

13. 待ち行列のカオス性から考察する空域容量

機上等技術領域 *塩見 格一, 金田直樹
ATM領域 井上 諭

1. はじめに

1990 年代の後半, 筆者等は図 1 に示す様な航空管制業務用 GUI の試作・開発・評価を行っていた。図 1 は, ターミナル管制用として検討したもので, 縦方向に時間が経過し, 横方向に経路の位置関係が識別できる様になっている。航空機シンボルの縦方向の長さを安全間隔とすれば, 合流前の航空機のシンボルが水平方向に並ばない様に制御すれば, 安全間隔を維持したまま合流点を通り過ぎる, と考えた。

図 1 は図 2 のレーダ・イメージに対応するダイアグラムである。図 2 に示す情報表示形態では, 2次元 XY 表示面の X 軸, Y 軸が両方とも位置情報の識別に割当てられているために時間情報の定量的な識別精度は低く, 航空機の順序情報以上の時間情報を認識することは難しい。これに対して図 1 に示す形態では, 航空機の位置情報は 1 次元 (X 軸) に縮退されるために空間的な配置としての認識は困難になるが, 時間情報については Y 軸方向に線形に対応させることができるために, 航空機相互の経路点通過時刻等時間的な航空機相互の関係は, 図 2 の表示形態に依るよりも, 遥かに高い精度で認識することができる。

図 2 における表示形態においては, 管制官は過去の経験等に照らし合わせて航空機 JAL502 便の進路方位を決めなければならないが, 図 1 における表示形態においては, JAL502 便を ANA652 便の次に着陸させるか, 或は ANK813 便が離陸した後に着陸させるか, 処理手順を決めることにより, 対応する進路方位を決めることができる。「業務支援システムに何処までの, どの程度の知的な支援機能を実現すべきか?」との問いに対しては, 支援機能の信頼性に依存する, としか現時点では言い得ないが, 業務支援機能の高度化は, 管制官の行うべき業務を, 処理手順を理解して行わなければならないものから, 処理目的を理解するだけで行い得るものに変更する。

1990 年代における, 我々の研究開発の目的は管制卓への CPDLC オペレーションの合理的な実装であったが, 2010 年の今日における ATC/ATM のキーワードは Trajectory (Trj) である。個々の航空機の Trj. は飛行計画を細密化した様なモノと捉えることもできると思われるが, ATM における管理対象としての Trj. はきっと抽象名詞であって, 拡張された飛行計画の全体の様な概念に対応するのではなかろうか。

