

化学生物総合管理

第14巻 第1号

技術革新と社会変革 —現場基点—

第10巻 第1号

2018年7月

	頁
巻頭言	
新しい技術を世に出す難しさ	竹内誠 1
報文	
ナノ材料の発がん性とリスク評価	酒々井眞澄 3
報文	
シンガポールの交通管理政策	三橋茉由 14
編集後記	32

【巻頭言】

新しい技術を世に出す難しさ

竹内 誠

9年前の本誌第2巻に「小規模木質バイオマス発電の実現による地球温暖化防止と持続的森林保全への試み」と題した報文を掲載していただいた。日本における森林資源と再生可能エネルギーの位置づけ、そして小規模バイオマス発電の必要性と技術提案を述べたものだった。この9年間に東日本大震災と原発事故があり、我が国の再生可能エネルギーを取り巻く環境はずいぶん変わった。木材自給率が20%から30%まで改善していることや再生可能エネルギーが太陽光を中心に予想以上に増加していることなど、報文に書いたことが良い方向に向かっている面がある一方、世界の変化はさらに早く、日本の立ち後れという意味ではますます課題が大きくなっている。筆者のテーマは、間接加熱式低温度差型スターリングエンジンの開発で小規模バイオマス発電を実現し、普及を目指すことであるが、震災後の防災のために作られた南相馬市大町市民交流センターに導入されるなど、着々と前進してはいるものの、社会に浸透したというにはまだまだ遠い状況である。現在、商用化に向けた技術開発を進めている段階であるが、新しい技術を世に出す難しさを実感しているところである。

さて、新しい技術を世に出す難しさは、国を超えて共通の課題であるが、諸外国に比べて日本はこの分野において遅れているという話が最近良く聞かれる。その際、社会変革まで結びついたLEDのような技術を引き合いに出して、そこからヒントを得ようとする場合が多い。確かに成功例を遡って行けば必ず一本の道が描けることは確かで、現在の社会にあふれている商品から、実用化研究、ノーベル賞級の基礎研究、さらにその前の着想に至るまで辿ることができる。しかし、実際の研究、開発の現場において、こうした話を参考にして個々のプロセスを改善することでイノベーションは増加するのだろうか。むしろ、個々のプロセスにあまり重点を置くと、イノベーションに結びつかない研究開発は意味がなく無駄だ、といった空気を醸成して、ユニークで新規性のあるテーマに取り組む意欲のブレーキになりかねないことが心配である。思うに、ユニークで新規性のあるテーマであればあるほど社会に受け入れられ難く、永久にもものにならない研究開発が実は数多くあるのではないだろうか。しかし、社会に出ることのない一見無駄なそれらが研究開発現場の裾野になり、少数のイノベーションを高みに押し上げているのではないだろうか。そうだとすれば、イノベーションを増やすには、個々のプロセスより、失敗を恐れず新規な研究開発に取り組む土壌、雰囲気醸成することのほうが重要な

ではないだろうか。

近年は副業解禁や働き方改革などで、自由な時間が増える傾向にあり、そういった時間を持つ幅広い人材が幅広いテーマで研究開発のプレイヤーとして参画するようになると、裾野の広い研究開発現場が形成され、ひいては社会変革につながるイノベーションが増えるのではないだろうか。

本学会もそういったのびのびした研究テーマが多く集まる場であってほしいと願うものである。

【報文】

ナノ材料の発がん性とリスク評価

Carcinogenicity and risk assessment of nanomaterials

酒々井眞澄

名古屋市立大学大学院医学研究科分子毒性学分野

Masumi SUZUI

Department of Molecular Toxicology, Nagoya City University Graduate School of Medical Sciences and Medical School

要旨

ナノ材料は1~100 nmという極めて小さいサイズのために特徴的な物理化学的特性をもつ。したがって、これまでにない全く新しい素材開発が世界で進んでいる。毒性学は細胞あるいは個体レベルでの科学的な検証により、起きうる毒性影響を予測し、この結果を健康被害の防止に役立てるという重要な社会的役割を担っている。私達の研究グループはラット肺に多層カーボンナノチューブ（MWCNT）を投与することにより悪性中皮腫と肺腫瘍が発生することを明らかにし、この結果から多種のMWCNTがその内の1品種であるMWCNT-7と同様にIARC発がん性の分類のグループ2Bであるとした。本稿ではナノ材料のうち、とくにカーボンナノチューブの特性、アスベストとの形状類似性、想定されうる発がん性を含む健康影響、リスク評価上の課題などについて科学的なエビデンスにもとづき議論したい。

キーワード

ナノ材料、多層カーボンナノチューブ、発がん性、毒性学、リスク評価（Risk assessment）

Abstract

Nanomaterial is defined as the size range from approximately 1-100 nm, and has unique and valuable physicochemical characters, expediting the new material development. Toxicology plays an important social role in preventing adverse side effects by elucidate possible toxicity in a cell culture system and/or animal experiments. In a recent study, we found that administration of multiwalled carbon nanotube (MWCNT) to the lung in the rat induces malignant mesothelioma and lung tumors. Our study extends the IARC classification of MWCNT-7 as a group 2B carcinogen to other species of MWCNT. Based on the scientific evidence, we summarize and discuss the specific features of carbon nanotubes, similarity between nanotubes and asbestos, and their possible health effects including carcinogenicity and issues of risk assessment.

Key word

Nanomaterial, Multiwalled carbon nanotube, Carcinogenicity, Toxicology, Risk assessment

1. はじめに

化学物質は多くの利便をもたらす一方で、その使用法によっては健康に有害な影響を及ぼすことがある。化学物質の有害性を予測し評価するのが毒性学である。私達のミッションは化学物質の発がん性、生殖発生毒性、遺伝毒性、免疫毒性および一般毒性について毒性発現機序をつきとめリスク評価を行うことにより化学物質のリスク管理に役立つ情報を社会に送り出すことである。なかでも、発がん性および遺伝毒性についての正確なリスク評価は極めて重要といえる。リスク評価は、化学物質のばく露はどのような種類の毒性（例えば、遺伝毒性）を惹起するかを確認する、用量・反応関係の分析からヒトへの無毒性量を予測する、ヒトのばく露量を算出する、ヒトへの許容摂取量と摂取量のデータ分析により化学物質の安全性を評価する、という順に一般的に進められる。本稿ではナノ材料のうち、とくにカーボンナノチューブ (CNT) の特性、アスベストとの形状類似性、想定される発がん性を含む健康影響（動物試験）、リスク評価上の課題などについて科学的なエビデンスにもとづき議論したい。

2. 科学的なエビデンス

(1) ナノ材料の定義とカーボンナノチューブ (CNT) の特性と活用

国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO) は、ナノ材料を「縦・横・高さのいずれかの外寸がナノスケールであるもの、内部構造あるいは表面構造がナノスケールであるもの」と定義し、ナノ粒子を「縦・横・高さのすべての外寸がナノスケールである物体」と定義している (Boverhof DR et al. 2015)。この場合、ナノスケールとはサイズがおおよそ 1 から 100 nm であることを意味する (Boverhof DR et al. 2015)。このサイズはデオキシリボ核酸 (DNA) 1 巻きの長さ (3.4 nm) からウイルスの大きさ (約 100 nm) に相当する。CNT の歴史は、Geim と Novoselov が 2 次元の平面状構造を持つグラフェンに関する草分け的な研究を行ったことに始まり、CNT は炭素原子から構成される六員環が平面上に並んだグラフェンを筒状に巻いた形状であることを提起した (Geim と Novoselov は 2010 年にノーベル賞を受賞)。そして、1970 年代に遠藤 (信州大学) は CNT の存在を示し 1990 年代に飯島 (NEC 筑波研究所) は CNT を発見した (Iijima S. 1991)。CNT は電気伝導性、熱伝導性、高硬度などの優れた物理化学的特性をもつため電池、絶縁材料、塗料、構造材料等の工業製品への利用が進んでいる (Berber S et al. 2000, Kang SJ et al. 2007, Yu MF et al. 2000)。CNT にはその形状により幾つかの種類があり、1 層の筒状グラフェンからなるものを単層カーボンナノチューブ (Singlewalled carbon nanotube, SWCNT) といい、複数層の同心筒状グラフェンからなるものを多層カーボンナノチューブ (Multiwalled carbon nanotube, MWCNT) という。2000 年以降には、薬物を患部まで届ける方法である薬物送達システム (drug delivery system, DDS) を利用したがん化学療法への応用が期待されている (Chen J et al. 2008, Ji SR et al. 2010)。たとえば、ビオチンタンパク・SWCNT・リンカー・抗がん物質の抱合体をつくり、これを細胞外に投与することで形質膜に存在する特異的な受容体に取り込ませる方法がある (Chen J et al. 2008)。

(2) アスベストの発がん性と CNT のリスク評価

アスベスト（石綿）は、安価で耐熱性や絶縁性などの特性をもつ鉱物であり、ブレーキライニング、クラッチパッド等の工業製品、電気コンロ、コタツ等の家庭用製品、セメント、化粧板等の建材そして各種材料として広く使われてきた。アスベストを吸入するとこれが肺組織内にとどまり 20~30 年の潜伏期間を経て非小細胞性肺がんや悪性中皮腫といった腫瘍性病変の発生に至ることがわかっている（O'Reilly KM et al. 2007）。CNT はアスベスト繊維と類似した直線状構造（例えば針の形状）を呈することから環境あるいは職業ばく露の場合、長期経過後に肺がんを含む肺障害の健康影響が生じるリスクを想定する必要がある。また、CNT のサイズが小さくなると単位体積あたりの表面積が増大する。例えば、1 cm の立方体を分割して 1 mm の立方体の粒子にすると表面積は計算上 10 倍になる。これに伴い、CNT の光学的、機械的、電気的な特性が変化することで結果的に体液中での溶解速度や流動性が増加し生体への反応性が高まる可能性とこれに対応した毒性評価を考慮する必要がある。CNT についても排気、排水、廃棄物等などの形態を経て環境中への放出の可能性が想定されている（環境省ナノ材料環境影響基礎調査検討会資料）。現状では、作業所・事務所などの屋内ばく露と環境中での屋外ばく露の状況を示す科学的なエビデンスはないが、屋内外でのばく露をモニタリングするシステムの開発が進められている（Taghavi SM et al. 2013）。また、健康有害性の制御に用いる基準値である職業ばく露限界値（occupational exposure limit, OEL）は動物実験の結果より $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と計算されている（Fukushima S et al. 2018）。

