



University of Tsukuba  
筑波大学

日本交通心理学会第83回大会  
自動車教習所セミナー  
2018年6月15日

# 人と機械の共生のデザイン

## 自動運転システムとドライバーの関係

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>

<http://www.css.risk.tsukuba.ac.jp>

# 先進安全自動車(ASV)推進計画 1991~

## ①ドライバーの過信

## ②運転支援システムの複合化

### ドライバーの過信に関する検討



### 運転支援システムの複合化に関する検討



## ③ドライバー異常時対応システム

### ドライバー異常時対応システムに関する検討



# 代表的なASV技術 (その1)

## ACC (Adaptive Cruise Control)

一定速で走行する機能および車間距離を制御する機能を持った装置

### 先行車なし

設定した速度で走行



### 先行車あり

車間距離を一定に保って走行



先行車に続いて停止

## 衝突被害軽減ブレーキ

前方の障害物との衝突を予測して警報し、衝突被害を軽減するために制動制御する装置

### システムあり



▲ 警報により自分でブレーキ



警報に気付かない時は…



▲ 自動ブレーキ

ブレーキの制御

### システムなし

発見遅れにより  
遅いタイミングで  
ブレーキ



## レーンキープアシスト

走行車線の中央付近を維持するよう操作力を制御する装置

### システムあり

車線維持支援



操舵支援



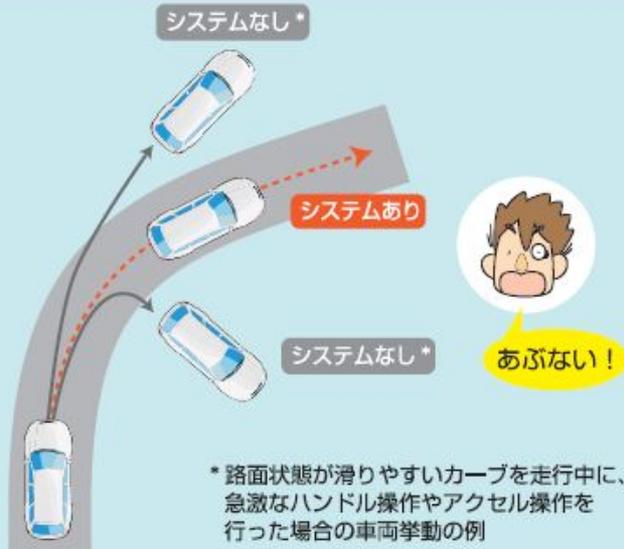
