

燃料消費削減のための航空路線設計

東京大学

JST, ERATO, 合原複雑数理モデルプロジェクト

中央大学

*岩佐 大 IWASA Masaru

齊藤 廣大 SAITO Hiroo

松井 知己 MATSUI Tomomi

1. はじめに

航空機は、運航のために化石燃料を使用しており、燃焼の際には二酸化炭素 (CO₂)、窒素酸化物 (NO_x)、水蒸気 (H₂O) などの温室効果ガスを排出している。そのため、航空機による燃料消費削減に対する施策を行っていくことは、地球温暖化防止のために重要な課題となっている。また、このことは限られたエネルギー資源である化石燃料を節約することにも貢献するものである。

本稿では、ハブ・アンド・スポーク型と呼ばれる航空路線形態を扱い、航空機の燃料消費削減のために最適な航空路線を設計する問題を考える。そして、この問題に対する精度保証付きの近似解法を提案する。

2. 航空輸送事業と地球温暖化との関わり

航空機輸送は、世界経済の発展に伴い、急速に成長してきた。旅客輸送量 (旅行者一人 1km 当たりの収入で測られる) の伸び率は、1960 年以降、年率 9% 近くとなっており、国内総生産 (GDP) の平均伸び率の 2.4 倍を示している。また、航空機貨物輸送の約 80% は、旅客用航空機を使って輸送されているが、この航空機貨物の輸送量も同じ期間に増加している。航空輸送産業の成熟化とともに、旅客輸送の伸び率は下がってきており、1997 年以降は年率 5% となっている。

しかし、航空機による排出ガスの総量は年々少しずつ増加している。これは、航空需要の伸びが、技術改良や運行管理方法の改善による燃料消費の削減を上回っていることが原因と考えられている。需要の増加が落ち着いた限り、今後も旅客輸送量は GDP の伸びを超える勢いで成長すると予測されている [7]。

航空輸送事業では、航空機による排出以外にも、地上ではエンジンや補助動力装置の運転、航空整備・運航支援用の化石燃料使用車両の走行を行っており、航空機と同種のエンジン排気物を排出している。さらに、一般事務オフィスで使用してい

る電気・熱等のエネルギーは、火力発電所等でのエネルギー転換過程で二酸化炭素を発生している。しかし、航空輸送事業を通じて排出される温室効果ガスのうち、実際には航空機の運航によるものがその大部分を占めている。例えば、全日本空輸による 2005 年度環境白書によれば、2004 年度に全日本空輸の企業活動で排出された二酸化炭素の総量約 670 万トンのうち、約 98% が航空燃料によるものであったことが報告されている [11]。

因みに、環境省による 2002 年度環境白書によれば、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの大半を占める二酸化炭素の総排出量に占める航空機寄与分は、日本では約 0.8%、世界では約 2~3% 程度と推定されている。環境に与える影響は現時点ではそれほど大きいものではないが、旅客輸送量の増加に伴いその値が増加すると予測され、低減のための取り組みが不可欠であるとされている [5]。

3. 燃料消費や排出削減のための施策

航空機の排出ガスの総量を減少させる方法、すなわち航空機の燃料消費を削減させる方法として、現在、航空機やエンジンの技術革新、運航方法の最適化、規制や経済対策等の施策が考えられている。本節では、各施策の現状について記述する。

3.1. 航空機やエンジンの技術革新

燃料効率の良い航空機を導入することは、燃料消費削減のための最も主要な施策の一つである。航空機の技術進歩により、1km 運航時の 1 座席当たりの燃料消費量は、過去 20 年間にほぼ半減している。世界の主要航空会社により構成される IATA (国際航空運送協会) の統計においても、過去 10 年間の旅客輸送量の伸び率が年平均 5% であるのに対し、航空燃料の消費量の伸び率は年率 3% に留まっている。こうした効率向上の大部分は、エンジンの改良によるものであり、残りは機体設計の改善である。燃料効率は、今日製造されている航空機と比べると、2015 年には 20%、2050 年には 40~50% 向

上すると予測されている。エンジンの効率改善は、燃料消費を削減するとともに、ほとんどの排気物質の量を削減するが、地表を暖める効果を持つ飛行機雲の生成は多くなるものと考えられている。

現在、多くのエンジン研究プログラムが国際的に進められており、2010年までには、離着陸サイクルでの窒素酸化物排出を現在の規制基準より70%まで削減すること、また、エンジンの燃料消費についても近年製造のエンジンより8%~10%向上することが目標とされている。しかし、これらの目標が達成されたとしても、新しい技術を新規生産の航空機の多くに適用するには、通常10年ほどかかると見られている。現在では商業飛行は行われていないが、超音速航空機からの窒素酸化物排出についても、同様の研究が進められている [7]。

