自動車利用と避難開始時間帯を考慮した津波避難計画の評価

長尾　文平[1]・嶋本　寛[2]・中村　俊之[3]・宇野　伸宏[4]・
Jan-Dirk Schmöcker[5]・山﨑　浩気[6]

[1]学生会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）
E-mail:nagao@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　宮崎大学工学部（〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1）
E-mail: shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

[3]正会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）
E-mail:nakamura@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

[4]正会員　京都大学経営管理大学院（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）
E-mail:uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

[5]正会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）
E-mail: schmoecker@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

[6]正会員　京都大学大学院工学研究科（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂Cクラスター）
E-mail: yamazaki@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

2011年に発生した東日本大震災では，津波災害による被害が極めて甚大であったため，津波避難計画の重要性が再認識された．本研究では，大阪市港区を対象として，線形計画モデルにより記述される避難計画策定モデルにより避難先，避難開始時間帯，避難手段からなる避難シナリオを策定し，残留交通量と自動車と歩行者の相互干渉を考慮したマルチクラス時間帯別配分モデルで表される避難計画評価モデルにより避難完了率，総避難時間の指標によりシナリオの評価を行った．分析を通じて，現在中央防災会議で想定され得る範囲内の津波災害に限定すれば，自動車を利用して避難する避難者は地震発生後すぐに港区外へ向かい，それ以外の避難者は一定時間経過後，徒歩で近くの避難所に避難することで，全員が徒歩での避難を行うよりも，高い避難完了率，かつ総避難時間を低減することができる結果となった．

Key Words : *the evacuation from tsunami, usage of cars, user equilibrium assignment, mutual interference, scenario*

1.　はじめに

2011年3月11日に宮城県沖で東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）が発生し，それに伴い大規模な津波が発生した．この津波により，東北地方を中心に我が国には，甚大な被害がもたらされた．2014年4月現在，東日本大震災からの復興が急がれると同時に，今後高い確率で発生が予測されている地震，それに伴う津波への対策が求められている．中でも東海地震，東南海地震，南海地震は遠くない将来起こると予測され，これらが連動する南海トラフ巨大地震は今後10年以内に20%程度，20年以内に40～50%，30年以内に60～70%の確率で発生することが報告されている[1)]．この地震の発生に伴い，大規模な津波が発生する可能性は極めて高く，津波対策を中心とした防災対策の強化の必要性に迫られている．その防災対策を進めるにあたっては，東日本大震災による津波被害の状況から，今まで大規模な津波災害は起こらないと考えられていた都市沿岸部の地域でも，避難手段や避難方法等への検討が必要となった．

東日本大震災以前の学術研究を調査してみると，地震発生後，津波災害の危険度の高い地域を対象にしているケースが多く見受けられる．例えば，竹内ら[2)]は新潟県須崎市，今村ら[3)]は北海道奥尻島青苗地区，片田ら[4)]は三重県尾鷲市が研究対象地区であり，都市沿岸部を対象とした研究事例は少ないことがわかる．都市沿岸部地域では，津波到達までに従来から大規模な津波災害が想定さ

れる地域よりもを時間を要するものの，特に都市部では当該地域に人口が集中，さらには，日常的に交通渋滞が発生していることからも効率的な避難計画が必要とされると考えられる．

そういった中で，中川ら[5]は，大阪市港区を対象とし，津波避難において自動車利用がどの程度であれば避難者全体が効率よく避難できるかという点に着目し，全体の総避難時間を最適化するモデルを提案した．しかし，この研究で提案したモデルでは，避難を行う時間を1つの時間帯でのみ表現しており，東日本大震災で見られたような実際の避難開始時間を考慮していない静的なモデルで，実現象で発生した短時間の交通集中による交通渋滞の影響を考慮できているとは言い難い．また，避難先は避難所までの距離と避難所の容量を変数としたロジスティック関数により決定しているが，設定した関数やパラメータの妥当性について十分に検証されていないことも問題点として挙げられる．

中央防災会議では，東日本大震災後は自動車利用を一部認めるようになるなど津波に対する避難方針を変更している．また，東日本大震災においては避難開始が遅れたために逃げ遅れた人も数多く存在した．また，今後発生が危惧されている東南海地震では，首都圏や関西圏などの大都市にも津波が襲来することが予想されている．例えば大阪市沿岸部には南海トラフ巨大地震発生から2時間後に津波が襲来すると想定されているように，これらの大都市では避難対象人口が多いものの津波からの避難にかけられる時間的余裕が比較的ある，一方で避難施設の容量が不足しており，限られた時間の中で自動車を効率的に利用し，より安全な場所へ避難することが求められる．したがって，都市沿岸部で今後の津波避難を考えるにあたって，自動車利用と避難開始時間帯について考慮することは，重要な視点であるといえる．

以上を踏まえて，本研究では数理計画モデルを用いて避難先，避難開始時間帯，避難手段を考慮した避難シナリオを策定，評価する手法論を提案する．その上で，提案する手法論を大阪市港区に適用し，総避難時間と時間帯ごとの避難完了率によって策定する津波避難シナリオを評価する．

