早稲田商学第 455 号
2 0 1 9 年 6 月

自動運転技術とボトルネック渋滞*

片　岡　孝　夫

1　はじめに

多くの先進諸国において自動車通勤者が渋滞のために浪費する時間は無視できない。国土交通省（2015）等によれば，交通渋滞によって失われる時間は，全国平均で一人あたり年間 40 時間程度であり，乗車時間の 4 割に相当する。現在，実用化に向けて研究が進められている自動運転技術は，渋滞運転により浪費されている時間を有効活用させることで，渋滞の費用を大きく削減させるかもしれない。また自動運転技術は，都心部で駐車のために利用されている空間を郊外に移動させることで都市の空間利用を効率化させると同時に，不注意運転による自動車事故を減らしたり，車間距離を短縮することで道路利用を効率化させることも期待されている。

自動運転技術が交通渋滞に与える影響は，人々の道路利用に関する要求を所与とした上で，自動運転技術がその処理をいかに効率化させるか，という工学的な接近によって盛んに研究されている。しかし，このような分析手法に対しては，かつてマクロ経済学の領域で注目された，いわゆる「ルーカス批判」

＊　本研究にあたっては同志社大学技術・企業・国際競争力研究センターから支援を受けたこと，ならびに川上敏和氏，清水弘幸氏，高橋達氏より有益なコメントをいただいたことに感謝する。

（Lucas（1987））が当てはまる可能性がある[1]。人々は，交通技術，渋滞状況，税制等を所与とした上で，通勤手段として自家用車を利用するか，それとも電車，地下鉄のような公共交通機関を利用するか，あるいは早朝出勤をするべきか否か等の選択をしている。したがって，自動運転技術の普及によって渋滞の苦痛が軽減されるならば，混雑状況にある道路に進入しようとする車両は増加し，結果的に交通渋滞は深刻化するかもしれない。その意味で，自動運転技術の影響を分析するにあたっては，自動車通勤者の行動変化も視野に入れた分析が重要である。（自動運転の経済学的分析のサーベイとしては Mankis et al.（2017）がある。）

Arnott（2001）によれば，交通渋滞の経済分析において，flow congestion と queuing congestion の２つのアプローチが代表的である。Flow congestiton とは，混雑状況にある道路に一台の車両が進入するとき周囲の車両の通行費用が増加してしまうことに注目した外部性の問題であり，多くの場合，静学的な枠組みで論じられる。それに対しボトルネック渋滞は，道路上のある地点（ボトルネック）における単位時間当たり流量に上限があるとき，そこへ流入するフローが上限を超えてしまえば，その差分がボトルネック入口に累積することで発生する待ち行列に起因するものであり，その性質上，動学的な枠組みで分析される[2]。

ボトルネック渋滞に関する経済学的な分析の嚆矢である Vickrey（1969）は，運転者の合理的選択の結果としてボトルネックへの流入フローと渋滞がどのように推移するかを分析した。たとえば一定量の同質な自動車通勤者が始業時刻

⑴ Lucas（1987）は，過去のマクロ経済政策のレジーム下で観察された人々の行動パターンを不変とみなして，政策レジーム変更の効果を予測することの危険性を指摘した。この批判に対処するためには，人々の行動が経済環境の変化に対応してどのように変化するかを内生化するミクロ経済学的基礎をモデルに取り込む必要がある。

⑵ 流入量が定常的にフローの上限を下回るならば渋滞は発生しない。流入量が定常的に上限を超えるとすれば，渋滞ストックは無限大に発散してしまう。

(たとえば朝９時) にボトルネックを通過し職場に到着したいと考えているとしよう。ボトルネックの流量には上限があるため，ほとんどの通勤者は始業時刻前，あるいは始業時刻後に職場に到着せざるを得ない。早朝出勤により朝８時に着くことを選ぶ通勤者は渋滞運転を免れるかもしれないが，定刻まで長時間を職場で無駄に過ごす費用を負担する。それに対して，９時丁度に職場に着くことを選ぶ者は，早朝出勤の費用を免れる代わりにボトルネック入り口で長い待ち行列に耐えなければならない。通勤者は職場に到着する時刻を自由に選べるのであるから，均衡において，どちらの出勤時刻を選んだとしても通勤の総費用は同じでなければならない。この裁定条件が渋滞の動学を決定するのである。ここで政府が，渋滞ピーク時に，ボトルネック通行料を徴収するならば，混雑時にボトルネックに進入しようとする誘引は弱まり，自動車通勤の出発時刻が分散化されることで，自動車通勤の社会的費用が節約される。

