

橋梁の損傷状況からみた恵庭岳ポロピナイ沢 土石流の流動形態に関する考察

STUDY ON FLOWING FORM OF DEBRIS FLOW AS SEEN FROM DAMAGES ON
A BRIDGE OVER POROPINAI STREAM IN THE FOOT OF MT.ENIWA

藤浪 武史¹・阿部 孝章¹・倉橋 稔幸¹

Takeshi FUJINAMI, Takaaki ABE, Toshiyuki KURAHASHI

¹国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: fujinami-t22aa@ceri.go.jp

E-mail: abe-t@ceri.go.jp

E-mail: kurahashi-t@ceri.go.jp

Key Words: debris flow, depth of debris flow, damage to the bridge by debris flow, experiment

1. はじめに

北海道では、2014年9月10日から11日にかけて活火山である恵庭岳周辺に集中的な降雨があり、山麓に土石流が発生した¹⁾。土石流が発生した恵庭岳ポロピナイ沢(写真-1、図-1)を横断する国道453号の丸駒橋では、上流側にある道路橋が残存し、橋面上に土石が堆積していた(写真-2)。

著者らのグループでは土石流発生2日後に現地調査を行った。土石流が発生した溪流において、横断構造物が残存していた場合、土石流の流下痕跡か

ら多くの情報が得られることが多い。そのため、現地を丁寧に観察し、痕跡が生じた原因を推察することは、土石流の流動形態の解明と土石流被害の軽減に関して重要である。しかし、土石流の流下と橋梁の損傷との分析事例はあまり見られない。この土石流では土石流が橋梁上部を乗り越えたにも関わらず橋桁上流面に大きな衝突痕が見られないことを確認した。本稿では、これらのような橋梁の損傷状況はどのような土石流の流動形態が原因なのか水路実験から解明を試みることを目的とした。



写真-1 恵庭岳ポロピナイ沢の状況

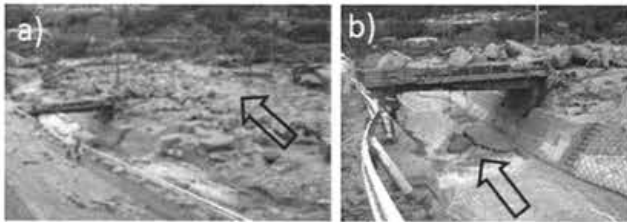


図-1 ポロピナイ沢と丸駒橋の位置関係



写真-2 歩道橋が流下した丸駒橋と左岸側橋面の堆積土石

土石流が流下した溪流で橋梁が残存し、橋面上に土石が堆積していた事例は2014年7月の長野県南木曾町梨子沢橋でも見られた(写真-3)。



中部地方整備局hpから引用 2014年7月9日土石流発生(南木曾町撮影) 10日撮影

写真-3 長野県南木曾町梨子沢橋の状況 (a) 梨子沢橋周辺の状況²⁾, (b) 土石堆積状況³⁾)

2. 土石流発生状況

気象庁発表の降水分布では、2014年9月11日午前6時までの12時間で支笏湖西岸を中心に北東-南西方向へ線状に総雨量300mmを超える集中的な大雨が降った(図-2)。特に奥漁観測地点では午前1時~4時までの3時間に95mm、また午前5時に最大時間雨量77mmを観測し、午前7時までに連続雨量412mmを記録した(図-3, 4)。

土石流が発生した恵庭岳ポロピナイ沢は、アイヌ語で「大きい石のある川」あるいは「大きくえぐれた川」の意味がある⁵⁾。恵庭岳西麓のこの地域は、17世紀初頭に現火口を形成した水蒸気爆発により発生した岩屑なだれと、その後の2層の土石流堆積物を基盤としている⁶⁾。

そのポロピナイ沢を横断する国道453号の丸駒橋は、上流側に道路橋、下流側に歩道橋が併設され道路橋は橋長25mの1径間鉸桁構造(図-5, 6)、設計時の図面から桁下高は概ね4m(図-6)であることが読み取れ、現地調査から土石流発生時とほぼ同様と考えられた。そのため、桁下空間の断面積は100m²程

