

省エネ・高能率加工の実現に貢献する工作機械に優しい 革新的CAM開発のための調査研究

研究概要

【背景】 工作機械の待機電力を低減することは考えられているが、工作機械の加工時消費電力を低減するという試みは見られない。これは、工具経路の良し悪しによって工作機械の加工時の消費電力が増減することに無頓着であるためである。特に、CAMは工具経路を計算する際に工作機械の構造や軸構成を考慮しておらず、加工時の消費電力も大きく異なる。これは、今後の普及が拡大する5軸加工機では特に顕著となり、工具経路の計算や素材配置の決定を行う際に、工作機械の動き易さを考慮できれば、加工時の消費電力を大きく低減できる。

【目的】 工作機械の加工時消費電力が運転状況によって大きく増減することに着目し、工作機械の動き易さを消費電力の大小で定量評価する。この評価法に従って、工作機械の動き易さに配慮した(工作機械に優しい)工具経路を計算するCAM機能を検討する。

省エネ・高能率加工の実現に貢献する工作機械に優しい 革新的CAM開発のための調査研究

【実施体制】

リーダー： 神戸大学 白瀬敬一
協力学術会員： 神戸大学 佐藤隆太, 埼玉大学 金子順一
賛助会員企業： (株)IHI, 川崎重工業(株), (株)ジェイテクト,
デジタルプロセス(株), 富士通(株), 三菱電機(株),
ヤマザキマザック(株)

【実施事項】

① 市販されているCAM機能と技術課題の調査

市販されているCAMを調査して、本研究で提案している工作機械に優しい(工作機械が動き易い)工具経路の生成が独自のアイデアであることを明らかにする。また、現行のCAMが備えている、工具経路の最適化、加工条件の最適化、5軸加工における干渉回避などに関する機能を調査して、革新的なCAM開発に求められる技術課題を明らかにする。

【実施事項】(つづき)

② 工作機械の送り駆動系の消費電力推定モデルの開発

消費電力のシミュレーションが可能な送り駆動系の数学モデルを構築する。さらに、シミュレーション結果を消費電力の実測値と比較して数学モデルの妥当性を検証する。その後、工作機械の送り駆動系をモデル化して、運転状況(駆動軸の違い)によって変化する消費電力の大小や、サーボゲインによって変化する消費電力の大小を検討する。

③ 工作機械に優しい(工作機械が動き易い)素材配置決定法の検討

工作機械の消費エネルギーを考慮した工程計画法を実現するために、同一の工具経路、および工具姿勢変化に対して、異なる素材の配置案を与えてポスト処理を行った場合のNCプログラムを作成して工作機械運転時の消費電力を測定し、素材配置と機械消費電力の関係を明らかにする。

省エネ・高能率加工の実現に貢献する工作機械に優しい 革新的CAM開発のための調査研究

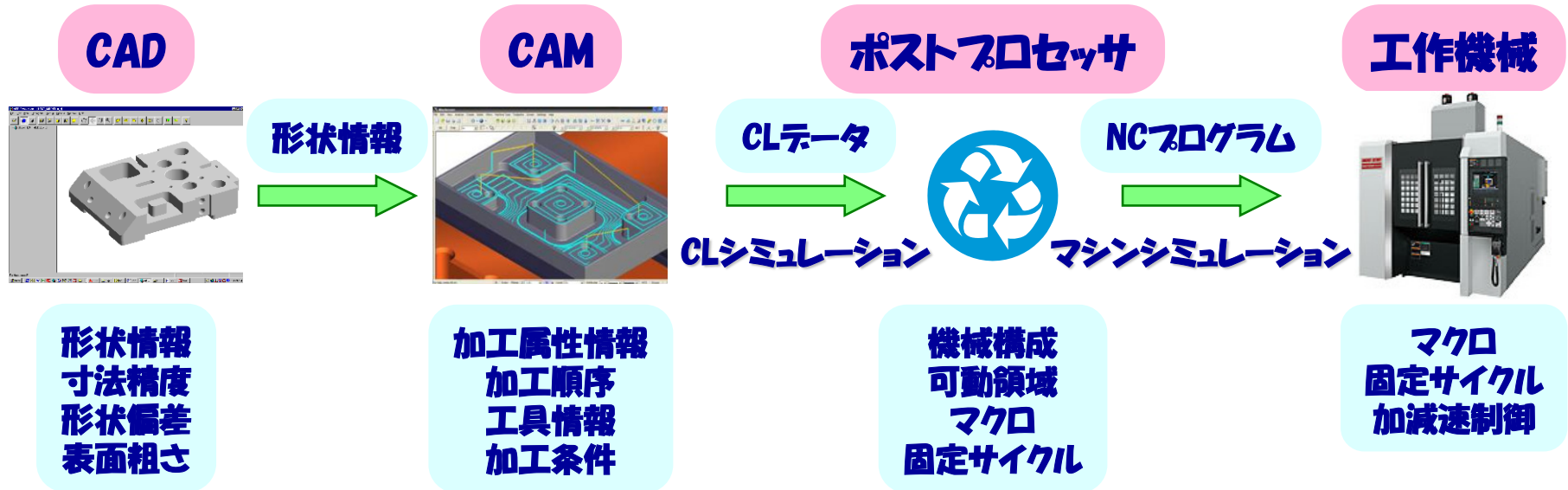
【実施事項】(つづき)

また、素材の配置によって消費電力が最小となる工具経路パターンが異なることが予想されることから、遺伝的アルゴリズムなどによって消費電力を最小化する工程最適化の解法を検討する。

④ 工作機械に優しい(工作機械が動き易い)工具経路生成法の検討

工具経路生成時に工作機械に対する負担を評価指標として考慮可能とすることを目的として、商用CAMの工具経路生成モジュールによる工作機械運転時の消費電力測定を実施し、工具経路生成モジュールに与えられるパラメータと消費電力、加工時間との関係を調査する。さらに、多関節ロボット等の経路計画に用いられているポテンシャル法を参考として、工具移動経路中の運動方向変化に対する消費電力の大きさをポテンシャル関数で記述して、工具経路生成時にCAMオペレータが陽に参照可能とするシステムの開発を検討する。

欠けている省エネ・高能率加工への配慮



CAMは工作機械のことを考えない!

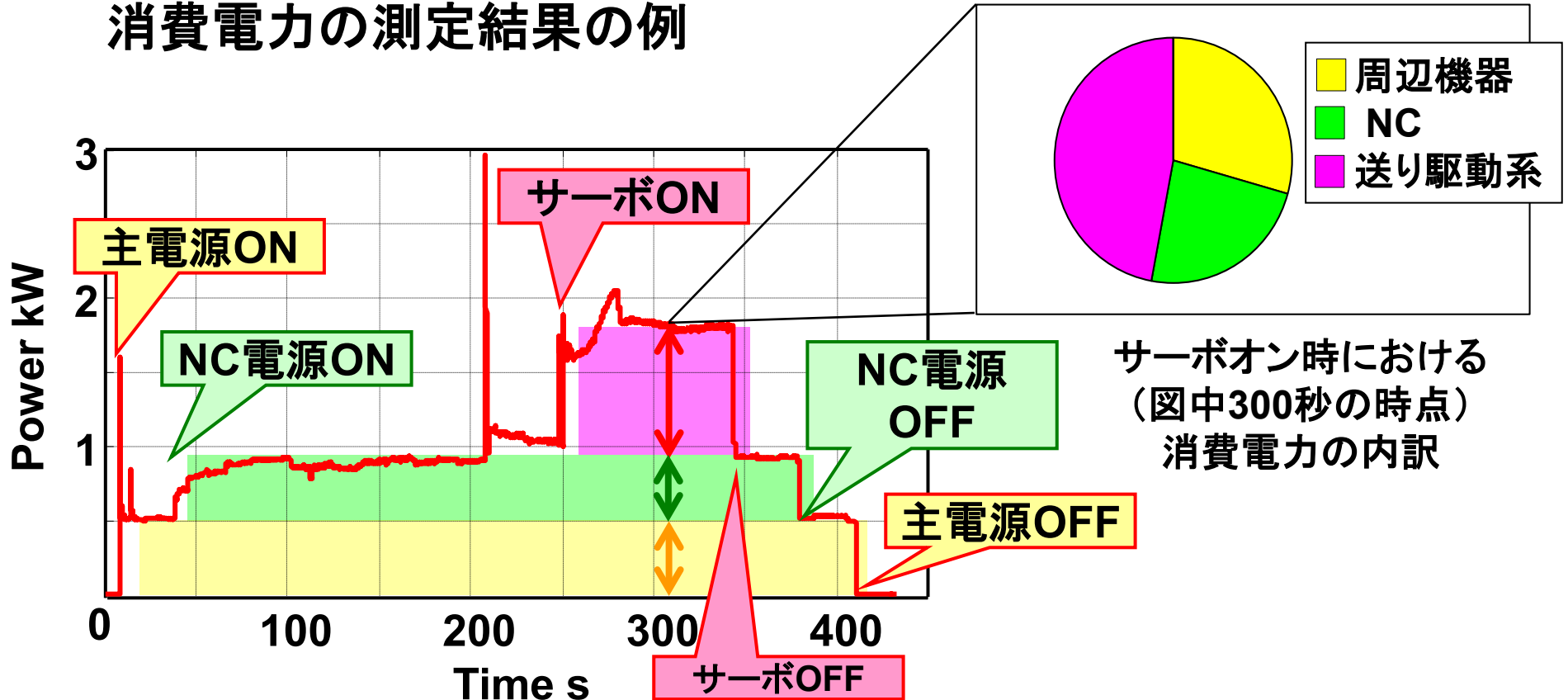
工作機械はNCプログラムに従うだけ!

