HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	野外科学におけるスケール論：時空間問題の整理
Author(s)	中村, 太士
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 46(2), 287-313
Issue Date	1989-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21290
Type	bulletin (article)
File Information	46(2)_P287-313.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

野外科学におけるスケール論

——時空間問題の整理——

中　村　太　士*

Scale Problems in Field Science

—— Solution for Spatiotemporal Problems ——

By

Futoshi NAKAMURA*

要　　旨

総合科学の必要性が叫ばれる現在，「分離・分割」ではない「総合」の方法論が必要とされる。このためには，多次元情報を統合し，有機的つながりとして表現しなければならず，この点が本論の中心課題である。時空間スケールの問題は，野外科学研究のすべての段階で密接に関連しており，測定間隔，集計単位，単位次元等を変えることにより，事象の変動・分布特性は大きく変化する。スケール概念は，この問題を解決するため地理学，生態学，林学など野外科学を中心とした分野においてすでに導入され，プロセス・パターン双方について議論されている。

野外科学研究を行ううえで最も重要な点は，対象とする事象が時間に対して独立であるか，従属であるかである。ある時間スケールで生起する現象にとって，より短い時間スケールで変化する要因は無視できるほど変動幅が小さく，より長い時間スケールで変化する要因はこの現象の全体的傾向を規制し，そして同時間スケール要因は現象と共に変化する。空間スケールは，現象の空間的ひろがりを規定しており，大空間スケールで表現される要因の部分が小空間スケール要因となる。方法論的には，まず研究対象とする「場」の最大・最小空間スケールを決定し，要因を時間スケールに基づき整理することが，ある「場」に関与する要因の主従（因果）関係を意味しており，多くの情報の関連性を総合的にとらえる基礎となる。

キーワード：　時空間スケール，階層構造，時間的独立・従属，野外科学，プロセスとパターン。

1988年8月31日受理　Received August 31,1988.

* 北海道大学農学部砂防工学講座
Laboratory of Erosion Control Engineering, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

目 次

はじめに…… 288
1. 問題提起…… 288
2. 時空間スケールと現象特性…… 290
3. 時間的独立・従属要因…… 294
4. プロセスとパターン，そして定常性…… 297
5. スケール概念と野外科学…… 299
1）各学問分野におけるスケール概念…… 299
2）野外科学と実験科学…… 301
6. 時空間問題の整理…… 303
1）時間スケール…… 303
2）空間スケール…… 303
3）時間スケールと空間スケールの関連…… 305
7. 方法論への展開…… 306
1）自然認識の方法…… 306
2）技術学への応用…… 309
おわりに…… 310
参考文献…… 311
Summary …… 312

はじめに

“たとえ同一の自然現象を観察，測定していても，時間枠（空間枠）の設定の仕方により，時系列（空間系列）変化の特徴が大きく異なる。”筆者が1987年博士論文「河川の動態解析に関する砂防学的研究」を書き終え，方法論的に到達した段階であった。このようなことは，もうすでにほとんどの研究者が知るところであり，筆者自身の学問的レベルの低さを表すものである。ところが多くの研究事例に触れる際，時空間問題については理解はされているのであろうが，うっかり忘れ去られている例を数多く見かけるのもまた事実である。そして，各分野間で行われている論争の多くが，時空間スケールを明記していないことに起因すると思われるのである。「森林科学」，「環境科学」など総合科学の必要性が叫ばれる現在，「分離・分割」ではない「総合」の方法論が必要とされる。本論で掲げた目次は，総合化の方法論を組み立てる上で解決しなければならない問題点であり，解決のカギは時空間スケール，とくに時間スケールの導入にあると思われた。したがってほとんどすべての問題は時間概念との関連で論じられているのが本論文の特徴である。

1. 問題提起

野外科学における基本的な研究の流れは，まず 1）野外において目的とする現象もしくは対象を調査・測定し，2）得られたデータを整理・解析し，3）最後に，これら解析結果を軸に過去もしくは未来を推定することであろう。これから本論で述べる時空間スケールの問題は，

1)， 2)， 3)すべての段階において密接に関連しており，これなくして議論をすすめることはできない。

まず， 1）の段階における問題点を例を挙げて説明する。筆者の属する林学においては，森林群落調査・記載の代表的手法として，方形区調査，帯状区法（ベルト・トランセクト法）があるが，方形区を構成する一辺の長さ，もしくは帯状区法におけるベルト幅等の諸元は，一体何によって決定されるのか。一般的には方形区に対して，20 m，50 m，ベルト幅に対して5 mといった慣用値が定められているが，これらの値はいかなる森林をいかなる目的で調査研究する際にも，基準値として適当であるといえるのであろうか。

筆者自身がこれまで手がけてきた研究の多くは，河川に関する問題であり，河床が時系列的に変化する様子を空間的に把握することに論点がおかれてきた。フィールドに出かけていつも悩まされてきたことは，河床変動を測量する際の測量間隔であり，さらに1ヵ月，1年に代表される測定期間の決定である。経験的には測量間隔は河幅程度，測定期間は1年程度として行ってきたが，仮にもっと細かい時空間スケールで行った場合，異なる結果が導かれはしないかという問題である。

河床変動といっても，魚類の生息場として河床を捉えた場合，時空間スケールはさらに細かくなるであろうし，水性昆虫にいたっては，石れき1つの河床状況が重要となるかもしれない。また，同じ土砂の運動を論ずる場合においても，いわゆる土石流，掃流，浮遊形態において，時空間スケールが大きく変化するであろうことは，容易に理解できる（川島，1988)。

2）の段階であるデータ整理・解析段階においても，調査測定段階と同様の問題が発生する。代表的にはデータ集計もしくは解析レンジ (range) の決定である。このレンジの取り方により，現象特性は大きく変わると思われるが，一般的には得られた解析結果のみが議論されがちで，レンジに対する論点は見逃されることが多い。また，仮に幅を設定できたとしても，たとえばデータ群の積分特性を表す平均を用いるべきか，微分特性を表現する最大値，最小値を選択するべきかは問題となろう。

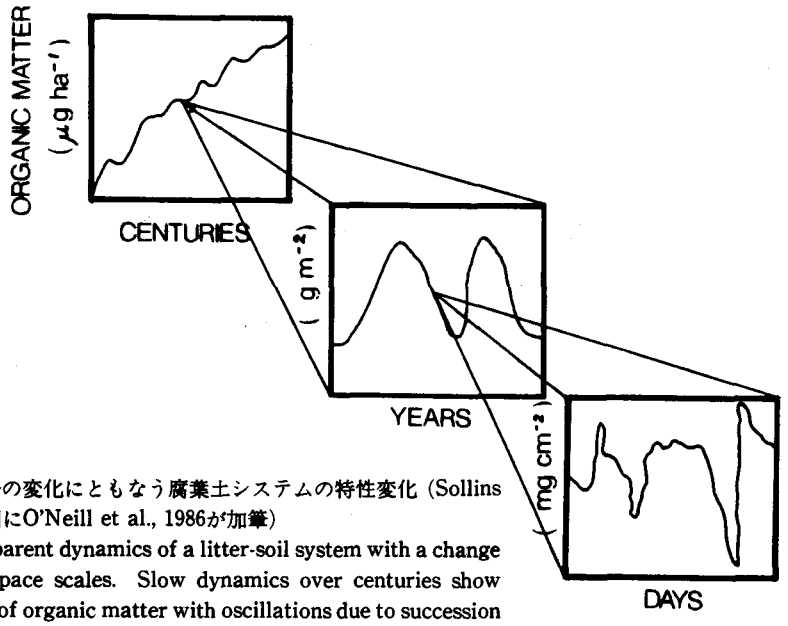
3）の段階である解析結果にもとづく未来・過去の推論においては，結果の内挿・外挿が論点となる。得られた解析結果の時空間スケールをはっきり認識し，このスケール以内で内挿する場合，問題はないと思われるが，さらに小さなスケール，そしてさらに大きなスケールへと外挿を試みる場合，多くの疑問点が指摘される。例えば年輪年代学的手法を用いて気候変動を探ろうとする場合である。数本の樹木サンプルから得られた年輪幅時系列と，降雨データ，もしくは気温データ等との相関をみるのであるが，樹木がかりに単木レベルで，マクロ的気候変動のみに影響されて生長するものであるなら納得はいくが，事実はそうではない。樹木は基本的に他の植物群と競合して生育するものであり，上層木によって形成されるミクロ的気候が，下層における成長段階では極めて重要となる。かりに上層に達したとしても，隣接する上層木との競合関係はぬぐいさることはできない。このように書いてしまうと年輪年代学を否定して

いるように思われるかもしれないが，そうではない。論点は，いかなる場所に生育している樹木をサンプルとして得たのか，そしてサンプル地点の個数・分布範囲がマクロ的気候変動を説明するに，十分な範囲を満たしているかどうかである。このほかにも，湿地で得られる埋積花粉をもとに，過去の植物群落を再現しようとする花粉分析においても，同定・カウントされた花粉数がサンプル地点の周辺何m，もしくは何km程度の植物群落を反映しているのかは，重要な問題である。誤解のないように繰り返すが，各々の分析手法は過去の事象を探るのにきわめて有効な手法であることにはまちがいない。問題は，こうした手法がどの時空間スケールに適用できるかを明らかにすることであり，それにより他の手法との位置づけ，すなわち関連性を明確にすることができる。

森林科学，環境科学なる言葉が近年使用されているが，これらが「場の科学」として認識される以上，多くの時空間スケールにおよぶ多次元情報を統合し，有機的つながりとして表現されなければならない。ただ単に多次元情報を羅列するだけでは，科学的方法論を組み立てているとは言い難いのである。筆者は，個々の事象が規定されている時空間スケールを明らかにすることが，情報を統合するカギであると考えており，この点が本論の中心課題である。

