

Transport Limited Model による長期的な地形変化の推定

三箇智二*・石橋正祐紀**・羽根幸司**・升元一彦**・田部井和人**

Estimation of long-term topographic evolution using the Transport Limited Model

SANGA Tomoji*, ISHIBASHI Masayuki**, HANE Kouji**, MASUMOTO Kazuhiko** and Tabei Kazuto**

*SNG コンサルタント SNG Consultant, 080-5075-4508, E-mail:sanga.consul@gmail.com

**鹿島建設(株) KAJIMA Corporation, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu, Tokyo

キーワード：地形変化, 超長期, Stream Power Model, Transport Limited Model

Key words: Topographic changes, Long-term, Stream Power Model, Transport Limited Model

1. はじめに

数万年以上の超長期的な物質移動を評価する地層処分事業においては、国内でも普遍的に認められる地殻・海水準変動等に伴い発生する隆起・沈降・侵食・堆積による地形変化を考慮することが重要と考える。そこで、本報では、既存情報が豊富な北海道の天塩川流域を対象として、沖積河川の表現モデルを適用し、超長期的な地形変化を解析的に推定する方法の開発・検討を行った結果を報告する。

2. 解析手法

隆起・沈降を除けば陸域における地形変化は主に水の移動により誘発される。そこで本検討では特に河川の侵食・運搬・堆積による河床高の変化に着目した。この変化は、河川流量と河床勾配等の関係から評価される(stream power model¹⁾)。河川モデルとしては山地河川を対象とする Detachment limited model¹⁾と沖積河川を対象とする Transport limited model¹⁾が提唱されている。前者は河床勾配と流量から侵食力が決定されるモデルであり、河床勾配の大きな山地河川に適用される場合が多い。後者は流入・流出する土砂フラックスの収支から河床高の変化を説明する方法であり、ある地点での標高変化は下流からの河床高変化の伝搬と、上流からの土砂フラックスの収支から推定され、主として沖積河川に適用される。本報で対象とする天塩川流域は流域面積が大きく、全体に沖積域が広がることから、Transport limited model を基本とした Hergarten (2020)²⁾で提唱された手法を用いることとした。

Hergarten (2020) の手法は、Transport limited model を単純化し、標高、集水面積、勾配および Stream power model の定数 m , n のみを入力パラメータとした状態式を陰解法で解いている。陰解法を用いることで大きなタイムステップ(数万年など)での解析が可能であり、流域面積の大きな河川でも任意の地点における標高変化を一意的に決定することができる。この際、推定される本流・支流の河床縦断形は従順化を受けた河川の特徴である Flint 則(後述)を満たす地形となり、天然に見られる河川の地形特徴を再現できることが特徴とされる。

また、本手法は地形変化を逐次的に評価にすることで、

非平衡状態にある河川流域にも適用できる利点もある。一方、この手法は上流部(山間部)も河川として扱うため、上流部の侵食速度が大きく推定される難点がある。このため、上流部を斜面域と仮定し、この課題を克服した。具体的には上流部の斜面域の侵食速度は隆起速度の $1/2$ と仮定する非平衡モデルとし、国内山地で一般的と考えられる山稜高度が上昇するモデルとした。なお、期間中に河口まで運搬された土砂の一部は、拡散モデルを用いて海域への堆積を模擬した。

