一般財団法人 関西空港調査会
2019 年度 調査研究助成事業

隣接空港間の競争と協調が空港事業の資金調達へ与える影響

成果報告書

2020 年 3 月

上智大学　石井昌宏
日本大学　手塚広一郎
中央大学　石坂元一
帝京大学　橋本悟

目次

隣接空港間の競争と協調が空港事業の資金調達へ与える影響

石井昌宏
上智大学 経済学部

手塚広一郎
日本大学 経済学部

石坂元一
中央大学 商学部

橋本悟
帝京大学 経済学部

2020/3/31

概 要

本研究においては, 隣接する 2 つの空港間の協調が空港の経営戦略 (事業投資) へ与える影響を明らかにすることを試みた. 特に, 空港の投資とその投資のために発行される債券の価格あるいはそのクレジット・スプレッドとの関係の解明を目的とした. 隣接 2 空港間の協調を分析するためのモデル, および, 空港のレベニュー債を利用した資金調達を考察するモデルを構築した. いずれも非協力ゲームであり, その一部については Nash 均衡を求めた. そして, これらのモデルから, 空港間の協調が空港利用料へもたらす効果, クレジット・スプレッドと空港の投資額, 協調による需要安定化と投資額のそれぞれに関する若干のインプリケーションを得た.

1 イントロダクション

一国の経済活動に対して空港というインフラストラクチャーが持つ影響力を無視できないことは明らかであろう. しかし, 2018 年度の政府債務残高が対 GDP 比 2 倍を超えた日本において, 国や地方自治体の財源のみに依存しながら, 空港の増設, あるいは, 既存空港の能力拡大や整備を押し進めることが可能ということは難しいであろう. この状況に加えて, 2011 年 7 月に国土交通省が発表した「空港経営改革の実現に向けて (空港運営のあり方に関する検討会報告書)」に代表されるように, 経営効率性の向上が空港に対して求められている. この空港の経営効率性向上を達成するための方策として, 主に 2 つの方向が考えられる. 第 1 の方向は各空港においてより効率性を高めることである. もう 1 つの方向は複数空港の経営を統合し, その範囲で最適化を図ることである. 特に, 同一経済圏に含

まれる複数空港を対象とする経営統合はその効果も大きいように思われる. 周知のように, 2012 年に関西国際空港と大阪国際空港の経営統合がなされ, その後, コンセッション方式の下, 2016 年に関西エアポート株式会社に運営権が売却された. 2018 年に売却された神戸空港も含め, 同社による三位一体の経営がなされている. これは経営統合による効率化を意図した主たる例である.

ここで, 本研究の 2 空港間の協調に関連する既存研究として, Dong et al.[10], Asadabadi and Miller-Hooks[1], Dong et al.[11], Kavirathna et al.[22] を挙げておく. いずれも港湾間の競争と協調を分析対象としている. しかし, そのモデルのアイデアは空港間の競争と協調にも転用可能である.

Dong et al.[10], Dong et al.[11] は異なるターミナルあるいは港湾間における容量に関する協調がその利用料金の設定および需要量へ与える効果を分析している. Asadabadi and Miller-Hooks[1], Kavirathna et al.[22] ではターミナルあるいは港湾間における投資に関する協調が各ターミナル・港湾の需要量や利潤へ影響が分析されている.

さらに, 空港の容量投資に関する既存研究として, Xiao et al.[26] と Xiao et al.[27] を挙げておく. いずれも需要の不確実性を考慮している. Xiao et al.[27] では, 航空会社と空港との関係も分析対象としている. ただし, これらの研究においては空港間の競争は考察されていない.

そこで, 本研究においては, 隣接する 2 つの空港間の協調が空港の経営戦略 (事業投資) へ与える影響を明らかにすることを試みた. さらに, 隣接 2 空港間の協調が空港の事業投資 (整備・維持・更新) を目的とする資金調達コストとの関係に特に注目した. すなわち, 空港の投資とその投資のために発行される債券の価格あるいはそのクレジット・スプレッドとの関係の解明を本研究の目的とした. この研究課題は今後の空港経営において重要と考えられるものの, 既存研究が十分に蓄積されているとは思われない.

この研究はファイナンスとの関連が強い. そこで, この研究目的の背景を学術的視点から説明する[1] .

ファイナンスの研究領域において, 証券価格評価およびそれに関連する諸研究は一つの大きな流れを形成してきた. そして, 債券価格評価やクレジット・スプレッド算出はこの研究の系譜に位置付けられる. それらの中でも, 信用リスクを考慮した証券価格評価に関する既存研究が本研究と深く関連している. 標準的には, 信用リスクを考慮した証券価格評価の諸研究は大きく 2 分類される. この分類は, その研究モデルにおいて基礎となる確率過程を用いたデフォルトの表現方法に基づいている. 一方のモデルの分類は Structural アプローチとよばれ, もう一方のモデルの分類は Reduced-form アプローチあるいは Intensity-based アプローチとよばれる. Structural アプローチにおいては, 企業価値の変動と負債の大小関係を用いてデフォルトが表現される. この具体的イメージは貸借対照表の資産額が負債額より小さくなる状態がデフォルトの定義である. 一方, Reduced-form アプローチにおいては, 信用リスクのレベルを表す確率過程を所与とする議論の枠組みが採用される. この具体的イメージは格付けの推移である.

Black and Scholes[5] と Merton[25] が Structural アプローチの嚆矢である. これらのモ

[1] ファイナンス関連の既存研究のレヴューについては, 石井他 [29] を基に加筆修正している.

デルでは企業価値変動に幾何ブラウン運動が用いられている．企業が発行する社債にはゼロクーポン債が仮定される．そして, そのゼロクーポン債の満期において企業価値が額面以下になる事象をデフォルトとする．

Black and Scholes[5] と Merton[25] 以後の Structural アプローチは多様である．デフォルトの定義の変更に関して, 社債満期以前にデフォルトが発生することを考慮した社債価格評価モデルが Black and Cox[4] により導出された．このモデルでは, デフォルトの定義に社債満期以前であっても企業価値があるレベル (閾値) を下回るという事象が用いられた．さらに, 安全資産の利子率の不確実変動の影響を考察するため, Longstaff and Schwartz[23] や Briys and Varenne[6] は Black and Cox[4] を拡張した．

Ishizaka and Takaoka[17] は, デフォルトの前に債権者による監視期間をモデル化している．そして, その監視期間中に, ある一定時間以上にわたり企業価値低迷が継続することをデフォルト発生と定めている．Goldstein et al.[14] では, 経営者による負債の増減がそのモデルの中で表現されている．Hackbarth et al.[16] は経済変動が企業のキャッシュフローへ影響を与える構造を持つモデルを開発した．

さらに, 企業価値変動の表現により複雑な確率過程を用いることにより, 社債価格の特徴を捉えることを目的とする研究もある．具体的には, 企業価値変動にジャンプのある確率過程を用いた社債価格評価モデルである．例えば, Zhou[28], Chen et al.[7], Cremers et al.[9] である．Cremers et al.[9] では, 市場共通のジャンプと企業固有のジャンプという 2 種類のジャンプが導入された．

Jarrow and Turnbull[21] と Jarrow et al.[19] が Reduced-form アプローチの原型である．このアプローチでは, 高々可算の集合を状態空間とする確率過程を用いて, 格付け等の離散的に評価される企業の信用リスクのレベルが表現される．この状態空間の 1 つの元がデフォルトを表すと仮定される．そして, 確率過程が社債満期よりも前にデフォルトを表す点に到達するという事象をその企業のデフォルトと定義する．この仮定が企業価値を表す確率過程と負債額を表す関数等との関係によりデフォルトを定義する Structural アプローチと大きく異なる．Structural アプローチ同様に, Reduced-form アプローチの蓄積も大きく多様な展開がある．

