

鉄道インフラネットワークに対する最適維持 管理施策：3種類のヒューリスティクスの検討

水谷 大二郎¹

¹正会員 大阪大学特任研究員（常勤） 大学院工学研究科 地球総合工学専攻（〒565-0871 吹田市山田丘 2-1）
（研究当時：Research Associate, IBI, ETH Zurich（8093 Zurich, Switzerland））
E-mail:d.mizutani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

鉄道インフラネットワークは複数の異なる種類の施設（トラック、スイッチ、橋梁など）で構成される。それら施設に対して、維持管理費と劣化によるリスクを考慮し、適切な時期に適切な補修を行ってゆく必要がある。本研究では、鉄道インフラネットワークに対する維持管理施策最適化モデルを定式化する。その際、ネットワーク内の個々の施設のリスクは相互に影響し合い、最適解の候補の組み合わせ爆発が問題となる。それに対し、本研究では、3種類の基本的なヒューリスティクス（遺伝的アルゴリズム、擬似アニーリング法、蟻コロニー最適化）の適用を試みる。具体的には、2種類の規模の仮想的な鉄道インフラネットワークにおける維持管理施策最適化問題に対してそれらヒューリスティクスを適用し、それらの適用可能性を検証する。

Key Words : *optimal intervention program, railway network, genetic algorithm, simulated annealing algorithm, ant system algorithm*

1. はじめに

近年、社会基盤施設の補修、更新などの維持管理施策最適化のための研究が盛んに行われている。研究の発展過程として、i) 単一の施設に着目した維持管理施策最適化、ii) 同質の劣化特性、補修費用を持つ施設グループに対する維持管理施策最適化、iii) 異なる劣化過程、補修費用を持つ施設グループに対する維持管理施策最適化、iv) 異なる劣化過程、補修費用を持ち、それぞれの施設に対する維持管理施策による結果が相互に影響し合うような（例えば、隣接する施設の同時補修による便益を考慮するような）施設グループに対する維持管理施策最適化、と変遷している。前者 i), ii) に関しては、マルコフ決定過程による最適解の解析的な、あるいは、数値解析的な導出が可能であり、その簡便性からも多数の適用事例がある。一方、後者 iii), iv) に関しては、インフラネットワークに対する維持管理施策最適化と位置付けることができ、ネットワーク内の個々の施設に対して、異なる劣化過程、補修費用、補修による便益、iv) で言及した相互作用などを設定し、最適モデルが定式化される。その際、ネットワーク内の施設数、あるいは、考慮する年数が増加するに従い、最適維持管理施策の候補数が指数関数的に増加し、混合整数計画法、ヒューリスティクス、動的計画法などを用いた解法が提案されている。

後者に位置付けられる研究において、その成果を実装するためには、多様なシチュエーションを想定した、

最適化モデルを解くアルゴリズムの求解の安定性の検証も重要となる。そこで本研究では、ある仮想的な鉄道インフラネットワークの最適維持管理施策をヒューリスティクスを用いて求める問題において、維持管理施策の初期値をランダムに発生させ求解安定性を評価する。具体的には、16施設（6トラック、7スイッチ、3橋梁）で構成されるネットワーク、80施設（30トラック、35スイッチ、15橋梁）で構成されるネットワークそれぞれにおける維持管理施策最適化問題に対して、遺伝的アルゴリズム、擬似アニーリング法、蟻コロニー最適化の3種類のヒューリスティクスを、解の初期値をランダムに発生させながら、1,000回ずつ適用する。その上で、解析的に求められた最適維持管理施策とヒューリスティクスによる解を比較し、そのばらつきを評価する。それにより、それぞれのヒューリスティクスがどの程度の規模のネットワークにおいて安定的に最適解を求めることが可能であるか、さらには、最適解を求めることができない場合には最適解とヒューリスティクスによる解の差はどの程度なのかを定量的に事後評価することができる。

ノーフリーランチ定理としても知られるように、対象とするネットワークの性質（施設数、補修費用、損傷費用、リスク）に応じて、その維持管理施策最適化問題に適したヒューリスティクスの種類は異なるであろう。そのため、例えば、インフラネットワークにおける維持管理施策最適化問題（先述の iii) や iv) に該当する問題）を解くようなスタンドアローンアプリケーション

