

# 内航貨物船におけるトリップ連鎖パターンの推計手法に関する研究

岡山 正人<sup>1</sup>・小谷 通泰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 商船修 広島商船高等専門学校 助教授 流通情報工学科(〒725-0200 広島県豊田郡東野町4272-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 神戸商船大学 教授 輸送システム工学講座(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

従来より筆者らは、内航貨物船のトリップ連鎖パターンの形成メカニズムについて分析を行ってきた。その結果、各船舶が連鎖パターンにおける第1トリップを中心に運航されていることや、帰り荷輸送のODペアの選び方によって異なる連鎖パターンが形成されていることを明らかにした。そこで本研究では、こうして明らかにした連鎖パターンの形成メカニズムを考慮した連鎖パターンの推計手法を提案した。なお、本手法は「帰り荷候補設定モデル」と「帰り荷OD交通量推計モデル」の2つのモデルからなり、特にモデルの推定には船舶の交通量の希少性をポアソン分布で表現したポアソン回帰分析を用いた。また、本手法を分析に用いたデータに適用した結果、良好な精度で連鎖パターンの発生量を推計でき、その有効性が確認できた。

**Key Words :** coastal shipping, trip chain, poisson regression analysis

## 1. はじめに

筆者らは、従来から内航貨物船を対象に、OD貨物量から船舶OD交通量を推計する手法を構築することを試みている。この際、推計手法に船舶の運航・配船形態を反映させるため、基礎的な研究としてこれまでに、船舶の交通軌跡をトリップチェインとみなし、その連鎖パターンの分類や連鎖パターンの形成メカニズムについて分析を試みてきた<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、船舶OD交通量の推計手法の中で、その主要な部分を構成するものであり、こうした連鎖パターンの形成メカニズムを記述する部分となる「連鎖パターンの推計手法」を考案し、その有効性を検討することを目的としている。

なお、本手法は「帰り荷候補設定モデル」と「帰り荷OD交通量推計モデル」の2つのモデルからなり、特に、本手法の推定精度の向上をはかるため、船舶の交通量の希少性をポアソン分布で表現したポアソン回帰分析を用いることを試みた。

## 2. 従来の研究と本研究の特徴

一般に、船舶や貨物車などによる貨物輸送では、貨物を集配送するために複数の地点を巡回するトリップや、空荷での回送のためのトリップが生じるため、

貨物の流動とそれを運ぶ輸送機関のODとは必ずしも一致しない。そのため、貨物車等の交通量をOD貨物量から推計するための様々な方法が考えられている。

一つの方法は、OD貨物量から直接、貨物車のOD交通量を推計せず、貨物の発生集中量から貨物車の発生集中量を推計し、それから貨物車のOD交通量を推計する方法である<sup>2)</sup>。また、貨物の輸送活動をピストン型と巡回型に分け、ピストン型の推計にはOD貨物量を利用し、巡回型には前述の貨物の発生集中量をもとに推計する方法を応用することなどによりOD交通量を推計する方法も開発されている。さらに、佐野らは貨物車のトリップを出発トリップと帰社トリップ、およびそれらの中間トリップに分けることで、貨物車のOD交通量を推計する方法を提案している<sup>3)</sup>。

しかしながらこれらの研究では、ピストン型となるか巡回型となるかを決定する要因が明らかになっていないことや、一連のトリップの繋がりからなる貨物車の運行をトリップ単位に分けて考えているなどの問題がある。こうしたことからこれらの研究では、貨物車による貨物の輸送形態や空車の現れ方といった貨物車の運行特性や、そうした特性がどのような過程によって引き起こされるかと言った貨物車の運行メカニズムを考慮しているとは言い難い。そ

のため、これらの方法は現実の貨物車の運行形態を反映したものとなっていない。

これに対して筆者らは、内航一般貨物船を対象として、貨物とそれを運ぶ船舶のODの不一致を解決するために、貨物の輸送形態や空船回航の現れ方などの運航特性や、そのメカニズムを考慮することで、より現実の運航形態に近い形で船舶OD交通量を推計する手法を開発することを目的としている。そして、本研究ではこうしたことを実現するために、従来より筆者らが考察してきた内航一般貨物船のトリップ連鎖パターンの形成メカニズムを記述する部分として、連鎖パターンの推計手法の開発を試みている。

ところで一般に、船舶交通は陸上交通ほど頻繁に発生するものではなく、また、その交通量のOD表の各要素の多くは「0」である場合がしばしば見られる。そこで本研究では、こうした船舶交通量の希少性に着目し、船舶交通量にポアソン分布を仮定したポアソン回帰分析を用いることで、連鎖パターンを推計することを試みることとした。

ポアソン回帰分析は「一般化線形モデル<sup>4), 5)</sup>」の一手法で、これを交通現象へ応用したものとして、分布交通量がポアソン分布に従うと仮定したポアソン・グラビティモデルなどがあり、OD表に「0」の要素を多く含む場合に有効であることが確かめられている<sup>6)</sup>。また、古屋らはこのポアソン・グラビティモデルを改良し、観光交通のOD交通量の推計を行いその有効性を確かめている<sup>7)</sup>。

このように本研究は、船舶の運航実態から明らかになった連鎖パターンの形成メカニズムを考慮した、連鎖パターンの推計手法を開発しようとしているところに特徴がある。また、本手法では、船舶交通の希少性に着目することで、その交通量にポアソン分布を仮定したポアソン回帰分析を適用することにより推定精度の向上を試みた。

本論文の内容は以下の通りである。

まず、3.において、従来の研究のまとめとして内航一般貨物船のトリップ連鎖パターンの形成メカニズムについて述べ、こうした形成メカニズムを取り込んだトリップ連鎖パターンの推計手法の考え方やその手順について述べる。

4. より 5. では、3. で示した手順に従いトリップ連鎖パターン推計手法の各段階におけるモデルの推定を行うとともに、それぞれのモデルの推定精度についても検討する。

そして 6. では、連鎖パターンの推計手法による推計結果が、連鎖パターンの形成メカニズムにより引き起こされる内航貨物船の連鎖パターンの特性を有しているかどうかを確かめることで、本手法の有

表-1 トリップ連鎖パターンの頻度分布

	トリップ連鎖パターン	頻度	頻度比率
ピ ス ト ン 型	1 	832	49.1%
	2 	132	7.8%
三 角 型	1 	138	8.1%
	2 	45	2.7%
四 角 型	1 	95	5.6%
その 他	—	425	27.7%

