情報処理学会論文誌 Vol.57 No.3 976–988 (Mar. 2016)

ネットニュースシステムを利用した耐障害性の高い電子メールサービスの提案

石橋 由子[1,a)] 桝田 秀夫[2]

受付日 2015年6月22日, 採録日 2015年12月7日

概要：電子メールはインターネット上において手軽で最も利用されているコミュニケーションツールとして我々の生活において必要不可欠なものとなっている．メールは仕事や日常生活での情報交換だけにとどまらず，緊急時の連絡手段としても利用されている．しかしひとたび大規模な災害や重度の障害が発生すると，一定時間メールの送受信ができなくなり，非常に大きな混乱を招く恐れがある．そこで自組織のメールサービスを利用できなくなった場合でも，利用者が可能な限りメールの利用が可能となるシステムを提案する．本提案システムは，通常一体化しているケースが多いメールサーバのメールを受信する部分とスプール部分を分離し，これらを物理的に離れた場所に設置する．そして，複数箇所に設置されているスプール部分の同期を行う．スプール部分の同期を行うためにネットニュースプロトコルを利用する．メールサーバが受信したメール 1 通を 1 つのネットニュースプロトコルの記事に変換して宛先メールアドレスに対応したニュースグループに投稿する．投稿された記事はネットニュースの記事として同期を行う他のサーバに配送される．利用者はアクセス可能なネットニュースサーバにアクセスしてメールを読む．これにより，メールシステム障害時でも利用者はメールを受信することが可能となる．

キーワード：電子メール，ネットニュース，デザスタリカバリ，分散配置スプール

Proposal of Fault-tolerant E-mail Service Using NetNews System

Yoshiko Ishibashi[1,a)] Hideo Masuda[2]

Received: June 22, 2015, Accepted: December 7, 2015

Abstract: Email is one of the most popular and easy-to-use communication tools on the Internet. It is essential for our life these days. Email is a way to exchange information also in an emergency situation in addition to our business and daily life. Despite of that, once disasters or serious troubles occur, we cannot send/receive email for a period of time. It will make great confusion. In order to reduce the unavailable time as much as possible, we propose a system while the original server is in failure. The system consists of two subsystems, message receivers and message spoolers. Although these two subsystems are usually composed monolithically, we separate them and place them in distant sites. The Netnews Protocol is used to synchronize the contents of the message spools. Receiving an email message, the message receiver converts the message into a netnews article and submits it to a newsgroup corresponding to the destination address of the message. The submitted article is distributed to other servers by the netnews protocol. A user accesses an available netnews server and read his/her message. This scheme make it possible to read mail messages even when the mail system is out of order.

Keywords: Email, NetNews, disaster recovery, distributed spool

[1] 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Kyoto 606–8585, Japan
[2] 京都工芸繊維大学情報科学センター
Center for Information Science, Kyoto Institute of Technology, Kyoto 606–8585, Japan
[a)] y-isbs08@dsm.cis.kit.ac.jp

1. はじめに

メールは重要なコミュニケーションツールの 1 つとして私たちの仕事や生活に必要不可欠なものとなっている．メールは手軽に利用できるため，日常的な連絡や情報交換

だけでなく，緊急時の連絡手段としてもおおいに利用されている．しかし，阪神淡路大震災や東日本大震災のような甚大な被害をもたらす災害や，ハードウェアやソフトウェアの重大な障害が発生した場合（以下ではこれらをまとめて「障害時」という），自組織のメールサーバを 1 カ所で運用している環境では，長時間にわたりメールを利用できなくなる可能性がある．

これを避けるために，あらかじめメールを複数箇所に自動転送しておくという方法がある．障害時に自動転送先のうちいずれか 1 カ所にアクセスできれば，メールの受信が可能となる．しかしこの方法では，障害発生後に送られてきたメールを自動転送することができないうえ，常時メールを複数箇所に自動転送しておく必要があるため，大切な情報が複数箇所に蓄積されていくこととなり，セキュリティ上好ましいとはいえない．また，利用者側で複数の転送先メールアドレスを管理しなければならない．

そこで本論文では，障害時にメールを利用できなくなるという問題を解決するために，障害時であってもメールを利用できるシステムを提案する．さらに，障害時に本システムの稼働を開始するのではなく，つねに稼働させておき平常時および障害時に利用できるシステムとする．本提案では，受信したメールをネットニュースプロトコル（Network News Transfer Protocol）を使って遠隔地にあるサーバに配送し，サーバ間でメールの同期を行う．利用者はいずれかのネットニュースサーバにアクセスできればメールを閲覧することが可能となる．

以下，2 章で要求要件，3 章で提案システムの概要，4 章で提案システムの試作を述べ，5 章で関連研究，6 章で評価，7 章で考察，8 章で全体のまとめとする．

2. 要求要件

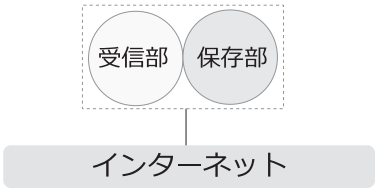
2.1 想定環境

通常時は，組織の管理者がメールシステムの運用・管理を行っているが，大規模な災害が発生した場合，広範囲にわたりライフラインが途絶え，ネットワークが寸断されてしまうと，管理者の手元にある機器やまわりのネットワークがまったく利用できない可能性がある．本論文では，このような場合を想定し，管理者が特別な操作をすることなく利用できるメールシステムの構築を目的としている．

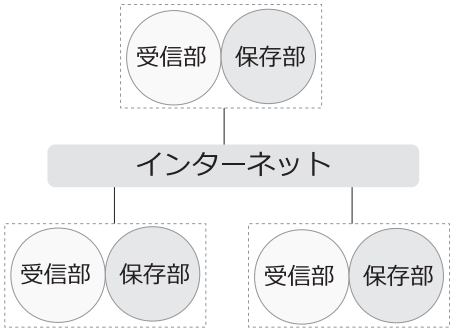
2.2 メールシステムのモデル化

メールサーバは，メールを受信する部分（以下「受信部」という）と受信したメールをスプールに保存する部分（以下「保存部」という）から構成されていると考えることができる．

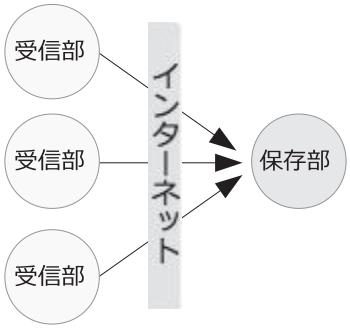
メールサーバを 1 台で運用している場合，**図 1** (a) に示すように，受信部と保存部は一体化された状態で管理・運用されている．メールサーバの設置場所に障害が発生する



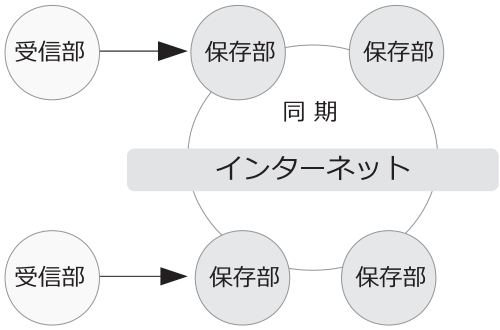
(a) 受信部と保存部を一体化して 1 カ所で管理



(b) 受信部と保存部を一体化して
物理的に離れた複数箇所に配置



(c) 受信部と保存部を分離して
保存部を 1 カ所で集中管理



(d) 受信部と保存部を分離して
保存部を複数箇所に配置し保存部間を同期

図 1 従来のメールシステムおよび提案するメールシステムのメール受信部分とメールボックス（保存部）の関連図

Fig. 1 Overview of the mail receiving part and mail-box part of the current system and our proposed system.

