

**Increasing Complexity and Limits of
Organization in the Microlithography Industry:
Implications for Japanese Science-based
Industries**

一橋大学イノベーション研究センター

中馬宏之

なぜ半導体露光装置産業か？

- 同産業の生み出す露光装置が“歴史上最も精巧な装置”と称されるほどの科学・技術の粋を集めた**究極の“擦合せ型”**(藤本(2001))装置であること、
- 同産業においては、**ニコン・キヤノン**という我が国を代表する企業が90年代後半に至る20年余にわたって**他を寄せ付けない国際競争力**を保持してきたこと、
- ところが、90年後半以降、**オランダ・ASML**の台頭と共に、そのような**競争力維持に翳り**が見え始めていること、
- そもそも露光装置は我が国が通常比較優位を持つとされてきた“擦合せ型”製品の究極に位置するが、**このような製品に競争力弱化傾向が出てきていること**

Figure 1: Transition in Stepper Market Share (Total Sales)

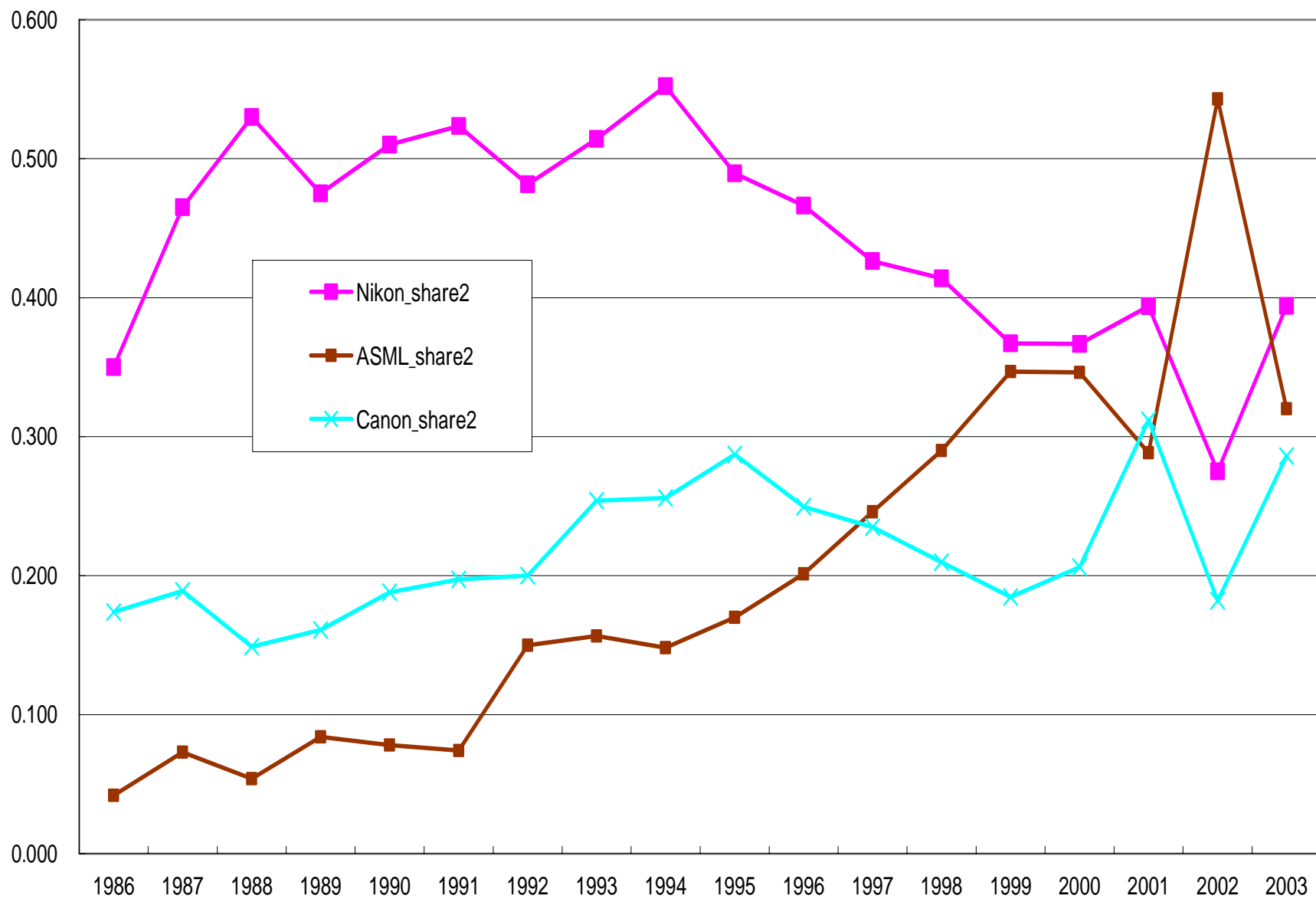
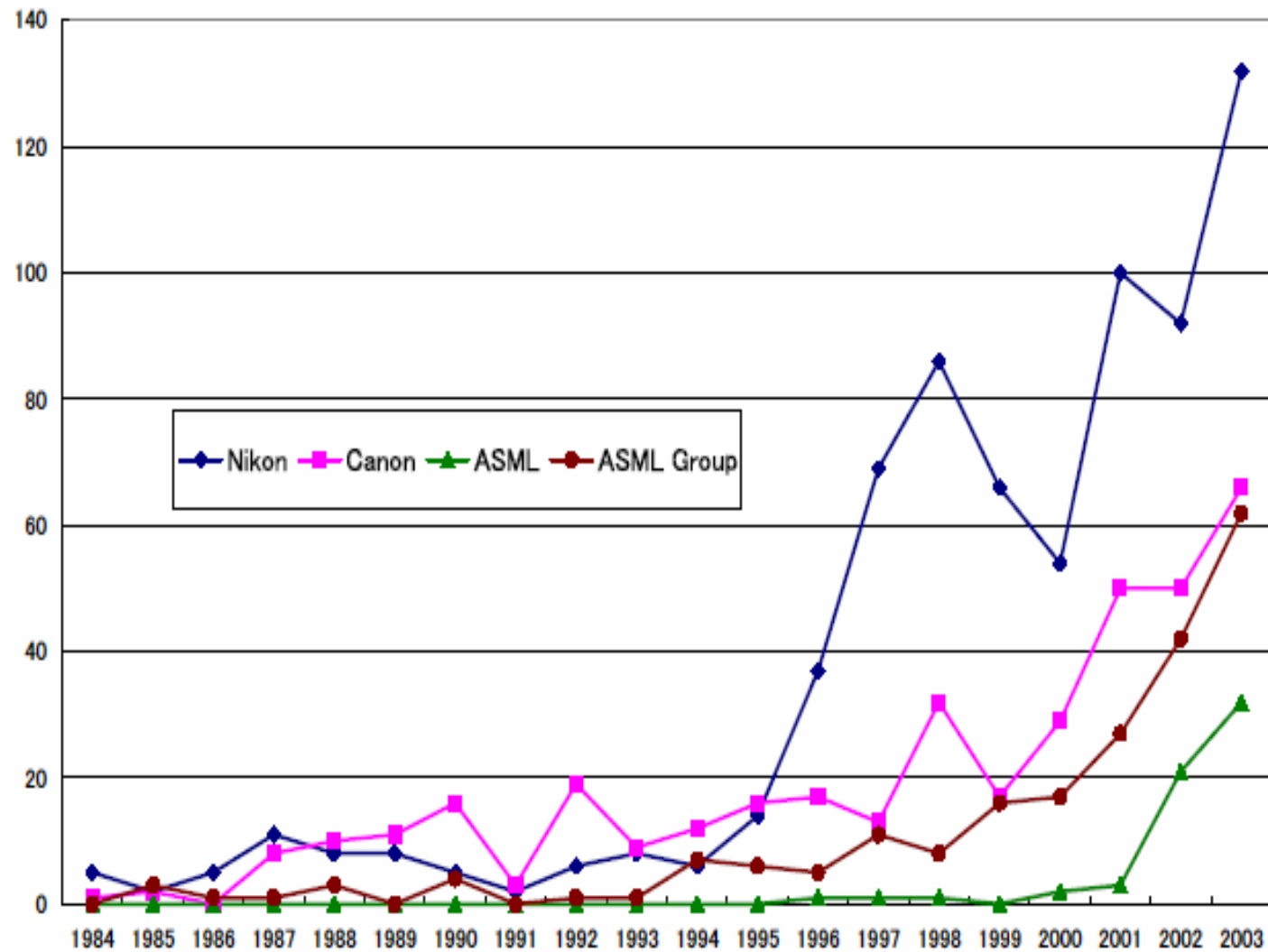