NC加工の省エネ・高効率加工を考える余地がない!

工作機械の動き易さを考慮すれば省エネ・高効率加工に繋がるのでは?

工作機械送り駆動系の消費電力

消費電力の測定結果の例

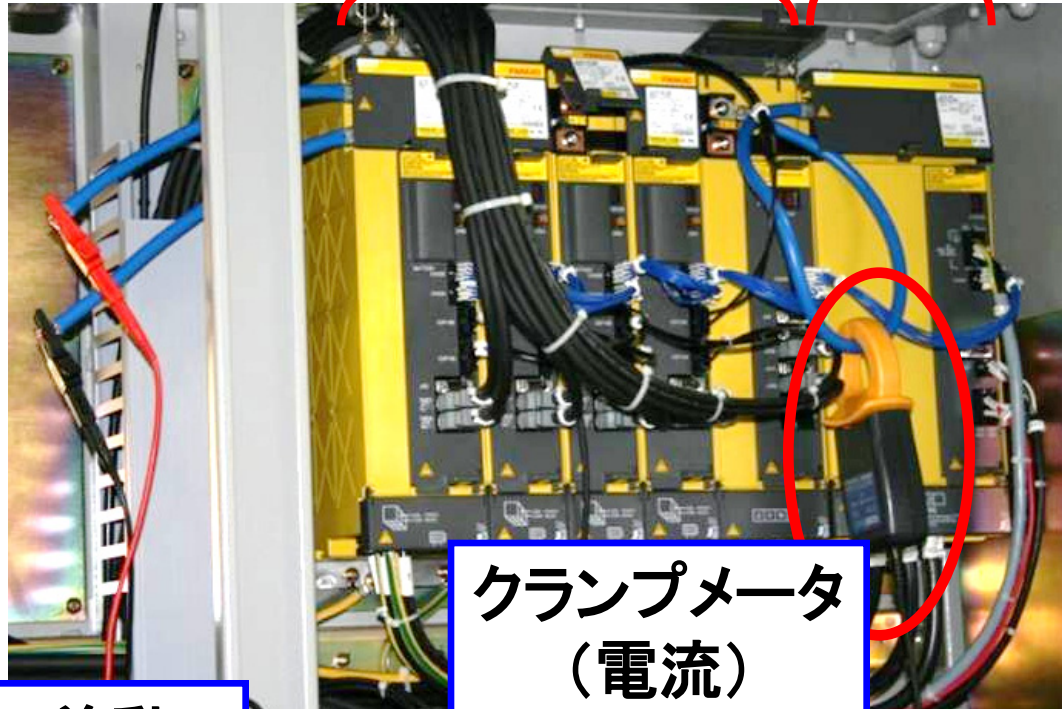


メインブレーカ部における消費電力の測定結果
(電源ON-サーボON-サーボOFF-電源OFF)

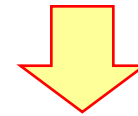
送り駆動系の消費電力
⇒ 無視できない

消費電力の測定

モータドライバ コンバータ



- ・モータトルク
- ・回転速度



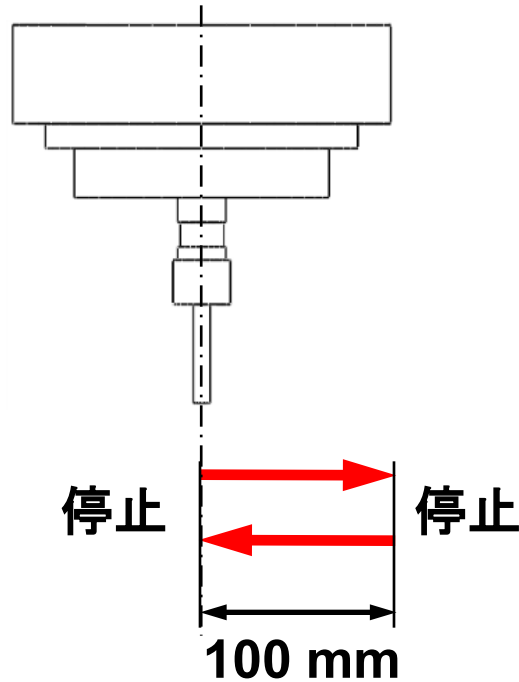
波形診断機能
により記録

差動
プローブ
(電圧)

データロガ

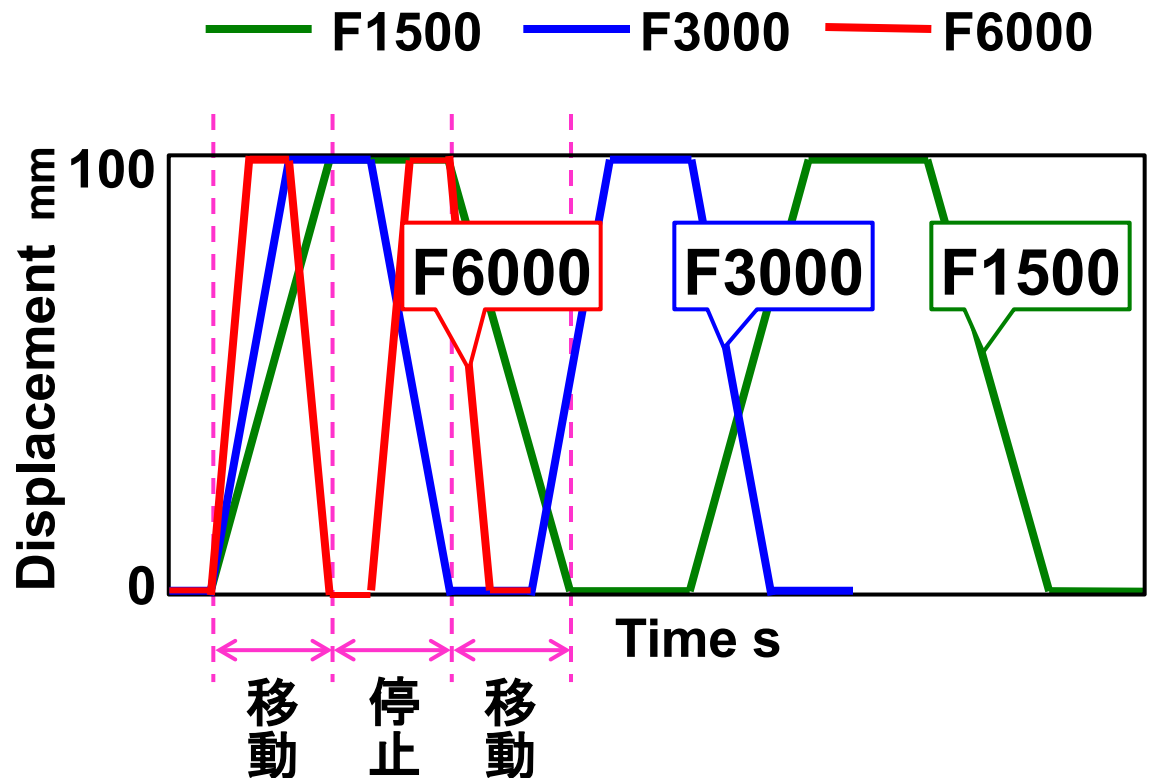
$$\text{電力[W]} = \text{電流[A]} \times \text{電圧[V]}$$

