

空域におけるセクター間 交通流のモデル化

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学系

平石邦彦

ACC Sector Boundary

Sapporo ACC

S01 Misawa West
S02 Misawa East
S31 Tohoku Kouki
S03 Hokkaido South
S04 Hokkaido East
S34 Doto Kouki

Tokyo ACC

T01 Joetsu
T02 Tohoku
T03 Kanjo North
T04 Kanjo East
T05 Kazusa
T06 Isumi
T07 Joshu
T09 Kanjo South A
T10 Kanjo South B
T11 Kanjo South C
T12 Kanjo West
T13 Musashi
T14 Shonan
T15 Boso
T17 Kii
T21 Kinki West
T22 Sanyo
T23 Harima
T24 Mikawa
T26 Tokai
T27 Hokuriku
T28 Wakasa

Fukuoka ACC

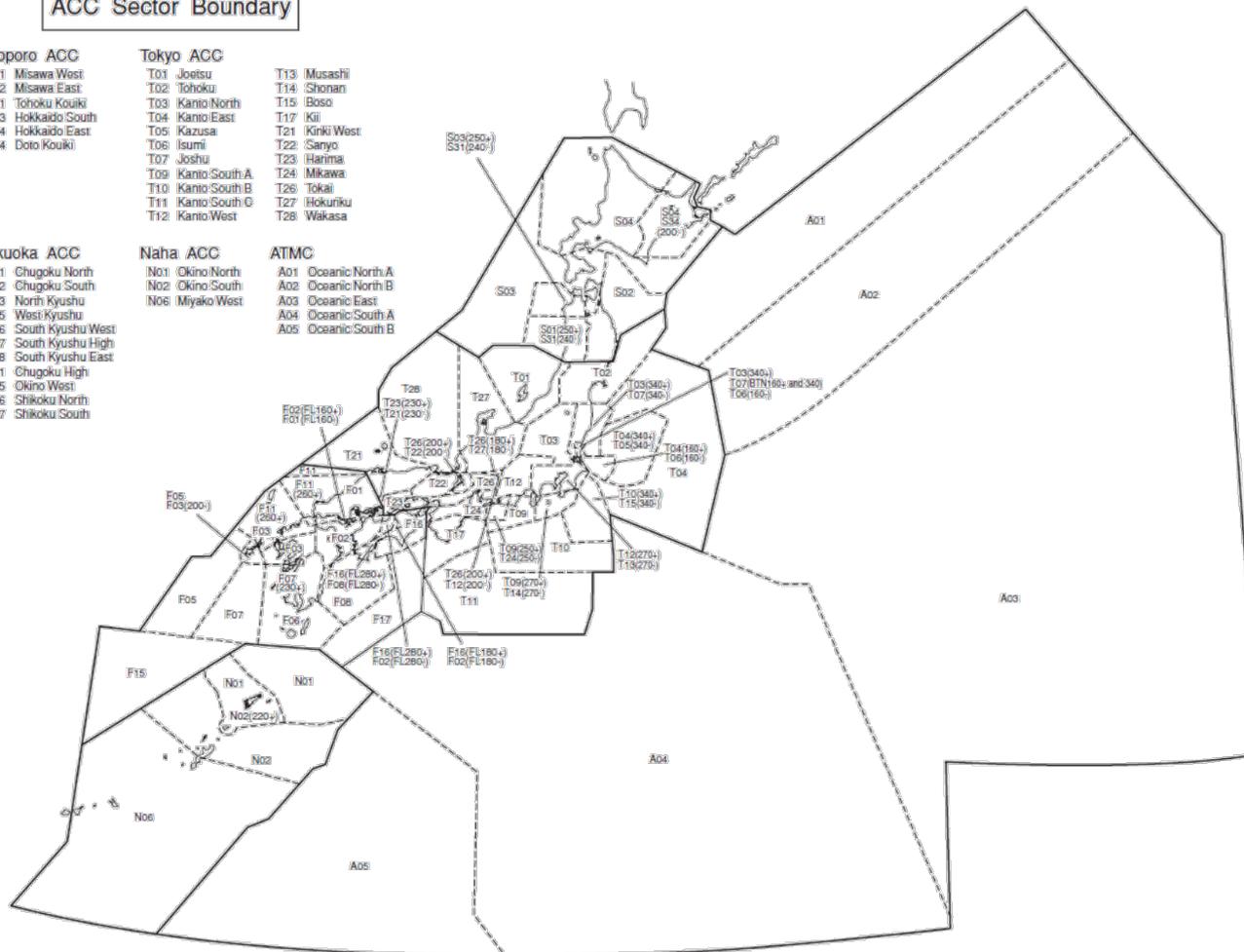
F01 Chugoku North
F02 Chugoku South
F03 North Kyushu
F05 West Kyushu
F06 South Kyushu West
F07 South Kyushu High
F08 South Kyushu East
F11 Chugoku High
F15 Okino West
F16 Shikoku North
F17 Shikoku South

Naha ACC

N01 Okino North
N02 Okino South
N06 Miyako West

ATMC

A01 Oceanic North A
A02 Oceanic North B
A03 Oceanic East
A04 Oceanic South A
A05 Oceanic South B



