

物流問題研究

2015 冬
No.63

ISSN 1346-2016

特集

高齢化社会と物流

流通経済大学 物流科学研究所

CONTENTS

FOCUS

Relation between an aging society and Logistics

- Future of Trucking in the Aging Society ~ A Proposal of “slow logistics” ~
_____ GO INOUE
- The latest trend of logistics companies in Aging society
_____ FUJIO MORITA

I U C L

Industry-University Consortium on Logistics

ARTICLE

- Study on Logistics that supports Omni-Channel Retailing,
which integrates Online and Offline Sales
_____ ETSUO MASUDA
- A Branch and Price Algorithm for Capacitated Network Design Problem
_____ NAOTO KATAYAMA
- Hop-Constrained Capacitated Network Design Problem
_____ NAOTO KATAYAMA

特集 高齢化社会と物流

高齢化社会におけるトラック輸送のあり方…………… 2

—「スローロジスティクス」の提唱—

井上 豪 (一般社団法人 東京都トラック協会 事業振興部 事業振興課 課長補佐)

高齢化社会における物流会社の新動向…………… 8

森田富士夫 (物流ジャーナリスト)

ロジスティクス産学連携コンソーシアムの紹介

2014年度の産学連携プログラムの実施状況…………… 12

論文

ネット・店舗が融合するサービスの動向とロジスティクスの課題…………… 18

増田悦夫 (流通経済大学 流通情報学部 教授)

分枝価格法を用いた容量制約をもつネットワーク設計問題の解法…………… 29

片山直登 (流通経済大学 流通情報学部 教授)

ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題…………… 45

片山直登 (流通経済大学 流通情報学部 教授)

編集後記…………… 61

高齢化社会におけるトラック輸送のあり方

— 「スローロジスティクス」の提唱—

Future of Trucking in the Aging Society

～ A Proposal of “slow logistics”～



井上 豪：一般社団法人 東京都トラック協会 事業振興部 事業振興課 課長補佐

略 歴

1974年生。2000年駒澤大学大学院法学研究科私法学専攻修士課程修了。同年、全国信用協同組合連合会に入社、預金事務や営業店管理等に携わった後、日本投信委託株式会社（現 岡三アセットマネジメント株式会社）コンプライアンス部を経て現職。現在、海上コンテナ、紙・パルプ、セメント、食料品など、輸送品目別の部会の事務局を務める。物流経営士（第1445号）。

1. はじめに ～トラック運転者の高齢化

「人間五十年、下天の内をくらぶれば、夢幻の如くなり」とは、今から450余年前の戦乱の世に生きた織田信長が好んで演じたとされる幸若舞「敦盛」の一節であるが、2013年における日本人の平均寿命は、男性が80.21歳と初めて80歳を超え、女性は過去最高の86.61歳で2年連続の世界一となった。今やわが国は、「人間八十年」の長寿国である。さらに、2060年には男性の平均寿命が84.19年、女性の平均寿命が90.93年になると見込まれている。「人間九十年」も夢物語ではない。

その一方で、日本の総人口は少子化の影響などから長期の減少過程に入っており、2048年に総人口が1億人を割り込んだ後も減少が続くと見られている。そのため、わが国は、世界的に例を見ない速さで高齢化が進んでいる。高齢化率（総人口に占める65歳以上の高齢者人口の割合）が7%を超えてから倍の14%に達するまでの所要年数（倍化年数）を

欧州の先進諸国と比較すると、フランスが126年、スウェーデンが85年、イギリスが46年、ドイツが40年であるのに対し、日本はわずか24年である。1950年の時点では5%にも満たなかった日本の高齢化率は、2013年時点で25.1%と4人に1人の割合にまで上昇しており、2060年には2.5人に1人が65歳以上に、4人に1人が75歳以上になると推計されている。

高齢化は、わが国の産業構造にも大きな影響を及ぼす。特に、労働集約型産業であるトラック運送事業にとって、労働者の高齢化は深刻な問題である。

今から10年ほど前の2004年の時点では、道路貨物運送業（従業員規模10人以上）の平均年齢は41.7歳で、全産業の平均年齢（40.7歳）と比べてほとんど差はなかった。しかし、2013年には45.2歳まで急上昇し、全産業の平均年齢（42.0歳）との差も拡大した。従業員5～9人の小規模事業者の平均年齢は47.3歳とさらに高い。また、関東1都6県の各トラック協会の海上コンテナ部会で構成され、筆者

が事務局を務める関東トラック協会海上コンテナ部会で部会員事業者を対象に実施した海上コンテナセミトレーラ運転者の年齢別在籍人数調査でも、2014年3月末時点における在籍運転者の平均年齢は46.8歳と同様の水準であった（図表1）。

道路貨物運送業の就業者（約187万人）のうち、40歳以上の就業者が7割弱（約125万人）を占めていることから分かる通り、現在のトラック輸送は中高年層の運転者によって支えられている。単純に考えれば、20年後にはその多くが65歳以上の高齢者層となる。若年層の新たな労働力の確保が喫緊の課題であるが、少子化などの構造的要因に加え、職業選択の幅が広がっていることやトラック運送業界に対するマイナスイメージが払拭されていないこともあり、残念ながら現時点では困難な状況である。よって、トラック運送事業は他の産業と比べて高齢化がより急速に進む可能性が高い。

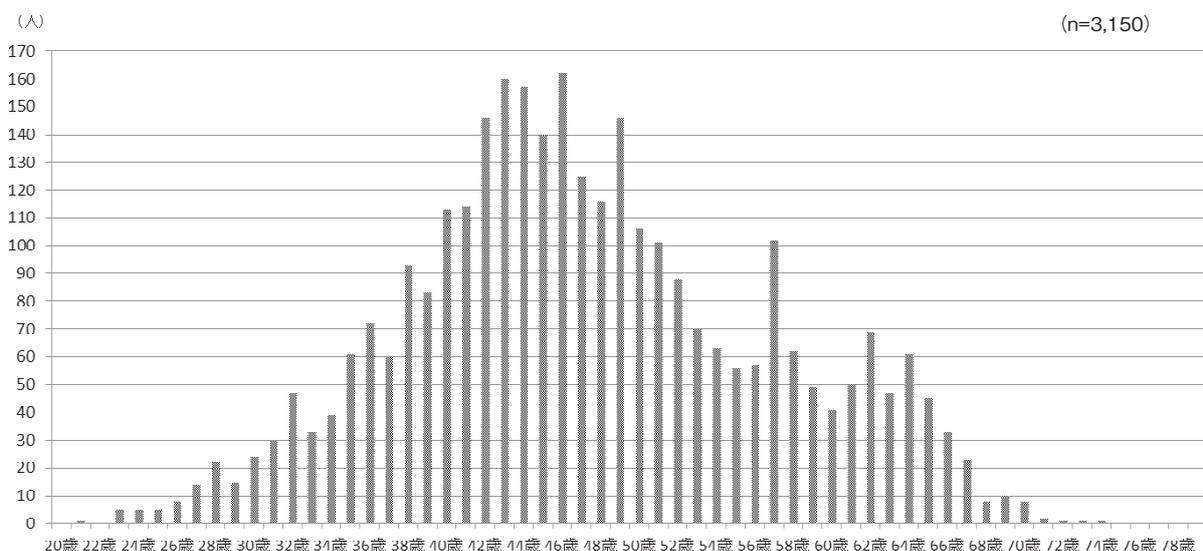
2. 加齢がトラックの運転に及ぼす影響

トラックは、一般的な乗用車とは車両諸元が異なり、挙動にも特性があるため、その運転には高度な技能が求められる。この点、国内外の自動車メーカーでは自動運転の研究が進められており、乗用車では一定の成果が認められているものの、トラックなど大型の商用車は安全面などクリアすべき課題が多く、依然としてハードルが高い。時々刻々と変化する交通状況に臨機応変に対処し、大型車両を安全かつ巧みに操るトラック運転者は、まさにマイスターである。

しかし、前述の通り、トラック運転者の平均年齢が40歳台後半に差し掛かっており、今後は50歳台から60歳台のトラック運転者が増加してくると見込まれることから、加齢がトラックの運転に及ぼす影響が懸念される。

自動車安全運転センターが実施した調査によれば、50歳台後半から60歳台前半の職業運

図表1 関東トラック協会 海上コンテナ部会 運転者年齢別在籍人数調査(2014年3月31日現在)



※東京都・神奈川県・茨城県・栃木県・群馬県・千葉県の名トラック協会海上コンテナ部会員事業者を対象として調査を実施。（回答店数：215店社）
 ※「70歳」（対象者8名）には、東京都トラック協会海上コンテナ専門部会の調査で「70歳代」と回答した4名が含まれている。

転者は、運転に対して真摯な姿勢で臨み、普段から落ち着いた運転を心掛けていることから、総じて安全運転意識は高いとしている。その一方で、視機能など身体機能の衰えの他、集中力や判断力等の認知機能の衰えも始まる年齢であり、思い込みや勘違い、うっかり等による事故や、信号や標識の見落とし等に注意が必要であること、衰えを自覚せずにトラックの運転を続けることは非常に危険であることが指摘されている。

具体的な調査結果を見ると、職業運転者による全体の事故件数は減少しているが、55歳以上の事故が大幅に増加している。年齢別職業運転者単位人数当たりの事故件数(指数)は、30歳未満を頂点として、30歳台、40歳台と年齢の上昇とともに低下していくものの、50～59歳で微増し、60歳以上になると平均値を上回って大きく増加する傾向が見られる(図表2)。55歳以上の事故が多い事業所における年齢別事故率(過去3年間の事故件数を現在の運転者数で除した値)でも、55～59歳が他の年齢層に比べて最も事故が多い。55歳以上で事故率が高くなる原因としては、加

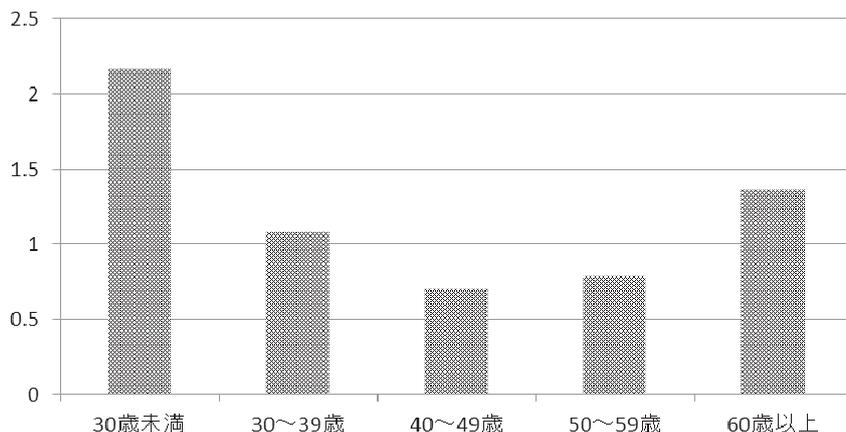
齢による視力の低下、緊急時の反応の遅れ、判断力の低下、慣れによる運転の手抜きなどが挙げられている。

50歳以上の職業運転者は、高血圧や糖尿病など何らかの疾患がある比率が50歳未満の職業運転者よりかなり高い。また、「夜間の運転は疲れるようになった」「運転が下手になった」「運転中に目がかすんだり、ものが見えにくくなることがある」「運転中に緊張状態が長く続かないと感じるようになった」など、加齢による身体機能や認知機能の変化を強く感じているにもかかわらず、トラックを運転する頻度は「毎日」が7割で、50歳未満の職業運転者とほとんど変わらない。

企業側も定年を間近に控えた職業運転者に対する教育投資には消極的で、高齢者層をターゲットとした安全運転教育を実施している企業は非常に少ない。

こうした中、警察庁は、昨今の認知症に起因した交通事故の増加を踏まえ、道路交通法を改正して75歳以上のドライバーに対するチェック体制を強化する方針を打ち出した。具体的には、現在は運転免許の更新時のみ義

図表2 年齢別職業運転者単位人数当たり事故件数の指数(全国平均=1)



出典：自動車安全運転センター「加齢に伴う職業ドライバーの運転技能の変化に関する調査研究」を基に筆者作成

務付けられている認知機能検査を信号無視や逆走などの違反があった場合にも臨時的に実施し、認知症のおそれがあると判定されたドライバーには医師による確定診断を受診させるとしている。

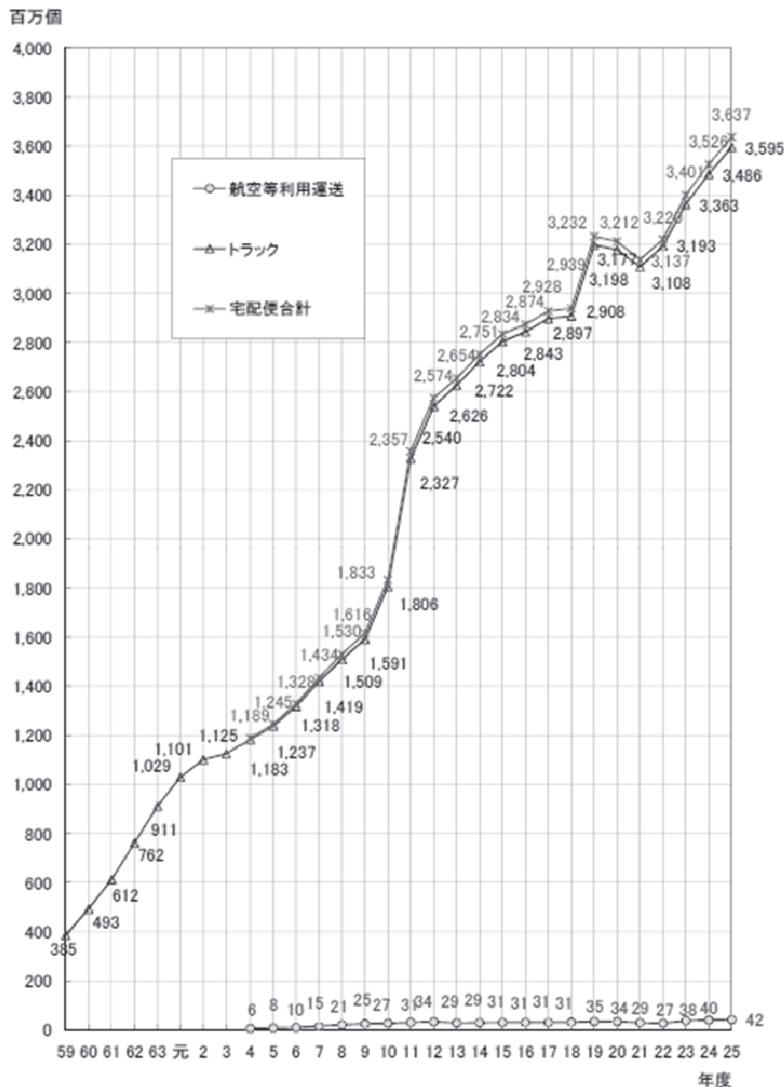
3. 高齢化社会における「スローロジスティクス」の提唱

近年、インターネット通販などの電子商取引（e-コマース）が急速に普及している。黎明期には仕事が多忙で買い物に行く時間がないビジネスパーソンやパソコンに精通している一部の人を使うツールとして想定されてい

たが、現在は生活必需品から嗜好品に至るまで品揃えが豊富で、家に居ながらにして買い物ができ、購入した商品がすぐ手元に届く便利さから、対面での購買を好まない若い世代の他、育児や介護で家を空けることができない家庭や、高齢者を中心として全国に約600万人存在すると言われる、居住地域で日常の買い物や生活に必要なサービスを受けることに困難を感じる人たち、いわゆる「買い物弱者」などにも積極的に利用されている。

これに伴い、多種多様な商品を早く確実に全国津々浦々の消費者の手元まで届ける「毛

図表3 宅配便等取扱個数の推移



出典：国土交通省ホームページ「平成25年宅配便等取扱実績について」

細血管型物流」を担うトラック輸送のニーズも拡大し、平成25年度は宅配便全体の約99% (35億9,506万個) を取り扱っている (図表3)。

しかし、前述の通り、加齢による身体機能や認知機能の衰えが大型車両の安全な運行に支障をきたす危険性が存在する以上、高齢化社会において従来と同様の大型車両による高密度なトラック輸送を行うことは、交通事故発生リスクが高いと言わざるを得ない。わが国における交通事故は減少傾向にあるものの、平成26年には57万件以上が発生し、負傷者は70万人以上、死亡者は4,000人を超えている。ましてや大型車両であるトラックがひとたび事故を起こせば、その被害は甚大なものとなる。

利便性を追求するあまり、安全が疎かになることは決してあってはならない。仮に、安全の確保によって利便性が後退したとしても、それは社会全体で甘受しなければならない。高齢化による社会構造の変化に応じたトラック輸送サービスの構築が不可欠となる。

そこで、高齢化社会における新たなトラック輸送のあり方として、「スローロジスティクス」を提唱したい。

思うに、現在のトラック輸送は、顧客サービスの名の下にあらゆる貨物を「一律に」「早く」輸送しているため、物量の集中や労働力不足などの問題を招くだけでなく、トラックの安全な運行を阻害していると考えられる。確かに、必要なものがすぐ手に入るのは便利であるが、明日絶対に必要なものと1週間後でも十分間に合うものがあることも事実である。

よって、必要性や緊急性の観点から、受注以降のリードタイムを極力短くして「特別に」「早く」輸送する貨物と、ピッキングや梱包などの作業時間にも余裕を持たせてリードタイムを長く取り、「普通に」「ゆっくりと」輸送する貨物とに区別するという方法が採れないだろうか。そして、前者については身体機能や認知機能が高い若年層や中高年層のトラック運転者に従来の大型車両による輸送を担当させ、後者については高齢のトラック運転者が小型で低速の貨物専用車両 (超小型モビリティ) を使って輸送する。これにより、安全の確保や輸送量の平準化をはかることができる上に、高齢のトラック運転者の活用にも繋がると思われる。

4. おわりに ～持続可能なトラック輸送を目指して～

当然ながら、「スローロジスティクス」は、わが国の物流のあり方そのものに関わるため、車両の開発をはじめとした技術面や交通インフラ・ネットワーク機能の整備など、クリアすべき課題が山積している。非現実的な話のように思われるかもしれないが、来るべき高齢化社会におけるトラック輸送のあり方を今から真剣に模索していかなければ、物流がわが国の産業活動や国民生活の維持・発展を阻害するボトルネックとなりかねない。

また、「スローロジスティクス」の根底にある、「ゆっくりと」運ぶことが「普通」であり、「早く」運ぶことは「特別」であるという考え方や、トラック輸送サービスは有償であるという認識を、わが国全体で共有することが極めて大切である。

一般的に、「早く」「楽に」「確実に」などのメリットを享受すれば、それに見合った対価が発生するのが通常である。トラック輸送においても、実際に自分の足で店舗に出向いて買い物をして商品を自らの手で家まで持ち帰るといふ、多くの時間と労力が費やされる一連の行為を輸送のプロフェッショナルであるトラック運送事業者が安全かつ迅速に代行することは高品質な輸送サービスの提供であり、そこには相応の対価が発生すると考えるのが自然であろう。各駅停車の電車と比べ、特急電車の方が目的地まで早く着き、車内環境も快適であるという付加価値の分だけ乗車料金が高いことと同じ理屈である。ましてや、トラック輸送の送料は、決して無料などではない。

トラック運送事業者も提供した輸送サービスに応じた対価を利用者から適正に収受することによって、その一部を高齢のトラック運転者の安全運転教育などに積極的に投下することが可能となり、利用者もトラック輸送に高い価値を認め、自らが享受したサービスに相応した対価を納得して負担する、という好循環が構築されるものと思われる。

高齢化社会における「スローロジスティクス」が持続可能なトラック輸送（Sustainable Trucking）への架け橋となることを期待したい。

<参考資料>

- ・ 内閣府「平成26年版高齢社会白書」
- ・ 総務省「平成25年労働力調査年報」
- ・ 国土交通省「平成25年度 宅配便等取扱実績について」（平成26年7月）

- ・ 厚生労働省「平成25年賃金構造基本統計調査」
- ・ 厚生労働省「買いもの弱者応援マニュアルver.2.0」（平成23年5月）
- ・ 警察庁「『道路交通法改正試案』に対する意見の募集について」（平成27年1月）
- ・ 自動車安全運転センター「加齢に伴う職業ドライバーの運転技能の変化に関する調査研究」（平成22年3月）

<追記>

本稿で述べた内容は、筆者の個人的な見解である。

高齢化社会における物流会社の新動向

The latest trend of logistics companies in Aging society



森田富士夫：物流ジャーナリスト

略 歴

1949年茨城県常総市生まれ ペトロケミカル分野で中間製品の流通構造ならびに最終製品の市場調査・分析・執筆などに従事 流通業界誌や物流業界紙誌の記者・編集者を経験 1977年からフリーの物流ジャーナリストとして今日に至る 会員制情報誌『M Report』を毎月発行 著書は『ネット通販と当日配送』（2014年1月・白桃書房）など多数

「高齢化社会」といってもさまざまな解釈ができる。ここでは高齢者の比率が高い人口構造の社会だけではなく、労働人口の減少、若い世代の大都市圏への人口集中と人口分布の偏り、それに伴い地方での人口減少の加速化や「限界集落」の増加その他、さまざまな意味合いを包含した広義の高齢化社会と解釈し、それに対応した物流企業の新動向のいくつかを紹介する。

高齢者や女性パートを活用し 軽ワゴン車で中山間地域のニーズに対応

市場縮小と高齢化が進行する中で、中山間地域などの運送事業者にとっては、地域特性を考慮した新サービスを創造することが必要になっている。そこで、軽ワゴン車によって“運ぶだけでなく販売もやれる仕事”というサービス・コンセプトを新たに打ち出した長野県の事業者がいる。

同社は引越サービスも行っているので、一般家庭の住居空間にまで入って作業をするノウハウがある。将来的には多様な事業展開を構想しているが、取材時点ですでに開始しているサービスは、電話帳の各戸（あるいは法

人）配布、観賞用植物のレンタル会社との契約による配送、高齢者向け弁当の宅配などである。弁当宅配では、いずれは地元産の野菜などを調達して、高齢者向け弁当を自社（子会社）で製造するような構想もある。また、地産地消で、宅配と絡めてマイナーな地元の特産品の販路開拓なども考えている。高齢者への宅配の延長としては、買い物代行サービスなども視野に入れている。買い物代行は地元の商店街とのタイアップで地域振興にもなる。さらに、高齢者への弁当宅配は各種施設に高齢者が引っ越す際の引越サービスや、遺品整理サービスなどにも繋げることが可能だ。

同社では、高齢化の進んだ農家から中古農機具を買い取って販売する事業も始めた。高齢化で農作業をしなくなった農家が中古の農機具を売りに出すケースが多いという。一方、販売先は団塊の世代などリタイアして田舎暮らしをする人たちだ。最近では退職後に都会から田舎に移住する人たちが増加しており、休耕地を借りて農業をしたいという人たちが中古の農機具を求める。さらに、自社でも休耕

