

- 9 GAを用いた都市間鉄道網計画策定支援システムの開発

Development of Support System for Drawing up an Intercity Rail Network Plan by GA

波床 正敏¹・中川 大²
Masatoshi HATOKO, Dai NAKAGAWA

抄録: 本研究では、スイス Rail2000 政策のような駅間所要時間や発車時刻を調整することで利便性を向上させる方針の場合、費用制約下でどの路線をどれだけ改良すれば、全体の利便性を効率よく改善できるかを具体的に計算するシステムを開発した。このシステムはナップサック問題を取り扱うのでGAを用いたが、乗継ぎの良否という局所解の多い問題を扱いながら、期待所要時間という計算量の多い指標を高速演算するために各種の工夫をした。例として分析した九州の鉄道網では、比較的小規模な投資で乗継ぎを含めた総合的な利便性に関して比較的大きな効果を引き出せる可能性があり、今後の幹線鉄道整備の基本策になりうるということがわかった。

Abstract: Swiss Rail 2000 policy is a significant policy which has adjusted block times between major stations and timings of train departures on their rail network. In this study, we developed a computer system for searching an effective solution of improvement of intercity railway network considering such policy. This calculation system consists a Genetic Algorithm, because it has to solve a "Knapsack Problem": how much and which sections could be improved. We worked out some techniques for the problem with a lot of local solutions and for high-speed calculation of Expected Value of Traveling Time. As a result of sample calculation of trunk rail network in Kyushu, we found that a policy like Rail 2000 may be a new basic rail policy, because smaller investment can bring out bigger effect considering block times and timings of train departures on the rail network.

キーワード: GA, パルスタイムテーブル, 期待所要時間, 交通網計画, 鉄道計画, Rail2000, スキーマ, 局所解

Keywords : GA, Pulse Timetable, EVTT, Transportation Network Planning, Railway Planning, Rail2000, Schema, Local Solution

1. はじめに

自動車交通と異なり、鉄道ネットワークでは全発着地相互間に直通列車を走らせることは困難であり、実際には何度かの乗継ぎを要することが多い。航空ネットワークではハブ・アンド・スポークシステムが導入されることによって、一度の乗継ぎで数多くの発着地の組合せに対して航空サービスを提供できるようになっている。しかし、鉄道は航空機に比べると速度が遅く、1カ所の乗継ぎ拠点に集めることは大幅な遠回りになり、必ずしも得策ではない。

同じ鉄道でも、大都市圏内の通勤・通学鉄道は運行頻度が高く、乗継ぎ駅で多少待たされることはあっても大幅な問題とはなりにくい。しかし、都市間鉄道については運行頻度が小さく、乗継ぎの良否が都市間移動の利便性を大きく左右する。

都市間鉄道網の利便性を大きく改善する方法とし

て、わが国では新幹線が建設されてきているが、整備新幹線ですら完成までに何十年も要しており、新幹線整備に対する新たな視点が提起されてはいる¹⁾が整備の進行は遅く、全国新幹線鉄道整備法(1970)に示されているような全国的なネットワークが早期に完成する可能性は小さい。このため、新たな鉄道整備の基本原則が必要な時期に来ていると考えられる。

いっぽう、海外に目を向けると、スイスの Rail2000 政策のように、駅間所要時間、運行頻度、発車のタイミングなどを調節することによって、複数の拠点駅での乗継ぎ利便性を向上させる政策を実施し、高速新線の建設はほとんど無いものの、利用者の増加をはかっているところもある。

本研究では、このような駅間所要時間と発車のタイミングを調節する方法によって都市間鉄道網の利便性を向上させる政策を具体化するための支援システムを開発し、その概要と分析例を示すこととする。

1 : 正会員, 博士(工), 大阪産業大学 准教授 工学部都市創造工学科

(〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1, Tel: 072-875-3001 (ex. 3722), E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp)

2 : 正会員, 工博, 京都大学大学院 教授 工学研究科

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Tel: 075-383-3225, E-mail: nakagawa@urban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

これまでに、拠点駅で必ず便利に乗継ぎができるための幾何的な条件についての研究を行ってきたが、実際の鉄道ネットワークでは必ずしも完全に実現できるわけではない。そこで、本研究で開発したシステムでは、一定の費用制約下において鉄道ネットワークの改良を行った場合、乗継ぎ利便性の良否をも考慮すると、どのようなネットワークが最も利便性が高くなるかについて、具体的に計算できるようにした。

開発した支援システムは、いわゆるナップサック問題を取り扱っている。ナップサック問題とは、一定の容積を持つナップサック(袋)と複数の品物(個々の荷物は異なる体積と価値を持っている)が与えられた時、ナップサックの容積を超えない範囲で品物をいくつか詰め、ナップサック内の品物の価値を最大化するという問題である。この問題は多項式などを用いて解を求めることが困難であることが知られており、完全な最適解を求めるには全組合せを総当たりで調べるしか方法がない。

本研究では、一定の費用制約下において整備費用の異なる路線改良レベルを選択するという点でナップサック問題となっている。さらに、路線改良レベルの組み合わせ方によって乗継ぎ利便性が非連続的に変化するとともに、駅の出発時刻についても選択しており、極めて多くの組み合わせを考慮しなければならないという特徴がある。

そこで、本研究では遺伝的アルゴリズム(= Genetic Algorithm、以下、単にGA)を用いて、路線ごとの改良レベル選択をどのような組み合わせで行うと利便性

が向上するかについて分析した。また、乗継ぎ利便性を取り扱う問題であるので、都市間交通の評価指標としては期待所要時間(以下、EVTT)を用いた。また、局所解の多いと考えられる問題であるため、解の探索における遺伝子の淘汰圧をあまり大きくすることはできないが、いっぽうで計算量の多い指標を評価指標(適合度)とするため、両方を同時に解決するための工夫を凝らした。

2. 都市間鉄道網の特徴

(1) 間欠運行であり待ち時間が無視できない

鉄道を含む都市間公共交通一般にあてはまることであるが、自動車のように任意の時刻に出発できるわけではなく、また一部の過密路線を除き、運行頻度も都市内交通よりも小さいため、出発時の待ち時間や乗り継ぎ時の待ち時間を無視することができない。

例えば、表-1は長野から新潟まで新幹線利用で昼間に移動する場合であるが、まず、長野駅を出発可能な時刻の間隔は43-83分と大きく異なっており、出発時の待ち時間が無視できない。また、新幹線への乗車時間そのものはいずれも2時間10分前後であるが、乗継ぎの利便性が大きく異なり、高崎駅での乗継ぎ時間は5-43分で、ばらばらである。このため、全体での所要時間は最短2時間12分から最長2時間55分まで、大きく異なっている。

このように、都市間鉄道では、運行間隔や乗り継ぎの利便性を考慮しなければ、実際の都市間の利便性を的確に表すことができない。

(2) 航空ハブシステムの導入が困難

このような乗継ぎの利便に関して、航空ネットワークでは図-1のようなハブ&スポークシステムが導入されている。しかし、このようなシステムを鉄道ネットワークに導入することは必ずしも適切ではない。

図-2は移動距離に対する所要時間を、鉄道の在来線、新幹線、航空路線についてそれぞれ示したもので

表-1 長野→新潟の乗り継ぎ(2007年5月)