運転負担軽減  
車線逸脱警報



# 代表的なASV技術 (その2)

## ESC (Electronic Stability Control)

車両の横滑りの状況に応じて、制動力や駆動力を制御する装置



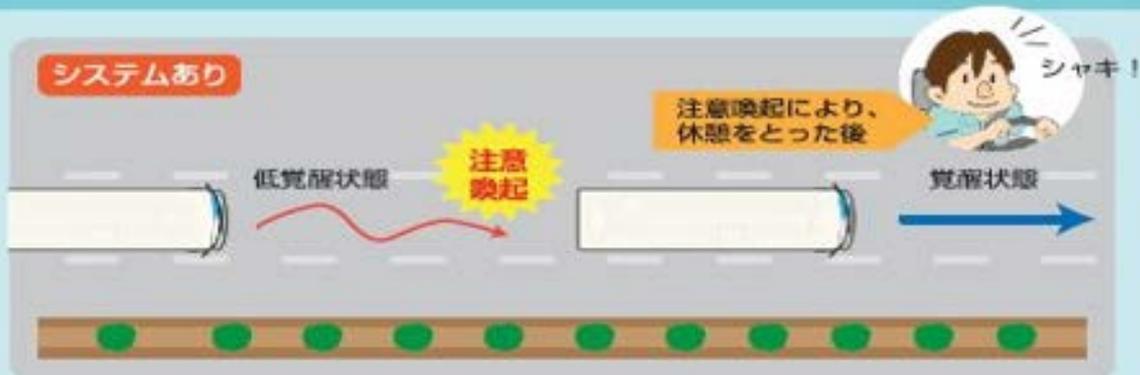
## 駐車支援システム

後退駐車時、ハンドルを自動制御して後退駐車を補助する装置

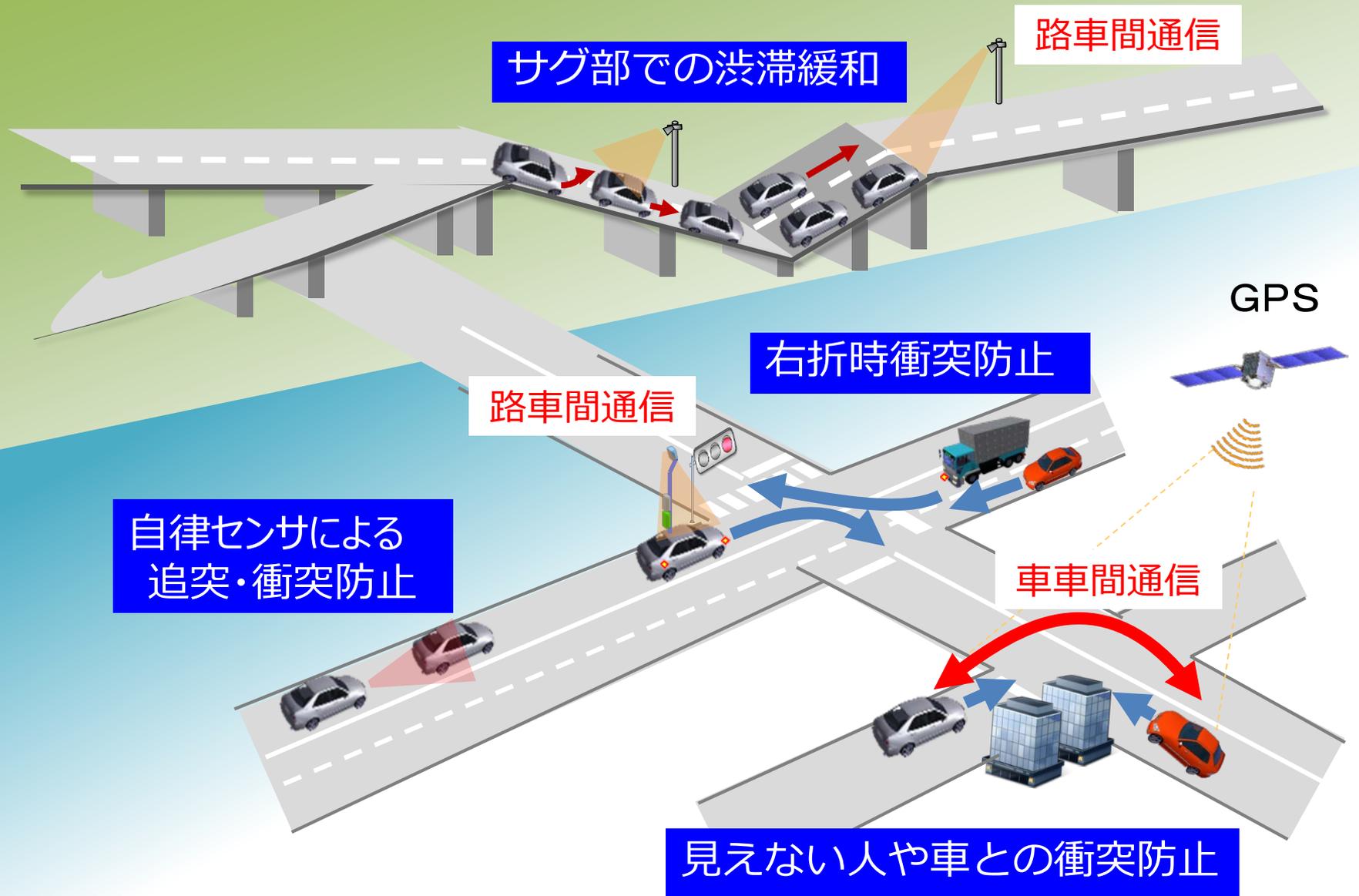


## ふらつき警報

ドライバーの低覚醒状態を注意喚起する装置

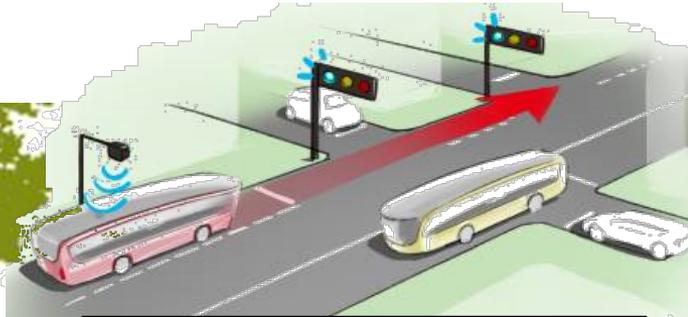


# 自動運転による交通事故・渋滞の軽減

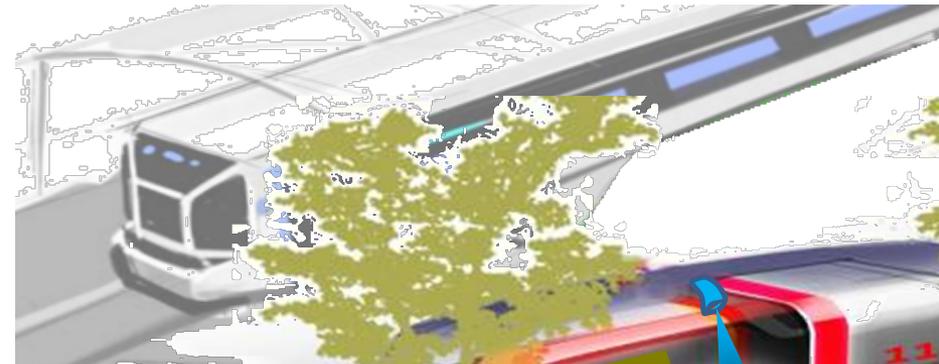


# 自動運転を活用した次世代都市交通

スムーズな加減速、乗客転倒防止



統合的・有機的な運行



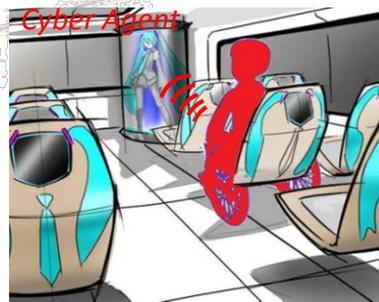
交通流整流、定時運行



事故低減  
運転負荷軽減



乗降時間短縮  
乗降安全性向上



# 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**

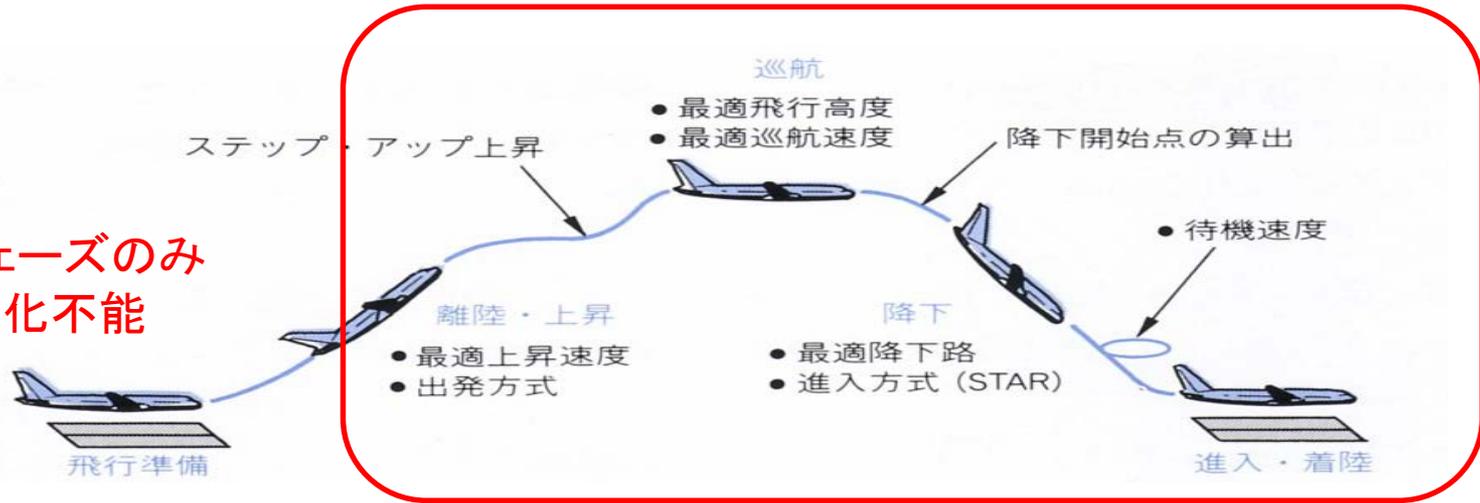


**飛行管理も自動化** (機体重量や気象条件に合った離陸速度・上昇速度・巡航高度・降下開始点等の決定)

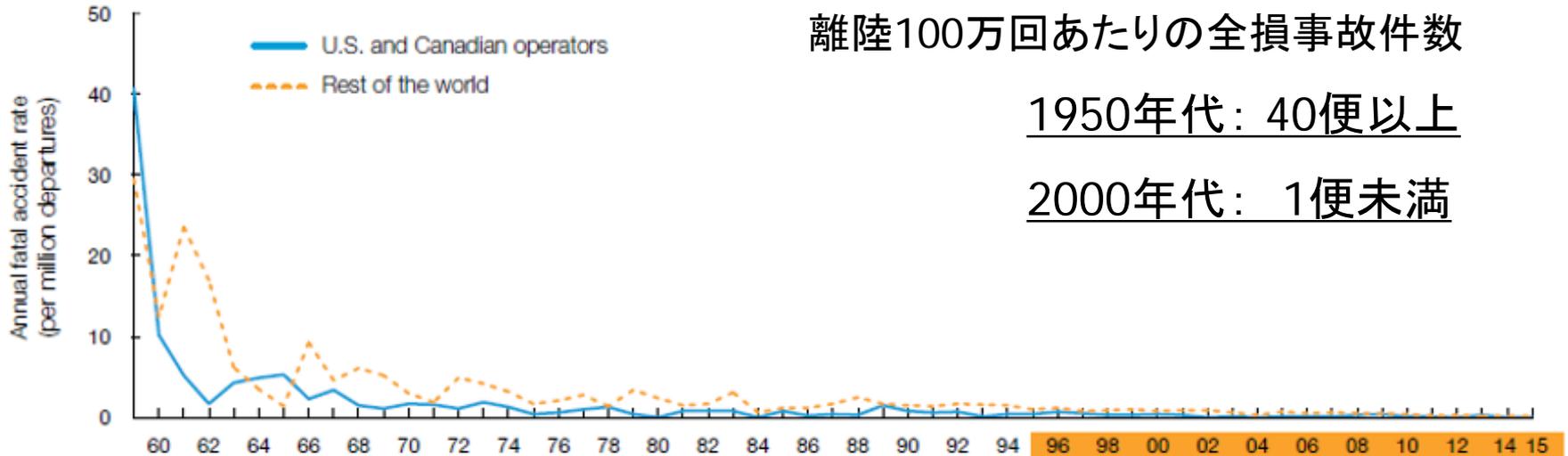
- 年間飛行時間 800-900時間の国際線パイロットの場合、手動操縦は 3時間程度