(3) 動物実験から想定される CNT による健康影響

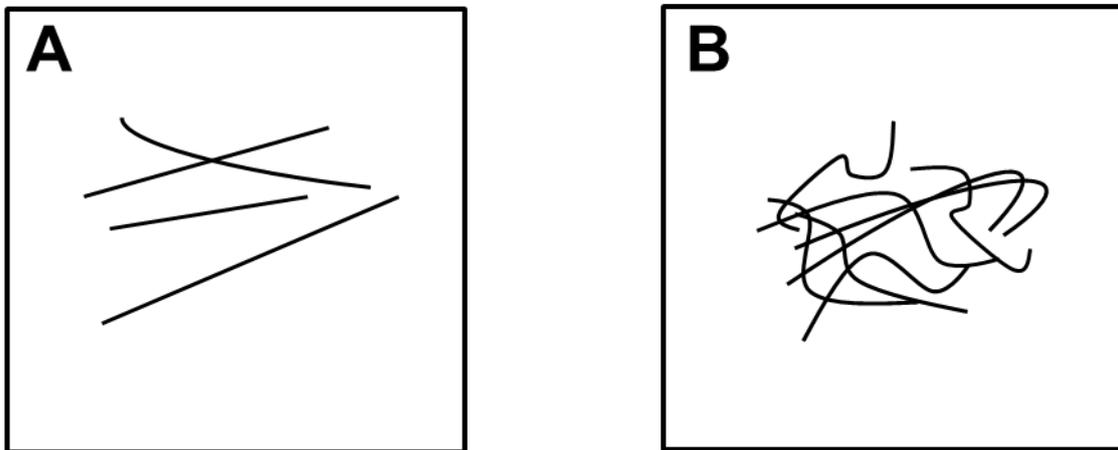
動物モデル（マウス、ラット）を用いて腹腔内あるいは陰嚢内への MWCNT の投与により悪性中皮腫が誘発された（Sakamoto Y et al. 2009, Takagi A et al. 2008）。また、MWCNT をラットの気管内に投与すると炎症、肺胞間質の線維化および肉芽腫が引き起こされた（Aiso S et al. 2010, Muller J et al. 2005）。直線状の MWCNT は胸膜に沈着し炎症反応および細胞増殖を引き起こすことが報告されている（Donaldson K et al. 2006）。

CNT による肺・胸膜発がんに影響する因子として CNT の長さ・直径の比（アスペクト比）と形状（直線状、集合体状）が考えられている。CNT の直径が小さく鋭利で長い、つまりアスペクト比が高い CNT は中皮腫誘導能があり細胞毒性は高い（Kostarelos K. 2008）。一方、アスベスト繊維の長さとの関連に関しては、直径が $0.25 \mu\text{m}$ 以下で長さが $8.0 \mu\text{m}$ 以上即ち、アスペクト比 32 以上の繊維は発がんを誘発するリスクがあるという仮説がある

（Stanton MF et al. 1972）。アスペクト比 154 あるいは 339 の直線状の MWCNT、アスペクト比 337 あるいは 1,923 の集合体状 MWCNT をマウスの腹腔内に投与した結果、直線状の MWCNT 投与群では横隔膜に炎症および肉芽腫が生じた（Poland CA et al. 2008）。マウスにアスベストと SWCNT を肺内投与した実験では、アスベスト投与群と SWCNT 投与群で肺組織に炎症が生じた（Teeguarden JG et al. 2011）。アスペクト比 100 の MWCNT をラットの腹腔内に投与すると 1 年後に 100% の頻度で悪性中皮腫が発生した（Nagai H et al. 2011）。しかし、アスペクト比 200 の集合体状態の MWCNT を腹腔内に投与し 3 年間経過後に調べた結果、肉芽腫は発生したが悪性中皮腫は発生しなかった（Nagai H et al. 2013）。吸入チャンバーを用いてラットに MWCNT の 1 品種である MWCNT-7（保土谷化学工業社）を全身ばく露した結

果、肺がんの発生増加がみられた（日本バイオアッセイ研究センターがん原性試験実施結果，2014年）。MWCNT-7の平均一次粒径データ（ナノマテリアル情報提供シート 経済産業省）によれば、MWCNT-7は直径60 nm、長さ10 μmであるのでアスペクト比は約167と計算される。逆に、CNTの組織に対する影響について否定的な報告もある。マウスにアスペクト比250～1,500の直線状のMWCNTを吸入ばく露後に調べた結果、肺組織での炎症、組織傷害および線維化は見られなかった（Mitchell LA et al. 2007）。また、アスペクト比62のMWCNTをラットの腹腔内に投与後2年経過しても腹腔内に中皮腫の発生がみられなかった（Muller J et al. 2009）。

これらの動物実験による報告から、CNTの平均直径、平均長、形状（図1）、投与量、投与期間および吸入か肺内投与かといった投与方法の違いは腫瘍性病変を含む肺障害の発生に影響する重要な因子であるといえる。動物実験の結果をヒトへ外挿する場合にはこれらの因子を考慮する必要がある。



A: 直線状のCNT。針のように細長い。 B: 集合体状のCNT。線維が密に絡み合っている。

図1 CNTの形状を示す模式図

ナノ材料が細くなることによる表面積の増加は物理化学的特性に影響すると考えられるが、物理化学的特性の変化とアスペクト比との関連性に関する科学的エビデンスは乏しいのが現状である。たとえば、アスペクト比を維持しながら粒子が細くなる場合とアスペクト比が変化して同時に粒子も細くなる場合とで測定結果がどのようになるのかの解析が望まれる。また、ナノ材料のなかには細長くない粒子、たとえば、炭素原子60個から成るサッカーボール状の構造を持つフラーレンがあり、これらの粒子を含めた詳細な検討も解析の一助になるであろう。これらの解析により表面積の増加といった物理化学的特性の変化と毒性発現との関連を分子レベルで解明することで安全性の高い形態の提案につながる可能性がある。

これらの研究結果から、動物試験において詳細なばく露評価を行うことはヒトへの健康影響を予測するうえで極めて重要であるといえる。しかし、EUの化粧品における動物実験規制や日本の「動物の愛護及び管理に関する法律（動物愛護管理法）」の改定の例に見られるような規制の強化により、現在では動物試験の実施に際しては大学を含む各種研究施設はいわゆる3R

(代替法、使用数削減、苦痛軽減)の徹底を図ることが一般化している。これらの状況をふまえて、今後の課題としては、CNTの形状とヒトへのばく露状況をよく反映した細胞レベルと個体レベルでの実験システムを確立することが必要である。

CNTなどの繊維性物質の吸入により発がんする詳細な機序についてはまだ不明な点が多い。CNTのサイズはマクロファージによる貪食(食作用)を規定する因子であると考えられている。マクロファージが貪食できるくらい十分にサイズが小さい場合は体内での遺残物にならない。しかし、サイズが大きいとマクロファージはこれを貪食できず、結果としてヒトの健康影響へつながるいくつかの機序が想定されている(Donaldson K et al. 2013, Kostarelos K. 2008)。その機序としては、1) CNTがDNA付加体を誘導するような酸化ストレスを引き起こす、2) CNTが細胞分裂に影響する、3) CNTが細胞増殖を促進する、4) CNTの貪食により炎症細胞がDNA付加体を誘導するような酸化ストレスを引き起こすことが挙げられる(Donaldson K et al. 2013, Kostarelos K. 2008)。マクロファージは組織内で異物を食べる作用があり約20 μm と比較的サイズが大きい細胞である。CNTのサイズがマクロファージのサイズより大きい場合には不完全な貪食となり、これらの過程を経て結果的に細胞増殖につながるとの仮説がある(Kostarelos K. 2008)。この仮説に関連して、私達の最近の研究結果ではCNTばく露初期の変化から慢性炎症・線維化の過程を経て最終的に発がんするまでを一連の実験系で証明している(Suzui M et al. 2016)。

3. 著者らの分析

(1) MWCNTの細胞および個体レベルにおける影響解析

私達の研究グループはこれまでにMWCNTが引き起こす肺障害性について、MWCNTの形状と炎症や発がんとの関連を調べてきた。その過程で、MWCNTの平均長8 μm で針状のMWCNTでは、それより短く集合体状のものにくらべてラット胸膜中皮細胞の増殖がより促進されることを見いだした(Xu J et al. 2014)。様々な施設での動物モデルを使ったこれまでの研究では、ばく露後長期経過による臓器影響をみるには実験期間が短いと考え、私たちは観察期間を2年間として実験を行った(Suzui M et al. 2016)。この研究ではMWCNT投与2週間および1年経過後の臓器影響を経時的に観察して発がんに至った過程を解析している。さらに、これまではMWCNTの肺内ばく露では発がんしないと一般的にみられていたが、アスペクト比が80~140で細くて長い針状のMWCNT-N(日機装社)をラット肺内に投与すると65週以上の経過後に胸膜悪性中皮腫・肺がんが高頻度に発生することを世界に先がけて発見した(Suzui et al. 2016)。

この研究で私達は、MWCNTをグループ2B物質であると提唱した。付け加えて説明すると、国際がん研究機関(International Agency for Research on Cancer, IARC)は、ヒトに対する発がんリスク評価モノグラフのなかで約700種類の化学物質を次の5つのカテゴリーに分類している。この分類は発がん性のリスク評価に世界で広く用いられている(Kuempel ED et al. 2017)。その内容は、グループ1: 発がん性がある(carcinogenic to humans)、グループ2A: おそらく発がん性がある(probably carcinogenic to humans)、グループ2B: 発がん性があるかもしれない(possibly carcinogenic to humans)、グループ3: 発がん性が分類できない(not classifiable as to its carcinogenicity to humans)、グループ4: おそらく発

がん性はない(probably not carcinogenic to humans)である(IARC 発がん性の分類 2017)。

新たに行った解析で、初代培養されたラット肺胞マクロファージに MWCNT をばく露し 25,000 遺伝子のマイクロアレイ解析を行った結果、2 つのサイトカイン(Csf3, IL6)の mRNA 発現および 2 つのケモカイン(Cxcl2, Ccl4)の mRNA 発現が対照群と比較してそれぞれ高いことがわかった。これをもとに MWCNT の肺内ばく露 2 週および 52 週経過後の肺組織での炎症とこれら 4 つのタンパク発現を調べた結果、炎症とこれらの高発現は 52 週間持続することがわかった。予備実験では、いくつかの腫瘍組織検体でもこれらの発現が高いことをつきとめた。すなわち、ラット肺胞マクロファージが MWCNT を貪食し、マクロファージより放出されたサイトカインが好中球の増殖動員および機能強化を行う。これに伴い、ケモカインの作用により好中球および単球が遊走しマクロファージをさらに動員するという循環が生じると私達は考えている。MWCNT 投与 52 週後の胸膜と肺胞上皮は肥厚し細胞増殖の促進がみられる。

これらの所見から私達は、「MWCNT→炎症→好中球・マクロファージ動員→サイトカイン/ケモカイン発現→細胞増殖→発がん」という機序を想定している。私達は CNT ばく露に伴う炎症・線維化から発がんまでを、正常組織と比較することで形態学的変化を明らかにするとともに炎症やがんといった各病態でのサイトカインやケモカインの発現の状況をつきとめるという一連の実験系で証明したと考えている (Suzui M et al. 2016)。

