



University of Tsukuba  
筑波大学

日本機械学会 交通・物流部門  
講習会「交通・物流機械の自動運転2018」  
東京理科大学 森戸記念館 2018年10月26日

# 自動運転におけるヒューマンファクター的課題

筑波大学 副学長・理事

稲垣敏之

[inagaki.toshiyuki.gb@un.tsukuba.ac.jp](mailto:inagaki.toshiyuki.gb@un.tsukuba.ac.jp)

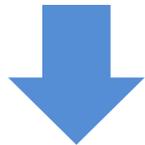
<http://css.risk.tsukuba.ac.jp/project/kakenhiS.html>

# 航空機における自動化の進展

1900年代初頭は、操縦の困難さをパイロットの練度で克服

- パイロットの負担が大
- ヒューマンエラーが入り込む余地

解決策のひとつは、**操縦操作の自動化**

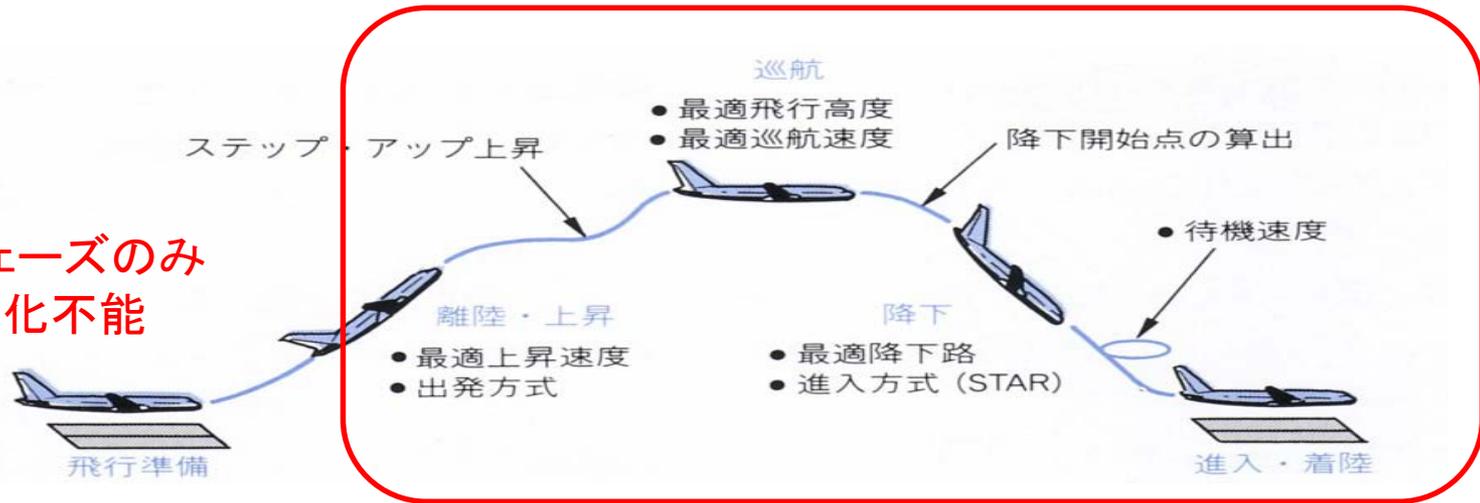


**飛行管理も自動化** (機体重量や気象条件に合った離陸速度・上昇速度・巡航高度・降下開始点等の決定)

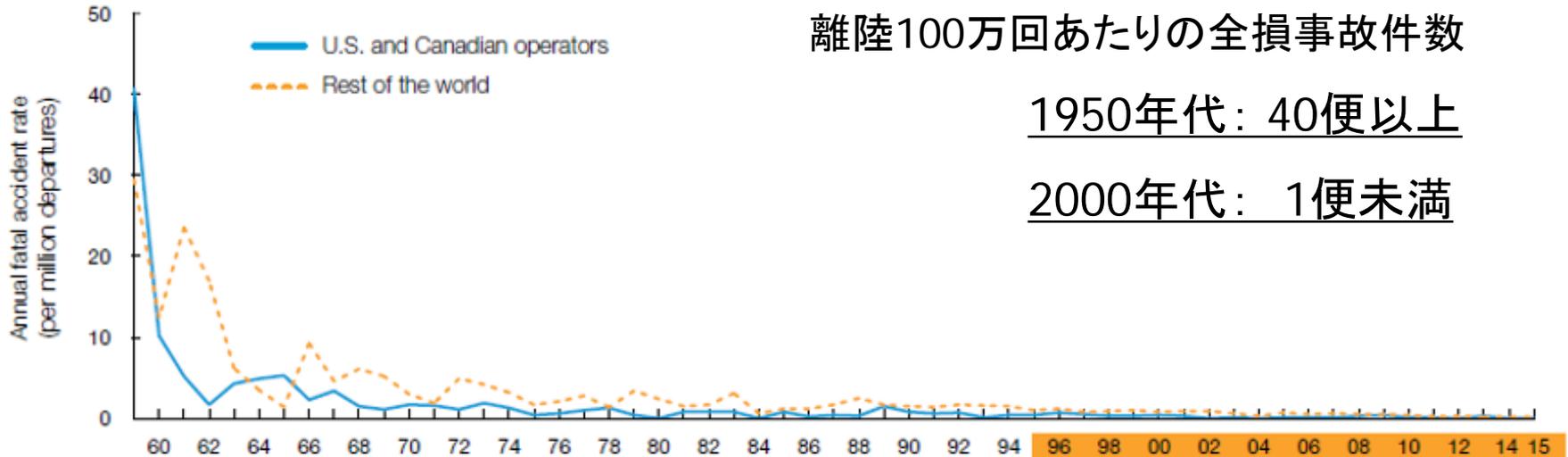
- 年間飛行時間 800-900時間の国際線パイロットの場合、手動操縦は 3時間程度

