

工程管理手法を参考とした 同期運行ネットワークの実現手順に関する研究

波床 正敏¹・高野 晋作²・田中 辰弥³

¹正会員 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp (Corresponding Author)

²非会員 大阪産業大学 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: s19k041@ge.osaka-sandai.ac.jp

³非会員 大阪産業大学 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: s19k051@ge.osaka-sandai.ac.jp

本研究ではPERT/CPMを参考とし、「結節点駅で必ず短時間で乗換が実現する(同期運行ネットワーク)」条件を最小費用で構築する手順の確立が目的である。PERT/CPMは大別して余裕日程の消費段階とその後の追加的な改善段階に分けられ、前者の段階ではクリティカル作業とフロートの確認、フロートを消費しながらクリティカル作業の日程短縮が繰り返し行われる。一方、同期運行ネットワーク構築でも、結節点での待ち時間解消段階とその後の追加的な改善段階に大別できる。前者の段階では、結節点間の時間的距離と運行周期からPERT/CPMでのフロート相当の待ち時間を求め、次に待ち時間を解消しつつ既に待ち時間が解消されたリンクの所要時間短縮を繰り返し実施することにより、本研究の目的が達せられることを示した。

Key Words : process control method, trunk railway, connection, network improvement, optimisation

1. はじめに

(1) 研究の背景

CO₂排出について、日本では2030年までに2013年比46%削減、2050年までにカーボンニュートラルを実現させる方針が出されている^{注1}が、運輸部門全体における削減は1990年以降進まず、特に自家用車は増加している^{注2}。電動車の導入により内燃車比で排出量半減が期待されているが、開発が飽和状態に達してしまっている水力や社会的理解の得にくい原子力等で発電された電力の利用を前提とせざるを得ない側面があり、実際には前途多難である。水素やアンモニアの利用も考えられているが、現在のところ安価かつゼロ・カーボンでこれらを大量生成できる状況にない。

一方、鉄道利用は、新規の技術開発が無くとも自家用車比で排出量を数分の一程度へと大幅低減可能である。特に、一度の移動で日常交通の数十倍の距離になる都市間交通では、鉄道利用促進は現実的な解であるとともに、既設の鉄道線での利用増については、追加的なCO₂排出が極小であることも期待できる。だが、東海道新幹

線のような例外を除き、特に自動車交通との厳しい競合にさらされている地域ほど都市間鉄道の運転本数は少なく、列車をタイミング良く乗り継げるかどうかの利便性を大きく左右するという状況にある。

世界に目を向けると、主要乗換拠点駅で必ず短時間で乗換を実現させる鉄道政策として有名なものとしてはスイスが挙げられる。1980年代以降、まず主要幹線で等間隔運転が導入された後、Bahn 2000 (Rail 2000) 政策として実施され、2000年代後半には概成し、幹線鉄道網の利便性を向上させたり。現在は2030年代の完成を目指し、容易な乗換を維持しながら、さらなる移動時間短縮を目指している²⁾。また、隣国ドイツも同様の政策(BVWP 2030)を導入しつつある³⁾。これらの基本システムは次のとおりである。

- a) 列車の運行間隔をそろえる。
- b) 駅間所要時間を路線整備により若干短縮することにより、図-1の各都市の駅では毎時0分と30分(または15分と45分)に全方面との乗換を確保する。

これにより、スイスでは利用者数を伸ばすとともに鉄道

の分担率を増加させている^{2),4)}。乗換を実現するための投資は、拠点駅間を30分の整数倍よりも少し短い時間で結べるだけの最小限の額となる。整備目標は幾何的条件の達成になっており、高速新線の新規建設がわずかで済むなど少額投資で大きな効果を得る手法である。この方法は、必ずしも旅客が多い路線を最優先で整備するというルールになっているわけではない。

日本の幹線鉄道整備では、社会的な費用便益分析だけでなく営業主体の経営効率化も求められるなど、強い効率性の観点が導入されている。だが、このような経済的な効率性の追求は大都市圏への集中を助長する可能性もあり、発想の転換が必要である。スイスのBahn 2000導入時にも特定地域への集中を避けるべきとの世論の背景があり^{2),4)}、独特の鉄道政策導入につながっている。このBahn 2000には以下のような特徴があり、わが国の幹線鉄道政策においてもこの政策を参考とすることは意義が大きい。

- a) 必ずしも効率第一の視点でなく、均衡ある発展への配慮を背景としている政策である。
- b) 路線改良を多用し、新線建設が比較的少ない政策なので、少コストである。
- c) 高速新線依存のフランス等の政策と比べて効果的に移動時間短縮を実現している。

(2) 本研究の視点と目的

日本では幹線鉄道整備において強い経済合理性が求められるため、そのような社会の要請に対応して既存の研究も経済合理性の観点からのものがほとんどである。最適な路線網とは費用対効果の大きな路線網から順に整備する方法により実現されるべきとの視点が一般的と思われる。しかし、前述のようにスイスやドイツの幹線鉄道政策のように「乗換拠点駅で必ず乗換が成功する」には、路線網の幾何学的条件の充足を目指すことになり、必ずしも経済合理性の観点における最適解ではなく、根源的な視点が異なっている。

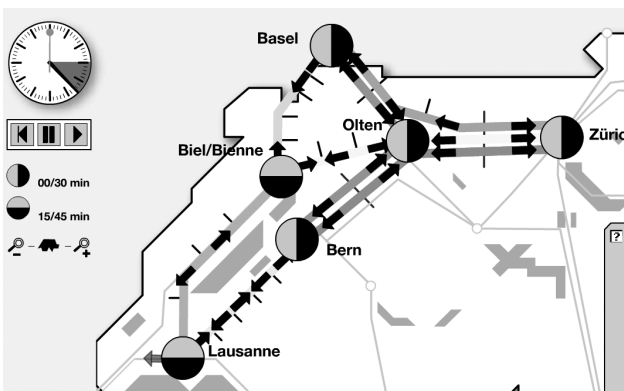


図-1 Bahn 2000の運行システム注3)

さて、「乗換が成功する」状態は「多方面から同時に列車が到着し、全列車の到着後、列車を各方面に出發させる」(図-2)ということでもあり、「必要な先行作業がすべて完了した後に後続作業を開始」(図-3)という工程管理の基本的な考え方が応用できる。本研究はこの点に着目したものであり、既存の研究と手法が大きく異なる。

本研究は、「乗換拠点駅でも必ず短時間で乗換が実現する」条件を最少の費用で達成するような幹線鉄道網改善を図る方法として、PERT/CPMを参考とした最適化の手順を確立することが目的である。