# 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)

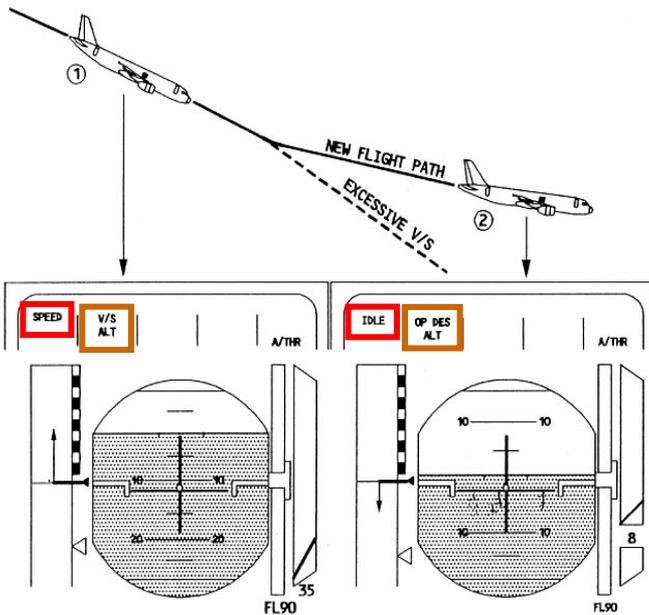
## 賢い機械

- 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)



## 状況認識の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)

# ひとくちに「自動運転」といっても、形態は多種多様



Photo: BMW

監視制御



Phot: Volvo

エールフランス447便



Photo: Zoox

タクシーの  
乗客

# 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横方向又は縦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横方向及び縦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必要あり。
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 (LoDA 2)

システム： 縦方向制御と横方向制御の両方を担当。

ドライバー： 走行環境監視を含め、動的運転タスク残余分を担当。



Photo: BMW

## 監視制御

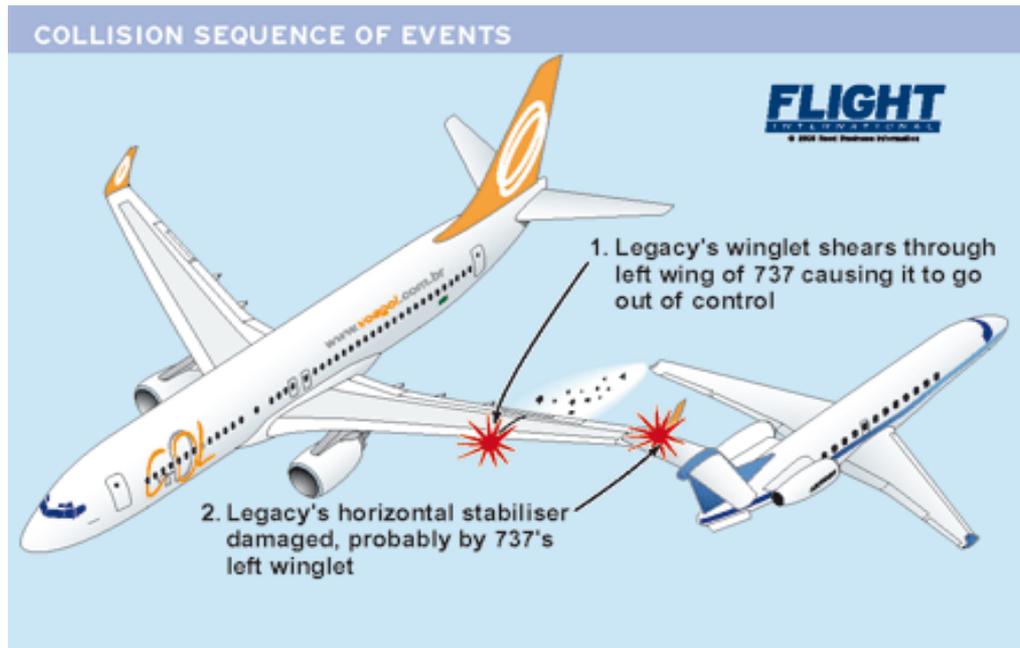
- 人が何をなすべきかを決め、システムに指示
- システムは、人の指示に沿って制御を実行
- 人は、システムによる制御が適切かどうかを継続的に監視

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

Human-Machine Interface (HMI) のデザインが鍵



# システムの作動／不動作は明確に分かる？



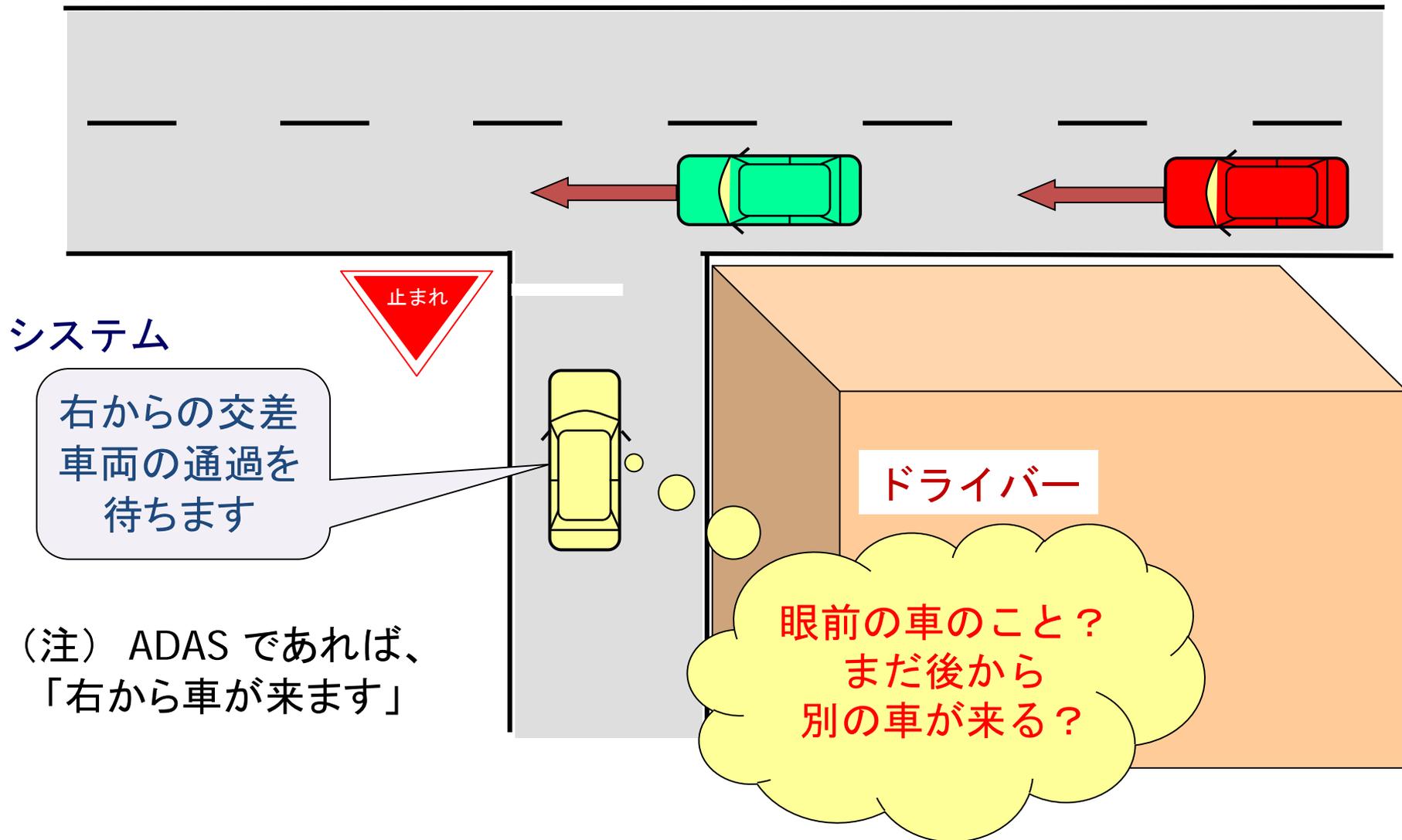
2006年9月、Boeing 737 と Embraer Legacy がアマゾン上空で衝突