4. まとめ - CNT のリスク管理に関する課題と対策に関する考察 -

MWCNT の国内企業の製造量は 70~120 トン (2016 年度) と報告されている (経済産業省「ナノマテリアル情報提供シート」)。また、MWCNT の世界市場の推移および予測は、2010 年における販売量 150 トンは 2017 年に 230 トンに増加、販売金額 27 億円 (2010 年) は 43 億円 (2017 年) に増加するとしている (富士キメラ総研「2014 年 高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」)。これは潜在的なニーズが高く成長しうる市場であることを示している。よって、CNT の健康影響リスクを明らかにすることは重要である。

IARC は 2017 年の発がん性の分類において MWCNT-7 をグループ 2B とした。一方、MWCNT-7 以外の MWCNT および SWCNT をグループ 3 (発がん性が分類できない) としている (IARC 発がん性の分類 2017)。CNT を含むナノ材料の社会的な展開に当たっては、安全な開発の推進と健康へのリスク評価・リスク管理をバランスよく勘案する必要がある。安全な開発の推進では少なくともヒトへの影響を示す証拠が不十分であるため発がんを含む臓器障害の機序の解明、発がんさせない形状・特性の特定は重要な課題である。健康へのリスク評価・リスク管理では、正確・迅速な評価法の確立、安全性が評価済のナノ材料の上市、生産・処理管理、環境・職場でのモニタリングとばく露回避が重要である (図 2)。

評価手法のひとつである動物モデルについて、中皮腫は臨床症例では腹膜や陰嚢内の中皮から発生することがある。しかし、腹腔内中皮腫や陰嚢内中皮腫 (精巣鞘膜中皮腫) の頻度は低く、その原因も明確でないため腹腔内投与の動物実験がこれらの臨床症例の良いモデルになることは現状では考えにくい。また、F344 雄ラットの長期飼育例 (120~131 週齢) では 2~4% の頻度で腹腔内に中皮腫が自然発生する (小野寺ら)。しかし、腹腔内投与の動物実験は、CNT の形状、投与量、投与期間などを一定の条件に制御・管理した場合に CNT が中皮に何らかの影響を与えて最終的に発がんすることを証明できる信頼できる動物モデルであるといえる。私

達の研究成果をふまえて今後は動物個体レベルでの CNT の発がん性に関するデータを蓄積することでエビデンスレベルを上げることが肝要である。

安全な開発の推進	
発がんを含む臓器障害の機序の解明	
発がん機序の解明	
発がんさせない形状・特性の特定	
リスク評価・リスク管理	
リスク評価	正確・迅速な評価法の確立
リスク管理	安全性が評価済のナノ材料の上市 生産・処理管理 環境・職場でのモニタリングとばく露回避

図 2 ナノ材料の安全な開発とリスク評価・リスク管理に関する課題

環境省ナノ材料環境影響基礎調査検討会資料では、ナノ材料の製造事業所を想定したばく露経路が示されている。排気装置からの大気中への放出、排水処理での公共水域への放出、汚水処理汚泥や使用済フィルターなどの廃棄物を通じた環境中への放出などが考えられている（環境省ナノ材料環境影響基礎調査検討会資料）。労働現場あるいは環境でのばく露状況を把握できるモニタリングシステムの有用性の検討が必要であろう。こうした CNT のヒトへのばく露状況を考慮すると動物試験では吸入法は整合性があると考えられるが、吸入法（付表 1）では莫大な費用と大型の設備が必要であること、腫瘍性病変の頻度が低いことなどを考慮し、気管内投与法（付表 1）が用いられる場合が多い。この方法の利点は簡便で比較的短期間に安定して毒性・臓器障害を観察できることにある。これらの現状からも、今後は炎症、線維化、発がんなどの臓器障害に関する機序を含めた検証データの蓄積と綿密な解析が望まれる。

謝辞

本稿をまとめるにあたりご協力いただいた名古屋市立大学大学院医学研究科の深町勝巳講師、吉本恵里君、松本晴年君、安藤さえこ君、加賀志稀君、池永周平君に感謝いたします。

付表1 動物実験でのCNTによる影響解析まとめ

動物実験の報告	CNTの種類	投与経路	動物種	投与量	形状	アスペクト比	病変	区分	文献番号
Suzui et al. 2016	MWCNT-N	気管内	ラット	1 mg/rat	granular and needle like shapes	80-140	悪性中皮腫、 肺がん	腫瘍	22
Nagai H et al. 2011	MWCNT	腹腔内	ラット	1 or 5 mg	thin (細い, $\phi \sim 50$ nm), aggregative, tangled (集合的, 絡み合った, $\phi \sim 2-20$ nm), thick (太い, $\phi \sim 150$ nm)	100	悪性中皮腫 (1年間)	腫瘍	16
Sakamoto Y et al. 2009	MWCNT-7	陰嚢内	ラット	1 mg/kg body weight	1) in water suspension: multi-layered hollow fibers (多層中空糸) 2) in CMC suspension: multi-sized rod-shaped or fibrous particles (複数の大きさの棒状または繊維状の粒子)	Width: with a peak at 90 nm, and 82% of particles belonged in a range of 70-110 nm Length: with a peak at 2 μ m, and 72.5% of particles belonged in a range of 1-4 μ m	悪性中皮腫	腫瘍	20
Takagi A et al. 2008	MWCNT-7	腹腔内	マウス	1×10^9 of MWCNT particles (corresponding to 3 mg/head)	1) fine fiber or rod-shaped (細い繊維または棒状) 2) aggregated (集合的)	1) length around 10 to 20 μ m with an aspect ratio of more than three 2) aggregates are 50 to 200 μ m in dimensions.	悪性中皮腫	腫瘍	24
日本バイオアクセス研究センター (Sasaki T et al. 2016)	MWCNT-7 他6種類	吸入	ラット	0.02、0.2及び2mg/m ³ , 6時間/day, 1週5日間で104週間	MWCNT-7: straight fibrous type MWCNT: curved fibrous type, tangled type	MWCNT-7: 5.7 μ m length, 91 nm width 他6種類: 論文参照	肺がん	腫瘍	30
Aiso S et al. 2010	MWCNT-7	気管内	ラット	40 or 160 μ g/head (equivalent to 160 or 640 μ g/kg body weight)	【記載なし】	the mean length and width were 5.0 μ m and 88 nm, respectively, and that fibers longer than 5.0 μ m occupied 38.9% of the total fibers counted.	炎症、肺胞間質の線維化 および肉芽腫	非腫瘍	1

Donaldson K et al. 2006 (Review)	SWCNT MWCNT				直鎖状	SWCNT: between about 0.7 and 3 nm MWCNT: generally range from 10 to 200 nm in diameter	炎症反応および細胞増殖	非腫瘍	5
Mitchell LA et al. 2007	MWCNT	吸入	マウス	0.3, 1, or 5 mg/m ³ , 7 or 14 days (6 h/day)	直鎖状	200-1,500	炎症・組織障害および繊維化なし	非腫瘍	13
Muller J et al. 2005	MWCNT	気管内	ラット	0.5, 2 or 5 mg	【記載なし】	Length: 5.9 μm Average inner diameter: 5.2 nm Average outer diameter: 9.7 nm	炎症、肺胞間質の線維化および肉芽腫	非腫瘍	14
Muller J et al. 2009	MWCNT	腹腔内	ラット	2 or 20 mg/rat	agglomerates (凝集物)	62	中皮腫なし(2年間)	非腫瘍	15
Nagai H et al. 2013	MWCNT	腹腔内	ラット	10 mg	集合体状	200	肉芽腫(3年間、悪性中皮腫なし)	非腫瘍	17
Poland CA et al. 2008	MWCNT	腹腔内	マウス	50 μg	直鎖状	154	炎症および肉芽腫	非腫瘍	19
	MWCNT	腹腔内	マウス	50 μg	直鎖状	339	炎症および肉芽腫	非腫瘍	
Teeguarden JG et al. 2011	MWCNT	腹腔内	マウス	50 μg	集合体状	337	-		
	MWCNT	腹腔内	マウス	50 μg	集合体状	1923	-		
Teeguarden JG et al. 2011	SWCNT	肺内	マウス	40 μg/mouse twice a week for 3 weeks	【記載なし】	Length: 0.5-2 μm Diameter: 0.4-1.2 nm	炎症	非腫瘍	25
Xu J et al. 2014	MWCNT	気管内	ラット	1.625 mg/rat	針状	平均長8 μm	胸膜中皮細胞の増殖	非腫瘍	27

参考文献

- 1) Aiso S, Yamazaki K, Umeda Y, et al. Pulmonary toxicity of intratracheally instilled multiwall carbon nanotubes in male Fischer 344 rats. *Ind Health* 48: 783-795, 2010.
- 2) Boverhof DR, Bramante CM, Butala JH. et al. Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regul Toxicol Pharmacol* 73: 137-150, 2015.
- 3) Berber S, Kwon YK, Tomanek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. *Phys Rev Lett* 84: 4613-4616, 2000.
- 4) Chen J, Chen S, Zhao X, et al. Functionalized single-walled carbon nanotubes as rationally designed vehicles for tumor-targeted drug delivery. *J Am Chem Soc* 130: 16778-16785, 2008.
- 5) Donaldson K, Aitken R, Tran L, et al. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol Sci* 92: 5-22, 2006.
- 6) Donaldson K, Poland CA, Murphy FA, MacFarlane M, Chernova T, Schinwald A. Pulmonary toxicity of carbon nanotubes and asbestos-similarities and differences. *Adv Drug Deliv Rev* 65: 2078-2086, 2013.
- 7) Fukushima S, Kasai T, Umeda Y et al. Carcinogenicity of multi-walled carbon nanotubes: challenging issue on hazard assessment. *J Occup Health* 60: 10-30, 2018.
- 8) Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354: 56-58, 1991.
- 9) Ji SR, Liu C, Zhang B, et al. Carbon nanotubes in cancer diagnosis and therapy. *Biochim Biophys Acta* 1806: 29-35, 2010.
- 10) Kang SJ, Kocabas C, Ozel T, et al. High-performance electronics using dense, perfectly aligned arrays of single-walled carbon nanotubes. *Nat Nanotechnol* 2: 230-236, 2007.
- 11) Kostarelos K. The long and short of carbon nanotube toxicity. *Nat Biotech* 26: 774-776, 2008.
- 12) Kuempel ED, Jaurand MC, Moller P, et al. Evaluating the mechanistic evidence and key data gaps in assessing the potential carcinogenicity of carbon nanotubes and nanofibers in humans. *Crit Rev Toxicol* 47: 1-58, 2017.
- 13) Mitchell LA, Gao J, Wal RV, et al. Pulmonary and systemic immune response to inhaled multiwalled carbon nanotubes. *Toxicol Sci* 100: 203-214, 2007.
- 14) Muller J, Huaux F, Moreau N, et al. Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. *Toxicol. Appl Pharmacol* 207: 221-231, 2005.
- 15) Muller J, Delos M, Panin N, et al. Absence of carcinogenic response to multiwall carbon nanotubes in a 2-year bioassay in the peritoneal cavity of the rat. *Toxicol Sci* 110: 442-448, 2009.
- 16) Nagai H, Okazaki Y, Chew SH, et al. Diameter and rigidity of multiwalled carbon nanotubes are critical factors in mesothelial injury and carcinogenesis. *Proc Natl Acad Sci USA*. 108: E1330-E1338, 2011.
- 17) Nagai H, Okazaki Y, Chew SH, et al. Intraperitoneal administration of tangled multiwalled carbon nanotubes of 15 nm in diameter does not induce mesothelial carcinogenesis in rats. *Pathol Int* 63: 457-462, 2013.
- 18) O'Reilly KM, McLaughlin AM, Becktt WS, et al. Asbestos-related lung disease. *Am Fam Physician* 75: 683-688, 2007.
- 19) Poland CA, Duffin R, Kinloch I, et al. Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nat Nanotech* 3: 423-428, 2008.

