

最適化で鉄道車両を列車に割り当てる

森戸 晋

キーワード：鉄道，車両運用計画，交番，仕業，検査，車両割当計画，整数計画，終端効果，ローリングスケジュール

本稿は、竹日 悠帆さんによる 2015 年度早稲田大学創造理工学研究科に提出した修士論文をもとに加筆修正したものです。

1. 問題の簡単な説明と得られた結果

鉄道の列車を運行するためには、列車ダイヤを定めるほかに、車両編成や乗務員を列車に割り当てる車両運用計画や乗務員運用計画を定める必要があります。車両運用計画では、通常、編成が割り当てられて一日に走行する列車の組み合わせを定めた仕業（しぎょう）が作られます。そして、複数の仕業を特定の順番で並べた交番に従って循環的に車両を運用します。車両運用計画では、車両の運用中に適当なタイミングで仕業検査を行ったり、より長い間隔で交番検査を実施する必要がありますが、これが計画の作成を難しくします。

旅客需要の週内波動に対応すべく曜日ごとにダイヤが異なる新幹線の場合、交番どおりに車両を回すことでは所定の検査が行えないという状況が発生するため、仕業、交番に加えて、日々、各仕業をどの編成に割り当てるかを定める車両割当計画の作成が重要となります。

この研究は、数理計画法による車両割当計画の策定を想定し、Lai et al. [1] のモデルをそのままの形で、論文に記載されている 4 週間の計画策定に適用しても、計算面・策定されるスケジュールのもっともらしさの両側面において課題があることを明らかにしたうえで、両側面の改善を図る方策を提示しています。

2. 問題の設定と考え方

問題の基本的な前提条件は以下のとおりです。

1. 日を最小単位とする有限の計画期間を考慮
2. 仕業の開始／終了場所（駅や基地）は所与

3. 各仕業は、毎日 1 編成により一度だけ遂行
4. 0 日目の各編成の仕業など初期条件は所与
5. 各編成は「仕業検査を 2 日以内に一回」「交番検査を 30 日もしくは 30,000 km 以内に一回」実施
6. 検査は特定の仕業や場所でのみ可能

本研究で扱う具体的なデータは、Lai et al. [1] に示されている台湾の新幹線データとわが国の新幹線データで、いずれも 30 程度の仕業と編成を扱っています。

3. Lai et al. の最適化モデルの課題

Lai et al. の混合整数計画モデルは次のようなモデルです（詳細は、[1] 参照）：

最小化 総費用（検査費+回送費）

- 制約
- ・ 各日、各編成に一つの仕業を割り当て
 - ・ 各日、各仕業に一つの編成を割り当て
 - ・ 交番検査、仕業検査を限度内に実施

Lai et al. のデータや日本のデータで実験したところ、計画期間 7 日では可能解を得ることができましたが、最適性を保証するには至りませんでした。一方、計画期間 14 日以上（21 日、28 日も実験）では膨大な計算時間をかけても可能解すら得ることができませんでした。

一方、得られるスケジュールにも問題があります。図 1 は交番検査がどの仕業でも実施可能と想定（実際は、26 仕業中 4 仕業のみ）して、計画期間 21 日の問題に対して得られたスケジュールです。図 1 の行は 26 の編成に対応し、列は計画期間内の日を示し、図のエントリは各編成が各日に割り当てられる仕業の番号を示しており、黒色のエントリは交番検査を実施する仕業であることを示しています。また、図 1 の右端の列は 21 日目終了時の前回の交番検査からの累積走行距離を示しています。

得られたスケジュールを見ると、交番検査が計画期間前半に偏り、14 日目以降の後半は交番検査が全く行われていません。また、計画期間終了時の各編成の累積走行距離を見ると、限度いっぱいの 30,000 km に近いものが多いことがわかります。これは、問題を有限期

