

一般均衡型CUEモデルによる 地域防災投資の便益評価

西鶴 誠希¹・武藤 慎一²

¹ 学生員 山梨大学 大学院医工農総合教育部工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail:g17tc011@yamanashi.ac.jp

² 正会員 山梨大学准教授 大学院総合研究部工学域 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail:smutoh@yamanashi.ac.jp

近年、各地で豪雨による洪水被害、土砂災害が頻発している。その一因は地球温暖化にあるとされており、早急に適応策の実施が必要な状況にあると考えられる。適応策の実施にあたっては、ハード整備は多大な整備費用が必要という問題、ソフト施策も立地規制などは経済損失をもたらすという問題がある。そこで、防災投資の効果と、負担や損失の両者を評価した上で総合的に適応策評価を行うことが重要である。そこで本研究では、地域防災投資を評価するための一般均衡型CUEモデルを開発した。そこでは、平常時と災害時とに分けて各主体の行動モデルを定式化し、平常時と災害時に対する期待効用を用いた立地モデルを構築した。一般均衡化により、洪水被害の企業生産への影響を介して、最終的に家計の効用水準に与える影響の評価が可能になった。

Key Words : flood damage, CUE model, Barro's CES function, Benefit evaluation

1. はじめに

2014年8月に広島豪雨による土砂災害が発生し、2015年9月には関東・東北豪雨による洪水被害、今年（2017年）の7月には九州での豪雨による洪水被害が発生した。これまで様々な治水対策により、洪水被害は軽減されてきたかに思われていたが、近年になり再び洪水リスクが高まっているといえる。その一因は地球温暖化にあるとされ、IPCCの第4次評価報告書¹⁾によると地球温暖化により大雨の頻度がますます増加していくと予測されている。そして、地球温暖化による被害を抑制するための、いわゆる適応策を早急に実行に移していくことが求められているものと考えられる。本研究では、近年洪水被害が多く発生していることに注目し、洪水を対象とした適応策の評価を行うことにする。

洪水を対象とした適応策とは、具体的には堤防整備や調整池の整備などのハード整備から、避難体制の確立や洪水リスクの著しく高い地域の立地を規制する等のソフト施策まで、様々なものが考えられる。この中でハード整備は、これまで着実に実行されてきたものであり、洪水被害の軽減という効果も一定程度認められるものである。しかし、今後ますます高まるであろう洪水リスクへの適応策としてハード整備を選択する場合、これまで

以上の高いレベルの整備が必要と考えられ、そのためには多額の投資費用が必要となる。財政事情が厳しい今日、いくら防災のための投資といっても、やはり投資効率の高い整備を効果的に進めていくことが必要と考えられる。一方、ソフト施策についても、避難体制が確立され、スムーズな避難がなされたとしても、物理的被害が抑制されるわけではない。そのため、その後の復興の問題等も考えれば、避難体制の確立のみで適応策が十分であるとは決して言えない。また、立地規制についても、仮に洪水が発生したとしても、その地域に資産価値の高い構造物がなければ大きな被害が発生しないという効果は期待されるが、立地規制により利用可能面積が縮小されることによる経済損失が発生することに注意が必要である。

以上より、いずれの適応策を実行するにしても、効果がある一方で負担や損失が発生する。それらを総合的に判断して効果的な適応策を実行していくことが重要であると考えられる。そのときに応用都市経済（CUE：Computable urban economic）モデルが有効といえる。高木らは一連の研究において²⁾³⁾、洪水対策が平常時の立地選択に影響を与える点に着目し、治水効果の経済評価をCUEモデルにより実施している。また、今井、佐藤ら⁴⁾は水害対策やコンパクトシティ化に向けたソフト対策が都市内人口分布に及ぼす影響をCUEモデルにより評価

している。しかし、CUEモデルは土地市場のみしか考慮されていない部分均衡型のモデルであり、そのため水害が発生した際の所得や雇用の変化、企業生産への影響が評価できないという問題があった。これは企業の資本の損失が企業生産の低下を介して、最終的に家計の効用にもつながる。したがって、従来のCUEモデルによる防災投資の評価は過小評価であった可能性が指摘できる。