2. 幹線公共交通網の最適化に関する研究

(1) 航空網の最適化など

本研究は工程管理手法を参考にした幹線鉄道網整備計画手法の確立を目指したもの(鉄道建設工事の工程管理に関するものではない)である。幹線公共交通システムの最適化に関する研究としては、航空ネットワークに関する研究が30年以上前から行われており、旅客の乗り継ぎについても考慮事項となっているが、多くはサービス供給側の効率性の観点からの機材スケジューリングについてのものであり、近年でもそのような研究⁵⁾が行われている。利用者の観点から乗り継ぎに着目した研究^{6),7)}もあり、文献⁶⁾ではGAを用いて航空や鉄道などの複数モードにまたがるスケジューリングが扱われ、また文献⁷⁾ではコミュータ航空を活用した北海道内における航空のハブシステム構築が扱われている。しかし、計画結果がインフラそのものの計画に反映されるわけではなく、また工程計画手法の応用でもない。

(2) 工程計画の考えを取り入れた研究

工程計画の考え方を交通計画に取り入れた研究としては、駅構内での列車の入れ替え作業スケジュールについて

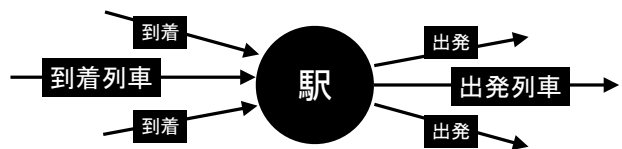


図-2 駅での乗り継ぎのイメージ

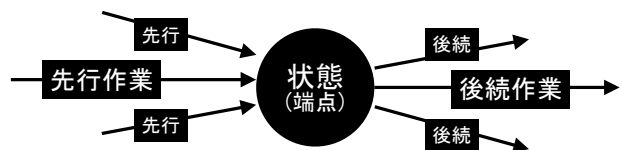


図-3 工程管理における先行作業と後続作業

て局所的探索とPERTを組み合わせた方法についての研究⁸⁾、鉄道網における列車遅延の伝播をクリティカルパスの観点から定量評価した研究⁹⁾、PERT/CPMと類似する手法を用いて上下列車の交換設備が限定されている単線鉄道を想定しながら列車遅延に対する運行ダイヤの堅牢性を評価した研究¹⁰⁾、スロバキア国鉄における車扱い貨物輸送(コンテナではなく、貨車単位で連結する列車を替えながら輸送する方法)をCPMを用いて最適化する研究¹¹⁾などが見られる。いずれも整備済みのインフラ上における列車等の動きに関するものであり、工程計画手法をインフラ計画に反映させるような視点にはなっていない。

(3) 乗り継ぎ等を考慮した幹線鉄道網の最適化

一方、交通インフラ計画の研究については、(極めて多数あるので詳細は省略するが) 所要時間や運賃等の犠牲量の総量を最小化する最適化の研究がほとんどである。総犠牲量の最小化方針は明快な方法ではあるものの、大都市間相互などの流動の多いODの影響を強く受けるため、局所的な改善しかできない場合がほとんどである。総犠牲量最小化において鉄道等の運行頻度や乗り継ぎの成否を考慮できる所要時間指標¹²⁾を用いた研究¹²⁾などもあるが、これらの結果についても流動の多いODの影響が強い。

(4) 公共交通網における即時乗換が成立する条件

本研究は「乗換拠点駅でも必ず短時間で乗換が実現する」ような条件を満たすような最適化手法を確立することが目的だが、この条件自体は本研究の先行研究となっている研究¹³⁾で明らかにされており、このうち、本研究で参照する条件は以下の3点である。

- a) 乗継ぎ元と乗継ぎ先の運行間隔を等しくすること。
- b) 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。(図-4で、1番のノードから出発して一周して戻ってきた場合、発時刻と一周後の着時刻のタイミングを同期させるには、閉ループを一周する際の所要時間の和 ΣL は運行周期 T の整数倍になる。)
- c) 交通結節点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。(図-5で交通結節点Xから出発して別の結節点Yに到達し、再びXに戻ってきた場合、最初の発時刻と往復後の着時刻のタイミングを同期させるには、往復の所要時間の和 $2L_{XY}$ は運行周期 T の整数倍になる。)

このように基本的な条件は明らかになっているものの、

条件を満たすための路線改良はどうすれば効率的かつ確実かについての手順は明確でなく、課題が存在する。

3. 同期運行ネットワーク

(1) ノードとリンク

交通網をネットワーク表現する場合は、ノードとリンクで表現するが、表-1のようにノードは起終点や交通結節点、リンクはこれらを結ぶ交通路になる。これに対し、Bahn 2000のような交通結節点において必ず乗り継ぎができるような公共交通網(本研究では、各路線が同期して運行されることに着目して、以下同期運行ネットワークと呼ぶこととする)では、ノードは起終点や交通結節点であるものの、リンクは単にこれらを結ぶ交通路であるだけでなく、リンクで表現される路線の経路上にある小駅での乗降をも可能としている。単にノード間を結ぶだけならば最短経路木だけが重要であるが、同期運行ネットワークでは全てのリンクが意味を持っている(スイスにおけるBahn 2000政策の成功も広範囲に利便性を提供したことを背景としている)。このようにノードにおいて全ての路線からの到着を待って次の路線の運行に移るという点で、表-1のように同期運行ネットワークは工程計画でのPERT図におけるノードとリンクの関係に似ている。

(2) 時刻と経路

各ノードまでに要する時間については、同期運行ネットワークでは通常の交通ネットワークと同じく基本的に

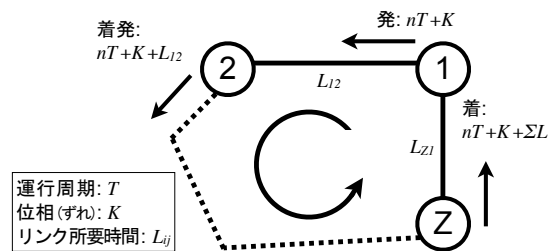


図-4 閉ループが存在する場合の条件¹³⁾

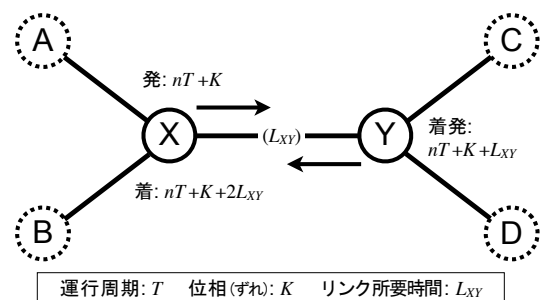


図-5 交通結節点間のリンク所要時間の条件¹³⁾

は最短経路探索で求まるものの、交通結節点における乗り継ぎに着目すると、当該ノードに到着する最も遅い交通便の到着を以て次の出発時刻とするという点で工程計画に似ている。