Fukuoka FIR

Sapporo ACC

- 6 Sectors

Tokyo ACC

- 22 Sectors

Fukuoka ACC

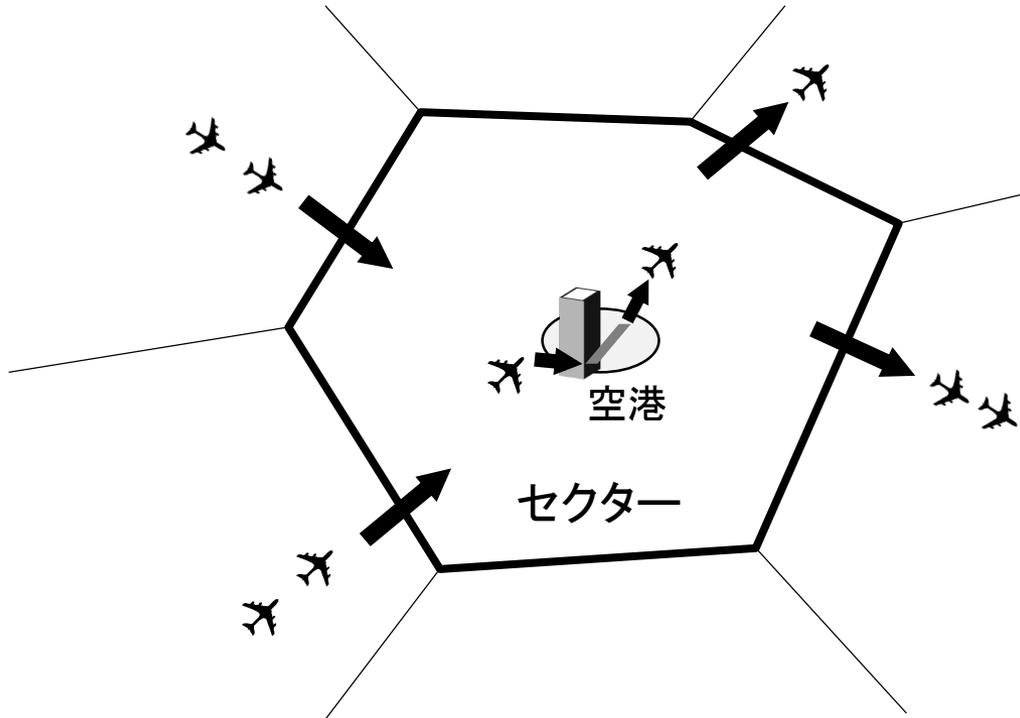
- 11 Sectors

Naha ACC

- 3 Sectors

<https://aisjapan.mlit.go.jp>

空域交通流のモデル化



状態:

- セクター内の航空機配置

入力:

- 隣接セクターからの流入機
- セクター内空港への着陸機
- セクター内空港からの離陸機

出力

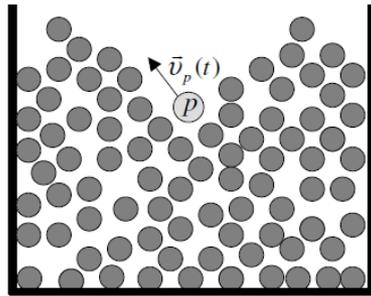
- 隣接セクターへの流出機

モデルの分類

- 個々の機体のモデル化
 - Lagrangian traffic flow model
 - Multi-agent simulation
- フローのモデル化
 - Eulerian traffic flow model
 - Aggregate sector flow models
- 中間的・ハイブリッド
 - Cell transmission model
 - Queuing network

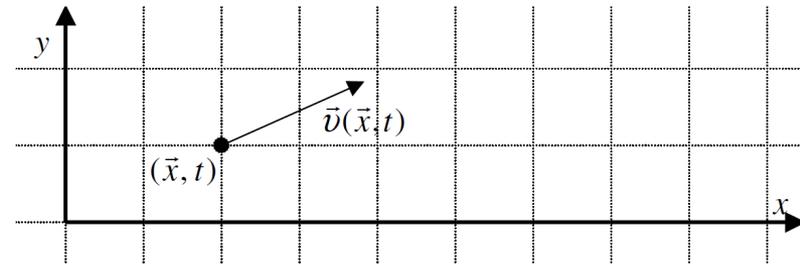
Lagrangian and Eulerian Models

Lagrangian



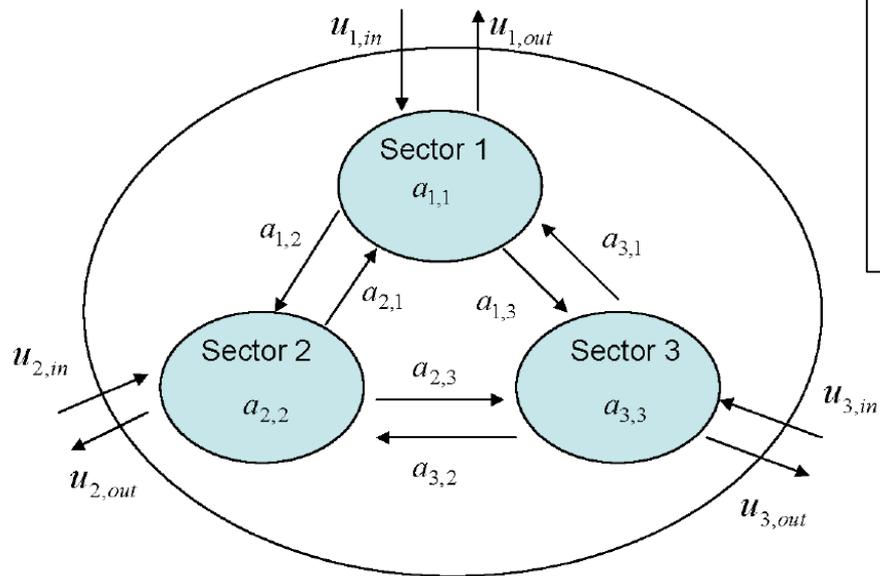
particle p with properties
(density, velocity, pressure, ...)