これら問題に対しては、CUEモデルの一般均衡化が有効と考えられる。武藤ら⁹⁾では、交通整備評価を対象としたものではあるがCUEモデルの一般均衡化を試みている。本研究では、武藤らにより構築された一般均衡型CUEモデルを用いることにより、洪水被害時の所得や雇用の変化まで考慮した洪水を対象とした適応策評価を実施することを目的とする。これにより、適応策として立地規制を導入した場合の家計および企業立地に与える影響も評価できる。さらに洪水被害による企業生産の低下がもたらす間接的被害も考慮されることから、適応策の間接被害の軽減効果まで含めた評価が可能になる。

2. 防災投資評価のための一般均衡型CUEモデル

(1) モデルの全体構成

本研究で構築する一般均衡型CUEモデルも、従来のものと同じく複数のゾーンに分割された都市圏を対象とする。各ゾーンには代表家計と産業部門別の企業、さらに政府、公的投資部門、民間投資部門が存在する。このうち企業に関しては、産業部門を農林水産業、製造業、業務系サービス業、商業、対個人サービス業、不動産業、貨物運輸業、旅客運輸業の8部門とした。

家計の立地選択については、ゾーン*i*に勤務する家計が居住地としてゾーン*j*を選択するものを考える。なお、ゾーン*j*に居住しゾーン*i*に勤務する家計を対象とするのは、武藤らと同じである。この立地選択行動は、財消費行動と同じように、家計が居住地*j*でどれだけ効用を得るのかを決定する問題としてモデル化する。ただし、ここでは平常時と災害時のそれぞれに対する効用水準に対して立地選択を行うものとする。その具体的な定式化は後に詳説するが、高木と同様に平常時と災害時の効用の期待値を基に立地を選択するものとなっている。

平常時と災害時の効用水準の決定に関しては、武藤らの一般均衡型CUEモデルと同様である。すなわち、家計の財消費に係る支出最小化問題を解いて得られる財、サービスの需要関数を直接効用関数に代入することにより効用水準を求める。しかし、この家計需要に対して、財、サービスを供給する企業は、平常時と災害時とで行動が変わる点を考慮する。企業の生産行動モデルの枠組みは、

武藤らの一般均衡型CUEモデルと同様であるが、災害時には資本ストックの損壊や交通ネットワークの寸断によ

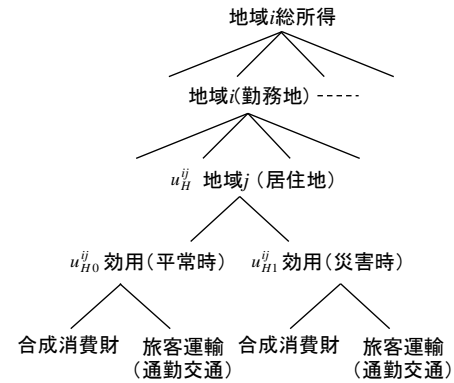


図-1 家計の立地選択行動モデルのツリー構造

る影響などをモデルに入力し、その結果企業生産がどれだけ低下するのかを算出する。それに伴い、家計需要も減少し、効用水準が低下することが評価できる。

こうして求められる災害時の効用水準と、平常時の効用水準の期待値をとった期待効用水準を基に、家計は立地選択を行うものとする。なお、このときの期待効用は、災害発生確率により、それぞれの部分の重み付き平均を求めたものとする。以上の定式化により、本モデルでは家計は平常時の効用だけではなく、災害時の効用も考慮に入れて立地を選択する点が評価可能となる。

(2) 家計の立地選択行動モデル

家計の立地選択行動モデルの概要は図-1のとおりである。勤務地*i*の家計がゾーン*j*を居住地として選択する立地選択行動モデルは以下のように表される。

$$e_H^i = \min_{u_H^j} \left[\sum_j p_v^j u_H^j \right] \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } u_H^i = \gamma_{LH}^i \left[\sum_j \alpha_{LH}^j \left\{ \beta_{LH}^j u_H^j \right\}^{\frac{\sigma_{LH}^i - 1}{\sigma_{LH}^i}} \right]^{\frac{\sigma_{LH}^i}{\sigma_{LH}^i - 1}} \quad (1b)$$

