

回転翼航空機に対するフライト・スケジューリング

防衛大学校・情報工学科 宝崎隆祐 (Ryusuke Hohzaki)
Department of Computer Science, National Defense Academy
防衛省・海上幕僚監部 森本達也 (Tatsuya Morimoto)
Maritime Staff Office, Ministry of Defense

1 はじめに

スケジューリングのニーズはあらゆる人間活動で発生し、特に産業界における利用は時に多くの利益を会社にもたらす。米国においては貨物航空機運行のための効率的な乗務スケジューリングにより、会社側に数億ドルの節約を達成させた例もある。航空機に対するスケジューリングだけを対象と考えると、往々にして我々の頭に浮かぶ例は、このような商業ベースの航空機運航 [1] であるが、軍用航空機に対するそれ [3, 2] はあまり公表されていないだけで、担当者からの効率化に対する要請は大きい。

海上自衛隊ヘリコプター部隊において、回転翼航空機 SH-60J に対する訓練及び搭乗員の割当スケジューリングは現在人手によって行われている。しかし、その作業では多種多様な制約を考慮する必要があり、人手による方法では正確な制約条件の組み込みは難しい上に、多くの時間を費やしている現状にある。この研究の狙いは、この問題点を解決するため、人手でのスケジューリング作業で暗黙のうちに想定していた評価尺度や制約を明示化し、それらを目的関数や制約式としてもつ整数計画問題に定式化することで、多種多様な制約条件の正確な満足と、評価尺度の対外的な透明性を確保し、合わせて担当者の計画立案作業の支援のために、短時間で実施可能な半自動化されたスケジューリングツールを提案することである。

2 回転翼航空機のスケジューリング問題

ヘリコプター部隊における短い期間での可動機数は概ね決まっており、それによってフライト回数の上限が決定される。ここでは、可動機を使っての 1 週間分のフライトが決められている場合に、それらに搭乗員を割り当てるスケジューリングをここでのフライト・スケジューリング問題と考える。スケジューリングされていないフライトは 1 週間のどの時間帯で可動機が使用されフライトが実施できるかの線表により表され、スケジューリング後の出力では、その線表上にどの搭乗員が乗るかが具体的な固有名で記入される。

以上のようなフライトに対する搭乗員の割当ては任務形態を介して行われる。たとえば、あるフライトに対し緊急事態に対処するために待機の任務が与えられると、当然その搭乗員はすべて待機のための要員となるのである。以下では、回転翼航空機のフライト・スケジューリング特有の考慮事項を、搭乗員、訓練形態、任務形態といった観点から述べてゆく。

2.1 搭乗員とフライト

SH-60J の搭乗員 (クルー) には 2 種類あり、機体の運行を行うパイロットと装備機器の操作を行うセンサーマンが各々 2 名ずついる。機体前方のある 2 つの席が、メインパイロット (主操縦士) とコ・パイロット (副操縦士) 席であり、後方にセンサーマン 2 名の席が並んでいる。実機における 1 クルーは、これらパイロット 2 名とセンサーマン 1 名ないし 2 名 (計 3 名ないし 4 名) で構成される。フライト・スケジューリングの対象となる部隊の全搭乗員の個有名はすでに準備されているものとする。

さて、これまでは実機によるフライトを想定して説明してきたが、スケジューリング対象であるフライトには訓練装置（シミュレータ）も含まれる。シミュレータは、実機による訓練では困難な状況を容易に、かつ安全に作ることができるため、搭乗員の訓練には欠かせないハードウェアである。次にこのようなフライトの形態（訓練形態と呼ぶ）としてどのようなものがあるかを述べる。

2.2 訓練形態

訓練形態としては、実機により実際に飛行を行うフライト（F）の形態のほか、主として4種類の地上シミュレータがある。WST（W）は1クルーの総合的訓練を行うものであり、実機とほぼ同じ態勢、クルーで使用できる。OFT（O）はパイロットの個別訓練、SOT（T）及びSNT（N）はセンサーマンの個別訓練に使用する。上述したように、Fでは4つの席が準備されているが、シミュレータではそれぞれの機能に合った席が用意され、場合によってはシミュレータのオペレータ役として搭乗員が配置される席もある。上述した1週間分の空白フライト線表には、F、W、O、T、Nの5種類の訓練形態のどれが利用可能かの情報も予め書き込まれているものとする。

