

学術俯瞰講義：エネルギーと地球環境

エネルギー・地球環境問題における技術の役割
山地憲治(10月22日、29日、11月5日)

- エネルギーシステムの視点
- エネルギー資源と技術
- 地球温暖化対策の長期技術シナリオ

‡:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

エネルギーシステムの視点

- －システム効果とシステム工学
- －エネルギー概念の成立
- －エネルギー統計の読み方
- －エネルギー需給：世界と日本
- －3E問題：Energy, Economy, Environment

エネルギーシステム工学とは何か

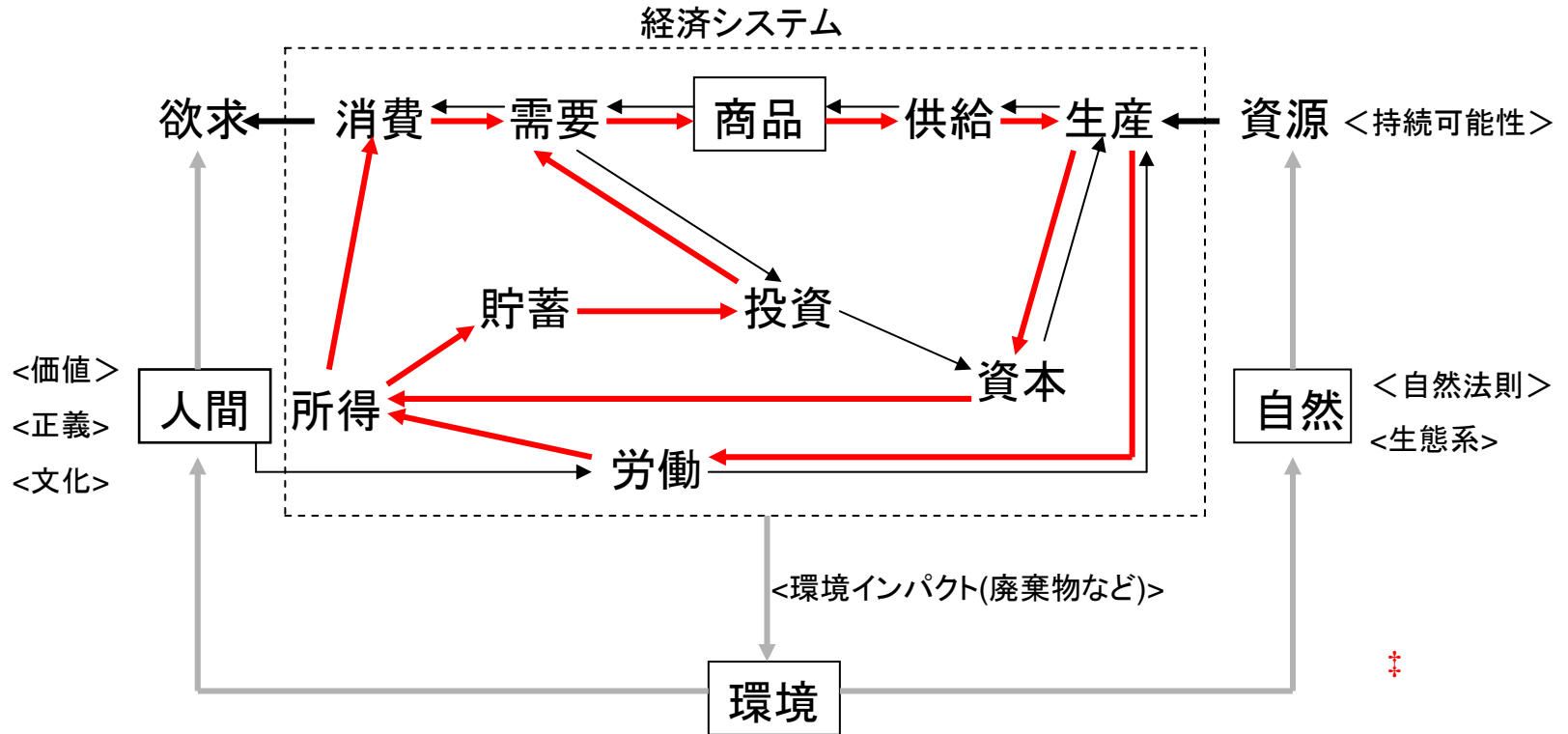
- ・「**システム**」: 複数の要素が有機的に関係し合い、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体。組織。系統。[広辞苑 第四版]
- ・「**縁起**」: さまざまな原因と条件の集まり、つまり、関係性の集合
- ・「**空**」: 縁起によって成り立つ固定的な実体のないこと、つまり、システム全体
- ・「**色**」: 実体を持つ物質的存在、つまり、要素
- ・「**色即是空、空即是色**」: システム全体は要素に規定され、要素はシステム全体に規定される(山地の勝手な解釈)
- ・「**般若知**」: 全体を理解する能力、「空」を理解する知恵
対比されるのは、「**分別知**」: 分析的に理解する能力
- ・「**システム工学**」: 般若知に数学的表現を与えるもの
- ・「**エネルギーシステム工学**」: エネルギーに関する全体的理解、エネルギー学

縦型の学問と横型の学問

- ・日本学術会議「新しい学術の体系」
 - 「認識科学」:あるものの探求
 - 「設計科学」:あるべきものの探求
- ・「横断型基幹科学技術」

縦型の知は「モノ(実体)」を対象とするのに対し、横型の知は「コト(機能)」を対象として「モノ」に依存しない普遍性を探求する。
- ・「縦型の学問」における工学:土木工学、建築学、機械工学、電気工学、…
 - 自然法則の普遍性を個別の対象に特化して適用;ものづくり
- ・「横型の学問」における工学:システム工学、設計学、制御工学など
 - 機能に着目して縦型の学術分野を横断的にカバーする。普遍性のある唯一の正解は無いが、解を求める論理過程には普遍性がある。
 - 横型の学問が人間・社会にもたらすものは、手順や計画、政策や制度など「モノ」ではなく「コト」
 - 横型の学問の検証:人間社会の現実問題の解決
 - エネルギーシステム工学の検証の場:エネルギー政策の現場
- ・人間と自然を統合したシステム全体を理解する「般若知」を求める。

グローバルシステムの概念



マクロ経済の均衡:

生産 = 所得 = 供給 = 需要 = Y

所得(Y) = 消費(C) + 貯蓄(S)

需要(Y) = 消費(C) + 投資(I)

よって、投資(I) = 貯蓄(S)

→ モノ・サービスの流れ

→ お金の流れ

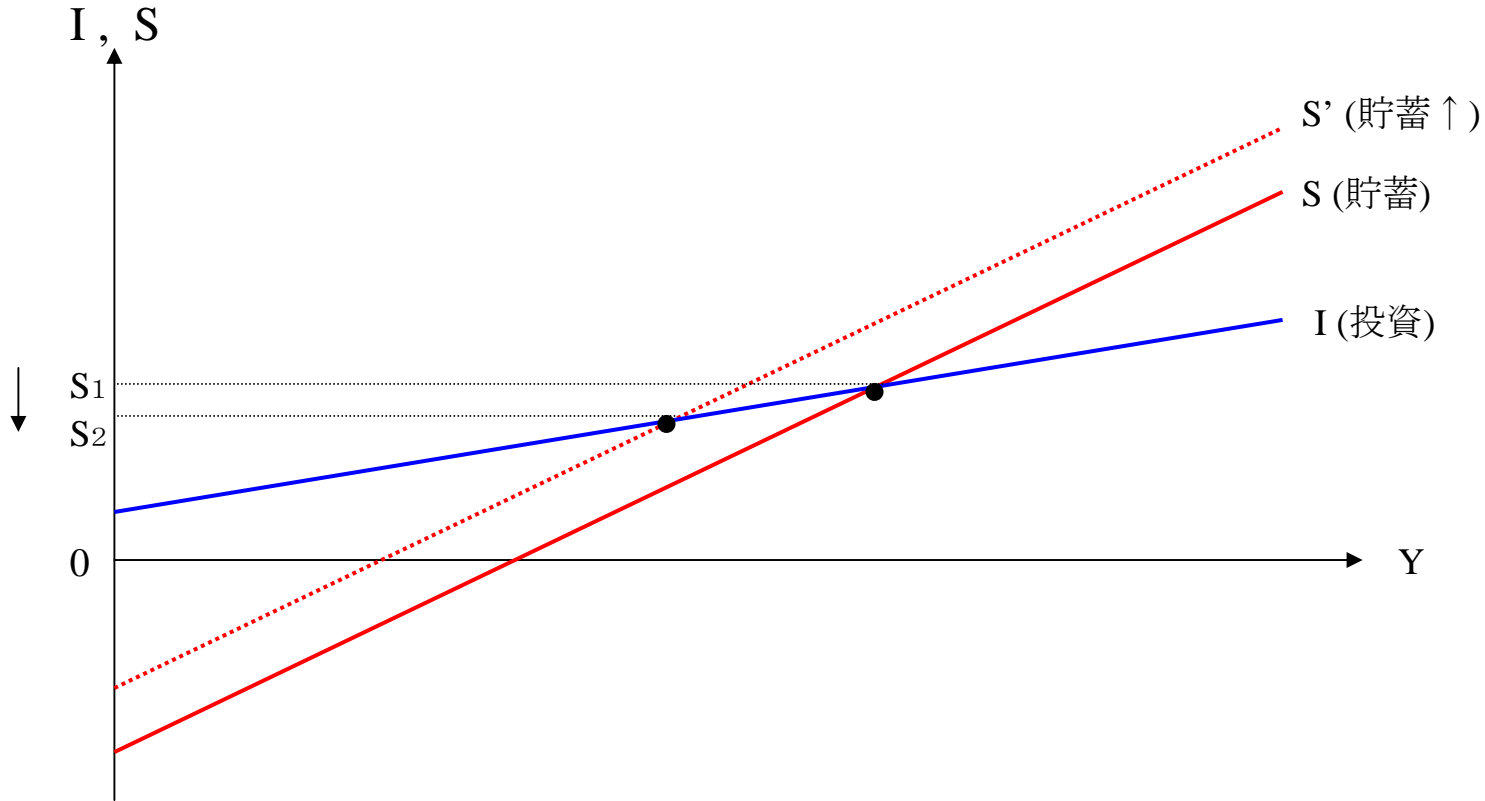
→ 経済システム外の関係
(外部性)

$$Y=C+I=C+S$$

Y: 生産=所得=GNP

C: 消費 I: 投資 S: 貯蓄

$$I=S$$

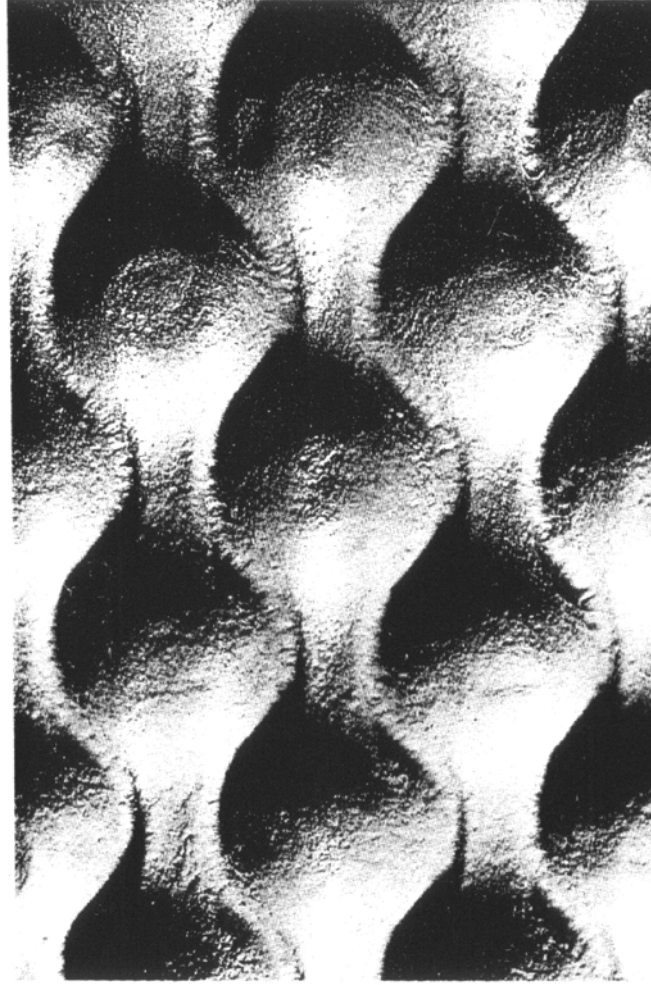
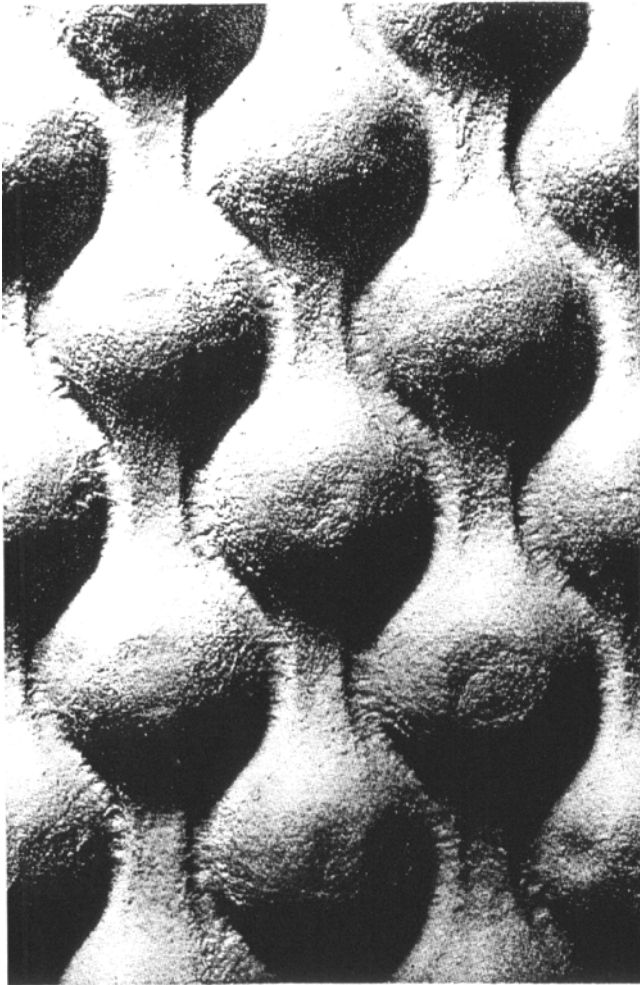


貯蓄のパラドックス



Jung oder alt: In welcher Weise Sie dieses berühmte Bild des amerikanischen Psychologen E. G. Boring sehen, ist ein Hinweis darauf, wie alt Sie sind. Sehen Sie eine junge Frau, die das Gesicht abwendet, sind Sie wahrscheinlich selbst jung. Sehen Sie eine ältere Frau, sind Sie vermutlich nicht ganz jung. Beim ersten Mal braucht man eine Weile, bis man beide Bilder sehen kann, kennen Sie beide Bilder aber, können Sie leicht entscheiden, welches Sie sehen wollen. Die Zeichnung hängt im Wissenschaftsmuseum "Exploratorium" in London.

