交通安全のための路線バス，建設車両の運行コーディネーション：東北大学青葉山キャンパスの事例 *

Coordination of bus and construction vehicle operations aiming the traffic safety : Case in Aobayama Campus, Tohoku University*

奥村誠**・フォンセカ カルロス ナバ***
By Makoto OKUMURA** ・Carlos Nava FONSECA ***

１．はじめに

東北大学青葉山キャンパスでは，バイクが通学の主要な手段となっている．仙台市地下鉄東西線の工事の本格化に伴い，バイク通行路への工事用車両の混入率の増加が予想されており，バイクと工事用車両との錯綜による交通事故の危険性が懸念されている．そこで，路線バスの運行スケジュールを学生の通学交通需要の時間的なパターンに合致させることを通して路線バスの利用率を高めるとともに，工事用車両の運行スケジュールを調整してバイク交通事故のリスクを低下させることが望まれる．本論文では地下鉄建設というインフラの整備に比較的長い期間が必要とされることから，その期間に起こる問題回避のためのコーディネーション問題を扱う．公共交通サービス水準の時間的な構成を変えることによって交通需要の時間的な集中を緩和させると言う意味では従来TDMと言われてきた施策に含まれるが，交通需要の分散ではなく，交通事故リスクの軽減を最終目的とするところが特徴的である．

本論文は，このコーディネーション問題を扱う枠組みと，分析のための行動モデルの考察を行う．なお，最終的な目的関数の最適化を解析的に行うことはできないため，数値計算が必要となる．計測交通量データからの基本パラメータの同定と数値計算による最適化については今後の課題とする．

２．東北大学青葉山キャンパス交通問題の概要

東北大学は，仙台市内に5つのキャンパスを持っているが，中でも理系学部が立地する青葉山キャンパスには2年次以上の学部生が約4,100名，大学院生が約3,900名在籍している．東北大学の職員は1,200名であり，さらに奥に位置する宮城教育大学を合わせると10,000名弱の通勤通学者の目的地となっている．仙台市の中心市街地がおよそ標高40mであるのに対して，青葉山キャンパスは標高140mの台地上にあり，途中の川内キャンパスからも80m程度の標高差がある．

学生の居住地は川内キャンパスから広瀬川を挟んで北側の地区と，青葉山キャンパスから竜の口渓谷を挟んだ南側の八木山地区に集中している．仙台駅とキャンパスを結ぶ路線バスが平日には90便運行されているが，その路線の周囲は中心業務地域であり学生向けの住居が少ない．2000年の調査では学部生ではバス利用は1割程度で，バイクが約7割となっている．他のキャンパス分を含めて東北大生のバイクによる死傷者数はここ数年50～70名程度であり，特に冬季の坂道におけるスリップ事故は死亡事故につながるなど，大きな問題となっている．

東北大学では，青葉山キャンパスに隣接するゴルフ場跡地の県有地を取得し，現在市内の片平キャンパスにある一部の研究所と，雨宮キャンパスにある農学部を2011年度に統合移転させる計画が進行中であり，2008年後半から造成工事が始まる予定である．また，仙台駅と青葉山キャンパスをつなぐ仙台市高速鉄道東西線の建設工事として，青葉山キャンパス中央部に開削工法で建設される青葉山駅工区，および青葉山トンネル工区は着工済みで2007年秋からは掘削工事が行われている．この2つの工区の工事関係車両として，10トンダンプ車および10トン生コン車の運行が予定されている．2008年4月までは1日平均80台弱であったが，6月からは1日100台，11月からは1日120台に増える見込みである．さらに2009年9月ごろまではその他の資材が搬入される日には大型車の台数は1日140台を越える場合も予想されている．

図-1のように，これらの工事用車両は，上述したバイクが主に利用する川内キャンパスと青葉山キャンパス間の坂道を通行するため，バイクと工事用車両との錯綜による交通事故の危険性が懸念される．特に冬季には積雪や凍結によるスリップの危険性が高まる．通学トリップは必須の交通であるため，バイクの利用を減らす上では路線バスへの転換を進めることが必要となる．現在のバイクの交通量は，授業開始時刻の直前に鋭いピークを

