平成24年度卒業論文

論文題目

ゲーム理論を用いた
標的型メール攻撃による防御戦略

神奈川大学　工学部 電子情報フロンティア学科
学籍番号　200902794
最上　亮

指導担当者　木下宏揚　教授

目 次

図 目 次

第1章　序論

1.1　背景

今ではネットワークの普及により，あらゆるところからインターネットに接続することができる環境になった．また，企業などのほぼすべての機能がシステム化され，それにより管理されるようになり，会社の機密情報から，顧客の個人情報などがネットワーク上に存在している．それらを狙った，サイバー攻撃に対し企業などは日々警戒しながら，対策を行わなければならない．そもそもサイバー攻撃とは，主にネットワークを経由して，行われるコンピュータやネットワーク，コンピュータ上に格納されている情報やデータ，システムを標的とした攻撃である．近年，そのサイバー攻撃の中で標的型メール攻撃が増加し，大企業や公的機関，各国の政府関連機関など様々な組織が情報窃取型の標的型メール攻撃の被害を受け、社会の関心を集めた．従来のような，不特定多数のコンピュータやサイトを狙った，システムの停止を目的とした「いたずら」的な攻撃とは違い，メールにより送られたウイルスがシステム内部に侵入し，スパイ活動をすることで，システム内部の情報が抜き取られてしまうものである．このような攻撃事例が，海外でも複数報告されており，日本では4年前に比べ6倍もの被害を受けているのが現状である．

1.2 問題提起

標的型メール攻撃の，一番の対策法としては，攻撃活動の上流で回避することが望ましい．攻撃活動の上流とは，なりすましメールに気付き，添付ファイルの開封やURLのクリックによるウイルス感染を防ぐことである．しかし，信頼できる企業や個人を偽った標的型メールや，巧みなソーシャルエンジニアリングや人間の心理等をもうまくついた攻撃に関しては，回避できないケースが生じる．そのため，今回はウイルスに感染してしまった状態についいて検討していくこととする．

1.3 提案モデル

標的型メール攻撃の対策としては，攻撃に対して適応的に防御していく必要があるため，プレイヤーの状況が逐次的に変化する意思決定問題の分析に効果的なゲーム理論を用いることにする．ゲーム理論とは，自分の行動が相手の利益・損失に影響し，相手の行動が自分の利益・損失に影響するという相互依存状況を分析するのに有効である．

現在サイバー攻撃における攻撃者，防御者の戦略をゲーム理論を用いてモデル化した研究がおこなわれているが，今回は個人情報に特化し，攻撃者は得られる利得の最大化を，防御者は損失の最小化を図るようなモデル化を提案する．

第2章　基礎知識

2.1　標的型メール攻撃

標的型メール攻撃とは、不特定多数をターゲットにした攻撃ではなく、特定の個人や企業をターゲットとした攻撃である。ソーシャルエンジニアリング的手法などを使い攻撃を仕掛ける．その動機として「金銭目的」や「組織活動の妨害」などがあげられ，金銭目的の場合，攻撃側は初めから組織の内部にある金銭価値のある情報を狙い，その企業の実施している対策を調べ上げ攻撃を仕掛けることが多い.

主な攻撃法としては、差出人を偽り信頼性の高いメールを送り、添付してあるファイルを開くことなどでウイルスに感染する。攻撃側は、遠隔操作により活動の妨害、個人情報を取得する。これが標的型メール攻撃である。

2.2 ゲーム理論

ゲーム理論では，囲碁，将棋のようなゲームから，政治，経済に至るまで，さまざまな問題をゲームとして式で表し検討する．この場合のゲームは，相手がいて成立し，そのゲームにはルールが存在し，そのルールにもとづいてプレイされる．例えば，経済学において，ライバル企業の行動が自社の利益を左右するように，自社の行動や利益が他の人々の行動の影響を受けていると考えることがふつうである．このとき，自分の最適な行動は他社の行動によって変化し，他の人々にとって最適な行動は自分の行動により変化する．このように、最適な戦略が相互に依存し，相手の戦略との駆け引きが生じるような状況をゲーム理論は分析対象としている．