Young or old: The way you see this famous picture of the American psychologist E.G. Boring, indicates how old you are. If you see a young woman who is turning away her face, then you are probably young. If you see an old woman, you are presumably not so young. First it takes some time to see both pictures; those, however, who then know these pictures can easily decide which one they want to see. The drawing can be seen in the scientific museum "Exploratorium" in London.

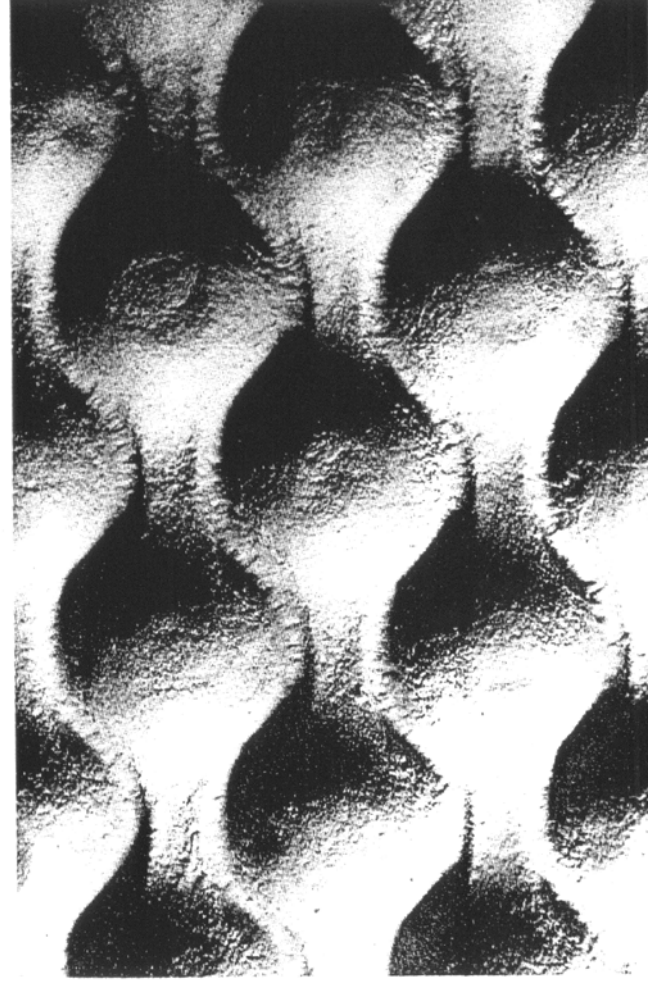
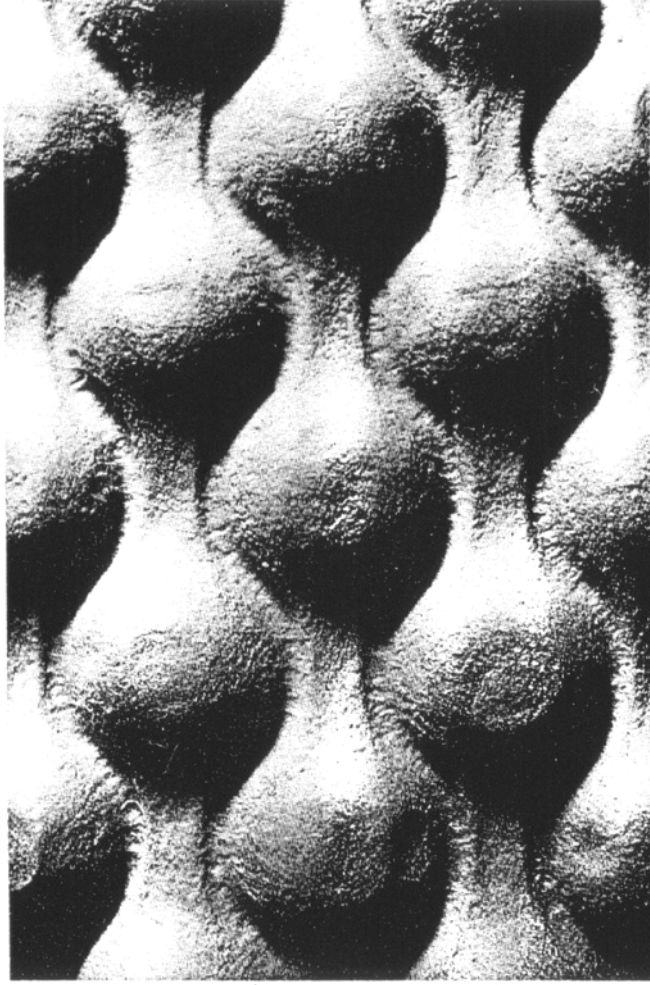


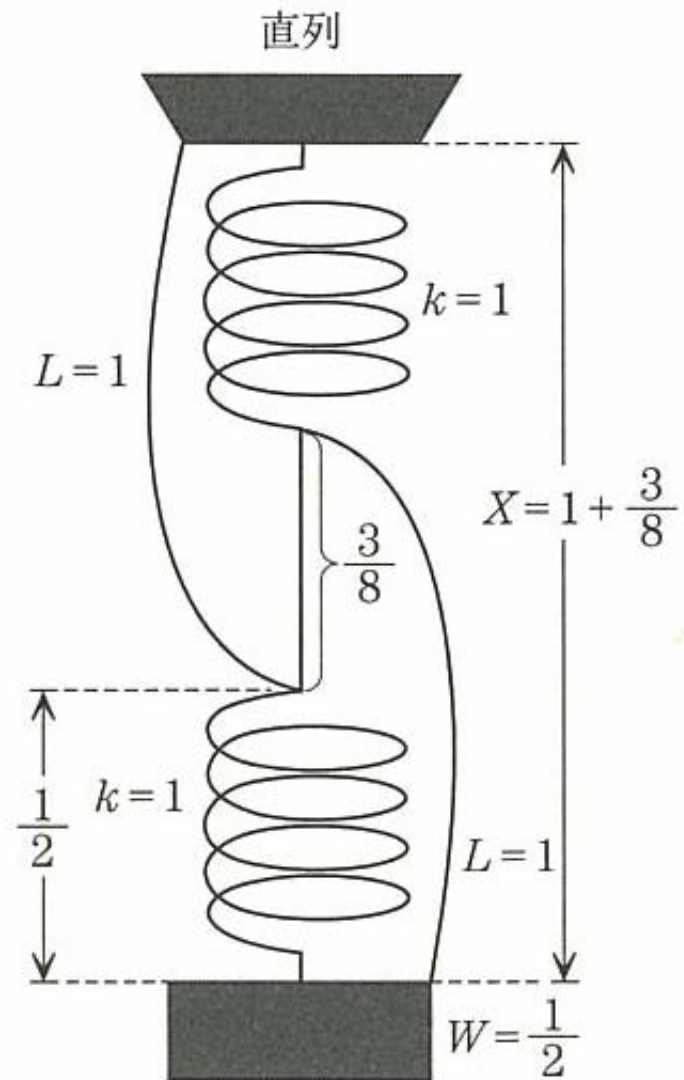
Der Eierbehälter. Ist dieser Eierbehälter nach unten oder nach oben gewölbt? Wenn Sie die Antwort haben, drehen Sie das Heft auf den Kopf. Aus den Erhebungen werden plötzlich Vertiefungen. Ist der Schatten oben, sehen wir eine Vertiefung, ist er unten, sehen wir eine Erhöhung. Ein Hinweis darauf, daß wir auf einem Planeten leben, der sein Licht erfahrungsgemäß von oben und nicht vom Erdboden erhält. Dieser Effekt wurde erstmals im 19. Jahrhundert beschrieben.

The egg-cup: Is this egg-cup arched upwards or downwards? When you have the answer turn the magazine upside down. The elevations suddenly become depressions. Is the shadow at the top, we see a depression, is it below we see an elevation. This is a hint that we live on a planet where the light, as experience shows, comes from above and not from the ground. This effect was described for the first time in the 19th century.

Der Eierbehälter, ist dieser Eierbehälter nach unten oder nach oben gewölbt? Wenn Sie die Antwort haben, drehen Sie das Heft auf den Kopf. Aus den Erhebungen werden plötzlich Vertiefungen. Ist der Schatten oben, sehen wir eine Vertiefung, ist er unten, sehen wir eine Erhöhung. Ein Hinweis darauf, daß wir auf einem Planeten leben, der sein Licht erfahrungsgemäß von oben und nicht vom Erdboden erhält. Dieser Effekt wurde erstmals im 19. Jahrhundert beschrieben.

The egg-cup: Is this egg-cup arched upwards or downwards? When you have the answer turn the magazine upside down. The elevations suddenly become depressions. Is the shadow at the top, we see a depression, is it below we see an elevation. This is a hint that we live on a planet where the light, as experience shows, comes from above and not from the ground. This effect was described for the first time in the 19th century.





※ 山地憲治「エネルギー・環境・経済システム論」 岩波書店2006年 p.13 図1.5

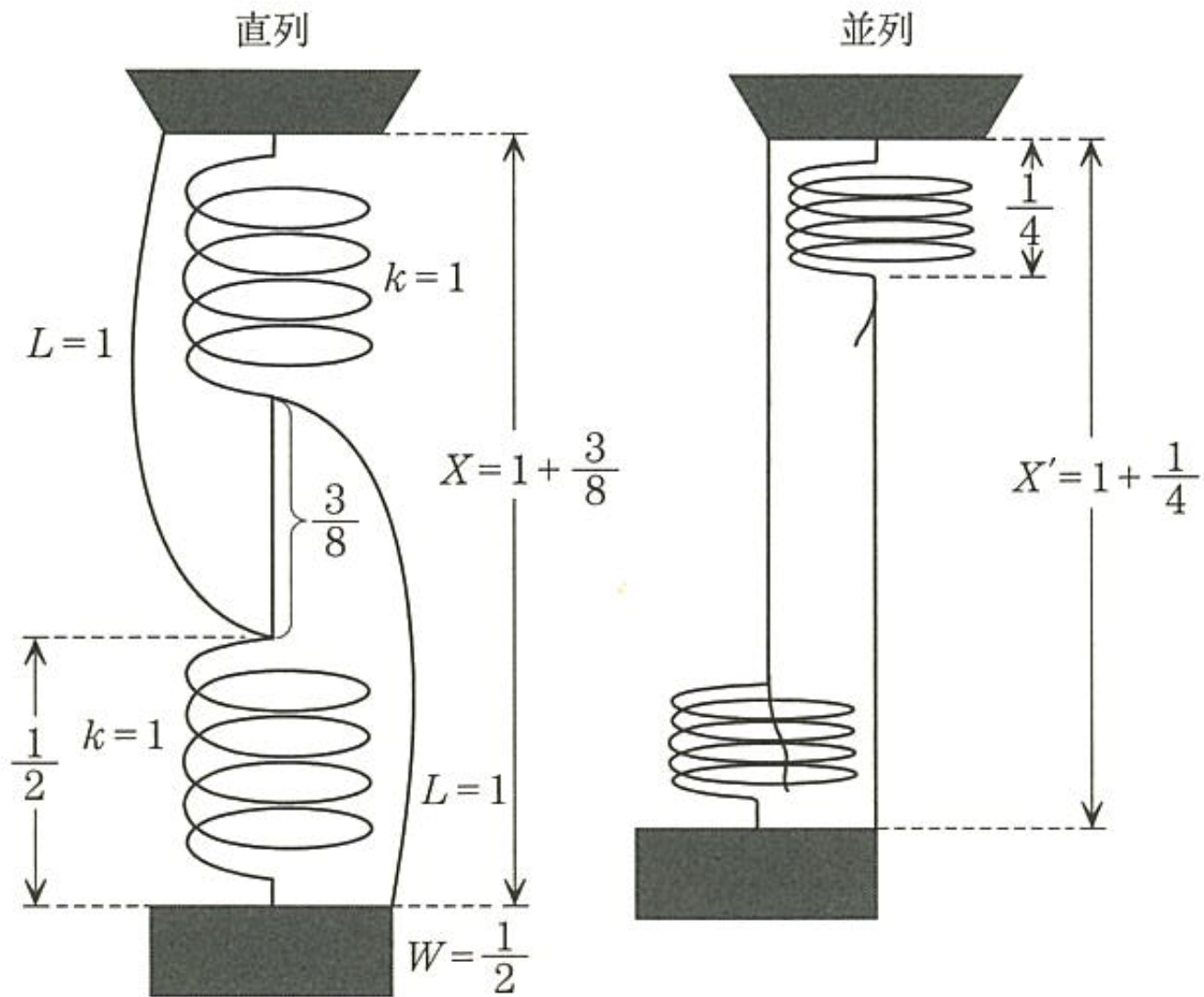


図 1.5 バネと錘から構成される力学システム。

❖ 山地憲治「エネルギー・環境・経済システム論」 岩波書店2006年 p.13 図1.5

視点と学問

知識が視点を作る

視点が知識の構造(学)を作る

構造(パラダイム)変化を見抜けるか？

学問のタイプと対象

自然科学 → プログラム科学 芸術
(論理実証型) (論理整合型)

