

# 空調用モータドライブにおける自動コード生成の量産適用

ダイキン工業 宮島 孝幸

## 目次

1. ダイキン工業の紹介
2. 空調機のシステム構成とパワーエレ技術の重要性
3. モータドライブ開発への自動コード生成の適用
4. 量産適用の展開で見えてきた課題
5. まとめ



弊社TIC HP



# 企業概要・事業領域

会社名	ダイキン工業株式会社
創業	1924年10月25日 大阪市で創業
設立	1934年2月11日
資本金	850億円
グループ従業員数	連結96,337名
会長・社長	会長：井上礼之 社長兼CEO：十河政則
本社	大阪市北区
グループ会社数	連結子会社347社 (国内30社、海外317社)

(2023年3月末現在)

## 空調事業



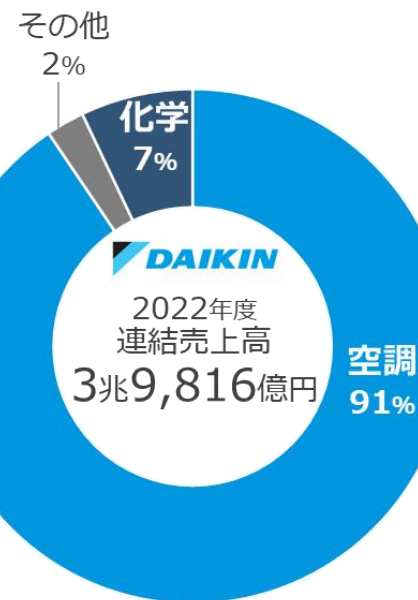
住宅用



業務用



サービス



## その他事業



油圧機器



酸素濃縮機

## 化学事業



冷媒



半導体用途



自動車用途

# 国内拠点

淀川製作所(大阪府摂津市)

空調・化学・油機・特機  
テクノロジー・イノベーションセンター



テクノロジー・イノベーションセンター東京ラボ  
(東京都江東区)



鹿島製作所  
(茨城県神栖市)

化学

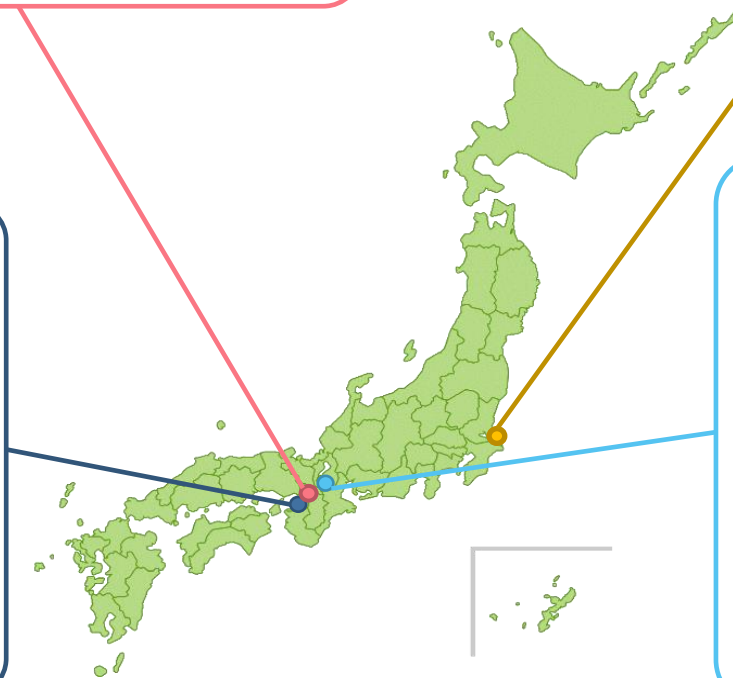
堺製作所  
金岡工場・臨海工場  
(大阪府堺市)

業務用空調



滋賀製作所  
(滋賀県草津市)

家庭用空調



# 空調事業の主なグローバル生産拠点

市場最寄化生産をベースに、世界27カ国87ヶ所以上※に生産拠点を構築

## 欧州

- ・ダイキンヨーロッパ（ベルギー：1972）  
業務用エアコン、暖房製品
- ・ダイキンインダストリーズチェコ（2003）  
住宅用エアコン
- ・ダイキンアプライドヨーロッパ（伊：2007買収）  
チラー、ターボ冷凍機
- ・ダイキントルコ（2011）  
住宅用エアコン、暖房製品

## 日本

- ・滋賀製作所（滋賀県草津市：1970）  
住宅用エアコン
- ・堺製作所（大阪府堺市：1937）  
業務用エアコン

堺製作所臨海工場 新1号工場（2018）

## 米国

※フィルタ、低温を含む

- ・ダイキンアプライド・アメリカズ（ヴァージニア州スタントン：2007買収）  
大型チラー、ターボ冷凍機
- ・ダイキンコンフォートテクノロジーズノースアメリカ（テキサス州ヒューストン：2012買収）※旧グッドマン  
住宅用ユニットリ、ガスファーンレス、業務用エアコン

ダイキン・テキサス・テクノロジーパーク（2017）

## インド

- ・ダイキンエアコンディショニングインド（2009）  
住宅用エアコン、業務用エアコン、水冷チラー、空冷チラー

## 中国

- ・大金空調（上海）有限公司（1995）  
業務用エアコン、全熱交換器、空冷チラー
- ・大金空調（蘇州）有限公司（2011）  
住宅用エアコン、業務用エアコン
- ・マッケイ（武漢 2007買収）  
水冷チラー、ターボ冷凍機など
- ・マッケイ（深セン 2007買収）  
空冷チラー、ファンコイルユニットなど

## アジア

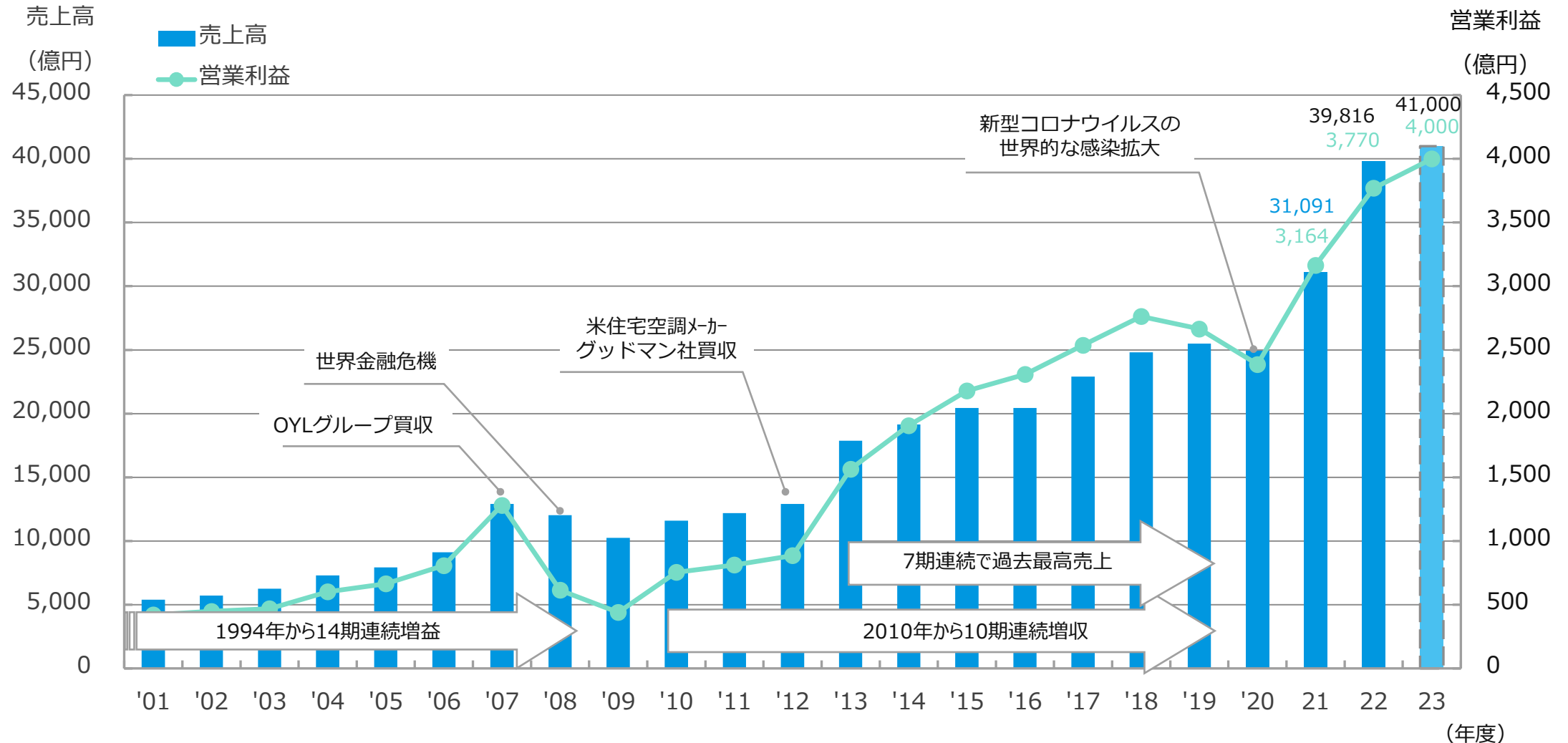
- ・ダイキンインダストリーズタイランド（1990）  
住宅用エアコン、業務用エアコン
- ・ダイキンマレーシア（2007買収）  
住宅用エアコン、業務用エアコン、チラー
- ・ダイキンエアコンディショニングベトナム（2018）  
住宅用エアコン