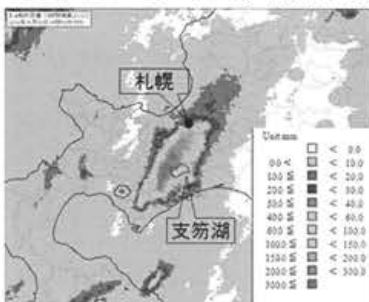


図-2 2014年9月11日午前6時までの12時間積算雨量分布図⁴⁾



図-3 ポロピナイ沢と雨量観測所との位置関係

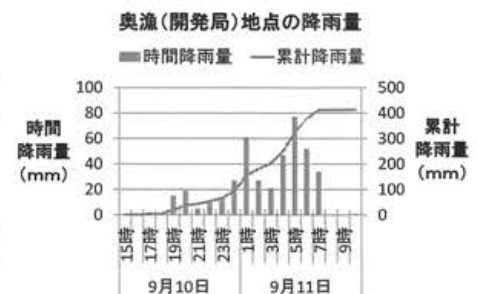


図-4 奥漁観測地点の降雨状況

度と考えられる。国土地理院ホームページから丸駒橋地点の溪床高は標高約304m、周辺の溪床勾配は約5度と求められた。

丸駒橋地点の土石流ピーク流量を式(1)に示す合理式から推定する。丸駒橋地点の集水面積0.83km²、流出率を1.0、最大時間降雨量77mmを使用し、

$$Qp = \frac{1}{3,600} \times fRA \quad (1)$$

ここで、 Qp は流量(m³/s)、 f は流出率、 R は降雨量(m/hr)、 A は流域面積(m²)であり、17.8m³/sが求められる。また、式(2)から土石流のピーク流量 Qsp を推定する。

$$Qsp = \frac{C_*}{C_* - C} \times Qp \quad (2)$$

ここに一般的な値として堆積層の容積濃度 C_* に0.7、土石流の平均濃度 C に0.55を代入⁷⁾して土石流のピーク流量約80m³/sを推定した。

丸駒橋周辺の痕跡等の観察から、ポロピナイ沢の土石流の主な特徴は以下の通りである。

- ① 土石流が橋梁右岸側を直進し(写真-2, 4)、橋右岸側及び右岸取り付け部をせき上げ乗り越えたこと。
- ② 橋梁左岸側では橋面より約3m高い位置に土石流あるいはその飛沫の痕跡とみられる樹幹の傷があったこと(写真-5)。併せて11日午後3時頃撮影の航空写真等から橋面上に土石が堆積していたこと(写真-2, 6)。
- ③ 目視から丸駒橋周辺の土石の大きさは径0.1~2m程度であったこと(写真-4, 6, 7, 9)。

④ 上流に面する橋桁右岸側のリブ周辺に土石の衝突痕が見られた外は、橋桁、橋台前面および桁フランジ下面に泥質分が付着していたこと（写真-7,8）。

⑤ 土石流の流下方向の衝撃を直接受けない下流側の歩道橋桁が流下したこと（写真-2, 5, 9）。

このポロピナイ沢土石流では、国道の的確な通行規制と土石流の発生・流下・堆積範囲が非居住地であったこと等により人的被害は発生しなかった。

丸駒橋周辺の痕跡及び航空写真から、土石流は丸駒橋右岸及び右岸取り付け部を乗り越え、その一部は橋面上3m程度を上限に流動した（写真-5）。丸駒

橋右岸側および右岸盛土部分を流下した土石の大きさに対して、右岸上流側の橋桁の損傷程度が小さく感じられた。併せて、土石流のピーク流量推定値に比べて丸駒橋の桁下断面積が大きい。

これらのことから、丸駒橋右岸側を流下した土石流は、橋桁衝突後せき上がり、せき上がった土石は橋桁を損傷させない程度の水平力を持って流動したと推察される。

一方、2014年7月の長野県南木曾町の事例（写真-3）では、国土地理院ホームページから梨子沢橋地点の溪床高は標高約445m、周辺の溪床勾配は約5～6度と求められた。

