

# 第5章 中～大規模問題における最適スケジュール設計

## 5.1 概要

4章で提案した Adaptive GLS を用いれば、スケジュール最適化問題に対して有用な解が得られる。

本章では、具体的な設計対象を設定し、必要な各種データを示すと共に、Adaptive GLS 及び3章で示した評価モデルを用いて中～大規模問題における近似解を算出し、どのような結果が得られたかを示す。

## 5.2 中～大規模問題でのシミュレーション

### 5.2.1 シミュレーションの対象

本章におけるシミュレーションは、現段階で収集完了しているデータの都合上、3章で提案したモデルのうち P to P 型モデルを用いてシミュレーションを行っていく。

実際にシミュレーションを行うには、まず船社の選択を行う。それにより、その船社の保有する船舶が具体的な最適化対象となり、その総利益最大化が図られる。但し、以下のシミュレーションでは、多様な船舶を用いたスケジュール最適をする事を目的として、日中間に就航している船舶のうち5隻を任意に選択し、それらを保有している船社がいると仮定する。

次に、船舶のスケジュールを最適化する際、どの範囲の港まで考えるかを設定する。ここでは、日中間の領域を捉え、日中の主要港39港を設定する。この範囲で、船舶のスケジュールを評価していく際、この領域に置ける貨物フローを求める必要があった。貨物フローを求める為には、設定した領域での週間での輸送貨物需要量及び、この領域で貨物を輸送しうるその他船舶のスケジュールが必要である。貨物需要量は、現実のデータを用いる。設計領域におけるその他船は、133船存在し、その他船の運航スケジュールとしては現実データを用いる。これらの船舶は、必ずしも設定領域内のみを就航しているとは限らない。よって、各船舶の輸送可能経路を正確に表現するには設計外船

船が就航する港も存在させる必要がある。これらの港も含めると港の総数は56港となる。すなわち、評価モデルの段階で評価する問題の規模は138船56港を対象となり、このうち設計対象の船舶に関する評価を抽出する事になる。但し、新たに追加した港は設計対象外船舶で輸送する際の経路を正しく表記する為のものであったので、設計領域外の港に関しては輸送需要を発生させないものとする。また、これらの経路は設計外船舶のスケジュールを参照すれば得られるので、新たに追記する港はデータを必要としない。

以上をまとめると、最適化する問題は56港138船が就航しているシステムにおいて5隻の船舶のスケジュールを39港を用いて構築していく問題となる。

### 5.2.2 データ設定

シミュレーションを行うにあたり必要となる仮想データを記載する。なお、シミュレータ自体が持つ各種パラメータは4章の値を用いる。

#### (1) 港に関するデータ

港間距離：pp79 参照。

要求輸送量：pp80 参照。

港での積み、降ろし費：港、及び船舶の種類によらず、各 12000(JPY/TEUs)とする。

#### (2) 荷主に関するデータ

荷主の時間価値：全ての港間輸送で均一とし、先行研究[2]を基に300 (JPY/hr・TEUs)とする。

#### (3) 船舶に関するデータ

船舶スペック：pp81～pp83 参照。

各船舶の初期スケジュール：pp84～pp86 参照。

船舶の運賃：船舶の運賃は船型別に異なるがOD別には一定とする。pp87,88 参照。

設計対象船舶：スペック表における船舶IDが2, 3, 4, 9, 10の5隻

設計船舶の周遊周期：周期はweekly サービスを前提として、一週間とする。但し、多様な航路を生み出す為、船舶IDが9, 10の船舶は周期を二週間とし同じ航路を週遅れで運航するように設定した。

C 重油価格：2004年度データを基に29163(JPY/kl)

表 5-1 港間距離 (mile)

origin	port name	destination																																							
		Tokyo	Kohka	Nagoya	Osaka	Kobe	Moji	Hakata	Nagasaki	Oyama	Chiba	Bahima	Sekai	roshi	Kuyayama	monozushi	hikokuyayama	kammifuzuru	saotokama	tsuyai	Ota	Imari	Oturu	Dallari	ingen	ngidsh	hangshyung	antor	rajiu	kanjin	Ningbo	uzho	Kame								
1	0	25	221	369	361	545	592	764	860	21	129	216	519	521	542	431	443	511	736	842	866	819	414	492	497	535	627	740	1164	1318	1114	1049	1121	1082	1106	1213	1049	1236	1348		
2	25	0	207	355	347	532	579	751	847	26	116	202	505	507	528	417	429	486	723	829	853	805	400	479	483	522	614	726	1159	1304	1095	1035	1108	1069	1092	1199	1034	1222	1331		
3	221	207	0	239	231	417	463	638	730	16	389	991	413	302	313	380	607	713	737	869	868	368	368	406	498	864	1049	1188	979	920	992	954	976	1084	920	1106	1212	1331			
4	369	355	239	0	16	251	298	472	565	16	251	298	472	565	16	248	97	109	176	248	236	314	333	101	867	1024	814	774	827	808	830	938	808	1015	1123	1215	1331				
5	361	347	231	16	0	239	286	730	863	359	280	226	173	204	235	85	97	165	429	536	562	601	66	147	214	305	321	1003	860	1012	802	723	515	796	818	926	796	1006	1115		
6	545	532	417	251	239	0	47	480	453	545	485	412	118	51	4	168	155	109	190	297	321	452	177	94	77	218	82	773	621	773	563	523	576	557	579	667	557	767	903		
7	592	579	463	298	286	47	0	518	481	591	512	458	165	98	51	215	202	157	218	325	349	480	224	141	122	265	50	801	598	748	538	493	551	527	550	657	524	757	874		
8	764	751	888	742	730	490	518	0	118	763	797	883	609	542	495	659	646	660	867	865	567	709	548	380	1060	1121	1002	977	1015	1010	1033	1141	1010	1033	1141	1010	1033	1141	1010	1232	1369
9	860	847	870	705	693	453	481	118	0	859	893	865	572	505	458	622	609	563	286	219	197	61	630	548	530	672	511	467	1023	1175	965	939	978	973	996	1104	978	1121	1215	1332	
10	21	26	219	367	359	545	591	763	859	0	128	215	517	519	441	430	441	508	735	841	865	818	413	491	496	534	626	739	1167	1317	1108	1048	1120	1081	1104	1212	1047	1234	1343		
11	129	116	137	288	280	465	512	797	893	128	0	133	438	440	462	351	362	430	656	762	786	852	334	412	477	455	547	772	1084	1238	1029	969	1041	1003	1025	1134	968	1155	1264		
12	216	202	16	234	226	412	458	883	885	215	133	0	384	386	408	297	308	376	602	708	732	864	280	358	363	401	483	859	1041	1184	975	915	989	949	971	1080	914	1101	1231		
13	519	505	389	185	173	118	165	609	572	517	438	384	0	83	115	102	89	16	309	415	439	571	111	42	94	223	200	891	739	891	681	641	694	675	608	806	675	905	1022		
14	521	507	391	216	204	51	98	542	505	519	440	386	83	0	47	133	120	74	242	348	372	503	141	59	53	194	132	824	672	824	614	547	627	608	630	739	607	838	955		
15	542	528	413	248	235	4	51	495	458	541	482	408	115	47	0	164	152	106	195	301	325	457	173	91	73	215	86	777	625	777	567	527	590	561	584	692	561	791	908		
16	431	417	302	97	85	168	215	659	622	430	351	297	102	133	164	0	23	94	359	485	489	620	23	76	143	272	250	941	789	941	731	691	744	725	747	856	724	955	1072		
17	443	429	313	109	97	155	202	646	609	441	362	308	89	120	152	23	0	80	346	452	476	608	35	63	131	260	237	928	776	928	719	678	731	712	735	843	712	942	1059		
18	511	496	380	176	165	109	157	600	563	508	430	376	16	74	106	94	80	0	300	406	430	562	102	33	85	215	191	883	730	882	673	633	695	666	689	797	666	896	1013		
19	736	723	607	442	429	190	218	323	286	735	656	602	309	242	195	359	346	300	0	124	148	285	367	285	267	409	248	621	763	915	706	679	718	712	735	843	715	952	1069		
20	842	829	713	548	536	297	325	256	219	841	762	708	415	348	301	465	452	406	124	0	56	217	474	391	373	515	355	575	870	1046	836	809	849	843	866	974	846	1082	1199		
21	866	853	737	572	560	321	349	234	197	865	786	732	439	372	325	489	476	430	148	56	0	196	498	415	397	539	379	554	884	1046	836	809	849	843	866	974	846	1082	1199		
22	819	805	689	703	691	452	480	68	61	818	852	864	571	503	457	620	608	562	285	217	196	0	629	547	529	671	510	433	1022	1174	964	938	977	972	995	1103	977	1214	1331		
23	414	400	285	80	68	177	224	667	630	413	334	280	111	141	173	23	35	102	367	474	498	629	0	85	152	281	259	950	788	950	740	700	753	734	756	864	733	963	1080		
24	492	479	363	159	147	94	141	585	548	491	412	358	42	59	91	76	63	33	285	391	417	547	85	0	69	197	176	867	715	867	658	617	670	651	674	782	651	881	998		
25	497	483	368	226	214	77	123	567	530	496	417	363	94	53	73	143	131	85	267	373	397	529	152	69	0	170	158	849	697	849	640	599	652	633	656	764	633	863	979		
26	535	522	406	314	305	218	265	709	672	534	455	401	223	194	215	272	260	215	409	515	539	671	281	197	170	0	261	991	723	875	660	539	664	572	595	703	538	725	834		
27	627	614	498	333	321	82	50	548	511	626	547	493	200	132	86	250	237	191	248	355	379	510	259	176	158	261	0	830	576	728	518	473	531	506	529	637	506	736	853		
28	740	726	664	1011	1003	773	801	380	467	739	772	859	891	824	777	941	928	863	621	575	554	433	950	867	849	991	830	0	1315	1467	1257	1232	1270	1265	1288	1396	1273	1522	1641		
29	1164	1152	1049	867	860	621	596	1060	1023	1167	1084	1041	739	672	625	789	776	730	763	870	894	1022	798	715	697	723	576	1315	0	217	289	527	351	561	584	692	582	884	1005		
30	1318	1304	1188	1024	1012	773	748	1212	1175	1317	1238	1184	891	824	777	941	928	882	915	1022	1046	1174	950	867	849	725	728	1467	217	0	441	679	503	713	736	844	734	1036	1157		
31	1114	1095	979	814	802	563	538	1002	965	1108	1029	975	681	614	567	731	719	673	706	812	836	964	740	658	640	660	518	1257	289	441	0	351	106	365	407	516	406	720	841		
32	1049	1035	920	774	762	523	493	977	939	1048	969	915	841	547	527	691	678	633	679	785	809	938	700	617	599	539	473	1232	527	679	351	0	308	72	94	202	132	444	565		
33	1121	1108	992	827	815	576	551	1015	978	1120	1041	987	694	627	580	744	731	685	718	825	849	977	753	670	652	664	531	1270	351	503	106	308	0	342	365	473	363	677	798		
34	1082	1069	954	808	796	557	527	1010	973	1081	1003	949	675	608	561	725	712	666	712	819	843	972	734	651	633	572	506	1265	561	713	365	72	342	0	32	140	168	462	603		
35	1106	1092	976	830	818	579	550	1033	996	1104	1025	971	698	630	584	747	735	686	735	842	866	995	756	674	656	595	529	1288	584	736	407	94	365	32	0	113	191	505	625		
36	1213	1199	1084	938	926	687	657	1141	1104	1212	1134	1080	806	739	692	856	843	797	843	950	974	1103	864	782	764	703	637	1396	682	844	516	202	473	140	113	0	299	613	734		
37	1049	1034	920	808	796	557	524	1015	978	1104	1025	971	698	630	584	747	735	686	735	842	866	995	756	674	656	595	529	1288	584	736	407	94	365	32	0	113	191	505	625		
38	1236																																								

表 5-2 1 週間の要求輸送量 (TEUs/week)

port name	required volume(TEUs/week)										destination																																		
	Tokyo	Tokohi	Nagoya	Osaka	Kobe	Meji	Hakata	Ningde	Toyama	Chiba	Shimizu	Yokohama	Hiroshi	Tokyo	Shimo	Mizusaki	Fukuyama	Iwakura	Sakurajima	Tsuru	Nagasaki	Takamatsu	Oita	Shimonoseki	Imari	Otaru	Dalian	Xingang	Qingdao	Shanghai	Luoyang	Nantong	Zhangjiagang	Nanjing	Fuzhou	Xiamen									
1	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	31	32	33	34	35	36	37	38	39							
Tokyo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Yokohama	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Nagoya	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Osaka	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Kobe	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Meji	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Hakata	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ningde	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Toyama	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Chiba	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Shimizu	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Yokohama	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Hiroshima	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tokuyama	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Shimonoseki	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mizushima	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fukuyama	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iwakura	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sakaminato	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Misuru	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tsuruga	210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nagasaki	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Takamatsu	230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matsuyama	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oita	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shimonoseki	260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imari	270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otaru	280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dalian	29985	578	472	634	353	177	194	106	26	0	0	145	47	0	53	96	0	22	40	21	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Xingang	30483	609	551	552	423	185	0	0	0	0	44	7	0	0	30	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Qingdao	31182	591	644	1138	472	91	190	54	10	0	0	46	0	275	39	133	0	7	12	12	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Shanghai	323368	1881	2499	4003	1226	503	249	306	27	3	76	65	147	41	160	332	6	101	0	0	97	111	17	33	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Luoyang	33186	220	189	123	103	51	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Nantong	340	41	51	26	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zhangjiagang	350	12	27	16	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Nanjing	360	31	39	19	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ningbo	37432	200	206	514	204	132	20	0	0	0	0	13	0	46	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fuzhou	3855	162	47	105	0	42	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Xiamen	39454	577	279	269	226	162	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

