

クラスタリングを用いた P2P 型 SIP における DHT 参加ノード数の最適値の検討

澤田あかね[†] 鳴海寛之[†] 白石陽^{††} 高橋修^{††}

近年, SIP に P2P を適用し, ネットワークを構成し, SIP サーバの機能を P2P ネットワーク上に分散させることで, 高いスケーラビリティと耐故障性を確保するセッション制御の手法が提案されている. しかし, セッション確立時のアドレス解決を DHT による探索処理で行うため, P2P 型の SIP はクライアントサーバ型の SIP よりもセッション確立時の遅延が大きいという問題がある. こうした P2P 型 SIP におけるセッション確立時の遅延を解決する代表的な手法として, クラスタリングが用いられるが, DHT ネットワークのサイズを小さくすることでスケーラビリティ/耐故障性が失われるという問題がある. そこで筆者らは, P2P 型 SIP にクラスタリングを適用し P2P ネットワークを階層化することで, 高いスケーラビリティ/耐故障性と短いセッション確立時間を同時に確保する SIP アドレス解決手法を提案する.

本稿では, P2P 型 SIP における DHT 参加ノード数に焦点を当て, スケーラビリティと耐故障性を保ちつつ, 短い時間でセッション確立を行う DHT 参加ノード数の最適値を, 計算機シミュレーションを用いて検討する.

A Study on Optimal Value of Node Population in the P2P-SIP using a hierarchical DHT

AKANE SAWADA[†] HIROYUKI NARUMI[†]
YOH SHIRAISHI^{††} OSAMU TAKAHASHI^{††}

Recently, a number of researchers proposed the method of session control which has high scalability and fault-tolerant by decentralizing function of SIP server over P2P network using DHT. However, P2P advantages come at the cost of increased call setup latency because of lookup on DHT, so P2P call setup take times more than traditional client-server call setup in SIP. Generally, clustering is an effective method to improve such as call setup latency. However, existing algorithm have the problem of the

[†]公立はこだて未来大学大学院
Graduate School of Future University Hakodate

^{††}公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

scalability and fault-tolerant.

Consequently, we propose the resolving method for SIP addresses which provides scalability and improves lookup latency by clustering SIP nodes. In this paper, we focus on a DHT node population, and consider the optimal value of DHT node population in the hierarchical DHT.

1. はじめに

SIP (Session Initiation Protocol)^[1]はセッションの開始・変更・終了などセッション制御を行う, IETF で標準化された拡張性の高いプロトコルであるが, クライアントサーバ型の構成をとるため, クライアント (以下, UA:User Agent) 数の増加によってサーバに負荷が集中し, ボトルネックが生じる. こうした背景から, 近年では, DHT (Distributed Hash Table)^[2,3,4,5]を用いてノード同士が対等に通信する P2P (Peer-to-Peer) ネットワークを構成し, SIP サーバの機能を P2P ネットワーク上に分散させることで, 高いスケーラビリティと耐故障性を確保するセッション制御の手法が提案されている^[7,8]. SIP は, セッション確立を要求する INVITE リクエストを送信後, 宛先 UA の SIP アドレスに対応する IP アドレスを取得する必要がある. この処理をアドレス解決という. 従来のクライアントサーバ型 SIP は, SIP サーバによりアドレス解決が行われるが, P2P 型の SIP では, DHT による探索処理でアドレス解決を行うため, P2P 型の SIP はクライアントサーバ型の SIP よりもセッション確立時の遅延が大きいという問題がある^[6]. こうした P2P 型 SIP におけるセッション確立時の遅延を解決する代表的な手法として, クラスタリングが用いられる. 筆者らは, P2P 型 SIP にクラスタリングを適用し, 階層化した P2P ネットワークによる SIP アドレス解決手法を提案する. 一般に, ノードをクラスタリングし DHT ネットワークのサイズを小さくすることで DHT 探索ステップ数が減少するが, DHT の利点であるスケーラビリティ/耐故障性が失われる. よって P2P 型 SIP において, クライアントサーバ型の SIP では得られない高いスケーラビリティや耐故障性を確保するとともに, DHT を利用することにより発生するセッション確立時の遅延を減少させる必要がある.