とメールサーバはメールを受信することができなくなる．メールサーバが複数台存在するがクラスタリング構成等により物理的に近接した場所に設置されている場合，メールサーバが 1 台の場合と同様に，設置場所に障害が発生すると以降のメールを受信することができなくなる．

これを回避するために，図 1 (b) に示すようにメールサーバを物理的に離れた複数箇所に配置すると，複数台あるメールサーバのいずれかがメールを受信することができれば，障害時であっても利用者はメールを受信することができる．しかし，メールはいずれか 1 台のメールサーバの保存部に格納されるため，メールサーバによって保存部のメールが異なることになる．これでは，利用者はすべてのメールサーバに接続してメールを読む必要があり，さらに，1 台のメールサーバに障害が発生するとそこに保存されていたメールを読むことができなくなる．

そこで，メールサーバの冗長性を保ちつつ，どのメールサーバに接続しても同じメールを読めるようにするため，図 1 (c) に示すようにメールサーバの受信部と保存部を分離し，受信部を複数箇所に配置し保存部を 1 カ所に配置すると，どのメールサーバに接続しても保存部には同じメールが格納されており，いずれかの受信部に障害が発生しても他の受信部がメールを受信し保存部に格納することができる．しかしこの方法では保存部が単一障害点となるため，保存部に障害が発生するとメールを受信することも閲覧することもできなくなる．

この問題を解決し，2.1 節で示した想定環境で動作するために，図 1 (d) に示すように受信部と保存部を分離した状態で，受信部も保存部も複数箇所に配置し，保存部間で同期をとることとした．これにより，単一障害点をなくすことができ，利用者はどのメールサーバに接続しても同じメールを読むことができる．また，受信部および保存部に障害が発生しても，他の受信部および保存部が稼働していればメールの受信および閲覧が可能となる．本論文では図 1 (d) のモデルが望ましいと考えている．

2.3 要求要件

2.2 節の図 1 (d) で示した提案モデルをシステム化するために求められる要求事項は次のとおりである．

［要求 1］受信したメールを保存部に格納し，複数の保存部間で同期をとること：

受信したメールは保存部に格納する．保存部は物理的に離れた箇所に設置されているので，利用者が複数箇所にあるいずれのサーバにアクセスしても同じメールを閲覧できるようにするために，保存部間で受信したメールの同期を行う．

［要求 2］障害により利用者がふだん利用しているメールサーバにアクセスできない場合でも，自分宛のメールを閲覧できること：

障害により，利用者がメールを受信する際に利用しているメールサーバにアクセスできない場合は，代替となる別のメールサーバにアクセスして利用者宛に届いたメールを閲覧できるようにする．

［要求 3］障害により通常受信用に指定されているメールサーバがメールを受信できない場合でも代替のメールサーバが受信できること：

障害時にメールサーバが自組織宛のメールを受信できない場合であっても，別のメールサーバが代替となってメールを受信し保存部に格納する．

［要求 4］複数箇所に配置している保存部のメールを，利用者本人以外が内容を読めないこと：

複数箇所に配置した保存部のメールは利用者本人だけが内容を確認できるものとする．他の利用者にメールの内容を知られてはならない．

［要求 5］障害時だけでなく平常時も利用できること：

障害時および平常時に利用できる機能としては，指定した受信者にメッセージを送ることができること，指定された受信者宛のメッセージを当該受信者が取り出すことができることの 2 つとする．

性能としては，平常時の配送遅延時間は 4 時間以内とする．一般的には，送信したメールを受信すべきメールサーバが受信しなかった場合，4 時間経過すると警告メールを送信者に返送する設定にしていることが多いので，配送遅延時間を 4 時間以内とする．一方，障害時の配送遅延時間とメールクライアントからメールボックスへのアクセス時間の合計値を 12 時間以内とする．人命救助をする際には災害発生から 72 時間を超えると生存が望めないといわれているが，国土交通省発行「阪神・淡路大震災の経験に学ぶ」[1] によると，災害発生から 24 時間経過すると生存率が大幅に下がることが分かる．そこでメッセージの往復にかかる時間を 24 時間以内とし，送信者が送信してから受信者が閲覧するまでにかかる時間を 24 時間の半分の 12 時間とした．

3. 提案システムの概要

本章では，提案するシステムの概要について述べる．

3.1 ネットニュースの概要

2.2 節の図 1 (d) のモデルを実現するために，本論文では複数箇所に設置された保存部間のメールを同期するための技術としてネットニュース [2] を利用する．

図 2 にニュースシステムの概要図を示す．ネットニュー

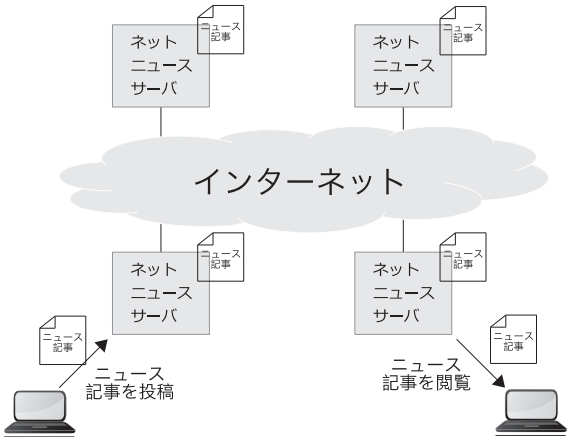


図 2 ニュースシステムの概要図
Fig. 2 Overview of NetNews System.

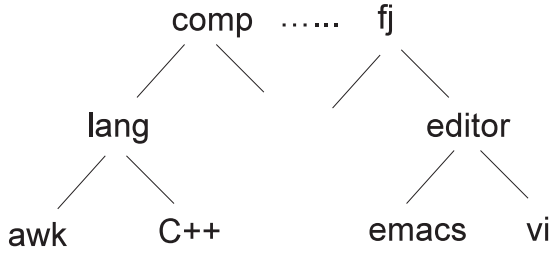


図 3 ニュースグループの構造
Fig. 3 Structure of Newsgroups.

