高速鉄道整備における単線新幹線システムの適合条件に関する研究
—基本条件の分析と GA に基づく考察—

波床 正敏（大阪産業大学 工学部，hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp）

A study on compatible condition of single-track Shinkansen system in high-speed railway construction:
Analysis of elementary conditions and consideration based on Genetic Algorithm

Masatoshi Hatoko (Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University)

要約

近年、いわゆる整備新幹線の建設が進行し、次なる路線整備として基本計画線の建設に対する注目が集まりつつあるが、いわゆるフル規格新線による整備は高機能だが建設コストが高く、かといって他の整備手法では低コストではあるものの高速鉄道とは言いがたいほど低機能であるという問題を抱えている。そのような中、コストを抑えながらも高速鉄道としての一定の水準を確保できる方式として単線新幹線システムが提案されている。本研究では一連の研究の成果を踏まえ、まず、新幹線整備前の表定速度と、各種整備手法の整備単価や整備後の表定速度を用いて基本的な分析をした。その結果、全ての速度域においてスーパー特急方式よりも単線新幹線システムの方が手法が成立しうる旅客数の下限値が小さいこと、整備前の在来線の表定速度が 100 km/h 程度以下の場合においてフル規格に比べて少ない利用者数でも成立する傾向にあることなどがわかった。また、遺伝的アルゴリズムを使って実際の我が国の幹線鉄道網の中でどのような区間において単線新幹線システムが適用されうるのかを探索した結果、単線新幹線はフル規格線に比べると安価であるものの表定速度が劣るため長距離区間には向かないこと、比較的利用者の少ない短距離の支線的な役割の路線に向いていることなどがわかった。

キーワード

新幹線，単線整備，適合路線，交流拡大，多様性

1. はじめに

全国新幹線鉄道整備法策定から 40 年以上を経て整備新幹線が次々と開業を迎え、次なる新幹線整備に注目が集まりつつある。しかし、日本の新幹線はフル規格新線、すなわち全線立体交差で複線電化の高速新線の建設を標準的な整備方法としており、そのコストの高さ故に一部の利用者数が多い区間を除いてフル規格で建設することは非常にハードルが高い状況にあると思われる。一方、海外に目を向けると、幹線鉄道の軌間が標準軌で統一されている国が多いため、大規模に高速新線を建設する方法以外にも通過に時間を要する難所だけ新線建設する方法が採用されるなどしており、比較的ローコストで高速鉄道ネットワークを拡大してきている。

日本では新幹線網のローコスト整備手法としていわゆるミニ新幹線やスーパー特急方式が提案されてきており、一部区間ではこれら方法によって幹線鉄道整備がされているが、コストは安いものの時間短縮がほとんど無かったり、ある程度の建設費抑制はできるものの直通運転ができなかったりといった状況であり、ローコストかつ速達性向上を実現できる方法は存在していなかった。 そのような中、運転本数の少ない路線向けの整備方法として単線の高速新線を整備する方法が提案され、その基本的なアイデアや建設費の水準に対する分析が行われてきている。

以上のような背景をもとに、本研究では一連の研究の成果をもとに、単線方式による新幹線システムは、どの程度の利用者数と時間短縮が見込まれるような区間で採用するのが適当かについて分析を行うものとする。まず単線新幹線システムを含む各種の整備手法が現状の整備水準と旅客数がどのような路線において適する可能性があるかについての目安について考察し、次に遺伝的アルゴリズム（GA = Genetic Algorithm）を使って実際の我が国の幹線鉄道網の中でどのような区間において単線新幹線システムが適用されうるのかを探索する。このような方法を経て、単線新幹線システム適用上の特徴を明らかにすることが本研究の目的である。なお、本研究は日本の幹線鉄道網の望ましい将来像を直接的に明らかにすることが目的ではなく、計画策定時の代替案作成における参考となることを目指した研究である。

2. 幹線鉄道の整備コストと適用範囲に関する議論

2.1 幹線鉄道整備の整備方法に関する研究など

幹線鉄道整備について新たな整備方法が提案された事例は少なく、ほとんどの場合はフル規格新線整備を前提とした有無比較によるプロジェクト案の評価を行ったものとなっている。車両側に軌間変更機能を持たせた FGT（= Free Gauge Train）を用いた整備方法が検討対象になっていることもあるが、検討上はインフラ整備費用がゼロであるかのように取り扱われることもある（例えば整備新幹線小委員会（2012））。

既存の整備手法だけを想定しながらも、スイスの幹線

鉄道政策である Bahn 2000（Rail 2000）を参考に乗り継ぎ時間のロスの低減に着目して日本の幹線鉄道整備のあり方と現実の整備結果を比較して分析した研究として波床（2015a）がある。この研究では、効率よく我が国の幹線鉄道網を構築する上ではフル規格新線にこだわらずに 160 km/h 程度の在来線改良やミニ新幹線、フル規格新線などを組み合わせるのが適切であることが示されている。

新たな整備手法を組み込んだ例としては、豊予海峡に幹線道路や幹線鉄道を整備した場合の効果を計測した大分市（2016）の調査報告書では、豊予海峡トンネルに新幹線を通す場合について、単線トンネルは複線の場合の断面積の約 70％であることを参考に、建設費用についても単線トンネルは複線の場合の 70 % であると仮定し、費用対効果の分析が行われている。また、波床（2016; 2017a）では、新幹線システムそのものについて単線整備を前提として構築した場合、表定速度等の諸元や建設費用がどの程度になるかについて分析が行われている。

このように、新たな新幹線整備手法として単線の新幹線システムについての分析は進みつつあるが、どのような特徴を持った区間において用いるのが適しているかについては、まだよくわかっていない状況にある。

2.2 本研究の分析方法

利用者の多い区間では 1 人あたりの費用負担が少なくなるために幹線鉄道整備に多額の費用をかけることも合理的な説明ができるが、利用者が少ない区間では多額の費用をかけることは難しい。また、同じ利用者数であっても、元々の交通整備状態が劣悪なために新規整備することで大きな時間短縮が得られる場合には高コストな整備手法でも採用できるが、時間短縮量が小さいと大きな費用をかけることが難しくなる。