ゲーム理論は経済学，政治学，社会学など社会科学における人間の社会的行動の相互依存関係を厳密に数学を用いて分析することを目標とした学問である．

2.3 戦略形ゲーム

戦略形ゲームは，ゲーム理論の中で最もシンプルかつ，多くの社会科学への応用がなされている方法である．戦略形ゲームは，プレイヤー集合，各プレイヤーのとることができる戦略の集合，利得関数によって表現する．

2.3.1 定義

戦略形 n 人ゲームの要素は

$$\langle N, \{S_i\}_{i \in N}, \{f_i\}_{i \in N} \rangle \tag{2.1}$$

で表される．ここで $N = \{1, 2, 3, \cdots, n\}$ はプレイヤー集合，S_i は戦略の集合，f_i は利得関数の集合である．

2.3.2 プレイヤー集合

ゲーム理論でのプレイヤーは，意思決定し行動する主体のことである．行動を決定する主体は，個人の場合もあるし，複数の個人からなる国家や政党などの組織も 1 人のプレイヤーとなる．このゲームは相手プレイヤーが存在してはじめて成立する．それは，1 対 1 だけではなく複数のプレイヤーでも成立するため，常にプレーヤーの数を明確にする必要がある．この場合のプレイヤー集合 $N = \{1, 2, 3, \cdots, n\}$ である．

2.3.3 戦略

各プレイヤーは常に何らかのとりうる行動を持っている．行動とは，ある状況における選ばれえる選択肢のことであり，どのような行動をとるかは，自然の法則や社会的条件によって決めるとする．このように，各プレイヤーは自分が選択できる行動から、行動計画を立てることができる．この行動の計画が戦略である．S_i はプレイヤー i の戦略の集合で表す．

2.3.4 利得

各プレイヤーが戦略を決定すると，それに応じて各プレイヤーの得ることができる利益が決定する．ゲーム理論ではこの利益のことを利得と呼ぶ．また，各プレーヤーの戦略と利得の関係を表す関数が利得関数である．しかし，ゲーム理論の特徴として，自分の利得は，自分のとる戦略だけでなく他のプレイヤーのとる戦略に関係し依存することに注意しなければならない．プレイヤー i の利得を π_i で表すとき，利得関数は $\pi_i = f_i(s_1, s_2, \cdots, s_n)(i = 1, 2, \cdots, n)$ のように表される．

（ここで，$s_1 \in S_1, s_2 \in S_2, \cdots, s_n \in S_n$ である．）

2.3.5 協力関係

すべてのプレイヤーは，さまざまな要因に従いながらも，自由に自己の判断にもとづいて行動する．その中でプレイヤー間の何らかの話し合いにもとづいて行動することも十分に可能である．コミュニケーションのあるゲームで，各プレイヤーがとるべき戦略を，他のプレイヤーと話し合いで合意のうえで決定するゲームを「協力ゲーム」といい，話し合いがなく，各自の独立な判断によって戦略を決定するゲームを「非協力ゲーム」という．

2.4 双行列ゲーム

双行列ゲームは，プレイヤーの数が2のときの，戦略形ゲームの一つである．このゲームの利得関数は，2つの要素を持つ利得ベクトルをセルとする行列として表現される．

定義

$| N |= 2$ の戦略形ゲームを双行列ゲームと呼ぶ．

双行列ゲームは，のように表される．ここで，a_{ij} はプレイヤー1が戦略 i を，プレイヤー2が戦略 j をとったときのプレイヤー1の得る利得を表しており，b_{ij} はプレイヤー2の利得を表している．また，m はプレイヤー1の戦略の数，l はプレイヤー2の戦略の数である．

