



東京大学生産技術研究所  
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo



名古屋大学機械・航空工学科  
Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Nagoya University

CMI & 名古屋大学 機械・航空工学科 共催シンポジウム 2015.11.6

# 次世代の航空機部品加工技術を目指して

—低剛性工作物に対する各種びびり振動抑制法，  
および難削材に対する各種高能率加工法の開発—

## 名古屋大学 機械・航空工学科

社本 英二

上田隆司 寄附講座教授，鈴木教和 准教授，藤巻俊介  
寄附講座助教，樋野励 元准教授，Burak Sencer 元特  
任助教，橋本洋平 元研究員，博士課程/修士課程/学  
部学生，共同研究企業/機関など



## 次世代の航空機部品加工技術を目指して

### 1. 高能率化

#### 1.1 びびり振動→現象の解明, 解析・抑制法の開発

ボールエンドミル, 工具姿勢, 安定性指標, 不等ピッチ・不等リード, 速度差法, 深溝(ロングシャンク)加工法, 異方性工具, 摩擦減衰の解析・最適化

#### 1.2 高速切削 vs 重切削→切削温度測定・解析, 加工条件最適化

### 2. 各種難削材の加工技術の開発

#### 2.1 CFRP: 剥離, 工具摩耗, 低能率→上下分割傾斜ミリング法

#### 2.2 超耐熱合金: 工具摩耗, 低能率→セラミック工具, ロータリミリング工具

### 3. 自動化

切りくずの絡み付き→案内溝付き工具の考案・開発と引張り旋削

### 4. 難削材加工の精密・微細化

ダイヤモンド工具の摩耗→楕円振動切削加工法の考案・開発

# 1.1 切削加工におけるびびり振動

## 現象の解明, 解析・抑制手法の開発に関する研究成果

### 不等ピッチ/不等リード工具

- 不等ピッチエンドミルによる再生型びびり振動の抑制—解析モデルの構築とピッチ角の最適化, 社本, 影山, 森脇, 日本機械学会関西支部第77期定時総会講演会講演論文集, 024-1 (2002), 3-5
- 角度差の大きい不等リードエンドミルによる高硬度材の半径方向低切込み・軸方向高切込み加工法の提案, 伊藤, 社本, 2015, 精密工学会誌, 81-9, pp.867-874

### マルチミリング

- Suppression of Regenerative Chatter Vibration in Multiple Milling Utilizing Speed Difference Method, E Shamoto, T Mori, B Sencer, N Suzuki, R Hino, 2013, Precision Eng., 37-3, pp.580-589

### 異方性を持つ回転工具

- 異方性を持つ低剛性工具によるエンドミル加工時のびびり振動安定限界, 倉田, 鈴木, 樋野, 社本, 2011, 精密工学会誌, 77-1, pp.97-104

### 伝達関数のクロス項の影響

- Effect of Cross Transfer Function on Chatter Stability in Plunge Cutting, N Suzuki, K Nishimura, E Shamoto, K Yoshino, 2010, J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 4-5, pp.883-891

### 強制・自励型びびり振動の回避

- 強制・自励型びびり振動抑制・自励型びびり振動を回避するエンドミル加工条件の統合的検討, 鈴木, 井加田, 樋野, 社本, 2009年, 精密工学会誌, 75-7, pp.908-914

### ボールエンドミル加工時のびびり振動

- Analytical prediction of stability lobes in ball end milling, Y Altintas, E Shamoto, P Lee and E Budak, 1999, Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, 121, pp.586-592



オークマ(株)と共同開発 加工ナビ

### 工具姿勢の影響と安定性指標

- Analytical prediction of chatter stability in ball end milling with tool inclination, E Shamoto, K Akazawa, 2009, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58/1, pp.351-354
- A novel tool path/posture optimization concept to avoid chatter vibration in machining, E Shamoto, S Fujimaki, B Sencer, N Suzuki, T Kato, R Hino, 2012, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 61/1, pp. 331-334

### ロングシャンク

- A novel deep groove machining method utilizing variable-pitch end mill with feed-directional thin support, E Shamoto and A Saito, Precision Engineering, 2015, doi:10.1016/j.precisioneng.2015.08.006

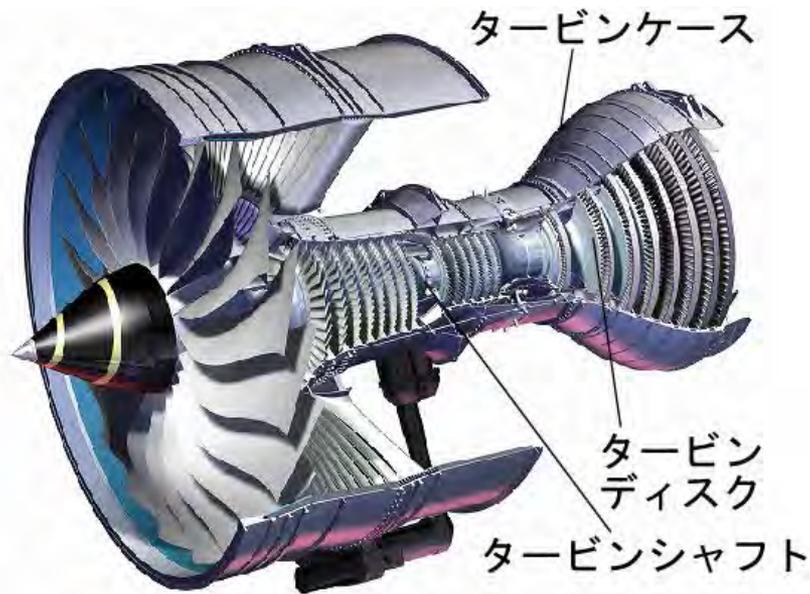
### 摩擦減衰と接触剛性

- Analytical prediction of contact stiffness and friction damping in bolted connection, E Shamoto, Y Hashimoto, M Shinagawa, and B Sencer, 2014, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 63/1, pp.353-356

### プロセスダンピング

- Chatter Stability in Turning and Milling with in Process Identified Process Damping, Y Kurata, S D Merdol, Y Altintas, N Suzuki, E Shamoto, 2010, J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 4-6, pp.1107-1118

# 低剛性薄肉構造の切削加工が多い航空機部品製造



大型民間機用ジェットエンジン(資料提供:三菱重工業)

## ジェットエンジン構造

細長い工具で薄肉構造に  
削り出して軽量化

→ **びびり振動が課題**



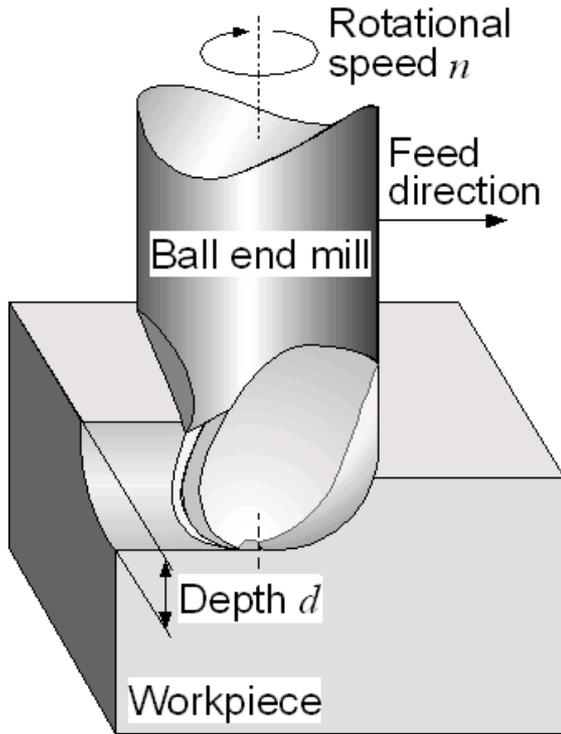
## 機体部品の例

びびり振動抑制によって, **加工能率大幅向上の可能性**

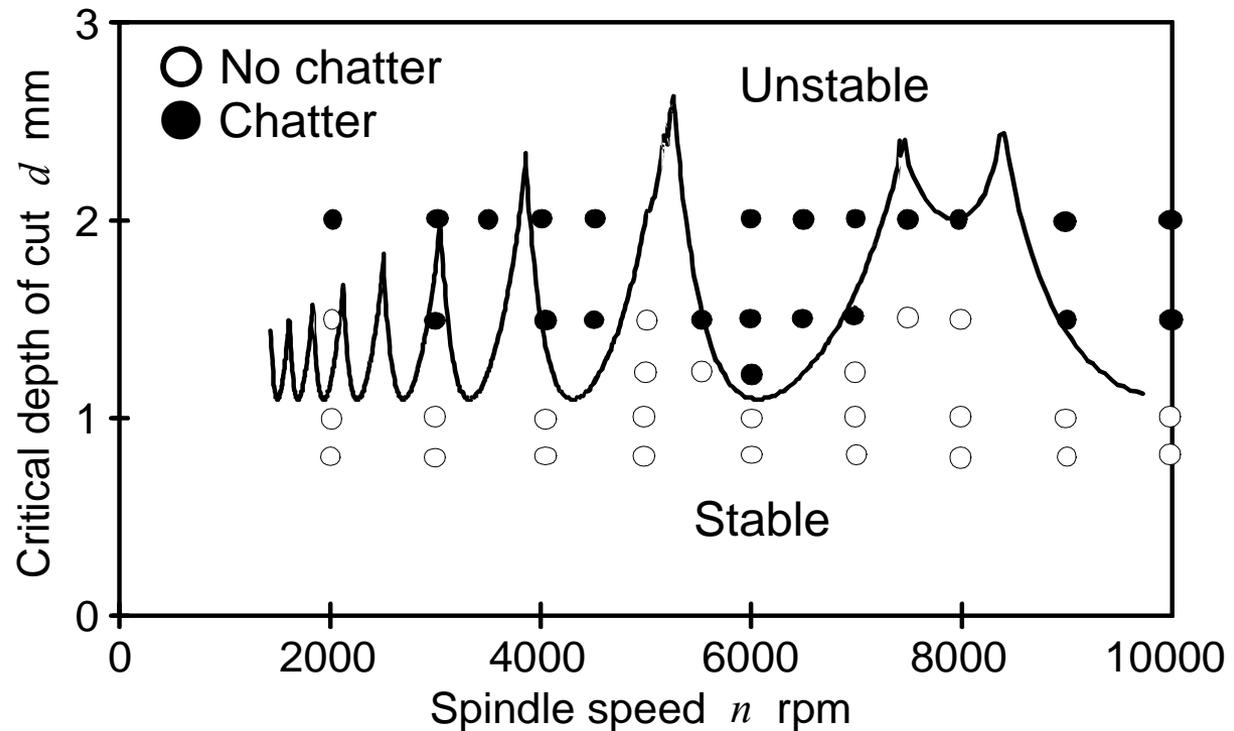
# 1.1.1 ボールエンドミル加工時のびびり振動安定性解析モデルの構築

## Prediction of chatter stability lobes in ball end milling

Chatter stability depends on depth of cut and spindle speed.



Ball end milling process

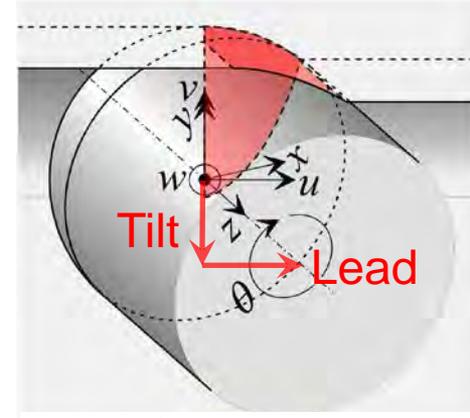
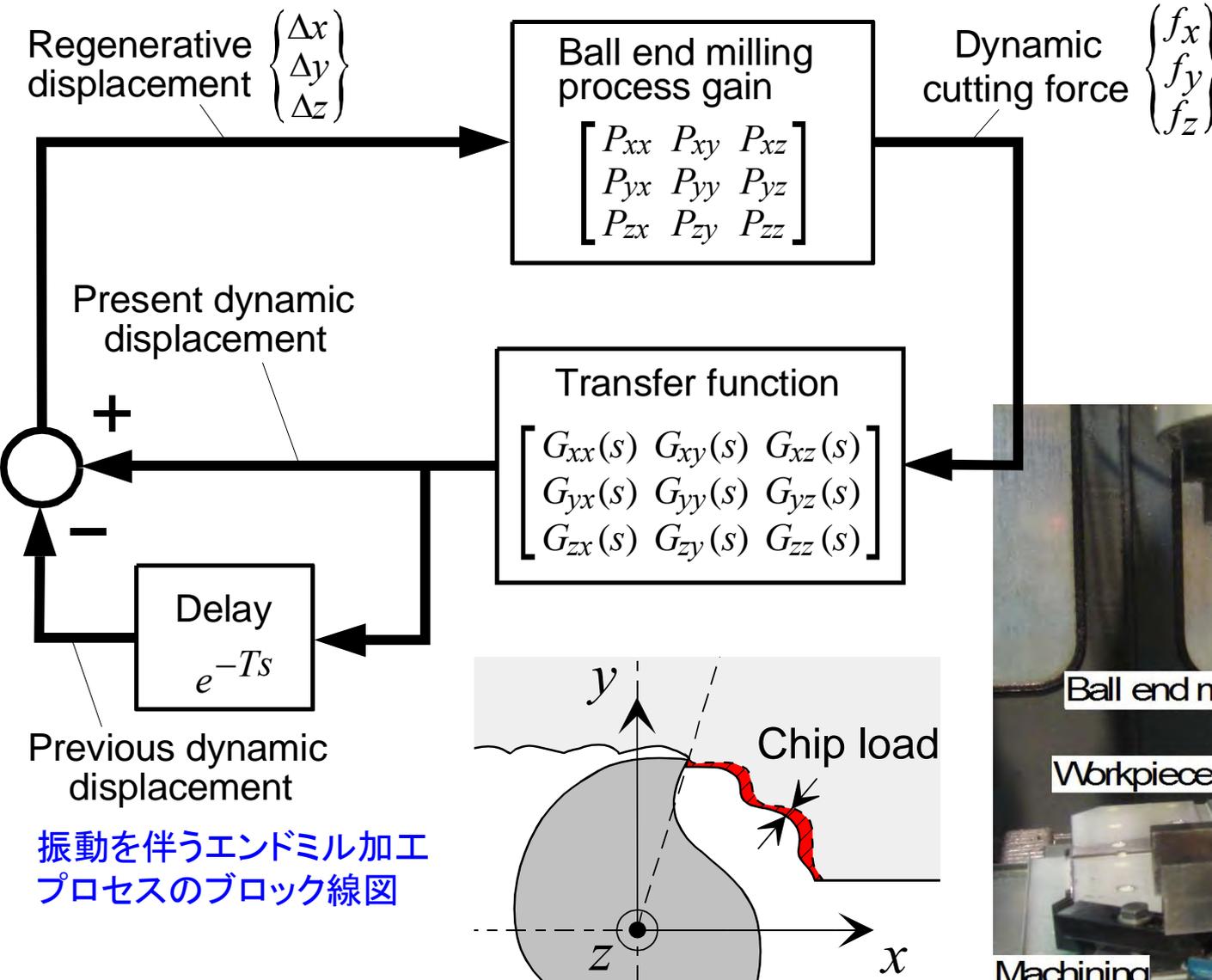