長野(発)	高崎(着)	(発)	新潟(着)	乗車時間	乗継ぎ時間	総所要時間
9:22	10:12	10:19	11:38	2:09	0:07	2:16
10:26	11:20	12:03	13:21	2:12	0:43	2:55
11:09	11:58	12:03	13:21	2:07	0:05	2:12
12:09	12:58	13:28	14:53	2:14	0:30	2:44
13:02	13:55	14:23	15:40	2:10	0:28	2:38
14:25	15:18	15:23	16:38	2:08	0:05	2:13

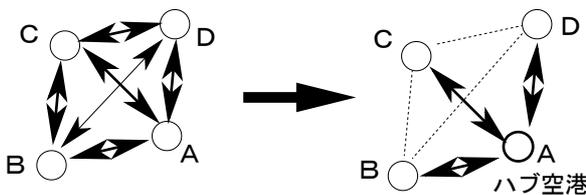


図-1 ハブ空港形成の概念図

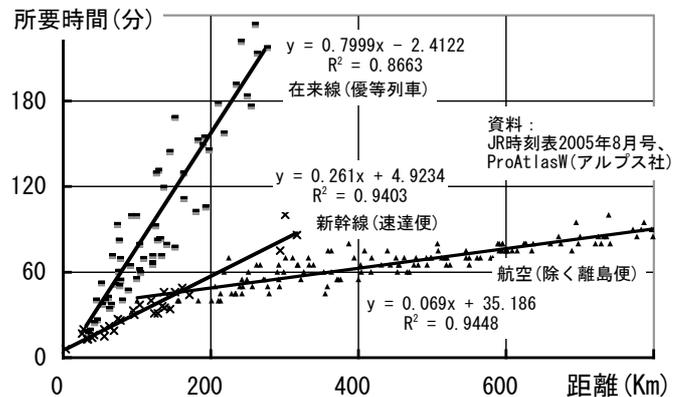


図-2 航空・鉄道の距離と所要時間('05)

ある。在来線・新幹線ともに、鉄道は距離に一定値を乗じて所要時間がほぼ求まる。これに対し、航空は距離が増えても所要時間の増加が小さい反面、距離が短くてもある程度の所要時間が必要となる。

図-2のように、航空機は巡航速度そのものは非常に高速であるので、移動距離そのものは大きな問題ではないが乗継ぎ回数は所要時間に大きな影響を与える。すなわち、少々大回りでも、1つのハブ空港に多くの路線を集め、一度に相互の乗り換えをさせる方が有利である。

いっぽう、鉄道、特に在来線は速度が遅いため、移動距離がそのまま所要時間や運賃などの総合的な輸送サービス水準に直結しやすく、移動距離そのものを小さくするように路線網を形成する方が有利である。したがって、路線網は網目状の方が都合がよい。路線の接点となる駅では、その駅に乗り入れる路線相互の乗継ぎ利便性を向上させる必要はあるが、遠回りをしてまで多くの路線を1カ所に集める意義は小さい。

3. スイスの鉄道政策 Rail 2000

スイスの幹線鉄道網政策では、わが国の新幹線整備を主体とした鉄道政策とは大きく異なる方法により利便性向上が実現されている。

スイスの幹線鉄道政策は Rail 2000 (Bahn 2000) と呼ばれる²⁾³⁾が、その政策目標は「より頻繁に、より速く、乗換を少なく、より快適に」である。具体的には、図-3のように⁴⁾、主要幹線において終日 30 分間隔の長距離列車運行をおこない、同時に新線建設・路線改良・高性能車両の投入などをおこなって主要駅間を 30 分の倍数以内で結ぶようにした。これにより、主要駅では必ず他の幹線路線への乗継ぎが短時間でこなえるようになっている。

例えば、表-2 は Bern 駅における正午前後の中長距離列車の発着状況を示したものであるが、正午前に 9 方面から列車が到着し、相互に乗換が可能であり、正午以降に 9 方面に出発してゆく。乗換時間は数分から

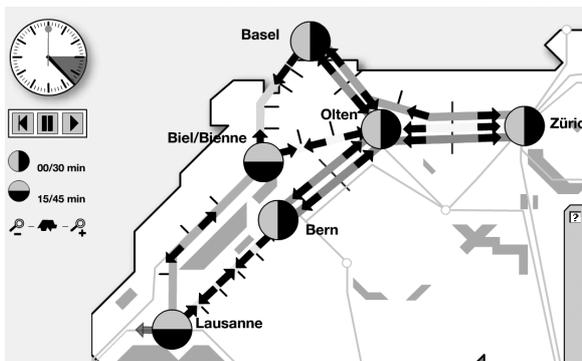


図-3 Rail 2000 の運行システム

最大 16 分である。長距離列車の直通方向が変更されたりすることがあるものの、基本的にこのパターンが毎時繰り返される。また、このような乗継ぎは、原則として図-3 に示された主要駅で可能となっている。

Rail2000 実施の結果、列車本数が 12%、列車キロは 14%、それぞれ増加するとともに、ネットワーク全体で旅客数が平均 8%、改良対象路線で約 20% 増加するなど、大きな効果を上げている⁵⁾。

4. 乗継ぎを考慮した都市間鉄道網の条件

(1) 基本条件

Rail2000 では、前章の施策のほかに、幹線鉄道へのアクセス手段となるバス・私鉄線・フェリーなども含めて、幹線の運行にあわせたダイヤが実現されており、公共交通システムの成功例として注目されている。このような運行システムをパルスタイムテーブルシステム（以下、PTS）と呼ぶが、この成立条件として、次の各項が挙げられる⁶⁾。

- ① 乗継ぎ元と乗継ぎ先の運行間隔をそろえること。
- ② 不必要に乗継ぎ先の出発時刻を遅らさないこと。
- ③ 図-4 のように、交通結節点が 1 つだけであり、閉ループが存在しないネットワークについては、交通結節点への集合時刻さえ決めればよい。
- ④ 図-5 のようなネットワーク上の閉ループについて、一周した際のリンク走行時間の総和は、運行周期の整数倍でなければならない。例えば、P を時刻 $nT+k$ (n : 整数, T : 運行周期, k : 定数) に出発し、一周した際の P への到着時刻 $nT+k+\sum L$ (L : 各リンクの所要時間) は、同時に P の出発時刻 $n'T+k$ でなければならない。よって、

表-2 Bern 駅における正午前後の乗継ぎ状況('05)

列車番号	始発方面	着	直通	発	行先方面
	Biel	11:48	//	-----	-----
EC90	Brig	11:51	→	12:04	Basel
RE3220	Olten	11:53	//		午後
	Neuchatel	11:54	//		
IC923	Interlaken	11:54	→	12:02	Zurich
IC2523	Geneva/Lausanne	11:56	→	12:00	Luzern
IC969	Basel	11:56	→	12:06	Interlaken
IC820	Zurich	11:58	→	12:09	Brig
IC2520	Luzern	12:00	→	12:04	Lausanne/Geneva
午前	Biel	12:00	//		
			//	12:00	Biel
RE3223			//	12:06	Olten
			//	12:06	Neuchatel
			//	12:12	Biel