もりと すすむ

早稲田大学 創造理工学部

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

morito@waseda.jp

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	走行距離	
1	23	24	17	17	18	4	5	9	16	18	19	0	3	4	5	9	16	24	25	3	24450	
2	6	2	26	23	19	2	16	22	23	22	22	23	22	23	19	4	5				25322	
3	19	3	4	5	20	21	17	17	17	17	25	3	4	5	16	17	18	4	5	9	25839	
4	13	14	3	19	10	23	23	18	4	5	15	2	6	10	1	2	15	2	20	21	27660	
5	9	6	10	1	2	9	3	4	5	7	10	1	2	3	4	5	3	19	16	25	25406	
6	12	1	2	9	3	4	5	7	13	14	3	4	5	15	9	16	17	17	17	17	26080	
7	17	25	15	26	23	17	18	26	7	1	7	8	10	1	2	6	6	26	13	14	10	29785
8	16	22	13	14	7	11	12	6	26	8	2	20	21	18	19	10	11	12	11	12	11	23650
9	18	19	9	7	1	2	9	3	4	5	9	6	3	4	5	9	15					25780
10	26	8	7	8	6	15	26	11	12	11	12	1	7	8	6	20	21	25	9	26	1	25050
11	25	26	11	12	8	20	11	12	1	3	4	5	7	1	2	13	14					26000
12	4	5	6	2	9	3	19	2	3	19	10	11	12	13	14	16	18	19	10	23	22	20769
13	23	22	11	12	13	14	6	2	26	8	16	18	19	7	11	12	8	20	21	24		23935
14	2	3	16	18	19	7	1	9	15	16	6	9	15	7	13	14	10	11	12	11		29972
15	21	17	25	9	4	5	15	10	8	16	17	24	17	17	25	9	4	5	6	20		27853
16	15	15	20	21	22	8	6	15	10	13	14	2	9	26	1	15	15	10	8	10		26902
17	3	4	5	6	26	1	10	8	9	20	17	25	15	2	20	21	22	1	16			29757
18	15	16	24	22	11	12	9	20	18	19	26	11	12	9	26	8	7	1	2	6		27859
19	14	20	21	24	24	12	18	14	16	22	23	18	19	9	26	13	14	2	15	15		26750
20	1	7	1	20	21	24	24	18	19	2	15	7	8	10	11	12	13	14	7	8		28856
21	24	18	19	10	10	14	7	13	14	10	11	12	13	14	20	21	24	22	23	24		29000
22	10	11	12	13	14	6	16	22	11	12	13	14	16	22	23	18	19	6	16	18		23647
23	11	12	6	15	15	10	23	24	24	24	17	22	23	24	18	19	26	13	14	7		28740
24	20	21	10	4	5	16	23	26	23	25	26	13	14	16	24	22	23	24	25	3		23711
25	8	10	23	25	16	25	20	21	25	20	21	25	20	21	25	7	1	9	19	26		29591
26	7	13	14	16	25	20	21	25	20	21	24	24	25	20	21	24	25	20	21	22		27936

図1 Lai et al. のモデルの単純な適用に伴う終端効果

間とする一方で、検査回数を少なくしようとする目的関数のもとで解いているために「終端(End-of-Horizon)効果」が発生し、費用のかかる検査を計画期間の外に押し出したからと考えられます。

図1のような結果をもとに、22日目を以降の計画を立てようとする、いきなり多くの編成で交番検査を実施せざるを得なくなると、実行可能なスケジュールを立てられなくなります。

4. 最適化モデルの改善

生成される計画から終端効果を除去/軽減することがどうしても必要と考えられます。また、一連の実験から、膨大な計算時間をかけても、制約条件が厳しすぎて解の選択の自由度が小さくなりすぎたり、制約条件が緩すぎて解の選択の自由度が大きくなりすぎたりすると、解法、つまり、最適化ソフトが可能解(すら)を見つけれないという状況証拠が揃いました。