ただし、 u_H^j : ゾーン*j*に居住しゾーン*i*に勤務する家計が獲得する効用水準、 p_v^j : 効用水準の価格 (式(15)より決定される)、 $\alpha_{LH}^j, \beta_{LH}^j$: 分配パラメータ ($\sum_j \alpha_{LH}^j = 1, \sum_j \beta_{LH}^j = 1$)、 γ_{LH}^i : 効率パラメータ、 σ_{LH}^i : 代替弾力性パラメータ。

式(1)は、ゾーン*i*に勤務する家計の総効用 u_H^i を基に、彼らが居住地*j*を選択し、そこでどれだけ効用を得るのかを、支出最小化問題により表現したものである。この中で p_v^j は効用水準の価格と呼んでいるが、後に示す。

式(10)のゾーン*j*に居住しゾーン*i*に勤務する家計の合成消費財および通勤交通の消費行動モデルから導出される p_v^j (式(12)) により求められる。すなわち u_H^j は、合

成消費財と通勤交通の合成財を意味するともいえる。これをここでは、従来の立地モデルと合わせるために効用水準と呼ぶことにしたものである。

式(1)を解くと、 u_H^i が以下のとおり求められる。

$$u_H^i = \frac{1}{\gamma_{LH}^i (\beta_{LH}^i)^{1-\sigma_{LH}^i}} \left(\frac{\alpha_{LH}^i}{p_V^i} \right)^{\sigma_{LH}^i} \Psi_{LH}^i \frac{\sigma_{LH}^i}{1-\sigma_{LH}^i} \cdot u_H^i \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \Psi_{LH}^i = \sum_n \left(\alpha_{LH}^i \right)^{\sigma_{LH}^i} \left(\frac{p_V^i}{\beta_{LH}^i} \right)^{1-\sigma_{LH}^i}$$

式(2)は、ゾーン*j*の効用水準価格(あるいは合成財価格)が低下すれば、そこで得ようとする効用水準 u_H^i が増加する関数形となっていることがわかる。式(2)を式(1a)に代入すると、勤務地*i*における総支出水準が以下のように求められる。

$$\begin{aligned} e_H^i &= \frac{1}{\gamma_{LH}^i} \Psi_{LH}^i \frac{1}{1-\sigma_{LH}^i} \cdot u_H^i \\ &= p_V^i \cdot u_H^i \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、簡単化のため $p_V^i \equiv \frac{1}{\gamma_{LH}^i} \Psi_{LH}^i \frac{1}{1-\sigma_{LH}^i}$ とおいている。

ここで、そもそも支出水準とは価格が与えられた下で、ある効用(ここでは u_H^i)を実現するために必要な所得を意味する。今、家計一人あたり所得を全家計に対し同一であると仮定し、ゾーン*i*に勤務する家計数を全産業の労働投入時間の地域比率により求めるものとすれば、ゾーン*i*に勤務する家計の総所得は以下のとおり求められる。

$$\Omega_H^i = \phi_H N_H^i \quad (4a)$$

ただし、 ϕ_H : 家計一人あたり所得、 N_H^i : ゾーン*i*に勤務する家計人口数であり、以下により求められる。

$$\phi_H = \frac{\left\{ wT + rK + \sum_j r_{RE}^j K_{RE}^j \right\} (1-\tau_H) - S_H}{N_H^T} \quad (4b)$$

$$N_H^i = \frac{\sum_m l_m^i}{\sum_i \sum_m l_m^i} N_H^T \quad (4c)$$

ただし、 T : 対象地域全体の総利用可能時間の合計、 K : 対象地域全体の総資本ストック量(ただし、不動産の投入する資本ストック量を除く)、 K_{RE}^j : ゾーン*j*の不動産資本ストック量、 w, r : 賃金率と利子率、 r_{RE}^j : ゾーン*j*の不動産資本利子率、 τ_H : 所得税率、 S_H : 地域全体の総貯蓄額(この額は、基準年値で固定であるとする)、 l_m^i : 産業*m*のゾーン*i*における労働投入時間、 N_H^T : 地域全体の総家計数(固定)。