注) ◎はベース港を、●は訪問港を示す。また、  
→は貨物輸送、···→は空船回航を意味する。

効性を検証する。

最後に 7. では、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について述べる。

### 3. トリップ連鎖パターンの形成メカニズムとその推定手法の考え方

#### (1) 内航貨物船のトリップ連鎖パターンとその形成メカニズム

従来より著者らは、内航一般貨物船の運航実態をトリップチェインの考え方を適用することにより分析してきた。その結果、内航一般貨物船におけるトリップ連鎖パターンを分類するとともに、その形成メカニズムについて以下のような知見を得ることができた<sup>8)</sup>。

①各船舶の寄港地の内で貨物の積み込み量の多い港を、その船舶のベース港であると考えた。そして、そのベース港を出発し再びベース港に戻ってくるまでのトリップの連鎖を、訪問港数や貨物の輸送形態に着目することで表-1 のように類型化できることを示した。なお、表-1 中の「その他」のパターンは、給油や同一港内のバース間の移動といった直接貨物輸送とは無関係な移動であったり、貨物を複数の港に配達するなど比率が極端に少ないものが大半であった。このため、内航一般貨物船の主な連鎖パターンは表-1 の残る 5 つのパターンであることがわかった。

②表-1 の「その他」を除く連鎖パターンについて、その形成メカニズムを分析した結果、次のことがわかった。すなわち、各船舶は第 1 トリップで輸送し

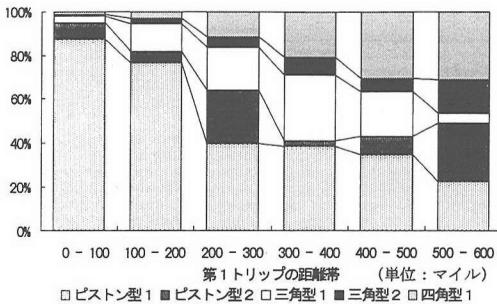


図-1 第1トリップ長の距離帯別による各連鎖パターンの構成比率

ている貨物を中心に運航されており、各連鎖パターンは、こうした第1トリップの終了後、再びベース港へ戻る際に、空船で戻るか、帰り荷輸送をともなうか、もしともなうとすればその際に空船トリップを何度行うかにより形成されている。また、各船舶は空船回航する距離をできるだけ短くするなど輸送の効率性を考慮することで配船されている。こうしたことにより、第1トリップが長くなると、帰り荷輸送を行わないピストン型1では復路の空船回航が長くなり非効率的であるため、帰り荷輸送を行うパターンとなる。また、帰り荷輸送を行うパターンにおいても、四角型1は空船トリップが1回の三角型よりも総空船回航長が長くなるため、第1トリップ長が三角型よりも長い時に行われることが多い。この結果、連鎖パターンの発生比率は、図-1に示されるように第1トリップ長の距離帯ごとに異なるという大きな特徴を有していた。

そこで本研究では、このようにして明らかになつた連鎖パターンの形成メカニズムを考慮した連鎖パターンの推計手法の開発を試みる。

## (2) 連鎖パターン推計の考え方

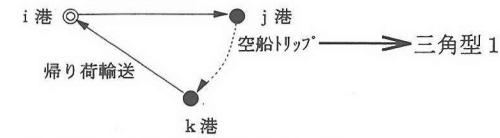
上述のように、各連鎖パターンは第1トリップ終了後の船舶の動向により決定されていた。そこで本研究では、第1トリップとなるODペアとそのODペアを第1トリップとする総船舶交通量、および対象域内のすべてのODペアにおける貨物量を与件とし、第1トリップ終了後の船舶の動向をモデル化することで、各連鎖パターンの発生量を次のようにして推計することを試みる。

本手法ではまず、各第1トリップにおける帰り荷を行うODの船舶交通量を推計し、これを後で述べるような方法により帰り荷輸送をともなう各連鎖パターン、すなわち、表-1におけるピストン型2、三角型1、2、四角型1ごとに集計することでそれぞれのパターンの発生量を求める。そして次に、帰

◆ベース港を i 港、第1トリップを i 港から j 港とする時

- ・ k 港から i 港(ベース)に帰り荷輸送をする場合

第1トリップ



- ・ 1 港から m 港に帰り荷輸送をする場合

第1トリップ

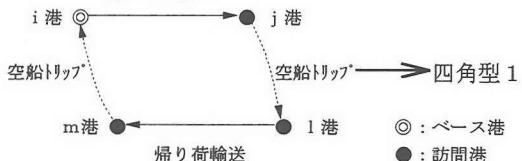


図-2 連鎖パターンの特定の方法

り荷輸送をともなわないピストン型1を、第1トリップのODにおける総船舶交通量から、先に得られた各第1トリップごとの帰り荷輸送をともなう連鎖パターンの発生量の合計値を引くことにより求める。

このように、帰り荷をともなう連鎖パターンを、帰り荷をともなわないピストン型1よりも先に推計するのは次のような理由による。すなわち、連鎖パターンの形成メカニズムによれば、ベースに戻る際の空船回航が長くなる時、それを避けるためできるだけ帰り荷輸送を行おうとしていた。言い換えれば、意思決定の手順としてまず、帰り荷貨物を探し、それが見つかなかった場合にピストン型1となるものと考えられる。こうした手順と同様にするため、本手法においても帰り荷輸送を有するパターンを先に推定することとした。

なお今後、OD貨物量から直接、船舶OD交通量を推計できるようにするために、本手法で与件としている第1トリップとなるODの船舶交通量を推計する手法を付加する必要がある。

また、第1トリップとなるODペアは、一般に内航貨物船が鉄鋼など比較的限られた品目の貨物を中心輸送しているため、こうした貨物の積み出し拠点となる港がベース港となる可能性が大きいものと考えられ、このことを利用することで比較的容易に抽出できるものと考えられる。

ところで、先に述べたように本手法では、第1トリップごとに帰り荷輸送を行う各ODの船舶交通量を推計し、それを連鎖パターンごとに集計することで連鎖パターンの推計量を得ることとしていた。そこで、帰り荷を行うODの船舶交通量から各連鎖パターンの推計量は次のようにして求めることとした。