Figure 3. Transition in acquired U.S. patents by ASML, Canon, and Nikon



半導体露光装置の基本構造

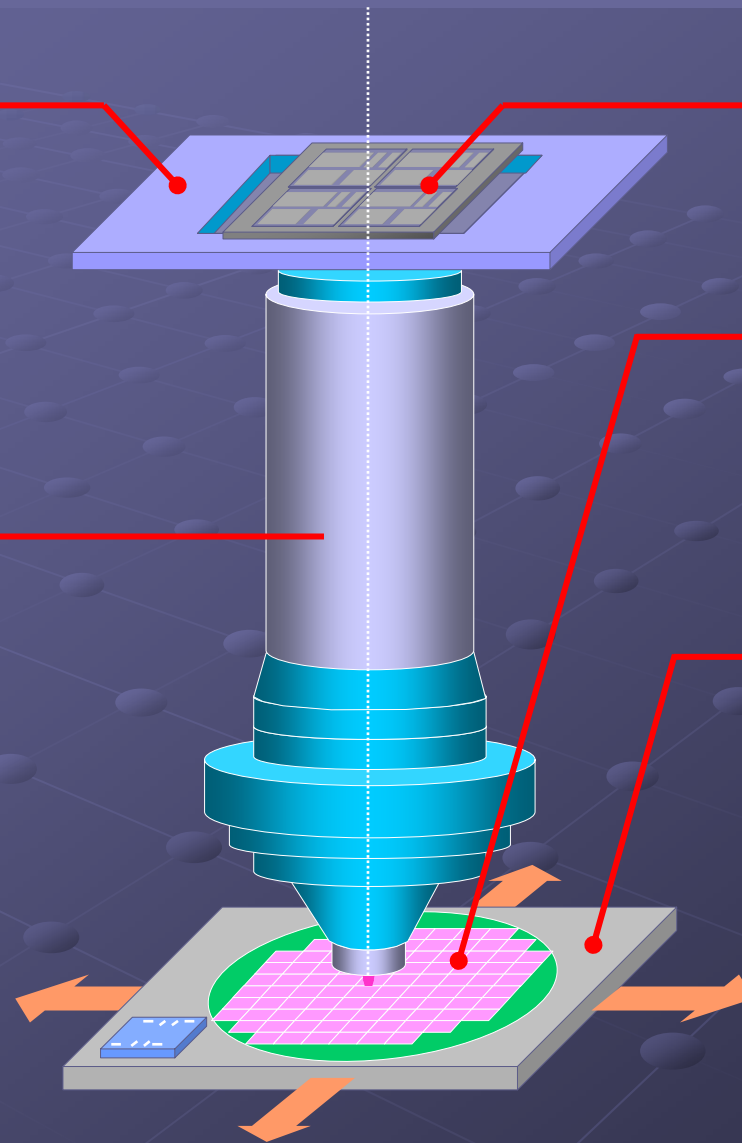
レチクル
ステージ

フォトマスク
(回路原画)

