Project PAI のための予測 ハイブリッド・コンセンサス

<u>著者:</u> Mark Harvilla博士¹ Jincheng Du²

査読者:

Thomas Vidick博士³
Bhaskar Krishnamachari博士⁴
Muhammad Naveed博士⁵

概要

PAIコインの「Proof of Work」(PoW)コンセンサスメカニズムは、ダブルSHA-256ハッシュプロトコルを利用します。これは、ビットコイン・コアで使用されるのと同じメカニズムです。この古典的で互換性のあるビットコイン型のマイニングは、PAIコインマイニングの参入障壁を低くし、その結果、PAIコインネットワークをいわゆる51%攻撃などに対して脆弱化します。このようなリスクを軽減するために、このホワイトペーパーではハイブリッドのProof-of-Work、Proof-of-Stake(PoS)_コンセンサスメカニズムを提案します。この提案が成功する場合に、村慕容なメカニズムがPAIコインネットワークの固有の脆弱性にどのように対処するかについて詳細な技術分析を提供します。ブロックチェーンベースのProof-of-WorkとProof-of-Stakeコンセンサスの詳細な技術的概要は様々な長所と短所を含めていますので、独自に使われても、ハイブリッドモデルで使われても、両方で使用できる方法を提供します。ハイブリッドのPAIコインネットワークを攻撃することの経済分析が提示され、PAIコインのコンセンサスの今後の予定と推薦も提示されます。

¹ObEN. Incのチーフエンジニア.

²ObEN, Incのブロックチェーン研究員

³カリフォルニア工科大学の計算および数学科学の教授

⁴南カリフォルニア大学電気工学教授

⁵南カリフォルニア大学の計算機科学助教授

謝辞

このレポートは、カリフォルニア工科大学の計算と数学の教授であるThomas Vidickと、南カリフォルニア大学のコンピュータ科学の助教授であるMuhammad Naveedによってレビューされ、承認されています。このレポートは、南カリフォルニア大学電気工学教授のBhaskar Krishnamachariによる提案を取り入れています。このレポートに貢献してくださったP19 Inc.の社長、Ryan Strausに感謝します。

追加の貢献者

ObEN, Incのブロックチェーン研究員Dan Fang博士、LA Blockchain Labの共同設立者・COOである Eman Safadi

用語集

- PoW Proof of Work; ブロックを採掘する確率が、採掘者の作業に依存するというコンセンサス方式。
- PoS *Proof of Stake*; ブロックを採掘する確率が、保持している暗号通貨の量によって決定されるコンセンサス方式。
- ASIC Application-Specific Integrated Circuit; 特定の用途、例えば暗号通貨用採掘に特別に設計された集積回路。デザインの特異性はパフォーマンスの向上をもたらします。
- DCR Decred: ハイブリッドPoW/PoSコンセンサス方式を使う暗号通貨
- KYC Know Your Customer, 見込み顧客のアイデンティティとビジネスの意図を検証する プロセス。
- Dapps Decentralized Applications; 単一障害点を回避するように設計された、トラストレスプロトコルを使用して分散ネットワーク上の多数のユーザーによって実行されるアプリケーション[2]。
- UTXO Unspent Transaction Output; 未使用トランザクションアウトプット。新しいトランザクションへの入力として使用できます[25]
- P2P Peer-to-peer, ピア(対等の者)間で作業または作業量を分配する分散アプリケーションアーキテクチャ。ピア(対等の者)は、アプリケーションの中で等しく特権があり、等効力のある参加者です[3]。
- DDoS Distributed Denial-of-Service; 多数の異なるソースからのトラフィックを増大させることによって、対象システムまたはネットワークのサービスを妨害、中止させる攻撃。

目次

紹介	5
セクション1 — 実用的なコンセンサスメカニズム	6
1.1 Proof of Work (PoW)	6
1.1.1 利点	6
1.1.2 Attack Vectorsと脆弱性	7
多数派攻撃 7	
例 7	
Strip Mining8	
シビル攻撃 8	
1.2 Proof of Stake (PoS)	8
1.2.1 利点	8
1.2.2 Attack Vectorsと脆弱性	9
Nothing-at-Stake Attack	9
1.3 ハイブリッド Proof of Work & Proof of Stake (PoW/PoS)	10
1.3.1 概評	10
ステーキング(Staking)メカニズムの例	11
1.3.2 技術パラメータ	12
1.3.3 Attack Vectorsと脆弱性	12
多数派攻撃	12
Nothing-at-Stake Attack	14
Stakepool	14
1.3.4 他の利点	15
セクション 2 — Proof of Workのハッシュ関数	15
2.1 ASIC耐性	16
セクション3— 推薦 & 今後の予定	17
3.1 全般的な推薦	17
3.2 今後の予定	17
付録 A — 多数派攻撃の数学的証明	18
付録 B — 多数派攻撃のコスト分析	19
付録 C — 暗号通貨ハッシュアルゴリズム	22
参考文献	

紹介

PAIコイン[4]は、ビットコイン・コアのコードフォークとして作成された、UTXOベースの Proof-of-Work (PoW) ベースの暗号通貨です。 PAIコインは、分散データ共有など、ビットコインの上に他の機能を追加しました[5]。 PAIコインプロトコルを利用するアプリケーションには、ObEN Inc.のコンシューマパーソナルAIの認証が含まれています[6]。 PAIコインは、PAI生態系のトランザクション媒体としても機能します。

ビットコイン・コアのコードフォークとして、PAIコインのProof-of-WorkコンセンサスメカニズムはダブルSHA-256ハッシュプロトコルを利用します。そのため、PAIコインはビットコインスタイルの採掘と完全に互換性があります。実際、ビットコインを採掘できる採掘ソフトウェアまたはデバイスでもPAIコインを採掘することができます。 ビットコインと互換性のある大量のハッシュパワーが存在するため、その多くが陳腐化し、アイドリング状態となります。[7]。したがって、PAIコインは現在の状態では、51%の攻撃やStrip Miningなどの壊滅的なAttack Vectorsに対して脆弱です。

プロジェクトPAIに貢献している開発者は、常にこの状況を認識していました。暫定的な解決策として、PAIコインは現在プロトコルレベルのコインベースアドレスホワイトリストを実装しています[8]。つまり、採掘者がCheckBlock()で実行される標準ブロックの検証に加えて、新しいブロックを提供するときには、指定されたコインベースの支払いアドレスが、採掘アドレスのホワイトリスト[9]のいずれかに一致する必要があります。これにより、ホワイトリストに登録されているアドレスを管理していない採掘者がブロック報酬を獲得することを防ぎ、それによって前述のAttack Vectorsを制御します。

