

2C2 分子線エピタキシを事例とする科学技術分野の形成過程の分析

○伊地知寛博, 平澤 冷 (東京大学)

1. 序

著者らは、知的成果物データベースに基いて、研究開発組織における動的過程を表現する方法論を開発してきた[1]。この方法論を用いて分析するレベルとして3つのレベルを想定しているが[1,2]、本研究は、これらのうち科学技術社会全般を対象とし、科学技術の国際的展開の実態を把握しようとするものである。

この方法論による場合、国・社会全般といったレベルにおいても特定の技術領域に関して、研究者・技術者の氏名に基づいて、研究開発活動の展開の実態を明確にすることが可能である。さらに、この方法論の応用として、学術文献・特許の内容的記述に表れる用語を用いて、技術内容の連関関係に基づいた構造化による研究開発活動の分析が可能であることも示す。

選択した技術分野は「分子線エピタキシ(Molecular Beam Epitaxy: MBE)」である。MBEについては、従来、学術文献に基づいた研究活動のメソ・レベルでの分析がStenberg[3]によって行われている。ここでは、さらに、特許も合わせることで、研究と開発の実態を総合的に分析できることを示す。

2. 分析対象技術の概要

MBEは、高真空中に導いた原子(分子)のビームを制御しながら結晶表面に照射して、その上に原子を堆積させ、下地となる結晶と一定の方位関係をもった結晶成長を表面上に行わせる技術である。とくに、有機金属化学蒸着(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)法とともに、GaAsといったIII-V族の半導体や超格子等の量子デバイスの作製に必要な技術である。

3. 方法論

3.1. 手法

組織過程を把握するためには、著者らがこれまでに開発してきた、学術文献や特許といった知的成果物のデータベースを用いて、共著や共同発明の関係から、著者・発明者の氏名を手がかりとして知的成果物の形成動向を構造化させて表現する方法論を用いる。

また、技術過程を把握するためには、氏名の代わりに、知的成果物データベースに収録されている学術文献や特許の記述に表れる用語を手がかりとして、用語が共通して表れる関係(コワード関係(co-word relation))に基づいて、知的成果物の形成動向を構造化させて表現する方法論を用いる。ここでは、知的成果物の要旨を対象として分析した。

より具体的には次の手続きを経る。まず、すべての語から技術用語を抽出する。次に、語形変化を集約させた代表語を選択する。さらに、これらの代表語を、元素、化合物、処理対象、処理方法、機能といった観点から分類する。そして、各分類ごとにコワード関係に基づいてクラスター分析を行い、構造化して図に表現する。

3.2. データ・セットの確定

本研究では、MBEに関連した、世界全体における国際的な研究開発活動の把握が目的であるため、学術文献データベースについては、Institution of Electrical Engineersによって作成されているINSPECデータベースを、また、特許データベースについては、IFI/Plenum Data Corporationによって作成されているClaims™/U.S. Patent Abstractsデータベースを用いる。前者は、物理学関連の学術雑誌等で発表された文献が世界的に幅広く収集されており、また、後者は、世界的にみて共通の市場であると考えられる米国の特許が所収されている。

サーチ・キーに関しては、以下のとおりである。まず、INSPECデータベースでは、各文献にはシソーラス化された見出し(subject)が付与されることとなっている。このシソーラスはしばしば改変されるため、見出しの新設や変更の様子、および、各見出しと技術例あるいは他の用語との対応関係等を考慮して、次のサーチ・キーを用いて検索した： MBE or MOMBE or OMMBE or (molecular and beam and epitax*) or (molecular beam epitaxial growth) or (chemical beam epitaxial growth) (andは積集合を、orは和集合をとることを、また*は前方一致を表す)。