Eulerian



properties (density, velocity, pressure,
...) as functions of position and time

Aggregate Sector Flow Model



$$\mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N a_{j,1}(k) + u_{1,in}(k) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N a_{j,N}(k) + u_{N,in}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(k+1) \\ \vdots \\ s_N(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{x}(k+1).$$

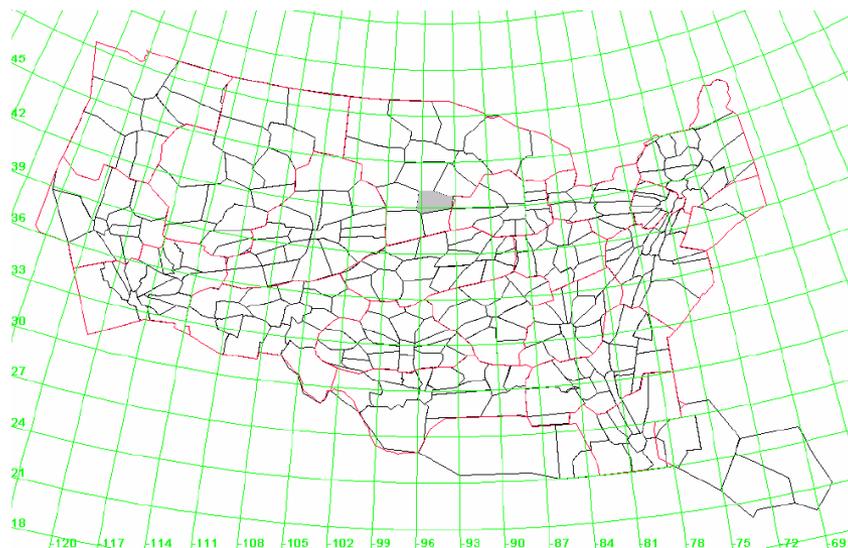
状態方程式



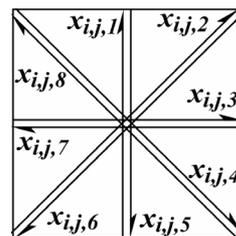
混雑度予測

Banavar Sridhar, An Aggregate Sector Flow Model for Air Traffic Demand Forecasting, 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2009

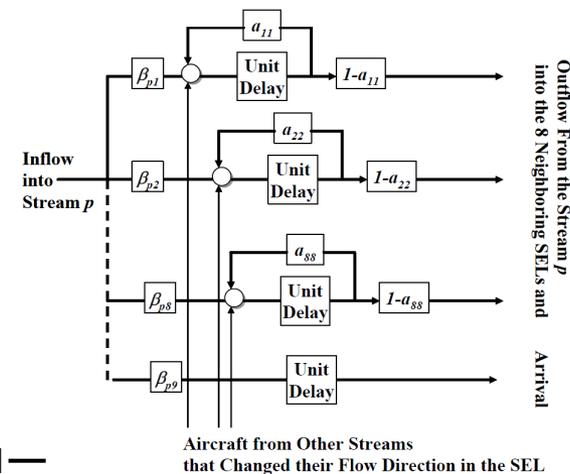
Eulerian Traffic Flow Model



緯度・経度によるグリッド分割



8方向の移動フロー



各セルに対するフローの入出力



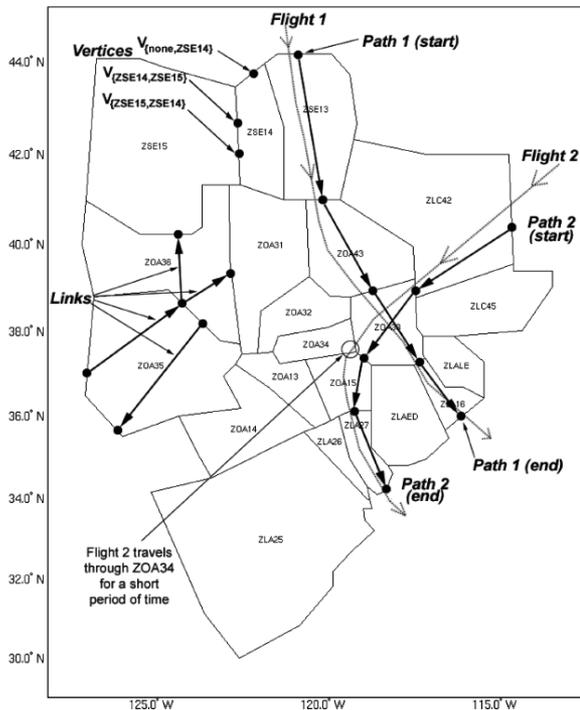
$$x(k+1) = A(k)x(k) + Bu(k) + B_d q^{depart}(k) + B_e q^{exo}(k)$$

$$y(k) = C(k)x(k) + D_T v(k)$$

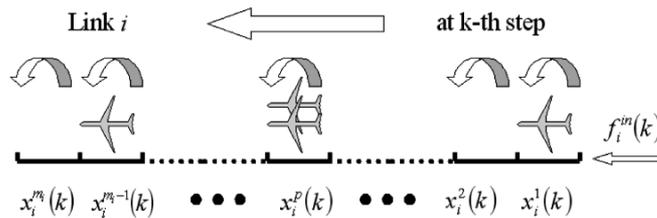
状態方程式

Menon, P.K., Sweriduk, G.D., Lam, T., Diaz, G.M. and Bilimoria, K.D., 2006. Computer-aided Eulerian air traffic flow modeling and predictive control. Journal of guidance, control, and dynamics, 29(1), pp.12-19.