そこで、本研究ではまず、単純な分析として整備前後の表定速度の差から時間短縮量を求め、利用者数と時間短縮量とから効果量を計算して費用と比較することで新幹線の整備手法ごとに手法が成立する旅客数の下限値を求め、各システムの基本的な特徴を明らかにする。

次に、単線新幹線システムを含む主要整備手法が実際のネットワークの中でどのような箇所に適用できるかについて GA を用いて分析を試みる。実際の幹線鉄道ネットワークでは、並行路線の存在やその整備水準、結ぶべき都市や交通拠点の配置、関連する路線の整備状態の変化などによって、単純に整備費用と現行の利用者数だけでは判断できないことがある。このため、全国のすべての路線の整備水準の変化を織り込んで各路線の様々な整備水準の組合せについて分析を行うことで、各システムの実際的な特徴を明らかにする。

3. 新幹線の主要整備手法の概要と基本的な適用範囲

3.1 新幹線の主要整備手法の概要

新幹線の主要整備手法の特徴を表 1 に示した。フル規格新線は新幹線電車を大量に高速運行させることができるが、建設費が比較的高価である。ミニ新幹線は小型車両を使ってフル規格新幹線と直通運転が可能であり、整備費が安価であるものの、ミニ新幹線区間は改軌だけ行った在来線そのものであるため、運転速度が極めて低い。スーパー特急方式はフル規格新線とほぼ同じインフラを整備し、当面は狭軌の在来線特急を走らせるものであるが、新線建設を行うため整備費用が比較的高額である。かつては当面走行させる特急列車として 200 km/h 程度の高速運転も構想されていたが、実際にはそのような車両は開発されておらず、低速かつ高価な整備手法になっている。FGT の利用も検討されているが、技術開発途上であるとともに在来線の線路強化費用や車両のメンテナンス費用などの隠れたコストが比較的大きい。

表 1：各整備方式の特徴概要

名称	フル規格	ミニ新幹線	スーパー特急方式	FGT	単線新幹線
事例	整備新幹線	山形 / 秋田新幹線	青函トンネル区間	－	－
構造物	複線の高速新線	在来線転用	複線の高規格新線	在来線そのもの	高速新線
軌道	標準軌	軌間のみ標準軌化	狭軌 （将来は標準軌化）	在来線そのもの	標準軌
速度	260 km/h 以上	130 km/h 程度	140 km/h 程度	130 km/h 程度	260 km/h 以上
本数	毎時片道 15 本以上	毎時片道 2 本程度	在来線複線区間程度	在来線次第	毎時片道 2 本程度
費用	50 ～ 100 億円 /km	数億円 /km	50 ～ 100 億円 /km	車両費と軌間変換設備	フル規格の 2/3 程度
信頼性	ほとんど遅れない	普通列車 踏切、鳥獣 降雨、降雪	普通列車 貨物列車	普通列車 踏切、鳥獣 降雨、降雪	「ミニ」のような 課題はない
車両	大型車体 320 km/h 対応	小型車体 320 km/h 対応	小型車体 160 km/h 程度	小型車体 270 km/h 対応	車体の大小不問 高速運転
直通	新幹線直通	新幹線直通	在来線直通 （乗換必要）	新幹線直通	新幹線直通
駅	新規	既存駅活用	新規 / 既存	既存駅活用	新規 / 既存
備考	工費大	工期短い	工費大	工期短い	－

一方、波床（2016; 2017a）によって提案されている単線新幹線システムでは、運転本数は片道 2 本 / 時で最高速度は 260 km/h を想定している。信号場（約 7 km の複線区間を持ち、保安装置の保護下で 160 km/h に減速した上で走行しながらすれ違い可能）の構内および駅構内は複線とし、それ以外を単線の高速新線とすることで、表定速度が約 152 km/h（整備新幹線の各駅停車型列車と同程度）、整備費用はフル規格新線の 3 分の 2 程度とすることができるものである。

なお、高速鉄道の単線運用については日本では例が無いが、波床（2016）において技術的観点からの考察が行われている。すなわち、新幹線では ATC（Automatic Train Control）により衝突や速度超過などの危険から列車が守られており、高度な安全性が確保されている。新幹線は本線上では走行方向が一定方向に固定されているが、駅構内では ATC の保護下で現時点でも双方向に運転されている。また、台湾高速鉄道用には双方向運転用の ATC が開発されて日本から輸出されており、実際に使用されている。欧州の TGV や ICE についても、線路が 2 本並行して敷設されている区間であっても双単線システムが一般的であり、1 本の線路を双方向に使用すること自体は珍しくない。また、海外での高速鉄道の事故事例を見ても ATC に相当する保安装置の保護の無い状態で重大事故が発生しており、適切な保安装置の設置と運用が高速鉄道の安全を担保する重要点になっている。

3.2 単一路線における主要整備手法の基本的な適用範囲

単純な 2 点間を結ぶ路線について、他路線との相互干渉を全く無視できるような状況ならば、前述の主要整備手法については、整備前後の表定速度や整備費用、利用者数を設定すれば、一定の仮定の下で基本的な適用範囲を想定することができる。FGT を除く各手法についての整備後の表定速度および単位 km あたりの整備費用などを実績や研究結果（波床, 2015b）をもとに表 2 のように設定し（以下、次章の分析を含めて新線整備の際の単価設定はこの表の値を用いる）、鉄道・運輸機構（2009）を参考に時間価値 V = 77.8 円 / 分（以下、本研究ではこの時間価値を用いる）、集計期間 L = 40 年とし、以下の式 (1) で整備単価に対する比を求め、その結果が 1 となるような F の値（単一路線における各システムの成立する年間旅客数の下限値）を示したものが図 1 である。運賃変化については考慮されておらず、時間短縮に伴う利用者数変化についても考慮されていないものであるため、採用できるシステムを検討する際の目安と考えるのが適当であり、実際に成立するかどうかについては、検討対象区間の具体的諸元を用いて詳細に検討する必要がある。

