学生実験のスケジューリングシステムの構築

真野　洋平，橋本　英樹，柳浦　睦憲

名古屋大学工学部電気電子・情報工学科の電気電子工学コースでは 3 年時に電気電子工学実験を履修する．前期実験では，学生は A，B，C の 3 コースのいずれかに配属され，同じコースの学生 3〜4 人が 1 つのグループになり，半年かけて 11 個の実験を順番に実施する．例年，どの学生グループがどの実験をいつ行うかを決定するスケジュールは手作業で作成されてきた．しかし，スケジュールが満たすべき条件として，必修実験を行った後に各コースの実験を行う，実験室の都合により同時に実施できない実験があるなどの多くの制約があり，これらを満足するスケジュールを作成することは負担の大きな作業であった．本研究では，この作業を自動化するスケジューリングシステムの構築を行った．

キーワード：学生実験，スケジューリング問題，最適化

1. はじめに

名古屋大学工学部電気電子・情報工学科の電気電子工学コースでは 3 年時に電気電子工学実験を履修する．前期実験では，学生は A，B，C の 3 コースのいずれかに配属され，同じコースの学生 3〜4 人が 1 つのグループになり，半年かけて 11 個の実験を順番に実施する．例年，実験に参加する学生数は 120 名程度であり，どの学生グループがどの実験をいつ行うかを決定するスケジュールは人手で作成されてきた．実験のスケジュールは，担当教員や実験室などの制約と年度ごとの事情を考慮した条件を満足することが求められる．このようなスケジュールを作成することは，担当者にとって非常に負担のかかる作業となっていた．そこで，この作業の負担を軽減するため，必要なデータを入力するだけでこの問題を解決するシステムが求められていた．

このような大学の業務の自動化にはさまざまな試みがある [3, 4, 5, 6]．そのような業務のほとんどにおいて一般に，大学や部局には固有の制約や要望が多数存在するため，個々の事例に応じてモデル化を行い，システムを作る必要がある．

本研究では，前期実験のスケジューリングを計算機により自動的に解決するシステムを構築する．まず，これまで手作業でスケジュールを作成していた担当者にヒアリングを行って問題のモデルを設定した．本システムでは，それを重み付き制約充足問題 (weighted constraint satisfaction problem, WCSP) として定式化し，既存の WCSP ソルバを適用することでスケジュールの作成を行う．また，ユーザが本システムを容易に利用できるように，データの入力や結果の表示を Excel 上で行うユーザインターフェースを実装した．

本研究では，電気電子工学実験の後期実験において，学生の希望を考慮して実験テーマに学生を割り当てるシステムも構築した．この割当システムでは，問題を複雑な個数制約のついた一般化割当問題として定式化し，文献 [2] のソルバを利用して解を求めている．本稿では紙面の都合上この割当システムについての詳細は省略し，以下では前期実験のスケジューリングシステムについて報告する．

2. 学生実験のスケジューリング

本節では，学生実験のスケジューリングについて説明する．まず，平成 23 年度の電気電子工学実験において，実際に人手で作成され使用されたスケジュール S_{manual}（図 1）を紹介する．表中の数字は学生グループの番号を表す．

例年 120 人程度の学生が A，B，C の 3 コースに分かれ，前期の間毎週 1 つ，合計 11 個の実験を行う．実験を実施する期間は，4 月から 7 月の毎週火曜日と水曜日（約 28 回分）である．11 個の実験のうち R1，R2，R3 と呼ばれる 3 つの実験は全コース共通の実験で，残りの 8 つがコース別に行う実験である．各コースの 8 つの実験は，A コースであれば A1, A2, . . . , A8 のように，コース名と番号で名前がつけられている．ただし，実験の中には複数のコースで実施するものもあり，そのような実験には A1B6 や B1C7 のように，各コースの実験名を合わせた名前がつけられている．学生は 3 人もしくは 4 人で構成されるグループを組み，グルー

まの　ようへい，はしもと　ひでき，やぎうら　むつのり
名古屋大学大学院　情報科学研究科
〒 464–8601 名古屋市千種区不老町

実験テーマ	4月						5月							6月									7月			
	6	13	19	20	26	27	10	11	17	18	24	25	31	1	7	8	14	15	21	22	28	29	5	6	12	13
R1		1	2	3	4	5	6																			
		7	8	9	10	11	12																			
		13	14	15	16	17	18																			
R2			1	2	3	4	5	6	13	14	17	18														
			7	8	9	10	11	12	15	16																
R3			13	14	1	2	7	8	3	4	5	6														
					15	16	17	18	9	10	11	12														
A1 B6							1	2	5	6	3	4	7	8			11	12	9	10						
A2 B7							3	4	1	2			5	6	7	8			11	12	9	10				
A3C6													3	4	5	6	13	14	1	2	17	18	15	16		
A4											1	2			3	4									5	6
A5																	3	4			1	2	5	6		
B1 C7					7	8	9	10	11	12			13	14			17	18	15	16						
B2C8									7	8	9	10	11	12	13	14			17	18	15	16				
B3 A6											7	8	9	10	11	12	1	2			5	6	3	4		
B4															9	10			7	8			11	12		
B5																	9	10			7	8			11	12
C1 A7					13	14	15	16	17	18			1	2			5	6	3	4						
C2 A8							13	14			15	16	17	18	1	2			5	6	3	4				
C3 B8											13	14	15	16	17	18	7	8			11	12	9	10		
C4															15	16			13	14			17	18		
C5																	15	16			13	14			17	18