表-1 既往研究

文献	アルゴリズム	適用対象	リスク低減効果	維持管理施策の候補数
Madanat & Ben-Akiva, 1994 ¹⁾	隠れマルコフ決定過程	舗装	Yes	N/A
Lake et al., 2000 ²⁾	疑似アニーリング	鉄道トラック	Yes	5 ^{3,360}
栗野等, 2001 ³⁾	最適インパルス制御	一般構造物	Yes	N/A
Liu & Frangopol, 2004 ⁴⁾	遺伝的アルゴリズム	橋梁部材	No	2 ¹⁰⁰
織田澤等, 2004 ⁵⁾	マルコフ決定過程	港湾施設	No	N/A
青木等, 2005 ⁶⁾	マルコフ決定過程	トンネル照明施設	No	N/A
貝戸等, 2005 ⁷⁾	マルコフ決定過程	橋梁部材	No	N/A
Hajdin & Adey, 2006 ⁸⁾	整数計画法	高速道路施設	Yes	2 ²⁰⁹
Ouyang & Madanat, 2006 ⁹⁾	解析解	舗装	No	N/A
Oyama & Miwa, 2006 ¹⁰⁾	整数計画法	鉄道トラック	No	2 ^{6,984}
青木等, 2006 ¹¹⁾	マルコフ決定過程	トンネル照明施設	No	N/A
Durango-Cohen, 2007 ¹²⁾	FONC に基づく数値解析	一般構造物	Yes	N/A
Jido et al., 2008 ¹³⁾	積分方程式の数値解析	舗装	Yes	N/A
織田澤等, 2008 ¹⁴⁾	マルコフ決定過程	トンネル消火施設	No	N/A
Budai-Balke, 2009 ¹⁵⁾	遺伝的アルゴリズム, 疑似アニーリング, タブーサーチ	鉄道トラック	No	2 ^{1,768}
Lukas et al., 2010 ¹⁶⁾	蟻コロニー最適化	一般構造物	No	376,437,600
Fwa & Farhan, 2012 ¹⁷⁾	遺伝的アルゴリズム	舗装	No	600
小林等, 2012 ¹⁸⁾	混合マルコフ決定過程	舗装	No	N/A
Lethanh et al., 2014 ¹⁹⁾	シンプレックス法	舗装	No	2 ³²⁰
Torres-Machi et al., 2014 ²⁰⁾	反復的ヒューリスティクス	舗装	No	5 × 6 ²⁵
平川等, 2015 ²¹⁾	遺伝的アルゴリズム	トンネル照明施設	No	3.95 × 10 ¹⁹
Compare et al., 2015 ²²⁾	遺伝的アルゴリズム	ガスタービン	No	2 ¹⁴
Lee & Madanat, 2015 ²³⁾	遺伝的アルゴリズム	舗装	Yes	400 ⁹³³
Eicher et al., 2015 ²⁴⁾	混合整数計画法	高速道路施設	Yes	3 ⁵⁶⁷
Lee et al., 2016 ²⁵⁾	動的計画法	舗装	Yes	400 ⁹³³
Kielhauser et al., 2017 ²⁶⁾	遺伝的アルゴリズム	水道施設	Yes	2 ²⁸⁰

ンの導入を考えた場合、複数種類のヒューリスティクスによるアルゴリズムを同時に内包し、それらそれぞれで解を求め、最良の維持管理施策を選択する、というプロセスが考え得る。このような実用化に向けても、本研究で行うような、複数種類のアルゴリズムの比較を様々なスケールのネットワークにおいて行うことは有用となると考える。

以下、2. で既往研究のレビューを行う。3. で本研究で用いる維持管理施策最適化モデルを定式化する。4. で本研究で用いる3種類のヒューリスティクスについてその概要を説明する。

