Ⅳ-59　待ち行列理論を用いた交通解析とその応用に関する基礎的研究

京都大学大学院　学生員　○喜多 秀行
京都大学工学部　正 員　長尾 義三

1．はじめに

道路・航路等の路線施設の通行に要する時間は，その施設の整備条件と交通量に依存する。これらの関係が明らかになれば，費用便益理論等の評価基準を用いて最適交通容量すなわち最適容量を求めることができる。この種の研究は，従来，観測またはシミュレーションによって経験的に，各施設異なって求められていたが，本研究は，各交通施設に一貫した評価基準の適用可能な統計的手法を用いた交通解析理論モデルを提案し，容量決定の基礎資料を得ようとするものである。今回は既に発表済み[1]の道路に引きつづき，航路への拡張を試みる。

2．航路への拡張とモデルの概要

船舶は，通常シフトによる運航を行ないながら定速航行している。これは道路と異なり面交通であること，および速度変化に大きな時間遅れを伴なうためであるが，このような交通流に対しても道路交通と同様"航行中の待ち時間"を考えることにより遅れを把握できないかと考え，アプローチを行なった。

ここで，船舶の規格速度と船首間隔とを想定する。規格速度は，道路のように路線固有のものが存在しないため，個々の船舶の航海速度（Full）を規格速度とする。また，船首間隔は垂線間長と船間距離の和として与えられ，船間距離は船舶の速度・垂線間長・潮流・視程などより定まる。

さて，道路交通では車種にかかわらず車頭間隔・規格速度がほぼ一定であったため，単純なM／M／S型待ち行列モデルで遅れを解析することができた[1]。しかし，海上交通では船首間隔・規格速度に大きなばらつきがあり，M／M／Sでは解析できない。したがって以下に示す最低速船への追従と集団到着待ち行列系への近似を考える。各船舶は最低速船に追従し，同じ速度で航行するとの仮定のもとに，各船舶の遅れを，最低速船規格速度への減速によるものと，混雑のため最低速船が規格速度で航行できないことによるものの和として取り扱おうとするものである。ただ，この考え方は船舶の輻輳時には実際現象に近いものと思われるが，交通量が少ない時には当然各船固有の規格速度で航行しているため，遅れを過大に見積もることとなる。さらに，階級i（解析に際しては簡単のため船種・船型を数階級に分類し，各階級に属する船舶の平均的な船舶諸元をもってその代表値として扱う）の船舶の有する船首間隔をr_i，最低速船の規格速度をV_0とすると，サービス時間t_{si}，サービス率μ_iは(1)(2)式で与えられるが，r_iのとる値が離散的でかつ範囲が広いため，ある基本長r_0（各r_iの公約数）を考え，(3)式で与えられるj_iを1集団内の客数，(4)式で与えられるt_{s0}をサービス時間とする集団到着待ち行列系を考える。そして，この集団に属する全ての客へのサービスが終了した時点で，この船舶に対するサービスが終了した（系を通過し終えた）とするものである。なお，サービス時間の分布は理論的には定常分布となるが，解析の容易さから指数分布を仮定する。この場合，利用者側に有利にはたらく。

$$t_{si} = \frac{r_i}{V_0} \quad \cdots (1) \qquad \mu_i = \frac{1}{t_{si}} \quad \cdots (2) \qquad j_i = \frac{r_i}{r_0} \quad \cdots (3) \qquad t_{s0} = \frac{r_0}{V_0} \quad \cdots (4)$$

集団到着待ち行列系の，平衡状態における状態方程式が(5)式である。ここに窓口数Sは横方向船間距離の平均と航路幅との比を整数化したものである。

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1 & \\ 0 = -(\lambda + n\mu) P_n + (n+1)\mu P_{n+1} + \sum_{j=1}^{n} P_{n-j} \cdot C_j \cdot \lambda & (1 \le n \le S-1) \\ 0 = -(\lambda + S\mu) P_n + S\mu P_{n+1} + \sum_{j=1}^{n} P_{n-j} \cdot C_j \cdot \lambda & (S \le n) \end{cases} \quad \cdots (5)$$

λは集団の平均到着率であり，ここでは当該航路の単位時間交通量である。到着はポアソン到着とする。C_iは階級での船舶混在率である。この連立方程式より各状態確率を求めると，客1人あたりの平均待ち時間W_qは，

