



第4章 交通工学

大口 敬 (東京大学生産技術研究所 教授)

交通工学は、内燃機関大衆車が普及した20世紀初頭に興り、第2次世界大戦以降の世界的なモータリゼーションの進展に伴い発展した。その伝統的な範疇は、交通混雑、交通安全、交通公害（環境負荷）といった道路上の自動車交通による負の影響を軽減するために必要な科学・技術分野である。本章では、こうした自動車交通流の科学とこれに基づく交通技術を概観する。

4.1 交通流の基礎

道路上の自動車交通の流れを理解するためには、以下の交通量、交通密度、および（交通）速度という基礎的な変数を用いる。

1時間あるいはそれよりも短い時間を集計単位として、ある地点を通過した車両数、あるいはこれを単位時間当たりの車両数に換算したものを交通流率[台/時]と呼ぶが、一般に交通量とも呼ぶ。交通量はある地点の通過台数に過ぎず、その地点が交通渋滞（4.2節参照）状態でないならば、交通量はその地点の交通需要を意味するが、交通渋滞状態にある場合は、交通量はその交通渋滞の原因となるボトルネック地点（4.2節参照）の交通容量に等しい。

交通密度とは、一般に1kmあるいはそれよりも短い道路延長方向の距離を集計単位として、ある時点で存在する車両数を単位距離当たりの車両数に換算したものの[台/km]である。交通量とは異なり、道路の上空から比較的長い区間を同時に観察して台数計測をする必要があり、直接観測は困難である。

交通の速度[km/h]とは、異なる速度を持つ個々の車両からなる交通の流れを代表する速度である。この代表値には個別車両の「空間平均速度」を用いる。

これは、ある区間長の走破に要する個別車両の走行時間の平均値でこの区間長を除いたものである。空間平均速度は、同一地点で観測された各車両の速度値の調和平均で推定できる。(交通)速度に空間平均速度を用いると、

$$(\text{交通量}Q) = (\text{交通密度}K) \times (\text{交通速度}V) \quad (\text{式}1)$$

なる関係が成立する。地点で観測された各車両の速度値を普通に(算術)平均したのでは(式1)は一般には成立しない。(式1)は、物理学の基本法則「質量保存則」に相当し、交通に限らず「流れ一般」に対して普遍的に成立する。

図1に、時間-空間図上の個別車両の軌跡と交通量,交通密度の関係を示す。この2変数が時間軸と空間軸に対して対称な関係にあること、平均車頭時間の逆数が交通量,平均車頭距離の逆数が交通密度に相当することが分かる。

図2は、道路に設置された車両感知器で5分間ごとに集計し、計測された交通量と(交通)速度から(式1)を用いて交通密度を計算し、この3つの変量相互の関係を示したものである。一般に交通密度がゼロに近づくとき速度が最大値(自由速度)、速度がゼロに近づくとき交通密度が最大値(飽和密度)を取り、両者はおよそ単調減少の関係にある。また、交通量が極大値となる交通密度(臨界密度)と速度(臨界速度)が存在する。臨界密度より高い密度(臨界速度より低い速度)の状態が交通渋滞状態であり、逆に臨界密度より低い密度(臨界速度より高い速度)の状態は渋滞していない交通状態を表す。

(式1)と交通密度-速度関係の単調減少性から、交通量-交通密度(交通量-速度)関係が2値関数で、交通量の極大値の存在が導かれる。これが道路交通において「最大交通量(交通容量)が存在する」ことの理論的根拠である。