2.3 任務形態

以下では、部隊員がフライトを飛ば際に付与される任務の3つの形態について解説する。各搭乗員は、これらの任務を通じてフライトに割り当てられることになる。

(1) 搭乗員の資格と養成訓練

資格とは、搭乗員に対してその知識及び技量を認識できる公式に認定され、付与された資格を言う。パイロットに関しては上級順に1PA、1PB、1PC、2PA、2PB、2PCの6種類があり、センサーマンに対してSMA、SMB、SMCの3種類がある。航空機に与えられる実際の任務には、どのような資格を有する搭乗員が乗るべきかの規定があり、任務遂行上これらの資格保有は搭乗員に課せられる最低限の要求事項である。

資格を取得するためには、訓練形態と訓練内容及び座席指定が記述された順序付けられたシラバスから成る養成訓練課程をクリアーすることが必要となる。因みに、養成訓練には、1PA、1PB、1PC、2PA、習熟訓練、慣熟訓練の養成訓練がある。そのような一例は、まず1番目のシラバスで、訓練形態Oにより1番席に座り緊急処置訓練を実施する。2番目のシラバスでは、訓練形態FまたはWの1番席で基本飛行訓練を実施した後、3番目のシラバスで、実機による訓練形態Fを夜間飛行により訓練を行う、といったものである。この順序付けられたシラバス列は、フライト・スケジューリング上絶対的に守られるべき制約である。フライト・スケジューリングが養成訓練をスケジュールする際に果たすべき第1の機能は、養成訓練の各訓練生のシラバスの進捗状況を管理し、どのフライト線表にどのシラバスを割り当てるかを決め、そのシラバスを受けるべきどの養成訓練生を規定どおりのどの搭乗席に座らせるかを決定することである。上記の例のように、夜間のフライト割当てが要請される場合もある。1週間の間に同一養成訓練の複数シラバスがスケジュールされる場合は、シラバスの順序規定も満足させなければならない。

さて、部隊所属の全搭乗員の保有資格についてもデータがあり、また1週間のスケジューリング期間中に、どの搭乗員がどの資格の養成訓練を受けるかは予め決まっているものとする。通常は、これらの養成訓練で訓練生を指導する教官も規定の資格を有する他の部隊員が務めるが、教官のフライトへの割り当ては養成訓練とは別のスケジューリングとして扱うことにし、それについては後述する。また、訓練生をシラバス者、その他の搭乗員をノンシラバス者とも言う。

養成訓練は自らの資格取得に直結するため、搭乗員にとって最も重要なものの1つであるとともに、部隊の任務遂行の基礎をなすものであり、また部隊の練度の高さを示す客観的な指標となるため、部隊指揮官も最も重要視するものである。

(2) 応急待機

応急待機とは、防衛上の不測事態、災害派遣等緊急を要する事態に迅速に対処するために1クルーないしは2クルーが常時即応態勢で待機するものであり、そのために実機が毎日割り当てられている。待機要員の第1候補を1レディ、第2候補を2レディと呼称する。もちろん、これにも資格規定があり、搭乗員の割り当てにおいて考慮すべきであるが、次の事項がこのスケジューリングにおいて最も求められる機能である。すなわち、応急待機はその要員を長時間拘束するため、平日、休日における個人別の過去の実績を考慮して、可能な限り平等に搭乗員に割り当てることが重要となる。

(3) 練度維持訓練及び教官指定

練度維持訓練は、搭乗員が現在有する資格、技量を維持するために実施する訓練であり、対象とする訓練形態は養成訓練と同じくF、W、O、T、Nの5種類である。これまで述べた任務形態である養成訓練、応急待機に比較するとその重要性、優先度は低く、前者の任務形態に割り当てられなかったフライト線表をこれに当てる。自分の技量を維持し、場合によっては向上させようとする搭乗員の意識は一般に高いから、このスケジューリングでも過去の搭乗実績を参照しつつ、平等に練度維持訓練を受けさせる必要がある。