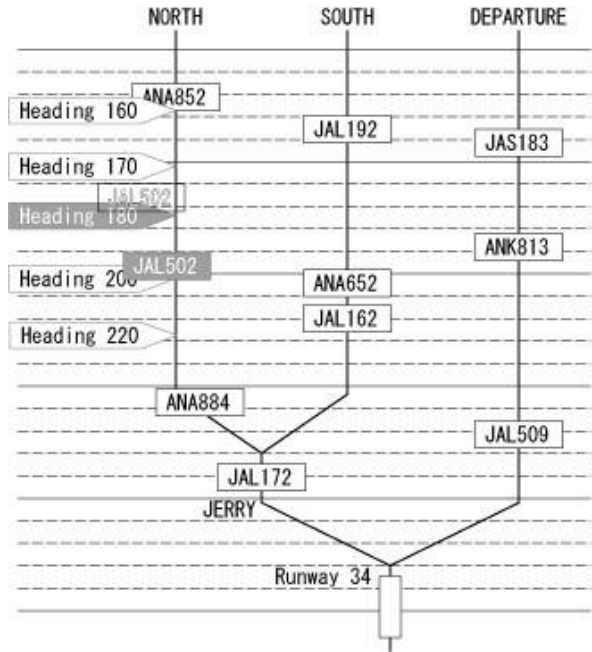


図 1 ターミナル管制用 GUI

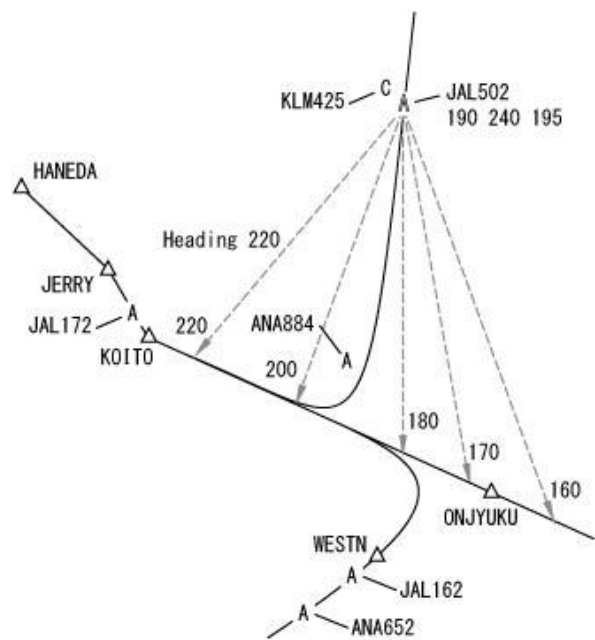


図 2 図 1 に対応するレーダ・イメージ

なお図1のデザイン・コンセプトにおいて、実際の航空管制業務においてレーダで航空機位置を監視している場合、航空機相互の距離的な間隔の調整として業務を行っていると考えれば、時間的な間隔を直接には意識しない訳で、図1の縦軸方向は距離的な安全間隔を単位としたものと見なさなければならないが、航空機の運航速度とその空域に対する監視精度と安全間隔要件が決まっている場合には、距離は時間に、時間は距離に相互翻訳が可能であり、いずれの立場であっても図1のデザインから共通の解釈を得ることは可能であろう。

2. 戦術から戦略への転換は可能か？

1990年代、航空管制業務用ユーザ・インタフェースを検討していた我々のスローガンは、「手続きの理解から目的の理解へ！」であったが、ここに言う“目的”は、精々、例えば図1の場合には「JAL502便はANA652便の次に着陸させて、ANK813便の離陸は少し遅らせよう。」と言った様な戦術的なレベルに留まっていた。

これに対して、Trajectory Management (TM) では、例えば「排出CO2量はレギュラーとして、RJxx到着便の平均値遅延時間は10分に抑えて、最大遅延も30分以下になる様にしたい。RJyyについては・・・。」とか、「平均的な遅延時間が15分になっても、最大遅延時間を40分に抑えられるのであれば、その範囲でCO2排出量を最小限に抑えたい。」の様に、ずっと戦略的な“目的”が設定される様になると考えられる。戦略的な目的が設定できれば、コンピュータ (TG: Trajectory Generator) により1日分か？ 1週間分か？ 或は1シーズン分か？ その生成されたTrj.の遂行率がどの程度のものになるのかはTGの性能次第であろうが、形式的には飛行が予定される全ての航空機のTrj.を生成することができるであろう。

個々の航空機のTrj.を“ソコソコに合理的なものの以上”として生成するアルゴリズムは確かに必要ではあるが、我々が、ここにおいて検討すべき課題は、これだけではない。航空交通は、そのカオス性の検討がなされる程に複雑なシステムであり、現時点において、構成要素の個々の最適化が全体としての最適化を齎すとは言い得ない。とすれば、個々の航空機のTrj.の最適生成の検討に並行して、全体としての最適化と個々の航空機における最適化との関係も同時に明らかにしなければならない。

筆者は、ある時間的な範囲で取り纏めたTrj.全体の特徴を掴んで表現する技術的な枠組みと個々の航空機のTrj.を最適化する技術的な枠組み（限定的にはアルゴリズムと言うこともできるだろ

う。）は“鶏と卵の関係”にあると考えている。“鶏と卵の関係”は“どちらが先か決めることのできない関係”と理解される場合が多いとは思いますが、構造的には明らかに卵の方が簡単であって、卵についての検討から始めることが合理的ではあるが、結果としての卵に関する理解を得るためには、卵に対するのと同程度の鶏に対する理解も必要である、と言うことである。

