

水源かん養機能から見たゴルフ場開発の 影響評価についての基礎的検討

Assesment on Development of Golf Links in terms of
Headwater Conservation Function

吉田弘*・端野道夫**・木村誠***・村岡浩爾****

By Hiromu YOSHIDA, Michio HASHINO, Makoto KIMURA and Kohji MURAOKA

This study investigates the assesment on the development of golf links in terms of the headwater conservation function. Mathematical runoff model developed by authors are applied to a virtual basin based upon Shirakawadani experimental basin in Tokushima prefecture, and simulates the change of daily runoff discharge in various conditions concerned with the infiltration and water retention capacities. The reduction of the capacities by the development of golf links cause the accelerative decrease of daily runoff discharge.

keywords: headwater conservation function, tank model, runoff discharge
development of golf links

1. はじめに

バブル経済が弾けた今日においてさえ、ゴルフ場や大規模レジャー施設の開発が地方自治体における地域振興方策の中核として位置づけられている。大規模開発に伴う森林流域の改変は流域の降雨流出特性を変化させることから、従来は人命、財産の安全確保を第1条件に治水対策の観点から調整池ないしは調節池を設置するのみで対応してきた。しかるに近年の渇水時における都市機能の混乱ぶりからも見て取れるように、日常の社会生活と直結する低水・渇水時の流況変化もまた重要であるにもかかわらず、治水面のみに目を奪われて、利水、水質保全と関わる低水・渇水時の流況変化についてこれまで顧みられることは意外にも少なかったように思われる。

本研究では大規模開発の一例としてゴルフ場の造成を取り上げ、これまでに著者らが開発した数理モデルを用いて様々な流域、環境条件下で調整池による洪水調節を受けた場合の流出シミュレーションを行い、開発に伴う流域の変化が流況に及ぼす影響、とりわけ低水・渇水時の流況変化に与える影響について流域の水源かん養機能という観点から検討を行った。

*	正会員	工修	徳島大学助手	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**	正会員	工博	徳島大学教授	工学部建設工学科	(同 上)
***	学生員		徳島大学大学院	工学研究科建設工学専攻	(同 上)
****	正会員	工博	大阪大学教授	工学部土木工学科	(〒770 吹田市山田丘2-1)

表-1 白川谷同定パラメーター一覧

記号	記号の説明	数値
λ_s	早い中間流出遅減係数 (hr^{-1})	0.01236
λ_g	地下水補給遅減係数 (hr^{-1})	0.012804
C_{f1}	1次土壌水分飽和度	0.51068
C_{f2}	2次土壌水分飽和度	0.68752
f_0	$x_1/h_1 = C_{f1}$ のときの浸透強度 (mm/hr)	4.88695
$C_{f1,ini}$	1次土壌水分飽和度初期値	0.511046
$C_{f2,ini}$	2次土壌水分飽和度初期値	0.640114
$H_s (=h_1+h_2)$	土壌水分飽和容量 (mm)	76.3005
$h_1/(h_1+h_2)$	1次土壌水分飽和容量率	0.32913
K_1	土壌水分移動係数 (mm)	1.72646
K_4	表層からの蒸発散係数	0.498227
K_5	溪岸植生による蒸発散係数	0.0
K_6	溪岸での滲みだしによる蒸発係数	0.0
K_7	同上	0.0
E_{smax}	限界蒸散強度 (mm/hr)	0.99884
λ_h	1次土壌水分からの地下水補給遅減係数 (hr^{-1})	0.000987
λ_j	1次土壌水分からの遅い中間流出遅減係数 (hr^{-1})	0.003050
λ_j	1次土壌水分からの地下水補給遅減係数 (hr^{-1})	0.007096
λ_k	2次土壌水分からの遅い中間流出遅減係数 (hr^{-1})	0.001143
λ_l	2次土壌水分からの地下水補給遅減係数 (hr^{-1})	0.002458
λ_n	2次土壌水分からの地下水補給遅減係数 (hr^{-1})	0.000929
x_u	蒸散抑制の上限1次土壌水分飽和度	0.261958
x_l	蒸散抑制の下限1次土壌水分飽和度	0.234902
λ_p	被圧地下水流出遅減係数 (hr^{-1})	0.000484
λ_n	不圧地下水流出遅減係数 (hr^{-1})	0.009996
h_{qc}	被圧地下水流出の限界流出高 (mm)	0.068751
γD	見かけの表層厚 (mm)	54.15362
λ_0	斜面粗度に関する定数	0.000013

