



日本航海学会 航空宇宙研究会  
@東京海洋大学 20\_May\_2017

# 航空管制における航空交通の 複雑性の指標について

○長岡 栄・平林博子・ブラウンマーク  
(電子航法研究所)

# 背景

## ■ ATMの近代化

—性能(安全性、効率、容量、定時性等c.)

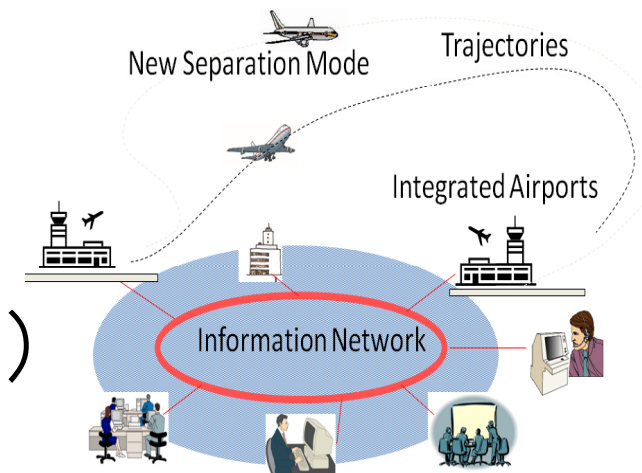
によるシステム管理

—人間が中心のシステム

■ 性能向上

■ 容量(管制官の作業負荷)

⇒(交通量、複雑さ, etc.)



# 複雑さ(Complexity)の定義

- **Complex**: Consisting of interconnected or interwoven parts(American Heritage Dictionary)
- 管制官の作業負荷に関する研究  
(e.g., EUROCONTROLのCOCA(Complexity and Capacity)プロジェクト)⇒文献調査<sup>[1]</sup>
- 「特定の交通状況が管制官にもたらす困難さの尺度」 C. Meckiff <sup>[2]</sup>

# アプローチ

- 交通の複雑さ:  
⇒ 航空交通の構造に起因した固有の複雑さ
- 管制官の作業負荷:  
⇒ 担当しているシステム(交通形態を有するセクター)における管制作業の難しさ



# 複雑さの指標

管制の作業負荷



コンフリクト回避  
と円滑な流れ  
⇒  
(空域構造, 交通密度)  
⇒軌道の特

## ■ 複雑さの評価方法

- Dynamic Density [3]
- フラクタル次元 [6]
- Intrinsic Metrics [4]
- Input-Output法 [5]
- 確率的手法 [7]
- グラフ理論的手法 [14]
- その他

# 管制官の作業負荷

## ■ MBB (Messerschmitt-Bolkov-Blohm) 法(1976):

ICAO ATS Planning Manual, Appendix C, 1992

作業の分類⇒各作業時間の計測

- a) 無線通話時間
- b) 作業時間
- c) 情報処理, 情報記載に要する時間



- Conflict回避
- 管制移管
- モニタリング

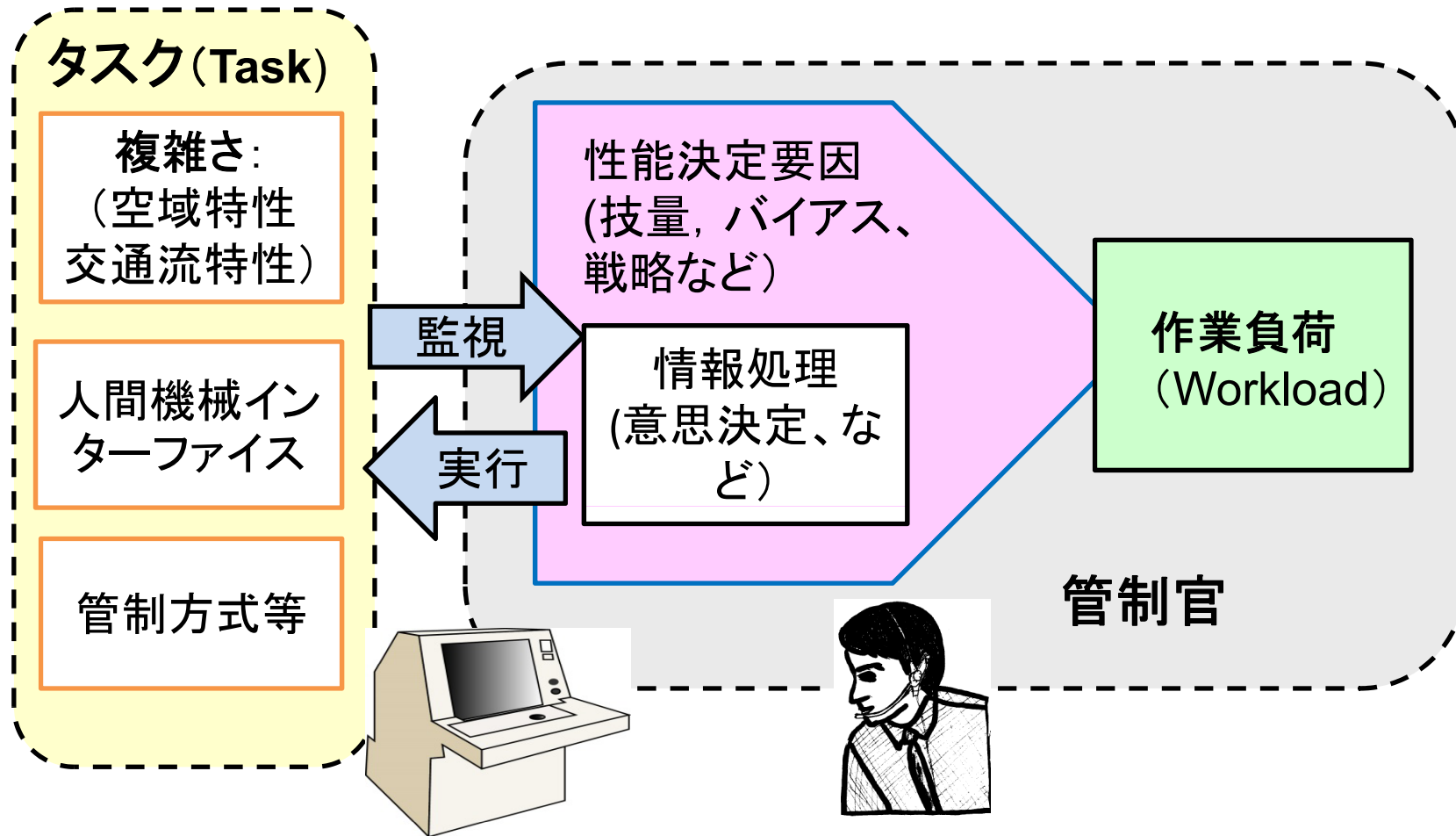
管制官席の容量⇒Radar管制官の作業

Kind of traffic	Weight factor
Cruise	$\eta_1 = 1$
Partial cruise	$\eta_2 = 1.24$
Full evolutive	$\eta_3 = 1.62$

$$W = \sum_i \eta_i \cdot n_i \cdot t_i$$

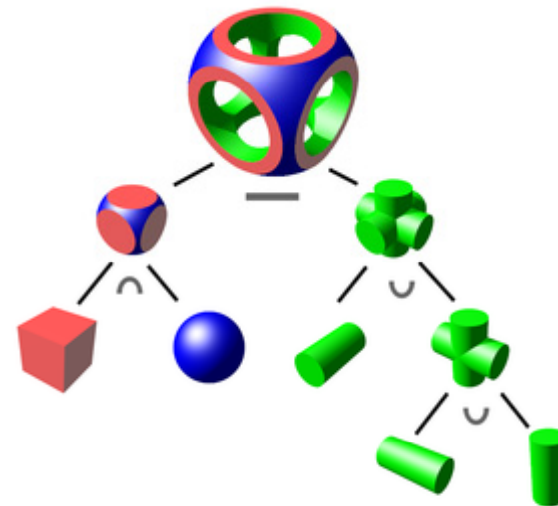
出典: D.Delahaye  
S.Puechmorel  
(ENAC), Tutorial: Trajectory  
Complexity, ICRA2008

# 作業負荷と複雑さの関係



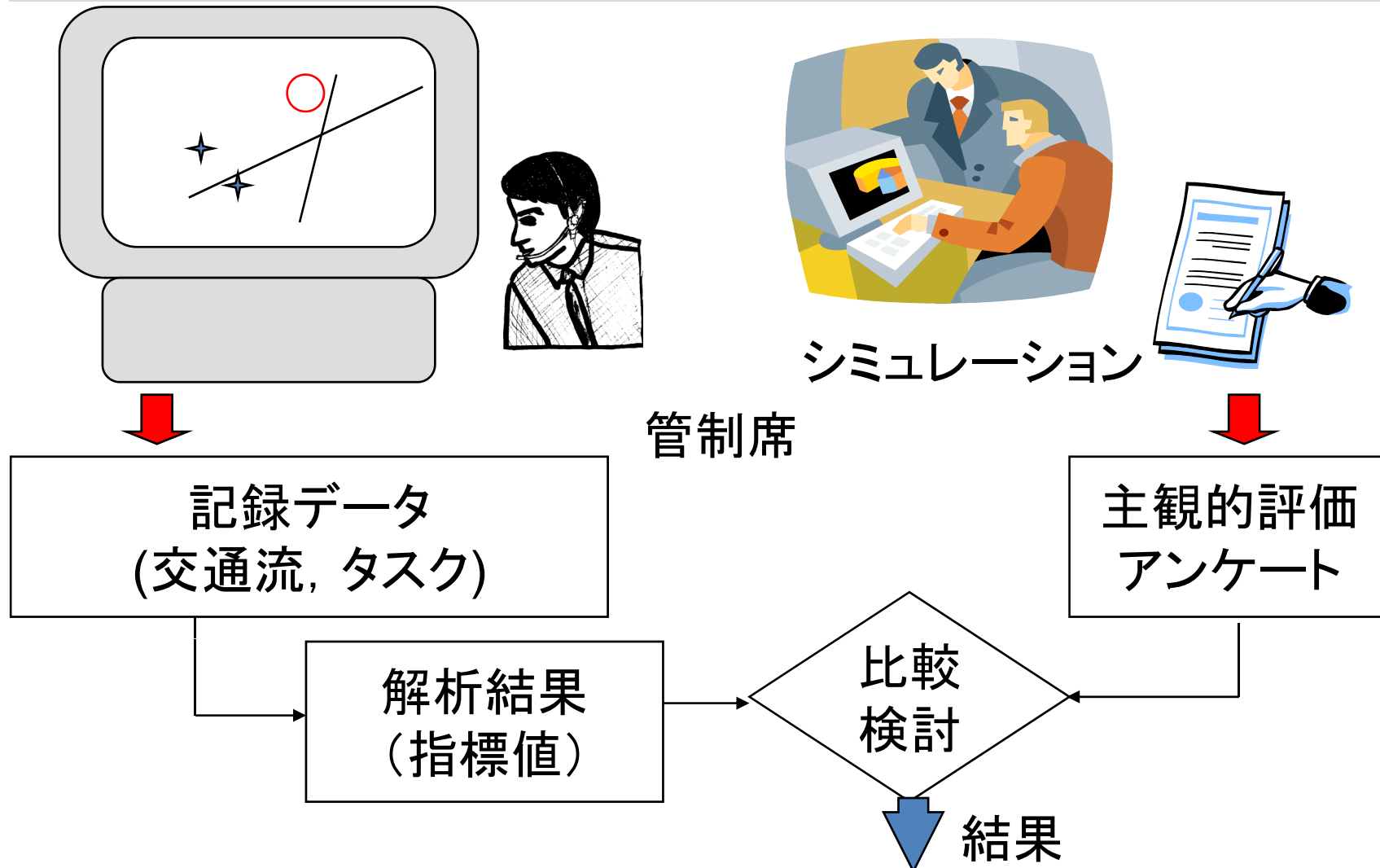
# 複雑さの要素

- 航空機の分布
  - 交通密度
  - 高度変更
  - コンフリクト数
- セクターの特性
  - 制限空域の影響
  - セクタ形状
  - 航空路の構造
  - 運用方式