[Reference]

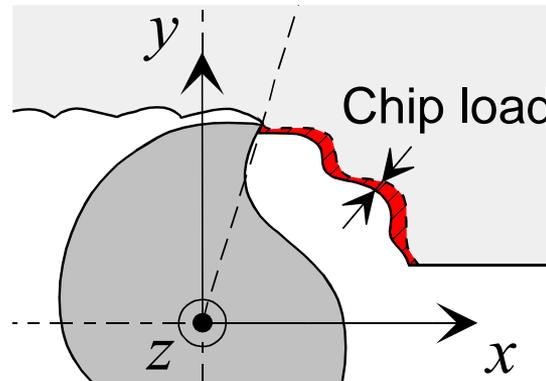
Y. Altintas, E. Shamoto, P. Lee, E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling, Trans. ASME, J. of Manuf. Sci. Eng., 121 (1999) 586-592

# 1.1.2 びびり振動安定性に対する工具姿勢の影響

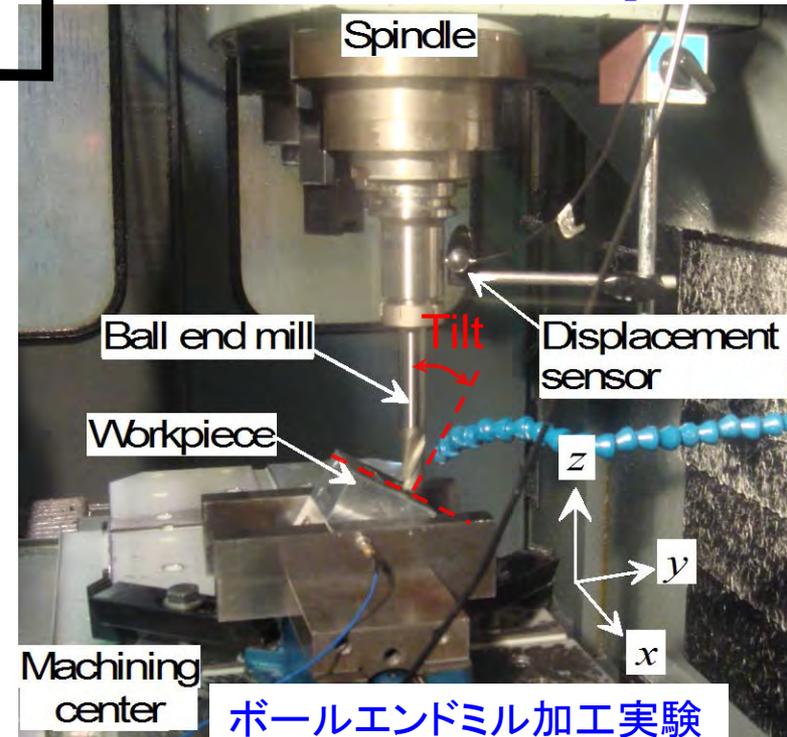
神戸製鋼所(株)と共同研究



工具姿勢 (Top view)



振動を伴うエンドミル加工



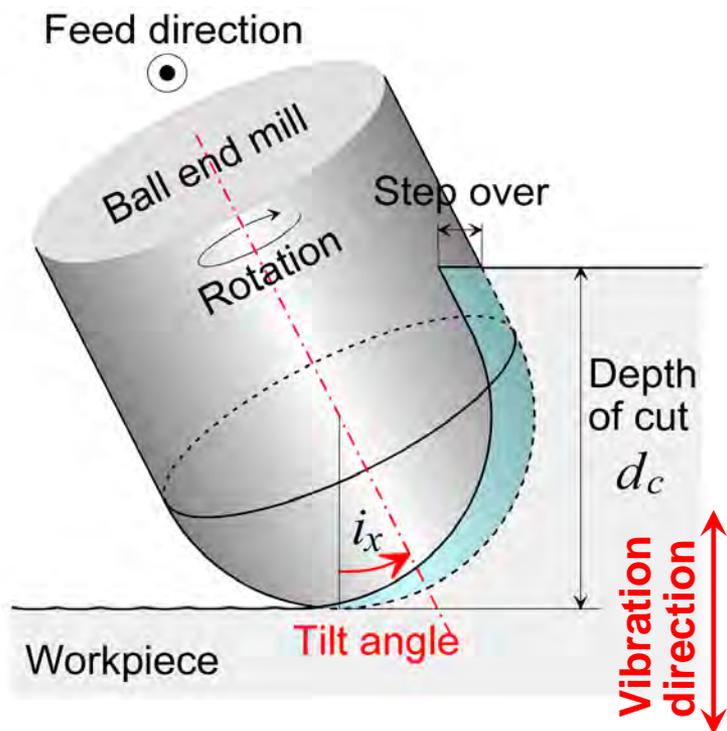
ボールエンドミル加工実験

振動を伴うエンドミル加工  
プロセスのブロック線図

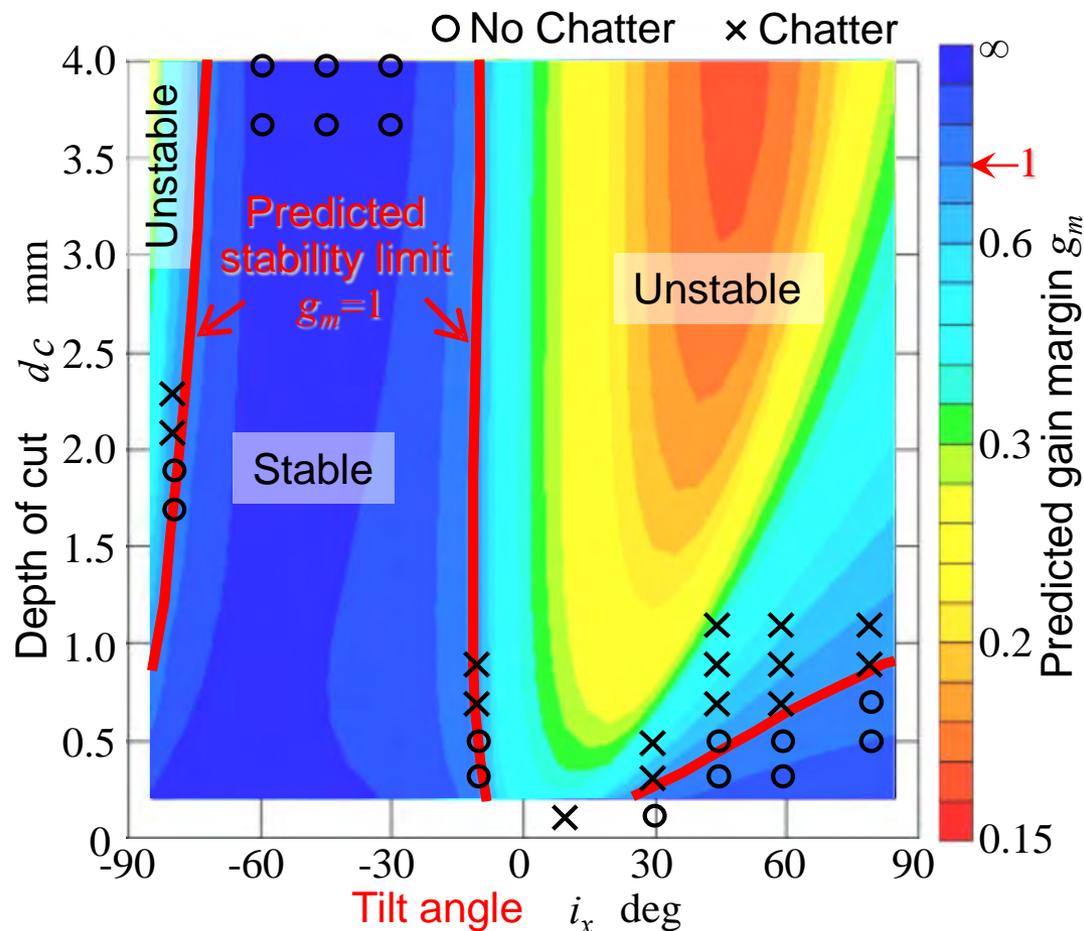


# Directional Effect on Chatter Stability

Chatter stability heavily depends on tool posture relative to vibration direction!



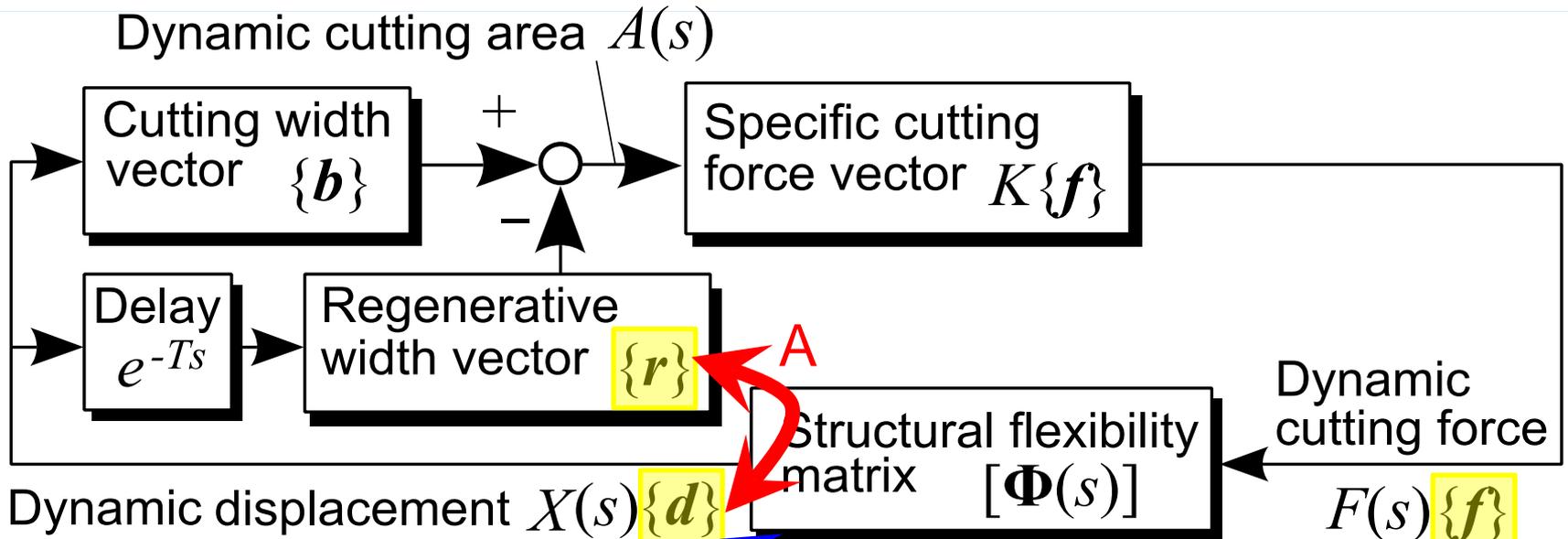
Ball end milling with inclination



## [References]

- E. Shamoto, K. Akazawa: Analytical prediction of chatter stability in ball end milling with tool inclination, CIRP Annals, 58/1 (2009) 351-354
- K. Akazawa, E. Shamoto: Study on regenerative chatter vibration in ball end milling of flexible workpieces, Proc. of 2008 MHS (2008) 1-6

# 1.1.3 再生びびり安定性指標の提案と工具軌跡の最適化



Block diagram of turning and milling processes with regenerative chatter

**Concept A:**

Previous vibration does not generate dynamic cutting area  $A(s)$ ,  $\alpha=0$ .