教官指定は、上述した養成訓練に同乗し訓練生を指導する教官を割り当てるものであり、一般に高い資格が必要とされるから資格上の制約が厳しい。パイロット養成訓練のシラバスの中にはコース途中の検定を実施するものもあり、その場合には1PA資格者の中でも検定資格をもつ教官というように更に高い資格が必要となることもある。

3 制約条件と定式化

前節で解説したように、各フライトには3種類に分類された任務が付与され、それに適合する資格を有する搭乗員がスケジューリングされる。また、これらの任務には共通した優先順位があることも述べたが、それがためにここで考えるフライト・スケジューリングを次のように逐次的に実施する。すなわち、養成訓練に関するスケジューリングを実施した後、その結果を既定の固定して、応急待機に関するスケジューリング、最後に練度維持訓練及び教官指定に関するスケジューリングを行う。以降では、各スケジューリングの目的関数、制約条件等の詳細を説明してゆく

3.1 制約条件

各スケジューリングで用いられる制約条件を大きく分類すると、次のように4つに分けられる。

(1) 座席制約

各訓練形態において搭乗員が座る座席に関する制約である。養成訓練において、訓練生や教官に対する座席がシラバスの中で指定されることが多い。例えば、訓練形態Fの第1席には2PB以上の資格を有する者が座る等の規定がある。

(2) 同乗者制約

同一フライトにおける同乗者間の組合せに関する制約である。資格、隊員の期別、階級等によっては許可されない組合せがある。例えば、すべてのフライトにおいて同期の同乗は禁止されており、あるいは、応急待機において第1席のパイロットの階級及び期別は2席の者より上位であることが要求される、といったものである。

(3) 訓練形態指定制約

これは、養成訓練における訓練形態とその順序に関する制約で、養成訓練課程のシラバスという形で明確に規定されている。

(4) フライト組合せ制約

搭乗員の負荷を斟酌したフライトの組合せに関する制約である。例えば、応急待機要員は、当日及びその前後日のすべてまたは一部のフライトへの割当ては禁止されている。あるいは、シミュ

レータによる訓練を受けた直後の実機によるフライトは、人間の五感の上から危険であるとされ禁止されている。

これらすべての種類の制約条件は、すべての任務形態に多かれ少なかれ含まれている。しかしながら、個々の逐次スケジューリングの特徴を明らかにする意味で、それぞれの定式化においてそれらの制約の数がどの程度となるかを表1に示す。

表1 スケジューリング対象と制約条件の厳しさ

スケジュール 対象	制約条件			
	座席	同乗者	訓練形態指定	フライト組合せ
1PA 養成訓練	○	○	◎	○
1PB 養成訓練	○	○	◎	○
1PC 養成訓練	△	○	◎	○
2PA 養成訓練	△	○	◎	△
習熟訓練	△	△	◎	△
慣熟訓練	△	△	◎	△
SMA 養成訓練	○	○	◎	○
SMB 養成訓練	△	△	◎	△
SMC 養成訓練	△	△	◎	△
慣熟訓練	△	△	◎	△
応急待機	○	◎		◎
練度維持訓練	△	△		△

◎：非常に厳しい，○：ある程度制約を受ける，△：多少制約を受ける

3.2 混合整数計画問題による定式化

以下では、任務形態ごとに行うスケジューリングの具体的な定式化を述べてゆくが、制約条件をすべて記載することは紙数の上から無理であるため、その幾つかだけを示す。多くの整数計画問題でもそうであるが、制約の意味するところを0-1変数の線形制約式に置き換える作業に、時に大きな工夫を、時に小さな工夫を要する。制約の分類で言えば、訓練形態指定制約は時間的順序関係をもち、他の制約とは性質を異にするが故に、数理的にも詳述する価値がある。また、パイロットのスケジューリングを主として解説し、センサーマンに関する記載はできるだけ割愛する。以上のような省略と詳述を混ぜながら、この研究で採用した定式化を述べてゆく。まず共通して使用する記号を定義し、個別のスケジューリングで使用する記号はそれぞれの定式化で記述する。

