

相互依存性解析：研究開発動向と課題

INTERDEPENDENCY ANALYSIS: TRENDS AND ISSUES

奥山 恭英¹・堀井 秀之²・山口 健太郎³

¹Ph.D. (地域計画) 国際大学大学院准教授 国際関係学研究所 (E-mail:okuyama@iuj.ac.jp)

²Ph.D. (社会技術) 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (E-mail:horii@civil.t.u-tokyo.ac.jp)

³Ms.Eng. (社会システム政策) (株) 三菱総合研究所 社会システム政策研究部
(E-mail:yamaken@mri.co.jp)

相互依存性解析は、社会システムにおける脆弱性を相互依存関係から分析を進めるものであるが、第三期科学技術基本計画や日米安全・安心な社会に資する科学技術に関するワークショップにても取り上げられているように、現在の複雑化する社会システムを把握する上で有用な視点と考えられる。本論文ではこの相互依存性解析につき、日本および海外の事例からのその研究開発動向を紹介するとともに、研究者側と研究開発のユーザー側へのヒアリングを行い、現状での課題を抽出したものである。さらに抽出された課題を基に、今後の研究開発の方向性を提案することを目的としている。

キーワード：社会システム、災害、脆弱性分析、ライフライン、動向調査

1. はじめに

第三期科学技術基本計画の社会基盤分野でも大きく取り上げられている、災害時における相互依存性解析は、社会システムの脆弱性を相互依存性に着目して検討・分析することを目的としている。この相互依存性解析は、例えば 2005 年に開催された政府間レベルで行われている「第2回日米安全・安心な社会に資する科学技術に関するワークショップ」においても、災害時における「重要社会基盤施設保護及び相互依存性解析」が重要課題の一つとして討議が行われていることなどからも、その研究が世界的な潮流であることが窺える。本論文はこの相互依存性解析に関する研究開発の動向調査を行い、その課題や将来への方向性を検討したものである。このため、相互依存性解析を活用した社会の脆弱性把握等について、研究者側の研究の現状と、行政機関や民間事業者等の研究開発成果のユーザーにおけるニーズの両面から、その研究開発の全体像の把握と今後の課題について分析した。

2. 相互依存性解析に係わる研究開発の動向

まず相互依存性とは何か、何をどの範囲で扱うものか、といった定義について、専門家へのヒアリングを基に考察する。そして現在までの相互依存性解析に係わる研究開発の経緯を総括するとともに、現行の研究開発動向を日本と諸外国に分けて評価する。そしてこれらの動向とともに研究者側から見た課題をまとめる。

2.1. 相互依存性解析の定義

「相互依存性」という用語は、英語の”interdependency”を直訳したものと考えられる。相互依存性を文字通りに解釈すると、「二つの主体が双方向で影響し合う」¹⁾ということになり、これは単なる「依存性」(影響が単方向のみ)と明確に区別されなければならない。また、この定義のままでは、どのような主体間の双方向での関係も含まれてしまうため、本報告書で取り扱う相互依存性を特定の対象に関するものとして定義する必要がある。

そこで、本報告書では「相互依存性」を以下の広義のものと狭義のものと二通りの定義に分ける：

広義の相互依存性解析：

社会的な機能が関連を持って双方向に影響し合うものは全て相互依存的な関係にあるといえる。そのため産業連関分析²⁾やネットワーク分析など、相互に何らかの関連を明示的にもしくは暗示的に持つものまで全て、広義の相互依存性の解析として定義することができる。この意味では「相互依存」という用語は「相互連関」と同義語または類義語と考えてよい。

狭義の相互依存性解析：

狭義の相互依存性は、災害時の被害連鎖や影響波及など、特にインフラストラクチャー間の相互依存性に焦点を当てるものである。特に米国ではこの点を強調して“infrastructure failure interactions”と呼ばれる場合も多い³⁾。狭義の相互依存性解析は、平常時から相互依存性を有するものが途絶することによって、あるべきものが影響を受けてしまうという考え方であり、「広義の相互依存性+特殊な要因」と考えられなくもない。例えば、道路機能に依存して行動を起こさなけ

ればならないものが、道路の被害により影響を受けるといったことである。ただし、そのため本定義は研究の間口を狭くしている可能性がある、という意見もある。

この定義区分により、本論文では「狭義の相互依存性解析」を中心にその動向調査を行ったが、「広義の相互依存性」を含めた拡張を行わなかったわけではない。広義の相互依存性においては、様々なレイヤーの上で社会機能が稼働していると考えられる。例えば、ライフライン上で様々な社会機能が複雑に絡み合っていて稼働している、といった具合である。相互依存性を扱う際には、どこからどこまでという境界を設けることが重要になり、さらに一般的な市民や民間企業も含めた複合的な相互依存性を勘案する必要がある。例えば、後述する研究開発ユーザーのニーズに関するヒアリングから、災害時における社会経済への影響と復旧・復興時におけるその他の要因（帰宅困難者や避難所の問題等）も併せて考察する必要があるとの指摘を受けた。

2.2. 相互依存性解析に関する研究開発の経緯

岐阜大学の能島教授によれば、地震を対象とした相互依存性解析研究については、宮城県沖地震に関する1980年代に実施された研究で、ガス・電力・上水道供給システムの震災後の復旧シミュレーションや、ライフライン機能の影響波及といった研究が最初と考えられ、その後は主に事例調査に留まっている。相互依存性の原用語である“interdependency”は、1991年にニュージーランドのカンタベリー大学のグループが作成した報告書の中で初めて使われた⁴⁾、と考えられている。

