

流域から海岸への土砂供給量の検討 —酒匂川を例として—

柴山知也*・Joel Nobert**

河川流域を解析対象として気象, 土壌, 地形のデータを集積し, MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) を援用して, GIS 上のモデルで流域内の土砂の浸食量および河川での浸食, 堆積を考慮して海岸への土砂供給量を推定する方法を開発した. 浸食土砂量の推定には, 降雨量変化, 表土流出, 洪水, 河口への土砂の流出とつながる因果連鎖を設定している. 酒匂川流域はこれらのデータがそろっているため, 今回開発したモデルを適用し, その妥当性を検討した. 酒匂川における流域生産土砂量を積算して求めた, 河口からの土砂供給量は, 河口付近の取水堰での滞砂量, 浚渫量の合計とほぼ匹敵しており妥当な値を得ることができた. この結果に基づいて, 環境変化に対応する河口への供給土砂量変化の推定方法を提案した.

1. はじめに

地球規模で進行しつつある環境変動の一つである河川流域表土の浸食量の変化とそれに伴う海岸への土砂供給量の変化を把握する方法を開発し, 神奈川県酒匂川流域に適用した. また, この結果をタンザニアのルフィジ川の流域, アジアのメコン川, イラワジ川, 紅河 (ベトナム) 流域などの推定結果と対照した.

具体的には流域からの浸食土砂量を算定するため, 酒匂川流域を解析対象として気象, 土壌, 地形のデータを集積し, MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Woolhiser ら, 1990) を援用して, GIS 上のモデルで流域内の浸食量を推定した. 酒匂川の場合データの集積度が高く, 従って推定の精度も高い. また, 飯泉取水堰近傍での滞砂, 浚渫量からモデルの検証が可能のため, 本論文では主に酒匂川の結果について述べる. ルフィジ川については Nobert・Shibayama (2005) が算定を行っている.

現在, 世界の海岸域は, 大きな転換期に差し掛かっている. 日本の場合には, 戦後, 治山治水を進め, また, 水資源の開発のためにダムを建設し, 洪水の抑制を図った. この結果, 海岸に河口から供給される土砂の量は急激に低下し, 全般的に侵食傾向に変化した. 河口付近にいわば砂の貯えとして形成されていた河口テラスが, 多くの河口部で失われてしまった今, 全国ほとんどの海岸で侵食問題は顕在化している. 一方, 途上国では主に流域土地利用の変化に起因して流域での表土の浸食が進み, 河川を通じて河口に大量の土砂がもたらされ, 河口での航路の埋没, 河口閉塞などの問題が頻発している. この

ような問題への対処をするために, 地球規模で, 流域から海岸への土砂の供給量の把握と収支の算定が必要となる.

2. 算定モデルの内容

(1) 土砂生産量の推定モデル

まず, 標高を表す数値地図を用いて, 流域を水の流れに沿って, 図-1 に示すように流下方向を推定し, 流下ネットワークを決定して, 小流域に分割する. 結果は図-2 のように与えられる.

次に MUSLE を用いて, 降雨および表層水による地表からの浸食量を推定する. 浸食量は以下で表される.

$$sed = 11.8(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \dots \dots \dots (1)$$

ここで sed は, 1 日あたりの土砂生産量, Q_{surf} は単位面積あたり表面流出体積 ($mm \text{ H}_2\text{O}$), q_{peak} は表面流量のピーク値 (m^3/s), K_{USLE} は土壌浸食可能性係数, C_{USLE} は表層土地状況係数, P_{USLE} は表土保存工の効果係数, LS_{USLE} は局地勾配の大きさと長さによる係数である.

