第143回 京都大学丸の内セミナー
2024年 12月 6日(金)

暗号通貨と
それを支える
ブロックチェーン

首藤 一幸

京都大学

bit.ly/shudo20241206

Kyoto U.

首藤 一幸 (51)

しゅどう　かずゆき

1996　早稲田大学 修士課程

1998　早稲田大学 博士課程

2001　産総研 **国研**

2006　ウタゴエ(株) **スタートアップ**

2008/12 東工大 **大学**

2022/ 4 京大

2009/ 5 未踏 PM

2023/ 4 未踏アドバンスト PM

2018/11　(株)アーリーワークス 顧問

2019/ 1　Miraise (シード特化ファンド) メンター

2022/ 7　GMOインターネットグループ(株) 技術顧問

2022/10　GMO AI & Web3(株) 顧問

2024/ 6　メルカリR4D 研究開発アドバイザリーボード

魔法のようなソフト

Java スレッド移送システム MOBA

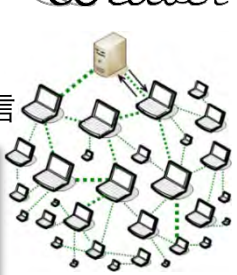
Java Just-in-Time コンパイラ shuJIT

17,000ダウンロード, 商用

P2P の基盤ソフト Overlay Weaver

26,000ダウンロード, 15ヶ国

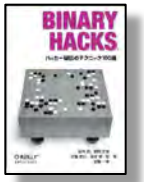
41ヶ国 673台以上で動作 (データベース)



P2P ライブ配信ソフト UG Live

未踏スパクリ × 2人, 商用化, 1万数千人に同時配信

書籍 Binary Hacks



1万数千部, ネタ100個中 10個執筆

P2P のアルゴリズム, 2009 ～

構造化オーバレイ / DHT の統一フレームワーク

大規模分散システム

分散データベース, 2009 ～

読み書き性能両立, Causal consistency, NVRAM / SCM

分散システムのシミュレーション, 2011 ～

1億ノード / 10台, 既存手法の20倍の性能, Apache Spark 上

ソーシャルネットワーク解析, 2013 ～

非集中 分散 機械学習, 2016 ～

ブロックチェーン, 2016 ～

シミュレータ SimBlock, 性能と安全性, 分権性, 公平性

2024年 12月

講演の概要

ブロックチェーンの
起源・価値

- 暗号通貨 Bitcoin
- 非集中に二重使用を防止 → trustless

暗号通貨　または仮想通貨, 暗号資産

cryptocurrency　　crypto asset

- デジタルなお金は、いろいろある。
  - Suica, PASMO, PayPay, ○○ポイント, …

2万種類以上あるとか

- 暗号通貨：Bitcoin (BTC), Ethereum (ETC), Ripple (XRP), …
  - Bitcoin に端を発する、非集中的 (後述) なもの
  - Bitcoin 時価総額 2百兆円以上　「通貨」になりたいが現状「資産」

Bitcoin (1 BTC) 価格

暗号通貨の起源

- 2008年の論文

  ネットで見つかる。
  和訳も見つかる。
  眺めるのもいいのでは？

Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System

ビットコイン: peer-to-peer 電子現金 システム

Satoshi Nakamoto
satoshin@gmx.com
www.bitcoin.org

Abstract. A purely peer-to-peer version of electronic cash would allow online payments to be sent directly from one party to another without going through a financial institution. Digital signatures provide part of the solution, but the main benefits are lost if a trusted third party is still required to prevent double-spending.

- 2009年 1月のメール

Bitcoin v0.1 released

Satoshi Nakamoto satoshi at vistomail.com

Thu Jan 8 14:27:40 EST 2009

Announcing the first release of Bitcoin, a new electronic cash system that uses a peer-to-peer network to prevent double-spending. It's completely decentralized with no server or central authority.

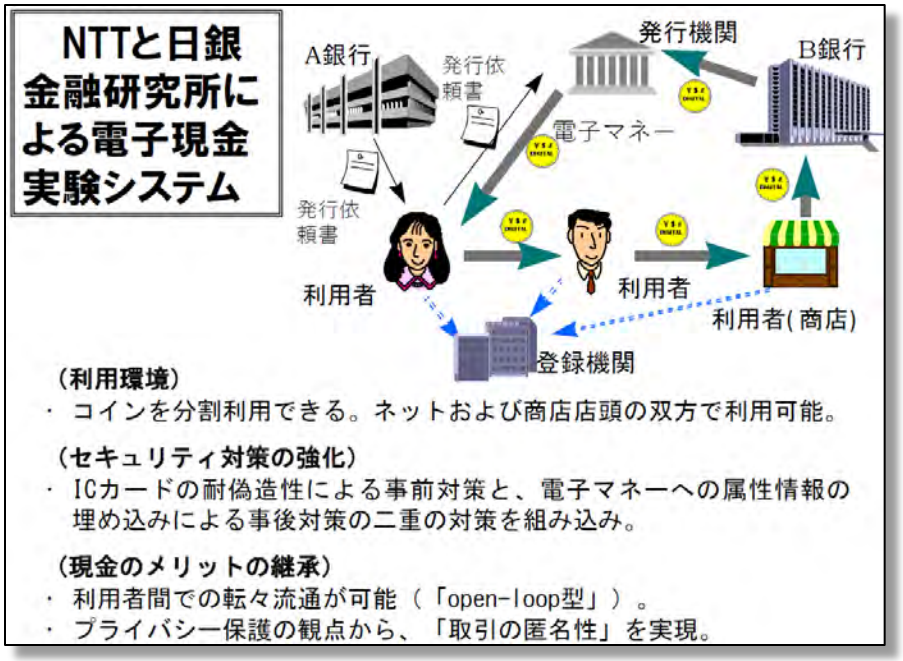
See bitcoin.org for screenshots.

