

P2P アーキテクチャ



ビジネス開発本部 技術研究部 森下民平

1. はじめに

本稿は、昨今、注目を集める機会の多くなってきた Peer-to-Peer（しばしば P2P と略される）アーキテクチャについて解説するものである。まず、なぜ P2P アーキテクチャが注目されるのか、その背景を紹介する。次に P2P アーキテクチャの概要を解説し、通常のクライアント/サーバー・システムや一極集中型のシステムと比較して、その特徴や課題は何か、そして最後に今後の展望について述べる。

2. なぜ P2P なのか？

まず近年の P2P アーキテクチャへの注目の背景について、その歴史を振り返りながら考えてみよう（参考文献1.）。

P2P アーキテクチャは、新しいアーキテクチャではない。1960年代の終わりに考え出され、現在のインターネットの原型となった ARPANET*1（Advanced Research Projects Agency NETwork）は、アメリカ合衆国全土にわたって、コンピュータリソースの共有を可能にし、すべてのホストが対等に振舞うことができる、共通のネットワーク基盤として開発された。初期のインターネットは、すべての Peer（=ホスト）が、対等に相互通信できる P2P アーキテクチャになっていたのだ。

しかし、WWW の登場をきっかけにインターネットが爆発的に普及し始めると、いくつかの理由から相互接続性は失われ始めた。その主な理由を以下に挙げる。

①多くのノードは、WWW サーバーに対するブラウズ

ができればよかった。つまり、ほとんどのノードはクライアントとしての動作のみを必要とし、サーバー機能は必要ではなかった。

②サーバー機能を必要としないため、IP アドレスが変更されてもよかった。

③組織内の多くのノードを、外部からの意図しないアクセスから保護するために、ファイアウォールの導入が一般的になった。

④IPv4（Internet Protocol version 4）のアドレス空間が限られているため、すべてのノードにアドレスを割り当てることはできず、NAT*2（Network Address Translation）を使用することが一般的になった。

しかし近年、Napster や Gnutella といった、P2P アーキテクチャを採用したファイル交換システムが登場し、インターネット上できちんと機能すること、そして多くのユーザーが、これを受け入れて利用することが実証された。これを契機に、P2P アーキテクチャの可能性を再認識する動きが出ている。その背景について以下に述べる。

コンピュータの分野では、個々のノードの処理能力の向上は、まさに日進月歩で、さらなる高性能化、小型化が進んでいる。ネットワークにおいても、帯域幅の急速な広がり、接続コストの低下、ワイヤレス環境の発達、カバーされる地域の拡大などの進展が現在も進行中である。企業や個人がインターネット上でやりとりする情報やサービスについても、トラフィックは増加の一途をたどっている。スーパーコンピュータから微細なセンサーまでがネットワークに接続され、どこでもネットワーク環境の恩恵を受けることが可能な時代が着実に到来しつつある。

* 1) ARPANET：米国の国防総省高等研究計画局が構築した分散型ネットワーク。

* 2) NAT：プライベート・IP アドレスとグローバル・IP アドレスを相互変換する仕組み。

このようにインターネット接続された環境は、重要な資源を提供しているが、すべてが有効に活用されているわけではない。ここでいう資源とは、以下の3つである（参考文献2.）。

①情報

1つのサーチエンジンやポータルサイトからでは、必ずしも最新の情報を取得できるわけではない*3。さらに、多くの情報は一過性のものであり、Webクロールリングなどによって捕捉されない傾向にある。ある調査によると、毎年世界中で、2エクサバイト（ 2×10^{18} バイト）の情報が産み出されているが、公表されているのは、その内の300テラバイト（ 3×10^{12} バイト）に過ぎず*4、さらにGoogleが捕捉しているのは、 1.3×10^8 のWebページである。つまり、リアルタイムに有用な情報を見つけるのは、だんだん困難になってきている。

②帯域幅

人気のあるサイトにはトラフィックが集中し、そうでないサイトの帯域幅は使われないままである。単一ファイバーの帯域幅は1975年から106倍に増加し、16か月で倍の速度で帯域が増加しているにもかかわらず、多くの人々が「インターネットは混雑している」と感じる原因の1つとなっている。