Trj.全体はどの様に評価することが可能であって、またどの様に評価されるべきであろうか？

仮にTrj.の評価単位を1日とすれば、その合理性や妥当性は兎も角として、あるTrj.により運航された1日分の航空機が排出した全CO2量を評価尺度とすることは可能であろう。

一旦評価尺度を設定することができれば、Trj.が遂行された結果としての実際のCO2発生量が計測される様になれば、TGが予想するCO2発生量との差を低減させる様に、TGのアルゴリズムや設定されるパラメータを調整することが可能となり、TMの有効性や合理性は、その評価尺度が妥当なモノである限りにおいて改善される。

評価尺度が不十分なモノであったり間違っていたりした場合には、関係者間における不満や軋轢が生じ、不満や軋轢が内部的に解消できなければ、更には、より広い範囲から社会的な批判等を受ける様な状況になるであろう。

例えば、全CO2量を低減できても平均遅延時間が延びれば、個々人の旅客はその遅延を取戻すために航空機以外の移動手段部分においてCO2排出量の多い乗り物を選択するかも知れず、Trj.の合理性の評価尺度には平均的な運航遅延時間や発生した最大遅延時間も加味しなければならなくなるかも知れない。

評価尺度等は社会的な評価に遅れない様に適時修正して行くべきモノであって、最初は何等かの特別・独特な研究的な立場からの提案であったとしても、以降の発展は社会工学的に合理的と信任される手続きに委ねるべきモノである。

TM/TG/Trj.の合理性や妥当性については、更に、より総合的・普遍的には、スケジュールされたTrj.における個々の航空機の出発時刻や到着時刻が個々人の旅客の希望と乖離していれば、遅延の形には現れなくとも膨大な無駄な時間等が発生してしまう訳であるから、経常的に旅客満足度の調査等を行い、可能であるならば、その平均的な満足度を向上させる様にTMにフィードバックを掛けられる様にすべきであることは明らかであろう。

ここには、満足度の調査や、その明確な向上等を

評価することは不可能との意見が存在することは予想に難くないが、我が国のサービス業等の歴史的経験に照らせば困難ではあっても不可能ではないことは明らかである。複雑な問題の解決や、複雑な状況の改善は、常に**状況把握のための調査と単純なモデルの実現**から始まるのであるから。

例えば、コンビニエンス・ストアの配置等の問題は、膨大な調査を伴う極めて複雑な問題であり、モデル化（この問題では、シミュレーションとモデル化は同値である。）が、時に、巧く行っていると思われる結果を与え、短期的な成果を肯定的に与えても、中長期的には見込み違いに見えて・・・、まさにカオスそのものであることを示しているに過ぎなくとも、短期的な成果を経常的に積み上げることで比較優位な発展を実現している。

3. 交通流とカオス

20 世紀において、様々な複雑な現象にも、その現象が単純な現象に見える視点が存在することが明らかになっている。20 世紀の中頃に発見された“**一見単純なシステムが生成する想像を超えた複雑な現象**”に関する知見は、21 世紀に向けての半世紀の間に複雑系の理論、或はカオス理論として取り纏められ発展した。カオス理論は、未だに発展途上であり、或る立場からは「特に目立つ成果を生んでいない。」とか「理論としての体を成していない。」等と否定的に言われることも珍しくはない。

時にカオス理論の呈示するモデルが、その単純な構造にも拘らず劇的とも言える説得力を有する場合があります、そのことが或る時に熱狂的な信奉者を生み出すが、同時に、モデルが単純であるが故にその限界も劇的であって、時に熱狂的な信奉者を意固地な拒絶者に転向させる。