図-2に示すように、ある船舶が i 港をベース港とし第1トリップを i 港から j 港へ行ったものとす

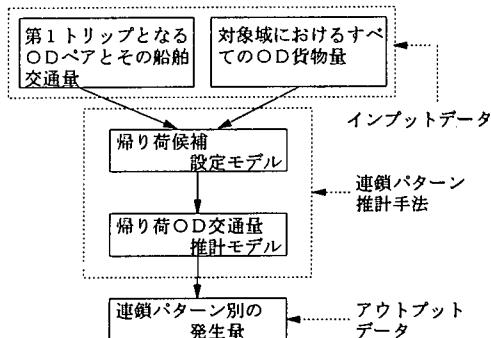


図-3 トリップ連鎖パターン推計手法のフロー

る。この時、 $k$  港からベース港である  $i$  港へ帰り荷輸送を行うとすると、 $j$  港から  $k$  港へは空船トリップを行うこととなり、三角型 1 のパターンとなる。また、 $l$  港から  $m$  港へ帰り荷輸送を行えば、 $j$  港から  $l$  港、 $m$  港からベース港である  $i$  港に、2 回の空船トリップを行う必要があり、四角型 1 のパターンとなる。このように、選択された帰り荷の OD と第 1 トリップとなる OD との関連から空船回航の現れ方を調べることで、その OD を帰り荷として選択するとどのような連鎖パターンになるかを特定することができる。

そこでこうしたことを利用して、帰り荷として選択された各 OD における船舶交通量を、その OD が特定された連鎖パターンごとに集計することで連鎖パターンごとの推計量を得る。

### (3) 連鎖パターン推計手法の手順

図-3 は本研究で提案するトリップ連鎖パターンの推計手法をフローとして示したものである。図に示すように、本手法は主として、帰り荷 OD 交通量を推計するための「帰り荷候補設定モデル」と「帰り荷 OD 交通量推計モデル」という 2 つのモデルから成っており、この推定結果から各連鎖パターンの推計量を得る。

#### ① 帰り荷候補設定モデル

本モデルでは、各第 1 トリップの OD ペアごとに、その OD ペアを第 1 トリップとする船舶が、帰り荷輸送を行う候補とする OD ペアを抽出する。先に述べたように各船舶は、輸送の効率性を考えながら帰り荷貨物を選んでおり、対象域のすべての OD 貨物を帰り荷貨物の候補としているわけではなく、特定の範囲内の OD 貨物を帰り荷の対象貨物としていると考えられる。そこで、本モデルにより帰り荷の候補となる OD ペアを第 1 トリップごとに抽出する。

#### ② 帰り荷 OD 交通量推計モデル

本モデルでは、帰り荷候補設定モデルによって得

られた帰り荷の候補となる OD ペアそれぞれに、各第 1 トリップからどれだけの船舶交通量があるかを推計する。この際、船舶交通量の OD 表には「0」の要素が多く見られることから、帰り荷の候補となる OD ペアの数が実際に帰り荷として選択される OD ペアの数よりも多く存在し、帰り荷 OD 交通量が「0」となる OD が多数存在することが考えられる。また 2. で述べたように、船舶交通は頻繁に発生するものではない。そこで、交通量にポアソン分布を仮定することを考え、こうした帰り荷 OD 交通量の推計に、交通量にポアソン分布を仮定したポアソン回帰分析を用いることとした。

これらの 2 つのモデルを通して得られた帰り荷 OD 交通量を、その帰り荷の OD ペアを選択した際の空船回航の現れ方から(2)で述べた方法により連鎖パターンを特定し、特定された連鎖パターンごとに集計する。こうすることで、第 1 トリップごとの帰り荷をともなう連鎖パターンの発生量を得ることができる。

そして最後に、第 1 トリップの OD における総船舶交通量から、算出した第 1 トリップごとの帰り荷輸送をともなう連鎖パターンの発生量の合計値を引くことにより、帰り荷輸送をともなわないピストン型 1 の発生量を得ることができる。

### (4) 使用データの概要

本研究では、こうしたトリップ連鎖パターン推計手法を実際のデータに適用することで、その有効性を確かめることとした。ここで使用するデータは、昭和 59 年 10 月 1 日から同年 10 月 31 日の 1 ヶ月間に(社)神戸海難防止協会(大阪湾交通システム調査研究委員会)によって、大阪湾とその周辺海域を航行する内航船舶を対象に行われた起終点調査の結果である<sup>9)</sup>。この内、本研究で分析対象としたのは、一般貨物船 557 隻で、そのサンプリング率(=サンプル隻数/全内航貨物船保有隻数)は 24.3% (=557 隻 / 2,293 隻) であった。また、対象船舶の船型分布を調べたところ、90.8% が総トン数 500 トン未満の船舶であった。

さらに、各船舶の起終点は、大阪湾とその周辺海域内は個々の港ごと 31 地点、それ以外の海域は各港をその港が所在する都道府県名で代表させ合計 36 地点、総計 67 地点を設定した。これによって、分析対象とする OD 表の大きさは 67 × 67 となった。

なお、表-1 および図-1 の結果もこのデータより得たものである。

## 4. 判別分析による帰り荷候補設定モデル

### (1) 帰り荷候補設定モデル

本研究で使用したデータでは、貨物流動量のあるODペアは全部で411ペアあった。あるODペアを第1トリップとする船舶は、この第1トリップのODペアを除く残りの410ペアを帰り荷の対象とすることはできる。しかしながら、これら410ODペアの中には、そのODペアを選択すると空船回航の長さが長くなり、輸送効率が低下したり、貨物量が少なく帰り荷の対象となりにくいODが存在するものと考えられ、各船舶がこれらすべてを帰り荷の候補としているとは言い難い。そこでここではまず、多くのODペアの中から帰り荷の候補となるODを設定するためのモデルを構築する。

本研究では、こうしたモデルの構築に、それぞれのODが帰り荷貨物のODとして選択されるか否かを外的基準とした判別分析を用いることとした。すなわち、第1トリップとなるODペアは全部で62ODペアあり、各第1トリップとなるODペアは、貨物流動量のある410ODペアの中から帰り荷候補となるODペアを選択することとなる。したがって、延べ25,420 (=410×62) ODペアについて帰り荷の候補として選択されるか否かを判別分析により分析することとした。

また、構築するモデルでは、帰り荷貨物の選択は輸送効率、すなわち、選択したODの貨物量（単位：トン）やその距離（単位：マイル）、および、そのODを選択した際に行われる空船回航の長さなどを考慮して行われるものと考え、次の2つのモデルを考えた。

まず、モデルIは、帰り荷貨物の選択されやすさが、そのODの貨物量と距離に比例し、そのODを選択した際に行われる空船回航の長さに反比例するものとして、次式で求められるものとした。なお、モデル式において各変数を対数化しているのは、比例や反比例の関係を線形化するためである。