しているリンゴ畑を賃借して農園経営にも参入した。定年退職した社員が通常は農作業をし、繁忙日だけトラックに乗務する仕組みだ。

このように同社では高齢化社会の進行に伴う社会の変化を多面的に捉えて、高齢者の雇用と結びつけ新たなサービス展開を図っている。

物流をベースにした 高齢化社会の「便利屋」事業

ハウスクリーニングや不用品回収、さらには各種のチケット購入代行など、高齢者家庭の困りごとを一括して解決、サポートするという「便利屋」事業を行っているのが山口県の事業者。地方都市に所在する同社は社歴も古く、地元では社名が浸透している。そこで、女性の社会進出や高齢化など社会構造が変化する中で、自社の知名度やノウハウを活かせる地域限定の新サービスの可能性を3年ほどかけて社内で検討した。同地固有の事情かもしれないが、家具などを廃棄する場合に自治体が引き取りに来てくれないため、自分で所定の場所まで運んでいかなければならない。しかも、たとえば布団を廃棄する場合なら、決められた大きさに裁断して出さなければならないという。これでは高齢者世帯などでは難しい。さらに一般家庭を調べたら様々なニーズがあることが分かった。

そこで「便利屋」事業を行う子会社を設立したのである。便利屋は高齢者だけが対象ではない。たとえば、女性の社会進出という面からは、家が留守がちになる、男手がなく重い物などが運べない、家事の時間が充分にとれないなどのニーズがあった。自己実現社会

という面では、自分の好きなことだけに多くの時間を割きたいので、代行サービスがあるなら委託したい。そして高齢化社会では、高齢者だけの家庭が増加していて体が動かない、車が運転できないといった人が増えている。このような調査結果を踏まえ、不用品引き取り、掃除、力仕事、パソコンや携帯電話などのサポート、配達、家電製品やAV機器の設置、ハウスクリーニング、買い物代行、自転車修理、その他のサービスを始めたのである。この新サービスは、「創造的・革新的な経営への取組」による「新サービスの開発、提供」として、同県産業振興財団の承認を受けた。

大都市では高齢者だけでなく 「おひとり様」も含めたサービス展開も

引越サービスから派生して、高齢者の生活パートナーを目指して子会社を設立した都内の事業者は、介護保険ではカバーできない高齢者のニーズに応える様々なサービスを展開している。大都市ならではの事情かもしれないが、事前のマーケティング調査では高齢者だけでなく、女性の「おひとり様」にも共通するようなニーズがあることが分かった。そこで、お片づけパートナー、1人暮らしの方への“生涯安心特別プラン”サービス、リサイクル事業、不用品廃棄、遺品整理事業などのサービスを始めた。

お片づけパートナーでは、季節ごとの衣替え、不要の道具や破損物の処分、部屋の模様替え、病院や施設などへの入退去時の片づけ、住み替えに応じた整理や片づけサービスなどを行う。1人暮らしの人の生涯安心プランで

は、介護施設などの紹介、子や孫などに集合してもらっての記念ポートレートの撮影、相続・遺言・贈与などの事前相談、遺品整理などのサービスを提供する。そのためには専門知識や資格が必要になることもあるため、弁護士、税理士、司法書士など各分野の専門家とも提携している。リサイクル事業や不用品廃棄では、リサイクル、リユース、適正処分などをする。また、遺品整理では、個人の思いのこもった遺品の供養サービスなども行う。

社内スタッフにはサービス介助士の認定試験を全員が受けるように奨めている。同時に外部スタッフの拡充に努め、ケアマネジャーやヘルパーなどの資格を持ちながら働いていない人たちのネットワーク化も図っている。これら外部スタッフの活用によって、高齢者の1人暮らしの「買物難民」を解消するための買い物代行、衣替えや片づけ、高齢者を抱える夫婦の家事代行などを行う。また、若い女性の「おひとり様」にも、将来にわたっての不安に対応できるようなサービスを考え、不安を解消するための法的なサポートなどができるような部隊（外部スタッフ）も抱えている。

作業スタッフに ホームヘルパーが加わる引越サービス

やはり引越サービスから派生して、介護の必要な高齢者を主たる対象とし、ホームヘルパーの有資格者が作業に加わる独自の引越サービスを展開している大阪の事業者がいる。

この事業者の保有車両は2t車と軽トラッ

クで、取引形態もスポット契約の比率が他社より高い。そのような中で引越サービスにも参入したが、引越事業も競争が激しい。そこで引越サービス分野で他社との差別化を図るために介護の必要な高齢者などを対象にした引越サービスを独自に考えた。高齢者の引越は単身で老人ホームやグループホームなどの施設に入るケースがほとんどである。施設への入所の順番を待っていて空きがでたら引越するため繁忙の波動がない。また、荷物が少ないので2t車や軽トラックなど小さな車両でもよく、ほとんどが同一行政管内での引越のため近距離で作業時間も短い。

現状の介護サービスには、ホームヘルパーによる引越の手伝いは含まれていない。引越の手伝いなどは周辺サービスという位置づけに過ぎない。そこで同社は独自のサービス・システムを考えた。①高齢者の施設への入居が決まったら、ヘルパーステーションのケアマネジャーなどから同社に連絡が入る。②同社の社員（ホームヘルパーの有資格者）がケアマネジャーなどとスケジュールや引越内容、契約金額、その他の必要事項について相談。③ホームヘルパーの訪問介護日に合わせて、荷造りなどの引越準備を行う（ホームヘルパーの訪問介護日でなくても、有資格者がスタッフに加わっているので安心）。④施設への入居だけでなく、施設からの退居や、万が一の際にも遺品の処理、部屋の掃除、リサイクルなどトータルでサポートする（家財の再販売、廃棄処分、部屋の掃除、遺品などの処分その他）。

同社ではフランチャイズによる全国展開を

進めており、現在、加盟店は17社（同社を含む）で、サービスエリアは1都2府17県になっている。

高齢化した農家を支援して 農産物輸送需要を掘り起こす

高齢化の波は農業従事者にも及んでいる。そのため休耕地が増えると農産物の出荷量が減少し、荷物も減ることになる。そこで茨城県の事業者は、地元の各JAや同県の全農と提携して、高齢化した農家をサポートする子会社（農業生産法人ではない）を設立した。子会社では農作業の受託や農産物の生産・加工および販売、農業資材の貯蔵・運搬・販売、農業機材の賃貸借、貨物運送取扱などの事業を行う。高齢化した農業従事者をサポートして休耕地化を防ぎ、農産物の輸送量を増やすのが目的である。

サービスの流れは、JAと農家が話し合い、JAから農家サポートの委託を受けて、農作業や遊休農地の活用などを支援するというもの。具体的には野菜の収穫・調整・荷づくり、野菜の袋詰め、利用されていない農地を活用して野菜などの生産を手伝う、といった事業である。さらに、これらの作業はシルバー人材などを活用して行う。高齢化した農家の作業をシルバー人材でサポートするという構図はなかなか面白い。

農産物の販売金は全額、同県全農に入る。運送事業者には全農から作業委託費（子会社）や運賃（同社）として支払われる。また生産農家への支払は、全農から各JAに支払われ、JAから生産農家に支払うという形だ。

農家の高齢化という点では、集荷場で農産

物を等階級別に選別する作業すら困難になってきた地域もある。たいていは農家が朝から収穫して集荷場に持ち込む。集荷場では地域の高齢者の人たちが等階級別に選別して箱詰めを行う。運送事業者はそれを集荷するという仕組みである。しかし、高齢化が進んだために等階級別の選別作業もできなくなっている地域もある。そこで愛知県の事業者は、選別されていない農産物を集荷場から集荷し、自社のセンターで、これもシルバー人材を活用して選別作業まで請け負うようにした。

物流は「買物弱者」と「販売弱者」のインターフェースという発想

まだ具体的なビジネスにはなっていないが、「買物弱者」と「販売弱者」を結びつける物流システムの事業化を構想・模索している中小トラック運送事業者もいる。

「買物弱者」は一般的な言葉になっているが、その一方には「販売弱者」もいるという発想である。どの地方に行っても、昔からの商店街の疲弊が目立つ。いわゆるシャッター通りである。郊外の大型店に客が流れ、地元の商店街は活気がない。このような小規模小売店を「販売弱者」と捉え、高齢化などによって買物も難儀になっている「買物弱者」を結びつけることができるのが物流事業者である、という発想だ。

高齢化社会における物流新サービスを創造するには、冒頭で高齢化社会を広義に解釈すると書いた理由でもある。

以上のように、高齢化社会では宅配だけではなく、多様な新サービスの可能性がある。

2014年度の産学連携プログラムの実施状況

Industry-University Consortium on Logistics

流通経済大学流通情報学部では、2010年度からロジスティクス産学連携プログラムを正式に立ち上げました。今年度が5年目であり、プログラムが確実に定着してきました。プログラムの講師は、ロジスティクス関連の業界団体、物流業、運輸業、メーカー、卸売業、小売業、コンサルタントなど、企業を中心とした幅広い人材で構成されております。

ロジスティクス産学連携プログラムとして、「ロジスティクス実践講座」、「物流マネジメント実践講座」、「国際物流実践講座」、「情報システム実践講座」、「ロジスティクス企業訪問講座」、「ロジスティクス改善演習」の6科目、さらに関連する寄付講座として、「日本通運寄付講座」、「全国通運連盟寄付講座」、「日本通信販売協会寄付講座」の3科目があります。2014年度の実施状況の概要をご報

告させていただきます。

① 「ロジスティクス実践講座」の2014年度の実施状況

「ロジスティクス実践講座」は、荷主企業等を中心にロジスティクス実務者を招き、各企業のロジスティクスシステムの現状を学び、ロジスティクスの考え方を現場から考えていくことを目標としています。また、環境問題あるいは安全・安心といった新たな問題についても学びます。ロジスティクス実践講座Ⅰが春学期、ロジスティクス実践講座Ⅱが秋学期に、龍ヶ崎、新松戸の両キャンパスで開講しました。各回のテーマ、講師は表1、表2のとおりです。新松戸の受講生数は春学期55人、秋学期53人でした。龍ヶ崎の受講生数は春学期58人、秋学期56人でした。

表1 「ロジスティクス実践講座－龍ヶ崎」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ロジスティクス実践講座ガイダンス	流通経済大学 矢野裕児
2	ロジスティクスの基礎知識	流通経済大学 矢野裕児
3	企業のロジスティクス戦略の変遷-1	日通総合研究所 廣瀬吉英氏
4	企業のロジスティクス戦略の変遷-2	日通総合研究所 廣瀬吉英氏
5	物流改善のポイントは-1	紙中コンサルティング 紙中英伸氏
6	物流改善のポイントは-2	紙中コンサルティング 紙中英伸氏
7	トラック輸送の実態と未来像	日通総合研究所 大島弘明氏
8	流通業におけるロジスティクスの展望	ロジスティクス経営士 楠堂昌純氏
9	地球環境問題と国際化	みずほ情報総研 秋山浩之氏
10	ロジスティクスと包装	ティ・エス・ケイ 橋爪文彦氏
11	ロジスティクス企業に期待されていること	日通情報システム 藤田光樹氏
12	ロジスティクスの最新動向	日通総合研究所 山田健氏
13	ロジスティクスと環境－環境問題とグリーン物流－	ロジスティクス革新パートナーズ 菅田勝氏
14	ロジスティクスと環境－リコーロジスティクス環境活動事例－	ロジスティクス革新パートナーズ 菅田勝氏
15	春学期まとめ	流通経済大学 矢野裕児
16	ロジスティクス概論	元日本ロジスティクスシステム協会 石井徹郎氏
17	ガイダンスとロジスティクスの基礎知識	流通経済大学 矢野裕児
18	物流コスト低減のための改善策	紙中コンサルティング 紙中英伸氏

回	テーマ	講師
19	フード業界企業間電子商取引(BtoB)プラットフォーム「FOODS InfoMart」	インフォマート 藤田尚武氏
20	物流業界で重要性が高まる物流不動産ビジネスを学ぼう!	イーソウコ 大谷巖一氏
21	都市内物流の効率化について	日通総合研究所 大島弘明氏
22	中小企業の生き残りをかけた取り組み	十和運送 結束洋氏
23	食品コールドチェーンにおける課題改善と効果について	物流環境管理士 櫻井保氏
24	ロジスティクスファイナンスについて	日通キャピタル 馬越史郎氏
25	食品の安全と物流効率を実現した「駅ナカ」「百貨店」向けサプライチェーンの取組み	ロジスティクス・ネットワーク 立川哲二氏
26	激変する物流業界とこれからの方向性	ハウス物流サービス 早川哲志氏
27	首都圏4千万人のゲートウェイ東京港	中央大学 成田浩氏
28	酒類・加工食品業界と味の素グループのロジスティクス	ファイネット 恒吉正浩氏
29	卸売業にとっての物流システム	国分 山田英夫氏
30	菓子物流のネットワーク価値の拡大	スナックフードサービス 一山幸市氏

表2 「ロジスティクス実践講座-新松戸」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ロジスティクス実践講座ガイダンス	流通経済大学 矢野裕児
2	ロジスティクスの基礎知識	流通経済大学 矢野裕児
3	企業のロジスティクス戦略の変遷-1	日通総合研究所 廣瀬吉英氏
4	企業のロジスティクス戦略の変遷-2	日通総合研究所 廣瀬吉英氏
5	物流改善のポイントは-1	紙中コンサルティング 紙中英伸氏
6	物流改善のポイントは-2	紙中コンサルティング 紙中英伸氏
7	流通業におけるロジスティクスの展望	ロジスティクス経営士 楠堂昌純氏
8	地球環境問題と国際化	みずほ情報総研 秋山浩之氏
9	ロジスティクス企業に期待されていること	日通情報システム 藤田光樹氏
10	トラック輸送の実態と未来像	日通総合研究所 大島弘明氏
11	ロジスティクスの最新動向	日通総合研究所 山田健氏
12	ロジスティクスと環境-環境問題とグリーン物流-	ロジスティクス革新パートナーズ 菅田勝氏
13	ロジスティクスと環境-リコーロジスティクス環境活動事例-	ロジスティクス革新パートナーズ 菅田勝氏
14	春学期まとめ	流通経済大学 矢野裕児
15	ロジスティクス概論	元日本ロジスティクスシステム協会 石井徹郎氏
16	ガイダンスとロジスティクスの基礎知識	流通経済大学 矢野裕児
17	物流業界で重要性が高まる物流不動産ビジネスを学ぼう!	イーソウコ 大谷巖一氏
18	沖縄県の地域特性分析	あんしん 雨宮路男氏
19	食品の安全と物流効率を実現した「駅ナカ」「百貨店」向けサプライチェーンの取組み	ロジスティクス・ネットワーク 立川哲二氏
20	中小企業の生き残りをかけた取り組み	十和運送 結束洋氏
21	包装	ケイ・ティ・エス 橋爪文彦氏
22	変化に対応する花王のSCM	花王 山口裕人氏
23	激変する物流業界とこれからの方向性	ハウス物流サービス 早川哲志氏
24	菓子物流のネットワーク価値の拡大	スナックフードサービス 一山幸市氏
25	卸売業にとっての物流システム	国分 山田英夫氏
26	鉄道貨物の輸送の現状と課題	日本貨物鉄道 神立哲男氏
27	物流コスト低減のための改善策	紙中コンサルティング 紙中英伸氏
28	酒類・加工食品業界と味の素グループのロジスティクス	ファイネット 恒吉正浩氏

②「物流マネジメント実践講座」の2014年度の実施状況

「物流マネジメント実践講座」は、トラック、鉄道、3PL等の物流事業者及び有識者を招き、ロジスティクス管理に関する現状を学ぶことを目標としています。また、企業の物流戦略や多様な物流サービスの事例といった最

新の動きについても学びます。半期科目であり、春学期は新松戸キャンパスで、秋学期は龍ヶ崎キャンパスで開講しました。各回のテーマ、講師は表3、表4のとおりです。新松戸の受講生数は24人、龍ヶ崎の受講生数は21人でした。

表3 「物流マネジメント実践講座－春学期、新松戸」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス	流通経済大学 小野秀昭
2	講座受講に必要な知識	流通経済大学 小野秀昭
3	トラック運送産業の概要	運輸・物流研究室 中田愛子氏
4	3PLの役割と実例	川崎陸送 樋口恵一氏
5	ロジスティクス分野のIT活用事例	野村総合研究所 足立研二氏
6	経営戦略の中での物流の位置づけ/役割	金方堂運輸 松本有司氏
7	鉄道貨物輸送の仕組みとJR貨物の取り組み	日本貨物鉄道 大熊真理子氏
8	メーカーと物流子会社の関係・役割	ファイネット 恒吉正浩氏
9	内航海運の現状	海上技術安全研究所 間島隆博氏
10	重量品輸送	日通総合研究所 福島茂明氏
11	宅配便の開発と成長過程	ヤマト運輸 江口真一氏
12	物流における倉庫の役割	日本通運 佐藤健吾氏
13	市場流通の動向と市場物流の実際	コンサル アグリ 藤井憲雄氏
14	講座の復習とまとめ TVドキュメント	流通経済大学 小野秀昭
15	講座の復習とまとめ	流通経済大学 小野秀昭

表4 「物流マネジメント実践講座－秋学期、龍ヶ崎」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス	流通経済大学 小野秀昭
2	講座受講に必要な知識	流通経済大学 小野秀昭
3	トラック運送産業の概要	運輸・物流研究室 中田愛子氏
4	3PLの役割と実例	川崎陸送 樋口恵一氏
5	宅配便の開発と成長過程	ヤマト運輸 江口真一氏
6	鉄道貨物輸送の仕組みとJR貨物の取り組み	日本貨物鉄道 大熊真理子氏
7	ロジスティクス分野のIT活用事例	野村総合研究所 足立研二氏
8	重量品輸送	日通総合研究所 福島茂明氏
9	経営戦略の中での物流の位置づけ/役割	金方堂運輸 松本有司氏
10	内航海運の現状	海上技術安全研究所 間島隆博氏
11	物流における倉庫の役割	日本通運 佐藤健吾氏
12	市場流通の動向と市場物流の実際	コンサル アグリ 藤井憲雄氏
13	メーカーと物流子会社の関係・役割	ファイネット 恒吉正浩氏
14	講座の復習とまとめ TVドキュメント	流通経済大学 小野秀昭
15	講座の復習とまとめ	流通経済大学 小野秀昭

③「国際物流実践講座」の2014年度の実施状況

「国際物流実践講座」は、国際物流に携わる経営者、実務経験者を講師として招聘し、国際物流における最新動向、事例により、国

際物流の現状と課題を把握するとともに今後の展望を学修することを目標としています。春学期に半期科目として、新松戸キャンパスで開講しました。各回のテーマ、講師は表5のとおりです。受講生数は63人でした。

表5 「国際物流実践講座－春学期、新松戸」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス	流通経済大学 林克彦
2	荷主企業の国際物流管理	ニトリ 岡村毅氏
3	国際物流サービス	流通経済大学 林克彦
4	船会社の国際物流戦略	オーシャントランス 辰巳順氏
5	ロシアの最新物流事情	環日本海経済研究所 辻久子氏
6	商社の国際物流管理	住友商事 河野達也氏
7	インテグレータの国際物流戦略	FedEx 山口邦夫氏
8	航空会社の国際物流戦略	株式会社ANA Cargo 嶋崎 聡氏
9	中間まとめ	流通経済大学 林克彦
10	航空フォワーダーの国際物流戦略	日本通運 石川淳一氏
11	海上貨物フォワーダーの国際物流戦略	日本通運 織田博文氏
12	物流企業の海外展開(中国)	日本通運 小林克人氏
13	ASEANの最新物流事情	日通総合研究所 山口修氏
14	クーリエ会社の国際物流戦略	日本クーリエサービス 杉山年弘氏
15	講義のまとめ	流通経済大学 林克彦

④「情報システム実践講座」の
2014年度の実施状況

「情報システム実践講座」は、物流分野などに利用されている情報システムやその要素技術などに関わる実務者を講師として招き、具体的事例を通して最近の動向や課題などについて学びます。また、システムやネットワー

ク的设计・開発の手法についても学びます。半期科目であり、春学期は新松戸キャンパスにて、秋学期は龍ヶ崎キャンパスにて開講しました。各回のテーマ、講師は表6、表7のとおりです。新松戸の受講生数は40人、龍ヶ崎の受講生数は37人でした。

表6 「情報システム実践講座－春学期、新松戸」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス	流通経済大学 増田悦夫
2	情報システムを活用したロジスティクス・ネットワークの最適化	日本ビジネスクリエイト 後藤一孝氏
3	ロジスティクスと情報システム	フレームワークス 秋葉淳一氏
4	SCMにおける情報セキュリティの課題	飛天ジャパン 傘義冬氏
5	物流の効率化とこれからの取り組み	日通総合研究所 要藤洋文氏
6	物流情報化と標準化	オフィス・ロン 吉本隆一氏
7	サプライチェーン情報の活用とその効果	日本ユニシス 澤上多恵子氏
8	パレットにおけるRFIDの利用	日本パレットレンタル 永井浩一氏
9	物流作業における先端物流情報機器導入について	日立物流ソフトウェア 小林道明氏
10	IT業界での職務とキャリアパス・企業研究	ヒューマネテック 松下雄二氏
11	本人認証学への入門	きさいや 宇都宮康夫氏
12	Webシステム開発の現状と今後	ヒューマネテック 田中裕樹氏
13	物流現場力強化のためのIT技術	MTI 粟本繁氏
14	TMSの現状と今後の課題	光英システム 三輪宏氏
15	講義のまとめ	流通経済大学 増田悦夫

表7 「情報システム実践講座－秋学期、龍ヶ崎」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス	流通経済大学 増田悦夫
2	情報システムを活用したロジスティクス・ネットワークの最適化	日本ビジネスクリエイト 後藤一孝氏
3	Webシステム開発の現状と今後	ヒューマネテック 田中裕樹氏
4	SCMにおける情報セキュリティの課題	飛天ジャパン 傘義冬氏
5	物流作業における先端物流情報機器導入について	日立物流ソフトウェア 小林道明氏
6	物流情報化と標準化	オフィス・ロン 吉本隆一氏
7	本人認証学入門	きさいや 宇都宮康夫氏
8	ロジスティクスと情報システム	フレームワークス 秋葉淳一氏
9	サプライチェーン情報の活用とその効果	日本ユニシス 澤上多恵子氏
10	物流の効率化とこれからの取り組み	日通総合研究所 要藤洋文氏
11	パレットにおけるRFIDの利用	日本パレットレンタル 永井浩一氏
12	物流現場力強化のためのIT技術	MTI 粟本繁氏
13	TMSの現状と今後の課題	光英システム 三輪宏氏
14	講義のまとめ	流通経済大学 増田悦夫