上表は、2006 年度の日中間の年間輸送実績を基に作成した。

また、日中間での海上輸送航路を対象としているので、日本—日本間の輸送や中国—中国間の輸送量は全て 0 と設定した。表中における黄色のセルは、輸送需要が一個以下であり、不定期船で輸送されていると判断して除外したものである

表5-3 船舶スペック(1)

Name of Vessel	ship ID	Speed(knot)	Max loadage(TEUs)	GT(ton)	DW(ton)
YANJING	1	20.1	161	9960	3626
PERSEUS	2	18.5	752	10868	15165
XIANG WANG	3	14	392	4960	7069
LIN YUAN	4	15.5	614	7065	9946
TAO YUAN	5	15.5	614	7065	9946
XIANG MING	6	15	514	7864	8634
XIANG ZHU	7	15	514	7864	8634
YU JIN XIANG	8	20	228	12304	5700
XIANG KAI	9	14	1020	14505	19207
XIANG PU	10	14	1020	13927	21101
XIN JIAN ZHEN	11	21	242	14543	4321
SKY BLUE	12	14.8	342	3997	5934
YONG DING HE	13	17	764	9471	12668
ZI YA HE	14	17	764	9471	12714
LONG HE	15	17	725	9951	13278
YAN HE	16	17	725	9951	13275
TAKEKO	17	17.5	564	8957	9513
COSCO RAN	18	18	542	8917	9287
COSCO SAKURA	19	18	542	8917	9287
MATSUKO	20	17.5	564	8957	9509
COSCO KIKU	21	18	542	8917	9294
SHANG CHENG	22	14.5	724	9683	12553
SONG CHENG	23	13.5	724	9683	13003
UMEKO	24	17.5	564	8957	9515
HAN JIANG HE	25	15	422	8282	9509
HUAI JI HE	26	15	424	6367	7785
GAO CHENG	27	14.5	724	9683	12739
MING CHENG	28	15	724	9683	13003
XIANG HENG	29	13	210	3986	5206
XIANG TU	30	13	208	3984	5206
PRETTY SEA	31	14	316	3968	5648
XING SHUN	32	17	329	5819	6423
XIANG FENG	33	12.5	210	4119	5205
JI FENG	34	14.8	450	5601	8238
RONG FENG	35	14.5	452	6177	8302
JI YUAN	36	12	245	4061	4944
ZHE HAI 108	37	12	298	4061	5177
ACACIA	38	15	400	8853	8853
COCOPALM ISLE	39	18	662	8652	11244
HIBISCUS ISLE	40	18	662	8652	11250
TENSHA MARU No.1	41	15	178	4364	2613
LEO ISLAND	42	14.5	505	6251	8721
VIRGO ISLAND	43	14.5	400	6251	8721
METHAN	44	15.4	518	4450	5539
DUBAI TRADER	45	17.8	578	9764	8717
BUNGA MAS DUA	46	17.3	668	7998	11064
BUNGA MAS EMPAT	47	17	668	7998	11036
BUNGA MAS TIGA	48	17	668	7998	11064

表5-4 船舶スペック(2)

Name of Vessel	ship ID	Speed(knot)	Max loadage(TEUs)	GT(ton)	DW(ton)
J. PIONEER	49	14	357	4879	6772
JIN RONG	50	14	385	4822	6816
JIN SHENG	51	14	385	4822	6816
CHE HE	52	14	382	4625	5461
JIN MAN JIANG	53	15	366	2900	4906
ASIAN FAVOUR	54	15.25	511	4400	5500
ATLANTIC HAWK	55	15.25	511	4450	5500
EAVLE SKY	56	15.5	653	6000	7966
JIN MAN HAI	57	15.3	332	2900	4900
BUDAI WAJA	58	17	1164	18353	19710
MOL EVOLUTION	59	18.1	1028	13156	17781
MING ZHOU 12	60	13	358	5012	7218
MING ZHOU 8	61	13	320	5508	8050
SEA DRAGON	62	15	424	6362	7795
DA HONG	63	15	324	4593	6601
GOOD FUTURE	64	13	310	4559	6497
XIN HAI LI	65	14	342	4090	5945
UTOPIA	66	22	265	26906	6965
SU ZHOU HAO	67	21	200	14410	3721
SKY TREASURE	68	16.8	724	7451	10813
RESURGENCE	69	18.5	915	9443	11247
HANSEWALL	70	16	543	6659	8300
YUE DA 28	71	14.5	338	3805	4340
MILD STAR	72	15	617	6976	10425
MILD SUN	73	15	422	6269	7608
MILD UNION	74	15.75	443	6256	8103
TONG YUN	75	15.75	443	6256	8477
PROSRICH	76	17.2	712	7589	8430
HENG YU	77	15.8	712	7589	8370
SHANGHAI SUPER E	78	20	242	7389	4910
BOX OSLO	79	18	800	7970	9865
RELIANCE	80	18	855	9141	10004
JIN DA	81	14.5	388	3994	5962
PRETTY LAKE	82	14	420	4914	6985
BRIGHT SILVER	83	17	836	9352	12368
DA QING HE	84	17	764	9475	12570
MOUNT JOB	85	17	700	8628	12827
JIN TENG	86	14.5	338	3994	5962
YI FA	87	14	357	4879	6772
YI FENG	88	14	357	4879	6772
JIN MAN HE	89	13	332	2900	4906
JIN MAN HU	90	13.5	332	2900	4830
TRADE HOPE	91	15.5	385	4811	6810
TRDE WORLDER	92	14	385	4811	6796
XIANG DA	93	14	316	4018	5672
YU YIN	94	14	298	4048	4373
STEAMERS PRESTIC	95	17	779	7171	8965
SITC DALIAN	96	18.1	748	9413	12675

表5-5 船舶スペック(3)

Name of Vessel	ship ID	Speed(knot)	Max loadage(TEUs)	GT(ton)	DW(ton)
SITC SHANGHAI	97	19.2	847	9413	8000
SITC TOKYO	98	19.2	847	9413	8000
QUAN CHENG	99	17	598	6577	10266
SHUN CHENG	100	16	598	6568	10094
STRAMERS PROSPE	101	17	779	7171	8937
ASIAN GLORY	102	14	357	4811	6744
PRETTY BILLOW	103	14	422	4914	7020
XIANG XING	104	14	392	4960	7069
JIN MAN YANG	105	16	672	7310	9618
UNION EXPRESS	106	14	404	4813	6700
J. GLORY	107	14	357	4879	6720
REVERNCE	108	18	800	9990	12106
SITC QINGDAO	109	18	748	9413	12649
DUBAI DIAMOND	110	15	578	9764	8717
HAI FENG LIAN FA	111	14	358	4151	4336
YAN TONG	112	15.75	443	6256	8497
CHRISTIAN RUSS	113	16	585	7167	8787
JI XIANG QUAN	114	17	598	6577	10257
JIN MAN YU	115	16	672	7310	9632
HAPPY ISLAND	116	14	500	6384	8717
VICTORIA STRAIT	117	20	1076	9528	13760
CAPE COOK	118	19	834	9038	11400
CEC CULEMBOURG	119	16.5	650	6714	8499
RU YI QUAN	120	16	598	6577	10266
SILVER OCEAN	121	18	834	9030	10935
SCHELDER TRADER	122	18	843	9030	10935
CAPE CANAVERAL	123	18.5	834	9030	11031
CAPE CANET	124	18	834	9038	10935
CAPE COLDBEK	125	18	843	9038	10968
MARE ADRIATICUM	126	18	1054	9581	12721
MARE BALTICUM	127	17.5	1054	9584	12715
FRANKLIN STRAIT	128	15	518	4450	5585
DOLPHIN STRAIT	129	18	1118	9528	13760
MARE DORICUM	130	18	1054	9590	12380
VEGA DIAMOND	131	20	1076	9528	13760
ANEMI	132	16.5	626	8647	12798
PELA 1	133	16.5	626	8647	12798
TINY YAN	134	14	303	5231	6742
TUAS EXPRESS	135	14.75	445	6258	7627
SKY LIGHT	136	16.8	746	7405	9696
XIN HAI RUN	137	15.5	612	6734	9586
XIANG XIU	138	14	316	4018	5658

表5-3～表5-5のデータは現実のデータを参照した[12]。表中に数箇所黄色のセルが存在するが、これはデータが無い為に推定した値である。

表5-6 船舶スケジュール(1)

ship_name	ship_id	port1	arr_t	dep	port2	arr_t	dep	port3	arr_t	dep	port4	arr_t	dep	port5	arr_t	dep	port6	arr_t	dep	port7	arr_t	dep	port8	arr_t	dep	port9	arr_t	dep	port10	arr_t	dep			
YANJING	1	Xingang			0	1	Kobe	3	5																									
PERSEUS	2	Tokyo	1	1.5	Yokohama	1.8	1.8	Shanghai	4	5																								
XIANG WANG	3	Moji	1	1	Hakata	1.5	2	Ningbo	4	5	Shanghai	5	6																					
LIN YUAN	4	Osaka	1	1	Kobe	1.5	1.5	Ningbo	4	4	Shanghai	5	6																					
TAO YUAN	5	Shanghai	0	1	Yokohama	3	3	Tokyo	4	4	Nagoya	5	5	Shanghai	8	9	Kobe	11	11	Osaka	13	14	Hakata	13	14	Ningbo	19	21						
XIANG MING	6	Shanghai	1	2	Kobe	4	4	Osaka	5	5	Hakata	6	7	Ningbo	12	14	Shanghai	14	15	Yokohama	17	17	Tokyo	18	18	Nagoya	19	19						
XIANG ZHU	7	Ningbo	5	7	Shanghai	7	8	Yokohama	10	10	Tokyo	11	11	Nagoya	12	12	Shanghai	15	16	Kobe	18	18	Osaka	19	19	Hakata	20	21						
YU JIN XIANG	8	Nagoya	1	1	Shanghai	5	5																											
XIANG KAI	9	Qingdao	1	1	Tokyo	5	5	Yokohama	5.5	6	Nagoya	7	7	Xingang	11	12	Dalian	13	14															
XIANG PU	10	Nagoya	0	0	Xingang	4	5	Dalian	6	7	Qingdao	8	8	Tokyo	12	12	Yokohama	13	13															
XIN JIAN ZHEN	11	Osaka	1	2	Kobe	2.5	2.5	Shanghai	4	4	Kobe	8	9	Osaka	9.5	9.5	Shanghai	11	13															
SKY BLUE	12	Shanghai	0	0.5	Moji	2	2.3	Hakata	2.5	2.8	Mizushima	3	3.5	Busan	4	4.5																		
YONG DING HE	13	Tokyo	1	1	Yokohama	1.5	2	Keelung	7	7	Ningbo	10	10	Shanghai	11	12																		
ZI YA HE	14	Keelung	0	0	Ningbo	3	3	Shanghai	4	5	Tokyo	8	8	Yokohama	8.5	9																		
LONG HE	15	Yokohama	3	3	Tokyo	4	4	Nagoya	5	5	Hongkong	9	10	Huangpu	10	10	Zhangzhou	12	12	Xiamen	13	13												
YAN HE	16	Hongkong	2	3	Huangpu	3	3	Zhangzhou	5	5	Xiamen	6	6	Yokohama	10	10	Tokyo	11	11	Nagoya	12	12												
TAKEKO	17	Nagoya	1	1	Kobe	2	2	Shanghai	4	5																								
COSCO RAN	18	Osaka	1	1	Kobe	1	2	Lianyungang	4	4	Qingdao	5	5	Yokohama	8	8	Nagoya	9	9	Lianyungang	11	12	Qingdao	13	13									
COSCO SAKURA	19	Yokohama	1	1	Nagoya	2	2	Lianyungang	4	5	Qingdao	6	6	Osaka	8	8	Kobe	8	8	Lianyungang	11	11	Qingdao	12	12									
MATSUKO	20	Osaka	1	1	Moji	2	2	Ningbo	4	5	Shanghai	5	6																					
COSCO KIKU	21	Shanghai	1	2	Osaka	4	4	Yokohama	5	5																								
SHANG CHENG	22	Shanghai	0	0	Yokohama	3	3	Nagoya	4	4	Kobe	5	5	Iwakuni	6	6	Shanghai	6	6	Taichang	9	10	Nantong	12	13									
SHANG CHENG	23	Shanghai	2	3	Taichang	4	5	Nantong	5	6	Shanghai	7	7	Yokohama	10	10	Nagoya	11	11	Kobe	12	12	Iwakuni	13	13									
UMEKO	24	Tokyo	2	2	Yokohama	2.8	3	Qingdao	6	6																								
HAN JIANG HE	25	Moji	2	2	Osaka	3	3	Yokohama	4	5	Xiamen	10	11	Fuzhou	12	13																		
HUI JI HE	26	Xiamen	3	4	Fuzhou	5	6	Moji	9	9	Osaka	10	10	Yokohama	11	12																		
GAO CHENG	27	Dalian	0	0	Yokohama	4	4	Tokyo	4.5	4.5	Nagoya	5	6	Xingang	11	12	Yingkou	13	13															
MING CHENG	28	Xingang	4	5	Yingkou	6	6	Dalian	7	7	Yokohama	11	11	Tokyo	12	12	Nagoya	12	13															
XIANG HENG	29	Kobe	2	2	Osaka	2.5	2.5	Nagoya	3	3	Tokyo	4	4	Dandong	11	11	Weiha	12	12															
XIANG TU	30	Dandong	4	4	Weiha	5	5	Kobe	9	9	Osaka	9.5	9.5	Nagoya	10	10	Tokyo	11	11															
PRETTY SEA	31	Tsuruga	1	1	Naoetsu	2	3	Maizuru	4	4	Dandong	8	10	Dalian	11	11	Qingdao	12	12															
XING SHUN	32	Dandong	1	3	Dalian	4	4	Qingdao	5	5	Tsuruga	8	8	Naoetsu	9	10	Maizuru	11	11															
XIANG FENG	33	Hakata	1	1	Moji	2	2	Shidao	5	5	Qingdao	6	6																					
JI FENG	34	Mizushima	2	2	Osaka	2.5	2.5	Yokohama	4	4	Tokyo	4.5	4.5	Hitachinaka	5	5	Nagoya	6	6	Xiamen	10	12	Fuzhou	13	13									
RONG FENG	35	Xiamen	3	5	Fuzhou	5.5	6	Mizushima	9	9	Osaka	9.5	9.5	Yokohama	11	11	Tokyo	12	12	Hitachinaka	12	12	Nagoya	13	13									
JI YUAN	36	Dalian	0	0	Osaka	5	5	Kobe	5.5	5.5	Xingang	12	12																					
ZHE HAI 108	37	Xingang	5	5	Dalian	7	7	Osaka	12	12	Kobe	13	13																					
ACACIA	38	Dalian	0	0	Hakata	2	2	Moji	3	3	Qingdao	5	5																					
COCOPALM ISLE	39	Dalian	0	1	Qingdao	2	2	Shanghai	3	3	Sakaiminato	5	5																					
HIBISCUS ISLE	40	Nigata	1	1	Otaru	3	3	Toyama	4	4	Dalian	7	8	Qingdao	9	9	Shanghai	10	10	Tokyo	11	11												
TENSHA MARU N	41	Ningbo	1	1	Shanghai	2	2	Fukuyama	5	5	Mizushima	5.5	5.5	Hiroshima	6	6																		
LEO ISLAND	42	Busan	0	0	Shibushi	1	1	Fukuyama	2	2	Mizushima	3	3	Hiroshima	4	4	Busan	5	5	Xingang	9	9	Dalian	10	10	Qingdao	12	12						
VIRGO ISLAND	43	Xingang	2	2	Dalian	3	3	Qingdao	5	5	Busan	7	7	Shibushi	8	8	Fukuyama	9	9	Mizushima	10	10	Hiroshima	11	11	Busan	12	12						
METHAN	44	Fukuyama	1	1	Mizushima	2	2	Hiroshima	3	3	Ota	3.5	3.5	Shanghai	5	6																		
DUBAI TRADER	45	Nigata	2	2	Shanghai	5	5																											
BUNGA MAS DIA	46	Tokyo	2	2	Yokohama	2.5	3	Nagoya	3.5	4	Xingang	8	9	Dalian	9.5	10	Moji	12	12	Osaka	13	13	Kobe	14	14	Xingang	17	18	Dalian	19	19			
BUNGA MAS EMP	47	Xingang	1	2	Dalian	2.5	3	Moji	5	5	Osaka	6	6	Kobe	7	7	Xingang	10	11	Dalian	12	12	Tokyo	16	16	Yokohama	17	17	Nagoya	18	18			
BUNGA MAS TIG	48	Kobe	0	0	Xingang	3	4	Dalian	4.5	5	Tokyo	9	9	Yokohama	9.5	10	Nagoya	11	11	Xingang	15	16	Dalian	17	17	Moji	19	19	Osaka	20	20			