2. 時空間スケールと現象特性

1つの自然現象が，仮に多くの時空間スケールで検討された場合，その現象特性は変化す

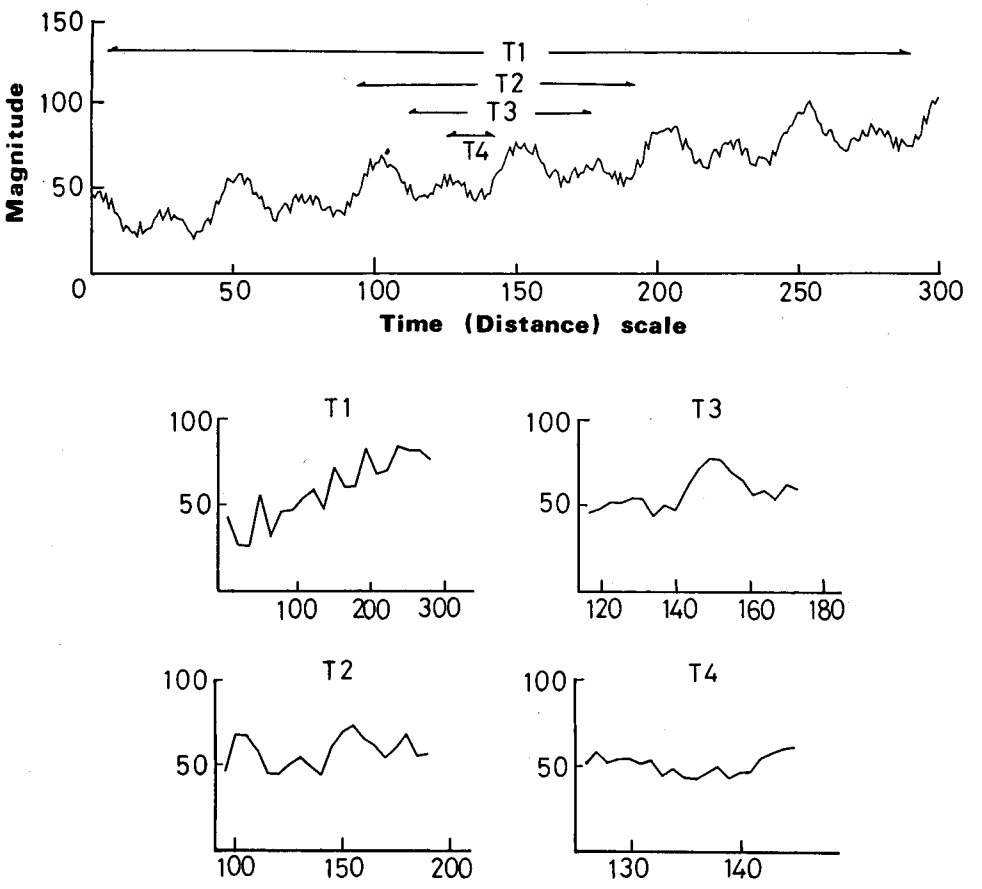


図－1 時空間スケールの変化にともなう腐葉土システムの特性変化 (Sollins et al., 1983の図にO'Neill et al., 1986が加筆)

Fig. 1. Changes in apparent dynamics of a litter-soil system with a change in time and space scales. Slow dynamics over centuries show accumulation of organic matter with oscillations due to succession (Sollins et al., 1983). On a scale of years, seasonal decomposition processes are apparent, while an observation window of days reveals rapid fluctuations in litter due to wind and arthropods (O'Neill et al., 1986).

る。一例を図－1に示した。Sollins et al.（1983）の研究をもとにO'Neil et al.（1986）が加筆したもので，3つの時間スケールすなわち100年単位(centuries)，年単位(years)，日単位(days)を取り上げ，各時間スケールで有機物蓄積の変化状況を検討している。時間スケールに対応して，空間スケールを表す縦軸の単位も変化している。まず，100年単位においては，植物遷移にともなう振動を繰り返しながら，有機物が蓄積されていく。さらに年単位においては，季節的変動が明瞭に表れてくる。そして，日単位においては風や土壌動物等による急激な変動が示されている。

たとえ同一の現象を観察していても，時間スケールに対応して現象特性は大きく変化するのである。筆者自身これと同様な視点を持っており，図－2に例示した（中村，1988）。最上段のグラフをある自然現象の時系列変化とし，T 1，T 2，T 3，T 4の4つの時間枠で調査を

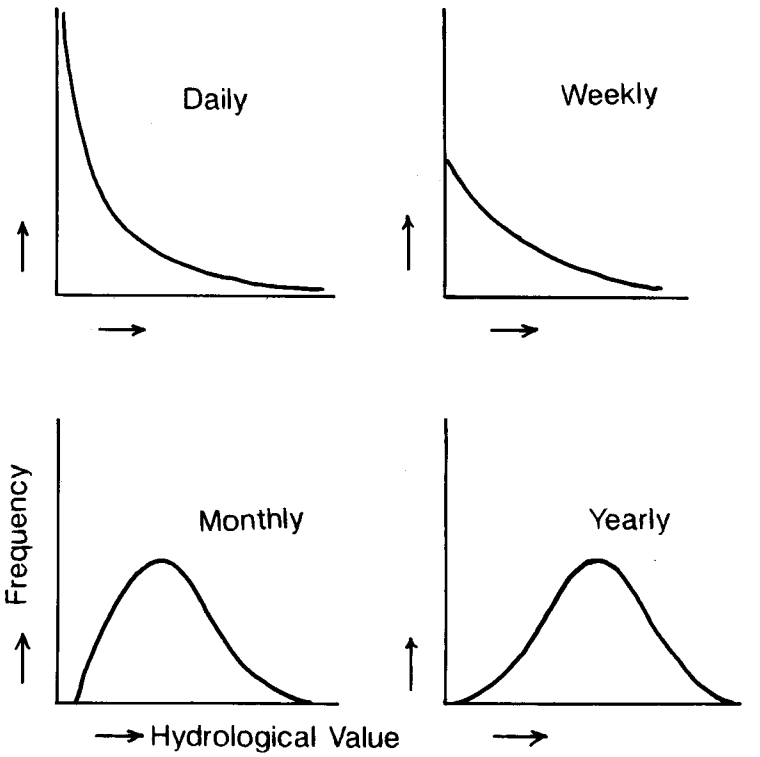


図－2　時間（空間）スケールと時系列（空間系列）変化の特性

Fig. 2. Characteristics of time series depending on time spans of measurement. Measurement interval is assumed to be 1/20 of the surveying period.

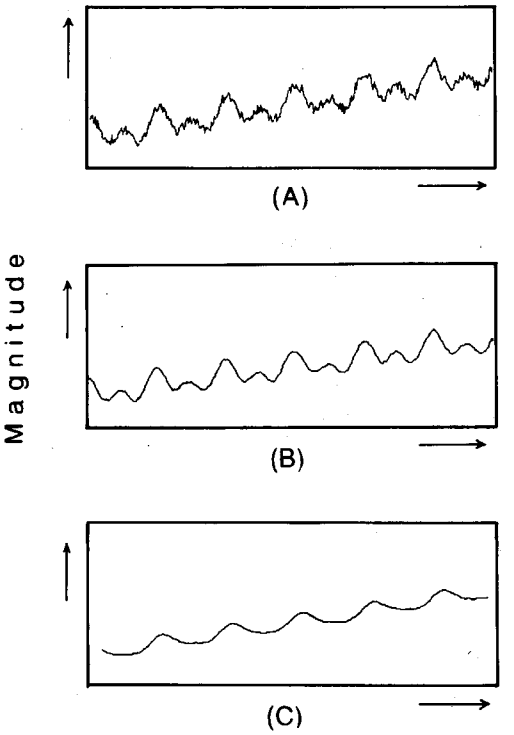
実施したと仮定する。また調査結果の収録は等時間間隔で行い、その単位時間は各時間枠の1/20とする。つまり，各時間枠において20個の調査データが収録されることになり，その結果を下の4つのグラフ（T 1～T 4）に示した。なお，座標軸の数値はT 1～T 4を比較検討するために表示したもので，数字自体に特別な意味はない。もっとも長い時間枠であるT 1の調査結果は全体的に上昇傾向を示し，T 2はやや規則的に上昇・下降を繰り返している。T 3は中央に大きな山をもち，最も短い時間枠であるT 4は比較的変化が少ない。現象的特性としては，T 1は不可逆的変化，T 2は周期的変動，T 3は突発的変動，さらにT 4は定常的変化を意味することになる。

この2つの事例は，調査・測定段階における時空間スケールの重要性を表したものであるが，仮に長い連続データを得た場合，データの集計レンジに伴う結果の違いも同様な意味をもつ。すなわち，整理・解析段階において関与する時空間スケール問題である。水文学に於ける水文量の度数分布は，計測時間単位が大きくなるにつれて，左右対称な分布に近づくことが知られている（図－3）。日単位においては，明瞭な指数減少形を示すのに対して，週単位では穏



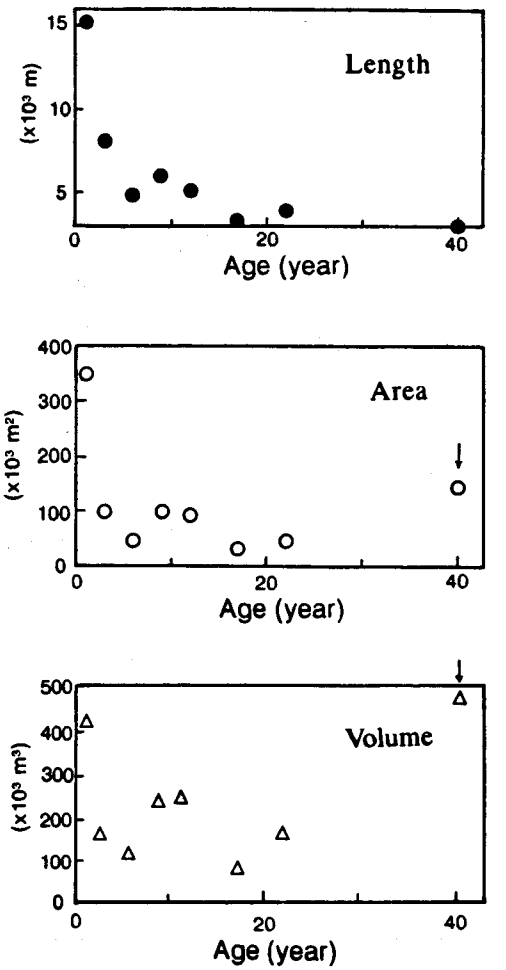
図－3　時間スケールの変化にともなう水文量の度数分布変化

Fig. 3. Changes in frequency distributions of hydrologic factors with a change in time scale.