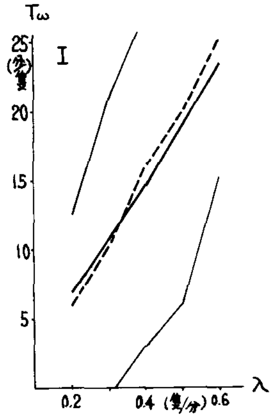
$$W_q = \frac{1}{\lambda}\sum_{n=s}^{\infty}(n-s)P_n \qquad \cdots (6)$$

で得られる。1集団（すなわち1船舶）あたりの平均待ち時間T_Qは(7)式で与えられ，一方高速船がV_0で航行するための平均遅れT_ℓは，航路長をLとすると(8)式で与えられるから，結局総遅れ時間T_wは，T_QとT_ℓの和として表わされる。

$$T_Q = W_q \cdot \sum_i j_i \cdot C_i \qquad \cdots (7) \qquad\qquad T_\ell = \sum_i C_i \cdot \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_i}\right) \cdot L \qquad \cdots (8)$$

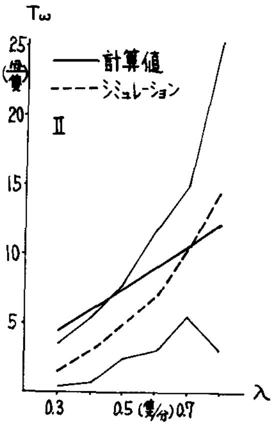
3，計算例

航路における交通量－遅延時間の関係を詳しく観測した資料がないため，(株)日建設計の手で備讃瀬戸を対象に実施されたシミュレーション結果[2]と計算値との比較を行なう。シミュレーションは，船種船型（3船種5船型計9種類）構成の違いによって10ケース行なわれており，それぞれ航路幅200 m，350 m，500 mに対する交通量と遅延時間との関係が求められている。これらの要因分類と示されている船舶諸元から総遅れ時間t_wを計算し，比較・図示したものが図I～Vである。I～IIIは同一ケース（Case 3）で航路幅の違うもの，II・IV・Vは航路幅が同じ（350 m）でケースの異なるものである。



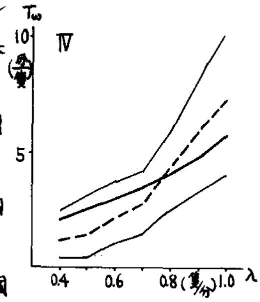
4，考察

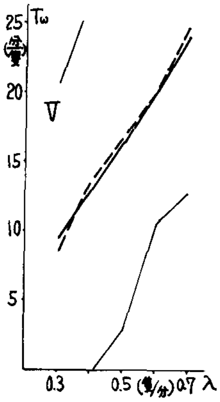
到着率の小さいところではシミュレーション結果が計算値をかなり上回っているが，これは高速船が最低速船に追従するという仮定が，交通量の少ない時ほど成り立たないことによるものであろう。逆に，到着率の大きいところでは，どれもやや計算値がシミュレーション結果より小さくなっている。これは本解析法が単路部を念頭に置いたものであるのに対し，交差を含む航路区間（延長14 km）についてなされているため，横断交通の影響が出ているのであろう。したがって，航路延長が短かい程横断交通の影響は小さくなり，精度もあがるものと推察される。以上，問題もあるが，細線で示した標準偏差の大きさとも比較して，現象の説明は可能と考えている。

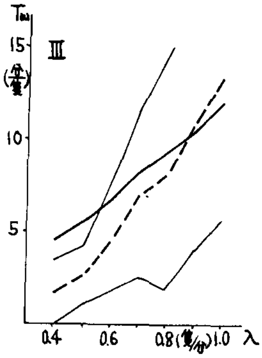


5，おわりに

航路における交通解析は，そのほとんどをシミュレーションに頼っている。本報告で示した解析法は精度的にも十分ではないが，シミュレーションに代わる交通解析の方法を示したものと言えよう。







(1) 長尾・喜多「待ち行列理論を用いた交通解析とその応用に関する基礎的研究」第32回土木学会全国大会講演概要集，S 52.

(2) (株)日建設計「船舶交通容量調査報告書（I），(II)」 S.45，S.46