以上のとおり勤務地*i*における総所得が求められることにより、その所得水準の下で実現される効用水準が、式(3)の総支出水準より以下のように求められる。

$$v_H^i = \frac{\Omega_H^i}{p_V^i} \quad (5)$$

これを式(2)の u_H^i に代入することにより、ゾーン*j*に居住しゾーン*i*に勤務する家計の効用水準が求められる。なお、その効用水準が決定される際に用いられる価格は p_V^i であり、ゾーン*j*に居住しゾーン*i*に勤務する家計の支出額は $p_V^i \cdot u_H^i$ となる。ゾーン*i*に勤務しゾーン*j*に居住する家計人口数は、この家計の支出額の地域比率から導出できる。

$$N_H^{ij} = \frac{p_V^i \cdot u_H^i}{\Omega_H^i} N_H^i \quad (6a)$$

なお、 $\Omega_H^i = \sum_j p_V^i \cdot u_H^i$ であり、さらに式(4c)を代入すると、式(6a)は以下のようにも表される。

$$N_H^{ij} = \frac{p_V^i \cdot u_H^i}{\sum_j p_V^i \cdot u_H^i} \cdot \frac{\sum_m l_m^i}{\sum_i \sum_m l_m^i} \cdot N_H^T \quad (6b)$$

以上より、本モデルでは u_H^i を決定することが立地を決定するとも解釈できるといえる。

本モデルは、防災投資の効果を計測することが目的であることから、 u_H^i は平常時の効用と災害時の効用からなるものとする(図-1)。ただし、それらは完全非代替であるとする。すなわち、災害時における効用低下は、いくら平常時の効用が高いといっても、それをもって補うことはできないと想定したものである。

完全非代替は、Barro型CES関数の代替弾性をゼロにすることにより表現できる。これは、いわゆるLeontief関数のことである。平常時の効用と災害時の効用をLeontief関数により特定化し、その効用一定制約下での支出最小化問題を定式化したものが以下である。

$$p_V^i u_H^i = \min_{u_{H0}^i, u_{H1}^i} \left[p_{V0}^i u_{H0}^i + p_{V1}^i u_{H1}^i \right] \quad (7a)$$

$$\text{s.t. } u_H^i = \gamma_{DH}^i \cdot \min \left[\beta_{DH}^i u_{H0}^i, (1-\beta_{DH}^i) u_{H1}^i \right] \quad (7b)$$

ただし、 β_{DH}^i : 分配パラメータ、 γ_{DH}^i : 効率パラメータ。

式(7)を解くと以下の需要関数が得られる。

$$u_{H0}^i = \frac{1}{\gamma_{DH}^i \beta_{DH}^i} u_H^i \quad (8a)$$

$$u_{H1}^i = \frac{1}{\gamma_{DH}^i (1-\beta_{DH}^i)} u_H^i \quad (8b)$$

式(8)を式(7a)に代入すると、式(1)で用いた効用水準の価格が求められる。

$$p_V^{ij} = \left[\frac{1}{\gamma_{DH}^{ij} \beta_{DH}^{ij}} p_{V0}^{ij} + \frac{1}{\gamma_{DH}^{ij} (1 - \beta_{DH}^{ij})} p_{V1}^{ij} \right] u_H^{ij} \quad (9)$$