- 20) Sakamoto Y, Nakae D, Fukumori N, et al. Induction of mesothelioma by a single intrascrotal administration of multi-wall carbon nanotube in intact male Fischer 344 rats. *J Toxicol Sci* 34: 65-76, 2009.
- 21) Stanton MF, Wrench C. Mechanisms of mesothelioma induction with asbestos and fibrous glass. *J Natl Cancer Inst* 48: 797-821, 1972.
- 22) Suzui M, Futakuchi M, Fukamachi K, et al. Multiwalled carbon nanotubes intratracheally instilled into the rat lung induce development of pleural malignant mesothelioma and lung tumors. *Cancer Sci* 107: 924-935, 2016.
- 23) Taghavi SM, Momenpour M, Azarian M, et al. Effects of nanoparticles on the environment and outdoor workplace. *Electron Physician* 5: 706-712, 2013.
- 24) Takagi A, Hirose A, Nishimura T, et al. Induction of mesothelioma in p53^{+/-} mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J Toxicol Sci* 33: 105-116, 2008.
- 25) Teeguarden JG, Webb-Robertson BJ, Waters KM, et al. Comparative proteomics and pulmonary toxicity of instilled single-walled carbon nanotubes, crocidolite asbestos, and ultrafine carbon black in mice. *Toxicol Sci* 120: 123-135, 2011.
- 26) Yu MF, Lourie O, Dyer MJ, et al. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*. 287: 637-640, 2000.
- 27) Xu J, Alexander DB, Futakuchi M, Numano T, Fukamachi K, Suzui M, Omori T, Kanno J, Hirose A, Tsuda H. Size- and shape-dependent pleural translocation, deposition, fibrogenesis, and mesothelial proliferation by multiwalled carbon nanotubes. *Cancer Sci* 105: 763-769, 2014.
- 28) 経済産業省ナノマテリアル情報提供シート
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html
- 29) 環境省平成20年度 ナノ材料環境影響基礎調査検討会第3回資料2
<https://www.env.go.jp/chemi/nanomaterial/eibs-conf/03.html>
- 30) 日本バイオアッセイ研究センターがん原性試験実施結果, 2014
<http://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/kag/bio/gan/ankgd56.htm>
- 31) 富士キメラ総研「2014年 高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」
<https://www.fcr.co.jp/report/132q21.htm>
- 32) 発がん性の分類 IARC 2017
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>

【報文】

シンガポールの交通管理政策

Traffic management policy in Singapore

三橋 茉由

帝京平成大学 現代ライフ学部 観光経営学科

Mayu MITSUHASHI

Department of Tourism Management, Faculty of Modern Life, Teikyo Heisei University

要 旨：シンガポールは面積が小さく人口密度が高い国である。このような国で、日本のように1人が1台自動車を持つと直ちに渋滞が発生してしまう。そのため政府は対策として自家用車の保有と利用に厳しい制限を設けている。その一つが通行料課金制度（Road Pricing）であり、中でも電子式道路通行料課金制度（ERP：Electronic Road Pricing）は交通量に応じてリアルタイムで料金の設定が行われること、徴収コストがかからないことが特徴である。さらに、シンガポール陸上交通庁では、シンガポール全体の国家開発計画の中で自家用車だけでなくバスや電車などの公共交通機関も含めた全般的な視点から人間中心の陸上交通システムの達成までを目指している。交通渋滞は経済活動や国民生活に様々な悪影響を及ぼすため、渋滞緩和政策は多くの都市で課題となっている。日本でも一部の地域や2020年開催予定の東京五輪の期間に一部の地域に限定してインターネットによる輸送管理をおこなう計画があり、その導入の可否が注目される中で、シンガポールの事例が示唆することを検証する。

キーワード：シンガポール、交通管理、交通渋滞、自動車登録制度、道路通行料課金制度、渋滞緩和政策、都市計画

Abstract : Singapore is a country with a small area and high population density. In such countries, severe traffic jams would occur if each citizen were to have their own car as it is in Japan. Therefore, as a tool of traffic control policy the government has strict limits on the possession and use of private cars. One of them is the road pricing system, among which ERP (Electronic Road Pricing) is characterized by setting up fees in real time according to the traffic volume, and without requiring collection costs. Introducing traffic congestion mitigation policies is a challenge in many cities because traffic jams have various adverse effects on economic activities and people's lives. The government of Japan plans to introduce a road pricing system in some areas during the Tokyo Olympic Games. Therefore, I evaluate implications of the system of Singapore.

Keywords : Singapore, traffic control system, traffic jam, car registration, road pricing system, traffic congestion mitigation policies, urban planning

1. はじめに

本論のテーマである交通管理政策について論ずる前にシンガポール共和国（以下、「シンガポール」という。）を概観する。シンガポール統計

ⁱによれば、2017年中央のシンガポールの総人口は561.23万人と推定されている。その中でシンガポール人は396.58万人で、それ以外の多くは外国人労働者である。同統計によれば2017年時点で面積は719.9平方キロメートルで東京23区よりやや広い程度の大きさである。また、2016年時点の民族構成は、中華系74%、マレー系13%、インド系9%を中心とする多民族国家であるⁱⁱ。2017年人口密度は779.6人/km²で世界第二位である。

各民族が様々な規範を抱えており一律の規範を採用することが困難であったことから、シンガポールでは社会生活における規範維持のため監視カメラの設置と厳格な罰金制度が導入された。交通管理に関しても、多民族国家ならではの様々な制度設計が行われてきた。

本論ではシンガポールの交通管理対策を、交通インフラの整備と通行量の規制に大別する。都市計画の中に位置付けられた交通インフラの整備、自動車登録制度及び通行料課金制度の点から分析し、同国交通管理政策の日本の交通政策への適用の可能性を考察する。

2. 交通管理政策

シンガポールの交通管理政策に関し、公共交通計画の策定の流れから説明していく。

2.1 所管官庁

シンガポールの陸上交通は、陸上交通庁（LTA: Land Transport Authority）の所管である。LTAは、1995年9月1日に運輸通信省陸上交通局（The Land Transport Division）、自動車登録局（Registry of Vehicles）、大量高速度交通公団（MRT）および国家開発省の附属機関である公共事業局道路輸送局（Roads and Transportation Division）を統合して新設された。

2.2 陸上交通マスタープラン

先に交通インフラの整備が交通管理政策の一つの柱であると述べたが、交通インフラ整備は、陸上交通マスタープランに示されている。LTAは、2013年10月に「陸上交通マスタープラン2013」を発表したⁱⁱⁱ。同マスタープランは、シンガポールの都市基本計画に基づき、中長期的な陸上交通の基本計画を示したものである。

シンガポールは1950年代までは漁村だった。経済開発に着手した1965年の独立時はバスが公共交通を担ったが、1987年に地下鉄が開通し、徐々にバスと地下鉄による二大公共交通システムに移行した。2013年年次報告によれば、陸上交通マスタープラン2013は、1996年の白書に示された世界水準の輸送システムの樹立計画および2008年の陸上交通マスタープランの実施を踏まえ、市街部ビジネス地区の交通渋滞や通勤時間帯の混雑に関し様々な対応策を盛り込んだ。各計画の達成目標を表1にまとめた。

表 1：1996 年、2008 年、2013 年に策定されたマスタープランの主な内容

名称	陸上輸送システムに関する白書	陸上輸送マスタープラン	陸上輸送マスタープラン
英文名	White Paper on A world Class Land Transport System	LT Master Plan on A People - Centred Land Transportation System	Land master plan 2013
策定年	1996年	2008年	2013年
主な内容	1995年9月政府は陸運局を設置	ニーズの多様化を充足する公共交通の整備	拡大するニーズへの対応
	世界水準の輸送システムの樹立を目指す	道路使用の効率的な管理	公共交通網の一層の整備と車両数増大
	国土の利用・都市開発及び輸送計画の調和	より効果的なERP制度の適用	公共バスサービスの拡充
	今後5年間で11億ドルの政府支出	自動車保有台数増加率の低減	公共交通システムの統合
	総延長225kmの道路の建設	自動車利用を抑制する駐車政策の導入	ERP用ガントリー設置台数増大
	公共交通網の整備（MRT網の160kmの延長）	人間中心の交通システムの実現	自動車関連設備の拡充
環境省・交通警察との協力継続	低所得者層向け手頃な公共交通の提供	ビジネス街と居住地の連結	
	全ての国民のための公共交通システムの実現	より快適なコミュニティーの実現	

出所：Land Transport Authority 各レポートより作成

これらのマスタープランは、シンガポール全体の国家開発計画の中で、各時点の課題を集約し、最終的には公共交通のみならず交通全般を含む総合的な陸上交通システムの達成目標を示している。これらには、「人間中心の陸上交通システム」を目指しているという特徴がみられる¹。

「人間中心の陸上交通システム」は、シンガポール政府の考え方の基本であり、都市開発や住宅整備計画と一体のものである。郊外に整備された住宅とビジネスエリアの勤務先を最小限の乗り換えと1時間以内の所要時間で結ぶことを目指す。そのためには合理的な路線ルートの設定、駅の構造、さらに駅と住宅のアクセスの利便性等の確保が必要になる。こうした人間中心の陸上交通システムの一例を2.4項に示した。

