

論文

関西圏の物流に関するネットワーク分析
～ 将来的なドローン輸送の発展を想定した
シミュレーションと考察 ～

平 悠佑¹・植杉 大²

Network analysis of logistics in the Kansai area

Yusuke Hira Dai Uesugi

【要 旨】

本論文では、Society5.0を見据えた関西圏の物流の将来を考察するため、物流ODデータを用いたネットワーク分析を行い関西陸輸ネットワークとその物流クラスターに関する現状把握を行い、さらに将来的なドローン物流導入が関西圏物流ネットワーク構造へどのような変化をもたらすのかを考察するため複数のシミュレーションを実行・考察した。その結果、ネットワーク分析の適用によっても、先行研究において示唆された関西陸輸ネットワークの特徴についてほぼ同様のインプリケーションを確認することができたとともに、ドローン物流拠点の建設エリアの選択について、都心部か過疎地域ではなく、高速道路等幹線道路の交通インフラが整備されアクセス性の高いエリア(特に関西圏における滋賀県等)を考慮して選ぶのが適当であることが示唆された。

¹ 摂南大学大学院経済経営学研究科

² 摂南大学経済学部

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症に伴う外出や移動の自粛により、観光産業や旅客輸送の需要が大幅に減少し、未だ十分には回復していない。その一方、巣ごもり消費などによる電子商取引市場の急成長並びに通販需要の拡大に伴って宅配便の取引量が増加しており、ヒトに比べてモノの動きは活発化している。この旺盛な需要を支える物流は、感染リスクにさらされながらも絶えることなく我々の生活を支え、社会に大きく貢献している。

新型コロナウイルス感染症による社会環境の変化は、物流のデジタル化や物流業界の構造改革を加速度的に促進させる要因となる可能性をもつ。国土交通省「総合物流施策大綱」(2021)によれば、①人口減少の本格化や労働力不足への対応、②災害の激甚化・頻発化と国民の安全・安心の確保、③Society5.0の実現によるデジタル化・イノベーション化の強化、④地球環境の持続可能性の確保やSDGsへの対応、⑤新型コロナウイルス感染症への対応といった5つの課題を挙げ、これらに対応しつつ物流の社会的価値を広く浸透させることが必要であるとしている。

特に、③Society5.0の実現によるデジタル化・イノベーション化の強化については、2018年に経団連が「Society5.0時代の物流」を公表し、様々なデジタル技術を社会実装した物流の方向性を示したうえで、それらに必要な施策を挙げている。しかし、既存の物流に関する研究ではトラック物流が主な手段とされており、物流手段の変化に対応した柔軟な物流の動向を把握するのが困難である。近年、日々目まぐるしく技術発達がかえらるドローンを含め、新たなアプローチで将来的な物流ネットワークを捉える研究が必要である。

そこで本論文では、地域の物流ネットワークの現状を把握し、ドローンという新たな技術の導入による将来的な変化をとらえるため、ネットワーク理論を適用した分析及び考察を行うことを目的とする。ネットワーク理論は、人間関係や通信インフラといった複雑な系を分析する手法を提供するものであり、21世紀初頭に誕生して以来、近年関心が高まっている学際的分野である。自然、社会、科学技術などの様々な領域に現れるネットワークの構造は類似の組織原理によって支配されており、共通の数学的ツールを用いることができる（池田・井上・谷澤, 2019）。この普遍性により、ネットワーク理論は、ネットワークの特徴を明らかにするだけでなく、ある事象がネットワークの挙動に与える影響を明らかにし理解することを可能にするものであることから、研究目的に適応した分析ツールだといえよう。

以上の研究背景と研究目的に基づき、研究対象を関西圏に設定して分析及び考察を行う。本論文の構成は以下のとおりである。第2節では、当該分野に関する既存研究を概説する。第3節では、研究対象である関西圏物流ネットワークを概説する。第4節では、第3節を参照しつつ、ネットワーク理論に基づく関西圏物流ネットワークの現状分析を行う。第5節では、シミュレーションを通じて、ドローン導入を想定したネットワークの変化を分析・考察する。第6節では結果のまとめと今後の研究の展望を示す。

2. 当該分野に関する既存研究

はじめに、物流に関する先行研究を概説する。

谷口・則武・山田・泉谷(1998)は、環境問題の面から、都市周辺部における高速道路インターチェンジに直結した物流ターミナルを建設する場合の最適規模および配置を同時に決定するモデルを構築している。遺伝的アルゴリズムを用いて、環境面における二酸化炭素の総排出量及び総走行時間費用について検討されている。

山田・則武・谷口・多賀(1999)は、我が国の物流が自動車交通へ過度に依存しているといった交通の側面に注目し、物流ターミナル整備の必要性を論じるとともに物流ターミナルの体系や配置のあり方を整理している。また、単一評価指標に基づく物流ターミナルの最適規模・配置決定モデルを構築し、京阪地域を対象に物流ターミナル配置計画への適用を行い、新規の物流ターミナルの立地によって得られる種々の整備効果は、配置パターン間で競合すること等を明らかにしている。

石黒・桜田・稲村(2000)は、国民経済的な観点に立って、トラックターミナルや流通倉庫など、拠点集約化を通じた物流費用削減および効率的物流体系の構築・整備することが望ましいと主張する。そこで、規模の経済を考慮した広域物流拠点配置モデルを提案している。また、東京以外の本州を対象に、ネットワーク配分問題として数値シミュレーションを行い、大規模な広域物流拠点をそれぞれ孤立型・自立型・周辺依存型に分類し、拠点整備の指針を示している。