**Concept B:**

Dynamic force  $F(s)\{f\}$  does not have a component in  $\{d\}$ ,  $\beta=0$ .

**Proposed index:**

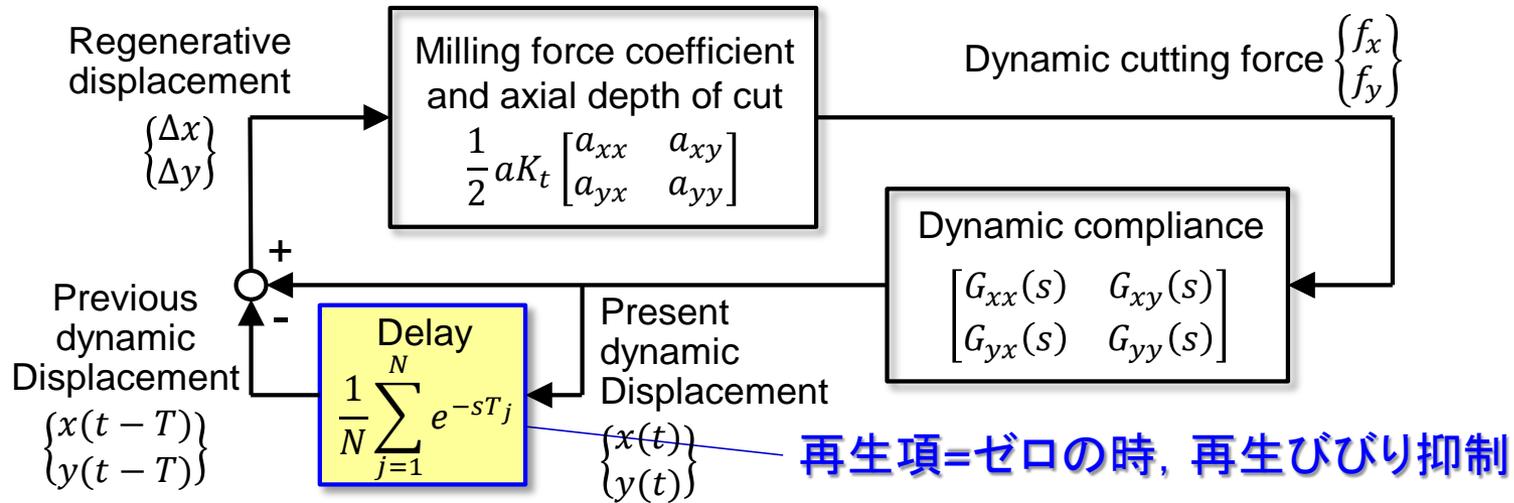
(Index of Regenerative Chatter Stability)

$$I_{RCS} = 1 / \left| a \sin \alpha \sin \beta \right|$$

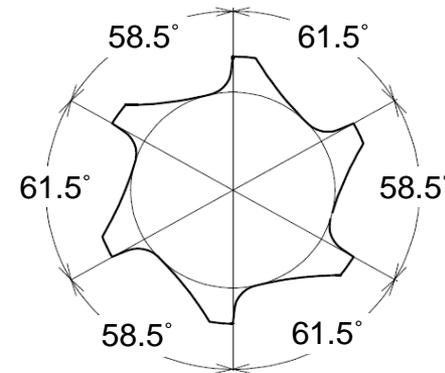
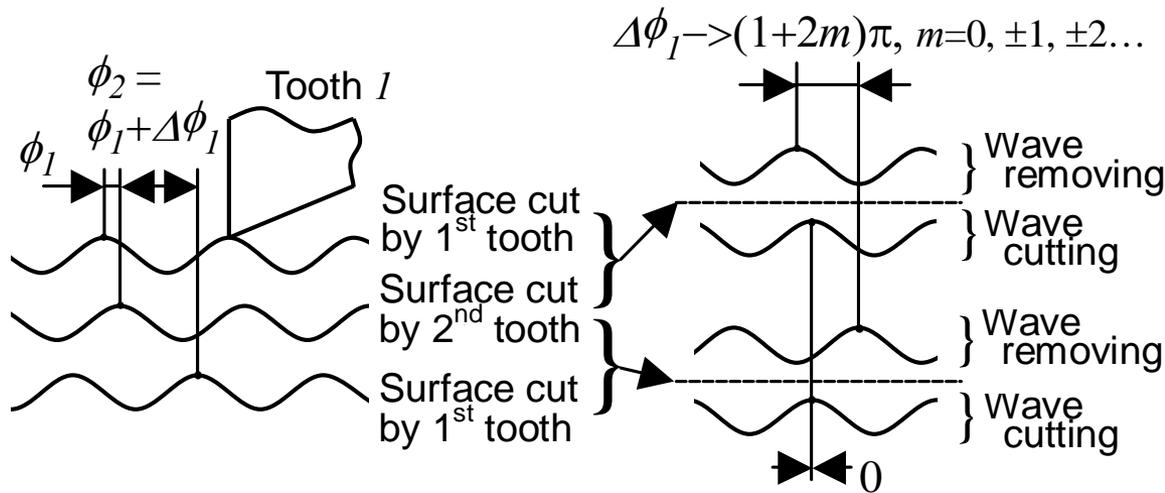
$a$ : Regenerative width of cut (Axial depth of cut in peripheral milling)

# 1.1.4 不等ピッチエンドミルのピッチ角最適化と解析モデルの構築

再生びびり振動を伴う加エプロセス(不等ピッチエンドミルの場合)



## 不等ピッチエンドミルの作用機構の解明とピッチ角の最適化



4枚刃の例:  $\theta_1 = \theta_3, \theta_2 = \theta_4$ として,

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{(1+2m)n}{60f_c} \right)$$

[Reference]

# 1.1.5 不等リードエンドミルによる 再生びびり振動の抑制

—再生効果相殺線図の提案と図的理解—

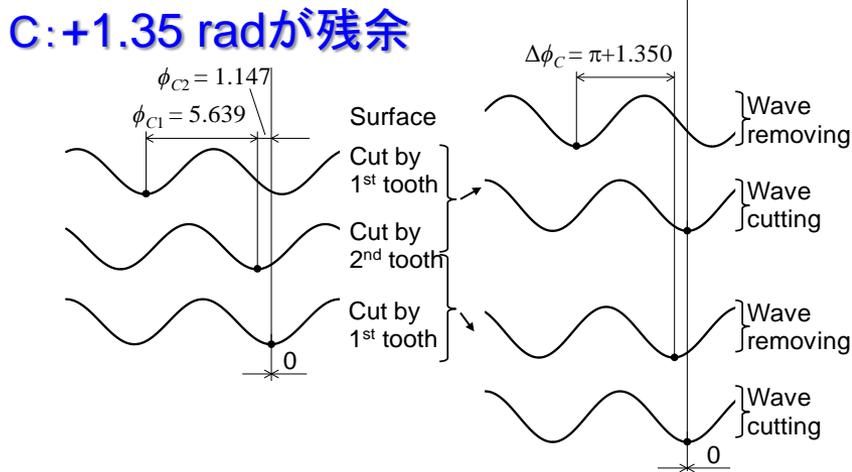
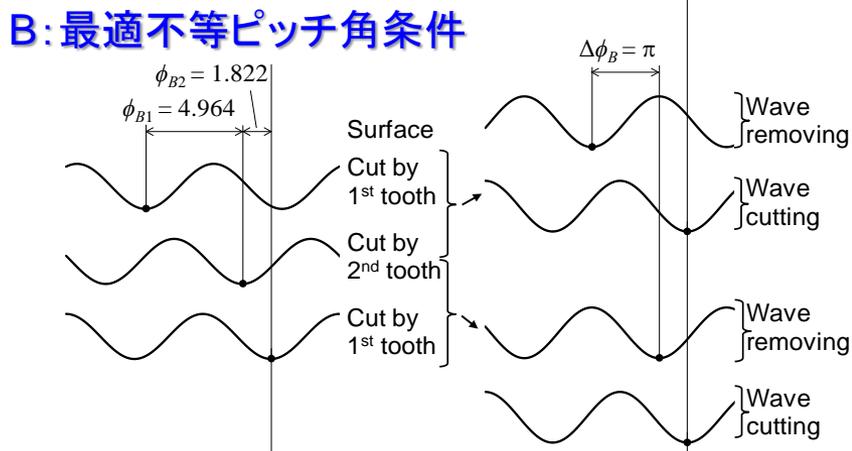
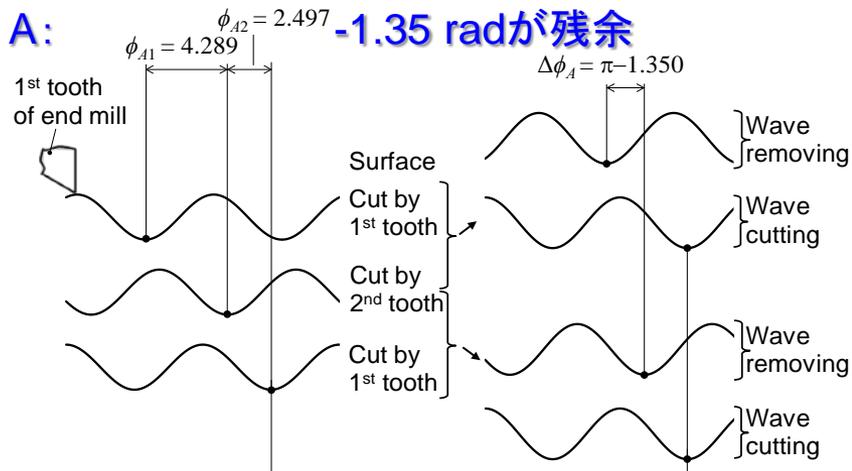
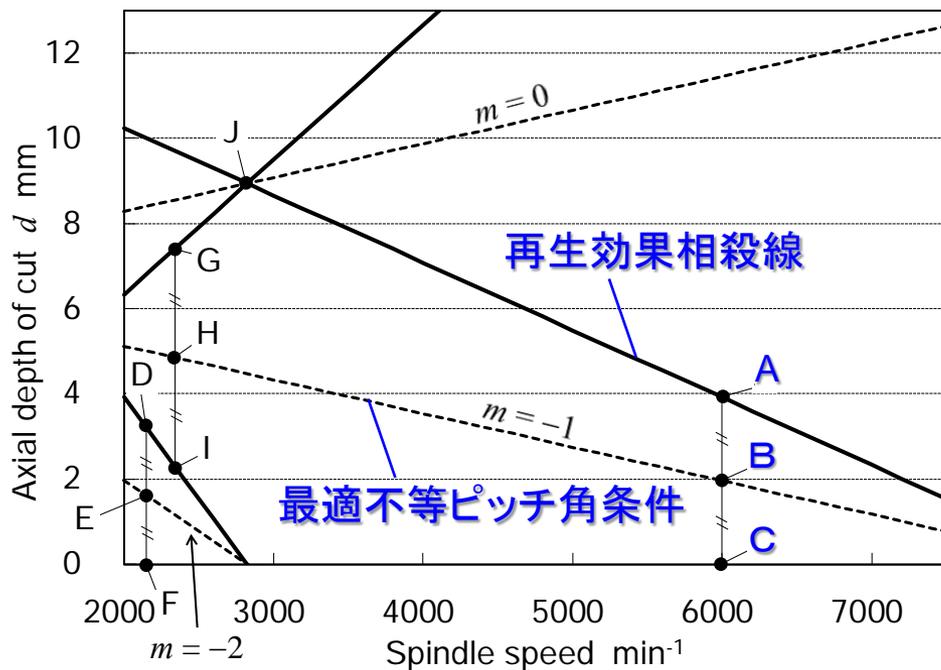
ブラザー工業(株)と共同開発

## 最適不等ピッチ角の条件

$$\frac{60 f_c (\theta_2 - \theta_1)}{n} = (1 + 2m)\pi$$

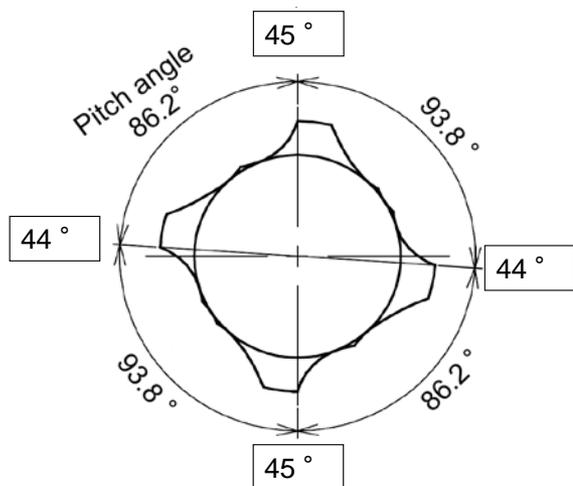
$n$  [min<sup>-1</sup>] : 工具回転数,  $\theta_1, \theta_2$  [rad] : ピッチ角,  
 $f_c$  [Hz] : びびり振動周波数,  $m$  : 任意の整数