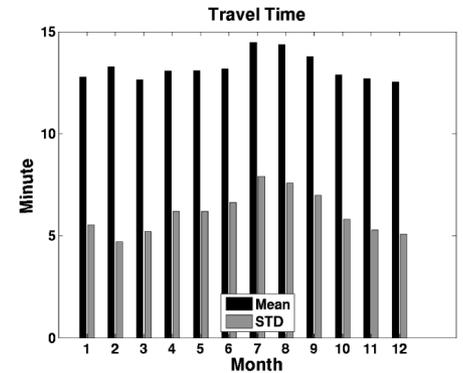
Large-capacity Cell Transmission Model



Vertices and links



リンク上のセル分割

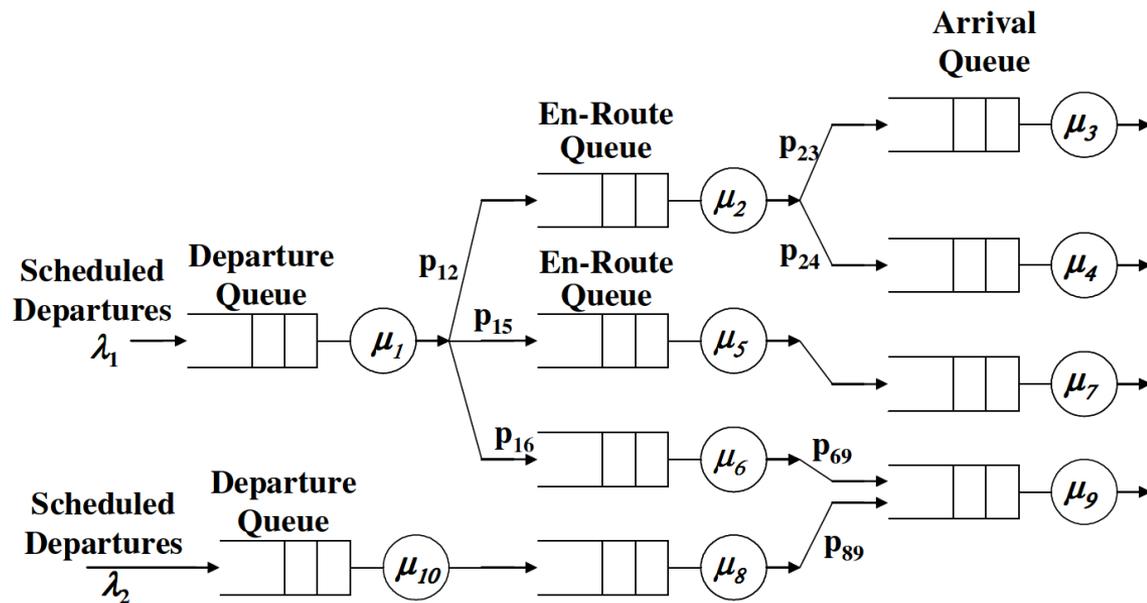


各リンクの移動時間

$$\begin{aligned}
 x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + B_i^{\text{in}} f_i^{\text{in}}(k) + B_i^{\text{desc}} f_i^{\text{desc}}(k) \\
 &\quad + B_i^{\text{climb}} f_i^{\text{climb}}(k) + B_i^u u_i(k) \\
 y_i(k) &= C_i x_i(k)
 \end{aligned}$$

状態方程式

Queuing Network



連続時間マルコフ連鎖



定常状態における各待ち
行列の平均長さ

Monish D. Tandale et. al., Queuing Network Models of the National Airspace System,
The 28th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 2008.

本研究の内容

1. CARATSデータにおける各座標位置のセクター判定(データの
前処理)

Shoya TOKUMARU, Kunihiro HIRAISHI: Sector Identification for a Large Amount of Airspace Traffic Data, IEICE Trans Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E102-A, No.5, pp. 755-756 (2019/5)

2. Large-capacity Cell Transmission Modelの拡張と, CARATS
データを用いたモデルパラメータの推定

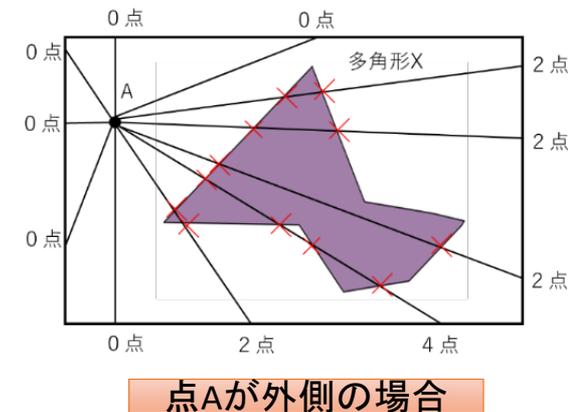
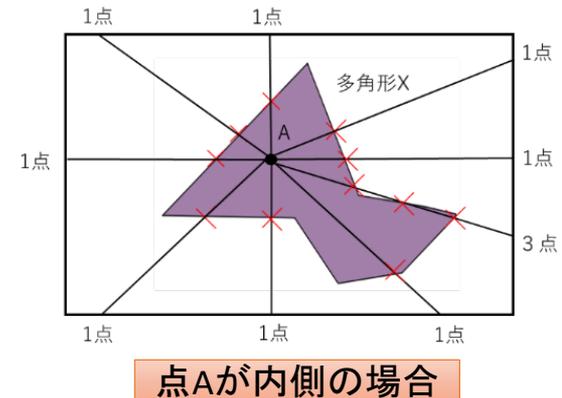
Quang Khai Tran, Kunihiro Hiraishi: An Improved Version of Cell Transmission Model for Air Traffic Flow, 3rd Int. Conf. Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC2019), (2019/8/31-9/1, Danang, Vietnam)
Quang Khai Tran, Master Thesis, JAIST (2018/03)

座標位置のセクター判定問題

- 関連する計算幾何(Computational Geometry)の問題
 - Point location問題: 点座標と空間の領域分割を与え, 点が含まれる領域を求める.
 - Point in Polygon問題: 点座標とポリゴンを与え, 点がポリゴンの内部にあるか否かを判定する.