記号の定義

$D = \{1, 2, \dots, 7\}$: スケジューリング対象日の集合 (1週間)

P : パイロットの集合

S : センサーマンの集合

P_{Ns} : 資格 $s \in \{1PA, 1PB, 1PC, 2PA, 2PB, 2PC, D\}$ をもつノンシラバス・パイロットの集合

P_s : 養成訓練課程 $s \in \{1PA, 1PB, 1PC, 2PA, S_y, PKa\}$ に属するシラバス・パイロットの集合。

ただし、 S_y は習熟訓練生の集合、 PKa は慣熟訓練生の集合である。

r_p : パイロット p の階級

r_s : センサーマン s の階級

a_p : パイロット p の期別番号

r_s : センサーマン s の期別番号

A_k^P : 期別 k のパイロットの集合
 F : 全フライト集合. ただし, フライトには早いものほど若い番号が付けられている.
 F : 全夜間フライトの集合
 F^l : 訓練形態 $l \in \{F, W, O, T, N\}$ の全フライト集合
 F_k^l : k 日における訓練形態 l のフライト集合
 F_k^R : k 日の応急待機フライト集合
 $F_{k,t}^l$: k 日の午前, 午後, ナイト ($t \in \{AM, PM, N\}$) における訓練形態 l のフライト集合
 A_a^M : 搭乗員 $M \in \{P, S\}$ の a 期の同期集合
 C_P : パイロットの座席集合
 C_S : センサーマンの座席集合
 C_P^l : パイロットの訓練形態 $l \in \{F, W, O\}$ での座席
 C_S^l : センサーマンの訓練形態 $l \in \{F, W, T, N\}$ での座席
 C_P^{l+} : パイロットの訓練形態 $l \in \{F, W, O\}$ での補助座席
 C_S^{l+} : センサーマンの訓練形態 $l \in \{F, W, T, N\}$ での補助座席

(1) 変数と共通制約

使用する変数は次のような2つの0-1変数である.

- x_{pfc} : パイロット $p \in P$ がフライト $f \in F$ で座席 $c \in C_P$ に搭乗する場合は1, そうでなければ0.
- y_{sfc} : センサーマン $s \in C_S$ がフライト $f \in F$ で座席 $c \in C_S$ に搭乗する場合は1, そうでなければ0.

すべてのスケジューリングで考慮すべき制約は全部で14種類を数えるが, その一例として次のようなものがある.

- 各フライト (訓練装置も含む) の席には必ず1人は搭乗する.

$$\sum_{p \in P} x_{pfc} = 1, \quad c \in C_P^l, f \in F^l, l \in \{F, W, O\} \text{ or } f \in F_P$$

$$\sum_{s \in S} y_{sfc} = 1, \quad c \in C_S^l, f \in F^l, l \in \{F, W, T, N\} \text{ or } f \in F_S$$

- パイロットは, 訓練装置による訓練を実施した同じ日に, 実機によるフライトはできない.

$$\sum_{l \in \{W, O\}} \sum_{c \in C_P^l} \sum_{f \in F_{k,l}^{AM}} x_{pfc} + \sum_{c \in C_P^F} \sum_{f \in F_{k,F}^{PM}} x_{pfc} + \sum_{c \in C_P^F} \sum_{f \in F_{k,F}^N} x_{pfc} \leq 1, \quad p \in P, k \in D$$

$$\sum_{l \in \{W, O\}} \sum_{c \in C_P^l} \sum_{f \in F_{k,l}^{PM}} x_{pfc} + \sum_{c \in C_P^F} \sum_{f \in F_{k,F}^N} x_{pfc} \leq 1, \quad p \in P, k \in D$$

センサーマンに関する制約にはパイロットに関するそれによく似たものがあり, 以下では, パイロットに関するものだけを示す.