←----- 対象 ----->
自然、生命、人工物、(人間)、制度、価値、欲望、・・・感動

リニアモデル → フィードバックモデル
(法則の発見→応用) (仮説→検証→仮説・・・)

エネルギー概念の成立(1)

・力学的エネルギー概念の成立過程:

- 槌子の原理(ギリシャ文明)→ダヴィンチ「**仕事の原理**」
- 17世紀の思索: デカルトの**運動量**(mv)保存則; ライプニッツの「**活力**(mv^2)」保存則→力の時間積分が運動量、空間積分がエネルギー ($mv^2/2$)
- **ワット**(18世紀): 仕事量を「物体に加えられた力×移動距離」と定義して計量

・エネルギー保存の法則の発見:

- ヤング(1807年): 仕事を行う活力を表す概念としてエネルギーという言葉を使用。
- マイヤー、ジュール、ヘルムホルツ(19世紀前半): エネルギー保存の法則を独立に発見。
- **マイヤー**は船医で熱帯地域での船員の血の色の変化(欧州より鮮やか)についての探究から出発してエネルギー保存の法則という考えに到達。
- **ジュール**はより直接的で、様々な実験を通して**熱の仕事当量**を見出した。
- **ヘルムホルツ**は力学系における位置エネルギーと運動エネルギーの総和が一定であることに基づいて考察を展開。

エネルギー概念の成立(2)

・熱力学第2法則(エントロピー増大の法則)の発見:

- 一 熱と燃焼に関する科学の歴史: フロギストン(燃素)→熱素(ラヴォアジエ)
→熱運動論
- 一 **カルノー**、トムソン(ケルビン卿)、クラウジウス: 1824年のカルノーサイクルの考察(熱効率の最大値)を基に、**トムソン**(一つの熱源をすべて仕事には変換できない)と**クラウジウス**(低温から高温へ熱が自然に流れることはない)が独立に定式化。

・エネルギーの哲学的背景:

「エネルギー」の語源となったギリシャ語の「エネルゲイア」は、仕事を意味する“ergon”に接頭語の“en”が付加されて、「仕事をしている状態にある」ことを表す。**アリストテレス**の哲学的解釈によれば、潜在的な本質が現実化された状態(=現実態)が「エネルゲイア」。19世紀に成立したエネルギー概念には、熱のような目に見えない“活力”が具体的な仕事に転換するという発想が背景にある。

熱の仕事当量(1cal=4.2J)は正しいのか?

- ジュールは仕事を熱に変えることで熱の仕事当量を計量した(熱力学第一法則(エネルギー保存則)が適用される)。
- 熱を仕事に変える場合には熱の温度を考慮しなければならない(熱力学第2法則が関与する)。ここで、環境と平衡になるまでに取り出せる最大仕事量で定義されるエクセルギーが重要な役割を果たす。**エクセルギー**はエネルギーの質を考慮した概念。

例: 周囲の環境(15°Cとする)より**1°C温度の高い水1kgの仕事当量**はいくらか?

- 第一法則で考えると、水が周囲の温度と同じになるまでに1kcal=4.2kJのエネルギーを放出する。このエネルギーを同じ1kgの水の位置エネルギーで表すと、 $mgh=1 \times 9.8 \times h=4.2\text{kJ}$ より、 **$h=430\text{m}$** となる。実感に合わない?
- 第二法則を考慮したエクセルギーで考えると(環境の温度は15°C=288K)、 $1 \times 9.8 \times h=(289-288)-288 \times \log(289/288)\text{kcal}=0.00173\text{kcal}=0.00724\text{kJ}$ より、 **$h=74\text{cm}$** になる。
- この例は示すように、熱と仕事のように質の異なるエネルギーを単純に足し合わせてはならない。

環境系に置かれた $m(\text{kg})$ の温度 $T(\text{K})$ 、圧力 P_0 の (圧力は外界と同じで温度のみ環境系と異なる) 資源の熱量 Q とエクセルギー E は次のように計算される。

・この資源が環境系の温度 T_0 と同じ温度になるまでに出す熱量 (定圧比熱 C_p は一定と仮定) : $Q = mC_p(T - T_0)$

・この資源から取り出せる最大仕事量 (エクセルギー E ; T から T_0 への温度変化を考慮) :
 T' の熱 $\delta Q = mC_p dT'$ から取り出せる最大仕事 (カルノーサイクル) : $mC_p dT'(1 - T_0/T')$

$$E = \int_{T_0}^T mC_p \left(1 - \frac{T_0}{T'}\right) dT' = mC_p \left\{ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right\} \cong \frac{mC_p (T - T_0)^2}{2T_0} ; \quad \left| \frac{T - T_0}{T_0} \right| \ll 1$$

・よって、外界との温度差が小さい場合には、熱資源のエクセルギー E は、通常の熱量 Q から、 $E/Q = (T - T_0) / 2T_0$ によって近似計算できる。

エネルギーデータの読み方

- ・数値より定義を知ること

エネルギーの単位、**発熱量(高位、低位)**、電力の一次エネルギー換算

- ・身の回りのエネルギーから大きさの感覚をつかむこと

1kWh、ガソリン1リットル、都市ガス1m³、木材1kg、ゴミ1kg

- ・データソースの確認

公式統計(総合エネルギー統計など)、個別統計、推計値

- ・エネルギーシステムの構造と対比すること

エネルギーバランス表、一次エネルギー総供給、最終エネルギー消費

- ・数値の常識を身につけること

石油価格、電力料金、日本のエネルギー消費量

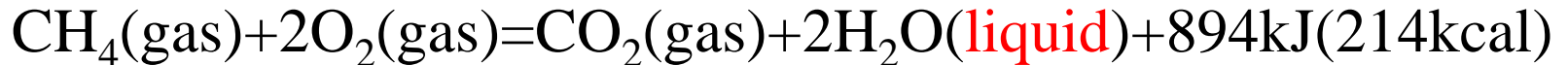
- ・経済統計の場合には貨幣価値に注意すること

インフレ(物価水準)調整、為替調整

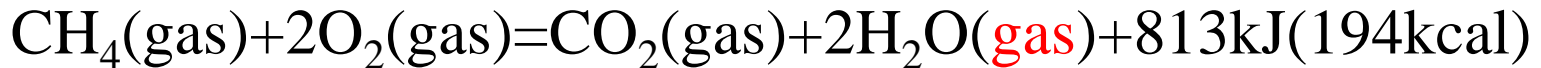
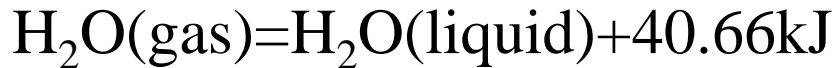
高位発熱量(HHV)と低位発熱量(LHV)

メタン(CH₄)のケース:

高位発熱量(HHV):



低位発熱量(LHV):

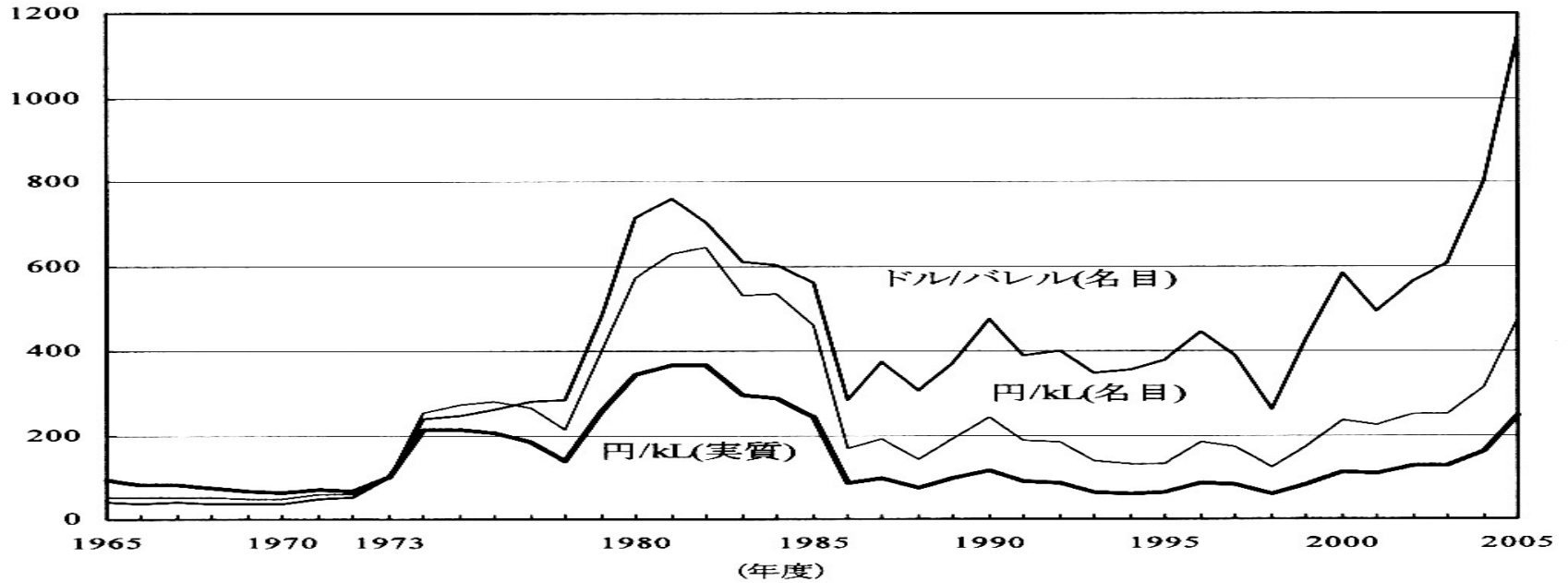


メタン1モル: 約16グラム、22.4L

→ メタン1kg~13000kcal, 1m³~10000kcal

(1) 原油輸入CIF価格の推移

(73年度=100)



年度	1965	1973	1979	1985	1990	1995	2000	2005
名目ドル建てCIF価格 (ドル/バレル)	1.97	4.85	23.37	27.21	22.97	18.28	28.33	55.68
名目円建てCIF価格 (円/kL)	4,461	8,343	33,522	38,340	20,138	11,000	19,560	39,580
実質円建てCIF価格 (円/kL、2000年価格)	16,040	17,300	44,683	41,935	20,330	10,696	19,618	42,496
GDPデフレーター (2000年=100)	27.8	48.2	75.0	91.4	99.1	102.8	99.7	93.1

出所：財務省「日本貿易月表」、内閣府「国民経済計算年報」等をもとに加工

注：(1)円建てCIF価格の実質化は2000年基準のGDPデフレーターを用いて行った

出所：山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年、図2.1(p.19)

エネルギーの単位

・エネルギーとパワー:

ジュール(J)とワット(W): $1W=1J/sec$

・エネルギーの単位:

共通単位: J, cal, 石油換算トン(TOE).....