プロジェクトPAIに貢献する開発者は、プロジェクトPAIがプロジェクトの「現在のニーズを満たすために」進化し、そして「代替手段が実質的に有益であることが経験的に証明されれば、その代替手段の技術を初期の基幹技術と交換する、もしくは両方を採用する」と予測しました。[4]より広範な公共の採掘に対する要望に応えて、プロジェクトPAIはコインベースアドレスのホワイトリストを安全に削除するための解決策の特定に向けて取り組んできました。この目的のために、このレポートは、分野における現在の技術的進歩に部分的に動機づけられた、ハイブリッドProof-of-Work、Proof-of-Stakeコンセンサスプロトコルを提案しています。この提案を採用することで、公的でアクセシブルな採掘、より高い分散性、コインstakingによる電力効率の向上、より広範なコインの配布、より安全なP2Pネットワーク、より堅牢なエコシステムなど、さまざまな改善がもたらされます。

このレポートの残りは次のように構成されています。一般的なコンセンサスメカニズムの利点と欠点についてはセクション1で概説しています。提案されたハイブリッドコンセンサスメカニズムの慎重なレビューはセクション1.3で与えられます。候補ハッシュ関数、つまりProof of Workのアルゴリズムのバックボーンについては、セクション2で確認します。最後に、セクション3では、コンセンサス変更に対する全体的な推奨事項を示し、統合と展開の計画について概説

します。

セクション1―実用的なコンセンサスメカニズム

1.1 Proof of Work (PoW)

古典的かつ最も一般的なコンセンサスメカニズムは、「Proof of Work」です。「PoW」では、有効なブロックを作成することを計算するのが「難しい」が検証するのが「簡単」である数学的問題に対する解答を提示することによって作業の証明を立証することを採掘者に要求します。一般的に言って、与えられた採掘者がブロックチェーンに新しいブロックを追加する確率は、彼または彼女がアクセスできる計算能力の量に比例します。「PoW」のいくつかのよく挙げられている欠点は、時間とともにますます集中化されたハッシュカによってもたらされる高い物理リソース、使用量/コスト、およびユーザエンゲージメントの低下などがあります。

1.1.1 利点

PoW のいくつかの注目される利点は[10]:

- DDoS攻撃に対する耐性
 - 仕事はかなりの努力を必要とするため、「Proof of Work」は参加者の行動に 一定の制限を課します。効果的な攻撃は通常膨大な計算リソースを必要とす るため、経済的なインセンティブが低くなります。
- コイン保有量の影響が少ない
 - 上述のように、新しいブロックを形成することは、どれだけのステークが保有されているかにかかわらず、計算資源にのみ依存します。したがって、大量のコインを持っている人には、ネットワーク全体の決定を下す権利が直接付与されるわけではありません。

1.1.2 Attack Vectorsと脆弱性

多数派攻撃

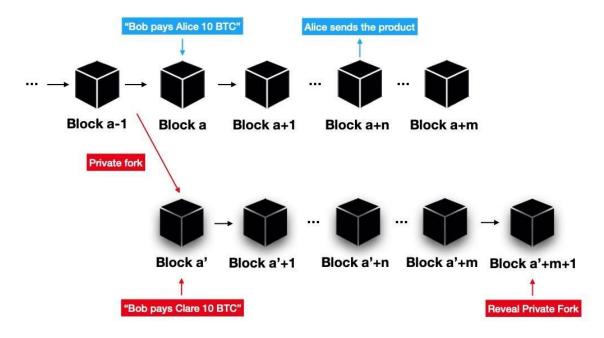


図1. 二重支払い攻撃

ネットワーク参加者がネットワークハッシュレートの50%以上を制御している場合、多数派攻撃、つまり51%攻撃が発生する可能性があります。他のすべてのネットワーク参加者を組み合わせた場合よりも多くのハッシュパワーを持つことで、攻撃者は平均して、ネットワークの他の部分よりも速くブロックを作成して検証できます。これは、Longest Chain Rule(最長チェーンルール)[24]と組み合わせることで、不正なトランザクションをブロックに挿入し、その後それらを検証することを可能にします。多数派攻撃の1つの達成可能な結果は、次に示すように二重支払いです。

例

図1に示すように、攻撃者のBobは、商人のAliceから取引を送信することによって商品を購入します。このトランザクションはブロックalc含まれています。aは整数のインデックスです。内密に、Bobは、不正な二重支払い取引がBlock a 'に含まれる代替のブロックチェーンフォークを採掘します。 n 回の確認を待った後、すなわちブロック a + n が採掘されると、商人Aliceはその商品をBobに送ります。 Bobがネットワークハッシュレートの50%以上を制御している場合、それが正直なネットワークによって構築されたブランチより長くなるまで、彼は自分のプライベートな不正ブロックチェーンを採掘し続けることができます。ブロックa '+ m + 1、ある整数m> nが採掘されたとき、Bobは彼の詐欺的なフォークを公開することができます。そしてそれはLongest Chain Ruleのために有効なブロックチェーンとして認識されるでしょう。

Strip Mining⁶

安定した平均ブロック時間®を達成するために、ネットワークの難易度は、一定数のブロック7の後に調整されます。かなりの量のアイドル状態のネットワークハッシュパワーを制御している攻撃者は、非常に迅速に新しいブロックを生成する可能性があります。難易度の再調整の高さに達すると、ネットワークの難易度は大幅に増加し®、他の採掘者が採掘するには高すぎるレベルになりえます。さらに、攻撃者が難易度の再調整後に突然採掘を終了すると、ブロック時間が急激に低下し、ネットワークが結果的に凍結され、未確認のトランザクションが大量に発生することになります。

⁶著者は、PoWベースのブロックチェーンの脆弱性の評価を提供してくれたAlex Waters氏とJonathan Silverman氏に感謝します。

シビル攻撃

攻撃者は、多数の偽のアイデンティティを偽造することにより、P2Pネットワークに対して過度に大きな影響力を持つ可能性があります。一部のノードは攻撃ノードのみに接続し、正直なネットワークから隔離される可能性があります。これは次のようにしてさらに不当に利用されることができます[11]。