⑤「ロジスティクス企業訪問講座」の
2014年度の実施状況

企業がロジスティクスをどのように考え、システムを構築しているかについて、企業訪問を通じて考察します。実際の現場を訪問することによって、学生が実感として理解する

ことを目標としています。2014年度は11箇所を訪問し、現場でロジスティクス担当者が概説し、物流現場を実際に見学しました。半期科目で、企業訪問を実施することから、夏季休暇中の9月に集中講義で、開講しました。各回のテーマ、訪問先は表8のとおりです。

表8 「ロジスティクス企業訪問講座」の2014年度の実施結果

回	テーマ	訪問先、講師
1	企業訪問講座ガイダンス-1 ・企業訪問講座の全体像 ・訪問場所のロジスティクスの概要	流通経済大学 矢野裕児、洪京和
2	企業訪問講座ガイダンス-2 ・訪問スケジュール ・訪問時の注意事項	流通経済大学 矢野裕児、洪京和
3	自動車メーカーの工場見学	富士重工業 矢島工場
4	自動車メーカー向け物流センターの見学	日発運輸 太田配送センター
5	江戸時代から昭和までの物流の歴史を紹介	物流博物館
6	鉄道貨物駅の見学	東京貨物ターミナル駅
7	物流改善事例の説明、物流機器の見学	トヨタL&F カスタマーズセンター
8	最新の物流システム、物流機器の見学	国際物流総合展 東京ビッグサイト
9	社用品物流センターの見学	日本郵便 東日本物流センター
10	通信販売の物流センターの見学	ファンケル 関東物流センター
11	建設現場向け物流センターの見学と改善事例	カネシン
12	小売業の物流センター見学	カスミ 中央流通センター
13	メーカーから物流業務を委託された物流センターの見学	トーワ流通 小絹センター

⑥ 「ロジスティクス改善演習」の
2014年度の実施状況

「ロジスティクス改善演習」では、物流部門の現場で発生する課題を題材として取り上げ、現状の問題点の整理を行い、各種手法を用いて改善案を検討します。この演習を受講

することにより、物流システムに関する理解を深め、分析手法を習得するとともに、分析能力や改善案を提案できる能力を習得することを目標としています。半期科目として、竜ヶ崎キャンパスで実施しました。各回の内容は表9のとおりで、受講生数は36人でした。

表9 「ロジスティクス改善演習」の2014年度の実施結果

回	項目	内容
1	はじめに	授業のテーマと目標、実施方法、評価基準等を理解する。
2	ミニチュアモデルによる設備配置1	方眼紙を用いて、倉庫およびラックのミニチュアモデルを作成する。
3	ミニチュアモデルによる設備配置2	ミニチュアモデルを用いたシミュレーションを用いてにより、物流施設内のラック配置を設計する。
4	ミニチュアモデルによる倉庫設備3	総移動距離などを算出し、提案した設計案を評価し、レポートを作成する。
5	RALCによるラック配置設計1	ミニチュアモデルにより作成したラック配置案に対応するRALCシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行い、設計案を評価する。
6	RALCによるラック配置設計2	RALC上で、ラック配置を改善したモデルを作成し、シミュレーションを行い、改善案を評価する。
7	RALCによるラック配置設計3	RALCシミュレーションの各モデルについて分析し、レポートを作成する。
8	サプライチェーンゲーム 1	サプライチェーンゲーム(ビールゲーム)の概要を理解し、ゲームの実施方法を習得する。
9	サプライチェーンゲーム 2	サプライチェーンゲームを実施する。
10	サプライチェーンゲーム 3	サプライチェーンゲームを実施する。
11	サプライチェーンゲーム 4	エクセルを用いて、ゲームの結果を評価・分析し、レポートを作成する。
12	物流とCO ₂ 排出	物流部門におけるCO ₂ 排出量の計算法を学習する。
13	モーダルシフトによるCO ₂ 排出量の削減1	事例データを用いて、モーダルシフトによるCO ₂ 排出量の削減量を算出する。
14	モーダルシフトによるCO ₂ 排出量の削減2	モーダルシフトによるCO ₂ 排出量の削減に関するレポートを作成する。
15	まとめ	全体のまとめを行う。

⑦「全国通運連盟寄付講座」の2014年度の実施状況

「全国通運連盟寄付講座」は、鉄道貨物輸送をテーマとして、物流博物館、JR貨物、鉄道利用運送事業者、荷主企業の実務者を招き、鉄道貨物輸送の現状、課題、今後の展望

を広く学びます。半期科目であり、新松戸キャンパスで開講しました。各回のテーマ、講師は表10のとおりです。下記の講義以外に夏休み期間中に、事前講習として東京貨物ターミナル駅の見学を実施しました。受講生数は43人でした。

表10 「全国通運連盟寄付講座」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	物流と通運の歴史	物流博物館 玉井幹司氏
2	地球環境問題とモーダルシフト	三菱総合研究所 永村知之氏
3	国際物流の動向と鉄道利用運送事業者の役割	流通経済大学 林克彦
4	JR貨物に関する知識(1)	JR貨物 高澤弘人氏
5	鉄道コンテナ輸送へのモーダルシフトの実際(1)	日本通運 中野泉氏
6	鉄道コンテナ輸送へのモーダルシフトの実際(2)	合通 高橋宏樹氏
7	鉄道コンテナ輸送へのモーダルシフトの実際(3)	磐城通運 鈴木孝雄氏
8	鉄道コンテナ輸送へのモーダルシフトの実際(4)	日本ロジスティクスシステム協会 荻原克郎氏
9	JR貨物に関する知識(2)	JR貨物 和田智秀氏
10	企業物流の中の鉄道貨物輸送(1)	ブルボン 稲田浩氏
11	企業物流の中の鉄道貨物輸送(2)	ホンダロジスティクス 久保田靖氏
12	鉄道コンテナ輸送の今後	全国通運連盟 西濱公樹氏
13	日本経済と鉄道貨物輸送ネットワークのあり方について	流通経済大学 林克彦
14	講義のまとめ	流通経済大学 林克彦

⑧「日本通信販売協会寄付講座 ダイレクト・マーケティング論」の2014年度の実施状況

「日本通信販売協会寄付講座」は、近年、市場が大きく拡大している通信販売、ネット販売といったダイレクト・マーケティングをテーマに、通販業界の実務家を招き、講義を進めます。ダイレクト・マーケティングの進展は、小売業における店舗型から無店舗型への変化というだけでなく、メーカー、卸、小売、物流企業による流通システム全体に大き

な影響をもたらしつつあります。本講座は、このような展開を、広く学んでいきます。半期科目であり、春学期に新松戸キャンパスで開講しました。また、9月にファンケルの物流センターを見学しました。各回のテーマ、講師は表11のとおりです。受講生数は40人でした。「日本通信販売協会寄付講座」は2年間限定の寄付講座ですが、学生からの評価が高かったため、2015年度からはダイレクト・マーケティング実践講座として継続します。

表11 「日本通信販売協会寄付講座」の2014年度の実施結果

回	テーマ	講師
1	ガイダンス(講義の進め方と講義の対象・課題)	矢野裕児
2	データでみる通販市場2014	日本通信販売協会 三浦千宗氏
3	ダイレクト・マーケティングとロジスティクス	矢野裕児
4	顧客対応からみた通販	日本通信販売協会 八代修一氏
5	顧客満足作りのポイント 『購入後満足』と『個性化』をいかに具体化するか	カタログハウス 松尾隆久氏
6	地方発産直通販の現状	ふくや 平山高久氏
7	スクロールの変遷と今後の展開	スクロール 高山隆司氏
8	通信販売市場の動向とオムニチャネル化	日本通信販売協会 柿尾正之氏
9	リーダーシップ論/ヒット商品を売り続ける秘訣	オークローンマーケティング 堀秀樹氏
10	世の中の“不”の解消を目指して ～お客様第一主義と価値創造の追求～	ファンケル 岡田周久氏
11	オットー・ジャパンの国内・海外でのフルフィルメントサービスとその事例～顧客に求められるフルフィルメントサービスとは?～	オットー・ジャパン 勝井武二氏
12	インターネット通販の展開	千趣会 中山茂氏
13	ヤフー・ジャパンの基本戦略とショッピング事業開	ヤフー 佐藤弘一氏
14	まとめ	矢野裕児
15	ファンケル関東物流センターの見学	矢野裕児

ネット・店舗が融合するサービスの動向とロジスティクスの課題

Study on Logistics that supports Omni-Channel Retailing,
which integrates Online and Offline Sales



増田悦夫：流通経済大学 流通情報学部 教授

略 歴

1977年3月電通大修士修了。同年4月日本電信電話公社（現在NTT）入社。2002年3月NTT退職。同年4月より現職。日本物流学会・電子情報通信学会などの会員。

[要約] ネット通販やスマートフォン（以下、スマホ）の進展などを背景に、小売業におけるネット・店舗間の融合が進みつつある。2011年頃から北米において登場し、「オムニチャネル」という言葉で呼ばれる。我が国でも2013年辺りから注目されつつある。融合が進む背景として、ネット通販の進展、スマホやそのアプリなどの進展、さらには、SNS (Social Networking Service) やブログなどのソーシャルメディアの浸透などにより、商品の売り方・買い方のバリエーションが大きく広がり、消費者の行動が多様化・複雑化してきたことが挙げられる。本稿では、ネット・店舗が融合するサービスの動向とそれを支援するロジスティクスの課題について示す。

キーワード ネット・店舗、融合、オムニチャネル、スマートフォン、ネット通販、ロジスティクス、配送網

1. まえがき

インターネットの進展や配送網の拡充などによりインターネット通販（以下、ネット通販）が進展している [1]。一方、スマホやタブレットなどのモバイル機器の進展、モバイル機器上で実行される応用ソフト（いわゆるアプリ）の拡充が進みつつある。特に、交流サイトのSNS (Social Networking Service) や簡易型ホームページのブログ、口コミサイトなどのソーシャルメディアの進展が著し

い。消費者は、このようなモバイル機器やソーシャルメディアなどを通して認知した商品を、近くの店舗で確認したり、ネット上で調べたりして、いつでも、どこからでも注文することが可能となり、しかも注文した商品は、その日のうちに受け取れたり、あるいは翌日に受け取れたりできるようになってきた。商品の売り方・買い方のバリエーションは大きく広がり、消費者の行動は多様化・複雑化してきている [2]。例えばIT機器や衣類・履物の購入などにおいて、実店舗にて商品の実物を確認し、その場では購入せず、価格や他の類似商品との比較をネット上でを行い、最終的にネットにて購入といった動きが見られる。あるいは、逆に、店舗の近くを通りかかっ

た時に、スマホのアプリ上に配信される当該店舗のチラシやクーポンを見て、店舗へ足を運び割安価格で購入といった動きもある。

ネット通販の売り上げ拡大の煽りを受け、スーパーマーケットや百貨店の収益が低迷する事態が顕在化しつつある中、消費者行動の多様化・複雑化が、ネット通販と実店舗とを独立の販売チャネルとして扱うことに対し改革の必要性を提起した。2011年頃から、北米の小売業において、複数の販売チャネルを明確に区別した運営を改め、小売業全体としての収益向上を目的として、チャネルの垣根を意識させずに、消費者とのあらゆる接点において、一元化された商品アイテムや在庫情報などを提供するという販売形態、即ち、ネット・店舗の融合を図った販売形態の取り組みが始まった。この種の形態は「オムニチャネル」と呼ばれ [3]、我が国においても2013年あたりからその実現に向けた取り組みが始められている。

本稿では、ネット・店舗が融合するサービスの動向とそれを支援するロジスティクスの課題について示す。第2章では、ネット・店舗の融合の概念や狙い、融合が進む背景について示す。続く、第3章では、ネット・店舗の融合に向けての基本的課題をマーケティング、ロジスティクス、ITなどに関連づけて整理する。第4章では、ネット・店舗が融合するサービスの形態や現時点における企業の動向を示す。続く、第5章では、ロジスティクス面の課題として、商品配送網の扱い、在庫箇所や出荷拠点、商品配送ルートなどの扱いについて示す。第6章で全体をまとめる。

2. 小売業におけるネット・店舗の融合

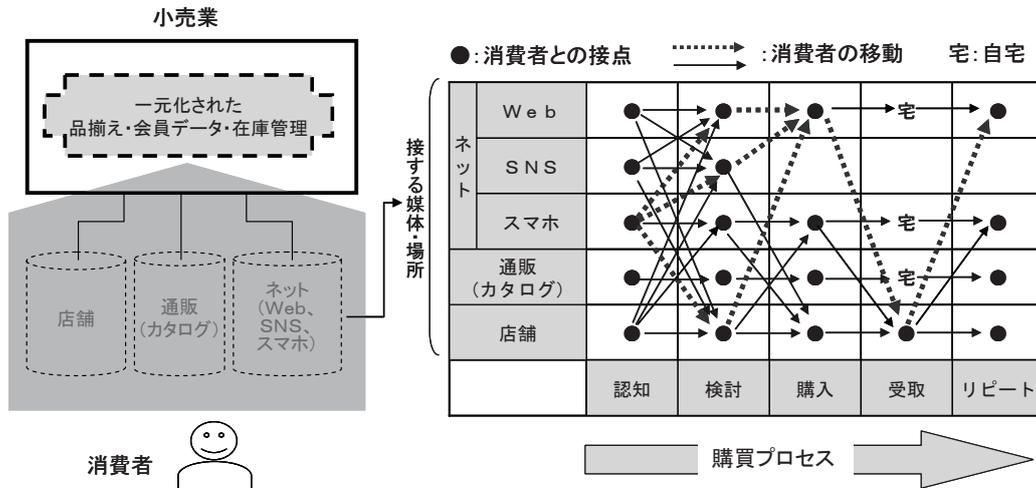
2.1 ネット・店舗の融合と狙い

MRI (Mobile Retail Initiative、全米小売業協会NRFが2010年に設立) が2011年1月に公開したMobile Retailing Blueprint Ver.2.0.0 [3] によると、小売業と消費者との接点は、シングルチャネル→マルチチャネル→クロスチャネル→オムニチャネル (Omni-Channel) と進化していき、最も適した形に行きつくところがオムニチャネルであるとしている。即ち、オムニチャネルは、消費者に店舗やネット通販などといったチャネルの垣根を感じさせない、ネット・店舗が融合した商品販売の仕組みである。

消費者の意識は、ある店の商品をどのチャネルを利用して買うかではなく、どの店で何を買うかにある。もはや、店舗、ネット通販などの販売チャネルを選択することに神経を使う必要はないということになる。小売業者からすると、いわゆるマーケティングミックス (4P) のPlace (流通) として、あらゆる消費者接点を活用することを意味している。即ち、複数のチャネルを連携させ、戦略的に個々の消費者に対応する。その場合、顧客や商品の管理は、複数のチャネル間で一元化され、切れ目なく (シームレスに) 運用される。

図1にその概念図を示す。同図の右側に、消費者と小売業者とが接する媒体・場所、消費者の移動の例を示している。特にインターネットと店舗とを融合させた販売の形態が進展しつつある。例えば、この図の点線で示すように、スマホで商品を認知した後、Web

図1 小売業におけるネット・店舗の融合



上あるいはSNSにて、あるいは店頭で、関連商品との比較やクチコミの確認あるいは商品の実物などを確認し、その後Web上（通販サイト）で購入（注文）し、受け取りは自分の都合に合わせて店頭で行いWeb上でリピートする、といった購入の形態がそれに該当する。ネット・店舗が融合する販売形態の狙いは、両者を融合させ相乗効果による小売業全体としての収益拡大を図ることにある。

2.2 ネット・店舗の融合が進む背景

ネット・店舗の融合が進む背景として、ネット通販市場の拡大、モバイルマーケティングにおけるO2O戦略（注：下記の（2）を参照）の進展、実店舗におけるショールーム化（注：「ショールーミング」と呼ばれる）が挙げられる。

(1) ネット通販市場の拡大

図2は日本のBtoC-EC市場規模の推移を示したものである [1]。小売業（実店舗）の販売額が過去数年間に亘りほぼ135兆円規模で横ばい状態に推移している（図示略）のに対して、消費者向けのBtoC-EC市場は着実に増

加しており、2013（平成25）年では11.2兆円（前年比17.4%増）規模に達している。この傾向がさらに継続していくと、実店舗の利用者が減少していき存続の危ぶまれる事態が想定される。

(2) モバイルマーケティングにおけるO2O戦略の進展

O2Oとは、Online（ネット）to Offline（実店舗）あるいはOffline（実店舗）to Online（ネット）を意味しており、ネットから実店舗へあるいは実店舗からネットへと集客を促したりするマーケティング戦略である（図3）。スマホ、SNSなどソーシャルメディアの普及により、それらを活用するマーケティングの手法として注目されるようになった

図2 日本のBtoC-EC市場規模の推移 経済産業省(2014年8月)

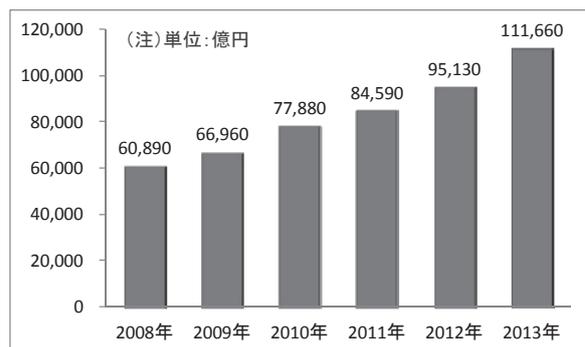
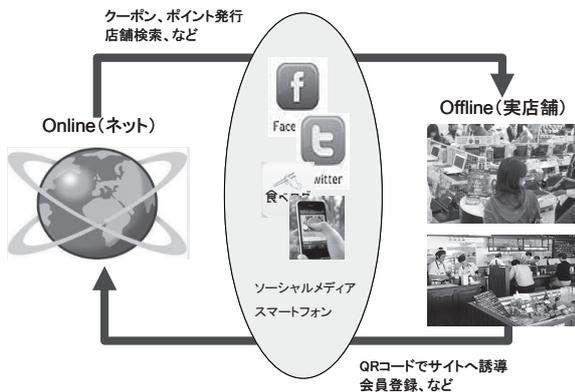


図3 O2Oの概念



[4]。10年以上も前に使われた言葉で、オンラインと実店舗との連携・融合を意味する「クリック（ネット）& モルタル（店舗）」と同様の概念である。

ネットから実店舗へ誘導する基本的な事例としては、登録された会員へメールで割引クーポンを送りつけたり、店の近くを通りかかった人のスマホにその店のチラシを表示させたり、割引クーポンを発行している近くの店を検索できたりするものなどがある。逆に、実店舗からネットへ誘導する事例として、来店の際にメールマガジン会員へ登録させたり、店内に用意したQRコードにより店のサイトへ誘導させたりするものがある。

(3) 実店舗のショールーム化

米国において2012年1月頃から小売店（実店舗）の新たな問題として顕在化しているのが「ショールーミング」と呼ばれる現象である。消費者が家電製品やアパレル商品などを購入する際、実店舗では購入したいと思う商品の下見などを行うのみで注文はネットで行う現象である。近場の実店舗は、ネット上でイメージがつかみにくいような商品の現物確認のみの場、いわゆるショールームの役割で

しかないということである。この現象は、ネット通販の普及により、ECサイトや比較サイトなどが充実し、商品の購入が便利になったことが背景にある。

最近では、実店舗で商品を確認し、その場でスマートフォンを利用して価格チェックを行い、注文してしまうといったことも珍しくない。図4に示すような、スマートフォンのアプリを利用し、実店舗に陳列されている商品のバーコードを読み取ると、価格や色の種類など商品に関する詳細な情報が表示される。価格を比較することも容易である。その場で購入する必要はなく、ネット経由で注文することが可能である。アマゾン・ドット・コムが提供するスマホアプリ [5] を利用し、店頭商品のバーコードをスマホで読み取ると、アマゾンの在庫をその場で検索し購入することが可能である。楽天も同様のショールーミング支援アプリ「ショッピ！」 [5] を2013年4月から提供している。このアプリを利用すると、楽天だけでなく、アマゾンやヤフー！を含む6万点のECサイトの在庫を検索できる。

図4 バーコードで商品検索できるスマホアプリの例



3. 融合の実現と運用に向けた課題

ネット・店舗の融合を実現しかつ効果的に運用するための課題としては、マーケティング

グに関するもの、ロジスティクスに関するもの、ITに関するもの、さらには企業の組織構造に関するものまで多岐に亘る。ネット・店舗の融合化は小売業が中心となって推進されるものと思われるが、その基本的課題を表1に示す。表1の、(1) サービス形態の明確化については、ネット・店舗が融合する環境下で、消費者の便宜を図る観点から消費者との接点をどのようにするか、即ち、消費者に対し、商品を見せる媒体や場所、渡す場所、渡し方などを明確にする必要がある。(2) サービス形態の効果的な実現については、明確にされたサービス形態の実現を支援するための情報システム面やロジスティクス面の課題の検討が必要となる。情報システム面では、ネット・店舗間での消費者IDの同一化、消費者情報の一元化、さらには複数拠点に配備されている在庫を一元管理するシステムの構築が求められる。一方、ロジスティクス面では、サービス形態に対応して、商品の出荷拠点から消費者への受け渡し拠点・場所までに商品を配送する配送網の扱いの明確化、さらには在庫箇所や商品出荷箇所、商品配送ルートな

どの明確化が必要となる。さらに、(3) 収益拡大を狙うプロモーション戦略では、スマホやソーシャルメディアを利用したO2Oの戦略などにより、ネット・店舗の垣根を意識させない環境における販売促進策の展開を検討する必要がある。

表1において、(1) サービス形態の明確化および(3) 収益拡大を狙うプロモーション戦略については「マーケティング」が深く関連する課題であり、(2) サービス形態の効果的な実現のうちの情報管理の一元化については「IT」が深く関連し、またネット・店舗の融合に対応する物流網/在庫運用法の明確化については「ロジスティクス」が深く関連する課題である。また、どの課題についても組織構造の見直しに関連してくる。

4. ネット・店舗が融合するサービスの動向

ネット・店舗が融合する環境下において、消費者の便宜を図る観点から消費者との接点をどのようにするか、即ち、消費者に対し、商品を見せる媒体や場所、渡す場所、渡し方などを明確にする必要がある。