送り速度の影響

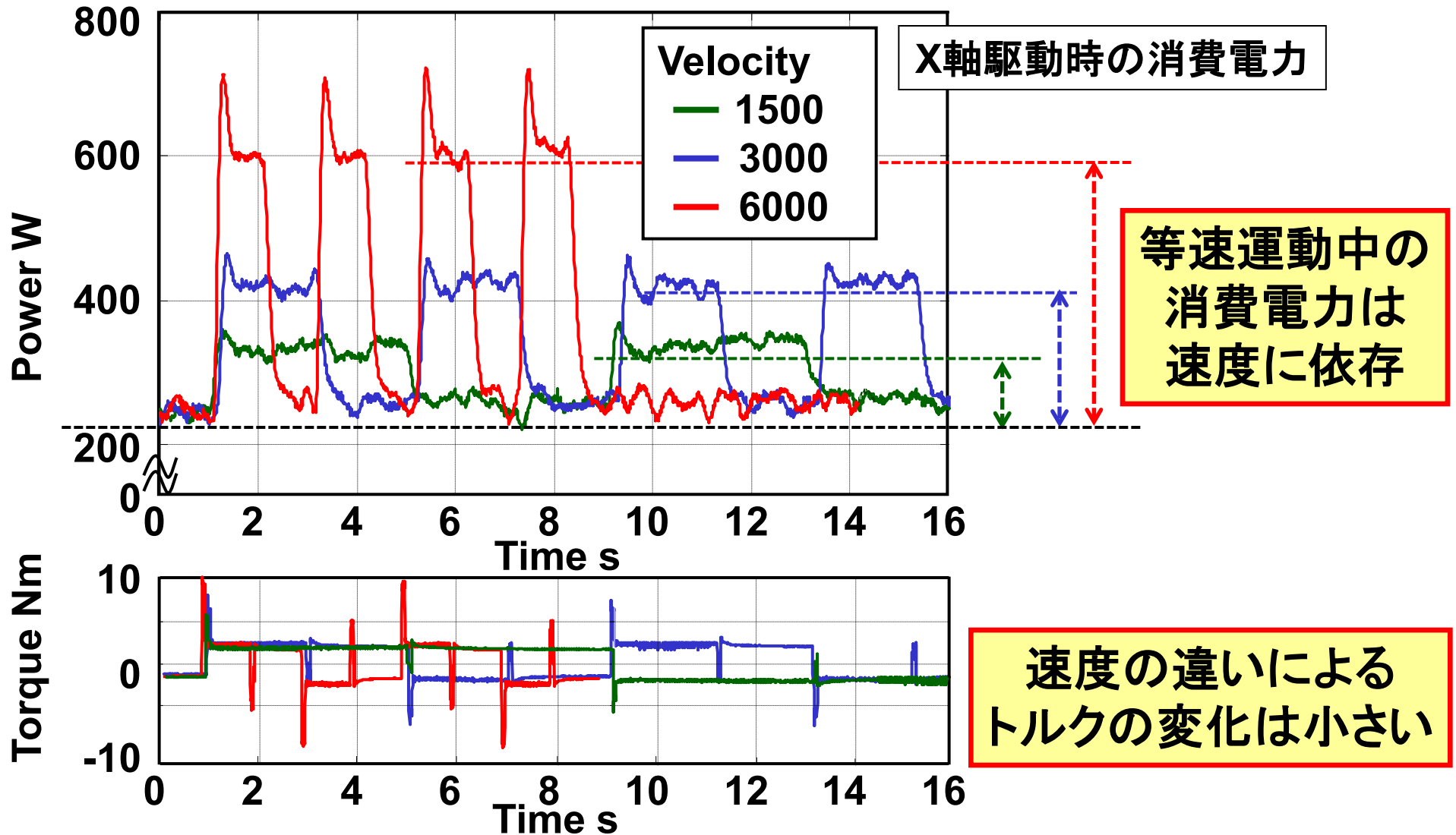


- ・移動距離 100 mm
- ・等速運動
- ・2往復

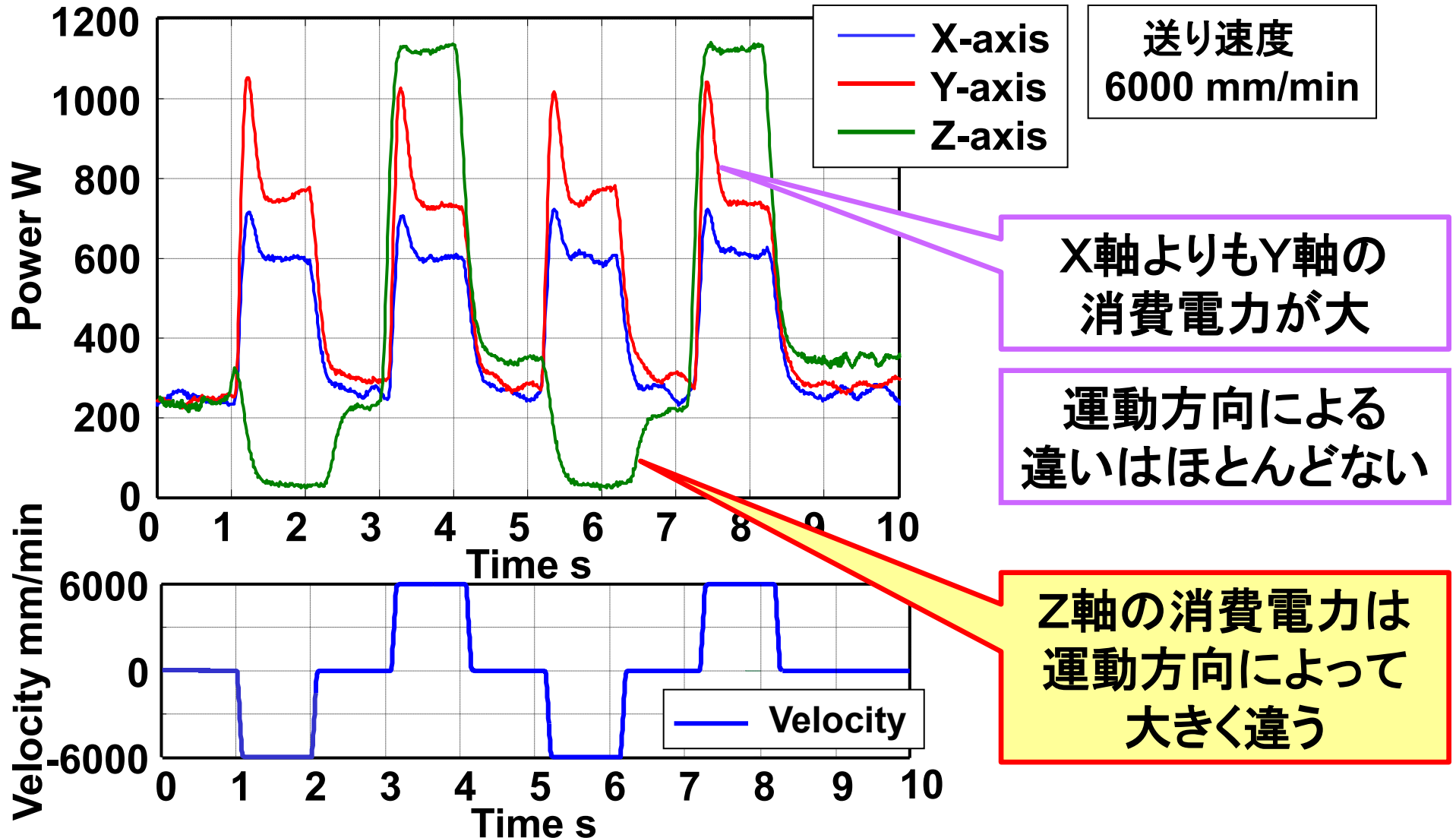
・送り速度
1500, 3000, 6000 [mm/min]