# 複雑さ指標の解析・評価手順



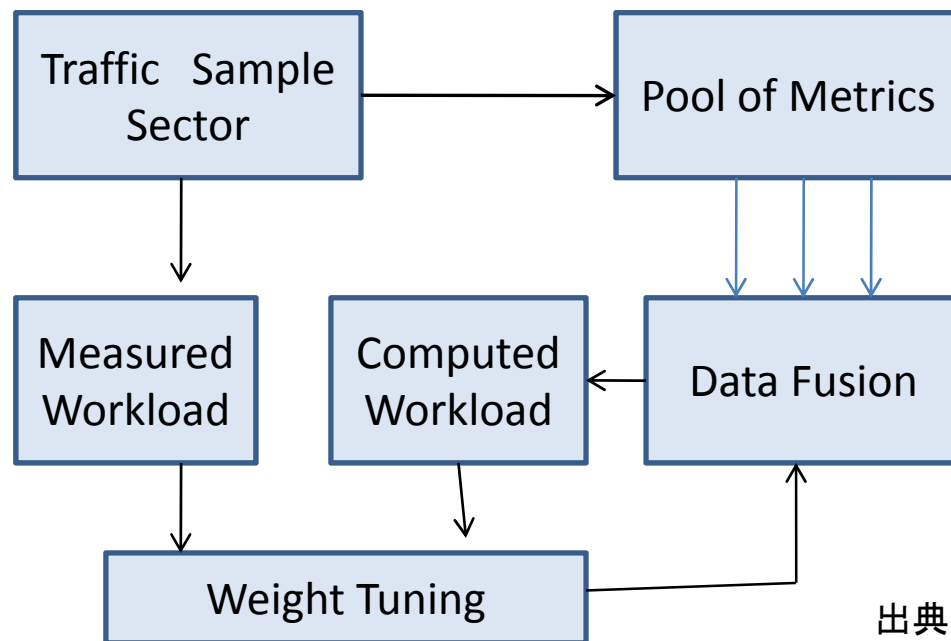
# これまでの指標の研究例

- 動的密度 [3]
- Intrinsic Complexity [4]
- 入出力 (Input-output) 手法 [5]
- Fractal次元 [6]
- 確率的指標 [7]
  - <最近の例>
  - 欧州空域の年間比較の複雑性指標 [8]
  - MITの航空機データに基づく解析(分類木) [9]
  - ENRIで開発中の難度指標 [10-13]
  - 中国のグラフ理論的指標 [14]

# 動的密度 (Dynamic Density) [3]

Dynamic Density (DD):

セクターで測定できる交通に関わる要素の重み付和



$$DD = \sum_{i=1}^9 W_i CP_i$$

重み係数      パラメータ

出典: Dynamic density : an air traffic management metric I.V.  
Laudeman et al. Tech. Report TM-1998-112226 (1998)

# Dynamic Density

DD= 2.40 ・ (針路変化 > 15度)

2.45 ・ (速力変化 > 10kt)

2.95 ・ (高度変化 > 750ft)

.....

.....

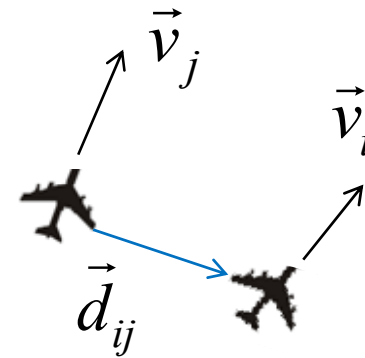
.....

- 各セクターに対して較正する必要あり
- 航空機の瞬時的な位置と速度が空域に関する全体の複雑さを表すようには思えない

# Intrinsic Metric [4]

## 軌道情報(位置, 速度)

- 近接 (Proximity) 指標
- 収束 (Convergence) 表示
- Grassmannian 指標



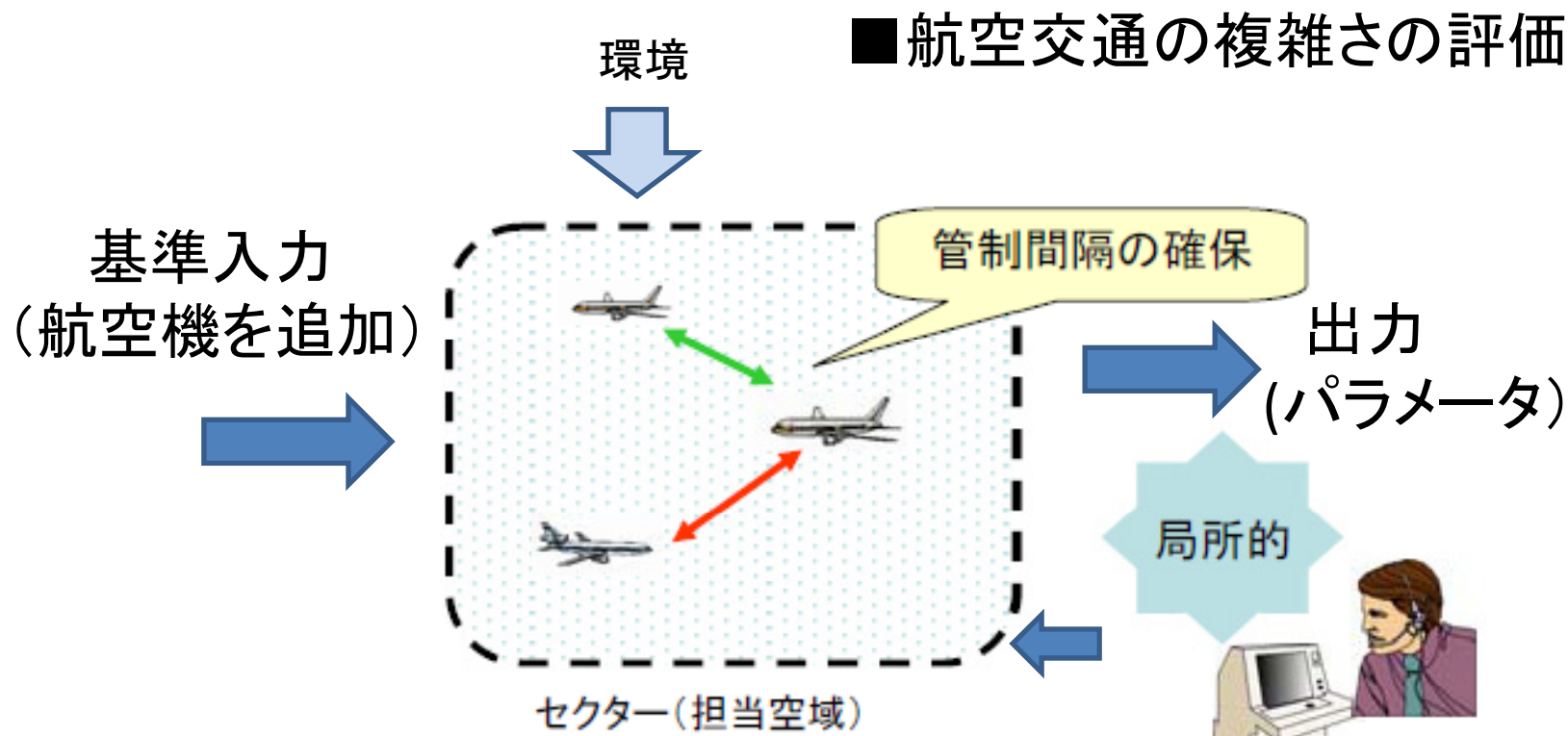
$$d_{ij}^{a,h} = \|\vec{p}_i - \vec{p}_j\|_{a,h} \equiv \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}{a^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{h^2}}$$