1＼2	戦略1	戦略2	…	戦略l
戦略1	a_{11}, b_{11}	a_{12}, b_{12}	…	a_{1l}, b_{1l}
戦略2	a_{21}, b_{21}	a_{22}, b_{22}	…	a_{2l}, b_{2l}
⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
戦略m	a_{m1}, b_{m1}	a_{m2}, b_{m2}	…	a_{ml}, b_{ml}

図 2.1: 2人双行列ゲーム

2.5 支配戦略

2つの戦略を比較する基本的な関係の1つに，戦略の間の支配関係がある．これを基に戦略のより良い選択を行っていく．

2.5.1 戦略の強支配

他のプレイヤーの戦略が決まっている状態で考える．このとき，自分が持つ2つの戦略a, bを比較したとき，単純に比較して戦略aの利得が，戦略bの利得よりも大きいとき，戦略aをとったほうがよい．しかし，他のプレイヤーのとる戦略はさまざまに変わるので，比較は容易ではない．ただし，他のプレイヤーのとるすべての戦略の組に対して戦略aの利得が，戦略bの利得よりも大きいとき，比較が可能となり，戦略aをとるべきである．このとき戦略aは戦略bを強支配するという．言い換えると，戦略bをとるほうが有利な状況は絶対に起こらないため，強支配される戦略はとるべき出はない．

定義

$\bar{s_i} \in S_i$が$s_i \in S_i$を強支配する　$\Longleftrightarrow$ すべての$t_{-i} \in S_{-i}$に対して$f_i(\bar{s_i}, t_{-i}) > f_i(s_i, t_{-i})$.

n人戦略形ゲームにおける戦略の組$s = (s_1, s_2, \cdots, s_n) \in S_1 \times S_2 \times \cdots \times S_n$において，プレイヤー$i$だけが戦略を$s_i$から$s_i' \in S_i$に変更したときの戦略の組を$(s_i', s_{-i})$と表現する．ここで，$s_{-i} \in S_{-i} = S_1 \times S_2 \times \cdots \times S_{-1} \times S_{i+1} \times \cdots \times S_n$とする．さらに，$s = (s_i, s_{-i})$と表す．

2.5.2 逐次消去均衡

戦略間の支配関係により戦略ゲームの解をもとめることができる．しかし，自分がそのような行動原理によって戦略を選択するのであれば，当然相手もその行動をとると予想できる．また，ゲーム理論の特徴は相手も自分と同じように合理的であるから，相手も合理的な行動をとると仮定できるため，より洗礼された戦略をとることを想定することができる．このように，すべてのプレイヤーは自分の戦略の中から支配される戦略を削除するプロセスを戦略の逐次消去と呼ぶ．

これを繰り返し消去された戦略を取り除くことによって，縮小された戦略形ゲームができる．このプロセスを続け，最終的に残された戦略の組を戦略の逐次消去による結果と呼ぶ．

このとき，戦略の逐次消去による結果が，ただ1つの戦略の組になる場合がある．これを逐次消去均衡と呼ぶ．

2.5.3 ナッシュ均衡

最適反応戦略

逐次消去のプロセスを考えた場合，n人非協力ゲームの戦略の組(s_i, s_{-i})において，自分のi以外の戦略の組$s_{-i} \in S_{-i}$に対し，条件

$$f_i(s_i, s_{-i}) \geq f_i(t, s_{-i}) \forall t \in S_i \tag{2.2}$$

を満たす戦略s_iを，戦略の組s_{-i}に対するプレイヤーiの最適反応あるいは，最適反応戦略と呼ぶ．

ナッシュ均衡

互いにほかのプレイヤーの戦略に対して最適反応になっている戦略の組のことをナッシュ均衡と呼ぶ．

定義

戦略の組 $s = (s_i, s_{-i})$ が以下の条件を満たすとき，ナッシュ均衡と呼ぶ.

$$f_i(s_i, s_{-i}) \geq f_i(t, s_{-i}) \forall t \in S_i, \forall i \in N \tag{2.3}$$

ナッシュ均衡を構成する戦略を，ナッシュ均衡戦略と呼び，他の人のある戦略の組と組み合わせてナッシュ均衡を構成することができる戦略である.