## 南米

- ・ダイキンエアコンディショニングアマゾナス（2012）  
住宅用エアコン、業務用エアコン

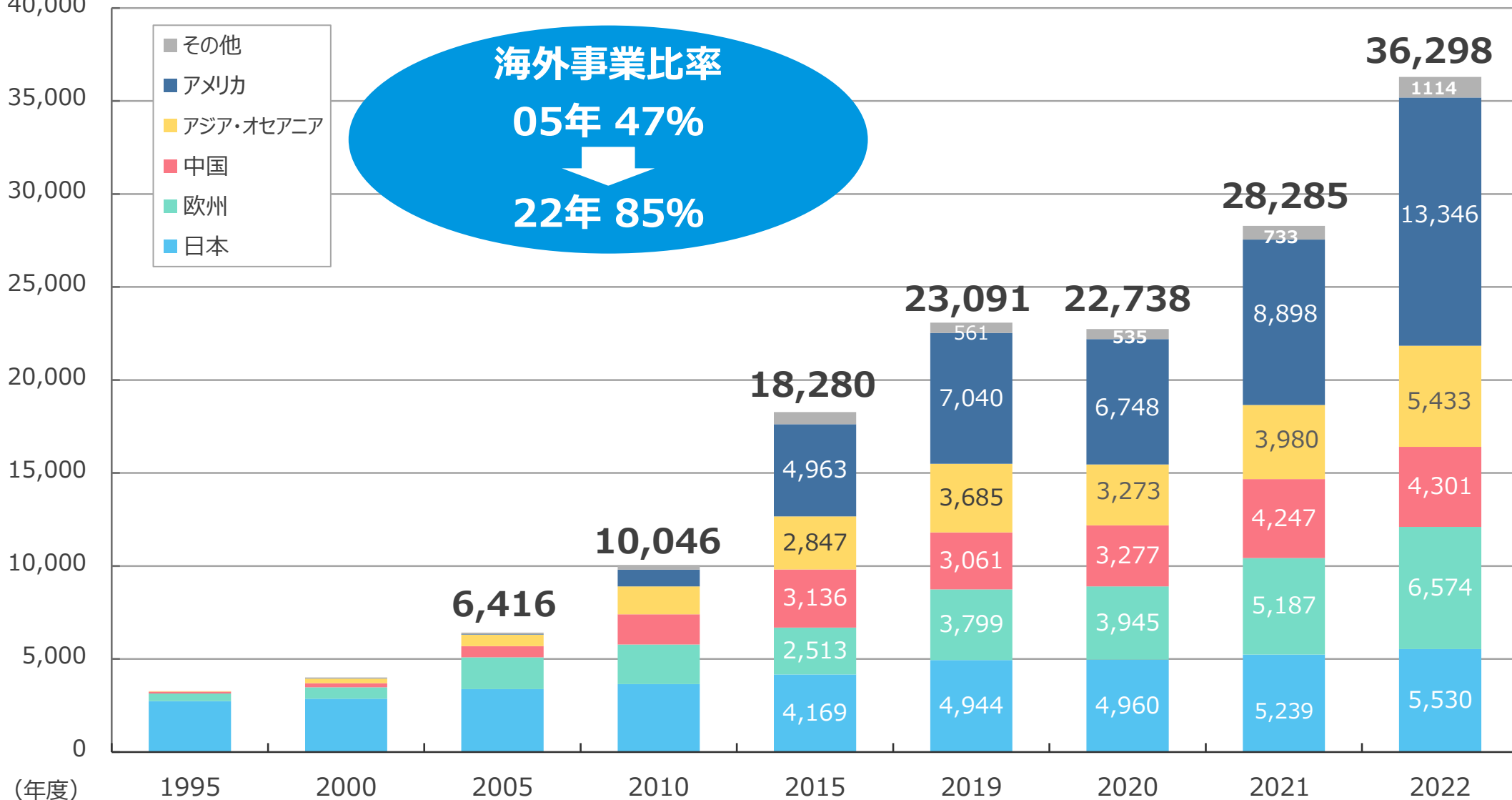
# 業績の推移

グローバルを中心に事業拡大し、2010年から2019年まで10期連続増収  
2021年度で売上高3兆円を突破、2022年度は2年連続で過去最高の業績を更新



# 空調事業 地域別売上高推移

(億円) 40,000



海外事業比率  
05年 47%  
↓  
22年 85%

海外売上高比

16%

29%

47%

64%

77%

79%

78%

81%

85%

# 当社の空調製品ラインアップ

省エネ、換気、環境、快適、安心・安全、衛生など豊富なラインアップで、あらゆるニーズに対応する空調ソリューションを実現

## 住宅用エアコン

ルームエアコン



ハウジング・マルチエアコン



ユニタリーエアコン



## 空気清浄機



## 暖房・給湯機

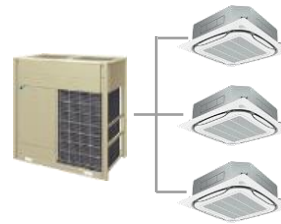


住宅用

## 集中管理・メンテナンスサービス



## ビル用マルチエアコン



## 換気機器



## 設備・工場用エアコン



## 店舗・オフィス用エアコン



## ルーフトップ

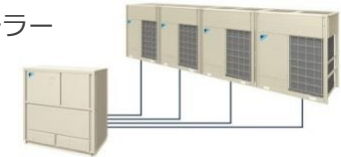


## アプライド機器

ターボ冷凍機



チラー



エアハンドリング  
ユニット



ファンコイル  
ユニット



商業用

産業用

# 空調事業のグローバル開発体制

空調機は国や地域ごとに気候や住宅様式、顧客の嗜好が異なり、地域の特性に応じた、開発・生産・サービス・販売体制の構築が求められる。海外開発拠点のさらなる強化や、イノベーションを推進する人材の獲得・育成に取り組み、グローバル全体で事業貢献を加速。



## ダイキンのコア技術

### インバータ



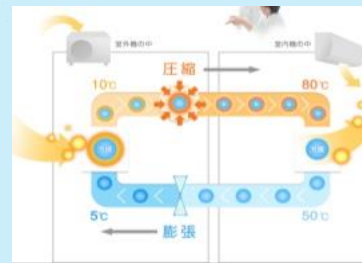
エアコンの心臓部である圧縮機のモーター回転数を0～100%の間できめ細かく制御する技術。省エネ性、快適性の向上に貢献。

### ヒートポンプ



室外の空気中から熱を取り出し、空気や水を温める（または冷やす）エアコンの基本原則。他の方式と比べ、エネルギー効率が低い。

### 冷媒制御



一台の室外機で複数の室内機を制御する「マルチエアコン」において、熱を運ぶ「冷媒」を必要なときに必要な量を必要な温度で届ける技術。



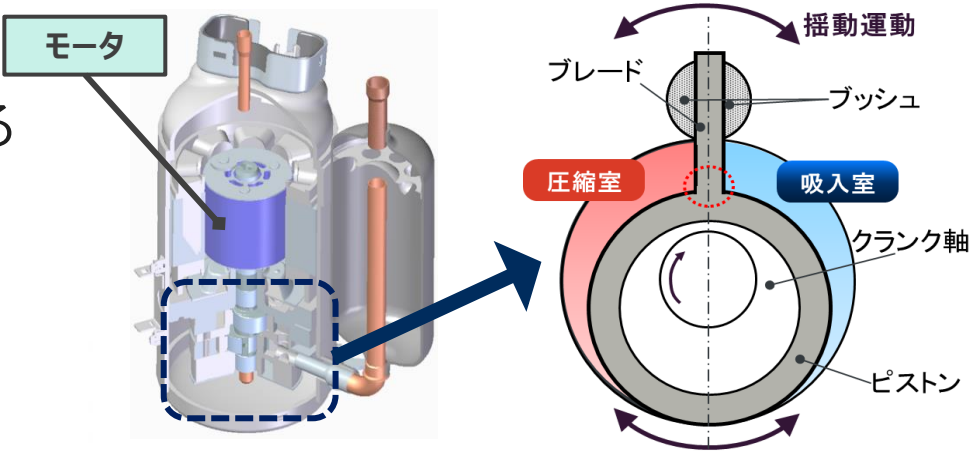
---

# 目次

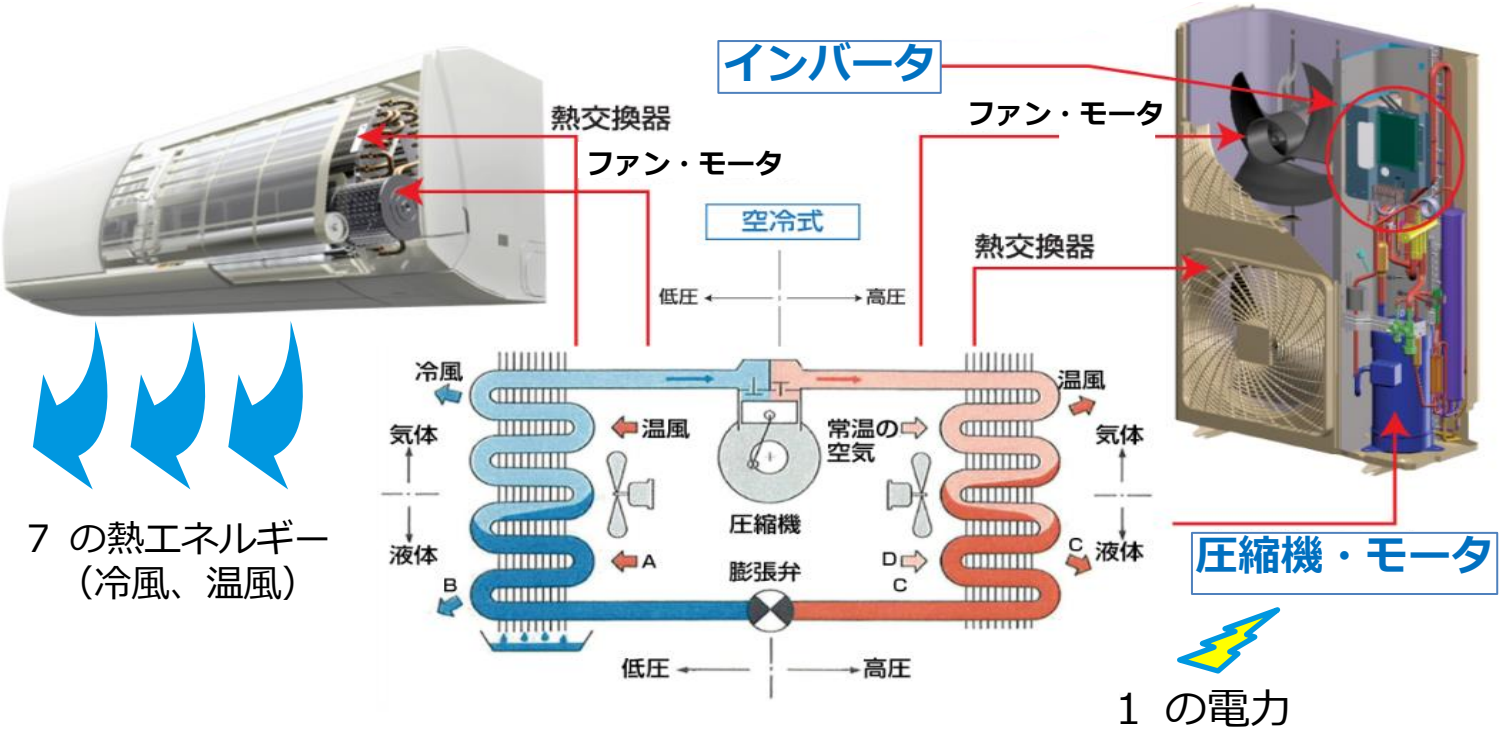
1. ダイキン工業の紹介
2. 空調機のシステム構成とパワーエレ技術の重要性
3. モータドライブ開発への自動コード生成の適用
4. 量産適用の展開で見えてきた課題
5. まとめ

# 空調機の原理：ヒートポンプ

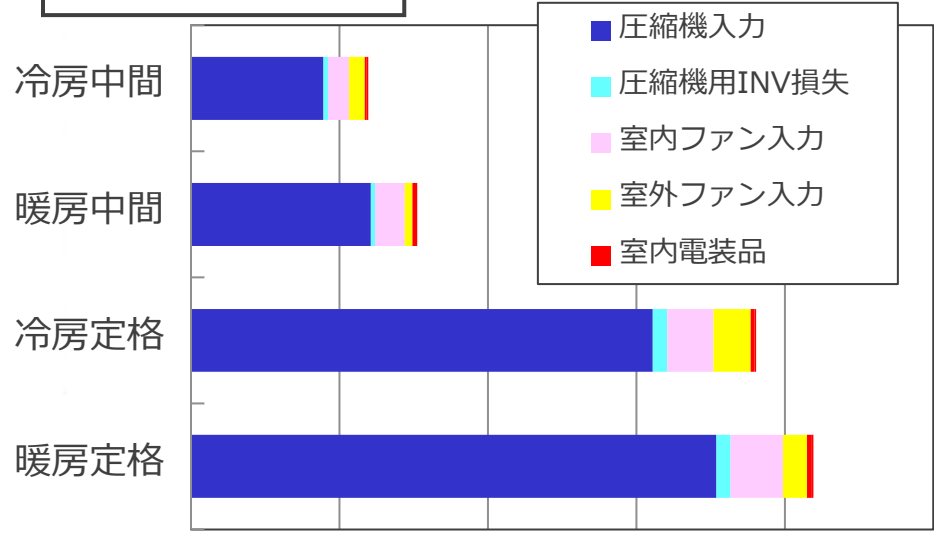
- ✓ 少ない電力で空気中から集めた熱をエネルギーとして利用
- ✓ 最新の空調機は「1」の電力で、最大「7」の熱を得られる
- ✓ 室外機（圧縮機）での電力消費が支配的