起終点間の経路についても、同期運行ネットワークでは通常の交通ネットワークと同じく基本的には最短経路探索で求まるものの、乗り継ぎに着目するならば結節点における余分な乗り継ぎ待ち時間の無い経路が無駄のない経路ということになり、これについては工程計画のクリティカルパスに似た概念になる。

(3) ネットワークの改善

ネットワークの改善については、通常の交通ネットワークでは最短経路(木)を構成するリンクの改善が全体の改善につながり、同期運行ネットワークでも基本的には同じであるが、交通結節点における良好な乗り継ぎ条件を維持するためにはネットワーク全体を分割する断面での改善が必要な局面が存在するなどの点で工程計画のPCMと似た作業を要することがある。

4. 同期運行ネットワークの実現手順概要

(1) 実現手順の概要

工程計画のPERT/CPMの手順を参考にすると、同期運行ネットワークの実現手順は表-2に示すようになると考えられる。PERT/CPMの手順では、大きく分けて余裕日程の消費の段階と余裕日程が無くなった後の追加的な改善の段階に分けられる。前者の段階では、クリティカル作業の発見とフロートの存在の確認、およびフロートを消費しながらクリティカル作業の日程短縮による工程全体の日程短縮が繰り返し行われ、後者の余裕日程が無くなった段階では、PERT図の分断面での全体工程の短縮という追加的な改善を行い、これを繰り返す。

一方、同期運行ネットワークについても、交通結節点における待ち時間解消の段階と待ち時間が無くなった後の追加的な改善の段階に大別でき、スイスにおけるBahn 2000政策は前者の待ち時間解消段階を実現したものと捉えることができる。前者の段階では、結節点間の時間的距離と運行周期から、PERT/CPMでのフロートに相当する待ち時間を求めるとともに、待ち時間を解消しながら待ち時間の無いリンクの所要時間短縮を実施することが繰り返される。後者の結節点における待ち時間が

表-1 各ネットワークにおけるグラフ上の基本的な表現の違い

項目	交通ネットワーク	工程計画におけるPERT図	同期運行ネットワーク
ノード	起終点や交通結節点	工程途上の状態	起終点や交通結節点
リンク	結節点間の交通路 結節点間の移動	作業(状態間の遷移)	経路上の小駅での乗降 結節点間の交通路、結節点間の移動
リンク上の移動・実行	最短経路を構成するリンク群を経由する、起終点間の1回限りの移動。	ネットワークを構成する全リンク(作業)を一度ずつ実行。	ノード間の移動だけならば最短経路の考慮だけで十分であるが、Bahn 2000のようにネットワーク全体での乗り継ぎ利便向上を図るには、全リンクを一度ずつ実行する必要あり。
各ノードの時刻・日程	各ノードまでの最短経路により決まる。	当該ノードに到達するリンクのうち、最も遅い日程で決まる(最早節点時刻の場合)。	各ノードまでの最短経路により決まる。交通結節点での乗り継ぎに着目するならば、当該ノードに到達するリンクのうち、最も遅い到着時刻以降に乗り継ぎ先の出発が可能となる。
起終点間のルート	最短経路探索では、最短経路を構成するリンクのみが意味を持つ。	工程全体の日程は、クリティカルパスにより決まる。	最短経路探索では、最短経路を構成するリンクのみが意味を持つ。交通結節点での乗り継ぎに着目するならば、余分な待ち時間の無い経路がクリティカルパスに相当する。
ネットワークの改善	最短経路を構成するリンクの所要時間短縮により実現。	クリティカルパスを構成するリンクの作業日数の短縮。	乗り継ぎ条件維持のため、ネットワークを分割する断面での運行周期の半分の整数倍の改善、または単一リンクにおける運行周期の整数倍の改善。

表-2 PERT/CPM の概略と同期運行ネットワークの実現手順概略

PERT/CPM の概略		同期運行ネットワークの実現手順概略	
1)	PERT図を作成する	1)	初期状態のネットワークを作成する。
2)	PERT計算を行い、フロートの存在を確かめながら、クリティカル作業を求める。	2)	結節点間のリンク所要時間と結節点の発時刻の差(運行周期)から待ち時間(フロート相当)を計算する。一般的にこの初期状態ではクリティカル作業に相当する待ち時間がゼロのリンク群は存在しない。
3)	フロートを消費しつつ、クリティカル作業を短縮するような費用最小の切断集合を求める。逆向きの作業で伸長が可能なのは負の費用として計上。	3)	待ち時間(フロート)を解消しつつ、リンク所要時間の短縮を実施する費用最小の切断集合を求める。初期状態に比べてリンク所要時間の短縮量の合計が運行周期Tを超える場合、Tだけ伸長させて負の費用を計上する。一定の条件下で単リンクの短縮も可能。
4)	前段階で求めた断面で全体工程を短縮する。まだフロートが残存している場合は2)へ戻る。	4)	前段階で求めた断面で全体工程を短縮する。まだフロートが残存している場合は2)へ戻る。
5)	費用が最小となる切断集合を求める。逆向きの作業で伸長が可能なのは負の費用として計上。全カットセット値が∞の場合は終了。	5)	費用対効果が最大となる切断集合を求める。切断面における費用の全カットセット値が∞の場合は終了。一定の条件下で単リンクの短縮も可能。
6)	前段階で求めた断面で全体工程を短縮する。5)へ戻る。	6)	前段階で求めた断面でネットワーク全体を短縮する。5)へ戻る。

解消された段階では、ネットワークの分断面での全体工程の短縮(または一部の単リンクの改善)という追加的な改善を行い、これを繰り返す。

(2) 初期状態の同期運行ネットワーク

同期運行ネットワークの改善手順の初期状態を図-6に示す。全ての交通結節点(ノード)が乗り継ぎ拠点であるとともに閉ループを形成している様子である。2章で示した条件「b)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」と「c)交通結節点間のリンク走行時間は、運行周期の半分の整数倍」の両方を確実に満たすには、全てのノードにおける出発時刻を運行周期 T の整数倍に合わせることで実現できる。

