

特別講演：座長 坂本和彦

(全国環境研協議会会長＝埼玉県環境科学国際センター総長)

熊本地域における広域地下水流動の実態と その持続的管理を目指した取り組み

嶋田 純

(熊本大学大学院自然科学研究科 教授)



1. はじめに

温暖化に伴う降水量変化に起因する地表水の流量変動の増大に対し、広大な地下水帯水層はバッファ的な効果が大きいため、相対的に安定した水資源として注目されるようになってきている。湿潤温帯に属するわが国の水循環はきわめて活発で地下水も相対的に速い速度で循環していることが知られているが、地表水に比べるとその滞留時間は長く、汚染に対する脆弱性も相対的に大きい。そのため、地域地下水の流動場としての帯水層の全貌の把握とその流動特性を踏まえた適確な利用をめざすことが求められている。

1960～90年代に3大都市圏のある関東・大阪・濃尾地域で経験した地下水の過剰揚水に伴う地下水頭低下が引き起こした大規模な地盤沈下とそれに対する対策として実施された広範囲の揚水規制による急激な水頭回復の実態を顧みると、わが国のような湿潤温帯においては十分な地下水涵養量があるため、地下水帯水層の構造とその循環様式・水収支を詳細に把握し、それを基に適確な揚水量と涵養量の管理を行うことで、その水量の持続的確保が可能であることが確信される。

地下水の過剰揚水に伴う地下水頭低下が引き起こした地下水災害に対する揚水規制とその効果による水頭回復という一連の人為的な地下水変動は、日本の3大都市圏だけではなく、実はモンスーンアジアの主要な沿岸大都市(台北、上海、マニラ、ハノイ、バンコク、ジャカルタ等)でも確認されている。これらの諸都市の中で、日本を含むアジア沿岸の都市のいくつかで揚水規制が成功した背景には、沿岸アジア特有の水文気象特性

(潜在的な地下水涵養能力)が存在するためと考えられる。モンスーンアジア域での地下水問題は、実効的な揚水規制さえ整えば解決できる余地があり、さらに有効な可能地下水涵養量を効果的に利用した持続可能な地下水管理を行うことで、地域の地下水資源を持続的に有効利用できる可能性を示している(嶋田(2010)¹⁾、嶋田(2011)²⁾。

わが国では国レベルでの統一した地下水資源管理のしくみを作るよりは、地下水を積極的に利用している地域レベルの個別管理制度や条例等を制定して、地下水資源管理を行っていく方がスムーズで実効性のある展開が望めるのではないかという雰囲気は漂っており(日本水文学会(2010)³⁾)、その先駆けとして熊本地域でのユニークな地下水管理の取組みが知られている。ここでは、熊本地域における地下水流動の実態とそれを踏まえた最近数年間の新たな地下水管理に向けたしくみ作りの紹介を試みる。

2. 熊本地域の水利地質と地下水流動系

図1に示すように、熊本地域の第四紀層の大半は阿蘇火砕流堆積物で、基盤岩類や安山岩を覆い、台地部では火砕流台地を形成している。火砕流台地は河川によっていくつかの台地に分断され、一部の台地は段丘堆積物に覆われている。第四紀層の大半を占める阿蘇火砕流堆積物は、噴出時期の違いにより大きく4つに区分される。これらは、堆積時期の古いものから順にAso-1、Aso-2、Aso-3、Aso-4と呼ばれている。