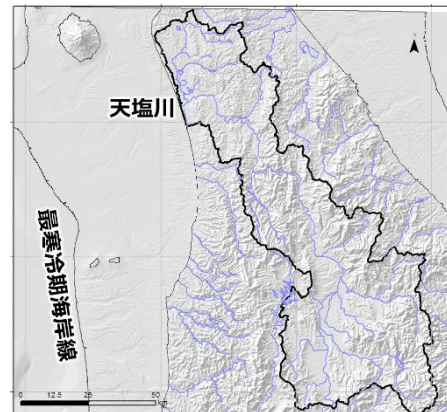


図-1 解析対象の地域と流域

3. 適用地域と河床縦断形および対象期間

適用地域は、天塩川流域を含む範囲(2.6万km²)とした(図-1)。天塩川沖合は遠浅であり、約1.7万年前の最寒冷期前後の海岸線は現在より50~60km沖合に位置したと推定される。解析期間の海水準変動は過去の気候変動1サイクル(12.5万年)が将来も繰り返されると仮定し、各海水準の変化を逐次的に再現するために時間断面を16に分割し解析した(図-2)。なお、最寒冷期(MIS2, MIS6)や最温暖期(現在, MIS5e)など海水準が類似する時期の河床縦断形は、地殻変動量の補正によりほぼ一致するとされる(吉山・柳田,1995³⁾)。この特徴を用いると、推定する10.8万年後の最寒冷期の河床高分布は、約1.7万年前の沖積層基底深度と類似することになる。そこで、本手法の妥当性の検

証として、10.8 万年後の地形と沖積層基底深度を比較した。

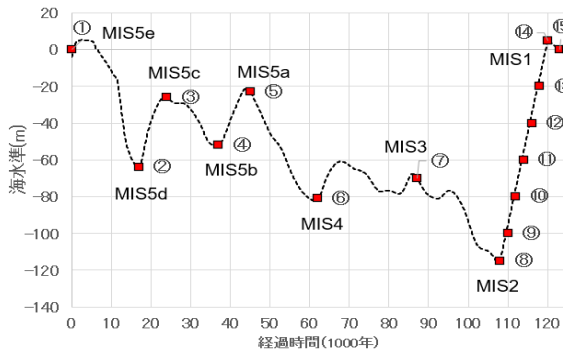


図-2 仮定した海水準変動と推定時刻

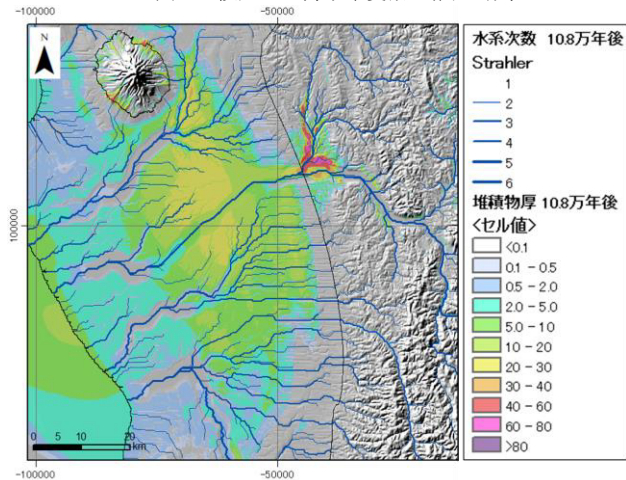


図-3 推定した 10.8 万年後の地形

4. 適用結果

図-1 に示す現在の地形に比べ、図-3 に示す 10.8 万年後に推定される地形は河川による浸食・堆積など天然の河川の特徴を保持する地形が推定される。なお、前述したように推定される本流・支流では河床勾配(S)と集水面積(A)に以下の Flint 則が成立する。この際の m/n は河川によってやや異なっているが、変動帯の河川での値(0.4~0.6 前後, Whipple and Tucker, 1999⁴⁾; Regalla et al., 2013⁵⁾)に収まる。

$$S = k \cdot A^{-m/n}$$

次に、約 1.7 万年前の最寒冷期の河床標高 (試錐調査より推定された沖積層基底深度⁶⁾) と推定した 10.8 万年後の河床標高を図-4 に示す。なお、沖積層基底深度分布のハッチ・白丸で示した河口から約 8,000~約 12,000m, 約 16,000~約 17,000m の範囲については、試錐孔で沖積層を捕捉できておらず周辺から推定された不確実性が高い範囲である。