2. 津波避難計画策定および評価手法

(1) 本研究で構築する手法の位置づけ

本研究では，後述するように線形計画問題により記述される避難シナリオ策定モデルにより，避難先，避難開始時間帯，避難手段からなる避難シナリオを策定し，時間帯別利用者均衡配分モデルをベースとした避難シナリオ評価モデルにより，策定したシナリオの効率性を評価する．両モデルとも規範モデルであり，本研究では行政などの主体が避難先，避難時間帯，避難手段を統制できるという条件下でより効率的な避難シナリオの探求を行うものである．

(2) 避難シナリオ策定モデル

本研究では，前節のシナリオに則する避難者の目的地・避難開始時間帯・避難手段別のODを式(1)から式(4)に示す線形計画問題によって決定する．

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\sum_{m\in\{C,W\}}\sum_{t\in T}\beta_{rs}\beta_m\beta_t\alpha_{rsm}x_{rsmt} \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{s\in S}\sum_{m\in\{C,W\}}\sum_{t\in T}x_{rsmt}=D_r,\forall r\in R \tag{2}$$

$$\sum_{r\in R}\sum_{m\in\{C,W\}}\sum_{t\in T}x_{rsmt}\le C_s,\forall s\in S \tag{3}$$

$$x_{rsmt}\ge 0 \tag{4}$$

ここに，

R	:	発生ノードの集合
S	:	避難先ノードの集合
T	:	時間帯の集合
m	:	避難に用いる手段(C : 自動車, W : 徒歩)
D_r	:	ノード r から発生する避難者需要
C_s	:	ノード s の避難所容量
α_{rsm}	:	時間帯 t における rs 間，交通機関 m の移動コスト（定数）
β_{rs}, β_m, β_t	:	シナリオを表現するために課すペナルティ
x_{rsmt}	:	時間帯 t に交通機関 m を使って rs 間を避難する人数

式(1)においてα_{rsm}が時間帯，避難手段別のOD間移動コスト(定数)，β_{rs}，β_m，β_tがシナリオを表現するためにそれぞれODペア，交通手段，時間帯ごとに設定するパラメータであり，未知変数の$\mathbf{x}$が時間帯別，交通手段別のOD間避難者数によって表現されるシナリオである．制約条件の式(2)，式(3)，式(4)はそれぞれ避難者数の保存，避難所の容量制約，OD交通量の非負制約を表している．

(3) 避難シナリオ評価モデル

前節で述べた避難シナリオ策定モデルにおいてゾーン間移動コストを一定としているため，避難時の混雑の影響を考慮できない．そこで，前節の避難シナリオ策定モデルによって算出されるシナリオを，時間帯別利用者均衡配分モデルをマルチクラスに拡張した避難シナリオ評価モデルによって評価を行う．本節では，マルチクラス時間帯別配分モデルの定式化について述べる．

a) 避難シナリオ評価モデルの前提条件

前章で述べた避難シナリオ策定モデルにおいては，時

間帯別のOD交通量がシナリオとして出力されるので，構築する避難シナリオ評価モデルは時間的な混雑の波及を表現するために時間帯別配分モデルをベースとする．時間帯別均衡配分における当該時間帯内に目的地に到着できない残留交通量の取り扱い方法について，主にOD修正法[6) 7)]，リンク修正法[8)]，渋滞内生化モデル[9)]の3つが提案されているが，本研究では解の一意性が保障されかつ計算コストが小さいOD修正法による時間帯別配分モデルをベースとする．さらに，徒歩による避難者が多く自動車交通に及ぼす影響が無視できないため，リンク所要時間に関する自動車と歩行者の相互干渉を考慮する必要がある．避難シナリオ評価モデルにおいては，自動車，歩行者が道路を共有するが，同じ交通量に対する旅行時間は両者で異なるものとして扱うことにより，両者の相互干渉を考慮するものとする．

b) 避難シナリオ評価モデルの定式化

時間帯Tにおける均衡状態は，式(5)から(12)のように定式化できる．

$$f_{rs,k}^{m,T}\left(c_{rs,k}^{m,T}-C_{rs}^{m,T}\right)=0\ ,c_{rs,k}^{m,T}-C_{rs}^{m,T}\geq 0\ ,\forall m\in M,rs\in\Omega,k\in K_{rs} \tag{5}$$

$$\sum_{k\in K_{rs}} f_{rs,k}^{m,T}=u_{rs}^{m,T}\ ,f_{rs,k}^{m,T}\geq 0\ ,\forall m\in M,rs\in\Omega \tag{6}$$

$$x_a^{m,T}=\sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K_{rs}}\delta_{rs,k}^{a,m}f_{rs,k}^{m,T}\ ,\forall m\in M,a\in A \tag{7}$$