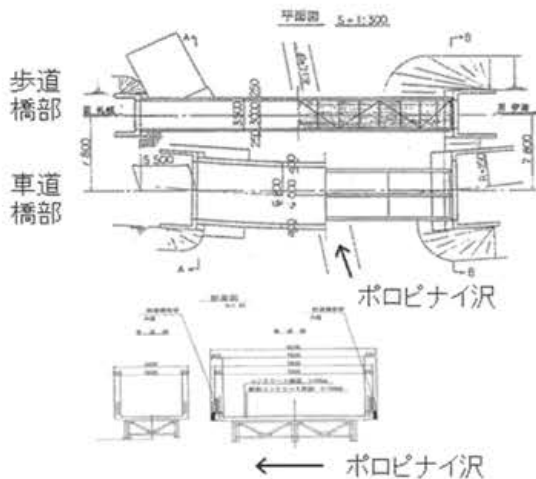


図-5 丸駒橋平面および断面図

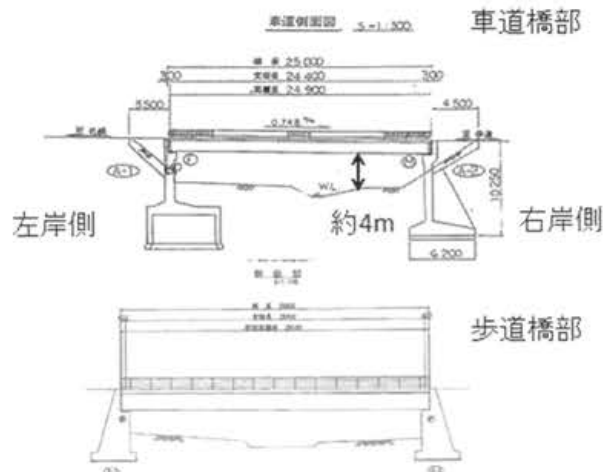


図-6 丸駒橋側面図



写真-4 丸駒橋右岸側を直進した土石流



写真-5 丸駒橋左岸下流の樹幹に残った土石流の痕跡



写真-6 丸駒橋上に堆積した土石^{B)}
(手前が右岸側)



写真-7 丸駒橋上流側桁の衝突痕の状況

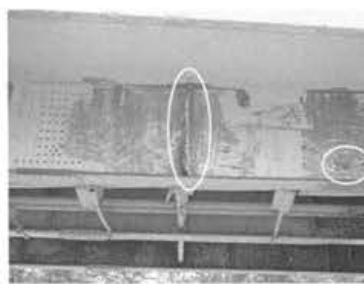


写真-8 上流側桁の衝突痕やリブの損傷状況



写真-9 下流側から見た丸駒橋と流下した歩道橋の橋台

3. 実験の概要

前章に記した土石流の性状を踏まえ、水路実験から土石流の発生および観察を行い、挙動を解明するため、水路長 2.0m、水路幅 10.0cm、側壁高 20cm の縮尺 1/100 程度の可傾式実験水路を製作しフルード相似則を踏まえ実験を行った(写真-10)。河床材料は土石を模擬し粒径 3~5mm の購入砂利(大磯 1分)を使用した。側壁の一方は観察のためアクリル板で製作し、1cm のメッシュシートを貼り付けた。

橋桁模型は、水路側壁と干渉しない幅のアルミ製(桁長さ 9.4cm、桁高さ 2.0cm、幅 4.0cm)を作成した。この橋桁模型両側を 2mm 幅のアクリル板で 3 分力計(日章電機(株)製 LMC3502A-10NWP)に接続し、橋桁にかかる上下流方向などの作用力を測定した(写真-10、図-7,8)。測定はミリ秒間隔で行い、平滑化処理は当該時点と前後 100 ミリ秒分の計 201 データの平均とした。

土石流の流下を動画として 640×480 画素、毎秒 120 フレーム、焦点距離 25mm (35mm フィルムカメラ

換算)に設定して記録した。

実験水路を使用した土石流実験は、水路勾配、水路への供給水量、桁下高を変化させて実験を行った。実際の土石流は、概ね勾配 15 度以上で発生し 10 度~20 度で流下し 2 度から 10 度で堆積すると言われている⁹⁾。本実験では、橋桁による土石流のせき上げ現象の発生と、橋桁への作用力の確認を意図して水路勾配を 20 度と 25 度に設定した。水路への水供給は一定量とし、水量は毎分 15 リットル、20 リットル、25 リットルの 3 種を設定した。河床については、水路上部 1m を厚さ 5cm の砂利を敷き、水路下部 1m を河床材料で覆った板による固定床(以下、固定河床という)を用いた。桁下高については、1cm および 2cm は固定河床により実験を行った。参考として水路全長 2m を厚さ 5cm の砂利を敷いた河床(以下、移動河床という)で実施した桁下高 3cm の実験結果とも比較した。主な実験内容を表-1 に示す。