その例として, Duffie and Singleton[12], Madan and Unal[24], Belanger et al.[3], Jarrow et al.[20], Jarrow et al.[18] を挙げておく．デフォルト発生時間の分布のハザードレートそれ自身が不確実に変動するモデルが Duffie and Singleton[12] において構築された．Madan and Unal[24] は資産構成と負債額を考慮した Reduced-form アプローチといえる．デフォルトが発生するまでの時間の分布を決定するハザードレートがその企業の資産構成と負債額に依存している．Belanger et al.[3] は effective credit spot rate を定義し, それを用いてデフォルトリスクのあるゼロクーポン債の価格式を導出している．Jarrow et al.[20] では, モデルを基礎としてデータからデフォルトリスク・プレミアムを推定するための方法が提案されている．Jarrow et al.[18] はデフォルトと繰り上げ償還をモデルへ取り入れている．なお, Barnhill and Maxwel[2] は Structural アプローチと Reduced-form アプローチの合成モデルである．

社債投資家は離散時点でのみノイズを含めた企業価値を観察可能であるとする仮定を出発点として, Structural アプローチと Reduced-form アプローチの関係が Duffie and Land[13]

において考察された．Coculescu et al.[8] も Structural アプローチと Reduced-form アプローチの接続を研究している．Duffie and Land[13] と Coculescu et al.[8] のモデル設定における差は観測誤差の構造にある．

ここまでに紹介したように, 2 つのアプローチのいずれにおいても研究は蓄積され, それら諸モデルにより様々な状況が表現されている．しかし, これら諸研究のモデルにおいて, 債券の発行体が直面する経済環境や競争環境が十分に表現されているということは難しいように思われる．

この点を具体的に説明する．基本的に, Structural アプローチにおいては企業価値の変動を表すためにある確率過程が用いられ, Reduced-form アプローチにおいては企業の信用リスクのレベルを表すためにある確率過程が用いられている．このことは, 社債発行により調達された資金は前もって決められたあるポートフォリへ投資されるという状況を表現している．すなわち, 企業が戦略を選択する状況はモデルで表現されていないことになる．

さらに, 資金調達以前に設定されているこの資産ポートフォリオには, その収益率がポートフォリオの規模に依存しないという特徴がある．このことは, 任意の社債規模に対して, この資産ポートフォリオの規模を調整することによりこの社債の信用リスクを一定にできることになる．極端な例ではあるが, 1 万円の資産ポートフォリオと 1 億円の資産ポートフォリオで同一の投資収益率を達成できることになる．株式や債券等の金融資産のみを対象とする資産ポートフォリオを想定している場合には, これに近い状況へ到達できる場合もあろう．しかし, 企業の事業資産から構成されるポートフォリオにおいてはこれに近い状況を作ることは極めて困難といえる．したがって, 資産ポートフォリオの規模に依存して, そのポートフォリオを保有するために発行する社債のリスクが異なると考えられる．

さらに, 本研究では, 混雑などの外部不経済の解決を目的とする投資の資金を調達するために空港により発行される債券を分析対象とする．ここで, 民営化された空港であっても, その利潤最大化行動が純粋に選択されると考えるよりもその事業の公益性の側面が作用し, 社会的余剰の増加も意図した利用料金と空港施設の規模 (投資規模あるいは調達する資金量) が選択されると思われる．このように, 利潤最大化とは異なる基準が加われば, それは発行体の信用リスクの増加, そして, 調達コストの増加へ作用すると考えられる．

これに関連する既存研究を挙げておく．空港会社の信用リスク評価に関する実務的方法は, 柿本 [30] 第 4 章, 加藤・手塚 [34] 第 14 章と第 15 章, 手塚・加藤 [37] 第 10 章等で解説されている．アメリカの空港債の格付けに影響を与える諸要因は三枝他 [36] や加藤 [32] において分析された．ただし, 社会的余剰の増加を目的とする公益性を有する企業の投資と資金調達コストの関係を解明する研究はこれまでにはなさそうである．そして, これはファイナンスと交通経済学の両研究領域にまたがり, 学術的のみでなく実務的にも意義のある研究課題と考えられる．

これらの理由から, 隣接する 2 空港間の競争と協調, 空港の資金調達コスト, 空港サービスから生ずる社会的余剰, 空港整備投資の規模の関係を分析するモデルを構築することは, 上述の学際的研究課題に対してある一定の貢献を有すると考えられる．

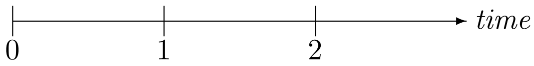
本報告書の構成は次の通りである．第 2 節において, 隣接 2 空港の協調を考察するためのモデルおよびその若干の結果を説明する．第 3 節において, レベニュー債を用いた空港の資金調達と投資を考察するモデルとそこから得られる簡単なインプリケーションを説明

する. そして, 本研究のまとめと今後の課題を第 4 節に述べる.

2　空港の間の協調の分析モデル

本節においては, 隣接する 2 つの非対称的な空港間の協調の効果を分析するためのモデルを説明する[2]. ただし, ここでの協調とはカルテルのように競争緩和を目的として 2 つの空港から自発的に生ずるような協定を指してはいない. 個別に利潤最大化を計る空港に対して, 社会的余剰を増加させるという観点から, それらの空港を所有する政府あるいは地方自治体が何らかの統合を行うという意味である.

2.1　モデルの概観



ここでは, モデルの概観を述べる. 本研究では以下の 3 つのケースを考察するためのモデル構築を試みた.

(a) 隣接する 2 空港間が競争関係にあるケース

(b) 隣接する 2 空港を統合して運営するケース

(c) 隣接する 2 空港間において部分的な統合を行うケース

そして, これらの 3 ケースを以下の観点から比較することを目的にモデル構築を試みた.

- 空港利用料,
- 総需要,
- 各空港の期待利潤,
- 混雑費用も含めた空港利用者に生ずる移動に関わる費用,

このモデルの経済主体に関して, 以下の仮定をおく. 隣接する 2 つの空港を仮定し, それぞれを個別の経済主体と考える. 以下では, これら 2 つの空港を空港 1 と空港 2 と表記する. さらに, いずれの空港とも異なるある 1 つの経済主体が隣接する 2 つの空港を所有・管理していることとする. より具体的には, 政府や地方自治体等をこの経済主体として想定している. このモデルでは, この経済主体を空港管理者とよぶこととする. さらに, 空港サービスを需要する経済主体を便宜的に消費者とよぶことにする.

空港に関して以下を仮定する. 本モデルでは, 空港サービスとは消費者に対して航空機による移動の機会を供給することである. その空港サービスの供給能力を容量とよぶ. 空

[2]本節の内容に関して, Prof. Lee, P. T. W.(Zhejiang University), and Prof. Zheng, S. (Shanghai Maritime University), Dr. Dong, G. (Shanghai Maritime University) とも共同研究を行なっている.