$$a=5\text{NM}, \quad h=1,000\text{ft}$$

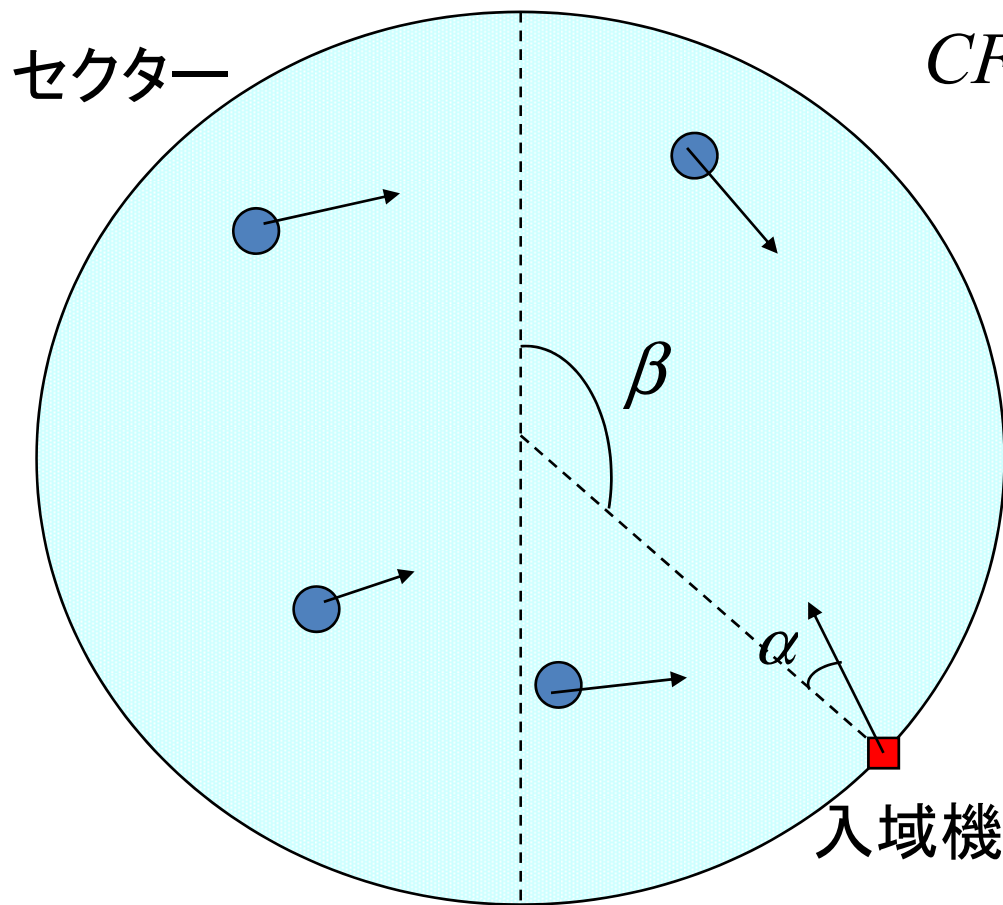
出典: D. Delahaye, S. Puechmorel, "Air Traffic Complexity : Towards Intrinsic Metrics", ATM Seminar 2001

# 入出力法 (Input-Output Approach) [5]

- ・セクタを一つのシステムとみなす。
- ・ある入力に対する出力を見る。

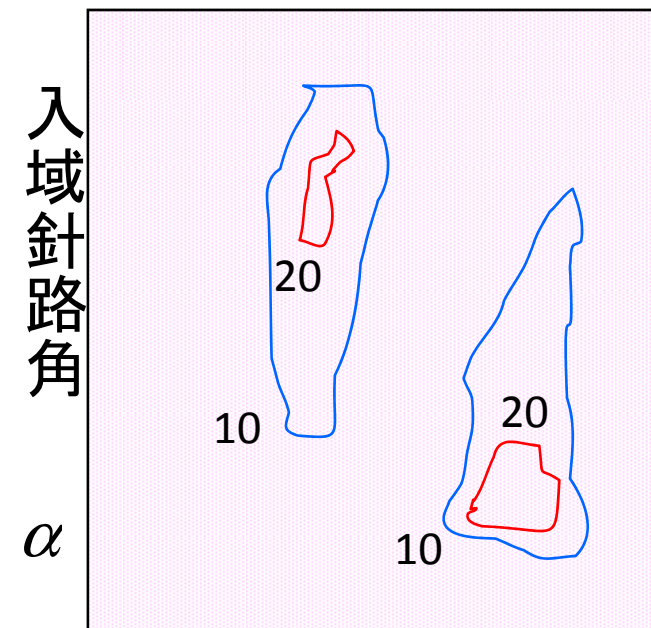


# Complexity Mapの例<sup>[5]</sup>



$$CF(\alpha, \beta) \equiv \sum_{i=1}^n |\theta_{in} - \theta_i|$$

Complexity Map



入域方位(位置)角  $\beta$

# Fractal次元 [6]

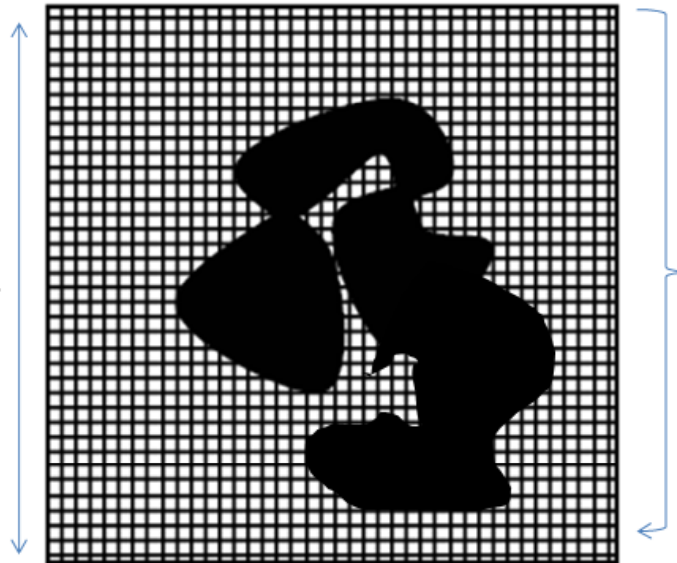
$$D_0 \equiv \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\log(N)}{\log(d)}$$

長さ:

L=1

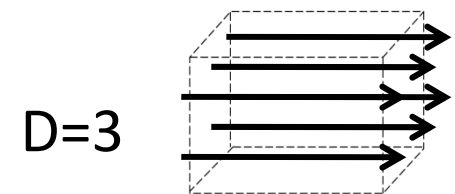
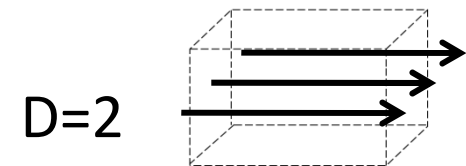
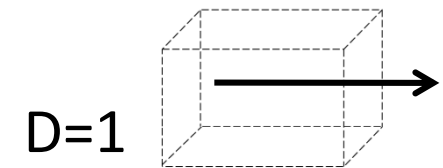
分割幅:

d=1/n



セル数:  
n個

総数  
N=n<sup>2</sup>個



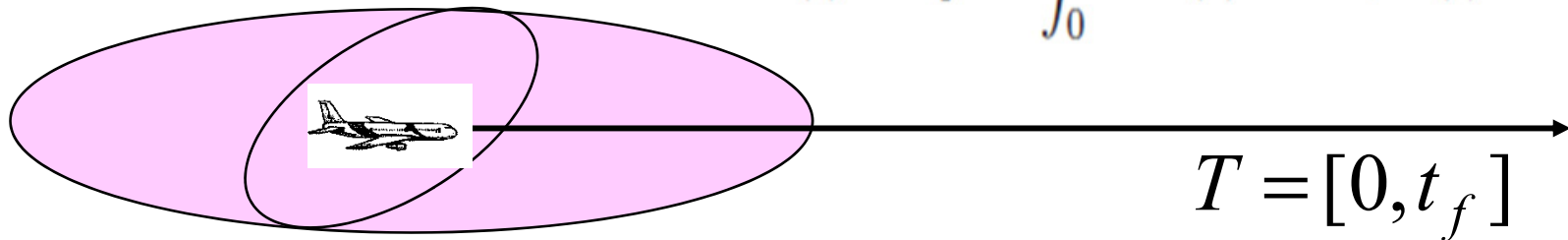
出典[6]: S.Mondoloni and D,Liang, Airspace Fractal Dimension and Application,  
ATM Seminar 2001 Santa-Fe



# 確率的手法：考え方<sup>[7]</sup>

- Complexity の時間と空間依存性
- 不確定性(誤差)の影響

$$x^{A_i}(t) = x_0^{A_i} + \int_0^t u^{A_i}(s) ds + Q^{A_i}(t) \Sigma^{A_i} B^{A_i}(t)$$



$$M_\rho(x) = \left\{ \hat{x} \in R^3 : (\hat{x} - x)^T M (\hat{x} - x) \leq \rho^2 \right\}$$

出典：Prandini M, Putta V, Hu J, "Air traffic complexity in advanced automated Air Traffic Management Systems", Proc. of the 9th Innovative Research Workshop & Exhibition, pp.3-10, 2010.

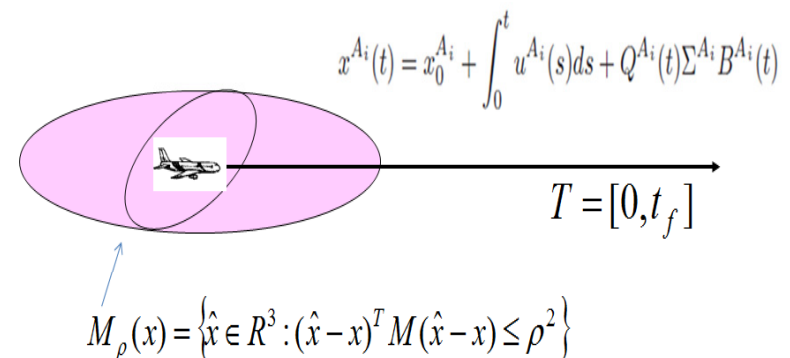
# 確率的手法：考え方(2)

## ■ 1次Complexity(航空機の存在)

$$C_1(x,t) \equiv P(x^{A_i}(t) \in M(x), \text{ for some } t \in [t, t+\Delta], i \in \{1, 2, \dots, N\})$$

## ■ 2次Complexity(複数の航空機の同時存在)

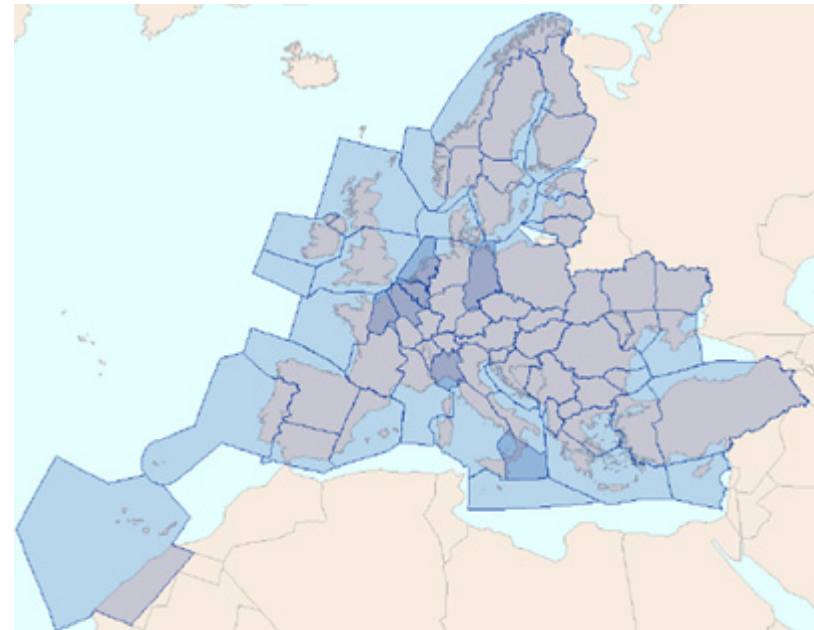
$$C_2(x,t) \equiv P(x^{A_i}(t), x^{A_j}(t') \in M(x), \text{ for some } t, t' \in [t, t+\Delta], i \neq j \in \{1, 2, \dots, N\})$$



出典: Prandini M, Putta V, Hu J, "Air traffic complexity in advanced automated Air Traffic Management Systems", Proc. of the 9th Innovative Research Workshop & Exhibition, pp.3-10, 2010.