### 5.2.3 シミュレーション結果

5.2.2で設定したデータを用いてシミュレーションを行う。シミュレーションの過程で得られる、5隻の船舶の総利益の推移を下図に示す。なお、計算には一般的なPCを用い、16時間程度を要した。

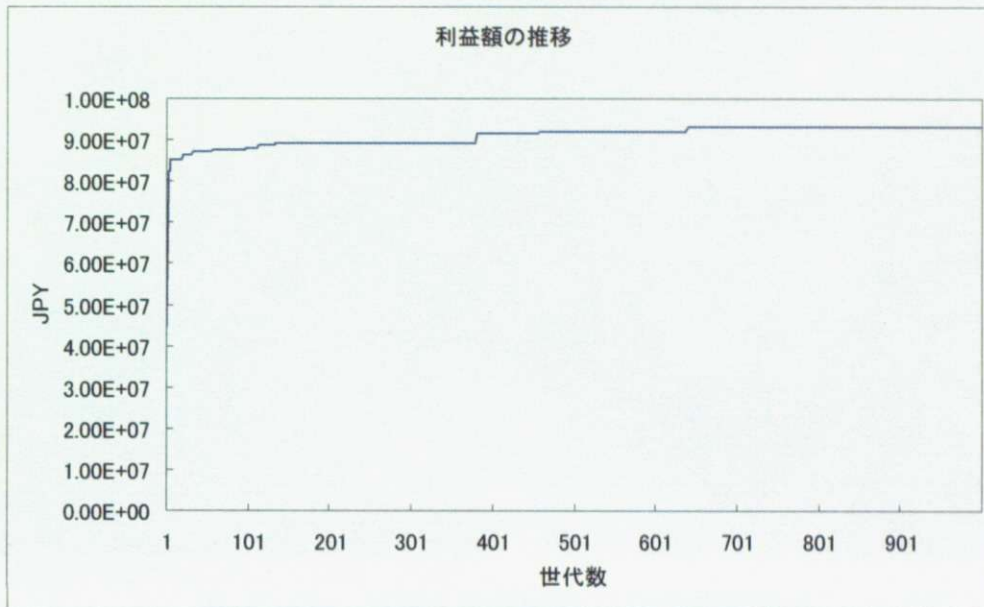


図 5-1 Adaptive GLS による探索経過

上図で得られた最終的な利益額は、現状を再現した際の利益額であった 56,632,000 円と比較し倍増する事が示されている。これより理論に基づいて航路設計を行う事で大幅に効率的な航路を編成可能である事がわかる。

この利益額を一隻あたりの船舶に変換すると、初期解の段階ですら平均して週当たり約 850 万円とやや多く算出されている。この理由の一つとして、原油価格データの年度がその他データより古く、支出が安く算出されている事が挙げられる。また、別の要因としては、上記の利益額は船舶のみの支出で算出されている点が挙げられる。実際には船舶の運航を行う際には、船社のオペレーティング活動の存在が欠かせない。それらに要する支出も加味すれば、妥当な利益額に落ち着くであろう。

シミュレーション時間に関しては 16 時間となり、現実的な時間で解が得られている。更に、この計算時間は設計船舶を増加させてもあまり変化しないという特徴を持つ。なぜならば、設計船舶数を増大させても、その評価に要する時間は変わらない為である。無論、組み合わせ数の増加により Adaptive GLS を用いた際の収束は遅くなるが、図 5-1 より 1000 世代程シミュレーションを行えば、ある程度の規模までは十分な精度の解が得られると考えられる。

次に、スケジュールを最適化した結果得られた船舶スケジュールの航路情報を視覚化して示す。



図 5-2 最適化後の航路（設計船舶のみ）

図中において、赤の航路を船舶2が、青の航路を船舶3が、緑の航路を船舶4が、紫の航路を船舶9、10が週遅れで周回している。各航路において経由する港の順に従って番号も記した。

得られた航路を見ると、形状としては無駄の少なく主要港同士を結ぶ航路を構築しており、現実的な航路が得られている。但し、いくつかの航路において、近距離の港に関しては地理的な観点から見た航路と整合性を持たないケースが存在している。例えば、紫の航路において5番目の経由港である新港と6番目の経由港である大連は地理的には逆の方が効率的である。そこで、この経路に対して経由順を入れ替えた航路を評価してみたが、入れ替える前の方が利益額が高いという結果になった。

このような現象が起こった要因としては、2つの要因挙げられる。ひとつは他の船舶の航路が大連、新港の順に寄港するケースが多い事である。多少航海距離が伸びても、新港へ直行する事で新港行きの貨物が集まりやすくなり、大連行きの貨物の取り合いから逃れる事ができる。また、大連へは主に大連発の貨物を積みに寄港する事で、ここでも他船との日本行き積荷の取り合いに有利さが生まれるのである。もう一つの要因は、原油価格が現状よりやや低い点である。原油価格を低く見積もれば航路長が延びることによる負の影響が緩和される事になる。

これら2つの要因があいまってこの様な航路が構築されたと考える。より正確な原油価格を用いれば、ここで挙げた負の要素がより強く現れ、航路長の短い航路が優れるケースも存在するであろう。

## 5.3 本章のまとめ

- 本章では、日中間海上輸送システムを対象として、提案したモデル及びアルゴリズムによるスケジュール最適化を行った。
- 得られるスケジュールが適切なものである事を確認した。
- 大規模な問題に対しても実用的な時間で解が得られる事を示した。

# 第6章 マルチレベル最適化手法

## 6.1 概要

3～5章で開発してきたシミュレータを用いる事で得られる解はある一定の精度を持つ事を示してきた。ところが最適化を行う都合上、ある程度簡略化されたモデルで扱わざるを得ず、それ故、実際には得られた解よりも適した解が存在する可能性が高い。

そこで、本章ではより適した解を算出すべく、異なる精度でモデリングを行った2種のシミュレータを連携させることにより、スケジュールを算出する機構について述べる。

## 6.2 マルチレベル最適化について

マルチレベル最適化では2種のシミュレータを用いる。一つは3～5章で示した様に最適化を行う為のシミュレータである。このシミュレータでは、結果に与える影響が許容できる範囲で種々の仮定を導入した荒いモデリングが行われている。それ故、精度に関しては完全ではない。もう一方のシミュレータは、3章においてモデルの精度検証に用いた離散型モデルを用いたシミュレータである。こちらのシミュレータは、現実再現型のシミュレータであり、計算量の点から最適化には不向きであるが、かなりの精度を持って現実を再現可能である。

これら二種のシミュレータは互いの短所を補う関係にある。そこで、これらのシミュレータを連携させる事で互いの短所を克服し、長所を生かした最適化を行う事が本手法の意義である。なお、以下3～5章で開発したシミュレータは、貨物を連続量として扱う仮定を導入している事より、連続型シミュレータと呼ぶ。

具体的な連携方法は下記の通り

- ① 連続型シミュレータを用いて航路の最適化を行う。この際、最適解のみを求めらるのではなく、探索過程で得られた優良な解を数個保持しておく。
- ② 連続型シミュレータから算出された最適解、及び優良解を解候補として、離散型シミュレータに入力する。
- ③ 離散型シミュレータでは引き継いだ解候補を一つ一つ再現し、実際の利益額を算出する。



- ④ 離散型シミュレータで評価された各解候補の中から真の評価を基に、最適解を決定する。

この様な連携を行う為には、連続型シミュレータが解候補を絞り込めるだけの精度を保持している必要があるが、其の点については3章、4章の検討を通じて確認済みである。また、離散型シミュレータも現実を忠実に再現している必要がある。次項において、3章で簡単に触れた離散型シミュレータについてその概要を説明する。

## 6.3 離散型シミュレータ概要

離散型シミュレータ（以下、離散型）は現実のコンテナ貨物輸送をできるだけ忠実にコンピュータ上に再現する事を目的としている。詳しくは文献[23]を参照されたい。このシミュレータに用いられるモデルは、以下に示す3つの特徴を備える。

### 1) 離散型データ

コンテナ1個1個、ならびに船舶1隻1隻を離散データとして扱う。各コンテナには、個別にOD、ID番号、時間価値を定め、それらのコンテナを輸送する船舶がコンテナデータを保持する事で、どの船舶にどの貨物が積載されているかが出力される。

### 2) 時間発展型

現実のコンテナ輸送の手続きと同様、荷主がスケジュールに従って運航している船舶のスペース予約を行い、その予約に従って船社がコンテナを輸送するという手順でシミュレーションを行う。荷主が予約を行う時間という概念が含まれるので、時間発展型の動解析となる。

### 3) マルチエージェント

各コンテナにはコンテナ船のスペース予約を行うエージェントがついており、エージェントは、コンテナ貨物の犠牲量が最小となる輸送経路を探索する。また、エージェントが予約をしようとした時点で、コンテナ船が既に満載である場合は、別のコンテナ船を探索する事とする。

上記の特徴を持つ離散型でシミュレーションを行うために、以下の4種類のデータを準備する。

- a) OD表（一年間の海上コンテナ輸送実績）
- b) コンテナ船の時刻表と運賃表
- c) 距離表（里程表）
- d) コンテナ貨物の時間価値

時間価値は、黒川らのモデル[10]のように、対数正規分布で時間価値分布を近似し、乱数を用いて個々のコンテナに与える。残りのデータは全て連続型と共通とする。

シミュレーションにおいては、一年間を一日単位の繰り返しで進行させる。但し、時間精度は一日ではなく、コンテナ船の時刻表の時間精度に依存する。シミュレーションの流れは以下の通りである。