そこで本稿では, P2P 型 SIP にクラスタリングを適用し P2P ネットワークを階層化することで, 高いスケーラビリティ/耐故障性と短いセッション確立時間を同時に確保する SIP アドレス解決手法を提案する. また, P2P 型 SIP における DHT 参加ノード数に焦点を当て, スケーラビリティと耐故障性を保ちつつ, 短い時間でセッション確立を行う DHT 参加ノード数の最適値を検討する.

2. 関連研究

一般的な P2P 型の SIP に関する研究動向について触れ, P2P 型 SIP へクラスタリングを適用した場合の課題について述べる.

2.1 P2P型 SIP

P2P 型の SIP プロトコルは未だ標準化されていないが、SIP における高いスケーラビリティと耐故障性を確保するために、SIP サーバを P2P ネットワークに置き換える様々な研究がこれまでに提案されている^[6, 7, 8]。P2P 型 SIP には、P2P over SIP^[7]と SIP using P2P^[8]の二つのアプローチがあり、いずれも UA が DHT ネットワークを形成することを想定している。P2P over SIP は、オーバーレイネットワーク上で SIP リクエスト/レスポンスを転送するモデルである。SIP リクエスト/レスポンスで P2P ネットワークを制御するため、SIP ヘッダに変更を加える必要があり、従来の SIP をそのまま利用することができない。また、SIP リクエスト/レスポンスの転送に大きなオーバーヘッドを伴う。一方 SIP using P2P は、SIP のアドレス解決のみに P2P ネットワークを利用するモデルである。そのため SIP 層と P2P 層が完全に独立しており、従来の SIP をそのまま利用することができる。本研究では後者のアプローチをとり、SIP using P2P の一般的な概念図を図 1 に示す。SIP using P2P では、UA の情報を DHT ネットワーク上のノードが管理する。

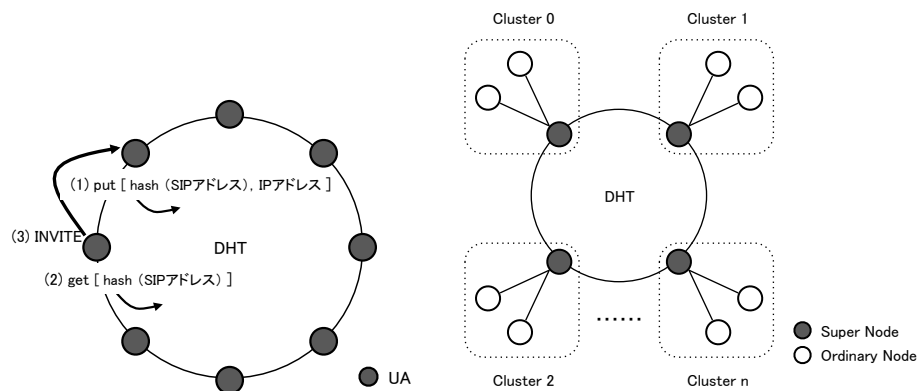


図 1 SIP using P2P

UA が新たに DHT ネットワークに参加する場合、IP アドレスとポート番号のハッシュ値をノード ID とする。ユーザ登録を行う場合は、SIP アドレスのハッシュ値をキーとして DHT における探索処理を行うことで、登録先のノードを決定する (図 1(1))。これらの制御メッセージには SIP リクエスト/レスポンスを用いず、DHT のメッセージとして定義する。任意の UA からセッション確立要求が発生した場合は、DHT にお

ける探索を用いて探索対象の SIP アドレスをもとに IP アドレスを求める (図 1(2))。セッションは、UA 同士 end-to-end で確立される (図 1(3))。

SIP に P2P を適用することで DHT による探索処理が発生するため、セッション確立時に従来のクライアント-サーバ型の SIP よりも遅延が生じる。DHT は、いずれのアルゴリズムもオーバーレーティングにおける探索ステップ数が $O(\log N)$ (N : DHT 参加ノード数) であるため、DHT 参加ノード数を減らすことで探索遅延を減少させることができる。図 2 は、ノードをクラスタリングして DHT ネットワークを形成したものである。UA としてサービスを利用するだけでなく、DHT ネットワークに参加しアドレス解決を行うスーパーノード (SN: Super Node) と、サービスを利用するのみで DHT ネットワークには参加しないノード (ON: Ordinary Node) にノードをクラスタリングする。SN は自身が管理する ON から発生した要求を代わりに解決することでプロキシの役割を果たす。