このボトルネック渋滞モデルは，代替的な交通手段や複数のボトルネックを導入するなど，多くの方向に拡張されており，自動運転技術の効果についても Lamotte et al. (2016) や van den Berg and Verhof (2016) 等の研究が存在する。(ボトルネック渋滞研究全般に関するサーベイとしては Arnott et al. (1998) や Small (2005) が有益である。) Lamotte et al. (2016) はボトルネック渋滞モデルに自動運転機能付き車両とそうでない車両間の選択を導入したが，二つのタイプの車両は異なった道路を利用し，また自動運転車両はボトルネック渋滞が発生しないようにボトルネック進入時刻を協調的に調整すると仮定した。それに対し van den Berg and Verhof (2016) では，両タイプの車両は同じボトルネックを通過し，いずれも非協調的に行動すると仮定されている。

本稿では van den Berg and Verhof (2016) のモデルに，自動車とは代替的な通勤手段としての公共交通機関と自動運転機能付き車両に課される税を導入する。また van den Berg and Verhof (2016) では，自動運転機能の付いた車両は，そうでない車両に比べ，運転時間の費用を節約すると同時に，ボトルネッ

クを抜ける際の運動性能も高いと仮定しているが，我々は，ボトルネック通過時の運動性能に関して，両タイプには差が無いと仮定する。この仮定は本稿の結論にとって重要なので，その妥当性について考察しておこう。高速道路でインターチェンジ間を走行するような場合，運転者は運転に集中していないことが多い。このような場合，自動運転機能は，不注意による交通事故を減少させたり，車間距離を縮小することで道路容量を実質的に高める効果を持つだろう。しかし料金所などのボトルネック渋滞を抜ける際，自動運転機能が付いていない車両の運転者は運転に集中し効率的に車両を操作しており，自動運転機能がボトルネックの最大流量を大きく改善することは難しいと考えられる。我々の仮定は，このような考察に基づいている。

このような想定の下，以下の結論が示される。自動運転技術が進展することにより，自動運転装置の生産コストが低下したり，渋滞運転の心理費用が低下したとしても，その恩恵は，交通渋滞が深刻化する効果で打ち消され，通勤の社会的費用は減少しない。また自動運転車両に対して課税をすることは社会的に望ましい。

本論文の構成は次のとおりである。次節ではモデルの環境が記述され，所与の税率下における均衡が導出される。第3節では，通勤の社会的費用を最小化するような税率について考察し，第4節では本論文の結論を再述するとともに，その直感的説明およびモデルの限界について説明する。

2　自動運転車と非自動運転車が共存するボトルネック渋滞モデル

1単位の連続的な通勤者が居住する一つの閉鎖的な地域（市）を考える。市は郊外部と中心部から成り，各通勤者は郊外部に一つの「自宅」，中心部に一つの「職場」を与えられている。連続的な時間（t あるいは T）が存在し，各通勤者は閉区間 $[-1, 1]$ に対応する時間内に自宅から職場まで移動しなければならない。全ての通勤者は，ある特定の時刻（始業時刻）$t_J = 0$ に近いタイミン

グで職場に到着することを好む[(3)]。具体的には，始業時刻前の $t < t_J$ に職場に着く通勤者は $t_J - t = -t$ 時間を職場で無駄に過ごすことになり $-c^E t$ 円に相当する費用（早朝出勤費用）を負担する。また始業時刻後の $t > t_J$ に職場に着く通勤者は $c^L t$ 円に相当する遅刻費用を負担する。c^E，c^L は正の定数である。

家計が職場まで移動する交通手段としては通勤電車のような公共交通機関と自家用車の 2 種類がある。公共交通機関には十分な輸送能力がありボトルネックは存在しないため，全ての公共交通機関利用者は始業時刻丁度に職場に到着できる。公共交通機関利用者は $c^P \in C^P \subset \Re$ の通勤費用（運賃と通勤時間の費用等の和）を負担する。c^P は通勤者間で異なり，その累積分布関数を $F: C^P \to [0, 1]$ とする。