攻撃者は次のことができます:

- 1. ブロックとトランザクションの中継を拒否します。
- 2. 自分のブロックだけを中継し、ネットワークから正直なノードを分割します。
- 3. 例えば、二重支払い攻撃を実行するために、確認の回数が0のトランザクションをいくつか 除外します。
- 4. ブロックチェーン伝送の低レイテンシー暗号化/匿名化を危うくするために、正直なノードからの伝送を監視し、実行時間を分析することによって、タイミング攻撃を実行します。

1.2 Proof of Stake (PoS)

Proof of Stakeは、採掘者(すなわち、stakers)が新しいブロックを作成する確率が、彼または彼女が出したステークの相対量に比例するというもう1つの一般的なコンセンサスメカニズムです。 PoSは一般的な概念です - 多くの異なる実装があります。一例として、ステークは、問題のブロックチェーン上で取引された同じ暗号通貨トークン(例えば、Peercoin、Cardano)からなることができ、あるいはステークは投票チケット(例えば、Decred)からなることができます。いくつかの実装形態では、すべてのトークンは、ブロックチェーンの生成時に発行されます(例えば、NXT、NEM)。他では、そうではありません(例えば、Decred、Peercoin、NEO、Cardano)。

⁷ 難易度はPAIコインで2.016ブロックごとに再調整されます。

⁸PAIコインの目標ブロックタイムは10分です。

⁹PAIコインのネットワークの難易度は、一度に4倍までしか変化できません。

1.2.1 利点

PoSは、高コスト、エネルギー効率の悪さ、および集中化から影響されやすい点を含む、PoWのいくつかの欠点に対処するとされています。

膨大な処理能力の代わりに、PoSは参加者がネットワークのルールに従うように動機付けるための抑止力として保証金を使用しようとします。参加者は、最初にクリプトコインの入金を提出しない限り、ブロックを提案または検証することはできません。参加者がネットワークをだまそうとすると、セキュリティデポジットの一部または全部を失います。計算リソースの必要性を排除することによって、PoSは劇的にエネルギー消費を削減しながらネットワークセキュリティを維持することができます。

セキュリティは計算パズルの難しさに依存しないため、PoSベースのブロックチェーンでは、 ブロック時間をPoWベースのブロックチェーン¹⁰よりもはるかに低いレベルに設定することが 実現可能です。ブロック時間を短縮することで、PoSベースのブロックチェーンは確認待ち時間を短縮し、1秒あたりのトランザクション数を増やすことができます。

PoSベースブロックチェーンでstakerのブロックがブロックチェーンに追加される可能性は、ユーザーがステークした暗号通貨の量に比例します。PoSは、(a) トランザクションを確認するための計算資源への依存性が低いため、より効率的で、より無駄がすくないいためより効率的でありより無駄が少ない、(b) 参入障壁が低いほど中央集中化に対する抵抗力が高いので(c) 最終的にはPoWより持続可能な分散型の影響をよりよく反映するソリューションを提供するという主張があります。

10 イーサリアムのブロック時間は15秒、ビットコインは10分です。

1.2.2 Attack Vectorsと脆弱性

Nothing-at-Stake Attack

PoWにおいて、採掘者は同時に複数のチェーンにまたがって採掘することはかなりの計算コストがかかりうるため単一の(最長の)チェーンで採掘するインセンティブがあります。しかし、PoSでは、採掘の計算コストは存在しません。したがって、複数のブロックチェーンフォークがある場合、最適な(欲張りな)戦略はすべてのフォークに同時に投票することです。そうすれば、検証者はフォークの結果に関係なく報酬を受けることができます。

いわゆるNothing-at-Stake攻撃は、すべての採掘者が貪欲に行動し(あらゆるフォークにブロックを作る)、利他的ではないと実用的に想定しています。そのような仮定の下では、総ステークのわずか1%であっても、他の誰もが両方のフォークにステーキングしている時、攻撃者の二重支払いのフォークは勝つでしょう。ネットワークに利他的な採掘者がいる場合、攻撃者はより多くのステークを購入するか、他の検証者を賄う必要があるかもしれませんが、Nothing-at-Stakeによる二重支払い攻撃の実行はPoWより比較的簡単です。

Nothing-at-Stake攻撃を軽減するためのいくつかのアプローチが提案されています:

- Ethereum Slasher 1.0は、セキュリティ・デポジットベースのPoSアルゴリズムを使用 します。採掘者が複数のフォークに投票したことが発覚された場合、保証金は奪われ ます[12]。
- Ethereum Slasher 2.0は、「間違ったフォーク」に投票した投票者に不利益を与えますが、二重投票した投票者には不利益を与えません[1]。
- Peercoin [26]は、各ブロックでステークされたコインの総数とそれらのコインがステークされた時間の積で定義される、highest consumed coin age(最高消費コイン年齢)を持つチェーンを使います。
- NXT [27]はブロック報酬を排除し、取引料金にプロセスを決定させる。
- EOSの「Delegated Proof of Stake (dPoS)¹¹」ではシェアホルダーはブロック生産者への投票にステイクを充てます。検証者の数は固定されており、順番は各ラウンドで決定されます。
- Algorand [28]では、口座/ノードは、委員会を形成するための暗号的抽選プロセスを通して、コイン保有に比例した確率で無作為に選択されます。その後、委員会はBFT合意方法を使用してブロックを作成します。
- ハイブリッドPoW/PoSコンセンサスは、PoW/PoSを結び付けることによってぞれぞれの欠点を排除することを試みることです。

¹¹2013年にDan Larimer氏によって発明された方法です。DPoSを利用した現在のブロックチェーン: EOS、BitShares、Steem、Golos、Ark、Lisk、PeerPlays、Nano(以前のRaiblocks)およびTezos。少しDPoSを適用した例: Cosmos / Tendetmint、Cardano [13]などがあります。

1.3 ハイブリッドProof of Work & Proof of Stake (PoW/PoS)

PoWおよびPoSの欠点は、オンチェーンのコンセンサスのためのより安全な代替物を探求すことを我々に動機付けます。ハイブリッドPoW / PoSの特性はそれを見込みのある候補にします。たとえば、ハイブリッドPoW / PoSは次のようなことを提供します:

- PoW採掘者とPoS検証者が互いに依存することを要求することによって多数派攻撃に 対するより大きな保護が可能。
- ◆ ネットワーク参加に対するより低い参入障壁。
- より良いエネルギー効率。
- 常時オンラインのノードを維持するためのインセンティブなど、付随的な利益 によるネットワークの安定性が向上する。

ハイブリッドPoW / PoSにはさまざまな実装があります。 Decred [14] (DCR) のProof of Activity [15]からヒントを得た以下のデザインを提案します。

1.3.1 概要

その名前が示すように、ハイブリッドPoW / PoSコンセンサスメカニズムの2つの主要な要素があります。Proof-of-Work採掘とProof-of-Stakeブロック投票です。採掘者は、新しい候補ブロックを作成して提出する責任があります。PoSステイクホルターは、投票によって候補ブロックをブロックチェーンに追加する必要があることを確認します。ネットワークノードは、同時に、PoWの採掘者、PoSのステークホルダー、またはその両方であり得ます。

PoW採掘は古典的な「Nakamoto スタイル」で行われます。採掘者は、常にノンス(すなわち使い捨て乱数)を生成し、それを前のブロックハッシュおよび現在のブロックのマークル・ルートのようなデータと組み合わせる動作を、動的に計算された閾値(すなわち、目標)より低いハッシュ値が出てくるまで繰り返します。

PoS構成要素では、ステークホルダーが無作為に選択され、候補ブロックの有効性に投票する機会が与えられます。ステークホルダーのコインが一定期間、すなわちステーキング期間の間ロックされると、ステークホルダーは新しいブロックに対する検証者候補になります。各ブロックの高さで、すべての検証者候補からランダムにm個のステークホルダーのグループが選択され、確率はステークした暗号通貨の量に比例します。これらのm人のステークホルダーは、n-of-m投票で新しいブロックの有効性を決定します。多数の人が新しいブロックの有効性を確認すると、そのブロックがブロックチェーンに追加されます。このブロックには、ステーキングインボイスのリストに加えて、m個すべてのステークホルダーの投票が含まれます。各ステーキングインボイスには、ステークホルダー¹²のステーキング金額、ステーキングフィーの支払い、およびリターンアドレスが記載されています。これは現在のブロックの高さでのステーキング活動の確認として機能します。投票するステークホルダーの投票権を確認するために、すべてのステークホルダーの投票は、ブロックの高さがより小さい前のステーキングインボイスにつながります。

ブロック報酬は、ブロックを作成したPoW採掘者、ブロックを検証したm人のステークホルダー、および/または他の団体の間で分配される。分布パラメータは調整可能です。たとえば、Decredでは、60%がPoW採掘者に、30%がステイクホルダー5人(それぞれ6%)、10%が貢献開発者に割り当てられています。PoW採掘者がm個の票すべてを含んでいない場合、彼らの補助金は消えた票ごとに1/mずつ減少します。

¹² 投票のステークホルダーの場合もあれば、そうでない場合もあります。

ステーキング (Staking) メカニズムの例

Aliceが、彼女の暗号通貨のいくつかをブロック検証に投票するためにステークしたいPoSのステークホルダーであるとします。

- 1. Aliceは一定量の暗号通貨をステークするためにステーク手数料を支払う意思があることをネットワークに知らせます。
- 2. PoW採掘者(Bob)がブロックの高さhに新しいブロックを作成し、Aliceのステーキング活動情報をステーキングインボイスに詰め込みます。ステーク手数料はBobに支払われ、返金不可になります。Aliceが賭けた暗号通貨はロックされています。
- 3. Aliceは、ブロックh + 256から始まりブロックh + 256 + Wで終了する有効期限内に投票する 資格があります。採掘者によって生成された各候補ブロックについて、候補ブロックを検証 するためにm人の適格なステークホルダーが無作為に選ばれ、確率はそれらが賭けた金額に 比例します。
- 4. 有効期限ウィンドウの幅Wはネットワークのステークの合計に依存するため、Aliceは有効期限ウィンドウ内で検証者として選択される可能性が高くなります。
- 5. Aliceの場合、有効期限内、
 - a. 検証者として選ばれ、ブロックに投票する。
 - b. 検証者として選ばれているがオフラインであり、投票する機会を逃している(すなわち、ノードがオフライン)。
 - c. 検証者として選択されていない。

彼女の資金(ステーク、該当する場合はブロック報酬、ステークを差し引いた額)は、次の256ブロックの間ロックされたままで、その後使えるようになります。

1.3.2 技術パラメータ

現在のPoWベースのプロジェクトPAIとハイブリッドPoW / PoS Decredブロックチェーンの技術的パラメータの比較を次の表に次のように示すことができます:

	現在のプロジェクトPAI	Decred
ハッシュアルゴリズム	SHA-256	BLAKE-256
総供給	2,100,000,000	21,000,000
目標ブロック生成時間	10分	5分
難易度の目標調整間隔	2,016ブロック (2週)	144ブロック(1.25日)
ブロック報酬の減少率	50/100	100/101
ブロック報酬減少間隔	210,000ブロック (4年)	6,144 ブロック(21日, 8 時間)

ブロック報酬分配	100% PoW採掘者に	60%PoW採掘者+ 30%ステー クホルダー (各6%) + 開発 チームに10%
打ち上げ日付	2/23/2018	2/8/2016
推定採掘寿命	Until 2154	Until 2120
最初採掘以後の初期ブ ロック報酬	1,500	31.19582664

表1. プロジェクトPAI& Decred技術パラメーター比較表

Decredは、ハイブリッドのProof-of-Work/Proof-of-Stakeのブロックチェーンの例です。 PAIコインに貢献している開発者は、提案されたハイブリッドコンセンサスメカニズムのための最適パラメータセットを調査しています。

1.3.3 Attack Vectorsと脆弱性

多数派攻擊

セクション1.1.2で説明されているように、多数派攻撃は基本的に攻撃者がネットワークの他の部分より速く有効なブロックを作成できることを意味します。PoWでは、ネットワークハッシュレートの50%以上を制御することはそのような利点を得るのに十分です。ただし、ハイブリッドPoW/PoSでは、攻撃はネットワークハッシュの割合だけでなく、ネットワークの総ステークホルダー割合も制御する必要があります。