固有単位:

電力量: kWh(kW時)、電力の一次エネルギー換算

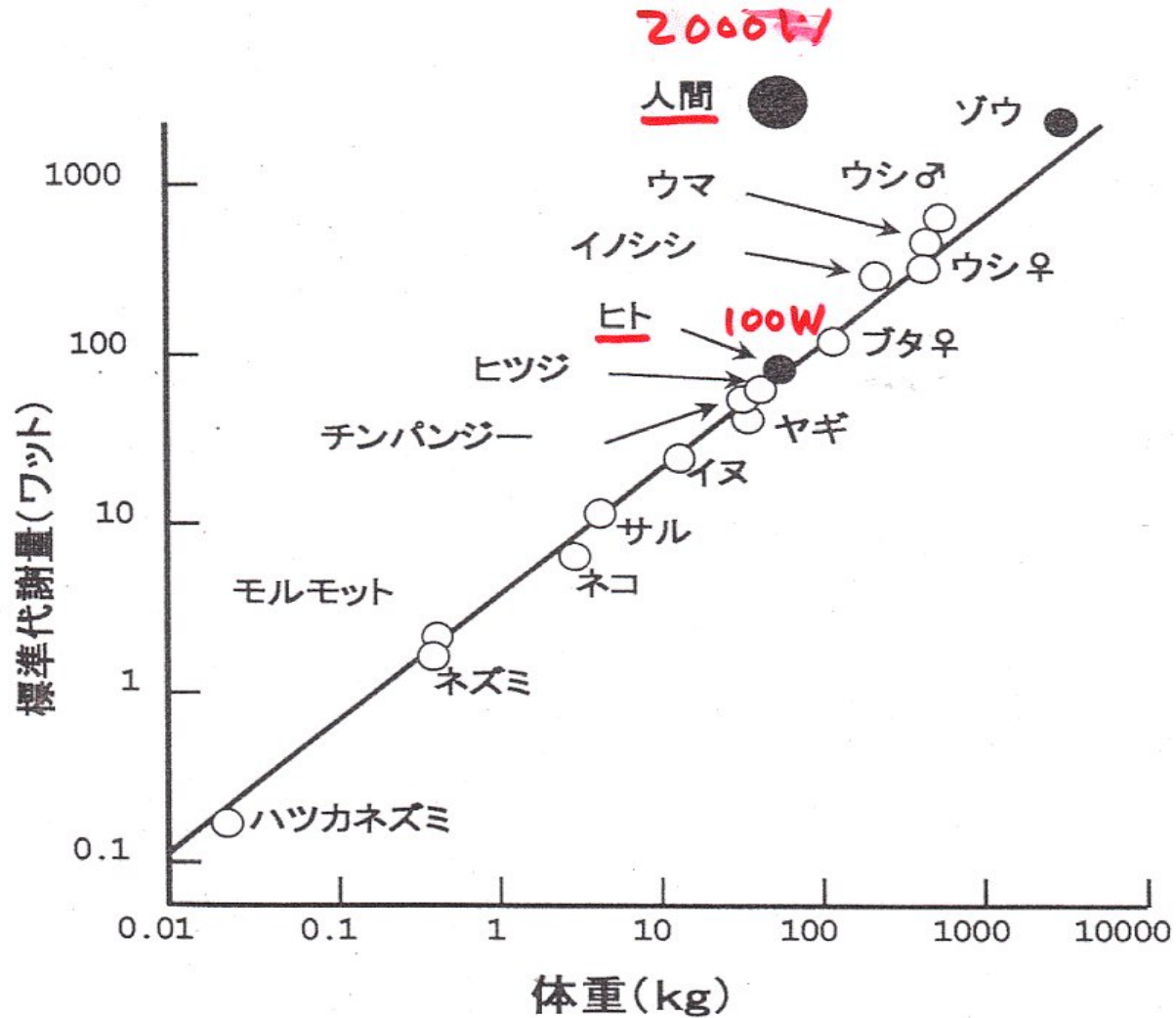
石油: バレル(bbl), kL

天然ガス: 立方メートル(m^3), tcf(兆立方フィート), トン(LNGの場合)

石炭: トン(t)

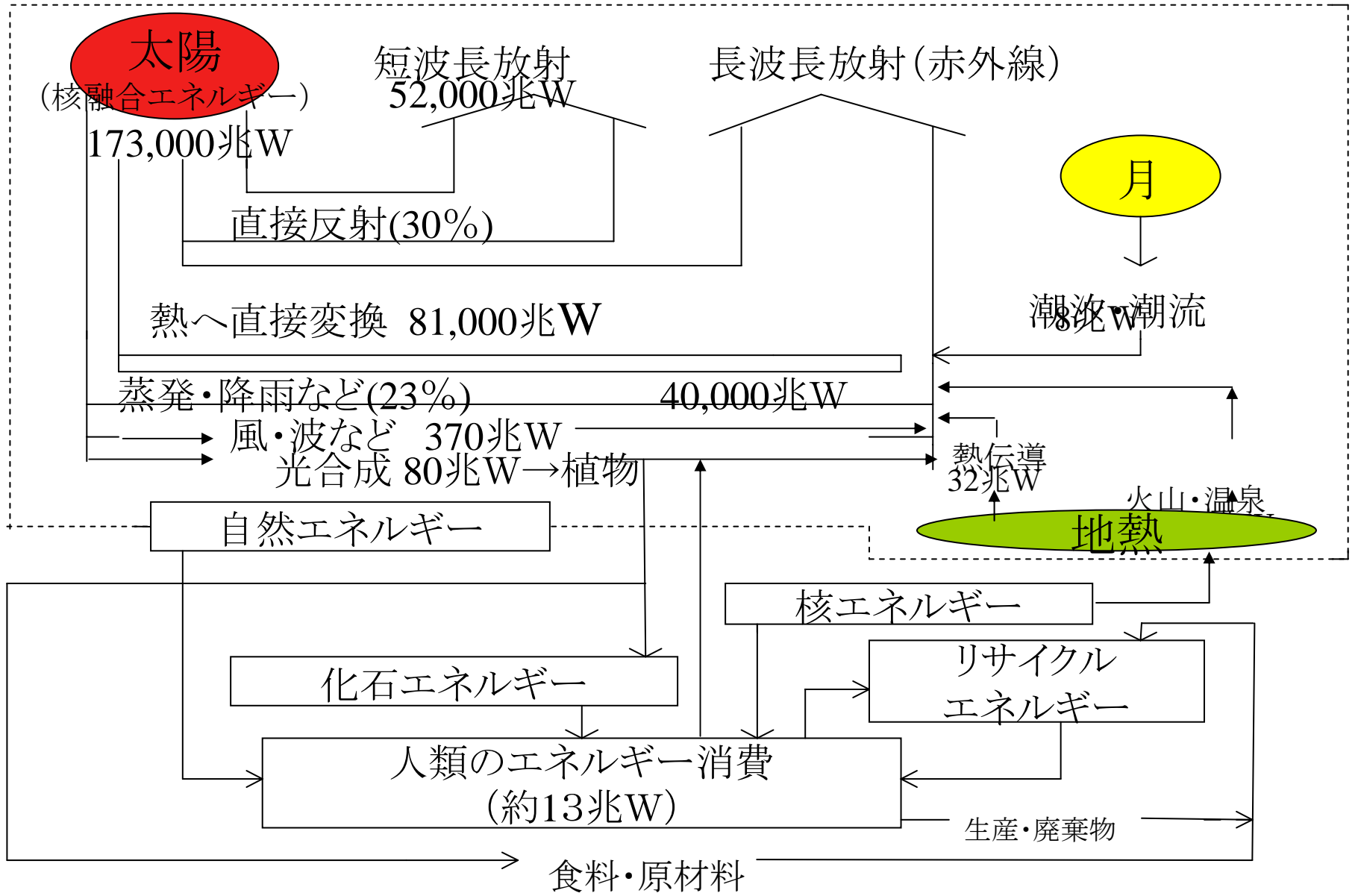
熱量: cal, BTU(英国熱量単位), therm

生命維持に必要なエネルギー



動物の生存に必要なエネルギー

出所: 山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年、図2.2(p.25)



地球のエネルギーバランスと各種エネルギー資源



他に非商業エネルギー(主として薪などの伝統的バイオマス)が焼く10億TOE/年

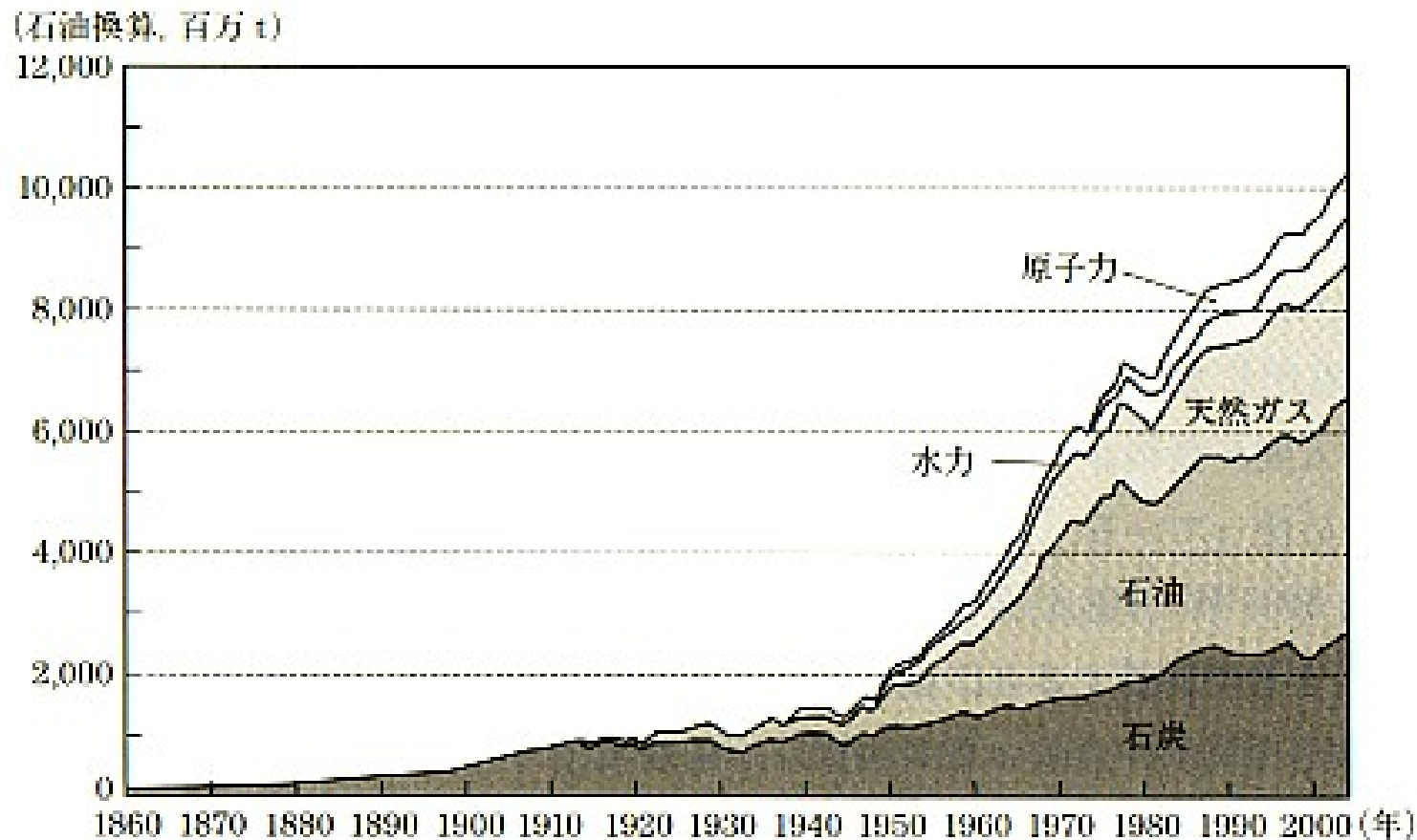


図 2.3 世界の一次エネルギー消費の推移。

出典) 富館孝夫, 木船久雄: 最新・エネルギー経済入門, 東洋経済新報社, 1994, および BP 統計から作成。

†

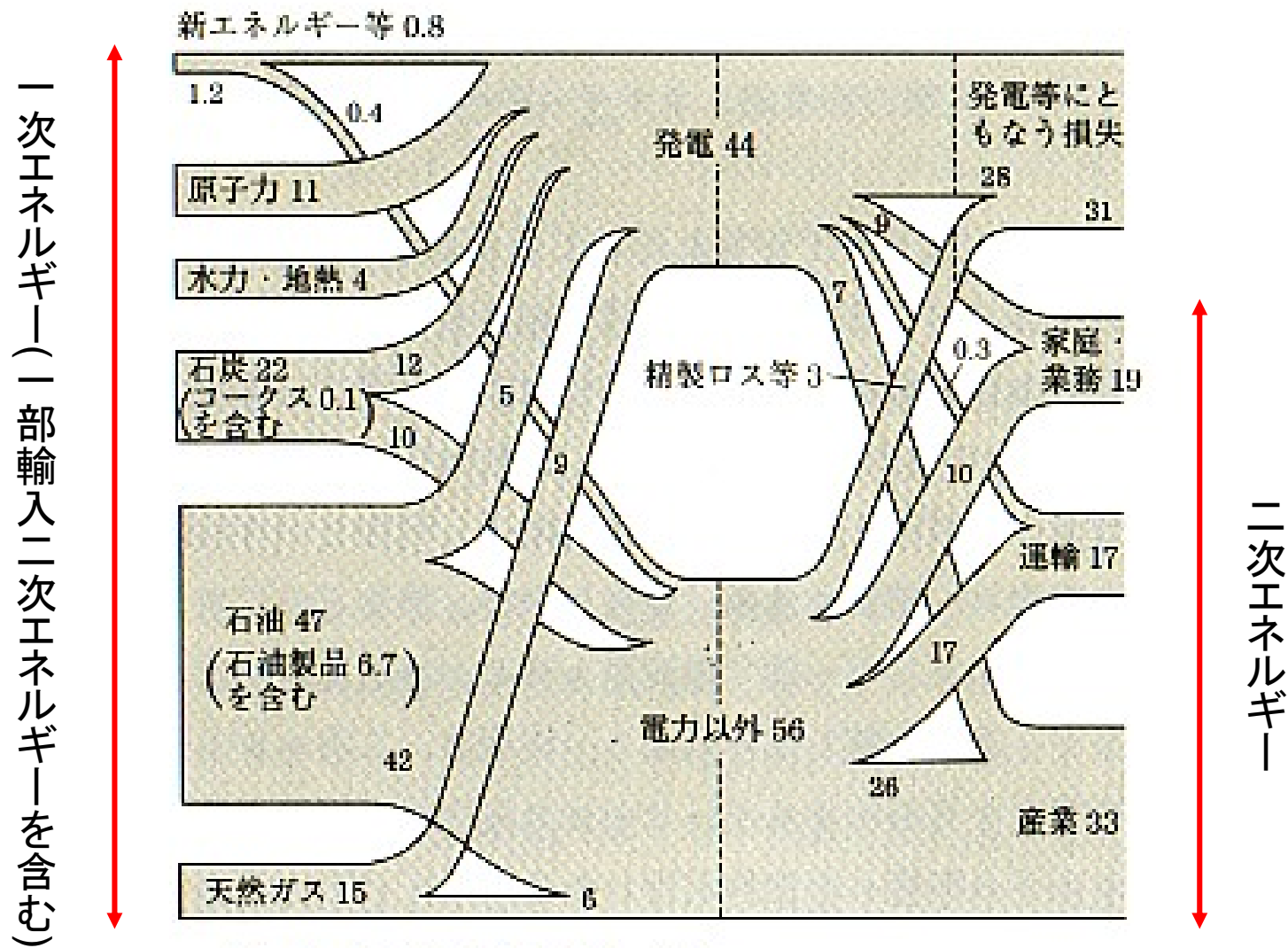


図 1.3 わが国のエネルギーフロー。
 数値は一次エネルギー国内供給(石油換算約5億4000万t)に対する割合(%表示)。2004年度エネルギーバランス表より計算。