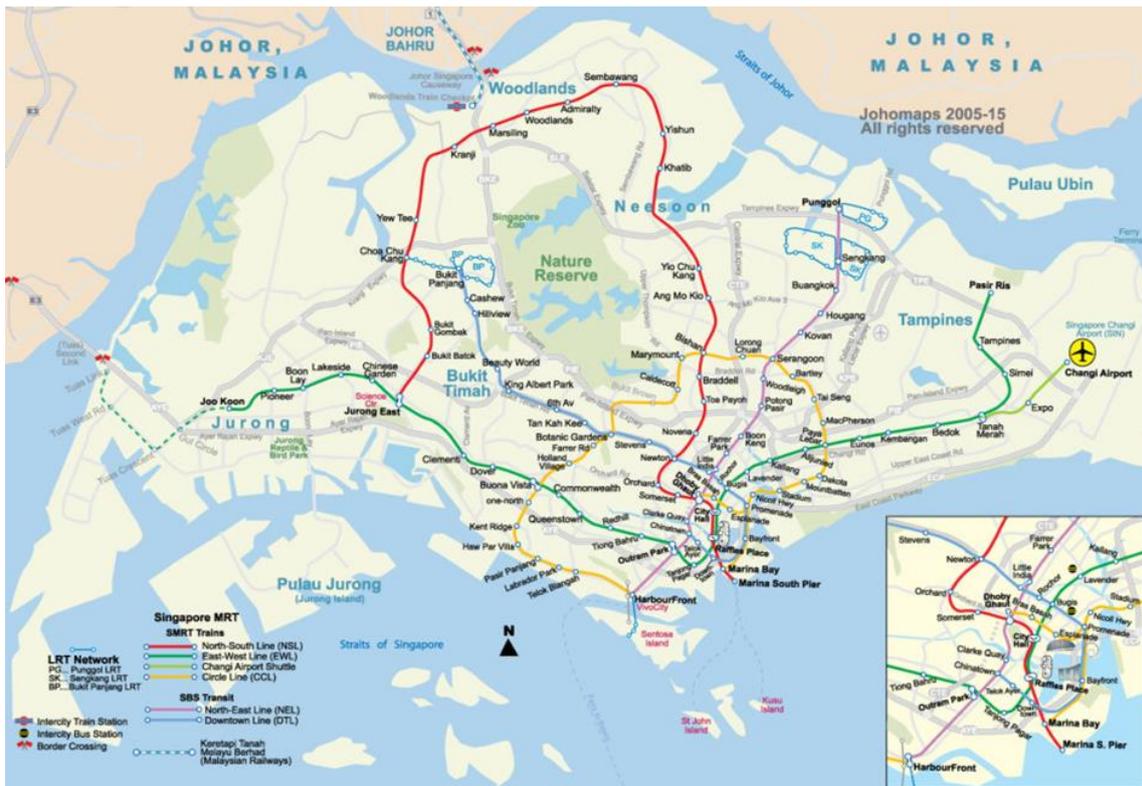
2.3 公共交通システム

シンガポールの地下鉄は市街地向けの大量輸送を担うMRT (Mass Rapid Transit) と郊外の住宅街を循環するLRT (Light Rapid Transit) に分けられる。1980年代以後北部に公団住宅が建設されるようになり、LRTは住宅地域をカバーするために作られた。陸上交通マスタープランでは、2030年までに鉄道総延長距離を現在の178キロメートルから360キロメートルに拡張すること及び8割の世帯が駅から徒歩10分圏内に居住することを目標とした。

同計画のもう一つの特徴は、地下鉄網の拡張に加えて、バスの利便性の向上を目指している点である。バス路線の新設やサービス水準の向上などを目標にしたバスサービス向上計画を紹介し、2016年までに800台のバスを購入するとともに、新たに40系統の開設によりバス交通網の改善を図ったことを報告している。

さらに、この計画は市民の自転車の利用を促進し、2016年の年次報告によると一層の自転車利用が促されている。シンガポールの総合的な交通サービスの実現は、徒歩・自転車・公共交通・自家用車からなる都市交通システムの究極的な姿を示している。

¹ 2016年の年次報告は、その目標の実現を「Walk・Cycle・Ride—Singapore」とまとめ、国民の住宅から職場までの移動を視野に入れた交通システムの実現に置いていることを明らかにしている。



地図 1：シンガポールの主要交通網

出所：<http://johomaps.com/as/singapore/singaporemetro.html>

(1) MRT (Mass Rapid Transit)

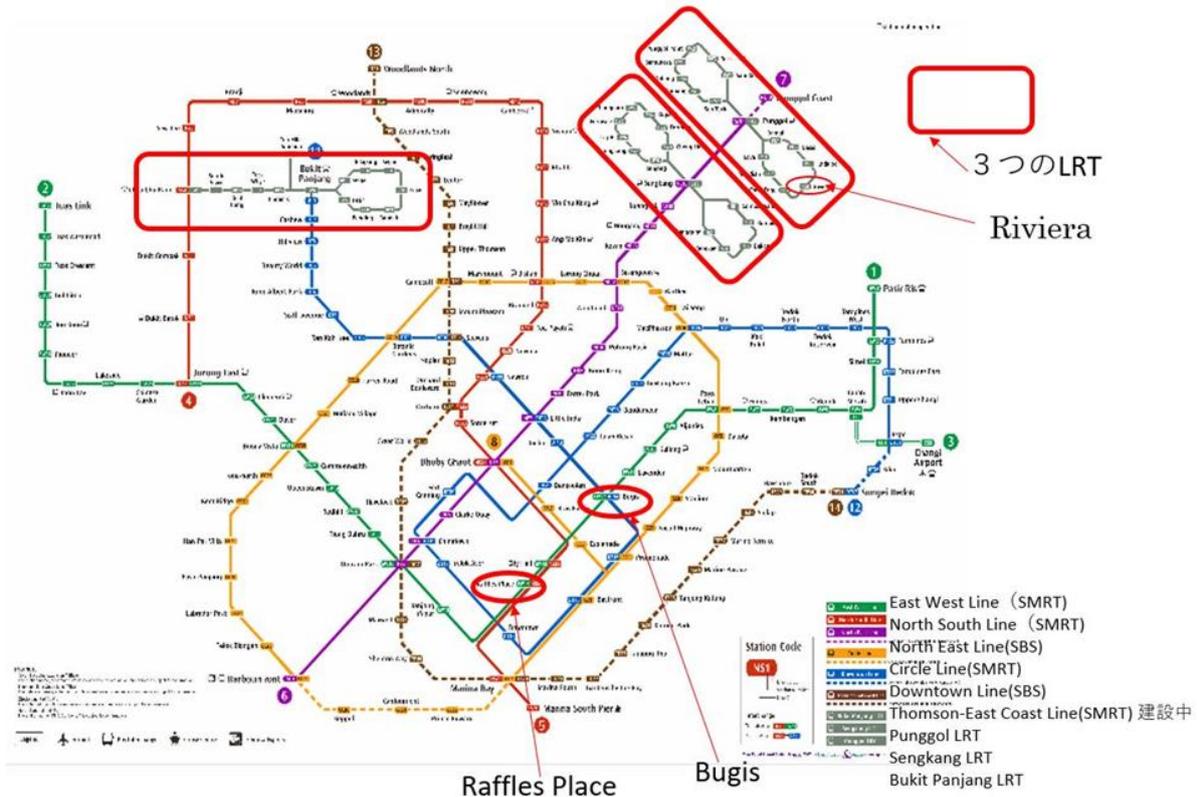
MRTは、直訳すれば大量高速交通システムであるが、実態は地下鉄網であり、今日5つの路線が整備されている。MRTは一般に地下線と言われており、本論でもそれになった。この内、North South Line(南北線)、East West Line(東西線)、Circle Line(環状線)の3路線はSMRT トレインズ社が、North East Line(北東線)、Downtown Line(ダウンタウン線)の2路線はSBS トランジット社が運営している。SMRT トレインズ社は2024年開業予定で、Thomson-East Coastal Lineの建設に取り組んでいる。

MRTは、都心部では地下を走行し、都心外では高架線を走行している。MRTの中で、2003年に開業した北東線では鉄輪方式の鉄道としては世界初の無人運転が採用され、その後環状線とダウンタウン線にも無人運転が導入された。各駅では駅構内での不必要な長居を規制するために、乗車券にひとつの駅内では改札通過後20分以内、4駅以内の移動では40分以内という有効時間が設定されている。

飲食禁止等を車内でも明示するMRTの規則からも窺えるとおり、シンガポール社会の特徴は、監視カメラによる監視と罰金制度にあるが、MRTにも多くの禁止事項があり、上記の他に列車内や駅構内での喫煙は罰金の対象である。また、水洗トイレの流し忘れや紙屑の投棄などにも詳細に罰金が定められている。

(2) LRT (Light Rapid Transit)

LRTは、MRTと住宅地域を結ぶ、自動運転（無人運転）によって固定軌道を走行する交通システムである。日本でいう新交通システムに該当する。日本の新交通システムは、自動運転を指向した都市公共交通機関で、従来のバス・路面電車・地下鉄などの短所を改善した交通システムを指し、既に普及が進んでいる「自動案内軌条式旅客輸送システム（AGT Automated Guideway Transit）」の呼称として用いられている。



地図2：シンガポールのMRT, LRTシステム図

出所：シンガポール交通局 <https://www.lta.gov.sg>

LRTにはBukit Panjang LRT(ブギ・パンジャン線)、Sengkang LRT(センカン線)、Punggol LRT(プンゴル線)がある。ブギ・パンジャン線はSMRTトレインズ社によって運営され、センカン線とプンゴル線はSBSトランジット社によって運営されている。センカン線とプンゴル線に採用された車両は三菱重工業が開発した。

LRTは、MRT駅と高層住宅団地のあるニュータウンを結んでおり、市民の通勤手段として広く利用されている。地図2において赤枠を付けたものが2.4項で紹介するプンゴル線を含む3つのLRTである。それ以外の路線はMRTで、車両の大きさも車列編成も日本の地下鉄とほぼ同様の交通システムである。それに対してLRTは、MRTの主要駅周辺の住宅地の中を走る補完的な交通システムである。車両の規模も小さく、前部と後部に運転席がある1両編成である。

こうした補完システムが住宅地域に設置され、国民の足となっている。写真1-1および写真1-2は、LRTの車両である。また、写真1-3は、LRTが結ぶ郊外の典型的な住宅地域である。

その中で LRT の駅は写真 1-4 で示すように周辺の住宅団地と屋根付き舗装道路で結ばれているのが一般的である。



写真 1-1: 後方から撮影した LRT 車両



写真 1-2: 横から撮影した LRT 車両



写真 1-3: 住宅地域を結ぶ LRT の線路



写真 1-4: LRT 駅と住宅を結ぶ屋根付き舗装道路

出所：帝京平成大学海外研修チーム提供（2018年2月10日撮影）

(3) 公共バス

MRT と LRT に加えて、当局は路線バスの整備を進めた。路線バスは、SBS トランジット社と SMRT バス社の 2 社によって運行され、その路線は島内のほとんどを網羅している。SBS トランジット社は、2017 年現在 200 以上のバス路線で約 2,700 台のバスを運行している^{iv}。また、SMRT バス社は、2000 年 3 月 6 日に設立された公共交通を運営する SMRT コーポレーションのバス部門で、急行バス、深夜バス、通勤時間帯に運行される着席保証のプレミアムバス、セントーサ島行きのシャトルバスを運行している^v。

(4) 鉄道

一般に、鉄道は機関車により走行し、地下鉄を含む電車は架空電線または第 3 軌条により電力供給を受け、機関車に頼らず走行する。したがって、機関車の有無が鉄道と地下鉄を含む電車の違いである。シンガポールは面積が東京都程度の狭い国であるため、今日鉄道はマレーシアのジョホールバルとシンガポール側の国境駅であるウッドランズを往復する路線のみであ

る。同線は、距離約 2 キロメートル、所要時間 5 分の国境通過だけの機能を果たすものであるが、渋滞がなく出入国手続きに要する時間を多く必要としないため広く利用されている。