#### a) モデルI

$$z = \alpha \cdot \ln(\text{空船回航比}) + \beta \cdot \ln(\text{貨物の輸送距離比}) + \gamma \cdot \ln(\text{OD貨物量}) + \kappa$$

ここで、

$z$  は判別分析の外的基準

$$\text{空船回航比} = (\text{空船回航長}/\text{第1トリップ長}) + 1$$

(空船回航長とはバターン内の空船距離の合計を意味する。)

$$\text{貨物の輸送距離比} = \text{帰り荷貨物の輸送距離}/\text{第1トリップ長}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \kappa$  はパラメータ

ここで、空船回航比において「+1」を行っているのは、ピストン型2のパターンとなる帰り荷ODでは、空船距離が全くなく対数化が不能となってしまうためである。またこのような操作を行っても上式の変数における比例・反比例の関係は損なわれないものと考えられる。

また、モデルIIは帰り荷貨物の選択されやすさがそのOD貨物量に比例し、帰り荷輸送を行う際に船舶が航行する総距離（以下、帰り荷総距離），および、そのODを選択した際に行われる空船回航の長さに反比例すると考え、次式で求められるものとした。

帰り荷総距離が帰り荷貨物としての選択しやすさに反比例すると考える理由は次の通りである。各船舶はベース港で積まれる貨物を主要貨物としており、各船舶は主要貨物の輸送スケジュールに支障を来さないように運航されていると考えられる。そのため、帰り荷輸送を行う際には、それにともなう空船回航を短くするだけではなく、帰り荷輸送を行うODもベース港から比較的近い港を対象に行われるものと考えられ、これらにより、各船舶は帰り荷総距離を短くするように運航されているものと考えた。

さらにここでも先と同様、変数間の比例や反比例の関係を線形化するため式を対数化している。

#### b) モデルII

$$z = \alpha \cdot \ln(\text{帰り荷空船率}) + \beta \cdot \ln(\text{帰り荷総距離比}) + \gamma \cdot \ln(\text{OD貨物量}) + \kappa$$

ここで、

$z$  は判別分析の外的基準

$$\text{帰り荷空船率} = (\text{空船回航長}/\text{帰り荷総距離}) + 1$$

(帰り荷総距離とは帰り荷輸送にともなう貨物の輸送距離と空船回航長の合計を意味する。)

$$\text{帰り荷総距離比} = \text{帰り荷総距離}/\text{第1トリップ長}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \kappa$  はパラメータ

ここで、帰り荷空船率において「+1」を行っている理由は、先の空船回航比と同様に、ピストン型2のパターンとなる帰り荷ODでは、空船距離が全くなく対数化が不能となってしまうためである。

また、モデルII式においては「帰り荷総距離」が第1項の分母と第2項の分子に存在し、第1項と第2項の変数は厳密には独立であるとは言えない。しかしながら、後述するモデルの推定結果を見ると、いずれのパラメータの符号も理論的な整合性もある他、いずれのF値の値も充分大きいため、これらの間に強い相関があるとは言えないものと判断した。

なお、これらの他にも帰り荷OD選択の要因として船舶の大きさなどの属性も考えられるが、使用データの限界やモデルの簡略化のためにより、モデルの

表-2 判別分析による帰り荷候補設定モデルI

変数名	判別係数	F 値
空船回航比	-6.5074	638.831 **
貨物の輸送距離比	1.6607	57.024 **
OD貨物量	0.4758	98.630 **
定数	0.5794	—
各群の重心	3.5337 -0.0317	選択されたOD されなかつたOD
正判別率(%)	81.416	

注1) 判別関数の式は、

$$z = \alpha \cdot \ln(\text{空船回航比}) + \beta \cdot \ln(\text{貨物の輸送距離比}) + \gamma \cdot \ln(\text{OD貨物量}) + \kappa$$

注2) F値の\*は有意水準5%で、\*\*は有意水準1%で有意であることを意味する。

注3) 正判別率は、帰り荷ODとして選択されたODのみを対象とした正判別率を載せた。

変数としては取り扱わなかった。

## (2) モデルの推定結果

表-2および表-3はそれぞれモデルIおよびモデルIIの推定結果を示したものである。これらの表における正判別率は、通常のすべてのサンプルを対象とした判別率ではなく、帰り荷ODとして選択されたODペアのみを対象とした判別率（=帰り荷ODとして選択されているODペアの内で、判別関数によつても帰り荷候補として判別されたODペア数/帰り荷ODとして選択されているODペアの総数）を載せている。これは、本モデルの目的が全サンプルを帰り荷ODとして選択されるか否かを判別するところにあるのではなく、むしろ、すべてのODの中から、帰り荷の候補となり得るODを抽出しようするところにあるためである。

これらの表によると、いずれのモデルについても各変数は統計的に有意となっており、両モデルとも良好な結果を得ることができた。また、F値の値を見る限り、モデルIIの各変数の方が大きな値を示しており、モデルIIの方が推定精度が高いように思われる。しかしながら、本モデルの目的は、先も述べたように、帰り荷の候補となるODを抽出しようとするところにあるため、帰り荷ODとして選択されたODのみを対象とした正判別率に着目することとした。その結果、本研究ではこの正判別率の高いモデルIを、帰り荷候補設定モデルとして採用することとした。

なお、このモデルにより帰り荷候補とされた延べODペア数は4,506ペアで、一つの第1トリップあたりの平均で約72.7ODペアとなった。従って、このモデルにより帰り荷の候補として抽出されたODペアは全体の17.7% (=100×72.7ペア/410ペア)

表-3 判別分析による帰り荷候補設定モデルII

変数名	判別係数	F 値
帰り荷空船率	-12.5440	707.645 **
帰り荷総距離比	-2.3817	198.718 **
OD貨物量	0.4314	65.421 **
定数	4.2154	—
各群の重心	4.3348 -0.0388	選択されたOD されなかつたOD
正判別率(%)	76.991	

注1) 判別関数の式は、

$$z = \alpha \cdot \ln(\text{帰り荷空船率}) + \beta \cdot \ln(\text{帰り荷総距離比}) + \gamma \cdot \ln(\text{OD貨物量}) + \kappa$$

注2) F値の\*は有意水準5%で、\*\*は有意水準1%で有意であることを意味する。

注3) 正判別率は、帰り荷ODとして選択されたODのみを対象とした正判別率を載せた。

にしばられたことになる。また、帰り荷候補とされた延べODペアである4,506ペアの内、対応する第1トリップのODペアから交通量が1隻以上あるODペアは184ペアで、全ペアのわずか4.06%であった。