(4)2004年度エネルギーバランス簡約表

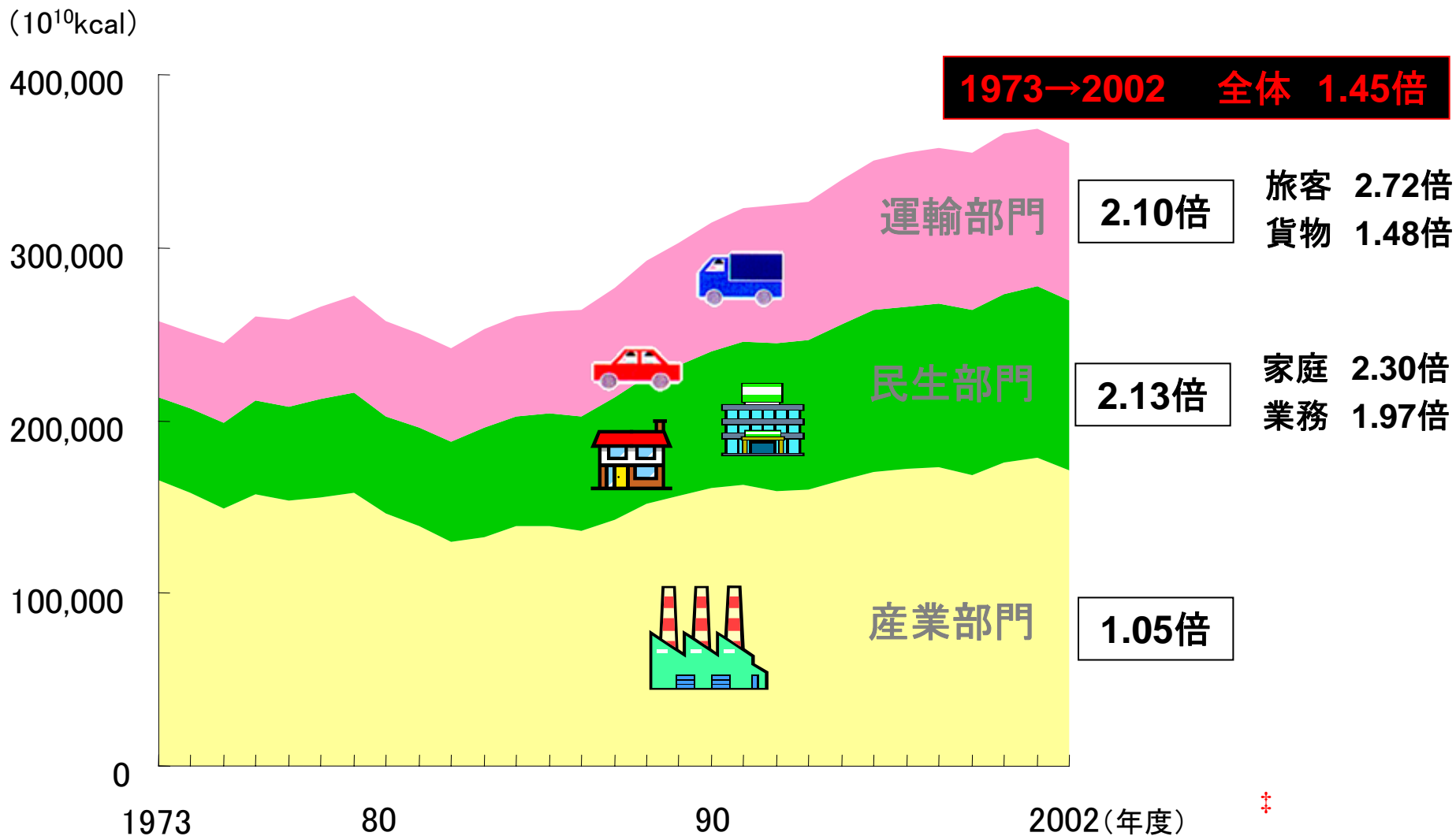
(10¹⁰ kcal)

	NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		石炭	コークス等	原油	石油製品	天然ガス	都市ガス	水力発電	原子力 発電	地熱	新エネ ルギー等	電力計	合計
一次エネルギー供給													
国内生産	1	684		786		2,890		20,964	60,725	970	6,306		93,325
輸入	2	117,818	2,121	220,146	53,830	75,537							469,452
一次エネルギー総供給	3	118,502	2,121	220,932	53,830	78,427		20,964	60,725	970	6,306		562,777
輸出	4		-1,463		-18,404								-19,867
在庫変動	5	-1,238		-683	658	-2							-1,265
一次エネルギー国内供給	6	117,264	658	220,249	36,084	78,425		20,964	60,725	970	6,306		541,645
エネルギー転換および自家消費													
電気事業者	7	-49,363	-4,318	-5,708	-10,578	-48,906	-1,412	-19,322	-60,725	-695	-586	80,404	-121,209
自家発電	8	-10,122	-3,002		-13,221		-2,386	-1,642		-54	-5,892	16,390	-19,929
熱供給事業者	9	-12			-33		-423				659	-99	92
都市ガス	10		-69		-1,738	-27,547	30,787						1,433
コークス	11	-42,195	36,740		-583								-6,038
石油精製	12			-213,432	212,234								-1,198
石油化学	13			-1,133	1,134								1
その他	14												
自家消費・ロス	15	-110	-3,091	-1	-13,673	-1,052	-714					-10,132	-28,773
統計誤差	16	236	-3,408	25	6,047	-273	-10			1	2,806	361	5,785
最終エネルギー消費計	17	15,698	23,510		215,673	647	25,842			222	3,293	86,924	371,809
産業部門計	18	15,698	22,484		85,098	630	9,412			95	2,135	36,459	172,011
農林水産業	19				8,850					95		319	9,264
鉱業	20				581							195	776
建設業	21				2,908							87	2,995
製造業計	22	15,698	22,484		72,759	630	9,412				2,135	35,858	158,976
食料品	23				1,518		1,535					2,434	5,487
繊維	24	28			1,665		184				45	552	2,474
紙・パルプ	25	1,478			2,298		419				2,090	2,988	9,273
化学工業	26	908	106		44,360	447	1,693					5,592	53,106
窯業土石	27	4,233	352		2,975		485					1,773	9,818
鉄鋼	28	8,746	21,255		2,407		1,525					7,130	41,063
非鉄金属	29	84	199		869		424					1,646	3,222
金属機械	30	112	106		456		1,395					7,705	9,774
その他	31	109	466		16,211	183	1,752					6,038	24,759
民生部門計	32		1,026		34,854	17	16,430			127	1,158	48,580	102,192
家庭用	33		20		19,690		9,463				580	24,211	53,964
業務用	34		1,006		15,164	17	6,967			127	578	24,369	48,228
運輸部門計	35				89,893							1,885	91,778
非エネルギー	36				5,828								5,828