(Flight International, 6 December 2008)

- Legacy のトランスポンダーは standby モード(送受信機能喪失)
- 「TCAS OFF」は表示されたが、目立たない白字表示
- Boeing 737 と Legacy に搭載されていた TCAS は、いずれも相手機の存在を知ることができない状態

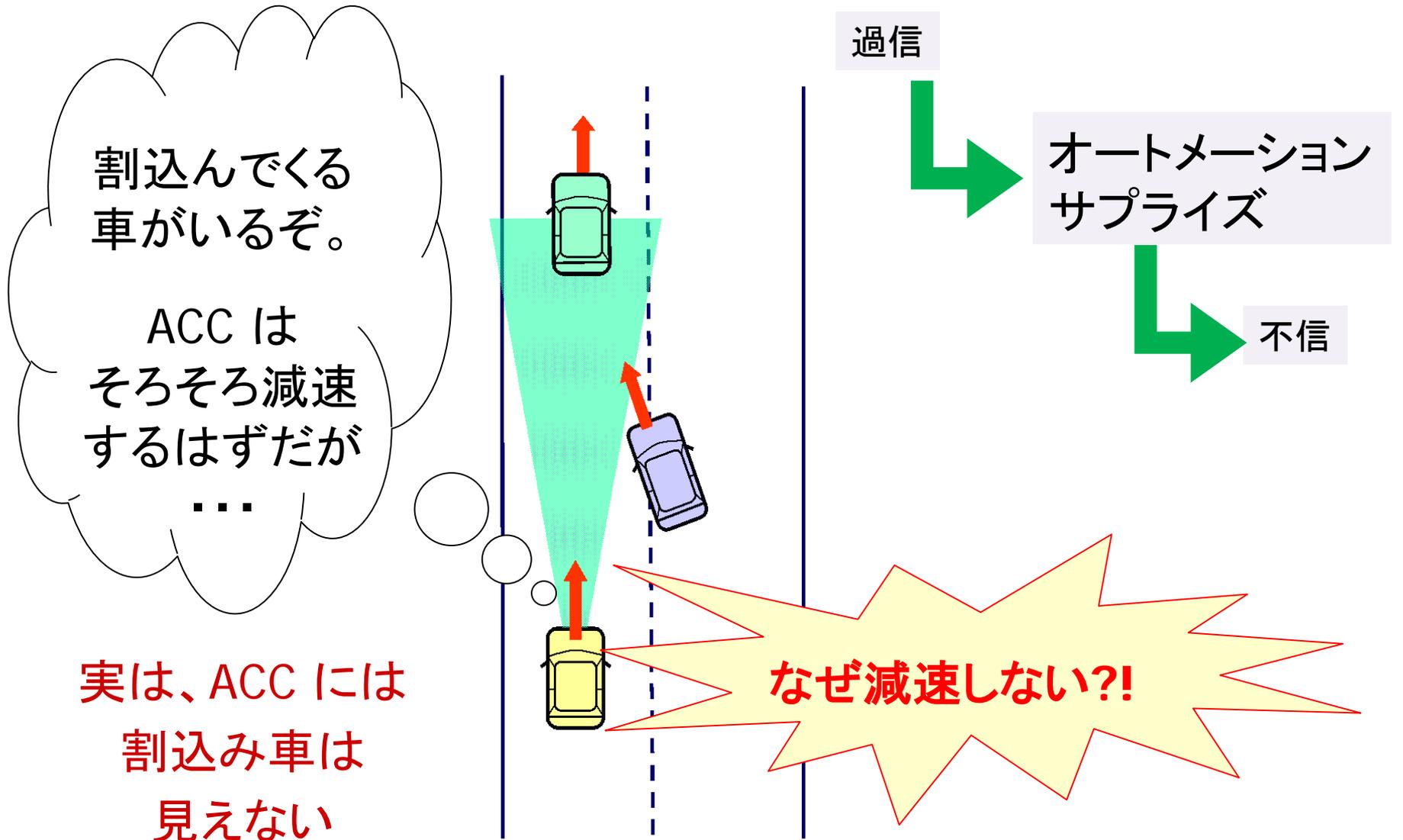
➡ TCAS 警報が発せられないまま、2機が衝突

# システムの状況判断と意図は明確に分かる？



(注) ADAS であれば、「右から車が来ます」

# 機械の能力限界は明確に分かる？

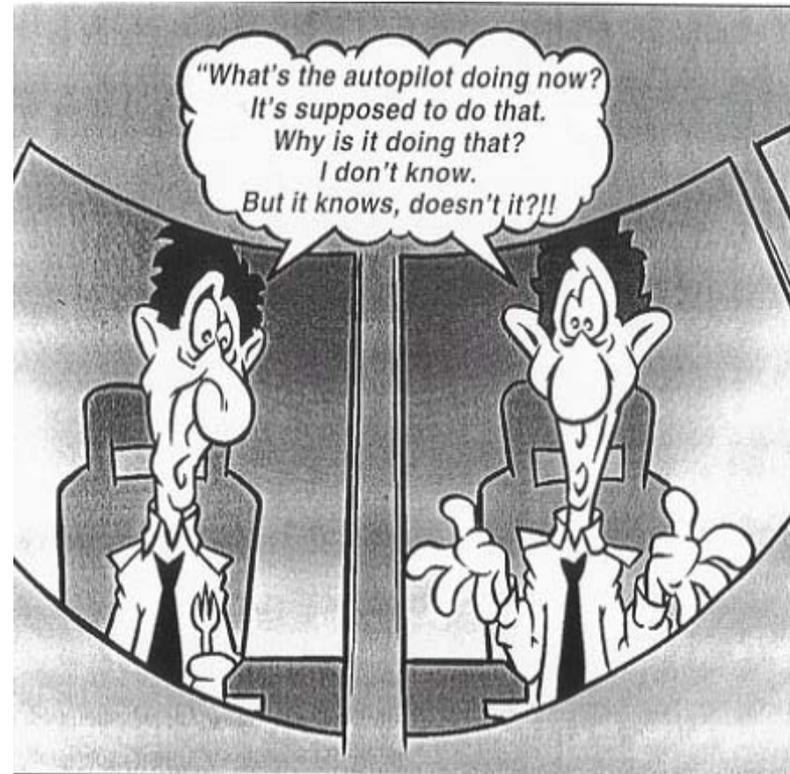


# 機械の意図とその背景は明確に分かる？

オートパイロットは  
なぜこんなことをする？

私にはわからない。

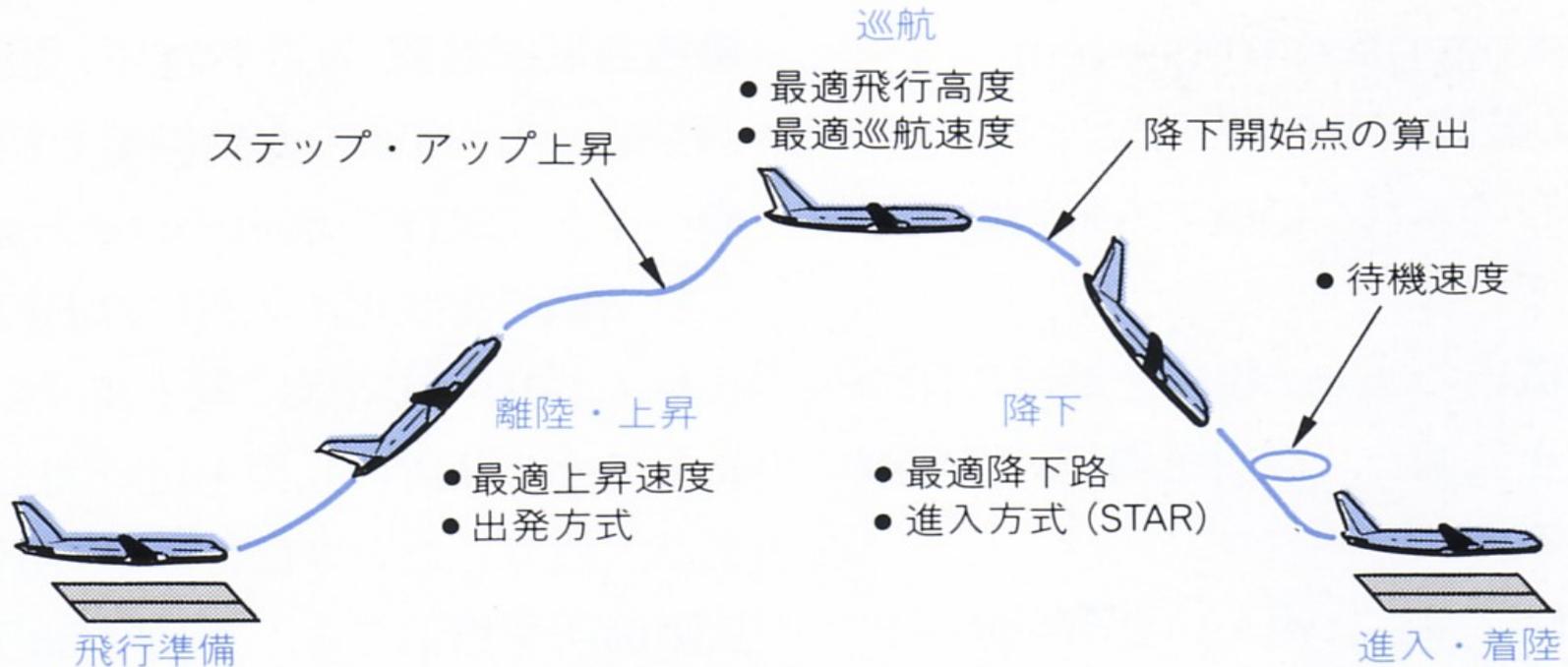
でも、オートパイロットは  
わかったうえで  
やっているはず。



(FAA 1995)

- 監視制御： システムによる制御が適切かどうか継続的に監視。  
必要に応じて適時に介入