- ① 一日分のコンテナを発生させる
- ② エージェントが各コンテナの犠牲量が最小となる経路を予約する。エージェントが探索する船舶の範囲は、コンテナが発生した時刻において、コンテナヤードへの入庫時刻に間に合う船舶全てであり、コンテナ発生日の船舶に限らずそれ以降の船舶全てをある一定の範囲まで探索する。最小コストとなる船舶が既に満載であれば、2番目、3番目と順次コストが安い船舶のスペースを予約する。
- ③ 出向予定の船舶を出港させ、コンテナ船の収入、支出を算出する。

これらの一連の操作を1年間繰り返す。ただし、シミュレーション開始時においてはコンテナ船が全て予約されていない状態であるので、初期状態の影響がなくなるまで数十日間シミュレーションを行い、定常状態に達してからの結果を採用する。主な出力データは、以下に示す3つである。

- a) コンテナ貨物データ：各コンテナの輸送経路
- b) コンテナ船データ：各コンテナ船の収支
- c) 各コンテナの犠牲量および総犠牲量

各コンテナの犠牲量は、次式で算出する。

$$[\text{犠牲量}] = [\text{時間価値}] \times [\text{輸送時間}] + [\text{運賃}]$$

また、各コンテナ船の収入、および支出を次式で定義する。

$$[\text{収入}] = [\text{運賃}] \times [\text{輸送コンテナ数}]$$

$$[\text{支出}] = [\text{傭船費}] + [\text{燃料費}] + [\text{港湾費}] + [\text{コンテナハンドリング費}]$$

上記で定義された[収入]－[支出]を最適化対象となる船舶に関して総和をとったものを、離散型シミュレーションによる利益計算結果とする。

## 6.4 マルチレベル最適化の効果

4港10船舶のシステムを仮定し、そのうち5隻の船舶のスケジュールを設計して利益を最大化する問題を想定する。連続型では探索で得られた上位8個体を記憶しておきそれらを離散型で再評価する。上位8個体に対する各シミュレータで評価した利益額を下表に示す。

表6-1 各シミュレータによる利益額比較 (10<sup>6</sup>¥/week)

連続型における評価順位	連続型での利益額	離散型での利益額
1	39.08	33.59
2	37.24	35.60
3	36.88	36.77
4	36.75	31.10
5	36.69	35.59
6	36.35	35.56
7	36.27	36.52
8	36.04	35.69

上表を見ると、連続型で3番目の優良個体が現状再現型シミュレータでは最も利益額が高いという評価がされている。仮に、離散型で算出される解が現実を忠実に再現しているとすれば、連続型でのみ評価した場合に比べ離散型と連携させて解を決定する事により、このケースでは約10%程度利益が高いシステムを発見する事が可能となった。

なお、離散型で解候補の評価を行うのに要する時間であるが、上記の様な小規模なシステムに対して20秒程度を要する。連続型が約0.2秒程度であるので約百倍の時間を必要とするが、解候補が十分に限定されている為、再評価により追加的に生じる計算時間は微量に留まる。

以上の結果を踏まえれば、物流システムのような単純なモデルを構築するのが困難な社会システムに対しては、最適化する為のシミュレータを開発するのみにとどまらず、現状再現型のシミュレータを開発し両者を連携させて最適化を行う事が効果的であると結論づけられる。

## 6.5 本章のまとめ

本章では異なる精度でモデリングされたシミュレータを連携させより優れた解を求めるマルチレベル最適化手法について述べた。また、マルチレベル最適化手法を用いる事によって、より優れた解が実行時間で得られる事を示した。

# 第7章 低炭素型物流システムの設計手法

## 7.1 概要

本章では、3章～5章で開発したシミュレータを異なる設計目的に転用すべく、開発したシミュレータの改良を行う。

ここまでの章では、効率的な輸送システムを現実的条件下で構築すべく、特定の船舶スケジュールを変化させる事で任意の船社の利益を最大化する事を目的としてきた。しかし、近年では単純に利便性の高い輸送システムを求めるのみならず、環境負荷が低い、低炭素型輸送システムへのニーズが高まりつつある。そのような時代変化を受け、これまで開発してきた物流システム構築手法を、低炭素型物流システムを構築する為に転用する事を考える。

ややこれまでと研究背景が変化するので、簡潔に低炭素型物流システムを設計する事の必要性を述べる事から始める。その後、低炭素型物流を構築する為の概念設計を行い、その概念に従って最適化する為に必要なシミュレータへの変更点について述べる。最後に、本章で改良を加えたシミュレータによってどのような結果が得られたかを示す。

## 7.2 低炭素型物流へのニーズ

近年、自然環境の急速な変化に伴い、環境へ配慮した社会活動の重要性が認知されてきた。とりわけ、自然環境に大きな変化を生み出しているとされる温暖化ガス排出量を削減する事が重視され、1997年には温暖化効果ガス削減目標を掲げた京都議定書が採択された[24]。

京都議定書では、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、ハイドロフルオロカーボン(HFCs)、パーフルオロカーボン(PFCs)、六ふっ化硫黄(SF<sub>6</sub>)の6種類の温室効果ガスが削減対象となっており、先進各国の温室効果ガス排出量削減に関する数値目標が定められている我が国も2002年にこの削減目標を受諾しており、それによると第一結末期間に当たる2008年～2012年の5年間における温暖化ガス排出量を基準年(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oについては1990年、HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>については1995

年)の排出量から6%削減するという目標が割り当てられている。

ところが、最新の報告では2005年度の温暖化効果ガス排出量は基準年の7.8%増加しており、現状のままでは排出権取引を活用しても目標達成が極めて困難な状況である[25]。この様な状況をうけ、各種社会活動に対する個別の削減目標が改められ、現在では運輸部門に対する削減目標は2005年度比で2.7%の削減目標となっている。この削減目標を達成するには、現状のシステムを改善すべく再構築していく必要がある。

本研究では、これまで考えてきたコンテナ輸送を対象として、削減目標に貢献していく事を考える。また、削減対象としては温暖化ガスの大半を占めるCO<sub>2</sub>に設定する。

## 7.3 低炭素型物流の構築に向けた概念設計

### 7.3.1 コンテナ輸送の分類

低炭素物流の構築を行う為に、ここではコンテナ輸送を分類しターゲットとなるコンテナ輸送について検討する。

コンテナの輸送形態は大きく2つに分類する事ができる。一つは密接した近距離地域で行われる域内輸送であり、もう一つは地域間を輸送する域間輸送である。輸送を域内と域間に分類し、世界を大まかな地域で分類した場合の例を下記に記しておく。図中において、黒色の矢印は域間輸送を表し、赤色の円が分類された地域内を表す。



図7-1 世界の地域分類図

一般に、各地域にはハブ港と呼ばれる大型港が存在しており、域間輸送はそれらの港を周遊する事で地域間輸送を行う。各地域内では、ハブ港に輸送されてきた貨物を積み替え、域内各所へ輸送する。当然、その逆向きの輸送もあれば、域内同士での輸送もあり、域内輸送はより細かく分類できる。域内輸送を細かく分類したものを下図に示す。

なお、3章から5章で開発してきたシミュレータは、下図における②の輸送を対象としたものとして解釈できる。

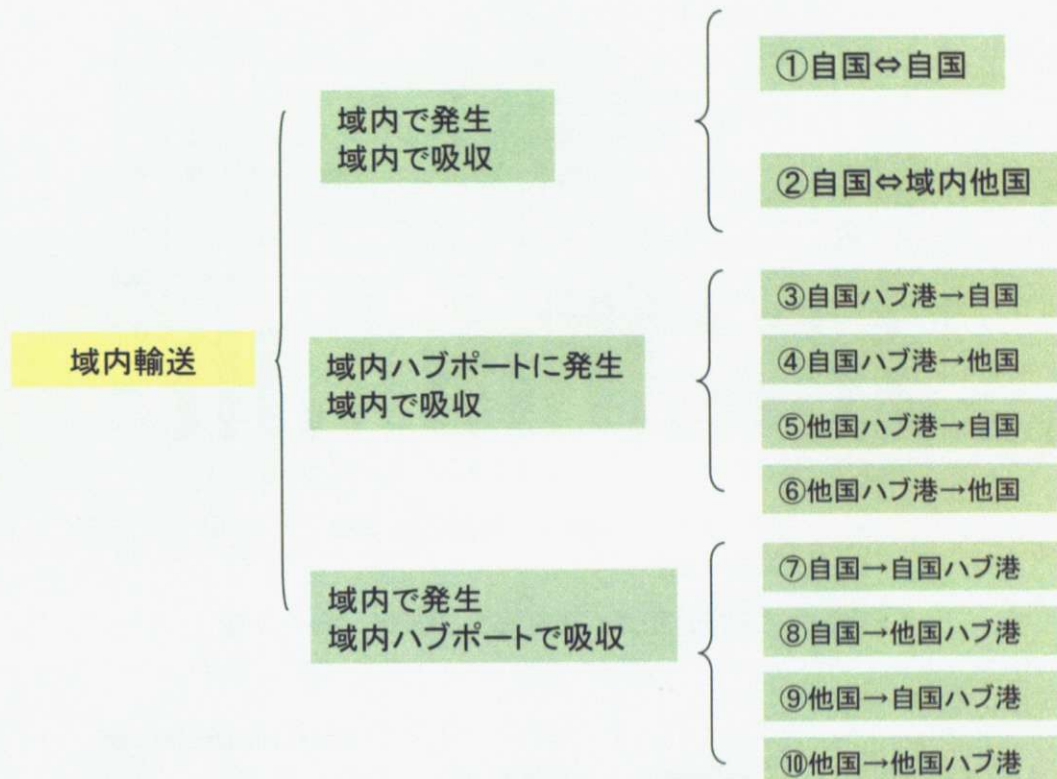


図 7-2 域内輸送の分類

ここまでで分類した域間輸送と域内輸送の合計 11 通りの輸送を対象として低炭素化を計らなくてはならない。しかし、これらの輸送には低炭素化を図りやすいものとそうでないものがある。また、自国の CO2 に関与する輸送とそうでないものがある。そこで、これらの輸送のうちどれを対象とし、どのように低炭素化していくのかを検討する。

### 7.3.2 ターゲットとなる輸送種の抽出と、低炭素化の為のアプローチについて

7.3.1 で分類した各輸送のうち、日本が関与しない輸送に関しては日本での CO2 の削減とは無関係なので除外することができる。これにより⑥、⑩を除外する。

次に、CO2 排出が多い輸送種の方がより効果的に低炭素化を行えるという観点に立ち、輸送種別の CO2 排出量をだまかに比較する。図 7-3 を参考にすると、日本に関して

は④、⑤、⑧、⑨と比較し③、⑦による輸送量が圧倒的に多いことが分かる。但し、④、⑤、⑧、⑨の輸送種は③、⑦よりも最大で域内国家間を海上輸送する分だけ輸送距離が長くなる(国内での移動距離は各国大差ないとした)。輸送距離が伸びる事に対しては、図7-4における国内の輸送モード分担比、及び表7-1のモード別のトンキロ当たりCO2排出量を参照する事で、国内移動より影響力が小さいと判断し、④、⑤、⑧、⑨も除外する。

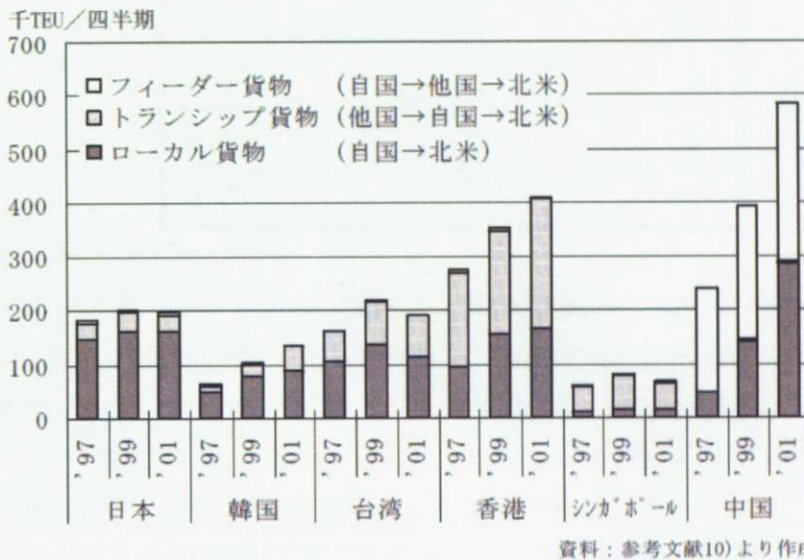


図7-3 輸送種別貨物量 (文献[26]より抜粋)