4.1 商品取り扱い場所から見たサービス形態

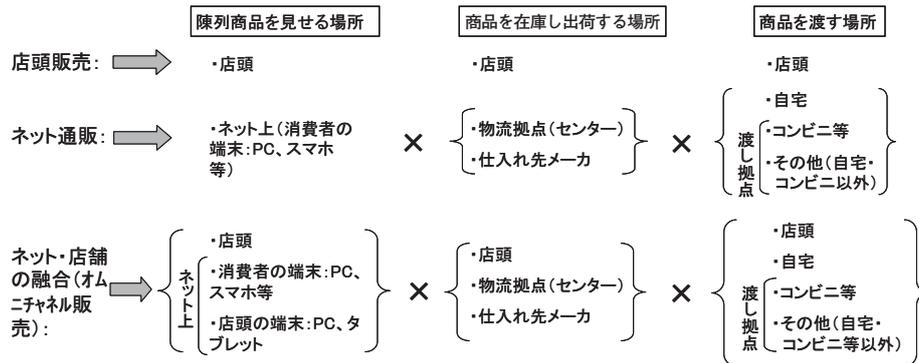
図5は、商品の販売形態毎に商品取り扱い場所を整理したものである。即ち、従来の「店頭販売」、インターネットの進展により登場した「ネット通販」、そして今回の「ネット・店舗の融合（オムニチャネル販売）」の3種の販売形態を取り上げ、陳列商品を見せる場所、商品を在庫し出荷する場所、商品を渡す場所のそれぞれについての選択肢を示している。時間軸は無視している。

表1 ネット・店舗の融合化に関する基本的課題

項目	内容	検討分野(注)			
		マーケティング	ロジスティクス	IT	組織構造
(1) サービス形態の明確化	消費者接点の明確化: 消費者へ商品を見せる場所、渡す場所等、媒体や場所をどのようにするか	◎	△	△	○
(2) サービス形態の効果的な実現	情報管理の一元化: 同一IDのネット・店舗間共同利用化、消費者情報の一元化、複数拠点在庫情報の一元化		△	◎	○
	ネット・店舗の融合に対応する物流網/在庫運用法の明確化: 通販品配送網と在庫補充網の扱いの明確化	△	◎	△	
(3) 収益拡大を狙うプロモーション戦略の展開	ネット・店舗を意識させない環境における販売促進策の展開	◎	△	○	○

(注)◎: 深く関連 ○: やや関連 △: 浅く関連

図5 販売形態毎に整理した商品取り扱い場所



この図から分かるように、ネット・店舗が融合する販売の場合は、より多くの選択肢が存在する。商品を取り扱う場所の中で、特に消費者と直接関係する2つの場所、即ち陳列商品を見せる場所と商品を渡す場所に着目した場合、{店頭、ネット上(消費者の端末)、同(店頭の端末)} × {店頭、自宅、渡し拠点としてのコンビニ等の店舗、同その他} = 12通りのサービス形態が考えられる。消費者が望む(時刻と)場所で商品を見ることができ、かつ望む(時刻と)場所で受け取れるようにするには、少なくとも上記12通りのサービス形態の実現が考慮されなければならない

が、需要動向と費用面のトレードオフにより優先順位をつけた提供が現実的であろう。なお、商品を在庫し出荷する場所については、5章で扱う。

4.2 サービスの動向

現時点で知られている企業事例を、前節で示したネット・店舗が融合するサービス形態の観点から整理した(表2)。表2に示すように、消費者端末からネット経由で注文し店頭(実店舗)で確認して受け取る形態(V1a)の事例、同じく消費者端末で注文し自宅やコンビニ等の拠点で引き渡すサービス形態(V1b、V1c)の事例、店頭に設置されたPCやタブレット

表2 サービス形態で整理した企業の取り組み事例

商品を見せる場所	商品を見せる場所	商品を見せる場所	商品を見せる場所
	a) 店頭	b) 自宅	c) 拠点(自店舗以外のコンビニ等、他)
R) 店頭	Ra: ※通常の店頭販売	Rb: -(事例見当たらず)	Rc: -(事例見当たらず)
V1) ネット上(消費者の端末で)	V1a: ①メガネスーパー(ネット上の商品の注文を受け付け店頭渡し) ②バルコ(ネット上で予約、店頭で確認してもらい店頭渡し) ③ヨドバシカメラ(ネット上商品を同一価格、店頭で24時間いつでも渡せる体制も) ④キタムラ(専門性高いネット注文品を店頭で説明して渡す) ⑤コメリ(ネット上で在庫確認して注文を受け、店頭渡し)	V1b/V1c: ①セブン&アイ(グループ内実店舗の商品、即日渡し可能化) ②アマゾン(通販商品をロッソ、ファミリーマートなどのコンビニやヤマト運輸集配所へ届ける)	V1c: ①ウォルマート(ネット注文品を駐車場で乗車したまま渡す)
V2) ネット上(店頭の端末で)	V2a/V2b/V2c: ①セブン&アイ(セブンイレブン店頭のタブレットから店頭にはない雑誌・書籍、化粧品・靴等を受注) ②トイザラス(店頭のPCやタブレットから店頭で扱っていない/在庫がない商品も含めて注文受付、店舗や自宅にて渡す)	V2a: ①アディダス(店頭端末から店頭在庫なしの商品などを注文受付、自宅へ届ける) ②メガネスーパー(同上)	V2c: -(事例見当たらず)
	V2a: -(事例見当たらず)	V2b/V2c: ①アマゾン(ロッソ店頭端末から注文受付)	

端末で注文し、別途店頭にて引き渡すサービス形態（V2a）あるいは自宅や拠点等へ届けるサービス形態（V2b、V2c）の事例が登場している。以下に代表的な事例を示す。

(1) V1aの事例

このタイプは、ネット上に店頭の在庫情報を公開し消費者が事前に確認してから店舗へ足を運べるよう便宜を図ったり、カメラやメガネなど専門性の高い商品についてネット上で取り置き予約などをできるようにしその後店頭で説明をして購入してもらうような形態である。前者の例としてはコメリ、後者の例としてメガネスーパー、パルコ、ヨドバシカメラ、キタムラなどが知られている。特に、ヨドバシカメラでは、実店舗での販売価格をネット上に公開したり、24時間いつでも渡せるなどの便宜を図っている [6]。

(2) V1b/V1cの事例

V1bタイプは、通常のネット通販の形態であるが、特にV1cは、ネット通販品を注文者へ配達する際に起こり得る、宅配業者-消費者間の受け渡しのミスマッチの問題を防ぐ目的で導入されるものであり、消費者の商品受け取り時の便宜を図った形態である。セブン&アイは、ネット事業専用の物流拠点を稼働させ、グループに属するスーパーマーケット、百貨店などが取り扱う300万品目の商品をそこへ集め、最寄りのコンビニや自宅へ即日あるいは翌日に届ける取り組みを開始しつつある [7]。一方、アマゾンには自らの店舗は有していないが、コンビニ（ローソン、ファミリーマート、ミニストップ）などと連携し、ネット通販で扱う1億品目以上の商品のうちの数1000万品

目をそこでも受け取れる取り組みを始めている [8]。

(3) V2a/V2b/V2cの事例

このタイプは、店頭に置かれたPCやタブレット端末からネット上の商品を注文できるようにし、在庫切れに伴う販売機会損失を避けたり、レコメンデーションによる売り上げ拡大を狙うものである。セブン&アイは、セブンイレブンの店頭にタブレット端末を置き、店頭にはない雑誌・書籍、化粧品、靴などの注文を受け、後日、店頭や自宅などへ届けるサービスを進めている [8] [9]。また、トイザらスでは、店頭のPCやタブレット端末から店頭商品の注文を受け他の店舗で受け取れるようにしたり、店頭にはない商品や在庫切れの商品の注文を受け、後日、店頭や自宅などへ届けるサービスを行っている [10]。一方、アディダスやメガネスーパーでは、店頭のタブレット端末から店頭在庫のない商品（スポーツウェアや靴、メガネ）の注文を受け、自宅へ届けるサービスを始めている。アマゾンはローソン店頭設置されている情報端末から注文を受け取るサービスを拡大しつつある。

5. ロジスティクスの課題

明確にされたサービス形態の実現を支援するためのロジスティクス面の課題として、商品の出荷拠点から消費者への受け渡し拠点・場所へ商品を配送する配送網の取り扱いの明確化、さらには在庫箇所や商品出荷拠点、商品配送ルートなどの取り扱いの明確化が必要と考えられる。

表3 商品配送網の特徴の比較

項目	通販品の配送網	在庫補充の配送網
1) 例	Amazon、セブンネット、楽天、コープみらい、ロハコなど	各小売業の配送網
2) 配送先の属性	一般に個人	法人
3) 配送先の数	一般に多い	少ない
4) 配送のきっかけ	消費者(会員)からの通販品受注	店舗からの補充要求
5) 配送アイテム数/配送先	一般に少ない	多い
6) 配送先の変動、配送ルート、配送便数	日ごとに変動、ルートは個人の場合、一般に決まっていない(例外: コープ)、便数はネット注文有無に依存	日々変動しない、ルートはほぼ決まっている、便数は商品需要依存
7) 納入までのリードタイム、納入時刻の許容変動範囲	リードタイムは多様(小さいものからそうでないものまで)、変動範囲は2時間程度あるいはそれ以上	リードタイムは小さくない、変動範囲は小さい(厳しい)
8) 配送車両の大きさ	配送先部分は小型	大型
9) 配送に課された条件など	・個人宅への効率良い配送(距離や積載率改善)が課題となる ・配達時の消費者ミスマッチ起り易い	配送品質の要求が厳しい(納入時刻の厳守)

5.1 商品配送網の取り扱い

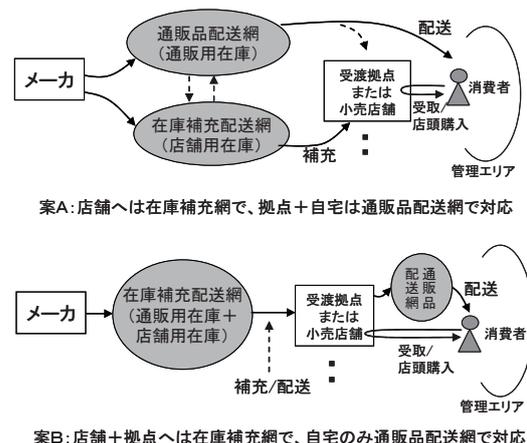
ネットと実店舗を融合させる場合のロジスティクス面のひとつの課題として、性格の異なる2種の配送網、即ち、ネット購入者へ通販品を配送するための「通販品配送網」と店舗へ在庫を補充するための「在庫補充配送網」をいかに取り扱えばよいかを考えられる。

これら2つの配送網の基本的な特徴を表3に示す。即ち、通販品配送網では、通販の注文者が日々変動しかつ自宅受取りの場合には届け先が変わるため配送ルートが日々変動すること、消費者から注文された多様な個別の商品を配送すること、配達時間帯に通常2時間以上の時間幅があるため受け渡し時のミスマッチが起こりやすいこと等の特徴がある。一方、在庫補充配送網については、届け先が決まっているため配送ルートがほぼ一定であること、店舗が対象のため多くのアイテムをバッチで配送すること、リードタイムの要求は厳しくはないが納入時刻の許容変動範囲が小さいこと等の特徴がある。

ネット・店舗の融合を支援する配送網の取り扱い方として、図6に示すように、従来の延長として捉える考え方(案A)や極力在庫補充網を流用する考え方(案B)などがある。案Aは、受け渡し拠点も自宅と同様の届け先ルートとして通販品の配送を行う形態である。配送エリアは比較的広くなる。通販利用者に特化した対応が可能な案である。一方、案Bは、届け先が変動しにくい受け渡し拠点(店舗が兼ねる場合あり)を店舗の位置づけとして在庫補充の配送ルートに組み込んで配送を行う形態である。通販品配送のための車両やルートを在庫補充のものに極力統合する案である。通販品配送は拠点から先のための狭い範囲のみで小型車両等で対応すればよい。文献[11]では、案Aにおいて特に店舗がネット購入品の受け渡し拠点も兼ねるとし、消費者の最寄り拠点受け取り率 β をパラメータにして、配送距離の比較を行い、短くて済む案Bが有効であるとしている。しかしながら、案Bの場合には、以下のような点の考慮も必要であり、更なる検討が必要となる。

(1) 案Bで店舗が受け渡し拠点を兼ねず受

図6 ネット・店舗の融合を支援する配送網の実現案



案A: 店舗へは在庫補充網で、拠点+自宅は通販品配送網で対応

案B: 店舗+拠点へは在庫補充網で、自宅のみ通販品配送網で対応

け渡し専用の拠点が存在する場合には、店舗への補充品配送のルートに拠点も組み込んだ配送を行うのが良いと考えられるが、その場合のオーバーヘッドを通販品配送の費用として考慮する必要がある。

(2) 案Bで通販品を注文者宅へ届ける場合、店舗への在庫補充のタイミングに合わせて、一旦、店舗あるいは受け渡し拠点へ注文品を届け、そこから改めて注文者宅へ配送することになる。通販品の出荷から配達までのリードタイムを短くする必要がある場合には、その要求を満たせない可能性が生じ得る。そのような商品を配送するための特殊便を用意するかどうかの検討が必要となる。

(3) 案Bではネット注文された商品と店舗向け在庫商品の両方を同一センターから出荷することになるが、通販品の出荷作業と店舗向け在庫補充のための出荷作業が効率的に行えるためのスペースや作業員の配置、作業の効率化のための検討が必要となる。

5.2 在庫や商品配送などの取り扱い

(1) 在庫箇所や商品出荷拠点の取り扱い

図5で示したように、ネット・店舗が融合する販売形態においては、「商品を在庫し出荷する場所」(業者出荷拠点)と「商品を渡す場所」(消費者受取場所)のそれぞれにおいて多くの選択肢が存在する。考え得る組み合わせのパターンとしては、{店舗、在庫センター、仕入れ先メーカー} × {店舗、自宅、コンビニ、コンビニ以外の拠点} = 12通りとなる。例えば、日本トイザラスでは、ストア・オーダー・システムと呼ばれる仕組みを構築し、2014年7月より、店舗に置いたPCやタブレッ

トから商品を注文すると自宅や他の店舗などで受け取れるようにした [10]。店舗に在庫切れの商品や店舗で扱っていない商品なども注文可能である。注文内容に応じて、店舗や物流センターの在庫を発送したり、仕入れ先メーカーに配送依頼しそこから届けたりもできるようになっている (図7)。即ち、出荷拠点として、店舗、物流センター、仕入れ先メーカーのいずれも可能となっている。このように、従来とは異なる出荷拠点の新たな導入の必要性が生じている。

(2) 商品配送ルートの取り扱い

5.1節では、出荷拠点の選択肢を考慮した議論はしていないが、消費者の商品受け取り

図7 日本トイザラスのストア・オーダー・システム

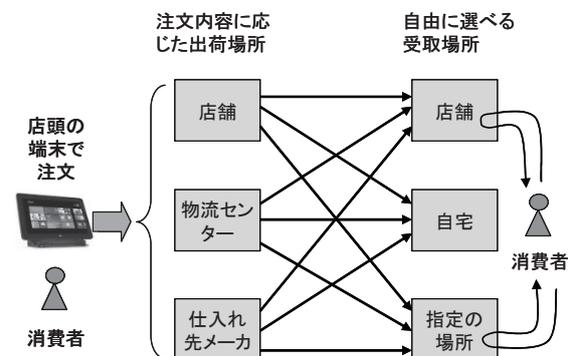


図8 ネット・店舗の融合に対応する商品配送ルート方式案

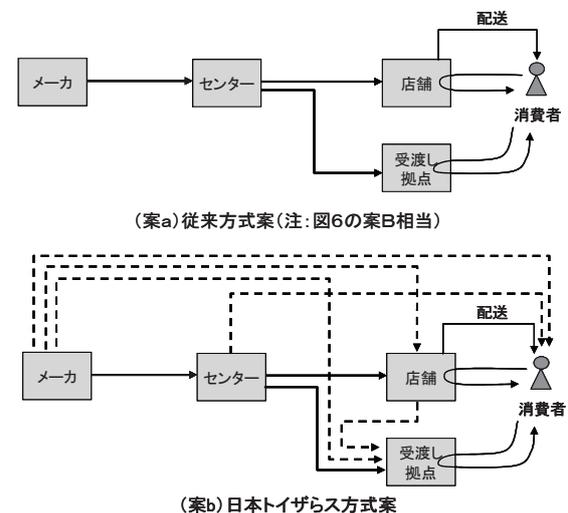
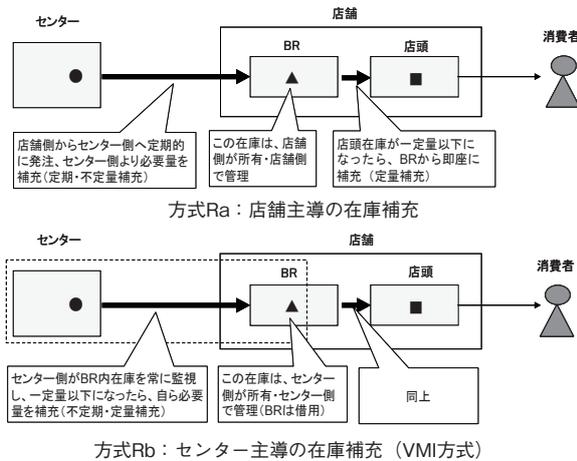


図9 在庫補充の基本的な2方式



場所が複数種類存在する場合、受け取り拠点へ配送する商品をどの拠点から出荷するかについても検討が必要となる。即ち、図8に示すように、従来のメーカー→センター→店舗というサプライチェーンの流れに沿って商品を流すやり方で対応する(案a:従来方式案)か、サプライチェーンの各ノードから消費者受け取り場所へ届ける新たな商品配送ルート(あるいは在庫移動ルート)(図の破線のルート)を導入する(案b:トイザラス方式案)か、などについての検討が必要となる。

(3) 在庫補充方法の取り扱い

一方、在庫を移動する基本的な方式案として、図9に示すような2方式が知られている[12]。例えば、センターから店舗へ在庫を補充する場合、店舗からの発注を受けてセンターから補充する店舗主導の方式Raと、逆にセンター側で店舗側の在庫状況を情報システムの活用により常時監視しセンター主導で補充する方式Rbである。ネット・店舗が融合する場合の在庫補充としては、消費者に対しシームレスな接点を提供しかつ品切れによる機会損失を避ける観点から方式Rbとの親

和性が高いと考えられる。この点を考慮したモデル化と評価が今後必要となろう。

(4) 在庫情報の一元管理の扱い

以上のように、ネット・店舗が融合するサービスを支援するロジスティクスにおいては、種々の商品出荷拠点、商品配送ルートの新たな導入が必要となり得る。その場合、商品在庫の一元的でよりきめ細かな管理が求められる。例えば、ネット・店舗間で在庫や顧客データを一元管理するものとして、「ITFOReCMS2」(アイティフォー)[13]は、ネット通販サイトや実店舗毎に用意された複数倉庫の在庫情報をひとつにまとめて管理でき、ある商品が通販サイトで売れた場合、倉庫の在庫情報も連動して減らされるようになっている。小売業全体としての一元管理を可能とする情報システムの導入も必要となる。

6. まとめ

以上、本稿では、最近注目されているネット・店舗が融合する小売業の販売形態を取り上げ、商品の取り扱い場所に着目したサービスの形態や動向、それを支援するロジスティクスの課題について述べた。NTTデータ経営研究所の2014年7月の調査[14]によると、約4割の企業が複数のサービスで同一IDを利用できる環境の整備を進めており、同様に約4割の企業が顧客や在庫情報の統合により販売機会ロスを減少させる施策を実施している。一方、日経MJの第3回ネットライフ1万人調査[15]によると、企業側の仕掛けたサービスに対し消費者の反応は現時点では高くはないものの、着実に向上している。収益拡大

という狙いの達成に向け、ネットと店舗を融合させたサービスの効果的実現とその運用が必要となるが、そのために今回提示したようなロジスティクスの課題に関する検討が必要と考えられる。

参考文献・サイト

- [1] 平成25年度我が国経済社会の情報化・サービス化に係る基盤整備、電子商取引に関する市場調査報告書、経済産業省 商務情報政策局 情報経済課、2014年8月、
<http://www.meti.go.jp/press/2014/08/20140826001/20140826001-4.pdf>
- [2] 増田悦夫：小売業におけるチャンネル連携（オムニチャンネル）への動きと今後の課題、流通経済大学流通情報学部紀要、Vol. 18、No.2、2014年3月
- [3] Mobile Retailing Blueprint Ver. 2.0.0、Mobile Retail Initiative、2011/01/04
- [4] 松浦由美子：O2O 新消費革命、東洋経済新報社、2012年11月1日発行
- [5] 以下のようなスマホアプリである。
 - ・ Amazonアプリ、http://www.amazon.co.jp/b/ref=footer_mobapp?ie=UTF8&node=3211799051
 - ・ ショッピング!、<https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.shoppi>
- [6] 中村勇介：ヨドバシカメラ、顧客重視のオムニチャンネルへ、日経デジタルマーケティング、2014年7月号
- [7] セブン&アイ ネット通販拡大、利便性でアマゾンに対抗、日経新聞、2014.10.29
- [8] アマゾンVS.セブン、日経MJ（流通新聞）、2014.12.10
- [9] ネット時代こそ接客、セブン&アイ 鈴木会長、日経MJ（流通新聞）、2014.5.26
- [10] 日本トイザラス、店頭端末で注文、自宅・指定場所へ配送、日経MJ（流通新聞）、2014.7.30
- [11] 万堯心、増田悦夫：小売業のチャンネル連携を考慮した商品配送網の検討、日本物流学会第31回全国大会研究報告集、2014年9月11日
- [12] 李君、増田悦夫：販売物流におけるVMI方式の適用性に関する検討、日本物流学会誌、第20号、No. 20、2012年5月
- [13] 株式会社アイティフォー：プレスリリース、2014.5.8、
<https://www.itfor.co.jp/ne/news/index.asp?nr=140508a>
- [14] NTTデータ経営研究所：ニュースリリース、2014年9月4日、<http://www.keieiken.co.jp/aboutus/newsrelease/140904/>
- [15] 第3回ネットライフ万人調査、日経MJ（流通新聞）、2014.10.22

分枝価格法を用いた容量制約をもつネットワーク設計問題の解法

A Branch and Price Algorithm for Capacitated Network Design Problem



片山直登：流通経済大学 流通情報学部 教授

略 歴

1982年早稲田大学工学部卒業。1988年同大学院博士後期課程単位取得退学。博士（物流情報学）。早稲田大学工学部助手、金沢工業大学工学部講師、1996年流通経済大学流通情報学部助教授を経て、2002年から現職。

[要約] 本研究では、アークに容量制約をもつネットワーク設計問題に対して分枝価格法を実装し、分枝時において限定されたパス変数をもつ問題に対する分枝限定法を用いた近似解法を提案する。ネットワーク設計問題のベンチマーク問題に対して数値実験を行い、従来の研究との比較を行なった結果、従来の容量スケールリング・局所分枝法と比較すると誤差は大きいですが、その他の解法よりも誤差の小さい解を求めることができ、容量スケールリング・局所分枝法と比べて計算時間を大きく削減できることが明らかとなった。