Download link:
http://downloads.sourceforge.net/bitcoin/bitcoin-0.1.0.rar

Satoshi Nakamoto
が誰なのかは、
今日に至るまで不明

電子なお金は以前もあったし他にもある

- 例：NTT & 日銀 金融研究所, 1996年

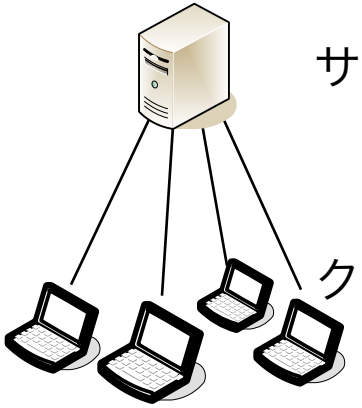


岩下直行氏 (日銀 → 京大) のスライド

- SUICA / スイカなんかすごい。
  - 8,000万枚 (2020/12), 200ミリ秒 (要求仕様), 平均 105件/秒 (2019/8/2)
  - 集中的な仕組みでこの性能を出すために、様々に工夫

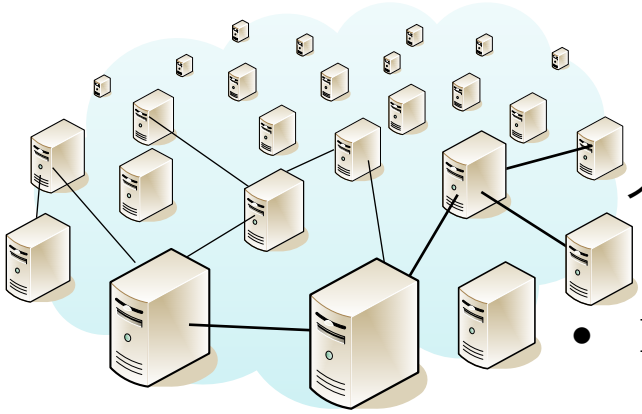
Bitcoin の技術は何が違ったか？

- 非集中 / decentralized → トラストレス に二重使用 / double-spending を防止した
  - 非集中　⇔ 集中 / centralized
    - 親分がいない



集中的
分散システム

- 普通はこちら
- 作りやすい
- 管理しやすい

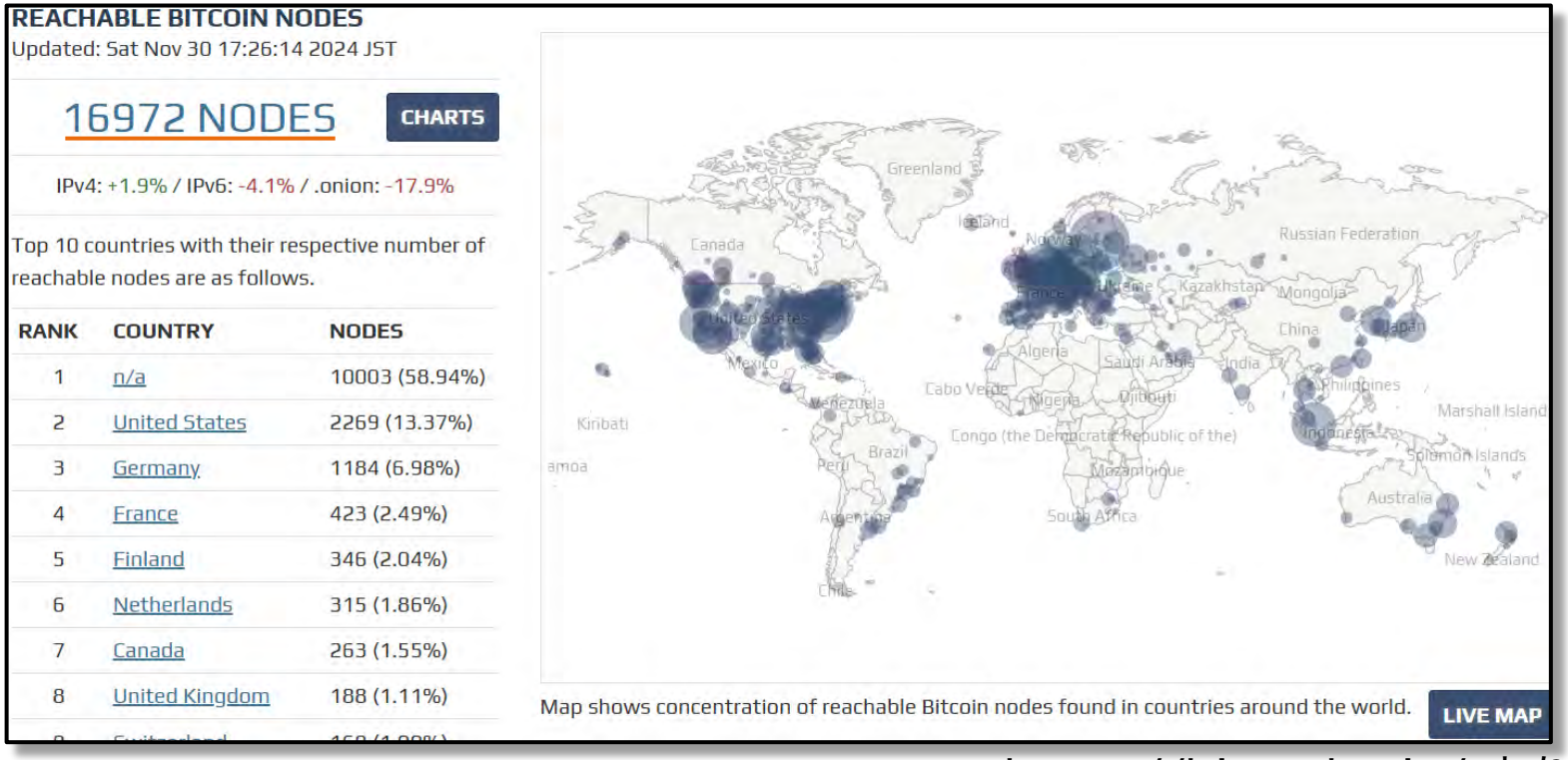


非集中
分散システム

- Peer-to-peer (P2P)と呼ばれる
- 例: Skype (電話), Gnutella (ファイル共有)
- スケール (台数増) しやすい, 耐故障