表 2：各手法の表定速度と単価設定（2010 年価格）

（単位）	表定速度	整備単価	備考
	（km/h）	（億円 /km）	―
フル規格	213.3	75.9	260 km/h 運転
ミニ（複線）	87.1	5.1	山形新幹線
スーパー特急	113.1	45.3	160 km/h 運転
単線新幹線	151.7	48.3	260 km/h 運転

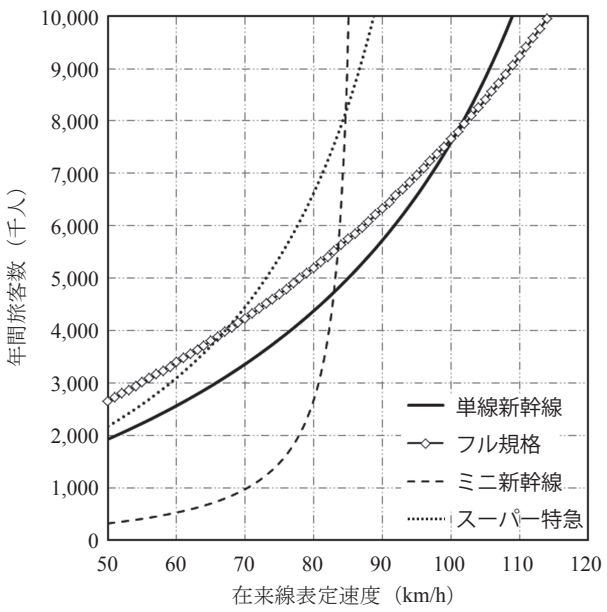

図 1：各システムが成立する旅客数の下限値の目安

$$\frac{\left(\frac{1}{v_b}-\frac{1}{v_a}\right)\times V\times 60\times(F\times 10^3)\times L}{C\times 10^8} \quad (1)$$

v_b：整備前の在来線の表定速度（km/h）
v_a：整備後の新幹線等の表定速度（km/h）
V：時間価値（円 / 分）
F：当該単一路線上の年間旅客数（千人 / 年）
L：集計期間（年）
C：整備単価（億円 /km）

低成長社会における社会基盤整備時の社会的割引率はどうあるべきかについては議論のあるところと思われるが、式（1）は割引率 0 % でプロジェクトライフを 40 年とした場合の費用便益比に相当し、割引率 0.95 % でプロジェクトライフを 50 年、あるいは割引率 2.3 % でプロジェクトライフを 100 年とした場合とほぼ同等である。

図 1 の横軸は整備対象とする区間の在来線の表定速度（km/h）であり、縦軸は単一路線における各新幹線システムが成立する年間旅客数の計算上の下限値（千人）である。整備前在来線の速度が遅いほど成立する旅客数の下限が小さく、逆に速いほど旅客数の下限が高い。式（1）による結果であるので当然ではあるが、時間短縮へのニーズが高く、こまめに路線改良を行ってきた在来線ほど新幹線建設のハードルが上がるという逆説的状況である。例えば北陸新幹線の金沢開業に関しては初年度利用者数が 925 万人の水準であったが、北陸新幹線開業直前の在来線特急の表定速度は約 103 km/h（越後湯沢－金沢間、2012

年 3 月末）と比較的高水準であったため、費用便益比の観点では余裕を持ってフル規格新線整備が成立しているとは言えない状態にあった。

さて、各システムの特徴について分析すると、図 1 で対象とした全ての速度域においてスーパー特急方式よりも単線新幹線システムの方が旅客数の下限値が小さい。このため、スーパー特急方式は将来的に確実に複線のフル規格路線になるような区間において一時期に高速な在来線特急を走行させるような使い方が適当であると言える。

ミニ新幹線は整備単価が極めて小さいため、表定速度が 80 km/h 程度までの範囲において成立する旅客数の下限値が非常に小さく、整備後の速度に対する要求水準が低くても良い場合には、広い範囲の条件に対して有効である。

単線新幹線システムについては、フル規格と似た傾向ではあるが、表定速度が概ね 100 km/h 以下の範囲においてフル規格に比べて少ない利用者数でも成立する傾向にあり、整備前の表定速度が低い場合には上記の北陸新幹線の 4 分 1 程度の利用者数でも成立する可能性がある。このため、多数の運転本数が要求されない支線的な役割を果たす路線において有効な整備手法ではないかと考えられる。

4. GA を用いた路線網内における適合区間の探索

4.1 分析の考え方

前章では単純な方法により表定速度、利用者数、整備費用の面から計算した適用可能な手法の目安について示したが、実際の幹線鉄道ネットワークでは、並行路線の存在やその整備水準、結ぶべき都市や交通拠点の配置、関連する路線の整備状態の変化などによって、単純には判断できないことがある。このため、全国のすべての路線の整備水準の変化を織り込んで各路線の様々な整備水準の組合せについて分析を行う必要がある。そこで、本研究では、単線新幹線システムを含む主要整備手法が実際のネットワークの中でどのような箇所に適用されるかについて GA を用いて分析することとする。

GA を用いた理由としては、主として各路線の整備状態の組み合わせ最適化問題になるからである。地点間の所要時間が出発時刻に依らずに一定である場合には PERT/CPM のような考え方に基づいて投入費用と全行程の所要日数短縮量の関係の分析と類似の方法の採用の可能性はある。だが本研究で対象としている都市間交通ネットワークの場合、待ち時間を含めた所要時間が出発時刻の非線形関数（時刻を横軸､瞬間の所要時間を縦軸にとった場合､波形がノコギリ型になる）であること、特に鉄道において運賃や料金が距離に対して増加率が逓減する階段状の非線形関数であること、特定路線間（あるいはモード間）で運賃割引が存在したり乗換え抵抗が発生したりすること、各区間の整備水準の選択と各区間の便の出発時刻を同時決定する必要があること、PERT/CPM では発着相当が 1 組であるのに対して都市間交通ネットワークの場合は全発着地の組合せについて分析する必要があること、などを考慮して GA を用いた。