西垣・石黒・小谷・秋田(2009)は、製造業や流通業を中心に、サプライ・チェーン・マネジメントの導入によって社会全体の物流効率化・費用最小化が図られることを想定し、規模の経済および物流ネットワークにおける多層性を考慮した物流拠点配置モデルを提案した。それにより現実に近い物流システムが再現され、数値シミュレーションを通じて、品目の垣根を超えた共同輸送が物流費用削減効果をもたらすことを示した。

これらのいずれの研究も、物流ネットワーク最適化を実現する物流拠点の立地を検討するために拠点配置モデルを定式化し、費用、取扱量などに複数の仮定を設定して数値シミュレーションを行っている。しかし、拠点配置モデルを構成するにあたって恣意的な仮定が多く設定されており、Data-drivenな分析ではなく Model-drivenな分析に偏っている。

次に、ネットワーク分析を用いた先行研究を概説する。

内田・白山(2006)では、SNSに着目し、複雑ネットワーク分析を用いてSNSの構造を分析している。ネットワーク構造モデルを考察し、SNSネットワークには冪乗分布的な次数分布や空間的に均一的ではない性質があることを確認している。また、既存のモデルではSNSネットワークの構造の特徴を再現していないことを指摘している。

交通ネットワークについて、小方(1980)は、総理府統計局（現在の総務省統計局）のメッシュデータを活用し、京都市の市営バスの路線網における停留所をノードとみなし、ネットワークを構成している。2つのメッシュ地区を結ぶバス系統が存在する場合に、区間につながりが「ある」とみなしエッジで結合する。ネットワーク分析を行った結果、各地区の近接性は四条

鳥丸付近が最大となり、旧市街、周辺部と低くなっていくことがわかった。また、運行回数を考慮しても大きな違いは見られなかった。

松崎・米崎(2017)では、アジア・太平洋地域におけるLCCネットワークの拡大に関して中心的な役割を果たしたとされるフランチャイズ、航空連合という2つの航空ネットワークを取り上げ、それぞれのネットワークの影響を定量的に分析している。また2つの航空ネットワークの特徴について整理・考察を行い、路線数や距離などの面に差異はなかったが、フランチャイズと比較して航空連合の方がネットワークの構造上競争力が勝っていると結論づけている。

以上、本研究に関連する既存研究を概説したが、いずれも物流ネットワークについてネットワーク理論を適用して分析及び考察をしている既存研究はない。また、いずれも現状分析にとどまり、将来的な物流システムの進化やネットワークの構造変化に対して示唆を与えるものではない。そこで本論文では、物流ネットワークにネットワーク理論を適用し、現状分析とともに、ドローンによる物流の発展といった将来的なシナリオを設定しシミュレーションを行った結果と現状との比較考察を行う。

3. 関西圏物流ネットワーク

本論文では、研究対象地域として関西圏を選択した。歴史的・文化的背景から、関西圏は京阪神地域を中心として、周辺の他県との間にも複雑な物流ネットワークが形成されており、関東圏のような東京一極型と異なって、多極的な興味深いネットワークが形成されていると予想される。

谷本(1982)によれば、大阪を中心として見た関西圏の物流特性は地域構造の特性、産業構造からの特性の2つあり、それらは以下である。

第1に地域構造の特性は、地域の主体は京阪神であり、大阪を中心に京都、兵庫(神戸)を副核として形成されている。首都圏の場合、東京が巨大で一極集中的な単一核で形成されているが関西は多核の構造になっている。その栄えた過程も異なり大阪は物資の集散基地や天下の台所、兵庫はものづくり産業の集積や大阪湾のメインポートとして外易、京都は文化・教育の集約場として互いに栄えてきた。しかし、六甲や生駒など山によって平野に恵まれていない結果、京阪神間の交通はすべて大阪の北部に集中している。

第2に産業構造をみると、京阪神は河川中心となる産業配置であり、中之島や島之内を中心に生まれた問屋街をとりまく物流施設等が河川、堀川をはさみ市の中心部に密集している構造になっている。また、大阪は生産の場である一方で中小企業が立地していることから、産業の内容を見ても流通機能が強い都市といえる。

京阪神都市圏交通計画協議会(以下、「協議会」)は、京阪神都市圏の望ましい交通体系の実現を目指し、調査の実施・検討ならびに総合都市交通体系の計画・提案を重ね、「第5回近畿圏物資流動調査」を平成27年度に実施した。その調査の結果、3つの特徴が挙げられている。

- ・高速道路周辺地域に事業所の立地が多く、広域的な物流がみられる

第一に、近畿圏において高速道路整備と事業所立地の状況は、協議会の資料によると平成26

年度経済センサスを用いて事業所立地について整理した結果、平成17年度以降の新規立地は大阪市全体で約5,900件となっており、高速道路ネットワークが整備された地域で事業所の立地が多くみられている。また、新名神高速道路の整備により、新名神高速道路・名神高速道路のダブルネットワークの構築が進み、高速道路周辺の事業所からは近畿圏外への広域的な物流がみられ第4回調査に対して関東・中部地方方面への物流量は約1.2倍になっている。

- ・建設から30年以上経過した事業所が約3割

近畿圏において建設から30年以上経過している事業所が多く存在し、事業所の多くが住居系用途地域に立地していることが明らかになり施設の老朽化に加え、道路交通や環境面での影響が懸念されている。

そのため、産業の持続的発展を図るため、老朽化が進行している事業所に対して機能更新を促す施策等を検討。また、移住地に関しては物流施設と住宅の混在による影響への対応を検討するとしている。