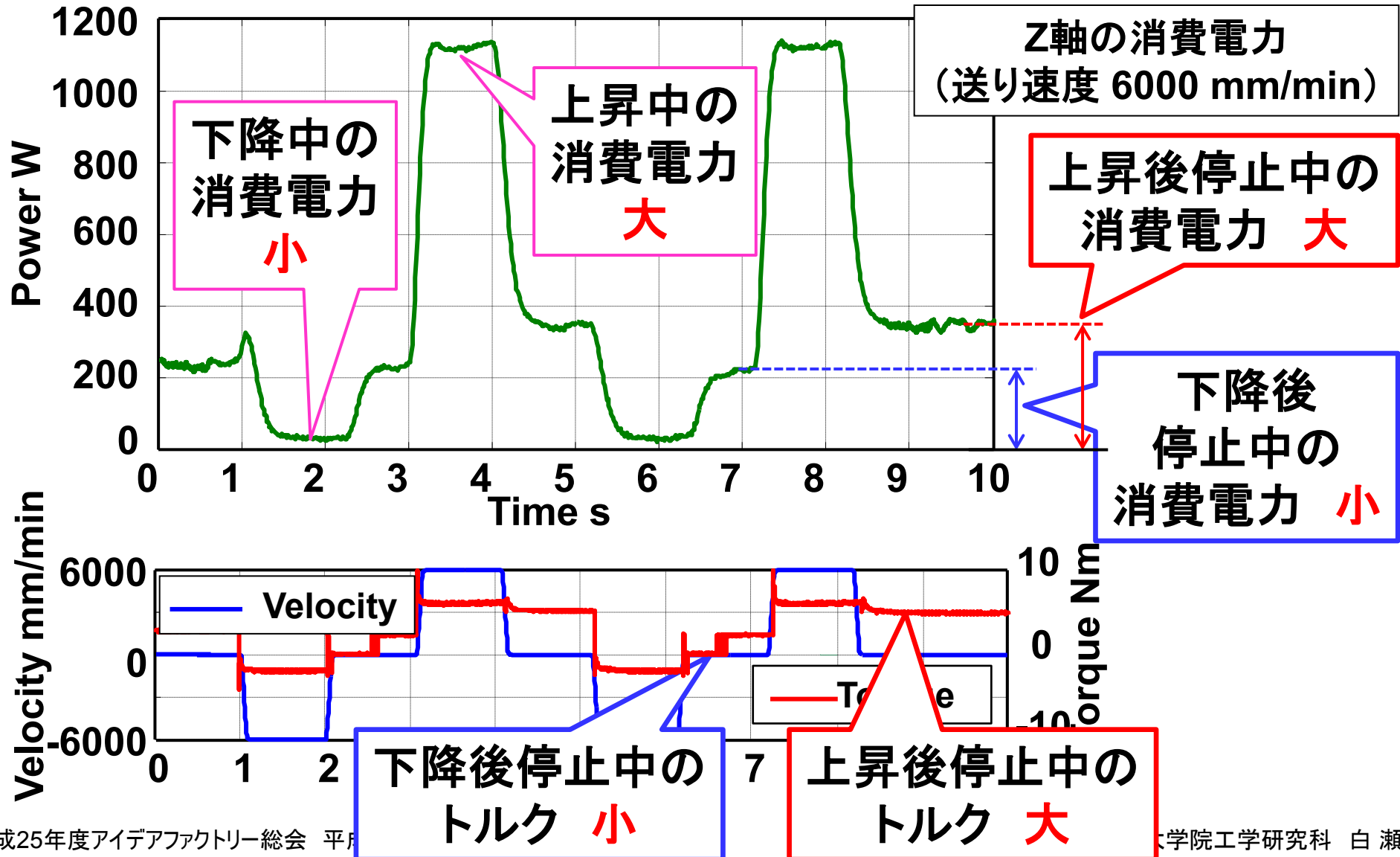
送り速度による消費電力の違い



駆動軸による消費電力の違い



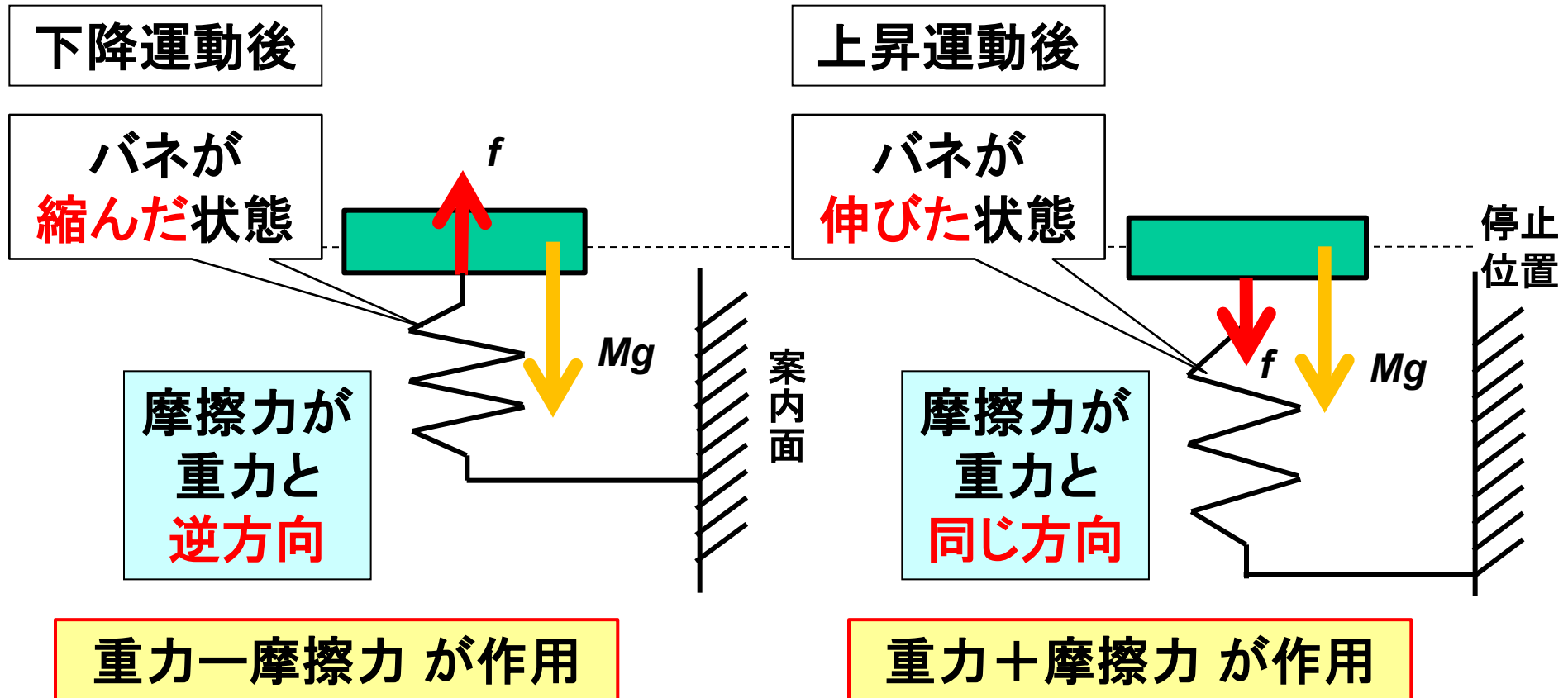
重力による消費電力の違い



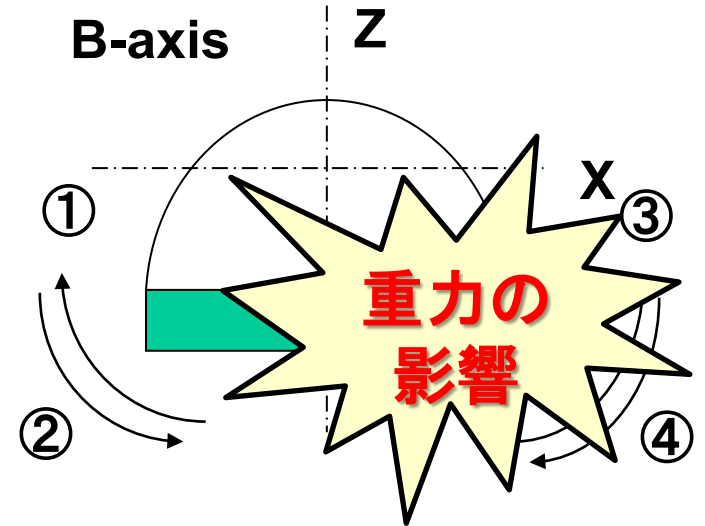
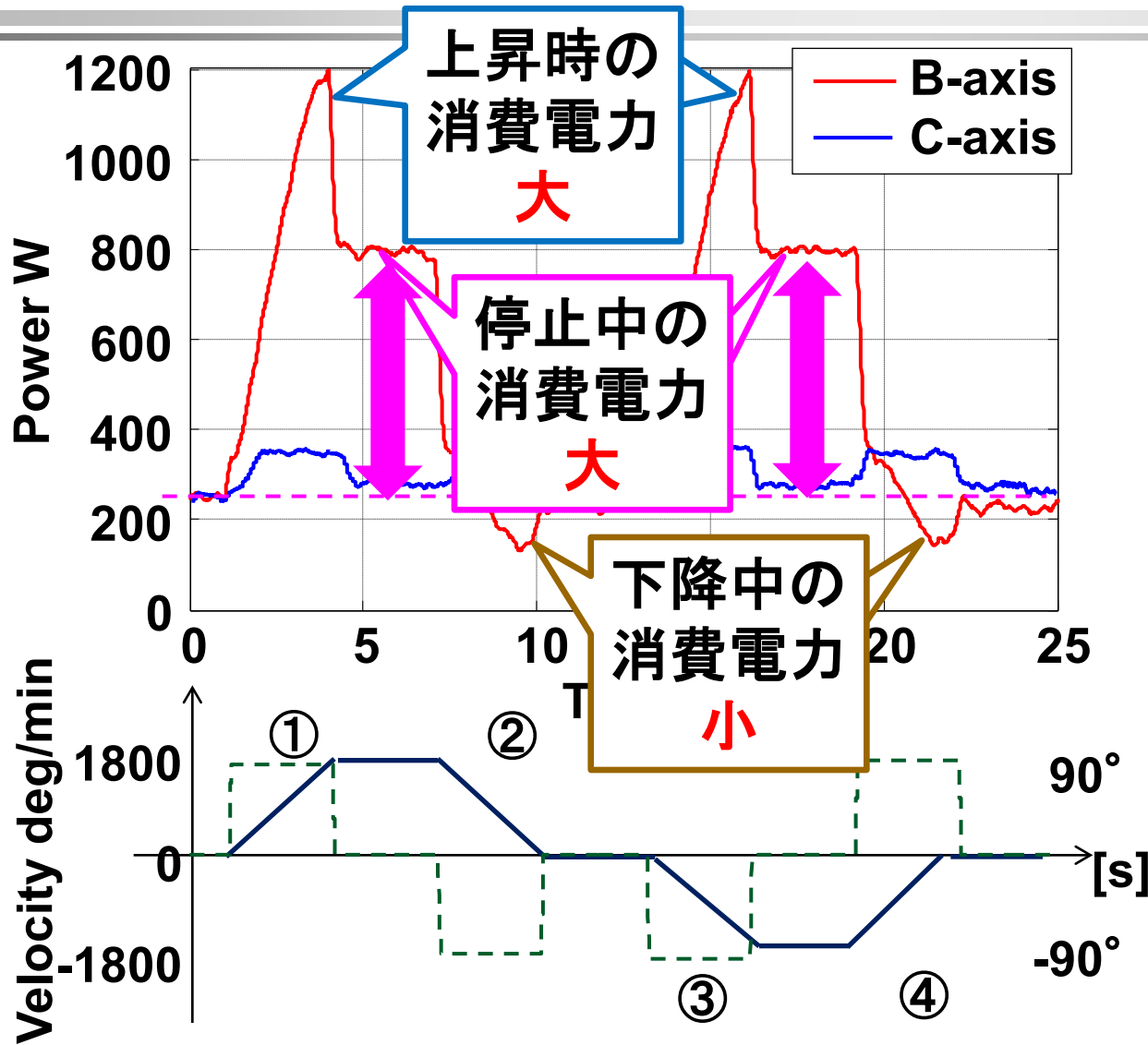
重力と摩擦の影響