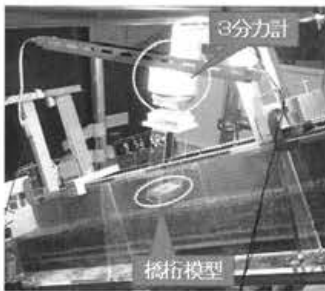


写真-10 実験水路の概要

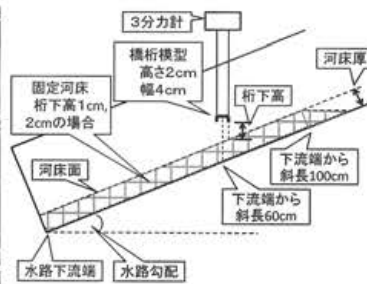


図-7 実験水路の計測位置詳細

表-1 主な実験内容

	勾配別実験	流量別実験	桁下高別実験
水路勾配	20度, 25度	25度	25度
供給水量	毎分20リットル	毎分15, 20, 25リットル	毎分20リットル
桁下高	2cm	2cm	1, 2, 3cm 固定(桁下高 1cm, 2cm) 移動5cm厚 (桁下高 3cm)
河床状態	固定	固定	移動5cm厚 (桁下高 3cm)
河床材料	直径3~5mm	直径3~5mm	直径3~5mm
橋桁応力測定	あり	あり	あり

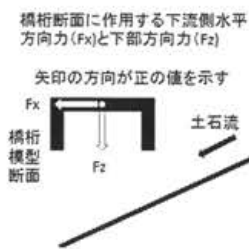


図-8 橋桁模型に係る作用力の模式

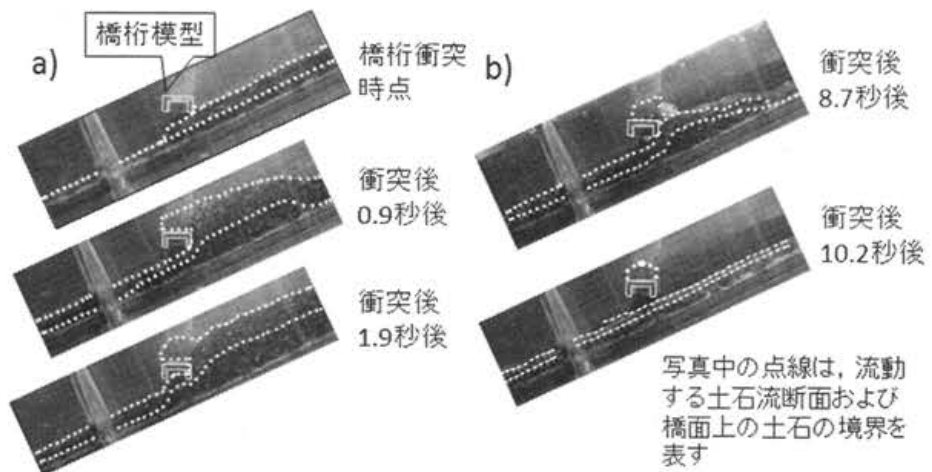


写真-11(a)~(b)) 橋桁を擁した土石流断面の挙動(水路勾配 25 度、供給水量毎分 20 リットル、桁下高 2 cm の場合)

4. 結果と考察

(1) 実験結果の概要

土石流実験の結果、土石流が橋桁衝突後せき上がり、せき上がった土石は下方あるいは斜め下方に流動し、橋面上の土石堆積が継続した事例を本実験で確認した。この事例の断面画像を写真-11 a) ~b) に示す。この事例は水路勾配 25 度、水路への供給水量毎分 20 リットル、桁下高 2cm の組み合わせであった。