港 1 の容量は空港 2 の容量よりも大きいと仮定する．例えば, 空港 2 と比較して空港 1 はより多くの滑走路を持つ, より多くのゲートを持つ, 空港 1 のターミナルの規模がより大きい等ということを想定している．また, 空港 2 よりも空港 1 の方が消費者の居住地域に近く, 消費者が空港 1 へ移動する場合に生ずる移動費用は空港 2 へ移動する場合に生ずる移動費用よりも小さいと仮定する．すなわち, 本研究では, 消費者が居住地から別の場所へ航空機を利用して移動することをモデル化している．

なお, 2 つの空港に対する総需要は各空港の空港利用料に依存していることとする．

本研究では, 0, 1, 2 という 3 つの時点を仮定する．そして, 各時点において, 何らかの経済主体が意思決定を行うこととする．ただし, その意思決定は各ケースおいて異なる．そこで, 各ケース毎に, 時間の流れに沿って各時点における意思決定を説明する．

まず, 「隣接する 2 空港間が競争関係にあるケース」について説明する．

0 時点

このケースでは, 0 時点において各経済主体は何も行わない．

1 時点

上に述べたように, 2 つの空港への総需要は空港利用料に依存して定まる．ただし, このケースでは, 各空港に対する需要量の比は不確実であると仮定する．

2 時点で得られる利潤の期待値を最大にするように, 各空港は空港利用料を設定する．

2 時点

各空港に対する需要が実現する．すなわち, 各空港に対する需要量の比が判明する．それによって, 各空港の利潤が定まる．

次に, 「隣接する 2 空港を統合して運営するケース」について説明する．

0 時点

このケースでは, 0 時点において各経済主体は何も行わない．

1 時点

このケースでは, 各空港に対する需要量はその価格のみに依存して決定すると仮定する．このため, 2 時点で得られる利潤を最大にするように, 各空港は空港利用料を設定する．

2 時点

消費者余剰を最大にするように, 空港管理者が各空港の供給量 (各空港への需要量) を調整する．ただし, このモデルでは, 混雑コストを含めた消費者の総費用を最小にすることを消費者余剰最大化に対応させている．ここで, 空港管理者による各空港の供給量 (各空港への需要量) の調整の解釈について説明を加える．ある 1 つの空港から出発する航空機の到着地は様々である．ただし, 到着地毎に需要は異なると考えられる．また, 旅客機の 1 台の搭乗人数は有限である．そこで, 到着地毎の便数の組み合わせを空港のポートフォリオとみなす．そして, 空港管理者が各空港のポートフォ

リオを組み替えることにより, 各空港の供給量 (各空港への需要量) を調整可能と仮定する.

最後に, 隣接する 2 空港間において部分的な統合を行うケースを説明する.

0 時点

空港管理者は総需要の一定割合を各空港に配分するための比率を決定する. 空港管理者は消費者余剰をより大きくする目的から, この比率を調整する. 具体的には, 特定の路線の便数を調整すること等を想定している.

ただし, このモデルにおいては, この配分を極めてシンプルに考えることとする. 例えば, 2 空港に対する総需要が 1000 であったとする. 空港管理者はこの総需要の 70%を各空港へ配分する需要量と決定したとする. さらに, その 90%を空港 1 へ配分し, 残りの 10%を空港 2 へ配分すると決定したとする. この場合, 空港 1 は 630 の需要を得て, 空港 2 は 70 の需要を得ることになる. そして, 空港管理者により配分されていない 30%の需要量, すなわち, 300 は各消費者の選択に委ねられる.

すなわち, この部分に不確実性が残る. この 300 に該当する需要量の空港 1 と空港 2 への配分を 0 時点あるいは 1 時点で前もって知ることは不可能で, その比率は 2 時点で判明することとする.

1 時点

2 時点で得られる利潤の期待値を最大にするように, 各空港は空港利用料を設定する.

「隣接する 2 つの空港間が競争関係にあるケース」と同様に, 2 つの空港への総需要は空港利用料に依存して定まる. しかし, 各空港に対する需要量の比は不確実であると仮定する.

2 時点

各空港に対する需要が実現する. すなわち, 各空港に対する需要量の比が判明する. それによって, 各空港の利潤が定まる.

2.2 仮定と記号設定

$(\Omega, \mathcal{F}, \mathrm{P})$ を確率空間とする. s_1, s_2, t_1, t_2, c_1, c_2 および a を正の定数 (たち) とする. ただし, $s_1 \geq s_2$ と $t_1 \leq t_2$ を仮定しておく.

各 $j = 1,\ 2$ について, s_j, t_j, c_j に次の意味を与える.

s_j を空港 j の容量とする.

t_j は消費者が居住地域から空港 j へ移動する場合に生ずるコストとする.

c_j は空港 j の限界費用を表す.

a を混雑をコストへ変換するための係数とする．そして, 空港 j で生ずる混雑コストを以下のように定義する．

$$\frac{a}{s_j} \cdot (\text{空港 } j \text{ の需要量}).$$

各 $j = 1,\ 2$ について, $x_j \in [c_j, \infty)$ は空港 j の空港利用料を表す．1 時点において, 各空港は空港利用料を提示することとする．そして, 2 時点においてそれを変更することについてはこのモデルでは考慮しない．

空港を利用する消費者は, 空港利用料, 移動コスト, 混雑コストを負担することになる．

N と k を正の定数 (たち) とする．そして, 関数 $f : \mathbf{R} \times \mathbf{R} \to \mathbf{R}$ を次のように定める．

$$f(x_1, x_2) = N - k(x_1 + x_2).$$

ここでは, f をこれら 2 つの空港に対する総需要量として用いる．

2.3 各ケースにおける最適化問題

2.3.1 隣接する 2 空港が競争関係にあるケース

b_1 と b_2 を正の定数 (たち) とする．Y をベータ分布に従う確率変数とする．このベータ分布の 2 つのパラメータを $x_2 + \dfrac{ab_2}{s_2} + t_2$ と $x_1 + \dfrac{ab_1}{s_1} + t_1$ とする．すなわち,

$$Y \ \sim \ \mathrm{Beta}\left(x_2 + \frac{ab_2}{s_2} + t_2, x_1 + \frac{ab_1}{s_1} + t_1\right).$$

なお, 空港 j で生ずる混雑に対する消費者たちの予想が b_j へ反映されていることとする．

Y は総需要量 $f(x_1, x_2)$ に占める空港 1 への需要量の割合を表す．以下では, $Y_1 = Y$ および $Y_2 = 1 - Y$ とおく．したがって, 空港利用料が x_1 および x_2 と与えられたとき, $Y_j f(x_1, x_2)$ が空港 j の需要量を表す．

$x_2 + \dfrac{ab_2}{s_2} + t_2$ よりも $x_1 + \dfrac{ab_1}{s_1} + t_1$ が小さい場合には, Y が 1 に近い値となる確率が高くなる．すなわち, 空港 1 を利用することから生ずる費用が空港 2 を利用することから生ずる費用よりも相対的に小さくなれば, 空港 1 の利用者が増加しやすい, という状況を確率変数 Y が表現している．

このケースにおいて解く空港間の非協力ゲームは以下である．

$$\begin{cases} \text{空港 } j \text{ の戦略集合:} \quad x_j \in [c_j, \infty), \\ \text{空港 } j \text{ の目的関数:} \quad \mathrm{E}((x_j - c_j) Y_j f(x_1, x_2)). \end{cases} \tag{1}$$

ここでは, 空港利用料を戦略とする非協力ゲームを考える．空港 j がその空港利用料 x_j を増加させることにより, 消費者 1 人から得られる利益 $x_j - c_j$ は増加する．これは期待利潤の増加へ作用する．しかし, x_j の増加は総需要量 $f(x_1, x_2)$ の減少, および, 消費者の空港 j への移動コストの増加をもたらし Y_j が小さくなる確率を増加させる．これらは期待利潤の減少へ作用する．このようなトレードオフの中で, 各空港は空港利用料を決定する．

非協力ゲーム (1) の Nash 均衡は以下の通りである．

$$\begin{pmatrix} x_1^0 \\ x_2^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{N-3kA}\left[\begin{pmatrix} 2kA & N-kA \\ N-kA & 2kA \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} + \{NA - k(c_1-c_2)^2\}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}\right] \tag{2}$$

ただし，$A = \dfrac{ab_1}{s_1} + t_1 + \dfrac{ab_2}{s_2} + t_2$.

