

# サプライチェーン指向の交通ネットワークの脆弱性評価：スラウェシ島のココアのサプライチェーンを例に

里内 俊介<sup>1</sup>・山田 忠史<sup>2</sup>・Zukhruf Febri<sup>3</sup>・谷口 栄一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:shunsuke.s@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail:t.yamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員, Academic Assistant, Dept. of Civil Eng., Bandung Institute of Technology  
(Bandung 40132, Indonesia)

E-mail: febrizukhruf16@gmail.com

<sup>4</sup>フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)

E-mail:taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は、サプライチェーンの観点から、交通ネットワーク(TN)の脆弱性評価を試みるものである。TN上のリンクの途絶によるサプライチェーンネットワーク(SCN)上の総余剰の低下に着目し、ネットワーク停止問題の一種として、脆弱性を取り扱う。具体的には、均衡制約付き数理計画問題の枠組みで、サプライチェーンネットワーク均衡モデルを下位レベルに組み込み、上位レベルで、余剰低下が最大となるような途絶リンクの組み合わせを求める。下位レベルでは、地域集荷商、卸売業者、輸出業者、消費市場、物流業者の行動を記述する。この手法をインドネシアスラウェシ島のココアのSCNに適用し、TNの脆弱性について基礎的検討を行う。

**Key Words :** *vulnerability, network interdiction problem, supply chain network equilibrium, cocoa transport*

## 1. はじめに

東日本大震災において、交通ネットワーク(transport network: TN)上のリンクの途絶が、物資や製品のサプライチェーンネットワーク(supply chain network: SCN)に及ぼす影響の大きさが再認識されたように(例えば、文献1)、TN上のリンクの途絶は、SCNの効率性に、多大な影響を及ぼす。災害時を見据えた場合、SCN上の活動を継続させるうえで重要なリンクを事前に抽出しておき、災害に対して強靱であるように、何らかの対策を講じておくことが望ましい。山田ら<sup>2)</sup>は、SCN指向のTNの強靱化に供するために、ネットワーク停止問題(network interdiction problem: NIP)<sup>3)</sup>の枠組みで、TN上のリンクの途絶がSCNの余剰低下を最大にするようなリンクの抽出、すなわち、SCNの観点から見た、TNの脆弱性解析<sup>4,5)</sup>を行っている。

本研究では、山田ら<sup>2)</sup>の研究を、インドネシアのスラウェシ島におけるココアのSCNに適用する。インドネ

シアは、世界第三位の生産国であり<sup>6)</sup>、その大部分がスラウェシ島で生産されている<sup>7)</sup>。一方で、インドネシアは、地震や洪水など自然災害の多発国であり、災害によって莫大な経済損失が生じているため、災害に対するTNの強靱化と、それに資するTNの脆弱性分析が急務の課題となっている。

既存の手法<sup>2)</sup>では、均衡制約付き数理計画問題(mathematical programmes with equilibrium constraints: MPEC)が採用されており、上位レベルが、SCN上の余剰低下を最大にするような交通リンクを抽出する組み合わせ最適化であり、下位レベルが、サプライチェーンネットワーク均衡(supply chain network equilibrium: SCNE)に相当する。本研究では、ココアのSCNを対象とするため、従来の工業製品を対象としたSCNEモデル(例えば、文献8))ではなく、農産品を対象として構築されたSCNEモデル<sup>9)</sup>を用いる。上位レベルの解法については、組み合わせ数小さい場合には、列挙法により厳密解を求めることができるが、組み合わせ数が多い場合には、近似解法を

