撃を受ける可能性に対応するためには、よりシステムティックに記録の保存の冗長化（図2のAパート）を行っておく必要があると考える。

東日本大震災後の電子文書の復元では、委託先に保管されていたデータとの照合を行った例が見られた。このような場合、データが取得されたタイミングによる原本との齟齬、データの破損、また穿った見方をすれば意図的な偽データの混入の可能性も排除できず、文書が「どのような状態にあれば正しいか」という情報無しに正確に復元を行うことはできない。データの真正性を担保する、ブロックチェーンのような技術(図2のBパート)はここでも必要とされる。

また、破壊的事象の影響が広域に渡る可能性を考えると、記録の冗長的保存に関しては地理的分散の度合いを大きく設定しておく必要がある。国内の自治体が互いに(図2のA・B両パートの)バックアップを持ち合ったり、更には国外の姉妹市町村と同様な協定を結ぶ等の施策が考えられる。その際、個人情報等の扱いにおいて秘匿性が担保される必要があるが、単にバックアップを暗号化するという手法では、破壊的事象により復号のための鍵が失われるといった事態に対処できない。対処するためには、例えば、 m 個中 n 個の断片を集めると秘密情報(この場合は復号用の鍵)を復元できる「秘密分散法」といった手法を用いることができる。

いずれにせよ、破壊的事象を超えて正しくデータを維持し、現代において活用したり後世に伝え

るという必要がある限り、記録システムは止まってはならないという要求がある。ビットコインやイーサリアムといった、いわゆる暗号資産に基づくブロックチェーン(暗号資産の獲得をインセンティブとして人々が維持と運用に参加するブロックチェーン)は、当該資産の市場価値の暴落により停止する恐れがあるため、この用途に用いることは推奨できない。行政組織間の連携により運用する統合的な仕組みであることが望まれる。

4.4 補償や改造のためのファンディング

大規模な災害からの復旧や、防災に関わる土木事業のための予算的な手当てはどうすればよいだろうか。

想定外の被害に対処するためには、事前に予算を割り当てるというよりは、状況に応じて必要な支出を行えることの方が望ましい。そのための方法として国や自治体ができることに補正予算の編成があるが、デジタル技術を利用することで、より迅速に突発的な事態に対応できる可能性も考えられる。

ブロックチェーン技術の最初の応用は通貨(ビットコイン)であり、当該技術を用いることでデジタル通貨システムを自由に定義し運用できることが知られている。通貨を記述するプログラムコードを書く際に従来の常識に従う必要はなく、例えば、時間が経過するにつれ、額面的な価値が減価する通貨を設計するといったこともできる。

ブロックチェーン技術を用いて、特定の目的のためにそうした減価する通貨を発行することを通し、公益事業に対して必要な支出を行う可能性の例として、筆者らは、スペースデブリ(宇宙ゴミ)の除去への応用について研究し、論文化を行った[1]。デブリの除去は宇宙空間で行われるため全世界から観察可能であり、その事実にもとづいて、国際的な宇宙開発組織の連合であるコンソーシアムがデブリ除去の費用を賄う分のデジタルトークンを(何の後ろ盾もなく)発行し、除去事業者を支払う。トークンはコンソーシアムの負債を表すが、時間が経過するに従ってトークンが代表する