図 1　人手で作成された平成 23 年度スケジュール S_{manual}（実験日のみ）

プで実験を行い，実験内容を報告書にまとめ，各実験の翌週以降にその実験の担当教員による口頭試問を受ける．平成 23 年度は，グループを 2 種類に分けてスケジュールが組まれていた．一方のグループは毎週火曜日に実験，翌週の水曜日にその口頭試問を行い，もう一方のグループは毎週水曜日に実験，翌週の火曜日にその口頭試問を行っている．

この問題のモデルを設定するにあたって，前期実験のスケジュール担当者と協議を重ねた結果，スケジュールが満たすべき条件がいくつかあることがわかった．これは段階的かつ効果的に学習できるようなカリキュラムにするため，または教員や実験室の都合を調整するためであり，例として，「R1 の実験を行わなければ R2 の実験を行えない」，「R3，B3A6，B4 のうち 2 つの実験までしか同時に行うことができない」などが挙げられる．教員と学生の双方の視点から，最終的に以下に挙げる 12 種類の制約が必要であると判断した．

C_1: 各学生グループは 1 日に 1 つの実験か口頭試問しか受けられない．

C_2: 各実験ごとに 1 日に受け入れ可能な学生グループ数は決められている．

C_3: ある実験を行わなければ別の実験を行ってはならないなど，実験間の先行関係がある．

C_4: 各実験の口頭試問はその実験を行った日の翌週以降でなければならない．

C_5: 実験から口頭試問までの期間は可能な限り短いことが望まれる．

C_6: 各実験の開催期間（その実験にグループが割り当てられている最初の日から最後の日までの期間）は可能な限り短いことが望まれる．

C_7: 各実験は可能な限り早い時期に終わることが望まれる．

C_8: ある実験に関する口頭試問のある日には可能な限りその実験が行われていることが望まれる．

C_9: 各学生グループに対し，実験を行う曜日が毎回同じであることが望ましい．

C_{10}: 特定のいくつかの実験／口頭試問に対して同日に実施できる実験数／グループ数に制限がある．

C_{11}: 特定の実験／口頭試問を特定の日に実施することを禁止する．

C_{12}: スケジュールの最終週の 2 日間は実験を行ってはならない．

以上の制約条件を満たす実験と口頭試問のスケジュールを決定することがこの問題の目的である．制約条件をすべて満たすことが望ましいが，通常これは困難である．そのため多くの場合いくつかの制約を破らざるを得ないが，その際，必ず守らなければならない制約（絶対制約）をすべて満たしたうえで，可能な限り守ることが望ましい制約（考慮制約）をできるだけ多く充足することを目指す．ただし，この場合のスケジュールの評価基準は明確でなく，最終的な判断はスケジュール作成者に委ねられている．

3. 重み付き制約充足問題

本節では，実験のスケジューリング問題を解くために用いる重み付き制約充足問題 (WCSP) について述べる．

制約充足問題 (constraint satisfaction problem, CSP) とは，n 個の変数 X_i $(i=1,2,\dots,n)$ と各変数 X_i の値集合 D_i，m 個の制約 C_l $(l=1,2,\dots,m)$ が与えられたとき，すべての制約を満たすように各変数 X_i に値 $j \in D_i$ を割り当てる問題である．ここで，各制約 C_l は変数 $X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_{t_l}}$ に対する t_l-項制約であり，それらの変数が同時にとることのできる値の組の集合で与えられる．制約 C_l に現れる変数の添字集合を $I_l = \{i_1, i_2, \dots, i_{t_l}\}$ とおく．

変数 X_i とその値 $j (\in D_i)$ の組それぞれに対し値変数 x_{ij} を

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{変数 } X_i \text{が値 } j \text{ をとる} \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \tag{1}$$

と定義し，割当てを 0-1 ベクトル $\boldsymbol{x} = (x_{ij} \mid i = 1,2,\dots,n,\ j \in D_i)$ で表す．ここで，各変数にはちょうど 1 つの値が割り当てられるため

$$\sum_{j \in D_i} x_{ij} = 1, \quad i = 1,2,\dots,n \tag{2}$$

でなければならない．等式 (2) を満たす 0-1 ベクトル $\boldsymbol{x}$ を CSP の解と呼び，さらに，すべての制約を満たす解を実行可能解と呼ぶ．CSP の目的は実行可能解を求めることであるが，とくに現実の応用において必ずしも実行可能解が存在するとは限らない．このような状況に対応するため，CSP を制約違反最小化問題として扱う．すなわち，各制約 C_l に制約違反度を表すペナルティ関数 $p_l(\boldsymbol{x})$ を導入し，これを最小化する．ただし，解 $\boldsymbol{x}$ が C_l を満たすとき $p_l(\boldsymbol{x}) = 0$，満たさないとき $p_l(\boldsymbol{x}) > 0$ であるとする．また，制約間の重要度の違いを考慮するため，各制約 C_l はペナルティ重み $w_l > 0$ を持つものとする．これにより，この問題は