日本では、1995年に兵庫県南部地震が発生し、建築物を含めた被害の波及の現象そのものを捉える研究が多く実施された。相互依存性という言葉は使われていなかったが、ライフライン連関による被害波及の研究は事例研究として行われた⁵⁾。しかし、その後は事例研究を基にした理論的もしくは実証的研究への伸張はあまり見られなかった。

海外においては、特に米国において1997年のクリントン政権下で発せられた“Critical Infrastructure Protection (CIP)”に関する報告書の下、重要インフラ防御の観点から、相互依存性という観点により社会システムの脆弱性を研究開発する活動が活発になった。それに加えて、2001年の同時多発テロ以降活発化する国際テロへの備えから、重要インフラ防御・相互依存性解析という形で、国家安全保障と学術研究の両面から研究開発活動が進展している。その他の先進国（ヨーロッパ、オーストラリア、カナダ等）においても、主に国家安全保障の観点からインフラの脆弱性の検討、そしてインフラ間の相互依存性の評価を実施している（詳細は後

述）。重要インフラに関する学術的研究は、災害による単一ライフラインへの被害とその機能障害、そしてそこから社会・経済への影響という点に概ね留まっており、ライフライン間の相互依存性を勘案した研究は、今後の課題となっている⁶⁾。

2.3. 相互依存性解析に係わる最近の研究開発の動向

ここでは、相互依存性解析に係わる最近の研究開発動向を日本と海外に分けて報告する。

日本における研究開発動向

日本における相互依存性解析に係わる研究開発について、まず岐阜大学の能島暢呂教授にヒアリングを行った。能島教授は1992年に発表した学位論文⁷⁾以来、一貫して相互依存性解析に係わる研究を手がけている。その研究の目的は、実際の災害時におけるライフラインに係わる被害とその影響把握の実態調査から、そこから得られたデータを基にした数理モデルの構築、そして導出された結果の考察と被害軽減策の検討への適用である。能島教授の研究は災害時におけるライフライン間での影響波及の研究だけに留まらず、生産過程での相互依存性、いわゆるサプライチェーンへの拡張等、より実証的・応用研究的な活動が中心である。能島教授とのヒアリングから得られた研究実施上の課題は、行政やライフライン事業者を巻き込んだ研究体制作りの必要性、関連省庁間におけるリーダーシップの不明確さ、被害想定に対する事業者の抵抗感、そして相互依存性解析に携わる研究者の不足などがあげられる。

相互依存性に関する多人数での研究プロジェクトとして挙げられるのが、千葉大学の山崎文雄教授を中心としたグループが行っているもので、地盤災害からの主要インフラに及ぼす影響を解明することを目的とし、総合的な見地から最適な対策を策定するための技術開発を目指している⁸⁾。このプロジェクトの特徴は約16の研究機関やライフライン事業者から研究者が集まり、相互依存性を多角的に検討し、さらに地盤災害の発生から相互依存性を通して地域経済に及ぼす影響までの包括的な災害影響評価を行うための研究体制としていることである。本研究プロジェクトの代表者である山崎教授によれば、研究実施上の課題としては、ライフラインシステムの相互依存に関する日本における系統的な研究の遅れ、関連省庁をまとめる総合的な推進体制の必要性、そして研究資金調達の困難さがあげられた。

研究機関単体として相互依存性解析研究を行っているものは、例えば電力中央研究所のシステム技術研究所を中心としたチームがあげられる。内閣官房の情報セキュリティ政策会議で策定した「重要インフラの情報セキュリティ対策に係る行動計画」⁹⁾に沿って、重要インフラの各事業においてITの機能不全が引き起こす障害（IT

障害)から重要インフラを防護するため、IT障害が電力供給に及ぼす影響とそこからの社会経済的な影響把握までを研究の対象としている。特に、本研究では災害時における電力供給に係わるリスクを機能障害と復旧障害の両局面から検討し、また時間軸における相互依存性の変化(短期または中期)にも研究の重点を置いている。基本的には電力ネットワークの数理モデルにより被害波及分析を行う計画である。研究チーム(研究代表者と研究者)へのヒアリングにおいて、当該事業者からのデータの入手の困難さ、および研究成果の公表に関する問題(脆弱性を露呈させることになるため、悪用されるのではないか)が課題としてあげられた。

公的研究機関でも相互依存性に関する研究開発活動は行われている。独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センターでは、二つの研究開発領域で相互依存性解析に係わる活動が行われている。「安全安心領域」では平成17年度以来、主に首都圏における巨大震災を対象とし、構造物の被害を高度地震シミュレーションシステムにて解析し、その結果を基に物流やその他のライフラインへの相互依存性を勘案した影響波及を推定する研究を行ってきた。また、当該地域への社会経済影響評価へ拡張することにより、社会一般への影響がどのようなものになるかを把握し、減災・防災対策への有用な情報を提供することを目的としている。その一端として、これらの手法から得られる結果を業務継続計画(BCP)策定に活かすため首都圏の企業との情報交換を行っていた(平成18年度末にて終了)¹⁰⁾。また、「情報と社会領域」では、平成15年度から始まった計画型研究開発の中で、内閣官房の情報セキュリティセンターと連携して、情報システムインフラの脆弱性と被害予測(ハザードマップ)研究を行っている。その一環として、重要インフラにおける相互依存性の調査を行った。これは、何らかの理由により電力の供給に不具合が発生し、それが起因となって情報・通信インフラに障害が発生し、それがどのように全国的に広がっていくか、というシミュレーションを行っている。このため、電力と情報という2つのインフラ間の相互依存性および情報とその上位のインフラ(金融ネットワークなど)との相互依存性の解析が主となっており、情報障害後の他のライフラインや経済活動への影響はその業務の情報への依存度を基に考えられている¹¹⁾。