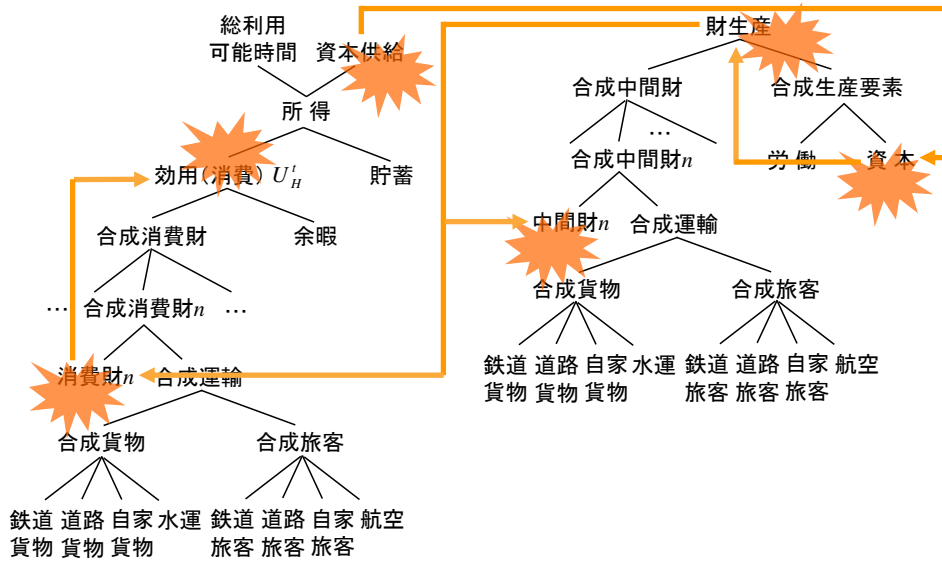


図-2 家計および企業の行動モデルツリー

次に、ゾーンjに居住することを決めた家計は、平常時、災害時のそれぞれにおいて、合成消費財と通勤交通に係る旅客運輸サービスの各消費量を決定する。これらはいずれも、定式化自体は以下の支出最小化問題により表されるものとする。しかし、実際の数値計算においては、特に災害時は、資本ストックの損壊や交通所要時間の増大などの影響が生じ、それらは価格（以下のモデルにおける q_{VH}^j, p_{TP}^{ij} ）の変化を介して、合成消費財と通勤交通の各消費の決定に影響をもたらすことになる。

$$p_V^{ij} u_H^{ij} = \min_{z_{VH}^{ij}, x_{TPCH}^{ij}} \left[q_{VH}^j z_{VH}^{ij} + p_{TP}^{ij} x_{TPCH}^{ij} \right] \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } u_H^{ij} = \gamma_{CH}^{ij} \left[(1 - \alpha_{CH}^{ij}) \left\{ (1 - \beta_{CH}^{ij}) z_{VH}^{ij} \right\}^{\frac{\sigma_{CH}^{ij} - 1}{\sigma_{CH}^{ij}}} + \alpha_{CH}^{ij} \left\{ \beta_{CH}^{ij} x_{TPCH}^{ij} \right\}^{\frac{\sigma_{CH}^{ij} - 1}{\sigma_{CH}^{ij}}} \right]^{\frac{\sigma_{CH}^{ij}}{\sigma_{CH}^{ij} - 1}} \quad (10b)$$

ただし、 z_{VH}^{ij}, q_{VH}^j : ゾーンjでの合成消費財の消費量とその価格、 $x_{TPCH}^{ij}, p_{TP}^{ij}$: 通勤のための旅客運輸サービスの消費量とその価格、 $\alpha_{CH}^{ij}, \beta_{CH}^{ij}$: 分配パラメータ
 γ_{CH}^{ij} : 効率パラメータ、 σ_{CH}^{ij} : 代替弾力性パラメータ。

式(10)を解くと、以下の需要関数が求められる。

$$z_{VH}^{ij} = \frac{1}{\gamma_{CH}^{ij} (1 - \beta_{CH}^{ij})^{1 - \sigma_{CH}^{ij}}} \left(\frac{1 - \alpha_{CH}^{ij}}{q_{VH}^j} \right)^{\sigma_{CH}^{ij}} \Psi_{CH}^{ij} \frac{\sigma_{CH}^{ij}}{1 - \sigma_{CH}^{ij}} \cdot u_H^{ij} \quad (11a)$$

$$x_{TPCH}^{ij} = \frac{1}{\gamma_{CH}^{ij} (\beta_{CH}^{ij})^{1 - \sigma_{CH}^{ij}}} \left(\frac{\alpha_{CH}^{ij}}{p_{TP}^{ij}} \right)^{\sigma_{CH}^{ij}} \Psi_{CH}^{ij} \frac{\sigma_{CH}^{ij}}{1 - \sigma_{CH}^{ij}} \cdot u_H^{ij} \quad (11b)$$

$$\text{ただし、} \Psi_{CH}^{ij} = (1 - \alpha_{CH}^{ij})^{\sigma_{CH}^{ij}} \left(\frac{q_{VH}^j}{1 - \beta_{CH}^{ij}} \right)^{1 - \sigma_{CH}^{ij}} + (\alpha_{CH}^{ij})^{\sigma_{CH}^{ij}} \left(\frac{p_{TP}^{ij}}{\beta_{CH}^{ij}} \right)^{1 - \sigma_{CH}^{ij}}$$