図—4　移動平均による平滑化
(A)　オリジナル　(B)　7個平均
(C)　21個平均

Fig. 4. Smoothing by moving average.
(A) original fluctuation
(B) 7 data average
(C) 21 data average



図—5　測定・解析単位の違いによる分布形の変化
—河床堆積地に関する年代分布の一例—

Fig. 5. Changes in distribution depending on the dimensions of the data.
This example indicates the differences of age-distribution for length, area and volume of flood-plain deposits.

やかな減少形，月単位では分布のピークがやや小さい方に偏る山型分布，そして年単位では正規分布となる。

いま，図—2の最上段のグラフが野外で得られた時系列データであるとし，移動平均をとることにする（図—4）。移動平均の個数の増加にともない，小スケールの変動特性が消されてゆく様子がわかる。いわゆるスペクトル解析等による波長と振幅の関係もこれと同様である。

これまでは集計単位を中心に，事象そして度数分布が変化する点について述べてきたが，長さ，面積，体積などの単位次元を変えることによっても事象の特性は変化する。河川における河床堆積地に関して，年代別堆積地の総区間長(Length)，総面積(Area)，総堆積量(Volume)で比べたのが図—5である。河床堆積地の年代は，成立している同齢林の樹齢によって定義され，図に示した事例は，1984年沙流川本流と支流額平川との合流点より約15 kmにわたって実

施された堆積地調査結果より作成されたものである。区間長の総計に関する年代分布は，年代の増加に伴う指数関数的減少傾向を示しているが，面積・堆積量に関する年代分布では分布形が変わっており，とくに40年の堆積地に関し顕著である。堆積地は，突発的現象である洪水によって形成され，その分布範囲は洪水規模に比例する。しかし，形成された堆積地はその後に発生する洪水により洗掘される傾向にあり，減少傾向は洪水規模に関係なく，指数関数的であるといえる。結果的に，現存する堆積地は突発的現象と漸減的変化をともに内包しており，この例では次元の増加に伴い，突発的現象の残存が顕著になると言える。

森林を表現する場合も，樹高，胸高直径，蓄積等の基準値が使われているが，それぞれの分布は森林の一面を表現しているにすぎない。結論として，現場における調査・測定の時間スケール，解析段階における集計レンジそして単位の問題は，現象特性と大きくかかわっており，研究対象・研究目的に応じてこの点を充分吟味する必要がある。

3. 時間的独立・従属要因

一般的に，x と y の関係が $y=f(x)$ で表された場合，x を独立要因，y を従属要因と呼ぶが，これから述べようとする独立・従属の概念とは，要因が時間に関して独立であるか，従属であるかということで，一応前者とは区別しなければならない。しかし，すべての現象は時間スケールの中で変化しており，実際にはあとで述べるように時間に対して独立であるか否かということが，関係式の独立・従属要因の決定に深くかかわってくる。

表—1　時間スケールと流域変数 (Schumm, 1971)
Table 1. River variables during time spans (Schumm, 1971)

	Variables	Status of variables during designated time spans		
		Geologic	Graded	Steady
1)	Time (stage)	I	N.R.	N.R.
2)	Initial relief	I	N.R.	N.R.
3)	Geology (lithology, structure)	I	I	I
4)	Paleoclimate	I	I	I
5)	Paleohydrology	D	I	I
6)	Relief or volume of system above baselevel	D	I	I
7)	Valley dimensions (width, depth, slope)	D	I	I
8)	Climate (mean ppt, temp., seasonality)	X	I	I
9)	Vegetation (type and density)	X	I	I
10)	Hydrology (mean discharge of water and sediment)	X	I	I
11)	Channel morphology	X	D	I
12)	Observed Qw Qs (reflecting meteorological events)	X	X	D
13)	Hydraulics of flow	X	X	D

I=independent　　N.R.=not relevant　　D=dependent　　X=indeterminate

時間スケールと独立・従属関係について，Schumm（1971）は地形学の立場から興味深いことがらを述べている。彼は，Geologic（地形学的），Graded（平衡的），Steady（定常的）という3つのtime spanを設定し，流域構造とその構成因子の独立・従属(independent-dependent)関係が3種のtime spanのなかでどのように変化するかを事例をあげて述べている。表—1がその内容を示したもので，Geologic timeは10^6年(百万年)オーダー，Graded timeは10^2年オーダー，そしてSteady timeは数日オーダーと定義している。時間スケールの違いにより，構成因子の独立・従属関係が大きく変化することを明確に示しており，小時間スケールになるほど固定して考えることのできる独立要因が増加する。

ある自然現象を研究する場合，関与すると考えられる多くの要因を選出し，検討する。ところが，これらの要因の中で$\partial v/\partial t \neq 0$（$v$は任意の変数，$t$は時間）として方程式中にくみこまなければならない要因は何なのか。また，$\partial v/\partial t = 0$として無視できる要因，$\partial v/\partial t = 0$ではあるが，方程式の境界条件として考慮しなければならない要因は何なのか，という吟味は，すなわち構成要因の時間的独立，時間的従属を明らかにすることである。ある時間スケールで生起する現象にとって，より短い時間スケールの要因は無視できるほど変動幅が小さく，より長い時間スケールの要因はこの現象の規制因子として作用し，そして同時間スケールの要因は現象とともに変化するのである。

たとえば，河川を流れる水の温度に関する方程式は，

$$\partial\theta/\partial t + v(\partial\theta/\partial x) = H\omega/c\rho D$$

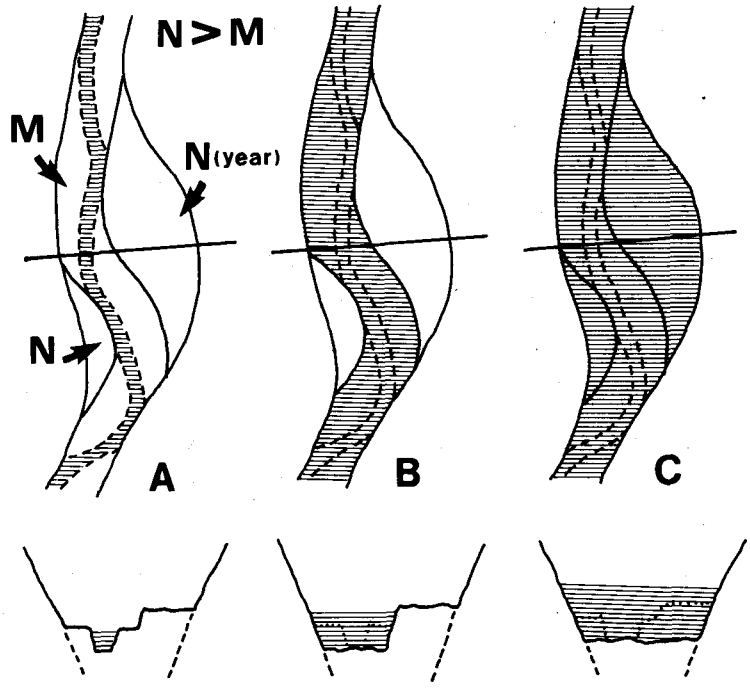
で表すことができる。ここで，θは水温，vは流速，$H\omega$は水塊に出入する熱量，c，ρはそれぞれ水の比熱と密度，Dは水流の平均水深である。左辺第1項は特定地点での水温の時間変化をあらわし，左辺第2項は河川水温が流下方向に温度勾配をもち，流れがあることによって生ずる項で移流項とよばれる（新井・西沢，1974）。秒，分，時間単位でこの方程式をとらえた場合，流量，河幅，河床勾配等によって決定されるvおよびDは長時間スケール要因に属し，規制要因として固定してとらえることができる。また日単位，たとえば日平均水温を考えた場合，短時間スケールに属するθは$\partial\theta/\partial t = 0$となり，左辺第1項は無視できる。

したがって，yとx_1，x_2，……，x_nの関係が$y = f(x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n)$として表わされた場合，$y$の時間スケールにおいて$x_i$は，同時間スケールで変化する要因か，もしくはより長い時間スケールで変化する要因かである。同時間スケールで変化する要因とは，$\partial x_i/\partial t \neq 0$であり，現象の誘因となる。これに対して，長い時間スケールで変化する要因は$\partial x_j/\partial t = 0$であり，現象の素因を形成する。

小出（1955）は，著書「山崩れ」のなかで次のように書いている。“山地が森林でおおわれているから，その山地の表土層が安定している，とよくいわれる。しかし表土層，つまり土壌層が安定しているからこそ森林がたち得えるし，また実際たっている，という逆説こそが可能であることを忘れてはならない。”原因と結果の逆転である。山体の安定，森林の存在，表土の

安定，種子の侵入のそれぞれについて時間スケールを考えた場合，山体の安定は 10^2～10^3年，森林の存在は 10^1～10^2年，表土の安定は 10^0年，種子の侵入は 10^{-1}年程度であると思われる。先に述べたように，長い時間スケールで変化する要因にとって短い時間スケールで変化する要因は影響を与えない因子であり，逆に短時間変化要因にとって長時間変化要因は素因となる。つまり，種子の侵入に関しては，山体も含めてまず表土の安定が必要である。森林の存在については山体の安定が必要で，表土は相対的に重要でなくなる。むしろ，森林の存在によって表土は安定すると解釈すべきである。

山地河川における河床横断形は，過去の土砂移動によって形成された段丘状を呈している。したがって，これから発生する土砂移動は図－6に示すように，これら過去の地形に規制を受けながら，新しい横断形を形成していく。すなわち，段丘状地形そのものは過去の河床変動によって形成された“結果”であるにもかかわらず，これから発生する現象に対しては初期境界条件として作用する。そして，低頻度・大規模変動によって形成された段丘状地形（N年堆積地）はそれより高頻度・小規模変動を強く規制することになる。逆に言えば，小規模変動によ



図－6　洪水規模と河床地形

Fig. 6. Magnitudes of floods and cross-sectional shapes of riverbed. In case A, M-terrace deposit forms the boundary condition, while this deposit becomes moving material in case B. Similarly, N-terrace deposit forms the boundary condition in case B and becomes moving material in case C.