# 高い知能と自律性を備えた機械がもたらす光と影(1)

離陸フェーズのみ  
自動化不能



自動化



離陸100万回あたりの全損事故件数

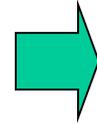
1950年代: 40便以上

2000年代: 1便未満

# 高い知能と自律性を備えた機械がもたらす光と影(2)

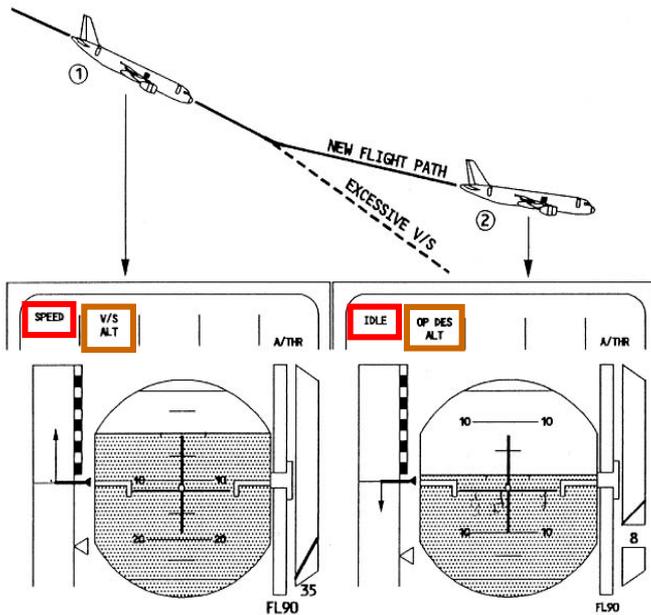
## 賢い機械

- 状況センシング
- 状況理解
- 何をなすべきかを決定し、実行



状況認識の喪失  
機械への過信と不信の交錯  
オートメーションサプライズ

(稲垣 2012)



## 状況認識: 3つのレベル

レベル1: 何かが起こっていることに**気づく**

レベル2: その**原因を特定**できる

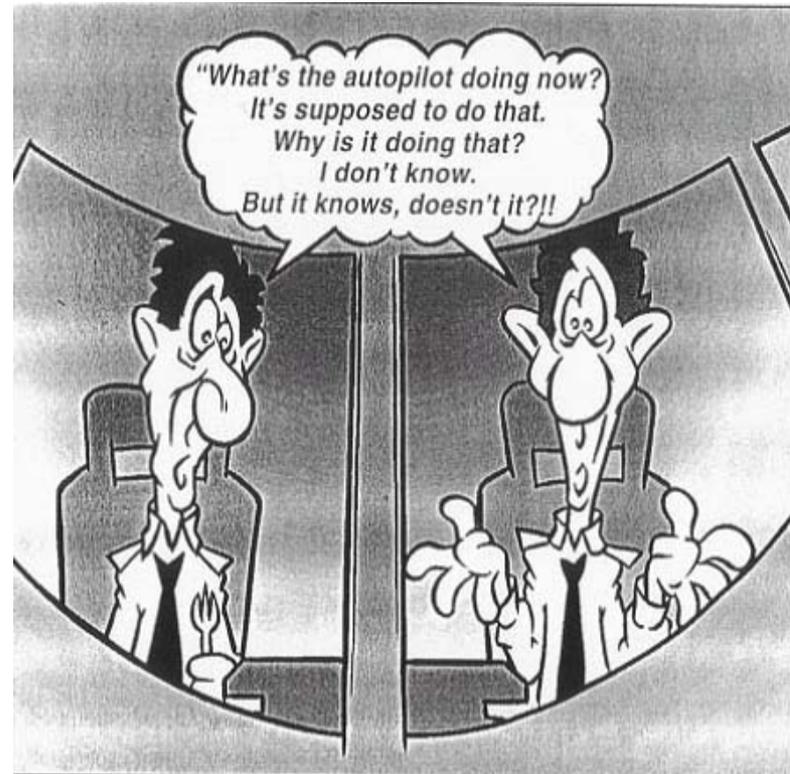
レベル3: これからの事態の**推移が予測**できる

(Endsley 1995)