シリコン・ウェーハ

投影レンズ

ウェーハ・ステージ



調査実施企業 (1999 – 2005)

- **ニコン**: Production (glass, lens and final & lens assembling), Fabrication Engineering (glass, lens, and final & projection lens assembling), and Design & Development Divisions (system design), planning division, personnel division, and three factory tours
- **キヤノン**: Production (final assembling), Fabrication Engineering (final assembling), and Design & Development Divisions (system design), planning division, personnel division, and factory tour
- **ASML**: Production (Fabrication Engineers) and Design & Development Divisions (CES), Hitachi High-Technology (previous Nissei Sangyo, Sales Management Division of ASML in Japan) and factory tour
- **Ultratech**: CEO, Vice President of Japanese Market, Lens Designer (Previous Perkin-Elmar), factory tour
- **IMEC**: CEO, (five) Division Managers, and factory tours
- **半導体デバイスメーカー**: **Epson, NEC, Hitachi (& Trecenti), Mitsubishi, Fujitsu, Fujitsu-AMD, SONY, UMCJ, TSMC, Winbond, Elpida, etc.**
- **半導体材料(Resist)メーカー**: **JSR (Japan, US, Belgium), TOK**
- **他の半導体製造装置メーカー**: **Dai Nippon Screen, TEL, AMAT, Novellus, Lam Research, Mattson, Daifuku, etc.**
- **他の半導体リサーチコンソーシアム**: **STARC, MIRAI, SEMATEC, ASPLA, NY Albany Nanotec. Center**

ASMLとは？（1）

- ニコン・キヤノンとは異なり、システム設計と最終組立のみに特化。研究開発や基幹部品供給をPhilips, Zeiss, TNO及びIMECに全面依存。そのため、一見した限りでは、なぜニコンやキヤノンをも凌駕する程の研究・開発力を持ちうるのか理解できない。
- ところが、より精査してみると、ASMLとは、Philips, Zeiss, IMEC and TNOと排他的契約 (exclusive contracts) 関係を通じて一体化した巨大複合企業であることが判明する。
- さらに、そのような複合体の組織形態は、従来型のニコン・キヤノンのような垂直統合型企業に比較すると、以下のような意味で極めて現代的である。
企業(グループ)の境界が極めて伸縮的かつ“穴ぼこ”状になっており、そのことによって企業(グループ)内外に点在している他分野にわたるプロフェッショナルの叡智を効果的かつ意図的に結集しやすくなっている。

何が起きている？

露光装置のソフト・ハードの複雑性急増

Table 1. Changes in complexity of ASML microlithography

	PAS5000 Stepper	PAS5500 Stepper	PAS5500 Scanner	Twinscan AT: 700S	Twinscan AT: 1100T	Twinscan (Unkonwn)
Initial Sale	1989	1996*	1997*	2000	2001*	2003*
Sampling Frequency (MHz)		3.85	2.5	3.3	5	
Processor (CPU) Frequency (MHz)		40	60	60	350	
# Processors (FPGA)	8 (0)		25 (200)			50 (500)
# Axes		3	17	24	36	
# Sensors	50		150			400
# Actuaters	40		100			300
# Motion		3	6	10	14	
(1)Lines of Source Codes (include coment lines)	200 millions		900 millions			1250 millios
(2)Lines of Source Codes		20000	140000	260000	450000	

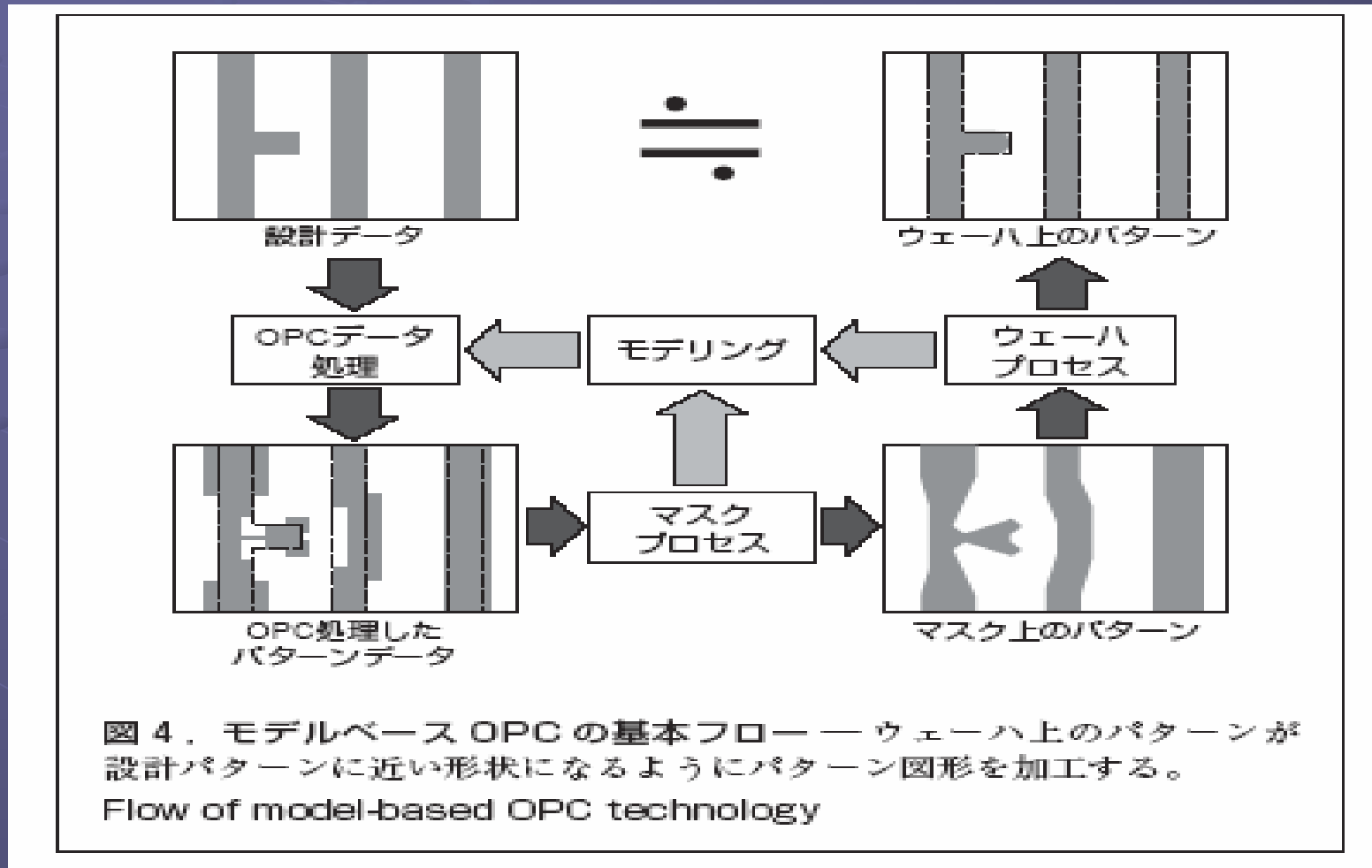
Astarisks (*) mean the estimation.