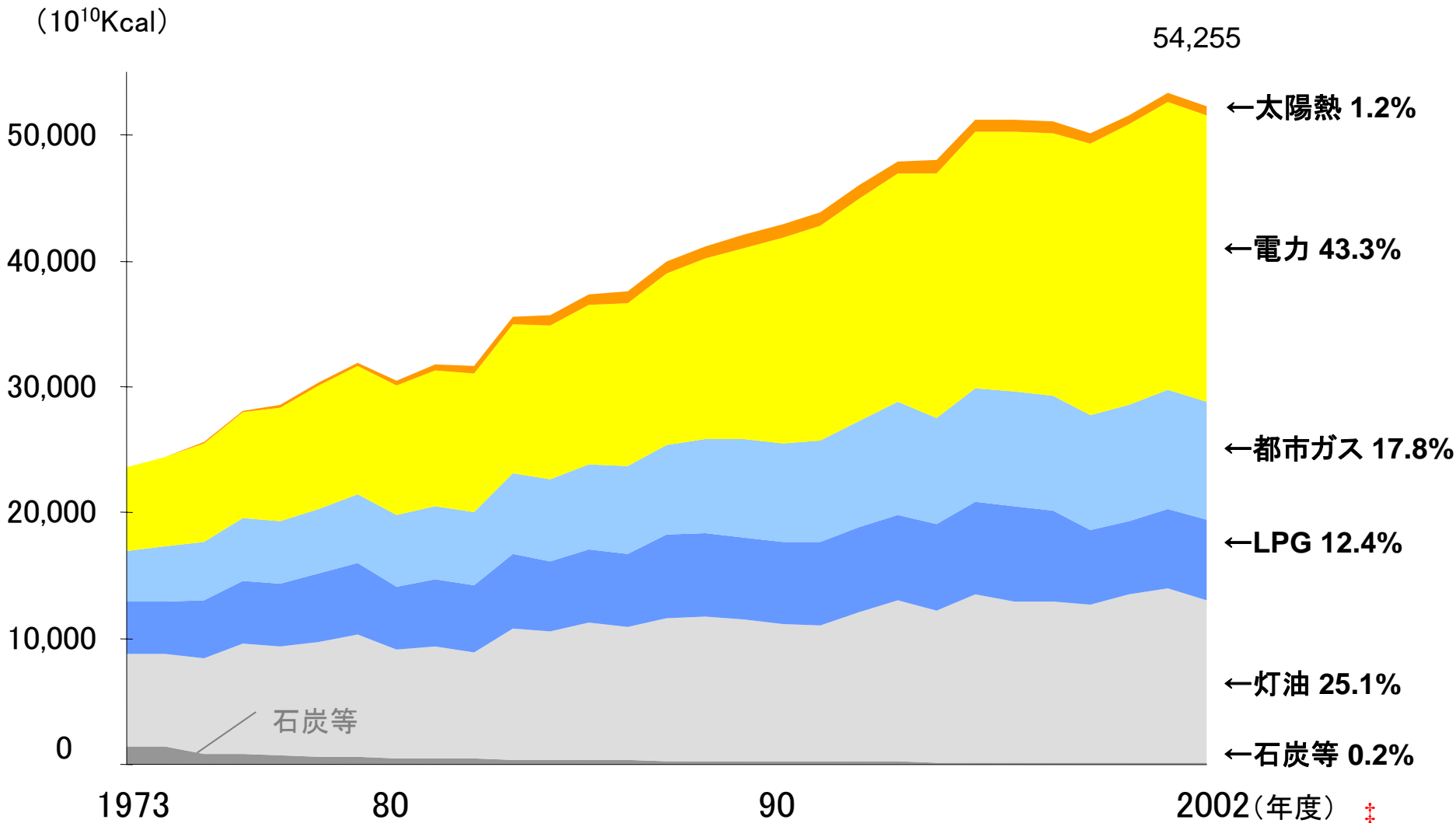
出所：EDMC推計

注：2000年度より各種エネルギー源別の発熱量について改定が行われた。

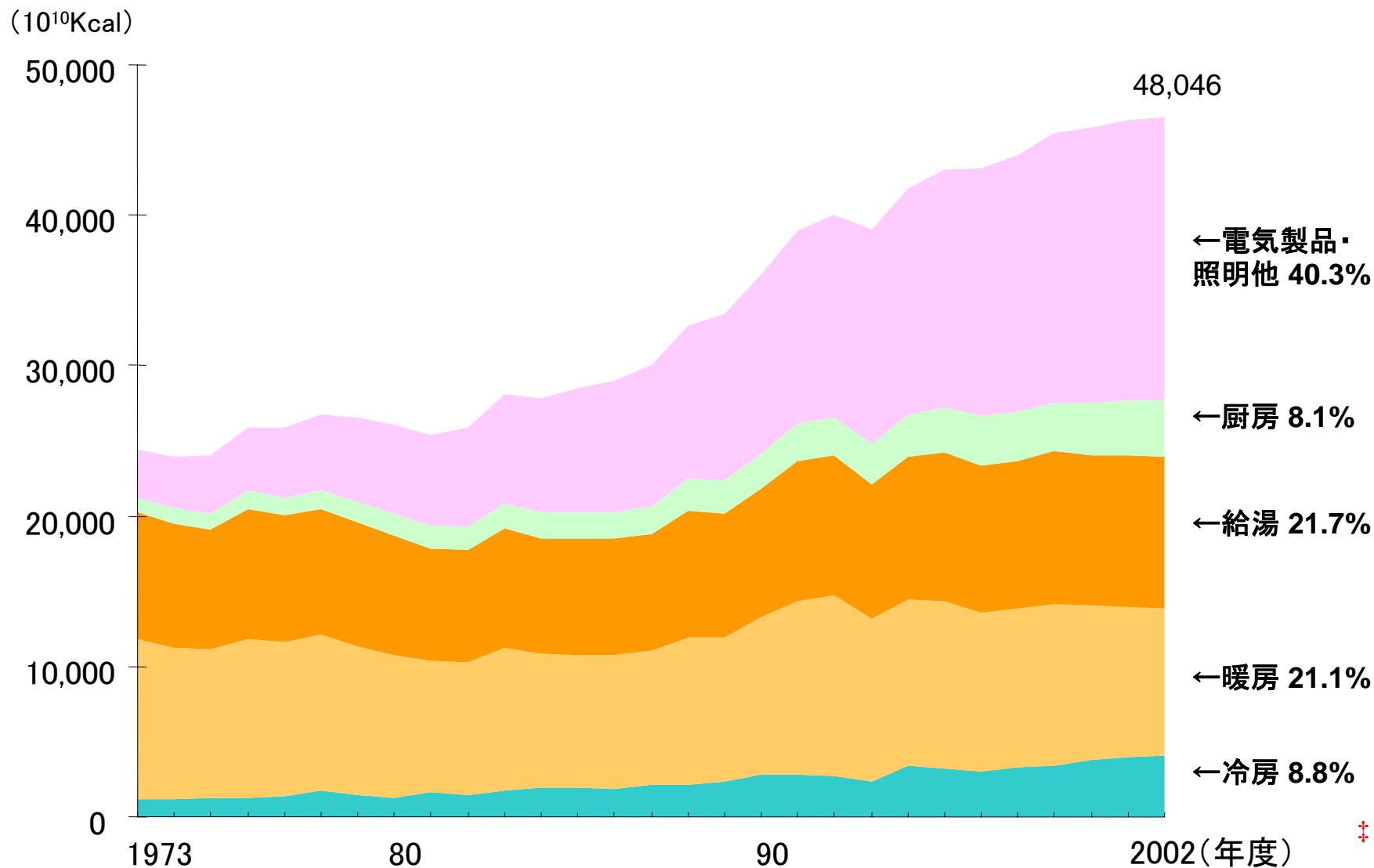
部門別最終エネルギー消費量の推移



家庭部門のエネルギー源別エネルギー消費量の推移

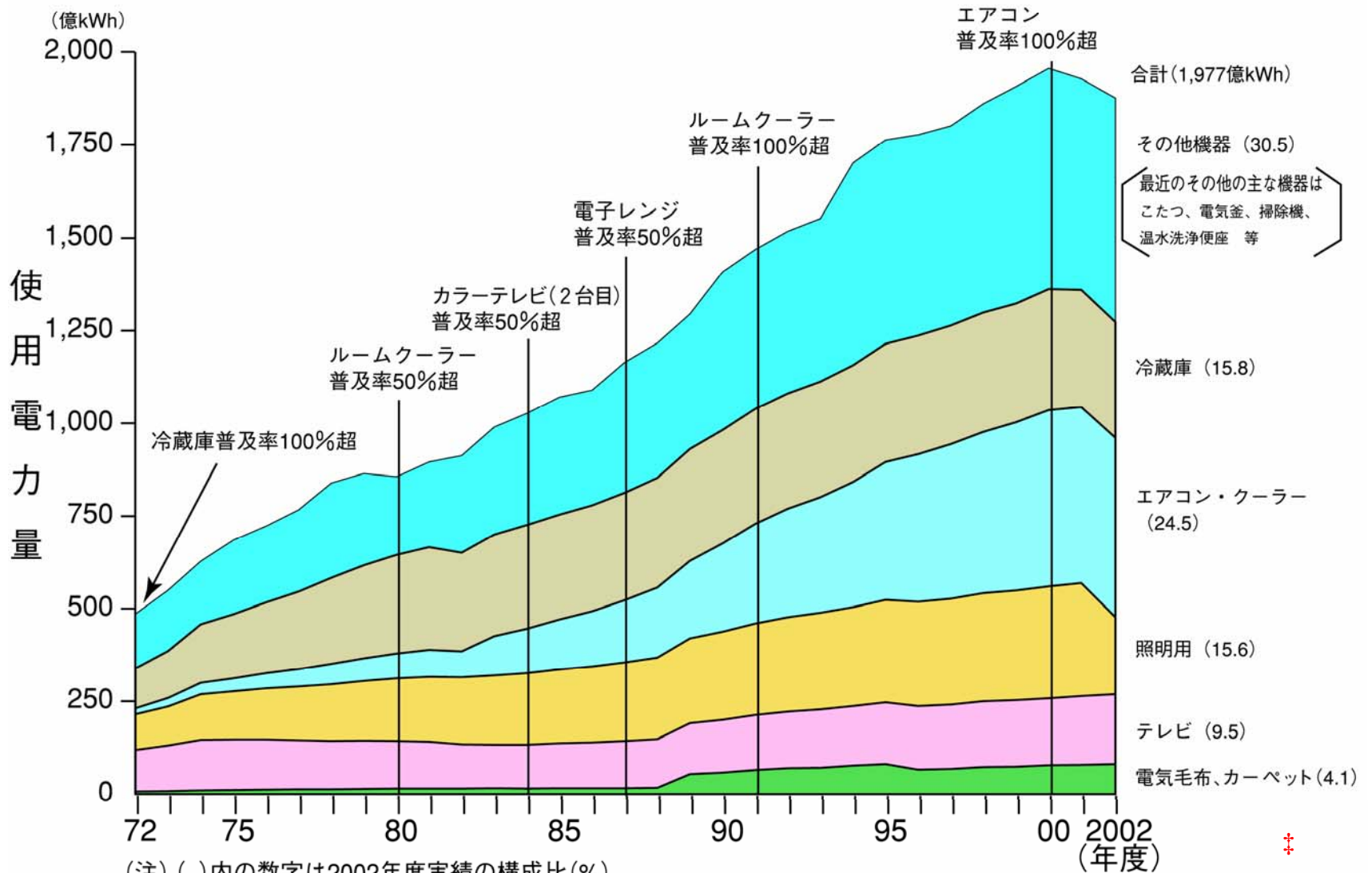


業務部門の用途別エネルギー消費量の推移

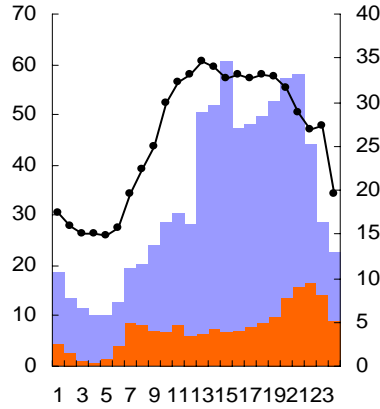


出所：山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年、図2.8(p.35)

家庭用電力の伸び

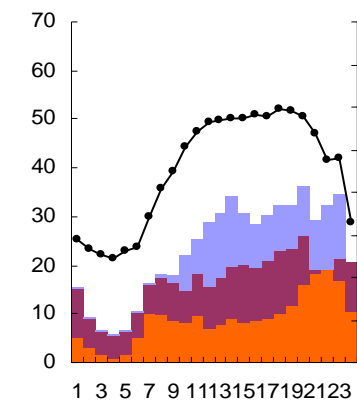


熱需要[kcal/m²]



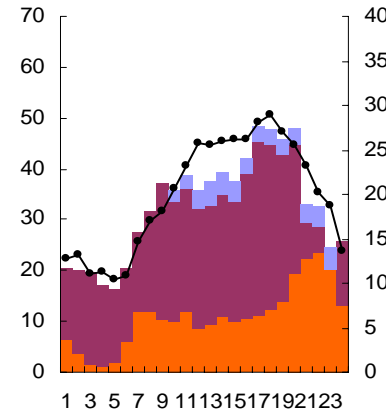
夏期

給湯 暖房 冷房 電力



中間期

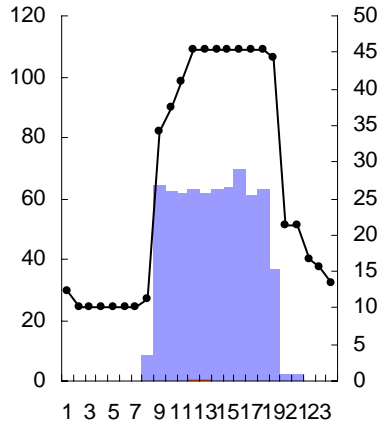
電力需要[Wh/m²]



冬期

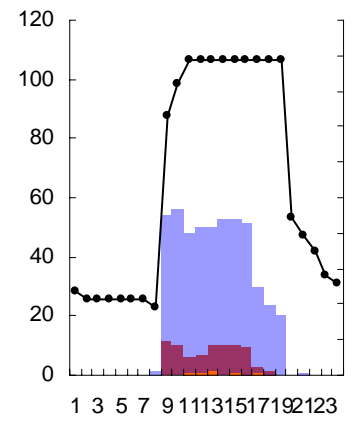
ホテルの電力・熱負荷

熱需要[kcal/m²]



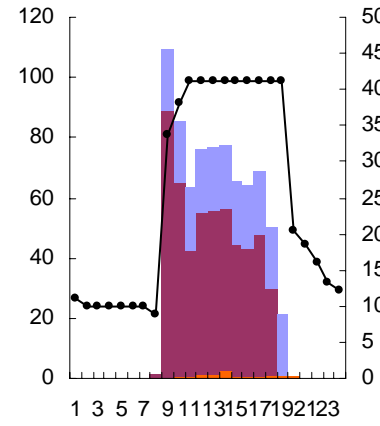
夏期

給湯 暖房 冷房 電力



中間期

電力需要[Wh/m²]

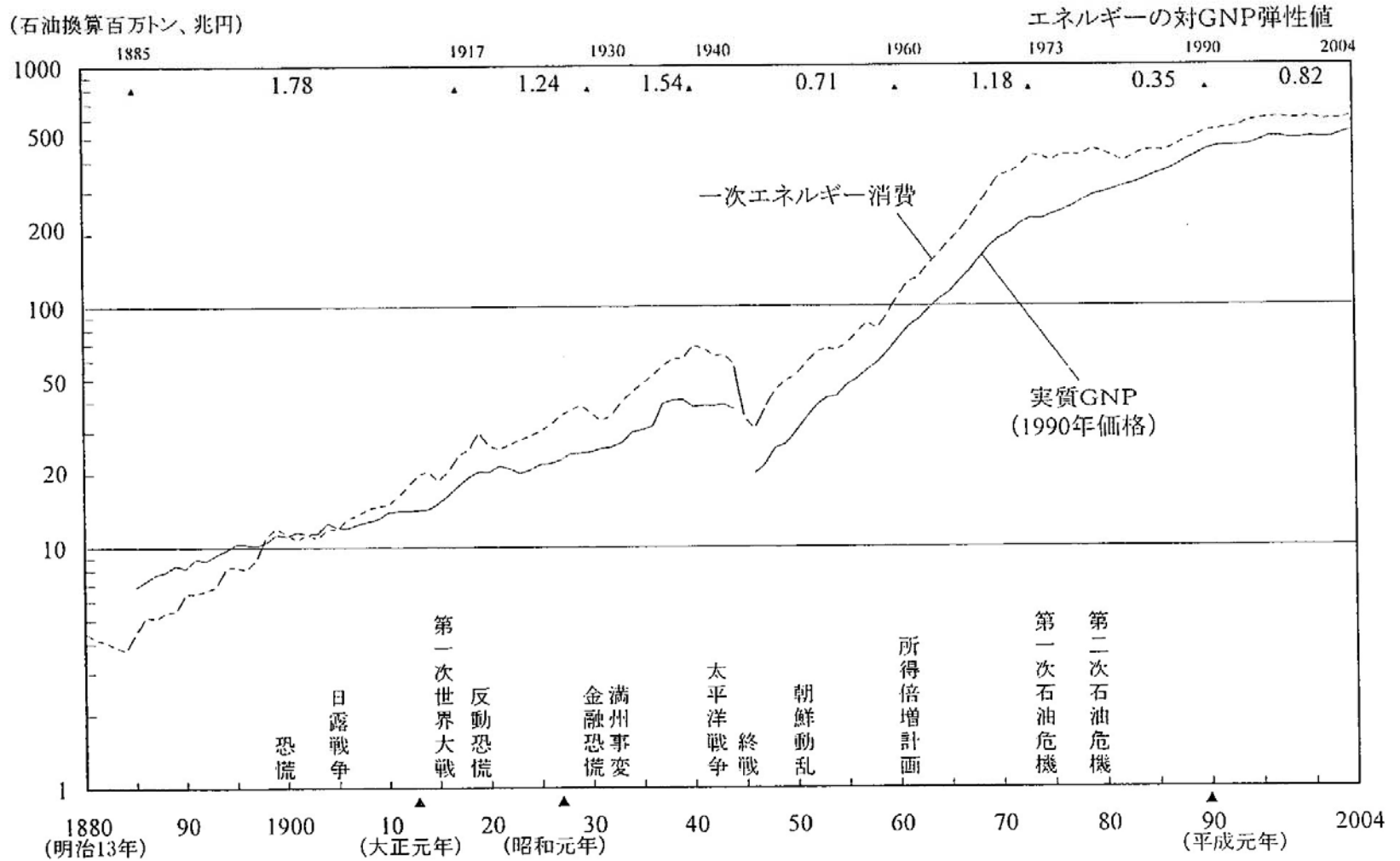


冬期

事務所の電力・熱負荷



わが国のエネルギー需要と経済活動(1)