人々は自家用車を利用して通勤することもできるが，その際，一つのボトルネックを通過する必要がある。もし渋滞が無いとすれば，自動車の速度は十分速く，自宅からボトルネック入り口まで，ボトルネック内，およびボトルネック出口から職場までの移動時間や費用は無視できるものとする。このボトルネックは単位時間あたり最大 α 単位の車両しか通過させることができないため，自動車通勤者全員が同時に職場に到着することはできない。ボトルネックに流入しようとする車両のフローが α を超えるとき，その差はボトルネック入り口に蓄積して渋滞ストックを形成する。（なお α は 1 より大きく，全通勤者が自動車を利用する場合でも期間内に通勤を終えることができる。）時刻 $T \in [-1, 1]$ にボトルネックに進入しようとした者がボトルネック入口で s の渋滞ストックを発見したとすれば，彼の渋滞運転時間は s/α であり，時刻 $t = T + s/\alpha$ にボトルネックを脱出する。（もちろん s が $\alpha(1 - T)$ を超えることはできない。）以下では，自宅を出発する時刻＝ボトルネック入り口に到着する時刻を「流入時刻」（T であらわす），ボトルネックを脱出する時刻＝職場に到着

(3) 無限に繰り返される期 $p = 0, 1, 2, \ldots$ を考え，人々は偶数期において自宅から職場に移動し，奇数期において職場から自宅に移動することを繰り返すと考えても良い。

する時刻を「脱出時刻」(t であらわす）とよぶことにする。

自動車通勤者は，自動運転機能が付いたタイプ A 車両と，その機能が付いていないタイプ M 車両のいずれかを選択できる。前節で述べたように，ボトルネックの最大流量 α は通過する車両のタイプと無関係であるが，渋滞運転中の時間費用は，車両のタイプによって異なる。タイプ $i = A, M$ 車両を利用する自動車通勤者にとって，渋滞運転がもたらす単位時間あたり費用を c^i としよう。タイプ A 車両の運転者はタイプ M 車両の運転者に比べて，運転中の時間をより有意義に使うことができるので運転の時間費用は低い。また c^A は早朝出勤の時間費用 c^E より大きいと仮定する。

自動車利用には費用がかかる。タイプ M 車両の利用費は通勤 1 回あたり δ であり，タイプ A 車両の利用費は通勤 1 回あたり $\delta+\beta+\tau$ である。ここで δ は非自動運転車両の価格，β は自動運転装置搭載のオプション価格（税別）であり，τ は自動運転車両に課せられる税をあらわす。自動車と自動運転装置を生産するための限界費用は一定であり，生産者は競争的である。したがって δ と β は技術的な定数であるが，τ は政府にとって操作可能である。なお，政府がタイプ A 車両に補助金を出す場合 τ は負になるが，$\beta+\tau$ は非負とする。

全ての通勤者は，公共交通機関を使う場合の通勤費用 c^P を除き，同質である。自動車を利用する通勤者は，早朝出勤あるいは遅刻の費用，渋滞運転の時間費用，および車両の利用費という 3 つの費用を負担するが，彼らは車両タイプと通勤のタイミングを自由に選択できるので，裁定条件により，3 つの費用の和（自動車通勤費用）は，その選択から独立である。これを C と表そう。公共交通機関を利用した場合の通勤費用 c^P が C より大きい通勤者が自動車を選択するので，自動車通勤者の人口を N とすれば次式が成立する。

$$N = 1 - F(C) \tag{1}$$

最初の自動車通勤者の流入時刻と脱出時刻を T_0，t_0，最後の自動車通勤者の

流入時刻と脱出時刻を T_N, t_N とあらわそう。彼らは渋滞を経験しないから，$T_0 = t_0 < 0$ かつ $T_N = t_N > 0$ である(4)。また渋滞に巻き込まれない彼らは自動運転機能の恩恵を受けないから，タイプ M 車両を選択する。したがって裁定条件より，彼らの早朝出勤費用や遅刻費用は自動車通勤費用からタイプ M 車両の利用費を引いたものと等しい。すなわち次式が成立する。