この設定において，空港間の限界費用が同一であれば ($c_1 = c_2$), $x_1^0 = x_2^0$ を得る．すなわち，消費者の移動コストの空港間の差が戦略 (空港利用料) へ影響しなくなることが分かる．競争優位でない空港 2 にとって，空港 1 よりも小さい空港利用料を提示して薄利多売を選択することは合理的ではないことを意味している．

Nash 均衡 (2) を用いることにより，以下が得られる．

- Nash 均衡における総需要量:

$$f(x_1^0, x_2^0) = N - k(x_1^0 + x_2^0)$$

- 各空港の期待利潤:

$$\mathrm{E}((x_j^0 - c_j)Y_j f(x_1^0, x_2^0))$$

- 消費者全体が負担する費用:

$$\left\{\left(x_1^0 + \frac{aY_1 f(x_1^0, x_2^0)}{s_1} + t_1\right)Y_1 + \left(x_2^0 + \frac{aY_2 f(x_1^0, x_2^0)}{s_2} + t_2\right)Y_2\right\} f(x_1^0, x_2^0)$$

2.3.2　隣接する 2 空港を統合して運営するケース

隣接する 2 つの空港を統合して運営するケースにおいては，2 時点で消費者の総費用を最小にするように空港管理者が各空港の供給量 (需要量) を調節する．そこで，2 時点における空港管理者の行動から考える．

次の関数 $h : [0,1] \to \mathbf{R}$ を導入する．

$$h(w) := \left\{\begin{array}{l} \left(x_1 + \dfrac{awf(x_1,x_2)}{s_1} + t_1\right)w \\ \qquad + \left(x_2 + \dfrac{a(1-w)f(x_1,x_2)}{s_2} + t_2\right)(1-w) \end{array}\right\} f(x_1, x_2). \tag{3}$$

総需要 $f(x_1, x_2)$ の空港 1 への配分比率を w とし，空港 2 への配分比率を $1-w$ とする．この配分によって生ずる消費者の総費用を h は表している．

h を最小にする $w \in [0,1]$ は以下で与えられる．

$$w(x_1, x_2) := \frac{s_1 s_2\left\{-(x_1+t_1) + x_2 + t_2 + \dfrac{af(x_1,x_2)}{s_2}\right\}}{2a(s_1+s_2)f(x_1,x_2)}. \tag{4}$$

以下の説明では, $w_1(x_1,x_2)=w(x_1,x_2)$, $w_2(x_1,x_2)=1-w(x_1,x_2)$ とおく.
この結果を利用して, 以下の非協力ゲームを考える.

$$\begin{cases} \text{空港 } j \text{ の戦略集合 } x_j \in [c_j, \infty), \\ \text{空港 } j \text{ の目的関数 } (x_j - c_j) w_j(x_1,x_2) f(x_1,x_2). \end{cases} \tag{5}$$

非協力ゲーム (5) の意味を述べる. 各空港は 2 時点における利潤を最大化するように空港利用料を選択する. ただし, 2 時点において, その空港利用料を反映して決定される需要量を考慮しながら, 空港管理者が消費者の総費用を最小にするように各空港の供給量を決定する. このことも踏まえて, 各空港は意思決定する.

非協力ゲーム (5) の Nasah 均衡は以下の通りである.

$$\begin{pmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \end{pmatrix} = \frac{1}{3s_1s_2 + 10ak(s_1+s_2) + 12a^2k^2} \left\{ \mathrm{B}_1 \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} + \mathrm{B}_2 \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} + \mathrm{B}_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}, \tag{6}$$

where

$$\mathrm{B}_1 = \begin{pmatrix} 2(s_1+2ak)(s_2+2ak) & (s_1+2ak)(s_2-2ak) \\ (s_1-2ak)(s_2+2ak) & 2(s_1+2ak)(s_2+2ak) \end{pmatrix},$$

$$\mathrm{B}_2 = \begin{pmatrix} -(s_1s_2+2aks_1+4aks_2) & s_1s_2+2aks_1+4aks_2 \\ s_1s_2+4aks_1+2aks_2 & -(s_1s_2+4aks_1+2aks_2) \end{pmatrix},$$

$$\mathrm{B}_3 = \begin{pmatrix} 2aN(2s_1+s_2+2ak) & 0 \\ 0 & 2aN(s_1+2s_2+2ak) \end{pmatrix},$$

上記の Nash 均衡 (6) から, 両空港の限界費用が等しくとも ($c_1=c_2$), 容量 (s_j) や居住地域からの移動により生ずるコスト (t_j) の差が空港利用料に反映されることが分かる. この点は, 上述の「隣接する 2 つの空港間が競争関係にあるケース」とは異なる.

Nash 均衡 (6) を用いることにより, 以下が得られる.

- 総需要量:
$$f(x_1^1, x_2^1) = N - k(x_1^1 + x_2^1)$$
- 各空港の利潤:
$$(x_j^1 - c_j) w_j(x_1^1, x_2^1) f(x_1^1, x_2^1)$$
- 消費者全体が負担する総費用:
$$h(w(x_1^1, x_2^1))$$

2.3.3 隣接する 2 空港間において部分的な統合を行うケース

$\alpha \in [0,1]$ かつ $\beta \in [0,1]$ とする. 需要の 100α %, すなわち, 全需要量 $\alpha f(x_1,x_2)$ を空港管理者が各空港に対してその配分を決定することとする. そして, そのさらに 100β %, すなわち, 需要量 $\alpha\beta f(x_1,x_2)$ が空港 1 へ配分されることとする.

このとき, 次の非協力ゲームを想定する.

$$\begin{cases} 空港\, j\, の戦略集合\ x_j \in [c_j, \infty), \\ 空港\, j\, の目的関数\ (x_j - c_j)\alpha\beta_j f(x_1, x_2) + \mathrm{E}((x_j - c_j)Y_j(1-\alpha)f(x_1, x_2)). \end{cases} \tag{7}$$

ただし, $\beta_1 = \beta$, $\beta_2 = 1 - \beta$ とする.

ここで, 各空港の目的関数について説明する. 全需要量 $f(x_1, x_2)$ は各空港が選択する価格 x_1 と x_2 のみに依存して決定される. そして, その需要量の中の $\alpha\beta_j f(x_1, x_2)$ が空港 j へ配分される. 空港管理者により配分が決定されない部分の需要 $(1-\alpha)f(x_1, x_2)$ の各空港への配分には不確実性を伴う. $Y_j(1-\alpha)f(x_1, x_2)$ によりその不確実性が表現されている.

また, この非協力ゲーム (7) は 1 時点において行われる. 一方, 0 時点において空港管理者は α と β を決定する. したがって, 各空港はこれらが与えられた状況で, 空港利用料に関する競争を行い, 2 時点に得られる期待利潤を最大化する.

現時点では, 非協力ゲーム (7) の複雑性が高過ぎるため Nash 均衡が求められていない. そこで, 0 時点における空港管理者の意思決定を説明するため, 非協力ゲーム (7) の Nash 均衡を (x_1^2, x_2^2) で記すことにして, 説明を進める.

0 時点において, 空港管理者は 2 時点で生ずる消費者全体に生ずる費用の期待値を最小にするように α と β を選択する. この具体的表現が, 以下の関数を最小にする α と β を求めることである.

$$\mathrm{E}\left(\begin{array}{l} \left(x_1^2 + \dfrac{\{\alpha\beta + (1-\alpha)Y\}f(x_1^2, x_2^2)}{s_1} + t_1 \right) \{\alpha\beta + (1-\alpha)Y\} f(x_1^2, x_2^2) \\ + \left(x_2^2 + \dfrac{\{\alpha\beta + (1-\alpha)(1-Y)\}f(x_1^2, x_2^2)}{s_2} + t_2 \right) \{\alpha(1-\beta) + (1-\alpha)(1-Y)\} f(x_1^2, x_2^2) \end{array} \right) \tag{8}$$

3 空港の資金調達を考察するモデル

3.1 モデルの概観

本研究モデルが想定している状況を概説しておく.