キーワード ネットワーク設計問題、分枝価格法、最適化問題

1. はじめに

ネットワーク設計問題は、ネットワーク上のアークにかかる固定的なデザイン費用とフローにかかる変動的なフロー費用を考慮して、アークやを適切に選択することによりネットワークを形成し、かつ異なる始点と終点もつ複数のフローを決める問題である。この問題は、輸送、ロジスティクス、通信や生産システムなどに幅広い応用分野をもつネットワークの構造を設計する問題であり、一般的なネットワーク設計問題は NP-困難な問題であることが知られている (Magnanti and Wong 1984)。

本研究で扱う容量制約をもつネットワーク設計問題はアークに容量をもつ問題であり、ネットワーク設計問題の中でも最適解や良い近似解を求めることが困難な問題である。容量制約をもつネットワーク設計問題に関しては、今日まで数多くの研究が行われている。ネットワーク設計問題とその関連問題に関するサーベイとして、Gendron et al. (1997)、Crainic (2003)、Costa (2005) および Yaghini and Rahbar (2012) などがある。

分枝価格 (Branch and Price) 法は、多くの変数を含む組合せ最適化問題や離散変数と連続変数を含む混合整数計画問題に対する解法である。すべての変数が連続変数である線形計画問題において連続変数が非常に多い場合は、適時、必要な変数を陽的に生成する列生成法が用いられる。一方、組み合わせ最適

化問題や混合整数計画問題の解法として、分枝限定法がある。分枝価格法は、これら列生成法と分枝限定法を組み合わせた手法である。分枝価格法は、一般化割当問題、鉄道などの乗務スケジュール問題や車両巡回問題などで大きな成功を収めている。

非分割フローに対する容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、Hewitt et al. (2013) が分枝価格カット法を用いたガイドつき探索法を用いている。この解法は、分枝時に強制制約式およびカバー制約をカットとして追加する分枝カット法を含めた分枝価格カット法であり、さらに一部変数を固定した問題を解くことによって、近似解を算出する近似解法を示している。ただし、フロー変数が0-1であり、本研究の対象とする問題とは異なる。

本研究では、アークに容量制約をもつネットワーク設計問題に対して分枝価格法を実装する。さらに、分枝時において限定されたパス変数をもつ問題に対する分枝限定法を用いた近似解法を提案する。さらに、これらの厳密解法および近似解法の有効性を検討する。

2 問題の定式化

この節では、容量制約をもつネットワーク設計問題の定義および前提条件、使用する記号を示す。続いて、パスフローによる定式化を示す。

2.1 問題の定義

はじめに、容量制約をもつネットワーク設計問題の定義を示す。

定義：(容量制約をもつネットワーク設計問

題)

デザイン費用 f 、フロー費用 c 、アーク容量 C をもつ向きをもつアーク集合 A が与えられ、ノード集合 N および品種の需要 d をもつ品種集合 K が与えられている。このとき、フロー費用とデザイン費用の合計を最小にするアーク集合 $A' (\subseteq A)$ 、およびアーク容量を満足するパスフロー x を求めよ。

容量制約をもつネットワーク設計問題の前提条件を示す。

- ノード集合が与えられている。
- 向きをもつアーク集合が与えられている。
- アークには、非負のデザイン費用が与えられている。
- 複数の品種からなる品種集合が与えられている。
- アークには、品種ごとの単位当たりの非負のフロー費用が与えられている。
- アークには、単位期間当たりの処理量の上限であるアーク容量が与えられている。
- 各品種ごとの需要が与えられている。
- 各品種の需要は、始点から終点までのいくつかのパス上を移動する。

容量制約をもつネットワーク設計問題の定式化で使用する記号の定義を示す。

- N : ノード集合
- A : アーク集合
- K : 品種集合
- P : 取り得るパス集合
- P^k : 品種 k の取り得るパス集合
- \bar{P} : 限定されたパスの集合 ; $\bar{P} \subseteq P$
- \bar{P}^k : 品種 k の限定されたパスの集合 ;

$$\bar{P}^k \subseteq P^k$$

- c_{ij}^k : アーク (i, j) 上における品種 k の単位当たりの非負のフロー費用
- f_{ij} : アーク (i, j) の非負のデザイン費用
- C_{ij} : アーク (i, j) のアーク容量
- d^k : 品種 k の需要量
- δ_{ij}^p : パス p にアーク (i, j) が含まれるとき1、そうでないとき0を表す定数
- x_p^k : パス p 上を移動する品種 k のフローを表すパスフロー変数; 連続変数
- y_{ij} : アーク (i, j) を選択するとき1、そうでないとき0であるデザイン変数; 0-1変数

2.2 パスフローによる定式化

容量制約をもつネットワーク設計問題の定式化CNDを示す。この定式化は、パスフローを用いたものである。

(CND)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k \sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = d^k \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} d^k \sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq d^k y_{ij} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (4)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad \forall p \in P^k, k \in K \quad (5)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

(1) 式は目的関数であり、フロー費用とデザイン費用の総和を最小化する。ここで、 $\sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k$ はアーク (i, j) 上の品種 k のフロー

量となる。(2) 式は、品種 k のパスフロー変数値の合計が品種 k の需要量に一致することを表す。(3) 式は、アーク (i, j) が選択される時はアーク上を移動するフロー量の合計がアーク容量以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す容量制約式である。(4) 式は、アーク (i, j) における品種 k に関する強制制約式であり、アーク (i, j) が選択される時はアーク上を移動する品種 k のフロー量の合計は品種 k の需要量アーク容量以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す。(5)式はパスフロー変数の非負条件、(6) 式はデザイン変数の0-1条件である。

CNDは、 $\sum_{k \in K} |P^k|$ 個である指数個のパスフロー変数、 $|A|$ 個のデザイン変数と $|K|+|A|+|A||K|$ 本の制約式をもつ問題となる。そのため、指数個のパスフロー変数を陽的に扱うのではなく、逐次、必要なパスフロー変数を生成して問題を解く列生成法が用いられることが多い。この列生成法をうまく適用すれば、アークフローによる定式化の場合よりも、陽的に使用する変数の数を大きく抑えることができる。

3 分枝価格法

3.1 分枝価格法

分枝限定法は、分枝操作と限定操作から構成される。ここでは、0-1変数をもつ最小化問題を想定する。

分枝操作は、問題をいくつかの変数の領域を限定した部分問題に分割する手続きである。0-1変数をもつ問題の場合、特定の0-1

変数を0に固定した問題と1に固定した問題の2つの部分問題に分割するのが一般的である。元問題と部分問題の関係は二分木となり、二分木上の節を分枝ノードとよび、分枝ノードは部分問題に対応する。

限定操作は、分枝操作を停止する手続きである。分枝ノードの部分問題に対して、その緩和問題を解く。多くの場合、緩和問題は0-1条件を連続条件に緩和する線形緩和が用いられる。最小化問題の場合、緩和問題の最適値は元の問題の下界値となる。このため、元の問題の適当な上界値が求められている場合、求められた下界値が上界値を上回るまたは実行不可能であれば、その分枝ノード以降分枝しても、より良い上界値を得られないことから、分枝を停止することができる。また、緩和問題の最適解が0-1条件を満たせば、分枝を停止することができ、得られた解は元の問題の実行可能解となり、緩和問題の最適値は上界値となる。

指数個のような膨大な連続変数をもつ線形計画問題を解く場合、適時、必要な変数を生成していく列生成法が用いられる。列生成法では、適当な一部の変数を含む限定主問題を解き、その双対解で構成される価格付け問題を作成し、これを解くことによって被約費用が負となる変数、すなわち限定主問題の目的関数値を減少できる変数を生成し、限定主問題に加えていく。被約費用が負となる変数が存在しなければ、元の問題の最適解に必要な変数が生成されており、元の問題の最適解が得られたことになる。

列生成法は線形計画問題を対象とする解法

である。このため、0-1変数を含み、指数個の変数をもつような混合整数計画問題や組合せ最適化問題では、直接的に列生成法を適用することができない。分枝限定法では、分枝ノードにおける部分問題の緩和問題を解くことから、それぞれの分枝ノードにおける部分問題の線形緩和問題に列生成法を適用することにより、部分問題の線形緩和問題の最適値である元問題の下界値を求めることができる。このように、適当な変数を含む限定主問題に対して、分枝限定法を適用し、その分枝ノードの部分問題において列生成法を行う解法が分枝価格法である。

3.2 限定主問題

CND においてパス集合が \bar{P} に限定された問題である限定主問題を $CNDM(\bar{P})$ とおく。 CND に対するすべての変数が含まれてはいないことから、 $CNDM(\bar{P})$ の最適値は、 CND の上界値となる。

一方、 $CNDM(\bar{P})$ には、非常に多くの強制制約式である(4)式が含まれている。しかし、列生成により生成されたパスフロー変数が含まれる強制制約式はそれほど多くなく、生成されたパスフロー変数が左辺に含まれていない強制制約式は不要なものとなる。そこで、生成したパスフロー変数が初めて左辺に含まれる強制制約式を逐次生成し、問題に追加する。生成する制約式が単体法の行に相当することから、このような方法を行生成法とよぶ。なお、適時、線形緩和問題を除外するような有効な強制制約式であるカットを加えることも可能であり、分枝価格法と組合せた方法を分枝価格カット法とよぶ。

生成されているパス集合 \bar{P} とそのパスフロー変数を含む強制制約式の集合 $\bar{A}K(\bar{P})$ ($C_{A \times K}$) が求められているものとする。このとき、パス集合が \bar{P} 、強制制約式が $\bar{A}K(\bar{P})$ に限定されている限定主問題を $CNDM(\bar{P}, \bar{A}K)$ とおく。

($CNDM(\bar{P}, \bar{A}K)$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (7)$$

subject to

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} x_p^k = d^k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} d^k \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (9)$$

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq d^k y_{ij} \quad \forall (i,j) \in \bar{A}K(\bar{P}) \quad (10)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad \forall p \in \bar{P}^k, k \in K \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (12)$$

分枝ノード n におけるパス集合 \bar{P} をもつ部分問題を $CNDM_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ とする。

$CNDM_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ でデザイン変数を1に固定されているアーク集合 A_n^1 と0に固定されている A_n^0 を用いると、 $CNDM_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ は $CNDM(\bar{P}, \bar{A}K)$ における(12)式を次の三つの式で置換えた問題となる。

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A \setminus \{A_n^0 \cap A_n^1\} \quad (13)$$

$$y_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A_n^1 \quad (14)$$

$$y_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A_n^0 \quad (15)$$

3.3 価格付け問題

$CNDM_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ における0-1変数である

デザイン変数を線形緩和した問題を $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ とおく。

($CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{A}K)$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (16)$$

subject to

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} x_p^k = d^k \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} d^k \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (18)$$

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq d^k y_{ij} \quad \forall k \in \bar{A}K \quad (19)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad \forall p \in \bar{P}^k, k \in K \quad (20)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A \setminus \{A_n^0 \cap A_n^1\} \quad (21)$$

$$y_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A_n^1 \quad (22)$$

$$y_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A_n^0 \quad (23)$$

$CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{A}K)$ はパスフロー変数が限定された線形緩和問題である。このため、すべてのパスフロー変数を含む問題 $CNDMLP_n(P)$ の最適解を求めるためには、逐次、基底に入るであろう新たなパスフロー変数を生成しなければならない。そのために、価格付け問題とよばれる問題を解き、被約費用が負であるパスフロー変数を求めることが必要である。パスフロー変数とそれに対応するパスを \bar{P} に加え、再度問題を解き直す。この操作を被約費用が負である変数がなくなるまで繰り返す。被約費用が負である変数がなければ、 $CNDMLP_n(P)$ の最適解が得られたことになる。

フロー変数に関する制約式である (17) 式に対する双対変数を s 、(18)、(19) 式に対する非負の双対変数を u 、 w とする。これらの双対変数の最適解は、線形計画問題である $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{AK})$ を最適に解くことにより求めることができる。

このとき、パスフロー変数 x に関する被約費用は、

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in A_{\bar{P}^k}} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij} + w_{ij}^k) \\ & + \sum_{(i,j) \in A \setminus A_{\bar{P}^k}} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij}) - s^k \\ & \forall p \in P^k, k \in K \quad (24) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $A_{\bar{P}^k}$ は \bar{P}^k のパスに含まれるアーク集合である。また、品種 k 、アーク (i, j) の需要に関する強制制約式が生成されていない、すなわち \bar{AK} に含まれない制約式に対する w_{ij}^k は (24) 式には含めていない。

アーク (i, j) の長さを $\delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij} + w_{ij}^k)$ または $\delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij})$ としたとき、(24) 式の第一項と第二項の和はパス p の長さとなる。また、 s^k は品種 k の始点・終点間の現在のパス集合 \bar{P}^k におけるパスの最短距離である。被約費用は「パス p の長さ - 現在の最短距離」であるので、被約費用が負である変数を見つけることは現在の最短距離よりも短いパスを見つけることになる。

s^k は定数項として扱えるので、被約費用が負であるパスフロー変数を見つけるには、品種 k に対して、(24) 式の第一項と第二項の和を最小化するパス p を見つければ良い。したがって、 $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{AK})$ における品種 k に関する価格付け問題は、次のような問題

$PRICE^k$ に帰着される。

$$\begin{aligned} & (PRICE^k) \\ & \min \sum_{p \in P^k} \left\{ \sum_{(i,j) \in A_{\bar{P}^k}} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij} + w_{ij}^k) \right. \\ & \left. + \sum_{(i,j) \in A \setminus A_{\bar{P}^k}} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + d^k u_{ij}) - s^k \right\} x_p^k \quad (25) \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = 1 \quad (26)$$

$$0 \leq x_p^k \leq 1 \quad \forall p \in P^k \quad (27)$$

s^k は定数であるので、 $PRICE^k$ はアーク (i, j) の長さが非負の $c_{ij}^k + d^k u_{ij} + w_{ij}^k$ または $c_{ij}^k + d^k u_{ij}$ とした品種 k に対する始点・終点間の最短路問題に帰着され、この問題はダイクストラ法により容易に解くことができる。

この最短路問題の最短パスを p^k 、最短パスの長さを t^k とする。このとき、 $t^k - s^k < 0$ であれば、品種 k における被約費用が負であるパスフロー変数が見つかったことになり、 p^k が生成すべきパス、パスに対応するパスフロー変数 $x_{p^k}^k$ が生成すべき変数となる。また、すべての品種 k について $t^k - s^k \geq 0$ であれば、被約費用が負である変数が存在しないため、 $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{AK})$ が最適に解けたことになる。続いて、生成した p^k 上のアークに関して、要素 (i, j, k) を \bar{AK} に追加し、新たな強制制約式を追加する。

分枝ノードの部分問題で生成したパスは、次に解く分枝ノードの部分問題でも変数として使用することができるので、現在までに生成したパス集合をそれ以降の部分問題におけるパスの初期集合 P^0 として利用する。

3.4 近似解法

価格付け問題を解くことによって新たに生

成されパスフロー変数と強制制約式を含む $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{AK})$ において、デザイン変数の連続条件である (21) 式を0-1条件に戻した問題を $CNDMB_n(\bar{P}, \bar{AK})$ とおく。

$CNDMB_n(\bar{P}, \bar{AK})$ は一部のデザイン変数が固定され、かつパスや強制制約式が限定された問題であるため、 $CNDMB_n(\bar{P}, \bar{AK})$ の最適値は CND の上界値であり、得られた解は CND の実行可能解、すなわち近似解となる。 $CNDMB_n(\bar{P}, \bar{AK})$ は変数および制約式が限定されている、すなわち相対的に変数および制約式の数が多い問題となるため、 CND に比べて最適解を求めやすい問題となる。しかし、必ずしも適切な時間内に最適解が得られる保証はない。

分枝価格法のアルゴリズムを Algorithm 1 に示す。Algorithm 1 の記述は、最適解を算出する厳密解法となる。最適解を求めるためには、一般的に大きな計算時間を必要とするため、計算時間に上限を設定し、その上限時間で計算を打ち切り、その時点の最良解を近似解として採用する。

Algorithm 1 : Branch and Price

```

Set  $\bar{P} := P^0$ ;
while  $CND$  has not been solved do
  Select an unevaluated branch node  $n$ ;
  while a new path has been added do
    Solve  $CNDMLP_n(\bar{P}, \bar{AK})$  ;
    Solve  $PRICE^k, k \in K$  and find adding
    paths and forcing constraints;
    Add new paths and forcing constraints;
  end while
end while

```

```

Solve  $CNDMB_n(\bar{P}, \bar{AK})$  ;
Branching if necessary;
end while

```

4 数値実験

容量制約をもつネットワーク設計問題で用いられるベンチマーク問題である C問題および R問題 (Crainic et al. 2001) に対して、数値実験を行った。

数値実験で使用した設定した主な条件および設定などは以下の通りである。

- 使用OSおよび言語：UBUNTU 14.10、Python 2.7
- 最適化ソルバー：Gurobi 5.63
- CPU INTEL i7 3774 3.4GHz 4Core、RAM 24GByte
- 使用コア数：分枝価格法1コア、近似解法4コア
- 分枝価格法の計算時間の上限：600秒、3600秒
- 初期上界値：使用せず、および容量スケールリング法 (スケールリングパラメータ 0.150) (Katayama 2015) による上界値を使用
- 分枝ルール：下界値の最小のノード

近似解の誤差には、アークフローによる定式化を数理計画ソルバー CPLEX (最大 30 時間) により解くことにより得た下界値または最適値を使用した。

なお、C問題に対しては多くの研究が行われ、その結果が公開されている。ここでは、2010年以降の主な研究である Rodriguezの局

表1：上界値の平均誤差の比較(%)：C問題

LBR	IPS	MIP	HSA	CPLB	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
3.28	1.86	1.04	0.91*	0.43	1.55	2.88	1.64	0.97	0.91

*:30/520/400/FTを除く

表2：平均計算時間の比較(秒)：C問題

LBR	IPS	MIP	HSA	CPLB	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
574.6	408.1	6958.6	4587.2	7011.4	73.0	513.3	2772.6	341.2	1590.3

表3：上界値の平均誤差の比較(%)：R問題

CPLB	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
0.17	0.86	1.94	1.44	0.31	0.29

表4：平均計算時間の比較(秒)：R問題

CPLB	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
3374.9	30.5	254.9	1217.8	172.6	805.6

所分枝法 (Rodríguez-Martín and Salazar-González 2010), HewittのIP探索法 (Hewitt et al. 2010), ChoumanのMIPタブー探索法 (Chouman and Crainic 2010)、ハイブリッドシミュレーテッドアニーリング法 (Yaghini et al. 2013), ならびにKatayamaの容量スケールリング・局所分枝法 (Katayama 2015) の結果を併記した。

表1に、C問題に対する上界値の平均誤差を示す。LBRは局所分枝法、IPSはIP探索法、MIPはMIPタブー探索法、HSAはハイブリッドシミュレーテッドアニーリング法、CPLBは容量スケールリング・局所分枝法による結果である。なお、HSAにおける問題30/520/400/FTの解は誤りのため、集計から除いている。また、CSは容量スケールリング法、BP(600)からCSBP(3600)までは本研究で提案した解法であり、BP(600)は計算時間の上限が600秒、BP(3600)は計算時間の上限が3600秒であり、CSBP(600)は容量スケールリング法で求めた上限を用いた計算時間の上限が600秒、CSBP(3600)は容量スケールリング法で求めた上限を用いた計算時間

の上限が3600秒のものである。

従来の研究では、MIPタブー探索法が誤差1.04%、容量スケールリング・局所分枝法が誤差0.43%となっている。一方、分枝価格法では、初期上界値を用いない場合は2.88%および1.64%であったが、容量スケールリング法で求めた上界値を用いた場合には平均誤差0.97%および0.91%となった。このように、従来の解法と比べると、IP探索法やMIPタブー探索法よりも良い解を求めることができている。しかし、容量スケールリング・局所分枝法よりも劣っている。また、30ノードの問題では、容量スケールリング法による初期の上界値を更新することができていない。

表2に、C問題に対する平均計算時間を示す。従来の研究の計算時間は、各論文に掲載してのものであり、使用しているコンピュータが異なっているため、計算時間を直接比較することはできない。平均誤差の最も小さい容量スケールリング・局所分枝法は、範囲の広い局所分枝法を行っているため、大きな計算時間が必要であり、7011.4秒となっている。一方、本研究の分枝価格法は、初期上界値を用

いない場合では 513.3秒および 2675.3秒と大きいですが、初期上界値を用いると 341.2秒および 1590.3秒となっている。初期上界値を求めるための計算時間は CSの73.0秒であり、それを加えても計算時間は短い。

表3に、R問題に対する上界値の平均誤差を示す。従来の研究では、容量スケールリング・局所分枝法が誤差 0.17%となっている。一方、分枝価格法では、初期上界値を用いない場合は同程度の 1.94%および 1.44%であったが、容量スケールリング法で求めた上界値を用いた場合には誤差 0.31%および 0.29%となった。このように、容量スケールリング・局所分枝法よりも劣っているが誤差の小さな解を算出することができている。また、C問題とは異なり、多くの問題で初期上界値を更新することができている。

表4に、R問題に対する平均計算時間を示す。従来の研究の計算時間は、各論文に掲載してのものである。平均誤差の最も小さい容量スケールリング・局所分枝法は、範囲の広い局所分枝法を行っているため、大きな計算時間が必要であり、3374.9秒となっている。一方、本研究の分枝価格法は、初期上界値を用いない場合では1254.9秒および 1217.8秒と大きいですが、初期上界値を用いると172.6秒および 805.6秒となっている。初期上界値を求めるための計算時間は CSの30.5秒であり、それを加えても計算時間は短い。

表5および表6に、C問題に対する個別の問題に対する上界値を示す。また、表7から表11に、R問題に対する個別の問題に対する上界値を示す。なお、表内のLB/OPTは、

CPLEXにより求めた下界値または最適値であり、Lが付いている値が下界値、Oが付いている値が最適値である。また、太字体は近似解法により最適値が求められたことを表している。C問題の37問中、局所分枝法では9問、IP探索法では6問、MIPタブー探索法では7問、ハイブリッドシミュレーテッドアニーリング法では9問、容量スケールリング・局所分枝法では20問の最適値が求められている。一方、本研究で提案した解法である BP (600) からCSBP (3600) まではそれぞれ、7問、9問、10問、12問の最適値を求めることができている。

5 おわりに

本研究では、アークに容量制約をもつネットワーク設計問題に対して分枝価格法を実装し、分枝時において限定されたパス変数をもつ問題に対する分枝限定法を適用することによる近似解法を提案した。また、ベンチマーク問題である C問題および R問題に対して、数値実験を行い、従来の研究との比較を行った。

従来の研究の容量スケールリング・局所分枝法と比較すると誤差は大きいですが、それ以外の解法よりも誤差の小さい解を求めることができた。また、計算時間は、容量スケールリング・局所分枝法と比べて大きく削減することができている。しかし、現在のバージョンの最適化ソルバー Gurobiには分枝価格法を直接組み込むことができないため、プログラミング言語 Pythonにて分枝・限定操作を行い、緩和問題および近似解を算出するためのフロー