すべり案内面の摩擦力をバネ要素で表した研究例(ブラシモデル)

D.A.Haessig,Jr., B.Friedland : On the Modeling and Simulation of Friction, (1991)



回転軸の消費電力



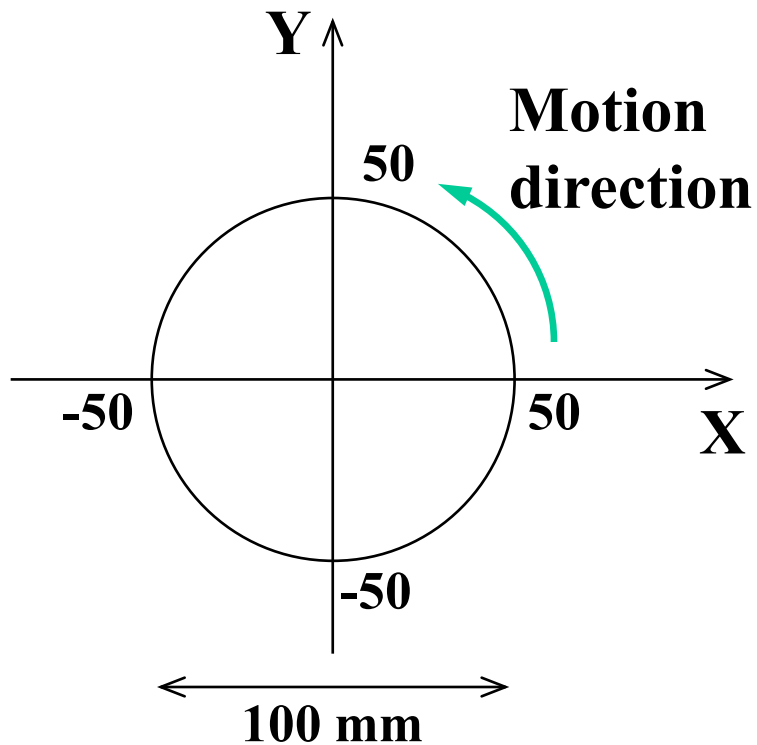
B軸の消費電力は運動方向によって大きく違う

停止中にも大きく電力を消費している

同時多軸制御時の消費電力

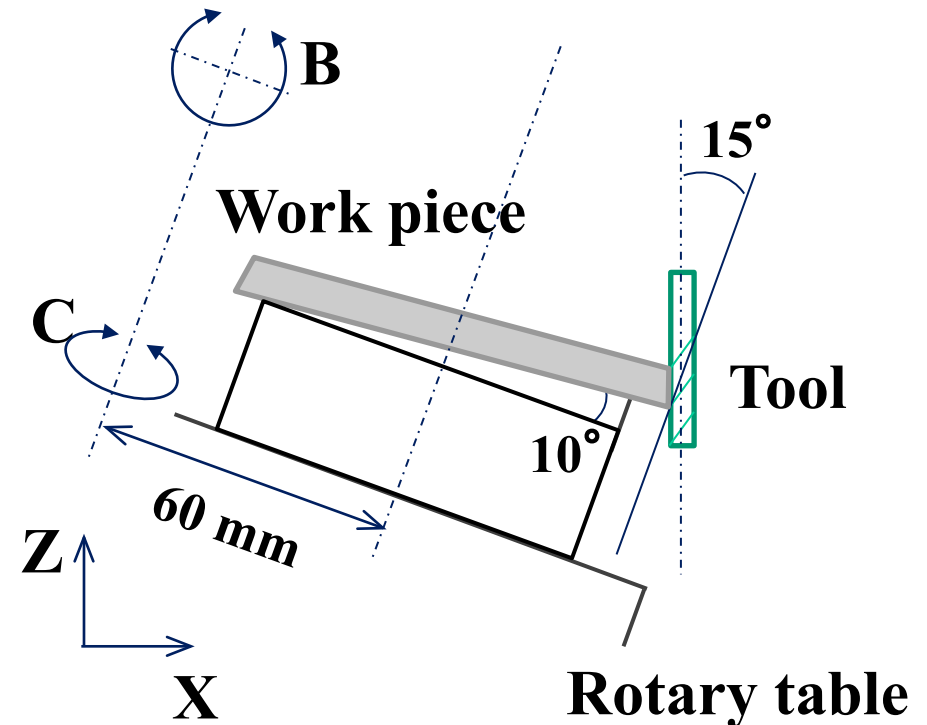
同時2軸制御

(X軸およびY軸)
円運動

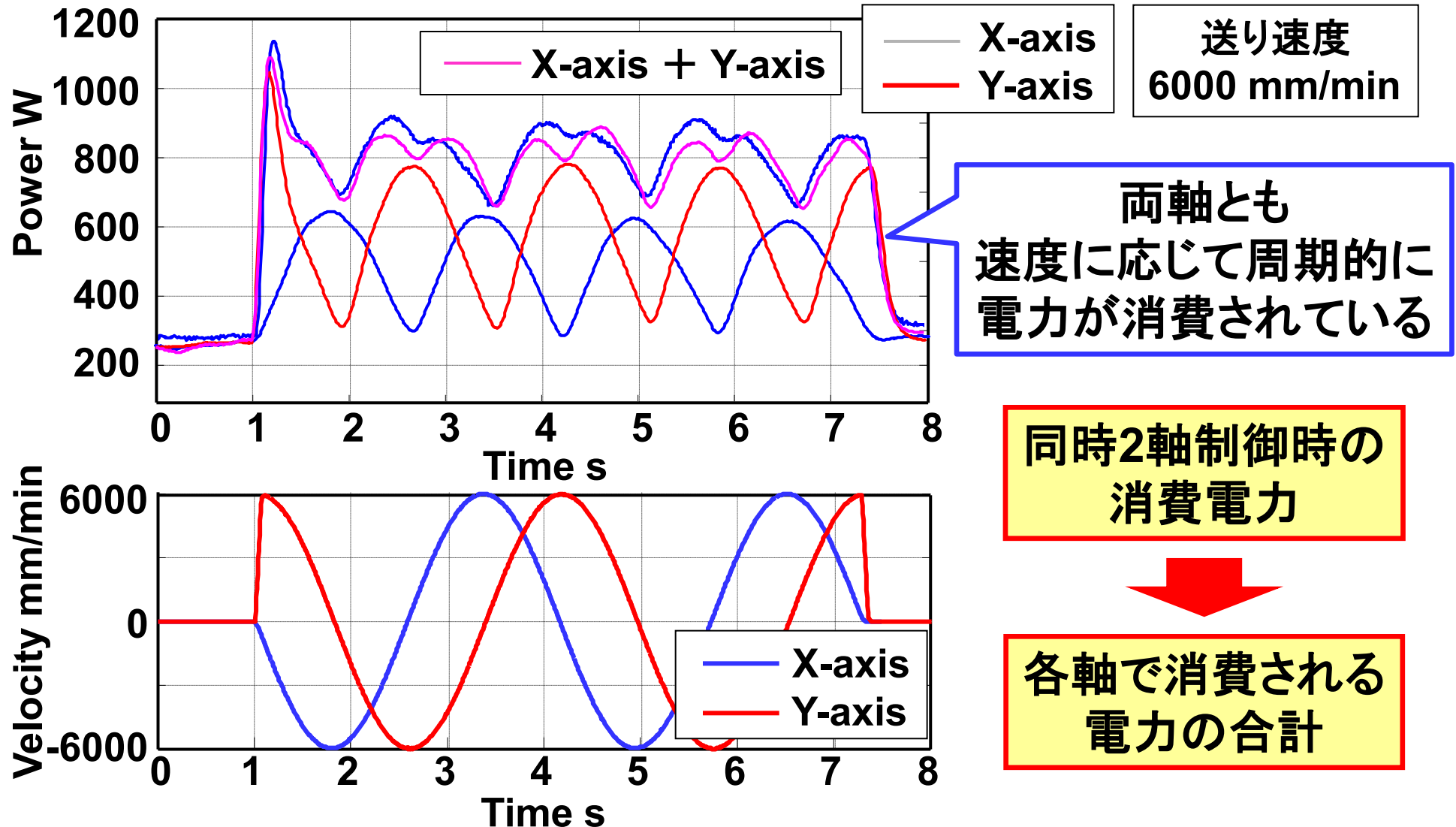


同時5軸制御

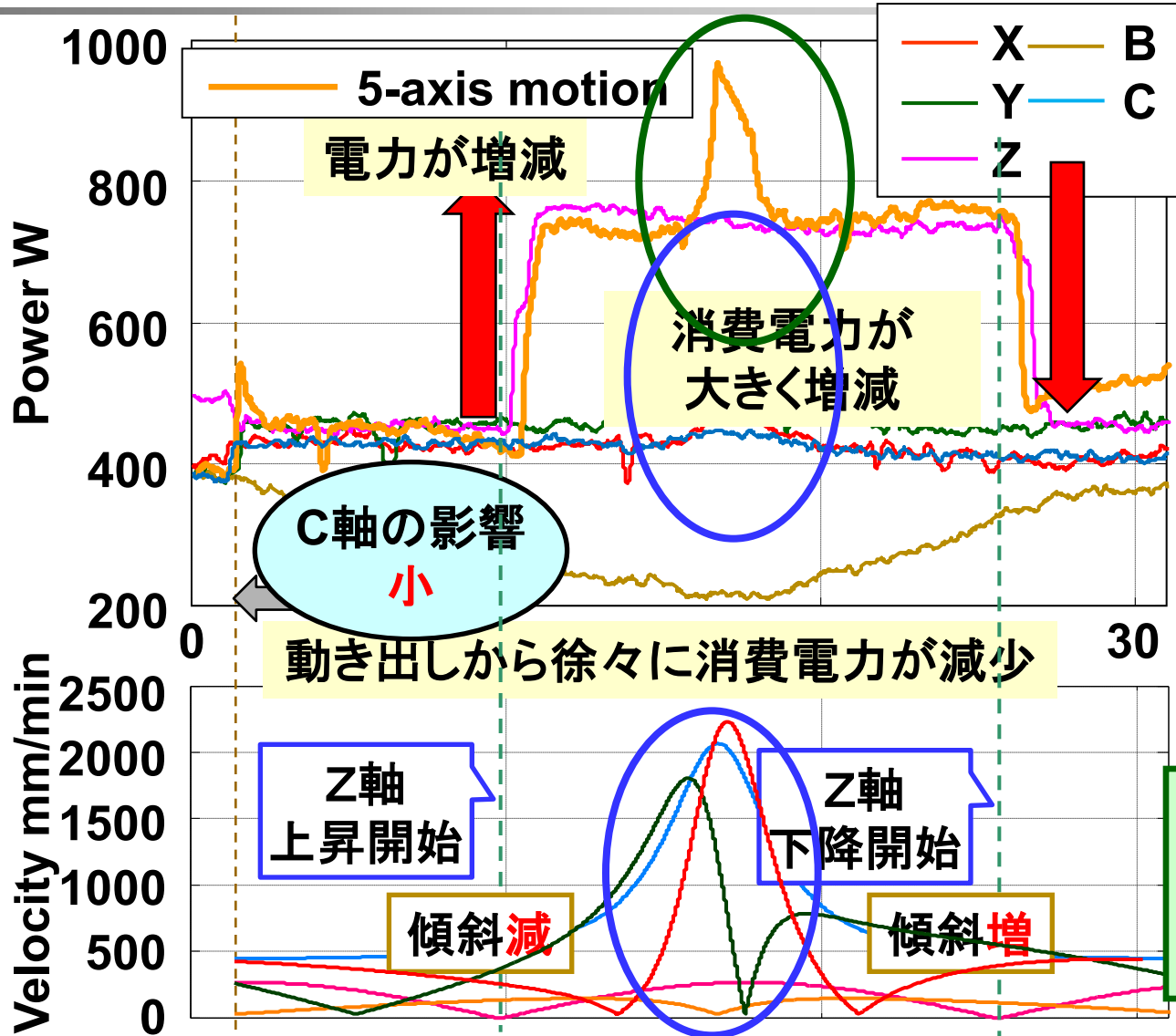
(回転軸を含む5軸)
円すい台加工運動



円運動時に各軸で消費される電力



円すい台加工時に各軸で消費される電力