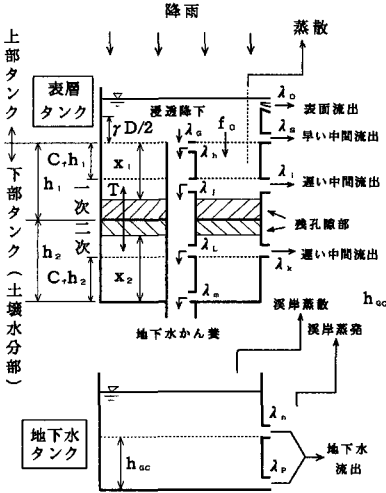


図-1 直列2段タンクモデルの構造

2. 数値モデルの概要

本モデルは樹冠による降雨遮断量を推定し、地表到達雨量を算定する降雨遮断タンクモデルと表層土壌からの蒸散量、浸透量ならびに流域からの流出量を算定するSPACを考慮した直列2段タンクモデルとからなる。モデル構造の詳細については関連する参考文献を参照願いたい。

2・1 降雨遮断タンクモデル

降雨遮断タンクモデル¹⁾は枝葉(樹冠)部分を表現する樹冠タンクと幹での流下を表現する樹幹タンクから構成されており、地表到達雨量を算定するために用いる。構造上の特長は降雨中と降雨終了後とはパラメータの値が変化する点、樹冠の濡れ具合が蒸発強度を支配することを考慮して蒸発強度が樹冠への付着水高とPenmanの可能蒸発散強度との積に比例するとした点である。

2・2 SPACを考慮した直列2段タンクモデル

直列2段タンクモデル²⁾は図-1のように表層タンクと地下水タンクとからなる。上部タンクにおいて表面流出はkinematic wave理論に従うとし、流出高の増減に応じて表面流の発生場を変化させる。早い中間流出および地下水補給はDarcy則に従うとして定式化してある。

下部タンクでは遅い中間流出、浸透降下ならびに土壌水分の変動過程を表現している。土壌水分構造は比較的水分移動の激しい1次貯留部と穏やかな2次貯留部とからなる。蒸散量は抑制作用を考慮してある臨界値を下回ったら土壌水分量により変化すると仮定している。

地下水タンクでは深層地下水に対応する被圧型地下水と浅層地下水に対応する不圧型地下水をそれぞれモデル化している。

2・3 実流域での同定パラメータ値

本モデルを徳島県白川谷試験地適用して同定されたパラメータを表-1にまとめて示す。両試験地の概要を簡単に述べる。白川谷流域は面積23ha、平均標高940m、平均流域勾配 $\theta = 21.5^\circ$ であり、地質は砂質片岩ないしは泥質片岩との互層からなり土壌はほとんどが褐色森林土である。植生は流域の下流側3/5程度に平均30年生のスギが、上流側に天然広葉樹がそれぞれ分布している。一方筑波流域は面積67.5ha、平均標高290m、平均流域勾配 $\theta = 15^\circ$ で地質は表層が関東ローム質粘土、以深に泥岩中心の堆積岩と風化花崗岩が分布する。基岩はGL=-10m付近である。植生は流域の85%がスギ、ヒノキ、アカマツで占めている。

3. 解析流域・条件の設定

3・1 解析流域の設定

解析の対象流域は徳島県Dゴルフ場の開発事例を参考に流域面積150ha(3000m×500m)と設定する。土壌および植生条件については白川谷流域のデータをベースとする。降雨遮断ならびに流出に関するパラメータの基準値は全て表-1に掲げた値とする。

3・2 計画ハイエトグラフ、ハイドログラフの設定

計画確率率は30年とする。洪水到達時間は土研式およびカーベイ+ルチハ式⁸⁾を用いてそれぞれ試算した

ところ、54.2minおよび27.9minとなったことからここでは30minを与える。降雨強度式はDゴルフ場近隣の観測地点における実績を用いる。一般的な値として降雨継続時間は24hrを設定し、後方集中型のハイエトグラフを作成し、設定条件下で流出計算を行い洪水施設の設計のためのハイドログラフを得る。