ナッシュ均衡は，自分の戦略は相手の戦略の組に対する最適反応になっているので，相手が戦略を変えない限り，自分は戦略を換える要因をもたない.

2.6 展開形ゲーム

今回は，さまざまなゲームを表現する方法の中から，展開形ゲームを使うこととする．展開形ゲームとは，プレイヤーの意思決定が逐次的な場合の問題分析に有効な表現方法である．樹形図を用いた表現方法であるため，特に，プレイヤーの持つ情報の構造を明確に表現するのに適している．

2.6.1 展開形ゲーム

展開形ゲームは，プレイヤーの可能な行動選択を図2.2のように樹形図を用いて表現するゲームの表現方法で，木の分岐点でプレイヤーは，選択肢を選択する．始点の選択肢から始まり，終点である頂点に到達することでゲームは終了する．

一般的に，展開形ゲーム Γ は4つの要素 $\langle K, P, U, h \rangle$ で表される．K はゲームの木，P はプレイヤー分割，U は情報構造，h は利得関数を表す．

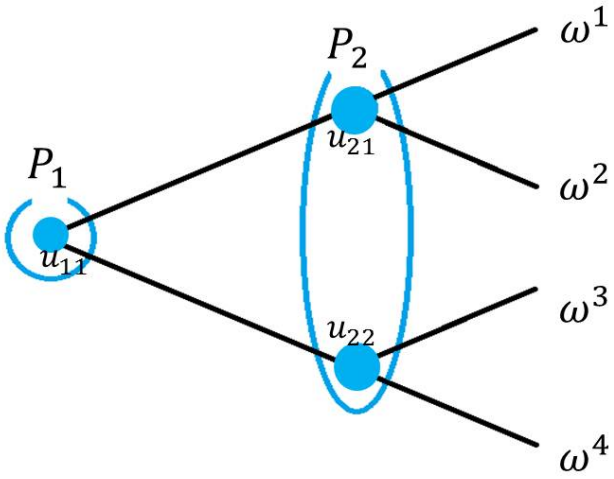

図 2.2: 一般的な2人展開形ゲーム

プレイヤー分割

各手番において，プレイヤー1人のみが戦略を選択することができるが，そのプレイヤーを規定するのがプレイヤー分割P=[P_1，P_2，$\cdots$，P_n]である．

すなわち，手番の集合は各プレイヤーiの手番の集合P_iに分割される．したがって，

$$P_1 \cup \cdots \cup P_n = M \tag{2.4}$$

$$P_k \cap P_j = \emptyset (j \neq k) \tag{2.5}$$

が成り立つ．ただし，Mはゲームの木におけるすべての手番である．

情報構造

情報構造U=[U_1，U_2，$\cdots$，U_n]は，プレイヤーが選択肢を決定する際に得ることのできる情報を表している．ここでプレイヤーiの情報集合$u_{ik} \in U_i$はiの手番の部分集合であり，その情報集合に属する各手番の選択肢の数は同じである．

利得関数

各頂点ωに各プレイヤーの得る利得のベクトル$(h_1(\omega)$，$h_2(\omega)2$，$\cdots$，$h_n(\omega))$を対応させる関数$h = (h_1, h_2, \cdots, h_n)$を利得関数と呼ぶ．利得は，1つのプレイに対し必ず1つの頂点が対応するため，全員の利得が存在する．

2.6.2 展開形ゲームにおける戦略

逐次的に意思決定が行われる展開型ゲームにおいて，各情報集合で選択される選択肢を局所純戦略と呼ぶ．また，プレイヤーはゲーム開始時に全体の行動計画を立てたとする．このように，プレイヤーが各情報集合において，どのような局所選択をとるかを計画した行動スケジュールを，純戦略と呼ぶ.

プレイヤーは純戦略に確率を与えることができ，純戦略に確率分布を与えたものを混合戦略と呼ぶ．各プレイヤーが純戦略あるいは混合戦略を選ぶと，各頂点に到達する確率が定まり，それに対応する利得を基に，各プレイヤーの期待利得を求めることができる.