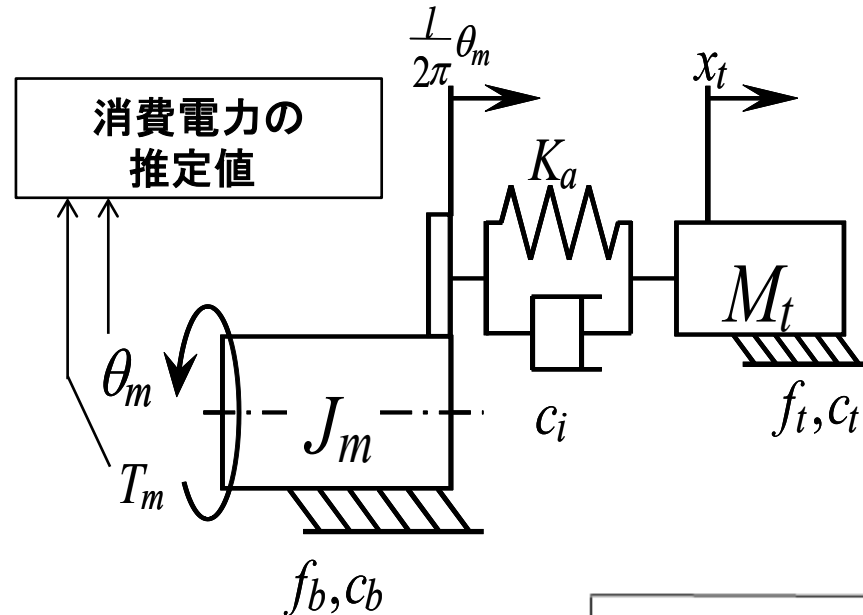
B軸の傾きが小さくなる部分
消費電力 **減**

X軸Y軸の速度が速くなる部分
消費電力 **増**

Z軸上昇中の消費電力 **激増**

Z軸は動作範囲が小さくても消費電力に及ぼす影響が大きい

送り駆動系のモデル化

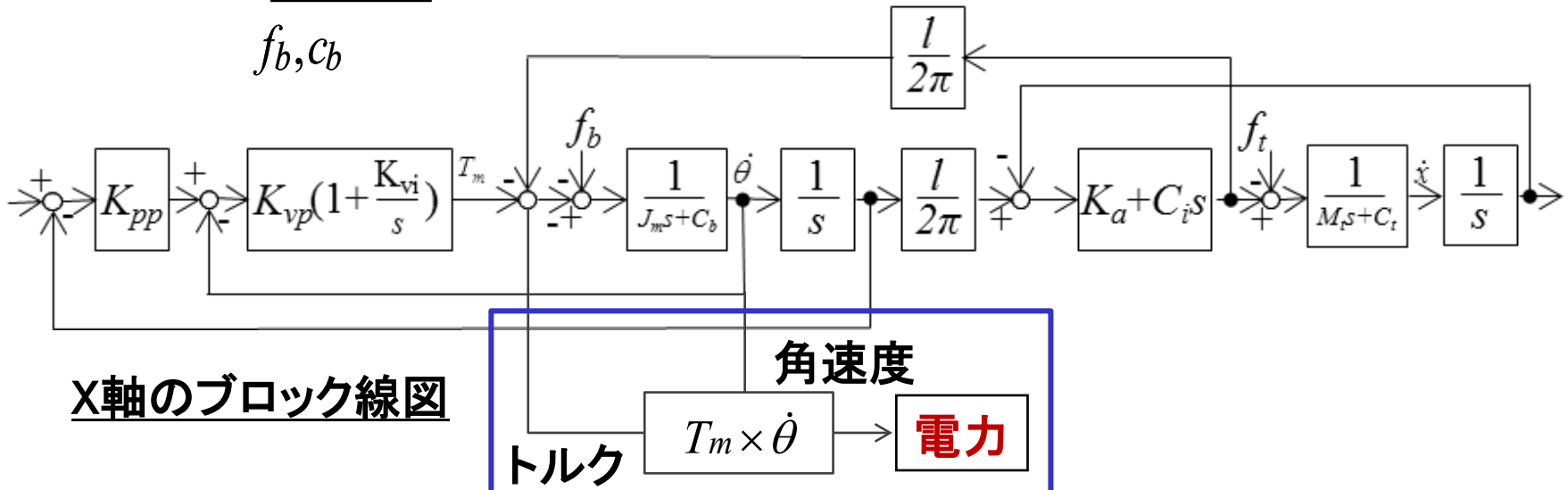


消費電力はトルクと角速度に依存

$$T_m \times \dot{\theta}_m = Power$$

$$Nm \times rad / sec = W$$

角速度とトルクの積をとると
電力とその単位が同じになる

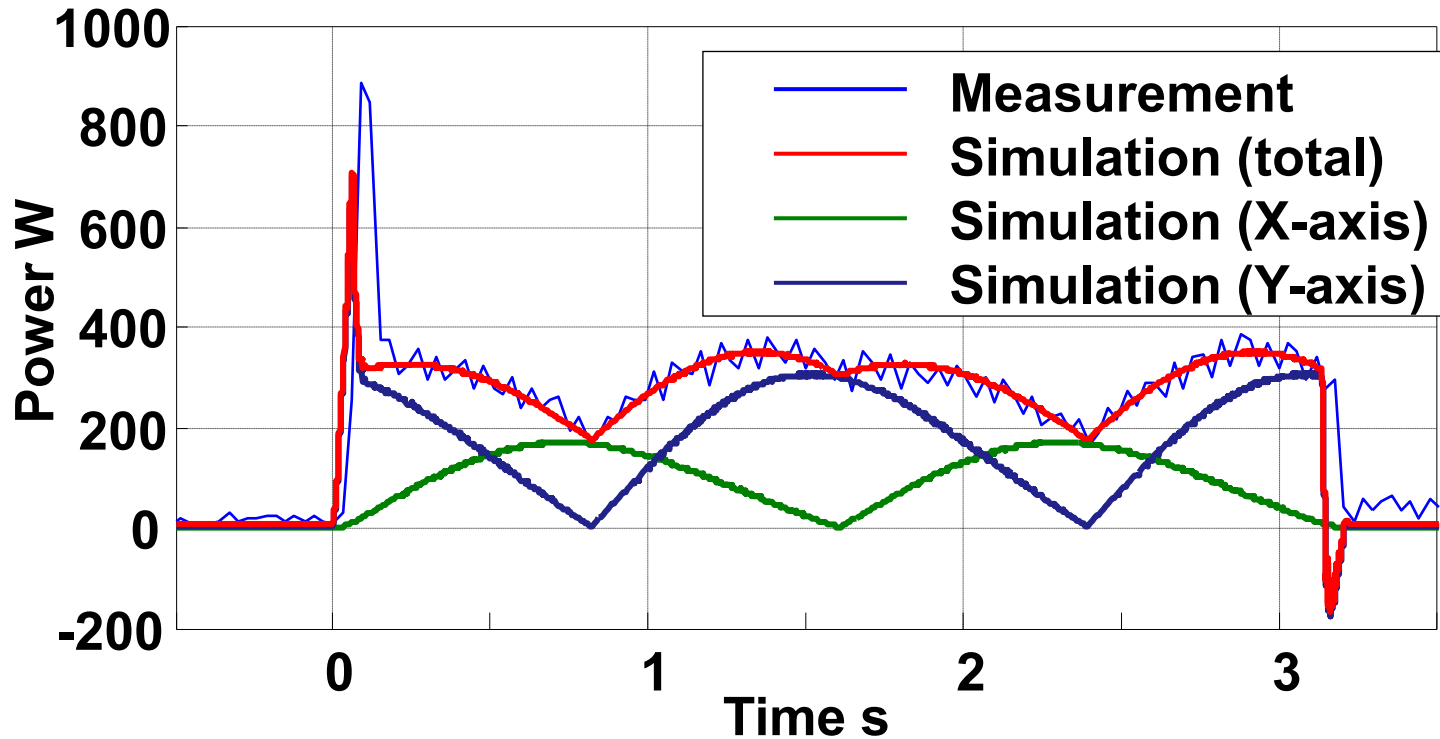


円運動時の消費電力シミュレーション

同時2軸制御時の
消費電力

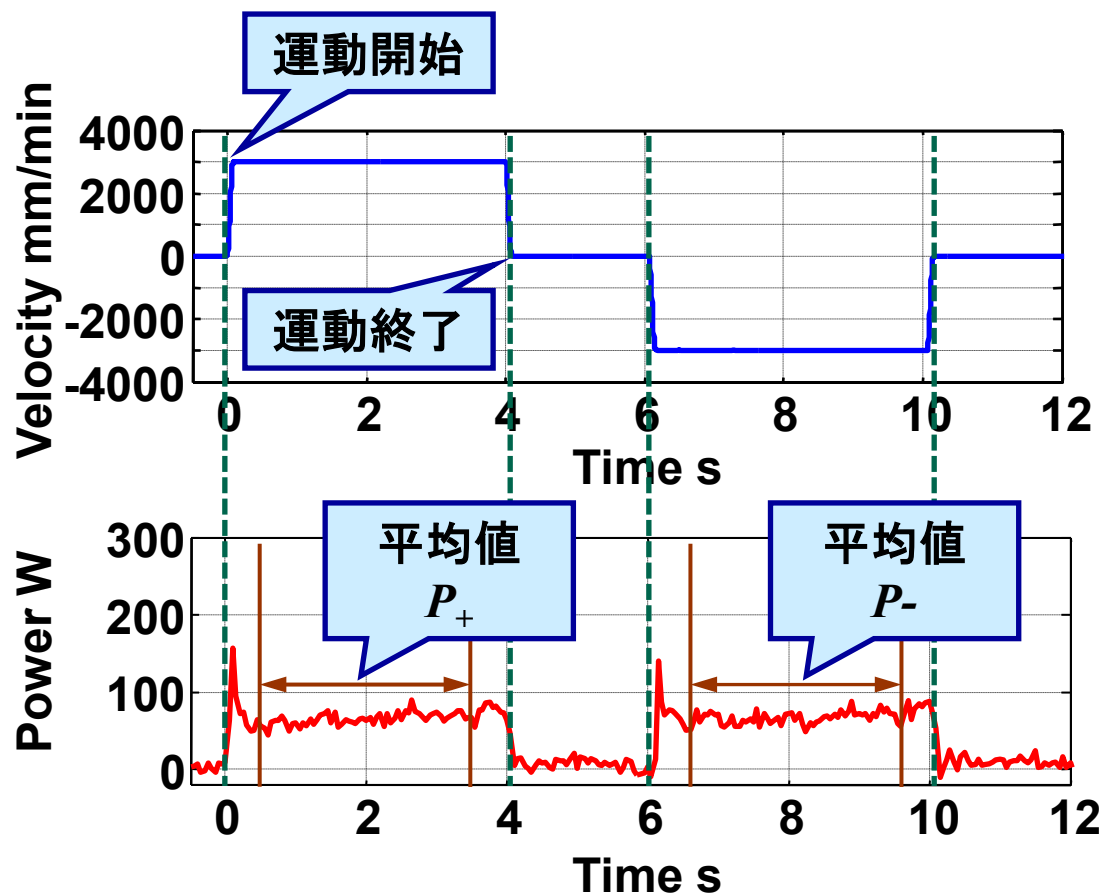