これらの火山起源の地層は、熊本地域の帯水層を構成する主要な地層で、河川の沖積堆積物から

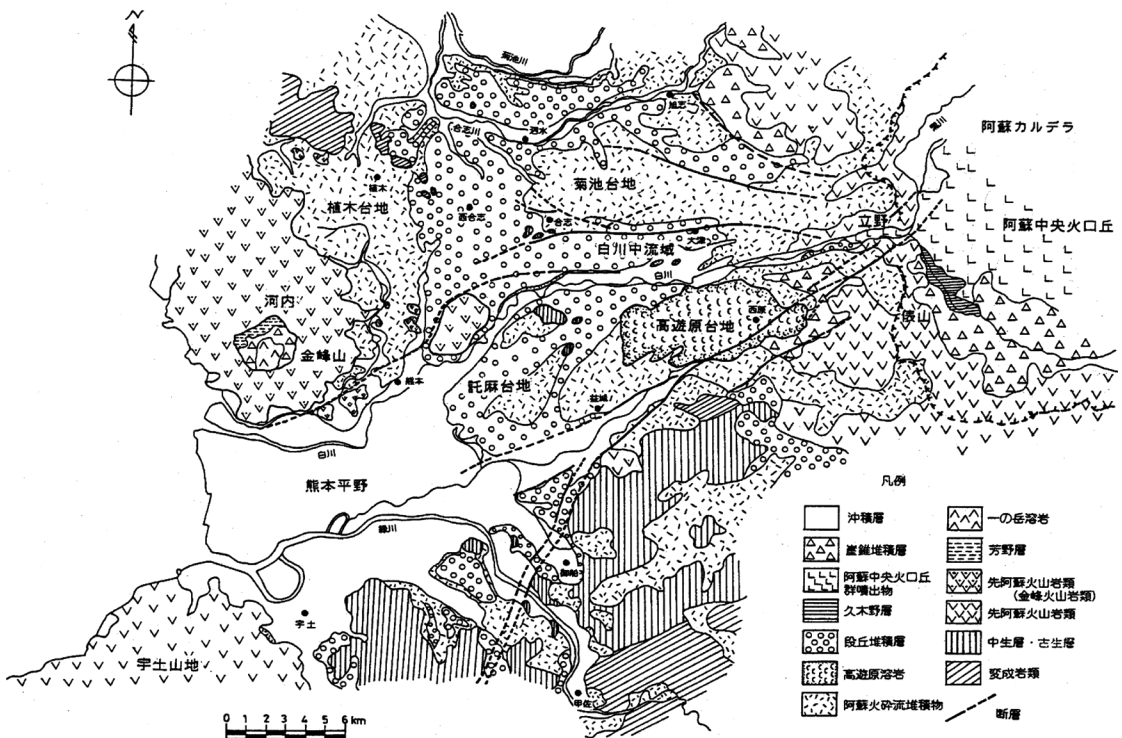


図1 地質平面図(熊本地域地下水総合調査報告書, H7, 熊本県・熊本市)

なる帯水層を主体としているわが国の他の地域の地下水と大きく異なっている。各火砕流堆積物間には、それぞれの火砕流活動の休止期の堆積物として、砥川溶岩や大峰火砕丘堆積物、高遊原溶岩などの溶岩類や「花房層」・「布田層」などの湖成堆積物が分布しており、前者は主として帯水層に、また後者の湖成堆積物は、帯水層間の難透水層として機能している。阿蘇カルデラ西側の熊本地域に分布する Aso-4 は非溶結の火砕流堆積物で、一部強溶結の部分と未固結の軽石・礫混じりの凝灰質砂から構成されており、基本的に透水性が高く、その下位の4/3間隙堆積物である「花房層」・「布田層」などの湖成層を基盤として不圧帯水層(第1帯水層)を形成している。一方これらの湖成層起源の難透水層より下位にある Aso-1, Aso-2, Aso-3 の火砕流堆積物および江津湖周辺や嘉島町の浮島や下六嘉付近にみられる著しく発泡した多孔質部や割れ目密集地帯からなる砥川溶岩は、中・古生代の堆積岩系基盤岩をベースに被圧帯水層(第2帯水層)を形成している。地域の主要地下水資源は、この第2帯水層からの取水に依

存している。

熊本県・熊本市は平成6年「熊本地域地下水総合調査」において、地下水の分布と地下水の流動状況を明らかにするために、前述の第1帯水層および第2帯水層について約500カ所の既存井戸を対象に一斉測水調査を実施した。この結果によれば、第2帯水層においては、6月に低水位期、10月に高水位期を持った季節変動を示しているが、阿蘇西麓台地の地下水涵養域にあたる菊池台地においては、地下水頭の季節変動は10m~20mもの大きな変動を示すことが特徴的であり、とくに前述の Aso 4/3 間の難透水性湖成堆積物の存在しない白川中流域低地が第2帯水層に対する効果的な涵養域になっていることが明らかにされている。