# 欧州空域の年間比較の手法<sup>[8]</sup>

出典: [8] Complexity Metrics for ANSP Benchmarking Analysis, Report commissioned by the Performance Review Commission, EUROCONTROL, April 2006.

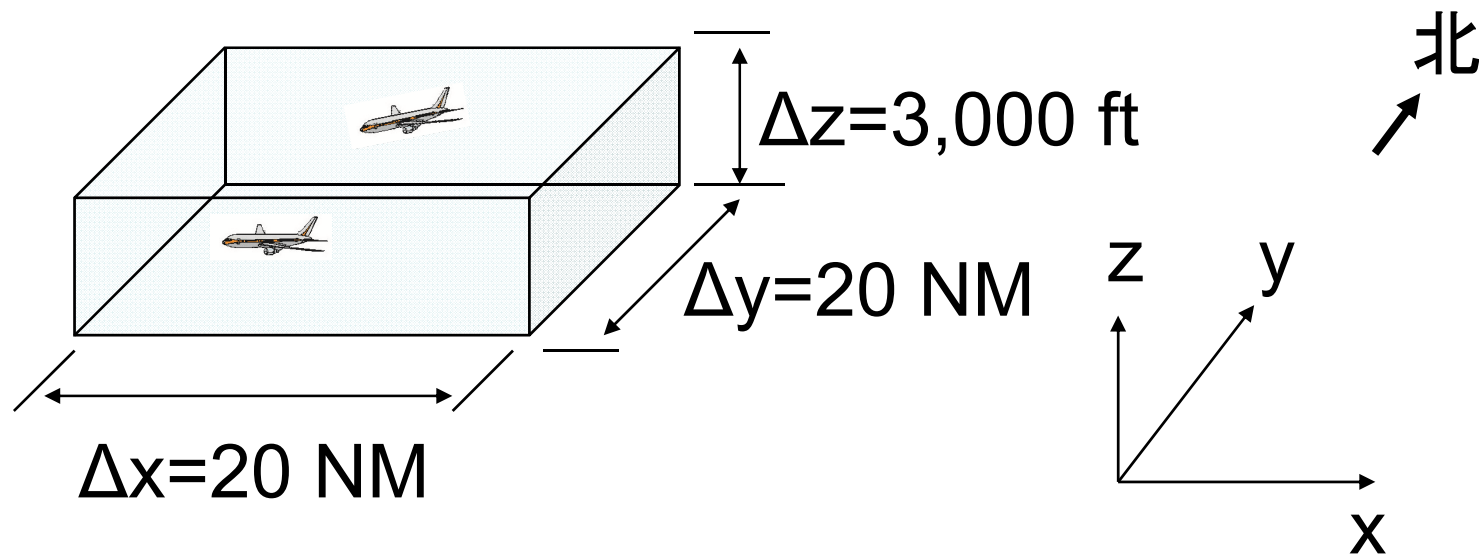


## ■ 欧州空域の年間比較の手法<sup>[8]</sup>

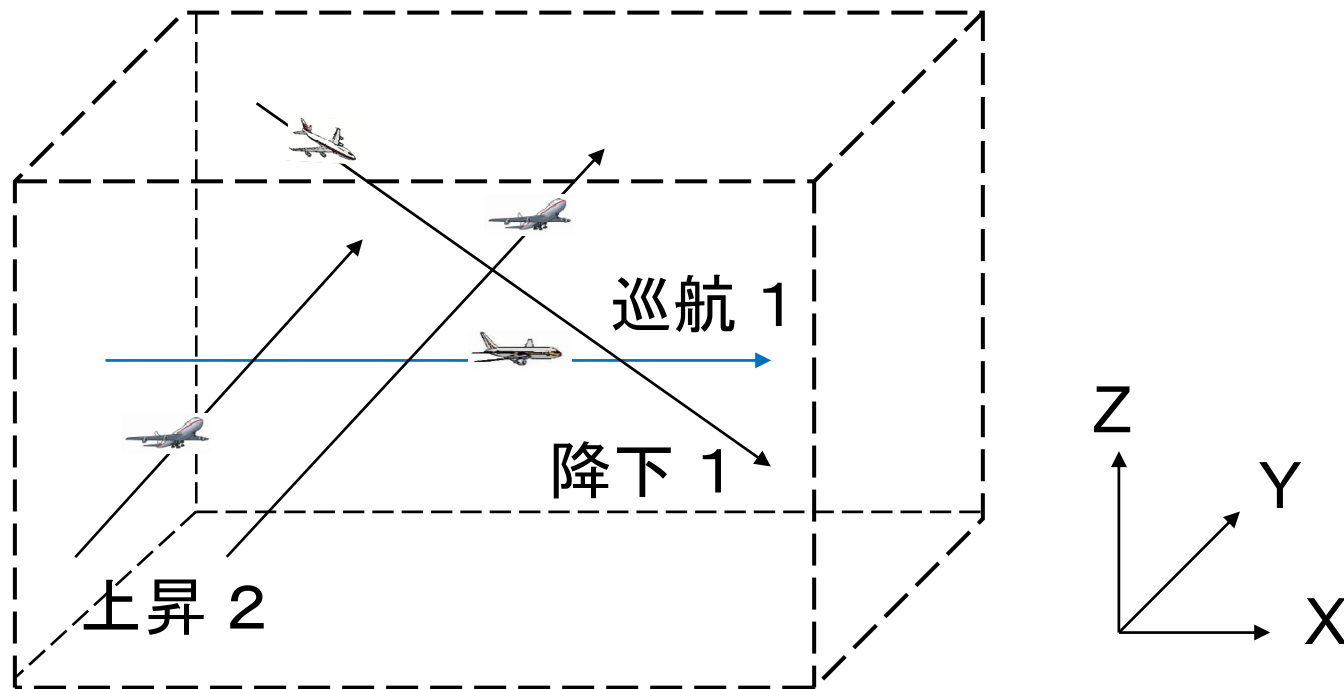
- EUROCONTROLのACE (ATM Cost-Effectiveness ) 作業部会が開発した空域の複雑さの指標
- ACC単位で複雑さの年間比較(Benchmarking)が目的
- 「複雑さ」: ATCタスクレベルの困難さ／作業負荷を与える外的要因

# 干渉 (Interaction) の概念 [8]

- ◆ Interaction: セル中に2機が同時に存在  
( $\Delta t=60$  min.)



# 垂直干涉 (Vertical Interaction)<sup>[8]</sup>



$$\text{垂直干涉} = 2 \times 2 + 1 \times 3 + 1 \times 3 = 10$$

# ACE作業部会が開発した指標<sup>[8]</sup>

複雑さの様相	指標 (Indicator)	備考
①交通密度	調整密度	航空機間の干渉
②変化中の交通	垂直干渉 (VDIF)	上昇/下降/巡航機間の干渉
③交通の構造	水平干渉 (HDIF)	針路差による干渉
④交通の混合	速力干渉 (SDIF)	速度差による干渉