## 5. ポアソン回帰分析による帰り荷OD交通量推計モデル

### (1) 帰り荷OD交通量推計モデル

ここでは、先の帰り荷候補設定モデルにより、帰り荷の候補として選択されたODを対象として、そのODの交通量をポアソン回帰分析を用いた推計モデルにより推計する。

本研究で推計しようとする帰り荷OD交通量は、先に帰り荷候補設定モデルで推定された4506ODペアについて行われるが、先にも述べたようにこの内、対応した第1トリップのODペアから交通量があるODペアはわずか約4%で、残りの96%は対応した第1トリップからの交通量が「0」となっている。こうしたデータを通常の重回帰分析で分析した場合、以下のような問題が生じる。

まず第一に、一般に交通量を推計するモデル式は非線形となることが多く、通常こうした式を対数化することで線形化し、最小二乗法によりパラメータを推定する。しかしながら、交通量の観測値に「0」が存在する場合、「0」を対数化することができないため、その取り扱いが問題となる。

また第二に、最小二乗法によるパラメータの推定では、推定したパラメータを統計的に検定する際、交通量を対数化した値に正規分布を仮定する、すなわち、交通量に対数正規分布を仮定することで検定を行っている場合がある。しかしながら、船舶交通

の希少性を考えた場合、船舶交通が対数正規分布に従っているとは必ずしも言い難い。

そこで本研究では、船舶交通の希少性をその交通量にポアソン分布を仮定し、パラメータの推定には従属変数にポアソン分布を仮定したポアソン回帰分析を適用することを試みた。

本研究で構築する帰り荷OD交通量推計モデルは、第1トリップとなるODペアとその船舶交通量および帰り荷候補設定モデルにより帰り荷候補となるODの貨物量を与件として、任意のODを第1トリップとする船舶が帰り荷輸送として選択したODそれぞれに延べ何隻船舶が通行するかを求めるようとするものである。そして、こうして得られた各ODペアごとの船舶交通量を、3.(2)で述べた方法により特定した連鎖パターンの各パターンごとに集計することで、帰り荷輸送を有した連鎖パターン、すなわち、ピストン型2、三角型1、2、四角型1の推計量を得る。

本モデルは次のように定式化した。まず、 $k$ 番目のODペアを第1トリップとして*i*港から*j*港へのODを帰り荷輸送として通行する船舶交通量を $\lambda_{ij}$ とする。本モデルではこの $\lambda_{ij}$ が期待値 $\lambda_{ij}$ を持つポアソン分布に従うものとする。すなわち、

$$p(\lambda_{ij}) = \frac{\lambda_{ij}^k y_{ij}}{k!} \exp(-\lambda_{ij})$$

であるとする。またこの時、連鎖パターンの形成メカニズムより、各船舶は空船回航の距離をできるだけ短くするなど輸送の効率性を考慮して運航されている。そこでここでは、こうしたことをモデル化するに当たり、帰り荷候補設定モデルと同様の考え方に基づき、次の2つのモデルを考えた。

まず、モデルIは帰り荷候補設定モデルIと同様な考え方に基づき、帰り荷船舶交通量の期待値 $\lambda_{ij}$ がそのOD貨物量とそのOD距離に比例し、そのODを選択した際に行われる空船回航の長さに反比例するものとして、次式で求められるものとした。

#### a) モデルI

$$\lambda_{ij} = K \frac{C_{ij}^{\beta_1} D_{ij}^{\beta_2}}{E f_{ij}^{\beta_3}} G^{\beta_4}$$

ここで、

$K$ : 第1トリップ番号

$i, j$ : 帰り荷ODの起終点番号

$C_{ij}$ : 港*i*, *j*間のOD貨物量

$G$ :  $k$ 番目の第1トリップのOD交通量

$E f_{ij}$ : 空船回航率 = (空船回航長

/帰り荷総距離) + 1

(空船回航長とはパターン内の空船距離の合計を意味する。)

$D_{ij}$ : 貨物の輸送距離比  
= 帰り荷貨物の輸送距離

/第1トリップ長

$\kappa, \beta_j$ : パラメータ

上式を両辺の対数をとり変形すると下式のようになる。

$$\begin{aligned} {}_k \lambda_{ij} &= \exp (\beta_0 + \beta_1 \ln (C_{ij}) + \beta_2 \ln ({}_k D_{ij}) \\ &\quad + \beta_3 \ln ({}_k G) - \beta_4 \ln ({}_k E f_{ij})) \\ \beta_0 &= \ln (\kappa) \end{aligned}$$

これらの式から最尤推定法に基づきパラメータ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ および $\kappa$ を推定する。

また、モデルIIは帰り荷候補設定モデルIIと同様な考え方に基づき、 $\lambda_{ij}$ がそのOD貨物量に比例し、帰り荷輸送を行う際に船舶が航行する総距離(以下、帰り荷総距離)、および、そのODを選択した際に行われる空船回航の長さに反比例すると考え、次式で求められるものとした。

#### b) モデルII

$${}_k \lambda_{ij} = K \frac{C_{ij}^{\beta_1}}{T_{ij}^{\beta_3} E t_{ij}^{\beta_4}} G^{\beta_2}$$

ここで、

$K$ : 第1トリップ番号

$i, j$ : 帰り荷ODの起終点番号

$C_{ij}$ : 港*i*, *j*間のOD貨物量

$G$ :  $k$ 番目の第1トリップのOD交通量

$E t_{ij}$ : 空船回航率 = (空船回航長

/帰り荷総距離) + 1

(帰り荷総距離とは帰り荷輸送にともなう貨物の輸送距離と空船回航長の合計を意味する。)

$T_{ij}$ : 帰り荷総距離比 = 帰り荷総距離

/第1トリップ長

$\kappa, \beta_j$ : パラメータ

上式を両辺の対数をとり変形すると下式のようになる。

$$\begin{aligned} {}_k \lambda_{ij} &= \exp (\beta_0 + \beta_1 \ln (C_{ij}) + \beta_2 \ln ({}_k G) \\ &\quad - \beta_3 \ln ({}_k T_{ij}) - \beta_4 \ln ({}_k E t_{ij})) \\ \beta_0 &= \ln (\kappa) \end{aligned}$$

これらの式から最尤推定法に基づきパラメータ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ および $\kappa$ を推定する。