熊本県および熊本市が測定している観測井では、流出域にあたる熊本平野においては、ゆるやかな水位低減傾向(0.5m/20年)が認められており、一方地下水涵養域にあたる阿蘇西麓台地の菊池台地等においては、より大きな水位の長期低減傾向(3m/20年)を示している。これに伴い流出

域にあたる熊本市の主要な湧水地域における湧出量においても、その長期変動は明らかな低減傾向を示しており、地域の地下水資源量が低下しつつあることが懸念されている。

3. 白川中流域低地における休耕田水張り事業 (Trans - boundary groundwater management)

熊本地域はその水道水源のほぼ100%を地下水に依存しているため、熊本市・熊本県による地下水資源の維持管理の取組みが積極的であり、多くの地下水帯水層構造に関する調査研究と観測井戸による20～30年以上の期間に渡る地下水水位変動データを保持している。阿蘇火砕流による帯水層は相対的に高い透水性と大きな動水勾配を持ち、九州地域の高い降水量が加わった水文地質状況は熊本地域の活発な地下水循環の特徴となっている。

前述したように熊本県・熊本市を中心とする100本近い地下水観測システムによる20年以上にわたる地下水水位変化記録によれば、涵養域から流出域に至る地下水流動系のいずれの地域においても長期的な地下水水位低減傾向が認められ、それに伴う湧水域にある八景水谷や江津湖等の湧水湖の湧水量が1950年代に比べて20～30%近い明確な水量低下を示している。

これまでの県市による調査研究によってこの地下水資源の低下要因は、熊本地域の都市化と減反政策による水田面積の減少による涵養域の低減にあることが判明している。地下水を上水道として利用している地域の最大地下水利用者である熊本市は、このような地域の根幹の水資源である地下水の長期的低減傾向に危機感を抱き、2004年より地下水資源の持続的利用のための涵養強化策に取り組みだした。

検討された対応策は、熊本地域の水源対象となっている第2帯水層(被圧帯水層)の地下水域の中で、加圧層となる粘土層が欠落しているため水理地質学的に熊本地域の有望な涵養地域として考えられている白川中流域低地において、転作田を利用したかつての水田を所有する農家に1～3カ月間の水張りを依頼する事業である。具体的には、図2に示すような熊本市内の地下水利用者か

らの基金をベースに、白川中流域低地の休耕田を一定期間借り上げ、農家の所有している水利権を利用して休耕田に水を張ってもらうことで地下水涵養効果を高めるしくみである。この地域の水田は、もともと減水深が100 mm/日にもなるざる田であるため農家にとっては泣かせどころであったが、地下水涵養にとっては有難い存在で400年前に加藤清正が新田開発に着手しだして以降熊本地域における重要な地下水涵養地域となっている。水張を行う休耕田が熊本市域外の大津町・菊陽町の農家に帰属することから、行政境界を越えた地下水管理(Trans - boundary groundwater management)としても注目すべき事業である。

2009年に熊本大学でスタートした熊本地域の地下水を対象としたCREST研究(地域水循環を踏まえた地下水持続利用システムの構築、代表：嶋田 純)の研究において最近実施した熊本地域の詳細な3次元地下水シミュレーションによれば、表1に示されるような4つのシナリオ(加藤清正による白川中流域の新田開発前(シナリオ1)、1930年代の水田耕作最盛期(シナリオ2)、近年の休耕田水張り事業前(シナリオ3)、水張り事業に成果