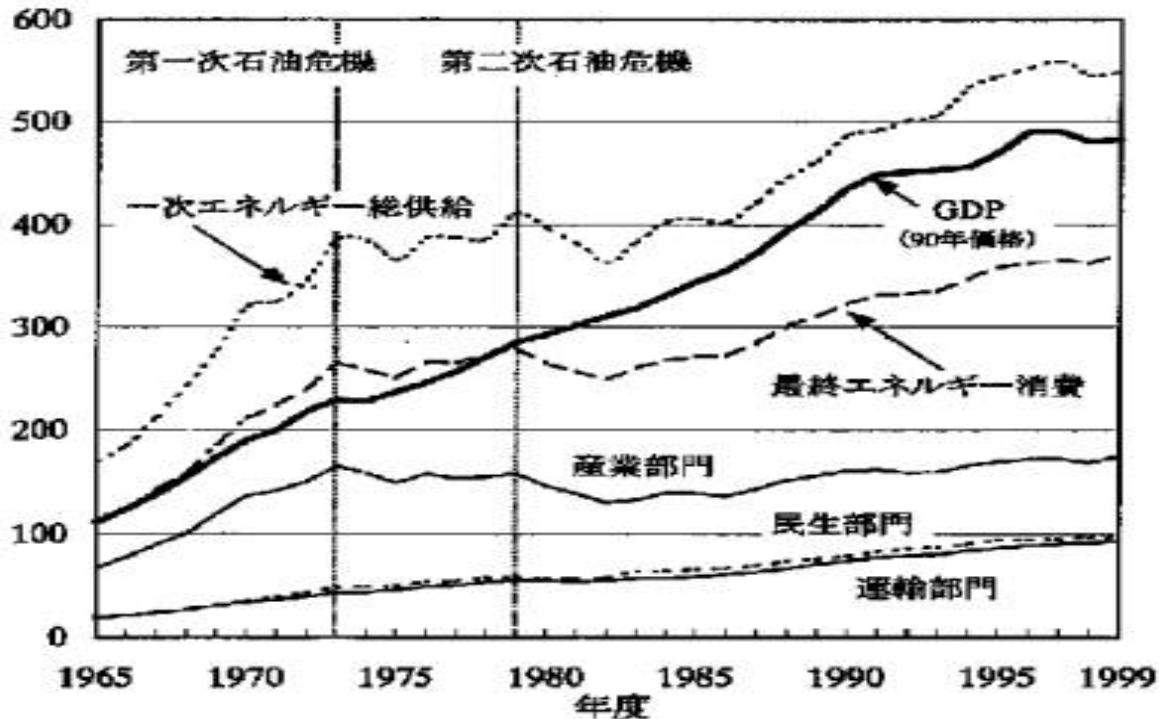


出所: 山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年、図2.11(p38)

わが国のエネルギー需要と経済活動(2)

(1) エネルギー需要とGDPの推移

(兆円、石油換算百万トン)



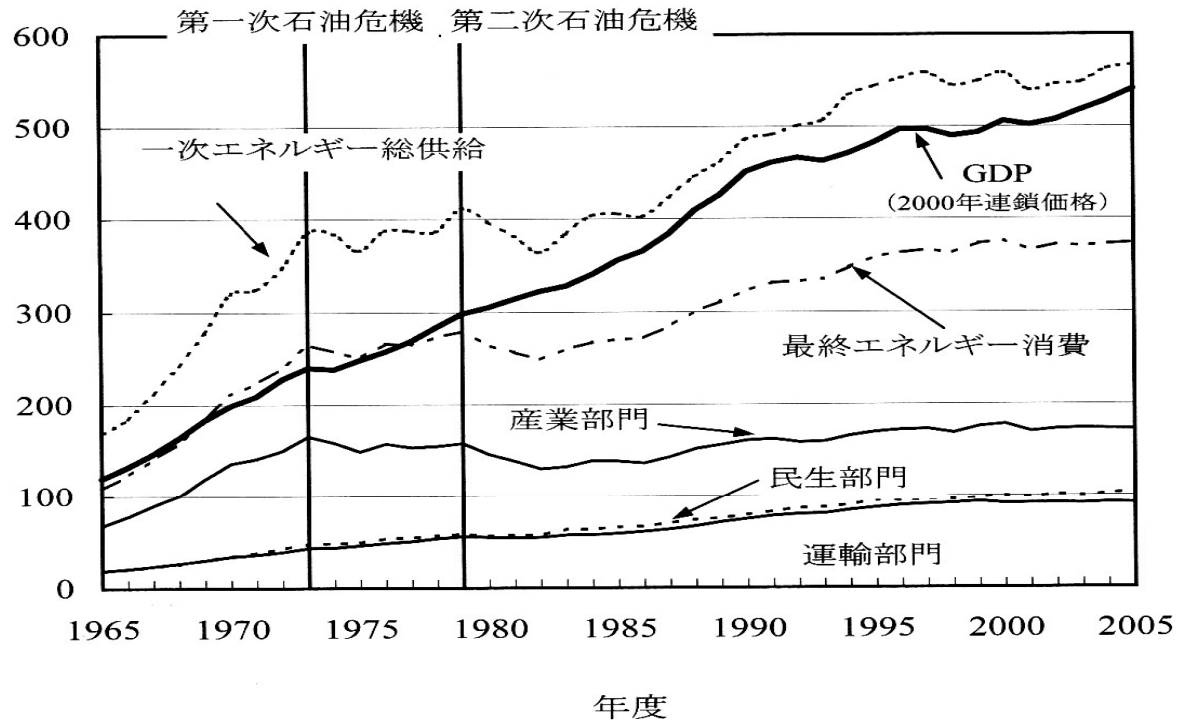
(2) エネルギー需要のGDP弾性値

	1965-73	73-79	79-86	86-91	91-99
GDP	9.4%	3.7%	3.2%	4.7%	0.9%
一次エネルギー総供給	10.9%	1.1%	-0.3%	4.1%	1.4%
最終エネルギー消費	11.8%	0.9%	-0.4%	4.1%	1.5%
一次エネルギー弾性値	1.15	0.29	-0.10	0.86	1.55
最終エネルギー弾性値	1.25	0.24	-0.13	0.86	1.61

わが国のエネルギー需要と経済活動(3)

(1) エネルギー需要とGDPの推移

(兆円、石油換算百万トン)

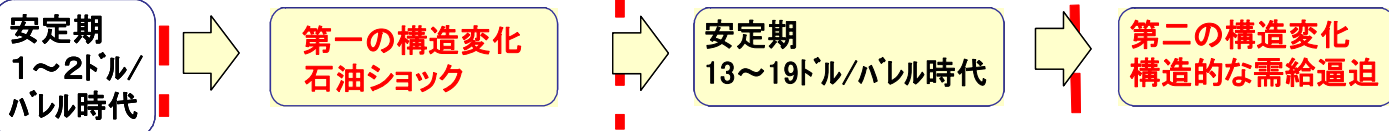
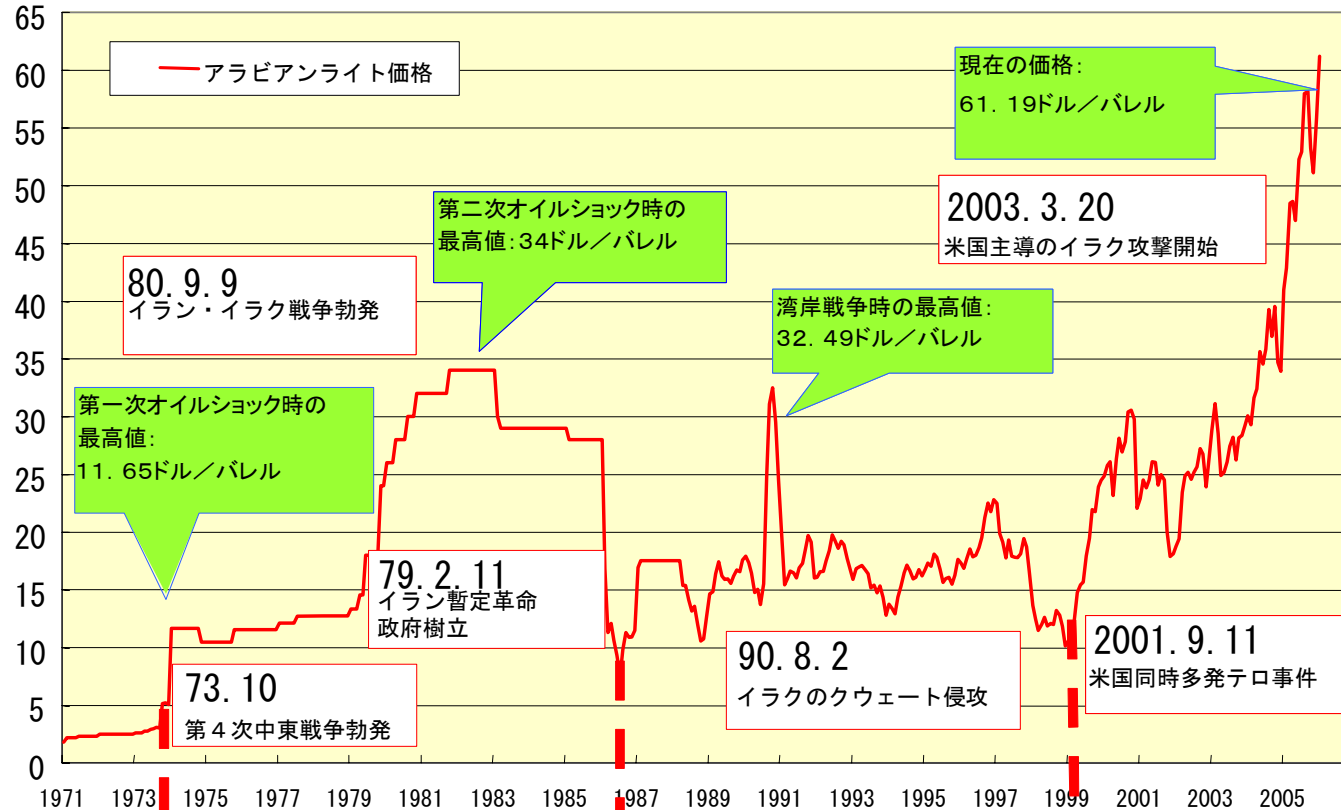


(2) エネルギー需要のGDP弾性値

	1965-73	73-79	79-90	90-00	00-05
GDP	9.1%	3.7%	3.8%	1.2%	1.3%
一次エネルギー総供給	10.9%	1.1%	1.5%	1.4%	0.3%
最終エネルギー消費	11.8%	0.9%	1.3%	1.5%	-0.1%
一次エネルギー弾性値	1.20	0.29	0.40	1.21	0.21
最終エネルギー弾性値	1.30	0.24	0.35	1.32	-0.09

ドル建て名目価格による石油価格の推移

(単位：ドル/バレル)



出典) 経済産業省作成。我が国の取引量が多い、サウジアラビア産「アラビアン・ライト」の価格推移。ただし、価格決定方式は時期により異なる。なお、現在の価格とは、最新月平均(本年1月)。

†

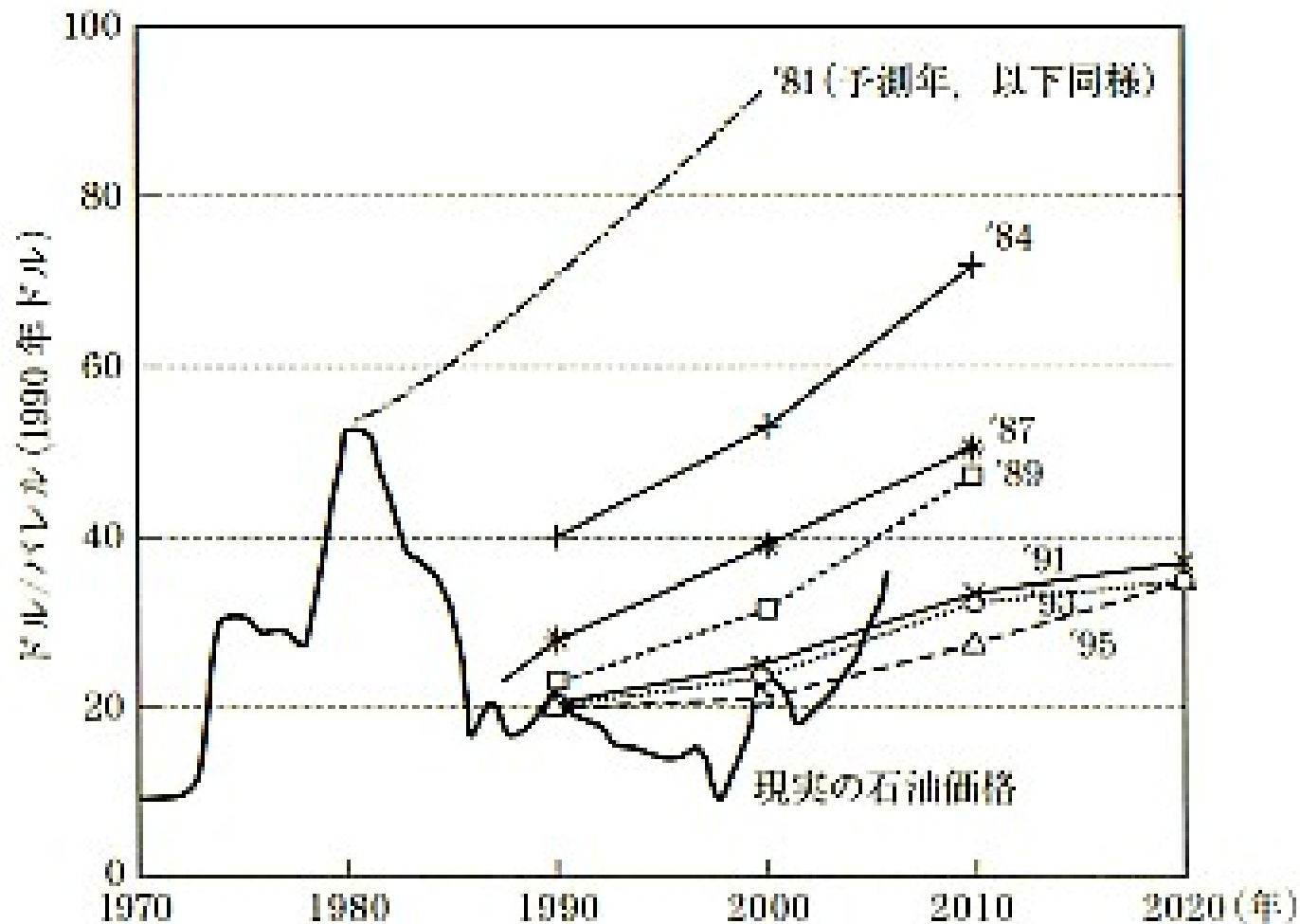


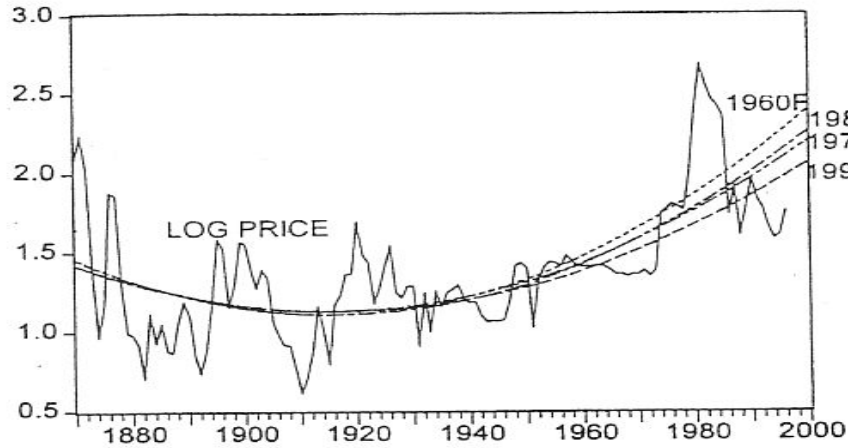
図 2.20 石油価格の推移と予測。

出典) L. Schrattenholzer: Selected Results of the 1996 IEW Polls of Energy Projections, IEW/JSER '96, Osaka, June 1996
 に最近の実質価格を加筆。