分析の枠組み自体は波床（2015b）と同様とするが、以下にその概要を説明する。

4.2 評価に用いる指標

本研究では、将来的な幹線鉄道網の整備についての分析を通して単線新幹線システムの適用の特徴を探るため、研究開始時点（2016 年秋）において着工が決まっている路線や区間が完成した状態を基準とし、現時点での公表されている最も先の都道府県別将来人口推計である 2040 年時点の人口分布とそれに基づく旅客流動を前提に GA を用いて幹線鉄道網の最適解の実用的近似状態を探索する。GA による探索では最適化の基準とする基本指標として期待一般化費用（Expected Value of General Cost: EVGC）を主として用い、期待所要時間 (Expected Value of Traveling Time: EVTT) についても併用する。

EVGC は、都市間交通で運行されている便ごとの所要時間や乗り継ぎ等を考慮できる指標で、運賃・料金も考慮できる（天野，1991）。このため、EVGC は利用者（需要側）の実際の移動抵抗の主な要素を考慮した総合指標となっており、地域間交流の拡大という観点では EVGC が改善されることが望ましい。ただし、EVGC を基準に路線網を最適化した場合、事業者側（供給者側）の収支変化は考慮されないため、必ずしも社会的改善につながるとは限らない。

一方、併用する EVTT も算出の基本的な考え方は同じであり、前述の説明のうち運賃等の費用を考慮外とし、単に時間だけで計算したものになる。EVTT はその定義上運賃変化を計測できないが、利用者の費用増は交通事業者側の収入増であり、基本的に社会全体では相殺されていると考えることもできるので、計測には一定の意味がある。

4.3 分析対象ネットワークについて

本研究では図 2 のような 2016 年時点の沖縄を除く都道府県を結ぶ幹線鉄道網（JR・第 3 セクター）、図には示していないが、航空路（1 日 5 往復以上の路線）および高速バス（1 日 6 往復以上の路線）、さらに紀淡海峡の航路および豊予海峡の航路についても考慮した。

主要地点間の所要時間や運行頻度については基本的には 2016 年秋時点としており、九州新幹線や東北新幹線延伸部分沿線では交通状況が異なっているが、基本の流動データは 2010 年時点のものを使用している（研究開始時点において 2015 年の流動データが入手できなかったため）。各路線の運行周期は 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（2016 年時点）と同数とした。その他条件（乗継ぎ条件や乗り継ぎ抵抗、運賃水準、代表地点の設定等）は波床（2015b）と同様である。

新幹線整備を検討する対象路線としては、現行法制に従うならば全幹法に基づく基本計画線になるが、策定後

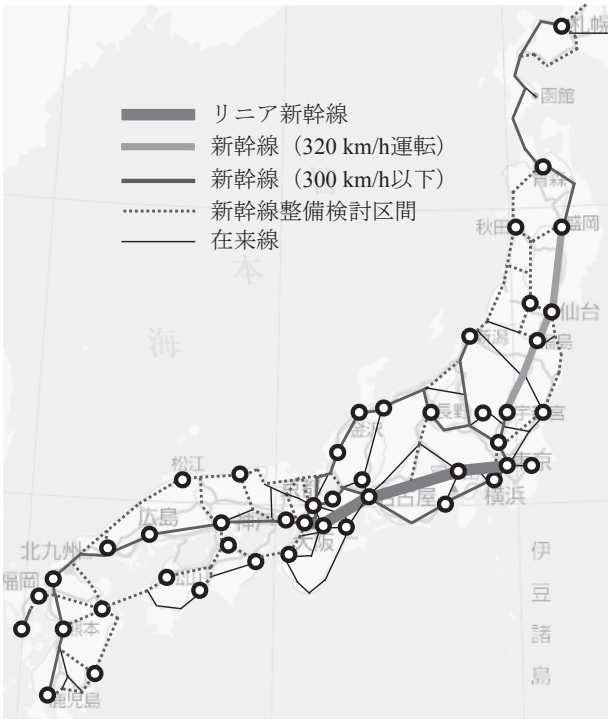

図 2：分析対象とした鉄道網

40 年以上を経ており、旅客流動の実態に合っていない可能性もある。図 2 には本研究で新幹線化を検討した区間を示しており、基本計画線（すでにミニ新幹線化されている区間も含む）のほかにも、代表地点（都道府県庁所在都市）間を結んでいる高速バス（選定基準は前述の通り）、代表地点間移動に利用される可能性のある定期在来線特急列車の運転路線、ミニ新幹線の構想等がある区間。新幹線の整備されていない地方中核都市を通る路線についても検討対象とした。

なお、既設新幹線については速度向上の余地があると考え、線形の悪い東海道新幹線を除き、320 km/h 運転までの速度向上を整備の選択肢に加えた。在来線については、ミニ新幹線化を整備の選択肢に加えた。これらはいずれも波床（2015b）と同様の基準で改良の選択肢を作成した。

4.4 異種交通モード間の配分の考え方

GA の計算システム内においては、基本的には前節で示した各交通モードを区別することなくデータ（区間ごとの運賃、所要時間、営業距離、毎時の運転本数、運賃計算方法の情報、乗り継ぎ割引や乗換え抵抗考慮対象の情報、整備費用など）管理している。EVGC や EVTT をシステム内部で計算する際、EVGC や EVTT の定義（天野, 1991）にしたがって出発時刻を変えながら全モードを使用して経路探索しており（市販の「乗換案内」や「駅すぱあと」のようなイメージ）、時刻によって経路やモードが変化するとともに、異種モード間の乗り継ぎも考慮している。