有効な各ブロックには、PoSステークホルダーからの投票を含める必要があります。ネットワークハッシュパワーの大部分を制御している攻撃者は、他よりも速く候補ブロックを局所的に生成することができます。ただし、このより長いプライベートチェーンが公開されると、PoSのステークホルダーは、長いプライベートチェーンの先頭ではなく、フォークが始まったブロックで検証と投票を開始します。投票ステークホルダーは、保有するステークの量に比例して無作為に選択されるので、理論的には事前にPoW採掘者はわかりません。したがって、攻撃者がネットワークハッシュパワーと総ステークの両方の大部分を制御していない限り、多数派攻撃はほとんど発生しません。

クレーム: 3-of-5 PoS投票スキームでは、チケットの一部 f_s を持つ攻撃者が保有しなければならないハッシュパワーは

$$6(1-f_s)^5 - 15(1-f_s)^4 + 10(1-f_s)^3$$
$$6f_s^5 - 15f_s^4 + 10f_s^3$$

とネットワークのハッシュパワーの積です。付録Aの証明を参照してください。一般投票方式 の分析については[15]を参照してください。

attacker's stake
network total stakeattacker's hashpower
honest network hashpowerの間の関係は図2に示されていま す。例えば、攻撃者が約50%のステークを持っているなら、正直なチェーンについていくため に、、正直なハッシュパワーの100%が必要となります。

attacker's stake

一般的に、 network total stake の割合が大きければ大きいほど、

attacker's hashpower

honest network hashpower の割合が少なければなりません。 多数派攻撃のための

コイン供給の大部分を売買することは問題になりますが、ステーク参加が減少した場合(例えば、 大きなステークプールの失敗またはすべてのトークンが採掘

されたため)、多数派攻撃が心配されるかもしれない。一般的に言って、ハイブリッドシステムがス テーク参加を高く維持することは重要です。ハイブリッドコンセンサスシステムの下でのプロジェク トPAIの多数派攻撃コスト分析については、付録Bを参照してください[17]。

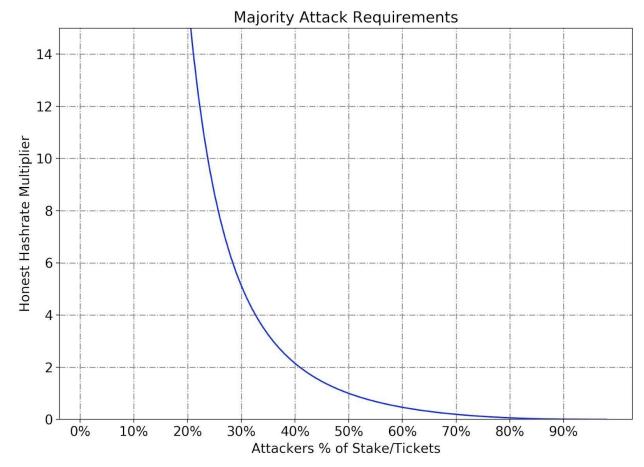


図 2. 正直なチェーンについていくために必要なPoWとPoSの割合

Nothing-at-Stake Attack

PoW採掘者がフォークしようとして悪意のあるブロックを採掘した場合、PoS検証者は単にそのブロックを拒否することができます。悪意のあるブロックを採掘することは計算コストを要するので、PoW採掘者は検証者によって拒否される可能性が高いブロックを採掘するインセンティブが低くなります。同様に、ステークホルダーは事前に議決権を得るために支払うため、機会を他のフォークに無駄遣いするのではなく、他の人が将来投票すると予想していると同じように(つまり、ブロック報酬を生み出す可能性が最も高いである最長チェーンに)投票する傾向があります。

ステークプール

ハイブリッドシステムのPoS投票に参加するには、検証者のウォレットソフトウェアが常に実行されている必要があります。ウォレットは投票のためにいつでも使えるようにオンラインである必要があります - ウォレットが利用できないならば、投票の機会は見逃され、そしてステーカーはブロック報酬を受けません[19]。

自分のウォレットを常にオンラインにしておくことができないステークホルダーを受け入れるために、投票をステークプールに委任することができます。 1/2マルチシグ経由で、ステークプールは、ステークへのアクセス権を与えることなく、ユーザーが自分の代わりに投票するための許可をステークプールに付与することを可能にします。

残念なことに、集中型のステークプールは失敗をもたらします。あまりにも多くのステークを委任しているステークプールがブロックの内外への投票を強制する可能性があります。さらに、大規模なステークプールがオフラインになると、多数の投票が見逃され、投票せずにステークが開放される可能性があります[20]。したがって、一般的には、小さなステークプールを利用することをお勧めします。

1.3.4 他の利点

すでに述べたように、ハイブリッドシステムのPoSメカニズムでは、ステークホルダーが投票する機会を逃さないように、ウォレットソフトウェアを常に実行する必要があります。さらに、ブロック報酬は、PoW採掘者とPoS ステークホルダーに分配されるので、ハイブリッドPoWは、通常、純粋なPoWよりも収益性が低いです。したがって、参加ノードは、ハッシュパワーを獲得するための投資を少なくする傾向があり、それによって、新しいPoW採掘者の参入に対する障壁を低くします。これらの要素は両方とも、ネットワークへの参加を促進するのに役立ちます。最後に、ハッシュパワーへの総投資額が減少する可能性があるため、ネットワークのエネルギー消費量は純粋なPoWよりも比較的少なくなる可能性があります。

古典的なPoWでは、採掘者はブロックを獲得する可能性を高めるために集中型プールを形成しています。マイニングプールが保有するハッシュ力が大きいほど、プールがブロック報酬を獲得する可能性が高くなり、したがってプールに参加するためにより多くのノードを引き付けることになり(すなわち、Matthew Effect)その多くが陳腐化し、アイドリング状態となります。[30])。一方、ハイブリッドPoW / PoSでは、検証者が投票の機会を逃さないように、委任しているウォレットをオンライン状態で維持するためだけにステークプールが存在します。ステークプールのサイズは、選択される可能性には影響しません。ハイブリッドPoW / PoSは依然として大きな集中型マイニングプールの形成をもたらす可能性があるが、PoS層によって提供される追加のセキュリティがあるためそのようなマイニングプールにはあまり影響されません。一般に、ハイブリッドPoW / PoSにおける集中度は、従来のPoWよりも小さいと予想されます。

Section 2 — Proof of Workのハッシュ関数

Proof-of-Workハッシュ関数を選択する目的は、自然に公平なパブリックマイニングを通じて真の分散型を促進することです¹³。理想的な候補暗号ハッシュ関数は以下の特性を持ちます[21]。