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & p(\boldsymbol{x}) = \sum_{l=1}^{m} w_l p_l(\boldsymbol{x}) \\ \text{subject to} & (2) \end{array}$$

となる．以下ではこの問題を重み付き制約充足問題 (weighted CSP, WCSP) と呼ぶ．

一般に，各制約 C_l の表現方法は一意ではなく，等式や不等式，非等式，論理式など，問題に応じて適切な表現方法を自由に用いることができる．今回使用したソルバ [1] では基本的な制約として線形等式・不等式制約と all_different 制約の 2 種類が使用できる．

- 線形等式・不等式制約 C_l: $\displaystyle\sum_{i \in I_l} \sum_{j \in D_i} a_{lij} x_{ij} \sim b_l$.
  ここで，記号 $\sim$ は $=$，$\leq$，$\geq$ のいずれかを表すものであり，係数 a_{lij} および b_l は整数値であるとする．ペナルティ関数は，左辺を $f_l(\boldsymbol{x})$ として

$$p_l(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} |f_l(\boldsymbol{x}) - b_l| & f_l(\boldsymbol{x}) = b_l \text{のとき} \\ \max\{f_l(\boldsymbol{x}) - b_l, 0\} & f_l(\boldsymbol{x}) \leq b_l \text{のとき} \\ \max\{b_l - f_l(\boldsymbol{x}), 0\} & f_l(\boldsymbol{x}) \geq b_l \text{のとき} \end{cases}$$

  で与えられる．
- all_different 制約 C_l: all_different(V_l).
  与えられた変数集合 $V_l \subseteq \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ に対し，V_l に含まれる変数すべてが互いに異なる値をとらなければならない．ペナルティ関数は

$$p_l(\boldsymbol{x}) = |V_l| - |\{j \mid \exists X_i \in V_l, x_{ij} = 1\}|$$

  で与えられる．

4. 重み付き制約充足問題としての定式化

本節では，前期実験のスケジューリング問題を前節で紹介した重み付き制約充足問題 (WCSP) として定式化する方法を述べる．

ここで，問題をより一般的にするため，学生グループの集合を $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$，実験の集合を $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$，各実験 e を行う学生グループの集合を $G_e \subseteq G$ とし，$n_e = |G_e|$ とする．また，実験日は実験初日を第 1 回とした回数で表現し，実験の最終日を第 d_L 回として，実験可能な日の集合を $D = \{1, 2, \dots, d_L\}$ とする．

各学生グループ g と各実験 e に対応して変数 $X_{g,e}, Y_{g,e}$ を用意する．ここで $X_{g,e}$ は実験の日を割り当てる変数，$Y_{g,e}$ は口頭試問の日を割り当てる変数であり，ともに D のいずれかの値をとる．ただし，口頭試問を行わない実験に対しては変数 $Y_{g,e}$ を用意しない．また $x_{g,e,d}$ を，変数 $X_{g,e}$ が値 d をとるとき，$x_{g,e,d} = 1$，そうでないとき 0 とする（$y_{g,e,d}$ も同様）．

以降では，2 節で挙げた 12 個の制約条件を線形等式・不等式制約もしくは all_different 制約で記述する方法を述べる．

C_1: 各学生グループは 1 日に 1 つの実験か口頭試問しか受けられない．各グループ $g \in G$ に対して，

$$\text{all\_different}(\{X_{g,e_1}, \dots, X_{g,e_m}, Y_{g,e_1}, \dots, Y_{g,e_m}\})$$

とすることでこの制約を表現する．この制約式は各学生グループに割り当てられるすべての実験と口頭試問の実施日が異なることを表している．

C_2: 各実験 e に対し，1 日に受け入れ可能なグループ数の上限 u_e が与えられている．1 日に受け入れ可能なグループ数が 2 以上 $(u_e \geq 2)$ である実験 e に対する制約は

$$\sum_{g \in G_e} x_{g,e,d} \le u_e, \quad \forall d \in D \tag{3}$$

と記述できる．また 1 日に受け入れ可能なグループ数が 1 $(u_e = 1)$ である実験に対する制約は

$$\text{all\_different}(\{X_{g,e} \mid g \in G_e\})$$

と記述できる．線形不等式 (3) でも記述できるが制約数が増えてしまうため，all_different で記述した．

C_3: ある実験を行わなければ別の実験を行ってはならないなど，実験間に先行関係がある．例えば，実験 e_1 を行わなければ実験 e_2 を行うことはできないという制約は次のように記述できる:

$$x_{g,e_2,d} \le \sum_{d'<d} x_{g,e_1,d'}, \quad \forall d \in D, \forall g \in G.$$

この式は第 $d-1$ 日以前に e_1 が行われていた場合に（右辺）$=1$ となり，e_2 が第 d 日に実験を行うか否かを表す左辺が 1 の値をとることが可能になる．そうでない場合は（右辺）$=0$ となり，（左辺）$=0$ とならざるをえないため，e_2 を第 d 日に実施することはできなくなる．また，e_1 か e_2 のどちらかの実験を行わなければ e_3 を行うことができないという制約は次のように記述できる:

$$x_{g,e_3,d} \le \sum_{d'<d} (x_{g,e_1,d'} + x_{g,e_2,d'}), \quad \forall d \in D, \forall g \in G.$$