また、今日マレーシア・シンガポール高速鉄道の建設が計画されている。同計画はクアラルンプール・シンガポール間約 350 キロメートルを 90 分間で結ぶ計画であり、シンガポール側のターミナルはジュロン駅が候補に上っている。2016 年 12 月 13 日、両国首相は 2026 年末までの開業を目指す両国間の高速鉄道建設に最終合意した。

2. 4 都市計画と交通システムの調和

陸上交通マスタープランは、都市計画の下位にある開発目標である。その陸上交通マスタープランは、都市計画を進展させシンガポール国民の生活環境を大きく改善した。

都市計画と交通システムの調和を考える上では、国民の通勤・通学にどのくらいの時間がかかるかという点が一つの指標になる。2018 年 2 月、帝京平成大学海外研修チームは、通勤時間の目安を得るために、シンガポールの中心部から郊外の住宅地区までの所要時間を実測した。調査期間の制約があったため平日の昼間（12:50~14:40）の一例をここに示す。

代表的なビジネス街であるラッフルズ・プレイスから MRT 南北線及び東北線と LRT プンゴル線を利用し、ドービーゴート駅とプンゴル駅を経由してプンゴル線のリビエラ駅まで至る時間を測った。リビエラ駅を選んだ理由は、3 つの LRT のうち、ビジネスセンターから最も遠い駅のひとつだからである。所要時間は 45 分だった。電車への乗り込み時点から到着駅に到着した時点の時間を測定しており、乗り継ぎ時間を含んでいる。

また帰路はリビエラ駅から商業地区のブギスまでの所要時間を測った。ルートはプンゴル駅からリトルインディア駅までは MRT 東北線、ブギスまでは MRT ダウンタウン線を利用し、乗り換え 2 回で所要時間は 41 分だった。

MRT と LRT は料金も運行も完全に統合されている。また、実際に乗車して、シンガポール政府が都市計画、交通インフラ、住宅整備等を統合した開発マスタープランの下に陸上交通マスタープランを位置づけ、長期的に取り組んできたこと、そしてそれを着実に実現していることを実感した。

その結果、今日では郊外には近代的な高層住宅が整備され、シンガポール国民は住宅地から 40~50 分の所要時間と 1~2 回の乗り換えで、ほとんどの勤務地に通勤可能になった。

都市開発で最も重要なことは長期的な視野であり、全体構想である。その意味で、マスタープランの策定を出発点に据えたシンガポールのやり方には学ぶべき点が多い。シンガポールは、各省庁を超えた、単一の国家目標の実現に邁進してきた。国土の狭さ、人口の少なさなど、日本と違う点はあるものの、同国のやり方には十分な合理性があると考えられる。

3. シンガポールの交通事情

3. 1 自動車登録台数

シンガポール統計^{vi}によれば、同国の自動車の登録台数は 2016 年現在 60.1 万台、人口は 561 万人である。これに対し、日本は、2016 年 3 月末現在の乗用車数^{vii}は全国 6,083 万台、東京 314.7 万台であり、2016 年 10 月 1 日現在の人口^{viii}は全国 12,693 万人、東京 1,362 万人である。し

たがって、シンガポールの一人当たりの保有台数は 0.107 台で、日本全体の 0.479 台の約 1/5、東京都 0.231 台の約 1/2 に相当するが、このことはシンガポール政府の自動車の保有抑制策を反映している。

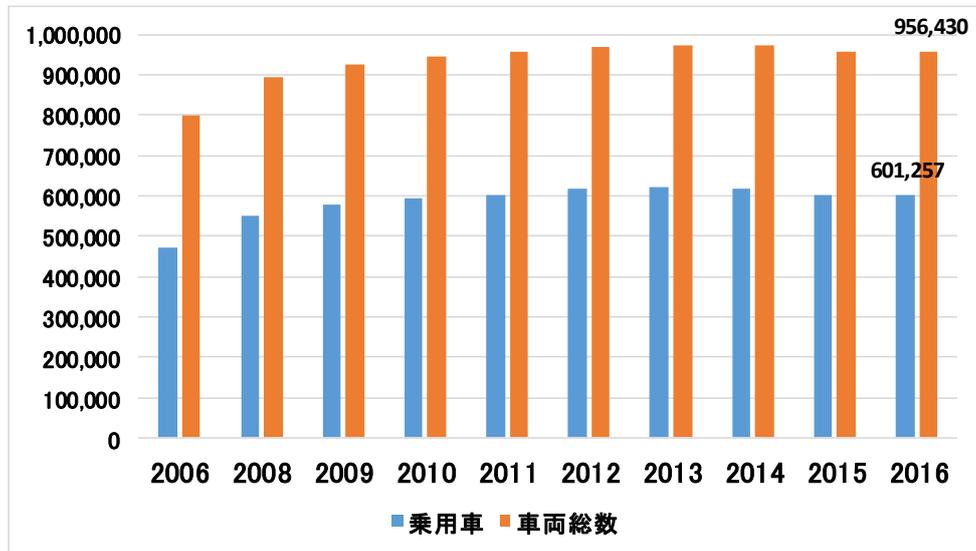


図 1：自動車登録台数の推移

出所：Annual Vehicle Statistics 2016, LTA

一般に通行量の規制をするためのツールは大きく分けて 2 つある。1 つ目は車両数を制限する方法、2 つ目は交通量を制限する方法である。

3. 2 車両数の制限

シンガポールでは、車両取得権利制度を設けることと車両価格を上げることで車両を保有する人数を抑制している。

(1) 車両取得権利 (COE: Certificate of Entitlement)

商用車を含む全車両について、購入する際に車両本体の価格にプラスして「車を所有する権利 (車両取得権利 = COE)」を政府から購入しなければならない。これは車両を購入する全ての人に義務付けられている。シンガポール政府はこの COE の発行枚数を調整することで、国内の車両の数を適正な一定数に保っている。COE は 10 年の有効期限付きで、価格は毎月 2 回の入札で変動する。その入札はインターネットを通じて行われ、入札価格は小型車や中型車など車種によって異なる。全車種共通の車両取得権の価格は 2010 年 1 月には 2 万シンガポールドルだったが、2011 年 1 月には約 7 万 1 千シンガポールドルと 3.5 倍余りに上昇するなど、経済の状況によって大きく変化する^{ix}。そしてこれらの価格は、1 シンガポールドルを 70 円で換算するとそれぞれ 140 万円と 500 万円であり、かなりの高額である。

(2) 車両価格

シンガポールでは車両を購入するには様々な面でコストがかかる。理由の一つには国内では車両の生産が行われておらず全て輸入であることが挙げられる。新車を購入する際、COEの金額に加え、その輸入に関する輸送費用、輸送時の保険、関税などが科せられ、日本での車両購入額の3, 4倍以上、時には5倍になることもある。車自体の価格は車種によって変わるが、それ以外に最低でも、車両取得権利の取得経費の400万円、輸入手数料の300万円などが追加になり、およそ表2の通りの価格となる。

表2：車両価格の比較

	日 本	シンガポール
カローラ	200万円	1,000万円
プリウス	300万円	1,500万円
アコード (ハイブリッド)	350万円	1,600万円

注：日本の価格は本体価格（2017年3月現在）、シンガポールは新車購入に必要な総費用
出所：ジェトロ・シンガポール事務所資料（2017年2月）

自家用車登録台数が管理されているため、自家用車の世帯普及率は約15%と低い。車両価格が高い自家用車の保有は可処分所得の多さを示し、社会的ステータスの高さを示すものである。

3. 3 交通量の制限

特定地域の車両の数を抑制するため、当該地域を走行する車両に課金する制度が道路通行料課金制度(Road Pricing)である。同制度は、導入順に入域許可制度(ALS: Area License Scheme)、道路通行料課金制度(RPS: Road Pricing Scheme)、電子式道路通行料課金制度(ERP: Electronic Road Pricing)の3つがある。

1975年、都心部の混雑を緩和するために、商業中心地区に制限区域を定め、制限区域へ進入する車両から通行料を徴収するALSが導入された。当初は、朝の通勤車の抑制を目的として午前中のピーク時間のみで実施し、その後、1989年以降には夕方の混雑時が含まれ、1994年以降は昼間においても実施されるに至った。

ALSが市中心部の混雑緩和に効果を発揮したため、1995年から、シンガポールの高速道路のうち、特に混雑が問題となっていた3大高速道路においても、平日の朝の時間帯にも、通行料を徴収することになった。

ALSやRPSは市中心部の混雑緩和に効果を発揮したが、渋滞地域の拡大や渋滞の程度に応じた課金徴収に対応できないこと、入域証の監視に人手とコストが嵩むことから、1998年よりERPに移行した。



写真 2-1 : ガントリー—2017年2月24日筆者撮影



写真 2-2 : 車載器 (In-Vehicle Unit)

出所 : 「シンガポールにおける交通事情と ICT の利活用」 ITU ジャーナル 2013 年 12 月

都心部や特定の混雑区域への車両流入を抑制するために、流入地点にガントリー（写真 2-1 参照）と呼ばれるゲートを設置し、ゲートを通過する際に、車載器と通信を行うことで課金するシステムである。ガントリーは国内 90 か所に設置されている。日本の ETC システムと似たシステムではあるが、シンガポールでは写真 2-2 に示す車載器の搭載が義務付けられており、ガントリーが一般道に設置されているのが特徴である。通過した時点で、トラック、バス、二輪車を含む全ての車両に自動課金される。ガントリーの稼働時間は、祝日を除く月～土の午前 7:30～午後 8:00 で、ERP の料金は 5 分ごとに設定され、交通量の多い時間帯ほど通行料が高くなる仕組みである。



写真 3 : ガントリー裏の監視カメラ

出所 : <https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/management/price/country/singapore.html>

写真3はガントリー裏に設置されている監視カメラである。車載器を搭載していなかったり残高不足などの理由により料金が徴収できなかった場合、ガントリー裏に設置してある監視カメラが通過車両の後方からナンバープレートを撮影し、違反車両のデータを陸上交通庁(LTA: Land Transport Authority)に送信し、後日、罰金が請求される仕組みになっている。罰金の額は、車載器の未搭載が70シンガポールドル(日本円で約4900円)、カードの入れ忘れが10シンガポールドル(日本円で約700円)で、違反の大部分はカードの入れ忘れである。請求に応じないと、1か月後には出廷が求められ裁判となる。カードは銀行や郵便局、ガソリンスタンドなどで購入でき、また、銀行のATMやスーパーマーケットに設置されている専用機でチャージすることができる。自家用車の保有と利用に関する交通管理は、シンガポールが管理社会であることを良く示す事例である。

ERPの料金や現在の渋滞状況の情報は、ドライバー向けの総合ポータルサイト「ONE MOTORING」でリアルタイムに提供されており、ドライバーの経路選択に活用されている。