家庭用空調機のスイング式圧縮機

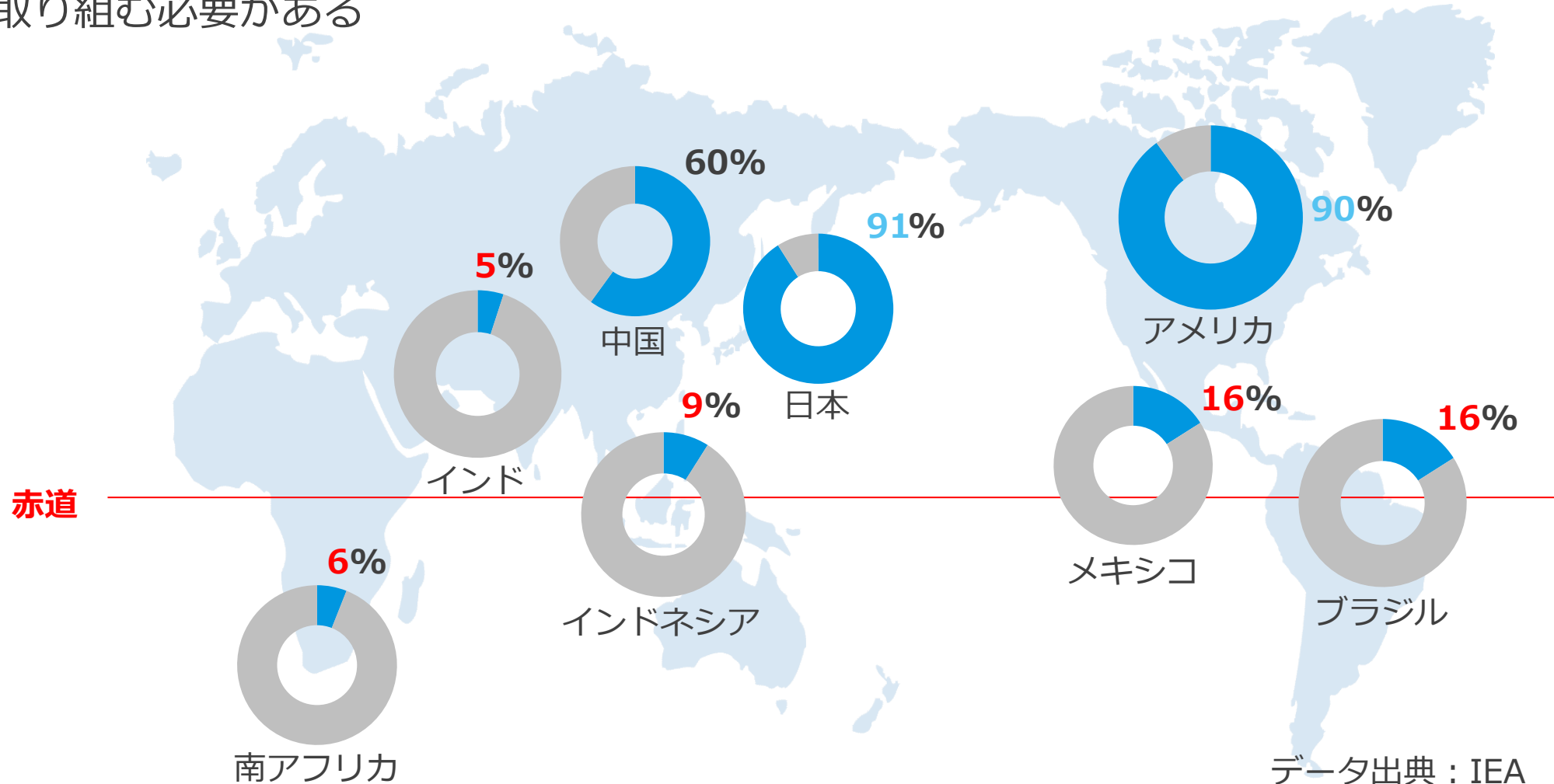


電力消費の内訳



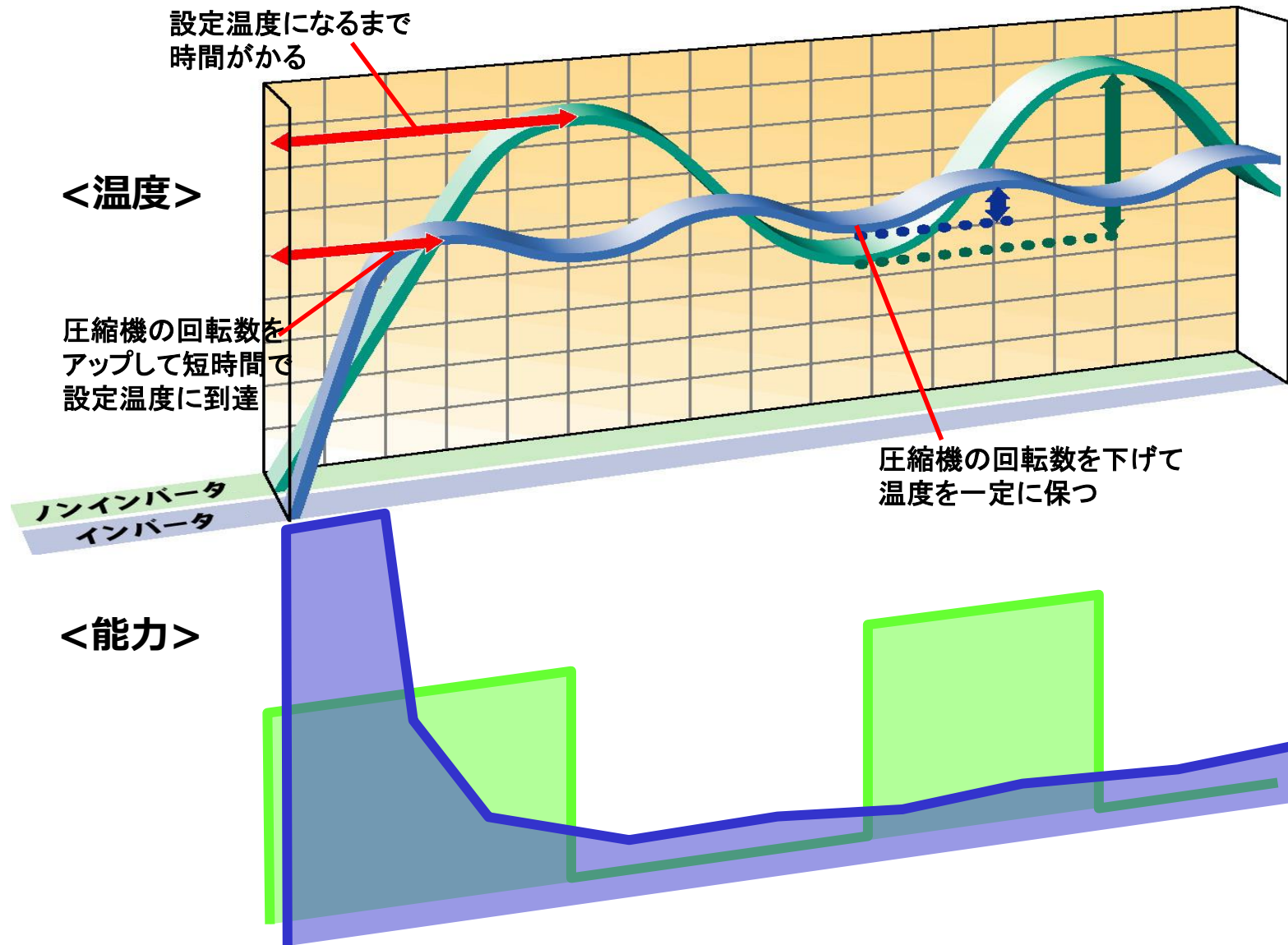
## 空調機の普及率とインバータ化の必要性

- 酷暑地域での空調機普及率はまだ低く、空調が必要な地域に届けられていない
- 人口増加・経済発展で、世界の空調需要は2050年までに2017年の約3倍になると予測されている
- 2050年のカーボンニュートラル達成に向け、製品ライフサイクルを通じて温室効果ガス排出の削減に取り組む必要がある



# インバータ化による快適性と省エネ

## 暖房運転時



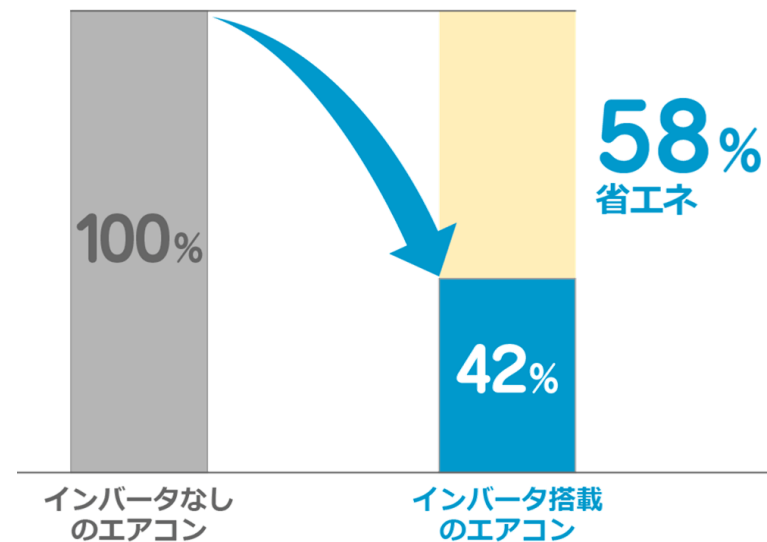
## インバータ化の効果

### ①快適空間

室温の変化に対応し、キメ細かに調整。室温ムラの少ない空調が可能。

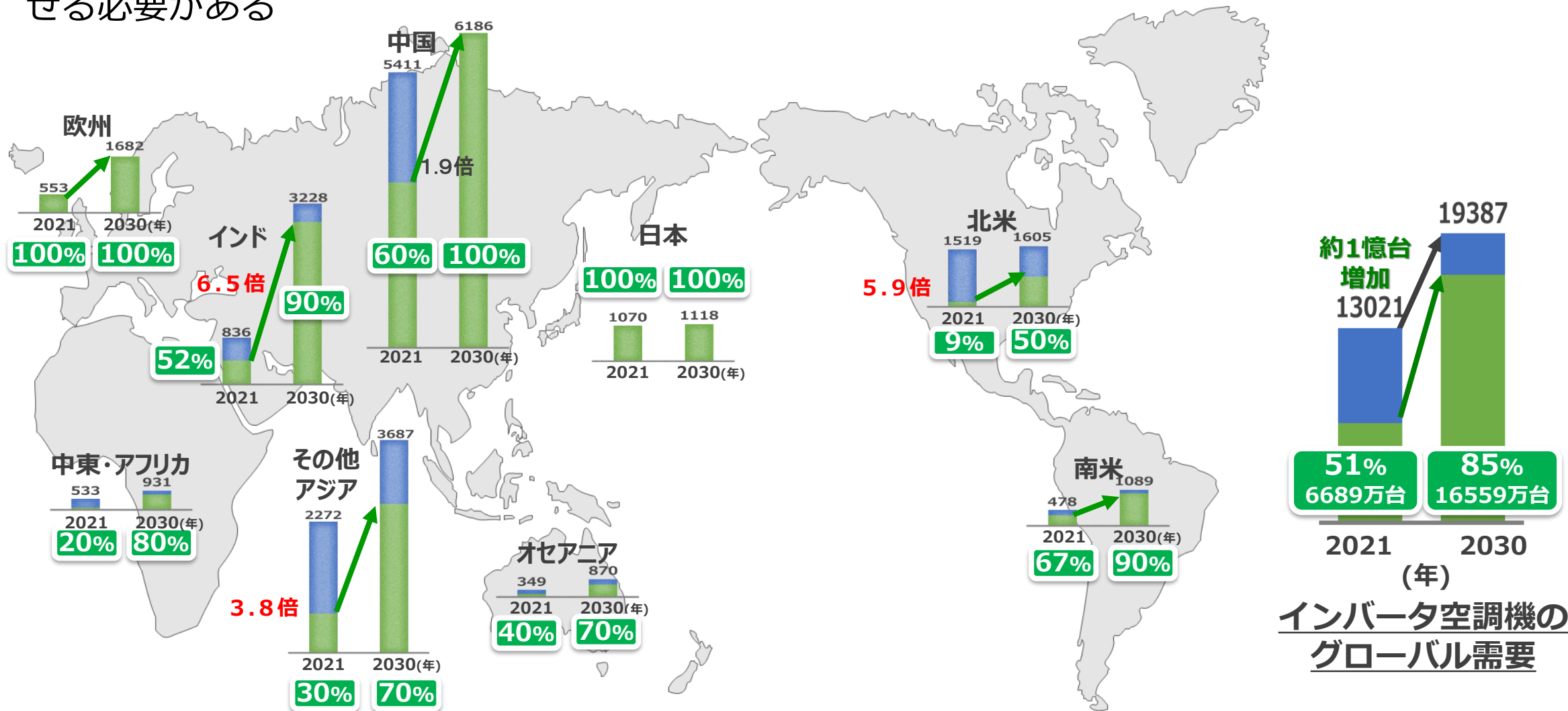
### ②省エネ

部屋が一旦暖まると、室温を保ちながら低能力運転。



# 空調機のインバータ化率

- ✓ 日本ではインバータ化率は100%だが、グローバルではインバータ化率はまだ低い
- ✓ 特にインド・アセアン・北米に向けてインバータ空調機を低コスト化、インバータ空調機を普及させる必要がある



---

## 目次

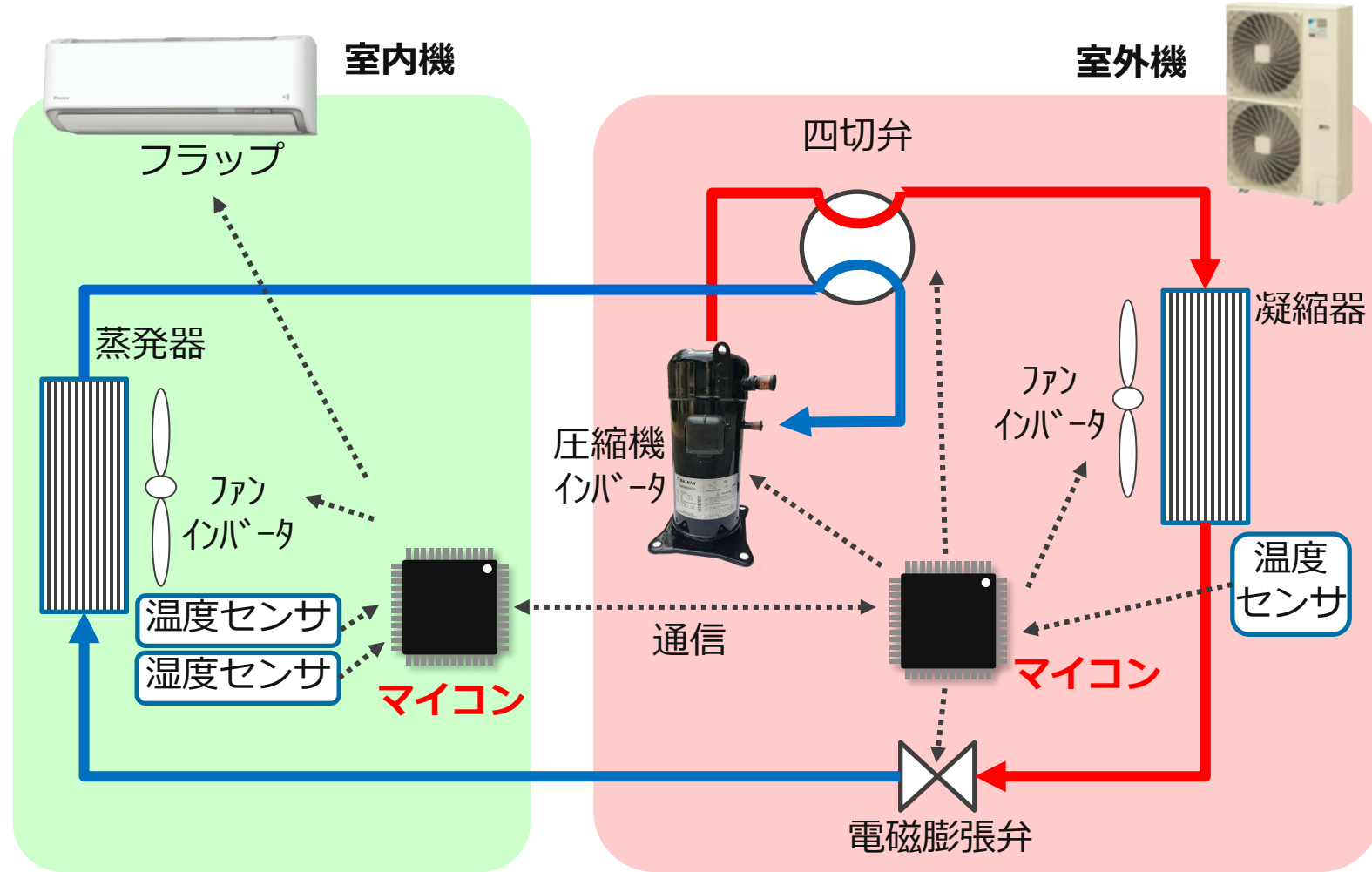
1. ダイキン工業の紹介
2. 空調機のシステム構成とパワーエレ技術の重要性
3. モータドライブ開発への自動コード生成の適用
4. 量産適用の展開で見えてきた課題
5. まとめ