- 定期的なシステム機能・原理等の教育と使用法の訓練

# 航空機の自動化は LoDA 2 と同等



パイロットは安全運航の責を負い、システム状態と飛行環境を監視

➡ 定期的なシステム機能・原理等の教育、使用法の訓練を受ける

➡ **クルマの自動運転のための教育・訓練や免許制度は？**

# レベル3の自動運転 (LoDA 3)

システム： 特定の運行設計領域において、すべての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときは、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： システムの要請に適切に対応すること。



Photo: Volvo

- ドライバーは結果予見、結果回避の義務から解放されているのか？
- 過失責任を問われることもあるのか？
- システムの要請に適切に対応するよう人に求めるのは妥当か？

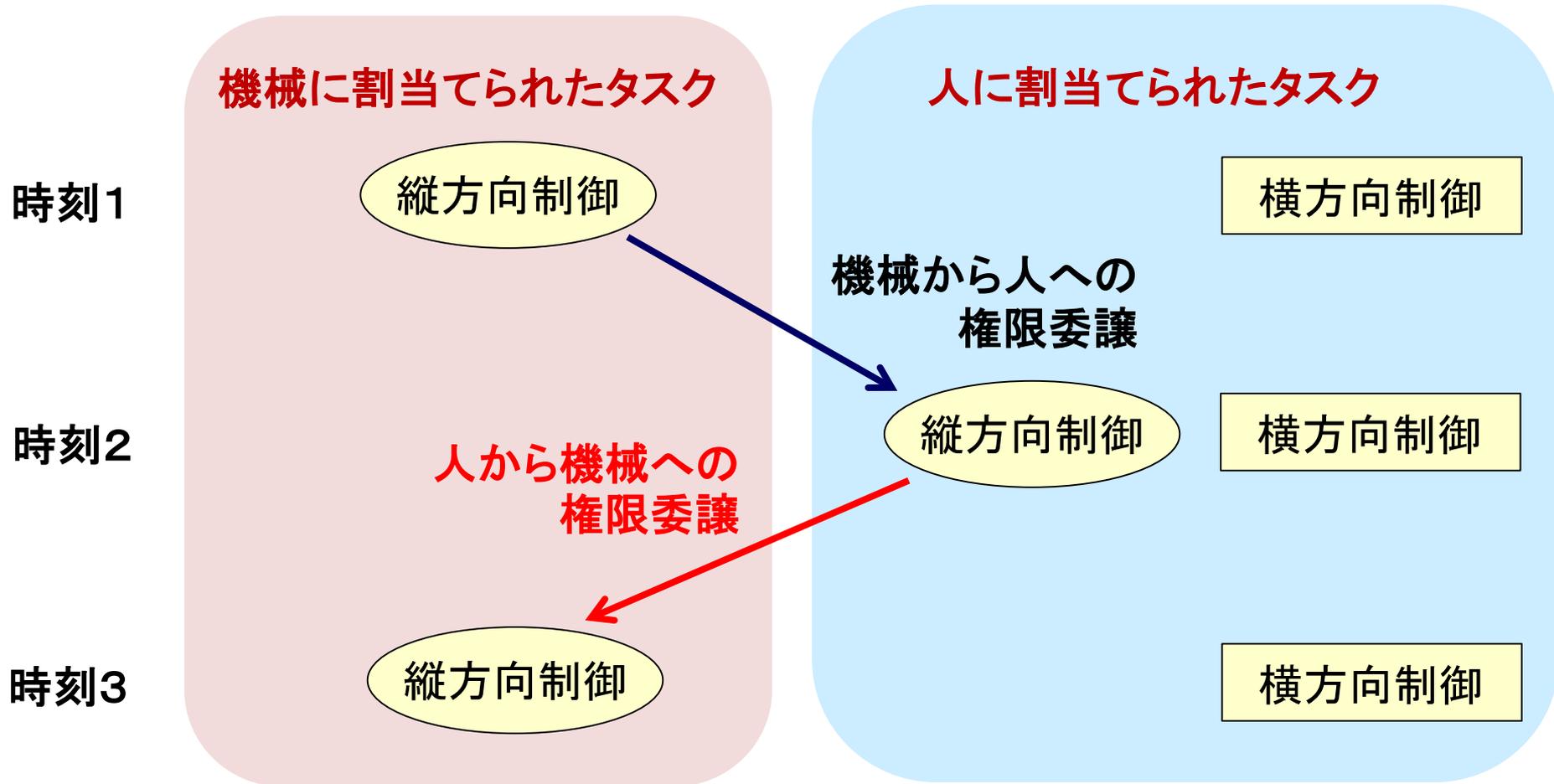
- 「いつ運転交代要請 (RTI: request to intervene) が出されても対応できるようにせよ」と言われて仕事に集中／リラックスできる？