これら以外にも関連した活動として、相互依存性としてではなく災害とライフラインを中心とした社会基盤への影響という点で研究開発活動は行われており、それらについてはヒアリングではなく、収集可能な資料を基に以下に簡潔にまとめる。例えば、文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクトのⅢ—3、大課題2「大規模ライフライン網の地震災害評価シミュレーション手法

と耐震性向上技術の開発」は、京都大学防災研究所を中心とした研究チームで行われ、単一ライフライン網の震災時における信頼性解析法の開発を目的としている。災害のみに特定せず、社会をシステムと考えそのマネジメント方法を研究しているものに、高知工科大学の21世紀COEプログラム「社会マネジメント・システム学の拠点形成」がある。これはどちらかというと社会を広義の相互依存性でとらえ、その相互依存性をシステムとして考察し、そのマネジメント方法を学問体系として構築する、というものと考えられる。これとは逆に、都市地震のみに特化しその中のモノ・ヒト・社会に関連する広範囲な研究を行っているものに、東京工業大学の21世紀COEプログラム「都市地震工学の展開と体系化」がある。これはどちらかというと地震防災に係わるものを「地震防災先端技術」、「都市再生防災技術」、そして「都市防災技術戦略」の視点から体系化することを目的としており、その中の高精度震災シミュレーション技術などを用いて相互依存性解析が研究されている。

以上のように、日本における相互依存性解析に係わる研究開発活動は、比較的限定されていると考えられる。逆に捉えれば、日本の専門分野的な縦割りの防災・減災に係わる研究開発体制は、世界的に最先端にあることは異論が無いと思われるが、横断的・俯瞰的に事象を捉えそれを包括的に融合するような相互依存性解析は、どちらかといえば研究開発が端緒についたばかり、といえるのかも知れない。この日本の現状における課題は、以下の海外における動向と比較して、次項にてさらなる分析とまとめを行う。

海外における研究開発動向

・米国における動向

米国の場合、1997年にクリントン政権下で発せられたCIP(critical infrastructure protection)に関する報告書(PCCIP、1997)¹²⁾により、重要インフラの防御が政策課題として取り上げられ、研究活動が活発化した。この報告書はその後1998年に「大統領令63:重要インフラ防御」として発せられ、その後2003年にブッシュ政権下で「大統領令 Hspd-7 (Critical Infrastructure Identification, Prioritization, and Protection)」に取って代わられた。その他には North American Electric Reliability Council (NERC) が2001年に相互依存性解析を電力業界における4つの最重要課題の一つとして位置づけている¹³⁾。

相互依存性に係わる研究もこれと同時に活発化している。1998年には Electric Power Research Institute と国防総省が5年間3,000万ドルの研究資金で共同研究プロジェクトとして Complex Interactive Networks/Systems Initiative (CIN/SI)を行った。このイニシアティブは26の米国内の大学から研究者が集い、複雑なインフラシステ

ムをモデル化し、管理するための基本的な方法が開発された¹⁴⁾。また、米国立研究所ではいくつかの相互依存性を勘案したモデルが構築されている。例えば、ライフラインにおける障害のシミュレーションモデルでは、相互依存性による他のインフラへの障害波及も取り込んだものである¹⁵⁾。さらに最近では3つの国立研究所(Argonne, Los Alamos, and Sandia)共同でCritical Infrastructure Protection/Decision Support System (CIP/DSS)の開発が2003年より始まった。この共同研究の中では14種類の重要インフラの相互依存性が都市レベルおよび全国レベルで大規模モデル化される計画である¹⁶⁾。しかしながら、これらの研究は一部の公表されている資料を除き、大部分がClassified(機密)文書となっている。

その後、2004年の米国北東部の大停電などにより研究活動が活発化している。米国では、主に電力や電気通信、都市基盤施設に関する相互依存性研究がなされている。民間レベルでは、例えば米国西海岸北西部のPacific Northwest Economic Region (PNWER)が2002年の7月にライフライン間の相互依存性を勘案した災害の机上演習を行った¹⁷⁾。この演習は米国側の連邦緊急事態局(FEMA)とカナダ側のOffice of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparednessから資金を得て、70以上の公的および民間組織が参加した。この中では、テロ攻撃による電力供給や交通網の支障などのシナリオが含まれており、相互依存性を勘案した地域のインフラ防御改善の必要性が確認された。

・欧州その他における動向

ETH Zurichのグループが、2003年よりCIPについて研究プロジェクトを実施¹⁸⁾し、その中で「interdependencies」について取り上げている。電力システムに焦点をあてプロジェクトを実施しており、2つのケーススタディ、①イタリアでの停電(2003年9月28日)、②米国での停電について実施。さらに中国との共同研究も検討している。2006年には「Critical Infrastructures at Risk: Securing the European Electric Power System」¹⁹⁾としてその研究結果がまとめられた。

オーストラリアでは1998年以来、国防関係の観点からインフラの脆弱性についての検討が始まった。その第一段階では、15のインフラ部門の脆弱性を評価し、その相互依存性を分析した。これを基として、産業部門における脆弱性の分析を実施した。産業部門間の相互依存性は専門家により3段階(重篤、重要、または平穩)のランク付けが行われた²⁰⁾。