2.6.3 期待利得

混合ナッシュ均衡

$$H_i(q_1, q_2, \cdots, q_n) = \sum_{\pi_1 \in \prod_1} \cdots \sum_{\pi_n \in \prod_n} (\prod_{i=1}^{n} q_i(\pi_i)) h_i(\omega(\pi_1, \cdots, \pi_n) \quad (2.6)$$

と表されるので，混合戦略ナッシュ均衡 $(q_1^*, \cdots q_n^*)$ は

$$H_i(q_i^*, q_{-i}^*) \geq H_i(q_i, q_{-i}^*) \forall q_i, \forall i \in N \quad (2.7)$$

で表される.

行動ナッシュ均衡

$$\hat{H}_i(b_1, b_2, \cdots, b_n) = \sum_{\omega \in W} \prod_{i=1}^{n} \prod_{e \in E_i(\omega)} b_i(e) h_i(\omega) \quad (2.8)$$

と表されるので，行動戦略ナッシュ均衡 $(b_1^*, \cdots b_n^*)$ は，

$$\hat{H}_i^*(b_1^*, b_{-i}^*) \geq H_i^*(b_i, b_i^*) \forall b_i, \forall i \in N \quad (2.9)$$

で表される.

2.7 繰り返しゲーム

繰り返しゲームとは，何度も切り替えし行われるゲームをそれ自体1つのゲームとしてみたものである．

2.7.1 繰り返し n 人ゲーム

戦略形 n 人ゲームを

$$G = \langle N, \{A_i\}_{i \in N}, \{g_i\}_{i \in N} \rangle \tag{2.10}$$

であるとする．

ここで，戦略形ゲーム G を成分ゲームと呼び，A_i はプレイヤー i の純戦略の集合であり，その要素を $a_i \in A_i$ で表す．g_i は利得関数であり，この戦略形ゲームを有限回切り替えすこととする．各プレイヤーの純戦略の組を $a = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$ と表し，純戦略の組の集合を $A = A_1 \times A_2 \times \cdots \times A_n$ で表す．

2.7.2 有限繰り返しゲーム

成分ゲームが T 回繰り返されるゲームとすると，このとき A の t 個の直積集合 $A^t = A \quad \times A \times \cdots \times A(t\text{回})$ の要素 a^t は，純戦略の組の列である．各プレイヤーの $t+1$ 回目の成分ゲームは，その列の t 回目の純戦略の履歴をもとに決定する．プレイヤー i の純戦略を $s_i = \{s_i^t\}_{t=1}^T$ とすると，各 $t = 1, 2, \cdots, T$ に対し，s_i^t は A^{t-1} から A_i への関数である．

第3章　提案手法

3.1　ゲーム理論

今回モデルは，ゲーム理論の，自分の行動が相手の利益・損失に影響し，また相手の行動が自分の利益・損失に影響するという相互依存状況を分析し定式化をおこない検討することにする．これにより，事前に計算を行うことができ，ある程度かかるコストを想定することができるため，サイバー攻撃を効果的に防ぐことができる．

3.2 相互依存関係

1. プレイヤー数は2人

   攻撃側はプレイヤーA，防御側はプレイヤーB

2. 交渉なしの非協力ゲーム

   攻撃側と防御側の協力関係は存在しない

3. ゲーム理論を使った展開形ゲーム

   攻撃側は攻撃策を，防御側は防御策を，時系列的に逐次的選択する

4. 繰り返しのあるゲーム

   お互いに攻撃策，防御策を1つずつ選択し実施する行為を1ラウンドとし，サイバー攻撃が終了するまでラウンドを繰り返す

5. 情報の共有知識について

   攻撃側と防御側が実施する攻撃策および防御策，またその攻撃策に対する防御策の有効性は，お互いの共有知識とする

3.3 利得の条件

通常ゲーム理論は同じ価値観で利得を得るゲームを扱う．しかし，今回のような情報関係の場合，攻撃側，防御側の収益やコストなどの価値観は異なる．個人情報で考えると，攻撃側は1件につきa円で売ることができるとする．しかし，防御側の個人情報漏えいは会社の信頼を失うことにつながるため，価値の相違が生まれる．また実施コストに関しても，攻撃側の捕まるリスクなども含めるため，両者の価値観の同質性が成立することは難しい．そのため，攻撃者の目的として，情報を売買し収入を得たり，経済的なねらいを持つことが多いため金銭換算した場合で考えることとする．