今日、高速道路の坂道に「**スピードを落とさないで!**」との呼びかけの看板に気づいている人は大勢いると思われるが、この看板こそが、筆者においては、20 世紀におけるカオス理論の最大の成果とも言えるモノである。何人かの運転者がこの看板に気付いて走行速度を上げることで、渋滞の発生確率が劇的に低減しているのである。個々の自動車の CO2 削減技術において、この看板の**投入経費に対する CO2 削減効果**に匹敵する程の成果を上げることは不可能であった。この看板が何時まで有効であるのかは分かってはいないが。

この看板による現象と同じ様な現象を航空交通流に発見したり、また実現したりすることができれば、Trj. を必ずしも秒単位の詳細性を有する様な飛行計画の様なモノとはすることを要せずに、目的とする CO2 の削減や平均遅延時間の短縮等々を、2, 3

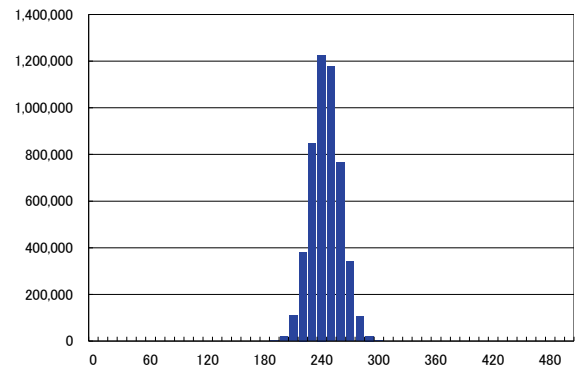


図 3 ポアソン到着間隔の分布 ($\lambda=240$)

の少数のパラメータの制御により実現することができるかも知れない。

図 3 は、一般的な待ち行列のシミュレーションに使用されるポアソン到着の分布を示した例であり、「平均到着間隔 (λ) を 240」とした場合の到着間隔の分布を示している。高速道路における自動車の通過間隔の分布等として良く利用されていても、必ずしも航空交通流の模擬に相当であるとは言いがたいが、交通流検討のための第一歩としての選択肢は少ない。しかし、上述の様な分布を想定して、「航空機の平均時間間隔が 240 秒であれば、偶然に時間間隔が 180 秒以下となる確率は 0.004%以下となる。」と予言すれば「そんな馬鹿な!」と言うことになる。実際の管制業務に携わる管制官においては意識されない事かも知れないが、航空路監視レーダの捜査間隔は 10 秒であるから、上述の様な λ 設定は不適切であり、 $\lambda = 24$ とする方が現実の近似としては妥当であろう。 $\lambda = 24$ とすれば、図 3 の分布は図 4 の様に修正され「航空機の平均時間間隔が 240 秒であれば、偶然に時間間隔が 180 秒以下となる確率は 12.8%程度」となり、自由に航空交通流が合流する様な状況においては、管制官が介入しない限り、航空機が相互の安全間隔を失う状況が頻発する事において、現実に対する感覚により整合するシミュレーション結果となる。

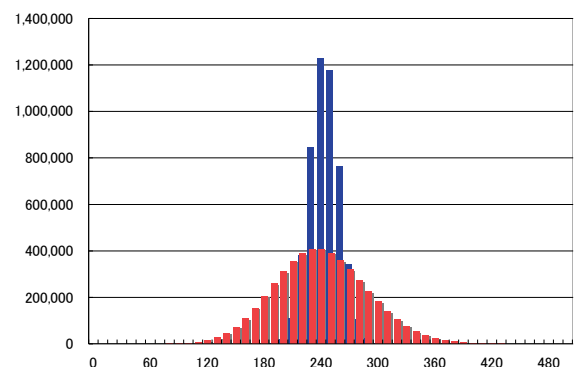


図 4 ポアソン到着間隔の分布 ($\lambda=24$)

「実際の航空管制業務の模擬において、単位時間を幾らに設定する事が妥当であるのか？」現実の観測に依らなければ適正値を推定する事はできず、残念ながら、現時点で我々は適正値を知らない。