一方、米国特許の検索には、版の連続性からIPC(International Patent Classification)を用いる。周期表のIV族の元素およびIII-V族化合物によるエピタキシャル成長が例として挙げられている分類としてH01L 21/20があり、また、技術用語の分類との対応表[4]によれば、MBEはH01L 21/203となっている。さらに、技術内容から判断しても、当然、MBEは物理的蒸着を用いる方法である。そこで、MBE関連特許を検索するために次の分類を用いる： H01L 21/20, H01L 21/203。

検索した日に関しては、以下のとおりである。まず、INSPECデータベースは、1994年4月10日に検索された。したがって、1969年(データベースの収録開始年)から1994年3月までの文献がレコードとして収録されている。また、Claims™/U.S. Patent Abstractsデータベースは、1993年7月29日に検索された。したがって、1950年から1993年7月15日までに登録された特許が収録されている。なお、分析にあたっては、必要に応じてさらに期間を限定した。

4. 分析

4.1. 組織過程

4.1.1. 国別・機関別推移

まず、MBEに関連する学術文献と特許それぞれの国別・機関別の件数とその推移を見てみる。

図1は、MBEに関連する学術文献を出した機関が属する国と、その期間別の件数の推移を表している。これより、米国が圧倒的に多く、しかも初期から研究を行っていたことがわかる。これに次いで多いのは日本であり、旧ソ連、英国、旧西ドイツ、フランスがこの順序で続く。

図2は、1980年までに10件以上の学術文献がINSPECデータベースに収録されている機関について、その数や推移を表している。これを見ると、旧Bell Telephone Laboratory Inc.および旧Bell Laboratoriesが圧倒的な数の文献を出していることがわかる。これに次ぐのは、IBM T.J. Watson Research Centerである。多くの文献を出している研究機関は、当時の公的研究機関か、民間企業であっても基礎的研究を行っていた研究所であることがわかる。

一方、図3は、MBEに関連する米国特許の譲受人(assignee)が所属する国と、その期間別の件数の推移を表している。これより、ほとんどが米国と日本であることがわかる。