Source of data: Compiled by the author from public data available from ASML and other agencies.

何が起きている？ 露光プロセスの複雑性が急増

- 90年代後半以降における超解像技術(RET)の多用は、(光)露光装置に新たな進化の道筋を開いた。ところが、他方、露光装置メーカーに、これまでとは比較にならない程の新たな試練を与えはじめた。
- RETを使用することにより、設計上のマスクパターンから実際に製造されたマスクパターン、製造されたマスクパターンからウェーハ上のパターンへの転写忠実度を確保することが格段に難しくなった(森・東木(2004))。
- 転写忠実度を確保できない根本原因を、露光装置メーカーだけではなかなか究明できなくなってきた。その結果、露光装置が“物理限界”に近づくに連れ、さらなる性能向上を達成するために、従来とは異なる要素技術との広範囲な専門知識の融合が不可欠になってきた。
- ASMLが大躍進を遂げはじめたのは、このような時期。

超解像度技術(RET)導入によるプロフェッショナル結集範囲の拡大: OPCの事例



森一郎、東木達彦(2004)、「先端リソグラフィ技術の課題と革新」より

“*ex ante Modularity*”

- “製品の全体性能が各基幹ユニットの性能保証によって自動的に保証される”という意味で、“完全”であれば、モジュラー設計思想が、下記のようなBC流の便益 = “*ex ante Modularity*”をもたらす。

(a) 対処可能な複雑性の範囲の拡大

(b) 同時並行開発・生産・アウトソーシングによる
対処可能なビジネス・リスクの範囲の拡大

(c) 同時並行開発・生産による各種リードタイムの
短縮

複雑性対処策としての“*interim Modularity*”

- “*interim Modularity*”とは、不完備なモジュラー・アーキテクチャがもたらす**一目瞭然化便益** = “**広範囲に専門家の智慧を結集して即興演奏可能とするためのコミュニケーション便益**”（「きょうはAm(エーマイナー)で行こう」という具合に！）

モジュラー・アーキテクチャは、たとえ当初に不完備なものであっても、複雑性が錯綜していればいるほど一目瞭然化便益をより多く喚起可能。

- “*interim Modularity*”に比べて“*ex ante Modularity*”は、より成熟したテクノロジーにフィットする概念か？

藤本アーキテクチャ論と“*interim Modularity*”