式(11)を式(10a)に代入すると、式(1)で用いた効用水準の価格が求められる。

$$p_V^{ij} = \frac{1}{\gamma_{CH}^{ij}} \Psi_{CH}^{ij} \frac{1}{1 - \sigma_{CH}^{ij}} \quad (12)$$

(3) 家計の財消費行動モデルと企業の生産行動モデル

家計の財消費行動モデルについては、武藤らの一般均衡型 CUE モデルと全く同じである。ただし、それぞれ平常時と災害時に分けてモデル化する点は異なっている。それらの消費行動モデルのツリーを図-2の左側に示した。

一方、財、サービスを提供する企業については、基本的な生産行動モデルは武藤らの一般均衡型 CUE モデルと同じであるが、企業についても平常時と災害時に分けてモデル化を行っている。その生産行動モデルのツリーも図-2に示している。

図-2には、洪水被害が発生した場合の影響についても示した。ここでは、洪水被害が発生し資本ストックが流出あるいは損壊したとする。なお、本モデルでは、交通ネットワークの寸断による影響なども評価することが可能であるが、ここでは資本ストック被害のみについて説明

を行う。資本ストック被害は、家計の保有する資本ストックを減少させ、家計の資本所得を減少させる。それとともに、企業に対する資本供給量も減少することになり、その結果企業の投入する資本の需要も減少させることになる。資本需要量の減少は、企業生産も減少させることになり、さらに、それらの財を中間財として需要する企業や最終消費財として消費する家計にも影響をもたらす。そして、家計の資本所得の減少と財消費の減少によって効用がどれだけ低下するかが計算される。

図-2 は、企業生産への影響がどのように家計や企業の中間投入に影響をもたらすのかを示しているが、本モデルは複数のゾーンを考慮していることから、図-2 のような影響が他ゾーンにも波及的に影響していくことが考慮可能となっている。

3. おわりに

本研究は、地域防災投資を評価するための一般均衡型 CUE モデルを開発した。そこでは、平常時と災害時とに分けて家計の消費行動モデル、企業の生産行動モデルを定式化し、平常時と災害時の効用を、災害発生確率によって重みを付けて平均化した期待効用に対する立地選択モデルを構築した。特に、一般均衡化を行ったことにより、洪水被害が資本ストック損壊等の被害をもたらした場合に、企業の生産行動への影響を介して、最終的に家計の財、サービス消費および効用水準をどの程度減少させるのかが評価可能になる点に特長がある。

今後は、構築した一般均衡型 CUE モデルを、甲府都市圏に対する実証分析へと適用する予定である。その結果

については講演時に紹介する。

参考文献

- 1) 高木朗義, 武藤慎一, 太田奈智代: 応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価, 河川技術論文集, Vol.7, pp.423-428, 2001.
- 2) 高木朗義, 吉田正卓: 流域管理と地域計画の連携を考慮した総合的な洪水災害リスクマネジメント方策の経済評価システム, 河川技術論文集, Vol.11, pp.215-220, 2005.
- 3) 高木朗義: 土地利用変化を考慮した防災の経済評価, 多々納裕一, 高木朗義編著: 防災の経済分析 リスクマネジメントの施策と評価, 勁草書房, 第 13 章, pp.231-246, 2005.
- 4) 今井一貴, 佐藤徹治, 神永希, 杉本達哉, 高森秀司: ソフト対策による水害リスク軽減対策が将来の都市内人口分布に与える影響分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 5, pp.L423-L434, 2016.
- 5) 武藤慎一, 宮下光宏, 右近崇, 水谷洋輔, 猪狩祥平: 都市内交通基盤整備評価のための CUE モデルの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.54, CD-ROM_P-65, 2016.
- 6) 武藤慎一, 森杉壽芳, 青木優, 桐越信: Barro 型 CES 関数による SCGE モデルの一般性向上一交通行動モデルを中心に, 応用地域学会 2009 年度第 23 回研究発表大会, 山形大学, 2009.
- 7) 上田孝行: Excel で学ぶ地域・都市経済分析, コロナ社, pp.112-144, 2010.

(2017. 7. 31 受付)