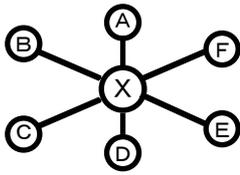


図-4 閉ループを持たないネットワーク

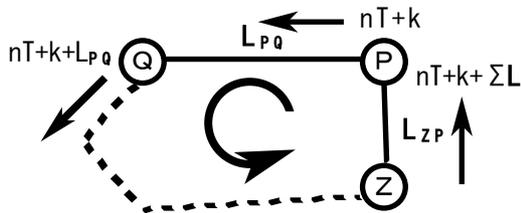


図-5 閉ループを持つネットワーク

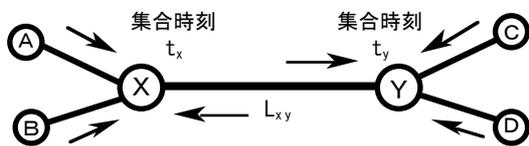


図-6 交通結節点間のリンク長の条件

$\Sigma L = mT$ (m は整数) となる。

- ⑤ 図-6 のように複数の交通結節点が隣接する場合、これらの間のリンク走行時間は、運行周期の半分の整数倍でなければならない。例えば、 X の集合時刻 t_x と Y の集合時刻 t_y との間には $t_x = t_y + L_{yx}$ の関係があるが、同時に $t_y = t_x + L_{xy}$ であり、 $L_{xy} = L_{yx}$ なので、 X の集合時刻を $t_x = nT + k$ とすると、 $mT = 2L_{xy}$ となる。

(2) 実際の計画で考慮すべき事項

わが国の幹線鉄道網を対象として PTS を構築するための幹線鉄道網の改良計画を立案するためには、次のような考慮すべき課題が存在する。本研究では、費用制約下における、改良対象路線・改良対象内容・運行ダイヤ設定の組合せ最適化問題ととらえて分析をおこなうこととした。

a) 部分的に運行頻度が異なる場合

人口の疎密や鉄道網の形状により、列車の運行頻度が路線により異なる。

b) 乗継ぎのための停車時間確保が難しい場合

新幹線のような大都市間を高速で結ぶことを使命としている列車は、乗継ぎ拠点駅といえども、長時間停車が難しい。このような場合、乗継ぎ先の在来線側のダイヤにホーム間の移動時間の分の余裕を持たせる方法で対処可能であるが、在来線相互の乗継ぎ利便性は低下する。

c) 乗継ぎを意図する必要がない場合

実際のネットワークでは、別の最短経路が存在するために、乗継ぎを考慮する必要のない場合がある。例えば $B \rightarrow A \rightarrow C$ という経路とは別に $B \rightarrow C$ という最短経路が存在する場合は、 A において B 方面から C 方面への乗継ぎを考慮する必要がない。

d) 隣接する交通結節点間が非常に短い場合

大都市部等では乗継ぎ拠点駅が多数存在し、前節⑤項を満たすには、① PTS の周期を非常に短くする、② 乗継ぎ駅間をゆっくり走行する、③ 乗継ぎ駅での待ち時間を大きくする、④ 一部の乗り継ぎ駅での円滑な乗継ぎをあきらめる、などの対策が必要となる場合がある。

e) 費用制約の存在

幹線鉄道の改良資金には限りがある。特に、社会的な便益を上回るような整備費用は投入できない。

5. 支援システムの概要

(1) システムの開発目的

スイスの Rail2000 のような乗継ぎ改善を目指した幹線鉄道の改良計画を立案するには、どの路線をどれだけ時間短縮するのかを明らかにしなければならない。また、前章で述べたように、整備費用の制約が存在し、投入された費用はなるべく有効に活用されなければならない。

本研究で開発した支援システムでは、次のような各項目を考慮してシステム設計をおこなった。

- ① 一定の費用制約を考慮する。
- ② 整備後の列車運行のダイヤについても考慮する。
- ③ どの路線を、どの程度改良するかについての組合せを求める。
- ④ 改良の組合せ案について、一定の基準の下に評価する。

(2) システムの全体構成について

本研究で開発したシステムの概要を図-7 に示した。大きく分けて、路線ごとの整備段階の選択肢を作成する部分と、費用制約下において適合度を最適にする選択肢の組合せを求める部分から構成される。

本研究で取り扱う問題は、いわゆるナップサック問題となる。旅客流動量の多い路線を優先的に改良しさえすれば乗継ぎを含めた利便性が向上するとは限らない。また、乗継ぎの良否には僅かな所要時間やダイヤ設定の差が大きく影響するので、逐次改善のような方法では適切な解にたどり着きにくいことが予想される。このため、後者の部分については、GA を用いて解の探索をおこなうこととした。

(3) 改良選択肢作成支援ツール

まず最初に、例えば図-8 のような路線の改良単価

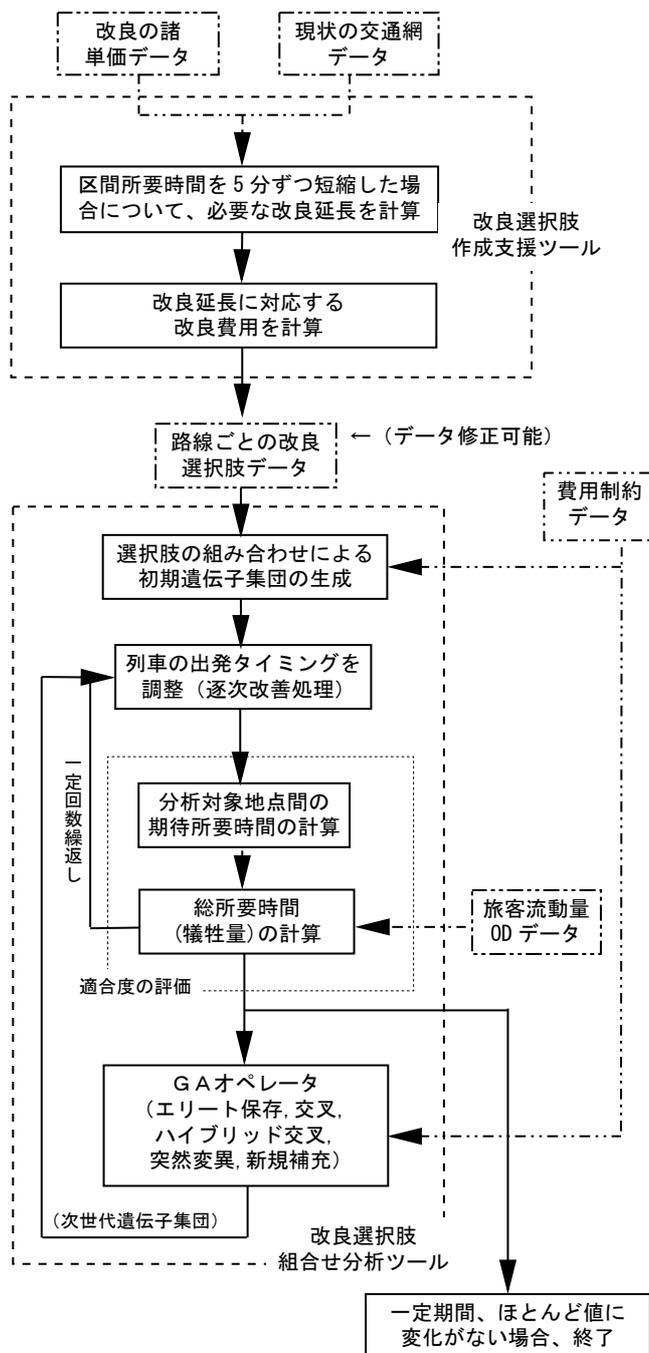


図-7 システムの構成概要

および改良後区間における走行可能な速度に関するデータを作成する。改良選択肢作成支援ツールでは、このデータをもとに、各路線の区間所要時間を5分ずつ短縮するためには、どのような改良方法と改良延長を採用すればよいかを計算するとともに、改良に要する費用を計算し、図-9のようなデータを出力する。