# 機械の状況判断・意図が分からないまま、機械を信頼

オートパイロットが  
なぜこんなことをするのか  
私にはわからない。

でも、オートパイロットは  
わかったうえで  
やっているのだろう。



(FAA 1995)

## 監視制御

システムによる制御の適切性を常時監視し、必要に応じて介入



システムを正しく理解し適切に使うための教育・訓練が不可欠

# 自動化はパイロットの技量を低下させる？

- スキポールで、トルコ航空 1951 便が墜落 (2009.02)
- ブラジル沖大西洋上で、エールフランス 447 便が墜落 (2009.06)
- サンフランシスコで、アジアナ航空 214 便が着陸失敗 (2013.07)



Photo: CNN

# グラスコクピット機におけるヒューマンファクター課題

1. 自動化システムの機能や論理が分かりにくい  
(状況認識の喪失、オートメーションサプライズ、教育訓練の長時間化)
2. 自動化システムの作動状態が分かりにくい  
(状況認識やモード認識の喪失、等：不十分なHMI設計も一因)
3. 自動化システムの使用により、本来低いワークロードがさらに低減  
(退屈、危機感の喪失)
4. 自動化システムの使用により、本来高いワークロードがさらに増大  
(無理な決定や行動、及びそれに伴うヒューマンエラーの誘発)
5. 自動化システムを使うべきであるのに、使おうとしない  
(不信、規則違反)
6. 自動化システムを使ってはいけないうちに、使おうとする  
(過信、過度の依存、規則違反)
7. 自動化システムを使用し続ける間に技量の低下が起こる？  
(アップセットリカバリ能力の低下・欠如？)

# ひとくちに「自動運転」といっても、形態は多種多様



Photo: BMW



Photo: Volvo



Photo: Zoox

# 自動運転レベル (Levels of Driving Automation: LoDA)

ドライバーは動的運転タスクの一部を担当（環境及びシステムの監視ならびに必要な応じての介入はドライバーの役目）

1	Driver Assistance	特定の運行設計領域においてシステムは縦方向又は横方向のいずれか一方の車両運動制御を担当。ドライバーは動的運転タスクの残余分を担当。
2	Partial Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムは縦方向及び横方向の車両運動制御を担当。ドライバーは動的運転タスクの残余分と監視制御を担当。

システムは動的運転タスクのすべてを担当

3	Conditional Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕をもってドライバーに運転交代を要請。ドライバーはその要請に適切に対応すること。
4	High Driving Automation	特定の運行設計領域においてシステムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。
5	Full Driving Automation	運行設計領域に限定されることなく、システムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。

# レベル2の自動運転 (Partial Driving Automation)

システム： 縦方向と横方向の車両運動制御を担当。

ドライバー： 動的運転タスク残余分と監視制御を担当。



Photo: BMW

## 【監視制御 (supervisory control)】

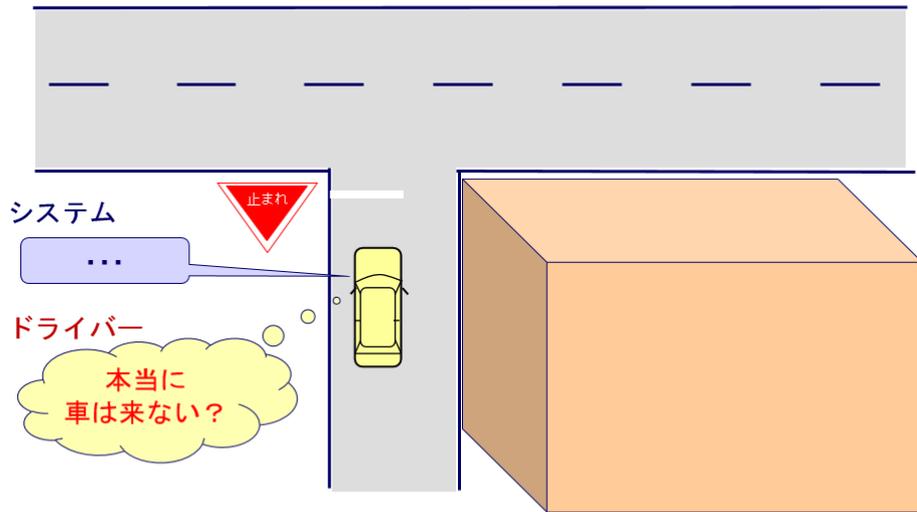
- 人が何をなすべきかを決め、システムに指示
- システムは、人の指示に沿って制御を実行
- 人は、システムによる制御が適切かどうかを**継続的に監視**。場合に応じて**適時に介入**