このような初期状態におけるリンク所要時間は必ずしも運行周期 T の整数倍ではないため、ノード間の出発時刻の差とリンク所要時間は一致せず、待ち時間が生じる(PERT/CPMでのフロートに相当する)。

(3) 同期運行ネットワークの改善原則

前述のb)c)の条件を満たしつつ、待ち時間解消とリンク所要時間の短縮を実施するには、図-7に示すように2つの方法がある。

一つはリンク単体を対象とするものであるが、この場合は図-5のように両端が交通結節点であっても、条件b)があるため、運行周期 T の半分の整数倍(奇数倍)の短縮はできない。このため、単リンクの短縮は運行周期 T の整数倍である必要がある。

もう一つは複数のリンクを同時に対象とする場合である。この場合は運行周期の半分の整数倍(奇数倍)の短縮が可能である。任意の断面に対して閉ループは必ず偶数回横切するため、1周した場合の所要時間の和が運行周期の整数倍という条件を必ず保持できる。

5. 待ち時間の解消

(1) 結節点間の待ち時間解消イメージ

前述のように待ち時間の解消段階はPERT/CPMのフロートの解消段階に対応するが、PERT/CPMでは1日単位でフロートを消費したり作業日程を短縮できるものの、同期運行ネットワークでは運行周期 T の半分(もしくは運行周期 T)の短縮が最小単位である。このため、短縮量とフロート(待ち時間)との関係によって図-8~図-11のような状況が発生する。

図-8は $T/2$ の短縮断面に対して通過するフロート(待ち)が十分な大きさがあり、待ち時間の短縮だけで断面にお

ける時間短縮が実現できるケースである。図-9はフロートの消費(待ち時間の解消)だけでは結節点間の時間短縮が $T/2$ に達しない結節点間が生じるケースであり、リンクそのものも短縮する必要があり、路線改良等の費用が発生する。図-10も同様である。

図-11は単リンクのみを短縮するケースであり、 T の短縮が必要であるため、フロートの消費(待ちの解消)だけでは結節点間の時間短縮が T に達しないため、リンクそのものも短縮する必要がある。この場合も、路線改良等の費用が発生する。

(2) 短縮断面の選定

待ち時間解消のための短縮断面の選定方法は、PERT/CPMにおけるフロート解消のための断面の選定方法と基本的には同じであるが、PERT/CPMの場合は起点方と終点方を分断するようなあらゆる断面を想定するのに対し、同期運行ネットワークの場合は起点と終点が固定されていないので、図-12のようにネットワークを二分するあらゆる(待ちを解消する)断面を想定する。また、リンク単独(単一の結節点間)での短縮も認めている。

図-8~図-10のような状況を考慮しながら各断面での短縮に要する費用をそれぞれ計算し(図-11のような単独での短縮の場合についても費用を計算し)、これらのうちの最小費用の断面で短縮することで待ちを解消する。

断面での短縮に要する費用計算の際、(例えば既に新幹線化されているなど)これ以上の時間短縮の余地がな

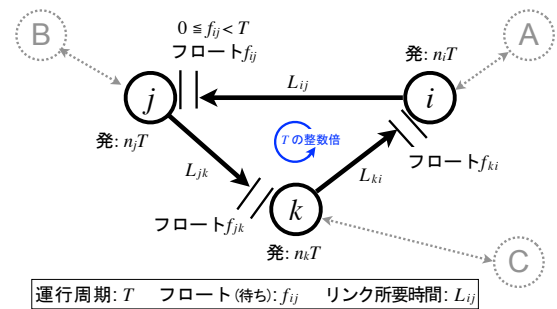


図-6 初期状態の同期運行ネットワーク

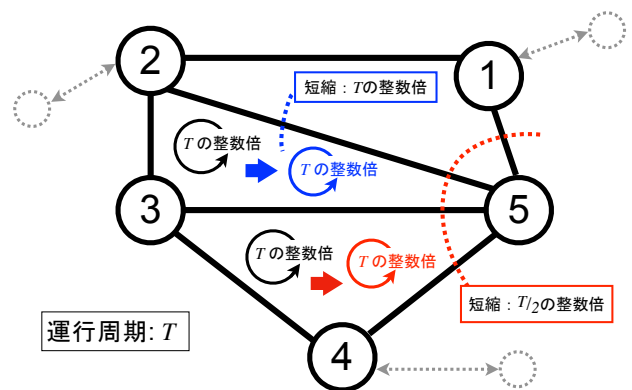


図-7 閉ループを含む場合の改善原則

1) $T/2 \leq f_{ij} < T, T/2 \leq f_{ki} < T$ の場合

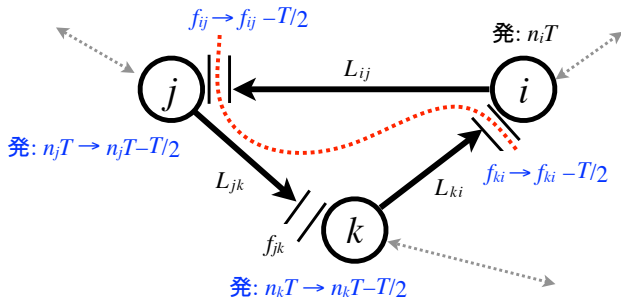


図-8 フロート(待ち時間)の解消に向けた改善(1)

2) $0 \leq f_{ij} < T/2, T/2 \leq f_{ki} < T$ の場合

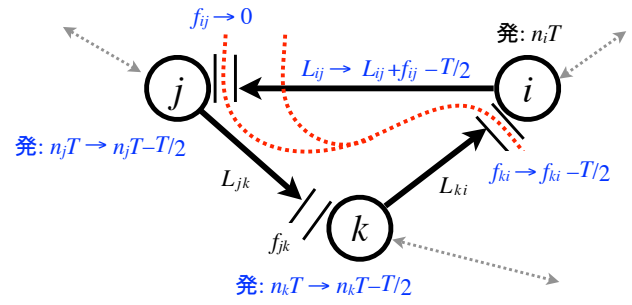


図-9 フロート(待ち時間)の解消に向けた改善(2)

3) $0 \leq f_{ij} < T/2, 0 \leq f_{ki} < T/2$ の場合

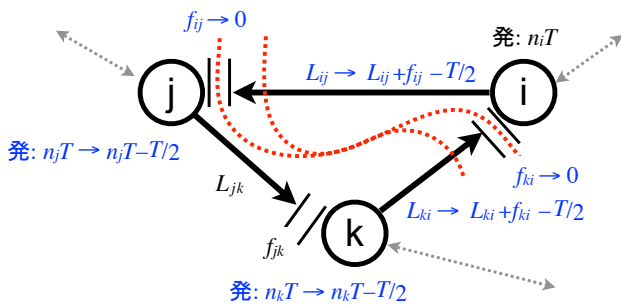


図-10 フロート(待ち時間)の解消に向けた改善(3)