単位面積あたり表面流出体積 Q_{surf} は, 以下の式で推定する (SCS, 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \dots \dots \dots (2)$$

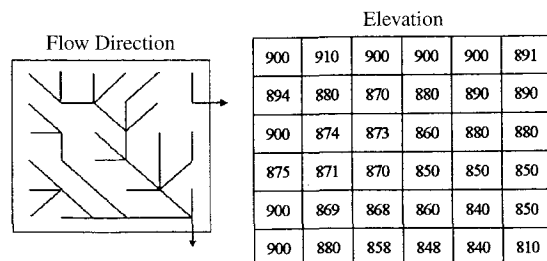


図-1 流下方向の推定方法

* フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門

** 学生会員 M. Eng. 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻

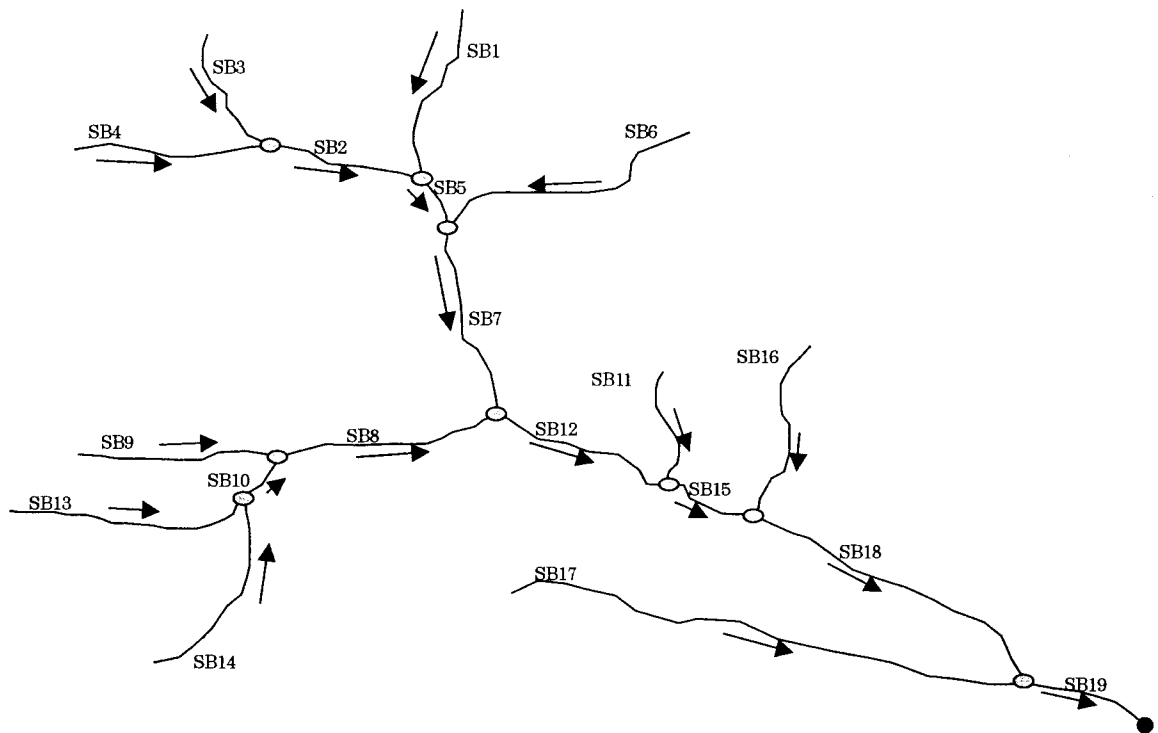


図-2 酒匂川流路ネットワークの概観

I_a は表面貯留, 遮蔽, 浸透などを含む流出前の初期値, R_{day} は日雨量, S は貯留関数であるが, 表層地質, 土地利用, 勾配, 含水比などに依存するパラメータ CN を用いて, 以下の式で与えられる.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \dots\dots\dots (3)$$

表層流率の最大値 q_{peak} は以下で与える (USDA-SCS, 1986).

$$q_{peak} = \frac{\alpha_1 \cdot q \cdot A}{3.6 t_c} \dots\dots\dots (4)$$

ここで, q_{peak} は表層流率の最大値 (m^3/s), q は表層流厚 (mm), A は小流域の面積 (km^2), t_c は時間 (hr), α_1 は無次元パラメータである. 土壌浸食係数 K_{USLE} は EPIC モデル (Sharpley・Williams, 1990) を用いて以下で表す.

$$K = \frac{1}{7.6} \left[0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \right] \cdot \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \cdot \left(1.0 - \frac{0.25 OM}{orgC + \exp(3.72 - 2.95 OM)} \right) \cdot \left(1.0 - \frac{0.7 SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9 SN)} \right) \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここで, $SN = 1.0 - SAN/100$ であり, SAN , SIL , CLA と OM はそれぞれ砂, シルト, 粘土, 有機物の含有率 (%) である.