3.2. 運航方法の最適化

航空管制の改善や、他の運行手続きの改良により、航空燃料の燃焼を8~18%削減することが可能であると予測されている。このような削減の大半(6~12%)は、航空管制の改善により可能と見られており、今後の20年間で完全実施が期待されている。これが実施されれば、エンジンからの排出が削減できるが、どれだけ早く航空管制の改善を導入するかは、国際レベルの機構整備がいつ実現できるかという点にも依存するものである。

航空管制システムは、航空機の運航について、誘導、間隔取り、調整、管制を行うためのシステムである。現在の国内・国際航空管制システムには限界があり、その結果として、例えば、空中待機、非効率な経路、最適ではないフライトパターンが現実に生じている。このような限界が存在することは、過剰な燃料消費や、その結果としての過剰な排出を生むことになる。

具体的な改善内容としては、航空機の垂直保持間隔を減らすことによる燃費の向上、航法衛星等の利用による洋上航空や着陸進入の効率化、フリーフライトの実現による運航効率の向上等が考えられている [4]。組織上や規制上必要な調整を適切なタイミングで行うことで、今後20年間の間に、必要な改善が実施されることが期待されている。

1km 運航時の1座席当たりの燃料消費量を削減するための運航対策としては、この他にも搭載量(一つの航空機の搭載旅客人数または貨物量)の増

加、不要重量の除去、航空機の速度の最適化、(暖房用、換気用等の)副次的電力消費の制限、そして地上走行の削減などがある。これらの運航対策における改善により、燃料の燃焼を2~6%ほど節減することが可能であると予測されている [7]。

3.3. 規制や経済対策

航空機とエンジンの技術向上や、運航方法の最適化により、燃料消費が削減され、環境への負荷が軽減される。しかしこれにより、予想される航空業界の成長に伴う排出増加の影響を完全に消すことは困難である。さらに排出を削減するための主な施策として、航空機エンジンからの排出に対する規制強化、環境税や排出権取引の導入等が考えられる。しかし、これらの施策の一部は、十分に研究されているとは言えず、航空輸送での実験も行われていないことから、その成果がどれだけ期待できるのかは、現状では不明な点も多い。

航空機エンジンからの排出に対する規制強化は、排出率を削減する方法の一つである。国際的な枠組みでの規制は、1947年に発足した国連の専門機関である国際民間航空協定(ICAO)により行われてきた。この機関により、1981年に初めて亜音速機が排出する窒素酸化物を20%削減する案が採択され、1996年に規制として発効された。さらに、それを約16%厳しくする窒素酸化物の規制強化基準の適用が1998年に採択され、2004年以降の新型航空用エンジンはこの基準をクリアする必要がある。現在、高空巡回時の排出規制は行われていないが、この機関では将来的に規制を行うことを検討している [4]。

環境税は、より効率的な航空機の開発と利用に一層の刺激を与えるものである。また、航空輸送の需要の伸びを抑えて、航空機からの排出の増加を減衰させる手段ともなりうる。これに関連する研究では、環境上有効な課税を、国際的な枠組みで考える必要があることが示されている。

航空輸送からの排出を緩和するために検討する必要がある施策としては、もう一つ排出権取引という市場本位の施策がある。これは、国や自治体、企業などの排出主体間であらかじめ排出権と呼ばれる権利を割り当てておき、各主体の排出量に応じてその権利を売買することで、全体の排出量を調整する施策である。この排出権取引という施策

は、温室効果ガスの排出削減のための手段の一つとして、1997年に議決された京都議定書に盛り込まれたことでも知られている。

環境税や排出権取引のような市場本位の施策は、技術革新を促し、効率を改善する可能性がある一方で、航空旅行の需要を減らすかもしれない。このような施策の多くは、まだ全面的に検討された訳ではなく、航空業界として実験が試みられた訳でもない。このため、その成果は不確実なもので見られている [7]。

4. 燃料消費削減のための航空路線設計

現在利用されている主な航空路線形態としては、ハブ空港(乗り換え空港となる大空港)を中心として放射状に周辺の空港への路線を設計するハブ・アンド・スポーク型と、ハブ空港を経由せずに空港間を直接結ぶポイント・トゥ・ポイント型がある。