- ・求められる物流機能に変化

最後に、近畿圏の物流機能を保有する事業所では、敷地の広さを重視する声が減少する一方、労働力の確保のしやすさを重視する声が増加といった事業所の機能・形態やニーズの変化が見られ、今後は地域や物流業務形態といった観点から事業者ニーズの変化動向を把握し、物流の効率化や物流施設の適正な立地への施策を検討すると発表している。

以上、関西圏物流ネットワークの特徴や現状について概観してきたが、第4節では、これらの特徴を、ネットワーク分析を通じて再確認する。

4. ネットワーク分析による現状把握

第3節で確認した近畿圏物流ネットワークの現状から、将来を見据えた物流体制を予測することは極めて有用であると考えられる。そこで、本節ではネットワーク分析を通じて関西圏物流ネットワークの現状を把握する。ネットワーク分析を実行するにあたり、①ネットワークグラフの作成を通じた分析、②様々な中心性概念の分析、を通じて関西圏物流ネットワークの現状把握を行う。

ネットワーク内のあるノードが、同じネットワークに存在する他のノードとの関係においてどの程度重要な位置を占めているのかを定量的に把握する指標が「中心性」であり、これはネットワーク特性や構造に関する基本的指標を与える。ネットワーク理論における「中心性」指標は、ノードに接続する紐帯数である「次数中心性」、「近接中心性」、「媒介中心性」に基づく定義がある。

第1に、次数中心性の定義の考え方はノードの中心性を測るもっともスタンダードなもので、中心となるノードはネットワーク内において、他のノードに対してもっとも多くリンクをもっているノードが最も活動的であると判断する³。第2に、近接性または距離にもとづく近

³ 例えばSNSを対象としたネットワーク分析においては、フォロワー数を用いた分析が考えられる。

接中心性の考え方は、あるノード(行為者)がエッジで結合されている他のすべてのノードとどれほど近接して結びついているかに焦点をあて、近接度が高いほど他のノードと早く相互行為できることを中心的であると判断する。例えば、情報交換を行う場合、近接性で中心的位置にいる行為者は、相互行為である情報伝達を行う上で非常に生産的と考えることができる⁴。第3に媒介中心性は、あるノードが隣接していない他の複数ノードの中間に存在していれば、隣接していないノード間の相互行為に影響力を持っているとみなして中心的だと考える⁵。

本研究で分析のために利用した主たるデータは、国土交通省近畿地方整備局・国土交通省近畿運輸局(以下、運輸局)が提供している「京阪神都市圏交通計画協議会」の第5回物資流動調査(平成27年度調査)で公表されているOD表データである⁶。また、それらのネットワークグラフを図示するためのGISデータとして、国土交通省が提供している「行政区域データ」、「湖沼データ」、「道路データ」を利用した。

はじめにネットワークグラフを作成し、地域クラスターをみる⁷。結果は図表1に示した通りである(なお地域番号については、図表3の「区分」及び「ノード番号」を参照のこと)。大阪、京都、神戸間の物流の活発さから京阪神中心に栄えていることが視覚的に確認でき、谷本(1982)と同様の結果が示されている。一方、和歌山県や奈良県に属する地域ノードにつながるエッジがないことから、流通量が少なく、幹線道路の存在が与えるトラック輸送へのインパクトは大きいことが想像できる。

さらに、地域特性をより詳細に考察するため、図表2において次数中心性をグラフに可視化し、特に図表3において各中心性指標をまとめた。

図表2および図表3を見ると、次数中心性から入次数中心性・出次数中心性の高い値を示す地域が確認できる。入次数(消費地・流通の終点)中心性では、大阪市、東部大阪、北大阪の順で大阪が関西圏の消費地として大きな位置を占めていることがわかる。一方出次数(生産地・流通の始点)中心性では、大阪市、神戸市、東部大阪の順となっており、生産地としても大阪の役割が大きく、続いて神戸市も強みがあることがわかる。特に大阪市は入次数・出次数ともにネットワーク内で一番高い数値となっており、生産地・消費地両方の特徴を持っているとみられる。

次に、図表3において近接中心性の上位3つを見ると、大阪市、東部大阪、北大阪となっている。この指標は、中心的なノードほど他のノードと相互行為をする際に生産的であることを

⁴ 村田(2019)では、消防署の適切な配置を決定する指標としてこの指標を用いている。

⁵ この指標は主に無向関係を対象として導出されたものであるが、任意の二者間のエッジのつながりを考慮することで、有向関係における媒介中心性を適用させることができる(Gould, 1987)。

⁶ OD表(Origin-Destination Table / Matrix)とは、経済統計調査の一種で、人、物、通信の流動を調べるため、どこからどこへどれ位の量が流れているのかを、見やすい行列形式の表にしたものである。データの出所は、以下の通りである。

国土交通省近畿地方整備局・国土交通省近畿運輸局。『京阪神都市圏交通計画協議会』。 https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/pt/research_b/h17/p1.html