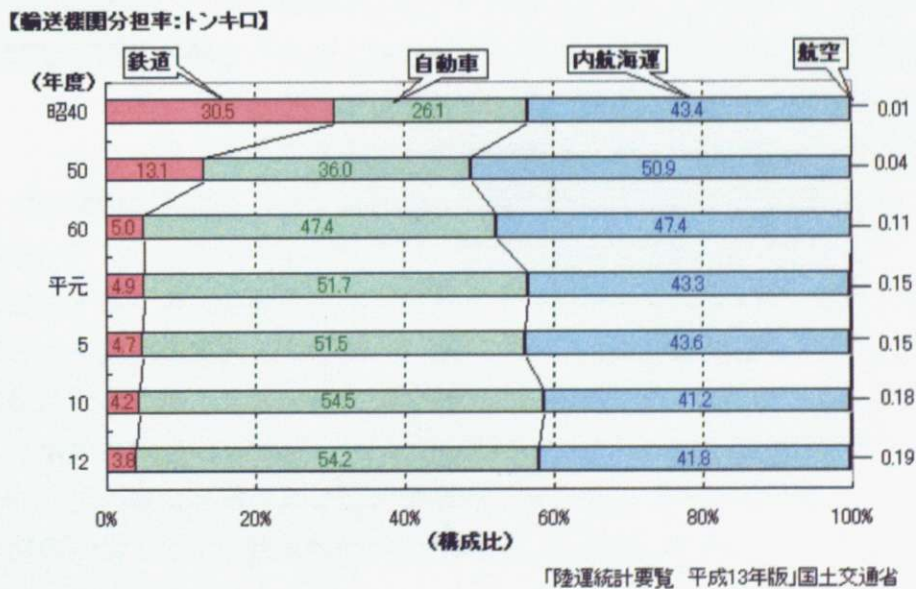


図7-4 国内輸送モード費 (文献[27]より抜粋)

表7-1 輸送モード別トンキロ当たり CO2 排出量(文献[28]より抜粋)

輸送モード	g-CO <sub>2</sub> /トンキロ
自家用小型トラック	3,271
営業用軽自動車	1,949
営業用小型トラック	830
自家用普通トラック	388
営業用普通トラック	174
鉄道	21
船舶	38
航空	1,480

以上より、ターゲットとなる輸送種としては域間輸送、及び域内輸送の①、②、③、⑦となる。これらのうち域間輸送を対象として検討すると、船舶を対象とするよりはむしろ港を対象として、どこをハブ港とするべきかという議論に陥る。この、ハブ港の位置設計を行うには域内の輸送も加味して行う必要があり非常に複雑な為、初期検討には適さない。また、①、②の輸送種は③、⑦を複雑化したものであるため、初期検討としては③、⑦を対象とし低炭素化を試みる。

上記で設定した③、⑦の輸送種について低炭素化を試みる場合、図7-4及び表7-1を考慮すれば、国内ハブ港⇄国内都市の輸送における内航船、鉄道の使用比率を高める様、トラックやトレーラー輸送からモーダルシフト促すのが効果的である。このうちレールに関しては旅客輸送の都合上輸送能力も現状からの上昇が見込めない為、主に国内内航フィーダーネットワークを改善する事によりシフト助長する事を考える。

ネットワークの改善を考えるにあたり設計対象となりうるのは、第一章で述べた様に船舶の形状的側面にあたるスケジュールと性質的側面にあたる、運賃、船舶スペックが挙げられる。ここまでのシミュレータでは形状的側面に焦点をあててきたが、モーダルシフトを起こす事を考える際には運賃設定が重要な要素となるので、運賃も設計対象に含める事とする。初期検討としては、船舶のスペックまでは最適化対照に含めない。

目的関数については、システム全体で放出される総 CO2 排出量とし、これを最小化するように全ての船舶のスケジュール、及び運賃を設計する。この様な考え方は、本来的には船社同士の競争原理を無視した最適化手法である事を序論で述べたが、社会全体に関わる問題に対しては、競争外の力、すなわち政府援助等を働かせる事が可能なため適当と判断した。



## 7.4 評価モデル、評価式の変更

### 7.4.1 評価モデル、評価式の変更について

7.3 で示したアプローチに従って評価するには、これまでに構築した評価モデル及び評価式を用いる事はできない。評価式に関しては CO2 排出量に変換する必要が生じるし、モデルに関しても、陸続きの国内が設計領域となる為トレーラーのみを用いた輸送経路をモデルに導入せねばならない。以下、新たな評価式の設定を事から始める。なお、評価モデルを用いて評価する際にはこれまでのモデル同様、スケジュールや運賃といった最適化段階における設計変数は所与である。

### 7.4.2 評価式の設定

任意システムに対する評価値は一週間におけるシステム全体での総 CO2 排出量として下式で定める。

$$[1 \text{ 週間の総 CO2 排出量}] = [1 \text{ 週間のトレーラーの総燃料使用量}] \times [\text{トレーラーの CO2 排出係数}] + [1 \text{ 週間の船舶の総燃料使用量}] \times [\text{船舶の CO2 排出係数}] \quad (7.1)$$

なお、本来的には貨物の積み下ろし等にも CO2 は発生するがこれらの値は微小であると考え、考慮していない。港湾や船舶などの設備の構築に関わる CO2 も既に排出されたとし、考慮しない。

式(7.1)における輸送モード別の CO2 排出係数は文献[28]より下記の様に設定する。

トレーラー : 2.62(t/k1)

船舶 : 2.98(t/k1)

式(7.1)の船舶の燃料使用量は下式で定義される。

$$[1 \text{ 週間の船舶の総燃料使用量}(k1)] = \sum ([\text{船舶 } k \text{ の燃料使用量}(g/hr)] \times \text{船舶 } k \text{ の週当たりの運航時間}) \div C \text{ 重油費}(kg/k1) \times 0.001 \quad (7.2)$$

これは船舶毎の燃料使用量を求め、全船舶で総和を取ったものを k1 に変換する式である。船舶毎の燃料使用量は 3 章で示した式で算出する。船舶毎の週当たり運航時間はスケジュールを基に、24(hr/day) × 7(day) から停泊時間を減じたもので定義する。C 重

油比は 0.95 とする。

式(7.1)の、トレーラーの総燃料使用量は、

$$[1 \text{ 週間のトレーラーの総燃料使用量 (kl)}] = [1 \text{ 週間のトレーラーの総走行距離 (km/week)}] \div [\text{トレーラーの燃費 (km/l)}] \times 0.001 \quad (7.3)$$

で定義する。

燃費は文献[29]を基に 5km/l とする。トレーラーの総走行距離は下式で求める。

$$[1 \text{ 週間のトレーラーの総走行距離 (km/week)}] = \Sigma ([\text{トレーラーが各輸送経路で輸送する際の走行距離 (km/台)}] \times \text{各トレーラー経路で輸送される貨物量 (TEUs/week)} \div \text{トレーラーの輸送効率 (TEUs/台)}) \quad (7.4)$$

(7.4)式は各経路で輸送される貨物量を輸送するのに必要なトレーラーの台数を求め、走行距離を乗じて、経路別の延べ走行距離を算出し、更に全経路で総和を取ったものである。各経路で輸送される貨物量は、現段階では不明であるのでモデルを用いて予測していく事になる。その他の項はデータとして与え、トレーラーの輸送効率は 1 とする。

#### 7.4.3 P-D 型輸送システムにおける輸送設備のモデル化

本章で扱う輸送システムは、ハブ港と内陸都市間で貨物を輸送するシステムであるので、以下 P-D 型輸送システムと呼ぶ。7.4.2 で設定した評価式を用いて任意の P-D 型輸送システムを評価するには、そのシステムにおける貨物フローを求める必要が生じた。そこで、3章で構築した評価モデル同様、物流設備モデルと荷主行動モデルを設定し、貨物フローを予測する式を構築する。荷主行動モデルについては 3.3.3 を流用する事とし、物流設備モデルについては新たに検討を行う。

ここで対象とする P-D 型輸送システムは下記の特徴を持つ。

1. 船舶はハブ港とフィーダー港の区間で貨物を輸送する。フィーダー港とは、ハブ港と内陸都市間での貨物輸送に海上輸送システムを用いる際に活用される中継港である。
2. 内陸モードはハブ港と内陸都市間、及び、フィーダー港と内陸都市間の輸送を行う。
3. 一定期間に輸送するべきコンテナが内陸都市とハブ港で随時発生し、其の総量は所与。
4. ハブ港で発生するコンテナは目的地として都市を持つ。
5. 内陸都市で発生する貨物は目的地としてハブ港を持つ。
6. 貨物はハブ港と内陸都市間を、内陸モードのみ、もしくは船舶と内陸モードを

併用して輸送される。

上記の特徴を持つシステムをモデル化するにあたり仮定を導入する。

1. 海上輸送については、船舶を乗り継いでの輸送を行わない。
2. 各船舶は一週間で航路を周回する。
3. 船舶の航路は単純閉ループに限定。
5. 港はあらゆる船舶が常時利用可能である。
6. 全ての貨物を積み、降ろしするには LoLo 船で各 6 時間、RoRo 船で各 3 時間要するものとし給油等もこの時間内で終了する。
7. 各船舶の運賃は輸送区間ごとに与えられている。
8. 各港間の航海距離は一定で与えられる。
9. 各船舶は、当該船舶の積み込み開始時刻まで予約可能である。
10. 内陸モードとしてはトレーラーのみを想定する。
11. 各トレーラーは都市⇄港間で直行輸送する。
12. トレーラーは常時利用可能。
13. トレーラーはあらゆる港と都市間を結んでいる。
14. トレーラーは都市と都市の間は結んでいないものとする。
15. トレーラーの移動速度は常に一定とする。
16. トレーラーに対する積み降ろし時間、給油時間はかからないものとする。
17. トレーラーを乗り継いでの輸送は行わない。

これらの仮定の大半は、3章で開発した D to D 型輸送システムの輸送設備をモデル化する際に課したものである。新たに追加した、10、14 の仮定の妥当性について確認しておく。

#### 10. の仮定について：

内陸モードとしては他にレールが存在するが、7.3.2 で述べた様に、レールは内陸モードとしての分担率が低く、また分担率を上昇させる事も困難であるため、モデルから除外しても影響度は低いと考える。

#### 14. の仮定について：

本モデルは P-D 間での輸送を対象としているため、都市間の輸送経路は不要である。

これらの仮定を導入する事で得られる輸送設備モデルのうち、トレーラーのみを記したものを下記に示す。

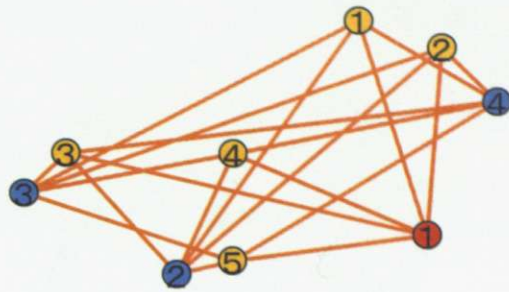


図 7-5 トレーラー輸送設備のモデル例

導入した仮定に基づけば上記の様なトレーラー輸送経路が得られるが、ここで貨物がハブ港⇔都市の間でのみ輸送される事を踏まえれば、

$$[\text{ハブ港 } i \leftrightarrow \text{都市 } a \text{ の距離}] \leq [\text{フィーダー港 } j \leftrightarrow \text{都市 } a \text{ の距離}] \quad (7.5)$$

となるフィーダー港  $j \leftrightarrow$  都市  $a$  のトレーラー経路は考慮する必要が無い。これらの経路で輸送する際にはハブ港  $i \leftrightarrow$  フィーダー港  $j$  の間の海上輸送を必要とするのでトータルの運賃、及び輸送時間も、ハブ港  $i \leftrightarrow$  都市  $a$  の陸路での直行輸送が優位となる。またハブ港  $i \leftrightarrow$  都市  $a$  の輸送量には制約がかからない為、直行経路が常に優位である。このような経路を省略した例を下記に示す。

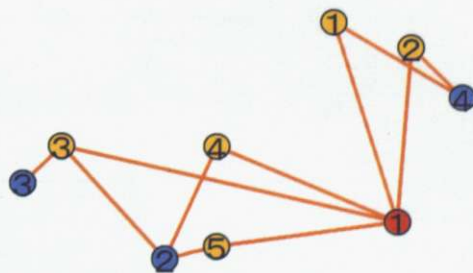


図 7-6 不要経路を省略したトレーラー輸送設備のモデル例

次に図7-6に船舶輸送設備も記述した、全体の輸送設備モデルを示す。

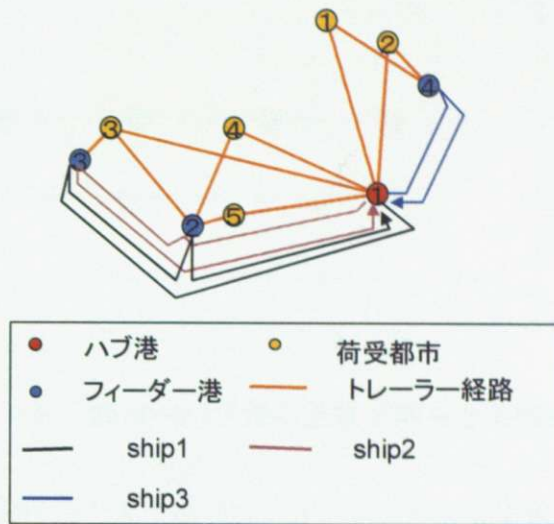


図7-7 P-D型輸送システムの輸送設備モデル例

上記のモデルによって貨物が輸送される事になるがこの際、各OD貨物は多様な経路を持つ。これらの経路はハブ港→都市の貨物か都市→ハブ港の貨物かで性質が異なる。例えば、ハブ港①から都市⑤に向かう貨物が輸送される経路は下記の様になる。図中の港における時間経過は3章のモデルと等しい為、簡略化して記載している。