$$x_a^T=\sum_{m\in M}\left(A_m x_a^{m,T}\right),\forall m\in M,a\in A \tag{8}$$

$$t_a^m\left(x_a^T\right)=t_{a0}^m\left(1+\alpha_m\left(\frac{x_a^T}{Cap_a}\right)^{\beta_m}\right),m\in M,a\in A \tag{9}$$

$$c_{rs,k}^{m,T}=\sum_{a\in A}\delta_{rs,k}^{a,m}\cdot t_a^m\left(x_a^T\right),\forall m\in M,rs\in\Omega,k\in K_{rs} \tag{10}$$

$$u_{rs}^{m,T}=\tilde{q}_{rs}^{m,(T-1)}+q_{rs}^{m,T}-q_{rs}^{m,T}\frac{C_{rs}^{m,T}}{2T_w}\ ,m\in M,rs\in\Omega \tag{11}$$

$$\tilde{q}_{rs}^{m,T}=q_{rs}^{m,T}\frac{C_{rs}^{m,T}}{2T_w} \tag{12}$$

ここに，

M ： 交通手段の集合
Ω ： ODペアの集合
K_{rs} ： ODペア rs 間の経路集合
$f_{rs,k}^{m,T}$ ： ODペア rs 間，経路 k，交通手段 m のフロー
$c_{rs,k}^{m,T}$ ： ODペア rs 間，経路 k，交通手段 m の旅行コスト
$\tilde{q}_{rs}^{m,(T-1)}$ ： ODペア rs 間，交通手段 m の時間帯(T-1)から時間帯 T に繰り越された交通量
$C_{rs,}^{m,T}$ ： ODペア rs 間，交通手段 m の最小旅行コスト
$q_{rs}^{m,T}$ ： ODペア rs 間，交通手段 m の交通量(残留交通量の考慮なし)
$u_{rs}^{m,T}$ ： ODペア rs 間，交通手段 m の交通量(残留交通量の考慮あり)
$x_a^{m,T}$ ： リンク a，交通手段 m のリンク交通量
x_a^T ： リンク a の総交通量
Cap_a ： リンク a の容量
$\delta_{rs,k}^{am}$ ： ODペア rs 間，経路 k，交通手段 m がリンク a を通過すれば 1，そうでなければ 0 を取る変数
α_m^T,β_m^T ： 車種別の BPR 関数のパラメータ
T_w ： 時間帯幅

式(5)は相補性条件により表現されたWardropの第1原則である．式(6)，式(7)はそれぞれ経路交通量，リンク交通量に関する保存則である．式(8)はクラスごとのリンク交通量と総リンク交通量の換算式であり，A_mは歩行者人数を自動車台数に換算するためのパラメータである．式(9)はリンク旅行時間を表しており，前節で述べた通り自動車，歩行者が道路を共有するが，同じ交通量に対する旅行時間は両者で異なると仮定しているので，リンク旅行時間は全クラスの総交通量x_a^TのBPR関数として表現するが，そのパラメータはクラスごとに別に定義している．式(10)，式(11)，式(12)はそれぞれリンクコストから経路コストを求める式，残留交通量を考慮してOD交通量を修正する式，次の時間帯に繰り越す残留交通量を表す式である．

式(5)から式(12)で定式化したモデルは，式(13)から式(17)に示す等価な最適化問題に変換可能である．両者が等価であることの証明は付録に示す．

$$\min_{\mathbf{x},\mathbf{u}} Z_T(\mathbf{x},\mathbf{u})=\sum_{m\in M}\sum_{a\in A}\int_0^{x_a^T}t_a^m(w)dw-\sum_{m\in M}\sum_{rs\in\Omega}\frac{2T_w}{q_{rs}^{m,T}}\left\{\left(\tilde{q}_{rs}^{m,(T-1)}+q_{rs}^{m,T}\right)u_{rs}^{m,T}-\frac{\left(u_{rs}^{m,T}\right)^2}{2}\right\} \tag{13}$$

subject to

$$f_{rs,k}^{m,T}\geq 0\ ,\forall m\in M,rs\in\Omega,k\in K_{rs} \tag{14}$$

$$\sum_{k\in K_{rs}} f_{rs,k}^{m,T}=u_{rs}^{m,T}\ ,\forall m\in M,rs\in\Omega \tag{15}$$

$$x_a^{m,T}=\sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K_{rs}}\delta_{rs,k}^{a,m}f_{rs,k}^{m,T}\ ,\forall m\in M,a\in A \tag{16}$$

$$x_a^T=\sum_{m\in M}x_a^{m,T}=\sum_{m\in M}\sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K_{rs}}\delta_{rs,k}^{a,m}f_{rs,k}^{m,T}\ ,\forall m\in M,a\in A \tag{17}$$

定式化したモデルは，OD修正法に基づく時間帯別利用者均衡配分に準じたアルゴリズムにより計算することができる．

3. 避難シナリオの策定

(1) 研究対象地域

本章では，本研究で構築した手法を大阪市港区に適用して，津波避難施策の評価を行う．中央防災会議では南海トラフ巨大地震が発生した場合，大阪湾沿岸にも地震発生後約2時間で3～5mの津波が押し寄せると想定されており，その中でも大阪市港区は最も標高が低く，津波に対する危険性の高い地域であると考えられる．