Bitcoin の非集中 分散システム

- インターネット上に 1万数千ノード (サーバ)
  - インターネット側からは通信できないノードを含めると、数万



REACHABLE BITCOIN NODES

Updated: Sat Nov 30 17:26:14 2024 JST

16972 NODES CHARTS

IPv4: +1.9% / IPv6: -4.1% / .onion: -17.9%

Top 10 countries with their respective number of reachable nodes are as follows.

RANK	COUNTRY	NODES
1	n/a	10003 (58.94%)
2	United States	2269 (13.37%)
3	Germany	1184 (6.98%)
4	France	423 (2.49%)
5	Finland	346 (2.04%)
6	Netherlands	315 (1.86%)
7	Canada	263 (1.55%)
8	United Kingdom	188 (1.11%)

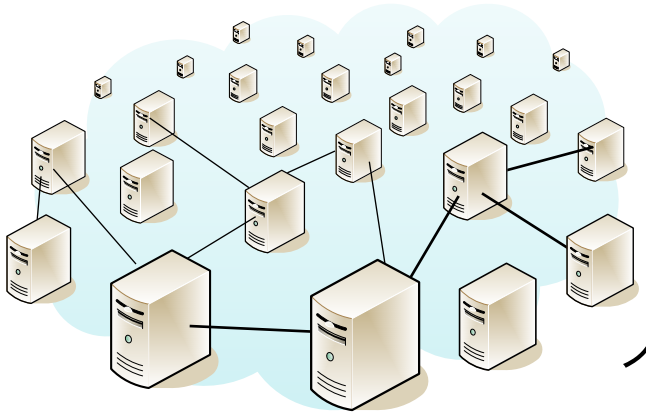
Map shows concentration of reachable Bitcoin nodes found in countries around the world. LIVE MAP

https://bitnodes.io/ より

- 非集中 → 一部壊れても全体は動作し続ける

トラストレス / trustless

- 非集中 / decentralized



ピア / peer
ノード / node

非集中 分散システム (peer-to-peer)

- 誰かを信用する必要がない → 「トラストレス **trustless**」
  - 政府, 銀行, 企業, … 等を信用する必要がない。
  - 実際は、ノードのうち例えば 2/3 は悪意のないノード (運用者) である必要がある。

ブロックチェーン

- 暗号通貨 Bitcoin が提供した価値
  - 非集中 → トラストレス に
  - 二重使用を防止
    - 整合性 を保つ
    - 改ざん困難性
- … これは、通貨に限らず他に応用できるのでは？

ブロックチェーン または
Distributed Ledger Technology (**DLT**) / 分散台帳技術

「ブロックチェーン」は特定のデータ構造を指す語なので、
それを嫌って、DLT と呼ぶ人も多い。

ブロックチェーンの価値

- 非集中
  分散システム
  decentralized

→ **トラストレス**
trustless

→ **耐故障性**
fault tolerant

非集中に加えて
・複製
・悪意あるノードに耐えるトランザクション承認方式

- 暗号理論
  cryptography

→ **整合性**
fault tolerant

派生 → **トレーサビリティ**
traceable

整合性確認のために
(全) 履歴を残すので

→ **改ざん困難性**
unalterable, tamper proof, …

→ 二重使用の防止

ブロックチェーンの分類

permissionless blockchain

permissioned blockchain

- パブリック ブロックチェーン　～ 数万台
  - Bitcoin, Ethereum 等
  - **誰でも**ノード (サーバ) を立てられる
    - 異なる定義もある：誰でも台帳の読み（書き）ができる

- プライベート ブロックチェーン　数台 ～ 数十台
  - **組織内で**運用
  - 専用のソフト (例: HyperLedger ○○) や Ethereum をプライベート用の設定で用いる
  - トラストレスではないから意味ないよね、と揶揄される

- コンソーシアム ブロックチェーン
  - **組織をまたいで**運用　　例: 銀行間決済
  - 運用者達が結託しそうになければ、ある程度トラストレスか？

ブロックチェーンの
基礎

- トランザクション承認方式
- ブロック生成

トランザクション承認方式

トランザクション (取引情報) をどうやって確定させていくか？

- Bitcoin：Proof of Work (PoW)
- HyperLedger Fabric：特定のサーバが順序付け

トランザクション承認方式

不特定 & 多数のノード群で承認

Proof of Work, Stake, …

DAG 向けの方式：
Tangle (暗号通貨 IOTA)
Byteball

特定のノード (群) で承認

単一ノードが交代で承認
‖
Proof of Authority

Clique (in Ethereum)
Aura (in Parity)
Grid Ledger System
by アーリーワークス社

複数ノード群で承認
‖
Consensus algorithm / 分散合意アルゴリズム

Byzantine fault tolerance /
ビザンチン障害耐性 (BFT)
あり　PBFT　Ripple (悪意ノード 20%まで)
Istanbul BFT (IBFT)
LibraBFT (based on HotStuff)