ERPの整備に関して三菱重工業メカトロシステムズ(三菱重工業が100%出資)は、2016年3月9日シンガポール陸上交通庁(LTA)から次世代型電子式道路通行料課金システム(以下、「次世代ERP」という。)を受注したと発表した^x。そのシステムは都市部の渋滞を緩和するためのものであり、受注はシンガポールのシステム統合サービス会社であるNCS Pte. Ltd.と共同でおこなわれ、受注総額は5億5,600万シンガポールドル(約390億円)である。同社の発表によれば、受注した次世代ERPは衛星測位技術と広域通信網を用いて渋滞緩和などの交通需要管理を行うもので、同タイプのシステムは初めて都市部に広く導入されることになる。

4. 考察

ERPを代表とするシンガポールの交通管理政策の日本の都市部への適用の可能性について、考察する。

4.1 日本とシンガポールの車保有比較

図2に示す一般社団法人日本自動車工業会の「乗用車市場動向調査」(2015年度)によれば、日本人自動車保有者の車の使い方は、「買物・用足し・その他」が42%、「通勤・通学」が29%、「レジャー」が15%、「仕事・商用」が15%になっている²。このことは、大きく考えれば、毎日車を使用する人(通勤・通学、仕事・商用)は44%で、必要に応じて利用する人が57%という割合になると考えられる。

一方、表3-1においては1週間に6-7日使用する保有者が52%であるが、これには通勤・通学と商用を合計した44%と「買物・用足し・他」の42%の内の10%が含まれているのではない。また、使用頻度0~3日の割合は29%である。平均使用日数は4.9日/週であるが、その中でもそれ程遠出をしない利用者がかなりの割合で存在していると考えられる。

そのことは表3-2を見ると、月間走行距離の平均が350kmに過ぎないことから窺がえる。このことは1週間当たりの走行距離は78km、1日当たりでは12~15km程に過ぎないことを意

² 四捨五入の関係で原資料は計101になっている。

味し、片道 7km 程の行動範囲で車を利用している者が多いことが日本の自動車保有者の実態であることを示している。

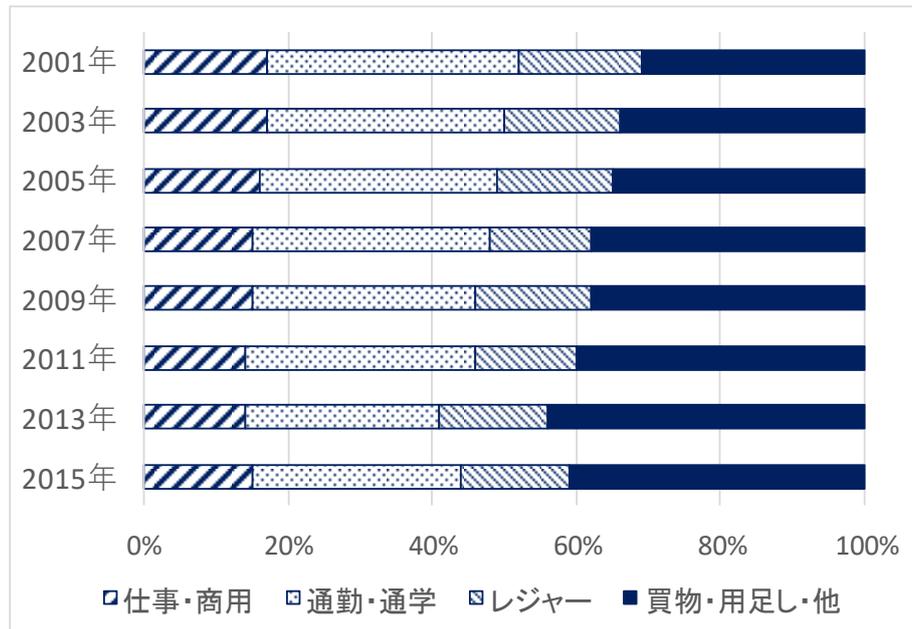


図 2: 日本の自動車保有者の主な使用用途 (単位: %、平均 日/週)

出所: (社) 日本自動車工業会「乗用車市場動向調査 2015 年度」2016 年 3 月

表 3-1: 日本の自動車保有者の利用状況 (一日あたり使用頻度、単位: %、km/月)

	0・1日	2・3日	4・5日	6日	7日	平均(日/週)
2001年	8	21	17	13	41	5.0
2003年	9	20	19	12	40	4.9
2005年	8	21	19	14	39	5.0
2007年	7	20	19	13	41	5.0
2009年	9	19	18	13	41	5.0
2011年	9	19	17	14	41	5.0
2013年	7	21	17	13	43	5.1
2015年	9	20	19	14	38	4.9

表 3-2：日本の自動車保有者の利用状況（月間走行距離）

	～300km	～600km	～1,200km	1,201km～	平均(km/月)
2001年	51	19	23	7	450
2003年	52	20	23	6	430
2005年	51	19	23	7	450
2007年	52	19	22	7	430
2009年	53	18	21	7	430
2011年	54	18	22	7	410
2013年	58	17	21	5	380
2015年	61	17	18	4	350

出所：(社) 日本自動車工業会「乗用車市場動向調査 2015 年度」2016 年 3 月

これらのことを考慮して、日本とシンガポールの利用者の使用実態を比較すると、シンガポールの使用頻度を 1 とした場合、少なくとも日本の保有者の実働保有台数は、大きく見積もったとしても使用頻度は 0.5、実走行距離は 0.5 となり、自家用車保有台数に 0.25 を乗じた値になると考えられる。

自家用車保有台数と一人当たりの保有台数を、それぞれ実働保有台数、一人当たり実働保有台数に補正して、表 4 にまとめた。

表 4：シンガポールと日本の自動車保有台数の比較（2012 年）

	シンガポール(*1)	日本全体	東京
自家用車保有台数（万台）	53.5	5,873 (*2)	312 (*2)
実働保有台数（万台） （日本は利用率 25%として推定）	53.5	1,468	78
一人当たり保有台数（台）	0.10	0.46 (*3)	0.24 (*3)
一人当たり実働保有台数（台）	0.10	0.115	0.06

*1：「シンガポールにおける交通事情と ICT の利活用」（ITU ジャーナル、2013 年 12 月）を元に作成

*2：「都道府県別・車種別自動車保有台数（軽自動車含む）」（自動車登録協会統計情報、2012 年 3 月末）

*3：総務省統計局の人口データ 日本全体 12,752 万人、東京 1,323 万人（2012 年 10 月 1 日現在）

表 4 より、一人当たりの実働保有台数は日本全体とシンガポールはほぼ等しく、東京だけでみた場合はシンガポールの約半分である。しかし、以下に述べる理由により、渋滞に関しては日本全体、東京の方がはるかに激しいと推察される。

例えば、シンガポールでの駐在経験者を含む現地訪問者は東京の方が渋滞は激しいと述べている。因みに、シンガポールでは、チャンギ空港から市の中心の市庁舎界限までは、27~28km の距離であるが、通常タクシーでは 30 分もかからない。これに対して、東京羽田空港から東京駅下では 19.4 km であり、東京駅のホームページ^{xi}によれば通例、タクシーで 25~45 分かかる。また、シンガポール市内では車は時速 60km で走行できるが、これに対して東京の都市部は経験的には平均 18km 程度でしか走れない。このことは、シンガポールの方が東京と比べ 3 倍以上車が流れているということの意味している。

シンガポールと日本の交通渋滞の実態は、両国の国土や産業構造の違いから一概に比較することは難しいが、日本の交通渋滞問題に関しては、2003 年国土交通省がまとめた報告書で以下のように記述されている。日本全国における渋滞による総損失時間を算出すると、年間 38.1 億時間にのぼり、これを金額に換算すると約 11.6 兆円に達する。これは一人当たりによれば、年間約 30 時間、金額は約 9 万円が渋滞によって失われていることになる。渋滞損失時間・損失額の求め方については、全国の道路の交通量、旅行速度を調査し、各調査区間について、昼間 12 時間帯の各旅行時間と、渋滞がない場合の旅行時間の差を求め、1 台あたり平均乗車人員を乗じると渋滞損失時間となり、費用便益分析に用いる時間価値原単位を用いて 1 台あたり時間価値を乗じると、渋滞損失額となる。

同報告書によれば、都市圏の交通渋滞対策としては交通容量拡大と交通需要の調整が重要とされている。交通容量拡大に関してはボトルネックの解消と道路ネットワークの整備が重要であるとし、その後国土交通省は交差点や踏切道にかかるボトルネックの解消施策、バイパスの整備に鋭意取り組んでいる。しかしながら、交通需要の調整の一つである交通需要管理施策として例示された「ロードプライシング」は実施に至っていない。

シンガポールは、ERP 等のツールを用いて十分に交通の管理を実現している。以上のことから、日本でもシンガポールのような交通管理政策をとっていくことが有効であると思慮される。

4. 2 日本におけるロードプライシング導入の検討

(1) 鎌倉市

鎌倉市では、地区交通計画の見直しや新たな施策について検討するため、2012 年 5 月に市長の諮問機関として、市民、商工業者、交通事業者、関係行政機関の職員、及び学識経験者で組織する鎌倉市交通計画検討委員会の設置と、その下部組織として鎌倉市交通計画検討委員会・専門部会を設置した。専門部会では、2013 年 10 月から、交通渋滞の解消策の一つである「鎌倉ロードプライシング（仮称）」の内容について検討を開始した。

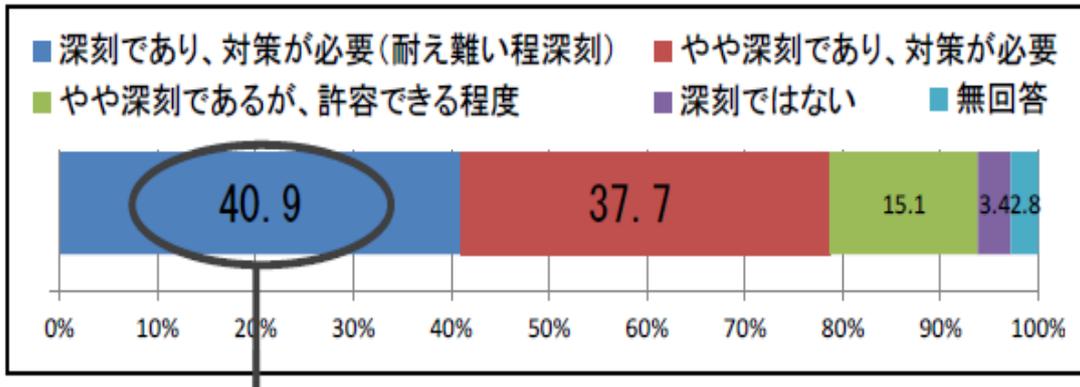


図3：鎌倉市の制度検討に際する市民アンケート結果（2012年実施）

出所：<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/koutsu/road-pricing-soan.html>

その導入の過程で、2012年に行った市民アンケートでは、「鎌倉地域で生じている交通問題についてどのようにお考えですか？」との設問に対し、「耐えがたいほど深刻であり、対策が必要」と回答した人は、全体の4割に達しており、特に鎌倉市内の鎌倉地域で顕著となっている。さらに、「やや深刻であり、対策が必要」と回答した人も含めると、全体の約8割に達している。検討委員会の検討は、専門部会が行われた2018年3月1日現在継続中である。