# 垂直干渉指標 (VDIF) の計算例

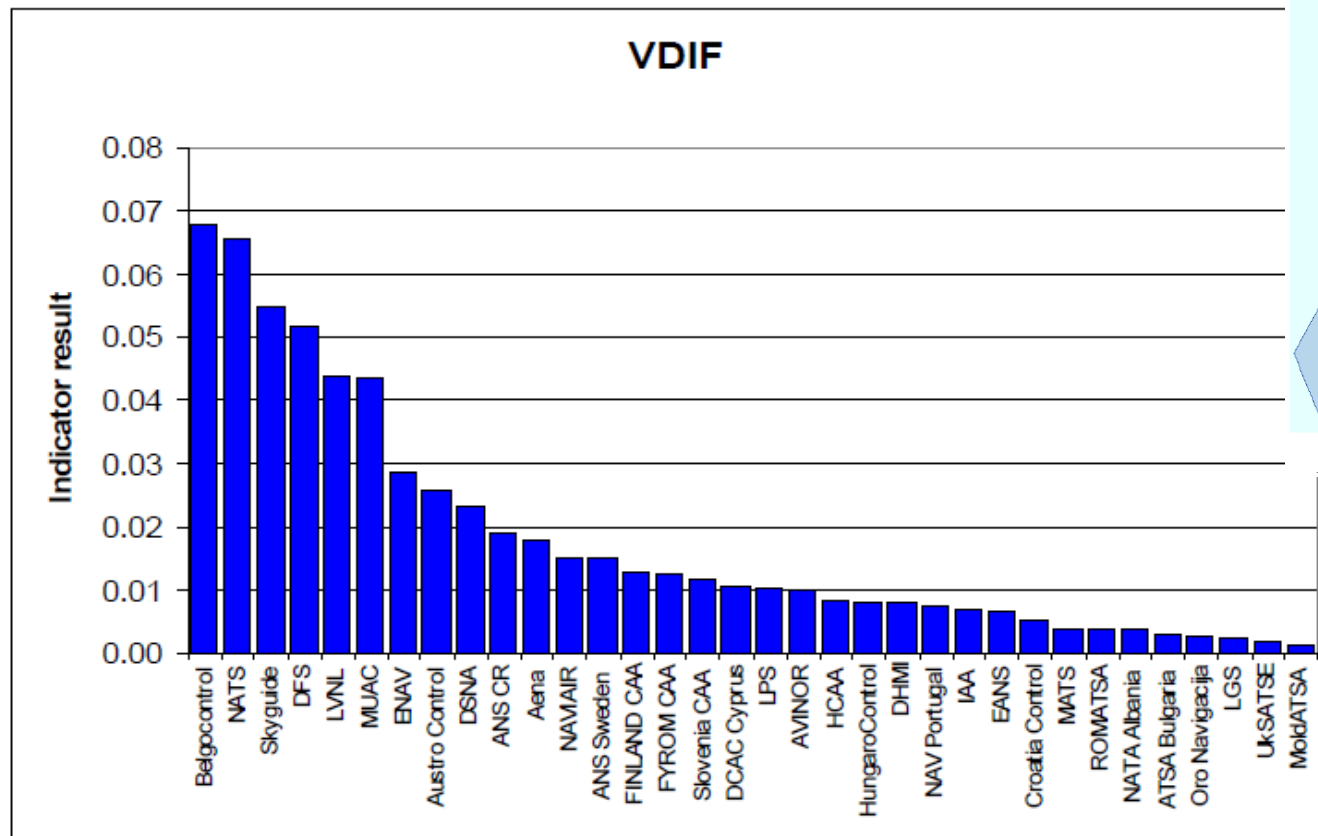


Figure 11: Vertical Interaction Indicator results

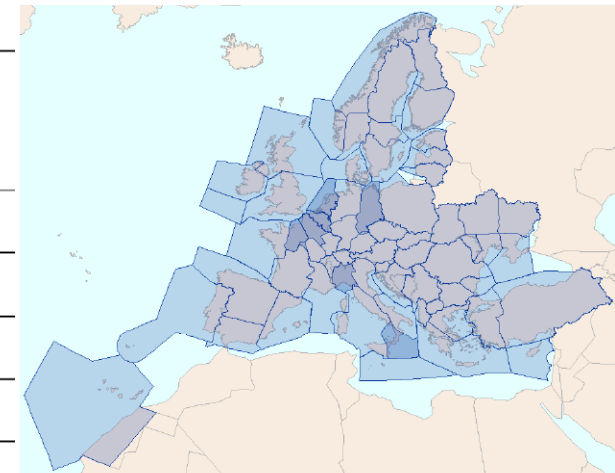


Figure 2: Map of the ECAC area

出典: EUROCONTROL [8]

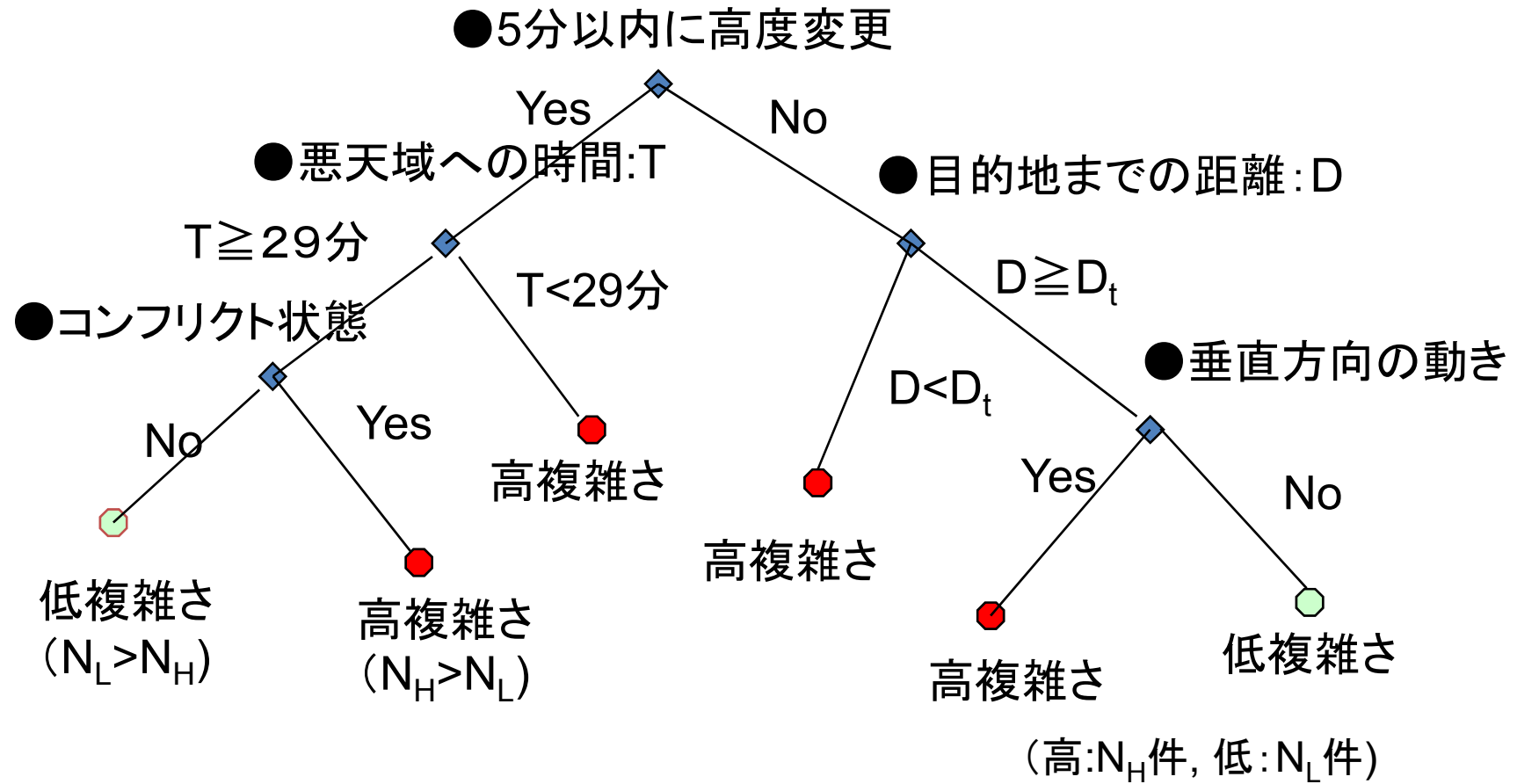


# 航空機に基づく管制の複雑さ評価<sup>[9]</sup>

出典: [9] Li, L., Cho, H. and Hansman, R. J., "Aircraft-Based Complexity Assessment for Radar Controllers in the Multi-Sector Planner Experiment," The 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Sep. 2010



# 分類木 [9]



# 管制官の認知的複雑さの評価<sup>[9]</sup>

表2 管制官の報告による複雑性要因（文献<sup>[9]</sup>）

高複雑さの理由	数	割合
潜在的コンフリクト(12分)	7	100%
上昇/降下	7	100
潜在的悪天域通過(30分)	6	86
ATC機関の要求(4D Re-routingなど)	6	86
主交通流との交差	4	57
<u>セクターへの入域</u>	2	29
<u>過負荷セクターの援助</u>	1	14

表3 分類木作成に使われた観測可能な状態<sup>[9]</sup>

Sector	高度
5分以内の高度変更	垂直方法の動き*
速力	針路
コンフリクト状態*	悪天域までの時間*
現在地の天候	Re-routing 要求状態*
出発地からの距離	目的地までの距離
目的地への方向	境界入域までの時間
<u>最近接セクター境界</u>	<u>セクター内または外側</u>

表4 最も影響するとみなされる観測可能な状態<sup>[9]</sup>

5分以内の高度変更
悪天域までの時間*
目的地までの距離
垂直方向の動き*
コンフリクト状況*

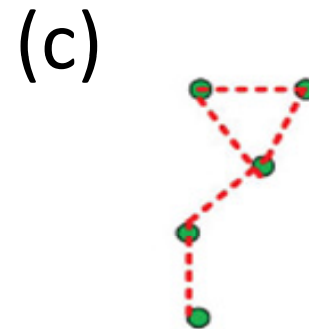
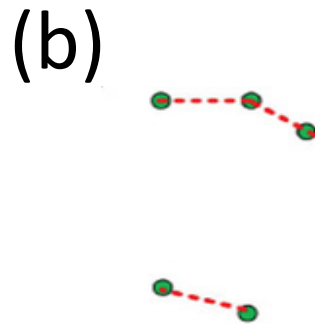
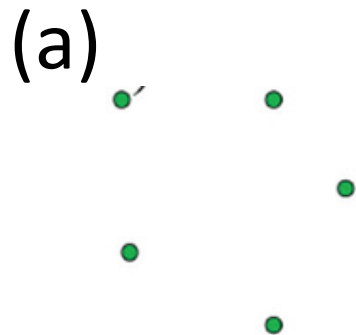
# 中国のグラフ理論的指標<sup>[14]</sup>

節点(Node)とエッジを用いた指標

出典:[14] Wang, H., Wen, R. and Zhao, Y., “Topological Characteristics of Air Traffic Situation”, 11<sup>th</sup> USA/Europe ATM Seminar, 2015

# グラフ理論的指標（節点とエッジ）

- 節点 (Node) とエッジ (Edge)



- (a) 近接無し
- (b) 近接がありコンフリクト回避操作を要す
- (c) 環状構造の近接。解決法が複雑。

## A. 度数 (Degree)

$N$ : 全節点数、

$k(i)$ : 節点  $i$  の度数

( $\equiv$  節点  $i$  に結合している  
エッジ数)

出典: Wang, H., Wen, R. and Zhao, Y., "Topological Characteristics of Air Traffic Situation", 11<sup>th</sup> USA/Europe ATM Seminar, 2015

# エッジ、結合率

■ 2機間の距離 < 閾値D ⇒ 節点間にエッジが存在

■ 結合率 (Connection rate) :  $\rho$

$\rho$  = 実エッジ数 / 潜在的エッジ数 (航空機対の総数)