*キーワーズ：公共交通運用，交通安全，TDM
**正会員，博（工），東北大学東北アジア研究センター
（仙台市青葉区川内41番地，
TEL022-795-7571，FAX022-795-7477，
E-mail：mokmr@cneas.tohoku.ac.jp）
***非会員，Mr.Eng.，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻（E-mail：alberto@cneas.tohoku.ac.jp）

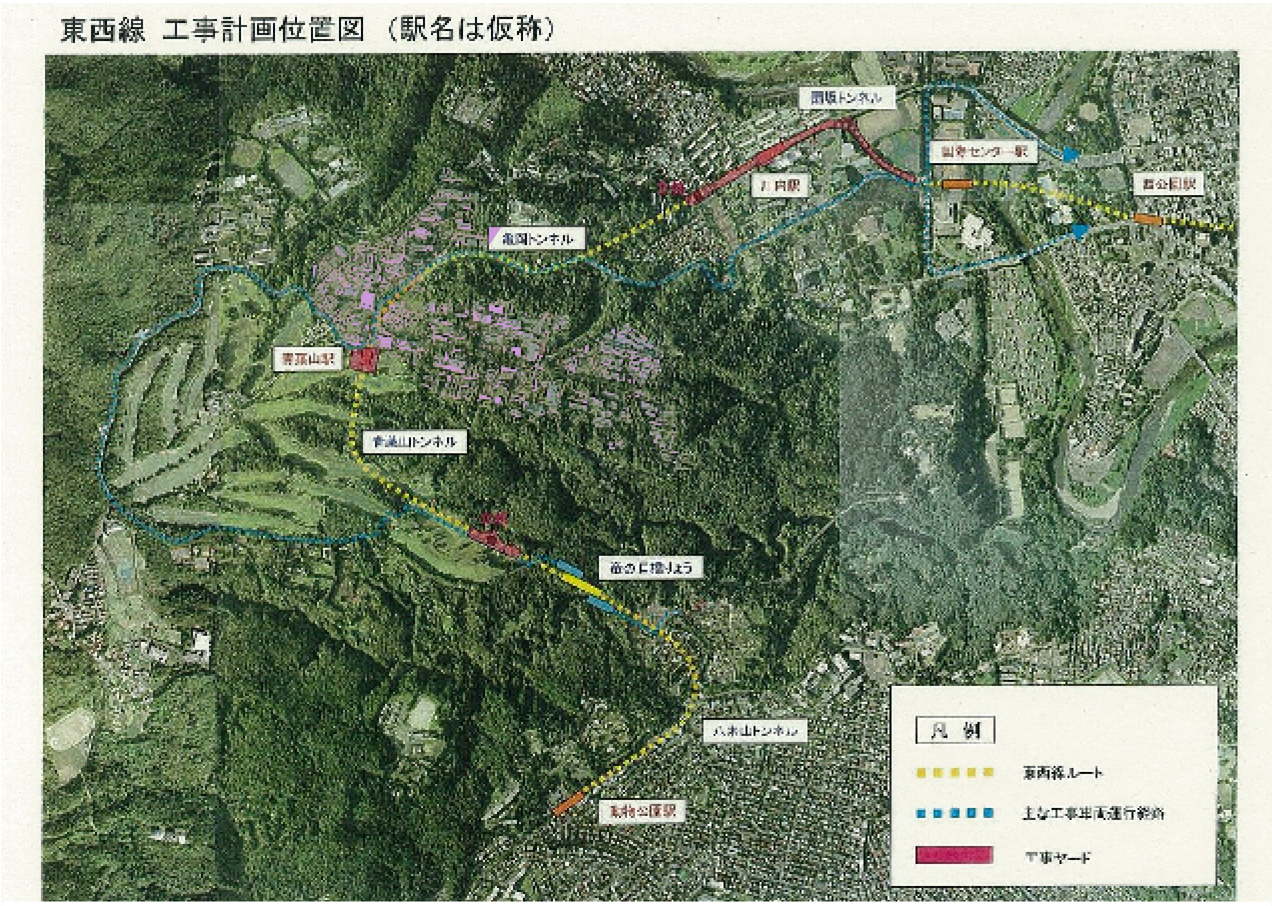

図-1　東北大学青葉山キャンパスと仙台高速鉄道東西線工事車両の運行ルート

有していることから，路線バスへの転換を図る上では，これらのピーク時間帯に合わせて路線バスの運行を行うことが必要となる．

３．交通スケジュール問題の定式化

（1）問題の設定

キャンパスに通学する学生Nは，1日の時間割の中で1～5時限のどれから出席しようとするかによって5つのグループ$N_k, k=1,\cdots,5$に分けられていると考える．各学生はバスとバイクの間で機関選択を行う．バスを選択した場合，どの時刻に到着する便を選択するかの問題が生じる．以下では時刻を連続変数tとして扱う．キャンパスへの到着時刻が授業開始時刻T_kに近いほどスケジュールコストは小さいが，車内混雑$g(t)$による不効用を強く感じることとなる．バスの運行スケジュール$m(t)$は，各時間帯に輸送できる乗客数$s(t)=g(t)m(t)$を変化させ，車内混雑の水準に影響を与えることとなる．なおバス運賃は時刻に関わらず外生的に与えられた一定値pである．

一方，バイク利用の学生にも，キャンパスへの到着時刻tの選択が生じる．ここではキャンパス内の駐輪場では教室に最も近い場所から占有されていき，到着時の駐輪台数$X(t)$に比例してそのときの到着バイク交通量$x(t)$に比例した移動時間が余分にかかると考える．以上の期間選択と到着時刻選択については十分な期間の試行がなされ，均衡状態に達していることを仮定する．そのときの不効用の水準を$\overline{U}_k$で表わす．

交通事故のリスクTRは，各瞬間におけるリスク$r(t)$を時間的に積分したものである．瞬間における交通事故リスクは，バイク交通量$x(t)$と大型車交通量$y(t)$の積に比例すると仮定する．ここで大型車交通量は，バスの交通量$m(t)$と工事関係車両の交通量$l(t)$の和である．

バスの運行費用TMは，特定の時間に密度の高い運行を行うほど多くなる．工事用車両の運行費用TYについても同様である．また工事計画スケジュールとの乖離に応じてスケジュール費用TDが発生する．