(2) 東京五輪

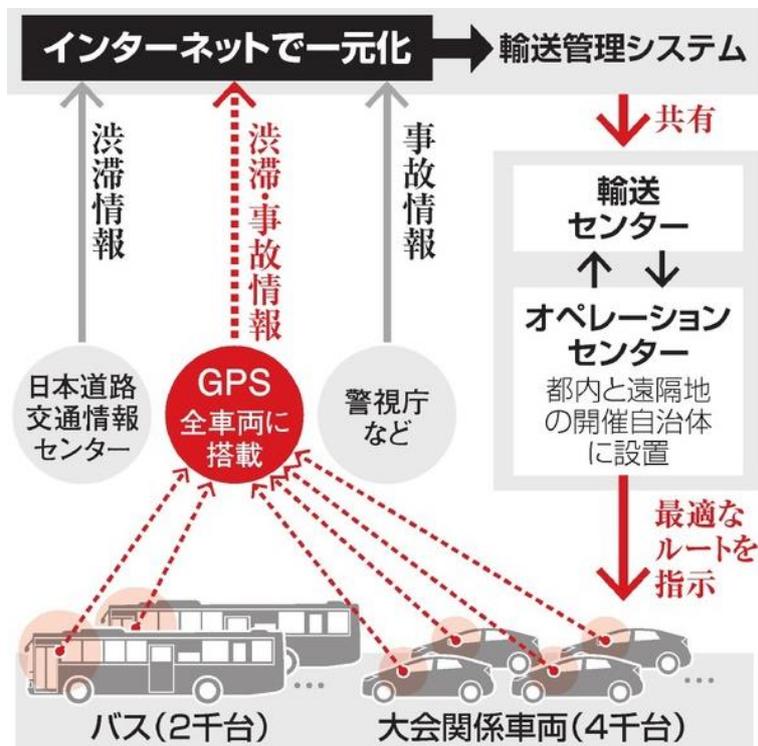


図4：東京五輪・パラリンピックでの輸送管理

出所：朝日新聞「五輪渋滞 ITで回避」2017年7月22日

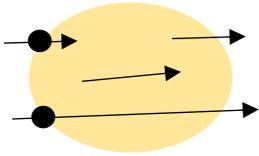
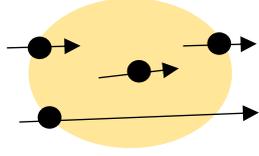
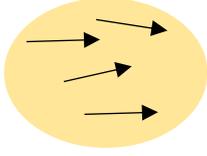
五輪開催中は延べ 800 万人の移動が見込まれている。東京五輪は都市近郊に競技場、選手村などが集中している。政府は、大会期間中の選手や観客らのスムーズな輸送方法の実現を目指している。そのために、東京五輪開催期間中の交通渋滞を避けるため、すべての関係者用のバスや乗用車などをインターネットにつなぎ、警察や道路管理者がそれぞれ持っている渋滞・事故情報も一元管理して運転手に最適なルートを示す新システムを導入することが2017年7月22日に決定した。IT（情報技術）を駆使して輸送を管理するのは五輪史上初めてで、閉幕後は災害時に緊急車両を効率的に動かすシステムに転用して大会の遺産とする予定である。

こうした輸送管理システムの一元化は、東京五輪のようなイベント開催時に限らず、継続的なものにするとともに、日本全体の輸送管理システムへの拡大を目指すことが有益であろう。それには渋滞・事故情報管理の一元化、ハード面としてはGPSの全車両での搭載が必要になるが、情報技術を駆使することで対応し得る課題であろう。

4. 3 ERP 導入都市の事例

道路通行料課金制度（Road Pricing）は、特定の道路や地域、時間帯における自動車利用者に対して課金することにより、自動車利用の合理化や交通行動の転換を促し、自動車交通量の抑制を図る施策で、交通需要マネジメント施策の一つである。交通渋滞や大気汚染の著しい市域に導入することにより、渋滞緩和と大気汚染の改善への貢献が期待され、現在、シンガポール、イギリスのロンドン、ノルウェーのオスロ等で導入されている。

表 5：ロードプライシング課金方法

	コードンプライシング	エリアプライシング	走行距離課金
課金方式	一定の区域内に進入する自動車に課金（●課金ポイント） 	一定の区域内を走行する自動車に課金（●課金ポイント） 	一定の区域内を走行する自動車に課金 
メリット	区域境界線上で課金するため、ここにチェックポイントを設ければいいことから、実現性やコスト面で優れる	一定の区域内を走行する自動車を対象とするため、課金の公平性が高い	走行距離に応じて、課金するため公平性が高い

出所：東京都環境局「海外におけるロードプライシングの事例」より作成

ロンドンでは、中心街での自動車交通量削減と渋滞の解消を目的としてエリアプライシング（Eria Pricing）が実施されている。エリアプライシングとは、一定の区域内を走行する自動車に課金する方法で、エリア内を走行すればするほど高い通行料を徴収される。一方、オスロ市では、道路整備を主とする交通インフラ整備の財源確保を目的に、コードンプライシングという課金方法が適用されている。コードンプライシングとは一定の区域に進入する際に徴収されるため、エリア内をいくら走行しても一定額を超えて徴収されることはない。

このように、シンガポール以外においてもすでに一定区内を走行する自動車に課金する方法を導入している都市があるが、これらの都市に比べて日本では鎌倉市等で依然導入が検討されている段階に過ぎない。

4. 4 今後の日本の都市部への適用性

日本では交通渋滞による経済や環境への悪影響がやまない。交通渋滞緩和ができれば、円滑な走行ができ、悪影響も最小限に収めることができるであろう。渋滞を緩和してより快適な交通環境を実現することは簡単なことではないが、少しずつ日本の都市部にも一定の区域内を走行する自動車に課金などの制度を検討する動きが見られるようになってきており、今後の展開が促進されることが期待できる。

5. おわりに

交通管理の手法は、交通インフラの整備と通行量の管理に大別されるが、前者の整備は国家開発計画の一翼を担い都市計画の各段階各側面に関係する。また通行量の管理には自動車登録制度および道路通行料課金制度（Road Pricing）が関連する。

シンガポールは、都市計画に基づき交通インフラ整備を行うと同時に、自動車登録制度、道路通行料課金制度を併用した結果、今日では交通渋滞の解消に加え、快適な交通環境を実現した。シンガポール国民の生活環境の整備を目標とする都市計画の中で、シンガポール陸上交通庁（LTA）が主導したこうした交通管理政策は、徒歩、自転車、公共交通、自家用車の調和を図ろうとする取り組みであり、同様な課題を抱える各国の都市に示唆を与えるものとなっている。

引用文献

- i Statistics Singapore Latest Data-2017 <https://www.singstat.gov.sg/statistics/latest-data#16>
- ii 外務省ホームページ <http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/singapore/data.html>
- iii Land Transport master plan 2013
- iv SBS Transit <https://www.sbstransit.com.sg/about/corpprofile.aspx>
- v SMRT Corporation Ltd <https://smrt.com.sg/Our-Business>
- vi Singapore Department of Statistics (DOS) <https://www.singstat.gov.sg/>
- vii 自動車検査登録協会データ：都道府県別・車種別自動車保有台数（2016年3月末）
- viii 総務省統計局人口推計（2016年10月1日）

- ix ジェトロ・シンガポールでのインタビュー結果（2017年2月24日）
- x 次世代型電子式道路課金システム（次世代 ERP）を受注
www.mhi.co.jp/news/story/1603095733.html 2016年3月9日三菱重工広報
- xi 東京駅から羽田空港へのアクセス | TOKYOINFO 東京駅構内・周辺情報
<http://www.tokyoinfo.com/access/directions/haneda/>

参考文献

- 1) “Statistics Singapore Latest Data-2017”シンガポール統計局, 2017年
- 2) “White Paper, A World Class Land Transport System”LTA, 1996年
- 3) “LT-Master Plan 2008” LTA 2008年
- 4) “Land Transport Master Plan 2013” LTA 2013年
- 5) LTA Annual Report, 2013/14年版
- 6) LTA Annual Report, 2015/16年版
- 7) LTA Annual Report, 2016/17年版
- 8) 「シンガポールの国家戦略から学ぶもの」(須藤繁、2017年11月 社会技術革新学会 議論の輪)
<http://s-innovation.org/index.html>
- 9) 「アジア共同体の創成に向けて」(一般財団法人ワンアジア財団助成講座実施報告書)
 帝京平成大学、2018年3月)
- 10) 「シンガポールにおける交通計画の取り組み」(仲田知弘、2014)
http://www.itej.or.jp/assets/seika/shiten/shiten_160.pdf
- 11) 「シンガポールにおける交通事情とICTの利活用」(武馬慎、2013)
- 12) 国土交通省「都市圏の交通渋滞対策—都市再生のための道路整備」(2003年3月)
<http://www.mlit.go.jp/common/000043136.pdf>
- 13) 東京都環境局
<https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/management/price/country/singapore.html>
- 14) 東京都環境局「海外におけるロードプライシングの事例」
<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/management/price/country/example.html>
- 15) 鎌倉市「(仮称)鎌倉ロードプライシングの検討内容と検討経緯等について」2016年10月17日
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/koutsu/road-pricing-soan.html>
- 16) 朝日新聞「五輪渋滞 ITで回避」2017年7月22日
- 17) 一般社団法人日本自動車工業会「乗用車市場動向調査 2013年度」2014年3月
- 18) 一般社団法人日本自動車工業会「乗用車市場動向調査 2015年度」2016年3月

編集後記

より多くの方々にご覧いただくために、化学生物総合管理学会の学会誌「化学生物総合管理」第14巻第1号と、社会技術革新学会の学会誌「技術革新と社会変革—現場基点—」第10巻第1号を合わせてお届けします。本号には2件の報文が掲載される運びとなりました。査読者の皆様をはじめ、著者、編集委員の皆様には多大なるご協力を賜り、感謝申し上げます。

巻頭言は竹内誠氏に執筆いただきました。執筆をご快諾くださった竹内氏に深く御礼申し上げます。新たな技術を普及させるためには、新開発が生まれる活発な礎を養成する必要があるという意見には強く同意するとともに、将来一分野の研究を担い得る者としてその重要性を再認識致しました。

前巻に引き続き、化学生物総合管理学会と社会技術革新学会の合同発刊となり、異なる2つの分野の報文が掲載されました。己の専門分野以外の知識を得る機会というものは、現代の教育機関において限られたものとなっております。そのような中で、こうして専門性が高い報文を外野の人々に向けて発信いただけるということは、大変貴重であり今後も大切にしていきたい機会であると思いました。

本学会誌の発行にあたり、ご尽力くださった皆様に重ねて感謝を申し上げます。

今後とも学会誌並びに学会の活動がより実りあるものとなりますよう、取り組んでまいりますので、引き続き皆様のご指導とご協力をお願い申し上げます。

編集委員会事務局 学会誌担当
家政 茜