この式も $d-1$ 日以前に e_1 か e_2 が行われていた場合に限って（右辺）≥ 1 となり，左辺が 1 の値をとれるようになる．このように制約式の右辺に変数を追加することで，複数の実験のうちいずれかを行った後でなければある実験を行うことはできないという制約を表現できる．

C_4: 各実験の口頭試問の日程はその実験を行った日の翌週以降でなければならない．各実験を行った後，学生は報告書を作成し，担当教員の口頭試問を受ける．この準備に約 1 週間を要するため，口頭試問は実験の翌週[1] 以降に行う必要がある．ある日 d の前の週の最終日を $prev(d)$ とおくと，口頭試問を行う各実験 e に対してこの制約は次のように記述できる:

$$y_{g,e,d} \le \sum_{d' \le prev(d)} x_{g,e,d'}, \quad \forall d \in D, \forall g \in G.$$

C_5: 実験の翌週以降にできるだけ早く口頭試問を行うことが望ましい．そのため，実験の翌々週[1] と 3 週目以降の 2 つの期間に対して制約式を用意し，これらの期間に口頭試問を行った場合に段階的にペナルティをかける（実験の翌週には制約式を用意せずペナルティをかけない）．第 d 日に実験 e を行い，その翌々週のある日 d' に口頭試問を行うことを禁止する制約式を，定数 $\alpha > 0$ を用いて

$$\alpha(x_{g,e,d} + y_{g,e,d'}) \le \alpha, \quad \forall g \in G \tag{4}$$

と記述する．α はこの制約式のペナルティ値を定める整数である．便宜上ある日 d が第 h 週に属することを $week(d) = h$ と記すことにすると，口頭試問を行う各実験 e に対し，d と d' の組で $week(d') = week(d) + 2$（つまり d' は d の翌々週のある日）であるものすべてに対してこの制約式を生成する．$X_{g,e}$ と $Y_{g,e}$ にそのような d と d' が割り当てられた場合，(4) 式は（左辺）$= \alpha(1+1) = 2\alpha$ となり成立せず，このときペナルティは $p_l =$（左辺）$-$（右辺）$= \alpha$ となる．また，第 d 日以前に実験 e を行い，d から 3 週目のある日 d' 以降にその実験の口頭試問を行うことを禁止する制約式を，定数 $\beta > 0$ を用いて

$$\beta\left(\sum_{k \le d} x_{g,e,k} + \sum_{d' \le k} y_{g,e,k}\right) \le \beta, \quad \forall g \in G \tag{5}$$

と記述する．β はこの制約式のペナルティ値を定める整数である．実験の日から 3 週目以降に口頭試問が行われるのは教員と学生の双方にとって不便であるため，そうなることがほとんどないように $\beta \gg \alpha$ とする．口頭試問を行う各実験 e に対し，d と d' の組で $week(d') = week(d) + 3$ であるものすべてに対してこの制約式を生成する．

C_6: 各実験の開催期間は可能な限り短いことが望まれる．実験担当教員にとって自分の担当する実験の開講期間が長くなると，その間の実験開講日に自分の担当する実験が実施される日とそうでない日が混在して不便であるため，実験開講日をまとめたいという要望がある．ある実験 e を行う全学生グループ数 n_e とその実験が 1 日に受け入れ可能な学生グループ数の上限 u_e より最低限必要な日数 t_e を $t_e = \lceil n_e/u_e \rceil$ と計算できる．この t_e よりも長い期間の空いた 2 つの日 d と d' $(d > d' + t_e - 1)$ の組の各々について，d と d' の両日に実験 e を行うことを禁止する制約を各グループ $g \in G_e$ に対して，

[1] 厳密に 1 週間=7 日後以降である必要はなく，翌週であればよい．例えばある週（第 h 週）の水曜日に実験を行い翌週（第 $h+1$ 週）の火曜日にその実験の口頭試問を受けることは問題ない．一方，14 日以上の間隔がなくても翌々週（第 $h+2$ 週）の火曜日に口頭試問を受ける場合は (4) 式によりペナルティがかかる．

$$x_{g,e,d'} \le 1 - \frac{\sum_{g' \in G_e} x_{g',e,d}}{u_e}$$

と記述できる．定式化では，両辺に $(d-d'-t_e+1)u_e$ をかけたものを制約式とする．d と d' の両日に実験 e を行った場合，d' 日に実験 e を行う各グループ g に対する制約式は (左辺) $=$ $(d-d'-t_e+1)u_e$，(右辺) $\le$ $(d-d'-t_e+1)(u_e-1)$ となり成立しない．$d-d'-t_e+1$ はこの制約式が満たされない場合の最小のペナルティ値であり，第 d 日と第 d' 日の間隔が長くなるほどペナルティは大きくなる．この定式化では各グループに対して制約を記述する必要があるが，$u_e=1$ の場合はそれらをまとめて

$$(d-d'-t_e+1) \sum_{g \in G_e} (x_{g,e,d'} + x_{g,e,d}) \le (d-d'-t_e+1)$$

と記述でき，その結果制約数を減らすことができる．そこで，前者の記法は $u_e \ge 2$ の場合に限って用い，$u_e=1$ の場合は後者の記法を用いた．後者の記法においても $d-d'-t_e+1$ はこの制約式が満たされない場合の最小のペナルティ値であり，第 d 日と第 d' 日の間隔が長くなるほどペナルティは大きくなる．d と d' の両日に実験 e を行った場合，この不等式は (左辺) $=$ $(d-d'-t_e+1)(1+1) = 2(d-d'-t_e+1)$ となり成立しない．このときペナルティは $p_l =$ (左辺) $-$ (右辺) $=$ $d-d'-t_e+1$ となる．