(4) 改良選択肢組み合わせ分析ツール

この部分が計算機システムの中核部分となる。初期遺伝子を生成した後、列車の出発タイミングについて一定回数の逐次改善処理を行った後、各種のGAオペレータによる操作を行って次世代遺伝子集団を作

改良単価データ(在来線)
 : 方法, 億円/km 表定 km/h, 備考
 基本単価 複線化, 3.00, -, 160km/h 運転の場合必須
 基本単価 電化, 2.00, -, 160km/h 運転の場合必須
 :
 在来線改良, 130km/h 単線, 0.52, 90, 元路線 90km/h 未満区間
 在来線改良, 130km/h 複線, 0.80, 100, 元路線 90km/h 未満区間
 在来線改良, 160km/h 運転, 7.10, 112, 元路線 90km/h 以上の場合
 在来線改良, 160km/h 新線, 40.00, 128, スーパー特急相当[改良長 20km 以上]
 在来線改良, 260km/h 新線, 70.00, 208, フル規格整備新幹線相当[改良長 20km 以上]
 :
 改良単価データ(新幹線)
 : 方法, 億円/km 表定 km/h, 対象クラス, 改良後, 備考
 新幹線改良, 260→300km/h 運転, 1.6, 240, 260, 300, 路線長 20km 以上
 新幹線改良, 260→320km/h 運転, 2.4, 255, 260, 320, 路線長 20km 以上
 新幹線改良, 260→350km/h 運転, 3.6, 280, 260, 350, 路線長 20km 以上
 新幹線改良, 300→320km/h 運転, 0.8, 255, 300, 320, 路線長 20km 以上
 新幹線改良, 300→350km/h 運転, 2.0, 280, 300, 350, 路線長 20km 以上
 新幹線改良, 320→350km/h 運転, 1.2, 280, 320, 350, 路線長 20km 以上

図-8 路線改良単価データ

:[路線]種別, 路線名, 始点, 終点, 距離 km, 毎時本数
 : [選択]採否, 番号, 所要分, 位相順, 位相逆, 億円, 段階, 改良 km, 備考
 :
 在来線, 長崎線, 肥前山口, 諫早, 60.8, 2.0
 *, 1, 44, 0, 0, 0.0, 単線電化, 0.0, 基本
 -, 2, 40, 0, 0, 122.9, 複線電化, 32.3, 130km/h 複線
 -, 3, 35, 0, 0, 1412.1, 複線電化, 35.3, 160km/h 新線
 -, 4, 30, 0, 0, 2196.6, 複線電化, 54.9, 160km/h 新線
 -, 5, 25, 0, 0, 3055.9, 複線電化, 43.7, 260km/h 新線
 -, 6, 20, 0, 0, 3860.1, 複線電化, 55.1, 260km/h 新線
 -, 7, 18, 0, 0, 4256.0, 複線電化, 60.8, 260km/h 新線

図-9 改良選択肢データ (一部分)

表-3 タイミングの調整

A (発)	B (着)	(発)	C (着)	乗車時間	乗継ぎ時間	総所要時間
0:00	0:10	0:15	0:25	0:20	0:05	0:25
0:00	0:10	0:20	0:30	0:20	0:10	0:30
0:00	0:10	0:25	0:35	0:20	0:15	0:35
:	:	:	:	:	:	:

成し、以下、同様の繰り返しを行う。一定期間(世代)にわたって、最善の評価値が更新されない場合には解に達したと判断して、計算を終了する。

a) 初期遺伝子集団の生成について

初期遺伝子集団は、図-9のような路線ごとの改良選択肢の組み合わせにより生成する。ただし、改良の組合せによっては、設定した費用制約を超える場合がある。これは致死遺伝子であり、以後の操作の意味がないため、別の新しい組合せによる遺伝子を生成した。

b) 列車の出発タイミングの調整について

同じ路線改良の選択肢の遺伝子であっても、表-3のように、列車の出発タイミングが異なると、乗継ぎ時間が変化し、路線の区間所要時間が同じでも、全体

の所要時間に大きな影響を与えるため、本研究のシステムでは、列車の出発時刻の調整をGAオペレータによる処理の前に実施している。

具体的には、出発のタイミングの初期値(初期遺伝子生成時に、同時に5分刻みで乱数により発生)をもとに、操作対象とする遺伝子座をランダムに選び、その遺伝子座に関する列車の出発タイミングを乱数により変更する。変更の前後で適合度(評価値)が改善されればその変更を採用し、されなければ変更しない。この操作を一定回数繰り返す。適合度が改善されないことがないので、一種の逐次改善処理である(エリート戦略+突然変異の繰り返しと見なすこともできる)。

c) 遺伝子の評価について

評価対象とする遺伝子は路線の区間所要時間、各路線の列車の出発タイミングの情報を持っているので、後述するEVTTを用いて評価できる。EVTTは、実際の列車の運行ダイヤや乗継ぎ状況を評価する指標として提案されており、本研究のような都市間鉄道の評価に適した指標である。

EVTTは、2点間の所要時間指標として計算されるため、本研究では[1]のように、これに旅客流動量を掛け合わせて総計を計算することによって、適合度とした。この適合度は旅客全体の総所要時間を表すことになるため、最適化の基準としては適合度最小化を目指すことになる。

$$S = \sum (t_{ij}q_{ij}) \quad [1]$$

ただし、 t_{ij} はij間のEVTT[分]、 q_{ij} はij間の旅客純流動量[人]である。

d) GAオペレータについて

本研究では、GAオペレータとして交叉と突然変異のほかに後述する特殊な交叉を使用した。また、優秀な遺伝子を次世代に残して、効率的に解の探索をすすめるためにエリート戦略を併用した。GAオペレータについては、後ほど詳しく説明する。

6. 期待所要時間(EVTT)について

本システムで適応度を算出する際に用いる期待所要時間(EVTT = Expected Value of Traveling Time)は、次のような考え方に基づく指標である⁷⁾。

2点間の所要時間は、一般的には利用する便ごとに乗車時間が異なっており、各便の出発時刻においては図-10の●点のように示される。また、他の時刻を出発時刻とした場合は、次便までの待ち時間が加わり、図中の斜め線のようになる。旅行開始時刻に対して目的地に最も早く着くことを想定すると、斜め線のうち実線部分をつなぎ合わせたノコギリ状のグラフが時刻に対する所要時間の変化を表している。この場