各軸で消費される
消費電力の合計



送り駆動系の総消費電力が的確に推定可能

実測値に基づく消費エネルギーの評価



X軸運転時の速度変化と消費電力

$$J_{1mm} = \left(\frac{P_+}{V} + \frac{P_-}{V} \right) / 2$$

J_{1mm} : 1mm移動に要する消費エネルギー
[J/mm]

P_+ : 正方向等速運動時の平均電力[W]

P_- : 負方向等速運動時の平均電力[W]

V : 送り速度[mm/s]

$$J = J_{1mmX}X + J_{1mmY}Y$$

J : 消費エネルギーの推定値[J]

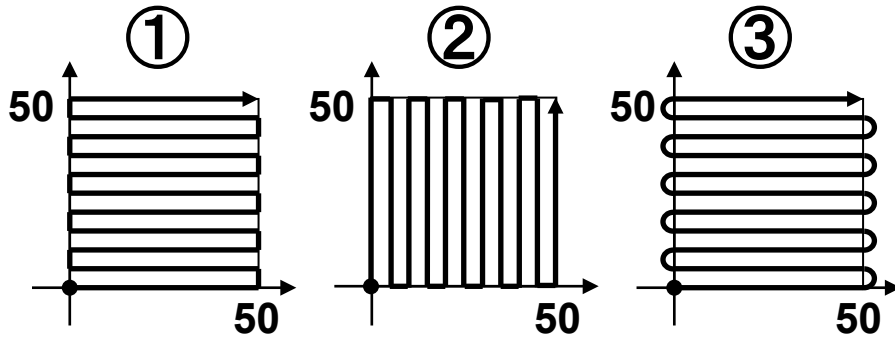
J_{1mmX} : X軸1mm移動当たり消費エネルギー
[J/mm]

X : X軸総移動距離[mm]

J_{1mmY} : Y軸1mm移動当たり消費エネルギー
[J/mm]

Y : Y軸総移動距離[mm]