③計算機資源

新しいプロセッサと記憶装置が、スピードや容量の記録を更新しつづけている。使用される計算機資源がデータセンターに集中する一方で、デスクトップPCなどのように、アイドル状態のままとなっているノードは数多い。

P2Pアーキテクチャが注目されるのは、これらの資源の有効活用に、このアーキテクチャが適しているからである。

また、インターネットのビジネスモデルの観点から、P2Pシステムがインターネットビジネスへの参入を容易にする可能性を示唆するという意見もある（参考文献3.）。

①これまでは、インターネット上でビジネスなどのサービスを行おうとすると、何らかのサーバーを確保する必要があった。しかしP2Pシステムでは、すべてのPeerがサーバーになれるため、特別なサーバーを確保することなしにインターネットサービスの提供者となることができる。

②P2Pシステムでは、データはPeerからPeerへ連鎖的に複製されて伝播する。自分のデータが、どこかで

コピーされるたびに代金が支払われるという仕組みになっているので、自分のデータがいったん複製されてしまえば、自分のPeerを常にオンラインにしておく必要がない。

このようにP2Pアーキテクチャは、クライアント/サーバーや一極集中型のモデルにはない可能性を秘めており、これからのインターネット社会の一翼を担うアーキテクチャになると考えられる。

3. P2Pアーキテクチャ概要

Peerとは、同等の人やものを意味する単語である。Peer-to-Peer（P2P）アーキテクチャは、個々のPeer（ノード）がサービスの消費者であると同時に、サービスの提供者である分散システムのアーキテクチャを指す。

以下の各節では、P2Pアーキテクチャの適用領域について考察し、ハイブリッドP2P、ピアP2P、グリッド・コンピューティングの各アーキテクチャについて論じる。

3.1 P2Pアーキテクチャの適用領域

P2Pアーキテクチャは、どのようなシステムに向いているだろうか。

すでに触れたように、インターネット上には、眠っている多くの情報、帯域幅、計算機資源が存在する。P2Pアーキテクチャは、これらの資源の有効利用を目指すシステムに向くと考えられる。たとえば、情報の検索について考えてみる。今日の代表的な検索エンジンは、集中型のアーキテクチャを持ったものである。集中型の検索エンジンは、WWW上の情報を定期的に収集し、中央のサーバー上にインデックスを作成する。よって、ほとんど変更のない静的な情報を検索する用途に適している。P2Pアーキテクチャによる分散検索の場合は、検索要求を動的に配分するため、動的に生成される情報や鮮度が重要な情報の検索に適している。

帯域幅や計算機資源についても、P2Pアーキテクチャをとる分散ファイルシステムやグリッド・コンピューティングなどの応用が考えられる。

3.2 P2Pアーキテクチャの3つの方式

P2Pアーキテクチャは、大別して3つの方式に分けられる。集中型のサーバーを持つハイブリッドP2Pと呼ばれる形態と、中心的なサーバーを持たずに個々のノードがサーバー、クライアント両方の機能を併せ持つ（サーバン

* 3) Googleのような典型的なサーチエンジンでは、定期的にWebページを巡回（クロール）し、その時点の情報をインデックスとしてカタログ化している。

* 4) 言い換えると、ほぼ1メガバイトにつき1バイトが公表されている。

ト、servantと呼ばれる) ピュアP2Pと呼ばれる形態。そして、個々のノード同士は通信せず、中央のサーバーから分割された問題をもたらせてきて、個々のノードはそれを計算し、中央のサーバーに結果を返すグリッド・コンピューティング (Grid Computing、大規模分散並列計算) もP2Pと呼ばれている。

- ・ノード同士の通信が存在するもの
 - ハイブリッドP2P
 - ピュアP2P
- ・ノード同士は通信しないが、ノードが主要な計算を分散して行うもの
 - グリッドコンピューティング