システムの動作原理、能力限界、サブシステム間の相互干渉等に関する正確な理解が必要

← HMI のデザインが鍵

- ドライバーが監視制御をしていないと思えるときはどうする？

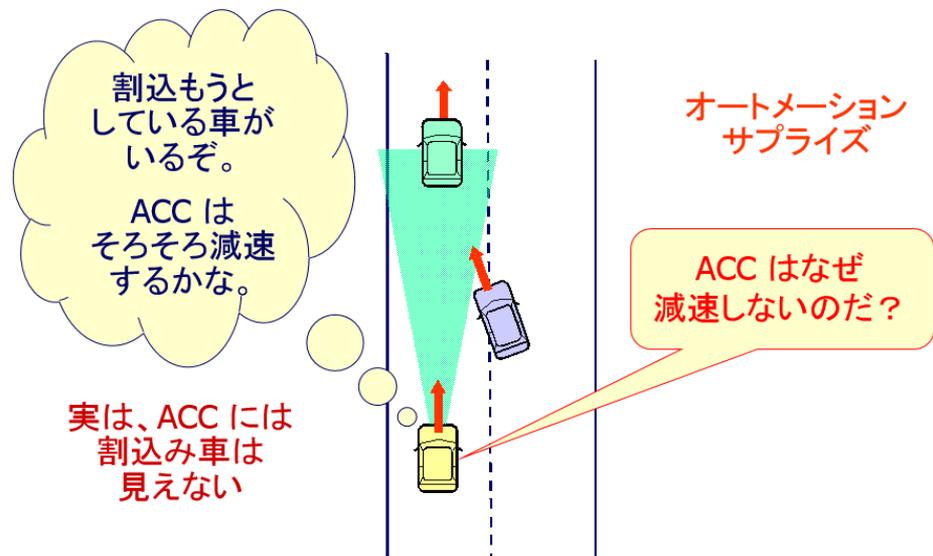
## 注意喚起も警報も出ていないから大丈夫？



- システムは作動している？  
していない？

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

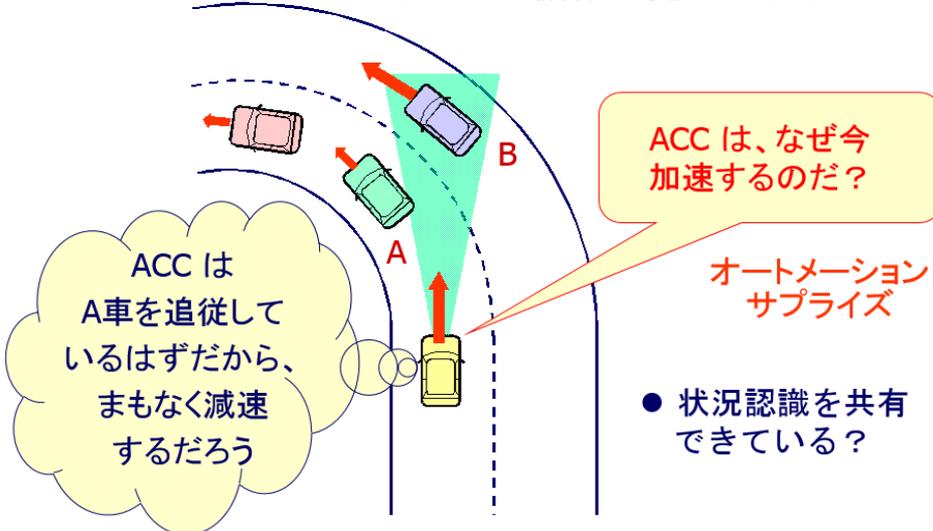
## 機械の能力限界が分からないと...



- 能力限界はどこにある？

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

## 人が見ているもの ≠ 機械が見ているもの

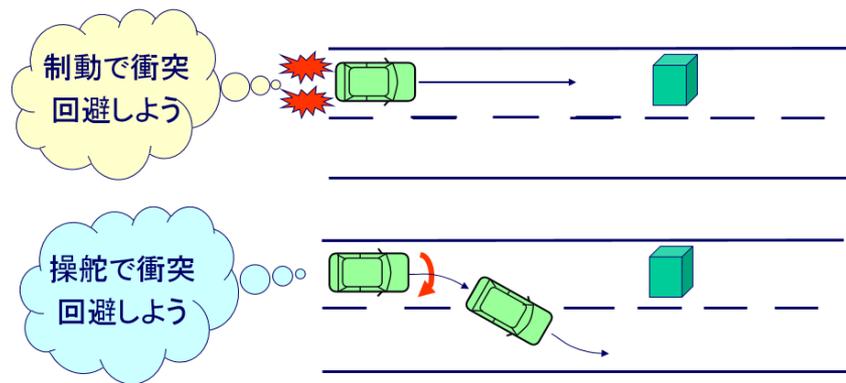


実は、ACCが見ているのはB車

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

## 「人が見ているもの = 機械が見ているもの」だが...

両方で「ものの考え方」が違っていると、オートメーション・サプライズ



- これから何をしようと考えている？  
(意図)