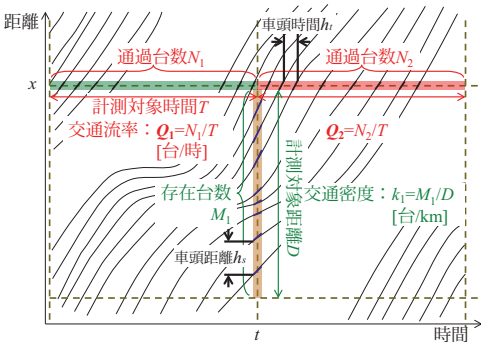


図1 時間距離図

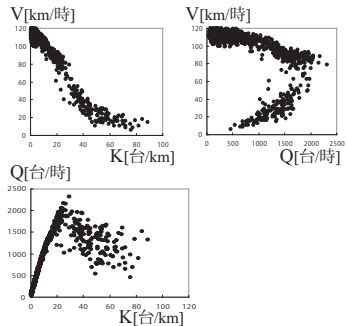


図2 交通量・交通密度・速度関係の実測例

4.2 交通渋滞の特徴

4.2.1 交通渋滞の定義とボトルネック

交通渋滞は、「交通容量上のボトルネックにその地点の交通容量を超える交通需要が流入しようとするときに、ボトルネックを先頭にしてその上流区間に生じる車両列（交通渋滞車列）における交通状態（待ち行列）」と定義される。ボトルネックとは、前後区間と比較して相対的に交通容量が低い道路区間である。日本の高速道路では、単路部のサグ部（縦断勾配が下り方向から上り方向へ変化する区間）やトンネル入り口^{1)・2)・3)}が都市間高速道路の交通渋滞の主な原因であるが、欧米では合分流部や織込み区間が主要なボトルネックとなっている。一方一般道では、交通量の多い信号制御された重要交差点、大規模ショッピングセンターの駐車場入場待ち行列や路上駐停車等がボトルネックとなりやすい。以上の定義からは、一定の速度閾値では交通渋滞を判定できないことが分かる。日本の都市間高速道路では時速40km以下、首都高速道路では時速20km以下を交通渋滞の判定基準にしているが、これは実務的な基準である。

4.2.2 交通渋滞の計算法

図2に基づいて、図3に示すように単純化した1車線当たりの交通量-交通密度関係を仮定する。この関係を用い、ボトルネックで交通渋滞が発生する様子を図4の時間-距離図に模式的に示す。交通容量 C_b のボトルネック（図4のBN地点）に流入する交通需要 A の交通状態は、図3の点 a （交通量 A 、交通密度 k_1 、速度 v ）で表される。ここで $A > C_b$ の場合ボトルネック上流に交通渋滞（図3の点 b ：交通量 C_b 、交通密度 k_2 、速度 v_b ）が発生し、その末尾は上流へ移動する。こ

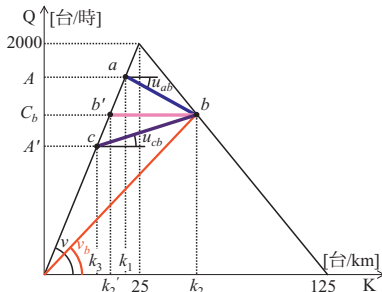


図3 交通量-交通密度関係モデル

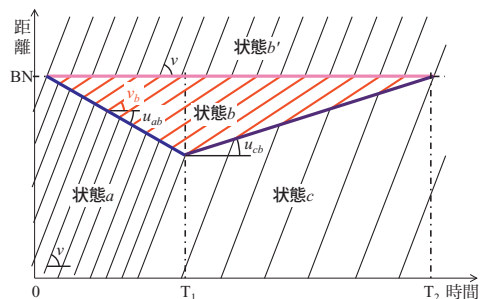


図4 交通渋滞の延伸・縮退の衝撃波

の衝撃波速度 u_{ab} は衝撃波理論で与えられ、(式2)で計算される⁴⁾。

$$u_{ab} = (A - C_b) / (k_1 - k_2) \quad (\text{式2})$$

(式2)は図3の点 a と点 b を結ぶ傾きを意味し、図中の u_{ab} は負の傾きなので交通渋滞末尾は上流へ移動する。図4では、交通需要の状態 a と交通渋滞の状態 b との境界が速度 u_{ab} で移動する。ここで、時刻 T_1 に交通需要が図3の点 c (交通量 A' 、交通密度 k_3 、速度 v)に変化し、 $A' < C_b$ が成り立つと、 u_{cb} は正の傾きなので、交通渋滞の末尾は縮退し、時刻 T_2 に消滅する。

例えば、ボトルネック交通容量 $C_b=1600$ [台/時]に交通需要 $A=1800$ [台/時]が到着すると、 $u_{ab} = (1800-1600) / (22.5-50) \approx -7$ [km/h]で交通渋滞が延伸し、 $T_1=2$ 時間なら、その交通渋滞長 L は約14kmとなる。ここで交通需要が低下して $A'=1500$ [台/時]になると、 $u_{cb} = (1500-1600) / (18.75-50) = 3.2$ [km/h]で、時刻 T_2 は $T_1+L/u_{cb} \approx 6$ 時間30分となる。