3.3 ハイブリッドP2P

ハイブリッドP2Pアーキテクチャのイメージを図1に示す。

ハイブリッドP2Pアーキテクチャは、ある部分についてはサーバーを利用し、ある部分については個々のPeer同士でやりとりを行うアーキテクチャのことを指す。代表的なのはNapsterで、認証やインデックスによるファイル検索は中央のサーバーが行い、ファイル交換はPeer同士が直接行う。

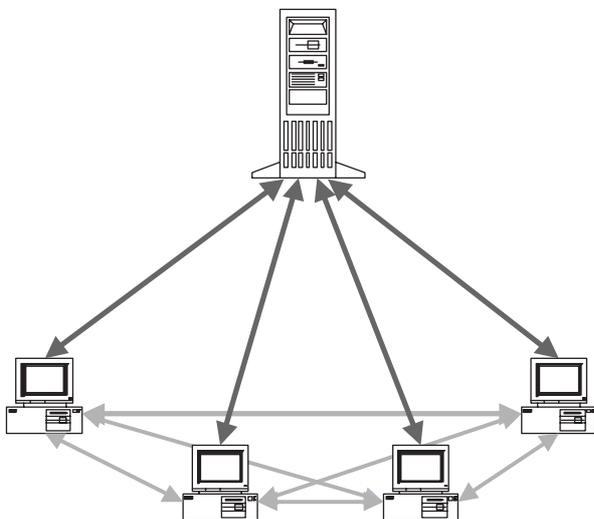


図1 ハイブリッドP2Pアーキテクチャ

ハイブリッドP2Pアーキテクチャには、以下の特徴がある。

- ①セキュリティなどの管理

中央のサーバーを経由させることができるため、アカウント管理、認証、承認といったセキュリティ管理やログニングを行いやすい。

②検索

サーバーに集積したインデックスを検索するため、検索が速い。一方、検索対象は索引付けされたものに限られるため、常に新しい情報が得られるとは限らない。

③耐障害性

特定の機能を一箇所のサーバー上に置いているため、ここが単一障害点*5になりやすい。

3.4 ピュアP2P

ピュアP2Pアーキテクチャのイメージを図2に示す。

ピュアP2Pアーキテクチャは、中心となるサーバーを持たない。全てのノードが対等な、非集中型のアーキテクチャである。代表的なのはGnutellaで、知っているノードが現れるまで検索クエリーが転送され、ファイル交換もPeer同士、という形になっている。

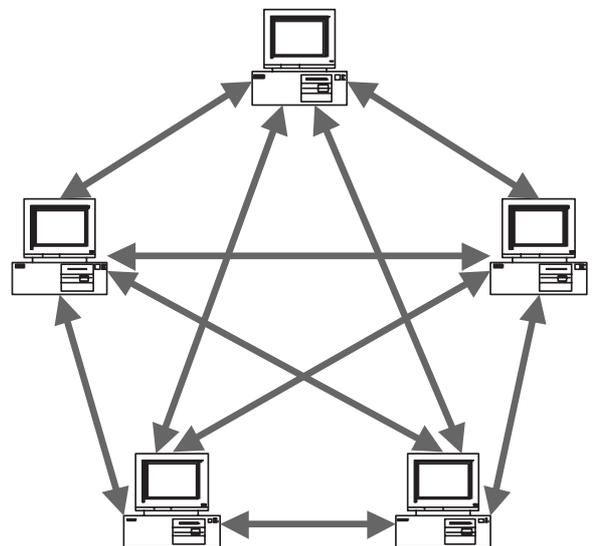


図2 ピュアP2Pアーキテクチャ

ピュアP2Pには、以下のような特徴がある。

①セキュリティなどの管理

中心となるサーバーを持たないため、アカウント管理などのセキュリティ管理機構を組み込みにくい。一方、匿名性の実現には適している。

②検索

単純な分散検索では、あるノードで検索にヒットしなければ、別のノードに次々と転送していくというものであるため、検索時間が長くなりやすい。一方、常に最新の情報を検索できるという利点がある。