4) 単リンクのみが対象の場合

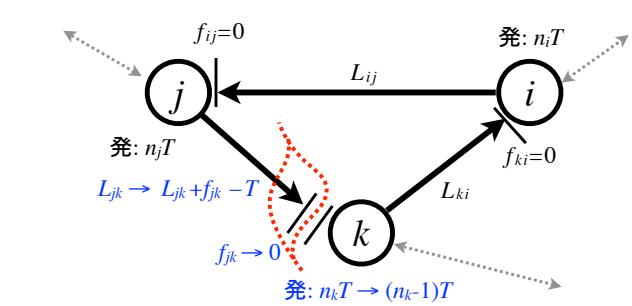


図-11 フロート(待ち時間)の解消に向けた改善(4)

い状況の場合はPERT/CPMの場合と同じく費用を ∞ に設定する。最小費用の断面を求める際には、図-13のような双対ネットワークの利用も可能である。

(3) 伸長させる場合

前述のような断面もしくは単リンクにおける短縮はすべての待ち時間が解消されるまで繰り返し行うが、特定のリンクについては待ち時間解消目的段階では繰り返しの短縮によって過剰な短縮を実施してしまうことがある。例えば、図-14のように $T/2$ ずつ結節点間を短縮する場合、 L_{ij} が $L_{ij}+f_{ij}-T$ まで2段階短縮することは容認される範囲である(伸長は T 単位なので、ここから伸長させると図の一番上の待ち時間が発生している段階まで戻ってしまう)が、 $L_{ij}+f_{ij}-3T/2$ まで3段階短縮する必要はなく、 $L_{ij}+f_{ij}-T/2$ までで十分である。このような場合は3段階目の短縮と2段階の伸長(もとに戻す)を同時に行い、その際の費用も第2段階の短縮費用 C_2 をマイナス計上(= $C_3-(C_2+C_3)$)する。

(4) 終了条件

短縮断面の選定(伸長させる場合を含む)と選定した断面での短縮を繰り返し、全ての待ち時間(フロート)が解消されたら待ち時間の解消段階は終了である。もしくは、待ち時間(フロート)が解消されていない箇所が残存していても、全ての短縮断面において費用が ∞ になった

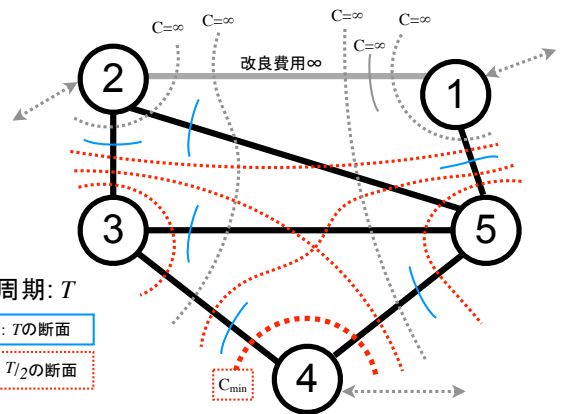


図-12 短縮断面の選定

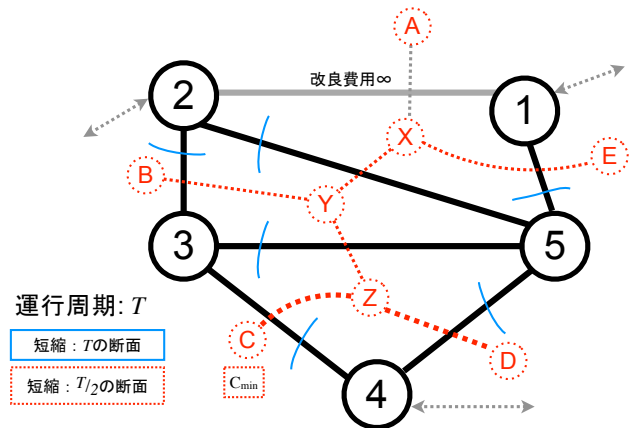


図-13 短縮断面の選定(双対ネットワーク利用)

場合は終了である。

6. 待ち時間の解消段階手順例

本章では同期運行ネットワークにおける待ち時間解消段階の手順について、数値設定を行って解消作業の例を示す。なお、数値やネットワークの形状は例示用のものであり、実際のネットワークとは異なる。

(1) 想定するネットワークと運行周期の設定

図-15に本章で想定するネットワークを示す。全部で7リンク5ノードで構成され、各ノードとも3方向以上につながる交通結節点である。このうち、1-2-3-4の区間は高速鉄道を想定しており、これ以上の時間短縮が出来ないものとする。運行周期は全路線とも $T=30$ 分の等間隔運転を想定する。このネットワークにおける初期状態(第4章(2))は図-16のようになり、各ノードとも毎時0分、30分の発車時刻とすると、路線により2~25分の待ち時間を生じている状態である。

(2) 路線改良方法の設定

各区間とも改良の段階を、 $T/2$ の整数倍に揃えた場合、さらに $T/2$ ずつの短縮をした場合について検討し、改良費用を設定する。本章での説明では表-3のような費用を設定した^{注5)}。1-2-3-4の区間は既に高速鉄道化されているため、および区間1-5については既に十分な在来線改良が実施されているため、それぞれ現状以上に時間短縮が困難であるとして時間短縮時の費用を ∞ に設定した。また、区間1-5について高速鉄道の建設を容認した場合の費用や所要時間についても計算しており、表-3のような値とした^{注6)}。

(3) 待ち時間解消手順

単リンクにおける運行周期 T の短縮もしくはネット

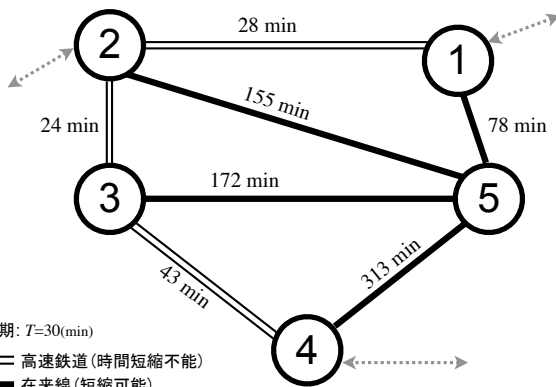


図-15 想定するネットワーク

ワークを二分する断面での $T/2$ の短縮を繰り返し実施するが、最初は図-17のように区間3-4および区間4-5に存在する待ち時間の消費($T/2$ の短縮、図-8のような作業)である。この場合の費用は0であり、実施によってノード4での発車時刻が毎時0分、30分から毎時15分、45分へと変化する。