2.2 クラスタリングにおける課題

ノードをクラスタリングし DHT 参加ノード数を減らすことは探索ステップ数の減少につながるが、減らしすぎることによって DHT の利点であるスケーラビリティ/耐故障性が失われる。そのため、セッション確立時間と、スケーラビリティ/耐故障性はトレードオフの関係になっている。全てのノードで DHT ネットワークを形成した場合よりもセッション確立時間を減少させながら、かつ SIP サーバにはないスケーラビリティや耐故障性を提供するためには、このトレードオフを左右する DHT 参加ノード数の最適値を求め、かつその最適値に近い状態で DHT ネットワークを維持する必要がある。そこで本稿では、P2P 型 SIP における DHT 参加ノード数に焦点を当て、スケーラビリティと耐故障性を保ちつつ、短い時間でセッション確立を行う DHT 参加ノード数の最適値を検討する。

3. 提案方式

本章では、まず 3.1 節で本提案方式の基本構成を示し、3.2 節以降は提案方式の詳細について述べる。

3.1 提案方式の基本構成

本提案方式は SIP に P2P を適用した SIP using P2P の構成をとり、P2P ネットワーク上で DHT を形成してアドレス解決を行う。セッション制御に SIP を使い、DHT は円状の ID 空間を形成する Chord^[2]を用いる。アドレス解決に DHT を用いることによりセッション確立時の遅延は従来の SIP より増大してしまうため、本研究ではクラスタリングというアプローチで DHT 参加ノード数を減らし、探索ステップ数を減少させる。

提案方式では図 2 のようにノードをクラスタリングし、 n 個のクラスタにまとめる。

さらにクラスタごとに、DHT ネットワークに参加する SN と、DHT ネットワークには参加せずそのサービスのみを利用する ON に分類する。SN は、クラスタ内の ON 情報を一元管理する代表ノードである。SN は DHT ネットワークに参加し、クラスタ内の ON のアドレス解決要求を代理で処理する。また、自分自身も UA としての機能を持つ。

このような階層型 P2P を実現するため、本提案方式は次の 5 つのアルゴリズムによって構成される。

- 1) クラスタリング
- 2) アドレス解決
- 3) SN の交代と離脱
- 4) SN の故障
- 5) SN 数の管理

次節以降でそれぞれのアルゴリズムの詳細を述べる。

3.2 クラスタリング

クラスタリングは、SIP において ON が自身の情報を DHT ネットワークに登録する、REGISTER 処理の際に行われる。

まず、新たに自身の情報を登録したい UA は自身の SIP アドレスをハッシュ関数にかけた値をノード ID とし、上位ビットであるプレフィックスをクラス分けのパラメータとする。次に同じプレフィックスの ID を持つ SN に REGISTER リクエストを送り、SN に自身の SIP アドレスや IP アドレスなどの情報を登録する。REGISTER 処理が成功の場合、SN は ON の登録情報と参加時刻を記録し、ON に 200OK レスポンスを返す。200OK レスポンスには SN の情報をのせ、ON は自身が所属するクラスタの SN を把握することができる。なお、SN が新たにクラスタを形成する際は、Chord における通常の参加処理が行われる。

SN が ON の登録情報とともに参加時刻を記録することで、SN はクラスタ内の個々の ON の参加時間を把握することができる。この仕組みにより、クラスタ内の情報を管理する SN の離脱が発生した場合に、クラスタ内で最も参加時間の長い ON を次の SN として選択できる。

3.3 アドレス解決

クラスタに所属する ON から、INVITE リクエストによりセッション確立要求が発生した場合、ON は、宛先 UA の SIP アドレスに対応する IP アドレスを取得する必要がある。ON は DHT ネットワークに参加していないため、ON から発生した INVITE リクエストは、ON が所属するクラスタの SN に転送される。SN は、宛先 UA の SIP アドレスのハッシュ値を求めノード ID とし、Chord における探索処理を行う。

図 3 は、クラスタ 1 に所属する ON1 が、クラスタ 2 に所属する ON2 とセッションを確立する際の流れを示したものである。ON1 は、宛先 UA である ON2 の SIP アドレ