③耐障害性

単一障害点を持たないため、障害に強い。

* 5) 単一障害点 (Single Point Of Failure) : その一点の障害が、システム全体の停止につながる部分のこと。

3.5 グリッド・コンピューティング

グリッド・コンピューティングのイメージを図3に示す。また、比較のために、クライアント/サーバーや一極集中型アーキテクチャのイメージを図4に示す。

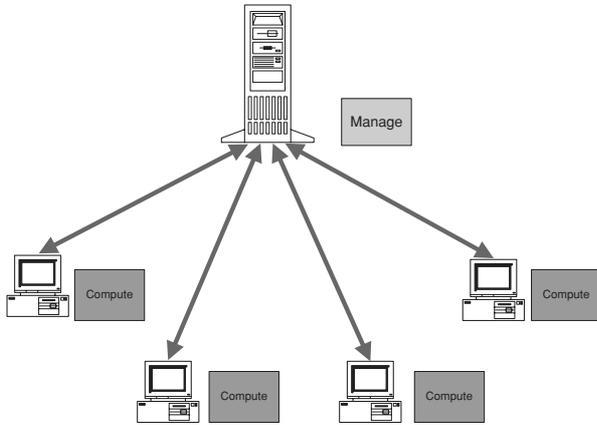


図3 グリッド・コンピューティング

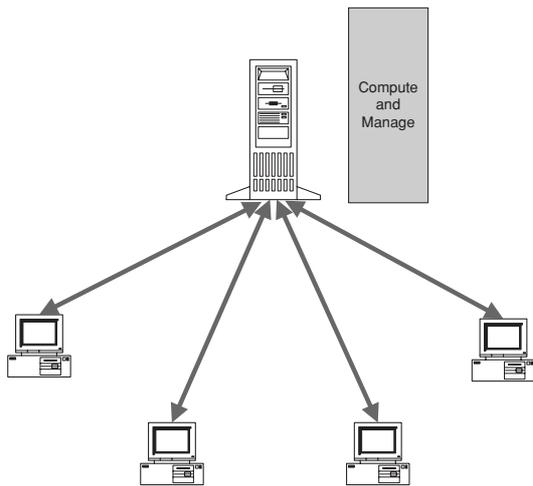


図4 クライアント/サーバー、一極集中型アーキテクチャ

グリッド・コンピューティングの通信形態は、クライアント/サーバーや一極集中型のアーキテクチャと変わりはない。そのため、Peer-to-Peer アーキテクチャからは除外して論じられる場合もある。

グリッド・コンピューティングとこれら一極集中型アーキテクチャの違いは、主要な計算の実行方法である。一極集中型のアーキテクチャでは、主要な計算はサーバー上で行われる。一方、グリッド・コンピューティングでは、大規模な計算を多数のノード上で分割して実行する。

3.6 P2P アーキテクチャの特徴

P2P アーキテクチャの特徴をまとめると、以下のとおりである。

(1) スケーラビリティが高い

Napster や Gnutella に代表されるように、個々の Peer が、情報（ファイル）、ディスクスペース、ネットワーク帯域、CPU 時間といった資源を提供することにより、中央のサーバーに（ときにはまったく）依存することなく、高いスケーラビリティを発揮することが示された。つまり、P2P アーキテクチャは、個々の Peer とその周辺の資源を活用することにより、システム全体の処理能力を高めるアーキテクチャである。

(2) 可用性が高い

P2P アーキテクチャの採用により、高い可用性を持ったサービスを実現している例が多い。特定のサーバーへの依存度が少ないか、あるいはまったく依存しておらず、特定のノードが単一障害点となることを回避している。また、個々の Peer の持つ資源を背景に、システム全体に冗長性を持たせることによって高可用性を実現する例も多い。たとえば、多数の Peer が同じサービスを提供する、あるいは個々の Peer がキャッシュとして動作するといった方法が取られている。

(3) Peer と Peer との直接的なつながり

多くの P2P アプリケーションでは、任意の Peer が特定のサーバーを介さずに、他の Peer と直接やりとりを行うことができるという点も大きな特徴である。

(4) 動的な構成・検索

P2P アプリケーションやプロトコルの多くは、個々の Peer がネットワークに対して動的に参加や離脱を行うことを前提に設計されており、動的に構成を変更できるようになっている。また分散検索を行う場合には、動的に変化する情報をアドホックにとらえることが可能である。