# インバータ空調機のシステム構成とモータ制御への要求事項

高効率化のため、圧縮機モータ、ファンモータともに永久磁石同期モータを主に使用

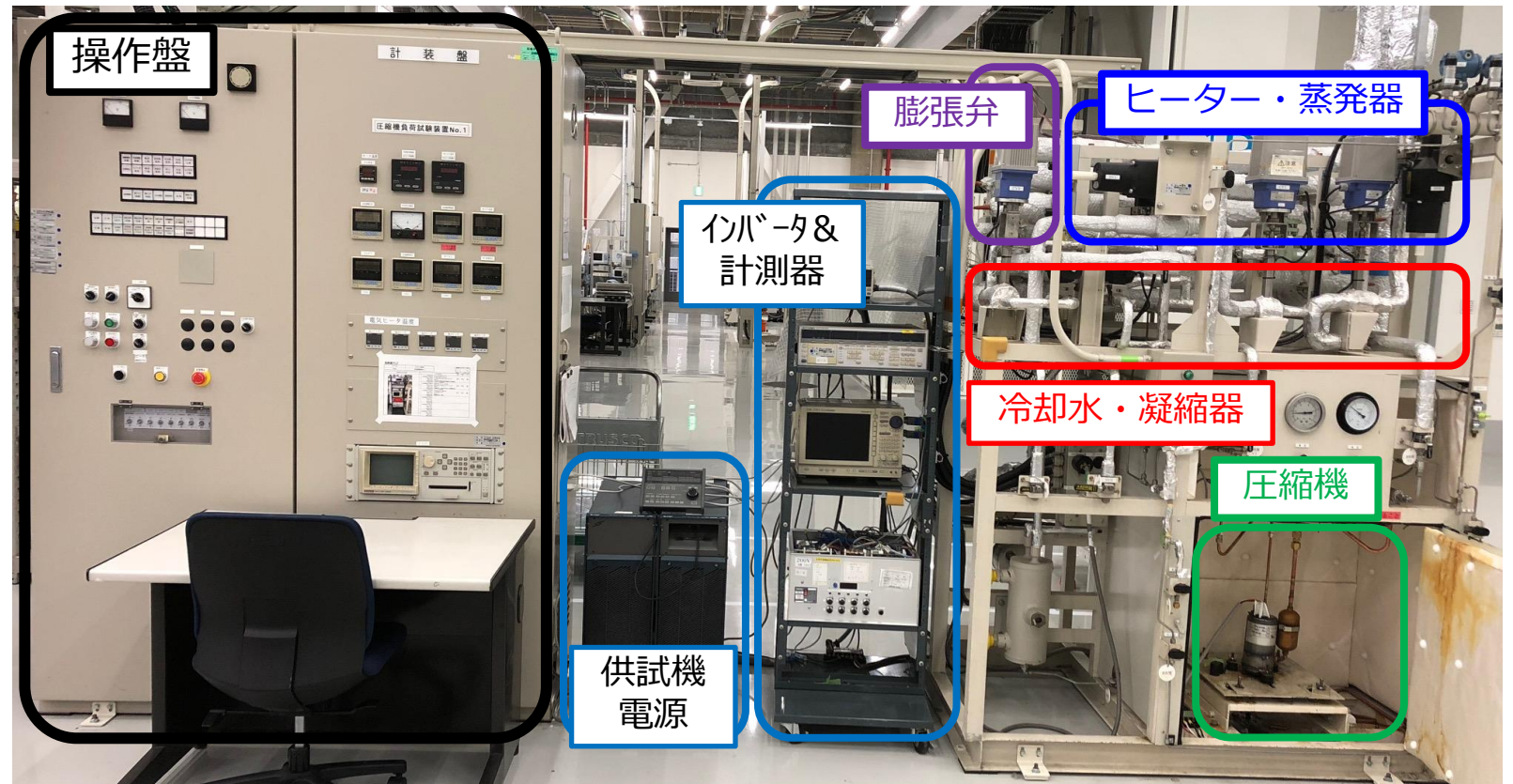
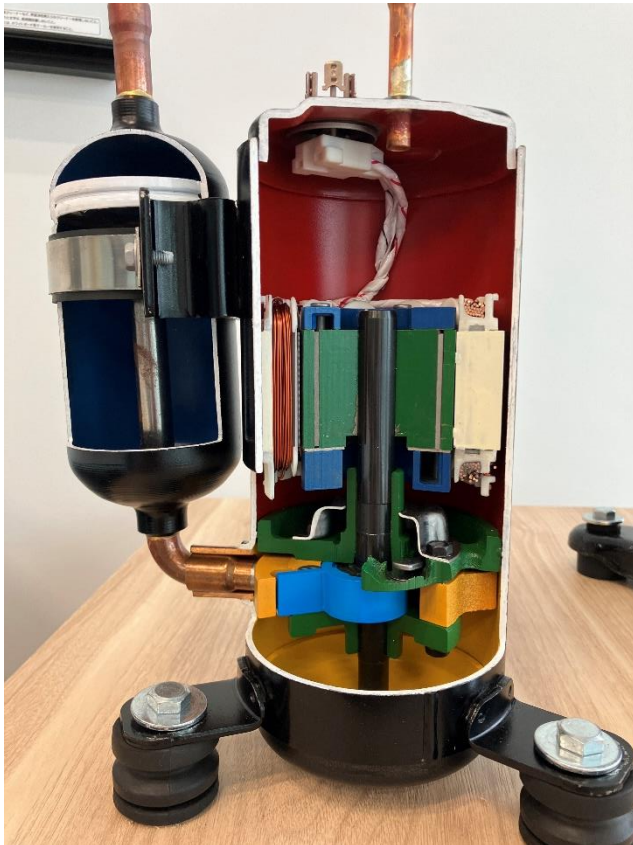
## モータ制御への要求事項

- ✓ 磁極位置センサレス制御で駆動
- ✓ 1つのマイコンで圧縮機・ファンを駆動（室外機）
- ✓ 1シャントでのモータ電流検出
- ✓ 開発工数の削減（シミュレーションの活用）
- ✓ 様々なマイコンへの移植容易性
- ✓ 1シリンダのスイング式圧縮機搭載機種では制振制御を実施



# モータドライブ開発の課題

- 上位の製品制御から回転数指令値を与えられ、空調用モータドライブでは回転数制御を実施
- 圧縮機ではイナーシャが極めて小さく、モータ周辺温度が高いためモータ試験台での確認不可
- ありとあらゆる条件を作り出すことができる大型の圧縮機試験装置を用いた実機ベースでの開発  
⇒ 試験工数大、所望の条件までの安定待ち時間大、トラブル再現のための繰り返し



圧縮機試験装置～家庭用空調機2.8kWクラス（主に10畳用）～



# 自動コード生成の導入背景

## <ファンモータ制御>

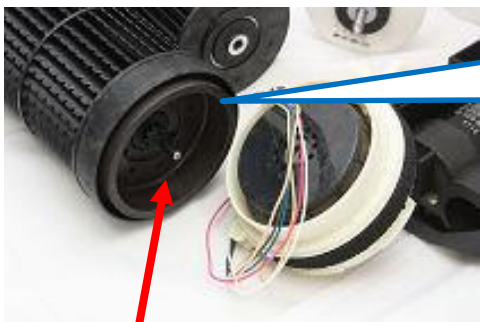
「ドライバ付きの購入モータ」から、「内製のファンモータ+位置センサレス制御」への置き換え  
 下記の観点と開発効率化と技能伝承から、MATLAB®、Simulink®によるモデルベース開発、自動コード生成の適用を決定

- ✓ ファンとモータの組み合わせ数が多く、ファンモータ制御の開発工数が多い
- ✓ 今まで採用してきた圧縮機モータ制御は使えず、新しいファンモータ制御ロジックを開発する



### 一般的なファンモータ

インナーロータ  
 (モータの内側が回転)

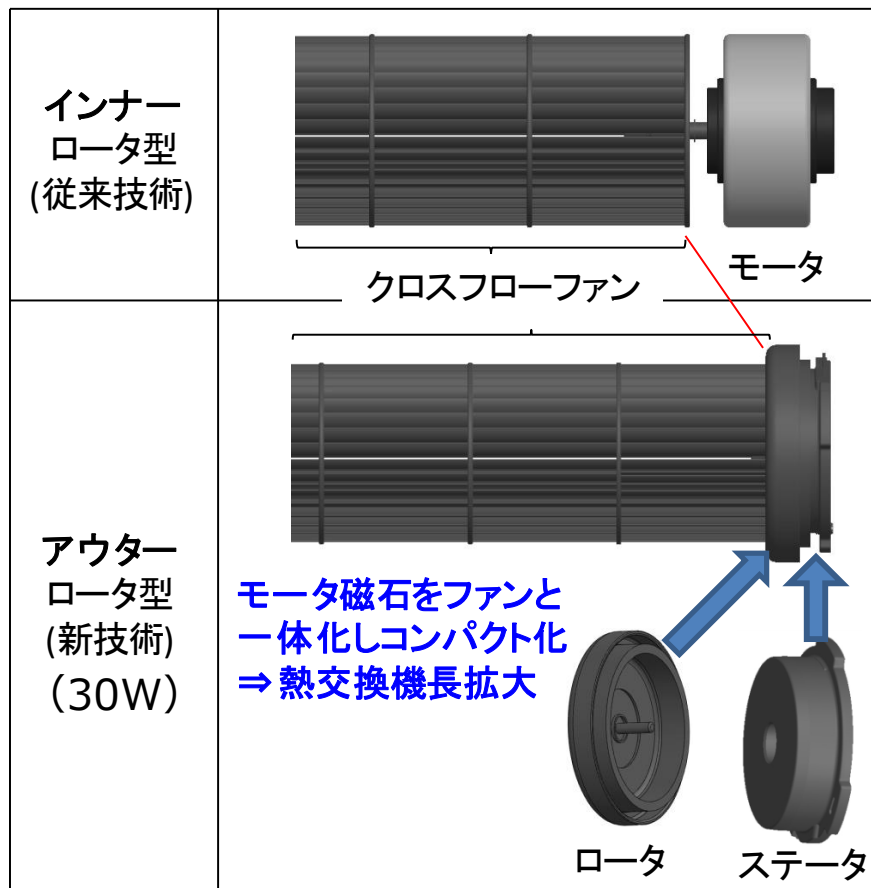


### 内製ファンモータ

アウターロータ  
 (モータの外側が回転)  
 ⇒低回転数・大トルクで有利

クロスフローファンとロータを一体化した  
**空調業界初の形式**でモータの効率アップと  
**室内機の性能向上に貢献**

藤井浩和・石丸 純・佐藤純一・高山佳典・大辻基史：「アウターロータ型ファンモータを搭載した高効率エアコン」, 冷凍, 第94巻, 第1100号(2019)



# 自動コード生成の導入背景

## <圧縮機モータ制御>

ファンモータ制御と同時期に、新方式の圧縮機モータ制御開発

- 暖房：低外気温での空調機の能力を確保するため、**圧縮機の最大回転数を上げたい**
- 冷房：低負荷でも室温を維持するため、**圧縮機の最小回転数を下げて最小能力を下げたい**

## 高回転：6step駆動を用いた電圧利用率改善

安本竜志, 宮島孝幸, 芦田剛, 小林直人 (ダイキン工業) : 「6ステップ駆動を用いた圧縮機向けセンサレス制御による空調機の暖房能力向上」, 電気学会回転機/リニアドライブ/家電民生合同研究会, RM-19-072/LD-10-071/HCA-19-049(2019)