大阪市港区の面積は7.9km^{2}であり，また沿岸部から内陸部までの距離は最大で5km程度である．また，国勢調査データから算出した港区の総避難人口は，平日12時の時点で90,910人，休日12時の時点で82,162人である．一方で，大阪市が指定している公共・民間の避難所の容量は63,844人となっており，避難人口に対して大きく不足しており，港区外のより内陸に避難の必要が生じている．そのため，高齢者のような要援護者が，沿岸部から内陸部までを徒歩で避難することは困難であることが想定されることからも，ある程度自動車による避難を考える必要がある．

(2) 計算条件

前述したように研究対象地域では避難人口に対して避難所容量が大きく不足しているため，便宜上港区外にも避難場所を設置する．本研究では，港区外に避難する場合は内陸側の西区へ避難することを想定して，港区から西区方面へ出ているノードに対して，仮想的な避難所容量を与えることとする．具体的には，国道，主要地方道，指定市主要道路から港区外に出ているノードであれば，一律に7,000人の容量，その他道路から港区外に出ているノードであれば，一律に3,000人の容量を与える．港区外の避難所ノードも含めると避難可能容量は92,844人となり，避難施設の容量はすべての避難者人数を上回ることになる．

また，需要は250mメッシュごとに集計されているため，当該メッシュの中心に最も近いノードから発生するとし，集中ノードは避難所に最も近いノードとする．さらに，上記の設定で避難距離がゼロとなる需要が存在するが，この場合は建物の高層階に上がる垂直避難を行ったものとみなす．

避難シナリオ策定モデルおよび評価モデルにおいて設定したパラメータ値に関しては，自由流旅行速度は，自動車は道路交通センサスデータから道路種別ごとに設定し，歩行者の自由流旅行時間は一律で4km/hと設定した．また，避難シナリオ評価モデルにおいて，1時間帯あたりの時間帯幅を40分として4時間帯までを分析対象とした．また，自動車1台と歩行者6人が同等，すなわちA_C = 1.0，A_W = 6.0と設定した．さらに，BPR関数のパラメータは，自動車についてはα_C=0.15，β_C=4.0とし，歩行者についてはLam and Cheung[10]を参考にしα_C=1.4483，β_C=4.0707とした．シナリオを表現するためのパラメータ値については，次節で述べる．

(3) シナリオの設定

本研究では，表-1に示す3つの避難シナリオの評価を行う．シナリオ1は現状の多くの自治体で策定されている避難計画に基づくものである．また，研究対象地域では沿岸部から内陸部まで距離があるため，内陸部への避難は自動車を許容するものの，混雑を緩和するために内陸部への避難と沿岸部の高所への避難で時間差をつけるという意図でシナリオ2とシナリオ3を設定した．避難シナリオ策定モデルにおいてそれぞれのシナリオで設定したパラメータ$\boldsymbol{\beta}$を表-2に示す．

また，対象地域では，平日・休日で発生人口分布が異なるため，シナリオ別に分析を行う．

表-1　本研究で評価するシナリオ

シナリオ	シナリオ別の避難方法
1	全避難者が徒歩で避難する
2	遠距離の避難を行う人は自動車を用いて早い時間帯に避難を開始し，近距離の避難を行う人は徒歩にて後の時間帯に避難を開始する
3	徒歩で避難を行う人は近距離の避難所に早い時間帯に避難を開始し，自動車で避難を行う人は遠距離の避難所に後の時間帯に避難を開始する

表-2　各シナリオで設定したパラメータ

シナリオ	時間帯	自動車(C)	徒歩(W)
1	1	$\beta_{rs}=\infty$	$\beta_{rs}=1.0$
	2	$\beta_{rs}=\infty$	$\beta_{rs}=1.0$
	3	$\beta_{rs}=\infty$	$\beta_{rs}=1.0$
2	1	遠距離を小さく設定	$\beta_{rs}=\infty$
	2	$\beta_{rs}=1.0$	近距離を小さく設定
	3	$\beta_{rs}=1.1$	近距離を小さく設定
3	1	$\beta_{rs}=1.1$	近距離を小さく設定
	2	$\beta_{rs}=1.0$	近距離を小さく設定
	3	遠距離を小さく設定	$\beta_{rs}=\infty$

図-1　防災マップのエリア分け

(4) モデルにより策定されたシナリオ

本節では，避難シナリオ策定モデルに基づき，算出される避難者の動きを図-1のような港区の11エリア別に示す．なお，11エリアとは大阪市が作成している港区の防災マップにおいて区分けされているエリアである．