スを含む INVITE リクエストを所属スラストの SN である SN1 に送信する。INVITE リクエストを受信した SN1 は ON2 の SIP アドレスのハッシュ値を求め、DHT ネットワーク上で探索処理を行う。探索メッセージが ON2 の情報を管理する SN2 に転送されると、SN2 は、INVITE リクエスト送信元である ON1 へリクエスト要求のあった ON2 の IP アドレスを送信する。IP アドレスの送信は IP 通信で行われる。最後に、ON1 は取得した ON2 の IP アドレスを用いて ON2 へ INVITE リクエストを送信する。

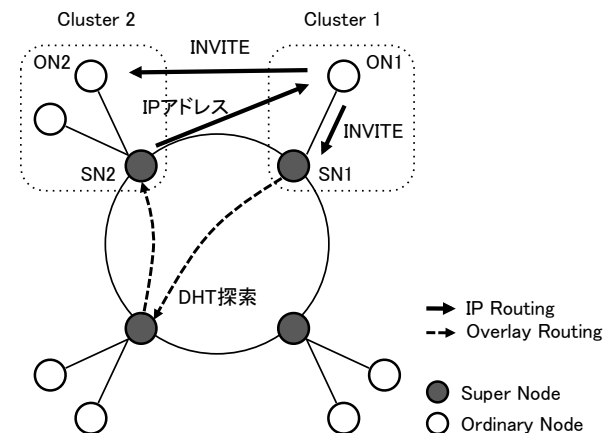


図 3 アドレス解決

3.4 SN の交代と離脱

SN から離脱要求が発生すると、離脱ノードは自身のクラスタ内で一番参加時間の長い ON を選択して、SN を委譲する。その際、離脱する SN のクラスタ内に ON が存在する場合と、離脱する SN のクラスタ内に ON が存在しない場合に分けられる。以下にそれぞれの場合のアルゴリズムを述べる。

離脱する SN のクラスタ内に ON が存在する場合、SN の交代処理が行われる。離脱ノードは自身のクラスタ内で最も参加時間の長い ON に、SN を委譲する通知と自身が保持するクラスタ情報を送信する。離脱ノードはクラスタ内の ON 全て、および Chord における自身の前任ノードと後任ノードに、SN 変更メッセージを送信する。離脱ノードは Chord における通常の離脱処理を行い、新たに SN となるノードは Chord における通常の参加処理を行う。

離脱する SN のクラスタ内に ON が存在しない場合、SN の離脱処理が行われる。離脱ノードは Chord における通常の離脱処理を行う。

P2P ネットワークにおいて、参加時間の長いノードはその後一定時間参加し続ける傾向がある^[9]. そのためクラスタ内で一番参加時間の長い ON を次の SN に選択することで、DHT ネットワークにおけるノードの頻繁な参加/離脱動作を防ぎ、DHT ネットワークが安定する.

3.5 SN の故障

DHT ネットワークに参加し、UA の情報を管理する SN が故障した場合、SN が保持していた情報は失われ、セッションを確立することができない場合が生じる. また、SN の故障により Chord におけるルーティングテーブルに不具合が生じ、探索処理が失敗する場合が生じる. Chord における探索処理を成功させるためには、Chord に参加するノードが、円状の ID 空間における自身の直後のノード (successor ノード) のポインタを正確に維持することが必要不可欠である. そのため Chord に参加するノードは、円状のオーバーレイ ID 空間において自身の successor となりうるノードを r 個保存したテーブルである successor-list を保持し、ノードの故障が発生した際に利用することで故障回復を図る (図 4). 提案方式における故障回復アルゴリズムを図 5 に示す.

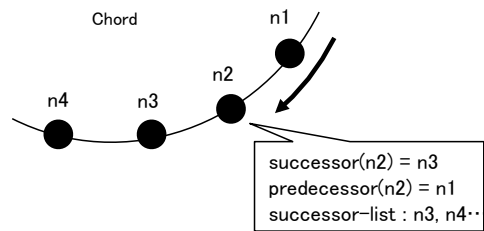


図 4 successor ノードと predecessor ノード

ノードの故障発生時においても、故障ノードが保持していた情報が失われることを防ぐため、SN はそれぞれ自身が管理するクラスタ内の情報を、あらかじめ Chord における自身の周辺の SN にキャッシュする. キャッシュ先の SN は successor-list 中のノードから選択する. 提案方式では、それぞれの SN が自身の保持する successor-list から自身に近い 4 ノードを選択し、保持するクラスタ情報をキャッシュする. また、ノードの故障に気づくため、ping パケットを利用する. SN は自身の直後の successor ノードに ping パケットを送信し、一定時間以上レスポンスがなければノードの故障とみなす. ping パケットを受信したノードは送信元ノードにレスポンスを返した後、自身の直後の successor ノードに ping パケットを転送することで、ping パケットがオーバーレイ ID 空間内で等しく転送される. SN1 が自身の successor ノードである SN2 の故