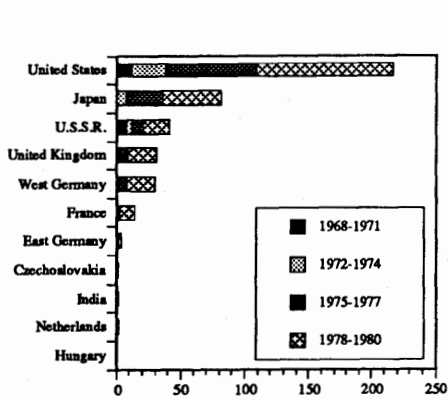


図1 MBEに関連した学術文献の国別件数とその推移

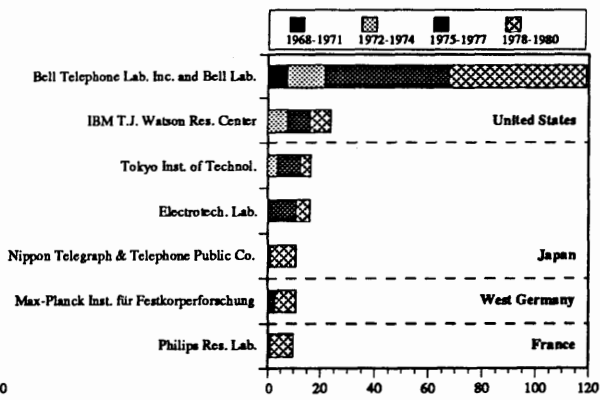


図2 MBEに関連した学術文献の組織・機関別件数とその推移

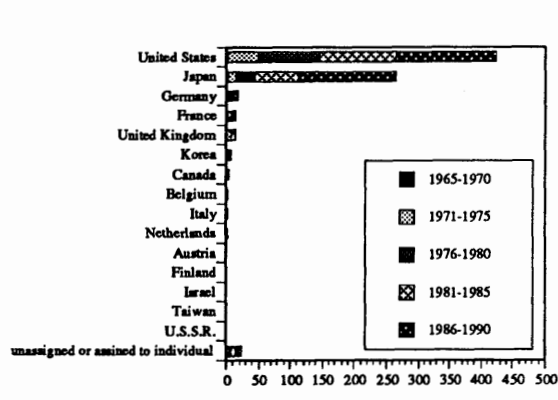


図3 MBEに関連した米国特許の譲受人所属国別件数とその推移

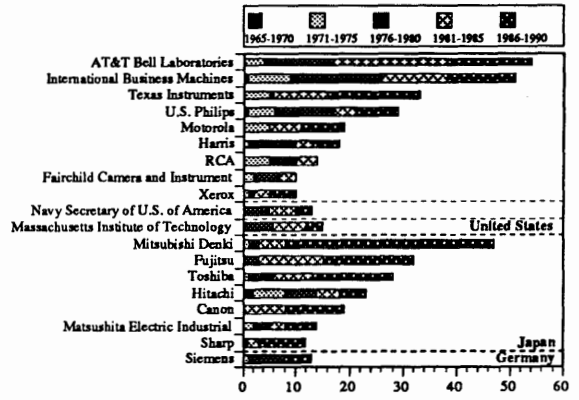


図4 MBEに関連した米国特許の組織・機関（譲受人）別件数とその推移

図4は、1990年までに20件以上の米国特許を所有していた機関について、その件数と推移を表している。なお、米国特許では発明者が出願をするので、一般に譲渡人である組織にその発明者が所属していると考えてよい。米国では、学術文献を多く出しているAT&T Bell LaboratoriesやInternational Business Machinesの発明者によって、特許も多く出されていることが推定される。また、日米独とも、電機・電子関連企業が上位を占めている。

これを通してみると、MBEに関連する研究開発活動は、おもに米国と日本で行われている。組織・機関は、大きく次の3つのパターンに分けることができる：a)学術文献も特許も出す通信関連の公的研究機関およびコンピュータ関連企業、b)学術文献をおもに出す公的研究機関、c)特許をおもに出す電機・電子関連企業。これらのうち、学術文献においても、また特許においても、数の点から、もっとも多くの貢献をしているといえるのは、研究と開発の双方に取り組んでいるa)の組織・機関である、といえる。

4.1.2. 研究開発ネットワーク・ダイナミクス

図5は、1977年までのMBEに関連する研究開発ネットワーク・ダイナミクスのうち、大きい研究開発グループをなす部分について示したものである。なお、図5に示していない研究開発グループの内訳は、表1のとおりである。これらより以下のことがわかる。まず、もっとも多くの研究開発チームから構成されている研究開発グループは、Cho, A. Y.らをキーパーソンとする旧Bell Laboratoriesのメンバーにより主として構成されている。出されている成果のほとんどが学術文献であるが、特許もいくつかは出されている。これに次いで研究開発チームの多い研究開発グループは、IBM T.J. Watson Research Centerに所属するEsaki, L.らをキーパーソンとするメンバー、および、電子技術総合研究所に所属するメンバーでそれぞれ構成されている。これらの研究開発グループも、学術文献を多く出しているが、特許も出しており、“研究”と“開発”の両方を行って

表1 MBEに関連する研究開発グループ

1研究開発グループ内の 研究開発チーム数	研究開発グループの成果			全研究開発グループ数
	学術文献のみ	学術文献と特許の両方	特許のみ	
45	0	1	0	1
12	0	2	0	2
6	1	0	0	1
4	4	0	0	4
3	3	0	1	4
2	6	2	10	18
1	43	1	84	128