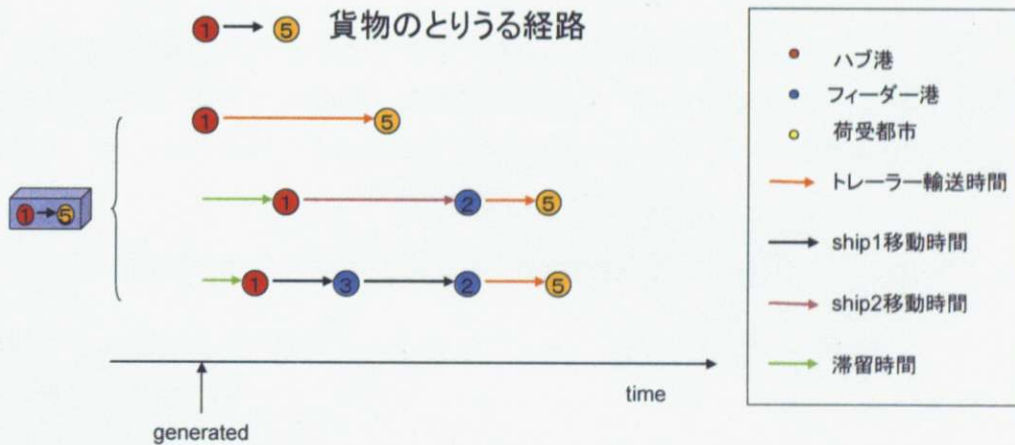


図7-8 ハブ港→都市の貨物を取りうる輸送経路例

P-D型輸送ではトレーラーでの直行輸送が可能であり、このトレーラーは常時利用可能な為滞留が発生しない事に留意されたい。

これに対し、都市⑤からハブ港①に向かう貨物を取りうる経路は下図のようになる。

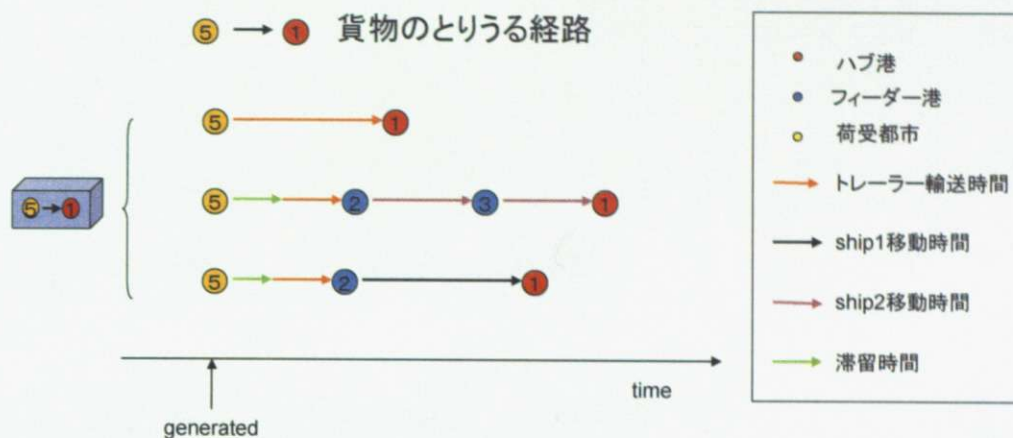


図 7-9 都市→ハブ港の貨物が取りうる輸送経路例

図中において、滞留時間を表す緑色は D to D モデルを参照して都市⑤に集約した。

図 7-8 と図 7-9 では、海上輸送が関与する経路において、トレーラー輸送を行う時期が異なる。それ故、滞留発生時間が、貨物が発生してから船舶への積み開始時刻までであるか、3.4.4 で定義した船舶への仮想積み時刻までであるかが異なるので、区別して扱う必要がある。また、どちらの図でも、トレーラーの直行経路は海上を利用する場合とは性質が異なるので、これらも区別して扱う必要がある。

#### 7.4.4 P-D 型モデルにおけるフロー予測式

一週間での貨物フローを予測する事を考え、目的関数となる荷主に生じるコストを順次定義していく。求めたい量は、各経路で輸送される貨物量であるが、この経路は OD の性質と、海上輸送を用いるか否かで性質が異なるので、変数の表現方法の段階で区別しておく。

トレーラーのみで輸送される貨物量は、その OD の性質に応じて、 $x_{Pi,Dk}$  または、 $x_{Di,Pk}$  で表現する。前者はハブ港 P i から都市 D k への貨物を、後者は都市 D i からハブ港 P k への貨物を表す。

海上輸送を用いる経路で輸送される貨物量は  $x_{Pi,Pj,Dk}^k$  または  $x_{Di,Pj,Pk}^k$  で表す。前者はハブ港 Pi からフィーダー港 Pj へ船舶 k で輸送されその後トレーラーで都市 D k まで輸送される貨物量を表す。後者は都市 Di からトレーラーでフィーダー港 Pj へ輸送され、その後船舶 k によってハブ港 Pk まで輸送される貨物量を表す。これら貨物が輸送される実際の経路は船舶 k のスケジュールを参照する事で得られる。

以下この変数を用いて定式化を行う。定式化に用いた記号は表 3-3 を参照されたい。

1) 運賃コスト

$$f_1' = \sum_{(Pi, Dk)} x_{Pi, Dk} \cdot ctr_{Pi, Dk} \quad (Pi, Dk) \in Ph^k \times D \quad (7.6)$$

$$f_1'' = \sum_{(Di, Pk)} x_{Di, Pk} \cdot ctr_{Di, Pk} \quad (Di, Pk) \in D \times Ph^k \quad (7.7)$$

$$f_1''' = \sum_k \sum_{(Pi, Pj)^k} \sum_{Dk} x_{Pi, Pj, Dk}^k \cdot (csh_{Pi, Pj} + ctr_{Pj, Dk}) \quad (Pi, Pj)^k \in Ph^k \times Pf^k \quad (7.8)$$

式中の  $Ph^k$ 、 $Pf^k$  は船舶  $k$  が経由するハブ港、及びフィーダー港の集合を現す。

$$f_1'''' = \sum_k \sum_{(Pj, Pk)^k} \sum_{Di} x_{Di, Pj, Pk}^k \cdot (csh_{Pj, Pk} + ctr_{Di, Pj}) \quad (Pj, Pk)^k \in Pf^k \times Ph^k \quad (7.9)$$

以上4式は、前半2式はトレーラー直送タイプの、後半2式が海上利用タイプの総運賃コストであり、全体の運賃コストは、

$$f_1 = f_1' + f_1'' + f_1''' + f_1'''' \quad (7.10)$$

となる。

2) 輸送時間コスト

$$f_2' = \sum_{(Pi, Dk)} x_{Pi, Dk} \cdot cti_{Pi, Dk} \cdot ttr_{Pi, Dk} \quad (Pi, Dk) \in Ph^k \times D \quad (7.11)$$

$$f_2'' = \sum_{(Di, Pk)} x_{Di, Pk} \cdot cti_{Di, Pk} \cdot ttr_{Di, Pk} \quad (Di, Pk) \in D \times Ph^k \quad (7.12)$$

$$f_2''' = \sum_k \sum_{(Pi, Pj)^k} \sum_{Dk} x_{Pi, Pj, Dk}^k \cdot cti_{Pi, Dk} (tsh_{Pi, Pj}^k + ttr_{Pj, Dk}) \quad (Pi, Pj)^k \in Ph^k \times Pf^k \quad (7.13)$$

$$ttr_{Pj, Dk} = ddp_{Dk, Pj} / str$$

$$tsh_{Pi, Pj}^k = 24 \times (arr_{Pj}^k - dep_{Pi}^k) + lsh^k + ush^k$$

$$f_2''' = \sum_k \sum_{(Pj, Pk)^k} \sum_{Di} x_{Di, Pj, Pk}^k \cdot cti_{Di, Pk} (str_{Pj, Pk}^k + ttr_{Di, Pj}) \quad (Pj, Pk)^k \in Pf^k \times Ph^k$$

$$ttr_{Di, Pj} = ddp_{Di, Pj} / str$$

$$tsh_{Pj, Pk}^k = 24 \times (arr_{Pk}^k - dep_{Pj}^k) + lsh^k + ush^k$$
(7.14)

以上4式は、それぞれ経路種毎の総輸送時間を金銭換算したものであり、全体の輸送時間犠牲量は、

$$f_2 = f_2' + f_2'' + f_2''' + f_2''''$$
(7.15)

となる。

### 3) 滞留時間コスト

滞留コストも、これまでと同様の概念で行う事を考える。3章で示した滞留コスト式は、輸送開始時刻から理想滞留量を算出し、その理想から外れる事によるコストの増分を扱うものであった。

ところがP-Dモデルでは常時利用可能なトレーラーの直送輸送が存在する為、理想滞留を算出すると全てトレーラーで輸送される状態となる。この状態に対して、これまで同様、貨物の発生割合が一定という仮定を課したとしても、その滞留増分は下図のような三角形の面積となり、二次式で表現せざるを得ない。なお、図中の $\alpha$ は港で貨物が発生する割合 (TEUs/hr) である。

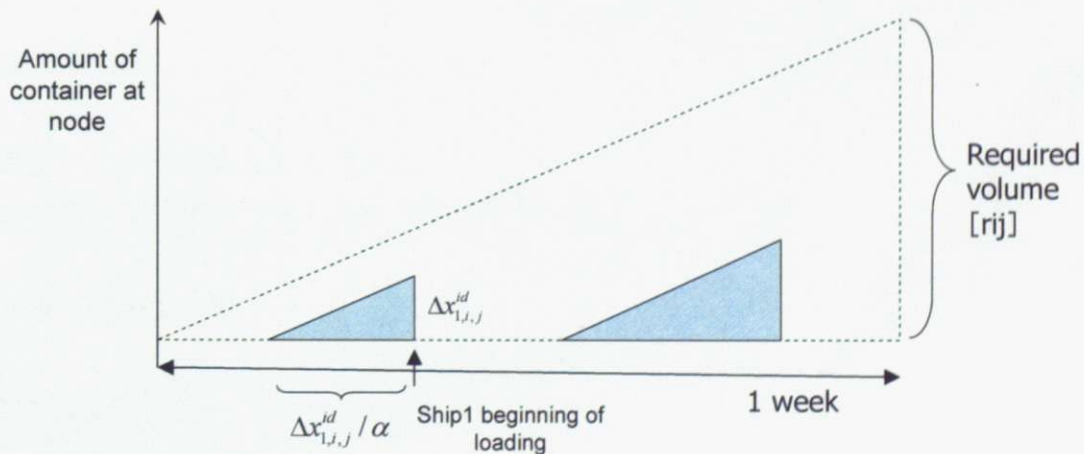


図7-10 P-D型モデルにおける滞留コスト増分



この様な二次式による定式化は、迅速なフロー予測という点から好ましくない。そこで、P-D型モデルにおける滞留コストには従来の仮定に加え新たに下記の仮定を導入する。

仮定：

トレーラーは基本的に自由に利用可能であるが、ハブ港⇄都市の直行輸送に関しては、日々0時に輸送を開始する。

この様な仮定を導入する事で、任意のOD貨物を輸送する媒体全ての輸送開始時刻を与える事ができ、理想輸送量、及び輸送間隔が定数として求まる。それ故、滞留コストの増分を一次式で表現可能となる。但し、新たな仮定により、これまで一通りであったトレーラーの直行輸送は、輸送開始時刻毎に異なる経路として扱う必要があり、設計変数  $x_{Pi,Dk}$ 、 $x_{Di,Pk}$  はそれぞれ  $x_{Pi,Dk}^n$ 、 $x_{Di,Pk}^n$  へ分割される。ここで、 $n$  は曜日を表すインデックスであり1~7の値をとる。なお、上記の仮定は、輸送開始時刻の間隔を短くしていく事でトレーラーが自由に利用可能である状況に近づけていく事ができる。しかし、輸送間隔を狭めればそれだけトレーラーで直行輸送される貨物量を表す変数も細かく分割され、変数の増加につながるので、輸送間隔は1日とした。

P to D 輸送に対する滞留コスト増分式は、船舶の積み開始時刻、及び直行輸送を行うトレーラーの輸送開始時刻を用いれば、式(3.8)、(3.9)と同様の概念で定義され、これを  $f_3'$  とする。

また D to P 輸送に対しては、仮想積み開始時刻と直行輸送を行うトレーラーの輸送開始時刻を用いれば式(3.25)と同様の概念で定義され、これを  $f_3''$  とする。

これら2つの関数の和をとった

$$f_3 = f_3' + f_3'' \quad (7.16)$$

を滞留コスト評価式として考える。

ここまでで定義した各コストの総和を取った、

$$f(x) = f_1 + f_2 + f_3 \quad (7.17)$$

が目的関数である。

この関数における変数は次式の通り。

$$x = (x1, x2)$$

$$x1 = (x_{Pi,Dk}, x_{Di,Pk}, x_{Pi,Pj,Dk}^k, x_{Di,Pj,Pk}^k, x_{Pi,Dk}^n, x_{Di,Pk}^n) \quad (7.18)$$

$$x2 = (\Delta x_{Pi,Dk}, \Delta x_{Di,Pk}, \Delta x_{Pi,Pj,Dk}^k, \Delta x_{Di,Pj,Pk}^k, \Delta x_{Pi,Dk}^n, \Delta x_{Di,Pk}^n)$$