スはインターネット初期の 1980 年後半から，メーリングリストや Web ベースの電子掲示板や SNS（Social Networking Service）が普及する 2000 年代半ばごろまで長年にわたり有用な情報交換の場として広く長く利用されてきた．現在でも国内外で一部の情報交換用としてネットニュースが利用されている．ネットニュースは，複数のサーバにまたがった掲示板システムである．記事（メッセージ）を蓄積しながら近隣のサーバにバケツリレー式に記事のコピーを配送することで，結果的にどのサーバにも同じ記事が保存されるという仕組みで動作している．

話題ごとにニュースグループが作成され，それぞれのニュースグループは階層構造になっている．ニュースグループは，カテゴリ別に階層構造になっている．**図 3** がニュースグループの一例である．ニュースグループ名は，comp や fj といった最上位のカテゴリから下位のカテゴリをドット “.” で区切って表現する．たとえば，図 3 の場合 comp.lang.c++ や fj.editor.emacs となる．comp.lang.c++は，計算機の中の言語の中の C++に関する話題に関するニュースグループになっている．記事がニュースサーバ内に保存される際には，comp.lang.c++の場合には $DIR/comp/lang/c++ の配下に 1 つの記事が 1 つのファイルとして保存される（$DIR は記事が保存されるトップディレクトリを示す）．

ニュースサーバ間で記事を送受信するプロトコルは NNTP（Network News Transfer Protocol）が主流となっている．隣接するニュースサーバ間で記事の送受信を行うが，送受信するニュースサーバのホスト名，送受信するニュースグループについてあらかじめ定義ファイル内に明記しておく．また記事には記事ごとにユニークな Message-ID が付与されており，各ニュースサーバは過去に受信した記事の Message-ID を記録している．記事を受信する際には，隣接するニュースサーバから NNTP プロトコルで接続され，定義されたホスト名であるか，定義されたニュースグループであるか，過去に受信した Message-ID と同じかどうかの確認を行う．これにより，許可されていないホストやニュースグループの記事や過去に受信した記事を受信しない仕組みとなっている．記事を送信する際には，定義ファイル内に記載されたホストに定義されたニュースグループの記事を NNTP プロトコルで隣接するニュースサーバに接続して配送を行う．

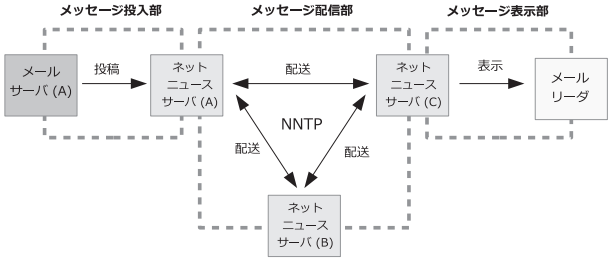


図 4 提案システムの概略図（メールサーバにアクセスできる場合）
Fig. 4 Overview of our proposed system when a mail server is available.

送信されてきた記事が条件に合致していればニュースサーバ内に保存していくため，到着の順番も保証していないうえ，すべての記事が届くことも保証していないが，記事が配送されてくる上流のサーバを複数配置する等により，極力記事の欠落を回避している．

3.2 提案システムの構成図

ネットニュースの仕組みを利用して保存部を同期するために，受信したメールをネットニュースの記事に変換し，ネットニュースシステムを使って記事（メール）を複数サーバに配送し，利用者が自分宛に届いたメールを閲覧するシステムを提案する．

図 4 に，メールサーバが稼働している場合のシステム概要図を示す．メッセージ投入部，メッセージ配信部，メッセージ表示部から構成されている．図中のメールサーバ (A) は，利用者がメール受信用に利用しているサーバである．メッセージ投入部では，メールサーバ (A) が受信したメールをニュース記事に変換してネットニュースサーバ (A) に投稿する．メッセージ配信部では，ネットニュースサーバ (A)，(B)，(C) の間でニュース記事を配送する．メッセージ表示部では，利用者宛のメールを表示する．

図 4 のメールサーバ (A) が障害によりメールを受信で

表 1 メールアドレスが user@subdomain.example.jp の場合のニュースグループ名
Table 1 Newsgroup Name for e-mail address in the case of user@subdomain.example.jp.

メール保存用ニュースグループ名	jp.example.subdomain.ee11cbb19052e40b07aac0ca060c23ee.mail
暗号化用鍵ファイル保存用ニュースグループ名	jp.example.subdomain.ee11cbb19052e40b07aac0ca060c23ee.key

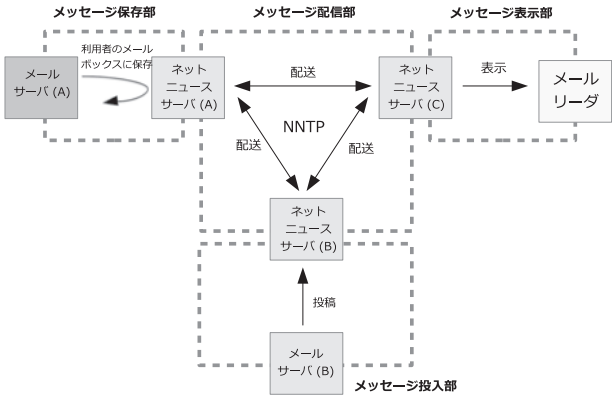


図 5 提案システムの概略図（メールサーバにアクセスできない場合）
Fig. 5 Overview of our proposed system when a mail server is unavailable.

きなくなった場合のシステム構成図を図 5 に示す．メールサーバ (A) に障害が発生した場合は，メールサーバ (A) の代替となるメールサーバ (B) がメールを受信しニュース記事に変換してネットニュースサーバ (B) に投稿する．投稿された記事は他のネットニュースサーバ (A)，(C) に配送される．メールサーバ (A) 復旧後は，障害発生中にメールサーバ (B) が受信しネットニュースサーバ (A) に配送したメールをネットニュースサーバ (A) がメールサーバ (A) の利用者用メーブボックスに保存する．

3.3 記事の暗号化と復号

ネットニュースの記事はアクセスした利用者が誰でも閲覧することができ，制限されていなければ誰でも投稿もできる仕組みになっている．一方，メールは私信であるため受信した本人以外は読めないようにしなければならない．そこでネットニュースサーバにアクセスした人が自分宛ではないメールを読めないようにするために，つまりネットニュースサーバの利用者から，他人が受信したメールの閲覧をできないようにするために，メールサーバに届いたメールをニュース記事として投稿する際に，受信者本人のみが解読できる方法で暗号化を行い，閲覧時に復号を行うこととする．

暗号化を行うために暗号化用鍵ファイルとペアとなる復号用鍵ファイルを作成する．暗号化用鍵ファイルはニュースグループに投稿しておく．また，復号用鍵ファイルのパスフレーズは，利用者がメールを受信する際に利用するパスワードと同じものにしておく．

3.4 メールアドレスとニュースグループのマッピング

受信したメールをニュース記事に変換して投稿するために，1 つのメールアドレスに 2 つのニュースグループを割り当てる．ニュースグループの 1 つは受信したメールを保存するため，もう 1 つは暗号化用鍵ファイルを保存するためである．