なし　Raft　Paxos

パブリック
ブロックチェーン向け

プライベート, コンソーシアム
ブロックチェーン向け

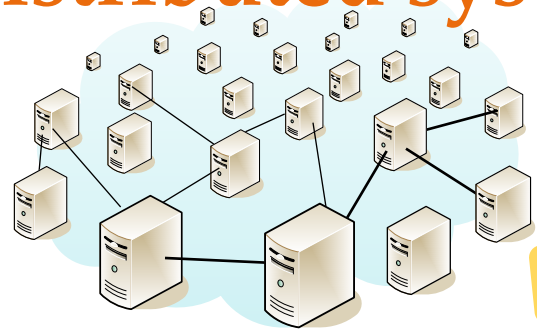
ブロックチェーンを支える技術

- ブロックチェーン
  - 誰かを信用することなしに (トラストレス)
    データを不整合なく確定させていく仕組み
    例：二重使用
- 支える技術：

暗号理論 / cryptography

公開鍵暗号方式, 署名,
(暗号学的) ハッシュ関数,
乱数生成方式, …

分散システム / distributed systems

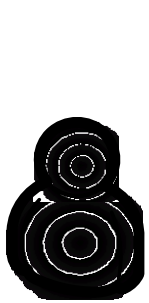


peer-to-peer ネットワーク,
flooding, 複製, 整合性,
分散合意アルゴリズム, …

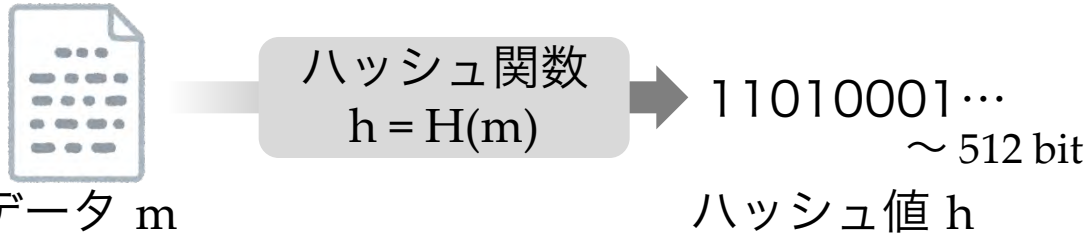
首藤の専門

ブロックチェーンを支える技術
暗号理論

- 公開鍵暗号方式、署名
  - 1人が2つの鍵を持つ：秘密鍵と公開鍵。
    一方で暗号化、もう一方で復号。
  - 秘密鍵で署名。公開鍵で検証。なりすましを防げる。
  - 一方向性関数に基づいて構成する。
    例：大きな整数の乗算は容易、因数分解は大変 → RSA 暗号 (1977)

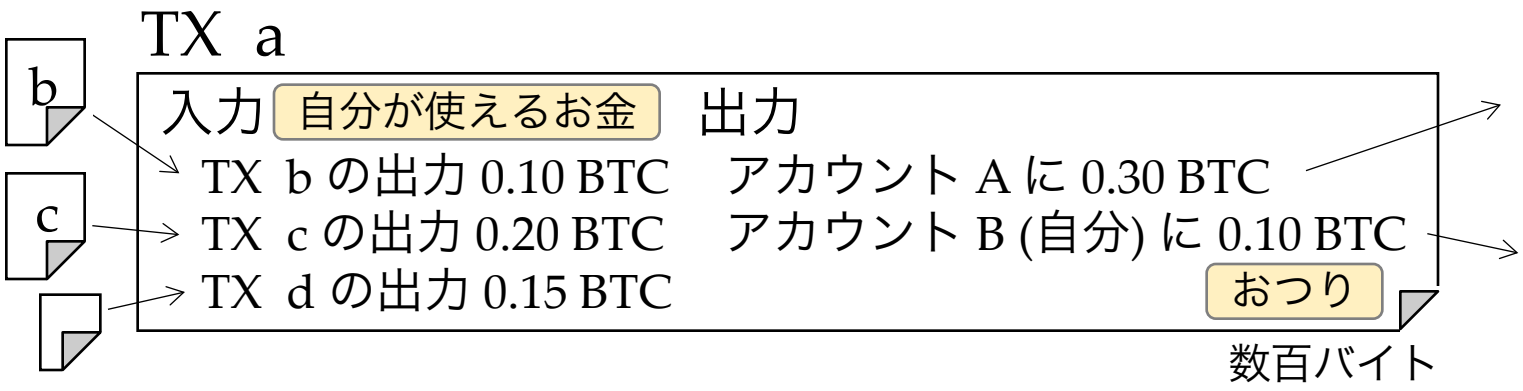


- (暗号学的) ハッシュ関数
  - データごとの固有の数値 = ハッシュ値 (128 ～ 512ビット) を算出できる。
    データの指紋を採れるようなもの。
  - ハッシュ値を与えられても、データの側は作り出せない。一方向。
  - 署名 (上記) の際、データ自体ではなく、ハッシュ値に対して署名する。