そこで、試行錯誤の結果、終端効果を生じにくくするとともに、可能解を見つけやすくするために、計画期間内のさらに一定期間内で交番検査の回数に適当な上下限を設けることが有効であると判明しました。金太郎飴方式で、ある輪切りにした期間内の交番検査の回数を上下から制限する、すなわち、交番検査の均等化によって、終端効果を防ぐとともに、可能解を誘導しようという、単純な試みです。

交番検査回数の上下制限による均等化によって、可能解を出せる計画期間の長さを日本の新幹線データの場合、7日から14日に増やすことができ、終端効果も軽減されました。

5. ローリングスケジュールによる、より長期の車両割当計画

最適化モデルは交番検査回数の上下制限をうまく入れると「もっともらしい」計画が作成できることが

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	走行距離																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	21424																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	23762																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	24003																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	24244																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	24485																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	24726																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	24967																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	25208																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	25449																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	25690																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	25931																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	26172																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	26413																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	26654																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	26895																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	27136																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	27377																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	27618																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	27859																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	28100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
22	23	24	25	26	27	28	29	30	28341																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
23	24	25	26	27	28	29	30	28582																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
24	25	26	27	28	29	30	28823																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
25	26	27	28	29	30	29064																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
26	27	28	29	30	29305																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
27	28	29	30	29546																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
28	29	30	29787																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
29	30	29994	30000	30006	30012	30018	30024	30030	30036	30042	30048	30054	30060	30066	30072	30078	30084	30090	30096	30102	30108	30114	30120	30126	30132	30138	30144	30150	30156	30162	30168	30174	30180	30186	30192	30198	30204	30210	30216	30222	30228	30234	30240	30246	30252	30258	30264	30270	30276	30282	30288	30294	30300	30306	30312	30318	30324	30330	30336	30342	30348	30354	30360	30366	30372	30378	30384	30390	30396	30402	30408	30414	30420	30426	30432	30438	30444	30450	30456	30462	30468	30474	30480	30486	30492	30498	30504	30510	30516	30522	30528	30534	30540	30546	30552	30558	30564	30570	30576	30582	30588	30594	30600	30606	30612	30618	30624	30630	30636	30642	30648	30654	30660	30666	30672	30678	30684	30690	30696	30702	30708	30714	30720	30726	30732	30738	30744	30750	30756	30762	30768	30774	30780	30786	30792	30798	30804	30810	30816	30822	30828	30834	30840	30846	30852	30858	30864	30870	30876	30882	30888	30894	30900	30906	30912	30918	30924	30930	30936	30942	30948	30954	30960	30966	30972	30978	30984	30990	30996	31002	31008	31014	31020	31026	31032	31038	31044	31050	31056	31062	31068	31074	31080	31086	31092	31098	31104	31110	31116	31122	31128	31134	31140	31146	31152	31158	31164	31170	31176	31182	31188	31194	31200	31206	31212	31218	31224	31230	31236	31242	31248	31254	31260	31266	31272	31278	31284	31290	31296	31302	31308	31314	31320	31326	31332	31338	31344	31350	31356	31362	31368	31374	31380	31386	31392	31398	31404	31410	31416	31422	31428	31434	31440	31446	31452	31458	31464	31470	31476	31482	31488	31494	31500	31506	31512	31518	31524	31530	31536	31542	31548	31554	31560	31566	31572	31578	31584	31590	31596	31602	31608	31614	31620	31626	31632	31638	31644	31650	31656	31662	31668	31674	31680	31686	31692	31698	31704	31710	31716	31722	31728	31734	31740	31746	31752	31758	31764	31770	31776	31782	31788	31794	31800	31806	31812	31818	31824	31830	31836	31842	31848	31854	31860	31866	31872	31878	31884	31890	31896	31902	31908	31914	31920	31926	31932	31938	31944	31950	31956	31962	31968	31974	31980	31986	31992	31998	32004	32010	32016	32022	32028	32034	32040	32046	32052	32058	32064	32070	32076	32082	32088	32094	32100	32106	32112	32118	32124	32130	32136	32142	32148	32154	32160	32166	32172	32178	32184	32190	32196	32202	32208	32214	32220	3222