カナダでは2000年の春以降に、国防省内に重要インフラ防御専門部会(Critical Infrastructure Protection Task Force (CIPTF))が設置され、カナダにおける重要インフラの脆弱性の広範な評価を行う手順を開発した。その中で、相互依存性は重要課題として取り上げられて

いる。CIPTFが行った解析では、6つの重要部門(政府、エネルギーとライフライン、サービス、運輸・交通、安全、そして通信)を含んだ多階層モデルを開発し、多くの専門家の意見を反映して分析を行っている²⁰⁾。

2.4. 相互依存性解析に係わる研究開発側からの課題

上記において日本の研究開発者やグループの代表者等へのヒアリングから得た情報をもとに、日本での相互依存性解析に係わる課題をまとめると、1)相互依存性特有の課題; 2)日本特有の課題; そして3)体制・対策に係わる課題、の三つに大きく分けることができる。

第一の相互依存性特有の課題としては、災害時(狭義)の相互依存性を考察する際に特徴的なものが時間軸であり、それをいかに取り扱っていくかが非常に大切になるということである。平常時には比較的長い期間に渡って解析をするような相互依存性であっても、災害時は事態が刻々と変化していくものである。災害時においては、フェーズを区切って分析を行わないと様々な変化が混在してしまい、本質を見失うことが往々にしてある。例えば、ニュージーランドのウェリントンのグループが定量的に災害時の相互依存性を扱ったもの²¹⁾では2段階(直後1週間まで、と直後1ヶ月まで)に分けて考えている。また特に地震災害の場合、被害の同時多発性という特徴を有する。多くの場所で様々な構造物やインフラが同時に被災するため、被害伝播の因果関係が相互依存性によるものなのか、システム全般が被害を受けたためなのか、それを区別することが難しくなり、減災対策を検討する上で支障となる。

第二の日本特有の課題としては、日本のライフラインは欧米と比べて格段に信頼性が高く、例えば電力においてはリスク対策に対して過剰投資がなされているということである。また各ライフラインとも、他ライフラインからの被害波及を最小にするために自立閉鎖しており(例えば電気事業者は自前の通信手段を持つ等)、相互依存性解析が現在まで活発に行われてこなかった理由の一つと考えられる。また、事業者において相互依存性解析に取り組んでいる場合も非常に限定的である(例えば、電気事業者では相互依存性については、復旧時以外はあまり考えられていない)。さらに、日本では自然災害を事象の中心として考えているため、ライフライン事業者が被害を想定することに自己規制的であり、またテロなどは想定していないことが大半のため、相互依存性を考慮した被害波及までもっていくことが難しい。しかし、社会としての危機管理を考えると、テロ等によりどこが狙われるかは不明で、事業者としてはこれらの不測の事態に対しても相互依存性を勘案したcontingency planを考えることは必要と考えられる。

第三の体制・対策に係わる課題では、相互依存性に係

わる研究開発はステークホルダーが非常に多く、対策を担当する所管省庁間のリーダーシップがとりにくいと考えられるということである。これに対して、米国のCIPは省庁間等の障壁は存在するのであろうが、大統領を中心にトップダウンで進展させるという体制があるように見受けられる。これは、米国や欧州ではテロによる破壊（何が起きても不思議ではない；意図的に重要な施設を破壊する）を事象の中心と考えており、日本での自然災害（周期的に発生；法規制などで設計基準等を設定可能）を事象の中心と考えた取り組みとは基本的な姿勢が違うためであると考えられる。このため、相互依存性に関する研究開発体制を構築する場合には、省庁横断的な大規模なプロジェクトとして実施しないと、実践的に運用されるまでには到らないと考えられる。また、実際的な対策として考えた場合、インフラ事業者は相互依存を考慮した対策を検討していないわけではないが、それでもなかなか協力体制が進まないのは最終的に責任を取らなくてはいけないのは個々の事業者となるからであると考えられる。リーダーシップを取って進めていく機関があれば相互依存性を勘案した対策も進むのではないかと考えられる。

3. 相互依存性解析に関するユーザー・ニーズ調査

相互依存性解析に係わる研究開発のユーザー側におけるニーズを把握し分析するために、その成果を活用すると考えられるユーザーや相互依存性解析に係わるステークホルダー、官公庁、自治体、ライフライン事業者等の防災担当者にヒアリング調査を実施した。以下にこれらのヒアリングから得られた内容を、ニーズと課題にわけてまとめる。

3.1. 相互依存性解析に係わるニーズ

相互依存性解析に関して、またその期待される成果に係わるニーズとしてもっとも頻繁に挙げられたのが、災害時、特に巨大災害時、に複雑な社会システムで起きる事象のシミュレーションが可能になる、というものである。例えばインフラ事業者間では各々のインフラに関しての災害下でのシミュレーションや対策は十分に行われているが、他のライフラインへの被害の程度や具合により当該ライフライン使用者の利用形態が変化し、それによって自事業への負荷や利用形態にも変化が起こる、といったところまで考えられるのではないかと、といったニーズである。これは前述の「狭義の相互依存性」の範囲を超えており、(利用者を通した) 間接的な相互依存性と考えられ、この範囲まで解析に含まれる事が期待されて