## 不等リードエンドミルの再生効果相殺線図





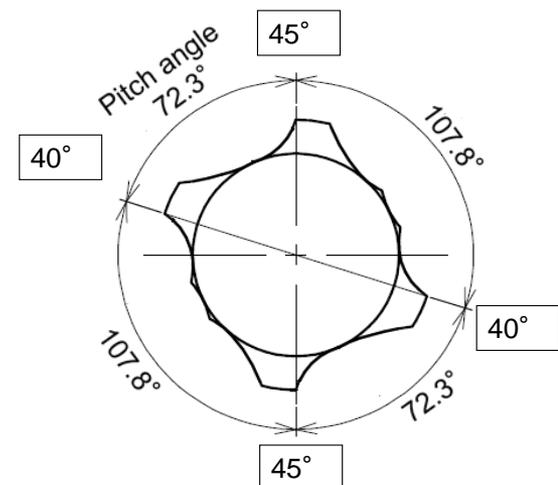
# 大リード角度差・低半径方向切込・高軸方向切込加工法の提案



$f_c$  変化 →  
安定条件の  
設定が困難



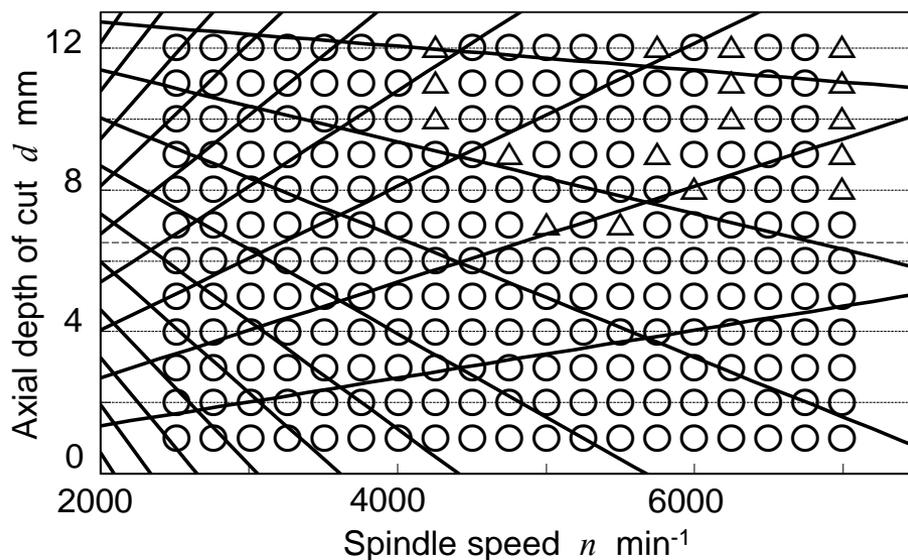
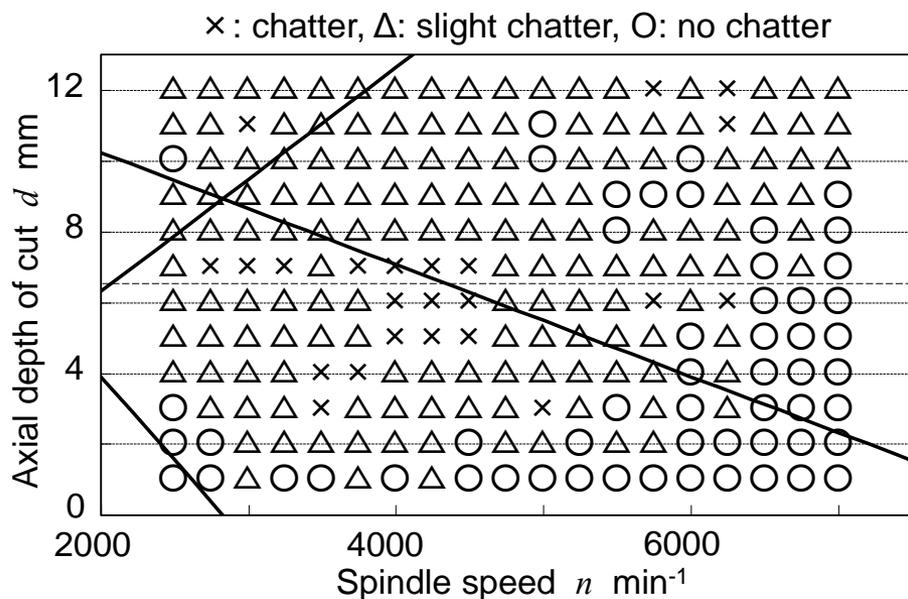
## 市販の不等リードエンドミル



安定限界軸方  
向切込みが理  
論上無限大！



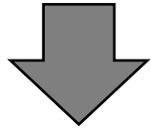
## 大角度差の不等リードエンドミル



# 1.1.6 速度差法の提案と薄板の両面同時フライス加工

大同アミスター(株)と共同開発

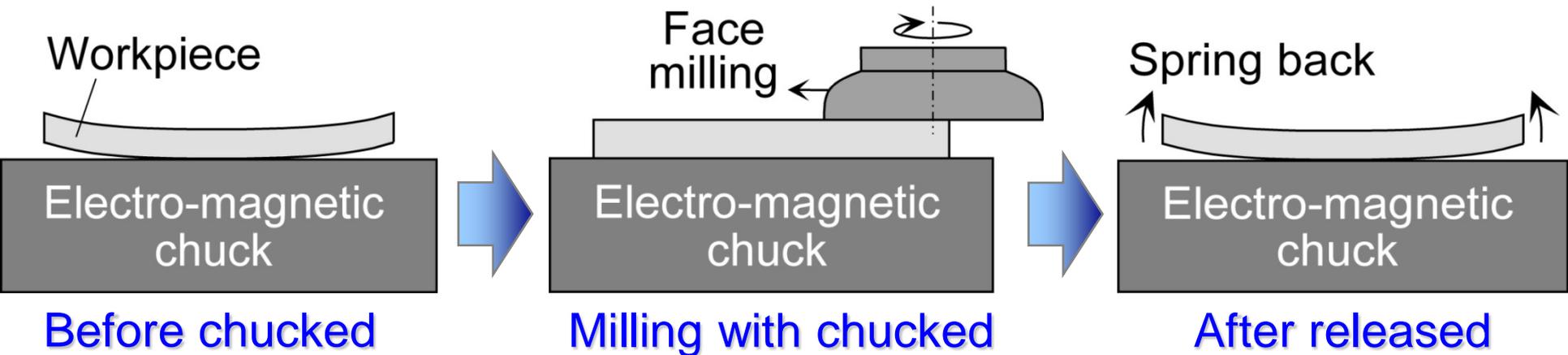
精密プレートの  
従来加工法



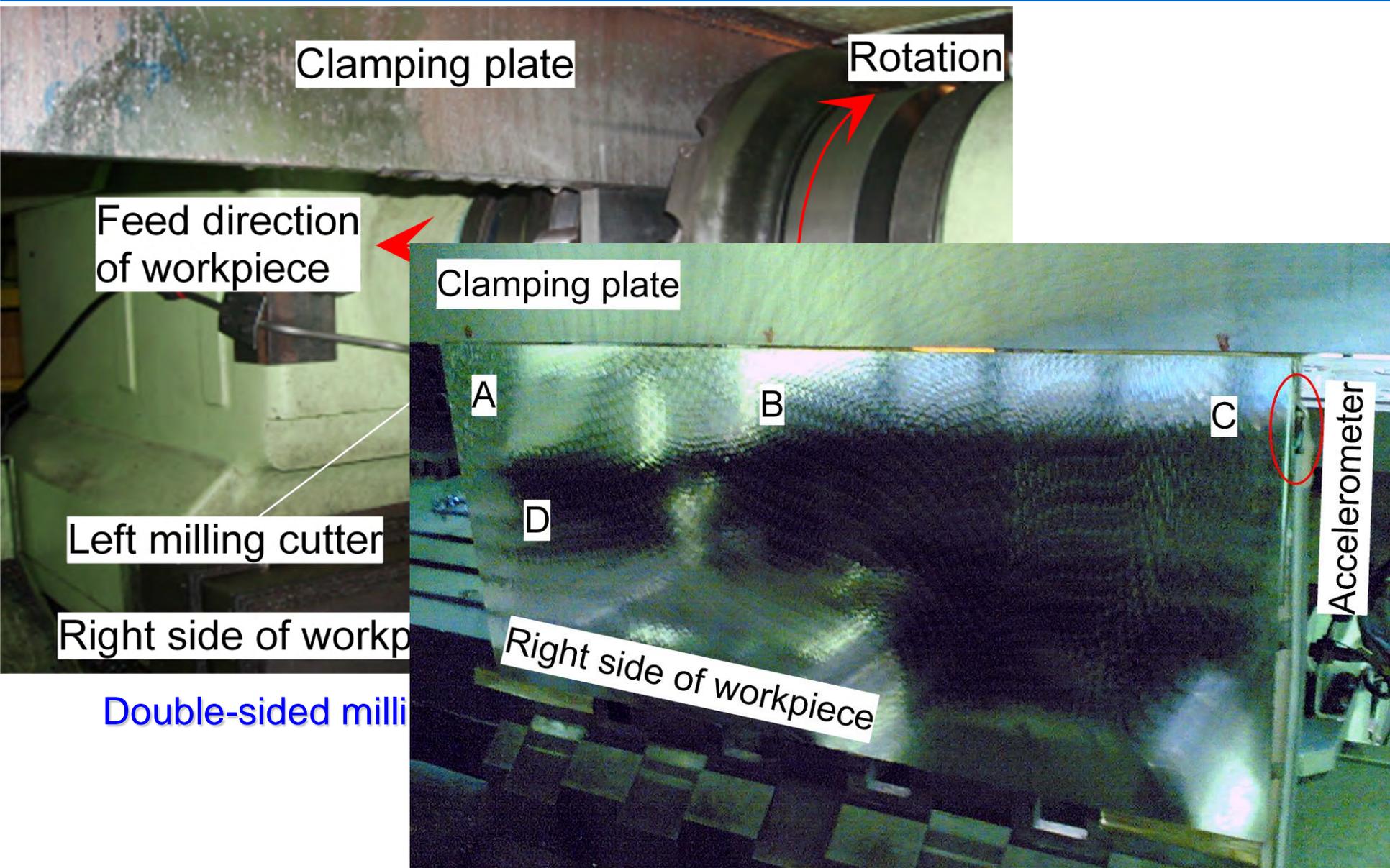
課題: 平面度が悪い,  
手作業で高精度化



[Reference] E Shamoto, T Mori, B Sencer, N Suzuki and R Hino: Suppression of Regenerative Chatter Vibration in Multiple Milling Utilizing Speed Difference Method - Analysis of Double-Sided Milling and Its Generalization to Multiple Milling Operations, Precision Engineering, 37-3 (2013) pp.580-589