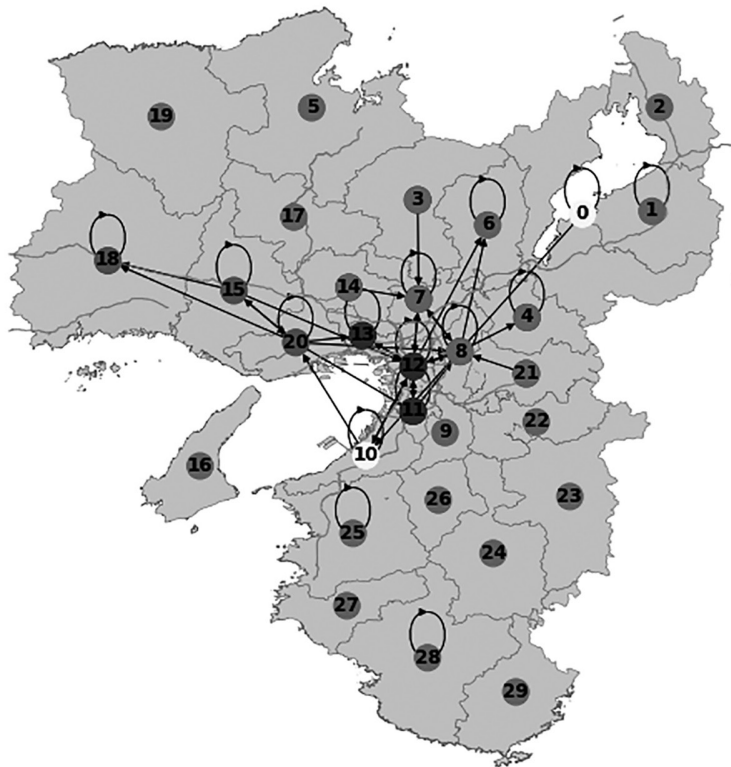
⁷ 分析ツールとして、Pythonベースのネットワーク分析用ツールであるNetworkXを用いた(<https://networkx.github.io/>)。

関西圏の物流に関するネットワーク分析
～将来的なドローン輸送の発展を想定したシミュレーションと考察～

示していると判断できる。上位3つのエリアは高速道路網など交通面で強みがあるため、高い数値を記録していると考えられる。このことは図表1のネットワークグラフからも視覚的に確認できる。一方で4番目に高い数値をとっている京都市の場合、入次数は上位の数値になっている反面、出次数は高いと言えない。そのため、京都市は消費の場として貢献している地域ではあるが生産地としての役割は相対的に低いと予想される。既存研究においても、京都は観光地や学問の集約地であるとされているように、他エリアと重ならない独特な地域特性を持っているものと考えられる。

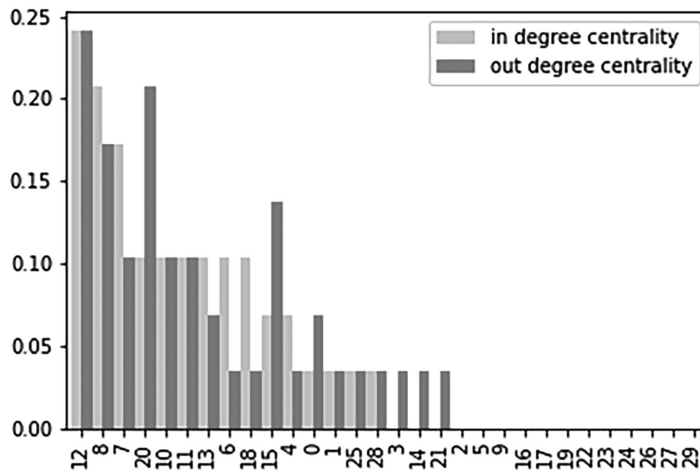
さらに図表3において媒介中心性をみる。物流量データはそもそも有向性をもつもの(ダイグラフ)であることから、中心的媒介地点(重要な経由地点)と考えられる。つまり、生産物を加工するために原材料が集まり、さらに加工した生産物を発送することで流通を活性化させる役割を強く持つエリアとみなすことができよう。媒介中心性の高いエリアは大阪府および神戸市であり、入次数中心性、出次数中心性の高さと併せて考えると、これらの地域が中心的存在として関西圏流通ネットワークを規定しているものと解釈できる。

図表1 関西圏物流ネットワークおよびクラスター



国土交通省近畿地方整備局・国土交通省近畿運輸局提供のデータを基に著者作成
※5千トン以上の物流関係のみを表示

図表2 陸輸ネットワークの次数中心性



図表3 陸輸ネットワークの中心性

府県	区分	ノード番号	入次数中心性	出次数中心性	近接中心性	媒介中心性
滋賀県	滋賀県南西部	0	0.034483	0.068966	0	0
	滋賀県中部	1	0.034483	0.034483	0	0
	滋賀県東北部	2	0	0	0	0
京都府	南丹	3	0	0.034483	0	0
	山城	4	0.068966	0.034483	0.165517	0
	丹後・中丹	5	0	0	0	0
	京都市	6	0.103448	0.034483	0.198621	0
大阪府	北大阪	7	0.172414	0.103448	0.219601	0.024631
	東部大阪	8	0.206897	0.172414	0.231801	0.030788
	南河内	9	0	0	0	0
	泉州	10	0.103448	0.103448	0.173851	0.041872
	堺市	11	0.103448	0.103448	0.173851	0.000616
	大阪市	12	0.241379	0.241379	0.260776	0.074507
兵庫県	阪神臨海	13	0.103448	0.068966	0.173851	0.000616
	阪神内陸	14	0	0.034483	0	0
	東播	15	0.068966	0.137931	0.104310	0.000616
	淡路	16	0	0.000000	0	0
	丹波	17	0	0	0	0
	西播	18	0.103448	0.034483	0.121110	0
	但馬	19	0	0	0	0
	神戸市	20	0.103448	0.206897	0.139080	0.032020
奈良県	奈良県北部	21	0	0.034483	0	0
	奈良県中部	22	0	0	0	0
	奈良県東部	23	0	0	0	0
	奈良県南部	24	0	0	0	0
和歌山県	和歌山県西部	25	0.034483	0.034483	0	0
	和歌山県東北部	26	0	0	0	0
	御坊	27	0	0	0	0
	田辺	28	0.034483	0.034483	0	0
	新宮	29	0	0	0	0