3.7 P2P アーキテクチャの問題点

この節では、P2P アーキテクチャにおける技術的な課題に、どのようなものがあるかを検討する。

(1) セキュリティなどの管理

ピア P2P アーキテクチャでは、集中管理を行うポイントがないため、認証や承認などの管理機構の組み込みが難しい。有効な解決策は、ハイブリッド P2P 方式のように集中管理機構を組み合わせたアーキテクチャとすることだろう。

(2) 一貫性

ファイル交換システムに P2P アーキテクチャを採用する場合、オリジナル・コンテンツの更新に伴ってコピーを更新するといった、一貫性を確保するのは難しい。

P2P 応用の中でも、特に研究が盛んな分散検索につい

て、課題をいくつか示す。

①可用性

集中型の検索エンジンであれば、常にすべてのインデックスを検索可能にしておくことは比較的容易だが、分散検索の形態では、それを保証することができない。

②検索速度

集中型の場合は、ある一定時間内に検索が終了することを保証できるが、分散検索では難しい。現在、この分野は、FastTrack^{*6}やJXTA Search (参考文献4.) など、役割の異なるノードを階層的に組合せるアプローチのもの、Freenet^{*7} (参考文献5.) のようにコンテンツのキャッシュを持つもの、NeuroGrid^{*8} のように、検索結果を学習しルーティングを最適化していくアプローチを取るものなどがある。また、CAN、Chord、P-Grid (参考文献6,7,8.) のように、各Peer上に分散ハッシュテーブルを持たせ、検索時間をlog N^{*9}のオーダーにまで抑えるものも提案されており、有力である。

③複雑な検索

現在の分散検索は、ファイル名などの単純なキーワードの一致しかサポートしていないものが多い。今後は、(参考文献9.) にあるように、さらに複雑な検索に対する技術開発が進むものと思われる。

④情報フィルタリング

分散検索に限らず検索一般に言えることだが、無意味な情報を、いかにフィルタリングするか。様々なコンテンツ、たとえばオフィス文書や映像などのファイル種別ごとにメタデータを定義し、タグ付けを行うことが解決策として考えられるが、これを自動的に抽出できるような技術が必要になるだろう。

4. 今後の展望

最後に、P2Pアーキテクチャの今後の展望について考察する。

P2Pアーキテクチャは、ビジネスあるいは個人向けのアプリケーションのみならず、OSやネットワークなどのインフラ領域に至るまで、各種の分野で注目を集めている。

インフラ領域では、相互接続された世界各地のストレージ・サーバープールを介して超大規模^{*10}かつメンテナンスフリーな分散ファイルシステムを実現しようとしているOceanStore^{*11}や、メンテナンスフリーや負荷分散をメリットとし、P2Pアーキテクチャによって、現在のDNSを置き換えようという試み(参考文献10.) などがある。また、モバイル端末などの端末同士が通信し合い、即興的にネットワークを構成するアドホック・ネットワークの分野でも、基本となるのはP2Pアーキテクチャである。

ビジネスユース向けの応用は、P2Pアーキテクチャを持ったグループウェアGroove^{*12}、グリッド・コンピューティングにより、タンパク質の構造解析などを行っているUnited Devices^{*13}、グリッド・コンピューティングによって集約したCPUパワーの一部を製薬会社などに販売するEntropia^{*14}、コンピュータウイルス対策のファイルを、P2Pアーキテクチャを利用して配布するサービスを行うmyCIO.com^{*15}などが出揃いつつある。