一般に、交通需要の増大により交通渋滞が生じてても、交通需要のボトルネック交通容量の超過割合は高々十数% (本計算例では $1800/1600=1.125$ なので超過割合は12.5%) であること、交通需要が超過する時間 (同2時間) より交通渋滞の継続時間 (同6.5時間) はかなり長いことが知られている^{5)・6)}。

4.2.3 高速道路単路部交通渋滞の特徴

日本の都市間高速道路では、近年ではサグ部とトンネル入り口を合わせるとボトルネック箇所⁷⁾の8割にも達する⁷⁾。これらの箇所では、合分流も交通信号もないが、勾配変化等による僅かな速度擾乱をきっかけに減速波が上流伝搬し交通渋滞状態に移行してしまう。この現象が発生する交通需要は、通常の単路部交通容量の75～90%程度の範囲で大きく変動する。これは運転者の前方車への追従特性に個人差・車両差が存在するためと考えられている^{8)・9)}。

またいったん交通渋滞状態に移行すると、ボトルネック交通容量はさらに低下して通常区間の60%前後にまで低下してしまう。これは、低速な交通渋滞状態で飽きや疲れが生じたために追従挙動が緩慢になることに起因する^{8)・9)}。図3のように交通需要を1車線当たり1800[台/時]とし、通常区間の1車線当たり2000[台/時]の80%相当の1600[台/時]で交通渋滞が発生した場合、時速約7kmで交通渋滞が延伸するが (4.2.2項参照)、仮にその後交通容量が60%の1200[台/時]に低下した場合、図3と(式2)を用いると、交通渋滞の延伸速度は時速約14kmと約2倍の速さになることが分かる。つまりサグで交通渋滞発生後に交通容量がさら

に低下すると交通渋滞車列は急速に延伸する。また、交通需要が減少しても、渋滞解消速度が低下しているため、交通渋滞継続時間も伸びてしまう。これが高速道路の交通渋滞が、距離延長も継続時間も長くなりやすい理由である。

4.3 道路の交通機能と計画設計

高速道路は自動車の大量・高速交通を担う大動脈である。その中には、国土の骨格を構成する長距離移動用もあれば、地方圏のネットワークを構成するもの、さらに大都市の都市内高速道路もある。自転車、歩行者等も含む多様な交通を担う一般道路でも、異なる連絡スケールによる道路機能分類が成立する。また都市内の一般道路は、こうした交通の機能以外にも、水道・ガス等のインフラ収納空間機能や火災延焼を防ぐ防災機能等、多様な機能を担う「街路」であり、都市間を結ぶ「街道」のような道路とは大きく異なる。近年、日本ではこうした道路の階層構造ごとの交通機能の違いに着目し、ネットワークとして一定の交通サービス性能目標を達成するような「性能照査型」の道路計画・設計論に関する研究が進められている^{10)・11)}。

道路同士が交わる交差点は、まさに「交通の要衝」であり、道路機能の階層性を担保するために最も重要な要素の1つである。多くの交通容量上のボトルネックは道路交差点、特に一般街路の重要信号交差点である。交通が集中する交差点では、交通渋滞が発生しないよう交差点部の幾何構造設計（車線数確保や一部立体交差、交通島による動線分離等）と、交通信号の現示企画や信号制御パラメータ（サイクル、スプリット、オフセット）の適切な設定が求められる（図5参照）。

道路ネットワーク上には、交通容量上のボトルネック（ C_b ）とならない交差点も多数存在する。交通需要 D が極めて少なくとも（ $0 \sim D \ll C_b$ ）、信号交差点では信号制御パラメータに応じた