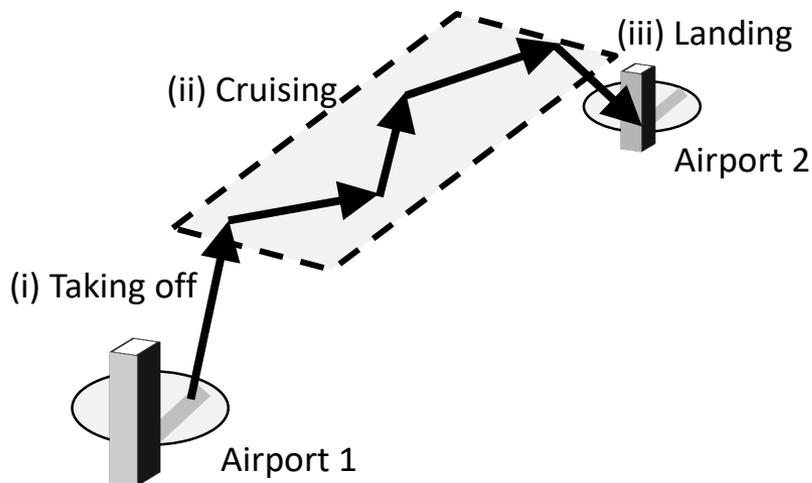
Point in Polygon問題

- Point in Polygon Problem
 - ポリゴンと点の内外判定をする.
 - 点Aからあらゆる方向に無限に広がる線を引き, 与えたすべてのポリゴンとの交点をカウントする.
 - 奇数の場合, 点AはポリゴンXの内側に存在する. 偶数の場合, 外側に存在する.
 - 実行時間は, 与えたポリゴンの頂点数に対し線形である.
- CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) では `bounded_side_2()` として実装.



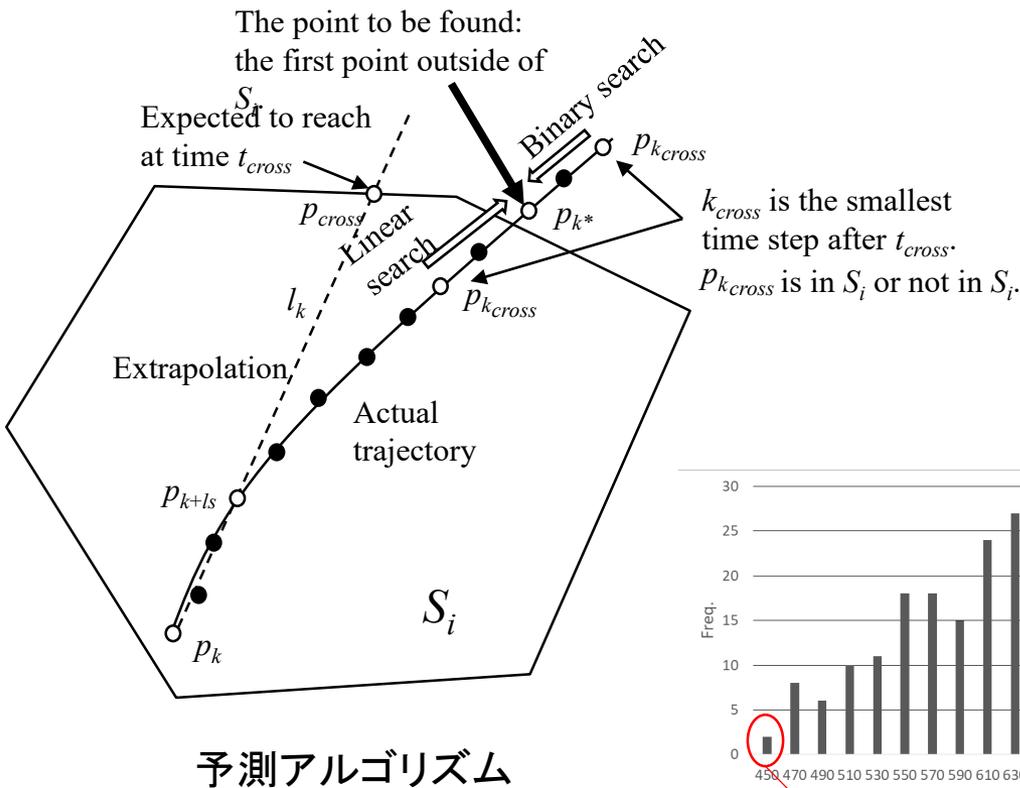
計算の効率化に向けたアイデア

- Point location, Point in polygonアルゴリズムを全点に適用するのかわ？
→ 多くの計算時間がかかる.
- 以下の2つのファクトを利用し, 計算時間の短縮を図る.
 - 飛行パターン(離陸→巡航→着陸)
 - データは(セクターの大きさと比較して)短い間隔の時系列データ

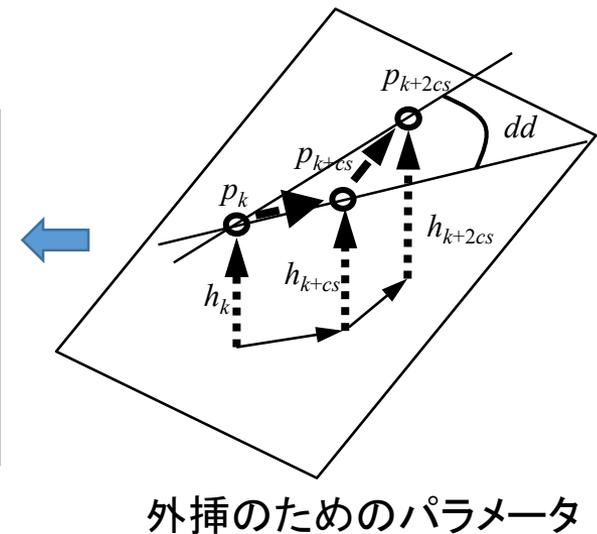
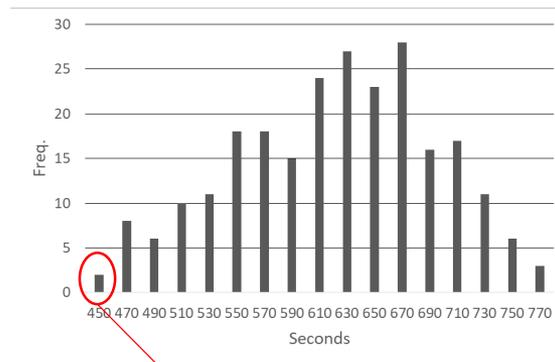