ネットワーク分析により導出した数値を基に作成

以上の分析結果に基づき、図表1で導出した物流クラスターについては、阪神地域におけるクラスター(ノード番号:11, 12, 13)を『消費・生産中心地クラスター』、大阪北地域におけるクラスター(ノード番号:3, 4, 7, 8, 14, 21)を『流通拠点クラスター』、兵庫県の瀬戸内海沿岸地域におけるクラスター(ノード番号:15, 18, 20)を『臨海工業地域クラスター』、大阪府泉州地域(ノード番号:10)および滋賀県南西部地域(ノード番号:0)については『地域接続クラスター』、その他の地域については明確なクラスターのない地域と判断できると考えられる。

5. シミュレーション

本節では、現状の陸輸ネットワークにドローンの物流拠点を建設し、当該地域およびその周辺地域に与える影響について一定の仮定のもとでデータの物流量を変化させ、関西圏全体の物流ネットワーク構造がどのように変化するかを分析・考察する。

まず、シミュレーション設定の妥当性について、ドローンの飛行可能距離から検討する。日本における物流用ドローンは、2022年12月に日本郵政などが開発中と公開したものとして、運搬可能重量5kg、最大飛行距離が約35kmである。そのため、ドローンによる荷物の配送ができる範囲は限られている。しかし将来的な流通ネットワークを考えるならば、ドローンの飛行距離向上、物流拠点の集積が進み、建設された地域の隣接地域と建設地域の府県全体まで効率的配送が可能となり、地域間の流通が増加・活発化することが想定される。

また、内閣官房の公表資料⁸において、買物難民が10年で4割急増、在宅医療ニーズの拡大、トラックドライバーが5割以上の企業で不足といった地域課題に対して、ドローン実装により解決を目指すとの見通しが示されている。したがって、増加が予測されている物流需要への対応、ドライバー不足によるトラック物流量の減少、一方ドローンがトラック物流を補完しさらに重要性が増すことなどを考慮して、物流量変化の倍率の設定については物流データを1.5倍程度変化させるのが適当と判断した。

シミュレーションのパターンは様々考えられるが、本論文では以下のパターンを分析・考察する。

- ・ Sim1: ドローン物流の影響範囲はその建設地域の府県全体(山間部)

ドローン拠点を六甲や生駒などの山脈を有する兵庫県と奈良県、周囲が山地で囲まれている地形となっている滋賀県に建設すると仮定する。また、ドローンによる物流量の影響はノードが位置する県内までとし数値を1.5倍変化させた。

- ・ Sim2: ドローン物流の影響範囲は建設地域の府県全体と隣接地域(琵琶湖周辺)

ドローン拠点を琵琶湖のある滋賀県に建設することで、湖を空から直線的に超えることで物

⁸ 内閣官房. 小型無人機等対策推進室. 『レベル飛行の実現、さらにその先へ (令和4年2月)』 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/drone_platform/pdf/2.pdf, 内閣官房. 小型無人機等対策推進室. 『レベル飛行の実現、さらにその先へ (令和4年7月)』 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/drone_platform/pdf/20220721kouen.pdfを参照のこと。

流効率が上がり、流通が盛んになるのではないかと仮定した。また、ドローンによる物流量の影響が建設地域を含め、隣接エリアまでおよぶものとして数値を1.5倍変化させた。

- ・ Sim3: ドローン物流の影響範囲は建設地域の府県全体と隣接地域(和歌山・奈良)
ドローン拠点を関西圏で人口の少ない和歌山県、奈良県に建設することで、トラック物流の課題として挙げられている人員不足問題が緩和され、物流量が変化すると仮定した。ドローンによる物流量変化の影響が建設地域、隣のエリアまで及ぶものとして数値を1.5倍変化させた。
- ・ Sim4: ドローン物流の影響範囲は建設地域の府県全体と隣接地域(全ノード)
ドローン拠点を全エリアに建設することで、シミュレーション3同様、トラック物流の課題である人員不足問題が緩和され物流量が変化すると仮定した。ドローンによる物流量変化の影響が各地域の隣のエリアまで及ぶものとして数値を1.5倍変化させた。
- ・ Sim5: ドローン物流の影響範囲は建設地域の府県全体と隣接地域(幹線道路あり)
ドローン拠点を高速道路情報が図示されているエリアに建設することで、都心部での渋滞が緩和されスムーズな流通が可能となり配達効率も上がり物流量が変化すると仮定した。ドローン導入によって物流量が拠点建設エリアでは1.5倍、それらの隣接したエリアは1.2倍変化するものとしてネットワークを導出した。

以上の前提条件のもと各シミュレーションを実行した結果として、図表4にネットワークグラフおよび図表5に次数中心性指標の結果をまとめて示した。

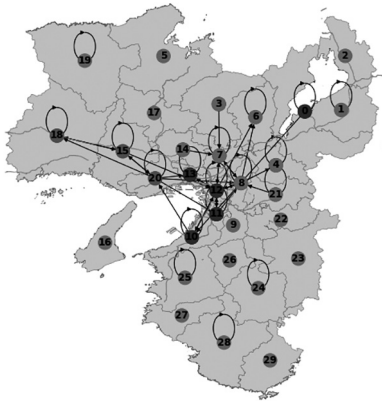
シミュレーション1では、物流クラスターは4つから3つへと変わりネットワーク構造が変化したことがわかる。もともと『地域接続クラスター』と仮定していたエリアが、『消費・生産中心地クラスター』エリアに合併されるようになった(ノード番号: 0, 10, 11, 12, 13)。そのようになった理由として、大阪泉州エリアには関西国際空港があり、人の移動が活発だと予測できる。加えて、滋賀県南西部は大阪を中心として見た際、中継地点として便利な地点に位置しており、インフラなど交通面で優れているからだと思われる。