メールアドレスの @ の右側（ドメイン）はピリオドで区切った階層構造になっており，右端が上位階層で主に国を表し左端が一番下位の階層となっている．メールアドレスのドメイン部分の階層構造はニュースグループと逆の記述方法になっている．そこで，メールアドレスに対応したニュースグループ名は，メールアドレスの @ をピリオドに変え，左から右に向かって階層構造が上位から下位になるように並べ替えた後，右端にメール保存用のニュースグループには .mail を付加し，暗号化鍵ファイル保存用のニュースグループには .key を付加する．たとえば，メールアドレスが user@subdomain.example.jp の場合のニュースグループ名は jp.example.subdomain.user.mail と jp.example.subdomain.user.key とすることができる．ところで，ニュースグループ名は特に制限をかけていなければニュースサーバにアクセスした人の目に触れるため，ニュースグループ名の一覧を取得することでどのようなメールアドレスが存在するのか推測が可能となる．これを避けるために，メールアドレスの @ の左側の部分（ユーザパート）をハッシュ値に置き換えを行う．メールアドレスが user@subdomain.example.jp の場合のニュースグループ名は表 1 となる．

3.5 ニュースグループのモード

ニュースグループ作成時に，ニュースグループ名を指定するとともに，ニュースグループのモードを (1) 投稿できるニュースグループ，(2) 投稿できないニュースグループ，(3) 投稿できるがモデレータ機能を持っているニュースグループの 3 種類から選択する．(3) のモデレータ機能を付加すると，投稿されたニュース記事はすぐに投稿されず，いったん指定されたメールアドレス宛に送信される．

メール保存用ニュースグループは通常利用しているメールサーバや代替メールサーバで受信したメールをすぐに投稿するために (1) の投稿できるニュースグループとして作成する．暗号化鍵用ファイル保存用ニュースグループは，暗号化用鍵ファイルを更新する際に投稿を行う．いたずら等の目的で暗号化用鍵ファイルを更新されないために，(3) の投稿できるがモデレータ機能を持っているニュースグループとして作成する．

(3) のモデレータ付きニュースグループは，ヘッダに

Approved:が存在すれば指定のメールアドレス宛にメールを送信することなく，記事が投稿されてしまう．このことを知っていれば誰でもモデレータ付きニュースグループに記事を投稿することができる．ネットニュースにこれを回避する機能はない．そこで，この部分は実装できていないが，投稿されている暗号化用鍵ファイルが正しいかどうかを検証する方法として，暗号化用の鍵をニュースグループに投稿する際に PGP で署名を行い，鍵を利用する際に署名を検証する仕組みを導入すれば，投稿された暗号化用の鍵が正しいものであるかどうかの判断が可能となるのではないかと考えている．ニュースグループへの投稿そのものを抑制することは困難であるが，大量に投稿されることを避けるためには，非常に多くのニュースグループに投稿するマルチポストや短時間に多数の記事の投稿を抑制する仕組みが別途必要となると考えられる．

3.6 メッセージ投入部

メッセージ投入部は，受信したメールを暗号化して宛先メールアドレスに対応したニュースグループに投稿する．処理の流れは次のとおりである．

(1) 新着メールが届いていないか定期的にチェックを行い，届いていれば (2)，(3) を行う．
(2) メールの受信者の暗号化用鍵ファイルが保存されているニュースグループにアクセスし，暗号化用鍵ファイルを取り出す．
(3) 受信したメールを (2) で読み出した暗号化用鍵ファイルを使って暗号化し，受信者のメールアドレスに対応したニュースグループに投稿する．

3.7 メッセージ配信部

ネットニュース配送用アプリケーションを利用して，ニュースグループに投稿された記事を他のネットニュースサーバに配送する．

3.8 メッセージ表示部

利用者はネットニュースサーバに接続して，次の手順でメールを閲覧する．

(1) ニュースリーダを使ってニュースサーバにアクセスする．
(2) メールアドレスに対応したニュースグループに投稿された記事を，復号用鍵ファイルとパスワードを使って復号し閲覧する．

3.9 メッセージ保存部

図 5 中のメールサーバ (A) が障害によりメールを受信できない場合は，代替としてメールサーバ (B) がメールを受信しネットニュースサーバ (B) に投稿する．投稿されたニュース記事（メール）は，メッセージ配信部によりネットニュースサーバ (A) および (C) に配送される．メールサーバ (A) が障害復旧後は，ネットニュースサーバ (A) が受信したニュース記事を利用者の復号用鍵ファイルを使って復号し，利用者のメールボックスに保存する．

4. 提案システムの試作

提案システムのメッセージ投入部およびメッセージ保存部は Python 2.7 で記述した．各サーバの OS は CentOS 6.3，メールサーバは Dovecot 2.0.9 および Postfix 2.6.6，ネットニュースサーバは inn 2.5.4 [3]，ニュースリーダに Thunderbird 17.0.7 [4]，Thunderbird のアドオンに Enigmail 1.5.2，暗号化および復号に PGP を使用した．

4.1 準備

管理者が (a) ネームサーバへ MX レコードを追加，(b) ニュースグループの作成および (c) 暗号化用鍵ファイル・復号用鍵ファイルの作成を行っておく．

(a) ネームサーバへ MX レコードを追加

障害時に図 5 中の代替となるメールサーバ (B) がメールを受信できるようにするため，ネームサーバの MX レコードにメールサーバ (A) と代替メールサーバ (B) を登録する．メールサーバ (A) の優先度を高く代替となるメールサーバ (B) の優先度を低く設定する．これにより，通常時はメールサーバ (A) がメールを受信し，障害時は代替となるメールサーバ (B) がメールを受信することができる．

(b) ニュースグループの作成

ネットニュースサーバ上に，メール保存用ニュースグループと暗号化用鍵ファイル保存用ニュースグループを表 1 に示す命名規則に従って，図 4 のメールサーバ (A) に登録されている利用者のメールアドレス分のニュースグループを作成する．1 台のネットニュースサーバ上にニュースグループが作成されると，ネットニュースシステムの機能により，自動的に他のネットニュースサーバにも同じニュースグループが作成される．

(c) 暗号化用鍵ファイル・復号用鍵ファイルの作成

PGP による暗号化用鍵ファイルおよび復号用鍵ファイルは，利用者のパスワードを生成/変更するタイミングで作成する．鍵の種類は RSA，鍵長は 2,048 bit とする．暗号化用鍵ファイルは (b) で作成した専用のニュースグループに投稿しておく．投稿した暗号化用鍵ファイルを**図 6** に示す．復号用鍵ファイルは，利用者が閲覧時に使用するだけでなく，障害時に代替メールサーバが受信したメールを自組織のメールサーバのスプールに保存する際にも使用する．自組織のメールサーバ上の復号用鍵ファイルは，利用者のパスワードを使ってパスフレーズ入力済みとして扱うものとする．

図 6 投稿された暗号化用鍵ファイル
Fig. 6 Posted encryption key file.