いる。また、復旧の側面から見れば、人的資源（復旧人員）の配置計画まで考察できるようになれば、有効であるという意見もあった。さらに、社会を一つのシステムとしてシミュレーションを行うことが可能であれば、一つのシナリオのシミュレーション結果を見たときに、各事業者や担当部局での対策の相違点や共通点、矛盾点を見つけ出していき事が可能になり、社会の危機管理システムの評価という事へ繋げていけるのではないかと、との提案もあった。

また、シミュレーションとしてのニーズと関連して、その結果を基に、事前の対策立案に結びつけていくことが重要である、との意見を得た。例えば、災害後の復旧時のライフライン間の復旧の順番付けを、被害の程度に応じて事前に検討するのに利用可能と考えられる。または、各ライフラインにおいて補修の優先順位付けを相互依存性に勘案して行うための情報を提供する事も考えられる。さらに、災害に備えた訓練にもこのような解析の結果を取り入れていけるのではないかと、という意見もあった。もしくは、事前の対策立案への利用をさらに発展させ、都市におけるインフラ間の相互依存度から脆弱性指標の様なものを作成することも可能、との提案もあった。一般的には相互依存度の高い都市は平常時にはその相互依存性が効率的と考えられるが、翻って災害時には脆弱であり、これらのトレードオフを指標等により明示化できれば大きな成果になる、とも考えられる。

このようなシミュレーションを用いた総合的な相互依存性の解析とは別に、個々のライフライン事業者への災害時における最も有用な情報は、道路被害に関するものである。これは主に復旧障害に係わるもので、道路被害のために当該ライフライン被害場所に行くことが不可能であり復旧が遅れるため、どの地域にどのような道路被害があるのかという情報は重要となる。ただ、これらの情報を一元的にまとめ共有するためには担当官公庁だけではなく、広く情報を受け入れ、まとめ、発信する方法が必要であり、これも「広義の相互依存性」として考えれば、相互依存性解析に関するニーズの一つと考えることができる。

その他に、相互依存性解析の安全以外への利用も考えられる、との意見もあった。これはどちらかといえば「広義の相互依存性」的な視野から、例えばマーケティングの分野にて相互依存（どちらかといえば代替機能）があるライフライン間で、一方の需要が落ちるときにその需要を如何に拾って行くかというような局面に相互依存性解析が利用可能と考えられる。

現状として、相互依存性を勘案した災害対策へのニーズ側の取り組みとして、東京都では道路・ライフライン協議会を設け、電力、ガス、通信、交通が四半期に一度の割合で集まって情報交換をしている、との事例もある。

3.2. 相互依存性解析に係わるユーザー・ニーズからの課題

相互依存性解析の研究開発に係わるニーズ側（ステークホルダーやユーザー）に対して行ったヒアリングから抽出された、ニーズ側から研究開発側への要望や課題を以下で要約する。

まず、「相互依存性解析」という用語の中の「解析」という言葉は、学術的な研究、さらに数理解析モデルによる分析、という印象が強く、学術論文としての成果しかあがってこないようなイメージがあり、ユーザー側に具体的な全体像を抱かせない危惧がある。さらに、相互依存性解析というだけでは何をターゲットとしているのかが非常に曖昧になってしまっている。つまり、相互依存性ということで社会をシステムと捉えることは必要であるのだが、その成果として何が生み出され何が変わる（良くなる）のかがはっきりと示されなければ、ユーザー側としては使いようがないのである。これは前述した「広義の相互依存性」と「狭義の相互依存性」の違いのように、相互依存性の定義とその扱う範囲を明確にすることによりステークホルダーやユーザーを特定することが肝要となる。また、ニーズ側においても相互依存性解析の重要性は理解されているが、それが学術研究の範囲内での成果だけで終わるのであれば、現実の相互依存性に係る問題点や事業者の利用ということはかなり難しいのではないかと、という意見も聞かれた。また、災害という事象の中で時間変化とともに各要因の相互依存性も刻々と変化しており、たとえば災害直後の救急救命時、復旧時、復興時には相互依存性の優先順位も大きく異なる。このため、時間軸に沿って相互依存性を整理し、その中で分析・検討を行って行く方がニーズ側からもわかりやすいという提案もあった。

相互依存性解析を事業者（ステークホルダーもしくはユーザー）の側から見た場合、その活用時に最も大きな課題となるのが、相互依存性を勘案したシステム全体と単体との間の最適化のずれ、の問題である。つまり、例えばライフライン事業者は当該単体でその信頼性評価の形で最適化を行っている。各事業者とも単体の最適化を総和にしたものがシステム全体としての最適解ではないことは理解しているが、システム全体の最適解が単体での最適解ではない事も経験的に認識している。またライフラインは通常時はワンセットとなって利用されることが効率的であるが、非常時にはワンセットであることが必須とは考えられない。もし、システム全体の相互依存性を勘案した最適解に従った場合に、単体としての信頼度が低下したときの責任の所在が非常に不明確となり、現実の事業者としてはその実施に二の足を踏む事も考えられる。これは、各ライフライン事業者の監督官庁が異なる、ということもあいまってその取り組みの実施への障害となっている。何らかのまとめ役が必要になること

は必須と考えられる。このことは、災害時や緊急時における法律的な責任を明確にするための法制度上の枠組みを検討する必要性、ともいえる。全体としての最適解を選んだ場合に、ライフライン事業者間の瑕疵担保条項を整理しなければ、事業者としても全体としての最適解に取り組みない、という実情もある。ライフライン間での連携によりどの程度状況が改善されるのかを提示するため、また行政の監督範囲を横断的にまとめる必要があることを明示するために相互依存性解析を活用する、という考え方もできる。