って形成された微地形（M年堆積地）は，大規模変動にとって無視できる要因になってしまうのである。したがって，ケースAでみられたような平常時の流水においては，M年堆積地は規制条件として働くが，ケースBではむしろ移動土砂となる。これに対し，N年堆積地はBで規制条件となり，Cでは移動対象となる。結果的に，Cにおいてのみこの渓床区間は拡幅部として作用する。

本質を見誤った結論を導かないためにも，現在研究対象としている現象とこれをとりまく要因の時空間スケールを明らかにすることが肝要であり，これにより，原因と結果は明瞭になると思われる。

4. プロセスとパターン，そして定常性

プロセス(process)とは日本語に翻訳すると，「手順，過程，進行」などの言葉が当てはまり，パターン(pattern)とは「模様，様式，原型」などを示す。すなわち，プロセスとは時間的変化過程を意味し，パターンとは空間的分布様式を意味する。定常性(stationary-state)という言葉は，時間的に変化しない状態を意味しており，定常性を獲得した段階で平衡(equilibrium)に達するとよぶ。この点は，プロセス，パターン双方にあてはまり，現象の定常性，(確率)分布の定常性が多くの分野で議論されている。

たとえば，生態学でいう遷移系列のなかの極相概念がそれであり，筆者にはやや難解な概念である。極相(climax)に関する定義として，沼田（1979）は著書「生態学方法論」のなかで“生物共同体の遷移における成熟期ないし安定期を意味し，語源的には気候に由来する。……”と説明している。Clements（1916,1936）に代表される単極相説(monoclimax)，Tansley（1920,1935）に代表される多極相説(polyclimax)は，プロセスとしての遷移変化系列における最終段階として極相を定義しているようであり，Whittaker（1953）に至っては，“群落を構成する個体群は環境の変化によって変動するので，極相植生は環境傾度によって変わる個体群のパターンとして認識される。”という極相パターン説(climax pattern hypothesis)を展開している。

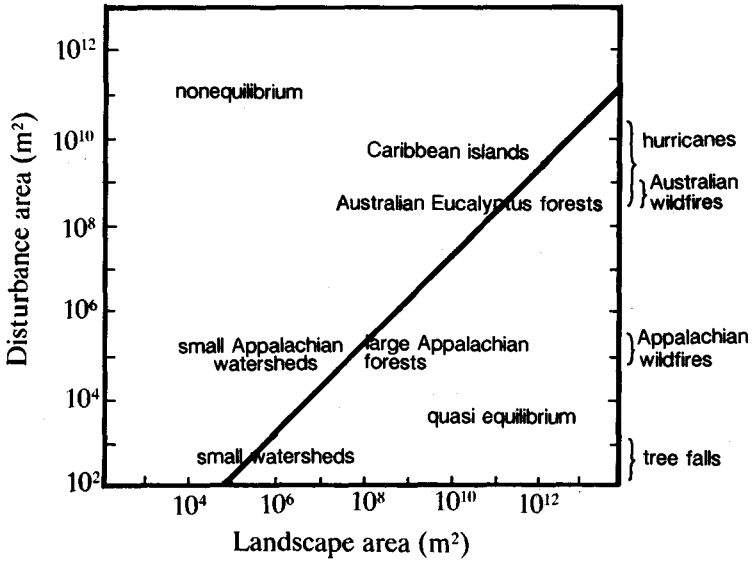
近年では，日本の縞枯山研究（甲山,1984）にみられるように，ギャップ形成と森林の更新を問題とした研究が多い（中静,1984；山本,1984；中静・山本,1987)。これらの研究は，ギャプ形成から成熟に至るまでの時間的変化を論じているが，それと同時に空間的分布状態も検討している。そして“森林が発達段階の異なるパッチのモザイクからなるとき，現存量や生産力の空間的分布もモザイクとなる。十分広い面積で考えれば，現存量や生産力の高低が相殺されて，わずかな変動をしながら一定の値を保つ（中静・山本,1987)”としている。この概念はBorman & Likens（1979）によって提示されたモザイク平衡(shifting-mosaic steady state)であり，明らかに空間的分布の定常性を述べている。“環境と動的平衡を保っていわゆる安定相を示すならば，これも極相（沼田,1979)”といえ，これがプロセス，パターン双方についてあて

はまるのであれば，近年論じられている極相概念は，パターンの定常性を意味しているようである。

植物群落変化のプロセスとパターンの問題は，遷移と「すみわけ」として議論されているが（沼田,1977），学説によって展開することができる時空間スケールが明確にされていない点に最大の問題があるように思える。さきのモザイク平衡においても，モザイク平衡を規定する“十分広い面積”とは一体どの程度の空間を意味しているのか，きわめて不明瞭であり，誤った理解は誤った適用，批判を生む。

この点に関してShugart & West（1981）は，撹乱(disturbance)と空間スケール，そして平衡状態に対しての考え方を提示した。（図－7）。10^6m^2程度の小面積森林地区を想定した場合，枯死・倒木に伴うギャップ形成（10^2～10^3m^2）に関しては空間的モザイク平衡を保つことができるが，10^8～$10^{10}m^2$程度で発生する山火，台風等の大面積撹乱に関しては，劇的に変化することになる。そして成熟した森林が，生物量平衡状態に近づくためには，倒木等の小規模撹乱に反応する50から100のパッチを含まねばならないとしている。すなわち，撹乱の空間スケールが増大すれば地域的変動を平均化するためにさらに大きな面積が必要になる。

こうした問題は，場の安定性・不安定性の議論ともかかわりあってくる。たとえば，地すべり現象がそれである。個々の地すべりに注目すると，地すべり現象とは不安定な状態にある



図－7 撹乱面積と定常性を仮定することのできる空間規模（Shugart and West, 1981）

Fig. 7. Some forested areas are too small to reach quasi equilibrium because they are subject to large-scale disturbances. A small watershed can be relatively unaffected by the fall of a tree, but drastically altered by a massive fire (Shugart and West, 1981).

土塊が安定した状態に移行することを意味する。すなわちプロセスとしては，不安定から安定であり，滑り発生後の土塊は他の不安定要素が加えられるまで安定状態を保つことができる。これに対して，地すべりの分布パターンを2流域に関して比較した研究例では，年代の若い地すべり地が広く分布する流域を，古期地すべりが分布する流域に比べて，相対的に不安定な流域と理解している。個々の現象としてとらえるか，全体としてとらえるかによって安定・不安定の意味づけが変わる。ここでの問題点は，安定性・不安定性の比較がどの程度の時間スケールで論じられているか。また個としてのプロセスもしくは全体としてのパターンに注目しているかである。基本的には，あとでのべるスケール概念によって問題点は整理されると思われる。

5. スケール概念と野外科学

1) 各学問分野におけるスケール概念

物理的現象に関する時空間スケールの問題，および構造(structure)としてのレベル概念については，地理学・地形学の分野において歴史的に議論され，生物的現象については生態学において論じられている。また，近年にあっては林学の分野においても提言されている。

地理学におけるスケール概念の問題は，すでに表－1に示したようにSchumm (1971) によって提起されている。彼は，いわゆる河川工学と地形学における時間スケールの重要性の違いに端を発し，実験科学的手法と野外科学的手法によって導かれた結論の対立について説明を与えている。"実験水路における測定流砂量は，流水の速度，水深そして水路形，水路勾配に左右される。しかしながら，自然河川においては長い時間スケールでとらえれば，平均流量，平均流砂量は河川形態を決定する独立変数である。"すなわち実験においては，流砂量は勾配等の実験条件に規制される従属要因であり，一方，長い時間スケールの野外調査では平均流砂量が河川形態を変えてゆくことになる。

近年の河川工学と地理学における河川縦断面形の説明に関しても同様の問題点がうかがえる（池田ら,1986)。沖積河川の縦断形は上方に凹型の曲線を描くことが多い。その理由として地理学では，河床砂れきが流送過程でこなれて小さくなることをその主原因とし，これを「磨耗説」と呼ぶ。すなわち，粒径に応じて縦断勾配が形成されると考えるのである。これに対し河川工学では，粒径が下流方向へと小さくなるのは掃流力の低下によるもので(「選択運搬説」)，現在の河川縦断形は非平衡状態にあるとするものである。地理学では粒径が原因で縦断勾配が結果であるのに対して，河川工学では縦断勾配が原因で粒径分布はその結果であると考えられており，両者の論理は逆転する。筆者はこの問題の論点が，Schummが例示したのと同様，研究対象としている時間スケールの違いにあると思われる。それと同時に，沖積河川のれきが河口に運搬されるまでの時間，さらに石れきが磨耗されるのに要する時間が明確にされない以上，主従を解決するのは難しいと考える。

このほかにも，時空間スケールの問題について地理学で議論された例は多く，地形種につ

表－2　規模による地形種の分類とその例（鈴木，1988）
Table 2. Geomorphic types classified by spatiotemporal scales (Suzuki, 1988)

類型名		超微地形	極微地形	微地形	小地形	中地形	大地形	巨地形
地形種の規模		10 m	100 m	1 km	10 km	100 km	1000 km	
主要な形成営力別の地形種の例	変動地形	噴砂丘	縦ずれ断層崖 地割れ	撓曲崖	横ずれ断層崖 断層角盆地	山地，丘陵 地塁，地溝 曲降盆地	弧状列島 楯状地 中央海嶺	大陸 大洋底
	火山地形	熔岩ジワ 噴気孔	熔岩堤防	火口，砕屑丘 熔岩円頂丘 マール	成層火山 カルデラ 熔岩流原	楯状火山 火山群 火砕流台地	熔岩台地	
	河成地形	瓶穴，砂漣	礫堆，砂堆， 泥堆，河道 落堰	自然堤防 後背低地 河川敷	扇状地，蛇行 原，三角州 谷底低地	河成低地 河成段丘		
	海成地形	カスプ，浜崖	浜，礫， バー，トラフ	浜堤，波蝕棚 堤間低地	堤列低地 潟湖跡地	海成低地 海成段丘		
	集団移動地形	落石孔	土石流堆 崖錐，滑落崖	沖積錐 地滑り地形				
地形物質の厚さ		1 m	10 m	100 m	1 km	10 km	100 km	
対応する地層区分			葉層	単層	部層	累層・層群	累層群	プレート
形成時間		数秒～数時間	数分～10^2年	数時間～10^2年	数年～10^3年	10^2年～10^4年	10^4年～10^6年	10^7年～
形成過程の複合性による階層区分			単成地形	単式地形	複式地形	複合地形	多重合地形	
						重合地形		
読図用地図の縮尺		10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	