- 「日本企業は擦合せ上手、米国企業は組合せ上手」というフレームワーク拡張の必要性？

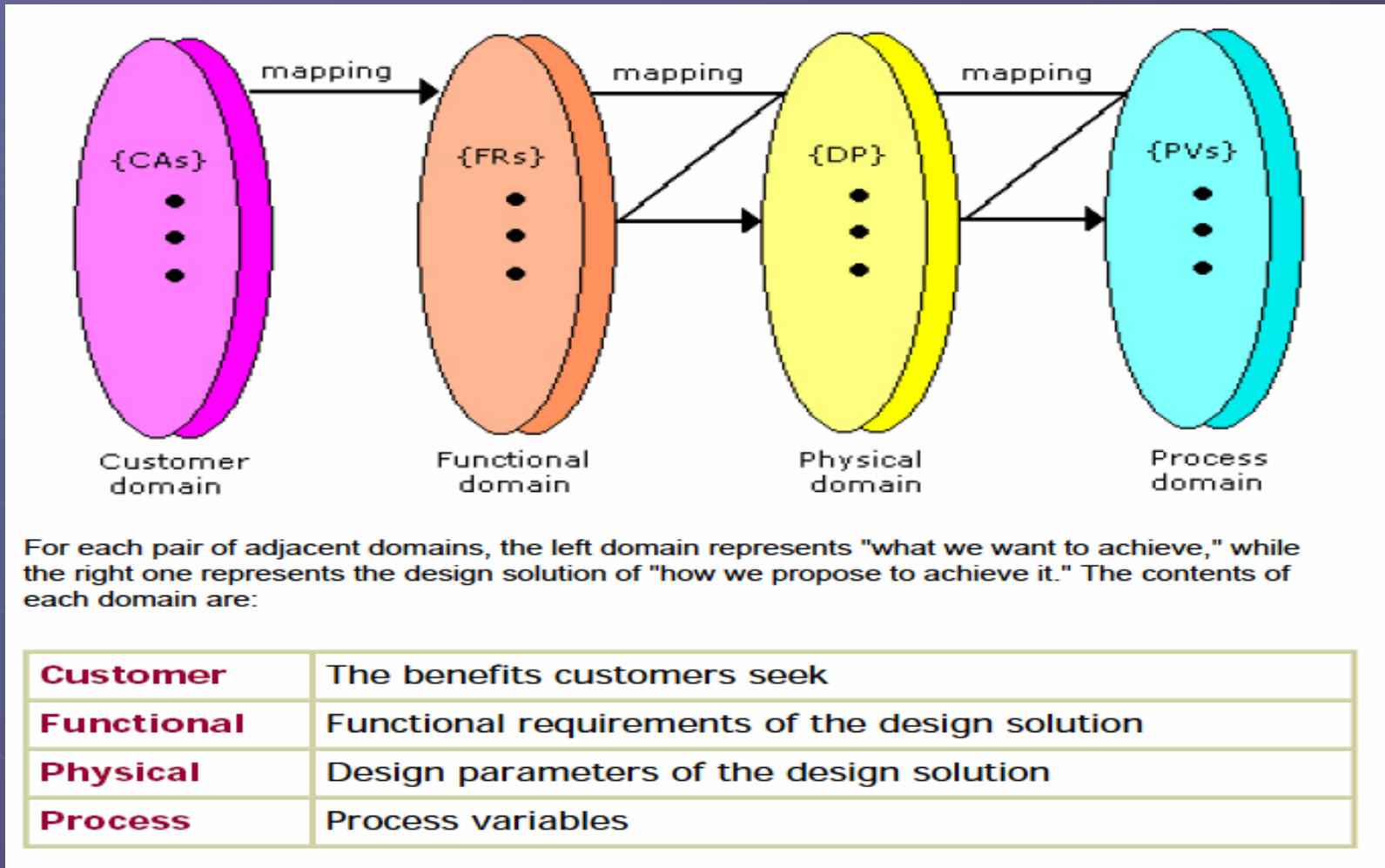
完成品に具体化されたアーキテクチャの役割とそれが試行錯誤を繰り返して完成されるまでのプロセスに具体化されたアーキテクチャの役割との峻別が必要？

露光装置は、完成品で見ると極めてクローズドかつインテグラル。ところが、完成されるまでのプロセスでは、**企業内外に点在する広範囲なプロフェッショナルの叡智を結集**することが不可欠。

叡智結集スピードを上げるには、社内外の様々な専門家間のコミュニケーション効率を高めること不可欠。そのためには、**不完備なモジュラー・アーキテクチャがもたらす一目瞭然化便益の追求**が効果的。

この種のコミュニケーション便益を高くすることができればできるほど、より迅速に“**より完成されたクローズドでインテグラルなアーキテクチャ**”に到達可能。

完成品に体化されたアーキテクチャーの役割 (マーケティング)・開発・設計・製造間を貫く“造り込み方法”の容易化



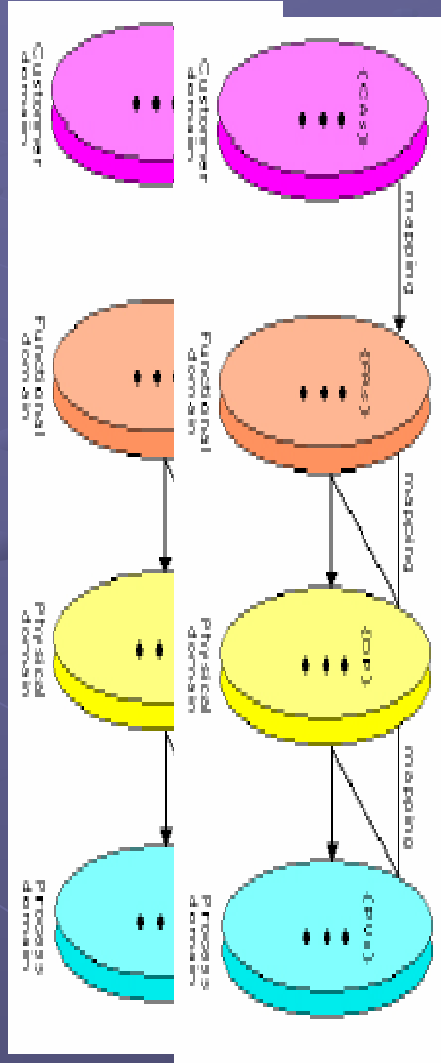
(<http://www.axiomaticdesign.com>より抜粋)