†

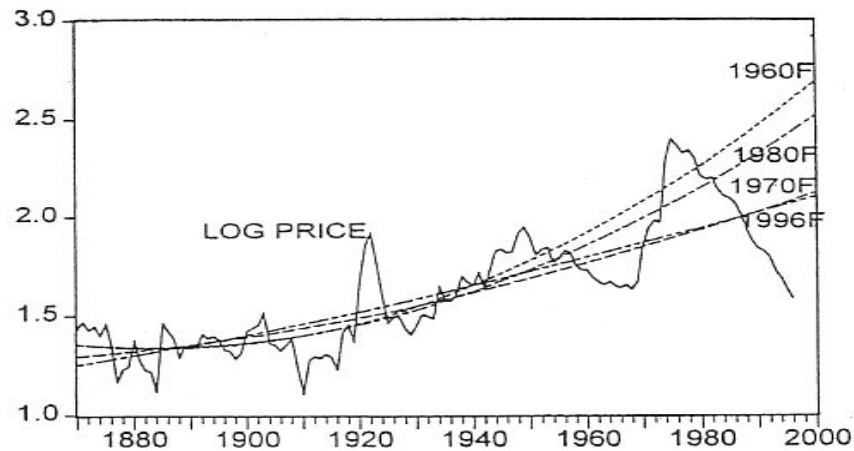
Figure 1. Log Price of Crude Oil and Quadratic Trend Lines

R.S. Pindyck
The Energy Journal
20, No. 2 pp. 1-20
(1999)



1980F (1980年7月 - 41.2322) (注)
1970F
1996F
平均
3.5 \$/barrel
1967 US \$
(WPI)
natural log

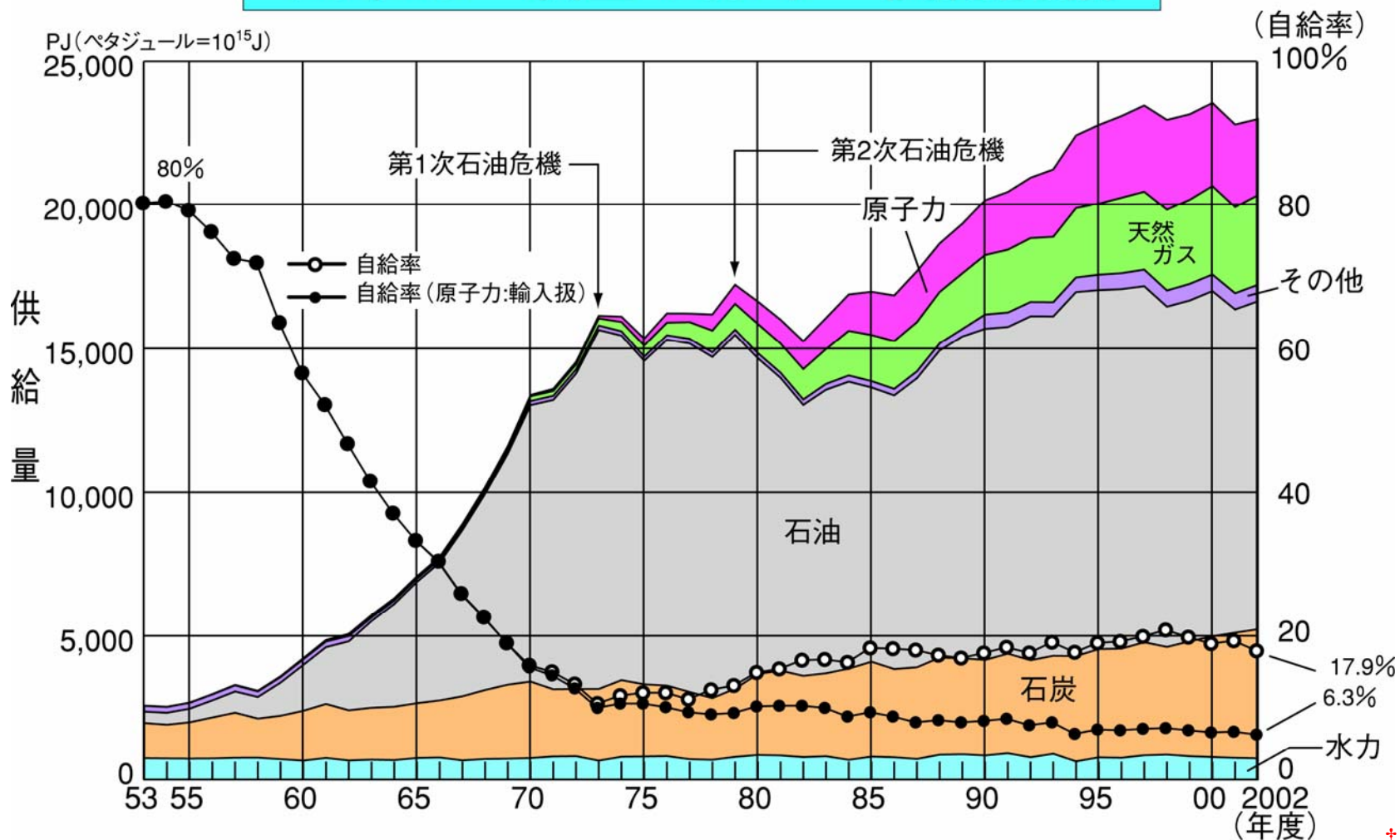
Figure 2. Log Price of Bituminous Coal and Quadratic Trend Lines



平均
4 \$/t



日本の一次エネルギー供給実績



(注) 1PJは原油約25,800klの熱量に相当

出典：総合エネルギー統計(平成15年度版)

出所：山地憲治、「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店、2006年、図2.13(p.40)

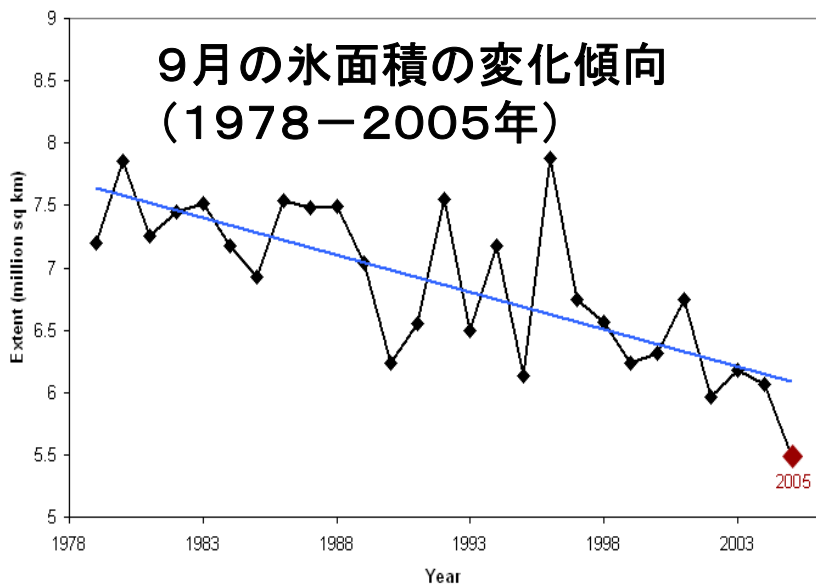
原油輸入の中東依存度の推移



北極の氷が融けている→

- ・地球の平均気温
ここ100年で 0.74°C 上昇
- ・日本の平均気温
ここ100年で 1.0°C 上昇
(東京は 3°C)
- ・アラスカ、カナダ西部
ここ50年で $3-4^{\circ}\text{C}$ 上昇
- ・氷河や海氷の融解
- ・積雪期間が短縮
- ・永久凍土の融解

出典: NASA



2003 北極の氷の変化(9月)

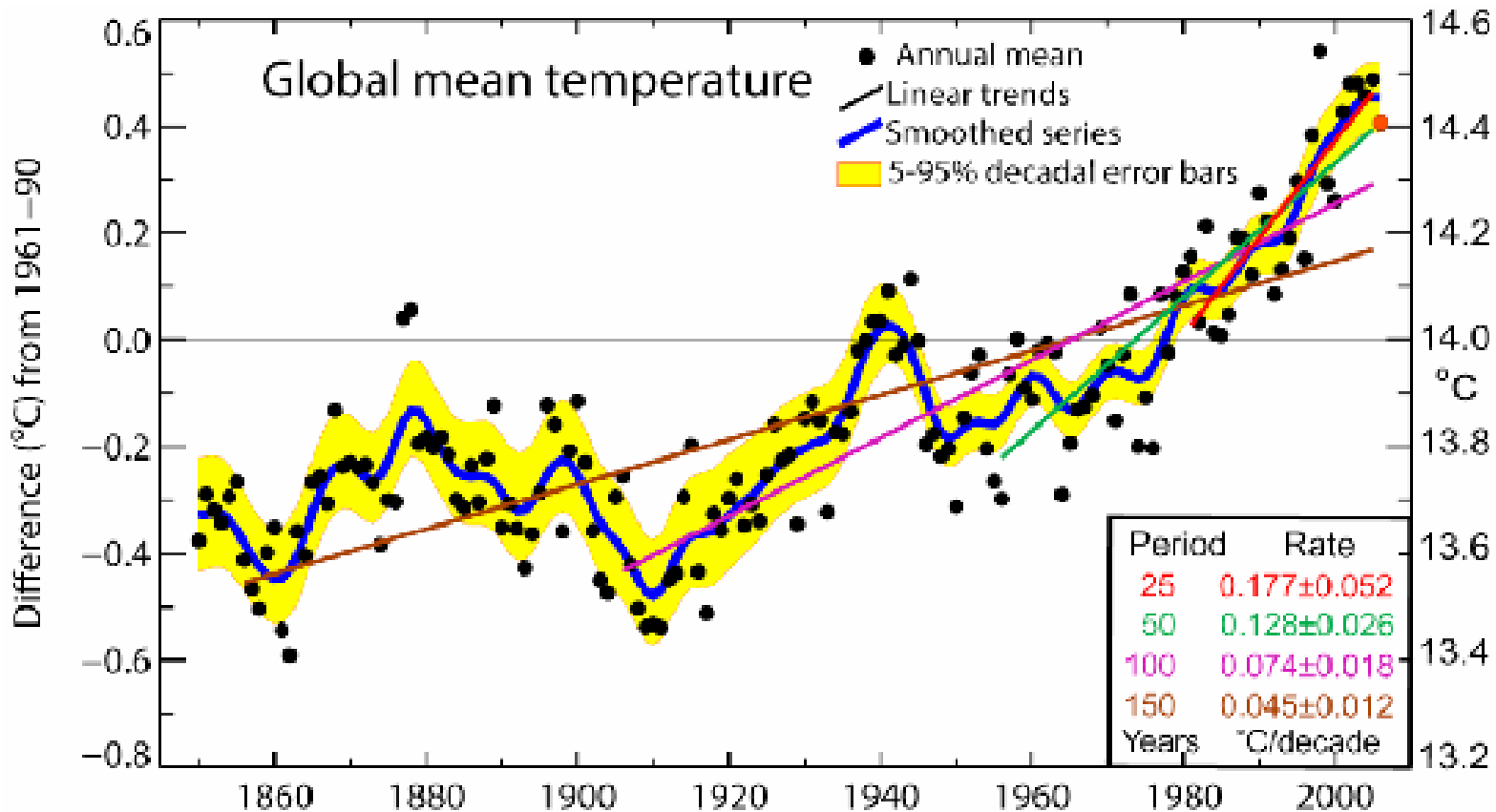


全球平均気温の観測

○過去100年間で世界平均気温が 0.74°C 上昇(2001年報告では 0.6°C 上昇)

○最近50年間の気温上昇傾向は、過去100年間のほぼ2倍

平均地上気温(1961~1990年までの平均気温と偏差)



學而不思則罔

思而不學則殆