**➡ 何のための自動化？ 誰のための自動化？**

# 運転主体の交代: 権限委譲(trading of authority)

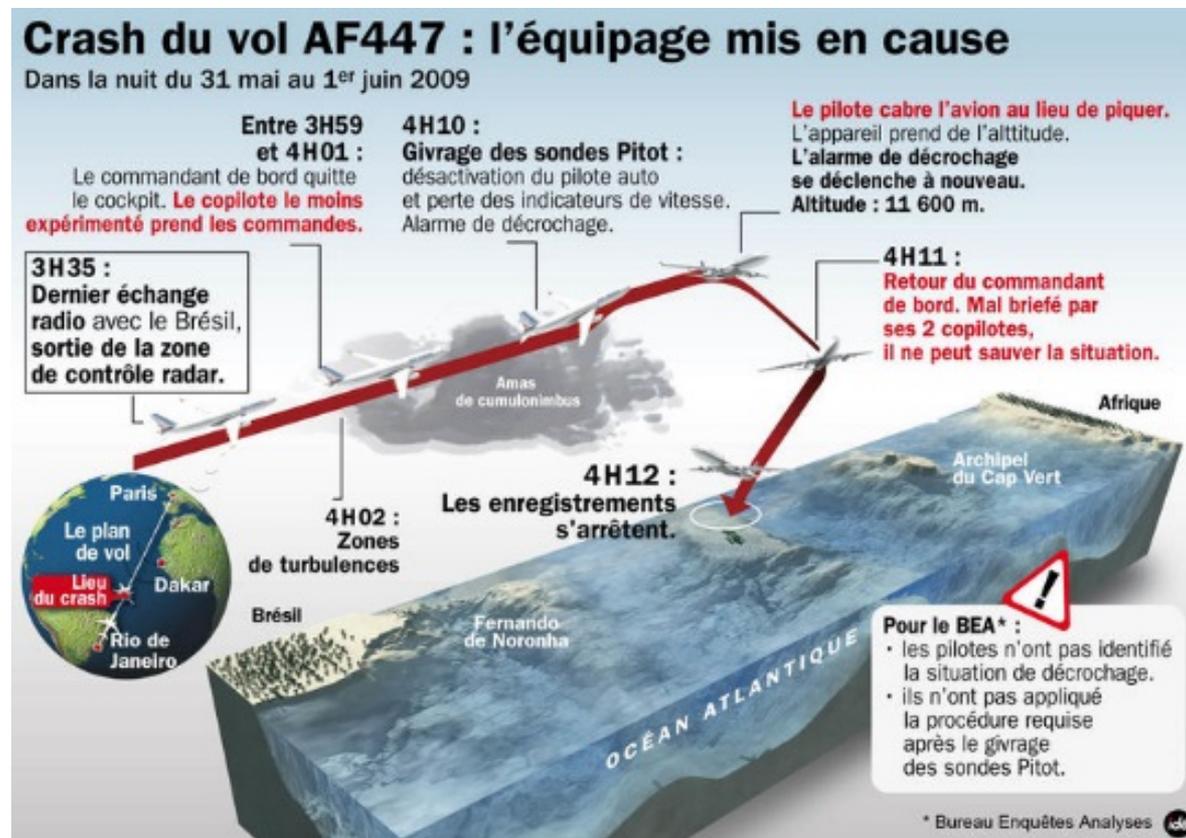
(1) 誰から誰への権限委譲?

(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。

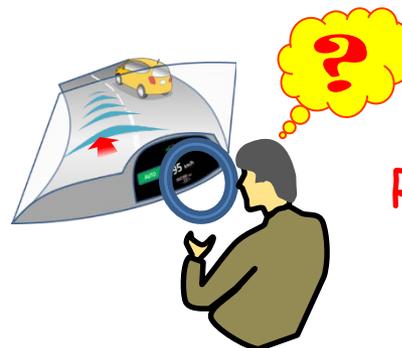
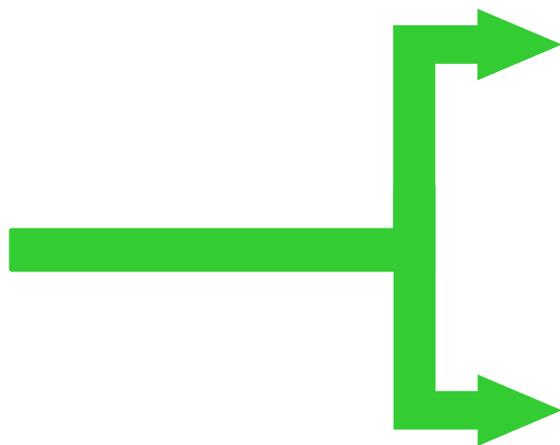


# 機械の判断に基づいて発出される RTI に ドライバーが対応するとは限らない！

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。  
システムがドライバーに運転交代を求めたとき、  
瞬時に状況を見極め、制御を引継がねばならない。

10秒後に自動走行モードを  
解除します。  
運転を交代してください

120 km/h なら 333 m 走行 / 10秒  
60 km/h なら 167 m 走行 / 10秒



RTI に対応して  
くれないときは  
どうする？

# 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。	

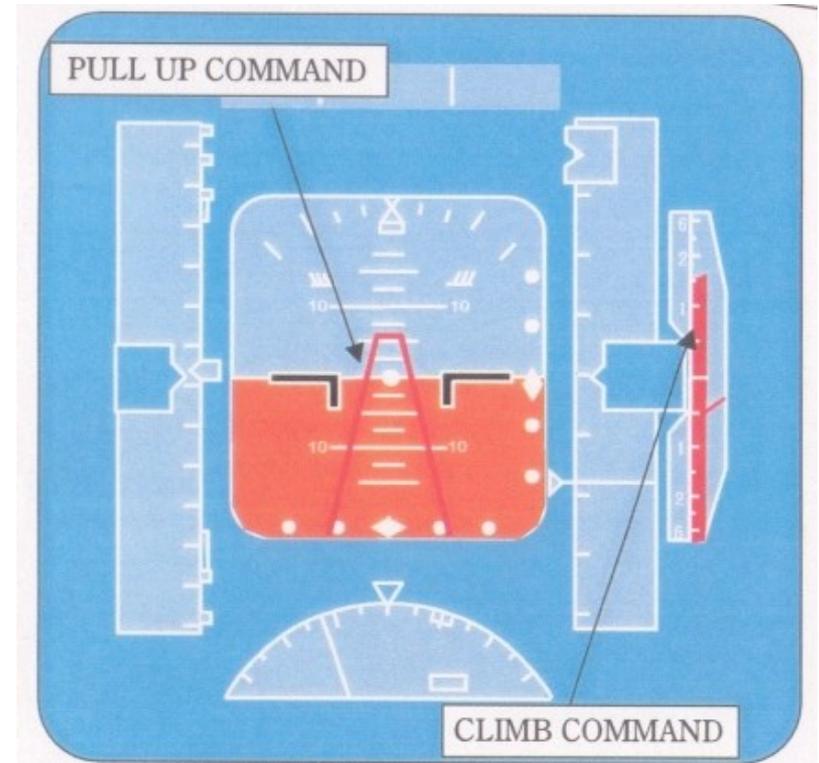
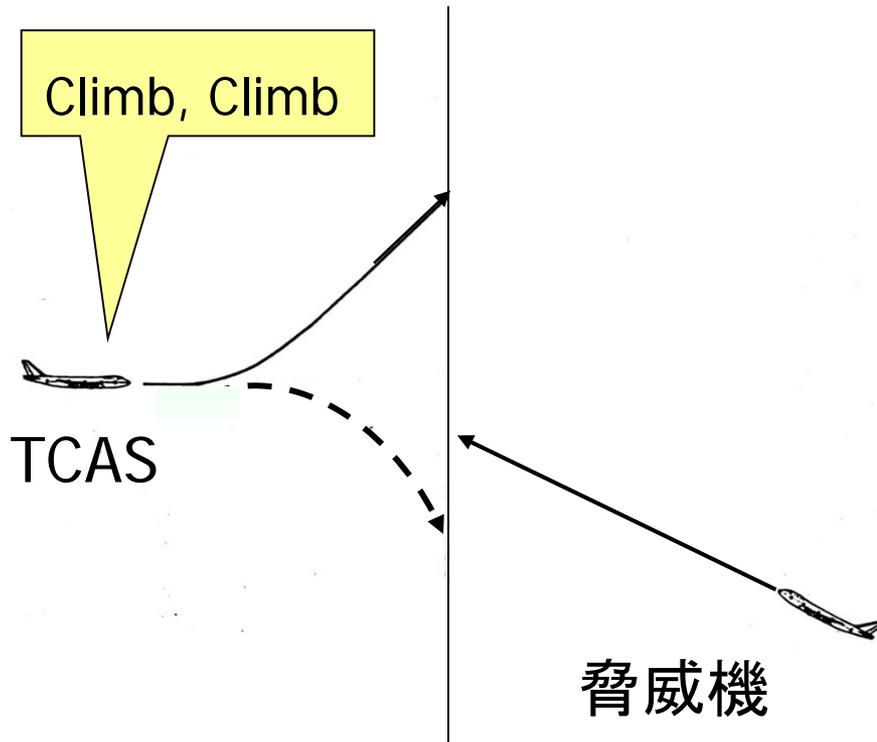
(Sheridan 1992; Inagaki et al. 1998)