土石流が橋桁に衝突 (写真-11 a) 上) 後、土石は橋桁上流の上方にせき上がり (写真-11 a) 中)、その後桁下空間を充填するように土石が流動 (写真-11 a) 下) した。そして、桁下空間の土石流動が橋桁上流にせき上げた土石を流下 (写真-11 b) 上) させることで、橋面上に土石が取り残されたと考えられる (写真-11 b) 下)。これ以降、水路勾配 25 度、水路への供給水量毎分 20 リットル、桁下高 2cm を中心に作用力 F_x (上下流方向) および F_z (上下方向) に関して実験で得られた結果を分析する。また、図-8~10 では、実験条件ごとに上下に「時間—作用図」を示し、縦軸を一目盛り 5N とした。

(2) 水路勾配に関する分析

供給水量毎分 20 リットルで桁下高 2cm の場合、図-8 から、水路勾配 25 度では土石流が橋桁衝突時は、 F_x 方向よりも F_z 方向の作用力の方が大きかった。約 10 秒以降で F_x 方向及び F_z 方向の作用力が減少した。特に F_x 方向の作用力がほぼ 0 になったことから、橋桁でせき上げられた土石が流下したことを表している。一方、 F_z 方向は作用力が 1.3N でほぼ一定となった。このことは橋面上に土石が堆積していることを表している。

水路勾配 20 度では、水路勾配 25 度よりも F_x 方向と F_z 方向ともに土石流が橋桁衝突時の作用力は小さかった。約 10 秒以降、水路勾配 20 度は F_x 方

向と F_z 方向ともに作用力が継続していることから、橋桁上流のせき上げた土石が残り、同時に橋面上に土石が堆積していることを表している。

(3) 供給水量に関する分析

水路勾配 25 度で桁下高 2cm の場合、図-9 から、衝突後の作用力は、供給水量毎分 25 リットルおよび 20 リットルともに F_x 方向よりも F_z 方向の方が大きかった。また、供給水量毎分 25 リットルでは、約 10 秒以降に F_x 方向の作用力が約 0.5N でほぼ一定となり、せき上げた土石の橋桁への作用が継続しているが、 F_z 方向の作用力がほぼ 0 となり、橋面上の土石が残らずに流下したことを表している。

一方、供給水量毎分 15 リットルでは、土石流は発生したが桁には接触しなかった。

(4) 桁下高に関する分析

水路勾配 25 度で供給水量毎分 20 リットルの場合、図-10 から衝突後の作用力は、桁下高 1cm と 2cm はともに F_x 方向よりも F_z 方向の方が大きかった。しかし、桁下高 1cm では約 40 秒経過時点でも F_x 方向および F_z 方向の作用力が生じており、橋桁上流にせき上げた土石が存在し同時に橋面上の土石も残存していることがわかる。一方、桁下高 2cm ではせき上げた土石が約 10 秒以降に解消されていた。

桁下高 1cm と 2cm は固定河床であり、移動河床である桁下高 3cm と供給土砂量等が異なり直接比較は出来ないが、図-10 から桁下高が小さいほど橋桁衝突時の F_x 方向及び F_z 方向ともに作用力大きいことが示された。また、桁下高 3cm の場合、衝突時の作用力は F_x 方向の方が F_z 方向よりも大きかった。