3.4 モデル化の条件

3.4.1 意思決定

攻撃側は，標的型メール攻撃により何らかの収益を得ようとする．防御側は，その攻撃策に必ず防御するとする．その中で，攻撃側は攻撃者利得が最大となるように意思決定し，防御側はサイバー攻撃が発生時の防御者損失が最小となるよう意思決定する．

3.4.2 標的型メール攻撃の開始と終了条件

互いに攻撃と防御をおこなったものを1ラウンドとし，各ラウンドの開始は，必ず攻撃から開始するものとし時系列に展開される．ここで攻撃の終了条件を定める．

1. 条件1

   攻撃側のコストの累積値が設定していた閾値を超えた場合，攻撃中止

2. 条件2

   攻撃者利益が見込めない場合または攻撃者利益の最大値がゼロもしくはマイナスになった場合，攻撃中止

3. 条件3

   攻撃側が可能な攻撃策をすべて実施してしまった場合，攻撃中止

以上の条件1，2，3の場合攻撃を中止し，ゲーム終了とする．

3.4.3 攻撃策と攻撃者収益

すべての攻撃策には，防御策が必ず存在する．攻撃成功となるのは，防御策の対応が遅れた時であり，対応が遅れれば遅れるほど攻撃が成功する確率は高くなり，攻撃が成功したときのみ攻撃者収益を得ることができる．また，攻撃策は各ラウンドで常に新しい攻撃が実施されるため，過去に行った攻撃は繰り返し実施されることはないとする．

3.4.4 防御策と防御者逸失

防御側は，攻撃が成功した際，防御者逸失を負うため，防御側は攻撃を効果的に防げるような防御策の選択を行う．その中で，各ラウンドで実施された防御策は，それ以降のラウンドでも有効な場合がある．過去のラウンドで実施した防御策が新しい攻撃策に有効な場合，そのラウンドで新しい防御策は実施されない．そのため，防御策は各ラウンドで実施されない場合もあり，また1つの防御策で，複数の攻撃策を防御することができる．

3.5 モデル化

攻撃者利得 $\lambda(r,x)$ は，攻撃者収益 $E(i)$，攻撃実施コスト $C(x)$，攻撃成功確率 ω_{xy} から決定し，同様に防御者損失 $\mu(r,y)$ は，攻撃が成功した時に失う財産 $F(j)$，防御実施コスト $D(y)$，攻撃成功確率 ω_{xy} から決まるものとする．

3.5.1 攻撃側意思決定

$$\alpha(r) = \{x | x \in m_0 - m_r, \max(\lambda(r,x))\} \tag{3.1}$$

$$\lambda(r,x) = E(i) \times \omega_{xy} - C(x) \tag{3.2}$$

$$E(i) = a \times i \tag{3.3}$$

パラメータ

x ： 攻撃策の選択肢
a ： 個人情報 1 件の金額
i ： 取得できた人数
m_0 ： 攻撃開始時の攻撃策の母集合
m_r ： 第 r ラウンドより前に行われた攻撃策の集合

3.5.2 防御側意思決定

$$\beta(r) = \{y | y \in n_0, \min(\mu(r, y))\} \tag{3.4}$$

$y \in n_0 - n_r$ のとき

$$\mu(r, y) = F(j) \times \omega_{xy} \times T_{\alpha(r)y} + D(y) \tag{3.5}$$

$$F(j) = a \times i \tag{3.6}$$

$y \in n_r$ のとき

$$\mu(r, y) = F(j) \times \omega_{xy} \times T_{\alpha(r)y} \times \quad S \tag{3.7}$$