注：類型間の破線は規模などが漸移的であることを示す。数値は目安である。

いて鈴木（1988）が整理した事例を表－2に紹介した。

明確にレベル概念を導入し，生物のあり方を問題にしているのは生態学であろう。生態学におけるレベル概念は，3つないし，4つの階層に区分することができる。個体(individual)，個体群(population)，群集もしくは共同体(community)，そして生態系(ecosystem)である。これらは，いわゆる生物学でいう細胞，組織，器官という系列に続くもので，空間的に拡大していく。沼田（1979）は生物レベルの認識の必要性について次のように述べている。“要するに，レベル認識というのはレベルに応じた法則性のちがいを具体的に追求すること，下のレベルでえられた知識を上のレベルに機械的に拡張することの危機を教えるところに重要な意義があるといえよう。”筆者も同意見であり，この点については実験科学と野外科学の違いに関連して後述する。

近年生態学で展開されている“階層概念(Hierarchical Concept)”はこれまでの生態学における先のレベル認識を批判し，より基本的より包括的概念として，時空間とくに時間スケールに基づくレベル概念規定を行おうとしている。こうしたレベル概念は Landscape Ecology (Forman & Gordon,1981)へと受け継がれ，環境の基本的な要素としての物理的現象と，主体である生物との関係をキロメータースケールの空間でとらえようとしている(Noss,1984;Urban

et al.,1987)。一例として，Swanson（1980）によって示された外部発生的要因(Exogenous events)，地形的変化(Geomorphic variation)，植生変化(Vegetation variation)と時間スケールの関連性を表－3に示した。

表－3　地形・植生変化と外部発生的要因の時間スケール区分（Swanson, 1980）

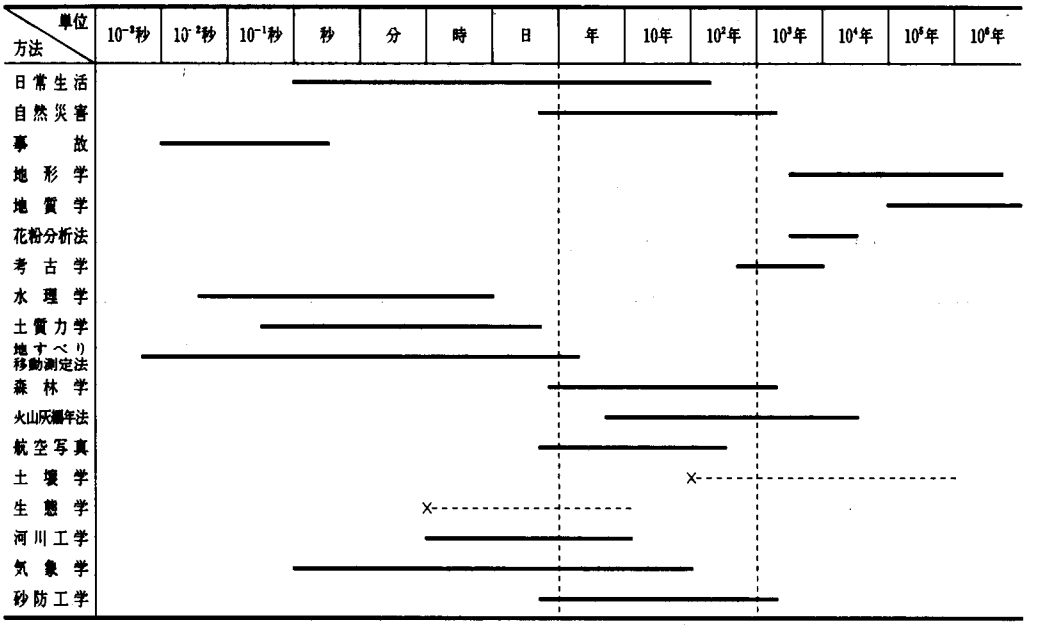
Table 3. Geomorphic and vegetative variation and exogenous events affecting ecosystems and landscapes on an array of time scales (example from Douglas-fir/western hemlock forests in Cascade Mountains, Oregon) (Swanson, 1980).

Event frequency (yrs)	Exogenous events	Geomorphic variation	Vegetation variation
10^{-2} to 10^{-1}	Precipitation-discharge event		
		"Base-flow" erosion by noncatastrophic processes	Physiologic response of individual plants
10^{0} to 10^{1}	Annual water budget, moderate storms		
10^{2}	Extreme storms, major disturbances of vegetation (e.g., fire)	Periods of accelerated erosion—slide scars, channel changes, etc.	Secondary succession
10^{3} to 10^{4}	Climate change, glaciation	Intermediate-scale landforms ; terraces, fans, moraines, etc.	
			Primary succession, migration,
10^{6}	Episodes of volcanism	Gross morphology of major drainage and constructional (volcanic) landforms	microevolution
10^{7} to 10^{8}	.....	Development of physiographic province as a whole	Macroevolution

林学において東(1979)は，砂防工学，林学における時空間スケールをそれぞれ10^{0}～10^{2}年，km²そして10^{0}～10^{2}年，haとし，他の学問分野との違いを明瞭に示している（図－8）。東は，“地形学・地質学・花粉分析・考古学では，時間単位が大きく，一方，水理学・土質力学・地すべり移動測定では，ミクロな時間単位の観測となっている。これに対して，森林学・火山灰編年法・航空写真は，人間の歴史をやや上まわった判断の材料を提供し，河川工学・気象学・砂防工学では，人間の制御できる範囲の営為としての時間単位になっている。”と述べている。そして，現実的な地表変動に必要な情報は，生活体験，樹木年輪・火山灰などの知識，航空写真判読，現地測量によって得られるとしている。

2）野外科学と実験科学

主として，野外科学において時間スケール概念が議論されてきたと考えるのは，筆者が実験科学に関してあまり知識を持っていないからだろうか。筆者は，歴史科学として位置づけられる野外科学の特徴は時間概念の重要性にあり，この点が実験科学とは根本的に異なると考え



図－8　自然認識の時間単位（東，1979）
Fig. 8.　Time-scale to understand the natural phenomena (Higashi, 1979).

ている（中村,1987)。実験科学的手法の利点は“外界の条件をなるべく一定にして，ある現象をおこさせてみる（中谷,1958)”ことができる点にある。確かに自然界においては他の要因に隠されてしまっており顕著でない現象に関しても，他条件を固定することにより，実験ではより明瞭に再現できるであろう。

しかし，こうして導かれた定理を実際の自然現象にあてはめようとする場合，問題が起こる。第3章で示したとうり，自然界においてある時間スケールで生起する現象は，より長い時間スケールで変化する現象に規制されるからである。すなわち，こうした規制を取り払って実験を行った場合，これを満たす事例が例外的，つまり自然界では起こらない現象であれば，いくら厳密な理論を展開したところであまり意味がないのである。実験的手法は、ある時間スケールで変化する自然現象に関して構成要因の関連式を吟味するには，きわめて有効な手法であり，現場技術への応用も容易である。しかし，実験を行う以前に，野外観察・調査によって構成要因のスケールを明確にする必要がある。

以上のような結果，実験科学においては，構成要因が選択的に単純化されているため，構成要因の関連性すなわち連続式(Continuity equation)，運動方程式(Motion equation)の演繹的解明が中心課題にすえられる。野外科学においては，まず目的とする現象・対象の時間的変化・空間的分布を詳査することに重点が置かれ，構成要因の抽出，初期そして境界条件の決定がきわめて重要となる。

実験科学分野においては，時空間スケールを下げる，すなわち，よりミクロに，より微少

時間間隔で測定することによってのみ，本質に迫ることができると考えている研究者も少なくないと思われる。ところが，各要因が時間的に単独変化しない自然界においては，時間スケールの違いは構成要因そして因果関係の変化を意味し，単純に部分の解明が全体の解明につながるとは言えない。むしろ，複数要因の相互関係(interaction)によって，時空間スケールに応じた本質なり法則性があるとみるべきである。

6.時空間問題の整理

前章で述べたように，スケール概念は内容的には異なるが，野外科学を中心とした分野においてすでに導入されている。本章では，時空間問題を整理するため，筆者の考え方をまじえてスケール論を展開する。

1）時間スケール

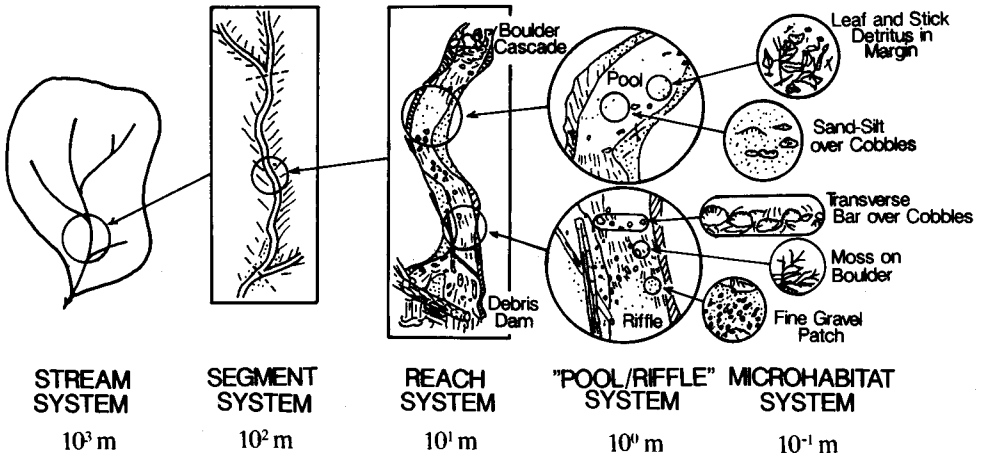
これまで述べてきたように，時間スケールの問題は現象の因果関係を決定する最も重要な概念であると考えられ，多くの情報を包括的に整理するための基準になる。O'Neill et al.(1986)は，時間スケールに基づく事象のレベル区分を提案し，“より高次のレベル(長い時間スケールで変化する）は低次のレベル（短い時間スケールで変化する）に影響を与えることができるが，逆はない。つまり，より高次のレベルは低次のレベルの反応に対して動かない障壁(constraint)のようにみえる。”と述べている。また Urban et al.（1987）は，“低次レベルの変動はきわめて速く，平均値としてとらえられるのに対し，高次レベルの変動は変数としてとらえるには遅すぎる。”と述べている。