3・3 調整池の設定

調整池の形状はDゴルフ場の事例を参考に、 H ：標高(mm)、 V ：貯留容量(m^3)として $H=50V^{0.05}$ を設定する。調整池からの放流施設は天端付近に設けた水通し部と堤体下方のオリフィスの2箇所とする。オリフィス径50cm、オリフィスと天端との標高差5mを固定し、洪水調節後のピーク流出量がゴルフ場開発前のピーク流出量を上回らないようにトライアルで天端での切り欠き幅が設定される。図-2に計画ハイエトグラフを入力した場合の洪水調節計算例を示す。

3・4 シミュレーション用ハイエトグラフの設定

流出シミュレーションは1年間を対象とする。その際の基本ハイエトグラフとして白川谷流域(1991.1~12：平均降雨継続時間16.5hr、年降雨量1800mmのときで平均降雨強度0.983mm/hr)および国立環境研究所筑波森林試験流域(1987.6.~1988.5.：平均降雨継続時間11.5hr、年降雨量1800mmのとき平均降雨強度1.53mm/hr)を用いる。白川谷流域は比較的降雨継続時間が長いのに比べ、筑波流域は寡雨で比較的短期に集中しているのが特徴である。年降雨量 R としては日本での平均値1800mmを平水年として与え、これを3/2倍および2/3倍したものをそれぞれ豊水年($R=2700mm$)および渇水年($R=1200mm$)と設定する。したがってシミュレーションに用いるハイエトグラフは2×3通りであり、設定年降雨量とそれぞれの実績降雨量との比によって単純に伸縮させることで作成する。

3・5 モデルパラメータの設定

本研究では主として森林土壌の改変に伴う流出特性の変化を対象とすることから、表-1に掲げたパラメータのうちで表面流出に関係する λ_0 、最大地下水補給強度 $f_0(=\lambda_0\gamma D/2)$ 、最大浸透強度 $f^*(=f_0/(1-C_r))$ 、見かけの表層厚(空隙部分のみ) γD および土壌水分層厚 H_s のみに着目し、その他のパラメータは表-1の値を援用する。開発に伴う土壌状態の変化が重要となることから、森林に対する想定流域でのパラメータ値の比を土壌パラメータ比 r_p と定義する。現状のゴルフ場ではプレーヤーが快適にプレーできるようにとゴルフコースの地下にかなり密な配水管網が張り巡らされているようである。そこで、こうした現状を勘案し r_p については1/1、1/2、1/4、1/8ならびに1/10の5通りを検討する。計算の便宜上4つのパラメータが開発にともなって極端にバランスを失わないと仮定して4つとも同一の r_p で変化させる。またゴルフ場の開発規模に伴う流況変化を捉えるために全流域面積に占める森林面積率 r_f (森林で100%)も重要となることから r_f は0%、25%、50%、75%、100%の5通りについて検討する。 λ_0 に関しては一般にゴルフ場のピーク流出係数とされている $f_p=0.9$ となる値を本モデルを通してトライアルに求めたところ、他のパラメータの値やその組み合わせによらず森林の約25倍に相当することが判った。したがって本計算では表-1にある森林値の25倍を基準値として採用する。

3・6 気象・蒸発散条件の設定

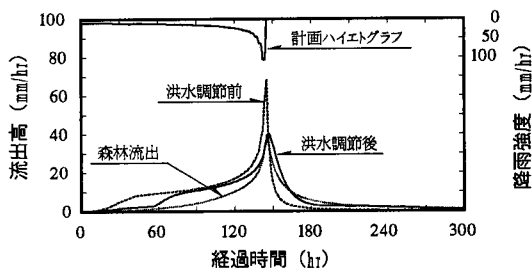


図-2 洪水調節計算例

気象データ（気温，湿度，風速，日照時間）は白川谷流域（1991.1～12.）の値を用いる．遮断蒸発量については白川谷流域で同定されたパラメータをそのまま用いる．ただし，草地の空気力学的抵抗が森林よりも同一の飽差に対して大きくなることから，ゴルフ場の部分に関してはPenman式の空気力学的項（第2項）に関して補正を加える．すなわち森林（平均樹高20m）と草地（平均樹高10cm）についてそれぞれの場合の地面修正量および粗度長を鈴木⁴⁾にしたがって計算し，空気力学的抵抗の比を考慮してそれぞれの可能蒸発散強度を算定する．一方，蒸散強度については想定条件下では両者の間に蒸発強度の場合ほどの差異は見られないことから近似的に同一量を与える．最終的に流域からの蒸発量，蒸散量は森林部分およびゴルフ場部分の面積による重みつき平均値で与える．