C_7: 各実験は可能な限り初日から早い段階で終わることが望まれる．スケジュール全体の期間を短縮するため，各実験の実施日をできる限り前に詰めていく制約である．C_6 で示した最低限必要な実験期間 t_e を用い，各実験 e に対して C_7 を

$$(d-t_e) \sum_{g \in G_e} x_{g,e,d} \le 0, \quad \forall d \in D \text{ s.t. } d > t_e$$

と記述する．どの実験も初日から t_e 日の間に実験が終了することが理想である．$d-t_e$ はこの制約式のペナルティを定める係数であり，第 t_e 日と第 d 日の間隔が長くなるほどこの値は大きくなる．第 t_e+1 日目以降に実験を行った場合，これらの不等式は（左辺）$\ge$ $d-t_e>0$ となり成立しない．このときペナルティは $p_l =$（左辺）$-$（右辺）$\ge d-t_e$ となる．

C_8: ある実験の口頭試問のある日には可能な限りその実験が行われていることが望まれる．実験担当教員にとって口頭試問しか行わない日があることは不便であるため，自分の担当する実験と口頭試問が同時に実施される日を増やしてほしいという要望がある．口頭試問を行う各実験 e に対して C_8 は

$$\sum_{g \in G_e} x_{g,e,d} \ge \sum_{g \in G_e} y_{g,e,d}, \quad \forall d \in D$$

と記述できる．この不等式では実験 e についてある日 d に実験のみを行う場合は（左辺）=1,（右辺）=0, 実験と口頭試問両方を行う場合は（左辺）=1,（右辺）=1, 実験も口頭試問も行わない場合は（左辺）=0,（右辺）=0 となりいずれも成立する．しかし，d に口頭試問のみ行う場合は（左辺）=0,（右辺）=1 となって不等式が成立せず，ペナルティがかかる．

C_9: 各学生グループに対し，実験を行う曜日が毎回同じであることが望ましい．学生にとって週によって実験の曜日が変わるのは不便であり，また実験日を間違えるなどの混乱の元となるため，このような要望がある．日 d と d' $(d<d')$ の組で，同一週ではなく曜日の異なるものすべてに対して制約式

$$\sum_{e \in E} x_{g,e,d} + \sum_{e \in E} x_{g,e,d'} - \sum_{k: d<k<d'} \sum_{e \in E} x_{g,e,k} \le 1$$

を用意することで各グループ $g \in G$ に対する制約 C_9 を記述する．これらの不等式の左辺の第一項と第二項はそれぞれ第 d 日と第 d' 日に学生グループ g が実験を行うとき 1 の値をとる．第三項は g が第 d 日と第 d' 日の間に実験を行うとき 1 以上の値をとる．したがって，グループ g の実験を曜日の異なる第 d 日と第 d' 日に行い，その間に 1 度も実施しないときにペナルティが 1 となる．すなわち，各グループ g に対するこれらの式のペナルティの合計は，g の実験の曜日が切り替わる回数を表している．

C_{10}: 特定の実験／口頭試問に対して同日に実施できる実験数／グループ数に制限がある．実験担当教員や部屋の受け入れ容量などの理由により，同日に実施する際にこのような制限がある実験や口頭試問の組がある．この制約には，複数の実験のなかから一つの実験しか行えないというような実験数に対するものと，複数の実験についてそれらのいずれかを行うグループ数は 1 日あたり高々3 であるというようなグループ数に対するものがある．

まず，グループ数に対する同時実施制限制約について説明する．例えば，e_1，e_2，e_3 の 3 つの実験のいずれかを行うグループ数が 1 日あたり高々2 であることを表す制約式は，各 $d \in D$ に対して，

$$\sum_{g \in G_{e_1}} x_{g,e_1,d} + \sum_{g \in G_{e_2}} x_{g,e_2,d} + \sum_{g \in G_{e_3}} x_{g,e_3,d} \le 2 \quad (6)$$

と記述できる．左辺の値は，第 d 日に e_1，e_2，e_3 のい

ずれかを行ったグループ数の合計を表している．

次に，実験数に対する同時実施制限制約について説明する．1 日に実施可能なグループ数が 1 ($u_e = 1$) である実験同士については，それらのうち実施されている実験数は，それらのいずれかを行っているグループの数と一致するため，グループ数に対する不等式 (6) と同様である．一方，1 日に実施可能なグループ数が 2 以上 ($u_e \geq 2$) である実験が 1 つ以上同時実施制限の対象に含まれる場合にはこのような不等式では制約を表現できない．このうちそのような実験数が 1 である場合は以下のように制約を記述する．例えば，e_1，e_2，e_3 の 3 つの実験に対して $u_{e_1} = u_{e_2} = 1$，$u_{e_3} \geq 2$ であり，これら 3 つのうち高々2 つまでが同時に行えることを表す制約式は，各 $d \in D$ に対して

$$\sum_{g \in G_{e_1}} x_{g,e_1,d} + \sum_{g \in G_{e_2}} x_{g,e_2,d} + \frac{1}{u_{e_3}} \sum_{g \in G_{e_3}} x_{g,e_3,d} \leq 2$$