0 時点において, ある空港がその容量 (capacity) を拡張することを目的とする投資を行うこととする. 例えば, 滑走路の増設やゲートの増築がこれに該当する. 以下では, この空港を空港 A とよび, その容量拡張の投資対象を施設 B とよぶことにする. 0 時点において, 空港 A は施設 B を建設するために必要な資金を調達し, これを建設すると仮定する.

空港 A は施設 B の建設を目的として, 1 時点を満期とする債券を発行して資金調達する. この債券を事業目的別歳入債券 (以下, レベニュー債と表記する) に限定して議論する. ただし, 建設に要する資金量は施設 B の容量に依存して決まる. ここで, 施設の容量とはその施設が単位時間あたりに供給可能なサービスの量を表している. また, 本研究モデルにおいては, 空港サービスに対する過大な需要から生ずる混雑等の外部不経済は社会的余剰の減少へつながることを仮定する. 施設 B の供給可能な容量の増加はこの外部不経済の軽減

へつながる．ただし, 施設の容量増加はその建設に必要な資金量 (レベニュー債の発行額) の増加をもたらすと仮定する．本研究においては, 0 時点で資金調達し, 0 時点で施設 B の建設も完了することにしておく．少数の要因間の関係を明確にすることを目的として, このようにモデルをシンプルにする．

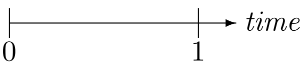
0 時点において, 空港 A は供給量を決定する．そして, 1 時点において空港サービスに対する需要関数が判明する．この結果, 0 時点で選択した供給量と実現した需要関数に依存して定まる空港利用料を消費者は空港 A へ支払う．すなわち, この空港利用料と供給量の積が空港 A の利用料収入となる．そして, 空港の利用料収入のみを原資として, このレベニュー債の利息と元本が返済される．1 時点でのデフォルトリスクを考慮しつつ, 社会的余剰の最大化を目的として, 空港 A は供給量と施設 B の容量 (資金調達額) を決定する．一方, 債券の購入者 (レベニュー債投資家) は空港 A の信用リスク (負債の返済可能能力) を評価して, 出資する資金に対するクレジット・スプレッドを決定する．

議論を簡単にするため, 債券満期である 1 時点においてのみ利息と元本が返済されることとする．1 時点において, 空港の利用料収入が返済すべき利息と元本合計に達しない場合, その差額分を政府が税金等から補填することはなく, 債務不履行 (デフォルト, default) が生ずる．したがって, このレベニュー債投資家 (資金提供者) はデフォルトリスクにさらされている．さらに, 議論の単純化のためレベニュー債投資家はただ 1 人と仮定する．

ここで, レベニュー債について簡単に触れておく．既にアメリカではレベニュー債は空港事業だけでなく道路事業等の他のインフラストラクチャーの資金調達手段としても利用されている．しかし, 現在の日本においてレベニュー債発行は導入されていない．これに関して, 長野他 [38], 日下部・森山 [35], 加藤・手塚 [34] 第 13 章, 加藤 [31], 加藤他 [33] 等は日本におけるレベニュー債導入を検討している．

3.2 仮定と記号設定

本研究のモデルの仮定と記号設定を述べる．



$(\Omega, \mathcal{F}, \mathrm{P})$ を確率空間とする．なお, 便宜的に $\mathcal{F}_0 = \{\phi, \Omega\}$, $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}$ としておく．

非負値確率変数 X は $\mathcal{F}_1$-可測とし, その確率密度関数の存在を仮定する．さらに, $\mu = \mathrm{E}(X)$, $\sigma^2 = \mathrm{V}(X)$ とおく．このモデルにおいて, 確率変数 X を空港需要に影響を与える不確実要因として用いる．

$y \geq 0$ は施設 B の容量を表す．a と b を正の定数 (たち) とする．ただし, $b > 1$ としておく．そして, 施設 B の容量を y とするために要する建設資金を ay^b とする．したがって, 空港が発行するレベニュー債の元本は ay^b となる．

c と k を正の定数 (たち) とする．そして, 関数 $f : (0, \infty)^2 \to [0, \infty)$ を

$$f(u, x) = cyxe^{-ku} \tag{9}$$

と定める. 施設 B の容量を y とする場合, $f(u, X)$ を 1 時点で明らかになる空港に対する (逆) 需要関数として用いる. したがって, 供給量を u とすれば, 空港利用料は $f(u, X) = cyXe^{-ku}$ である. 施設 B の容量 y の増加が空港に対する需要量の増加へつながることをこの関数 f は表している.

正の定数 m を混雑コスト定数とよぶ. 空港 A が提供する空港サービスの供給量を u とする. このとき, 1 時点で生ずる社会的余剰を次の通り定める.

$$\int_0^u cyXe^{-kt} - cyXe^{-ku}\,\mathrm{d}t - \frac{m}{2}\{\max(u-y, 0)\}^2. \tag{10}$$

式 (10) の第 1 項は消費者余剰を表している. そして, 第 2 項は供給量 (需要量)u が容量 y を上回る程度に依存して生ずる外部不経済の表現である. 供給量 (需要量) が施設 B の容量を超える場合には, その超えた大きさに依存して混雑という外部不経済が生じて社会的余剰が減少することを式 (10) は意味している. m の値が大きいほど, 供給量 (需要量) が容量を上回ることから生ずる外部不経済は大きく評価されることになる.

なお, (10) の第 1 項を計算すると,

$$cyX\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} - \frac{m}{2}\{\max(u-y, 0)\}^2. \tag{11}$$

正の定数 r は連続複利の無リスク金利を表す. $s \geq 0$ をレベニュー債投資家が空港 A へ要求するクレジット・スプレッドとする. したがって, 施設 B の容量を y とする場合には, 1 時点における返済額は

$$ay^b e^{r+s}$$

となる.

ここで, 空港の供給量を $u \geq 0$ とすれば, 1 時点における空港の収入は

$$cyXe^{-ku}u$$

である. これより, 1 時点で事象

$$cyXe^{-ku}u \leq ay^b e^{r+s}$$

が発生する場合には, レベニュー債はデフォルトする. 一方, 1 時点で事象

$$cyXe^{-ku}u > ay^b e^{r+s}$$

が発生する場合には, レベニュー債投資家は予定された元本と利息を受け取ることが可能となる. そこで, 1 時点におけるレベニュー債投資家の受取額を

$$\min(cyXe^{-ku}u, ay^b e^{r+s})$$

とする.

ここで, 以下のように記号を定める. X の α-quantile を x_α で表す. すなわち,

$$x_\alpha = \inf\{x \in \mathbf{R} \,|\, \mathrm{P}(X \leq x) > \alpha\}.$$

同様に, x_β は X の β-quantile を表す.

$\alpha, \beta \in (0,1)$ とする. そして, 各 $s \geq 0$ に対して,

$$W_1(s,\alpha) = \{(u,y) \in (0,\infty)^2 \,|\, \mathrm{P}(cyXe^{-ku}u \leq ay^b e^{r+s}) \leq \alpha\}$$

と定め, 各 $(u,y) \in (0,\infty)^2$ に対して,

$$W_2(u,y,\beta) = \{s \in [0,\infty) \,|\, cyx_\beta e^{-ku}ue^{r+s} \leq ay^b e^r\}$$

と定める. $W_1(s,\alpha)$ と $W_2(u,y,\beta)$ の意味を説明する. レベニュー債投資家が要求するクレジット・スプレッドを s とする. このとき, デフォルト確率を α 以下とする供給量と容量の組 (u,y) の全体を $W_1(s,\alpha)$ が表している.

$W_2(u,y,\beta)$ を説明する. 空港 A が選択する供給量と容量の組 (u,y) が与えられたとき, 1 時点で空港が得られる収入 $cyXe^{-ku}u$ の β-quantile が $cyx_\beta e^{-ku}u$ である. 1 時点で空港が得る収入が確率 β で発生するような低いレベルであったとしても, レベニュー債元本 ay^b を安全資産で運用した場合の収益を得られるクレジット・スプレッド s の全体を $W_2(u,y,\beta)$ が表している.