異なるモード間（あるいは経路間）の交通量配分については、以下のように説明される。都市間交通の分析では主要交通モード別に OD 間の所要時間や費用を算出し、ロジットモデルなどを使って分担率を計算するような方法がよく使われる。一方、本研究では前述のように交通モードを区別せずにミクストモードで経路探索を行うが、EVGC や EVTT では所要時間は出発時刻の関数であり出発時刻によって経路やモードが刻々と変化するとともに、異種モード間の乗り継ぎもあり得るとの前提で計算される指標であり、最終的な指標値は OD 交通量の出発側における交通発生が時刻に対して一様分布であると仮定した上で集計（期待値を計算）したものと定義されている。このため、EVGC や EVTT の計算が終了した段階でネットワーク上の各リンクへの交通量配分も終了しており、分担状況の計算も終了している。

すなわち、本研究では新幹線整備をしたからといって高速バスや航空路の需要をすべて無条件に新幹線に強制転換させるような想定はされておらず、EVGC や EVTT の計算過程を通じて異種モードを含めて各リンクに交通が配分されるようになっている。ただし並行在来線については、国鉄改革の際に旧国鉄の事業は JR 各社が引き継ぐことに決定されていること、原則として新規新幹線建設時には在来線の経営が JR から分離されることから、全ての在来線の都市間交通需要が新幹線に移転する前提になっている（現実の整備新幹線建設時もそのようになっている）。

GA での処理過程において、並行する交通モード（あるいは別経路）のサービス水準が高く、新幹線の新規路線への交通配分が少ない場合には EVGC や EVTT の改善が小さくなり、投入される費用に比して効率が悪いと判断される場合には建設案が淘汰される。

4.5 探索基準（最適化基準）

本研究では、図 2 に示した路線の主要拠点間の区間ごとに新幹線整備の有無や速度向上策の導入などの整備レベルを離散的に設定し、それらの組合せとしてのネットワークに対して評価を行って GA により最適なネットワークを探索する。路線の整備水準の選択肢の作成方法については次節で説明し、本節では本研究における探索基準（最適化基準）について説明する。

GA では多数のネットワークについて評価を行って最適な実用解を探索するが、そのうち n 番目のネットワークについて以下の方法で 4.2 節において言及した 2040 年を想定した都道府県間流動量 A_{ij} を考慮した EVGC の総和 S_n を計算する（i, j は発着地となる都道府県）。

$$S_n = \sum_i \sum_j (A_{ij}\, EVGC_{ij}) \qquad (2)$$

これに対し、どの区間も新規整備も改良もせず現状のままである場合の EVGC の総和を S_0 とし、n 番目のネットワークを実現するために必要な整備費用を C_n とするとき、以下の式（3）を使って、EVGC の改善量を計算した上で一定の集計期間分を積み上げ、整備費用と比較す

ることで評価値f_nを計算する。この評価値についてGAを用いて最大化する方針で実用解を探索する。Lは前述の場合と同じく集計期間であり、40年間とした。また、EVGCを計算する際には運賃と所要時間だけでなく乗換え抵抗を1回あたり27分相当と設定して考慮した（鉄道・運輸機構, 2009）。

$$f_n = L \times (S_0 - S_n) - C_n \quad (3)$$

なお、4.2説でも説明したようにEVGCの代わりにEVTTを用いて計算することにも意味があるため、式（2）や式（3）において費用変化を考慮せずに計算したEVTTを用いた最適化についても実施した。

また、ネットワークを最適化する際、評価値を最大にするという方針の他にも、（我が国ではこのような方法がとられることは少ないが）評価値が負にならない範囲での最大の投資水準を求めるという方針も考えられる。そこで、本研究ではEVGCを用いて計算した式（3）による評価値を0に近づけるという方針でも解の探索を行い、参考とした。さらに、この評価値を0に近づける探索についても、EVGCの代わりにEVTTを用いたものも求めた。

以上より、最適化の方針別のケース設定としては、以下の4種となる。基本的には本研究は単線新幹線システムの適する路線の特徴を探るものであるが、各ケースの想定する社会的方針についても説明する。

① EVGC使用、評価値最大となる路線網
…一般化費用で表現した移動者のみの便益から初期投資費用を差し引いた純便益が最大になるような路線網整備を想定
② EVTT使用、評価値最大となる路線網
…総移動時間短縮量という便益から初期投資費用を差し引いた純便益が最大になるような路線網整備を想定
③ EVGC使用、評価値非負で整備費用が最大の路線網
…初期投資費用を一般化費用で表現した移動者のみの便益が上回るという範囲で、可能な限り高いレベルの路線網整備を想定
④ EVTT使用、評価値非負で整備費用が最大の路線網
…初期投資費用を総移動時間短縮量という便益が上回るという範囲で、可能な限り高いレベルの路線網整備を想定

GAによる解の探索の打ち切り条件としては、波床（2009）や波床（2015b）を参考に、式（2）のS_nの変化率が100世代間で0.01 %未満の場合に打ち切る条件で20回の独立した探索を繰り返す。その後、各結果を初期集団に混入させて再度探索し、S_nの変化率が100世代間において全く変化しないことを確認して探索を打ち切った。なお、GAを用いた解の探索を行った研究では1世代あたり100個体で1万～10万世代程度で解の探索を打ち切っている例を見かけるが、この場合の評価値の総計算回数は100万～1,000万である。一方、本研究の場合、例えば上記①のケースでは評価値の総計算回数は約19.6億であり、十分な評価回数を確保している。

5. 単線新幹線システムの適用箇所の特徴に関する考察

5.1 GAによる探索結果

表3は前章で説明したGAによる探索結果の概要である。4.4節でのケース①（指標がEVGC、式（3）による評価値を最大化）の場合の整備費用は2.36兆円であり、探索結果としてフル規格複線での整備（FL）は首都圏の主要拠点間のみ、ミニ新幹線化（MN）は札幌周辺や大阪－和歌山間などとなった。また、姫路－鳥取間と山口−新山口間では単線新幹線（ST）になった。