障に気づくと、SN1 は自身の successor-list を参照し、故障ノード SN2 の successor ノードである SN3 へ SN2 の故障を通知する. SN2 が故障していなければ、SN1 は SN3 を、SN3 は SN1 を新たな successor ノード、前任ノード (predecessor ノード) にそれぞれ設定する. SN3 は自身が管理するクラスタに加えて、故障した SN2 が管理していたクラスタの管理ノードとなるため、自身のキャッシュテーブルを参照し SN2 が管理していたクラスタに所属する ON に SN 変更通知を送信する. SN2 の故障に伴うルーティングテーブルの更新は、Chord における通常のルーティングテーブル更新アルゴリズムと同様のアルゴリズムで行う.

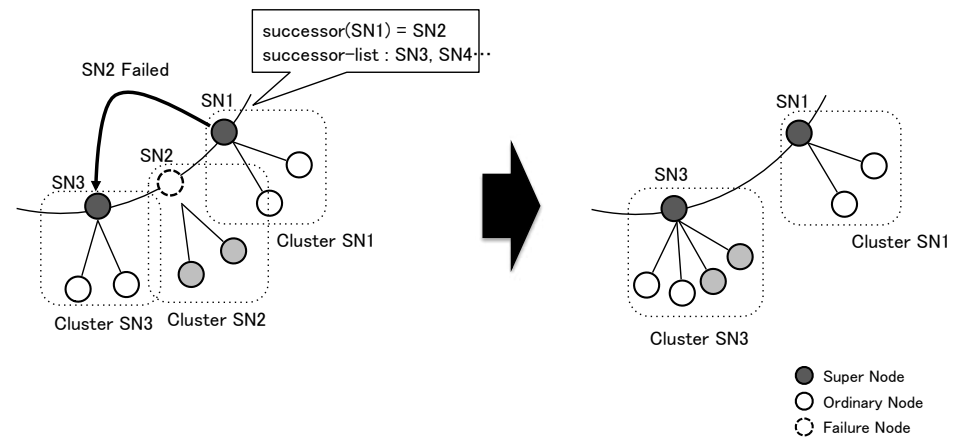


図 5 SN の故障回復処理

3.6 SN 数の管理

スケーラビリティと耐故障性を確保しながらセッション確立時の遅延を減少させる DHT 参加ノード数を求めるためには、DHT ネットワークに参加しているノード数を管理する必要がある. そのため提案方式では、SN 数を管理するノードを設ける. この管理ノードを、ノード ID が最も 0 に近いノードとする. SN 数が変化の場合は、SN の参加、SN の離脱、SN の故障時の 3 通りである. SN の参加時には、参加処理後、参加ノードがキーを 0 として DHT 参加ノード数を管理するノードを探索し、SN 数を 1 増やすよう依頼する. SN の離脱時には、離脱処理前に SN 数を管理するノードを探索し、SN 数を 1 減らすよう依頼する. また、SN の故障時には、故障ノードの predecessor ノードが故障回復時に SN 数管理ノードにノードの故障を通知することで、SN 数を 1 減らすよう依頼する. なお、SN 数を管理するノードが離脱し、クラスタ内に ON がい

て SN の交代処理が行われる際は、自身が保持するクラスタ情報とともに SN 数の管理情報を次の SN へ渡す。また、SN 数を管理するノードが離脱し、クラスタ内に ON がおらず SN の離脱処理が行われる際は、Chord における通常の離脱処理が行われるため、離脱ノードが保持する SN 数の管理情報は、離脱ノードの successor ノードへ引き継がれる。