筆者が考えているスケール論も同様で，“対象とする事象が時間に対して独立であるか，従属であるか”が問題となる。基本的に O'Neil, Urban らが述べているレベル概念と内容的には同じであると思われる。しかし，「構造」には階層性（レベル）が認められるが，「時間」には階層性がない以上，レベル概念とスケール概念は区別して述べなければならない。結局，ある時間スケールで生起する現象にとって，短い時間スケールで変化する要因は無視できるほど時間的変動幅が小さく長い時間スケールで変化する要因は，この現象の全体的傾向を決定する制限条件(constraint)を形成し，そして同時間スケールで変化する要因は，現象とともに変化する。

しかし，多くの現象を時間スケール上で統一的に考えてゆこうとする場合，すべての現象にあてはまる統一的スケール規定は存在せず，時間境界を見つけることはできない。したがって，秒，分，時間，日，月，年，10^n年という時間スケールを便宜的に設定する以外方法がないと考えられ，これにより整理するのが妥当であろう。当然，現象によっては先の時間スケール間の関係が厳密にはあてはまらない例があると思われるが，内容をより柔軟に解釈すれば，離れたスケール間における各要因の関係は変化しない。

2）空間スケール

空間スケールは，研究対象としている現象の空間的ひろがり（場）を規定する。図—9は，

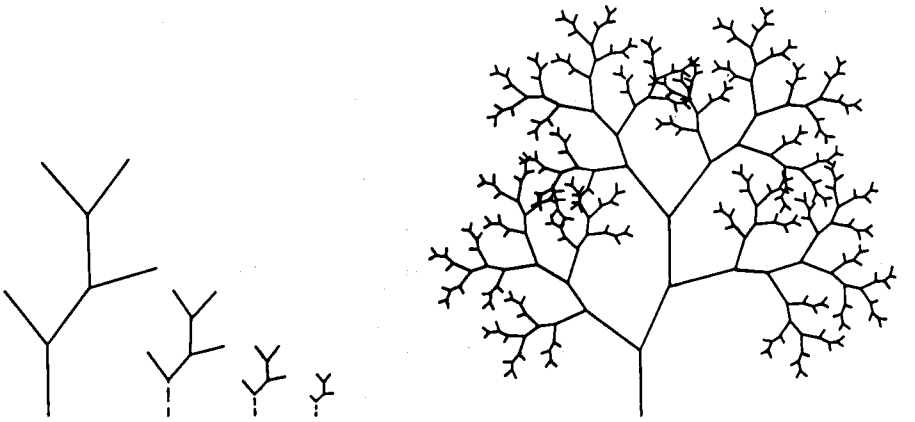


図—9 河川系に関する階層概念図 (Frissel et al., 1986)

Fig. 9. Hierarchical organization of a stream system and its habitat subsystems. Approximate linear spatial scale, appropriate to second- or third-order mountain stream, is indicated (Frissel et al., 1986).

Frissell et al. (1986) が示した河川系に関する階層概念図である。各空間スケールが，ちょうどカメラに装備されているズーム機能のように，左から右に描かれている。写真の種類でいえば，左から人工衛星写真，空中写真，気球写真，地上写真，接写写真となりそうである。彼らは，10^nm オーダーによって Stream, Segment, Reach, Pool/Riffle, Microhabitat とシステムを区分している。このような河川系の空間スケール区分が，河川を対象とするすべての研究に対して適当であるかどうかは，議論のあるところであり，基本的には対象とする現象に応じて，空間スケール区分が存在すると考える。しかし，自然界には，分水嶺など明瞭な境界が存在することも事実であり，スケール区分にあたっては十分考慮する必要がある。空間スケール区分は，パターンの分布状況を示しているだけで，時間概念が導入されていない限りいわゆる因果関係を探ることはできない。したがって，空間軸上における大空間スケール要因と小空間スケール要因の相互関係は，大スケール要因の部分が小スケール要因であるという以外，何も情報を提供しない。ちょうど，曼陀羅やフラクタル図形を見ているようなもので，小スケールによって作られる小図形の集合は大スケールのパターン図形を形成し，その集合はさらに次のパターンを形成する(図—10)。結局，実験科学分野の一部で行われているように，より小さなスケールを追求することによって全体に通じる単位パターン（本質）が認められることになる。

ところが，実際のパターンは時間軸上で変化しており，現在われわれが野外で観察できるパターンは時系列上の一断面である。この一断面は過去の現象の歴史的産物であり，決して瞬間・瞬間で形成されるものではない。すなわち，空間スケールは時間スケールに関連して位置づけられてのみ野外科学的意味をもつものと考えられ，単独に論ずることはできない。



図—10　フラクタル図形の一例（Stevens, 1987）
Fig. 10. An example of fractal structure (Stevens, 1987).

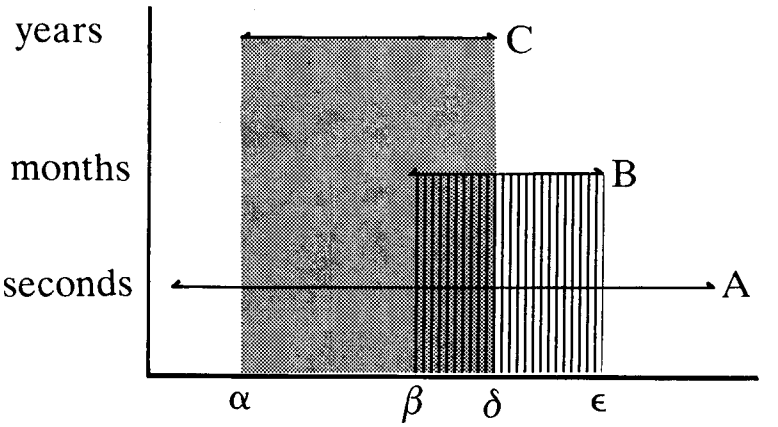
3）時間スケールと空間スケールの関連

時間的にゆっくり変化する現象は広い空間に及ぶのに対し，小刻みに変動する現象は小面積しか及ばないことは容易に想像できる。すなわち，長時間スケールの変動は大空間スケールに波及するのに対し，短時間スケールの変動は小空間スケールにおさまるという一般的特性を認めることができる。たとえば山火事という単一の現象に関して，頻度と規模の関係を調べればこの原理に従うと考えられるが，異なる現象を時空間スケールのなかで考えるときには必ずしもそうはならない。これは基本的に，現象に応じて変動周期・分布範囲が異なるためである。したがって，ある現象は短時間内に広い範囲にわたって影響を及ぼし（もしくは制限を受け）またある現象は長時間要しても狭い範囲しか影響を与えない（もしくは受けない）ことになる。

短時間で変化し，尚かつ大空間におよぶ現象を対象とする場合，空間スケール上で規制要因が変化する可能性があり注意を要する。この点に関し，概念的に示すと図—11になる。時間スケールより，AはBに規制を受け，BはCに規制を受ける。しかし，これらが分布する範囲は異なっており，時間スケール的に短いが，空間スケール的に広いA現象についてみると，$\alpha\beta$ 区間においてはC，$\beta\delta$ 区間ではBとC，$\delta\varepsilon$ 区間ではB，そしてこれより先の区間ではB，Cの規制を受けなくなる。

こうした例は，たとえば河川水温と河畔林の関係に認められる。河川の水温は1時間単位で大きく変動し，この変動は下流域までの広い範囲に及び，図—11ではAで代表できる。これに対して河畔林の河川水温に対する効果は，いわゆる樹冠によるカバー効果であり，開葉・落葉に伴い月変動すると考えてよい。したがって，Bと考えることができる。しかし，この効果も上流域（$\beta\sim\varepsilon$）では顕著であるが，下流域（$\alpha\sim\beta$）ではあまり影響しない。なぜなら，河幅が流域面積の増大に伴い拡大し，相対的に樹冠の影響を受けづらくなるからである。したがって多くの事象の関連性を調べる場合，まず空間分布パターンを検討し，同一空間を占める現象

についてその時間スケールを明らかにする必要がある。



図—11　空間スケール上での制限要因の変化

Fig. 11. Changes of constraints in spatial scale. Phenomena A, B, and C change in temporal scales of seconds, months, and years, respectively. Phenomenon A is constrained by C from α to β, by C and B from β to δ, by B from δ to ϵ, and is released from all constraints over the sections less than α and greater than ϵ point.