$$C - \delta = -c^E t_0 = c^L t_N \tag{2}$$

時点 t_0 から t_N の間で渋滞ストックが消滅することはなく，その期間中のボトルネック流量（脱出フロー）が上限 α を下回ることもあり得ないから，

$$N = \alpha (t_N - t_0) \tag{3}$$

が成立する(5)。(1), (2), (3) を整理することで $N, C, T_0 = t_0, T_N = t_N$ が決定されるが，ここまでの議論は $F, \alpha, c^E, c^L, \delta$ のみに依存していることに注意して欲しい。自動運転技術の進歩により自動運転装置の生産費用 β や渋滞運転時の不効用 c^A が削減されたとしても，N や C は変化しないのである。図 1 は N，C の決定を表している。図の右下がりの曲線 D は(1)式を表しており，座標 $(0, \delta)$ から傾き $1/(\alpha(1/c^E + 1/c^L))$ で伸びる直線 S は(2)式と(3)式を整理することで得

(4) 最初にボトルネックに入る運転者が渋滞を免れるのは自明である。また最後の自動車通勤者の流入時に渋滞ストックが存在するとすれば，最後の自動車通勤者は，脱出時刻を遅らせることなく流入時刻を遅らせることによって，渋滞の費用を減らすことができる。均衡ではそのような余地は残り得ない。

(5) t_0 と t_N の間で渋滞ストックがゼロになる時間帯が存在するとすれば，最初か最後の自動車通勤者は，流入時刻をその時間帯内に変更することで，渋滞を免れたまま職場に到着する時刻を始業時刻に近づけ，通勤費用を節約できる。そのような余地を残した状態は均衡となり得ない。

また渋滞ストックが存在するにも関わらず，ボトルネック流量が α より小さい時点が存在するとすれば，渋滞ストック内で待機している車両には脱出時刻を予定よりも早める余地が残されていることになる。遅刻予定者にとって脱出時刻が早まることは，渋滞運転費用と遅刻費用の両方を削減する。また早朝出勤予定者にとって脱出時刻が早まることは，渋滞運転費用を削減し，早朝出勤費用を増加させるが，c^E は c^M や c^A より小さいので，やはり通勤費用は減少する。均衡においてこのような余地が残ることはあり得ないので，渋滞ストックが存在する限り，ボトルネック流量が α 未満になることはない。

られる関係を表している。N と C はＤ線とＳ線の交点で決定される。

ここで N, C を変化させる要因について検討しておこう。たとえば，公共交通部門への投資が行われることで，各通勤者の公共交通通勤の費用 c^P の分布が下方にシフトしたとしよう。これは図のＤ曲線を左にシフトさせるので，自動車通勤者の人口と自動車通勤費用を減少させるだろう。道路資本に対する投資が行われ，ボトルネックの最大流量 α が1%増大するならば図の直線Ｓの傾きが1%低下するので，N は増加し C は減少する。このとき，N の増加率は1%より小さくなる。自動車本体の生産技術が進歩し，その生産費用 δ が低下するならば，Ｓ線は下方にシフトするので N は増加し，C は低下する。最後に，フレックスタイム制の普及などにより出勤時刻の多様化が進むことは，c^E や c^L を低下させると考えられるが，このような変化は，α の増大と同様に，図のＳ曲線の傾きを小さくさせるから，N を増加させ C を減少させる。