2. 既往研究

表-1 に示すように、社会基盤施設の維持管理施策最適化問題を取り扱った既往研究は数多く存在する。同表は、1. で述べた i) から iv) それぞれに該当する研究を含み、それぞれで多くの既往研究が存在する。適用対象に関しても、鉄道トラック、舗装など様々である。また、維持管理施策の候補数については、本研究で対象とする個々の施設の補修施策を直接的に求めそれらの組み合わせを選定するような問題のみにおいて、具体的な候補数を示している。「N/A」としている研究に関しては、最適な補修間隔（離散、連続を問わず）やマルコフ過程における最適な補修行列を求めることに

よって、個々の施設に対する補修施策が間接的に決定される。前者において、遺伝的アルゴリズム、疑似アニーリング、蟻コロニー最適化、タブーサーチなどといったヒューリスティクスの適用が見られ、近年は維持管理施策の候補数も増加傾向にあり、より大規模なネットワーク、あるいは、複数年に亘る維持管理施策最適化に関する研究が行われている。本研究の特徴としては、i) ネットワークの規模は比較的小規模であるものの、複数のヒューリスティクスを独立に同一の最適化問題に適用し、それらを比較している点、ii) 若干の既往研究^{14),21)}においては考慮されているが、複数の異なる種類の施設を含むインフラネットワークにおける維持管理施策最適化問題を議論している点、が挙げられる。

さらに、表-1 においては、施設に対する補修実施効果がリスク低減効果として明示的に考慮されているか、補修を行う動機として維持管理水準（例えば、健全度 J 以上の施設を全体の $U\%$ 以下に抑えるなど）が制約条件としてのみ考慮されているかにも着目している。前者には「Yes」、後者には「No」としている。本研究は前者の立場を取る。これにより、補修実施効果をより明示的に柔軟に（例えば、補修による利用快適性向上や騒音低減効果といった副産的な効果も含めて）考慮することができる。なお、施設に対する補修効果をリスク低減効果として考慮し、さらに、維持管理水準に関す

る制約条件を設定している既往研究に関しても「Yes」と表記している。

3. 最適化モデル

異なる種類の施設を含む E 個の施設 ($e = 1, \dots, E$) で構成された鉄道ネットワークに対する維持管理施策の最適性を議論するために、目的関数を

$$Z_{\mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} = B_{rr, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} - C_{int, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} \quad (1)$$

と設定する。ここに、 $\mathbf{S} = (\bar{S}_1, \dots, \bar{S}_E)$ は健全度ベクトルであり、 \bar{S}_e は施設 e の健全度を表す。記号「 $\bar{\quad}$ 」は観測値を表す。 $\boldsymbol{\delta} = (\delta_1, \dots, \delta_E)$ は維持管理施策ベクトルであり、 δ_e を以下のように設定する。

$$\delta_e = \begin{cases} 0 & \text{施設 } e \text{ に補修を実施しない} \\ 1 & \text{施設 } e \text{ に補修を実施する} \end{cases} \quad (2)$$

$B_{rr, \mathbf{S}}$ は維持管理施策 $\boldsymbol{\delta}$ を実施することによる便益を表し、任意の貨幣単位で表される維持管理施策実施前後のリスク低減量として

$$B_{rr, \mathbf{S}} = R_{0, \mathbf{S}} - R_{1, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} \quad (3)$$

と定義する。 $R_{0, \mathbf{S}}$ は維持管理施策実施前の施設の劣化に起因したリスクであり、本研究では、

$$R_{0, \mathbf{S}} = \sum_{e=1}^E R_{0, e, \bar{S}_e} = \sum_{e=1}^E P_{e, \bar{S}_e} C_{f, e, \bar{S}_e} = \sum_{e=1}^E C_{f, e, \bar{S}_e} \quad (4)$$