次の作業は単リンクの改良費用もしくは断面における改良費用が最も小さいものを選ぶと、図-18のように単リンクである区間2-5における待ち時間の解消および所要時間の短縮(合計 T の短縮、図-11のような作業)である。この場合の費用は、表-3より11億円になる。

その次の費用最小のものを選ぶと、図-19の図中の単リンク区間3-4における待ち時間の解消および所要時間の短縮(合計 T の短縮、図-11のような作業)であり、この場合の費用は15億円と33億円の計48億円になる。

さらにその次の費用最小のものを選ぶと、図-19の図

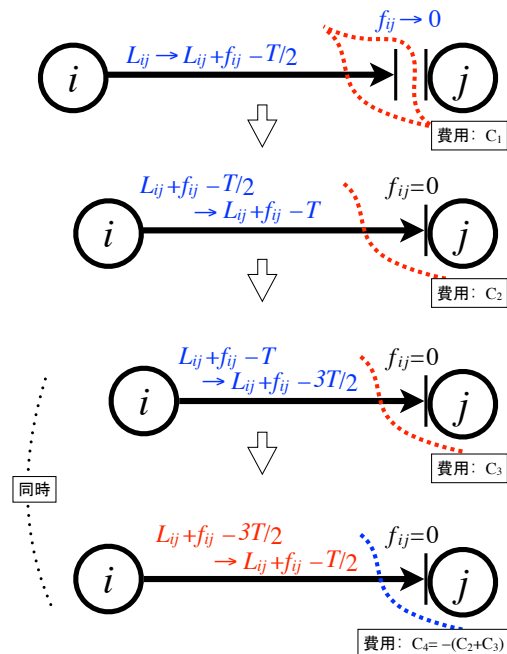


図-14 伸ばさせるケース (待ち時間解消段階)

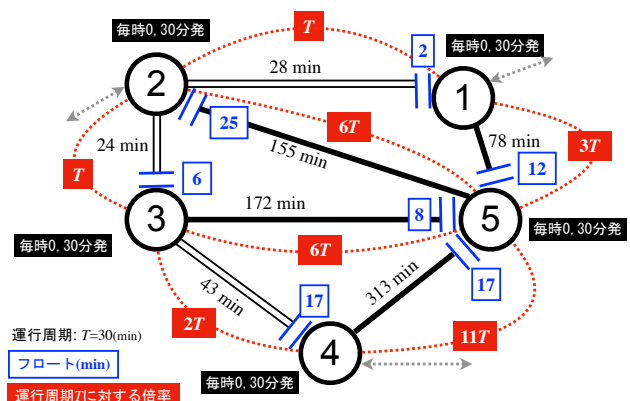


図-16 初期状態

表-3 区間別路線改良費用の設定^{注5),注6)}

区間	現行	短縮一段	短縮二段	短縮三段	備考
	(上段) (下段)	所要時間 費用	所要時間 費用(増分)	所要時間 費用(増分)	
1—2	28分 0億円	15分 ∞	— —	— —	既に高速鉄道
1—5	78分 0億円	75分 ∞	— —	— —	在来線の改良限界
	78分 0億円	40分 12,500億円	25分 ∞	— —	高速鉄道建設
2—3	24分 0億円	15分 ∞	— —	— —	既に高速鉄道
2—5	155分 0億円	150分 11億円	135分 +33億円	120分 +33億円	在来線改良
3—4	43分 0億円	30分 ∞	— —	— —	既に高速鉄道
3—5	172分 0億円	165分 15億円	150分 +33億円	135分 +33億円	在来線改良
4—5	313分 0億円	300分 28億円	285分 +33億円	270分 +33億円	在来線改良

中の単リンク区間4-5における待ち時間の解消および所要時間の短縮(合計 T の短縮、図-11のような作業)であり、この場合の費用は28億円に33億円を加えた計61億円になる。

在来線改良だけで実施した場合、全ての断面における費用は無限大となり、ここで終了である。単リンクの改良は可能であるが、既に待ち時間そのものは0になっているので、待ち時間解消段階としてはやはり終了である。結果をまとめると図-20のようになり、第2章で示したb)c)の条件を満たすものの、改良が不能な区間1-2-3-4および区間1-5にそれぞれ待ち時間が残存する。

(4) 区間1-5の高速新線建設を容認する場合

前節では区間1-5については既に十分な在来線改良が実施されていることとして待ち時間解消例を示したが、区間1-5に高速鉄道を建設した場合についても例を示す。なお、区間1-5に高速鉄道を建設すべきか否かについての検討そのものは本研究の範囲外である。

この場合、最初とその次については図-17および図-18と同じであるが、その次の手順は図-21のようになる。すなわち、区間3-5および区間4-5をそれぞれ単独で T の短縮(図-19)をする代わりに、区間1-5(高速新線建設、12,500億円)、区間2-5(路線改良、33億円)、区間3-5(待ち時間解消と路線改良、15億円)、区間4-5(同、28億円)の4つを同時に通る断面で $T/2$ の改善を図る(費用計12,576億円)。ただし、区間1-5については、高速新線建設により大幅に所要時間が短縮されるため、この部分だけ $T/2$ ではなく $3T/2$ の改善になる(断面での $T/2$ の改善と単リンクにおける T の改善の同時実施の形)。実施によってノード5での発車時刻が毎時0分、30分から毎時15分、45分へと変化する。