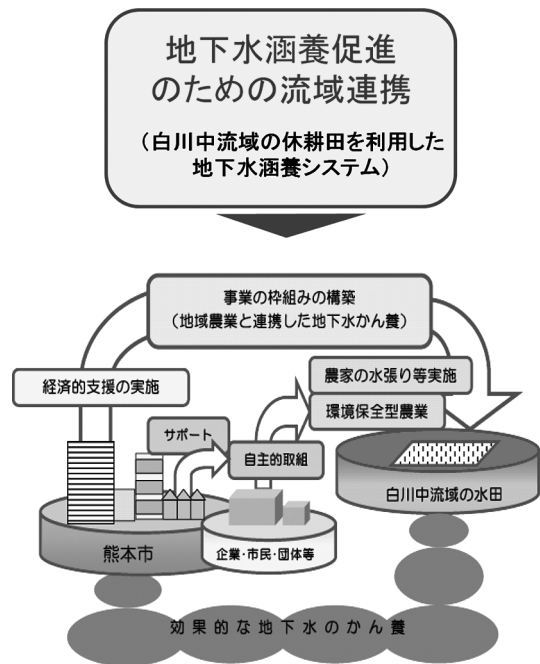


図2 地下水涵養促進のための転作水田水張り事業を介した流域連携システム

表 1 熊本地域における異なる土地利用シナリオの入力条件とそれに応じた 3 次元地下水シミュレーションモデルによって得られた、地下水涵養量・流出量。

	Scenario 1 1600's	Scenario 2 1930's high paddy	Scenario 3 Before artificial paddy recharge (1997-2003)	Scenario 4 After artificial paddy recharge (2004-2006)
Precipitation ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	2,127	1,550	2,127	2,721
Estimated Evapotranspiration ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	557	539	578	611
Groundwater pumping ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	0	24	158	158
Total recharge volume to 2 nd aquifer ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	539	629	612	643
Recharge volume to 2 nd aquifer at mid Shira area ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	206	279	264	275
Estimated discharge volume at Lake Ezu [*] ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$)	348	384	314	334

が出てきた最近数年間図(シナリオ 4))についてシミュレーションモデルを用いて第 2 帯水層への地下水涵養量等を評価した結果、白川中流域低地での水田耕作がもっとも盛んであった 1930 年代(シナリオ 2)に、同低地においてもっとも高い地下水涵養量とそれに伴う流出域である江津湖の湧水量の最大値が確認されており、同低地からの地下水涵養が第 2 帯水層への地下水涵養全体の 40% 以上を占め、そのうち 6% 程度が水田からの涵養効果であることが示された(Shimada *et al.*, (2012)⁴⁾。

これは、図 3 に示した 4 つのシナリオに対応する第 2 帯水層への涵養域分布にも明確に示されている。

地域における休耕田水張り事業は、この効果を再び活性化しようとの取組みである。事業の主導は熊本市であるが、実施する地域は地下水域を共有している熊本市の周辺自治体(大津町および菊陽町)であるため、2004 年 1 月 21 日熊本県庁で大津町・菊陽町および水循環型営農推進協議会と協定を締結し、地域の水循環を踏まえ、行政境界を越

えて地下水を流域として管理しようとする画期的な取組みとして上述の流域連携システムをスタートさせた。事業開始後 6 年を経過し対象地域面積や参加農家数、投入資金等が開始当初の 2 倍近くに増加しており、それに伴って湧水量の長期的低下が懸念されていた江津湖の湧水量にも図 4 に見られるような回復傾向が確認されてきている。

4. 熊本県地下水条例の改定と揚水許可制の導入

前述の地下水涵養強化のための転作水田水張り事業に見られるように、これまで熊本市が中心となって実施していた地下水管理政策を熊本県が中心となって実施していく方向が、2012 年 4 月からの県地下水条例の改定とともにスタートした。これに伴い、これまであった熊本地域にある地下水保全・運営関係の 3 つの組織を統合して、(公財)くまもと地下水財団が設立され、この組織が熊本地域の地下水全体の管理運営を実施する母体となった。今回の熊本県地下水条例の改定の大きなポイントは、地域の長期的な地下水資源の量的管