数値シミュレーションの実施に当っては、初期的には、残念であり遺憾でもあるが、この様な不注意なミスは頻発し、運が悪ければ、実際の業務の現場に混乱を与える事にも至ってしまう。以下の推論にも誤解等が含まれる事を危惧するが、将来的には、高速道路の看板の様な成果に結びつく事を期待して、本稿における以下については、一つのモデルとその解釈として、ご理解をいただきたい。

或るセクターに平均 240 秒の時間間隔で航空機が進入し、そのセクターを最小時間間隔 190 秒、或は 200 秒で出て行く場合、時にセクターには時間間隔 120 秒程度で入域して来る航空機もある訳で、空域内における連続的に調整可能な遅延時間を 120 秒とする。迂回に依っては時間調整ができない場合にホールディングが発生し、1 回のホールディングを 120 秒とすれば、最小時間間隔が 190 秒である場合には遅延の連鎖が発生する事は殆どないが、最小時間間隔が 200 秒である場合には遅延の連鎖が発生する。遅延の連鎖が発生する迄の平均的な時間については、現在数値シミュレーションを実施中で、未だ結論が出てはいないが、一旦遅延の連鎖が発生した場合には、平均的な入域間隔を大きくしない限りにおいて、その遅延が解消される事はない。

制限速度 80km/h の高速道路で平均車間距離が 80m 以下になって渋滞が発生すれば、渋滞の後端が 20km/h で後方に延びて行く様に、航空機のコンフリクトも一旦連鎖が発生すれば、その環境（平均入域時間間隔、最大連続迂回調整時間、ホールディング調整時間間隔）に変化が無い限り、連鎖が解消することは無い、と言う事が待ち行列を利用した簡単なシミュレーションによって確認できる。

4. おわりに

本稿では始めにターミナル管制用に検討した CPDLC メッセージ生成用の GUI を紹介した。実は、図 1 に示す様に航空機の流れが素人目にも分かり易く描かれる場合は、本来的に航空機の流れが、仮に流量は多くとも、単純な場合に限定される。航空路に比較して遷移的なターミナル管制であっても、進入や航空路への合流の経路パターンが数多く存在する場合には、必ずしもレーダ・イメージよりも単純な交通流ダイアグラムが生成できる訳ではない。だからと言って、レーダ・イメージとは見た目は異なってもトポロジカルには同じダイアグ

ラム表示が無意味な訳ではなく、限定的なパターンを大量に処理する様な場合、即ち人間ではなくコンピュータにその処理を任せたい様な場合、その処理アルゴリズムの検討には、必要不可欠でもある。

待ち行列によるシミュレーションも同様であって、先のモデルは最も単純な交通流制御を述べたものであるが、明快な結論が劇的に述べられる場合は、このモデルの様に単純な場合だけであり、交通流の複雑な合流や分岐が繰り返される様な場合に対しては無効である。しかしながら、現実世界には単純なモデルにより十分な近似が得られる場合も多く存在するのであって、主要な幹線の流れの理解には有効な状況も期待され、特にコンピュータにより処理の自動化が求められる様な部分については、有用な知見が与えられる事が期待される。

我々の技術的な現状は、現象を記述するモデルを作成する方法論を検討し、そのモデルを運用し解釈を取り出すシミュレーション環境と共に実現しようと試行錯誤しているものであるが、我々は近い将来に、ある時間的な範囲で取り纏めた Trj. 全体の特徴を掴んで表現する技術的な枠組みを、人間が直感的に理解できる範囲のパラメータの組合せにおいて実現し、更にはその枠組みを、生成された Trj. が遂行された場合の期待値を制御するユーザ・インタフェースと共に提示したいと考えている。

文 献

- [1] ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス編集部：複雑系の経済学，ISBN4-478-37201-2，1997.
- [2] ケヴィン・ケリー：「複雑系」を越えて，ISBN4-7561-3018-6，1999.
- [3] ローレンツ：カオスのエッセンス，ISBN4-320-00895-2，1997.
- [4] H.Kantz, etc.: Nonlinear Time Series Analysis, ISBN0-521-65387-8, 1997.