- 1. 決定性 同じ入力メッセージが常に同じ出力ハッシュを生成します。
- 2. 効率 任意の入力メッセージからの出力ハッシュの計算が高速が速いです。
- 3. セキュリティ 総当たり攻撃(brute force)以外では、出力ハッシュから入力メッセージを 生成することは不可能です。
- 4. 無作為性 一 入力メッセージへの小さな変更は、出力ハッシュへの大きな無相関の変更をもたらします。
- 5. 唯一生— 同じ出力ハッシュを持つ2つの異なる入力メッセージを見つけることは実行 不可能です。

上記の基準を満たすハッシュ関数は暗号学的に安全であると見なされます。さらに、多くの場合、基礎となるハッシュ関数がASIC耐性を持つ(すなわち、特定用途向け集積回路(ASIC)上でアルゴリズムを実装する)ことによって、CPUベースの実装に比べての計算の大幅なスピードアップを達成することができないことが、ブロックチェーンにとって理想的と考えられています[22]。ASIC耐性は理想的ですが、長期的に達成することは事実上不可能であります(詳細については「ASIC耐性」のセクションを参照)。

さまざまな暗号通貨で採用されているハッシュ関数の表については、付録Cを参照してください。 SHA-3 [31]ファミリーのハッシュ関数は、次のような優れた特性を持っています¹⁴:

- MD構造ハッシュアルゴリズム(MD5、SHA-1、SHA-2)よりも優れた時間効率。
- より良いエネルギー効率:同じレベルの硬さに対して、計算によって消費される(散 逸される)エネルギー(熱)が少なくなります。
- 暗号化セキュリティ:近い将来、SHA-3 (またはSHA-2) に対する古典的または量子的 な攻撃が発見される可能性はほとんどありません。
- ASIC耐性: ASICは現在入手しやすくありません。

問題となっているハイブリッドPoW / PoSコンセンサスメカニズムのPoW要素については、この提案はSHA3-256、およびSHAKE-256 [31]と呼ばれるSHA-3の変形を検討することを推奨します。ほぼ同じセキュリティを持っていますが、もっと効率的であり、調整可能な出力長さを持っています。

¹³ 著者はTarnover LLCのJascha Wanger氏に、ネットワークのセキュリティ、パフォーマンスおよび採用に対するさまざまなコンセンサスメカニズムの影響の徹底的な概要を提供してくれたことに感謝します。.

2.1 ASIC耐生

付録Cに記載されているハッシュアルゴリズムのいくつかは、意図的にASIC耐性のために設計されています。 ScryptとCryptonightには大きなメモリ使用量があり、ASICマイニングとCPU / GPUマイニングの間のギャップを縮小します。 X11は、一連の11の科学的ハッシュアルゴリズムを使用しているため、ASICマイナーを構築するために必要なR&Dのコストが増加します。 X16Rもハッシュアルゴリズムシーケンスを使用し、さらにハッシュアルゴリズムの順序付けを定期的に乱します。そのような対策にもかかわらず、マーケットに十分な経済的インセンティブがある限り、理想的なASIC耐性ハッシュアルゴリズム(例えば、ScryptとCryptonight)のためのASICが出現する傾向があります。

実際、100%ASICプルーフハッシュアルゴリズムに対する疑いがあります¹⁵。さらに、ASICとの闘いの必要性については議論もあります[23]。最小限の脆弱性でオープンマイニングを目指すための合理的なアプローチは、既存のASIC採掘者がほとんどもしくは一切ターゲットしていないハッシュ関数を探し、それをハイブリッドPoW / PoSと組み合わせることかもしれません。暗号通貨はオープンマイニングの開始段階でASIC採掘者に対して、より脆弱性が高いです。開始段階で前述のようなハッシュ関数を使えば、その暗号通貨の主流化に貢献します。その後、ハイブリッドPoW / PoSはASICが広く利用可能であっても長期的なセキュリティを維持するのに役立ちます。 SHA-3ファミリーのハッシュ関数はこの条件を満たします。 カリフォルニアエ科大学のThomas Vidick教授は、「スタンドアロンのPoWの一部としてではなく、51%の攻撃の可能性を軽減することを目的とした、PoSなどの別のアプローチと組み合わせた方がいい」とSHA-3の使用を強く推奨しています。

¹⁴ 著者は、ここで検討した多くのハッシュ関数の評価と要約、そして全体的な推奨を提供してくれたカリフォルニア工科大学のThomas Vidick教授に感謝します。

¹⁵ Monero(XMR)は、ハッシュアルゴリズムを定期的に変更して(年に2回)既存のASICを陳腐化させることを勧めています。

セクション3 ― 推薦& 今後の予定

3.1 全般的な推薦

- SHA-3の優れた特性は、SHA-3をハイブリッドPoW / PoSコンセンサスメカニズムの Proof-of-Work要素に適した候補にしています。 SHA3-256とSHA-3の変種SHAKE-256 がお勧めです。
 - 長期のASIC耐性はハッシュ関数の選択によって達成するのが難しいかもしれませんが、PAIコインの現在のSHA-256メカニズムをASIC採掘者がまだ存在しないアルゴリズムで置き換えることは短期間の保護を提供します。 SHA-3はこの条件を満たしています。
- SHA-3の変種とハイブリッドPoS / PoWアルゴリズムを組み合わせることで、51%の 攻撃に対する長期的な保護が実現できます。セクション 1.3に概説されているア プローチは、PoW採掘者とPoS検証者を互いに依存させることを要求することに よって、PoWとPoSの両方の欠点に対処しています。
- 前述の最新技術の調査およびレビューに基づいて、全体的な推奨はプロジェクトPAIが ハイブリッドPoW / PoSコンセンサスメカニズムを採用することです。このメカニズム はセクション1.3で概説されたハイブリッドコンセンサスメカニズムと組み合わせて SHA-3変種を利用するべきです。

3.2 今後の予定

PAIコインに貢献している開発者のこのアプローチに関する研究開発が進むにつれて、PAIコインコードベース統合とロールアウトについてのより技術的な詳細が発表されると予想されます。

付録A — 多数派攻撃の数学的証明

 $\frac{6(1-f_s)^5 - 15(1-f_s)^4 + 10(1-f_s)^3}{6f_s^5 - 15f_s^4 + 10f_s^3}$

チケットの一部 f_s を持っている攻撃者は利点を得るためにネットワークのハッシュパワーを持っていなければなりません。

証明:

- 1. $E_1 = \{3$ またはもっと多くの表は攻撃者の統制下にある $\}$; $E_2 = \{3$ またはもっと多くの表は正直なステークホルダーの統制下にある $\}$; $E_3 = \{5$ 名の投票者がオンラインにある $\}$
- 2. $Pr[E_1 | E_3] = C_5^5 * f_s^5 + C_5^4 * f_s^4 * (1 f_s) + C_5^3 * f_s^3 * (1 f_s)^2 = 6f_s^5 15f_s^4 + 10f_s^3$
- 3. $Pr[E_2|E_3] = 6(1 f_s)^5 15(1 f_s)^4 + 10(1 f_s)^3 P$
- 4. 平均的に攻撃者は 1/P $r[E1 \mid E3]$ の ノンス試しの後にブロックを作ります。正直なネットワークは 1/P $r[E2 \mid E3]$ の試しが必要です。
- 5. もし攻撃者が正直なネットワークの一回のノンスの試しごとにP $r[E2 \mid E3]$ P $r[E1 \mid E3]$ 回のノンス試しが可能であるぐらいに速ければ、攻撃者はネットワークの残りと同じ平均速度でブロックを生成することができます。

付録B — 多数派攻撃コスト分析

プロジェクトPAIハイブリッドコンセンサスを攻撃するためのコストは、2つの部分に分けられます。(1)PoSでステークするためのコイン購入のコスト、(2)PoWでハッシュするためのGPU取得のコストです。次のように定義することができます:

attacker's stake

ステークの割合: network total stake

attacker's hashpower

正直なハッシュレート乗数: honest network hashpower

正直な採掘者は、それぞれ6,369ドル[29] (2018年12月17日現在) の価値がある100個の NVIDIA TESLA V100 GPUを所有していると仮定します。

これは正直なハッシュパワーの最小値です。表2は、2018年12月17日の時点での攻撃のコストと統計を示しています。

PAIコインの価値: \$0.052201 総コイン供給: 1,563,172,500

公的に利用可能なコイン供給: 735,000,000

ステーク 比率(%)	公的に 利用可能な コイン供給 の割合(%)	コイン購入 費用 (\$ 百万)	正直な ハッシュ レート 乗数	コスト 取得	総攻撃 コスト (\$百万)
18.93	40.25	15.44	19	12.09	27.54
24.66	52.45	20.13	9	5.73	25.86
28.99	61.66	23.66	5.67	3.6	27.26
32.66	69.46	26.65	4	2.55	29.2
35.94	76.44	29.33	3	1.91	31.24
38.98	82.91	31.81	2.33	1.48	33.29
41.86	89.02	34.16	1.86	1.18	35.33

44.63	94.91	36.41	1.5	0.95	37.36
47.33	100.66	38.62	1.22	0.78	39.4

50	106.34	40.8	1	0.64	41.44
52.67	112.02	42.98	0.82	0.52	43.5
55.37	117.77	45.19	0.67	0.42	45.61
58.14	123.66	47.44	0.54	0.34	47.78
61.02	129.77	49.79	0.43	0.27	50.06
64.06	136.23	52.27	0.33	0.21	52.48
67.34	143.22	54.95	0.25	0.16	55.11
71.01	151.02	57.94	0.18	0.11	58.05
75.34	160.22	61.47	0.11	0.07	61.54
81.07	172.43	66.16	0.05	0.03	66.19

表2.攻撃コスト表

公的に利用可能なコインの供給の割合が100%を超えるすべての行は、多数派攻撃が不可能な状況を 表しています。

0.05ドルのPAIコイン価格で、必要なステーク比率を得るのに十分な量のコインが公的に利用可能である状況における総攻撃コストは、攻撃者がネットワークハッシュパワーの5%から95%を制御している場合、2,586万ドルから6,619万ドルです。

純粋なPoWベースのPAIコインネットワークとハイブリッドPoW/PoSベースのネットワークを攻撃するコストの比較を図3に示されています。

コインの購入コストは、PAIコインの価値に比例して増加します。 PAIコインの値が0.25ドルの場合、ステーク率が18.93%、ネットワークハッシュパワーが95%の多数派攻撃の総コストは、8,605万ドル、PAIコインの値が1.00ドルの場合、3億7,93万ドルになります。