3・7 計算方法

流出計算は便宜的にゴルフ場（自然に手の加えられた）流域と森林流域とに分けて考える．まず降雨遮断モデルにより地表到達雨量を算定し，これを基にそれぞれからの流出量を計算して両者の面積率による重みつき平均を行い全流出量を得る．続いて調整池に関する連続式から放流量を算定するという手順をとる．

4. シミュレーション結果と検討

4・1 洪水調節例

降雨波形を白川谷流域ベースとした場合の洪水調節計算例の一部を図-3に示す．図を見て判るようにピーク流出付近では明らかに調整池によってピークカットされているが2～3日間後では森林流量とほぼ一致してくる．したがって通常の降雨で調整池が機能を発揮するのは極めて短期間に限定される．

4・2 流況曲線

白川谷流域での降雨波形をベースとした場合および筑波流域をベースとした場合について土壌パラメータ比 $r_p=1/10$ の場合の流況曲線を図-4，5に示す．流況曲線は異なった年降雨量のケースを比較できるように $r_f=100\%$ での平水量（185日間確保し得る流量）で規準化されている．特徴的な点を列記すると，

- ① いずれのケースについても森林面積率 r_f が減少するほど曲線の勾配は大きくなる傾向を示す．
- ② 同一年降雨量であっても比較的均等降雨型の白川谷ベースの方が集中降雨型の筑波ベースよりも曲線の遞減は若干大きくなる傾向にあること．

が認められる．

4・3 流況評価指標の定義

流況曲線の変化の定量評価にあたり，通例に従って185日，275日および355日間確保し得る流量をそれぞれ平水量（ Q_{185} ），低水量（ Q_{275} ）および渇水量（ Q_{355} ）とする．ここで比較のために Q_{275} および Q_{355} を Q_{185} で規準化した量をそれぞれ低水量指標 I_{275} および渇水量指標 I_{355} と定義する．

図-6，7に低水量指標 I_{275} を示す．年降雨量が大きいほど r_f の減少にともなう流量の遞減率は大きい．降雨波形で見ると

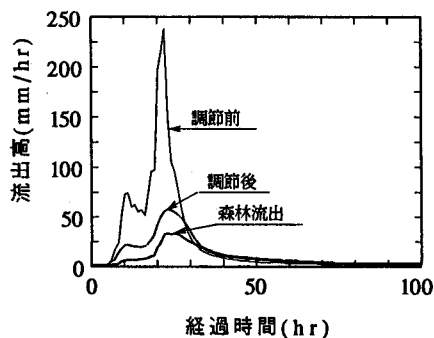


図-3 通常降雨時の洪水調節例
(年降雨量1800mm)

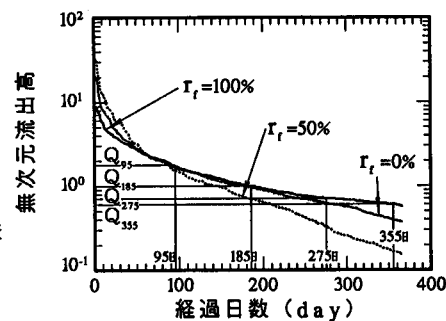


図-4 流況曲線（白川谷ベース）

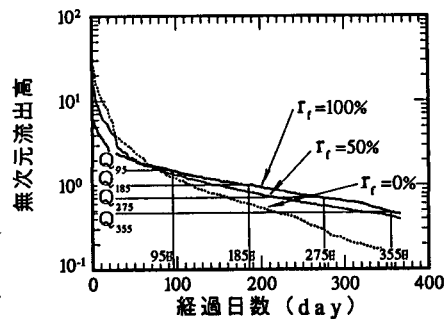


図-5 流況曲線（筑波ベース）

と全般的に集中降雨型に近い筑波ベースの降雨波形の方が均等降雨型の白川谷ベースに較べて森林状態からの逓減率はやや大きめである。これらは水源かん養機能の中核をなす流域の浸透能、保水能に比較して降雨強度が大きいと早期に直接流出する成分が多くなるためと考えられる。土壌パラメータ比 r_f が小さくなるにつれて浸透能、保水能が減少するため加速度的に I_{275} は減少している。一方森林面積率で見ても r_f が50%の場合と0%の場合とを比較するとその差は極めて大きい。