変数を限定した問題のみを Gurobi で解いている。このため、強力な Gurobi の分枝限定法やマルチコアの機能を十分に活用することはできていない。また、分枝操作を単純な下

界値優先則を用いているため、この工夫も必要である。

本研究は科学研究費基盤研究 C (課題番号 25350454) による成果の一部である。

表5：上界値の比較：C問題(1/2)

N/A/K/FC	OPT/LB	LBR	IPS	MIP	HSA	CALB
100/400/010/VL	28423.0 ^O	28423	28423	28423	28423	28423.0
100/400/010/FL	23949.0 ^O	24690	23949	24161	23949	23949.0
100/400/010/FT	63066.2 ^L	67357	65885	67233	65172	63753.0
100/400/030/VT	384802.0 ^O	384809	384836	384940	384802	384802.0
100/400/030/FL	49018.0 ^O	49872	49694	49682	49250	49018.0
100/400/030/FT	132128.9 ^L	141633	141365	144349	141014	136803.0
20/230/040/VL	423848.0 ^O	423848	424385	423848	423848	423848.0
20/230/040/VT	371475.0 ^O	371475	371779	371475	371475	371475.0
20/230/040/FT	643036.0 ^O	643036	643187	643538	643036	643036.0
20/230/200/VL	94213.0 ^O	95295	95097	94218	94283	94213.0
20/230/200/FL	137642.3 ^O	143446	141253	138491	137842	137642.3
20/230/200/VT	97914.0 ^O	98039	99410	98612	97914	97914.0
20/230/200/FT	135380.1 ^L	141128	140273	136309	137072	135863.1
20/300/040/VL	429398.0 ^O	429398	429398	429398	429398	429398.0
20/300/040/FL	586077.0 ^O	586077	586077	588464	586077	586077.0
20/300/040/VT	464509.0 ^O	464509	464509	464509	464627	464509.0
20/300/040/FT	604198.0 ^O	604198	604198	604198	604201	604198.0
20/300/200/VL	74753.2 ^L	76375	75319	75045	74902	74811.0
20/300/200/FL	113862.3 ^L	119142.8	117543	116259	116431	115526.0
20/300/200/VT	74991.0 ^O	76167.5	76198	74995	74991	74991.0
20/300/200/FT	106671.6 ^L	109808	110344	109164	108638	107167.0
30/520/100/VL	53958.0 ^O	54026	54113	54008	53983	53958.0
30/520/100/FL	93569.5 ^L	96255	94388	93967	94066	93967.0
30/520/100/VT	52046.0 ^O	52129	52174	52156	52247	52046.0
30/520/100/FT	96260.3 ^L	101102	98883	97490	98543	97107.0
30/520/400/VL	112646.8 ^L	114367.4	114042	112927	113720	112774.4
30/520/400/FL	147790.1 ^L	157725.5	154218	149920	151009	149151.0
30/520/400/VT	114640.5 ^O	115240	114922	114664	115581	114640.5
30/520/400/FT	150685.0 ^L	168561	154606	152929	*	152476.7
30/700/100/VL	47603.0 ^O	47603	47612	47603	47603	47603.0
30/700/100/FL	59612.3 ^L	60272	60700	60184	60391	59958.0
30/700/100/VT	45871.5 ^O	45905	46046	45880	45956	45871.5
30/700/100/FT	54904.0 ^O	55104	55609	54926	54975	54912.0
30/700/400/VL	97188.5 ^L	103787	98718	97982	99316	97853.4
30/700/400/FL	131689.6 ^L	169759.7	152576	135109	133976	134553.7
30/700/400/VT	94508.1 ^L	96680	96168	95781	95538	95249.6
30/700/400/FT	128242.8 ^L	144925.5	131629	130856	131473	129990.0

*:エラー

表6：上界値の比較：C問題(2/2)

Problem	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
100/400/010/V/L	28423.0	28423.0	28423.0	28423.0	28423.0
100/400/010/F/L	24925.0	24022.0	23949.0	24022.0	23949.0
100/400/010/F/T	73247.0	65828.0	65255.0	65828.0	65255.0
100/400/030/V/T	384809.0	384847.0	384835.0	384809.0	384809.0
100/400/030/F/L	50325.0	55701.0	51375.0	50325.0	50325.0
100/400/030/F/T	144233.0	139343.0	138504.0	139343.0	138504.0
20/230/040/V/L	424075.0	423848.0	423848.0	423848.0	423848.0
20/230/040/V/T	371939.0	371475.0	371475.0	371475.0	371475.0
20/230/040/F/T	644483.0	643288.0	643036.0	643288.0	643036.0
20/230/200/V/L	94213.0	101544.0	97599.0	94213.0	94213.0
20/230/200/F/L	138440.0	153861.0	143138.0	138440.0	138440.0
20/230/200/V/T	98344.0	99256.0	98725.0	98344.0	98344.0
20/230/200/F/T	136715.0	144073.3	139492.0	136715.0	136715.0
20/300/040/V/L	429398.0	429837.0	429837.0	429398.0	429398.0
20/300/040/F/L	588380.0	586077.0	586077.0	586077.0	586077.0
20/300/040/V/T	464569.0	464509.0	464509.0	464509.0	464509.0
20/300/040/F/T	604208.0	604198.0	604198.0	604198.0	604198.0
20/300/200/V/L	75660.0	76473.4	75745.0	75660.0	75660.0
20/300/200/F/L	116309.0	115658.0	115553.0	115658.0	115553.0
20/300/200/V/T	75471.0	74991.0	74991.0	74991.0	74991.0
20/300/200/F/T	108557.0	109889.5	108371.5	108557.0	108557.0
30/520/100/V/L	54060.0	54136.0	54106.0	54060.0	54060.0
30/520/100/F/L	95435.0	100984.0	98292.0	95435.0	95435.0
30/520/100/V/T	52221.0	52232.0	52162.0	52189.0	52162.0
30/520/100/F/T	98516.0	98998.0	98627.0	98516.0	98516.0
30/520/400/V/L	113026.3	115536.5	114276.4	113026.3	113026.3
30/520/400/F/L	149740.8	153903.0	151933.7	149740.8	149740.8
30/520/400/V/T	114640.5	114858.3	114642.3	114640.5	114640.5
30/520/400/F/T	152767.2	157728.0	154946.7	152767.2	152767.2
30/700/100/V/L	47680.0	47856.0	47856.0	47680.0	47680.0
30/700/100/F/L	60279.0	61427.0	61056.0	60279.0	60279.0
30/700/100/V/T	46244.0	46181.0	46094.0	46181.0	46094.0
30/700/100/F/T	55167.0	56112.0	55533.0	55167.0	55167.0
30/700/400/V/L	98174.7	102883.0	100242.0	98174.7	98174.7
30/700/400/F/L	135199.3	135787.0	135586.1	135199.3	135199.3
30/700/400/V/T	95468.3	97088.0	96168.9	95468.3	95468.3
30/700/400/F/T	130145.9	137270.7	133328.0	130145.9	130145.9

表7：上界値の比較：R問題(1/5)

Problem	LB/OPT	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
r01.1	74079.0	74079.0	74079.0	74079.0	74079.0	74079.0
r01.2	92403.0	92403.0	92403.0	92403.0	92403.0	92403.0
r01.3	115304.0	115304.0	115304.0	115304.0	115304.0	115304.0
r01.4	84908.0	84908.0	84908.0	84908.0	84908.0	84908.0
r01.5	113036.0	114565.0	113036.0	113036.0	113036.0	113036.0
r01.6	147599.0	150650.0	147599.0	147599.0	147599.0	147599.0
r02.1	232239.0	232239.0	232239.0	232239.0	232239.0	232239.0
r02.2	322453.0	323861.0	322453.0	322453.0	322453.0	322453.0
r02.3	419503.0	419503.0	419503.0	419503.0	419503.0	419503.0
r02.4	316437.0	316437.0	316437.0	316437.0	316437.0	316437.0
r02.5	431250.0	432234.0	431250.0	431250.0	431250.0	431250.0
r02.6	559578.0	559578.0	559578.0	559578.0	559578.0	559578.0
r03.1	484830.0	484830.0	484830.0	484830.0	484830.0	484830.0
r03.2	703362.0	706676.0	703362.0	703362.0	703362.0	703362.0
r03.3	944990.0	944990.0	944990.0	944990.0	944990.0	944990.0
r03.4	704247.0	704247.0	704247.0	704247.0	704247.0	704247.0
r03.5	932897.0	932897.0	932897.0	932897.0	932897.0	932897.0
r03.6	1188638.0	1190999.0	1188638.0	1188638.0	1188638.0	1188638.0
r04.1	31730.0	31730.0	31730.0	31730.0	31730.0	31730.0
r04.2	48920.0	48920.0	48920.0	48920.0	48920.0	48920.0
r04.3	63767.0	63767.0	63767.0	63767.0	63767.0	63767.0
r04.4	33740.0	33760.0	33740.0	33740.0	33740.0	33740.0
r04.5	53790.0	54743.0	53790.0	53790.0	53790.0	53790.0
r04.6	74030.0	75159.0	74548.0	74548.0	74548.0	74548.0
r04.7	68291.7	68291.7	68291.7	68291.7	68291.7	68291.7
r04.8	113004.0	113855.0	113004.0	113004.0	113004.0	113004.0
r04.9	163208.0	165914.0	163208.0	163208.0	163208.0	163208.0
r05.1	123003.0	123003.0	123003.0	123003.0	123003.0	123003.0
r05.2	170060.0	170060.0	171229.0	171229.0	170060.0	170060.0
r05.3	221486.0	222930.0	222904.0	222904.0	222904.0	222904.0
r05.4	131608.0	131808.0	131608.0	131608.0	131608.0	131608.0
r05.5	204157.0	204593.0	204157.0	204157.0	204157.0	204157.0
r05.6	286524.0	293183.0	286524.0	286524.0	286524.0	286524.0
r05.7	278372.0	278372.0	278372.0	278372.0	278372.0	278372.0
r05.8	445810.0	445913.0	445810.0	445810.0	445810.0	445810.0
r05.9	625879.0	634688.0	625879.0	625879.0	625879.0	625879.0

表8：上界値の比較：R問題(2/5)

Problem	LB/OPT	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
r06.1	245936.0	245936.0	245936.0	245936.0	245936.0	245936.0
r06.2	401685.0	401685.0	401685.0	401685.0	401685.0	401685.0
r06.3	559477.0	559477.0	559533.0	559533.0	559477.0	559477.0
r06.4	286682.0	286873.0	286682.0	286682.0	286682.0	286682.0
r06.5	498266.0	505827.0	498266.0	498266.0	498266.0	498266.0
r06.6	734414.0	739974.0	734414.0	734414.0	734414.0	734414.0
r06.7	682921.0	683290.0	682921.0	682921.0	682921.0	682921.0
r06.8	1030479.0	1030479.0	1030479.0	1030479.0	1030479.0	1030479.0
r06.9	423316.0	423688.0	423316.0	423316.0	423316.0	423316.0
r07.1	32807.0	32807.0	32807.0	32807.0	32807.0	32807.0
r07.2	47252.0	47252.0	47252.0	47252.0	47252.0	47252.0
r07.3	62962.0	62962.0	62962.0	62962.0	62962.0	62962.0
r07.4	37432.0	37432.0	37432.0	37432.0	37432.0	37432.0
r07.5	56475.0	56915.0	56475.0	56475.0	56475.0	56475.0
r07.6	77249.0	79227.0	77249.0	77249.0	77249.0	77249.0
r07.7	59947.0	60083.0	59947.0	59947.0	59947.0	59947.0
r07.8	99194.0	103334.0	99194.0	99194.0	99194.0	99194.0
r07.9	141692.0	146560.0	141692.0	141692.0	141692.0	141692.0
r08.1	102531.0	102645.0	102556.0	102556.0	102645.0	102645.0
r08.2	143894.0	143894.0	146828.0	146828.0	143894.0	143894.0
r08.3	182793.0	182793.0	192784.0	192784.0	182793.0	182793.0
r08.4	109325.0	109325.0	109325.0	109325.0	109325.0	109325.0
r08.5	157047.0	157720.0	157527.0	157527.0	157527.0	157527.0
r08.6	207540.0	208325.0	208394.0	208394.0	208325.0	208325.0
r08.7	154160.0	155573.0	154160.0	154160.0	154160.0	154160.0
r08.8	274866.5	285456.0	274866.5	274866.5	274866.5	274866.5
r08.9	415793.0	425018.0	415793.0	415793.0	415793.0	415793.0
r09.1	171512.0	171902.0	172002.0	172002.0	171902.0	171902.0
r09.2	296712.0	297976.0	307380.0	297976.0	297976.0	297976.0
r09.3	424266.0	425978.0	445005.0	445005.0	425978.0	425978.0
r09.4	192736.0	192833.0	192736.0	192736.0	192736.0	192736.0
r09.5	357318.0	357824.0	357807.0	357807.0	357824.0	357824.0
r09.6	522187.0	524640.0	527540.0	527540.0	524640.0	524640.0
r09.7	345057.0	345728.0	345057.0	345057.0	345057.0	345057.0
r09.8	646579.0	656094.0	646579.0	646579.0	646579.0	646579.0
r09.9	951136.0	973498.0	951136.0	951136.0	951136.0	951136.0

表9：上界値の比較：R問題(3/5)

Problem	LB/OPT	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
r10.1	200087.0 ^O	200087.0	200087.0	200087.0	200087.0	200087.0
r10.2	346813.5 ^O	350741.0	346875.0	346875.0	346875.0	346875.0
r10.3	488015.0 ^O	501231.0	489628.0	489628.0	489628.0	489628.0
r10.4	229196.0 ^O	229889.0	229196.0	229196.0	29196.0	229196.0
r10.5	411664.0 ^O	422059.0	411738.0	411738.0	411738.0	411738.0
r10.6	609104.0 ^O	615169.0	609104.0	609104.0	609104.0	609104.0
r10.7	486895.0 ^O	487014.0	486895.0	486895.0	486895.0	486895.0
r10.8	951056.0 ^O	960573.6	951056.0	951056.0	951056.0	951056.0
r10.9	1421746.0 ^O	1426726.0	1421746.0	1421746.0	1421746.0	1421746.0
r11.1	714431.0 ^O	714431.0	714431.0	714431.0	14431.0	714431.0
r11.2	1263713.0 ^O	1267743.0	1264004.0	1263713.0	1264004.0	1263713.0
r11.3	1843611.0 ^O	1897029.0	1844219.0	1843611.0	1844219.0	1843611.0
r11.4	870451.0 ^O	871323.5	870451.0	870451.0	870451.0	870451.0
r11.5	1623640.0 ^O	1641731.0	1623640.0	1623640.0	1623640.0	1623640.0
r11.6	2414060.0 ^O	2427453.2	2417679.0	2417263.0	2418126.0	2417263.0
r11.7	2294912.0 ^O	2296595.0	2294912.0	2294912.0	2294912.0	2294912.0
r11.8	3507100.0 ^O	3508336.0	3507100.0	3507100.0	3507100.0	3507100.0
r11.9	4579353.0 ^O	4582878.0	4579353.0	4579353.0	4579353.0	4579353.0
r12.1	1639443.0 ^O	1639565.0	1640650.0	1640149.0	1639565.0	1639565.0
r12.2	3396050.0 ^O	3449304.0	3422297.0	3410224.5	3422297.0	3410224.5
r12.3	5228711.0 ^O	5364495.0	5283678.3	5254118.0	5283678.3	5254118.0
r12.4	2303557.0 ^O	2303557.0	2303557.0	2303557.0	2303557.0	2303557.0
r12.5	4669799.0 ^O	4685870.0	4669799.0	4669799.0	4669799.0	4669799.0
r12.6	7100019.0 ^O	7126937.5	7100019.0	7100019.0	7100019.0	7100019.0
r12.7	7635270.0 ^O	7635270.0	7635270.0	7635270.0	7635270.0	7635270.0
r12.8	10067742.0 ^O	10067742.0	10067742.0	10067742.0	10067742.0	10067742.0
r12.9	11967768.0 ^O	11967768.0	11967768.0	11967768.0	11967768.0	11967768.0
r13.1	142947.0 ^O	143036.0	144277.0	144277.0	143036.0	143036.0
r13.2	263800.0 ^O	265049.0	271923.0	271923.0	265049.0	265049.0
r13.3	365836.0 ^O	368578.0	394664.0	393185.0	368578.0	368578.0
r13.4	150977.0 ^O	151471.0	150977.0	150977.0	150977.0	150977.0
r13.5	282682.0 ^O	286240.0	286032.0	286032.0	286240.0	286240.0
r13.6	406790.0 ^O	419616.0	426745.0	425036.0	419616.0	419616.0
r13.7	208088.0 ^O	210351.0	208088.0	208088.0	208088.0	208088.0
r13.8	444826.0 ^O	463902.0	446593.0	446593.0	446593.0	446593.0
r13.9	697967.0 ^O	738302.0	698079.0	697967.0	698079.0	697967.0

表10：上界値の比較：R問題(4/5)

Problem	LB/OPT	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
r14.1	403414.0 ^O	403787.0	409201.0	409201.0	403787.0	403787.0
r14.2	749503.0 ^O	753409.0	814427.0	799050.0	753409.0	753409.0
r14.3	1063098.0 ^O	1067891.0	1200653.0	1122610.0	1067891.0	1067891.0
r14.4	437607.0 ^O	439275.0	438959.0	438959.0	438959.0	438959.0
r14.5	849163.0 ^O	855847.0	885023.0	870788.0	855847.0	855847.0
r14.6	1214609.0 ^O	1221338.5	1306840.0	1261689.0	1221338.5	1221338.5
r14.7	668216.3 ^O	668216.3	668216.3	668216.3	668216.3	668216.3
r14.8	1613428.8 ^O	1667957.7	1615000.0	1613929.0	1615000.0	1613929.9
r14.9	2602690.0 ^O	2686446.0	2609888.9	2605729.9	2609888.9	2605729.0
r15.1	1000787.0 ^O	1000787.0	1001366.0	1001366.0	1000787.0	1000787.0
r15.2	1966206.0 ^O	1978741.0	2039892.0	2000548.5	1978741.0	1978741.0
r15.3	2826200.7 ^L	2906616.0	3201521.0	3076067.0	2906616.0	2906616.0
r15.4	1148604.0 ^O	1150475.0	1150754.0	1150474.0	1150475.0	1150474.0
r15.5	2452534.5 ^L	2491253.8	2519339.0	2498915.0	2491253.8	2491253.8
r15.6	3771050.7 ^L	3860314.0	3843107.6	3832922.0	3843107.6	3832922.0
r15.7	2297919.0 ^O	2302811.0	2298038.3	2297919.0	2298038.3	2297919.0
r15.8	5573412.8 ^O	5585929.0	5573840.0	5573412.8	5573840.0	5573412.8
r15.9	8696932.0 ^O	8704582.0	8696932.0	8696932.0	8696932.0	8696932.0
r16.1	136161.0 ^O	136161.0	137332.0	137332.0	136161.0	136161.0
r16.2	239500.0 ^O	240356.0	249572.0	249572.0	240356.0	240356.0
r16.3	325671.0 ^O	325839.0	360543.0	360543.0	325839.0	325839.0
r16.4	138532.0 ^O	138532.0	138747.0	138747.0	138532.0	138532.0
r16.5	241801.0 ^O	241801.0	255113.0	255113.0	241801.0	241801.0
r16.6	337762.0 ^O	341023.0	373418.0	373418.0	341023.0	341023.0
r16.7	169233.0 ^O	174160.0	169573.0	169573.0	169573.0	169573.0
r16.8	348167.0 ^O	361279.0	350407.0	350407.0	350407.0	350407.0
r16.9	525454.3 ^L	539837.0	540200.0	535441.0	539837.0	535441.0
r17.1	354138.0 ^O	354223.0	356909.0	356909.0	354223.0	354223.0
r17.2	645488.0 ^O	655289.0	698307.0	690898.0	655289.0	655289.0
r17.3	910518.0 ^O	917683.0	1100180.0	1068264.0	917683.0	917683.0
r17.4	370590.0 ^O	371144.0	372996.0	372996.0	371144.0	371144.0
r17.5	706746.5 ^O	713979.0	748288.0	730024.0	713979.0	713979.0
r17.6	1019646.0 ^O	1037558.0	1151724.0	1092513.0	1037558.0	1037558.0
r17.7	501634.5 ^O	506268.0	503313.0	502677.0	503313.0	502677.0
r17.8	1097312.6 ^L	1109221.2	1121537.0	1113327.5	1109221.2	1109221.2
r17.9	1752512.3 ^L	1819763.5	1815289.0	1805699.0	1815289.0	1805699.0

表11：上界値の比較：R問題(5/5)

Problem	LB/OPT	CS	BP(600)	BP(3600)	CSBP(600)	CSBP(3600)
r18.1	828117.0 ^O	830776.0	845300.0	841294.0	830776.0	830776.0
r18.2	1533675.0 ^O	1541976.0	1987982.0	1850753.0	1541976.0	1541976.0
r18.3	2152710.3 ^L	2192163.0	3327640.0	2864914.0	2192163.0	2192163.0
r18.4	919325.0 ^O	930069.5	920048.0	919325.0	920048.0	919325.0
r18.5	1799590.4 ^L	1839531.0	1899760.0	1865774.5	1839531.0	1839531.0
r18.6	2640190.2 ^L	2738202.0	2987503.0	2915580.0	2738202.0	2738202.0
r18.7	1469035.8 ^L	1484940.6	1479385.0	1476923.3	1479385.0	1476923.3
r18.8	3870930.2 ^L	3938238.5	3892087.5	3890406.0	3892087.5	3890406.0
r18.9	6361906.0 ^O	6431275.7	6377339.0	6374673.0	6377339.0	6374673.0

参考文献

- Chouman, M., T. G. Crainic. 2010. A MIP-tabu search hybrid framework for multicommodity capacitated fixed-charge network design. Tech. Rep. CIRRELT-2010-31, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Costa, A. M. 2005. A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems. *Computers and Operations Research* **32** 1429-1450.
- Crainic, T. G. 2003. Long-haul freight transportation. R. W. Hall, ed., *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers, 451-516.
- Crainic, T. G., A. Frangioni, B. Gendron. 2001. Bundle-based relaxation methods for multicommodity capacitated fixed charge network design problems. *Discrete Applied Mathematics* **112** 73-99.
- Gendron, B., T. G. Crainic, A. Frangioni. 1997. Multicommodity capacitated network design. Tech. Rep. CIRRELT-98-14, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Hewitt, M., G. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh. 2013. Branch-and-price guided search for integer programs with an application to the multicommodity fixed charge network flow problem. *INFORMS Journal on Computing* **25** 302-316.
- Hewitt, M., G. L. Nemhauser, M. Savelsbergh. 2010. Combining exact and heuristics approaches for the capacitated fixed charge network flow problem. *Journal on Computing* **22** 314-325.
- Katayama, N. 2015. Combined capacity scaling and local branching approach for capacitated multicommodity network design problem. Working Paper.
- Magnanti, T. L., R. T. Wong. 1984. Network design and transportation planning : Models and algorithms. *Transportation Science* **18** 1-55.
- Rodríguez-Martín, I., J. J. Salazar-González. 2010. A local branching heuristics for the capacitated fixed-charge network design problem. *Computers & Operations Research* **37** 575-581.
- Yaghini, M., M. Rahbar. 2012. Multicommodity network design problem in rail freight transportation planning. *Procedia -Social and Behavioral Sciences* **43** 728-739.
- Yaghini, M., M. Rahbar, M. Karimiand. 2013. A hybrid simulated annealing and column generation approach for capacitated multicommodity network design. *Journal of the Operational Research Society* **64** 1010-1020.

ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題

Hop-Constrained Capacitated Network Design Problem



片山直登：流通経済大学 流通情報学部 教授

略 歴

1982年早稲田大学工学部卒業。1988年同大学院博士後期課程単位取得退学。博士（物流情報学）。早稲田大学工学部助手、金沢工業大学工学部講師、1996年流通経済大学流通情報学部助教授を経て、2002年から現職。

[要約] 本研究では、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、ホップ数変数による定式化と限定されたパスによる定式化を示し、限定されたパスによる定式化に対して容量スケールリング法を用いた近似解法を提案する。続いて、最適化ソルバーと提案した容量スケールリング法による近似解法を用いた数値実験を行ない、定式化と解法の有効性を検討する。ホップ数変数による定式化と最適化ソルバーを組合せた場合では誤差の小さな解を算出することができ、限定されたパスによる定式化と容量スケールリング法の組合せでは短時間で比較的良好な近似解を算出することができ、さらに局所分枝法を組み合わせることによって計算時間を抑えながら誤差の小さな解を算出できることを示す。

キーワード ネットワーク設計問題、ホップ数、容量スケールリング、最適化問題

1. はじめに

今日の物流・ロジスティクスは、輸送ネットワークやロジスティクスネットワークといったネットワーク上で展開されている。このような物流・ロジスティクスを始めとする様々なネットワークの形態を決める数理的な問題がネットワーク設計問題である。ここでは、ネットワーク設計問題の中の基本的な問題、すなわちネットワーク上の輸送路線などのアークにかかる固定的なデザイン費用と輸送であるフローにかかる変動的なフロー費用

を考慮して、アークを適切に選択することによりネットワークを形成し、かつ異なる始点と終点もつ複数種類の荷物である品種の経路を決める問題を対象とする。

一般的なネットワーク設計問題はNP-困難な問題であることが知られている(Magnanti and Wong 1984)。また、ネットワーク設計問題の現実問題への応用に関しては、Magnanti et al. (1986) やPowell and Sheffi (1989) に詳しい記述がなされ、Balakrishnan et al. (1997)、Costa (2005)、Crainic (2003)、Gendron et al. (1997)、Magnanti and Wong (1984)、Minoux (1989)、Wong (1984, 1985)、Yaghini and Rahbar (2012) などがサーベイを示している。

通信ネットワークにおいては、サーバー等の経由数であるホップ数の大小に通信のフローは大きな影響を受けない。一方、物流・ロジスティクスでは、配送センターを経由し、荷物の積替えを行うことによって輸送・配送を実現している。このような場合、配送センターでは積降し、積替え等の作業により多くの時間と費用が発生するため、経由する配送センターの数は限られたものとなる。本研究では、荷物の輸送経路上で経由する配送センター等の数に上限をもつような問題を対象とし、輸送経路上の輸送能力を考慮した問題を対象とする。このような問題を経由回数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題またはホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題とよぶ。

このようなホップ数を考慮したネットワーク設計問題に関連した研究が数多くなされている。Gouveia and Requejo (2001)、Gouveia et al. (2011)、Gouveia (1995, 1996) および Dahl et al. (2006) はホップ数を考慮した最小木問題、Costa et al. (2009) や $V\alpha\beta$ (1999) はホップ数を考慮したスタイナー木問題、Balakrishnan and Altinkemer (1992) はホップ数を考慮した通信ネットワーク問題を取り扱っている。また、Botton et al. (2013) および Gouveia et al. (2006) は、ホップ数を考慮したサバイバルネットワーク設計問題を対象としている。また、Dahl et al. (1999) や Dahl and Gouveia (2004) は、ホップ数制約をもつ最短路問題に対して解析を行っている。

一方、ホップ数を考慮した容量制約をもつ

ネットワーク設計問題に対しては、Thiongane et al. (2015) が3種類の非分割フローをもつ問題の定式化およびラグランジュ緩和を含むいくつかの緩和問題を示し、列勾配法を用いた解法を示している。

本研究では、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、ホップ数変数による定式化と限定されたパスによる定式化を示す。続いて、ホップ数変数による定式化に対しては最適化ソルバーを用いて解を求めることとし、限定されたパスによる定式化に対して容量スケールリング法を用いた近似解法を提案する。

2 問題の定式化

この節では、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題の定義および前提条件、使用する記号を示す。続いて、ホップ数変数によるホップアークフローを用いた定式化、および限定されたパスフローによる定式化を示す。

2.1 問題の定義

はじめに、対象とする問題の定義を示す。
定義：(ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題)

デザイン費用 f 、フロー費用 c 、アーク容量 C をもつ向きをもつアーク集合 A が与えられ、ノード集合 N および品種の需要 d をもつ品種集合 K 、および各品種に対するホップ数の上限 H が与えられている。このとき、品種の需要を満足し、フロー費用とデザイン費用の合計を最小にするアーク集合 $A' (\subseteq A)$ 、およびアーク容量とホップ数制約を満足するパス

フローまたはアークフロー x を求めよ。

つづいて、前提条件を示す。

- ノード集合が与えられている。
- 向きをもつアーク集合が与えられている。
- アークには、非負のデザイン費用が与えられている。
- 複数の品種からなる品種集合が与えられている。
- アークには、品種ごとの単位当たりの非負のフロー費用が与えられている。
- アークには、単位期間当たりの処理量の上限であるアーク容量が与えられている。
- 各品種ごとの需要が与えられている。
- 各品種ごとに、パスに含まれるノードの経由数に1を加えたホップ数の上限値が与えられている。
- 各品種の需要は、始点から終点までのいくつかのパス上を移動する。

ここで、ホップ数は"ノードの経由数+1"と定義し、これはパス上のアーク数と一致する。

ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題の定式化で使用する記号の定義を示す。

- N : ノード集合
- A : アーク集合
- K : 品種集合
- P : ホップ数制約を満足するパス集合
- P^k : 品種 k のホップ数制約を満足するパス集合
- \bar{P} : パス集合 P の部分集合で、生成されたパスの集合
- \bar{P}^k : 品種 k パス集合 P^k の部分集合で、生成されたパスの集合

- A_{P^k} : パス集合 P^k のパスに含まれるアーク集合
- c_{ij}^k : アーク (i, j) 上における品種 k の単位当たりの非負のフロー費用
- f_{ij} : アーク (i, j) の非負のデザイン費用
- C_{ij} : アーク (i, j) のアーク容量
- d^k : 品種 k の需要量
- H^k : 品種 k のホップ数
- δ_{ij}^p : パス p にアーク (i, j) が含まれるとき1、そうでないとき0を表す定数
- x_{ij}^{hk} : アーク (i, j) 上を移動する品種 k のフロー量を表すホップ数 h のホップアークフロー変数; 連続変数
- x_p^k : 品種 k のパス p のパスフロー量を表すパスフロー変数; 連続変数
- y_{ij} : アーク (i, j) を選択するとき1、そうでないとき0であるデザイン変数; 0-1変数

2.2 ホップ数変数による定式化

ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題のホップアークフローによる定式化 $HNDA$ を示す。この定式化は、ホップ数変数であるホップアークフローを用いたものであり、Thiongane et al. (2015) の非分割フローに対する定式化を分割フローに対応させたものである。

ホップ数はパス上の始点からのアーク数であり、始点から続くアークをホップ数1、次のアークをホップ数2などとする。なお、品種 k のホップ数の最大値は H^k であり、ホップアークフロー変数により H^k を超えるフローは存在しないため、すべてのフローはホップ数制約を満足することができる。

($HNDA$)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{h=1}^{H^k} c_{ij}^k x_{ij}^{kh} + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} \sum_{h=1}^{H^k} x_{in}^{kh} - \sum_{j \in N_n^-} \sum_{h=1}^{H^k} x_{nj}^{kh} = \begin{cases} -d^k & \text{if } n = O^k \\ d^k & \text{if } n = D^k \end{cases} \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{kh} - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{k,h-1} = 0 \quad k \in K, \\ n \in N \setminus \{O^k, D^k\}, h = 2, \dots, H^k \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^{k1} = 0 \quad k \in K, n \in N \setminus O^k \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^{k,H^k} = 0 \quad k \in K, n \in N \setminus D^k \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h=1}^{H^k} x_{ij}^{kh} \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (6)$$

$$\sum_{h=1}^{H^k} x_{ij}^{kh} \leq d^k y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (7)$$

$$x_{ij}^{kh} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h = 1, \dots, H^k \quad (8)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (9)$$

(1) 式は目的関数であり、第一項はフロー費用、第二項はデザイン費用であり、それらの総和を最小化する。フロー費用は、アークごと、品種ごとおよびホップ数ごとのフロー費用の合計となる。(2) 式は、流入するホップアークフローの合計と流出するホップアークフローの合計の差が品種 k の始点では $-d^k$ 、終点では d^k であることを表すフロー保存式である。(3) 式は、品種 k において、始点と終

点以外のノードでは、流入するホップ数 $h-1$ のホップアークフローと流出するホップ数 h のホップアークフローが一致することを表すフロー保存式である。この式により、ホップ数の整合性を取ることができる。(4) 式は始点以外のノードから出るホップ数1のホップアークフローの合計は0であり、(5) 式は終点以外のノードに入るホップ数 H^k のホップアークフローの合計は0であることを表す。(6) 式は、アーク (i, j) が選択されるときはアーク上を移動するホップアークフロー量の合計がアーク容量以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す容量制約式である。(7) 式は、アーク (i, j) における品種 k に関する強制制約式であり、アーク (i, j) が選択されるときはアーク上を移動する品種 k のホップアークフローの合計は品種 k の需要量以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す。(8) 式はホップパスフロー変数の非負条件、(9) 式はデザイン変数の0-1条件である。

2.3 ホップ数制約を満足するパスフローによる定式化

定式化に含むパスおよびパスフロー変数の集合をホップ数制約を満足するものに限定する。これにより、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題の定式化は、パス集合の定義以外は一般の容量制約をもつネットワーク設計問題の定式化と同一となる。この定式化は、Thiongane et al. (2015) の非分割フローに対する定式化を分割フローに対応させたものである。パスフローによる定式化HNDPを示す。

(HNDP)

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k \sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (10)$$

subject to

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = d^k \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq d^k y_{ij} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (13)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad \forall p \in P^k, k \in K \quad (14)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (15)$$

ここで、 P^k は品種 k のホップ数制約を満足するパス集合であり、定式化に現れるパスフロー変数はホップ数制約を満足していることに注意する。(10)式は目的関数であり、フロー費用とデザイン費用の総和を最小化する。(11)式は、品種 k のパスフローの合計が品種 k の需要 d^k に一致することを表す需要保存式である。(12)式は、アーク (i, j) が選択される時はアーク上を移動するフロー量の合計がアーク容量以下であり、アークが選択されないときは0であることを表す容量制約式である。(13)式は、アーク (i, j) における品種 k の需要 d^k に関する強制制約式である。(14)式はパスフロー変数の非負制約であり、(15)式はデザイン変数の0-1条件である。

$HNDP$ は、 $\sum_{k \in K} |P^k|$ 個である指数個のパスフロー変数、 $|A|$ 個のデザイン変数と $|K|+|A|+|A||K|$ 本の制約式をもつ問題となる。変数が指数乗個存在するので、小規模な問題であってもこの定式化を直接的に解くことは困難である。実際には、逐次、必要なホップ数

制約を満足するパスフロー変数を生成して問題を解く列生成法が用いられる。この列生成法をうまく適用すれば、ホップアークフローによる定式化の場合よりも、陽的に使用する変数の数を抑えることができる。

3 定式化 $HNDP$ に対する近似解法

3.1 容量スケールリング法・列生成・行生成・局所分枝法

ホップ数変数による定式化 $HNDA$ は、直接的に最適化ソルバーで解くことにする。ここでは、ホップ数制約を満足するパスフローによる定式化 $HNDP$ に対する近似解法を提案する。

$HNDP$ の取り得るパスは集合で与えられており、ホップ数制約を満足するパスは指数乗個存在する。このような定式化をもつ線形計画問題に対しては、変数である列を適時生成する列生成法が有効である。一方、強制制約の数も多いため、強制制約に対しては、制約式である行を適時生成する行生成法が有効である。

本研究では、線形緩和問題を用いて近似解を求める手法として、容量スケールリング法、列生成および行生成を組み合わせた解法を使用する。得られた線形緩和解をもとに、適時、限定された分枝限定法を行い、元の問題の近似解を生成する。さらに、これらの解法により得られた近似解に対して、局所分枝法を適用する。この一連の解法は、一般の容量制約をもつネットワーク設計計画問題に対して提案され、有効であることが示されている。この容量スケールリング法、列生成、行生成、限定分枝限定法、および局所分枝法を組み合わせ

た解法の詳細はKatayama (2014) に詳しい解説がなされている。

*HNDP*に対しては、列生成の際に、被約費用が負となるパスを生成するのではなく、ホップ数制約を満足し、かつ被約費用が負となるパスを生成することに注意する。次の節では、容量制約をもつネットワーク設計問題の解法とは大きく異なる列生成法の部分を解説する。

3.2 限定主問題

容量スケールリング法では、*HNDP*における0-1条件を線形緩和した問題*HNDPL*を対象とする。ホップ数があるため取り得るパスの数は限定されているとはいえ、*HNDPL*は非常に多くのパスフロー変数を含む。そのため、*HNDPL*を直接解くことは困難である。そこで、あらかじめ対象となるすべてのパスフロー変数を含む問題を対象とするのではなく、逐次、必要なパスフロー変数を生成し、問題に追加していく。生成するパスフロー変数が単体法の列に相当することから、このような方法を列生成法とよぶ。

一方、*HNDPL*には、非常に多くの強制制約式が含まれている。しかし、列生成により生成されたパスフロー変数が含まれる強制制約式はそれほど多くなく、生成されたパスフロー変数が左辺に含まれていない強制制約式は不要なものとなる。そこで、生成したパスフロー変数が初めて左辺に含まれる強制制約式を逐次生成し、問題に追加する。生成する制約式が単体法の行に相当することから、このような方法を行生成法とよぶ。

品種 k のホップ数の限定されたパスの適当

な部分集合 \bar{P}^k が求められているものとし、 $\bar{P} = (\bar{P}^k)$ とする。このとき、パス集合が \bar{P} に限定されている次のような限定主問題*HNDPL* (\bar{P}) を考える。

(*HNDPL* (\bar{P}))

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k + \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} y_{ij} \quad (16)$$

subject to

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} x_p^k = d^k \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq C_{ij} y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (18)$$

$$\sum_{p \in \bar{P}^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq d^k y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A_{\bar{P}^k}, k \in K \quad (19)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad p \in \bar{P}^k, k \in K \quad (20)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (21)$$

ここで、 $A_{\bar{P}^k}$ は品種 k のパス集合 \bar{P}^k に含まれるアーク集合であり、(19)式はアーク (i, j) を通る品種 k のパスフロー変数が生成されているときのみ存在する強制制約式となる。

この問題は線形計画問題であるため、パスの部分集合の要素数が少なければ、汎用の最適化ソルバーを用いて解くことができる。

3.3 列行生成法と行生成法

HNDPL (\bar{P}) は変数が限定された問題である。そのため、*HNDPL* (\bar{P}) の最適解を求めるためには、逐次、基底に入るであろうホップ数を満足するパスフロー変数を生成しなければならない。そのために、価格付け問

題を解き、被約費用が負であり、かつホップ数を満足するパスフロー変数を求める必要がある。このようなパスフロー変数を問題に加え、この変数に対応するパスを \bar{P}^k に加えて、再度HNDPL (\bar{P}) を解き直す。この操作を被約費用が負であるパスフロー変数がなくなるまで繰り返す。被約費用が負であるパスフロー変数がなければ、HNDPLの最適解が得られたことになる。

(17) 式に対する双対変数を π 、(18)、(19) 式に対する非負の双対変数を u (≥ 0)、 w (≥ 0) とする。これらの値は、最適化ソルバーを用いてHNDPL (\bar{P}) を最適に解くことにより求めることができる。なお、(19) 式が生成されていない場合、対応する w は0と考える。

このとき、パスフロー変数 x に関する被約費用は、

$$\sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k) - \pi^k \quad \forall p \in P^k, k \in K \quad (22)$$

となる。 $\sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k)$ は、アーク (i, j) の長さを $c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k$ としたとき、パス p の長さに相当する。また、 π^k は現在のパス集合 \bar{P}^k における品種 k の最短距離である。被約費用は「パス p の長さ - 現在の最短距離」であるので、被約費用が負である変数を見つけることは現在の最短距離よりも短いパスを見つけることになる。

π^k は定数項として扱えるので、ホップ数を満足する負のパスフロー変数を見つけるには、品種 k に対して、ホップ数制約の下で (22) 式の第一項を最小化するパス p を見つければ良い。したがって、HNDPL (\bar{P}) における

品種 k に関する価格付け問題は、次のような問題 PRP^k に帰着される。

$$(PRP^k) \quad \min \sum_{p \in P^k} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^p (c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k) - \pi^k \right\} x_p^k \quad (23)$$

subject to

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = 1 \quad (24)$$

$$x_p^k \geq 0 \quad \forall p \in P^k \quad (25)$$

ここで、品種 k の需要に関する強制制約式 (19) が生成されていない、すなわち $A_{\bar{P}^k}$ に含まれない制約式に対する w_{ij}^k は0であること、また P^k はホップ数制約を満足するパス集合であることに注意する。

PRP^k は次のようなアーク (i, j) の長さを $c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k$ とした品種 k に対する始点・終点間のホップ数制約をもつ最短路問題 SPP^k に帰着される。

$$(SPP^k) \quad \psi^k = \min \sum_{(i,j) \in A} (c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k) \nu_{ij}^k \quad (26)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} \nu_{in}^k - \sum_{j \in N_n^-} \nu_{nj}^k = \begin{cases} -1 & \text{if } n = O^k \\ 1 & \text{if } n = D^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N \quad (27)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \nu_{ij}^k \leq H^k \quad (28)$$

$$\nu_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (29)$$

ここで、 ψ^k は SPP^k の最適値である。

この SPP^k はホップ数制約件である (28) 式をもつ最短路問題であるため、一般的には容易に最適解を求めることはできない。そこで、ラグランジュ乗数 λ (≥ 0) を用いてホッ

プ数制約である (28) 式をラグランジュ緩和した問題 $SPPL^k(\lambda)$ を考える。

$$(SPPL^k(\lambda))$$

$$\phi^k = \min \sum_{(i,j) \in A} (c_{ij}^k + u_{ij} + w_{ij}^k + \lambda) v_{ij}^k - H^k \lambda \quad (30)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} v_{in}^k - \sum_{j \in N_n^-} v_{nj}^k = \begin{cases} -1 & \text{if } n = O^k \\ 1 & \text{if } n = D^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\forall n \in N \quad (31)$$

$$v_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (32)$$

ここで、 ϕ^k は $SPPL^k(\lambda)$ の最適値である。

この問題は最短路問題となり、係数が非負であるのでDijkstra法を用いて容易に解くことができる。

$SPPL^k(\lambda)$ の最適値である ϕ^k は、 λ に対して上に凸の微分不可能な関数となる。しかし、ラグランジュ乗数は1変数のみであるので、 λ の値を二分探索法によって設定し、その都度、 $SPPL^k(\lambda)$ を解くことにし、それらの最適値の最大値を求め、 ϕ^k またはその近似値とすることにする。

$SPPL^k(\lambda)$ は SPP^k のラグランジュ緩和問題であるので、その最適値 ϕ^k は SPP^k の下界値となり $\phi^k < \psi^k$ となる。 $\phi^k - \pi^k < 0$ であれば、 $SPPL^k(\lambda)$ の解に対応する $\psi^k - \pi^k$ が負になる可能性はあるが、 $\phi^k - \pi^k < \psi^k - \pi^k$ であるため、 $\psi^k - \pi^k$ は必ずしも負になるとは限らない。しかし、 $SPPL^k(\lambda)$ の最適解に対して $\psi^k - \pi^k < 0$ で、かつ (28) 式を満足するパスが得られれば、ホップ数制約を満足する負の被約費用をもつパスが得られたこと

になる。

得られた解において、 $v_{ij}^k = 1$ または $v_{ij}^k = 1$ であるアークの集合からなるパスを p^k とすると、 p^k が生成すべきパス、パスに対応するパスフロー変数 $x_{p^k}^k$ が生成すべき変数となる。生成した p^k 上のアークに関して、新たに A_{p^k} の要素となったアーク集合に対して、品種 k の需要に関する強制制約式を問題に追加する。

一方、 $SPPL^k(\lambda)$ の最適解において $\phi^k - \pi^k \geq 0$ であれば、 $\psi^k - \pi^k \geq \phi^k - \pi^k \geq 0$ となり、被約費用が負となるパスが存在しないことになる。また、すべての品種 k について $\phi^k - \pi^k \geq 0$ であれば、被約費用が負である変数が存在しないため、 $HNDPL$ が最適に解けたことになる。

ここでは、緩和問題 $SPPL^k(\lambda)$ の解からパスを導出しているため、ホップ数制約である (28) 式を満し、被約費用が負となるパスをすべて生成できる保証はない。しかし、解法自体が近似解法であるため、被約費用が負となるパスをすべて生成できなくとも、近似解を求めることは十分に可能である。

4 数値実験

ホップ数変数による定式化 $HNDA$ およびホップ数制約を満足するパスフローによる定式化 $HNDP$ に対して、数値実験を行なった。使用した問題は、容量制約をもつネットワーク設計問題に対するCrainicらのベンチマーク問題であるC問題とR問題 (Crainic et al. 2000) である。それぞれの問題に対して、各品種のホップ数の上限値は、“すべてのアー

クを含むネットワーク上での最短経路のホップ数+1”とした。このため、ホップ数の上限がきついため、いくつかの問題では実行不可能となっている。

ホップ数変数による定式化HNSAに対し、これを最適化ソルバー CPLEXにより解き、上界値または最適値を求めた。なお、CPLEXの計算時間が30時間を超えた場合は、その時点における最良の上界値および下界値を求めた。