ケース②（指標がEVTT、評価値最大化）の場合は3.89兆円であり、FLは札幌－新千歳空港間、首都圏の拠点間、新鳥栖－佐賀間となった。MNは岡山－高松間だけであり、米沢－福島間、姫路－鳥取間、山口－新山口間、佐賀－武雄温泉間、新鳥栖－大分間はSTになった。

ケース③（指標がEVGC、評価値が非負で整備費用最大化）の場合は4.00兆円であり、FLは首都圏の拠点間と山口－新山口間だけである。MNは札幌周辺、敦賀－米原間、四国島内であった。姫路－鳥取間と新鳥栖－大分間はSTになった。

ケース④（指標がEVTT、評価値が非負で整備費用最大化）の場合は14.86兆円であり、探索結果は多数の路線でFLとなり、札幌付近での整備、秋田・山形新幹線のフル化、首都圏の拠点間の路線、日本海側の鳥取や松江と山陽新幹線を個別に結ぶ路線、四国の主要幹線、佐賀や大分と九州新幹線を結ぶ路線の新規整備であった。また、仙台－山形間がMNであり、塩尻－飯田附近、川之江－高知間、関西空港－和歌山間、佐賀－武雄温泉間、宮崎－鹿児島中央間でSTになった。

5.2 単線新幹線システム適用区間に関する考察

表3では、各ケースとも単線新幹線システムが探索結果として選択されている区間が存在する。基本的にはいずれも100 km程度以下の比較的短い区間であり、幹線に対する支線的な役割の区間が多く、単線区間が連担することはなかった。例えば、東北新幹線から分岐する米沢－福島間（約35 km、ケース②）、山陽新幹線から分岐する姫路－鳥取間（約89 km、ケース①②③）と山口－新山口間（約13 km、ケース①②）、四国新幹線から分岐する川之江－高知間（約56 km、ケース④）、九州新幹線から分岐する宮崎－鹿児島中央間（約107 km、ケース④）および新鳥栖－大分間（約107 km、ケース②③）などである。また、塩尻－飯田附近間（約69 km、ケース④）は中央新幹線の支線として、関西空港－和歌山附近（約24 km、ケース④）は主要航空路に対する支線的役割として、それぞれ機能しているとも考えられる。

このように単線新幹線システムは比較的短い支線的な区間での採用が多くなる結果であった。この理由としては、フル規格の複線に比べると建設費が安いものの表定速度が若干劣るため、長距離にわたって建設する場合に

表 3：新幹線化の検討対象区間と GA による探索結果

基本：基本計画，整備：整備計画、他：その他 FL: フル規格複線、ST: 単線新幹線、MN: ミニ新幹線			ケース番号	①	②	③	④
			最適化方針	効果量最大化		効果非負整備費用最大化	
			最適化指標	EVGC	EVTT	EVGC	EVTT
種別	路線	区間	費用（兆円）	2.36	3.89	4.00	14.86
基本	北海道	札幌	旭川	MN		MN	FL
基本	北海道南	札幌	新千歳空港	MN	FL	MN	FL
		新千歳空港	長万部				
基本	羽越	新青森	秋田				
		秋田	余目				
		余目	新潟				
		長岡	上越妙高				
基本	奥羽	秋田	大曲				FL
		大曲	山形				
		山形	米沢				FL
		米沢	福島		ST		FL
他	秋田	大曲	盛岡				FL
他	仙山	仙台	山形				MN
他	陸羽西	新庄	余目				
他	常磐	仙台	水戸				
		水戸	つくば				FL
		つくば	大宮				FL
整備	上越	大宮	新宿		FL	FL	FL
他	山手	新宿	品川	FL	FL	FL	FL
		品川	羽田空港	FL	FL		FL
他	信州	長野	塩尻				FL
		塩尻	飯田附近				ST
基本	北陸中京	敦賀	米原			MN	FL
基本	山陰	新大阪	宮津				
		小浜	宮津				
		京都	宮津				
		宮津	鳥取				
		姫路	鳥取	ST	ST	ST	FL
		鳥取	米子				
		米子	松江				FL
		松江	益田				
		益田	新下関				
他	山口	益田	山口				
		山口	新山口	ST	ST	FL	FL
基本	中国横断	米子	岡山				FL
基本	四国横断	岡山	坂出		MN		FL
		川之江	高知				ST
基本	四国	新大阪	関西空港	MN			
		関西空港	和歌山附近	MN			ST
		和歌山附近	徳島附近				
		徳島附近	高松附近			MN	FL
		高松附近	坂出	MN	MN	MN	FL
		坂出	川之江				FL
		川之江	松山				FL
		松山	大分				
整備	九州長崎	新鳥栖	佐賀		FL		FL
		佐賀	武雄温泉		ST		ST
基本	東九州	小倉	大分				
		大分	宮崎				
		宮崎	鹿児島中央				ST
基本	九州横断	大分	熊本				
他	久大	新鳥栖	大分		ST	ST	FL
他	宮崎	新八代	宮崎				

はフル規格との所要時間差が顕在化しやすいことが考えられる。また、支線的な区間は幹線的役割を果たす区間に比べて通過旅客数が少ないため、図 1 の状況を考慮すると、フル規格の複線の新線よりも単線新幹線システムの方が成立しやすいことが影響しているとも考えられる。

5.3 単線システムが全国的交流に与える影響について

図 3 は前節のケース①および②について、何もせずに現状のままであった場合に比べ、どれだけ総期待所要時間（EVTT）が減少するかについて図示したものであり、横軸が整備費用（兆円）、縦軸が EVTT の減少量（万時間 / 年）である。同図には、単線新幹線という手段が選べることによる影響が明確になるように、ケース①および②の探索を行う際に単線新幹線という選択肢を選ぶことができず、フル規格新幹線しか選べないような制限を加えて探索した結果も表示している。