個人向けの応用としては、動画などのコンテンツ配信をP2Pによって行い負荷を分散させるもの、配布するコンテンツは暗号化しておき鍵は別に配信することにより課金を可能にするものなどが多い。コンテンツ供給者と消費者間に、双方が信頼する第三者サービスを介して、正当な課金やコンテンツの正真性を上げる試み(参考文献11.)なども提案されている。P2Pアーキテクチャに関する応用や研究の一部をざっと紹介したが、基本的な方向性は、集中型アーキテクチャとP2Pアーキテクチャとの相互補完とP2Pアーキテクチャの適用範囲の拡大である。つまり、集中的な管理が必要、または向いている部分については集中型のアーキテクチャが使われ続けるが、P2Pアーキテクチャの利用も着実に拡大傾向にある。

P2Pアーキテクチャは、個々のノードの持つ資源を有効に利用するものであると同時に、Metcalfの法則^{*16}からも示唆されるように、その通信の双方向性ゆえに、ネットワーク全体の価値を高めるアーキテクチャであると考えられる。ファイル交換システムの普及から、にわかに脚光を浴びたP2Pアーキテクチャだが、今後のインターネット社会の一翼を担うアーキテクチャとして、長期的にも各種の分野で技術開発と普及が進んでいくだろう。

* 6) FastTrack : <http://www.fasttrack.nu/>

* 7) Freenet : <http://www.freenetproject.org/>

* 8) NeuroGrid : <http://www.neurogrid.com/>

* 9) Nはノード数を表す。

* 10) 約10⁹バイトのファイルを10⁴個持つ10¹⁰ユーザーを想定している。

* 11) OceanStore : <http://oceanstore.cs.berkeley.edu/>

* 12) Groove : <http://www.groove.net/>

* 13) United Devices : <http://www.ud.com/>

* 14) Entropia : <http://www.entropia.com/>

* 15) myCIO.com : 執筆現在では McAfee ASaP となっている。
<http://www.nai.com/japan/mcafee/>

* 16) Ethernetを発明したRobert Metcalfeによる、「ネットワークの価値は、そのネットワークにつながれている端末数(ユーザー数)の二乗に比例して拡大する」という法則。

<参考文献>

1. Nelson Ninar, Marc Hedlund 著 : 『A Network of Peers』, In Andy Oram(編). Peer-to-Peer : Harnessing the Power of Disruptive Technologies. O'Reilly & Associates (2001)
2. Li Gong 著 : 『ProjectJXTA : A Technology Overview』, Sun Microsystems, Inc. (2001)
3. 山崎重一郎著 : 『P2P ネットワークシステム』, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 6, 112001 (2001)
4. Sun Microsystems, Inc. 発行 : 『JXTA Search : Distributed Search for Distributed Networks』, Sun Microsystems, Inc. (2001)
5. Ian Clarke 著 : 『A Distributed Decentralized Information Storage and Retrieval System』, Div. of Informatics, Univ. of Edinburgh (1999)
6. Sylvia Ratnasamy, Paul Francis, Mark Handley, Richard Karp 著 : 『A Scalable Content-Addressable Network』, In Proceedings of ACM SIGCOMM '01 (2001)
7. Ion Stoica, Robert Morris, David Karger, M. Frans Kaashoek, Hari Balakrishnan 著 : 『Chord : A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet』, In Proceedings of ACM SIGCOMM '01 (2001)
8. Karl Aberer, Magdalena Puceva, Manfred Hauswirth, Roman Schmidt 著 : Improving Data Access in P2P Systems 『IEEE Internet Computing』, Vol. 6, No. 1, Jan/Feb2002 (2002)
9. Matthew Harren, Joseph M. Hellerstein, Ryan Huebsch, Boon Thau Loo, Scott Shenker, Ion Stoica 著 : 『Complex Queries in DHT-based Peer-to-Peer Networks』, In Proceedings of the 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS '02), Cambridge, MA, 2002 (2002)
10. Russ Cox, Athicha Muthitacharoen, Robert T. Morris 著 : 『Serving DNS using a Peer-to-Peer Lookup Service』, In Proceedings of the 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS '02), Cambridge, MA, 2002 (2002)
11. Bill Horne, Benny Pinkas, Tomas Sander 著 : 『Escrow Services and Incentives in Peer-to-Peer Networks』, In Proceedings of the 3rd ACM Conference on Electronic Commerce, Tampa, FL, 2001 (2001)