ニーズ側のヒアリングを通して、重要インフラ間の相互依存性解析という枠組みには今までのところ含まれていなかった、しかしインフラ事業者には災害後の復旧作業時に相互依存性として直面する問題が導出された。災害後の復旧時において必要となるいわゆる「人・物・金」（この場合は、復旧要員・復旧資材・復旧資金）ということが、現在の研究開発の枠組みの中に組み込まれていない。例えば首都圏における直下型地震を想定した場合、これらの復旧活動に係わる人・物・金は震災後のインフラ間の相互依存性に大きな負荷や影響を与える。それらの活動を上手くシミュレーションに内包せず通常時と同じ負荷で分析をすると、災害後の相互依存性の解析が現実的ではないのではないかと、との指摘もあった。これらと同様に、災害後の復旧活動に対する基地的役割を担う空間が、首都圏を想定した場合には重要な問題となり、この空間の確保、もしくは空間とライフライン復旧作業の相互依存性という観点も必要と考えられている。さらに、災害によって被害を受けた構造物等から発生する瓦礫も、復旧作業や交通等（瓦礫が道路をふさぐ、瓦礫運搬のため交通が滞る）に大きな影響を与えるため、社会をシステムとして扱う相互依存性解析ならば瓦礫に係わる影響も勘案する必要がある、との意見も聞かれた。

復旧という点に注目すれば、相互依存性そのものが再構築される、との意見も得られた。つまり重要インフラでも、上流側インフラ（電気、通信、交通など）と下流側インフラ（ガス、水道等）のグループ化が可能であり、この上流側と下流側の復旧に係わる相互依存性を考慮する必要があるというものである。また、復旧時における復旧の優先順位に関しても、ライフライン間のものから復旧要員、避難住民、在宅住民間の支援優先順位の検討など、より現実的な問題があり、そちらの方がステークホルダーとしては検討の課題としては大きいと考えられる、といった声もあった。

「縦割り行政」という点も相互依存性に係る研究活動を行う上で課題となる、という意見も多く出された。「縦割り行政」の弊害としては、監督官庁ごとのアカウントビリティーが求められているため、相互依存性を定量的に考慮した行政サービスの設計は今のところ行われ

ていないのが現状である。また、省庁によってはどうしてもハード面（構造物や箱物）が壊れるのを防ぐ傾向にあるが、相互依存性の様なソフト面やシステム面の対策に対してはなかなかイメージができない、といった事も課題として考えられている。

このように、相互依存性解析に係わるニーズ側から見た課題は、相互依存性の持つ幅広さや横断的な側面からのものであり、このあたりを明確に定義してから実施に移行しないと、ニーズ側からはわかりづらいものになる可能性もある。また、重要インフラ間の相互依存性だけでなく、復旧時におけるインフラ以外の要因（人・物・金、空間、瓦礫等）も考慮して検討することが求められており、前述の範囲の明確化とともに「相互依存性」をどのように定義するか、何を指すものなのか、というところを明確にする必要がある。

4. 今後の相互依存性解析に係わる研究開発の方向性への提言

ここでは、相互依存性解析に係わる研究開発として、今後どのような方向やあり方が必要であるかについて、現在までの取り組みの遅れの原因分析と今後の方向性を本論文の結論として報告する。

4.1. なぜ日本では相互依存性解析が活発に行われてこなかったのか

上記にて総括した相互依存性解析に係わる研究開発動向において、日本と世界との間の大きな隔たりは明白なものである。主要先進国においては国家プロジェクトとして多くの予算を投じて相互依存性解析を実施している。これに相対して我が国では複数箇所で行われているが、全体としてあまり統制のとれていない形で行われている、といっても過言ではない。なぜこのように大きな隔たりがあり、何が問題点かという点に関して検討すると概ね次の3点に集約できると考えられる：

- 1) 横断的（複合領域的）研究開発；
- 2) 事業者単体での最適化・縦割り行政；そして、
- 3) 国家安全保障としての視点の欠落。

各々の点につき以下で考察する。

1) 横断的（複合領域的）研究開発

いうまでもなく、相互依存性解析は多くの要因を含有し、様々な分野の知見と経験を統合して連携して作業を行ってはいじめて有効な研究開発が可能となる。これは第2章で述べた相互依存性の定義からもわかるとおり、「相互依存性」というものの定義一つにしても人によって千差万別であり、また災害という事象そのものの中でも相互依存性は時間とともに変化していくため、局面ごとに

相互依存性の定義を綿密にしながらその対象や範囲を限定して解析を行う必要がある。このため、それに係わる研究者やステークホルダーも局面ごとに異なり、研究開発としてこれらを横断的にまた俯瞰的に統括また総括していく事は、至難の業となる。例えば既存の大学の学部学科といった様な枠組みや、省庁間の棲み分けといった様な体制的な区別化が進んでいる我が国の現状では、このような横断的な活動はかなり困難といわざるを得ない。相互依存性解析を行えるような分野横断的な活動を支援する機関や、研究開発活動を俯瞰的に総括できる人材も、残念ながら我が国では限定的であるといわざるを得ない。

2) 事業者単体での最適化・縦割り行政

ニーズ側の問題として、例えばライフライン事業者ではその単体ごとに最適化を高度な次元で達成しており、社会をシステムとして全体として見ての最適化の達成という要求も存在していない。もちろん、企業として社会への貢献という点でシステム全体の最適化への必要性は認識しているが、単体としての最適化とシステム全体の最適化を考えた場合、事業者としての信頼性評価という点ではどうしても単体としての最適を選ぶのは必然といえる。また、システム全体の最適化を選択したときの責任の所在に関して、それを明確にする体制が存在していないことも事実である。これは行政に関しても同様で、行政サービスの相互依存性に関しての必要性を担当者レベルでは痛感していても、それを実施するための枠組みが存在しないか、構築しようとしても非常に困難であるという現状がある。