(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

# レベル3の自動運転 (Conditional Driving Automation)

システム： 走行環境の監視を含め、全ての動的運転タスクを担当。  
作動継続が困難なとき、十分な時間余裕をもって  
ドライバーに運転交代を要請。

ドライバー： システムの要請に適切に対応すること。



Photo: Volvo

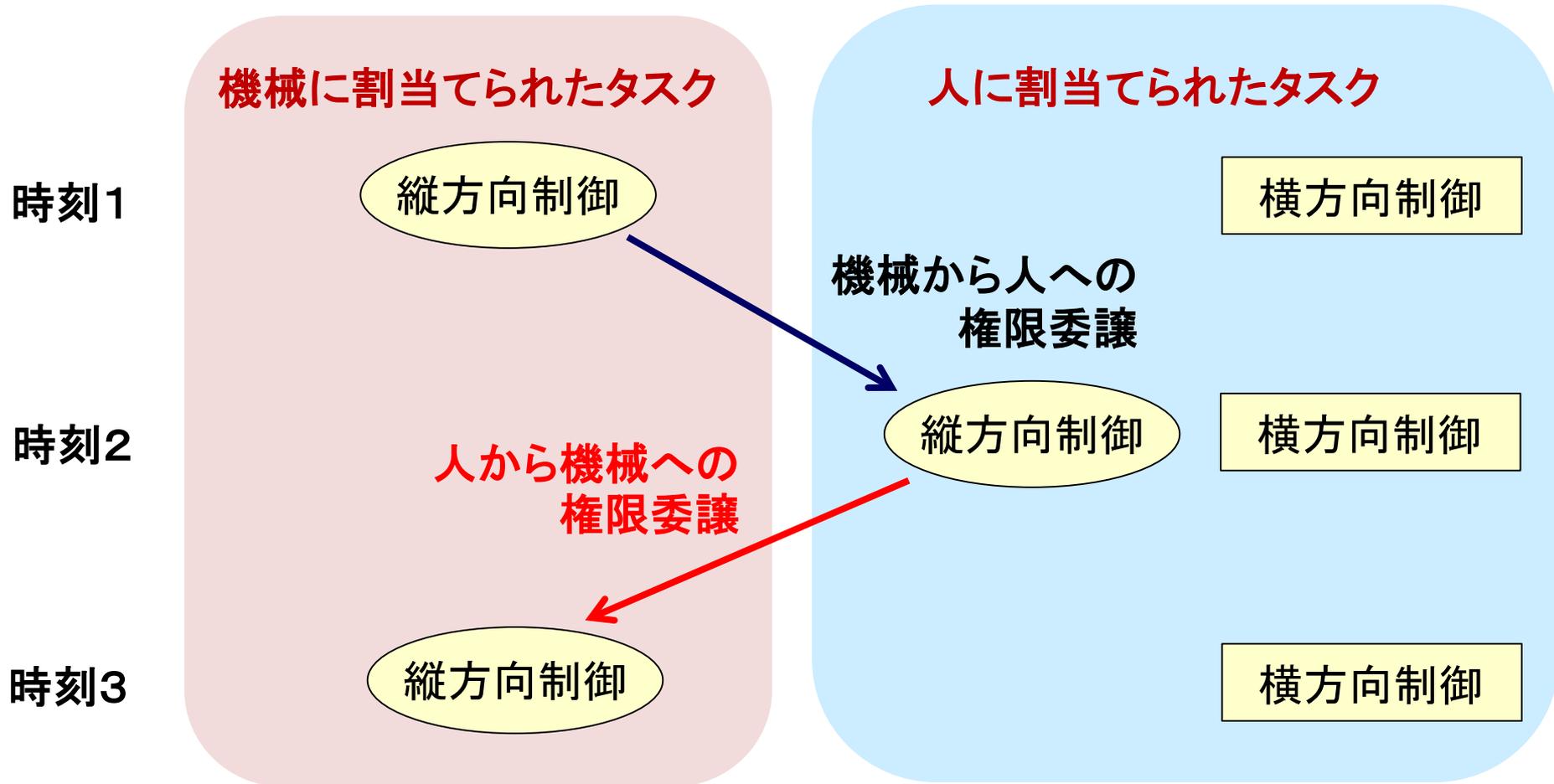
- 「十分な時間余裕」とはどれくらい？
- 運転交代を要請して一定時間経過後システムは機能停止してよい？
- レベル3の自動運転の狙いは何？

- 「システムの手に余るときは、人に対応させよう」という設計思想は妥当か？
- ドライバーは、**結果予見義務**／**結果回避義務** (過失責任) から解放されているのか？

# 運転主体の交代: 権限委譲 (trading of authority)

(1) 誰から誰への権限委譲?

(2) 権限委譲の要否と実行タイミングを決定・実行するのは誰?



# 機械の判断による、機械から人への権限委譲は 成功するとは限らない！

高高度を飛行中に対気速度に矛盾が生じ、オートパイロット解除。  
その後のパイロットの操作が不適切であったため異常姿勢に陥り、墜落。



# 機械から人への権限委譲を行うためのRTI

ドライバー：運転操作は行わず、走行環境の監視もしていない。  
システムから運転交代を求められたとき、  
瞬時に状況を見極め、適切に車両を制御できる？

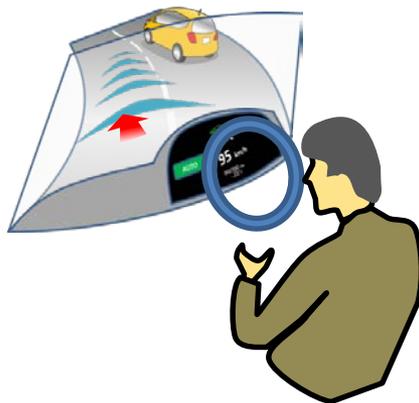


Photo: Volvo

RTI  
(request to intervene)