時刻	便名	経度 (度)	緯度 (度)	高度(ft)	形式
8:00:00	FLT0001	42.413533	141.681313	6247	B763
8:00:00	FLT0002	33.877210	131.116394	11800	DH8D
8:00:01	FLT0003	42.275752	141.749411	20266	B773
8:00:02	FLT0004	35.508394	133.801179	7979	B738
...					
8:00:10	FLT0001	42.426521	141.656398	6417	B763

セクター交差位置予測アルゴリズム



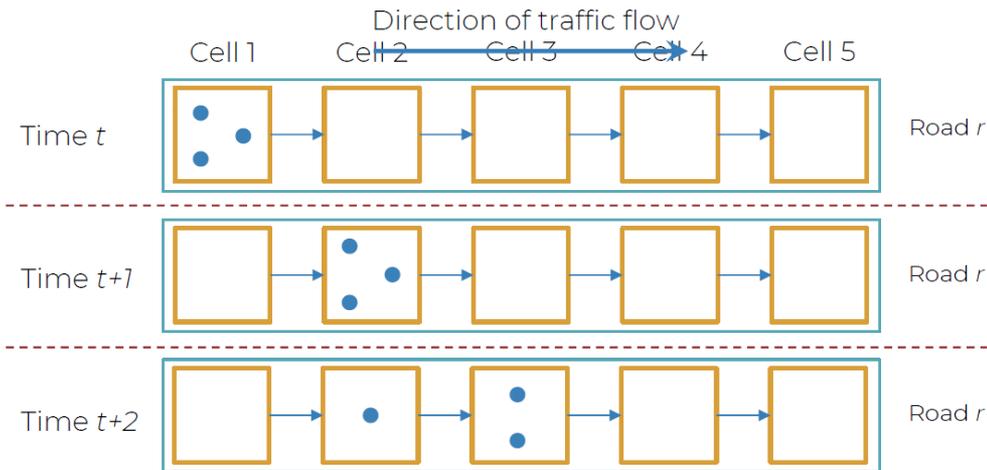
- 現在の方向ベクトルを外挿し、セクター境界との交差点を予測.
- 予測交差点からの探索により、真の交差点を求める.
- 外挿パラメータ設定: 網羅的探索



計算結果

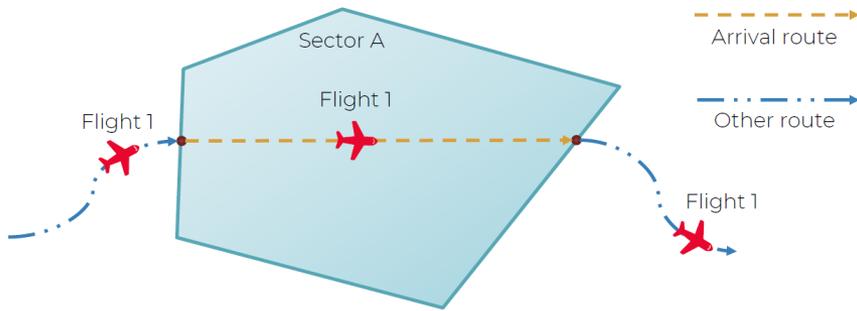
- Test data: tk2016 03 07 12 18.csv (size 40.5MB, 793,585 points).
- 全点テスト : 1,303 sec.
- 提案手法 : 456 sec. (35%に削減)