4. 実装と評価

4.1 シミュレーション条件

提案手法をアプリケーション層に実装し、耐故障性および探索ステップ数の評価を ns-2^[10]により行った。主なシミュレーションパラメータを表 1 に示す。

表 1 シミュレーションパラメータ一覧

ネットワークパラメータ	
ノード数 (M_{all})	4000
シミュレート時間	2000 秒
提案方式の主なオプションパラメータ	
SN 数 (N)	400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400, 2800, 3200, 3600
ON 数 ($M_{all}-N$)	3600, 3200, 2800, 2400, 2000, 1600, 1200, 800, 400
故障ノード数 (F)	40, 80, 120

本提案方式では、ノードをクラスタリングし、DHT ネットワークに参加する SN と参加しない ON に分類する。そのため全ノード数を 4000 (M_{all}) とし、 $SN=N$, $ON=(M_{all}-N)$ とする。ネットワークの立ち上げ後 SN を故障させ、一定時間待ち DHT ネットワークの故障回復を図る。その後送信元/宛先ノードとともに ON としてセッション確立要求を発生させ、DHT ネットワーク上で探索処理を行うことによりアドレス解決を行う。本研究では、DHT ネットワークに参加し ON の情報を管理する SN が故障しても、故障ノードが管理する ON の情報を手に入れることを DHT ネットワークにおける耐故障性と定義する。また、送信元 ON がセッション確立(探索) 要求を出し、宛先 ON の IP アドレスを取得した場合を探索成功と定義し、取得できなかった場合を探索失敗と定義する。故障ノード数 F に対する DHT 参加ノード数 N を変化させた場合における探索失敗率、および探索成功時の平均探索ステップ数を計測する。

4.2 評価と考察

本節では、耐故障性および平均探索ステップ数の 2 つの観点から、DHT 参加ノード

数 N の最適値について評価する。

(1) 故障ノード数 F に対する DHT 参加ノード数 N を変化させた場合の比較

故障ノード数 F の値を 40, 80, 120 とした場合の N に対する探索失敗率と、それぞれの N における探索成功時の平均探索ステップ数を以下に示す(図 6, 7, 8)。横軸は

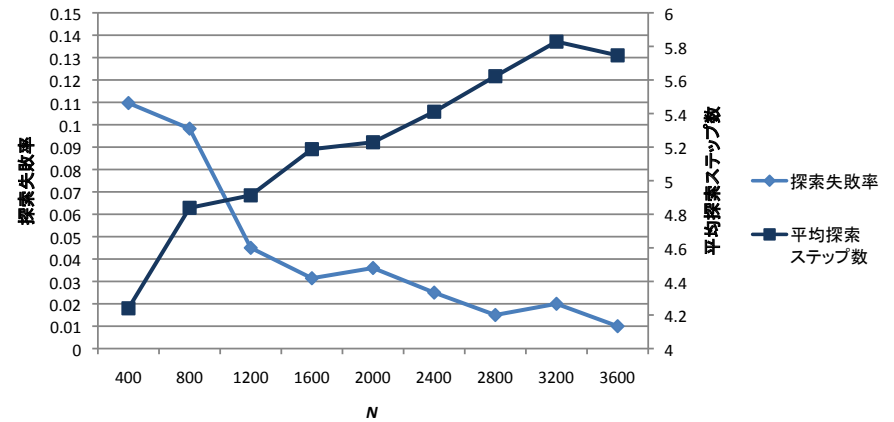


図 6 $F=40$ の場合の N に対する探索失敗率と平均探索ステップ数

N を表し、縦軸左、縦軸右はそれぞれ探索失敗率、平均探索ステップ数を表す。Chord を含む DHT の特徴として、ノード数の増加に伴いスケーラビリティ/耐故障性が優れる一方、探索ステップ数が増加する点が挙げられる。そのため、 F の値が同じであった場合、 N の値が小さい場合よりも大きい場合の方が探索失敗率が低下するが、探索ステップ数は増加することが分かる。また、 F の値が大きい方が、いずれの N においても探索失敗率が高いことがわかる。

次に、 N に対する一つの SN あたりの平均 ON 数を図 9 に示す。これは、 N を変化させた場合のクラスタの大きさの変化を意味し、 N の増加に伴い一つのクラスタの大きさが対数的に小さくなっていることがわかる。また、図 6, 7, 8 および図 9 から、SN が管理する ON 数が少ない(クラスタが小さい)ほど、SN の故障が発生した場合の探索失敗率が低下することがわかる。