傾斜の長さ と勾配に関する係数 LS は以下で算定する.

$$LS = \left(\frac{L}{22.1} \right)^m (65.41 \sin^2 \alpha_2 + 4.56 \sin \alpha_2 + 0.065) \dots\dots\dots (6)$$

ここで L は斜面の長さ (m), α_2 は傾斜角度, m は, 以下で表される.

$$m = \left(\frac{F}{1+F} \right); F = \left(\frac{\sin \alpha_2 / 0.0896}{3(\sin \alpha_2)^{0.8} + 0.56} \right) \dots\dots\dots (7)$$

(2) 土砂移動の推定モデル

流路における土砂移動は沈降と浸食に分離して検討することができる. 以下では図-2 のような酒匂川の流路系を用い, 流路の断面形はその分岐の中では一定と仮定して算定を進める. ある分岐水路から輸送される土砂輸送量の最大値は,

$$T = a \cdot V_{pk}^b \dots\dots\dots (8)$$

で表される. ここで T が輸送能力 (t/m^3); a は係数, V_{pk} は水路の流速の最大値 (m/s) である. 最大流速は

$$V_{pk} = \frac{q_{pk}}{A_{ch}} \dots\dots\dots (9)$$

で表すことができ、 A_{ch} 水路の断面積(m^2)、 q_{pk} 最大流量(m^3/s)である。

ある時間における移動状態の土砂の濃度 C_{in} は $C_{in} = \frac{sed_{in}}{q_{din}}$ で表される。ここで sed_{in} はMUSLEで算定した土砂発生量であり、 q_{din} は流路への水流入量である。式(8)で算定した最大輸送量と C_{in} を比較し、 $C_{in} > T$ の場合には沈降が支配的な過程であり、沈降量を

$$sed_{dep} = (C_{in} - T) \cdot V_{ch} \dots\dots\dots (10)$$

で算定する。ここで、 sed_{dep} は土砂沈降総量(t)であり、 V_{ch} はその流路内に存する水の体積(m^3)である。

一方、 $C_i < T$ の場合には、浸食が支配要因となり、運び去られる土砂量は以下で評価される。

$$sed_{deg} = (T - C_{in}) \cdot V_{ch} \cdot K_{ch} \cdot C_{ch} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 sed_{deg} は運び去られる土砂量(t)、 K_{ch} と C_{ch} とは水路に依存する係数である。

このように沈降と浸食の過程が定量化されると、最終的な水路内における土砂量収支は以下となる。

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \dots\dots\dots (12)$$

ここで sed_{ch} は流路内の移動中の土砂総量(t)、 $sed_{ch,i}$ は計算開始時の総量(t)である。

流路から出ていく土砂量は

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \dots\dots\dots (13)$$

で表され、 sed_{out} は流路から運び出される土砂量(t)、 V_{out} はタイムステップ内の水の流出量(m^3)、さらに V_{ch} は流路内の水量(m^3)である。

3. 酒匂川流域への適用

酒匂川での具体的な作業手順は以下である。

- 1) 数値地図上で与えられた標高、土地利用、降雨分布、流域境界、植生分布、土壌浸食インデックスなどの情報をGIS上に取り込む。
- 2) 局地的な降雨量、土壌浸食可能性係数(K_{USLE})、局地勾配の大きさと長さによる係数(LS_{USLE})、表層土地状況係数(C_{USLE})、表土保存工の効果係数(P_{USLE})などの諸量を算定する。
- 3) 特性によって区分した小地域ごとにMUSLEを適用し、流出土砂量 $A(t/km^2/day)$ を式(13)を用いて算定する。
- 4) 河口への土砂供給量を予測し、周辺海岸への供給漂砂量を算定する。