燃料消費の削減を考える場合、各空港間に直行便を設けるポイント・トゥ・ポイント型によって必要な輸送をカバーする方法をまず考えることができるが、この場合、運航する路線数が非常に多くなり、極めて非効率的である。ハブ・アンド・スポーク型の構築により、広範囲に点在する乗客を効率良く運べるようになるため、航空会社にとってメリットは大きい。また、ハブ空港間に乗客が集中するため、1km 運航時の1座席当たりの燃料消費量の削減が期待できることも重要な点である。乗客にとっても、乗り換えを余儀なくされるため不便になるように感じられるが、実際は、路線数が減少することによって、逆に1つ1つの路線では便数が増えるため、選択の幅が広がるというメリットがある [9]。

本稿では、ハブ・アンド・スポーク型の航空路線形態を扱い、航空機の燃料消費削減のために最適な航空路線を設計する問題を考える。具体的には、ハブ空港および非ハブ空港の集合と、各空港間の輸送量および単位輸送コストが与えられたとき、総輸送コストを最小化するように最適な航空路線を決定する問題を考える。総輸送コストは燃料の総消費量に比例すると考えられるため、この問題は航空機の燃料消費削減のために最適な航空路線を設計する問題と捉えることができる。

オペレーションズ・リサーチの分野においては、この問題の原型となる問題が1980年代に考えられ

るようになった。これは、米国での1978年の航空規制緩和に端を発するものである。O'Kelly [6] が、与えられたハブ空港の候補からハブ空港を選択し、非ハブ空港からハブ空港への接続を決定する問題を扱い、2次整数計画問題として定式化した。一方で、Sohnら [10] は、ハブ空港の配置を既知として、接続のみを決定する問題を扱っている。彼らはハブ空港の数が3つ以上であるとき、この問題がNP困難と呼ばれるクラスに属することを示した。これまで、接続のみを決定する問題に対し、精度保証付きの多項式時間近似解法は知られていなかった。本稿では、ハブ空港の数が3つでその配置が既知であるとき、接続のみを決定する問題に対し、多項式時間(4/3)-近似解法を提案する。

5. 問題の定義および定式化

h 個のハブ空港と n 個の非ハブ空港、および各空港間の輸送量と単位輸送コストが与えられているものとする。非ハブ空港は唯一のハブ空港に接続し、非ハブ空港間の輸送はハブ空港を経由して行われる。また、各ハブ空港間は直行便を持ち、乗り換えは2回までとする。本稿では、以上の条件の下で、総輸送コストを最小化するように非ハブ空港のハブ空港への接続を決定する問題を扱う。

h 個のハブ空港の集合を $H := \{1, 2, \dots, h\}$ 、 n 個の非ハブ空港の集合を $N := \{1, 2, \dots, n\}$ 、空港 i から j への輸送量と単位輸送コストをそれぞれ $w_{ij} (\geq 0)$ 、 $c_{ij} (\geq 0)$ とする。ただし、 $w_{ii} = 0$ 、 $c_{ii} = 0$ である。また、単位輸送コストは対称であり、ハブ空港間で三角不等式を満たすものとする。この問題は、線形制約および整数制約の下で2次関数を最小化する問題であり、2次整数計画問題として定式化することができる:

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{p \in N} \sum_{q \in N} w_{pq} \left(\sum_{i \in H} c_{pi} x_{pi} \right. \\ & \left. + \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} c_{ij} x_{pi} x_{qj} + \sum_{j \in H} c_{jq} x_{qj} \right) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i \in H} x_{pi} = 1 \quad (\forall p \in N), \\ & x_{pi} \in \{0, 1\} \quad (\forall p \in N, \forall i \in H). \end{aligned}$$

ただし、変数 x_{pi} は、非ハブ空港 p をハブ空港 i に接続するとき1の値をとり、接続しないときに0の値をとるものとする。ここで、新たな変数 y_{piqj} を導入することにより目的関数を線形化し、次に簡単な変形と制約条件の緩和を行うことにより、

以下の線形緩和問題を導出することができる:

$$\begin{aligned}
\min. \quad & \sum_{p \in N} \sum_{q \in N} w_{pq} (\sum_{i \in H} c_{pi} x_{pi} \\
& + \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} c_{ij} y_{piqj} + \sum_{j \in H} c_{jq} x_{qj}) \\
\text{s. t.} \quad & \sum_{i \in H} x_{pi} = 1 \quad (\forall p \in N), \\
& \sum_{j \in H} y_{piqj} = x_{pi} \quad (\forall p, q \in N, \forall i \in H), \\
& \sum_{i \in H} y_{piqj} = x_{qj} \quad (\forall p, q \in N, \forall j \in H), \\
& 0 \leq x_{pi} \leq 1 \quad (\forall p \in N, \forall i \in H), \\
& y_{piqj} \geq 0 \quad (\forall p, q \in N, \forall i, j \in H).
\end{aligned}$$

Saito ら [8] は, CAB データと呼ばれるベンチマーク問題において上記の線形緩和問題を扱い, ハブ空港が 3 つの場合, ほとんどの問題例で整数最適解が得られることを報告している. 本稿では, 線形計画緩和に基づく近似解法を提案し, 解法によって得られる 2 次整数計画問題の許容解における, 目的関数値の上界を理論的に保証する.