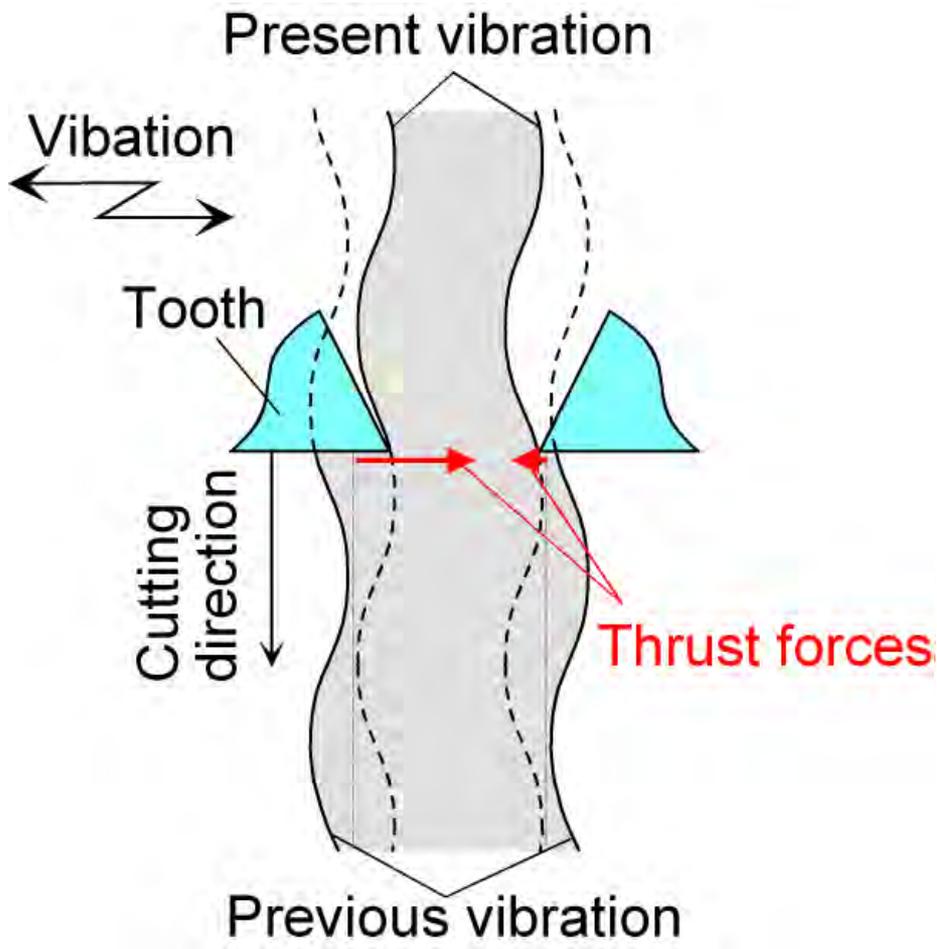
# 精密薄板プレートへの両面同時フライス加工の適用



Double-sided milli

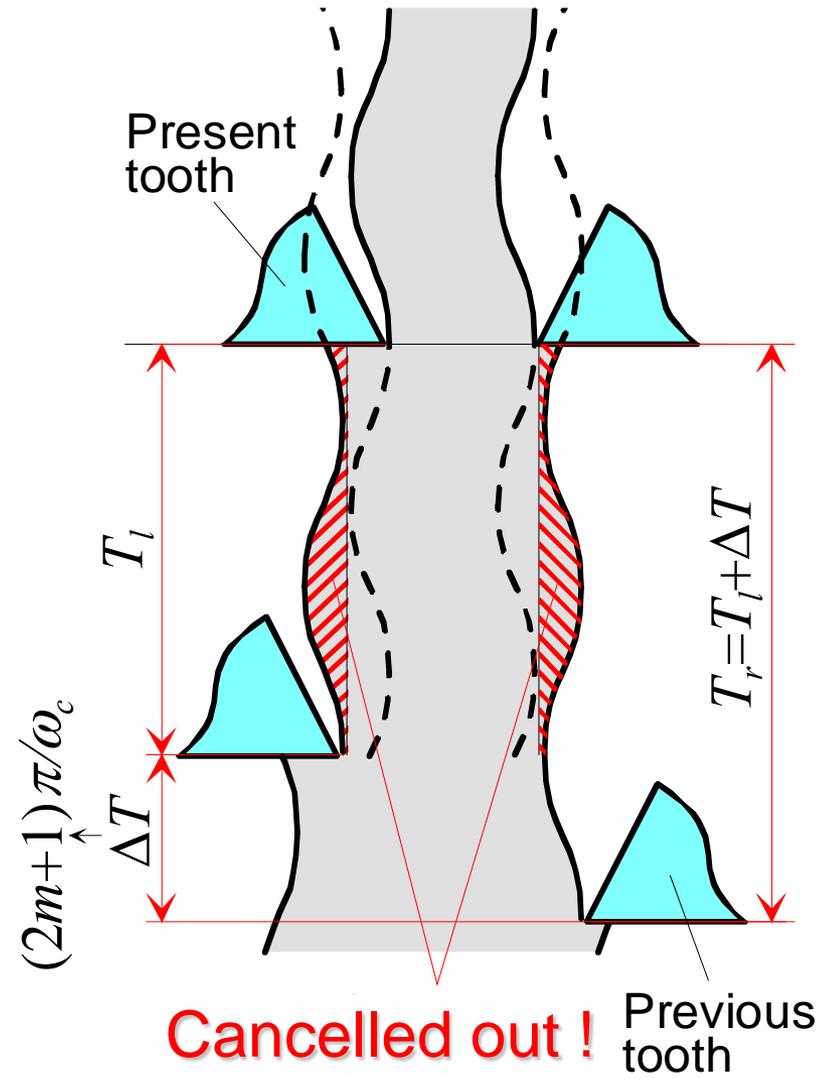
Thin workpiece machined with chatter

# 速度差法による両面フライス加工時のびびり抑制



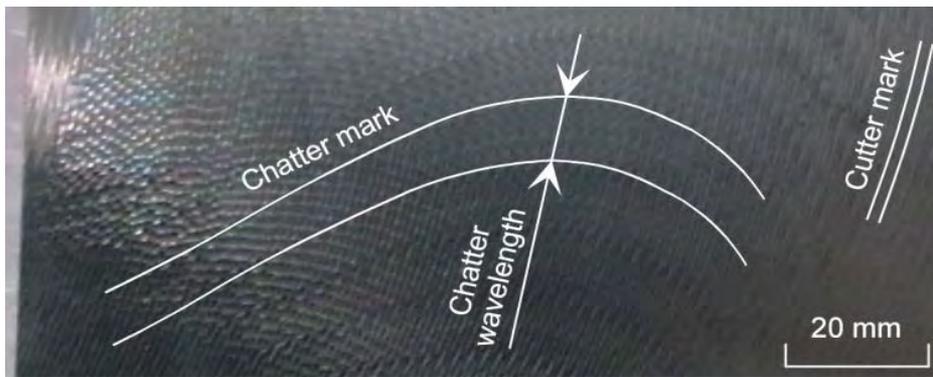
Vibration

Dynamic force is doubled.  
(Self-excitation force)

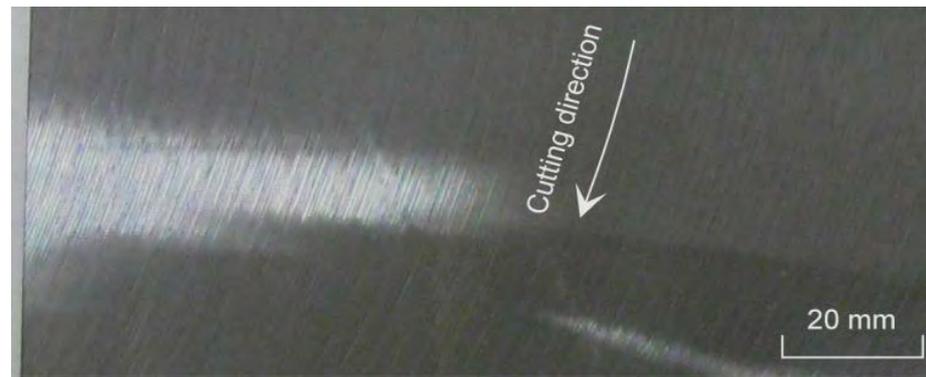


Proposed method to cancel regenerative effects

# 回轉数差による再生びびり抑制と実験結果



回轉数差0, 再生型のびびり振動マーク



回轉数差10rpm, 良好な仕上げ面状態

Machining method	Double-sided			One-sided	
	Speed difference between two spindles $\Delta n \text{ min}^{-1}$	5	10	13	—
Flatness of left surface mm	0.045	0.033	0.013	0.100	0.100
Flatness of right surface mm	0.039	0.050	0.023	0.104	0.114
Average flatness mm	0.034			0.105	

(Flatness was measured with a 3D coordinate measuring machine.)

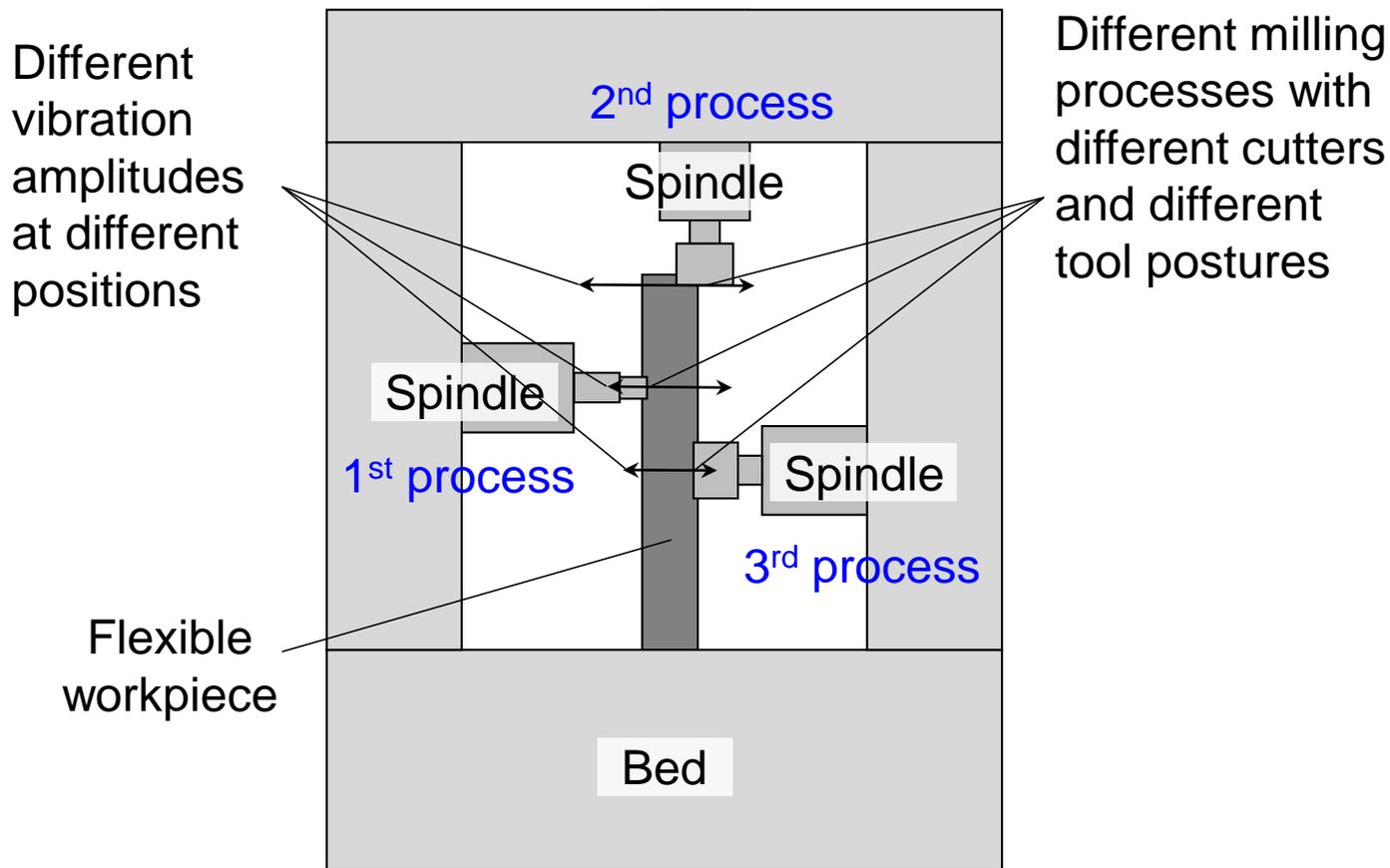
Improved 3 times

従来片面フライス加工に比べて平面度・生産性3倍程度向上





# Extension to multi-milling operations



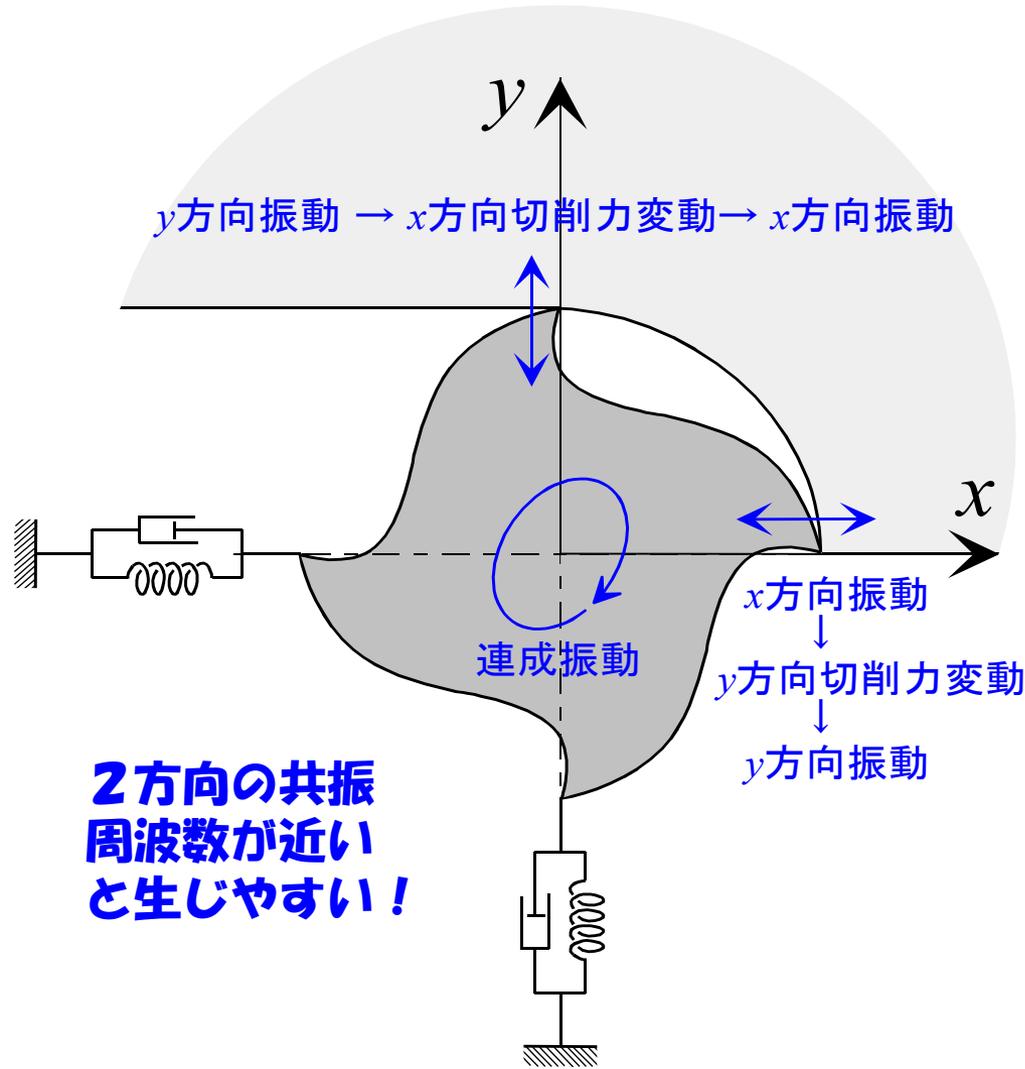
## Stability equation

$$\bar{F} = gK \sum_{j=1}^M \left\{ \eta_j \zeta_j \left( -\bar{b}_j + \bar{r}_j e^{-i\omega_c T_j} \right) \right\} \Phi(i\omega_c) \bar{F}$$