と記述できる．第 d 日に 3 つの実験が実施された場合は e_3 を行うグループ数に係わらず (左辺) > 2 となって不等式は成立せずペナルティがかかるが，それ以外の場合には (左辺) ≤ 2 となる．しかし，1 日に実施可能なグループ数が 2 以上である実験が 2 つ以上同時実施制限の対象に含まれる場合は，著者らの知る限りこの制約を 1 本の線形不等式で表現することはできず，ある実験をある日に行っているグループが 1 つ以上あるか否かを表す人為変数を導入する必要がある．しかし，このような変数を導入すると今回利用した WCSP ソルバの探索効率が落ちることが予想される．また，前期実験において $u_e \geq 2$ である実験は R1，R2，R3 の 3 つのみであるが，これらに対する同時実施禁止は現在の電気電子工学実験の運用上考える必要がない．したがって，1 日に実施可能なグループ数が 2 以上である実験が 2 つ以上同時実施制限の対象に含まれるような制約の入力を本システムでは受け付けないようにした．口頭試問については，上述の制約式において $x_{g,e,d}$ を $y_{g,e,d}$ に置き換えることで同様に同時実施数を制限できる．

C_{11}: 特定の実験／口頭試問を特定の日に実施することを禁止する．実験担当者や実験室の都合で特定の日に実施できない実験や口頭試問がある．実験 e を第 d 日に行ってはならないことを表す制約は

$$\sum_{g \in G_e} x_{g,e,d} = 0$$

と記述できる．左辺の和の項は第 d 日に実験 e を行うグループ数を表しており，それが 0 になれば第 d 日には実験 e を行わないことを表す．この制約式において $x_{g,e,d}$ を $y_{g,e,d}$ に置き換えることで口頭試問についても同様に制約を表現できる．

C_{12}: スケジュールの最終週の 2 日間は実験を行ってはならない．つまり，実験の候補日集合 D における最後の 2 回（同一週に最後の 2 日が入るように D を用意する）は口頭試問のみを行う日に設定されている．制約 C_4 より，口頭試問を行う各実験に対してその実験を行う最後の週の翌週以降に口頭試問のみを実施する日が必要となる．多くの実験で口頭試問が実施されることから，最後の週の 2 日をこのための日に設定している．各実験 e に対し，最後の 2 日である第 d_L 日と第 $d_L - 1$ 日に実験 e を行わないことを表す制約式は

$$\sum_{g \in G_e} x_{g,e,d_L} = 0, \quad \sum_{g \in G_e} x_{g,e,d_L - 1} = 0$$

と記述できる．

5. 前期実験のスケジューリングシステム

本節では実験のスケジューリングシステムについて説明する．

実験のスケジューリング問題を WCSP に定式化したとき，その問題例の大きさは，平成 23 年度の例ではグループ数 18，実験数 18，実験期間 28 回で，制約条件については約 33,000 個の制約式が必要であった．本研究では，このような制約式や，スケジュール結果をユーザが管理，調整できるようなシステムを目指して，いくつかの工夫を行った．問題の諸条件とユーザにとっての使いやすさを考慮し，Excel VBA を用いて自動スケジューリングシステムのユーザインターフェースを作成した．

まず，手順シートを用意し，その手順に従って操作を進めれば簡単にスケジュールを作成できるようにした（図 2)．ユーザは学生グループのデータ，各実験のデータ，実験期間に関するデータを入力すればよい．ユーザがデータを入力する際に実験名やグループ名の誤入力や未入力の項目が発生しないように，データの整合性のチェックなどを行い，不備があった場合はエラーを返すという工夫をした．システムはこれらのデータから自動的に制約式を生成し，ソルバから解を得て，実験と口頭試問のスケジュールを表示する．