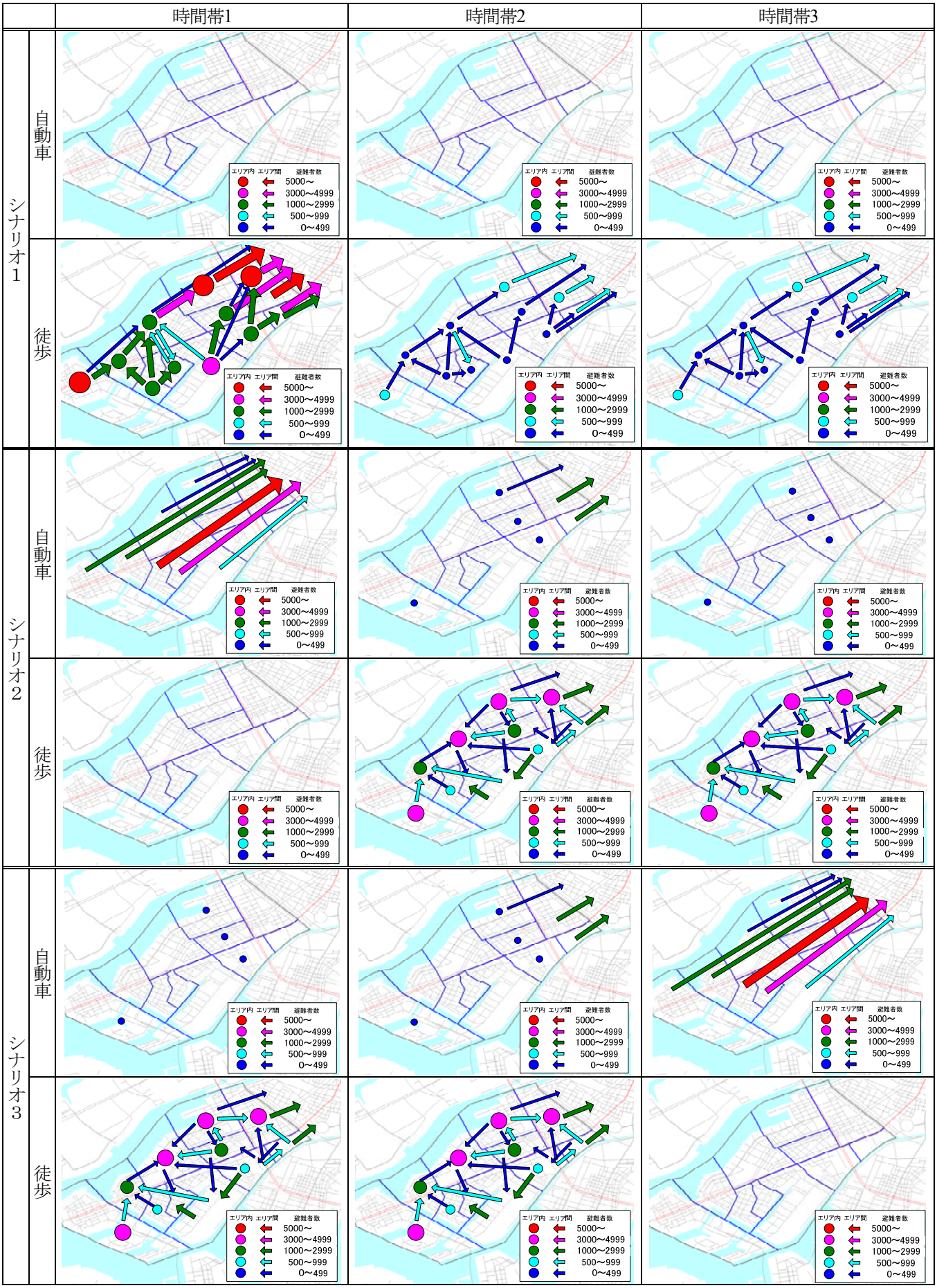

図-2　シナリオ別における避難パターン（平日）

図-2に避難シナリオ策定モデルにより算出された平日のシナリオ別時間帯別の避難パターンを示す．なお，モデルの構造上複数の解が存在するが，シナリオ1としては，時間帯1に大半の避難者が避難を開始するものを採用している．「全避難者が徒歩で避難する」シナリオ1は自動車による避難者は存在せず，その上で，沿岸部において，同一エリアや比較的近距離のエリアに避難する人が多く，内陸部では港区外に避難する人が多いことが確認できる．シナリオ2では，沿岸部からの避難者は地震発生後すぐに自動車で西区に避難して港区内の避難所容量を確保し，それ以外の避難者は基本的に徒歩で近距離の避難所に避難するような設定を想定しているが，避難パターンからは，概ね設定通りのシナリオとなっていることが読み取れる．シナリオ3は，シナリオ2とは反対に先に徒歩で最寄りの避難者に避難させ，後の時間帯に避難所に入り切れなかった避難者を自動車で港区外に避難させることを想定しているが，図-2のシナリオ3の被験者の動きから，概ね設定通りのシナリオが策定できたことが読み取れる．

なお，休日では避難者数は異なるものの，避難者のシナリオ別の避難パターンを避難シナリオ策定モデルで求めたところ，概ね平日と同様の傾向であることが確認されたために図の掲載を割愛する．