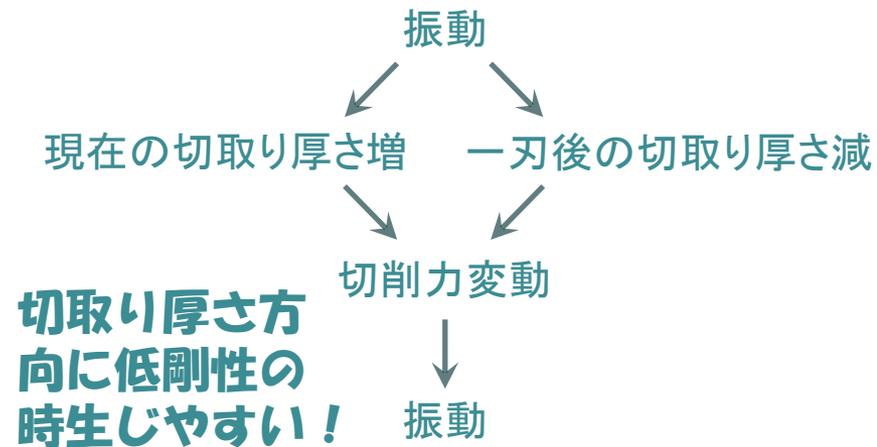
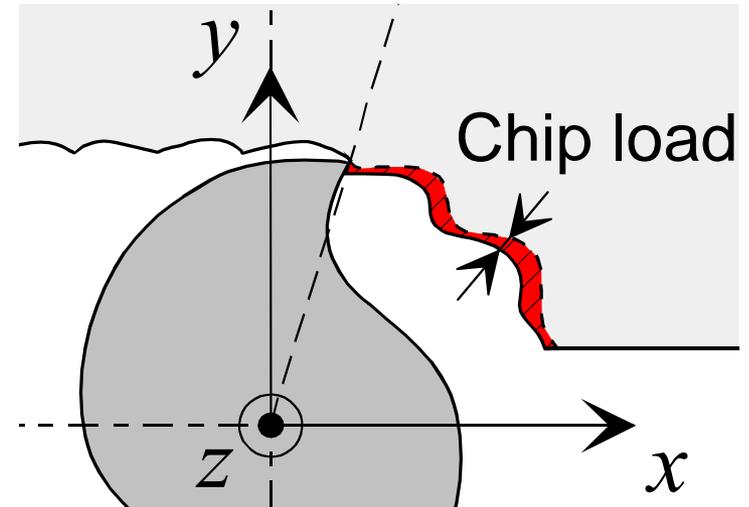
## Condition to cancel multi-regenerations

$$\sum_{j=1}^M \left( \bar{r}'_j e^{-i\omega_c T_j} \right) \approx 0$$

# 1.1.7 深溝(ロングシャンク)加工時のびびり振動抑制法



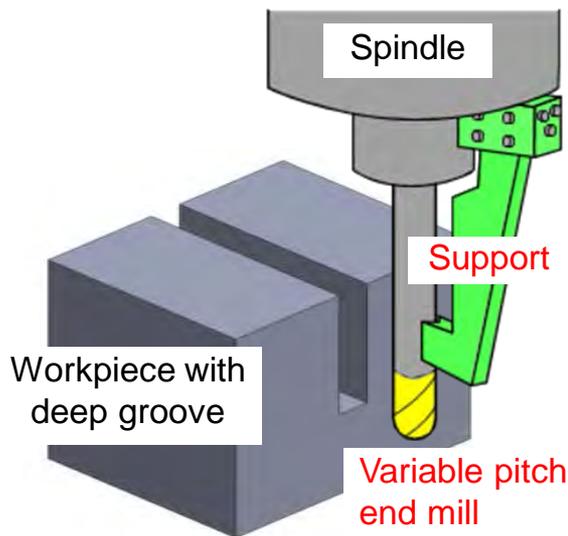
モードカップリング型のびびり振動



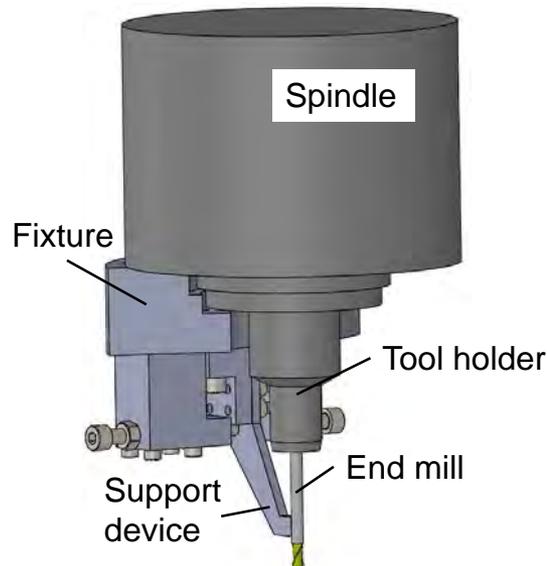
再生型のびびり振動

深溝 (ロングシャンク) 加工時には2種類のびびり振動が同時発生!

# 深溝(ロングシャンク)加工法の提案・実証



Proposed method

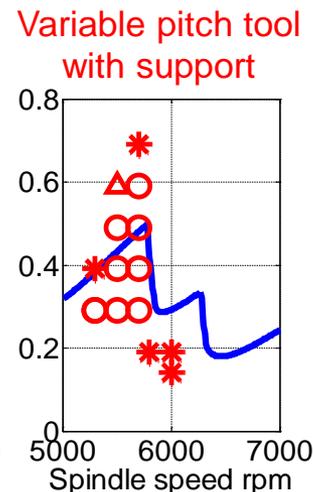
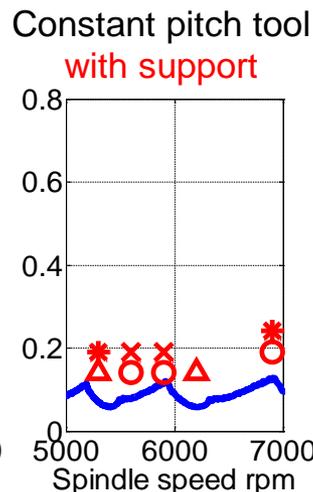
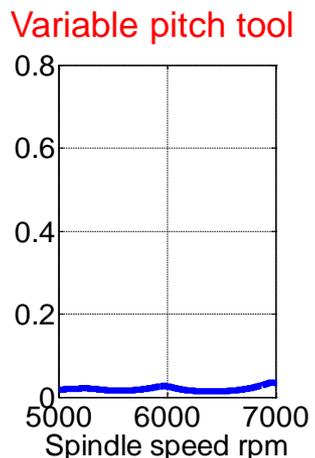
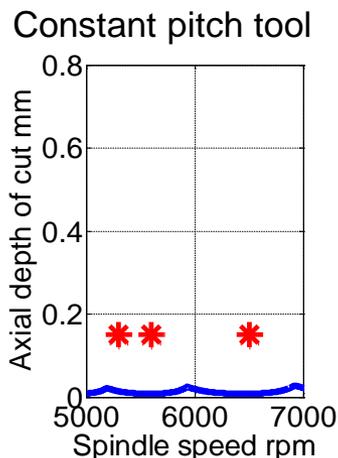


1<sup>st</sup> prototype for research



Practical device applicable with ATC

Developed with NT Tool Corp., OSG Corp., etc.



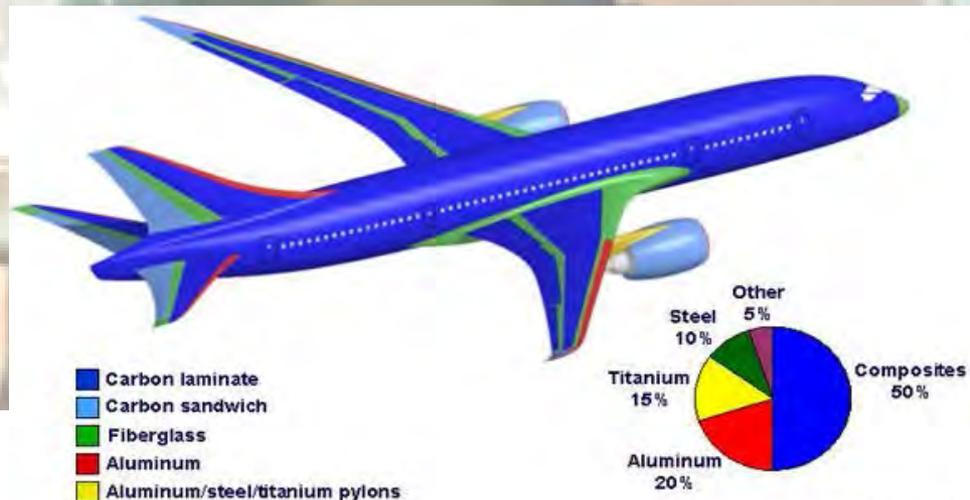
**At least 4 times, analytically 20 times higher stability!**

Significant stability increase verified analytically and experimentally

## 2. 各種難削材の加工

### 2.1 CFRP: 剥離, 工具摩耗, 低能率 → 上下分割傾斜ミリング法の提案・開発

川崎重工業(株), 岐阜県工業技術研究所と共同開発



CFRPが多用されるB787の機体(Boeing)

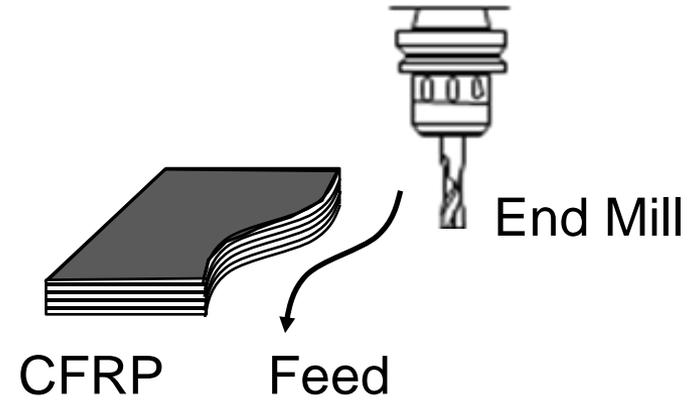


# CFRPのトリミングの課題と提案手法

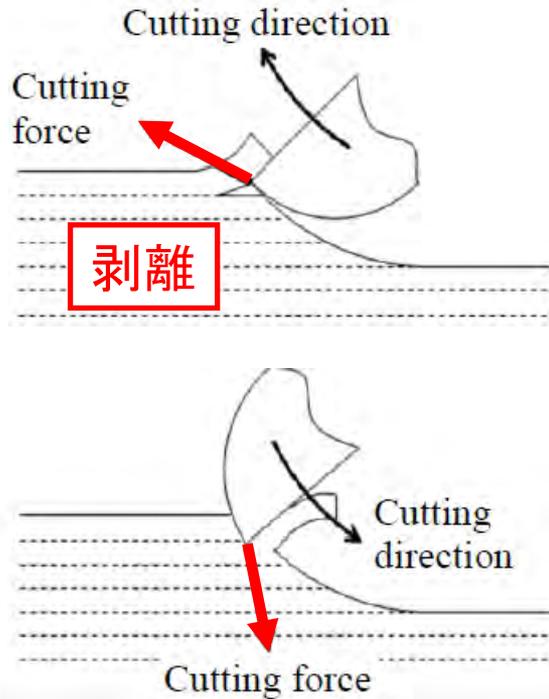
## 背景

航空機産業等でCFRPの利用拡大  
エンドミルによるトリミングの課題

- ・層間剥離
- ・加工能率
- ・工具摩耗 等

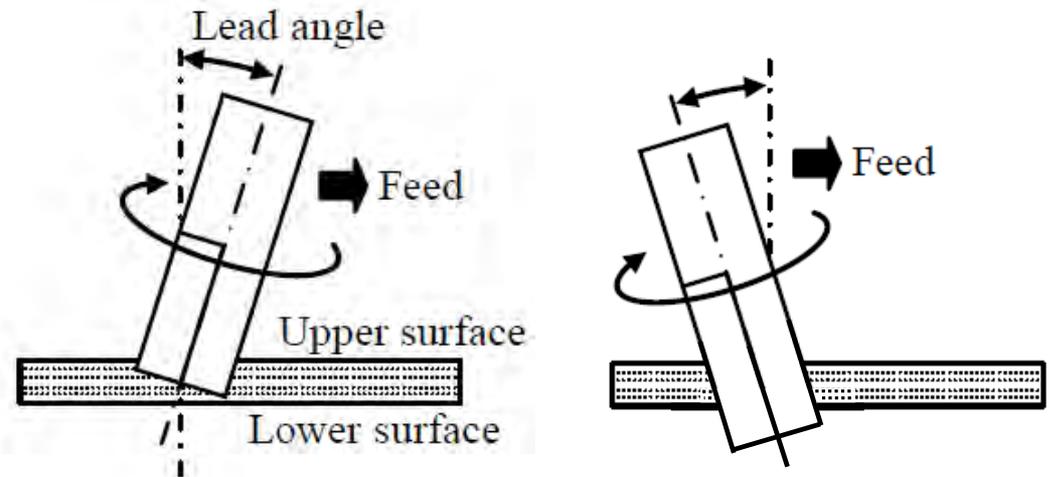


## 現象と提案



### 上下分割傾斜ミリング法

(剥離を防ぐ力が働く工具姿勢で加工)