RTI に対して適切に  
対応してくれれば  
よいのだが・・・



RTI を発しても  
ドライバーが対応して  
くれなかったら・・・

# 自動化レベル (Levels of Automation: LoA)

レベル	定義	
1	システムの支援なしに、すべてを人が決定・実行。	人に最終決定権
2	システムはすべての選択肢を提示し、人はそのうちのひとつを選択して実行。	
3	システムは可能な選択肢をすべて人に提示するとともに、ひとつを選んで提案。それを実行するか否かは、人が決定。	
4	システムは可能な選択肢の中からひとつを選び、それを人に提案。それを実行するか否かは、人が決定。	
5	システムはひとつの案を人に提示。人が了承すれば、システムが実行。	
6	システムはひとつの案を人に提示。 人が一定時間内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。	機械に最終決定権
6.5	システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。	
7	システムがすべてを行い、何を実行したか人に報告。	
8	システムがすべてを決定・実行。人に問われれば、何を実行したかを報告。	
9	システムがすべてを決定・実行。 何を実行したかを人に報告するのは、報告の必要性をシステムが認めたときのみ。	
10	システムがすべてを決定し、実行。	

## 自動化レベル1: ナイトビュー

(1) システムの支援なしに、すべてを人間が決定・実行

状況理解に有用な情報は提供するが、何をすべきかについて助言はしない。行為実行に関する支援もしない。



車載の暗視カメラで捕らえた前方映像を解析し、その中に歩行者が映っていることを検知したとき、歩行者に枠をつけてディスプレイに表示（注意喚起）

## 自動化レベル5: Advanced TCAS

(5) システムはひとつの案を人に提示。  
人が了承すれば、システムが実行。

機械からの提案に賛成ならば、人は、その実行を機械に指示

Climb が妥当です。  
実行してよろしい  
ですか？

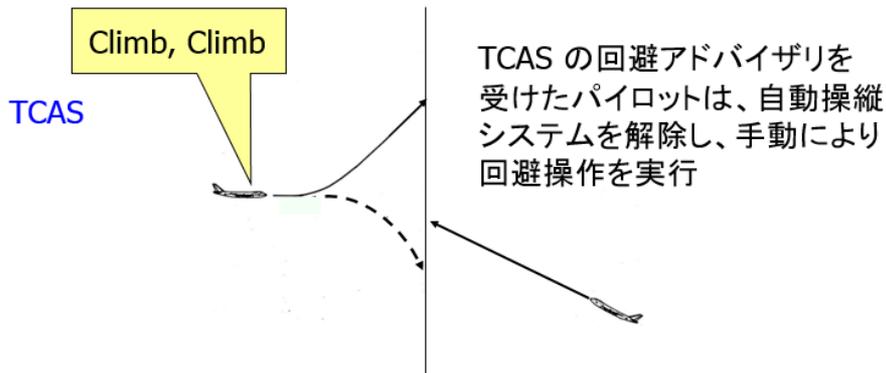
パイロットが「OK」ボタンを  
押し、システムが回避  
操作を開始

Advanced  
TCAS

## 自動化レベル4: TCAS

(4) システムは可能な選択肢のうちからひとつを選び、それを人に提案。それを実行するか否かは、人が決定。

機械は助言をするが、場合によっては、人は助言を無視できる



## 自動化レベル6: 急減圧検知時の自動降下

(6) システムはひとつの案を人に提示。  
人が一定時間以内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。

機械が人に提案を行ったとき、**限られた時間内**に人が明確な拒否を表明しない限り、機械はその提案を実行



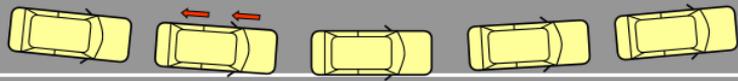
- ① システムが客室急減圧を検知
- ② システムは乗員に告知し、緊急降下のカウントダウン開始
- ③ カウントダウン終了までに乗員が拒否権を発動しなければ、システムは緊急降下を実行

## 自動化レベル 6.5: 車線逸脱防止システム

(6.5) システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。

機械は、自分の意図を人に伝えると同時に、それを実行

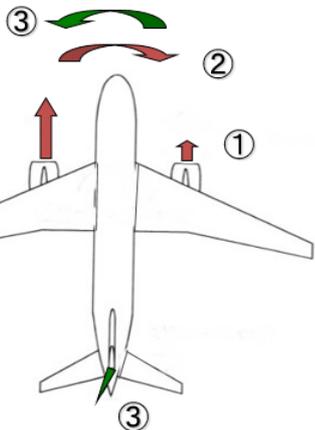
クルマが車線を逸脱しそうになると、警報と表示でドライバーに知らせると同時にステアリングを修正するトルクを発生