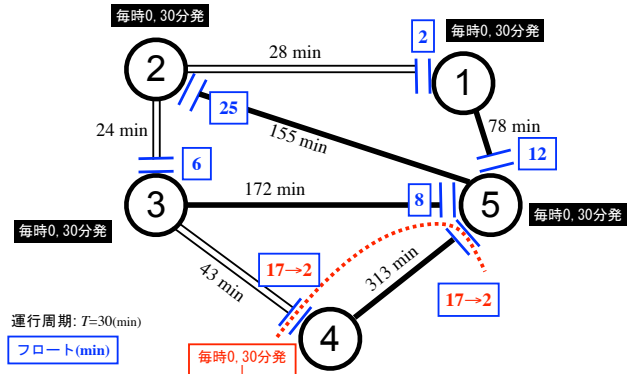


図-17 短縮第一段階

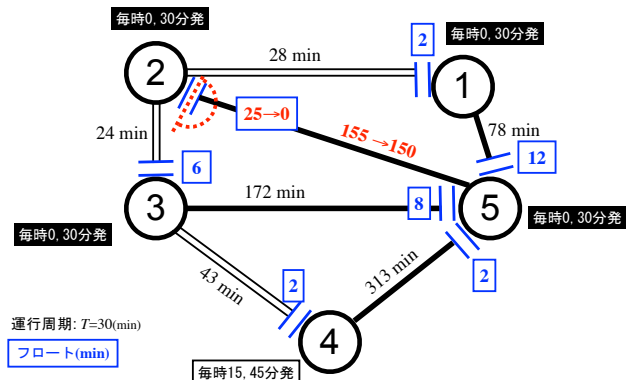


図-18 短縮第二段階

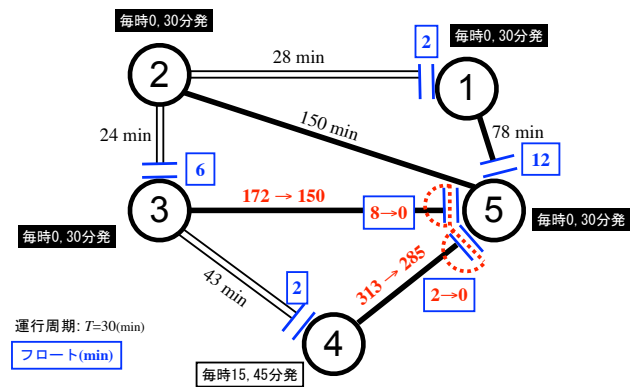


図-19 短縮第三段階

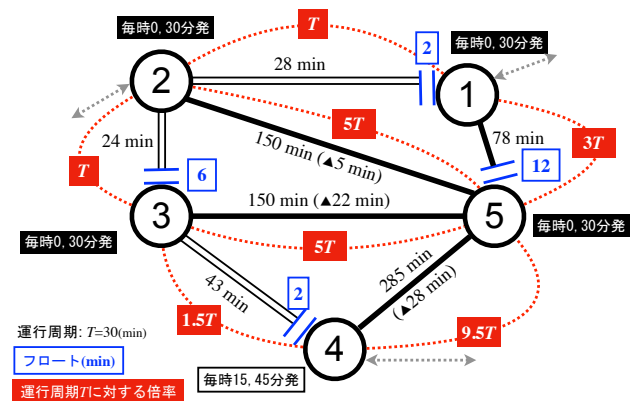


図-20 待ち時間解消段階完了時点

高速新線建設を容認した場合、上記の改善によって以後の全ての断面における費用は無限大となり、ここで終了である。結果をまとめると図-22のようになり、第2章で示したb)c)の条件を満たすものの、改良不能な区間1-2-3-4および区間1-5にそれぞれ若干の待ち時間が残存する。このような待ち時間については、現実的には各区間の運行時間に若干の余裕をもたせる、乗り継ぎ時のホーム間移動時間に充てるなどの活用方法が考えられる。

7. さらなる改善について

以上の手順は、最少の費用による同期運行ネットワークの幾何的条件の達成方法になっており、待ち時間解消段階の手順としては十分であるが、現時点でいくつかの今後の課題が存在する。以下、その概略を述べる。

(1) 追加的改善段階について

PERT/CPMの場合では、フロートの解消後(すべての作業がクリティカル作業になった後)も断面の選定とその断面における作業日程短縮が行われ、全ての断面において短縮に要する費用が ∞ になるまで繰り返される。

一方、同期運行ネットワークの場合についても同様の作業自体は可能であるが、さらに費用を投じ、より費用対効果の大きなネットワークを目指す場合には、費用最小の断面による改善ではなく、費用対効果の大きな断面での時間短縮を実施する必要がある。その際、本稿2章のb)c)の条件を同時に満たす必要があるため、短縮の最小単位は運行周期の半分の整数倍であることに変わりはない。このため、本稿5章の図-12や図-13のような短縮方法が考えられるが、その詳細の検討が必要である。

(2) 乗り継ぎ時間の確保方法について

本稿による改善手順の検討では理論的な手順を明らかにすることが目的のため、乗り継ぎ結節点駅におけるホーム間の移動時間については、リンク所要時間に暗に含めた形で検討を行っている。しかし、実際には乗り継ぎ結節点駅に集散している路線条件は対称的ではなく、例えば新幹線のように乗り換え客のための停車時間を十分に確保できないケースも存在する。このような場合は他路線にその分を移さなければならないが、これに対する合理的な手順の確立が必要である。

(3) 運行頻度の違いの反映

本稿における手順の検討では、対象とするネットワーク全体で運行頻度が同じであることを想定しているが、実際には交通需要の多寡により部分部分によって運行頻

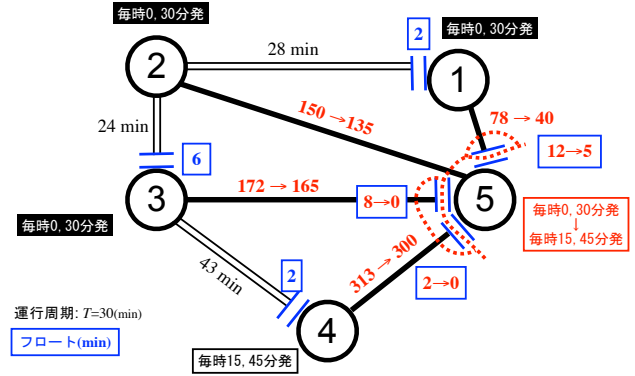


図-21 短縮第三段階(別シナリオ)

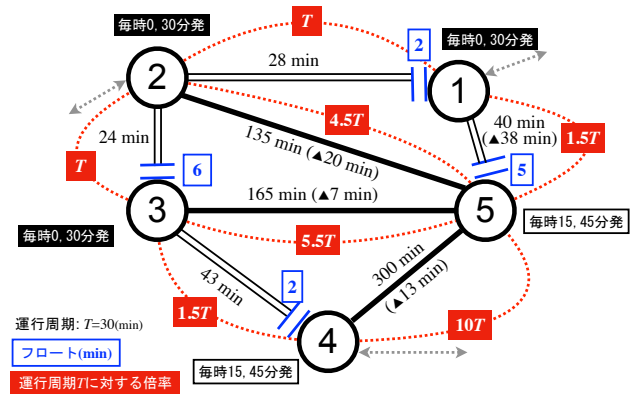


図-22 待ち時間解消段階完了時点(別シナリオ)