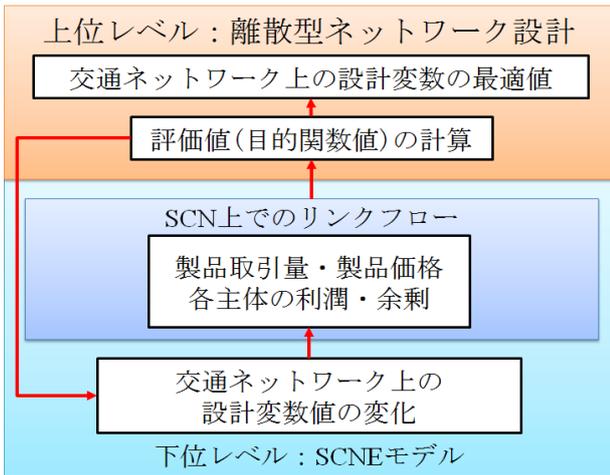


図-1 モデルの全体構造

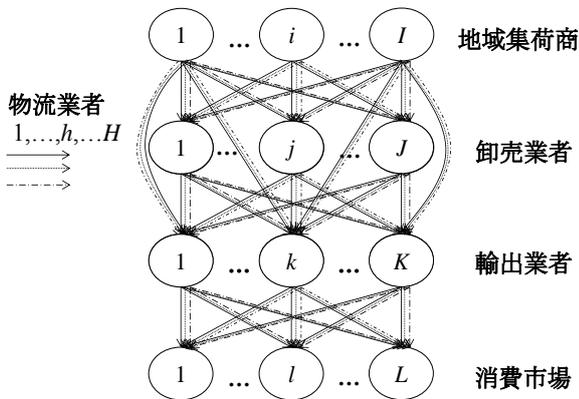


図-2 モデル化の対象とするココアの SCN

用いる必要がある。その際、本研究では、遺伝的アルゴリズムやタブーサーチよりも高速で高精度な手法である、Yamada and Febr<sup>10)</sup>による修正型確率的離散二値粒子群最適化法(modified probability-based discrete binary particle swarm optimization: MPBPSO)を用いる。

## 2. モデルの概要

上述のMPEC型モデルの全体構造は、図-1のようになる。図中の製品が、本研究ではココアに相当する。この構造を定式化すると、上位レベルの式(1)と下位レベルの式(2),(3)により、以下ようになる。なお、式中の\*は均衡解を、山括弧はベクトルの内積を表す。

$$\text{Max}_u P(u, Z^*) \quad (1)$$

$$\text{subject to } (u, Z) \in K \quad (2)$$

$$\langle G(u, Z^*), Z - Z^* \rangle \geq 0 \quad (3)$$

ここに、

$u$  : TN 上のリンクの組み合わせ (設計変数ベクトル)

$Z$  : SCN 上の状態変数ベクトル

$K$  : 空でない集合 (=実行可能空間)

下位レベルは、SCN 上のココアの取引額 (および、

輸送量) や価格を決定する SCNE モデルである。一方、上位レベルはリンクの組み合わせを決定する離散最適化問題である。

下位レベルのSCNは、図-2の通りである<sup>9)</sup>。農家や栽培業者からココアを集荷する地域集荷商が、卸売業者あるいは輸出業者にココアを出荷する。卸売業者は輸出業者に出荷する。最終的に、輸出業者が海外の消費市場にココアを輸出する。いずれの主体間においても、物流業者によって、ココアの輸送が行われる。なお、工業製品を対象とした従来のSCNEモデル (例えば、文献8)とは異なり、最上流の地域集荷商は、生産過程を持たないので生産費用は生じないが、集荷過程に伴う集荷費用が生じる。また、実態に従って、地域集荷商は、卸売業者だけでなく、輸出業者とも取引を行うものとする。地域集荷商、卸売業者、輸出業者、物流業者は、利潤最大化のもとに、ココアの取引額 (輸送量) を決定する。利潤は、収入から各種費用を減じたものであり、以下のように算定される。

地域集荷商：販売収入－集荷費用－保管費用－施設費用－取引費用－運賃

卸売業者：販売収入－保管費用－施設費用－取引費用－運賃－購入費用

輸出業者：販売収入－保管費用－施設費用－取引費用－運賃－購入費用

物流業者：運賃収入－施設費用－運行費用

消費者が輸出業者からココアを購入するとき、輸出業者の販売価格と消費者の支払意思額が一致し、また、消費者の支払意思額が正のとき、購入量は市場の需要と一致するという均衡条件が成り立つものとする。

均衡状態においては、各主体の最適性条件、および、消費市場の均衡条件が同時に満たされる。このときの取引額 (および、輸送量)、価格や運賃が求める解、すなわち、均衡解である。