#### (2) モデルの推定結果と重回帰分析との比較

上述のような2つの帰り荷OD交通量推計モデルの推定結果を示したものが表-4および6である。

表-4はモデルIを表-6はモデルIIの結果を示し、それぞれの表には同様のモデルを重回帰分析を用いて推定した結果も載せている。ここでは、いずれの重回帰分析の推定においても帰り荷OD交通量の実

表-4 モデルIの推定結果

推定モデル 説明変数	ポアソン 回帰分析	重回帰分析
空船回航比	-6.1712 (-17.710)	-0.6185 (-4.497)
貨物の輸送距離比	3.1119 ( 4.423)	0.3122 ( 1.316)
OD貨物量	0.5885 ( 11.911)	0.07822 ( 2.373)
第1トックの OD交通量	0.9292 ( 18.816)	0.26685 ( 7.263)
定数 ( $\beta_0$ )	-8.9970 (-14.055)	0.1605 ( 0.680)
残尤離度 (残自由度)	1430.345 ( 4501)	—
重相関係数	—	0.5730

注) 説明変数の () 内の値は  $t$  値を意味する。また、  $\beta_0 = \ln(\kappa)$  であるため、  $\kappa = \exp(\beta_0)$  により求めることができる。

表-5 推定値と実測値の単回帰による  
モデルIの推定精度の分析

推定モデル 説明変数	ポアソン 回帰分析	重回帰分析
切片	-0.0446	-0.6815
傾き	1.6237	0.3782
相関係数	0.6063	0.2365

測定値が「0」のODについては対数化が不能であるため分析対象から除いて行った。なお、交通量が「0」のODに非常に小さな値 ( $1.0 \times 10^{-10}$ ) を仮定した重回帰分析も行ったが、相関係数はいずれも0.3にも満たず、しかも船舶交通量の推定値が「1.0」を越えるものが全く見られず、良好な結果を得ることができなかった。

また、これらの表のポアソン回帰分析における「残尤離度」とは、重回帰分析の残差平方和に相当し、ポアソン回帰ではパラメータの推定には最尤推定法は用いるが、これは「残尤離度」を最小にするようにパラメータを推定することと同値であり、ポアソン回帰の枠組みでモデルの比較を行うときに用いられる値である。なお、「残自由度」は残尤離度を正規化するのに用いられる<sup>10)</sup>。

表-5および7はこれらのモデルの推定精度をモデルの推定値と実測値の単回帰によって確かめたものである。本モデルで推定するのは帰り荷OD交通量であるが、本モデルで得られた交通量は、3.

(2) 述べた方法により連鎖パターンを特定することで、帰り荷をともなう連鎖パターンの推計量となる。言い換えれば、本モデルの推定値は帰り荷をともなうすべての連鎖パターンを同時に推定しているものと考えられる。したがって、これらの表における推定精度の分析は、本手法による帰り荷をともなうすべての連鎖パターンの推定精度の検証を同時に行っているものと考えられる。

まず、表-5および7の推定値と実測値の単回帰

表-6 モデルIIの推定結果

推定モデル 説明変数	ポアソン 回帰分析	重回帰分析
帰り荷空船率	-9.1383 (-13.042)	-0.9393 ( -3.803)
帰り荷総距離比	-0.1065 ( -0.293)	-0.0132 ( -0.105)
OD貨物量	0.5613 ( 11.271)	0.0518 ( 2.373)
第1トックの OD交通量	0.9145 ( 18.493)	0.26685 ( 7.216)
定数 ( $\beta_0$ )	-6.4466 (-14.559)	0.4011 ( 2.229)
残尤離度 (残自由度)	1413.482 ( 4501)	—
重相関係数	—	0.5791

注) 説明変数の () 内の値は  $t$  値を意味する。また、  $\beta_0 = \ln(\kappa)$  であるため、  $\kappa = \exp(\beta_0)$  により求めることができる。

表-7 推定値と実測値の単回帰による  
モデルIIの推定精度の分析

推定モデル 説明変数	ポアソン 回帰分析	重回帰分析
切片	-0.0436	-0.7055
傾き	1.6102	0.3908
相関係数	0.6278	0.2430

によるモデルの推定精度についてみると、いずれのモデルにおいてもポアソン回帰の相関係数の方が重回帰分析のそれよりも大きくなっているのがわかる。また、切片においてもポアソン回帰ではいずれのモデルも-0.044程度と「0」に近い値を示しているが、重回帰のそれはいずれも-0.7程度と「0」よりも小さな値を示している。これは重回帰分析により推定したモデルでは、実測値が「0」の値のODを除いてパラメータを推定しているためである。

このように、本研究のデータのように「0」の値の非常に多いデータでは、ポアソン回帰分析の方が通常の重回帰分析よりも良好な結果を得ることができたと考えられる。

しかしながら、いずれのポアソン回帰の傾きも1.6程度と1.0より少し大きな値を示している他、相関係数の値も0.6程度と充分な値であるとは言えない。こうした結果となった理由は、本手法が隻数単位で連鎖パターンの発生量を推計しているが、船舶ではその船型により輸送する貨物量も大きく異なり、本手法のように貨物量を説明変数として用いた場合、こうした隻数単位での推計に限界があったことなどが考えられる。

こうしたことから今後は、ここで用いた説明変数以外にも、船舶の大きさなど船舶の属性に関する変数などを考慮することや、隻数単位での推計ではなく、たとえば、船舶総トン数単位で推計する必要があるものと思われる。

このように、本手法による帰り荷OD交通量、す

なわち、帰り荷をともなう連鎖パターンの推定結果は多少精度が低くなっているものの、重回帰分析に比べより良好な結果を得ることができるなど、有効性があるものと考えられる。

最後に、モデル間によるポアソン回帰分析の推定結果を比較すると、モデルⅡでは「帰り荷総距離比」のt値が小さく統計的に有意とはならなかったものの、残尤離度の値はモデルⅠよりも小さな値を示していることに加え、実測値と推定値との単回帰の相関係数はモデルⅡの方がわずかではあるが高くなっていることがわかる。こうしたことからここでは、モデルⅡは統計的に有意ではない変数を含んでいるが、モデル全体としての説明力や精度を示す残尤離度の値および推定精度を示す単回帰の相関係数の値から、モデルⅠよりもわずかではあるが優れていると考えることとした。

そこで以下では、「帰り荷候補設定モデルⅠ」を用いて帰り荷候補のODを抽出し、「帰り荷OD交通量推計モデルⅡ」を用いて帰り荷OD交通量を推計する方法を用いることで、さらに本手法の有効性について分析を試みた。