4. 策定した避難シナリオの評価

本章では，第3章にて避難シナリオ評価モデル用いて，策定したシナリオの評価を行う．まず，評価を行うための指標について述べる．その後，平日・休日別に分析を実施する．

(1) 評価指標

本章では，避難シナリオ評価モデルを用いて，前章で策定されたシナリオの評価を行う．評価指標として，式(18)に示す総避難時間と，式(19)に示す地震発生からの経過時間ごとの避難完了率を用いることとする．

$$TC = \sum_{t=1}^{T_n} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} x_a^{m,t} t_a^m \left(x_a^t \right) \tag{18}$$

$$CR_E = \frac{\sum_{m \in M} \sum_{rs \in \Omega} \sum_{t=1}^{E} u_{rs}^{m,t}}{\sum_{r \in R} D_r} \tag{19}$$

ここに，

TC	:	総避難時間
T_n		分析対象の時間帯数
CR_E	:	経過時間 E における避難完了率
$u_{rs}^{m,t}$	:	OD ペア rs 間，交通手段 m の経過時間 t において避難を完了した人数

(2) 避難完了率による分析結果と考察

図-3に平日および休日の各シナリオの避難完了率の推移を示す．まず平日における経過時間と避難完了率の関係について着目して考察する．なお，前述したように避難シナリオ評価モデルにおいて，1時間帯の幅を40分として計算しているため，時間帯1，時間帯2，時間帯3はそれぞれ経過時間が0分から40分，40分から80分，80分から120分に相当する．

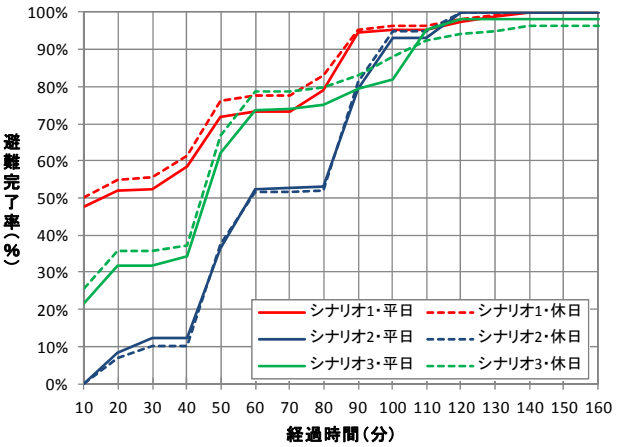

図-3 シナリオ別の避難完了率

全避難者が徒歩で近くの避難所に避難するシナリオ1では，地震発生直後の避難完了率は約50%と高く，その後徐々に避難完了率が上昇している．

時間帯1に自動車で内陸部に避難させるシナリオ2では，時間帯1の避難完了率は低いものの，経過時間が40分から60分にかけてと80分から100分にかけての間の避難完了率が大きく上昇している．経過時間が40分から60分にかけては，時間帯1に自動車で避難していた者が内陸部への避難が完了したためで，80分から100分にかけては時間帯3に徒歩で近くの避難所に避難した者の避難が完了したためであると考えられる．

時間帯1に徒歩で近くの避難所に避難させて，時間帯2以降に自動車で内陸部に避難させるシナリオ3では，地震発生直後の避難完了率は20%程度であり，その後40分から60分にかけて避難完了率が大きく上昇していることがわかる．40分から60分にかけて避難完了率が大きく上昇したのは，時間帯1から徒歩で避難した者の避難が完了したためであると考えられるが，シナリオ2で見られたような自動車で内陸部に避難した者が避難完了することに起因する避難完了率の大幅な上昇は見られなかった．これは，本研究で構築した避難シナリオ評価モデルではリンク所要時間に関する自動車と歩行者の相互干渉を考慮しているが，時間帯2において徒歩による避難者の残留交通量が存在しているためにシナリオ2よりも道路上の混雑が激しかったためであると考えられる．このよう

に，避難させる順番を変えるだけで道路混雑に差が生じ，避難完了率も大きく変化する可能性があることがわかる．

また平休の違いに着目すると，シナリオ1では，すべての経過時間において総避難者数の少ない休日の方が平日より避難完了率が高く，短い経過時間においてその差が大きいといえる．一方，シナリオ2では平日と休日の避難完了率の差は小さく，また経過時間が20分から40分にかけては平日の方が避難完了率が高くなっている．さらにシナリオ3では経過時間が100分までは休日の方が平日より避難完了率が高いものの，110分を超えると平日の方が避難完了率が高くなっている．これは自動車利用時間帯と平休の避難者数の差が影響を与えている結果であると考えられる．

なお，津波到達が想定される120分時点での避難完了率はシナリオ1で約97%，シナリオ2で100%，シナリオ3で約98%という結果となり，これはシナリオ1において総避難者数の約2.7%にあたる約2,500人，シナリオ3において約2.2%にあたる約2,000人の犠牲者が発生するものの，シナリオ2では犠牲者が発生しないという結果に相当する．