Cell Transmission Model

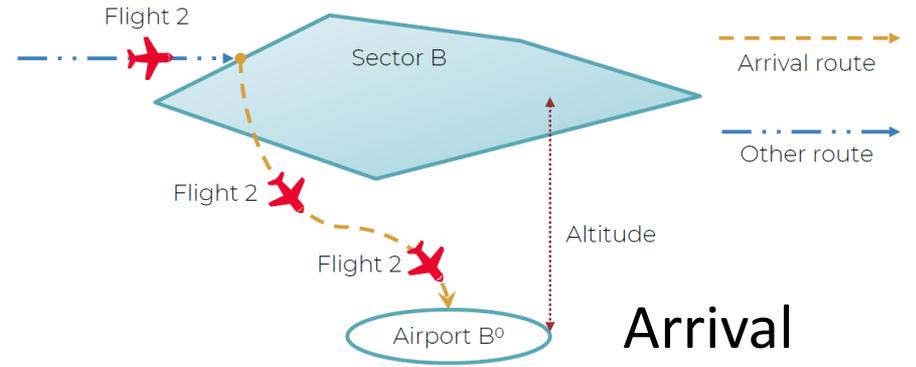


- 道路交通流のモデル
- 空域交通流への適用には、「道路」を定義する必要がある。

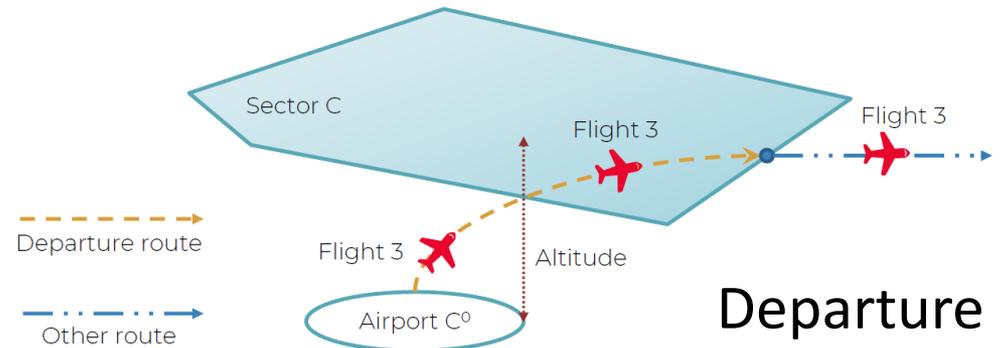
セクター内航路の分類



Fly Over

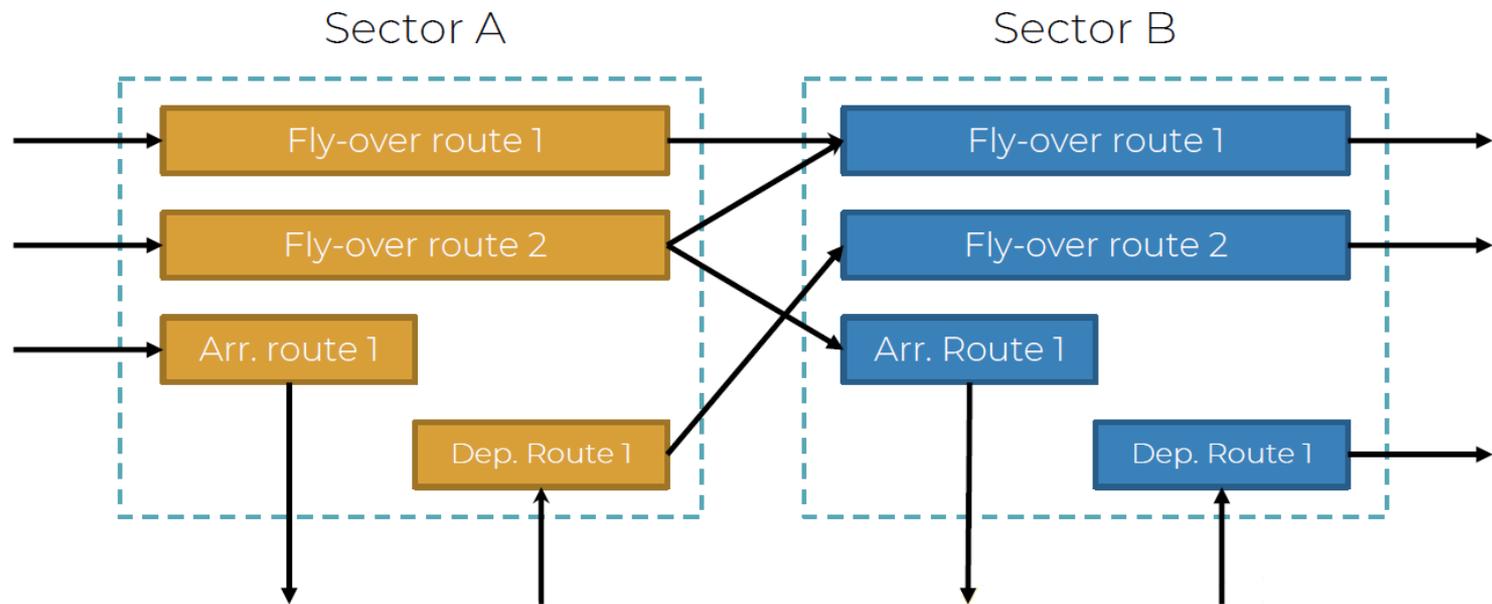


Arrival



Departure

空域交通流ネットワークモデル



空域交通流ネットワークモデル

Sector	Fly-over routes	Arrival routes	Departure routes
F11-2	22	2	2
S01	14	1	0
T02	19	4	5
T04-1	24	8	3

実際のルート数

Route	Average flight time (seconds)	Number of cells
$S01_{S032 \rightarrow T01}$	710	12
$S01_{S032 \rightarrow S31}$	595	10
$S01_{T01 \rightarrow S03-2}$	584	10
$S01_{T01 \rightarrow S31}$	504	9
$S01_{S31 \rightarrow S02}$	304	6