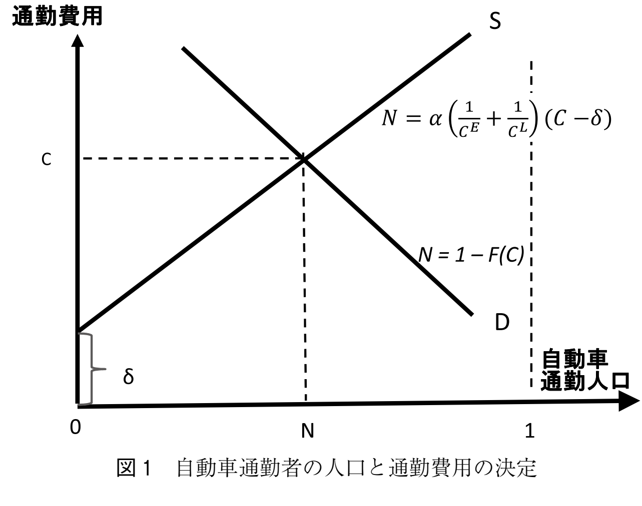

図１　自動車通勤者の人口と通勤費用の決定

始業時刻に職場に到達する自動車通勤者（定刻脱出者）について考えてみよう。彼は，遅刻や早朝出勤の費用を完全に免れる代わりに長時間の渋滞運転を

経験するから，自動運転機能の恩恵を強く受ける。もし彼までがタイプ M 車両を選ぶとすれば，タイプ A 車両を選択する者はいなくなる。ここでは定刻脱出者はタイプ A 車両を選択するような均衡を考えよう。彼の出発時刻を T_J とすれば，裁定条件より，定刻脱出者の渋滞運転時間 $t_J - T_J = -T_J$ は $(C - \delta - \beta - \tau)/c^A$ と一致しなければならない。これにより T_J が定まる。ところで定刻脱出者がタイプ M 車両を選択したとすれば，その時の通勤費用は $\delta + (t_J - T_J)c^M$ となる。定刻到着者はタイプ A 車両を選ぶと仮定したのであるから，その値が C を下回ってはならない。この条件が成立するためには，自動運転技術による運転時間費用の削減率 $(c^M - c^A)/c^M$ が $(\beta + \tau)/(\mathrm{C} - \delta)$ 以上であれば良い。ところで税率 τ が十分に大きくなれば，この条件は成立し得ない。以下では自動運転機能付き車両に課される税率がゼロの時，タイプ A 車両を選択する者が存在すること，すなわち次式が成立すると仮定する。

$$\frac{c^M - c^A}{c^M} \geq \frac{\beta}{C - \delta} \tag{4}$$

始業時刻付近にボトルネックを脱出する者は，早朝出勤費用あるいは遅刻費用が小さく，相対的に長時間の渋滞運転を経験するためタイプ A 車両を選択する。逆に両端の時刻，t_0 あるいは t_N，近くに脱出する者は，渋滞運転時間が相対的に短く，タイプ M 車両を選択する。したがって，負の時間帯と正の時間帯にそれぞれ 1 回，ボトルネックを脱出する車両のタイプが入れ替わる瞬間があることになる。それらの時刻を $t_{ET} \in (t_0, 0,), t_{LT} \in (0, t_N)$ とあらわし，またその時刻に脱出する通勤者のボトルネック流入時刻をそれぞれ T_{ET}，T_{LT} とあらわそう(6)。時刻 t_{ET} にタイプ M 車両で脱出する場合の通勤費用は $\delta - c^E t_{ET} + (t_{ET} - T_{ET})\, c^M$，同時刻にタイプ A 車両で脱出する場合の通勤費用は $\delta + \beta + \tau - c^E t_{ET} + (t_{ET} - T_{ET})\, c^A$ である。これらはいずれも C と等しいことから次式を得る。