ここで，解くべきスケジューリングは，学生の均衡不効用の総和と交通事故リスク，バスの運行費用，工事用車両の運行費用および工事スケジュール費用をすべて足し合わせた全費用TTを最小にするバスの交通量$m(t)$と工事関係車両の交通量$l(t)$である．

この問題は学生の交通機関選択と時刻選択に関する均衡制約条件つきの最適化問題であるため，MPEC (Mathematical Planning with Equilibrium Conditions)と呼ばれる問題になっている．

（２）バス利用に関する均衡条件

グループkのバス利用者S_kについて考える．キャンパスへの到着時刻がtであるバスの混雑率を$g(t)$で表わす．このバスを利用する学生が感じる不効用は，混雑率に基づくものと運賃，および到着時刻と授業開始時刻との乖離によるスケジュールコストからなるものとする．早着と遅着の単位コストをそれぞれe,dとすると，早着する学生についての不効用は,

$$U_{sk}(t) = \beta g(t)^{\eta} + p + e(T_k - t) \quad (1)$$

遅着する学生の不効用は,

$$U_{sk}(t) = \beta g(t)^{\eta} + p + d(t - T_k) \quad (2)$$

となる．

あるグループ内についての均衡条件は, 早着と遅着の区別なしに, 利用者がいる時間帯のすべての時刻について不効用が一致することである. すなわち,

$$\begin{aligned} U_{sk}(t) &= \overline{U_k} \quad if\ \ g(t) > 0, \\ U_{sk}(t) &< \overline{U_k} \quad if\ \ g(t) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

となる．微分形で表わせば早着と遅着についてそれぞれ,

$$\dot{U}_{sk} = \beta\eta g(t)^{\eta-1}\dot{g}(t) - e = 0 \quad (4)$$

$$\dot{U}_{sk} = \beta\eta g(t)^{\eta-1}\dot{g}(t) + d = 0 \quad (5)$$

が成立する必要がある.

ここで，ある時刻においてクラスkの遅着とクラス$k+1$の早着が同時に起こっていると仮定する. 遅着が起こる時間帯では(4)式より$\dot{g}(t) > 0$であり．これは早着がある時間帯について(5)式から得られる$\dot{g}(t) < 0$と矛盾する. 以上のことから同じ時間帯のバスには遅着の利用者と早着の利用者が混在することはないことがわかる.