(2) パイロット養成訓練のスケジューリング

ここで定式化する混合整数計画問題の目的関数と制約条件は以下のとおりである. 養成訓練に関する最も重要な訓練形態指定の制約は, 別に詳述する. パイロットの養成訓練に関しては全部で1

8種類の制約があるが、その一例を下に示した。各日の養成訓練フライト割当数の最大を最小化するようにスケジューリングを行うことで、養成訓練数を各日に平準化させる。

定式化: 各養成訓練種類 $L = \{Ka, Sy, 2PA, 1PC, 1PB, 1PA\}$ に対する次の問題

$\min_x \eta$

$$\sum_{p \in P_L} \sum_{l \in \{F, W, O\}} \sum_{c \in C_P^l} \sum_{f \in F_k^l} x_{pfc} \leq \eta, \quad k \in D$$

- (慣熟訓練) WSTの教官は1PA以上で、装置を操作するコンソール員はノンシラバス1PCまたは1PB

$$2 \sum_{p \in P_{Ka}} x_{pf1} \leq \sum_{p \in P_{N1PA}} x_{pf2} + \sum_{p \in P_{N1PC} \cup P_{N1PB}} x_{pfc}, \quad f \in F^W \quad (1)$$

- (2PA養成訓練) 教官は1PA以上 (検定フライト以外)

$$\sum_{p \in P_{2PA}} x_{pf1} \leq \sum_{p \in P_{N1PA}} x_{pf2}, \quad f \in F \quad (2)$$

(3) 応急待機のスケジューリング

ここで使用する特有の記号、定式化における目的関数、制約条件の例は以下のとおりである。制約条件は全部で12種類を考慮した。ここでのスケジューリングは、レディに割り当てられた搭乗員の (その分類に関する過去割当回数) \times (その分類の重み) の総和の最小化の下でなされる。

記号の定義:

F_k^{lR} : k 日目の第 $l = 1, 2$ 応急待機のフライト番号集合

F_k^R : k 日目の応急待機フライト番号集合。 $F_k^R = \cup_{l \in \{1, 2\}} F_k^{lR}$

F^{lR} : 第 l 応急待機フライト番号集合。 $F^{lR} = \cup_{k \in D} F_k^{lR}$

$C_P^R = \{1, 2\}$: 応急待機のパイロット席

$C_S^R = \{3, 4\}$: 応急待機のセンサーマン席

P_V : 右席のみ座るベテランパイロット

P_2^R, S_2^R : 前週の応急待機割に2回就いたパイロット集合、及び、同センサーマン集合

rt_p^H, rt_s^H : パイロット p , またはセンサーマン s の休日待機実績 (回数/過去2ヶ月)

rt_p^l, rt_s^l : パイロット p , またはセンサーマン s の第 l 応急待機実績 (回数/過去2ヶ月)

Rw^H : 休日レディの重み

Rw^l : 第 $l = 1, 2$ レディの重み。 (通常は $Rw^H > Rw^1 > Rw^2 = 1$ と設定する)

定式化:

$$\min_{x, y} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C_P^R} \left(\sum_{f \in F_6^R \cup F_7^R} Rw^H \cdot x_{pfc} \cdot rt_p^H + \sum_{l \in \{1, 2\}} \sum_{f \in F^{lR}} Rw^l \cdot x_{pfc} \cdot rt_p^l \right) \\ + \sum_{s \in S} \sum_{c \in C_S^R} \left(\sum_{f \in F_6^R \cup F_7^R} Rw^H \cdot y_{sfc} \cdot rt_s^H + \sum_{l \in \{1, 2\}} \sum_{f \in F^{lR}} Rw^l \cdot y_{sfc} \cdot rt_s^l \right)$$