合、鎖線部分はより早く到着する便があるので利用されない。このノコギリ状のグラフを平均して所要時間相当の指標としたものが期待所要時間である。

EVTTは、各便の所要時間が小さく、運行頻度が高いほど小さな値となり、また各便の所要時間や運行本数が同じ場合でも、団子運転のような実質的な利便性が低い場合には値が大きくなる。複数路線を乗継ぐ場合には、実際のダイヤおよび経路に沿って算出することで、乗継ぎの良否も考慮できる。なお、EVGC(期待一般化費用⁸⁾)は図の縦軸を一般化費用としたものである。

7. GAオペレータについて

本研究で使用したGAオペレータと採用の主旨は以下のとおりである。

a) エリート戦略

優秀な遺伝子をそのまま次世代にコピーするものである。厳密にはGAオペレータではないが、適合度の改善を効果的に進めるために採用した。本システムでは適合度が計算対象遺伝子集団サイズの上位1%以内(最少1個)であるものについて次世代に残した。

b) 交叉

GAの遺伝子変更手段の主要なオペレータであり、本システムでも主たる手段の1つとして採用した。本システムの計算対象は都市間鉄道ネットワークであり、図-11に概念を示したように、部分的に優れた特徴(遺伝子の部分構造で、以下、スキーマ)を持つ遺伝子どうしが交叉することによって、より優れた遺伝子が出現することが期待される。

交叉方法として一様交叉を選択した場合、スキーマが破壊される可能性が高いため、本システムでは、交叉方法として二点交叉を用いた。また、遺伝子の選択にはトーナメント方式を用いた。

c) ハイブリッド交叉

優れたスキーマを持つ遺伝子どうしの交配方法とし

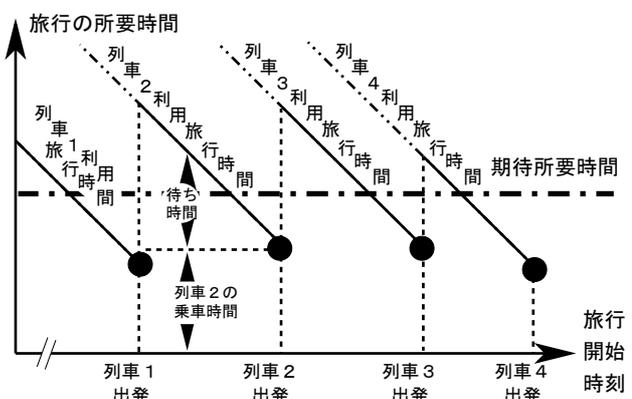


図-10 期待所要時間の考え方

ては交叉が一般的であるが、通常の交叉では遺伝子を交換する位置が確率的に変化するため、図-11のような理想的な交配が生じる確率は低く、二点交叉であってもスキーマが破壊される可能性がある。そこで、本システムでは優れたスキーマを破壊することなく積極的に次世代に残す方法として、次の方法を用いた。

まず、整備費用の割に適合度の改善量が比較的大きな遺伝子を交叉対象の親として選び、図-12のように、2つの親の各遺伝子座のうち整備水準の高い方を子に引き継ぐ。この方法により、優れたスキーマが確実に子に引き継がれる可能性が高くなると考えられる。本システムでは、この方法による交叉をハイブリッド交叉と呼ぶこととする。

なお、この方法により作成される子の遺伝子は、改良対象区間数が多くなるとともに、改良の水準が高めになるため、整備費用も大きめとなる。このため、特に解の探索終盤において致死遺伝子となる可能性が高くなるという欠点がある。

d) 突然変異

GAの遺伝子変更手段の主要なオペレータであり、本システムでも主たる手段の1つとして採用した。

e) 逐次改善型突然変異

通常の突然変異では、突然変異を生じた遺伝子座が適合度改善の方向で変化するか、改悪の方向で変化するのかは定かではない。そこで、本システムでは図-13のように、突然変異の対象となる遺伝子座を2つ選び、旅客流動の通過量の大きい方の遺伝子座の値

について改良レベルを高くする方向で変化させ、小さい方の遺伝子座の値は改良レベルを低くする方向で変化させる方法を用いた。

この方法では、改良のランクを上げる箇所と下げる箇所が存在するので、全体の改良費用の変化が小さく、遺伝子を致死遺伝子とすることなく適合度を改善できる可能性が高いと考えられる。

f) 新規補充

本システムにおける主なGAオペレータは交叉およびハイブリッド交叉であるが、これらは初期遺伝子集団の遺伝子を組み換えているに過ぎない面がある。そこで、本システムでは、交叉や突然変異などのオペレータの際に致死遺伝子を生じたときには、オペレータを再試行するのではなく、新規の遺伝子を代わりに補充することにより、新しい遺伝子の組合せを集団に導入することで、遺伝子の多様性を確保した。

8. 局所解対策と計算の高速化

(1) 多数の局所解の存在について

本システムでは都市間鉄道ネットワークについて、乗継ぎを考慮した所要時間計算を行っているが、本システムで取り扱うナップサック問題では、局所的な解が多数存在すると考えられる。

例えば図-14は、横軸に時刻をとり、縦軸に位置をとったものであり、図中の斜線は駅間を走行する列車を表現している。A駅-B駅間およびC駅-D駅間については、改良レベルと列車ダイヤを規定とする。この

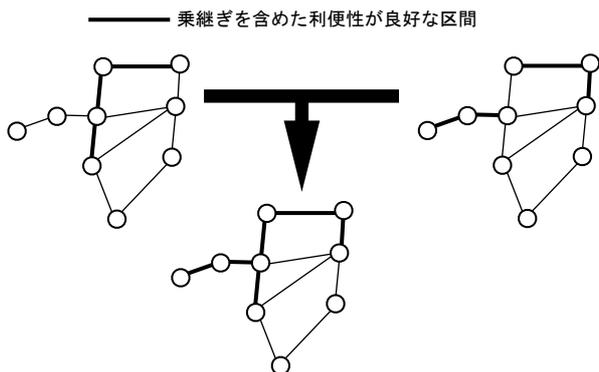


図-11 都市間鉄道網改善におけるスキーマ

親 A	1	1	1	2	1	4	1	1	2
親 B	1	1	2	1	1	2	1	2	3
↓									
新遺伝子	1	1	2	2	1	4	1	2	3

図-12 ハイブリッド交叉

①変異対象を2カ所ランダムに選択する

親遺伝子	1	1	2	2	1	4	1	2	3
(通過量)	大	中	少	中	特大	少	少	中	大
↓									
新遺伝子	1	1	1	2	1	4	1	2	4