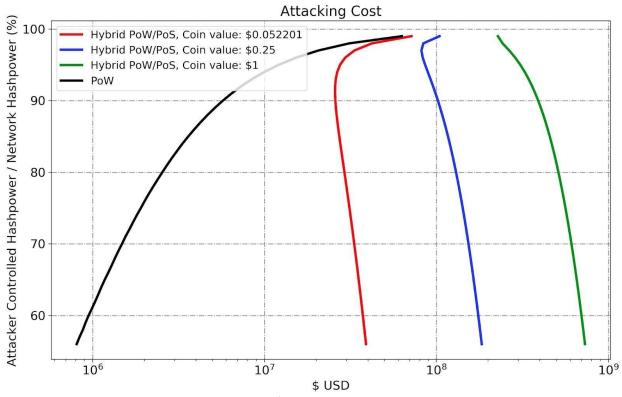


図3. PoWとハイブリッドPoW/PoSの攻撃コスト

付録C — 暗号通貨ハッシュアルゴリズム

ハッシュ アルゴリズム	ハッシュレート	暗号通貨	既存のASIC マイナー
SHA-256	GH/s	Bitcoin Cash (BCH), Bitcoin (BTC), 21Coin (21), Peercoin (PPC), Namecoin (NMC), Unobtanium (UNO), Betacoin (BET), Bytecoin (BTE), Joulecoin (XJO), Devcoin (DVC), Ixcoin (IXC), Terracoin (TRC), Battlecoin (BCX), Takeicoin (TAK), PetroDollar (P\$), Benjamins (BEN), Globe (GLB), Unicoin (UNIC), Snowcoin (SNC), Zetacoin (ZET), Titcoin (TIT)	Antminer S9, Antminer T9
Scrypt	KH/s	Litecoin (LTC), Dogecoin (DOGE), Novacoin (NVC), WorldCoin (WDC), Latium (LAT), FeatherCoin (FRC), Bitmark (BTM), TagCoin (TAG), Ekrona (KRN), MidasCoin (MID), DigitalCoin (DGC), Elacoin (ELC), Anoncoin (ANC), PandaCoins (PND), GoldCoin (GLD)	Antminer L3
Cryptonight	H/s	Monero (XMR), Bytecoin (BCN), Boolberry (BBR), Dashcoin (DSH), DigitalNote (XDN), DarkNetCoin (DNC), FantomCoin (FCN), Pebblecoin (XPB), Quazarcoin (QCN)	Antminer X3
Dagger Hashimoto (Ethash)	MH/s	Ethereum (ETH), Ethereum Classic (ETC), Expanse (EXP)	Antminer E3
Equihash	MH/s	Zcash	Antminer Z9
X11 (X13, X15, X17)	MH/s	Dash (DASH), CannabisCoin (CANN), StartCoin (START), MonetaryUnit (MUE), Karmacoin (Karma), XCurrency (XC)	Antminer D3
X16R		Ravencoin, Motion(XMN)	
BLAKE-256 (BLAKE2s)		Decred	iBeLink DSM 6T, iBeLink DSM 7.2T, Innosilicon D9, Ffminer DS 19
SHA-3 (Keccak)		MaxCoin (MAX), Slothcoin (SLOTH), Cryptometh (METH), NEM	

参考

- [1] Foundation, Ethereum. "Proof of Stake: How I Learned to Love Weak Subjectivity." *Ethereum Blog*, blog.ethereum.org/2014/11/25/proof-stake-learned-love-weak-subjectivity/.
- [2] "Decentralized Application." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 2 Dec.
- 2018, en.wikipedia.org/wiki/Decentralized_application.
- [3] "Peer-to-Peer." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 13 Dec.
- 2018, en.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer.
- [4] "Whitepaper." Project PAI, 13 Nov. 2018, projectpai.com/assets/files/whitepaper/whitepaper-tech.pdf
- [5] Projectpai. "Projectpai/Pdps." GitHub, github.com/projectpai/pdps/blob/master/pdp-0002.mediawiki.
- [6] "About | ObEN, Inc." ObEN Inc, oben.me/about-us-3/.
- [7] "S2 Server Manual." BITMAIN,
- file.bitmain.com/shop-bitmain/download/Antminer%20S2%20Manual_EN.pdf.
- [8] Projectpai. "Projectpai/Paicoin." GitHub, github.com/projectpai/paicoin/blob/master/src/coinbase_addresses.h
- [9] Projectpai. "Projectpai/Paicoin." GitHub, github.com/projectpai/paicoin/blob/master/src/validation.cpp#L2793
- [10] AndrewMarshall. "Proof-of-Work (PoW). All about Cryptocurrency Bitcoin Wiki." . What Is Blockchain Technology? Bitcoin Wiki, Bitcoin Wiki, 22 Oct. 2018, en.bitcoinwiki.org/wiki/Proof-of-work#The_advantages_of_PoW.
- [11] "Weaknesses." B-Money Bitcoin Wiki, en.bitcoin.it/wiki/Weaknesses#Sybil_attack.
- [12] Foundation, Ethereum. "Slasher: A Punitive Proof-of-Stake Algorithm." Ethereum Blog, blog.ethereum.org/2014/01/15/slasher-a-punitive-proof-of-stake-algorithm/.
- [13] Myles Snider, Kyle Samani, and Tushar Jain. "Delegated Proof of Stake: Features & Tradeoffs." Multicoin Capital, multicoin.capital/wp-content/uploads/2018/03/DPoS -Features-and-Tradeoffs.pdf
- [14] "Decred Autonomous Digital Currency." Decred Autonomous Digital Currency, www.decred.org/.
- [15] Bentov, Iddo, et al. "Proof of Activity." ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol. 42, no. 3, Aug. 2014, pp. 34–37., doi:10.1145/2695533.2695545.
- [16] Decred. "Decred/Dcps." GitHub, github.com/decred/dcps/blob/master/dcp-0001/dcp-0001.mediawiki.
- [17] Zia, Zubair. "Decred's Hybrid Protocol, a Superior Deterrent to Majority Attacks." Medium.com, Medium, 4 July 2018, medium.com/decred/decreds-hybrid-protocol-a-superior-deterrent-to-majority-attacks-9421bf486

292.

[18] "Defence Against Early Stage Botnet Attack?" Decred Forum,

forum.decred.org/threads/defence-against-early-stage-botnet-attack.84/

.

[19] "How to Stake/Vote." Decred Documentation, docs.decred.org/mining/how-to-stake/.

[20] "Voting Service Providers." Decred

Documentation,

docs.decred.org/faq/proof-of-stake/stake-pools/.

[21] "Cryptographic Hash Function." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 9 Nov.

2018, en.wikipedia.org/wiki/Cryptographic_hash_function.

[22] "What Does It Mean for a Cryptocurrency to Be ASIC-Resistant?" Bitcoin Stack Exchange,

bitcoin.stackexchange.com/questions/29975/what-does-it-mean-for-a-cryptocurrency-to-be-asic-resistant.

[23] Hsue, Derek. "Is The War Against ASICs Worth Fighting? – Token Economy."

Token Economy, Token Economy, 4 Apr. 2018,

tokeneconomy.co/is-the-war-against-asics-worth-fighting-b12c6a714bed.

[24] Dexter, Shawn. "Understanding Longest Chain – A Simple Analogy." Mango

Research, 9 Sept. 2018, www.mangoresearch.co/understanding-longest-chain-rule/.

[25] "Unspent Transaction Output, UTXO." FAQ -

Bitcoin,

bitcoin.org/en/glossary/unspent-transaction-output.

[26] Sunny King, Scott Nadal. "PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with

Proof-of-Stake." peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper.pdf.

[27] Nxt Community. "Nxt Whitepaper."

dropbox.com/s/cbuwrorf672c0yy/NxtWhitepaper v122 rev4.pdf.

[28] "Whitepapers." Algorand, algorand.com/docs/whitepapers/.

[29] "Nvidia Tesla v100 16GB." Amazon, Amazon,

www.amazon.com/PNY-TCSV100MPCIE-PB-Nvidia-Tesla-v100/dp/B076P84525.

[30] "Matthew Effect." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 21 Nov.

2018, en.wikipedia.org/wiki/Matthew effect.

[31] SHA, NIST. "standard: Permutation-based hash and extendable-output functions, 2015." (3).