3) 国家安全保障としての視点の欠落

第2章でまとめた諸外国での研究開発動向を見てもわかるとおり、外国での相互依存性解析に係わる取り組みは、概ね National Security（国家安全保障）という観点から主導的に行われており、そのため大規模な国家をあげてのプロジェクトとなり、それ故その成果も実務への反映を前提として行われている。この点において、我が国の相互依存性解析に係わる研究は学術的研究の側面が強く、実務レベルとのフィードバックについてやはり弱いといわざるを得ない。もちろん、内閣官房の情報セキュリティセンターが関与している研究開発活動は国家安全保障に関連してはいるが、「情報」という一側面のみ切り口であり、包括的な国家安全保障（いわゆる「広義の相互依存性」をすべて含む様な形）を勘案したものは異なる。これは我が国独自の問題ともいえるかも知れないが、この視点が欠落していることは、相互依存性を勘案した政策や事業を実施する上で、その目的の大きな部分が欠如してしまうことになりかねず、研究開発を進めたとしても、その出口（何を達成するためのものか）を考慮するに当たり大きな障害となっていると考えられる。

4.2. 今後どのような方向で取り組むべきか

それでは、相互依存性解析の研究開発を今後進めて行く上で、どのような方向で取り組む事が必要かを以下にまとめる。

1) 横断的な研究開発体制の構築

相互依存性解析のような横断的・包括的な研究対象を取り扱うものに関しては、分野横断的、省庁横断的、そして産官学協働の研究体制が必要となる。これは上記からもわかる通り、現状の大学における分野縦割り型の学部学科の構成では研究者の横のつながりに対して評価が低く、研究者のインセンティブを向上させるためにも横断型の組織は必要である。また、相互依存性の様に社会の事象を幅広く扱うような研究開発では、一官庁の所管研究所では守備範囲が著しく限られるため、研究開発の意義すらなく、省庁横断的な組織でなければ意味のある研究開発に着手できない事は明白である。ただし、すべてが横並びというよりは、いずれかの官庁がまとめ役となって音頭と取ることは日本の文化的背景を勘案すると必要な事だと思われる。さらに、ニーズ側のヒアリングからも抽出されたように、事業者の視点を考慮しなければ、実際に考慮されなければならない要件が反映されないため、事業者やステークホルダーを幅広く集め組み込んでいくような体制が必要と考えられる。これらの事すべてを実現するためには、かなりの規模の研究開発体制が必要となり、その構造もすべからず吟味される事が肝要となる。

2) 単体での不利益を担保する体制づくり

ニーズ側でのヒアリングからも明白であるが、相互依存性を勘案してシステム全体としての最適化を目指す時に、単体としての最適化が損なわれる場合、それを担保する体制がなければ、いくら相互依存性解析の研究開発活動を推進しても、その結果が社会や現場で活かされる事は非常に困難である、と考えられる。このため、まず相互依存性解析に係わる研究開発の目的を国家安全保障という観点からとらえ、国家安全保障を高い次元で実現すべく、社会システム全体での最適化を図る、とすることが検討されなければならない。さらに、システム全体での最適化のために単体における不利益（信頼性の低下や復旧時間の遅延等）が発生する場合には、それを担保する制度を整備し、事業者からの協力を保証する仕組みを構築する事が肝要となる。このためには、法体制の整備や税の優遇などの措置が考えられ、相互依存性解析の研究開発の初期段階では、これらの研究開発が含められることが必須と考えられる。

3) 切り口（入り口）の選定

現在までのところ、我が国における相互依存性解析に係わる研究は、その入り口を自然災害、特に巨大地震としている。これは、自然災害の多い我が国ではもともと

なことであるのだが、同時に両刃の剣でもある。つまり、自然災害に対する研究開発は長年の歴史とその蓄積があり、各事業者においても自然災害への対策は実施・改良が継続してなされており、単体としては世界でも高い水準の自然災害への対策を施している、と考えられているためである。自然災害に対する防災・減災の政策も幅広い方面で行われてきており、この上さらに相互依存性を勘案した対策というものが本当に必要なのか、という印象を事業者のヒアリングからも感じた。逆に、世界各国で行われている相互依存性解析は、テロや人的災害に対する重要インフラ防御を主眼にしているものが多く、このような切り口であると「どこで起きても仕方がない」、「設計耐力以上の破壊活動が行われる可能性がある」、「重要インフラすべてを防御することは不可能なのでどこを優先的に防御すべきか」といった政策課題に答えるためにも、相互依存性解析が必要となる。日本では、テロ発生そのものは非常に確率が低いと考えられているが、国家の政策として、また上記の国家安全保障の一環として、テロを切り口として相互依存性解析の研究開発を押し進めることは、その結果を自然防災・減災の政策にフィードバックさせることができるだけでなく、より安全で強固な社会システムを構築する上でも有益な事であると考えられる。