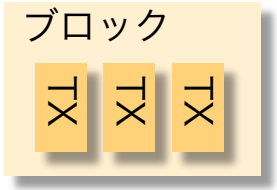
ブロックチェーンのデータ構造

- トランザクション (TX と略記)　　お金の動き



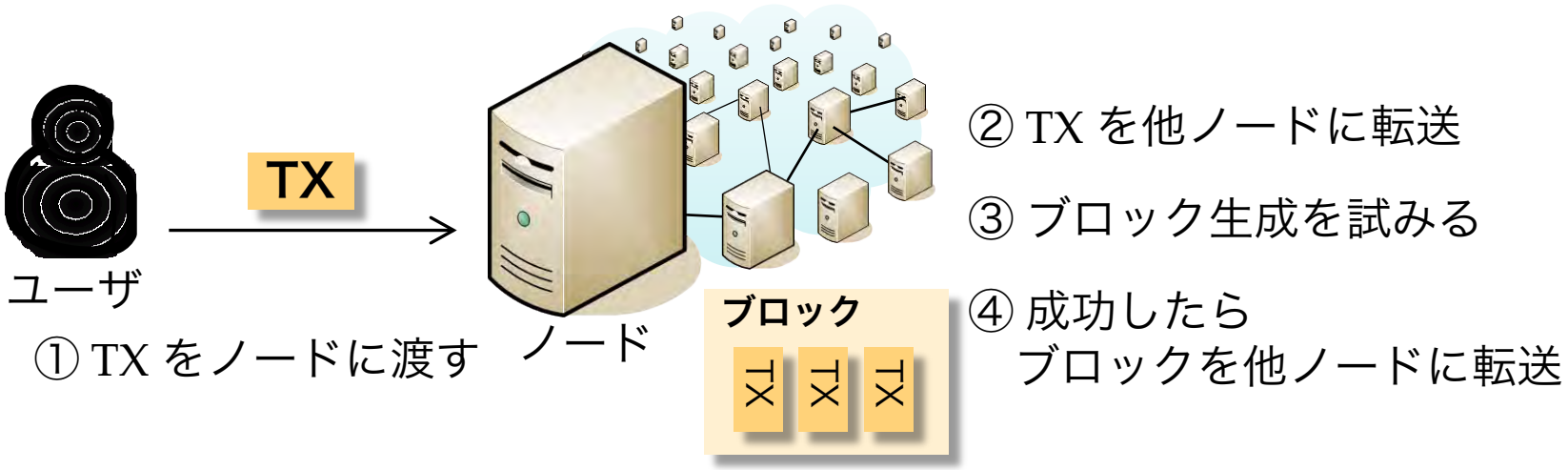
  - 自分に使用の権限があることや、確かに自分が発行した TX であることは、署名 (前項) で示す。
  - TX を矛盾 (二重使用) なく連鎖させていく。

- ブロック



  - TX をたくさんまとめたもの。　　1 MB (メガバイト) くらい (Bitcoin)
  - ブロックを生成 (= 確定) することで、TX を確定させる。

ブロックチェーンの動作



- ① ユーザが TX をノードに渡す。
- 　ノード群は
  - ② 受け取った TX を他ノードにブロードキャストする。
  - ③ TX 群をブロックにまとめて、ブロック生成を試みる。
    計算競争 = Proof of Work (PoW) に勝つと生成できる。
    ④ ブロック生成に成功したら、
    他ノードにブロードキャストする。

次ページ
2ページ後

ブロック生成の計算競争

- Proof of Work (PoW)
  - 全ノードが頑張って計算して、
    10分に 1回 (← Bitcoin の場合) 成功するような計算問題

計算問題：
数値として n より小さなハッシュ値を出せ

暗号学的
ハッシュ関数
$h = \mathrm{H}(\text{ブロック})$

00…00…
ハッシュ値 h

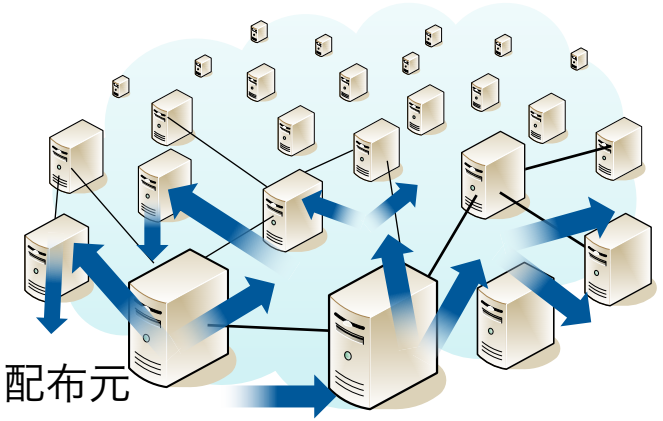
① TX をノードに渡す

- ブロック中の、任意に決めてよい部分を変更して試しまくる
- ハッシュ値は乱数のようなもの
  → ごく稀に、成功する
- 一定期間ごとに難易度 n を調整する

  - 勝つと報酬 (BTC) を得られる。
    貴金属の採掘になぞらえてマイニングと呼ばれる。

ブロックや TX のブロードキャスト

- 手段：flooding / フラッディング
  - ノード群は、アプリケーションレベルの peer-to-peer ネットワークを構築している。
    - Bitcoin の場合：outbound 接続 8 + inbound 接続 125
  - 受け取ったら、隣接ノードすべてに転送する。