特に流量の逓減率が必ずしも森林面積率 r_f に比例していない点は注目される。したがって r_f および r_p をそれぞれ単独に見た場合でさえ非線形性が強い上に水源かん養機能の低い流域面積が増加するとこれらの相乗効果により低水時の流況はますます悪化することが示唆される。

一方、図-8、9に示す湧水量指標 I_{355} で見ると降雨形態の差異が表れている。豊水年と湧水年について筑波ベースの場合であるとそれぞれの平水年に対する比率にさほど差異は見られないが、白川谷ベースの場合に豊水年と湧水年とでの流況変化は大きい。

トータルボリュームとしての流況変化を把握するために、自然に手を付けていない森林状態($r_f=100\%$)の場合の流況曲線を基準に取って、開発に伴う流量の減少量を対象として以下に定義する流況指標を用いて

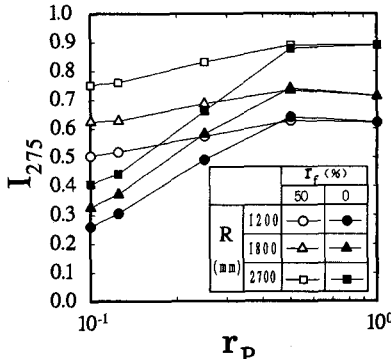


図-6 低水量指標 (白川谷ベース)

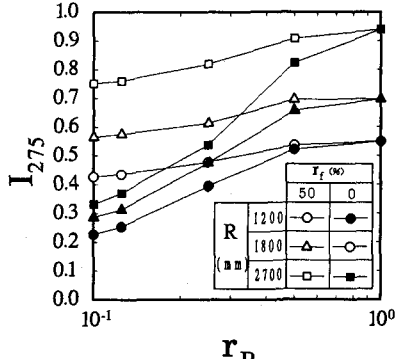


図-7 低水量指標 (筑波ベース)

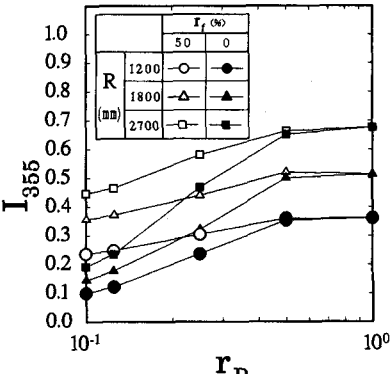


図-8 湧水量指標 (白川谷ベース)

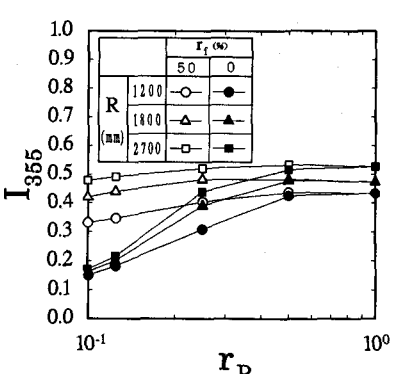


図-9 湧水量指標 (筑波ベース)

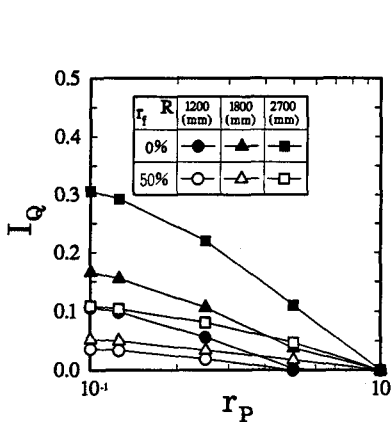


図-10 流況指標 I_Q (白川谷ベース)