# 自動化レベル4: 空中衝突防止システム

- (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

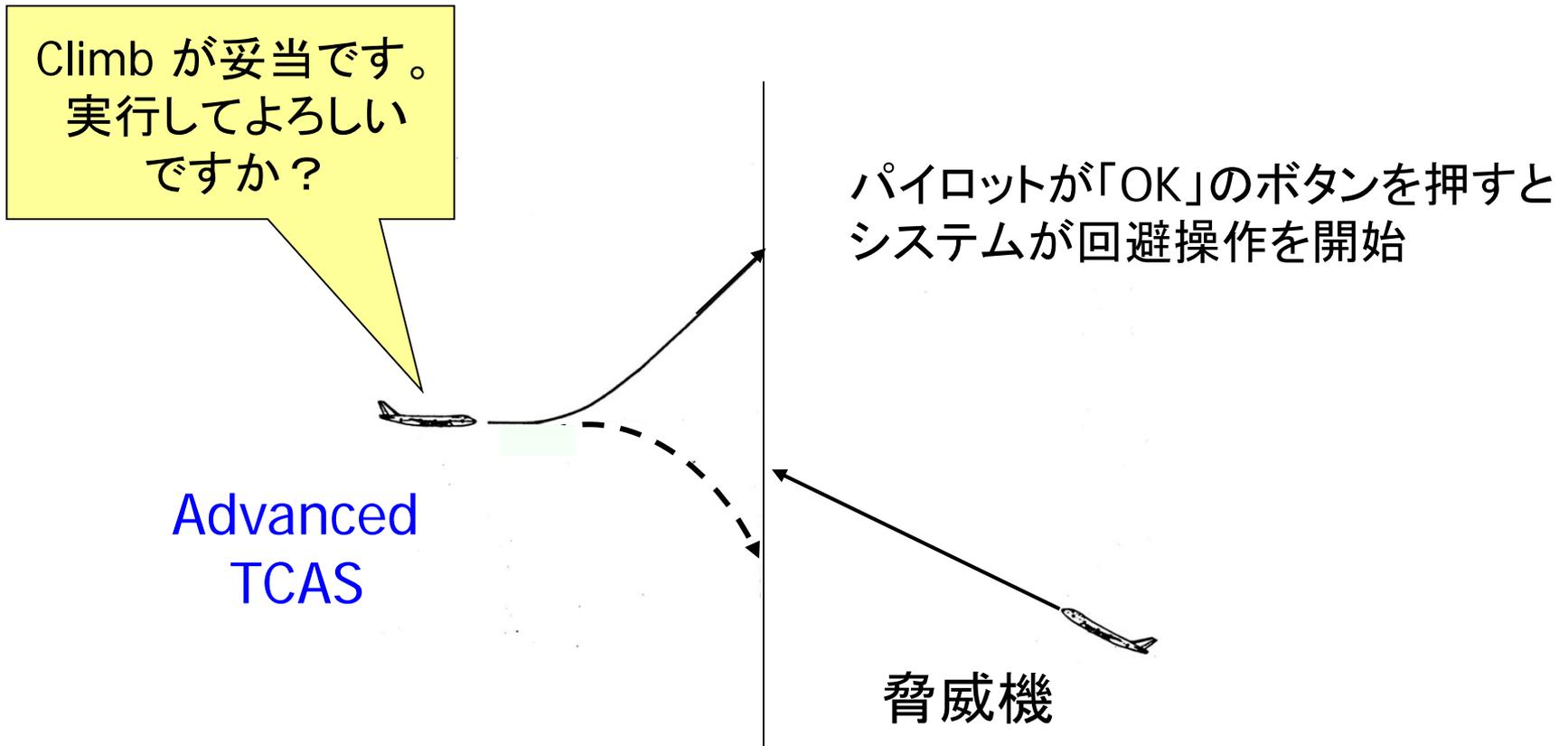
回避アドバイザー



# 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**



# 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、同時に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

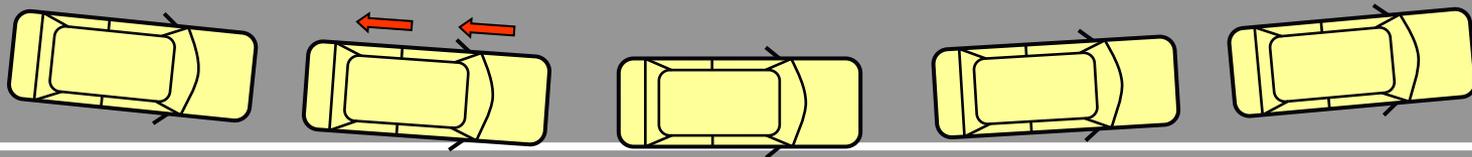
(Flight International, 18-24 Aug 2009)

# 自動化レベル 6.5: 車線逸脱防止システム

LoA 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**

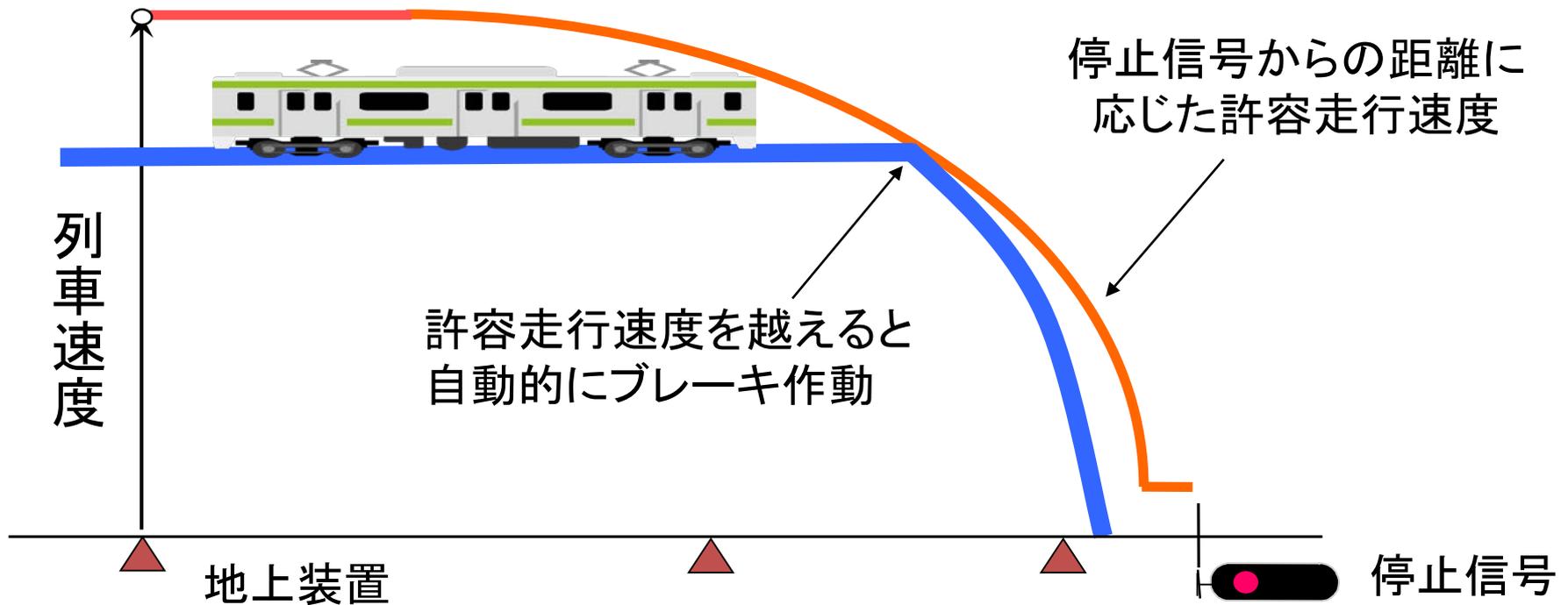
クルマが車線を逸脱しそうになると、警報と表示でドライバーに知らせ、それと同時にステアリングを修正するトルクを発生する