表2 MBEに関連する学術文献・特許の要旨に表れる主要な代表語

主要代表語	出現頻度	主要代表語	出現頻度
計 584 代表語	9,379 100.00%		
layer	396 4.22%	Ga	52 0.55%
substrate	358 3.82%	junction	52 0.55%
epitaxy	307 3.27%	Ge	48 0.51%
surface	292 3.11%	laser	48 0.51%
beam	219 2.34%	wafer	48 0.51%
Si	207 2.21%	carrier	46 0.49%
semiconductor	189 2.02%	dielectric	45 0.48%
GaAs	144 1.54%	emitter	38 0.41%
crystal	124 1.32%	n-type	37 0.39%
deposition	107 1.14%	monocrystalline	35 0.37%
conductivity	103 1.10%	channel	34 0.36%
device	103 1.10%	p-type	34 0.36%
MBE	95 1.01%	plane	34 0.36%
dope	90 0.96%	Al/sub_x/Ga/sub_1-x/As	32 0.34%
etch	73 0.78%	evaporation	32 0.34%
fabricate	64 0.68%	vacuum	32 0.34%
polycrystalline	62 0.66%	Al	31 0.33%
transistor	57 0.61%	mask	31 0.33%
diode	56 0.60%	p-n	31 0.33%
circuit	52 0.55%	waveguide	30 0.32%

MBE

date of application / reception

order	team	country / author	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	total
1	158	USA, A. Yeh, P.														1
2	177	USA, A. Yeh, P.														1
3	206	USA, Logan, R.W.; Casey, H.C.Jr.; Harman, R.L.														1
4	228	USA, Logan, R.W.; Cho, A.Y.; Barnes, P.A.														1
5	236	USA, Logan, R.W.; Casey, H.C.Jr.														2
6	179	USA, Logan, R.W.; Casey, H.C.Jr.; Foy, P.W.														1
7	81	USA, Logan, R.W.; Cho, A.Y.														2
8	248	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														1
9	253	USA, Logan, R.W.; Igarashi, I.														2
10	256	USA, Logan, R.W.; Stohrowsk, S.E.														1
11	11															7
12	215	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														1
13	112	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														1
14	187	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														3
15	94	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														1
16	118	USA, Logan, R.W.; Reinhart, F.K.														1
17	204	USA, Logan, R.W.; Barnes, M.B.														5
18	165	USA, Logan, R.W.; Link, R.A.; Cho, A.Y.														1
19	48	USA, Logan, R.W.; Igarashi, I.; Mahoney, G.E.														1
20	184	USA, Logan, R.W.; Igarashi, I.; Mahoney, G.E.														1
21	237	USA, Logan, R.W.; Kuvras, R.L.; Schroeder, W.E.														1
22	225	USA, Logan, R.W.; Mikulyak, R.M.; Cho, A.Y.														1
23	188	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Ilegems, M.														1
24	219	USA, Logan, R.W.; Casey, H.C.Jr.; Somakh, S.; Parish, M.B.														1
25	223	USA, Logan, R.W.; Somakh, S.; Ilegems, M.														1
26	167	USA, Logan, R.W.; Ilegems, M.														1
27	180	USA, Logan, R.W.; Ilegems, M.														1
28	138	USA, Logan, R.W.; Ilegems, M.														1
29	209	USA, Logan, R.W.; Ilegems, M.														1
30	302	USA, Logan, R.W.; Ilegems, M.; Mikulyak, R.M.														2
31	136	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.														1
32	156	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.														1
33	163	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.														1
34	169	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
35	229	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
36	190	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Logan, R.A.; Nordland, W.A.Jr.; Wiegmann, W.														1
37	182	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Petroff, P.M.; Wiegmann, W.; Dingle, R.; Savage, A.														1
38	9	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Petroff, P.M.; Wiegmann, W.														1
39	227	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
40	220	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
41	160	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
42	226	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
43	222	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
44	243	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.; Logan, R.A.; Reinhart, F.K.														1
45	149	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
46	231	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														2
47	188	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
48	245	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
49	244	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
50	132	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														4
51	213	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														2
52	111	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														3
53	153	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
54	166	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
55	242	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
56	125	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
57	78	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
58	135	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
59	140	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
60	191	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														3
61	189	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
62	178	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														3
63	241	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
64	57	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
65	150	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
66	131	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
67	201	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
68	183	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
69	170	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
70	138	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
71	126	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1
72	171	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														2
73	207	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														6
74	208	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														2
75	239	USA, Logan, R.W.; Gossard, A.C.; Wiegmann, W.														1