4.2 メッセージ投入部

メッセージ投入部では，NNRP（Network News Reader Protocol）[5] を使ってメッセージを投稿する．メールサーバに届いた 1 通のメールごとに次の処理を行う．

(1) メールのヘッダから本文の最後まで，1 通のメール全体を取り出す．
(2) 表 1 に示すような受信者のメールアドレスに対応するメール保存用ニュースグループ名，暗号化用鍵ファイル保存用ニュースグループ名を決定する．ハッシュ値は md5 で算出する．
(3) (2) で決定した暗号化用鍵ファイル保存用ニュースグループにアクセスして最新の記事を入手し，暗号化用鍵を取り出す．
(4) (3) で入手した暗号化用鍵を使って (1) のメールを暗号化する．
(5) (2) で決定したメール保存用ニュースグループに (4) で作成した暗号化したメールを投稿する．

投稿した暗号化後のメールを図 **7** に示す．

4.3 メッセージ配信部

inn を使ってニュース記事を配送する．他のネットニュースサーバから配送されてきたどのような記事を受信するかという設定を incoming.conf ファイルで行う．実際には incoming.conf ファイルに接続を許可するニュースサーバのホスト名と受信するニュースグループのパターンを記載する．また newsfeeds ファイルで，他のニュースサーバにどの記事を送信するのかという設定を行う．具体的には newsfeeds ファイルに送信を許可するニュースサーバのホスト名や送信するニュースグループのパターン，送信時に使用するアプリケーション名を指定する．incomming.conf および newsfeeds とも，ニュースグループ名にはワイルドカードでの指定が可能となっているので，表 1 の場合は jp.example.subdomain.* と指定することができる．ニュースグループごとに記事の有効期間を日数で設定することができる．有効期間を過ぎた記事は自動的に削除される．記事の有効期間は，ストレージの空き容量やメールシステムが復旧するおおよその日数を推測して設定する．今回は，30 日とした．この設定により，30 日を経過した記事は自動的に削除される．

図 7 投稿された暗号化後のメール
Fig. 7 Posted encrypted message.

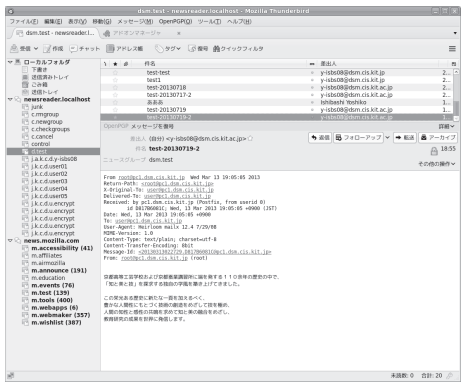


図 8 復号したメール
Fig. 8 Decoded message.

4.4 メッセージ表示部

ニュースを閲覧するためのニュースリーダとして Thunderbird を利用する．また PGP により暗号化されたデータを復号するために，Thunderbird のプラグインである Enigmail を利用する．これらを使って，指定されたニュースサーバに接続し，自分宛のメールが保存されたニュースグループにアクセスする．ニュース記事（メール）閲覧時に復号用鍵ファイルを指定しパスフレーズを入力すると，復号されたメールが表示される（図 **8**）．

4.5 メッセージ保存部

図 5 のネットニュースサーバ (A) にニュースログファイル投稿用のニュースグループを作成しておき，定期的にニュースログファイル$NEWS/log/news（$NEWS は inn

がインストールされたディレクトリを表す）を投稿する．ニュースログファイルには，記事が投稿された日付，記事のメッセージ ID，記事の送信元 FQDN（Fully Qualified Domain Name）名が保存されている．メッセージ ID はすべての記事でユニークになっている．

図 5 のメールサーバ (A) が復旧後，ニュースサーバ (A) のニュースログファイル投稿用のニュースグループから，最新のニュースログファイルを取り出す．ニュースログファイルより，記事の送信元 FQDN 名がニュースサーバ (A) ではない記事のメッセージ ID を取り出す．取り出されたメッセージ ID が，メールサーバ (A) が停止中に代替メールサーバが受信しネットニュースの記事として投稿されたものとなる．利用者のメール保存用ニュースグループ内に保存されている記事にアクセスし，先ほど取り出したメッセージ ID と合致すれば，記事の本文を利用者の秘密鍵で復号して利用者のメールボックスに保存する．この処理をすべての利用者について行う．

5. 関連研究

5.1 コンテンツ分散配置技術

受信したメールを複数のサーバで同期させるための技術的な方法が存在する．

5.1.1 メールの自動転送

受信したメールを自動転送し，複数のメールサーバ間でお互いにメールを持ち合う形態について考えてみる．たとえば 3 台あるメールサーバをそれぞれ A，B，C とする．メールサーバ A が受信したメールを B，C のメールサーバに転送する．メールサーバ B および C も同様に，受信したメールを他の 2 台のメールサーバに転送する．3 台のメールサーバが互いにメールを持ち合う構成となる．メールサーバに加えて，認証サーバのレプリカも複数台設置を行う．持ち合うサーバの台数が増えた場合，転送設定のルールを記述することが非常に困難なものになる．このような方法と本システムを比較すると，本システムは暗号化されたメールを利用者が持つ復号用鍵ファイルで復号する仕組みをとっているので認証サーバは不要であること，他組織のネットニュースサーバを利用することで自組織で管理するサーバを増やすことなくメールの保存先を増やすことができることが優位点としてあげられる．

5.1.2 rsync

rsync [6] は遠隔地のサーバにあるファイルやディレクトリを同期することができる．同期するデータを転送する際に，データの圧縮や暗号化を行うオプションを備えている．mailsync [7] や offlineIMAP [8] を利用すると，imap サーバ上にあるメールを同期することが可能となる．具体的には，imap サーバにログインして指定したフォルダのメールを別の imap サーバや手元の PC にコピーを保存することができる．rsync，mailsync，offlineIMAP を利用することで，メールサーバに保存されているデータを遠隔地のサーバや手元の PC に定期的に保存することができるが，これらの共通点として，保存先のサーバや認証サーバの管理が必要となる．サーバ台数が増えた場合，同期をとる組合せが増大し，同期のための通信路が非常に高くなる．

5.1.3 P2P オーバレイネットワーク

P2P オーバレイネットワーク上で動作するファイル共有アプリケーションを使用することでデータを同期することができる [9], [10], [11]．P2P オーバレイネットワークは，ネットワーク上に仮想的なネットワークを構築し，各ノードが直接通信を行う．サーバ・クライアント型のネットワークに比べ，一部のノードに負荷が集中しにくいという特徴を持つ．

P2P は，トラフィックの統制が効きにくくどのようなデータが配送されているかを把握することが困難な状態にある．一方，ネットニュースは 1980 年代後半から利用されてきた成熟したプロトコルであり，ニュースサーバどうしがニュース記事を配送したり利用者がニュースグループにアクセスして記事の閲覧や投稿を行ったりしている等，利用状況を把握しやすいプロトコルとなっているため，明示的に禁止している組織やプロバイダの存在を確認することはできなかった．

5.2 ネットニュースシステムを利用したデータ伝送

井澤の研究では，本研究と同様にデータ配送部分にネットニュースシステムを利用して，配送したいデータを共通鍵で暗号化しテキストデータにエンコード後ニュース記事として投稿し，ネットニュースシステムを使って遠隔のサーバに配送し，受信側ではデコード後共通鍵で復号してデータを取り出している [12]．取り出したデータはデータベースに保存している．これにより，データを投入するサーバと取り出すサーバで同じデータを保持することが可能となる．