6. 近似解法

本稿で扱う問題は, 対立する複数の制約を満たす有限個の解から最良の解を探す問題であり, 組合せ最適化問題と呼ばれる問題に含まれる. 組合せ最適化問題の多くは NP 困難と呼ばれるクラスに属し, $P \neq NP$ という仮定の下では多項式時間で最適解を求めることはできない. よって, NP 困難である問題に対する解法として, 多項式時間近似解法あるいは発見的解法を用いることが実務において有効な手段となる. 多項式時間近似解法には, 得られる解の近似精度が保証されている近似解法と, 保証されていない近似解法が存在するが, 本稿では精度保証付きの近似解法を扱う.

目的関数が非負関数の最小化であるような組合せ最適化問題を \mathcal{I} とする. さらに, 問題例 $I \in \mathcal{I}$ の最適値を $OPT(I)$, 解法 A によって得られる許容解の目的関数値を $APR(I)$ とする. このとき, ある $\alpha \geq 1$ が存在して,

$$0 \leq APR(I) \leq \alpha \cdot OPT(I) \quad (\forall I \in \mathcal{I}) \quad (1)$$

が成り立つ解法を, (\mathcal{I} に対する) α -近似解法という. また, α を近似解法 A の近似率という. 最小化問題において, 近似率は常に 1 以上である. 近似率が 1 に近いほど, 性能の良い近似解法となる. 解法 A が確率的解法である場合には, 解法 A に

よって得られる目的関数値の期待値 $E[APR(I)]$ を用いて近似率は定義される. すなわち, (1) 式において $APR(I)$ を $E[APR(I)]$ に置き換えた式が成り立つ解法を, (\mathcal{I} に対する) α -近似解法という.

さらに, \mathcal{I} の緩和問題の最適値を $OPT^*(I)$ としたとき, 最小化問題においては, $OPT^*(I) \leq OPT(I)$ が成り立つことから, 実際には

$$0 \leq APR(I) \leq \alpha \cdot OPT^*(I) \quad (\forall I \in \mathcal{I}) \quad (2)$$

の不等式を用いて近似率を評価することも多い.

7. (4/3)-近似解法

本章では, ハブ空港の数が 3 つの場合に対する多項式時間 (4/3)-近似解法を提案する. 本稿では以降, $a := c_{12}$, $b := c_{23}$, $c := c_{13}$ によってハブ空港間の単位輸送コストを表すものとする.

解法 7.1 (ハブ空港の数が 3 つの場合)

入力: ハブ空港の集合 $H = \{1, 2, 3\}$,
 非ハブ空港の集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,
 空港 i から j への輸送量 $w_{ij} (\geq 0)$,
 空港 i, j 間の単位輸送コスト $c_{ij} (\geq 0)$.

出力: 非ハブ空港のハブ空港への接続.

1. 線形緩和問題を解き, 最適解 (x^*, y^*) を得る.
2. 区間 $[0, 1)$ で一様分布に従う確率変数 U を 1 つ生成する.
3. 次の Rounding 1, 2, 3 を, それぞれ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の確率で実行する.

Rounding 1. 各非ハブ空港 $p \in N$ に対して,
 $0 \leq U < x_{p2}^*$ ならば, x_{p2}^* を 1 に丸める.

$x_{p2}^* \leq U < x_{p2}^* + x_{p1}^*$ ならば, x_{p1}^* を 1 に丸める.
 $x_{p2}^* + x_{p1}^* \leq U < 1$ ならば, x_{p3}^* を 1 に丸める.

Rounding 2. 各非ハブ空港 $p \in N$ に対して,
 $0 \leq U < x_{p3}^*$ ならば, x_{p3}^* を 1 に丸める.

$x_{p3}^* \leq U < x_{p3}^* + x_{p2}^*$ ならば, x_{p2}^* を 1 に丸める.
 $x_{p3}^* + x_{p2}^* \leq U < 1$ ならば, x_{p1}^* を 1 に丸める.

Rounding 3. 各非ハブ空港 $p \in N$ に対して,
 $0 \leq U < x_{p1}^*$ ならば, x_{p1}^* を 1 に丸める.