シミュレーション2では、琵琶湖の存在が物流効率のハードルとなっており、ドローン導入によってそれが軽減される可能性を検証するため、滋賀県内の物流量を変化させた。その結果、同じ『地域接続クラスター』に属していた泉州エリアが分離し『消費・生産中心地クラスター』に併合され(ノード番号: 10, 11, 12, 13)、一方滋賀県南西部エリアが、現状ではクラスターを形成していなかった京都市エリアと併合し新たなクラスター(ノード番号: 0, 6)となるネットワーク構造を形成するという変化が起こった。クラスターの変化要因としては、滋賀県に限定した物流量の増加を想定したことによって、京都市エリアを含む隣接エリア両方の物流量増加によってネットワーク構造が変化したと考えられる。

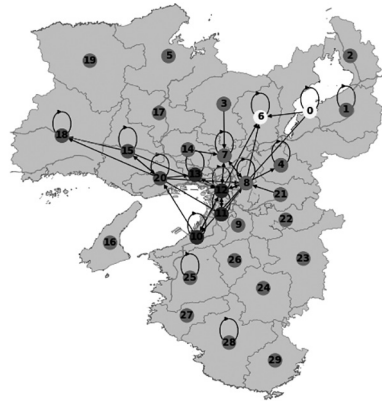
関西圏の物流に関するネットワーク分析
 ～将来的なドローン輸送の発展を想定したシミュレーションと考察～

図表4 各シミュレーションの物流クラスター

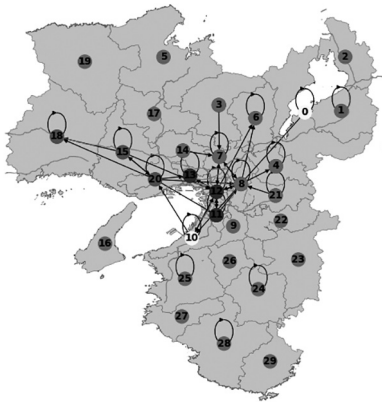
シミュレーション1



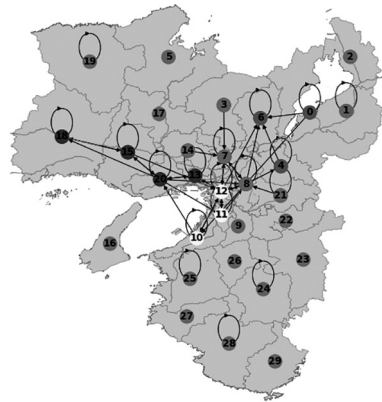
シミュレーション2



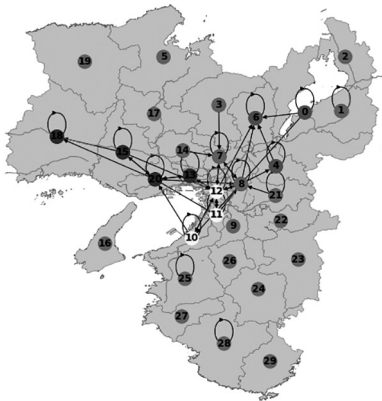
シミュレーション3



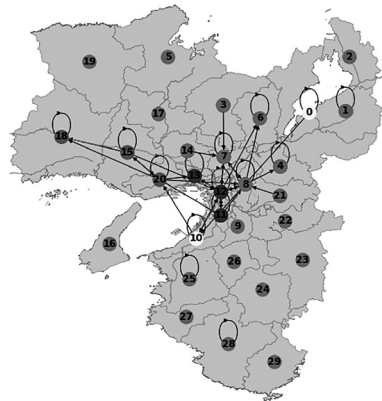
シミュレーション4



シミュレーション5



現状のネットワーク(比較用・再掲)