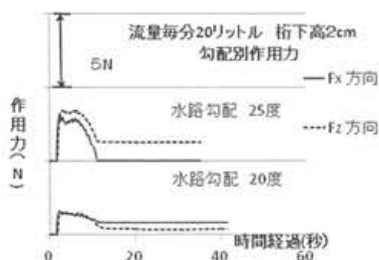


図-8 橋桁に係る水路勾配別作用力

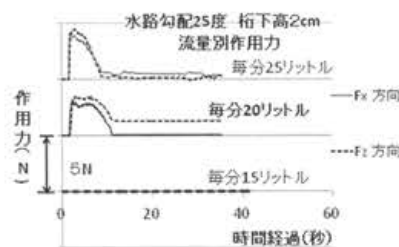


図-9 橋桁に係る流量別作用力

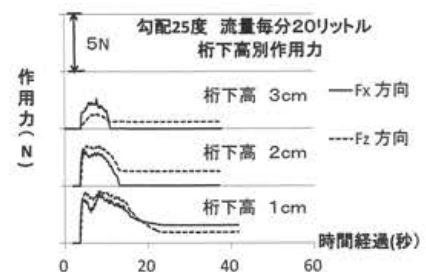


図-10 橋桁に係る桁下高別作用力

(5) 考察

本研究の実験から土石流の挙動において、以下の3分類に大別できることがわかった。①土石流が発生したが流動深が小さく橋桁に接触しなかった。(水路勾配25度、供給水量毎分15リットル、桁下高2cmの場合)、②土石流が橋桁によりせき上げられ、その後橋桁を土石が越流するがすぐに桁下空間を土石が流下することで、橋面上に土石が残った。丸駒橋もこの場合と考えられる。(水路勾配25度、供給水量毎分20リットル、桁下高2cmの場合)、③土石流が橋桁によりせき上げられ、その後橋桁を土石が越流するがすぐに橋面上部を土石流が流下し橋面上の土石を流下させた。この場合、高欄の損壊が考えられる。(水路勾配25度、供給水量毎分25リットル、桁下高2cmの場合)

丸駒橋では、上流に面した橋桁に土石による大きな衝突痕が見られなかった。これらのことから、土石流は橋桁によってせき上げられ橋桁への水平方向の衝撃が緩和されたことが推察される。また、実験結果から河床礫径の6~10倍の桁下高3cmにおいてもせき上げが発生したことから、橋梁の土石流被害の軽減には、どの程度桁下空間を確保すべきか定量的に示すことができた。

本研究の実験結果から推察すると、梨子沢橋(写真-3)でも橋桁による土石流のせき上げおよび乗り越え現象が発生したのと考えられる。

5. まとめ

丸駒橋は、土石流発生から数日経った道路啓開後にすでに災害復旧工事用車両の通行に供していた。このように土石流が橋面上部を乗り越えても橋梁が流出せず機能を確保している場合がある。本研究の実験から、橋桁による土石流のせき上げによって、土石流が橋梁を乗り越えても橋梁への損傷が少ない可能性があることが示唆された。今後は、水路勾配・供給水量・桁下高などの条件を変化させて追加実験を行い、橋梁の損傷状況と土石流の流動形態との関係解明を進めていきたい。さらに土石流の流下方向の衝撃を直接受けない下流側の歩道橋桁が流出したことに関して、土砂の混合による流体の密度変化と橋桁に掛かる上下方向(F_z)の作用力との関係および参考文献1)に記載されている橋台付帯施設(杓座アンカーボルト等)の損傷状況等から歩道橋の流出メカニズムの解明に努めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所:平成26年(2014年)北海道地方被災橋梁等調査報告, 国総研資料 第868号 土研資料 第4307号, pp.1-37, 2015.
- 2) 国土交通省中部地方整備局: TEC-FORCE (緊急災害対策派遣隊) 平成26年度南木曾町土砂災害, http://www.cbr.mlit.go.jp/saigai/tec-force/pdf/h26_nagiso_pamphlet.pdf, 2016.05.24.
- 3) 国土交通省砂防部:長野県木曾郡南木曾町読書で発生した土石流災害, http://mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h26dosha/140805_nashizawa_dosekiriyuu.pdf, 2016.05.24.
- 4) 気象庁:北海道(石狩・空知・後志地方)に特別警報発表, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1409/11a/kaisetsu2014091106.pdf>, 2016.05.24
- 5) 北海道環境生活部:アイヌ語地名リスト, p.122, 平成13年3月.
- 6) 中川光弘, 増田健介, 勝井義雄:後支笏カルデラ, 恵庭火山の最新の噴火活動, 火山, 39巻, 5号, pp.237-241, 1994.
- 7) 芦田和男, 高橋保, 沢田豊明:山地流域における出水と土砂流出(5)-穂高砂防観測所の観測結果-, 京大防災研究所年報, 第19号B, pp.345-360, 1976.
- 8) 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部:支笏湖周辺の国道の被災・復旧の記録, http://www.sp.hkd.mlit.go.jp/douro/pdf/9.11_shikotsu.pdf, 2016.5.24.
- 9) 土砂災害研究部 砂防研究室:土石流・流木対策設計技術指針解説, 国土技術政策総合研究所資料第905号, p.1, 2016.

(2016.5.31 受付)