これらの変数に対しては制約が存在し、トレーラーで直行輸送される貨物量を表す変数には以下の制約がかかる。

① フロー正の条件

$$x_{Pi,Dk} \geq 0 \quad (Pi, Dk) \in Ph^k \times D \quad (7.19)$$

$$x_{Di,Pk} \geq 0 \quad (Di, Pk) \in D \times Ph^k$$

② 1週間にトレーラーで直行輸送されたOD貨物量は日々輸送されたOD量の1週間分の総和に等しい

$$\begin{aligned} x_{Pi,Dk} &= \sum_n x_{Pi,Dk}^n \\ x_{Di,Pk} &= \sum_n x_{Di,Pk}^n \end{aligned} \quad (7.20)$$

なお、その他の制約については3章のモデルで課していたものと同等のものが課され、形式が異なるだけなのでここでは割愛する。

式(7.17)の目的関数を制約式の下、最小化する事で式(7.18)の各変数の値が得られる事になる。これらの値のうち評価式で求められていたのは、トレーラー輸送が行われる区間で週当たり輸送される貨物量であり、下記の通り。

①ハブ港Pi→都市Dkの直行区間： $x_{Pi,Dk}$

②都市Di→ハブ港Pkの直行区間： $x_{Di,Pk}$

③フィーダー港Pj→都市Dkの経路： $x_{Pj,Dk} = \sum_k \sum_{Pi} x_{Pi,Pj,Dk}^k$

④都市Di→フィーダー港Pjの経路： $x_{Di,Pj} = \sum_k \sum_{Pk} x_{Di,Pj,Pk}^k$

上記の①～④を評価式に代入する事で、システムに対する評価値を得る。

#### 7.4.5 評価式、評価モデルの変更点まとめ

7.4.2において評価式をシステムのCO<sub>2</sub>排出量へと変更した。

7.4.3～7.4.4では、輸送システムの再現領域をハブ港⇄都市間のものへ変更した。また、フロー予測モデルにトレーラーの直行輸送を付加した。これにより船舶とトレーラーの競争関係を直接的に取り扱い、フローを予測する事が可能となった。

## 7.5 最適化アルゴリズムへの変更点

最適化アルゴリズムは4章で開発した Adaptive GLS を用いる。但し、最適化対象が船舶のスケジュールのみから、スケジュールと運賃へと拡大したので、それにあわせて遺伝子の表現方法と局所探索の近傍に修正を加える。

スケジュールの遺伝子としては従来のを適用する。船舶の運賃に関しては全区間の運賃を自由変数とすると組み合わせ変数が増大するので、前もって全船舶共通の区間運賃表を設定しておき、その運賃表に乗じる船舶毎の運賃係数に乗じる事で運賃を与える事を考え、組み合わせ変数としては運賃係数をもつ事とする。この運賃係数を船舶のID順に並べ、既存の遺伝子の最後尾に接続したものを遺伝子とする。

近傍に関しては、運賃係数が格納された要素を任意に2箇所選択して交換する  $c\_swap$  近傍を設定する。その選択率は  $t\_swap$  近傍と等しいとする。

また、最適化の方向が、最大化から最小化へと変化しているので、個体の適応度としては評価値の逆数で与える。

## 7.6 低炭素型物流構築シミュレータを用いた分析

### 7.6.1 シミュレーションの設定

本項では、7.4～7.5 で改良を加えた評価モデルや最適化シミュレータを用いて、ケース分析及び最適設計を行う。行うケース分析、及び最適化は

- 1) 船舶のベース運賃のみを変化させた場合のCO<sub>2</sub>排出量変化の分析
- 2) スケジュールのみを最適化した際の効果

### 3) 運賃、スケジュールを最適化した際の効果

上記で設計するシステムは全て図7-7に概観を示したシステムとし、シミュレーションに必要な詳細データを次節に示す。データは、現実を基に作成した仮想データである。データ中でシミュレーションに用いられない要素については一部0と標記している。

## 7.6.2 シミュレーションに用いるデータ

### (1) 港に関するデータ

ハブ港：tokyo 港の1港

フィーダー港数：shizuoka 港、nagoya 港、chiba 港の3港

港間距離：

表7-2 港間距離 (mile)

<i>distance(mile)</i>		<i>destination</i>				
		Tokyo	Shizuoka	Nagoya	Chiba	
<i>origin</i>	port name					
	port ID	1	2	3	4	
	Tokyo	1	0	300	500	200
	Shizuoka	2	300	0	200	500
	Nagoya	3	500	200	0	700
Chiba	4	200	500	700	0	

上表では行を出発地に、列を目的地としてもつ港間距離を示している。以下、出発地、目的地を持つデータはこの形式で記載する。

### (2) 都市に関するデータ

都市数：5都市

### (3) 港、都市に関するデータ

港→都市の要求輸送量：

表7-3 港→都市の要求輸送量 (TEUs)

	city1	city2	city3	city4	city5
tokyo	300	100	200	400	200

都市→港の要求輸送量

表 7-4 都市→港の要求輸送量 (TEUs)

	Tokyo
city1	300
city2	200
city3	300
city4	400
city5	200

都市→港間距離：

表 7-5 都市→港間距離 (km)

	Tokyo	Shizuoka	Nagoya	Chiba
city1	200	0	0	100
city2	200	0	0	50
city3	500	150	50	0
city4	200	150	0	0
city5	200	50	0	0

港→都市間距離；表 7-5 を転置したものと等しいので割愛する。

(3) 荷主に関するデータ

荷主の時間価値：全ての港→都市間輸送で均一とし、先行研究[2]を基に 300 (JPY/hr・TEUs) とする。

(4) 船舶に関するデータ

使用船舶数：3 隻

設計船舶数：3 隻

船舶スペック：

表 7-6 船舶の基本性能

ship ID	Speed(knot)	Max loadage(TEUs)	GT(ton)	ship type
1	14.5	300	749	LoLo
2	14	150	499	LoLo
3	12.5	150	498	LoLo

表 7-6 の船速は平均移動速度である。

各船舶の初期スケジュール：

表 7-7 初期スケジュール

ship ID	port1	arr time	dep time	port2	arr time	dep time	port3	arr time	dep time	port4	arr time	dep time
1	Tokyo	1.0	2.4	Nagoya	3.8	5.2	Shizuoka	5.8	7.1			
2	Tokyo	1.0	2.3	Shizuoka	3.2	4.6	Nagoya	5.2	6.5			
3	Tokyo	0.0	1.1	Chiba	1.8	2.8	tokyo	3.5	4.6	Chiba	5.3	6.3

表 7-7 の見方は、3 章で掲載したスケジュールと同様である。

LoLo 船舶のベース運賃表：

表 7-8 LoLo 船のベース運賃 (JPY)

	Tokyo	Shizuoka	Nagoya	Chiba
Tokyo	0	15000	20000	10000
Shizuoka	15000	0	0	0
Nagoya	20000	0	0	0
Chiba	10000	0	0	0

設計船舶の周遊周期：周期は weekly サービスを前提として、一週間とする。

C 重油比：0.95

船舶の CO2 排出係数：2.98(t/k1)

(5) トレーラーに関するデータ

トレーラーの平均移動速度：25km/hr

トレーラーの CO2 排出係数：2.62(t/k1)

トレーラーの燃費：5km/ℓ

トレーラーの輸送効率：1 (TEUs/台)

都市→港間のトレーラー運賃：

表 7-9 都市→港間輸送費 (JPY)

	Tokyo	Shizuoka	Nagoya	Chiba
city1	20000	0	0	5000
city2	15000	0	0	3000
city3	40000	3000	5000	0
city4	20000	5000	0	0
city5	20000	5000	0	0

港→都市間のトレーラー運賃：表 7-9 を転置したものに等しいので割愛する。

### 7.6.3 シミュレーション結果

#### 1) 運賃のみを変化させた場合のケース分析

7.6.2 で設定したデータ、及び変更を加えた評価モデルを用いて、船舶の運賃変化に対するCO<sub>2</sub>排出量変化を分析する。この分析では全船舶の運賃係数を同時に変化させる。運賃係数の範囲としては0.5~1.5倍を設定し、0.05刻みで分析した。その結果を以下に示す。

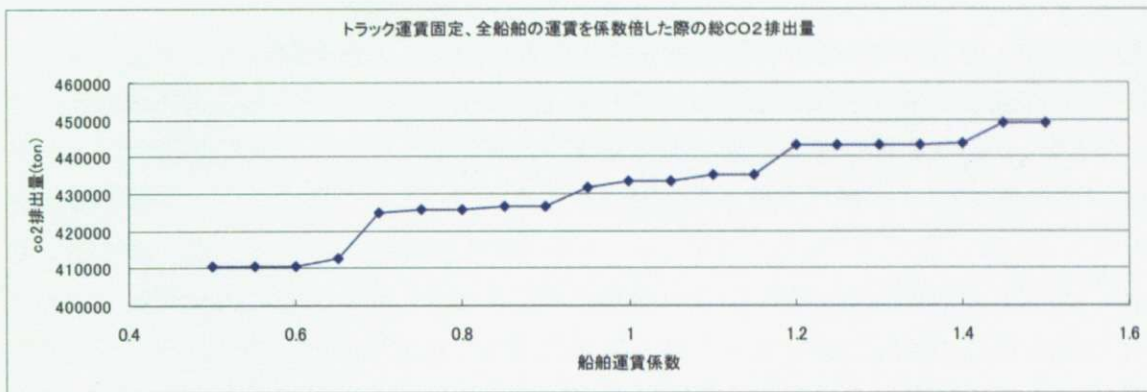


図7-11 運賃変化に対するCO<sub>2</sub>排出量の推移

上図より、船舶の運賃下げると、CO<sub>2</sub>排出量も低減していく事が確認できる。これは、海上経由の輸送コストが低下する事で、トレーラーでの直行輸送から海上経由での輸送へとシフトが起こる為であるが、このシフトは必ずしも運賃係数の変化と連動していない事も確認できる。例えば運賃係数を1.4~1.2まで低下させても図中ではCO<sub>2</sub>の排出量に変化は見られない。ところが、運賃係数を1.2から1.15へ変化させると、突如CO<sub>2</sub>排出量が低減する。この様な現象が生じるのは評価モデルの性質によると考えられる。本評価モデルでは荷主の時間犠牲量を均一に設定している為、モーダルシフトが発生する経路では、一斉にシフトが発生する事になるのである。

この様な現象は現実にも起こると予想される。黒川らのモデル[10]によれば、現実の貨物の犠牲量は均等に分布するのではなく対数正規分布に従う為、ピークを持つ事になる。このピーク値付近の貨物がシフトする際には一斉にシフトする為、図7-11程顕著では無いにしても、急激にシフトが生じるポイントが存在すると考える。

以上より、船舶運賃を変化させてシフトを促す際には効果的にシフトが起こる価格がシステム毎に存在しており、費用対効果の高い運賃を設定すべきである事が分かる。

なお、参考として、運賃変化をさせた場合の船舶利益の変化を、3.5の理論と適切なデータを用いて計算したものを下図に示す。

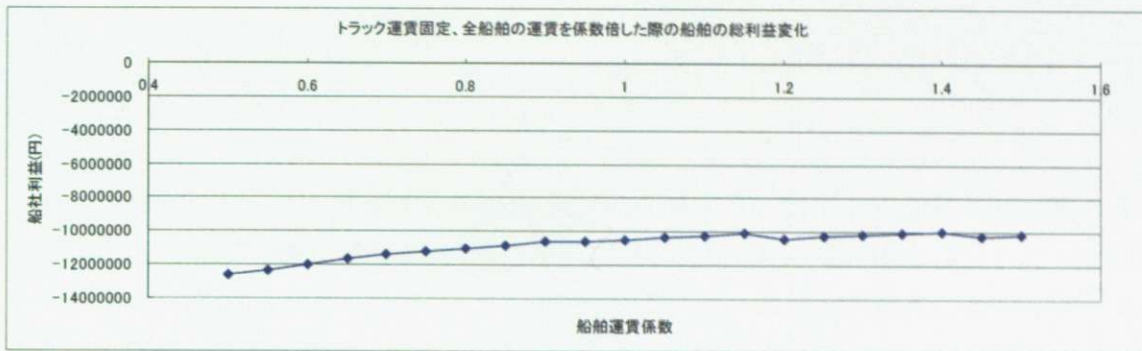


図7-12 運賃変化に対するCO2排出量の推移

設定したデータの都合所上、船社利益は赤字であるが、運賃の変化に対する利益額変化の傾向をつかむ事はできる。上図では、運賃変化に対して船社利益は比較的緩やかに推移していく事が示されている。これは、運賃を低下させてもシフトが起こり輸送する貨物量が増大していく為であり、この事より船舶運賃を低下させてCO2排出量を減少させる方法は現実的である事が分かる。

また、運賃係数が1.2から1.15へ低下した場合には、収益が改善されている。現実にも、この様な状況が存在すれば、船社は運賃を低下させる事に積極的に取り組むであろう。この、収益が改善される点は、図7-11においてCO2が突如改善される点と一致しており、一般にも急激なシフトを生じさせると収益が改善するケースが多いと考えられる。この事からもシフトが効率的に起こる価格を設定する事が重要であると言える。

## 2) スケジュールのみを最適化した際の効果

ここでは、船舶の運賃は全船舶共通で一定とし、船舶のスケジュールの最適化を試みる。全船舶の運賃係数を1とし、スケジュールをCO2排出量が最小になる様に設計した。得られたスケジュール表7-10に示す。また、CO2排出量を初期スケジュールや船舶輸送を行わない場合と比較したものを表7-11に示す。