本システムでは実験初日と実験最終日，1 週間のうち実験を行う 2 日分の曜日，期間内の休祝日を入力することで D を決定する．

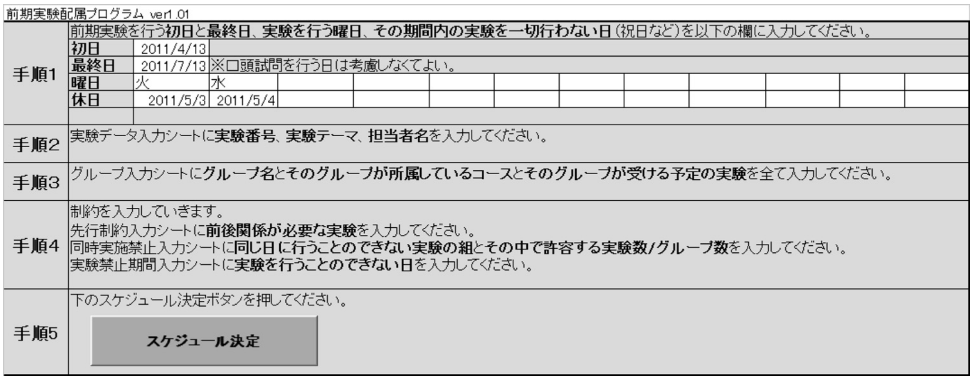

図 2　手順シート

コース分けは各学生グループが実施する予定の実験を入力することで実現する．このデータから実験 e を行う学生グループの集合 G_e と制約式を自動的に生成する．例えば，A コースに属するグループに対しては必修実験の R1–R3 と A コースの実験番号を入力する必要がある．このように各グループが行う実験を入力することによって，A，B，C の 3 コースの場合だけでなく，それ以上の数のコースがある場合にも対応可能であり，各グループにそれぞれ異なる実験集合を割り当てることも可能である．

C_3，C_{10}，C_{11} などの制約では，年度ごとに状況が変わる可能性があるため，それぞれ専用の入力シートを設け，個別に指定できるようにしている．そのなかの一つ一つの制約に対してペナルティ重みを設定できるようにしており，絶対制約か考慮制約かをユーザが決めることができる．また，それ以外の各制約のペナルティ重みも自由に設定できるようになっている．ペナルティ重みは非負整数もしくは inf から自由に選べる（後者の場合，絶対制約と見なされる）．このように自由な制約の入力やパラメータの変更によりユーザはさまざまな実験結果を試すことができるようになっている．

出力に関しては，実験の日と口頭試問の日を両方表示した結果と実験の日のみを表示した結果を用意した．解を確認するには，実験と口頭試問の両方の日程が必要であるが，それらを 1 つの表に同時に載せると表が煩雑になり，見づらくなってしまう．また，口頭試問の実施日については担当教員の判断により変更されることがあり，このような柔軟な運用を可能にするためこれまで学生には実験のみの日程表が掲示されていた．そのため，本システムでは，実験の日のみの表示を以前から前期実験で使用していた形式に合わせて出力した．違反した制約は別シートに表示し，実験の実施に支障が出る制約違反があった場合（絶対制約に対して違反があった場合）は警告するようにしている．また，各実験に対して最低限必要な開催期間 t_e と実際に作成されたスケジュール上の開催期間を表示するようにした．このように，ユーザに結果がよりわかりやすくなるよう表示を工夫した．

6. スケジュール結果

平成 23 年度および平成 24 年度の前期実験について実データを用いてスケジュール作成を行った．WCSP ソルバには文献 [1] の発見的解法を用い，計算時間の上限を 300 秒とした．

C_3 には，「$C_{3.1}$: R1 を行わなければほかの実験を行うことはできない，$w_{3.1} = \mathrm{inf}$」「$C_{3.2}$: R2 または R3 のいずれかを行わなければ A，B，C コースの実験を行うことができない，$w_{3.2} = \mathrm{inf}$」「$C_{3.3}$: A1B6，A2B7，A3C6 を行わなければ A4，A5 を行うことはできない，$w_{3.3} = 10$」「$C_{3.4}$: B1C7，B2C8，B3A6 を行わなければ B4，B5 を行うことはできない，$w_{3.4} = 10$」「$C_{3.5}$: C1A7，C2A8，C3B8 を行わなければ C4，C5 を行うことはできない，$w_{3.5} = 10$」を入力した．C_5 において実験と口頭試問の期間が 3 週間以上空かないように $\alpha = 1$，β =10,000 とした．C_{10} には，平成 23 年度は「$C_{10.1}$: R3，B3A6，B4 のうち 2 つの実験までしか同時に行うことができない」を，平成 24 年度は「$C_{10.2}$: R1，A1B6，A2B7 のうち 2 つまでしか同時に行うことができない」を入力した．C_{11} は平成 23 年度，24 年度ともに条件はなかった．制約の重み w_l については，C_1，C_2，C_4，C_{12} の重みを $w_l = \mathrm{inf}$（絶対制約）とし，C_5，C_6 の重みを 100，C_7 の重みを必須実験である R1，R2，R3 に対しては 100，それ以外は 1 とし

実験テーマ	4月						5月							6月									7月			
	6	13	19	20	26	27	10	11	17	18	24	25	31	1	7	8	14	15	21	22	28	29	5	6	12	13
R1		5	1	2	4	9	3																			
		6	8	10	13	16	7																			
		14	11	12	17	18	15																			
R2			5	1	2	10	9	3	12	11	6	4														
			14		8	17	16	15	18	13		7														
R3			6	11	12	4	2	7	5	3	8	1														
					14	13	18	17	9	10	16	15														
A1 B6													6			4	5	3	9	1	12	7	2	11	8	10
A2 B7						1	12	11	8	7	2		5	4	6	3	9	10								
A3C6															2	1	6	4	16	3	5	17	18	15	14	13
A4																			6		2	1	5	4		3
A5																			2	4		3	6	1	5	
B1 C7														10	18		8	11	14	7	9	13	16	17	12	15
B2C8												17	12	15		11	14	13	8	10	18		9	7	16	
B3 A6					6	11	8	1	2	4	5	10	9	3	12			7								
B4																				11	8	10	12		9	7
B5												11	8	7	9	10	12									
C1 A7													16	17	5	15	2	1	18	13	14			3	6	4
C2 A8											18	3	2	1	14	13	16	17	5	15	6	4				
C3 B8							14	10	16	17	9	13		11	8	7	18	15	12							
C4																				17	16	15	14	13	18	
C5										15	14		18	13	16	17										