参考文献

- 1) Myriam Dunn and Isabelle Wigert. (2004) Critical Information Infrastructure Protection. ETH Zurich: p. 243.
- 2) 例えば、Geoffrey J.D. Hewings, Yasuhide Okuyama, and Michael Sonis (2001) "Economic Interdependence within the Chicago Metropolitan Region: A Miyazawa Analysis," *Journal of Regional Science*, 41 (2): 195-217.
- 3) Stephanie E. Chang, Timothy L. McDaniels, and Dorothy Reed. (2005) "Mitigation of Extreme Event Risks: Electric Power Outage and Infrastructure Failure Interactions," in H.W. Richardson, P. Gordon, and J.E. Moore II eds. *The Economic Impacts of Terrorist Attacks*. Edward Elgar: pp. 70-90.
- 4) The Centre for Advanced Engineering. (1991) *Lifelines in Earthquakes: Wellington Case Study*, Project Report. University of Canterbury, NZ.
- 5) 能島暢呂・亀田弘行 (1995) 地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.231-241.
- 6) Stephanie E. Chang, Timothy L. McDaniels, and Dorothy Reed. (2005) "Mitigation of Extreme Event Risks: Electric Power Outage and Infrastructure Failure Interactions," in H.W. Richardson, P. Gordon, and J.E. Moore II eds. *The Economic*

- Impacts of Terrorist Attacks. Edward Elgar: pp. 70-90.
- 7) 能島暢呂 (1992) 地震災害における都市ライフライン系のリスク評価に関する研究 京都大学博士論文.
 - 8) 大規模災害時のライフライン防御戦略研究会 (2006) 公開シンポジウム: 大規模災害時のライフライン機能の防御戦略策定を目指して 配付資料.
 - 9) http://www.nisc.go.jp/active/infra/pdf/infra_rt.pdf
 - 10) 独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター 安全安心研究ユニット (2007) 相互依存性解析に関する研究開発動向の調査: 報告書.
 - 11) 独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター 「情報と社会」研究開発領域 (2006) 「高度情報社会の脆弱性の解明と解決」平成17年度成果報告書.
 - 12) President's Commission on Critical Infrastructure Protection (PCCIP). (1997) Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures. Washington D.C.
 - 13) North American Electric Reliability Council (NERC). (2001) An Approach to Action for the Electricity Sector. Princeton, NJ: Working Group Forum on Critical Infrastructure Protection.
 - 14) Amin, Massoud. (2000) "National Infrastructures as Complex Interactive Networks," in T. Samad and J. Weyrauch eds. Automation, Control, and Complexity: An Integrated Approach. New York, NY: John Wiley and Sons: 263-86.
 - 15) Peerenboom, J., R. Fisher, and R. Whitfield. (2001) "Recovering from Disruptions of Interdependent Critical Infrastructure," paper presented for CRIS/DRM/IIIT/NSF Workshop on Mitigating the Vulnerability of Critical Infrastructures to Catastrophic Failures. Alexandria, VA, 10-11 September.
 - 16) CIP/DSS Overview. (2004) "Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP/DSS) Project Pverview," Argonne, Los Alamos, and Sandia National Laboratories.
 - 17) <http://www.pnwer.org/pris/CascadesReport.htm>
 - 18) https://www.rdb.ethz.ch/projects/project.php?type=&proj_id=7562&z_detailed=1#detailed/
http://www.irgc.org/irgc/projects/critical_infrastructure/
https://www.rdb.ethz.ch/projects/project_pdf.php?proj_id=7562
 - 19) Gheorghe A.V., Masera M., Weijnen M.P.C., and De Vries L.J. (2006) Critical Infrastructures at Risk: Securing the European Electric Power System. Springer.
 - 20) Wenger, Andreas. and Jan Metzger. (2004) Critical Information Infrastructure Protection Handbook 2004. ETH Zurich.
 - 21) The Centre for Advanced Engineering. (1991) Lifelines in Earthquakes: Wellington Case Study, Project Report. University of Canterbury, NZ.

謝辞

本論文は、独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター 安全安心研究ユニットが文部科学省 科学技術・学術政策局 政策課 安全・安心科学技術企画室からの依頼を受けて、相互依存性解析に関する研究開発動向について平成18年度に調査・取りまとめをした報告書を基にしている。社会技術研究開発センター、安全安心研究ユニットの諸氏、特に安藤二香氏および山口直也氏には多大なるご協力をいただいた。また匿名の3人の査読者の方々には貴重なご意見をいただいた。ここに心から感謝の意を表する。

INTERDEPENDENCY ANALYSIS: TRENDS AND ISSUES

Yasuhide OKUYAMA¹, Hideyuki HORII², and Kentaro YAMAGUCHI³

¹Ph.D. (Regional Planning) Associate Professor, International University of Japan, Graduate School of International Relations (E-mail:okuyama@iuj.ac.jp)

²Ph.D. (Science and Technology for Society), Professor, University of Tokyo, Dept. of Civil Engineering (E-mail:horii@civil.t.u-tokyo.ac.jp)

³Ms.Eng. (Social-system Policy) Mitsubishi Research Institute, INC., Social-System Policy Department (E-mail:yamaken@mri.co.jp)

This paper aims to investigate the trends of and to extrapolate the issues surrounding interdependency analysis. Interdependency analysis studies the linkages, especially among lifeline infrastructures, within the socio-economic system for evaluating its vulnerability, and has gained its importance in the recent years, due mostly to the frequent occurrence of sever natural disasters and the increasing threats of international terrorism. Survey was conducted by interviewing both the researchers and the users of such research, in order to examine the current affairs and to formulate the agendas for the future research and development.

Key Words: Socio-Economic System, Hazards, Vulnerability Analysis, Infrastructures, Trend Survey