これよりあるクラスkに対する遅着者が存在しうる時間帯は, T_k以降の時間帯（終了時刻をR_kと表わす）の次は$T_{k+1} \le t < R_{k+1}$，$T_{k+2} \le t < R_{k+2}$のように断続的に現われる. 不効用に関する均衡条件を満足するには, 後の時間帯の混雑による不効用が$d(T_{k+i} - T_k)$という差を埋める程度に小さい必要があるが，それは実際的ではない. 以上のことからクラスkに対する遅着者は$T_k \le t < R_k$にのみ存在すると仮定できる. 同様に早着者は$R_{k-1} \le t < T_k$にのみ存在すると仮定してよい.

(1) 式と(3)式から$R_{k-1} \le t < T_k$について,

$$g(t) = \left\{ \frac{\overline{U}_k - p - e(T_k - t)}{\beta} \right\}^{\frac{1}{\eta}} \quad (6)$$

となり混雑率はtに関する増加関数となる．一方(1)式と(4)式から$T_k \le t < R_k$について,

$$g(t) = \left\{ \frac{\overline{U}_k - p - d(t - T_k)}{\beta} \right\}^{\frac{1}{\eta}} \quad (7)$$

のように，tに関する減少関数となる．なお(6)式と(7)式から時刻T_k前後の混雑率は等しくなり,

$$g(T_k - 0) = g(T_k + 0) = \left\{ \frac{\overline{U}_k - p}{\beta} \right\}^{\frac{1}{\eta}} \quad (8)$$

単位時間当たりのバス利用者数は，バス運行本数と混雑率の積である. したがってバス利用者数について,

$$\int_{R_{k-1}}^{R_k} m(t) g(t) \mathrm{dt} = S_k \quad (9)$$

が成立する. バスの運行頻度が所与であれば，(9)式よりS_k人の輸送に必要な時間の長さR_{k-1}, R_kが求まり，それを用いて均衡不効用$\overline{U}_k$の値が定まる.

バスの運行費用は，時間当たりの運行費用を時間的に加算したものである. すなわち,

$$TM = \sum_k \mu \int_{R_{k-1}}^{R_k} m(t)^{\gamma} \mathrm{dt} \quad (10)$$

と表現できる.

（３）バイク利用に関する均衡条件

キャンパス内の駐輪場では教室に最も近い場所から占有されていき，到着時の駐輪台数$X(t)$に比例した余分の移動が必要となるが，その所要時間はそのときの到着バイク交通量$x(t)$に比例して延びると考える．ここで,

$$\dot{X}(t) = x(t) \quad (11)$$

である．時刻tに駐輪場に到着した利用者が教室に到着できる時刻は$t + (\kappa + \lambda x(t))X(t)$に等しいから, 早着する学生の不効用は,

$$U_{Bk} = c(T_k - t - kX(t) - \lambda x(t)X(t)) \quad (12)$$

遅着する学生の不効用は,

$$U_{Bk} = d(t + \kappa X(t) + \lambda x(t)X(t) - T_k) \quad (13)$$

となる.

あるグループ内についての均衡条件は, 早着と遅着の区別なしに, 利用者がいる時間帯のすべての時刻について不効用が一致することである. すなわち,

$$\begin{aligned} U_{Bk}(t) &= \overline{U_k} \quad if\ \ x(t) > 0, \\ U_{Bk}(t) &< \overline{U_k} \quad if\ \ x(t) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

となる．ここで均衡効用は(3)式のものと同一である.