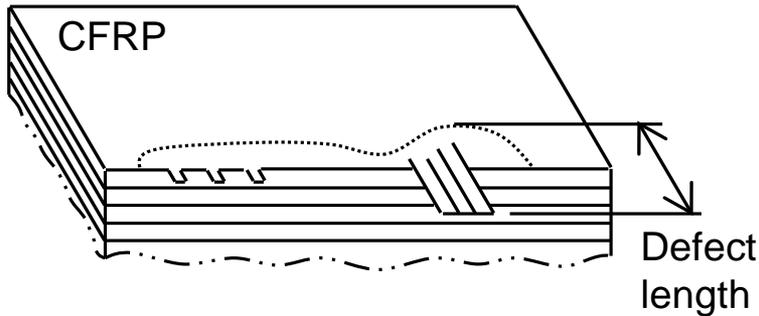
前傾で上面加工

後傾で下面加工

傾斜で剥離抑制, 高送りで工具寿命延長



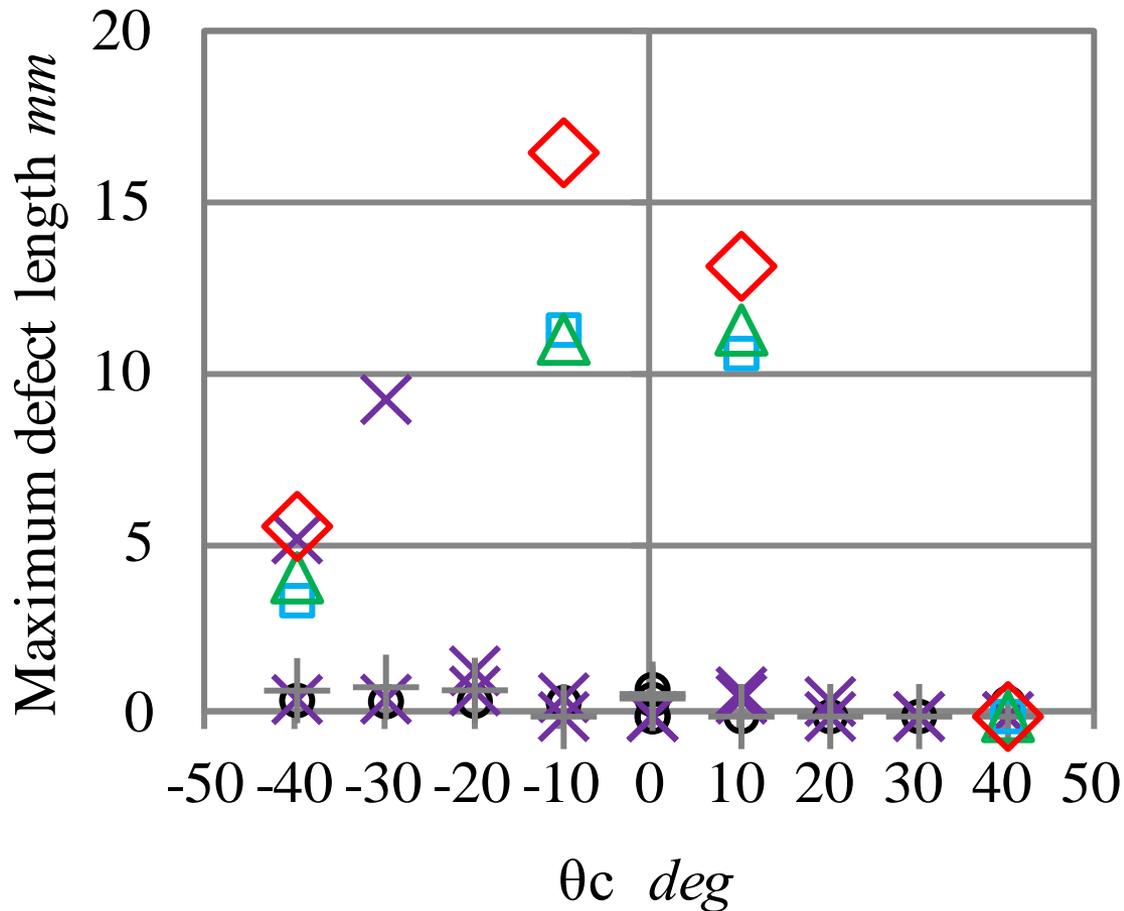
# 切削方向の傾斜による欠陥の抑制



仕上げ面端部の欠陥評価  
(剥離、盛り上がり、切れ残った繊維等)

Up-cut

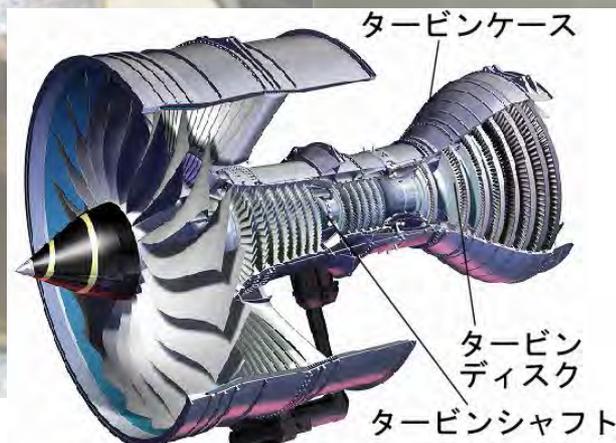
- 0.02 mm/tooth ← 生産条件
- × 0.1 mm/tooth
- + 0.2 mm/tooth
- 0.4 mm/tooth
- △ 0.6 mm/tooth
- ◇ 0.8 mm/tooth ← 40倍の高エネルギー加工, 実質工具寿命も延長



切削方向の傾斜と最大欠陥長さ

## 2. 各種難削材の加工

2.2 超耐熱合金：工具摩耗，低能率  
→セラミック工具，ロータリ工具の設計・開発

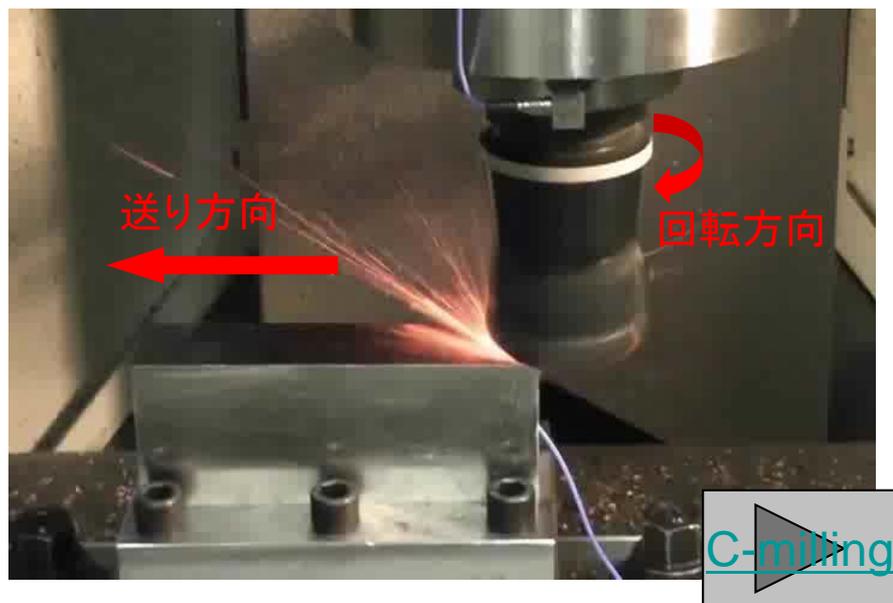


超耐熱合金が多用されるジェットエンジン(資料提供：三菱重工業)

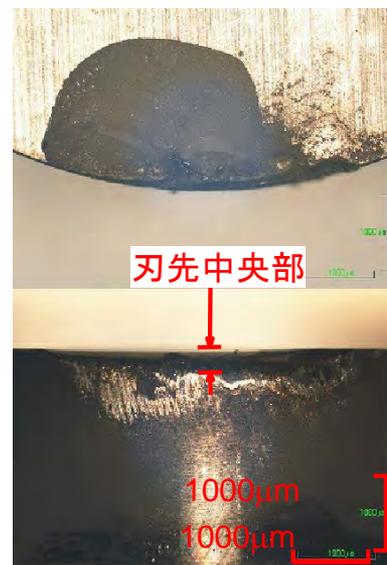


# 超耐熱合金インコネル718のセラミックミリング

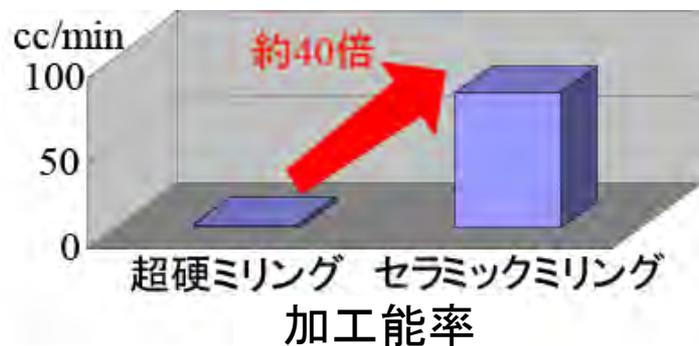
三菱重工業(株), 日本特殊陶業(株)と共同研究



## セラミック工具の欠損が課題



高温硬度の高いサイアロン系セラミック工具を用いて  
切削速度700m/min以上で高速加工



## 欠損の例

切削速度 700 m/min

軸切込 1.0 mm

半径切込 工具径70%

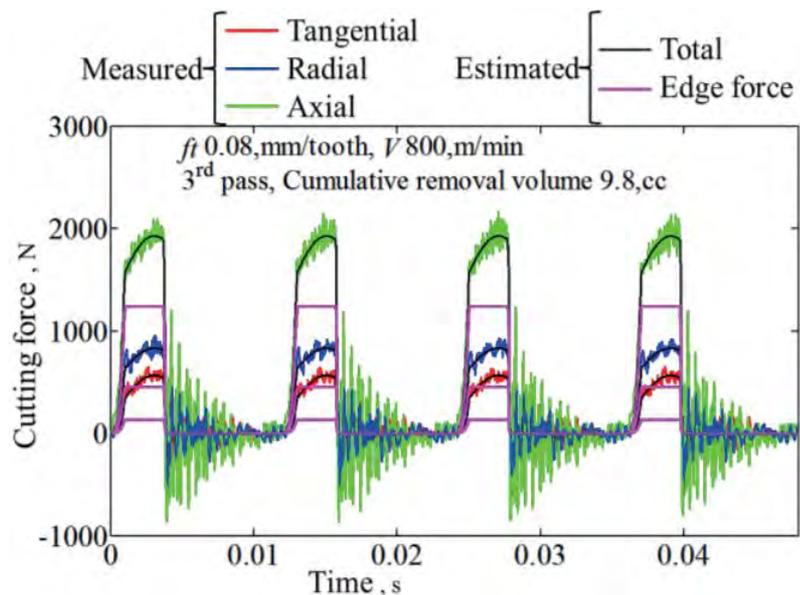
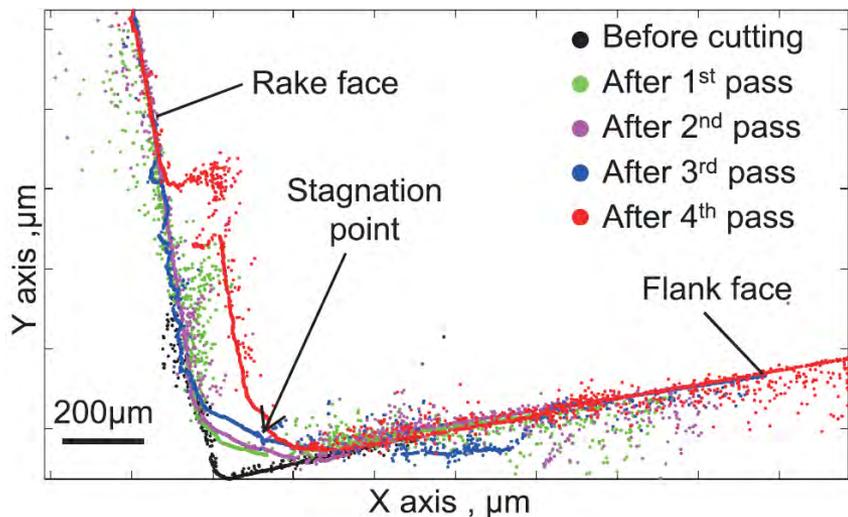
刃数1