比較のための工具経路



経路①

X方向に50mm, Y方向に5mm移動する

走査線経路

経路②

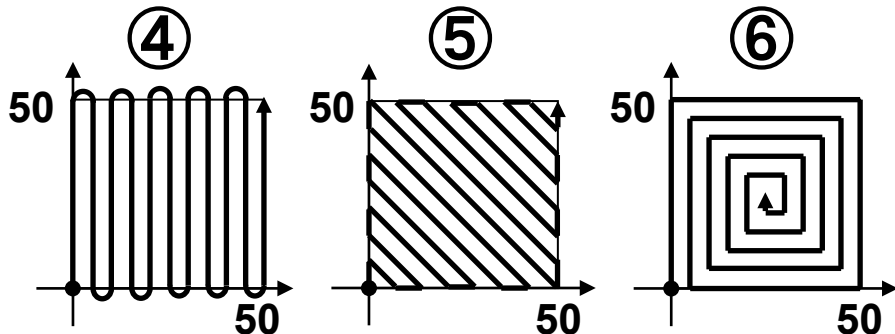
Y方向に50mm, X方向に5mm移動する

走査線経路

経路③

経路①の移動方向反転時に円弧で移動する

走査線経路



経路④

経路②の移動方向反転時に円弧で移動する

走査線経路

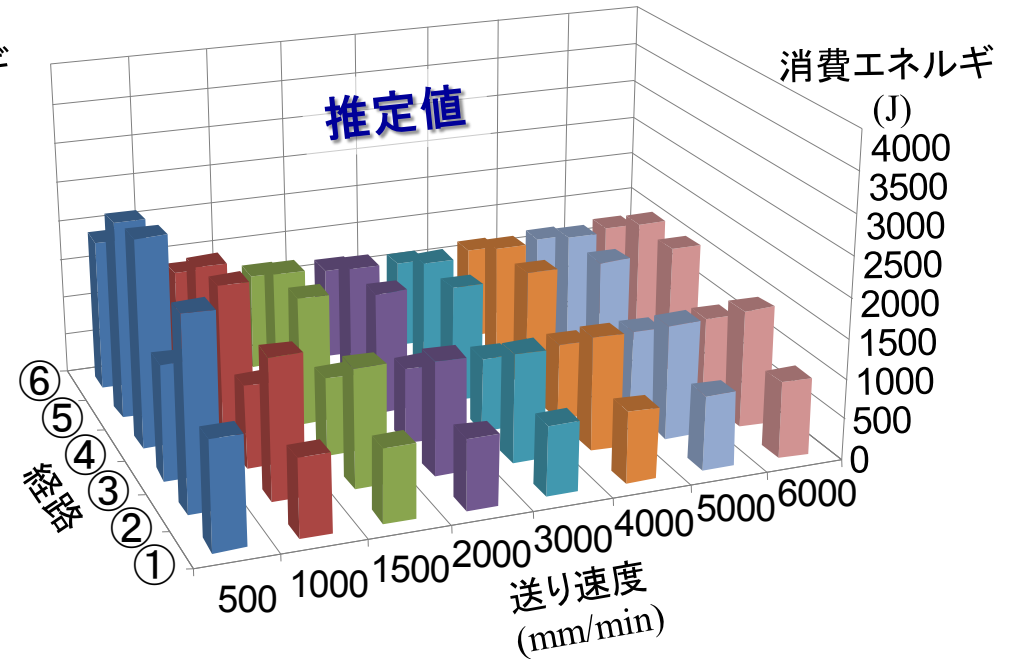
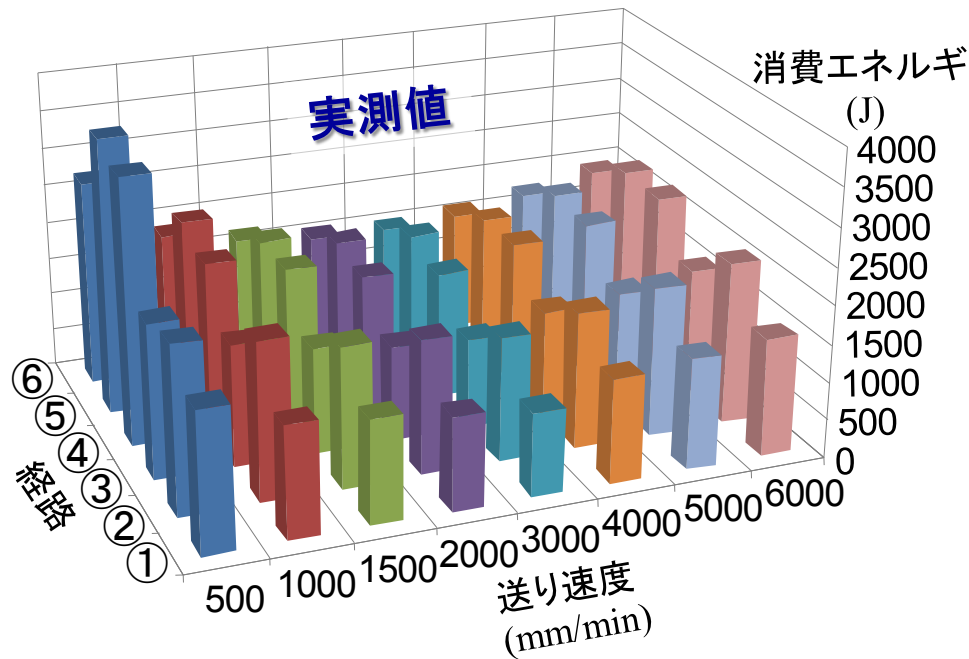
経路⑤

斜め45度で経路間隔が5mmの走査線経路

経路⑥

経路間隔5mmの**渦巻形経路**

工具経路ごとの消費エネルギー



- 実測値, 推定値共に**経路①**の消費エネルギーが最も小さい。
→ 単位長さ当たりの消費エネルギーがX軸よりもY軸の方が大きい
- 実測値, 推定値共に送り速度**3000mm/min**のときに消費エネルギーが最も小さい。
→ 送り速度の大小による消費エネルギーの評価が可能
- 実測値では総移動距離が最も長い経路**⑤**の消費エネルギーが最も大きい

これまでの研究成果

- ◆ NC工作機械の送り駆動系における消費電力を測定して、送り速度や駆動軸、重力等の影響を考察した。
- ◆ 同時2軸制御(円運動)と同時5軸制御(円すい台加工)における消費電力を測定して、各駆動軸の消費電力の総和に等しいことが分かった。
- ◆ 各軸の送り駆動系をモータの慣性モーメントや被駆動体の質量、各部の摩擦を考慮した2自由度系の数学モデルで表現し、モータのトルクと回転速度のシミュレーション結果とから消費電力を計算する方法を開発した。測定結果とシミュレーション結果とを比較し、開発した数学モデルで送り駆動系の消費電力が的確に推定できることを確認した。
 - **推定した各軸の消費電力の総和で総消費電力が推定できる**
- ◆ 消費電力の実測値から求めた単位移動量当たりの消費エネルギーを用いて、送り速度の違いや工具経路の違いによる消費エネルギーの大小を推定した。推定結果は実測値と概ね一致しており、工具経路の評価指標となる。
 - **推定精度を改善すれば“工作機械の動き易さ”が評価できる**

CAMの技術課題の検討例

- ◆ 汎用CAMで工具経路が作成できない複雑形状はオペレータによる個別対応に依っており、強固な干渉判定・姿勢計画手法の実現が望まれる。
- ◆ ツーリング最適化、工作物配置等、オペレータの判断に依存した工程計画の支援技術が求められている。
- ◆ 工作機械メーカーでは、第一に機械はCAMで生成した工具経路を精密に追従することが求められ、次に加工工程全体（工具経路計画、段取り、実加工）の所要時間を短縮することが求められている。
 - **現状では消費電力削減の要望はない**
- ◆ マシンシミュレーター段階でのエラー発生から工具経路生成への手戻りの削減が課題とされている。
- ◆ CAMとマシンシミュレーターの機能として、工具経路生成時に機械動作を逐次検証しながら計画する機能の実現が望まれる。
- ◆ CAM開発側の不満は、NC側の応答が明示化されておらず、工具経路を最適化する際に、現状の工具経路案が機械上で示すパフォーマンスを評価する手段がないことである。海外NCメーカーでは、NC装置の応答を計算するエミュレータを提供して、上記の評価結果を他の汎用プログラムから利用可能としている例がある。

期待される成果と今後の展開

◆ 期待される成果

工作機械の動き易さに配慮して工具経路や素材配置を計算するというコンセプトは現行のCAMにはない。使用する工作機械の特性に配慮して工作機械が動き易くなるように工具経路の計算と素材配置の決定を行えば、消費電力は自ずと低減する。また、工作機械が動き易いということは、加速・減速も滑らかに行われることから、加工時間の短縮や加工精度の改善にも貢献することが期待される。CADやCAMは欧米の製品に席卷されているが、日本独自の革新的なCAMとしての差別化に繋がる。

◆ アイデアファクトリ終了後の展開

消費電力の低減、加工時間の短縮、加工精度の改善といった効果が検証できた段階で、CAMベンダーや工作機械メーカーの賛同を得てコンソーシアムを結成してCAMの開発に繋げる。特に、5軸加工の場合に効果が大きいと予想されることから、独自の5軸CAMとして開発を進める。