度が異なる。そのような場合におけるネットワーク全体の合理的な設計方法の検討も必要である。

(4) 地域交通ネットワークへの応用

本稿における検討では、対象として幹線鉄道網を想定しているが、原理としては公共交通網一般に応用できるため、低運行頻度の路線で構成される地域公共交通ネットワークなどにも応用可能と考えられる。

謝辞: 本研究は大阪産業大学令和4年度産業研究所分野別研究組織の研究結果の一部である。ここに感謝の意を表したい。

Notes

- 注1) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(令和3年10月22日、閣議決定), <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100285601.pdf>, 2022年7月4日取得。
- 注2) 国土交通省: 運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseissaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html, 2022年7月4日取得。
- 注3) SBB: Informationen-Bahn2000 (<http://mct.sbb.ch/mct/bahn2000>), 2006年11月18日取得(現在はリンク切れ)。
- 注4) EVTT (期待所要時間, Expected Value of Traveling Time) は以下の事項を考慮可能である。 a)最小の乗車時間。 b)最速便より遅い列車の追加的乗車時間。

c)経路が異なる場合の追加的乗車時間. d)出発が離散的なために生じる待ち時間. e)途中で乗り継ぐ場合の乗り継ぎ時間(全便考慮可, ホーム間の移動時間や列車乗り継ぎ時の待ち時間). また, 類似指標として時間の代わりに一般化費用を用いた EVGC(Expected Value of General Cost)もある.

注5) 日豊線大分以北の高速化事業において, 30.7億円(2020年度価格)の費用を投じて20分の所要時間短縮を実施していることを参考に, 時間短縮に要する費用を2.2億円/分と設定した.

注6) 西九州新幹線(武雄温泉以西)の建設単価(93.9億円/km)を参考に設定した. また, 運行速度は東海道新幹線ののぞみ号程度(表定速度200km/h)として設定した.

REFERENCES

- 1) 波床正敏, 中川大: 幹線鉄道におけるハブシステム構築の効果と意義に関する研究-スイスの鉄道政策 Rail 2000の効果分析を踏まえて-, 都市計画論文集, No.41-3, pp.839-844, 2006. [Hatoko, M. and Nakagawa, D.: A Study on Effects and Meanings of Hub System on Trunk Railway Network -on the Basis of Analysis Results of Swiss Rail 2000 Policy-, *Journal of the City Planning Institution of Japan*, No.41-3, pp.839-844, 2006.]
- 2) Mange, D.: Bahn-Plan 2050 Mehr Tempo für die Schweiz, *Rüegger Verlag*, 2012.
- 3) 波床正敏, 吉村晟輝: ドイツの幹線鉄道網発達に伴う主要都市間の移動時間変化, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol.74, No.5(土木計画学研究・論文集第35巻), pp. I_991-I_1004, 2018. [Hatoko, M. and Yoshimura, S.: An Analysis Of Traveling Time Between German Major Cities Accompanied By The Development Of Trunk Railway Network, *Journal of JSCE, Ser. D3 (Infrastructure Planning And Management)*, Vol.74, No.5, (*Infrastructure Planning Review*, No.35), pp.I_991-I_1004, 2018.]
- 4) Kräuchi, C., Stöckli, U. and Leuenberger, M.: Mehr Zug für die Schweiz (Die Bahn-2000-Story), *Schweiz, AS Verlag*, 2004.
- 5) 穴原大輔, 大森峻一, 吉本一穂: 離発着時刻調整を考慮した航空機の運航スケジュールリングに関する研究, 日本経営工学会論文誌, Vol.70, No.3, pp.147-156, 2019. [Anahara, D., Ohmura, S., and Yoshimoto, K.: Research on Flight Scheduling Considering Flight Time Arrangements, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.70, No.3, pp.147-156, 2019.]
- 6) 浦田康滋, 有村幹治, 田村亨, 梶谷有三, 斉藤和夫: GAを用いた複数モードのスケジュールリング, 土

木計画学研究・論文集, No.13, pp.821-826, 1996. [Urata, K., Arimura, M., Tamura, T., Masuya, Y., and Saito, K.: Application of GA Method to Multiple Modes Scheduling *Infrastructure Planning Review*, No.13, pp.821-826, 1996.]

- 7) 日野智, 岸邦宏, 相浦宣徳, 佐藤馨一: 北海道におけるハブ・アンド・スポーク航空路線の構築に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.4, pp.667-674, 2001. [Hino, S., Kishi, K., Aiura, N., and Satoh, K.: Development of Hub and Spoke System for Domestic Airlines in Hokkaido, *Infrastructure Planning Review*, Vol.18, No.4, pp.667-674, 2001.]
- 8) Tomii, N., Fukumura, N., and Zhou, L.: Development of Station Shunting Scheduling Algorithm, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.42, No.4, pp.190-194, 2001.
- 9) Goverde, R.: Railway Timetable Stability Analysis Using Max-plus System Theory, *Transportation Research Part B*, No.41, pp.179-201, 2007.
- 10) Gestrelus, S., Aronsson, M., Forsgren, M., and Dahlberg, H.: On the Delivery Robustness of Train Timetables with Respect to Production Replanning Possibilities, *2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure*, Computer and Information Sciences, 2012.
- 11) Dolinayová, A. and Loch M.: Determine the Optimal Route of the Routing of the Single Wagons Method CPM on the Network ŽSR, *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials."*, Vol. 9, Issue 10, pp.33-36, 2015.
- 12) 波床正敏, 中川大: 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, No.5(土木計画学研究・論文集第32巻), pp.I_629-I_641, 2015. [Hatoko, M. and Nakagawa, D.: An Ex-Post Facto Evaluation of Post-Jnr Policy on Trunk Railway Network Based on Network Optimization, *Journal of JSCE, Ser. D3 (Infrastructure Planning And Management)*, Vol.71, No.5, (*Infrastructure Planning Review*, No.32), pp.I_629-I_641, 2015.]
- 13) 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・論文集 Vol.24, no.4, pp.693-702, 2007. [Hatoko, M. and Nakagawa, D.: A Study on Conditions for Realizing Pulse Timetable System on Public Transportation Network, *Infrastructure Planning Review*, No.24, No.4, pp.693-702, 2007.]

(Received March 6, 2023)

A STUDY ON BUILDING PROCEDURE OF SYNCHRONOUS OPERATION NETWORK BASED ON PROCESS CONTROL METHOD

Masatoshi HATOKO, Shinsaku TAKANO and Tatsuya TANAKA