計算環境およびHNSAに対する近似解法で設定した主なパラメータおよび条件は以下の通りである。

- 使用OS および言語：UBUNTU 12.4, GNU C++ compiler
- CPU INTEL i7 3440K 3.4GHz 4Core, RAM 24GByte
- 最適化ソルバー：CPLEX 12.6 (Parallel Version)
- 容量スケールリングパラメータ：0.025 ~ 0.200
- 局所分枝の計算時間の上限：1000 秒
- 局所分枝の近傍：10

なお、その他の容量スケールリング法・局所分枝法におけるパラメータはKatayama (2015) と同一であり、パラメータの内容については同文献を参照のこと。

C問題に対する上界値と誤差を表1に示す。表内のCPLEXは最適化ソルバー CPLEXによる上界値、CAPは局所分枝法を行わない容量スケールリング法による上界値、LOBは局所分枝法を行った容量スケールリング法による上界値である。これらは実行可能であった33

問題の結果であり、太字は最適値、斜体文字は3つの方法の中の最良値である。また、CPLEX(%)はCPLEXによる上界値とCPLEXによる最適値または下界値との誤差であり、CAP (%) とLOB (%) も同様である。

CPLEXでは33問中28問、局所分枝法を行った容量スケールリング法では33問中26問の最適解を求めることができている。また、局所分枝法を行わない容量スケールリング法は問題100/400/010/VLの実行可能解を求めることができていない。局所分枝法を行わない容量スケールリング法の平均誤差は0.83%であった。また、局所分枝法を行った容量スケールリング法の平均誤差は0.20%であり、CPLEXの平均誤差0.18%と同程度となった。

C問題に対する計算時間を表2に示す。CPLEXの平均計算時間は24692.7秒と非常に大きく、最適解を求められなかった5問では上限の30時間となっている。一方、局所分枝法を行わない容量スケールリング法の平均計算時間は91.1秒と短かく、短時間で多くの近似解を求めることができている。また、局所分枝法を行った容量スケールリング法の平均計算時間は1836.5秒であり、局所分枝法を行わない方法よりも長いですが、CPLEXに比べると計算時間は1/13程度であり、大幅に計算時間を削減することができる。

R問題に対する上界値と誤差を表3および表4に示す。R問題はr01.1からr18.9までであるが、ここでは、容易に最適解を求めることができるか実行不可能となった問題r01.1からr12.9までを除く問題 r13.1からr18.9までの54問の結果を示す。なお、表5の平均は54問の

平均誤差である。

CPLEXでは54問中46問、局所分枝法を行った容量スケールリング法では54問中38問の最適解を求めることができている。局所分枝法を行わない容量スケールリング法の平均誤差は1.99%と比較的大きいが、局所分枝法を行った容量スケールリング法の平均誤差は0.43%であった。一方、CPLEXの平均誤差は0.21%と小さなものとなっている。

R問題に対する計算時間を表5に示す。CPLEXでは20464.1秒を要した。局所分枝法を行わない容量スケールリング法の計算時間は58.9秒であり、非常に短時間で近似解を算出できている。また、局所分枝法を行った容量スケールリング法の計算時間は1739.5秒であり、CPLEXに比べると計算時間は1/12程度となり、大幅に計算時間を削減することができている。

5 おわりに

本研究では、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、ホッ

プ数変数による定式化と限定されたパスによる定式化を示し、限定されたパスによる定式化に対して容量スケールリング法および局所分枝法を用いた近似解法を提案した。続いて、ホップ数変数による定式化に対しては最適化ソルバーを用いた数値実験、限定されたパスによる定式化に対しては提案した近似解法を用いた数値実験を行ない、定式化と解法の有効性を検討した。

ホップ数変数による定式化とCPLEXを組合せた場合、誤差の小さな解を算出することができたが、大きな計算時間が必要となった。このため、数値実験で用いた問題よりもさらに大規模な問題に対しては、このまま適用することは困難である。一方、限定されたパスによる定式化と容量スケールリング法の組み合わせは、短時間で比較的良い近似解を算出することができた。さらに局所分枝法を組み合わせることによって、計算時間を抑えながら、誤差の小さな解を算出することができた。

本研究は科学研究費基盤研究C（課題番号25350454）による成果の一部である。

表1：C問題の上界値と誤差

N/A/K/FC	CPLEX	CAP	LOB	CPLEX(%)	CAP(%)	LOB(%)
100/400/010/VL	29016.0	*	29016.0	0.00	*	0.00
100/400/030/FL	56260.0	60939.0	56260.0	0.00	8.32	0.00
20/230/040/VL	424075.0	424075.0	424075.0	0.00	0.00	0.00
20/230/040/VT	374013.0	375326.0	374013.0	0.00	0.35	0.00
20/230/040/FT	644361.0	645821.0	644361.0	0.00	0.23	0.00
20/230/200/VL	104072.0	105125.0	104072.0	0.00	1.01	0.00
20/230/200/FL	160969.0	163378.5	160969.0	0.00	1.50	0.00
20/230/200/VT	105729.0	106183.0	105729.0	0.00	0.43	0.00
20/230/200/FT	144587.0	144803.0	144587.0	0.00	0.15	0.00
20/300/040/VL	429700.0	429700.0	429700.0	0.00	0.00	0.00
20/300/040/FL	588325.0	588502.0	588325.0	0.00	0.03	0.00
20/300/040/VT	464550.0	464569.0	464550.0	0.00	0.00	0.00
20/300/040/FT	604237.0	604997.0	604237.0	0.00	0.13	0.00
20/300/200/VL	78649.0	79071.0	78649.0	0.00	0.54	0.00
20/300/200/FL	122151.0	122695.0	122151.0	0.00	0.45	0.00
20/300/200/VT	78242.0	78330.0	78242.0	0.00	0.11	0.00
20/300/200/FT	111729.7	112053.0	111729.7	0.00	0.29	0.00
30/520/100/VL	54586.0	54650.0	54586.0	0.00	0.12	0.00
30/520/100/FL	99745.0	100925.0	99919.0	0.00	1.18	0.17
30/520/100/VT	52439.0	52711.0	52439.0	0.00	0.52	0.00
30/520/100/FT	<i>98087.0</i>	98848.0	<i>98087.0</i>	0.42	1.20	0.42
30/520/400/VL	115313.1	115699.0	115313.1	0.00	0.33	0.00
30/520/400/FL	<i>155191.7</i>	156664.0	156196.5	0.59	0.95	0.65
30/520/400/VT	116650.3	116789.4	116659.8	0.00	0.12	0.01
30/520/400/FT	<i>156311.2</i>	156933.5	156819.0	0.79	1.19	1.12
30/700/100/VL	48693.0	48770.0	48693.0	0.00	0.16	0.00
30/700/100/FL	61144.0	61365.0	61144.0	0.00	0.36	0.00
30/700/100/VT	46341.0	46495.5	46341.0	0.00	0.33	0.00
30/700/100/FT	55960.0	56646.0	55960.0	0.00	1.23	0.00
30/700/400/VL	100875.0	101292.5	100875.0	0.00	0.41	0.00
30/700/400/FL	<i>139239.7</i>	143680.0	143037.8	2.68	3.19	2.73
30/700/400/VT	96500.5	96571.7	96500.5	0.00	0.07	0.00
30/700/400/FT	134329.5	134694.0	<i>134266.6</i>	1.39	1.66	1.34
平均	-	-		0.18	0.83	0.20

*:実行可能解を算出せず.

表2：C問題の計算時間（秒）

N/A/K/FC	CPLEX	CAP	LOB	N/A/K/FC	CPLEX	CAP	LOB
100/400/010/VL	0.3	0.4	1.2	30/520/100/VL	114.2	1.1	147.4
100/400/030/FL	51.9	1.7	144.1	30/520/100/FL	21711.2	44.8	3459.8
20/230/040/VL	0.1	0.2	0.8	30/520/100/VT	1313.2	1.3	2353.2
20/230/040/VT	0.9	0.4	2.9	30/520/100/FT	108000.0	49.4	6302.7
20/230/040/FT	2.0	0.3	5.4	30/520/400/VL	9600.3	24.2	2809.1
20/230/200/VL	1074.6	23.2	553.2	30/520/400/FL	108000.0	249.6	4476.0
20/230/200/FL	55726.7	67.5	1786.9	30/520/400/VT	29797.4	73.1	3087.0
20/230/200/VT	329.2	13.3	499.5	30/520/400/FT	108000.0	392.1	4602.5
20/230/200/FT	2059.9	88.2	2544.9	30/700/100/VL	12.4	0.7	36.6
20/300/040/VL	0.2	0.2	1.1	30/700/100/FL	943.8	7.4	213.0
20/300/040/FL	2.4	0.3	6.0	30/700/100/VT	9138.3	3.7	3174.9
20/300/040/VT	0.8	0.2	2.9	30/700/100/FT	51337.0	8.7	5388.6
20/300/040/FT	0.8	0.2	2.6	30/700/400/VL	41416.7	75.1	3595.3
20/300/200/VL	4636.3	169.1	1853.0	30/700/400/FL	108000.0	524.8	4596.8
20/300/200/FL	38500.8	371.7	3396.8	30/700/400/VT	65574.8	54.4	2809.0
20/300/200/VT	2448.6	32.2	1072.6	30/700/400/FT	108000.0	1000.1	6728.8
20/300/200/FT	13141.7	90.0	2291.0	平均	24692.7	91.1	1836.5

表3：R問題の上界値と誤差（1/2）

Problem	CPLEX	CAP	LOB	CPLEX(%)	CAP(%)	LOB(%)
r13.1	143541.0	143674.0	143541.0	0.00	0.09	0.00
r13.2	281252.0	287864.0	281252.0	0.00	2.35	0.00
r13.3	411372.0	429319.0	411372.0	0.00	4.36	0.00
r13.4	151641.0	152517.0	151641.0	0.00	0.58	0.00
r13.5	299410.0	304001.0	299410.0	0.00	1.53	0.00
r13.6	440367.0	450587.0	440367.0	0.00	2.32	0.00
r13.7	212638.5	214378.0	212821.0	0.00	0.82	0.09
r13.8	450918.0	467427.0	450918.0	0.00	3.66	0.00
r13.9	715480.0	742683.0	715480.0	0.00	3.80	0.00
r14.1	414252.0	414252.0	414252.0	0.00	0.00	0.00
r14.2	844465.0	857546.0	844465.0	0.00	1.55	0.00
r14.3	1289818.0	1303938.0	1289818.0	0.00	1.09	0.00
r14.4	442306.0	443159.0	442306.0	0.00	0.19	0.00
r14.5	912191.0	916065.0	912191.0	0.00	0.42	0.00
r14.6	1373849.0	1386597.0	1378534.0	0.00	0.93	0.34
r14.7	668216.3	668216.3	668216.3	0.00	0.00	0.00
r14.8	1624706.7	1638949.0	1625832.0	0.00	0.88	0.07
r14.9	2661294.0	2687144.0	2661294.0	0.00	0.97	0.00
r15.1	1031834.0	1033277.0	1031834.0	0.00	0.14	0.00
r15.2	2231916.0	12331456.0	2235527.0	0.00	4.46	0.16
r15.3	3455061.0	3619800.0	3455061.0	0.00	4.77	0.00
r15.4	1158115.0	1158137.0	1158115.0	0.00	0.00	0.00
r15.5	2585256.0	2606421.5	2585256.0	0.00	0.82	0.00
r15.6	<i>4132383.0</i>	4198413.0	4133941.0	1.13	2.75	1.17
r15.7	2300838.7	2305518.5	2300838.7	0.00	0.20	0.00
r15.8	5869005.0	5951961.5	5869005.0	0.00	1.41	0.00
r15.9	9978303.7	10174604.5	9978303.7	0.00	1.97	0.00

表4：R問題の上界値と誤差（4/4）

Problem	CPLEX	CAP	LOB	CPLEX(%)	CAP(%)	LOB(%)
r16.1	138735.0	140156.0	138735.0	0.00	1.02	0.00
r16.2	247883.0	253099.0	247883.0	0.00	2.10	0.00
r16.3	348778.0	371599.0	348778.0	0.00	6.54	0.00
r16.4	140619.0	141310.0	140619.0	0.00	0.49	0.00
r16.5	254948.0	263359.0	254948.0	0.00	3.30	0.00
r16.6	361568.0	382101.0	361568.0	0.00	5.68	0.00
r16.7	170091.0	171344.0	170091.0	0.00	0.74	0.00
r16.8	352792.0	362471.0	354443.0	0.00	2.74	0.47
r16.9	535386.0	546723.0	537597.0	0.01	2.13	0.42
r17.1	368471.0	370834.0	368471.0	0.00	0.64	0.00
r17.2	668216.3	732285.0	725760.0	0.00	9.59	8.61
r17.3	1092098.0	1120213.0	1092098.0	0.00	2.57	0.00
r17.4	377809.0	378669.0	377809.0	0.00	0.23	0.00
r17.5	755019.0	762624.0	755019.0	0.00	1.01	0.00
r17.6	1143868.0	1144883.0	1143868.0	0.00	0.09	0.00
r17.7	502058.0	505281.0	502058.0	0.00	0.64	0.00
r17.8	<i>1115633.3</i>	1120564.3	1115633.3	0.70	1.14	0.70
r17.9	<i>1808907.0</i>	1831656.0	1809268.0	1.70	2.98	1.72
r18.1	855561.5	857729.0	855561.5	0.00	0.25	0.00
r18.2	1804839.0	1863766.0	1804839.0	0.00	3.26	0.00
r18.3	<i>2785908.0</i>	2906025.0	2785908.0	4.31	8.81	4.31
r18.4	935866.0	938272.0	935866.0	0.00	0.26	0.00
r18.5	1963823.0	1994580.0	1964142.0	0.00	1.57	0.02
r18.6	<i>3063289.0</i>	3102872.0	3080864.0	2.84	4.17	3.43
r18.7	<i>1479097.6</i>	1488695.0	1479640.5	0.51	1.17	0.55
r18.8	<i>3926968.0</i>	3947124.8	3933131.0	0.25	0.76	0.40
r18.9	6570230.8	6680270.7	6606947.0	0.00	1.67	0.56
平均	-	-	-	0.21	1.99	0.43

表5：R問題の計算時間（秒）

Problem	CPLEX	CAP	LOB	Problem	CPLEX	CAP	LOB
r13.1	0.6	0.2	1.1	r16.1	0.2	0.0	1.3
r13.2	26.7	0.4	4.9	r16.2	6.4	1.3	7.6
r13.3	45.6	1.8	14.1	r16.3	14.8	3.6	20.1
r13.4	4.4	0.3	2.7	r16.4	0.6	0.2	2.0
r13.5	92.0	0.9	11.0	r16.5	9.9	1.6	23.1
r13.6	568.3	5.7	32.0	r16.6	33.3	4.4	53.3
r13.7	393.5	1.1	312.9	r16.7	207.9	1.1	995.0
r13.8	2094.6	3.3	1218.0	r16.8	13836.3	10.6	2614.5
r13.9	2371.9	9.2	3263.0	r16.9	29735.9	25.8	2179.5
r14.1	0.9	0.2	2.4	r17.1	3.7	0.6	13.4
r14.2	44.7	5.7	60.3	r17.2	302.9	9.6	144.4
r14.3	627.3	15.0	135.9	r17.3	6622.3	44.5	1591.6
r14.4	2.6	0.7	9.5	r17.4	4.8	0.7	13.4
r14.5	869.7	42.3	554.3	r17.5	569.6	41.0	307.1
r14.6	2186.8	29.5	1533.2	r17.6	11929.2	60.3	1683.4
r14.7	311.9	5.3	1686.5	r17.7	8537.4	12.8	2250.1
r14.8	50274.8	31.3	4915.5	r17.8	108000.0	231.1	5555.7
r14.9	7965.9	43.3	2381.8	r17.9	108000.0	308.6	4222.5
r15.1	18.0	1.10	36.4	r18.1	232.0	4.4	157.3
r15.2	8573.8	37.5	2329.0	r18.2	65556.3	163.0	2276.0
r15.3	38726.2	200.8	3269.5	r18.3	108000.0	312.5	4903.0
r15.4	99.3	3.40	202.7	r18.4	9771.7	14.6	3682.2
r15.5	26476.3	158.9	4581.0	r18.5	54733.4	134.5	4555.1
r15.6	108000.0	432.4	7059.0	r18.6	108000.0	445.5	5712.2
r15.7	303.6	11.5	818.7	r18.7	108000.0	56.8	4138.5
r15.8	137.8	9.8	374.6	r18.8	108000.0	130.0	5333.3
r15.9	106.4	12.5	392.2	r18.9	4630.8	98.8	6295.5
平均	-	-	-	-	20464.1	58.9	1739.5

参考文献

Balakrishnan, A., K. Altinkemer. 1992. Using a hop-constrained model to generate alternative communication network design. *ORSA journal on Computing* 4 192-205.

Balakrishnan, A., T. L. Magnanti, P. Mirchandani. 1997. Network design. M. Dell'Amico, F. Maffioli, S. Martello, eds., *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, New York, 311-334.

Botton, Q., B. Fortz, L. Gouveia, M. Poss. 2013. Benders decomposition for the hop-constrained survivable network design problem. *INFORMS Journal on Computing* 25 13-26.

Costa, A., J. Cordeau, G. Laporte. 2009. Models and branch-and-cut algorithms for the steiner tree problem with revenues, budget and hop constraints. *Networks* 53 141-159.

Costa, A. M. 2005. A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems. *Computers and Operations Research* 32 1429-1450.

Crainic, T. G. 2003. Long-haul freight transportation. R. W. Hall, ed., *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers, 451-516.

Crainic, T. G., M. Gendreau, J. M. Farvolden. 2000. A simplex-based tabu search for capacitated network design. *INFORMS journal on Computing* 12 223-236.

Dahl, G., A. Martin, M. Stoer. 1999. Routing through virtual paths in layered telecommunication networks. *Operations Research* 47 693-702.

Dahl, G., L. Gouveia. 2004. On the directed hop-constrained shortest path problem. *Operations Research Letters* 32 15-22.

Dahl, G., L. Gouveia, C. Requejo. 2006. On formulations and methods for the hopconstrained minimum spanning tree problem. M. Resende, P. Pardalos, eds., *Handbook of Optimization in Telecommunications*. Springer, 493-515.

Gendron, B., T. G. Crainic, A. Frangioni. 1997. Multicommodity capacitated network design. Tech. Rep. CIRRELT-98-14, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

- Gouveia, L. 1995. Using the miller-tucker-zemlin constraints to formulate a minimal spanning tree problem with hop constraints. *Computers & Operations Research* **22** 959-970.
- Gouveia, L. 1996. Multicommodity flow models for spanning trees with hop constraints. *European Journal of Operational Research* **95** 178-190.
- Gouveia, L., P. Patricio, A.Sousa. 2006. Compact models for hop-constrained node survivable network design: An application to MPLS. S. Raghavan, G. Anandalingam, eds., *Telecommunications Planning: Innovations in Pricing, Network Design and Management*. Springer, 167-180.
- Gouveia, L., C. Requejo. 2001. A new lagrangian relaxation approach for the hopconstrained minimum spanning tree problem. *European Journal of Operational Research* **132** 539-552.
- Gouveia, L., L. Simonetti, E.A. Uchoa. 2011. Modeling hop-constrained and diameterconstrained minimum spanning tree problems as steiner tree problems over layered graphs. *Mathematical Programming* **128** 123-148.
- Katayama, N. 2015. Combined capacity scaling and local branching approach for capacitated multicommodity network design problem. Working Paper.
- Katayama, N. 2014. A combined matheuristic for service network design problem. *The International Journal of Logistics and SCM Systems* **8**. Submitted for publication.
- Magnanti, T. L., P. Mireault, R. T. Wong. 1986. Tailoring benders decomposition for uncapacitated network design. *Mathematical Programming Study* **26** 112-155.
- Magnanti, T. L., R. T. Wong. 1984. Network design and transportation planning : Models and algorithms. *Transportation Science* **18** 1-55.
- Minoux, M. 1989. Network synthesis and optimum network design problems: Models, solution methods and applications. *Networks* **19** 313-360.
- Powell, W. B., Y. Sheffi. 1989. Design and implementation of an interactive optimization system for network design in the motor carrier industry. *Operations Research* **37** 12-29.
- Thiongane, B., J. Cordeau, B.Gendron. 2015. Formulations for the nonbifurcated hopconstrained multicommodity capacitated fixed-charge network design problem. *Computers & Operations Research* **53** 1-8.
- Voß S. 1999. The steiner tree problem with hop constraints. *Annals of Operations Research* **86** 321-345.
- Wong, R. T. 1984. Introduction and recent advances in network design: Models and algorithms. M. Florian, ed., *Transportation Planning Models*. Elsevier Science, North Holland, Amsterdam, 187-225.
- Wong, R. T. 1985. Location and network design. M. O'heEigeartaigh, J. Lenstra, A. RinnooyKan, eds., *Combinatorial Optimization Annotated Bibliographies*. John Wiley & Sons, New York, 129-147.
- Yaghini, M., M. Rahbar. 2012. Multicommodity network design problem in rail freight transportation planning. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **43** 728-739.

昨年11月、NS物流研究会主催による「第6回物流関連ゼミ学生による研究発表会」が開催された。私の3年ゼミでは3回目の参加となる。参加各校のゼミ生が発表した研究内容をみると、人材不足解消の対策、ドライバー確保への提言、大学生の採用に関する考察、買い物難民対策などで、いずれもタイムリーな提案であった。発表分野は特に決められているわけではなく、ゼミのチームで自由に設定できるのだが、半数以上が少子化に伴う物流業界の労働力不足や高齢化問題に関連する内容であった。学生の目線から見ても、こうした問題が物流業界に大きな影響を及ぼしていると考えられているのだろう。

『物流問題研究63号（2015年冬）』の特集の部も、少子高齢化の問題を取り上げた。物流業界の労働力不足の実情、逆に高齢化社会による新たな物流市場の開拓など、陰陽の両面で、その具体的な現状や対応策を紹介していただいた。この場を借りて、お礼を申し上げたい。

本誌は本学ホームページに掲載しており、誰でも閲覧できる。「知の共有」の場として少しでも役立てばと考えている。

なお、本誌の掲載論文ならびにロジスティクス産学連携コンソーシアムのタイムリーな活動情報も、ホームページにも掲載しており、是非お立ち寄りいただければ幸甚である。

(<http://www.rku.ac.jp/distribution/index.html>)

(小野)

物流問題研究 No.63

ISSN 1346-2016

2015年3月1日発行

非売品

編集 小野 秀昭

発行 流通経済大学物流科学研究所
〒301-8555 茨城県龍ヶ崎市120
電話 (0297) 64-0001 (代表)

制作 港洋社