## 自動化レベル 7: エンジン推力不均衡の補償

(7) システムがすべてを行い、何を実行したか人に報告。

機械がよいと思ったことは、即時実行。人へは事後報告のみ



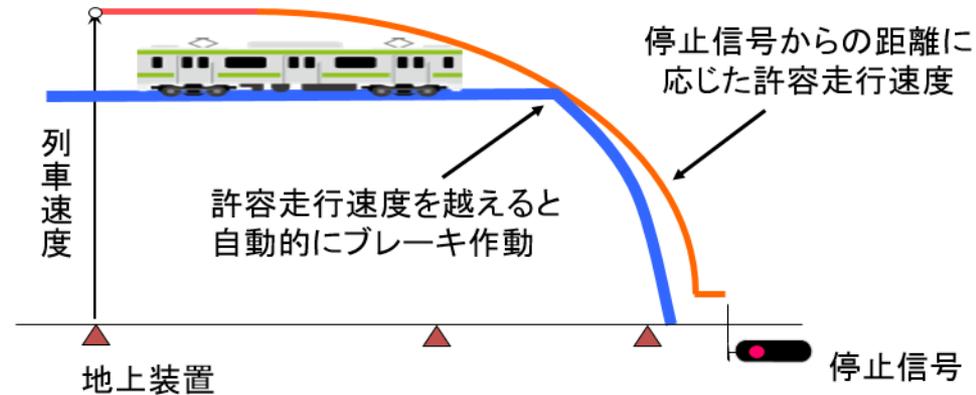
- ① 第2エンジン(右主翼側)故障
- ② 左右エンジンの推力不均衡により機首が右に振れる
- ③ TACが方向舵を制御して機首を左に向ける力を作り、②の力を打消して機首の振れを抑制

TAC (thrust asymmetry compensation)

## 自動化レベル 6.5: ATS-P

(6.5) システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。

機械は、自分の意図を人に伝えると同時に、それを実行



# 運転交代要請 (RTI) メッセージのデザイン

基本形 (SAE J3016): T秒以内に運転を交代してください



他のメッセージの可能性は？

自動化レベル (LoA) を参考に考案すると...



以下のような代替案が...

- |             |  |
|-------------|--|
| LoA 5 RTI   | 運転を交代してください。運転が引継がれたことが確認でき次第、自動走行モードを解除します    |
| LoA 6 RTI   | T秒以内に運転を交代してください。交代できない／交代したくない場合は拒否権を発動してください |
| LoA 6.5 RTI | 直ちに運転を交代してください。今、まさに自動走行モードを解除しようとしているところです    |

# 運転交代要請 (RTI) が無視／拒否されたら？

Baseline 「T 秒以内に運転を交代してください」 ← SAE J3016

無視: T 秒後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

LoA 5 「運転を交代してください。運転が引継がれたことが確認でき次第、自動走行モードを解除します」

無視: T 秒経過後もドライバーによる運転行動が確認できないため、システムが最小リスク状態へ向けて制御継続

LoA 6 「T 秒以内に運転を交代してください。交代できない／交代したくない場合は拒否権を発動してください」

無視: T 秒後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

拒否: システムが最小リスク状態へ向けて制御継続

LoA 6.5 「直ちに運転を交代してください。今、まさに自動走行モードを解除しようとしているところです」

無視: RTI 発出直後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

# 効用関数を用いた RTI メッセージデザインの比較

$$U(\text{Baseline}) = a P(\text{RD}|\text{Baseline}) - c P(\text{NR}|\text{Baseline})$$

$$U(\text{LoA 5}) = a P(\text{RD}|\text{LoA 5}) + b P(\text{NR}|\text{LoA 5})$$

$$U(\text{LoA 6}) = a P(\text{RD}|\text{LoA 6}) + b P(\text{VT}|\text{LoA 6}) - c P(\text{NR}|\text{LoA 6})$$

$$U(\text{LoA 6.5}) = \underline{a} P(\text{RD}|\text{LoA 6.5}) - c P(\text{NR}|\text{LoA 6.5})$$

where

RD: driver resumes driving      NR: no response was given to the RTI

VT: driver vetoes the RTI

$a$  : benefit of successful fallback by the driver

$b$  : benefit of successful fallback by the automation

$c$  : cost arising out of the state in which the vehicle is controlled neither by the automation or the driver

(Inagaki & Sheridan 2018)

# レベル3の自動運転は実現すべき目標たり得ず

$$U(\text{LoA } 6.5) < U(\text{Baseline}) < U(\text{LoA } 6) < U(\text{LoA } 5)$$

- LoDA 3 with Baseline RTI は非合理的
- LoDA 3 with LoA 5 RTI が最適だが、LoDA 3の範疇外
- LoDA 3 with LoA 5 RTI は、LoDA 4 にも一致しない
- 前2項は、SAE J3016 (2016年版)の不完全性を示唆
- LoDA 3 with LoA 5 RTI は、2014年版 High Automation

T Inagaki & TB Sheridan (2018).