②通過量の少ない方のランクを下げ、多い方を上げる

図-13 逐次改善型突然変異

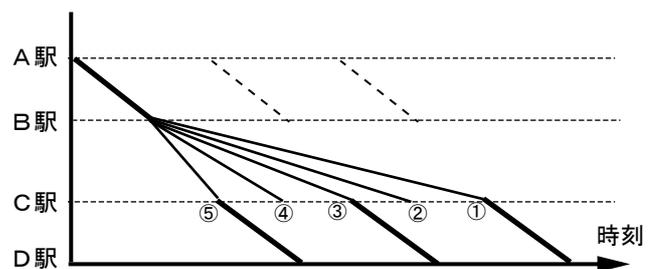


図-14 局所解の存在可能性について

場合、B 駅-C 駅間の改良選択肢は①②③の順に整備費用が順に大きくなり、⑤が最も改良費用が大きい。図のように、①③⑤の場合には乗継ぎが円滑に行えるが、②④の場合にはC 駅で待ち時間が生じ、結局①や③の場合と同一の所要時間となる。つまり、①③⑤では投じた改良費用が有効に所要時間改善に反映されるものの、②④の場合は反映されないため、後者の改良選択肢を含む遺伝子は比較的不利な適合度となる可能性が高い。逆に①③⑤は近傍の②④よりも比較的有利な適合度となり、局所解の形成の原因となりうると考えられる。

このような状況はネットワーク上の至る所で生じる可能性があり、本システムの分析対象には多数の局所解が存在するのではないかと予想される。

(2) 多様性の確保

多数の局所解を持つ場合に対する基本的な対策としては、遺伝子集団のサイズを大きくし、同時に淘汰圧を小さくすることによって、なるべく集団全体での遺伝子の多様性を保つ方法が考えられる。だが、淘汰圧を小さくすると解への到達が遅くなりがちである。

GA では解の探索が進行すると、集団全体に優秀な遺伝子の一部分が広く行き渡るようになり、大規模な遺伝子集団を維持し続ける意義が小さくなっていく。本システムでは、このようなGA における解の探索の特徴を考慮し、初期遺伝子集団のサイズを大きくすることによって遺伝子の多様性を確保しながらも、解の探索が進行するにつれて、致死遺伝子の発生などにより失われた遺伝子に対する新規遺伝子の補充数を減らし、徐々に遺伝子集団のサイズを小さくする方法を採用した。これにより、実質的な解の多様性の確保と比較的高速な計算の両立を図った。

(3) 類似遺伝子の考慮 (淘汰圧の調整 1)

遺伝子の多様性を確保する方法としては、初期遺伝子集団のサイズを大きめにする方法以外にも、解の探索途中で特定の優秀な遺伝子の系統が集団全体を支配しにくくする方法も考えられる。

本研究では、以下の[2]により遺伝子の類似度(値が小さいほど類似する遺伝子が多数存在する)を計算した後、適合度に乗ずることによって、類似する遺伝子が多数存在する場合、GA オペレータの対象とりにくくした。これにより、なるべく多種多様な遺伝子を集団に残すようにした。

$$s_i = \sqrt{\sum_k \left((C_i^k - C_j^k) / C_{\max}^k \right)^2} / n \quad [2]$$

ただし、 s_i は遺伝子 i の類似度指標、 C_i^k および C_j^k はそれぞれ遺伝子 i および j のリンク(路線) k に関する改良費用、 C_{\max}^k は k の改良費用の最大値、 n はネットワークのリンク総数である。 s_i は、 i を含めた全遺伝子が

同じ場合に 0 となり、 i が全リンクについて最大改良かつ他の遺伝子すべてが無改良の場合に 1 となる。

(4) 逐次改善処理の程度調整 (淘汰圧の調整 2)

遺伝子に対する淘汰圧発生は、基本的には遺伝子ごとの適合度が異なることに起因する。適合度に差があると GA オペレータの対象遺伝子となる確率にも差が生じ、結局、適合度が小さい遺伝子に対して淘汰圧が発生することになる。

遺伝子の適合度は逐次改善処理や交叉をはじめとする GA オペレータを通じて変化してゆくが、当初時点での適合度が、その遺伝子の最終的な適合度を反映しているならば、淘汰圧が生じてても何ら問題となることはない。しかし、例えば単に列車の出発タイミングの調整過程の途中であるがために適合度が低くなっているだけならば、その段階において遺伝子を淘汰してしまうことはあまり適切ではない。

そこで本システムでは、図-7 の列車の出発タイミング調整による逐次改善処理の部分において、適合度が比較的悪い遺伝子については逐次改善処理を多数回行い、逆に適合度が比較的良好な遺伝子については逐次改善処理の処理回数を少なめとして、全体として適合度のばらつきを小さくするような処理を行って、有望な遺伝子に無用な淘汰圧がはたらくことを防止した。

(5) 計算の高速化

本システムでは、計算の大部分は、各遺伝子が表現する都市間鉄道網についての EVTT 計算である。したがって、EVTT 計算の高速化が計算システム全体の処理の高速化に直結する。本システムでは、以下の方法により EVTT 計算部分の高速化を図った。

a) データベース検索からパラメタを使った処理へ

EVTT の計算には、全列車の駅ごとの発着時刻をデータベース化する必要があり、計算には多大な労力を要する。コンピュータによる計算も事実上多数回のデータベース検索となり、計算時間が延びる傾向にある。

本システムでは、ネットワーク上の列車は一定の運行間隔で毎時同じ運行をするとの仮定をした。具体的には、パターンダイヤに基づいて運行されている列車が P を時刻 $t_p^{(Dep)}$ に出発するとすると、次のように表現できる。

$$t_p^{(Dep)} = n T_p + K_p \quad [3]$$

ここに、 T_p は運行間隔[周期]、 K_p は基準となる時刻からのズレ(例えば毎正時からのズレ)[初期位相]、 n は任意の整数である。このような表現を用いることにより運行ダイヤのデータベース検索を廃し、数値計算のみで高速に EVTT の計算を行った。

b) 最小限の時間帯幅

前述のように、必ず毎時同じ運行をするとの仮定を

したので、計測時間帯幅は60分幅だけの計算をするだけでよく、計算回数を減少させ、高速にEVTTの計算を行った。

c) 高速計算アルゴリズムの採用

文献9)に示した高速計算アルゴリズムを採用し、単純な「初期値(出発時刻)の指定とDijkstra法による各ノードへの到着時刻の計算」の繰り返しに比べて、数倍から十倍程度以上の高速化をはかった。

9. 計算結果例と応用方法

(1) 分析対象地域とネットワーク

開発したシステムを用いて、列車の乗継ぎを考慮しながら、費用制約条件下においてどのようなネットワーク改良を行うことが最も効果的であるかについて計算をおこなった。

分析対象地域は九州とした。九州は関門海峡部分のみで他地域とつながっているため、計算が適切に行われているかの確認をしやすい。また、本システム開発の背景となったスイスとは地理的な面積が同程度であり、比較分析などを行いやすいという利点もある。

分析を行うためのEVTT計測に用いる地点としては、図-15に示す広域生活圏の中心都市(含む県庁所在都市)の中心駅とした。九州外からの流動を考慮する際の代表地点は、小倉駅とした。

分析対象ネットワークは、図-15に示した九州内のJR線および第3セクター鉄道、福岡市営地下鉄の一部区間とし、九州新幹線鹿児島ルートは全通した状態を想定する。ただし、行き止まり線等は除いてある。