本提案システムは，組織やグループで同じデータを持ち合うことが目的ではなく，利用者ごとにネットニュースサーバに接続して記事（メール）を閲覧することを目的としている．そのために，受信者のメールアドレスごとにニュースグループを分け，受信者本人のみが解読できる方法で暗号化を行っている．さらに，通常受信用に利用しているメールサーバに障害が発生した場合は，代替となる別のサーバがメールを受信してニュース記事として投稿するために，利用者ごとに公開鍵をあらかじめニュースグループ内に投稿することで，いつでも暗号化鍵を取り出せるようにしている．

5.3 メールサーバの冗長化

中筋らの研究では，メールサーバがメールを受け取り送信するまでの間にメールシステムに障害が発生した場合

にメールが消失する可能性が高い点に注目し，メールがキューに取り込まれるタイミングで同期をとることでメールの消失を回避するシステムを提案している [13]．金らの研究は，インターネットに複数の接続経路を持つマルチホーム環境において，ネットワークの経路制御の観点から，DNS（Domain Name System）サーバへの問合せに対する応答を複数の経路からそれぞれ異なる内容のものを返すことで最適な経路を選択する手法を提案している [14]．これらの研究はメールサーバ内の障害やメールサーバまでの経路の障害に対応することが主眼であって，いずれもメールサーバが稼働していることが前提として設計されているが，本研究では障害時にメールサーバにアクセスができない状況を想定しているためこの点が異なっている．

大隅らの研究では，物理的に離れた複数箇所に同じ仮想 IP アドレスを割り当てたサーバを設置し，経路情報を広告する際にメインのサーバはメトリックを小さくしバックアップのサーバはメトリックを大きくしておくことで通常時はメインのサーバに接続され障害時には自動的にバックアップサーバに接続されるよう設計されている [15]．この方法により，サーバ単体やネットワークの障害だけでなく，サーバが設置されている地域一帯が災害によりサービスできなくなった場合であっても，バックアップサーバが遠隔地に設置されていれば，遠隔地のバックアップサーバを使って継続してサービスを提供することができる．しかし，コンテンツの同期については触れられていないため，復旧時の対応が難しくなる．

6. 評価

6.1 保存部に格納したメールの同期

本システムを利用すると，メールサーバに到着したメールはネットニュースサーバに投稿された後，ネットニュースの仕組みを使って他のネットニュースサーバに配送される．このため，各ネットニュースサーバには同じメールが保存される．よって［要求 1］を満たすことができるといえる．

遠隔地にあるファイルを同期する他の手法として，rsync やメールの自動転送がある．いずれも同期するサーバの台数が多くなると，自組織で管理するサーバ数が増え管理コストが高くなる．一方，ネットニュースシステムを利用すると，データを分散配置するネットニュースサーバは，他組織が管理しているサーバを利用することも可能なため，管理コストはほとんどかからないというメリットがある．

6.2 自分宛のメールの閲覧

本システムを利用すると，メールシステムに障害が発生しアクセスできない状態であっても，ネットニュースサーバにアクセスできれば，利用者が最後にメールを受信した後に配送されたメールに加えて，障害が発生した後に送られてきたメールも読むことができるようになった．一方，本システムを利用しない場合でもメールの自動転送を行っていれば，メールシステムに障害が発生する前に送られてきたメールは転送先に自動的に転送されるので自動転送先で閲覧することができるが，障害発生後に送信されたメールは自動転送されないため閲覧することができない．さらに，本システムも自動転送も利用しなければ，利用者が最後にメールを受信した後に送られてきたメールを閲覧することができない．これらをまとめたものが**表 2** である．

表 2 利用するシステムと閲覧できるメール
Table 2 Systems used and viewable emails.

	メールを読んだ後に配送されてきたメール	メールシステムに障害が発生した後に送られてきたメール
本システムおよびメールの自動転送とも未使用	閲覧不可	閲覧不可
メールの自動転送利用時	自動転送先で閲覧可	自動転送されないため閲覧不可
本システム利用時	ネットニュースの保存期限内であれば閲覧可	ネットニュースの保存期限内であれば閲覧可

本システムを利用し，ネットニュースサーバに接続することができ，かつ，ネットニュース記事の保存期間内であれば，つねに受信したメールの閲覧が可能となり，［要求 2］，［要求 3］を満たすことができるといえる．

ふだんアクセスしているメールボックスが利用できない場合に自分宛のメールを閲覧するための他の手法として，メールを複数サーバに自動転送しておく方法がある．この方法により，障害時も自分宛のメールを閲覧できるが，障害発生以降のメールは読むことができない．一方，提案システムでは，障害発生以降のメールも読むことができるという点が優位点としてあげられる．

このシステムはメールの配送の仕組みに冗長性を与えたものである．配送の仕組みに追加の機能を持っており，本来のメールシステムでは送信できなかった状況であっても，ニュースシステムに専用の手順でメッセージを投入することで，相手にメールとして届けようとしてくれる機能が追加されている．これはメールシステムが障害で利用できない状況であっても配送を試みるところが新しく，自分宛のメールを読む手段が増えている．

6.3 他人宛のメールの閲覧

1 つのメールアドレス宛に届いたメールを 1 つのニュースグループの記事として保存している．アクセスしたニュースサーバのすべてのニュースグループを閲覧することができるので，他人宛のメールが保存されているニュースグループにもアクセスできるが，保存されているメールは暗号化されている．復号用鍵ファイルは利用者本人あるいは

メールサーバ内のみ保存されているため，他人宛のメールを復号して読み出すことができない．よって［要求 4］を満たすことができるといえる．

6.4 ネットニュースサーバの運用

関西大学発行の「学の実化」[16] によると，メール受信数が一番多い月が 2 月で 1,032,189 通（学部生），177,675 通（院生）で学生数が 28,325 人となっているので，1 日平均 43,209 通のメールを受信していることになる．総務省情報通信政策研究所発行の「我が国の情報流通量の指標体系と計量手法に関する報告書」[17] によると，メール 1 通のサイズを 18.5 Kbyte と仮定しているのでこの値を利用する．受信したメールをネットニュースに投稿する際には PGP による暗号化を行っている．暗号化処理により約 30%増量していると仮定すると，ネットニュースに投稿する 1 通の記事は 24.1 Kbyte となる．1 日平均 43,209 通のメールを受信しているので，ネットニュースの記事にすると 1 日平均 1.04 Gbyte となる．提案システムでは記事の有効期限を 30 日に設定しているので，31.2 Gbyte のデータを保有するディスクスペースがあれば学生数 28,000 名ほどの必要なメールをニュース記事として保存することができる．ネットニュースシステムの運用コストは，自組織でネットニュースシステムを管理する場合は，管理者が定期的にログを確認し，記事の送受信が行えているか，ディスクの空き容量やソフトウェアの更新作業が必要となる．