また、Nam P. Suh著 *Axiomatic Design*(2004)参照

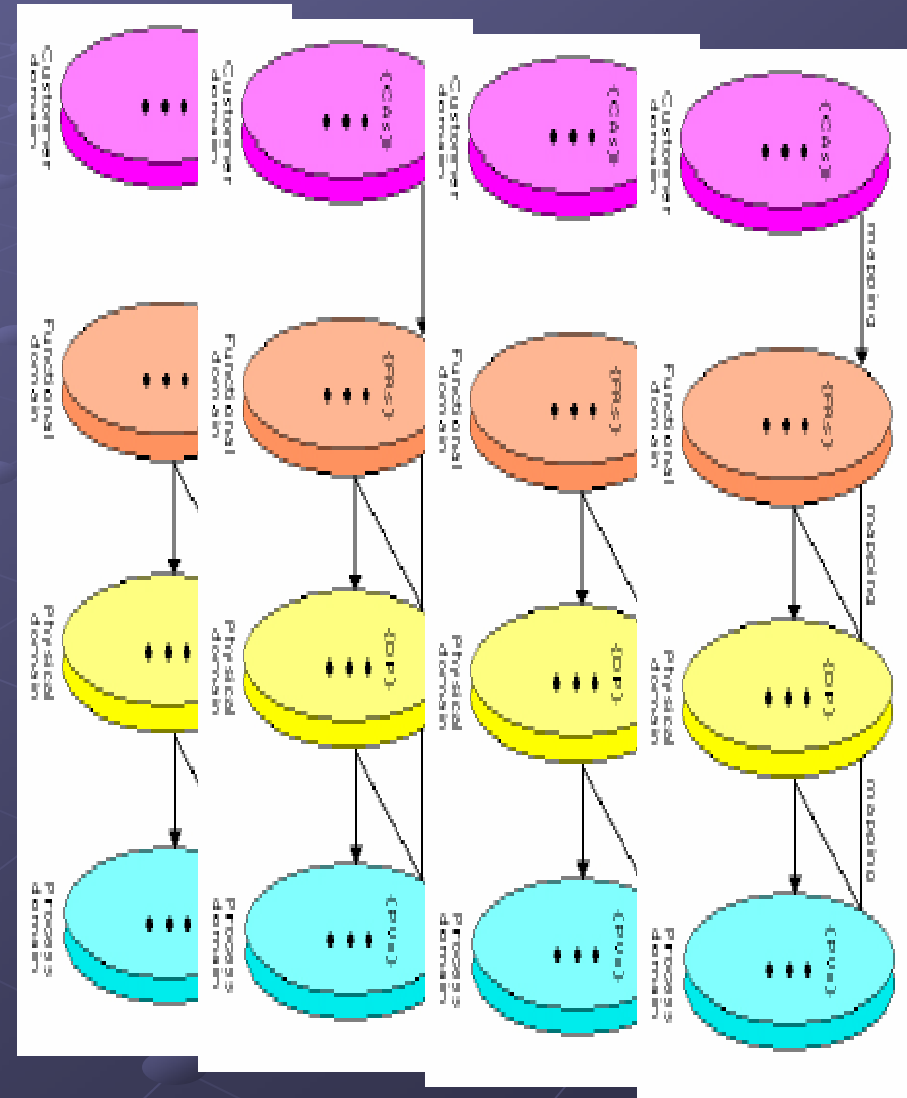
開発フェーズでのモジュール・アーキテクチャの役割

(アーキテクチャー自体の探査とそのアーキテクチャでの“造り込み”方法の同時探査)

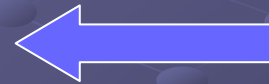
未知のアーキテクチャ群



既存の利用可能なアーキテクチャー群



複雑性のもたらした新難度の問題



ASMLの競争力を支える“*interim Modularity*”

● 共同研究開発の方法(1)

ASMLが、ニコン・キヤノンに比較して、“*interim Modularity*”をより明確に認知している様子は、SPIE (国際光工学会)コンファレンスにおける論文発表形態においても顕著?

ASMLは、90年代以降共同論文の数が増えており、その傾向は、98年以降にさらに加速してきている。他方、ニコン・キヤノンでは、依然としてスタンド・アローン型の論文が圧倒的に多い。この傾向は、特にニコンで顕著である。(キヤノンの場合、論文自体少ない。)

日本のデバイスメーカーが、ごく最近に至るまで、独自プロセス技術を、オープンにしてこなかったという事情を反映? その意味では、“*interim Modularity*”の認知の不十分さは、我が国デバイスメーカーにおいてより顕著?