防御策は，過去のラウンドに実施された防御策が新しい攻撃策にも有効な場合，新しい防御策は実施されない.（S : 過去のラウンドに防御が成功していれば0，失敗していれば1）

パラメータ

y : 防御策の選択肢
a : 個人情報1件の金額
i : 取得できた人数
n_0 : 防御開始時の防御策の母集合
n_r : 第r ラウンドより前に行われた防御策の集合
$T_{\alpha(r)y}$: 攻撃策に対して防御策が有効であれば1、無効ならば0

第4章　結果

今回ランダムに値を与え，攻撃側意思決定，防御側意思決定を基に計算を行った.

1. $r = X = Y = 3$
   (ラウンド数，攻撃策，防御策の選択肢はともに3つである）

2. 個人情報1件の金額　$a = 50$

3. 取得できた人数　$j = i = 1000$

4. 攻撃策xの実施コスト　$C(x)$
   $C(1) = 600$
   $C(2) = 400$
   $C(3) = 200$
   (攻撃コストの閾値　1000）

5. 防御策yの実施コスト　$D(y)$
   $D(1) = 1200$
   $D(2) = 800$
   $D(3) = 400$

6. 攻撃成功確率　ω_{xy}
   $\omega_{11} = 0.05$
   $\omega_{22} = 0.7$
   $\omega_{33} = 0.2$
   ($x \neq y$ のときの成功確率は 0 とする)

7. 攻撃の有効性　$T_{\alpha(r)y}$
   (今回，$\alpha(r) = y$ の場合 1，$\alpha(r) \neq y$ の場合 0)

計算結果

適用結果を示す．第 1 ラウンドでは，攻撃策 2 が実施され，そのに対し防御策 2 が対応するが，攻撃が成功する．第 2 ラウンドでは，攻撃策 3 が実施され，防御策 3 が対応するが，攻撃は成功する．しかし，第 3 ラウンドで攻撃策 1 を行おうとするが，閾値を超え終了条件にあてはまるため攻撃することなく，サイバー攻撃は終了する．

その結果，防御側は防御策 1 を実施しなかったため，1200 のコストを削減することができた．

第5章　結論

本論文では，ゲーム理論を使った標的型メール攻撃に対する，逐次的な意思決定問題について検討した．ゲーム理論を使うことで，最適化戦略を選択することができ，攻撃側は利得最大，防御側は損失を最小に抑える戦略を求めることができた．

課題として，今回は比較的簡単な式を使いゲーム理論を解いてみたため，パラメータが多い式を検討することができなかった．しかし，ゲームのルールが増え相互依存関係が複雑になったとしても，意思決定モデルの定式化が複雑になるが，必ず最適化戦略を導き出せるはずである．

第6章　質疑応答

防御策が存在しない攻撃を受けたときはどうするのか?
前提として，すべての攻撃策に防御策が存在する.

第7章　謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心にご指導してくださった木下宏揚教授，宮田純子氏に心から感謝致します．また，有意義な研究生活を送らさせていただいた木下研究室の皆様に感謝致します．

2013年2月
最上　亮

参考文献

[1] 船木由喜彦，ゲーム理論講義，新世社，2012 年 2 月

[2] 佐藤直，渡邉均，サイバー攻撃・防御戦略の動的意思決定モデルの提案，信学技報, vol. 111, no. 495, ICSS2011-47, pp. 49-54, 2012 年 3 月

[3] 鈴木光男，ゲーム理論入門，新装版，2003 年 2 月

[4] 岡田章，ゲーム理論・入門，有斐閣，2008 年

[5] 情報処理推進機構，標的型サイバー攻撃の事例分析と対策レポート，2012 年 1 月

[6] 船木由喜彦，演習ゲーム理論，新世社，2004 年 7 月

[7] 岡田章，ゲーム理論 [新版]，有斐閣，2011 年 11 月