6.5 指定した受信者へのメッセージの送信，自分宛メッセージの取り出し

障害時および平常時に本システムに求められる要件のうち，機能に関しては指定した受信者にメッセージを送信できることと，自分宛のメッセージを取り出せることの 2 つである．ここでの障害時とは，通常利用しているメールボックスが保存されているサーバにアクセスできない場合と定義すると，代替となるメールサーバが稼働していれば，指定した受信者にメッセージを送信することは可能であり，また，いずれかのニュースサーバが稼働していれば自分宛のメッセージを取り出すことができる．平常時は，通常利用しているメールサーバを利用して指定した受信者にメッセージを送信することができ，また，自分宛のメッセージを取り出すこともできる．

性能について求められている要件は，平常時の配送遅延時間は 4 時間以内，障害時の配送遅延時間と閲覧時間の合計値は 12 時間以内である．6.4 節で 1 通のニュース記事のサイズを 24.1 Kbyte とした．現在稼働しているネットニュースサーバにアクセスし，複数グループに保存されている記事を無作為に 100 通取り出し，記事が配送されてきたサーバ名が保存されている Path: 行を抜き出したところ，平均で 10 のネットニュースサーバを経由していることが分かった．

18.5 Kbyte のメールが 24.1 Kbyte の記事としてネットニュースに投稿される際にかかる時間は 1 秒以内であった．10 のネットニュースサーバがバケツリレー式に 24.1 Kbyte の記事を配送した場合，途中の 9 カ所の回線速度を 100 Kbps，途中のネットニュースサーバがリアルタイムに記事を配送せず 10 分おきに配送していると仮定すると，始点のニュースサーバから終点のニュースサーバに到達するためには，サーバ間の伝送に 2 秒かかり，次のサーバに配送されるまで最大 10 分待つことになる．おおよそ 90 分あれば始点のニュースサーバから終点のニュースサーバに記事が配送されることになる．実際には，リアルタイムで記事を配送しているサーバも多いため，90 分よりもっと短い時間での配送が可能と考えられる．平常時の配送遅延時間の 4 時間以内を満たしており，さらに障害時の配送遅延時間とアクセス時間の合計値の 12 時間も満たしているといえる．よって［要求 5］を満たしているといえる．

7. 考察

7.1 通常時および障害時の運用

図 5 のメールサーバ (A)，(B) は自組織で運用を行う．ネットニュースサーバ (A)，(B)，(C) も自組織で運用を行ってもよいが，ネットニュースサーバ (B)，(C) は他組織で運用されているサーバを利用することも可能となっている．東日本大震災のような大規模災害時での利用やメールサーバの故障時に利用できることを想定しているので，ネットニュースサーバ (B)，(C) はネットワーク的にも物理的にも遠隔地に設置されることが望ましい．

利用者はいずれかのネットニュースサーバにアクセスしてメールを閲覧するので，すべてのネットニュースサーバが停止している場合はメールを閲覧することができないが，ネットニュースサーバが 1 台でも稼働していればメールの閲覧が可能となる．さらに，メールサーバが稼働していて，メールサーバが新着メールを投稿するネットニュースサーバが稼働していれば，利用者は障害発生前にメールサーバが受信したメールに加えて，障害発生後に受信したメールも閲覧することができる．図 5 を例にして，どのサーバが稼働していればどこまでのサービスを提供できるのかについてまとめたものが**表 3** である．

メールサーバ (A) が稼働している通常時は，利用者はメールサーバ (A) またはいずれかのネットニュースサーバにアクセスを行う．メールサーバ (A) が停止した場合は，利用者はいずれかのネットニュースサーバにアクセスを行う．メールサーバ (A) の管理者は，サーバ自身の障害であれば復旧に努めるが，大規模な災害により広範囲にネットワークが寸断された状態の場合は復旧を待つことになる．

一方で，セカンダリメールサーバを 1 台あるいは複数台用意し，メールサーバの送信待ちキューに保存されている

表 3 稼働しているサーバと提供可能なサービス
Table 3 Running servers and the services provided.

	稼働しているサーバ	提供できるサービス
(1)	メールサーバ (A) とネットニュースサーバ (A)	利用者は過去に受信したメールに加えて新着メールも閲覧できる
(2)	メールサーバ (B) とネットニュースサーバ (B)	同上
(3)	ネットニュースサーバ (A)(B)(C) のいずれか稼働，ただしメールサーバ (A)(B) とも停止	利用者はメールサーバ (A) または (B) が稼働している間に受信したメールを閲覧できるが，メールサーバ (A)，(B) ともがダウンしてから届いたメールは閲覧できない
(4)	ネットニュースサーバ (A)(B)(C) がすべて停止	利用者はメールを閲覧できない

利用者宛のメールを読む仕組みを提供する方法が考えられる．しかし，利用者に見せるためには認証サーバのレプリカを持つ必要があることや，どのセカンダリメールサーバの送信待ちキューに残っているかは利用者には簡単には分からないので，見つけ出すことが困難になる．

7.2 暗号化用鍵ファイル，復号用鍵ファイルの再作成

暗号化用鍵ファイルおよび復号用鍵ファイルを再作成した場合の処理について述べる．旧暗号化用鍵ファイルは，ネットニュースサーバの暗号化鍵ファイル保存用ニュースグループに保管されている．旧復号用鍵ファイルは利用者および図 5 のメールサーバ (A) で保管されている．メール保存用ニュースグループに保存されているメールは旧暗号化用鍵ファイルで暗号化されているので，ニュース記事（メール）を 1 通ずつ取り出し，旧復号用鍵ファイルで復号した後，新暗号化用鍵ファイルで暗号化を行い投稿する．旧暗号化用鍵ファイルで暗号化されたニュース記事は削除を行う．暗号化用鍵ファイルおよび復号用鍵ファイルの再作成や利用者が復号用鍵ファイルを入手する部分はまだ実装できていないので，今後実現していきたい．

7.3 記事の既読・未読管理

障害時に図 5 のネットニュースサーバのいずれかで閲覧したメールは，障害復旧後にメールサーバ (A) で新着メールとして再度閲覧することとなるが，どのようにすれば既読メールと見なせるかについて述べる．

ネットニュースのクライアントソフトは，ニュース記事に割り当てられた記事番号を利用して既読・未読の管理を行っている．記事番号はニュースサーバごとに発番されているため，同じニュース記事であってもネットニュースサーバが異なれば，記事番号が異なる．ニュース記事を投稿する際にすべてのニュース記事でユニークな Message-ID が自動的に付加され，以降書き換えられることはない．そこで，ネットニュースのクライアントソフトが持つ既読・未読を管理するデータベースに Message-ID の情報を追加し，何らかの方法で（例．ニュースグループに投稿する等）障害復旧時に図 5 のメールサーバ (A) が参照できるようにしておく．メールサーバ (A) がスプールに書き込む際に，あるいは，利用者がメールサーバ (A) のメールを受信する際に，既読であるという情報を付加できないかと考えているが，このあたりは今後の課題としたい．

7.4 メールサーバ障害時の切替え

提案システムでは，DNS の MX レコードに複数のメールサーバを登録しておき，利用者のメールボックスを保有するメールサーバの MX レコードは優先度を高く，障害時に代替となるメールサーバの優先度を低く設定しておく．メールサーバの障害時には，自動的に代替となるメールサーバにメールが届き，ネットニュースシステムにより各ネットニュースサーバにメールが分散配置されるので，利用者はいずれかのニュースサーバに接続して自分宛のメッセージを閲覧する．