## 3. 数値計算

上述のモデルを用いて、図-3に示すような、スラウェシ島のココアのSCNを対象として、数値計算を行う。本研究で使用するTNやSCNに関する関数形やパラメータの値は、既存研究<sup>9)</sup>と同じである。また、MPBPSOを用いる場合、そのパラメータ値については、文献10)で設定された値を用いる。

本研究では、SCNの総余剰減少量を最大にするような、TN上の途絶箇所 (途絶リンク) を探索する。このとき、式(1)の目的関数は、 $U(u, Z^*)$ を途絶がある場合のSCNの総余剰、 $U_0(Z^*)$ を途絶がない場合のSCNの総余剰とすると、以下ようになる。

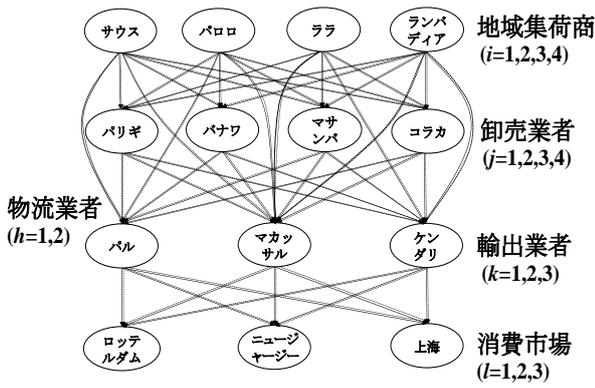


図-3 スラウェシ島のココアのSCN

$$P(u, Z^*) = U_o(Z^*) - U(u, Z^*) \quad (4)$$

総余剰は生産者余剰と消費者余剰の総和であり、生産者余剰は、地域集荷商、卸売業者、輸出業者、物流業者の利潤の総和である。TN上にリンクの途絶がない場合をケース0とする。ケース0において、ココアのSCN上の総余剰は797であった。

途絶箇所の候補は、図-4に示すように、11箇所の道路と3箇所の港湾の計14箇所とする。道路上の候補箇所では、上下線リンクが同時に途絶すると想定する。また、港湾については、TN上の積替リンクを利用して、その途絶を表現する。

はじめに、計14箇所の候補が1箇所ずつ途絶する場合を想定する(ケース1)。総余剰低下が最大であったのは13、すなわち、パル港が途絶した場合であり、このときの総余剰は、653である、ケース0に比べて18%低下した。次いで、(12),(14)の順で総余剰の低下が大きかった。ココアが港湾を介した輸出品であるという性格上、輸出港湾の機能停止が、スラウェシ島のココアのSCNに与える影響が大きいものと考えられる。また、道路に着目すると、6や7が途絶した場合に、総余剰の低下が大きくなった。これらの道路は、地域集荷商、卸売業者、輸出業者が密集するエリアである中央スラウェシに存在しており、これらの道路が1本でも途絶すると、ケース0と比較して、総余剰が約11%低下することが示された。

図-4のようなリンク数の小さい交通ネットワークを対象とする場合、多数の箇所の途絶を想定すると、SCNに与える影響が大きいのが自明であり、かつ、影響が卓越する箇所が曖昧になる。一方で、複数のリンクの途絶が相乗的に影響をもたらす可能性がある。これらのことを勘案して、以降の計算ケースは、途絶が2箇所のとき、および、3箇所のときとする。途絶箇所を2箇所と3箇所に限定すれば、途絶リンクの組み合わせ数はそれほど大きくはなく、列挙法での求解が可能である。近似解法の適用は、あくまで、組み合わせ数が多い場合に有用であるが、途絶箇所が2箇所と3箇所の場合に適用してみた