- 1席のパイロットの階級は2席の者以上、また期別も上位である。

$$\sum_{p \in P} x_{pf1} r_p \geq \sum_{p \in P} x_{pf2} r_p, \quad f \in F_k^R, \quad k \in D$$

$$\sum_{p \in P} x_{pf1} a_p + 1 \leq \sum_{p \in P} x_{pf2} a_p, \quad f \in F_k^R, \quad k \in D$$

- 第1レディ要員の当日のフライトはすべて禁止.

$$\sum_{f \in F_k^{1R}} \sum_{c \in C_P^R} x_{pfc} + \sum_{l \in \{F, W, O\}} \sum_{f \in F_k^l} \sum_{c \in C_P^l \cup C_P^{l+}} x_{pfc} \leq 1, \quad p \in P, \quad k \in D$$

(4) 練度維持訓練及び教官指定のスケジュールリング

ここでの定式化で採用する目的関数は、ある(訓練形態, 時間帯, 座席)に割り当てられた搭乗員の(当該分類の過去の実績) × (当該分類の重み)の総和とするが、目的関数は大変長い式となるので記述は割愛させていただく。留意すべきことは、養成訓練のスケジュールリングを経て得られた訓練生の割当て変数 x_{pcf} は固定するものの、教官としてそのフライトに一時的に設定された値はここでは再び変数としてクリアーされ、教官の制約を満足する他の部隊員が養成訓練のフライトに割り振られることもある。

教官指定の制約としては、次の例のように養成訓練スケジュールリングで一度考慮されたものが用いられ、養成訓練のフライトに教官として乗り込むことも、また練度維持訓練の一環として補助者としてノンシラバス者が同乗することもあり得る。練度維持訓練特有の制約条件は特になく、共通制約の下で、これまで固定されずに空席となっているフライトの席にノンシラバス者が割り当てられることになる。

- 1PB養成訓練のOFT訓練では、教官として左席は1PA以上、3席には2PA、1PC資格を有するノンシラバスパイロットが搭乗する。

$$2 \sum_{p \in P_{1PB}} x_{pf1} \leq \sum_{p \in P_{N1PA}} x_{pf2} + \sum_{p \in P_{N2PA} \cup P_{N1PC}} x_{pf a}, \quad f \in F^O$$

(5) 養成訓練シラバスを満足するフライト割当法

ここで述べる制約条件はパイロット養成訓練のスケジュールリングの際に組み込まれるべきものであるが、特殊な制約であるため、ここに別記している。記号と変数の定義、及びすべての制約条件は以下のとおりである。

記号の定義:

$P_S = P_{K_a} \cup P_{S_y} \cup P_{2PA} \cup P_{1PA} \cup P_{1PB} \cup P_{1PA}$: パイロットのシラバス訓練生の集合

$S_S = S_{K_a} \cup S_{SMC} \cup S_{SMB} \cup S_{SMA}$: センサーマンのシラバス訓練生の集合

$F_P^{ALL} = F^F \cup F^W \cup F^O$: パイロットが搭乗する全フライト

$F_S^{ALL} = F^F \cup F^W \cup F^T \cup F^N$: センサーマンが搭乗する全フライト

L_p, L_s : それぞれパイロット p , センサーマン s が予定しているシラバス数

SY_p^l, SY_s^l : それぞれパイロット p , センサーマン s のシラバスにおいて、 l 種の訓練形態をとる順番

L_p^l, L_s^l : それぞれパイロット p , センサーマン s のシラバスにおける l 種訓練形態の総数

最後の2つの記号を理解し易くするため、シラバスの一例として、1番目シラバスでは実機によるFをこなし、2番目にはOFTによる装置訓練、3番目にも実機フライト、4番目にはWSTによる装置訓練が予定されているものとする、上記の記号の設定は、 $SY_p^F = \{1, 3\}$, $SY_p^W = \{4\}$, $SY_p^O = \{2\}$, 及び $L_p^F = 2$, $L_p^W = 1$, $L_p^O = 1$ となる。