(2) 結論

本研究の目標は、従来の SIP サーバにはないスケーラビリティ/耐故障性を確保しながら、SIP に P2P を適用した場合に発生するセッション確立時の遅延を減少させることである。そのため、本研究における DHT 参加ノード N の最適値は、探索失敗率と

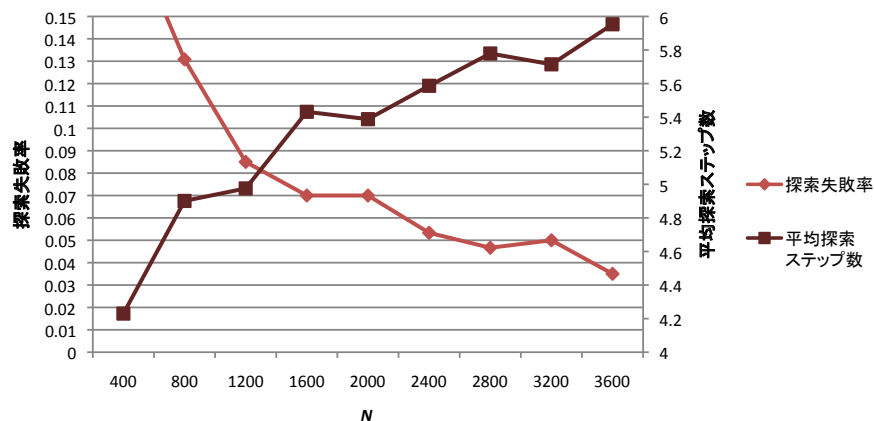


図 7 $F=80$ の場合の N に対する探索失敗率と平均探索ステップ数

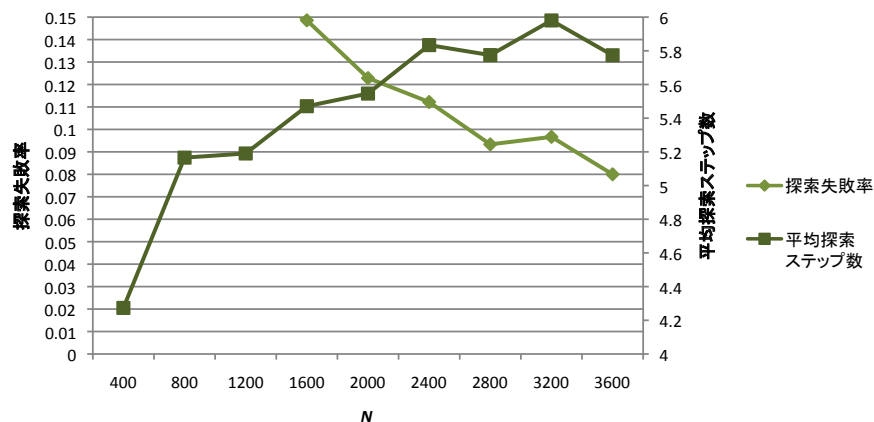


図 8 $F=120$ の場合の N に対する探索失敗率と平均探索ステップ数

平均探索ステップ数の交点と定義する。この場合、グラフのそれぞれの縦軸における最大値/最小値の決定が検討事項として挙げられる。今回、探索失敗率の最大値、最小値をそれぞれ 0.15, 0 とした。また、平均探索ステップ数の最大値、最小値をそれぞれ 6, 4 とした。これは、提案方式における探索失敗率、平均探索ステップ数の許容範

囲を、それぞれ 0.15, 6 としたためである。探索失敗はセッションを確立したい相手の IP アドレスを取得できない場合を示し、同時に IP 電話における呼損を意味する。IP 電話における呼損率は 0.15 以下と規定されているため^[1]、本提案方式における探索失敗率の最大値を 0.15 とした。また、提案方式のベースとなる Chord における平均探索ステップ数は、 $1/2\log_2 N$ となることがわかっている^[2]。そのため平均探索ステップ数の最大値、最小値をそれぞれ N の最大値、最小値と考え、 $1/2\log_2(3600) \approx 5.9$ 、 $1/2\log_2(400) \approx 4.3$ より、最大値、最小値をそれぞれ 6, 4 とした。