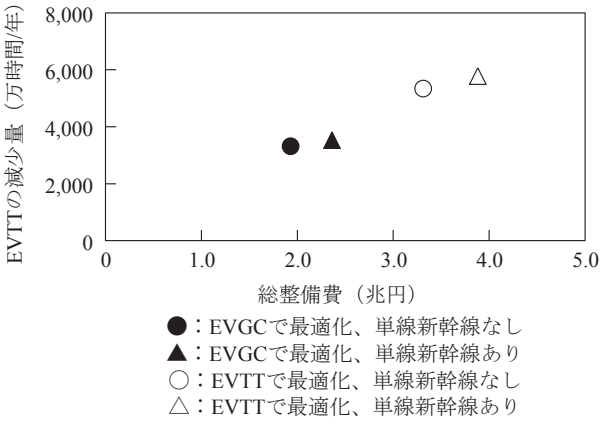

図 3：EVTT の減少量の比較

EVGC を用いて効果量最大化の方針で最適化した結果について比較してみると、ケース①そのものを表す▲印（単線新幹線あり）と選択制限した●印（単線新幹線なし）では、単線新幹線を選択できることによって整備費用が約 22 % 増加するとともに EVTT の減少量も約 6 % 増加している。同様に、EVTT を用いて最適化した結果については、ケース②そのものを表す△印（単線新幹線あり）と選択制限した○印（単線新幹線なし）では、単線新幹線という選択ができることによって整備費用が約 18 % 増加するとともに EVTT の減少量も約 8 % 増加している。

図 4 は上述の図 3 と同様の分析であるが、どれだけ総期待一般化費用（EVGC）が減少するかについて図示したものであり、横軸が整備費用（兆円）、縦軸が EVGC の減少量（億円 / 年）である。記号類は図 3 と同じである。

EVGC を用いて最適化した結果では、ケース①そのものを表す▲印（単線新幹線あり）と選択制限した●印（単線新幹線なし）では、単線新幹線という選択肢の追加により、EVGC の減少量は約 13 % 増となった。同様に、EVTT を用いて最適化した結果では、ケース②そのものを表す△印（単線新幹線あり）と選択制限した○印（単線

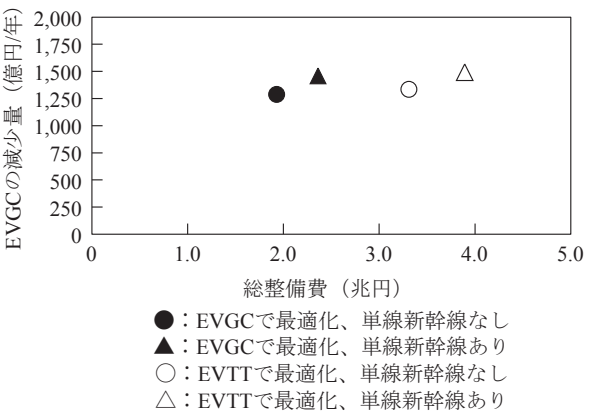

図 4：EVGC の減少量の比較

新幹線なし）では、単線新幹線という選択の追加により、EVGC の減少量は約 11 % 増加している。

さらに図 5 は都道府県間の交流の多様度がどれだけ増加するかについて図示したものであり、横軸が整備費用（兆円）、縦軸が交流の多様度の増加量（bit）である。記号類は図 3 や図 4 と同じである。

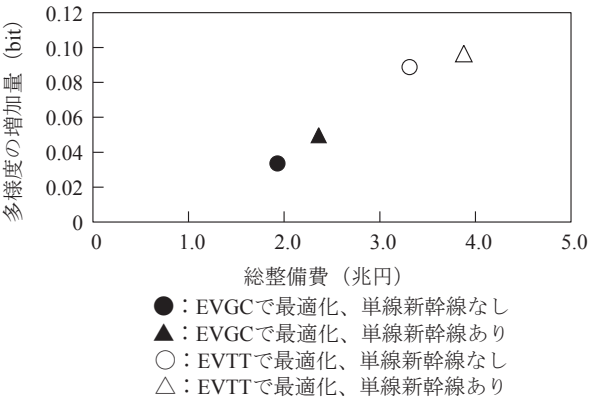

図 5：多様度の増加量の比較

交流の多様度の計算については（波床, 2017b）と同じ方法で計算した。すなわち、同研究で推定済みのパラメタを用い、まず次式（4）で都道府県間交流量を推計する。

$$F_{ij} = \kappa P^{\alpha}_{i} P^{\beta}_{j} \exp(\gamma EVTT_{ij}) \quad (4)$$

F_{ij}：ij 間の旅客流動量（千人 / 年）
P_i, P_j：都道府県人口（千人）
$EVTT_{ij}$：ij 間の EVTT（分）
$\alpha, \beta, \gamma, \kappa$：パラメタ

文献（波床, 2017b）では、全国幹線旅客純流動調査（2010 年秋期平日、鉄道と航空の合計値）、2010 年の都道府県人口（北海道は 4 分割）、2010 年の EVTT を用い、決定係数 0.769、$\alpha = 1.078$（44.8）、$\beta = 1.075$（44.8）、$\gamma = -0.00568$（–32.0）、$\delta = -11.1$（–35.0）の結果（括弧内は t 値）を得ており、こ

れらの値を用いる。

次に、F_{ij} の分布についての多様度を求める。全 OD に対する各 F_{ij} の比率を求め、これを各 OD の生起確率 P_k とすることで次式（5）を用いて情報量相当の値が計算できる。これにより、分布の多様度指標として定量化できる。

$$H = -\Sigma (P_k) \log_2 (P_k) \quad (5)$$

H：平均情報量（bit）
P_k：k の生起確率

図 5 において、EVGC を用いて最適化した結果のうち、何もしない場合の交流の多様度が 8.95 bit であったものが、▲印（単線新幹線あり）では 9.00 bit へと約 0.05 bit 増加した。一方、●印（単線新幹線なし）では多様度の増加は約 0.03 bit であった。同様に、EVTT を用いて最適化した結果では、△印（単線新幹線あり）では約 0.10 bit の増加であったが、○印（単線新幹線なし）では約 0.09 bit の増加であった。このように、単線新幹線という整備方法の選択肢の追加により、交流パターンの多様度も増大することが確認できる。

6. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では単線方式による新幹線システムは、どのような区間で採用するのが適当かについて分析を行った。新幹線整備前の表定速度と、各種整備手法の整備単価や整備後の表定速度を用いて分析した第 3 章の結果では、全ての速度域においてスーパー特急方式よりも単線新幹線システムの方が旅客数の下限値が小さいこと、整備前の在来線の表定速度が 100 km/h 以下の場合においてフル規格に比べて少ない利用者数でも成立する傾向にあることなどがわかった。

また、GA を用いて実際の路線網における適用可能性について探索した第 5 章の結果からは、単線新幹線はフル規格線に比べると安価であるものの表定速度が劣るため、長距離区間には向かず、比較的利用者の少ない短距離の支線的な役割の路線に向いていることなどがわかった。さらに全国的な交流に与える影響について考察した結果、整備方式として単線新幹線システムを整備メニューに追加する方が、全国的な移動に要する総所要時間や総一般化費用をより多く減少させることが可能であり、交流の多様度も増すことができることがわかった。

具体的に単線新幹線システムの導入を検討する場合には、列車の交換設備（駅や信号場）の位置や部分複線区間（信号場）の長さが具体的な路線の状況によって変化し、それによって建設コストや表定速度も変わる。このため、本研究の分析結果はあくまでも代替案作成の際の参考（単線新幹線システムを考慮の際の選択肢に加える価値がある）であり、新幹線の建設手法の選択と建設の可否判断は具体的な状況に基づいて個別に判断すべきである。

なお、繰り返しになるが本研究は単線新幹線システムの特徴を捉える目的で実施されており、恣意的であるとの誹りを避けるために仮想のネットワークを使わずに実際の幹線鉄道網を使って分析を行ったが、GA の出力した結果は以下の点で必ずしも幹線鉄道網の実現可能な望ましい姿をそのまま示しているとは限らないことに留意する必要がある。すなわち、実際に新幹線が整備されると誘発需要が発生するが本研究では考慮されていないこと、沿線の地域変化に関する効果が織り込まれていないこと、社会的便益が発生したとしても鉄道事業者に必ずしも還元されるわけではないので事業経営が保証されているわけではないこと、また逆に旺盛な需要のある区間では社会的便益が小さくても事業経営的には新線経営が成立しうる場合があること、日本では習慣的に地域交通に対する都市間交通からの内部補助が当然と思われていること、社会的割引率の設定に議論の余地があること、経済合理性以外の議論が存在すること、などである。

謝辞

本研究は公益財団法人大林財団の平成 28 年度研究助成を受けて実施されている。ここに感謝の意を表したい。

引用文献

天野光三・中川大・加藤義彦・波床正敏（1991）．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，Vol. 9，69-76.

大分市（2016）．大分市豊予海峡ルート調査業務報告書．http://www.city.oita.oita.jp/www/contents/1485078675058/index.html．（2017 年 8 月 29 日取得）

交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会整備新幹線小委員会（第 1 回）（2012）．（資料 4）整備新幹線（未着工区間）の整備効果等について．http://www.mlit.go.jp/common/000204608.pdf．（2017 年 8 月 29 日取得）

鉄道・運輸機構（2009）．平成 20 年度事業評価監視委員会参考資料．p.33．http://www.jrtt.go.jp/01Organization/org/pdf/jk20-7.pdf．（2017 年 8 月 29 日取得）

波床正敏（2009）．GA を用いた都市間鉄道網計画策定支援システムの計算効率化に関する研究．2009 年度土木情報利用技術論文集，Vol. 18，223-234.

波床正敏・中川大（2015a）．高速鉄道網の最適化試算結果に基づく国鉄解体後の幹線鉄道政策に関する事後考察．土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 71，I_629-I_641.

波床正敏・中川大（2015b）．整備スキーム改善による幹線鉄道網における地域間交流活性化に関する定量的研究．土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 71，I_725-I_736.

波床正敏（2016）．新幹線における暫定整備計画の課題と改善方策―単線方式による新幹線システムの可能性―．実践政策学，Vol. 2，No. 2，151-160.

波床正敏・向井智和（2017a）．単線方式による新幹線システムの建設単価推計―ローコスト新幹線システムの整備費用について―．実践政策学，Vol. 3，No. 1，61-68.

波床正敏（2017b）．地域間交流に関する多様度の計測と地域構造への影響に関する研究．土木計画学研究・講演集 56，CD-Rom.

Abstract

In recent years, the second-phase Shinkansen construction projects of the Development Plan have progressed, and construction of the Basic Plan lines began to be attracted attention as next projects. However, construction of new line with full-standard can provide high functionality but its cost is too high. Other low-cost installation methods have problems that they can supply only low-quality services, therefore, those are hardly to say high speed railways. Under such surroundings, the single-track Shinkansen system is proposed as a low-cost approach for local Shinkansen with certain quality. First, based on the results of a series of researches, a preliminary analysis was made from the scheduled speed of conventional railway, the unit price of each construction method, and the scheduled speed of Shinkansen. As a result, it was found that the single-track Shinkansen system needs less passenger to establish the system than the Super-limited express method. And also it was found that when the scheduled speed of parallel conventional line is slower than 100km/h the new system tends to require fewer passenger than full-standard Shinkansen. The next, as a result of searching what kind of section the single-track Shinkansen system can be applied in the actual trunk line railway network of Japan with genetic algorithm, it was found that the single-track system is suitable not for long distance sections but for the short-distance branch lines with fewer passengers. The reason is that the new system inexpensive compared to the full-standard system but the scheduled speed is inferior to the old system.

（受稿：2018 年 4 月 8 日　受理：2018 年 6 月 14 日）