図-3に酒匂川での流域の小領域への分割図をしめす。流域は19の小流域に分割することができた。

図-4には土砂流出量の多い3つの小流域について、土砂流出量を示す。土砂生産量は降雨雨量に強く依存しており、時間変動は主に雨量の変化に依存している。酒匂川では、河口近くに飯泉の取水堰があり、ほとんどの土砂がここに堆積すると考えられる。飯泉での土砂滞砂量の実測値(図-5)と本研究で示した方法による算定値を比較したのが図-6である。実測値では、堆積量と浚渫量の和を土砂流入量として用いている。図より、本方法の精度の高さが裏付けられた。

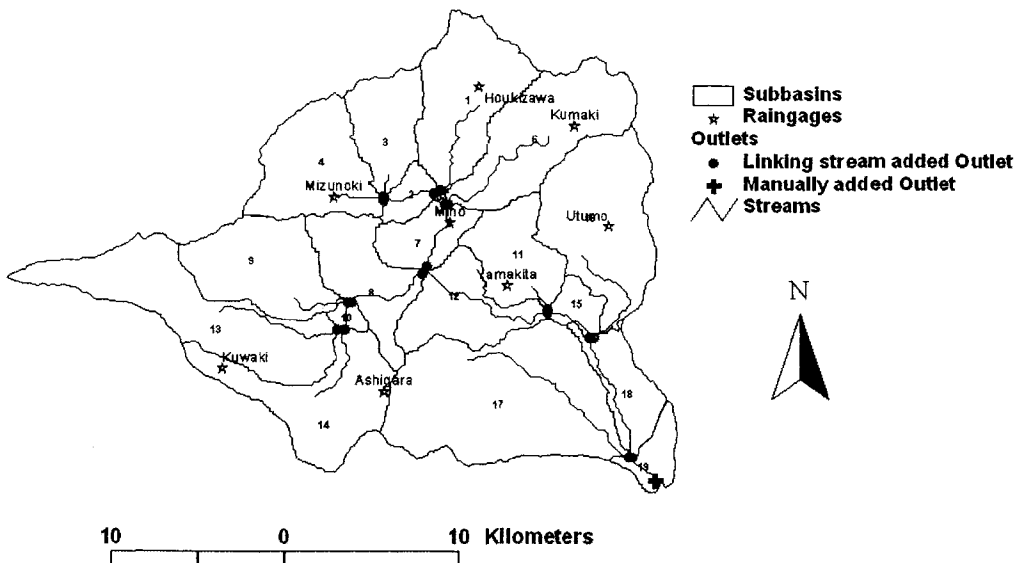


図-3 酒匂川の小流域の分割

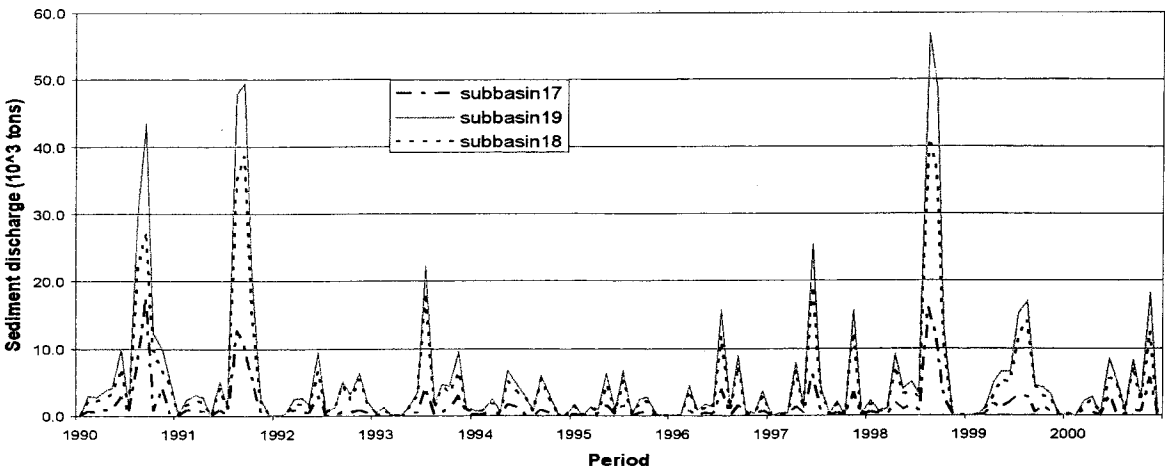


図-4 小流域からの土砂流失の月別算定値

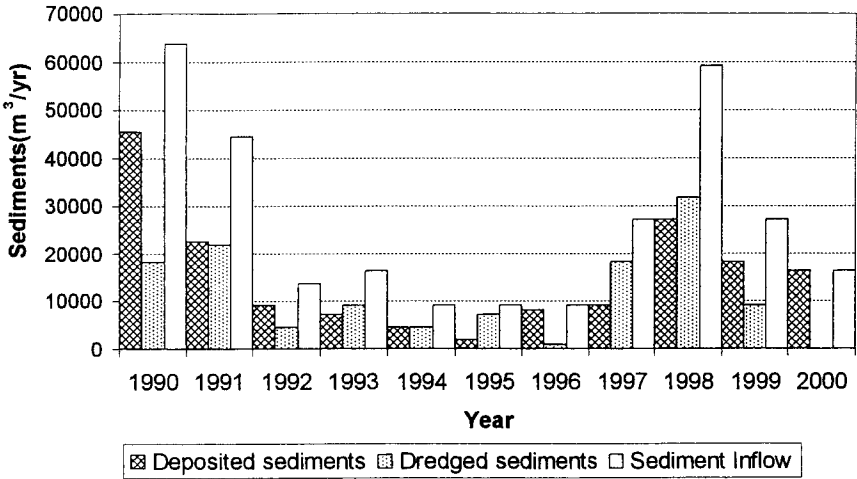


図-5 河口付近での土砂堆積，土砂浚渫の実測値

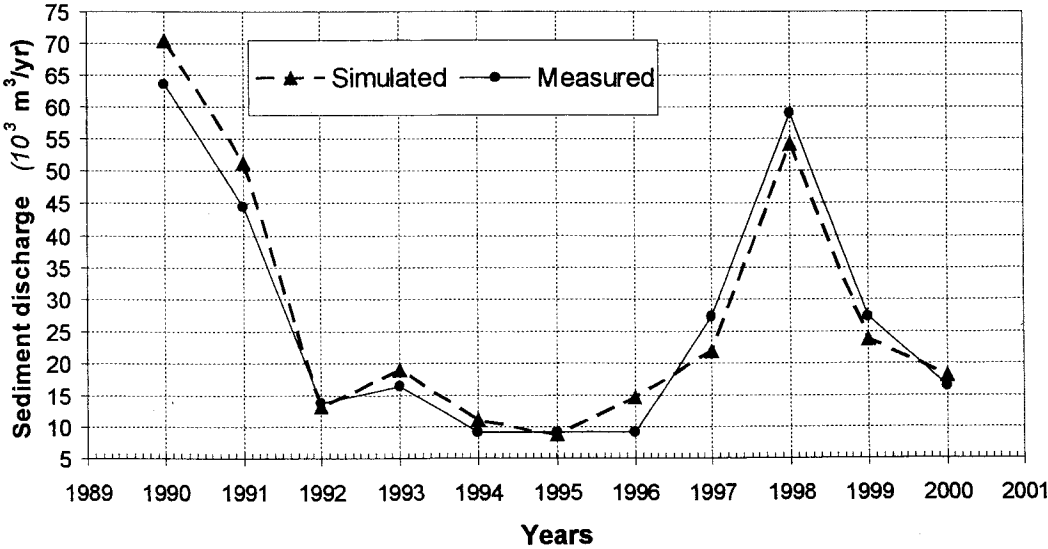


図-6 河口での土砂量の算定値と測定値の比較

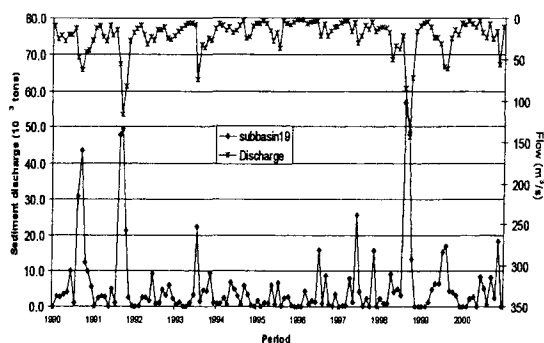


図-7 算定値と雨量の月別比較

また、図-7は、河口での土砂量と河川流量の月別変化を比較したものである。この図からも雨量によって土砂の生産が支配されていることが確かめられる。

以上の計算により、酒匂川の河口への1990年から2000年の間の年平均の土砂供給量は 4.83×10^4 t/yr となり、メコン川の 160×10^6 t/yr；紅河の 130×10^6 t/yr；長江の 502×10^6 t/yr あるいはタンザニアのルフィジ川(Nobert・Shibayama, 2005)の 20×10^6 t/yr に比べてもかなり小さな値となっている。この相違は、流域の地形特性、土地利用、降雨特性の違いに起因しているといえる。

4. 結 論

表土の流失による土砂量変化の推算について、MUSLEを援用した評価手法を適用した。浸食土砂量の推定に、降雨量、表土流出、洪水、河口への土砂の流出とつながる因果連関を設定し、河口への供給土砂量の推定を行った。また、酒匂川における流域生産土砂量の積算から求めた河口からの土砂供給量は、河口付近の取水堰での土砂流入量とほぼ匹敵しており妥当な値を得ることができた。