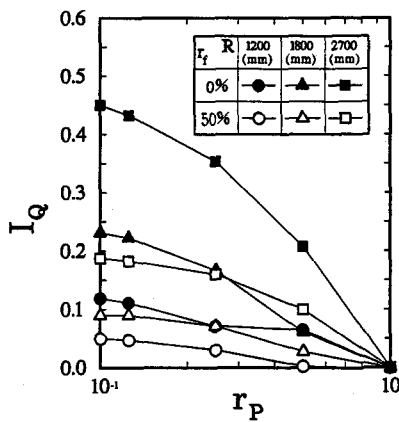


図-11 流況指標 I_Q (筑波ベース)

検討する。

$$I_q = \left\{ \sum_{q < q_f} (q_f - q) \right\} / \sum q_f$$

$$I_R = \left\{ \sum_{q < q_f} (q_f - q) \right\} / \sum r$$

ここに、 q_f ：森林流出高(mm/day)、 q ：流出高(mm/day)、 r ：日雨量(mm/day)である。

図-10～13に流況指標 I_q および I_R を示す。トータルボリュームとしての流況の変化を見てもやはり日流量としての場合と同様に r_f 、 r_P の減少とともに流況指標は加速度的に増加しており森林状態に較べて流量の減少は大きい。とりわけ、日流量でみた指標 I_{275} 、 I_{385} ではいずれも r_P が50%の場合と0%の場合との比率は概ね2倍程度であるのに対して、トータルボリュームで見た I_q 、 I_R では同じ場合についておよそ3倍程度の差異が生じており、開発が年間での流況変化に与える影響は大きい。

5. おわりに

本研究では数値モデルにより洪水調整池によるピークカット効果を加味した流出シミュレーションを行い、森林流域の大規模開発にともなう低水、渇水時の流況変化について検討した。その結果、大規模開発にともなって設置される調整池は通常規模の降雨ではピーク流出が生じるわずかな間にこそ効果を発揮するものの、それ以外では影響を及ぼさなかった。したがって本例のように低水、渇水時が対象の場合に調整池で人為的な流出制御がなされないときは、流域の水源かん養機能にあずかる浸透能、保水能の変化こそが重要となる。

土壌状態の改変にともなう流出特性の変化について特に水源かん養機能と密接に関わると考えられるモデルパラメータを抽出して流出シミュレーションを行った結果、ゴルフ場での水源かん養機能が低下するほど加速度的に低水、渇水時の流量は減少した。したがって、水源かん養機能の低い流域面積が増加すればするほど輪をかけて流況が悪化する結果を得た。こうした点について対策を講ずるとすれば、例えば最下流部の調節池に貯めるのではなく流域内の各所に貯留して流域への再かん養を促進するなり、調整池のオリフィス部分に操作可能なゲートを設けて下流での需要に応じた人為的な操作を考えるべきであろう。

参考文献

- 1) 端野道夫・吉田弘・中谷達志：実樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討，水工学論文集，第35巻，pp. 89-92，1991.
- 2) 端野道夫・吉田弘・市原秀樹：降雨遮断およびSPACを考慮したタンクモデルによる長期流出解析，水工学論文集，第35巻，pp. 93-98，1991.
- 3) 例えば水理公式集
- 4) 塚本良則編：森林水文学，p. 72，文永堂出版，1992.

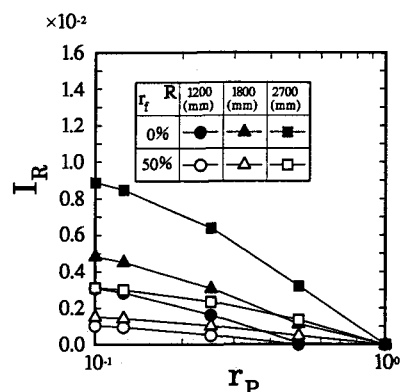


図-12 流況指標 I_R (白川谷ベース)

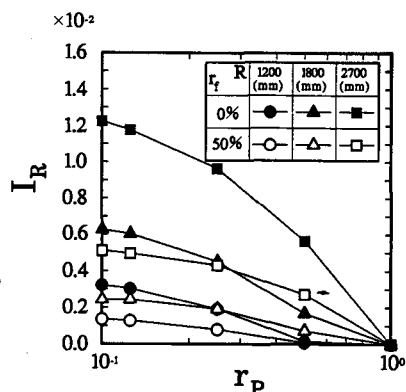


図-13 流況指標 I_R (筑波ベース)