図 3 システムで作成した平成 23 年度スケジュール S_{system}（実験日のみを表示）

表 1 本システムと人手によるスケジュールにおける各実験の開講期間の比較

実験名	最短期間 t_e	システム	人手
R1	6	6	6
R2	9	10	10
R3	9	10	10
A1B6	12	14	14
A2B7	12	13	16
A3C6	12	12	12
A4	6	8	16
A5	6	8	8
B1C7	12	13	16
B2C8	12	14	14
B3A6	12	14	14
B4	6	7	10
B5	6	6	10
C1A7	12	14	16
C2A8	12	12	16
C3B8	12	13	14
C4	6	6	10
C5	6	7	10
合計	168	186	222

た．また，違反してもそれほど問題ない C_8 の重みを 1，違反しないことが強く望まれる C_9 の重みを 10,000 とした．本システムでは，これらの重みの値は，これまでスケジュールを作成していた担当者のヒアリングをもとに，妥当と思われる値に設定したが，ユーザによって容易に変更することができる．

平成 23 年度前期実験のスケジューリングでは，学生グループ数は 18 個，実験数は 18 個，実験期間は 2011/4/13 から 2011/7/13 までの火曜日と水曜日（5/3，5/4 は祝日のため除く）であった．従来，人手で数日間かけて作成していたスケジュールを，8 分程度（Excel 上での制約式の生成に 3 分，ソルバの計算に 5 分）で作成することができた．システムにより作成したスケジュール S_{system} を図 3 に示す．S_{system} は絶対制約をすべて満たしており，このスケジュールで不都合なく実験を実施することが可能である．考慮制約のうち $C_{3.3}$，$C_{3.4}$，$C_{3.5}$，C_6，C_7，C_8 の一部で違反があったが，いずれもペナルティが軽いものであった．C_5 と C_9 には違反はなく，実験の翌週に口頭試問を行うことと各学生が行う実験の曜日が毎回同じであることが口頭試問のある全実験に対して実現されていた．

前期実験全体の期間は短縮できなかったが，各実験の開催期間に関しては，多くのものについて短くすることができた．S_{system} と S_{manual} の各実験の開講期間を比較したものを表 1 に示す．

平成 24 年度前期実験のスケジューリングでは，学生グループ数は 18 個，実験数は 18 個，実験期間は 2012/4/17 から 2012/7/17 までの火曜日と水曜日（5/1，5/2 は GW のため除く）であった．絶対制約はすべて満たされていた．考慮制約のうち $C_{3.3}$，$C_{3.4}$，$C_{3.5}$，C_6，C_7，C_8 の一部で違反があったがいずれもペナルティが軽いものであった．また，平成 23 年度に比べ，違反した制約の数，ペナルティ値ともに小さかった．作成したスケジュールは前期実験の予定を決定する実験検討委員会に提出され，検討の結果平成 24 年度前期実験に実際に使用されることが決定した．

以上のように，本システムによって従来のスケジュールと同等以上のスケジュールを作成することができ，さ

らに，スケジュール作成に要する労力と時間を大幅に削減することができた．

7. まとめ

名古屋大学工学部電気電子・情報工学科の電気電子工学実験のスケジューリングは手作業で作成されており，これまで担当者にとって負担の大きい作業であった．本システムでは，過去の担当者にヒアリングを行って問題のモデルを設定し，それを重み付き制約充足問題として定式化した．そして，制約を可能な限り満たしたスケジュールを自動的に作成するシステムを構築した．本研究で構築したシステムによって作成したスケジュールは，平成 24 年度の前期実験に適用され，問題なく使用することができた．今後もこのシステムによって電気電子工学実験のスケジューリングが行われる予定である．

参考文献

[1] K. Nonobe and T. Ibaraki, An improved tabu search method for the weighted constraint satisfaction problem, *INFOR*, **39**, 131–151, 2001.
[2] 小木曽由明，今堀慎治，柳浦睦憲，複雑な個数制約の付いた一般化割当問題について，数理解析研究所講究録，**1773**，218–230，2012.
[3] 小木曽由明，野々部宏司，柳浦睦憲，汎用ソルバーによる研究集会開催日程スケジューリングの自動化，オペレーションズ・リサーチ，**58**，224–230，2013.
[4] 鈴木敦夫，伏見正則，澤木勝茂，大学業務と OR—プロジェクト N，オペレーションズ・リサーチ，**54**，684–689，2009.
[5] 鈴木敦夫，伏見正則，澤木勝茂，大学業務におけるシフトスケジューリング，オペレーションズ・リサーチ，**54**，768–773，2009.
[6] 鈴木敦夫，伏見正則，澤木勝茂，南山大学での OR ソフトウェアの利用，オペレーションズ・リサーチ，**55**，37–42，2010.