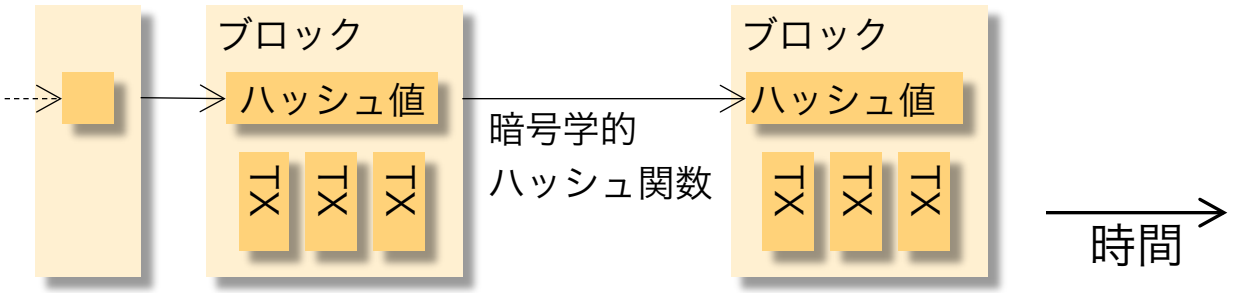


ノード (サーバ) のネットワーク

- 全ノードが同一のブロックチェーンを持つ

ブロックの連鎖

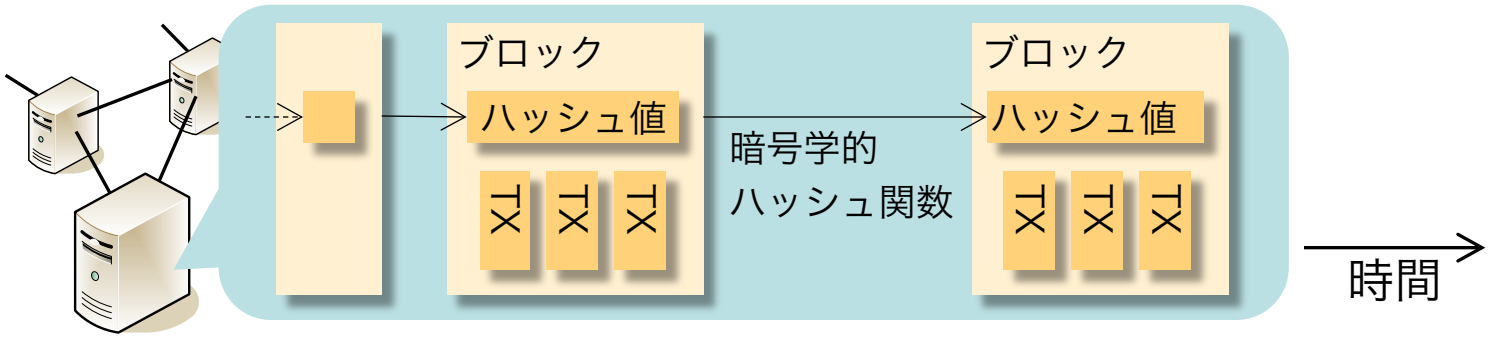
- ブロックをハッシュ値で連鎖させていく
  → ブロックのハッシュチェーン
  → ブロックチェーン



- 各ノードは最新ブロックの次を生成しようとする。
  生成は容易ではない (次項：計算競争)。
- TX を改ざんするには、
  後続ブロックすべてを作り直さねばならない。
  しかし、作り直しはほとんど不可能 (次項：計算競争)。
  → 改ざん困難

改ざん困難性 と 二重使用防止

- 改ざん困難性
  - **計算競争** (3ページ前) で生成された**ブロックの連鎖** (1ページ前) を**全ノードが保持** (2ページ前) していることに基づく



  - TX を改ざんするには、後続ブロックすべてを作り直さねばならない。
  - 後続ブロックを 1つ作り直すためには、全ノードで 10分かかる計算をやり直す必要がある。
- 二重使用防止
  - 各ノードは、ブロックを受信したら、ブロック内の全 TX を検証する。矛盾ある TX を含むブロックを、ノード群は受け入れない。

ブロック生成競争の問題

- Proof of Work (PoW) = ブロック生成の計算競争
  - 通称、マイニング

専用チップを
山のように並べる

マイニング専用データセンタ
https://imgur.com/a/CcIhX より

- 原発 ○ 個分の消費電力

→ 電力を食わない Proof of Stake (PoS) がそろそろ実用
e.g. Ethereum は 2022年 9月、PoW から PoS に移行した

ブロックチェーンに基づく
イノベーション

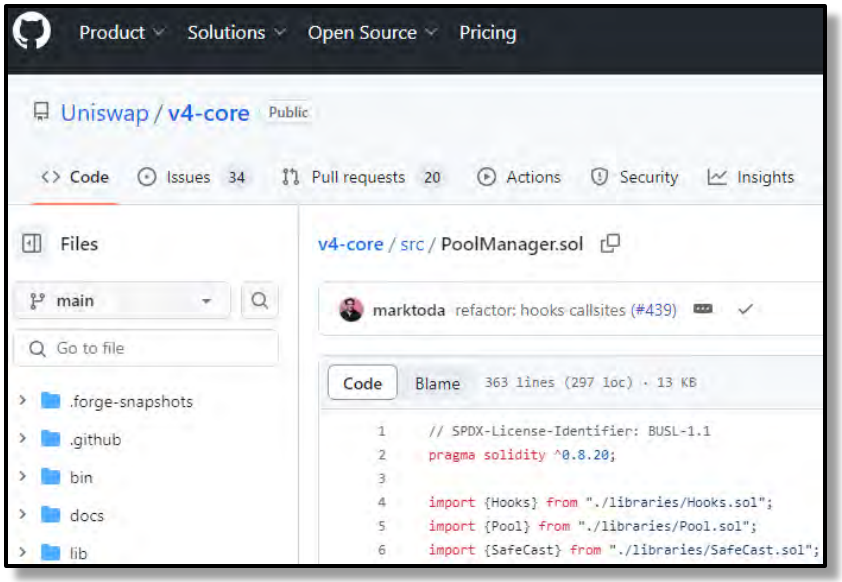
- 様々なイノベーション
- スマートコントラクト, DeFi, DAO, …

様々なイノベーション

- 暗号通貨 Bitcoin (2008)
- スマートコントラクト Ethereum (2014)
- 数多のトークン / コイン ERC-20 仕様 (2015)
- NFT ERC-721 仕様 (2018)
- DeFi Uniswap (2018), …
- DAO 定義 (2014) → The DAO (2016) → …
- Web3 用語 (2014) → 反 Big Tech → 投資の標語