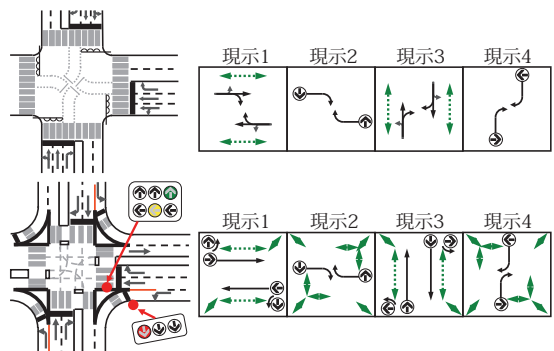


図5 重要信号交差点制御の改良例

信号待ち時間（遅れ）が生じる。一方、交通需要が一定以上ある（ $D > Q_0$ ）無信号交差点では、信号制御より遅れが大きくなることもある。中庸な交通需要（ $0 \ll D \sim Q_0 < C_b$ ）の交差点では、遅れを少なくするとともに、無信号交差点における追突・出会い頭事故のリスクを大幅に低減できる方式として、近年ラウンドアバウト（Roundabout: RAB）が注目され、日本でも導入の機運が高まっている。

一定レベル以上の幹線道路の通行機能を確保するためには、細街路との交差点部で必要以上に通行が阻害されないことが必要であり、細街路を幹線道路に接続しない・接続しても左折流入／流出しか認めない・幹線からの右折流出を認める場合には右折専用の車線ポケットを中央帯部に設けて本線通行交通と分離する等、道路幾何構造上の工夫や交通運用・規制が有効である。こうした考え方を米国ではアクセス・マネジメントと呼んで体系化を試みている¹²⁾。

4.4 道路の交通対策技術

4.4.1 基本的な考え方

交通渋滞の緩和・解消には、基本的には交通需要の調整かボトルネック交通容量の増大が基本的な対策となる。前者は交通需要マネジメント（Travel Demand Management: TDM）という考え方で体系化が図られているが、さらに近年では交通情報の提供や経路誘導等、より動的な調整策が取られるようになってきた。一方後者は、車線数増や道路ネットワークの増強等、物理的な施策が中心となるが、後述の動的交通管理（Active Traffic Management: ATM）も欧米では導入が進んでいる。

交通安全の向上のためには、交通工学のみならず車両技術、人間側の要因の解明等、多角的な取り組みが必要であるが、特に高速道路における交通渋滞は、追突事故や車両接触事故の原因ともなり、交通渋滞対策は交通事故削減にも大きく寄与する^{13)・14)}。道路線形設計や交差点配置計画等で、道路の幾何構造を運転者から自然に分かるように設計すること、さらに一般街路では歩行者や自転車等と混在することから、交通信号を含む交通規制全般を適切に設定することで、安全性の高い空間を提供することも重要である。

交通による環境影響には、騒音、大気汚染、地球温暖化ガス排出等がある。近年、日本では騒音や大気汚染は、車両や燃料の改善等で大きく軽減され、燃

費向上は二酸化炭素排出量も低減させている。ただし交通渋滞や交通信号による停止発進の繰り返しは二酸化炭素排出量を無駄に増加させる^{15) 16)}ため、これを軽減する交通円滑化対策は環境影響の軽減にも効果がある。

4.4.2 高速道路の交通渋滞対策

高速道路は、自動車専用道路として大量・高速な自動車交通を担う国土および大都市の大動脈である。これが頻繁に交通渋滞を起こすことは、大動脈の機能不全を意味し、国・地域にとっての大損失である。そのため、特に高速道路の交通渋滞解消は極めて重要である。欧米では、流入部で交通量を調整するランプメータリング、さらに近年では図6に示す車線別可変速度規制や臨時的路肩走行運用等のATMの導入が進められている。

日本でも、新東名高速道路の愛知区間の開通までは東名高速道路に交通が集中して交通渋滞の多発が予想されたため、道路幅員を変えずに幅員を狭めて車線数を増やす対策（図7参照）が行われ¹⁷⁾、交通渋滞と交通事故の減少に大きく寄与している。さらに最近注目されている自動車の自動走行技術でも、一定速度を自動的に維持するCC（Cruise Control）を進化させ、前方車に追い付くと自動的に前方車に追従するACC（Adaptive Cruise Control）は、高速道路単路部ボトルネック現象が運転者による追従挙動に起因する（4.2.3項参照）ことから、この現象発生を抑制し交通渋滞を減少できる可能性が期待されている¹⁸⁾。



図6 車線別可変速度規制の例(イギリス)