$$\rho = \frac{2 * E_i}{N * (N - 1)}$$

$E_i$  = Network内のエッジ数、N = 節点数

# Network構造Entropy

- Network構造エントロピーは航空機の交通全体への影響の均質性の尺度として導入した。

$$E_r = - \sum_{i=1}^N I_i \ln I_i$$

$$I_i = k_i / \sum_{j=1}^N k_j$$

$E_r$  : 構造エントロピー

$N$  : 航空機数

$I_i$  : 航空機*i*の重要度

$k_j$  : 航空機*j*に隣接する航空機数

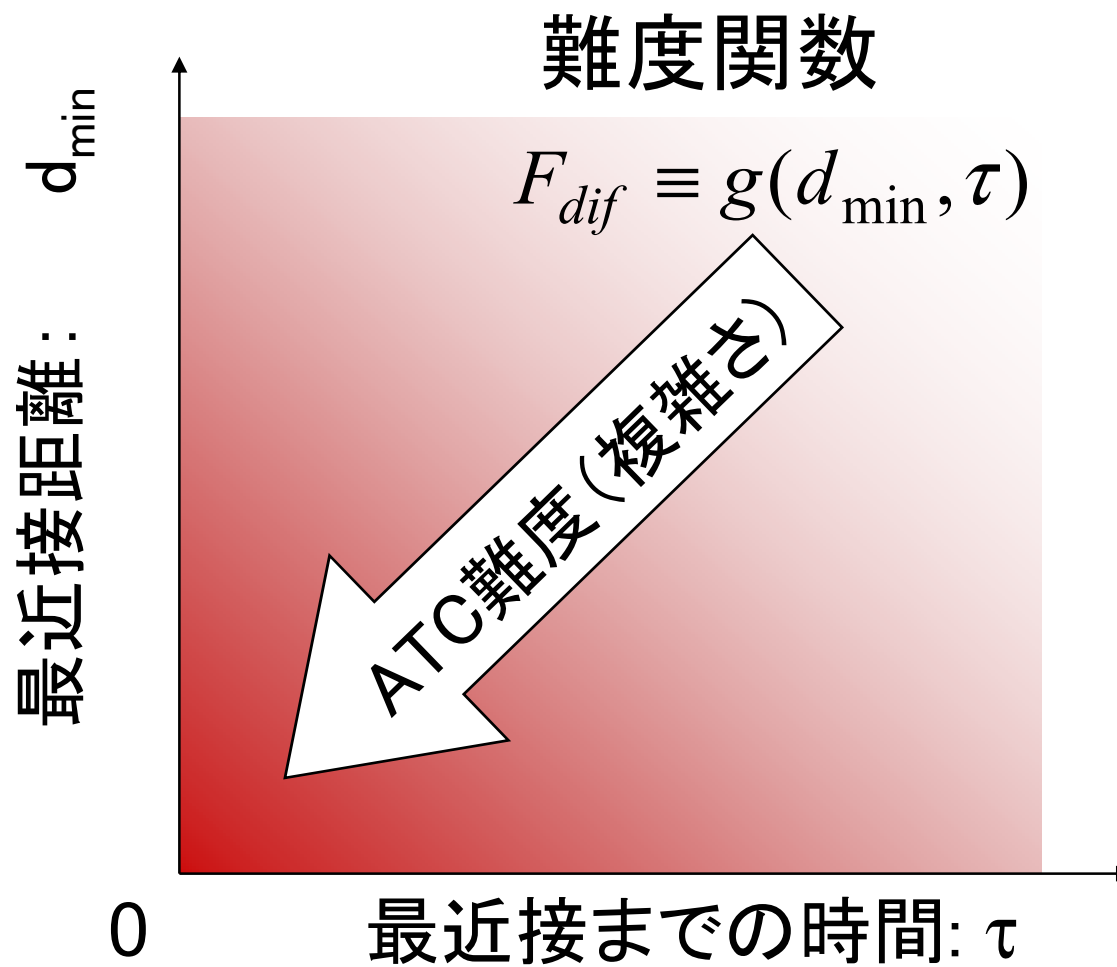
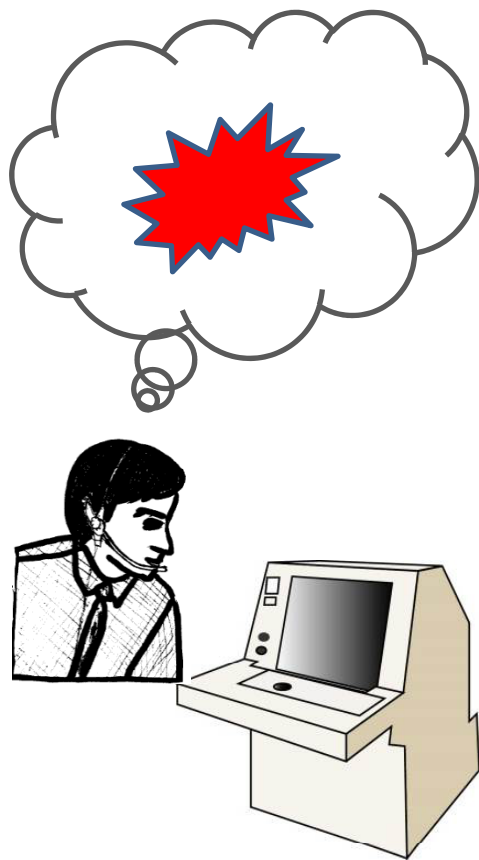
出典: Wang, H., Wen, R. and Zhao, Y., "Topological Characteristics of Air Traffic Situation", 11<sup>th</sup> USA/Europe ATM Seminar, 2015



# ENRIが開発した難度指標<sup>[10-13],[15-19]</sup>

最近接距離と余裕時間を組み込んだ  
管制の難度指標（時間的変化を観るのに適す）

# 難度指標<sup>[10-13]</sup>の考え方





# 難度関数への写像

■ 写像  $\{\vec{R}_r, \vec{V}_r\} \Rightarrow \{R_r, V_r, \theta\} \Rightarrow \{d_{\min}, \tau, R_r\} \Rightarrow [0, 1]$

■ 難度関数  $C_d(d, \tau) \equiv f_d(d) f_t(\tau)$

人間の感覚 → 対数的 (指数的)

$$f_d(d) = \exp\left(-\left(d / \lambda_d\right)^{k_d}\right)$$

$$f_t(\tau) = \exp\left(-\left(\tau / \lambda_t\right)^{k_t}\right)$$

選択パラメータ  
(管制間隔 etc.)

$$k_d, k_t \Rightarrow \{2, 2\}$$
$$\lambda_d \quad \lambda_t$$

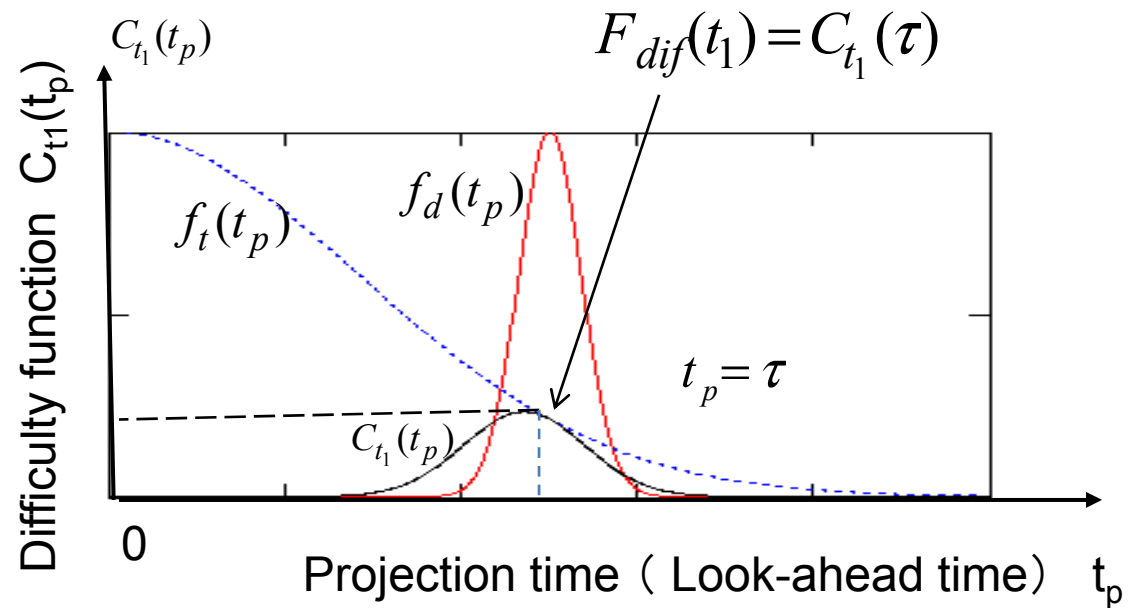
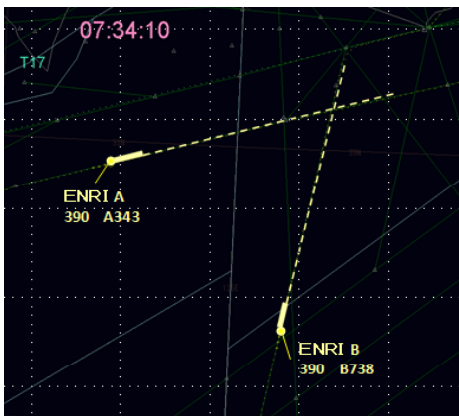
# 難度関数

$$F_{dif}(t_1) \equiv \max_{t_p \geq 0} [C_{t_1}(d(t_p), t_p)]$$

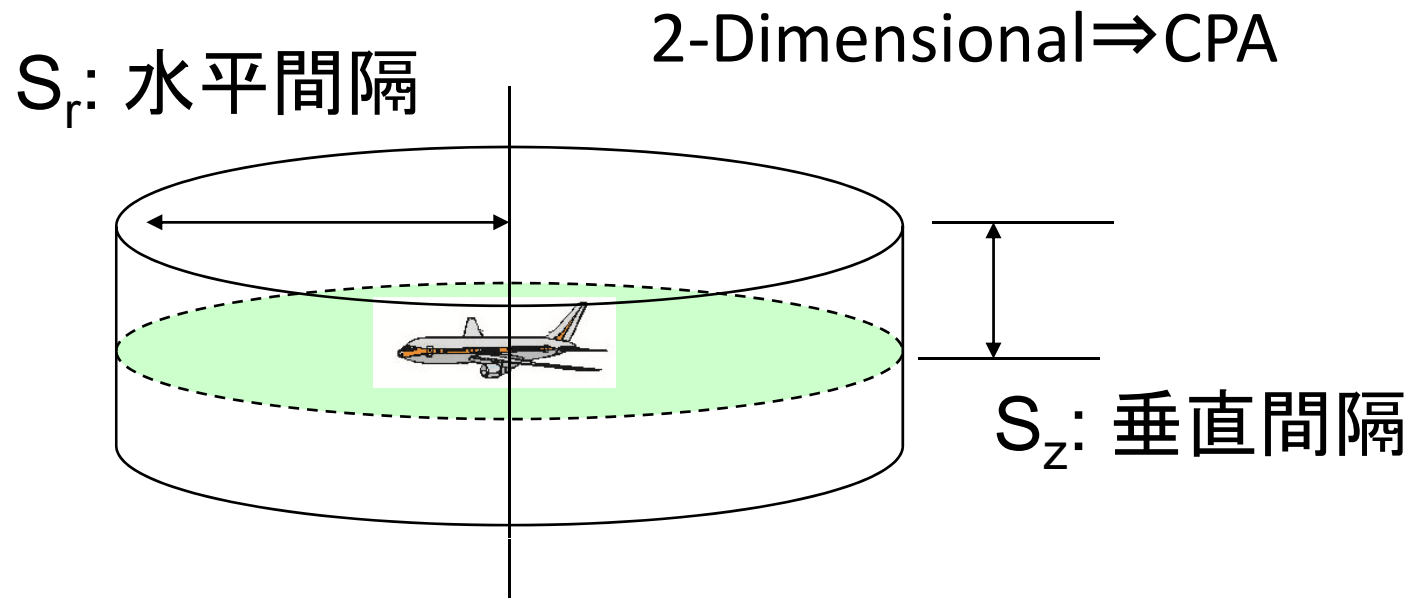
現在時刻 :  $t_1$

難度関数

$$C_{t_1}(t_p) \equiv f_d(d(t_p))f_t(t_p)$$



# 管制間隔 と 相対距離



垂直距離 & 水平距離

$\rightarrow$  独立

$$F_{dif} \equiv \text{Max}[C(d(t_p), t_p)]$$

# 難度関数の最大値の公式

$$F_{dif} = \text{Exp}(-U_{\min})$$

$$U(t) \equiv \left(\frac{d_H(t)}{\lambda_H}\right)^2 + \left(\frac{d_z(t)}{\lambda_z}\right)^2 + \left(\frac{t}{\lambda_t}\right)^2$$