表7-10 最適化後のスケジュール

ship ID	port1	arr time	dep time	port2	arr time	dep time	port3	arr time	dep time	port4	arr time	dep time
1												
2												
3	Shizuoka	0	0.75	Tokyo	1.75	2.5	Shizuoka	3.5	4.25	Tokyo	5.25	6



表 7-11 CO2 排出量変化 (ton)

	初期スケジュール	最適化後のスケジュール	トラックのみで全て輸送する場合
CO2排出量(ton)	433,300	317,910	351,080

表 7-10 において、就航する船舶が減少した事より、設定した運賃及び初期スケジュールでは各船舶の積載率が低く、結果的にトレーラーでの直送輸送よりもコンテナあたりのCO2排出量が高くなっていた事がわかる。それに対し、最適化後のスケジュールでは、積載可能量の小さい船舶を用いる事で、積載率を上昇させ、更に船速の遅い船舶を用いる事で、コンテナあたりのCO2排出量が最小に抑えている事が分かる。この船舶が就航する経路は tokyo-shizuoka 間を週 2 往復するものであるが、この区間が選択されているのは、トレーラー輸送費が高いハブ港⇄都市 3 を移動する貨物が最寄りのフィーダー港である静岡港を用いた海上輸送を選好する傾向にあり、高い積載率が実現できる為である。この区間に他の船舶が就航しない理由は、船舶同士の競合により積載効率が低下してしまう為である。

スケジュール最適化後のシステムで排出される CO2 排出量を初期スケジュールと比較すると、約 2 割の排出量が削減される事が表 7-11 より確認できる。運賃のみを変化させた図 7-11 では、運賃を半減させたところで 5% しか削減できなかった事を踏まえると、適切なスケジュールを構築する重要性が伺える。しかし、このケースの様な、船舶を就航させない事による低炭素化は本章で意図するものではない。最適化後のシステムでは就航しない船舶が多く現れてしまったが、表 7-11 の CO2 排出量の比較結果より、積載率が確保できれば船舶輸送を行う事で CO2 排出量は減少するので、出来る限り船舶を活用するシステムを構築すべきである。そこで、船舶のネットワークを効率化するのみならず、同時に運賃も変化させて積載率を上昇させ様々なネットワークの可能性を検討していく。

### 3) 運賃、スケジュールを最適化した際の効果

ここでは、船舶のスケジュールを最適化すると同時に各船舶の運賃係数も最適化する事を考える。但し、運賃係数としては 0.5~1.5 の範囲の値を 0.05 刻みで取れるものとする。以下に最適化後のスケジュール、運賃係数、及び CO2 排出量をこれまでのケースと比較したものを示す。

表 7-12 運賃も設計対象に含めて最適化したスケジュール

ship_ID	port1	arr time	dep time	port2	arr time	dep time
1						
2	Shizuoka	0.0	2.6	Tokyo	3.5	6.1
3	Tokyo	0	2.5	Shizuoka	3.5	6

表 7-13 最適化後の運賃係数

	ship1	ship2	ship3
最適化後の運賃係数	[ ]	0.5	0.55

表 7-14 CO2 排出量変化 (ton)

	初期スケジュール	スケジュール最適化後	運賃、スケジュール最適化後	トラックのみで全て輸送する場合
CO2排出量(ton)	433,300	317,910	304,740	351,080

運賃も最適化対象とする事で、CO2 排出量は更に減少している。しかし、スケジュール、及び運賃係数の変化を見ると、結局は運賃低下によって tokyo-shizuoka 港の輸送がやや上昇しただけであることが分かる。

運賃及び、スケジュールを最適化しても他の経路が用いられない要因の一つには、船舶の積載量の問題が挙げられる。CO2 排出量がトレーラーよりも優れるためには、ある程度の積載率を確保する必要がある、最大積載量が多ければその分多くの貨物を積む事になる。ところが、貨物を多く積む為には港等で滞留させて集める事になり、その分滞留コストが発生する事になる。各 OD 地点で十分な量の輸送需要が生じていれば、この滞留コストもわずかで済むがこのケースではそれほど多くは無い。また、設定したデータでは経路別の総運賃コストが近い値である為、この滞留コスト増分に耐えられず、結果として十分な積載率を確保できない事に繋がった。

もう一つの要因として、nagoya 港, chiba 港は輸送可能な都市が shizuoka 港よりも少ない事が挙げられる。これにより、より貨物を集めにくく、十分量を集めるにはかなりの時間コストが発生する事になる。

## 7.7 本章のまとめ

本章では、これまでに開発した船社利益最大化を行うシミュレータをベースに、CO2 排出量が最小のシステムを構築するシミュレータを構築した。新たに作成したシミュレータを用いて低炭素型システムの実現に向けた初期検討を行った。その結果、船舶の運賃、スケジュールも重要な検討課題であるが、船舶のスペックに対する検討がより重要である事を明らかにした。

# 第8章 結論

## 8.1 結論

本研究において、船社の利益が最大化される様に保有船舶のスケジュールを組み合わせて最適化機構により設計するシミュレータを開発した。

上記のシミュレータに必要となる任意スケジュール下における設計船舶の利益額を評価するモデルおよび具体的な評価式を示した。評価を行う為のモデルとしては、海上輸送のみを考慮した簡易版モデルである P to P 型モデルと、陸路も考慮して都市から都市への輸送を扱った D to D 型モデルの二種を示した。各モデルにおいては、従来の研究では未考慮であった要素を考慮しており、より正確な評価が可能となる事をデータより示した。

組み合わせ最適化手法については、近似解法に対する研究を行った。構築したアルゴリズムは GA、LS をベースとして各種拡張を施した Adaptive GLS であり、その手法によって、従来法よりも優れた解が得られる事を示した。

実際に、開発したシミュレータを用いて実問題におけるスケジュール設計を行った。実問題に対しても有用な時間で適切な解が得られる事を示した。

また異なる精度でモデリングされたシミュレータを連携させより優れた解を求めるマルチレベル最適化手法について述べた。このマルチレベル最適化手法を用いる事によって、より優れた解が実行時間で得られる事を確認しその有用性を示した。

開発したシミュレータをベースに、CO<sub>2</sub>排出量が最小のシステムを構築するシミュレータを構築した。新たに作成したシミュレータを用いて低炭素型システムの実現に向けた初期検討を行い、実現に不可欠な要因を示した。

## 8.2 今後の展望

本研究では、主に近距離の国家間輸送を対象として最適なスケジュールを構築するシミュレータを開発してきたが、今後、遠距離海上輸送システムについても検討していき、シミュレータの適用範囲を拡大していく事が望まれる。この遠距離の輸送システムでは一般には域間輸送と域内輸送が併用されて輸送が行われる為、貨物の積み替え等をモデルに含めていく事を検討していく。また、遠距離輸送システムの設計では、どの港をハブ港とするかが重要な要素となるので、設計対象を港にまで広げた検討を行っていく。

輸送システムの設計に際して、船舶のスケジュールのみを対象として行うのではなく、その性質的側面に当たる、船舶スペックなども設計対象に含め、システムに投入すべき船舶像を明らかにする機構を構築していく。

現段階での最適スケジュールの評価指標は、特定船社の利益最大化であるが、そのような指標の下スケジュールを最適化すると他の船社の利益額を減少させる事に繋がる。全船社の利益を最大化すべきか、個別の船社の利益を最大化すべきかを検討するとともに、それらの結果を用いて、どの船社とアライアンスを結ぶべきであるかという事についてもある程度数理的に示していく。

本研究で構築したD to D型評価モデルを活用して評価を行う為に、各種データが不足しているので、データの収集、予測を行なう。それらデータを用いてD to D型モデルによる実問題の評価を行い、結果をP to P型と比較する事でその必要性を検討する。

低炭素型輸送システム構築シミュレータについては、ハブ港⇄国内都市の輸送システムのみではなく、国内都市⇄国内都市や国外ハブ⇄国内都市の輸送システムに対するモデルも構築していく。それらに本研究で開発したD to D型モデルを付加する事で、東アジア圏における全ての物流を対象とした低炭素型輸送システム構築シミュレータを開発する。

## 参考文献

- [1] 大和 “実際に役立つ物流研究に向けて—研究動向と今後の進め方—” 日本船舶海洋工学会誌 第9号 pp21-25 (2006)
- [2] 大和、他 “数理計画手法によるコンテナ船航路の設計手法について 日本造船学会論文集 vol. 1184”
- [3] 田中、大和 “タブーサーチと相関ルール発見手法を組み合わせた日中間の定期船航路計画手法” 日本船舶海洋工学会講演論文集 vol. 2E pp23-26
- [4] 荒井、他 “GA を用いた海上コンテナ輸送ネットワーク設計手法の研究” 日本船舶海洋工学会講演会論文集 vol. 2E pp11-12
- [5] 有木、他 “GLS 法による日中海上物流の最適化” 日本船舶海洋工学会講演会論文集 vol. 2E pp19-22 (2006)
- [6] Li Ren-an; Yuan Ji-junl. “Research on the optimization of logistics distribution routing based on improved genetic algorithm” Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering) (1007-144X) Dec. 2004. Vol. 26, Iss. 12;p. 99-101
- [7] Zhou, Cheng. “Research on optimize method of logistics delivery route” Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering) (1006-2823) October, 2005. Vol. 29, Iss. 5;p. 797-800
- [8] 有木 俊博 “日中間物流の最適化に関する研究” 東京大学学位論文 (2006)
- [9] 福島 雅夫 “数理計画入門” 朝倉書店
- [10] 黒川、他 “時間価値分析による船舶へのモーダルシフトについての検討” 日本船舶造船学会論文集 vol. 189 pp405-412 (2001)

- [11] Lloyd's Register, Technical news and information on container ships, August 2005
- [12] 著者不明 “2004年国際輸送ハンドブック” オーシャンコマース
- [13] 久保 幹雄 “ロジスティクス工学” 朝倉書店
- [14] 伊理 雅夫 他 “最適化ハンドブック” 朝倉書店
- [15] 柳浦 睦憲/茨城 俊秀 “組み合わせ最適化—メタ戦略を中心として—”  
朝倉書店
- [16] 奈良 宏一、佐藤 泰司 “システム工学の数理手法” コロナ社
- [17] 長尾 智晴 “最適化アルゴリズム” 昭晃堂
- [18] 松本 啓之亮 知能システム工学入門 コロナ社
- [19] 三木 光範、他 “分散遺伝的アルゴリズムの性能に及ぼす交叉法とコーディング法の影響” 情報処理学会第59回全国大会 1999年
- [20] 佐藤 浩、他 “遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価”  
人口知能学会誌 vol.12 No.5 1997年9月
- [21] <http://www.kecl.ntt.co.jp/as/reports/JPN/yamada.html>
- [22] <http://www.netpas.net/>
- [23] 佐藤、他 “日中間海上物流の離散型シミュレータの開発” 日本船舶海洋工学会講演会論文集 vol.2E pp17-18(2006)
- [24] 日本国温室国化ガスインベントリ報告書
- [25] 著者不明 “京都議定書目標達成計画の進捗状況”
- [26] 北澤 壮介 “東アジアを中心とした国際海上コンテナ物流の動向分析”
- [27] 著者不明 “陸運統計要覧 平成13年度版” 国土交通省

[28] 著者不明 “物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン” 経済産業省・国土交通省

[29] 著者不明 “平成18年度エコドライブ等実施状況結果”

# 謝辞

本研究を行うにあたり、指導教官である鈴木克幸准教授には、研究内容についての幅広い観点からの御教示のみならず、研究の進め方、論文の推敲、研究室生活に至るまで多くの御指導、激励を賜りました。ここに深く感謝致します。

「日中海上物流システムの最適化と適合高速船の開発設計」のプロジェクトメンバーでおられる、宮田秀明教授、秋元博路准教授には研究結果に対する様々な指摘をいただき、研究を進める上で、多くの糧となりました事をここに感謝申し上げます。

同プロジェクトメンバーである佐藤陽平氏、鶴沢潔氏、金井亮浩氏、張静氏、K. Pichit氏、川合 崇氏には、様々な議論を通じて多くの知識を授けていただきました事をここに感謝申し上げます。また、柏木孝夫氏、菅直往氏、古田哲也氏、道田亮二氏、油谷正彰氏には、船型開発、船舶データにかかわる深遠な知識を御教示いただきました。誠に有難う御座いました。

「低炭素型シームレス物流の実現に向けた検討調査」のプロジェクトメンバーでいらっしゃる末岡英利教授、湯原哲夫教授、大和裕幸教授には、深い見識に基づく数々の御指導、助言をして頂きました。ここに深く感謝致します。

また、同プロジェクトメンバーの松倉洋史氏、木村哲也氏、小坂浩之氏には研究を進める上で有益な多くの情報、知識を授けていただきました。有難う御座いました。

本研究室の技術専門員であられる吉田二郎氏、博士3年 Kirkayak Levent 氏、博士1年 De Souza Vinicius Aguiar 氏には研究面のみならず研究生活面においても支えて頂きました事を深く感謝申し上げます。研究生活をともにした修士2年の市川幸太氏、伊藤陽介氏には、研究の垣根を越えた様々な討論を通じて多様な考え方を教えていただきました。有難う御座いました。修氏1年の稲田二郎氏、磯部信氏、二岡祐介氏には、様々な部分で支えていただきました事を感謝申し上げます。

皆様方のおかげで本論分の執筆を無事終える事が出来ました。  
様々な御教示、ご支援、本当に有難う御座いました。