(12)式は$Y(t) = X(t) + \kappa / \lambda$に関する変数分離型の微分方程式であり,

$$X(t)=\left[\frac{1}{\lambda}\left\{a^2-\left(t-T_k+\frac{\overline{U}_k}{c}\right)^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}}-\frac{\kappa}{\lambda}t$$

(15)

となり，

$x(t)=$

$$\frac{\left(T_k-\overline{U}_k/c-t\right)}{\lambda}\left[\frac{1}{\lambda}\left\{a^2-\left(T_k-t-\frac{\overline{U}_k}{c}\right)^2\right\}\right]^{\frac{-1}{2}}-\frac{\kappa}{\lambda}$$

(16)

を得る．これは時刻tの増加関数である．

一方(13)式から，

$$X(t)=\left[\frac{1}{\lambda}\left\{b^2-\left(t-T_k-\frac{\overline{U}_k}{d}\right)^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}}-\frac{\kappa}{\lambda}t$$

(17)

となり，

$x(t)=$

$$\frac{\left(t-T_k-\overline{U}_k/d\right)}{\lambda}\left[\frac{1}{\lambda}\left\{b^2-\left(t-T_k-\frac{\overline{U}_k}{d}\right)^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}}-\frac{\kappa}{\lambda}$$

(18)

を得る．これは時刻tの減少関数である．早着時間帯と遅着時間帯では交通量の増減が異なるため，両者は共存できないのはバス利用の場合と同様である．したがってクラスkのバイク利用者が存在しうる時間帯を$r_{k-1}\le t<r_k$と表わすと，

$$X(r_{k-1})+B_k=X(r_k) \tag{19}$$

が成り立つ．さらに1つのクラスの中での両者の切り替え時刻$t^*=T_k-\left\{\kappa+\lambda x(t^*)\right\}X(t^*)$における$X(t)$の連続条件より，

$$a^2-\left(T_k-\frac{\overline{U}_k}{c}-t^*\right)^2=b^2-\left(T_k+\frac{\overline{U}_k}{d}-t^*\right)^2$$

(20)

が成立する必要がある．この(19)(20)式より，バイク利用者数B_kと均衡不効用$\overline{U}_k$が与えられると，それに応じて未知のパラメータa^2,b^2を決定することができる．

（4）交通事故のリスク

瞬間における交通事故リスク$r(t)$は，バイク交通量$x(t)$と大型車交通量$y(t)$の積に比例すると仮定する．ここで大型車交通量は，バスの交通量$m(t)$と工事関係車両の交通量$l(t)$の和である．すなわち，

$$r(t)=\omega x(t)\left\{m(t)+l(t)\right\} \tag{21}$$

交通事故のリスクTRは，各瞬間におけるリスクを時間的に積分したものである．よって，

$$TR=\omega\int_0^T x(t)\left\{m(t)+l(t)\right\}\mathrm{dt} \tag{22}$$

と表わされる．

（5）工事関係車両の運行スケジュール

工事用車両の運行費用TYは特定の時間に運行が集中するほど高くなる．したがって，

$$TY=\nu\int_0^T l(t)^{\zeta}\mathrm{dt} \tag{23}$$

と表現できる．工事用車両の到着が望ましいスケジュール$h(t)$から乖離すると，現場における資材や土砂の過不足が生じる．その過不足に比例して費用TDが発生すると考えれば，

$$TD=\theta\int_0^T\left(\int_0^t l(\tau)\mathrm{d\tau}-h(t)\right)\mathrm{dt} \tag{24}$$

と表現できる．

（6）総費用最小化問題の定義

解くべきスケジューリングは，学生の均衡不効用の総和と交通事故リスク，バスの運行費用，工事用車両の運行費用および工事スケジュール費用をすべて足し合わせた全費用TTを最小にするバスの交通量$m(t)$と工事関係車両の交通量$l(t)$である．すなわち，

$$\min_{m(t),l(t)} TT=\sum_k N_k\overline{U}_k+TR+TM+TY+TD$$

(25)

である．

ここまでの定式化からわかるように，均衡効用水準とバス，バイク利用者数を与えれば，到着時刻選択に関する均衡条件式によってトリップの時刻分布を求めることができる．それらをもとに，目的関数の各項を数値計算により求めることができる．

4．おわりに

以上でスケジュール計画問題の枠組みとモデルの定式化を述べた．計測交通量データからの基本パラメータの同定と数値計算による最適化については今後の課題とする．

参考文献

1）吉村・奥村(2003) 自動車・鉄道の分担を考慮したフレックスタイム制度下の 最適通勤・始業時刻分布の分析，土木計画学研究論文集，No. 20，pp. 903-912.

2）塚井・奥村・吉村(2006) 施設利用交通の目的時刻別交通量への分解，交通工学研究発表会論文報告集，No. 26，pp. 237-240.