図5： SPIEにおけるASML連合 (ASML, フィリップス、ツアイス) の論文発表形態の推移

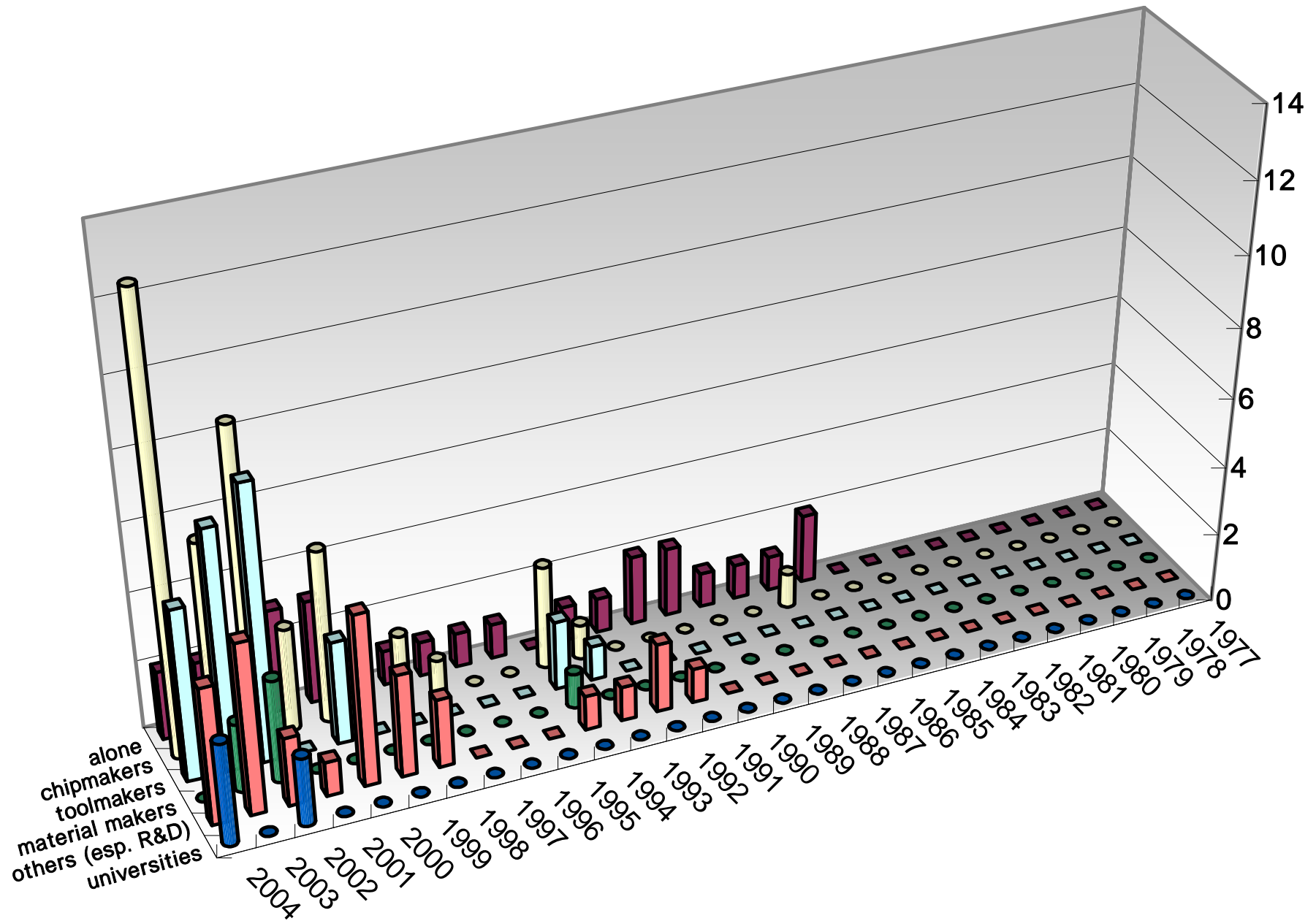


図6： SPIEにおけるニコンの論文発表形態の推移

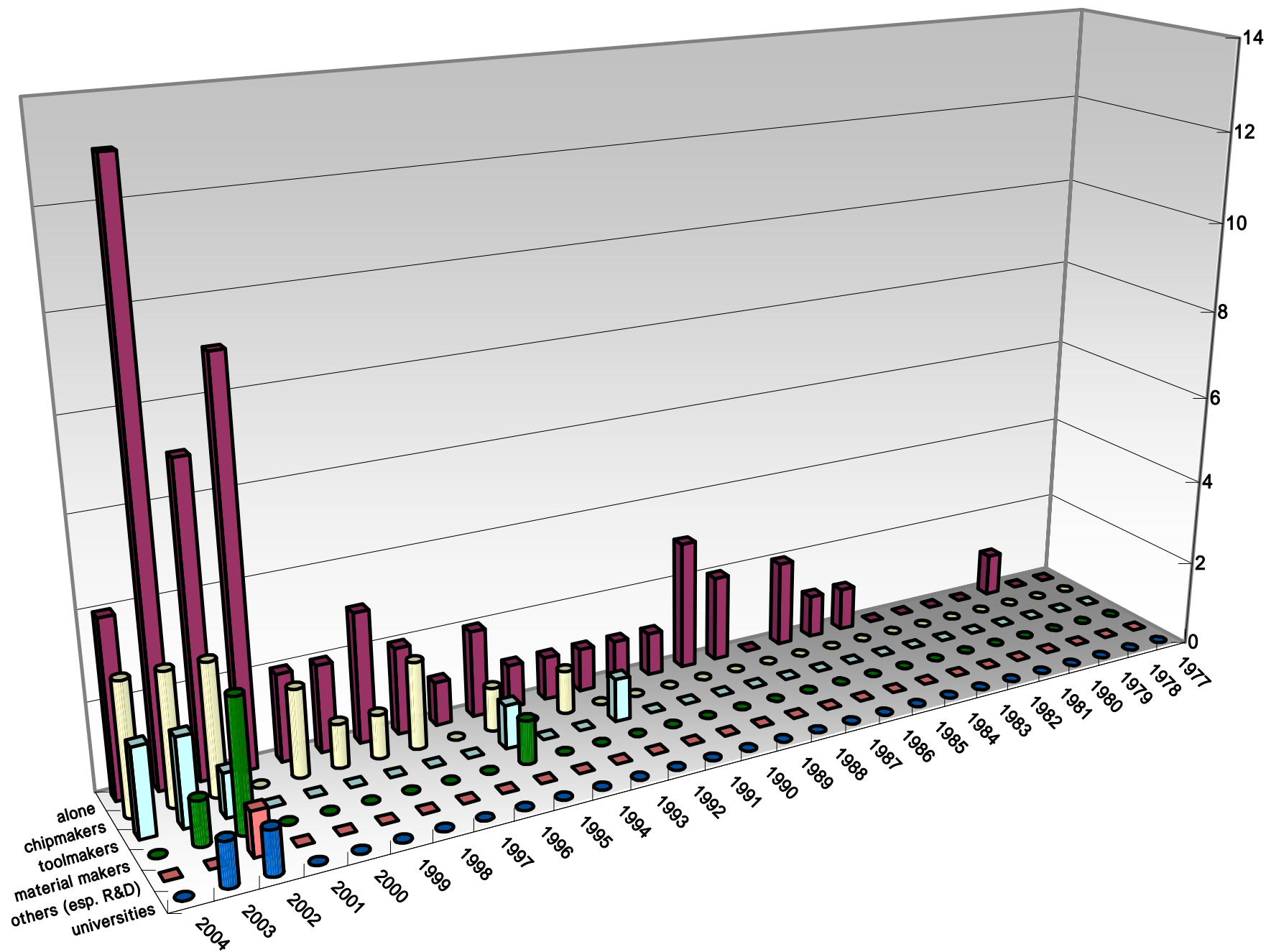
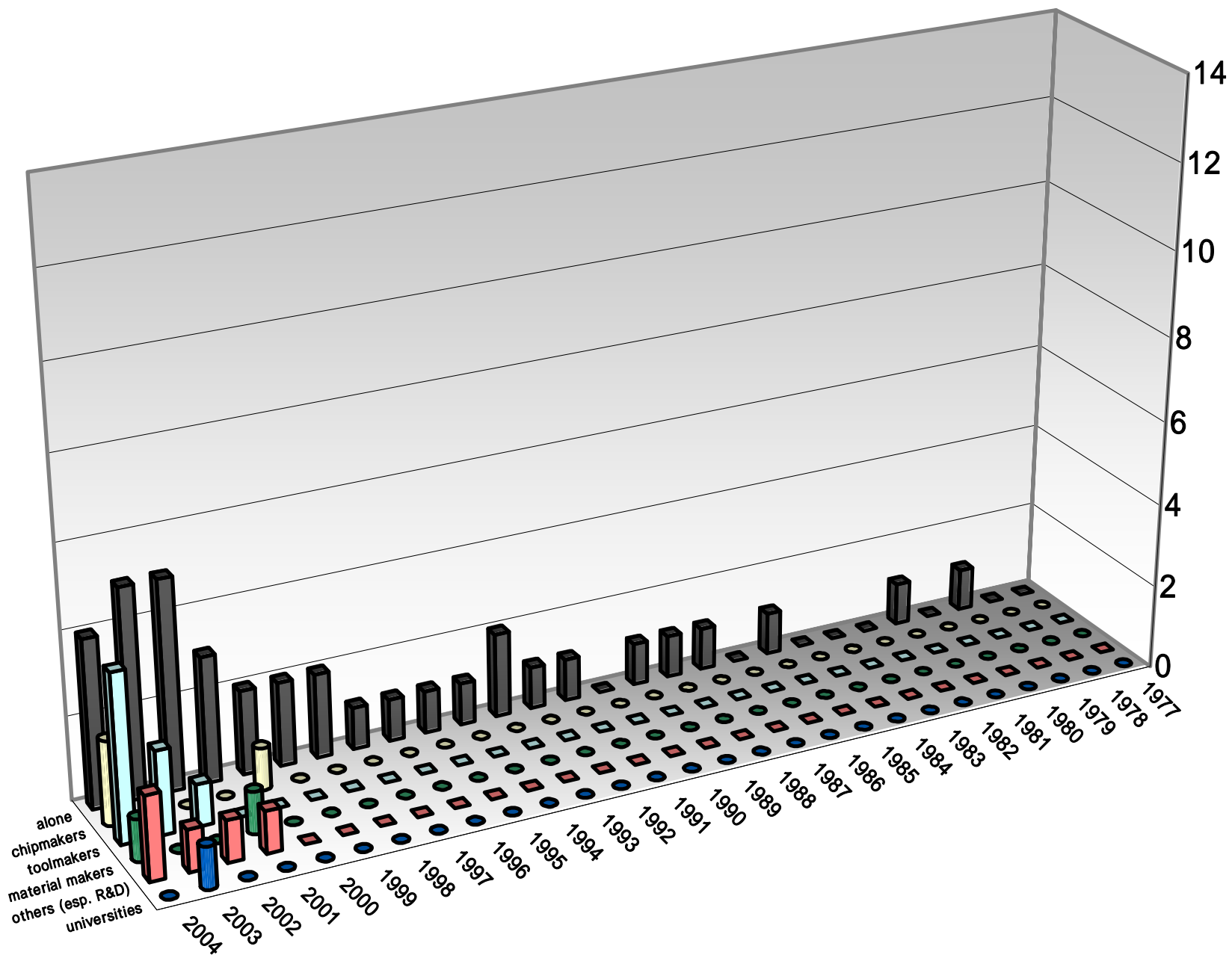