と個々の施設において独立に（個々の施設の劣化が他の施設のリスクに影響を与えない）定義できると仮定する。このとき、個々の δ_e は別個に最適化できる。個々の施設の劣化状態の組み合わせに応じてリスクが変化する場合には、フォルトツリー作成によるブール演算などによりリスクを定式化することができる²⁷⁾。本研究では、このように個々の施設の劣化状態の組み合わせに応じてネットワークでのリスクが決定される状況を想定して、 $\boldsymbol{\delta}$ の個々の要素を同時に最適化する問題を取り扱う（個々の δ_e を別個に最適化するのではなく、 2^E 通りの $(\delta_1, \dots, \delta_E)$ の組み合わせの中から最適な組み合わせをヒューリスティックスにより決定する）。その上で、個々の δ_e を別個に最適化した解（以下、解析解）とヒューリスティックスによる解を比較し、ヒューリスティックスの適用可能性を検証する。なお、 C_{f, e, \bar{S}_e} は施設 e が健全度 \bar{S}_e を持つ際の損傷費用（劣化に起因した利用不能な状態や事故リスクを表す費用）であり、本研究ではその発生確率を $P_{e, \bar{S}_e} = 1 \forall e, \bar{S}_e$ として確定的に与える。 $R_{1, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}}$ は維持管理施策 $\boldsymbol{\delta}$ 実施後のリスクであり、 $R_{0, \mathbf{S}}$ と同様の考え方にに基づき、

$$R_{1, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} = \sum_{e=1}^E R_{1, e, \bar{S}_e, \delta_e} \quad (5)$$

と与える。ここに、

$$R_{1, e, \bar{S}_e, \delta_e} = \begin{cases} R_{0, e, \bar{S}_e} & \delta_e = 0 \\ C_{f, e, 1} & \delta_e = 1 \end{cases} \quad (6)$$

であり、補修後には健全度 1（最も健全な状態。健全度が大きくなればなる程劣化の進展している状態を表す）に回復するとし、さらに、健全度 1 の状態での損傷費用を $C_{f, e, 1} = 0$ と仮定する。 $C_{int, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}}$ は補修費用であり、補修費用に関しても個々の施設で独立に、

$$C_{int, \mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} = \sum_{e=1}^E \delta_e C_{int, e, \bar{S}_e} \quad (7)$$

と定義する。 C_{int, e, \bar{S}_e} は施設 e の補修費用であり、健全度 \bar{S}_e に関わらず施設ごとに一定であると仮定する。

このように定義された目的関数を用いて、鉄道ネットワークの維持管理施策に関する最適化問題を以下のように定式化する。

$$\boldsymbol{\delta}^* = \arg \max_{\boldsymbol{\delta} \in \Xi} Z_{\mathbf{S}, \boldsymbol{\delta}} \quad (8)$$

Ξ は維持管理施策集合であり、要素数 2^E を持つ。

4. ヒューリスティックスの適用可能性

最適化問題（式 (8)）を 3 種類のヒューリスティックス（遺伝的アルゴリズム、疑似アニーリング、蟻コロニー最適化）を用いてそれぞれ解く。その際、同一のネットワーク、同一の補修、損傷費用、同一の健全度のもとで、維持管理施策の個々の要素の初期値をランダムに発生させ、1,000 回ずつ個々のアルゴリズムを適用することにより、その解と解析解を比較しながら、アルゴリズムの求解安定性を評価する。また、ネットワークの規模を 16 施設から 80 施設へと拡張することによっても、個々のアルゴリズムの適用可能性を評価する。本研究で対象とする 3 種類のアルゴリズムには、それぞれ特性（例えば、遺伝的アルゴリズムは大域探索が得意であるが、最適解近傍での局所探索は不得意であるなど）があり、それらを考慮した考察を加える。さらに、個々のアルゴリズムのパラメータ（例えば、収束条件となるループ数、突然変異確率（遺伝的アルゴリズム）、焼きなましスケジュール（疑似アニーリング）、蟻の数（蟻コロニー最適化）など）の妥当性も事後的に評価する。これにより、どの程度の規模のネットワークにおいては、どの程度のスケールのパラメータを用いることが望ましいのかといった議論が可能となる。

研究発表会当日には、個々のアルゴリズムの詳細、パラメータ値、2 種類の鉄道ネットワークの施設の構成、健全度、補修費用、損傷費用などについて具体的な説明を加えるとともに、それぞれのネットワークに対するそれぞれのアルゴリズムの適用結果を示し、それに対する考察を発表する。