---

(6) ET，LT はそれぞれ Early Threshold と Late Threshold の頭文字。

$$t_{ET} = t_0 + \frac{c^M}{(c^M - c^A)c^E}(\beta + \tau) \tag{5}$$

$$T_{ET} = t_0 + \frac{(c^M - c^E)}{(c^M - c^A)c^E}(\beta + \tau) \tag{6}$$

もう一つの境界時刻についても同様の議論により，

$$t_{LT} = t_N - \frac{c^M}{(c^M - c^A)c^L}(\beta + \tau) \tag{7}$$

$$T_{LT} = t_N - \frac{(c^M + c^L)}{(c^M - c^A)c^L}(\beta + \tau) \tag{8}$$

である。したがってタイプ A を利用する通勤者の人口 $N^A = \alpha\,(t_{LT} - t_{ET})$ は以下のようにあらわされる。

$$N^A = N - \gamma\,(\beta + \tau) \tag{9}$$

ただし γ は以下で定義される定数である。

$$\gamma \equiv \frac{\alpha c^M (c^E + c^L)}{(c^M - c^A)\,c^E c^L} \tag{10}$$

(4)式，すなわち税率 τ がゼロのとき，タイプ A 車両の利用者が存在すると仮定したことから N が $\gamma\beta$ を下回ることはない。

時刻 $T \in [T_0, T_{ET}]$ にボトルネックに流入し，時点 $t \in [t_0, t_{ET}]$ に脱出する者，すなわちタイプ M 車両で早朝出勤する者について考えよう。彼の負担する早朝出勤費用は $-c^E t$ であるから，裁定条件により，彼の負担する渋滞運転時間 $(t - T)$ は $(\mathrm{C} - \delta + c^E t)/c^M$ と等しい。また時点 T においてボトルネック入口に累積している渋滞ストックは $\alpha\,(t - T)$ でなければならない。これらの条件を整理すれば時刻 T における渋滞ストックは $\alpha c^E\,(T - t_0)\,/\,(c^M - c^E)$ とあらわされることが分かる。渋滞ストックの成長速度（すなわち渋滞ストックの流入時刻 T に関する微係数）はボトルネックへの流入フローから即時に処理される α

を除いた部分に相当することから，この時間帯の流入フローは$\alpha c^M/(c^M-c^E)$でなければならない。

時刻t_{ET}と時刻0の間，時刻0から時刻t_{LT}の間，また時刻t_{LT}と時刻t_Nの間にボトルネックを脱出する自動車通勤者に対しても同様の議論をすることで各時間帯の流入フローfは以下のように定まる。

$$f=\begin{cases} 0 & \text{for } T\in[-1,T_0) \\ \dfrac{\alpha c^M}{c^M-c^E} & \text{for } T\in(T_0,T_{ET}) \\ \dfrac{\alpha c^A}{c^A-c^E} & \text{for } T\in(T_{ET},T_J) \\ \dfrac{\alpha c^A}{c^A-c^L} & \text{for } T\in(T_J,T_{LT}) \\ \dfrac{\alpha c^M}{c^M-c^L} & \text{for } T\in(T_{LT},T_N) \\ 0 & \text{for } T\in(T_N,1] \end{cases} \tag{11}$$

図2の実線と破線はそれぞれ，流入フローと脱出フローを表しており，点線はボトルネック入り口に累積する渋滞ストックを表したものである。時点t_0からt_Nの間，脱出フローはボトルネック容量αで一定である。時点$T_0=t_0$より単位時間当たり$\alpha c^M/(c^M-c^E)>\alpha$単位のタイプ$M$車両がボトルネックに流入し，渋滞ストックは成長し始める。時刻T_{ET}において車両タイプはAに変化し，流入フローは$c^A/(c^A-c^E)$に加速することから，渋滞ストックの成長速度も高まる。定刻前の時刻T_Jに渋滞ストックは最大になるが，その後，流入フローは$\alpha c^A/(c^A+c^L)<\alpha$に低下し，渋滞ストックは解消し始める。時点$T_{LT}$に車両タイプが$A$から$M$へ変化すると同時に流入フローはやや増加し渋滞ストックの解消は鈍化する。時点$T_N=t_N$には渋滞ストックが消滅し，それ以降，流入フローもゼロになる。

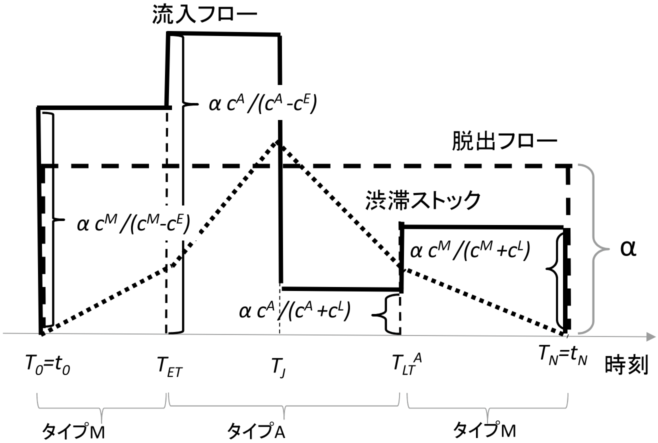

図２　流入フローと渋滞ストックの動学

3　自動運転車税と社会的余剰

図３は各時刻にボトルネックを脱出する自動車通勤者が負担する通勤費用の内訳を表している。彼らは時刻 t_0 と時刻 t_N の間に時間当たり α の率でボトルネックを脱出し，一人当たり C の費用を負担する。前節で見たように，両時刻と C は F，α，c^E，c^L，δ のみから定まり，全自動車通勤者が負担する通勤費用（図の四角形 efcd に相当）は自動運転技術の進展（c^A や β の減少）や自動運転車に課される税 τ から独立である。図の三角形 ald と三角形 bcl はそれぞれ早朝出勤と遅刻により失われる余剰を表しており，四角形 efba，四角形 ghio，四角形 oijn はそれぞれ自動車本体の生産費用，自動運転装置の生産費用，税負担を表している。通勤費用のうち，残された部分（三角形 agm，三角形 hbk，五角形 njklm）が渋滞運転により失われる余剰を表す。