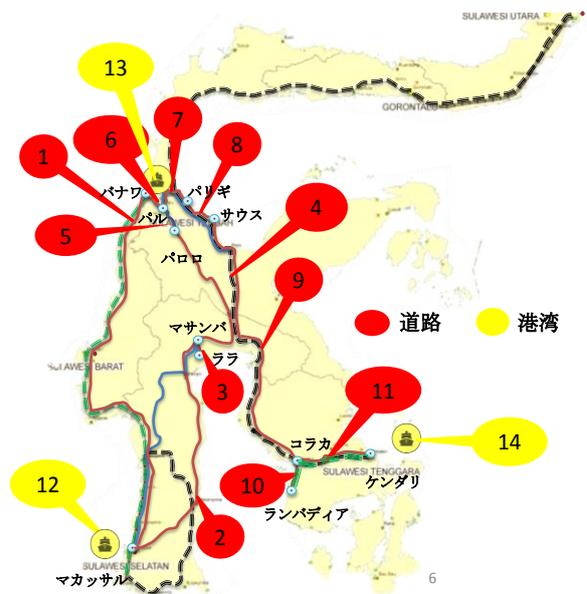


図-4 TN上の途絶箇所の候補

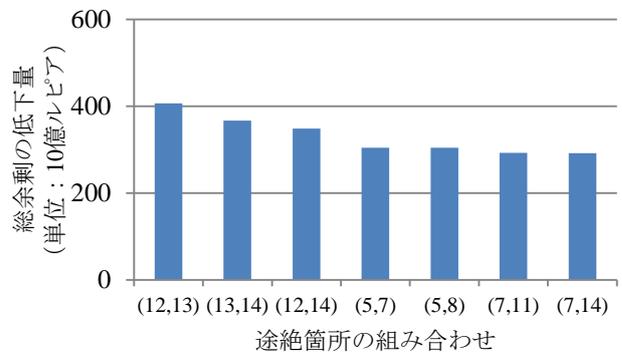


図-5 TNの途絶箇所と総余剰の低下量 (ケース2)

ところ、列挙法と修正型確率的離散二値粒子群最適化法とで、最適解は一致した。

途絶箇所が2箇所の場合(ケース2)、港湾の組み合わせである(12,13)が途絶した場合に、総余剰の低下が最大となった(図-5)。このとき総余剰は391であり、ケース0と比較して、総余剰がケース0の約49%にまで低下した。これら2つの港湾は、海外市場への輸出の76%を担っているため、これらの港湾の途絶がSCN全体に与える影響が大きくなるのは妥当な結果といえる。また、(12,13)に次いで、(13,14),(12,14)の順に総余剰の低下が大きかった。

港湾3箇所を除く、11箇所の道路のみを対象とし、途絶箇所を2箇所と想定した場合(ケース3)、(5,7)の途絶による影響が最も大きかった(図-6)。(5,7)が途絶した場合、港湾での取扱量に着目すると、ケース0と比較すると、マカッサル港は、164から200に、ケンダリ港では、112から188に増加し、一方で、パル港では、187から0に減少した。(5,7)の途絶により、中央スラウェシにおけるサウスやパロロの地域集荷商からパル港への取引が、マカッサル港やケンダリ港に移行したものと

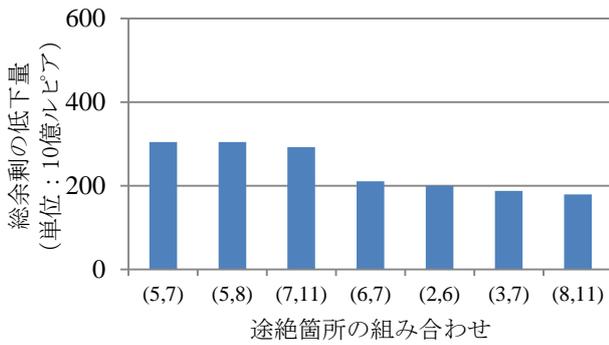


図-6 TNの途絶箇所と総余剰の低下量  
(ケース3, ケース0からの低下量)

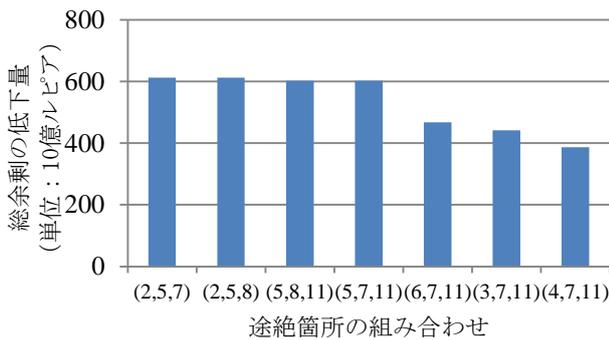


図-7 TNの途絶箇所と総余剰の低下量  
(ケース4, ケース0からの低下量)