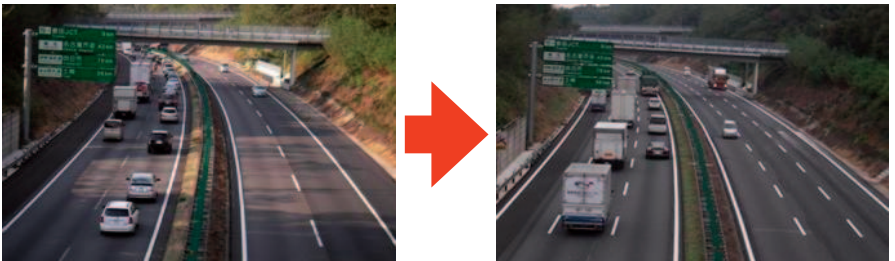


図7 東名高速道路音羽蒲郡IC-豊田JCT間の3車線化
(NEXCO中日本記者発表資料より引用)

4.5 交通マネジメントの高度化

交通工学の1つの大きな課題は、実験室における実験が極めて困難なことである。従って事実を丹念に観測・調査することが重要であるが、1, 2割の交通需要の変動や、運転挙動の個人差に起因して高速道路サグ部における交通渋滞発生の有無が生じる等、微妙な交通の違いや変化で交通の流れの特徴は大きく変わる。こうした時間・空間的変動の実態を把握するには、4.1節に示した車両感知器等による定点観測だけでは限界がある。

近年、情報化の進展により、車両に搭載のカーナビやスマートフォンを単に持ち歩いているだけで、その車両が経験した交通状態を時々刻々と計測・モニタリングできる「プローブ」と呼ばれる技術が確立されつつある。ただし、これは基本的にサンプルであり、全体の量的な特徴を知ることは難しい。

現在、既存の車両感知器データとプローブ・データを融合し、4.2節に示した交通流理論を援用して交通の全体像を描く技術も開発されている^{19)・20)}。またこうした大量のデータを蓄積し、最新のデータマイニング技術を援用することで、交通の実態の全体像に関する知見が飛躍的に増えることが期待されている。こうした蓄積情報による知見をベースにしつつ、センサーやプローブ情報をリアルタイムに利用し、理論に基づく交通シミュレーションを適用して現状の交通状況を正確に推定・把握する(“Now”-cast)技術²¹⁾を確立し、これを交通情報提供や経路誘導、さらにランプメータリングやTDM施策に動的かつ柔軟に応用する交通マネジメント技術を確立することで、日々の交通渋滞を最小限に軽減できるものと期待される。さらにこれらの技術は、悪天候時や大規模なイベント開催時、交通事故やその他の予測困難なインシデント等に対する迅速な対応策の計画・立案と実行に大きく役立つものと考えられる。

例えば、図8は2011年3月11日東日本大震災発生時の東京の主要幹線道路の大渋滞状態を示している²²⁾が、この時はボトルネックによる交通渋滞がネットワーク状に延伸することで、交通渋滞領域がループを形成し、交通渋滞末尾が最初のボトルネック位置まで伸びてくることで、

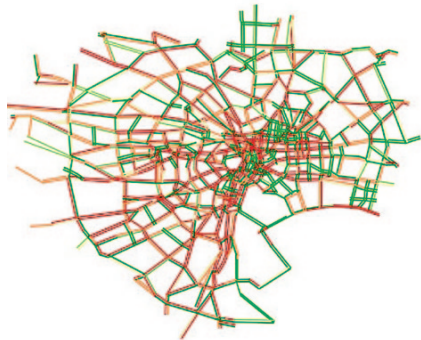


図8 グリッドロック状態の東京の幹線道路

さらにボトルネック交通容量を低下させて、ネットワーク全体を麻痺させる「グリッドロック」が発生したものと考えられている。グリッドロックは極めて深刻な交通渋滞であり、またいったんグリッドロックしてしまうと、この状態から抜け出すのは容易なことではない。グリッドロックをリアルタイムに検出し、あるいはその予兆を捉えてグリッドロックを回避できる交通制御手法の確立は、道路交通システムの安定性、信頼性向上に大きく貢献するものと考えられる。