(3) 総避難時間による分析結果と考察

表-3にシナリオ別の総避難時間を示す．平休日ともにシナリオ2が最も総避難時間が小さく，シナリオ3が最も大きくなった．シナリオ3の総避難時間が最も大きくなった理由としては，前述したように時間帯2で発生した歩行者の残留交通量が存在している上に，遠距離の移動を行う自動車が殺到し，大規模な渋滞が発生したためと考えられる．シナリオ1との比較では，シナリオ2では約8割程度に減少している．また，平休比から，避難者数の少ない休日のほうが総避難時間が小さくなっていることがわかる．

表-3　シナリオ別の総避難時間

シナリオ		総避難時間（万人・分）	シナリオ1との比	平休比（休/平）
平日	1	151.5	比較対象	比較対象
	2	116.1	0.77	
	3	162.6	1.07	
休日	1	106.3	比較対象	0.70
	2	88.4	0.83	0.76
	3	159.2	1.50	0.98

(4) 分析結果全体に対する考察

(2)，(3)の結果を踏まえると，分析対象エリアである大阪市港区に中央防災会議での津波到達が想定される120分の時間が存在しているとすれば，シナリオ1で想定するような全避難者が徒歩で避難する場合よりも，避難開始時間帯により自動車利用に制約を与えたシナリオ2，シナリオ3の方が，避難完了率は高い結果となった．ただし，総避難時間の観点からは，沿岸部から都心部へ地震発生後早い時間帯に自動車を用いて避難させることが分析エリア全体では最適な結果であった．ただし，本節の冒頭に記載したようにあくまでも当該分析エリアが津波到達までに120分の時間を有している場合の考察である．万が一にも，想定外の地震，津波被害が発生し，当該エリアに80分で津波が到達した場合には，多くの徒歩避難者に避難を待機させるシナリオ2ケースで避難完了率は約50%程度で，他の2つのシナリオよりも最悪の結果となる．

上記を踏まえると，我々の想定内の事象に対しての最適な避難計画を立てるだけで安心するだけでは行政の計画としては不十分であり，その地震規模，津波の程度に基づいて，適切な判断ができるよう事前検討しておくことが望ましいと考える．

5. まとめ

本研究では，線形計画モデルにより記述される避難計画策定モデルにより避難先，避難開始時間帯，避難手段からなる避難シナリオを策定し，残留交通量と自動車と歩行者の相互干渉を考慮したマルチクラス時間帯別配分モデルで表される避難計画評価モデルにより，策定した避難シナリオを評価する手法の提案した．その上で提案した手法を大阪市港区に適用し，複数の避難シナリオの比較分析を行った．

現状の大阪市の方針であるシナリオ1，および徒歩で避難する避難者が早い時間帯に避難を開始し，自動車で避難する避難者が出発を遅らせるシナリオ3では，津波の襲来までに全避難者が避難しきれないが，自動車で避難する避難者は地震発生後すぐに港区外へ避難し，徒歩で避難する避難者は出発を遅らせて近距離にある避難所に避難するシナリオ2では，避難完了率が100%，すなわち犠牲者がゼロとなる結果を得た．

ここから得られた知見としては，現在中央防災会議で想定され得る津波災害であると限定すれば，自動車を利用して避難する避難者は地震発生後すぐに港区外へ向かい，それ以外の避難者は一定時間経過後，徒歩で近くの避難所に避難することが望ましいことがわかった．また，自動車による避難を許容する場合，避難を行うタイミングが異なるだけで避難完了率に大きな差が生じることがわかり，避難計画を策定するにあたって交通手段の分担割合だけでなくその避難開始のタイミングも考慮することの必要性が示唆されたといえる．

本研究では分析対象地域である大阪市港区内の避難所施設容量が不足していたため区外に仮想的な避難所を設けて分析したが，港区から区外へ避難する場合に最も有力と考えられる大阪市西区においても避難所容量不足の

問題が発生しており，今後はより広範囲を対象とした津波避難計画も求められる．さらには自然災害に絶対はなく，万が一にも想定外の津波被害が発生した場合の検討も本モデルを用いて事前検討することが望まれる．

付録

式(5)から式(12)で定式化したモデルと，式(13)から式(17)に示した最適化問題が等価であることの証明を行う．まず，式(13)から式(17)の最適化問題のラグランジュ関数を以下のように定義する．

$$L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda) = Z_T(\mathbf{x},\mathbf{u}) + \sum_{m\in M}\sum_{rs\in\Omega}\lambda_{rs}^{m,T}\left(u_{rs}^{m,T} - \sum_{k\in K_{rs}} f_{rs,k}^{m,T}\right) \tag{20}$$