7. 方法論への展開

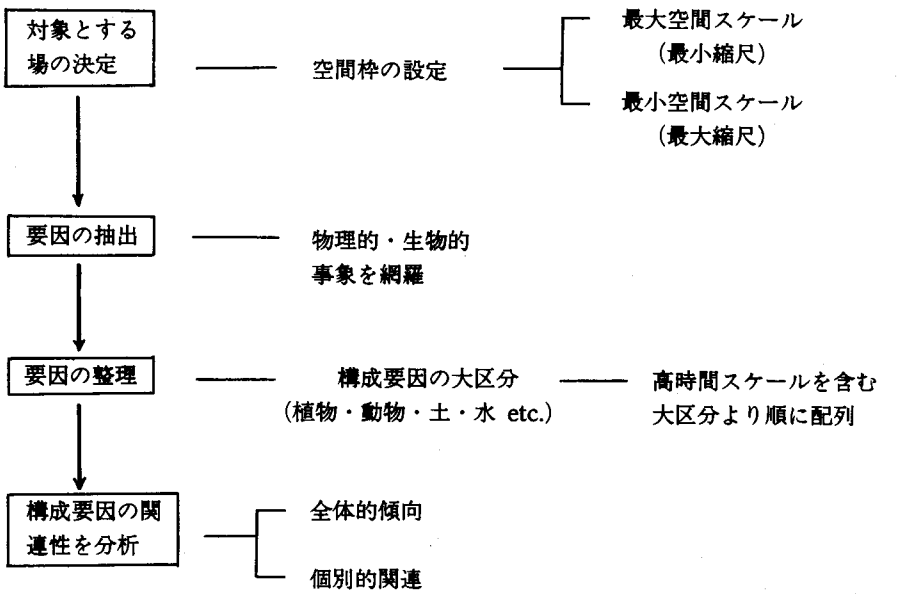
筆者が本論文を書くにあたり研究目的とした点は，第1章 問題提起で述べたように 1)単位，独立・従属，プロセス・パターン，定常性など科学的研究を行う上で見誤ってはならない諸因子を整理することであり，そして，2)「場」の科学として今後発展が望まれる森林科学，環境科学など，1つの場を多面的，多次元的に把握する際，有力な方法論を提示することである。特に筆者が強調したいのは 2) の観点であり，本章では事例をあげて方法論への展開を試みることにする。そして最後に，スケール論の技術学への応用について述べることにする。

1) 自然認識の方法

第1段階として我々が決定しなければならないことは，研究対象とする「場」であり，このことは空間スケールの決定を意味する。先の章で述べたように，一般論として広い空間スケールで発生する現象は，長い時間スケールに属する。したがって，同一空間スケールで認められる要因のみ抽出し議論することは，概して同一時間スケールに属する要因で現象の因果関係を捉えようとするようなもので，現象をとらえる際最も重要な制約要因としての長時間スケール要因，変動要因として考慮しなくてもよい短時間スケール要因に関する考察がぬける結果となる。本論の目的もいわゆる異なる時空間スケールで発生する現象を統一的・有機的に考察する点にあり，空間スケールを横断する「枠」を設定しなければならない。枠の設定とは，考察を試みる際の最大空間スケールと最小空間スケールを決めることであり，地形図によって表現

すれば最小縮尺と最大縮尺を選択することである。これにより，一定空間スケール（最大空間スケール，もしくは最小縮尺）で発生する現象のなかでどの程度の微小現象（最小空間スケール，もしくは最大縮尺）までとらえるかが決められる。ちょうど図－9において，どの空間スケールまで対象とするかを目的に応じて判断するようなものである。

第2段階は，第1段階で決定された空間枠内で発生する現象（要因）をできるだけ網羅し，これを時間スケールに基づき整理することである。すなわち，Schumm（1971）が示した表－1と同様の表を作成すればよい。もっともSchummは時間スケールとして3つ(Geologic, Graded, Steady)をかかげているが，筆者はさらに細かく秒(second)，分(minute)，時間(hour)…etc.と区分することにしている。またこれまでの議論で明らかなように，時間スケールに基づき整理することが，ある「場」に関与する要因の主従（因果）関係を示しており，Schummが行っているように時間的に独立であるか従属であるかを記する必要はあまりないと思われる。また表を作成する際，要因の内容に応じて分類し整理することが，より理解を深める上で重要である。たとえば植物，土，水など，構成要因の大区分である。またこうした大区分の配列は，より長い（遅い）時間スケールに属する要因を多く含んでいる大区分から順に配列するのが肝要である。なぜなら一見して，設定された空間枠内の自然がどのような要因により強く影響を受けているのかが明瞭に理解できるからである。結論的には，この種の表を作成することがスケール区分の最終目標となり，対象の違いにより学問的に分割されていた諸現象を有機的につなぐことができると考える。これまで述べてきた方法を，フローチャートにあらわすと図－12



図－12　時間スケール区分に関するフロー・チャート
Fig. 12. Flow chart for the classification of elements based on time-scale.

になる。以下，参考事例として筆者がこれまで主として研究を行ってきた河畔ゾーン(Riparian Zone)に関し，諸因子の時間スケール区分を行うことにする。

まず空間枠すなわち最大空間スケールと最小空間スケールを決定しなければならない。ここでは事例的に 10^2m～10^{-1}m オーダーを選出することにし，山地渓流を対象とする。この空間オーダーの河畔環境に関しては図－9にその概要が示されている。次に，時間スケール区分の基準単位として秒，分，時間，日，週，月，年，10年，10^2年，10^3年を用いた。そして構成要因の大区分としては，土，水，植物，大気，太陽光，動物（昆虫，魚類）とした。筆者なりに考えることのできる諸要因を，さきの大区分，時間スケールに応じて整理すると表－4のようになる。この他にもまだまだ多くの要因が欠けていると思われるが，参考例として理解していただきたい。

全体的に破線で示したように，各大区分が右下がり傾向に整理されており，河畔ゾーンもしくは河畔生態系を形成する諸要因のなかで，無機的環境である土，水要因が主体を成しているのがわかる。植物区分は土・水という無機的環境に規制(constrain)を受けながら存在している。しかし，植物は枝葉のカバー効果によって河畔ゾーンの気温・日射量に関与し，ひいては

表－4　河畔林ゾーンに関する諸因子の時間スケール区分
Table 4. Time-scale classification of elements existing in riparian zone.

単位	土	水	植物	大気	動物（魚・昆虫）	太陽光
10^3 年	大規模斜面変動					
10^2 年	中規模斜面変動 （崩壊・地すべり）	大洪水				
10 年	小規模斜面変動 （侵食・クリープ） 高位段丘状堆積地 河幅 河床勾配 mオーダーれき移動	中洪水				
年	低位段丘状堆積地 河幅 10cmオーダーれき移動	洪水	河畔林の形成・破壊 倒木			
月	融雪に伴う土砂流出 cmオーダーれき移動	融雪出水 月平均水温 瀬と淵の形成	木本・草本種子散布	月平均気温 強風	魚類遡上・産卵 水生昆虫生活史	月平均日射量
日	降雨に伴う土砂流出	降雨出水 日平均水温 （晴・曇・雨）	開葉・落葉	日平均気温 （晴・曇・雨）	魚類移動 水生昆虫孵化	日平均日射量 （晴・曇・雨）
時間		水温時間変動（24h）	光合成・蒸発散	気温変動（24h）	魚類採餌	日射量変動（24h）
分	ウォッシュ・ロード流出					日射量変動（雲）
秒			枝葉の移動（風）	風		日射量変動 （枝葉による遮断）

水生昆虫・魚類等の生物相に影響を及ぼす。

個別的には，たとえば10年オーダーで発生する崩壊現象が河道をせき止め，上流部に魚類生息環境としての池を形成したり，10 cm オーダーの石れきが移動する年オーダーの河床変動（土石流など）が，魚類の生息環境の形成・破壊に多大な影響を与える事例，河畔林により浮遊砂，細粒の掃流砂などが捕捉される事例など多々読み取ることができる。

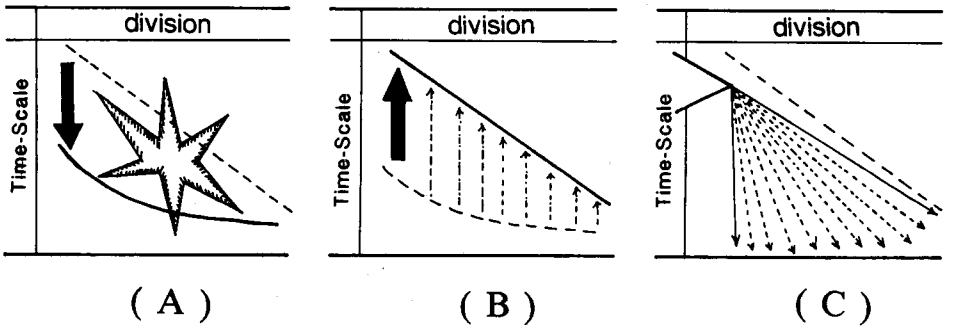
しかし，より最小空間スケールに近づくほど，構成要因は実地渓流において空間的に「すみわけ」ているケースが多く，単純に長時間スケールにある要因がすべて短時間スケールの要因を規制しているとは限らない。図—11に示したように，空間スケールを横断して議論する場合，この点に注意しなければならない。ここに提示された時間スケール区分は，多くの情報の関連性を総合的に捉えるためのいわば基礎であり，個々の時空間スケールに位置する現象の関係式を探るためには，隣接した上下時間スケールに属する複数要因に関しフィールドにおける詳査が必要となろう。

2）技術学への応用

自然界における物理的・生物的大変動は，これまでの豊かな景観を一掃し，多くの場合，多様性(diversity)のない無機的環境を創り出す。北海道で記憶に新しい1977年8月7日の有珠山大噴火は，これまで緑で覆われていた火山山麓をまたたく間に灰の海とした。多くの動植物は灰の下に埋もれ，日常的な雨でも表面侵食，斜面崩壊が多発，土砂災害の危険性は増大した。これまできわめてゆっくりと動いていた地表変動が，噴火というイベントを境に急激に加速化されたのである。ちょうど，表—4の土の項，時間スケール10^2年もしくは10年に記入されている要因が，噴火によって月もしくは日スケールまで押し下げられたのである。これまで述べてきたように，長時間スケールの要因は短時間スケールの要因を規制する以上，長時間スケールの要因が短時間スケールに移行したとき，場を共有している他の要因は消滅する（図—13（A））。噴火後の有珠山砂漠化の様相がこれである。

こうして荒廃した有珠山に，緊急治山・砂防工事が着手され，再び緑に覆われた。現在見られる有珠山には，過去のつめあとを認めることすらできないほど，自然は豊かさをとりもどした。我々のこうした技術は，噴火後短時間スケールに移行した変化要因を長時間スケールまで押し上げることであり，規制すなわち環境圧(environmental stress)が取り払われた多くの要因は復活する（図—13（B））。

人間が自然界にある技術を行使する場合，また人間によってある自然要因が除去される場合，これをとりまく様々な要因に多大な影響を与えることは，これまでの議論より明かである。そして，これらの影響は決してプラス面のみではない。自然界に付加された技術が長時間スケール，さらに大空間スケールに属するならば，同じ場を共有するこれより短い時間スケールで変化するすべての要因に対して，規制を加えることになる（図—13（C））。たとえば，近年のコンクリート構造物に代表されるように，その技術が多大であればあるほど，また永久的であ



図—13 自然攪乱・人為技術と時間スケール問題
(A) 自然攪乱 (B) 復元事業 (C) 人工構造物設置

Fig. 13. Influences of natural disturbance and human technology based on the time-scale concept.