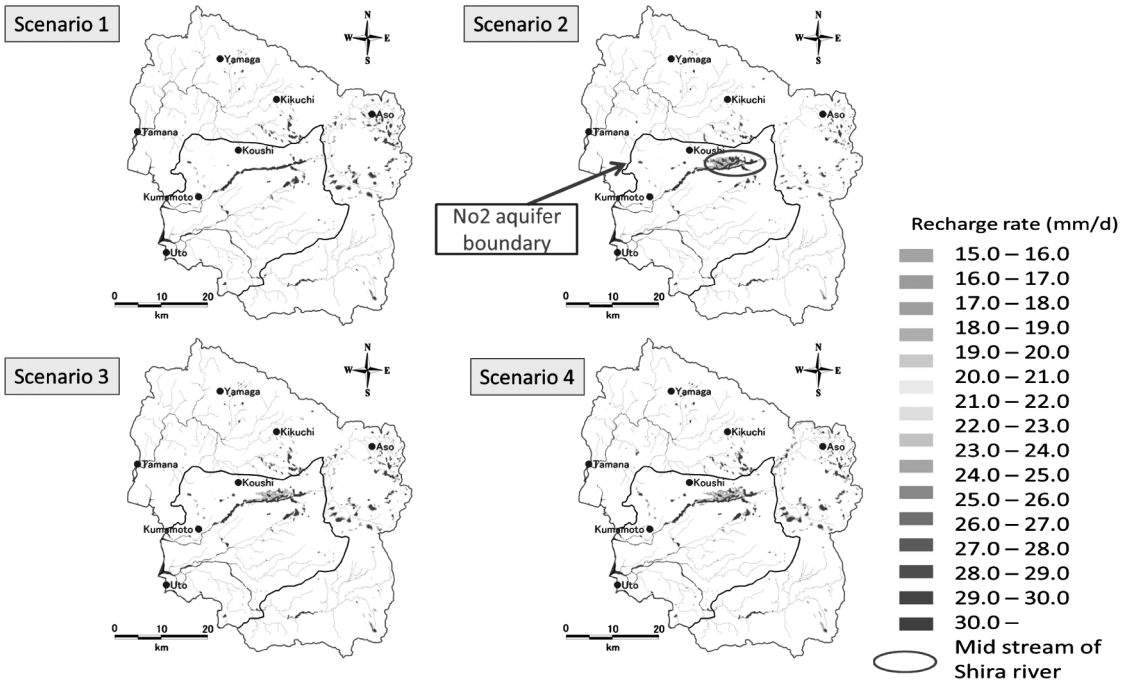


図3 異なる土地利用シナリオに対3次元地下水シミュレーションモデルに基づく第2帯水層への地下水涵養量分布。

理をめざして

- ・重点地域として熊本地域を取り上げ、地下水の許可制を導入すること。
- ・これに伴い、量水器の設置義務や、涵養対策の実施等が組み込まれたこと。

があげられる。熊本地域とは、熊本市を中心として11市町村からなる第2帯水層を共有する地域の中で、2012年10月より揚水機本体の吐出口の断面積が19 cm²(直径約5 cm 超)の地下水採取に対し許可制導入を実施することになっている。また涵養対策とは、許可申請時に揚水量に見合った必要な涵養対策を要請するもので、涵養方法に対応した実質的な涵養効果に対しての基準を策定し、それを基に申請者の涵養対策を定量評価することで、当面希望揚水量の10%相当量の涵養対策を講じることを義務づけている。方法としては、事業者による自主的な敷地内・外での涵養事業の取組みのほか、協同の涵養事業を利用した涵養対策として前述のくまもと地下水財団を介した転作水田水張事業のような広域涵養強化対策への資金負担によっても対応できるようなくみとなっている。詳しくは、熊本県庁 HP(水の国くまもと)を

参照されたい。

(http://mizukuni.pref.kumamoto.jp/one_html3/pub/default.aspx?c_id=6)

5. おわりに

湿潤気候にあるモンスーンアジアでは蒸発散量を上回る豊富な降水量によって潜在的な可能地下水涵養量が存在しているため、地下水災害を引き起こした過剰揚水に対して、規制策として講じた揚水規制によりきわめて急速な地下水頭回復が見られる多くの事例が示されている。このような水文環境下では、涵養量に見合う揚水量管理の実施や、余剰河川水を効果的な水理地質構造の場所から人工的に涵養する方策を的確に講じるシステムが確立できれば、地下水資源を持続的に利用することは可能である。目に見えない地下にある地下水資源の存在量とその涵養・流出機構を的確に評価した上でのそれぞれの地域の実情に合わせた持続的な地下水管理システムを確立することは、モンスーンアジアならではのユニークな地下水管理の取組みである。