$x_{p1}^* \leq U < x_{p1}^* + x_{p3}^*$ ならば, x_{p3}^* を 1 に丸める.
 $x_{p1}^* + x_{p3}^* \leq U < 1$ ならば, x_{p2}^* を 1 に丸める.

4. 得られた近似解 X を元に, $Y_{piqj} = X_{pi} X_{qj}$ の関係式から, 近似解 Y を計算する.

Rounding 1, 2, 3 を実行する確率 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は以下で与えられる．すなわち，

$$\alpha_1 = b(b+c-a)(a+b-c)/M,$$

$$\alpha_2 = c(c+a-b)(b+c-a)/M,$$

$$\alpha_3 = a(a+b-c)(c+a-b)/M.$$

ただし， $M = 4abc - (a+b-c)(b+c-a)(c+a-b)$ である．

解法 7.1 は，文献 [1] において提案された従属ラウンディングと呼ばれる手法に基づくものである．この文献において，著者らは複数の組合せ最適化問題に対して，従属ラウンディングに基づく近似解法を提案している．これまで扱われてきた非整数解から整数解への変換手法では，各非整数解をそれぞれ独立に整数解に変換すると見なせるものが多かった．そのような手法は独立ラウンディングと呼ばれている．一方で，解法 7.1 のように従属した形で非整数解を整数解へ変換する手法は，独立ラウンディングと対比する意味で文献 [1] の著者らにより従属ラウンディングと名付けられた．定理 7.2 ハブ空港の数が 3 つでその配置が既知であるとき，解法 7.1 は，非ハブ空港のハブ空港への接続を決定する問題に対する多項式時間 $(4/3)$ -近似解法である．

定理 7.2 の証明については，文献 [3] を参照されたい．この文献において，著者らはハブ空港の数が一般の場合についても扱っており，簡潔な 3-近似解法と，独立ラウンディングに基づく 2-近似解法を提案している．また，本稿で記述した $(4/3)$ -近似解法と，上記の 2-近似解法を組み合わせることにより，ハブ空港が 3 つの場合に対する $(5/4)$ -近似解法が得られることを示している．

8. おわりに

本稿では，ハブ・アンド・スポーク型の航空路線形態において，航空機の燃料消費削減のために最適な航空路線を設計する問題を扱った．そして，ハブ空港の数が 3 つであるとき，この問題に対する多項式時間 $(4/3)$ -近似解法を提案した．ハブ空港が 4 つ以上の場合に対しても，性能の良い近似解法を設計していくことは今後の課題である．また文献 [2] においては，本稿とは別の様々な評価基準に対して，最適な航空路線を設計する問題の定式化が示されている．これらの定式化に対する解法を設計していくことも今後の課題である．

参考文献

- [1] D. Bertsimas, C. Teo, and R. Vohra, “On dependent randomized rounding algorithms,” *Operations Research Letters*, 24 (1999), pp. 105–114.
- [2] J. F. Campbell, “Integer programming formulations of discrete hub location problems,” *European Journal of Operational Research*, 72 (1994), pp. 387–405.
- [3] M. Iwasa, H. Saito, and T. Matsui, “Approximation algorithms for the single allocation problem in hub-and-spoke networks and related metric labeling problems,” *Mathematical Engineering Technical Reports, METR 2006-52*, University of Tokyo, 2006.
- [4] 航空機国際共同開発促進基金，“平成 17 年度 大型精密機器システム基盤技術の開発振興に関する調査研究事業報告書 –航空機等の機械工業動向調査事業–,” 東京, 2006.
- [5] 日本航空 地球環境部，“環境報告書 2004 –環境と社会との共生をめざして–,” 東京, 2004.
- [6] M. O’Kelly, “A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities,” *European Journal of Operational Research*, 32 (1987), pp. 393–404.
- [7] J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, and M. McFarland, “Aviation and the global atmosphere,” Cambridge University Press, UK, 1999.
- [8] H. Saito, S. Matuura and T. Matsui, “A linear relaxation for hub network design problems,” *IEICE transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E85-A* (2002), pp. 1000–1005.
- [9] 佐々木美裕，“ハブ空港配置モデル,” *オペレーションズ・リサーチ*, 45 (2000), pp. 437–443.
- [10] J. Sohn and S. Park, “The single allocation problem in the interacting three-hub network,” *Networks*, 35 (2000), pp. 17–25.
- [11] 全日本空輸 環境・社会貢献部，“環境白書 – Sustainability for Society– 2005 年度版,” 東京, 2005.