送り 0.11 mm/刃

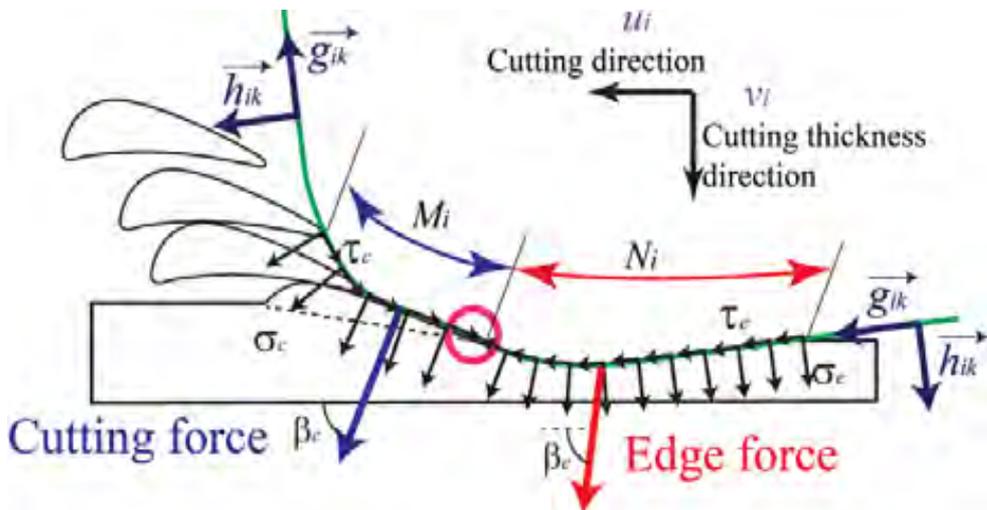
除去体積14.6 cc時に欠損

欠損時逃面摩耗幅 370 μm

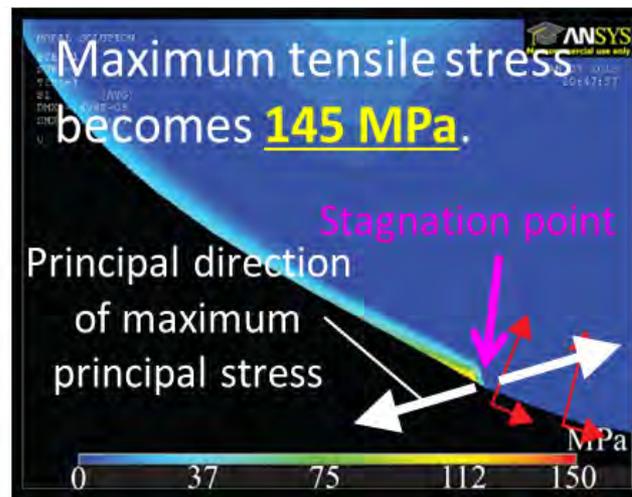
# 工具欠損メカニズムの解明



摩耗過程計測→工具摩耗後の欠損が判明



工具欠損のモデル



切削力モデルとFEMによる応力解析

# ロータリ工具の特徴と傾斜切削理論に基づく工具設計

三菱重工業(株),三菱マテリアル(株)と共同研究

## ロータリ工具の特徴

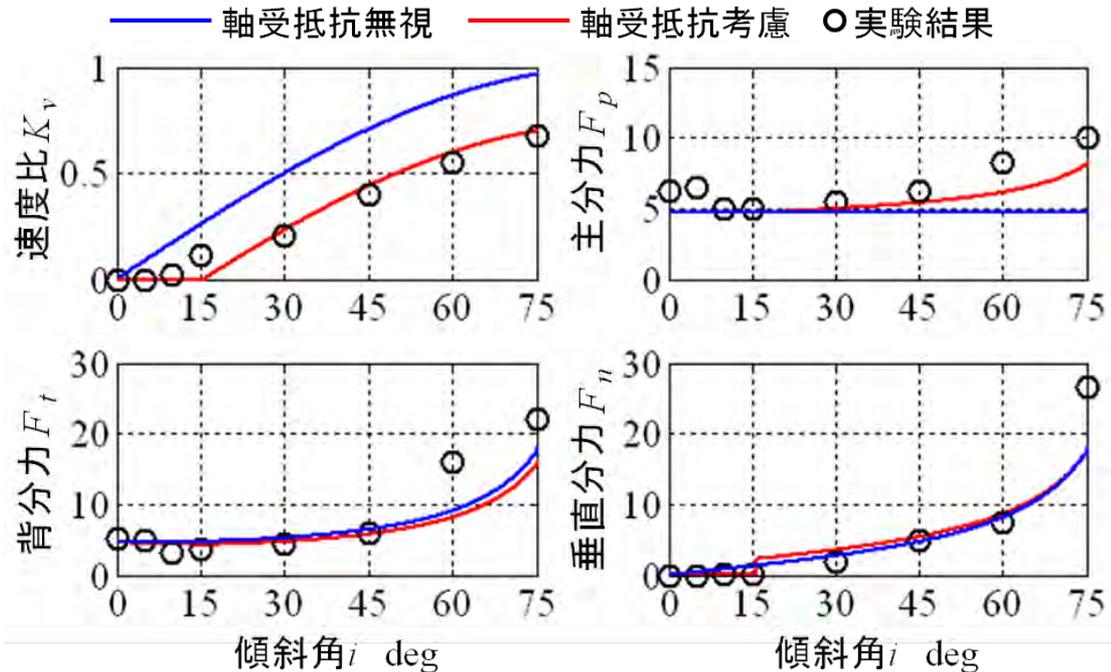
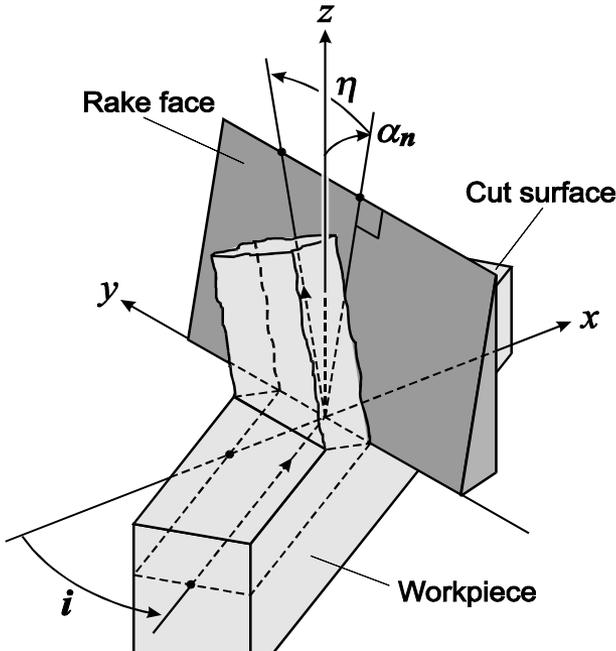
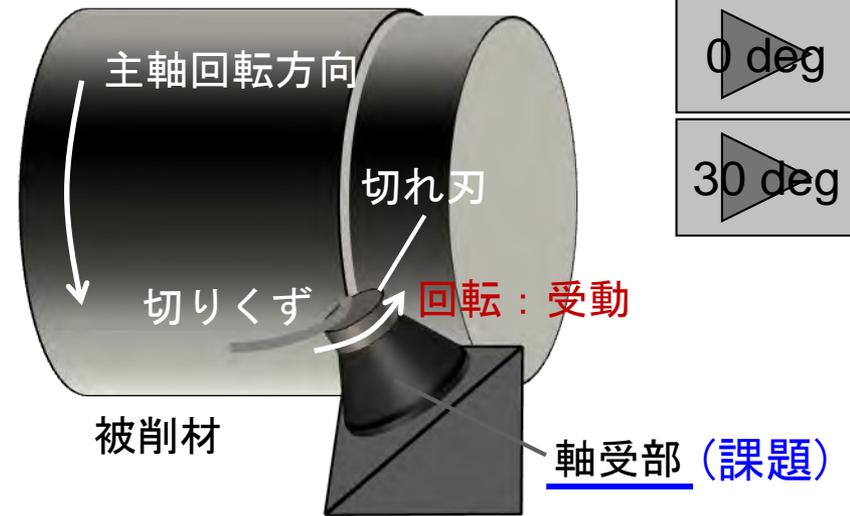
回転速度：工具姿勢・加工条件依存

駆動装置：不要 (課題)

刃先冷却， 摩耗分散， 境界摩耗低減

➔ **工具寿命延長**

## 傾斜切削理論に基づくミリング工具設計



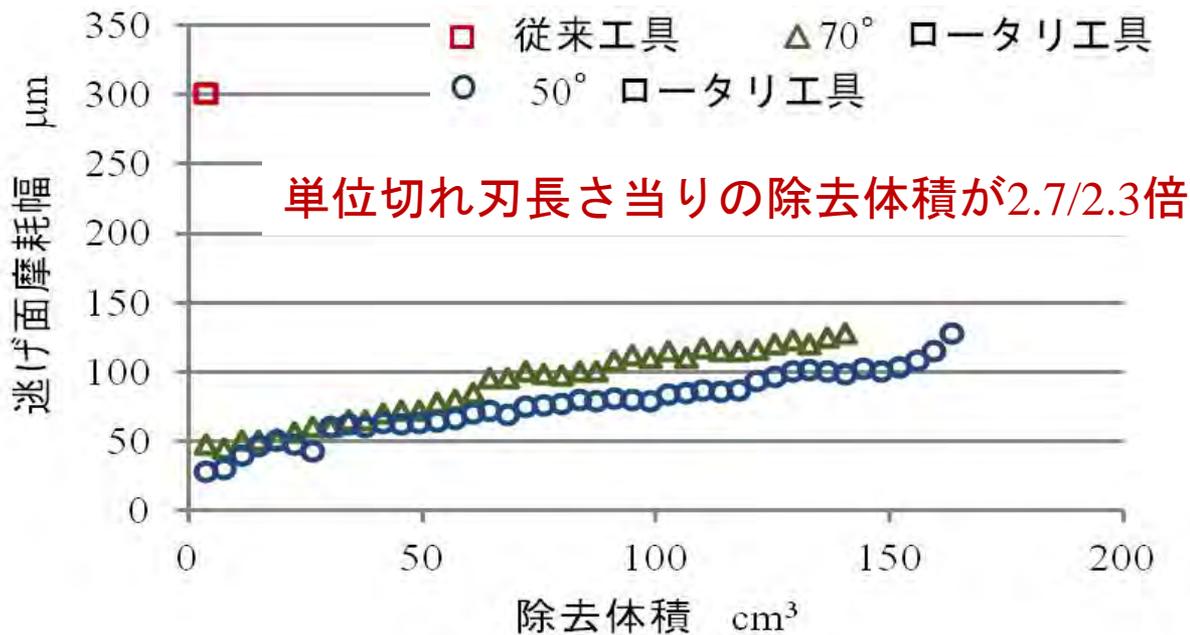
# ロータリ工具による超耐熱合金のミリング(加工条件と工具寿命)



ロータリミリング実験の様子



カッタ	従来工具 (BRP6PR08006C)		ロータリ工具	
	50°	70°		
インサート直径 mm	12		12.7	
被削材	Inconel718			
刃数	1			
主軸回転数 $\text{min}^{-1}$	262	120	257	
切削速度 m/min	56			
軸方向切込 mm	0.5			
半径方向切込 mm	68			
送り量 mm/rev	0.05			
切削雰囲気	水溶性切削油			
1パス毎の切削距離 m	230			
1パス毎の除去体積 cc	3.7			
送りの傾斜 (水平/垂直方向)	0.2%			



- 安, 鈴木, 社本, 鶴飼, 吉田, 長谷川, 石川, 山田:  
従動式ロータリ工具を用いた難削材のミリング  
加工に関する研究, 2012年度精密工学会春季  
大会学術講演会講演論文集, pp.239-240

# 次世代の航空機部品加工技術を目指して

## 1. 高能率化

### 1.1 びびり振動→現象の解明, 解析・抑制法の開発

ボールエンドミル, 工具姿勢, 安定性指標, 不等ピッチ・不等リード, 速度差法, 深溝(ロングシャンク)加工法, 異方性工具, 摩擦減衰の解析・最適化

### 1.2 高速切削 vs 重切削→切削温度測定・解析, 加工条件最適化

## 2. 各種難削材の加工技術の開発

### 2.1 CFRP: 剥離, 工具摩耗, 低能率→上下分割傾斜ミリング法

### 2.2 超耐熱合金: 工具摩耗, 低能率→セラミック工具, ロータリミリング工具

## 3. 自動化

切りくずの絡み付き→案内溝付き工具の考案・開発と引張り旋削

## 4. 難削材加工の精密・微細化

ダイヤモンド工具の摩耗→楕円振動切削加工法の考案・開発