スマートコントラクト

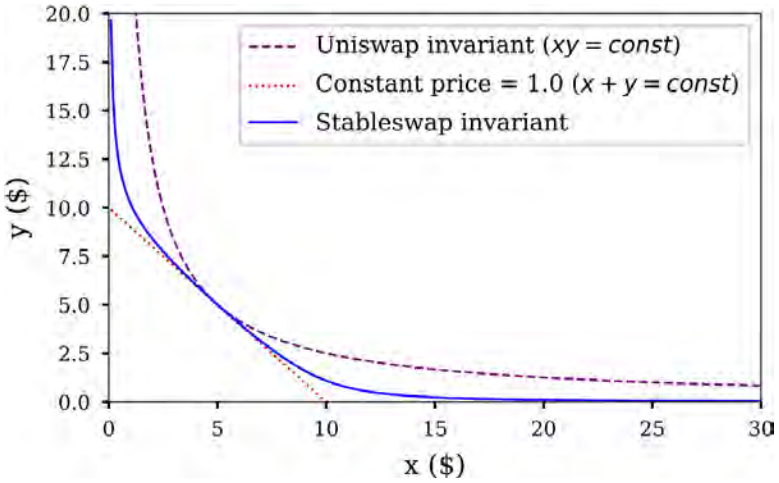
- ブロックチェーン上で動作するプログラム
  - 全ノードが同一の処理をする。
    無駄っぽいけど、これによって不正を防いでいる。
  - ブロックチェーン上のデータ、つまり資産を扱える。
  - Ethereum (2014 ～) が導入
    - Solidity 言語などで記述, EVM (Ethereum仮想マシン)で実行
    - おそらく、Bitcoin Script から着想
  - DeFi, DAO など様々なイノベーションの基盤



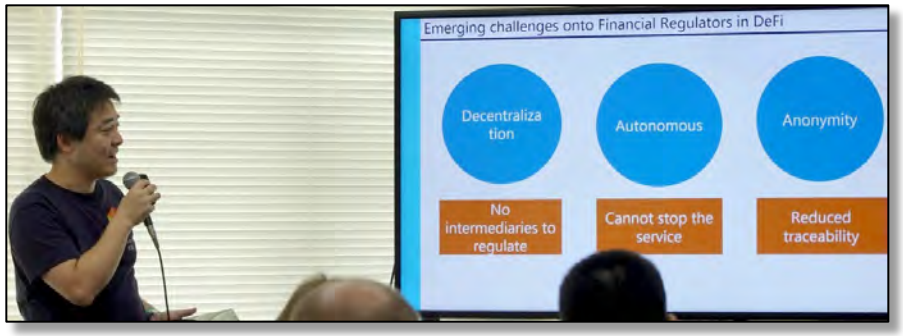
DEX (分散型取引所) である Uniswap のソースコード in Solidity 言語

DeFi (Decentralized Finance) / 分散型金融

- スマートコントラクトを用いて
  様々な金融サービスを実現する試み
  - 取引所 (両替), 証券, 保険, デリバティブ, 賃借 (銀行), …
- 代表例：DEX / 分散型取引所 Uniswap 等
  - スマートコントラクトが自動で両替



AMM (Automated Market Maker) の数式



金融庁（当時）三輪さんの講演
2019/10/10(木)

DAO (Decentralized Autonomous Organization)

- Ethereum 創設者の 1人 Vitalik Buterin が提唱
  - 2014年 5月のブログ "DAOs, DACs, DAs and More: An Incomplete Terminology Guide"
  - コンピュータによる自動運営組織 (が人間を使う)

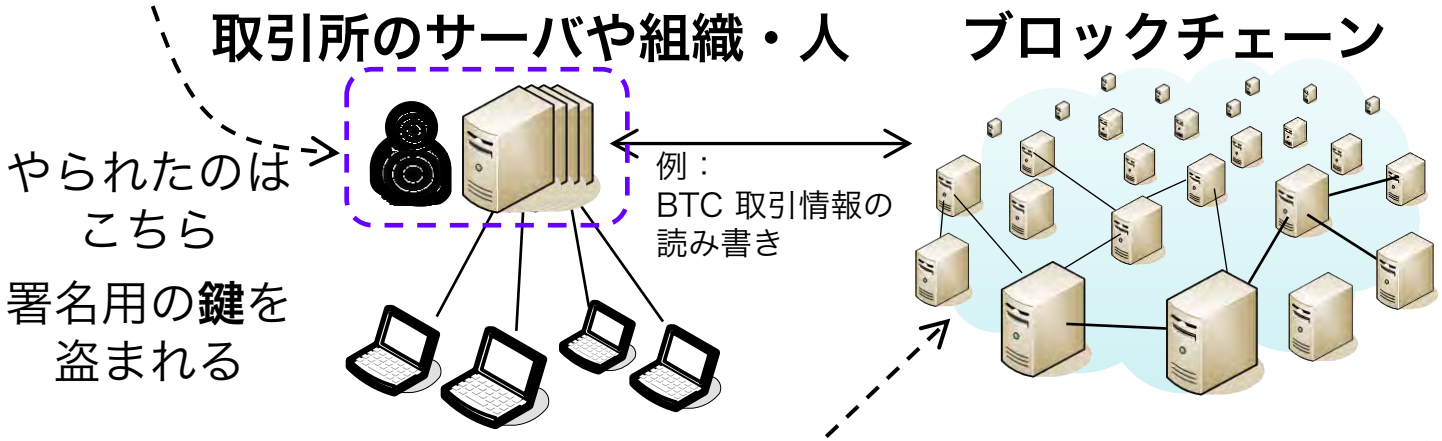
- 提唱
  - コンピュータ**プログラムが運営**する組織
    - LLM に「目的」を与えたら、けっこうできちゃいそう。さらに「センサ」と「アクチュエータ」を与えて、うまいこと実世界（めいた場所）で学習させたら、汎用人工知能 (AGI) に？
- 今日
  - 株式会社ならぬ、トークン会社。
    - 株式の代わりに、**特別なトークン（コイン）の持ち分に応じて、意思決定**していく組織