一方，組織やプロバイダのメールサーバは，DNS や負荷分散装置等を使って複数台で運用されていることが多い．メールサーバ障害時は，障害のあったメールサーバを DNS の切替えや負荷分散装置からの切り離しにより，メールサービスの停止を回避していると考えられるが，負荷分散装置を含むメールシステム全体の障害や大規模災害発生時にメールサービスを継続することは難しいと予想される．

障害時のシステム切替え方法とアナウンス方法について，提案システムと組織やプロバイダのメールシステムの比較を行う．

障害時のシステムの切替え方法は，提案システムでは自動的に代替となるメールサーバがメールを受信するが，組織やプロバイダのメールシステムでは障害のあったメールサーバを負荷分散装置から切り離すことでサービスを継続できる場合もあれば，復旧するまでサービス停止を余儀なくされる場合もある．

障害時のアナウンス方法は，提案システムでは平常時に利用者に自分宛のメッセージが保存されているニュースサーバの情報を伝えておくことで障害が発生しても特にアナウンスを行う必要がないが，組織やプロバイダのメールシステムでは Web システム等を利用してアナウンスを行うこともあるが，障害の程度によりアナウンスが行えない場合も考えられる．

7.5 記事のウイルスチェック，SPAM チェック

新着メールがメールサーバに到着後，ウイルスチェックや SPAM チェックの判定が終了し，利用者のメールボックスに保存されるという流れになっていることが多い．利

用者のメールボックスに保存されるメール全体（ヘッダとメール本文）を本システムで取り出し暗号化してニュース記事として投稿している．そのため，既存のウイルスチェックおよびSPAMチェックサーバの処理を利用しつつ本システムを稼働させることができる．

7.6 メッセージを閲覧するクライアントソフト

ニュースサーバに自分宛に届いたメッセージを閲覧する際には，ニュースサーバに接続後，PGPによる復号が必要となる．本論文内では本機能を有するThunderbirdを利用した．本機能を有しないクライアントソフトでは，別途本機能に相当する仕組みの提供が必要となるため，今後の課題としたい．

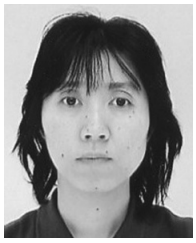
8. おわりに

本論文では，メールサーバの受信部と保存部を分離して受信部および保存部を複数箇所に設置し，保存部をインターネットを介して同期するモデルを考案した．また，保存部の同期にはネットニュースの仕組みを利用した．受信したメールは受信者本人のみが解読できる方法で暗号化されニュースの記事として投稿され，ニュースサーバに配送される．受信者はメール/ニュースクライアントソフトであるThunderbirdを使って自分宛のメールが保存されているニュースグループにアクセスし，暗号化されたメールを復号して閲覧するという流れになっている．メールシステムが障害により受信できなくなっている間に送られてきたメールも，代替となるメールサーバが受信し暗号化を行いニュース記事としてニュースサーバに投稿することで，メールシステムに障害が発生している間でも，ニュースサーバにアクセスすることができればメールを閲覧できることを確認した．本システムは保存部を単純に分散させるシステムとは異なり，いずれかのニュースサーバに接続することができれば，自分宛に送られているメールを読むことができるという機能を提供できている．本システムより，メールシステムの障害が利用者に与える影響を軽減することが可能となった．今後は実運用を行い，それによって得られた知見をもとにシステムの改善を行ってゆきたい．

謝辞 本研究はJSPS科研費26330104の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 国土交通省近畿地方整備局震災復興対策連絡会議：阪神・淡路大震災の経験に学ぶ，入手先 ⟨http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/daishinsai/index.html⟩（参照 2015-09-23）．
[2] Feather, C.: Network News Transfer Protocol (NNTP), RFC3977, IETF (2006).
[3] INN (IFull-featured, flexible and configurable news server), available from ⟨http://www.isc.org/software/inn⟩ (accessed 2015-06-01).
[4] Thunderbird, available from ⟨http://www.mozilla.jp/thunderbird/⟩ (accessed 2015-09-26).
[5] Spencer, H. and Lawrence, D.: Managing Usenet, O'Reilly Media (1998). 紀太 章, 田中 幸（訳）：Usenetネットニュース管理，オライリー・ジャパン (1999).
[6] rsync, available from ⟨http://rsync.samba.org/⟩ (accessed 2015-06-01).
[7] Mailsync, available from ⟨http://mailsync.sourceforge.net/⟩ (accessed 2015-06-01).
[8] OfflineIMAP, available from ⟨http://offlineimap.org/⟩ (accessed 2015-06-01).
[9] 江崎 浩（監修）：P2P教科書，インプレスR&D (2007).
[10] ネットワーク高度利用協議会，入手先 ⟨http://www.isc.org/software/inn⟩（参照 2015-06-01）．
[11] BitTorrent, available from ⟨http://www.bittorrent.com/⟩ (accessed 2015-06-01).
[12] 井澤志充：NetNewsを使った信頼性のあるデータ通信の技法，情報処理学会研究報告インターネットと運用技術，Vol.1998-DSM-009, No.36, pp.49–54 (1998).
[13] 中筋香里，泉 裕，齋藤彰一，塚田晃司，上原哲太郎，國枝義敏：メールシステムの信頼性に関する一考察，情報処理学会研究報告インターネットと運用技術，2004-DSM-034, pp.13–18 (2004).
[14] 金 勇，山井成良，岡山聖彦，清家 巧，中村素典：マルチホーム環境におけるDNS応答の多重化による自組織宛メール配送の動的経路選択手法，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.3, pp.998–1007 (2010).
[15] 大隅淑弘，山井成良，藤原崇起，岡山聖彦，河野圭太，稗田隆：IP aliasと経路制御を用いた複製サーバ冗長化構成，情報処理学会研究報告インターネットと運用技術（IOT），Vol.2012-IOT-18, No.4, pp.1–6 (2012).
[16] 学校法人関西大学自己点検・評価委員会（大学部門委員会）：関西大学「学の実化」，入手先 ⟨http://www.kansai-u.ac.jp/Jikotenken/pdf/databook2013.pdf⟩（参照 2015-09-23）．
[17] 総務省情報通信政策研究所：我が国の情報流通量の指標体系と計量手法に関する報告書，入手先 ⟨http://www.soumu.go.jp/main_content/000030652.pdf⟩（参照 2015-09-23）．



石橋 由子 （正会員）

2010年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科修士課程修了．2012年より京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士後期課程．1989年より京都大学にて勤務．電子情報通信学会会員．

桝田 秀夫 （正会員）

1998 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻情報工学分野博士後期課程修了．1998 年より大阪大学情報処理教育センター助手，2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター情報メディア教育研究部門助手を経て，2005 年より京都工芸繊維大学情報科学センター助教授，2007 年同准教授を経て，2015 年より京都工芸繊維大学教育研究基盤機構系教授．分散システムの運用技術に関する研究に従事．博士（工学）．平成 18 年情報処理学会山下記念研究賞受賞．電子情報通信学会，ACM 各会員．