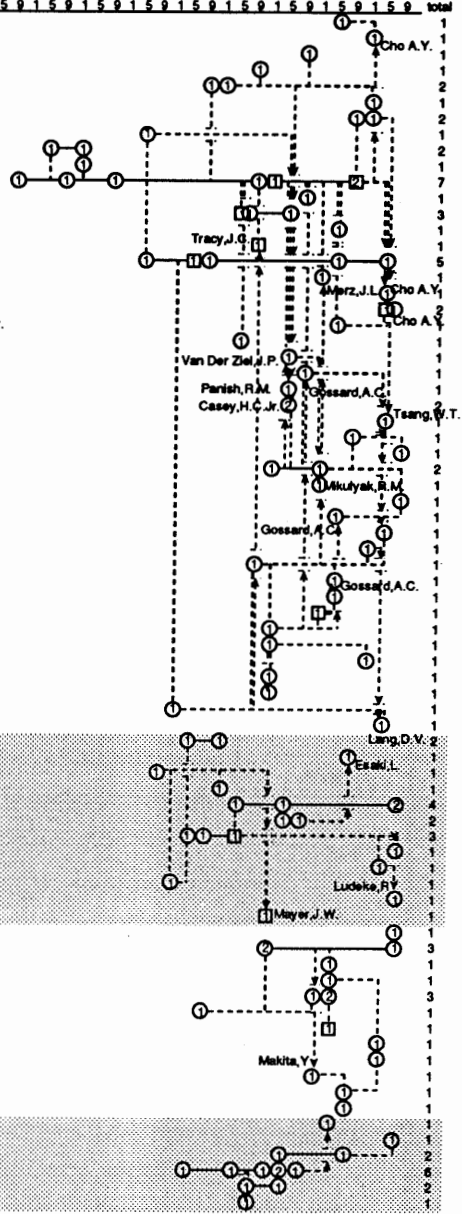


図5 MBEに関する動的活動連関図 (一部)

atom/coword/MBE

order	set	atom
1	5	III-group; V-group
2	59	V-group
3	26	Ga; Sb; In
4	35	Ga; As; Sn; Sb; In
5	61	Ga; As; Sn; Zn; Mg
6	54	As; I
7	45	As
8	12	As; Sb; P; Fe
9	25	Si; Sb; P; B
10	32	Si; Sb; B
11	42	Si; He
12	80	Si; C
13	82	Si; III-group
14	1	Si
15	3	Si; P
16	15	Si; As; P
17	36	Si; As; Sb
18	77	Si; As; III-group; V-group
19	9	Si; Ga; III-group; Pd
20	65	Si; Ge; Sn
21	24	Si; Ge
22	11	Si; As; Ge
23	7	Si; Ge; Sn; III-V; Mg; Be; Mn
24	17	Si; Ga; Ge; B
25	75	Ga; Ge
26	22	Ga; Sn; III-V
27	28	Ga; Sn
28	63	Ga; Mn
29	16	Ga
30	44	Ga; Al/As
31	62	Ga; P
32	34	Ga; As
33	60	Ga; As; Al; B
34	39	Ga; Al; Al/Ga
35	19	Ga; Al
36	38	Si; Ga; Al
37	37	Si; Al
38	43	Al; Mn
39	2	Al
40	69	Al; Ar
41	57	Ge; Al
42	48	Ge; Cd
43	31	Ge
44	13	Ge; Zn
45	46	Zn
46	67	Zn; Cd
47	64	Zn; Cd; Se
48	40	Zn; Cd; Mg; Be; Mn
49	47	Zn; III-V; Be
50	23	III-V; III-group
51	56	III-V
52	18	III-V; Cs
53	70	As; III-V; C; Cs
54	20	III-V; C; S
55	4	C
56	73	Cs; Rb
57	8	Al; Zn; Cd; Sb; Ag; Mg; Ba; Pb; Au; Ca; Cu; Li; Na
58	10	Ba
59	6	Cd; Ba
60	76	Cd; W
61	14	W
62	72	Ag; W
63	29	Ag
64	79	Ag; Ar
65	78	Ag; /sup_4/He; Ni
66	81	Ag; He; /sup_4/He; H; /sup_3/He
67	58	H; Mo
68	55	Pt
69	68	He; Pt
70	71	He
71	33	Mg
72	53	Pb
73	41	In
74	51	Sn; In
75	52	Sn
76	48	Sn; Ga/As
77	66	Be; Pr; Th; Yb
78	30	II-VI
79	21	Se; II-VI; II-IV
80	74	Se; Te
81	10	II-group
82	27	/sup_11/B