α および β, それぞれの経済主体のリスク選好度に依存して決定される量である. ここでは, これらを所与として議論する.

0 時点において, 空港 A とレベニュー債投資家の間で行われる非協力ゲームを次のように定める.

$$\begin{aligned}
&\text{空港 A の戦略集合} \\
&\quad (u,y) \in W_1(s,\alpha) \\
&\text{空港 A の目的関数} \\
&\quad \mathrm{E}\left(cyX\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} - \frac{m}{2}\{\max(u-y,0)\}^2\right) \\
&\text{レベニュー債投資家の戦略集合} \\
&\quad s \in W_2(u,y,\beta) \\
&\text{レベニュー債投資家の目的関数} \\
&\quad \mathrm{E}\left(\min(cyXe^{-ku}u, ay^b e^{r+s})\right)
\end{aligned} \tag{12}$$

この非協力ゲームの意味を説明する.

0 時点において, 需要関数は定まっていない. このため, 空港 A は社会的余剰の期待値が最大になるように供給量と容量の組 (u,y) を選択する. u の増加は消費者余剰の増加につながる. ただし, u がある値以上になると, 1 時点における空港の収入は減少し始める. さらに, それと同時に外部不経済の増加をもたらす. これに対して, y の増加は社会的余剰の増加へつながる. しかし, y の増加はデフォルト確率の増加ももたらす. このようなトレードオフ関係において, 資金調達に用いたレベニュー債のデフォルト確率があるレベル α 以下になる範囲内から空港 A は (u,y) を選択する.

一方, レベニュー債投資家にとって, 他の変数を一定とすれば, クレジット・スプレッド s の増加は受取額の期待値の増加につながる. ただし, s の増加はデフォルトリスクの増加

をもたらす．その結果, 施設 B の容量 y の減少へつながり, それは受取額の期待値の減少へ作用する．このようなトレードオフ関係において, レベニュー債投資家はクレジット・スプレッド s を選択する．

3.3 考察

非協力ゲーム (12) の Nash 均衡について考察していく．そのために, 空港 A の最適反応戦略を求める．

$u > 0$, $y > 0$ に対して,

$$\mathrm{P}\left(cyXue^{-ku} \leq ay^b e^{r+s}\right) = \mathrm{P}\left(X \leq \frac{ay^{b-1}e^{r+s+ku}}{cu}\right).$$

そこで, $u > 0$, $y > 0$, $s \geq 0$ に対して,

$$g(u,y,s) = \frac{ay^{b-1}e^{r+s+ku}}{cu}$$

と定める．

補題 1
各 $y > 0$, 各 $s \geq 0$ に対して, $u = \dfrac{1}{k}$ において $g(u,y,s)$ は最小となり, その最小値は

$$g\left(\frac{1}{k}, y, s\right) = \frac{aky^{b-1}e^{r+s+1}}{c}.$$

補題 1 より, レベニュー債投資家が要求するクレジット・スプレッド s に対して,

$$g\left(\frac{1}{k}, y, s\right) = \frac{aky^{b-1}e^{r+s+1}}{c} \leq x_\alpha$$

により選択可能な容量 y の最大値が与えられている．すなわち,

$$y \leq \left(\frac{cx_\alpha}{ake^{r+s+1}}\right)^{\frac{1}{b-1}}.$$

このことから, 次の補題が得られる．

補題 2
$s \geq 0$, $\alpha \in (0,1)$ に対して,

$$W_1(s,\alpha) = \{(u,y) \in (0,\infty)^2 \mid 0 < y \leq \hat{y}(u,s,x_\alpha)\}.$$

ただし,

$$\hat{y}(u,s,x_\alpha) = \left(\frac{cx_\alpha u}{ae^{r+s+ku}}\right)^{\frac{1}{b-1}}.$$

補題 3
$s \geq 0$, $\alpha \in (0,1)$ とする．$\hat{y}(u,s,x_\alpha)$ は $u = \dfrac{1}{k}$ において最大となり, その最大値は

$$\hat{y}\left(\frac{1}{k}, s, x_\alpha\right) = \left(\frac{cx_\alpha}{ake^{r+s+1}}\right)^{\frac{1}{b-1}} \tag{13}$$

である．

デフォルトリスクを考慮した場合に, 空港 A が施設 B の容量として選択可能な最大値を式 (13) が表している．明らかに, 式 (13) はクレジット・スプレッド s の減少関数である．ここで, より大きな b の値は施設 B の容量拡大により多額の資金を必要とすることを表している．しかし, 式 (13) の右辺から, クレジット・スプレッド s があるレベル以上になった場合には, それがもたらす減少効果を緩和する作用があると解釈される．

非協力ゲーム (12) における空港 A の目的関数である 1 時点の期待利潤は以下のように計算される．

$$\begin{aligned} F(u,y) &:= \mathrm{E}\left(cyX\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} - \frac{m}{2}\{\max(u-y,0)\}^2\right) \\ &= cy\mu\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} - \frac{m}{2}\{\max(u-y,0)\}^2 \end{aligned} \tag{14}$$

これより,

$$\frac{\partial F}{\partial u}(u,y) = ck\mu yue^{-ku} - m\cdot\max(u-y,0) \tag{15}$$

および

$$\frac{\partial F}{\partial y}(u,y) = c\mu\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} + m\cdot\max(u-y,0) \tag{16}$$

を得る．

ここで, (16) より, $F(u,y)$ は y に関して単調増加であることが分かる．一方, 補題 2 より, 各 u に対して, $(u,y) \in W_1(s,\alpha)$ をみたす y の最大値は $y = \hat{y}(u,s,x_\alpha)$ である．このことから, 各 $u > 0$ に対して, $y = \hat{y}(u,s,x_\alpha)$ が $F(u,y)$ を最大にする．したがって, $F(u,\hat{y}(u,s,x_\alpha))$ を最大にする u を求めていく．

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}u}F(u,\hat{y}(u,s,x_\alpha)) &= ck\mu\hat{y}(u,s,x_\alpha)ue^{-ku} - m\cdot\max(u-\hat{y}(u,s,x_\alpha),0) \\ &\quad + \left[c\mu\left\{\frac{1}{k}(1-e^{-ku}) - ue^{-ku}\right\} + m\cdot\max(u-\hat{y}(u,s,x_\alpha),0)\right] \\ &\quad \times\frac{1}{b-1}\left(\frac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}\right)^{\frac{1}{b-1}}\left(\frac{u}{e^{ku}}\right)^{\frac{-b+2}{b-1}}\frac{1-ku}{e^{ku}} \end{aligned} \tag{17}$$

この式 (17) より, $F(u,\hat{y}(u,s,x_\alpha)$ を最大にする u を求めるためには, $u = \hat{y}(u,s,x_\alpha)$ をみたす u と $\dfrac{1}{k}$ との関係を明らかにすることが必要となる．

そこで, 方程式 $u = \hat{y}(u,s,x_\alpha)$ の解に関連する補題を述べる．

補題 4
$s \geq 0,\ 0 < \alpha < 1,\ 1 < b < 2$ とする. u についての方程式

$$\frac{(-b+2)cx_\alpha}{ae^{r+s}}u^{-b+1} - ke^{ku} = 0 \tag{18}$$

はただ 1 つの解を持つ.

以下では, この解を $\hat{u} = \hat{u}(s, x_\alpha)$ と記す. 方程式 (18) から, $\hat{u}(s, x_\alpha)$ が s についての減少関数であることは明らかである.

補題 5
$s \geq 0,\ 0 < \alpha < 1$ とする. u についての方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ において, $u = 0$ はその解である. そして, この方程式の正の解については以下の通りである.