在来線相互または新幹線相互の乗継ぎ時間は5分、在来線と新幹線を乗継ぐ場合は7分必要であるとして計算をおこなった。

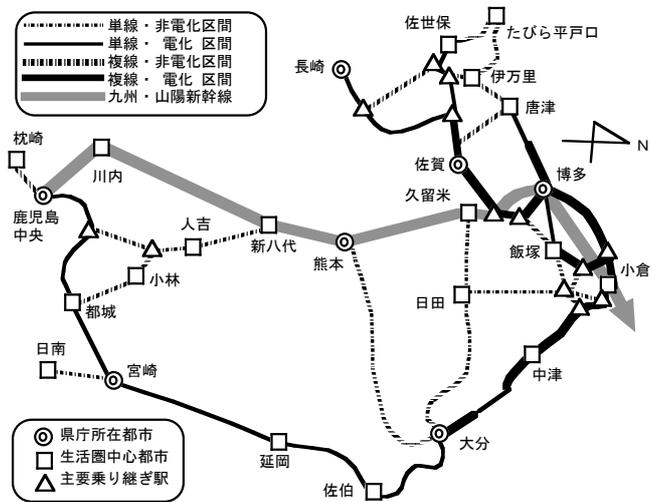


図-15 分析対象都市(駅名)・鉄道ネットワーク

(2) 改良費用の算定条件

路線改良に要する費用のkmあたり単価および改良後の平均速度は、文献などを参考に図-8のように設定した。このうち、路線改良費用のkmあたり単価については、在来線の改良についての調査がおこなわれた文献10)に示された工事単価をもとに計算した。また、路線改良後の区間平均速度については、鉄軌道の諸条件について記載されている文献11)を参考に路線条件が似ている既存路線を選定した上で、実際の運行状況を示す資料である文献12)などを用いて駅間の表定速度を計算し、この計算値を参考に概ね標準的と思われる値を設定した。

なお、データ年次としては、全国幹線旅客純流動調査の調査年次にあわせて2005年頃とした。また、文献10)の調査年から近年までは10年以上経過しているが、大幅な物価変動はなかったため整備費用の物価調整は行っていない

図-8をもとに、図-15の各区間(全61区間)ごとに現状、および5分の整数倍の短縮量となるような選択肢を、図-9のように、分析対象とする全区間について作成した。在来線は区間全体の260km/h新線化、既設新幹線は350km/h運転化をそれぞれ短縮量最大の選択肢とした。同じ時間短縮量で改良方法が複数ある場合は、改良費用の小さい方法を採用した。

(3) 評価方法

分析対象全61区間について、前項の方法で改良選択肢を作成するとともに、各交通結節点を都市間列車が出発時刻を5分刻みで変化させ、その組み合わせ(単純計算で約 1.5×10^{176} とおりに)の中から、改良の総費用が設定された費用以下であり、なおかつ適合度が最小のものを選ぶこととした。

広域生活圏の中心都市相互間のEVTTと全国幹線旅客純流動調査(2005)の流動量(鉄道、秋期平日)とを[1]に代入することにより総移動時間数を計算し、適合度(評価値)とした。運賃変化や他の交通機関からの移転、区間ごとの利用者数変化に伴う運行本数の増減については考慮していない。

(4) 計算機システムと計算の設定値について

本研究のシステムを用いて計算をおこなったが、主として使用した計算機のハードウェアの概要を表-4

表-4 主として使用した計算機の概要

CPU	Intel Core 2 Duo 2.13GHz (E6400)
Memory	1 G Bytes うち、本システム使用分は約160MB
OS	Windows Vista (64bit版)
Compiler	Intel Visual Fortran 9.1 (64bit版) Core 2 Duoに最適化

に示す。また、計算時の各種設定値を表-5に示す。

計算時間は状況により大きく異なり、一定ではないが、1 ケースあたり概ね 30~70 時間程度を要している。計算時間を短縮するために表-5 の設定値のうち、例えば集団サイズを小さくしたりするような変更をおこなうと、局所解と思われる数値で計算を終了してしまう傾向が強くなる。このため、現状ではこれ以上の時間短縮は難しい。

(5) ケース設定

整備費用制約 0 億円(速度向上無しでダイヤ調整のみ実施)、1,000 億円~5,000 億円 (1,000 億円刻み)、5,000 億円~1.5 兆円 (2,500 億円刻み) の計 10 ケースについて計算をおこなった。また、PTS の周期は 60 分を基本とし、最低毎時 1 本運行とした。すでに毎時 1 本以上運行されている区間については、現状と同じ運行本数とした。

(6) 計算の進行状況について

図-16 は、費用制約 5,000 億円の場合について計算を 5 回実行した結果である。横軸は世代数、縦軸は適合度(計算開始時の値を 100 としたもの)である。いずれの場合も、概ね 100 世代目あたりまでは急速に適合度の改善が進んでいるが、それ以降は改善が緩やかになっている。

GA という計算手法の性質上、最適解に達した保証はないが、図の太線のケースが最終的な適合度が最も

優れており、他のケースは明らかに局所解に至っている。このように、局所解に至りやすい分析対象であるので、計算精度を向上させるためには、複数回の計算を実行し、その中から最も優れている結果を採用するなどの方法が望ましいと考えられる。

一般的に GA では、試行回数や集団サイズ(初期遺伝子数)が多いほど計算精度が向上する。完全な最適解を保証するには全ての組み合わせ(本研究の場合は、単純計算で約 1.5×10^{176} とおり)を評価する必要があるが、これでは実用的な時間内で解を求めることは不可能である。したがって、試行回数や集団サイズ(初期遺伝子数)は、計算結果の精度が実用的な範囲に収まっているかどうかを以て判断することが適当であろうと考えられる。

本研究では、GA による図-17 に示した各ケースに関する 5 回の計算結果において、最も優れた適合度の値(最小値)に対する最も劣った適合度の値(最大値)を計算すると 1.005 倍~1.050 倍(単純平均で 1.018 倍)であった。このことから、極端な局所解に至ったケースはほとんど無かったと考えられる。

また、本研究の場合は費用制約の値が類似するケースの計算結果は比較的良好な値になることがあらかじめ予想されるが、図-17 のように、大きく傾向を乱す結果は無かった。これより、試行回数はさほど多くはないが、実用的な解を得ることができたものと考えられる。

なお、1 世代分の計算に要する時間は、第 8 章で示した手法を採用している関係から、表-4 の装置で第 1 世代は概ね 40~50 分程度、計算終了時付近では 2~3 分程度である。

(7) 各ケースの計算結果について

図-17 は、本章(5)で示した各ケースの整備費用と EVTT 短縮による利用者便益、およびこれらの差分としての社会的便益額を示したものである。

利用者便益については、2005 年時点の実際の EVTT (九州新幹線は新八代以南のみ)をもとに計算した総移

表-5 計算時の各種設定値

遺伝子集団個数	初期値 1000 個	最終値 100 個
遺伝子選択方法	トーナメント方式	サイズ 5
突然変異率	5%	
交叉率	70%	ハイブリッド交叉と二点交叉、ほぼ半数ずつ
エリート戦略	集団サイズの 1%	最低個数 1 個
終了条件	100 世代にわたって適合度の改善がないとき	