# 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。

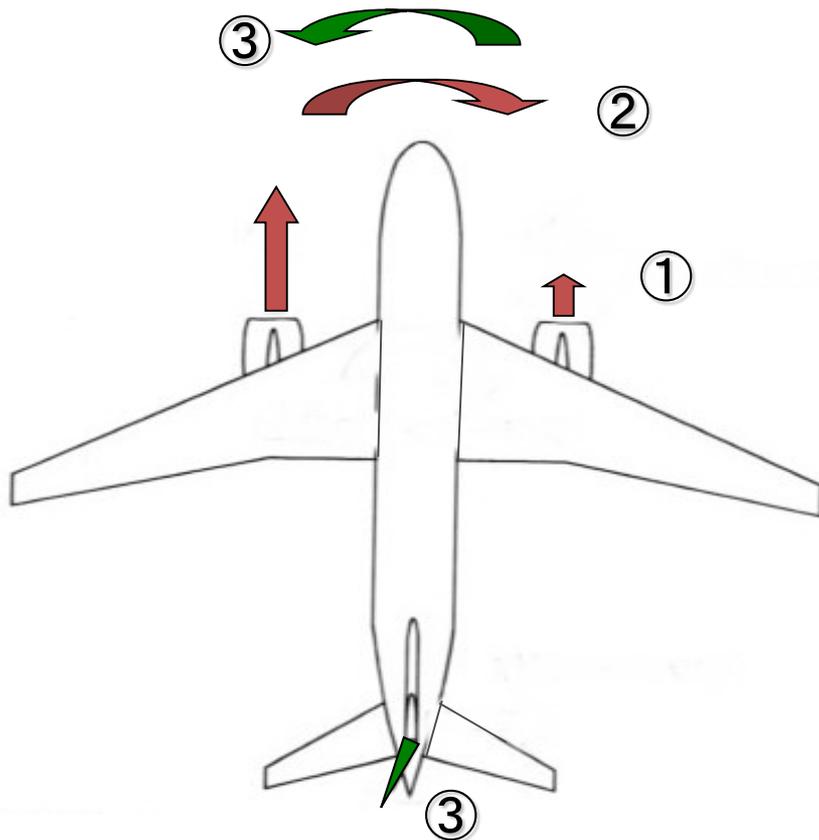
機械は、自分の意図を人に伝えると同時に、それを実行



# 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ようとする
- ③ TACが方向舵を制御して機首を左に向ける力を作り出して②の力を打消し、機首の振れを抑制

TAC  
(thrust asymmetry compensation)

# 機械から人へ権限委譲を行いたいときのメッセージは？

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

# システムからの運転交代要請が無視／拒否されると・・・

- 基本形** 「T 秒以内に運転を交代してください」  
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」  
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」  
RTI 発出直後にシステム解除。その後の車両は無制御状態

# 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とは言えない
- LoDA 3 with LoA 5 RTI は、LoDA 4 とも言えない
- 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
- LoDA 3 を 2014年版 High Automation を包含するよう再定義、又は LoDA 3 と LoDA 4 の間にHigh Automation 挿入が必要

# SAE J3016の2014年版と2016年版はいずれも不完全

## SAE J 3016 2014年版

LoDA 1	Driver Assistance
LoDA 2	Partial Automation
LoDA 3	Conditional Automation
LoDA 4	High Automation
High Driving Automation (2016)	
LoDA 5	Full Automation

## 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

# レベル4の自動運転 (LoDA 4)

システム： 特定の運行設計領域において、すべての動的運転タスクを担当。作動継続が困難なときも、ドライバーの手助けを求めることなく、システム自身で適切に対応。

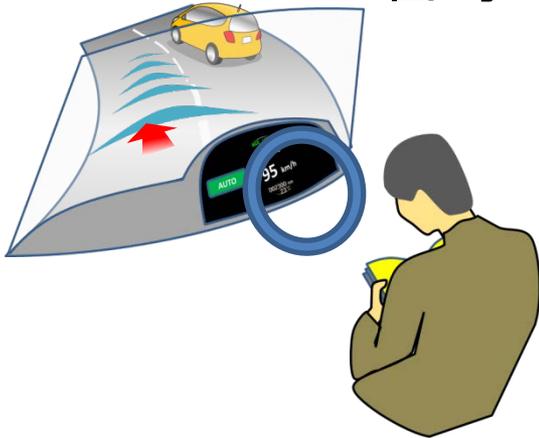
(注) 運行設計領域の範囲から出るときは、ドライバーが運転を引継ぐ必要あり。

- 「システムだけで対応できる」ことは、「ドライバーに関与させない」ことを意味するのか？
- 何が起きているか、システムはそれに対応しようとしているか等はドライバーに知らせるべきか、知らせる必要はないか？



# レベル5の自動運転 (LoDA 5)

システム： 運行設計領域に限定されることなく、すべ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。



有人運転ではあるが、いわゆる「ドライバー」が乗らない車

➤ 車載 AI が「ドライバー」として操縦

**ウィーン条約(ジュネーブ条約)との関係をどのように整理？**



Photo: Google

車両の運転者は、正当な注意義務を適正に行使でき、いかなる操作であっても必要なものはいつでも実行できるよう、車両を常に制御できていなければならない

# 完全自動運転であれば HMI は不要？

- 「ドライバーとのインタフェース技術が意味をなさなくなる」
  - 「完全自動運転が実用になると、クルマがやり取りする相手はドライバーではなく、乗客になる」
- といった意見もあるが・・・



Photo: Google



Photo: Zoox

「タクシードライバー」への信頼が前提

# 自動運転システムの利用には、それなりの心構えが必要



Photo: BMW



Photo: Volvo

- 監視制御は、楽な仕事ではない
- 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
- 権限の的確な引継ぎには、瞬時の状況判断力が不可欠
- 自動運転の活用には、ドライバーも社会も意識改革が必要

# 人が機械を知る

そのために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

# 機械が人を知る：ドライバーモニタリング

「ドライバーの状態を監視し、不適切な状態になっている場合は注意喚起／警告する」ということだが・・・



LoDA 2



LoDA 3

## ➤ 視線

- ✓ **監視制御**を行っているか否かを知る上で重要
- ✓ 意識の脇見は？

## ➤ 視線

- ✓ 視線を前方に向けていることは求められていないのでは？
- ✓ **何のための LoDA 3 ?**

# 注意喚起／警告で事態が改善しないときはどうする？



LoDA 2



LoDA 3

- 注意喚起／警告を続ける？
- 一定時間が経過した時点で自動走行機能を停止させる？
  - ✓ 機械の判断による  
機械から人への権限委譲
  - ✓ それを判断し実行する権限を機械に与えてよいのか？
  - ✓ 車両無制御状態の可能性

- 注意喚起／警告は意味を持つ？
  - ✓ LoDA 3 ではドライバーに  
周辺監視義務はないはず
- 一定時間が経過した時点で自動走行機能を停止させる？
  - ✓ 機械の判断による  
機械から人への権限委譲
  - ✓ 車両無制御状態の可能性

# 何のための自動運転？ 誰のための自動運転？

- 自動運転がドライバーにもたらすもの
  - － 自動運転のレベルに依存
  - － 誰を対象とするかに応じて適切な自動運転のレベル選定
  - － 自動運転レベルが高いものが「レベルが高い」のではない
- 自動運転がドライバーに求めるもの
  - － 自動運転のレベルに依存
  - － ドライバーの役割を社会・ドライバーが認識する必要

メーカーが想定する  
「ドライバーの役割」

≠

ドライバーが考える  
「ドライバーの役割」