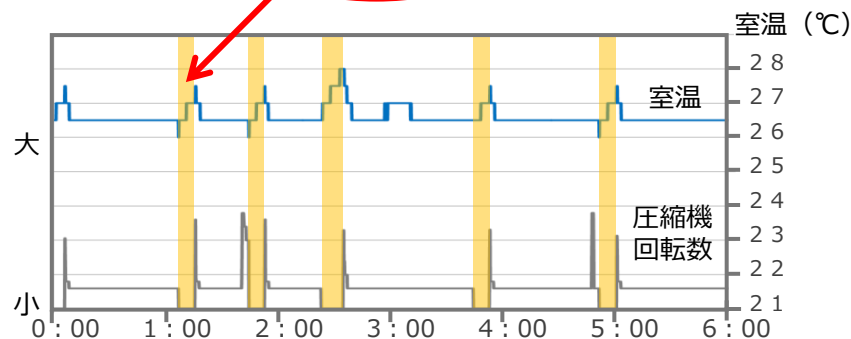
## 低回転：新方式のモータ制御で運転エリアのワイドレンジ化

- ファンモータ制御と同様に、**圧縮機モータ制御もMATLAB/Simulinkによるモデルベース開発、自動コード生成適用**を決定
- 自動コード生成によるROM/RAM/負荷率増から、演算が少ない簡易なセンサレス制御方式を選定
- 現行の圧縮機モータ制御方式は、ハンドコーディング開発から変更せず
  - 理由①：Simulinkモデルへの置き換えと信頼性担保の工数（改良の研究開発も続いている）
  - 理由②：マイコンの負荷率、ROM、RAMの増加

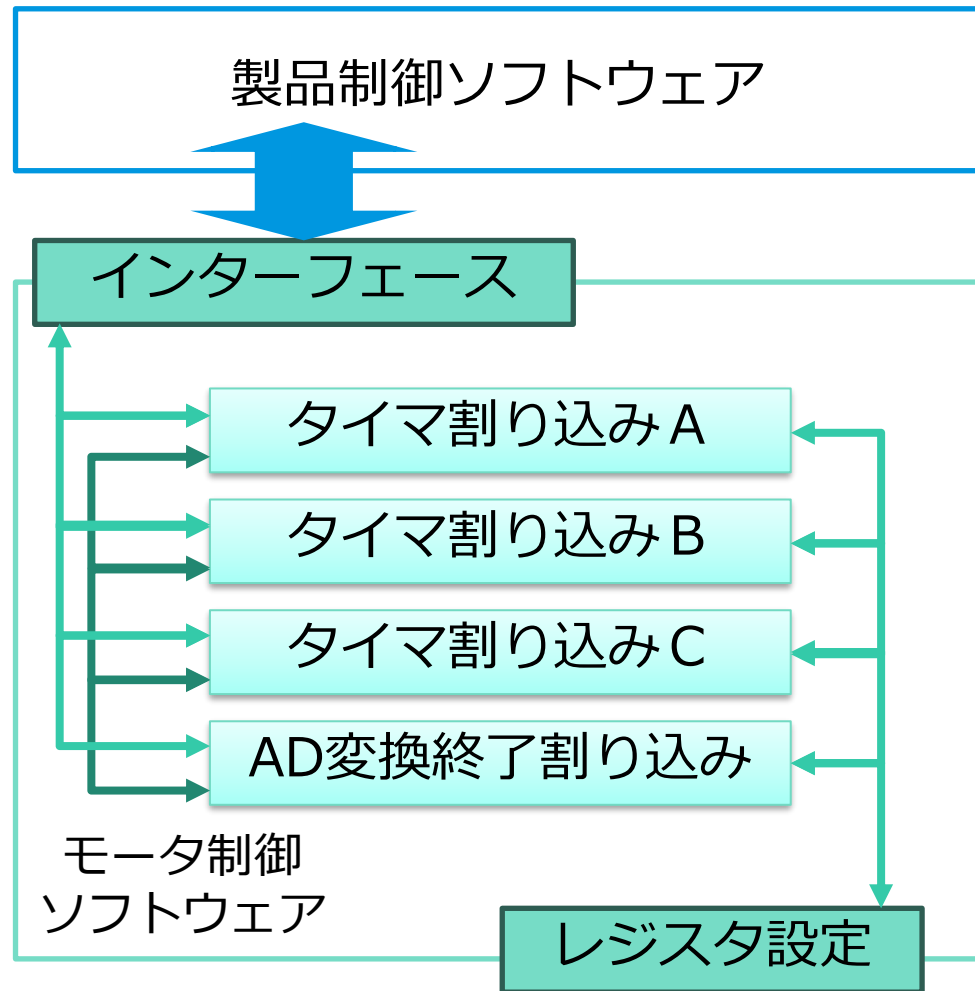
※現在でもハンドコーディングのみの開発、自動コード生成も用いる開発の2つに分かれている 18

センサレス制御の安定限界による制約

インバータの出力電圧による制約



# ソフトウェア構成



## オートコードの適用範囲

- 製品制御のシミュレーションモデルがないため、Simulinkを使うメリットがない
- 市場実績のあるソフトウェアを流用したい

➡ **自動コード生成をモータ制御ソフトウェアに限定**

## 各割り込み関数間のデータ引き渡し

- ある割り込み関数の演算完了後に他の割り込み関数にデータを引き渡したい（例 タイマ周期のレジスタ転送後に、タイマ割り込みのフィルタ定数を変更）

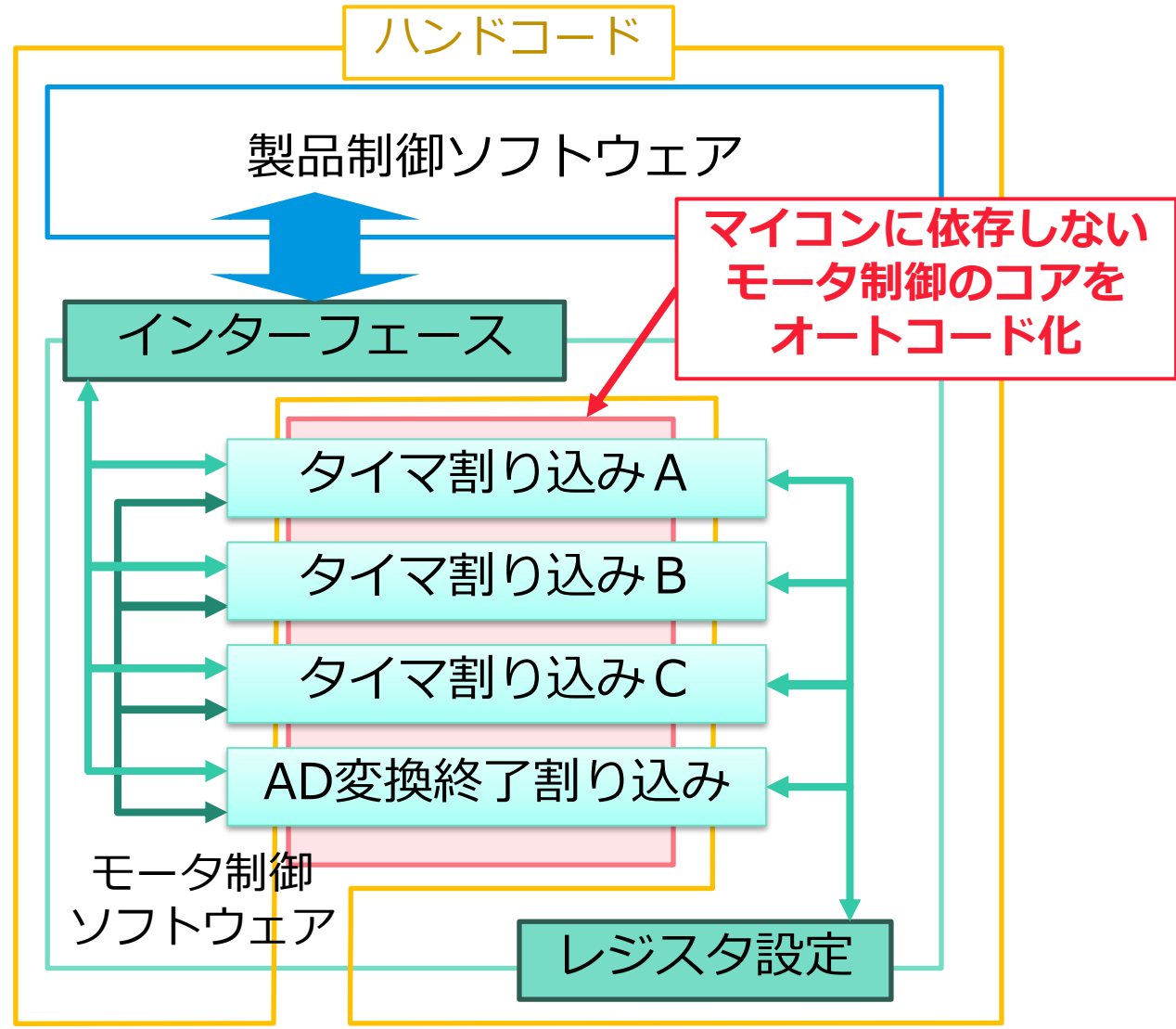
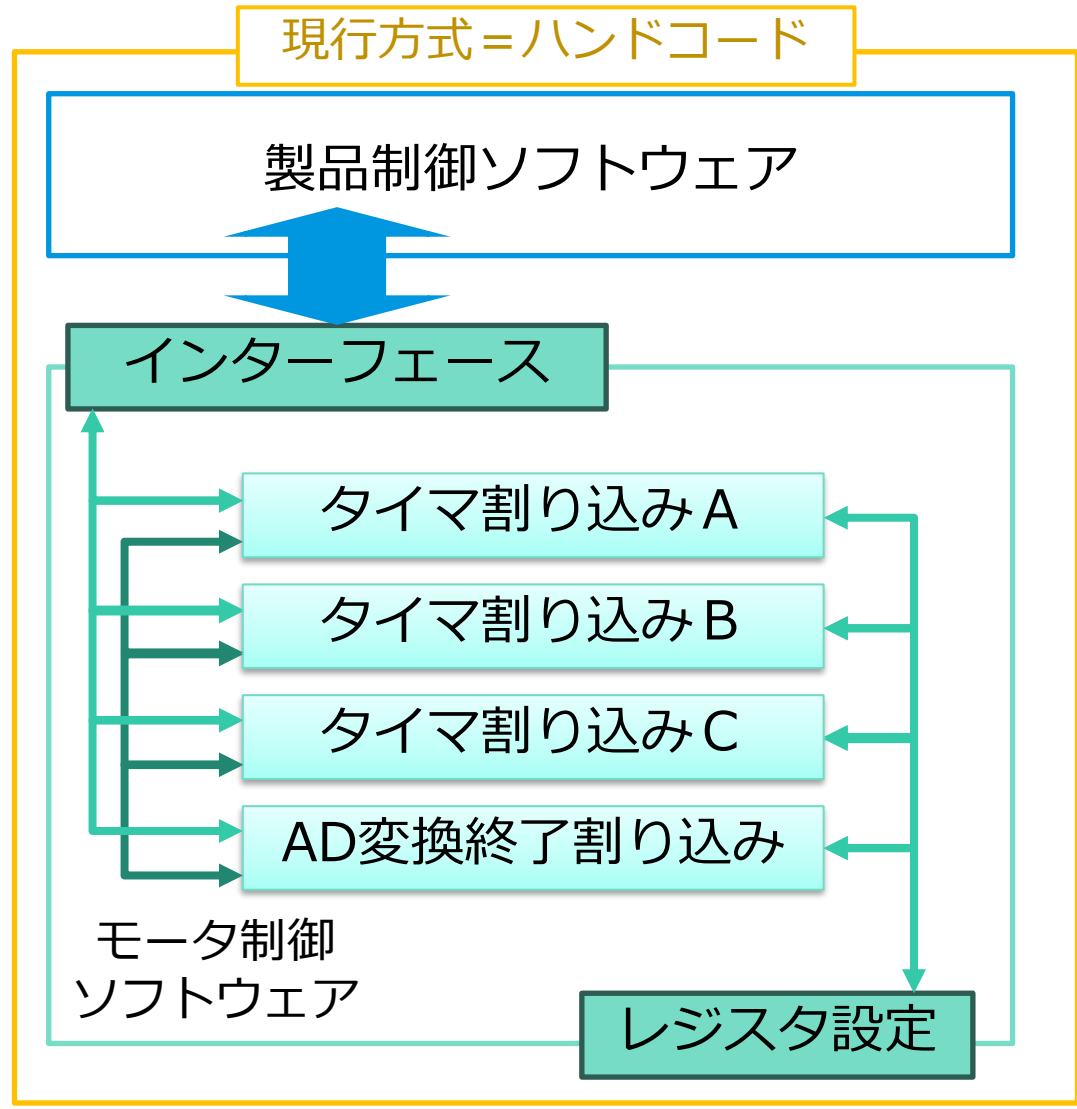
➡ **割り込み関数間のデータ引き渡しは  
ハンドコードで対応**