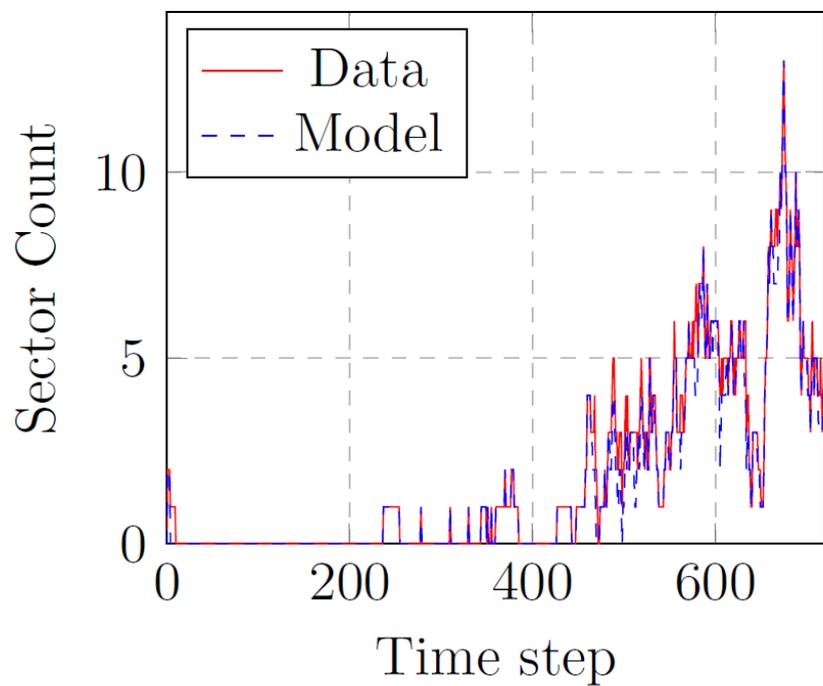
Misawa West Sectorのルート長



各ルートのセル分割数を決定

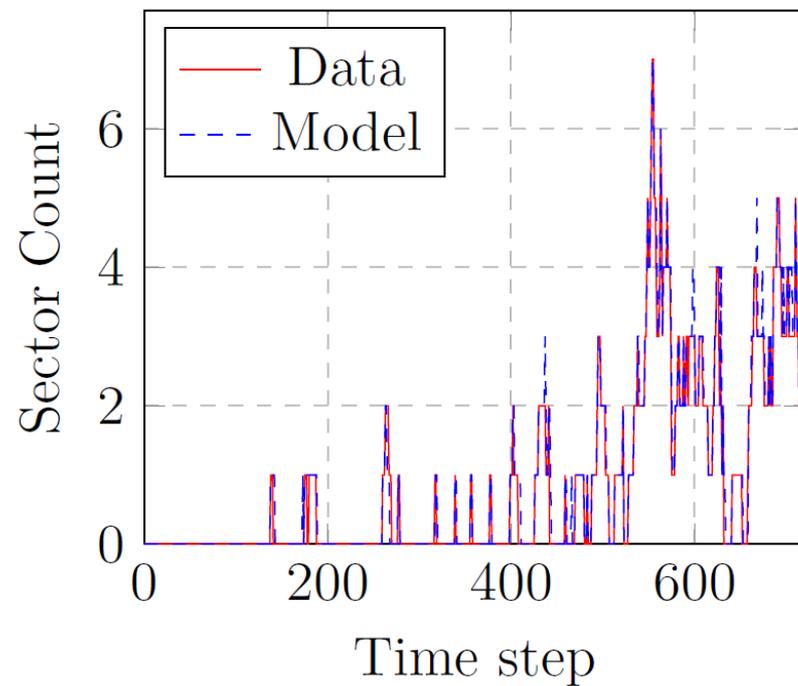
モデルの評価

- 航空機密度の異なる4つのセクターをピックアップ：
F11-2 Chugoku High Sector, S01 Misawa West Sector, T02 Tohoku Sector, T04-1 Kanto East Sector.
- セクター内航空機数の時間変化を提案モデルと実データで比較. モデルへの入力の実データを使用.



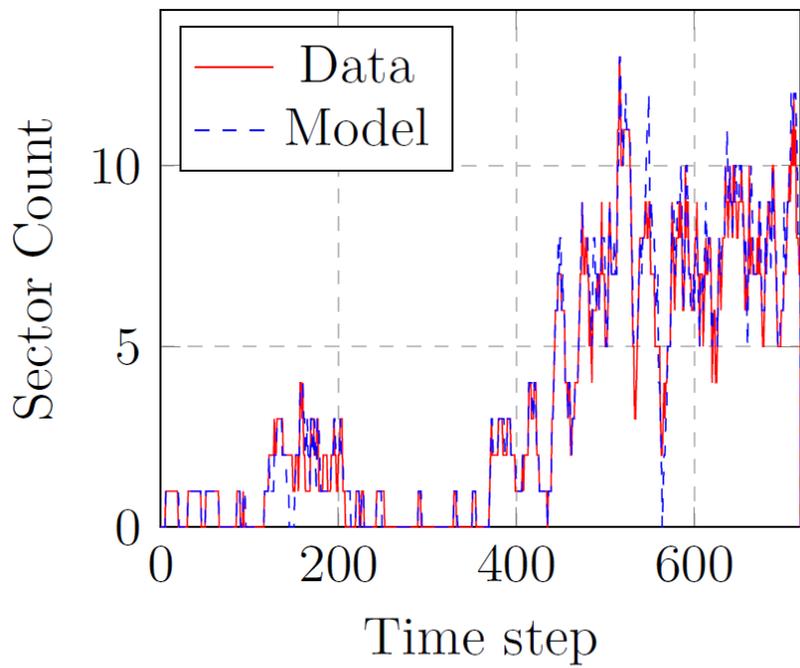
(a) May 11, 2015

Chugoku Sector



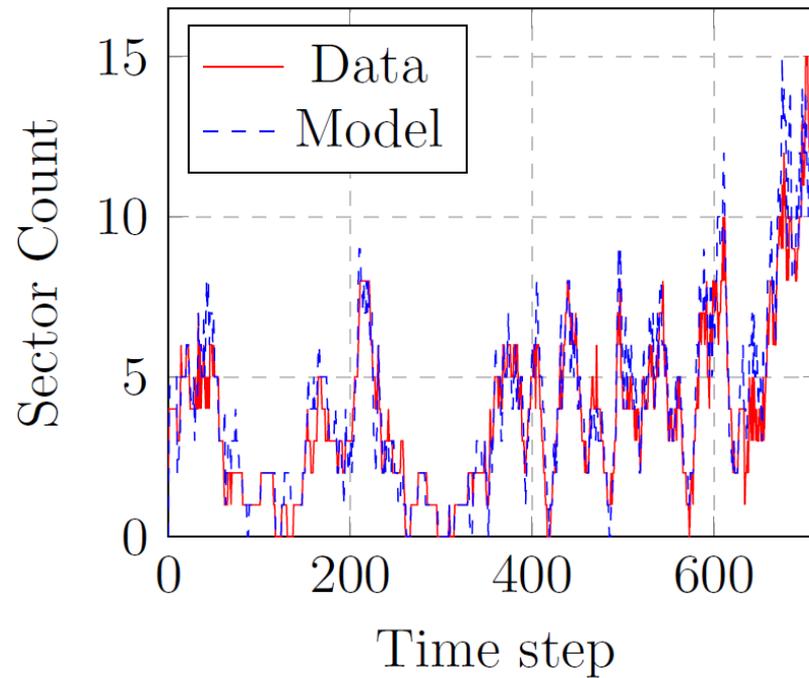
(a) May 11, 2015

Misawa West Sector



(a) May 11, 2015

Tohoku Sector



(a) May 11, 2015

Kanto West Sector

おわりに

- セクター内交通流モデルの単体テスト → ○
- 今後, セクター内交通流モデルを結合したモデルをテスト.
- その他, 統計的学習による混雑度予測も.