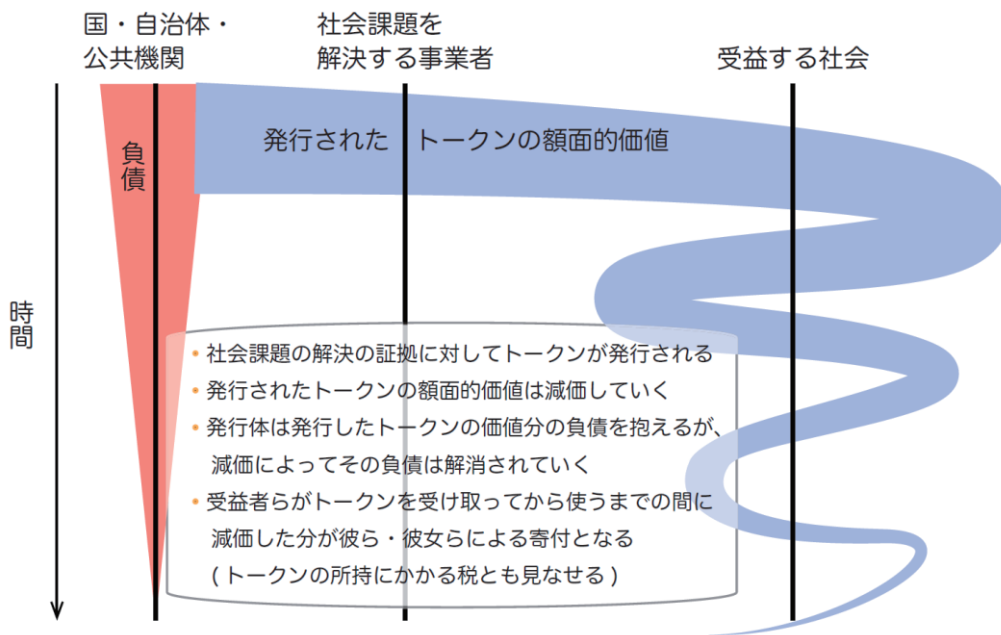


図3: 減価するトークンによる公益事業の費用の手当て

額面的価値が減少することで、最終的に負債は解消される。トークンは支払いの手段として流通するが、それを経済的な主体が受け取ってから使うまでの間に減価した分、その主体はコンソーシアムに対して寄付をしているに等しい。気象衛星、GPS、通信衛星等、宇宙空間の利用は地上の全員にとっての利益となる面があり、デブリが除去され、衛星軌道が安全になることによって利益を受ける社会全体で除去費用を賄うという考え方である。

図3はその手法を社会課題の解決に一般化して描いたものである。減価はトークンの所持にかかる税とも見なせるが、日本円には（今のところ）所持することに税はかからないので、所持しているだけで税が取られるような通貨の利用は回避されるのではないかと考える向きもあるかも知れない。しかし、減価は階段状に例えば「毎週水曜日に何パーセント」といったかたちになるので、次の減価のタイミングまでに支払いに使えば、原理的には（通貨システムの運用の費用も減価により賄えば）使い方によって決済手数料さえ無料な安価な支払い方法として設計できる。

これは1930年代の世界大恐慌の時代に欧米を中心に実験されたスタンプ紙幣（経済学者シルビ

オ・ゲゼルが提唱した減価する貨幣）のアイデアをデジタル時代に蘇らせたものとも言えるが、同様の手法を例えば治水対策のために用いることは可能だと考える。

5 おわりに

本稿で示したように、治水に関して、記録や文書の維持・証明システムにできることは多岐にわたる。

我が国では、2019年5月24日、行政手続きを原則として電子申請に統一する、いわゆるデジタルファースト法が成立した。これに伴い、当然のことながら、申請を処理するバックエンドはすべてデジタル化されることになるだろう。何であれ、いったんインフラとして出来上がってしまうとそれを置き換えることが困難になるため、初期の段階から記録の長期保存に対応し、記録の真正性を検証可能な仕組みとして設計し、実装を進めることは急務と言える。本稿で示した可能性は、そうした技術への要求仕様となる。

筆者の知る限りその要求仕様を満たす技術は現存せず（筆者らは開発に努力しているが）、無いのであれば創り出す必要がある。本稿がそうした議

論と実行のきっかけとなれば幸いである。

謝辞

本稿は、筆者が代表を務める一般社団法人ビヨンドブロックチェーンにおける 2019 年 10 月の開発会議にて「治水×ブロックチェーン」というテーマで雑談した際に出た様々なアイデアを元にしつつ、当該問題領域におけるブロックチェーン技術の適用可能性を改めて整理したものである。会議に参加した諸氏に、ここで改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] Kenji Saito, Shinji Hatta, and Toshiya Hanada. Digital Currency Design for Sustainable Active Debris Removal in Space. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 127-134, February 2019.
- [2] 青木睦. 被災した組織アーカイブズの消滅と救助・復旧に関する検証—基礎自治体を事例に一. 国文学研究資料館紀要アーカイブズ研究篇第 12 号 (通巻第 47 号), pp. 97-117, 2016 年 3 月.
- [3] 板宮朋基, 吉村達之. 複合現実による災害想定没入体験アプリ Disaster Scope の開発と避難訓練における活用. 日本災害情報学会誌「災害情報」, No. 16-2, pp. 191-198, 2018 年 7 月.
- [4] 甲斐市. 洪水ハザードマップ. 2008 年 3 月.
- [5] 国土交通省. 不動産取引時のハザードマップを活用した水害リスクの情報提供について(依頼). 2019 年 7 月.
- [6] 斉藤賢爾. スマートコントラクトによる土地売買を考える. 土地総合研究, Vol. 25, No. 3, pp. 18-24, 2017 年 7 月.
- [7] 斉藤賢爾. 「空中文書固定装置」のある世界. 現代思想 2018 年 6 月号特集=公文書とリアル, 2018 年 5 月.