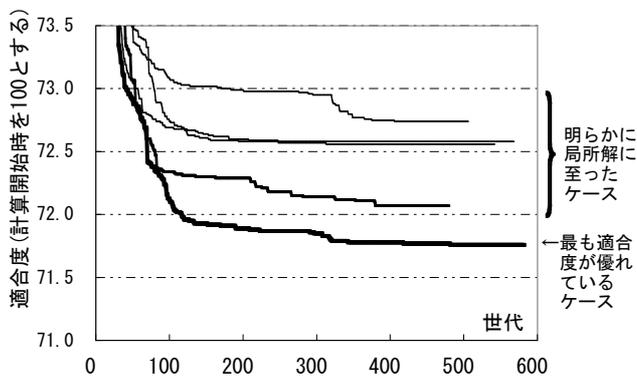


図-16 適合度の推移

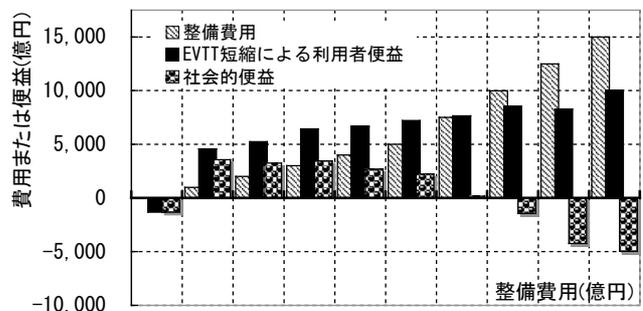


図-17 整備費用(制約)と発生する便益

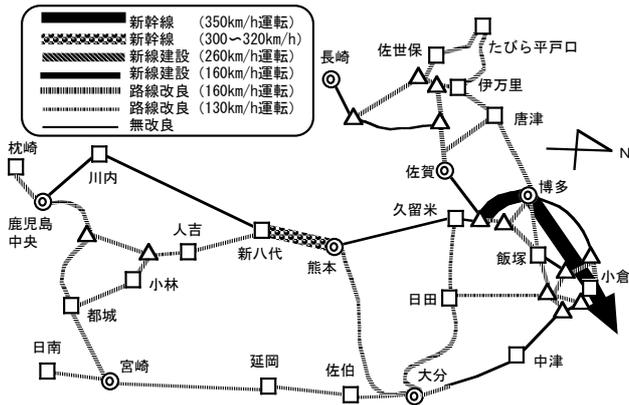


図-18 整備費用1,000億円の場合のネットワーク

動時間を基準に、各分析ケースにおける総移動時間との差分を計算し、文献8)を参考に1分=69.4円として40年分の便益額を計算したものである。

図-17では利用者便益が1兆円付近以上でのびが頭打ちになっており、整備費用7,500億円超では社会的便益が負となる。これは整備費用が大きい場合、利用者の少ない路線の改良がおこなわれていることが影響しているものと考えられる。

いっぽう、整備費用が小さいケースでは乗継ぎ利便性の向上などにより、比較的社会的便益が大きくなっており、図-17では整備費用が最小の1,000億円のケースが社会的便益が最大であった。図-18はこのケースの整備内容を図示したものである。一部の新幹線区間で高速化が行われているが、それ以外は現状において速度が遅い路線における広範囲な改良が主体である。このように、必ずしも旅客流動の通過量が多い路線だけが改良対象となっているわけではない。

なお、ダイヤ調整のみ(整備費用0億円)では乗継ぎ待ち時間が長くなってしまい、社会的便益を正にすることができなかった。

10. 研究のまとめと今後の展望

(1) 支援システムの開発結果

本研究では、スイスのRail2000政策を念頭に、駅間所要時間や発車のタイミングを調節した場合、都市間鉄道網の利便性がどのように変化するかを期待所要時間(EVTT)によって計測し、一定の費用制約下においてどの路線をどれだけ改良すれば効率よく利便性の改善が行えるかを求める計算システムを開発した。

開発した支援システムは、いわゆるナップサック問題を取り扱うので、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いたが、局所解の多いと考えられる問題であると同時に、計算量が多くなりがちなEVTTという指標を用いる

ため、局所解に至りにくくするとともに、計算速度を向上させる工夫を凝らした。

例として分析した九州のネットワークでは、比較的小規模な投資で乗継ぎを含めた総合的な利便性について比較的大きな効果を引き出せる可能性があり、今後の幹線鉄道整備の基本策になりうるということがわかった。

(2) 今後の展望

開発したシステムでは、EVTTを用いて地域間の旅客流動量で重み付けして評価を行いながら解の探索をすすめたが、最適化の基準としてはこのほかにも地域ごとのバランスをとる観点や乗車時間の最小化の観点、あるいは駅などでの待ち時間最小化の観点などいくつかの基準が考えられる。これらについては、EVTTの計算ルーチンを他の計算方法に置き換えたり、重み付けデータを変更することで容易に対応が可能である。

また、分析対象範囲を全国に広げ、今後の全国的な幹線鉄道体系の姿を探ることも課題である。

なお、本システムのようなGAを用いた数値計算は計算機の負荷が大きいため、より迅速かつ的確な解を見つけ出すような、さらなるアルゴリズムの改良も続けてゆく必要があるのではないかとと思われる。

参考文献

- 1) 中川大・波床正敏: 整備新幹線評価論 - 先入観にとらわれずに科学的に評価しよう -, ピーテック出版部, 2000.10
- 2) SBB: Information - Bahn 2000, German, <http://mct.sbb.ch/mct/infrastruktur/infrastruktur_bahnbetrieb/bahn2000.htm>, (入手 2007.5.18)
- 3) SBB: Rail 2000 - A Public Transport Network for the Third Millennium, <<http://mct.sbb.ch/mct/en/bahn2000-summary.pdf>>, (入手 2007.5.18)
- 4) SBB: Bahn 2000-Grundlagen-Knotensystem. <http://mct.sbb.ch/mct/en/infrastruktur/infrastruktur_bahnbetrieb/bahn2000/bahn2000-grundlagen/bahn2000-grundlagen-knotensystem.htm>, (入手 2007.5.18)
- 5) 加藤浩徳: スイスの都市間鉄道サービス改善に向けた取り組み: RAIL2000 プロジェクトとその後のSBBの研究開発, 運輸政策研究 Vol.9 No.2 2006 Summer, pp.59-61, 運輸政策研究機構, 2006
- 6) 波床正敏・中川大: 公共交通網におけるパルスタイムテーブルシステム成立条件に関する研究, 土木計画学研究講演集 34, CD-ROM, 2006
- 7) 天野光三・中川大・加藤義彦・波床正敏: 都市間交通における所要時間の概念に関する基礎的研究, 土木計画学研究論文集 9, pp.69-76, 1991
- 8) 野村友哉・青山吉隆・中川大・松中亮治・白柳博章: EVGCを用いた都市間高速鉄道プロジェクトの便益評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集 Vol.18 No.4, pp.627-636, 2001

- 9) 波床正敏・中川大: 公共交通利用における都市間の所要時間指標算出システム, 土木情報システム論文集 Vol.7, pp.169-176, 1998
- 10) 運輸経済研究センター:「在来線の高速化に関する調査研究報告書」,p.36,1993
- 11) 国土交通省鉄道局監修:「鉄道要覧 平成16年度」, 電気車研究会鉄道図書刊行会, 2004
- 12) JTB 時刻表 2005 年 10 月号など

(2007.5.18受付)