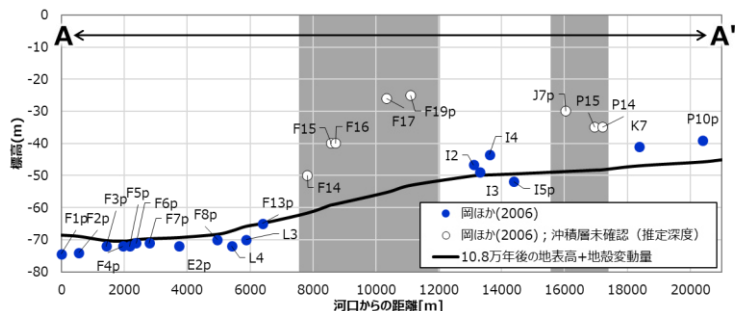
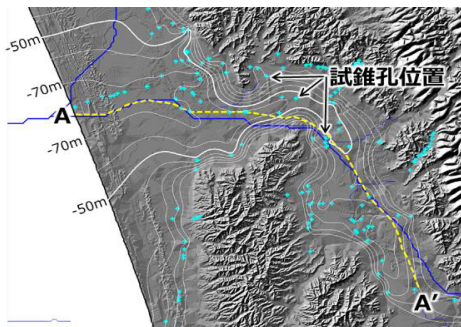


図-4 沖積層深度と解析結果 (地殻変動量補正後) の比較

当該範囲を除き解析結果と沖積層基底深度を比較すると、5~10m 程度の標高差で両者は整合しており、適切に地形変化 (河川標高の変化) が評価できているものと考えられる。

一方、河川横断形状については、実測値として用いた結果の不確実性もあるが、解析時のメッシュ間の標高が同一の場合、河川中心位置がランダムに選択される点、現行の河川勾配と幅の関係性に基づく設定といった解析上の不確実性があり、河川横断形状については必ずしも一致するわけではないことが確認された。

5. まとめ

超長期の地形変化の解析的評価手法の検討として、北海道天塩川流域を対象に、Hergarten(2020) の考え方を一部改良した手法を適用した。その結果、河床標高については数 m 程度の誤差で精度良く評価できることを確認した。

以上の結果から、本手法では任意時刻の河床高が容易に推定でき、推定した本流・支流の河川地形は天然の河川の特徴を再現できることが確認できた。また、本手法は仮想的な地形を模擬する場合にも適用可能であり、従順化に必要な十分な時間 (回数) を与えることで、天然の河川の地形特徴を踏まえた地形モデルを作成することができる。このほか、任意の時期のイベント (断層形成や火山灰の降灰等) の組み込みや、それに伴う河道や河床縦断形の変化なども評価可能と考えられ、本手法は様々なシナリオに基づく地形変化の評価に適用できる可能性があり、今後の発展と応用が期待される。

※本報告の一部は 2023 年「土木学会全国大会」で報告済み

文献

- 1) Whipple, K. X. and Tucker, G. E. (2002) Implications of sediment-flux dependent river incision models for landscape evolution, *Journal of Geophysical Research*, vol.107, pp. 2039.
- 2) Hergarten, S. (2020) Transport-limited fluvial erosion - simple formulation and efficient numerical treatment, *Earth Surface Dynamics*, vol.8, pp.841-854.
- 3) 吉山昭, 柳田誠: 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, *地学雑誌*, 104, 6, pp.809-826.(1995).
- 4) Whipple, K.X. and Tucker, G.E. (1999) Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*. 104, B8, 17, 661-674.
- 5) Regalla, C., Kirby, E., Fisher, D. and Bierman, P. (2013) Active forearc shortening in Tohoku, Japan: Constraints on fault geometry from erosion rates and fluvial longitudinal profiles, *Geomorphology*, vol.195, p84-98.
- 6) 岡 孝雄, 五十嵐 八枝子, 林 正彦 (2006) ボーリングデータ解析および花粉分析による天塩平野の沖積層の研究, *北海道立地質研究報告*, 77, 17-75.