A critique of the SAE conditional driving automation definition, and an analyses of options for improvement. *Cognition, Technology & Work*.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0471-5>

# 効用最大(リスク最小)の RTI

運転を交代してください。運転が引継がれたことが  
確認でき次第、自動走行モードを解除します (LoA 5 RTI)



10秒経過後も、ユーザーが運転していることを確認できない



システムは「権限委譲は不可能」と判断し、  
自身の機能範囲内で車両停止へ向けて制御を実行

上記形態は、「レベル3の自動運転」の範疇外

➡ レベル3の自動運転は、実現すべき目標として妥当か？

(Inagaki & Sheridan 2018)

# SAE J3016の2016年版の不完全性を解消するには

## 【方法1】

SAE J 3016 2016年版	
LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Driving Automation
LoDA 3	Conditional Driving Automation
High Automation (2014)	
LoDA 4	High Driving Automation
LoDA 5	Full Driving Automation

## 【方法2】 LoDA 3の定義改訂

特定の運行設計領域においてシステムがすべての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕を持ってドライバーに運転交代を要請。ドライバーがシステムの要請に対応しないときは、システムが車両を最少リスク状態に誘導



### (現在)

特定の運行設計領域においてシステムが全ての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なとき、システムは十分な時間余裕をもってドライバーに運転交代を要請。ドライバーはその要請に適切に対応すること。

# 自動運転車の安全技術ガイドライン

## (2) 自動運転システムの安全性

- ⑤ レベル3の自動運転車については、次の要件を満たす自動運転システムであること。
- 設定されたODDの範囲外となった場合や自動運転車に障害が発生した場合等、自動運転の継続が困難であるとシステムが判断した場合において、運転者に対し介入のための警告(運転権限の委譲)を行うこと
  - 運転者に運転権限が委譲されるまでの間、システムの機能を維持又はシステムの機能を制限した状態でシステムの稼働を継続させるフォールバック(縮退運転)を行うことにより、安全に自動運転を継続すること
  - システムから運転者に運転が引き継がれたか否かを判別することができること
  - システムから運転者に運転が引き継がれない場合において、車両を自動で安全に停止させるミニマム・リスク・マヌーバー(MRM)を設定すること

# レベル3の自動運転におけるドライバーモニタリング



ドライバーがシステムから運転操作を引継ぐことができる状態にあるか否かを監視し、「必要に応じて注意喚起／警報を発する」方式が検討されているが、それでもドライバーの状態が改善されなかったらどうする？

- 「対応しないのはドライバーの責任」と考えてRTIを発出  
… ドライバーが対応しなければ、車は無制御状態へ
- RTIを発出するのをあきらめて、システムが対応  
… LoDA 4
- RTIを発出し、ドライバーが対応しなければ、システムが対応  
… LoDA 3 + LoA 5 RTI

➤ いずれの方式でも、ドライバーモニタリングは不要では？

# レベル4の自動運転 (High Driving Automation)

システム： 全ての動的運転タスクを担当。  
作動継続が困難なときも、システム自身で適切に対応。



Photo: Volvo

- 「システムだけで対応できる」とは、「ドライバーに関与させない」こと？
- 何が起きているか、システムがどのように対応しようとしているか等はドライバーに知らせる？ 知らせない？

## 【移動サービスへの応用可能性】

- 道路交通に関する条約(ジュネーブ条約)との整合性を図ったうえで、限定的な地域において無人自動運転移動サービスを実現させることができれば、高齢者のモビリティ向上へ…

# 自動運転における人と機械の協調と共生(1)



Photo: BMW



Photo: Volvo



Photo: Zoox

- 自動運転レベルが高いものが「レベルが高い」のではない
  - ドライバーの役割と責任を、社会やドライバーは認識すべし
- 
- 監視制御は、楽な仕事ではないのだが...
  - 高機能なシステムの動作原理や能力限界を知らないと、システムを正しく監視することはできないのだが...
  - 権限の的確な引継ぎには、瞬時の状況判断が不可欠だが...

# 自動運転における人と機械の協調と共生(2)

HMI が提供すべきものは・・・

- 機械と状況認識を共有できる手がかり
- 機械の判断の根拠が分かる手がかり
- 機械の意図が分かる手がかり
- 機械の能力限界を知る手がかり
- 機械の作動状態が分かる手がかり



(Inagaki 2010; 稲垣 2012)

- 不適切な信頼(不信／過信)の低減
- 過信に基づく依存(過度の依存)の低減
- モード認識喪失やオートメーションサプライズの低減

さらに踏み込んでいうならば・・・

自然な形でドライバーモニタリングの役割を担う HMI と制御系の構築

# レベル3以上の自動運転の実現を目指すときの 法律上・運用上の課題

1. ドライバーには、どのようなセカンダリアクティビティ(運転以外の行為)を認めるか
2. 自動運転システムを使用して走行中の車両が規範を遵守するものであることをどのように担保するか
3. 自動運転システムを使用して走行中の車両が規範を逸脱した際のペナルティのあり方をどのように考えるか
4. 自動運転システムを使用して走行中のデータの保存とその利用はどうあるべきか
5. 他の交通主体との関係はどうあるべきか
6. 自動運転に関する社会受容性をどのように醸成するか