## マイコンのレジスタ設定

- 多種多能なマイコンへの対応
- 大半のマイコンでは、オートコード生成でレジスタ設定のコードは自動生成不可能

➡ **オートコード出力からレジスタ設定は  
ハンドコードで対応**

# ソフトウェア構成



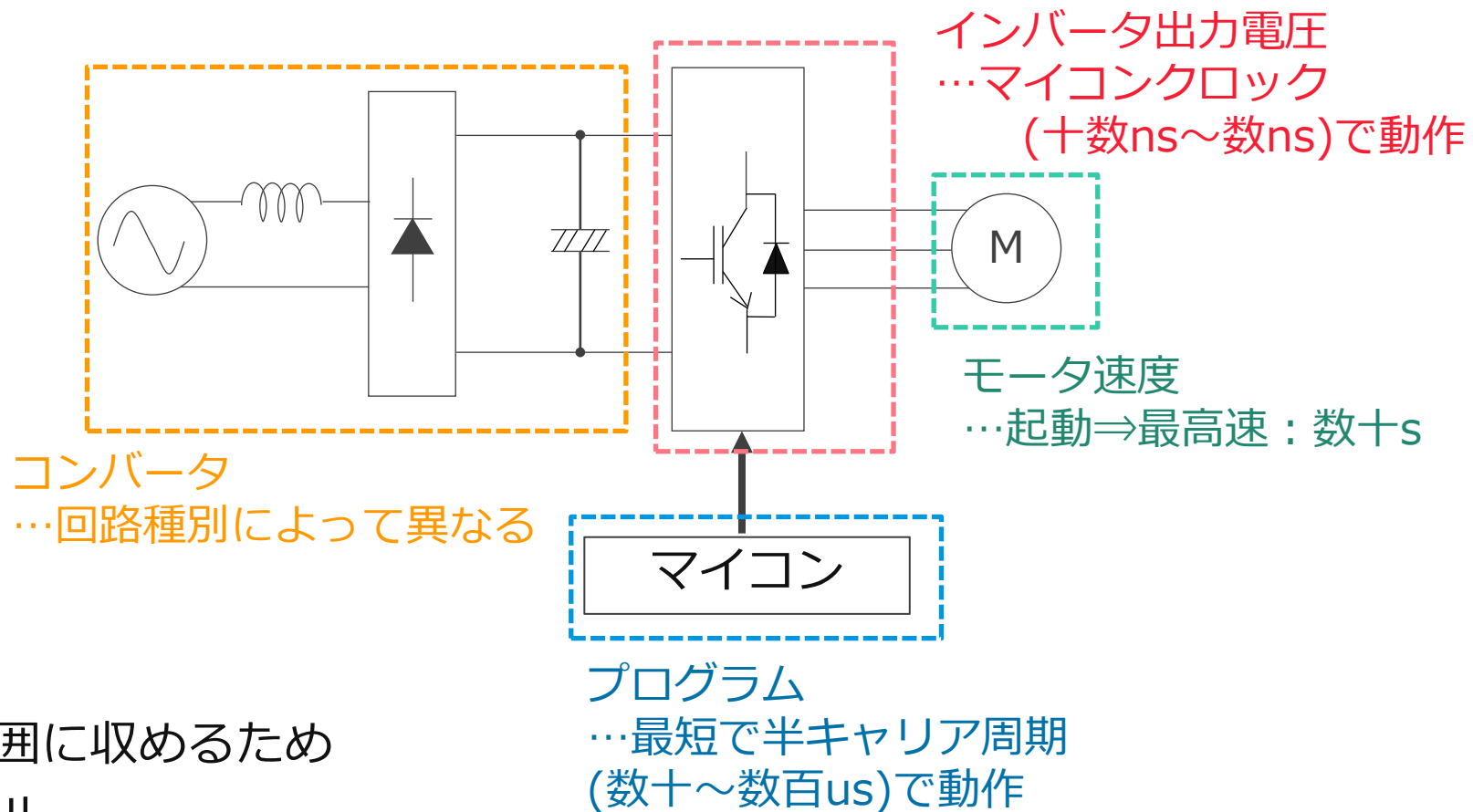
# シミュレーションモデル

- ▶ モデルベース開発では、制御対象をどの粒度でモデル化するかが重要（シミュレーション時間と精度のトレードオフ）
- ▶ パワーエレクトロニクス回路の動作周波数が高いのに対し、空調機用モータドライブの応答時間は長く、回路合わせのシミュレーション刻み幅を開発で用いるのは現実的ではない

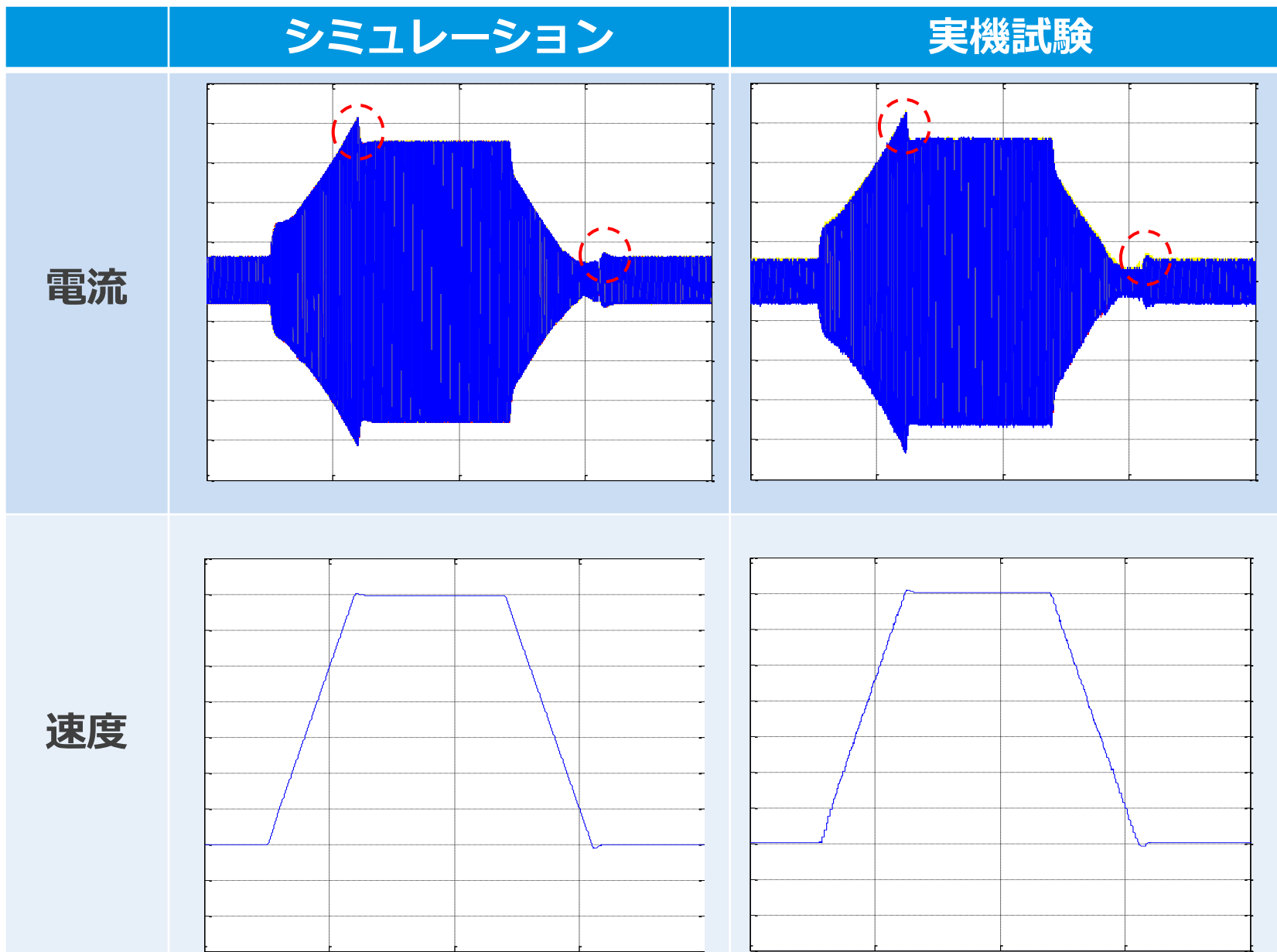


シミュレーション時間を現実的な範囲に収めるため

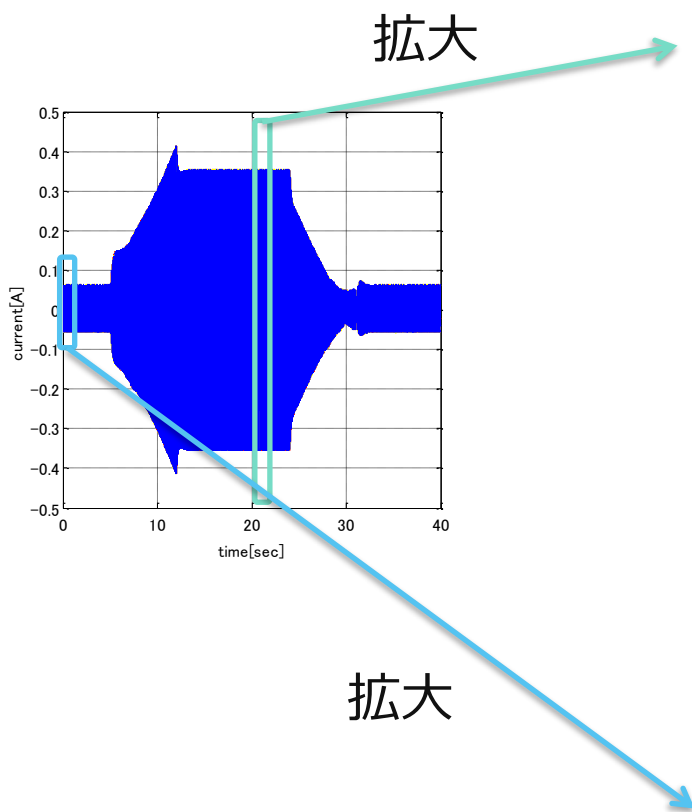
- ▶ インバータモデルは平均電圧モデル
- ▶ コンバータモデルは、
  - ◆ モータ制御に影響するものは厳密モデリング
  - ◆ 影響しないものはDC電圧を変更だけの簡易的なモデリング
- ▶ モータの加速レートは加速トルクが無視できる範囲で製品仕様より上げる(小手先のテク)