図7：SPIEにおけるキヤノンの論文発表形態の推移



ASMLの競争力を支える“*interim Modularity*”

● 共同研究開発の方法(2)

ASMLとIMECとの長期にわたる親密な関連

第1世代KrF ()機“PAS5500/70”(89年)、第2世代KrF ()機“PAS5500/300”(95年)、第1世代ArF ()機“PAS5500/900”(99年)、第1世代 ()機“F2スキャナー(2004)”をいずれもIMECに導入

デバイス・装置・材料・検査メーカーとの緊密なコラボレーションの“場”を、IMECのIIAPで効果的に獲得

(IIAP参加)レジストメーカーの場合、開発中の特定レジストを最新の 機で試せる。実験結果の微妙な部分は、自社内のみのもる秘事項。同業他社とのベンチマーク比較可能。さらに、特定デバイスメーカーからのフィードバック情報獲得。場合によっては、IMEC推奨レジストとして選出され、より大きな市場獲得。

ASMLの競争力を支える“*interim Modularity*”

● 組込(制御)ソフトウェアの開発方法

組込ソフトウェア構造が複雑性のある閾値を超えると、“*interim Modularity*”の有用性が際立ってくる。この点に関し、ASMLとオランダ内の各種大学との緊密な結びつきは、特筆に値？

TU/e (Technische Universiteit Eindhoven) を中心とした諸大学と長期にわたる緊密な関係

露光装置用組込ソフトウェアの複雑性に対処するため、TU/eと協調して、“Twinscan”導入に際し、UML (Unified Modeling Language) に基づくソフトウェア・アーキテクチャーを早期(97, 8年)に導入

ASMLがTU/eの協力で拡張したUMLは、このような一目瞭然化便益に加えて、TU/e開発の高度なシミュレーター(モデル)との自動リンクが図られている

オランダ・TNO主導でTangram(国家)プロジェクト開始(ニコン・キヤノン製露光装置の組込ソフトウェア開発に、東大・東工大・阪大・産総研・東芝・CSK・大学発ソフトベンチャーが結集するような格好？)