制約を表現するため、次の変数を新たに用いる。

$$\bullet \quad z_{pfcd} (z_{sfcd}) = \begin{cases} 1, & \text{パイロット } p \text{ (センサーマン } s) \text{ が } d \text{ 番目シラバスを} \\ & \text{フライト } f, \text{ 座席 } c \text{ で飛ぶ場合,} \\ 0, & \text{そうでなければ} \end{cases}$$

この変数を使って、パイロットの養成訓練シラバスのデータ SY_p^l , L_p^l を満足するための制約式を考える。まず、全般を通じて使用している 0-1 変数 x と変数 z との整合性を表現するのが次の条件である。

$$x_{pfc} = \sum_{d=1}^{L_p} z_{pfcd}, \quad p \in P_S, \quad f \in F_{ALL}, \quad c \in C_P \quad (3)$$

また、訓練生が d 番目シラバスを飛ばすフライトは 1 つだけであるから、その単独性を次の制約で表現する。

$$\sum_{f \in F_{ALL}} \sum_{c \in C_P} z_{pfcd} = 1, \quad d = 1, \dots, L_p, \quad p \in P_S \quad (4)$$

同様に、順番 $d \in SY_p^l$ のシラバスは l 種訓練形態を使用した 1 度きりのフライトで行われるから、訓練形態種別での単独性は次式で表すことができる。

$$\sum_{f \in F_p^l} \sum_{c \in C_P} z_{pfcd} = 1, \quad d \in SY_p^l, \quad l \in \{F, W, O\}, \quad p \in P_S \quad (5)$$

最も大事な制約として、 d 番目シラバスを飛ばす以前のフライトには、 $d-1$ 番目までのシラバスが割り当てられている必要がある。その順序関係を保障する制約が次式である。

$$\begin{aligned} & (L_p + d) \left(\sum_{c \in C_P} z_{pfcd} - 1 \right) \\ & \leq \sum_{d'=1}^{L_p} \sum_{f' \leq f, f' \in F_P} \sum_{c \in C_P} z_{pf'cd'} - d + L_p \left(\sum_{f' \geq f, f' \in F^l} \sum_{c \in C_P} z_{pf'cd} - 1 \right) \leq 0, \\ & \quad f \in F^l, \quad d \in SY_p^l, \quad l \in \{F, W, O\}, \quad p \in P_S \quad (6) \end{aligned}$$

この制約には二重の意味がある。 d 番目シラバスのフライト f への割当てにより $\sum_{c \in C_P} z_{pfcd} - 1 = 0$ となるが、このとき両辺で挟まれる式はゼロとなる。それがすなわち、このフライト f 以前に合計 d 個のシラバスがスケジュールされていなければならないことを意味する。もし、このフライト f に割り当てされず、 $\sum_{c \in C_P} z_{pfcd} = 0$ であれば、この不等式は結果的に何の制約も課さないものとなる。

以上の制約条件式は、次のようなケースにも容易に拡張できる。

1. 複数種フライトの許可：訓練形態種別が A でも B でも構わないシラバス番号の集合を SY_p^{AB} で表すと、条件式 (5), (6) をそれぞれ次のように修正すればよい。

$$\sum_{f \in F_p^A \cup F_p^B} \sum_{c \in C_P} z_{pfcd} = 1, \quad d \in SY_p^{AB}, \quad p \in P_S \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (L_p + d) \left(\sum_{c \in C_P} z_{pfcd} - 1 \right) \\ & \leq \sum_{d'=1}^{L_p} \sum_{f' \leq f, f' \in F_P} \sum_{c \in C_P} z_{pf'cd'} - d + L_p \left(\sum_{f' \geq f, f' \in F^A \cup F^B} \sum_{c \in C_P} z_{pf'cd} - 1 \right) \leq 0, \\ & \quad f \in F^A \cup F^B, \quad d \in SY_p^{AB}, \quad p \in P_S \quad (8) \end{aligned}$$