参考文献

- 1) 越正毅「高速道路トンネルの交通現象」『IATSS Review』Vol. 10, No. 1, pp. 32-38, 1984年
- 2) Koshi, M. 1985. "Traffic Flow Phenomena in Expressway Tunnels." *IATSS Research* Vol. 9: 50-56.
- 3) 越正毅「高速道路のボトルネック容量」『土木学会論文集』No. 371/IV-5, pp. 1-7, 1986年
- 4) Lighthill, M. J., and G. B. Whitham. 1955. "On Kinematic Waves: 2. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads." *Proceedings of the Royal Society of London A* Vol. 229: 317-345.
- 5) 越正毅, 赤羽弘和「渋滞の研究」『道路交通経済』No. 45, pp. 64-69, 1988年
- 6) Koshi, M., H. Akahane, and M. Kuwahara. 1989. "Explanation of and Countermeasures against Traffic Congestion." *IATSS Research* Vol. 13, No. 2: 53-63.
- 7) <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/05/6.pdf>.
- 8) Koshi, M., M. Kuwahara, and H. Akahane. 1992. "Capacity of Sags and Tunnels on Japanese Motorways." *ITE Journal* Vol. 62, No. 5: 17-22.
- 9) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和「高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究」『土木学会論文集』No. 458/IV-18, pp. 65-71, 1993年
- 10) Oguchi, T. 2008. "Redesign of Transport Systems on Highways, Streets and Avenues." *IATSS Research* Vol. 32, No. 1: 6-13.
- 11) 中村英樹, 大口敬「性能照査型道路計画設計の導入に向けて」『土木学会論文集D3』Vol. 67, No. 3, pp. 195-202, 2011年
- 12) Transportation Research Board. 2003. *Access Management Manual*.
- 13) 彦坂崇夫, 中村英樹「高速道路単路部における事故率と交通状況との関連に関する統計的分析」『第21回交通工学研究発表会論文報告集』pp. 173-176, 2001年
- 14) 大口敬, 赤羽弘和, 山田芳嗣「高速道路交通流の臨界領域における事故率の検討」『交通工学』Vol. 39, No. 3, pp. 41-46, 2004年
- 15) Oguchi, T., and M. Katakura. 2000. "New Conceptual Evaluation Method of Amount of Exhaust Emission Gas on Vehicular Road Traffic." *Advances in Transport (Urban Transport VI)* Vol. 6: 383-392.
- 16) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明「都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル」『土木学会論文集』No. 695/IV-54, pp. 125-136, 2002年

- 17) http://media2.c-nexco.co.jp/images/press_conference/78/2918114934ea7888494e01.pdf.
- 18) 岩崎健, 金澤文彦, 坂井康一, 鈴木一史 「高速道路サグ部におけるACC車両の混入状況に応じた渋滞緩和効果」『第10回ITSシンポジウム2011 Proceedings』2011年
- 19) Mehran B., Kuwahara M. 「プローブ, 車両通過時刻, 信号制御データの融合による一般街路上の車両軌跡推定」『交通工学』Vol. 46, No. 1, pp. 77-89, 2011年
- 20) Mehran, B., M. Kuwahara, and F. Naznin. 2012. "Implementing Kinematic Wave Theory to Reconstruct Vehicle Trajectories from Fixed and Probe Sensor Data." *Transportation Research Part C* Vol. 20: 144-163.
- 21) Hanabusa, H., M. Kobayashi, K. Koide, R. Horiguchi, and T. Oguchi. 2013. "Development of the Nowcast Traffic Simulation System for Road Traffic in Urban Area." In *Proceedings of 20th World Congress on ITS*. CD-ROM.
- 22) 大口敬, 伊藤麻紀, 水田隆三, 堀口良太, 飯島護久 「東京23区を対象とした大規模災害時交通シミュレーションと交通渋滞緩和策の評価」『第33回交通工学研究発表会論文集』pp. 273-278, 2013年

推奨文献

- 1) May, A. D. 1990. *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice Hall.
- 2) Daganzo, C. F. 1997. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. Elsevier Science.
- 3) 久保田尚, 大口敬, 高橋勝美 『読んで学ぶ交通工学・交通計画』理工図書, 2010年
- 4) 交通工学研究会編 『道路交通技術必携2013』丸善, 2013年

参照すべき実践編プロジェクト

- 歩行者の道路横断実態を重視した実用的な最適信号制御 156ページ
 二段階横断方式によるサイクル長の大幅短縮 160ページ
 安全でエコなラウンドアバウトの実用展開・社会実装・普及促進に関する研究 164ページ
 東南アジアにおけるオートバイの都市交通手段としての役割と限界に関する研究 168ページ