$$t_{\min} < 0 \quad U(0) = \frac{1}{\lambda_H^2} (R_H^2 + K_p^2 z^2)$$

$$t_{\min} \geq 0 \quad U(t_{\min}) = \frac{1}{\lambda_H^2} \left\{ R_H^2 + K_p^2 z^2 - \frac{(\vec{V}_H \cdot \vec{R}_H + K_p^2 v_z z)^2}{V_H^2 + K_p^2 v_z^2 + K_t^2} \right\}$$

$$K_t \equiv \lambda_H / \lambda_t$$

$$K_p \equiv \lambda_H / \lambda_z$$

$$\vec{V}_H \cdot \vec{R}_H = v_x x + v_y y$$

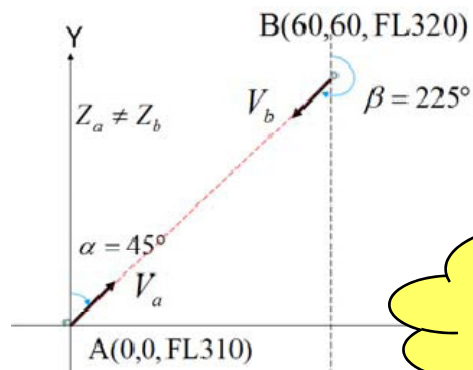
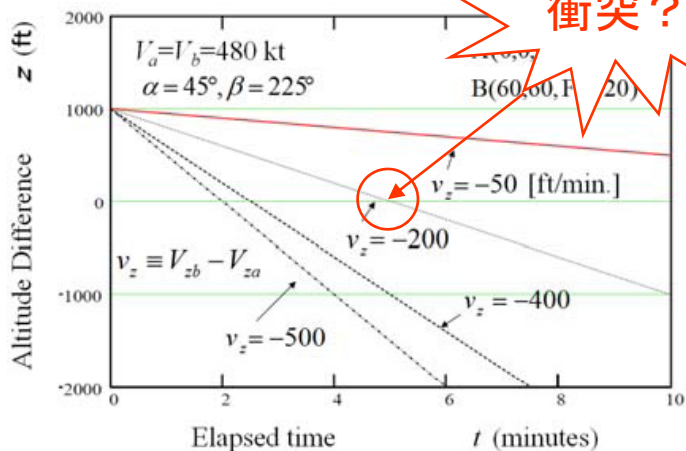
$$V_H = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$R_H = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$t_{\min} = -\frac{\vec{V}_H \cdot \vec{R}_H + K_p^2 v_z z}{V_H^2 + K_p^2 v_z^2 + K_t^2} \quad 39$$

# 相対距離と難度値

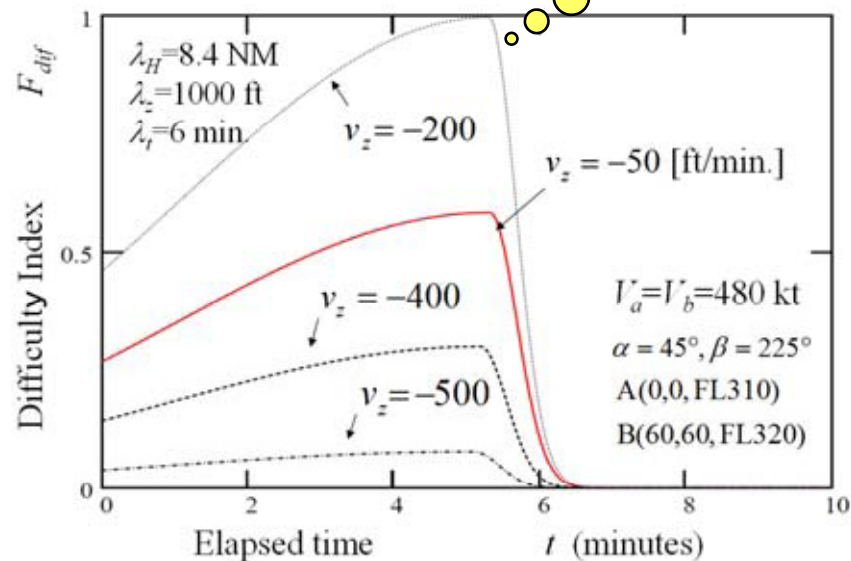
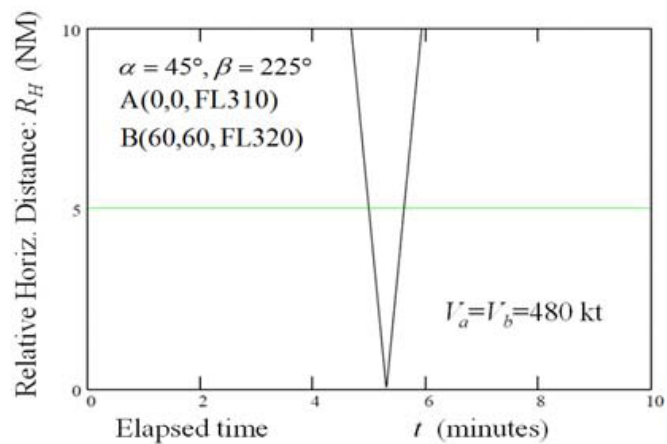
衝突?