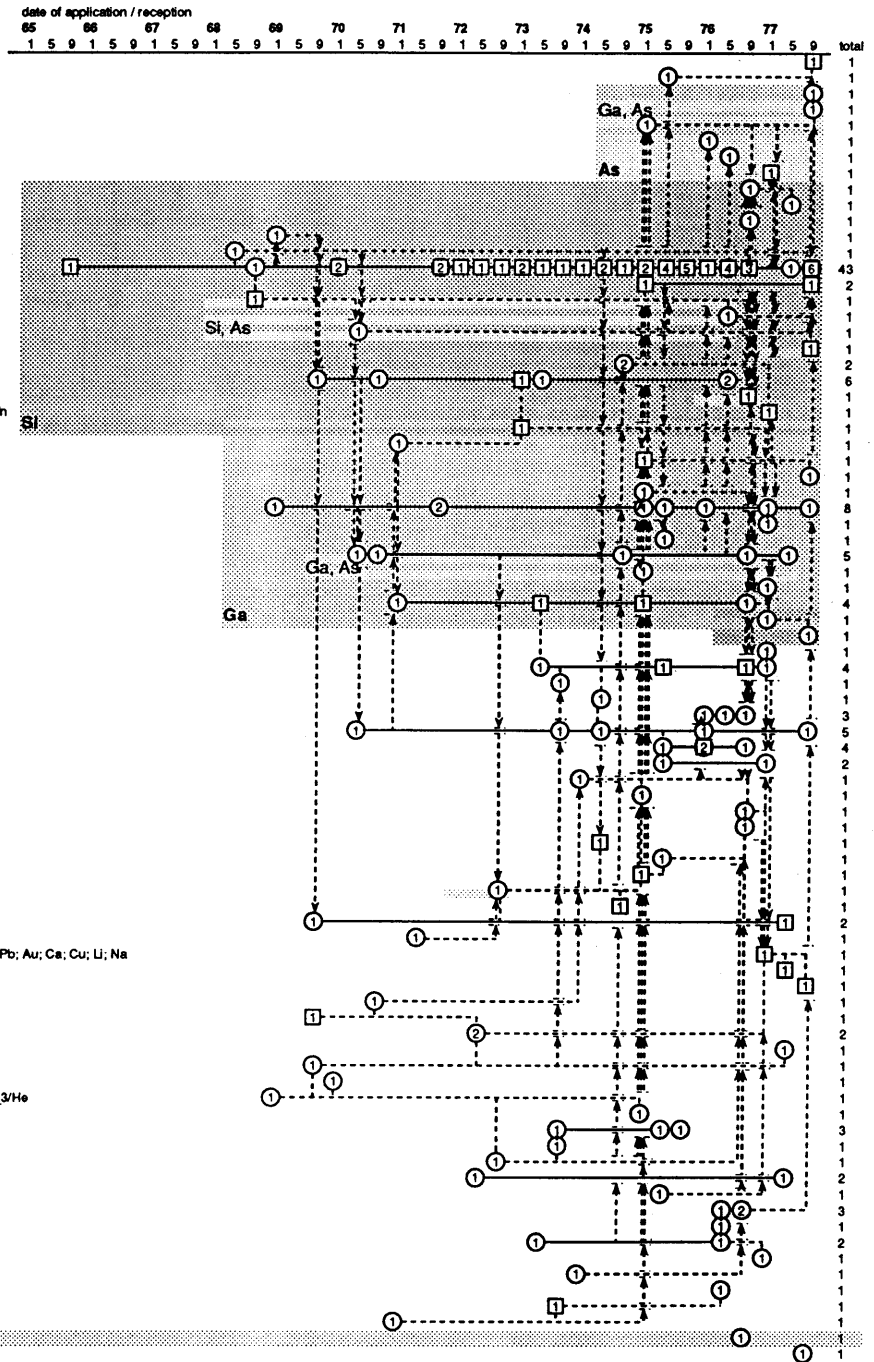


図6 元素名による MBE に関する動的技術連関図

たことがわかる。しかし、構成する研究開発チームの少ない研究開発グループでは、ほとんどが、学術文献か特許かのいずれかのみを出している。

これらより、大きな研究開発グループ内では、各サブグループ間での人のつながりが見られ、統合的な体制がとられていたと推察できる。

4.2. 技術過程

表2は、MBEに関連する学術文献・特許の要旨の中に表れる用語の代表語のうち、MBEに特徴的な40語を選択し、その出現頻度と割合を示している。

図6は、学術文献・特許の要旨の中に表れる用語の代表語のうち、元素名に基づいて、研究開発過程を構造化したものである。これによると、MBEはまずSiを対象として始められ、次いで、Ga、GaAs、Geへと展開されてきた様子がうかがえる。これらを展開の主軸としながら、第2、第3の付加元素を加え、多様な構成元素による結晶表面の作成に寄与している。また、特許はSiに集中していて、GaAsに関しては、1977年時点ではまだ出願されていない。SiにPやAsを添加する特許は見られるが、B等のIII族元素を添加して、p型、n型半導体の両者を構成するための特許はまだ見られない。大多数の元素の組み合わせは学術文献に見られるものであり、この分野が学術的興味から展開されてきた様子が特徴的にうかがえる。

表2に示した主要な代表語による“動的技術連関図”も、技術展開の実態を整理するうえで興味深い。

5. まとめ