(i) $b > 2$ の場合

方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ にはただ 1 つの解が存在する.

(ii) $b = 2$ の場合

$cx_\alpha > ae^{r+s}$ ならば, 方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ には正の解がただ 1 つ存在する. この正の解は

$$\tilde{u} = \frac{1}{k}\log\frac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$$

である.

$cx_\alpha \leq ae^{r+s}$ ならば, 方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ に正の解は存在しない.

(iii) $1 < b < 2$ の場合

$\hat{u}(s, x_\alpha) > \dfrac{-b+2}{k}$ ならば, 方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ には異なる 2 つの正の解が存在する.

$\hat{u}(s, x_\alpha) = \dfrac{-b+2}{k}$ ならば, 方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ には正の解がただ 1 つ存在する.

$\hat{u}(s, x_\alpha) < \dfrac{-b+2}{k}$ ならば, 方程式 $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ には正の解は存在しない.

それでは, $b = 2$ の場合に限定して, 空港 A の最適反応戦略を述べていく. ただし, $b = 2$ に限定しても場合分けが複雑である. このため, 先に場合分けをまとめて示す. その後, 各場合について, 空港 A の最適反応戦略を述べていく.

(a) $0 \leq s < \log\dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}}$, すなわち, $\dfrac{1}{k} < \tilde{u}$.

この場合をさらに以下の 2 つへ分ける.

(a-1) $\tilde{x} \leq \log\dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$

(a-2) $\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}} < \tilde{x}$

ただし, $\tilde{x}$ は以下の方程式の解である.

$$2x^2 + (1-x)e^x - 1 = 0$$

また, $\tilde{x} > \log 4$ が示される.

(b) $\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}} \leq s < \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^r}$, すなわち, $\tilde{u} \leq \dfrac{1}{k}$.

この場合をさらに以下の 2 つへ分ける.

(b-1) $\dfrac{m}{c\mu e^{-2} + me^{-1}} \leq \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$

(b-2) $\dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}} < \dfrac{m}{c\mu e^{-2} + me^{-1}}$

(c) $\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^r} \leq s$, すなわち, $u = \hat{y}(u, s, x_\alpha)$ に正の解が存在しない.

それでは, 順に定理の形で, 空港 A の最適反応戦略を述べていく. いずれの場合においても,

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}u} F(u, \hat{y}(u, s, x_\alpha)) = 0 \tag{19}$$

をみたす u が求まれば, それが $F(u, \hat{y}(u, s, x_\alpha))$ の最大値を与えていることが示される.

定理 1

$0 \leq s < \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}}$ かつ $\tilde{x} \leq \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$ であれば, u についての方程式 (19) の解は

$$u = \frac{1}{k}\tilde{x}$$

である.

定理 2

$0 \leq s < \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}}$ かつ $\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}} < \tilde{x}$ の場合, u についての方程式 (19) の解は次の区間に存在する.

$$\left(\frac{1}{k} \log \frac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}, \frac{1}{k}\tilde{x} \right)$$

定理 3

$\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}} \leq s < \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^r}$ かつ $\dfrac{m}{c\mu e^{-2} + me^{-1}} \leq \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$ の場合, u についての方程式 (19) の解は $\left[\dfrac{1}{k}, \infty\right)$ に存在する.

定理 4

$\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+1}} \leq s < \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^r}$ かつ $\dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}} < \dfrac{m}{c\mu e^{-2} + me^{-1}}$ の場合, u についての方程式 (19) の解は次の区間に存在する.

$$\left(\frac{1}{k} \log \frac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}, \frac{1}{k} \right)$$

定理 5
$\log \dfrac{cx_\alpha}{ae^r} \leq s$ であれば, u についての方程式 (19) の解は $\left[0, \dfrac{1}{k}\right)$ に存在する.

ここで, 上記の結果のインプリケーションについて述べる.

定理 1 から, $\tilde{x} \leq \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+s}}$, したがって, $s \leq \log \dfrac{cx_\alpha}{ae^{r+\tilde{x}}}$ という範囲内にクレジット・スプレッド s が含まれるのであれば, 最適な供給量および容量は金利 $r+s$ に依存しない. すなわち, 空港がクレジット・リスクを考慮しながら投資意思決定を行う場合, 調達金利低下が投資規模増加にもたらす効果には限界があることを示唆している. また, $\tilde{x} > 1$ であることから,

$$\frac{1}{k}\tilde{x} > \frac{1}{k}$$

を得る. この不等式と補題 3 から, 空港 A の最適反応戦略における容量は投資可能な最大の容量よりも小さいことがわかる. 調達金利がある程度小さいため, 多少の外部不経済を許容しても, 供給量を拡大させ, それによる消費者余剰増加から得られる社会的余剰の増加効果が大きいことになる.

定理 1 と定理 2 の比較から, クレジット・スプレッドの増加が最適反応戦略における供給量の減少へ作用していることが分かる. ただし,

$$\frac{1}{k}\log\frac{cx_\alpha}{ae^{r+s}} \ \rightarrow\ \frac{1}{k} \quad \text{as } s \ \rightarrow\ \log\frac{cx_\alpha}{ae^{r+1}}$$

であるから, 空港 A の最適反応戦略における容量は投資可能な最大の容量へより近づいていると考えられる.

s との比較において, x_α が定理 2 の十分条件をみたす程度に大きい場合には, 投資可能な最大容量が選ばれることもある. しかし, 定理 1 の十分条件をみたす程度に x_α が十分大きい場合には, 最適反応戦略における容量は投資可能な最大の容量よりも小さい. ここで, 隣接 2 空港において統合効果により需要を安定させることになれば, x_α は μ に近くなる. しかし, その需要安定効果は施設 B の容量増加に対して単調ではないことが分かる.

次に, レベニュー債投資家の最適反応戦略を求める. レベニュー債投資家の目的関数が s の増加関数であることは明らかである. したがって, 各 $(u, y) \in (0, \infty)^2$ に対して, レベニュー債投資家は $W_2(u, y, \beta)$ の最大値を選択する. すなわち,

$$cyx_\beta e^{-ku}ue^{r+s} = ay^b e^r$$

をみたす s がレベニュー債投資家の目的関数を最大にする. この値は

$$s = \log\frac{ay^{b-1}e^{ku}}{cyx_\beta u}$$

である.

ここで, D_1 と D_2 を以下のように定める.

$$D_1 = \left\{(u, y, s) \;\middle|\; \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}u}F(u, \hat{y}(u, s, x_\alpha)) = 0, y = \hat{y}(u, s, x_\alpha), s \geq 0\right\}$$

$$D_2 = \left\{(u, y, s) \;\middle|\; s = \log\frac{ay^{b-1}e^{ku}}{cyx_\beta u}, (u, y) \in (0, \infty)^2\right\}$$

これより, 非協力ゲーム (12) の Nash 均衡は

$$D_1 \cap D_2 \tag{20}$$

である. ただし, 現時点では, 集合 (20) を明示的に求めることはできていない.

4 まとめと今後の課題

隣接 2 空港間の協調が空港の事業投資 (整備・維持・更新) のための資金調達コストへ与える影響の解明を目的として本研究を進めてきた. 現時点においては, これらを個々に分析するためのモデル, 空港間の協調 (統合) を分析するモデル, および, 空港の資金調達を考察するモデルの構築を進めている段階である. このため, これらを接続する段階には至っていない. しかし, 各モデルから若干ではあるが, 空港経営に対して有用な知見も得られた.

もちろん, 今後に残された課題は多い. まず, 空港間の協調 (統合) を分析するモデルにおける各ケースについてより詳細な分析が必要とされている. 特に, 隣接する 2 空港間において部分的な統合を行うケースでは, Nash 均衡が導出されていない. ただし, その導出にはモデルの修正が伴う可能性もある.