このとき，KKT 条件は以下のように与えられる．

$$f_{rs,k}^{m,T}\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial f_{rs,k}^{m,T}} = 0\ ,\ f_{rs,k}^{m,T} \ge 0\ ,\ \frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial f_{rs,k}^{m,T}} \ge 0\ ,\quad \forall m\in M, rs\in\Omega, k\in K_{rs} \tag{21}$$

$$u_{rs}^{m,T}\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial u_{rs}^{m,T}} = 0,\ u_{rs}^{m,T} \ge 0,\ \frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial u_{rs}^{m,T}} \ge 0,\quad \forall m\in M, rs\in\Omega \tag{22}$$

$$\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial \lambda_{rs}^{m,T}} = 0,\ \forall m\in M, rs\in\Omega \tag{23}$$

いま，

$$\begin{aligned}\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial f_{rs,k}^{m,T}} &= \sum_{m\in M}\sum_{a\in A}\left\{\left(\frac{\partial}{\partial x_a^T}\int_0^{x_a^T} t_a^m(w)dw\right)\frac{\partial x_a^T}{\partial f_{rs,k}^{m,T}}\right\} - \lambda_{rs}^{m,T}\\ &= \sum_{a\in A} t_a^m\left(x_a^T\right)\delta_{rs,k}^{m,T} - \lambda_{rs}^{m,T}\\ &= c_{rs,k}^{m,T} - \lambda_{rs}^{m,T}\end{aligned} \tag{24}$$

となるので，$\lambda_{rs}^{m,T}=C_{rs}^{m,T}$ とすれば式(21)は以下の条件と同値となる．

$$f_{rs,k}^{m,T}\left(c_{rs,k}^{m,T} - C_{rs}^{m,T}\right) = 0\ ,\ c_{rs,k}^{m,T} - C_{rs}^{m,T} \ge 0\ ,\quad \forall m\in M, rs\in\Omega, k\in K_{rs} \tag{25}$$

次に，

$$\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial u_{rs}^{m,T}} = -\frac{2T_w}{q_{rs}^{m,T}}\left(\tilde{q}_{rs}^{m,(T-1)} + q_{rs}^{m,T} - u_{rs}^{m,T}\right) + \lambda_{rs}^{m,T} \tag{26}$$

となるが，時間帯別配分に関する前提条件より $u_{rs}^{m,T}>0$ と見なせるので，$\lambda_{rs}^{m,T}=C_{rs}^{m,T}$ とすれば式(22)より

$$u_{rs}^{m,T} = \tilde{q}_{rs}^{m,(T-1)} + q_{rs}^{m,T} - q_{rs}^{m,T}\frac{C_{rs}^{m,T}}{2T_w}\ ,m\in M, rs\in\Omega \tag{27}$$

さらに，式(23)より，

$$\begin{aligned}&\frac{\partial L_T(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda)}{\partial \lambda_{rs}^{m,T}} = u_{rs}^{m,T} - \sum_{k\in K_{rs}} f_{rs,k}^{m,T} = 0\\ &\Leftrightarrow u_{rs}^{m,T} = \sum_{k\in K_{rs}} f_{rs,k}^{m,T}\ ,m\in M, rs\in\Omega\end{aligned} \tag{28}$$

となる．式(25)，式(27)，式(28)より，式(13)から式(17)の最適化問題は式(5)から式(12)で定式化したマルチクラス時間帯別配分モデルと等価であることが確認された．

参考文献

1) 内閣府中央防災会議，「南海トラフの巨大地震モデル検討会」，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/nankai_trough_top.html>（2014/4/25 時点）
2) 竹内光生，近藤光男：地震津波発生時の避難場所の選定に関する研究 - 須崎市を事例として -，土木計画学研究・論文集，Vol.19，No.2，pp.297-304，2002.
3) 今村文彦，鈴木介，谷口将彦：津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用，自然災害科学，Vol.20，No.2，pp.183-195，2001.
4) 片田敏孝，桑沢敬行，渡邉寛：津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会研究発表大会予稿集，Vol.14，pp.152-155，2012.
5) 中川貴文，中村俊之，嶋本寛，宇野伸宏：自動車利用を考慮した津波避難計画モデルの構築，土木学会・土木計画学研究・講演集，Vol.47，No.49，CD-ROM，2013.
6) 藤田素弘，松井寛，溝上章志：時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究，土木学会論文集，No.389/IV-8，pp.111-119，1988
7) 宮城俊彦，牧村和彦：時間帯別交通配分手法に関する研究，交通工学，Vol.26，No.2，pp.17-28，1991
8) 藤田素弘，山本幸司，松井寛：渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発，土木学会論文集，No.407/IV-11，pp.129-138，1998
9) 菊池志郎，赤松隆：リンクの流入・流出交通量を内生化した時間帯別交通均衡配分に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，No.24，pp.577-585，2006
10) Lam William HK，Cheung Chung-yu：Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong，Journal of transportation engineering，Vol.126，No.4，pp.343-349，2000

(2014.4.25 受付)

Evaluation of Tsunami Evacuation Plans Considering Car Usage and the Starting Time of Evacuation

Bumpei NAGAO, Hiroshi SHIMAMOTO, Toshiyuki NAKAMURA, Nobuhiro UNO, Jan-Dirk Schmocker and Hiroki YAMAZAKI