これらのうち，影の付いた部分に相当する τN^A は，通勤者にとって費用であるが，政府にとっては収入となるので，社会的費用からは除外される。したがって社会的費用を最小化するためには税収 τN^A を最大化するように税率 τ

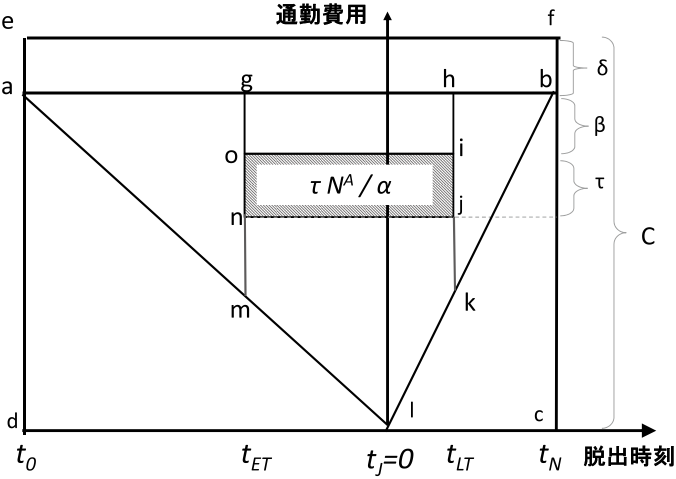

図 3　社会的余剰と税収

を定めれば良い。(9)式を考慮すれば，最適税率 τ^* は，

$$\tau^* = \frac{N}{2\gamma} - \frac{\beta}{2} \tag{12}$$

となる。先に，税率がゼロの時，タイプ A 車両の需要が正であると仮定したことから，上式右辺は正である。したがって自動運転車両に対しては補助金ではなく課税することが望ましい。

経済環境が変化するとき，最適税率がどのように変化するか見ておこう。技術進歩により自動運転装置の生産費用 β が減少したり，自動運転機能により削減される時間当たり運転費用の比率 $(c^M - c^A) / c^M$ が増加するのであれば，自動運転車税を引き上げることが望ましい(7)。道路資本への投資が行われるなどしてボトルネックの最大流量 α が 1％増大するならば，前節で見たように，γ と N はいずれも増加するが，γ の増加率は 1％，N の増加率は 1％以下なので，

(7)　$(c^M - c^A) / c^M$ の増加は γ を低下させる。

最適税率は低下する。また公共交通部門への投資により c^P の分布が下方にシフトするならば，N は減少するので最適税率は低下する。自動車本体部分の生産費用 δ が削減されたり，フレックスタイム制の普及等により c^E，c^L が低下するならば，N が増加するので最適税率は上昇する。

4　結語

自動運転技術の発達により運転者は車両の操作に煩わされることが少なくなり，渋滞運転の時間費用は削減されると考えられる。したがって渋滞のために失われる時間が一定であるかぎり，自動運転技術が渋滞の費用を削減することは自明である。しかし運転者は，自動運転装置の性能や費用を考慮した上で，それを装備するか否か，またどのようなタイミングで道路を利用するか，という選択を行っている。自動運転技術の発展により，人々が渋滞を忌避しなくなれば，混雑した道路に侵入しようとする車両は増加し，結果として渋滞は深刻化する可能性がある。

このような問題意識から，本稿では van den Berg and Verhof（2016）による自動運転車両と非自動運転車両間の選択を含んだボトルネック渋滞モデルに，代替通勤手段としての公共交通機関と自動運転車税を導入したモデルを用い，自動運転技術の影響について分析した。自動運転機能を備えた自動車はそうでない自動車に比して，渋滞運転中の時間あたり費用を引き下げるものの，ボトルネック脱出時の自動車の運動性能に影響を与えない，という前提の下で 2 つのことが示された。第 1 に，自動運転技術が渋滞運転の時間費用を削減する効果は，渋滞を忌避しなくなった車両が混雑した道路に押し寄せ渋滞を深刻化させることで相殺され，自動車通勤の社会的費用は減少しない。第 2 に，自動運転車両に対しては課税することが望ましい。また最適な自動運転車税率とは，その税から得られる税収が最大になるような税率，すなわち自動運転車両需要の税に対する弾力性が 1 となるような税率であり，そのような税率は自動