図表5 各シミュレーションの次数中心性指標

府県	区分	ノード番号	元データ		シミュレーション1		シミュレーション2		シミュレーション3		シミュレーション4		シミュレーション5	
			入次数	出次数	入次数	出次数	入次数	出次数	入次数	出次数	入次数	出次数	入次数	出次数
滋賀県	滋賀県南西部	0	0.034483	0.068966	0.034483	0.068966	0.034483	0.103448	0.034483	0.068966	0.034483	0.103448	0.03448276	0.10344828
	滋賀県中部	1	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.03448276	0.03448276
	滋賀県東北部	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
京都府	南丹	3	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.03448276
	山城	4	0.068966	0.034483	0.068966	0.034483	0.068966	0.034483	0.068966	0.034483	0.068966	0.068966	0.06896552	0.06896552
	丹後・中丹	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	京都市	6	0.103448	0.034483	0.103448	0.034483	0.137931	0.034483	0.103448	0.034483	0.172414	0.034483	0.17241379	0.03448276
大阪府	北大阪	7	0.172414	0.103448	0.172414	0.103448	0.172414	0.103448	0.172414	0.103448	0.172414	0.103448	0.17241379	0.10344828
	東部大阪	8	0.206897	0.172414	0.206897	0.172414	0.206897	0.172414	0.206897	0.172414	0.206897	0.172414	0.20689655	0.17241379
	南河内	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	泉州	10	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.10344828	0.10344828
	堺市	11	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.103448	0.10344828	0.10344828
	大阪市	12	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.241379	0.24137931	0.24137931
兵庫県	阪神臨海	13	0.103448	0.068966	0.103448	0.068966	0.103448	0.068966	0.103448	0.068966	0.103448	0.103448	0.10344828	0.10344828
	阪神内陸	14	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.034483	0	0.03448276
	東播	15	0.068966	0.137931	0.103448	0.137931	0.068966	0.137931	0.068966	0.137931	0.103448	0.137931	0.06896552	0.13793103
	淡路	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	丹波	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	西播	18	0.103448	0.034483	0.103448	0.068966	0.103448	0.034483	0.103448	0.034483	0.103448	0.068966	0.10344828	0.03448276
	但馬	19	0	0	0.034483	0.034483	0	0	0	0	0.034483	0.034483	0	0
	神戸市	20	0.103448	0.206897	0.103448	0.206897	0.103448	0.206897	0.103448	0.206897	0.137931	0.206897	0.13793103	0.20689655
奈良県	奈良県北部	21	0	0.034483	0.034483	0.068966	0.000000	0.034483	0.034483	0.068966	0.034483	0.068966	0.03448276	0.06896552
	奈良県中部	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	奈良県東部	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	奈良県南部	24	0	0	0.034483	0.034483	0	0	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0	0
和歌山県	和歌山県西部	25	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.03448276	0.03448276
	和歌山県東北部	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	御坊	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	田辺	28	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.034483	0.03448276	0.03448276
	新宮	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

シミュレーション3では、関西圏域で人口が少なく、幹線道路不足や人員不足問題の影響が大きい地域と思われる和歌山、奈良県を対象に物流量を変化させたが、結果として物流ネットワークのクラスター構造にほぼ変化は見られなかった。本論文で行ったシミュレーションでは、ドローン輸送の発展により現状の1.5倍に物流量が増加することを想定しているが、和歌山、奈良県の物流量がほかの地域と比べかなり少ないため、想定増加量では関西圏に与える影響は小さいと考えられる。そのため和歌山、奈良県におけるドローン物流拠点建設の優先順位は低くならざるを得ない。山間部輸送に対するドローン活用が主張されているが、エリア内流通のみでは発展に限界があり、需要増の期待される他エリアとの関わり(エッジ)を持つ手段としてドローン物流を構成すべきであろう。

シミュレーション4では、ドローン物流の発展によって全ノードの物流量が1.5倍に変化したことを想定したところ、全てのクラスター分類が変わりネットワーク構造に明確な変化が起こった。大阪市・堺市エリアと泉州エリア(ノード番号: 10, 11, 12)が同じクラスターに分類されており、兵庫県の臨海工業地域エリア(ノード番号: 13, 15, 18, 20)が同じクラスターに分類されている。このように分類された要因として、シミュレーション2および3の結果から滋賀京都間の関係が強くなると考えられるため、アクセス面で優れている泉州、都市の大阪市・堺市間の関係が強くなり同じクラスターに分類されたのではないと思われる。第二に、

同一県内の物流量を増加させるというシミュレーションの仮定に反応した結果、兵庫県の臨海工業地域どうしの関係が強くなったと考えられる。第三に、滋賀南西部地域（ノード番号：0）と灰色クラスターに分類されていた京都市（ノード番号：6）、赤クラスターに分類されていた山城エリア（ノード番号：4）が同じクラスターに分類される変化を見せた。シミュレーション2で導出されたクラスターに、山城エリアが加わっている。京都市は観光地として人気で観光業をはじめとする産業の活発さがあり、滋賀県は京都へのアクセスの良さを謳うホテルが多い。このことから、京都市と滋賀南西は生産地・消費地として強い関係を持っていると想像できる。山城エリアは宇治茶の生産地、ものづくり企業の集積といった生産の大きな役割を担うポテンシャルを持っている地域で、京都・奈良・大阪を結ぶ位置にあることを踏まえると、大きな消費の役割を担っている京都との相性の良さによって同一クラスターに分類されたのではないだろうか。

シミュレーション5は、ドローン物流拠点を高速道路情報が図示されているエリアに建設することで、都心部での渋滞が緩和されスムーズな流通が可能となり配達効率も上がり物流量が変化すると仮定し、ドローン物流の影響が建設地域と隣接地域に及ぶものとして物流を増加させた。なお、その増加量は拠点建設地域では1.5倍、それらの隣接した地域は1.2倍変化させ、関西陸輸ネットワークの物流クラスターを導出した結果、シミュレーション4と同様のクラスターに分類された。シミュレーション4および5を比較すると、それぞれで分類されたクラスターが重なっていること、変化を与えた地域における次数中心性の数値を確認してもネットワーク構造に変化が見られなかったため、シミュレーションにおける多少の数値的操作に対して頑強な関係性であることがわかる。

シミュレーション1～5を通じて理解される結果を整理する。今回の条件設定において、和歌山県および奈良県の物流量を増加させても関西物流ネットワーク構造にほとんど変化が見られなかった。したがって、エリア内流通を活性化させるようなドローンの導入（例えば山間地での輸送手段）の可能性はあるものの、圏域全体への影響が低いため、ドローン物流拠点建設の優先順位は低くなると思われる。他方、滋賀県の物流量を増加させたときに与える物流ネットワークへの影響の大きさをみるに、物流において大きなポテンシャルを有し、関西圏の中でドローン物流の社会実装への優先順位が最も高いようにみえる。