# ファンモータ制御 実機実験とシミュレーションの比較

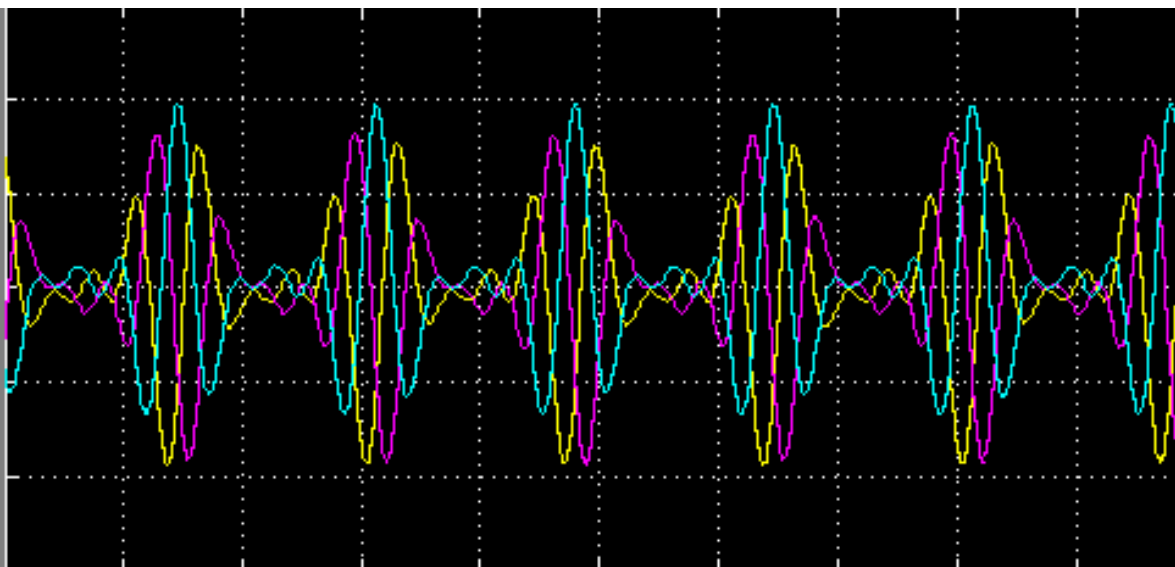


# ファンモータ制御 実機実験とシミュレーションの比較



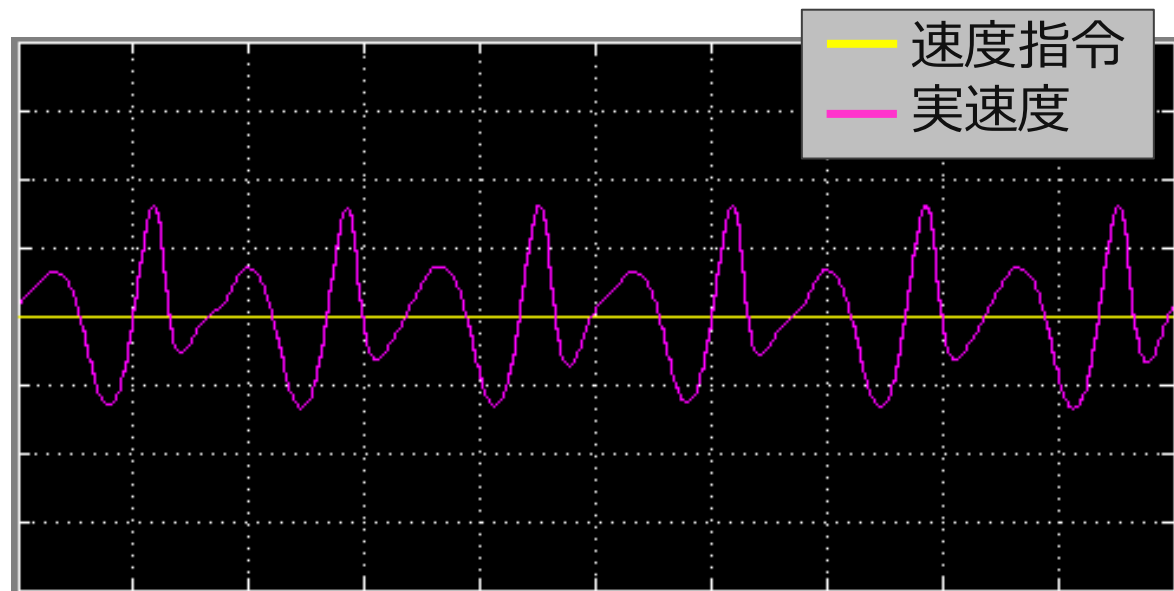
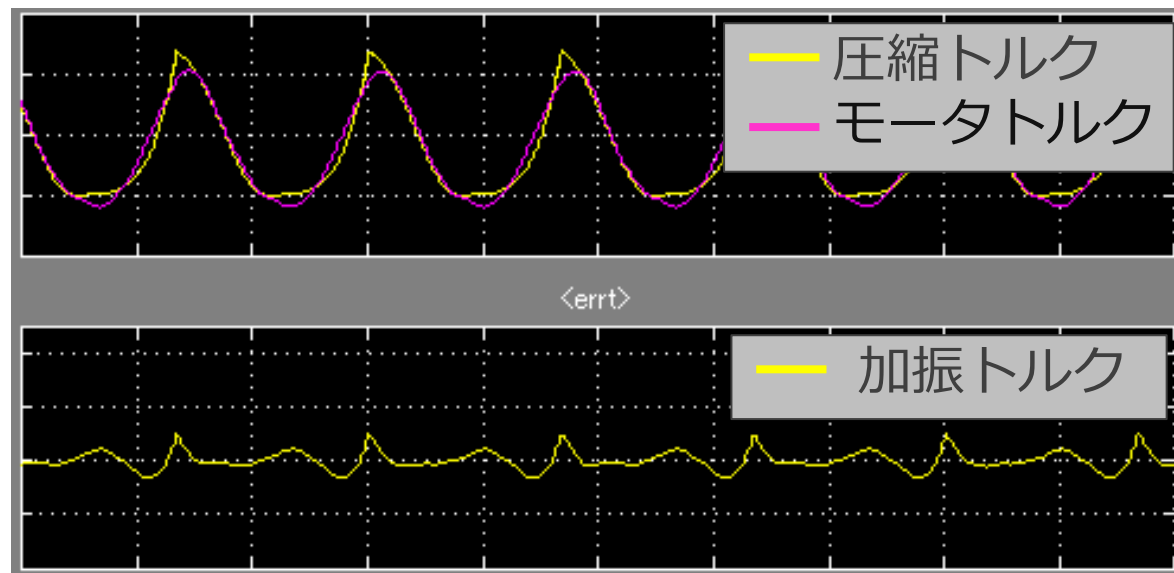
	シミュレーション	実機試験
高速		
低速		

# 圧縮機モータ制御シミュレーション



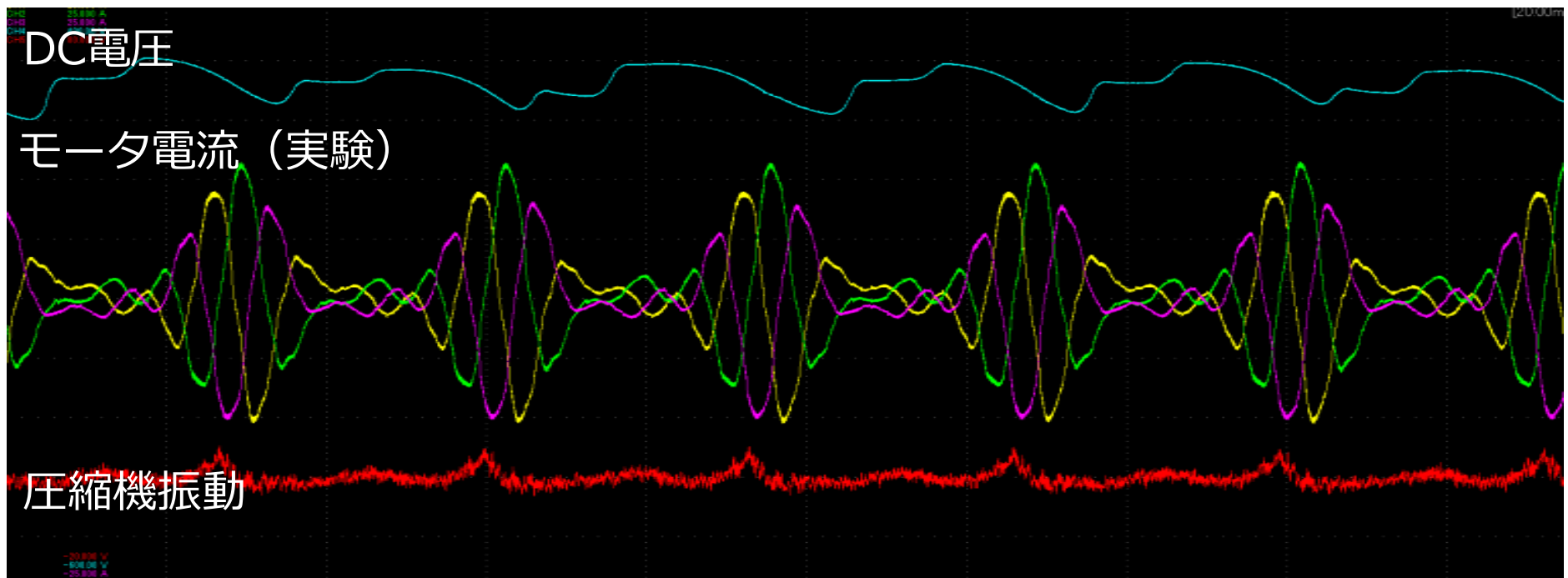
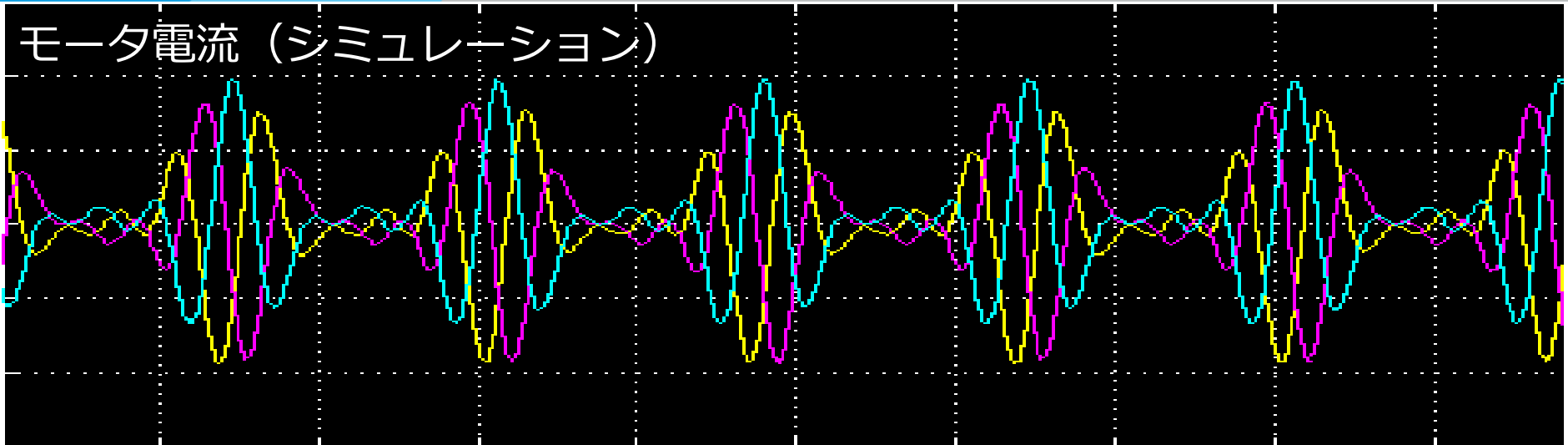
モータ電流

- 1シリンダのスイング式圧縮機の機械角1次の圧縮機トルク脈動に対し、モータトルクを逆位相で補償し、実速度の脈動（振動）の低減を確認
- モデルベース開発環境により、実際の圧縮機ではモニタできない回転数・トルクなどからロジックの妥当性を確認





# 圧縮機モータ制御 実機実験とシミュレーションの比較



## モデル設計基準

- Simulinkモデルの品質向上と安定化を目的とし、モデル設計基準の社内規格を作成
- MathWorks Automotive Advisory Board (MAAB、現在はMAB: MathWorks Automotive Board) のControl Algorithm Modeling Guidelines Using MATLAB, Simulink, and Stateflowを社内規格の底本として採用
- MAABモデリングガイドラインを関係者で読み合わせを行い、大半の項目をモータ制御アルゴリズムで準拠できることを確認
- 1項目だけ厳格に適用するとSimulinkモデルの可読性低下、およびモデリング工数増加の懸念
- MathWorks様から、ルール運用についての所見と、他社事例をご紹介いただき、該当項目は拡張して社内規格化



- モデル設計基準策定前に作成したモデルをモデル設計基準に準拠させることで、ROM/RAM/負荷率が4割程度削減
- 可読性も向上し、作業者によるモデル設計のバラツキも抑制

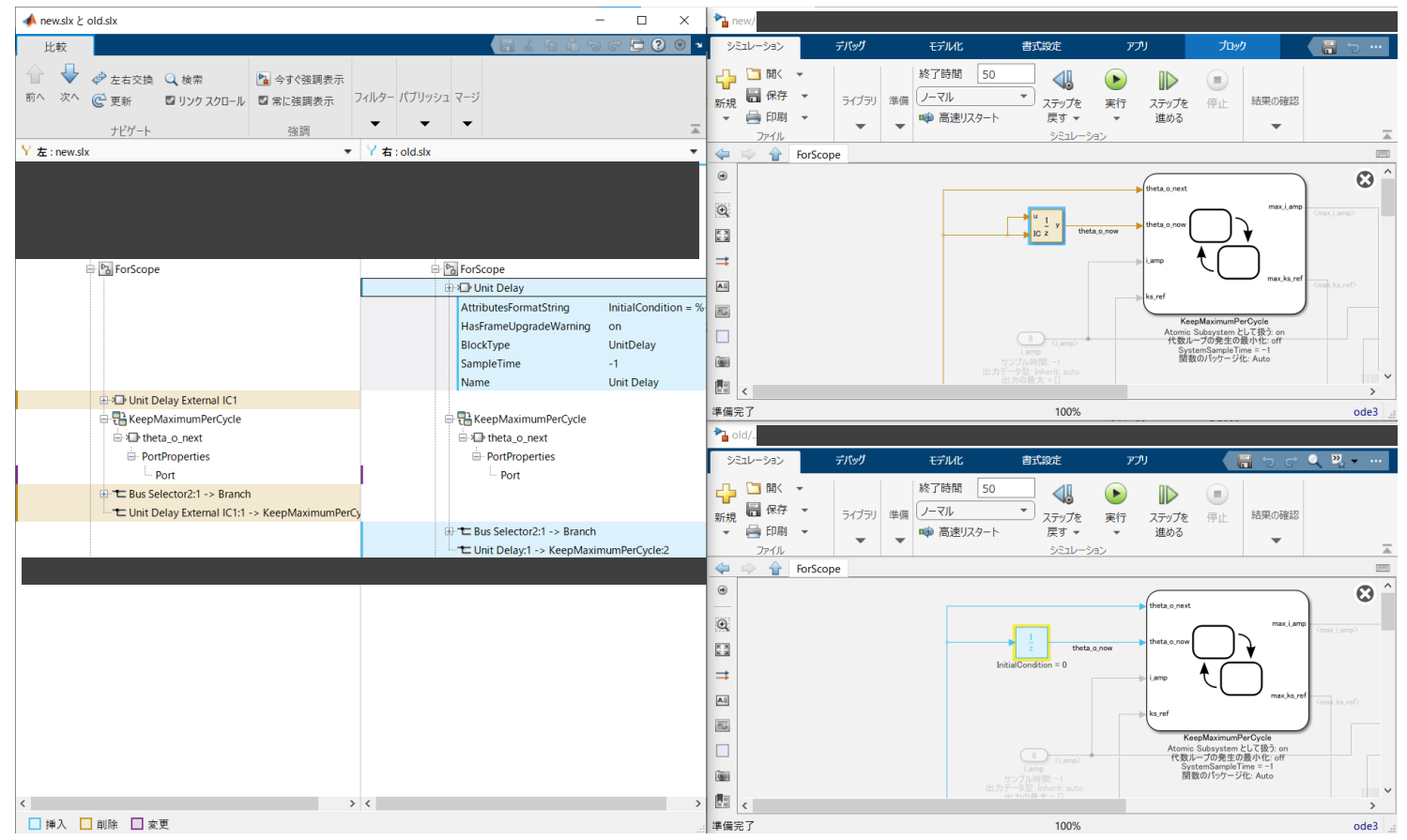
<参考> MAB ガイドライン <https://jp.mathworks.com/solutions/mab-guidelines.html>  
JMAAB <https://jmaab.jp/>