運転技術の進展に伴って上昇する傾向がある。

なぜこのような結論が得られたのだろうか。ボトルネック流量に制約がある以上，自動車通勤者には始業時刻近くに出勤する者と早朝出勤する者（あるいは遅刻出勤する者）が存在する。彼らは出勤のタイミングを自由に選べるのであるから，両者の自動車通勤の費用は同じにならなければならない。定刻に出勤する者は早朝出勤の費用を免れることができるから，その差（定刻出勤のレント）を何らかの形で負担する必要があるが，それが渋滞運転の費用となって表れるのである。したがって自動運転技術により渋滞運転中の時間当たり費用が削減されるならば，定刻出勤のレントを埋め合わせるために，定刻付近の渋滞運転時間が延長される必要がある。

定刻出勤のレントを埋め合わせるものが渋滞運転だけとは限らない。Vickrey（1969）は渋滞中の道路で通行料を徴収（ピークロードプライシング）することを提案した。定刻出勤のレントの一部が通行料として徴収されるならば，渋滞運転の費用はその分縮小する。渋滞運転の費用は社会的に浪費されているが，通行料は政府（あるいは道路サービスの提供者）の収入として回収されるため，社会的にみれば費用とならない。したがってピークロードプライシングには自動車通勤の社会的費用を削減する効果が期待できる。本稿で提案される自動運転機能付き車両に対する課税は，ピークロードプライシングを代替するものである。自動運転車両から大きな恩恵を受ける者とは，長時間の渋滞運転を覚悟する代わりに始業時刻近くに出勤することを選択した者であるから，自動運転車両に対する課税は，渋滞に対する課税と同じように，定刻出勤レントの一部を税収として回収させる効果を持つのである。

最後に，本稿で展開したモデルの限界について指摘しておこう。ここではボトルネック渋滞脱出時において非自動運転車両の運転者は車両の操作に集中しているため，自動運転技術の普及はボトルネック容量を改善しないと仮定した。しかしボトルネックの原因には橋やトンネルのように固定されているもの

もあるが，事故による車線減少や，サグ部における無意識な減速など，自動運転技術の普及によって発生が抑えられるものもある。自動運転技術が社会に存在するボトルネックの数を減少させることをモデルに取り込むならば，本稿で得られた結論とは異なり，自動運転技術の進展は交通渋滞を緩和させることが示され，また自動運転車両に対する有料道路料金割引のような補助金を正当化する結論が得られるかもしれない。

参考文献

［1］ 国土交通省：交通流対策について，http://www.meti .go.jp/committee/sankoushin/sangyougijutsu/chikyu_kankyo/yakusoku_souan_wg/pdf/005_07_ 00.pdf, (2015).

［2］ Arnott, R.: “The Economic Theory of Urban Traffic Congestion: A Microscopic Research Agenda,” Boston College Working Papers in Economics, (2001).

［3］ Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R,: “Recent developments in the bottleneck model,” in Botton, K. J., Verhoef, E. T. eds, Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility, Edward Elgar, Aldershot, (1998).

［4］ Lamotte, R., de Palma, A., Geroliminis,N.: “Sharing the road: the economics of autonomous vehicles,” HAL working paper, 01281425, (2016).

［5］ Lucas, R.: “Econometric Policy Evaluation: A Critique,” in Brunner, K.; Meltzer, A., The Phillips Curve and Labor Markets, Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy. 1, Elsevier, (1976).

［6］ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B.: “Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research,”, Journal of intelligent transportation systems, (2017).

［7］ Small, K. A,: “Congestion theory and transport investment,” The American Economic Review, (1969).

［8］ van den Berg, V. A. C., and Verhoef, E. T.: “Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity,” Transportation Research Part B, (2016).

［9］ Vickrey, W. S.: “Congestion theory and transport investment,” The American Economic Review, (1969).