## 6. 連鎖パターン発生量による推計手法の有効性の検討

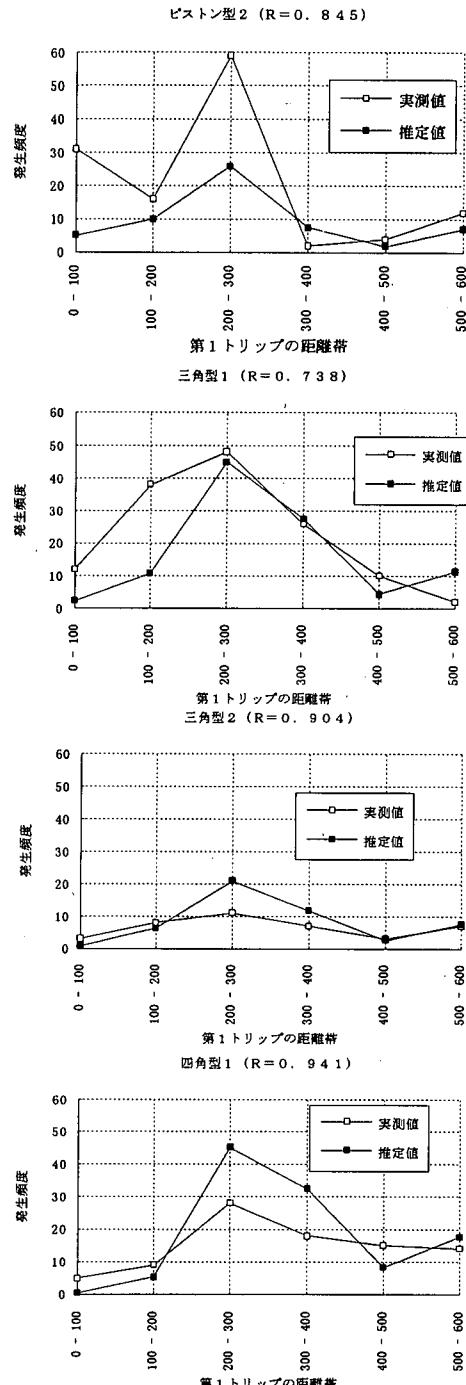
5. では、連鎖パターン推計手法を構成する2つのモデルの推定を行うとともに、それらの推定精度について検討した。次にここでは、第1トリップ長の距離帯ごとに各連鎖パターンの発生量や構成比率について実測値と推定値を比較する。なお、推定値は、5. で得られた帰り荷OD交通量から3. (2) で述べた方法により、帰り荷ODごとに連鎖パターンを特定し、それらを第1トリップの距離帯ごとに集計することができる。

各連鎖パターンの発生比率は、各船舶が空船回航ができるだけ短くするという連鎖パターンの形成メカニズムによって、その第1トリップ長により大きく影響されるという特徴があった。そこでここでは、本手法により推計された各連鎖パターンの発生比率が、こうした特徴を有しているかどうかという視点から本手法の有効性を検討することとした。

### (1) 第1トリップ長ごとの各連鎖パターンの発生量の推計

#### a) 帰り荷輸送をともなう連鎖パターンの推計

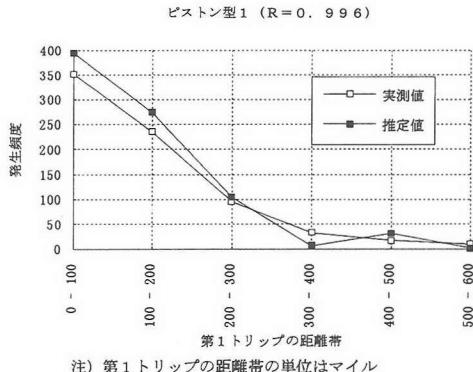
トリップ連鎖パターン推計手法を用いて、帰り荷輸送をともなう連鎖パターン、すなわち、ピストン型2、三角型1および2、四角型1それぞれの推定



注) Rの値は推定値と実測値の相関係数を意味する。  
なお、第1トリップの距離帯の単位はいずれもマイル

図-4 各連鎖パターンの実測値と推定値の比較

発生量を第1トリップの距離帯ごとに図示したのが図-4である。なお、図では実測値も同時に示すとともに、距離帯ごとに6つのサンプルではあるが、参考までに実測値と推定値の相関係数も示している。



注) 第1トリップの距離帯の単位はマイル

図-5 ピストン型1の発生量の実測値と推定値の比較

これによれば、グラフの概形は多少実測値と推定値に差があるパターンがあるものの、全体としては大きな違いがないことがわかる。また、相関係数も最も低い三角型1で0.738といずれも良好な値を示している。これらのことから、本研究で開発したトリップ連鎖パターン推計手法による第1トリップの距離帯ごとの各連鎖パターンの発生量は、その観測値とよく合致しているものと考えられる。

なお、実測値と推定値に見られる多少の差は、5.(2)でも述べたように、本手法が船舶の船型を考慮したものでないことなどによるものと考えられる。

#### b) ピストン型1の発生量の推計

次に、こうした結果をもとに帰り荷輸送とともにない連鎖パターン、すなわちピストン型1の発生量について推計する。

ピストン型1の推計は次のようにして行った。まず、各第1トリップのODペアごとにトリップ連鎖パターン推計手法により帰り荷輸送をともなう連鎖パターンの発生量を合計する。そしてこれを第1トリップのODにおける総船舶交通量（そのODペアを第1トリップとしている連鎖パターンの合計値）より引けば、その残りがピストン型1の発生量となる。

図-5はこうして推計したピストン型1の発生量を第1トリップの距離帯ごとに図示したものである。また、この図には図-4と同様に実測値も図示するとともに、推定値と実測値の相関係数も示した。

図-5を見ると、グラフの概形は非常によく似ている他、実測値と推定値の相関係数も0.996と高い値を示しているのがわかる。また、200マイル以下の距離帯ではピストン型1の発生量が他のパターンに比べて圧倒的に多いため、ピストン型1の推定誤差と他のパターンの推定誤差は必ずしも比較できない。そこで、他のパターンの発生量の合計がピストン型1のそれよりも多くなっている200マイル以上