# モデルレビュー

- ▶ ハンドコーディングの開発では、C言語で記述されたソースコードを差分抽出ソフトで変更点差分抽出し、変更点を抜け漏れなくレビューできた
- ▶ オートコードは少しモデルを変更するだけでローカル変数名が変わるため、オートコードの差分抽出で変更点のレビューはできない



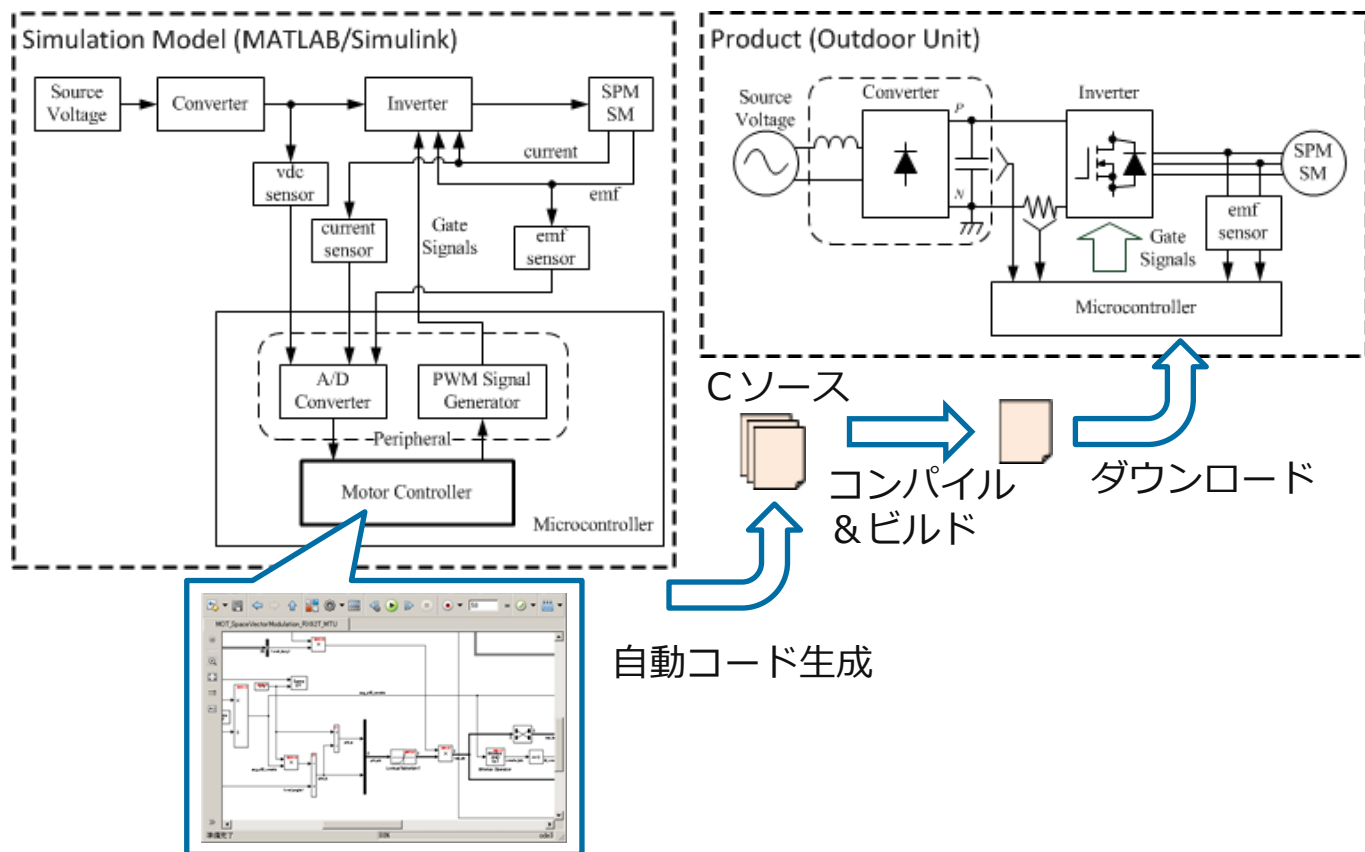
- ▶ 他社製品で差分抽出を抽出  
※MATLABのvisdiffで代替可能
- ▶ PDFファイルでレポート出力し、  
変更点レビューで活用



## 自動コード生成導入した結果

- ハンドコーディングのみの開発ではC言語でシミュレーションモデルを構築したり、回路シミュレータでシミュレーションしてからコーディングしたり、と開発手法が属人化
- マイコンの演算能力不足から今でも固定小数点演算が主であり、デバッグ作業が難航

- ◆ 変更点が多いモータ制御ロジックのコーディング作業が不要になり、シミュレーションから実験までを一気通貫で効率化
- ◆ オーバーフロー／アンダーフローが検出できるので、実装ミスを防げるようになった
- ◆ コーディングが悪いのか、ロジックが悪いのか、定数設定が悪いのか、課題を切り分けが可能になった
- ◆ 学生時代に制御を研究した人はSimulinkでシミュレーションするのがスタンダードになっているので業務に順応しやすい



---

## 目次

1. ダイキン工業の紹介
2. 空調機のシステム構成とパワーエレ技術の重要性
3. モータドライブ開発への自動コード生成の適用
4. 量産適用の展開で見えてきた課題
5. まとめ

## ① MATLAB®のバージョンアップ対応

- 量産適用したものの、バージョンアップなどのメンテナンス体制まで構築できず
- 2014年発売の製品開発から約8年間R2013aを継続して使用
- 2021年、全社的に業務用PCのOSバージョンアップが発生し、R2013aがサポート対象外

### バージョンアップ時の課題(一例)

- ◆ バージョンアップ前後でのオートコードの等価性検証
- ◆ ROM/RAM/負荷率の増減
- ◆ 互換性 (TRUE/FALSE ⇒ true/false、サンプリング時間の継承でエラー、オートコードのファイル等々)
- ◆ 変更されたユーザインタフェースへの慣れ

### 新OSがサポート対象かつ、他社で実績のあるR2015a SP1に移行

- ◆ 等価性検証 ⇒ 人力で対応
- ◆ 負荷率 ⇒ 0.3%増加 ⇒ 将来を見据え、負荷率増加箇所のモデル修正で対応
- ◆ ROM ⇒ 減少で問題なし
- ◆ RAM ⇒ 0.2%増加
- ◆ 互換性 ⇒ 人力で対応

## ① MATLAB®のバージョンアップ対応

- R2013a ⇒ R2015a SP1への移行で当初は問題なかったが、現時点でR2015a SP1は古い
- 最新版になるほど、MATLAB/Simulinkの利便性は向上
- 学生時代からMATLABを使っている新入社員にとっては最新のバージョンの方が馴染みがある



### 定期的にバージョンアップする体制構築が必要

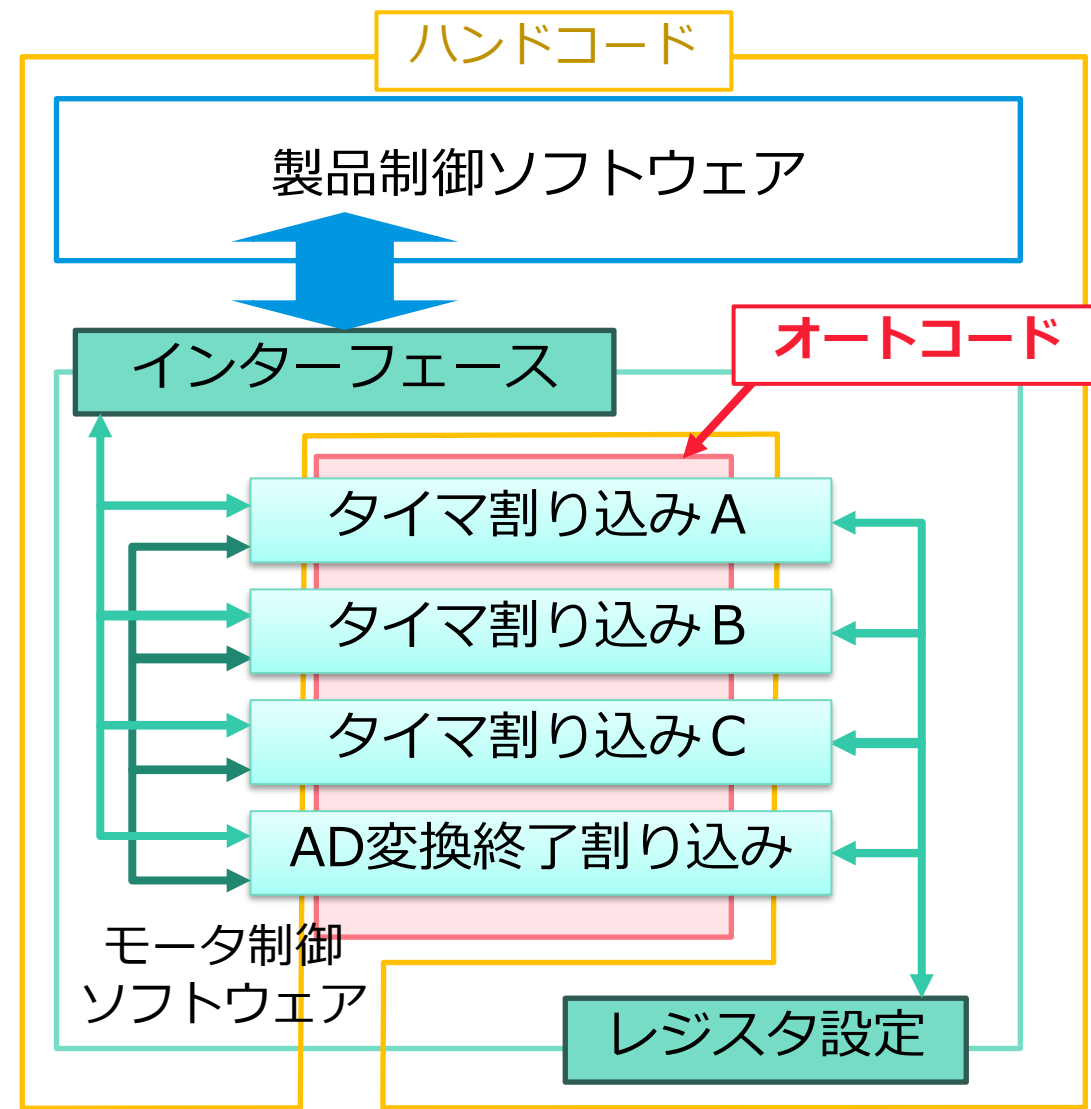
- 人力での対応でバージョンを検証には限界がある
- 下記のtoolboxなどを活用し、最小限の工数でのバージョンアップ実現が必要
  - ◆ Simulink Check™
  - ◆ Simulink Coverage™
  - ◆ Simulink Design Verifier™
  - ◆ Simulink Test™

## ② デバッグ作業・実機を使った定数設計確認

- モータ制御を全てをオートコード化ではなく、レジスタ設定やオートコード間のデータ受け渡しをハンドコードで実施。
  - ◆ レジスタの設定ミスや、受け渡しのデータ型によるバグ
  - ◆ Simulinkでのシミュレーションでは負荷率が評価不可
- インバータ・モータの非線形性、インバータ・コンバータモデルを簡易化

### 実機を用いたデバッグ作業・定数設計が残っている


- 全てをモデル化してシミュレーション(MILS : Model In the Loop Simulation)で確認になりがちだが、現実的ではない
- HILS (Hardware In the Loop Simulation)や実機試験との使い分けが重要





### ③ 技能伝承

- 社内にモータ制御を開発できる技術者が少ない
- モータ制御方式を使い分けており、「ハンドコーディングのみの開発」（現行方式）、「自動コード生成も用いる開発」（新方式）の2つに分かれている
- MATLABライセンス数も多くはないため、作業する人が限られる
- モデルベース開発に馴染めない人の声
  - そもそもMATLABの使い方がわからない
  - Subsystemの階層が深くて、信号の流れを追えない
  - 仕様書との対応関係がわかりにくい



MathWorksのトレーニング、社内セミナーなどで実際にMATLAB/Simulinkに触ってもらい、開発を経験させてモデルベース開発をできる技術者を徐々に増やしてきた

- ◆ 4人から始めて、10年経ってようやく10名程度が開発できるようになったきた
- ◆ ただし、部署異動もあって、実際に開発できるのは全社で6名程度  
(ハンドコーディングでモータ制御を開発できる人の方が多い)

モデルベース開発導入は技能伝承も目的の1つあり、教育資料を拡充させながら技術者育成を継続する

## 5. まとめ

- 2050年に向け、2017年比で空調機需要が3倍
- カーボンニュートラルに向け、インバータ空調機の比率が増えていく  
⇒ ソフトウェア開発工数の削減が、今後ますます課題になる
- 開発人数・MATLABライセンス数も限られる中で自社独自の仕組みづくりは限界
- 他社事例を学び、当社でも10年ほど前から自動コード生成を導入で工数削減してきたが、まだまだ改善代は多く、道半ば



- ◆ 様々な業種のニーズを集約しているMathWorks様からサポートだけではなく、**コンサルティング契約を通じて、更なる信頼性向上と開発工数削減**を目指す
- ◆ MATLAB EXPOを通じた情報共有・意見交換を通じて、エンドユーザの皆様、サードパーティー製品のベンダー様、マイコンメーカー様が足並みを揃えていくことも大事ではないか