また物流クラスターを複数のパターンから導出することで、各地域の生産や消費といった役割、関西圏への貢献度、ドローン導入の影響について、従来の数理モデルではなくネットワークグラフから理解することができた。

6. まとめと今後の展望

本論文では、Society5.0を見据えた関西圏の物流の将来を考察するため、物流ODデータを用いたネットワーク分析を行い関西陸輸ネットワークとその物流クラスターに関する現状把握を行い、さらに将来的なドローン物流導入が関西圏物流ネットワーク構造へどのような変化をもたらすのかを考察するため複数のシミュレーションを実行し、考察した。

その結果、ネットワーク分析の適用によっても、先行研究において示唆された関西陸輸ネットワークの特徴についてほぼ同様のインプリケーションを確認することができた。また、GISデータを活用した可視化方法を採用し、先行研究では試みられていない将来的なドローン物流が関西圏物流ネットワーク構造に与える変化についてシミュレーションを実施し、ネットワークグラフとネットワーク理論で用いられる中心性指標をもって分析、考察を行うことができた。

特にシミュレーションでは、複数のパターンを比較しながら考察した結果、幹線道路等の交通インフラが与える物流への影響力が高いと考えられるため、社会実装に向けたドローン物流の拠点を建設するならば選択する地域は都心部か過疎地域ではなく、アクセス面の良さで選ぶのが適当であると示唆された。中でも、関西圏では、すでに発展している大阪、神戸付近ではなく、滋賀県など都会よりも土地代が安くアクセス面に優れているエリアに物流拠点を建設するのが良いのではないかと考えられる。

ただし、様々な指標からのネットワーク解釈については、有向関係か無向関係で分析指標が異なることや、分析に用いたデータエリアや条件はあくまで限定的なデータに基づき任意に設定したため、確実性が欠けているかもしれない。これらの点について、見直し、改善を行えるよう、今後もネットワークの研究を進めていきたい。

<参考文献>

- ・ Granovetter, M. S. (1973). The strength of weak ties. *American journal of sociology*, 78(6), 1360-1380.
- ・ Akhavan, M., Ghiara, H., Mariotti, I., & Sillig, C. (2020). Logistics global network connectivity and its determinants. A European City network analysis. *Journal of Transport Geography*, 82, 102624.
- ・ Sugishita, K., & Asakura, Y. (2021). Vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks: A citation network analysis. *Public Transport*, 13(1), 1-34.
- ・ Castella Barrera, J. (2021). Drone delivery network: optimized deployment of charging stations in Chicago (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- ・ Sah, B., Gupta, R., & Bani-Hani, D. (2021). Analysis of barriers to implement drone logistics. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(6), 531-550.
- ・ 小方登. (1980). 都市内公共輸送網のネットワーク分析. *人文地理*, 32(6), 493-503.
- ・ 谷本谷一. (1982). 国際空港に対する物流面からの一考察. *大阪産業大学産業研究所所報* (5)
- ・ 佐々木公明. (1983). 都市交通体系の変化の評価について. *地域学研究*, 14(0), 127-138.
- ・ 苦瀬博仁. (1993). 都市内物流施設整備の必要性と課題. *土木計画学研究・講演集*, (16), 2.
- ・ 安田雪. (1994). 社会ネットワーク分析: その理論的背景と尺度. *行動計量学*, 21(2), 32-39.
- ・ 野村宏. (1994). 関東地方・関西地方間の物資流動における機関選択の現状とモーダルシフトの問題. *奈良県立商科大学研究季報*, 5(2), 1-11.
- ・ 谷口栄一, 則武通彦, 山田忠史, & 泉谷透. (1998). 物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究. *土木学会論文集*, (583), 71-81.
- ・ 山田忠史, 則武通彦, 谷口栄一, & 多賀慎. (1999). 物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用. *土木学会論文集*, (632), 41-50.

関西圏の物流に関するネットワーク分析
～将来的なドローン輸送の発展を想定したシミュレーションと考察～

- ・ 内田誠, & 白山晋. (2006). SNS のネットワーク構造の分析とモデル推定. 情報処理学会論文誌, 47(9), 2840-2349.
- ・ 村田剛志. (2009). ネットワークからのコミュニティ抽出. 知能と情報, 21(4), 500-508.
- ・ 福山祥代, & 羽藤英二. (2015). ネットワーク上の空間計画に向けた観測と行動モデルの展開. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 71(5), I_1-I_19.
- ・ 松崎朱芳, & 米崎克彦. (2017). アジア市場における航空ネットワーク分析. 交通学研究, 60, 135-142.
- ・ 金光淳. (2018). 社会ネットワーク論. 京都マネジメント・レビュー, 32, 138-142.
- ・ 北野佑, & 浅原彰規. (2019). OD ネットワーク分析による人流シミュレーション. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, 2019, 1457-1462.
- ・ 兵藤哲朗. (2019). ドローン物流の現状と展開可能性. IATSS Review (国際交通安全学会誌), 44(2), 132-139.
- ・ 池田裕一, 井上寛康, 谷澤俊弘. 『ネットワーク科学 ひと・もの・事の関係性をデータから解き明かす新しいアプローチ』. 京都大学ネットワーク社会研究所訳. 共立出版. 2019
- ・ S・ワッサーマン, K・ファウスト. 『社会ネットワーク分析「つながり」を研究する方法と応用』. 平松闊, 宮垣元訳. ミネルヴァ書房. 2022
- ・ 村田剛志. 『Pythonで学ぶネットワーク分析 ColaboratoryとNetworkXを使った実践入門』. オーム社. 2019