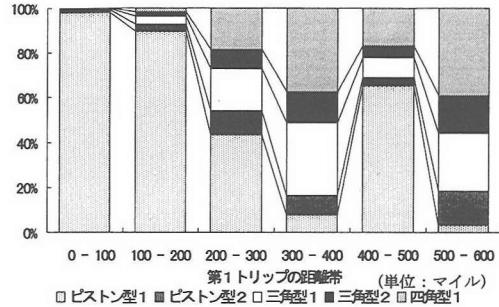


図-6 第1トリップ長の距離帯別による各連鎖パターンの推定構成比率

表-8 各連鎖パターンの推定比率と実測比率の相関係数

連鎖パターン	相関係数
ピストン型1	0.860
ピストン型2	0.770
三角型1	0.517
三角型2	0.916
四角型1	0.785
全 体	0.881

の距離帯について見ると、その誤差は他のパターンと比べてもさほど大きなものとなっていない。このように、ピストン型1の推定結果についても良好な結果を得ることができたと考えられる。

#### (2) 第1トリップ長ごとの各連鎖パターンの構成比率の推計

図-6は、上述のようにして得られた各連鎖パターンの発生量から、第1トリップ長ごとの各連鎖パターンの構成比率を求め図示したものである。またこれらの実測値は図-1であるので、表-8では参考に、図-1における第1トリップの距離帯ごとの各連鎖パターンの発生比率の実測値と図-6におけるそれとの相関係数を各連鎖パターンごとに表にした。

まず、実測値である図-1と本手法による推定結果である図-6を比較すると、推定値のグラフの概形も、400-500マイルの距離帯でピストン型1の比率が実測値に比して少し高くなっていることや、逆に四角型1の比率が低くなっていることを除けば、比較的両者は似通っていることがわかる。また、表-8の各連鎖パターンの相関係数は三角型1の0.517を除いて、いずれも0.75以上の値を有している。このように、連鎖パターンの構成比率の推計値は実測値に比較的よく合致していると考えられる。

このように、本研究で開発したトリップ連鎖パターンの推計手法は、5.(2)で述べたように多少推計精度が低くなっていたものの、連鎖パターンの形

成メカニズムによる、第1トリップ長により連鎖パターンの発生比率が大きく影響されるという特徴をよく説明していることを確かめることができた。

## 7. おわりに

本研究では、内航一般貨物船を対象に、貨物流動とそれを輸送する船舶のODの不一致を解決するため、内航貨物船の運航特性やそのメカニズムを考慮することで、より現実の運航形態に近い形で再現することを考えた。そして、こうしたことを船舶OD交通量の推計手法の中で実現する部分として、連鎖パターンの形成メカニズムを考慮した「連鎖パターンの推計手法」を開発することを目的としていた。

以下では、まず本研究で得られた成果を要約する。  
①本研究では、トリップ連鎖パターンの発生量を推計する手法を開発した。本手法は、連鎖パターンの形成メカニズムを考慮しているところに大きな特徴があった。また、本手法は「帰り荷候補設定モデル」と「帰り荷OD交通量推計モデル」の2つのモデルからなっており、前者は、連鎖パターンの第1トリップごとに帰り荷の候補となるODペアを抽出するもので、後者はその結果得られた帰り荷の候補となるODペアそれぞれに各第1トリップからどれだけの船舶交通量があるかを推計するものであった。  
②こうした2つのモデルを推定した結果、いずれのモデルも良好な推定精度が得られた。特に、「帰り荷OD交通量推計モデル」では、船舶交通量の希少性をポアソン分布で表現したポアソン回帰分析を用いることで、従来の重回帰分析による推定結果に比べ精度の高い推定結果を得ることができた。  
③本手法により第1トリップ長ごとの連鎖パターンの発生比率を求めたところ、これらは連鎖パターンの形成メカニズムによって引き起こされる、第1トリップ長により連鎖パターンの発生比率が大きく影響されるといった特徴をよく説明しており、こうしたことからも本手法の有効性を確かめることができた。

今後の課題としては以下の諸点があげられる。

- ①帰り荷OD交通量推計モデルに、船舶の大きさや積載効率などの要因を新たに説明変数として加えることで、モデルの推計精度を向上する必要がある。
- ②本研究では対象外としたベース港および第1トリップとなるOD交通量を推計する手法を開発し、本モデルをより発展させることで、貨物量から船舶のOD交通量を直接推計する手法を開発して行きたい。
- ③本研究では連鎖パターンの推計を船舶の隻数単位で推計したが、こうした船舶交通需要の推計に際しては船型も大きな要素となってくる。そのため、今後は、船舶の需要量を隻数のみではなく総トン数で推計するなど、船型も考慮した推計手法の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 小谷通泰、岡山正人：内航一般貨物船におけるトリップ連鎖パターンの形成メカニズムに関する研究、土木学会論文集、No. 506/IV-26, pp. 69~76, 1995年。
- 2) たとえば、  
仙台都市圏総合交通計画協議会：平成元年度総合都市交通体系調査 仙台都市圏物資流動調査報告書4 将来予測編、1990年。
- 3) 佐野可寸志、小根山裕之：都市内物流における貨物車交通量変換モデル、土木計画学研究論文集、No. 13, pp. 649~655, 1996年。
- 4) たとえば、  
Aitkin, M. A., Anderson: *Statistical Modeling in GLIM*, Oxford University Press, pp. 215~228, 1989  
柴田訳、Sと統計モデル データ科学の新しい波、  
J. M. Chambers, T. J. Hastie編、共立出版, pp. 203~264, 1994年。
- 5) 大橋靖雄、浜田知久馬：生存時間解析、東京大学出版 pp. 228~235, 1995年。
- 6) 飯田恭敬、岡田憲夫編著：土木計画システム分析-現象分析編-, 森北出版, pp. 123~132, 1992年。
- 7) 古屋秀樹、西井和夫、大矢正樹、元田智子：交通機関分担率を考慮した観光入り込み客数予測モデルに関する基礎的研究、土木計画学研究・講演集17, pp. 445~448, 1995年。
- 8) 前掲1)
- 9) 神戸海難防止研究会：内航船舶による貨物輸送の実態解析報告書、1984年。
- 10) 前掲4)

(1997. 5. 29受付)

## A METHOD OF ESTIMATING TRIP PATTERNS BY COASTAL CARGO SHIPS

Masato OKAYAMA and Michiyasu ODANI

We have analyzed a mechanism for trip patterns generation by coastal cargo ships on the basis of OD survey, and it was made clear that ships are operated centering on the first trip from origin and their trip patterns are specified by choosing one among alternative OD pairs for return cargo transportation.

The purpose of this study is to develop a method of estimating trip patterns by coastal cargo ships considering the generation mechanism described above. In this method, Poisson Regression Analysis is employed instead of Multi Regression Analysis, considering the scarcity of marine traffic.