ブロックチェーンと
社会

– 盗難事件, 通貨, Libra, …

暗号通貨の盗難事件

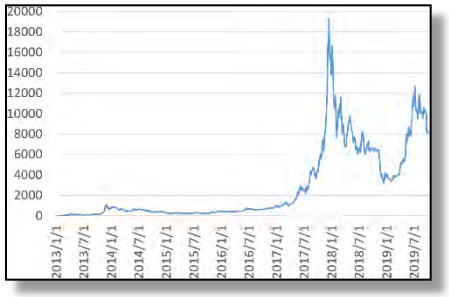
- 盗まれまくってる…
  - 2018年 1月 コインチェック社　　580億円
  - 2018年 9月 テックビューロ社 (Zaif)　70億円
  - 2024年 5月 DMM Bitcoin社　　480億円



- しかし、こちらをやられたケースもある
  - 2018年 5月 Bitcoin Gold　　20億円
  - 2018年 5月 MONA (モナコイン)　1,000万円
  - 2020年 8月 Ethereum Classic　　6億円
- 51% 攻撃は、金しだい： https://www.crypto51.app/
- インセンティブ不整合問題： https://bit.ly/32nvDbI (首藤 論文)

【通貨】流通手段・支払い手段として機能している貨幣

- 暗号通貨で支払った / 受け取ったこと (→ 決済)、ありますか？ ビックカメラとか
  - コインチェック社の方だって、決済手段としての普及を目指してた。
- …
- 乱高下するので、決済に使いにくい。-->



BTC 価格の推移

- 解決案：ステーブルコイン / stablecoin
  - 米ドルや円といった法定通貨との交換レートを一定に保つ → 法定通貨 並みに安定
  - そう甘い話でもない。

    cf. https://blog.liquid.com/ja/insight/what-is-stablecoin-190510

    無担保型は、期待が下がって、調整のための資産を使い果たして破綻、があり得る

Libra / リブラ by Facebook 社

2019年 6月 18日(火) 発表

Libra 協会の
創設メンバ

- 世界統一通貨
- 大義は financial inclusion / 金融包摂
- こなれた設計
  - よくできた財布アプリ (ウォレット)：Calibra
  - ステーブルコイン
    - 通貨バスケット：US$ 50%, € 18%, 円 14%, ポンド 11%, SGD 7%
  - 当初、取引承認は協会メンバのサーバ群が行う。5年以内に、誰でも。
- **前途多難**
  - 各国の金融当局が強く警戒。
    - 金融政策が効かなくなる。
      cf. 「決済のイノベーションと中央銀行の役割」by 日銀 黒田総裁 (2019/12)
  - 予定されていた創設メンバが次々と離脱。
    - Visa, Mastercard, Stripe, eBay, PayPal, … → 大手 決済企業が不在に

Libra / リブラ by Facebook 社

2020年 4月 16日(木) White Paper v2.0

- 世界統一通貨 → まず単一通貨から
- 大義は financial inclusion / 金融包摂
- こなれた設計
  - よくできた財布アプリ (ウォレット)：Calibra
  - ステーブルコイン
    - 通貨バスケット：US$ 50%, € 18%, 円 14%, ポンド 11%, SGD 7%
  - 当初、取引承認は協会メンバのサーバ群が行う。5年以内に、誰でも。
- **前途多難**
  - 各国の金融当局が強く警戒。
    - 金融政策が効かなくなる。
      cf. 「決済のイノベーションと中央銀行の役割」by 日銀 黒田総裁 (2019/12)
  - 予定されていた創設メンバが次々と離脱。
    - Visa, Mastercard, Stripe, eBay, PayPal, … → 大手 決済企業が不在に

Libra 協会の
創設メンバ

見合わせ

Libra / リブラ → Diem に改名

2020年 12月 1日(火) 発表 → 2022年 1月 31日 サービス提供断念

- 世界統一通貨 → まず単一通貨から
- 大義は financial inclusion / 金融包摂
- こなれた設計
  - よくできた財布アプリ (ウォレット)：Calibra
  - ステーブルコイン
    - 通貨バスケット：US$ 50%, € 18%, 円 14%, ポンド 11%, SGD 7%
  - 当初、取引承認は協会メンバのサーバ群が行う。5年以内に、誰でも。
- **前途多難**
  - 各国の金融当局が強く警戒。
    - 金融政策が効かなくなる。
      cf. 「決済のイノベーションと中央銀行の役割」by 日銀 黒田総裁 (2019/12)
  - 予定されていた創設メンバが次々と離脱。
    - Visa, Mastercard, Stripe, eBay, PayPal, … → 大手 決済企業が不在に

Libra 協会の
創設メンバ

見合わせ

トラストレスが導くイノベーション

- ブロックチェーン周辺の 様々なイノベーション
  - 暗号通貨 — Bitcoin (2008)
  - スマートコントラクト — Ethereum (2014)
  - 数多のトークン / コイン — ERC-20 仕様 (2015)
  - NFT — ERC-721 仕様 (2018)
  - DeFi — Uniswap (2018)
  - DAO — 定義 (2014) → The DAO (2016) → …
  - Web3 — 用語 (2014) → 反 Big Tech → 投資の標語

- Bitcoin が、もし、トラストレスでなかったら？ ※
  - Satoshi Nakamoto が管理・発行するただの電子マネーだったら、誰も買わなかっただろう。
    - 無名の個人、悪いことするかもしれないし、ミスするかもしれない。
  - トラストレスという性質が、国や大組織にしかできなかったことを**個人にまで開放**した。

参照：記事「**トラストレスのメカニズム**」, 情報処理, 2023年 1月号
http://www.shudo.net/article/202301-IPSJ-trustless/