考えられる。

最後に、途絶箇所が3箇所であると想定する(ケース4)。ケース3と同様に港湾を除く、11個所の道路のみを対象とする。このとき、最も総余剰の低下が大きかったのは、(2,5,7)が途絶した場合であり、総余剰の低下量は612(ケース0の約77%低下)であった(図-7)。途絶箇所が2箇所であった場合に比べて、明らかに総余剰の低下が大きくなっている。港湾での取扱量に着目すると、ケース0と比較すると、ケンダリ港において112から281に増加し、一方でマカッサル港とパル港は取引を行わなくなった。ケース3の(5,7)が途絶した状態から、さらにマカッサル港への路線が途絶したことで、南東スラウェシのケンダリ港のみが輸出港湾となった。この結果は、地域集荷商、卸売業者、輸出業者が集中する中央スラウェシの道路と、中央スラウェシから南スラウェシに至る道路が途絶してしまうと、それらの道路とつながる港湾の機能が停止するため、これらの道路はスラウェシ島のココアのSCNにとって重要であることを示唆している。

#### 4. おわりに

本研究では、インドネシアスラウェシ島のココアのSCNを対象として、サプライチェーンの観点から、TN

の脆弱性評価を試みた。MPECの枠組みで、上位レベルが、SCN上の総余剰低下を最大にする交通リンクの組み合わせ最適化であり、下位レベルが、ココアを対象としたSCNEモデルである。インドネシアスラウェシ島のTNに、このモデルを適用した結果、海外へのココア輸出港湾や、ココアの取引を行う業者(地域集荷商、卸売業者、輸出業者)が集中するエリアにおける道路の途絶が、SCNの効率性に大きく影響を与えることが示された。港湾が途絶しなくとも、港湾への輸送を担う道路が途絶すると、結果的に港湾の機能が停止してしまうことも示された。また、道路の途絶に伴う港湾の機能停止により、道路の途絶による影響の小さい港湾の取扱量が増加するが、SCN全体のココア取引量は減少する。途絶によって港湾の機能を停止させてしまう可能性のある道路は、災害時を見据えて、強靱にしておく必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費15K06251の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 野口英雄：我々は東日本大震災で何ができたのか、ロジスティクスレビュー，第221号，2011。
- 山田忠史，中村昂雅，横山大河，谷口栄一：サプライチェーンを考慮した交通ネットワークの離散型最適化：最適設計と脆弱性評価，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol.68, No.4, pp.272-284。
- Israeli, E. and Wood, R.K.: Shortest-path network interdiction, *Networks*, Vol.40, pp.97-111, 2002。
- 倉内文孝，宇野伸宏，嶋本寛，山崎浩気：交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向，土木計画学研究・講演集，Vol.35, CD-ROM, 2007。
- Murray, A.T., Matisziw, T.C. and Grubestic, T.H.: A Methodological Overview of Network Vulnerability Analysis, *Growth and Change*, Vol.39, pp.573-592, 2008。
- The International Coffee and Cocoa Organisation (ICCO) : Production of cocoa beans, *Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics*, Vol. 39, No. 1, 2013。
- Indonesian Ministry of Industry : *Road map of development cocoa industry*, 2010 (in Bahasa Indonesia)。
- 山田忠史，里内俊介，谷口栄一：多階層の原材料の調達過程を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡モデル，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol.71, No.2, pp.57-69, 2015。
- Zukhruf, F., Yamada, T., Taniguchi, E. : Designing Cocoa transport networks using a supply chain network equilibrium model with the behaviour of freight carriers, 土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol.70, No.5, I\_709-I\_722, 2014。
- Yamada, T. and Febri, Z.: Freight transport network design using particle swarm optimisation in supply chain-transport supernetwork equilibrium, *Transportation Research Part E*, Vol.75, pp.164-187, 2015。