本研究は、MBEを対象技術として、知的成果物データベースに基づいて、研究開発の組織過程を国や機関を越えた動的活動連関図として表現したり、あるいはこの方法論を応用して、知的成果物の要旨のコワード関係に基づき、世界全体にわたって技術過程を構造化して表現することを目的としていた。ここでは、件数の関係から、分析対象を1977年までとしたが、この期間はMBEに関しては、学術研究中心の初期研究過程に相当する。その後の展開については、主要機関ごとにデータを収集し、その相互連関や新たな参入機関の展開に配慮しつつ、分析を進めるべきであろう。

謝辞

本研究は、文部省の平成5年度科学研究費による重点領域研究「高度技術社会」、および科学技術庁の平成6年度科学技術振興調整費による「知的生産活動における創造性支援に関する基盤的研究」の一環として行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Ijichi, T., Yoda, T., and Hirasawa, R. Mapping R&D network dynamics: Analysis of the development of co-author and co-inventor relations. 研究技術計画. (in press)
- [2] 平澤 冷, 依田達郎, 朝光 浩, 李 昌協, 伊地知寛博 第8回研究・技術計画学会年次学術大会講演要旨集. (1993)
- [3] Stenberg, L. Molecular beam epitaxy: A mesoview of Japanese research organization. In Grupp, H. (ed.). *Dynamics of science-based innovation*. Berlin: Springer-Verlag. (1992)
- [4] 特許庁(編) 技術用語による特許分類索引. 東京: 日本特許情報機構. (1992)