参考文献

- 1) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, No.1, pp.55-62, 1994.
- 2) Lake, M., Ferreira, L. and Murray, M.: Minimising costs in scheduling railway track maintenance, *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol.50, pp.1-8, 2000.
- 3) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における補修投資ルール, 土木学会論文集, No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 4) Liu, M. and Frangopol, D. M.: Optimal bridge maintenance planning based on probabilistic performance prediction, *Engineering Structures*, Vol.26, No.7, pp.991-1002, 2004.
- 5) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 6) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.
- 7) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 8) Hajdin, R. and Adey, B. T.: Optimal worksites on highway networks subject to constraints. *2nd International Forum on Engineering Decision Making (IFED)*, Lake Louise, Canada, 2006.
- 9) Ouyang, Y. and Madanat, S.: An analytical solution for the finite-horizon pavement resurfacing planning problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.40, No.9, pp.767-778, 2006.
- 10) Oyama, T. and Miwa, M.: Mathematical modeling analyses for obtaining an optimal railway track maintenance schedule, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol.23, No.2, pp.207-224, 2006.
- 11) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 12) Durango-Cohen, P.L.: A time series analysis framework for transportation infrastructure management, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.5, pp.493-505, 2007.
- 13) Jido, M., Otazawa, T. and Kobayashi, K.: Optimal repair and inspection rules under uncertainty, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.14, No.2, pp.150-158, 2008.
- 14) 織田澤利守, 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設の最適補修同期化政策, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.
- 15) Budai-Balke, G.: *Operations research models for scheduling railway infrastructure maintenance*, PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, 2009.
- 16) Lukas, K., Borrmann, A. and Rank, E.: Using ant colony optimisation for infrastructure maintenance scheduling, *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling 2010*, pp.371-375, 2010.
- 17) Fwa, T. F. and Farhan, J.: Optimal multiasset maintenance budget allocation in highway asset management, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.138, No.10, pp.1179-1187, 2012.
- 18) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之, 松村泰典: 舗装構造の最適補修更新モデル, 土木学会論文集 E1, Vol.68, No.2, pp.54-68, 2012.
- 19) Lethanh, N., Adey, B. T. and Sigrist, M.: A mixed-integer linear model for determining optimal work zones on a road network, *International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, Kos Island, Greece, 2014.
- 20) Torres-Machi, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., and Yepes, V.: An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level, *The Scientific World Journal*, Vol.2014, ID 524329, 2014.
- 21) 平川恵士, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之: 非定常な点検間隔を考慮した高速道路トンネル照明設備の最適点検・更新施策, 土木学会論文集 F4, Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
- 22) Compare, M., Martini, F. and Zio, E.: Genetic algorithms for condition-based maintenance optimization under uncertainty, *European Journal of Operational Research*, Vol.244, No.2, pp.611-623, 2015.
- 23) Lee, J. and Madanat, S.: A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.78, pp.106-122, 2015.
- 24) Eicher, C., Lethanh, N. and Adey, B. T.: A routing algorithm to construct candidate workzones with distance constraints, *Proceedings of the 5th International/11th Construction Speciality Conference*, pp.1-10, 2015.
- 25) Lee, J., Madanat, S. and Reger, D.: Pavement systems reconstruction and resurfacing policies for minimization of life-cycle costs under greenhouse gas emissions constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.93, Part A, pp.618-630, 2016.
- 26) Kielhauser, C., Martani, C. and Adey, B. T.: The development of intervention programs for inland waterway networks using genetic algorithms, *Structure and Infrastructure Engineering*, (Under review).
- 27) Burkhalter, M.: *Optimal intervention programs on rail networks taking into consideration the temporal and spatial properties of the network*, Master Thesis (Under supervision of Prof. Dr. Bryan T. Adey), IBI, ETH Zurich, 2016.

(2017. 4. 28 受付)

OPTIMAL INTERVENTION PROGRAMS FOR RAILWAY
INFRASTRUCTURE NETWORKS: INVESTIGATION INTO THREE
HEURISTIC ALGORITHMS

Daijiro MIZUTANI