2. 訓練形態と飛行時間帯の指定：夜間における実機フライトのように，訓練形態種別 A で時間帯 T と指定のあるシラバス群を SY_p^{AT} で表すと，条件式 (5) 式は次のように修正され，(6) 式では訓練形態種別 $l = A$ のものを使用すればよい。

$$\sum_{k \in D} \sum_{f \in F_{k,A}^T} \sum_{c \in C_P} z_{pfc} = 1, \quad d \in SY_p^{AT}, \quad p \in P_S$$

4 数値例

ここでは，航空機部隊における標準的なフライト数の約 1.5 倍（1 週間における空のフライト 45 本）に対し，部隊員 81 名をスケジューリングした。使用したハードウェアは，Pentium4 搭載の富士通 FMV (60GHz) であり，混合整数計画問題に対するソルバーとしては市販ソフト NUOPT (Ver.6) を使った。スケジューリング上最も負荷となる養成訓練におけるシラバスの数は 21 を想定したから，45 本のフライトの約半数は養成訓練に割り当てられる。使用したパイロットのデータは，保有資格，クリアすべきシラバス，応急待機資格，期別，階級及び次の項目に関する過去の実績である。応急待機回数，座席毎に取得した総飛行時間と夜間飛行時間，訓練装置による訓練回数，必要な最低飛行時間。

得られた結果をフライト線表上に書き写したものが図 1 である。フライトを示す各線分の直前にはそのフライト番号を，線分の上に個人の固有番号が記入されている。また，逐次スケジューリングを実施し解を得るのに要した時間を表 2 に記載した。ただし，センサーマン (SM) の養成訓練には，すべての課程に対する同時スケジューリングを実施した。

表 2 解導出の所要時間

	1PC	1PB	1PA	2PA	習熟	慣熟	SM	応急待機	練度維持	計
所要時間 (s)	73.7	52.5	15.9	25.0	49.7	18.7	13.2	477.8	0.75	727.2

応急待機スケジューリングでは，フライトの組合制約や同乗者制約が厳しいため実行可能領域が狭く，最適解導出までの計算時間が大きい。また練度維持訓練スケジューリングでは，多くの搭乗員割当はすでに終了しているから，瞬く間に最適解が得られている。

5 おわりに

提案した逐次スケジューリング手法を，現実的なデータに適應した結果，現行の人手による所要時間をおよそ 30 分の 1 にする効果があり，制約の組込みの厳密化と所要時間の短縮化の面では相当な効果がある。またスケジューリングには膨大な個人の実績データを用いるため，予めデータ処理ソフトに掛ける等の事前処理により，更なる効率化を望むことができる。

参考文献

- [1] J. Barnhart, L. Hatay and E. Johnson, Deadhead selection for the long-haul crew pairing problem, *Operations Research*, **43**, pp.491-499, 1995.
- [2] R. Brown, Optimizing readiness and equity in Marine Corps aviation training schedules, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1995.
- [3] J.F. Raffensperger and S. Sword, Scheduling Prowler training, *Naval Research Logistics*, **50**, pp.289-305, 2003.

		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1日 (日)	1R:8 18 64 71																
	2R:12 16 67 74																
2日 (月)	日没:1714			11	22	31	70	58									
	TGL P M			12	18	14	71	81									
	1R: 6 24 65 67 2R: 5 26 58 76			13	26	8	62	79									
3日 (火)	日没:1714			14	7	30	53	52									
	TGL A M			21	25	13	56	79									
	1R:12 27 60 77 2R: 7 19 54 66			22	20	15	71	78									
4日 (水)	日没:1715			31	1	15	74	79									
	TGL AM-PM			32	25	31	69	78									
	1R:13 17 68 71 2R:16 21 61 63			33	18	9	70	81									
5日 (木)	日没:1715			34			82	53	56								
	TGL P M			41	25	31	69	80									
	1R:8 18 64 74 2R:5 26 58 73			42	22	9	52	67	54								
6日 (金)	日没:1715			51	10	14	60	57									
	TGL A M			52	17	12	53	68									
	1R: 7 27 65 66 2R:19 28 54 76			53	23	3	79	70									
7日 (土)	1R:13 24 68 77 2R:6 17 60 63			54	1	30	52	81									

図1 ステジューリング結果