地下水涵養量は地形勾配、土地利用、植生状況、

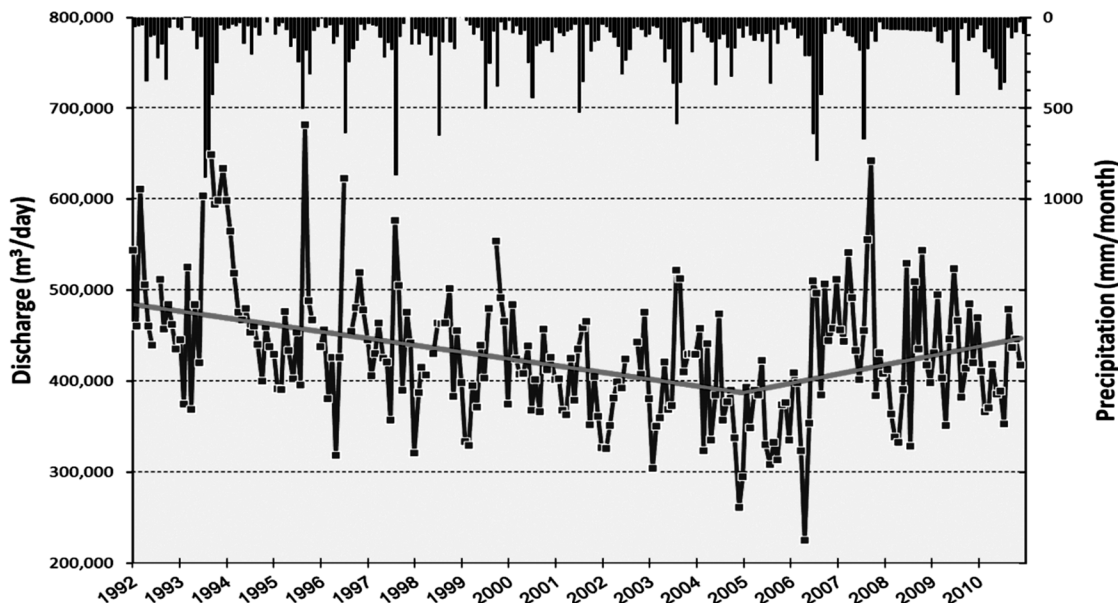


図4 地下水流出域にあたる江津湖における湧水量変化(東海大学市川研究室による)

降雨条件，地下水流動域内での場所等によって大きく変化する量であるため，持続的管理方策の中での運用にはその評価が難しい概念であるが，一定量の地下水揚水を行ったものはそれに見合う涵養を求めることで地域全体の地下水量を強化し，それによって持続的な地下水管理を行っていくことを目標に策定された新たな熊本県の地下水条例とそれに対応した管理運営組織作りの取組みは，地下水を公水とする立場に立ってその持続的管理をめざすわが国における先駆的な事例といえる。

また時期を同じくして，熊本県では地下水政策強化の一環として、『水の戦略会議』の設置や、『水の国熊本』HP作成による県の地下水関連情報の公開を開始した。熊本市では，これまでにすでに地下水関連HPとして『くまもとウォーターライフ』というHPを持っており，地下水関連情報の公開や，熊本市による市民の地下水に関する啓発活動の一環として実施している『水守り制度』、『水検定制度』とのリンクを張っている。これらのHPから熊本県・熊本市が管理している地下水観測井戸のデータにもここからアクセスできるようになっており，許可制に伴う涵養対策の効果が

一般市民にも自由に確認できるような体制構築に向けた努力がなされている。これらの市民啓蒙活動は，新たな条例のスムーズな運用に向けての市民理解・協力を促進するもので，本講演で紹介した熊本地域における持続的な地下水管理事業の今後の展開に是非注目をお願いして本文を閉じることにしたい。

—参考文献—

- 1) 嶋田 純(2010)：アジアの地下水問題. 谷口真人編著『アジアの地下環境』, 89-114.
- 2) 嶋田 純(2011)：アジアモンsoon地域における可能地下水涵養量と地下水資源管理. 2011年度日本地下水学会・水文科学会合同シンポジウム『地下水涵養—水循環プロセスにおける地下水』要旨集, 1-6.
- 3) 日本水文科学会(2010)：シンポジウム特集号「地域水循環を踏まえた地下水管理のあり方」. 日本水文科学会誌 40(3), 67-147.
- 4) Shimada, J. *et al.* (2012): Effect of artificial recharge using abandoned rice paddies for the sustainable groundwater management in Kumamoto, Japan. 2012 Proceedings of World Environmental & Water Resources Congress, Albuquerque, New Mexico, USA, 59-69.

(第39回環境保全・公害防止研究発表会講演要旨集より)