提案手法において、DHT 参加ノード数 N の最適値は故障ノード数 F に依存すると考えられる。例えば、図 6 において $F=40$ とした場合の最適値 N は、1000 ノード付近であると考えられる。一方、図 8 において $F=120$ とした場合の最適値 N は、2000 ノード付近であると考えられる。つまり、最適値 N は故障ノード数に左右され一意に定まらないことを意味し、故障ノード数 F が大きくなるにつれて最適値 N も大きくなることが予想される。このことから、SN が定期的に DHT ネットワークに参加するノード (= SN, クラスタ) 数を把握し、その数に応じて SN の離脱処理、および SN の新規参加処理を動的に行い、最適値 N を維持することが今後の課題として挙げられる。

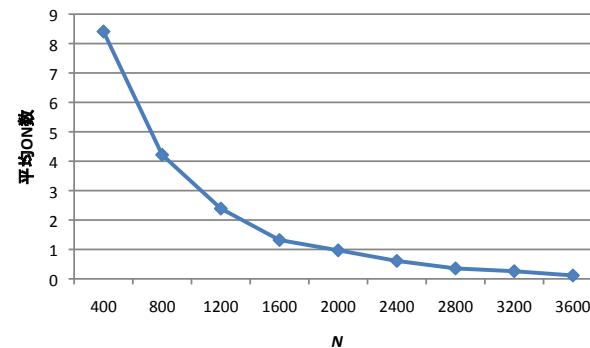


図 9 N に対する一つの SN あたりの平均 ON 数

5. おわりに

本稿では、P2P 型 SIP にクラスタリングを適用し P2P ネットワークを階層化することで、高いスケーラビリティ/耐故障性と短いセッション確立時間を同時に確保する SIP アドレス解決手法を提案した。また、P2P 型 SIP における DHT 参加ノード数に焦点を当て、スケーラビリティと耐故障性を保ちつつ、短い時間でセッション確立を行

う DHT 参加ノード数の最適値を, ns-2 によるシミュレーションによって検討した. その結果, DHT 参加ノード数の最適値は, 故障ノード数に左右されることがわかった. 今後は, 実環境で実際に用いることを想定して全ノード数や故障ノード数を設定し, DHT 参加ノード数の最適値を評価値として定義する予定である. また, DHT ネットワークに参加するノードが自立的に DHT 参加ノード数を把握し, 動的に DHT ネットワークへの参加/離脱を行うことで, DHT 参加ノード数の最適値を維持することが必要であると考え.

参考文献

- [1] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. R. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley and E. Schooler, "SIP: session initiation protocol," RFC3261, 2002.
- [2] I. Stoica, R. Morris, D. Karger, M. Frans Kaashoek and H. Balakrishnan, "Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications," Proc. of SIGCOMM, 2001.
- [3] P. Maymounkov and D. Mazieres, "Kademlia: A Peer-to-peer Information System Based on the XOR Metric," IPTPS02, pp.53-65, 2002.
- [4] A. Rowstron and P. Druschel, "Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems," Proc. of the IFIP/ACM Int. Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware), pp.329-350, 2001.
- [5] B. Y. Zhao, J. Kubiatowicz and A. D. Joseph, "Tapestry: An Infrastructure for Fault-tolerant Wide-area Location and Routing," Technical Report UCB/CSD-01-1141, 2001.
- [6] B. Meyer and M. Portmann, "Practical Performance Evaluation of Peer-to-Peer Internet Telephony Using SIP," Proc. of IEEE 8th Int. Conf. on Computer and Information Technology Workshops, pp. 130-135, 2008.
- [7] K. Singh and H. Schulzrinne, "Peer-to-peer internet telephony using SIP," Proc. of International Workshop on Network and Operating System support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), pp. 63-68, 2005.
- [8] A. Johnston, "SIP, P2P, and Internet Communications," Internet Draft draft-johnston-sipping-p2p-ipcom-01, Internet Engineering Task Force, 2005.
- [9] S. Saroiu, P. K. Gunmmadi and S. D. Gribble, "A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems," Technical Report UW-CSE-01-06-02, 2001.
- [10] The Network Simulator version 2 (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [11] 総務省: 「IP ネットワーク技術に関する研究会」報告書, http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020222_3.html