酒匂川のデータは、神奈川県庁県土整備部から頂いた。

記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 河田恵昭・井上雅夫・鹿室 宏(1994)：大井川・駿河海岸系における海岸土砂収支について，海岸工学論文集，第41巻，pp. 516-520.
- Arnold, J.G., J.R. Williams and D.R. Maidment (1995): Continuous water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(2), pp. 170-183.
- Bagnold, R. A. (1977): Bed Load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, Vol. 13(2), pp. 303-312.
- Johns T.C., R.E. Carnell, J.F. Crossley, J.M. Gregory, J.F.B. Mitchell, C.A., Senior, S.F.B. Tett and R.A. Wood (1997): The second hadley centre coupled ocean-atmosphere GCM: Model description, spinup and validation. *Climate Dynamics* 13, pp. 103-134.
- Nobert, J and T. Shibayama (2005): Total sediment transport in Refuji River basin. *Proc. of APAC2005*(printing).
- Renarl, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder (1997): Predicting soil erosion by water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
- Sharpley, A.N. and J.R. Williams (1990): EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: USDA Technical Bulletin 1768 : 235p.
- Tuan, L.T. and T. Shibayama (2003): Application of GIS to evaluate long-term variation of sediment discharge to coastal environment. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 45, No. 2 (2003) pp. 275-293.
- Tayfur, G. and V.P. Singh (2004): Numerical model for sediment transport over nonplanar, nonhomogeneous surfaces. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 1 (2004) pp. 35-41.
- Tayfur, G. (2001): Modeling two-dimensional erosion process over infiltrating surfaces. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 6, No.3 (2001) pp. 259-262.
- Woolhiser, D. A., R. E. Smith and D. C. Goodrich (1990): KINEROS. A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. ASR-77, U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C., 130p.
- Yang, D., S. Kanae, T. Oki, T. Koike and K. Musiak (2003): Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Wiley Interscience, Hydrological Process*, 17, pp. 2913-2928.