$$v_x = V_b \sin \beta - V_a \sin \alpha$$

$$v_y = V_b \cos \beta - V_a \cos \alpha$$

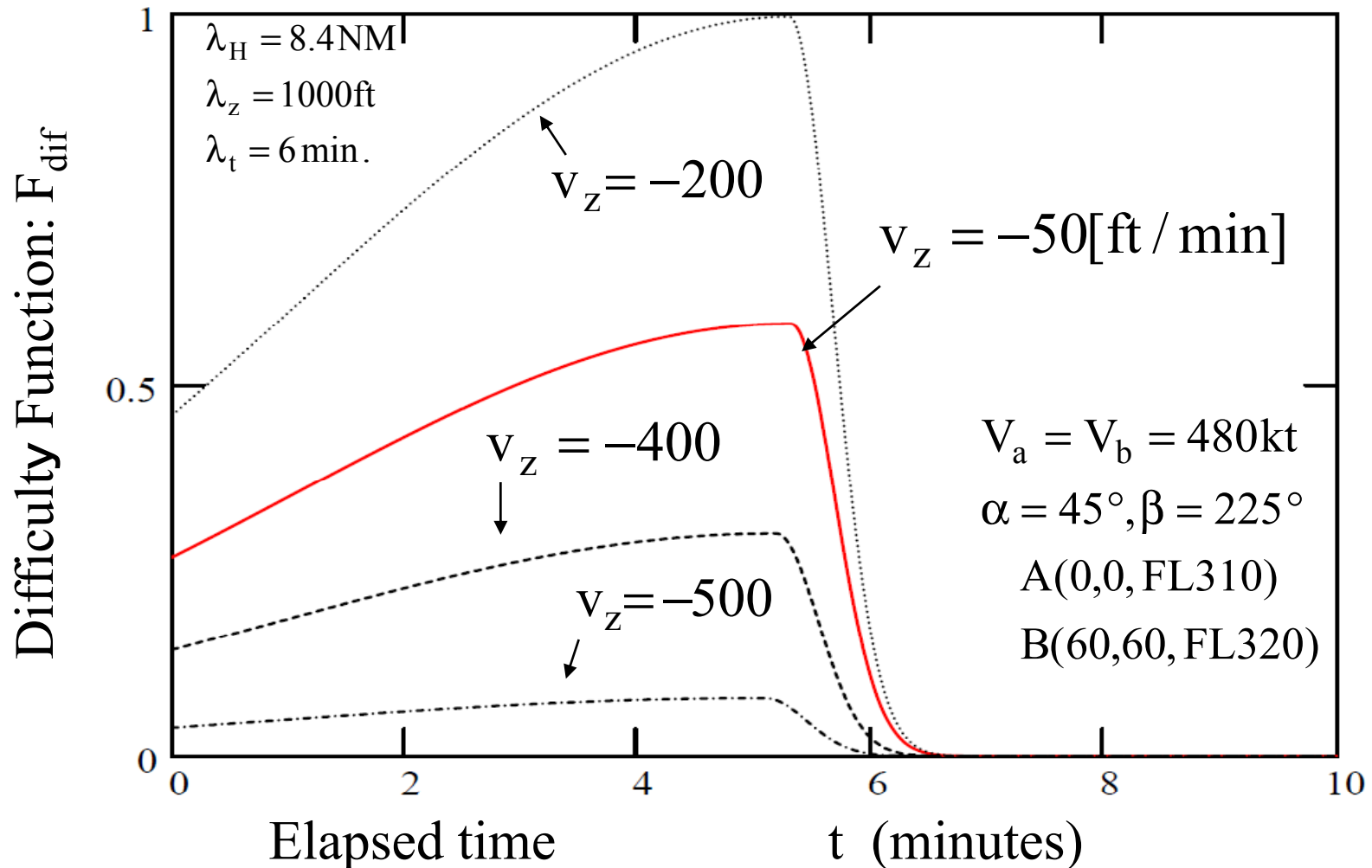
潜在的コンフリクト  
検出





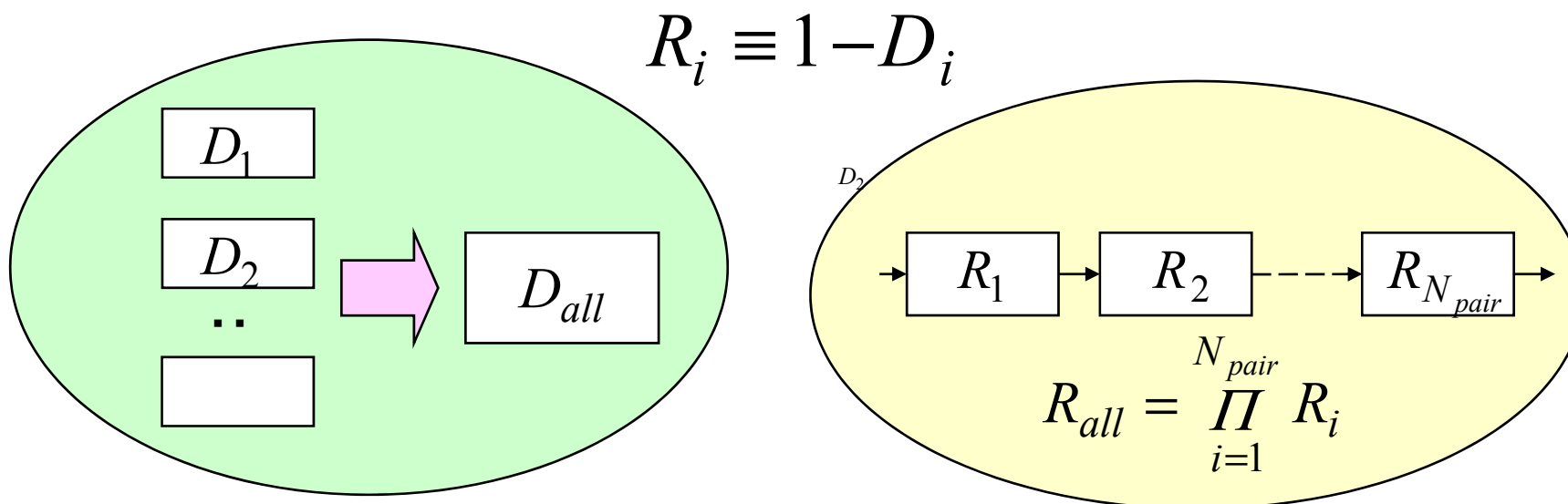
# 3D難度指標

( $k_h=k_z=k_t=2, \lambda_t=6$ 分)



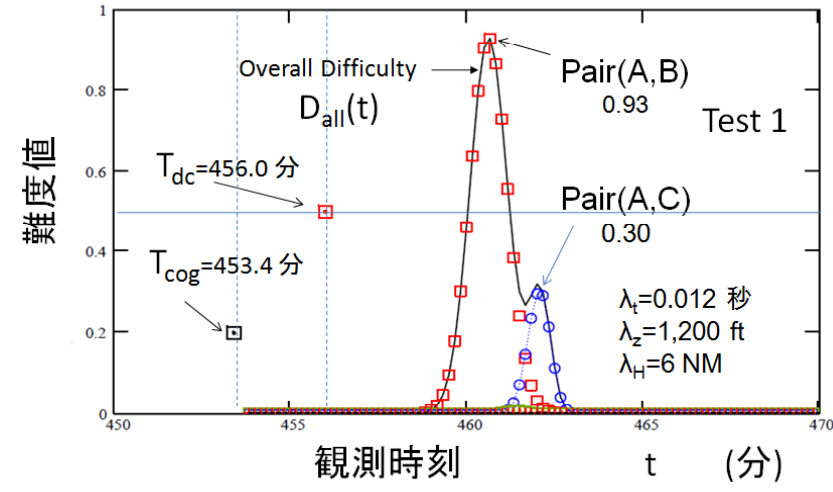
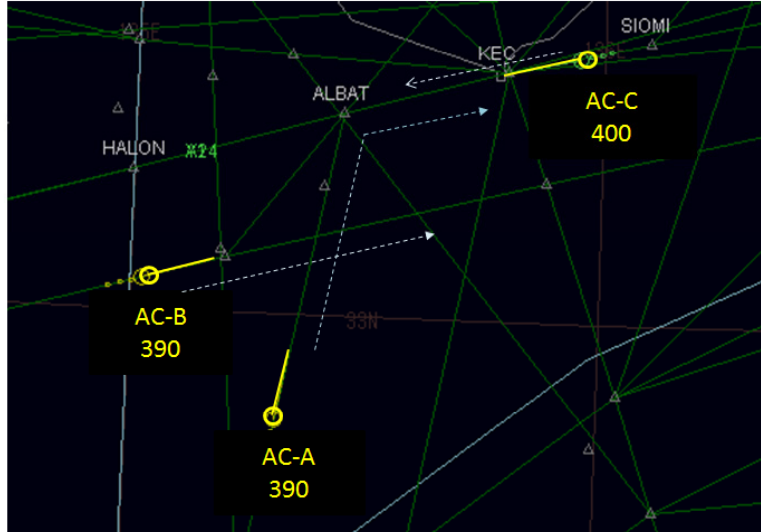
# 空域難度への統合方法

■ 航空機対*i*の難度:  $D_i$



$$D_{all} \equiv 1 - R_{all} = 1 - \prod_{i=1}^{N_{pair}} (1 - D_i)$$

# 近接認知実験シナリオと難度変化

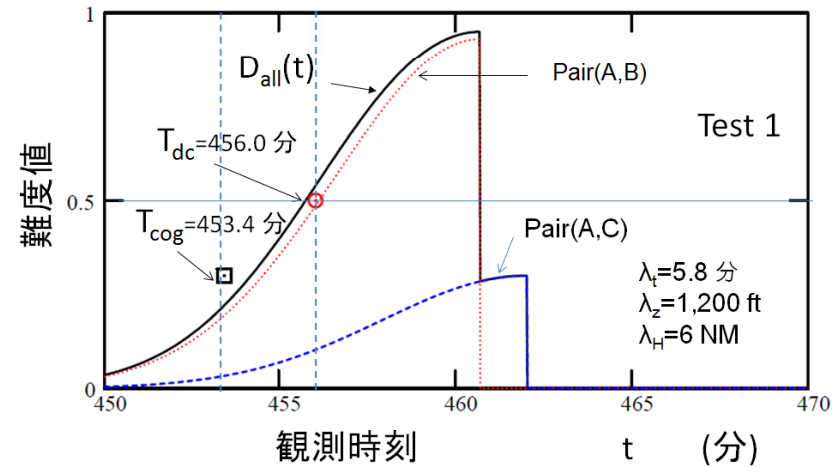


## 認知調査の概要



認知時刻:  $T_{cog}$   
 =管制指示発出可能性  
 を認識した時刻

意思決定時刻:  $T_{dc}$   
 =管制指示発出  
 を決めた時刻



# まとめ

- 複雑さ (Complexity) は管制官の作業負荷 (Workload) とともに半世紀ほど研究されてきた。双方とも確立された定義はなさそうだが、多くの報告例がある。
- 今でも目的に応じ様々な指標が提案されている。それらの中から、筆者らの研究を含めて幾つかの方法を紹介した。
- 複雑さの指標はデータから定量的に計算できるものが望ましい。現在、利用可能なデータは主として航空機の軌道情報である。

# 参考文献(1)

- [1] Hilburn, B., "Cognitive Complexity in Air Traffic Control- A Literature Review," EEC Note No.04/04, EUROCONTROL, March 2004.
- [2] Meckiff, C., Chone, R. and Nicolaon J-P., "The Tactical Load Smoother for Multi-Sector Planning," The 2nd USA/Europe ATM R&D Seminar (ATM Seminar), Orlando, Dec. 1998.
- [3] Sridhar B., Sheth K. S. and Grabbe S., "Airspace Complexity and Its Application in Air Traffic Management," The 2nd ATM Seminar, Dec. 1998.
- [4] Delahaye, D. and Puechmorel S., "Air Traffic Complexity: Towards Intrinsic Metrics," The 3<sup>rd</sup> ATM Seminar, Napoli, June 2000.
- [5] Lee K., Feron E. and Pritchett A., "Air Traffic Complexity : An Input-Output Approach", The 7th ATM Seminar, 2007.

## 参考文献(2)

- [6] Mondoloni S. and Liang D., "Airspace Fractal Dimensions and Applications," The 4th ATM Seminar, 2001.
- [7] Prandini M., Putta V. and Hu J., "Air Traffic Complexity in Advanced Automated Air Traffic Management Systems," Proc. of the 9th Innovative Research Workshop & Exhibition, pp.3-10, 2010.
- [8] Complexity Metrics for ANSP Benchmarking Analysis, Report commissioned by the Performance Review Commission, EUROCONTROL, April 2006.
- [9] Li, L., Cho, H. and Hansman, R. J., "Aircraft-Based Complexity Assessment for Radar Controllers in the Multi-Sector Planner Experiment," The 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Sep. 2010.

## 参考文献(3)

- [10] Nagaoka, S. and Brown, M., "A Review of Safety Indices for Trajectory-Based Operation in Air Traffic Management," *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 12, No. APISAT-2013, pp. a43-a49, 2014.
- [11] 長岡 栄, ブラウン マーク, “近接パラメータによる航空交通管制の難度指標—軌道変更点を用いる計算法—,” 電子情報通信学会, 信学技報SANE2015-33, 2015年7月.
- [12] Nagaoka, S. and Brown, M., "Constructing an Index of Difficulty for Air Traffic Control Using Proximity Parameters," *Procedia Engineering*, 99 (2015), pp.253-258, Feb. 2015.
- [13] 長岡栄, “航空管制における空域複雑性に関する研究の動向,” 「航空管制」, No. 6, pp.44-53, 2014.
- [14] Wang, H., Wen, R. and Zhao, Y., “Topological Characteristics of Air Traffic Situation,” 11<sup>th</sup> USA/Europe ATM Seminar, 2015.

## 参考文献(4)

- [15] Nagaoka, S. Hirabayashi, H. and Brown, M., " Integrating Pairwise Proximity-based Air Traffic Control Difficulty Indices into an Airspace Index," 7th APISAT 2015, Carns ,Australia, Nov. 2015.
- [16] Hirabayashi, H., Brown, M., and Nagaoka, S., "Visualization of Airspace Complexity based on Air Traffic Control Difficulty," *Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, ICAS 2016-0160, ICAS2016, Daegu, 2016.
- [17] Nagaoka, S. Hirabayashi, H. and Brown, M., " Method for Scale Parameter Determination of Air Traffic Control Difficulty Index Based on Survey Results of Controller's Recognition for Aircraft Proximities," 8th APISAT 2016, Toyama, Nov. 2016.
- [18] 長岡 栄, 平林博子, ブラウンマーク, "航空機対の近接認識調査による航空管制の難度指標の較正," 信学技報SSS2016-3, May 2016.
- [19] 長岡 栄, 平林博子, ブラウンマーク, " 管制官の近接認知試行に基づく管制難度指標の一検討," 信学技報SANE2016-108, Jan 2017.





ご清聴ありがとうございました

*Any Questions?*