(A) Natural disturbance: Natural disturbance presses long time-scale elements down to shorter scale and it causes extinction of other elements.

(B) Rehabilitation work: Rehabilitation work raise shorter time-scale elements up to longer scale, and other elements which were previously depressed are then released from the environmental stresses.

(C) Man-made structure: Man-made structure can be classified into time-scale based on its life span. Constructing this kind of structure in the natural field is interpreted as adding the artificial element into the previous structure. Consequently, this effect spreads over the shorter time-scale elements.

ればあるほど，影響は絶大なものとなる。これまでの技術は，単一目的を達成するために駆使されてきた感が強いが，これからの技術は単一目的はもちろんのこと，技術を施工したことにより周りの環境がどう変化するかを念頭に置く必要がある。

おわりに

本研究は経験の少ない筆者が，大胆にも自然科学における方法論を論じたもので，筆者自身まだ整理されていない点が多く残されている。また方法論的にも不明瞭・不正確な点が論旨の各所に認められ，まだ論文として提出するには時期尚早と考えられた。

しかし，「森林科学」「環境科学」とは一体何なのか，その方法論はいかなるものかという問いは筆者自身のなかでますます大きくなり，この時点で未熟な考えをまとめておくのが良いと思われた。本論文は，当初「レベル」と「スケール」という言葉が混同して使われており，北海道大学農学部附属演習林石城謙吉教授より“自然界の「構造」には階層性（レベル）が認められるが，「時間」「空間」には階層性はない。”という明快な指摘を受けた。筆者なりにこの点について修正を加え，スケール論としてまとめたつもりであるが，尚問題点が十分に整理されているとは言い難い。石城先生に深謝の意を表すると同時に，多くの方々の御指導，御批判

を心からあおぐ次第である。

最後に，この論文をまとめるにあたり，筆者の考え方に疑問点，問題点を指摘してくださり，多くの助言をいただいた林業試験場北海道支場の坂本知己氏，また普段より筆者との議論につきあってくださった北海道大学農学部林学科，とくに砂防工学研究室の院生・学生諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

1) 新井　正・西沢利栄（1974）：水温論．水文学講座 **10**，共立出版，47-143.
2) Borman,F.H. and G.E.Likens (1979) : Pattern and process in a forested ecosystem. Springer-Verlag, New York, 253p.
3) Forman,R.T.T. and M.Godron (1981) : Patches and structural components for a landscape ecology. BioScience, **31-10** ,733-740
4) Frissell,C.A. ,W.J.Liss ,C.E.Warren, and M.D.Hurley (1986) : A hierarchical framework for stream habitat classification-Viewing streams in a watershed context. Envir.Manage., **10-2**, 199-214.
5) 東　三郎（1979）：地表変動論．北大図書刊行会，280p.
6) 池田　宏・伊勢屋ふじこ・飯島英夫（1986）：実験水路に形成される河川の縦断形．筑波大学水理実験センター報告，**10**，115-123.
7) 川島茂樹（1988）：豊平川上流域における浮遊砂流出に関する研究．北大農学部修士論文，83p.
8) 甲山隆司（1984）：亜高山帯シラビソ・オオシラビソ林の更新．遺伝，**38-4**，67-72.
9) 小出　博（1955）：山崩れ．古今書院，205p.
10) 中村太士（1988）：河川の動態解析に関する砂防学的研究．北大演研報，**45-2**，301-369.
11) 中静　透（1984）：ブナ林の更新．遺伝，**38-4**，62-66.
12) 中静　透・山本進一（1987）：自然撹乱と森林群集の安定性．日生態会誌，**37**，19-30.
13) 中谷宇吉郎（1958）：科学の方法．岩波新書，212p.
14) Noss,R.F. (1984) : A regional landscape approach to maintain diversity. BioScience, **33-11** ,700-706.
15) 沼田　真（1977）：群落の遷移とその機構．朝倉書店，植物生態学講座 4，74-88.
16) 沼田　真（1979）：生態学方法論．古今書院，393p.
17) O'Neill,R.V., D.L.DeAngelis, J.B.Waide, and T.F.H.Allen (1986) : A hierarchical concept of ecosystem. Monographs in Population Biology, **23**, 253p.
18) Schumm,S.A.(1971) : Fluvial Geomorphology in River Mechanics (H.W.Shen,Ed.). Water Resources Pub., Fort Collins,Colo. ,chapter4.
19) Shugart,H.H. and D.C.West (1981) : Long-term dynamics of forest ecosystems. Amer. Sci. **69**, 647-652.
20) Sollins,P., G.Spycher, and C.Topik (1983) : Processes of soil organic-matter accretion at a mudflow chronosequence, Mt.Shasta,California. Ecol. **64**, 1273-1282.
21) Stevens,P.S. (1987) : 自然のパターン―形の生成原理（金子務訳）．白揚社，279p.
22) 鈴木隆介（1988）：地形形成論．北海道大学大学院地球物理学専攻「特別講義」資料.
23) Swanson,F.J. (1980) : Geomorphology and ecosystems. in "Forests: Perspectives from Ecosystem Analysis.", Proc. **40th** Annual Biology Colloquium 1979, 159-170.
24) Urban,D.L., R.V.O'Neill, and H.H.Shugart,Jr (1987) : Landscape Ecology — A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns — , BioScience, **37-2**, 119-127.
25) 山本進一（1984）：森林の更新―そのパターンとプロセス―．遺伝，**38-4**，43-50.

Summary

The need for the development of synthetic disciplines such as "forest science" and "environmental science" has been increasing, and therefore, the methodology for the synthesis of disparate disciplines should be developed, as opposed to the methodology for separation and/or division. To merely arrange information from various fields in a row is not sufficient for understanding the characteristics of the natural world. The author has hypothesized that temporal and spatial scales for each phenomenon are the key to the successful synthesis of diverse data, and this point is the main subject of this paper. The outline of the contents is as follows:

1) The basic sequence of study for field sciences is to first survey the objective phenomenon in the field, then arrange and analyze the obtained data, and finally estimate past or future states based on the analyzed results. Temporal and spatial scales involved with the above three stages are used to overcome the problems of determining the surveying interval, the total range of obtained data, the dimensions of the data, and the process of inter- and/or extrapolation from the results (Fig. 1~5).

2) When one studies a phenomenon, many elements considered to be related to this phenomenon are selected for discussion. However, which elements should be included in the formula because $\partial v/\partial t \neq 0$ (where v is a given variable, t is the time)? Which elements can be ignored because $\partial v/\partial t = 0$? Which elements should be considered as constants in the formula in spite of $\partial v/\partial t = 0$? The above questions determine which elements are dependent or independent variables in a given temporal scale (Table 1).

3) When phenomenon y is explained by $x1, x2, \cdots, xn$ elements as $y = f(x1, x2, \cdots, xn)$, the element xi changes over the same temporal scale, while the element xj changes over a longer temporal scale than phenomenon y. The element xi, which changes over the same temporal scale ($\partial xi/\partial t \neq 0$) becomes an occasion for the phenomenon, that is, it co-occurs with the phenomenon, while the element xj, which changes over a longer temporal scale ($\partial xj/\partial t = 0$) becomes a cause of the phenomenon (Fig. 6).

4) Processes and patterns regarding vegetation have been discussed in ecology, and the ideas used to explain them are represented by "succession" and "habitat segregation". However, the temporal and spatial scales in which these theories can be applied are not clear. For instance, how large an area and how long a time are needed to reach a state of equilibrium? Theories that are vague with regard to time and space tend to be misunderstood and lead to unjustified criticism (Fig. 7).

5) The scale problem and level concept have historically been discussed in geography (for physical phenomena) and in ecology (for biological phenomena). Recently, this matter has also been discussed in the forest sciences. Consideration of a phenomenon using the level concept involves the investigation of the differences between the natural laws operating at each level. The level concept is used to avoid the danger of extending knowledge obtained at lower levels to upper levels without caution (Table 2~3, Fig. 8).

6) The most important thing in the investigation of natural phenomena is whether an objective phenomenon is dependent on or independent of time. Consequently, for a phenomenon occurring on a given time-acale, the elements changing over a shorter time-span create fluctuation too small to take into consideration, while the elements changing over a longer time-span create constraints which determine the total trend in the manifestation of the phenomenon being investigated. The elements belonging to the same time-scale vary with the phenomenon.

7) The bilateral relationship between elements in large and small space-scales involves a condition where a part of the large scale element is equal to the whole of the small scale element (Fig. 9～10).

8) Generally, elements of a longer time-scale belong to a larger space-scale, and those of a shorter time-scale belong to a smaller space-scale. However, this is not necessarily true in all cases, because each phenomenon can be distributed over different sites of different sizes. Consequently, some phenomena influence a large area over a short period, while some phenomena influence only a small area over a long period (Fig. 11).

9) Methodologically, the first thing we have to determine is the spatial range from the minimum to the maximum. This will show how the samll elements (minimum space-scale) are distributed among the many larger elements occurring within a given area (maximum space-scale). Secondly, many phenomena occurring in a given spatial range should be given a "large" classification (vegetational, edaphic, aquatic factors, etc.) and arranged according to their time-scale in order to understand the synthetic relationships found among the many elements (Table 4, Fig. 12).

10) Rehabilitation or conservation work raises specific elements having short time-scales up to larger scales, and other elements which were previously depressed are then released from the environmental stress induced by natural or artificial disturbances (Fig. 13).