空港の資金調達を考察するモデルにおいては, 非協力ゲーム (12) の Nash 均衡の明示的な導出がなされていない. このため, Nash 均衡におけるクレジット・スプレッドと容量選択の関係の解明が十分になされたということは難しい. さらに, 空港間の協調 (統合) を分析するモデルとの接続も今後の課題である.

謝辞

本研究は関西空港調査会の援助を受けた. ここに感謝の意を記して表する.

参考文献

[1] Asadabadi, A. and Miller-Hooks, E. “Co-opetition in Enhancing Global Port Network Resiliency: A Multi-Leader, Common-Follower Game Theoretic Approach,” *Transportation Research Part B*, Vol. 108, pp. 281-298, 2018.

[2] Barnhill, T. M. and Maxwell, W. F., “Modeling Correlated Market and Credit Risk in Fixed Income Portfolios,” *Jounal of Banking and Finance*, Vol.26, pp.347-374, 2002.

[3] Belanger, A., Shreve, S. E. and Wong, D., “A General Framework for Pricing Credit Risk,” *Mathematical Finance*, Vol.14, pp.317-350, 2004.

[4] Black, F. and Cox, J. C., “Valuing Corporate Securities: Some Effect of Bond Indenture Provisions,” *The Journal of Finance*, Vol.31, pp.351-367, 1976.

[5] Black, F. and Scholes, M., "The Pricing of Options and Corporate Liabilities," *Journal of Political Economy*, Vol.81, pp.637-654, 1973.

[6] Briys, E. and Varenne, F., "Valuing Risky Fixed Rate Debt: An Extension," *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, Vol.32, pp.239-248, 1997.

[7] Chen, N. and Kou, S. G., "Credit Spreads, Optimal Capital Structure, and Implied Volatility with Endogenous Defaule and Jump Risk," Mathematical Finance, Vol.19, No.3, pp.343-378, 2009.

[8] Coculescu, D., Geman, H. and Jeanblanc, M., "Valuation of Default-Sensitive Claims under Imperfect Information," *Finance and Stochastic*, Vol.12, pp.195-218, 2008.

[9] Cremers, K. J. M., Driessen, J. and Maenhout, P., "Explaining the Level of Credit Spreads: Option-Implied Jump Risk Premia in a Firm Value Model," Review of Financial Studies, Vol. 21, Issue 5, pp. 2209-2242, 2008.

[10] Dong, G., Huang R., and Ng, P., "Tacit Collusion between Two Terminals of Port," *Transportation Research Part E*, Vol.93, pp.199-211, 2016.

[11] Dong, G., Zheng, S., and Lee P. T-W., "The Effects of Regional Port Integration: The Case of Ningbo- Zhoushan Port," *Transportation Research Part E*, Vol.120, pp.1-15, 2018.

[12] Duffie, D. and Singleton , K. J., "Modeling Term Structures of Defaultable Bonds," *The Review of Financial Studies*, Vol.12, pp.687-720, 1999.

[13] Duffie, D. and Lando, D., "Term Structure of Credit Spreads with Incomplete Accounting Information," *Econometrica*, Vol.69, pp.633-664, 2001.

[14] Goldstein, R, Ju, N. and Leland, H., "An EBIT-based Model of Dynamic Capital Structure," *Journal of Business*, Vol.74, No.4, pp.483-512, 2001.

[15] Graham, A. and Morrell, P., *Airport Finance and Investment in the Global Economy*, Routledge, 2016 (木谷直俊・塩見英治 [監訳]『グローバル経済における空港のファイナンスと投資』, 創成社, 2018).

[16] Hackbarth, D., Miao, J. and Morellec, E., "Capital Structure, Credit Risk, and Macroeconomic Conditions," *Journal of Financial Economics*, Vol.82, pp.519-550, 2006.

[17] Ishizaka, M. and Takaoka, K., "On the Pricing of Defaultable Bonds Using the Framework of Barrier Options," *Asia-Pacific Financial Markets*, Vol.10, pp.151-162, 2003.

[18] Jarrow, R., Li, H., Liu, S. and Wu, C., "Reduced-Form Valuation of Callable Corporate Bonds: Theory and Evidence," *Journal of Financial Economics*, Vol.95, pp.227-248, 2010.

[19] Jarrow, R. A., Lando, D. and Turnbull, S. M., "A Markov Model for the Term Structure of Credit Risk Spreads," *The Review of Financial Studies*, Vol.10, pp.481-523, 1997.

[20] Jarrow, R. A., Lando, D. and Yu, F., "Default risk and diversification: Theory and empirical implications," *Mathematical Finance*, Vol.15, No.1 pp.1-26, 2005.

[21] Jarrow, R., and Turnbull S. M., "Pricing Derivatives on Financial Securities Subject to Credit Risk," *The Journal of Finance*, Vol.50, pp.53-86, 1995.

[22] Kavirathna, C. A., Kawasaki, T. and Hanaoka, S., "Intra-Port Coopetition under Different Combinations of Terminal Ownership,'' *Transportation Research Part E*, Vol. 128, pp. 132-148, 2019.

[23] Longstaff, F. and Schwartz, E. S. "A Simple Approach to Valuing Risky Fixed and Floating Rate Debt," *The Journal of Finance*, Vol.50, pp.789-819, 1995.

[24] Madan, D. and Unal, H., "A Two-Factor Hazard Rate Model for Pricing Risky Debt and The Term Structure of Credit Spreads," *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, Vol.35, pp.43-65, 2000.

[25] Merton, R., "On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rate," *The Journal of Finance*, Vol.29, pp.449-470, 1974.

[26] Xiao, Y., Fu, X. and Zhang, A., "Demand Uncertainty and Airport Capacity Choice," *Transportation Research Part B*, Vol.57, pp.91-104, 2013.

[27] Xiao, Y., Fu, X., Oum, T. H. and Yan J., "Modeling Airport Capacity Choice with Real Option," *Transportation Research Part B*, Vol.100, pp.93-114, 2017.

[28] Zhou, C., "The Term Structure of Credit Spreads with Jump Risk," *Journal of Banking and Finance*, Vol.25, pp.2015-2040, 2001.

[29] 石井昌宏・橋本悟・石坂元一・手塚広一郎「空港事業における資金調達手段に関する研究 最終報告書」, 航空政策研究会 2018 年度研究プロジェクト支援報告書, 2018.

[30] 柿本与子『公的セクターの改革と信用リスク分析』, 金融財政事情研究会, 2007.

[31] 加藤一誠「アメリカにおける空港債による資金調達」,『日本大学経済学部経済科学研究所紀要』, Vol.38, pp.111-124, 2008.

[32] 加藤一誠「アメリカの空港債と空港オーソリティ」,『産業経営プロジェクト報告書』, Vol.38, 2015.

[33] 加藤一誠・地主敏樹・砂川伸幸・播磨谷浩三・後藤孝夫「空港プロジェクトのファイナンス手法 -アメリカのレベニュー債を中心に-」, APIR REPORT, No.12, 2013.

[34] 加藤一誠・手塚広一郎 編著『交通インフラ・ファイナンス』, 成山堂書店, 2014.

[35] 日下部隆昭・森山弘一「事業目的別歳入債券の有効活用に関する研究 II ～我が国への導入に向けた可能性の調査・考察～」,『国土交通政策研究』, Vol.73, 2006.

[36] 三枝まどか・加藤一誠・黒沢義孝「アメリカにおける空港債の格付けの決定要因」『公益事業研究』, 第 60 巻, 第 2 号, pp.1-10, 2008.

[37] 手塚広一郎・加藤一誠 編著『交通インフラの多様性』, 日本評論社, 2017.

[38] 長野幸司・日下部隆昭・江岡幸司・渡瀬友博・森山弘一「事業目的別歳入債券の有効活用に関する研究」,『国土交通政策研究』, Vol.56, 2005.